



Akademia Wychowania Fizycznego
im. Eugeniusza Piaseckiego w Poznaniu

mgr Jakub Malik

**Wpływ treningu kuglarskiego oraz żonglerki
na wybrane funkcje poznawcze
i zdolności koordynacyjne u osób starszych**

Rozprawa doktorska

Promotor:
Prof. dr hab. Janusz Maciaszek

Poznań 2025

„Nie wykorzystasz pełnego potencjału ruchu, jeśli nie masz o nim pojęcia”.
Robert Jamiński, *Praktyka ruchu w tańcu ulicznym*

SPIS TREŚCI

DANE O KANDYDACIE	4
WYKAZ SKRÓTÓW	5
STRESZCZENIE	7
ABSTRACT.....	9
1.WSTĘP.....	11
2.CELE I HIPOTEZY	15
3.CYKL PUBLIKACJI	16
4. METODY	17
4.1. Uczestnicy badań	17
4.2. Ogólna procedura badań	18
4.3. Interwencja	18
4.3.1. Przebieg treningu kuglarskiego w formie żonglowania	19
4.4. Aparatura, narzędzia i przebieg pomiarów	20
4.4.1. Pomiar samopoczucia na skali subiektywnego poziomu samopoczucia (publikacja 1).....	20
4.4.2. Kwestionariuszowy pomiar aktywności fizycznej (publikacja 2)	20
4.4.3. Pomiar stabilności posturalnej (publikacja 2)	20
4.4.4. Pomiar wybranych funkcji poznawczych (publikacja 2 i publikacja 3)	21
4.4.5. Pomiar dopasowania pozycji w stawie łokciowym (publikacja 3)	22
4.5. Analiza statystyczna	23
5. OMÓWIENIE WYNIKÓW	25
5.1. Ocena wpływu treningu kuglarskiego w formie żonglowania na samopoczucie uczestniczących w niej osób starszych (publikacja 1)	25
5.2. Ocena wpływu treningu kuglarskiego w formie żonglowania na stabilność posturalną (publikacja 2).....	26
5.3. Ocena wpływu treningu kuglarskiego w formie żonglowania na zmiany w wybranych funkcjach poznawczych u osób starszych (publikacja 2 i publikacja 3)	26
5.4. Ocena wpływu treningu kuglarskiego w formie żonglowania na zmiany propriocepcji stawu łokciowego u kobiet powyżej 65. roku życia (publikacja 3)	27
6. DYSKUSJA	29
6.1. Ograniczenia projektu	34
6.2. Nowatorstwo projektu	35
7. WNIOSKI	36
8. PIŚMIENNICTWO	37
PODZIĘKOWANIA	47
PRZEBIEG PRACY NAUKOWO-ZAWODOWEJ – INFORMACJE DODATKOWE	48
ZAŁĄCZNIK 1. OŚWIADCZENIA	51
ZAŁĄCZNIK 2. PUBLIKACJE	57

DANE O KANDYDACIE

Data uzyskania tytułu magistra wychowania fizycznego: 20.06.2017 r.

Specjalizacja: trenerska z gimnastyki sportowej.

Nazwa jednostki organizacyjnej, w której nadany został tytuł: Wydział Wychowania Fizycznego, Sportu i Rehabilitacji Akademii Wychowania Fizycznego im. Eugeniusza Piaseckiego w Poznaniu.

Data uzyskania tytułu magistra sportu: 7.07.2020 r.

Specjalizacja: trener przygotowania motorycznego.

Nazwa jednostki organizacyjnej, w której nadany został tytuł: Wydział Wychowania Fizycznego, Sportu i Rehabilitacji Akademii Wychowania Fizycznego im. Eugeniusza Piaseckiego w Poznaniu.

Kandydat nie ubiegał się uprzednio o nadanie stopnia doktora.

Aktualne miejsce pracy: Zakład Pedagogiki, Akademia Wychowania Fizycznego im. Eugeniusza Piaseckiego w Poznaniu.

WYKAZ SKRÓTÓW

„PP” – efekt główny: czas – pre/post

„TR” – efekt główny: interwencja – żonglerka/ brak żonglerki

95%CI_{ES} (ang. *95% confidence interval for effect size*) – 95% przedziału ufności dla wielkości efektu

95%CI (ang. *95% confidence interval*) – 95% przedziału ufności

95%CI_{MD} (ang. *95% confidence interval for mean difference*) – 95% przedziału ufności dla średniej różnic

AE (ang. *absolute error*) – błąd bezwzględny

ANOVA RM (ang. *repeated measure analysis of variance*) – analiza wariancji powtarzanych pomiarów

Area95 (ang. *area 95 percentile*) – powierzchnia obejmująca 95% elipsy ufności, wyznaczającej obszar wokół środka siły nacisku stóp

BMI (ang. *body mass index*) – wskaźnik masy ciała

CE – (ang. *constant error*) – błąd stały

COG_C (ang. *number of correct answers in the Cognitrone test*) – liczba poprawnych odpowiedzi w teście Cognitrone

COG_{CA} (ang. *average time of correct acceptations in the Cognitrone test*) – średni czas poprawnych akceptacji w teście Cognitrone

COG_{CR} (ang. *average time of correct rejections in the Cognitrone test*) – średni czas poprawnych odrzuceń w teście Cognitrone

COG_T (ang. *Cognitrone test duration*) – czas trwania testu Cognitrone

CONTRA – warunek kontra-lateralnego dopasowania pozycji stawu łokciowego

COP (ang. *center of pressure*) – środek siły nacisku stóp na podłoże

CRT (ang. *choice reaction time*) – czas reakcji wyboru

DT (ang. *decision time*) – czas decyzji

ES (ang. *effect size*) – wielkość efektu

F ANOVA (ang. *Friedman's analysis of variance*) – analiza wariancji Friedmana

IPSI – warunek ipsi-lateralnego dopasowania pozycji stawu łokciowego

IQR (ang. *interquartile range*) – zakres międzykwartylowy

JP (ang. *juggling period*) – okres interwencji obejmujący aktywność fizyczną w formie żonglerki

MD (ang. *mean difference*) – różnica średnich

MT (ang. *motor time*) – czas motoryczny

NJP (ang. *non-juggling period*) – okres interwencji nieobejmujący aktywności fizycznej w formie żonglerki

p – prawdopodobieństwo testowe (wartość p)

POST – pomiar po interwencji

PRE – pomiar przed interwencją

PST_C – stanie swobodne bez dodatkowego zadania

PST_E – stanie swobodne z dodatkowym zadaniem poznawczym

PST_{LOS} (ang. *limits of stability test*) – test granic stabilności

RangeX (ang. *medio-lateral range of sway*) – zakres wychyleń w płaszczyźnie czołowej

RangeY (ang. *anterior-posterior range of sway*) – zakres wychyleń w płaszczyźnie strzałkowej

RMSE (ang. *root mean square error*) – pierwiastek z błędu średniokwadratowego

RMS_{VX} (ang. *root mean square of medio-lateral velocity of movement of center of pressure*) – średnia kwadratowa zmiennej prędkości środka siły nacisku stóp na podłoże w płaszczyźnie czołowej

RMS_{VY} (ang. *root mean square of anterior-posterior velocity of movement of center of pressure*) – średnia kwadratowa zmiennej prędkości środka siły nacisku stóp na podłoże w płaszczyźnie strzałkowej

RT (ang. *reaction time*) – czas reakcji

SRT (ang. *simple reaction time*) – czas reakcji prostej

V_{COP} (ang. *velocity of movement of the center of pressure*) – prędkość środka nacisku stóp

VCRT (ang. *variability of choice reaction time*) – zmienność czasu reakcji wyboru

VE (ang. *variability error*) – zmienność błędu

VMT (ang. *variability of motor time*) – zmienność czasu motorycznego

VSRT (ang. *variability of simple reaction time*) – zmienność czasu reakcji prostej

VTs (ang. *Vienna Test System*) – Wiedeński System Testów

WHO-5 – Indeks Dobrego Samopoczucia opracowany przez Światową Organizację Zdrowia (WHO – *World Health Organization*)

η^2 (ang. *eta partial square*) – wielkość efektu, częściowy współczynnik eta kwadrat

STRESZCZENIE

Wstęp. W starzejącym się społeczeństwie, szczególnie w krajach rozwiniętych, rośnie znaczenie interwencji wspierających spowolnienie procesów starzenia się, w tym działań poprawiających funkcje poznawcze i zdolności motoryczne. Celem niniejszego projektu doktorskiego była analiza wpływu treningu dwuzadaniowego na zdrowie osób starszych, ze szczególnym uwzględnieniem treningu kuglarskiego w formie żonglowania trzema piłkami jako aktywności fizycznej jednocześnie angażującej ciało i umysł. Wnioski płynące z dotychczasowej literatury naukowej sugerują, że żonglowanie, wymagające zaawansowanej koordynacji i kontroli sensomotorycznej, może pobudzać neuroplastyczność, która odgrywa kluczową rolę w spowalnianiu procesów starzenia mózgu i poprawie jego funkcjonowania.

Metody. W projekcie doktorskim przeprowadzono trzy badania: badanie jednogrupowe z dwoma pomiarami (pre-test/post-test; publikacja 1), randomizowane, kontrolowane badanie krzyżowe (AB/BA; publikacja 2) oraz badanie w modelu powtarzanych pomiarów z projektem łacińskiego kwadratu (A – BC/CB; publikacja 3). Wszystkie badania obejmowały 4-tygodniowy trening żonglowania 3 razy w tygodniu, trwający 45 minut w każdej sesji. Uczestnicy w czasie interwencji wykonywali ćwiczenia w formie żonglerki trzema piłkami.

Wyniki. *Samopoczucie psychiczne:* W badaniu dotyczącym wpływu treningu kuglarskiego w formie żonglowania na samopoczucie osób starszych uczestnicy opanowali technikę kaskady trzema piłkami i ocenili tę formę aktywności jako atrakcyjną i umiarkowanie trudną. Samopoczucie, mierzone skalą WHO-5, wzrosło znacząco po przeprowadzonej interwencji (Cohen $d = 0,76$), a liczba osób kwalifikowanych do dalszych badań pod kątem depresji zmalała z 50% do 5%, co sugeruje pozytywny wpływ treningu na dobrostan psychiczny uczestników. *Stabilność posturalna:* Na podstawie wyników pomiaru stabilności posturalnej wykazano poprawę parametrów stabilności po okresie treningu kuglarskiego w formie żonglowania, szczególnie dla zmiennych prędkości przemieszczania się środka siły nacisku stóp na podłoże, średniej kwadratowej zmiennej prędkości środka siły nacisku stóp na podłoże w płaszczyźnie strzałkowej, a także średniej kwadratowej zmiennej prędkości środka siły nacisku stóp na podłoże w płaszczyźnie czołowej zarówno w warunkach kontrolnym (stanie swobodne), jak i z zadaniem poznawczym (liczenie w pamięci). W porównaniu z okresem kontrolnym, w którym parametry te ulegały pogorszeniu, uczestnicy po treningu kuglarskim w formie żonglowania uzyskali lepsze wyniki dla zmiennych stabilności posturalnej. *Funkcje poznawcze:* Na podstawie przeprowadzonych pomiarów funkcji poznawczych zaobserwowano, że po zakończeniu interwencji o charakterze treningu kuglarskiego w formie żonglowania uczestnicy osiągnęli szybszy czas reakcji oraz większą stabilność w zadaniach mierzących prosty czas reakcji i czasu reakcji wyboru. Po okresie kontrolnym, który charakteryzował się brakiem interwencji, zaobserwowano natomiast pogorszenie lub mniejsze pozytywne zmiany wybranych funkcji poznawczych. Mimo że na podstawie wyników można wnioskować o przewadze treningu kuglarskiego w formie żonglowania nad warunkiem kontrolnym w poprawie funkcji poznawczych wśród osób uczestniczących w badaniach, brak statystycznie istotnych różnic ogranicza

możliwość wyciągania uogólnionych wniosków. *Propriocepcja*: W badaniu nad propriocepcją stawu łokciowego nie wykazano istotnych zmian ani po treningu kuglarskim w formie żonglowania, ani po okresie kontrolnym, co pozwala wnioskować o braku wpływu tej formy aktywności na propriocepcję stawów łokciowych u starszych kobiet.

Wnioski. Na podstawie wyników badań z projektu doktorskiego wskazuje się na potencjał aktywności fizycznej w formie żonglerki w zakresie poprawy stabilności posturalnej oraz samopoczucia u osób starszych. Żonglowanie stanowi prostą i dostępną formę aktywności fizycznej, szczególnie dla osób z ograniczeniami ruchowymi, choć jego wpływ na funkcje poznawcze i propriocepcję wymaga dalszych badań.

ABSTRACT

Introduction. In an aging society, particularly in developed countries, the importance of interventions supporting the slowing of aging processes is increasing, including activities that improve cognitive functions and motor skills. The aim of this doctoral project was to analyze the impact of dual-task training on the health of older adults, with a particular focus on juggling training with three balls as a physical activity that simultaneously engages both body and mind. Conclusions from existing scientific literature suggest that juggling, which requires advanced coordination and sensorimotor control, may stimulate neuroplasticity, which plays a key role in slowing brain aging processes and improving its functioning.

Methods. The doctoral project included three studies: a one-group study with two measurements (pre-test/post-test; publication 1), a randomized controlled crossover study (AB/BA; publication 2), and a repeated-measures study using a Latin square design (A – BC/CB; publication 3). All studies involved a 4-week juggling training program, conducted 3 times per week, with each session lasting 45 minutes. During the intervention, participants performed exercises in the form of three-ball juggling.

Results. *Psychological well-being:* In the study examining the impact of juggling training on the well-being of older adults, participants mastered the three-ball cascade technique and rated this form of activity as attractive and moderately challenging. Well-being, measured using the WHO-5 scale, significantly increased after the intervention (Cohen's $d = 0.76$), and the percentage of individuals qualifying for further depression screening decreased from 50% to 5%, suggesting a positive impact of training on participants' mental well-being. *Postural stability:* Based on postural stability measurements, an improvement in stability parameters was observed following the juggling training. This was particularly evident in variables such as the velocity of the center of pressure displacement, the root mean square velocity of the center of pressure in the sagittal plane, and the root mean square velocity of the center of pressure in the frontal plane, both in the control condition (free standing) and during a cognitive task (mental arithmetic). Compared to the control period, during which these parameters deteriorated, participants achieved better results in postural stability variables after the juggling training. *Cognitive functions:* Cognitive function assessments indicated that after completing the juggling training intervention, participants demonstrated faster reaction times and greater stability in simple and choice reaction time tasks. However, during the control period, which lacked any intervention, cognitive function either worsened or showed only minor positive changes. Although the results suggest a potential advantage of juggling training over the control condition in improving cognitive functions among participants, the lack of statistically significant differences limits the ability to draw generalized conclusions. *Proprioception:* In the study on elbow joint proprioception, no significant changes were observed either after the juggling training or following the control period. This suggests that this form of activity does not affect elbow joint proprioception in older women.

Conclusions. The results of this doctoral project highlight the potential of juggling as a form of physical activity in improving postural stability and well-being in older adults. Juggling is a simple and accessible form of exercise, particularly for individuals with movement limitations. However, its impact on cognitive functions and proprioception requires further research.

1. WSTĘP

W krajach rozwiniętych obserwuje się zjawisko starzenia się populacji (De i in. 2011). Wydłużająca się oczekiwana długość życia oraz wzrost liczby osób starszych wpływają zarówno na gospodarkę, jak i społeczeństwo. Sprawność fizyczna człowieka zmniejsza się wraz z wiekiem, co osłabia wydajność funkcjonalną, zwłaszcza w codziennych czynnościach (Ribeiro i Oliveira 2007; Thompson i in. 2003) – proces ten często nazywany jest niezdrowym starzeniem się (Fisher i in. 2017). Badania populacyjne wskazują, że zarówno funkcje poznawcze, jak i motoryczne pogarszają się w podobny sposób w procesie starzenia. Spadek ten między 45. a 65. rokiem życia przebiega liniowo, natomiast po 65. roku życia ulega znacznemu przyspieszeniu (van der Willik i in. 2021). Starzenie się to złożony proces, na który wpływają zmiany w ośrodkowym oraz obwodowym układzie nerwowym – uznawane za główne przyczyny deficytów motorycznych u osób starszych (Murman 2015; Seidler i in. 2010). Rosnące ryzyko zaburzeń poznawczych oraz choroby związane ze starzeniem mogą dodatkowo przyspieszyć dysfunkcje i utratę neuronów (Murman 2015). Deficyty te komplikują codzienne funkcjonowanie osób starszych i przyczyniają się do zwiększonego ryzyka upadków (Seidler i in. 2010), co podkreśla konieczność zapewnienia odpowiedniej opieki tej grupie społecznej.

Wśród głównych objawów deficytów motorycznych i poznawczych wymienia się: pogorszenie koordynacji, wzrost zmienności ruchów, trudności z równowagą, szybkością przetwarzania, pamięcią roboczą i funkcjami wykonawczymi (Murman 2015; Seidler i in. 2010). Samo pogorszenie się koordynacji, które może być efektem osłabienia propriocepcji u osób starszych, jest jednym z powodów zwiększającego się ryzyka upadków (Ribeiro i Oliveira 2007). Należy jednak pamiętać, że proces starzenia jest indywidualny i zróżnicowany, co zależy od wielu czynników, takich jak choroby współistniejące, zasoby zdolności (poznawcze i fizyczne) oraz środowisko. W literaturze naukowej podkreśla się, że na przebieg starzenia wpływa także poziom codziennej aktywności fizycznej – odpowiednio ukierunkowana może być bowiem skutecznym środkiem umożliwiającym zdrowe starzenie się (Nguyen i in. 2021). Aktywność fizyczna pozytywnie wpływa na skład ciała, zmniejsza ryzyko chorób sercowo-naczyniowych (Berlin i Colditz 1990; Wendel-Vos i in. 2004), cukrzycy (Kelley i Goodpaster 2001) oraz niektórych nowotworów (McTiernan i in. 2019; Rogers i in. 2008). Coraz częściej podkreśla się jej korzystny wpływ na sprawność funkcjonalną u osób starszych (Busse i in. 2009; Netz i in. 2005).

Promowanie aktywności fizycznej wśród seniorów stało się skuteczną strategią poprawy ich dobrostanu. Regularne ćwiczenia sprzyjają zdrowiu psychicznemu, mogą zapobiegać depresji oraz chorobom neurodegeneracyjnym (Rovio i in. 2005). Osłabione samopoczucie psychiczne zwiększa ryzyko wystąpienia chorób fizycznych (Steptoe 2006; Steptoe i in. 2015), podczas gdy pozytywny stan psychiczny działa jako czynnik ochronny (Lyubomirsky i in. 2005; Steptoe i in. 2015). Stewart i King wykazali, że aktywność fizyczna wiąże się z dobrostanem i odgrywa kluczową rolę w łączeniu zdrowia psychicznego ze zdrowiem fizycznym (Stewart i King 1991). Dostępne dowody sugerują, że udział osób starszych w ćwiczeniach zwiększa ich poczucie własnej skuteczności, co sprzyja ich dobrostanowi (McAuley i Rudolph 1995), a także może wpływać na nastrój, satysfakcję z życia (Arent i in. 2000; Stathi i in. 2010), uwagę, pamięć i funkcje wykonawcze, zmniejszając ryzyko zaburzeń poznawczych (Hernández-Mendo i in. 2019). Aktywny styl życia

oraz regularne ćwiczenia wpływają korzystnie na wydajność motoryczną i proces uczenia się ruchowego (Hübner i Voelcker-Rehage 2017). Dowody wskazują również, że ćwiczenia fizyczne wzmacniają neuroplastyczność i mogą poprawiać funkcje poznawcze (Cassilhas i in. 2016; Dayan i Cohen 2011; Hötting i Röder, 2013; Pi i in. 2019). Z kolei nauka nowych umiejętności motorycznych prowadzi do zmian morfologicznych w mózgu, jak wzrost objętości regionu przyhipokampowego (efekt po 18-miesięcznym treningu tanecznym u starszych osób) (Müller i in. 2017). Wykazano, że umiarkowane sesje aktywności fizycznej, które wymagają zaangażowania poznawczego, korzystnie wpływają na funkcje poznawcze, postawę ciała, równowagę oraz wydajność sensomotoryczną (Kattenstroth i in. 2013). Można więc wnioskować, że aktywności angażujące zarówno poznawczo, jak i motorycznie mogą przynosić większe korzyści dla neuroplastyczności niż powtarzalne ćwiczenia (Müller i in. 2017). Ponadto nauka zadań motorycznych angażujących obie strony ciała może prowadzić do większego zaangażowania półkul mózgu, w zależności od etapu uczenia się (Debaere i in. 2004). Synaptogenezę wspiera nowość, co zostało potwierdzone w badaniach na dorosłych szczurach, w których wykryto większą złożoność drzew dendrytycznych spowodowaną codziennymi zadaniami eksploracji labiryntu (Ambrogini i in. 2010; Greenwood i Parasuraman 2010). Wykazano, że umiarkowana aktywność fizyczna, która nie wpływa znacząco na układ krążeniowo-oddechowy ludzi, ale angażuje ich poznawczo, m.in. poprzez nowość zadania i zaangażowanie uwagi, pozytywnie wpływa na funkcje poznawcze lub wydajność sensomotoryczną (Debaere i in. 2001; Kattenstroth i in. 2013; Müller i in. 2017). Potwierdzono również, że zmiany w mózgu pod wpływem tego rodzaju aktywności mogą mieć miejsce już po tygodniu ćwiczeń (Driemeyer i in. 2008). Te odkrycia są obiecujące dla starzejącego się społeczeństwa. Z tego powodu uczenie się ruchowe rozumiane jako „[...] zbiór procesów związanych z praktyką lub doświadczeniem prowadzących do stosunkowo trwałych zmian zdolności do reagowania” (Schmidt i Lee 2005) zasługuje na szczególną uwagę przy tworzeniu nowych programów ćwiczeń dla osób starszych.

Mimo szerokiej wiedzy na temat wpływu aktywności fizycznej na zdrowie szacuje się, że co czwarta lub piąta dorosła osoba nie spełnia zaleceń Światowej Organizacji Zdrowia, dotyczących podejmowania minimum 150 minut aktywności fizycznej tygodniowo (Boulton i in. 2018; Dumith i in. 2011). Z tego względu konieczne jest organizowanie systematycznych, atrakcyjnych programów aktywności, szczególnie dla osób starszych zamieszkujących obszary wiejskie (Omelan i in. 2017).

W ostatnich latach obserwuje się wzrost zainteresowania naukowego treningiem podwójnego zadania (ang. *dual-task*), które definiowane jest jako zdolność do wykonywania jednocześnie dwóch lub więcej aktywności poznawczych i motorycznych (Lüder i in. 2018). Umiejętność jednoczesnego podziału uwagi między dwa zadania lub więcej jest również istotnym aspektem funkcjonalnego ruchu podczas codziennych czynności (Shin i An 2014). Klasyczna żonglerka, jako aktywność polegająca na jednoczesnym rzucaniu i łapaniu piłek w określonym wzorcu motorycznym obiema rękami oraz śledzeniu toru każdej piłki, jest przykładem aktywności podwójnego zadania motorycznego. Okazuje się, że osoby, które profesjonalnie żonglują, osiągają mniejszą amplitudę odchylenia podczas pomiarów stabilometrycznych niż osoby początkujące, przy jednoczesnym wykonywaniu kaskady z trzema piłkami (Rodrigues i in. 2016). Bardziej doświadczeni żonglerzy nie tylko wykonują zadanie precyzyjniej, ale również staje się ono dla nich bardziej automatyczne. W rezultacie zasoby uwagi profesjonalnych żonglerów nie są tak wyczerpane podczas żonglerki jak w przypadku osób początkujących, u których amplituda odchylenia jest wówczas większa (Rodrigues i in. 2016). Ważną część zwiększenia skuteczności nauki i przewidywania trajektorii piłki stanowi skupienie uwagi na bodźcach, a nie na

rękach (Haibach i in. 2004; Mechsner i in. 2001). Żonglowanie, jako ćwiczenie wymagające od ręki chwytającej rekompensowania błędów ręki rzucającej, doskonale odzwierciedla proprioceptywną koordynację obu rąk. Opanowanie żonglerki wymaga zmniejszenia zmienności rzutów i nauki kompensacji błędów poprzez produkowanie podobnych relacji fazowych ruchu kończyn (Haibach i in. 2004). Ponadto żonglerka wymaga stałej, złożonej kontroli wzrokowo-motorycznej i współpracy obu kończyn, może zwiększać efekt bilateralnego transferu uczenia się (zjawisko, w którym umiejętność nabyta przez jedną stronę ciała wpływa na poprawę tej samej umiejętności po drugiej stronie ciała, mimo że ta druga strona nie była bezpośrednio trenowana (Zhou 2000)), który został zaobserwowany dla kończyn górnych i dolnych podczas treningu niedominującej kończyny (Focke i in. 2016; Haaland i Hoff 2003; Witkowski i in. 2018). Efekt ten pokazuje, że efektywność jednej strony ciała może być zwiększona poprzez rozwijanie drugiej strony ciała (Norcross 1921). Ma to istotne znaczenie gdyż codzienne czynności nie wymagają rozważania złożoności ruchów, jakie wykonuje ciało. Używanie obu rąk do manipulacji obiektem lub wykonania określonego zadania jest powszechne. Jednak większość ludzi ma dominującą rękę, która pozostaje bardziej efektywna w wykonywaniu precyzyjnych ruchów, co rozwija się od dzieciństwa i trwa niemal przez całe życie. Wiele narzędzi używanych w codziennym życiu zostało zaprojektowanych dla osób praworęcznych. W rezultacie, niedominująca strona ciała jest często zaniedbywana (Hildreth 1949; Sebastjan i in. 2017). Nauka żonglerki jako nowego zadania ruchowego może stanowić interesującą formę aktywności dwustronnej, która ze względu na swoją złożoność może mieć pozytywny wpływ na neuroplastyczność u osób w każdym wieku (Malik i in. 2022).

Prawidłowa stabilność posturalna jest szczególnie ważna dla populacji osób starszych, gdyż jej pogorszenie się wiąże się z ryzykiem upadków, wpływając na zdolność do zachowania niezależności (Maki i McIlroy 1996; Pettersson i in. 2023). U zdrowych osób stabilność posturalna opiera się na informacjach somatosensorycznych, przedsionkowych i wzrokowych (Appeadu i Gupta 2023). Pogorszenie jednej z nich może stwarzać przeszkody w funkcjonowaniu motorycznym i zdolności do prawidłowego stabilizowania postawy. Największymi zagrożeniami związanymi z niestabilnością są upadki i zaburzenia postawy, które należą do wielkich problemów geriatrycznych i stanowią zagrożenie dla zdrowia i życia (Kłak i in. 2017). W 2015 roku oszacowano, że ponad milion osób w Polsce w wieku 65 lat i starszych doświadczyło przynajmniej jednego upadku. Według danych do 2050 roku liczba ta prawie się podwoi (Kłak i in. 2017). Chodzenie i stabilność posturalna nie są tylko zadaniem motorycznym, ale także czynnością angażującą funkcje wykonawcze i uwagę (Dierijck i in. 2020). Dodatkowo zaburzone czucie proprioceptywne znacznie zmniejsza reakcje posturalne wywołane niespodziewanymi bodźcami (Appeadu i Gupta 2023; Rinalduzzi i in. 2015). Jest to związane z jądrami podstawy, które są istotnym obszarem mózgu zaangażowanym w utrzymanie równowagi (Appeadu i Gupta 2023; Palakurthi i Burugupally 2019).

Propriocepcja zależy od mechanoreceptorów zlokalizowanych w ścięgnach, więzadłach, mięśniach i torebkach stawowych (Myers i Lephart 2000; Riemann i Lephart 2002). Mechanoreceptory przekazują informacje o pozycji i ruchu stawów do ośrodkowego układu nerwowego (Ribeiro i Oliveira 2007). Dlatego propriocepcja jest istotnym czynnikiem wpływającym na jakość życia starzejących się populacji. Jednakże zmiany związane z wiekiem w obwodowym i ośrodkowym układzie nerwowym powodują pogorszenie mechanizmów proprioceptywnych (Myers i Lephart 2000; Ribeiro i Oliveira 2007). Starzenie się prowadzi do zmniejszenia dynamicznej wrażliwości wrzecion mięśniowych, co wpływa zarówno na sprzężenie zwrotne dotyczące pozycji, jak i prędkości. Dodatkowo liczba neuronów motorycznych alfa ulega zmniejszeniu, a funkcjonowanie pewnych obszarów mózgu

zaangażowanych w planowanie poleceń ruchowych pogarsza się znacząco u osób starszych (Adamo i in. 2007; Cruz-Sánchez i in. 1998). Propriocepcja odgrywa istotną rolę w zmianach związanych z wiekiem wpływających na koordynację oraz precyzyjne planowanie ruchów (Ferlinc i in. 2019; Ghez i in. 1995), a także zapewnia orientację i stabilność ciała podczas działań statycznych i dynamicznych (Ferlinc i in. 2019; Han i in. 2016). Świadomość położenia segmentów ciała w przestrzeni jest także niezbędna do skutecznej interakcji z otoczeniem (Ferlinc i in. 2019; Suetterlin i Sayer 2014). Z kolei krótszy RT pozwala na utrzymanie równowagi i unikanie upadków w sytuacjach zagrożenia posturalnego (Sturnieks i in. 2008). Pogorszenie uwagi oraz dłuższy RT u osób starszych mogą być związane ze zmianami w centralnym i obwodowym układzie nerwowym (Sturnieks i in. 2008). Niestabilność wynikająca z pogorszenia funkcji poznawczych lub zmian zachodzących z wiekiem w układzie nerwowym może prowadzić do wielu problemów związanych z codziennym funkcjonowaniem i zdrowiem. Zależny od wieku spadek zdolności przetwarzania poznawczego przyczynia się także do zmian w funkcji proprioceptywnej, szczególnie w zadaniach wymagających większego wysiłku poznawczego (Adamo i in. 2007; Yang i in. 2019). Poprawa stabilności posturalnej, propriocepcji oraz funkcji poznawczych u osób starszych jest prawdopodobna i może zależeć od rodzaju podejmowanego treningu fizycznego (Goble i in. 2009). Jedną z aktywności silnie związanych z poprawą tych zdolności jest tradycyjne chińskie tai chi (Goble 2010; Tsang i Hui-Chan 2003; Xu i in. 2004), które promuje zwiększone poczucie pozycji stawów poprzez powolne, świadome ruchy i stałą świadomość pozycji ciała (Tsang i Hui-Chan 2003; Xu i in. 2004). Podobne korzyści odnotowano u starszych dorosłych, którzy praktykują takie aktywności jak golf czy taniec kreatywny wymagające zwiększonej świadomości pozycji stawów (Marmeleira i in. 2009; Tsang i Hui-Chan 2003). Niemniej jednak większość badań oceniających wpływ ćwiczeń na dopasowanie pozycji stawu, w tym stawu łokciowego, koncentrowała się głównie na wpływie ćwiczeń o charakterze jednorazowym, a nie długoterminowym (Allen i in. 2010; Brockett i in. 1997; Walsh i in. 2006; Weerakkody i in. 2003). Ponadto istnieje ograniczona liczba badań dotyczących wpływu żonglerki na funkcje mózgu, samopoczucie, wydajność poznawczą i zdolności równowagi u osób starszych (Boyke i in. 2008), mimo że aktywność ta wydaje się bezpieczna i łatwo dostępna dla populacji osób starszych.

Mając na względzie, że aktywność fizyczna w formie żonglerki wydaje się ciekawą do zaproponowania formą ćwiczeń, celem niniejszego projektu doktorskiego było przeprowadzenie badań z interwencją o charakterze treningu kuglarskiego w formie żonglerki, aby ocenić jej wpływ na samopoczucie (publikacja 1), stabilność posturalną (publikacja 2), funkcje poznawcze (publikacja 2 i 3), a także propriocepcję kończyn górnych (publikacja 3).

2. CELE I HIPOTEZY

Celem głównym niniejszego projektu doktorskiego było określenie wpływu treningu kuglarskiego w formie żonglowania trzema piłkami na stabilność posturalną oraz zmiany w obrębie wybranych funkcji poznawczych (czas percepcji bodźca wzrokowego, czas decyzji, uwaga selektywna, szybkość i dokładność przetwarzania informacji) u osób starszych obu płci, a także wpływu tejże aktywności na propriocepcję u kobiet powyżej 65. roku życia. Trening ten w każdym z badań wchodzących w skład projektu doktorskiego odbywał się 3 razy w tygodniu przez okres 4 tygodni.

Cele szczegółowe:

1. Ocena poziomu samopoczucia wśród osób starszych uczestniczących w treningu kuglarskim w formie żonglowania (publikacja 1).
2. Ocena wpływu treningu kuglarskiego w formie żonglowania na okresowe zmiany stabilności posturalnej (publikacja 2).
3. Ocena wpływu treningu kuglarskiego w formie żonglowania na zmiany wybranych funkcji poznawczych (publikacja 2 i 3).
4. Ocena wpływu treningu kuglarskiego w formie żonglowania na zmiany propriocepcji kończyny górnej u kobiet powyżej 65. roku życia (publikacja 3).
5. Ocena związku wybranych funkcji poznawczych z wynikami propriocepcji kończyn górnych ocenianymi za pomocą zadania dopasowania pozycji stawu łokciowego (publikacja 3).

Hipotezy:

1. Trening kuglarski w formie żonglowania 3 razy w tygodniu w ciągu 4 tygodni poprawia samopoczucie osób starszych uczestniczących w treningu (publikacja 1).
2. Udział w treningu kuglarskim w formie żonglowania 4 razy w tygodniu w ciągu 4 tygodni wpływa na poprawę wskaźników stabilności posturalnej, takich jak: 95% obszaru kołysania, prędkość przemieszczania się środka siły nacisku stóp na podłoże, zakres wychyleń (publikacja 2).
3. Udział w treningu kuglarskim w formie żonglowania 3 razy w tygodniu w ciągu 4 tygodni poprawia czas percepcji bodźca wzrokowego, czas decyzji, uwagę selektywną, a także szybkość i dokładność przetwarzania informacji wśród osób starszych (publikacja 2 oraz publikacja 3).
4. Trening kuglarski w formie żonglowania 3 razy w tygodniu w ciągu 4 tygodni wpływa na poprawę propriocepcji kończyn górnych w zadaniu dopasowania pozycji stawu łokciowego u kobiet powyżej 65. roku życia (publikacja 3).
5. Ręczność, czas percepcji bodźca wzrokowego, czas decyzji, uwaga selektywna, a także szybkość i dokładność przetwarzania informacji korelują z propriocepcją kończyn górnych w zadaniu dopasowania pozycji stawu łokciowego u kobiet powyżej 65. roku życia (publikacja 3).

3. CYKL PUBLIKACJI

Niniejszy autoreferat został opracowany w ujęciu syntetycznym – w formie zwięzłego zaprezentowania informacji zawartych i szerzej omówionych w artykułach opublikowanych w ramach cyklu. Publikacje przedstawione są w kolejności daty wydania. W skład cyklu pod wspólnym tytułem *Wpływ treningu kuglarskiego oraz żonglerki na wybrane funkcje poznawcze i zdolności koordynacyjne u osób starszych* wchodzi następujące artykuły naukowe:

1. Malik J., Maciaszek J. (2022) Effect of the juggling-based motor learning physical activity on well-being in elderly: a pre-post study with a special training protocol. *Healthcare (Basel)*, 10 (12), 2442. <https://doi.org/10.3390/healthcare10122442>
punktacja MEiN: 40; Impact Factor: 2,8; Impact Factor 5-letni: 3,0
2. Malik J., Głowska N., Jelonek W., Stemplewski R., Maciaszek J. (2024) Effect of a juggling-based physical activity on postural stability, reaction time, and attention focus in older adults: a randomized crossover study. *European Review of Aging and Physical Activity*, 21 (1), 15. <https://doi.org/doi:10.1186/s11556-024-00351-w>
punktacja MNiSW: 140; Impact Factor: 3,7; Impact Factor 5-letni: 4,7
3. Malik J., Głowska N., Jelonek W., Maciaszek J.. (2024) The effect of juggling on the proprioceptive and attentional abilities among older women. *Frontiers in Public Health*, 12, 1386981. <https://doi.org/doi:10.3389/fpubh.2024.1386981>
punktacja MNiSW: 100; Impact Factor: 3,0; Impact Factor 5-letni: 3,6

Łącznie punktacja MEiN/MNiSW: 280; Impact Factor: 9,5¹

W niniejszym autoreferacie zdecydowano się nie zamieszczać tabel oraz rycin występujących w źródłowych publikacjach. Ponadto dla przejrzystości rozdział Wyniki zastąpiono rozdziałem Omówienie wyników, skupiając się nie tyle na surowych wartościach, co na opisowym ich wyjaśnieniu. Uznano bowiem za bezzasadne powtarzanie informacji, które zostały zawarte już w rzeczonych artykułach.

¹ Wartość Impact Factor na rok 2023.

4. METODY

4.1. Uczestnicy badań

Łącznie 77 osób zgłosiło się do udziału w trzech różnych badaniach dotyczących interwencji o charakterze treningu kuglarskiego w formie żonglowania, które odbywały się w okresie od czerwca 2021 do grudnia 2022 roku. Zgłoszenia te były odpowiedzią na reklamy załączone w gazetach oraz lokalnej telewizji miasta Poznań. Przyjęto następujące kryteria włączenia do badań: osoby aktywne fizycznie, powyżej 65. roku życia, bez urazów oraz patologii w obszarze kończyn górnych, bez urazów neurologicznych, bez przeciwwskazań do aktywności fizycznej, bez istotnego zaburzenia wzroku, praworęczne. Uwzględniając powyższe czynniki, do udziału w badaniach łącznie zrekrutowano 70 uczestników, z których 4 zrezygnowało z przyczyn osobistych lub zdrowotnych w trakcie badań (publikacja 1: $n = 20$; publikacja 2: $n = 26$; publikacja 3: $n = 20$). Każdorazowo do oszacowania wielkości prób niezbędnych do zminimalizowania prawdopodobieństwa popełnienia zarówno błędu I, jak i II rodzaju posłużono się oprogramowaniem G*Power 3.1 (wersja 3.1.2; Heinrich Heine Universität, Düsseldorf, Niemcy).

Publikacja 1

W celu oceny wpływu treningu kuglarskiego w formie żonglowania na samopoczucie osób starszych zakwalifikowano do badania 20 uczestników (17 kobiet, 3 mężczyzn), których wyniki poddano analizie statystycznej. Średni wiek uczestników wynosił: 70,55 ($\pm 4,91$) roku, średni wskaźnik masy ciała (BMI): 25,82 ($\pm 3,77$) kg/m² [w tym średnia masa ciała: 67,55 ($\pm 14,11$) kg; średnia wysokość ciała: 161,50 ($\pm 8,79$) cm]. Średnią ręczność natomiast oszacowano jako 91,88 ($\pm 13,27$) za pomocą skróconej wersji Edynburskiego Inwentarza Ręczności (Oldfield 1971; Veale 2014), co potwierdziło bezwzględną praworęczność wśród wszystkich uczestników. Wielkość próby oszacowana została zgodnie z przyjętym minimalnym poziomem mocy 0,80, progiem alfa na poziomie prawdopodobieństwa 0,05 oraz wielkością efektu (ES) 0,732 (Schuch i in. 2016) dla oceny depresji po umiarkowanej aktywności. 20 uczestników badania spełniało oszacowaną wymaganą wielkość próby. Charakterystyka osób biorących udział w projekcie zawarta jest w tabeli 1 publikacji 1.

Publikacja 2

Aby zweryfikować wpływ treningu kuglarskiego w formie żonglowania na stabilność posturalną i zmiany w obrębie wybranych funkcji poznawczych, analizie statystycznej poddano wyniki 26 uczestników (21 kobiet, 5 mężczyzn), których średnia wieku wynosiła: 70,08 ($\pm 4,46$) roku, BMI: 25,95 ($\pm 3,86$) kg/m² [w tym masa ciała: 67,77 ($\pm 13,44$) kg; wysokość ciała: 161,23 ($\pm 7,89$) cm], natomiast ręczność: 92,31 ($\pm 12,62$). Wielkość próby oszacowana została na podstawie danych, w których zastosowano wielosystemowe ćwiczenia fizyczne do poprawy RT u starszych dorosłych (Cohen's $f = 0,715$, co odpowiada dużemu rozmiarowi efektu $\eta^2 = 0,34$ (Lord i Castell 1994)). Pozwoliło to wybrać poziom ES wynoszący $\eta^2 = 0,138$. Zgodnie z opcją „tak jak w SPSS” (Lakens 2013) minimalną mocą 0,80 i progiem alfa na poziomie 0,05 wielkość próby wynosząca 26 uczestników okazała się wystarczająca do zminimalizowania błędów typu I i typu II. Charakterystyka uczestników zawarta jest w tabeli 1 publikacji 2.

Publikacja 3

W celu oceny wpływu treningu kuglarskiego w formie żonglowania na zmiany w obrębie wybranych funkcji poznawczych, a także zmiany propriocepcji kończyny górnej analizie statystycznej poddano wyniki 20 kobiet o średniej wieku 69,95 ($\pm 4,58$) roku i średnim BMI wynoszącym 25,04 ($\pm 3,52$) kg/m² [w tym masa ciała: 62,88 ($\pm 8,55$) kg; wysokość ciała: 158,65 ($\pm 5,12$) cm]. Wielkość próby dla oceny propriocepcji oszacowana została przy założeniu dużej ES (Niespodziński i in. 2022), mocy 0,80 i progu alfa wynoszącego 0,05. 20 uczestniczek badania spełniało oszacowaną wymaganą wielkość próby. Charakterystyka kobiet biorących udział w projekcie zawarta jest w tabeli 1 publikacji 3.

4.2. Ogólna procedura badań

Projekt doktorski uzyskał pozytywną opinię Komisji Bioetycznej przy Uniwersytecie Medycznym im. Karola Marcinkowskiego w Poznaniu (uchwała 106/21). Wszystkie badania zostały przeprowadzone zgodnie z Deklaracją Helsińską z 2013 roku, a także zarejestrowane retrospektywnie w bazie badań klinicznych ClinicalTrials.gov (NCT06108713).

W celu realizacji założeń dysertacji przeprowadzono badanie jednogrupowe z dwoma pomiarami w (pre-test/post-test; publikacja 1), randomizowane, kontrolowane badanie w układzie krzyżowym (AB/BA; publikacja 2) oraz randomizowane, kontrolowane badanie w modelu powtarzanych pomiarów z wykorzystaniem projektu łacińskiego kwadratu (A – BC/CB; publikacja 3).

4.3. Interwencja

Interwencja odbywała się w Akademii Wychowania Fizycznego w Poznaniu. Okres treningu kuglarskiego w formie żonglowania trwał 4 tygodnie i obejmował 12 spotkań (3 treningi tygodniowo), z których każde trwało po 45 minut (Blasco-Lafarga i in. 2020; Driemeyer i in. 2008). Treningi były zawsze prowadzone przez tę samą osobę, która jest profesjonalistką w żonglowaniu i posiada doświadczenie w edukacji fizycznej.

Publikacja 1

Uczestnicy byli zaangażowani wyłącznie w jeden etap interwencji – 4-tygodniowy trening kuglarski w formie żonglowania (JP – *juggling period*). Dane dotyczące samopoczucia oceniano dwukrotnie – zarówno przed JP (PRE), jak i po nim (POST).

Publikacja 2

Uczestnicy zostali zaangażowani w protokół randomizowanego, kontrolowanego badania w układzie krzyżowym AB/BA, w którym to jednym z warunków (A lub B) było uczestniczenie w JP, natomiast drugim – brak dodatkowej aktywności (NJP – *non-juggling period*). Etapy badania krzyżowego oddzielone były od siebie 4-tygodniowym okresem „oczyszczania” (*washout*). Pomiary wykonywano każdorazowo zarówno w PRE, jak i w POST każdego z etapów (JP, NJP). Badanie składało się łącznie z czterech spotkań (przed warunkiem A i po nim; oraz przed warunkiem B i po nim). Schemat protokołu badawczego przedstawiony został na rycinie 1 publikacji 2.

Publikacja 3

Uczestniczki były zaangażowane w protokół randomizowanego, kontrolowanego badania w modelu powtarzanych pomiarów z wykorzystaniem projektu kwadratu łacińskiego A-BC/CB, w którym to jednym z warunków było uczestniczenie w JP, natomiast drugim – NJP. JP oraz NJP oddzielone były 4-tygodniowym okresem *washout*. Badanie składało się łącznie z trzech spotkań: przed przystąpieniem do warunków (punkt A, poziom początkowy) oraz POST JP i POST NJP (punkt B oraz C). Schemat protokołu badawczego przedstawiony został na rycinie 1 publikacji 3.

4.3.1. Przebieg treningu kuglarskiego w formie żonglowania

Pierwsze 8 minut każdej sesji treningowej obejmowało rozgrzewkę z wykorzystaniem piłek do żonglowania, wprowadzającą uczestników do stosowanych przyborów (piłki żonglerskie). Główna część, trwająca 32 minuty, była poświęcona nauce żonglowania trzema piłkami w kaskadzie. Ostatnie 5 minut przeznaczono na ćwiczenia wyciszające organizm oraz rozciąganie. Każda jednostka treningowa obejmowała różnorodne ćwiczenia, głównie rzuty i chwyt, przy użyciu piłek do żonglowania. Uczestników zobowiązano do nieżonglowania poza zajęciami.

W celu ułatwienia nauki piłki miały różne kolory – zielony, żółty i czerwony – co w późniejszej fazie interwencji umożliwiało jasną komunikację dotyczącą rodzaju zadania i wyboru piłki. Uczestnicy opanowali podstawy żonglowania trzema piłkami – o średnicy 70 mm i masie 90 g – w kaskadzie.

Ze względu na ryzyko związane z pandemią COVID-19 grupy treningowe były celowo ograniczone do maksymalnie 5 osób, co umożliwiało zachowanie odpowiedniego dystansu między uczestnikami.

Program obejmował łącznie 12 jednostek treningowych trwających po 45 minut każda, wliczając rozgrzewkę i ćwiczenia wyciszające. Główna część sesji była poświęcona nauce kolejnych etapów żonglowania trzema piłkami w kaskadzie. Trudność poszczególnych ćwiczeń systematycznie zwiększano, na przykład przez wprowadzanie dodatkowych elementów, takich jak klaskanie w ręce podczas rzutu lub skupienie uwagi na przedmiotach znajdujących się w niewielkiej odległości przed uczestnikiem. Każde zadanie trwało od 3 do 5 minut, a kluczowe było angażowanie zarówno dominującej, jak i niedominującej strony ciała. Uczestnicy rozpoczynali ćwiczenia od rzucania piłek ręką dominującą, następnie przechodzili do niedominującej. Protokół obejmował trzy główne grupy ćwiczeń: kolumnowe, paraboliczne oraz mieszane.

Ćwiczenia kolumnowe polegały na żonglowaniu z pionową trajektorią rzutu, przy czym rzut i chwyt wykonywano tą samą ręką. Piłki były rzucane na wysokość oczu, co utrudniało zachowanie prawidłowej trajektorii, lecz jednocześnie wydłużało czas na reakcję.

Ćwiczenia paraboliczne obejmowały rzuty między rękami wzdłuż trajektorii parabolicznej, z zachowaniem odpowiedniej synchronizacji rzutów – kolejny rzut wykonywano, gdy poprzednia piłka osiągała szczyt trajektorii. Ważne były unikanie synchronicznego rzucania piłek oraz koncentracja na piłce znajdującej się w powietrzu.

Ćwiczenia mieszane, łączące różne style rzutu, miały na celu przygotowanie uczestników do bardziej zaawansowanych elementów i podtrzymanie procesu uczenia się ruchowego przez modyfikację wcześniej opanowanych zadań. Wykonywano je między ćwiczeniami kolumnowymi a parabolicznymi, przy zachowaniu wysokości rzutów na poziomie oczu.

Kompletny protokół treningowy został szczegółowo przedstawiony w materiałach uzupełniających do publikacji 1, które opisują całą procedurę krok po kroku, przeznaczoną dla osób bez wcześniejszych doświadczeń w żonglerce.

4.4. Aparatura, narzędzia i przebieg pomiarów

Wszystkie badania odbywały się w Akademii Wychowania Fizycznego w Poznaniu, w Pracowni Motoryczności Człowieka Zakładu Nauk o Aktywności Fizycznej i Promocji Zdrowia, a także w pracowni Zakładu Fizjoterapii Nerwowo-Mięśniowej. Pomiary wykonywane były pod nadzorem wyspecjalizowanych w danym zakresie badaczy, każdorazowo w zbliżonych warunkach oraz przez te same osoby.

4.4.1. Pomiar samopoczucia na skali subiektywnego poziomu samopoczucia (publikacja 1)

W celu pomiaru subiektywnego poziomu samopoczucia wykorzystano polską wersję Indeksu Dobrego Samopoczucia (WHO-5), która ocenia subiektywne samopoczucie, odnosząc się do ostatnich 2 tygodni. Wskaźnik ten może identyfikować objawy depresji u osób starszych. Optymalna wartość odcięcia <13 punktów okazuje się najdokładniejszą wartością w identyfikacji depresji. WHO-5 wykazał dobrą trafność wewnętrzną i zewnętrzną (Bonsignore i in. 2001; Cichoń i in. 2020). Dla polskiej adaptacji skali WHO-5 alfa Cronbacha wynosiła 0,87, a trafność zbieżna była dobra: (a) korelacja z PHQ-9 (*Kwestionariusz Zdrowia Pacjenta-9*) $r = 0,75$; ujemna korelacja z PAID (*Kwestionariusz Obszarów Problemowych w Cukrzycy*) $r = 0,52$ (Cichoń i in. 2020).

4.4.2. Kwestionariuszowy pomiar aktywności fizycznej (publikacja 2)

Na potrzeby badania, w celu oszacowania poziomu aktywności fizycznej uczestników, wykorzystano polską adaptację skali CHAMPS (ang. *Community Health Activities Model Program for Seniors*) (Król-Zielińska i in. 2019). Kwestionariusz ten zawiera 41 pytań służących do oceny częstotliwości i czasu trwania różnych form aktywności fizycznej osób starszych (Hekler i in. 2012; Stewart i in. 2001). Jest to jeden z najbardziej trafnych i rzetelnych kwestionariuszy do tego celu (Harada i in. 2001; Król-Zielińska i in. 2019; Król-Zielińska i Ciekot 2015). Jednotygodniowa rzetelność test-retest polskiej adaptacji wynosiła od 0,79 do 0,85 (Król-Zielińska i in. 2019). Pytania obejmowały ostatnie 4 tygodnie aktywności uczestnika i pozwoliły oszacować wydatek energetyczny i częstotliwość aktywności fizycznej w tygodniu (Stewart i in. 2001). Uczestnicy badania zostali poproszeni o wypełnienie kwestionariusza na koniec JP i NJP.

4.4.3. Pomiar stabilności posturalnej (publikacja 2)

Stabilność posturalną uczestników mierzono za pomocą platformy posturograficznej AccuGait™ System (model AMTI PJB-101, AMTI, Watertown, MA) z oprogramowaniem Balance Trainer i częstotliwością próbkowania 100 Hz. Wszystkie uzyskane dane zostały odfiltrowane z poziomem odcięcia 10 Hz (Ruhe i in. 2010).

Każdy uczestnik na każdym z czterech spotkań badawczych wziął udział w pięciu próbach w losowej kolejności. Dwie próby obejmowały swobodne stanie bez dodatkowego zadania (PST_C), dwie – swobodne stanie z dodatkowym zadaniem poznawczym (PST_E), a jedna próba obejmowała granice stabilności (PST_{LOS}). PST_C odwzorowywało wstępne stanie w ciągu minuty. Każdy uczestnik został poinstruowany słowami „Proszę stać swobodnie, trzymać ręce wzdłuż tułowia, oczy otwarte, patrzeć przed siebie”. W przypadku prób PST_E dodatkowym zadaniem podczas stania było słuchanie zestawu cyfr i liczenie występowania liczb parzystych lub nieparzystych (randomizowane). Liczby były wcześniej nagranych, przez jednego z badaczy, próbkami dźwiękowymi, odtwarzanymi z głośników oddalonych o 1 m od pleców badanego. Uczestnicy słyszeli 30 cyfr podczas każdej próby PST_E , które pojawiały się co 2 sekundy. Po zakończeniu próby badany zgłaszał wynik. Błąd większy niż 2 był interpretowany jako słaba koncentracja na zadaniu, wymagająca ponownego przeprowadzenia testu z nową próbką dźwięku. Instrukcje dla każdej próby PST_E były takie same, wyjątek stanowiło zdanie dodane na końcu polecenia: „Policz parzyste/nieparzyste cyfry”. PST_{LOS} został przeprowadzony z asekuracją badacza. Zadaniem badanego było możliwie maksymalne wychylenie się do przodu i do tyłu oraz na boki. Każde wytrącenie poza granicę stabilności powodowało powtórzenie testu.

Każda z prób trwała 60 sekund. Pomiedzy nimi badany miał 2-minutową przerwę w pozycji siedzącej. Po instrukcjach poprzedzających test badacz czekał 2 sekundy przed zakomunikowaniem „Start” i kolejne 2 sekundy przed włączeniem pomiaru. Pomiar w każdym dniu rozpoczynał się od zapoznania się z próbami PST_C , PST_E i PST_{LOS} .

Podczas prób stabilności posturalnej monitorowano przemieszczenia środka siły nacisku stóp na podłoże (COP). Na podstawie sygnału COP obliczono następujące parametry: prędkość (V_{COP}), powierzchnię obejmującą 95% elipsy ufności wyznaczającej obszar wokół środka siły nacisku stóp (Area95), przyśrodkowo-boczny (płaszczyzna czołowa) zakres kołysania (RangeX), przednio-tylny (płaszczyzna strzałkowa) zakres kołysania (RangeY), średnia kwadratowa zmiennej V_{COP} w płaszczyźnie czołowej (RMS_{VX}) i średnia kwadratowa zmiennej V_{COP} w płaszczyźnie strzałkowej (RMS_{VY}), które uwzględniono w analizie stabilności posturalnej (Quijoux i in. 2021). Wiarygodność międzysesyjnego pomiaru V_{COP} u osób starszych wynosi $r = 0,76$, dla zmiennych PST_{LOS} waha się od $r = 0,67$ do $r = 0,85$ (Stemplewski i in. 2011).

4.4.4. Pomiar wybranych funkcji poznawczych (publikacja 2 i publikacja 3)

Wybrane funkcje poznawcze oceniane były na każdym spotkaniu badawczym (4 spotkania – publikacja 2; 3 spotkania – publikacja 3) przy pomocy testów RT oraz testu Cognitrone przy użyciu Vienna Test System (VTS) (SCHUHFRIED GmbH, Austria; polska dystrybucja – COGNIFIC) z wykorzystaniem specjalnego panelu. Korzystając zarówno z przycisku spoczynku, jak i przycisku reakcji znajdujących się na panelu, możliwe było podzielenie zmiennych na czas reakcji (RT) i czas motoryczny (MT), przy czym obie zmienne mierzono w milisekundach. Termin „czas reakcji” oznacza czas pomiędzy prezentacją bodźca a wystąpieniem reakcji (podniesieniem palca z przycisku spoczynkowego). „Czas motoryczny” rozumiany jest jako czas pomiędzy podniesieniem palca z przycisku spoczynkowego a naciśnięciem przycisku czasu reakcji. Formularz testowy S1 został wykorzystany do oceny odpowiedzi z prostą wskazówką wizualną (żółte światło na ekranie monitora). Formularz testu S4 został wykorzystany do oceny czasu reakcji wyboru (go/no-go) z większą liczbą bodźców (żółte światło, czerwone światło, żółte i czerwone światło jednocześnie lub

prosty dźwięk – w różnych kombinacjach). W przypadku S4 jedyną poprawną reakcją stanowiła jednoczesna obecność wyłącznie żółtego i czerwonego światła.

Co ważne, do odpowiedzi w obu testach należało używać tylko jednego palca ręki dominującej, w tym celu poproszono uczestników, by był to zawsze palec wskazujący. Podczas pomiarów zebrano również dane dotyczące poszczególnych zmiennych: zmienność czasu reakcji prostej (VSRT), zmienność czasu reakcji wyboru (VCRT), zmienność czasu motorycznego (VMT). Aby wystandaryzować pomiary, każde podejście było poprzedzone testem próbnym, dopiero po którym uczestnik wykonywał 4-minutowy test główny. Dodatkowo zmienne czasu decyzji (DT) zostały obliczone na podstawie danych SRT i CRT przy użyciu metody chronometrażu umysłowego (Posner 1978):

$$CRT - SRT = DT$$

Wiarygodność zmiennych RT waha się od $r = 0,83$ do $r = 0,98$ w próbie normalnej. W przypadku MT wiarygodność waha się od $r = 0,84$ do $r = 0,95$ (SCHUHFRIED GmbH). Powyższe testy pozwoliły na ocenę takich funkcji poznawczych, jak czas percepcji bodźca wzrokowego, DT i uwaga selektywna.

Ocena uwagi i koncentracji uczestników była również możliwa poprzez wykorzystanie oprogramowania VTS. W tym celu zastosowano test Cognitrone ze wspomnianej baterii testów, który opiera się na teoretycznym modelu Reulecke'a (Bartolacci i in. 2020), w którym koncentracja jako stan została opisana przez trzy zmienne: energię, funkcję, precyzję. W protokole badań wykorzystano formę S10 tego testu. Zadanie polegało na udzieleniu odpowiedzi, czy wyświetlona na środku ekranu figura jest obecna w zestawie czterech figur wyświetlonych w szeregu w górnej części ekranu monitora. Uczestnicy w teście Cognitrone używali obu rąk. Lewa ręka znajdowała się nad czerwonym przyciskiem, a prawa – nad zielonym. Każda reakcja była rejestrowana w milisekundach i pod względem poprawności (COG_{CR} – średni czas prawidłowego odrzucenia; COG_{CA} – średni czas prawidłowego zaakceptowania). Pominięcie zadania, powrót do poprzedniego lub korekta nie były możliwe. Prawidłowa odpowiedź (COG_{C}) polegała na prawidłowym odrzuceniu (czerwony przycisk, jeśli wzorzec nie występował w zestawie figur) lub prawidłowej akceptacji (zielony przycisk, jeśli wzorzec występował w zestawie figur). Ponadto mierzono czas potrzebny na ukończenie całego testu (COG_T). W celu standaryzacji każde podejście było poprzedzone testem próbnym, po którym uczestnicy wykonywali test główny. Rzetelność testu Cognitrone wynosi ponad $r = 0,95$ (SCHUHFRIED GmbH).

4.4.5. Pomiar dopasowania pozycji w stawie łokciowym (publikacja 3)

Podczas każdego spotkania pomiarowego dla testów dopasowania pozycji stawu łokciowego zarówno warunki ipsi-lateralnego (IPSI), jak i kontra-lateralnego (CONTRA) dopasowania pozycji stawu były wykonywane na specjalnym krześle, które umożliwiało pomiar zgięcia w stawach łokciowych z dokładnością do 0,1 stopnia (Allen i Proske 2006). Zgięcie stawów rejestrowano za pomocą elektrogoniometrów, jednostki bazowej i oprogramowania DataLINK CP firmy Biometrics LTD, z całkowitą częstotliwością próbkowania 40 kHz. Rzetelność wewnątrz- i międzylaboratoryjna tej metody została określona jako dobra (odpowiednio 0,76 i 0,86 dla zgięcia, 0,92 i 0,89 dla wyprostu) (Zwerus i in. 2019). Krzesło było indywidualnie dopasowywane do wysokości ciała i długości kończyn uczestników z uwzględnieniem osi barków i osi stawów łokciowych. Każdorazowo badani wykonywali 8 prób poprzedzonych 3 próbami treningowymi. Przerwa pomiędzy zadaniami trwała 30 sekund. W każdym punkcie pomiarowym wyniki poszczególnych

uczestników zarówno w warunku IPSI, jak i CONTRA były sprawdzane pod kątem wartości odstających przy użyciu metody IQR (Vinutha i in. 2018). Wartości odstające zostały usunięte, ponieważ mogły być efektem wystąpienia mniejszego zaangażowania w test lub ze względu na narastające zmęczenie. Podczas całego zadania wszyscy uczestnicy mieli opaski na oczach, które blokowały widzenie pozycji ramion (Goble 2010). Siedząc w pozycji wyprostowanej, oba przedramiona uczestników spoczywały na ruchomych szynach manipulatora bimanualnego. Uczestników poinstruowano, aby trzymali ramiona w rozluźniony sposób. Podłokietnik miał ogranicznik zapewniający tę samą pozycję wyjściową dla wszystkich prób (90° zgięcie stawu łokciowego, 80° odwodzenie ramienia, 10° zgięcie boczne ramienia). W obu warunkach biernie przemieszczenie kończyny było wykonywane w taki sposób, aby osiągnąć wartość 10° przemieszczenia na sekundę. Kolejność warunków była losowa. Testy dopasowania pozycji pozwoliły na określenie błędu stałego (CE), błędu bezwzględnego (AE), błędu zmienności (VE) i błędu średniokwadratowego (RMSE) dla każdego warunku.

Celem warunku IPSI było określenie wydajności pamięci roboczej podczas zadania proprioceptywnego. W każdej próbie ISPI eksperymentator przesunął szynę na dominującym ramieniu uczestnika o 30° od pozycji wyjściowej w kierunku ciała (Goble 2010). Badacz ustnie informował uczestników o osiągnięciu pożądanej pozycji docelowej. Ich przedramię było następnie biernie przesuwane z powrotem do pozycji wyjściowej. Następnie uczestnicy aktywnie przesuwali przedramię do zapamiętanej pozycji docelowej. Zostali poinstruowani, aby zatrzymać ruch i przekazać ustne powiadomienie, gdy poczują, że osiągnęli tę samą pozycję przedramienia co cel odniesienia. Stała próbka danych kątowych została zarejestrowana natychmiast po wydaniu komendy przez badanych („Stop”) za pomocą potencjometru.

W warunku dopasowania CONTRA każde ramię kontrolowano. Pilnowano, aby kąt zgięcia dla obu ramion był podobny i stały w obrębie uczestników i pomiędzy nimi. Cel tego zadania stanowiło określenie skuteczności międzypółkulowego przetwarzania informacji proprioceptywnych podczas bimanualnego zadania proprioceptywnego (Goble 2010). W każdej próbie badacz przesunął niedominujące przedramię uczestników do pozycji docelowej 30° od pozycji wyjściowej w kierunku ciała (Goble 2010). Eksperymentator ustnie informował uczestników o osiągnięciu pożądanej pozycji docelowej. Ich zadaniem było przesunięcie ręki dominującej do takiej pozycji, aby kąt zgięcia łokcia ręki dominującej odpowiadał kątowi zgięcia łokcia ręki niedominującej. Uczestnicy informowali o uzyskaniu pozycji („Stop”) i utrzymywali ją przez około 3 sekundy, aby umożliwić zebranie próbki danych kątowych za pomocą potencjometru.

4.5. Analiza statystyczna

Publikacja 1

Na potrzeby tego badania wykorzystano test W Shapiro–Wilka do oceny rozkładu zmiennych. Test t dla prób zależnych zaadaptowano do oceny różnic przed protokołem i po nim w uzyskanych wynikach WHO-5. Ponadto zastosowano dychotomizację wartości WHO-5 względem zalecanego punktu odcięcia, aby podzielić dane pod kątem jakościowym na wyniki oznaczające zagrożenie depresją i wyniki oznaczające brak zagrożenia depresją. W przypadku zmiennych kategoriycznych wykorzystano test McNemara do oceny wpływu interwencji na ryzyko wystąpienia depresji u uczestników. Wszystkie analizy statystyczne zostały przeprowadzone przy użyciu STATISTICA (wersja 13.3.0, TIBCO Software Inc, Palo Alto, CA, USA; 2017). Wzór d Cohena został użyty do obliczenia ES dla testu t dla

prób zależnych (gdzie: 0,2 – mały efekt; 0,5 – umiarkowany efekt; 0,8 – duży efekt), a wzór g Cohena został użyty do obliczenia wielkości efektu dla testu McNemara (gdzie: 0,05 – mały efekt; 0,15 – umiarkowany efekt; 0,25 – duży efekt) (Cohen 1988). Zakładany poziom alfa wynosił 0,05.

Publikacja 2

Wszystkie analizy danych zostały przeprowadzone przy użyciu oprogramowania STATISTICA (wersja 13.3.0, TIBCO Software Inc., Palo Alto, CA, USA; 2017). Dane analizowano za pomocą dwukierunkowej analizy ANOVA RM w celu zbadania interakcji między ‘interwencjami’ (JP, NJP – jako „TR”) a ‘czasem’ (PRE, POST – jako „PP”) dla testów funkcji poznawczych i równowagi. Różnice między poziomami aktywności fizycznej dla dwóch okresów określono za pomocą testu t dla prób zależnych (rozkład normalny) lub testu Wilcoxona (rozkład odbiegający od normalnego). Zakładany poziom alfa wynosił 0,05. ES określono na podstawie Cohena z 95% przedziałem ufności ($95\%CI_{ES}$). Różnice przedstawiono jako średnią różnicę (MD) i 95% przedział ufności tej wartości ($95\%CI_{MD}$).

Publikacja 3

Test Shapiro–Wilka został użyty do sprawdzenia normalności wszystkich danych. Różnice między trzema punktami czasowymi (punkt wyjściowy, POST JP, POST NJP) dla każdego warunku osobno (IPSI, CONTRA) sprawdzono za pomocą ANOVA RM, która obejmowała analizę sferyczności Mauchly’ego. Gdy warunek sferyczności nie został spełniony, zastosowano korektę Greenhouse’a–Geissera. Alternatywnie, w przypadku danych o rozkładzie odbiegającym od normalnego, wykorzystano analizę wariancji Friedmana (F ANOVA). Wykonano również testy post hoc dla porównań parami po analizie powtarzanych pomiarów (test Bonferroni’ego lub sparowany test Wilcoxona). Różnice między warunkami sprawdzono za pomocą testów t (rozkład normalny) lub testów Wilcoxona (rozkład odbiegający od normalnego). Współczynnik korelacji sprawdzono za pomocą współczynnika korelacji Spearmana, biorąc pod uwagę rozkład zmiennych (rozkład odbiegający od normalnego). Zastosowano następującą interpretację współczynników korelacji: poniżej 0,20 jako bardzo słaby, od 0,20 do 0,40 jako słaby, od 0,40 do 0,60 jako średni, od 0,60 do 0,80 jako silny i co najmniej 0,8 jako bardzo silny. Wszystkie wyniki zostały przedstawione w tabelach i na rysunkach jako średnie z odchyleniami standardowymi i mediany z przedziałami międzykwartylowymi (IQR). ES dla ANOVA RM określono jako częściowy eta-kwadrat (η^2 ; 0,01 – mały efekt; 0,06 – średni efekt; 0,138 – duży efekt), dla F ANOVA określono jako współczynnik zgodności Kendalla (W; 0,20 – dobra zgodność, 0,40 – umiarkowana zgodność, 0,60 – znaczna zgodność, 0,80 – prawie doskonała zgodność), a dla testów t określono go jako d Cohena (d: 0,2 – mały efekt; 0,5 – średni efekt; 0,8 – duży efekt) lub Wilcoxona z rangą współczynnika korelacji dwuwartościowej (rc: 0,1 – mały efekt; 0,3 – umiarkowany efekt; 0,5 – duży efekt). MD sparowanych danych przedstawiono z 95% przedziałami ufności ($95\%CI$) dla wszystkich porównywanych zmiennych. Wartość $p < 0,05$ uznano za wskazującą na istotność statystyczną.

5. OMÓWIENIE WYNIKÓW

5.1. Ocena wpływu treningu kuglarskiego w formie żonglowania na samopoczucie uczestniczących w niej osób starszych (publikacja 1)

W celu oceny zmian w samopoczuciu uczestników zastosowano narzędzie WHO-5, które pozwala na mierzenie dobrostanu psychicznego. Szczegółowe wyniki uzyskane za pomocą tego narzędzia przedstawiono w publikacji 1 (rycina 5, tabela 2).

Interwencja o charakterze treningu kuglarskiego w formie żonglowania zakończyła się dla wszystkich uczestników opanowaniem techniki nazywanej kaskadą trzema piłkami, która była celem zaproponowanego protokołu. Umiejętność ta została opanowana przez większość uczestników na siódmym, z dwunastu, spotkaniu treningowym.

Osoby starsze uczestniczące w projekcie oceniły jego atrakcyjność w skali 1–5 na poziomie 4,85 ($\pm 0,37$). Natomiast trudność w tej samej skali na poziomie 3,35 ($\pm 0,75$). Dodatkowo na tej samej skali wartości fizycznego, jak i psychicznego zaangażowania w aktywność proponowanego protokołu oceniono w skali 1–5 kolejno jako 2,95 ($\pm 0,76$) i 3,05 ($\pm 0,69$). Uczestnicy subiektywnie uznali więc zaproponowany protokół jako bardzo atrakcyjny, umiarkowanie trudny, a także umiarkowanie wymagający pod względem fizycznym, jak i psychicznym.

Poprzez ilościową analizę danych wykazano, że średnia wartość samopoczucia osób uczestniczących w projekcie, mierzona skalą WHO-5, przed interwencją wynosiła 13,75 ($\pm 6,32$), natomiast po 4-tygodniowej interwencji w formie żonglerki wartość ta wzrosła do 17,75 ($\pm 4,04$), co sugeruje umiarkowanie pozytywny efekt zmian po interwencji ($p < 0,01$; Cohen $d = 0,76$).

Autorzy wymienionego narzędzia jako punkt odcięcia sugerują wartość wynoszącą 13,00. Wartość wskaźnika samopoczucia uzyskana za pomocą tego narzędzia poniżej zaproponowanego punktu odcięcia jest wskazaniem do badania w kierunku depresji zgodnie z klasyfikacją ICD-10. Przeanalizowano więc uzyskane dane również pod kątem jakościowym, czego wynikiem jest poprawa samopoczucia po interwencji o charakterze treningu kuglarskiego w formie żonglerki. 50% uczestników przed podjęciem interwencji kwalifikowało się jako osoby ze wskazaniem do badania w kierunku depresji. Po interwencji natomiast zaledwie 5% uczestników pozostało w tej kwalifikacji po ocenie narzędziem WHO-5. Wyniki żadnego z uczestników natomiast nie spadły poniżej progu odcięcia po interwencji, nawet jeśli zaobserwowano zmniejszenie oceny samopoczucia narzędziem WHO-5 po interwencji. Zarejestrowanie zmiany wyniku dla pojedynczej osoby wyższej w skali WHO-5 o 10% świadczy o istotnej klinicznie poprawie samopoczucia – taki rezultat uzyskało 60% badanych po uczestnictwie w 4-tygodniowej interwencji. U 20% osób nie zaobserwowano żadnych zmian, u 5% subiektywna ocena samopoczucia wzrosła, ale nieznacznie, natomiast dla pozostałych 15% istotnie się obniżyła. Jednakże żadna z tych osób nie uzyskała wyniku poniżej progu wrażliwości. Podsumowując, zaproponowana interwencja o charakterze treningu kuglarskiego w formie żonglerki wpłynęła istotnie na zmniejszenie prawdopodobieństwa wystąpienia kryterium (na podstawie narzędzia WHO-5) wskazującego do diagnostyki w kierunku depresji ($p < 0,01$).

5.2. Ocena wpływu treningu kuglarskiego w formie żonglowania na stabilność posturalną (publikacja 2)

Szczegółowe wyniki stabilności posturalnej przedstawiono w publikacji 2 w formie ryciny (rycina 2) oraz tabeli (tabela 2).

PST_c charakteryzowała się nieznaczną poprawą wartości V_{COP} , RangeX, RangeY oraz RMS_{VX} po interwencji w formie żonglerki wśród uczestników badania. Ponadto zmiany tych wartości w obu warunkach (PST_c, PST_e) podkreśliły przewagę interwencji o charakterze treningu w formie żonglowania wśród uczestników badania przy porównaniu zmian dla PRE/POST, jednakże brak istotnych statystycznie różnic nie pozwala na generalizację wyników.

W przypadku oceny PST_e dla POST JP najniższe wartości zaobserwowano dla zmiennej V_{COP} . Jednak istotność statystyczną interakcji „TR”*„PP” zaobserwowano dla RMS_{VX} oraz RMS_{VY}. Przy pomocy analizy post hoc metodą Bonferroniego wykazano, że wiązało się to głównie z pogorszeniem wartości tych zmiennych dla POST NJP w porównaniu z innymi punktami czasowymi (dla RMS_{VX}: PRE JP vs POST NJP: MD = -0,37; 95%CI_{MD} = [-0,56; -0,18]; POST JP vs POST NJP: MD = -0,38; 95%CI_{MD} = [-0,58; -0,18]; PRE NJP vs POST NJP: MD = -0,36; 95%CI_{MD} = [0,21; 0,52]; dla RMS_{VY}: PRE JP vs PRE NJP: MD = 0,36; 95%CI_{MD} = [0,21; 0,52]; POST JP vs PRE NJP: MD = 0,31; 95%CI_{MD} = [0,15; 0,46]; PRE NJP vs POST NJP: MD = -0,34; 95%CI_{MD} = [-0,49; -0,18]), przy czym po 4-tygodniowej interwencji o charakterze treningu kuglarskiego w formie żonglerki nie zaobserwowano żadnych istotnych zmian dla tych zmiennych. Natomiast istotną różnicę zarejestrowano dla „TR” w zmiennej RangeY przy PST_c (JP vs NJP: MD = -0,19; 95%CI_{MD} = [-0,37; -0,02]; PRE JP vs PRE NJP: MD = -0,07; 95%CI_{MD} = [-0,42; -0,28]; POST JP vs POST NJP: MD = -0,32; 95%CI_{MD} = [-0,68; -0,03]). W POST JP zaobserwowano zmniejszenie wartości tej zmiennej, natomiast w POST NJP wartość ta zwiększyła się. W teście PST_{LOS} nie zaobserwowano żadnych istotnych różnic pod wpływem interwencji.

Nie bez znaczenia wydaje się jednak obserwacja, że wszystkie zmienne charakterystyczne dla pomiarów PTS_c (V_{COP} , Area95, RMS_{VX}, RMS_{VY}), a także większość w PST_e (V_{COP} , RMS_{VX}, RMS_{VY}) oraz w PST_{LOS} (Area95, RangeY) charakteryzowały się zmianami dla JP świadczącymi o pozytywnym wpływie treningu kuglarskiego w formie żonglowania na osoby w badanej grupie. Natomiast NJP charakteryzował się, w większości przypadków, nieznacznym pogorszeniem się tych zmiennych. Różnice te okazały się jednak nieistotne statystycznie, więc w tym zakresie nie można wyciągać wniosków na całą populację osób starszych.

Podsumowując, trening kuglarski w formie żonglowania pozytywnie wpłynął na stabilność posturalną po JP, co potwierdziły zmiany w RangeY dla warunku PST_c, a także różnice dla zmiennych RMS_{VX} oraz RMS_{VY} pomiędzy JP a NJP w szczególności w warunku PST_e.

5.3. Ocena wpływu treningu kuglarskiego w formie żonglowania na zmiany w wybranych funkcjach poznawczych u osób starszych (publikacja 2 i publikacja 3)

Szczegółowe wyniki pomiarów funkcji poznawczych przedstawiono w publikacji 2 w formie ryciny (rycina 3) oraz tabeli (tabela 3), a także w publikacji 3 w formie tabelarycznej (tabela 5).

W badaniu w układzie krzyżowym (publikacja 2) uczestnicy uzyskali krótszy czas reakcji w POST JP, dotyczyło to takich zmiennych, jak: SRT, CRT, DT w porównaniu z innymi punktami pomiarowymi. Dodatkowo osiągnęli oni również lepsze wyniki dla VSRT,

VCRT oraz COG_{T_1} . Ponadto na podstawie obserwacji zmian PRE/POST dla wybranych funkcji poznawczych – zarówno dla JP, jak i NJP – zaobserwowano przewagę dla JP. Jednakże statystycznie istotne różnice odnotowano wyłącznie dla „PP” dla zmiennych SRT oraz COG_c , przy czym po przeprowadzeniu analizy post hoc (Bonferroni) zaobserwowano poprawę obu tych zmiennych z czasem, ale bez wskazania istotnej różnicy między JP a NJP (dla SRT: PRE vs POST: MD = 11,42; 95%CI_{MD} = [1,55; 21,30]; dla COG_c : PRE vs POST: MD = -0,81; 95%CI_{MD} = [-1,52; -0,10]). W przypadku innych funkcji poznawczych nie zarejestrowano żadnych istotnych statystycznie zmian ($p > 0,05$). Jednakże w badaniu tym zaobserwowano przewagę wpływu JP (PRE/POST) na pozytywne zmiany funkcji poznawczych w grupie osób biorących udział w projekcie (SRT, CRT, MT, VSRT, VCRT, VMT, COG_{CR} , COG_{CA}), natomiast NJP charakteryzował się nieznacznym pogorszeniem tych wyników w grupie badanych (MT, VSRT, COG_{CA}) lub ich poprawą, ale mniejszą niż w przypadku JP (SRT, CRT, COG_{CR} , VCRT, VMT). Różnice te okazały się jednak nieistotne statystycznie, więc w ich przypadku nie można wyciągać wniosków na całą populację osób starszych. W badaniu z powtarzanymi pomiarami (publikacja 3) nie zaobserwowano żadnych istotnych różnic dla funkcji poznawczych zarówno dla warunku JP, jak i warunku NJP ($p > 0,05$).

Podsumowując, trening kuglarski w formie żonglowania przyczynił się do wyraźnej poprawy SRT oraz COG_c . Jednakże różnice te okazały się istotne statystycznie wyłącznie dla „PP”, co oznacza, że poprawa ta była obserwowana również dla okresu bez interwencji w formie żonglerki.

5.4. Ocena wpływu treningu kuglarskiego w formie żonglowania na zmiany propriocepcji stawu łokciowego u kobiet powyżej 65. roku życia (publikacja 3)

Szczegółowe wyniki pomiarów propriocepcji przedstawiono w publikacji 3 w formie tabelarycznej (tabele: 2, 3 i 4). Natomiast szczegółowe wyniki korelacji funkcji poznawczych i propriocepcji zarejestrowano w publikacji 3 w formie tabelarycznej (tabela 5).

W badaniu zaobserwowano niewielkie zmiany wśród osób badanych w propriocepcji dla JP, przy czym podobna trajektoria zmian obserwowana była również dla NJP, szczególnie w przypadku CE oraz VE w obu warunkach (IPSI, CONTRA) oraz dla AE i RMSE w warunku IPSI. Obserwowane zmiany nie były jednak istotne statystycznie, co sugeruje, że interwencja o charakterze treningu w formie żonglowania nie wpływa na propriocepcję stawu łokciowego w grupie starszych kobiet.

Niemniej za pomocą analizy korelacji wykazano, że w warunku IPSI wyższy wskaźnik praworęczności wiąże się z większą dokładnością dopasowania pozycji prawą ręką. Nie wykazano jednak, aby zdolność uwagi lub czas reakcji były związane z dokładnością zadania dopasowania pozycji. Natomiast w warunku CONTRA nie zaobserwowano istotnej korelacji z ręcznością, co potwierdza, że zadanie to wymaga komunikacji między obiema półkulami. Zarejestrowano jednak, że uczestniczki miały tendencję do niedoszacowania dopasowania pozycji w warunku CONTRA, gdy reagowały wolniej w testach czasu reakcji (SRT, CRT). Odwrotną zależność obserwowano w przypadku zmienności CRT i DT. Większe rozbieżności w reakcji na bodźce wymagające podjęcia decyzji i dłuższy czas podejmowania decyzji wiązały się z tendencją respondentek do przeceniania zadania dopasowania pozycji łokcia w warunku CONTRA. Natomiast VCRT była ujemnie skorelowana z błędami w dokładności dopasowania pozycji (AE, RMSE), co może sugerować, że mniejsza rozbieżność czasu reakcji wiązała się z lepszym wynikiem dopasowania pozycji. Nie stwierdzono istotnych korelacji między zadaniami uwagi mierzonymi testem Cognitrone a warunkiem

CONTRA. Zatem zdolność do zwracania uwagi podczas zadań dostosowywania pozycji łokcia w warunkach IPSI i CONTRA prawdopodobnie nie odgrywa tak ważnej roli.

Podsumowując, trening kuglarski w formie żonglowania nie wpłynął istotnie na propriocepcję stawu łokciowego w grupie starszych kobiet, co potwierdzają niewielkie i statystycznie nieistotne zmiany CE, VE, AE, oraz RMSE zarówno dla warunku IPSI, jak i CONTRA. Analiza korelacji wykazała natomiast, że w warunku IPSI wyższy wskaźnik praworęczności był związany z większą dokładnością pozycji, a w warunku CONTRA obserwowano związek czasu reakcji z precyzją dopasowania.

6. DYSKUSJA

Głównym uzasadnieniem wyboru tematu *Wpływ treningu kuglarskiego oraz żonglerki na wybrane funkcje poznawcze i zdolności koordynacyjne u osób starszych* jest rosnące zainteresowanie metodami wspierania zdrowia psychofizycznego w starzejącym się społeczeństwie. Osoby starsze często borykają się z pogorszeniem funkcji poznawczych, takich jak pamięć, uwaga i myślenie przestrzenne, oraz ze spadkiem zdolności koordynacyjnych, co wpływa na ich codzienne funkcjonowanie i ogólną jakość życia. Ponadto żonglowanie stanowi bezpieczną i łatwo dostępną formę aktywności, która angażuje równomiernie zarówno lewą, jak i prawą stronę ciała. Co więcej, szeroki wachlarz technik żonglerskich dostępnych do nauki pozwala na dostosowanie poziomu trudności do umiejętności uczestników, a to sprzyja zaangażowaniu zarówno fizycznemu, jak i poznawczemu. Taka aktywność może dostarczać ćwiczącym licznych korzyści, w tym poprawy koncentracji oraz koordynacji ruchowej. Dodatkowo ograniczona liczba publikacji na temat wpływu żonglowania na zdrowie osób starszych zwróciła uwagę na potrzebę bardziej wszechstronnej eksploracji tego tematu. Zrozumienie wpływu tego typu treningu na funkcje poznawcze i koordynację osób starszych może przyczynić się do rozwoju nowych metod terapeutycznych, które wspierają zdrowie psychofizyczne tej grupy i podnoszą jakość jej życia.

Publikacja 1

Celem badania opisanego w publikacji 1 było przetestowanie programu zajęć z żonglerki jako propozycji aktywności fizycznej dla osób starszych, mającej potencjał rozwijania funkcji poznawczych i zdolności koordynacyjnych. Główną istotą projektu stanowiła ocena wpływu treningu kuglarskiego w formie żonglowania na samopoczucie osób starszych biorących w nim udział. Wynikiem drugorzędnym była subiektywna ocena protokołu ćwiczeń przez uczestników pod względem jego atrakcyjności oraz trudności. W niniejszym badaniu postawiono hipotezę, że trening kuglarski w formie żonglowania 3 razy w tygodniu w ciągu 4 tygodni poprawi samopoczucie uczestników. Hipoteza ta została potwierdzona przez wskazanie na pozytywną zmianę samopoczucia mierzonego narzędziem WHO-5 zarówno przed uczestnictwem osób starszych w treningu kuglarskim w formie żonglowania, jak i po nim. Dodatkowo na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że przy zastosowaniu zadań o umiarkowanej trudności i wysiłku o umiarkowanej intensywności protokół treningu kuglarskiego w formie żonglerki jest bardzo atrakcyjny dla uczestników powyżej 65. roku życia.

Głównym wyzwaniem w promowaniu aktywności fizycznej pozostaje zrozumienie motywacji oraz barier: psychicznych, fizycznych, społecznych i środowiskowych, które mogą utrudniać osobom starszym podjęcie i utrzymanie aktywności fizycznej. Według modelu społeczno-ekologicznego McLeroya kluczowe w tym przypadku są czynniki: intrapersonalne, interpersonalne i środowiskowe (McLeroy i in. 1988; Yarmohammadi i in. 2019). Dla seniorów głównym motywatorem do podejmowania aktywności fizycznej jest poprawa kondycji fizycznej (Miller i Brown 2017; Nejati i in. 2010; Yarmohammadi i in. 2019) oraz przyjemność z aktywności (Miller i Brown, 2017; Yarmohammadi i in. 2019), a także redukcja stresu i depresji (Mortazavi i in. 2011; Nejati i in. 2010; Yarmohammadi i in. 2019). Uczestnicy przygotowanego do niniejszego projektu doktorskiego programu

o charakterze treningu kuglarskiego w formie żonglowania ocenili go jako „atrakcyjny” lub „bardzo atrakcyjny”, a ich samopoczucie i ocena ryzyka depresji poprawiły się po interwencji. Opanowanie nowej umiejętności prawdopodobnie zwiększyło ich wiarę we własne możliwości i samoocenę, co jest zgodne z wynikami innych badaczy (Elavsky i in. 2005; Eliezer i in. 2010; Moral-García i in. 2018). Czynniki interpersonalne, takie jak towarzyskość i wsparcie grupy, odgrywają istotną rolę w zakresie samooceny. Trening kuglarski w formie żonglowania prowadzony w postaci zajęć grupowych z instruktorem może przynieść więc lepsze efekty niż ćwiczenia indywidualne, co potwierdzają badania nad wpływem ćwiczeń grupowych na zdrowie psychiczne (Mortazavi i in. 2011; Stevens i in. 2021). Elementy środowiskowe, takie jak atrakcyjne otoczenie, również wpływają na motywację do aktywności fizycznej (Chippendale i Boltz 2015; Kowal i Fortier 2007; Yarmohammadi i in. 2019; Yoo i Kim 2017), tak więc ćwiczenia żonglerskie warto wykonywać w dowolnym miejscu, nie ograniczając się do aktywności w zamkniętym pomieszczeniu, gdyż większa przestrzeń czy środowisko naturalne mogłyby zwiększyć motywację osób starszych do aktywności.

Aktywny styl pozytywnie wpływa na samoocenę i jakość życia seniorów. Na podstawie wyników badania opisanego w publikacji 1 wykazano, że udział w treningu kuglarskim w formie żonglowania zmniejszył ryzyko występowania depresji. Uczestnictwo w zajęciach grupowych było kluczowe dla poprawy samopoczucia uczestników, co podkreśla znaczenie społecznego aspektu aktywności fizycznej wskazanego przez innych autorów (Mortazavi i in. 2011; Stevens i in. 2021). W sytuacjach utrudniających udział w zajęciach grupowych, takich jak pandemia, trening kuglarski w formie żonglowania może być atrakcyjną alternatywą dla ćwiczeń w domu. Aktywności te nie wymagają specjalnego sprzętu ani dużej przestrzeni, a materiały instruktażowe mogą pomóc w samodzielnej nauce. Obserwuje się, że ćwiczenia żonglerskie mogą również korzystnie wpływać na leczenie objawów zespołu stresu pourazowego (Welburn 2015) i redukcję lęku (Nakahara i in. 2007), co tłumaczy się m.in. poprzez wpływ tej formy aktywności na neuroplastyczność mózgu, szczególnie w obszarach istoty białej (Scholz i in. 2009; Schultz i in. 2012) i szarej (Boyke i in. 2008; Draganski i in. 2004; Driemeyer i in. 2008; Gerber i in. 2014).

Podsumowując, trening kuglarski w formie żonglowania jest interesującą formą aktywności fizycznej dla osób starszych, wpływającą pozytywnie na samopoczucie. Proponowane ćwiczenia mogą być włączone do różnych programów treningowych lub modyfikowane według potrzeb. Należy jednak pamiętać o odpowiedniej rozgrzewce i indywidualnym podejściu, gdyż proces uczenia się motorycznego nierzadko różni się w zależności od osoby. Zaproponowany program treningowy może służyć jako wprowadzenie do nauki innych sztuczek żonglerskich. Co więcej, mimo że niektóre schorzenia utrudniają wykonywanie precyzyjnych ruchów wymaganych przy żonglowaniu, ćwiczenia te są odpowiednie dla większości osób niemających przeciwwskazań do aktywności fizycznej.

Publikacja 2

Istotą badania opisanego w publikacji 2 była ewaluacja wpływu treningu kuglarskiego w formie żonglowania na stabilność postawy i funkcje poznawcze u zdrowych, aktywnych fizycznie osób starszych. Główny cel badania stanowiła ocena wpływu omawianego treningu na zmiany w zakresie stabilności posturalnej osób starszych w warunkach stania swobodnego, stania swobodnego z zadaniem poznawczym oraz w warunkach testu granic stabilności. Dodatkowo oceniano wpływ tego treningu na czas percepcji bodźca wzrokowego, DT, uwagę selektywną, a także szybkość i dokładność przetwarzania informacji mierzone odpowiednimi testami psychologicznymi. Wynik drugorzędny stanowił poziom aktywności fizycznej osób biorących udział w projekcie. W tym badaniu posta-

wiono dwie hipotezy: 1) że trening kuglarski w formie żonglowania 3 razy w tygodniu w ciągu 4 tygodni wpłynie na poprawę wskaźników stabilności posturalnej uczestników; 2) pozytywny wpływ tego treningu na czas percepcji bodźca wzrokowego, DT, uwagę selektywną, a także szybkość i dokładność przetwarzania informacji wśród osób starszych. Pierwsza hipoteza została potwierdzona wyłącznie dla zmiennej RangeY w warunku pomiaru stabilności posturalnej bez dodatkowego zadania poznawczego, przy czym w NJP takiej poprawy nie zaobserwowano. Natomiast pozostałe zmienne nie charakteryzowały się istotnymi różnicami po treningu kuglarskim w formie żonglerki, jednakże zaobserwowano istotne pogorszenie się zmiennych RMS_{vx} oraz RMS_{vy} dla NJP w warunku swobodnego z zadaniem poznawczym, gdy po JP nie uległy one zmianom. Dodatkowo obserwowano wyraźnie większe pozytywne różnice w zdecydowanej większości ocenianych zmiennych stabilności posturalnej w POST JP niż w POST NJP, jednak bez uzyskania istotności statystycznej. Choć pierwsza hipoteza potwierdzona została wyłącznie dla wskaźnika RangeY, nie bez znaczenia wydaje się obserwacja, że trening kuglarski w formie żonglowania przyczynił się do utrzymania wyników RMS_{vx} oraz RMS_{vy} , co podkreśla jego pozytywne znaczenie. W przypadku kolejnej hipotezy istotną poprawę zarejestrowano wyłącznie dla zmiennej SRT oraz COG_c , co świadczy o pozytywnych zmianach w zakresie czasu percepcji bodźca wzrokowego, a także dokładności przetwarzania informacji. Zmiany te zaszły zarówno dla JP, jak i NJP. Dodatkowo, tak jak w przypadku wskaźników stabilności posturalnej, w zakresie wyników testów mierzących funkcje poznawcze zaobserwowano, z podkreśleniem braku uzyskania istotności statystycznej, większe pozytywne zmiany w POST JP niż w POST NJP. Wyniki te nie pozwalają jednak na jednoznaczne przyjęcie tej hipotezy za prawdziwą.

Na podstawie wyników badania opisanego w publikacji 2 wykazano, że udział w treningu kuglarskim w formie żonglowania – JP – miał pozytywny wpływ na stabilność posturalną, szczególnie w zadaniach wymagających podzielności uwagi (PTS_E). Istotny efekt interakcji zaobserwowano dla RMS_{vx} i RMS_{vy} . W POST NJP stabilność postawy pogorszyła się, zwłaszcza w zakresie RMS_{vx} , natomiast w POST JP pozostała na stałym poziomie, co sugeruje, że aktywność ta może przynosić lepsze rezultaty niż standardowa aktywność fizyczna w zakresie stabilności posturalnej. W PTS_c dla POST JP zaobserwowano poprawę RangeY u uczestników, wartość tej zmiennej pogorszyła się natomiast w POST NJP.

W badaniach innych autorów wskazuje się, że lepsza kontrola kończyn górnych wiąże się z lepszą kontrolą postawy (Amado i in. 2016; Era i in. 1996; Leroy i in. 2008), a doświadczeni żonglerzy charakteryzują się mniejszym zakresem kołysania podczas żonglowania (Leroy i in. 2008). Wyniki te sugerują, że nawet krótkie interwencje żonglerskie mogą poprawiać kontrolę postawy i stabilność posturalną, choć wyraźne efekty mogą być widoczne dopiero przy dłuższych programach treningowych.

W badaniu opisanym w publikacji 2 odnotowano umiarkowane ES interakcji dla zmiennych V_{cop} , RangeY, RMS_{vy} oraz RMS_{vx} . Wyniki te nie były jednak statystycznie istotne, ale mogą sugerować, że żonglowanie poprawia stabilność posturalną u osób starszych w większym zakresie niż zaobserwowano. Jednakże dowody te są niewystarczające, by móc wyciągać wnioski odnoszący się do całej populacji. Obecne doniesienia naukowe potwierdzają, że aktywność fizyczna, zwłaszcza angażująca kończyny górne (a nie kończyny dolne), może poprawiać stabilność posturalną, np. gimnastyka u dzieci (Garcia i in. 2011; Gautier i in. 2008), treningi cyrkowe (Sahli i in. 2013) czy strzelanie z karabinu (Era i in. 1996). Wyniki stabilności posturalnej uzyskane przez osoby starsze po uczestnictwie w treningu kuglarskim w formie żonglowania, skupiającym się głównie na pracy kończyn górnych, są więc potwierdzeniem, że aktywność ta stanowi obiecującą i atrakcyjną formę ćwiczeń, która pomaga spowolnić pogarszanie się zdolności w zakresie kontroli postawy.

Na podstawie wyników pomiarów funkcji poznawczych z badania opisanego w publikacji 2 główny wpływ czasu zaobserwowano w SRT i COG_c, co może potwierdzać, że umiarkowana aktywność fizyczna wspiera utrzymanie funkcji poznawczych u osób starszych. Wyniki badań innych autorów potwierdzają ten wniosek (Abourezk i Toole 1995; Liu i in. 2022), zwłaszcza w przypadku połączonych interwencji aktywności fizycznej i wysiłku poznawczego (Leroy i in. 2008; Rodrigues i in. 2016), takich jak żonglowanie.

Podsumowując, wyniki badania opisanego w publikacji 2 sugerują, że udział w interwencji o charakterze treningu kuglarskiego w formie żonglowania trwającej minimum 4 tygodnie może poprawiać stabilność posturalną, a także – jako dodatkowa aktywność – wspierać poprawę funkcji poznawczych u osób już prowadzących aktywny styl życia, zwiększając korzyści wynikające z ich dotychczasowej aktywności. Jednak potrzebne są dalsze badania, aby potwierdzić wpływ żonglowania na plastyczność poznawczą oraz stabilność posturalną w dłuższej perspektywie.

Publikacja 3

Celem badania opisanego w publikacji 3 była ewaluacja wpływu treningu kuglarskiego w formie żonglowania na wyniki zadania dopasowywania pozycji stawów oraz zmiany funkcji poznawczych u zdrowych, aktywnych fizycznie kobiet powyżej 65. roku życia. Ocena obejmowała poziom początkowy uczestniczek, zmiany w POST JP oraz w POST NJP. Głównymi celami badania były zmiana w zakresie dokładności odwzorowywania pozycji stawu łokciowego w warunkach IPSI oraz CONTRA, a także korelacja rezultatów dokładności odwzorowywania pozycji stawu łokciowego z wynikami testów wybranych funkcji poznawczych. Wynikami drugorzędnymi okazały się wpływ tego treningu na wybrane funkcje poznawcze u badanych, a także efekt uczenia się obserwowany w zadaniu dopasowania pozycji stawu łokciowego. W tym badaniu postawiono dwie hipotezy: 1) że trening kuglarski w postaci żonglowania 3 razy w tygodniu w ciągu 4 tygodni wpłynie na poprawę propriocepcji kończyn górnych w zadaniu dopasowania pozycji stawu łokciowego u kobiet powyżej 65. roku życia; 2) o istotnych korelacjach propriocepcji kończyn górnych w zadaniu dopasowania pozycji stawu łokciowego z wynikami zdolności percepcji bodźca wzrokowego, DT, uwagi selektywnej, a także szybkości i dokładności przetwarzania informacji wśród osób starszych. Pierwsza z tych hipotez nie została potwierdzona ze względu na brak obserwowalnych różnic wywołanych wpływem interwencji na wyniki dopasowania pozycji stawu łokciowego zarówno w IPSI, jak i CONTRA. W przypadku kolejnej hipotezy nie zaobserwowano istotnych korelacji wyników wybranych funkcji poznawczych z dokładnością dopasowania pozycji w stawie łokciowym w IPSI, jednakże w CONTRA już tak, szczególnie dla zmiennej DT.

Na podstawie rezultatów otrzymanych w badaniu opisanym w publikacji 3 wykazano niewielkie zmiany dokładności dopasowania pozycji stawu łokciowego po interwencji o charakterze treningu kuglarskiego w formie żonglowania, jednak podobne trajektorie zaobserwowano również w okresie kontrolnym, szczególnie dla błędów CE i VE we wszystkich warunkach oraz AE i RMSE w IPSI. Brak znaczącego efektu żonglowania może wynikać ze zbyt krótkiego czasu trwania interwencji, gdyż pozytywne efekty propriocepcji u osób starszych obserwowano w interwencjach trwających od 6 tygodni do 12 miesięcy (Winter i in. 2022).

Zmiany w zdolnościach proprioceptywnych są powszechne wraz z wiekiem (Adamo i in. 2007, 2009; Goble 2010; Goble i in. 2009). W badaniach nad propriocepcją wśród osób starszych wykazano, że aktywne fizycznie osoby starsze osiągają lepsze wyniki w dopasowywaniu pozycji niż ich rówieśnicy preferujący siedzący styl życia (Adamo i in. 2007, 2009). Stopień błędu AE w badaniach Adamo i in. był zbliżony do wyników uczestniczek

badania opisanego w publikacji 3 na ich poziomie początkowym (Adamo i in. 2007, 2009). W kolejnych pomiarach w warunku IPSI zaobserwowano znaczną poprawę wszystkich zmiennych błędu (CE, AE, VE, RMSE) zarówno w okresie żonglowania, jak i po okresie kontrolnym, w porównaniu z poziomem początkowym. Sugeruje to, że u starszych kobiet znajomość zadania poprawia jego wykonanie w kolejnych próbach. Prawdopodobnie więc na uzyskane wyniki wpłynął efekt zapoznania się z zadaniem, gdyż starsze osoby chętniej angażują się w znane sobie aktywności (Zhang i in. 2019). Omawiane aspekty wydają się mieć istotne znaczenie dla przyszłych badań z zakresu propriocepcji, w szczególności w grupie osób starszych, gdyż najczęściej familiaryzacja zdolności dopasowania pozycji stawu łokciowego odbywała się w dniu badania, tuż przed pomiarami głównymi, lub wcale nie zachodziła (Boisgontier i Swinnen 2015; Talis i Levik 2016; Tsay i in. 2016).

W badaniu opisanym w publikacji 3 w warunku CONTRA nie zaobserwowano statystycznie istotnych zmian dla żadnego rodzaju błędu. Pojawił się jednak trend wskazujący na pogorszenie wydajności zarówno w przypadku POST JP, jak i POST NJP w odniesieniu do poziomu początkowego. Jednakże pomimo tego spadku w POST JP wyniki uczestników pozostały blisko wartości referencyjnych. W porównaniu z poziomem początkowym w pomiarach w POST JP obserwowano większe zakresy błędów (CE, AE, VE, RMSE), podczas gdy w pomiarach w POST NJP zakresy błędów typu: AE, VE i RMSE zauważalnie się poprawiły. Różnice te, w szczególności spadek dokładności w przypadku JP, są intrygujące. Biorąc pod uwagę udokumentowane zmiany w mózgu po treningu żonglerskim – takie jak zwiększona objętość istoty szarej w kompleksie wzrokowo-ruchowym (Boyke i in. 2008; Carus i in. 2016; Driemeyer i in. 2008) – zaobserwowana różnica może być związana ze zmianami neuroplastycznymi, które zachodzą w mózgu po zadaniach bimanualnych (Debaere i in. 2001, 2004; Puttemans i in. 2005). Inną możliwością jest to, że uczestnicy badania opisanego w publikacji 3 nie angażowali wcześniej swoich kończyn górnych w takim samym stopniu jak podczas interwencji żonglerskiej, co prowadziło do zmian w aktywacji kończyn – sugerują to również inni autorzy (Proske i Gandevia 2012). Ponieważ jednak różnice te nie były istotne statystycznie, potrzebne są dalsze badania w celu oceny zmian w komunikacji międzypółkulowej podczas doskonalenia zadań bimanualnych.

W literaturze naukowej wykazano, że najmniejszy błąd AE w stosunku do wartości referencyjnej występuje w warunku IPSI, który angażuje pamięć (Goble 2010), a wyższe wartości AE obserwowane są w warunku CONTRA wymagającym większej interakcji międzypółkulowej. W wynikach zaprezentowanych w publikacji 3 zaobserwowano istotne różnice między warunkami (IPSI, CONTRA) zarówno w POST JP, jak i POST NJP dla AE i RMSE. Na poziomie początkowym nie było jednak żadnych istotnych różnic między warunkami dla wszystkich rodzajów błędów (CE, AE, VE, RMSE), ale obserwowalna dokładność uczestników w odwzorowywaniu pozycji była większa w warunku IPSI. Można zatem spekulować, że interakcja międzypółkulowa w warunku CONTRA wpływa na dokładność i powtarzalność dopasowywania pozycji u starszych kobiet.

W wykorzystanych podczas opisywanego badania (publikacja 3) testach VTS (SRT, CRT, Cognitrone) jedyną istotną zmianę zaobserwowano w COG_c, jednak zmiana ta nie różniła się między POST JP a POST NJP. Natomiast wyniki pozostałych badanych zmiennych funkcji poznawczych nie różniły się znacząco między pomiarami. Zaobserwowano jednak lepsze rezultaty po etapie zapoznania, co mogłoby sugerować, że zaznajomienie się z testami przed głównymi pomiarami jest kluczowe dla uzyskania wiarygodnych wyników. Różnice te nie osiągnęły jednak istotności statystycznej. JP nie miał zatem wpływu na funkcje poznawcze badanych kobiet w wybranych testach.

Mimo że w innych badaniach wykazano, iż aktywność fizyczna poprawia funkcje poznawcze (Erickson i in. 2019; de Greeff i in. 2018; Kelly i in. 2014), zwłaszcza uwagę (Erickson

i in. 2019; Kelly i in. 2014), to wyniki opisane w publikacji 3 tego nie potwierdziły, co może wynikać z faktu, że u starszych, aktywnych fizycznie kobiet zmiany w funkcjach poznawczych nie zachodzą po dodaniu aktywności o charakterze treningu kuglarskiego w formie żonglowania lub zmiany te są niewielkie.

Wykorzystując analizę korelacji, w badaniu opisanym w publikacji 3 wykazano, że w IPSI wyższy wskaźnik praworęczności był związany z większą dokładnością dopasowania pozycji prawą ręką. Nie stwierdzono jednak, by zdolności uwagi czy RT były związane z dokładnością zadania dopasowywania pozycji stawów w tym warunku. Może to sugerować, że osoby rzadziej używające lewej ręki osiągają większą precyzję w ruchach prawą ręką, co stoi w sprzeczności z hipotezą przewagi niepreferowanego ramienia w zadaniach dopasowania pozycji proprioceptywnej (Goble 2010). Na podstawie wyników badań innych autorów (Goble i Brown 2008) zauważono, że dominujące i niedominujące ręce różnią się pod względem zakresu wykorzystania informacji – wizualnych i proprioceptywnych – co może być korzystne przy wykonywaniu codziennych czynności wymagających użycia obu rąk. Zgodnie z tymi doniesieniami dominująca ręka częściej polega na informacjach wzrokowych podczas precyzyjnego manipulowania przedmiotami. Natomiast ręka niedominująca, zwykle trzymana poza polem widzenia, musi polegać na proprioceptywnym sprzężeniu zwrotnym, by wykonywać zadania, takie jak trzymanie przedmiotów w określonej pozycji (Goble i Brown 2008). Jednakże wyniki dowiedzionej w opisywanym badaniu (publikacja 3) korelacji wydają się przeczyć temu stwierdzeniu, szczególnie w przypadku badanych osób starszych. Wydaje się, że preferowane ramię potrzebuje mniej informacji wzrokowych niż ramię niepreferowane, aby poradzić sobie z zadaniami uni- i bilateralnymi. Te obserwacje wymagają dalszych badań, aby lepiej zrozumieć mechanizmy rządzące precyzyjnymi ruchami rąk w różnych grupach wiekowych.

W badaniu opisanym w publikacji 3, w warunku CONTRA, nie zaobserwowano związku z ręcznością, co potwierdza, że zadanie wymaga komunikacji między półkulami mózgu (Goble 2010). Stwierdzono jednak, że wolniejszy czas reakcji w testach był związany z tendencją do niedoszacowania dopasowania pozycji w warunku CONTRA. Może to wskazywać na istotną relację czasu reakcji z wynikami w zadaniach wymagających współpracy obu półkul mózgowych. Odwrotną zależność zaobserwowano dla VCRT i DT; większa rozbieżność była związana z mniejszymi błędami dopasowania. Sugeruje to, że poprawa spójności w RT i DT wiąże się z lepszymi wynikami w warunku CONTRA.

Podczas analizy wyników dopasowywania pozycji stawu łokciowego w warunku CONTRA w badaniu opisanym w publikacji 3 warto uwzględnić DT uczestników, gdyż może on istotnie wpływać na uzyskane rezultaty. Nie stwierdzono istotnych korelacji między zadaniami uwagi mierzonymi testem Cognitrone a warunkiem CONTRA, co sugeruje, że zdolność koncentracji nie odgrywa tu kluczowej roli. Należy jednak bardziej szczegółowo sprawdzić tę kwestię w przyszłości.

6.1. Ograniczenia projektu

Ograniczeniem eksperymentu opisanego w publikacji 1 było uczestnictwo ochotników, a zatem osób niebędących reprezentatywną grupą do całej populacji osób starszych. Można więc spekulować, że w treningu kuglarskim w formie żonglerki uczestniczyły osoby zainteresowane taką formą aktywności, co mogło mieć wpływ na ostateczną ocenę atrakcyjności tych zajęć. Ponadto skala samooceny aktywności treningu kuglarskiego w formie żonglerki, która opiera się na 5-stopniowej skali Likerta, stanowi raczej pomiar opinii uczestników niż jawnych zmiennych, a zatem nie powinna być porównywana z innymi

wiarygodnymi pomiarami odczuwania zmęczenia fizycznego lub poznawczego. Dodatkowo brak grupy kontrolnej nie pozwolił na wyciągnięcie precyzyjnych wniosków przyczynowo-skutkowych z pomiarów.

Eksperyment opisany w publikacji 2 miał również pewne ograniczenia. Pomimo przeprowadzenia analizy i spełnienia założeń minimalnej wielkości próby wydaje się, że liczba uczestników okazała się niewystarczająca, aby wyraźnie wskazać wpływ interwencji na funkcje poznawcze i stabilność postawy. Średnie wielkości efektów przy braku uzyskania istotności statystycznej zdawały się potwierdzać to ograniczenie, inną przeszkodą mogła być liczba trzech treningów w tygodniu. Biorąc pod uwagę praktyczny aspekt interwencji, było to uzasadnione, ale nadal brakuje pewności, czy przy większej częstotliwości zajęć żonglerskich efekty byłyby bardziej zauważalne dla osób aktywnych.

Również eksperyment opisany w publikacji 3 miał kilka istotnych ograniczeń. Efekty żonglowania oceniono jedynie w grupie aktywnych fizycznie kobiet, w wieku powyżej 65 lat. Uczestnikami były jedynie te osoby, które odpowiedziały na ogłoszenia o zajęciach, zatem nie są one reprezentatywne dla populacji starszych kobiet, a prawdopodobnie tylko tych, które z chęcią podejmują nowe formy aktywności. Zmiany w funkcjonowaniu poznawczym i zdolnościach proprioceptywnych mogą zachodzić w różnym tempie, a uwzględnienie obu płci i porównanie ich ze sobą niewątpliwie podniosłoby jakość wyników. Dodatkowo wyłącznie w badaniu poziomym początkowego uczestniczek mierzono ich maksymalną siłę w kończynach górnych, na podstawie której następnie kondycjonowano wrzeciona mięśniowe przed wykonaniem rzeczywistego testu dopasowania pozycji stawowej.

6.2. Nowatorstwo projektu

Projekt doktorski, w którym wykorzystano trening kuglarski w formie żonglowania, ma istotne znaczenia zarówno teoretyczne, jak i praktyczne w kontekście zdrowia osób starszych. Nowatorskie podejście do aktywności fizycznej, jaką jest żonglowanie, wyróżnia się na tle tradycyjnych metod rehabilitacyjnych i treningowych, oferując unikalne połączenie motoryczności, koncentracji i koordynacji. Dzięki temu projekt ten można uznać za wprowadzenie innowacyjnej formy aktywności, która może zostać szeroko zaadaptowana w programach rehabilitacyjnych oraz profilaktycznych skierowanych do osób starszych. Zaletą tego rodzaju aktywności jest jej wszechstronność i łatwość implementacji w różnych warunkach, co czyni ją dostępną dla szerokiej grupy osób, niezależnie od poziomu zaawansowania fizycznego. Co więcej, skrócenie czasu reakcji oraz poprawa stabilności posturalnej u osób starszych mogą znacząco wpłynąć na jakość ich życia, umożliwiając lepszą kontrolę nad ciałem, a tym samym redukując ryzyko upadków.

W związku z powyższym, wyniki projektu stanowią podstawę do opracowania nowych programów treningowych, które łączą korzyści płynące z aktywności fizycznej i poznawczej. Dzięki łatwej adaptowalności trening w formie żonglerki może być skutecznym narzędziem w promocji zdrowia o ważnym znaczeniu dla starzejącego się społeczeństwa.

7. WNIOSKI

Publikacja 1

Trening kuglarski w formie żonglowania jako nauka nowych zadań motorycznych poprawia ocenę samopoczucia u osób starszych. Łatwość wykonywania ćwiczeń oraz efektywność interwencji wskazują na potencjał żonglowania jako formy aktywności promującej poprawę samopoczucia w grupie osób starszych.

Publikacja 2

Żonglowanie, jako zadanie wymagające nauki nowych umiejętności motorycznych, sprzyja poprawie stabilności posturalnej u zdrowych i aktywnych fizycznie osób starszych. Szczegółnej poprawie ulegają RMS_{VX} , RMS_{VY} oraz RangeY, zwłaszcza w zadaniach obligujących do skupienia uwagi. Dodatkowo żonglowanie wspiera poprawę funkcji poznawczych, w tym czasu percepcji bodźców wzrokowych oraz dokładności przetwarzania informacji. Choć zmiany te mają umiarkowane znaczenie kliniczne, sugerują, że żonglowanie może być skutecznym narzędziem wspomagającym zdrowy styl życia.

Publikacja 3

Żonglowanie nie wpływa na zmiany w dopasowaniu pozycji stawu w warunkach IPSI i CONTRA u zdrowych starszych kobiet. Istotna korelacja między czasem reakcji a dokładnością odwzorowania pozycji stawu w warunkach CONTRA może jednak sugerować, że trening żonglerski ma pośredni związek z rozwojem integracji motoryczno-poznawczej u osób starszych mimo braku wyraźnie obserwowanych zmian proprioceptywnych.

8. PIŚMIENNICTWO

- Abourezk T., Toole T. (1995) Effect of task complexity on the relationship between physical fitness and reaction time in older women. *Journal of Aging and Physical Activity*, 3 (3), 251–260. <https://doi.org/10.1123/japa.3.3.251>
- Adamo D.E., Alexander N.B., Brown S.H. (2009) The influence of age and physical activity on upper limb proprioceptive ability. *Journal of Aging and Physical Activity*, 17 (3), 272–293. <https://doi.org/10.1123/japa.17.3.272>
- Adamo D.E., Martin B.J., Brown S.H. (2007) Age-related differences in upper limb proprioceptive acuity. *Perceptual and Motor Skills*, 104 (3 Pt 2), 1297–1309. <https://doi.org/10.2466/pms.104.4.1297-1309>
- Allen T.J., Leung M., Proske U. (2010) The effect of fatigue from exercise on human limb position sense. *The Journal of Physiology*, 588 (8), 1369–1377. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2010.187732>
- Allen T.J., Proske U. (2006) Effect of muscle fatigue on the sense of limb position and movement. *Experimental Brain Research*, 170, 30–38. <https://doi.org/10.1007/s00221-005-0174-z>
- Amado A.C., Palmer C.J., Hamill J., van Emmerik R.E.A. (2016) Coupling of postural and manual tasks in expert performers. *Human Movement Science*, 46, 251–260. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2015.12.008>
- Ambrogini P., Cuppini R., Lattanzi D., Ciuffoli S., Frontini A., Fanelli M. (2010) Synaptogenesis in adult-generated hippocampal granule cells is affected by behavioral experiences. *Hippocampus*, 20 (7), 799–810. <https://doi.org/10.1002/hipo.20679>
- Appeadu M.K., Gupta V. (2023) Postural instability. W: StatPearls. Treasure Island (FL), StatPearls Publishing. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK560906/>
- Arent S.M., Landers D.M., Etnier J.L. (2000) The effects of exercise on mood in older adults: a meta-analytic review. *Journal of Aging and Physical Activity*, 8 (4), 407–430. <https://doi.org/10.1123/japa.8.4.407>
- Bartolacci C., Scarpelli S., D'Atri A., Gorgoni M., Annarumma L., Cloos C., Giannini A.M., De Gennaro L. (2020) The influence of sleep quality, vigilance, and sleepiness on driving-related cognitive abilities: a comparison between young and older adults. *Brain Sciences*, 10 (6), 327. <https://doi.org/10.3390/brainsci10060327>
- Berlin J.A., Colditz G.A. (1990) A meta-analysis of physical activity in the prevention of coronary heart disease. *American Journal of Epidemiology*, 132 (4), 612–628. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aje.a115704>
- Blasco-Lafarga C., Cordellat A., Forte A., Roldán A., Monteagudo P. (2020) Short and long-term trainability in older adults: training and detraining following two years of multi-component cognitive–physical exercise training. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17 (16), 5984. <https://doi.org/10.3390/ijerph17165984>
- Boisgontier M.P., Swinnen S.P. (2015) Age-related deficit in a bimanual joint position matching task is amplitude dependent. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 7. <https://doi.org/10.3389/fnagi.2015.00162>
- Bonsignore M., Barkow K., Jessen F., Heun R. (2001) Validity of the five-item WHO Well-Being Index (WHO-5) in an elderly population. *European Archives of Psychiatry and Clinical Neuroscience*, 251, II27–II31. <https://doi.org/10.1007/BF03035123>

- Boulton E.R., Horne M., Todd C. (2018) Multiple influences on participating in physical activity in older age: developing a social ecological approach. *Health Expectations: An International Journal of Public Participation in Health Care and Health Policy*, 21 (1), 239–248. <https://doi.org/10.1111/hex.12608>
- Boyke J., Driemeyer J., Gaser C., Büchel C., May A. (2008) Training-induced brain structure changes in the elderly. *The Journal of Neuroscience: An Official Journal of Society for Neuroscience*, 28 (28), 7031–7035. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0742-08.2008>
- Brockett C., Warren N., Gregory J.E., Morgan D.L., Proske U. (1997) A comparison of the effects of concentric versus eccentric exercise on force and position sense at the human elbow joint. *Brain Research*, 771 (2), 251–258. [https://doi.org/10.1016/S0006-8993\(97\)00808-1](https://doi.org/10.1016/S0006-8993(97)00808-1)
- Busse A.L., Gil G., Santarém J.M., Filho W.J. (2009) Physical activity and cognition in the elderly: A review. *Dementia & Neuropsychologia*, 3 (3), 204–208. <https://doi.org/10.1590/S1980-57642009DN30300005>
- Carius D., Andrä C., Clauß M., Ragert P., Bunk M., Mehnert J. (2016) Hemodynamic response alteration as a function of task complexity and expertise – an fNIRS study in jugglers. *Frontiers in Human Neuroscience*, 10, 126. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2016.00126>
- Cassilhas R.C., Tufik S., De Mello M.T. (2016) Physical exercise, neuroplasticity, spatial learning and memory. *Cellular and Molecular Life Sciences*, 73, 975–983. <https://doi.org/10.1007/s00018-015-2102-0>
- Chippendale T., Boltz M. (2015) The neighborhood environment: perceived fall risk, resources, and strategies for fall prevention. *The Gerontologist*, 55 (4), 575–583. <https://doi.org/10.1093/geront/gnu019>
- Cichoń E., Kiejna A., Kokoszka A., Gondek T., Rajba B., Lloyd C.E., Sartorius N. (2020) Validation of the Polish version of WHO-5 as a screening instrument for depression in adults with diabetes. *Diabetes Research and Clinical Practice*, 159, 107970. <https://doi.org/10.1016/j.diabres.2019.107970>
- Cohen J. (1988) *Statistical power analysis for the behavioral sciences*, 2nd ed.. New York: Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203771587>
- Cruz-Sánchez F.F., Moral A., Tolosa E., de Belleruche J., Rossi M.L. (1998) Evaluation of neuronal loss, astrogliosis and abnormalities of cytoskeletal components of large motor neurons in the human anterior horn in aging. *Journal of Neural Transmission*, 105 (6–7), 689–701. <https://doi.org/10.1007/s007020050088>
- Dayan E., Cohen L.G. (2011) Neuroplasticity subserving motor skill learning. *Neuron*, 72 (3), 443–454. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2011.10.008>
- De L. d'Alessandro E., Bonacci S., Giraldi G. (2011) Aging populations: the health and quality of life of the elderly. *La Clinica Terapeutica*, 162 (1), e13-8.
- Debaere F., Swinnen S.P., Sunaert S., Van Hecke P. (2001) Changes in brain activation during learning of a new bimanual coordination task. *NeuroImage*, 13 (6), 1149. [https://doi.org/10.1016/S1053-8119\(01\)92471-1](https://doi.org/10.1016/S1053-8119(01)92471-1)
- Debaere F., Wenderoth N., Sunaert S., Van Hecke P., Swinnen S.P. (2004) Changes in brain activation during the acquisition of a new bimanual coordination task. *Neuropsychologia*, 42 (7), 855–867. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2003.12.010>
- Dierijck J., Kenefick M., Smirl J., Dalton B.H., van Donkelaar P. (2020) Attention is required to coordinate reaching and postural stability during upper limb movements generated while standing. *Journal of Motor Behavior*, 52 (1), 79–88. <https://doi.org/10.1080/00222895.2019.1587351>

- Draganski B., Gaser C., Busch V., Schuierer G., Bogdahn U., May A. (2004) Neuroplasticity: changes in grey matter induced by training. *Nature*, 427, 311–312. <https://doi.org/10.1038/427311a>
- Driemeyer J., Boyke J., Gaser C., Büchel C., May A. (2008) Changes in gray matter induced by learning–revisited. *PLoS ONE*, 3 (7), e2669. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0002669>
- Dumith S.C., Hallal P.C., Reis R.S., Kohl H.W. (2011) Worldwide prevalence of physical inactivity and its association with human development index in 76 countries. *Preventive Medicine*, 53 (1–2), 24–28. <https://doi.org/10.1016/j.ypmed.2011.02.017>
- Elavsky S., McAuley E., Motl R.W., Konopack J.F., Marquez D.X., Hu L., Jerome G.J., Diener E. (2005) Physical activity enhances long-term quality of life in older adults: efficacy, esteem, and affective influences. *Annals of Behavioral Medicine*, 30 (2), 138–145. https://doi.org/10.1207/s15324796abm3002_6
- Eliezer D., Major B., Mendes W.B. (2010) The costs of caring: gender identification increases threat following exposure to sexism. *Journal of Experimental Social Psychology*, 46 (1), 159–165. <https://doi.org/10.1016/j.jesp.2009.09.015>
- Era P., Konttinen N., Mehto P., Saarela P., Lyytinen H. (1996) Postural stability and skilled performance – a study on top-level and naive rifle shooters. *Journal of Biomechanics*, 29 (3), 301–306. [https://doi.org/10.1016/0021-9290\(95\)00066-6](https://doi.org/10.1016/0021-9290(95)00066-6)
- Erickson K.I., Hillman C., Stillman C.M., Ballard R.M., Bloodgood B., Conroy D.E., Macko R., Marquez D.X., Petruzzello S.J., Powell K.E. (2019) Physical activity, cognition, and brain outcomes: a review of the 2018 physical activity guidelines. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 51 (6), 1242–1251. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000001936>
- Ferlinc A., Fabiani E., Velnar T., Gradisnik L. (2019) The importance and role of proprioception in the elderly: a short review. *Materia Socio-medica*, 31 (3), 219–221. <https://doi.org/10.5455/msm.2019.31.219-221>
- Fisher G.G., Chaffee D.S., Tetrack L.E., Davalos D.B., Potter G.G. (2017) Cognitive functioning, aging, and work: a review and recommendations for research and practice. *Journal of Occupational Health Psychology*, 22 (3), 314–336. <https://doi.org/10.1037/ocp0000086>
- Focke A., Spancken S., Stockinger C., Thüerer B., Stein T. (2016) Bilateral practice improves dominant leg performance in long jump. *European Journal of Sport Science*, 16 (7), 787–793. <https://doi.org/10.1080/17461391.2016.1141996>
- Garcia C., Barela J.A., Viana A.R., Barela A.M.F. (2011) Influence of gymnastics training on the development of postural control. *Neuroscience Letters*, 492 (1), 29–32. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2011.01.047>
- Gautier G., Thouwarecq R., Larue J. (2008) Influence of experience on postural control: effect of expertise in gymnastics. *Journal of Motor Behavior*, 40 (5), 400–408. <https://doi.org/10.3200/JMBR.40.5.400-408>
- Gerber P., Schlaffke L., Heba S., Greenlee M.W., Schultz T., Schmidt-Wilcke T. (2014) Juggling revisited – a voxel-based morphometry study with expert jugglers. *NeuroImage*, 95, 320–325. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2014.04.023>
- Ghez C., Gordon J., Ghilardi M.F. (1995) Impairments of reaching movements in patients without proprioception. II. Effects of visual information on accuracy. *Journal of Neurophysiology*, 73 (1), 361–372. <https://doi.org/10.1152/jn.1995.73.1.361>
- Goble D.J. (2010) Proprioceptive acuity assessment via joint position matching: from basic science to general practice. *Physical Therapy*, 90 (8), 1176–1184. <https://doi.org/10.2522/ptj.20090399>

- Goble D.J., Brown S.H. (2008) Upper limb asymmetries in the matching of proprioceptive versus visual targets. *Journal of Neurophysiology*, 99 (6), 3063–3074. <https://doi.org/10.1152/jn.90259.2008>
- Goble D.J., Coxon J.P., Wenderoth N., Van Impe A., Swinnen S.P. (2009) Proprioceptive sensibility in the elderly: degeneration, functional consequences and plastic-adaptive processes. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 33 (3), 271–278. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2008.08.012>
- de Greeff J.W., Bosker R.J., Oosterlaan J., Visscher C., Hartman E. (2018) Effects of physical activity on executive functions, attention and academic performance in preadolescent children: a meta-analysis. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 21 (5), 501–507. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2017.09.595>
- Greenwood P.M., Parasuraman R. (2010) Neuronal and cognitive plasticity: a neurocognitive framework for ameliorating cognitive aging. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 2, 150. <https://doi.org/10.3389/fnagi.2010.00150>
- Haaland E., Hoff J. (2003) Non-dominant leg training improves the bilateral motor performance of soccer players. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 13 (3), 179–184. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0838.2003.00296.x>
- Haibach P.S., Daniels G.L., Newell K.M. (2004) Coordination changes in the early stages of learning to cascade juggle. *Human Movement Science*, 23 (2), 185–206. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2004.07.002>
- Han J., Waddington G., Adams R., Anson J., Liu Y. (2016) Assessing proprioception: a critical review of methods. *Journal of Sport and Health Science*, 5 (1), 80–90. <https://doi.org/10.1016/j.jshs.2014.10.004>
- Harada N.D., Chiu V., King A.C., Stewart A.L. (2001) An evaluation of three self-report physical activity instruments for older adults. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 33 (6), 962–970. <https://doi.org/10.1097/00005768-200106000-00016>
- Hekler E.B., Buman M.P., Haskell W.L., Conway T.L., Cain K.L., Sallis J.F., Saelens B.E., Frank L.D., Kerr J., King A.C. (2012) Reliability and validity of CHAMPS self-reported sedentary-to-vigorous intensity physical activity in older adults. *Journal of Physical Activity and Health*, 9 (2), 225–236. <https://doi.org/10.1123/jpah.9.2.225>
- Hernández-Mendo A., Reigal R.E., López-Walle J.M., Serpa S., Samdal O., Morales-Sánchez V., Juárez-Ruiz de Mier R., Tristán-Rodríguez J.L., Rosado A.F., Falco C. (2019). Physical activity, sports practice, and cognitive functioning: the current research status. *Frontiers in Psychology*, 10, 2658. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.02658>
- Hildreth G. (1949) The development and training of hand dominance: II. Developmental tendencies in handedness. *The Pedagogical Seminary and Journal of Genetic Psychology*, 75 (2), 221–254. <https://doi.org/10.1080/08856559.1949.10533518>
- Hötting K., Röder B. (2013) Beneficial effects of physical exercise on neuroplasticity and cognition. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 37 (9 Pt B), 2243–2257. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2013.04.005>
- Hübner L., Voelcker-Rehage C. (2017) Does physical activity benefit motor performance and learning of upper extremity tasks in older adults? – a systematic review. *European Review of Aging and Physical Activity*, 14, 15. <https://doi.org/10.1186/s11556-017-0181-7>
- Kattenstroth J.-C., Kalisch T., Holt S., Tegenthoff M., Dinse H.R. (2013) Six months of dance intervention enhances postural, sensorimotor, and cognitive performance in elderly without affecting cardio-respiratory functions. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 5. <https://doi.org/10.3389/fnagi.2013.00005>

- Kelley D.E., Goodpaster B.H. (2001) Effects of exercise on glucose homeostasis in Type 2 diabetes mellitus. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 33 (6), S495–501; discussion S528–529. <https://doi.org/10.1097/00005768-200106001-00020>
- Kelly M.E., Loughrey D., Lawlor B.A., Robertson I.H., Walsh C., Brennan S. (2014) The impact of exercise on the cognitive functioning of healthy older adults: a systematic review and meta-analysis. *Ageing Research Reviews*, 16, 12–31. <https://doi.org/10.1016/j.arr.2014.05.002>
- Kłak A., Raciborski F., Targowski T., Rzodkiewicz P., Bousquet J., Samoliński B. (2017) A growing problem of falls in the aging population: a case study on Poland – 2015–2050 forecast. *European Geriatric Medicine*, 8 (2), 105–110. <https://doi.org/10.1016/j.eu-rger.2017.02.004>
- Kowal J., Fortier M.S. (2007) Physical activity behavior change in middle-aged and older women: the role of barriers and of environmental characteristics. *Journal of Behavioral Medicine*, 30, 233–242. <https://doi.org/10.1007/s10865-007-9102-y>
- Król-Zielińska M., Ciekot M. (2015) Assessing physical activity in the elderly: a comparative study of most popular questionnaires. *Trends in Sport Sciences*, 3 (22), 133–144.
- Król-Zielińska M., Ciekot-Sołtysiak M., Szeklicki R., Zieliński J., Osiński W., Kantanista A. (2019) Validity and reliability of the Polish adaptation of the CHAMPS physical activity questionnaire. *BioMed Research International*, 6187616. <https://doi.org/10.1155/2019/6187616>
- Lakens D. (2013) Calculating and reporting effect sizes to facilitate cumulative science: apractical primer for t-tests and ANOVAs. *Frontiers in Psychology*, 4. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2013.00863>
- Leroy D., Thouvarecq R., Gautier G. (2008) Postural organisation during cascade juggling: influence of expertise. *Gait & Posture*, 28 (2), 265–270. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2007.12.071>
- Liu Y., Hou X., Tang Z., Zhang H., Liu J. (2022) The effect of different types of physical activity on cognitive reaction time in older adults in China. *Frontiers in Public Health*, 10, 1051308. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.1051308>
- Lord S., Castell S. (1994) Effect of exercise on balance, strength and reaction time in older people. *Australian Journal of Physiotherapy*, 40 (2), 83–88. [https://doi.org/10.1016/S0004-9514\(14\)60454-2](https://doi.org/10.1016/S0004-9514(14)60454-2)
- Lüder B., Kiss R., Granacher U. (2018) Single- and dual-task balance training are equally effective in youth. *Frontiers in Psychology*, 9, 912. <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fpsyg.2018.00912>
- Lyubomirsky S., King L., Diener E. (2005) The benefits of frequent positive affect: does happiness lead to success? *Psychological Bulletin*, 131 (6), 803–855. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.131.6.803>
- Maki B.E., McIlroy W.E. (1996) Postural control in the older adult. *Clinics in Geriatric Medicine*, 12 (4), 635–658.
- Malik J., Stemplewski R., Maciaszek J. (2022) The effect of juggling as dual-task activity on human neuroplasticity: a systematic review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19 (12), 7102. <https://doi.org/10.3390/ijerph19127102>
- Marmeleira J., Pereira C., Cruz-Ferreira A., Fretes V., Pisco R., Fernandes O.M. (2009) Creative dance can enhance proprioception in older adults. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 49 (4), 480–485.
- McAuley E., Rudolph D. (1995) Physical activity, aging, and psychological well-being. *Journal of Aging and Physical Activity*, 3 (1), 67–98.

- McLeroy K.R., Bibeau D., Steckler A., Glanz K. (1988) An ecological perspective on health promotion programs. *Health Education Quarterly*, 15 (4), 351–377. <https://doi.org/10.1177/109019818801500401>
- McTiernan A., Friedenreich C.M., Katzmarzyk P.T., Powell K.E., Macko R., Buchner D., Pescatello L.S., Bloodgood B., Tennant B., Vaux-Bjerke A., George S.M., Troiano R.P., Piercy K.L. (2019) Physical activity in cancer prevention and survival: a systematic review. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 51 (6), 1252–1261. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000001937>
- Mechsner F., Kerzel D., Knoblich G., Prinz W. (2001) Perceptual basis of bimanual coordination. *Nature*, 414, 69–73. Scopus. <https://doi.org/10.1038/35102060>
- Miller W., Brown P.R. (2017) Motivators, facilitators, and barriers to physical activity in older adults: a qualitative study. *Holistic Nursing Practice*, 31 (4), 216–224. <https://doi.org/10.1097/HNP.0000000000000218>
- Moral-García J.E., García D.O., García S.L., Amatria M., Dios R.M. (2018) Influence of physical activity on self-esteem and risk of dependence in active and sedentary elderly people. *Anales de Psicología*, 34 (1), 162–166. <https://doi.org/10.6018/analesps.34.1.294541>
- Mortazavi S.S., Eftekhari Ardebili H., Eshaghi S.R., Dorali Beni R., Shahsiah M., Botlani S. (2011) The effectiveness of regular physical activity on mental health in elderly. *Journal of Isfahan Medical School*, 29 (161), 1805–1814.
- Müller P., Rehfeld K., Schmicker M., Hökelmann A., Dordevic M., Lessmann V., Brigadski T., Kaufmann J., Müller N.G. (2017) Evolution of neuroplasticity in response to physical activity in old age: the case for dancing. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 9, 56. <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fnagi.2017.00056>
- Murman D.L. (2015) The impact of age on cognition. *Seminars in Hearing*, 36 (3), 111–121. <https://doi.org/10.1055/s-0035-1555115>
- Myers J.B., Lephart S.M. (2000) The role of the sensorimotor system in the athletic shoulder. *Journal of Athletic Training*, 35 (3), 351–363.
- Nakahara T., Nakahara K., Uehara M., Koyama K., Li K., Harada T., Yasuhara D., Taguchi H., Kojima S., Sagiya K., Inui A. (2007) Effect of juggling therapy on anxiety disorders in female patients. *BioPsychoSocial Medicine*, 1, 10. <https://doi.org/10.1186/1751-0759-1-10>
- Nejati V., Kordi R., Shoaee F. (2010) Evaluation of effective motivators and barriers of physical activity in the elderly. *Iranian Journal of Ageing*, 4 (4), 52–58.
- Netz Y., Wu M.-J., Becker B.J., Tenenbaum G. (2005) Physical activity and psychological well-being in advanced age: a meta-analysis of intervention studies. *Psychology and Aging*, 20 (2), 272–284. <https://doi.org/10.1037/0882-7974.20.2.272>
- Nguyen H., Moreno-Agostino D., Chua K.-C., Vitoratou S., Prina A.M. (2021) Trajectories of healthy ageing among older adults with multimorbidity: A growth mixture model using harmonised data from eight ATHLOS cohorts. *PLoS ONE*, 16 (4), e0248844. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0248844>
- Niespodziński B., Mieszkowski J., Sawczyn S., Kochanowicz K., Szulc A., Zasada M., Kochanowicz A. (2022) Elbow joint position and force senses in young and adult untrained people and gymnasts. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19 (13), 7592. <https://doi.org/10.3390/ijerph19137592>
- Norcross W.H. (1921) Experiments on the transfer of training. *Journal of Comparative Psychology*, 1 (4), 317–363. <https://doi.org/10.1037/h0072134>
- Oldfield R.C. (1971) The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, 9 (1), 97–113. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(71\)90067-4](https://doi.org/10.1016/0028-3932(71)90067-4)

- Omelan A., Podstawski R., Wziatek B., Merino-Marbán R., Romero-Ramos O. (2017) Physical activity levels of rural and urban seniors in the region of Warmia and Mazury in Poland. *Baltic Journal of Health and Physical Activity*, 9 (4), 74–88. <https://doi.org/10.29359/BJHPA.09.4.07>
- Palakurthi B., Burugupally S.P. (2019) Postural instability in Parkinson's disease: a review. *Brain Sciences*, 9 (9), 239. <https://doi.org/10.3390/brainsci9090239>
- Pettersson B., Lundell S., Lundin-Olsson L., Sandlund M. (2023) 'Maintaining balance in life' – exploring older adults' long-term engagement in self-managed digital fall prevention exercise. *European Review of Aging and Physical Activity*, 20, 12. <https://doi.org/10.1186/s11556-023-00322-7>
- Pi Y.-L., Wu X.-H., Wang F.-J., Liu K., Wu Y., Zhu H., Zhang J. (2019) Motor skill learning induces brain network plasticity: a diffusion-tensor imaging study. *PLoS ONE*, 14 (2), e0210015. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0210015>
- Posner M.I. (1978) *Chronometric explorations of mind*. Hillsdale, New Jersey: Lawrence Erlbaum.
- Proske U., Gandevia S.C. (2012) The proprioceptive senses: their roles in signaling body shape, body position and movement, and muscle force. *Physiological Reviews*, 92 (4), 1651–1697. <https://doi.org/10.1152/physrev.00048.2011>
- Puttemans V., Wenderoth N., Swinnen S.P. (2005) Changes in brain activation during the acquisition of a multifrequency bimanual coordination task: from the cognitive stage to advanced levels of automaticity. *The Journal of Neuroscience*, 25 (17), 4270–4278. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3866-04.2005>
- Quijoux F., Nicolai A., Chairi I., Bargiotas I., Ricard D., Yelnik A., Oudre L., Bertin-Hugault F., Vidal P.-P., Vayatis N., Buffat S., Audiffren J. (2021) A review of center of pressure (COP) variables to quantify standing balance in elderly people: algorithms and open-access code. *Physiological Reports*, 9 (22), e15067. <https://doi.org/10.14814/phy2.15067>
- Ribeiro F., Oliveira J. (2007) Aging effects on joint proprioception: the role of physical activity in proprioception preservation. *European Review of Aging and Physical Activity*, 4, 71–76. <https://doi.org/10.1007/s11556-007-0026-x>
- Riemann B.L., Lephart S.M. (2002) The sensorimotor system, part I: the physiologic basis of functional joint stability. *Journal of Athletic Training*, 37 (1), 71–79.
- Rinalduzzi S., Trompetto C., Marinelli L., Alibardi A., Missori P., Fattapposta F., Pierelli F., Currà A. (2015) Balance dysfunction in Parkinson's disease. *BioMed Research International*, 434683. <https://doi.org/10.1155/2015/434683>
- Rodrigues S.T., Polastri P.F., Gotardi G.C., Aguiar S.A., Mesaros M.R., Pestana M.B., Barbieri F.A. (2016) Postural control during cascade ball juggling: effects of expertise and base of support. *Perceptual and Motor Skills*, 123 (1), 279–294. <https://doi.org/10.1177/0031512516660718>
- Rogers C.J., Colbert L.H., Greiner J.W., Perkins S.N., Hursting S.D. (2008) Physical activity and cancer prevention. *Sports Medicine*, 38, 271–296. <https://doi.org/10.2165/00007256-200838040-00002>
- Rovio S., Kåreholt I., Helkala E.-L., Viitanen M., Winblad B., Tuomilehto J., Soininen H., Nissinen A., Kivipelto M. (2005) Leisure-time physical activity at midlife and the risk of dementia and Alzheimer's disease. *The Lancet Neurology*, 4 (11), 705–711. [https://doi.org/10.1016/S1474-4422\(05\)70198-8](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(05)70198-8)
- Ruhe A., Fejer R., Walker B. (2010) The test-retest reliability of centre of pressure measures in bipedal static task conditions – A systematic review of the literature. *Gait & Posture*, 32 (4), 436–445. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2010.09.012>

- Sahli S., Ghroubi S., Rebai H., Chaâbane M., Yahia A., Pérennou D., Elleuch M.H. (2013) The effect of circus activity training on postural control of 5–6-year-old children. *Science & Sports*, 28 (1), 11–16. <https://doi.org/10.1016/j.scispo.2011.10.010>
- Schmidt R.A., Lee T.D. (2005) *Motor control and learning: a behavioral emphasis*, 4th ed. Champaign, IL: Human Kinetics.
- Scholz J., Klein M.C., Behrens T.E.J., Johansen-Berg H. (2009) Training induces changes in white-matter architecture. *Nature Neuroscience*, 12 (11), 1370–1371. <https://doi.org/10.1038/nn.2412>
- Schuch F.B., Vancampfort D., Rosenbaum S., Richards J., Ward P.B., Veronese N., Solmi M., Cadore E.L., Stubbs B. (2016) Exercise for depression in older adults: a meta-analysis of randomized controlled trials adjusting for publication bias. *Brazilian Journal of Psychiatry*, 38 (3), 247–254. <https://doi.org/10.1590/1516-4446-2016-1915>
- Schultz T., Gerber P., Schmidt-Wilcke T. (2012) Juggling increases interhemispheric brain connectivity: a visual and quantitative dMRI study. *Vision, Modeling, and Visualization*, 217–218. <https://doi.org/10.2312/PE/VMV/VMV12/217-218>
- Sebastjan A., Skrzek A., Ignasiak Z., Sławińska T. (2017) Age-related changes in hand dominance and functional asymmetry in older adults. *PLoS ONE*, 12 (5), e0177845. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0177845>
- Seidler R.D., Bernard J.A., Burutolu T.B., Fling B.W., Gordon M.T., Gwin J.T., Kwak Y., Lipps D.B. (2010) Motor control and aging: links to age-related brain structural, functional, and biochemical effects. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 34 (5), 721–733. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2009.10.005>
- Shin S.-S., An D.-H. (2014) The effect of motor dual-task balance training on balance and gait of elderly women. *Journal of Physical Therapy Science*, 26 (3), 359–361. <https://doi.org/10.1589/jpts.26.359>
- Stathi A., McKenna J., Fox K.R. (2010) Processes associated with participation and adherence to a 12-month exercise programme for adults aged 70 and older. *Journal of Health Psychology*, 15 (6), 838–847. <https://doi.org/10.1177/1359105309357090>
- Stemplewski R., Maciaszek J., Osiński W., Szeklicki R. (2011) Test-retest reliability of measurements of the center of pressure displacement in quiet standing and during maximal voluntary body leaning among healthy elderly men. *Journal of Human Kinetics*, 28, 15–23. <https://doi.org/10.2478/v10078-011-0018-9>
- Steptoe A. (2006) *Depression and physical illness*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Steptoe A., Deaton A., Stone A.A. (2015) Subjective wellbeing, health and ageing. *The Lancet*, 385 (9968), 640–648. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(13\)61489-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(13)61489-0)
- Stevens M., Lieschke J., Cruwys T., Cárdenas D., Platow M.J., Reynolds K.J. (2021) Better together: how group-based physical activity protects against depression. *Social Science & Medicine*, 286, 114337. <https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2021.114337>
- Stewart A.L., King A.C. (1991) Evaluating the efficacy of physical activity for influencing quality-of-life outcomes in older adults. *Annals of Behavioral Medicine*, 13 (3), 108–116. <https://doi.org/10.1093/abm/13.3.108>
- Stewart A.L., Mills K.M., King A.C., Haskell W.L., Gillis D., Ritter P.L. (2001) CHAMPS physical activity questionnaire for older adults: outcomes for interventions. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 33 (7), 1126–1141. <https://doi.org/10.1097/00005768-200107000-00010>
- Sturnieks D.L., St George R.S., Lord S.R. (2008) Balance disorders in the elderly. *Neurophysiologie Clinique/Clinical Neurophysiology*, 38 (6), 467–478. <https://doi.org/10.1016/j.neucli.2008.09.001>

- Suetterlin K.J., Sayer A.A. (2014) Proprioception: where are we now? A commentary on clinical assessment, changes across the life course, functional implications and future interventions. *Age and Ageing*, 43 (3), 313–318. <https://doi.org/10.1093/ageing/aft174>
- Talis V.L., Levik Y.S. (2016) Elbow matching accuracy in young and elderly humans under unusual mechanical constraints. *Frontiers in Neuroscience*, 10, 520. <https://doi.org/10.3389/fnins.2016.00520>
- Thompson K.R., Mikesky A.E., Bahamonde R.E., Burr D.B. (2003) Effects of physical training on proprioception in older women. *Journal of Musculoskeletal & Neuronal Interactions*, 3 (3), 223–231.
- Tsang W.W.N., Hui-Chan C.W.Y. (2003) Effects of tai chi on joint proprioception and stability limits in elderly subjects. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 35 (12), 1962–1971. <https://doi.org/10.1249/01.MSS.0000099110.17311.A2>
- Tsay A., Allen T.J., Proske U. (2016) Position sense at the human elbow joint measured by arm matching or pointing. *Experimental Brain Research*, 234 (10), 2787–2798. <https://doi.org/10.1007/s00221-016-4680-y>
- Veale J.F. (2014) Edinburgh Handedness Inventory – Short Form: a revised version based on confirmatory factor analysis. *Laterality*, 19 (2), 164–177. <https://doi.org/10.1080/1357650X.2013.783045>
- Vinutha H.P., Poornima B., Sagar B.M. (2018) Detection of outliers using interquartile range technique from intrusion dataset. W: Satapathy S.C., Tavares J.M.R.S., Bhateja V., Mohanty J.R. (eds.) *Information and Decision Sciences. Advances in Intelligent Systems and Computing*, 701, 511–518. Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7563-6_53
- Walsh L.D., Allen T.J., Gandevia S.C., Proske U. (2006) Effect of eccentric exercise on position sense at the human forearm in different postures. *Journal of Applied Physiology*, 100 (4), 1109–1116. <https://doi.org/10.1152/japplphysiol.01303.2005>
- Weerakkody N., Percival P., Morgan D.L., Gregory J.E., Proske U. (2003) Matching different levels of isometric torque in elbow flexor muscles after eccentric exercise. *Experimental Brain Research*, 149, 141–150. <https://doi.org/10.1007/s00221-002-1341-0>
- Welburn K. (2015) Juggling-exposure therapy: an innovation in trauma treatment. *Journal of Trauma & Dissociation*, 16 (1), 39–50. <https://doi.org/10.1080/15299732.2014.949019>
- Wendel-Vos G.C.W., Schuit A.J., Feskens E.J.M., Boshuizen H.C., Verschuren W.M.M., Saris W.H.M., Kromhout D. (2004). Physical activity and stroke. A meta-analysis of observational data. *International Journal of Epidemiology*, 33 (4), 787–798. <https://doi.org/10.1093/ije/dyh168>
- van der Willik K.D., Licher S., Vinke E.J., Knol M.J., Darweesh S.K.L., van der Geest J.N., Schagen S.B., Ikram M.K., Luik A.I., Ikram M.A. (2021) Trajectories of cognitive and motor function between ages 45 and 90 years: a population-based study. *The Journals of Gerontology. Series A*, 76 (2), 297–306. <https://doi.org/10.1093/gerona/glaa187>
- Winter L., Huang Q., Sertic J.V.L., Konczak J. (2022) The effectiveness of proprioceptive training for improving motor performance and motor dysfunction: a systematic review. *Frontiers in Rehabilitation Sciences*, 3, 830166. <https://doi.org/10.3389/fre.2022.830166>
- Witkowski M., Bronikowski M., Nowik A., Tomczak M., Strugarek J., Króliczak G. (2018) Evaluation of the effectiveness of a transfer (interhemispheric) training program in the early stages of fencing training. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 58 (9), 1368–1374. <https://doi.org/10.23736/S0022-4707.17.07556-9>

- Xu D., Hong Y., Li J., Chan K. (2004) Effect of tai chi exercise on proprioception of ankle and knee joints in old people. *British Journal of Sports Medicine*, 38 (1), 50–54. <https://doi.org/10.1136/bjsm.2002.003335>
- Yang N., Waddington G., Adams R., Han J. (2019) Age-related changes in proprioception of the ankle complex across the lifespan. *Journal of Sport and Health Science*, 8 (6), 548–554. <https://doi.org/10.1016/j.jshs.2019.06.003>
- Yarmohammadi S., Mozafar Saadati H., Ghaffari M., Ramezankhani A. (2019) A systematic review of barriers and motivators to physical activity in elderly adults in Iran and worldwide. *Epidemiology and Health*, 41, e2019049. <https://doi.org/10.4178/epih.e2019049>
- Yoo S., Kim D.H. (2017) Perceived urban neighborhood environment for physical activity of older adults in Seoul, Korea: a multimethod qualitative study. *Preventive Medicine*, 103, S90–S98. <https://doi.org/10.1016/j.ypmed.2016.12.033>
- Zhang H., Miao C., Wu Q., Tao X., Shen Z. (2019) The effect of familiarity on older adults' engagement in exergames. W: Zhou J., Salvendy G. (eds.), *Human Aspects of IT for the Aged Population. Social Media, Games and Assistive Environments*, 277–288. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22015-0_22
- Zhou S. (2000) Chronic neural adaptations to unilateral exercise: mechanisms of cross education. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 28 (4), 177–184.
- Zwerus E.L., Willigenburg N.W., Scholtes V.A., Somford M.P., Eygendaal D., van den Beekrom M.P. (2019) Normative values and affecting factors for the elbow range of motion. *Shoulder & Elbow*, 11 (3), 215–224. <https://doi.org/10.1177/1758573217728711>

PODZIĘKOWANIA

Serdecznie dziękuję mojemu Promotorowi – prof. drowi hab. Januszowi Maciaszkowi – za opiekę nad projektem, nadzorowanie mojej pracy i cierpliwość.

Dziękuję prof. AWF drowi hab. Rafałowi Stemplewskiemu za merytoryczne wsparcie i liczne, konstruktywne sugestie w trakcie realizowania doktoratu.

Dziękuję mgr Natalii Głowce za zaangażowanie i pomoc w realizacji mojego projektu, poświęcony czas oraz motywację, bez której sprostanie wielu trudnościom w trakcie pracy nad doktoratem byłoby niemożliwe.

Dziękuję mgrowi Wojciechowi Jelonkowi za poświęcony czas i zaangażowanie w pomoc przy przygoowaniu mojego projektu doktorskiego mimo realizowania własnego.

Dziękuję prof. AWF drowi hab. Maciejowi Tomczakowi za ciekawe i angażujące przedstawienie metodologii i statystyki badań naukowych na zajęciach, których jako uczestnik pierwszego roku Szkoły Doktorskiej byłem słuchaczem, a tym samym za zarażenie mnie pasją i szacunkiem do tego aspektu badań.

Dziękuję prof. AWF drowi hab. Krzysztofowi Durkalec-Michalskiemu za zaufanie i zaangażowanie w projekty Zakładu Dietetyki Sportowej AWF Poznań, które rozwijały mnie dodatkowo w zakresie umiejętności prowadzenia badań naukowych i pracy w zespole.

Dziękuję rodzicom za wiarę w moje możliwości i zaszczepienie we mnie pasji do nauki oraz braciom – Karolowi i Dawidowi – którzy, choć nie zawsze rozumieli, o czym mówię, zawsze byli gotowi wysłuchać moich opowieści ze świata nauki. Szczególnie dziękuję im za to, że jako starsi bracia pokazali mi, iż warto realizować swoje marzenia.

Dziękuję również uczestnikom badań, którzy wykazali się ogromnym zaangażowaniem w projekcie, uczestnicząc w zajęciach, oraz bez których przeprowadzenie tychże badań byłoby niemożliwe.

PRZEBIEG PRACY NAUKOWO-ZAWODOWEJ – INFORMACJE DODATKOWE

Publikacje naukowe (spoza cyklu)

Jelonek W., Malik J., Łochyński D. (2025) Effects of attentional focus on spatial localization of distal body parts and touch in two-arm position matching. *Experimental Brain Research*, 243 (1), 27. <https://doi.org/10.1007/s00221-024-06976-8>

MNiSW: 70; Impact Factor: 1,7; Impact Factor 5-letni: 1,8

Główka N., Malik J., Anioła J., Zawieja E.E., Chmurzynska A., Durkalec-Michalski K. (2024) The effect of caffeine dose on caffeine and paraxanthine changes in serum and saliva and CYP1A2 enzyme activity in athletes: a randomized placebo-controlled crossover trial. *Nutrition & Metabolism*, 21 (1), 90. <https://doi.org/10.1186/s12986-024-00863-3>

MNiSW: 100; Impact Factor: 3,9; Impact Factor 5-letni: 4,3

Główka N., Malik J., Podgórski T., Stemplewski R., Maciaszek J., Ciężyńska J., Zawieja E.E., Chmurzynska A., Nowaczyk P.M., Durkalec-Michalski K. (2024) The dose-dependent effect of caffeine supplementation on performance, reaction time and postural stability in Cross-Fit – a randomized placebo-controlled crossover trial. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 21 (1), 2301384. <https://doi.org/10.1080/15502783.2023.2301384>

MNiSW: 100; Impact Factor: 4,5; Impact Factor 5-letni: 4,8

Malik J., Stemplewski R., Maciaszek J. (2022) The Effect of juggling as dual-task activity on human neuroplasticity: a systematic review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19 (12), 7102. <https://doi.org/10.3390/ijerph19127102>

MEiN: 140.

Wiśniewski D., Śliwicka E., Malik J., Durkalec-Michalski K. (2021) Evaluation of fluid loss and customary fluid intake among a selected group of young swimmers: a preliminary field study. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18 (6), 3205. <https://doi.org/10.3390/ijerph18063205>

MEiN: 140; Impact Factor: 4,6; Impact Factor 5-letni: 4,8

Bibliometryczne podsumowanie osiągnięć

Data: 26.01.2025

Index H (według JCR): 2

Liczba cytowań (wg JCR): 7

Łączny Impact Factor: 24,2

Łącznie punktacja MEiN: 830

Staże naukowe

Staż naukowy pod opieką dra Daniela Goble'a w School of Health Sciences, Oakland University, Michigan. Zrealizowany w ramach programu PROM Narodowej Agencji Wymiany Akademickiej (09.2022 r.). Głównym celem udziału w stażu było podniesienie kwalifikacji naukowych i praktycznych w obszarach obejmujących: aspekty biomechaniki, obsługę platformy o nazwie Balance Tracking System służącej do oceny stabilności posturalnej oraz podstaw programowania w środowisku LabVIEW.

Staż naukowo-badawczy pod opieką prof. SWPS dra hab. Jarosława Michałowskiego na SWPS w Poznaniu w Laboratorium Neuronauki Emocji. Głównymi zadaniami udziału w stażu były przeprowadzanie badań laboratoryjnych z wykorzystaniem 64-kanalowego czepka oraz systemu BrainVision actiChamp do zbierania danych EEG, a także analiza zebranych danych EEG przy użyciu narzędzi EEGLab i ERPLab podczas badań dotyczących neuronalnych korelatów dysfunkcji regulacji emocji w prokrastynacji.

Udział w realizacji projektów badawczych

Wykonawca: projekt w ramach programu rozwoju młodych pracowników nauki AWF Poznań 2022 pt. *Ocena wpływu podaży różnych dawek kofeiny na czas reakcji, wydolność fizyczną i specyficzne zdolności wysiłkowe zawodników uprawiających dyscypliny szybkościowo-siłowe*, kierownik: mgr N. Głównka, miejsce: Zakład Dietetyki Sportowej.

Wykonawca: projekt w ramach programu rozwój młodych pracowników nauki AWF Poznań 2021 pt. *Wpływ ogniskowania uwagi na czucie pozycji w stawie łokciowym*, kierownik: mgr W. Jelonek, miejsce: Zakład Fizjoterapii Nerwowo-Mięśniowej.

Współpraca: grant naukowy finansowany przez Fundację Nutricia, nr. RG 3/2020, pt. *The effect of Colostrum Bovinum supplementation on upper respiratory track infections rate and selected immunological biomarkers in trained athletes: a randomized, crossover, placebo-controlled, double-blind trial*.

Konferencje naukowe

European College of Sport Science, 5.07.2024, Glasgow:

Współautor doniesienia pt. *Does bovine colostrum supplementation affect inflammatory and immunological outcomes in endurance athletes?*.

Autorzy: K. Durkalec-Michalski, N. Głównka, T. Podgórski, M. Woźniewicz, J. Malik, K. Wochna, P.M. Nowaczyk.

Free Radicals in Biology, Medicine, Sport and Nutrition Conference, 20–21.10.2023, Gdańsk: Współautor prezentacji w formie posteru pt. *The effect of colostrum bovinum supplementation on selected adaptation and nutrition status indices in trained athletes*.

Autorzy: N. Głównka, J. Malik, T. Podgórski, P.M. Nowaczyk, K. Durkalec-Michalski.

12th European Federation of Sports Medicine Associations Congress of Sports Medicine „Sporty Life – Healthy Life”, 19–21.10.2023, Wrocław:

Współautor doniesienia pt. *The effect of bovine colostrum supplementation on resting and exercise-induced changes in hematological blood parameters, physical capacity and performance in trained triathletes and swimmers*.

Autorzy: K. Durkalec-Michalski, N. Główka, T. Podgórski, M. Woźniewicz, J. Malik, K. Wochna, P.M. Nowaczyk.

Saúde e Desenvolvimento Humano International Congress 2023, 12–13.10.2023. Vila Real: Współautor doniesienia pt. *The effect of bovine colostrum supplementation on swimming performance in trained athletes*.

Autorzy: K. Durkalec-Michalski, N. Główka, T. Podgórski, M. Woźniewicz, J. Malik, K. Wochna, P.M. Nowaczyk.

8 Ogólnopolska Konferencja Naukowa „Rozmiar w Umyśle”; 17–18.09.2022, Poznań: Ustna prezentacja doniesienia pt. *Adaptacja i walidacja polskiej wersji skali obsesyjno-kompulsywnego jedzenia SOKJE*.

Autorzy: M. Sakrajda, M. Biniaś, A. Frydrysiak, W. Dziwura, K. Szymański, M. Krajewska, J. Gajos, M. Morkowska, M. Gronkowska, A. Daniszewska, J. Malik.

Międzynarodowa Konferencja Naukowa – II Kongres Młodej Nauki; 7–10.07.2022, Gdańsk: Ustna prezentacja doniesienia pt. *Wpływ motorycznego uczenia się na pomyślne starzenie: przegląd systematyczny dotyczący efektu żonglowania na neuroplastyczność*.

Autorzy: J. Malik, J. Maciaszek.

II Międzynarodowa Multidyscyplinarna Konferencja „Food and Memory”; 20–21.04.2022, Szczecin:

Ustna prezentacja doniesienia pt. *Beyond Dietetic Counselling: Symptoms of Orthorexia and OCD among Polish Experts in the Area of Eating Disorders*.

Autorzy: W. Dziwura, E. Łobodziec, J. Malik.

ZAŁĄCZNIK 1. OŚWIADCZENIA

załącznik 6 do Wniosku o wszczęcie post.
w sprawie nadania stopnia doktora

Jakub Malik

Imię i nazwisko doktoranta/ki

Poznań 16.11.2024

Miejscowość, data

Oświadczenie autora rozprawy doktorskiej o jej oryginalności, samodzielności jej przygotowania i o nienaruszeniu praw autorskich

Ja, niżej podpisany/a oświadczam, że:

a) rozprawa doktorska pt. **Wpływ treningu kuglarskiego oraz żonglerki na wybrane funkcje poznawcze i zdolności koordynacyjne u osób starszych**

jest wynikiem mojej działalności twórczej i powstała bez niedozwolonego udziału osób trzecich;

b) wszystkie wykorzystane przeze mnie materiały źródłowe i opracowania zostały w niej wymienione,
a napisana przez mnie praca nie narusza praw autorskich osób trzecich;

c) załączona wersja elektroniczna pracy jest tożsama z wydrukiem rozprawy;

d) praca nie była wcześniej podstawą nadania stopnia innej osobie.

Mam świadomość, że złożenie nieprawdziwego oświadczenia skutkować będzie niedopuszczeniem do dalszych czynności postępowania w sprawie nadania stopnia doktora lub cofnięciem decyzji o nadaniu mi stopnia doktora oraz wszczęciem postępowania dyscyplinarnego/karnego.


Podpis doktoranta/ki

Jakub Malik

Imię i nazwisko doktoranta/ki

Poznań 16.11.2024

Miejscowość, data

Dotyczy: postępowania w sprawie nadania stopnia doktora w dziedzinie nauk medycznych i nauk o zdrowiu, w dyscyplinie nauki o kulturze fizycznej w Akademii Wychowania Fizycznego w Poznaniu.

Oświadczenie

Oświadczam, że mój wkład w powstanie przedłożonej rozprawy doktorskiej pt.

**Wpływ treningu kuglarskiego oraz żonglerki na wybrane funkcje poznawcze i zdolności
koordynacyjne u osób starszych**

polegał na:

Ustaleniu problemu i hipotez badawczych; konceptualizacja; zaplanowaniu i opracowaniu syntetycznej formy przedstawienia poruszanego problemu; doborze przebiegu procedur badawczych oraz analiz statystycznych podjętych w każdej z publikacji; koordynacji i przeprowadzeniu pomiarów funkcji poznawczych przy użyciu Wiedeńskiego Systemu Testów; koordynacji i przeprowadzeniu pomiarów stabilności posturalnej przy wykorzystaniu platformy posturograficznej AMTI; koordynacji i przeprowadzeniu testów dopasowania pozycji stawu łokciowego; przeprowadzeniu kwestionariuszy CHAMPS, WHO-5 wykorzystywanych w trakcie badań; rekrutacji uczestników badań, w tym: promowanie badań (radio, telewizja, sieć internetowa), selekcja osób zgłaszających się pod kątem kryteriów włączenia i wyłączenia, stały kontakt z uczestnikami; przeprowadzeniu procesu randomizacji uczestników do odpowiednich grup interwencyjnych; przeprowadzeniu randomizacji kolejności występowania poszczególnych pomiarów w testach stabilności posturalnej, a także w testach dopasowania pozycji stawu łokciowego; opracowanie programu ćwiczeń żonglerskich; organizacja, koordynacja oraz prowadzenie jednostek treningowych z żonglerki dla uczestników; gromadzenie danych, przetwarzanie danych, oczyszczanie danych, właściwa analiza danych, raportowanie i dystrybucja wyników; przegląd literatury; pisanie pierwszego draftu każdej z publikacji naukowych oraz tworzenie ostatecznej jego wersji po uwagach współautorów; przygotowywanie artykułów pod wymogi czasopism, odpowiadanie na recenzje; autor korespondencyjny każdej publikacji wchodzącej w skład rozprawy doktorskiej.



Prof. dr hab. Janusz Maciaszek

Poznań, 15.11.2024 r.

Zakład Nauk o Aktywności Fizycznej i Promocji Zdrowia

Akademia Wychowania Fizycznego im. E. Piaseckiego

w Poznaniu

Oświadczenie wskazujące zadania, jakie pełnił promotor rozprawy doktorskiej
mgra Jakuba Malika pt. „Wpływ treningu kuglarskiego oraz żonglerki na wybrane funkcje
poznawcze i zdolności koordynacyjne u osób starszych”

Jako kandydat na promotora dysertacji doktorskiej wpięrow uczestniczyłem w dyskusjach z magistrem Jakubem Malikiem, których celem było wyeksponowanie głównego problemu badawczego, którego uwieńczeniem mogłaby być praca doktorska. Wspólne rozmowy i dyskusję pozwoliły na przygotowanie projektu i przedstawienie przed Komisją Doktorską, która pozytywnie oceniła plan badań, jak i moją osobę jako promotora.

Przez cały okres prac nad realizacją przyjętego projektu badawczego moim zadaniem było udzielanie Doktorantowi niezbędnej pomocy merytorycznej i metodycznej, coroczna ocena rozwoju naukowego Doktoranta i stanu zaawansowania rozprawy doktorskiej, wpieranie w organizacji warsztatu badawczego, udzielanie wskazówek metodycznych, opiniowanie rocznych sprawozdań Doktoranta z przebiegu jego kształcenia w Szkole Doktorskiej.

Magister Jakub Malik jest pierwszym i głównym autorem publikacji naukowych zaliczonych do cyklu zaliczonych do rozprawy doktorskiej. Jestem jednym z autorów, który uczestniczył jako promotor w całym procesie przygotowania i realizacji prac naukowych. Moim zadaniem było wspieranie Doktoranta i udzielanie pomocy jeszcze niesamodzielnemu pracownikowi nauki. Jednak magister Jakub Malik wykazywał się niezwykle dużą samodzielnością, zaangażowaniem, pomysłowością, cierpliwością i umiejętnościami w radzeniu sobie z wieloma problemami wynikającym z prowadzenia badań wśród osób starszych, a później pojawiającymi się podczas przygotowywania manuskryptów i związanych z odpowiedziami na uwagi recenzentów.



Poznań, 13/04/2025
miejscowość, data

mgr Natalia Głowska
imię i nazwisko współautorki/współautora

Dotyczy: postępowania w sprawie nadania Pani/Panu mgr Jakubowi Malikowi stopnia doktora w dziedzinie nauk medycznych i nauk o zdrowiu, w dyscyplinie nauk o kulturze fizycznej w Akademii Wychowania Fizycznego w Poznaniu.

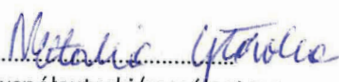
Oświadczenie

Oświadczam, że mój wkład w powstanie publikacji wchodzących w skład rozprawy doktorskiej pana/i Jakuba Malika zatytułowanej:

„Wpływ treningu kuglarskiego oraz żonglerki na wybrane funkcje poznawcze i zdolności koordynacyjne u osób starszych”

polegał na:

- publikacja 1 – n/d
- publikacja 2 – współautorstwo w publikacji: współpraca przy opracowaniu metodologii procedur badawczych; przeprowadzanie pomiarów funkcji poznawczych; ocena poprawności językowej pierwszej wersji manuskryptu; sprawdzenie oraz zaakceptowanie ostatecznej wersji manuskryptu.
- publikacja 3 – współautorstwo w publikacji: współpraca przy opracowaniu metodologii procedur badawczych; asystowanie podczas zajęć z żonglerki; przeprowadzenie pomiarów propriocepcji oraz pomiarów funkcji poznawczych; ocena poprawności językowej pierwszej wersji manuskryptu; sprawdzenie oraz zaakceptowanie ostatecznej wersji manuskryptu.


Podpis współautorki/współautora

POZNAN, 13.02.2015

miejsowość, data

mgr Wojciech Jelonek

imię i nazwisko współautorki/współautora

Dotyczy: postępowania w sprawie nadania Pani/Panu mgr Jakubowi Malikowi stopnia doktora w dziedzinie nauk medycznych i nauk o zdrowiu, w dyscyplinie nauk o kulturze fizycznej w Akademii Wychowania Fizycznego w Poznaniu.

Oświadczenie

Oświadczam, że mój wkład w powstanie publikacji wchodzących w skład rozprawy doktorskiej pana/i Jakuba Malika zatytułowanej:

„Wpływ treningu kuglarskiego oraz żonglerki na wybrane funkcje poznawcze i zdolności koordynacyjne u osób starszych”

polegał na:

- publikacja 1 – n/d
- publikacja 2 – współautorstwo w publikacji: współpraca przy opracowaniu metodologii procedur badawczych; przeprowadzanie pomiarów stabilności posturalnej; sprawdzenie oraz zaakceptowanie ostatecznej wersji manuskryptu.
- publikacja 3 – współautorstwo w publikacji: opracowanie metody pomiaru propriocepcji pomoc w pomiarach propriocepcji; przeprowadzenie pomiarów propriocepcji; sprawdzenie oraz zaakceptowanie ostatecznej wersji manuskryptu.

Wojciech Jelonek

Poznań 13.02.2025
miejsowość, data

prof. AWF dr hab. Rafał Stemplewski
imię i nazwisko współautorki/współautora

Dotyczy: postępowania w sprawie nadania Pani/Panu mgr Jakubowi Malikowi stopnia doktora w dziedzinie nauk medycznych i nauk o zdrowiu, w dyscyplinie nauk o kulturze fizycznej w Akademii Wychowania Fizycznego w Poznaniu.

Oświadczenie

Oświadczam, że mój wkład w powstanie publikacji wchodzących w skład rozprawy doktorskiej pana/i Jakuba Malika zatytułowanej:

„Wpływ treningu kuglarskiego oraz żonglerki na wybrane funkcje poznawcze i zdolności koordynacyjne u osób starszych”

polegał na:

- publikacja 1 – n/d
- publikacja 2 – współautorstwo w publikacji: współpraca przy opracowaniu metodologii procedur badawczych; nadzorowanie metodologii pomiaru stabilności posturalnej podczas badań; współpraca w procesie analizy danych; sprawdzenie oraz zaakceptowanie ostatecznej wersji manuskryptu.
- publikacja 3 – n/d



Podpis współautorki/współautora

Article

Effect of the Juggling-Based Motor Learning Physical Activity on Well-Being in Elderly: A Pre–Post Study with a Special Training Protocol

Jakub Malik *  and Janusz Maciaszek 

Department of Physical Activity and Health Promotion Science, Poznan University of Physical Education, Królowej Jadwigi 27/39, 61-871 Poznań, Poland

* Correspondence: malik@awf.poznan.pl; Tel.: +48-739-975-701



Citation: Malik, J.; Maciaszek, J. Effect of the Juggling-Based Motor Learning Physical Activity on Well-Being in Elderly: A Pre–Post Study with a Special Training Protocol. *Healthcare* **2022**, *10*, 2442. <https://doi.org/10.3390/healthcare10122442>

Academic Editor: José Carmelo Adsuar Sala

Received: 7 November 2022

Accepted: 30 November 2022

Published: 3 December 2022

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2022 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Abstract: Background: The importance of physical activity for the elderly is undeniable. Specific forms of exercise that are able to engage practitioners, both cognitively and physically, may provide more positive consequences for health and quality of life. Juggling is one of these activities that has both of these characteristics. Methods: Twenty elderly people (70.55 ± 4.91) were included in a juggling-based motor learning protocol for twelve training units during one month of exercising. An evaluation of the proposed exercises (five-point Likert scale) and a subjective assessment of well-being (WHO-5) were conducted during the protocol. Results: All participants learned to perform a three-ball flash cascade. Exercises were rated as very attractive (4.85 ± 0.31) by the practitioners, and a statistically significant improvement in well-being in participants was shown ($p < 0.01$; $d = 0.76$). Additionally, in the participating group, the number of people at risk of depression decreased significantly after the intervention with juggling classes ($p < 0.01$; $g = 0.5$). Conclusions: The proposed protocol could be an interesting physical activity for the elderly. It can be assumed that this activity, especially when performed in a group form, can improve the well-being of participants in a short period of time.

Keywords: well-being; depression; cognitive development; fall prevention; exercise; elderly; motor learning; juggling; physical activity; exercise protocol

1. Introduction

Population studies have shown that cognitive and motor functions decline similarly during the aging process. Between 45 and 65 years of age, the decline is linear, but after age 65, the effect is rapid [1]. However, as described by Murman [2], the changes that constitute and influence aging are complex. The progressive dysfunction of the central nervous system, peripheral nervous system and neuromuscular system with age appears to be the main effect of motor deficits in the elderly [3]. Cognitive dysfunction is also caused by age-related changes in the neuronal structure. The risk of these changes increases with age, and age-related diseases may accelerate the rate of neuronal dysfunction and loss [2]. These deficits make it difficult for the elderly to perform activities of daily living and can be one of the main factors that increase the risk of falls, which are very dangerous for the elderly [3]. The main causes of motor and cognitive deficits include the deterioration of coordination skills, the increased variability of movements and difficulties with balance, processing speed, working memory, executive functions and others [2,3]. However, despite the progressive changes with age, the aging process should be viewed as heterogeneous because it depends on many factors, such as comorbidities, intrinsic abilities (cognitive and physical), the environment or functional abilities. Therefore, in the opinion of Nguyen et al. [4], the process of aging and the weakening of cognitive as well as physical abilities will progress but in an individualized way in each adult.

One of the proven methods for developing cognitive functions in people is physical activity [5–13]. The promotion of physical activity, especially among the elderly, has become a potent strategy to improve their well-being. Regular physical activity is linked to mental health, especially acting as a preventive measure for depression or neurodegenerative diseases [5]. It not only can improve attention, memory and executive functioning but also may be a means of preventing cognitive impairment [6]. An active lifestyle and regular physical activity or exercise might also improve motor performance and the motor learning process [7]. In addition, other findings showed that combining physical exercise and cognitive training into one activity leads to greater improvement in cognitive functions in the elderly [8]. This type of exercise increases the hippocampus [9], which is involved in motor learning [10], and in addition, exercises involving the cardiovascular system increase the activity of the sensorimotor network [11] or blood flow in the motor cortex, which is responsible for motor control [12]. Moreover, cognitively demanding activities, such as motor learning, do not need to affect cardiorespiratory fitness to have a beneficial effect on cognition and sensorimotor performance [13]. These findings are promising for our aging society. For this reason, motor learning deserves special attention.

Motor learning is “... a set of processes associated with practice or experience leading to relatively permanent changes in the capability for responding” [14]. As we have presented in our systematic review [15], the evidence shows that in the elderly, motor learning retains the ability to change the brain structure. Older adults achieve a worse final performance, but the neuroplastic changes in the brain are similar to those of younger people with a better final performance of juggling. There is still no conclusive knowledge about whether these changes persist long-term or affect the day-to-day functioning of the elderly.

Nevertheless, this evidence seems promising enough to make it worthwhile to introduce activities that focus strictly on motor learning in the elderly. One example of such a form of activity is classical juggling. This is a form of activity that requires concentration while tossing and catching balls in a specific sequence. The number of possible combinations of techniques is so large that even with a long training period, practitioners can learn new tasks during each meeting. Evidence suggests that juggling among the elderly can induce neuroplasticity and thus perhaps improve cognitive and motor functions, and importantly, the elderly are still able to master juggling [15]. These changes can occur after just one week of a juggling intervention [15,16].

However, in addition to the ability to function physically or cognitively, a sense of well-being is also important to health-related quality of life [17]. Worse mental well-being is associated with an increased risk of physical illnesses [18,19], but positive mental well-being works as a protective factor [19,20]. Stewart and King [19] concluded that physical activity correlated with well-being and turned out to be the most important element linking mental well-being and human health. Existing evidence suggests that older people's participation in exercise increases their sense of self-efficacy, which in turn affects their well-being [21]. In addition, physical activity can have a positive impact on mood and life satisfaction [22,23] by reducing, among other things, symptoms of depression in the elderly [24]. So, it is worth encouraging older adults to take up different, especially new, forms of activity. Additionally, in order to be able to reach a wider community of older adults, it is also necessary to offer them a wide range of these activities.

Due to the limited requirements of juggling, it seems to be a good form of activity for people who do not have the opportunity to leave the house or are forced to stay there for a certain period of time, for example, due to quarantine. However, there is a lack of research evaluating the impact of juggling on aspects of daily life, such as its effect on participants' cognitive function and mood. In addition, the lack of protocols for practicing this activity causes people, especially older adults, to not try juggling, so they miss out on the benefits that juggling can bring.

The purpose of this study was to implement the authors' juggling-based motor learning protocol (J-BMLP) in the elderly, evaluate its quality and assess the impact of the J-BMLP on the subjective well-being of participants. Our hypothesis is that after physical

activity in the form of juggling, there will be a positive change in the perception of the well-being of the participants.

2. Materials and Methods

2.1. Participants

Twenty volunteers (mean age = 70.55 ± 4.91) who responded to a local advertisement were included in the single-arm pre–post study design with the J-BMLP intervention. Advertisements were published on the local radio, television and newspapers and also as ads on social networks covering the reach of the city of Poznań, located in Poland. The exclusion criteria for participation in the J-BMLP were as follows: individuals with mixed or left-handedness, any neurological impairments, any balance issues, prior experience in juggling or contraindications to physical activity and individuals under 65 years of age. Participants were asked not to take up new forms of activity during the project, but their previous activities were not restricted during the study, and their physical activity levels were not recorded. Right-handedness was only advisable for more efficient juggling classes. The characteristics of all participants are included in Table 1.

Table 1. Characteristics of participants.

Variable	PRE Mean $\pm$ SD	POST Mean $\pm$ SD
Age	70.55 $\pm$ 4.91	-
Body mass [kg]	67.55 $\pm$ 14.11	67.85 $\pm$ 13.58
Height [cm]	161.50 $\pm$ 8.79	-
BMI [kg/m ²]	25.82 $\pm$ 3.77	25.97 $\pm$ 3.73
Handedness ¹	91.88 $\pm$ 13.27	-

¹ Values from 100 to 61—right-handedness; 60 to –60—mixed handedness; –61 to –100—left-handedness; the Edinburgh Handedness Questionnaire—short form [25].

2.2. Assessment of the Attractiveness and Well-Being

The J-BMLP was assessed by participants individually after completing the whole protocol. For this purpose, a simple proprietary evaluation scale for proposed activities was used. This scale is based on five-point Likert ratings, where participants' opinions about the difficulty, cognitive effort, motor effort and attractiveness of exercises were assessed. A rating of 5 on the scale indicated high attractiveness, effort or difficulty, while a rating of 1 meant low attractiveness, effort or difficulty. Participants filled out the J-BMLP evaluation questionnaire anonymously. Additionally, before and after the J-BMLP, participants were asked to respond to the Polish version of the Well-Being Index (WHO-5), which assesses subjective well-being, referring to the last two weeks. This index can identify depressive symptoms in elderly subjects. An optimal cutoff value of <13 points proves to be the most accurate value in identifying depression. WHO-5 showed good internal and external validity [26,27]. For the Polish adaptation of the WHO-5 scale, Cronbach's alpha was 0.87, while convergent validity was reported as good: (a) correlation with PHQ-9 $r = 0.75$; (b) negative correlation with PAID $r = 0.52$ [27]. Each time, before beginning the questionnaires, participants were instructed on how to complete the WHO-5 scale by the same researcher. The researcher did not interfere in the process of filling out the scale. Participants were not limited by time.

2.3. J-BMLP Description

The main goal of the J-BMLP was to learn a juggling trick named the three-ball cascade. The elderly can learn cascade juggling with three balls, which can improve their cognitive and motor functions (or prevent the impairment of these functions) when the activity is regularly continued [11,28]. The proposed exercise protocol is designed for the elderly as an additional and interesting physical activity that can be performed individually in the

privacy of one's house or in organized classes. For the purposes of the study, the protocol was conducted as a group class with a qualified juggling instructor.

The J-BMLP included twelve training units, with each class lasting 45 min (a warm-up and a cool-down were included). Exercising and learning the steps of the three-ball cascade were included in the main part of the training unit. Each exercise of this protocol could have been modified by increasing its difficulty, e.g., clapping hands during a throw or a toss or directing attention to objects in front of the participant. For the purpose of this study, each task was performed for 3 to 5 min. In all of these exercises, it was important to involve both the dominant and non-dominant sides of the body. Participants in each exercise started tossing or throwing balls with the dominant hand and then with the non-dominant hand. The entire protocol consists of three main groups of exercises called column exercises, various exercises and parabola exercises.

Column exercises are a type of juggling exercise and require the straight vertical trajectory of a ball when thrown (Figure 1). During these exercises, the focus should be placed on the ball, not on the individual hand position. The toss and catch should be performed by the same hand. Balls in these exercises (with some exceptions) should be tossed at eye level. With a higher toss, it is difficult to maintain the correct trajectory of the balls, but exercisers have more time to react.

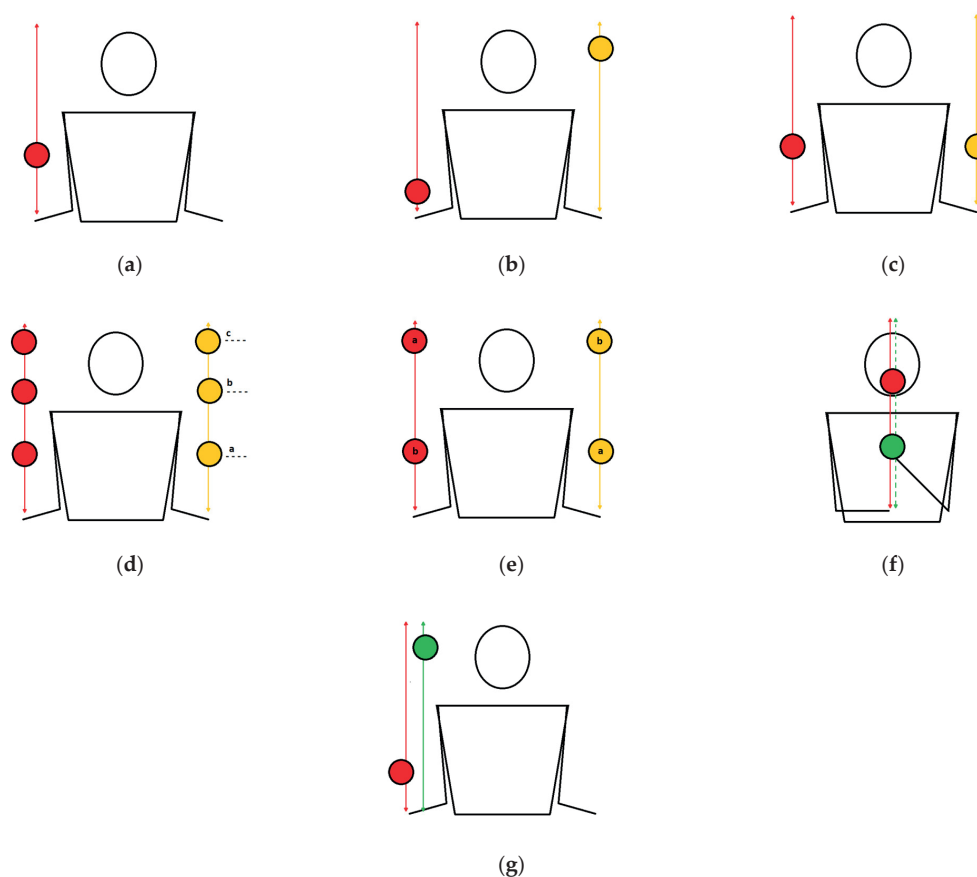


Figure 1. Column juggling exercises: (a) the one-handed column; (b) two-handed alternate columns; (c) two-handed simultaneous columns; (d) two-handed simultaneous columns at three levels; (e) two-handed simultaneous columns at different levels; (f) fake columns; (g) two-balls-in-one-hand columns.

- The one-handed column is the simplest task of this type. Using one hand, practitioners should toss and catch one ball.
- The two-handed alternate-column task requires tossing balls in alternating order. The task should be performed smoothly; i.e., tossing one ball should occur when the other is at the peak of its trajectory.
- The two-handed simultaneous columns is a task in which exercisers should toss two balls using two hands simultaneously at the same level. Attention should be directed toward both balls at the same time.
- The two-handed simultaneous column task at three levels requires throwing balls using two hands at the same level in a specific order: (1) the first (low), (2) the second (medium, eye line); (3) the third (high) level.
- The two-handed simultaneous columns at different levels is a task in which practitioners should toss two balls in the following order: (1) the dominant hand—the first level; the non-dominant hand—the third level; (2) the dominant hand—the third level; the non-dominant hand—the first level.
- Fake columns are a group of similar tasks that require tossing and isolation exercises at the same time. Isolation is not throwing but guiding the ball using a hand along the trajectory of a column, just like a tossed ball. The ball, which is guided by a hand, can be next to, above or below the tossed ball. It is important to react with an isolated ball to the movements of the tossed ball.
- The two-balls-in-one-hand column task requires tossing two balls alternately in the same hand. Each toss should be performed when the previous ball is at the peak of its column trajectory.

Various exercises are a group of tasks that require more than one style of throw (Figure 2). It should be based on previously learned tasks. The main purpose of these various tasks is to prepare for more demanding tasks and also maintain the motor learning process to make previously learned exercises more difficult. Therefore, these exercises should be implemented between the column and parabola tasks. Throws should be performed mainly at eye level.

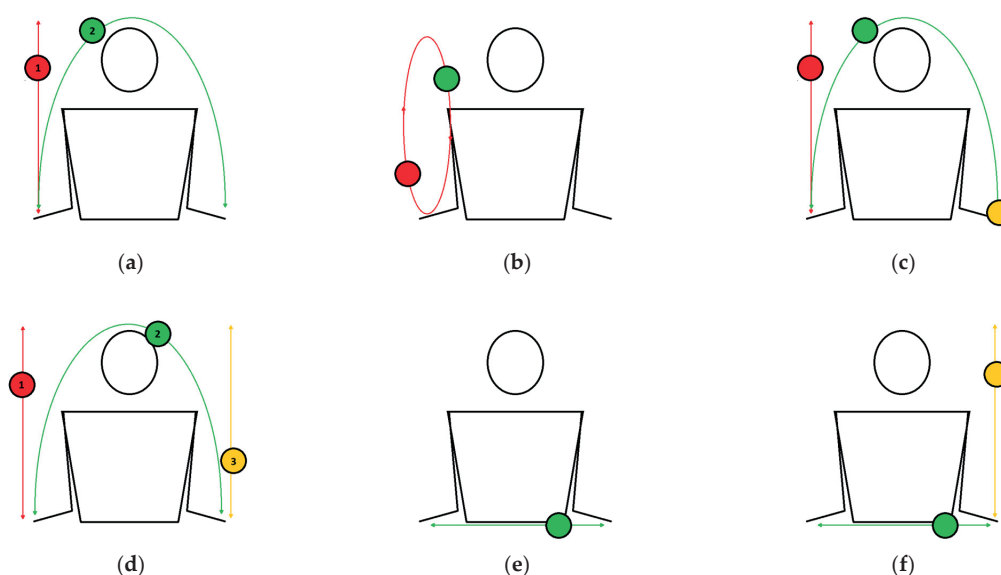


Figure 2. Various juggling exercises: (a) the one-handed column and the parabola; (b) the two-balls-in-one-hand fountain; (c) the one-handed column and the parabola with three balls at pace; (d) the three-ball “W”; (e) the zero throw; (f) the two-ball box.

- The one-handed column and the parabola task is a combination of the one-handed column and the one-handed parabola. Two balls are in one hand. During one repetition, exercisers should follow the correct order: (1) toss the first ball in a column trajectory; (2) throw the second ball in a parabolic trajectory; (3) catch the first ball; (4) catch the second ball.
- The two-balls-in-one-hand fountain is a task where balls move in an ellipse. Two balls are held in one hand. The rhythm of tossing is important: when one ball is at the peak of its trajectory, then the practitioner should toss the second ball. The purpose of this exercise is to master the correct rhythm of tossing the balls. It is not necessary to catch both balls in the same hand. If someone performs this exercise well, we encourage them to try to perform as many such tosses as possible in a series.
- The one-handed column and the parabola with three balls at pace is a task that differs from “the one-handed column and the parabola” with a third ball. Two balls should be held in one hand, with the third in the other. The task should start from the hand with two balls. The order of performing this task is as follows: (1) toss the first ball in a column trajectory; (2) throw the second ball in a parabolic trajectory; (3) catch the first ball; (4) catch the second ball with the hand in which the third ball is held.
- The three-ball “W” task is a more difficult version of the previous task and requires smooth movement so that none of the balls come into contact with each other.
- The zero throw is a simple task that involves the dynamic throwing of a ball in a horizontal line from hand to hand.
- The two-ball box task requires simultaneously moving two balls in the following order: (1) a column toss of the first ball and a zero throw of the second ball at the same time; (2) a zero throw of the second ball and a catch of the first ball at the same time. This task can be performed alternately on both sides at pace.

Parabola exercises are a group of tasks in juggling that require a throw from one hand to the other (Figure 3). The throw should be performed at the eye line along a parabolic trajectory. With two or more balls, each successive throw should be performed while the previous ball is at the peak of its trajectory. It is important to avoid synchronously throwing the balls. Attention should be focused on the ball that is in the air, not on the position of the hands or other balls.

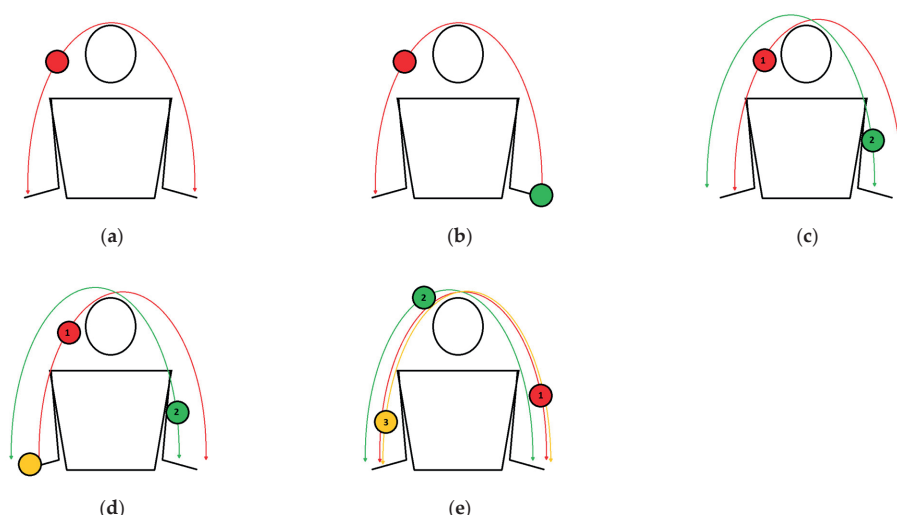


Figure 3. Various juggling exercises: (a) the one-handed parabola; (b) the one-handed parabola, with the second ball in a catching hand; (c) two-handed parabolas with a different focus of attention; (d) two-handed parabolas with three balls; (e) the zero throw.

- The one-handed parabola is the simplest task of the parabola exercises and involves throwing the ball from hand to hand. Exercisers should avoid the direct transfer of the ball.
- The one-handed parabola with the second ball in the catching hand task requires throwing a ball from one hand to the other. The exercisers should complete one repetition of this exercise with two balls in one hand. An important progression in this exercise is to release the second ball before the first ball lands in the hand, as follows: (1) throw the first ball; (2) release the second ball on the ground; (3) catch the first ball.
- The two-handed parabolas with a different focus of attention is a group of tasks with two balls (each in one hand), where it is required to throw balls in the following order: (1) throw the first ball; (2) throw the second ball; (3) catch/ignore the first ball; (4) catch/ignore the second ball. The practitioner should focus their attention only on the first ball and ignore the second ball or on the second ball and then ignore the first ball. Ignoring is understood as letting the ball fall to the ground. It is necessary to have the perfect parabolic trajectory of both balls. The ball on which the participant focuses their attention must be caught. The goal of this task is to throw and catch both balls alternately at pace.
- The two-handed parabolas with three balls/throwing two balls is a more difficult version of the previous task. This task requires alternating the throwing and catching of both balls at pace with an additional ball constantly held in a hand. The practitioners should always start the task from the hand with two balls.
- The two-handed parabolas with three balls with a different focus of attention is a group of tasks that require exercisers to throw three balls along a perfect parabolic trajectory. In this task, practitioners should start from the hand with two balls. The order of movement in this task should be as follows: (1) throw the first ball; (2) throw the second ball; (3) throw the third ball; (4) catch/ignore the first ball; (5) catch the second ball; (6) catch/ignore the third ball. Ignoring is understood as mentioned previously—letting the ball fall to the ground. In one version of this task, the first two balls should be caught, and the third can fall; in the second version, the first ball can fall, and the second and the third should be caught. A difficult variance of this task is a “flash” cascade with three balls, which means that each ball should be thrown and caught once at pace. In this task, exercisers should try to throw the balls alternately along a parabolic trajectory and catch them all. One repetition of this task should proceed in the following order: (1) throw the first ball; (2) throw the second ball; (3) throw the third ball; (4) catch the first ball; (5) catch the second ball; (6) catch the third ball. This task is also the aim of this protocol. The next step in this task is to juggle continuously for a long sequence. An easier version of this task consists of throwing three balls in a parabolic trajectory but focusing on only one of them (the first, the second or the third), and this ball should be caught, while the other two may fall to the ground.

The whole J-BMLP is included in the Supplementary Materials (see additional written material (Supplemental Digital Content 1), which describes the whole protocol of the juggling intervention for people with no previous experience in this activity and includes the step-by-step motor learning process; videos (Supplemental Digital Content 2–66) are provided that demonstrate each exercise described in the additional written materials of Supplemental Digital Content 1. For the purpose of this research, all training units were conducted by the same person. The instructor was a person characterized by experience in teaching physical education in schools and in conducting sports gymnastic classes for children. The person had several years of juggling experience.

2.4. Statistical Methods

For the purpose of this study, we used the W Shapiro–Wilk test for assessing the normality of variables. In the next step, a paired-sample *t*-test for measuring differences in dependent variables (before and after protocol) in the Well-Being Index results was used.

We also used the dichotomization of the values of WHO-5 to divide participants into those at risk for depression and those not at risk for depression. For categorical variables, we used the McNemar test to assess the impact of the intervention on the risk of a depressive state in participants. All statistical analyses were performed using STATISTICA (version 13.3.0, TIBCO Software Inc, Palo Alto, CA, USA; 2017). Cohen's *d* formula was used to calculate the effect size for the paired-sample *t*-test (where 0.2—small effect; 0.5—moderate effect; 0.8—large effect), and Cohen's *g* formula was used to calculate the effect size for the McNemar test (where 0.05—small effect; 0.15—moderate effect; 0.25—large effect) [29].

2.5. Sample Size Calculation

The sample size was calculated in G*Power software (Version 3.1.9.6, Düsseldorf, Germany) [30]. The “means: difference between two dependent means (matched pairs)” test from the *t*-test family for a priori estimation was used. According to a minimal power of 0.8, an alpha error of probability of 0.05, and an effect size of 0.732 [31] for depression assessment after moderate activities, a sample size of 14 participants is adequate. Additionally, due to the ongoing risk of COVID-19 infection among participants, 40% more people were recruited, which amounted to 20 participants.

3. Results

All of the included participants were able to perform the three-ball flash cascade. With this protocol, the elderly, on average, achieved the three-ball flash cascade skill after seven training units.

The attractiveness of the project, the difficulty of the tasks and the physical and cognitive efforts were rated by the elderly participants of the juggling class (Figure 4). On the rating scale, the protocol was found to be very attractive (4.85 ± 0.37), moderately difficult (3.35 ± 0.75) and moderately demanding in terms of both physical (2.95 ± 0.76) and cognitive effort (3.05 ± 0.69).

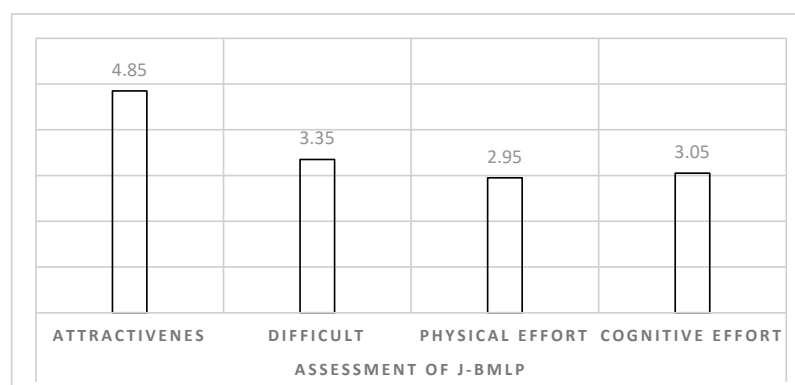


Figure 4. Participants' assessment of J-BMLP.

The average of the WHO-5 values for all participants before the start of the protocol was close to the sensitivity value of 13.00 points ($\text{WHO-5}_{\text{before}} = 13.75 \pm 6.32$). After the protocol, the average had improved ($\text{WHO-5}_{\text{after}} = 17.75 \pm 4.04$), and this difference is statistically significant and shows a moderate effect size ($p < 0.01$; $d = 0.76$). The data are shown in Figure 5.

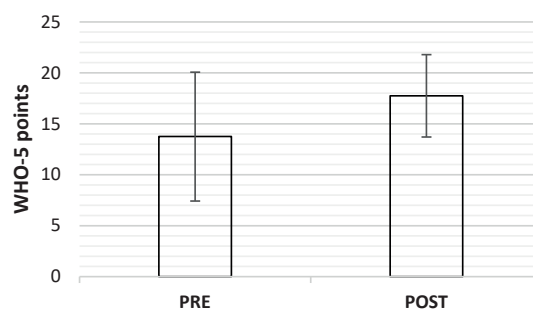


Figure 5. Difference in subjective assessment of participants' well-being before (PRE) and after (POST) the intervention presented as averages with standard deviation. Statistically significant difference $p < 0.01$; $d = 0.76$.

Authors of the Well-Being Index suggest that a score below 13 indicates malaise and is an indication for an examination for depression according to the ICD-10 classification. Before the J-BMLP, 50% of participants classified themselves as depressed under these criteria. After the protocol, just 5% of participants scored below 13 points. Additionally, a WHO-5 result 10% higher than the previous value for a single subject, according to the scale key, indicates a significant improvement in well-being [32]. Such a result was obtained by 60% of the participants. For 20%, no change was perceived. For 5%, the subjective assessment of well-being increased slightly. For the remaining 15%, it decreased significantly, but none of these individuals scored below the sensitivity threshold. After dichotomizing these variables (A: <13 points—risk of depressive state; B: ≥ 13 points—no risk of depressive state), it turns out that the effect of the intervention on the probability of a depressive state in older adults is statistically significant with a large effect size and effectively reduces this risk ($p < 0.01$; $g = 0.5$). The dichotomous data of the WHO-5 scale are cross-tabulated in Table 2.

Table 2. Cross-tabulated WHO-5 subjective well-being rating scale data before (PRE) and after (POST) the intervention.

PRE	POST		Total
	WHO-5 < 13 Points [n]	WHO-5 ≥ 13 Points [n]	
WHO-5 < 13 points [n]	1	9 *	10
WHO-5 ≥ 13 points [n]	0 *	10	10
Total	1	19	20

* Statistically significant improvement, $p < 0.01$; $g = 0.5$.

4. Discussion

The purpose of this study was to test the J-BMLP as a physical activity proposal for the elderly that may have the potential for developing cognitive function and coordination abilities among participants. As the results show, along with its moderate difficulty and moderate cognitive and physical effort is the high attractiveness of this protocol. It seems that juggling proves to be an interesting form of physical activity even for people over 65 years old. The high value of this protocol is that it does not require specialized equipment and can be performed in a standing or sitting position due to the involvement of only the upper body. Additionally, the proposed exercises can be safely performed without the presence of an instructor and can be performed by the elderly with positive performance results, and it is not necessary to have a large space to perform the recommended exercises, so there is no obstacle to juggling alone at home.

The main problem in promoting physical activity programs is understanding the motives and barriers involved. Following McLeroy's socio-ecological model, three main criteria for barriers and motivators regarding physical activity in seniors can be mentioned: intrapersonal, interpersonal and environmental [33,34]. According to numerous studies, the main motivator for older adults to engage in physical activity is to improve their physical condition [34–36]. In contrast, the second most important intrapersonal motivators are pleasure [34,35] and solving psychological problems (such as relief from stress or depression) [34,36,37]. Participation in the J-BMLP seems to give a lot of pleasure to the participants. Among all evaluations, the program received a rating of "attractive" or "very attractive". The assessment of well-being and, consequently, the classification of participants as at risk or not at risk for depression also changed positively after the J-BMLP intervention, which may provide an added incentive for potential beneficiaries to participate in this program. Assessing changes in overall physical fitness was not the goal of this research; however, our current research confirms reports that the elderly can successfully start learning juggling [28,38]. Mastering a new, complex skill in a relatively short period of time may have had an impact on increasing their confidence in their own abilities and in their physical fitness. Studies show that elderly people are physically active achieve higher levels of self-esteem and self-efficacy [39–41]. When it comes to interpersonal motivations for older adults to engage in physical activity, sociability is of the greatest importance. This is understood as communication with others, peer support or exercising together [35,39,42,43]. This shows the advantage of conducting the J-BMLP as a group class with an instructor. Although the J-BMLP is safe to do on one's own without an instructor present, it is likely that the effect of such exercises would not be as high as in a group class. This is supported by studies showing the advantage of group exercise over individual exercise on mental health [37,44]. The main environmental motivator for physical activity for seniors is a group of elements related to the environment in which the elderly person is active. Such an environment should be attractive, with pleasant landscapes, well lit and free of uncultured social activities [34,43,45,46]. In our study, the J-BMLP intervention took place in a sports hall, but these exercises can be performed in any environment, even where space is limited (such as at home). A larger space and, above all, a natural environment, such as a park, would certainly increase the attractiveness of this type of activity. There is no obstacle to performing the proposed J-BMLP exercises outdoors.

As the evidence shows, an active lifestyle can have a positive impact on an individual's self-esteem due to improved levels of independence, which are associated with utility, leisure activities, physical autonomy and perceived health in old age, among other things. Consequently, engaging in physical activity enhances self-esteem [41] and thus can contribute to an improved quality of life [39,47]. Our research shows a large effect size of the implemented protocol as an exercise intervention, which reduces the chances of being placed in a risk group in the WHO-5 depression screening test. The main reason for this phenomenon is the moderate effect size of the improvement in subjective well-being on the WHO-5 questionnaire after one month of participation in J-BMLP group activities. Current evidence [37,44] shows the superiority of group exercise over individual exercise in the fight against depression. In contrast, the loss of opportunities to interact directly with people in physical activity classes is associated with an increase in depressive symptoms. We believe that the main reason for the improvement in WHO-5 scores among the participants in our study was the group format of the classes.

Unfortunately, it is not always possible to take part in group activities. For example, the pandemic situation, which required restrictions and isolation, made it difficult to undertake physical activity at all. The frequency of pandemics is increasing, and this trend is likely to continue [48]. So, situations such as those that occurred during the COVID-19 pandemic can still be expected. As the evidence shows, such situations cause a decline in physical activity levels among people of all ages and an increase in sedentary behaviors [49]. In such cases, higher levels of physical activity and exercise also contribute to greater well-being [47,50], despite the inability to participate in group activities. One of the suggestions

in such conditions may be the J-BMLP because of the limited requirements for space or equipment (after all, participants can juggle anything). The instructional videos included in the Supplemental Digital Content can be helpful when direct contact with the instructor is not possible. An additional strength of the J-BMLP may be that case study research has shown that juggling as a form of therapy also has a beneficial effect on treating refractory PTSD symptoms [51]. In addition, other studies have noted that regular juggling can also effectively reduce anxiety [52]. There is a suggestion that the temporal lobe of the brain is involved in generating panic attacks [53], so movement information and physical movement itself may be an important part of controlling this problem. Existing evidence suggests that juggling as a physical activity that engages the practitioner's attention precisely affects the neuroplasticity of the brain, both white [15,54,55] and gray matter [15,16,28,56,57], including but not limited to the medial temporal lobe [15,16,28,56–58]. This shows that juggling as a physical activity can effectively improve well-being. This may be due to a form of activity that requires focus, such as some form of meditation, or due to its neuroplastic property.

Based on the existing premises and this research, the J-BMLP can be considered an interesting form of physical activity for the elderly. The proposed exercises included in the Supplementary Materials can also be incorporated into various training units as an attractive form of activity or be modified for the purposes of the training unit. If these exercises are to be performed on a special separate training unit, a warm-up is necessary to prepare the exercisers for the effort. The “milestones” of the proposed three-ball cascade juggling process are described in specific groups of juggling tasks and with increasing difficulty. It should be remembered that the motor learning process depends on different variables and can work differently in people of the same age [59,60].

This protocol, for those interested, can serve as an introduction to learning other juggling tricks in the future. The exercises included in the protocol can be undertaken by anyone who has no contraindications to physical activity. However, certain medical conditions may hinder the performance of these exercises due to the requirement of precise tosses and catches with the upper extremities.

5. Limitations

The main limitation of the research conducted is the lack of a control group to draw cause-and-effect conclusions from the measurements. In addition, the J-BMLP activity self-reported evaluation scale, which is based on the 5-point Likert scale, represents a measurement of participants' opinions rather than explicit variables and thus should not be compared with other reliable measurements of the feeling of physical or cognitive fatigue. Despite the high strength of the effect, and thus the calculated sample size, it seems that studies conducted on a larger number of participants would allow inferences of greater external validity. In addition, the participants were a group of volunteers and thus an unrepresentative group of people relative to the whole elderly population. Thus, one can speculate that J-BMLP classes were attended by people interested in this form of activity, which may have influenced the final rating of the attractiveness of these classes.

6. Conclusions

Although our data suggest that the offered physical activity based on juggling and motor learning can improve subjective ratings of well-being, the study's methodology does not make it clear what influences this change. Of the many variables, such as decreased COVID-19 restrictions, the effect of socialization during the activity or even life changes that may have occurred during the project, it is difficult to isolate the J-BMLP as the one of primary importance.

Nevertheless, the large effect size of the changes and the ease of carrying out the exercises of the J-BMLP under almost any conditions allowed us to infer that it is worth implementing this form of physical activity for the elderly with the expectation of positive results in both physical fitness and well-being.

Further research should be based on randomized controlled trials with a larger number of participants, with an attempt to isolate any side and confounding variables, so as to be able to demonstrate the actual impact of a specific physical activity on the well-being of the elderly.

Supplementary Materials: The following supporting information can be downloaded at: <https://www.mdpi.com/article/10.3390/healthcare10122442/s1>, Training protocol: Supplemental Digital Content 1; Videos: Supplemental Digital Content 2–66.

Author Contributions: Conceptualization, J.M. (Jakub Malik) and J.M. (Janusz Maciaszek); methodology, J.M. (Jakub Malik) and J.M. (Janusz Maciaszek); intervention, J.M. (Jakub Malik); writing—original draft preparation, J.M. (Jakub Malik); writing—Supplementary Material preparation, J.M. (Jakub Malik); writing—review and editing, J.M. (Janusz Maciaszek); preparation of Supplemental Digital Content, J.M. (Jakub Malik). All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Institutional Review Board Statement: The study was conducted in accordance with the Declaration of Helsinki and approved by the Ethics Committee of Poznan University of Medical Sciences (protocol code 106/21 date: 04.02.2021).

Informed Consent Statement: Informed consent was obtained from all subjects involved in the study.

Data Availability Statement: Not applicable.

Acknowledgments: We would like to thank Natalia Głowka for linguistic support during the preparation of the manuscript and assistance in the preparation of Supplemental Digital Content.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. van der Willik, K.D.; Licher, S.; Vinke, E.J.; Knol, M.J.; Darweesh, S.K.L.; van der Geest, J.N.; Schagen, S.B.; Ikram, M.K.; Luik, A.I.; Ikram, M.A. Trajectories of Cognitive and Motor Function between Ages 45 and 90 Years: A Population-Based Study. *J. Gerontol. A Biol. Sci. Med. Sci.* **2021**, *76*, 297–306. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
2. Murman, D.L. The Impact of Age on Cognition. *Semin. Hear* **2015**, *36*, 111–121. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
3. Seidler, R.D.; Bernard, J.A.; Burutolu, T.B.; Fling, B.W.; Gordon, M.T.; Gwin, J.T.; Kwak, Y.; Lipps, D.B. Motor Control and Aging: Links to Age-Related Brain Structural, Functional, and Biochemical Effects. *Neurosci. Biobehav. Rev.* **2010**, *34*, 721–733. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
4. Nguyen, H.; Moreno-Agostino, D.; Chua, K.-C.; Vitoratou, S.; Prina, A.M. Trajectories of Healthy Ageing among Older Adults with Multimorbidity: A Growth Mixture Model Using Harmonised Data from Eight ATHLOS Cohorts. *PLoS ONE* **2021**, *16*, e0248844. [\[CrossRef\]](#)
5. Rovio, S.; Kåreholt, I.; Helkala, E.-L.; Viitanen, M.; Winblad, B.; Tuomilehto, J.; Soininen, H.; Nissinen, A.; Kivipelto, M. Leisure-Time Physical Activity at Midlife and the Risk of Dementia and Alzheimer’s Disease. *Lancet Neurol.* **2005**, *4*, 705–711. [\[CrossRef\]](#)
6. Hernández-Mendo, A.; Reigal, R.E.; López-Walle, J.M.; Serpa, S.; Samdal, O.; Morales-Sánchez, V.; Juárez-Ruiz de Mier, R.; Tristán-Rodríguez, J.L.; Rosado, A.F.; Falco, C. Physical Activity, Sports Practice, and Cognitive Functioning: The Current Research Status. *Front. Psychol.* **2019**, *10*, 2658. [\[CrossRef\]](#)
7. Hübner, L.; Voelcker-Rehage, C. Does Physical Activity Benefit Motor Performance and Learning of Upper Extremity Tasks in Older Adults?—A Systematic Review. *Eur. Rev. Aging Phys. Act.* **2017**, *14*, 15. [\[CrossRef\]](#)
8. Lee, Y.; Wu, C.; Teng, C.; Hsu, W.; Chang, K.; Chen, P. Evolving Methods to Combine Cognitive and Physical Training for Individuals with Mild Cognitive Impairment: Study Protocol for a Randomized Controlled Study. *Trials* **2016**, *17*, 526. [\[CrossRef\]](#)
9. Niemann, C.; Godde, B.; Voelcker-Rehage, C. Not Only Cardiovascular, but Also Coordinative Exercise Increases Hippocampal Volume in Older Adults. *Front. Aging Neurosci.* **2014**, *6*, 170. [\[CrossRef\]](#)
10. Albouy, G.; Sterpenich, V.; Baletau, E.; Vandewalle, G.; Desseilles, M.; Dang-Vu, T.; Darsaud, A.; Ruby, P.; Luppi, P.-H.; Degueldre, C.; et al. Both the Hippocampus and Striatum Are Involved in Consolidation of Motor Sequence Memory. *Neuron* **2008**, *58*, 261–272. [\[CrossRef\]](#)
11. Voelcker-Rehage, C.; Godde, B.; Staudinger, U.M. Cardiovascular and Coordination Training Differentially Improve Cognitive Performance and Neural Processing in Older Adults. *Front. Hum. Neurosci.* **2011**, *5*, 26. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
12. Wagner, G.; Herbsleb, M.; de la Cruz, F.; Schumann, A.; Köhler, S.; Puta, C.; Gabriel, H.W.; Reichenbach, J.R.; Bär, K.-J. Changes in FMRI Activation in Anterior Hippocampus and Motor Cortex during Memory Retrieval after an Intense Exercise Intervention. *Biol. Psychol.* **2017**, *124*, 65–78. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)

13. Kattenstroth, J.-C.; Kalisch, T.; Holt, S.; Tegenthoff, M.; Dinse, H.R. Six Months of Dance Intervention Enhances Postural, Sensorimotor, and Cognitive Performance in Elderly without Affecting Cardio-Respiratory Functions. *Front. Aging Neurosci.* **2013**, *5*, 5. [CrossRef]
14. Schmidt, R.A.; Lee, T.D. *Motor Control and Learning: A Behavioral Emphasis*, 4th ed.; Human Kinetics: Champaign, IL, USA, 2005; pp. vi, 535. ISBN 978-0-7360-4258-1.
15. Malik, J.; Stemplewski, R.; Maciaszek, J. The Effect of Juggling as Dual-Task Activity on Human Neuroplasticity: A Systematic Review. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2022**, *19*, 7102. [CrossRef] [PubMed]
16. Driemeyer, J.; Boyke, J.; Gaser, C.; Büchel, C.; May, A. Changes in Gray Matter Induced by Learning—Revisited. *PLoS ONE* **2008**, *3*, e2669. [CrossRef]
17. Stewart, A.L.; King, A.C. Evaluating the Efficacy of Physical Activity for Influencing Quality-of-Life Outcomes in Older Adults. *Ann. Behav. Med.* **1991**, *13*, 108–116.
18. Steptoe, A. *Depression and Physical Illness*; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2006; ISBN 978-1-139-45930-3.
19. Steptoe, A.; Deaton, A.; Stone, A.A. Psychological Wellbeing, Health and Ageing. *Lancet* **2015**, *385*, 640–648. [CrossRef]
20. Lyubomirsky, S.; King, L.; Diener, E. The Benefits of Frequent Positive Affect: Does Happiness Lead to Success? *Psychol. Bull.* **2005**, *131*, 803–855. [CrossRef]
21. McAuley, E.; Rudolph, D. Physical Activity, Aging, and Psychological Well-Being. *J. Aging Phys. Act.* **1995**, *3*, 67–96. [CrossRef]
22. Arent, S.; Landers, D.; Etnier, J. The Effects of Exercise on Mood in Older Adults: A Meta-Analytic Review. *J. Aging Phys. Act.* **2000**, *8*, 407–430. [CrossRef]
23. Stathi, A.; McKenna, J.; Fox, K. Processes Associated with Participation and Adherence to a 12-Month Exercise Programme for Adults Aged 70 and Older. *J. Health Psychol.* **2010**, *15*, 838–847. [CrossRef] [PubMed]
24. McMurdo, M.E.T.; Burnett, L. Randomised Controlled Trial of Exercise in the Elderly. *GER* **1992**, *38*, 292–298. [CrossRef] [PubMed]
25. Veale, J.F. Edinburgh Handedness Inventory—Short Form: A Revised Version Based on Confirmatory Factor Analysis. *Laterality* **2014**, *19*, 164–177. [CrossRef] [PubMed]
26. Bonsignore, M.; Barkow, K.; Jessen, F.; Heun, R. Validity of the Five-Item WHO Well-Being Index (WHO-5) in an Elderly Population. *Eur. Arch. Psychiatry Clin. Neurosci.* **2001**, *251*, II27–II31. [PubMed]
27. Cichoń, E.; Kiejna, A.; Kokoszka, A.; Gondek, T.; Rajba, B.; Lloyd, C.E.; Sartorius, N. Validation of the Polish Version of WHO-5 as a Screening Instrument for Depression in Adults with Diabetes. *Diabetes Res. Clin. Pract.* **2020**, *159*, 107970. [CrossRef]
28. Boyke, J.; Driemeyer, J.; Gaser, C.; Büchel, C.; May, A. Training-Induced Brain Structure Changes in the Elderly. *J. Neurosci.* **2008**, *28*, 7031–7035. [CrossRef]
29. Cohen, J. *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*, 2nd ed.; Routledge: New York, NY, USA, 1988; ISBN 978-0-203-77158-7.
30. Faul, F.; Erdfelder, E.; Lang, A.-G.; Buchner, A. G*Power 3: A Flexible Statistical Power Analysis Program for the Social, Behavioral, and Biomedical Sciences. *Behav. Res. Methods* **2007**, *39*, 175–191. [CrossRef] [PubMed]
31. Schuch, F.B.; Vancampfort, D.; Rosenbaum, S.; Richards, J.; Ward, P.B.; Veronese, N.; Solmi, M.; Cadore, E.L.; Stubbs, B. Exercise for Depression in Older Adults: A Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials Adjusting for Publication Bias. *Braz. J. Psychiatry* **2016**, *38*, 247–254. [CrossRef]
32. Ware, J.E. The Status of Health Assessment 1994. *Annu. Rev. Public Health* **1995**, *16*, 327–354. [CrossRef]
33. McLeroy, K.R.; Bibeau, D.; Steckler, A.; Glanz, K. An Ecological Perspective on Health Promotion Programs. *Health Educ. Q.* **1988**, *15*, 351–377. [CrossRef]
34. Yarmohammadi, S.; Mozafar Saadati, H.; Ghaffari, M.; Ramezankhani, A. A Systematic Review of Barriers and Motivators to Physical Activity in Elderly Adults in Iran and Worldwide. *Epidemiol. Health* **2019**, *41*, e2019049. [CrossRef] [PubMed]
35. Miller, W.; Brown, P.R. Motivators, Facilitators, and Barriers to Physical Activity in Older Adults: A Qualitative Study. *Holist. Nurs. Pract.* **2017**, *31*, 216–224. [CrossRef] [PubMed]
36. Nejati, V.; Kordi, R.; Shoaee, F. Evaluation of Effective Motivators and Barriers of Physical Activity in the Elderly. *Iran. J. Ageing* **2010**, *4*. Available online: <http://salmandj.uswr.ac.ir/article-1-305-en.html> (accessed on 30 November 2022).
37. Mortazavi, S.S.; Eftekhari Ardebili, H.; Eshaghi, S.R.; Dorali Beni, R.; Shahsiah, M.; Botlani, S. The Effectiveness of Regular Physical Activity on Mental Health in Elderly. *J. Isfahan Med. Sch.* **2011**, *29*, 1805–1814.
38. Voelcker-Rehage, C.; Willimczik, K. Motor Plasticity in a Juggling Task in Older Adults—a Developmental Study. *Age Ageing* **2006**, *35*, 422–427. [CrossRef]
39. Moral-García, J.; García, D.; García, S.; Amatria, M.; Dios, R. Influence of Physical Activity on Self-Esteem and Risk of Dependence in Active and Sedentary Elderly People. *An. Psicol.* **2018**, *34*, 162–166. [CrossRef]
40. Elavsky, S.; McAuley, E.; Motl, R.W.; Konopack, J.F.; Marquez, D.X.; Hu, L.; Jerome, G.J.; Diener, E. Physical Activity Enhances Long-Term Quality of Life in Older Adults: Efficacy, Esteem, and Affective Influences. *Ann. Behav. Med.* **2005**, *30*, 138–145. [CrossRef]
41. Eliezer, D.; Major, B.; Mendes, W.B. The Costs of Caring: Gender Identification Increases Threat Following Exposure to Sexism. *J. Exp. Soc. Psychol.* **2010**, *46*, 159–165. [CrossRef]
42. de Groot, G.C.L.; Fagerström, L. Older Adults' Motivating Factors and Barriers to Exercise to Prevent Falls. *Scand. J. Occup. Ther.* **2011**, *18*, 153–160. [CrossRef]
43. Yoo, S.; Kim, D.H. Perceived Urban Neighborhood Environment for Physical Activity of Older Adults in Seoul, Korea: A Multimethod Qualitative Study. *Prev. Med.* **2017**, *103S*, S90–S98. [CrossRef]

44. Stevens, M.; Lieschke, J.; Cruwys, T.; Cárdenas, D.; Platow, M.J.; Reynolds, K.J. Better Together: How Group-Based Physical Activity Protects against Depression. *Soc. Sci. Med.* **2021**, *286*, 114337. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
45. Chippendale, T.; Boltz, M. The Neighborhood Environment: Perceived Fall Risk, Resources, and Strategies for Fall Prevention. *Gerontologist* **2015**, *55*, 575–583. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
46. Kowal, J.; Fortier, M.S. Physical Activity Behavior Change in Middle-Aged and Older Women: The Role of Barriers and of Environmental Characteristics. *J. Behav. Med.* **2007**, *30*, 233–242. [[CrossRef](#)]
47. Faulkner, J.; O'Brien, W.J.; McGrane, B.; Wadsworth, D.; Batten, J.; Askew, C.D.; Badenhorst, C.; Byrd, E.; Coulter, M.; Draper, N.; et al. Physical Activity, Mental Health and Well-Being of Adults during Initial COVID-19 Containment Strategies: A Multi-Country Cross-Sectional Analysis. *J. Sci. Med. Sport* **2021**, *24*, 320–326. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
48. Ross, A.G.P.; Crowe, S.M.; Tyndall, M.W. Planning for the Next Global Pandemic. *Int. J. Infect. Dis.* **2015**, *38*, 89–94. [[CrossRef](#)]
49. Stockwell, S.; Trott, M.; Tully, M.; Shin, J.; Barnett, Y.; Butler, L.; McDermott, D.; Schuch, F.; Smith, L. Changes in Physical Activity and Sedentary Behaviours from before to during the COVID-19 Pandemic Lockdown: A Systematic Review. *BMJ Open Sport Exerc. Med.* **2021**, *7*, e000960. [[CrossRef](#)]
50. Jenkins, M.; Houge Mackenzie, S.; Hodge, K.; Hargreaves, E.A.; Calverley, J.R.; Lee, C. Physical Activity and Psychological Well-Being during the COVID-19 Lockdown: Relationships with Motivational Quality and Nature Contexts. *Front. Sport. Act. Living* **2021**, *3*, 637576. [[CrossRef](#)]
51. Welburn, K. Juggling-Exposure Therapy: An Innovation in Trauma Treatment. *J. Trauma Dissociation* **2015**, *16*, 39–50. [[CrossRef](#)]
52. Nakahara, T.; Nakahara, K.; Uehara, M.; Koyama, K.; Li, K.; Harada, T.; Yasuhara, D.; Taguchi, H.; Kojima, S.; Sagiya, K.; et al. Effect of Juggling Therapy on Anxiety Disorders in Female Patients. *BioPsychoSoc. Med.* **2007**, *1*, 10. [[CrossRef](#)]
53. Sazgar, M.; Carlen, P.L.; Wennberg, R. Panic Attack Semiology in Right Temporal Lobe Epilepsy. *Epileptic Disord* **2003**, *5*, 93–100.
54. Scholz, J.; Klein, M.C.; Behrens, T.E.J.; Johansen-Berg, H. Training Induces Changes in White Matter Architecture. *Nat. Neurosci.* **2009**, *12*, 1370–1371. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
55. Schultz, T.; Gerber, P.; Schmidt-Wilcke, T. Juggling Increases Interhemispheric Brain Connectivity: A Visual and Quantitative fMRI Study. *Vision* **2012**, *VMV12*, 217–218. [[CrossRef](#)]
56. Draganski, B.; Gaser, C.; Busch, V.; Schuierer, G.; Bogdahn, U.; May, A. Neuroplasticity: Changes in Grey Matter Induced by Training. *Nature* **2004**, *427*, 311–312. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
57. Gerber, P.; Schlaffke, L.; Borowy, S.; Greenlee, M.; Schultz, T.; Schmidt-Wilcke, T. Juggling Revisited—A Voxel-Based Morphometry Study with Expert Jugglers. *NeuroImage* **2014**, *95*, 320–325. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
58. Carius, D.; Andrä, C.; Clauß, M.; Ragert, P.; Bunk, M.; Mehnert, J. Hemodynamic Response Alteration As a Function of Task Complexity and Expertise—An fNIRS Study in Jugglers. *Front. Hum. Neurosci.* **2016**, *10*, 126. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
59. Voelcker-Rehage, C. Motor-Skill Learning in Older Adults—A Review of Studies on Age-Related Differences. *Eur. Rev. Aging Phys. Act.* **2008**, *5*, 5–16. [[CrossRef](#)]
60. Sampaio-Baptista, C.; Scholz, J.; Jenkinson, M.; Thomas, A.G.; Filippini, N.; Smit, G.; Douaud, G.; Johansen-Berg, H. Gray Matter Volume Is Associated with Rate of Subsequent Skill Learning after a Long Term Training Intervention. *Neuroimage* **2014**, *96*, 158–166. [[CrossRef](#)]

RESEARCH ARTICLE

Open Access



Effect of a juggling-based physical activity on postural stability, reaction time, and attention focus in older adults: a randomized crossover study

Jakub Malik^{1*} , Natalia Głowska² , Wojciech Jelonek³ , Rafał Stemplewski⁴ and Janusz Maciaszek¹

Abstract

Background In the aging society, more attention is paid to the promotion of forms of physical activity that can improve postural stability and cognitive functioning. In this context, the importance of combined exercises, requiring simultaneous physical and cognitive involvement, is emphasized. Juggling seems to be a form of activity that is both cognitively and physically demanding. The purpose of this study was to determine the effect of additional juggling exercise on postural stability and cognitive abilities in healthy, physically active older adults.

Methods Twenty-six healthy and physically active older adults (70.08 ± 4.40 years old) were included in a randomized crossover study. The addition of juggling three times a week during four weeks was the main intervention (one period), while the control phase included four weeks with no addition of juggling (second period). Measurements of postural stability and cognitive abilities were performed before and after each period. For the purpose of postural stability assessment, a velocity of center of pressure with root mean square, area 95 percentile, medio-lateral and anterior-posterior range of motion were measured. Center of pressure signals were obtained using an AccuGait™ System force plate in three conditions: free standing, dual-task and limits of stability. The Vienna Test System was used for the assessment of selected cognitive abilities. A battery of reaction time tests and Cognitrone test were used for this purpose.

Results A significant interaction effect of intervention and time was observed in the postural stability dual-task condition in the root mean square of the center of pressure velocity in the advantage of the juggling period (medio-lateral: $F=14.83, p<.01, \eta_p^2=.37$; anterior-posterior: $F=26.30, p<.01, \eta_p^2=.51$). Additionally, moderate effect sizes were observed in the velocity of the center of pressure and variability of simple reaction time measurements, but without statistical significance.

Conclusions The results of this study indicate that the implementation of juggling activity in everyday life may have positive effects on cognitive abilities and postural stability in healthy, physically active older adults, but the true effect may be low to moderate.

Trial registration The study was registered retrospectively (30.10.2023) at ClinicalTrials.gov (NCT06108713).

Keywords Physical activity, Dual-task, Cognitive abilities

*Correspondence:

Jakub Malik

malik@awf.poznan.pl

Full list of author information is available at the end of the article



© The Author(s) 2024. **Open Access** This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>. The Creative Commons Public Domain Dedication waiver (<http://creativecommons.org/publicdomain/zero/1.0/>) applies to the data made available in this article, unless otherwise stated in a credit line to the data.

Introduction

A rapidly aging population has been observed nowadays in developed countries [1]. The increasing life expectancy of people, as well as the growing size of the older adult population, is affecting the economy, as well as society as a whole. In view of the mentioned challenges, there is a growing necessity to provide adequate care for older adults [2, 3]. The phenomenon of increasing average age in the global population should, in particular, increase interest in interventions to prevent disease and cognitive decline among older adults. It seems that appropriately targeted physical activity may be a suitable way of healthy aging. Its effects on body composition, cardiovascular diseases [4, 5], diabetes [6] and certain cancers [7, 8] are widely known. In addition, it is increasingly emphasized that physical activity can improve the functionality of aging people [9, 10]. Nevertheless, the activity of older adults does not meet the accepted norm of 150min/week [11]. It is estimated that one in four to five adults does not meet current World Health Organization recommendations in regard to undertaking physical activity [12]. This can accelerate unhealthy aging, which causes both physical and cognitive functional deterioration, further interfering with older adults' ability to perform daily activities [13]. Therefore, there is a need to organize and recommend attractive and systematic physical activity programs, especially among older adults living in rural areas [14].

Postural stability is of growing interest among the elderly, and they are looking for fall prevention measures to maintain their independence [15, 16]. Among healthy individuals, postural stability relies on somatosensory, vestibular and visual information [17]. Deterioration in one of these functions can create impediments in motor function and the ability to stabilize posture correctly. Additionally, disrupted proprioception significantly decreases postural reactions induced by unexpected stimuli [17, 18]. This phenomenon is connected with the basal ganglia, which is an essential part of the brain involved in maintaining balance [17, 19]. Another factor affecting balance are cognitive abilities [17, 20]. The ability to quick reaction time is important for maintaining balance and avoiding falls during postural challenges or threats [20]. Deterioration of attention and slower reaction time among older adults may be due to changes in the central and peripheral nervous systems [20]. Instability due to cognitive deterioration or age-related changes in the nervous system can lead to a host of problems related to functioning in daily life and health. The greatest risks associated with instability are falls and postural disorders, which are among the great geriatric syndromes and pose a threat to health and life [3]. For example, in 2015, more than 1 million people aged 65 and older in

Poland experienced at least one fall. By 2050, this number will almost double [3]. Walking and postural stability is not just a motor task but an activity that engages executive functions and attention [21]. Moreover, exercise has a positive impact on physical functioning, reducing the number of falls and increasing the autonomy of older adults and their quality of life [22]. All these projections show that the care of older adults will be particularly important in the coming years.

In a review on neuronal and cognitive plasticity Greenwood and Parasuraman [23] hypothesized that the interaction between neural and cognitive plasticity is needed for successful cognitive aging. It was stated that whereas neural plasticity is stimulated by experience, cognitive plasticity can change patterns of cognitive behavior [23]. Moreover, the manifestation of cognitive plasticity may depend upon the neural plasticity mechanism [23]. The aging brain has the ability to adapt, among other things, through the promotion of neurogenesis [23, 24] but also through the ability to change in response to the environmental demands of synapses and dendrites [23, 25]. One of the animal studies [26] confirmed that certain plastic changes in the brain can occur in as little as one week. Moreover, synaptogenesis is promoted by novelty, which was confirmed in studies on adult rats in which greater complexity of dendritic trees caused by daily maze exploration tasks was detected [23, 27]. The above conclusions are also confirmed in the case of humans. It has been shown that moderate physical activity, which does not significantly affect a person's cardiorespiratory system but instead engages it cognitively through, among other things, novelty of the task and engagement of attention, has a positive effect on cognition or sensorimotor performance [28–31]. It has also been confirmed that changes in the brain under the influence of this type of activity can take place after just one week of exercise [30, 32].

One such activity that can engage both cognitively and physically and will be a novelty for potential participants is juggling [33, 34]. Classical juggling is a form of activity that requires simultaneous throwing and catching of balls (or other objects like, rings, clubs, scarves) individually with one or both hands in a specific sequence without dropping them [34, 35]. It can be performed in various techniques as column exercises (where each hand throws objects in straight vertical trajectory), parabola exercises (that requires throwing objects from one hand to another) or various (which is a combination of mentioned previously column and parabola exercises) [34]. Although this form of exercise seems demanding, research confirms that older people are fit enough to master juggling exercises [11, 34]. One of the positive aspects of taking up this form of exercise is the growing evidence indicating that juggling improves the well-being of exercisers

[34, 36–38]. In addition, our previous research showed that this form of exercise is attractive to older people [34]. Most importantly, the juggling intervention causes an increase in the volume of gray matter [30, 32, 33, 39, 40, 40, 41] and white matter [30, 42, 43] in the human brain and thus shows potential for neuroplasticity. This evidence suggests that engaging in this activity is likely to improve cognitive and executive functions in exercisers, but there is a lack of studies addressing this issue. To the authors' best knowledge, there are also no studies focusing on the influence of juggling on postural stability.

Therefore, the purpose of this study was to investigate the effect of a juggling intervention on postural stability and selected cognitive abilities in active older adults. We hypothesized that the implementation of a short period of juggling in the everyday life of older adults may improve postural stability, reaction time and attention focus.

Materials and methods

Study design

A randomized crossover study design (AB/BA) with two periods (A: implementation of juggling; B: without implementation of juggling) was used. Participants were randomly assigned to the AB and BA groups in a 1:1 ratio. Handedness for homogeneity of the group was examined according to the *Edinburgh Handedness Questionnaire – short form* [44, 45]. Before and after each period, postural stability, reaction time and attention focus were assessed. Physical activity level was tracked using the Polish adaptation of the CHAMPS scale [46].

Participants

Thirty-seven volunteers aged 65 years or older who responded to a local advertisement were initially enrolled in the study. The inclusion criteria were as follows: physically active people over 65 years old, with no injuries or pathologies involving the upper limb, without neurological issues, and with no significant visual impairments. In turn, individuals with mixed or left-handedness, sedentary lifestyle, any contraindications to physical activity, neurological impairment, daltonism, prior experience in juggling or under the required age were excluded from the study protocol ($n=7$). All participants declared that they took an active part in other organized activities, such as Nordic walking, aqua aerobic or rhythmic gymnastic activities. This information was crucial because among those who had not previously participated in any organized activity, new social factors could affect the measured effects [47]. Participants' physical activity was not restricted during the experiment. However, they were asked not to undertake any new forms of activity for the period of their participation in the project to avoid the

motor learning process outside the proposed juggling classes. Dropouts also occurred during the testing and intervention period, including individuals who became seriously ill or missed training units for any reason ($n=4$). Finally, twenty-six participants completed the entire intervention protocol: 21 women and 5 men (age range: 65–75). All procedures were explained and well understood by participants prior to the commencement of the study. All participants signed a written informed consent form and were informed that they could withdraw from participation at any time. The trial was conducted in three waves. First one from September to December 2021, and the next two from March to September 2022.

The study was conducted in accordance with the Declaration of Helsinki 2013 and approved by the Ethics Committee of Poznan University of Medical Sciences (No. 106/21, date: 04.02.2021) and was registered retrospectively at ClinicalTrials.gov (NCT06108713).

Intervention

The study took place at Poznan University of Physical Education. Two study periods (juggling period - JP and non-juggling period - NJP) were separated by a four-week washout period. The juggling period lasted 4 weeks and consisted of 12 meetings (3 trainings per week), each lasting 45 minutes [32, 48]. The training was always taught by the same person who is a professional in juggling and has a background in physical education. The first 8 minutes of the training unit was a warm-up with juggling balls and familiarization of the participants with the equipment. The main part of the training unit was dedicated to learning how to juggle three balls cascade. Participants were asked to not juggle outside of the classes. In turn, the last 5 minutes were dedicated to calm down and simple stretching exercises. The entire intervention aimed to execute juggling as a dual-task exercise with the deferral of the traffic automation phase. Each training unit required the completion of various tasks (catching and throwing exercises) using juggling balls. The difficulty level of these tasks increased over time in the JP. To facilitate learning, the balls were in three different colors - green, yellow and red. At a later stage of the intervention, this enabled easy communication of what task was to be performed and which of the several balls held should be used for that task. Additionally, participants completed the course by mastering the basics of the three-ball cascade. During the intervention, participants juggled with 70mm diameter, 90g balls. Due to the complexity of the entire procedure of the intervention, it was described separately in our previous study [34]. Due to the pandemic risk (COVID-19), the groups were intentionally small. A maximum of 5 people participated in one training session at one time so that adequate spacing

could be maintained between other exercisers. The NJP was characterized by a lack of additional activity in the form of juggling. The whole study design is described in Fig. 1.

Measurements

Postural stability tests (PST)

The postural stability of the participants was measured using an AccuGait™ System force plate (AMTI PJB-101 model, AMTI, Watertown, MA) with Balance Trainer software and a sampling frequency of 100 Hz. All obtained data were filtered out with a cutoff level of 10Hz [49]. Each participant took part in five trials in a random order. Two trials involved free standing without an additional task (PST_C), the next two involved free standing with an additional cognitive task (PST_E), and one trial involved stability limits (PST_{LOS}). The PST_C mapped the free standing in one minute. Each participant was instructed with the words “Please stand freely, keep your arms along your torso, eyes open, gaze ahead”. In the case of the PST_E trials, an additional task while standing was to listen to a set of digits and count the occurrence of even or odd numbers (randomized). The numbers were prerecorded sound samples by one of the

researchers, played from speakers 1m away from the participant’s backs. The participants heard 30 digits during each PST_E trial, which appeared every two seconds. After the trial, the participant reported the result. A mistake of more than 2 was interpreted as poor focus on the task, requiring a retest with a new sound sample. The instructions for each PST_E trial were the same, and the exception was the sentence added at the end: “Count even/odd digits”. PST_{LOS} was performed with the assurance of the researcher. Any precipitation beyond the limit of stability caused the test to be repeated. The test participant’s task was to lean forward and backwards and lean to the left and to the right, as much as possible.

Each of the trials lasted 60 seconds. Between each trial, the test participant had a two-minute break in a sitting position. After instructions preceding the test, the researcher waited two seconds before communicating “start” and another two seconds before turning on the measurement. Measurements in each period began with familiarization with the PST_C, PST_E and PST_{LOS} trials.

During postural stability trials, center of pressure (COP) displacements were monitored. Based on the COP signal, the following parameters were calculated: velocity (Vcop), area 95th percentile (Area95), medio-lateral

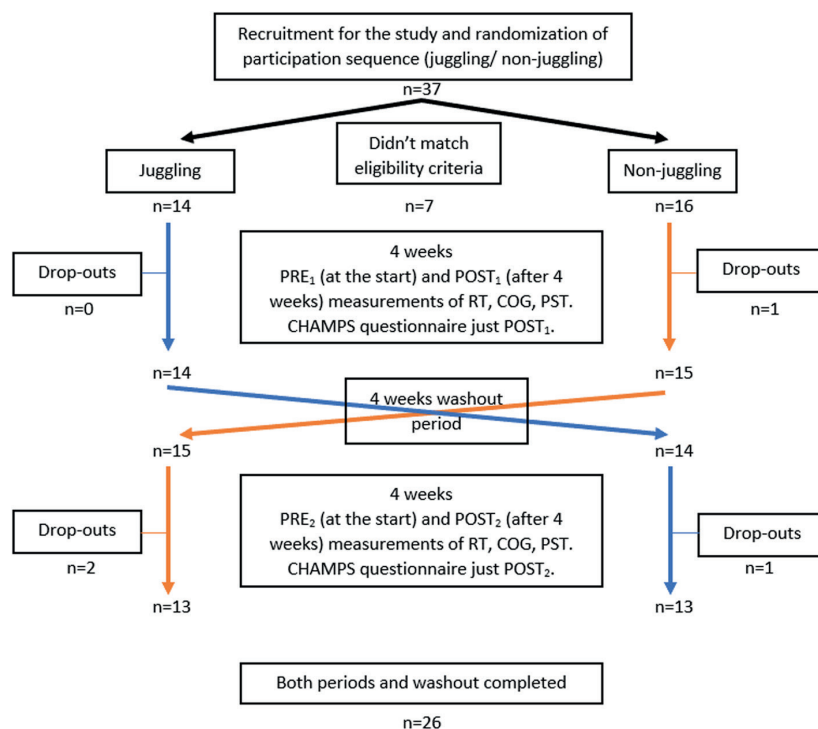


Fig. 1 Study design chart; n – number of participants PRE₁/PRE₂ – before first/second period; POST₁/POST₂ – after first/second period; RT – reaction time tests; COG – attention focus tests; PST – postural stability tests; CHAMPS – physical activity questionnaire

range of sway (RangeX), anterior-posterior range of sway (RangeY), medio-lateral root mean square velocity (RMS_{VX}) and anterior-posterior root mean square velocity (RMS_{VY}) of COP [50]. The reliability of intersession Vcop measurement in older adults is equal to $r=.76$, for PST_{LOS} variables varies from $r=.67$ to $r=.85$ [51].

Simple reaction time (SRT) and Choice reaction time (CRT)

Reaction time tests were conducted with the usage of the Vienna Test System (VTS) (SCHUHFRIED GmbH, Austria; Polish distribution - COGNIFIC) with a special panel device. By using the resting and reaction key on the device, it was possible to split the variables into reaction time (RT) and motor time (MT), with both variables measured in milliseconds. The S1 test form was used to assess single-choice responses with a simple visual cue (yellow light on the monitor screen). The S4 test form was used to assess choice reaction time (go/no go) responses with more stimuli (yellow light, red light, yellow and red light simultaneously or simple sound – in various combinations). For S4, the only correct response was in the simultaneous presence of yellow and red light. It was important to use just one finger of the dominant hand to respond in both tests. Data were also collected on the variability of the individual variables (VSRT; VCRT; VMT). The term “reaction time” means the time between the presentation of the stimulus and the occurrence of the response (raising the finger from the resting button). “Motor time” is understood as the time between raising a finger from the rest button and pressing the reaction time button. To standardize the measurements, each approach was preceded by a practice test, after which the participant performed a four-minute main test. Additionally, decision time (DT) variables were calculated from SRT and CRT data using the mental chronometric method ($CRT-SRT=DT$) [52]. Reliabilities of RT variables vary between $r=.83$ and $r=.98$ in the norm sample. MT reliability varied between $r=.84$ and $r=.95$ (SCHUHFRIED GmbH).

Attention and concentration measurement

The assessment of the attention and concentration of participants was possible through the comparison of figures concerning their congruence in the Cognitrone test form of VTS software. Cognitrone is based on Reulecke's theoretical model [53], where concentration as a state is described by three variables: (a) energy, (b) function, and (c) precision. We used the S10 form of this test. The task was to answer whether the model displayed below was present in the set of figures at the top of the monitor screen. Participants used both hands. Left hand over the red button (to reject), the right hand over the green button (to accept). Every reaction was recorded by

milliseconds and correctness (COG_{CR} – average time of correctly rejected; COG_{CA} – average time of correctly accepted). Skipping a task, going back to a previous or correcting task, was not possible. The correct answer (COG_C) was to reject correctly (red button if the pattern did not occur in the set of figures) or to accept correctly (green button if the pattern occurred in the set of figures). In addition, the time it took to complete the entire test was also measured (COG_T). For standardization purposes, each approach was preceded by a practice test, after which the participants performed the main test. The reliability was over $r=.95$ (SCHUHFRIED GmbH).

CHAMPS questionnaire

For the purpose of the study, we used a Polish adaptation of the CHAMPS scale [46]. This questionnaire with 41 questions for assessing the frequency and duration of various physical activities of older adults was used [54, 55]. It is one of the most valid and reliable questionnaires for this purpose [46, 56, 57]. The one-week test-retest reliability of the Polish adaptation was .79 to .85. The questions covered the last four weeks of the participant's activity and allowed the estimation of caloric expenditure and the frequency of physical activity per week [55]. Study participants were asked to complete a questionnaire at the end of the NJP and JP.

Outcomes

The primary outcomes of the study were postural stability variables (Vcop including RMS data, RangeX, RangeY and Area95) and selected cognitive abilities (SRT, CRT, MT including variability of these data, DT, COG_{CR} , COG_{CA} , COG_C and COG_T). Physical activity results from the CHAMP scale were characterized as secondary results.

Sample size and randomization

For the purpose of the crossover research design, the a priori F-test repeated measure analysis of variance (ANOVA RM), within-between interactions in G*Power software (version 3.1.9.6, Germany) was used [58]. Based on data where Multi System Physical Exercise was used to develop reaction time in older adults (Cohen's $f=.715$, what equals of high effect size $\eta_p^2=.34$ [59]), we chose borderline result of high effect size $\eta_p^2=.138$, which gives an effect size $f(U)=.40$ to estimate minimum sample size. According “as in SPSS” option [60], minimal power .80 and alpha error of probability .05, the sample size of 26 participants would be adequate to minimize Type I and Type II errors. Additionally, in two studies with parallel design, significant changes in brain structure after juggling in 12 healthy young participants who underwent the intervention [39] and also in 25 healthy older

participants of the intervention group were detected [33]. These results seem to confirm that the estimated minimum sample size should be adequate to detect whether and to what extent juggling can affect functional changes.

Participants enrolled for the study were randomly assigned to one of two groups with the use of randomization with the NumPy library in Python (each participant was assigned a number of 1 to 37 according to the order in which they signed up to participate). These numbers were then input into the array using the *array()* function. Then, their order was randomly generated using the command *Shuffle()*. The first 18 numbers that represented participants from the generated list were involved in the AB sequence of the study, while the remaining numbers were involved in the BA sequence.

Data analysis

All data analyses were performed using STATISTICA software (version 13.3.0, TIBCO Software Inc., Palo Alto, CA, USA; 2017). Data were analyzed using two-way ANOVA RM to study the interaction between interventions (JP, NJP – as “TR”) and time (PRE, POST – as “PP”) for tests of cognitive function and balance. Differences between the physical activity levels for the two periods were determined using the paired t test (normal distribution) or Wilcoxon test (abnormal distribution). The assumed alpha level was .05. The effect size (ES) was determined from Cohen's with a 95% confidence interval ($95\%CI_{ES}$). Differences are presented as the mean difference (MD) and 95% confidence interval of this value ($95\%CI_{MD}$).

Results

All participants (age=70.08 years old) were right-handed. Detailed characteristics of the participants who finished the whole protocol are described in Table 1.

Primary outcomes

PST_C was characterized by the lowest values of Vcop, RangeX, RangeY and RMS_{VX} for POST JP. Additionally,

changes in the main PST variables in both conditions from PRE to POST measurements showed an advantage of JP (Fig. 2). For PST_E , the lowest values in POST JP were observed for Vcop. However, statistical significance of the interaction of “TR”x“PP” was observed for RMS_{VX} and RMS_{VY} in PST_E . Bonferroni post hoc analysis of RMS_{VX} showed statistically significantly higher values for POST NJP versus the other time points (PRE JP – POST NJP: $MD=-.37$; $95\%CI_{MD}=[-.56;-.18]$; POST JP – POST NJP: $MD=-.38$; $95\%CI_{MD}=[-.57;-.18]$; PRE NJP – POST NJP: $MD=-.36$; $95\%CI_{MD}=[-.55;-.17]$). The RMS_{VY} variable was significantly lower in PRE NJP than in other time points of this study (PRE JP – PRE NJP: $MD=.36$; $95\%CI_{MD}=[.21;.52]$; POST JP – PRE NJP: $MD=.31$; $95\%CI_{MD}=[.15;.46]$; PRE NJP – POST NJP: $MD=-.34$; $95\%CI_{MD}=[-.49;-.18]$). Additionally, a statistically significant main effect of “TR” was observed for RangeY JP – NJP: $MD=-.19$; $95\%CI_{MD}=[-.37;-.02]$; PRE JP – PRE NJP: $MD=-.07$; $95\%CI_{MD}=[-.42;-.29]$; POST JP – POST NJP: $MD=-.32$; $95\%CI_{MD}=[-.68;-.03]$ in the PST_C condition. There were no statistically significant differences for any of the PST_{LOS} variables. All data of the three conditions in balance testing are described in Table 2. An additional file shows more detailed post hoc results [see Additional file 1].

Participants were characterized by shorter response time between POST JP and the other time points, especially for SRT, VSRT, CRT, VCRT, DT and COG_T . Additionally, changes in selected cognitive abilities in both conditions from PRE to POST measurements showed an advantage of JP (Fig. 3). Statistical significance was obtained for the main effect of “PP” in variables: SRT and COG_C . Bonferroni post hoc analysis of SRT showed significantly worse reaction time for PRE compared to POST timepoint (PRE – POST: $MD=11.42$; $95\%CI_{MD}=[1.55;21.30]$), but there were not significant changes in specific periods as juggling (PRE JP – POST JP: $MD=14.69$; $95\%CI_{MD}=[-1.24;23.63]$) or control (PRE NJP – POST NJP: $MD=8.15$; $95\%CI_{MD}=[-7.78;24.09]$) despite a larger change in sequence with the intervention. Bonferroni post hoc analysis for COG_C showed significantly less correct answers in Cognitrone test for POST compared to PRE timepoint (PRE – POST: $MD=-.81$; $95\%CI_{MD}=[-1.52;-.10]$), but without significance in specific periods as juggling (PRE JP – POST JP: $MD=-.62$; $95\%CI_{MD}=[-2.57;1.34]$) or control (PRE NJP – POST NJP: $MD=-1.00$; $95\%CI_{MD}=[-2.96;.96]$). Other cognitive variables were not characterized by any significant changes ($p>.05$). All cognitive data obtained in the study are described in Table 3. An additional file shows more detailed post hoc results [see Additional file 1].

Table 1 Characteristics of participants included into analyses

Variable	All(n=26) Mean (SD)	Women(n=21) Mean (SD)	Men(n=5) Mean (SD)
Age [years]	70.08 (4.40)	70.81 (5.10)	69.00 (3.81)
Body height [cm]	161.23 (7.89)	158.52 (5.01)	172.60 (8.62)
Lateralization ^a	92.31 (12.62)	92.86 (12.22)	90.00 (16.30)
Body mass [kg]	67.77 (13.44)	63.95 (9.74)	83.80 (16.05)
BMI [kg/m ²]	25.95 (3.86)	25.49 (3.95)	27.90 (3.01)

^a Values from 100 to 61 – right-handedness, -60 to 60 mixed handedness, -61 to -100 left-handedness

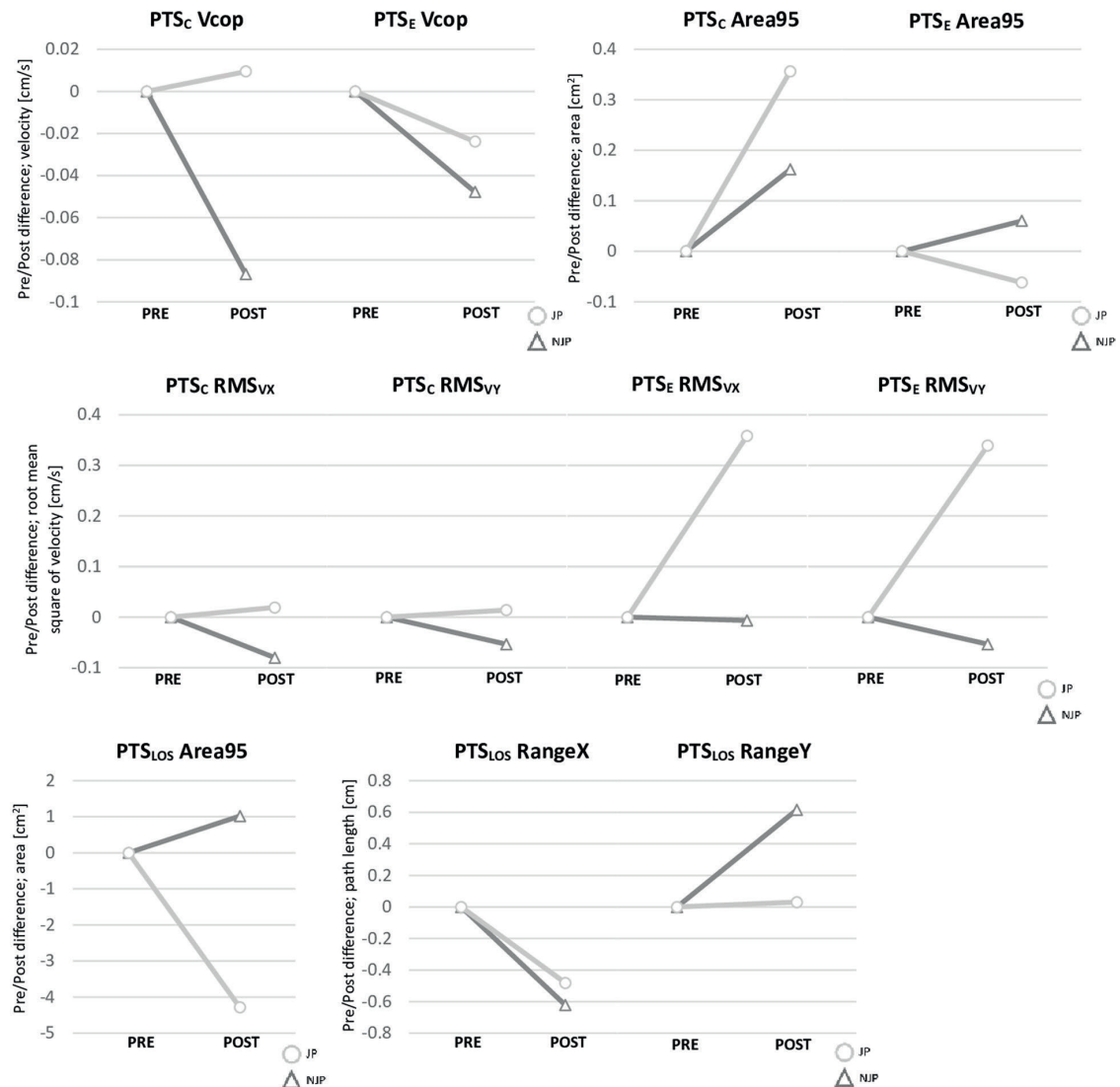


Fig. 2 PRE/POST differences in postural stability tests. PST_C – postural stability tests without additional task; PST_E – postural stability test with additional task (counting); PST_{LOS} – limits of stability test, Vcop – velocity of center of pressure, RMS_{VX} – medio-lateral root mean square of velocity; RMS_{VY} – anterior-posterior root mean square of velocity; Area95 – area 95 percentile, RangeX – medio-lateral range of sway, RangeY – anterior-posterior range of sway, JP – juggling period, NJP – non juggling period

Secondary outcomes

Participants reported statistically significant higher frequency of total physical activity (AAF) during NJP than JP ($p=.03$) and also in moderate physical activity (MAF; $p<.05$). Nevertheless, data on both: estimated caloric expenditure/week for all activities (ECE) and estimated caloric expenditure/week for moderate only activities (MECE) showed no difference at a statistically significant

level (respectively $p=.06$, $p=.15$). Table 4 shows the detailed results of the CHAMPS questionnaire variables.

Discussion

The purpose of this study was to determine the effect of additional juggling exercise on postural stability and cognitive abilities in healthy, physically active older adults. Twenty-one women and five men over the age of 65 participated in the study. This gender difference in the

Table 2 Values of three condition PST measurements (mean, SD, F, p-value, effect size and 95%CI_{ES}) obtained by participants (n=26) during the crossover study

Variable	JP		NJP		"TR"x"PP"		"TR"		"PP"	
	PRE Mean(SD)	POST Mean(SD)	PRE Mean(SD)	POST Mean(SD)	F (p-value)	η_p^2 [95%CI _{ES}]	F (p-value)	η_p^2 [95%CI _{ES}]	F (p-value)	η_p^2 [95%CI _{ES}]
PST_C										
Vcop [cm/s]	1.17(.33)	1.09(.28)	1.17(.27)	1.18(.28)	3.38(.08)	.12[.00;.35]	1.47(.24)	.06[.00;.27]	1.09(.31)	.04[.00;.25]
RangeX [cm]	1.94(.69)	1.87(.69)	2.00(.56)	1.98(.75)	.09(.77)	<.01[.00;.15]	.78(.39)	.03[.00;.23]	.21(.65)	<.01[.00;.17]
RangeY [cm]	2.65(.58)	2.54(.72)	2.71(.67)	2.86(.61)	2.16(.15)	.08[.00;.31]	5.24(.03)	.17[.00;.41]	.04(.84)	<.01[.00;.12]
Area95 [cm ²]	2.82(1.22)	2.98(1.83)	3.18(1.56)	3.53(2.14)	.40(.53)	.02[.00;.20]	3.55(.07)	.12[.00;.36]	1.71(.20)	.06[.00;.29]
RMS _{Y₉₅} [cm/s]	.84(.32)	.76(.29)	.84(.25)	.86(.27)	2.71(.11)	.03[.00;.33]	1.53(.23)	.06[.00;.28]	.53(.47)	.02[.00;.21]
RMS _{Y₉₅} [cm/s]	1.16(.36)	1.11(.31)	1.16(.30)	1.17(.28)	1.46(.24)	.06[.00;.27]	.58(.45)	.02[.00;.22]	.35(.56)	.01[.00;.19]
PST_E										
Vcop [cm/s]	1.13(.29)	1.08(.27)	1.14(.27)	1.12(.25)	.09(.76)	<.01[.00;.15]	.27(.61)	.01[.00;.18]	.81(.38)	.03[.00;.23]
RangeX [cm]	1.77(.51)	1.83(.68)	1.88(.60)	1.93(.54)	.01(.90)	<.01[.00;.08]	1.94(.18)	.07[.00;.30]	.39(.54)	.02[.00;.20]
RangeY [cm]	2.50(.57)	2.50(.59)	2.60(.77)	2.47(.62)	.02(.90)	<.01[.00;.10]	.04(.85)	<.01[.00;.12]	1.06(.31)	.04[.00;.25]
Area95 [cm ²]	2.63(1.25)	2.69(1.30)	3.04(1.49)	2.98(1.46)	.15(.70)	<.01[.00;.34]	2.78(.11)	.10[.00;.33]	.00(1.00)	.00[.00;.00]
RMS _{Y₉₅} [cm/s]	.78(.30)	.77(.31)	.79(.25)	1.15(.30)	14.83(<.001)	.37[.09;.58]	14.81(<.001)	.37[.09;.58]	11.55(<.001)	.32[.05;.53]
RMS _{Y₉₅} [cm/s]	1.15(.29)	1.10(.25)	.79(.20)	1.13(.30)	26.30(<.001)	.51[.21;.68]	20.75(<.001)	.45[.15;.63]	6.09(.02)	.20[<.01;.43]
PST_{Los}										
RangeX [cm]	17.35(4.37)	16.73(5.44)	17.15(4.24)	16.67(5.16)	.01(.93)	<.01[.00;.08]	.02(.88)	<.01[.00;.10]	.55(.46)	.02[.00;.21]
RangeY [cm]	14.86(2.97)	15.47(3.34)	15.64(2.08)	15.68(2.47)	.40(.54)	.02[.00;.20]	1.33(.26)	.05[.00;.27]	.58(.45)	.02[.00;.22]
Area95 [cm ²]	166.47(71.09)	167.48(84.29)	185.47(83.88)	181.18(91.88)	.04(.84)	<.01[.00;.12]	1.74(.20)	.07[.00;.29]	.02(.89)	<.01[.00;.10]

"TR" main effect, intervention (juggling/ non-juggling), "PP" main effect, time (PRE/POST), JP juggling period, NJP non-juggling period, POST after period, F F statistic of ANOVA RM, η_p^2 - effect size, partial eta square; 95%CI_{ES} - 95% confidence interval for effect size; PST_C - standing freely without an additional task, PST_E - standing freely with an additional task, PST_{Los} - limits of stability test, Vcop - velocity of center of pressure, Area95 - area 95 percentile, RangeX - medio-lateral range of sway, RangeY - anterior-posterior range of sway, RMS_{Y₉₅} - medio-lateral root mean square of velocity, RMS_{Y₉₅} - anterior-posterior root mean square of velocity

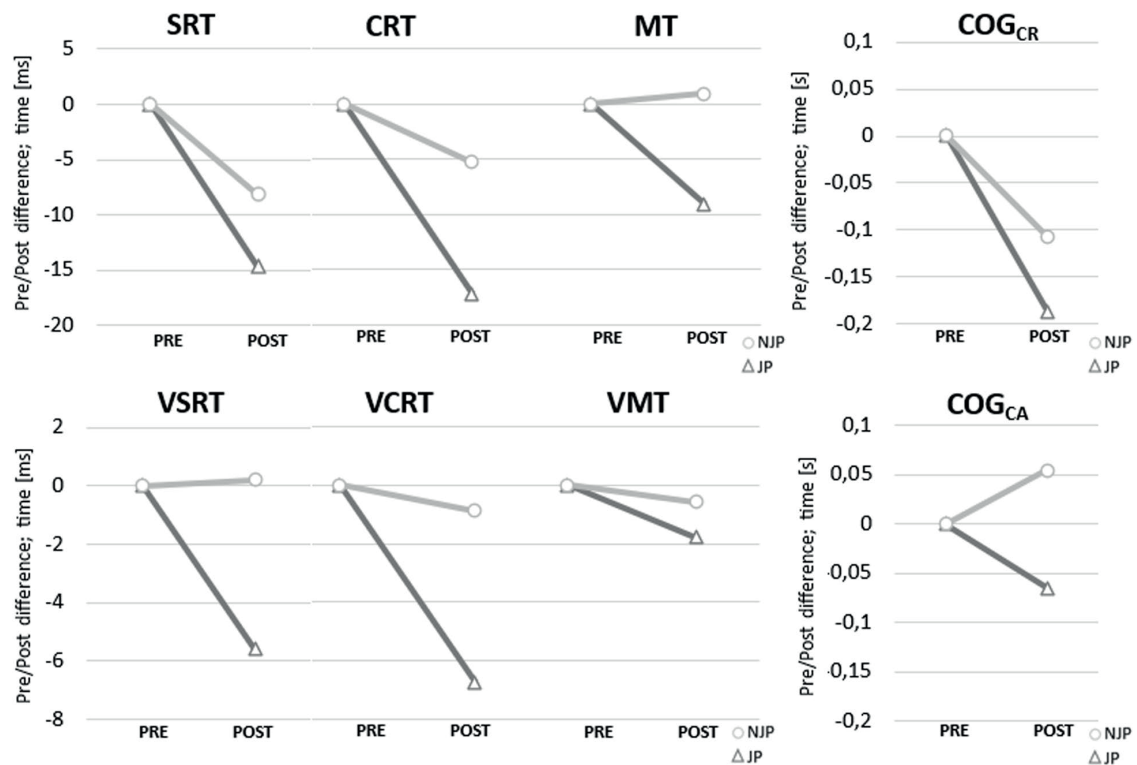


Fig. 3 PRE/POST differences in cognitive function assessment. SRT – simple reaction time, CRT – complex reaction time, MT – motor time, VSRT – variability of simple reaction time, VCRT – variability of complex reaction time, VMT – variability of motor time, COG_{CR} – average time of correct rejections in the Cognitrone test, COG_{AR} – average time of correct acceptance in the Cognitrone test, JP – juggling period, NJP – non-juggling period

number of participants may have been due the fact that the women more often than men take part in individual activities rather than team activities [61, 62]. Additionally the recruitment process, relied on a request for participation, in a Polish population, where there is a preponderance of women gender among adults over 60 years of age [63] may also contributed to this disparity.

Classical juggling is a kind of activity in which exercisers need to use only the upper limbs of their body. However, if juggling is performed in a standing position or walking, it requires from participants proper postural control. It is a core element within the coordination of most skills. During juggling exercises, the whole attention is directed on the tossed utensils, not on the lower limbs or the body posture [64, 65]. In our study, a statistically significant interaction effect of intervention and time was observed for medio-lateral and anterior-posterior root mean square of COP velocity and during postural stability test with additional counting, with a definite deterioration of medio-lateral root mean square of velocity during the period without intervention. The

lowest and statistically significant result of anterior-posterior root mean square velocity was observed at the start of the non-juggling period, since no carryover effects were observed during the study. Deterioration, however, was observed for the non-juggling period, whereas for the juggling period, it remained steady at a level similar to the POST non-juggling period. These results allow us to conclude that the addition of juggling even in a short period may have a better positive impact on postural stability than standard physical activities, especially in a task demanding the focus of attention on other elements, where automatic processes are more responsible for postural control.

Another interesting result of our study was for the anterior-posterior range of sway variable. In the postural stability test without additional task a statistically significant main effect of intervention with a clear advantage for juggling period was observed. Despite the absence of the main effect of time, the mean differences suggested that improvements in this variable occurred only in juggling period. Period without additional juggling activity

Table 3 Reaction time and attention values (mean, SD, F, p-value, effect size and 95%CI_{ES}) obtained by participants (n=26) during the crossover study

Variable	JP		NJP		"TR"x"PP"		"TR"		"PP"	
	PRE Mean(SD)	POST Mean(SD)	PRE Mean(SD)	POST Mean(SD)	F (p-value)	η_p^2 [95%CI _{ES}]	F (p-value)	η_p^2 [95%CI _{ES}]	F (p-value)	η_p^2 [95%CI _{ES}]
Reaction Time test										
SRT[ms]	307.38(42.97)	292.69(41.98)	303.12(49.89)	294.96(47.65)	.69(.41)	.03[.00;.22]	.03(.87)	<.01[.00;.11]	5.68(.03)	.19[.00;.42]
VSRT[ms]	44.96(17.34)	39.35(11.19)	40.62(14.58)	40.81(15.76)	1.97(.17)	.07[.00;.30]	.25(.62)	<.01[.00;.18]	1.75(.20)	.07[.00;.29]
CRT[ms]	480.35(57.63)	463.12(55.68)	477.81(62.91)	472.54(57.71)	.78(.39)	.03[.00;.23]	.30(.59)	.01[.00;.19]	3.22(.08)	.11[.00;.35]
VCRT[ms]	73.77(18.75)	67.04(20.19)	72.00(20.83)	71.12(19.41)	.92(.35)	.04[.00;.24]	.17(.68)	<.01[.00;.17]	1.33(.26)	.05[.00;.27]
MT[ms]	262.96(73.85)	253.92(71.97)	247.71(64.28)	248.65(81.35)	.68(.42)	.03[.00;.22]	3.03(.09)	.11[.00;.34]	.43(.52)	.02[.00;.20]
VMT[ms]	35.42(8.30)	33.65(11.15)	33.67(9.95)	33.10(13.68)	.20(.66)	<.01[.00;.17]	.60(.44)	.02[.00;.22]	.52(.48)	.02[.00;.21]
DT[ms]	172.96(40.87)	170.42(48.82)	174.69(45.28)	177.58(36.69)	.23(.64)	<.01[.00;.18]	.36(.55)	.01[.00;.19]	.00(.97)	<.01[.00;<.01]
Cognitrone test										
COG _{CR} [s]	3.23(.94)	3.04(.66)	3.18(.78)	3.07(.73)	.24(.63)	<.01[.00;.18]	.04(.85)	<.01[.00;.12]	2.97(.10)	.11[.00;.34]
COG _{CA} [s]	2.52(.61)	2.45(.59)	2.45(.51)	2.50(.58)	1.57(.22)	.06[.00;.28]	.02(.89)	<.01[.00;.10]	.01(.91)	<.01[.00;.08]
COG _C [n]	54.54(3.42)	55.15(4.20)	54.69(3.67)	55.69(3.87)	.16(.69)	<.01[.00;.16]	.55(.46)	.02[.00;.21]	5.47(.03)	.18[.00;.42]
COG _S [s]	176.81(46.06)	168.31(35.19)	174.81(40.66)	171.15(35.07)	.55(.47)	.02[.00;.21]	.01(.92)	<.01[.00;.08]	2.06(.16)	.08[.00;.30]

"TR" – main effect: intervention (juggling/ non-juggling); "PP" – main effect: time (PRE/POST), JP juggling period, NJP non-juggling period, PRE before period, POST – after period, F – F statistic of ANOVA RM, η_p^2 – effect size, partial eta square, 95%CI_{ES} – 95% confidence interval for effect size, Vienna Test System – Reaction time test, SRT simple reaction time, VSRT variability of simple reaction time, CRT choice reaction time, VCRT variability of choice reaction time, MT motor time, VMT variability of motor time, DT decision time, Vienna Test System – Cognitrone test, COG_{CR} – average time of correct rejections, COG_{CA} – average time of correct acceptance, COG_C – number of correct answers, COG_S – duration of test, ms – milliseconds, s – seconds, n – number of correct answers

Table 4 Self-reported level of physical activity after JP and NJP (CHAMPS questionnaire)

Measure	JP Mean (SD)	NJP Mean (SD)	t or Z (p-value)	ES [95%CI _{ES}]	MD (JP-NJP) [95%CI _{MD}]
AAF/week	28.23(10.31)	31.15(9.92)	-2.34 (.03)*	d=.29 [-.26;.84]	-2.92 [-5.49;-.35]
MAF/week	8.42(5.04)	10.00(5.66)	-2.09 (.05)*	d=.29 [-.25;.84]	-1.58 [-3.13;-.03]
ECE/week	5747.15(4123.58)	7285.81(3997.35)	1.87 (.06)	d=.37 [-.17;.93]	-1538.67 [-3146.47;69.13]
MECE/week	5155.30(3729.85)	6318.70(3597.24)	1.44 (.15)	d=.29 [-.23;.87]	-1163.40 [-2706.02;379.23]

JP juggling period, NJP non-juggling period, t or Z t value for paired t test, or Z value of Wilcoxon test, ES effect size, MD mean difference, 95%CI_{ES}/95%CI_{MD} – 95% of confidence interval for effect size or mean difference, AAF all activities frequency, MAF moderate activities frequency, ECE estimated caloric expenditure/week for all activities, MECE estimated caloric expenditure/week for moderate only activities

* $p < .05$

characterized by deterioration in the value of anterior-posterior range of sway. However, these results should be interpreted with caution.

Studies on experts and intermediate jugglers [65] showed similar sway amplitude in postural stability of those groups during the juggling task, but with better posture correction in favor of experts. Additionally, better juggling performance was associated with more consistent patterns of postural stability test, such as medio-lateral and anterior-posterior COP velocity or medio-lateral and anterior-posterior range of sway. Thus, better control of upper limb performance is associated with better postural control of the performer during the task. However, there are only a few evidences [65] on how mastering upper limb performance can improve general postural stability on a daily basis when people mostly maintain posture and simultaneously manipulate objects in the upper extremities. Our results showed that it is worth to look over this specific problem.

Additionally, our results showed moderate effect sizes of interaction effects for COP velocity, anterior-posterior range of sway, and anterior-posterior root mean square velocity in the postural stability test without an additional task and COP velocity and medio-lateral COP velocity in the limits of stability test in the study group but without statistical significance. All of these variables were characterized by lower values in POST juggling period. Given the sample size of our study, these results may indicate that juggling can improve postural control in healthy active older adults; however, the evidence is not conclusive.

There is a lot of evidence that physical activity can improve postural stability in older adults [22, 66]. However, better postural stability was observed after motor learning or development also among people of various ages, for example, during interventions such as gymnastics in children aged 7-11 and adults over 20 [67, 68] or

during circus activities in 5- to 6-year-old children [69]. Moreover, it was observed after activities with upper limb activation as manual rhythmic movements [70] or even rifle shooting [71]. Two years of experience in circus activity training can improve postural control. The experimental group, which participated in training for two days a week, had better results of COP velocity, medio-lateral and anterior-posterior COP velocity in various conditions than the control group, which performed only recreational activities [69]. Additionally, it was proven that in the case of learning to juggle, coupling between the control of posture and manual tasks decreases. It can be understood as a better resistance to perturbations of performers during tasks, which probably translates into the manipulation of objects on a daily basis [70, 72]. Most likely, the effect of juggling on postural stability would be more pronounced for interventions among individuals without systematic physical activity.

During cognitive ability measurements, the main effect of time was observed in simple reaction time and number of correct answers in Cognitrone test, which may confirm that physical activity is somewhat effective for the maintenance and improvement of cognitive abilities. A significant amount of research confirms that a particularly moderate form of physical activity is able to improve reaction time among older adults [73, 74], especially with combined interventions of physical activity and cognitive effort [75–78]. Juggling, due to the specificity of the task and especially as a motor learning process in unexperienced people, can be interpreted as a combined form of activity [30, 34, 64, 65]. Interestingly, our results showed a medium effect size of the interaction effect of intervention and time for the variability of simple reaction time and average time of correct acceptance in Cognitrone test variables, with a clear advantage of POST juggling period. It may be speculated that this specific form of activity can have an impact on the ability to maintain

attention over time. However, the results of our study did not clearly establish such an effect.

Manifestations of cognitive plasticity depend on mechanisms of neural plasticity [23]. Nevertheless, the above results indicated a much lower effect of juggling on cognitive abilities and postural stability than studies analyzing changes in brain plasticity [30, 32, 33, 39, 41–43]. Probably a higher frequency or duration of juggling intervention would increase the observed effects of cognitive abilities. However, there is a lack of studies measuring both neuronal changes and changes in cognitive abilities after a juggling intervention.

The range of physical activity of participants was lower in juggling period than in non-juggling period, but the main limitation of the CHAMPS questionnaire was that juggling could at most be considered as “other activities”. This point, however, was not taken into account when analyzing the level of physical activity of respondents. This limitation reduced the questionnaire results accordingly. Noteworthy, during the period in which respondents marked themselves with a smaller range of physical activity but experienced intervention in the form of juggling, moderate or strong effect sizes of positive changes were observed. The lack of statistical significance makes it necessary to treat these premises with caution and should be resolved in future studies.

The strengths and limitations of the study

The strength of this study was carrying out a new form of physical activity - juggling - in the form of a training, aiming at learning a new movement on each training. The intervention was entirely tailored to the functional abilities of the older adults. In addition, this was one of the few studies that examined the effects of juggling on cognitive function and postural stability in older adults.

This study has some limitations. Despite conducting a minimum sample size analysis, it appears that the number of participants proved insufficient to clearly indicate the effects of the intervention on cognitive function and postural stability. The medium effect sizes in the absence of obtaining statistical significance seemed to confirm this limitation. Another problem may have been the number of three workouts per week. This in view of the practical aspect of the intervention was justified, but there is still a lack of certainty if with a higher frequency of juggling classes, the effects would be more noticeable for active people.

Future studies that include juggling interventions should take into account the above limitations of this study. A larger sample would have been desirable to obtain stronger results. Additionally, it may be easier to observe any statistically significant changes in samples with sedentary lifestyles or with documented disorders,

in which physical activity significantly helps, than in healthy, active people. Additionally it would be valuable to compare juggling intervention not only to control non-exercising group, but also to other social activities not related to physical activities such as educational groups or film discussion session. In this case, it would be a better solution to monitor participants' physical activity throughout the whole protocol, as questionnaires can only estimate physical activity levels, whereon activity such as juggling is unclear where to be included. For studies that consider the effects of the intervention in physically active individuals, a more accurate measurement of the “physical activity” variable would be desirable, with separate consideration of non-exercise activity, exercise activity and exercises performed during the intervention. For this purpose, the use of objective methods based on accelerometry would seem appropriate. Additionally, further studies should be conducted on a larger sample of people, varying the frequency of training, and with the separation of a group of people characterized by sedentary lifestyle or with mild cognitive or postural stability impairments.

Conclusions

Juggling in the form of a new motor task in each training unit has the potential to maintain or improve postural stability among healthy and active older adults. These changes are particularly true for medio-lateral and anterior-posterior root mean square of COP velocity variables and, to some extent, for anterior-posterior range of sway in a task requiring attention to be focused on other tasks. Moreover, the addition of juggling may induce a better effect on maintaining attention over time. A positive effect of general physical activity on cognitive functions was observed in the study, especially for reaction time and number of correct answers in Cognitrone test. Nevertheless, it can be indicated that it can be a good solution to recommend juggling, especially as lessons focused on motor learning, even for healthy and physically active older adults, expecting a positive effect. However, the clinical relevance of these changes for healthy and physically active older adults is probably low to moderate.

Abbreviations

“PP”	main effect: time (PRE/POST)
“TR”	main effect: intervention (juggling/non-juggling)
95%CI _{ES}	95% confidence interval for effect size
95%CI _{MD}	95% confidence interval for mean difference
ANOVA RM	repeated measure analysis of variance
Area95	area 95 percentile
COG _C	number of correct answers in the Cognitrone test
COG _{CA}	average time of correct acceptations in the Cognitrone test
COG _{CR}	average time of correct rejections in the Cognitrone test
COG _T	Cognitrone test duration
COP	center of pressure
CRT	choice reaction time
DT	decision time

ES	effect size
JP	juggling period
MD	mean difference
MT	motor time
NJP	non-juggling period
<i>p</i>	<i>p</i> -value
POST	after period
PRE	before period
PST	postural stability test
PST _C	standing freely without an additional task
PST _E	standing freely with an additional task
PST _{LOS}	limits of stability test
RangeX	medio-lateral range of sway
RangeY	anterior-posterior range of sway
RMS _{VX}	medio-lateral root mean square of center of pressure velocity
RMS _{VY}	anterior-posterior root mean square of center of pressure velocity
RT	reaction time
SD	standard deviation
SRT	simple reaction time
V _{COP}	velocity of center of pressure
VCRT	variability of choice reaction time
VMT	variability of motor time
VSRT	variability of simple reaction time
VTs	Vienna Test System
η_p^2	effect size, eta partial square

Supplementary Information

The online version contains supplementary material available at <https://doi.org/10.1186/s11556-024-00351-w>.

Additional file 1: “Bonferroni post hoc comparison between groups for significant main or interaction effects”

Acknowledgements

N/A.

Authors' contributions

Conceptualization, J.Mal., J.Mac., R.S.; methodology, J.Mal., N.G., J.Mac., W.J., R.S.; investigation, J.Mal., N.G., W.J.; writing—original draft preparation, J.Mal. and N.G.; writing—review and editing, J.Mac., R.S., W.J.; All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding

The authors received no financial support for the research, authorship, and/or publication of this article.

Availability of data and materials

The datasets used and/or analysed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

Declarations

Ethics approval and consent to participate

All study participants gave written informed consent. All procedures were carried out in accordance with the ethical standards of the Helsinki Declaration of 2013, and approved by the Ethics Committee of Poznan University of Medical Sciences (No. 106/21, date: 04.02.2021).

Consent for publication

N/A.

Competing interests

The authors declare no competing interests.

Author details

¹Department of Physical Activity and Health Promotion Science, Poznan University of Physical Education, Królówej Jadwigi 27/39, 61-871 Poznan, Poland.

²Department of Sports Dietetics, Poznan University of Physical Education, Królówej Jadwigi 27/39, 61-871 Poznan, Poland. ³Department of Neuromuscular Physiotherapy, Poznan University of Physical Education, Królówej Jadwigi 27/39, 61-871 Poznan, Poland. ⁴Department of Digital Technologies in Physical Activity, Poznan University of Physical Education, Królówej Jadwigi 27/39, 61-871 Poznan, Poland.

Received: 3 November 2023 Accepted: 22 May 2024

Published online: 31 May 2024

References

- De L, d'Alessandro E, Bonacci S, Giraldo G. Aging populations: the health and quality of life of the elderly. *Clin Ter.* 2011;162(1):e13-8.
- Leszko M, Zajac-Lamparska L, Trempala J. Aging in Poland. *The Gerontologist.* 2015;55(5):707–15.
- Klak A, Raciborski F, Targowski T, Rzedkiewicz P, Bousquet J, Samoliński B. A growing problem of falls in the aging population: A case study on Poland – 2015–2050 forecast. *European Geriatric Medicine.* 2017;8(2):105–10.
- Wendel-Vos GCW, Schuit AJ, Feskens EJM, Boshuizen HC, Verschuren WMM, Saris WHM, et al. Physical activity and stroke A meta-analysis of observational data. *Int J Epidemiol.* 2004;33(4):787–98.
- Berlin JA, Colditz GA. A meta-analysis of physical activity in the prevention of coronary heart disease. *Am J Epidemiol.* 1990;132(4):612–28.
- Kelley DE, Goodpaster BH. Effects of exercise on glucose homeostasis in Type 2 diabetes mellitus. *Med Sci Sports Exerc.* 2001;33(6 Suppl):S495-501. discussion S528-529.
- Rogers C, Colbert L, Greiner J, Perkins S, Hursting S. Physical Activity and Cancer Prevention. *Sports Medicine.* 2008;38:271–96.
- McTiernan A, Friedenreich CM, Katzmarzyk PT, Powell KE, Macko R, Buchner D, et al. Physical Activity in Cancer Prevention and Survival: A Systematic Review. *Med Sci Sports Exerc.* 2019;51(6):1252–61.
- Busse AL, Gil G, Santarém JM, Jacob Filho W. Physical activity and cognition in the elderly: A review. *Dement neuropsychol.* 2009;3(3):204–8.
- Netz Y, Wu MJ, Becker BJ, Tenenbaum G. Physical Activity and Psychological Well-Being in Advanced Age: A Meta-Analysis of Intervention Studies. *Psychology and Aging.* 2005;20:272–84.
- Boulton ER, Horne M, Todd C. Multiple influences on participating in physical activity in older age: Developing a social ecological approach. *Health Expect.* 2018;21(1):239–48.
- Dumith SC, Hallal PC, Reis RS, Kohl HW. Worldwide prevalence of physical inactivity and its association with human development index in 76 countries. *Prev Med.* 2011;53(1–2):24–8.
- Fisher GG, Chaffee DS, Tetrick LE, Davalos DB, Potter GG. Cognitive functioning, aging, and work: A review and recommendations for research and practice. *Journal of Occupational Health Psychology.* 2017;22(3):314–36.
- Omeland A, Podstawski R, Wziatek B, Merino-Marbán R, Romero-Ramos O. Physical activity levels of rural and urban seniors in the region of Warmia and Mazury in Poland. *BJHPA.* 2017;2017(4):74–88.
- Maki BE, McIlroy WE. Postural Control in the Older Adult. *Clinics in Geriatric Medicine.* 1996;12(4):635–58.
- Pettersson B, Lundell S, Lundin-Olsson L, Sandlund M. 'Maintaining balance in life'—exploring older adults' long-term engagement in self-managed digital fall prevention exercise. *European Review of Aging and Physical Activity.* 2023;20(1):12.
- Appadu MK, Gupta V. Postural Instability. In: StatPearls. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2023 [cited 2023 Sep 24]. Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK560906/>
- Rinalduzzi S, Trompetto C, Marinelli L, Alibardi A, Missori P, Fattapposta F, et al. Balance dysfunction in Parkinson's disease. *Biomed Res Int.* 2015;2015:434683.
- Palakurthi B, Burugupally SP. Postural Instability in Parkinson's Disease: A Review. *Brain Sci.* 2019;9(9):239.
- L. Sturnieks D, St George R, R. Lord S. Balance disorders in the elderly. *Neurophysiologie Clinique. Clin Neurophysiol.* 2008;38(6):467–78.
- Dierijck J, Kennefick M, Smirl J, Dalton BH, van Donkelaar P. Attention Is Required to Coordinate Reaching and Postural Stability during

- Upper Limb Movements Generated While Standing. *J Mot Behav*. 2020;52(1):79–88.
22. Low DC, Walsh GS, Arkesteijn M. Effectiveness of Exercise Interventions to Improve Postural Control in Older Adults: A Systematic Review and Meta-Analyses of Centre of Pressure Measurements. *Sports Med*. 2017;47(1):101–12.
23. Greenwood PM, Parasuraman R. Neuronal and Cognitive Plasticity: A Neurocognitive Framework for Ameliorating Cognitive Aging. *Front Aging Neurosci*. 2010;2:150.
24. Anderson I, Adinolfi C, Doctrow S, Huffman K, Joy KA, Malfroy B, et al. Oxidative signalling and inflammatory pathways in Alzheimer's disease. *Biochem Soc Symp*. 2001;67:141–9.
25. Chklovskii DB, Mel BW, Svoboda K. Cortical rewiring and information storage. *Nature*. 2004;431(7010):782–8.
26. Lee WCA, Huang H, Feng G, Sanes JR, Brown EN, So PT, et al. Dynamic remodeling of dendritic arbors in GABAergic interneurons of adult visual cortex. *PLoS Biol*. 2006;4(2):e29.
27. Ambrogini P, Cuppini R, Lattanzi D, Ciuffoli S, Frontini A, Fanelli M. Synaptogenesis in adult-generated hippocampal granule cells is affected by behavioral experiences. *Hippocampus*. 2010;20(7):799–810.
28. Kattenstroth JC, Kalisch T, Holt S, Tegenthoff M, Dinse HR. Six months of dance intervention enhances postural, sensorimotor, and cognitive performance in elderly without affecting cardio-respiratory functions. *Front Aging Neurosci*. 2013;5:5.
29. Debaere F, Swinnen SP, Snaert S, Van Hecke P. Changes in brain activation during learning of a new bimanual coordination task. *NeuroImage*. 2001;13(6):1149.
30. Malik J, Stemplewski R, Maciaszek J. The Effect of Juggling as Dual-Task Activity on Human Neuroplasticity: A Systematic Review. *Int J Environ Res Public Health*. 2022;19(12):7102.
31. Müller P, Rehfeld K, Schmicker M, Hökelmann A, Dordevic M, Lessmann V, et al. Evolution of Neuroplasticity in Response to Physical Activity in Old Age: The Case for Dancing. *Frontiers in Aging Neuroscience*. 2017 [cited 2022 Mar 3];9. Available from: <https://www.frontiersin.org/article/https://doi.org/10.3389/fnagi.2017.00056>
32. Driemeyer J, Boyke J, Gaser C, Büchel C, May A. Changes in Gray Matter Induced by Learning—Revisited. *PLOS ONE*. 2008;3(7):e2669.
33. Boyke J, Driemeyer J, Gaser C, Büchel C, May A. Training-induced brain structure changes in the elderly. *J Neurosci*. 2008;28(28):7031–5.
34. Malik J, Maciaszek J. Effect of the Juggling-Based Motor Learning Physical Activity on Well-Being in Elderly: A Pre-Post Study with a Special Training Protocol. *Healthcare*. 2022;10(12):2442.
35. Beek PJ. Timing and Phase Locking in Cascade Juggling. *Ecological Psychology*. 1989;1(1):55–96.
36. Welburn K. Juggling-exposure therapy: an innovation in trauma treatment. *J Trauma Dissociation*. 2015;16(1):39–50.
37. Nakahara T, Nakahara K, Uehara M, Koyama K, Ichiro, Li K, Harada T, et al. Effect of juggling therapy on anxiety disorders in female patients. *BioPsychoSocial Med*. 2007;1(1):10.
38. Sazgar M, Carlen PL, Wennberg R. Panic attack semiology in right temporal lobe epilepsy. *Epileptic Disord*. 2003;5(2):93–100.
39. Draganski B, Gaser C, Busch V, Schuierer G, Bogdahn U, May A. Neuroplasticity: changes in grey matter induced by training. *Nature*. 2004;427(6972):311–2.
40. Gerber P, Schlaffke L, Borowy S, Greenlee M, Schultz T, Schmidt-Wilcke T. Juggling revisited — A voxel-based morphometry study with expert jugglers. *NeuroImage*. 2014;95:320–5.
41. Sampaio-Baptista C, Scholz J, Jenkinson M, Thomas AG, Filippini N, Smit G, et al. Gray matter volume is associated with rate of subsequent skill learning after a long term training intervention. *NeuroImage*. 2014;96:158–66.
42. Scholz J, Klein MC, Behrens TEJ, Johansen-Berg H. Training induces changes in white matter architecture. *Nat Neurosci*. 2009;12(11):1370–1.
43. Schultz T, Gerber P, Schmidt-Wilcke T. Juggling Increases Interhemispheric Brain Connectivity: A Visual and Quantitative fMRI Study. *Vision*. 2012; VMV12, 217–218. Available from: <http://dx.doi.org/10.2312/PE/VMV/VMV12/217-218>.
44. Oldfield RC. The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*. 1971;9(1):97–113.
45. Veale JF. Edinburgh Handedness Inventory - Short Form: a revised version based on confirmatory factor analysis. *Laterality*. 2014;19(2):164–77.
46. Król-Zielińska M, Ciekot-Sołtysiak M, Szeclicki R, Zieliński J, Osiński W, Kantanista A. Validity and Reliability of the Polish Adaptation of the CHAMPS Physical Activity Questionnaire. Braido F, editor. *BioMed Research International*. 2019;2019:6187616.
47. Shelton RC, McNeill LH, Puleo E, Wolin KY, Emmons KM, Bennett GG. The Association Between Social Factors and Physical Activity Among Low-Income Adults Living in Public Housing. *Am J Public Health*. 2011;101(11):2102–10.
48. Blasco-Lafarga C, Cordellat A, Forte A, Roldán A, Monteagudo P. Short and Long-Term Trainability in Older Adults: Training and Detraining Following Two Years of Multicomponent Cognitive—Physical Exercise Training. *Int J Environ Res Public Health*. 2020;17(16):5984.
49. Ruhe A, Fejer R, Walker B. The test-retest reliability of centre of pressure measures in bipedal static task conditions—a systematic review of the literature. *Gait Posture*. 2010;32(4):436–45.
50. Quijoux F, Nicolai A, Chairi I, Bargiotas I, Ricard D, Yelnik A, et al. A review of center of pressure (COP) variables to quantify standing balance in elderly people: Algorithms and open-access code. *Physiol Rep*. 2021;9(22):e15067.
51. Stemplewski R, Maciaszek J, Osiński W, Szeclicki R. Test-Retest Reliability of Measurements of the Center of Pressure Displacement in Quiet Standing and During Maximal Voluntary Body Leaning Among Healthy Elderly Men. *Journal of Human Kinetics*. 2011;2011(28):15–23.
52. Posner MI. Chronometric explorations of mind. Oxford, England: Lawrence Erlbaum; 1978. xiii, 271 p. (Chronometric explorations of mind).
53. Bartolacci C, Scarpelli S, D'Atri A, Gorgoni M, Annarumma L, Cloos C, et al. The Influence of Sleep Quality, Vigilance, and Sleepiness on Driving-Related Cognitive Abilities: A Comparison between Young and Older Adults. *Brain Sci*. 2020;10(6):327.
54. Hekler EB, Buman MP, Haskell WL, Conway TL, Cain KL, Sallis JF, et al. Reliability and validity of CHAMPS self-reported sedentary-to-vigorous intensity physical activity in older adults. *J Phys Act Health*. 2012;9(2):225–36.
55. Stewart AL, Mills KM, King AC, Haskell WL, Gillis D, Ritter PL. CHAMPS physical activity questionnaire for older adults: outcomes for interventions. *Med Sci Sports Exerc*. 2001;33(7):1126–41.
56. Harada ND, Chiu V, King AC, Stewart AL. An evaluation of three self-report physical activity instruments for older adults. *Med Sci Sports Exerc*. 2001;33(6):962–70.
57. Król-Zielińska M, Ciekot M. Assessing physical activity in the elderly: A comparative study of most popular questionnaires. 2015;3:12.
58. Faul F, Erdfelder E, Lang AG, Buchner A. G*Power 3: A flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. *Behavior Research Methods*. 2007;39:175–91.
59. Lord S, Castell S. Effect of exercise on balance, strength and reaction time in older people. *Australian Journal of Physiotherapy*. 1994;40(2):83–8.
60. Lakens D. Calculating and reporting effect sizes to facilitate cumulative science: a practical primer for t-tests and ANOVAs. *Frontiers in Psychology*. 2013 [cited 2022 Nov 12];4. Available from: <https://www.frontiersin.org/articles/https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00863>
61. Ericson H, Geidne S. The characteristics of organized sport and physical activity initiatives for older adults in Sweden. *Front Sports Act Living*. 2023 Sep 4 [cited 2024 May 8];5. Available from: <https://www.frontiersin.org/articles/https://doi.org/10.3389/fspor.2023.1168312>
62. Hickey M, Mason S. Age and gender differences in participation rates, motivators for, and barriers to exercise. *Modern Psychological Studies*. 2017;22(2). Available from: <https://scholar.utc.edu/mps/vol22/iss2/3>
63. GUS. stat.gov.pl. [cited 2023 Aug 5]. The situation of older people in Poland in 2020. Available from: <https://stat.gov.pl/en/topics/older-people/older-people/the-situation-of-older-people-in-poland-in-2020-1,3.html>
64. Rodrigues ST, Polastri PF, Gotardi GC, Aguiar SA, Mesaros MR, Pestana MB, et al. Postural Control During Cascade Ball Juggling: Effects of Expertise and Base of Support. *Percept Mot Skills*. 2016;123(1):279–94.
65. Leroy D, Thouvarecq R, Gautier G. Postural organisation during cascade juggling: Influence of expertise. *Gait & Posture*. 2008;28(2):265–70.
66. Adzhar MA, Manlapaz D, Singh DKA, Mesbah N. Exercise to Improve Postural Stability in Older Adults with Alzheimer's Disease: A Systematic Review of Randomized Control Trials. *Int J Environ Res Public Health*. 2022;19(16):10350.

67. Garcia C, Barela JA, Viana AR, Barela AMF. Influence of gymnastics training on the development of postural control. *Neurosci Lett*. 2011;492(1):29–32.
68. Gautier G, Thouvenecq R, Larue J. Influence of Experience on Postural Control: Effect of Expertise in Gymnastics. *J Motor Behav*. 2008;40:400–8.
69. Sahli S, Ghroubi S, Rebai H, Chaâbane M, Yahia A, Pérennou D, et al. The effect of circus activity training on postural control of 5–6-year-old children. *Science & Sports*. 2013;28(1):11–6.
70. Amado AC, Palmer CJ, Hamill J, van Emmerik REA. Coupling of postural and manual tasks in expert performers. *Human Movement Science*. 2016;46:251–60.
71. Era P, Konttinen N, Mehto P, Saarela P, Lyytinen H. Postural stability and skilled performance—A study on top-level and naive rifle shooters. *Journal of Biomechanics*. 1996;29(3):301–6.
72. Huys R, Daffertshofer A, Beek PJ. Learning to juggle: On the assembly of functional subsystems into a task-specific dynamical organization. *Biological Cybernetics*. 2003;88(4):302–18.
73. Abourezk T, Toole T. Effect of Task Complexity on the Relationship between Physical Fitness and Reaction Time in Older Women. *J Aging Physical Activity*. 1995;3(3):251–60.
74. Liu Y, Hou X, Tang Z, Zhang H, Liu J. The effect of different types of physical activity on cognitive reaction time in older adults in China. *Front Public Health*. 2022;10:1051308.
75. Rieker JA, Reales JM, Muiños M, Ballesteros S. The Effects of Combined Cognitive-Physical Interventions on Cognitive Functioning in Healthy Older Adults: A Systematic Review and Multilevel Meta-Analysis. *Front Hum Neurosci*. 2022;16:838968.
76. Guo W, Zang M, Klich S, Kawczyński A, Smoter M, Wang B. Effect of Combined Physical and Cognitive Interventions on Executive Functions in OLDER Adults: A Meta-Analysis of Outcomes. *Int J Environ Res Public Health*. 2020;17(17):6166.
77. Gheysen F, Poppe L, DeSmet A, Swinnen S, Cardon G, De Bourdeaudhuij I, et al. Physical activity to improve cognition in older adults: can physical activity programs enriched with cognitive challenges enhance the effects? A systematic review and meta-analysis. *Int J Behav Nutr Phys Act*. 2018;15:63.
78. Zhu X, Yin S, Lang M, He R, Li J. The more the better? A meta-analysis on effects of combined cognitive and physical intervention on cognition in healthy older adults. *Ageing Research Reviews*. 2016;31:67–79.

Publisher's Note

Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



OPEN ACCESS

EDITED BY
Richard Kreider,
Texas A&M University, United States

REVIEWED BY
Dana Badau,
Transilvania University of Braşov, Romania
Xi Chen,
Wenzhou Medical University, China

*CORRESPONDENCE
Jakub Malik
✉ malik@awf.poznan.pl

RECEIVED 16 February 2024
ACCEPTED 13 September 2024
PUBLISHED 02 October 2024

CITATION
Malik J, Gtówka N, Jelonek W and
Maciaszek J (2024) The effect of juggling on
the proprioceptive and attentional abilities
among older women.
Front. Public Health 12:1386981.
doi: 10.3389/fpubh.2024.1386981

COPYRIGHT
© 2024 Malik, Gtówka, Jelonek and
Maciaszek. This is an open-access article
distributed under the terms of the [Creative
Commons Attribution License \(CC BY\)](#). The
use, distribution or reproduction in other
forums is permitted, provided the original
author(s) and the copyright owner(s) are
credited and that the original publication in
this journal is cited, in accordance with
accepted academic practice. No use,
distribution or reproduction is permitted
which does not comply with these terms.

The effect of juggling on the proprioceptive and attentional abilities among older women

Jakub Malik^{1*}, Natalia Gtówka², Wojciech Jelonek³ and
Janusz Maciaszek¹

¹Department of Physical Activity and Health Promotion Science, Poznan University of Physical Education, Poznan, Poland, ²Department of Sports Dietetics, Poznan University of Physical Education, Poznan, Poland, ³Department of Neuromuscular Physiotherapy, Poznan University of Physical Education, Poznan, Poland

Background: Age-related changes in attentional abilities can lead to a decline in body segment awareness in space. However, studies have reported that physical activity can improve proprioception among older adults, although proven activities with this potential are limited. Juggling is a promising activity for enhancing proprioception, as it requires high levels of attention and sensory precision. The first hypothesis posited that a juggling intervention would positively impact ipsilateral and contralateral elbow joint position matching without visual input. The second hypothesis suggested a correlation between cognitive abilities and joint position sense efficiency.

Methods: A total of 20 older women (mean age: 69.95 ± 4.58) participated in a repeated-measures study using a Latin square design. Measurements were taken at three time points (baseline, post-juggling, and control). Ipsilateral and contralateral elbow joint position matchings without visual or verbal feedback of accuracy were used to assess proprioception. Attention and reaction time variables were measured using the Vienna Test System protocols.

Results: Although significant changes were observed between baseline and subsequent time points in joint position sense accuracy, no specific effect of juggling was detected. Low and medium correlations were found between decision time and the variability of choice reaction time with contralateral accuracy. For ipsilateral accuracy, a relationship was observed only with handedness. No correlations were found between attention test scores and joint position sense accuracy.

Conclusion: The study did not demonstrate a significant effect of juggling on position-matching ability. However, cognitive abilities such as decision speed and the stability of choice reaction time may play a role in enhancing position-matching in older women.

Clinical trial registration: [ClinicalTrials.gov](#), identifier NCT06108713.

KEYWORDS

attention, bilateral exercises, dual-task, joint position matching, physical activity, reaction time

1 Introduction

The level of physical fitness decreases with age, which can impair functional performance, particularly in activities of daily living (1, 2). A loss of coordination, often contributing to an increased risk of falls, is a key factor in functional deterioration and may be associated with decreased proprioception (2). By the end of 2020, approximately 25% of Poland's population was aged ≥ 60 years, with women comprising the majority (51). Although women tend to live longer than men, they are also more likely to experience chronic diseases and disabilities (3). Additionally, the age-related decline in physical activity is more pronounced in women than in men (4), which may contribute to a less active lifestyle among older women (5).

Proprioception plays an important role in age-related changes in coordination or precise movement planning (6, 7). It enables the orientation and stability of the body during static and dynamic activities (6, 8).

Awareness of body segments in space is crucial for the body to interact effectively with the environment (6, 9). Proprioception depends on mechanoreceptors located in tendons, ligaments, muscles, and joint capsules (10, 11). Mechanoreceptors transmit information about joint position and movement to the central nervous system (2). Therefore, proprioception is an important factor influencing the quality of life in aging populations. Age-related changes in the peripheral and central nervous systems cause deterioration of proprioceptive mechanisms (2, 10). Two types of tasks are commonly used to assess proprioceptive acuity in clinical and research situations (12). These joint position matching methods involve matching the position of a joint to a reference position, most often without visual input. The first task, "ipsilateral matching" (IPSI), involves determining the reference location and adjusting the arm using memory. This reliance on memory occurs because the reference joint angle, which was demonstrated before the task was performed, is not available during the task.

The second task, "contralateral matching" (CONTRA), takes advantage of the constant presence of the joint's reference position and that of the other limb. Therefore, memory-based matching in this case does not occur.

Additionally, matching using the opposite limb requires greater interhemispheric communication (or transfer) than in the IPSI task (12). Joint position-matching methods reflect the processing of external sensory feedback and many basic sensorimotor processes (13, 14). Both internal and external feedback are combined in the process of sensorimotor integration involving activation of the somatosensory cortex, primary motor and premotor cortical areas, and subcortical areas (13, 15).

Moreover, cognitive decline represents another significant issue that worsens with age. These declines may be partly dependent on proprioceptive acuity (16). Structural and functional changes at the central level may underlie the decline in proprioceptive performance in older adults (17). Reduced attention, memory, and cognitive resources may diminish proprioceptive acuity in older adults compared to younger adults (17, 18). Age-related declines in cognitive processing ability also contribute to changes in proprioceptive function, particularly in tasks requiring greater cognitive effort (16, 17). Aging leads to a reduction in the dynamic sensitivity of muscle spindles, which affects both position and velocity feedback.

In addition to a reduction in the number of alpha motor neurons, brain areas involved in planning descending motor commands also deteriorate significantly in older people (16, 19).

Improving proprioception in older people is likely possible and may depend on the type of physical training undertaken (18). One activity with a strong association with enhanced proprioceptive abilities is traditional Chinese tai chi (12, 20, 21). Tai chi promotes an increased sense of joint position through slow, deliberate movements and constant awareness of body positioning (20, 21). Similarly, proprioceptive benefits have been reported in older adults who practice activities like golf or creative dancing, which also involve heightened joint position awareness (20, 22). Although little is known about the effects of other forms of physical activity on proprioception in older people (22), juggling shows promise as an activity that can potentially enhance proprioception.

Moreover, data indicate that proprioception contributes greatly to juggling (23). It is an activity that involves throwing and catching balls with both hands simultaneously according to a specific motor pattern (24). Additionally, the neuroplasticity potential of juggling has been confirmed by numerous studies (24–27). There is evidence showing a link between juggling and mental rotation performance and, more broadly, between motor and cognitive performance (28–30). In the juggling cascade, hands toss and catch balls alternately. Combining the limbs into a new phasing relationship requires practice to learn new phasing relationships between limb movements (31). Juggling as a bimanual task requires attention, which can contribute to both proprioception and attention development. Importantly, with greater juggling experience, the direction of focus changes from the hands to the top of the parabolic arc of ball flight (31). An important part of increasing the effectiveness of learning and predicting the trajectory of a ball is focusing one's attention on the stimuli rather than on the hand (31, 32). Juggling, as an exercise that requires the catching hand to compensate for the throwing hand's mistakes, appears to perfectly reflect the proprioceptive coordination of two hands. To master juggling, it is crucial to reduce the variability of throws and learn to compensate for errors by producing similar phase relationships of limb movement (31). Notably, performing this physical activity is both appealing and safe for older people (33).

The majority of the studies evaluating the effect of exercise on joint position matching, including the elbow joint, have primarily focused on the effect of acute exercise rather than long-term training (34–37). Additionally, there is limited research on the effect of juggling on brain function and cognitive performance in older adults (26, 38). Therefore, investigating the impact of systematic juggling exercises on elbow joint position adjustment in older women presents a promising area for further exploration.

Given the limited data on juggling interventions in older people, this study aimed to evaluate the effects of juggling on proprioception (through IPSI and CONTRA elbow joint task matching) and assess its impact on attentional abilities in older women, a population known for lower physical activity levels. Moreover, the purpose was to assess the association between attentional abilities and joint position sense. We hypothesized that after physical activity in the form of juggling, there may be a positive change in proprioception in both the IPSI and CONTRA tasks. Moreover, we hypothesized that there may be a significant relationship between attentional abilities and joint position sense, indicating that better attention test results may correlate with better elbow joint position matching results.

2 Materials and methods

2.1 Participants

A total of 25 right-handed older women responded to announcements about juggling classes, which were made via local radio, television, newspapers, and social media.

Finally, 20 older women were included in the study, which used a repeated measures design based on three conditions (69.95 ± 4.58 years; min-max: 65–76). Five respondents were excluded because they did not meet the inclusion criteria.

The inclusion criteria for participants were as follows: women aged 65 years or older, with no known injuries or pathologies affecting the upper limb, no neurological conditions, and no significant visual impairments. Each participant underwent an interview to confirm that these criteria were met.

Additionally, the handedness of the participants was assessed with the Edinburgh Handedness Inventory – short version (Cronbach's $\alpha = 0.93$) (39). No dropouts occurred during the study. All participants who started the protocol completed it, and complete measurement data were obtained. The study was conducted in accordance with the Declaration of Helsinki 2013 and approved by the Ethics Committee of Poznan University of Medical Sciences (No. 106/21, date: 04.02.2021). Participants were informed about the procedures before the study commenced. All participants signed a written informed consent form and were informed that they could withdraw from participation at any time. The study was registered retrospectively at [ClinicalTrials.gov](https://clinicaltrials.gov) (NCT06108713). The basic characteristics of the whole group are presented in Table 1.

2.2 Experimental design and intervention

The experiment followed a repeated measures design with three measurement time-points (TPs) and an intervention/control condition applied in the assigned sequence order (Figure 1). After the series of the first measurements (baseline, BASE), each participant was randomly assigned to the mentioned different sequence order of intervention/control condition in a crossover manner (each participant experienced both conditions in the assigned sequence), based on the Latin square design (AB/BA). The intervention (A) consisted of four weeks of juggling training, in which participants participated in structured, supervised activities three times a week for 45 min each. The training was a structured juggling activity. The success of the juggling training was defined as the ability to juggle a three-ball cascade. The detailed intervention condition (juggling

training) and information on training success were thoroughly described and published elsewhere (33).

The control (B) condition involved four weeks without juggling, and participants were also asked not to undertake any new physical activities. The following two TP measurements (A, B) refer to the series of measurements after each condition. To be precise, the second series of measurements for one sequence order was indeed the third series for the other sequence order, and conversely. To simplify, the series of measurements that occurred after the intervention condition, juggling training, was labeled JUGG, and the series of measurements after the control condition was labeled CON. Additionally, the second sequence was implemented after a four-week break of no activity, during which participants were asked to refrain from juggling or any other new physical activity. A chart of the study design is presented in Figure 1.

2.2.1 Ipsilateral and contralateral position matching

During each measurement meeting for joint position matching, both the IPSI and CONTRA conditions were performed on a special chair that allowed flexion measurement in the elbow joints with an accuracy of 0.1 degrees. Joint flexion was recorded using electrogoniometers, a base unit, and DataLink CP software (Biometrics Ltd.) with a 40 kHz total sampling frequency. This method's intra- and interrater reliability was described as good (0.76 and 0.86 for flexion, 0.92 and 0.89 for extension, respectively) (41). The chair was individually adjusted to the participants' body height and limb length, taking into account the shoulders and the axis of the elbow joints. Participants performed eight trials, preceded by three practice trials, with a 30-s break between tasks. For each TP, the results of individual participants in both the IPSI and CONTRA conditions were checked for outliers using the IQR method. Outliers were removed because they may have occurred on a one-time basis if there was less engagement on the task or if there was increasing fatigue. During the whole task, all participants wore a pair of blindfolds that prevented the participants from visually accessing the arm position. While seated upright, both participants' forearms rested on the movable splints of a bimanual manipulandum, and they were instructed to keep their arms relaxed.

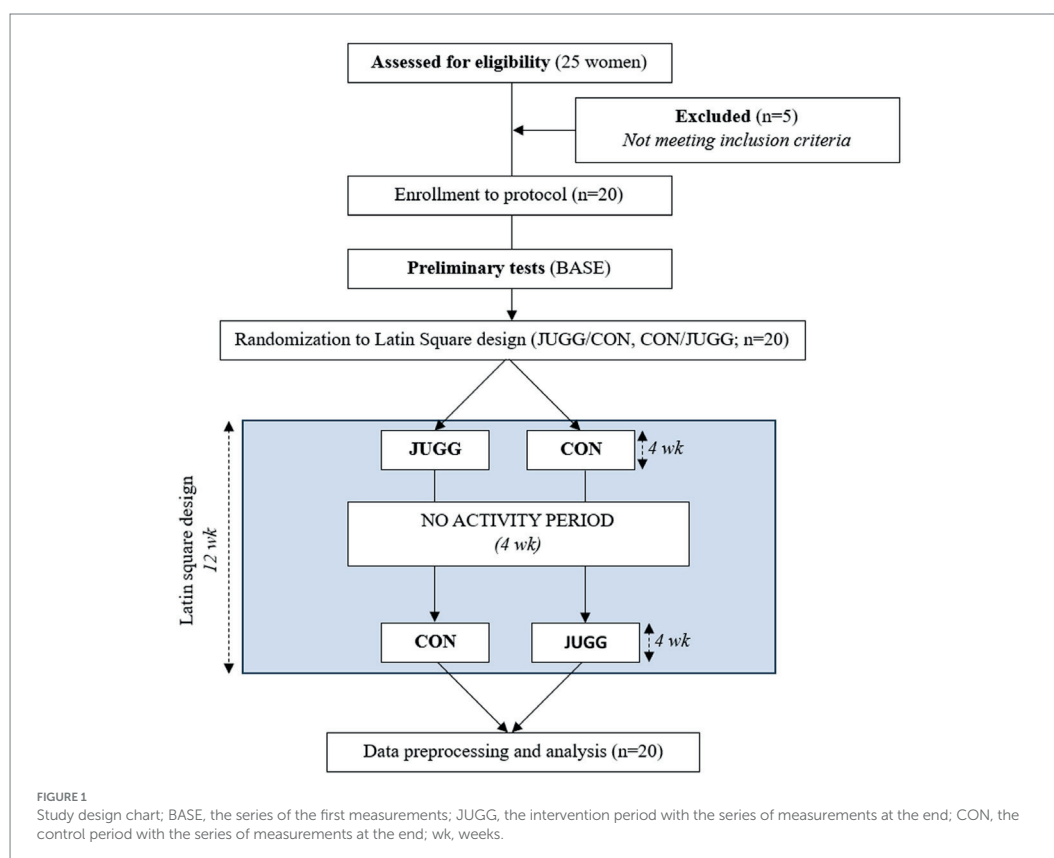
The armrest had a stopper to ensure the same starting position for all the trials (90° flexion of the elbow joint, 80° arm abduction, 10° arm lateral flexion). For both conditions, passive limb displacement was performed in such a way as to achieve a value of 10 degrees of displacement per second. The order of conditions was randomized. The position matching tests allowed us to determine the constant error (CE), absolute error (AE), variability error (VE), and root mean square error (RMSE) for each condition.

The IPSI condition assessed working memory performance during a proprioceptive task. In each IPSI trial, the experimenter moved the splint on the participant's dominant arm 30 degrees from the starting position toward the body. The experimenter verbally informed the participants when the desired target position was reached. The forearm was then passively moved back to the starting position. Subsequently, the participants actively moved their forearms to the remembered target position. The participants were instructed to stop their movement and verbally indicate when they felt they had reached the reference target. Angular data were recorded immediately after the participant's command using the potentiometer. They did not receive verbal or visual feedback on the accuracy of their matching performance.

TABLE 1 Participants characteristics.

Variable	Mean (SD)
Age [years]	69.95 (4.58)
Body mass [kg]	62.88 (8.55)
Body height [cm]	158.65 (5.12)
Body mass index [kg/cm ²]	25.04 (3.52)
Lateralization* [points]	92.50 (12.43)

*Assessed by the Edinburgh Handedness Inventory – short version; SD, standard deviation.



In the CONTRA matching condition, both arms were controlled, and the inversion angle for both arms was kept similar and constant across and within participants. This task aimed to assess the efficiency of interhemispheric proprioceptive information processing during a bimanual proprioceptive task. In each trial, the examiner moved the participants' non-dominant forearm to a target position of 30 degrees from the starting position toward the body. The examiner verbally informed the participants when the desired target position was reached. The participant's task was to move their dominant hand to such a position that the elbow flexion angle of the dominant hand matched the elbow flexion angle of the non-dominant hand. The participants held their positions for approximately 3 s to allow for the collection of stable angular data via a potentiometer. They did not receive verbal or visual feedback regarding the precision of their matching performance.

We based the above methods on reports of the general practice of proprioception testing by adjusting joint positions, including that joint position adjustment tasks should be performed at the same magnitude of target amplitudes, should always be adjusted in the same way, and should always be adjusted at the same speed (12).

2.2.2 Reaction time and attention

The results of cognitive abilities were obtained with the Vienna Test System (VTS; SCHUHFRIED GmbH, Austria; Polish

distribution - COGNIFIC). Participants performed three different tasks in the following order: simple reaction time test and choice reaction time test (which made it possible to determine simple reaction time and its variability), choice reaction time and its variability, motor time and its variability, decision time and Cognitrone test, which allowed to assess mean time of correct acceptance, mean time of correct rejection, number of correct answers and task duration time. In each measurement meeting, all of the tests were preceded by practice trials.

The simple reaction time test consisted of responding to a visual stimulus displayed on the computer screen (yellow spot). Participants used one finger of the dominant hand to maintain constant contact with the touch panel. After the stimulus was displayed, participants were asked to let go of the touch panel as quickly as possible (reaction time), use the same finger to press the button above the panel, and return to the initial position (motor time).

The choice reaction time test required the same response as the preceding test. Different visual stimuli were presented, but participants had to respond only to a predetermined stimulus. Responding to other stimuli was considered a mistake. The Cronbach's alpha of the reaction time tests varied between 0.83 and 0.98 for the reaction time results and between 0.84 and 0.95 for the motor time results (SCHUHFRIED GmbH).

The Cognitrone test consisted of finding as quickly as possible among the four figures displayed, the reference figure presented below, and reacting appropriately depending on whether the figure was there (green button under the right hand) or not (red button under the left hand). The level of complexity of the figures presented increased as the test progressed. The test consisted of 60 cases. The Cronbach's alpha of the Cognitrone test results is 0.95 (SCHUHFRID GmbH).

2.3 Statistical analysis and sample size

The Shapiro–Wilk test was used for data to test the normality of all the data. Differences between three TPs (BASE, JUGG, CON) for each condition separately (IPSI, CONTRA) were checked by repeated measures analysis of variance (ANOVA RM), which included Mauchly's sphericity analysis. When the sphericity condition was not met, the Greenhouse–Geisser correction was used. Alternatively, Friedman's analysis of variance (F ANOVA) was used for abnormally distributed data.

After repeated measures analysis, *Post-hoc* tests (Bonferroni or paired Wilcoxon) were used for pairwise comparisons. Differences between conditions were analyzed using paired t-tests for normal distributions or Wilcoxon tests for non-normal distributions. The correlation coefficient was checked by the Spearman correlation coefficient, given the distribution of the variables (nonnormal distribution). The following interpretation of correlation coefficients was applied: less than 0.20 as very weak, 0.20 to 0.40 as weak, 0.40 to 0.60 as medium, 0.60 to 0.80 as strong, and at least 0.8 as very strong.

The results are presented in the tables and figures as means with standard deviations and medians with interquartile ranges (IQR). The effect size for ANOVA RM was determined as partial eta-square (η_p^2 ; 0.01 – small effect; 0.06 – medium effect; 0.138 – high effect), for F ANOVA, it was determined as Kendall's coefficient of concordance (W; 0.20 – fair agreement, 0.40 – moderate agreement, 0.60 – substantial agreement, 0.80 – almost perfect agreement), and for pairwise t-tests, it was determined as Cohen's *d* (*d*; 0.2 – small effect; 0.5 – medium effect; 0.8 – high effect) or Wilcoxon with bivariate correlation coefficient rank (*rc*; 0.1 – small effect; 0.3 – moderate effect; 0.5 – large effect). Differences between the means (*Md*) of paired data are presented with 95% confidence intervals (CI 95%) for all compared variables. A *p*-value of <0.05 was considered to indicate statistical significance. G*Power software (version 3.1.9.6, Germany) was used to calculate the minimum sample size. According to Niespodziński et al. (42), assuming a large effect size, the required sample size at a power of 0.80 is 15 participants. Due to the duration of the study and the possibility of unforeseen situations, we decided to increase this number by 30%. Nevertheless, based on previous studies of elbow joint proprioception in older adults, with sample sizes ranging from 12 to 17 (16, 43–45), the adopted sample size of 20 participants appeared to be sufficient.

3 Results

3.1 Carryover effect analysis

The carryover effect analysis for the CON condition revealed no significant differences between the sequence order of

intervention/control (AB/BA) in the joint position matching tests (for IPSI, *p*-values ranged from 0.473 to 0.970; for CONTRA, *p*-values ranged from 0.307 to 0.678). In terms of cognitive abilities, the carryover effect analysis revealed a significant difference in motor time (*p* = 0.035) between the sequence order of intervention and control. However, no significant differences were found for the other test results (for reaction time tests, *p*-values ranged from 0.175 to 0.950; for Cognitrone test results, *p*-values ranged from 0.266 to 0.921).

3.2 Joint position matching

In the IPSI condition, a significant main effect of TPs for CE was observed (*p* = 0.03, η_p^2 = 0.17). The Bonferroni *post-hoc* test for CE in the IPSI condition showed no significant differences between the TPs. The change observed between BASE and the other TPs was very pronounced. The JUGG and CON were characterized by more precise joint position matching. All the TP results were characterized by an overestimation.

In the CONTRA condition, the changes in CE from BASE to JUGG and CON were characterized by deterioration of joint position matching. All TPs were characterized by an underestimation of the position matching the reference position. However, ANOVA RM showed that there was not any statistically significant effect of TPs (*p* = 0.32, η_p^2 = 0.06), which was reflected by the nonsignificant *post hoc* test of differences between TPs.

Data on CE differences across the TP are presented in Table 2. A significant difference between conditions was observed for the CON condition (*p* = 0.01, *d* = 0.64) but not for the BASE (*p* = 0.09; *d* = 0.49) or the JUGG condition (*p* = 0.31; *d* = 0.23). Visualization of changes in CE for each condition and task is shown in Supplementary Figure S1, while data on CE differences between each condition are presented in Table 3. Means with standard deviations of CE are presented in Table 4.

A significant difference in AE was observed in the IPSI condition (*p* < 0.01, *W* = 0.29), with worse AE scores observed in the BASE condition compared to the other TPs, indicating a disadvantage for BASE. Wilcoxon pairwise comparison revealed significant differences between BASE, as well as between JUGG and between BASE and CON, but not between JUGG and CON.

For the CONTRA condition, no statistical significance was observed in the F ANOVA analysis (*p* = 0.86, *W* = 0.01), which was corroborated by Wilcoxon pairwise comparisons. The percentage difference indicated a minor advantage for CON and a slight disadvantage for JUGG compared to BASE. Data on AE differences across TPs are presented in Table 2.

Between the conditions, a statistical difference was observed for JUGG (*p* < 0.01, *d* = 0.68) and CON (*p* < 0.05, *d* = 0.44) but not for BASE (*p* = 0.43, *rc* = 0.23). All AE data are presented in Supplementary Figure S2, and data on AE differences between all conditions are presented in Table 3. Means with standard deviations for AE are presented in Table 4.

F ANOVA showed no statistically significant main effect of TPs for the IPSI condition in the VE (*p* = 0.55, η_p^2 = 0.03). The lack of significant changes was further confirmed by the results of Wilcoxon pairwise comparisons. However, the overall percentage change

TABLE 2 Mean differences with confidence intervals between the series of measurements (BASE-JUGG; BASE-CON; JUGG-CON).

Conditions	Differences between the series of measurements		
	BASE-JUGG Md [95%CI] <i>p</i> -value	BASE-CON Md [95%CI] <i>p</i> -value	JUGG-CON Md [95%CI] <i>p</i> -value
CE			
IPSI	2.08 [−0.13;4.30] 0.072	2.14 [−0.07;4.36] 0.061	0.61 [−2.16;2.28] 1.000
CONTRA	0.71 [−2.70;4.12] 1.000	2.04 [−1.36;5.45] 0.424	1.33 [−2.07;4.74] 0.999
AE			
IPSI	1.27 [0.26;2.28] 0.010*	1.32 [0.31;2.33] 0.007*	0.05 [−0.96;1.06] 1.000
CONTRA	−0.54 [−2.65;1.56] 1.000	0.69 [−1.42;2.80] 1.000	1.23 [−0.87;3.34] 0.454
VE			
IPSI	5.43 [−0.59;11.44] 0.089	4.68 [−1.33;10.70] 0.176	−0.74 [−6.76;5.27] 1.000
CONRA	5.96 [−2.83;14.75] 0.293	4.28 [−4.51;13.08] 0.690	−1.68 [−10.47;7.11] 1.000
RMSE			
IPSI	1.36 [0.28;2.44] 0.010*	1.30 [0.22;2.39] 0.014*	−0.57 [−1.14;1.03] 1.000
CONTRA	−0.28 [−2.45;1.89] 1.000	0.81 [−1.36;2.98] 1.000	1.09 [−1.08;3.26] 0.665

*statistically significant; IPSI, the ipsilateral condition of joint position matching; CONTRA, the contralateral condition of joint position matching; BASE, the first series of measurements; JUGG - the series of measurements taken after the intervention period; CON, the series of measurements taken after a period without implementing any intervention; Md, mean difference; 95%CI, 95% confidence interval of mean difference; CE, constant error of joint position matching assessment; AE, absolute error of joint position matching assessment; VE, variable error of joint position matching assessment; RMSE, root mean square error of joint position matching assessment.

between the BASE and the other conditions showed noticeable improvement in later TPs.

In the CONTRA condition, no statistical significance was observed ($p=0.12$, $\eta_p^2=0.11$). Compared to BASE, an approximation to the reference value was observed for JUGG and CON. Data on VE differences between each TP are presented in Table 2.

No statistically significant differences were detected across the TPs (BASE: $p=0.79$, $rc=0.06$; JUGG: $p=0.71$, $rc=0.08$; CON: $p=0.43$, $rc=0.17$). All results from the VE analysis are presented in Supplementary Figure S3, with data on VE differences between conditions presented in Table 3. Means with standard deviations for AE are presented in Table 3.

ANOVA RM showed a statistically significant difference in RMSE for the IPSI condition ($p<0.01$, $\eta_p^2=0.25$). The results recorded in both the JUGG and CON were noticeably closer to the reference

values than those recorded in the BASE group. Bonferroni *post hoc* pairwise comparisons detected differences between BASE and JUGG and between BASE and CON. Differences between JUGG and CON were not statistically significant.

In the CONTRA condition for the RMSE, F ANOVA was used. No statistical significance was detected between TPs ($p=0.70$, $W=0.02$). However, the difference between the TPs indicated that BASE performed worse. Data of RSME differences between each TP are presented in Table 2.

Differences between conditions were observed in JUGG ($p<0.01$, $d=0.68$) and CON ($p=0.04$, $d=0.51$) but not in BASE ($p=0.19$, $rc=0.29$). All the RMSE data are presented in Supplementary Figure S4, data of RMSE differences between each condition are presented in Table 3, and means with standard deviations of RMSE are presented in Table 4.

TABLE 3 Mean differences with confidence intervals between joint position matching conditions (IPSI-CONTRA).

Conditions	BASE Md [95%CI] <i>p</i> -value	JUGG Md [95%CI] <i>p</i> -value	CON Md [95%CI] <i>p</i> -value
CE	2.83 [−0.44;6.11] 0.086	1.46 [−1.48;4.40] 0.312	2.73 [0.72;4.74] 0.010*
AE	−0.83 [−2.31;0.64] 0.252	−2.65 [−4.46;−0.83] 0.007*	−1.46 [−2.76;−0.17] 0.029*
VE	2.87 [−10.86;5.12] 0.461	−2.34 [−7.56;2.89] 0.361	−3.27 [−9.99;3.44] 0.302
RMSE	−1.03 [−2.51;0.45] 0.191	−2.67 [−4.51;−0.84] 0.007*	−1.52 [−2.93;−0.12] 0.035*

*Statistically significant; IPSI, the ipsilateral condition of joint position matching; CONTRA, the contralateral condition of joint position matching; BASE, the first series of measurements; JUGG, the series of measurements taken after the intervention period; CON, the series of measurements, taken after a period without implementing any intervention; Md, mean difference; 95%CI, 95% confidence interval of mean difference; CE, constant error of joint position matching assessment; AE, absolute error of joint position matching assessment; VE, variable error of joint position matching assessment; RMSE, root mean square error of joint position matching assessment.

TABLE 4 IPSI and CONTRA means with standard deviations obtained in three different TPs.

Variables	BASE Mean ± SD	JUGG Mean ± SD	CON Mean ± SD	BASE-JUGG %	BASE-CON %	<i>f</i> / <i>X</i> ² <i>p</i> -value [ES]
IPSI_CE [°]	2.73 ± 2.92	0.64 ± 2.93	0.58 ± 3.12	↓ 124.04	↓ 129.91	3.80 0.03* [0.17]
CONTRA_CE [°]	−0.10 ± 5.63	−0.81 ± 6.75	−2.15 ± 4.38	↓ 156.04	↓ 182.22	1.16 0.32 [0.06]
IPSI_AE [°]	4.52 ± 1.12 ^{LC}	3.25 ± 1.12 ^B	3.20 ± 1.53 ^B	↓ 32.69	↓ 34.20	11.70 <0.01* [0.29]
CONTRA_AE [°]	5.36 ± 2.77	5.90 ± 3.66	4.67 ± 2.08	↑ 9.59	↓ 13.76	0.30 0.86 [0.01]
IPSI_VE [°]	13.51 ± 9.54	8.08 ± 4.95	8.83 ± 7.15	↓ 50.30	↓ 48.57	1.20 0.55 [0.03]
CONTRA_VE [°]	16.38 ± 14.78	10.42 ± 9.19	12.10 ± 12.50	↓ 47.48	↓ 30.06	4.30 0.12 [0.11]
IPSI_RMSE [°]	5.11 ± 1.11 ^{LC}	3.75 ± 1.27 ^B	3.81 ± 1.71 ^B	↓ 30.70	↓ 29.15	6.33 <0.01* [0.25]
CONTRA_RMSE [°]	6.14 ± 2.81	6.42 ± 3.57	5.33 ± 2.22	↑ 4.56	↓ 14.12	0.70 0.70 [0.02]

*Statistically significant; ^Bresult significantly different from baseline time-point; ^{LC}result significantly different from juggling time-point; ^Cresult significantly different from control time-point; TPs, time-points; BASE, baseline time-point; JUGG, juggling time-point; CON, control time-point; IPSI, the ipsilateral condition; CONTRA, the contralateral condition; CE, constant error; AE, absolute error; VE, variable error; RMSE, root mean square error *f*/*X*², *f* statistic or chi-square statistic (if in italics); ES, effect size: *η*² (*f* statistic) or *W* (chi-square statistic).

3.3 Cognitive abilities

The only statistically significant change was observed for correct reactions in the Cognitrone test. All the cognitive test data are presented in [Table 5](#).

3.4 Correlation coefficient

Spearman's Rho analysis revealed statistically significant correlations for the CONTRA condition: a weak negative correlation

between CE and simple reaction time, a weak positive correlation between CE and variability in choice reaction time, and a medium positive correlation between CE and decision time. Additionally, variability in choice reaction time was weakly and negatively correlated with AE and RMSE in the CONTRA condition. In the IPSI condition, a weak negative correlation was found between handedness and both AE and RMSE. No other variables were significantly associated with any type of error in either the IPSI or CONTRA conditions. The results of the correlation analysis between cognitive variables and joint position matching are presented in [Table 6](#).

TABLE 5 Results of cognitive tests in three different TPs.

Variables	BASE Mean ± SD Median ± IQR	JUGG Mean ± SD Median ± IQR	CON Mean ± SD Median ± IQR	p-value [ES]
Simple reaction time [ms]	302.10 ± 48.65 294.00 ± 57.00	296.55 ± 41.33 292.00 ± 53.00	293.60 ± 43.32 287.00 ± 70.00	0.63 [0.02]
Variability of simple reaction time [ms]	41.10 ± 17.30 37.00 ± 16.00	40.55 ± 39.40 38.50 ± 14.00	39.40 ± 14.64 34.50 ± 22.50	0.85 [0.01]
Choice reaction time [ms]	491.60 ± 56.66 482.50 ± 67.50	472.70 ± 50.10 473.50 ± 78.00	478.80 ± 52.96 472.50 ± 50.00	0.45 [0.04]
Variability of choice reaction time [ms]	72.65 ± 16.66 68.00 ± 14.50	67.60 ± 19.69 65.50 ± 33.00	72.80 ± 21.07 70.00 ± 27.00	0.54 [0.03]
Motor time [ms]	263.38 ± 57.05 254.75 ± 88.75	265.55 ± 68.96 247.50 ± 106.75	260.28 ± 75.63 251.25 ± 94.25	0.87 [0.01]
Variability of motor time [ms]	37.15 ± 7.95 38.00 ± 12.00	35.40 ± 11.71 35.25 ± 13.50	35.45 ± 14.15 31.75 ± 15.00	0.54 [0.03]
Decision time [ms]	189.50 ± 48.15 176.00 ± 70.00	176.15 ± 49.45 166.50 ± 76.50	185.20 ± 33.65 190.50 ± 54.00	0.82 [0.01]
Correct rejections in the Cognitrone test [s]	3.19 ± 0.62 3.22 ± 1.10	3.11 ± 0.77 3.07 ± 1.18	3.11 ± 0.76 3.02 ± 0.86	0.78 [0.01]
Correct acceptances in the Cognitrone test [s]	2.58 ± 0.67 2.39 ± 0.68	2.50 ± 0.61 2.41 ± 0.83	2.52 ± 0.61 2.41 ± 0.64	0.86 [0.01]
Correct reactions in the Cognitrone test [points]	53.75 ± 2.92 54.00 ± 4.00	55.65 ± 3.76 57.00 ± 6.00	55.90 ± 4.28 56.50 ± 5.00	0.01* [0.21]
Duration time of the Cognitrone test [s]	182.45 ± 47.42 174.00 ± 46.00	171.90 ± 35.24 171.50 ± 56.50	171.95 ± 34.83 172.50 ± 34.50	0.21 [0.08]

*Statistically significant; BASE, baseline time-point; JUGG, juggling time-point; CON, control time-point; ES, effect size: η^2 (f statistic) or W (if in italics; chi square statistic).

4 Discussion

4.1 Joint position matching

The main purpose of this study was to determine the effect of additional juggling exercises on joint position-matching tasks and cognitive abilities in healthy, physically active women older than 65 years. The assessment was performed in BASE, JUGG, and CON. The results showed minor improvements in joint position-matching accuracy in the JUGG group.

Similar changes were also observed in the CON group, especially for CE and VE in all conditions, as well as for AE and RMSE in the IPSI condition. We hypothesized that physical activity in the form of juggling would have a positive effect on the accuracy of elbow position matching among older women. Thus, we found that the juggling training intervention did not improve the accuracy of elbow joint position matching among the older women studied.

A systematic review (40) of studies on improving proprioception (including balance) showed that positive effects could be observed after just 3 weeks of intervention. However, in studies considering the effects of whole-body exercises on proprioception in older adults, the most common duration of intervention varied from 6 weeks to 12 months.

The lack of significant effects of juggling on elbow position matching in our study could be due to the intervention being too short. The secondary aim of this study was to evaluate the correlations between attention and reaction time variables and type of error in two

different joint position matching tasks. A significant correlation was observed mostly for CE in the CONTRA condition. These were weak or medium correlations.

Few studies have assessed the effect of specific activities on the proprioception of the upper limbs among older women. In particular, research on juggling, which may have a promising impact on neuroplasticity, is lacking (24). As such, this discussion is based on the limited available literature.

Age-related changes in proprioceptive abilities are well-documented (12, 16, 18, 52). Although the potential for physical activity to improve proprioception is increasingly recognized (18, 20–22, 52), there remains a need to explore new types of physical activities that can influence these abilities. Studies (16, 52) have shown that active older adults tend to have better positional accuracy scores than their more sedentary counterparts.

The degree of AE results in studies conducted by Adamo D.E. et al. (16, 52) is comparable to the scores of our participants, especially at the BASE. However, in later TPs for the IPSI condition, all error variables showed a noticeable improvement for both the JUGG and CON groups compared to the BASE, with statistically significant improvements observed for AE, CE, and RMSE. A similar trend of difference was also observed in VE, although the differences were not statistically significant.

This finding suggests that, at least in older women, familiarity with a task may enhance performance in proprioceptive tasks over time. Given the lack of differences between the JUGG and CON groups, it is difficult to determine whether the intervention itself contributed to

TABLE 6 Correlation coefficient between joint position matching conditions and cognitive abilities.

Variables	IPSI Spearman rho (p-value)				CONTRA Spearman rho (p-value)			
	CE	AE	VE	RMSE	CE	AE	VE	RMSE
Simple reaction time	−0.06 (0.62)	−0.02 (0.86)	0.11 (0.38)	−0.02 (0.91)	−0.36* (<0.01)	0.20 (0.13)	0.05 (0.68)	0.19 (0.14)
Variability of simple reaction time	−0.03 (0.83)	0.01 (0.94)	0.19 (0.14)	−0.01 (0.91)	−0.24 (0.07)	0.17 (0.21)	−0.03 (0.79)	0.16 (0.21)
Choice reaction time	−0.01 (0.91)	0.07 (0.58)	−0.01 (0.93)	0.05 (0.73)	0.08 (0.52)	0.02 (0.86)	0.04 (0.75)	0.01 (0.93)
Variability of choice reaction time	0.24 (0.07)	0.17 (0.19)	−0.05 (0.69)	0.13 (0.34)	0.39* (<0.01)	−0.27* (0.04)	0.00 (1.00)	−0.26* (0.05)
Motor time	−0.18 (0.18)	0.02 (0.85)	0.02 (0.88)	0.03 (0.83)	−0.13 (0.34)	0.09 (0.48)	0.09 (0.50)	0.09 (0.48)
Variability of motor time	0.01 (0.94)	0.13 (0.32)	0.06 (0.66)	0.11 (0.42)	0.09 (0.51)	0.01 (0.92)	0.19 (0.14)	0.03 (0.82)
Decision time	0.07 (0.60)	0.13 (0.31)	−0.02 (0.88)	0.09 (0.49)	0.42* (<0.01)	−0.19 (0.14)	−0.06 (0.63)	−0.22 (0.09)
Correct rejections in the Cognitrone test	−0.05 (0.73)	−0.06 (0.73)	−0.10 (0.47)	−0.07 (0.61)	−0.09 (0.48)	0.15 (0.27)	0.03 (0.80)	0.13 (0.32)
Correct acceptances in the Cognitrone test	−0.05 (0.72)	−0.07 (0.58)	0.03 (0.85)	−0.08 (0.55)	−0.19 (0.15)	0.18 (0.16)	−0.04 (0.79)	0.17 (0.19)
Correct answers in the Cognitrone test	−0.20 (0.13)	−0.14 (0.29)	−0.07 (0.58)	−0.13 (0.33)	−0.21 (0.11)	0.04 (0.77)	−0.25 (0.06)	−0.01 (0.95)
Time duration of the Cognitrone test	−0.02 (0.85)	0.01 (0.95)	−0.02 (0.90)	0.00 (1.00)	−0.11 (0.40)	0.09 (0.49)	−0.14 (0.30)	0.08 (0.55)
Handedness	0.09 (0.51)	−0.27* (0.04)	−0.24 (0.07)	−0.30* (0.02)	0.08 (0.56)	0.20 (0.14)	0.16 (0.23)	0.20 (0.13)

*Statistically significant; IPSI, the ipsilateral joint position matching task; CONTRA, the contralateral joint position matching task; CE, constant error; AE, absolute error; VE, variable error; RMSE, root mean square error.

this effect. One possible explanation is the “familiarity effect,” as research suggests older adults are more inclined to engage in activities with which they are familiar (46).

In the CONTRA condition, no statistically significant changes were observed for any type of error. However, a trend emerged, indicating a deterioration in performance for both JUGG and CON compared to BASE. Interestingly, despite this decline, the JUGG group remained close to the reference values.

Compared to BASE, JUGG showed deterioration in each error type, while in CON, AE, VE, and RMSE improved noticeably relative to BASE. These differences, particularly the decline in accuracy for JUGG, are intriguing. Given the documented brain changes following juggling training—such as increased gray matter volume in the visuomotor complex (24–26, 47)—the observed difference may be related to neuroplastic changes that occur in the brain after bimanual tasks (48–50). Another possibility is that participants had not previously engaged their upper limbs to the same extent as during the juggling intervention, leading to changes in limb activation (53). However, since these differences were not statistically significant, further research is needed to explore changes in interhemispheric communication during bimanual task improvement.

Of the two joint position matching conditions used, previous scientific data (12) indicated that the smallest AE, relative to the reference value, should be characteristic of the IPSI condition, which involves memory requirements. In contrast, higher AE values are usually observed in the CONTRA condition, during which memory is no longer involved. However, this condition requires more interhemispheric interaction during task performance (12). In our research, these speculations were confirmed. We observed significant

differences between conditions in both JUGG and CON for AE and RMSE. The BASE was characterized by no significant differences between conditions for all types of error but better accuracy between conditions. Thus, it can be speculated that the interhemispheric interaction that occurs during the CONTRA condition in older women affects both the accuracy of item matching and the repeatability of matching attempts.

4.2 Cognitive abilities

In the Vienna Test System, the only significant change was observed in the number of correct answers on the Cognitrone test. However, no significant differences were found between the JUGG and CON groups in terms of correct answers. The results for other cognitive abilities did not differ significantly across all TPs.

However, most variables showed better (though not statistically significant) results across the TPs following the familiarization phase. This suggests that, similar to joint position matching, familiarity with the tasks prior to the main research sessions is essential for obtaining reliable results in cognitive testing. This trend highlights the importance of conducting familiarization sessions before the primary evaluations to ensure more accurate and consistent outcomes.

In summary, the juggling training intervention did not have any measurable effect on the cognitive abilities of older women studied in the chosen cognitive tests. Previous studies (54–56) have shown that physical activity can significantly improve cognitive abilities, especially attention (55, 56). Unfortunately, our results did not support the idea that juggling produces similar cognitive benefits in older adults. However, research on

healthy older adults (47–50) has demonstrated that the effect size of cognitive changes following physical activity interventions varies, ranging from non-significant (47, 48) to 0.48 and higher (56–58). It is likely that older, physically active women may be a population in which changes in cognitive abilities are more difficult to discern.

4.3 Correlation results

Correlation analysis revealed that in the IPSI condition, a higher degree of right-handedness was associated with greater accuracy in position matching with the right hand. However, attentional abilities and reaction time were not related to accuracy in the joint position-matching task in this condition. This could mean that for people who use their left hand less frequently in daily activities, the right hand may exhibit significantly better accuracy in detecting position. Moreover, it appears that the participant's reaction speed or fluctuations in attentional abilities do not have a substantial impact on elbow joint position matching in the IPSI condition.

In contrast, the CONTRA condition showed no relationship with handedness, which confirms that this task requires communication between both hemispheres (12). Correlation analysis showed that participants who had slower reaction times tended to underestimate position matching in the CONTRA condition. An inverse relationship was observed for variability in choice reaction time and decision time: greater variability in response to stimuli requiring decisions and longer decision-making times were associated with respondents' tendency to overestimate the elbow position matching task in the CONTRA condition.

Interestingly, variability in choice reaction time was negatively correlated with errors in item matching accuracy (AE and RMSE), suggesting that less variability was associated with better joint position-matching performance. This discrepancy may be due to similar decision times across trials requiring choices between several stimuli. Thus, longer decision-making times may lead to overestimations in the joint position-matching tasks. However, greater variability in decision response times was linked to fewer errors in joint position matching in the CONTRA condition. These findings suggest that improvements in the consistency of choice reaction time and decision time are associated with better position-matching accuracy in the CONTRA condition. Therefore, it may be worth considering adjustments for decision time when evaluating elbow joint position matching in the CONTRA condition, as it could significantly influence the results.

No significant correlations were found between attention tasks measured by the Cognitrone test and performance in the CONTRA condition, indicating that attention may not play a critical role in elbow position adjustment tasks in either the IPSI or CONTRA condition. Further research is needed to explore the role of attention in joint position-matching tasks more comprehensively.

4.4 Limitations

Notably, our research has several limitations. We assessed the effects of juggling only in a group of physically active women over 65 years of age. The participants were those who voluntarily responded to announcements about the classes, making them unlikely to represent the broader population of older women. Instead, they are

probably more representative of individuals motivated to engage in new activities.

Additionally, changes in cognitive functioning and proprioceptive abilities can occur at different rates within a wide age range (65–76 years). Including both genders in a comparative analysis would likely have enhanced the quality and generalizability of the results. Notably, although the sample size was consistent with estimation requirements and larger than many studies on elbow joint position matching, it may still have been insufficient to detect clear differences for variables with such subtle effects.

The chair used to measure elbow joint position was a custom-made instrument that may have deviated from common standards. However, this design allowed for precise adjustments to accommodate participants' body heights and individual limb segment lengths. Despite using reliable tools to measure elbow flexion, the custom-made chair may have slightly reduced the reliability of these tools. Moreover, the maximal force in the upper extremities—used to condition muscle spindles before the joint position matching test—was only measured during the BASE phase, potentially changing throughout the study.

Due to the length of the measurement sessions, we chose to assess joint position matching only with the dominant hand, which unfortunately limits the scope of the findings compared to examining both limbs under the same conditions.

4.5 Strengths

A key strength of our study was the design, which included familiarizing the participants with proprioception and cognitive ability tests during separate TPs. Notably, participants' performance in both the IPSI and CONTRA conditions often deviated from the reference values at the BASE, while better results were observed in the JUGG and CON conditions. To obtain reliable results in proprioception testing, particularly with the elbow joint position adjustment method, it may be beneficial to conduct the familiarization session on a different day from the main test, especially with older adults.

An additional advantage of our study was the inclusion of average differences between TPs and the percentage range of change across conditions, providing a comprehensive view of the changes within study group. To the best of our knowledge, this is the first time that outliers for individual trials were rejected based on an internal analysis of the participants' attempts at a given TP, rather than discarding all results from a participant due to a single outlier in the group.

While this approach may have contributed to the normalization of the study group's results, it also risks excluding individuals who could represent an interesting segment of the population, thus limiting insights. In addition, correlating the results of attention and reaction time tests with joint position matching performance provided a more detailed understanding of the relationship between cognitive and proprioceptive abilities, an area that warrants further investigation in further research using joint position-matching tasks.

5 Conclusion

The present study did not confirm a significant effect of juggling on joint position matching in either the IPSI or CONTRA conditions in

healthy, physically active older women. No differences were found between the JUGG and CON groups in terms of reaction time, attention, or joint position-matching accuracy. However, some fluctuations were observed, suggesting a possible influence of the bimanual task on participants. A noticeable improvement in variable error (VE) was seen following juggling, but the lack of statistical significance prevents drawing firm conclusions for the wider population.

Additionally, relationships between variables pointed to a potential role of decision speed and the stability of choice reaction time in achieving more accurate position representation. However, no evidence was found regarding a correlation between attention and joint position matching in the IPSI condition. These relationships warrant further investigation in future research.

Data availability statement

The raw data supporting the conclusions of this article will be made available by the authors, without undue reservation.

Ethics statement

The studies involving humans were approved by Ethics Committee of Poznan University of Medical Sciences. The studies were conducted in accordance with the local legislation and institutional requirements. The participants provided their written informed consent to participate in this study.

Author contributions

JakM: Conceptualization, Data curation, Formal analysis, Investigation, Methodology, Project administration, Visualization, Writing – original draft, Writing – review &

editing. NG: Data curation, Investigation, Methodology, Writing – original draft, Writing – review & editing. WJ: Data curation, Investigation, Methodology, Writing – review & editing. JanM: Conceptualization, Methodology, Project administration, Supervision, Writing – review & editing.

Funding

The author(s) declare that no financial support was received for the research, authorship, and/or publication of this article.

Conflict of interest

The authors declare that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.

Publisher's note

All claims expressed in this article are solely those of the authors and do not necessarily represent those of their affiliated organizations, or those of the publisher, the editors and the reviewers. Any product that may be evaluated in this article, or claim that may be made by its manufacturer, is not guaranteed or endorsed by the publisher.

Supplementary material

The Supplementary material for this article can be found online at: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpubh.2024.1386981/full#supplementary-material>

References

- Thompson K, Mikesky A, Bahamonde R, Burr D. Effects of physical training on proprioception in older women. *J Musculoskelet Neuronal Interact.* (2003) 3:223–31.
- Ribeiro F, Oliveira J. Aging effects on joint proprioception: the role of physical activity in proprioception preservation. *Eur Rev Aging Phys Act.* (2007) 4:71–6. doi: 10.1007/s11556-007-0026-x
- Kaczorowska A, Fortuna M, Katan A, Kaczorowska A, Ignasiak Z. Functional physical fitness and anthropometric characteristics of older women living in different environments in Southwest Poland. *Ageing Int.* (2023) 48:367–83. doi: 10.1007/s12126-021-09475-1
- Li W, Procter-Gray E, Churchill L, Crouter SE, Kane K, Cheng J, et al. Gender and age differences in levels, types and locations of physical activity among older adults living in car-dependent neighborhoods. *J Frailty Aging.* (2017) 6:129–35. doi: 10.14283/jfa.2017.15
- Lee Y-S. Gender differences in physical activity and walking among older adults. *J Women Aging.* (2005) 17:55–70. doi: 10.1300/J074v17n01_05
- Ferlinc A, Fabiani E, Velnar T, Gradisnik L. The importance and role of proprioception in the elderly: a short review. *Mater Sociomed.* (2019) 31:219–21. doi: 10.5455/msm.2019.31.219-221
- Ghez C, Gordon J, Ghilardi MF. Impairments of reaching movements in patients without proprioception. II. Effects of visual information on accuracy. *J Neurophysiol.* (1995) 73:361–72. doi: 10.1152/jn.1995.73.1.361
- Han J, Waddington G, Adams R, Anson J, Liu Y. Assessing proprioception: a critical review of methods. *J Sport Health Sci.* (2016) 5:80–90. doi: 10.1016/j.jshs.2014.10.004
- Sueterlin KJ, Sayer AA. Proprioception: where are we now? A commentary on clinical assessment, changes across the life course, functional implications and future interventions. *Age Ageing.* (2014) 43:313–8. doi: 10.1093/ageing/af1174
- Myers JB, Lephart SM. The role of the sensorimotor system in the athletic shoulder. *J Athl Train.* (2000) 35:351–63.
- Riemann BL, Lephart SM. The sensorimotor system, part I: the physiologic basis of functional joint stability. *J Athl Train.* (2002) 37:71–9.
- Goble DJ. Proprioceptive acuity assessment via joint position matching: from basic science to general practice. *Phys Ther.* (2010) 90:1176–84. doi: 10.2522/ptj.20090399
- Elangovan N, Herrmann A, Konczak J. Assessing proprioceptive function: evaluating joint position matching methods against psychophysical thresholds. *Phys Ther.* (2014) 94:553–61. doi: 10.2522/ptj.20130103
- Sciutti A, Squeri V, Gori M, Masia L, Sandini G, Konczak J. Predicted sensory feedback derived from motor commands does not improve haptic sensitivity. *Exp Brain Res.* (2010) 200:259–67. doi: 10.1007/s00221-009-1996-x
- Ciccarelli O, Toosy AT, Marsden JE, Wheeler-Kingshott CM, Sahyoun C, Matthews PM, et al. Identifying brain regions for integrative sensorimotor processing with ankle movements. *Exp Brain Res.* (2005) 166:31–42. doi: 10.1007/s00221-005-2335-5
- Adamo DE, Martin BJ, Brown SH. Age-related differences in upper limb proprioceptive acuity. *Percept Mot Skills.* (2007) 104:1297–309. doi: 10.2466/pms.104.4.1297-1309
- Yang N, Waddington G, Adams R, Han J. Age-related changes in proprioception of the ankle complex across the lifespan. *J Sport Health Sci.* (2019) 8:548–54. doi: 10.1016/j.jshs.2019.06.003
- Goble DJ, Coxon JP, Wenderoth N, Van Impe A, Swinnen SP. Proprioceptive sensibility in the elderly: degeneration, functional consequences and plastic-adaptive processes. *Neurosci Biobehav Rev.* (2009) 33:271–8. doi: 10.1016/j.neubiorev.2008.08.012

19. Cruz-Sánchez FF, Moral A, Tolosa E, de Belleruche J, Rossi ML. Evaluation of neuronal loss, astrocytosis and abnormalities of cytoskeletal components of large motor neurons in the human anterior horn in aging. *J Neural Transm (Vienna)*. (1998) 105:689–701. doi: 10.1007/s007020050088
20. Tsang WWN, Hui-Chan CWY. Effects of tai chi on joint proprioception and stability limits in elderly subjects. *Med Sci Sports Exerc*. (2003) 35:1962–71. doi: 10.1249/01.MSS.0000099110.17311.A2
21. Xu D, Hong Y, Li J, Chan K. Effect of tai chi exercise on proprioception of ankle and knee joints in old people. *Br J Sports Med*. (2004) 38:50–4. doi: 10.1136/bjsm.2002.003335
22. Marmeleira J, Pereira C, Cruz-Ferreira A, Fretes V, Pisco R, Fernandes O. Creative dance can enhance proprioception in older adults. *J Sports Med Phys Fitness*. (2009) 49:480–5.
23. Sánchez García R, Hayes SJ, Williams AM, Bennett SJ. Multisensory perception and action in 3-ball cascade juggling. *J Mot Behav*. (2013) 45:29–36. doi: 10.1080/00222895.2012.740099
24. Malik J, Stemplewski R, Maciaszek J. The effect of juggling as dual-task activity on human neuroplasticity: a systematic review. *Int J Environ Res Public Health*. (2022) 19:7102. doi: 10.3390/ijerph19127102
25. Driemeyer J, Boyke J, Gaser C, Büchel C, May A. Changes in Gray matter induced by learning—revisited. *PLoS One*. (2008) 3:e2669. doi: 10.1371/journal.pone.0002669
26. Boyke J, Driemeyer J, Gaser C, Büchel C, May A. Training-induced brain structure changes in the elderly. *J Neurosci*. (2008) 28:7031–5. doi: 10.1523/JNEUROSCI.0742-08.2008
27. Draganski B, Gaser C, Busch V, Schuierer G, Bogdahn U, May A. Neuroplasticity: changes in grey matter induced by training. *Nature*. (2004) 427:311–2. doi: 10.1038/427311a
28. Jansen P, Titze C, Heil M. The influence of juggling on mental rotation performance. *Int J Sport Psychol*. (2009) 40:351–9.
29. Jansen P, Lange L, Heil M. The influence of juggling on mental rotation performance in children. *Biomedical Human Kinetics*. (2011) 3:18–22. doi: 10.2478/v10101-011-0005-6
30. Lehmann J, Jansen P. The influence of juggling on mental rotation performance in children with spina bifida. *Brain Cogn*. (2012) 80:223–9. doi: 10.1016/j.bandc.2012.07.004
31. Haibach PS, Daniels GL, Newell KM. Coordination changes in the early stages of learning to cascade juggle. *Hum Mov Sci*. (2004) 23:185–206. doi: 10.1016/j.humov.2004.07.002
32. Mechsner F, Kerzel D, Knoblich G, Prinz W. Perceptual basis of bimanual coordination. *Nature*. (2001) 414:69–73. doi: 10.1038/35102060
33. Malik J, Maciaszek J. Effect of the juggling-based motor learning physical activity on well-being in elderly: a pre-post study with a special training protocol. *Healthcare*. (2022) 10:2442. doi: 10.3390/healthcare10122442
34. Walsh LD, Allen TJ, Gandevia SC, Proske U. Effect of eccentric exercise on position sense at the human forearm in different postures. *J Appl Physiol*. (2006) 100:1109–16. doi: 10.1152/japplphysiol.01303.2005
35. Brockett C, Warren N, Gregory JE, Morgan DL, Proske U. A comparison of the effects of concentric versus eccentric exercise on force and position sense at the human elbow joint. *Brain Res*. (1997) 771:251–8. doi: 10.1016/S0006-8993(97)00808-1
36. Weerakkody N, Percival P, Morgan DL, Gregory JE, Proske U. Matching different levels of isometric torque in elbow flexor muscles after eccentric exercise. *Exp Brain Res*. (2003) 149:141–50. doi: 10.1007/s00221-002-1341-0
37. Allen TJ, Leung M, Proske U. The effect of fatigue from exercise on human limb position sense. *J Physiol*. (2010) 588:1369–77. doi: 10.1113/jphysiol.2010.187732
38. Malik J, Głowska N, Jelonek W, Stemplewski R, Maciaszek J. Effect of a juggling-based physical activity on postural stability, reaction time, and attention focus in older adults: a randomized crossover study. *Eur Rev Aging Phys Act*. (2024) 21:15. doi: 10.1186/s11556-024-00351-w
39. Veale JF. Edinburgh handedness inventory - short form: a revised version based on confirmatory factor analysis. *Laterality*. (2014) 19:164–77. doi: 10.1080/1357650X.2013.783045
40. Winter L, Huang Q, Sertic JVL, Konczak J. The effectiveness of proprioceptive training for improving motor performance and motor dysfunction: a systematic review. *Front Rehabil Sci*. (2022) 3:830166. doi: 10.3389/fresc.2022.830166
41. Zwerus EL, Willigenburg NW, Scholtes VA, Somford MP, Eygendaal D, van den Bekerom MP. Normative values and affecting factors for the elbow range of motion. *Shoulder Elbow*. (2019) 11:215–24. doi: 10.1177/1758573217728711
42. Niespodziński B, Mieszkowski J, Sawczyn S, Kochanowicz K, Szulc A, Zasada M, et al. Elbow joint position and force senses in young and adult untrained people and gymnasts. *Int J Environ Res Public Health*. (2022) 19:7592. doi: 10.3390/ijerph19137592
43. Talis VL, Levik YS. Elbow matching accuracy in young and elderly humans under unusual mechanical constraints. *Front Neurosci*. (2016) 10:520. doi: 10.3389/fnins.2016.00520
44. Li K, Wu Y. Clinical evaluation of motion and position sense in the upper extremities of the elderly using motion analysis system. *Clin Interv Aging*. (2014) 9:1123–31. doi: 10.2147/CIA.S62037
45. Cai NM, Dewald JPA, Gurari N. Accuracy of older adults in judging self-generated elbow torques during multi-joint isometric tasks. *Sci Rep*. (2020) 10:13011. doi: 10.1038/s41598-020-69470-5
46. Zhang H, Miao C, Wu Q, Tao X, Shen Z. The effect of familiarity on older adults' engagement in Exergames In: J Zhou and G Salvendy, editors. Human aspects of IT for the aged population. Social media, games and assistive environments. Lecture Notes in Computer Science. Cham: Springer International Publishing (2019). 277–88.
47. Carius D, Andrä C, Clauß M, Ragert P, Bunk M, Mehner J. Hemodynamic response alteration as a function of task complexity and expertise-an fNIRS study in jugglers. *Front Hum Neurosci*. (2016) 10:126. doi: 10.3389/fnhum.2016.00126
48. Puttemans V, Wenderoth N, Swinnen SP. Changes in brain activation during the Acquisition of a Multifrequency Bimanual Coordination Task: from the cognitive stage to advanced levels of automaticity. *J Neurosci*. (2005) 25:4270–8. doi: 10.1523/JNEUROSCI.3866-04.2005
49. Debaere F, Swinnen SP, Snaert S, Van Hecke P. Changes in brain activation during learning of a new bimanual coordination task. *NeuroImage*. (2001) 13:1149. doi: 10.1016/S1053-8119(01)92471-1
50. Debaere F, Wenderoth N, Snaert S, Van Hecke P, Swinnen SP. Changes in brain activation during the acquisition of a new bimanual coordination task. *Neuropsychologia*. (2004) 42:855–67. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2003.12.010
51. GUS. (2021) The situation of older people in Poland in 2020. Available online at: <https://stat.gov.pl/en/topics/older-people/older-people/the-situation-of-older-people-in-poland-in-2020,1,3.html> (Accessed August 5, 2023)
52. Adamo DE, Alexander NB, Brown SH. The influence of age and physical activity on upper limb proprioceptive ability. *J Aging Phys Act*. (2009) 17:272–93. doi: 10.1123/japa.17.3.272
53. Proske U, Gandevia SC. The proprioceptive senses: their roles in signaling body shape, body position and movement, and muscle force. *Physiol Rev*. (2012) 92:1651–97. doi: 10.1152/physrev.00048.2011
54. de Greeff JW, Bosker RJ, Oosterlaan J, Visscher C, Hartman E. Effects of physical activity on executive functions, attention and academic performance in preadolescent children: a meta-analysis. *J Sci Med Sport*. (2018) 21:501–7. doi: 10.1016/j.jsams.2017.09.595
55. Kelly ME, Loughrey D, Lawlor BA, Robertson IH, Walsh C, Brennan S. The impact of exercise on the cognitive functioning of healthy older adults: a systematic review and meta-analysis. *Ageing Res Rev*. (2014) 16:12–31. doi: 10.1016/j.arr.2014.05.002
56. Erickson KI, Hillman C, Stillman CM, Ballard RM, Bloodgood B, Conroy DE, et al. Physical activity, cognition, and brain outcomes: a review of the 2018 physical activity guidelines. *Med Sci Sports Exerc*. (2019) 51:1242–51. doi: 10.1249/MSS.0000000000001936
57. Colcombe S, Kramer AF. Fitness effects on the cognitive function of older adults: a meta-analytic study. *Psychol Sci*. (2003) 14:125–30. doi: 10.1111/1467-9280.t01-1-01430
58. Barha CK, Davis JC, Falck RS, Nagamatsu LS, Liu-Ambrose T. Sex differences in exercise efficacy to improve cognition: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials in older humans. *Front Neuroendocrinol*. (2017) 46:71–85. doi: 10.1016/j.yfrne.2017.04.002

