KJAB
Korean Journal of Applied Biomechanics 2026; 36(1): 19-29
http://dx.doi.org/10.5103/KJAB.2026.36.1.19
http://e-kjab.org eISSN 2093-9752
ORIGINAL

# Upper-lower Limb Differences in Bilateral Isometric Force Control and Coordination for Older Adults

# 노인 양측 힘 조절 및 협응 패턴의 상·하지 간 차이

**Hanall Lee[1,2,3], Nyeonju Kang[1,2,3]**

[1]Department of Human Movement Science, Incheon National University, Incheon, South Korea
[2]Division of Sport Science, Sport Science Institute & Health Promotion Center, Incheon National University, Incheon, South Korea
[3]Neuromechanical Rehabilitation Research Laboratory, Incheon National University, Incheon, South Korea

**Received : 28 January 2026**
**Revised : 19 February 2026**
**Accepted : 19 February 2026**

**Corresponding Author**
**Nyeonju Kang**
Neuromechanical Rehabilitation Research Laboratory/ Division of Sport Science/ Incheon National University, 119 Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon, 22012, South Korea
Email : nyunju@inu.ac.kr

**Objective:** The purpose of the current study was to estimate bimanual force control capabilities and coordination patterns in healthy older adults.

**Method:** Twenty-three healthy older adults performed bimanual isometric force control tasks to estimate force control capabilities and bilateral coordination. We calculated mean force, relative root mean square error (rRMSE), coefficient of variation (%CV), and sample entropy (SampEn) for estimation of force control capability. We used Pearson's correlation coefficient to estimate bilateral coordination. For the statistical analysis, we performed two-way repeated measures analysis of variances (ANOVAs) (Limb × Force level; 2 × 2) on force control capability and bilateral coordination outcome variables.

**Results:** Higher bilateral maximal force values were observed on the upper limbs as compared with the lower limbs. Whereas, no significant differences were found between the upper and lower limbs on mean force. For the force accuracy, upper-limb showed significantly higher rRMSE value than the lower-limbs. Force variability (%CV) failed to show any significant difference between upper- and lower-limb. For the force regularity, the upper-limbs demonstrated higher SampEn value than the lower-limbs at both low and high force levels. Finally, bilateral coordination analysis revealed significantly higher correlation coefficient values in the upper-limbs as compared with lower-limbs.

**Conclusion:** These findings suggest that partially shared potential motor control mechanisms between upper- and lower-limbs may affect bilateral movement control. Further, distinct patterns of bilateral force control and coordination between upper- and lower limb may exist in older adults.

**Keywords:** Older adults, Upper-limb, Lower-limb, Force control, Bilateral force coordination

## INTRODUCTION

상지 및 하지의 양측 힘 조절 능력은 일상생활을 수행하는 데 요구되는 중요한 운동 기능이다(Kang & Cauraugh, 2015a; Lee, Lee & Kang, 2024; Lee & Kang, 2025). 양손을 이용한 힘 조절의 경우 운전, 타이핑 및 물병을 여는 동작에 필수적

Copyright © 2026 Korean Journal of Applied Biomechanics
This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

으로 요구되며(Kim, Lee, Kang & Cauraugh, 2021), 양발의 경우 걷기, 달리기 및 계단 오르기 동작에 힘 조절 능력이 동반된다(Lacquaniti, Ivanenko & Zago, 2012). 원활한 양측 운동 협응을 위해서는 말초, 중추 및 감각-운동 통합 능력과의 원활한 상호작용이 요구된다(de Campos, Sukal-Moulton, Huppert, Alter & Damiano, 2020). 특히 노인의 상지와 하지 양측 힘 조절 능력은 노화에 의해 전반적인 저하가 발생하며(Kang, Roberts, Aziz & Cauraugh, 2019; Ko, Lee, Lee & Kang, 2025), 이는 일상생활 수행력의 저하로 이어질 수 있다(Gale, Martyn, Cooper & Sayer, 2007; Hortobágyi, Mizelle, Beam & DeVita, 2003). 또한 노화로 인하여 양측 협응 능력에 비정상적인 변화가 발생될 수 있으며, 이는 양측 간 조화로운 움직임을 원활히 생성하는 데 어려움이 발생할 수 있다(Hu & Newell, 2011; Krehbiel, Kang & Cauraugh, 2017).

최근 선행연구에서는 건강한 성인을 대상으로 한 양측 등척성 힘 조절 과제를 통해 상·하지 간 힘 조절 및 협응 패턴의 차이를 확인하였으며, 하지가 상지보다 높은 힘 정확성, 낮은 힘 가변성 및 강한 역위상(anti-phase) 힘 조절 패턴을 보인다고 보고하였다(Lee & Kang, 2025). 추가로 상·하지 양측의 힘 조절 변인 간 상관관계에서도 통계적으로 유의한 결과가 관찰되었다(Lee & Kang, 2025). 이는 운동 시스템의 상·하지 간 양측 힘 조절 제어 기전이 일부 공유될 수 있음을 의미하며, 동일한 힘 조절 과제를 수행할 경우 상·하지 간 유사한 힘 조절 양상이 나타날 수 있다(Lee & Kang, 2025). 하지만 노인의 경우 상·하지의 기능적 특성 및 근육 내 특성의 변화로 인해 노화에 따른 상·하지 간 힘 조절 능력의 차이가 반영될 수 있다(Pethick & Piasecki, 2022; Pethick, Taylor & Harridge, 2022). 예를 들어 상지의 근력의 감소가 상대적으로 하지에 비해 크게 보고된 바 있다(Abe, Loenneke, Thiebaud & Fukunaga, 2014; Sousa, Mendes, Abrantes & Sampaio, 2011). 이는 노화로 인한 힘 조절 능력의 감소가 운동신경의 사멸과 그에 따른 근섬유 재지배(reinnervation)로 인해 하나의 운동단위가 지배하는 근섬유 수가 증가하는 운동단위 특성 변화와 연관되며, 이러한 변화로 인해 상지의 힘 생성 시 상대적으로 높은 힘 가변성과 신경 잡음이 발생하여 하지에 비해 미세 힘 조절 능력의 저하가 더욱 두드러질 수 있음을 의미한다(Lee, Park & Kang, 2022; Pethick & Piasecki, 2022). 반면, 하지의 경우 상대적으로 상지에 비해 자세 조절 및 큰 반복적 움직임에 더 많이 관여하며, 근력 감소 또한 상지에 비해 상대적으로 적게 관찰된다(Bai et al., 2016). 따라서 하지의 경우 상지에 비해 높은 힘을 생성하는 활동(예: 무게중심 유지, 걷기, 달리기 등)에 주로 관여하기 때문에, 높은 힘을 요구하는 힘 조절 과제에서 상지보다 힘을 유지하는 능력이 보다 안정적으로 나타날 수 있다(Sousa et al., 2011). 종합해 보면 노화에 의한 상지의 기능 저하는 미세 조작과 연결되며 하지의 기능 저하는 자세 유지, 중심 및 걷기에 부정적인 영향을 줄 수 있기 때문에 서로 다른 기능적 차이에 의한 양측 힘 조절 능력 및 협응 패턴 간 차이가 발생될 수 있음을 의미한다(Pethick & Piasecki, 2022; Pethick et al., 2022).

일반적으로 양측 움직임은 뇌의 양측 반구 운동 관련 영역 및 피질하 구조의 협응을 통해 제어가 이루어지나(de Campos et al., 2020; Luft et al., 2002), 상·하지의 각각 움직임은 기능적 특성에 따라 서로 다른 신경적 조절 전략이 이루질 수 있다. 상지는 정밀한 움직임이 동반되는 물체 조작 및 미세 조절에 관여하며, 피질-척수로의 제어를 통해 정교하며 유연한 힘 조절이 가능하다(Volz, Eickhoff, Pool, Fink & Grefkes, 2015). 반면, 하지는 중추 패턴 발생기(central pattern generator)를 통해 중심 유지 및 보행과 같은 자동화된 움직임 제어 기전에 대한 의존도가 높은 특성을 가질 수 있다(Volz et al., 2015). 특히 노인들에게서 시각-운동 통합(visuomotor integration) 능력의 저하가 공통적으로 관찰되며(Gómez-Granados et al., 2021), 근육의 특성 또한 Type II 근섬유에서 Type I 근섬유 비율이 증가하게 되어 높은 힘이 요구되는 운동 과제에서 감소된 수행력을 보인다(Dowling, Gargan, Swandulla & Ohlendieck, 2023; Lexell, 1995). 상지의 기능적 움직임 특성을 고려해 볼 때 노화는 미세 조작 기능의 저하 및 힘 생성에 있어 가변성 증가에 영향을 미칠 수 있다(Coats & Wann, 2012; Simon-Martinez et al., 2018). 선행연구에 따르면 노인들의 경우 손가락 두드리기, 물체 닿기, 오른손-왼손 순서에 따른 손가락 엄지 맞대기(finger-to-thumb)와 같은 양손이 동반된 움직임 미세 조작 과제에서 정확성의 저하가 관찰되었으며(Coats & Wann, 2012; Dickins, Sale & Kamke, 2015; Loehrer et al., 2016), 노인들의 양손 힘 조절 과제 시 건강한 성인들에 비해 높은 힘 가변성 및 오차가 보고되었다(Fling & Seidler, 2012). 하지의 경우, 지면을 밀고 딛는 동작과 연관된 힘 생성을 통한 걷기 및 자세의 유지와 관련이 있으며, 노화는 하지의 기능적 능력들의 저하를 불러일으킬 수 있다(Franz, 2016; Jeon, Ramadan, Whitall, Alissa & Westlake, 2023). 실제로 노인들의 보행에서 속도 감소, 불안정한 신체중심 궤적(center of mass trajectory), 짧은 이중 지지기(double-support duration) 및 양다리 간 빈번한 위상 이동이 보고되었으며(Alijanpour & Russell, 2025; Krasovsky et al., 2012), 양발 힘 조절 과제에서 건강한 성인에 비해 높은 힘 오차와 가변성이 보고되었다(Ko et al., 2025). 이러한 선행연구들을 종합해 볼 때 하지 간 기능적인 특성이 분명 다르게 존재하며(Lee & Kang, 2025), 신경생리학적 변화를 겪는 노인의 양측 힘 조절 능력은 상·하지 기능적 특성에 따라 저하된 형태로 나타날 수 있음을 의미한다(Jin, Seong, Cho & Yoon, 2019; Ko et al., 2025). 그러나 노인을 대상으로 양측 등척성 힘 조절 과제를 통해 상·하지 간 양측 힘 조절 능력과 힘 협

응 패턴을 직접 비교·분석한 연구는 아직 부족한 실정이다.

따라서 본 연구의 목적은 노인을 대상으로 양측 등척성 힘 조절 과제를 수행하여 상지와 하지 간 양측 힘 조절 능력 및 힘 협응 패턴의 차이를 직접 비교·분석하는 데 있다. 더 나아가 본 연구는 상·하지의 특성에 따른 양측 움직임을 향상시키는 사지 특이적(limb-specific) 재활 프로토콜 개발에 필요한 기초 자료를 제공하고자 한다. 노화가 노인의 상지 및 하지의 기능적 특성에 따라 힘 조절 능력과 협응 능력의 저하를 초래할 수 있다는 점을 고려할 때(Jin et al., 2019; Ko et al., 2025), 양측 힘 조절 과제 시 전반적으로 감소된 힘 정확성, 높은 힘 가변성 및 낮은 힘 규칙성이 나타날 것이다. 특히 높은 힘 수준에서 상지가 하지에 비해 더욱 저하된 양측 힘 조절 능력 변인이 관찰될 것이다. 또한 상·하지 모두 동위상 양측 힘 조절 협응 패턴이 나타날 것이며, 상대적으로 상지에 비해 하지의 협응 능력 저하가 더 크게 나타나 상·하지 간 협응 패턴의 차이는 유의하지 않을 것으로 가설 설정하였다(Kang et al., 2019).

## METHODS

### 1. 연구 대상자 특성

본 연구에 필요한 적절한 피험자 수 산정을 위해, 파일럿 데이터 기반으로 G*Power software (version 3.1.9.6)를 통해 사전 검정력 분석(a priori power analysis)을 실시하였다. 검정력 0.9 이상 및 유의 수준 0.05를 기준으로 피험자 내 반복 측정 설계에서 최소 22명의 참여자가 필요한 것으로 확인되었다. 모든 참가자들은 등척성 힘 조절 과제를 진행하는 데 있어 신경학적 질환, 약물복용, 시력 및 근골격계 손상이 없음을 확인하였으며, 실험 24시간 전 카페인 섭취 및 과도한 신체 활동을 제한하였다(Lee, Lee, Lee, Ko & Kang, 2023). 본 연구를 진행하는 데 있어 헬싱키 선언(Declaration of Helsinki) 조항 준수 및 인천대학교 생명윤리위원회(7007971-202006-002A)의 연구 프로토콜 승인에 따른 실험이 수행되었다. 실험에 참여하는 모든 연구 대상자들에게 자세한 실험 과정 설명이 제공되었으며 동의서 작성 전 자발적 참여 의사를 확인하였다.

### 2. 실험 절차

#### 1) 등척성 양측 힘 조절 과제

양손 및 양발 힘 조절 과제를 실시하기 위해 자체 개발된 등척성 악력 측정 장비(isometric hand-grip force measurement system; SEED Technology Inc., South Korea) 및 발목 배측굴곡 힘 측정 장비(isometric ankle-dorsiflexion force measurement system; SEED Technology Inc., South Korea)가 사용되었다. 양손 힘 조절 과제를 진행하는 데 있어 피험자들은 편한 자세로 54.6 cm LED 모니터로부터 80 cm 떨어져 앉았으며, 어깨관절 굽힘 15-20° 및 팔꿈치관절 굽힘 20-45°를 유지한 상태로 악력 측정 장비의 양측 손잡이를 잡도록 지시하였다(Figure 1A). 손잡이에 내장된 힘 변환기를 통해 모든 힘 신호는 16-bit 아날로그-디지털 컨버터(A/D; ADS1148 16-bit 2 kSPS, 최소 감지 힘 = 0.0192 N)를 사용하여 200 Hz로 데이터를 수집하였다. 또한 5 V 전압의 INA122 (Texas Instruments Inc., Dallas, TX, USA)를 사용하여 증폭되었으며, Microsoft Visual C++ 프로그램(Microsoft Corp., Redmond, WA, USA)을 통해 개발된 소프트웨어를 이용하여 시각 정보 및 힘 신호를 수집하였다.

양발 힘 조절 과제의 경우 피험자들은 바닥에 고정된 힘 변

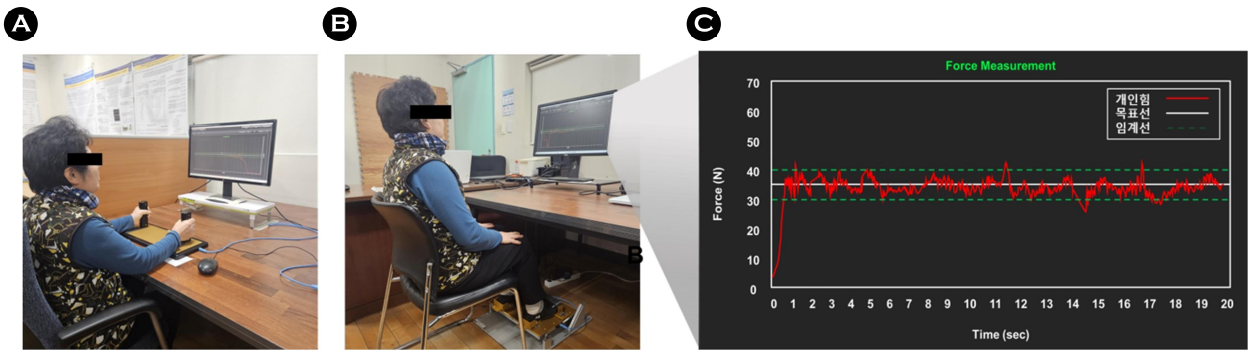


**Figure 1.** Bilateral force control task. (A) Bimanual hand-grip force control position. (B) Bilateral ankle-dorsiflexion force control position. (C) Visual feedback on the screen during bilateral isometric force control task. The red line indicates sum force production from left and right limbs. The White line represents a target force, and green dotted line refers 10% threshold of targeted force level.

환기(Micro Load Cell-CZL635-3135, range = 330 lbs, Phidgets Inc., Calgary, Canada)가 내장된 플랫폼에 편한 자세(knee flexion 90-100°, hip flexion 90-95°, and ankle dorsiflexion 90°; Figure 1B)로 발을 넣어 진행하였다. 양발 힘 조절 과제 중 하지관절에 따른 불필요한 움직임을 최소화하기 위해 피험자의 중족(metatarsal) 너비 및 높이에 맞춰 철로 이루어진 스트랩을 통해 발을 고정하였다. 또한 모든 피험자들은 개인의 발 크기에 맞는 동일한 신발을 착용하여 양발 힘 조절 과제를 진행하였으며, 위와 같은 조건에서 발목 배측굴곡 동작에 의한 등척성 힘이 스트랩을 통해 측정되었다.

양측 힘 조절 과제를 실시하기 전, 목표 힘 수준 설정을 위해 피험자들은 상·하지에 따른 최대 자발적 수축(maximum voluntary contraction; MVC) 측정을 수행하였다. 이전 선행연구의 프로토콜에 따라 총 2번의 시도를 통해 상지의 경우 양측 전완 굴곡근, 그리고 하지의 경우 양측 전경골근 수축으로부터 생성되는 합력의 최대값 평균을 계산하였으며, 각 시도 내(within-trial) 5초 및 시도 간(between-trial) 피로를 최소화하기 위해 60초의 휴식 시간을 제공하였다(Lee & Kang, 2025). 개인의 최대하 목표 힘 수준은 각각 10%와 40% MVC로 설정하였다. 양측 힘 조절 과제는 힘 수준이 반영된 1개의 블록당 10번의 시도로 이루어진 총 4개의 블록이 랜덤으로 제공되었다. 힘 조절 과제 시 스크린을 통해 제공되는 시각 정보는 다음과 같다(Figure 1C): (a) 개인의 양손 또는 양발의 합력으로 이루어진 실시간 힘 생성을 나타내는 빨간색 선, (b) 개인이 힘 생성을 통해 도달해야 되는 흰색 선으로 이루어진 목표선, (c) 개인의 힘 생성을 가이드 해주는 목표선의 10% 임계로 이루어진 초록색 점선. 즉, 양측 힘 조절 과제의 목표는 개인의 힘 생성을 통해 목표선에 최대한 가까이 20초 동안 유지하는 것이다. 또한 힘 조절 과제 시 발생될 수 있는 피로를 최소화하기 위해 시도 및 블록 간 각각 30초와 1분의 휴식 시간을 제공하였다.

## 3. 자료 분석

### 1) 양측 힘 조절 능력 평가

힘 데이터 분석에 Matlab R2022a (Math Works™ Inc., Natick, United States)를 이용하였으며, 시계열에 있어 발생될 수 있는 불필요한 잡음을 제거하기 위해 양방향 4차 버터워스 필터(bidirectional fourth-order Butterworth filter)를 이용하여 30 Hz cut-off 저역통과 필터링을 실시하였다. 또한 초기 조정 효과 및 종료 효과를 고려하여 시작 3초와 마지막 1초의 힘 데이터 구간을 제외한 중간 16초 구간을 분석하였다. 양측 등척성 힘 조절 능력은 힘 정확성, 가변성 및 규칙성으로 평가하였다. 상지 및 하지에 따른 힘 생성 정도의 차이를 표준화하기 위해 힘 정확성과 힘 가변성 분석에 있어서 상대 평균 제곱근 오차(rRMSE = RMSE / 목표 힘) 및 변동계수(CV% = 힘 표준편차 / 평균 힘 × 100)를 사용하였다. 힘 규칙성의 경우 SampEn을 사용하여 분석하였으며, 계산 방법은 다음과 같다(Equation 1).

$$\mathrm{SampEn}(x, m, r, N) = \ln[\frac{C_m(r)}{C_{m+1}(r)}] \quad (1)$$

$m$은 특정 패턴의 길이, $r$은 시계열 안 유사성 허용 오차 기준, $Cm(r)$은 길이가 $m$인 패턴이 서로 유사하게 반복해서 나타나는 확률을 의미하며 자기자신과의 비교(self-match)는 제외하였다(Richman & Moorman, 2000). 또한 선행연구에 따라 $m$의 값을 2로 설정하고 $r$ = 0.2 × 힘 데이터의 표준편차로 설정하였다(Yentes et al., 2013). 즉, 힘 시계열 데이터에서 길이가 정해진 $m$인 힘 패턴이 주어진 허용 오차 $r$ 내에서 다른 시점의 패턴과 얼마나 자주 반복되는지를 의미한다(Richman & Moorman, 2000; Yentes et al., 2013). 양측 힘 협응 능력은 피어슨의 상관계수를 통해 좌측과 우측에 따른 힘의 크기 변화 패턴을 평가하였다(Hu, Loncharich & Newell, 2011; Kang & Cauraugh, 2015b). 양측 등척성 힘 조절 모델에서, 상관계수의 값이 양의 방향에 가까울수록(e.g., $0 < r \leq 1$) 양손 및 양발 간 힘 생성이 동위상 패턴(in-phase pattern)과 연관되며, 이는 저하된 힘 조절 수행 능력을 의미한다. 반면, 상관계수가 음의 방향에 가까울수록(e.g., $-1 \leq r < 0$) 양손 및 양발 간 힘 생성이 역위상 패턴(anti-phase pattern)을 나타내며, 이는 향상된 힘 조절 능력과 연관될 수 있다(Hu et al., 2011; Kang & Cauraugh, 2014, 2015b).

## 4. 통계 처리

통계 분석 실시 전, 데이터의 정규성을 검증하기 위해 힘 조절 능력 결과 변인에 대해 Shapiro-Wilk 검정을 사용하였다. 상·하지 간 MVC 차이를 비교하기 위해 대응 표본 $t$-검정을 실시하였다. 노인들의 힘 조절 능력 및 양측 힘 협응 패턴의 차이를 비교하기 위해 Limb(상지, 하지)와 Force level (10%MVC, 40%MVC)을 대상자 내 독립변인으로 설정하여 이원 반복 측정 분산분석(two-way repeated measures ANOVAs; Limb × Force level; 2 × 2)을 실시하였다. 다음으로 통계적 유의성이 확인되었을 경우 사후 검정 분석으로 Bonferroni pairwise comparison을 실시하였다. 또한 통계적으로 유의미한 결과 크기 및 실질적 중요성을 평가하기 위해 효과크기(effect size)를 산출하였다. 대응 표본 $t$-검정 및 사후 분석 결과에 대해 Cohen's $d$를 사용하였으며, $0.2 \leq d < 0.5$는 작은 효과크기, $0.5 \leq d < 0.8$은 중간 효과크기, $d \geq 0.8$은 큰 효과크기로 해석하였다(Panzarella, Beribisky & Cribbie, 2021). 모

든 통계 분석의 유의 수준은 .05로 설정되었으며, IBM SPSS Statistics 28 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA) 프로그램을 사용하였다.

## RESULTS

### 1. 연구대상자 특성

본 연구에는 총 23명의 건강한 노인이 참여하였다(여성: 12명; 남성: 11명; 나이 = 64.80±3.91). 대상자 모집, 선별 및 최종 분석에 포함된 과정은 CONSORT flow chart에 제시하였다(Figure 2).

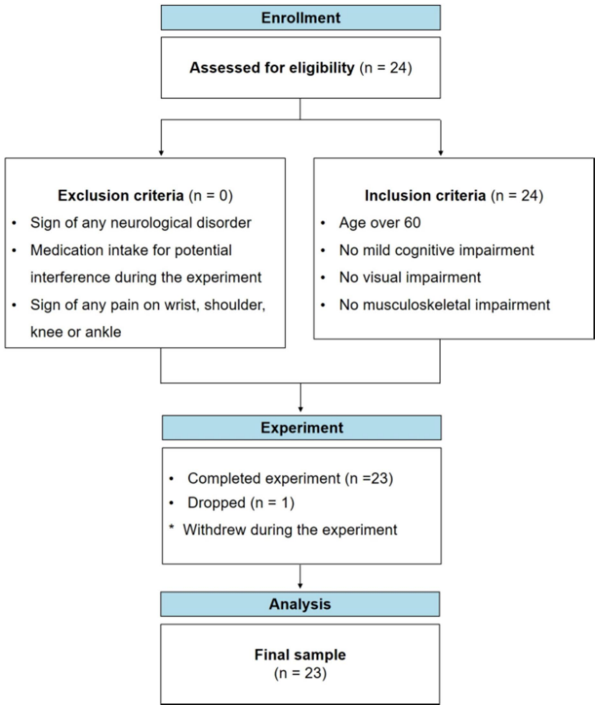


**Figure 2.** Consort flow diagram.

### 2. 상·하지 양측 힘 조절 능력

상·하지 간 MVC에 대한 대응 표본 $t$-검정 결과 상지의 MVC 값이 하지보다 더 높게 나타났으며($t_{22}$ = 2.369; $p$ = .027; Cohen's $d$ = 0.35; Figure 3A), 이는 작은 효과크기에 해당한다. 하지만 평균 힘(mean force)에 대한 분산분석 결과 유의미한 Limb × Force level 상호작용효과($p$ = .993) 및 사지 간 주효과($p$ = .539)가 관찰되지 않았다. 하지만 힘 수준 간 주효과[$F$(1, 22) = 186.372; $p$ < .001; partial $\eta^2$ = 0.894; Figure 3B]가 관찰이 되었다. 이는 높은 힘 수준 조건이 낮은 힘 수준 보다 높은 평균 힘을 나타내었으며, 큰 효과크기가 관찰되었다(Cohen's $d$ = 3.09). 힘 정확성(rRMSE)에 대한 이원 반복 측정 분산분석에서 Limb × Force level 상호작용효과($p$ = .593)는 관찰되지 않았으나, 사지 간 주효과가 확인되었다[$F$(1, 22) = 7.030; $p$ = .015; partial $\eta^2$ = 0.242; Figure 4A]. 이는 상지의 힘 정확성이 하지보다 더 낮게 나타났으며, 중간 효과크기를 나타내었다(Cohen's $d$ = 0.55). 반면 힘 가변성(%CV)의 경우 Limb × Force level 상호작용효과($p$ = .993) 및 사지 간 주효과 모두 관찰되지 않았다[$F$(1, 22) = 2.036; $p$ = .168; partial $\eta^2$ = 0.085; Figure 4B]. 마지막으로 힘 규칙성(SampEn)의 경우, Limb × Force level 상호작용 효과가 확인되었다[$F$(1, 22) = 46.837; $p$ < .001; partial $\eta^2$ = 0.680; Figure 4C]. 사후 검정 결과에 따르면 힘 수준이 낮아짐에 따라 상지의 힘 규칙성이 하지보다 낮게 나타났으며, 이는 큰 효과크기를 나타내었다(Cohen's $d$ = 5.70). 또한 힘 수준이 높아짐에 따라 상지의 힘 규칙성이 하지보다 낮게 관찰되었으며($p$ < .001), 마찬가지로 큰 효과크기가 확인되었다(Cohen's $d$ = 2.02).

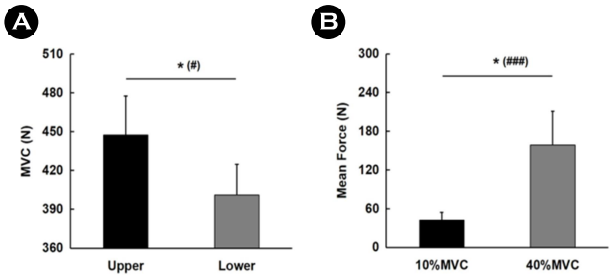


**Figure 3.** Bilateral isometric force production. (A) Maximum voluntary contraction (MVC). (B) Mean force. Asterisk (*) denotes significant difference between upper- and lower-limbs ($p$ < .05). Number sign (#) represents level of effect size (# = small effect; ## = medium effect; ### = large effect).

### 3. 상·하지 양측 힘 협응 패턴

피어슨의 상관계수에 대한 이원 반복 측정 분산분석 결과 Limb × Force level 상호작용효과($p$ = .952)는 관찰되지 않았으나, 유의미한 사지 간 주효과가 확인되었다[$F$(1, 22) = 17.181; $p$ < .001; partial $\eta^2$ = 0.438; Figure 5]. 사후 검정 결과에 따르면 상지의 상관계수 값이 하지보다 더 높게 나타났으며, 이는 낮은 효과크기가 관찰되었다(Cohen's $d$ = 0.29). 즉, 양측 힘 조절 시 상지보다 하지에서 더 강한 역위상 움직임 패턴을 보이는 것을 의미한다.

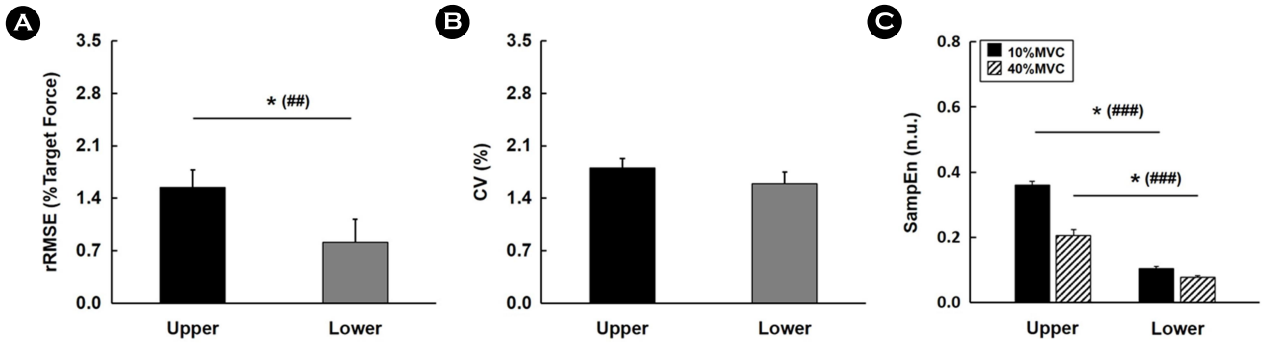


**Figure 4.** Bilateral isometric force control capabilities. (A) force accuracy (rRMSE). (B) Coefficient of variation (CV). (C) force regularity (SampEn). Asterisk (*) denotes significant difference between upper- and lower-limbs ($p$ < .05). Number sign (#) represents level of effect size (# = small effect; ## = medium effect; ### = large effect).

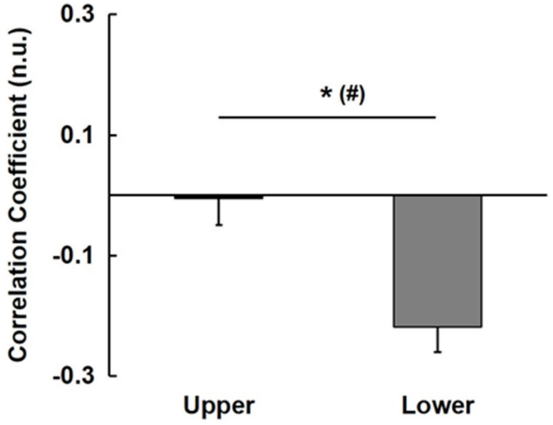


**Figure 5.** Bilateral force coordination pattern. Pearson's correlation coefficient. Asterisk (*) denotes significant difference between upper- and lower-limbs ($p$ < .05). Number sign (#) represents level of effect size (# = small effect; ## = medium effect; ### = large effect).

## DISCUSSION

본 연구에서 양측 등척성 힘 조절 과제를 통한 노인들의 양측 힘 조절 능력 및 양측 힘 협응 패턴을 상·하지 간 비교하였다. 양측 등척성 힘 생성 결과의 경우 최대 힘 생성에 있어 상지가 하지에 비해 유의하게 더 높게 나타났으며, 평균 힘에서 상·하지 간 차이는 나타나지 않았다. 양측 힘 조절 능력 분석 결과 상·하지 간 가변성의 차이는 나타나지 않았으나, 힘 정확성의 경우 상지가 하지보다 더 낮게 나타났으며, 힘 규칙성의 경우 상지가 하지보다 더 높게 관찰되었다. 추가적으로 양측 힘 협응 패턴의 경우 상지에서 더 높은 상관계수 값을 보였다.

양측 등척성 힘 생성 시 상·하지 간 평균 힘의 차이는 발견되지 않았으나 상지에서 유의하게 큰 최대 자발적 수축값이 확인되었다. 이는 양측 등척성 힘 생성 시 상·하지에 동원되는 각각 다른 근육군의 특성이 반영되었을 수 있으며, 일반적으로 근육 내 높은 비율의 Type II 근섬유로 구성되어 있을 경우 더 높은 최대 힘을 생성할 수 있다(Kim & Thompson, 2014). 실제로도 전완근 내 Type II 근섬유 비율이 하지의 배측굴곡근 비율보다 23.7% 더 높다는 점을 고려해 볼 때 (Dahmane, Djordjevic, Simunic & Valencic, 2005), 상지의 악력을 통한 최대 자발적 근수축값이 하지의 발목 배측굴곡보다 더 높게 나왔다고 사료된다. 반면 양측 등척성 힘 조절 과제 시 측정된 평균 힘의 경우 상·하지 간 유의미한 차이가 나타나지 않았다. 이는 노화가 진행됨에 따라 근육 내 빠른 수축 특성을 지닌 Type II 근섬유의 비율이 낮아지게 되고 상대적으로 지구력에 유리한 Type I 근섬유의 비율이 올라갈 수 있다(Lexell, 1995). 특히 상대적으로 큰 근육군에서의 근섬유 비율 변화가 작은 근육군보다 강조될 수 있으며(Messa et al., 2020), 본 연구에서 상·하지 간 준최대하 힘 생성을 통한 양측 등척성 힘 조절 시 전완근과 배측굴곡근의 평균 힘 생성 간극이 줄어들 수 있다 사료된다.

양측 힘 조절 능력 분석 및 비교 결과, 힘 정확성의 경우 상지보다 하지에서 유의하게 더 높게 나타났다. 선행연구에 따르면 동일한 양측 등척성 힘 조절 과제에서 건강한 성인일 경우 높은 힘 수준인 40% MVC에서 하지보다 상지에서 유의미하게 낮은 힘 정확성이 관찰되었다(Lee & Kang, 2025). 이를 본 연구의 결과와 비교하였을 때 상지와 하지 간 힘 정확성의 차이가 관찰되는 경향을 보였으나, 노인은 노화로 인한 상지 전완근의 Type II 근섬유 비율 감소가 발생 할 수 있으며(Lexell, 1995), 이는 힘을 지속적으로 출력하는데 힘 조절 수행 능력의 저하가 발생 할 수 있다고 생각된다. 또한 노인들의 시각-운동 통합 능력의 저하는 특히 상지 움직임에 있어 감각피드백을 활용한 미세 조절에 부정적인 영향을 미쳐

정확한 힘을 생성하는데 어려움이 발생할 수 있다(Pethick et al., 2022; Wolpe et al., 2016). 실제 본 연구에선 상·하지 간 힘 정확성 차이의 크기를 나타내는 효과크기(i.e., Cohen's *d*)의 값이 0.55로 나타났으며, 젊은 성인으로 상하지 간 힘 정확성의 차이를 본 선행연구에선 추정되는 효과크기의 값이 0.29로 확인되었다(Lee & Kang, 2025). 이러한 결과는 노인의 상·하지 간 힘 정확성의 격차가 상대적으로 젊은 성인에 비해 더 큰 수준에 해당한다. 상·하지 기능적 특성 차이에 의해 힘 정확성의 격차가 발생할 수 있으나, 본 연구에서 관찰된 효과크기의 증가는 힘을 제어하는데 있어 노화에 의해 오류 수정 메커니즘이 사지 특이적으로 변화 할 수 있음을 의미하며, 특히 상지에서 보다 강조된 기능 저하가 발생될 가능성을 간접적으로 뒷받침 할 수 있다(Pethick et al., 2022; Wolpe et al., 2016). 다음 변인인 양측 힘 가변성의 경우 상·하지 간 차이가 발생하지 않았다. 선행연구에 따르면 건강한 성인의 경우 양측 등척성 힘 조절 과제 시 높은 힘 수준에서 상지의 힘 가변성이 하지에 비해 유의미하게 높게 보고되었다(Lee & Kang, 2025). 이는 하체의 힘 조절 능력이 더 높은 힘을 생성해야 되는 활동 및 지속 시간이 연장된 활동(long-lasting activities)에 보다 많이 관여될 수 있는 점을 고려해 볼 때 상지에 비해 유리한 힘 조절 능력을 보이게 될 수 있다(Kern, Semmler & Enoka, 2001). 하지만 노화가 발생된 노인의 경우 10-20% MVC와 같은 낮은 힘 수준 조건에서 등척성 힘 조절을 하였을 때 건강한 성인에 비해 높은 힘 가변성이 보고되었다(Lee et al., 2022; Tracy & Enoka, 2002). 힘 가변성이 증가하는 잠재적 이유는 노화에 따른 운동신경 특성의 저하 및 신경 전달에 있어 시냅스 잡음 증가가 원인이 될 수 있으며, 낮은 힘 수준에서 수행되는 등척성 힘 조절 과제 시 운동단위 발화율의 변동성이 크게 나타날 수 있다(Kwon & Christou, 2024; Laidlaw, Bilodeau & Enoka, 2000). 특히 하지의 발목 배측굴곡근 또한 같은 노화의 영향을 받을 수 있다는 점을 고려해 볼 때 상지에서 발생되는 힘 가변성과의 차이가 줄어들게 되어 상·하지 간 힘 가변성의 차이가 관찰되지 않은 것으로 생각된다.

반면, 힘 규칙성의 경우 낮은 힘 수준 및 높은 힘 수준 조건 모두 상지가 하지에 비해 낮은 힘 규칙성을 보였다. 이는 상지 및 하지의 기능적 특성이 관찰된 결과로 볼 수 있다(Volz et al., 2015). 상지는 시각 피드백의 활용을 통한 물체의 잡기 및 정밀한 조작과 연관된 움직임에 많이 관여가 되며, 하지의 경우 고유수용감각 및 척수 반사를 통한 자세 유지와 연관된 움직임에 더 많이 관여한다(Pérez, 2023; Volz et al., 2015). 이러한 기능적 차이를 고려할 때, 양측 힘 조절 과제의 특성상 시각 피드백을 통한 지속적인 힘 조절 요구가 상지가 하지에 비해 더 크게 작용하여, 양측 힘 조절 과제 시 상지에서 시각 피드백 정밀 조작 능력이 더 크게 반영이 되었을 수 있다(Lee & Kang, 2025). 추가로 큰 근육은 작은 근육에 비해 같은 힘을 생성할 경우 더 넓은 범위의 운동단위들이 동원될 수 있으며, 실제로도 무릎 신전근과 첫째 손가락 굽힘근과 비교하였을 때 상대적으로 큰 근육군인 무릎 신전근에서 더 약한 운동단위 동기화 패턴 및 낮은 힘 가변성이 보고되었다(Kim et al., 2001; Tracy, Mehoudar & Ortega, 2007). 이는 상대적으로 큰 근육군인 전완근이 더 넓은 범위의 운동단위를 동원할 수 있으며, 작은 근육군인 발목 배측굴곡근에 비해 더 많은 운동 해법(motor solution)을 사용하여 높은 운동 적응성(motor adaptability)을 통해 양측 등척성 힘 조절 과제를 수행할 수 있다고 사료된다(Newell, Vaillancourt & Sosnoff, 2006).

마지막으로 양측 힘 협응 패턴의 경우 하지가 상지보다 더 강한 역위상 협응 패턴을 보여주었다. 일반적으로 양측 등척성 힘 조절 과제에서 역위상 협응 패턴은 좌측과 우측의 상보적인 힘 조절 관계로 지속적인 오류 수정을 통한 향상된 양측 힘 조절 수행에 기여한다고 알려져 있다(Hu et al., 2011; Lee et al., 2024). 원활한 양측 협응적 움직임과 연관된 핵심적 뇌 영역 중 하나는 양쪽 반구 간 신경 연결을 제어하는 뇌량이다(Richmond & Fling, 2019). 상지 및 하지 각각에 따른 성공적인 협응적 움직임을 수행하기 위해서는 뇌량 내 활성 및 신경 연결성이 중요하게 고려될 수 있다(Gooijers & Swinnen, 2014). 실제 선행연구에 따르면 양손 및 양발 두드리기 과제를 통해 뇌량의 섬유 경로를 시각화해 보았을 때 상지의 뇌량 연결은 상대적으로 길고 측면으로 퍼졌으며, 하지의 뇌량 연결은 척수 경로와 가까운 중앙에 위치함을 확인하였다(Gooijers et al., 2021). 이러한 결과는 하지의 협응이 상대적으로 상지에 비해 보다 자동화된 움직임과 연관될 수 있으며, 구조적 및 기능적으로 척수 경로와 가까운 점을 고려해 볼 때 상지에 비해 더 강한 신경 연결성이 발생될 수 있음을 의미한다(Gooijers et al., 2021). 실제 하지의 움직임 특성을 고려해 볼 때 일상생활에서 상지에 비해 역위상 움직임이 상대적으로 더 많이 사용될 수 있다(Grimmer, Elshamanhory & Beckerle, 2020). 즉 걷기, 달리기 및 자전거 페달 밟기와 같은 움직임은 좌측과 우측 다리의 교대적인 조정을 만들게 되며 역위상 움직임에 많이 노출된다는 것을 의미할 수 있다(Hiraoka, 2021). 마찬가지로 젊은 성인 또한 양측 등척성 힘 조절 과제에서 하지의 양측 협응 패턴이 상지보다 더 강한 역위상 협응 패턴을 보였다(Lee & Kang, 2025). 하지만 노화가 발생할 경우 저하된 운동 시스템은 힘 조절 과제를 수행하기 위해 역위상 힘 협응을 사용하는 것보다 내재적으로 안정적인 동위상 힘 협응 패턴으로 변할 수 있다(Hu & Newell, 2011; Kang et al., 2019). 또한 이를 뒷받침할 선행연구의 결과로써 노인의 경우 양손가락을 이용한 등척성 힘 조절 과제에서 젊은 성인에 비해 유의미하게 더 강한 동위상 패턴이

보고되었다(Jin et al., 2019). 따라서, 노인들의 양측 힘 협응 패턴의 경우 본 연구의 가설로서 양측 힘 조절 과제 수행 시 힘 수준이 올라가게 될 경우 상·하지 모두 동위상에 가까운 협응 패턴이 생성되어 상·하지 간 차이가 발생하지 않을 것으로 예상하였으나, 실제 본 연구의 결과와는 일치하지 않았다. 선행연구에 따르면 과제의 난이도가 올라가게 될 경우(i.e., 더 높은 힘 수준의 증가, 시각 정보의 조절 및 이중 과제 제공) 양손 등척성 힘 조절 협응 패턴이 동위상으로 변환된다는 점을 고려해 볼 때 본 연구에서 진행된 양측 등척성 힘 조절 과제가 노인들의 양측 힘 협응 패턴을 동위상으로 변화시키기에 과제의 난이도 수준이 낮았을 수 있다고 사료된다(Hu & Newell, 2011; Jin et al., 2019). 따라서 추후 연구에는 과제의 난이도 향상에 따른 노인들의 상·하지 간 협응 패턴의 양상을 관찰해 볼 필요가 있음을 제안할 수 있다(Hu & Newell, 2011; Kang et al., 2019).

본 연구를 통해 노인들의 양측 힘 조절 과제 시 상·하지에 따른 힘 조절 능력 및 양측 협응 패턴의 차이에 대한 분석이 이루어졌으나, 이에 따른 결과는 신중히 해석될 필요성이 있으며 제한점은 다음과 같이 제시될 수 있다. 첫째, 노인들의 양측 악력 및 발목 배측굴곡근을 통한 상·하지 간 양측 힘 조절 능력의 비교를 실시하였으나 상·하지에 따른 다른 근육군 간 비교(e.g., wrist vs. knee or finger vs. ankle-plantar flexion)를 할 경우 근육군 크기에 따른 특성 및 뇌 활성 영역의 차이에 의해 다른 양상의 결과가 나타날 수 있다(Luft et al., 2002). 또한, 두 사지는 관절 구조, 근육의 특성, 및 모멘트암과 같은 생체역학적 요인에서 차이를 보일 수 있으며, 상·하지 간 MVC를 직접적으로 비교하는데 제한점이 될 수 있다. 따라서, 본 연구에서 측정된 MVC는 근신경 조절 능력뿐만 아니라 상·하지 간 생체역학적 차이를 고려하여 해석할 필요가 있다. 둘째, 노화에 따른 상·하지 간 힘 조절 능력 및 힘 협응 패턴의 변화를 좀 더 민감하게 관찰하기 위한 과제 난이도의 점진적 증가(i.e., 힘 수준의 증가, 시각 정보의 제거, 이중 및 다중 과제 제시, etc.)를 통한 추후 연구가 필요하다고 사료된다(Jin et al., 2019; Kang et al., 2019; Tracy & Enoka, 2002). 마지막으로 본 연구는 노인들의 양측 등척성 힘 조절을 통해 상·하지 간 비교를 실시하였으나 상·하지 움직임에 따른 중추신경계 및 말초신경계가 중요하게 관여한다는 점을 고려할 때 뇌졸중, 소뇌 위축증, 파킨슨병 환자들을 통한 상·하지 간 양측 힘 조절 및 힘 협응 패턴의 특징적인 변화를 알아보는 추후 연구 또한 필요하다고 사료된다(Caliandro et al., 2019; Gorniak, Machado & Alberts, 2013; Kang & Cauraugh, 2017).

## CONCLUSION

본 연구에서 노인들의 양측 등척성 힘 조절 과제 시 상·하지 간 비교를 통해 양측 힘 조절 능력 및 양측 힘 협응 패턴을 분석하였다. 양측 힘 생성에서 상지에서 더 높은 MVC가 관찰되었으나 평균 힘에서는 유의미한 변화가 나타나지 않았다. 양측 힘 조절 능력의 경우 힘 가변성에서 상·하지 간 유의미한 차이가 발견되지 않았으나 힘 정확성 및 힘 규칙성 변인에서 상지가 하지에 비해 높은 힘의 오차와 낮은 규칙성을 보였다. 추가적으로 양측 힘 협응 패턴의 경우 하지와 비교하였을 때 상지에서 더 강한 동위상 힘 협응 패턴이 관찰되었다. 이러한 연구 결과는 일부 공유되는 움직임 제어 기전이 노인들의 양측 운동 조절 능력에 영향을 미칠 수 있으며, 상·하지 간 기능적 특성에 따라 양측 힘 조절 및 양측 힘 협응 패턴이 다르게 나타날 수 있음을 의미한다. 추후 연구에는 양측 움직임에 있어 연관되는 주요 뇌 영역 및 근신경을 통해 다양한 환경, 개인 및 과제에 따른 상·하지 간 차이를 확인해 볼 필요가 있다고 사료된다.

## REFERENCES

Abe, T., Loenneke, J. P., Thiebaud, R. S. & Fukunaga, T. (2014). Age-related site-specific muscle wasting of upper and lower extremities and trunk in Japanese men and women. *Age (Dordr)*, *36*(2), 813-821.

Alijanpour, E. & Russell, D. M. (2025). Age-related changes in gait coordination are focused on the step-to-step transition. *Journal of Biomechanics*, *189*, 112830.

Bai, H. J., Sun, J. Q., Chen, M., Xu, D. F., Xie, H., Yu, Z. W., Bao, Z. J., Chen, J., Pan, Y. R., Lu, D. J. & Cheng, S. (2016). Age-related decline in skeletal muscle mass and function among elderly men and women in Shanghai, China: A cross sectional study. *Asia Pacific Journal of Clinical Nutrition*, *25*(2), 326-332.

Caliandro, P., Conte, C., Iacovelli, C., Tatarelli, A., Castiglia, S. F., Reale, G. & Serrao, M. (2019). Exploring risk of falls and dynamic unbalance in cerebellar ataxia by inertial sensor assessment. *Sensors (Basel)*, *19*(24), 5571.

Coats, R. O. & Wann, J. P. (2012). Reaching a better understanding of the control of bimanual movements in older adults. *PLoS One*, *7*(10), e47222.

Dahmane, R., Djordjevic, S., Simunic, B. & Valencic, V. (2005). Spatial fiber type distribution in normal human muscle histochemical and tensiomyographical evaluation. *Journal of Biomechanics*, *38*(12), 2451-2459.

de Campos, A. C., Sukal-Moulton, T., Huppert, T., Alter, K. & Damiano, D. L. (2020). Brain activation patterns underlying upper limb bilateral motor coordination in unilateral cerebral palsy: An fNIRS study. *Developmental Medicine & Child Neurology*, *62*(5), 625-632.

Dickins, D. S., Sale, M. V. & Kamke, M. R. (2015). Intermanual transfer and bilateral cortical plasticity is maintained in older adults after skilled motor training with simple and complex tasks. *Frontiers in Aging Neuroscience*, *7*, 73.

Dowling, P., Gargan, S., Swandulla, D. & Ohlendieck, K. (2023). Fiber-type shifting in sarcopenia of old age: Proteomic profiling of the contractile apparatus of skeletal muscles. *International Journal of Molecular Sciences*, *24*(3), 2415.

Fling, B. W. & Seidler, R. D. (2012). Fundamental differences in callosal structure, neurophysiologic function, and bimanual control in young and older adults. *Cerebral Cortex (New York, N.Y : 1991)*, *22*(11), 2643-2652.

Franz, J. R. (2016). The age-associated reduction in propulsive power generation in walking. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, *44*(4), 129-136.

Gale, C. R., Martyn, C. N., Cooper, C. & Sayer, A. A. (2007). Grip strength, body composition, and mortality. *International Journal of Epidemiology*, *36*(1), 228-235.

Gómez-Granados, A., Barany, D. A., Schrayer, M., Kurtzer, I. L., Bonnet, C. T. & Singh, T. (2021). Age-related deficits in rapid visuomotor decision-making. *Journal of Neurophysiology*, *126*(5), 1592-1603.

Gooijers, J., De Luca, A., Zivari Adab, H., Leemans, A., Roebroeck, A. & Swinnen, S. P. (2021). Indices of callosal axonal density and radius from diffusion MRI relate to upper and lower limb motor performance. *Neuroimage*, *241*, 118433.

Gooijers, J. & Swinnen, S. P. (2014). Interactions between brain structure and behavior: The corpus callosum and bimanual coordination. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *43*, 1-19.

Gorniak, S. L., Machado, A. G. & Alberts, J. L. (2013). Force coordination during bimanual task performance in Parkinson's disease. *Experimental Brain Research*, *229*(2), 261-271.

Grimmer, M., Elshamanhory, A. A. & Beckerle, P. (2020). Human lower limb joint biomechanics in daily life activities: A literature based requirement analysis for anthropomorphic robot design. *Frontiers in Robotics and AI*, *7*, 13.

Hiraoka, K. (2021). Phase-dependent crossed inhibition mediating coordination of anti-phase bilateral rhythmic movement: A mini review. *Frontiers in Human Neuroscience*, *15*, 668442.

Hortobágyi, T., Mizelle, C., Beam, S. & DeVita, P. (2003). Old adults perform activities of daily living near their maximal capabilities. *The Journals of Gerontology: Series A, Biological Sciences and Medical Sciences*, *58*(5), M453-460.

Hu, X., Loncharich, M. & Newell, K. M. (2011). Visual information interacts with neuromuscular factors in the coordination of bimanual isometric force. *Experimental Brain Research*, *209*(1), 129-138.

Hu, X. & Newell, K. M. (2011). Aging, visual information, and adaptation to task asymmetry in bimanual force coordination. *Journal of Applied Physiology*, *111*(6), 1671-1680.

Jeon, W., Ramadan, A., Whitall, J., Alissa, N. & Westlake, K. (2023). Age-related differences in lower limb muscle activation patterns and balance control strategies while walking over a compliant surface. *Scientific Reports*, *13*(1), 16555.

Jin, Y., Seong, J., Cho, Y. & Yoon, B. (2019). Effects of aging on motor control strategies during bimanual isometric force control. *Adaptive Behavior*, *27*(4), 267-275.

Kang, N. & Cauraugh, J. H. (2014). Force control improvements in chronic stroke: Bimanual coordination and motor synergy evidence after coupled bimanual movement training. *Experimental Brain Research*, *232*(2), 503-513.

Kang, N. & Cauraugh, J. H. (2015a). Bimanual force variability in chronic stroke: With and without visual information. *Neuroscience Letters*, *587*, 41-45.

Kang, N. & Cauraugh, J. H. (2015b). Force control in chronic stroke. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *52*, 38-48.

Kang, N. & Cauraugh, J. H. (2017). Bilateral synergy as an index of force coordination in chronic stroke. *Experimental Brain Research*, *235*(5), 1501-1509.

Kang, N., Roberts, L. M., Aziz, C. & Cauraugh, J. H. (2019). Age-related deficits in bilateral motor synergies and force coordination. *BMC Geriatrics*, *19*(1), 287.

Kern, D. S., Semmler, J. G. & Enoka, R. M. (2001). Long-term activity in upper- and lower-limb muscles of humans. *Journal of Applied Physiology*, *91*(5), 2224-2232.

Kim, H. J., Lee, J. H., Kang, N. & Cauraugh, J. H. (2021). Visual feedback improves bimanual force control performances at planning and execution levels. *Scientific Reports*, *11*(1), 21149.

Kim, J. H. & Thompson, L. V. (2014). Non-weight bearing-induced muscle weakness: The role of myosin quantity

and quality in MHC type II fibers. *American Journal of Physiology-Cell Physiology*, *307*(2), C190-194.

Kim, M. S., Masakado, Y., Tomita, Y., Chino, N., Pae, Y. S. & Lee, K. E. (2001). Synchronization of single motor units during voluntary contractions in the upper and lower extremities. *Clinical Neurophysiology*, *112*(7), 1243-1249.

Ko, D. K., Lee, H., Lee, H. & Kang, N. (2025). Bilateral ankle dorsiflexion force control impairments in older adults. *PLoS One*, *20*(3), e0319578.

Krasovsky, T., Baniña, M. C., Hacmon, R., Feldman, A. G., Lamontagne, A. & Levin, M. F. (2012). Stability of gait and interlimb coordination in older adults. *Journal of Neurophysiology*, *107*(9), 2560-2569.

Krehbiel, L. M., Kang, N. & Cauraugh, J. H. (2017). Age-related differences in bimanual movements: A systematic review and meta-analysis. *Experimental Gerontology*, *98*, 199-206.

Kwon, M. & Christou, E. A. (2024). Visual information processing in older adults: Force control and motor unit pool modulation. *Journal of Motor Behavior*, *56*(3), 330-338.

Lacquaniti, F., Ivanenko, Y. P. & Zago, M. (2012). Patterned control of human locomotion. *Journal of Physiology*, *590*(10), 2189-2199.

Laidlaw, D. H., Bilodeau, M. & Enoka, R. M. (2000). Steadiness is reduced and motor unit discharge is more variable in old adults. *Muscle & Nerve*, *23*(4), 600-612.

Lee, H., Lee, J. H., Lee, T. L., Ko, D. K. & Kang, N. (2023). Dual-hemisphere anodal transcranial direct current stimulation improves bilateral motor synergies. *Frontiers in Psychology*, *14*, 1211034.

Lee, H., Lee, T. L. & Kang, N. (2024). Effects of visual feedback and force level on bilateral ankle-dorsiflexion force control. *Neuroscience Letters*, *824*, 137671.

Lee, H., Park, Y. M. & Kang, N. (2022). Unilateral hand force control impairments in older women. *EXCLI Journal*, *21*, 1231-1244.

Lee, T. L. & Kang, N. (2025). Bilateral force control and coordination patterns across upper and lower limbs. *EXCLI Journal*, *24*, 1335-1346.

Lexell, J. (1995). Human aging, muscle mass, and fiber type composition. *The Journals of Gerontology: Series A, Biological Sciences and Medical Sciences*, *50*(Spec No), 11-16.

Loehrer, P. A., Nettersheim, F. S., Jung, F., Weber, I., Huber, C., Dembek, T. A., Pelzer, E. A., Fink, G. R., Tittgemeyer, M. & Timmermann, L. (2016). Ageing changes effective connectivity of motor networks during bimanual finger coordination. *Neuroimage*, *143*, 325-342.

Luft, A. R., Smith, G. V., Forrester, L., Whitall, J., Macko, R. F., Hauser, T. K., Goldberg, A. P. & Hanley, D. F. (2002). Comparing brain activation associated with isolated upper and lower limb movement across corresponding joints. *Human Brain Mapping*, *17*(2), 131-140.

Messa, G. A. M., Piasecki, M., Rittweger, J., McPhee, J. S., Koltai, E., Radak, Z., Simunic, B., Heinonen, A., Suominen, H., Korhonen, M. T. & Degens, H. (2020). Absence of an aging-related increase in fiber type grouping in athletes and non-athletes. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, *30*(11), 2057-2069.

Newell, K. M., Vaillancourt, D. E. & Sosnoff, J. J. (2006). Aging, complexity, and motor performance. In Handbook of the psychology of aging (pp. 163-182). Elsevier.

Panzarella, E., Beribisky, N. & Cribbie, R. A. (2021). Denouncing the use of field-specific effect size distributions to inform magnitude. *PeerJ*, *9*, e11383.

Pérez, N. P. (2023). *Bimanual interaction in virtually and mechanically coupled tasks* (Doctoral dissertation, Queen Mary University of London).

Pethick, J. & Piasecki, M. (2022). Alterations in muscle force control with aging: Is there a modulatory effect of lifelong physical activity? *Frontiers in Sports and Active Living*, *4*, 817770.

Pethick, J., Taylor, M. J. D. & Harridge, S. D. R. (2022). Aging and skeletal muscle force control: Current perspectives and future directions. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, *32*(10), 1430-1443.

Richman, J. S. & Moorman, J. R. (2000). Physiological time-series analysis using approximate entropy and sample entropy. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, *278*(6), H2039-2049.

Richmond, S. B. & Fling, B. W. (2019). Transcallosal control of bilateral actions. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, *47*(4), 251-257.

Simon-Martinez, C., Dos Santos, G. L., Jaspers, E., Vanderschueren, R., Mailleux, L., Klingels, K., Ortibus, E., Desloovere, K. & Feys, H. (2018). Age-related changes in upper limb motion during typical development. *PLoS One*, *13*(6), e0198524.

Sousa, N., Mendes, R., Abrantes, C. & Sampaio, J. (2011). Differences in maximum upper and lower limb strength in older adults after a 12 week intense resistance training

program. *Journal of Human Kinetics*, *30*, 183-188.

Tracy, B. L. & Enoka, R. M. (2002). Older adults are less steady during submaximal isometric contractions with the knee extensor muscles. *Journal of Applied Physiology*, *92*(3), 1004-1012.

Tracy, B. L., Mehoudar, P. D. & Ortega, J. D. (2007). The amplitude of force variability is correlated in the knee extensor and elbow flexor muscles. *Experimental Brain Research*, *176*(3), 448-464.

Volz, L. J., Eickhoff, S. B., Pool, E. M., Fink, G. R. & Grefkes, C. (2015). Differential modulation of motor network connectivity during movements of the upper and lower limbs. *Neuroimage*, *119*, 44-53.

Wolpe, N., Ingram, J. N., Tsvetanov, K. A., Geerligs, L., Kievit, R. A., Henson, R. N., Wolpert, D. M. & Rowe, J. B. (2016). Ageing increases reliance on sensorimotor prediction through structural and functional differences in fronto-striatal circuits. *Nature Communications*, *7*, 13034.

Yentes, J. M., Hunt, N., Schmid, K. K., Kaipust, J. P., McGrath, D. & Stergiou, N. (2013). The appropriate use of approximate entropy and sample entropy with short data sets. *Annals of Biomedical Engineering*, *41*(2), 349-365.