Effect of kinetic degrees of freedom of fingers on the task performance during force production and release: archery shooting-like action

Abstract

Objective: The purpose of this study is to examine the effect of changes in DOF (Degrees of Freedom) of fingers (i.e., the number of the fingers involved in tasks) on the task performance during force production and releasing task.

Method: Eight right-handed young males (age: 29.63±3.02 yrs., height: 1.73±0.04 m, weight: 70.25±9.05 kg) participated in the study. The subjects were required to press the transducers with three combinations of fingers including index-middle (IM), index-middle-ring (IMR), and index-middle-ring-little (IMRL). During the trials, it was instructed to maintain a steady-state levels of both normal and tangential forces within the first 5 sec. After the first 5 sec, the subjects were instructed to release the fingers on the transducers as quickly as possible at a self-selected manner within next 5 sec resulting in zero force at the end. Customized MATLAB (MathWorks Inc., Natick, MA, USA) codes were written for data analysis. The following variables were quantified: 1) Finger force sharing pattern, 2) Root mean squared error (RMSE) of force to the target force in three axes at the aiming phase, 3) The time duration of the release phase (release time), and 4) The accuracy and precision indices of the virtual firing position.

Results: The RMSE was increased with the number of fingers in both normal and tangential forces at the steady-state phase. The precision index was smaller (more precise) in the IMR condition than in the IM condition, while no significant difference on the accuracy index between the conditions. Also, there was no significant difference in the release time between the conditions.

Conclusion: The study evidenced that the increased number of fingers resulted in better error compensation at the aiming phase and performed more constant shooting (i.e., smaller precision index). However, the increased number of fingers did not affect the release time, which may influence the consistency of terminal performance. Thus, the number of fingers led to positive results for the current task.

Keywords: Finger, Degrees of freedom, redundancy, archery

Introduction

인체시스템은 같은 수행을 다양한 방법과 경로를 통해서 만족할 수 있는 시스템이며, 이는 과제를 만족하기 위한 수행 변인(performance variable)에 비해 요소 변인이 상대적으로 많은 자유도(Degrees of freedom)를 가짐으로 인해 발생하게 된다. 이러한 이유로 자유도 과잉 상태인 요소들을 중추신경계(Central nervous system)에서 어떠한 전략을 통해 효율적으로 제어하는지에 대한 문제는 인간운동과학의 주요 관심분야 중 하나이다. 이러한 자유도의 과잉은 인체의 관절, 근육 또는 운동단위에 이르기까지 다양한 단계에 걸쳐 존재하며, 최근 연구들은 이러한 자유도 과잉 형태의 요소들이 주요 수행 변인을 안정화하기 위해서 서로 상호작용한다고 보고하였다(Park, Jo, Lewis, Huang, & Latash, 2013). 다시 말해서 요소 과잉에 의해 가능해지는 다양한 형태의 움직임들은 각 요소가 과제를 만족하기 위해 상호작용하게 되며, 이러한 특정 목적을 위해 각 요소가 상호작용 하는 방식은 중추 신경계(central nervous system)의 신체 제어원리로 이해할 수 있다 (Latash, Danion, Scholz, Zatsiorsky, & Schoner, 2003).

각 손가락은 힘을 생성을 할 수 있는 개별요소라고 할 수 있고, 두 개 이상의 손가락을 사용하여 힘을 만들어낼 경우 운동역학적 요소 과잉(kinetic redundancy)이 생기게 된다. 요소 과잉의 문제를 공학적, 수학적 측면에서 바라보면 이 문제는 제어 체계의 계산상의 부담으로 귀결되고 따라서 요소 과잉 문제의 해결책을 찾으려는 많은 연구가 진행되어오고 있다(Arimoto, Tahara, Bae, & Yoshida, 2003; Cheng & Orin, 1991; Xia, Feng, & Wang, 2005). 한편 요소 과잉 문제를 인간 움직임에 투영시켜 살펴보면 각각의 요소(손가락)가 수행 결과(총 합력)에 영향을 주는 오류를 일부 보완하는 형태로 작용한다고 볼 수 있다. 다시 말하면, 요소 과잉은 중추 신경계의 제어 체계에 부담을 주는 것이 아니라 각 요소가 만들어낼 수 있는 오류를 유연한 방법으로 수정할 수 있는 시스템 상의 장점으로 활용되고 있다는 것이다(Gelfand, & Tsetlin, 1966; Li, Latash, & Zatsiorsky, 1998; Latash, Scholz, Danion, & Schoner, 2001; Scholz, Danion, Latash, & Schoner, 2002).

양궁은 다중 손가락을 이용하는 스포츠로서 릴리즈 하는 손가락의 동작에 초점을 두고 바라볼 때 스포츠 상황에서 경험할 수 있는 운동역학적 요소 과잉의 예가 될 수 있다. 양궁은 여러 개의 손가락으로부터 생성된 힘의 안정된 제어를 통해 활시위에 가해지는 합력을 일정하게 유지하며 조준(aiming)해야 하는 경기이다. 한편 실제 양궁에서는 '클리커(clicker)'에 의해 활이 당겨지는 거리를 조절하게 되고, 궁수들은 클리커에 빠르게 반응하고 릴리즈 하는 능력 또한 요구되기 때문에(Leroyer, Van Hoecke & Helal, 1993), 양궁의 슈팅 동작은 정적인 힘의 안정화와 빠른 힘의 해제(릴리즈)라는 두 가지 목표를 모두 만족해야 하는 복합적인 과제이다. 선행연구들은 수적 과잉인 요소들(손가락)의 제어 기전이 목표하는 과제의 형태에 따라서 달라지는 결과를 보고하고 있다. 시스템이 안정화하려는 수행 변인(performance variable)이 무엇이냐에 따라서, 또는 과제를 수행하는데 소요되는 시간에 따라서도 다중 요소의 제어 기전은 달라질 수 있다 (Latash, 2008; Latash, Shim, & Zatsiorsky, 2004). 그런 면에서 양궁의 슈팅 동작은 다중 요소인 손가락들을 제어하기 위해 두 가지 서로 다른 제어 기전을 통해 이루어져야 하는 과제라고 할 수 있다.

본 연구에서는 과제 수행에 적극적으로 사용되는 다중 손가락의 자유도(degrees of freedom) 증감이 수행결과에 미치는 영향에 대해 살펴보고자 하였다. 앞서 언급한 바와 같이 다중 요소로서의 손가락들은 서로의 오류를 상쇄하여 결과물을 안정화하는 긍정적인 요소로 작용할 수 있지만, 빠른 힘의 변화에 대응하기 위해서는 부정적인 요소로 작용할 가능성도 존재한다. 이에 양궁의 릴리즈 동작을 가정한 실험을 통해서 복합적 특성의 과제를 수행하는 동안, 다중요소 제어기전에 대해 이해하고 손가락 자유도의 크기가 과제 수행에 미치는 영향을 확인해보고자 한다. 본 연구를 통해서 다음과 같은 가설을 검증하고자 한다. 첫째, 손가락 자유도의 증가는 손가락 합력의 오류를 감소시킬 것이며, 둘째, 힘의 해제에 걸리는 시간을 증가시킬 것이다. 셋째, 손가락 자유도의 증가는 합력의 오류 감소와 더불어 해제 시간의 증가를 유도할 것이므로, 손가락 자유도의 증가는 과제 수행의 결과(정확도 및 일관성)에 영향을 미치지 않을 것이다.

Method

1. Participants

본 연구에는 오른손을 사용하는 일반 성인 남성 8 명(나이: 29.63±3.02 세, 키: 1.73±0.04 m, 체중: 70.25±9.05 kg)이 참여하였다. 모든 참여자는 팔과 손 및 손가락에 기능적으로 영향을 줄 수 있는 병력이 없는 사람들로 선정하였으며, 충분한 사전 연습을 통해 실험 과제에 익숙하도록 한 상태에서 본 실험을 실시하였다. 본 연구는 생명윤리위원회(IRB)의 심사를 통해 연구 승인을 득한 후 진행되었다(IRB No. 1703/002-006).

2. Apparatus

본 연구의 실험 과제는 다중 손가락 힘 생성 및 해제 과제(Multi-finger force production and release task)이다.

본 실험 과제를 수행할 때 각 실험대상자들이 자신의 손가락 힘을 기준으로 동일한 수준의 과제를 수행할 수 있도록 사전에 손가락 최대 힘 측정 과제(Maximum voluntary contraction task)를 수행하였다. 손가락 최대 힘 측정을 위해서는 금속 프레임에 손가락 길이에 맞게 수평으로 고정된 네 개의 압전식 힘 측정용 변환기(208C02, PCB Piezotronics, Depew, NY)를 사용하였다. 연구의 본(main) 과제인 다중 손가락 힘 생성 및 해제 과제를 위해서는 금속 프레임에 고정된 네 개의 6 축 소형 힘/토크 측정용 변환기((Nano-17, ATI Industrial Automation, Garner, NC)를 사용하였다(Figure 1). 실험 중 손가락 힘을 생성할 때 손가락에 작용하는 중력의 효과를 배제하기 위해 각 변환기들의 누르는 방향이 중력방향에 수직이 되도록 고정하였다. 과제 수행 시 손가락 힘의 생성 및 해제가 자연스럽게 이루어질 수 있도록 반구 형태의 캡(Poly lactic acid 소재)을 제작하여 각 변환기 앞에 부착하였다(Figure 1).

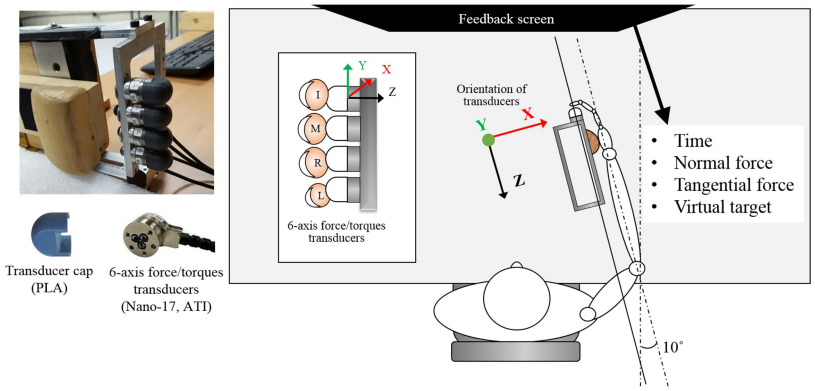

Figure 1. 다중 손가락 힘 생성 및 해제 과제의 실험장비 구성. 금속 프레임에 고정된 네 개의 6 축 소형 힘/토크 측정용 변환기를 사용하였으며, 전방 모니터를 통해 feedback 을 제공함

실험을 진행하는 동안 실험대상자는 의자에 허리를 펴서 바르게 앉은 자세로 실험에 임하였으며, 편안하게 당기는 동작을 할 수 있도록 우측 어깨관절을 약 45° 굴곡, 45° 외전 및 10° 내측회전 된 상태가 되도록 하였다(Figure 1). 변환기에 설정된 좌표계는 실험대상자를 기준으로 X-축은 좌우 방향, Y-축은 상하 방향, 그리고 Z-축은 전후 방향을 의미한다. 변환기를 통해서 들어온 아날로그 신호들은 아날로그-디지털 컨버터(NI USB-6225, National Instruments, Austin, TX)를 통해서 디지털화하여 컴퓨터에 전송되었다. 실험을 진행하는 동안 데이터의 수집 및 실험대상자에 대한 시각적 피드백 제공을 위해서 프로그래밍 소프트웨어(LabVIEW 2015, National Instruments, Austin, TX)를 이용하여 자체 구성한 프로그램을 사용하였다.

3. Measurement

사전 과제인 손가락 최대 힘 측정 과제(Maximal Voluntary Contraction task)를 수행하기 위해서 실험대상자들은 금속판에 수평으로 고정된 각 변환기 위에 네 손가락을 올린 상태로 반동 없이 5 초간 최대 등척성 수축(isometric contraction)을 하였다. 각 실험대상자가 최대 힘 측정 과제를 수행하는 동안 합력이 최대(MVC_{TOT})가 될 때의 각 손가락 별 힘 값(MVC_i, i = {검지, 중지, 약지, 소지})을 획득하였으며, 두 차례 반복하여 수행한 후 계산된 값들의 평균값을 산출하였다.

연구의 본(main) 과제인 다중 손가락 힘 생성 및 해제 과제(Multi finger force production and release task)는 양궁의 에이밍(aiming) 및 릴리즈(release) 동작과 유사하며, 실험을 위해서 각 실험대상자는 상하방향(Y-축)으로 배열된 변환기들을 손가락 자유도를 달리한 세 가지의 조합(IM: 검지-중지, IMR: 검지-중지-약지, IMRL: 검지-중지-약지-소지)으로 당기듯이 눌렀다가(aiming) 변환기로부터 손가락을 빠르게 분리하며 힘을 해제(release)하는 과제를 수행하였다. 본 과제는 에이밍 구간과 릴리즈 구간으로 나누어지는데, 처음 5 초 동안 정해진 크기의 전후 힘(Z-축 힘), 좌우 힘(X-축 힘), 그리고 상하 힘(Y-축 힘)을 생성하여 일정하게 유지하는 에이밍 구간, 그리고 나머지 5 초 이내에 손가락을 최대한 빨리 놓음으로써 힘을 해제하는 릴리즈 구간으로

나뉘었다. 처음 5 초간 실험대상자들이 유지해야 하는 힘의 크기는 활에 저장된 에너지의 크기로 가정되며, 전후 힘(Z-축 힘)의 경우 앞서 측정된 MVC_{TOT}(네 손가락을 이용하여 누르는 최대 힘 값)의 50%로 설정하였고, 좌우 힘과 상하 힘은 0 N 으로 설정하였다. 다시 말해, 에이밍 구간에서 요구되는 힘 값의 조건은 세 가지 손가락 조합에 걸쳐 동일하게 설정되었고, 에이밍 구간에서 힘 값의 오차가 없고 힘의 해제가 스텝함수(시간의 지연 없이 0 N 이 되는 경우)의 형태가 된다면, 가상으로 주어진 가상의 과녁에 명중할 수 있도록 설정하였다. 릴리즈 동작을 통해 투사되는 투사체는 가상의 물체이며, 부피가 없고 오직 질량만 있는 질점으로, 투사체에 작용하는 외력은 중력만 존재하는 것으로 가정하였다. 릴리즈 동작의 시작은 외부 신호에 의해 촉발되는 것이 아니라 참여자의 자기보속(self-paced)에 의해 촉발되도록 하였다. 각 실험대상자는 조건(손가락 조합)별로 25 회의 과제를 수행하도록 하였으며, 각 조건 간의 휴식은 5 분, 각 시도(trial) 간의 휴식은 10 초 이상으로 설정하였다. 실험대상자의 전방 모니터를 통해 피드백으로 제공되는 정보는 힘을 유지해야 하는 구간과 힘의 해제가 가능한 구간을 표시해주는 시간 정보와 에이밍 구간 동안 유지해야 하는 각 성분별 힘 값, 그리고 릴리즈 후 가상의 과녁에 투사체가 도달한 위치에 대한 정보이다.

4. Data processing

자료 분석을 위해서 MATLAB (MathWorks Inc., Natick, MA, USA) 코드를 구성하여 활용하였다. 측정된 모든 힘 값은 zero-lag 4th-order low-pass Butterworth filter(cutoff at 10Hz)를 이용하여 필터링하였다. 가상의 과녁에 도달하는 투사체의 위치 좌표는 투사체의 초기 속도 및 방향에 의해 결정되도록 설정하였고, 초기 속도는 힘의 해제 시 발생하는 에너지 손실의 영향을 받는 것으로 가정하였다. 즉 에이밍 구간을 통해 가상의 활에 에너지가 저장되고, 릴리즈가 시간의 지연없이 이루어질 경우 활에 저장된 에너지는 손실 없이 모두 가상의 투사체를 과녁으로 움직이게 된다. 투사체의 초기 속도는 힘의 해제가 시작되는 시점에서 측정된 힘의 크기, 가상의 활 시위의 탄성계수 0.7 N/m, 그리고 가상의 투사체 무게 1 kg 의 가정을 바탕으로 계산하였다. 힘의 해제 시 에너지 손실은 릴리즈 구간 동안의 힘의 적분 값만큼 투사체의 초기 속도에 영향을 주는 것으로 가정하여 계산하였다(식. 1). 본 실험에서는 활에 저장된 탄성에너지가 손실없이 투사체의 운동에너지로 전환된다고 가정하였으며, 이에따라 아래의 공식을 이용하여 투사체의 초기 속도를 계산하였다. 전후, 좌우, 상하 방향 성분에 대하여 각각 계산하였으며, 상하 방향은 중력가속도는 -9.81 m/s^2 로 설정하였다.

$$v_0{}^j = \frac{F_a^j}{\sqrt{km}} - \frac{\int_a^b F^j(t)dt}{2m} \qquad \text{(식. 1)}$$

$\boldsymbol{j}$ = {X, Y, Z}, $\boldsymbol{v_0}$: 가상의 투사체 초기 속도, $\boldsymbol{k}$: 활의 탄성계수, $\boldsymbol{m}$: 가상의 투사체 질량, $\boldsymbol{a}$: 릴리즈가 시작되는 시점(onset), $\boldsymbol{b}$: 릴리즈가 끝나는 시점, 즉 $\boldsymbol{F^j}$= 0 N 이 되는 시점, $\boldsymbol{F_a^j}$: 릴리즈가 시작되는 시점(onset)의 $\boldsymbol{j}$ -축 방향 힘.

4. 1 분석구간 정의

다중 손가락 힘 생성 및 해제 과제에서 힘의 해제(릴리즈)가 시작되는 시점(onset)은 과제에 참여하는 손가락 합력의 전후 방향 성분(Z-축)을 1 차 미분하여, 그 최댓값(최대 변화율)의 5%를 지나는 시점으로 정의하였다(Olafsdottir, Yoshida, Zatsiorsky, & Latash, 2005). 자료의 분석은 두 구간에 대하여 이루어졌다. 분석을 위한 첫 번째 구간은 힘 유지 구간인 에이밍(aiming) 구간으로 릴리즈가 시작되는 시점(onset, 식 1. 의 a)을 기준으로 -1500 ms 부터 -500 ms 까지의 구간으로 정의하였으며, 두 번째 구간은 릴리즈 구간으로 onset 시점부터 손가락 합력이 0 N(식. 1 의 b)이 되는 시점까지의 구간으로 정의하였다.

4. 2 분석 변인

본 연구에서 산출된 분석 변인은 다음과 같다.

1) 에이밍 구간에서 관찰되는 각 손가락 힘의 배분 형태, 2) 에이밍 구간에서 관찰되는 힘의 제곱 평균 제곱근 오차(Root mean square error: RMSE, 식. 2), 3) 릴리즈 구간의 힘 해제 시간(Releasing time: RT), 그리고 4) 가상의 과녁 중심에 대한 정확도(Accuracy index, AI; 식. 3)와 반복 시도 간에 가상의 투사체가 과녁에 도달한 지점의 일관성(Precision index, PI; 식. 4)이다.

에이밍 구간의 손가락 힘 배분 형태는 에이밍 구간의 평균 힘 값으로 제시하였다.

RMSE 는 에이밍 구간에서 목표로 제시되는 힘 값으로부터 벗어난 정도를 RMS error 로 산출한 후 이를 각각의 목표 기준치로 표준화하였으며, 아래 식. 2 에 의해 계산하였다.

$$RMSE_{norm}^{j} = \frac{\sqrt{\sum_{i}^{n}\left(F_{i}^{j} - F_{target}^{j}\right)^{2}/n}}{F_{target}^{j}} \qquad \text{(식. 2)}$$

$\boldsymbol{j}$ = {X, Y, Z}, $\boldsymbol{i}$= 10 ms, $\boldsymbol{F_i^j}$: 측정된 힘 값, $\boldsymbol{F_{target}^j}$: 목표 힘 값

힘 해제 시간(Releasing time: RT)은 릴리즈 구간의 소요시간으로 정의하였다.

정확도 지수(Accuracy index, AI)는 가상의 과녁 중앙으로부터 가상의 투사체가 도달한 지점까지의 변위를 평균 낸 값으로 정의하였고, 일관성 지수(Precision index, PI)는 가상의 투사체가 도달한 각 지점의 평균 좌표로부터 해당 시도에서 가상의 투사체가 도달한 지점까지의 변위를 평균 낸 값으로 정의하였다(Kim, Kim, Koh, Yoon, Damiano & Shim, 2016; Koh, Kwon, Park, Kiemel, Miller, Kim, Shin & Shim, 2016). 각각의 변인은 식. 3 과 식. 4 에 의해 계산되었다.

$$\mathrm{AI} = \frac{\sum_{i=1}^{n}\sqrt{(x_i - x_{target})^2 + (y_i - y_{target})^2}}{n} \qquad \text{(식. 3)}$$

$$\mathrm{PI} = \frac{\sum_{i=1}^{n}\sqrt{(x_i - \bar{x})^2 + (y_i - \bar{y})^2}}{n} \qquad \text{(식. 4)}$$

$\boldsymbol{i}$= 각 시도, $\boldsymbol{x_i}$= 해당 시도에서 가상의 투사체가 도달한 지점의 x 축 좌표, $\boldsymbol{x_{target}}$= 가상의 과녁 중심의 x 축 좌표 (0 mm), $\boldsymbol{y_i}$= 해당 시도에서 가상의 투사체가 도달한 지점의 y 좌표, $\boldsymbol{y_{target}}$= 가상의 과녁 중심의 y 축 좌표 (0 mm), $\bar{\boldsymbol{x}}$= 각 시도에서 가상의 투사체가 도달한 지점의 평균 x 축 좌표, $\bar{\boldsymbol{y}}$= 각 시도에서 가상의 투사체가 도달한 지점의 평균 y 축 좌표

5. Statistical analysis

본 연구의 통계처리는 SPSS 21.0(IBM, Armonk, NY)을 이용하였고, 각 변인의 통계적 차이를 검증하기 위하여 반복측정분산분석(repeated-measure ANOVAs)을 실시하였다. 요인은 각 손가락(4 수준: 검지, 중지, 약지, 소지), 손가락 조합(3 수준:IM, IMR, IMRL)이며, 분석 변인에 따라서 선택적으로 분석에 포함시켰다. 통계적 유의수준(α)은 0.05 로 설정하였다. 또한 각 조건의 일대일 대응 별 차이를 확인하기 위하여 사후 종속 t-검정(paired t-test)을 실시하였으며, 통계적 유의수준(α)은 0.05 로 설정하였다.

Results

1. 손가락 힘 배분 형태 (finger force sharing pattern)

Table 1. 각 손가락의 최대 힘 값. 손가락 최대 자발적 등척성 수축(MVC) 과제 수행 시 손가락 합력이 최대가 된 시점의 각 손가락(검지, 중지, 약지, 소지)별 힘 값으로, 총 8 명 실험대상자의 평균 및 표준편차.

(Unit : N)

	Index	Middle	Ring	Little	$F_{[DOF]}$	p	t
Mean	29.75	16.46	11.09	14.93	16.884 [3, 21]	.000	I>MRL
SD	9.78	2.86	2.76	6.04			

본 과제의 목표 힘 값을 설정하기 위하여 각 손가락의 최대 힘을 측정하였으며, 네 손가락을 동시에 누를 때를 기준으로 측정하였다. 그 결과 검지손가락의 힘이 나머지 세 손가락에 비해 크게 나타났고, 나머지 손가락 사이에서는 차이를 보이지 않았다. 소지의 경우는 실험대상자 간의 편차가 손가락 힘의 크기에 비해 다소 큰 경향을 보였다. 이러한 결과는 반복측정 일원변량분산분석(one-way repeated-measure ANOVA)과 사후 종속 t-검정(paired t-test)을 통해 확인되었다 (table 1).

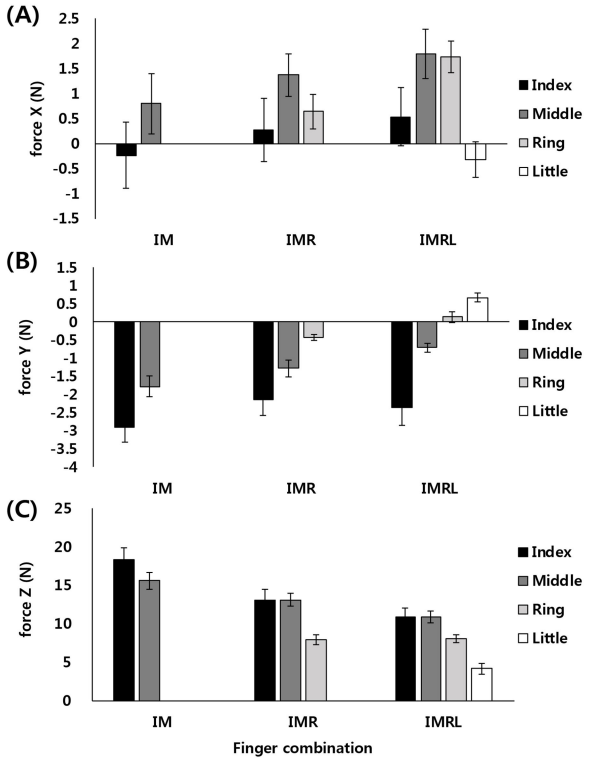

Figure 2. 에이밍 구간에서 손가락 조합(IM, IMR, IMRL)별 각 손가락(검지, 중지, 약지, 소지)의 힘 배분 형태로, 총 8 명 실험대상자의 의 평균 및 표준오차. 성분별로 좌우 성분인 X-축 (A: 위), 상하 성분인 Y-축 (B: 중간), 전후 성분인 Z-축 (C: 아래)

에이밍 구간 손가락 힘(X-축)의 좌우 성분 배분 형태를 살펴보면(figure 2 의 A), 더 많은 손가락이 과제에 참여함에 따라서(운동역학적 자유도의 증가) 손가락이 내는 합력의 우측(당기는 손의 손등 방향) 성분이 커지는 경향을 보였다. 또한 검지(I)보다 중지(M) 및 약지(R) 힘의 우측 성분이 크게 나타나는 경향을 보였다. 이러한 결과는 손가락(네 수준: 검지, 중지, 약지, 소지) 요인과 손가락 조합(세 수준:IM, IMR, IMRL) 요인을 포함하는 반복측정 이원변량분산분석(two-way repeated-measure ANOVA)으로 확인하였는데, 손가락 조합과 손가락 요인의 주 효과에서 모두 통계적으로 유의한 결과를 나타내었다 (손가락 조합: $F_{[2, 14]}$=10.70, P<0.005, 각 손가락: $F_{[3, 21]}$=5.32, P<0.01). 손가락 요인과 손가락 조합 요인의 상호작용 효과 또한 통계적으로 유의한 결과를 보였는데 ($F_{[6, 42]}$=4.03, P<0.005), 검지, 중지, 약지의 경우 참여 손가락의 수가 증가함에 따라 우측방향으로 힘 값이 증가하는 경향을 보이는 반면 소지의 경우 IM, IMR 조건에서 힘 값이 0 N 이었다가 IMRL 조건에서 좌측 방향(당기는 손의 손바닥 방향) 힘 값을 보이기 때문에 관찰되는 것이라 판단된다. 또한, 사후 종속 t-검정(paired t-test)을 통해 IMR 조건에서 M>I, R(p<0.05), 그리고 IMRL 조건에서 M, R>I, L (p<0.05)의 사실을 확인하였다.

에이밍 구간 손가락 힘(Y-축)의 상하 성분 배분 형태를 살펴보면(figure 2 의 B), 검지와 중지의 힘이 상하 성분 힘의 대부분을 차지하는 것으로 나타났다. 더 많은 손가락이 과제에 참여함에 따라서 손가락들의 위쪽 성분 힘 값이 커지는 것으로 나타났으며, 이에 따라 손가락 합력도 아래쪽으로 당기는 형태에서 점차 0 N(목표 힘 값) 에 가까운 쪽으로 변화하는 경향을 보였다. 이러한 결과는 손가락 요인과 손가락 조합 요인을 포함하는 반복측정 이원변량분산분석(two-way repeated-measure ANOVA)으로 확인하였는데, 손가락 요인과 과 손가락 조합 요인의 주 효과에서 모두 통계적으로 유의한 결과를 나타내었으며 (손가락 조합: $F_{[2, 14]}$=15.14, P<0.001, 각 손가락: $F_{[3, 21]}$=30.33, P<0.001), 손가락 요인과 손가락 조합 요인의 상호작용 효과 또한 통계적으로 유의한 결과를 보였는데($F_{[6, 42]}$=4.57, P<0.005), 이는 약지의 경우 IM 조건에서 0 N 이었다가 IMR 조건에서 과제에 참여하면서 아래 성분 힘 값이 나타나기 때문에 관찰되는 것이라 판단된다. 또한, 사후 종속 t-검정(paired t-test)을 통해 검지에 대해서 IM>IMR, IMRL(p<0.05), 그리고 중지에 대해서 IM, IMR>IMRL(p<0.05), 약지에 대해서 IMR>IMRL(p<0.05)의 사실을 확인하였다.

에이밍 구간 손가락 힘(Z-축)의 전후 성분 배분 형태를 살펴보면(figure 2 의 C), 더 많은 손가락이 과제에 참여함에 따라서 검지(I)와 중지(M)의 힘은 감소하는 경향을 보였다. 하지만, 검지와 중지 힘 간의 차이는 과제에 참여하는 손가락 수에 관계없이 일정한 경향을 보였다. 약지(R)와 소지(L)는 검지(I)와 중지(M)에 비해 상대적으로 작은 힘을 나타냈으며, 약지가 소지보다 더 큰 힘을 발휘하는 것으로 관찰되었다. 이러한 결과는 손가락 요인과 손가락 조합 요인을 포함하는 반복측정 이원변량분산분석(two-way repeated-measure ANOVA)으로 확인하였는데, 손가락 조합의 주 효과는 통계적으로 유의하지 않았으며, 손가락 요인의 주 효과는 통계적으로 유의한 결과를 나타내었다($F_{[3, 21]}$=77.45, $p<0.001$). 손가락과 손가락 요인의 상호작용 효과 또한 통계적으로 유의한 결과를 보였는데($F_{[6, 42]}$=60.75, $p<0.001$), 상호작용 효과는 IM 조건의 경우 소지와 약지의 힘 값이 0 N, 그리고 IMR 조건의 경우 약지의 힘 값이 0 N 이기 때문에 관찰되는 것이라 판단된다. 또한, 사후 종속 t-검정(paired t-test)을 통해 IMR 조건에서 I, M>R(p<0.05), 그리고 IMRL 조건에서 I, M, R>L(p<0.05)의 사실을 확인하였다.

2. 제곱 평균 제곱근 오차(RMSE)

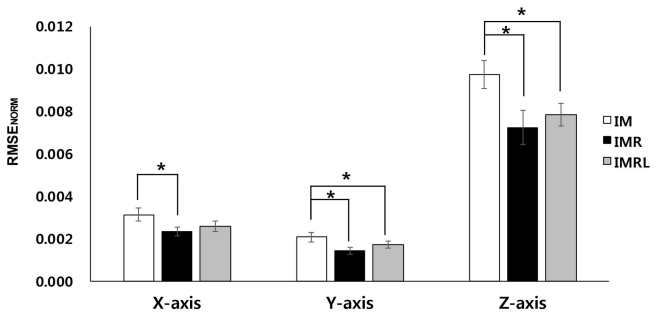

Figure 1. 에이밍 구간에서 각 축별 (X-좌우성분, Y-상하성분, Z-전후성분) 손가락 조합(IM, IMR, IMRL)에 따른 손가락 합력의 제곱평균제곱근 오차(RMSE)를 실험대상자별 과제의 목표 힘 값으로 표준화한 값으로 총 8 명 실험대상자의 평균 및 표준오차.

손가락 조합 조건에 따른 에이밍 구간 힘의 제곱 평균 제곱근 오차(RMSE)를 축별(좌우: X-축, 상하: Y-축, 전후: Z-축)로 제시하였다(Figure 2). 결과를 살펴보면 모든 성분에서 과제에 참여하는 손가락의 수가 증가함에 따라 RMSE 수치가 차이를 보이는 것으로 나타났으며, IM 조건이 다른 조건에 비해 상대적으로 큰 RMSE 수치를 보이는 것으로 나타났다. 이는 반복측정 일원변량분산분석(one-way repeated-measure ANOVA)을 통해 검증되었다(X: $F_{[2, 14]}$=4.789, p<0.05; Y: $F_{[2, 14]}$=5.293, p<0.05; Z: $F_{[2, 14]}$=12.520, p<0.005). 각각의 조건들을 사후 종속 t 검정(paired t-test)을 통해 서로 비교해본 결과 좌우 방향(X-축) 성분에서의 RMSE 값의 순서는 IM>IMR(p<0.05), 상하 방향(Y-축) 성분에서 IM>IMR, IMRL(p<0.05), 전후 방향(Z-축) 성분에서 IM>IMR, IMRL(p<0.05)의 사실을 확인하였다.

3. 힘 해제 시간(RT)

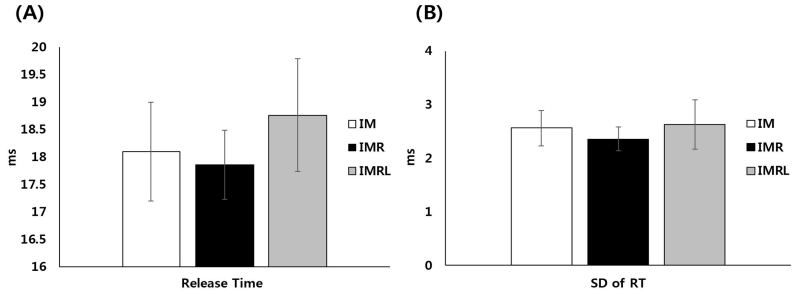

Figure 4. 각 손가락 조합(IM, IMR, IMRL)별 에이밍 구간의 소요시간(RT, (A)) 및 이에 대한 각 실험대상자별 표준편차(SD of RT, (B))로, 총 8 명 실험대상자의 평균 및 표준오차.

손가락 자유도 조건에 따른 손가락 힘 해제 시간(RT) 및 그 표준편차를 제시하였다(Figure 4). 반복측정 일원변량분산분석(one-way repeated-measure ANOVA) 및 사후 종속 t 검정(paired t-test)을 통해 확인한 결과에서 손가락 조합에 따른 통계적 차이를 보이지 않았으며(figure 4A). 각 조건 간의 편차에서 역시 차이를 확인하지 못하였다(figure 4B).

4. 정확도 지수(AI) 및 일관성 지수(PI)

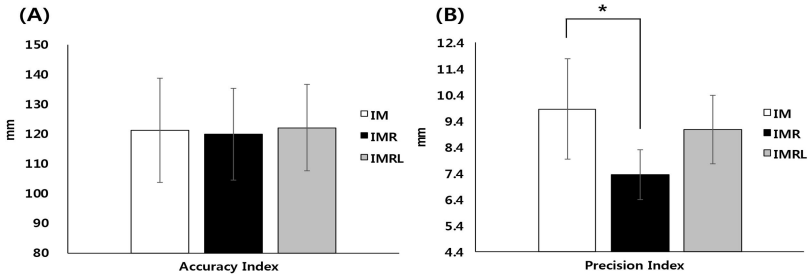

Figure 5. 각 손가락 조합(IM, IMR, IMRL)별, 가상의 과녁 중심으로부터 가상의 투사체가 도달한 각 지점까지의 평균 변위로 계산되는 정확성 지수(Accuracy Index, (A))와, 가상의 투사체가 도달한 지점의 평균 위치로부터 각 시행에서 가상의 투사체가 도달한 지점까지의 평균 거리로 계산되는 일관성 지수 (Precision Index, (B))로, 총 8 명 실험대상자의 평균 및 표준오차.

손가락 조합 조건에 따른 가상의 투사체의 정확도(AI) 및 일관성(PI)을 제시하였다(Figure 5). 목표한 타겟의 중심에 대한 정확도인 AI 에서는 변화가 나타나지 않았다. 반면 각 시도 간의 일관성을 보여주는 PI 에서는 자유도의 증가에 따라 IM 조건과 IMR 조건 사이에 유의한 차이를 보이는 것으로 나타났으며, 이는 종속 t 검정(paired t-test)을 통해 검증되었다(IM>IMR, $p<0.05$).

Discussion

본 연구에서는 힘의 안정화라는 정적인 목표와 힘의 빠른 해제라는 동적인 목표 두 가지가 복합적으로 포함된 과제를 통해서, 다중 목표를 가진 과제 수행 시, 손가락 자유도가 과제로 주어진 목표 수행에 미치는 영향을 확인하고자 하였다. 본 연구 실험의 과제는 양궁의 에이밍 및 릴리즈 동작의 역학적 측면과 유사하며, 따라서 본 연구결과는 양궁의 다중 손가락 운동역학 및 제어를 이해하는데 그 기초를 제공해 줄 수 있다. 선행연구에 따르면 양궁의 경기력을 좌우하는 가장 중요한 요인은 릴리즈 구간의 손가락 움직임이라고 하였다(Hah, & Yi, 2008;

Stuart & Atha, 1990). 손가락 자유도는 짧은 릴리즈 구간에 변화하는 힘의 조절에 영향을 줄 수 있으며, 따라서 손가락의 자유도 문제와 경기 수행능력 사이의 관계를 운동역학 및 운동제어적 관점에서 바라보는 것은 성공적인 양궁 슈팅 동작의 폭넓은 이해를 가능하게 한다. 선행연구들은 다중 손가락을 이용한 일부 과제에서 각 손가락 간에 서로의 오류를 부분적으로 상쇄하여 합력을 안정화한다고 설명하였다(Latash et al. 1998, 2001; Scholz et al. 2002). 본 연구의 결과는 더 많은 손가락이 주어진 과제를 수행하는데 사용될 경우 손가락 합력의 오차가 감소되는 결과를 보여주고 있다. 이 결과는 손가락의 운동역학적 자유도의 증가가 각 손가락 힘 간의 상호작용을 통해 손가락 합력의 오류를 감소시키는데 긍정적 영향을 주고 있으며, 결국 손가락 합력의 안정화에 기여하는 것으로 해석할 수 있다.

자유도의 증가에 따라 에이밍 구간에서는 더욱 안정적으로 힘을 제어하는 모습을 보였지만, 힘의 해제(릴리즈)를 통해 가상으로 투사된 물체가 가상의 과녁에 도달하는 위치의 정확도(accuracy)에서는 자유도의 증가에 따른 긍정적인 변화가 나타나지 않았다. 반면 반복 시도 간의 일관성(Precision)은 두 손가락을 이용한 경우보다 세 손가락을 이용할 때 향상되는 경향을 보였다. 양궁에서 높은 경기력을 결정짓는 요소는 타겟의 중앙을 정확하게 맞추는 것 뿐만 아니라 수행의 일관성을 확보하는 능력이라고 할 수 있다(Kim, 2005; Kim, 2008; Leroyer et al. 1993; Martin, Siler & Hoffman, 1990; Nishizono, Shibayama, Izuta & Saito, 1987). 양궁의 릴리즈 동작 시 손가락의 움직임은 저마다 다양한 전략으로 이루어지며, 손가락 신전근의 능동적인 수축을 통해 릴리즈하거나 손가락 굴곡근의 힘의 해제를 통해서 활시위에 의해 수동적으로 릴리즈되도록 하는 방법 등이 존재한다(Martin et al. 1990; McKinney & McKinney, 1997). 선행연구는 양궁의 릴리즈 시, 능동적인 손가락의 신전은 활시위의 측면 방향 변형을 유도하여 일관된 슈팅에 방해요소로 작용하기 때문에 수동적인 형태의 릴리즈가 일관된 스코어링에 유리하다고 보고하고 있다(Martin et al. 1990). 또한 이를 위해서는 손가락 굴곡근 힘의 해제와 손가락 신전근 수축 간의 조화로운 균형이 요구되기 때문에 많은 훈련이 필요하다고 설명하고 있다(Ertan, Kentel, Tümer, & Korkusuz, 2003). 본 연구의 결과에 의하면, 양궁 슈팅 동작 시 손가락 자유도의 증가는 일관된 슈팅에 유리한 것으로 나타났다. 이를 설명하기 위해 본 실험에서는 손가락의 자유도에 따라서 목표하는 힘 값을 동일하게 설정하였다. 즉 손가락 자유도의 증가는 각 손가락에 걸리는 부하를 상대적으로 줄일 수 있게 하고, 각 손가락이 발생시키는 상대적 힘의 감소는 각 손가락 힘의 제어에 긍정적인 효과를 가져왔을 가능성이 있다.

한편 본 연구의 실험을 통해서 산출한 타겟에 대한 정확도 지수(AI)는 힘 해제 시간(RT)과 직접적인 관련이 있다. 힘 해제 시간의 증가는 릴리즈 구간 동안 활에 저장된 에너지의 손실을 상대적으로 크게 하며, 이는 설정된 가상의 과녁 중앙에서 투사체가 벗어나는 원인이 될 수 있다. 즉 힘 해제 시간의 절대적인 크기는 정확도 지수(AI)에 영향을 주고, 힘 해제 시간의 편차는 일관성 지수(PI)에 영향을 주게 된다. 연구자는 손가락 자유도의 증가가 힘 해제 시간의 증가를 유발할 것으로 예상하였지만, 실험 결과에 따르면 힘 해제 시간은 손가락의 자유도 변화에 따라 유의한 차이를 보이지 않았다. 앞서 설명한 바와 같이 손가락 자유도의 증가는 각 손가락이 생성 및 유지해야 하는 상대적인 힘의 크기를 감소시키고, 이를 0 N까지 해제하는데 오히려 긍정적으로 영향을 줄 수 있다. 이러한 긍정적 영향은 손가락 자유도 증가에 따른 부정적 영향을 상쇄했을 가능성도 고려할 필요가 있다. 한편 힘 해제 시간의 편차에서 역시 각 조건 간에 차이를 보이지 않았다. 이는 손가락 자유도의 증가에 따른 일관성(Precision)의 향상이 일관된 힘 해제 시간에 의한 것이 아님을 설명하며, 에이밍 구간을 비롯한 릴리즈 직전까지의 힘의 안정적 제어가 일관된 과제 수행에 도움을 주었다고 볼 수 있다. 즉 일정 수준의 자유도 증가에 따른 일관된 힘의 제어는 과제의 결과에 긍정적인 효과를 이끌어내는 것으로 보인다.

본 연구는 첫째, 손가락 자유도의 증가가 손가락 합력의 오류를 감소시키는 반면, 둘째, 힘 해제에 걸리는 시간을 증가시킬 것이며, 이는 셋째, 과제 수행의 결과(정확도 및 일관성)에 영향을 미치지 않을 것이라는 세 가지 가설을 검증하기 위해 실시되었다. 본 연구의 결과는 첫 번째 가설의 타당성을 뒷받침하고 있으며, 두 번째와 세 번째 가설을 검증하는데 실패했다. 결과들을 토대로 살펴볼 때 손가락 자유도의 증가는 손가락 합력을 안정화하는데 긍정적인 영향을 주었고 일관된 과제 수행을 이끌어내는 것으로 나타났다.

따라서 본 연구결과를 통해 다중 목표를 가진 과제 수행에 있어서 손가락 움직임의 영향을 이해할 수 있다는 점은, 각 시도 간의 일관된 수행이 요구되는 양궁이라는 종목의 특성상 매우 긍정적으로 받아들일 수 있는 부분이다. 한편 실제 양궁에서는 '클리커(clicker)'에 의해 활이 당겨지는 거리를 조절하게 되고, 궁수들은 클리커에 빠르게 반응하는 능력이 요구되고(Leroyer et al. 1993), 과제에 참여하는 손가락 자유도의 증가는 이러한 동적인 힘의 변화에 유연하게 대처하기 어렵다는 부정적 측면 또한 포함하게 된다. 즉, 자유도의 증가는 긍정적인 요소와 부정적인 요소를 모두 포함하는 모순적인 영향을 줄 수 있다. 추후 본 연구의 연장을 통해서는 본 연구의 결과를 통해 확인한 가능성을 다양한 추가 변인을 통해 구체적으로 검증하고, 이를 통해 다중 목표를 가진 과제에서 긍정적인 요소는 부각하고 부정적 영향을 최소화할 수 있는 최적의 방법(optimal solution)을 확인할 수 있는지 검토하고자 한다.

Conclusion

손가락 합력의 오류 감소는 부분적으로 동원된 각 손가락의 힘들 간에 주요 수행변인 즉, 합력을 안정화하기위해 서로의 오류를 상쇄하는 역할을 보다 잘 수행했다는 것을 설명한다. 본 연구의 결과에 의하면, 손가락 자유도의 증가는 에이밍 구간에서 각 손가락 간 상호작용을 통해 손가락 합력을 안정화하였고, 일관된 과제 수행을 이끌어내는데 긍정적 작용을 하는 것으로 나타났다.

Reference

Arimoto, S., Tahara, K., Bae, J. H., & Yoshida, M. (2003). A stability theory of a manifold: concurrent realization of grasp and orientation control of an object by a pair of robot fingers. *Robotica, 21,* 163-178.

Cheng, F. T., & Orin, D. E. (1991). Optimal Force Distribution in Multiple-Chain Robotic Systems. *Ieee Transactions on Systems Man and Cybernetics, 21*(1), 13-24.

Ertan, H., Kentel, B., Tümer, S. T., & Korkusuz, F. (2003). Activation patterns in forearm muscles during archery shooting. *Human Movement Science, 22*(1), 37-45.

Gelfand, I. M., & Tsetlin, M. (1966). On mathematical modeling of the mechanisms of the central nervous system. In I. M. Gelfand, V. S. Gurfinkel, S. V. Fomin & M. L. Tsetlin (Eds.), *Models of the structural-functional organization of certain biological systems* (pp. 9-26). Moscow (a translation is available in 1971 edition by MIT Press: Cambridge, MA): Nauka

Hah, C. K., & Yi, J. H. (2008). Evaluation on Kinematic Factors Affecting Scores of Olympic Round Game during the Follow Through in Archery. *Korean Journal of Sport Biomechanics, 18*(1), 227-234.

Kim, J. P. (2005). The correlation of the physical stability and the performance of archers in non-shooting and shooting. *Korean Journal of Sports Biomechanics, 10*(1), 152-152.

Kim, J. P. (2008). The effect of balance exercise on postural control and shooting record in archers. *Korean Journal of Sport Biomechanics, 18*(2), 65-74.

Kim, Y., Kim, W. S., Koh, K., Yoon, B., Damiano, D. L., & Shim, J. K. (2016). Deficits in motor abilities for multi-finger force control in hemiparetic stroke survivors. *Experimental brain research, 234*(8), 2391-2402.

Koh, K., Kwon, H. J., Park, Y. S., Kiemel, T., Miller, R. H., Kim, Y. H., Shin, J. H. & Shim, J. K. (2016). Intra-Auditory Integration Improves Motor Performance and Synergy in an Accurate Multi-Finger Pressing Task. *Frontiers in Human Neuroscience, 10*, 1-11.

Latash, M. L. (2008). Synergy, Oxford University Press.

Latash, M. L., Danion, F. J., Scholz, F., Zatsiorsky, V. M., and Schoner, G. (2003). Approaches to analysis of handwriting as a task of coordinating a redundant motor system. *Human Movement Science, 22*(2): 153-171.

Latash, M. L., Li, Z. M., and Zatsiorsky, V. M. (1998). A principle of error compensation studied within a task of force production by a redundant set of fingers. *Experimental Brain Research, 122*(2): 131-138.

Latash, M. L., Scholz, J. F. Danion, F., and Schoner, G. (2001). Structure of motor variability in marginally redundant multifinger force production tasks. *Experimental Brain Research, 141*(2): 153-165.

Latash, M. L., Shim, J. K., & Zatsiorsky, V. M. (2004). Is there a timing synergy during multi-finger production of quick force pulses?. *Experimental brain research, 159*(1), 65-71.

Leroyer, P., Van Hoecke, J., & Helal, J. N. (1993). Biomechanical study of the final push–pull in archery. *Journal of Sports Sciences, 11*(1), 63-69.

Li, Z. M., Latash, M. L., & Zatsiorsky, V. M. (1998). Force sharing among fingers as a model of the redundancy problem. *Experimental Brain Research, 119*(3), 276-286.

Martin, P. E., Siler, W. L., & Hoffman, D. (1990). Electromyographic analysis of bow string release in highly skilled archers. *Journal of sports sciences, 8*(3), 215-221.

McKinney, W., & McKinney, M. (1997). Archery. brown & benchmark. Madison, WI.

Nishizono, A., Shibayama, H., Izuta, T., & Saito, K. (1987). Analysis of archery shooting techniques by means of electromyography. *International society of biomechanics in sports. Proceedings,* Symposium V, Athens, Greece

Olafsdottir, H., Yoshida, N., Zatsiorsky, V. M., & Latash, M. L. (2005). Anticipatory covariation of finger forces during self-paced and reaction time force production. *Neuroscience letters, 381*(1), 92-96.

Park, J., Jo, H. J., Lewis, M. M., Huang, X., & Latash, M. L. (2013). Effects of Parkinson's disease on optimization and structure of variance in multi-finger tasks. *Experimental brain research, 231*(1), 51-63

Scholz, J. P., Danion, F. Latash, M. L., and Schoner, G. (2002). Understanding finger coordination through analysis of the structure of force variability. *Biological Cybernetics 86*(1): 29-39.

Stuart, J., & Atha J. (1990). Postal consistency in skilled archers, *Journal of Sports Sciences, 8*. 223-234.

Xia, Y. S., Feng, G., & Wang, J. (2005). A primal-dual neural network for online resolving constrained kinematic redundancy in robot motion control. *IEEE Trans Syst Man Cybern B Cybern, 35*(1), 54-64.