한국운동역학회지, 2007, 제17권 3호, pp. 217-224
Korean Journal of Sport Biomechanics
2007, Vol. 17, No. 3, pp. 217-224

손가락 누르기 속력에 따른 Enslaving 효과

Enslaving Effects on Finger Pressing Speed

우병훈*(한양대학교)
Woo, Byung-Hoon*(HanYang University)

ABSTRACT

B. H. Woo, Enslaving Effects on Finger Pressing Speed. Korean Journal of Sport Biomechanics, Vol. 17, No. 3, pp. 217-224, 2007. This study was to investigate the effects of enslaving on finger-tip force of other fingers on finger pressing speed. We hypothesized that the effects depend on finger pressing speed, and the fingers proximity and are larger for fingers that are closer to each other. Six healthy, right-handed subjects(age: 27.1±4.3 yr, height: 175.4±7.2cm, weight 71.3±5.8kg) participated in the experiment.

Each finger showed no significant on task finger speed. In the tasks with two neighboring fingers (e.g. middle and ring finger tasks), the index and middle fingers showed larger forces than the other neighboring fingers. During the index and little finger tasks, the enslaving force magnitude decreased with distance to the task finger (i.e. index finger enslaving force was the smallest during the little finger task).

KEYWORDS : ENSLAVING EFFECTS, FINGER, PRESSING, FORCE

Ⅰ. 서 론

인간은 각 손가락이나 둘, 세 손가락 조합으로 등척성 힘을 발휘할 때, 그 이외의 다른 손가락들에도 어떠한 힘이 발생된다. 이것을 enslaving이라 한다. Enslaving은 힘을 발휘한 손가락 이외의 손가락들의 비자발적 힘이 발휘되는 현상이다. 힘을 가하는 손가락들을 master fingers라고 하고, 이외의 손가락들에서 힘이 발생되는 손가락들을 slave fingers라고 하였다. Enslaving으로 인해, 각 손가락의 신경 명령과 손가락의 힘 사이에 존재하는 직접적인 영향은 없지만, 힘을 가하는 손가락에 보낸 명령은 다른 손가락으로 보내진 명령의 크기가 일치되었다(Zatsiorsky, Li & Latash, 2000).

손가락이 MVC 작업과 병행하여 운동할 때, 각각 다르게 상호작용을 하였다(Kilbreath & Gandevia 1994; Kinoshita, Kawai, & Ikuta, 1995; Latash, Li, & Zatsiorsky, 1998; Li, Latash, & Zatsiorsky, 1998; Li, Latash, Newell, & Zatsiorsky, 1998; Zatsiorsky, Li, & Latash,, 1998; Zatsiorsky et al., 2000; Schieber 2001). Multi-finger 작업시 손가락의 상호작용은 운동과잉

* woowoo@hanyang.ac.kr

(motor redundancy)의 문제의 실질적인 예로 관찰되었다(Bernstein, 1967; Li et al., 1998). 실제로, 운동과잉의 문제로 실질적인 접근의 테스트로, 운동 작업(motor task)에 있어 무한히 가능한 해결방법이 있더라도, 중추신경계(CNS)는 특별한 한 방법을 선택하다는 UCM-가설(uncontrolled manifold hypothesis)을 이용하곤 한다. 그렇지만, 명백하게 포함된 많은 요소들에서 변화와 함께 다중요소체계(multielement system)로 상호작용의 변화는 조사되지 않고 있다.

손가락의 상호작용은 3가지 주요 특성으로 설명되고 있다; (1) 힘 부족(force deficit): multi-finger MVC(maximum voluntary contraction) 작업에서 손가락에 의해 발생된 최고 힘은 single-finger MVC 작업에서 손가락에 의해 발생된 최고 힘보다 작다. 이런 부족은 확실히 master finger가 포함된 수에서 증가되었다 (2) Enslaving: 피험자에게 한개의 master finger로 누르도록 지시했을 때, slave finger에도 힘을 발생한다 (3) 분배(sharing): 총 힘은 힘 크기의 광범위한 범위 이상의 어떤 방식으로 손가락 사이로 분배하였다(Li, Latash & Zatsiorsky, 2000).

이러한 특성중에서 Zatsiorsky et al. (1998)은 multi-finger 작업에서 손가락 끝의 힘을 측정하여 enslaving 효과가 (1) 크고, (2) 거의 체계적이고, (3) 이웃한 손가락들에서 크고, (4) 부가적이 아니라고 보고하였다. 둘이나 세 손가락에 의해 요구된 힘 발생의 작업에서, enslaving 효과는 단지 하나의 손가락에 의해 발생된 힘일 때 작다(폐쇄효과).

최근 손가락에 대한 연구로는 Li et al. (1998)이 손가락 힘의 분배에 관한 연구를 하였고, Zatsiorsky et al. (1998)은 손가락 힘의 조화에 대해 설명하였고, Zatsiorsky et al. (2000)의 연구에서는 손가락들의 enslaving 효과에 대한 연구를 하였다. 또한 Hager-Ross & Schieber(2000)는 손가락의 운동학적인 분석을 통하여 손가락 움직임의 독립성에 대한 연구를 하였고, Li et al. (2003)은 손가락 힘이 발휘될 때, 상호관계를 규명하였다.

선행연구를 살펴본 바, 손가락의 등척성 힘을 이용한 다른 손가락들의 힘의 분배, 과잉, 부족현상 등의 상호작용에 대한 연구가 주류를 이루고 있었다. 이는 운동제어분야 및 로봇공학, 인간공학적 디자인에 유용할 것으로 사료된다. 또한, 스포츠 종목에서 그립에 관련된 장비 개발에 기초자료로 활용될 것으로 기대된다. 이에 본 연구는 손가락의 조절된 힘을 바탕으로 나타나는 이웃 손가락들의 반응을 관찰하여 손가락 사이의 상호반응에 대한 연구의 필요성을 가지게 되었다.

이를 바탕으로, 본 연구의 목적은 각각의 master finger의 누르는 속력에 따라 slave fingers에 나타나는 enslaving 효과의 변화를 알아보는 것이다.

Ⅱ. 연구방법

1. 연구대상

신체질환이 없고 본 실험경험이 없는 대학생 6명의 남자들이 실험에 참여하였다. 모든 피험자들은 오른손잡이들로 선정하였고, 피험자들의 신체적 특성은 평균연령 27.1±4.3yrs, 신장 175.4±7.2cm, 체중 71.3±5.8kg 이었다.

2. 실험장비

실험시, 피험자는 전후면에서 약 45° 외전, 시상면에서 45° 굴곡된 상완과 견관절의 약 45° 굴곡된 상태로 실험테이블에 앉혔다. 원목 보드로 손목과 전완을 고정시켰다. 전완은 4개의 나이론 접착끈으로 보드에 고정시켰다. 피험자의 손바닥 아래에는 편안한 손과 손가락의 일정한 형태를 유지하는데 도움을 주기 위하여 적당한 나무 조각으로 고정하였다. 중수수지관절(metacarpophalangeal; MCP)과 지절간관절(interphalangeal joint; IP)는 모두 20° 굴곡하였다. 엄지손가락은 편안한 자세를 선택하여 정렬하였다.

4개의 압전 센서 (piezoelectric sensors) (model 208A03; Piezotronic)가 힘을 측정하는데 사용하였다. 센서로부터 나오는 아날로그 출력 신호를 AC/DC conditioners (M482M66; Piezotronic)로 연결하였다.

강철 프레임 (140×90 mm) 내부에 4개의 센서를 장치하였다. 각 센서 사이는 프레임내에서 30 mm 떨어진 곳에 설치하였다. 센서의 위치는 60 mm 범위에서 전-후 방향으로 이동할 수 있게 하였다. Gateway 450

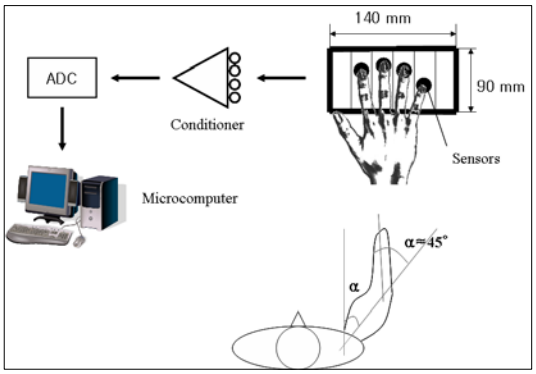

그림 1. 실험 배치도

MHz PC에서 상용 프로그램인 LabView 프로그램을 이용하여 데이터 습득과 처리를 하였다. 모든 데이터의 샘플링 빈도는 50 Hz로 하였다.

3. 실험절차

본 실험은 메트로놈을 이용한 6가지 속력 (75, 100, 125, 150, 175, 200 Hz)으로 하여 각 세션마다 2회의 실시하여 평균을 내었다.

먼저 각 피험자들의 각 손가락에 대한 MVC (maximal voluntary contraction)을 측정하여 MVC의 70%에 해당되는 힘을 계산하였다. 70%에 해당되는 힘의 크기를 모니터상에 선을 그려서 피험자가 인식하기 편하도록 하였다. 각 피험자들에게 센서에 손가락의 위치를 정확히 놓도록 하고 수직으로 정확히 누르도록 교육을 시켰다. 또한, master finger의 실험시 나머지 slave 손가락이 센서에서 떨어지지 않도록 교육시켰다.

실험 전, 피험자는 긴장을 풀게 하였고, '시작'이라는 구호와 함께 컴퓨터 모니터 상에서는 이동 선을 확인할 수 있고, 피험자는 각 속력에 따른 메트로놈의 소리에 따라 해당 손가락을 MVC의 70% 고정선까지 힘을 반복적으로 수축, 이완하였다. 실시 구간은 총 10초로 설정하였다. 각 실시간 휴식시간은 30초, 각 세션간 휴식시간은 2분으로 설정하였다.

4. 자료처리 및 통계처리

10초간 각 실험에서 나온 master finger의 자료중 최고값 (peak value) 3개를 선정하여 평균을 내었고, 그 순간 나온 slave 손가락들의 자료를 수집하여 분석하였다.

메트로놈의 속력에 따라 master finger에서 힘을 줄 때, 속력과 각 손가락들에서 나타나는 MVC에 어떠한 차이가 있는지 알아보기 위해 two-way ANOVA를 실시하였다.

모든 자료처리와 통계처리에 대해서는 MatLab 7.01과 SPSS 13.0으로 분석하였다.

Ⅲ. 연구결과

1. master finger가 검지(index finger)일 경우

검지가 master finger일 때, 주어진 속력에 따라 최대 힘을 발휘하였고, 그때 slave finger에서도 힘이 가해진 힘들을 <표 1>, <그림 2>에서 볼 수 있다.

검지를 master finger로 등척성 힘을 발휘했을 때, 속력에 따른 master finger에는 차이를 보이지 않았다. 그 이외의 slave fingers인 중지, 약지, 소지 모두 차이

표 1. master finger가 검지일 때, 속력에 따른 손가락 힘들의 차이 단위: N

master finger	속력 \ 손가락	검지	중지	약지	소지
검지	75	28.53±2.51	2.72±0.97	0.89±0.15	0.71±0.23
	100	24.83±4.93	2.84±2.07	0.86±0.55	0.73±0.33
	125	27.76±3.47	3.65±2.13	1.33±0.43	1.02±0.22
	150	28.77±3.78	4.07±2.22	1.22±0.53	0.96±0.26
	175	27.27±2.83	3.52±2.41	1.36±0.63	0.93±0.51
	200	28.63±2.03	3.81±2.11	1.12±0.51	0.87±0.34

표 2. master finger가 검지일 때, 속력에 따른 손가락 힘들의 차이 검증

변인	소스	자유도	F-값
검지	속력	5	1.456
	손가락	3	1543.511***
	상호작용	15	.786

표 3. master finger가 중지일 때, 속력에 따른 손가락 힘들의 차이 단위: N

master finger	속력 \ 손가락	검지	중지	약지	소지
중지	75	4.05±0.78	24.00±3.18	2.58±0.24	0.78±0.29
	100	4.43±1.13	27.77±6.25	3.31±0.97	0.93±0.29
	125	4.81±2.47	28.00±4.04	3.71±0.83	1.11±0.67
	150	4.36±1.91	26.70±2.02	4.12±1.59	0.89±0.64
	175	4.73±2.38	26.97±0.80	3.56±1.10	0.57±0.05
	200	4.09±1.62	26.77±0.88	3.03±1.35	0.58±0.25

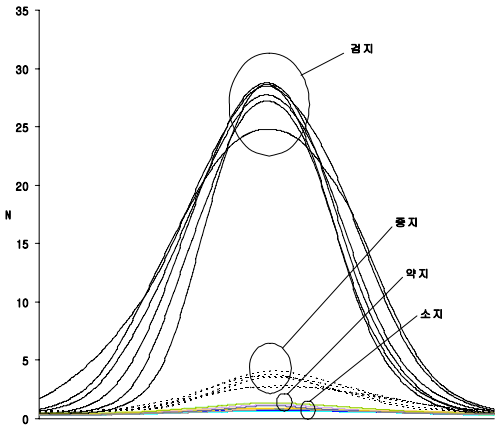

그림 2. master finger가 검지일 때, 각 손가락의 힘 곡선

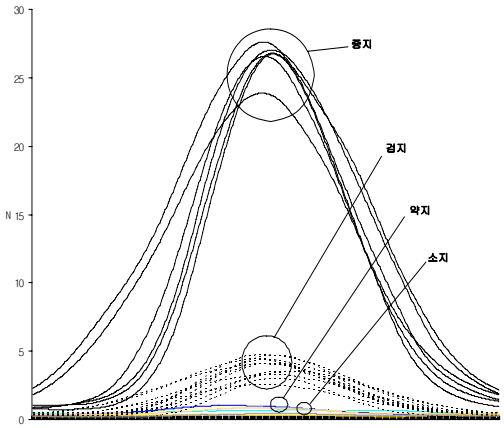

그림 3. master finger가 중지일 때, 각 손가락의 힘 곡선

를 보이지 않았다. 속력에 따른 힘 분배는 보이지 않는 것으로 나타났다.

하지만, slave fingers 사이에서는 통계적으로 현저한 차이(p<.001)를 보였다. 특히, master finger인 검지와 가까운 중지, 약지, 소지 순으로 힘을 발휘한 것으로 나타났다.

2. master finger가 중지(middle finger)일 경우

중지가 master finger로서 힘을 발휘했을 때, 각 손가락의 속력에 따른 차이는 보이지 않았다. slave fingers도 역시 master finger와 동일하게 차이를 나타내지 않았다<표 3><그림 3>.

Master finger인 중지가 힘을 발휘할 때, 나머지 slave fingers 사이에서는 통계적으로 현저한 차이(p<.001)를 보였다<표 4>. 이전 결과에 마찬가지로 중지에 가까이 있는 index와 약지의 힘이 크게 나타났고, 소지는 미미한 힘을 발휘하였다.

3. master finger가 약지(ring finger)일 경우

약지가 master finger로서 등척성 힘을 발휘하였을 때, 이전의 결과와 마찬가지로 메트로놈 속력에 따른 힘의 차이는 보이지 않았다<표 5><그림 4>.

표 4. master finger가 중지일 때, 속력에 따른 손가락 힘들의 차이 검증

변인	소스	자유도	*F*-값
중지	속력	5	2.482
	손가락	3	1137.827***
	상호작용	15	.571

표 5. master finger가 약지일 때, 속력에 따른 손가락 힘들의 차이 단위: N

master finger	속력 \ 손가락	검지	중지	약지	소지
약지	75	0.93±0.55	7.84±2.95	18.78±7.84	5.34±5.77
	100	1.27±0.52	7.87±1.43	20.00±2.19	3.28±1.60
	125	1.37±0.98	9.87±2.90	21.90±6.00	5.19±3.95
	150	1.75±1.21	9.82±1.59	22.97±3.44	4.13±1.59
	175	1.67±0.94	10.10±1.66	23.33±3.91	4.27±2.41
	200	1.31±1.80	8.59±7.67	21.57±4.61	4.18±1.93

표 6. master finger가 약지일 때, 속력에 따른 손가락 힘들의 차이 검증

변인	소스	자유도	*F*-값
약지	속력	5	.813
	손가락	3	346.311***
	상호작용	15	.656

표 7. master finger가 소지일 때, 속력에 따른 손가락 힘들의 차이 단위: N

master finger	속력 \ 손가락	검지	중지	약지	소지
소지	75	0.82±0.28	2.16±0.94	5.91±3.11	22.13±3.96
	100	1.09±0.76	2.19±1.65	6.44±3.25	21.93±3.38
	125	1.33±0.37	2.42±1.27	7.26±3.65	23.33±4.23
	150	1.59±0.67	2.74±1.27	7.65±3.94	23.17±5.35
	175	1.12±0.24	2.11±0.64	7.47±3.56	23.70±4.70
	200	1.23±0.30	2.64±1.41	6.87±3.37	22.70±4.19

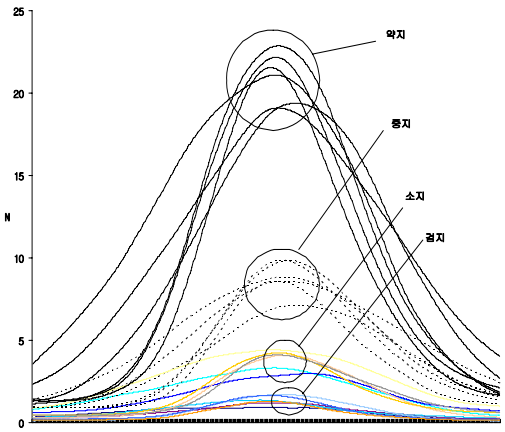

그림 4. master finger가 약지일 때, 각 손가락의 힘 곡선

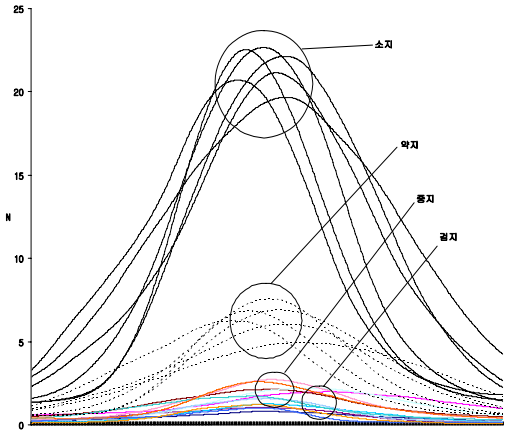

그림 5. master finger가 소지일 때, 각 손가락의 힘 곡선

표 8. master finger가 소지일 때, 속력에 따른 손가락 힘들의 차이 검증

변인	소스	자유도	*F*-값
소지	속력	5	.218
	손가락	3	761.963***
	상호작용	15	.163

하지만, 각 속력에 따라 slave fingers 사이에는 차이($p<.001$)를 보였다<표 6>. 약지가 master일 때, 또한 약지와 가장 근접한 중지와 소지가 검지보다 더 큰 힘을 발휘한 것으로 나타났다.

4. master finger가 소지(little finger)일 경우

손가락들 중 가장 작은 소지의 경우 또한 master finger로서 힘을 발휘할 때, 각 속력에 따른 차이를 보이지 않았다<표 7><그림 5>.

소지가 힘을 발휘할 때, 이전 결과들과 마찬가지로 소지와 가장 근접한 손가락인 약지가 slave finger에서 가장 큰 힘을 발휘했고, 중지, 검지 순으로 힘을 발휘한 것으로 나타났다.

Ⅳ. 논 의

이전에 보고된 손가락 누르는 힘에 관한 연구들에서는 한손 또는 양손을 이용한 손가락 힘의 분배(sharing)(Li et al., 1998; Latash et al., 1998), 부족(deficit)(Li, Danion, Latash, Li & Zatsiorsky, 2001; Li, Zatsiorsky, Li, Danion & Latash, 2001), 과잉(redundancy)(Latash, et al., 1998; Li, et al., 1998) 등 손가락 힘 사이의 상호작용에 대한 운동역학적 연구들과 손가락의 움직임을 통한 운동학적 특성을 다루는 연구들(Novak, Filler, & Houk, 2000; Hager-Ross & Schieber, 2000)이 주류를 이루고 있다. 본 연구에서는 이러한 선행연구를 토대로 손가락의 자발적인 힘을 속력에 맞추어 누르기를 했을 때, 어떠한 변화가 나타나는지에 대해 분석하였다.

피험자들은 메트로놈의 소리를 들으면서, 미리 master finger로 설정된 각 손가락을 이용하여 센서에 힘을 가하였다. 주어진 6가지의 속력(75, 100, 125, 150, 175, 200 Hz)에 따라, 각각의 master 및 slave fingers를 비교해 본 결과, 아무런 차이를 보이지 않았다. 본 연구에서는 속력이 빨라짐에 따라, 각 master fingers가 충분한 MVC를 발휘하지 못할 것으로 예상하였지만, 통계적으로 차이가 없는 것으로 밝혀졌다. 누르는 속력이 빨라짐에 따라 뇌에서 전달되는 신호가 말단부분인 손가락 끝마디까지 전달되는 반응시간이 떨어질 것으로 기대하였지만, 우리가 생각한 바와는 다르게 반응시간은 더 빠르게 작용하여, 아무런 차이를 보이지 않은 것으로 사료된다.

또한, master fingers에 힘이 주어졌을 때, 선행연구의 결과들과 유사하게 master finger와 가장 근접한 손가락들이 더 큰 힘을 발휘하는 것으로 분석되었다. 이는 가장 근접한 손가락들 사이에서 힘을 발휘할 때, 동일한 근육을 이용하는 것으로 사료된다. master finger에서 멀어질수록 발휘된 힘이 약해지는 결과들이 이를 뒷받침해주고 있었다.

Li et al.(1998)의 연구에 따르면, 검지가 master finger 일 때, 검지 49.1N, 중지 10.5N, 소지 5.5N, 약지 2.7N을 보여, 각각 총 힘의 72%, 15% 8%, 4% 힘을 발휘하였다. 중지가 master finger 일 때, 검지 14.0N, 중지 38.0N, 소지 12.9N, 약지 4.1N을 보여, 각각 총 힘의 20%, 55%, 8%, 4%의 힘이 발휘되었고, 약지가 master finger 일 때, 검지 9.4N, 중지 16.5N, 소지 29.9N, 약지 10.6N을 보여, 각각 총 힘의 14%, 25%, 45%, 16%의 힘이 발휘되었으며, 소지가 master finger 일 때, 검지 7.7N, 중지 6.7N, 소지 15.0N, 약지 24.8N으로, 각각 총 힘의 14%, 12%, 28%, 46%의 힘이 발휘되었다. 본 연구에서는 master finger가 검지일 때, 모든 속력의 평균 힘은 검지 84%, 중지 10%, 약지 3%, 소지 3%를 보였고, master finger가 중지일 때, 모든 속력의 평균 힘은 검지 12%, 중지 76%, 약지 10%, 소지 2%를 보였고, master finger가 약지일 때, 모든 속

력의 평균 힘은 검지 4%, 중지 25%, 약지 59%, 소지 12%를 보였고, master finger가 소지일 때, 모든 속력의 평균 힘은 검지 4%, 중지 7%, 약지 21%, 소지 69%를 보였다.

선행연구와 비교해 보면, master finger의 힘이 강하게 나타났지만, master finger와 이웃한 손가락들의 힘이 다른 손가락보다 더 큰 힘을 발휘하는 것을 확인할 수 있었다.

V. 결 론

본 연구는 각각의 master finger의 누르는 속력에 따라 slave 손가락들에 나타나는 enslaving 효과의 변화를 알아보는 것이다. 이에 본 연구의 결론은 다음과 같다.

1. 메트로놈의 속력(75, 100, 125, 150, 175, 200 Hz)에 따른 각각의 master finger의 등척성 힘을 발휘할 때, 손가락들의 MVC에는 차이를 보이지 않았다.

2. Master finger에 힘을 발휘했을 때, 각각의 손가락 힘에는 차이를 보였고, master finger와 근접할수록 더 강한 힘을 발휘하였다.

손가락에 대한 연구는 대부분 등척성 힘에 관련된 운동역학적 연구와 손가락 움직임에 관련된 운동학적 연구가 주류를 이루고 있다. 매우 세밀한 운동을 할 수 있는 손가락에 대한 차후 연구에서는 각 손가락들의 움직임을 통해 이루어지는 힘의 배분관계에 대한 운동학적 요인과 운동역학적 요인을 결합시킨 연구가 필요로 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

Bernstein, N.A.(1967). *The co-ordination and regulation of movements*. Pergamon Press, Oxford

Crowninshield, R.D., & Brand, R.A.(1981). The prediction of forces in joint structures: distribution of intersegmental resultants. *Exercise Sci Rev*, 9, 159-181

Hager-Ross, C., & Schieber, M.H.(2000). Quantifying the independence of human finger movement: comparisons of digits, hands, and movement frequencies. *The Journal of Neuroscience*, 20(22), 8542-8550

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

Latash, M.L.(1996). How does our brain make its choices? In: Latash ML, Truvey MT (eds) Dexterity and its development. Erlbaum, Mahwah, NJ, 277-304

Li, S., Danion, F., Latash, M. L., Li, Z. M. & Zatsiorsky, V. M.(2001). Bilateral deficit and symmetry in firger force production during two-hand multifinger tasks. *Exp Brain Res*, 141, 530-540

Li, Z. M., Zatsiorsky, V. M., Li, S., Danion, F., & Latash, M. L.(2001). Bilateral multifinger defictis in symmetric key-pressing tasks. *Exp Brain Res*, 140, 86-94

Li, Z.M., Latash, M.L., & Zatsiorsky, V.M.(1998). Motor redundancy during maximal voluntary contraction in four-finger tasks. *Exp Brain Res*, 122(1), 71-78

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

Novak, K. E., Miller, L. E., & Houk, J. C.(2000). Kinematic properties of rapid hand movements in a knob turning task. *Exp Brain Res*, 132, 419-433

Prilutsky, B.I., & Zatsiorsky, V.M.(1994). Tendon action of two-joint muscles: transfer of

mechanical energy between joints during jumping, landing, and running. *J Biomech*, 27, 25-34

Prilutsky, B.I., Petrova, L.N., & Raitsin, L.M.(1996). Comparison of mechanical energy expenditure of joint moments and muscle forces during human movement. *J Biomech*, 29, 405-416

Rosenbaum DA, Engelbrecht SE, Bushe MM, & Loukopoulos LD (1993). Knowledge model for selecting and producing reaching movements. *J Motor Behav*, 25, 217-227

Zatsiorsky, V. M., & Prilutsky, B.I.(1992). Estimating muscle forces from a given movement. In: Zatsiorsky VM (ed) Biomechanics of muscles and the structure of movement. Contemporary problems of biomechanics, vol 7. *Russian Academy of Science*, Nizhny Novgorod, 81-123

Zatsiorsky, V. M., Li, Z.M, & Latash, M.L.(1998). Coordinated forcce production in multi-finger tasks: finger interaction and neural network modeling. *Biol Cybern*, 79, 139-150

Zatsiorsky, V. M., Li, Z.M, & Latash, M.L.(2000). Enslaving effects in multi-finger force production. *Exp Brain Res*, 131, 187-195

투 고 일 : 7월 31일
심 사 일 : 8월 6일
심사완료일 : 9월 20일