creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

체육학박사 학위논문

지각정보에 따른
운동 타이밍과 협응 제어 연구

2022년 8월

서울대학교 대학원

체육교육과

정 재 욱

지각정보에 따른
운동 타이밍과 협응 제어 연구

지도교수 김 선 진

이 논문을 체육학박사 학위논문으로 제출함

2022년 8월

서울대학교 대학원

체육교육과

정 재 욱

정재욱의 박사 학위논문을 인준함

2022년 8월

위 원 장	권 성 호	(인)
부위원장	박 재 범	(인)
위 원	안 주 은	(인)
위 원	고 지 현	(인)
위 원	김 선 진	(인)

국문초록

지각정보에 따른 운동 타이밍과 협응 제어 연구

정 재 욱
서울대학교 대학원
체 육 교 육 과

움직임의 타이밍은 지각하는 정보와 동작의 협응에 따라 결정된다. 지각과 동작이 최적으로 결합 되는 과정에서 어떤 정보가 중요하고, 어떻게 동작의 특성이 변화하는지 관찰하는 것은 인간행동을 이해하는 데 매우 중요한 문제이다. 본 연구의 목적은 지각정보에 따른 운동 타이밍과 협응 제어를 비교하고, 운동 타이밍 향상에 필요한 전략을 탐색하는 것이다. 이를 위해 30명의 건강한 성인을 대상으로(age: 26.3 ± 4.7y, female: 2) 가상현실에서 주기적인 자극에 따라 원을 그리는 타이밍 과제를 진행하였다. 실험1의 동기화 과제에서는 자극의 양식(청각, 시각, 촉각)과 템포(20bpm, 30bpm, 60bpm)에 따른 타이밍 정확성과 가변성, 공간 정확성, 예측 경향성, 그리고 감각 기여도를 비교하였다. 실험2에서는 템포가 변하는 적응 과제를 통해 타이밍 수정 반응과 협응 특성을 알아보았다. 연구결과 타이밍 정확성에 유리한 감각정보는 자극의 템포에 따라 차이가 있었다. 구체적으로 빠른 템포에서 촉각정보, 중간 템포에서는 청

각정보가 타이밍 정확성에 효과적이었다. 또한, 템포가 느릴수록 타이밍 예측 경향성이 크고, 템포가 감소하는 변화는 증가의 경우보다 타이밍 과수정 반응이 나타났다. 로지스틱 회귀분석을 활용한 감각 기여도 비교 결과, 다감각 조건에서 촉각, 시각, 청각 순으로 타이밍 정확성에 미치는 영향이 큰 것으로 나타났다. 마지막으로 적응 과제에서 감각양식은 협응 특성에 영향을 미치지 않았으나, 템포의 변화는 협응 패턴과 안정성의 변화를 가져왔다.

본 연구는 지각과 동작의 두 가지 측면에서 다양한 운동 타이밍의 특성을 검증하고자 하였다. 실제 스포츠 현장에 연구 결과를 적용하기 위해서는 지각정보의 다양한 측면에서 운동 타이밍과 협응 제어를 살펴볼 필요가 있으며, 감각 기여도의 정량화 및 예측을 통하여 타이밍 정확성에 유리한 전략을 세우는 데 도움을 줄 수 있을 것이다. 최종적으로 본 연구를 통하여 도출한 다양한 결과는 운동 타이밍을 이해하고 발전시키는데 기초적인 자료로서 운동학습 현장에서 지도자의 피드백 정보 및 학습자의 수행력에 도움을 줄 것이라 기대한다.

주요어 : 지각정보, 운동 타이밍, 운동 협응, 감각운동 동기화, 감각 양식, 감각 기여도

학 번 : 2015-30436

목차

Ⅰ. 서론 ····· 1

1. 연구의 필요성 ····· 1
2. 연구목적 ····· 7
3. 연구가설 ····· 7
4. 연구의 제한점 ····· 9
5. 용어의 정의 ····· 10

Ⅱ. 이론적 배경 ····· 12

1. 운동행동 이론과 타이밍 ····· 12

1) 운동 시스템 접근 ····· 14
① 정보처리 이론 ····· 14
2) 동작 시스템 접근 ····· 16
① 다이내믹 시스템 이론 ····· 17
② 생태학적 이론 ····· 19
3) 운동제어 이론과 타이밍 제어 기전 ····· 22
① 자동-인지적 타이밍 제어 ····· 23
② 사건-발생적 타이밍 제어 ····· 24

2. 운동 타이밍 연구 ····· 26

1) 수행과제에 따른 타이밍 연구 ····· 27
① 타이밍 지각 연구 ····· 27
② 손가락 태핑 패러다임 ····· 29
③ 동작의 특성과 타이밍 ····· 30
④ 동기화-연속 반응 패러다임 ····· 31
2) 수행자의 특성에 따른 타이밍 연구 ····· 32
3) 타이밍 제어 전략 : 예측과 오류 수정 ····· 33

① 예측과 타이밍 ····· 33
② 지각정보와 타이밍 ····· 35
③ 타이밍 오류 수정 ····· 37
④ 메트로놈 동기화 훈련 ····· 37
4) 타이밍의 신경학적 기전 ····· 38
3. 운동 협응과 가변성 ····· 40

Ⅲ. 연구방법 ····· 42
1. 연구대상 ····· 42
2. 실험장비 ····· 42
3. 실험과제 ····· 44
4. 실험절차 ····· 44
1) 동기화 과제(synchronization task) ····· 45
2) 적응 과제(adaptation task) ····· 45
5. 실험설계 ····· 46
6. 자료수집 및 분석 ····· 47
1) 시간적 변인(temporal variables) ····· 47
① 비동기성(asynchrony) ····· 47
② 타이밍 가변성(CV of asynchrony) ····· 47
③ 부적 비동기성(negative asynchrony) ····· 48
④ 타이밍 수정 반응(phase correction response, PCR) ····· 48
2) 감각 기여도(sensory reliability) ····· 48
3) 공간적 변인(spatial variables) ····· 50
4) 운동학적 변인(kinematic variables) ····· 50
① 상대위상(relative phase) ····· 51
② Mean absolute relative phase(MARP) ····· 51
③ SD of relative phase(SDRP) ····· 51
7. 통계처리 ····· 52

Ⅳ. 연구결과 ····· 53
1. 동기화 과제(Task1: Synchronization task) ····· 53
1) 시간적 변인(temporal variables) ····· 53
① 타이밍 오류: Asynchrony ····· 53
② 타이밍 가변성: CV of asynchrony ····· 57
③ 예측 경향성: Negative asynchrony ····· 60
2) 감각 기여도(sensory reliability) ····· 63
① 청각-시각 조건(Audio-Visual) ····· 63
② 청각-촉각 조건(Audio-Tactile) ····· 66
③ 시각-촉각 조건(Visual-Tactile) ····· 68
3) 공간적 변인(spatial variables) ····· 70
① 관상면에서의 공간 정확성 및 가변성 ····· 70
② AP방향의 공간 정확성 및 가변성 ····· 71
2. 적응 과제(Task2: Adaptation task) ····· 72
1) 타이밍 수정 반응(PCR) ····· 72
2) 운동 협응(motor coordination) ····· 74
① 협응 패턴(coordination pattern): MARP ····· 76
② 협응 안정성(coordination stability): SDRP ····· 77

Ⅴ. 논의 ····· 78
1. 지각정보에 따른 운동 타이밍 ····· 78
1) 타이밍 정확성 및 가변성 ····· 78
2) 타이밍 예측 및 적응 ····· 80
2. 운동 타이밍의 감각 기여도 ····· 82
3. 지각정보에 따른 협응 특성 ····· 84

Ⅵ. 결론 ····· 86
Ⅶ. 제언 ····· 87
참고문헌 ····· 88
Abstract ····· 105

<표 차례>

표 1. 연구 대상자 특성 ····· 42
표 2. Experimental design ····· 46
표 3. 팔꿈치와 어깨 관절 움직임의 상대적 관계 ····· 51
표 4. Statistical methods ····· 52
표 5. 지각정보에 따른 비동기성 ····· 54
표 6. 비동기성 Two-way RM ANOVA 결과 ····· 55
표 7. 지각정보에 따른 타이밍 가변성 ····· 57
표 8. 타이밍 가변성 Two-way RM ANOVA 결과 ····· 58
표 9. 지각정보에 따른 부적 비동기성 ····· 60
표 10. 부적 비동기성 Two-way RM ANOVA 결과 ····· 61
표 11. 청각-시각 조건의 GLM 분석 결과(60bpm) ····· 64
표 12. 청각-시각 조건의 GLM 분석 결과(30bpm) ····· 65
표 13. 청각-촉각 조건의 GLM 분석 결과(60bpm) ····· 66
표 14. 청각-촉각 조건의 GLM 분석 결과(20bpm) ····· 67
표 15. 청각-촉각 조건의 GLM 분석 결과(60bpm) ····· 69
표 16. MRE의 Two-way RM ANOVA 결과 ····· 70
표 17. SD_{MRE}의 Two-way RM ANOVA 결과 ····· 70
표 18. SD_{DE}의 Two-way RM ANOVA 결과 ····· 71
표 19. 템포 변화 및 자극양식에 따른 PCR(Task2) ····· 72
표 20. PCR의 Two-way RM ANOVA 결과(Task2) ····· 73
표 21. 템포에 따른 MARP 및 SDRP(Task2) ····· 74

<그림 차례>

그림 1. 가상현실 장비(HMD, controller) ····· 43
그림 2. 관성센서 ····· 43
그림 3. 관성센서 부착 위치 ····· 43
그림 4. Unity 과제 설정 화면 ····· 43
그림 5. 원 그리기 과제 ····· 44
그림 6. Maximum likelihood estimation(MLE) ····· 49
그림 7. 원과 수행 궤적 ····· 50
그림 8. 거리 오차 ····· 50
그림 9. 지각정보에 따른 비동기성(barplot, Task1) ····· 53
그림 10. 지각정보에 따른 비동기성(lineplot, Task1) ····· 54
그림 11. 비동기성에 대한 지각정보의 주효과 ····· 55
그림 12. 비동기성에 대한 지각정보의 상호작용효과 ····· 56
그림 13. 지각정보에 따른 타이밍 가변성 ····· 57
그림 14. 타이밍 가변성에 대한 지각정보의 주효과 ····· 58
그림 15. 타이밍 가변성에 대한 지각정보의 상호작용효과 ····· 59
그림 16. 지각정보에 따른 부적 비동기성 ····· 60
그림 17. 부적 비동기성에 대한 지각정보의 주효과 ····· 61
그림 18. 부적 비동기성에 대한 지각정보의 상호작용효과 ····· 62
그림 19. 청각-시각 조건의 비동기성(좌)과 타이밍 가변성(우) 비교 ··· 63
그림 20. 청각-시각 조건의 로지스틱 회귀분석 결과(60bpm) ····· 64
그림 21. 청각-시각 조건의 로지스틱 회귀분석 결과(30bpm) ····· 65
그림 22. 청각-촉각 조건의 비동기성(좌)과 타이밍 가변성(우) 비교 ··· 66
그림 23. 청각-촉각 조건의 로지스틱 회귀분석 결과(60bpm) ····· 67
그림 24. 청각-촉각 조건의 로지스틱 회귀분석 결과(20bpm) ····· 68
그림 25. 시각-촉각 조건의 비동기성(좌)과 타이밍 가변성(우) 비교 ··· 68
그림 26. 시각-촉각 조건의 로지스틱 회귀분석 결과(60bpm) ····· 69
그림 27. 수행의 공간 정확성 및 가변성(frontal plane) ····· 71

그림 28. 수행의 공간 정확성 및 가변성(AP direction) ····· 71
그림 29. 템포 변화 및 자극양식에 따른 PCR(Task2) ····· 73
그림 30. PCR에 대한 템포 변화의 주효과(좌: 분포 비교, 우: 평균 비교) ··· 74
그림 31. 시간에 따른 어깨의 각도(왼쪽 위), 각속도(오른쪽 위), 위상각(왼쪽 아래), 팔꿈치-어깨 상대위상(오른쪽 아래) 자료(Sub.308, Task2) ····· 75
그림 32. 템포 및 자극양식에 따른 MARP(위) 및 SDRP(아래) ····· 75
그림 33. 어깨 움직임별 MARP에 대한 템포 변화의 주효과(Task2) ·· 76
그림 34. SDRP에 대한 템포 변화의 주효과(Task2) ····· 77
그림 35. 템포 변화에 따른 타이밍 오류 수정 반응(Sub.1, Task2) ····· 82

<수식 차례>

수식 1. Asynchrony ····· 47
수식 2. Timing variability ····· 47
수식 3. Negative asynchrony ····· 48
수식 4. Phase correction response(PCR) ····· 48
수식 5. Logistic response function ····· 48
수식 6. Odds ····· 48
수식 7. logit ····· 49
수식 8. Odds ratio ····· 49
수식 9. Mean radial error(MRE) ····· 50
수식 10. Phase angle ····· 51
수식 11. Relative phase ····· 51
수식 12. Mean absolute relative phase(MARP) ····· 51
수식 13. SD of relative phase(SDRP) ····· 51

Ⅰ. 서론

인간은 환경의 변화에 적응하고 동작을 안정적으로 제어하고자 한다. 특히, 운동에서 타이밍(motor timing)은 외부의 정보를 바탕으로 인지적, 신체적 수준에서 안정적이면서도 변화에 쉽게 적응할 수 있는 능력이 중요하다. 생태학적 관점에 따르면 지각되는 정보와 동작은 매우 밀접하게 상호작용하며 결합하게 된다(Gibson, 1950). 그러나 인간의 몸은 수많은 자유도로 이루어진 복잡한 시스템이고, 이를 둘러싼 환경에는 수많은 정보가 존재한다. 이런 복잡성으로 인해 수행에 필요한 정보를 지각하고, 성공적으로 동작을 제어하는 것은 어려운 문제이다. 따라서 인간이 타이밍을 지각하고 동작을 제어하는데 효과적인 지각정보를 탐구하는 것은 매우 도전적이고 흥미로운 일이라 할 수 있다.

1. 연구의 필요성

숙련된 운동기술은 정확한 타이밍으로 원하는 동작을 수행하는 것으로 이를 위해서는 효과적인 운동제어가 요구된다. 여기서 정확한 타이밍은 신체의 움직임이 시간과 공간의 조화로움을 이룰 때 가능하다(Kelso, 1995). 운동제어 연구에서 운동 타이밍은 초점의 위치에 따라 외적 타이밍(external timing)과 내적 타이밍(internal timing)으로 구분할 수 있다(Zelaznik, 2018). 외적 타이밍은 움직이는 공을 잡거나 칠 때 동작과 공이 시공간적으로 일치하는 것과 관련된다. 반면, 걷기나 달리기, 피아노 연주처럼 연속적인 움직임에서는 내적 타이밍의 템포(tempo)와 리듬(rhythm)이 중요한 속성이다(김선진, 2009).

하지만, 운동수행에서 두 가지 타이밍은 상호 관련되기에 구분하기보다 복합적으로 고려되어야 한다. 날아오는 공을 정확하게 예측하였더라도 움직임이 적절히 제어되지 않는다면 잡기 어려우며, 반대의

경우도 마찬가지다. 운동선수나 전문 음악가의 경우 이런 동작의 내·외적인 타이밍이 자연스럽고 조화롭기에 숙련된 수행이 가능하다고 할 수 있다(Zanone & Kelso, 1992). 따라서 타이밍을 예측하고, 일치시키기 위해 중요한 정보가 무엇이고, 동작을 효율적으로 조직화하기 위한 협응은 어떤 특성을 보이는지 복합적으로 살펴볼 필요가 있다.

우리는 움직일 때 기본적으로 다양한 감각정보를 바탕으로 수행한다. 외야수는 야구공을 잡을 때 보이는 공의 궤적과 함께 타구 소리를 활용하여 낙하지점을 예측하고 움직인다. 그리고 공을 잡을 때 손의 촉각정보를 활용하여 정확한 타이밍에 힘을 줄 수 있다. 이와 같은 시각, 청각, 촉각은 대표적인 감각양식(sensory modality)으로 타이밍 연구에서 이들 감각이 운동 타이밍에 어떤 효과가 있는지는 주요 관심이었다. 이를 탐구한 연구에서는 주로 외부의 연속적인 자극과 동작을 일치시키는 감각운동 동기화(sensorimotor synchronization) 과제를 사용하여 타이밍 특성을 비교하였다(Repp & Su, 2013).

그리고 이러한 감각운동 동기화 과제에서는 여러 감각이 혼합된 다감각(multisensory) 조건에서 인간이 환경의 정보를 어떻게 활용하는지 확인하려는 시도가 진행되었다. 둘 이상의 감각을 수용할 때 우리의 중추신경은 과제에 적합한 감각에 의존하거나, 둘 이상의 감각양식을 결합하여 활용한다(Welch & Warren, 1980). 따라서 감각이 운동 타이밍에 영향을 주는 기여도(reliability)는 감각에 따라 차이가 있다. 이러한 영향력의 차이를 구분하기 위해 감각 결합(sensory integration)과 관련된 연구에서는 최대우도 추정법(maximum likelihood estimation, MLE)을 활용하여 결합된 감각에서 각 감각이 타이밍에 미치는 기여도를 추정하였다(Alais & Burr, 2004; van Beers et al., 1999; Ernst & Banks, 2002).

기존의 타이밍 연구에서는 일반적으로 청각 자극이 시각이나 촉각보다 타이밍 지각 및 수행에 효과적이라고 알려져 있다(Elliott et al., 2010; Kolers et al., 1985; Repp et al., 2004; Varlet et al., 2012). 이들

연구에서는 소리 자극의 경우 식별할 수 있는 시간적 해상도(temporal resolution)가 시각이나 촉각정보보다 높고, 뇌에서 감각과 운동을 담당하는 영역이 강하게 결합(coupling)하기 때문이라고 설명한다(Grahn et al., 2011).

그리고 다감각의 경우 하나의 감각보다 감각운동 동기화에 더욱 유리하며, 특히 빠른 템포의 조건에서도 안정적인 협응 상태를 보인다고 하였다(Kelso et al., 2001; Wing et al., 2010). 관련하여 최적 다감각 통합모델(optimal multisensory integration)에서는 혼합된 감각정보는 감각 간 보상작용으로 지각과 동작의 협응 관계가 강하게 결합하기 때문에 타이밍 제어에 효과적이라고 하였다(Drugowitsch et al., 2014). 하지만, 감각정보가 3개 이상이면 오히려 인지적 부하를 가져오기 때문에 타이밍 수행에 부정적일 수 있다는 결과도 보고되고 있다(Elliott et al., 2010; Ernst & Bülthoff, 2004).

한편, 다감각의 경우 청각정보가 시각이나 촉각정보보다 시간적 사건에 대해 영향력이 우세하다고 알려져 있다(Fendrich & Corballis, 2001; Morein-Zamir et al., 2003; Vroomen et al., 2004; Bresciani et al., 2005). 이러한 청각정보의 우세성으로 시각정보와 동작의 동기화를 방해하지만, 그 반대 현상은 발생하지 않는다고 보고되기도 하였다(Repp & Penel, 2004; Kato & Konishi, 2006).

또한, 파킨슨병 환자의 보행 타이밍 정확성을 비교한 연구에서 시각정보는 타이밍 정확성에 효과가 없지만, 청각정보는 효과적이었다(Arias & Cudeiro, 2008). 그러나, 감각양식보다 정보의 양에 따라 반대의 결과를 보이기도 하였으며(Roerdink et al., 2011), 청각과 촉각의 양식을 결합한 조건이 청각과 시각의 결합 조건보다 정확한 타이밍으로 걷기를 수행하는 다양한 결과가 보고되었다(Nieuwboer et al., 2007).

이처럼 타이밍에 효과적인 감각정보를 살펴본 연구를 통해 청각정보가 다른 감각양식에 비해 효과적인 것을 알 수 있다. 그러나 감각이 혼합될 경우, 대상이나 과제에 따라 상반된 결과를 나타낼 수 있

다. 그리고 대부분의 선행연구에서는 단순하고 불연속적인 손가락 태핑(tapping) 과제를 이용하였기에, 이를 연속적인 움직임과 실제 다양한 동작에 적용될 수 있는지 추가적인 검증이 필요하다.

운동 타이밍에서 정보를 지각할 때 어떤 감각정보 양식이 타이밍 정확성에 효과적이냐의 문제와 함께 신체 분절의 효과적인 제어와 동작의 안정성(stability)은 신체적 측면에서 매우 중요하다. 특히, 리드미컬한(rhythmic) 움직임에서 보이는 협응 안정성은 속도(Hoyt & Taylor, 1981; Kelso, 1984), 무게(Scholz, 1993), 외부의 힘(Kelso & Schöner., 1988), 주의집중(Tembrado et al., 1999), 환경정보(Byblow et al., 1994; Fink et al., 2000) 등 다양한 요인에 의해 강화될 수 있다(Kudo et al., 2006). 이 중에서 동작의 속도는 운동 시스템(motor system)의 다이내믹에 영향을 미치는 주요 요인으로(Haken, 1977) 다양한 연구에서 동작의 안정성을 확인하기 위한 변인으로 활용되었다.

손가락 태핑 속도를 조절한 타이밍 연구에서는 1Hz 이하의 빠르기 조건에서 템포가 증가하면 타이밍 정확성도 좋아진다는 공통된 결과를 나타냈다(Fujii et al., 2011; McAuley et al., 2006; Kurgansky & Shupikova, 2011; Repp, 2008; Zendal et al., 2011). 반면, 원 그리기 과제에서는 빠른 템포에서 타이밍 정확성이 증가하지만, 가변성 또한 증가하였다(Lorås et al., 2012). 이는 손가락 태핑보다 원 그리기가 동작의 복잡성이 크기 때문에 지각적 요인뿐만 아니라 동작의 안정성이 타이밍 수행력에 영향을 미쳤을 것이라 예상할 수 있다. 따라서 타이밍 제어와 동작의 속도의 관계에서 동작의 안정성을 비교하는 것은 수행의 결과적인 수준(goal space)뿐만 아니라 수행 과정(task space) 대한 이해를 위한 심층적인 접근이라 할 수 있다.

또한, 지금까지의 살펴본 타이밍 연구는 감각양식이나 동작의 속도를 통합적으로 분석하기보다는 단일 수준에서 비교했다는 한계를 보인다. 이처럼 오랜 타이밍 연구에도 불구하고 타이밍 수행력 향상을 위해 지각정보를 체계적으로 살펴본 연구는 부족하다(Janzen et al.,

2014). 생태학적 다이내믹 관점에서 지각과 동작의 결합은 동작의 속도와 중요한 관련성 맺고 있기에(Gibson, 1977; Kelso, 2000; Kugler & Turvey, 1987), 감각양식과 속도 변인의 복합적 연구는 두 변인의 상호작용 효과를 구체적으로 확인할 수 있는 의미가 있을 것이다.

지금까지 살펴본 연구에서 주로 사용된 손가락 태핑 과제는 인지적 타이밍 능력과 관련된 단순한 동작이고, 원 그리기 과제의 경우 5-10cm 크기의 작은 동작이었다(Robertson et al., 1999; Spencer & Ivry, 2005; Studenka & Zelaznik, 2008; Zelaznik et al., 2005). 그리고 이들 연구는 수행의 시간 정확성을 확인하는 타이밍 연구이기 때문에 동작의 특성에 대한 탐구가 부족하였다(Hausdorff et al., 1996; Miura et al., 2011; Miyata et al., 2021; Studenka & Zelaznik, 2011; Zentner & Eerola, 2010). 그러나 실제 스포츠 상황에서 필요한 운동기술은 다양한 신체요소의 참여를 요구하는 복잡한 형태이고, 그것들의 시공간적 조화로움이 운동수행을 결정하게 된다. 따라서 기존의 타이밍 연구 결과를 실제 다이내믹한 운동기술에 적용하려면 자유도가 확장된 동작으로 과제를 수행하여 생태학적 타당도를 확보할 필요가 있다.

최근에는 가상현실 기술의 발달로 실제 세계의 다양한 정보들을 체계적으로 조작하고 실제와 같은 몰입감을 제공할 수 있게 되었다. 이를 활용한 인간의 운동행동 연구는 인간 움직임에 대한 입체적이고 정밀한 검증이 가능하다고 할 수 있다(Cohn, Dizio, & Lackner, 2000; Ghahramani & Wolpert, 1997). 따라서 가상현실을 활용한 연구는 기존의 연구에서 보인 물리적 한계를 극복하고, 인간의 움직임을 심층적으로 이해하는데 큰 기여(寄與)를 할 것이라 기대한다.

하지만, 지금까지 소개한 타이밍 연구는 일정한 자극에 어떻게 하면 동작을 안정적이고 정확하게 유지하느냐에 대한 단순한 접근이라 할 수 있다. 이러한 조건에서 인간은 자극을 예측하거나 이에 반응하지만, 실제 스포츠에서는 예측하기 어려운 다양한 상황이 발생한다. 따라서 타이밍 정확성은 템포와 리듬을 일정하게 유지하는 안정성과

함께 변화에 적절히 대응할 수 있는 적응력이 중요한 속성이라 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 먼저 일정한 자극을 제공하는 감각운동 동기화 과제에서 자극의 양식과 템포에 따른 타이밍 특성과 다감각 조건에서 감각 기여도를 심층적으로 검증하고자 한다. 그리고 예측하기 어려운 템포의 변화에 대응하여 인간이 어떻게 인지적으로 타이밍을 제어하고 동작의 협응이 변화하는지 다이내믹 측면에서 살펴보고자 한다.

이상과 같이, 본 연구에서는 선행연구의 한계를 극복하고 인간 움직임을 지각과 동작 측면에서 이해하고자 하였다. 이를 통해 지각정보와 운동 타이밍 및 동작의 협응 특성 사이의 관계가 충분히 설명된다면, 연구 결과를 실제 운동기술에 적용할 수 있는 의미 있는 결과를 얻을 수 있으리라 기대한다. 또한, 본 연구를 통해 운동 지도자와 학습자 모두에게 최적의 감각정보와 동작의 협응을 고려한 효과적인 학습방법을 제공하여 운동제어와 학습에 실질적인 도움을 주는 가치를 기대해 본다.

2. 연구목적

본 연구의 목적은 지각정보에 따른 운동 타이밍과 협응 제어를 살펴보고, 타이밍 향상에 필요한 전략을 탐색하는 것이다. 이를 위해 운동 타이밍 과제에서 자극의 양식과 템포에 따른 운동 타이밍, 감각 기여도, 운동학적 특성을 살펴보고자 하였다. 이에 따라, 본 연구에서는 다음과 같은 세부적인 연구목적을 설정하였다.

1) 지각정보에 따른 운동 타이밍을 비교한다.

2) 운동 타이밍에 영향을 미치는 감각 기여도를 추정한다.

3) 템포 변화에 따른 운동 타이밍의 적응 과정을 살펴본다.

4) 템포 변화에 따른 동작의 협응 패턴과 안정성을 확인한다.

3. 연구가설

본 연구는 운동 타이밍을 시간과 공간 측면에서 비교하고, 운동학적 특성과 함께 살펴보고자 하였다. 주기적인 지각정보는 타이밍 정확성과 일관성에 중요한 역할을 하기에(Repp & Steinman, 2010), 지각정보를 효과적으로 제공하는 것은 운동 타이밍에 도움을 줄 것이라 예상할 수 있다. 또한, 반복적인 자극의 시간적 특성은 내적 타이밍을 강화하기 때문에(Arnal & Giraud, 2012; Nobre et al., 2007) 연속 동작의 안정성이 향상될 것이다. 하지만 감각양식에 따라 지각-동작의 결합 정도가 다르고, 과

제의 특성과 인지적 부하의 정도가 다르기 때문에 수행 정확성과 동작 안정성의 차이를 보일 것이다. 그리고 그 차이는 자극의 템포 조건에 따라 세부적 차이를 나타낼 것이다. 이러한 가정을 근거로 본 연구에서는 다음과 같은 연구가설을 설정하였다.

1. 동기화 과제에서 자극의 양식과 템포에 따른 타이밍 비교

1.1 청각자극이 다른 자극보다 타이밍 정확성과 일관성이 높을 것이다.

1.2 단일감각보다 다감각에서 타이밍 정확성과 일관성이 높을 것이다.

1.3 빠른 템포에서 타이밍 정확성과 일관성이 높을 것이다.

1.4 느린 템포에서 예측 경향성이 높을 것이다.

2. 동기화 과제에서 자극의 양식에 따른 기여도 비교

2.1 청각자극이 다른 자극보다 타이밍 정확성에 미치는 기여도가 높을 것이다.

3. 동기화 과제에서 지각정보에 따른 공간 정확성 비교

3.1 템포에 따른 공간 정확성과 일관성의 차이가 있을 것이다.

4. 적응 과제에서 템포 변화에 따른 타이밍 적응 비교

4.1 자극양식과 템포 변화에 따라 타이밍 적응의 차이가 있을 것이다.

5. 적응 과제에서 지각정보에 따른 협응 특성

5.1 템포 변화에 따른 동작의 협응 특성 변화가 있을 것이다.

5.2 템포 변화에 따른 협응 안정성 차이가 있을 것이다.

4. 연구의 제한점

본 연구의 제한점은 다음과 같다.

1) 인지적 타이밍 능력은 6~7세 이후부터 연령에 따른 차이를 보이지 않는다. 따라서 본 연구에서는 연구 참가자를 2~30대로 한정하여 특정 연령대의 운동 타이밍 능력을 비교하였다.

2) 원 그리기 과제는 오른쪽 상지의 움직임만 가능하도록 고정하여, 어깨와 팔꿈치 관절의 움직임에 대한 분석으로 이루어졌다.

3) 본 연구에서 설정한 자극의 양식은 청각, 시각, 촉각이며 자극의 템포는 세 가지 조건으로 한정하였다.

5. 용어의 정의

본 연구에서 사용된 용어는 다음과 같이 정의된다.

- **지각정보(perceptual information) :** 자극의 양식과 템포로 타이밍을 지각할 수 있는 외부의 지각적 정보이다.

- **운동 타이밍(motor timing) :** 반복되는 자극에 동작을 정확하고 일관되게 제어하는 내적 타이밍을 말한다. 본 연구에서는 타이밍 정확성과 일관성, 예측과 관련된 부적 비동기성, 그리고 변화에 적응하는 타이밍 수정 반응과 같은 시간적 변인을 통해 운동 타이밍을 정의하였다.

- **운동 협응(motor coordination) :** 원 그리기 과제에서 사용되는 오른쪽 어깨와 팔꿈치의 상대적인 움직임이 시공간적으로 조화롭게 조직화된 것을 운동 협응으로 정의하였다. 동작의 협응 패턴은 상대위상(relative phase)의 평균적인 크기로(Stergiou et al., 2001), 운동 시스템의 협응 안정성은 상대위상의 가변성으로 정의하였다(van Emmerik & Wagenaar, 1996).

- **감각운동 동기화(sensorimotor synchronization, SMS) :** 반복되는 자극과 동작의 협응(Repp, 2005)으로 본 연구에서는 주기적으로 제공되는 자극과 목표 지점에서의 수행이 시공간적으로 일치하는 타이밍 동기화를 뜻한다.

- **비동기성(asynchrony) :** 반복되는 수행의 타이밍 오류(timing error), 또는 동기화 오류(synchronization error)를 의미하며 자극과 동작의 평균적인 시간오차(절대오차)로 산출된다. 특히, 자극보다 먼저 목

표에 도달한 부적 비동기성(negative asynchrony)은 전체 수행에서 자극보다 동작이 앞선 비율로 정의하였다.

- **타이밍 가변성(timing variability) :** 타이밍 일관성을 확인하기 위한 변수로서 비동기성의 변동계수(coefficient of variance)로 산출되었다.

- **타이밍 수정 반응(phase correction response, PCR) :** 제공되는 자극의 템포가 무작위로 변했을 때 나타나는 즉각적인 타이밍 수정 반응으로, 변화가 발생한 다음번 수행의 시간오차(항상오차)로 정의하였다(Repp, 2005).

- **감각 양식(sensory modality) :** 인간이 환경의 정보와 상호작용하는 과정에서 사용되는 감각 수용기 채널(channel)로서 청각, 시각, 촉각의 단일감각과 청각-시각, 청각-촉각, 시각-촉각이 결합된 다감각이 감각양식으로 설정되었다.

- **감각 기여도(sensory reliability) :** 결합된 감각 중 어느 감각이 운동 타이밍에 얼마나 우세한 영향을 미치는가 판단하는 정도이다. 로지스틱 회귀분석에서 산출된 비율인 오즈(odds)로 그 정도를 정의하였다.

Ⅱ. 이론적 배경

인간의 운동행동 연구에서는 동작을 어떻게 효율적으로 제어하고, 움직임을 생성하는가에 대한 답을 찾고자 한다. 이러한 과정으로 운동기술이 향상되기 위한 효과적인 학습 방법과 실제 현장에 얼마나 효과가 있는지 검증하는 것은 운동학습 분야에서 중요한 문제이다. 특히, 동작의 타이밍은 시간에 따라 발생하는 움직임의 시·공간적 특성 문제로서 운동행동 연구에서 가장 흥미로운 주제라고 할 수 있다. 따라서 이 장에서는 운동제어의 기전을 설명하는 이론들이 동작의 타이밍 제어와 학습에 어떤 과학적 틀을 제공할 수 있는지 살펴보았다.

1. 운동행동 이론과 타이밍

동작의 타이밍이 어떻게 제어되고 학습되는지 이해하려면 '움직임은 어떻게 제어되는가?'라는 질문으로 시작할 수 있다. 질문의 답을 찾기 위해서 먼저 운동 시스템(motor system)의 구조와 기능에 대한 이해가 필요하다. 날아오는 공을 잡기 위해서는 눈을 통해 물체의 크기나 빠르기, 이동 궤적을 파악하고 적절한 타이밍에 동작을 생성해야 한다. 눈이라는 감각 기관을 통해 들어온 시각정보는 중추 신경계에서 인지적 처리 과정을 거쳐 운동에 필요한 반응을 선택하고, 실행하는 데 활용된다. 이후 뇌에서 내려진 운동명령은 운동 뉴런(motor neuron)을 통하여 각 근육에 전기적 신호로 전달되고, 근육의 수축을 통해 관절이 움직이게 되면 최종적으로 원하는 동작이 만들어진다.

이처럼 인간의 신경 시스템(nervous system)과 환경적 정보 사이의 조절 과정은 매우 복잡하지만 정교하게 이루어진다. 이 과정에서 정보를 받아들이고 의미를 해석하는 감각-지각 시스템(sensory-perceptual

system)과 운동명령이 실행되는 동작 시스템(action system)은 운동 시스템을 구성하는 두 가지 신경계이다(Schmidt & Lee, 2014).

감각 시스템을 구성하는 눈, 귀, 피부, 관절, 근육 등의 감각 수용체(receptor)는 외부의 다양한 지각정보를 받아들이고 동작에 필요한 적절한 근육을 동원하도록 신호를 생성한다. 그리고 지각 시스템은 환경의 자극이나 정보의 의미를 지각하고 중추 신경계에서 동작의 계획, 선택, 실행, 기억 등의 인지 과정을 거친다. 동작 시스템은 수많은 움직임의 자유도를 제어하기 위해 단순한 반사부터 의식적인 움직임을 만들어내는 신경과 근육의 역학적 작용을 담당한다.

이처럼 인간의 몸은 움직임을 생성하는데 필요한 신경, 근육, 관절 등 수많은 물리적이고 기능적인 수준의 자유도를 가지고 복잡하게 연결되어 있다. 그렇기 때문에, 운동행동의 원리와 특성을 완벽히 이해하는 것은 현실적으로 어려운 문제이다. 하지만 Bernstein(1967)은 신체 체계 내의 수많은 자유도를 점진적으로 정복해 가는 과정으로 움직임의 원리를 이해할 수 있다고 하였다.

또한, 수행자의 의식과 무의식, 주의, 기억, 의도와 같은 인지적 요인들과 함께 환경의 정보와 과제의 조건은 원하는 동작을 생성하는데 고려되는 중요한 요소들이다(Newell, 1986). 따라서 인간의 움직임을 이해하기 위해서 환경의 정보와 신체의 운동 시스템이 어떤 관계를 형성하고 상호작용하는지 탐구하는 것은 운동행동 연구의 기본이라 할 수 있다. 운동행동 연구자들은 이러한 다양한 수준의 정교함과 복잡성을 가진 인간의 운동행동을 탐구하기 위해 신경생리학, 인지과학, 운동역학, 심리학 영역의 다양한 이론들을 기반으로 연구를 진행하였다.

움직임이 생성되는 원리를 바라보는 대표적인 관점은 중추적 표상(representation)의 존재에 따라 인위적 관점(artificial perspective)과 자연적 관점(natural perspective)의 큰 틀로 구분된다. 인위적 관점은 지식이나 동작을 습득하는 과정을 기억 체계 속에서 정보가 내적 표상으

로 형성되는 것으로 이해하기 때문에 인지적 관점이라 할 수 있다. 이 관점은 인간 내부의 위계적(hierarchical) 구조에서 운동 명령이 상위 중추에서 하위 중추로의 하향식(top-down) 전달을 기본적인 전제로 한다. 반면 자연적 관점은 위계적 계층이 존재하지 않고 병렬적이고 수평적인 관계(heterarchy) 속에서 움직임의 원리를 바라본다. 또한, 신체의 역학적 특성과 내외적으로 작용하는 힘을 고려하여 다양한 방식의 관계를 형성하는 것에 관심을 둔다.

이러한 두 가지 관점을 토대로 Reed(1988)는 인지적 관점의 운동 시스템 접근(motor system approach)과 자연적 관점의 동작 시스템 접근(action system approach)을 소개하였다. 이후, Meijer & Roth(1988)는 이를 구체화하여 운동행동 연구의 철학적 틀이 마련되었다.

1) 운동 시스템 접근

① 정보처리 이론

1970년대 소개된 정보처리 이론(information processing theory)은 인지 심리학에 바탕을 두고 운동행동을 인간의 능동적인 사고처리 과정의 결과로 바라보는 주된 접근 방법이다(Halford & Andrews, 2011; Siegler, 2006). 기본적으로 정보처리 이론에서는 마음(mind)을 정보가 흐르는 시스템으로 묘사하고 동작의 생성 과정에 초점을 맞추고 있다. 즉, 인간의 사고 과정을 컴퓨터와 비교하여 중추 신경계는 하드웨어(hardware), 인지적 처리 과정은 소프트웨어(software)에 대응하여 설명하는 것이다.

정보처리 이론은 인지적 처리 과정의 존재를 증명하고자 자극에 대한 지각, 반응선택, 반응실행의 단계의 의식적인 활동에 관심을 두고 반응시간 등의 변인과의 관계를 검증하였다. 특히 Adams(1971)의 폐쇄회로 이론(closed-loop theory)에서는 인간의 기억 체계에 저장된 동작의 참조 준거와 실제 수행 간 차이를 피드백(feedback) 정보를 활용하여 수정해나가는 과정으로 운동행동을 설명한다. 오류 수정은 연

속적으로 이루어지는 과정으로 움직임이 시작되기 전 운동 시스템의 초기 상태를 파악하고, 움직이는 동안에는 동작의 정확성을 비교한다. 마지막으로 동작이 종료되면 정확성의 참조 준거가 성취되었는지 판단하는 단계를 거친다. 이는 중추 신경계의 운동명령이 기억 흔적(memorial trace)과 지각 흔적(perceptual trace)의 두 기억 상태와 관련하여 정보의 활용이 어떻게 이루어지는지 설명하고 있다. 하지만, 구심성 신경을 차단한 동물들의 운동수행을 살펴본 연구결과 피드백 없이도 정상적인 운동수행이 가능함이 밝혀졌다. 또한, 동작의 오류를 수정할 시간적 여유가 없는 빠른 움직임의 경우 피드백을 통한 움직임의 제어 과정으로 동작 생성의 원리를 설명하는 것의 한계가 드러났다.

이후 개방회로 이론(open-loop theory)을 통해 피드백 없이 빠른 움직임이 운동 프로그램(motor program)을 통해 제어된다는 설명이 설득력을 얻게 되었다. 인지적 관점에서 운동 프로그램은 운동제어와 학습 분야에서 오랫동안 사용된 개념으로 동작이 발생하기 전에 기억의 형태로 대뇌 피질에 저장된다고 본다. 그리고 운동명령에 따라 위계적인 순서로 하위 시스템으로 전달되어 움직임이 실행된다. 따라서 운동시간이 200ms 이하의 빠른 동작의 경우 기억 속에 저장된 운동 프로그램에 대응된 동작의 반응이 빠르게 이루어질 수 있다고 설명한다. 개방회로 이론에서 운동 프로그램에 의해 운동 명령이 전달되는 과정은 피드백과 상대적인 개념인 피드포워드(feedforward)로 설명된다. 중추 신경계에서 내린 운동명령은 이미 정의된 방법으로 전달되는 것으로 여겨지기 때문에 중간에 동작을 수정하기 어렵다. 예를 들어 목표 지점까지 빠르게 선 긋기는 중간에 궤적을 바꾸거나, 공을 차거나 스트로크할 때 키퍼나 상대의 움직임이 있어도 이미 운동명령이 내려지면 동작을 수정하기 어렵다. 하지만, 인간의 무한히 다양한 동작을 프로그램으로 모두 보유하는 것에는 저장 용량의 한계가 있으며, 이전에 경험하지 못한 동작은 운동 프로그램이 생성되지 않았음

에도 동작을 제대로 수행하는 현상을 설명할 수 없는 문제점이 있다.

Schmidt(1975)는 두 가지 이론(폐쇄, 개방회로)을 혼합하여 움직임의 속도 조건에 따라 각기 다른 기전을 적용하는 일반화된 운동 프로그램(generalized motor program)을 소개하고, 이를 적용한 도식이론(schema theory)을 제안하였다. 도식이론은 빠른 움직임과 같이 인지적 정보를 처리할 시간이 부족한 경우 이미 형성된 운동 프로그램으로 움직임이 발생한다고 본다. 그러나 상대적으로 느린 움직임은 피드백을 활용할 충분한 시간이 있으므로 동작의 특성과 관련된 매개변수를 선택하여 동작을 수정하고 보완할 수 있다고 설명한다. 운동 프로그램과 피드백은 기존 기억을 근거로 동작을 계획하는 회상 도식(recall schema)과 동작을 수정하는 재인 도식(recognition schema)으로 인간의 기억 체계와 관련해서 이해될 수 있다. 이후, Schmidt와 그의 동료들(2018)은 인간 움직임의 생성을 정보의 저장(storage, memory), 부호화(coding), 인출(retrieval), 프로그래밍(programing)의 결과로 정보처리 관점을 구체화하였다.

지금까지 논의된 정보처리 관점에서 운동제어는 운동 프로그램으로 사전에 계획되고 운동수행 과정에서 피드백을 통해 수정되는 인간의 내적 작용으로 요약될 수 있다. 이를 바탕으로 외부의 사건의 시간적 특성을 감지하고 판단하는 타이밍 지각과 움직임의 시작과 동작의 속도 등을 결정하는 타이밍 계획과 실행 과정은 인지적 관점에서 해석될 수 있다.

2) 동작 시스템 접근

인간의 운동 시스템은 수많은 물리적, 기능적인 자유도를 가지고 다양한 환경 요인과 상호작용한다. 그 과정의 복잡성(complexity) 때문에 현재의 상태만으로 동작을 예측하기 어려운 비선형성(non-linearity)과 같은 특성을 보인다. 따라서 단순히 기억의 표상으로 복잡한 운동 행동을 설명하기에는 어려움이 있다. 이러한 문제를 해결하려는 동작

시스템 접근은 인지적인 과정보다 자연적인 물리 법칙으로 환경과 운동 시스템의 관계를 설명한다. 관련된 두 가지 이론은 현대 물리학과 생태심리학에서 유래한 Gibson(1950)의 생태학적 이론과 자유도와 협응 문제에 주목한 다이내믹 시스템 관점(Bernstein, 1967; Kelso, 1995; Newell, 1986; Turvey, 1990)을 포함한다. 이들 관점은 움직임에 대한 정보가 직접 처리되며, 인간의 역동적인 특성에 의해 협응 구조를 형성하여 중추 표상 없이 동작을 제어할 수 있다고 바라본다(김선진, 2009).

① 다이내믹 시스템 이론

Bernstein(1967)은 신체 역학적 특징과 자유도를 바탕으로 인간의 움직임을 설명하려고 하였다. 수많은 자유도를 가진 인간과 그 인간의 움직임은 매우 복잡하고(complicated), 정교하지만 작동 원리가 겉으로 드러나지 않기에 쉽게 이해하기 어렵다. 하지만 이러한 복잡한 성질에서 의미 있는 규칙과 패턴을 이해하고, 예측하는 것은 동작의 복잡성(complexity)에 대한 이해에서 시작된다.

실제 현상 중에는 선형적인 특성을 보이는 경우보다 다양한 요인들의 작용으로 인하여 비선형적인 모습을 보이는 경우가 많다. 운동학습 과정에서 제대로 수행하지 못하던 운동기술을 갑자기 수행할 수 있게 되거나, 걷다가 달리게 될 때 발생하는 동작의 상변이(phase transition) 현상과 같이 특정한 순간 급격한 변화가 발생한다. 이를 설명하기 위해 기본적으로 다이내믹 시스템 이론은 인간의 복잡한 시스템이 만들어내는 행동의 특징을 근신경학적(neuromuscular) 측면에서 수학적 도구를 사용하여 표현하고자 한다. 이러한 단계에서 대부분의 연구는 복잡성을 이해하고 결과를 예측하기 위한 노력으로 뉴턴의 법칙을 따르는 매우 특별한 현상을 선형적 시스템으로 찾아내고자 한다. 정보의 입력과 결과의 관계에서 개별 요소들을 분석하여 전체를 이해하려는 접근으로 특정 순간에 가지고 있는 특성을 비교하거나,

지배적인(dominant) 패턴을 찾는 것을 포함한다. 또한, 시계열(time-series)에서 데이터의 정상성(stationarity)을 고려한 분석을 통하여 비선형 시스템의 전체적 복잡한 패턴을 거시적인 시각으로 접근한다. 결과적으로 이러한 복잡성은 단순히 복잡하다는 개념이 아니라 그것들 안에 존재하는 규칙적인 성질을 밝히려는 접근을 의미한다. 따라서 운동제어 연구에서 다이내믹 시스템 이론의 핵심은 어떻게 복잡한 자유도를 효과적으로 조직하여 운동 시스템이 기능적인 동작의 패턴을 형성하는지 밝히는 과정이라 할 수 있다(Bernstein, 1967; Turvey, 1990).

Bernstein(1967)은 이러한 운동 구조(motor structure)를 형성하는 복잡한 과정에서 신경 시스템의 기능적 패턴과 구조적 특성을 이해하기 위해 운동 시스템의 위계적 구조(hierarchy)를 네 가지 수준으로 구분하여 설명하였다(Levels of Construction of Movements). 첫째, 힘을 생성하는 패턴을 형성하여 동작에 대한 자세나 균형을 유지하는 장력 수준(level of tone)이 가장 기본적인 단계이다. 그리고 수많은 자유도 문제를 해결하기 위해 사지 분절 간 유기적인 공동작용으로 움직임의 안정성을 확보하는 연결 수준(level of synergy)이 두 번째 단계이다. 세 번째, 공간 수준(level of space)은 동작에 필요한 정보를 선택하고 환경적 변화에 대처할 수 있는 협응 패턴의 변화로 적응력을 습득하는 것이다. 마지막 네 번째인 동작 수준(level of action)은 동작의 의도와 계획을 바탕으로 움직임 제어가 이루어진다고 설명한다. 종합하면, 새로운 동작을 습득하는 과정은 수많은 자유도의 연결과 상호작용 속에서 힘을 적절하게 생성하여 안정적으로 자세를 만들고 환경에 따라 협응 패턴을 변화시킬 수 있는 적응성을 형성하는 것이라 할 수 있다. 또한, 이러한 구분은 각 단계에 해당하는 자유도 문제를 해결하기 위한 신경학적 접근으로 동작의 복잡성에 대한 이해를 가능하게 하였다(Profetaa & Turvey, 2018).

Newell(1986)은 개인, 환경, 과제를 동작 생성의 핵심 제한 요소로

간주하고 인간의 움직임을 다이내믹 시스템 관점에서 설명하고자 하였다. 기억의 표상이 아닌 자기 조직화(self-organization), 비선형성 원리를 통하여 상변이 현상과 이력현상(hysteresis)과 같은 복잡한 인간의 움직임을 더욱 효과적으로 설명할 수 있게 되었다.

다이내믹 관점에서 협응은 유기체(neuromuscular-skeletal constraints), 과제 특성(e.g. speed, external force, spatial position), 환경(e.g. gravity)이라는 제어변수(control parameter)에 의해 그 변화과정을 이해할 수 있다. 또한 외부의 자극이나 지각정보에 대한 탐색 전략을 통하여 효율적인 신경과 근육의 공동 작용을 획득하고, 환경의 변화에 따라 제공되는 정보와 과제의 특성에 부합하는 운동기술의 협응 구조를 형성하게 된다(Newell & McDonald, 1993).

이처럼 다이내믹 시스템 이론의 관심은 복잡성을 가진 현상 속의 반복되는 다량의 데이터에서 보이는 의미 있는 현상이다. 초기 상태가 시간의 흐름 속에서 어떤 변화를 보이는지 수학적으로 접근하고, 그 과정에서 동작의 안정 상태에 대한 특성 및 원인 파악이 주된 관심이다. 이러한 다이내믹 접근이 기존 인지과학의 연구 흐름에서 새롭게 적용되어 다양한 요인들을 고려하여 복잡한 인간의 운동행동을 심층적으로 이해하는 새로운 축이 되었다.

② 생태학적 이론

최근에는 생태학적 관점(Gibson, 1950)에서 환경이 가지고 있는 정보와 신체의 역학적 특성과의 관계에 초점을 맞추고 있다. 유기체와 생태계(ecosystem)를 하나의 단위로 생각한 생태학적 관점에서는 실험실 조건을 탈피하여 실제 환경적 맥락을 강조하였다. 따라서 인간의 인지적인 처리 과정이나 신체의 자유도, 협응에 초점을 맞춘 기존의 두 이론과 다르게 생태학적 관점은 인간과 환경적 정보의 관계에 관심을 둔다.

생태학적 관점의 선구자인 Gibson(1950)은 유용한 정보를 탐색하는

지각 과정을 통해 움직임이 만들어진다고 하였다. 또한, Newell(1989)은 환경과 과제의 특성에 적합한 지각과 동작의 역동적인 상호 순환의 관계를 탐색하는 과정에서 동작이 생성된다고 하였다. 이 과정은 수행자가 자신과 이를 둘러싼 환경과의 관계에서 기억의 표상 없이 직접 정보를 지각하고 행동하는 것으로 해석한다. 지각과 동작의 유기적 관계에서 지각정보는 움직임을 만들고, 움직임은 지각정보의 변화를 가져올 수 있다는 논리이다(Gibson, 1977; Turvey, 2007). 이후 이러한 논리적 관점은 직접지각(direct-perception), 불변특성(invariants), 어포던스(affordance), 그리고 지각-동작 결합(perception-action coupling)의 문제와 관련하여 움직임을 이해하는 중요한 이론적 개념을 제공하였다.

생태학적 관점에서 인간의 지각 과정에 관한 관심은 정보를 어떻게 받아들이는지 설명했던 기존의 이론들과 다른 관점을 갖는다. 과거 인간의 능동적 사고 과정을 고려하지 않는 행동주의 관점에 대한 비판과 인지과학의 발달로 간접지각(indirect-perception)의 연구 기반이 형성되었다. 인지과학의 대표적인 이론인 정보처리 이론에서는 지각을 움직임과 환경 맥락에 대한 내적인 지식 구조를 형성하는 활동으로 설명한다. 간접지각은 수행자가 환경정보를 간접적으로 받아들이고, 의미를 파악하기 위해 기억에 저장된 지식을 근거로 추가적인 작업을 필요로 한다. 이는 환경정보 자체로는 의미가 없지만 지각된 정보가 부호화(encoding)되고 중추적 표상과 비교되는 인지적인 사고 과정에서 정보의 의미가 부여되는 과정으로 설명한다. 예를 들어 시각 시스템은 망막에서 활성화된 물리적인 전기 신호를 중추 신경계의 처리 과정을 거쳐 의미 있는 정보로 재구성한다는 것이다(Michaels & Carello, 1981). 하지만, 정보처리 관점에서 바라본 간접지각은 실험실 환경에 기반한 것으로 실제 스포츠 현장에 적용 가능한지 의문이 제기되었다. 따라서 연구결과의 생태학적 타당도(ecological validity)를 높이기 위해서는 실제 상황의 다양한 변인에 대한 고려가 필요해졌다.

이후, Gibson(1950, 1966, 1977)은 직접지각(direct-perception)을 토대로 생태학적 관점을 제시하며 수행자가 환경에서 얻는 정보 자체의 의미를 강조하였다. 즉, 발생한 사건이 보유한 정보는 그 자체로 충분하기에 추가적인 정보처리 과정이 불필요하다는 것이다. 이와 같은 환경정보를 직접적으로 지각할 수 있다는 생태학적 관점의 핵심 개념은 지각과 동작의 결합이라는 틀에서 이해된다.

인간의 운동행동이 지각과 동작으로 구분되어 위계적 관계를 형성하는 것이 아니라 상호 순환 및 보완의 관계라는 생각이 지각-운동 결합의 기본이다. Warren(1984)은 지각-동작 결합의 대표적인 연구인 계단 오르기 과제를 통하여 오를 수 있는 동작이 발생하는 높이를 지각하는 과정은 시각정보를 지각하는 과정에서 형성된다고 하였다. 또한, '움직이는 방'을 사용한 자세조절 연구들은 실제 지면은 고정된 조건에서 발바닥으로 받아들인 고유감각과 움직이는 상황으로 왜곡된 시각정보 간의 충돌을 살펴보았다(Lee & Aronson, 1974; Foster Sveistrup, & Woollacott, 1996). 연구결과, 시각정보가 강하게 작용하여 넘어지지 않게 자세를 조절하려는 동작이 발생함을 알게 되었다. 지각-동작 결합을 설명하는 또 다른 대표적인 연구 주제는 공을 잡는 캐칭(catching) 동작이다(Dannemiller et al., 1996). 캐칭 동작은 움직이는 물체에 대한 속도, 궤적, 낙하지점과 같은 정보를 파악하기 위해 지속적인 관찰이 필요하다. 이 과정에서 공의 수직 낙하에 대한 시각정보를 자신의 움직임과 일치시키는 광학적 가속도 상쇄(optical acceleration cancellation) 전략이 사용되어 수행자는 공을 잡기 위해 동작을 제어하게 된다(McLeod et al., 2001).

결국, 생태학적 이론의 관심은 직접 지각된 정보, 특히 시각정보가 동작에 미치는 강한 영향력에 대한 것이라 할 수 있다. 지금까지 강조한 시지각과 동작의 결합은 불변특성과 어포던스 두 개념으로 이해될 수 있다. 먼저 광학적 배열을 통해 수용하는 시각정보는 가변적이거나 불변적인 속성이 있다. 불변특성은 수행자의 움직임으로 정보가

변하는 것과 달리, 정보 자체의 의미는 변하지 않는 안정적이고 본질적이라는 것이다(Gibson, 1977). 이처럼 고정적인 정보의 특성으로 인해 수행자가 변하는 환경에서도 동작을 적절하게 수행할 수 있다. 또한, 유기체와 환경, 과제 사이의 관계에서 나타날 수 있는 행동 가능성, 잠재적 동작의 가능성을 어포던스라 한다. 이는 다양한 상황에서 적절한 동작이 가능한지 지각하는 것이다(Gibson, 1977).

결론적으로 지각-동작의 결합은 직접지각을 통해 환경적 정보를 활용하는 연속적인 결합의 과정을 불변특성과 어포던스 개념으로 이해할 수 있다(Warren & Hannon, 1988). 이후, 간접-직접지각에 대한 두 가지 관점을 통합하려는 시도가 있었다. 하지만 간접지각은 지각과 움직임 제어의 내적 기전에 관심을, 직접지각은 수행자와 환경 간 관계와 상호작용에 관심을 두기 때문에 두 접근의 절충은 불가능하다고 여겨졌다(Meijer, 1988).

3) 운동제어 이론과 타이밍 제어 기전

신체의 움직임이 시간과 공간의 조화로움을 이룰 때 동작의 타이밍이 정확하다고 할 수 있다(Kelso, 1992). 그렇다면 조화롭고 정확한 동작의 타이밍은 어떻게 제어되며 어떤 특성을 보이는지 앞에서 살펴본 운동 시스템과 동작 시스템 이론들로 접근해 볼 수 있다.

지금까지의 동작의 타이밍에 관한 연구를 살펴보면 다음의 두 가지 기전으로 작동 원리가 해석되고 있다. 기본적으로 정보처리 관점의 인지적 타이밍 모델은 인간이 선천적으로 시간에 대한 정보를 기억의 표상으로 보유(keeping)하는 것을 전제로 한다. 반면 다이내믹 시스템 이론은 자기조직화(self-organized)의 원리로 동작의 타이밍과 협응 패턴이 자동적으로 형성된다는 관점이다.

인지과학에서는 시간의 지각 과정이 의미 있는 사건 정보를 바탕으로 형성된 운동 프로그램으로 작동된다고 본다(Shaffer, 1981, 1982). 타이밍과 관련된 리듬, 박자, 템포와 같은 요인들이 인지 구조

(cognitive structure)를 형성하고 이를 동작에 유용한 정보로 활용될 수 있다는 것이다(Clarke, 1985; Gabrielsson, 1987; Shaffer, Clarke, & Todd, 1985). 이러한 관점은 신경과학의 발달로 뇌의 어느 영역이 타이밍과 관련되는지 실증적인 검증이 가능해지면서 논리의 과학적 근거가 마련되었다.

① 자동-인지적 타이밍 제어

한 번의 수행에 대한 운동 타이밍 제어는 시간 간격의 길이에 따라 자동-인지적 타이밍 제어(auto-cognitive timing control)로 설명된다. 시간 간격이 1초 이하로 짧은 동작의 경우 소뇌(cerebellum)와 기저핵(basal ganglia)의 기능으로 운동 타이밍이 제어된다(Buhusi & Meck, 2005; Lewis & Miall, 2003; Ivry, 1996; Pascual-Leone, 2001).

그러나 2초 이상의 지각해야 하는 시간 간격이나 운동시간이 긴 경우 전두엽피질(prefrontal area)과 운동보조영역(supplementary motor area, SMA)이 관여하여 인지적으로 시간을 감지하게 된다(Kagerer et al., 2002). 이러한 인지적 타이밍 제어는 기억과 주의(attention)를 담당하는 작업기억(working memory)이 중요한 역할을 한다고 보고되고 있다(Koch et al., 2009). 따라서 사고가 가능한 시간 길이의 움직임의 경우 의식적인 과정으로 타이밍 기전으로 설명될 수 있다.

하지만 시간 간격이 아니라 과제 난이도나 복잡성과 같이 과제 수행에 필요한 인지적 노력에 따라 작용하는 뇌의 영역은 달라질 수 있다고 한다. 또한, 기존의 시간의 인지적 표상에 소뇌와 기저핵이 관여한다는 전통적인 시각에서, 최근에는 대뇌 반구의 피질 시스템이 중요한 역할을 하는 것으로 새롭게 밝혀졌다(Harrington et al., 1998). 이처럼 다양한 환경이나 과제를 고려한 조건에 따라 타이밍 기전에 대한 논쟁은 계속되며 확실한 이론적 정립이 되어있지 않은 현실이다(Merchant, Zarco, & Prado, 2008; Diedrichsen, Ivry, & Pressing, 2003).

② 사건-발생적 타이밍 제어

학자들은 하나의 시간 간격이 아닌 연속적인 시간 간격에 대한 지각과 행동의 기전을 행동 실험과 신경과학적 증거를 토대로 사건 타이밍(event timing)과 발생적(emergent timing) 타이밍으로 구분하여 설명하였다(Ivry et al., 2002; Robertson et al., 1999; Spencer et al., 2003; Wing & Kristofferson, 1973; Zelaznik et al., 2002).

사건 타이밍은 Wing과 Kristofferson(1973)의 고전적인 타이밍 모델의 가정에 기반을 둔다. 분명히 구분되는 연속적인 사건과 시간 간격들이 독립적으로 내적시계에 표상되고, 이를 바탕으로 움직임의 반응이 유도된다는 것이다(Gibbon, 1977; Wing & Kristofferson, 1973). 이는 곧 정보처리 관점에서 타이밍 제어를 운동 프로그램에 의한 인지적 과정으로 해석하는 것과 연관되며(Schmidt, 1975), 대표적으로 손가락 태핑과 같은 불연속 움직임이 사건 타이밍으로 설명된다.

반면, 발생적 타이밍은 내적표상 없이 신경 시스템과 운동학적 요인의 다이내믹 과정에서 운동수행의 타이밍이 제어된다고 설명한다. 따라서 발생적 타이밍은 환경과 과제 조건에 따라 자기조직화(self-organized) 되는 과정으로 원 그리기 같은 연속 움직임의 타이밍 기전이라 할 수 있다.

앞에서 살펴본 두 가지 타이밍 기전을 종합하면 사건 타이밍은 연속적인 오류 수정의 과정이라 할 수 있고, 발생적 타이밍의 기전은 동작과 자극의 역동적 결합(dynamic coupling)으로 설명된다(Torre & Balasubramaniam, 2009). 이를 근거로 동작의 연속성에 따라 타이밍 기전이 구분되었다. 먼저 불연속 동작인 손가락 태핑 과제는 Wing과 Kristofferson(1973)이 제시한 사건 타이밍을 통하여 효과적으로 설명될 수 있다. 손가락을 최대로 피거나 굽히는 구간에서는 움직임의 속도가 0이 되는 정지 구간이 발생하고, 특히 손가락이 지면과 접촉하는 순간은 촉각정보를 통해 인지적으로 명확히 구분할 수 있는 불연속 구간이 타이밍 제어의 핵심 사건으로 작용한다. 이러한 특정한 사건

은 내적시계(internal clock)가 목표하는 시간 간격을 내적으로 표상하는 기준이 될 수 있다(Robertson et al., 1999).

그에 반해, 원 그리기(circle drawing)나 상지의 회전운동(forearm oscillations) 과제처럼 부드럽고 연속적인 움직임은 일정한 속도를 유지하는 것과 같이 운동학적 안정성이 중요하기 때문에 동작의 다이내믹 조건에 따른 발생적 타이밍으로 제어된다(Repp & Su, 2013). 이는 Torre와 Balasubramaniam(2009)이 언급한 연속적인 동작의 감각운동 동기화 과정을 신체분절이 움직이는 역동성(dynamic)과 주기적인 외부 신호의 결합(perception-action coupling)으로 해석하는 것과 같은 맥락이다. 발생적 타이밍은 다이내믹 시스템 이론에서 설명하는 연속적이고 반복적 패턴의 움직임이 특정 조건에서 자동으로 조직화 되는 현상과 관련된다. 따라서 연속 움직임의 타이밍 제어는 분절된 사건을 기반으로 하는 중추신경계의 의식적 제어가 아닌, 다이내믹 관점에서 발생적 타이밍 제어 전략으로 설명될 수 있다(Ivry et al., 2002; Repp & Steinman, 2010).

타이밍 제어의 두 가지 기전이 과제에 따라 구분된다는 신경학적 증거로는 소뇌의 손상이 있는 경우 연속 동작의 타이밍 과제 수행에 영향이 없지만, 불연속 동작의 시간적 가변성을 증가시켰다는 연구(Spencer & Ivry, 2005; Spencer et al., 2003)가 있다. 또한 fMRI를 활용하여 연속적이고 부드러운 동작의 타이밍 제어에는 소뇌가 관여하지 않는다는 결과를 확인한 연구들이 보고되었다(Spencer et al., 2003). 따라서 소뇌는 동작의 연속성에 따라 타이밍 제어에 선택적으로 한다고 할 수 있다.

또한, 두 가지 기전이 독립적이기 때문에 순간적인 전환은 가능하나 기본적으로 배타적으로 작동한다는 시각이 존재한다(Delignières & Torre, 2011). 이처럼 운동 타이밍의 기전은 앞에서 설명한 운동행동 실험을 통한 간접적인 방법과 신경 시스템을 직접 관찰하는 신경과학 분야의 노력으로 밝혀져 왔다. 하지만 기억의 표상으로 운동 타이밍

을 설명하는 인지적 접근과 자기조직화의 원리에 따른 자동적인 발생으로 해석하는 관점은 아직 완벽히 해결되지 않은 문제이다.

2. 운동 타이밍 연구

운동 타이밍을 구성하는 요인은 특정한 순간 의미 있는 사건(event)과 사건 간 시간 간격(interval)이다. 그리고 이러한 운동 타이밍은 동작의 속도라 할 수 있는 템포(tempo)와 동작의 시간적 패턴인 리듬(rhythm)에 많은 영향을 받는다(김선진, 2009). 리듬은 '흐름'이나 '움직임'을 뜻하는 그리스어의 '리트머스(rhythmos)'에서 유래되어 '리듬'으로 변화하였다. 기원에서 알 수 있듯이 리듬은 움직임이 반복해서 부드럽게 연결되는 패턴이라 할 수 있다. 따라서 운동행동 연구자들은 동작의 타이밍을 이해하기 위해 외부의 신호나 동작의 템포와 리듬을 중요하게 생각하였다.

이러한 관점에서 운동 타이밍은 다음의 주제들로 연구가 진행되었다. 먼저 지각정보의 양식, 템포, 리듬이나 동작의 연속성과 같은 과제의 특성에 따른 연구들이 진행되었다. 그리고 수행자의 연령이나 음악적 숙련성, 신경학적 손상, 수행자 사이의 상호관계(interpersonal) 등과 관련한 개인의 특성에 주목한 연구들이 있다(Repp & Su, 2013). 또한, 신경과학의 발달과 함께 타이밍의 신경학적 기전이 밝혀지면서 기존 행동학적, 인지적 접근의 연구들이 신경 시스템의 이해와 함께 논리적 근거를 바탕으로 발전하였다. 최근에는 타이밍 적응 및 학습과 관련하여 가상현실을 활용한 지각과 동작의 다양한 차원에서 연구들이 진행되고 있다.

1) 수행과제에 따른 타이밍 연구

운동 타이밍 연구에서 사용된 과제는 특성에 따라 지각 과제와 운동 과제로 나누어진다. 운동 과제는 다시 동작의 복잡성에 따라 손가락 태핑과 같은 인지적 타이밍 과제, 그리고 다관절을 사용하는 신체적 타이밍 과제로 구분된다.

① 타이밍 지각 연구

타이밍 지각 연구는 자극을 제공하고 시간의 길이나 변화를 판별하는 과제가 사용되었다(Meegan et al., 2000; Schubotz et al., 2000). 이들 연구에서는 지각 능력을 검증하는 연구와 지각 능력이 운동 능력으로 전이되는 현상에 주목하였다.

스위스의 심리학자 Piaget(1964)는 타이밍 정보가 경험의 동화(assimilation)와 조절(accommodation) 작용을 통해 내적으로 표상되고, 결국 인지적 구조인 도식(schema)이 만들어진다고 하였다. 타이밍 정보를 처리하는 기전이 명확히 밝혀지지 않았지만, 기본적으로 타이밍 지각은 외적인 시간 정보를 내적으로 조직화하고 인식하는 과정으로 바라본다(Ivry, 1997). 특히, 청각 신호를 활용한 타이밍 지각 훈련은 신경계의 구조적이고 기능적인 변화를 가능하게 하는 신경 가소성(neural plasticity) 덕분에 특정한 시간 간격의 표상을 강화할 수 있다. 관련된 연구에서 타이밍 지각 과제를 통해 의도하지 않은 운동 타이밍이 향상되는 학습의 전이 결과가 보고되었다(Meegan et al., 2000). 이러한 결과는 시간의 지각과 움직임의 타이밍 조절이 중추신경의 비슷한 영역이 관여하고 있음을 나타낸다(Schubotz et al., 2000).

앞에서 타이밍의 지각 원리를 인지적, 신경학적 관점에서 바라보았다. 하지만 움직임이 필요한 상황에서 타이밍 능력은 인간의 운동행동과 관련하여 살펴볼 수 있다. 운동행동을 통한 시간지각은 운동 시스템의 조절 과정에 기초를 두고 있다. Gibson(1977)은 움직임을 통해서 인간의 지각이 더욱 정확하게 이루어질 수 있다고 하였다. 예를

들어, 물체의 무게나 길이를 파악할 때 공간에서 이동시키는 방법을 사용하면, 측정의 정확성을 높일 수 있다고 한다(Turvey, Soloman, & Burton, 1989). 또한, 수행자나 물체가 움직이는 과정에서 망막에 맺히는 물체의 상의 크기가 변하기 때문에, 이에 대한 비율인 타우(TAU)를 이용하여 물체와의 접촉 시점을 판단할 수 있게 된다(Lee, 1988).

또한, 신체의 근육이나 관절에 존재하는 근방추나 골지건 기관은 움직임에 따른 신체의 위치나 길이 변화를 감지하는 고유수용감각으로서 시간지각에 이용된다(van Beers, Sittig, & van der Gon, 1998). 근육의 길이가 변하는 속도를 감지하고, 이를 토대로 시간의 흐름을 지각할 수 있다는 것이다. 움직이는 물체를 보고 시간에 따른 크기 변화를 시각정보 형태로 파악하거나, 기존에 가지고 있는 운동에 대한 기억을 활용하여 시간지각이 가능하다고 한다.

이러한 기억의 관점에서 시간지각은 처음 운동을 수행했을 때의 시간적 정보를 기억하고 그것을 다음에 유사한 행동이 일어났을 때 다시 적용하는 운동기억(motor memory) 개념으로 해석한다(Keele, 1968). 다양한 움직임에 대한 기억으로 지각하고자 하는 동작의 시간 간격을 비교하여 파악할 수 있다는 것이다. 운동행동을 바탕으로 타이밍을 지각할 수 있다는 논리는 시간지각을 단지 대략적인 인간의 정신적 과정으로 바라보는 것이 아니라 기억의 형태로 저장된 동작이 중요하다고 할 수 있다.

마지막으로 손가락 태핑(tapping)과 말하기와 같은 동작을 활용하여 시간을 지각하는 방법이 있다(Benuzzi, Basso, & Nichelli, 2005; Brown, Newcomb, & Kahrl, 1995; Fortin & Breton, 1995). 말하기 방법은 속이나 겉으로 숫자를 세는 것과 같이 시간지각을 위한 언어적 전략이다. 또한, 손가락이나 발을 이용하여 두드리는 동작을 하면서 리듬이나 템포를 세는 과정에서 움직임의 시간을 지각할 수 있다(Cassenti, 2011). 이러한 태핑 전략은 시간 간격을 측정하는 운동행동으로 반복되는 움직임을 통해 시간을 지각하려는 행동의 증거이다(Jones &

Boltz, 1989).

하지만 이러한 심리학적 접근에는 다음과 같은 한계점이 존재한다. 운동행동이 시간지각과 관련성이 있다는 실증적인 증명 과정에는 어려움이 있다. 눈이나 카메라에 보이지 않는 감각기관의 미세한 움직임이나, 속으로 말하기의 경우 그 정도를 정량화하기 어렵다. 따라서 시간지각과 관련하여 신경생리학 분야에서는 뇌의 활성화를 직접 관찰하여 시간지각을 이해하려 한다.

② 손가락 태핑 패러다임

타이밍 연구에서 대표적으로 사용되는 손가락 태핑은 운동시간을 최소화하여 인지적 타이밍 능력을 확인하는 과제라고 할 수 있다. Repp(2005)은 손가락 태핑 패러다임을 사용하는 대표적인 지각심리학자로 자극과 동작의 타이밍 일치 문제를 감각운동 동기화(sensorimotor synchronization, SMS)로 설명하였다. 감각운동 동기화는 외부 주기적인 자극과 리드미컬한 움직임의 협응으로 운동 타이밍을 결정하는 중요한 속성이다(Repp & Su, 2013).

감각운동 동기화의 정확성은 자극과 동작의 동기화 오류(synchronization error)를 수정하는 것으로 청각 신호와 수행의 시간 오차를 감지하고 최소화하는 과정이다(Keele et al., 1989; Pashler, 2001). 이러한 동기화 오류는 자극과 반응의 비동기성을 통해 평가할 수 있다. 비동기성은 자극과 실제 수행과의 시간 오차(inter stimulus-onset interval, ISI)를 통해 동기화 오류 정도를 알 수 있다. 수행의 타이밍 정확성과 함께 일관성은 시간 오차와 수행 간 시간 간격(inter-tap interval, ITI)의 표준편차를 통하여 확인할 수 있다. 또한, 자극의 시간 간격(inter-onset interval, IOI)은 템포를 결정하는 요인으로 기존의 손가락 태핑 연구에서는 일반적으로 300ms~2,000ms 범위로 실험 조건이 설정되었다(McAuley et al., 2006; Kurgansky & Shupikova, 2011). 이는 인간의 반응시간이 최소 100~200ms 소요(Whelan, 2008)되고, 1초를 기

준으로 타이밍 기전이 전환된다는 연구(Brown, 1997; Kagerer et al., 2002; Pascual-Leone, 2001)들을 토대로 실험 조건이 설정되었다.

Fujii와 그의 동료들(2011)의 연구에서는 300ms에서 1,000ms로 템포가 감소하는 경우 비동기성이 증가하는 결과가 나타났다. 이처럼 템포가 감소하면 타이밍 정확성 역시 감소하는 경향은 다양한 연구들에서 공통적으로 보고되었다(Repp, 2008; Zendal et al., 2011).

또한, 전문적인 훈련을 받은 음악가를 대상으로 태핑 과제를 수행한 연구에서는 자극간격이 1,000ms로 상대적으로 느린 템포 조건에서 타이밍 가변성이 16ms(1.6%), 그보다 템포가 빠른 500ms 조건에서는 10ms(2%)로 감소하는 경향을 보였다. 하지만 생체역학적으로 반응하기 어려운 300ms 간격의 빠른 속도에서는 가변성이 12ms(4%)로 증가하는 결과를 보였다(Fujii et al., 2011).

손가락 태핑 과제의 정확성과 일관성을 비교한 연구를 종합하면 인간이 반응할 수 있는 범위에서 자극의 템포가 증가하면 일반적으로 타이밍 정확성과 일관성이 높아짐을 알 수 있다. 이는 속도-정확성 상쇄 이론(Fitts, 1954)에서 공간 정확성은 속도가 증가하면 감소하지만, 시간 정확성은 오히려 증가하는 연구 결과(Newell, 1980)와 함께 인간의 운동행동의 특성을 시간과 공간적 속성에 따라 다르게 이해할 수 있다.

③ 동작의 특성과 타이밍

움직임의 시간적 속성이 내적으로 표상된다는 생각은 운동행동을 인지적 정보처리 과정으로 설명하는 일반화된 운동 프로그램(generalized motor program) 개념과 연관된다(Schmidt, 1975). 일반화된 운동 프로그램은 운동기술의 표상이 시간과 공간적 차원에서 추상적인 형태로 계획 및 구성된다는 개념이다. 특히 운동 프로그램의 시간적 표상은 동작의 타이밍을 결정하는 중요한 요인이며 과제의 특성이나 신체의 운동학적 요인과 독립적으로 작동한다고 여겨졌다(Zelaznik,

2018).

그렇다면, 이러한 내적시계의 존재는 다양한 과제와 환경에서 일관된 타이밍 특성을 보여야 한다. 하지만 일정한 외부 자극에 동작을 일치시키는 손가락 태핑이나 원 그리기와 같이 동작의 연속성이 다를 경우 타이밍 특성에도 차이가 발견되었다(Ivry et al., 2002; Robertson et al., 1999; Spencer et al., 2003; Zelaznik et al., 2002). 학자들은 구체적으로 과제 특성에 따른 타이밍 가변성 차이(Robertson et al., 1999; Zelaznik et al., 2005), 타이밍 오류 수정에 대한 비교(Repp & Steinman, 2010; Studenka & Zelaznik, 2011), 신경과학적 증거(Ivry et al., 2002; Spencer et al., 2003) 등을 통하여 동작의 연속성이 타이밍 기전의 차이와 관련됨을 밝혀왔다.

④ 동기화-연속 반응 패러다임

운동 타이밍 연구에서 반복되는 자극에 동작을 일치시키는 과제는 수행 이후에 자극이 지속되는지에 따라 동기화-연속 반응 패러다임(synchronization-continuation paradigm)으로 구분된다(Stevens, 1886; Summers & Pressing, 1994). 동기화 반응 패러다임은 연속되는 신호에 자극과 반응을 일치시키는 과제를 사용하는 반면, 연속 반응 패러다임은 신호 자극을 제거하고 수행자가 자유롭게 반응(self-pacing)하도록 한다. Wing과 Kristofferson(1973)는 연속 반응을 내적시계가 생성한 운동명령의 파동이 연속적으로 내려지는 과정에서 발생한다고 하였다. 이러한 목표 시간 간격의 인지적 표상과 운동 목표의 표상이 서론 결합되어 운동 타이밍이라는 종합적인 표상을 형성한다고 바라본다(Ivry & Richardson, 2002).

손가락 태핑 과제를 통해 두 모델을 비교한 연구에서는 인간은 주기적인 외부 신호에 직관적으로 결합 되려는 성질을 갖기 때문에 동일화 반응이 연속 반응보다 타이밍 정확성이 높다고 보고되었다(Ivry & Hazeltine, 1995). 하지만 연속 반응에서 타이밍 가변성에 높지만,

정확성은 높게 유지되거나(Wing, 2002), 연속 반응의 움직임 궤적이 더 부드러운 운동학적 특성을 보였다는 연구(Wing & Daffertshofer, 2004), 그리고 신경 활성화 패턴이 두 과제를 수행하는 동안 겹치는 등 두 패러다임에 대한 이해가 충분하지 않다(Rao et al., 1997).

2) 수행자의 특성에 따른 타이밍 연구

인간의 생체시계(내적시계)는 심장 박동, 체온, 호흡, 눈 깜빡임, 기분 등의 개인적인 상태와 연령, 음악 관련 경험, 신경학적 이상과 같은 특성에 따라 차이를 보인다. 개인의 상태를 최대한 통제한 조건에서 수행자의 특성에 주목한 타이밍 연구는 다음과 같다.

먼저, 4세에서 95세까지 다양한 연령에 따른 타이밍 연구에서는 4~5세는 손가락 태핑 수행의 타이밍 정확성이 낮았으나, 6세부터는 성인과 비슷한 수준의 결과를 나타냈다(McAuley et al., 2006). 하지만, 템포가 빠른 조건에서는 7~8세의 경우 타이밍 가변성이 성인보다 높은 결과를 나타내는 등 템포에 따라 연령 간 타이밍 결과의 차이가 났다(Kurgansky & Shupikova, 2011). 하지만, 외부 조건을 통일한 상태라면 성인의 경우 연령에 따른 타이밍 정확성이 차이를 보이지 않는다고 할 수 있다.

음악적 숙련성은 연습을 통해 시간에 대한 내적표상을 강화하는 과정에서 시간 간격을 구분하는 능력과 시간적 변동성에 지각적 예민함(perceptual sensitivity)을 습득한다고 한다(Buonomano & Karmakar, 2002; Ivry & Schlerf, 2008). 따라서 음악적 경험을 고려한 연구에서는 전문가 수준으로 훈련받은 음악가의 경우 일반인보다 타이밍 가변성이 낮은 결과를 보였다(Baer et al., 2013; Repp & Doggettt, 2007). 특히, 드러머(drummer)의 경우(-20ms) 피아니스트 등의 다른 음악가(-50ms)보다 타이밍 정확성이 높은 결과를 통해 타악기 중에서도 특정한 훈련을 통한 숙련성이 향상될 수 있음을 시사한다(Krause et al., 2010).

수행자의 신경학적 손상과 관련하여 소뇌의 문제가 있거나 (Nicolson & Fawcett, 2011), 언어적 능력이 손상된 경우(Corriveau & Goswami, 2009) 타이밍 정확성이 감소하는 경향을 보였다. 또한, 발달성 협응장애(developmental coordination disorder, DCD)가 있는 아동은 청각-운동 결합(auditory-motor coupling) 과정의 문제가 있기 때문에 타이밍 가변성이 높다는 연구들이 보고되었다. 이들 연구에서는 공통적으로 소뇌의 기능적 손상이 Wing과 Kristofferson(1973)이 제시한 내적 시계의 가변성을 높이기 때문에 나타난 결과로 해석한다.

3) 타이밍 제어 전략 : 예측과 오류 수정

인간은 누구나 움직임을 원하는 대로 제어하고자 한다. 원하는 동작의 성공적인 수행은 움직임의 시작부터 종료까지 적절한 시점과 공간에서 동작들이 이루어지는 것이다. 이를 위해 운동수행(motor performance)에서 어떠한 지각정보를 활용하고, 어떻게 동작이 생성되는지 탐구하는 것은 중요하다. 운동 시스템 접근에서는 타이밍 제어 전략을 예측과 오류 수정으로 보았다. 예측은 사전에 계획된 운동 프로그램을 통해 자극 이전의 전략이고, 오류 수정은 이전의 수행에 근거한 감각 피드백을 이용하여 이루어진다(Studenka & Zelaznik, 2011). 반면 동작 시스템 접근에서는 자기조직화에 의한 자동적인 과정으로 타이밍 제어를 해석한다. 두 가지 관점에서 운동 타이밍을 정확하게 제어하고 변화에 적응할 수 있는 전략은 어떤 것인지 선행연구들을 통하여 알아보고자 한다.

① 예측과 타이밍

음악에 맞추어 춤을 추거나 악기를 연주할 때, 날아오는 공을 타격할 때 모두 자신의 움직임과 외부 자극에 대해서 예측하고 반응해야 한다. 물리적으로 자극을 지각하고 반응이 생성되는 시간이 필요하기 때문에 반복되는 자극에 적합한 수행을 위해서는 예측이 필수적이다

(Roman et al., 2019). 사전적인 의미로 예측은 예상되는 사건에 대한 내적인 상태로서 실제 발생하기 전에 계획이나 반응을 준비하는 것으로 해석된다.

Poulton(1957)은 예측을 수용기 예측(receptor anticipation), 효과기 예측(effector anticipation), 지각적 예측(perceptual anticipation) 3종류로 구분하여 설명하였다. 수용기 예측은 축구 골키퍼나 야구의 타자가 다가오는 공을 눈으로 보고 예측하는 것과 같이 다양한 감각 수용기를 이용하여 사건을 감지하는 것이다. 이렇게 감각적으로 사건을 예측하는 것과 함께 효과기 예측은 자신의 동작이 얼마만큼의 시간이 걸리는지를 판단하여 움직임의 시작을 결정하는 데 활용된다. 특히 야구에서 타자가 투수의 빠른 공을 치기 위해서는 다양한 구질을 예측할 수 있어야 하는데, 이때 배트(bat)를 휘두르기 시작하는 타이밍은 공과 접촉하는 지점까지 운동시간이 얼마나 필요한지 예측해야 한다. 마지막으로 환경에서 정보를 받아들일 때 단순히 있는 그대로의 자극이 아니라 이전의 연습이나 경험을 통하여 지각적으로 의미 있는 정보로 빠른 예측에 활용할 수 있다.

예측으로 인해 지각-동작의 일치 과제에서 일반적으로 자극보다 동작이 10ms 정도 선행하여 나타나는 것으로 알려져 있다(Aschersleben & Prinz, 1995, Kolers & Brewster, 1985; Mates et al., 1994). 이러한 예측 전략으로 목표 자극보다 동작이 선행하는 경향을 부적 비동기성(negative asynchrony)이라고 한다(Aschersleben & Prinz, 1995; Hary & Moore, 1985).

부적 비동기성은 예측과 관련하여 다음의 두 가지 모델로 설명된다. 먼저 감각 누적 모델(sensory accumulation model)은 탭을 통해 수용되는 촉각이나 운동학적 피드백보다 외부 신호의 청각, 시각 정보가 빠르게 중추 신경계로 전달되기 때문에 이를 보상하기 위한 작용으로 동작이 빠르게 나타난다고 이야기한다(Aschersleben, 2002). 두 번째 가설은 지각적 과소평가(perceptual underestimation) 현상으로 지각

된 시간 간격은 실제보다 짧다고 느끼기 때문에 동작을 예측하고 수행이 이루어진다고 말한다(Wohlschläger & Koch, 2000).

반면, 2~3초 이상의 시간 간격을 실험 조건으로 한 연구에서는 예측보다 작업기억의 역할이 중요하기 때문에(Brown, 1997, Kagerer et al. 2002) 부적 비동기성이 감소하거나(Mates et al., 1994), 자극 후 동작이 일어나는 정적 비동기성(positive asynchrony)이 나타났다. 이를 근거로 Miyake와 그의 동료들(2001)은 타이밍 과제에서 시간 간격에 따라 기전이 다르게 작동하는 이중 예측 기전(dual-anticipation mechanism)을 주장하였다.

② 지각정보와 타이밍

타이밍 과제에서 수행자는 자극과 동작을 일치시키기 위해 외부의 사건을 단서로 활용하게 된다. 외부의 사건에서 받아들이는 신호(signal)는 물리적으로 단순한 자극(stimulus)이지만, 지각 및 인지과정을 통해 의미 있는 정보로 활용된다. 이러한 정보는 시각, 청각, 촉각 등의 다양한 지각정보의 양식(modality)이 될 수 있으며, 제공 시기와 빈도, 구성, 정밀성 등에 따라 그 성격이 달라진다(Schmidt & Young, 1991).

운동 타이밍에서 감각운동 동기화는 인지할 수 있는 지각적 사건(perceptual event)에 영향을 받는다(Pressing, 1999). 정지구간이 있는 태핑 과제는 특정할 수 있는 구간이 없는 연속적인 움직임보다 타이밍 정확성이 높다. 또한 연속 동작이라도 지각적 사건이 분명한 경우 타이밍 정확성이 높고, 오류 수정이 빠르게 이루어진다(Repp & Steinman, 2010). 예를 들어, 메트로놈을 활용한 원 그리기 과제에서 특정한 위치에 촉각정보(Zelaznik & Rosenbaum, 2010)나 시각정보(Studenka et al., 2012)를 제공하는 경우 그렇지 않은 경우보다 타이밍 정확성과 일관성이 높게 나타났다.

이처럼 외부의 지각적 사건은 다음 사건을 예측할 수 있는 중요한

단서로서 움직임의 시작이나 끝, 혹은 목표 시점을 가늠할 수 있는 기준으로 활용될 수 있다(Repp & Steinman, 2010; Torre & Balasubramaniam, 2009). 또한, 특정한 사건은 수행 이후에 피드백의 명확한 기준으로 동작의 오류를 수정하는데 중요한 단서라고 할 수 있다(Hary & Moore, 1985; Vorberg & Wing, 1996).

제공되는 지각정보의 양식은 일반적으로 시각정보보다 청각정보가 시간적 해상도가 높기 때문에 타이밍 수행에 효과적이라고 알려져 있다(Elliott et al., 2010; Repp et al., 2004; Varlet et al., 2012). 그리고 하나의 감각양식보다 두 개의 양식이 합쳐진 복합적 양식의 지각적 정보가 감각운동 동기화에 더욱 유리하며, 특히 빠른 템포의 자극에도 안정적인 협응 상태를 나타낸다고 하였다(Kelso et al., 2001; Wing et al., 2010). 관련하여 최적 다감각 통합 모델(optimal multisensory integration)에서는 다른 양식의 자극에 의존하거나 보상작용으로 타이밍 제어에 효과적일 수 있다고 하였다. 하지만, 지각정보가 3개 이상으로 확장될 경우 오히려 인지적 부하를 느낄 수 있기에 타이밍 수행에 효과적이지 않다고 설명한다(Ernst & Bülthoff, 2004).

지각정보의 양식과 함께 사건과 동작 특성의 적합성은 타이밍 수행력과 밀접한 관련이 있다. 연속성-대응 가설(continuity-matching hypothesis)에서는 지각정보와 동작이 같은 연속성이면 상호 적합성을 갖고, 운동수행에 효과적이라고 하였다(Umiltá & Nicoletti, 1990; Zelic et al., 2018). 연속적으로 제공되는 자극에는 연속 동작이 적합하고, 불연속인 자극은 불연속 동작과 접합하기 때문에 타이밍 수행에 유리하다는 것이다. 하지만 지금까지 대부분의 감각운동 동기화 관련 연구들은 청각이나 시각 자극이 불연속으로 제공했다는 방법적인 한계가 있다.

하지만, 다수의 타이밍 연구에서 동작의 운동학적 요인보다 지각정보가 타이밍 수행력에 미치는 영향이 더욱 크다고 보고하고 있다. 예를 들어 손가락 태핑 과제를 지면과 접촉 없이 공중에서 수행(air tapping)하였을 경우 접촉하는 순간 촉각 정보가 제공되지 않기 때문

에 사건 타이밍이 아닌 발생적 타이밍 제어의 특성을 보인다(Studenka & Zelaznik, 2011). 이처럼 동작의 운동학적 특성은 동일하지만 특정 시점의 지각적 사건이 운동수행의 타이밍 기전을 결정하는 중요한 요인이라고 할 수 있다(Zelaznik & Rosenbaum, 2010; Zelaznik, 2018). 또한, 동작은 동일하지만 과제의 목표가 동일화 과제(synchronization)인지, 당김음 과제(syncopation)인지에 따라 타이밍 수행력 차이를 보이는 등의 연구를 근거로 지각적 요인의 중요성이 강조되고 있다(Zelaznik, 2018).

③ 타이밍 오류 수정

운동기술을 학습하는 과정은 자신의 수행을 목표한 움직임과 일치시키는 과정으로 이미 형성된 운동 구조와 지금 수행하고 있는 동작의 느낌이나 움직임의 결과를 비교하여 차이를 발견, 수정하는 것이다. 감각운동 동기화는 반복되는 타이밍 과제를 통하여 살펴보게 된다. 이때 발생하는 타이밍 오류는 동기화 오류, 즉 비동기성이라고 한다. 감각운동 동기화는 비동기성에 대한 감각정보를 기반으로 오류를 수정하게 되는데, 만약 이러한 수정이 없다면 타이밍 오류와 가변성은 필연적으로 증가하게 된다(Vorberg & Wing, 1996).

④ 메트로놈 동기화 훈련

반복적인 메트로놈 동기화 훈련은 감각운동 동기화 능력을 향상시키는데 효과적이다(Meegan, Aslin, & Jacobs, 2000). 이는 메트로놈 동기화 훈련이 청각 리듬과 동작의 적절한 반응을 이끌고 지속적이고 안정적인 동기화 상태를 만들 수 있기 때문에 타이밍 수행력의 정확성과 일관성 향상에 효과적이라 할 수 있다(Thaut, 2003). 이는 시간 속성의 내적시계를 발전시키는 것으로 볼 수 있는데(Zelaznik, 2018), 내적인 생물의 리듬이 다른 리듬의 영향을 받아 그것과 동조하는 현상으로 독립적인 리듬이 서로 동조하는 상호동조(mutual entrainment)

라고 할 수 있다(Repp, 2004). 따라서 지각-동작 일치 훈련의 목적은 자극을 활용하여 시간 간격에 대한 신경학적 표상을 강화시키는 것이라 할 수 있다. 이를 활용하여 동작의 상변이 현상을 확인하기 위한 연구에도 사용되며(Repp, 2005; Volman & Geuze, 2000; Wimmers, Beek, & van Wieringen, 1992), 지각-동작 결합능력이 낮은 ADHD학생의 집중력을 향상시키는 도구로 사용되기도 한다(Shaffer et al, 2001).

특히, 메트로놈 동기화 훈련에서 활용되는 상호작용 메트로놈(Interactive Metronome, Interactive Metronome®, USA)은 주기적인 청각 신호에 맞추어 감각과 운동 시스템을 통합하는 도구로서 타이밍 정확성과 일관성에 효과적이라고 알려져 있다(Rönnqvist, McDonald, & Sommer, 2018). 상호작용 메트로놈은 일정한 리듬과 템포의 청각 자극이 운동 계획 및 순서화(sequencing)와 관련된 뇌의 신경망을 활성화하고(Bengtsson et al., 2009), 동작의 협응 변화와 내적 타이밍에 영향을 미친다고 알려져 있다(Jantzen et al., 2007).

4) 타이밍의 신경학적 기전

인간의 신경 시스템은 감각 시스템(sensory system)과 운동 시스템(motor system)으로 구성되어 있으며 두 체제의 유기적인 작용으로 움직임의 제어가 가능하다. 중추신경계의 소뇌(cerebellum)는 자세의 균형 유지, 근육 긴장, 수의적 운동 조절을 담당하며, 구체적으로는 여러 근육을 동시에 움직일 때 이들의 조화로운 제어가 가능하게 한다.

특히, 소뇌가 운동 타이밍에서 중요한 역할을 하고 있음을 다양한 신경학적 증거들을 통하여 밝혀졌다(Middleton & Strick, 1998; Ivry & Keele, 1989). 파킨슨병을 앓거나 소뇌에 병변이 있는 환자의 경우 뇌의 신경 시스템의 손상으로 동작의 타이밍 제어 능력이 현저히 떨어지는 것으로 밝혀졌다(Harrington, Haaland, & Knight, 1998). 소뇌가 손상된 경우 빠른 움직임을 수행할 때 주동근과 길항근의 수축 타이밍에 어려움을 보이고(Hore et al., 1991), 반복되는 손가락 태핑 과제에

서 타이밍 가변성이 높아졌다(Ivry et al., 1988). 또한, 타이밍 지각 과제에 수행력이 떨어지고(Ivry & Keele, 1989; Nawrot & Rizzo, 1995), 운동기술의 학습과정에서 낮은 학습 효과를 보였다(Cordo, Bell, & Harnad, 1997). 그리고 신체의 조화로운 협응(Welsh, & Llinás, 1997)과 지각적 예측과 관련된 과제(Buonomano & Mauk, 1994)를 통해 소뇌가 다양한 시간적 제어과정에 관여함을 알 수 있다.

타이밍 제어에 관여하는 다른 기관인 기저핵(basal ganglia)은 특히 내적 타이밍을 형성하는 데 중요한 역할을 한다(Ivry, 1996). 기저핵에 이상이 있는 파킨슨병 환자의 경우 태핑 과제에서 타이밍 가변성이 높으며(O'Boyle et al., 1996), 이는 내적시계가 정상적으로 작동하지 않기 때문에 시간 간격을 판단하는 능력에 이상을 보인다고 해석한다(Pastor et al., 1992). 파킨슨병 환자의 경우 움직임을 시작하거나 반복적인 동작을 유지하는 데 어려움을 겪는데, 이를 프리징(freezing) 현상이라고 한다. 걷기나 말하기, 글씨 쓰기와 같은 기본 동작이 부자연스러워지는 프리징은 외적 지각정보에 의해 발현되거나 소멸될 수 있다고 한다(Freeman et al., 1993). 이를 확인하기 위해 파킨슨병 환자에게 리듬이 있는 청각 신호를 이용한 손가락 태핑 과제를 실시하였고, 그 결과 외부의 주기적인 지각정보를 활용한 과제 수행에 수행력 저하를 보였다(Nakamura et al., 1978). 또한, 청각 신호를 수행 초기에 제공하고 이후 수행이 진행되면서 제거하는 조건의 실험을 통해 파킨슨병 환자의 경우 외적 신호에 더욱 의지한다는 것을 밝혀냈다. 건강한 성인의 경우 반복적인 움직임을 생성하기 위해 운동 프로그램이 활용되나 파킨슨병 환자의 경우는 기저핵이 그 역할을 하지 못하기 때문에 타이밍 수행력에 차이를 보인다고 할 수 있다.

Matell와 Meck(2000)는 타이밍 관련 과제를 할 때 기저핵과 소뇌의 활성화가 일어나는 현상을 바탕으로 뇌와 시간인지의 관련성을 신경심리학적 모델로 일반화하였다. 특히 전전두피질(The pre-frontal cortex)은 상위 단계의 인지, 감정, 동기 등의 과정을 담당하는 뇌의

부분으로서 이러한 기능들을 모니터링 과정에서 운동행동의 오류를 확인하고, 타이밍과 관련된 영역에 관여한다고 알려져 있다(de Jong, Willemsen, & Paans, 1999). 그리고 보조운동영역(the supplementary motor area: SMA)은 타이밍과 관련된 과제에서 활성화되는 뇌의 영역으로 알려져 있다(Macar, Coull, and Vidal, 2006). 또한 Brown(1997)은 높은 주의력이 필요한 다중과제를 통해 시간인지와 주의와의 관계를 알아보았다. 이 연구에서는 집중해야 할 요소의 숫자가 증가할 경우 시간지각에 대한 수행결과가 감소하였음을 나타낸다. 이를 통하여 뇌가 담당할 수 있는 주의 한계용량과 관련하여 인간의 시간 타이밍의 지각을 연결하고자 하였다.

앞서 설명한 사건-발생적 타이밍 기전에 관여하는 뇌의 영역은 과제에 따라 구분된다는 신경학적 증거는 다음과 같다. 소뇌의 손상이 있을 경우 연속 동작의 타이밍 과제 수행에 영향이 없지만, 불연속 동작의 시간적 가변성을 증가시켰다는 연구(Spencer & Ivry, 2005)를 통해 소뇌가 사건 타이밍에 관여하는 것을 알 수 있다. 또한 fMRI를 활용하여 연속적이고 부드러운 동작의 타이밍 제어에는 소뇌가 관여하지 않는다는 결과를 확인한 연구들이 보고되었다(Spencer et al., 2003). 따라서 소뇌는 동작의 연속성에 따라 타이밍 제어에 선택적으로 관여한다고 할 수 있다.

3. 운동 협응과 가변성

인간의 몸은 신경, 근육, 뼈 등의 수많은 해부학적·기능적 자유도로 구성된 복잡한 시스템이다(Eubank & Farmer, 1997). 시스템의 복잡성 때문에 인간은 완벽히 같은 동작을 반복하기 어려우며, 이때 필연적으로 동작의 가변성이 발생한다. 움직임에서 가변성은 운동제어 영역에서 근본적이고 중요한 문제로 숙련도를 비교할 수 있는 지표로서(Davids, Bennett & Newell, 2006), 일반적으로 수행력의 가변성이 낮으

면 동작이 일관되기 때문에 숙련되었다고 할 수 있다. 하지만, 가변성은 변화에 대한 유연성과 적응력의 전제조건(Sternad, 2006)으로 인간의 운동행동에서 보이는 긍정적인 특성으로 바라볼 수 있다.

움직임의 시간과 공간적 속성을 하나의 양적 변수로 표현하는 상대위상은 협응 패턴의 차이를 더욱 정밀하게 비교할 수 있는 변수로서(Haddad et al, 2010; Kurz & Stergiou, 2004), 운동기술의 숙련성을 묘사하거나 운동학습, 부상 및 재활의 상태를 파악할 수 있다. 운동협응을 나타내는 변수로 평균 절대 상대위상(MARP)은 동작의 협응 패턴을(Stergiou et al., 2001), 그리고 평균 절대 상대위상의 표준편차(SDRP)는 협응 안정성을 의미한다(van Emmerik & Wagenaar, 1996). 구체적으로 낮은 MARP는 in-phase(close to 0°), 높은 경우 anti-phase(close to 180°)를 의미하고(Bardy, et al., 2002), SDRP가 낮으면 협응 안정성이 높음을, 반대로 높은 경우 협응 패턴의 가변성이 높음을 의미한다(Kurz & Stergiou, 2004).

생태학적 관점에서 인간의 움직임은 정보를 지각하고 동작을 생성하는 유기적인 결합의 과정으로 이해된다(Gibson, 1950). 또한 동작의 협응과 운동 시스템의 안정성은 환경의 정보에 영향을 받는다(Bernstein, 1967). 따라서, 이러한 지각과 동작의 결합(perception-action coupling)과 운동 시스템의 협응 안정성(stability of motor coordination)을 복합적으로 살펴보는 생태학적 다이내믹 접근(ecological dynamics approach)을 통해 타이밍 과제에서 어떤 정보를 얼마나 지각하고, 동작을 어떻게 유기적으로 제어하는지 밝혀낼 수 있다.

Ⅲ. 연구방법

1. 연구대상

실험설계에 따라 연구 대상자는 G*power program에서 산출된 통계적 검증력 95%를 충족하는 30명으로 선정하였다. 실험은 과제 수행에 이상이 없는 건강한 성인 남녀 32명(female: 2)이 참여하여 진행되었다. 연구 대상자 모집 및 실험 진행은 서울대학교 생명윤리위원회의 허가를 받고 윤리적 가이드라인을 준수하며 진행하였으며(IRB No. 2205_004-011), 실험 이후 과제 실패율 10% 이상인 남자 2명은 분석에서 제외하였다.

표 1. 연구 대상자 특성

성별	나이(year)	신장(cm)	앉은키(cm)	팔길이(cm)
남 28, 여 2	26.3 ± 4.7	174.6 ± 5.0	61.7 ± 2.7	54.2 ± 2.4

2. 실험장비

본 연구의 실험과제는 HTC VIVE(HTC VIVE PRO-eye, HTC VIVE, USA & Taiwan)의 HMD(head mounted display)와 컨트롤러를 사용하여 가상현실에서 진행되었다. 운동 타이밍 과제는 유니티(Unity 3D, Unity Technologies, USA)를 이용하여 가상현실에서 구현하였다. 유니티를 활용하여 자극과 동작의 시간 차이를 ms 단위로 수집하였고, 컨트롤러의 3차원 좌표를 시간에 따라 100Hz로 수집하였다. 연구 참여자는 경추(cervical), 오른쪽 상완(right arm), 오른쪽 하완(right forearm) 세 곳(그림3)에 관성센서를 부착하여 어깨 및 팔꿈치 관절의 움직임을 iSen(iSen 3.0, STT systems, Spain) 소프트웨어를 활용하여 100Hz로 수집하였다.

그림 1. 가상현실 장비(HMD, controller)

그림 2. 관성센서

그림 3. 관성센서 부착 위치

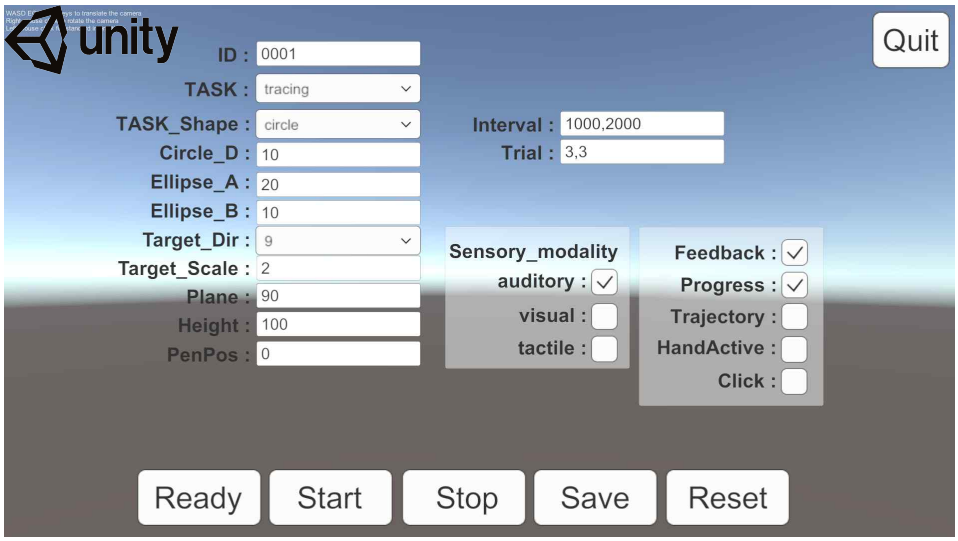

그림 4. Unity 과제 설정 화면

3. 실험과제

연구 참여자는 주기적인 자극에 동작을 일치시키는 운동 타이밍 과제를 수행하였다. 과제는 지각정보 조건인 자극의 양식과 템포에 따라 주어졌다. 제공되는 자극의 양식은 청각(Auditory, A), 시각(Visual, V), 촉각(Tactile, T)의 단일감각과 두 감각이 결합된 다감각으로 모든 조건에서 동일하게 25ms 동안 제공되었다. 자극의 템포는 20bpm(interval: 3000ms), 30bpm(interval: 2000ms), 60bpm(interval: 1000ms) 세 가지 조건으로 이루어졌다. 연구 참여자는 의자에 앉은 상태에서 오른쪽 어깨 기준으로 전방 40cm 떨어진 지점을 중심으로 생성되는 가상의 원을 따라 그리는 과제를 수행하였다. 제공되는 원은 관상면(frontal plane)에 존재하며, 지름은 수행자 팔길이의 50%로 생성되었다. 타이밍 목표는 원의 9시 방향에 지름 10cm의 붉은색 구(sphere)로 설정하였다. 연구 참여자는 오른손으로 컨트롤러를 쥔 상태에서 목표에서 시작하여 제시된 원을 따라 시계방향으로 움직이다가 다시 목표에 자극의 타이밍과 맞추어 도달하는 수행을 연속적으로 하였다.

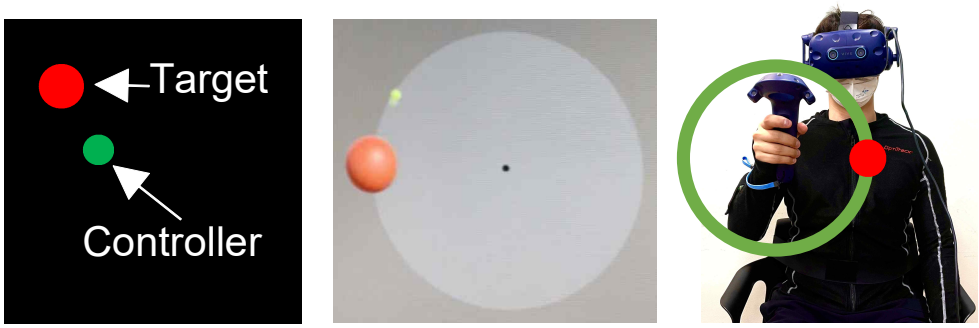

그림 5. 원 그리기 과제

4. 실험절차

연구의 모든 과정은 서울대학교 생명윤리위원회(Seoul National University Institutional Review Board, SNU IRB)의 허가받은 후 윤리적 가

이드라인을 준수하며 진행되었다. 실험실에 도착한 연구 참여자는 참여 동의서를 작성하고, 연구의 목적과 과정을 안내받게 된다. 이후, 앉은키와 팔길이를 측정하여 원의 중심 높이(앉은키)와 지름(팔길이 50%)을 설정하였다. 팔꿈치와 어깨 관절의 움직임을 측정하기 위해 관성센서를 부착하고, 장비 교정(calibration) 후 의자에 앉아 편안한 자세에서 HMD와 컨트롤러를 착용하였다. 몸통은 고정하여 어깨와 팔꿈치 이외 분절의 움직임은 제한하였다.

1) 동기화 과제(synchronization task)

일정한 템포로 제공되는 자극에 동작을 일치시키는 동기화 과제는 감각운동 동기화 능력을 확인하는 과제이다. 동기화 과제에서 수집한 비동기성, 타이밍 가변성, 수행주기, 부적 비동기성 등의 시간 변인을 통해 타이밍 정확성과 일관성을 비교하였다. 실험이 시작되면 헤드셋을 통해 청각자극(beep), 목표 지점의 시각자극(flash), 그리고 오른손 컨트롤러에 제공되는 촉각자극(vibration)을 연구 참여자에게 실험설계에 따라 제공하였다. 연구 참여자는 6가지 감각양식 및 3가지 템포 조건에 따른 동기화 과제를 조건별로 5회의 연습수행 후 20회씩 수행하였다(20trials×2blocks×6modality×3tempo = 720회).

2) 적응 과제(adaptation task)

실험2의 적응 과제는 중간 템포의 일정한 주기에서 템포가 변하면, 수행자는 변화된 타이밍에 맞추어 새롭게 적응하는 과제가 진행되었다. 20회 수행 중 8~12회 사이에 무선적으로 템포가 증가(30bpm→60bpm), 혹은 감소(30bpm→20bpm)하는 변화가 발생하였고, 연구 참여자는 가능한 빠르게 변화된 타이밍에 적응하도록 지시받았다. 연구 참여자의 피로 및 반복측정의 잔류효과를 제거하기 위해 조건별 1분 및 과제 간 10분의 쉬는 시간을 설정하였다.

5. 실험설계

본 연구에서는 타이밍 동기화 과제(Task1)에서 지각정보에 따른 시·공간적 정확성과 일관성을 비교하고, 결합된 감각에서 각 감각의 기여도를 비교하고자 하였다. 또한, 적응 과제(Task2)를 통해 타이밍 수정이 어떻게 이루어지며 동작의 협응 패턴과 안정성을 살펴보고자 다음과 같은 두 가지 실험으로 연구가 설계되었다.

표 2. Experimental design

Independent variable	Dependent variable
Task1 modality(6)*tempo(3)	**1. Temporal variables** • Timing error: asynchrony(Asy, ms) • Timing variability: CV of asynchrony(CV_{asy}, %) • Anticipation: negative asynchrony($Negative_{asy,}$ %) **2. Sensory reliability** • odds(%), odds ratio(%) **3. Spatial variables** • Spatial error: mean radial error(MRE, cm) • Spatial variability: SD of MRE(cm)
Task2 tempo change(2)	**1. Temporal variables** • Adaptation: phase correction response(PCR, ms) **2. Kinematic variables** • Coordination pattern : mean absolute relative phase(MARP, deg) • Coordination stability : SD of relative phase(SDRP, deg)

6. 자료수집 및 분석

수행의 정확성과 일관성은 가상현실에서 움직이는 컨트롤러 끝점(end-point)의 3차원 좌표를 이용하여 산출되었다. 협응 안정성 확인을 위한 관절의 움직임은 관성센서를 이용하여 수집된 오일러 각도(Euler angle)를 iSen 프로그램의 신체 모델링을 이용하여 분석하였다. 모든 자료의 표본 추출률(sampling rate)은 100Hz로 설정하였다. 종속변인에 따른 세부적인 분석방법은 다음과 같다.

1) 시간적 변인(temporal variables)

① 비동기성(asynchrony)

타이밍 오류인 비동기성은 자극이 제공되는 순간과 컨트롤러가 목표 범위에 도달하는 순간 사이에 발생하는 시간오차(ms)의 평균 절대오차(mean absolute error, AE)로 산출하였다(x_i: 실제 수행시간, T: 목표시간, n: 수행 횟수).

$$MAE = \sum_{i=1}^{n} \frac{|x_i - T|}{n}$$

수식 1. Asynchrony

② 타이밍 가변성(CV of asynchrony)

타이밍 일관성은 시간오차의 표준편차를 자극간격에 따라 표준화한 변동계수(coefficient of variation, CV)를 이용하여 타이밍 가변성을 산출하였다(S: 시간오차의 표준편차, $\bar{x}$: 시간오차의 평균).

$$CV = (S/\bar{x}) \times 100$$

수식 2. Timing variability

③ 부적 비동기성(negative asynchrony)

예측 경향성을 나타내는 부적 비동기성은 전체 수행(n) 중 자극이 주어지는 시점보다 먼저 목표 지점에 도달하는 수행의 빈도(k) 비율로 계산하였다.

$$N_{asy} = (k/n) \times 100$$

수식 3. Negative asynchrony

④ 타이밍 수정 반응(phase correction response, PCR)

타이밍 수정 반응은 자극의 템포가 변한 시점의 다음번 수행에서 나타나는 시간의 항상오차로 산출하였다(x_i: 실제 수행시간, T: 목표시간, n: 수행 횟수).

$$PCR = \sum_{i=1}^{n} \frac{x_i - T}{n}$$

수식 4. Phase correction response(PCR)

2) 감각 기여도(sensory reliability)

감각 기여도를 비교하기 위해 독립 변수의 선형 결합을 이용하여 사건의 발생 가능성을 예측하는 로지스틱 회귀분석(logistic regression)이 사용되었다. P(Y)는 0~1 사이의 값을 갖는 비선형 함수인 로지스틱 반응함수(logistic response function)로, 이를 선형화하기 위해 승산(odds) 개념을 도입하여 각 감각이 타이밍 수행에 미치는 기여도(reliability)를 추정하였다(Alais & Burr, 2004; van Beers et al., 1999; Ernst & Banks, 2002).

$$P(Y) = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 x)}}$$

수식 5. Logistic response function

$$odds(Y=1) = \frac{P}{1-P} = e^{\beta_0 + \beta_1 x}$$

수식 6. Odds

승산은 'P(Y)가 발생하지 않을 확률에 대한 P(Y)이 발생할 확률'로 목표 확률이 실패 확률보다 몇 배인지 나타내는 지표이다(수식6). 일반화선형모델(generalized linear model, GLM) 분석 결과 산출된 계수 β_0과 β_1은 최대우도추정법(maximum likelihood estimation, MLE)을 사용하여 반복적인 계산으로 우도가 최대가 되도록 조정하여 얻게 된다. 산출된 계수 적용 후, 로짓 변환을 통해 최종적으로 선형화된 확률 모형을 예측하였다(수식7).

$$Log(odds) = \beta_0 + \beta_1 x$$

수식 7. Logit

$$odds\,ratio = \frac{odds(Y=1)}{odds(Y=0)}$$

수식 8. Odds ratio

승산비(odds ratio)는 두 변수의 연관성을 나타내기 위한 상대적인 오즈 비율로 입력변수가 1단위 증가할 때 늘어나는 승산의 비율이다. 오즈비 1을 기준으로 결합된 두 감각양식의 상대적인 기여도를 비교하였다(수식8).

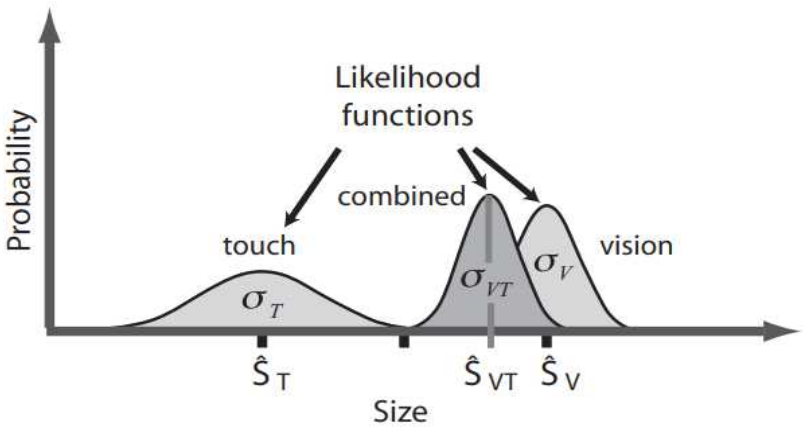

그림 6. Maximum likelihood estimation(MLE)

3) 공간적 변인(spatial variables)

수행자의 오른손 끝점(end-point)의 움직임이 관상면(frontal plane) 기준으로 제시된 원 궤적을 벗어나는 평균반경오차(mean radial error, MRE)와 앞뒤(anterior-posterior, AP) 방향의 거리오차로 공간 오차와 가변성을 비교하였다($predicted_i$: 목표 위치, $actual_i$: 수행 위치).

$$MRE = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \frac{(predicted_i - actual_i)^2}{n}}$$

수식 9. Mean radial error(MRE)

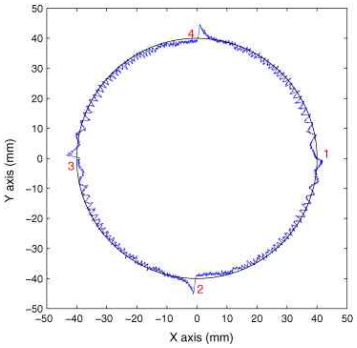

그림 7. 원과 수행 궤적

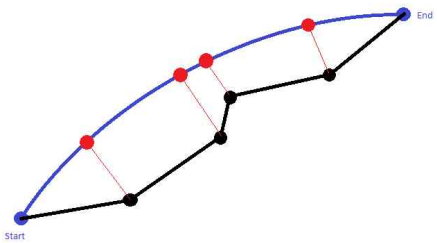

그림 8. 거리 오차
(빨강: 목표, 검정: 수행)

4) 운동학적 변인(kinematic variables)

어깨와 팔꿈치 관절의 움직임은 시공간적 특성을 하나의 양적 변수로 표현한 위상각으로 변환하였으며, 위상각의 차이인 상대위상은 두 관절의 협응 관계를 의미한다. 이를 활용하여 동작의 협응 패턴은 평균 절대 상대위상(mean absolute relative phase, MARP), 그리고 협응 안정성은 상대위상의 표준편차(SD of RP)로 비교하였다.

어깨는 움직이는 방향과 평면에 따라 네 가지 움직임으로 구분하여 분석하였다. 아래 표는 팔꿈치(1수준)와 어깨(4수준) 관절의 움직임 간 상대적 위상 관계(4수준)를 나타낸다.

표 3. 팔꿈치와 어깨 관절 움직임의 상대적 관계

Elbow	Shoulder		Indicator
Flexion-extension	Flexion-extension	→	E-Sf
	Abduction-adduction	→	E-Sa
	Horizontal rotation	→	E-Sh
	Vertical rotation	→	E-Sv

① 상대위상(relative phase)

$$\Theta = actan(y/x)$$

(x : angular displacement, y : angular velocity)

수식 10. Phase angle

$$\Theta_{rp} = \Theta_d - \Theta_p$$

(θ_d : distal segment phase angle, θ_p: proximal segment phase angle)

수식 11. Relative phase

② Mean absolute relative phase(MARP)

어깨와 팔꿈치 관절의 협응 패턴은 상대위상(relative phase)을 활용하여 평균 절대 상대위상(mean absolute relative phase, MARP)으로 산출하여 비교하였다.

$$MARP = \sum_{i=1}^{n} \frac{|RP(\theta_i)|}{n}$$

수식 12. Mean absolute relative phase(MARP)

③ SD of relative phase(SDRP)

협응 안정성은 상대위상의 표준편차로 비교하였다.

$$SDRP = \sum_{i=1}^{n} \frac{|SD\,of\ RP(\theta_i)|}{n}$$

수식 13. SD of relative phase(SDRP)

7. 통계처리

본 연구에서는 Unity program 및 iSens software에서 추출한 Excel 자료를 R package(version 4.1.2)를 사용하여 정제 및 분석하였다. 지각정보에 따른 시공간적 정확성과 가변성, 그리고 협응 특성은 반복측정 이원분산분석(Two-way ANOVA with repeated measures)을 실시하였다. 주효과 및 상호작용 효과가 발생한 경우, *TukeyHSD* 사후검정으로 요인별 다중비교를 하였다. 감각 기여도는 로지스틱 회귀분석(Logistic regression)을 통하여 감각에 따른 승산(odds)과 승산비(odds ratio)를 비교하였다. 본 연구의 통계적 유의수준은 .05로 설정하였다.

표 4. Statistical methods

Class	Variables	Analysis method
Temporal variables	• Asynchrony • CV of asynchrony • Negative asynchrony • Phase correction response(PCR)	Two-way ANOVA with repeated measures
Spatial variables	• Mean radial error(MRE) • Distance error	
Kinematic variables	• Mean absolute relative phase(MARP) • SD of relative phase(SDRP)	
Reliability	• Sensory reliability	Logistic regression

Ⅳ. 연구결과

본 연구에서는 지각정보에 따른 동기화 과제와 적응 과제를 통해 연속적인 원 그리기 동작의 운동 타이밍, 감각 기여도, 그리고 운동학적 특성을 살펴보았다. 실험1의 동기화 과제는 자극양식(6수준: 청각, 시각, 촉각, 청각-시각, 청각-촉각, 시각-촉각)과 템포(3수준: 20bpm, 30bpm, 60bpm)에 따라 18개 조건에서, 실험2는 템포 변화(2수준: 증가, 감소)가 있는 적응 과제를 통해 연구가 진행되었다.

1. 동기화 과제(Task1: Synchronization task)

1) 시간적 변인(temporal variables)

① 타이밍 오류: Asynchrony

동기화 과제에서 지각정보(양식, 템포)에 따른 타이밍 오류인 비동기성(Asy)은 다음과 같다.

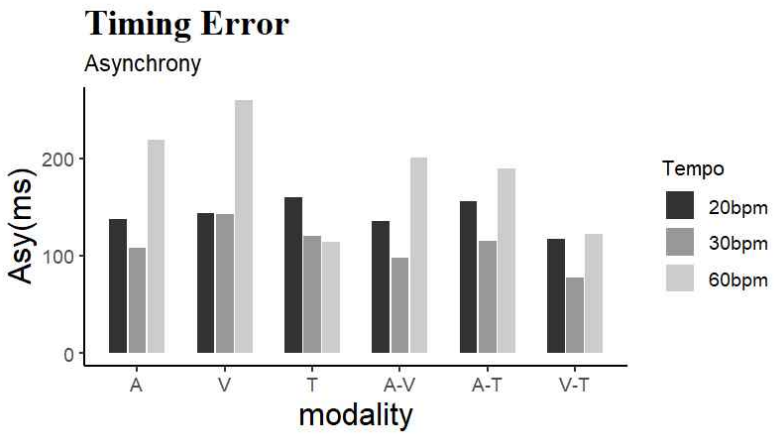

그림 9. 지각정보에 따른 비동기성(barplot, Task1)

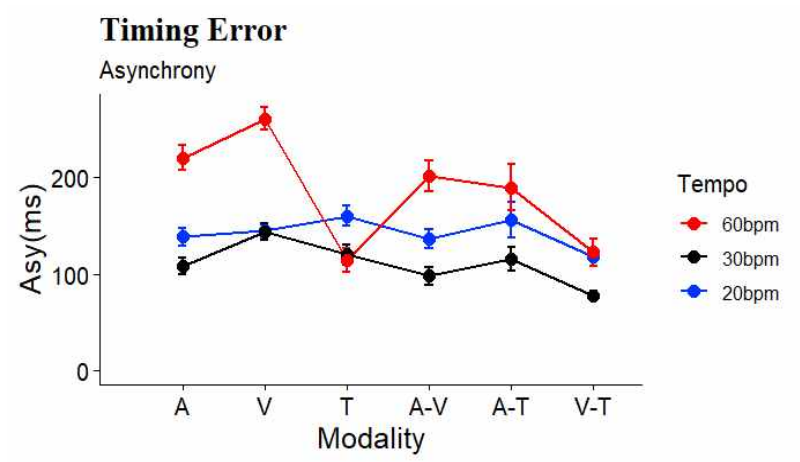

그림 10. 지각정보에 따른 비동기성(lineplot, Task1)

본 연구에서 표현되는 유의수준은 다음과 같이 정의하였다(Signif. codes: 0 '****' 0.0001 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05).

표 5. 지각정보에 따른 비동기성

비동기성(Asy, ms)				*F*	*P*
Tempo	Modality	N	Mean ± SD		
60bpm	A	30	219.0 ± 82.5	18.16	<.001***
	V	30	260.1 ± 70.2		
	T	30	113.8 ± 76.5		
	A-V	30	200.6 ± 71.4		
	A-T	30	189.3 ± 106.0		
	V-T	30	122.3 ± 63.7		
	average		188.5 ± 95.4		
30bpm	A	30	108.4 ± 53.8	4.78	0.00041**
	V	30	143.2 ± 55.7		
	T	30	120.0 ± 66.1		
	A-V	30	97.8 ± 40.3		
	A-T	30	115.5 ± 52.8		
	V-T	30	77.6 ± 23.4		
	average		114.9 ± 56.3		
20bpm	A	30	139.1 ± 57.8	1.77	0.12
	V	30	144.2 ± 43.7		
	T	30	160.0 ± 68.7		
	A-V	30	135.9 ± 43.5		
	A-T	30	155.9 ± 83.6		
	V-T	30	117.3 ± 42.6		
	average		143.9 ± 58.9		

A: auditory, V: visual, T: tactile *p<.05, **p<.01, ***p<.001

반복되는 요인(Id)의 등분산성 확인을 위한 구형성 검정(Mauchly's test of sphericity) 결과 구형성 가정을 위배하지 않았다(p>.05). 이어서 실시한 비동기성의 반복측정 이원분산분석 결과 자극의 양식 및 템포 조건에서 주효과가 나타났다(Modality: $F(5, 145) = 24.16$, $p<.001$, $\eta^2 = 0.22$; Tempo: $F(2, 58) = 28.958$, $p<.001$, $\eta^2 = 0.52$). 또한, 자극양식과 템포의 상호작용효과도 유의하였다(Modality*Tempo: $F(10, 290) = 12.6$, $p<.001$, $\eta^2 = 0.22$).

표 6. 비동기성 Two-way RM ANOVA 결과

	df	Sum Sq	Mean Sq	F	P	η^2
Modality	5	288181	57636	24.16	<.001***	0.22
Tempo	2	498445	249222	28.96	<.001***	0.52
Modality:Tempo	10	300633	30063	12.60	<.001***	0.22
Residuals	435	1037714	2386			

주효과에 대한 *TukeyHSD* 사후검정 결과 요인1(양식)의 경우 시각이 촉각(p<.0001), 청각-시각(p=.02), 시각-촉각(p<.0001)보다 비동기성이 높았다. 하지만, 시각과 촉각이 결합된 조건은 청각(p<.001), 청각-촉각(p=.007)보다 비동기성이 낮았다. 요인2(템포)에 의한 비동기성은 사후검정 결과 30bpm 조건이 다른 두 조건보다 유의하게 낮았으며(30bpm-60bpm: p<.0001; 30bpm-20bpm: p<.001), 60bpm 조건은 20bpm보다 비동기성이 유의하게 높았다(60bpm-20bpm: p<.0001).

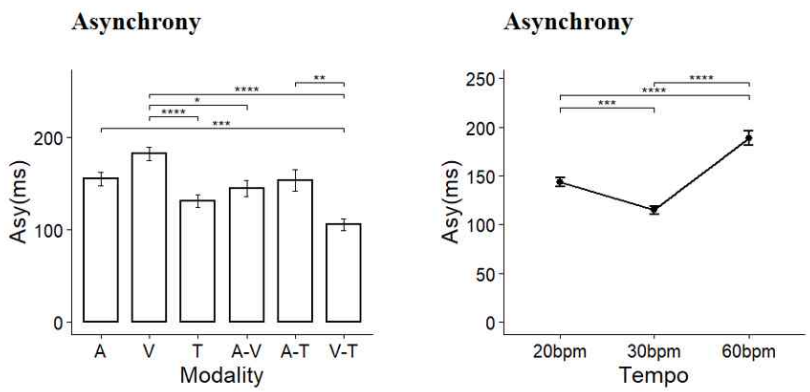

그림 11. 비동기성에 대한 지각정보의 주효과

자극의 양식*템포의 상호작용효과는 단순주효과 분석을 통해 60bpm 조건에서 촉각이 다른 네 양식보다 비동기성이 유의하게 낮은 결과를 얻었다(청각-촉각(p<.01), 청각-시각(p<.001), 청각(p<.001), 시각(p<.001)). 반면, 시각의 경우 시각-촉각(p<.001), 청각-촉각(p<.05)보다 비동기성이 높았다. 또한 시각의 경우 촉각과 결합될 경우 청각보다 비동기성이 유의하게 낮았다(p<.05). 이를 통해 상대적으로 빠른 타이밍 과제(60bpm)에서 촉각이 다른 두 감각보다 감각운동 동기화에 효과적임을 확인하였다. 또한, 단일감각과 다감각 조건에서 비동기성을 비교한 결과 촉각은 청각과 결합하는 경우 오히려 타이밍 정확성이 낮아졌으나, 시각은 청각은 촉각과 결합되면 타이밍 정확성이 높아지는 것으로 나타났다.

30bpm 조건에서 시각은 청각(p<.05), 청각-시각(p<.05), 시각-촉각(p<.001)보다 비동기성이 유의하게 높았다. 또한 촉각의 경우 시각-촉각보다 비동기성의 높은 결과를 보였다. 이를 통하여 선호하는 30bpm의 템포에서 단일감각은 청각, 촉각, 시각 순으로 타이밍 정확성이 높은 결과를 보였다. 마지막으로 느린 템포(20bpm) 조건에서 자극양식에 따라 비동기성의 차이는 유의하지 않았다(p=0.12).

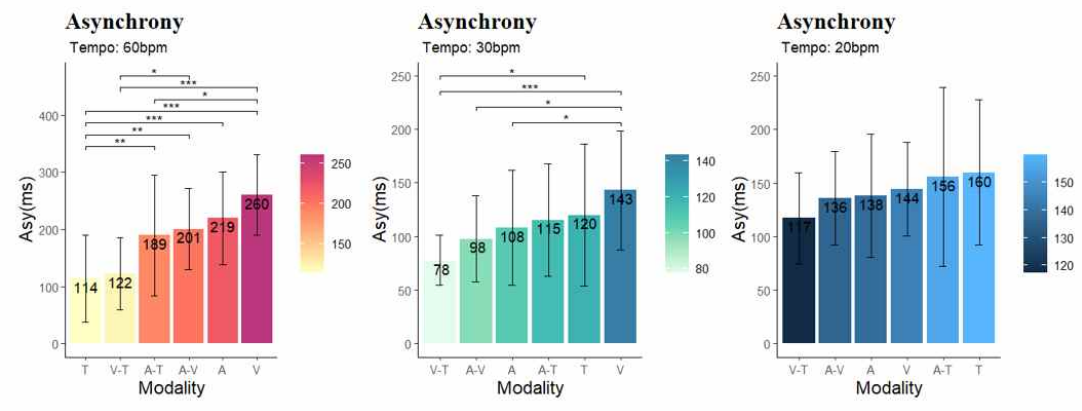

그림 12. 비동기성에 대한 지각정보의 상호작용효과

② 타이밍 가변성: CV of asynchrony

지각정보에 따른 타이밍 가변성은 비동기성의 변동계수(coefficient of variance, CV)로 다음과 같이 산출되었다.

표 7. 지각정보에 따른 타이밍 가변성

타이밍 가변성(CV_{asy}, %)				*F*	*P*
Tempo	Modality	N	Mean ± SD		
60bpm	A	30	33.1 ± 20.7	17.02	<.001***
	V	30	22.0 ± 11.6		
	T	30	62.0 ± 30.0		
	A-V	30	27.4 ± 18.2		
	A-T	30	36.5 ± 21.7		
	V-T	30	50.8 ± 21.6		
	average		38.7 ± 25.9		
30bpm	A	30	73.4 ± 26.1	0.847	0.518
	V	30	63.8 ± 24.8		
	T	30	67.7 ± 33.1		
	A-V	30	70.3 ± 22.5		
	A-T	30	72.6 ± 20.4		
	V-T	30	75.3 ± 20.8		
	average		69.7 ± 26.1		
20bpm	A	30	78.2 ± 24.2	2.641	0.025*
	V	30	74.9 ± 21.1		
	T	30	66.7 ± 13.8		
	A-V	30	74.3 ± 20.6		
	A-T	30	70.6 ± 19.9		
	V-T	30	84.9 ± 20.6		
	average		74.3 ± 20.7		

A: auditory, V: visual, T: tactile *p<.05, **p<.01, ***p<.001

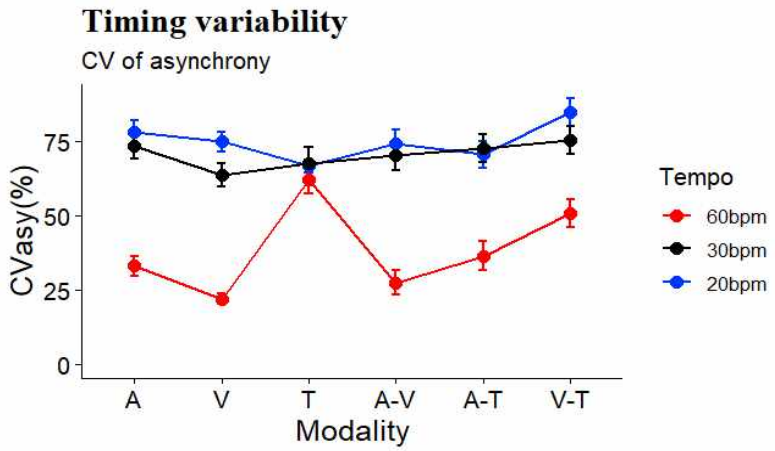

그림 13. 지각정보에 따른 타이밍 가변성

반복되는 요인(Id)의 등분산성 확인을 위한 구형성 검정(Mauchly's test of sphericity) 결과 구형성 가정을 위배하지 않았다(p>.05). 이어서 실시한 타이밍 가변성의 반복측정 이원분산분석 결과 자극의 양식 및 템포 조건에서 주효과가 나타났다(Modality: $F(5, 145) = 4.729$, $p<.01$, $\eta^2 = 0.05$; Tempo: $F(2, 58) = 83.457$, $p<.001$, $\eta^2 = 0.76$). 또한, 자극의 양식과 템포의 상호작용효과도 유의하였다(Modality*Tempo: $F(10, 290) = 6.020$, $p<.001$, $\eta^2 = 0.12$).

표 8. 타이밍 가변성 Two-way RM ANOVA 결과

	df	Sum Sq	Mean Sq	F	P	η^2
Modality	5	10622	2124.4	4.729	0.00003**	0.05
Tempo	2	135095	67547	83.457	<.001***	0.76
Modality:Tempo	10	27045	2704.5	6.020	<.001***	0.12
Residuals	435	195411	449.2			

주효과에 대한 *TukeyHSD* 사후검정 결과 요인1(양식)의 경우 시각 조건이 촉각(p=.017), 시각-촉각(p=.003)보다 타이밍 가변성이 유의하게 낮았다. 또한, 요인2(템포)의 경우 60bpm이 다른 두 조건보다 타이밍 가변성이 유의하게 낮았다(60bpm-30bpm: $p<.0001$; 60bpm-20bpm: $p<.0001$).

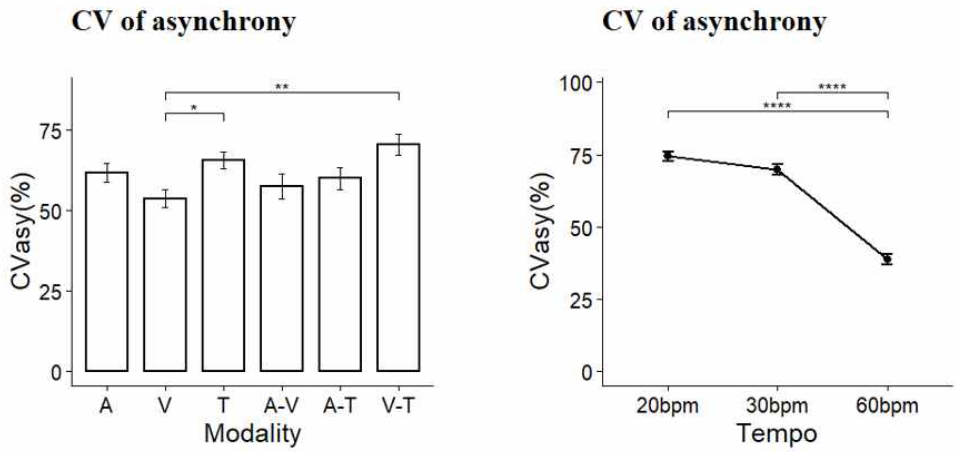

그림 14. 타이밍 가변성에 대한 지각정보의 주효과

타이밍 가변성에 대한 자극의 양식*템포의 상호작용효과는 단순주효과 분석을 통해 세부적으로 비교하였다. 분석 결과 60bpm에서 촉각이 다른 네 조건보다 타이밍 가변성이 유의하게 높았다(시각(p<.001), 시각-청각(p<.05), 청각(p<.01), 청각-촉각(p<.01)). 그리고 촉각이 시각과 결합된 경우에도 청각(p<.05), 청각-시각(p<.05), 시각(p<.01)보다 타이밍 가변성이 높았다. 이를 통해 촉각은 감각운동 동기화에서 타이밍 안정성에 부정적일 수 있음을 확인하였다.

30bpm 조건에서는 감각양식 간 유의한 차이가 나타나지 않았으며(p=.121), 20bpm 조건에서는 청각이 청각-시각보다 타이밍 가변성이 유의하게 낮았다(p<.05).

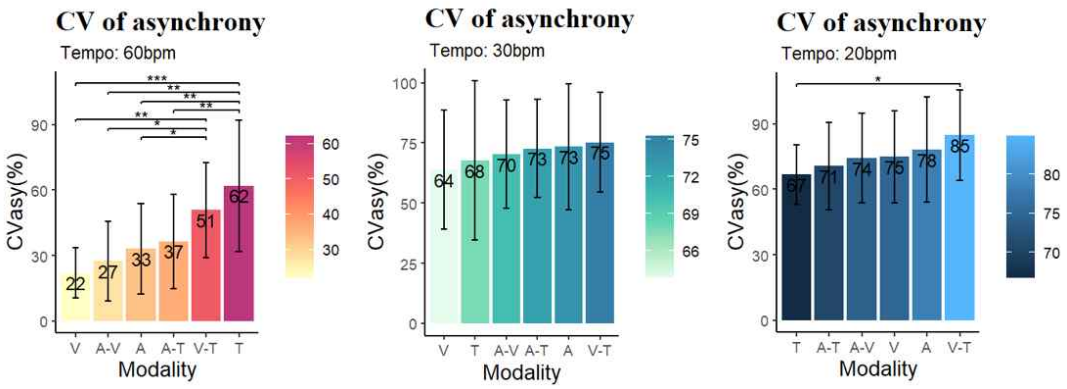

그림 15. 타이밍 가변성에 대한 지각정보의 상호작용효과

③ 예측 경향성: Negative asynchrony

예측을 통해 자극보다 동작이 선행하여 나타나는 빠른 타이밍의 부적 비동기성은 지각정보에 따라 다음과 같은 빈도를 보였다.

표 9. 지각정보에 따른 부적 비동기성

부적 비동기성($Negative_{asy}$, %)				*F*	*P*
Tempo	Modality	N	Mean ± SD		
60bpm	A	30	2.8 ± 7.2	5.138	0.000202***
	V	30	4.8 ± 11.3		
	T	30	19.5 ± 24.2		
	A-V	30	6.5 ± 20.1		
	A-T	30	9.0 ± 19.7		
	V-T	30	5.0 ± 12.4		
	average		8.3 ± 17.5		
30bpm	A	30	33.0 ± 24.6	31.59	<.001***
	V	30	13.2 ± 17.9		
	T	30	63.0 ± 21.3		
	A-V	30	22.0 ± 20.9		
	A-T	30	64.0 ± 19.0		
	V-T	30	50.0 ± 22.9		
	average		39.4 ± 29.0		
20bpm	A	30	41.5 ± 19.6	22.18	<.001***
	V	30	26.0 ± 18.8		
	T	30	65.0 ± 16.3		
	A-V	30	30.5 ± 19.0		
	A-T	30	58.5 ± 21.3		
	V-T	30	50.0 ± 19.2		
	average		44.9 ± 23.7		

A: auditory, V: visual, T: tactile *p<.05, **p<.01, ***p<.001

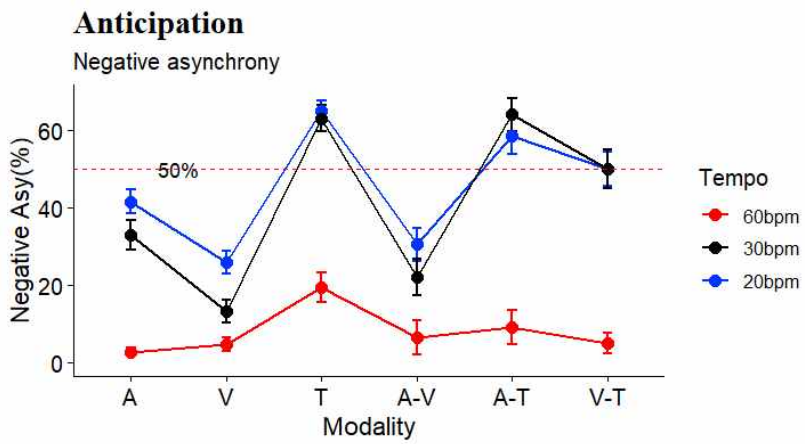

그림 16. 지각정보에 따른 부적 비동기성

반복되는 요인(Id)의 등분산성 확인을 위한 구형성 검정(Mauchly's test of sphericity) 결과 구형성 가정을 위배하지 않았다(p>.05). 이어서 실시한 부적 비동기성의 반복측정 이원분산분석 결과 자극의 양식 및 템포의 주효과가 나타났다(Modality: $F(5, 145) = 51.818$, $p<.001$, $\eta^2 = 0.29$; Tempo: $F(2, 58) = 194.486$, $p<.001$, $\eta^2 = 0.03$). 또한, 양식*템포의 상호작용효과도 유의하였다(Modality*Tempo: $F(10, 290) = 6.803$, $p<.001$, $\eta^2 = 0.11$).

표 10. 부적 비동기성 Two-way RM ANOVA 결과

	df	Sum Sq	Mean Sq	F	P	η^2
Modality	5	93461	18692	51.818	<.001***	0.29
Tempo	2	140311	70156	194.486	<.001***	0.03
Modality:Tempo	10	24539	2454	6.803	<.001***	0.11
Residuals	435	1895.1	4.356			

요인1(양식)과 요인2(템포)의 주효과는 *TukeyHSD* 사후검정을 통해 비교하였다. 분석 결과 자극양식 중 촉각(49.2%)이 예측 경향성이 가장 높고, 시각(14.7%)이 예측 경향성이 가장 낮았다. 또한, 60bpm 조건(8.3%)은 다른 두 조건보다 예측 경향성이 낮았다(30bpm: 39.4%, $p<.0001$; 20bpm: 44.9%, $p<.0001$).

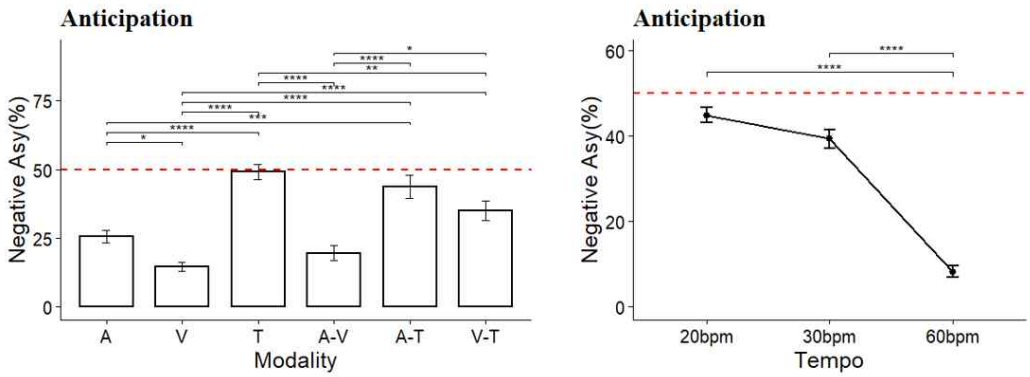

그림 17. 부적 비동기성에 대한 지각정보의 주효과

부적 비동기성에 대한 자극의 양식*템포의 상호작용효과는 단순주효과 분석을 통해 세부적으로 비교하였다. 분석 결과 60bpm에서 촉각(19.5%)이 가장 높은 예측 경향성을 보였고, 청각(2.8%)에서 가장 낮은 결과가 나타났다. 30bpm 조건에서는 촉각(63%)과 촉각-청각(64%) 조건에서 예측 경향성이 높았으며, 시각(13.2%), 시각-청각(22%)처럼 시각이 관여한 조건에서 예측 경향성이 낮게 나타났다. 20bpm 조건에서 예측 경향성 역시, 촉각(62%)이 가장 높았으며 시각(26%)이 가장 낮았다.

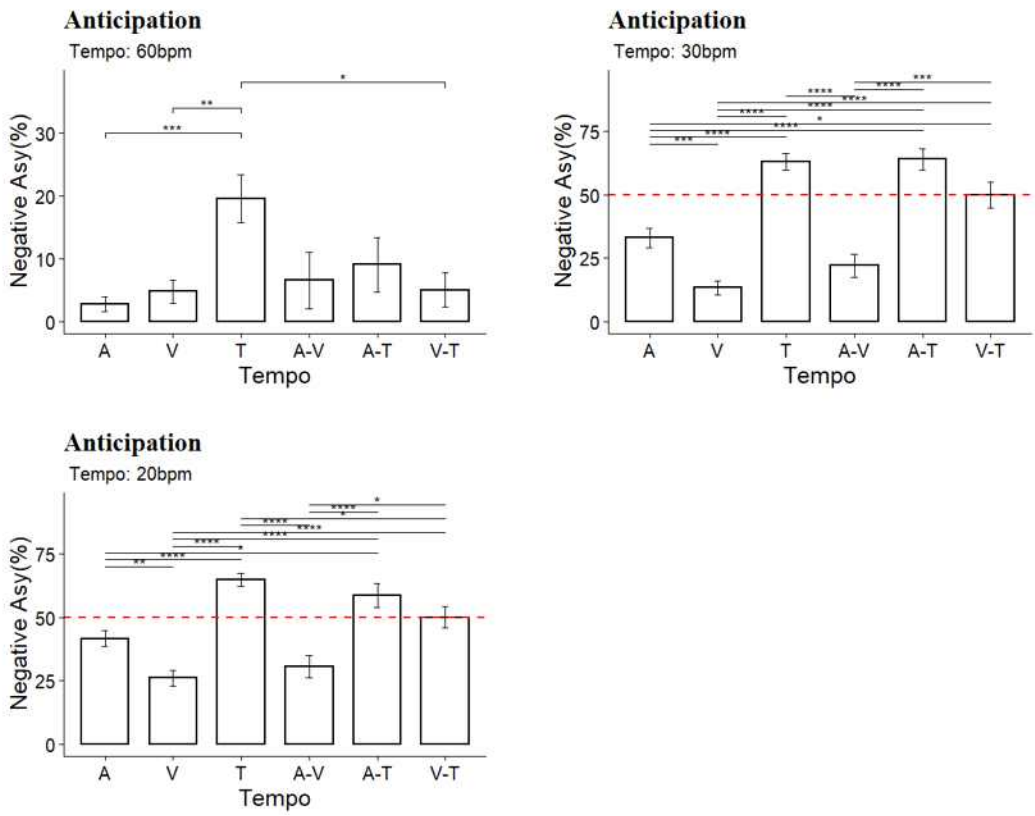

그림 18. 부적 비동기성에 대한 지각정보의 상호작용효과

2) 감각 기여도(sensory reliability)

로지스틱 회귀분석 결과는 모형의 적합도를 통해 추정된 사후확률(posterior probability)이다. 이를 이용하여 실제 관측된 결과가 어느 감각에서 발생했는지 추론하였다. 예측하고자 하는 목표변수는 다감각 조건으로(청각-시각, 청각-촉각, 시각-촉각) 이들이 속할 수 있는 청각(P(Y)=1), 시각(P(Y)=2), 촉각(P(Y)=3) 세 가지 범주의 확률을 통하여 감각 기여도를 산출하였다.

① 청각-시각 조건(Audio-Visual)

청각과 시각 두 양식이 결합된 조건은 세 가지 템포에서 단일감각보다 비동기성이 낮은 결과를 보였다. 그러나 통계적으로 유의한 차이는 30bpm 조건에서 시각 조건과 청각-시각 조건 사이에서만 나타났다(그림19, $P< .05$). 또한, 모든 템포 조건에서 청각-시각 조건의 관측된 타이밍 가변성(A-V, + shape)은 예측된 가변성(P_AV, grey color)보다 높았다(그림19). 이는 두 감각의 결합이 완전히 독립적이지 않고 특정 감각의 우세성이 있음을 의미한다.

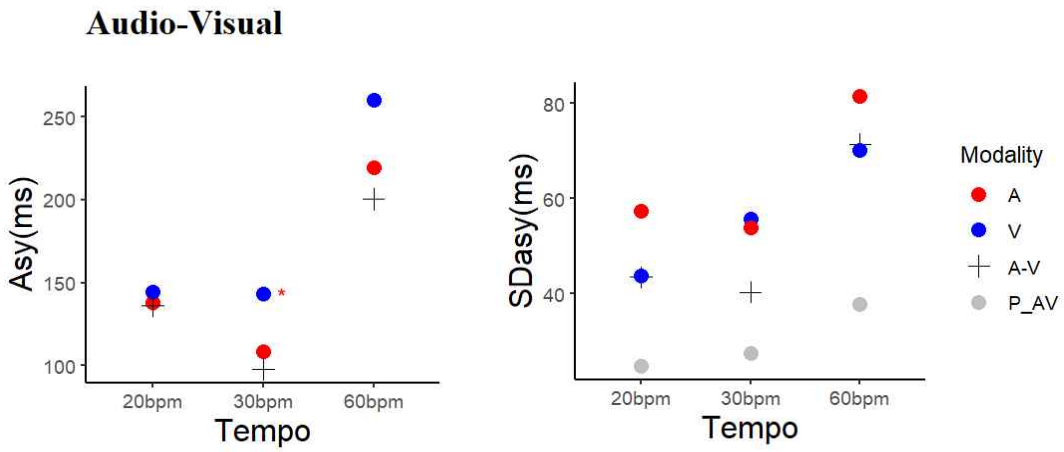

그림 19. 청각-시각 조건의 비동기성(좌)과 타이밍 가변성(우) 비교

○ **청각-시각 조건(60bpm)**

GLM 분석 결과 비동기성은 60bpm 조건에서 감각 기여도를 추정하는 데 유의미한 변수로 나타났다(p=0.015). 따라서, 추정된 계수(β_0 = -1.181, β_1 = 0.008067)로 산출된 예측모형은 다음과 같다.

$$odds\ :\ P(Y=2)\ /\ 1-P(Y=2)\ =\ exp(-1.181\ +\ 0.008x)$$

표 11. 청각-시각 조건의 GLM 분석 결과(60bpm)

Coefficients	Estimate	Std. Error	Z value	P	R^2
(Intercept)	-1.1814	0.8711	-1.356	0.175	
Asy	0.0080	0.0033	2.433	0.015*	0.114

청각-시각 조건(60bpm)에서 측정된 비동기성은 200ms로 예측모형을 통해 오즈값 1.5483를 도출하였다. 결과적으로 두 감각 중 청각에 비해 시각의 기여도가 54% 높음을 의미한다. 또한, 오즈비는 약 1.01(exp(0.008))로 Asy가 한 단위 증가하면 청각에 비해 시각과 관련될 확률이 1% 증가하는 것으로 예측할 수 있다.

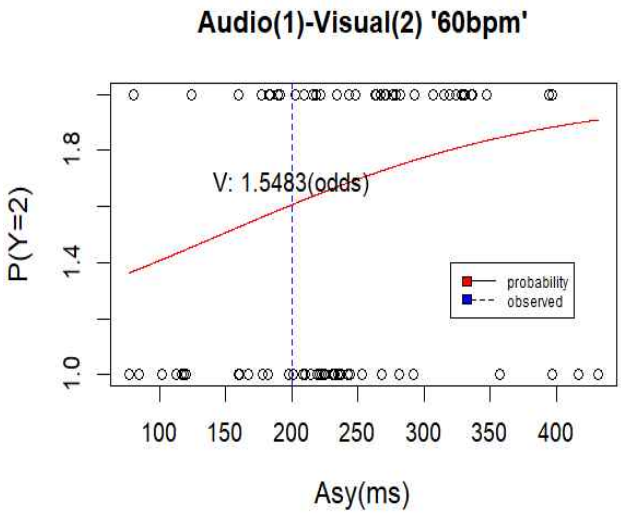

그림 20. 청각-시각 조건의 로지스틱 회귀분석 결과(60bpm)

○ 청각-시각 조건(30bpm)

GLM 분석 결과 비동기성은 30bpm 조건에서 감각 기여도를 추정하는 데 유의미한 변수로 나타났다(p=0.0298). 따라서, 추정된 계수(β_0 = -1.480, β_1 = 0.011)로 산출된 예측모형은 다음과 같다.

$$odds\ :\ P(Y=2)\ /\ 1-P(Y=2)\ =\ exp(-1.480\ +\ 0.011x)$$

표 12. 청각-시각 조건의 GLM 분석 결과(30bpm)

Coefficients	Estimate	Std. Error	Z value	P	R^2
(Intercept)	-1.4809	0.6612	-2.240		
Asy	0.0112	0.0052	2.173	0.0298*	0.152

청각-시각 조건(30bpm)에서 측정된 비동기성은 97ms로 예측모형을 통해 오즈값 1.4555를 도출하였다. 결과적으로 두 감각 중 청각에 비해 시각의 기여도가 45% 높음을 의미한다. 또한, 오즈비는 약 1.01(exp(0.011))로 Asy가 한 단위 증가하면 청각에 비해 시각과 관련될 확률이 1% 증가하는 것으로 예측할 수 있다.

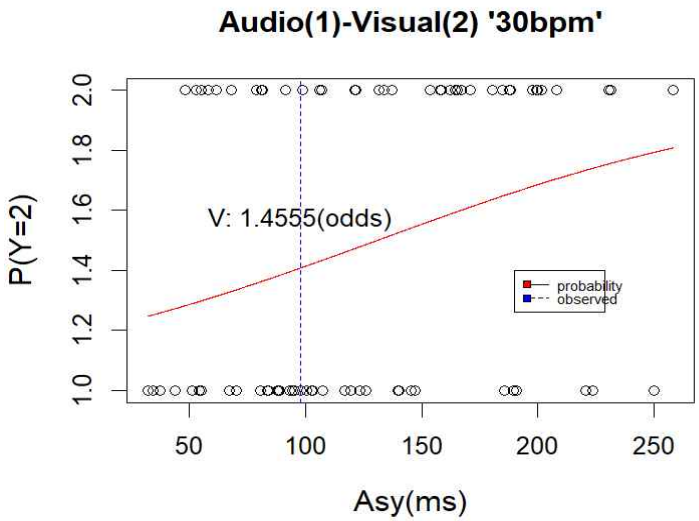

그림 21. 청각-시각 조건의 로지스틱 회귀분석 결과(30bpm)

② 청각-촉각 조건(Audio-Tactile)

60bpm 조건에서 청각-촉각 조건의 비동기성이 청각보다 유의하게 낮고(p<.05), 촉각보다 높았다(p<.01).

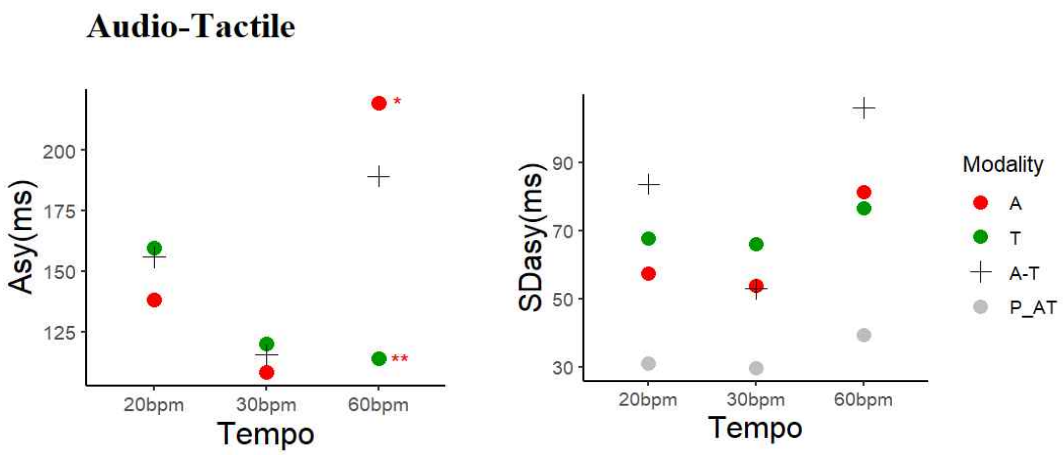

그림 22. 청각-촉각 조건의 비동기성(좌)과 타이밍 가변성(우) 비교

○ 청각-촉각 조건(60bpm)

GLM 분석 결과 비동기성은 60bpm 조건에서 감각 기여도를 추정하는 데 유의미한 변수로 나타났다(p=0.0298). 따라서, 추정된 계수(β_0 = -2.4816, β_1 = - 0.019)로 산출된 예측모형은 다음과 같다.

$$odds\ :\ P(Y=3)\ /\ 1\text{-}P(Y=3)\ =\ exp(2.4816\ -\ 0.019x)$$

표 13. 청각-촉각 조건의 GLM 분석 결과(60bpm)

Coefficients	Estimate	Std. Error	Z value	P	R^2
(Intercept)	2.4816	0.7751	3.201		
Asy	-0.0190	0.0043	-4.377	<.001***	0.476

청각-촉각 조건(60bpm)에서 측정된 비동기성은 189ms로 예측모형을 통해 오즈값 3.0894를 도출하였다. 결과적으로 두 감각 중 청각에

비해 촉각의 기여도가 208%(약 2배)로 나타났다. 또한, 오즈비는 약 1.02(exp(-0.019))로 Asy가 한 단위 증가하면 청각에 비해 촉각과 관련될 확률이 2% 감소하는 것으로 예측되었다. 즉, 촉각의 기여도가 2% 높아질수록 비동기성이 1ms 낮아진다고 추론할 수 있다.

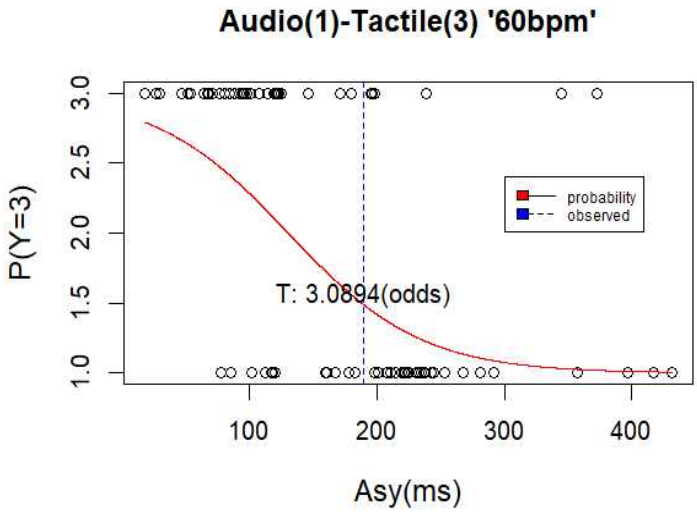

그림 23. 청각-촉각 조건의 로지스틱 회귀분석 결과(60bpm)

○ 청각-촉각 조건(20bpm)

GLM 분석 결과 비동기성은 20bpm 조건에서 감각 기여도를 추정하는 데 유의미한 변수로 나타났다(p=0.0274). 따라서, 추정된 계수(β_0 = -0.4731, β_1 = 0.0152)로 산출된 예측모형은 다음과 같다.

$$odds\ :\ P(Y=3)\ /\ 1-P(Y=3)\ =\ exp(-0.4731\ +\ 0.0152x)$$

표 14. 청각-촉각 조건의 GLM 분석 결과(20bpm)

Coefficients	Estimate	Std. Error	Z value	P	R^2
(Intercept)	-0.4731	0.6306	0.750		
Asy	0.0152	0.0069	2.205	0.0274*	0.476

청각-촉각 조건(20bpm)에서 측정된 비동기성은 156ms로 예측모형을 통해 오즈값 6.753를 도출하였다. 결과적으로 두 감각 중 청각에 비해 촉각의 기여도가 575%(약 6배) 높은 것으로 나타났다. 또한, 오즈비는 약 1.015(exp(0.0152))로 Asy가 한 단위 증가하면 청각에 비해 촉각과 관련될 확률이 1.5% 증가하는 것으로 예측되었다.

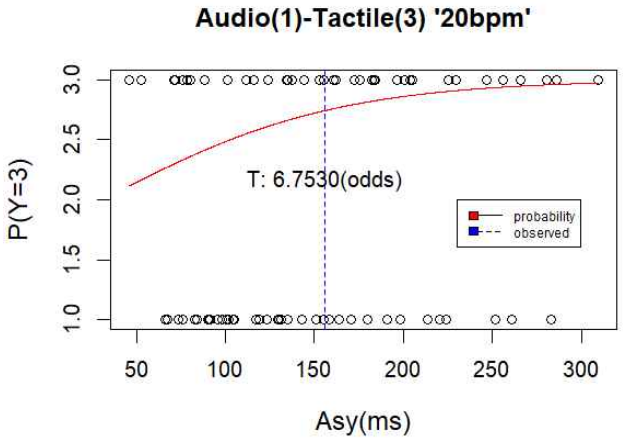

그림 24. 청각-촉각 조건의 로지스틱 회귀분석 결과(20bpm)

③ 시각-촉각 조건(Visual-Tactile)

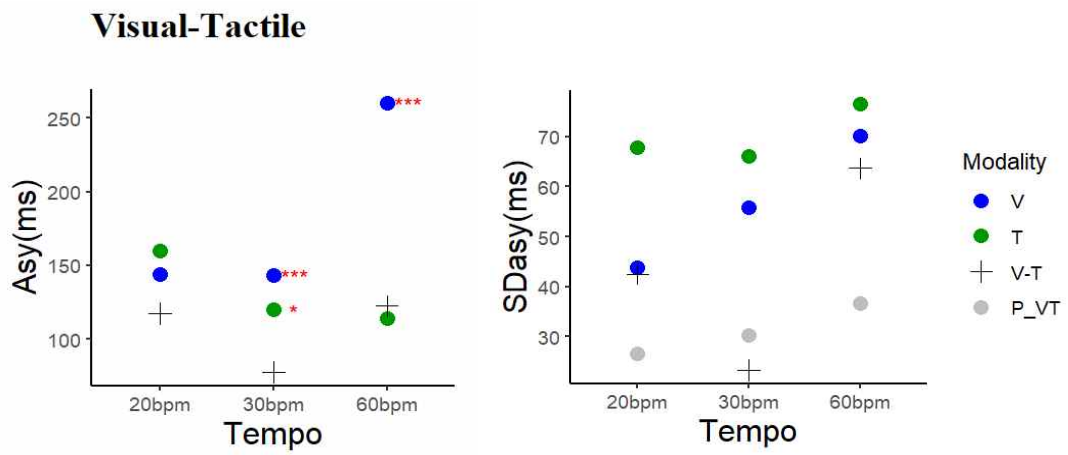

그림 25. 시각-촉각 조건의 비동기성(좌)과 타이밍 가변성(우) 비교

○ 시각-촉각 조건(60bpm)

GLM 분석 결과 비동기성과 타이밍 가변성은 60bpm 조건에서 감각 기여도를 추정하는 데 유의미한 변수로 나타났다(Asy: p<.001; SD_{asy}: p = 0.017). 따라서, 비동기성에 대한 추정 계수(β_0 = 3.0472, β_1 = -0.0260)로부터 산출된 예측모형은 다음과 같다.

$$odds(Asy) : P(Y=3) \ / \ 1-P(Y=3) = exp(3.0472 - 0.026x)$$

표 15. 청각-촉각 조건의 GLM 분석 결과(60bpm)

Coefficients	Estimate	Std. Error	Z value	P	R^2
(Intercept)	3.0472	0.9331	3.266		
Asy	-0.0260	0.0052	-4.951	<.001***	0.662

청각-촉각 조건(60bpm)에서 측정된 비동기성은 122ms로 예측모형을 통해 오즈값 1.15를 도출하였다. 결과적으로 두 감각 중 청각에 비해 촉각의 기여도가 15% 높은 것으로 나타났다. 또한, 오즈비는 약 1.026(exp(-0.026))로 Asy가 한 단위 증가하면 청각에 비해 촉각과 관련될 확률이 2.6% 감소하는 것으로 예측되었다.

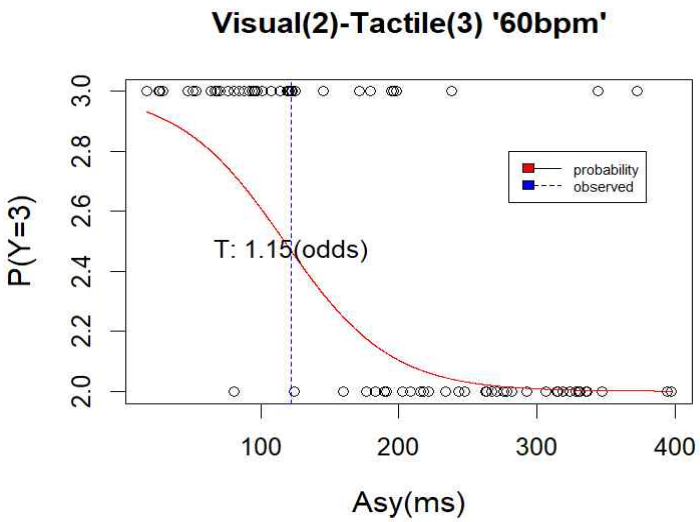

그림 26. 시각-촉각 조건의 로지스틱 회귀분석 결과(60bpm)

3) 공간적 변인(spatial variables)

원 그리기 수행의 공간 정확성은 관상면(frontal plane)에서 원과 수행의 평균반경오차(MRE)와 전후 방향(anterior-posterior)의 거리오차(DE)로 산출하였다. 수행의 공간 가변성은 평균가변오차 및 거리오차의 표준편차를 이용하여 분석하였다.

① 관상면에서의 공간 정확성 및 가변성

MRE 및 SD_{MRE}에 대한 반복되는 요인(Id)의 등분산성 확인 결과 구형성 가정을 위배하지 않았다(p>.05). 이어서 실시한 MRE의 반복측정 이원분산분석 결과 템포의 주효과가 나타났다(Tempo: $F(2, 58) = 7.10$, $p<.001$, $\eta^2 = 0.025$). 또한, SD_{MRE}의 반복측정 이원분산분석 결과에서도 템포의 주효과가 나타났다(Tempo: $F(2, 58) = 62.48$, $p<.001$, $\eta^2 = 0.191$).

표 16. MRE의 Two-way RM ANOVA 결과

	df	Sum Sq	Mean Sq	F	P	η^2
Modality	5	12	2.46	2.46	0.032	0.032
Tempo	2	14	7.11	7.10	<.001***	0.025
Modality:Tempo	10	3	0.28	0.28	0.985	0.005
Residuals	522	523	1.00			

MRE에 대한 템포의 주효과는 사후검정 결과 60bpm 조건이 30bpm($p<.05$)과 20bpm($p<.001$) 조건보다 MRE가 유의하게 낮은 것으로 나타났다. SD_{MRE}에 대한 템포의 주효과는 사후검정 결과 모든 조건에서 유의한 차이를 보였다(60bpm > 30bpm($p<.0001$); 60bpm > 20bpm($p<.0001$); 30bpm > 20bpm($p<.001$)).

표 17. SD_{MRE}의 Two-way RM ANOVA 결과

	df	Sum Sq	Mean Sq	F	P	η^2
Modality	5	0.4	0.09	0.71	0.62	0.005
Tempo	2	15.5	7.77	62.48	<.001***	0.191
Modality:Tempo	10	0.4	0.04	0.33	0.97	0.004
Residuals	522	64.9	0.12			

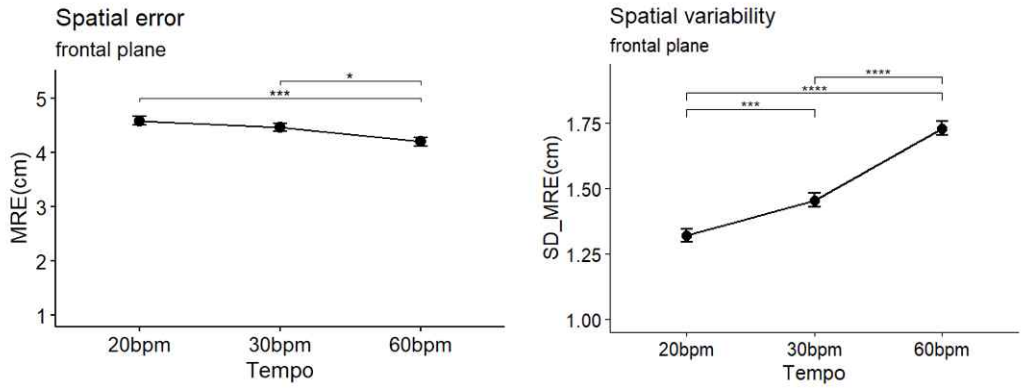

그림 27. 수행의 공간 정확성 및 가변성(frontal plane)

② AP방향의 공간 정확성 및 가변성

AP방향의 DE 및 SD_{DE}에 대한 반복되는 요인(Id)의 등분산성 확인 결과 구형성 가정을 위배하지 않았다(p>.05). 이어서 실시한 DE 및 SD_{DE}의 반복측정 이원분산분석 결과 SD_{DE}에 관한 템포의 주효과가 유의하게 나타났다(Tempo: $F(2,\ 58) = 3.49$, $p<.05$, $\eta^2 = 0.20$).

표 18. SD_{DE}의 Two-way RM ANOVA 결과

	df	Sum Sq	Mean Sq	F	P	η^2
Modality	5	3	0.597	1.95	0.084	0.017
Tempo	2	2.1	1.064	3.49	0.031*	0.012
Modality:Tempo	10	1.8	0.179	0.59	0.826	0.010
Residuals	522	159.4	0.305			

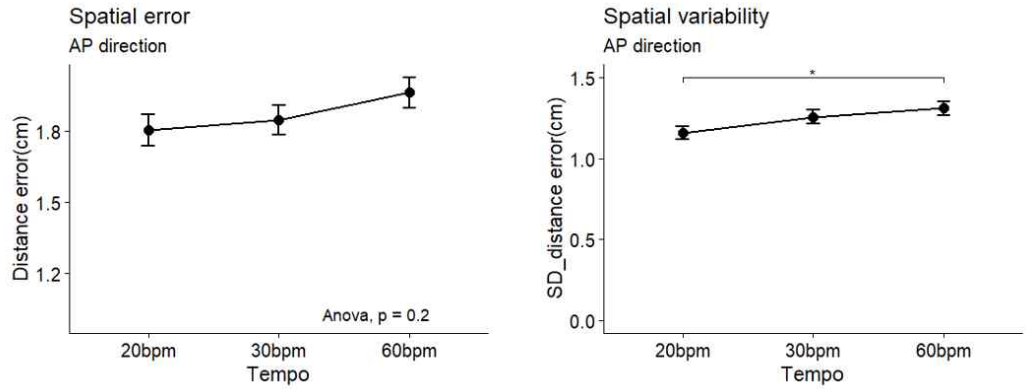

그림 28. 수행의 공간 정확성 및 가변성(AP direction)

2. 적응 과제(Task2: Adaptation task)

1) 타이밍 수정 반응(PCR)

연구 참여자는 중간 템포(30bpm)로 동기화 과제를 수행하는 중 임의의 순간 템포 변화(phase shift)에 적응하는 과제를 수행하였다. 타이밍 수정 반응(phase correction response, PCR)은 템포 변화가 발생한 다음 수행에서 타이밍 오류를 수정하며 나타나는 과수정(over correction)이다. 타이밍 적응 과제에서 템포 변화 및 자극양식에 따른 PCR 결과는 다음과 같다.

표 19. 템포 변화 및 자극양식에 따른 PCR(Task2)

타이밍 수정 반응(PCR, ms)				*F*	*P*
Phase shift	Modality	N	Mean ± SD		
-1000ms interval (30bpm→60bpm)	A	30	-179.6 ± 115.2	5.605	<.001***
	V	30	-48.4 ± 148.4		
	T	30	-210.4 ± 164.5		
	A-V	30	-170.3 ± 147.8		
	A-T	30	-207.3 ± 101.8		
	V-T	30	-109.0 ± 255.6		
	average		-150.85 ± 167.4		
+1000ms interval (30bpm→20bpm)	A	30	-241.6 ± 605.9	0.201	0.962
	V	30	-235.2 ± 478.8		
	T	30	-315.6 ± 566.7		
	A-V	30	-350.7 ± 581.1		
	A-T	30	-305.9 ± 596.2		
	V-T	30	-254.3 ± 523.5		
	average		-277.1 ± 551.55		

A: auditory, V: visual, T: tactile *p<.05, **p<.01, ***p<.001

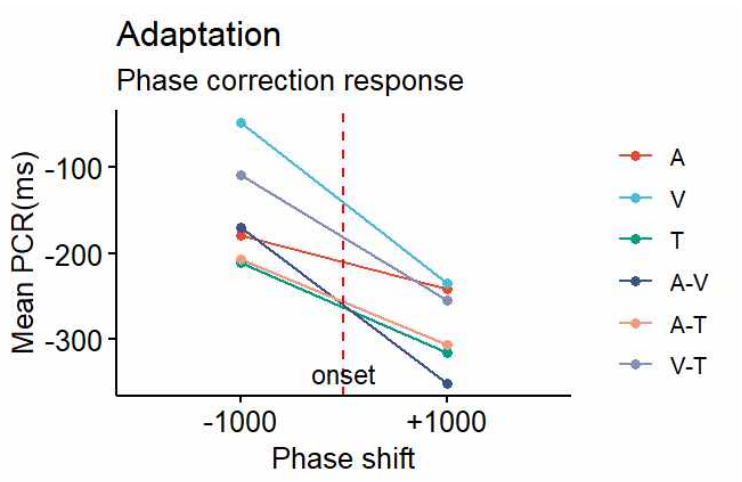

그림 29. 템포 변화 및 자극양식에 따른 PCR(Task2)

반복되는 요인(Id)의 등분산성 확인을 위한 구형성 검정(Mauchly's test of sphericity) 결과 구형성 가정을 위배하지 않았다(p>.05). 이어서 실시한 타이밍 수정 반응의 반복측정 이원분산분석 결과 템포 변화 조건에서 주효과가 나타났다(Shift: $F(1, 29) = 8.417$, p<.01, $\eta^2 = 0.023$). 반면, 자극양식의 주효과 및 템포 변화*양식의 상호작용효과는 유의하지 않았다(Modality: $F(5, 145) = 0.960$, p=.442, $\eta^2 = 0.013$; Modality*Shift: $F(5, 145) = 0.243$, p<.943, $\eta^2 = 0.003$).

표 20. PCR의 Two-way RM ANOVA 결과(Task2)

	df	Sum Sq	Mean Sq	F	P	η^2
Modality	5	808294	161659	0.960	0.442	0.013
Shift	1	1417522	1417522	8.417	0.004**	0.023
Modality:Shift	5	204898	40980	0.243	0.943	0.003
Residuals	345	58100867	168408			

TukeyHSD 사후검정을 통해 PCR에 대한 템포 변화의 주효과 분석 결과, 템포가 감소하는 조건(자극간격 증가, +1000ms)에서 템포 증가 조건(자극간격 감소, -1000ms)보다 PCR이 유의하게 낮았다(p<.01).

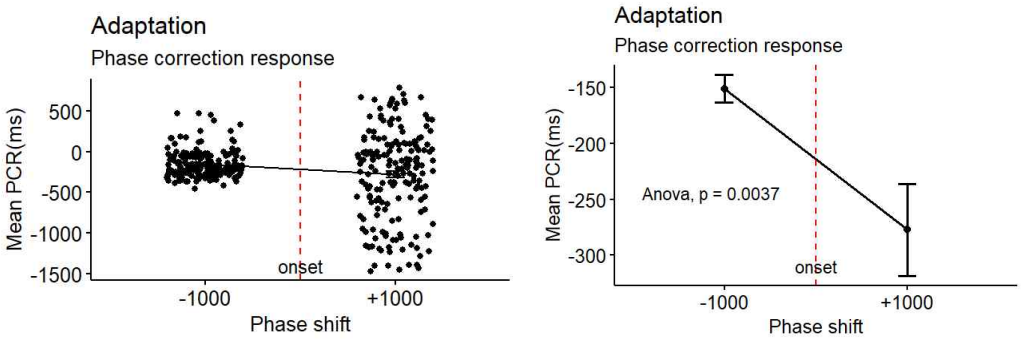

그림 30. PCR에 대한 템포 변화의 주효과(좌: 분포 비교, 우: 평균 비교)

2) 운동 협응(motor coordination)

동작의 협응 패턴은 평균 절대 상대위상(mean absolute relative phase, MARP), 그리고 협응 안정성은 상대위상의 표준편차(SD of RP)로 비교하였다. 어깨는 움직이는 방향과 평면에 따라 네 가지 움직임으로 구분하여 분석하였다(표5 참고).

표 21. 템포에 따른 MARP 및 SDRP(Task2)

RP		Mean ± SD(deg)		
		20bpm	30bpm	60bpm
MARP	E-Sf	40.0 ± 14.1	47.7 ± 14.4	67.4 ± 16.8
	E-Sa	36.3 ± 11.9	46.6 ± 13.1	63.2 ± 16.0
	E-Sh	53.3 ± 9.5	61.1 ± 10.0	73.0 ± 14.8
	E-Sv	56.7 ± 5.3	62.6 ± 8.4	72.5 ± 11.6
SDRP	E-Sf	19.3 ± 5.4	22.2 ± 4.8	29.1 ± 6.8
	E-Sa	19.2 ± 4.3	22.3 ± 4.4	28.4 ± 6.5
	E-Sh	25.3 ± 4.9	26.3 ± 5.2	30.4 ± 8.6
	E-Sv	27.7 ± 2.6	28.7 ± 4.5	32.0 ± 7.7

E: elbow, Sf: shoulder flexion-extension, Sa: shoulder abduction-adduction, Sh: shoulder horizontal rotation, Sv: shoulder vertical rotation

시간에 따른 관절의 각도와 각속도 변화를 위상평면에서 살펴본 결과 템포 변화에 따른 특정 순간의 변화가 관찰되었다(그림31). 그러나, 감각양식에 따른 협응 특성의 변화는 유의한 차이를 보이지 않았다.

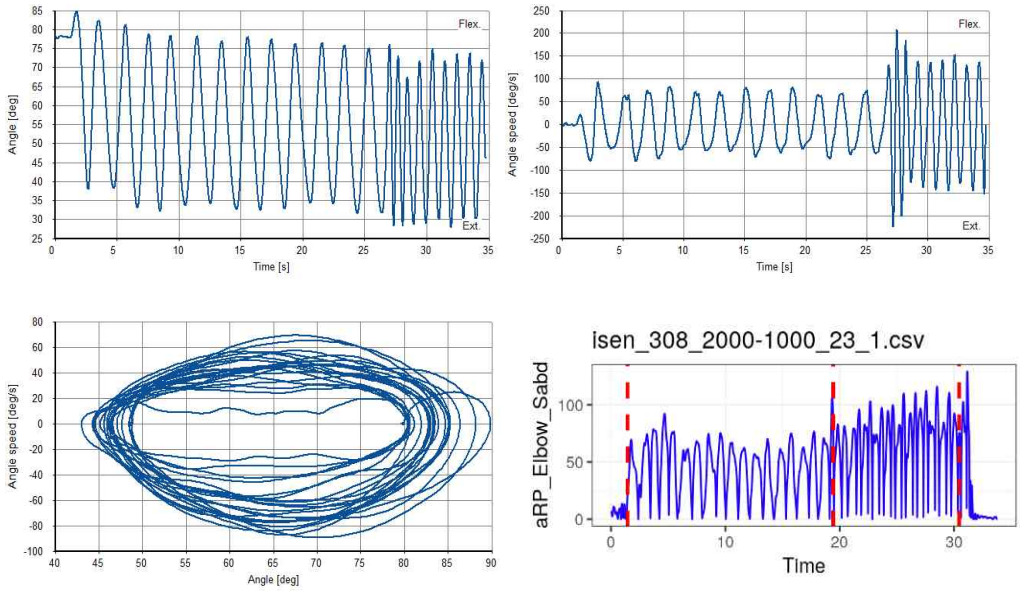

그림 31. 시간에 따른 어깨의 각도(왼쪽 위), 각속도(오른쪽 위), 위상각(왼쪽 아래), 팔꿈치-어깨 상대위상(오른쪽 아래) 자료(Sub.308, Task2)

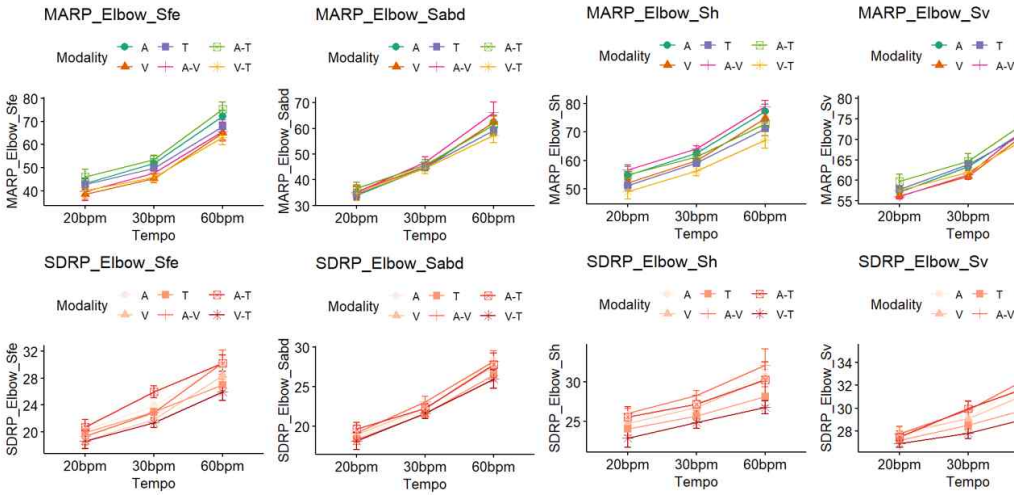

그림 32. 템포 및 자극양식에 따른 MARP(위) 및 SDRP(아래)

① 협응 패턴(coordination pattern): MARP

템포 변화와 감각양식에 따른 MARP의 반복측정 이원분산분석 결과 모든 움직임의 상대적 관계에서 템포 변화의 주효과가 나타났다 (E-Sf: $F(1, 29) = 144.073$, $p<.001$; E-Sa: $F(1, 29) = 193.489$, $p<.001$; E-Sh: $F(1, 29) = 150.844$, $p<.001$; E-Sv: $F(1, 29) = 187.331$, $p<.001$). 사후분석 결과 템포가 증가하는 경우 모든 어깨 움직임에서 MARP 또한 유의하게 증가하는($p<.001$) 반면, 템포가 감소하는 경우 MARP는 유의하게 감소하였다($p<.001$).

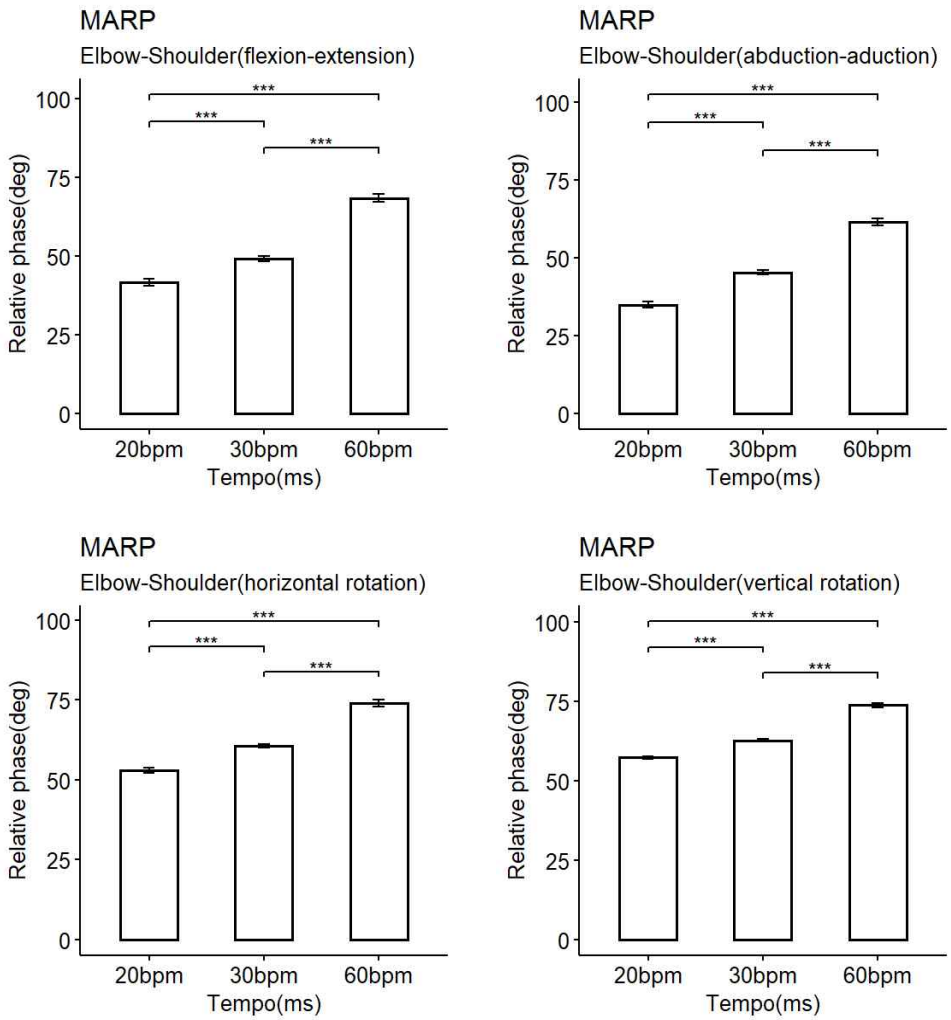

그림 33. 어깨 움직임별 MARP에 대한 템포 변화의 주효과(Task2)

② 협응 안정성(coordination stability): SDRP

템포 변화와 감각양식에 따른 SDRP의 반복측정 이원분산분석 결과 모든 움직임의 상대적 관계에서 템포 변화의 주효과가 나타났다 (E-Sf: $F(1, 29) = 116.447$, $p<.001$; E-Sa: $F(1, 29) = 164.994$, $p<.001$; E-Sh: $F(1, 29) = 32.386$, $p<.001$; E-Sv: $F(1, 29) = 33.800$, $p<.001$). 사후분석 결과 템포가 증가하면 모든 움직임에서 SDRP가 유의하게 증가하였고($p<.001$), 템포가 감소하면 SDRP가 유의하게 감소하였다($p<.001$).

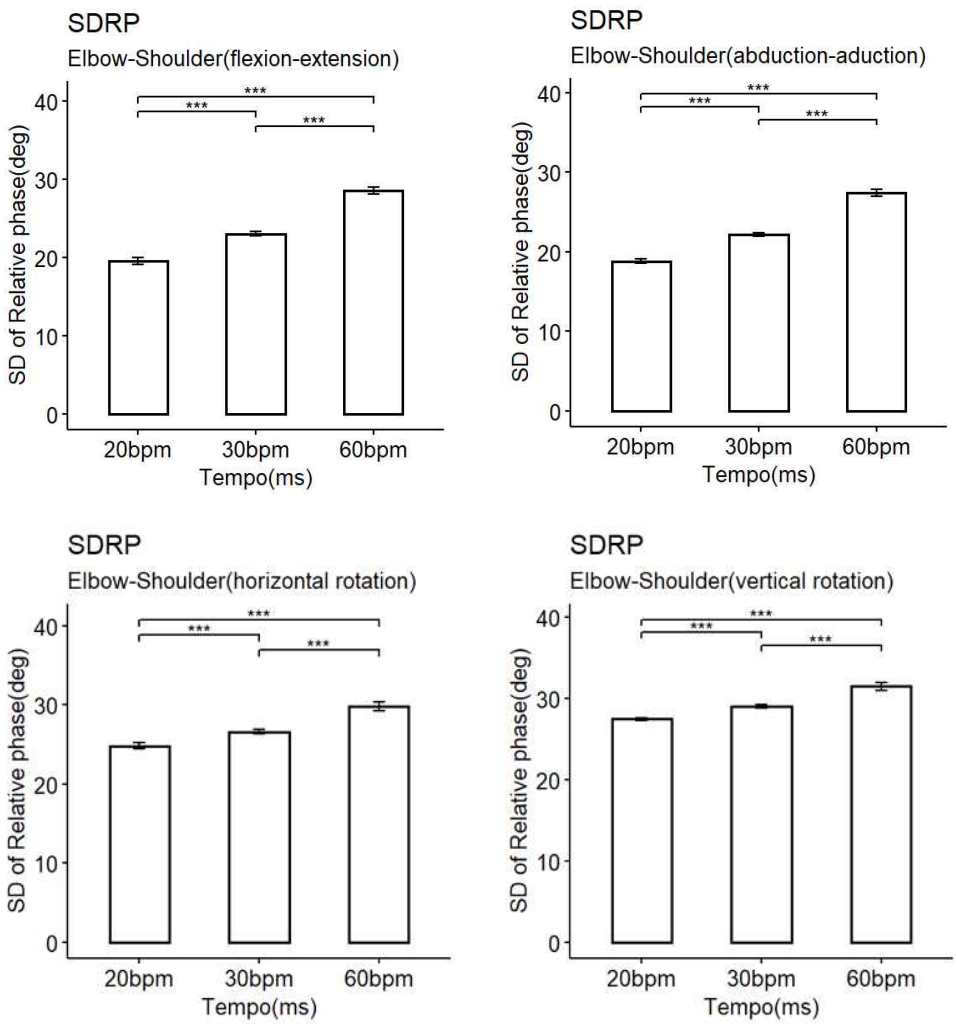

그림 34. SDRP에 대한 템포 변화의 주효과(Task2)

Ⅴ. 논의

인간은 매 순간 수많은 정보를 받아들인다. 이 과정에서 특정 정보는 의도적이거나 무의식적으로 동작을 제어하는 과정에 관여한다. 예를 들어 드럼연주나 수영의 스트로크에서 생성되는 주기적인 소리나 손의 감각정보는 움직임의 타이밍 조절에 활용된다. 본 연구는 인간이 동작의 타이밍을 어떻게 제어하는지 지각정보와 동작의 협응 제어 측면에서 탐구하고자 시작되었다. 이를 위해 주기적인 자극과 동작을 일치시키는 원그리기 타이밍 과제를 통해 자극의 양식과 템포에 따른 운동 타이밍, 감각 기여도, 운동학적 특성을 살펴보았다.

1. 지각정보에 따른 운동 타이밍

본 연구에서 관심 있는 운동 타이밍은 반복되는 자극에 동작을 정확하고 일관되게 제어하는 내적 타이밍이다. 운동 타이밍을 알아보기 위해 동기화 과제(task1)와 적응 과제(task2)를 통해 타이밍 정확성과 가변성, 예측 경향성을 비교하고, 템포 변화에 적응하는 타이밍 수정 반응을 살펴보았다.

1) 타이밍 정확성 및 가변성

연구결과 템포에 따른 타이밍 정확성은 중간 템포(30bpm)에서 가장 높았으며, 빠른 템포(60bpm)에서 가장 낮았다. 이는 기존 손가락 태핑을 활용한 인지적 타이밍 연구에서 자극의 템포가 증가하면 일반적으로 타이밍 정확성이 증가한다는 결과(Fujii et al., 2011; Repp, 2008; Zendal et al., 2011)와 차이를 보인다. 또한, 왕복 움직임 과제에서 속도-타이밍 정확성의 경우 속도가 증가하면 공간 정확성은 감소하지만, 타이밍 정확성은 증가하는 선행연구의 결과와 일치하지 않는

다(Hsieh, 2019; Newell et al., 1980). 선행연구와 다르게 본 연구에서 사용된 과제는 가상현실에서 생성되는 원 궤적을 따라 그리는 과제로서 타이밍과 공간 정확성이 동시에 요구되는 이중조절의 어려움이 있다. 따라서, 자극의 템포가 증가하여 동작을 빠르게 수행해야 하는 경우 기존 연구에서 사용된 과제보다 상대적으로 복잡하여 높은 주의 수준이 요구되기 때문에 타이밍 정확성이 오히려 감소한 것으로 사료된다. 이러한 결과는 기존에 밝혀진 동작의 빠르기와 시공간의 정확성 관계를 실제 복잡한 운동기술에 적용하기 위해서는 과제의 복잡성과 인간의 주의 수준이 고려되어야 함을 알 수 있다.

감각양식에 따라 발생한 타이밍 정확성의 차이는 템포 조건과 상호작용효과를 고려하여 구체적인 조건에서 분석되었다. 분석결과 중간 템포에서 청각 조건이 가장 높은 타이밍 정확성을 나타냈으나, 자극간격 1초의 빠른 템포에서는 촉각 조건의 타이밍 정확성이 가장 높았다. 기존 대부분의 타이밍 연구에서 청각양식의 시간적 해상도(temporal resolution)가 높기에 청각정보가 타이밍 정확성에 유리하다고 알려져 있다(Elliott et al., 2010; Kolers et al., 1985; Repp et al., 2004; Varlet et al., 2012). 하지만 본 연구를 통해 자극의 템포에 따라 타이밍 정확성에 유리한 감각양식은 차이가 있음이 밝혀졌다.

또한, 빠른 템포의 촉각양식을 제외한 나머지 조건에서 다감각의 타이밍 정확성이 단일감각보다 높았다. 이를 통해, 요구되는 주의 수준이 높은 과제에서도 두 감각이 결합된 경우 감각 간 보상작용으로 타이밍 정확성에 긍정적 효과를 미친 것으로 해석할 수 있다. 하지만, 촉각양식의 경우 빠른 템포에서 다른 감각 및 다감각보다 타이밍 오류가 현저하게 작은 예외적인 현상이 발견되었으며, 추가적인 연구가 필요하다고 생각된다. 또한, 느린 템포에서 감각양식에 따른 타이밍 정확성 차이가 나타나지 않은 결과를 통해 느린 동작의 타이밍 제어에서 특정 감각이 감각운동 동기화에 유리하거나 우세한 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

인간의 눈이나 귀, 피부의 감각 수용기로 자극이 들어오면 감각 뉴런에서 연합 뉴런, 그리고 운동 뉴런으로 신호가 이동하게 된다. 이때 전달되는 신호의 속도는 뉴런 내의 전기적 이동과 뉴런 간 화학적 이동으로 이루어지는데 나이와 성별, 의학적 상태에 따라 차이가 난다. 촉각 및 압력에 대한 신경전달 속도는 대략 30～70m/s로 다른 감각과 비슷한 수준의 속도로 신호가 전달된다. 따라서, 자극의 신호가 전달되는 물리적인 속도 차이가 아닌 다른 측면에서 감각양식에 따른 운동 타이밍의 차이를 살펴볼 필요가 있다. 신경생리학적으로 압력과 관련된 기계적 수용기(mechanoreceptors)의 활동전위는 역치가 낮으므로 감각자극에 활성화되기 쉬운 것으로 알려져 있다(Purves et al., 2008). 결과적으로, 빠른 움직임에서 촉각정보는 물리적인 신호전달의 속도 차이가 없으나 다른 감각보다 타이밍 오류를 탐지하고 수정하는데 효과적이며, 이는 다른 감각보다 동작과의 결합이 강하게 이루어졌다고 해석할 수 있다.

운동 타이밍의 일관성을 확인한 결과 템포가 증가할수록 일관성이 높아지는 기존 연구들과 같은 결과를 얻었다(Fukii et al., 2011). 이는 템포가 증가하면 인지적 사고에 필요한 시간적 여유가 줄어들기 때문에 인지적 타이밍 전략보다 일관된 특성의 발생적 타이밍 전략을 사용한 것이라 할 수 있다(Zelaznik, 2018). 그러나 일반적으로 빠른 템포에서 타이밍 가변성이 낮은 결과와 다르게, 촉각의 경우 템포와 상관없이 일정하게 높은 타이밍 가변성을 보였다. 이는 빠른 템포에서 타이밍 정확성이 감소하지 않는 것과 마찬가지로 촉각양식은 타이밍 정확성과 가변성이 템포 차이에 의해 쉽게 변하지 않는 견고한 특성임을 확인하였다.

2) 타이밍 예측 및 적응

연구 참여자들은 느린 템포의 타이밍 과제에서 예측하여 자극보다 먼저 수행하는 빈도가 높았다. 이는 2~3초 이상 시간 간격의 타이밍

제어는 자동적이기보다 작업기억의 역할이 크게 작동하기 때문에 (Koch, Oliveri, & Caltagirone, 2009) 인지적으로 예측하는 경향이 증가했을 것으로 생각된다. 또한, Aschersleben(2002)의 감각누적모델(sensory accumulation model)과 Wohlschläger & Koch(2000)의 지각적 과소화 현상(perceptual underestimation)에 따르면 실제 수행보다 사건(자극)을 더욱 빠르다고 지각하고, 판단하기 때문에 느린 템포에서의 시간적 여유는 예측 경향성을 더욱 증가시키는 요인이라 생각된다.

운동 타이밍은 얼마나 안정적으로 타이밍 동기화를 이루느냐와 함께 타이밍 오류 및 변화를 탐지하고 유연하게 적응하는 능력이 중요하다. 이를 확인하기 위한 적응 과제(task2)는 예상하지 못하는 시점에 템포의 변화를 주어 연구 참여자가 타이밍을 어떻게 수정하는지 반응(PCR)을 살펴보았다. 연구 참여자들은 템포가 증가하는 조건보다 감소하는 조건에서 타이밍 변화를 수정하는 크기가 더욱 큰 과수정(overcorrection) 경향을 보였다. 이는 변화 시점 다음 수행에서 phase correction과 period correction의 공동작용으로 나타나는 반응으로 지각-동작 결합이 강한 경우(tight binding) 과수정의 크기가 작게 나타난다(Repp, 2008). 따라서, 빠른 템포의 지각정보가 지각-동작의 결합이 약하기 때문에 느린 템포로 변하는 상황에서 과수정 반응이 크게 나타났다고 해석할 수 있다.

연구 참가자(Sub.1)의 수행에 따른 수행주기 및 비동기성을 살펴보면(그림35), 템포가 변하는 구간에서 급격하게 타이밍을 수정하는 반응이 나타난다. 템포가 증가하거나 감소하는 경우 모두에서 타이밍 수정 반응이 변화된 자극보다 먼저 수행하도록 이루어졌다. 다시 말해, 템포 변화에 적응하는 반응은 예측을 통한 부적 비동기성을 보인다고 할 수 있다. 앞서 운동 타이밍의 예측 및 적응의 결과를 통하여 변화에 적응하기 위해 인지적으로 동작을 제어하는 과정은 실제 변화에 대한 정도보다 크다고 인식하기 때문에 예측 경향이 크게 나타난다고 생각할 수 있다.

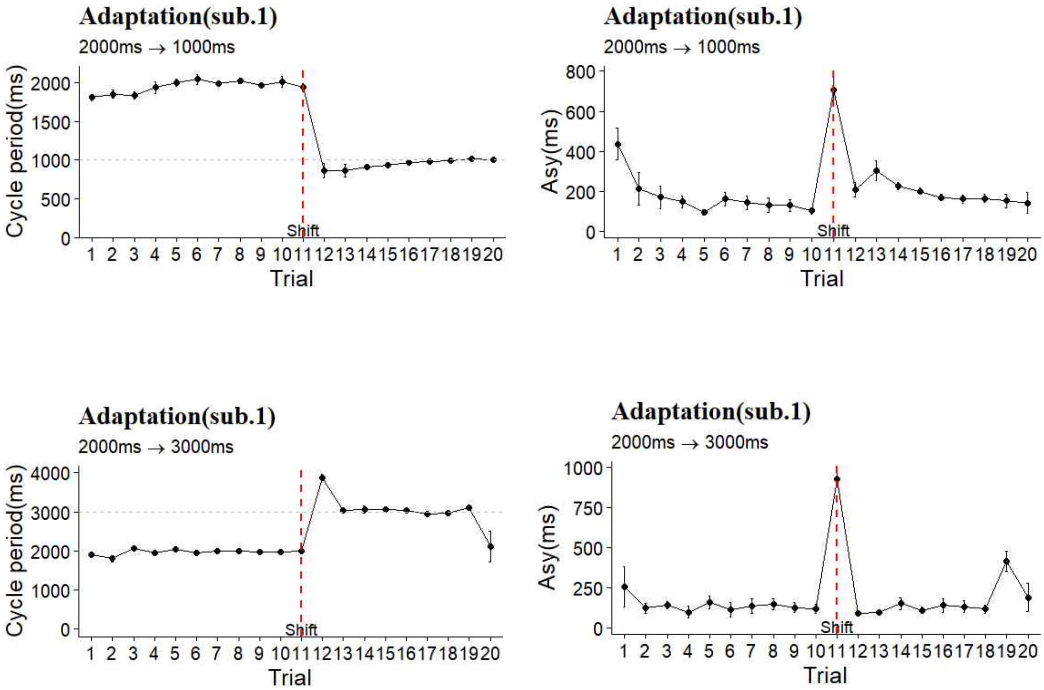

그림 35. 템포 변화에 따른 타이밍 오류 수정 반응(Sub.1, Task2)

종합적으로 운동 타이밍은 감각양식과 템포에 따라 다양한 상호작용효과가 발생함을 알 수 있다. 기본적으로 템포가 증가하면 운동 타이밍을 정확하고 일관되게 제어할 때 특정 감각양식에 의존하는 경향이 뚜렷해짐을 알 수 있다. 그리고 템포가 느리면 예측 경향성이 커지는데, 이는 템포가 느려지는 변화에서 타이밍을 수정하는 반응이 크게 일어나는 것과 관련됨을 확인하였다.

2. 운동 타이밍의 감각 기여도

인간의 뇌는 환경의 다양한 정보를 해석한다. 이때, 정확한 해석을 위해 다양한 정보 중 과제와 부합하는 특정 감각양식을 사용하거나, 서로 다른 감각정보를 결합하게 된다(Welch & Warren, 1980). 그리고, 감각이 결합된 경우 양식에 따라 수행에 미치는 영향의 차이, 즉 우세성은 차이를 보이게 된다. 실제로 뇌의 보조운동영역(supplementary

motor area, SMA)에서 모든 감각양식에 활성화되는 신경세포가 존재하지만, 특정 감각양식에 대한 선호도는 분명히 존재한다고 알려져 있다(Tanji 1994). 타이밍과 관련된 운동행동 연구에서 청각정보가 시각정보를 간섭하는 경우 타이밍 동기화를 방해하지만, 반대의 상황에서 간섭 현상은 나타나지 않았다(Repp & Penel, 2004; Kato & Konishi, 2006). 이러한 증거들을 통하여 청각은 다른 감각보다 타이밍 과제에 효과적이고, 우세한 감각양식으로 알려져 있다.

다양한 감각이 결합된 다감각 조건에서 각각의 기여도(reliability)를 확인하기 위해 최대우도법(maximum likelihood estimation: MLE)이 사용되었다(Alais & Burr, 2004; van Beers et al., 1999; Ernst & Banks, 2002). 만약, 결합된 감각양식 간 관련성이 없고(uncorrelated) 독립적이라면 각각의 감각양식별 타이밍 결과를 이용하여 결합 되었을 때의 타이밍 결과를 통계적으로 추정할 수 있다(Cochran, 1937). 하지만, 실험 결과 통계적 예측값과 실제 관측된 측정값의 차이가 존재하였다. 이는 특정 감각의 우세성이 있음을 의미하며, 감각 사이에 지각정보를 활용하는 과정에서 리던던시(redundancy)가 있음을 알 수 있다. 이를 토대로 각 양식의 리던던시를 고려하여 측정된 타이밍 데이터를 얼마나 설명할 수 있느냐를 기여도를 통하여 판단하였다(Briscoe, 2016; de Vignemont, 2014b; Bayne, 2014).

분석결과 빠른 템포에서 청각과 시각이 결합된 경우 타이밍 정확성에 미치는 기여도는 시각이 청각보다 54.8% 높았다. 이를 통하여 청각-시각의 결합에서 시각양식이 청각보다 타이밍 정확성에 미치는 영향이 우세하다고 해석할 수 있다. 또한 빠른 템포에서 촉각은 청각보다 208% 기여도가 높으며, 시각보다 15% 높은 결과를 보였다. 느린 템포에서도 촉각은 청각보다 575% 높은 기여도를 보였다. 이처럼 선행연구에서 청각이 우세한 감각양식으로 알려진 것(Bresciani et al., 2005; Fendrich & Corballis, 2001; Vroomen et al., 2004)과 다르게 본 연구에서는 촉각이 타이밍 수행에 가장 우세한 영향을 미치며, 청각

은 시각보다 기여도가 낮은 것으로 밝혀졌다.

공간의 정확성과 관련하여 시각과 청각 자극은 서로 충돌하는데 일반적으로 시각이 지배하는 효과를 ‘‘ventriloquist effect’’라고 칭한다 (Stekelenburg & Vroomen, 2009). 반면, 시간 정확성에서 청각정보가 우세함을 보이는 ‘‘temporal ventriloquism’’이 발생한다고 보고되고 있다(Parise & Spence, 2008). 이처럼 청각 감각의 우세성을 언급하는 기존 연구에서는 두 감각양식의 간섭과 충돌로 우세성을 판단하였으나, 본 연구에서는 감각이 결합된 조건을 제공하고 연구 참여자가 최적의 타이밍 전략을 선택하도록 유도하였다.

따라서, 실제 운동 상황에서 능동적인 정보처리가 어떻게 이루어지는지 확인하는 접근이라 할 수 있다. 또한 단순히 감각양식의 우세성을 비교하는 데 그치지 않고, 이를 정량화하여 상황을 예측하였다는 의미가 있다. 이를 토대로 만약, 타이밍 정확성에 유리한 청각자극을 시각보다 인지적으로 집중하는 전략을 사용한다면 청각-시각 결합된 조건에서 타이밍 정확성이 향상되는 결과를 나타낼 것이라 추론할 수 있다. 또한, 느린 템포보다 빠른 템포에서 특정 감각양식의 우세성이 나타나는 결과는 앞서 논의에서 언급한 빠른 템포에서 감각양식에 따라 타이밍 정확성 차이가 뚜렷하게 발생하는 현상과 연관되는 것으로 사료된다.

3. 지각정보에 따른 협응 특성

지각적 사건이 타이밍에 미치는 중요성 때문에 상대적으로 수행의 운동학적 요소는 타이밍 연구에서 비중 있게 다루어지지 않았다 (Studenka & Zelaznik, 2011). 하지만 지각정보는 인간의 인지·심리적 측면과 함께 동작의 특성과 밀접하게 관련된 변인이다. 특히, 연속 움직임의 협응 특성 및 안정성은 자극의 빠르기에 따라 결정되는 요인으로 타이밍을 정확하고 일정하게 유지하는 것과 관련된다.

이러한 운동학적 변인과 운동 타이밍의 관계를 살펴보고자 본 연

구에서는 팔꿈치와 어깨의 상대적 움직임에서 나타나는 협응 패턴과 시스템 안정성을 관찰하였다. 실험2의 적응 과제에서 연구 참여자들의 움직임은 템포가 증가하면 평균 절대 상대위상(MARP)과 평균 절대 상대위상의 표준편차(SDRP)가 높아졌다. 반면, 템포가 감소하면 동작의 MARP와 SDRP가 낮아졌다. 이는 타이밍 과제를 빠르게 수행하면 협응 패턴의 변화가 생기며 협응 안정성이 감소하는 것이라 해석할 수 있다. 그러나 협응 패턴의 변화는 in-phase(0°±30°)와 anti-phase(180°±30°) 범위에서 동작의 질적 특성이 다른 단계로 상변이(phase transition)되는 것이 아닌 out of phase(30°~150°) 범위에서 발생한 것이라 할 수 있다. 또한, 협응 안정성의 변화가 발생하는 과정은 다른 전략으로 타이밍 과제를 수행하려는 운동 시스템의 내적 역동성의 변화라고 할 수 있다(Pacheco et al., 2017).

이상에서의 논의를 종합하면, 본 연구에서는 지각과 동작의 두 가지 측면에서 다양한 운동 타이밍의 특성을 검증하였다. 자극의 템포와 양식이라는 이원 설계를 통하여 세부적인 조건에 따른 운동 타이밍을 검증하였으며, 감각 기여도의 정량화 및 예측을 통하여 타이밍 정확성에 유리한 전략을 세우는 데 기초적인 기반을 마련하였다고 생각한다. 또한 가상현실을 활용한 실험 설정은 감각양식을 보다 분명하게 통제하고, 과제 수행의 몰입감을 제공할 수 있었다. 두 가지 타이밍 실험을 통해 도출한 연구의 다양한 결과는 타이밍 정확성과 관련된 예측, 반응, 적응의 기초적인 특성 규명으로 운동학습 현장에서 지도자의 피드백 정보 및 학습자의 수행력을 위한 인지전략으로 활용될 것이라 기대한다.

Ⅵ. 결론

인간의 움직임은 3차원 공간에서 시간이라는 네 번째 축과 함께 이루어진다. 특히, 복잡한 운동기술은 정확하고 정교한 타이밍으로 신체가 유기적으로 움직여야 가능하다. 이때 환경의 정보는 동작을 원하는 대로 제어하는 데 절대적인 역할을 한다. 이러한 관점에서 '어떤 지각정보가 타이밍에 효과적이고, 어떻게 운동 타이밍과 협응이 제어되는가?'라는 질문에 답하기 위해 진행된 본 연구는 다음과 같은 결론에 도달하였다.

첫째, 자극의 템포에 따라 타이밍 정확성에 유리한 감각정보는 차이가 있다. 빠른 템포에서 촉각정보, 중간 템포에서는 청각정보가 효과적이다.

둘째, 느린 템포에서 타이밍 예측 경향성이 크고, 템포가 감소하는 변화는 증가하는 경우보다 타이밍 과수정 반응이 나타난다.

셋째, 다감각 조건에서 타이밍 정확성에 미치는 감각 기여도는 빠른 템포에서 촉각, 시각, 청각 순으로 나타났다.

넷째, 감각양식은 협응 특성에 영향을 미치지 않았으나, 템포의 변화는 협응 패턴과 안정성의 변화를 가져왔다.

Ⅶ. 제언

기본적인 동작을 재학습하는 재활이나 다양한 신체적 경험이 있는 스포츠 환경에서 개인은 목표를 달성하기 위해 부단히 노력한다. 이 과정에서 개인은 시각, 청각, 촉각, 고유감각 등의 감각정보를 이용하여 신체 움직임을 제어하게 된다. 따라서, 스포츠 영역의 지도자와 연구자의 주요 관심사는 운동수행력을 높이기 위한 최적의 정보라는 것을 알 수 있다.

하지만 지금까지 체육학 분야에서 시도된 노력은 신체적 특성에 대한 접근에 한정되는 경우가 많았다. 인간 심리와 움직임의 관계를 탐구하는 스포츠심리학에서 다양한 논의가 진행되었지만, 인간의 복잡한 시스템과 움직임의 원리를 이해하기에 한계가 분명히 존재하였다. 반면, 인지 및 신경과학의 영역에서는 인간 움직임의 근원에 대해 본질적인 질문을 던지고 심층적으로 밝히려는 과학적 방법론은 체육학에서 현장 적용이라는 중요한 사명 아래 상대적으로 주목되지 못한 상황이다. 하지만, 움직임에 대한 이해는 반드시 개인의 특성과 다양한 환경에 대한 정교한 틀을 바탕으로 효과적으로 진행되어야 할 것이며, 그것이 체육학이 현장 적용에 더욱 발전적인 성과를 낼 수 있는 새로운 시작이라 생각한다.

이 연구에서는 단순히 상지를 이용하여 원 그리기 과제를 수행하며 나타나는 운동 타이밍 및 운동학적 변인의 일부 측면에서 연구가 진행되었다. 한정된 상황에서 운동 타이밍 전체를 일반화하기 어려움이 있기에 다른 동작에서 본 연구의 결과들이 동일하게 적용되는지 추가적인 검증이 요구된다. 또한, 제공되는 자극은 절대적인 시간을 기준으로 설정하였는데, 개인이 선호하는 감각양식과 템포를 고려한 상대적인 기준 적용이 추후 연구에서 시도될 필요가 있다. 이러한 접근의 연구가 축적되어 인간 움직임의 본질적 특성과 감각정보가 어떤 관계를 갖는지 지적 호기심이 충족되고, 현장 적용에 대한 갈증 또한 만족하게 될 것이라 기대한다.

참고문헌

김선진. (2009). *운동학습과 제어 개정판*. 대한미디어.

Adams, J. A. (1971). A closed-loop theory of motor learning. *Journal of Motor Behavior*, *3*(2), 111-150.

Alais, D., & Burr, D. (2004). The ventriloquist effect results from near-optimal bimodal integration. *Current biology*, *14*(3), 257-262.

Arias, P., & Cudeiro, J. (2008). Effects of rhythmic sensory stimulation (auditory, visual) on gait in Parkinson's disease patients. *Experimental brain research*, *186*(4), 589-601.

Arnal, L. H., & Giraud, A.-L. (2012). Cortical oscillations and sensory predictions. *Trends in cognitive sciences*, *16*(7), 390-398.

Aschersleben, G. (2002). Temporal control of movements in sensorimotor synchronization. *Brain and cognition*, *48*(1), 66-79.

Aschersleben, G., & Prinz, W. (1995). Synchronizing actions with events: The role of sensory information. *Perception & Psychophysics*, *57*(3), 305-317.

Baer, L., Thibodeau, J., Gralnick, T., Li, K., & Penhune, V. (2013). The role of musical training in emergent and event-based timing. *Frontiers in human neuroscience*, *7*, 191.

Balasubramaniam, R., Wing, A. M., & Daffertshofer, A. (2004). Keeping with the beat: movement trajectories contribute to movement timing. *Experimental brain research*, *159*(1), 129-134.

Bardy, B. G., Oullier, O., Bootsma, R. J., & Stoffregen, T. A. (2002). Dynamics of human postural transitions. *Journal of Experimental Psychology: Human perception and performance*, *28*(3), 499.

Bayne, T. (2014). The multisensory nature of perceptual consciousness. *Sensory integration and the unity of consciousness*, 15-36.

Bengtsson, S. L., Ullen, F., Ehrsson, H. H., Hashimoto, T., Kito, T., Naito, E., Forssberg, H., & Sadato, N. (2009). Listening to rhythms activates motor and premotor cortices. *Cortex*, *45*(1), 62-71.

Benuzzi, F., Basso, G., & Nichelli, P. (2005). Temporal production and

visuospatial processing. *Perceptual and motor skills*, *101*(3), 737-758.

Bernstein, N. (1967). *The Coordination and Regulation Of MovementsPergamon Press Ltd*. Pergamon Press.

Bhutani, V. K., & Shaffer, T. H. (1982). Time-dependent tracheal deformation in fetal, neonatal, and adult rabbits. *Pediatric research*, *16*(10), 830-833.

Braun Janzen, T., Thompson, W. F., Ammirante, P., & Ranvaud, R. (2014). Timing skills and expertise: discrete and continuous timed movements among musicians and athletes. *Frontiers in psychology*, *5*, 1482.

Bresciani, J.-P., Ernst, M. O., Drewing, K., Bouyer, G., Maury, V., & Kheddar, A. (2005). Feeling what you hear: auditory signals can modulate tactile tap perception. *Experimental brain research*, *162*(2), 172-180.

Briscoe, R. E. (2016). Multisensory processing and perceptual consciousness: Part I. *Philosophy Compass*, *11*(2), 121-133.

Brown, S. W. (1997). Attentional resources in timing: Interference effects in concurrent temporal and nontemporal working memory tasks. *Perception & Psychophysics*, *59*(7), 1118-1140.

Brown, S. W., Newcomb, D. C., & Kahrl, K. G. (1995). Temporal-signal detection and individual differences in timing. *Perception*, *24*(5), 525-538.

Buhusi, C. V., Perera, D., & Meck, W. H. (2005). Memory for timing visual and auditory signals in albino and pigmented rats. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, *31*(1), 18.

Buonomano, D. V., & Mauk, M. D. (1994). Neural network model of the cerebellum: temporal discrimination and the timing of motor responses. *Neural computation*, *6*(1), 38-55.

Byblow, W. D., Chua, R., & Goodman, D. (1995). Asymmetries in coupling dynamics of perception and action. *Journal of Motor Behavior*, *27*(2), 123-137.

Cassenti, D. N. (2011). The intrinsic link between motor behavior and temporal cognition. *New Ideas in Psychology*, *29*(2), 72-79.

Clarke, E. F. (1985). Some aspects of rhythm and expression in

performances of Erik Satie's" Gnossienne No. 5". *Music Perception*, *2*(3), 299-328.

Cochran, W. G. (1937). Problems arising in the analysis of a series of similar experiments. *Supplement to the Journal of the Royal Statistical Society*, *4*(1), 102-118.

Cohn, J. V., DiZio, P., & Lackner, J. R. (2000). Reaching during virtual rotation: context specific compensations for expected coriolis forces. *Journal of neurophysiology*, *83*(6), 3230-3240.

Cordo, P. J., Bell, C. C., & Harnad, S. R. (1997). *Motor learning and synaptic plasticity in the cerebellum*. Cambridge University Press.

Corriveau, K. H., & Goswami, U. (2009). Rhythmic motor entrainment in children with speech and language impairments: tapping to the beat. *Cortex*, *45*(1), 119-130.

Dannemiller, J. L., Babler, T. G., Babler, B. L., Jacobs, T., Lawrence, M., Hong, K., Giordano Jr, N., Giordano Sr, N., McBeath, M. K., & Shaffer, D. M. (1996). On catching fly balls. *Science*, *273*(5272), 256-260.

Davids, K., Bennett, S., & Newell, K. M. (2006). *Movement system variability*. Human kinetics.

De Jong, B., Willemsen, A., & Paans, A. (1999). Brain activation related to the change between bimanual motor programs. *Neuroimage*, *9*(3), 290-297.

De Vignemont, F. (2014). A multimodal conception of bodily awareness. *Mind*, *123*(492), 989-1020.

Delignieres, D., & Torre, K. (2011). Event-based and emergent timing: dichotomy or continuum? A reply to Repp and Steinman (2010). *Journal of Motor Behavior*, *43*(4), 311-318.

Diedrichsen, J., Ivry, R. B., & Pressing, J. (2003). Cerebellar and basal ganglia contributions to interval timing. *Functional and neural mechanisms of interval timing*, 457-481.

Drugowitsch, J., DeAngelis, G. C., Klier, E. M., Angelaki, D. E., & Pouget, A. (2014). Optimal multisensory decision-making in a reaction-time task. *Elife*, *3*.

Elliott, M. T., Wing, A. M., & Welchman, A. E. (2010). Multisensory cues improve sensorimotor synchronisation. *European Journal of Neuroscience*, *31*(10), 1828-1835.

Ernst, M. O., & Banks, M. S. (2002). Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion. *Nature*, *415*(6870), 429-433.

Ernst, M. O., & Bülthoff, H. H. (2004). Merging the senses into a robust percept. *Trends in cognitive sciences*, *8*(4), 162-169.

Eubank, S. G., & Farmer, J. D. (1997). Introduction to dynamical systems. *Introduction to nonlinear physics*, 55-175.

Fendrich, R., & Corballis, P. M. (2001). The temporal cross-capture of audition and vision. *Perception & Psychophysics*, *63*(4), 719-725.

Fink, P. W., Foo, P., Jirsa, V. K., & Kelso, J. (2000). Local and global stabilization of coordination by sensory information. *Experimental brain research*, *134*(1), 9-20.

Fitts, P. M. (1954). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of experimental psychology*, *47*(6), 381.

Fortin, C., & Breton, R. (1995). Temporal interval production and processing in working memory. *Perception & Psychophysics*, *57*(2), 203-215.

Foster, E. C., Sveistrup, H., & Woollacott, M. H. (1996). Transitions in visual proprioception: A cross-sectional developmental study of the effect of visual flow on postural control. *Journal of Motor Behavior*, *28*(2), 101-112.

Freeman, J., Cody, F., & Schady, W. (1993). The influence of external timing cues upon the rhythm of voluntary movements in Parkinson's disease. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, *56*(10), 1078-1084.

Fujii, S., Hirashima, M., Kudo, K., Ohtsuki, T., Nakamura, Y., & Oda, S. (2011). Synchronization error of drum kit playing with a metronome at different tempi by professional drummers. *Music Perception: An Interdisciplinary Journal*, *28*(5), 491-503.

Ghahramani, Z., & Wolpert, D. M. (1997). Modular decomposition in

visuomotor learning. *Nature*, *386*(6623), 392-395.
Gibson, J. J. (1950). The perception of the visual world.
Gibson, J. J. (1977). *The theory of affordances* (Vol. 1).
Gibson, J. J., & Carmichael, L. (1966). *The senses considered as perceptual systems* (Vol. 2). Houghton Mifflin Boston.
Grahn, J. A., Henry, M. J., & McAuley, J. D. (2011). FMRI investigation of cross-modal interactions in beat perception: audition primes vision, but not vice versa. *Neuroimage*, *54*(2), 1231-1243.
Haddad, J. M., van Emmerik, R. E., Wheat, J. S., Hamill, J., & Snapp-Childs, W. (2010). Relative phase coordination analysis in the assessment of dynamic gait symmetry. *Journal of applied biomechanics*, *26*(1).
Haken, J., Wainwright, M., & Smith, R. (1977). A problem of accuracy of mathematical dead-time estimation. *Journal of Chromatography A*, *133*(1), 1-6.
Halford, G. S., & Andrews, G. (2011). Information-processing models of cognitive development.
Harrington, D. L., Haaland, K. Y., & Knight, R. T. (1998). Cortical networks underlying mechanisms of time perception. *Journal of Neuroscience*, *18*(3), 1085-1095.
Hary, D., & Moore, G. P. (1985). Temporal tracking and synchronization strategies. *Human Neurobiology*, *4*(2), 73-79.
Hausdorff, J. M., Cudkowicz, M. E., Firtion, R., Wei, J. Y., & Goldberger, A. L. (1998). Gait variability and basal ganglia disorders: stride-to-stride variations of gait cycle timing in Parkinson's disease and Huntington's disease. *Movement disorders*, *13*(3), 428-437.
Hore, J., Wild, B., & Diener, H. (1991). Cerebellar dysmetria at the elbow, wrist, and fingers. *Journal of neurophysiology*, *65*(3), 563-571.
Hoyt, D. F., & Taylor, C. R. (1981). Gait and the energetics of locomotion in horses. *Nature*, *292*(5820), 239-240.
Hsieh, T.-Y., Liu, Y.-T., & Newell, K. M. (2019). Task specificity and the timing of discrete aiming movements. *Human Movement Science*, *64*, 240-251.

Ivry, R. (1997). Cerebellar timing systems. *International review of neurobiology*, 555-573.

Ivry, R. B. (1996). The representation of temporal information in perception and motor control. *Current opinion in neurobiology*, *6*(6), 851-857.

Ivry, R. B., & Hazeltine, R. E. (1995). Perception and production of temporal intervals across a range of durations: evidence for a common timing mechanism. *Journal of Experimental Psychology: Human perception and performance*, *21*(1), 3.

Ivry, R. B., Keele, S., & Diener, H. (1988). Dissociation of the lateral and medial cerebellum in movement timing and movement execution. *Experimental brain research*, *73*(1), 167-180.

Ivry, R. B., & Keele, S. W. (1989). Timing functions of the cerebellum. *Journal of cognitive neuroscience*, *1*(2), 136-152.

Ivry, R. B., & Richardson, T. C. (2002). Temporal control and coordination: the multiple timer model. *Brain and cognition*, *48*(1), 117-132.

Ivry, R. B., & Schlerf, J. E. (2008). Dedicated and intrinsic models of time perception. *Trends in cognitive sciences*, *12*(7), 273-280.

Ivry, R. B., Spencer, R. M., Zelaznik, H. N., & Diedrichsen, J. (2002). The cerebellum and event timing. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *978*(1), 302-317.

Jones, M. R., & Boltz, M. (1989). Dynamic attending and responses to time. *Psychological review*, *96*(3), 459.

Kagerer, F. A., Wittmann, M., Szelag, E., & Steinbüchel, N. v. (2002). Cortical involvement in temporal reproduction: evidence for differential roles of the hemispheres. *Neuropsychologia*, *40*(3), 357-366.

Kato, M., & Konishi, Y. (2006). Auditory dominance in the error correction process: a synchronized tapping study. *Brain research*, *1084*(1), 115-122.

Keele, S. W. (1968). Movement control in skilled motor performance. *Psychological bulletin*, *70*(6p1), 387.

Keele, S. W., Nicoletti, R., Ivry, R. I., & Pokorny, R. A. (1989). Mechanisms of perceptual timing: Beat-based or interval-based

judgements? *Psychological research*, *50*(4), 251-256.

Kelso, J. (1984). Phase transitions and critical behavior in human bimanual coordination. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, *246*(6), R1000-R1004.

Kelso, J. S. (1995). *Dynamic patterns: The self-organization of brain and behavior*. MIT press.

Kelso, J. S. (2000). Principles of dynamic pattern formation and change for a science of human behavior. In *Developmental science and the holistic approach* (pp. 73-94). Routledge.

Kelso, J. S., & Schöner, G. (1988). Self-organization of coordinative movement patterns. *Human Movement Science*, *7*(1), 27-46.

Koch, G., Oliveri, M., & Caltagirone, C. (2009). Neural networks engaged in milliseconds and seconds time processing: evidence from transcranial magnetic stimulation and patients with cortical or subcortical dysfunction. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, *364*(1525), 1907-1918.

Kolers, P. A., & Brewster, J. M. (1985). Rhythms and responses. *Journal of Experimental Psychology: Human perception and performance*, *11*(2), 150.

Krauss, J., Bommarco, R., Guardiola, M., Heikkinen, R. K., Helm, A., Kuussaari, M., Lindborg, R., Öckinger, E., Pärtel, M., & Pino, J. (2010). Habitat fragmentation causes immediate and time-delayed biodiversity loss at different trophic levels. *Ecology letters*, *13*(5), 597-605.

Kudo, K., Park, H., Kay, B. A., & Turvey, M. (2006). Environmental coupling modulates the attractors of rhythmic coordination. *Journal of Experimental Psychology: Human perception and performance*, *32*(3), 599.

Kugler, P. N., & Turvey, M. T. (1988). Self-organization, flow fields, and information. *Human Movement Science*, *7*(2-4), 97-129.

Kurgansky, A., & Shupikova, E. (2011). Visuomotor synchronization in adults and seven-to eight-year-old children. *Human Physiology*, *37*(5), 526-536.

Kurz, M. J., & Stergiou, N. (2004). Does footwear affect ankle coordination strategies? *Journal of the American Podiatric Medical Association*, *94*(1), 53-58.

Kurz, M. J., Stergiou, N., Buzzi, U. H., & Georgoulis, A. D. (2005). The effect of anterior cruciate ligament recontruction on lower extremity relative phase dynamics during walking and running. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, *13*(2), 107-115.

Lee, D. N. (1998). Guiding movement by coupling taus. *Ecological psychology*, *10*(3-4), 221-250.

Lee, D. N., & Aronson, E. (1974). Visual proprioceptive control of standing in human infants. *Perception & Psychophysics*, *15*(3), 529-532.

Lorås, H., Sigmundsson, H., Talcott, J. B., Öhberg, F., & Stensdotter, A. (2012). Timing continuous or discontinuous movements across effectors specified by different pacing modalities and intervals. *Experimental brain research*, *220*(3), 335-347.

Macar, F., Coull, J., & Vidal, F. (2006). The supplementary motor area in motor and perceptual time processing: fMRI studies. *Cognitive processing*, *7*(2), 89-94.

Matell, M. S., & Meck, W. H. (2000). Neuropsychological mechanisms of interval timing behavior. *Bioessays*, *22*(1), 94-103.

Mates, J., Müller, U., Radil, T., & Pöppel, E. (1994). Temporal integration in sensorimotor synchronization. *Journal of cognitive neuroscience*, *6*(4), 332-340.

McAuley, J. D., Jones, M. R., Holub, S., Johnston, H. M., & Miller, N. S. (2006). The time of our lives: life span development of timing and event tracking. *Journal of Experimental Psychology: General*, *135*(3), 348.

McLeod, P., Reed, N., & Dienes, Z. (2001). Toward a unified fielder theory: what we do not yet know about how people run to catch a ball. *Journal of Experimental Psychology: Human perception and performance*, *27*(6), 1347.

Meegan, D. V., Aslin, R. N., & Jacobs, R. A. (2000). Motor timing learned without motor training. *Nature neuroscience*, *3*(9), 860-862.

Meijer, O. G., & Roth, K. (1988). *Complex movement behaviour:'The'motor-action controversy*. Elsevier.

Merchant, H., Zarco, W., & Prado, L. (2008). Do we have a common mechanism for measuring time in the hundreds of millisecond range? Evidence from multiple-interval timing tasks. *Journal of neurophysiology*, *99*(2), 939-949.

Michaels, C. F., & Carello, C. (1981). *Direct perception*. Citeseer.

Middleton, F. A., & Strick, P. L. (1998). Cerebellar output: motor and cognitive channels. *Trends in cognitive sciences*, *2*(9), 348-354.

Miura, A., Kudo, K., Ohtsuki, T., & Kanehisa, H. (2011). Coordination modes in sensorimotor synchronization of whole-body movement: a study of street dancers and non-dancers. *Human Movement Science*, *30*(6), 1260-1271.

Miyake, Y. (2001). Dual-anticipation in sensory-motor synchronization. Proc. of 1st Int. Symp. on Measurement, Analysys and Modeling of Human Functions (ISHF2001),

Miyata, K., Varlet, M., Miura, A., Kudo, K., & Keller, P. E. (2021). Vocal interaction during rhythmic joint action stabilizes interpersonal coordination and individual movement timing. *Journal of Experimental Psychology: General*, *150*(2), 385.

Morein-Zamir, S., Soto-Faraco, S., & Kingstone, A. (2003). Auditory capture of vision: examining temporal ventriloquism. *Cognitive Brain Research*, *17*(1), 154-163.

Nakamura, R., Nagasaki, H., & Narabayashi, H. (1978). Disturbances of rhythm formation in patients with Parkinson's disease: part I. Characteristics of tapping response to the periodic signals. *Perceptual and motor skills*, *46*(1), 63-75.

Nawrot, M., & Rizzo, M. (1995). Motion perception deficits from midline cerebellar lesions in human. *Vision research*, *35*(5), 723-731.

Newell, K. (1986). Constraints on the development of coordination. *Motor development in children: Aspects of coordination and control*.

Newell, K. M., Carlton, L., Carlton, M. J., & Halbert, J. (1980). Velocity as a factor in movement timing accuracy. *Journal of Motor Behavior*,

12(1), 47-56.

Newell, K. M., Kugler, P., Van Emmerik, R. E., & McDonald, P. (1989). Search strategies and the acquisition of coordination. In *Advances in psychology* (Vol. 61, pp. 85-122). Elsevier.

Newell, K. M., & McDonald, P. V. (1993). The evolving perceptual-motor workspace in infancy. In *Advances in psychology* (Vol. 97, pp. 175-199). Elsevier.

Nicolson, R. I., & Fawcett, A. J. (2011). Dyslexia, dysgraphia, procedural learning and the cerebellum. *Cortex*, *47*(1), 117-127.

Nieuwboer, A., Kwakkel, G., Rochester, L., Jones, D., van Wegen, E., Willems, A. M., Chavret, F., Hetherington, V., Baker, K., & Lim, I. (2007). Cueing training in the home improves gait-related mobility in Parkinson's disease: the RESCUE trial. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, *78*(2), 134-140.

Nobre, A. C., Correa, A., & Coull, J. T. (2007). The hazards of time. *Current opinion in neurobiology*, *17*(4), 465-470.

O'Boyle, D. J., Freeman, J. S., & Cody, F. W. (1996). The accuracy and precision of timing of self-paced, repetitive movements in subjects with Parkinson's disease. *Brain*, *119*(1), 51-70.

Oliveri, M., Koch, G., & Caltagirone, C. (2009). Spatial–temporal interactions in the human brain. *Experimental brain research*, *195*(4), 489-497.

Pacheco, M. M., Lafe, C. W., & Newell, K. M. (2019). Search strategies in the perceptual-motor workspace and the acquisition of coordination, control, and skill. *Frontiers in psychology*, *10*, 1874.

Parise, C., & Spence, C. (2008). Synesthetic congruency modulates the temporal ventriloquism effect. *Neuroscience letters*, *442*(3), 257-261.

Pascual-Leone, A. (2001). The brain that plays music and is changed by it. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *930*(1), 315-329.

Pashler, H. (2001). Perception and production of brief durations: beat-based versus interval-based timing. *Journal of Experimental Psychology: Human perception and performance*, *27*(2), 485.

Pastor, M., Artieda, J., Jahanshahi, M., & Obeso, J. (1992). Time estimation

and reproduction is abnormal in Parkinson's disease. *Brain*, *115*(1), 211-225.

Poulton, E. (1957). On prediction in skilled movements. *Psychological bulletin*, *54*(6), 467.

Pressing, J. (1999). The referential dynamics of cognition and action. *Psychological review*, *106*(4), 714.

Profeta, V. L., & Turvey, M. T. (2018). Bernstein's levels of movement construction: A contemporary perspective. *Human Movement Science*, *57*, 111-133.

Purves, D., Cabeza, R., Huettel, S. A., LaBar, K. S., Platt, M. L., Woldorff, M. G., & Brannon, E. M. (2008). *Cognitive neuroscience* (Vol. 6). Sunderland: Sinauer Associates, Inc.

Rao, S. M., Harrington, D. L., Haaland, K. Y., Bobholz, J. A., Cox, R. W., & Binder, J. R. (1997). Distributed neural systems underlying the timing of movements. *Journal of Neuroscience*, *17*(14), 5528-5535.

Reed, E. S. (1988). Applying the theory of action systems to the study of motor skills. In *Advances in psychology* (Vol. 50, pp. 45-86). Elsevier.

Repp, B. H. (2005). Sensorimotor synchronization: A review of the tapping literature. *Psychonomic bulletin & review*, *12*(6), 969-992.

Repp, B. H. (2008). Multiple temporal references in sensorimotor synchronization with metrical auditory sequences. *Psychological research*, *72*(1), 79-98.

Repp, B. H., & Doggett, R. (2007). Tapping to a very slow beat: a comparison of musicians and nonmusicians. *Music Perception*, *24*(4), 367-376.

Repp, B. H., & Penel, A. (2004). Rhythmic movement is attracted more strongly to auditory than to visual rhythms. *Psychological research*, *68*(4), 252-270.

Repp, B. H., & Steinman, S. R. (2010). Simultaneous event-based and emergent timing: synchronization, continuation, and phase correction. *Journal of Motor Behavior*, *42*(2), 111-126.

Repp, B. H., & Su, Y.-H. (2013). Sensorimotor synchronization: a review of

recent research (2006–2012). *Psychonomic bulletin & review*, *20*(3), 403-452.

Reutimann, J., Yakovlev, V., Fusi, S., & Senn, W. (2004). Climbing neuronal activity as an event-based cortical representation of time. *Journal of Neuroscience*, *24*(13), 3295-3303.

Robertson, S. D., Zelaznik, H. N., Lantero, D. A., Bojczyk, K. G., Spencer, R. M., Doffin, J. G., & Schneidt, T. (1999). Correlations for timing consistency among tapping and drawing tasks: evidence against a single timing process for motor control. *Journal of Experimental Psychology: Human perception and performance*, *25*(5), 1316.

Roerdink, M., Bank, P. J., Peper, C. L. E., & Beek, P. J. (2011). Walking to the beat of different drums: Practical implications for the use of acoustic rhythms in gait rehabilitation. *Gait & posture*, *33*(4), 690-694.

Roman, I. R., Washburn, A., Large, E. W., Chafe, C., & Fujioka, T. (2019). Delayed feedback embedded in perception-action coordination cycles results in anticipation behavior during synchronized rhythmic action: A dynamical systems approach. *PLoS computational biology*, *15*(10), e1007371.

Rönnqvist, L., McDonald, R., & Sommer, M. (2018). Influences of synchronized metronome training on soccer players' timing ability, performance accuracy, and lower-limb kinematics. *Frontiers in psychology*, *9*, 2469.

Schmidt, R., & Lee, T. (2014). *Motor control and learning: from principles to application*. Human Kinetics.

Schmidt, R. A. (1975). A schema theory of discrete motor skill learning. *Psychological review*, *82*(4), 225.

Schmidt, R. A., Lee, T. D., Winstein, C., Wulf, G., & Zelaznik, H. N. (2018). *Motor control and learning: A behavioral emphasis*. Human kinetics.

Schmidt, R. A., & Young, D. E. (1991). Methodology for motor learning: a paradigm for kinematic feedback. *Journal of Motor Behavior*, *23*(1), 13-24.

Scholz, J. P. (1993). Organizational principles for the coordination of lifting. *Human Movement Science*, *12*(5), 537-576.

Schubotz, R. I., Friederici, A. D., & Von Cramon, D. Y. (2000). Time perception and motor timing: a common cortical and subcortical basis revealed by fMRI. *Neuroimage*, *11*(1), 1-12.

Scott Kelso, J., Fink, P. W., DeLaplain, C. R., & Carson, R. G. (2001). Haptic information stabilizes and destabilizes coordination dynamics. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, *268*(1472), 1207-1213.

Shaffer, L. H. (1981). Performances of Chopin, Bach, and Bartok: Studies in motor programming. *Cognitive psychology*, *13*(3), 326-376.

Shaffer, L. H., Clarke, E. F., & Todd, N. P. (1985). Metre and rhythm in piano playing. *Cognition*, *20*(1), 61-77.

Shaffer, R. J., Jacokes, L. E., Cassily, J. F., Greenspan, S. I., Tuchman, R. F., & Stemmer Jr, P. J. (2001). Effect of Interactive Metronome® training on children with ADHD. *The American Journal of Occupational Therapy*, *55*(2), 155-162.

Siegler, R. S. (2009). Improving preschoolers' number sense using information-processing theory.

So, I. (1964). Cognitive development in children: Piaget development and learning. *Journal, of Research in Science Teaching*, *2*, 176-186.

Spencer, R. M., & Ivry, R. B. (2005). Comparison of patients with Parkinson's disease or cerebellar lesions in the production of periodic movements involving event-based or emergent timing. *Brain and cognition*, *58*(1), 84-93.

Spencer, R. M., Zelaznik, H. N., Diedrichsen, J., & Ivry, R. B. (2003). Disrupted timing of discontinuous but not continuous movements by cerebellar lesions. *Science*, *300*(5624), 1437-1439.

Stekelenburg, J. J., & Vroomen, J. (2009). Neural correlates of audiovisual motion capture. *Experimental brain research*, *198*(2), 383-390.

Stergiou, N., Jensen, J. L., Bates, B. T., Scholten, S. D., & Tzetzis, G. (2001). A dynamical systems investigation of lower extremity coordination during running over obstacles. *Clinical Biomechanics*,

16(3), 213-221.

Sternad, D. (2006). Stability and variability in skilled rhythmic action—A dynamical analysis of rhythmic ball bouncing. In *Motor control and learning* (pp. 55-62). Springer.

Stevens, L. T. (1886). On the time-sense. *Mind*, *11*(43), 393-404.

Studenka, B. E., & Zelaznik, H. N. (2008). The influence of dominant versus non-dominant hand on event and emergent motor timing. *Human Movement Science*, *27*(1), 29-52.

Studenka, B. E., & Zelaznik, H. N. (2011). Synchronization in repetitive smooth movement requires perceptible events. *Acta Psychologica*, *136*(3), 432-441.

Studenka, B. E., Zelaznik, H. N., & Balasubramaniam, R. (2012). The distinction between tapping and circle drawing with and without tactile feedback: an examination of the sources of timing variance. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *65*(6), 1086-1100.

Summers, J. J., & Pressing, J. (1994). Coordinating the two hands in polyrhythmic tapping. In *Interlimb coordination* (pp. 571-593). Elsevier.

Tanji, J. (1994). The supplementary motor area in the cerebral cortex. *Neuroscience research*, *19*(3), 251-268.

Tembrado, J., Zanone, P., Monno, A., & Laurent, M. (1999). Attentional load to the intentional stabilization of preferred coordination patterns. *Journal of Experimental Psychology: Human perception and performance*, *25*, 1579-1594.

Thaut, M. H. (2003). Neural basis of rhythmic timing networks in the human brain. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *999*(1), 364-373.

Torre, K., & Balasubramaniam, R. (2009). Two different processes for sensorimotor synchronization in continuous and discontinuous rhythmic movements. *Experimental brain research*, *199*(2), 157-166.

Turvey, M. T. (1990). Coordination. *American psychologist*, *45*(8), 938.

Turvey, M. T. (2007). Action and perception at the level of synergies. *Human Movement Science*, *26*(4), 657-697.

Turvey, M. T., Solomon, H. Y., & Burton, G. (1989). An ecological analysis of knowing by wielding. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*, *52*(3), 387-407.

Van Beers, R. J., Sittig, A. C., & Denier van der Gon, J. J. (1998). The precision of proprioceptive position sense. *Experimental brain research*, *122*(4), 367-377.

Van Beers, R. J., Sittig, A. C., & Gon, J. J. D. v. d. (1999). Integration of proprioceptive and visual position-information: An experimentally supported model. *Journal of neurophysiology*, *81*(3), 1355-1364.

Van Emmerik, R., & Wagenaar, R. (1996). Dynamics of movement coordination and tremor during gait in Parkinson's disease. *Human Movement Science*, *15*(2), 203-235.

Varlet, M., Marin, L., Issartel, J., Schmidt, R. C., & Bardy, B. G. (2012). Continuity of visual and auditory rhythms influences sensorimotor coordination.

Volman, M., & Geuze, R. H. (2000). Temporal stability of rhythmic tapping "on" and "off the beat": A developmental study. *Psychological research*, *63*(1), 62-69.

Vorberg, D., & Wing, A. (1996). Modeling variability and dependence in timing. In *Handbook of perception and action* (Vol. 2, pp. 181-262). Elsevier.

Vroomen, J., & de Gelder, B. (2004). Temporal ventriloquism: sound modulates the flash-lag effect. *Journal of Experimental Psychology: Human perception and performance*, *30*(3), 513.

Vroomen, J., Keetels, M., De Gelder, B., & Bertelson, P. (2004). Recalibration of temporal order perception by exposure to audio-visual asynchrony. *Cognitive Brain Research*, *22*(1), 32-35.

Warren, W. H. (1984). Perceiving affordances: visual guidance of stair climbing. *Journal of Experimental Psychology: Human perception and performance*, *10*(5), 683.

Warren, W. H., & Hannon, D. J. (1988). Direction of self-motion is perceived from optical flow. *Nature*, *336*(6195), 162-163.

Welch, R. B., & Warren, D. H. (1980). Immediate perceptual response to

intersensory discrepancy. *Psychological bulletin*, *88*(3), 638.

Welsh, J. P., & Llinás, R. (1997). Some organizing principles for the control of movement based on olivocerebellar physiology. *Progress in brain research*, *114*, 449-461.

Whelan, R. (2008). Effective analysis of reaction time data. *The psychological record*, *58*(3), 475-482.

Wing, A. M. (2002). Voluntary timing and brain function: an information processing approach. *Brain and cognition*, *48*(1), 7-30.

Wing, A. M., Doumas, M., & Welchman, A. E. (2010). Combining multisensory temporal information for movement synchronisation. *Experimental brain research*, *200*(3), 277-282.

Wing, A. M., & Kristofferson, A. B. (1973). Response delays and the timing of discrete motor responses. *Perception & Psychophysics*, *14*(1), 5-12.

Wohlschläger, A., & Koch, R. (2000). Synchronization error: An error in time perception. In *Rhythm perception and production* (pp. 115-127). Swets.

Zanone, P. G., & Kelso, J. (1992). Evolution of behavioral attractors with learning: nonequilibrium phase transitions. *Journal of Experimental Psychology: Human perception and performance*, *18*(2), 403.

Zelaznik, H. N. (2018). The past and future of clock-like timing in motor performance. *Kinesiology Review*, *7*(1), 36-41.

Zelaznik, H. N., & Rosenbaum, D. A. (2010). Timing processes are correlated when tasks share a salient event. *Journal of Experimental Psychology: Human perception and performance*, *36*(6), 1565.

Zelaznik, H. N., Spencer, R., & Ivry, R. B. (2002). Dissociation of explicit and implicit timing in repetitive tapping and drawing movements. *Journal of Experimental Psychology: Human perception and performance*, *28*(3), 575.

Zelaznik, H. N., Spencer, R. M., Ivry, R. B., Baria, A., Bloom, M., Dolansky, L., Justice, S., Patterson, K., & Whetter, E. (2005). Timing variability in circle drawing and tapping: probing the relationship between event and emergent timing. *Journal of Motor*

Behavior, *37*(5), 395-403.

Zelic, G., Varlet, M., Wishart, J., Kim, J., & Davis, C. (2018). The dual influence of pacer continuity and pacer pattern for visuomotor synchronisation. *Neuroscience letters*, *683*, 150-159.

Zendel, B. R., Ross, B., & Fujioka, T. (2011). The effects of stimulus rate and tapping rate on tapping performance. *Music Perception*, *29*(1), 65-78.

Zentner, M., & Eerola, T. (2010). Rhythmic engagement with music in infancy. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *107*(13), 5768-5773.

Abstract

Motor Timing and Coordination according to the Perceptual Information

Jaeuk Jeong
Department of Physical Education
The Graduate School
Seoul National University

Motor timing is determined by the coordination of perceptual information and action. Searching for the optimal perceptual-motion combination, and observing which information is important and how the characteristics of motion change, is a very important problem in understanding human motor behavior. The purpose of this study is to examine the motor timing and coordination control according to perceptual information and to explore the strategies necessary to improve the motor timing. 30 healthy adults (age: 26.3 ± 4.7y, female: 2) performed a timing task(circle drawing) according to periodic stimuli in virtual reality. In Experiment 1, timing accuracy and variability, spatial accuracy, prediction tendency, and sensory reliability were compared through the synchronization task according to the sensory modality (auditory, visual, tactile) and tempo (20bpm, 30bpm, 60bpm). In Experiment 2, the timing correction response and coordination characteristics were

investigated through an adaptation task in which the tempo changes. As a result, there was a difference which sensory modality was effective for timing accuracy. Specifically, tactile modality at fast tempo and auditory modality at medium tempo were effective for timing accuracy. In addition, the timing prediction tendency was high at slow tempo, and timing over-correction response was observed in the slowing tempo change. As a result of comparing the sensory reliability using logistic regression analysis, it was found that under multi-sensory conditions, tactile, visual, and auditory had the greatest effect on timing accuracy in the order. Finally, in the adaptation task, sensory modality did not affect the motor coordination, but the change in tempo brought about changes in coordination pattern and stability.

This study tried to verify the characteristics of various motor timing in two aspects of perception and motion. In order to apply the research results to the sports field, it is necessary to examine the motor timing and coordination control in various aspects of perceptual information, and it will help to establish a strategy favorable to timing accuracy through quantification and prediction of sensory modality. Finally, the various results derived from this study are basic data for understanding and developing the motor timing, and it is expected that it will help the feedback information of the coach and the learner in the filed of motor control and learning.

keywords **: Perceptual information, Motor timing, Motor coordination, Sensorimotor synchronization, Sensory modality, Sensory reliability**

Student Number **: 2015-30436**