Master's Thesis

Quantifying Self-motion Perception of Motion Effects in 4D Experiences

Jiwan Lee (이 지 완)

Department of Computer Science and Engineering

Pohang University of Science and Technology

2021

4D 경험에서 모션 효과의 자기 모션 지각 정량화

Quantifying Self-motion Perception of Motion Effects in 4D Experiences

Quantifying Self-motion Perception of Motion Effects in 4D Experiences

by

Jiwan Lee
Department of Computer Science and Engineering
Pohang University of Science and Technology

A thesis submitted to the faculty of the Pohang University of Science and Technology in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in the Computer Science and Engineering

Pohang, Korea
12. 17. 2020
Approved by
Seungmoon Choi (Signature)
Academic advisor

Quantifying Self-motion Perception of Motion Effects in 4D Experiences

Jiwan Lee

The undersigned have examined this thesis and hereby certify that it is worthy of acceptance for a master's degree from POSTECH

12. 17. 2020

Committee Chair	Seungmoon Choi	(Seal)
Member	Sung H. Han	(Seal)
Member	Inseok Hwang	(Seal)

MCSE 이 지 완. Jiwan Lee
20182617
Quantifying Self-motion Perception of Motion Effects in 4D Experiences,
4D 경험에서 모션 효과의 자기 모션 지각 정량화
Department of Computer Science and Engineering , 2021, 60p, Advisor : Seungmoon Choi.

ABSTRACT

When perceiving motion effects created for 4D content, we cannot perceive the motions exactly as the designer intended due to noises present in our senses/brains. To provide better 4D motion experiences in consideration of the perceptual noises, we quantified the human perception of passive self-motions. In this thesis, we studied three different topics: (1) The smallest intensity of motion that can be detected (Absolute threshold) for all six degrees of freedom of the motion chair, (2) The smallest difference in intensity between motions required for reliable perception (Difference threshold) for several motion frequencies, (3) How brains combine visual and vestibular information for the scenes similar to 4D Rides. Participants identified the direction of motion in the experiment (1) and compared the intensities of two motions in experiments (2) and (3).

In both rotation and translation of chair motion, we found that the motions

about an earth-vertical axis (Yaw and Heave) were less sensitive than those of the other axes. Also, the ability to differentiate motion intensity had a negative correlation with frequency at 0.2-0.8 Hz. In 4D rides where pitch is mainly used, participants believed in the vestibular and visual cues at a 7:3 ratio (vestibular capture), even though there were individual differences. These results can be useful for designing motion effects while considering human perception to motion feedback.

목 차

I. 서론 1

II. 관련 연구 3

2.1 모션 유형 3

2.2 전정 역치 5

2.3 전정 역치상 6

2.4 전정 감각과의 감각 통합 6

III. 전정 절대 역치와 민감도 9

3.1 연구 목표 9

3.2 방법 9

3.2.1 참여자 9

3.2.2 모션 자극 10

3.2.3 실험 절차 11

3.2.4 분석 방법 13

3.3 결과 14

3.4 토의 17

3.4.1 전정 절대 역치 17

3.4.2 전정 민감도 18

IV. 모션 주파수에 따른 전정 구별 역치 20

4.1 연구 목표 20
4.2 방법 20
4.2.1 참여자 20
4.2.2 모션 자극 21
4.2.3 실험 절차 22
4.2.4 분석 방법 24
4.3 결과 25
4.4 토의 30

V. 시각과 전정 감각의 통합 31

5.1 연구 목표 31
5.2 방법 31
5.2.1 Maximum Likelihood Estimation 모델 31
5.2.2 참여자 35
5.2.3 장비 35
5.2.4 모션 자극 36
5.2.5 실험 패러다임 39
5.2.6 실험 절차 42
5.2.7 분석 방법 43
5.3 결과 45
5.4 토의 53

VI. 결론 54

참 고 문 헌 55

표 목 차

3.1 여섯 모션 유형의 측정치 14

5.1 전체 실험 조건. C_{equal}: $S_{vi} = S_{ve} = 10°/\mathrm{s}$; C_{pos}: $S_{vi} - S_{ve} > 0$ ($S_{vi} = 12°/\mathrm{s}$, $S_{ve} = 8°/\mathrm{s}$); C_{neg}: $S_{vi} - S_{ve} < 0$ ($S_{vi} = 8°/\mathrm{s}$, $S_{ve} = 12°/\mathrm{s}$). 42

그 림 목 차

2.1 모션 효과를 구성하는 여섯 자유도 4

2.2 시각 모션 예시. A: 입체적인 무작위 점으로 표현한 Optic flow. B: 4D 라이드 영상. 7

3.1 모션 자극의 가속도, 속도, 변위 개형. 최대 각속도 ···: 0.1°/s, −−: 1.0°/s, −: 1.9°/s 11

3.2 실험 환경. 모션 플랫폼은 이노시뮬레이션 사 IMP6-M150 모델이다. 모션 플랫폼 구동 성능: Surge, ±1.0cm/s^2; Sway, ±0.9cm/s^2; Heave, ±0.8cm/s^2; Roll, ±30°/s; Pitch, ±40°/s; Yaw, ±220°/s. 모든 실험 조건에서는 참여자가 자극에만 집중할 수 있도록 주변 조명을 모두 차단한다. 12

3.3 실험 절차 구성도 13

3.4 회전 모션의 심리측정함수. −·−: Roll, $\mu = 0.54 \pm 0.05$°/s, $s = 0.38$°/s, RMSE = 0.02; −−: Pitch, $\mu = 0.60 \pm 0.10$°/s, $s = 0.54$°/s, RMSE = 0.03; −: Yaw, $\mu = 0.77 \pm 0.15$°/s, $s = 0.65$°/s, RMSE = 0.03. 오차 막대는 평균 값의 95% 신뢰 구간을 나타낸다. 오차 막대의 가시성을 위해 세로로 0.01 미만의 간격을 두어 표시하였다. . 15

3.5 선형 모션의 심리측정함수. −·−: Surge, μ = 6.88 ± 0.38cm/s^2, s = 3.82cm/s^2, RMSE = 0.02; −−: Sway, μ = 5.00 ± 0.94cm/s^2, s = 4.09cm/s^2, RMSE = 0.04; −: Heave, μ = 10.56 ± 2.01cm/s^2, s = 6.68cm/s^2, RMSE = 0.05. 오차 막대는 평균 값의 95% 신뢰 구간을 나타낸다. 16

4.1 모션 자극의 가속도, 속도, 변위 개형. 모션 주파수 −: 0.2 Hz, −·−: 0.4 Hz, −−: 0.8 Hz. 세 주파수 모두 최대 각속도는 10°/s 이다. . . . 21

4.2 모션 자극 쌍. 3초 간격을 두고 기준 자극과 비교 자극이 재생된다. A: 0.2 Hz, B: 0.4 Hz, C: 0.6 Hz, D: 0.8 Hz. 두 자극의 최대 각속도는 각각 10°/s, 8°/s를 보인다. 23

4.3 2U1D 규칙을 따르는 비교 자극 세기 변화. 흰 원은 비교 자극이 기준 자극보다 세기가 작다고 응답한 경우를, 검은 원은 그 반대로 응답한 경우를 의미한다. 원이 겹쳐진 경우 해당 시도에서 반전이 일어났음을 의미한다. 종료 조건인 10번의 반전을 보이는데 37 시도가 소요되었다. 26

4.4 모션 주파수 별 비교 자극의 제시 빈도 27

4.5 그림 4.5 모션 주파수 별 심리측정함수. −: 0.2 Hz, μ=10.33 ± 0.50°/s, s=1.84°/s; −−: 0.4 Hz, μ=10.24 ± 0.48°/s, s=1.84°/s; −·−: 0.6 Hz, μ=10.14 ± 0.41°/s, s=1.74°/s; ··: 0.8 Hz, μ=10.12 ± 0.50°/s, s=2.05°/s. 오차 막대는 평균 값의 95% 신뢰 구간을 나타낸다. 28

4.6 모션 주파수 f에 따른 구별 역치 d. −■−: 마지막 4개의 반전으로 계산된 평균 구별 역치, 선형 회귀 $d = 0.42f + 0.84$, $R^2 = 0.89$; □ : 심리측정함수로 계산된 구별 역치. 오차 막대는 평균의 표준 오차 (±1 SEM)를 나타낸다. 29

5.1 시각과 전정 감각의 통합. A: 감각 간 차이 없음($S_{vi} = S_{ve}$); B: 감각 간 차이 있음($S_{vi} < S_{ve}$), $\sigma_{vi}^2/\sigma_{ve}^2 = 1$; C: 감각 간 차이 있음 ($S_{vi} < S_{ve}$), $\sigma_{vi}^2/\sigma_{ve}^2 = 4$. E$_i$는 각 우도 함수에서 최대 우도를 보이는 값을 나타내며(E=Estimated), 글에서 표기한 $\hat{S}_i$와 의미하는 바가 같다. 34

5.2 세 모션 유형으로 구성된 롤러코스터 모션의 개형. A: Heave, 최대 가속도 2.2e-7 cm/s^2; B: Surge, 속도 1.25 cm/s; C: Pitch, 최대 각속도 10°/s. 38

5.3 롤러코스터 모션의 시각 영상. A: 방해 요소가 없는 영상, B: 5개 방해 요소가 개입된 영상, C: 10개 방해 요소가 개입된 영상. 40

5.4 단일 감각의 심리측정함수. −●−: C_{ve}, $\mu = 10.10°/s$, $s = 1.11°/s$, −■−: $C_{vi-none}$, $\mu = 10.05°/s$, $s = 1.42°/s$, −▲−: C_{vi-mid}, $\mu = 10.17°/s$, $s = 2.03°/s$, −◆−: $C_{vi-high}$, $\mu = 10.22°/s$, $s = 2.61°/s$. 전정 감각은 검정, 시각은 회색으로 표시되었다. 46

5.5 단일 감각과 이중 감각에 대한 우도 함수 노이즈. 오차 막대와 음영 부분은 각각 실측과 예측에 대한 95% 신뢰 구간을 나타낸다. 47

5.6 이중 감각의 심리측정함수. A. −●−: $C_{vv-none-neg}$, $\mu = 10.79°/s$, $s = 1.27°/s$, −■−: $C_{vv-none-equal}$, $\mu = 10.05°/s$, $s = 1.17°/s$, −▲−: $C_{vv-none-pos}$, $\mu = 9.05°/s$, $s = 0.95°/s$. B. −●−: $C_{vv-mid-neg}$, $\mu = 11.17°/s$, $s = 1.68°/s$, −■−: $C_{vv-mid-equal}$, $\mu = 10.16°/s$, $s = 1.64°/s$, −▲−: $C_{vv-mid-pos}$, $\mu = 9.14°/s$, $s = 1.44°/s$. C. −●−: $C_{vv-high-neg}$, $\mu = 11.01°/s$, $s = 1.98°/s$, −■−: $C_{vv-high-equal}$, $\mu = 9.85°/s$, $s = 1.89°/s$, −▲−: $C_{vv-high-pos}$, $\mu = 8.91°/s$, $s = 1.66°/s$. C_{vv-neg}은 빨강, $C_{vv-equal}$은 검정, C_{vv-pos}은 파란색으로 표시되었다. 점선은 시각과 전정 감각 사이 모션 세기 차이를 나타낸다. 오차 막대는 피팅 파라미터 μ의 95% 신뢰 구간을 나타낸다. 49

5.7 시각과 전정 감각의 상대적인 기여 가중치. 식 5.5에 따라 두 가중치 값의 합은 항상 1이므로 상반된 두 축으로 표현 가능하다. 오차 막대와 음영 부분은 각각 실측과 예측에 대한 95% 신뢰 구간을 나타낸다. 실측치는 C_{pos}, C_{neg} 조건에서 Δ에 비해 PSE가 이동한 정도로 계산되었다. 50

5.8 감각 충돌 발생 시 추정치. 추정치는 C_{pos}, C_{neg} 조건마다 사후 분포의 확률이 가장 높은 값이다(5.2.1 절 참고). 오차 막대와 음영 부분은 각각 실측과 예측에 대한 95% 신뢰 구간을 나타낸다. 51

5.9 이중 감각 간 모션 세기 차이로 정규화한 심리측정함수. −●−: $C_{vv-none}$, $\mu = 9.19°/s$, $s = 1.11°/s$, −■−: C_{vv-mid}, $\mu = 9.39°/s$, $s = 1.57°/s$, −▲−: $C_{vv-high}$, $\mu = 9.19°/s$, $s = 1.86°/s$. C_{pos}, C_{neg} 조건을 같이 표현하기 위해서 C_{neg}의 지각 데이터를 $w_{vi}\,\Delta/2$만큼 가로 좌표축으로 평행 이동시켰다. 이때 w_{vi}는 시각 방해 조건 별로 실측한 값이다. 52

I. 서론

모션 효과는 사용자에게 실재감 있는 4D 경험을 제공하고자 전달되는 전정 피드백(Vestibular feedback)이다. 사용자는 영상으로부터 받을 수 있는 시청각 정보 이외로 전정 정보를 추가적으로 얻음으로써 영상 속 모션에 대한 이해도가 높아진다. 이를 위해 설계자는 컨텐츠 이해를 기반으로 영상 내 특징을 분석하여 실제 모션과 유사한 모션 효과를 저작한다. 설계자의 예술적 감각에 따라 다양한 개형으로 저작될 수 있으나, 사용자의 감각기/뇌에 존재하는 인지 불확정성으로 인해 실제 모션대로 지각하는 것은 불가능하다. 모션 효과가 의도된 대로 사용자의 지각 결과(Percept)로 이어지기 위해서는 사용자의 모션 지각에 대한 정량화(Quantification)가 필요하다.

사용자는 모션 효과를 받고 4D 경험을 평가하는데 자신의 모션(Self-motion)을 지각하는 과정을 거치게 된다. 지각 결과는 사용자마다 신체적인 특성, 문화적 배경 등에 의해 편차가 발생할 수 있으나, 외부 자극에서 시작하여 지각까지 이르는 과정은 서로 동일하다. 전정계 내에는 회전 모션을 인지하는 반고리관(Semicircular canal)과 선형 모션을 인지하는 이석기관(Otolith organ)이 존재한다. 두 경우 모두 모션으로부터 입력 신호를 가속도로 받는다. 이에 선형 모션은 가속도로 지각되나, 회전 모션은 입력되는 신호를 누적하는 반고리관 특성으로 인해 각속도로 지각된다는 특징이 있다 [1].

사용자의 모션 지각 능력은 심리측정함수(Psychometric function)를 이용하여 정량적으로 표현될 수 있다. 심리측정함수는 물리적인 자극과 지각 반응 사이의 관계를 나타내는 함수로, 측정 시 지각 확률을 변화시킬 수 있는 요인이 조절된다.

이상적인 경우의 함수는 실제 자극 세기를 기점으로 계단 함수의 개형을 띄지만, 실제로는 여러 요인으로 인해 노이즈가 개입되어 Ogive 형태를 갖는다. 특히, 자극 세기의 정도, 부여하는 태스크 등 설계를 달리하여 측정함으로써 사람의 절대 역치(Absolute threshold)와 구별 역치(Difference threshold 또는 Just Noticeable Difference)를 간접적으로 알아낼 수 있다. 응답에 대한 신뢰도가 줄어들수록 함수의 분산이 증가한다 [2].

이 논문은 모션 지각의 정량화를 목표로 다음 기여들을 제시한다. 서론에 이어 2장에서 관련 연구를 소개하며, 3–5장에서 기여 항목들을 자세히 서술한다. 결론을 마지막으로 끝을 맺는다.

- 전정 감각의 절대 역치와 민감도
- 모션 주파수에 따른 전정 감각의 구별 역치
- 시각과 전정 감각의 통합

II. 관련 연구

이 장에서는 관련 연구들을 네 절로 나누어 기술한다. 1절에서는 모션 효과에 이용되는 모션의 유형을 소개하고 이후 절들은 모션 지각 연구들을 설명한다. 2절과 3절은 전정 감각의 역치 측정에 대한 내용으로 각각 역치 수준과 역치상(Supra-threshold) 수준을, 4절에서는 전정 감각과 다른 감각과의 감각 통합을 서술한다.

2.1 모션 유형

3차원 공간에서 모션은 세 축에 대한 회전 모션과 선형 모션으로 구성된다(Figure 2.1). 각 축은 전후면을 향하는 세로축(X-axis), 좌우 측면을 향하는 가로축(Y-axis), 상하면을 향하는 수직축(Z-axis)을 의미한다. 세로축, 가로축과 수직축을 따라 선형 이동하는 모션은 Surge, Sway, Heave, 세 축을 기준으로 회전 이동하는 모션은 Roll, Pitch, Yaw로 정의된다.

설계자는 이러한 여섯 자유도의 모션을 조합하여 영상 속 모션이 적절히 표현되도록 모션 효과를 저작한다. 모션 생성에 이용되는 자유도 수가 증가할수록 공간을 더 필요로 하지만 목표 모션과 더 유사하게 전달 가능하다. 4D 영화의 경우 주로 가로축과 세로축의 회전 모션인 Roll, Pitch와 수직축 선형 모션 Heave가 이용된다 [3]. 이외의 자유도들 또한 테마파크의 4D 라이드, 해상 훈련, 비행 시뮬레이터 등 풍부한 모션을 전달하는데 수요가 증가하고 있다 [4, 5, 6].

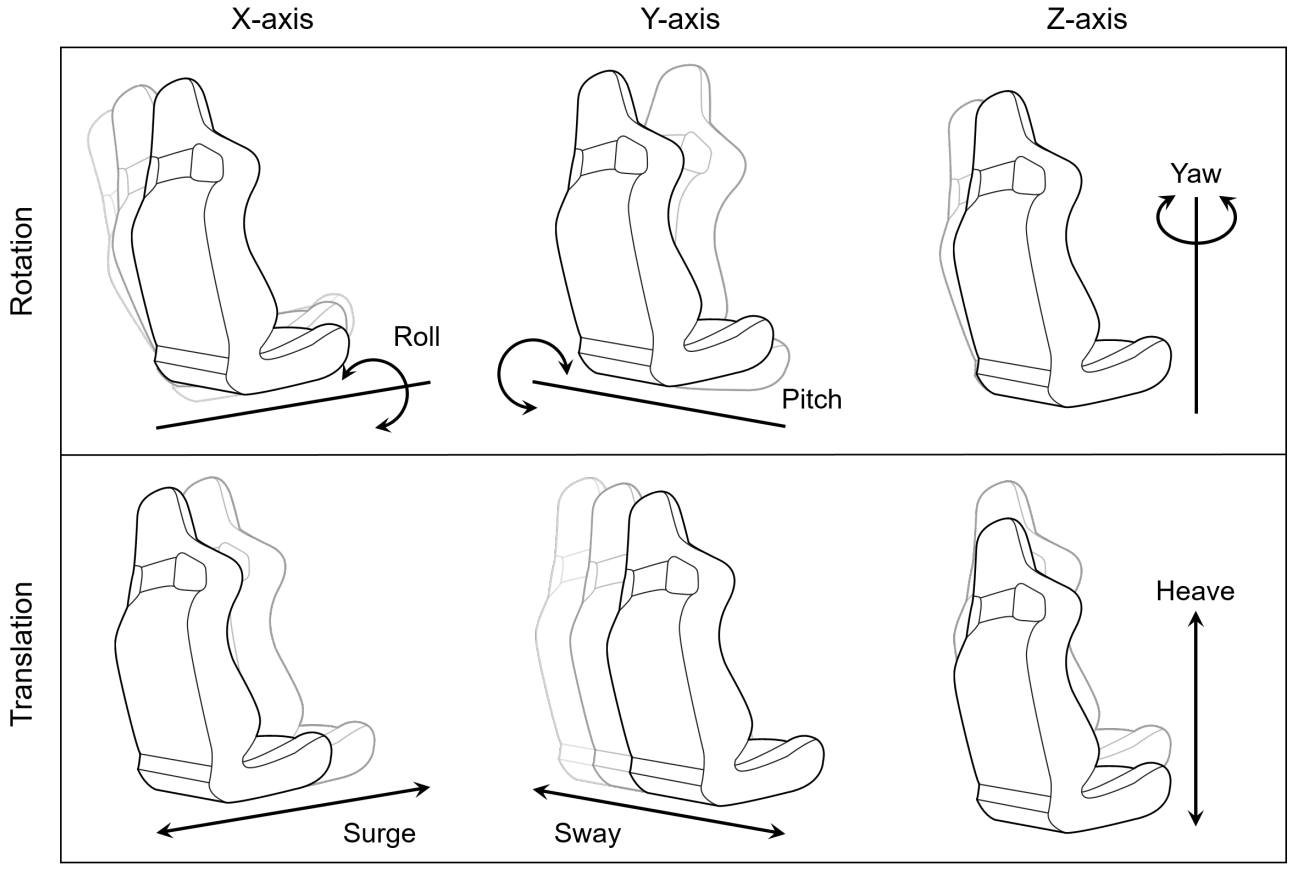

Figure 2.1: 모션 효과를 구성하는 여섯 자유도

2.2 전정 역치

역치 수준의 심리측정함수는 모든 지각 확률에 대한 자극 세기를 알 수 있으나 보고된 바가 적다. Yaw 모션의 경우 0.05–1.11 Hz 범위의 주파수를 갖는 모션으로 [7], 선형 모션들은 0.5 Hz 또는 1 Hz를 대상으로 함수가 보고되었다 [8, 9]. 두 연구 모두 함수 측정 시 Adaptive 방법이 이용되었으며, 역치에서 먼 자극 세기에는 실험 참여자의 응답 빈도가 적은 특징을 보인다. 이와 다르게 Constant stimuli 방법으로 측정되어 자극 세기마다 동일한 응답 빈도를 가지는 함수가 보고되기도 하였다 [10]. 이 연구의 경우 사인파 가속도 개형이 아닌 일정한 가속도 모션이 이용되었다.

지각 확률의 모든 구간이 아니라 역치 지점만을 측정한 연구는 다수 존재하며, 여섯 모션 유형의 역치들이 서로 비교되었다. 이들 연구에서는 0.08–1.27 Hz [11], 0.3 Hz [7, 12], 0.10–2.23 Hz [13] 주파수를 갖는 모션이 이용되었다. 그중 대부분은 실험 참여자에게 단방향 모션을 제시함으로써 모션의 방향을 식별하는 태스크를 주어 측정하였다. 반면, 모션이 지각 가능하다가 불가능해지는 지점과 지각되지 않다가 가능해지는 지점으로 나누어져 측정되기도 하였다 [13]. 방향 식별이 아닌 지각 유무 태스크가 주어질 경우 모션 재생 시 모션 플랫폼의 진동을 제거하기 어렵기 때문에 역치가 더 낮게 측정된다 [14].

이외에도 모션 유형의 일부를 대상으로 모션 지각에 영향을 주는 요인들이 연구되었다. 절대 역치와 모션 주파수의 관계가 Yaw 모션으로 설명되었으며 [15], 가속도 개형별 역치 변화가 Surge, Sway로 연구되었다 [16]. 또 나이에 따른 역치의 변화율이 모션 유형 별로 비교되었다 [17].

2.3 전정 역치상

유사한 개형을 가진 모션 효과가 서로 다른 자극으로 느껴지기 위해서는 모션의 세기 차이가 지각될 수 있어야 한다. 이를 파악하기 위해 모션 세기와 구별 역치의 상관관계가 연구되었으나, 주로 Yaw 모션과 선형 모션에 대해서만 진행되었다. 선형 모션의 경우 Heave 모션 0–0.59m/s^2 [11], 0.3–2m/s^2 [18], surge 모션 0–2m/s^2 [19], 회전 모션에는 Yaw 모션 0–150°/s [20], 15–60°/s [21]가 기준 자극으로 이용되었다. 그중 두 연구에서는 기준 자극의 세기가 커질수록 구별 역치가 선형으로 증가한다고 설명하였다 [11, 19]. 그러나 그 외 연구들은 지수가 0과 1 사이인 멱함수가 좀 더 역치를 잘 나타낼 수 있으며, 세기가 큰 모션에서 선형보다 더 나은 지각을 보였다고 보고하였다 [18, 20, 21].

모션 주파수는 모션 구별에 영향을 미칠 수 있음에도 변수로 고려된 경우가 적다. Surge 모션 0.25–0.6 Hz [19], Yaw 모션 0.2–1 Hz [22]가 연구되었으며, 모션 세기는 각각 1m/s^{2}와 15°/s로 고정되었다. Surge 모션의 경우 유의하지는 않았으나 주파수와 구별 능력은 양의 상관관계를 보였다. 반면, Yaw 모션에서는 주파수가 증가할수록 구별 능력이 현저하게 감소하는 음의 상관관계를 보고하였다.

2.4 전정 감각과의 감각 통합

사용자의 뇌는 모션 효과로부터 다수의 감각 신호들을 받게 되는데, 이러한 정보들을 통합하여 하나의 강인한 지각 결과로 통합한다. 이 과정을 설명하기 위해 베이지안 추론을 기반으로 한 Maximum Likelihood Estimation(MLE) 모델이 제안되었다 [2]. 모델에 따르면, 뇌는 신호마다 얻어진 개별 지각 결과에 접근할 수 있고 이 결과들을 각각의 신뢰도만큼 최종 추정치에 반영하여 통합한다. 이때 신뢰도는 각 지각 결과에 반영된 노이즈와 반비례한다고 가정된다. 이를 이용하여 감각 신호

마다 서로 다른 지각 결과를 낳도록 조절함으로써 실제 지각 결과가 어떤 정보를 더 반영하는지 파악 가능하다 [23].

모션 지각에는 전정 감각 포함 여러 감각 신호들이 상호 영향을 주고 있으나, 관련된 연구 사례는 적다. 그중 대부분은 시각과 전정 감각을 대상으로 하여, 실제로 뇌가 감각 신호들을 최적으로 통합하는지 연구하였다. 모션의 세기를 구별하는 태스크로는 Yaw 모션과 Sway 모션에 대해 진행되었다 [24, 25]. 두 연구 모두 모션 효과의 개형으로 가속도 사인파를 사용하였으며 영상은 모션의 광학 흐름(Optic flow)을 나타내는 입체적인 무작위 점들로 표현하였다. 또한 두 감각 간의 상대적인 신뢰도를 구하기 위해서 서로 다른 지각 결과를 야기하도록 모션 세기가 조절되었다. 그 결과 Yaw 모션에서는 전정 감각보다 시각을 세 배 정도 더 신뢰하는 Visual capture를 보였다. 반면 Sway 모션의 경우 두 감각을 거의 동등하게 신뢰하였다. 두 연구에서 사용한 시각 자극은 Figure 2.2 A와 같이 모션 세기 정보를 방해 없이 얻을 수 있는 영상으로 매우 추상적이며 실제 4D 컨텐츠로 소비되는 영상과는 거리가

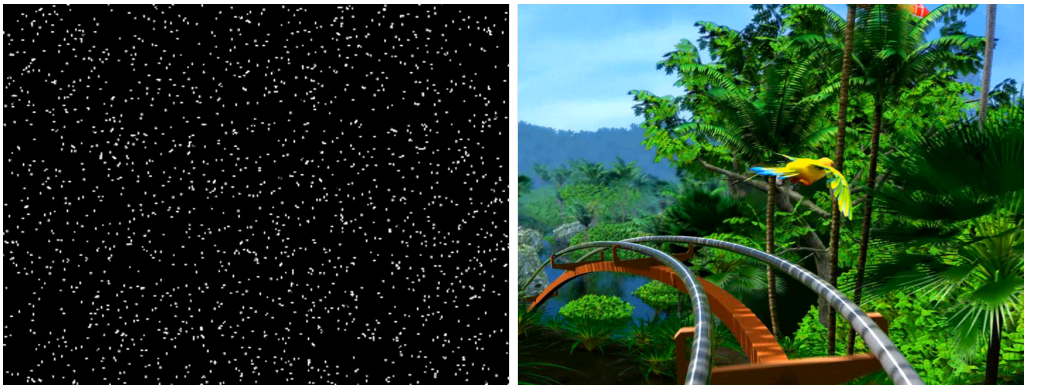

Figure 2.2: 시각 모션 예시. A: 입체적인 무작위 점으로 표현한 Optic flow. B: 4D 라이드 영상.

있다.

한편 모션 방향을 식별하는 태스크를 주어 역치 수준에서 감각 통합을 연구한 사례도 존재한다 [26, 27]. 두 연구는 각각 전정 감각과 시각, 청각을 대상으로 진행되었으며, 모션 주파수를 달리하여 두 감각 간 지각 능력이 비교되었다.

III. 전정 절대 역치와 민감도

3.1 연구 목표

모션 효과는 영상으로부터 단편적으로 생성되는 효과로, 모션 세기가 갑작스럽게 변하거나 구동 범위가 많이 요구되는 모션은 사용자에게 전달되기 어렵다. 이러한 이유로 모션 효과 곳곳에 역치 수준의 모션이 이용되고 있다. 역치 수준의 세기임에도 전달되는 모션 유형에 따라서 서로 다른 4D 경험을 유발할 수 있기에, 모션 피드백을 제공하는데 있어 모션 유형 간 상대적인 효과성을 비교해볼 필요가 있다. 이 장에서는 Constant stimuli 방법을 이용하여 모션의 기본 여섯 유형에 대한 심리측정함수를 측정한다. 특히, 특정 지각 확률로 정의된 모션 세기 한 값이 아닌 함수 자체를 보고함으로써 모든 지각 확률에 대한 모션 세기를 알 수 있도록 한다. 연구에 앞서, 이전 역치 측정치들을 참고하여 [7, 12, 13], 수직축에 대한 회전과 선형 모션이 다른 축들의 모션들보다 민감도 또한 낮을 것이다는 가설을 세우고 진행하였다.

3.2 방법

이 절에서는 실험 방법을 네 소절로 나누어 실험 참여자, 모션 자극, 실험 절차, 결과 분석 방법 순으로 기술한다.

3.2.1 참여자

실험에는 남자 다섯, 여자 세 명이 참여하였다. 참여자들의 나이는 만 18−32 세로 평균 24.63 ± 4.24 세이다. 모든 참여자는 어지러움, 현기증 등을 포함한 신경학적 병력이 없는 사람으로 제한되었으며, 실험 참여 전 연구 목적과 참여 방법에 대해

이해한 후 사전동의서에 서명하였다. 실험 후 참여자마다 한화 7만원이 지급되었다.

3.2.2 모션 자극

모션 자극은 식 3.1와 같이 사인파 가속도 한 주기를 이용하였다. 이 개형은 모든 구간에서 불연속적인 부분이 없으며 사람의 자연스러운 머리 움직임을 모방한다 [7, 12].

$$a(t) = A\sin(2\pi ft) \tag{3.1}$$

$$d(t) = \frac{A}{2\pi f}\left\{t - \frac{1}{2\pi f}\sin(2\pi ft)\right\} \tag{3.2}$$

$d(t)$는 $a(t)$을 두 번 적분하여 얻은 식으로, $0 \leq t \leq 1/f$ 일때의 모션 변위를 나타낸다. 두 식에서 A는 가속도의 진폭을, f는 모션의 주파수를 의미한다. 단일 방향으로 움직이는 $d(t)$는 모션의 방향에 따라 $d(t)$ 또는 $-d(t)$가 제시된다. 각 모션 자극은 최대 속도 $A/(\pi f)$, 전체 누적 변위 $A/(2\pi f^2)$를 갖는다. f가 1 Hz일 경우 모션의 최대 속도는 전체 누적 변위 값의 두 배이다. 이 실험에서는 모션 플랫폼의 성능과 실험 소요 시간을 고려하여 모션 주파수를 1 Hz로 고정하였다.

가속도 신호는 모션의 유형에 따라 회전 또는 선형 모션으로 제시되었으며, 지각 확률을 변화시킬 수 있도록 적합한 자극 파라미터가 조정되었다. 선형 모션의 경우 Heave는 최대 가속도 2−14cm/s^2, Surge, Sway는 최대 가속도 1−12cm/s^{2}를 사용하였다. 회전 모션의 경우 감각 기관인 반고리관의 특성을 고려하여 Yaw는 최대 각속도 0.1−1.9°/s, Roll은 최대 각속도 0.07−1.12°/s, Pitch는 최대 각속도 0.1−1.6°/s를 사용하였다. 각 범위는 여섯 등분한 후 일곱 개 값으로 모션 자극을 생성하였다. Figure 3.1은 사인파 모션 자극의 가속도, 속도, 변위를 나타낸다.

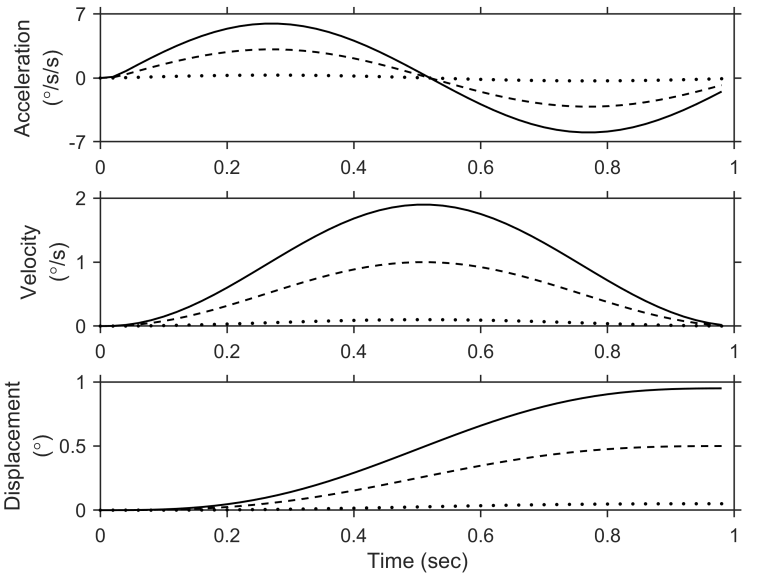

Figure 3.1: 모션 자극의 가속도, 속도, 변위 개형. 최대 각속도 ··: 0.1°/s, −−: 1.0°/s, −: 1.9°/s

3.2.3 실험 절차

실험 참여자는 Figure 3.2 환경에서 모션 플랫폼 위 의자에 정자세로 앉아 모션 효과를 받는다. 전정 감각 이외 타 감각기에서 받을 수 있는 정보를 차단하기 위해 암막 안대와 소음 제거 헤드폰을 착용하도록 지시하였다. 모션 플랫폼의 잔여 청각 신호에는 백색 소음을 일정한 크기로 재생하도록 하여 최소화하고자 하였다. 또한 모션이 재생되는 동안 전정계가 위치한 머리가 흔들리지 않도록 머리 밴드와 목 고정대를 착용하도록 하여 고정하였다.

모션의 심리측정함수를 측정하기 위해 Constant stimuli 방법을 따라 진행하였다. 실험 파라미터는 모션 자극의 이동 방향, 최대 가속도/속도, 모션 유형으로 설정하였다. 실험 참여자는 Within-subject 설계로 모든 실험 조건에 참여하며, 모

Figure 3.2: 실험 환경. 모션 플랫폼은 이노시뮬레이션 사 IMP6-M150 모델이다. 모션 플랫폼 구동 성능: Surge, $\pm 1.0 cm/s^2$; Sway, $\pm 0.9 cm/s^2$; Heave, $\pm 0.8 cm/s^2$; Roll, $\pm 30°/s$; Pitch, $\pm 40°/s$; Yaw, $\pm 220°/s$. 모든 실험 조건에서는 참여자가 자극에만 집중할 수 있도록 주변 조명을 모두 차단한다.

션 유형마다 모션 자극을 280회 무작위 순서로 제시 받는다(2 방향 × 7 자극 세기 × 20회 반복). 하나의 자극 세기는 40회의 지각 반응으로 이루어진다.

실험은 한 번에 한 모션 유형의 실험 조건들이 모두 수행되도록 6번으로 구성하였다. 모션 유형마다 하나의 학습 블록을 포함하여 8개 블록이 필요하다. 각 블록은 참여자로부터 40개의 모션 자극에 대한 응답을 받으며 블록마다 7분 정도가 소요된다. 학습 블록을 첫 번째로 배치하여 참여자들이 태스크 수행 방법을 이해하고 익숙해지도록 하였다. 이때 학습 블록에 사용하는 모션들은 무작위로 선택된다. 실험 참여자가 태스크를 수행한지 30 분이 초과되었을 경우 10분 정도의 휴식을 취하도록 권장하였다. 전체 실험은 휴식을 포함하여 약 1시간씩 6번으로 총 여섯 시간

정도가 소요되었다.

매 시도마다 참여자는 1초 동안 재생되는 단방향 회전 또는 선형 모션을 받는다(1-Interval). 모션 자극의 시작과 끝을 알리기 위해 각각 높은 경고음과 낮은 경고음이 전달된다. 참여자는 모션 자극을 제시 받고 게임 컨트롤러의 버튼을 이용하여 지각한 모션 방향을 보고한다. 응답은 두 방향 내에서만 가능하며, 2AFC(2-Alternative Forced-Choice)를 따라 방향을 지각하지 못한 경우에도 두 선택지들 중 하나를 강제로 선택해야 한다. 선택된 버튼은 컴퓨터로 기록된다. 이후 모션 플랫폼은 1cm/s 또는 1°/s 속도로 정위치로 복귀함으로써 모든 모션 자극이 동일 환경 상태에서 시작될 수 있도록 한다.

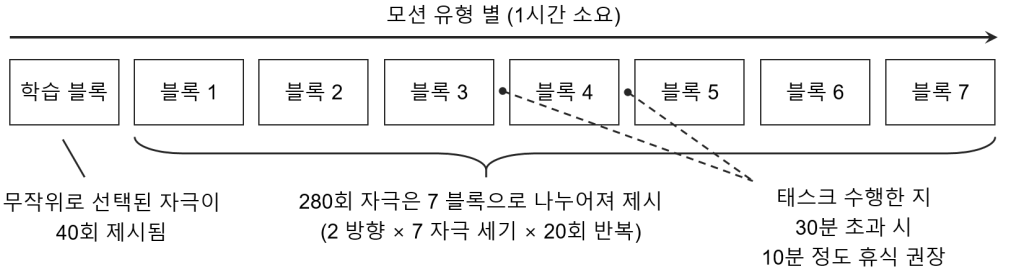

Figure 3.3: 실험 절차 구성도

3.2.4 분석 방법

모든 데이터 분석은 MathWorks 사 MATLAB R2017b에서 구현된 프로그램으로 수행되었다. 실험 참여자의 개인별 지각 데이터는 모션 유형 별로 모아진 후 심리측정함수가 도출되었다. 함수는 평균 μ과 표준편차 s로 정의되는 정규 분포의 누적 분포 함수로 피팅되었으며, 0.5와 1 사이의 확률 값을 가진다. 이후 피팅 결과의 적합도(Goodness of fit)를 나타내는데 평균 제곱근 편차(RMSE)를 구하였다.

식 3.3는 Forced-Choice 실험에서 얻어진 확률 P_{raw}을 0과 1 사이의 확률 값 $P_{corrected}$으로 나타내는 식이다. c는 랜덤하게 응답한 확률 값으로 2AFC 태스크에서는 0.5를 보인다. 파라미터 μ는 정답 확률 $P_{raw} = 0.75$를 보이는 자극 세기이며 예/아니오 실험에서 0.5 지점에 해당한다($P_{corrected} = 0.5$). 절대 역치는 $P_{corrected}$가 0.5 이상을 보이는 세기로 정의 가능하며, 이 실험에서는 μ를 절대 역치로 정의하였다. 민감도는 역치와 반비례한다고 판단하였다.

$$P_{corrected} = \frac{P_{raw} - c}{1 - c} \tag{3.3}$$

모션 유형 별로 파라미터들을 비교하기 위해 회전과 선형 모션으로 나누어 One-way repeated measures ANOVA를 시행하였다. 통계 분석 시 유의 수준 α는 0.05를 이용하였으며, 결과가 유의한 경우 Bonferroni-t 사후 검정을 행하였다.

3.3 결과

자극 세기에 상관없이 실험 참여자의 정답 확률이 무작위 수준 c에 가까운 경우 해당 모션 유형의 방향을 식별하지 못한다고 판단하였다. 모션의 여섯 유형 중 이와 같은 결과를 보이는 유형이 하나라도 있는 참여자는 데이터 분석에서 제외되었다.

Table 3.1: 여섯 모션 유형의 측정치

$P_{corrected}$	회전 모션 (°/s)			선형 모션 (cm/s^2)		
	Roll	Pitch	Yaw	Surge	Sway	Heave
0.50 (μ)	0.54	0.60	0.77	6.88	5.00	10.56
0.84 (μ+s)	0.92	1.14	1.42	10.69	9.09	17.24
0.98 (μ+2s)	1.30	1.67	2.06	14.51	13.18	23.91

심리측정함수는 다섯 명의 데이터로 추정되었다. Table 3.1은 측정 결과를 정리한 표이다.

Figure 3.4는 세 축에 대한 회전 모션의 심리측정함수를 나타낸다. Roll 모션은 역치 0.54°/s, 표준 편차 0.38°/s, Pitch 모션은 역치 0.60°/s, 표준 편차 0.54°/s, Yaw 모션은 역치 0.77°/s, 표준 편차 0.65°/s를 갖는다. 개인별 피팅 결과로 분산 분석한 결과, 세 모션 유형 간 역치 차이는 유의하지 않았으나($F(2,8) = 2.70, p = 0.126$) 표준 편차의 경우 유의하였다($F(2,8) = 13.25, p = 0.003$). 사후 검정 결과, Yaw

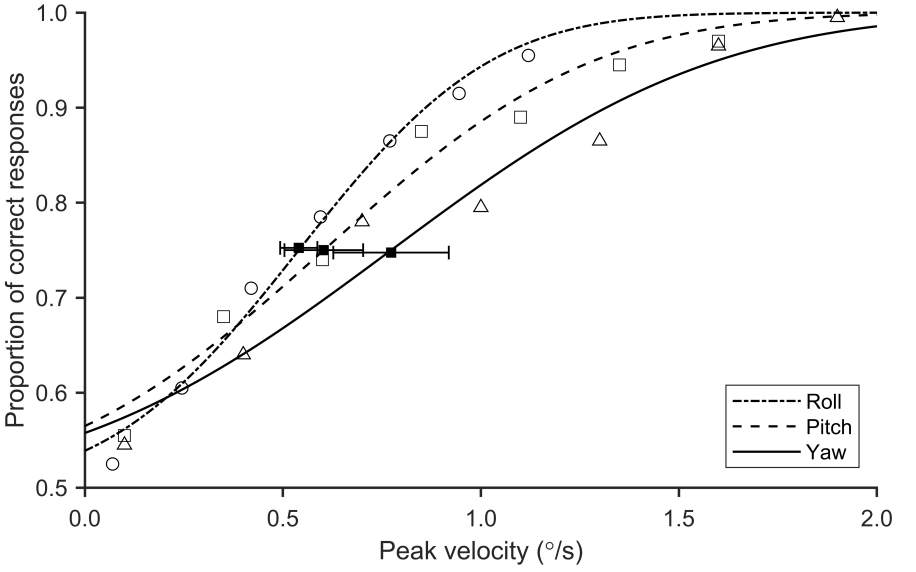

Figure 3.4: 회전 모션의 심리측정함수. −·−: Roll, $\mu = 0.54 \pm 0.05$°/s, $s = 0.38$°/s, RMSE = 0.02; −−: Pitch, $\mu = 0.60 \pm 0.10$°/s, $s = 0.54$°/s, RMSE = 0.03; −: Yaw, $\mu = 0.77 \pm 0.15$°/s, $s = 0.65$°/s, RMSE = 0.03. 오차 막대는 평균 값의 95% 신뢰 구간을 나타낸다. 오차 막대의 가시성을 위해 세로로 0.01 미만의 간격을 두어 표시하였다.

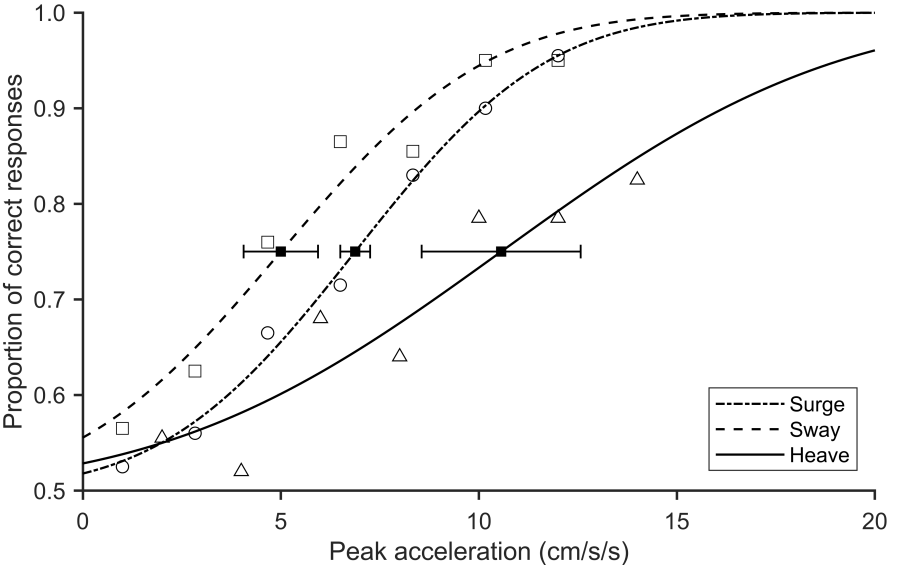

Figure 3.5: 선형 모션의 심리측정함수. $-\cdot-$: Surge, $\mu = 6.88 \pm 0.38\text{cm/s}^2$, $s = 3.82\text{cm/s}^2$, RMSE = 0.02; $--$: Sway, $\mu = 5.00 \pm 0.94\text{cm/s}^2$, $s = 4.09\text{cm/s}^2$, RMSE = 0.04; $-$: Heave, $\mu = 10.56 \pm 2.01\text{cm/s}^2$, $s = 6.68\text{cm/s}^2$, RMSE = 0.05. 오차 막대는 평균 값의 95% 신뢰 구간을 나타낸다.

모션의 표준 편차가 Roll 모션의 표준 편차보다 유의하게 큼을 보였다($p = 0.014$). 또한 나머지 쌍들인 Pitch 모션과 Roll, Yaw는 유의하게 차이 나지 않았다(각각 $p = 0.071; p = 1$).

Figure 3.5는 세 축에 대한 회전 모션의 심리측정함수를 보인다. Surge 모션은 역치 6.88cm/s^2 표준 편차 3.82cm/s^2, Sway 모션은 역치 5.00cm/s^2, 표준 편차 4.09cm/s^2. Heave 모션은 역치 10.56cm/s^2, 표준 편차 6.68cm/s^2를 보인다. 분산 분석 결과, 회전 모션과 달리 역치에서 모션 유형이 유의하였으며($F(2,8) = 16.98, p = 0.001$), 표준 편차에서는 유의하지 않았다($F(2,8) = 4.41, p = 0.051$). 사후 검정

결과, Heave 모션의 역치가 Surge, Sway의 역치보다 유의하게 큼을 보였으며(각각 $p = 0.018; p = 0.021$), Surge와 Sway 모션 사이에는 역치 차이가 유의하지 않았다 ($p = 0.525$).

Figure 3.4과 Figure 3.5에 표시된 오차 막대는 역치 파라미터 피팅의 95% 신뢰 구간을 나타낸다. 분산 분석 결과와 유사하게 회전 모션은 구간이 서로 겹치나 선형 모션은 구간이 서로 겹치지 않는다. 모든 피팅의 평균 제곱근 편차(RMSE)는 0.05 미만을 보인다.

3.4 토의

모션 유형 별 전정 감각의 절대 역치와 민감도를 정량화하기 위해 심리측정함수가 측정되었다. 동일 자극 조건을 여러 번 반복 측정하는 Constant stimuli 방법을 이용하여 모든 자극 세기에서 신뢰성 높은 결과를 얻고자 하였다. 측정 결과, 회전과 선형 모션 모두 수직축의 모션이 다른 축 모션보다 절대 역치가 높았다. 특히, 회전 모션의 경우 Yaw 모션의 표준 편차는 Roll 모션과 유의한 차이를 보였으며 ($p = 0.014$), 선형 모션의 표준 편차는 낮은 유의 확률 값으로 가능성을 보인다 ($p = 0.051$). 또한 회전과 선형 모션에 상관없이 가로축 모션보다 세로축 모션이 더 표준 편차가 컸다.

3.4.1 전정 절대 역치

심리측정함수는 회전 모션 중 Yaw 모션에서만 보고된 적 있으나, 서로 다른 실험 설계와 분석으로 인해 동일 선상에서 비교되기 어렵다. 본 실험과 동일한 모션 개형을 이용한 연구에서는, 모션의 좌우 방향에 따라 각각 $1.46 \pm 2.30°/s$, $1.53 \pm 2.64°/s$로 보고하였다 [7]. 이 결과는 1 Hz 미만인 모션 주파수가 포함된 결과이며, 역치와 표준 편차 모두에서 3.3 절의 결과보다 값이 크다. 모션의 주파수가 낮아질수

록 지각이 어려워진다는 결과 [8, 15]와 일치한다. 한편, 각가속도가 일정한 모션이 이용된 경우, 개인별 표준 편차는 2.82°/s^2, 1.26°/s^{2}로 보고되었다 [10]. 두 측정치는 각가속도 단위로 변환된 3.3 절의 표준 편차 2.03 (1.32−2.74)°/s와 유사한 값을 보이나, 각가속도로 표현된 데이터를 로그 스케일로 변환한 후 피팅하는 등 분석 방법에 차이가 있다.

선형 모션의 경우 두 편의 연구에서 심리측정함수가 보고되었으며, 이들 모두 본 연구와 동일한 모션 개형, 주파수를 이용하였다. Surge, Sway, Heave 순으로 3.0 ± 3.2cm/s^2, 2.6 ± 1.6cm/s^2, 8.4 ± 9.3cm/s^2 [8], Sway와 Heave는 각각 6.3 ± 2.5cm/s^2, 9.7 ± 3.4cm/s^{2}로 측정되었다 [9]. 절대적인 결과치는 서로 어느 정도 차이를 보이나, 수직축의 모션이 가로축/세로축의 모션보다 높은 역치를 보이고 있다. 또 가로축과 세로축 모션을 비교했을 때 세로축 모션인 Sway가 더 낮은 역치를 보인다. 이러한 양상은 본 실험 결과에서도 동일하게 나타났다.

3.4.2 전정 민감도

역치 측정치를 미루어 민감도를 파악해볼 때, 모션 효과는 가로축 모션 ∼ 세로축 모션 > 수직축 모션 순으로 효과적으로 제공 가능하다. 회전 모션의 경우, 수직축 모션인 Yaw보다 Roll은 1.4배, Pitch는 1.3배 민감하였다. 선형 모션에서는 Sway는 2.1배, Surge는 1.5배 정도로 Heave보다 민감함을 보였다. Heave는 Yaw에 비해 다른 축 대비 둔감율이 더 높아 모션 효과를 전달하는데 가장 비효과적인 모션 유형이라 할 수 있다. 이러한 추론과 일관되게, 실제 4D 영화들을 보고 파악했었던 모션 효과들에서도 Heave가 현저히 적게 보고되었다.

Heave는 4D 영화 속 낙하 장면과 같이 수직 하강/상승이 표현되는 모션에 직관적으로 매핑되기 쉽다. 하지만 다른 모션 유형들에 비해 사용자에게 둔감하게 지각되며 특히 나이가 증가할수록 둔감해지는 정도가 가파르다 [17]. 모션 지각에

있어 비효과적인 Heave를 대체하고자 Surge, Pitch 등 다른 모션 유형들을 조합하여 보완할 수도 있으나, 영상 속 모션과의 이질감을 고려해서 몰입감이 감소되지 않도록 적절히 고안되어야 할 것이다. 한편, 모션 유형들의 둔감도와 비례하게 별도로 크기를 조정함으로써도 보완될 수 있다. 너무 과하게 조정할 경우 같이 이용된 다른 모션 유형들에게도 마스킹을 일으킬 수 있어 주의되어야 한다.

IV. 모션 주파수에 따른 전정 구별 역치

4.1 연구 목표

이 장에서는 모션 구별에 대한 모션 주파수의 영향을 파악하고자 구별 역치를 측정한다. 모션 효과로 사용되는 범위 내에서 모션 구별을 정량화함으로써 모션 효과/생성 알고리즘 설계에 도움이 되고자 한다. 효과 설계 시 사용되는 자극은 그 세기가 많이 크지 않아 주파수에 따라 역치 변화가 유의하지 않을 수 있다. 모션 세기가 작은 경우의 역치 변화 양상 [19, 22]과 유사하게, 모션 구별 능력은 주파수와 음의 상관을 보일 것이다라는 가설을 세우고 진행하였다.

모션 구별과 관련하여 Pitch, Roll 모두 모션 효과에 자주 이용되는 모션 유형임에도 연구되지 않았다. 5장에서 진행하게될 연구에 도움이 되고자 모션 유형은 Pitch를 대상으로 진행하였다.

4.2 방법

이 절에서는 실험 방법을 네 소절로 나누어 실험 참여자, 모션 자극, 실험 절차, 결과 분석 방법 순으로 기술한다.

4.2.1 참여자

실험에는 남자 아홉, 여자 세 명이 참여하였다. 참여자들의 나이는 만 21−28 세로 평균 24.83 ± 2.48 세이다. 실험 후 참여자마다 한화 2만원이 지급되었다. 기타 설명은 3.2.1 소절 내용과 동일하다.

4.2.2 모션 자극

모션 자극은 사인파 가속도 개형을 이용하였다. 이 개형은 모든 구간에서 불연속적인 부분이 없으며 사람의 자연스러운 머리 움직임을 모방한다 [7, 12].

$$d(t) = -\frac{A}{(2\pi f)^2}\sin(2\pi f t) \tag{4.1}$$

$d(t)$는 식 3.1 $a(t)$을 두 번 적분하여 얻은 식이며, 양방향으로 움직이는 모션으로 식 3.2와 차이가 있다. 각 모션 자극은 최대 가속도 A, 최대 속도 $A/(2\pi f)$, 최대 변위 $A/(2\pi f)^2$를 갖는다. 만약 최대 속도가 동일하다면, 주파수에 의해 최대 가속도와 최대 변위는 달라지게 된다. 예를 들어, 주파수 1 Hz의 모션은 주파수 0.5 Hz의 모션

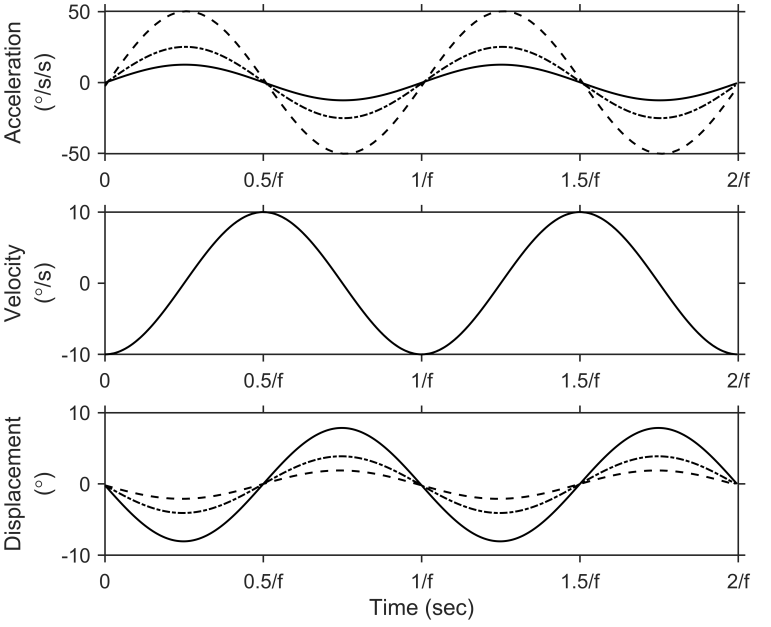

Figure 4.1: 모션 자극의 가속도, 속도, 변위 개형. 모션 주파수 −: 0.2 Hz, −·−: 0.4 Hz, −−: 0.8 Hz. 세 주파수 모두 최대 각속도는 10°/s 이다.

보다 최대 가속도는 2배, 최대 변위는 0.5배를 보인다. 이와 같이 주파수는 두 요소를 반비례하게 또는 비례하게 조절할 수 있는 특징이 있다. 실험에는 주파수 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 Hz가 이용되었으며, 주파수에 따라 자극의 재생 시간 또한 달라졌다.

사용자가 최대 각속도 지점을 모션의 양방향으로 충분히 지각하기 위해 사인파 개형의 한 주기가 아닌 여러 주기가 이용될 수 있다 [18, 19, 20, 21]. 이 실험에서는 실험 소요 시간을 고려하여 두 주기로 설정하였다. Figure 4.1은 양방향 모션 자극 $0 \leq t \leq 2/f$의 가속도, 속도, 변위를 보인다.

모든 모션 자극은 원점에서 시작해서 최대 변위에 도달하고 되돌아오기를 양방향으로 두 번 반복한다. 이러한 자극은 기준 자극과 비교 자극으로 나누어져 쌍으로 제시된다. 기준 자극과 비교 자극은 서로 동일한 주파수를 가지나 최대 각속도가 다르다. 기준 자극에는 최대 각속도 10°/s 모션이, 비교 자극에는 최대 각속도 5−10°/s로 기준 자극보다 작은 세기가 이용되었다. 기준 자극의 최대 각속도는 모션 플랫폼의 구동 범위 내에서 모션 효과로 이용 가능한 값으로 선택되었다. Figure 4.2는 모션 자극 쌍을 나타낸다.

4.2.3 실험 절차

실험 참여자는 Figure 3.2 환경에서 모션 플랫폼 위 의자에 정자세로 앉아 모션 효과를 받는다. 기타 설명은 3.2.3 소절의 첫 단락과 동일하다.

시간 효율적으로 모션 구별 역치를 측정하고자 2U1D(Two-up one-down) 규칙을 따르는 Adaptive 방법이 이용되었다 [28]. 해당 방법은 실험 도중의 응답을 기반으로 실험자가 설정한 지각 확률 지점에 수렴되도록 한다. 모든 자극 세기가 동일 횟수만큼 반복적으로 제시되기 보다는 특정 자극 세기 근처에 제시 빈도가 집중되어 있다. 2U1D 규칙에서는, 참여자가 연속적으로 두 번 정답을 맞출 경우 비교 자극의 세기는 기준 자극의 세기와 가까워지도록 조정된다. 만약 한 번이라도 오답

을 응답할 경우 비교 자극의 세기는 기준 자극 세기와 멀어지도록 조정된다. 이와 같이 비교 자극은 참여자의 응답에 따라 기준 자극과 가깝거나 멀도록 진동하면서 반전(Reversal)을 생성한다. 해당 규칙에 따르면, 기준 자극보다 0.29 확률로 크다 또는 0.71 확률로 작다고 지각하는데 필요한 자극 세기를 의미한다 [28].

초기의 비교 자극은 5−6°/s 사이 무작위 값으로 최대 각속도가 설정되었다. 다음 시도에서 비교 자극의 세기가 바뀌어야 할 때 3, 6 번째 반전을 기점으로 0.8°/s,

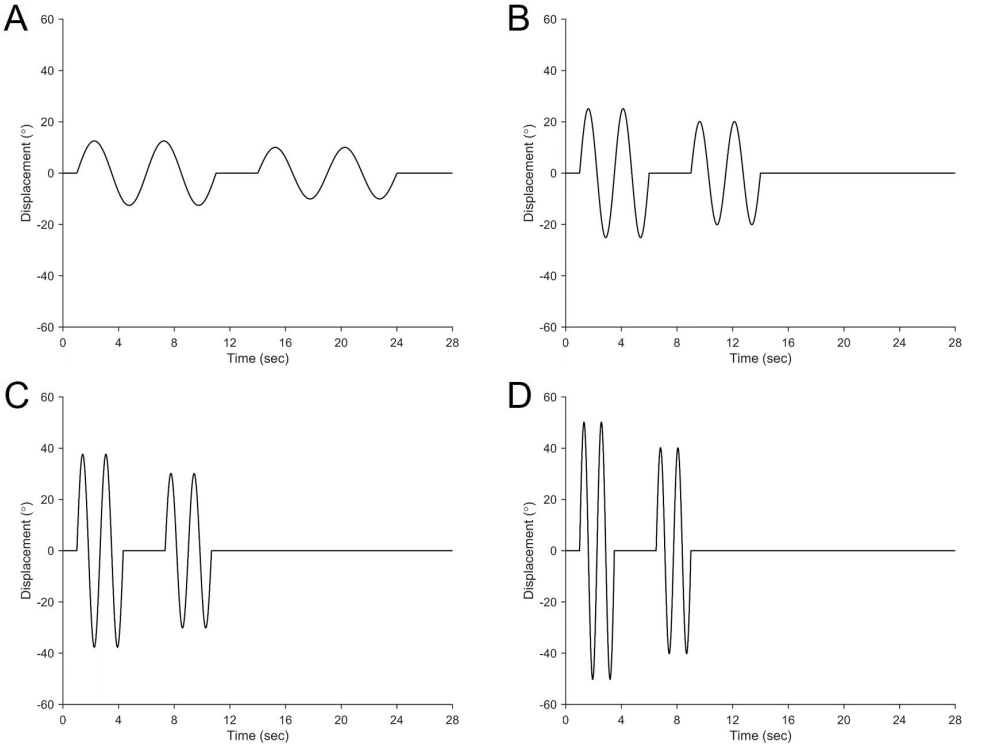

Figure 4.2: 모션 자극 쌍. 3초 간격을 두고 기준 자극과 비교 자극이 재생된다. A: 0.2 Hz, B: 0.4 Hz, C: 0.6 Hz, D: 0.8 Hz. 두 자극의 최대 각속도는 각각 10°/s, 8°/s를 보인다.

0.4°/s, 0.2°/s 만큼 변경되어 제시되었다. 만약 변경된 비교 자극이 기준 자극보다 큰 경우, 변경 전 세기에서 기준 자극 세기까지 차이의 절반만 증가시킨다. 이는 역치에 근접한 자극 세기에서 두 자극이 잘 구별되지 않아 발생한 경우로, 비교 자극이 기준 자극을 넘어가는 것을 방지한다. 실험은 10번째 반전을 발생시킨 자극을 마지막으로 종료된다. 실험에 이용한 증감 크기, 반전 수 등은 사전 실험으로 비교 자극의 수렴 속도와 정밀도를 고려하여 선택되었다.

실험은 각 모션 주파수를 하나의 블록으로, 실험 참여자마다 Balanced Latin Square [29] 순서로 블록을 제시하였다. 각 블록의 소요 시간은 10−20분으로, 블록 간 모션 재생에 필요한 시간이 서로 달라 소요되는 시간이 달랐다. 실험 참여자가 태스크를 수행한지 30−40분이 초과되었을 경우, 10분 정도의 휴식을 취하도록 권장하였다. 전체 실험은 휴식을 포함하여 1시간 반을 초과하지 않았다. 만약 참여자가 모션 멀미를 호소한 경우 실험은 일시 중단한 후 휴식을 부여하였다.

매 시도마다 참여자는 두 개의 양방향 회전 모션을 3초 간격을 두고 받는다 (2-Interval). 두 자극이 모두 제시된 후 참여자는 게임 컨트롤러의 버튼을 이용하여 세기가 더 큰 모션으로 보고한다. 응답은 기준 자극과 비교 자극 둘 중 하나로만 가능하다. 두 세기가 비슷하여 차이가 지각되지 않을 경우에도 2AFC를 따라 강제 선택해야 한다. 모션 자극 쌍을 재생한 후 모션 플랫폼은 항상 원점에서 정지하여, 별도의 복귀 모션은 필요하지 않았다.

4.2.4 분석 방법

모든 데이터 분석은 MathWorks 사 MATLAB R2017b에서 구현된 프로그램으로 수행되었다. 구별 역치는 전체 반전들 중 마지막 반전 4개의 산술 평균 값으로 계산되었다. 유의성 파악을 위해 One-way repeated measures ANOVA를 시행하였으며, 통계 분석 시 유의 수준 α는 0.05를 이용하였다.

주파수 간 개형을 비교하고자 자극 세기 별 제시된 빈도와 심리측정함수를 구하였다. 참여자들의 데이터를 모은 후, 평균 μ과 표준편차 s로 정의되는 정규 분포의 누적 분포 함수로 피팅하였다. 함수는 0−1 사이 확률을 가진다. Adaptive 방법을 따라 측정되는 지각 데이터는 Constant stimuli 방법과 달리 그룹 되어있지 않아 0과 1 사잇값이 아닌 0 또는 1로 나타내어진다(3.3 절 Figures 참고). 이러한 데이터들은 별도의 그룹화 없이 피팅에 이용되었다. 이때, 심리측정함수 피팅에 사용되는 Adaptive 절차의 시도 수가 50을 넘지 않을 경우, 무한한 기울기를 보일 가능성이 있다 [30]. 따라서, 개인별 데이터에서 얻어진 역치들의 평균이 아닌 모아진 데이터의 역치로 나타낸 후 비교하였다. 또한 동일한 이유로 개인별 함수로부터 계산된 역치는 신뢰할 수 없어 t-검정과 같은 유의성 분석은 별도로 진행하지 않았다.

4.3 결과

Figure 4.3은 2U1D 규칙으로 진행된 비교 자극의 세기 변화를 보인다. 실험 참여자가 한 블록을 수행하는데 평균 40.52 ± 6.22 개의 시도가 필요하였다. 수렴에 필요한 시도 수는 주파수에 따라 달라지지 않았다($F(3, 33) = 1.32, p = 0.283$). 참여자들로부터 주파수 별로 450−500 시도 정도의 데이터가 모아졌으며, 이는 2AFC Adaptive 방법으로도 정확도 있는 심리측정함수를 나타낼 수 있다 [30]. Figure 4.4는 2U1D 규칙에 따라 제시된 비교 자극의 제시 빈도를 보인다. 주파수 0.2, 0.4 Hz의 경우 9−9.5°/s, 0.6, 0.8 Hz의 경우 8.5−9°/s 자극 세기를 나타내는 구간이 가장 제시 빈도가 높았다.

구별 역치는 주파수가 증가할수록 증가하였다. 수렴되어가는 반전들로 계산된 역치는 0.2, 0.4 Hz일 때 0.96°/s, 0.6 Hz와 0.8 Hz의 경우 각각 1.08°/s, 1.20°/s를 보였다. 참여자 간 표준 편차 또한 0.45−0.54°/s 범위 내에서 증가하는 양상을 보였다.

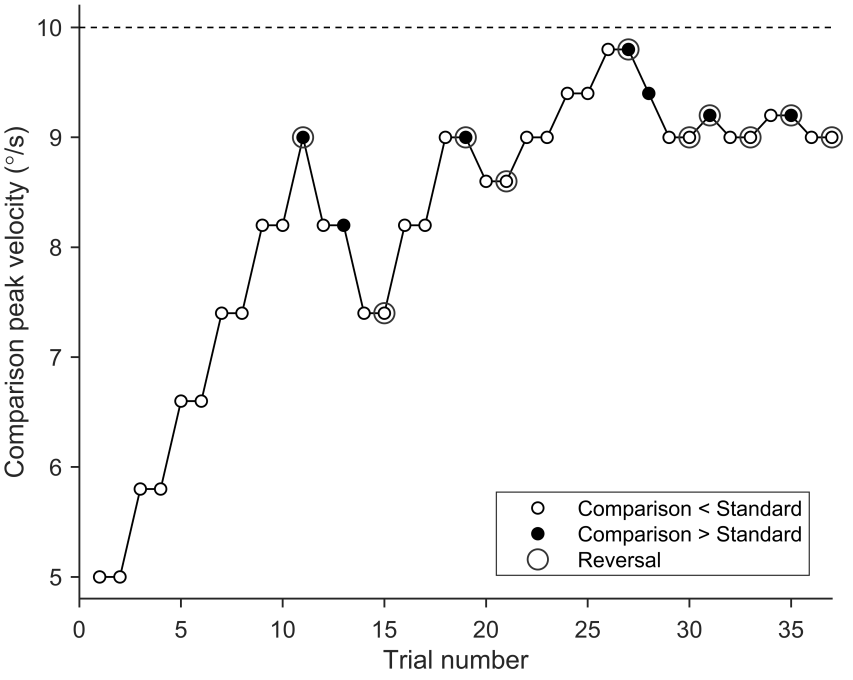

Figure 4.3: 2U1D 규칙을 따르는 비교 자극 세기 변화. 흰 원은 비교 자극이 기준 자극보다 세기가 작다고 응답한 경우를, 검은 원은 그 반대로 응답한 경우를 의미한다. 원이 겹쳐진 경우 해당 시도에서 반전이 일어났음을 의미한다. 종료 조건인 10 번의 반전을 보이는데 37 시도가 소요되었다.

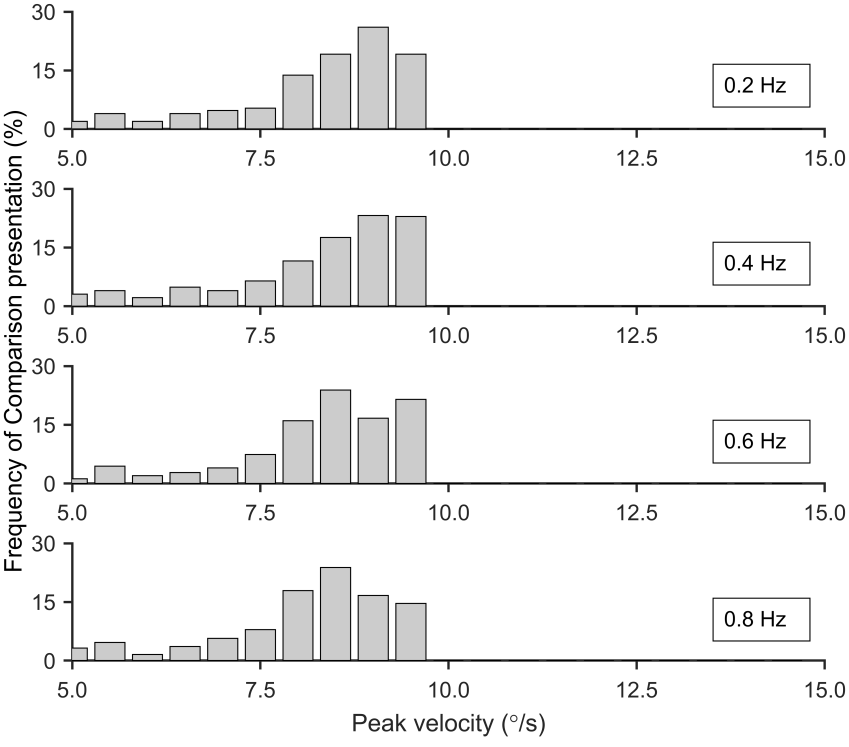

Figure 4.4: 모션 주파수 별 비교 자극의 제시 빈도

측정된 역치는 0.42 기울기를 갖는 선형 함수로 표현 가능하였다(R^2=0.89). 주파수에 따라 구별 역치가 달라지는 결과를 보였음에도 분산 분석 결과로는 유의하지 않았다($F(3, 33) = 0.74, p = 0.536$).

심리측정함수로 표현된 경우, 반전으로 계산된 수치 값과 유사하였다. 0.2, 0.4 Hz는 1.00°/s, 0.4, 0.6 Hz는 0.95°/s, 0.8 Hz는 1.12°/s의 구별 역치를 보였다. Figure 4.5는 그림 Figure 4.4 제시 빈도를 가지는 데이터로 구한 심리측정함수를 보인다. Figure 4.6는 위 결과를 나타내는 그래프이다.

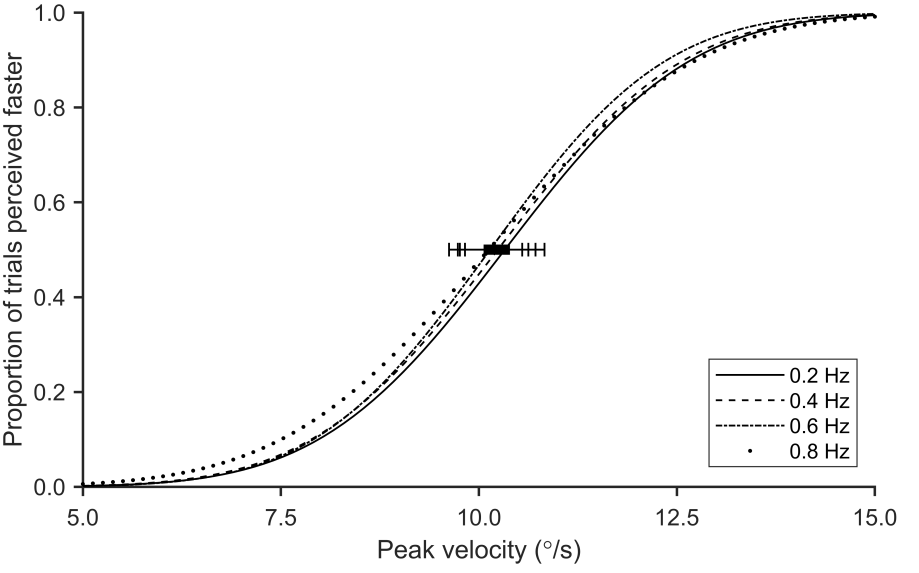

Figure 4.5: 그림 4.5 모션 주파수 별 심리측정함수. −: 0.2 Hz, μ=10.33 ± 0.50°/s, s=1.84°/s; −−: 0.4 Hz, μ=10.24 ± 0.48°/s, s=1.84°/s; −·−: 0.6 Hz, μ=10.14 ± 0.41°/s, s=1.74°/s; ··: 0.8 Hz, μ=10.12 ± 0.50°/s, s=2.05°/s. 오차 막대는 평균값의 95% 신뢰 구간을 나타낸다.

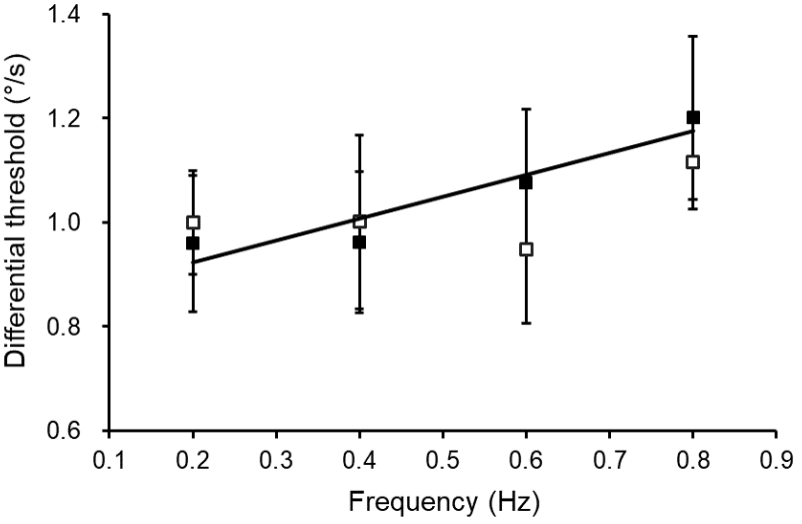

Figure 4.6: 모션 주파수 f에 따른 구별 역치 d. –■–: 마지막 4개의 반전으로 계산된 평균 구별 역치, 선형 회귀 $d = 0.42f + 0.84$, $R^2 = 0.89$; □ : 심리측정함수로 계산된 구별 역치. 오차 막대는 평균의 표준 오차(±1 SEM)를 나타낸다.

4.4 토의

모션 주파수는 사람의 모션 지각에 영향을 미치는 요소임에도 충분히 연구되지 않았다. 이 장에서는 기준 자극을 모션 효과로 사용되는 세기로 설정한 후 주파수에 따른 구별 역치 변화를 알아보았다. 구별 역치는 2U1D 규칙으로 진행되는 Adaptive 방법으로 측정하였다. 실험 결과, 주파수가 증가할수록 구별 능력이 감소하는 경향을 보이긴 했으나 그 차이가 유의하지는 않았다. Surge 모션 50cm/s^2 [19], Yaw 모션 15°/s [22]에서 또한 일관된 결과를 보였다.

회전 모션의 경우 구별 역치는 Yaw 모션에 대해서만 보고되었다. 본 실험의 기준 모션 세기 10°/s와 동일한 조건은 측정되지 않았으나, 자극 세기에 따른 역치 변화를 나타내는 멱함수에 따르면 2.06°/s [20], 3.04°/s [21]이다. 두 연구는 모두 주파수 0.5 Hz로 실험하였다. 본 실험 결과인 Pitch 모션의 경우 0.2−0.8 Hz에 대해서 평균 1.05°/s 구별 역치를 갖으며, Yaw 모션보다 높은 역치를 보인다. 두 모션 유형 간 모션 지각 능력의 우열 관계는 3.3 절의 역치 결과에서도 관찰된다.

정리하자면, 작은 세기로 생성된 모션 효과에서는 같은 시간 내 반복 빈도가 증가할수록 사용자가 모션을 구별하기 어려워한다고 해석할 수 있다. Surge 모션에서는 모션 주파수가 다른 경우 모션 세기에 따른 구별 능력 감소율(Weber's fraction)이 서로 차이를 보였다 [19]. 이러한 결과를 미루어 볼 때 두 요인 간에 상호작용이 있을 수 있으므로, 모션 효과로 이용되는 모든 세기 구간에 대해서 사용자의 구별 능력이 어떠한지 추후 파악해볼 필요가 있다. 만약 모션 세기에 상관없이 주파수 증가가 사용자의 모션 구별 능력을 저하시킨다면, 걷는 모션보다 달리는 모션에서 세기 변화에 유의해서 설계해야할 것이다.

V. 시각과 전정 감각의 통합

5.1 연구 목표

사용자는 모션 효과 지각 시 시각과 전정 감각을 주로 이용한다. 각 감각기에서 얻어진 정보는 동일 자극을 추정하고자 제공되는 정보로 서로 겹치게 되는데, 이 경우 사용자의 뇌는 중복된 정보를 버리지 않고 하나의 지각 결과로 통합한다 (Cue integration). 이 장에서는 이 과정을 설명할 수 있는 Maximum Likelihood Estimation(MLE) 모델 [2]을 4D 라이드 컨텐츠에 적용하고자 한다. 이로부터 4D 경험 시 두 감각 간의 기여 관계를 파악함으로써, 실제 지각 결과는 어떤 감각 정보를 우위로 결정되는지 알아보고자 한다. 모션 효과 저작에 주로 이용되는 Pitch 모션의 경우, 다중 감각으로 연구된 바 없다. 실험 진행에 앞서, Pitch 모션으로 자극 세기를 조절한다면 같은 회전 모션 중 하나인 Yaw 모션과 유사하게 시각 우위를 보일 것이다라는 가설을 세웠다.

5.2 방법

이 절에서는 실험 방법을 여섯 소절로 나누어 차용 모델, 실험 참여자, 모션 자극, 장비, 실험 절차, 결과 분석 방법 순으로 기술한다.

5.2.1 Maximum Likelihood Estimation 모델

감각 정보로부터 지각 결과를 추정하는데 Bayes 정리 기반 모델로 설명 가능하다. 실제 물리 자극 S는 여러 감각기로부터 정보를 얻어 추정된 자극 $\hat{S}$로 받아들여진다. 대개의 경우 추정치는 지각되는 동안 개입되는 노이즈로 인해 실제 자극 값

보다 조금 크거나 작은 오차가 발생된 값을 보이게 된다($S \neq \hat{S}$). 손상되지 않은 이상적인 추정치는 자극 세기 S에만 확률 1을 보이는 분포를 가지는 반면, 손상된 추정치는 노이즈가 개입된 정도가 심할수록 분산이 커지는 Gaussian 분포 형태를 띨 것이라고 가정된다.

추정치는 실제 관측 I를 보고 얻어진 우도(Likelihood) $P(I \,|\, S)$와 사전 지식(Prior probability) $P(S)$, $P(I)$으로부터 생성된 사후 확률(Posterior probability) $P(S \,|\, I)$ 분포를 의미한다 (식 5.1). 사후 분포는 해당하는 사후 확률 값만큼 실제로 가해진 자극 세기일 것이라고 추정하는 우도 함수 L이라 여길 수 있다 [31]. 모델은 우도 함수에서 최대값을 보이는 자극 세기 $\hat{S}$로 최종 지각할 것이라 예측한다 [2, 32].

$$P(S \mid I) = \frac{P(I \mid S)\, P(S)}{P(I)} \tag{5.1}$$

$$L(S \mid I) = \prod_i P(S \mid I_i) \tag{5.2}$$

다수의 감각 신호들이 참여한 경우, 통합된 우도 함수 $L(S \,|\, I)$는 식 5.2와 같이 각 감각 신호의 사후 확률 $P(S \,|\, I_i)$의 곱으로 간주된다. 이 식은 이론적으로 유도된 식은 아니나, 각 감각 정보가 서로 독립이라고 가정된다면 여러 정보를 통합하는데 있어서 그럴듯한 방법이다 [2].

시각과 전정 감각을 이용하여 모션을 지각할 때, 각 감각기로부터 모션 세기에 대한 정보 I_{vi}, I_{ve}를 얻을 수 있다. 두 정보들의 통합 결과인 최종 우도 함수 $L(S \,|\, I_{vi},\, I_{ve})$는 식 5.1, 5.2에 따라 두 우도 $P(I_{vi} \,|\, S)$, $P(I_{ve} \,|\, S)$와 비례하다고 표현 가능하다 (식 5.3). 이와 같이 다수의 정보가 주어진다면 모델은 최종 우도 함수에서 최대 우도를 보이는 세기로 지각할 것이라고 예측한다 [23].

$$L(S \mid I_{vi},\, I_{ve}) \propto P(I_{vi} \mid S)\, P(I_{ve} \mid S) \tag{5.3}$$

두 감각 신호의 우도 함수가 각각 분산 σ_{vi}^2, σ_{ve}^2을 가진다면, 통합된 추정치 $\hat{S}_c$

는 개별 추정치들의 선형 조합으로 표현 가능하다 [32]:

$$\hat{S}_c = w_{vi}\,\hat{S}_{vi} + w_{ve}\,\hat{S}_{ve} \tag{5.4}$$

where

$$w_i = \frac{r_i}{\sum_j r_j} = \frac{1/\sigma_i^2}{\sum_j 1/\sigma_j^2} \tag{5.5}$$

$\hat{S}_c$는 식 5.3의 최종 우도 함수에서 최대 우도를 보이는 자극 세기, w_i와 r_i는 해당 감각 신호에 대한 가중치와 신뢰도를 의미한다. w_i에 대해 부연하자면, 이 값은 참여하는 감각 신호들 간 정규화된 신뢰도로 계산되는데, 해당 추정치를 낳은 우도 함수에 노이즈가 개입한 정도 값 σ_i^2이 이용된다. 모델은 우도 함수의 분산이 큰 경우 해당 함수로부터 야기된 추정치는 그만큼 덜 가중하고, 분산이 작은 경우 더 가중함으로써 두 정보의 추정치를 통합한다.

또, 모델로부터 최종적인 통합 추정치 값 외에 통합된 우도 함수에 개입된 노이즈를 파악할 수 있다. 식 5.6은 통합 추정치에 대한 신뢰도 r_c를 보이는데, 개별 신뢰도들의 합으로 구해질 수 있다 [33]. 이 관계를 분산 값으로 표현한다면 식 5.7와 같이 전개 가능하다.

$$r_c = \sum_j r_j \tag{5.6}$$

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{\sigma_{vi}^2\,\sigma_{ve}^2}{\sigma_{vi}^2 + \sigma_{ve}^2}} \tag{5.7}$$

Figure 5.1 A는 시각과 전정 감각이 동일한 자극 세기를 받았을 경우($S_{vi} = S_{ve}$) 모델에 따른 통합을 보인다. Figure에는 편의상 최대 우도 값 $\hat{S}_i$를 E_i로 표기하였다. 개별 우도 함수 $P(S\,|\,I_{vi})$와 $P(S\,|\,I_{ve})$가 각각 $\hat{S}_{vi}$, $\hat{S}_{ve}$에서 최대 우도를 보인다면, 통합된 최종 우도 함수는 두 값 사이인 $\hat{S}_c$에서 최대 우도를 보일 것이다. 또한 식 5.6에 따라 보다 줄어든 분산을 가지는 우도 함수로 통합될 것이다.

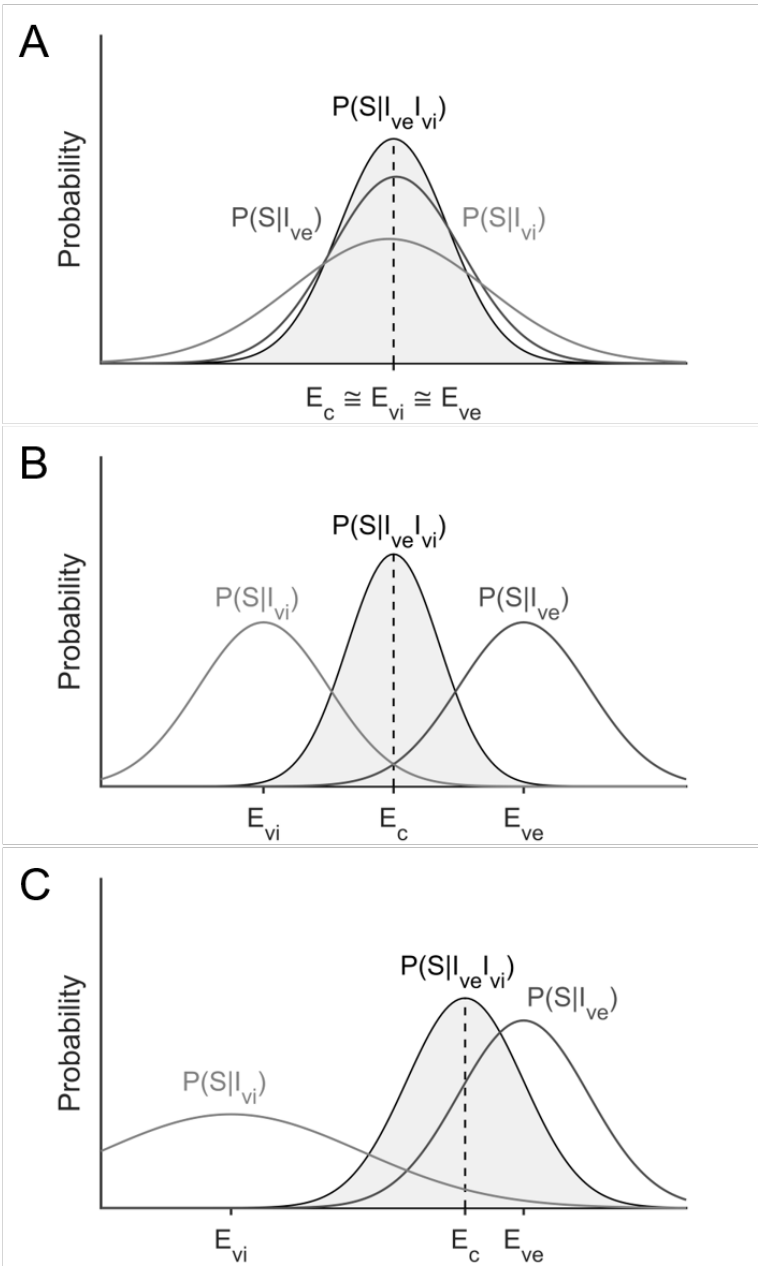

Figure 5.1: 시각과 전정 감각의 통합. A: 감각 간 차이 없음($S_{vi} = S_{ve}$); B: 감각 간 차이 있음($S_{vi} < S_{ve}$), $\sigma_{vi}^2/\sigma_{ve}^2 = 1$; C: 감각 간 차이 있음($S_{vi} < S_{ve}$), $\sigma_{vi}^2/\sigma_{ve}^2 = 4$. E_i는 각 우도 함수에서 최대 우도를 보이는 값을 나타내며(E=Estimated), 글에서 표기한 $\hat{S}_i$와 의미하는 바가 같다.

만약 두 감각기가 서로 다른 추정치를 유발하도록 자극 세기를 다르게 제시한다면, 모델은 개별 추정치들 $\hat{S}_{vi}$, $\hat{S}_{ve}$ 중 더 신뢰도가 높은/우도 함수가 더 작은 분산을 보이는 값에 가깝게 통합한다 (식 5.4). 두 감각 간에 차이가 지각 가능할 정도로 너무 다르다면 감각 통합은 일어나지 않으며 일부 감각 정보는 무시된다 [23]. Figure 5.1 B-C는 두 자극 간에 Δ 만큼 차이가 나는 경우($|S_{vi} - S_{ve}| = \Delta$) 모델에 따른 통합을 보인다. B와 같이 전정 감각과 시각을 동등하게 신뢰한다면, 개별 추정치가 서로 동일하게 가중됨으로써 통합된 우도 함수는 두 개별 우도 함수의 정중앙에 위치하게 된다. 반면, C와 같이 시각보다 전정 감각을 더 신뢰한다면, 모델은 최종 추정치 계산에 전정 감각의 추정치를 더 가중시키며 최종 우도 함수는 전정 감각의 함수에 가까이 위치하게 된다. 식 5.7에서도 알 수 있듯이, C에서는 통합된 우도 함수의 분산이 B보다 더 작아진다는 특징이 있다. B에서는 감각 우위를 보이지 않은 반면, C는 전정 우위를 보인다.

5.2.2 참여자

실험에는 여자 여섯, 남자 네 명이 참여하였다. 참여자들의 나이는 만 19–26 세로 평균 22.6 ± 2.41 세이다. 태스크 수행 시 시각 영상 속 적색과 녹색을 구별할 수 있음을 전제로 진행되므로, 두 색의 색약/색맹이 없는 사람으로 제한되었다. 실험 참여 후 참여자마다 한화 7만 5천원이 지급되었다. 기타 설명은 3.2.1 소절 내용과 동일하다.

5.2.3 장비

참여자는 영상 프로젝터로 투사된 영상을 보면서 모션 플랫폼 위 의자에 앉아 모션 효과를 받았다 (Figure 3.2). 영상은 해상도 = 1024 × 768 pixels, 밝기 = 5000 lm, 명암비 4000:1을 보이는 Panasonic PT-VX501 프로젝터를 사용하여 전

달하였으며, 모션 효과는 이노시뮬레이션 사 6자유도 모션 플랫폼 IMP6-M150으로 재생하였다. 투사되는 화면은 230 × 170 cm 크기로, 모션 플랫폼은 화면에서 2.45m 정도 떨어져 위치한다. 모션 자극을 안정적으로 받기 위해 참여자는 목 고정대와 헤드 밴드를 착용하였다. 모든 실험 조건에서는 참여자가 자극에만 집중할 수 있도록 영상을 제외한 주변 조명을 모두 차단하였다. 또한 시각이 차단되어야 하는 조건에서는 안대를 착용하도록 지시하였다.

5.2.4 모션 자극

모션 자극은 4D 컨텐츠로 잦게 이용되고 있는 롤러코스터 모션으로 선정하였다. 이 소절에서는 모션 자극을 물리적인 모션(모션 효과)와 시각 모션으로 나누어 기술한다. 두 모션은 각각 5.2.3 소절에서 언급한 모션 플랫폼과 영상 프로젝터를 통해 제시되었다.

A. 물리적 모션

실제 롤러코스터 모션과 유사하게 자극을 생성하기 위해 세 가지 모션 유형을 이용하였다. 탈것이 롤러코스터 선로 위를 따라 움직일 때 기울어지는 정도는 회전 모션 중 Pitch로, 선로의 위치 변화는 선형 모션인 Surge, Heave로 나타내었다. 두 선형 모션이 따라 움직이는 축인 세로축과 수직축은 전후면(Sagittal plane)을 이루며, Pitch는 해당 평면에서 회전하는 모션이다 (Figure 2.1). 세 모션 유형 간 관계는 식 5.8과 같이 표현 가능하다.

$$-\tan p(t) = \frac{d\,h(t)}{d\,s(t)} \tag{5.8}$$

$p(t)$는 Pitch, $h(t)$, $s(t)$는 각각 Heave, Surge로 시간 t일 때의 변위 값을 의미한다. 위 식은 Surge와 Heave의 순간 변위 변화율이 Pitch의 각도로 결정된 기울기와 같음을 나타낸다. − 부호는 모션 유형들의 방향을 맞추기 위해 표시되었다. 예를 들어,

Heave가 위로 움직이면서(+) Surge가 앞으로 움직여(+) 도달한 위치는 움직이기 전보다 몸을 뒤로 젖혀 바라볼 수 있다. 이는 Pitch로 볼 때 뒤로 움직이는(−) 모션과 같다.

모션 자극은 모션 유형마다 개별로 개형을 선정한 후 조합하여 생성하였다. Pitch 모션은 식 4.1과 동일하게 생성하였으며, 해당 개형의 최대 각속도를 달리하여 지각 세기를 조절하였다 [7]. 식 4.1에 대한 설명은 4.2.2 소절 첫 단락과 같다. Surge에는 속도 v가 일정하게 유지되는 개형을 이용하였다 (식 5.9). Heave의 경우 식 5.8에 두 모션 개형을 대입하여 구하였다 (식 5.10). c는 각도의 단위를 도에서 라디안으로 바꿔주는 상수 값 $\pi/180$이다.

$$s(t) = v\,t \tag{5.9}$$

$$h(t) = \int -v \tan\left(c\,p(t)\right)\,dt \tag{5.10}$$

세 모션 유형으로 조합된 모션 자극은 기준 자극과 비교 자극으로 나누어져 쌍으로 제시된다. 두 자극은 모두 0.6 Hz로 동일한 주파수를 가지나 Pitch의 최대 각속도가 다르다. 기준 자극에는 최대 각속도 10°/s 모션이, 비교 자극에는 최대 각속도 4−16°/s가 2°/s 간격으로 등분되어 이용되었다. 또, Surge의 속도 v는 1.25 cm/s, Heave의 최대 가속도 0.9e-7–3.5e-7 cm/s^{2}가 이용되었다. 이때 v는 Surge의 최종 변위 값이 모션 플랫폼의 구동 범위를 벗어나지 않도록 설정된 값이다. Heave와 Surge 모션의 최대 가속도 값은 절대 역치 미만으로 지각 세기 조절에는 영향을 미치지 않는다 (3.3 결과 참고). Figure 5.2은 세 모션 유형에 대한 가속도, 속도, 변위 개형을 나타낸다.

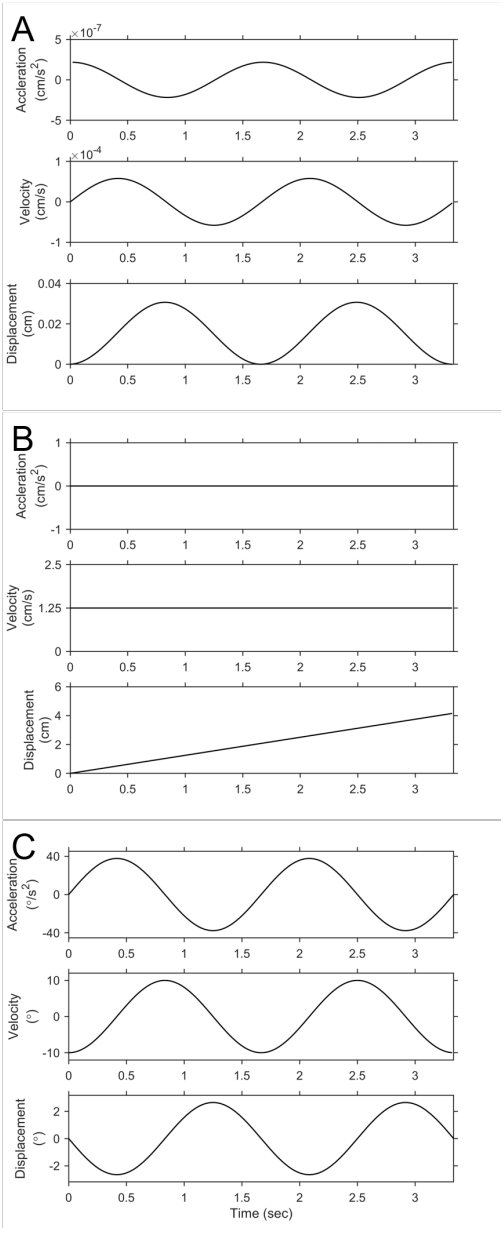

Figure 5.2: 세 모션 유형으로 구성된 롤러코스터 모션의 개형. A: Heave, 최대 가속도 2.2e-7 cm/s^2; B: Surge, 속도 1.25 cm/s; C: Pitch, 최대 각속도 10°/s.

B. 시각 모션

시각으로도 모션 정보를 전달하기 위해 모션 효과와 일관된 정보를 제공하는 영상을 생성하였다. 영상은 1인칭 시점(Point of view 또는 First-person) 샷으로 사용자가 실제 롤러코스터 모션을 탈 때 받을 수 있는 광학 흐름을 담고 있다. 영상 내 롤러코스터의 선로는 Surge, Heave 모션 개형을 이용하여 생성하였으며, 카메라는 선로를 따라 이동하면서 Pitch 모션을 보인다. 배경 지형은 Unity 사의 Asset store에서 무료로 제공받을 수 있는 MicroSplat을 이용하였다.

추가적으로, 실험 조건에 따라 시각 정보에 방해를 줄 수 있도록 영상에 배경보다 주의를 더 끌 수 있는 빨간색 구형의 방해 요소(Distractor)를 개입하였다. 방해 요소 수는 3–12개이며, 영상마다 개수와 위치가 달라진다. 특히, 방해 요소들의 화면상 위치가 영상의 시작부터 끝까지 배경의 흔들림과 상관없이 일정하게 고정되어 있도록 구현되었다. 이는 방해 요소들로부터 모션 정보를 얻는 것을 방지한다. Figure 5.3는 롤러코스터 모션을 보이는 시각 영상이다. 영상 제작에는 Unity 2019.3.14를 이용하였다.

5.2.5 실험 패러다임

참여자는 모션 세기에 대한 비교 태스크를 수행하면서 영상과 모션 효과로부터 얻은 감각 정보들을 통합한다. 해당 태스크에 대한 감각 통합 방식을 알아보기 위해, 다음 세 요인들을 조절하였다 [23]: A. 참여하는 감각, B. 시각 방해의 정도, C. 두 감각 간 정보 차이. A-C 요인들을 조합하여 참여자마다 13개의 실험 조건 모두에 참여하도록 하였다. Table 5.1은 전체 실험 조건들을 보인다.

A 모션 지각 시 참여자가 사용 가능한 감각이다. 참여하는 감각 수에 따라 단일 감각과 이중 감각으로 구분할 수 있다. 단일 감각은 시각 C_{vi}과 전정 감각 C_{ve}

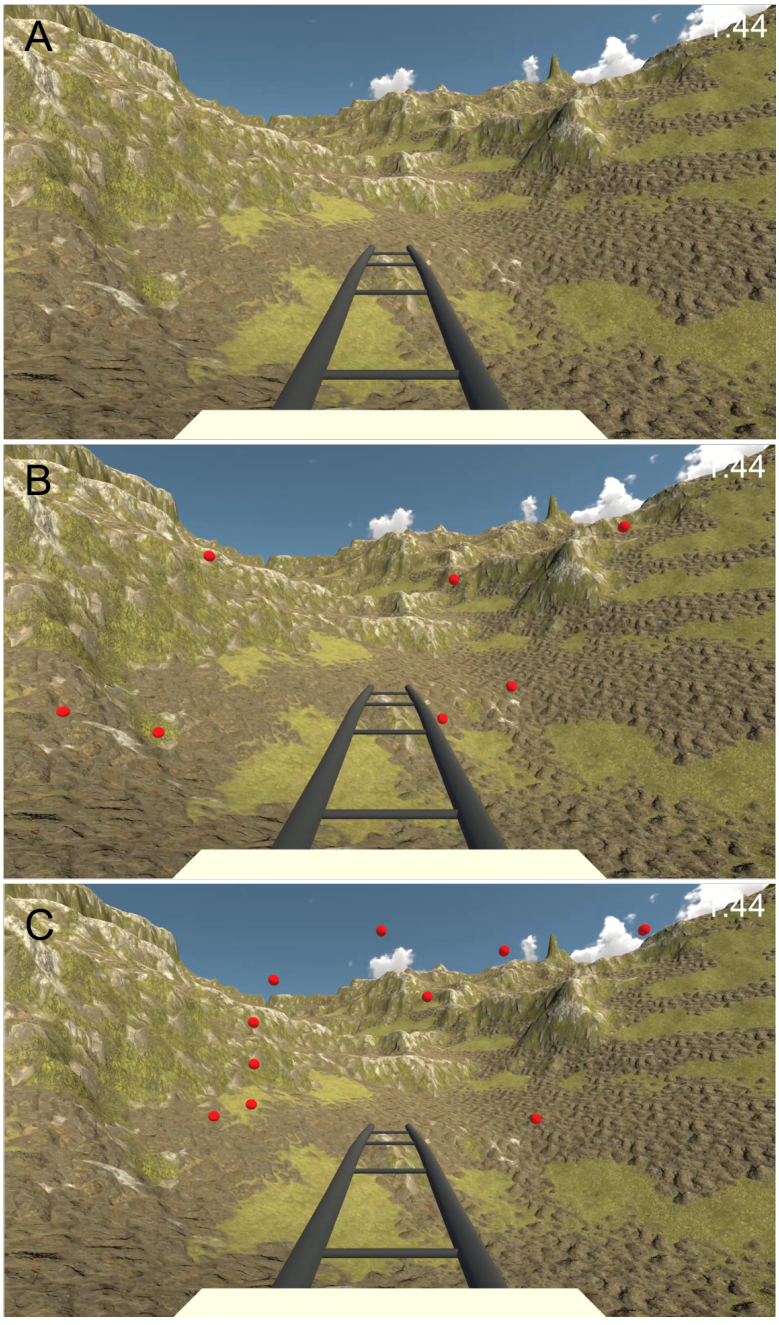

Figure 5.3: 롤러코스터 모션의 시각 영상. A: 방해 요소가 없는 영상, B: 5개 방해 요소가 개입된 영상, C: 10개 방해 요소가 개입된 영상.

을 각각 단독으로 사용하는 경우를, 이중 감각은 두 감각을 동시에 사용하는 경우 C_{vv}를 나타낸다.

B 모션 세기에 대한 시각 정보를 얻는데 방해하는 정도를 의미한다. 이로부터 시각 정보의 신뢰도를 조절하고자 하였으며, 4D 라이드 감상 시 자연스럽게 수행하게 되는 컨텐츠 이해/기억과 유사하게 접근하고자 하였다. 시각 Saliency가 높은 방해 요소를 개입하고 부가적인 태스크를 부여함으로써 정보원으로부터 시각 Attention을 분산시킬 수 있다 [34]. 간단한 Pilot 실험을 통해 방해 요소의 수 세기를 서브 태스크로 선정하였다. 이러한 접근 방법은 4D 라이드 영상에서 흥미 유발 목적으로 등장하는 투사체, 비행 물체 등 방해 요소를 추적하면서 감상하는 사용자 행동과 유사하다고 볼 수 있다. 기존의 시각 모션과 물리적인 모션 간 불일치 정도를 조절하는 방법과는 차이가 있다 [23, 24, 25]. 실험은 방해 요소가 없는 조건 C_{none}, 영상에 등장하는 방해 요소가 5 ± 2개인 조건 C_{mid}, 10 ± 2개인 조건 C_{high}로 진행하였다.

C 두 감각들 간 모션 세기 차이 Δ를 나타낸다($|S_{vi} - S_{ve}| = \Delta$). $\Delta = 0$ 조건에서는 영상 속 시각 모션과 물리적인 모션 효과가 동일한 Pitch 최대 각속도를 보인다. $\Delta \neq 0$ 조건에서는 두 모션의 세기가 Δ만큼 차이 난다. 부연하자면, 이 실험에서는 $\Delta > 0$일 경우 전정 감각보다 시각이, $\Delta < 0$일 경우 시각보다 전정 감각이 더 큰 최대 각속도를 보인다. 만약 차이가 너무 크다면, 두 모션을 별개의 모션으로 지각함으로 인해 감각 통합이 일어나지 않는다 [23, 35]. 이를 방지하기 위해 Δ는 경험 법칙에 따라 구별 역치의 1.5배 미만인 값으로 선택되도록 권고되었다 [36]. 4.3 결과로 얻은 Pitch의 구별 역치 값을 참고하여 $4°$/s로 설정하였다. $S_{vi} = S_{ve} = 10°$/s를 보이는 조건 C_{equal}, $S_{vi} = 12°$/s, $S_{ve} = 8°$/s를 보이는 조건 C_{pos}, $S_{vi} = 8°$/s, $S_{ve} = 12°$/s를 보이는 조건 C_{neg}

가 이용되었다.

Table 5.1: 전체 실험 조건. C_{equal}: $S_{vi} = S_{ve} = 10°/s$; C_{pos}: $S_{vi} - S_{ve} > 0$ ($S_{vi} = 12°/s$, $S_{ve} = 8°/s$); C_{neg}: $S_{vi} - S_{ve} < 0$ ($S_{vi} = 8°/s$, $S_{ve} = 12°/s$).

실험 조건	참여 감각	시각 방해도	Δ	표기 방법
1	전정 감각	-	-	C_{ve}
2	시각	낮음	-	$C_{vi-none}$
3	시각	보통	-	C_{vi-mid}
4	시각	높음	-	$C_{vi-high}$
5	전정 감각 · 시각	낮음	0	$C_{vv-none-equal}$
6	전정 감각 · 시각	보통	4	$C_{vv-mid-pos}$
7	전정 감각 · 시각	높음	-4	$C_{vv-high-neg}$
8	전정 감각 · 시각	낮음	0	$C_{vv-none-equal}$
9	전정 감각 · 시각	보통	4	$C_{vv-mid-pos}$
10	전정 감각 · 시각	높음	-4	$C_{vv-high-neg}$
11	전정 감각 · 시각	낮음	0	$C_{vv-none-equal}$
12	전정 감각 · 시각	보통	4	$C_{vv-mid-pos}$
13	전정 감각 · 시각	높음	-4	$C_{vv-high-neg}$

5.2.6 실험 절차

실험 조건마다 사후 분포의 평균 또는 분산을 파악하기 위해 Constant stimuli 방법을 따라 진행하였다. 기준 자극과 비교 자극 한 쌍으로 구성된 롤러코스터 모션을 70회 무작위 순서로 제시 받는다(7 자극 세기 × 10회 반복). 참여자로 병합할 경우 하나의 자극 세기는 100회의 지각 반응으로 이루어진다.

실험은 하루에 4–5개 블록씩 6일에 걸쳐 진행되도록 구성하였다. 하나의 블록에는 동일한 실험 조건으로 이루어진 35개의 시도에 응답이 필요하며, 블록마다

10분 정도가 소요된다. 감각 충돌이 발생하는 조건 C_{vv-pos}, C_{vv-neg}의 경우, 차이가 나는 자극에 대해 지속적으로 노출되면 시운동성 적응(Visuomotor adaptation)[1]을 야기할 수 있다. 이를 방지하고자 시각 방해도 조건 별로 무작위 순서로 섞었다. $C_{vv-none}$, C_{vv-mid}, $C_{vv-high}$ 각각에 대해서 6개의 블록으로 나누어져 제시되었다. 참여자는 블록 두 개를 수행하거나 태스크를 수행한지 30분이 초과되었을 경우 10분 정도의 휴식을 권장하였다. 전체 실험은 휴식을 포함하여 50–70분씩 총 6시간 40분 정도가 소요되었다.

매 시도마다 참여자는 한 쌍의 롤러코스터 모션을 받는다(2-Interval). 두 모션 자극이 모두 제시된 후 게임 컨트롤러의 버튼을 이용하여 세기가 더 큰 모션으로 보고한다. 응답은 기준 자극과 비교 자극 둘 중 하나로만 가능하며, 두 세기가 비슷하여 차이가 지각되지 않을 경우에도 2AFC를 따라 강제 선택해야 한다. 부가적으로, C_{mid}, C_{high} 조건에서는 모션에 대해 얻을 수 있는 시각 정보량을 감소시키기 위해 영상에서 방해 요소들의 수를 세는 태스크를 수행한다. 주 태스크의 응답과 마찬가지로 두 자극이 모두 제시된 후에 숫자 두 개를 무선 키패드로 보고한다. 이후 모션 플랫폼은 2.5 cm/s 속도로 정위치로 복귀함으로써 모든 모션 자극이 동일 환경 상태에서 시작될 수 있도록 한다.

5.2.7 분석 방법

모든 데이터 분석은 MathWorks 사 MATLAB R2017b에서 구현된 프로그램으로 수행되었다. 분석은 세 단계로 구분할 수 있다: 지각 데이터로부터 심리측정함수 도출, MLE 모델에 따른 예측, 실제 결과와 예측치 간 비교. MLE 모델과 관련된 분석은 [23, 36]를 참고하여 진행하였다.

[1]반복적이고 지속되는 일정한 자극으로 인해 시각 정보와 물리적인 움직임을 동기화하는 감각 수용체 반응이 감소하는 현상

실험 참여자의 지각 데이터로부터 심리측정함수를 도출하였다. 피팅 모델로는 0–1 확률을 갖고 평균 μ, 표준편차 s로 정의되는 정규 분포의 누적 분포 함수를 이용하였다. 피팅의 변동성을 나타내기 위해 피팅 파라미터마다 Bootstrap을 이용하였다. 피팅 시 발생하는 잔차들을 이용하여 데이터 셋들을 생성한 후 피팅하는 과정을 10,000회 반복하였다(Residual resampling). 이를 통해, 실험 조건 별로 피팅의 95% 신뢰 구간을 얻었다. 산출된 두 파라미터 μ, s는 다음과 같은 의미를 가진다. μ는 사후 분포에서 가장 높은 확률을 보이는 값으로 (5.2.1 참고), 해당 자극 세기 지점에서는 비교 자극을 기준 자극과 동일하다고 지각한다(Point of subjective equality). s는 함수에서 0.84 확률로 구별하는 자극 세기와 PSE 사이의 세기 차이를 나타낸다.

앞서 얻은 실험 조건 별 피팅 파라미터 μ, s를 이용하여, MLE 모델에 따른 모델 예측치를 구하였다. 모델은 개별 추정치 $\hat{S}_i$에 대한 가중치 w_{i-pred}와 최종 추정치 $\hat{S}_c$를 낳은 우도 함수의 노이즈 σ_{c-pred}를 예측할 수 있다 (5.1 절 표기 참고). 우도 함수의 노이즈는 심리측정함수의 표준 편차 s를 $1/\sqrt{2}$배 하여 얻을 수 있다 [23]:

$$\sigma^2 = \frac{s^2}{2} \tag{5.11}$$

개별 우도 함수에 개입된 노이즈 σ_{vi}^2, σ_{ve}^2는 실험 조건 C_{vi}, C_{ve}에서 측정한 s를 식 5.11에 대입하여 계산하였다. 이 값들 σ_{vi}^2, σ_{ve}^2로부터 감각 신호마다의 예상 가중치 $w_{vi-pred}$, $w_{ve-pred}$ (식 5.5), 통합된 우도 함수의 노이즈 예상 값 σ_{c-pred}을 구하였다 (식 5.7).

이어서, 앞서 계산한 예상 가중치들을 이용하여, 감각 간 차이를 발생시킨 조건 C_{pos}, C_{neg}에서 예상되는 통합 추정치 $\hat{S}_{c-pred}$를 알아볼 수 있다 (식 5.4). 이 값은 C_{pos} 조건에서는 $8\,w_{vi-pred} + 12\,w_{ve-pred}$로, C_{neg} 조건인 경우 $12\,w_{vi-pred} + 8\,w_{ve-pred}$로 계산되었다.

모델로부터 예측된 값과 실제 결과치를 비교하기 위해 Repeated measures ANOVA를 시행하였다. 기여 가중치 w_{pred}와 이중 감각 참여 시의 노이즈 σ_{c-pred}에 대해서 각각 Two-way로 진행하였다. 또한 4D 컨텐츠에 맞추어 사용한 시각 방해의 유의성, 감각 충돌에 대한 영향을 One-way로 검사하였다. 통계 분석 시 유의 수준 α는 0.05를 이용하였다. 결과가 유의한 경우 Bonferroni-t 사후 검정을 행하였다.

5.3 결과

단일 감각만을 이용하여 모션 세기를 구별한 경우, 시각보다 전정 감각이 더 작은 노이즈를 보였으며 시각 방해도가 증가할수록 노이즈가 증가하였다. Figure 5.4는 단일 감각기에서 감각 정보를 얻을 경우의 심리측정함수를 나타낸다. 전정 감각 조건 C_{ve}의 노이즈는 시각 방해가 없는 시각 조건 $C_{vi-none}$의 노이즈와 서로 차이 나지 않았으며(양측 t-검정, $p = 0.485$), 방해가 있는 시각 조건의 노이즈와는 차이가 있었다(양측 t-검정, C_{vi-mid}, $p = 0.042$; $C_{vi-high}$, $p = 0.012$). Figure 5.5은 단일 감각에 대한 노이즈와 참여자들의 편차로 계산된 신뢰 구간을 보인다. 분산 분석 결과, 방해 요소와 서브 태스크를 이용한 방법은 영상으로부터 시각 정보를 얻는 과정을 유의하게 방해하였다($F(2, 18) = 6.454, p < 0.01$).

Figure 5.6은 이중 감각 조건 별로 피팅한 심리측정함수를 나타낸다. 두 감각기로부터 정보를 얻은 경우 C_{vv}, 세 시각 방해도 조건 모두에서 시각만 참여한 조건 C_{vi}보다 감소된 노이즈를 보였다. 반면, 전정 감각만 참여한 조건 C_{ve}의 노이즈와 두 감각이 통합된 조건 C_{vv}의 예상 노이즈 σ_{c-pred}보다 큰 값을 보였다. 실측 값들은 시각 방해가 없는 경우 서로 차이를 보이지 않았으나(양측 t-검정, $C_{vi-none}$, $p = 0.668$; C_{ve}, $p = 0.657$), 방해된 조건에서는 이중 감각의 노이즈임에도 전정 노이즈보다 컸다(양측 t-검정, C_{vv-mid}, $p = 0.126$; $C_{vv-high}$, $p = 0.039$). Figure

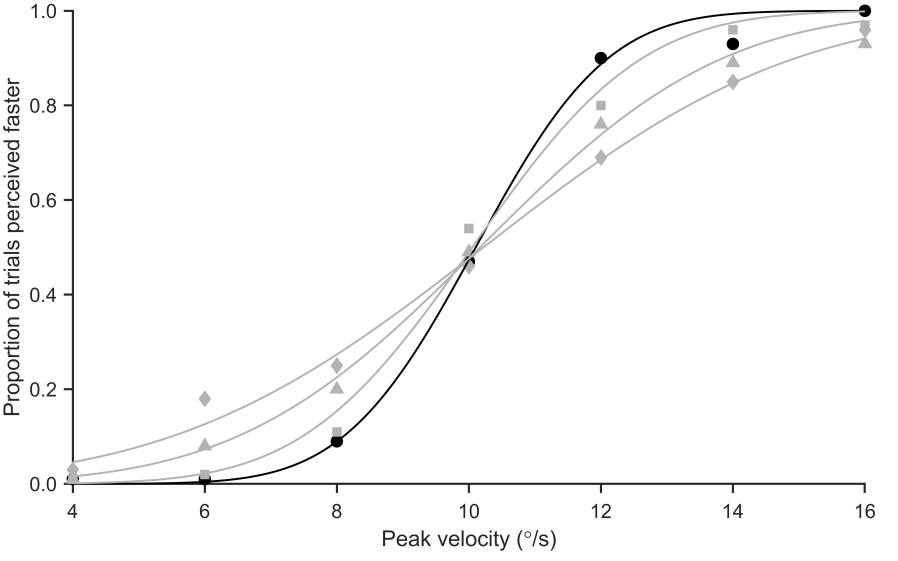

Figure 5.4: 단일 감각의 심리측정함수. –●–: C_{ve}, $\mu = 10.10°/\mathrm{s}$, $s = 1.11°/\mathrm{s}$, –■–: $C_{vi-none}$, $\mu = 10.05°/\mathrm{s}$, $s = 1.42°/\mathrm{s}$, –▲–: C_{vi-mid}, $\mu = 10.17°/\mathrm{s}$, $s = 2.03°/\mathrm{s}$, –◆–: $C_{vi-high}$, $\mu = 10.22°/\mathrm{s}$, $s = 2.61°/\mathrm{s}$. 전정 감각은 검정, 시각은 회색으로 표시되었다.

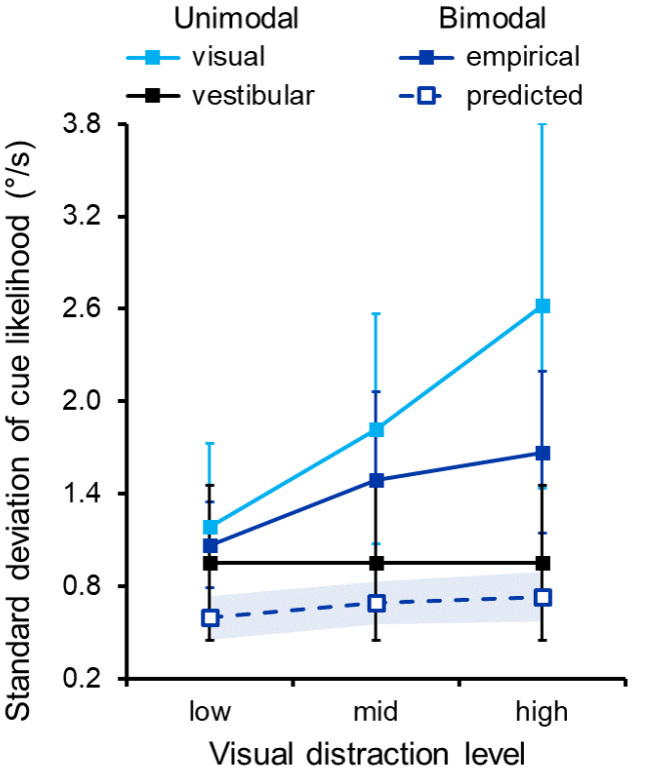

Figure 5.5: 단일 감각과 이중 감각에 대한 우도 함수 노이즈. 오차 막대와 음영 부분은 각각 실측과 예측에 대한 95% 신뢰 구간을 나타낸다.

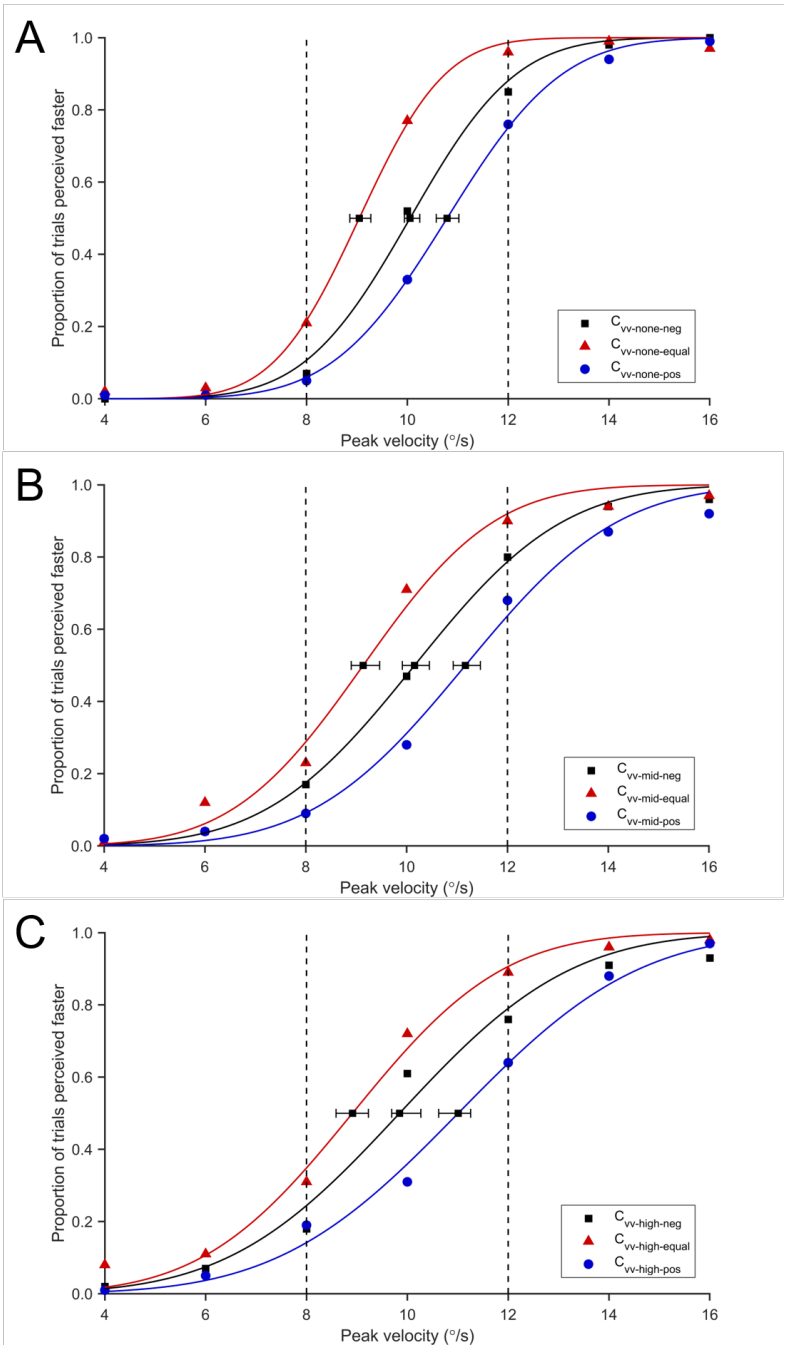
A
B
C
Proportion of trials perceived faster
Peak velocity (°/s)
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
4
6
8
10
12
14
16
C vv-none-neg
C vv-none-equal
C vv-none-pos
C vv-mid-neg
C vv-mid-equal
C vv-mid-pos
C vv-high-neg
C vv-high-equal
C vv-high-pos

Figure 5.6: 이중 감각의 심리측정함수. A. −●−: $C_{vv-none-neg}$, $\mu = 10.79°/s$, $s = 1.27°/s$, −■−: $C_{vv-none-equal}$, $\mu = 10.05°/s$, $s = 1.17°/s$, −▲−: $C_{vv-none-pos}$, $\mu = 9.05°/s$, $s = 0.95°/s$. B. −●−: $C_{vv-mid-neg}$, $\mu = 11.17°/s$, $s = 1.68°/s$, −■−: $C_{vv-mid-equal}$, $\mu = 10.16°/s$, $s = 1.64°/s$, −▲−: $C_{vv-mid-pos}$, $\mu = 9.14°/s$, $s = 1.44°/s$. C. −●−: $C_{vv-high-neg}$, $\mu = 11.01°/s$, $s = 1.98°/s$, −■−: $C_{vv-high-equal}$, $\mu = 9.85°/s$, $s = 1.89°/s$, −▲−: $C_{vv-high-pos}$, $\mu = 8.91°/s$, $s = 1.66°/s$. C_{vv-neg}은 빨강, $C_{vv-equal}$은 검정, C_{vv-pos}은 파란색으로 표시되었다. 점선은 시각과 전정 감각 사이 모션 세기 차이를 나타낸다. 오차 막대는 피팅 파라미터 μ의 95% 신뢰 구간을 나타낸다.

5.5은 단일 감각과 이중 감각의 노이즈를 보인다.

감각 간 차이가 있는 조건 C_{pos}, C_{neg}에서는, 시각보다 전정 감각을 신뢰하는 결과를 보였다. 특히, 모션 세기를 구별하는데 전정 감각은 0.7, 시각은 0.3 정도로 기여하였다(Vestibular capture; Figure 5.7). 전정 감각 8°/s, 시각 12°/s인 기준 모션이 제시된 C_{vv-pos}의 경우, 참여자는 8.91–9.14°/s인 모션과 구별하지 못하였다. 마찬가지로, C_{vv-neg}에서는 시각이 8°/s로 제시되었음에도 10.79–11.17°/s를 가진 모션과 구별하지 못하였다(Figure 5.6, 5.8). Figure 5.9는 두 감각 충돌 조건을 하나로 나타낸 그림으로, PSE 지점이 S_{ve}과 가까이 위치함을 보인다. 한편, 시각 방해는 두 감각 간 가중치 변화와 PSE 이동에 유의하게 영향 미치지 않았다 (w, $F(2,18) = 1.58, p = 0.232$; C_{vv-pos}, $F(2,18) = 0.42, p = 0.661$; C_{vv-neg}, $F(2,18) = 0.83, p = 0.450$).

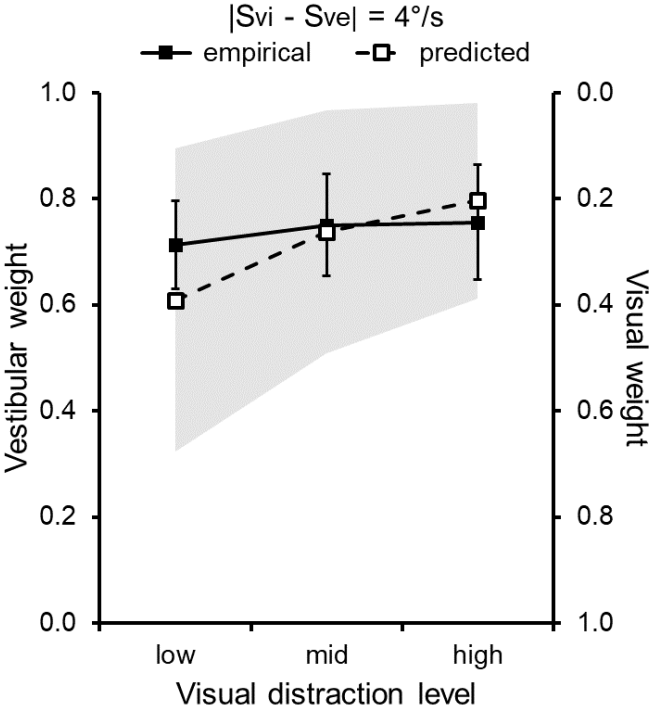

Figure 5.7: 시각과 전정 감각의 상대적인 기여 가중치. 식 5.5에 따라 두 가중치 값의 합은 항상 1이므로 상반된 두 축으로 표현 가능하다. 오차 막대와 음영 부분은 각각 실측과 예측에 대한 95% 신뢰 구간을 나타낸다. 실측치는 C_{pos}, C_{neg} 조건에서 Δ에 비해 PSE가 이동한 정도로 계산되었다.

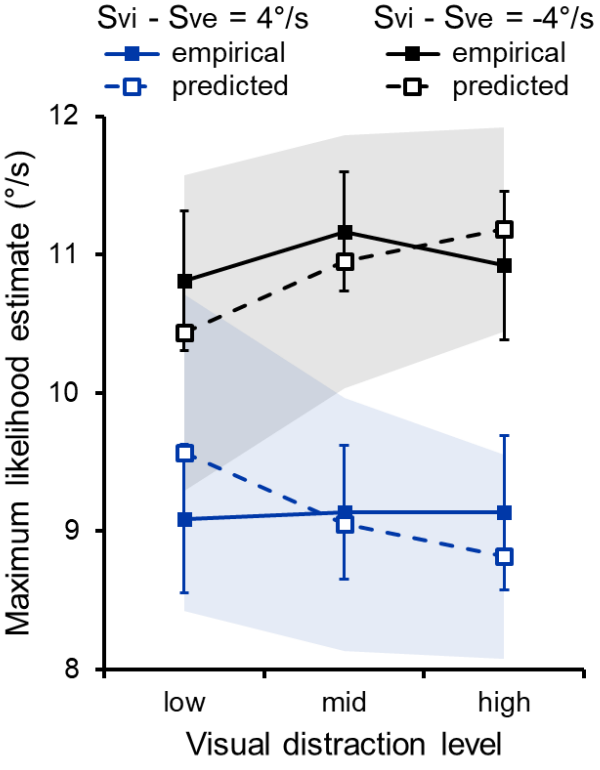

Figure 5.8: 감각 충돌 발생 시 추정치. 추정치는 C_{pos}, C_{neg} 조건마다 사후 분포의 확률이 가장 높은 값이다(5.2.1 절 참고). 오차 막대와 음영 부분은 각각 실측과 예측에 대한 95% 신뢰 구간을 나타낸다.

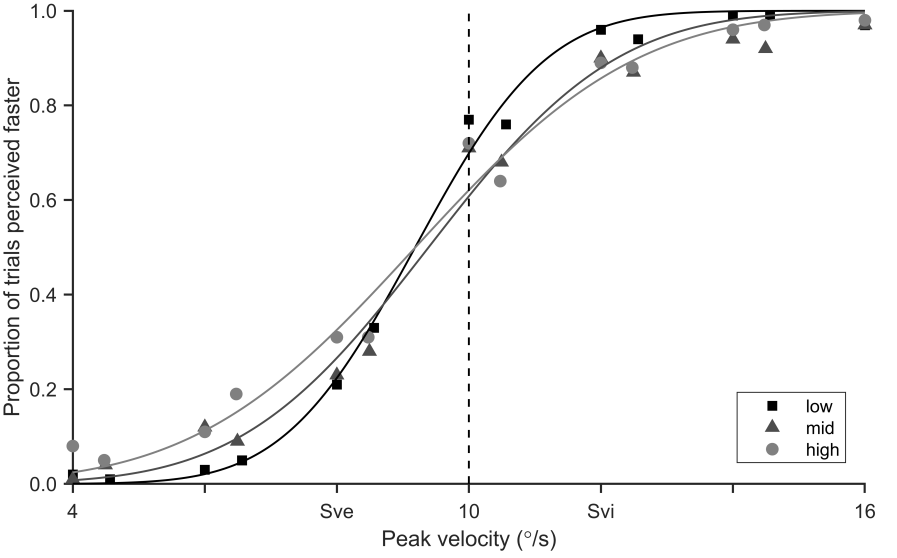

Figure 5.9: 이중 감각 간 모션 세기 차이로 정규화한 심리측정함수. –●–: $C_{vv-none}$, $\mu = 9.19°/\mathrm{s}$, $s = 1.11°/\mathrm{s}$, –■–: C_{vv-mid}, $\mu = 9.39°/\mathrm{s}$, $s = 1.57°/\mathrm{s}$, –▲–: $C_{vv-high}$, $\mu = 9.19°/\mathrm{s}$, $s = 1.86°/\mathrm{s}$. C_{pos}, C_{neg} 조건을 같이 표현하기 위해서 C_{neg}의 지각 데이터를 $w_{vi}\,\Delta/2$만큼 가로 좌표축으로 평행 이동시켰다. 이때 w_{vi}는 시각 방해 조건 별로 실측한 값이다.

5.4 토의

이 장에서는 MLE 모델을 이용하여 감각 통합 시 시각과 전정의 관계를 기술하였다. 특히, 4D Ride에 적합한 영상과 모션 효과를 적용하였다. 또한 시각 정보의 신뢰도를 조절하기 위해 영상에 방해 요소를 개입하여 시각 Attention을 분산시키고자 하였으며, 사용자가 컨텐츠를 감상할 때 수행하게 되는 물체 추적/기억 태스크와 유사하게 서브 태스크를 두어 진행하였다.

실험 결과, 시각 노이즈는 방해 요소를 더 개입시킬수록 유의하게 증가하였으며 ($p < 0.01$), 이와 유사하게 두 감각이 통합된 경우의 노이즈 또한 증가하는 양상을 보였다. 이 경우 뇌가 받을 수 있는 정보가 늘어난 상황임에도 전정 감각이 단일로 참여한 조건보다 큰 노이즈를 보였으며, 방해의 정도가 커질수록 MLE 모델로 예측된 값과 현저하게 차이가 났다. 한편, 이와 같이 시각 노이즈가 증가된 경우에는 상대적으로 전정 기여도가 증가되어야 하나, 두 감각 간 기여도 변화에는 영향이 없었다(Figure 5.7 예측치, 측정치 참고). 이 결과로 볼 때, 본 실험에서 이용한 방해 방법은 시각 정보 자체의 신뢰도를 감소시킨 것이 아니라, 서브 태스크가 야기한 인지적인 로드로 인해 지각의 노이즈가 증가된 것으로 보인다.

본 실험에 참여한 참여자들은 시각과 전정 정보 통합 시 전정 우위를 보였다. Pitch 모션으로 생성된 전정 정보는 7할, 시각 정보는 나머지 3할 정도 신뢰하였다. 이 결과는 시각 정보를 전정 정보보다 4배 이상 신뢰하는 Yaw 모션 [24], 거의 동등하게 신뢰하는 Sway 모션과는 차이가 있다 [25]. 본 연구와 두 연구 모두 0.6−0.77 Hz 사이로 유사한 모션 주파수를 사용하였음에도 모션 유형 별로 서로 다른 전정 기여도를 보인다. 추후 연구로 Roll과 Pitch의 조합 등 자주 이용되는 모션 유형 조합의 경우 어떤 관계로 변화되는지 파악해볼 필요가 있다.

VI. 결론

본 학위 논문에서는 모션 지각 시 사람의 감각기/뇌로 인해 발생하게 되는 노이즈를 정량화하고자 하였다. 모션에 대한 지각 능력은 심리측정함수로 나타내고자 하였으며, 이로부터 역치 값과 노이즈를 간접적으로 알아내었다. 모션 효과로는 1 Hz 이하의 사인파 가속도 개형을 이용하였고, 지각 세기를 달리하는데 모션 유형에 따라 최대 가속도 또는 각속도를 조절하였다. 참여자는 모션의 방향을 식별하는 태스크, 모션의 세기를 구별하는 태스크를 수행하면서 자신의 모션에 대한 지각 결과를 응답하였다.

3장: 회전 모션과 선형 모션 모두에서 가로축 ∼ 세로축 > 수직축 순으로 전정 민감도를 보였다. 특히, Heave는 Yaw에 비해 다른 축 대비 둔감율이 더 높아 모션 효과를 전달하는데 가장 비효과적이었다. 4장: 모션 세기를 구별하는 능력은 주파수가 증가할수록 감소하는 양상을 보였으나 유의하지 않았다. 5장: 4D 라이드 감상 시 참여자들은 시각과 전정 감각을 3:7 정도로 신뢰하였다. 또한 방해 요소 개입과 태스크 부여로 조절한 시각 Attention 분산은 지각 노이즈를 증가시켰음에도 전정 감각의 기여도를 증가시키진 않았다.

본 연구 결과는 모션 효과 설계에 사람의 지각 능력이 반영될 수 있도록 돕는다. 뿐만 아니라 4D 컨텐츠에 국한되지 않고 전정 감각이 관련된 다양한 분야에서 이용 가능하다. 정신물리학이 생소한 연구자에게 지각 연구의 가치와 중요성을 알리는 계기가 될 것이라 기대하며, 사람의 지각에 대해 새로이 밝혀진 정보는 새로운 연구 분야를 파생할 수도 있을 것이다.

참 고 문 헌

[1] Willem Mulder. Quantitatieve betrekking tusschen prikkel en effect bij het statisch orgaan. den Boer, 1908.

[2] Michael S Landy, Laurence T Maloney, Elizabeth B Johnston, and Mark Young. Measurement and modeling of depth cue combination: In defense of weak fusion. Vision research, 35(3):389–412, 1995.

[3] 4dx. `http://www.cj4dxvr.com/sub01/sub02_new.php#1`. Accessed 21 Sep. 2020.

[4] Valkyrie: Shooting ride. `http://www.cj4dxvr.com/sub01/sub01_new.php#1`. Accessed 21 Sep. 2020.

[5] Simuline. `http://www.cj4dxvr.com/bbs/board.php?tbl=project#1`. Accessed 21 Sep. 2020.

[6] Inmotionsimulation. `https://www.inmotionsimulation.com/index.html#`. Accessed 21 Sep. 2020.

[7] AJ Benson, EC Hutt, and SF Brown. Thresholds for the perception of whole body angular movement about a vertical axis. Aviation, space, and environmental medicine, 1989.

[8] Rachel E Roditi and Benjamin T Crane. Directional asymmetries and age effects in human self-motion perception. Journal of the Association for Research in Otolaryngology, 13(3):381–401, 2012.

[9] Paul R MacNeilage, Martin S Banks, Gregory C DeAngelis, and Dora E Angelaki. Vestibular heading discrimination and sensitivity to linear acceleration in head and world coordinates. Journal of Neuroscience, 30(27):9084–9094, 2010.

[10] M Rodenburg, AJJ Maas, and HPW Stassen. Thresholds for the perception of rotation: Variability, psychometric curves, and comparison with hearing thresholds. Biological cybernetics, 42(1):23–28, 1981.

[11] L Zaichik, V Rodchenko, I Rufov, Y Yashin, and A White. Acceleration perception. In Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit, page 4334, 1999.

[12] AJ Benson, MB Spencer, and JR Stott. Thresholds for the detection of the direction of whole-body, linear movement in the horizontal plane. Aviation, space, and environmental medicine, 1986.

[13] Harm Heerspink, Walter Berkouwer, Olaf Stroosma, René van Paassen, Max Mulder, and Bob Mulder. Evaluation of vestibular thresholds for motion detection in the simona research simulator. In AIAA modeling and simulation technologies conference and exhibit, page 6502, 2005.

[14] Shomesh E Chaudhuri, Faisal Karmali, and Daniel M Merfeld. Whole body motion-detection tasks can yield much lower thresholds than direction-

recognition tasks: implications for the role of vibration. Journal of Neurophysiology, 110(12):2764–2772, 2013.

[15] Luzia Grabherr, Keyvan Nicoucar, Fred W Mast, and Daniel M Merfeld. Vestibular thresholds for yaw rotation about an earth-vertical axis as a function of frequency. Experimental Brain Research, 186(4):677–681, 2008.

[16] Florian Soyka, Paolo Robuffo Giordano, Karl Beykirch, and Heinrich H Bülthoff. Predicting direction detection thresholds for arbitrary translational acceleration profiles in the horizontal plane. Experimental brain research, 209(1):95–107, 2011.

[17] María Carolina Bermúdez Rey, Torin K Clark, Wei Wang, Tania Leeder, Yong Bian, and Daniel M Merfeld. Vestibular perceptual thresholds increase above the age of 40. Frontiers in neurology, 7:162, 2016.

[18] Alessandro Nesti, Michael Barnett-Cowan, Paul R MacNeilage, and Heinrich H Bülthoff. Human sensitivity to vertical self-motion. Experimental brain research, 232(1):303–314, 2014.

[19] Amir R Naseri and Peter R Grant. Human discrimination of translational accelerations. Experimental brain research, 218(3):455–464, 2012.

[20] Robert M Mallery, Osarenoma U Olomu, Rosalie M Uchanski, Valentin A Militchin, and Timothy E Hullar. Human discrimination of rotational velocities. Experimental brain research, 204(1):11–20, 2010.

[21] Alessandro Nesti, Karl A Beykirch, Paolo Pretto, and Heinrich H Bülthoff. Human discrimination of head-centred visual–inertial yaw rotations. Experimental brain research, 233(12):3553–3564, 2015.

[22] Alessandro Nesti, Ksander De Winkel, and Heinrich H Bülthoff. Accumulation of inertial sensory information in the perception of whole body yaw rotation. PLoS one, 12(1), 2017.

[23] Marc O Ernst and Martin S Banks. Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion. Nature, 415(6870):429–433, 2002.

[24] Mario Prsa, Steven Gale, and Olaf Blanke. Self-motion leads to mandatory cue fusion across sensory modalities. Journal of neurophysiology, 108(8):2282–2291, 2012.

[25] Arjan C ter Horst, Mathieu Koppen, Luc PJ Selen, and W Pieter Medendorp. Reliability-based weighting of visual and vestibular cues in displacement estimation. PloS one, 10(12):e0145015, 2015.

[26] Faisal Karmali, Koeun Lim, and Daniel M Merfeld. Visual and vestibular perceptual thresholds each demonstrate better precision at specific frequencies and also exhibit optimal integration. Journal of neurophysiology, 111(12):2393–2403, 2014.

[27] Corey S Shayman, Robert J Peterka, Frederick J Gallun, Yonghee Oh, Nai-Yuan N Chang, and Timothy E Hullar. Frequency-dependent integra-

tion of auditory and vestibular cues for self-motion perception. Journal of Neurophysiology, 123(3):936–944, 2020.

[28] HCCH Levitt. Transformed up-down methods in psychoacoustics. The Journal of the Acoustical society of America, 49(2B):467–477, 1971.

[29] EJ Williams. Experimental designs balanced for the estimation of residual effects of treatments. Australian Journal of Chemistry, 2(2):149–168, 1949.

[30] Marjorie R Leek, Thomas E Hanna, and Lynne Marshall. Estimation of psychometric functions from adaptive tracking procedures. Perception & Psychophysics, 51(3):247–256, 1992.

[31] Anthony William Fairbank Edwards. Likelihood. CUP Archive, 1984.

[32] A. L. Yuille and Heinrich H. Bülthoff. Bayesian Decision Theory and Psychophysics, page 123–161. Cambridge University Press, USA, 1996.

[33] Marc O Ernst and Heinrich H Bülthoff. Merging the senses into a robust percept. Trends in cognitive sciences, 8(4):162–169, 2004.

[34] John D Wilder, Eileen Kowler, Brian S Schnitzer, Timothy M Gersch, and Barbara A Dosher. Attention during active visual tasks: Counting, pointing, or simply looking. Vision Research, 49(9):1017–1031, 2009.

[35] Sergei Gepshtein, Johannes Burge, Marc O Ernst, and Martin S Banks. The combination of vision and touch depends on spatial proximity. Journal of vision, 5(11):7–7, 2005.

[36] Marieke Rohde, Loes CJ van Dam, and Marc O Ernst. Statistically optimal multisensory cue integration: a practical tutorial. Multisensory research, 29(4-5):279–317, 2016.

Acknowledgements

그동안 바르게 지도해 주시고 이끌어주신 최승문 교수님께 감사합니다. 또 타지역에 와서 적응하는 데 도움을 준 가족과 연구실 선후배 분들에게 감사합니다. 마지막으로 이 학위 논문을 보다 완성도 있게 마무리하는 데 도움을 주신 한성호 교수님, 황인석 교수님 두 분께도 감사의 말을 전하고 싶습니다.

Curriculum Vitae

Name : Jiwan Lee

Education

2014. 3. – 2018. 2. Department of Computer Science, Sookmyung Women's University (B.S.)

2018. 9. – 2021. 2. Department of Computer Science and Engineering, Pohang University of Science and Technology (M.S.)

Affiliation

1. Interaction Lab., Department of Computer Science and Engineering, Pohang University of Science and Technology