

## 족부 진동 자극 유무에 따른 인체의 운동지각 변화 및 정량화<sup>§</sup>

임혜림\* · 박수경\*<sup>†</sup>

\* 한국과학기술원 기계공학과

### Effect of Vision Coherent Sensory Cue on Roll Tilt Perception and Sensory Weighting

Hyerim Lim\* and Sukyung Park\*<sup>†</sup>

\* Division of Mechanical Engineering, School of Mechanical, Aerospace and Systems Engineering, KAIST

(Received April 19, 2012 ; Revised August 24, 2012 ; Accepted August 29, 2012)

**Key Words:** Roll Tilt Perception(기울어짐 지각), Motion Perception(운동지각), Sensory Integration(감각 통합), Kalman Filter(칼만 필터)

**초록:** 최근 현실감을 주는 3D 영화에 진동, 바람과 같이 감각 정보를 추가하여 시각 자극으로 유도되는 운동지각을 향상시키기 위한 시도가 이루어지고 있으나, 추가적인 감각 정보에 의한 운동지각 변화를 정량화하는 연구는 많지 않다. 따라서 본 연구에서는 회전하는 시각 자극과 함께 추가적인 감각 정보를 가하여 그에 따른 운동지각과 이를 정량화하는 것에 대해 연구하였다. 가해진 시각 자극에 대해 피험자의 몸의 기울어짐과 피험자가 느끼는 지표면을 나타내는 체성 감각 막대의 각도를 측정된 결과 추가적인 감각 정보로 인해 운동지각은 증가하는 경향을 보였으며 칼만 필터를 이용하여 구한 시각 정보의 중요도 또한 증가함을 보였다. 따라서 시각 자극과 일치하는 다른 감각 정보는 시각 자극으로 유도되는 운동지각과 시각의 중요도를 증가시키는 경향이 있음을 알 수 있다.

**Abstract:** Nowadays, some movie theaters provide additional sensory information in 3D movies to enhance visually induced motion perception. However, no studies have investigated how motion perception increases. Thus, in this study, we examined the effect of visual coherent sensory information on visually induced motion perception and quantification of sensory information. A visual stimulus rotated sinusoidally and visual coherent sensory information were applied as vibrations to a subject's foot. We measured the sway of the subject's body by using a force plate and somatosensory bar rotation that represents the subject's perception of the horizon using an encoder. By using this data, we obtained the weight of the sensory information using a Kalman filter. As a result, it was found that subjects rotated the somatosensory bar more when visual coherent vibrations were applied. The weight of vision also increased when visual coherent vibrations were applied. Thus, we can conclude that visual coherent sensory information tends to enhance visually induced motion perception and weight of vision.

- 기호설명 -

$\theta_{ank}$  : 발목 각도

$H_{rv}$  : 회전 시각 전달함수

$H_{tv}$  : 병진 시각 전달함수

$H_{sc}$  : 반고리관 전달함수

$H_{ot}$  : 이석 전달함수

$H_{am}$  : 발목 근육 전달함수

$H_{tac}$  : 촉각 전달함수

$v_{vis}$  : 시각의 노이즈 공분산

$v_{oth}$  : 전정기관, 촉각의 노이즈 공분산

### 1. 서론

우리는 극장가에서 3D 영화를 쉽게 찾아볼 수 있다. 3D 영화용 안경을 쓰고 영화를 보면 화면 속 물체가 실제로 다가오는 듯 느껴진다. 여기에 요즘에는 바람, 진동을 가하거나 직접 좌석을 흔

§ 이 논문은 2012년도 대한기계학회 바이오공학부문 춘계학술대회(2012. 3. 28.-30., 전남대) 발표논문임

<sup>†</sup> Corresponding Author, [sukyungp@kaist.ac.kr](mailto:sukyungp@kaist.ac.kr)

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

드는 등 다른 감각을 추가하여 시각 자극에 대한 운동지각(motion perception)을 높이기 위한 시도가 많이 이루어지고 있다. 이런 영화가 4D 영화이다. 영화와 같이 상업적인 경우 외에도 병으로 인한 감각기관의 저하로 균형에 이상이 있는 환자를 대상으로 하여 다른 감각기관의 정보를 추가함으로써 운동지각을 높여서 균형 능력을 향상시킬 수 있는가에 대한 연구가 계속 되고 있다.<sup>(1)</sup> 특히, Conrad Wall과 Marc S. Weinberg는 몸의 기울어짐을 복부에 진동 자극을 가하여 알려주었을 때 자세 안정도의 변화에 대해 연구한 바 있다.<sup>(1)</sup> 그렇지만 추가된 감각 정보가 얼마나 운동지각을 높이는가에 대한 결과는 보고된 바가 없다. 따라서 본 연구에서는 발바닥에 시각 자극과 일치하는 진동 자극을 가함으로써 시각 자극에 의한 운동지각이 얼마나 높아지는 가에 대해 연구하였다.

또한 이 운동지각에 관여하는 감각 정보의 중요도를 정량화하는 방법으로는 칼만 필터(Kalman filter)를 이용하였으며, 이는 처음 Daniel M. Wolpert에 의해 논의 되었다.<sup>(2)</sup> 칼만 필터는 노이즈가 존재하는 상태에서 참 값을 추정하는 필터인데, 실제 측정값과 추정 값의 차이에 적절한 게인(gain)을 곱하여 그 다음 단계에서 값을 추정할 때 반영하는 필터이다.<sup>(3)</sup> 이때 측정값과 추정 값의 차이가 크면 게인을 줄임으로써, 측정값과 추정 값의 차이가 작으면 게인을 크게 함으로써 참 값을 추정한다.<sup>(3)</sup> 앞서 언급했듯 Daniel M. Wolpert는 피험자에게 처음 손의 위치를 보여준 후 암실 상태에서 가해지는 힘이 없을 때, 운동을 돕는 힘을 가해주었을 때, 운동을 저지하는 힘을 가해주었을 때의 사람이 지각하는 손의 위치를 관찰하고 이를 칼만 필터를 통해 해석하였다.<sup>(2)</sup> Arthur D Kuo 또한 칼만 필터를 이용하여 사람의 자세 제어를 모델링함으로써 사람의 뇌가

칼만 필터와 비슷한 제어를 한다는 것을 뒷받침 하였다.<sup>(5)</sup> 이후 사람이 칼만 필터를 사용한다는 전제로 많은 연구가 진행되어 왔다.<sup>(6,7)</sup>

앞의 두 연구에서는 사람의 운동을 칼만 필터를 통해 해석하였으나 본 연구는 시각 자극으로 유도되는 운동지각을 바탕으로 한다. 센서의 노이즈에 따라 게인이 바뀌는 칼만 필터의 특성을 토대로 운동지각에 관여하는 시각, 전정기관, 촉각<sup>(8)</sup>의 노이즈를 결정함으로써 사람이 어느 감각을 더 의존하는지에 대하여 연구하고, 감각 정보의 추가로 인한 감각 정보 간의 상대적인 중요도 변화를 살펴보고자 한다.

## 2. 실험

### 2.1 실험 개요

암실에서 사람에게 회전하는 시각 자극이 주어졌을 때 사람이 속아 실제로 방이 움직이지 않음에도 불구하고 방이 돌아가는 것처럼 느끼는 것을 백션(vection)이라고 한다.<sup>(9)</sup> 이렇게 느껴지는 기울어짐이 시각 자극으로 유도되는 운동지각(motion perception)이다. 여기에 시각 자극과 일치하는 추가적인 감각으로 발바닥에 진동 자극을 주어 사람의 운동지각의 변화를 관찰하였다. 그리고 사람의 기울어짐 지각에 주로 관여하는 시각, 전정기관, 촉각의 중요도를 칼만 필터를 통해 해석하였다.

### 2.2 피험자

감각기관에 이상이 없는 5명(연령: 23.8±1.3)의 청년이 실험에 참가하였다. 피험자들은 카이스트 생명윤리심의위원회(IRB)의 승인을 받은 피험자 동의서를 검토하고 서명하였다.



Fig. 1 4D movie theater<sup>(4)</sup>

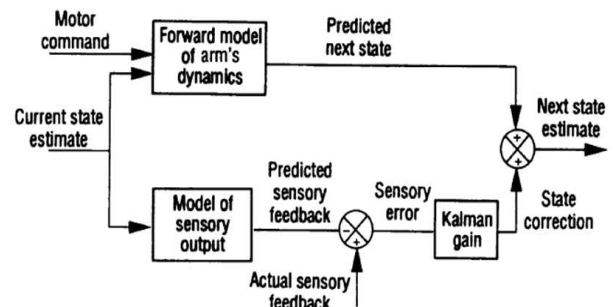


Fig. 2 Kalman filter model<sup>(2)</sup>

2.3 실험절차

피험자는 암실에서 지면 반력기(force plate)위에 정자세를 유지한 채 선다. 피험자의 정면과 양 옆면에 설치된 LCD 모니터를 통해 시각 자극을 가해주었다. 실험에 사용한 시각 자극의 주파수는 시각의 차단 주파수(cutoff frequency)와 전정기관의 차단 주파수를 고려하여 선정하였다. 시각 실험에서의 시각은 0.1 Hz를 차단 주파수로 하는 저주파 필터의 특성을 갖고 전정기관은 0.07 Hz를 차단 주파수로 하는 고주파 필터(high-pass filter)의 특성을 가지므로 시각 자극의 주파수는 0.08 Hz로 선정하고, 최고 속도는 7.5 degree/s로 하여 정현파로 피험자에게 가해주었다. 가해진 시각 자극으로 인하여 피험자는 모니터의 물체가 움직이는 것이 아니라 모니터의 물체는 정지되어 있고 마치 방이 돌아가는 것처럼 느끼게 된다. 피험자는 넘어지지 않기 위해 자연스럽게 몸을 기울이게 된다. 이때 피험자의 압력중심(COP, center of pressure)은 지면 반력기(force plate)를 이용하여 구하였다. 또한 피험자는 자신이 느끼는 지표면의 방향을 체성 감각 막대(somatosensory bar)를 돌려 표현하였다.

시각 자극만 가한 실험과 시각 자극과 함께 시각 자극과 일치하는 촉각 정보를 가한 실험을 수행하였으며 한 실험은 3번 실시되었다. 한 시도(trial)는 총 183초 동안 진행되었다. 처음 3초 동안은 화면이 회전하지 않고 정지해있으며 이후 화면이 회전하면서 피험자의 움직임을 유도하였

다. 피험자의 피로도가 실험에 미치는 영향을 최소화하기 위해 피험자는 각 시도 사이에 10분씩 휴식을 취하였다. 시각 자극과 일치하는 감각 정보는 진동 자극으로 발바닥에 가해주었다. 발바닥에 진동 자극으로 촉각 정보를 더해준 것은 피험자가 정자세를 취하고 있음에도 불구하고 방이 기울어지면 피험자의 발바닥에 압력이 느껴질 것이기 때문이다.

또한 피험자가 진동 자극에 익숙하지 않기 때문에 실험 전에 훈련을 실시하였다. 피험자의 정면에 위치한 모니터를 통해 피험자가 몸을 기울여 따라가야 하는 목표물(target)을 주고 목표물을 양 옆으로 이동시키면서 몸이 기울어지는 쪽의 발바닥에 몸의 기울기에 상응하는 진동 자극을 가해주었다. 위와 같은 훈련을 통하여 피험자는 발바닥의 압력에 따라 발바닥에 진동이 가해진다는 것을 지각한다.

2.4 실험 장비

피험자에게 3개의 모니터를 통해 정상과 형태로 돌아가는 시각 자극을 가하기 위하여 가상현실 프로그램(world vizard)을 이용하여 3차원의 움직임을 구현하였다. 피험자의 압력 중심의 변화는 지면 반력기(Accugait)를 이용하였다. 피험자가 돌리는 체성 감각 막대의 각도를 구하기 위하여 엔코더를 사용하였으며, 엔코더의 값은 Labview(National Instruments Corporation, Austin, TX) 프로그램을 이용하여 측정하였다. 또한 피험자에게 가해진 진동의 크기 또한 Labview 프로그램을 이용하여 조절하였다.

2.5 실험 분석

피험자가 느끼는 각도와 피험자가 표현하는 각도의 상관관계를 알기 위해 먼저 보정(calibration)을 수행하였다. 암실에서 눈을 감고 피험자가 느끼는 각도만큼 체성 감각 막대(somatosensory bar)를 돌림으로써 피험자가 느끼는 각도와 피험자가 표현하는 각도의 상관관계를 구할 수 있었다. 이때 90°와 -90°의 값은 피험자가 맞추기에 비교적 명확하기에 ±90° 사이의 상관관계의 의미를 떨어뜨리므로 보정 시 사용하지 않았다. 이렇게 구한 보정 값을 실험 결과를 분석할 때 적용하였다.

실험을 통해 얻은 데이터는 버터워스 필터(Butterworth filter)로 필터링 하였다. 차수는 3차

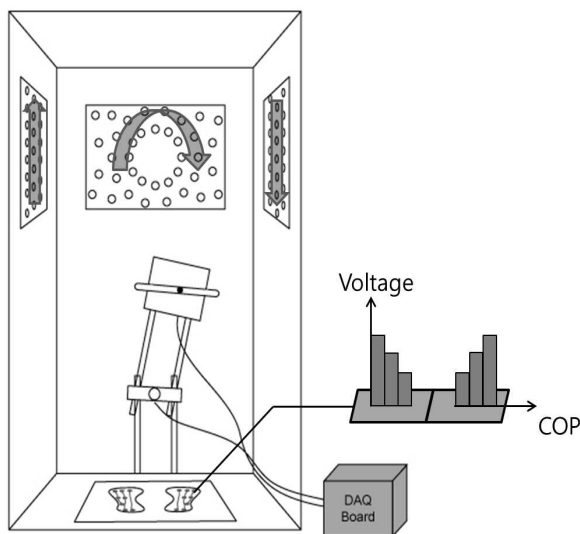


Fig. 3 Experimental set up

로, 차단 주파수는 실험에서 수행한 0.08 Hz의 10배인 0.8 Hz로 설정하였다. 그 후 데이터를 1 주기마다 잘라 최소 자승법을 통해 그 데이터와 가장 일치하는 0.08 Hz의 정상파를 구하였다. 이를 통해 데이터의 진폭을 구할 수 있었다. 이 크기는 피험자가 느끼는 몸이 회전한 정도를 나타내는 지표가 되므로 운동지각을 비교하는 중요한 인자라고 할 수 있다.

칼만 필터를 통해 감각기관의 중요도를 해석하기 위하여 노이즈를 정할 때에는 시각이 다른 감각기관에 보다 우세하기 때문에<sup>(1)</sup> 시각을 제외한 다른 감각기관의 노이즈 크기를 같다고 가정하였다.

### 2.6 칼만 필터(Kalman filter)

칼만 필터에는 플랜트(plant)에 해당하는 사람의 몸과 사람의 감각기관의 역학이 이용된다. 먼저 사람 몸의 역학의 경우, 사람이 0.08 Hz로 천천히 좌, 우로 기울어지기 때문에 사람 몸을 하나의 추(pendulum)로 모델링 하였다.

$$\ddot{\theta} = mg \frac{l}{2} \sin \theta \quad (1)$$

감각기관의 역학은 기존에 진행된 선행연구를 바탕으로 하였다. 눈의 경우 회전과 이동을 인지하는데, 두 경우 다 몸의 움직임과 일치한다.<sup>(10)</sup> 거의 동일하게 지각한다는 뜻이다. 따라서 눈의 전달 함수는 1이다.<sup>(10)</sup>

$$H_{rv}(s) = \frac{y_{rv}(s)}{\theta_{ank}(s)} = 1 \quad (2)$$

$$H_{tv}(s) = \frac{y_{tv}(s)}{\theta_{ank}(s)} = 1 \quad (3)$$

전정기관의 경우 속도를 느끼는 반고리관(semicircular canals)과 가속도를 느끼는 이석(otolith)이 있다.<sup>(10,11)</sup> 반고리관의 경우 고주파 필터의 특성을 갖고 이석은 저주파 필터의 특성을 갖는다.<sup>(10,11)</sup>

$$H_{sc}(s) = \frac{y_{sc}(s)}{\theta_{ank}(s)} = \frac{5.7s}{5.7s + 1} \quad (4)$$

$$H_{ot}(s) = \frac{y_{ot}(s)}{a_{hean}(s)} = \frac{90(s+1)}{s+0.2} \quad (5)$$

촉각의 경우 근육에 있는 자기 수용기인 체성감관(proprioceptors)은 몸이 기울어진 각도를 느끼고, 발바닥의 촉각(tactile) 역시 몸이 기울어진 각도를 느낀다.<sup>(12)</sup> 체성감관의 경우는 전정기관의 이석과 마찬가지로 저주파 필터의 특성을 갖고<sup>(12)</sup> 촉각의 경우 차단 주파수가 아주 높은 저주파의 특성을 갖는다.

$$H_{am}(s) = \frac{y_{am}(s)}{\theta_{ank}(s)} = \frac{0.4(s+0.15)}{s+0.06} \quad (6)$$

$$H_{tac}(s) = \frac{y_{tac}(s)}{\theta_{ank}(s)} = \frac{1000}{s+1000} \quad (7)$$

위의 감각기관의 전달 함수(transfer function)를 통해 상태 공간 형식(state-space form)으로 변환하여 칼만 필터에 적용시켜 줌으로써 감각기관의 역학을 완성하였다.

## 3. 결과 및 토의

### 3.1 실험 결과

시각 자극이 가해진 초기에는 피험자에게 백선이 생기지 않는다. 어느 정도 시간이 지난 뒤 피험자들은 방이 돌아간다고 느끼기 시작한다. 이때의 데이터를 실험 결과로 사용하였다. Fig. 4는 가해진 시각 자극에 대해 피험자가 돌린 체성 감각 막대의 각도 데이터의 일부분이다. (a)가 정현파의 형태로 피험자에게 가해진 시각 자극이다. 이 시각 자극에 대하여 피험자는 (b), (c)와 같이 체성 감각 막대를 회전하였다. 피험자의 백선이 항상 일정하지 않기 때문에 체성 감각 막대의 회

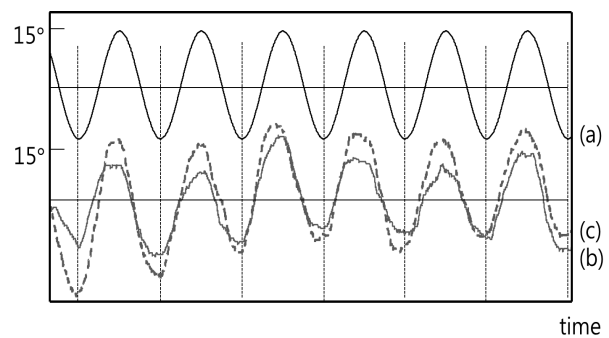


Fig. 4 A sample of rotation of somatosensory bar. (a) is visual stimulus. (b) and (c) are the result of somatosensory bar rotation. (b) is when visual stimulus was applied and (c) is when visual and vibration were applied

전이 일정하지 않은 것을 관찰 할 수 있다. 또한 이 그래프 상에서 시각 자극과 일치하는 진동 자극을 가했을 때 피험자가 체성 감각 막대를 더 많이 돌리는 것을 확인 할 수 있다. 모든 실험 결과에 대하여 주기별로 나누어 크기를 구하였을 때 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

시각 자극만 가했을 때보다 시각 자극과 일치하는 진동 자극을 가했을 때 피험자가 돌린 체성 감각 막대의 각도는 Fig. 5의 (a) 그래프와 같이  $13.32 \pm 3.80^\circ$ 에서  $16.22 \pm 3.15^\circ$ 로 증가하는 경향을 보였다( $p=0.14$ ). 반면 방이 돌아가는 것을 느끼면서 넘어지지 않기 위하여 몸을 기울이는 정도의 지표인 압력중심의 변화(change of COP)는 Fig. 5의 (b) 그래프와 같이  $2.50 \pm 2.55$  cm에서  $1.54 \pm 1.45$  cm로 줄어드는 경향을 보였다( $p=0.27$ ).

칼만 필터를 이용하여 실험 결과를 모사하는 감각기관의 노이즈를 구한 결과, 시각 자극만 가했을 때와 비교하여 진동 자극이 추가되었을 때 시각에 대한 다른 감각기관의 노이즈는 Fig. 6의 그래프와 같이  $5.04 \pm 2.63$ 에서  $7.01 \pm 2.77$ 로 증가하

였다( $p=0.035$ ).

3.2 토의

이번 실험에서는 암실에서 3개의 모니터를 사용하여 백션을 유도하였는데 피험자가 방이 돌아가는 것처럼 느끼고 그것에 상응하는 몸의 움직임과 체성 감각 막대를 돌린 것으로 보아 이 실험 장비로 충분히 백션 실험이 가능한 것으로 보인다.

시각 자극만 가했을 때에 비하여 시각 자극과 일치하는 진동 자극의 추가로 피험자가 돌린 체성 감각 막대의 크기가 증가하는 경향을 보인 것은 피험자가 방이 더 많이 돌아간 것으로 지각하였다는 뜻이다. 이는 진동 자극, 곧, 추가된 감각 정보로 인하여 시각 자극으로 유도되는 운동지각이 증가하는 경향을 보임을 의미한다. 처음의 본 연구의 질문으로 돌아가, 다른 감각 정보를 추가함으로써 시각 자극에 대한 운동지각이 증가하고, 이를 정량화 할 수 있는가에 대하여 우리는 시각과 일치하는 감각기관 정보의 추가는 시각에 대한 운동지각을 높이는 경향을 보이며 정량화를 통해 운동지각의 증가 경향성을 확인 가능하다고 할 수 있다.

반면 피험자의 몸의 움직임은 진동 자극을 추가하였을 때 확연히 줄어드는 경향을 보인다. 이는 체성 감각 막대와 완전히 반대되는 결과이다. 이러한 현상은 진동이 피험자의 발의 압력에 따른 감각 정보이기 때문에 피험자가 몸을 많이 기울이지 않았음에도 불구하고 이미 피험자의 발에 가해지는 진동으로 인하여 피험자가 이미 몸을 충분히 기울었다고 지각하여 덜 기울인 것으로 보인다. 이렇게 시각 자극과 일치하는 추가적인 감각기관 정보는 지각(perception)뿐만 아니라 그에 따른 피험자의 행동(action)에도 영향을 미치는 것을 볼 수 있다.

추가된 감각 정보가 사람의 운동지각을 변화시키는 이유는 감각 정보의 중요도 변화로 설명할 수 있다. 사람은 중추신경계(Central nervous system)에서 여러 감각 정보를 통합(sensory integration)하여 운동을 지각하는데<sup>(6)</sup> 특히 시각에 많은 중요도를 둔다고 알려져 있다.<sup>(9)</sup> 시각 자극만 가한 경우 시각에 대한 다른 감각의 노이즈는 5배 이상 큰 것을 확인 할 수 있다. 즉, 다른 감각에 비하여 시각을 신뢰한다는 뜻이다. 이는 기

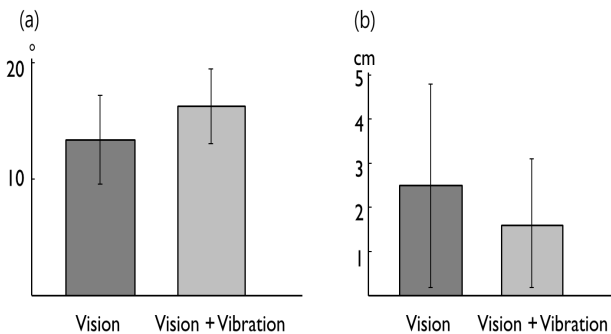


Fig. 5 Magnitude of rotation of somatosensory bar and change of COP. (a) is rotation of somatosensory bar and (b) is change of COP

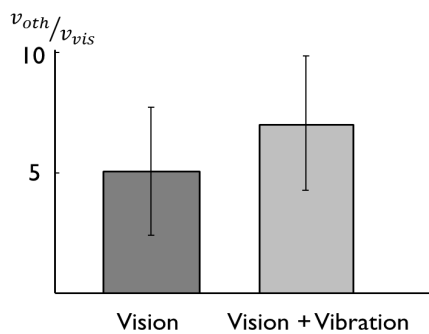


Fig. 6 Relative noise ratio between other sensory information and vision information

존의 연구결과와 일치한다. 여기에 시각과 일치하는 다른 감각 정보가 추가되었을 때 시각에 대한 다른 감각기관의 노이즈는 증가한다. 즉, 시각의 중요도가 높아짐을 의미한다. 시각이 아닌 다른 감각기관의 정보보다 시각에 대한 중요도를 높이는 까닭은 추가된 감각 정보가 시각 정보를 뒷받침하는 정보이기 때문인 것으로 보인다.

운동지각을 비교해 보았을 때 시각 자극만 가한 경우와 시각 자극과 일치하는 진동 자극을 함께 가한 경우의 뚜렷한 차이는 볼 수 없었는데 ( $p>0.05$ ), 이는 피험자 사이의 차이가 우선 존재하고 피험자의 수가 5명으로, 비교를 하기에는  $n$ 이 작기 때문인 것으로 보인다. 하지만 실험 결과의 경향성은 보이기 때문에 보다 많은 피험자를 대상으로 한다면 두 실험 사이의 차이를 확연히 볼 수 있을 것이다. 또한 피험자가 진동 자극에 훈련이 잘 되어있지 않을 수 있으므로 실험 전 충분한 훈련을 통하여 피험자가 진동 자극의 의미에 대해 잘 지각하게 할 필요가 보인다.

반면 시각에 대한 다른 감각기관의 노이즈는 두 실험 간의 뚜렷한 차이를 보인다( $p<0.05$ ). 이는 곧 적은 운동지각의 변화라 하더라도 감각기관의 상대적인 중요도는 큰 변화를 수반함을 의미한다.

또한 전체적으로 시각과 일치하는 다른 감각기관의 정보를 추가함으로써 시각으로 유도되는 운동지각이 높아지는 경향을 보인 것은 추후에 운동선수들이 훈련을 할 때에 시각 정보뿐만 아니라 시각과 일치하는 다른 감각 정보를 추가함으로써 선수들의 효과적인 훈련에 도움일 될 것으로 보인다.

#### 4. 결론

시각 자극과 일치하는 다른 감각 정보를 추가함으로써 시각 자극으로 유도되는 운동지각이 높아질 것인가에 대해 기울어짐 지각을 측정함으로써 운동지각을 평가하였다. 추가된 감각 정보로 발바닥에 진동 자극을 가해주었는데 이 감각 정보의 추가로 인해 시각으로 유도되는 기울어짐 지각이 향상되는 경향을 보였다. 즉, 기존의 감각 정보를 뒷받침하는 감각 정보를 추가하였을 경우, 운동지각이 증가하는 경향을 보인다. 또한 칼만 필터를 통해 시각, 전정기관, 촉각의 운동지각

에 대한 중요도를 정량화 할 수 있었고, 시각과 일치한 감각 정보의 추가로 시각의 중요도를 높일 수 있다.

#### 후 기

본 연구는 지식경제부 및 한국산업기술평가관리원의 산업융합원천기술개발사업(IT융합)의 일환으로 수행되었음(10041059, SOT기반 모션제어 컨트롤 플랫폼용 interactive 스마트웨어 기술 개발).

#### 참고문헌

- (1) Wall, C. III., Weinberg, M. S., Schmidt, P. B. and Krebs, D. E., 2001, "Balance Prosthesis Based on Micromechanical Sensors Using Vibrotactile Feedback of Tilt," *Biomedical Engineering, IEEE Transactions on*, Vol. 48, No. 10, pp. 1153~1161.
- (2) Wolpert, D. M., Ghahramani, Z. and Jordan, M. I., 1995, "An Internal Model for Sensorimotor Integration," *Science*, Vol. 269, pp. 1880~1882.
- (3) Welch, G. and Bishop, G., 1995, "An Introduction to the Kalman Filter," University of North Carolina, Department of Computer Science, TR 95-941.
- (4) Park, S., 2011, "4D, beyond 3D," *The Segye Times*, Vol. 6, No. 7015, p. 10.
- (5) Kuo, A. D., 2005, "An Optimal State Estimation Model of Sensory Integration in Human Postural Balance," *Journal of Neural Engineering*, Vol. 2, No. 3, pp. S235~S249.
- (6) Stevenson, I. H., Fernandes, H. L., Vilares, I., Wei, K. and Kording, K. P., 2009, "Bayesian Integration and Non-Linear Feedback Control in a Full-Body Motor Task," *PLoS Comput Biol*, Vol. 5, No. 12, e1000629.
- (7) Mahboobin, A., Loughlin, P. J., Redfern, M. S., Anderson, S. O., Atkeson, C. G. and Jessica K. Hodgins, 2008, "Sensory Adaptation in Human Balance Control: Lessons for Biomimetic Robotic Biped," *Neural Networks*, Vol. 21, pp. 621~627.
- (8) Robert J. Peterka, and Martha S. Benolken, 1995, "Role of Somatosensory and Vestibular Cues in Attenuating Visually Induced Human Postural Sway," *Experimental Brain Research*, Vol. 105, No. 1, pp. 101~110.

- (9) Shunji Nakamura, 2010, "Additional Oscillation Can Facilitate Visually Induced Self-Motion Perception: The Effects of Its Coherence and Amplitude Gradient," *Perception*, Vol. 39, pp. 320~329.
- (10) Borah, J., Young, L. R. and Curry, R. E., 1988, "Optimal Estimator Model for Human Spatial Orientation," *Annals of the New York Academy of Sciences*, Vol. 545, pp. 51~72.
- (11) Evans, M. J., 1998, "Modeling the Oculomotor System Using Modern and Adaptive Control Theory," In *Master thesis*, p. 26.
- (12) Stark, L., 1968, "Neurological Control Systems: Studies in Bioengineering," *Plenum Press*, Newyork, pp. 313~317.