Journal of the Ergonomics Society of Korea
Vol. 29, No. 6 pp.861-868, December 2010 DOI:10.5143/JESK.2010.29.6.861

Extended Fitts' Law for Three-Dimensional Environment

Yeonjoo Cha, Rohae Myung

Department of Industrial Engineering, Korea University, Seoul, Korea

ABSTRACT

This study explored an extended three-dimensional Fitts' law that is more suited for the pointing task than the conventional Fitts' law. The experiments were conducted under the manipulation of the distance to the target, size of the target, and direction of the target's location that can be described by two angles, $\theta 1$ and $\theta 2$. Considering the starting point as the center of coordinates, $\theta 1$ is the angle between the positive z-axis and the target location and $\theta 2$ is the angle between the positive y-axis and the projected target location on the x-y plane. From the experimental results, we confirmed that all four variables significantly affect the movement time. As we extended the index of difficulty of the conventional Fitts' model by incorporating $\theta 1$ and $\theta 2$, we established an extended Fitts' model that showed better accordance with the empirical data than the conventional Fitts' model and 3D Fitts' law of Murata and Iwase, in terms of the r^2 and the standard error of the residual between the measured movement time and the predicted value.

Keywords: Fitts' law, Movement direction, 3D

1. Introduction

실제 3차원 환경에서 인터페이스를 조작할 때 직접 손가락을 이용해 표적을 포인팅하는 과제가 많은 비중을 차지하고 있고, 이러한 인터페이스를 설계할 때 포인팅 작업에 소요되는 이동시간을 모델링 할 수 있다면 좀더 효율적인 3차원 인터페이스 디자인이 가능할 것이다. 포인팅 과제에서의 이동시간을 예측하는 기존 모델로는 대표적으로 Fitts' law (Fitts, 1954, 1964)가 있고 이것은 human psycho-motor bahavior에 관한 모델로 정보처리이론에 기반한다(Miller, 1953, 1956; McGill, 1954; Attneave, 1959; Garner, 1962). 정보처리이론에서 인간은 정보처리기로 취급되며 이동 수행이 정보의 전달과 같다. 이러한 점에 기반하여 Fitts는 인간의 움직임에 대한 이동시간을 식 1과 같이 나타내었다.

$$MT = a + b\log_2(2D/W) \quad (1)$$

Fitts' law에 의하면 시작점으로부터의 표적까지의 이동시간(MT)은 표적의 너비(W)와 표적까지의 거리(D)의 로그함수로 나타낼 수 있다. 식 1에서의 로그 부분은 Index of difficulty(ID)로 과제의 난이도를 나타낸다. 이 값은 D와 W에 의해 결정되는데, D가 2배씩 커질수록 그리고 W가 1/2배가 될수록 ID는 1bit씩 증가한다. MT는 ID와 선형적인 관계를 지니며 선형회귀분석을 통해 상수 a와 b의 값이 결정된다. 상수 a는 ID가 0일 때에도 기본적으로 걸리는 시간이고, b는 장치 자체의 고유의 속도를 의미한다. ID가 0일 때 MT가 0이어야 하므로 이상적인 a의 값은 0이어야 하지만 대부분의 선형회귀분석의 결과 0이 아닌 값이 나온다. b의 역수인 1/b은 인간의 정보처리율(rate of information processing)로써 1초에 전송되는 정보의 양으로 bits/sec의 단위를 지닌다.

이동시간을 예측하는 대표적인 모델이지만 식 1과 같은 Fitts' law에는 두 가지 문제점이 있다. 첫 번째 문제점은 ID 값이 3 이하일 경우 실제 실험 값보다 예측 값이 더 작게 나온다는 것이고, 두 번째 문제점은 log term의 괄호 안의 부분이 1보다 작아질 경우 ID가 음수가 나오게 된다는 것이다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 다양한 연구들이 이루어졌고 대표적으로 Welford(1960, 1968)가 식 2와 같

Corresponding Author: Rohae Myung. Department of Industrial Engineering, Korea University, Seoul, Korea.
Mobile: 02-3290-3392, E-mail: rmyung@korea.ac.kr

은 형태의 Fitts' law를 제시하였다.

$$MT = a + b\log_2(D/W+0.5) \quad (2)$$

그러나 이러한 Welford의 식을 통해 첫 번째 문제점은 해결되지만 두 번째 문제점은 해결되지 않는다. 두 가지 문제점을 모두 해결하기 위한 연구로 MacKenzie(1989, 1992)가 Shannon의 정보 이론에 기반하여 식 3과 같은 변형된 형태의 Fitts' law를 제시하였다.

$$MT = a + b\log_2(D/W+1) \quad (3)$$

이 공식은 Shannon의 Theorem(Shannon and Weaver, 1949)에 기반했기 때문에 Shannon's formulation이라고도 불린다. MacKenzie의 식은 위의 두 문제점을 해결하여 항상 양의 값의 *ID*를 생성하고, 실제 실험 값과 더 잘 일치한다는 장점이 있으며 현재 많이 사용되고 있다.

본래 Fitts' law는 1차원 환경을 기반으로 개발되었기 때문에 1차원 기반의 포인팅 과제에 대한 *MT*를 성공적으로 예측한다. 그러나 2차원 및 3차원 기반의 포인팅 과제에 대한 *MT*의 예측 값은 실험 값과 많은 오차가 발생하게 되는데 이것은 1차원을 가정으로 만들어진 Fitts' law의 특성상, *D*와 *W*, 두 변수만 이용해서는 2차원 및 3차원 환경에서의 포인팅 과제를 잘 나타내기 어렵기 때문이다. 따라서 이와 같은 과제에서는 Fitts' law의 예측력(predictive power)이 떨어지게 된다. 이를 해결하기 위해 2차원 상에서의 포인팅 과제에 대한 *MT*를 정확히 예측하기 위해 많은 연구들이 이루어져 왔다(Accot and Zhai, 2003; MacKenzie and Buxton, 1992). 그 중 Crossman(1956)은 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$MT = a + b\log_2(D/W+1) + c\log_2(D/H+1) \quad (4)$$

Crossman은 표적의 높이의 영향을 고려하여 이를 기존 1차원 기반의 Fitts' law에 추가 및 통합하였다. *D*와 *W*는 기존 Fitts' law와 동일하게 표적까지의 거리와 표적의 너비를 나타내고, *H*는 표적의 높이를 나타낸다. *a*, *b*, *c*는 상수

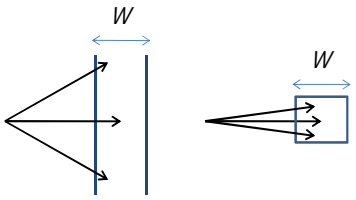


Figure 1. Directional constraint by the target heigh

이며 이 모델에서 높이에 대한 *ID*가 추가되면서 이동 방향(movement direction)에 대한 제약(directional constraint)이 고려되었다. Figure 1에서 보이는 것과 같이 높이에 따라 포인팅 과제의 방향이 제한되게 된다.

Hoffmann과 Sheikh(1994)에 의하면 Drury 또한 Crossman과 같이 표적의 높이를 고려하였으며 식 5와 같이 MT는 *W*와 *H*에 대한 *ID* 값 중 큰 값을 이용하여 나타낼 수 있다.

$$MT = a + b[\text{maximum } (ID_H, ID_V)] \quad (5)$$

위와 같은 표적의 높이의 영향에 관한 연구들 외에도 많은 연구자들이 이동 방향(movement directional)을 이동시간에 영향을 미치는 중요한 변수로써 고려하였다. 즉, Figure 2에서 보이듯이 1차원에서의 포인팅 과제에서와 달리 2차원 기반의 포인팅 과제에서는 θ가 *MT*에 영향을 미친다.

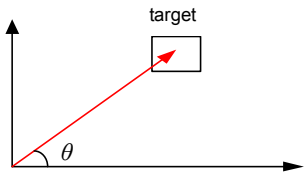


Figure 2. Movement in two-dimension space

2차원 환경 외에 3차원 환경의 포인팅 과제에 대한 연구도 이루어져 왔는데 Grossman과 Balakrishnan(2004)은 Fitts' law를 3차원의 가상 volumetric display로 확장시켰다. 이들의 모델에서 *MT*는 이동 각도(movement angle), 표적의 너비, 높이 그리고 표적까지의 거리의 함수로 나타내어진다. 그러나 이들의 연구는 3차원의 가상 volumetric display에서만 연구되었고, 실제 3차원 환경에서의 포인팅 과제에 대해서는 연구되지 않았기 때문에 실제 손가락을 이용한 포인팅 과제에 대한 *MT* 예측에는 적절하지 못하다.

실제 손가락을 이용한 3차원 환경에서의 포인팅 과제에 대한 연구로 Murata와 Iwase(2001)가 기존 Fitts' law를 확장하여 *MT*를 예측하였다. 이들의 연구에서 *MT*는 기존 Fitts' law에 이동 방향에 대한 변수의 항을 통합함으로써 식 6와 같이 나타내어진다.

$$MT = a + b\{\log_2(d/s+1)+c\sin\theta\} \quad (6)$$

이동 방향은 $\theta 2$로 나타내어지며 $\theta 2$는 Figure 3에서 보이듯이 시작점에서 표적이 위치한 평면을 봤을 때의 평면상의 방위각으로 0°에서 360°의 값을 갖는다. 즉, 3차원 환경에서의 포인팅 과제에서 표적이 방위상 어디에 위치해

있는지를 나타낸다.

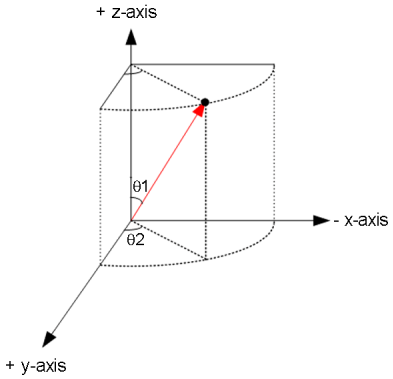


Figure 3. Movement in three-dimension space

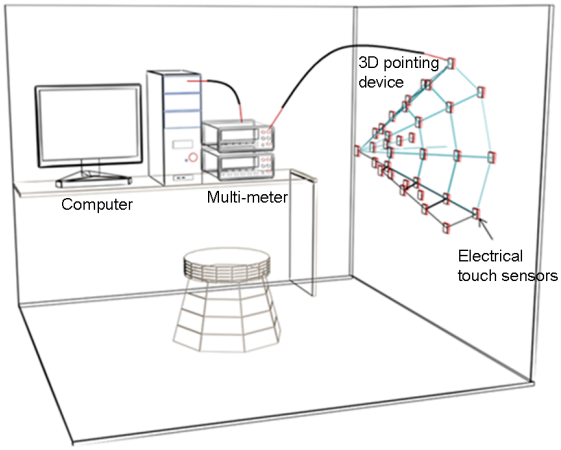


Figure 4. Schematic of the experimental setup

그러나 Figure 3에서 보이듯이 *θ2*가 같더라도 *θ1*이 다르면 이동 방향이 바뀌게 되며, 따라서 3차원 환경에서의 이동 방향은 *θ1*과 *θ2*를 모두 사용해야만 정확히 나타낼 수 있다. *θ1*은 양의 *z*축에서 표적의 위치까지의 각도로 3차원 환경에서의 포인팅 과제에서는 팔이 벌어지는 각도를 의미한다. Murata와 Iwase(2001)의 연구에서는 *θ2* 하나만을 이용하여 이동 방향을 나타냈기 때문에 3차원 환경에서의 이동 방향을 정확히 나타냈다고 보기 어렵다.

이번 연구에서는 이동 방향에 대해 *θ1*과 *θ2*를 동시에 고려하고, 두 변수가 *MT*에 미치는 영향에 대해 연구하였다. 또한 연구 결과를 바탕으로 이동 방향에 대한 변수의 항을 통합함으로써 실제 3차원 환경에서의 포인팅 과제에 적합한 확장된 Fitts' law를 개발하고, 확장된 모델과 기존 모델을 비교 및 평가하였다.

2. Method

2.1 Participants

실험은 고려대학교 대학교 및 대학원에 재학 중인 12명을 대상으로 실시하였고, 8명의 남자와 4명의 여자로 이루어졌다. 피실험자의 평균 나이는 27.1(±1.37)세이고, 모두 오른손잡이이다.

2.2 Apparatus

실험 환경은 Figure 4와 같이 설치되었다. 3차원 포인팅 장비는 전기적 센서와 전선으로 이루어졌고, 벽에 부착시킬 수 있도록 설계되었다.

전기적 센서들은 3차원 포인트 장비의 시작점(1개)과 표적(32개)을 포함한 33개의 지점에 부착되었고 모두 전선을 통해 연결되었다. 또한 전선들을 모두 디지털 멀티미터에 연결하여 전기적 신호를 컴퓨터에서 받아들일 수 있는 신호로 전환되도록 하였다. 피실험자가 센서에 손을 갖다 대는 순간 저항이 변화되고 이러한 저항의 변화가 디지털 멀티미터에 의해 감지되는 순간 컴퓨터에 신호를 보내게 된다. 디지털 멀티미터는 1,000Hz로 작동되고, *MT*를 1,000분의 1초의 정확도로 측정할 수 있다. 이것은 *MT*가 밀리 초 단위로 측정되는 것을 의미한다. 이러한 저항의 변화에 의한 신호를 이용하여 시작점에서 손가락을 떼는 순간부터 표적에 손가락을 대는 순간까지의 시간을 계산하는 타이머 프로그램을 만들어 자동적으로 *MT*가 계산 및 저장되도록 하였다.

Figure 5(a)는 3차원 포인팅 장비의 정면 모습으로 파란색 원으로 된 점과 빨간색 정사각형의 점은 각각 시작점과 표적을 나타낸다. 시작점은 장비의 중앙에 위치하고, 표적은 모든 수준의 *D*와 *θ2*를 만족하도록 32(4×8)개로 구성된다. 또한 모든 수준의 *θ1*을 만족하도록 Figure 5(b)의 장비의 옆모습에서와 같이 *θ1*을 변화시킬 수 있도록 설계되었다. 표적은 자석을 이용해 자유롭게 탈 부착할 수 있도록 하여 여러 수준의 *W*에 대해 실험이 가능하도록 하였고, 전도성을 띠도록 알루미늄으로 제작되었다.

2.3 Procedure

우선 피실험자들은 벽에 부착된 3차원 포인팅 장비 앞에 앉도록 요구되었고, 모두 오른손잡이기 때문에 피실험자들의 오른쪽 어깨와 시작 포인트의 높이 및 위치가 일치되도록 하였다. 그 후 피실험자들의 오른손 검지손가락을 시작점 위에 위치시키도록 하였다. 이때, 몸통이 장비로부터 약

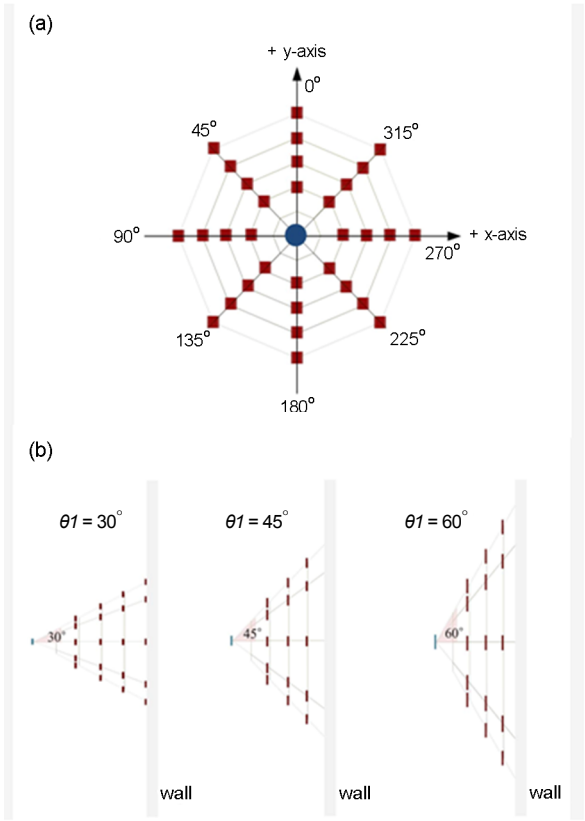


Figure 5. Schematics of the 3D pointing device. (a) Front view of the 3D pointing device: the denoted angles are values of $\theta 2$. (b) Side view of the 3D pointing device: the denoted angles are values of $\theta 1$.

50cm 정도 떨어지게 하였고, 팔이 약 90° 정도 꺾이도록 하여 편안한 자세를 취하도록 하였다. 피실험자가 시작점에 손가락을 갖다 대면 녹색의 준비 신호가 들어오고, 준비가 되면 표적으로 손가락을 이동시켰다. 준비 신호는 시작점에 손을 대는 순간부터 들어오고, 이 신호가 켜져 있는 동안에는 자신이 원하는 아무 때에나 손가락을 이동시키면 타이머가 작동되어 시간측정이 시작된다. 또한 Fitts' law는 time-minimizing movement task에 관한 것이기 때문에 피실험자들은 손가락을 가능한 빨리 표적으로 이동하도록 요구되었다. 실험을 실시하는 동안 피실험자들이 되도록 일정한 자세를 유지하도록 하였고 움직임은 되도록 몸통은 가만히 있으되 오른쪽 팔만을 이용하도록 하였다.

2.4 Variables

이번 연구에서는 4개의 독립변수와 1개의 종속변수를 구성하였다. 독립변수는 시작점으로부터 표적까지의 거리(D), 표적의 너비(W) 그리고 $\theta 1$과 $\theta 2$이고, 종속변수는 이동시간(MT)이다. D는 시작점의 중앙으로부터 표적의 중앙까지의 거리로 정의하였고, 표적의 모양은 정사각형으로 표적의 너비는 한 변의 길이로 정의하였다.

2.5 Design

실험은 within-subject repeated measure로 디자인되었다. 각 독립변수의 수준은 $\theta 1$의 경우 3수준으로 설계되었고($\theta 1$ = 30°, 45°, 60°) $\theta 2$는 8수준($\theta 2$ = 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270°, 315°), D는 4수준(D = 30cm, 40cm, 50cm, 60cm), 그리고 W는 3수준(W = 1cm, 2cm, 3cm)으로 설계되었다. 피실험자 모두 모든 독립변수의 수준에 대해 실험이 실시되었고 총 288(4×3×8×3)번의 포인팅 과제를 수행하였다. 하나의 고정된 $\theta 1$ 값에 대해 96(4×3×8)번의 포인팅 과제가 수행되었고, 약 10분의 휴식시간이 주어졌으며 그 후 $\theta 1$을 변화시켜 다시 실험을 실시하였다. 실험 시작 전, 3차원 포인팅 장비에 익숙해지기 위해 피실험자들은 약 30번 정도 포인팅 과제를 연습하였다.

3. Results

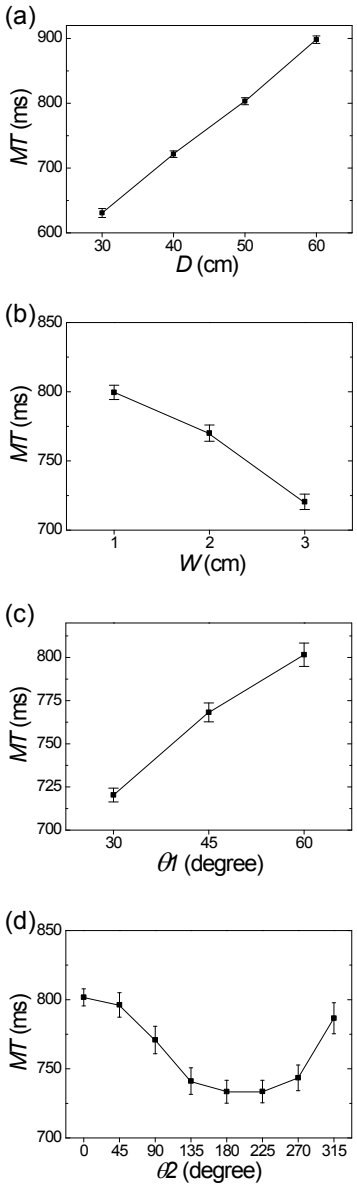
3.1 Main Effects

실험에서 에러적 수행(error trial)은 분석에서 제외되었다. 에러적 수행은 피실험자가 잘못된 표적을 포인팅하거나 표적에 정확히 손가락을 대지 않아 시간이 잘못 계산되었을 경우로 정의하였다. ANOVA 결과, $\theta 1$($F(2, 18) = 71.11$, $p<0.0001$), $\theta 2$($F(7, 63) = 13.28$, $p<0.0001$), D($F(3, 27) = 416.76$, $p<0.0001$) and W($F(2, 18) = 68.08$, $p<0.0001$)로 모든 독립변수들이 MT에 유의한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한 모든 변수들 사이에서 유의한 상호작용(interaction)이 발견되지 않았다.

3.2 Movement time with four independent variables

Figure 6은 MT와 각 독립변수 사이의 관계를 보여준다. 실험결과 D가 증가할수록 MT가 증가하였고, W가 증가할수록 MT가 감소하였다. 이러한 특징은 기존 Fitts' law의 특성과 잘 부합된다.

이동 방향을 나타내는 변수 $\theta 1$과 $\theta 2$에 대해서는 다음과 같은 경향을 보였다. $\theta 1$이 증가할수록 MT가 선형적으로 증가하였는데 이것은 사람이 팔을 벌리는 각도가 더 넓을수록 MT가 더 커진다는 것을 의미한다. 또한 $\theta 2$에 따른 MT의 변화는 코사인 함수의 형태를 보였다. 즉, $\theta 2$가 0°에서 180°



의 범위에서는 표적의 위치가 점점 밑으로 내려가 MT가 증가하였고, 다시 180°에서 315°의 범위에서는 표적의 위치가 점점 위로 올라가 MT가 증가하였다. 그러나 표적의 높이가 같다고 해서 MT가 같은 것은 아니었다. Figure 5(a)에서 왼쪽 반원에 위치한 표적이 상대적으로 오른쪽 반원에서 같은 높이에 위치한 표적에 비해 MT가 더 오래 걸리는 경향을 보였다. 즉, 45°와 315°, 90°와 270°, 135°와 215°는 평면상 같은 높이에 위치해 있지만, 왼쪽 반원에 있는 표적($\theta 2$ = 45°, 90°, 135°)에 대한 MT가 오른쪽 반원에 있는 표적($\theta 2$ = 225°, 270°, 315°)에 대한 MT에 비해 더 큰 경향을 보였다. 그리고 실험 결과 D와 W가 같더라도 MT가 $\theta 1$과 $\theta 2$에 따라 유의한 차이를 보였고, 이는 3차원 포인팅 과제에 대해서는 이 두 가지 변수가 추가적으로 고려되어야 하는 것을 의미한다.

3.3 Development of model

실험 결과 변수 D와 W 외에 $\theta 1$과 $\theta 2$가 MT에 유의한 영향을 미쳤으며 이 결과를 이용하여 이 연구에서는 이 두 변수를 기존 Fitts' law에 통합 및 확장시켰다. 모델 개발에는 12명 중 8명의 데이터만 사용되었고 나머지 4명의 데이터는 모델 검증을 위해 남겨두었다. 3차원 환경에서의 포인팅 과제에 적합하도록 확장된 Fitts' law의 ID는 식 7과 같다. 본 연구에서는 등 뒤쪽의 표적을 포인팅하는 과제에 대해서는 고려하지 않았기 때문에 $\theta 1$은 90° 이내로 한정시켰다. $\theta 2$에 대해 각각의 피실험자의 MT와 전체 피실험자의 평균 MT 값은 코사인 함수 형태로 나타내어질 수 있기 때문에 기존 Fitts' law의 ID에 $\theta 2$의 코사인 함수를 통합시켰다.

$$ID_{\text{extended}} = c\theta 1 + d\cos\theta 2 + \log_2(D/W+1) \quad (7)$$

식 7에서 c와 d는 임의의 상수로 선형회귀분석을 통해 결정된다. $\theta 1$과 $\theta 2$의 값은 도(°) 단위로 측정되고, D와 W의 단위는 센티미터이다. 위 식을 이용하여 개발된 모델은 식 8과 같다.

$$MT = 23.81 + 120.26 ID_{\text{extended}};\ r^2 = 0.756 \quad (8)$$

최적의 r^2 값(0.756)은 c가 0.03, d가 0.4일 때이며 이 값은 모든 3차원 포인팅 과제에 대한 확정 값이 아니라 실험 데이터에 따라 결정된다.

3.4 Comparison with existing models

본 연구에서는 ID_{extended}가 기존 모델을 더 향상시켰다는 것을 증명하기 위해 남은 4명의 데이터를 이용하여 기존 Shannon's formulation(식 3) 및 실제 3차원 환경에서의 포인팅 과제에 대한 Murata와 Iwase의 공식(식 6)과 비교 분석하였고 분석 결과는 Table 1과 같다.

Shannon's formulation의 공식(식 3)을 이용하여 ID를 선형회귀 분석한 결과 r^2 값이 0.488로 확장된 모델(r^2 = 0.76)에서보다 낮았고, 식 3을 통한 예측 값과 실제 실험에서의 측정 값 사이의 표준 오차 값이 6.89로 확장된 모델($stderr$ = 3.67)에서보다 높았다. 이는 기존 공식(식 3)이

Table 1. Comparison of r^2 and *stderr* of each model.

Model	r^2	*Stderr(msec)*
Shannon's formulation(Eq. 3)	0.48	6.89
Extended model(Eq. 7)	0.76	3.67
Murata & Iwase(Eq. 6) For data include all level of $\theta 1$	0.54	5.42
Murata & Iwase For data include one level of $\theta 1$ (30°)	0.61	4.62
Murata & Iwase For data include one level of $\theta 1$ (45°)	0.60	5.17
Murata & Iwase For data include one level of $\theta 1$ (60°)	0.57	5.51

1차원 기반에서 만들어졌기 때문에 3차원 환경에서의 포인팅 과제에 대한 예측력이 떨어지기 때문이라고 볼 수 있다.

Murata의 공식은 3차원 환경에서의 포인팅 과제에 대한 것으로 $\theta 2$를 기존 Fitts' law에 반영하였다. 때문에 분석 결과 기존 Fitts' law보다는 r^2가 높고 표준 오차가 작게 나타났다(r^2 = 0.54, *stderr* = 5.42). 그러나 표 1의 하단 부분에서 보이듯이 여러 수준의 $\theta 1$을 포함하는 전체적 공간의 데이터에 대한 r^2 값(0.54)이 $\theta 1$이 한 수준일 때의 데이터에 대한 r^2 값보다 낮게 나타난다. 예를 들어, $\theta 1$이 30°일 때의 데이터에 Murata의 공식을 대입하여 분석하였을 때 r^2가 0.61로 모든 $\theta 1$ 수준을 포함하는 전체 데이터에 대입하여 분석하였을 때(r^2=0.54)보다 높았다. 이는 $\theta 1$이 45°, 60°일 때의 데이터를 제외하기 때문에 $\theta 2$만으로 이동 방향을 정의하는 Murata의 공식의 특성상 예측력이 높아지기 때문이다. 그러나 3차원 공간은 여러 수준의 $\theta 1$을 포함하기 때문에 Murata의 공식이 전체적 3차원 공간에 적용되기에는 부족함이 있다.

Figure 7은 *ID*에 따른 데이터의 분포도로 기존 모델(ID_{conv})과 Murata의 모델(ID_{murata})보다 확장된 모델($ID_{extended}$)에서 데이터가 덜 퍼져 있는 것을 보여준다. 이는 본 연구에서 제안한 Extended model에 의한 예측 값이 데이터와 더 근접한 것을 나타내며 다른 두 모델보다 *MT*를 더 정확히 예측한다는 것을 의미한다.

분석 결과 1차원 환경에서 개발된 Shannon's formulation에 비해 이동 방향을 방위각($\theta 2$)으로 나타낸 Murata와 Iwase의 모델이 *MT*를 더 정확히 예측하였다. 그리고 Murata와 Iwase의 모델에 $\theta 1$을 추가하여 통합한 Extended model이 r^2 값 및 표준 오차 면에서 이동시간을 제일 정확히 예측하였으며 결과적으로 예측력이 제일 높았다.

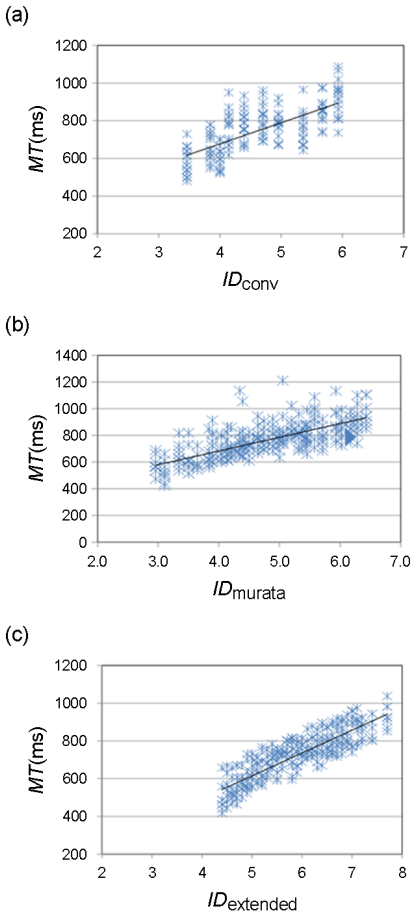


Figure 7. Raw data for (a) the conventional *ID*, (b) the Murata & Iwase's *ID* and (c) the extended *ID*. The r^2 of ID_{conv}, ID_{murata} and $ID_{extended}$ are *0.48*, *0.54*, *and 0.76*

4. Discussion

기존 연구에서는 3차원 환경에서의 포인팅 과제에 대한 이동시간을 표적까지의 거리와 표적의 너비만으로 나타내거나(MacKenzie, 1989), 평면 위의 표적의 방위각($\theta 2$)을 통해 이동 방향에 대한 항을 추가로 통합하여 나타내었다(Murata & Iwase, 2001). 하지만 MacKenzie의 모델은 1차원 환경의 포인팅 과제에는 적합하나 3차원 환경에서의 포인팅 과제를 충실히 나타내기에 부족하였다. 또한 Murata의 모델 역시 3차원 공간에서의 포인팅 과제에 대한 이동 방향을 정확히 나타내지 못하였다. 그러므로, 본 연구에서는 Figure 3과 같이 3차원 환경에서의 이동 방향을 좀더 정확히 나타낼 수 있도록 Murata의 모델에 또 다른 각도 변수($\theta 1$)를 추가한 모델을 제안하였다.

3차원 공간에서의 포인팅 과제에 대한 실험 분석 결과 표적까지의 거리와 표적의 너비가 이동시간에 유의한 영향을 미치는 것으로 나타났으며 이것은 기존 Fitts' law의 연구 결과와 일치한다. 또한 표적을 바라볼 때의 평면 상의 방위각($\theta 2$)과 평면 위의 수직선과의 각도($\theta 1$)가 이동시간에 유의한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 즉, 시작점으로부터 표적까지의 거리와 표적의 너비가 같다고 해도 MT는 $\theta 1$과 $\theta 2$의 수준에 의해 변화된다. 평면상의 방위각의 이동시간에 대한 영향은 Murata와 Iwase의 연구 결과와 일치하나 $\theta 1$이 추가적으로 이동시간에 영향을 미치며 $\theta 1$을 포함하여 확장된 모델이 이동시간을 더 정확히 예측하였다. 이는 $\theta 1$과 $\theta 2$ 모두를 이용하였을 때에 3차원 공간상의 이동 방향을 정확히 나타낼 수 있기 때문이다.

본 연구에서 제안된 모델에 의한 예측 값과 실제 실험 값 사이의 표준 오차 값은 표 1에서 보이듯이 3.67로 기존 MacKenzie의 공식에 의한 값(6.89) 및 Murata와 Iwase의 공식에서의 것(5.42)보다 낮았으며 r^2 값 또한 높게 나타났다. 이와 같은 결과는 본 연구에서 제안한 모델이 기존 모델들에 비해 3차원 공간에서의 이동시간을 더 잘 예측한다는 것을 나타낸다.

r^2와 표준 오차에 의한 정량적인 결과 이외에도 $\theta 2$한 변수만을 이용하여 이동 방향을 나타내는 Murata와 Iwase의 모델은 Figure 5(a)와 같이 평면 위에 위치한 표적의 방향만을 나타낸다. 그러므로 전체적인 3차원 공간에서는 표적으로의 이동 방향을 나타내는 데에 무리가 있으며 본 연구에서 $\theta 1$을 추가함으로써 이러한 단점을 해결하였다. 또한 $\theta 1$을 추가함으로써 MT의 accuracy에 유의한 변화를 주었기에 3차원 공간에서의 포인팅 과제에서 MT를 정확히 예측하기 위해서는 $\theta 2$ 이외에 $\theta 1$이 추가적으로 필요하다고 볼 수 있다.

$\theta 1$과 $\theta 2$의 영향은 인간 신체에의 물리적 요인 때문에 발생한다. $\theta 1$이 점점 증가할수록 팔을 더 넓게 벌리는 것이 그렇지 않은 것보다 더 힘들기 때문에, 더 큰 물리적 부하가 팔과 어깨에 걸리게 된다. 이것은 같은 거리를 포인팅하더라도 $\theta 1$이 증가할수록 MT가 길어지는 것을 의미한다. $\theta 2$의 영향은 왼쪽 반원($\theta 2 = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$)과 오른쪽 반원($\theta 2 = 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ, 315^\circ$)의 두 범위로 나뉘어진다. 팔을 올리는 것이 내리는 것보다 더 힘들기 때문에 왼쪽 반원에서는 $\theta 2$가 증가할수록 MT가 작아지게 되고, 오른쪽 반원에서는 $\theta 2$가 증가할수록 표적의 위치가 높아지게 되어 MT가 더 증가한다. 더욱이 같은 높이에 위치한 표적에 대해, 왼쪽 반원에서의 MT가 오른쪽 반원에서의 MT보다 크다. 이것은 피실험자가 오른손잡이이기 때문에 같은 높이에 위치해 있더라도 오른쪽에 있는 표적을 포인팅하는 것이 왼쪽에 있는 표적을 포인팅하는 것보다 더 쉽기 때문이다.

본 연구 결과 이동 방향을 위한 각도 변수 $\theta 1$과 $\theta 2$는 3차원 환경에서의 포인팅 과제에서의 정확한 이동시간 예측을 위한 중요한 요인이 된다. 그 이유는 표적까지의 거리(D)와 표적의 너비(W)만으로는 3차원 환경에서의 포인팅 과제를 잘 나타낼 수 없으며 D와 W가 같을 경우에도 이동시간에 많은 오차가 발생하여 예측력이 떨어지기 때문이다. 즉, 기존 Fitts' law에서처럼 D와 W만을 사용하여 이동시간을 예측하는 것은 3차원 환경에서 적합하지 않다. 3차원 환경에서의 이동 과제에 대해서는 그를 충실히 나타내기 위한 추가 변수를 고려해야 함은 물론, 이러한 변수를 모델에 반영해야 한다. 따라서 본 연구에서는 이동 방향을 나타내는 2개의 각도 변수를 모델에 반영하여 이동시간을 정확히 예측하는 모델을 제시할 수 있었다. 본 연구에서 제시된 확장된 Fitts' law는 3차원 환경에서의 이동시간을 예측하고 공간 디자인 등의 영역에서 잘 활용될 수 있다.

5. Conclusion

본 연구를 통하여 얻을 수 있는 결론은 다음과 같다.

3차원 환경에서의 이동 방향은 두 가지 각도 변수를 이용하여 정확히 나타내어질 수 있으며 실험 결과 두 변수 모두 이동시간에 유의한 영향을 미친다. 분석 결과 이동 방향을 아예 고려하지 않은 기존 Fitts' law와 각도 변수를 한 가지만 반영한 Murata와 Iwase의 모델보다 두 가지 변수를 모두 반영하였을 때의 모델이 3차원 이동 과제에 대한 이동시간을 더 잘 예측하였다.

이와 같은 연구 결과를 통해 두 변수를 기존 Fitts' law에 반영하여 3차원 환경에서의 포인팅 과제에 대한 확장된 모델을 제시하였으며 그 결과 기존 연구들에 비해 이동시간을 더 정확히 예측할 수 있었다.

본 연구 결과는 3차원 공간에서의 이동시간 예측 뿐 아니라 공간 인터페이스의 평가 및 개발에 활용될 수 있다.

Acknowledgements

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education, Science and Technology (Grant No. 2010-0013188). And this work was also supported by the Second Brain Korea 21 Project.

References

Accot, J. & Zhai, S., Refining Fitts' law models for bivariate pointing, *ACM CHI*, (pp. 193-200), 2003.

Attneave, F., *Applications of Information Theory to Psychology: A summary of basic concepts, methods, and results*. New York: Holt-Dryden, 1959.

Crossman, E. R. F. W, *The measurement of perceptual load in manual operations*, Unpublished Ph.D. thesis, University of Birmingham., 1956.

Fitts, P. M., The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology,* 47, (pp. 381-391), 1954.

Fitts, P. M., Information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology, 67*. (pp. 103-112), 1964.

Garner, W. R., *Uncertainty and structure as psychological concepts.* New york: Wiley, 1962.

Grossman, T. & Balakrishnan, R., Pointing at trivariate targets in 3D environments, *ACM CHI.* 6(1), (pp. 447-454), 2004.

Hoffmann, E. & Sheikh, I., Effect of varying target height in a Fitts' movement task. *Ergonomics,* 37(6), (pp. 1071-1088), 1994.

McGill, W. J., Multivariate information transmission. *Psychometrika,* 19, (pp. 97-116), 1954.

MacKenzie, I. S., A note on the information-theoretic basis for Fitts' law. *Journal of Motor Behavior*, 21. (pp. 323-330), 1989.

MacKenzie, I. S., Fitts' law as a research and design tool in human-computer interaction. *Human-Computer Interaction.* 7. (pp. 91-139), 1992.

MacKenzie, I. S. & Buxton, W., Extending Fitts' law to two-dimensional tasks. *ACM CHI.* (pp. 219-226), 1992.

Miller, G. A., What is information measurement? *American Psychologist*, 8, 3-11, 1953.

Miller, G. A., The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. *The Psychological Review,* 63, (pp. 81-97), 1956.

Murata, A. & Iwase, H., Extending Fitts' law to three-dimensional pointing task. *Human Movement Science*, 20. (pp. 791-805), 2001.

Shannon, C. E. & Weaver, W., *The mathematical theory of communication*. Urbana: University of Illinois Press, 1949.

Welford, A. T., The measurement of sensory-motor performance: Survey and reappraisal of twelve years' progress. *Ergonomics,* 3. (pp. 189 -230), 1960.

Welford, A. T., *Fundamentals of skill*. London: Methuen, 1968.

Author listings

Yeonjoo Cha: aaduswn@korea.ac.kr

Highest degree: 고려대학교 전기전자전파공학부 학사
Position title: 고려대학교 산업경영공학과 석사과정
Areas of interest: HCI, 인지공학

Rohae Myung: rmyung@korea.ac.kr

Highest degree: Texas Tech University, Industrial Engineering Ph.D
Position title: 고려대학교 산업경영공학과 정교수
Areas of interest: 인지공학, 사용성 공학, HCI

논 문 접 수 일 (Date Received) : 2010년 07월 20일
논 문 수 정 일 (Date Revised) : 2010년 10월 29일
논문게재승인일 (Date Accepted) : 2010년 10월 29일