

가상현실 시스템에서의 3차원 입력장치의 인간성능 평가

Human performance evaluation of the three-dimensional input devices in virtual environment system

박재희*, 박경수**

ABSTRACT

An experiment was designed to evaluate Fitts' law for the three-dimensional virtual pointing task and to compare the three input devices: Spaceball, Spacemouse, and 3D-Mouse. The result showed that Fitts law fitted poorly for the three-dimensional pointing tasks with relatively low coefficients of determinant. Three reasons, high degree-of-freedom, dynamic egocentric viewpoint change, and clutching problem were discussed to explain the poor fitness of Fitts' law. In terms of device comparison, the 3D-Mouse was superior to the other input devices. Also, the stereoscopic display significantly increased the performance. The results of this study can be used for the design of virtual control tasks and the selection of suitable input devices.

Keyword: Fitts' law, virtual reality, three-dimensional pointing task, human performance.

* 한경대학교 안전공학과
주 소 : 456-749 경기도 안성시 석정동 67
전 화 : 0334-670-5283
E-mail: maro@hnu.hankyong.ac.kr
** 한국과학기술원 산업공학과

1. 서 론

가상현실(VR: Virtual Reality) 시스템은 사용자의 감각을 차단하고 대신 인공적인 감각을 제공함으로써 사용자가 현실감 있는 가상세계를 경험하도록 한다(Pimentel and Teixaria, 1994). 이런 가상현실 시스템은 건축물 탐색(navigation)이나 운전 시뮬레이션(simulation)과 같은 분야 등에 효과적으로 사용되고 있는데 대부분 현실감을 높이기 위해 3 차원 상호작용(interaction) 방법을 채택하고 있다. 이를 위해 기존의 마우스나 일반 모니터와 다른 3차원 마우스나 입체시를 제공하는 HMD(Head Mounted Display) 등이 사용되고 있다.

이러한 3차원 입출력장치들은 가상 세계의 현실감을 높이는 데에는 매우 유리하나 많은 문제점도 가지고 있다. 특히 어떤 작업을 주어진 시간 안에 빠르고 정확하게 해야 하는 인간성능 측면에서 더욱 그러하다. 가상의 3 차원 공간에서 어떤 작업을 한다는 것은 실제 세계와 달리 매우 어려울 수 있다. 실제 가상현실 시스템을 경험한 많은 사람들이 이런 점을 들어 가상현실 기술의 유용성에 대해 회의 를 갖기도 한다.

따라서 가상현실 시스템의 성공적 개발과 적용에는 인간성능을 고려한 상호작용 방법과 이를 가능하게 하는 3차원 입출력장치의 설계가 매우 중요한 과제가 된다. 본 연구는 이러한 측면에서 3차원 입력장치들의 인간성능을 평가하는 방법에 관심을 두었으며, 실제 평가도 수행하였다.

그 동안 입력장치의 인간성능을 평가하는 모형으로 핏츠의 법칙(Fitts, 1954)이 널리 사용되어 왔다. 핏츠의 법칙은 인간 지체의 이동 시간을 예측하기 위한 수학적 모형으로 개발되었는데, 실제 손, 발, 눈동자 등의 이동 시간 예측에 매우 효과가 있다는 것이 여러 실험을 통해 입증되었다(Hoffman, 1991; Kweon, 1994; Gillan, Holden, and Adam, 1990).

또한 핏츠의 법칙은 컴퓨터에서 입력장치로 조작하는 커서(cursor)의 이동 시간을 예측하는데에도 사용될 수 있다는 것이 Card 등의 연구에 의해 처음 밝혀졌다(Card, English, and Burr, 1978). 이후 여러 연구자들이 마우스, 트랙볼, 조이스틱 등 다양한 2 차원 입력장치에 대한 핏츠의 법칙을 적용했다(MacKenzie, Sellen, and Buxton, 1991; Gillan et al., 1990; Han et al., 1991; MacKenzie et al., 1991; Park and Lee, 1994). 표 1은 그 동안 2차원 입력장치들에 대해 수행된 실험 결과들과 핏츠 법칙의 설명력을 보여주고 있다. 대부분의 연구에서 핏츠 법칙은 매우 모두 높은 설명력을 보여주고 있다.

그러나 2 차원 입력장치에 비해 3차원 입력장치에 대한 연구는 아직 많지 않다(Kim, Tendick, and Stark, 1993; Lee and Park, 1996; Jacob et al., 1994; Zhai and Milgram 1993; Zhai, Buxton, and Milgram 1996). 표 2에 3차원 입력장치에 대한 연구내용을 정리하였다.

표 1. 2차원 입력작업에 대한 선행연구 결과

Studies	Devices	Tasks	R ² s of Fitts' law
Card et al. (1978)	mouse, joystick, textkeys, stepkeys	text selection	0.83~0.95
Gillan et al.(1990)	mouse	pointing, dragging	0.87~0.99
Han et al. (1990)	four different mice	point-drag, tracking etc.	0.83~0.90
MacKenzie et al.(1991)	mouse, trackball, stylus	pointing, dragging	0.92~0.99
Park and Lee(1994)	mouse, trackball	pointing, dragging	0.60~0.89

Milgram(Zhai and Milgram, 1993), 김형석(1996)은 3차원 입력 작업에는 핏츠 법칙을 적용할 수 없다고 보고하고 있다.따라서 본 연구는 3차원 입력작업에 있어 핏츠 법칙의 적용 가능성을 파악하고, 이를 이용해 다양한 3차원 입력장치의 인간성능을 비교 평가하는 데 그 목적을 두었다. 이를 위해 등척성(isometric), 등력성(isotonic), 혼합형 등 3 개의 입력장치를 평면시(monoscopic display)와 입체시 (stereoscopic display) 두 조건에서 실험을 수행하였다. 본 연구의 결과는 가상현실 시스템의 입력작업 설계와 적절한 입력장치의 선택에 도움을 줄 수 있을 것이다.

표 2. 3차원 입력작업에 대한 선행연구 결과

Studies	Devices	Tasks	R ² s of Fitts' law
Kim et al. (1993)	separated two joysticks	pick-and-plate	not-studied
Zhai and Milgram (1993)	Spaceball, Flock of birds	pointing (fitting)	not-studied
Jacob et al. (1994)	Polhemus 3Space	positioning	not-studied
Lee et al. (1996)	Spaceball, 3D-Mouse	contacting	not-studied
Zhai et al. (1996)	Flock of Bird with clutch	grasping	not-studied

이들 연구 대부분 3차원 입력장치의 평가에 핏츠 법칙을 적용하지 않았고, Zhai와

2. 연구방법

2.1 피실험자

22~28 세 사이의 5 명의 남자가 실험에 참여하였다. 이들 모두 시각과 수동 작업에 특별한 이상을 갖고 있지 않았다. 피실험자 모두 오른손잡이로 입력장치 조작 시 모두 오른손을 사용했다.

이들은 최소 3 년 이상의 컴퓨터를 사용한 경험들을 가지고 있었다. 그러나 이전에 본 연구에서 채택하고 있는 입력장치나 가상현실 시스템을 사용한 경험은 전무했다. 따라서 실험 전 가상현실 시스템에 익숙하게 하기 위해 각 입력장치들에 대해 30분 이상의 연습을 실시해 익숙해지도록 했다.

2.2 실험장치

실험에는 서로 다른 세 종류의 입력장치인 Spaceball™, Spacemouse™, 3D-Mouse™가 사용되었다. Spaceball은 구형 센서에 접촉하는 6 방향(x, y, z, roll, pitch, yaw)의 힘을 감지해 이를 커서의 위치와 방향을 결정짓는 등척성(isometric) 입력장치이다.

반면 3D-Mouse는 등력성(isotonic) 입력장치로 마우스의 3차원 공간 이동을 초음파 센서로 감지해 이를 커서의 이동으로 변환해 준다. 특기할 사항은 목표점까지의 거리가 멀 경우, 클러치(clutch)를 조작하며 3D-Mouse를 왼 팔을 여러 차례 전후로 이동해야 커서가 목표점까지 도달하는 불편함이 있다.

Spacemouse는 초기에 약한 힘을 가할 경우 힘센서를 둘러싼 납작한 원기둥 형 덮개가 움직이며 등력성 장치의 특성을 갖는다. 그러나 덮개가 최대 이동 변위까지 움직이면 더 이상 움직이지 않고 Spaceball과 같은 등척성 특성을 갖는다. 따라서 Spacemouse는 두 장치의 특성을 혼합한 형태의 입력장치라고 할 수 있다(Zhai and Milgram 1993). 실험에 사용된 3 개의 입력장치를 그림 1에 나타내었다.

피실험자들에게 입체시를 제공하기 위한 출력장치로는 셔터링 글래스(shuttering glasses) 방식의 CrystalEyes™시스템을 사용하였다. 수평 방향으로 약간 어긋난 두개의 이미지가 양 눈에 번갈아 들어와 대뇌에서 하나의 입체 영상이 형성된다. 일반 평면시 조건에서의 실험을 위해서는 120Hz VGA 모니터가 사용되었다. 실험에 사용될 가상환경은 가상환경

제작도구인 Superscape VRT4™를 사용해 제작하였다. 실험은 PC에서 수행되었으며 프레임 재생율(refresh rate)은 20Hz로 동영상의 흐름이 자연스러워 실험에 문제가 없었다.

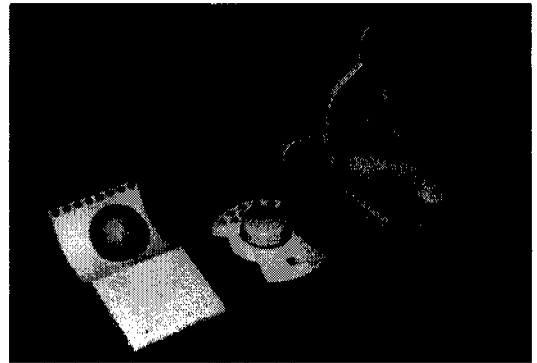


그림 1. 3차원 입력장치: 좌로부터 Spaceball, Spacemouse, 3D-Mouse

2.3 실험절차

입력장치를 비교하기 위한 대상 작업으로 입력작업의 대표 격인 포인팅(pointing) 작업을 선정했다. 포인팅 작업은 커서(cursor)를 표적(target)까지 이동시킨 후 표적을 선택하는 행위로 드래깅(dragging) 작업과 함께 GUI(Graphic User Interface) 환경에서 가장 대표적인 입력작업으로 여겨지고 있다(Gillan et.al., 1990). 이러한 작업 평가를 위해서는 커서와 표적을 필요로 하는데 다음과 같이 설정했다.

가상환경 시스템 내에서의 거리는 상대적인 개념으로 본 연구에서 커서는 한 변의 길이가 1000(Superscape unit)인 정육면체가 되도록 했다. 반면 표적은 한 변의 길이가 1000에서 10000 범위 내에서 무작위로 1000 단

위 크기를 갖는 정육면체로 설정했다.

커서의 출발점은 원점(0,0,0)으로 잡았고, 표적의 위치는 원점으로부터 x, y, z 방향으로 변이를 두되 화면의 시야 범위 내에 들어 오도록 하고 원점으로부터의 거리는 10000에서 200000 범위 내에서 무작위로 나타나게 하였다. 표적이 화면의 시야 범위 내에 있도록 하기 위해 모니터 표면 상의 x 축, y 축으로의 변이는 적게 한 반면 스크린 표면에 직교하는 z 축 방향으로의 변이는 상대적으로 크게 했다.

표적의 표면은 투명하게 하여 커서가 표적 뒤에 위치해도 커서의 위치를 확인할 수 있도록 했다. 포인팅 작업은 커서의 중심 좌표가 표적 내부에 위치한 후 입력장치의 버튼을 누르면 종료되도록 했다. 3차원 공간 상에서의 작업으로 커서가 표적 내에 있는 지 여부를 판단하기가 무척 어렵기 때문에 커서가 표적 내에 들어가면 커서의 색깔이 변하게 하여 피실험자의 판단을 돕도록 했다. 그림 2는 포인팅 작업 내용을 보여주고 있다.

실험은 2 개의 출력장치(평면시와 입체시)와 3 개의 입력장치(등척성, 등력성, 혼합형)의 조합인 6 개 조건에서 수행되었다. 피실험자는 6 개의 실험 조건을 무작위로 할당 받았다. 각 피실험자는 각 실험 조건에서 30 회의 포인팅 작업을 수행했다. 따라서 1 인당 총 수행 회수는 180 회(=2×3×30)가 된다.

한 조건의 실험이 끝날 때마다 피로효과를 줄이기 위해 피실험자는 충분한 휴식을 취하도록 했다.

실험 분석을 위해 100 msec 당 커서의 x,

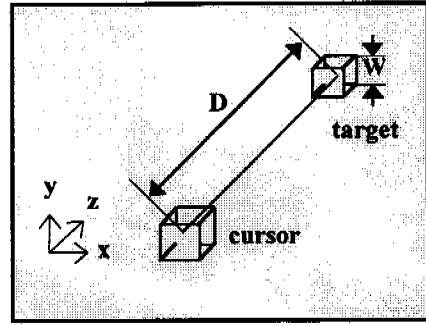


그림 2. 3차원 포인팅작업

y, z 좌표 값을 자동으로 로그(log) 파일에 기록하도록 프로그램 했으며, 포인팅 작업이 완료되면 작업 수행에 걸린 시간을 1 msec 단위까지 계산해 기록되도록 했다. 각 포인팅 작업의 제한시간은 120 sec로 이 시간 내에 포인팅 작업을 완수하지 못하면 제외하고 재시도를 하도록 했다.

2.4 결과분석

3차원 포인팅 작업이 쉽지 않아 데이터 중 이상치(outlier)가 일부 있는 것으로 판단되었다. 따라서 로버스트(robust) 회귀분석 방법의 하나인 LMS(Least Median of Squares)를 사용하여 이상치를 합리적으로 제거 한 후 나머지 데이터만 피츠의 모형 설정에 사용하였다(Rousseeuw and Leroy, 1987). 입력장치 간의 비교에는 각 입력장치 별 피츠의 모형을 수립하고 이들이 일반 선형 회귀 모형이라는 점을 고려해 회귀식의 동일성을 검정하는 방법을 사용하였다(Seber, 1977).

3. 결과와 토의

3.1 3차원 포인팅 작업의 핏츠 모형

그림 3은 실험 결과 데이터를 산점도(scatter diagram)로 그리고 핏츠 모형의 선형회귀식을 나타낸 것이다. 그림에서 X 축의 작업의 난이도 ID(Index of Difficulty)는 표적의 크기와 표적까지 거리의 로그 함수($ID = \log_2(2D/W)$, D: 표적까지 거리, W: 표적의 크기)로 계산된 것이다.

본 실험에서 표적의 크기와 표적까지 거리를 무작위로 나타나게 하였기 때문에 X 축의 분포는 일정하지 않다. 여기서 핏츠의 모형은 Y 축의 포인팅까지 걸린 시간 MT (Movement Time)와 ID를 독립변수로 하는 선형회귀식($MT = a + b \cdot ID$)이 된다(Fitts, 1954).

핏츠의 모형을 6 개 실험 조건의 데이터에 대해 적용해 본 결과는 표 3에 나타나 있다. 포인팅 시간과 작업난이도 간의 상관계수는 0.48~0.62 범위로 나타났다. 그리고 6 조건 모두에서 선형회귀식은 모두 유의한 것으로 나타났다($P < 0.001$).

그러나 회귀식의 설명력을 나타내는 결정계수(R^2)의 값은 2 차원 입력작업에 비해 매우 낮은 것으로 나타났다($R^2 = 0.16 \sim 0.49$). 그 이유에 대해서는 다음 3.4 절에서 자세히 토의될 것이다.

표 3. 3차원 입력장치의 핏츠 모형과 결정계수

Displays Controllers	Monoscopic Display	Stereoscopic Display
Spaceball	$Y = -0.46 + 1.35 ID$ ($R^2 = 0.16$)	$Y = -1.75 + 1.28 ID$ ($R^2 = 0.35$)
Spacemouse	$Y = -1.42 + 1.79 ID$ ($R^2 = 0.29$)	$Y = -0.56 + 1.04 ID$ ($R^2 = 0.30$)
3D-Mouse	$Y = -2.45 + 1.84 ID$ ($R^2 = 0.34$)	$Y = -1.17 + 1.04 ID$ ($R^2 = 0.49$)

3.2 출력장치 간 비교

일단 모든 회귀식의 유의성은 입증되었기에 회귀식의 동일성 검정 방법을 이용해 평면시와 입체시를 사용한 경우의 인간성능을 비교하였다. 예상했듯이 결과는 모든 경우에 입체시가 평면시에 비해 좋은 성능을 나타내었다(Spaceball, $F_{2,243} = 18.218$, $P < 0.001$; Spacemouse, $F_{2,238} = 43.224$, $P < 0.001$; 3D-Mouse, $F_{2,255} = 52.342$, $P < 0.001$).

평면시의 경우 양안시차(binocular disparity)에 의한 z 축 방향의 깊이 정보(depth cue)를 얻을 수 없고, 표적과 커서와의 상대적 크기 비교에 의해서만 깊이 정보를 얻을 수 있기에, 피실험자들은 자주 표적을 지나쳤고 이 때문에 포인팅 작업에 많은 시간이 소요되었다. 이런 경향은 작업의 난이도(ID)가 커질수록 더 큰 것으로 나타났다.

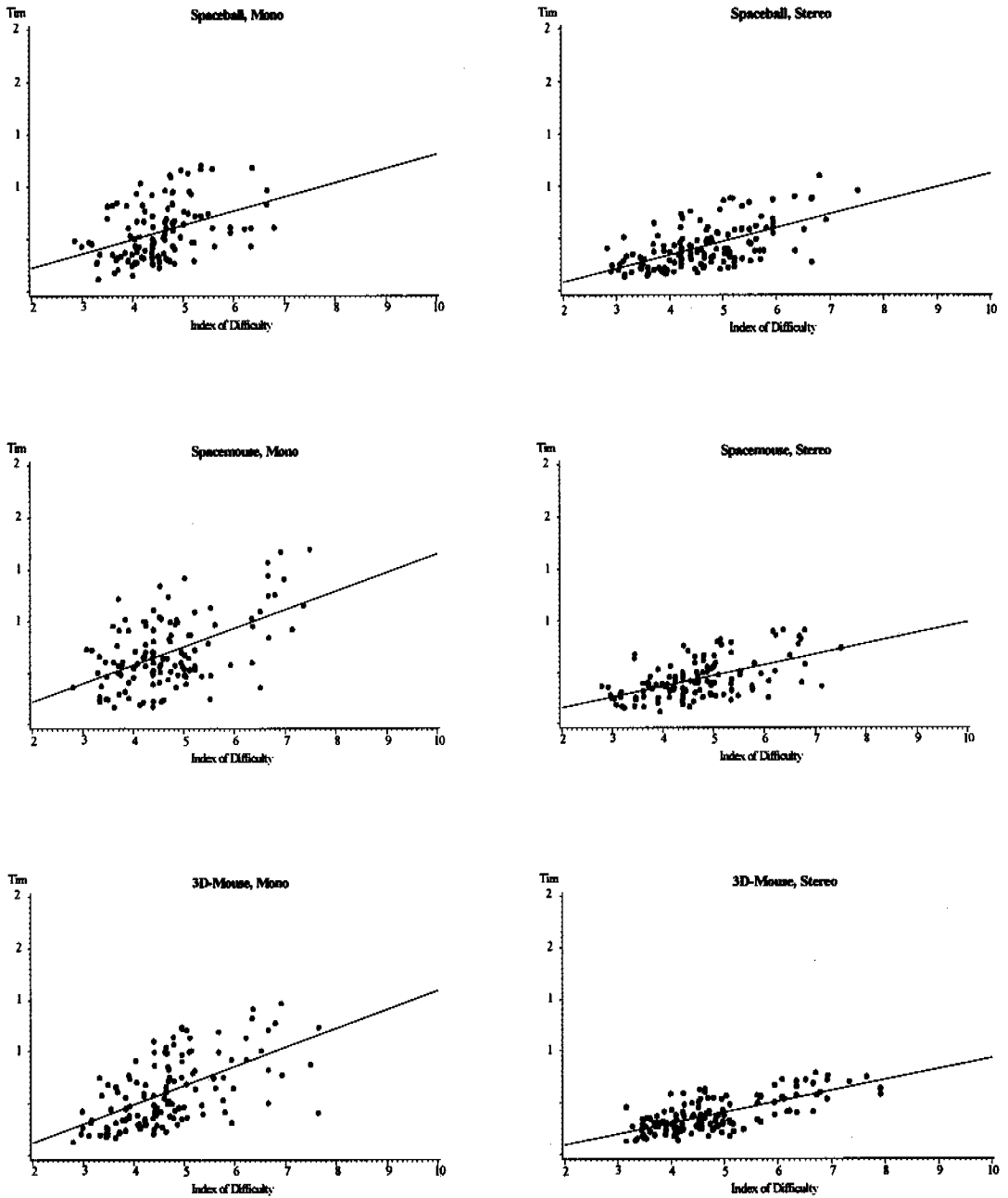


그림 3. 3차원 포인팅작업 산점도와 회귀식

3.3 입력장치 간 비교

3개 입력장치의 인간성능을 평면시와 입체시의 경우로 나누어 비교하였다. 이 비교도 회귀식의 동일성 검정을 이용했다. 평면시 출력장치를 사용할 경우 Spaceball이 Spacemouse에 비해 좋은 성능을 보였다($F_{2,235}=5.533, P=0.005$). 3D-Mouse도 Spacemouse에 비해 좋은 성능을 보였다($F_{2,248}=3.113, P=0.046$). 그러나 Spaceball과 3D-mouse 사이에는 차이를 보이지 않았다($F_{2,243}=1.063, P=0.347$).

입체시 조건에서는 3D-Mouse가 Spaceball($F_{2,255}=5.845, P=0.003$)과 Spacemouse($F_{2,245}=5.718, P=0.004$)에 비해 우수한 결과를 보였다. 그러나 Spaceball과 Spacemouse 사이에는 유의한 차이가 없었다($F_{2,246}=0.689, P=0.503$). 결과적으로 입체시 조건에서는 등력성 입력장치인 3D-Mouse를 사용하는 것이 가장 인간성능이 좋은 것으로 나타났다.

이처럼 등력성 입력장치가 좋은 성능을 보인 것은 공간 상에서의 팔의 운동이 커서의 이동과 일치하기 때문에 체성감각(proprioceptive sense)을 적절히 이용해 표적의 위치까지 쉽게 이동할 수 있었던 점에 기인하는 것 같다. 반면 Spaceball이나 Spacemouse는 이를 위해 각 방향의 힘을 적절히 기억해 조절해야 하는데 이것이 등력성 장치인 3D-Mouse 보다 쉽지 않았다.

또한 3D-Mouse는 이동 시 팔의 회전 운동이 신체 구조상 크게 제한되어 커서의 이동이 크게 흔들리지 않는 반면, Spaceball이나 Spacemouse는 자칫 회전 방향으로 힘을 크

게 주면 커서가 방향을 잃고 뒤집어져 표적이 시야에서 사라지는 경우가 상대적으로 많이 발생해 작업 수행시간을 오래 걸리게 했다. 그러나 등력성 입력장치인 3D-Mouse는 Spaceball이나 Spacemouse보다 팔의 운동이 커서 장시간 사용할 경우에 팔의 피로를 유발할 수 있다는 단점을 가지고 있다.

3.4 3차원 입력작업의 특성

3.1 절에서 밝혔듯이 3 차원 입력작업에 핏츠 모형을 적용하는 경우 그 설명력이 크게 떨어지는 것을 알 수 있었다. 이러한 결과가 나타난 원인을 밝히는 것은, 3차원 입력작업의 특성을 이해하고 인간성능을 높이는데 많은 도움을 줄 것이다. 이처럼 3차원 입력작업이 어렵고 작업 수행시간의 변이가 커서 핏츠 법칙의 설명력이 크게 떨어지는 이유로 크게 3차원 입력작업의 높은 자유도(degree of freedom)에 따른 제어의 어려움, 자기 중심적 시야 채택에 따른 표적의 잦은 실종, 그리고 등척성 장비에 국한된 특성이지만 클러치의 존재를 들 수 있다. 각각의 원인을 자세히 살펴보면 다음과 같다.

첫째, 3차원 입력작업의 높은 자유도는 커서의 제어를 매우 어렵게 만든다. 1차원 혹은 2 차원 작업에 비해 3 차원 입력 작업은 최대 6 자유도까지 가질 수 있다. 일반적으로 자유도가 증가할수록 제어의 어려움은 커지게 된다. 본 연구에서도 6 자유도의 제어는 너무 어려워 실제 5 자유도(x, y, z, pitch, and yaw)만 부여해 커서가 완전히 뒤집어져 방향 감각을 상실하는 것을 줄이려 했다. 하

지만 그래도 피실험자들은 자주 방향 감각을 잃고 표적을 못 찾아 많은 시간을 허비했다.

원래 핏츠의 법칙은 1차원 이동 작업에 직선 이동을 가정한 모형이다. 2차원 포인팅 작업 역시 이 가정을 지키지는 못하나 평면에서의 커서 이동 시 자유도가 작기 때문에 거의 표적까지 직선운동을 할 수 있어 핏츠의 법칙이 잘 적용된다(MacKenzie, 1992). 반면 3 차원 공간은 어느 방향이던 커서의 이동을 허용하기에 입력장치의 제어를 잘 못 한다면 커서의 궤적은 금세 직선에서 벗어나 엉뚱한 위치로 가기 쉽다.

그림 4 는 3차원 포인팅 작업에서의 커서 궤적의 한 예를 보여주고 있다. 이 궤적이 직선에 가까운 경우는 거의 없다고 할 수 있다. 따라서 직선이동을 하지 않는 3차원 작업은 직선이동을 가정한 핏츠의 법칙을 적용 시 설명력이 크게 떨어질 수 밖에 없는 것이다.

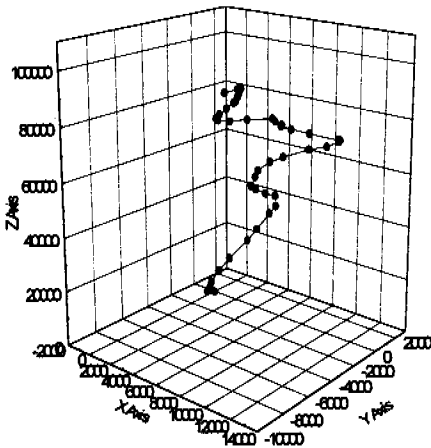


그림 4. 3차원 포인팅작업의 커서 궤적의 예

둘째, 자기중심적 시점(egocentric viewpoint) 설정이 3차원 제어작업을 더욱 어렵게 만든다. 자기중심적 시점은 커서에 시점을 두고 주변을 보는 것인데, 본 실험에서는 커서 위쪽에 시점을 두고 커서에 연동시켜 커서의 움직임에 시점도 따라 다니도록 했다. 따라서 마치 커서는 스크린의 한 점에 고정된 것처럼 보이고 배경이 움직이는 것처럼 피실험자들은 느끼게 된다. 그런데 건축물 탐색(navigation) 등 가상현실 응용 프로그램 대부분은 자기중심적 커서를 채택하게 된다. 따라서 본 실험에서도 자기중심적 시야를 갖는 커서를 채택했다.

그러나 대부분 컴퓨터 상에서의 1차원과 2 차원 이동 작업은 외부중심적 시점(external viewpoint)을 갖는다. 즉 화면의 배경은 그대로 있고 커서의 움직임이 표시된다. 반면 자기중심적 시점은 커서는 화면의 한 곳에 고정된 것처럼 보이고 배경이 변화된다. 따라서 커서가 방향을 바꿈에 따라 배경이 계속 변화되므로 표적이 시야 범위 내에서 사라지기 쉽고, 목표를 잃은 커서는 표적과의 상대적 위치를 찾기 위해 많은 시간을 허비하게 되고 심각한 경우는 표적을 못 찾고 실험을 중도에 포기하는 경우도 나오게 한다. 이러한 행동에 추가되는 시간이 핏츠 법칙의 설명력을 떨어트리는 두 번째 이유가 된다. 이렇듯 자기중심적 시점에 따른 방향 상실을 줄이기 위해서는 화면에 참조(reference)가 될 수 있는 수평선 등을 만들어 주는 것이 도움이 될 수 있다(Zhai, S., and Milgram, P., 1993).

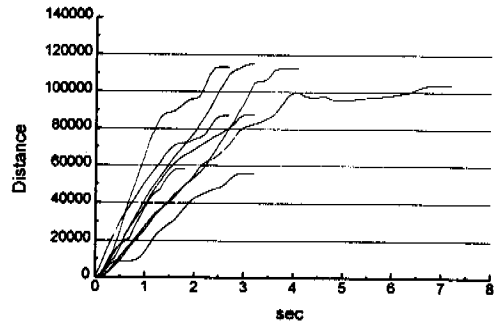
끝으로 등력성(isotonic) 입력장치의 경우 "클러치(clutch)" 문제가 핏츠 법칙의 설명력

을 떨어트리는 이유가 된다(MacKenzie, 1995). 클러치는 등력성 입력장치에 필요한 부가적 장치이다. 즉, 등력성 입력장치를 손에 쥐고 한번 팔 뻗음(reach)을 할 경우 갈 수 있는 거리에 한계가 있기 때문에, 목표까지의 거리가 멀 경우 여러 번 팔을 왕복 운동해야 한다. 이때 팔을 후퇴하면 커서의 좌표값도 같이 후퇴하여 목표까지 전진할 수 없는 문제가 발생한다. 따라서 팔의 후퇴 시 클러치 스위치를 눌러 좌표값의 변화를 정지시키고, 팔의 전진 시 클러치 스위치를 놓아 커서를 전진시켜야 한다(MacKenzie, 1995).

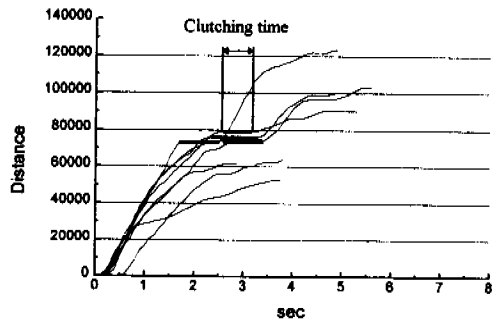
본 실험에서도 멀리 있는 표적까지 가기 위해서는 이러한 클러치를 이용해 팔의 왕복 이동을 해야 하는 경우가 있었다. 이때 클러치를 잡고 팔을 뒤로 후퇴시키는 시간은 커서의 전진 이동은 못하면서 추가로 드는 시간이기 때문에 핏츠 법칙의 설명력을 떨어트리게 된다.

그림 5는 등척성 장비인 Spaceball과 비교해 등력성 장치인 3D-Mouse 가 갖는 클러치 문제를 보여주고 있다. Spaceball은 시간 경과에 대해 커서의 움직인 거리가 연속적으로 증가하고 있는 반면, 3D-Mouse는 거리가 먼 표적의 경우 중간에 평탄한 부분을 가지고 있다. 이 평탄한 구간이 바로 커서가 이동하지 못하고 팔이 후퇴하는 시간을 보여주고 있다. 이 구간만큼 시간이 커서 이동 시간에 추가되고 핏츠 법칙의 설명력을 떨어트리는 요인으로 작용하게 된다.

본 연구에서는 이러한 문제를 고려해 핏츠 법칙의 설명력을 높일 수 있는 수정된 핏츠 법칙의 모형을 제안하였다.



(a) Spaceball



(b) 3D-Mouse

그림 5. 커서의 움직인 거리

수정된 모형에서는 이러한 추가 시간을 모형에 고려해 넣었다. 수정 제안된 핏츠 모형은 (식 1)과 같다.

$$MT = a + b \cdot ID + c \cdot NR, \\ NR = \text{Integer}(D/R) \quad (\text{식 } 1)$$

식 1의 팔뻗은 회수(NR; Number of Reach)는 표적까지의 거리(D)를 한번의 팔뻗음 거리(R)로 나눈 정수 값으로 정의했다. 즉 이 정수값이 클러치를 사용한 회수가 된

다. 여기서는 팔뚝음으로 갈 수 있는 거리의 평균은 60000으로 나타났다. 수정된 모형의 설명력을 보기 위해 동일한 실험 데이터를 사용해 모형의 모수(parameter) 값을 결정하였다.

표 4는 중회귀분석 결과와 결정계수 값을 나타내고 있다. 입체시의 경우 결정계수 값의 증가가 크게 나타나지 않았지만, 평면시의 경우에는 수정된 모형에서 결정계수의 값이 크게 증가하였다. 따라서 수정된 모형의 타당성이 일부 있는 것으로 나타났다.

표 4. 3D-Mouse를 위한 수정된 Fitts 법칙

Displays \ Controllers	Monoscopic Display	Stereoscopic Display
3D-Mouse	$Y = -1.19 + 1.28ID + 1.78NR$ $(R^2 = 0.42)$	$Y = -1.05 + 0.99ID + 0.14NR$ $(R^2 = 0.50)$

앞에서 토의했듯이 이 세 가지의 주요한 이 유가 3차원 입력작업의 인간성능을 크게 떨어 트리고 데이터의 분산을 크게 해 결국은 핏츠 법칙의 결정계수 값을 낮춘 것으로 나타났다. 물론 그렇다고 핏츠의 법칙을 3차원 입력작업 에서 아주 무시할 필요는 없다. 모형의 설명력 이 2차원 작업에 비교해 상대적으로 떨어지나 회귀 모형의 유의성은 있는 것으로 나타났고, 모든 작업난이도에 걸친 입력장치의 비교를 위 해서는 일반 모형인 핏츠의 법칙이 아직은 유 용하다고 할 수 있다. 다만 핏츠 법칙의 설명 력을 높이기 위한 노력이 요구된다 하겠다. 본 연구에서도 이를 위해 등척성 입력장비의 경우 수정된 모형을 제안한 바 있다.

4. 결 론

그 동안 핏츠 법칙은 1 차원과 2 차원 입 력 작업의 인간성능에 대한 예측력이 좋은 모 형으로 인정받아 왔다. 그러나 3 차원 입력 작업에 대해서는 아직 연구가 미미하고 핏츠 법칙의 예측력에 대한 명확한 결론이 나 있지 않은 상태이다.

본 연구에서는 핏츠의 법칙을 적용해 3 차 원 입력장치들에 대한 비교 평가를 수행하였 다. 평가 결과 등척성 입력장비를 입체시 상 태에서 사용할 때 가장 효과적이라는 것이 밝 혀졌다. 그러나 핏츠 모형의 설명력은 2 차원 작업에 비해 크게 저하되었는데 이는 3차원 제어작업의 높은 자유도, 자기중심적 시야 변 화, 등력성 장치의 클러치문제 등에서 기인한 것으로 나타났다. 따라서 이러한 점들을 염두 에 두고 이런 문제를 줄이거나 해결하는 방향 에서 3차원 입력작업을 설계할 필요가 있다.

또한 3차원 입력작업의 특성들을 잘 감안 한다면 핏츠 법칙의 설명력도 올릴 수 있는 것으로 판단된다. 본 연구에서는 그러한 노력 의 하나로 클러치 문제의 경우 수정된 모형을 통해 핏츠 모형의 설명력이 높일 수 있음 을 보여주었다.

앞으로 가상현실 시스템은 그 응용분야가 매우 많아 더 다양한 3차원 입출력 장치들이 개발되고 사용될 것이다. 이것들이 목표한 바 가상현실시스템의 현실감은 높여주면서도 인 간성능을 좋게 하기 위해서는 입력장치와 입 력작업의 인간공학적 설계가 더욱 필요할 것 이다.

참고문헌

- Card, S.K., English, W.K., and Burr, B.J. (1978). Evaluation of mouse, rate-controlled isometric joystick, stepkeys and textkeys for text selection on a CRT, Ergonomics, 21, 601-613.
- Fitts, P.M.(1954). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement, J. of experimental psychology, 47, 381-391.
- Gillan, D.J., Holden, K., and Adam, S. (1990). How does Fitts' law fit pointing and dragging?, In Proc. of CHI'90 (pp.227-23).
- Han, S.H. et al.(1990). A comparison of four input devices for the macintosh interface, In Proc. of the human factors society 34th annual meeting (pp. 267-271).
- Hoffman, E.R.(1991). A comparison of hand and foot movement times, Ergonomics, 34, 397-406.
- Jacob, R.J.K. et al. (1994), Integrity and separability of input devices, ACM Tr. On Computer-Human Interaction, 1, 3-26.
- Kim, HyungSeok (1996). A performance model and testbed for navigation in the virtual environment, M.S Thesis, KAIST.
- Kim, W.S., Tendick, F., and Stark, L. (1993). Visual enhancements in pick-and-place tasks: human operators controlling a simulated cylindrical manipulator, In Ellis, S. R.(Eds.), Pictorial communication in virtual and real environments(pp. 265-282), Taylor & Francis.
- Kweon, O. (1994), Hand movement characteristics under various conditions of vision, movement amplitude, target width, and subject characteristics, doctoral dissertation, University of Oklahoma.
- Lee, N.S., Park, J.H., and Park, K.S.(1996). Reality and human performance in a virtual world, International J. of Industrial Ergonomics, 18, 187-91.
- MacKenzie, I.S., Sellen, A., and Buxton, W.(1991). A comparison of input devices in elemental pointing and dragging tasks, In Proc. of the human factors in computing systems.(pp. 161-166).
- MacKenzie, I.S. (1992). Movement time prediction in human-computer interface, In Proc. of Graphic Interface'92 (pp. 140-150).
- MacKenzie, I.S. (1995). Input devices and interaction techniques for advanced computing, In Barfield W. and Furness III, T.A., Virtual environments and

advanced interface design (pp. 437-470), Oxford university press.

Park J.H. and Lee, N.S.(1994). Evaluating the performance of direct manipulation input devices, J. of the ergonomics society of Korea, 11, 103-109.

Pimentel, K., and Teixeira, K. (1993). Virtual reality, Mc-Graw Hill.

Rousseeuw, P.J., and Leroy, A.M.(1987). Robust regression ans outlier detection, John Wiley & Sons.

Seber, G.A.F. (1977). Linear regression analysis, John Wiley & Sons.

Zhai, S., and Milgram, P.(1993). Human performance evaluation of manipulation schemes in virtual environment, In Proc. of IEEE virtual reality annual international symposium (pp.155-161). Seattle: IEEE Computer Society.

Zhai, S., Buxton, W., and Milgram, P.(1996). The partial-occlusion effect: Utilizing semitransparency in 3D human-computer interaction, ACM Tr. On Computer-Human Interaction, 3, 254-284.

저자 소개

◆ **박재희**

서울대학교 산업공학과를 졸업하고 한국과학기술원 산업공학과에서 석사와 박사학위(1998)를 취득하였다. 한국생산성본부와 한국표준과학연구원 인간공학연구실에 근무했으며 현재 국립 한경대학교에 재직중이다. 주요 관심분야는 HCI와 VR이다.

◆ **박경수**

서울대학교에서 공학사, Univ. of Florida에서 산업공학 석사, Univ. of Michigan에서 산업공학 박사학위(1973)를 취득하였다. 미국 Rochester 공과대학 교수를 역임했으며, 현재 한국과학기술원 산업공학과 교수로 재직 중이다. 1982년 대한인간공학회 창립하고 회장을 역임했다. 1995년 한국 과학기술 한림원 종신회원으로 선임되었다. 미국 의학협회의 Adolf G. Kammer 최우수논문상(1975)과, 미국 인간공학회의 해외석학상(1988)을 수상하였다, 대표저서로 Elsevier사 발행 'Human Reliability'가 있다.

논문접수일 (Date Received): 2000/3/6

논문게재승인일(Date Accepted):

2000/5/8