

# 카메라의 상대적 추적을 사용한 핸드헬드 가상현실 인터랙션

황재인<sup>1</sup>, 김정현<sup>2</sup>, 김남규<sup>3</sup>  
포항공과대학교 컴퓨터공학과<sup>1,2,3</sup>  
{jane<sup>1</sup>, gkim<sup>2</sup>, ngkim<sup>3</sup>}@postech.ac.kr

## Camera-based Interaction for Handheld Virtual Reality

Jane Hwang<sup>1</sup>, Gerard Jounghyun Kim<sup>2</sup>, Namgyu Kim<sup>3</sup>  
Computer Science and Engineering Department, POSTECH<sup>1,2,3</sup>

### 요약

핸드헬드 가상현실 시스템이란 멀티모달 센서와 멀티모달 디스플레이 장치가 내장되어 가상환경을 제공하는 한 손으로 들고 다닐 수 있는 핸드헬드 시스템을 의미한다. 이런 핸드헬드 가상현실 시스템에서는 일반적으로 제한된 입력수단 (예> 버튼, 터치스크린)을 제공하기 때문에 이를 사용해서 3차원 인터랙션을 행하기가 쉽지 않다. 그래서 본 연구에서는 일반 핸드헬드 기기에 대부분 내장되어 있는 장치인 카메라를 사용해서 핸드헬드 가상환경에서 3차원 인터랙션을 수행하는 방법을 제안하고 구현, 평가한다.

Keyword : Interface, Interaction, Vision based tracking, Usability

## 1. 서론

근래에 들어 핸드헬드 기기들의 성능과 기능이 급격히 향상되는 추세이다. PDA(personal digital assistant)나 휴대폰, 휴대용 게임기(GBA, PSP 등)같이 한 손으로 들고 다니며 조작할 수 있는 핸드헬드 기기들은 근래에 들어 1GHz 에 가까운 속도의 CPU 를 채용하거나 그래픽스 가속칩을 사용하고 사운드 처리 모듈을 강화하는 등 멀티미디어 적인 요소가 증가하는 추세이다. 또한 이러한 디바이스에 제작된 콘텐츠는 사용자를 쉽게 몰입하게 하는 경향이 있다. 전통적인 가상현실의 관점에서 보면 사용자가 이렇게 작은 환경에 몰입한다는 것이 이해하기 힘든 측면이 있다. 하지만 사용자가 느끼는 실재감에 대한 논의 중 “형태와 내용(form vs. content)”[1]에 대한 연구 결과에 기반해 생각해 보면 설명이 가능하다. 사용자의 마음을 사로잡을 수 있는 내용(content)이 있다면 사용자가 충분히

몰입하게 될 수 있는 것이다. 그렇다면 핸드헬드 디바이스를 보다 멀티모달 측면으로 발전시킨다면 보다 높은 몰입도와 보다 나은 인터랙션 효과가 나타나리라고 기대된다.

기존의 핸드헬드 기기에서의 인터랙션은 주로 버튼이나 터치 스크린 위주로 이루어져왔다. 즉 손끝 혹은 펜끝 만을 사용한 인터랙션으로 3차원 인터랙션을 수행하기에는 많은 정보를 전달하기 힘든 인터랙션 형태였다. 이러한 방법으로는 3차원 인터랙션인 3차원 항해(navigation)나 조작(manipulation)에 많은 어려움이 있다. 이런 3차원 인터랙션을 위해서는 핸드헬드 기기에서 사용할 수 있는 3차원 추적 장치가 필요하다. 그래서 본 논문에서는 컴퓨터 비전 기반의 상대적인 위치 추적에 대해서 제시하고자 한다. 상대적인 위치 추적이란 핸드헬드 가상현실 시스템과 환경과의 상대적인 위치를 어느 정도 추정하여(estimate) 사용하는 기술을 의미한다. 이것은 연속해서 들어오는

영상을 분석하는 것으로 가능하다. 두 연속적인 영상에서의 상대적인 카메라의 위치와 방향의 추적은 다음의 세 단계를 거친다. 첫째, 앞선 영상에서 주목할 특징으로 삼을 만한 점(feature points)들인 모서리점(corners)들을 찾아낸다. 둘째, 연속된 두번째 영상에서 앞 영상에서 발견된 모서리점들과 같은 모서리점들을 찾아낸다. 셋째, 서로 같다고 발견된 모서리점들 (corresponding points)을 사용해서 두 영상 사이에 상대적인 카메라의 투영행렬(projection matrix)을 구한다. 이러한 위치 추적 방식을 이용해서 사용자는 핸드헬드 기기를 통해서 보이는 가상환경을 향해(navigation)하거나 가상환경 속에 보이는 가상 물체를 조작(manipulation)하는 것이 가능해진다. 본 논문에서는 이러한 방식이 임무 수행 성능(task performance)이나 사용성(usability) 측면에서 어떠한가를 실험을 통해 분석한다.

## 2. 관련 연구

핸드헬드 기기에서의 가상현실에 대한 가능성은 1993년에 Fitzmaurice 에 의해서 타진되었다[2]. 이 논문에서 저자는 팜탑 컴퓨터에서의 가상현실의 디스플레이와 인터페이스의 여러가지 원칙들에 대해서 제안한 바가 있다. 그러나 그 당시의 기술적인 한계로 실제로 휴대용 핸드헬드 기기를 사용할 수 없이 워크스테이션과 연결된 디스플레이와 유선 6 DOF 센서를 사용하였다. Watsen 들은 다른 가상환경과의 인터랙션을 위해서 PDA 를 사용하였으나 이들은 버튼이나 터치스크린만을 사용한 형태로 구현하였다[3]. Kukimoto 들 또한 PDA 에 기반해서 가상환경과 인터랙션 하는 시스템을 개발하였으나 6DOF 추적장치가 붙어있는 형태여서 실용적이지는 못하였다[4].

이외에 카메라를 사용한 것으로는 Wagner 가 핸드헬드 증강현실 시스템을 개발한 바가 있고[5] Paelke 들이 카메라를 통해 보이는 발로 축구를 하는 게임을 개발한바 있다 [7]. Hachet 들은 핸드헬드 기기에 장착된 카메라를 사용해서 인터랙션 하는 방법을 제안한 바 있는데 이 연구에서는 다른

손에 쥔 마커를 카메라가 인식하여 그 상대적인 움직임을 인터랙션에 적용하는 방식이었다 [8][9]. 본 논문의 연구는 Hachet 의 연구와 비슷한 면이 있지만 특수한 마커를 사용하는 것이 아니라 현재 환경의 특징점들을 마커 대용으로 사용하여 진정한 핸드헬드 인터랙션을 제공하는데 그 특징이 있다.

## 3. 상대적인 움직임 추적

상대적인 움직임 추적은 핸드헬드 가상현실 시스템의 환경상에서 상대적인 위치를 추정해 내는 것이다. 우리가 제안하는 컴퓨터 비전 기반의 상대적인 움직임 추적은 환경에 어떤 조작도 가하지 않은 상태에서 카메라 하나만을 사용하여 하는 방식이다. 이 방식은 카메라에서 들어오는 연속된 이미지들에서 특징점들을 찾아내고 그 특징점들이 어떻게 움직이는 가를 계산해서 결과적으로 카메라의 움직임을 찾아내는 방식이다. 그림 2 에서 이러한 상대적인 움직임 추적과 인터랙션의 과정을 보여준다. 비록 이러한 추적방식은 절대적인 정확도라는 측면에서는 그리 효과적이지 않지만 연속된 이미지 사이의 변화에 민감해서 사용자가 인터랙션 하기에 적합한 특징이 있다.



(a) 초기위치



(b) 회전하기



(c) Z 축으로 움직이기(전진)



(d) 가상물체를 선택하고 조작하기

그림 1. 핸드헬드 기기에서 카메라에 기반한 인터랙션

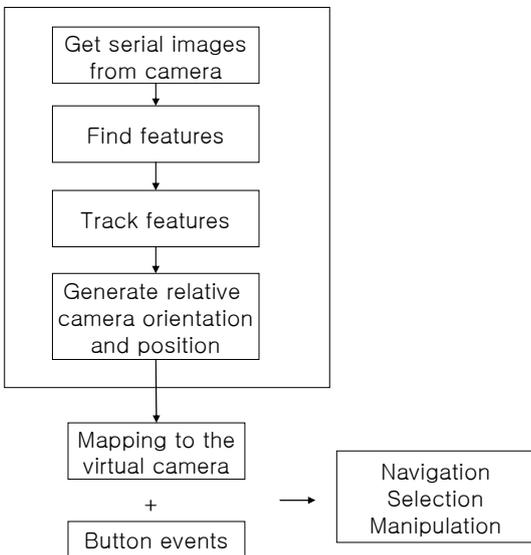


그림 2. 상대적인 움직임 추적과 인터랙션

### 3-1 특징점(feature points) 찾기

위에서 언급했다시피 본 시스템은 특별한 마커나 환경이 아닌 일반적인 환경을 그 대상으로 하기 때문에 카메라로 들어오는 영상에서 좋은 특징점을 찾아내어야 한다. 일반적으로 모서리점(corner)이 좋은 특징점으로 고려 되는데 이러한

모서리점은 이미지에서 x, y 방향으로 이미지의 변화가 심하게 일어나는 부분이다. 변화의 정도는 아래와 같은 spatial image gradient 행렬로 분석이 가능하다.

$$\begin{bmatrix} \sum_{neighborhood} \left( \frac{\partial I}{\partial x} \right)^2 & \sum_{neighborhood} \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} \\ \sum_{neighborhood} \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} & \sum_{neighborhood} \left( \frac{\partial I}{\partial y} \right)^2 \end{bmatrix}$$

$I$  : image intensity

위의 행렬에서 eigenvalue 가 두 개가 나오게 되는데 그 중에 작은 것을 선택하여 그 점에서의 코너의 정도를 알아낸다. 즉 이미지의 모든 픽셀에서 그 픽셀이 얼마나 코너의 속성을 가지는가를 두 eigenvalue 중에서 작은 것으로 나타내게 된다. 결과적으로 이미지의 픽셀 개수만큼의 코너의 속성이 나온다. 카메라의 움직임을 추적하기 위해서는 최소 7 개의 특징점이 필요한데 이 수가 증가하면 정확도가 늘어나지만 또한 처리 속도가 증가하므로 본 연구에서는 15 개를 사용한다. 코너 속성값이 높은 순서대로 15 개를 선택하여 사용한다.



그림 3. Spatial gradient matrix 를 사용해서 찾은 특징점들

### 3-2 특징점 추적하기

일단 코너인 특징점들이 찾아지고 선택되어지면 다음에는 그 특징점들이 어디로 이동했는지를 알아내어야 한다. 이 문제는 아래의 함수  $\epsilon$  를 최소화 하는 displacement vector  $d$  를 찾는 문제로 해석된다. 즉 이미지 두 장에서 일정한 영역 두개의 차이가  $\epsilon$  인데 이 값이 최소화 되는 벡터를 구하는 것이다. (여기에서  $w$  즉 윈도우 사이즈는 3 으로 하였다.)

$$\mathcal{E}(d) = \mathcal{E}(d_x, d_y) = \sum_{x=u_x-w_x}^{u_x+w_x} \sum_{y=u_y-w_y}^{u_y+w_y} (I(x, y) - J(x+d_x, y+d_y))^2$$

$I$ : first image,  $J$ : second image

위의 문제를 풀기 위해서 두 이미지 사이에 특징점을 매치시키는 방법인 Lucas-Kanade 특징점 추적 방식을 사용한다[10][11]. 이 방법은 매칭이 되는 특징점을 down sampling 된 이미지들로부터 점진적으로 찾아내는 방식을 취한다. (그림 4)

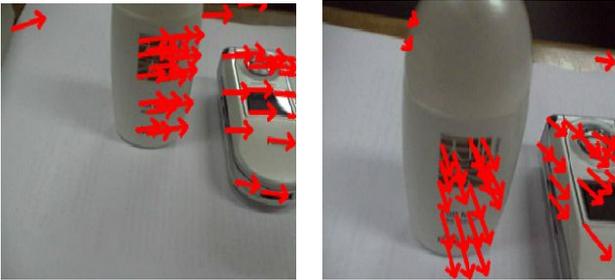


그림 4. Lucas-Kanade 특징점 추출방법을 사용한 특징점의 움직임 추적

### 3-3 카메라의 상대적인 움직임 계산하기

위에서 주어진 연속적인 두 이미지에서 일치되는 특징점들을 사용해서 카메라가 상대적으로 어떻게 움직였는지 계산하게 된다. 두 이미지에서 일치되는 특징점들이 어느 정도 있다고 해도 인위적인 기준점들(fiducial)이 주어지지 않은 상태에서 카메라의 움직임을 정확히 계산하기란 쉽지 않은 일이다[12][13][14]. 하지만 일치되는 특징점들을 사용해서 카메라의 상대적인 움직임을 찾는다는 측면에서는 가능성이 많다. 주어진 일치되는 특징점들이 있을 때 아래와 같은 조건을 만족하는 fundamental matrix  $F$  를 구할 수 있다.

$$x^T F x' = 0$$

$$x = P X$$

$$x' = P' X$$

여기에서 3 차원 공간의 점  $X$  가 두 카메라에 투영된 2 차원 점이 각각  $x$  와  $x'$  가 된다. 그리고  $P$  와  $P'$  는 그 프로젝션 행렬이 된다. 여기에서  $P$  를 단위 행렬(identity matrix)로 두고  $P'$  를 구하면 그  $P'$  가 카메라의 상대적인 움직임을 나타내게 된다. 여기에서  $P'$  를  $F$  로부터 구하게 되는데 다음

과 같이  $F$  를 SR 분해(decomposition)한 후에 Singular Value Decomposition[15]를 해서 구해내게 된다.

$$P' = [R / T] = [R(\omega, \phi, \kappa) / t] \\ = [U W V^T / U_3]$$

$$F = S R,$$

$$S = U Z U^T \text{ and } R = U W V^T$$

$$Z = \text{diag}(1, 1, 0),$$

$U$  constructed from basis of column space of  $F$ ,  $U_i$

$V$  constructed from basis of null space of  $F$ , and

$W$  is the diagonal matrix.

$\omega$ : Rotation around  $x$  axis,

$\phi$ : Rotation around  $y$  axis

$\kappa$ : Rotation around  $z$  axis

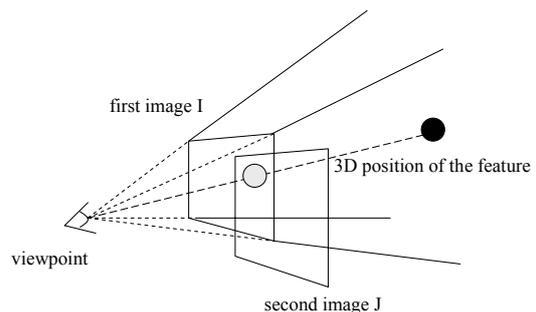
$R(\omega, \phi, \kappa)$ : Rot. matrix associated with camera orientation

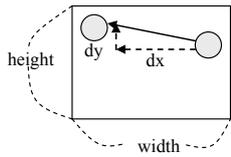
### 3-4 특징점이 충분하지 않은 경우

앞에서 주어진 식은 충분한 수의 특징점(7 개 이상)이 있을 때 풀리는 식이다. 그러나 카메라가 빨리 움직이든지 카메라로 들어오는 이미지에 특징점 자체가 별로 없는 경우에 특징점의 개수가 7 개 미만이 되는 경우가 있다. 이런 경우에는 다른 방식으로 카메라의 상대적인 위치를 추정한다.

#### 3-4-1 카메라의 회전 구하기

그림 5에서는 7 개 미만의 특징점이 있을 때 두 이미지에서 변화를 사용해서 카메라의 회전을 추정하는 것을 보여준다.





$$\Delta\omega \approx FOVy \times \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{dy}{height}$$

$$\Delta\phi \approx FOVx \times \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{dx}{width}$$

Movement of the feature in the viewing plane

그림 5. x 축으로의 회전 ( $\Delta\omega$ )과 y 축으로의 회전 ( $\Delta\phi$ ) 구하기

### 3-4-2 두 이미지에서 상대적인 Z 축 거리 구하기

두 연속적인 이미지를 사용해서 사용자가 얼마나 앞뒤로 움직였나를 추정하는 것은 회전을 구하는 것보다 복잡한 문제이다. 왜냐하면 이미지 상에서 특징점의 움직임이 약간의 좌우 회전으로 많은 영향을 받기 때문이다.

이러한 문제를 해결하기 위해서 회전으로 인한 영향을 줄이고 앞뒤 움직임을 특징을 뽑아내기 위해 특징점들의 근접정도(proximity)의 합을 사용한다. 그림 6에서 보면 카메라의 회전후에 앞뒤로 움직였을때도 특징점들 사이의 연결관계는 유지되는데 특징점들 사이의 거리는 카메라의 앞뒤 움직임에 밀접하게 관계됨을 알 수 있다. 따라서 특징점들 사이의 거리의 합을 사용해서 카메라의 앞뒤 움직임을 알아낸다. 아래의 식에서  $P$  값은 이러한 근접정도의 합을 나타낸다.

$$P = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \sqrt{(u_i - u_j)^2 + (v_i - v_j)^2}$$

( $n > 1$ )

$P_t$  를 시간  $t$  에서의 근접정도의 합이라고 했을때  $P_{t+1}$  는 시간  $t+1$  에서의 근접정도의 합이다. 이 두 값의 비율( $P_{t+1} / P_t$ )이 카메라가 앞뒤로 얼마나 움직였나를 나타내는 지표가 된다.

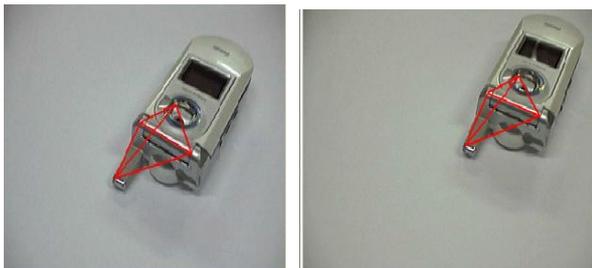


그림 6. 두 이미지에서 특징점들의 연결 관계

## 4. 상대적인 움직임 추적을 사용한 인터랙션

### 4-1 항해(Navigation)

카메라를 이용한 상대적인 움직임추적을 통해서 상대적으로 직접적인 항해 방법이 가능하다. 크게 두가지 방식으로 가능한데 하나는 실제 핸드헬드 기기의 움직임 자체가 가상 카메라의 움직임으로 매핑되는 방식(gaze mode)이고 또 다른 방식은 핸드헬드 기기가 자동차나 비행기의 조향 장치처럼 사용되는 방법(steering mode)이다. 그림 7의 a)처럼 핸드헬드 기기가 움직일 때 직접적으로 매핑되는 방식으로는 b)처럼 가상 카메라가 움직이겠지만 조향 장치 방법은 c)처럼 가상 카메라가 움직이게 된다.

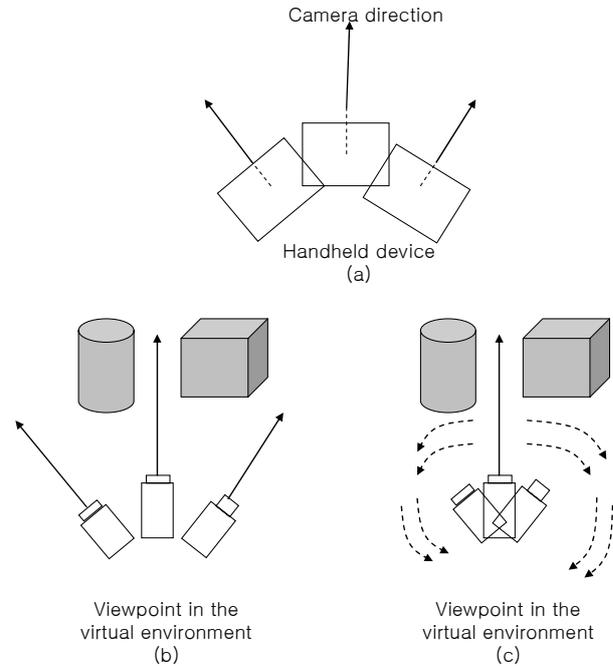


그림 7. a) 핸드헬드 기기의 움직임 b) 직접 매핑시의 가상 카메라 움직임 c) 조향 장치 방식일 때 가상 카메라 움직임

### 4-2 선택과 조작

선택과 조작을 위해서 가상 광선 발사 방식[16]과 유사한 방법이 구현되었다. 마치 핸드헬드 기기의 중간에서 가상의 광선이 발사되는 것으로 해서 그 선에 충돌이 일어나는 가상의 물체는 선택의 후보에 오르게 되고 그 상태에서 버튼을 누르면 그 가상의 물체가 선택되어 조작이 가능하게

된다.(그림 8)

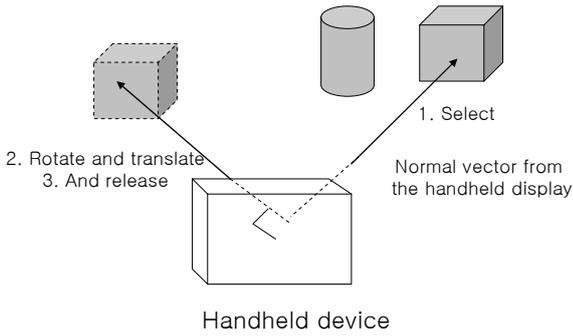


그림 8. 핸드헬드 기기를 이용한 가상물체 선택 및 조작

#### 4-3 구현

본 연구에서는 SONY 사의 핸드헬드 PC 인 VGN-U71P 이 개발 플랫폼으로 사용되었다. 그리고 Logitech 사의 QuickCam 이 카메라로 사용되었고 소프트웨어 개발 도구로는 OpenCV[18]이 이미지 처리부분에 사용되고 그래픽 생성은 Coin3D[19]를 사용하였다.

### 5. 사용성 분석

본 논문에서 사용되는 방식이 얼마나 사용성이 좋은지 두 가지 측면에서 실험하고 분석하였다. 하나는 주어진 임무(task)를 얼마나 빨리 수행할 수 있는가 하는 정량적인 측면에서 측정되고 다른 하나는 얼마나 사용하기 쉽고 배우기 쉬운가에 대해서 주관적인 설문으로 조사되었다.

실험에 주어진 임무는 공간에 있는 27 개의 가상의 물체를 주어진 순서에 따라 선택하는 것이었다. 그림 1 에서 보듯이 원통, 구, 원뿔 세 가지의 가상 물체가 공간에 분포되어 있는데 원통, 구, 원뿔의 순서로 모두 선택하는 것이 주어진 임무였다. 6 명의 20-30 세의 남자들이 실험에 사용되었고 모두 핸드헬드 게임 사용경험이 있었다. 논문에서 제시하는 인터페이스와 비교를 위해서 기존 핸드헬드 기기에서 많이 사용되는 버튼을 이용한 인터랙션 방법 또한 구현하여 비교군으로 사용하였다. 모두 주어진 인터페이스에 충분히 익숙해지도록 충분한 훈련시간이 주어진 후에 실험을 하였다. 실험 순서는 버튼 방식과 카메라 방식을 고루 섞

어서 영향이 없도록 하였다.

#### 5-1 임무 수행도(Task Performance)

그림 9 에서 보듯이 모든 피실험자들이 카메라 방식에서 더 빠른 임무 수행 능력을 보였다. 카메라 방식의 평균 수행 시간은 2 분 37 초였고 버튼 방식은 3 분 52 초로 1 분 15 초 정도 더 걸렸다. 이는 카메라 방식에 비해서 50% 정도 더 많이 걸린 것으로 paired T-test 를 사용한 실험 분석 결과 p 값이 0.004 로 유의하게 두 가지 방식 중에서 카메라 방식이 낫다는 결론이 내려졌다.

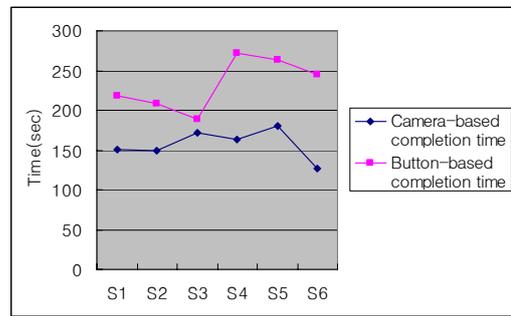


그림 9. 각 피실험자의 임무 수행 시간

#### 5-2 사용성 평가

7 Likert 스케일로 카메라 방식과 버튼 방식의 사용하기 쉬운 정도와 배우기 쉬운 정도에 대한 질문이 주어졌다. 그림 10 에서 보듯이 두 가지 질문에 대해서 카메라가 더 배우기 쉽고 사용하기 쉽다라는 경향이 나왔다. Paired T-test 를 사용한 분석 결과 사용하기 쉬운 것은 p 값이 0.038 로 유의하게 카메라 방식이 나은 것으로 나왔고 배우기 쉬운 것 또한 p 값이 0.018 로 카메라 방식이 유의하게 더 배우기 쉽다라는 결론이 나왔다.

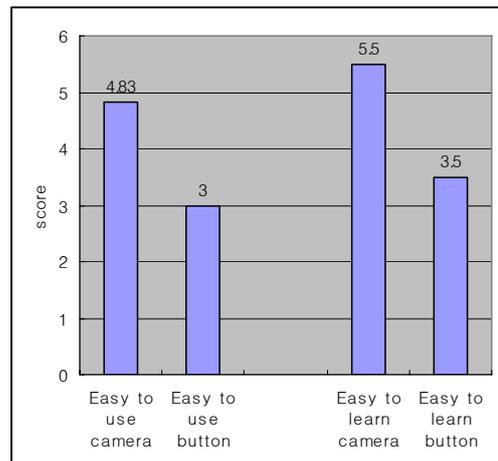


Figure 10: Results of the subjective questionnaire

## 6. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 카메라를 이용한 핸드헬드 기기의 상대적인 움직인 추적을 통해서 핸드헬드 가상현실에서의 인터랙션 방법을 구현하고 사용성에 대해서 평가하였다. 이러한 접근법은 기존의 핸드헬드 가상현실 인터랙션 기법에 비해서 상대적으로 부가비용 없이 소프트웨어적인 처리로 가능한 방식이라고 평가할 수 있다. 그리고 이러한 인터랙션 방법은 기존의 방식보다 더 자연스럽게 직관적인 성격을 가지고 있다. 또한 기존의 버튼 사용 방식보다 더 배우기 쉽고 사용하기 쉬울 뿐만 아니라 그 임무 수행 능력 또한 더 낫다는 것이 실험을 통해서 보여졌다. 앞으로의 핸드헬드 가상현실 분야에 이런 방식의 인터랙션이 많이 사용되기를 기대한다.

본 논문에 사용된 방법의 단점도 존재한다. 일단 변화가 심한 환경에서는 사용하기 힘들다. 즉 카메라로 들어오는 영상이 심하게 바뀌는 환경(자동차 안 등)에서는 카메라가 정지하고 있는 상태에서 영상이 심하게 바뀌므로 카메라 움직임 추적의 정확도가 많이 떨어지게 된다. 향후 연구에서는 이러한 부분을 개선하는 알고리즘 개발이 필요하다. 또한 카메라 추적 알고리즘을 더 개선해서 보다 정확한 추적이 가능하도록 하는 것도 향후에 연구되어야 할 바이다.

## 7. 참고 문헌

- [1] M. Slater, "A Note on Presence Terminology", Presence-Connect, 3 (3)
- [2] G. W. Fitzmaurice, S. Zhai, and M. H. Chignell, "Virtual Reality for Palmtop Computers," *ACM Transactions on Information Systems*, vol. 11, pp. 197-218, 1993.
- [3] K. Watsen, R. P. Darken, and M. Capps, "A Handheld Computer as an Interaction Device to a Virtual Environment," *Proceedings of the International Projection Technologies Workshop*, 1999.
- [4] N. Kukimoto, Y. Furusho, J. Nonaka, K. Koyamada, and M. Kanazawa, "PDA-based Visualization Control and Annotation Interface for Virtual Environment," *Proceeding of 3rd IASTED International Conference Visualization, Image and Image Processing*, 2003.
- [5] D. Wagner and D. Schmalstieg, "First Steps Towards Handheld Augmented Reality," *Proceedings of the 7th International Conference on Wearable Computers*, 2003.
- [6] D. Wagner, T. Pintaric, F. Ledermann, and D. Schmalstieg, "Towards Massively Multi-User Augmented Reality on Handheld

- Devices," *Third International Conference on Pervasive Computing (Pervasive 2005)*, 2005.
- [7] V. Paelke, C. Reimann, and D. Stichling, "Foot-based Mobile Interaction with Games," *ACM SIGCHI International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology (ACE)*, 2004.
- [8] M. Hachet and Y. Kitamura, "3D Interaction With and From Handheld Computers," *Proceedings of IEEE VR 2005 Workshop: New Directions in 3D User Interfaces*, 2005.
- [9] M. Hackett, J. Pouderoux, and P. Guitton, "A Camera-Based Interface for Interaction with Mobile Handheld Computers," *Proceedings of I3D'05 - ACM SIGGRAPH 2005 Symposium on Interactive 3D Graphics and Games*, 2005.
- [10] J. Shi and C. Tomasi, "Good features to track," *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Seattle, USA, 1994.
- [11] J. Y. Bouguet, "Pyramidal Implementation of the Lucas Kanade Feature Tracker Description of the Algorithm," 2000.
- [12] K. N. Kutulakos, "Calibration-Free Augmented Reality," *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 4, 1998.
- [13] M. I. A. Lourakis and A. A. Argyros, "Vision-based Camera Motion Recovery for Augmented Reality," *Proceedings of the computer graphics international*, 2004.
- [14] M. I. A. Lourakis and A. A. Argyros, "Efficient, causal camera tracking in unprepared environments," *Computer Vision and Image Understanding*, vol. 99, 2005.
- [15] R. M. Haralick and L. G. Shapiro, *Computer and Robot Vision Vol. II.*: Addison Wesley, 1993.
- [16] D. A. Bowman and L. F. Hodges, "An evaluation of techniques for grabbing and manipulating remote objects in immersive virtual environments," *Proceedings of the 1997 symposium on Interactive 3D graphics*, Rhode Island, United States, 1997.
- [17] J. S. Pierce, A. S. Forsberg, M. J. Conway, S. Hong, R. C. Zeleznik, and M. R. Mine, "Image Plane Interaction Techniques in 3D Immersive Environments," *Proceedings of the 1997 symposium on Interactive 3D graphics*, Rhode Island, United States, 1997.
- [18] Open Source Computer Vision Library, <http://www.intel.com/technology/computing/opencv>
- [19] Coin3D, <http://www.coin3d.org>

본 연구는 정보통신부 주관 ITRC 과제에서 지원을 받아 수행되었다.