

# Hand-Eye 캘리브레이션을 활용한 햅틱 지원 증강 현실 시스템\*

김기영<sup>0</sup> 박영민 우운택  
광주과학기술원 U-VR 연구실  
{kkim<sup>0</sup>, ypark, wwoo}@gist.ac.kr

## Haptic-enabled Augmented Reality System using Hand-Eye Calibration

Kiyoung Kim<sup>0</sup>, Youngmin Park, and Woontack Woo  
GIST U-VR Lab.

### 요 약

본 논문에서는 감각형 객체를 도입한 새로운 햅틱 지원 증강 현실 시스템을 제안한다. 제안된 시스템은 카메라 또는 증강용 마커가 이동할 경우 발생하는 카메라-햅틱 간 캘리브레이션 문제를 해결하여, 햅틱 장비의 좌표계를 증강 객체의 좌표계로 강건하게 변환시킨다. 사용자의 간섭없는 캘리브레이션을 위해, 햅틱 좌표계와 증강 좌표계간의 캘리브레이션은 Hand-Eye 방법으로 카메라 이동시 자동으로 수행된다. 또한, 감각형 객체 이동시 증강의 안정성을 높이기 위해 본 논문에서는 칼만 필터 (Kalman filter)를 적용한다. 사용자는 감각형 객체에 증강된 가상 모델을 손에 전채로, 햅틱 큐의 끝 부분을 움직여 가상 객체를 조작하고, 동시에 역감을 느끼게 된다. 실험에서는 시스템의 유용성을 보이기 위해, 증강용 감각형 객체, 상호작용 및 햅틱 피드백용 PHANToM, 그리고 디스플레이용 3차원 모니터로 구성된 MP3 조작 시스템을 구현하였다. 제안된 햅틱 지원 증강 현실 시스템은 역감과 증강 현실이 필요한 디자인 시스템이나, 교육 및 엔터테인먼트 응용 등에 적용되어 쓰일 수 있다.

### 1. 서 론

비전 기반 증강 현실 (Vision-based Augmented Reality) 시스템에 대한 사용자의 몰입감을 높이기 위해, 음향 효과 뿐 아니라 햅틱 장치 등의 다양한 접목이 시도되고 있다. 비전 기반 시스템은 3차원 가상 객체를 실제 3차원 공간에 삽입하고, 실제 영상과 가상 객체를 통합하여 보여줌으로써 몰입감을 높인다 [1]. 음향은 비전 기반 시스템에 상호 작용시 발생하는 다양한 음향을 실제처럼 재생하여 몰입감을 더욱 높인다. 이와 더불어 햅틱은 역감을 제공한다는 측면에서 몰입감을 더 높이는 중요한 요소로 부각되고 있다.

햅틱을 지원하기 위한 증강 시스템에 대한 소수의 연구가 진행되어 왔다. 대표적인 시스템으로 햅틱 워크벤치가 상용화되어 이용되고 있다 [5]. 이 시스템은 PHANToM과 디스플레이 장치를 연동하여, 가상 객체와의 강건한 상호작용을 제공한다 [3]. J. Vallino 등은 Affine 카메라 모델을 이용하여 가상 객체를 증강한 후, PHANToM을 연동하여 가상 객체를 조작하였다 [2]. M. Adcock 등은 ARToolKit을 활용하여 가상 객체를 증강하고, PHANToM으로 상호 작용하는 협업 시스템을 제안하였다 [4][6][7]. 그러나, 기존 시스템들은 증강용 마커를 특정 장소에 고정시켜 증강-햅틱간 캘리브레이션 문제를 단순화해서 마커를 옮기거나 카메라가 이동하는 어플리케이션의 확장이 어렵다. 또한, 마커 이동시 발생하는 증강 불안정성이 고려되지 않았다.

본 논문에서는 증강용 마커의 실시간 움직임 및 카메라의 이동을 지원하는 새로운 증강-햅틱 시스템을 제안한다. 제안된 시스템은 카메라 또는 증강 객체가 이동할 경우 발생

하는 카메라-햅틱 간 캘리브레이션 문제를 Hand-Eye 캘리브레이션 방법을 이용해 해결한다. 이를 위해, 디자인된 캘리브레이션용 다중 마커가 PHANToM 큐에 부착되고, 카메라에 의해 실시간으로 감지된다. PHANToM에서 추출된 좌표계 정보와 캘리브레이션 마커에서 추출된 좌표계는 Hand-Eye 알고리즘의 입력으로 쓰인다. 계산된 두 좌표계 관계를 이용해 PHANToM 좌표계를 증강 좌표계로 변환하게 된다. 이와 함께 감각형 객체 이동시 증강의 안정성을 높이기 위해 본 논문에서는 칼만 필터 (Kalman filter)를 다중 마커에 적용한다.

본 논문에서 제시한 방법은 구현과 적용이 용이하며, 이를 활용하면 기존의 정적 햅틱-증강 시스템을 동적 시스템으로 확장할 수 있다. 사용자는 감각형 객체에 증강된 가상 모델을 손에 전채로, 햅틱 큐의 끝 부분을 움직여 가상 객체를 조작하고, 동시에 역감을 느낄 수 있다. 카메라 및 모델 증강용 감각형 객체의 이동이 자유롭기 때문에 협업 환경으로의 확장이 용이하다. 제안된 감각 객체와 칼만 필터의 조합은 기존 증강의 불안정요소를 효과적으로 보간하여 시스템의 신뢰성을 높인다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 제안된 시스템의 구성에 대해 설명하고, 3장에서는 상호작용 기술을 지원하기 위해 제안된 방법을 설명한다. 4장에서는 실험 결과를 보이며, 5장에서는 결론과 향후 과제를 제시한다.

### 2. 제안된 시스템 구성

제안된 시스템은 그림 1에서와 같이 감각형 객체, 햅틱 장

\* 본 연구는 광주과학기술원 실감콘텐츠연구센터(ICRC)의 지원에 의해 수행되었음

비인 PHANToM, 3차원 모니터로 구성된다. 그림 1 (a)의 감각형 객체에는 사용자가 손으로 감각형 객체를 일부 가리더라도 강건한 증강이 이루어지도록 ARTag 마커들이 2열로 부착되었다 [11]. 일반적인 실감형 모델의 기본 형태에 맞도록 직육면체로 디자인되었고, 이는 사용자가 손으로 증강된 모델을 돌려보거나 이동하는 작업을 가능하게 한다. 그림 1 (b)의 PHANToM 큐의 끝에는 증강-햅틱 좌표계 캘리브레이션을 위해 다중 마커가 위치한다. 그림 1 (c)의 3차원 모니터는 증강된 가상 객체를 사용자에게 3차원으로 보여준다.

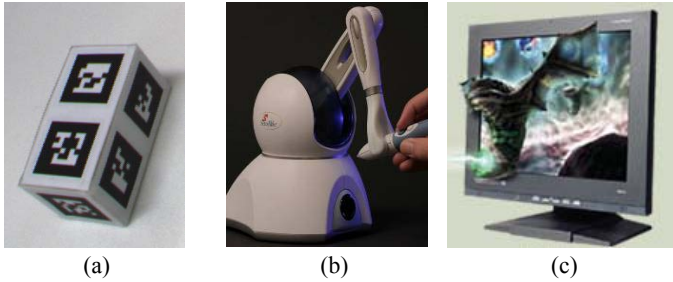


그림 1. 제안된 시스템 컴포넌트 (a) 감각형 객체 (b) 햅틱 장비 (c) 3차원 모니터

그림 2는 제안된 시스템의 전체적 알고리즘 흐름도를 나타낸다. 시스템은 마커 감지, 증강, 캘리브레이션, 좌표계 변환, 충돌 감지의 단계로 이루어진다.

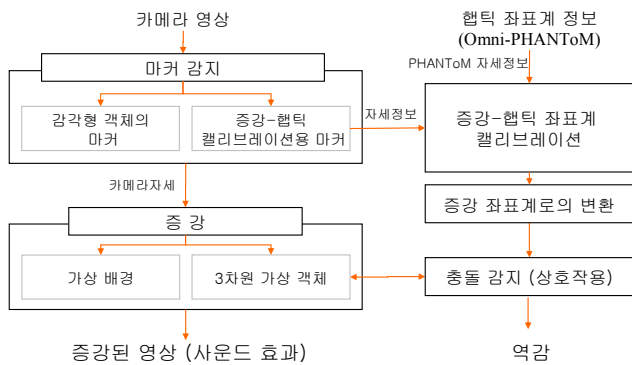


그림 2. 시스템 전체 알고리즘 흐름도

3. 증강-햅틱간 좌표계 캘리브레이션 및 증강 안정화

시스템에는 그림 3에 나타난 바와 같이 4개의 좌표계가 존재한다. 팬텀 끝부분으로 가상 객체와 상호 작용하기 위해서는 카메라 좌표계를 중심으로 증강 마커 좌표계와 팬텀의 좌표계를 표현해야 한다. 즉, 그림에서와 같이  $T_{cp}$ ,  $T_{cm}$ 의 변환 행렬을 구함으로써 상호작용이 가능하다.  $T_{cp} = T_{mp} \cdot T_{cm}$  관계를 통해 구한다. 특히, 카메라의 위치가 움직일 경우마다  $T_{cp}$ 를 구한다.

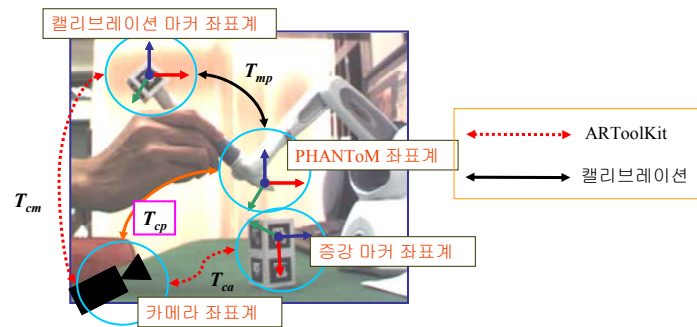


그림 3. 시스템 좌표계

3.1. Hand-Eye 캘리브레이션 ( $T_{mp} = X$  추정)

햅틱의 출력인 회전 및 이동 행렬 ( $T_{haptic}$ )과 햅틱 끝에 위치한 마커의 자세 행렬 ( $T_{marker}$ )이 식 (1)과 같이 주어졌다고 가정한다.

$$T_{haptic} = \begin{bmatrix} R_H & t_H \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, T_{marker} = \begin{bmatrix} R_M & t_M \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

위 식에서,  $R$ 과  $t$ 는 각각  $3 \times 3$  회전 행렬과  $3 \times 1$  이동 행렬을 의미한다.

증강-햅틱간 좌표계 캘리브레이션은 식 (1)의 두 행렬간의 관계를 구하는 것과 같다. 마커와 햅틱은 동일한 큐에 부착된 상태와 같으므로, 두 좌표계간의 변환  $X$ 행렬은 다음 식으로 표현된다.

$$T_{haptic} X = X T_{marker} \quad (2)$$

위 식을 정리하여, 다음과 같이 회전행렬을 분리한다.

$$R_H R_X = R_X R_M \quad (3)$$

위 식에서  $R_X$ 를 구하기 위해  $R_H$ 와  $R_M$ 의 고유치 (Eigenvalue)가 같다는 사실을 이용한다. 즉,  $R_H$ 와  $R_M$ 은 유사변환 (Similarity transform)으로 표현된다 [8].

$$e_H = R_X e_M \quad (4)$$

위 식에서  $e_H$ 와  $e_M$ 은 각각  $R_H$ 와  $R_M$ 행렬의 고유벡터 (Eigenvector)이다. 그러므로  $X$ 의 회전 행렬은 다음 식을 최소화하는  $R_X$ 를 구하는 것과 같다.

$$f = \|e_H - R_X e_M\|^2 \quad (5)$$

이동 행렬은 구해진 회전 행렬  $R_X$ 를 이용하여, 다음 식과 같이  $t_X$ 에 대해 정리하여 얻는다.

$$\begin{cases} (R_H - I)u_x = \left(\frac{\lambda_M}{\lambda_X}\right)(R_X u_M - k \cdot u_H) \\ t_X = \lambda_X u_x, k = \left(\frac{\lambda_H}{\lambda_M}\right) \end{cases} \quad (6)$$

위 식에서  $\lambda$ 는 정의된 스케일 인자 (Scale factor)이고,  $u_x$ 는 이동 행렬의 단위 행렬 (Unit vector)을 의미한다.

3.2. 증강 안정화

카메라의 위치는 감각형 객체에 부착된 마커의 코너점을 감지한 후, 주어진 마커 정보를 이용하여 계산된다. 다중 마커를 이용하면 특정 마커에 의존하지 않으므로, 손이 한 마커의 코너점을 가리더라도 증강은 이루어진다. 그러나 감각형 객체 이동시 증강의 불안정성이 그림 4 (c), (d)에서와 같이 발생한다.

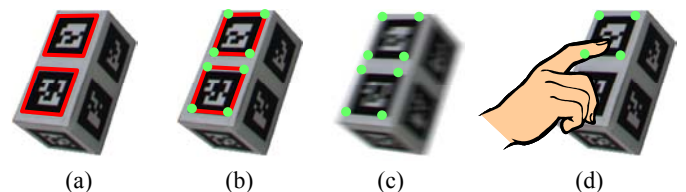


그림 4. 감각형 객체의 마커 불안정성 (a) 마커 감지 (b) 감지된 마커의 코너점 추출 (c) 급격한 이동시 발생하는 불안정성 (d) 손의 가림 현상

안정적인 마커 감지를 위해, 그림 5와 같이 칼만 필터를 적용한다. 칼만 필터에서는 마커의 움직임을 등가속도로 가정하고, 이전 프레임에서 Correction된 좌표를 기준으로 현재 프레임에서의 좌표를 예측 (Prediction)한다. Correction에서는 예측된 코너와 실제 감지된 코너의 좌표, 속도의 오차를 이용하여 코너의 예측 좌표를 Correction하고 칼만 필터의 파라미터를 갱신한다 [12].

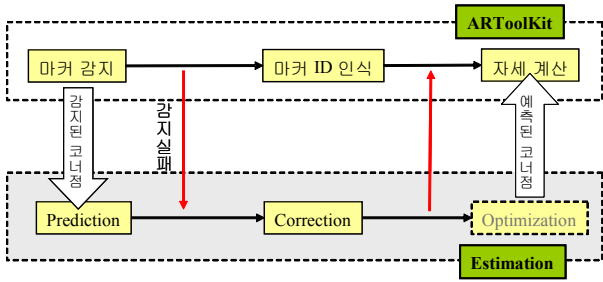


그림 5. 마커 감지 및 추적과 칼만 필터

4. 실험 및 결과

제안된 시스템으로 MP3 플레이어 시작품 디자인 시스템을 구현하였다. 시스템은 ARToolKit v.2.65와 OpenCV beta.4의 라이브러리를 사용하여 윈도우 환경에서 구현되었다 [4][10]. 햅틱 장비로는 Omni-PHANToM이 사용되었고, Dell의 워크스테이션 650MT에서 실험이 수행되었다. 카메라는 PointGrey사의 Flea가 사용되었다 [9]. Flea는 640×480에 최대 60 프레임률을 제공한다. 3차원 스캐너를 이용하여 재구성된 MP3 플레이어 모델이 감각형 객체에 증강되고, Omni-PHANToM으로 증강된 MP3 모델의 버튼을 누를 경우, MP3 플레이어의 디스플레이에 동영상 재생된다.

감각형 객체를 움직일 경우 발생하는 증강 불안정성은 칼만 필터에 의해 보강되었다. 그림 6은 프레임에 따라 감각형 객체 위의 마커 추적에서의 측정된 (x, y) 좌표와 칼만 필터를 통해 예측된 좌표를 나타낸다. 감각형 객체는 영상 안에서 좌우 이동을 반복했으며, 감지되지 않을 경우 좌표값은 0을 나타내게 된다.

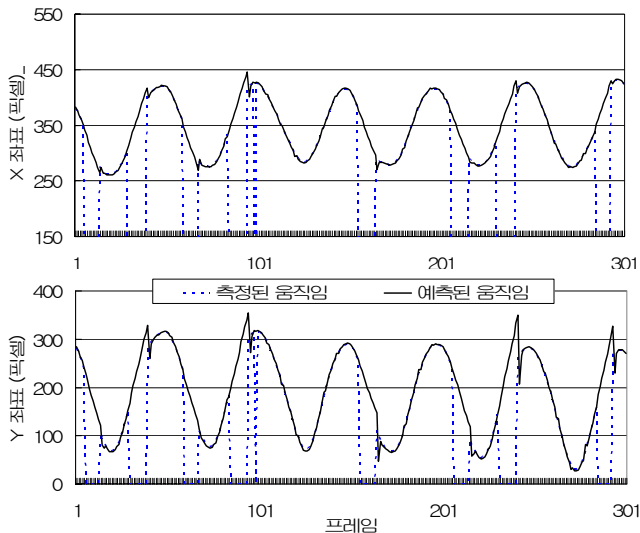
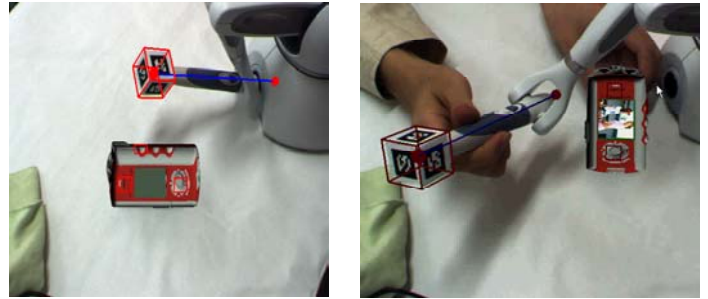


그림 6. 칼만 필터 이용 마커 코너점 추적 : 실제 마커는 카메라의 안에 있는 상태 (좌표가 0이 되는 경우 마커 감지 실패)

그림 7은 구현된 시스템에서 MP3 실감 모델의 증강 모습, 그리고 햅틱 큐로 버튼을 조작한 후 증강된 동영상의 모습을 보여준다. 가상 객체와의 충돌 검사는 특정 x, y, z 값 범위 테스트를 이용하였고, 햅틱 효과는 충돌시 단순 진동을 주었다.



(a) (b)

그림 7. 구현된 MP3 조작 시스템 (a) 감각형 객체에 증강된 MP3 플레이어 모델 및 상호 작용 큐 (b) 상호 작용 큐를 이용해 버튼을 누를 경우 증강되는 동영상

5. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 햅틱 장비를 상호 작용 및 역감 제공 도구로 활용하는 새로운 햅틱 지원 증강 현실 시스템을 제안하였다. 실험에서는 제안된 시스템의 유용성을 보이기 위해 MP3 모델 조작 시스템을 구현하였다. 시스템 구현시 발생하는 캘리브레이션은 햅틱 큐의 마커를 불함으로써 자동적으로 해결하였다. 그리고, 감각형 객체 위의 증강 불안정성은 칼만 필터를 사용하여 보강하였다. 향후 연구로는 증강 객체의 크기와 감각형 객체의 디자인의 상관성에 대한 연구와 상호 작용 정확성에 대한 분석이 필요하다. 제안된 시스템은 감각형 객체에 가상 객체를 증강한 후, 이를 햅틱 장비와 연동시켰다. 시스템은 카메라나 증강 객체가 움직이는 경우에 효과적으로 상호 작용 및 역감을 동시에 제공하였다. 향후, 디자인 시스템이나 교육, 엔터테인먼트 등의 분야에 활용될 수 있다.

참 조

- [1] R. Azuma, "A Survey of Augmented Reality", Presence: Teleoperators and Virtual Environments 6, 4, pp.355~385, 1997.
- [2] J. Vallino and C. Brown, "Haptics in Augmented Reality", IEEE International Conference on Multimedia Computing and Systems, pp.195~200, 1999.
- [3] Sensable Technologies Inc. (<http://www.sensable.com>)
- [4] ARToolKit ([http://www.hitl.washington.edu/research/shared\\_space/download/](http://www.hitl.washington.edu/research/shared_space/download/))
- [5] Reachin Technologies AB (<http://www.reachin.se>)
- [6] M. Adcock, M. Hutchins and C. Gunn, "Augmented reality haptics: Using AR Toolkit for display of haptic applications", ART03, 2003.
- [7] M. Adcock, M. Hutchins and C. Gunn, "Haptic collaboration with augmented reality", SIGGRAPH, August, 2004.
- [8] F. Dornaika and R. Chung, "Stereo geometry from 3D ego-motion streams", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B 33(2): pp. 308-323, 2003.
- [9] PointGrey Research Inc. (<http://www.ptgrey.com>)
- [10] Intel OpenCV Library (<http://www.intel.com/research/mrl/research/openCV>)
- [11] ARTag, (<http://www.artag.net/>)
- [12] G. Welch and G. Bishop, "An introduction to the kalman filter". CS TR 95-041, UNC, 1995.