

# 가상공간 이동플랫폼을 위한 교차 공분산 3D 좌표 추정 방법<sup>+</sup>

## (Cross-covariance 3D Coordinate Estimation Method for Virtual Space Movement Platform)

정 하 형<sup>1)</sup>, 박 진 하<sup>2)</sup>, 김 민 경<sup>3)</sup>, 장 민 혁<sup>4)\*</sup>

(HaHyoung Jung, Jinha Park, Min Kyoung Kim, and Min Hyuk Chang)

**요 약** 최근 가상/증강/혼합현실 분야의 이동 플랫폼 시장 수요 커지면서 가상환경을 이용한 다중 체험이 가능한 콘텐츠를 통해 사용자에게 실제 현장과 같은 느낌을 부여하는 체험형 콘텐츠가 주목받고 있다. 본 논문에서는 교육훈련생의 모션 캡처를 위한 가상공간 이동플랫폼에서 사용자 위치 추정을 위한 트래커의 추적하는 방법으로, 2차원 영상 평면에 투영된 마커의 좌표를 통한 3차원 교차 공분산의 3D 좌표 추정 방법을 제시한다. 또한, 강체 추적실험을 통해 제안한 알고리즘의 유효성을 검증하여 낮은 해상도의 카메라를 통해서도 3D 좌표 추정이 가능함을 보인다.

**핵심주제어:** 가상현실, 교차 공분산, 위치 추적, 다중 카메라, 강체

**Abstract** Recently, as the demand for the mobile platform market in the virtual/augmented/mixed reality field is increasing, experiential content that gives users a real-world felt through a virtual environment is drawing attention. In this paper, as a method of tracking a tracker for user location estimation in a virtual space movement platform for motion capture of trainees, we present a method of estimating 3D coordinates of the 3D cross covariance through the coordinates of the markers projected on the image. In addition, the validity of the proposed algorithm is verified through rigid body tracking experiments.

**Keywords:** Virtual reality, Cross covariance, Location tracking, Multiple cameras, Rigid body

### 1. 서 론

\* Corresponding Author: minhyuk@keti.re.kr

+ 본 연구는 문화체육관광부와 한국콘텐츠진흥원에서 지원하는 문화기술 연구개발 지원사업인 “다중 참여형 가상 공간 이동 플랫폼 및 시나리오 기반의 콘텐츠 저작 환경 구현 기술 개발(R2018020040-003)”의 지원을 받아 수행되었음

Manuscript received September 14, 2020 / accepted October 05, 2020

1) ㈜코어센스 연구원, 제1저자

2) ㈜코어센스 연구원, 제2저자

3) 전주대학교 소방방재학과, 제3저자

4) 한국전자기술연구원 IT융합부품연구센터, 교신저자

최근 급성장하고 있는 가상/증강/혼합현실 분야에서 가상공간 이동플랫폼은 시장 수요 관련된 산업이 증가하고 있으며, 다중 체험이 가능한 콘텐츠 생산 및 서비스 지원에 활용할 수 있다.

가상공간 이동플랫폼은 가상현실에서 시뮬레이션을 통해 실제로 경험하기 힘든 상황을 훈련하거나 장소의 제약을 받지 않는 체험적 교육 그리고 게임 콘텐츠와 같은 분야 등에 폭넓게 사용되고 있으며, 이때 실감 나는 체험을 위해

가상공간이 실제와 상호작용 피드백을 사용자에게 제공한다.

현재 가상환경에서 사용자에게 현실 같은 느낌 (Lee, 2014; Hong, 2019)을 주기 위해서 HMD (Head mounted display)와 같은 장비를 착용하게 된다. 이런 장비는 실제 공간에서 사용자의 위치 정보를 획득하기 위해서 큰 공간에서는 광학식 카메라 기반의 모션 캡처 장비를 소규모 크기의 공간에서는 HMD 제조사에서 제공하는 위치 추적 장비를 사용하고 있다.

본 논문에서는 고속·고정밀 측정이 가능한 모션 센서와 스마트 글러브 그리고 비전 센서와 융합하여 사용자 움직임 추적의 구현 (Kim, 2015; Jung, 2016)을 위해서 다중 카메라 기반 위치 추적 시스템에서 액티브 마커의 3D 좌표를 추정하고자 한다. 광학식 위치 추적 시스템은 다중 카메라를 이용한 위치 측위 방식으로서 보정 과정이 있어야 한다. 카메라 보정방법으로 단일 카메라의 경우 2차원 격자 형태의 무늬를 갖는 체스 보드를 이용한 방법 (Sturm and Maybank, 1999; Zhang, 2000; Kim, 2018)이 있으며, 두 개 이상의 카메라의 경우 체스 보드를 이용하는 방법과 3축 보정틀을 이용하는 방법 그리고 보정용 볼을 이용하는 방식 등이 있다. 이러한 보정 결과로는 카메라의 내부 변수와 외부 변수가 추정된다. 여러 대의 카메라에서 바라본 3차원 공간상 액티브 트래커의 마커는 2차원 영상에 투영된 마커의 좌표로부터 다시 3차원 좌표로 추정한다.

다중 참여형 가상공간 이동 플랫폼에서 참여자의 모션 캡처를 위한 광학식 위치 트래킹 시스템에서 실내 측위를 위한 트래커를 추적하는 방법으로 2차원 영상 평면에 투영된 마커의 좌표를 이용한 3차원 교차 공분산 (Deng et al., 2012)을 이용한 3D 좌표 추정 방법을 제안한다. 이렇게 가상훈련 사용자의 액티브 트래커의 추정된 3D 마커 좌표로부터 강체 (Rigid body)를 추적함으로써 가상공간 내에서 훈련생의 절대 위치를 추적한다.

## 2. 교차 공분산 3차원 위치 추정 방법

### 2.1 2차원 공분산 위치 추정

본 논문에서는 실감 기반 가상훈련의 사용자 위치추정을 위해 다중 카메라에서 바라본 영상속 2차원 마커의 좌표로부터 3차원 좌표를 추정하고자 한다. 이때 3차원 공간에서의 마커 좌표를 추정하기 위해 개별 카메라에서 바라본 마커의 좌표는 확률기반으로 공분산 형태로 Fig. 1에서처럼 표현하여 모든 카메라에서 바라본 마커의 공분산이 중첩하는 지점을 3차원 마커의 확률적 위치 (Angeli et al., 2009; Chang et al., 2010) 로 추정하고자 한다.

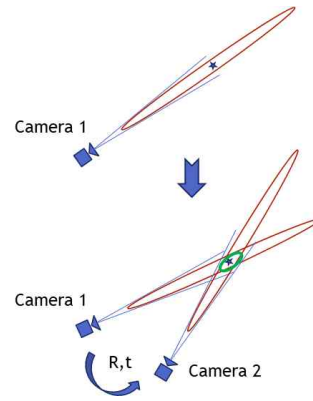


Fig. 1 Location Estimation Method through Covariance Intersection

Fig. 2는 카메라에서 바라본 한 점에 대한 공분산을 표현한 그림이며  $\theta_m$ 은 카메라 중점에서 떨어진 각을 의미한다.

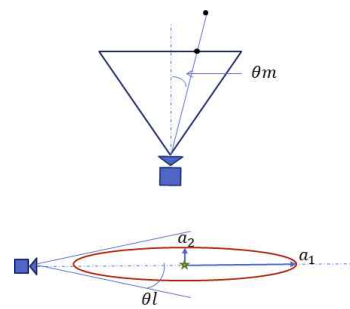


Fig. 2 Covariance of 2-D Markers

Fig. 2에서 2차원 공분산  $C_{xy}$ 의 표현은 식 (1)과 같으며

$$C_{xy} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} \end{bmatrix} \quad (1)$$

카메라 중심에서 벌어진  $\theta$ 로 회전된 공분산 행렬은  $P$ 와 공분산의 중심  $x$ 는 식 (2), (3)과 같다.

$$P = TC_{xy}T^{-1} \quad (2)$$

$$T = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix}$$

$$\hat{x} = T \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (3)$$

공분산 행렬에서 각축의 길이  $a1$ ,  $a2$ 는 식 (4) (5)와 같으며 이때  $a1$  계수는 카메라에서 감지 가능한 마커의 최대 거리  $D$ 를 사용하며  $a2$ 는 카메라 좌표계 기준으로 픽셀과 픽셀 사이의 계산된 각도  $\theta_l$ 를 통해 계산하도록 한다.

$$a1 = \sqrt{\sigma_{xx}} = D \quad (4)$$

$$a2 = \sqrt{\sigma_{yy}} = D \sin\theta_l \quad (5)$$

Fig. 3은 두 카메라  $C_0$ ,  $C_1$ 에서 바라본 하나의 마커의 중심점을 찾기 위한 교차 공분산  $P_{CI}$ 의 모습을 보여주고 있다.

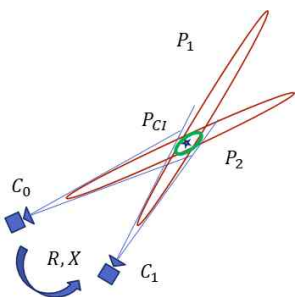


Fig. 3 Probabilistic Position Estimation Method through Cross-covariance

두 카메라의 교차 공분산은 가중치  $\omega$ 를 사용한 개별추종의 컨벡스 조합(Convex combination)

을 통해 계산할 수 있다. 식 (6)은 개별 카메라의 공분산  $P1$ 과  $P2$ 로 교차공분산  $P_{CI}$ 를 계산하며 식(7)은 개별 카메라 공분산 중심인 식(3)  $\hat{x}$ 과  $P_{CI}$ 를 통하여 교차공분산의 중심 위치인  $x_{CI}$ 를 계산한다.

$$P_{CI}^{-1} = \omega P_1^{-1} + (1 - \omega) P_2^{-1} \quad (6)$$

$$x_{CI} = \omega P_{CI} P_1^{-1} \hat{x}_1 + (1 - \omega) P_{CI} P_2^{-1} \hat{x}_2 \quad (7)$$

위와 같은 과정을 통해 교차 공분산을 이용한 좌표 추정 방법을 시뮬레이션 실험을 진행하기 위해서 CAD 프로그램을 통해 카메라의 위치와 카메라 중심으로부터 카메라에 투영된  $p1$ ,  $p2$ ,  $p3$  마커까지의 각도  $\theta$ 를 Fig. 4 처럼 설정하였다.

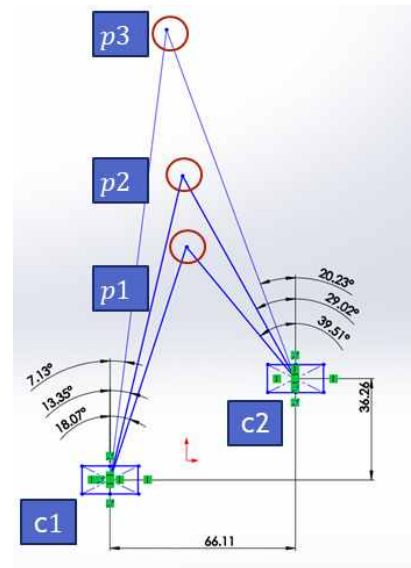


Fig. 4 Cross-covariance Simulation Settings

Fig. 5는 시뮬레이션 설정값을 매트랩을 통해 교차 공분산을 구현한 결과로서 개별 마커로부터 뻗어 나간 공분산이 서로 중첩된 영역으로 나타나며, Table 1에서 시뮬레이션 설정 위치와 매트랩의 추정 위치가 유사하게 추정되었음을 확인하였다.

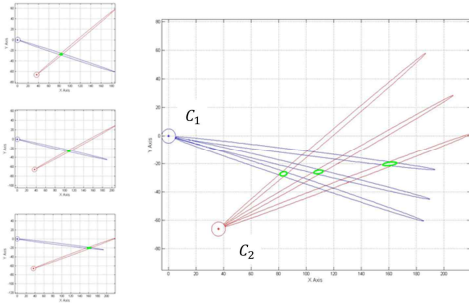


Fig. 5 Cross Covariance Matlab Plot Results

Table 1 Cross Covariance Matlab Calculation

	Simulations-Setup		Matlab	
	x	y	X(mean)	Y(mean)
P1	83.43	27.22	83.45	-27.21
P2	108.88	25.83	108.9	-25.83
P3	161.02	20.15	160.8	-20.17

### 2.2 3차원 공분산 위치 추정

2.1절에서 2차원 평면에서 공분산 중첩을 수행하였다. 하지만 카메라는 3차원 공간을 2차원 영상 평면에 투영하기 때문에 다중 카메라의 2차원 영상에서 3차원 위치를 추정해야 한다.

2.1절과 다르게 공분산 중첩 계산은 수식 (1)에서 2x2 행렬이 아닌 식 (8)의 3x3 행렬을 사용하며

$$C_{xy} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Fig. 6에서 3차원 공분산 행렬은 2차원과 달리 3축에 존재하는 타원체가 되기 때문에 공분산 행렬에서 각축의 길이  $a_1$ , 식 (4)를  $a_2$ ,  $a_3$ 은 식 (5)를 통해 구하도록 한다.  $a_2$ 는 카메라 좌표계 기준으로  $x$ 축 방향의 픽셀과 픽셀 사이의 계산된 각도  $\theta_1$ 를 통해 계산하도록 하며,  $a_3$ 는 카메라 좌표계 기준으로  $y$ 축 방향으로 계산하도록 한다.

따라서 3차원 공간에서 교차 공분산 (Julier and Uhlmann, 2007; Weng, 2012)을 실험하기 위해 Fig. 7에서처럼 다중 카메라를 배치하였으

며 카메라의 중심에 마커가 있다고 가정하여 카메라 원점에서 마커를 지나는 공분산을 표현하였다.

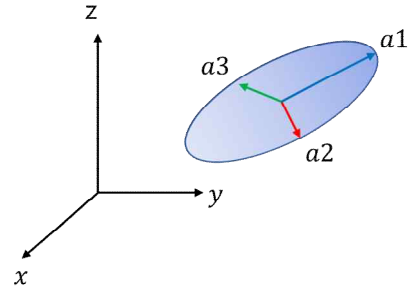


Fig. 6 3D Covariance Hyper Ellipsoid

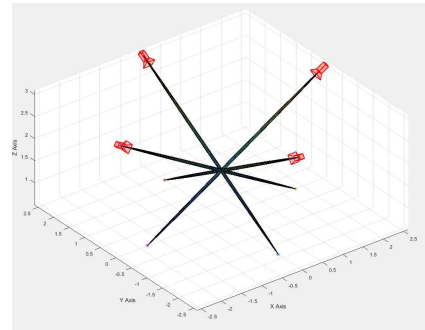


Fig. 7 Placement of Multiple Cameras and Markers

Fig. 8은 Fig. 7에서 교차 공분산 계산하여 3차원 공간상에서 마커의 위치를 추정한 모습으로 모든 카메라에서 바라본 마커의 중심을 추정한 모습을 확인할 수 있다.

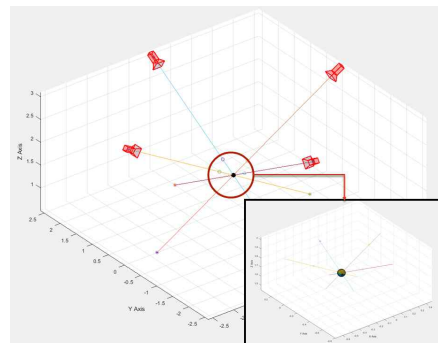
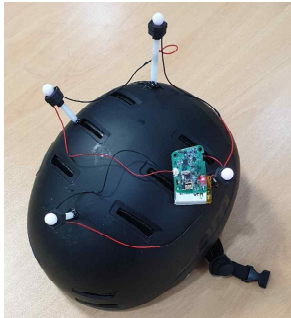


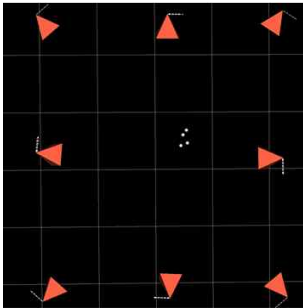
Fig. 8. 3D Point Estimation using Cross Covariance

### 3. 교육 훈련생 위치추정 방안

가상공간 이동플랫폼에서 훈련생을 추적하기 위해서 액티브 마커를 부착하여 Fig. 9 (a)와 같은 안전모를 제작하였고, 제작된 안전모의 마커는 2절에서 구현한 교차 공분산을 통해 Fig. 9 (b)와 같은 3차원 마커 추정을 수행했다.



(a) Helmet with Active Marker



(b) Estimated 3D Marker Appearance  
Fig. 9 Active Markers in 3D Space

안전모의 위치정보를 얻기 위해서는 최소 3개 이상의 마커가 필요로 하며, 이때 마커의 위치 정보를 조합하여 위치 및 자세 정보를 지닌 강체 (Rigid body)를 생성하도록 한다. 선택된 마커들의 모음은 하나의 강체로 설정하게 되며, 3차원 공간에서 찾아낸 모든 마커 중에서 선택된 마커들의 마커 모음을 정렬하고 그 둘을 비교하여 최적의 회전과 위치 이동 정보를 추정한다.

처음 선택된 마커 셋을  $A$ 라고 하고 3차원 공간에서 찾아낸 마커 셋을  $B$ 라고 할 때 회전  $R$ 과 이동  $t$ 를 구하는 방식은 Fig. 10과 같다.

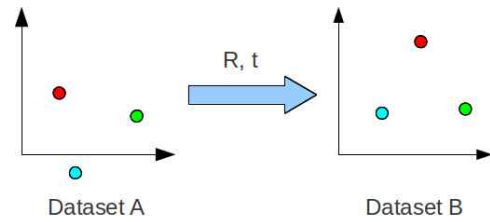


Fig. 10 Rigid Body Estimation Concept

두 데이터 세트에서 동일한 점은 같은 색을 가지며,  $R$ 은 회전이고  $t$ 는 평행 이동을 의미한다. 데이터 세트  $A$ 의 포인트를 데이터 세트  $B$ 에 정렬하는 최적의 회전 및 변환을 찾고 싶으며, 이 변환은 모양과 크기를 유지하기 때문에 강체 변환 (Rigid-transform)이라고 한다.

$$P = [x y z] \quad (7)$$

$$centroid_A = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_A^i \quad (8)$$

$$centroid_B = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_B^i \quad (9)$$

식 (7)의 점  $P$ 를 의미하고, 식 (8), (9)에서  $P_A^i$ 와  $P_B^i$ 는 각각 데이터 세트  $A$ 와  $B$ 의 점이며 이들의 중심점을 구하게 되며 다음 단계에서 식 (8,9)의 결과를 사용한다. 최적의 회전을 찾으려면 Fig. 11과 같이 두 중심이 원점에 오도록 두 데이터 세트를 원점으로 이동한다.

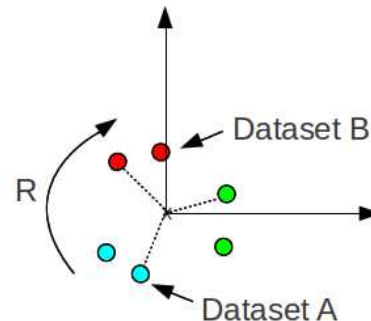


Fig. 11 Rotation of the Data Set

식 (10)은 두 데이터 세트에서 중심 위치정보를 제거한 데이터 세트  $A$ 의  $3 \times N$  행렬과 데이터 세트  $B$ 의  $N \times 3$  행렬을 통해  $3 \times 3$  행렬  $H$ 를 만든다. 식 (11)은  $H$  행렬에 대한 특이값 분해(SVD)를 통해 식 (12)의 회전 행렬  $R$ 을 구한다.

$$H = (A - \text{centroid}_A)(B - \text{centroid}_B)^T \quad (10)$$

$$[U, S, V] = SVD(H) \quad (11)$$

$$R = VU^T \quad (12)$$

식 (12)의 회전 행렬  $R$ 을 구하게 되면 마지막으로 식 (13)의 이동 정보  $t$ 를 구하여 안전모의 3차원 강체를 추적한다.

$$t = -R \times \text{centroid}_A + \text{centroid}_B \quad (13)$$

Fig. 12는 강체 변환방법을 개발한 모니터링 프로그램에서 구현한 모습으로 안전모의 강체를 추적하여 3차원 공간상 위치 및 자세를 표현한다.

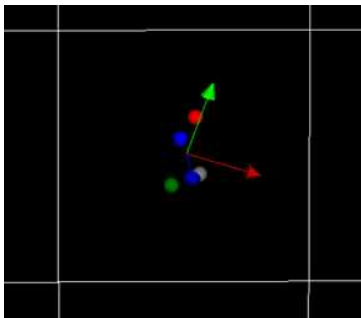


Fig. 12 Rigid Body Estimation

#### 4. 가상환경 위치 추적실험

본 장에서는 가상공간 이동플랫폼을 이용한 가상 훈련에서 안전모를 착용한 시험자의 위치 추적 실험을 위해 8대의 자체 개발한 적외선 카메라

를 이용하며 Intel I-7 3.4GHz 16G ram의 PC에서 수행되었다. Fig. 13 에서 천장에 4m x 6m 크기의 구조물에 8대의 카메라를 지상의 한 지점을 향해 지향하여 배치했다.

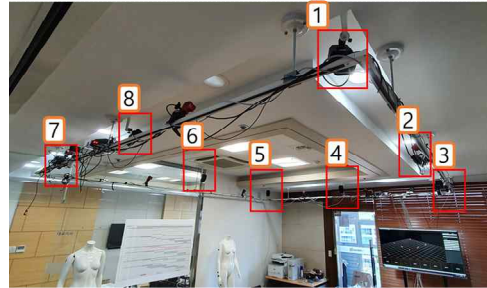


Fig. 13 Installation of Multiple Cameras

다중 카메라 보정을 통해 개별 카메라의 내부 변수와 외부 변수를 추정하였으며 Fig. 14의 광학식 위치 추적 모니터링 프로그램을 개발하여 제안 알고리즘을 구현하였다.

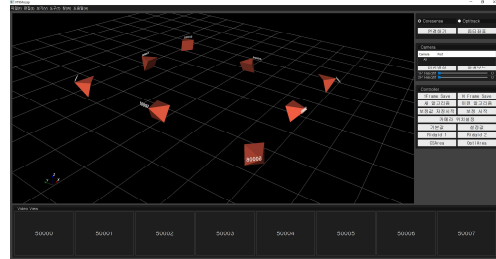


Fig. 14 Multi-camera Monitoring Pprogram

Fig. 15는 위치 추적을 위해 안전모를 착용한 시험자가 실험공간에서 이동하는 모습을 보여주고 있다.

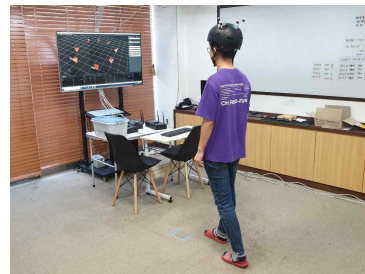


Fig. 15 Marker Jig's Walking Experiment



Fig. 16의 첫 번째 실험은 액티브 마커가 부착된 안전모를 착용한 시험자가 실험공간을 한 바퀴 이동하는 실험을 진행하였다.

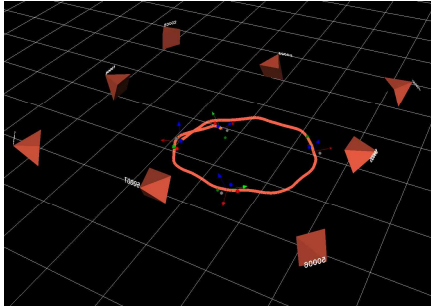


Fig. 16 Spinning Experiment Space

Fig. 17의 두 번째 실험은 안전모를 착용한 시험자가 실험공간에서 앞으로 걸어가는 도중 앉아서 멈추었다가 다시 일어서 걸어가는 실험을 진행하였다.

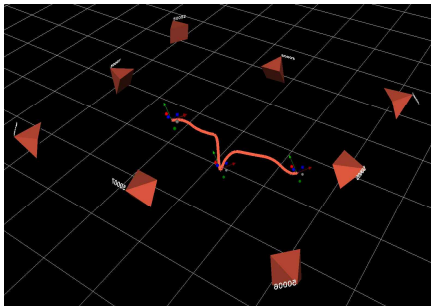


Fig. 17 An Experiment of Sitting While Walking

Fig. 18의 세 번째 실험은 안전모를 착용한 시험자가 실험공간에서 앞으로 걸어가는 도중 제자리 뛰기를 한 뒤 다시 걸어가는 실험을 진행하였다.

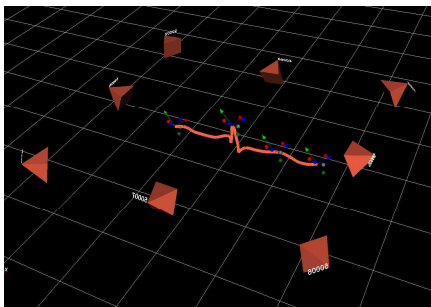


Fig. 18 An Experiment of Jumping While Walking

위 3가지 실험결과 공분산 중첩을 통한 3차원 마커의 생성과 이를 이용한 안전모의 강체를 추정하였으며 실험 공간상에서 사람의 머리추적이 가능하였으며, 앉거나 뛰는 동작을 통해 높이 차이에 대해서도 추적이 가능하다.

## 5. 결론

본 논문에서는 가상공간 이동플랫폼에서 사용자 위치추정을 위한 광학식 위치 트래킹 시스템 개발의 과정 중 하나로서 공분산 중첩을 통한 3차원 마커 추적 및 강체 생성에 관한 방식을 제시하였다. 실험결과 액티브 마커를 부착한 안전모의 강체 생성이 수행되었으며, 착용자의 3가지 이동 모습은 3차원 궤적을 추적하여 확인하였다. 제안한 알고리즘은 기존의 고해상도 카메라를 이용한 위치 추적 방식에 비해서 비교적 낮은 해상도의 카메라를 사용하여도 확률 기반의 3차원 좌표 추정이 가능하므로 저가형 광학식 모션 캡처 장비 또는 모바일 환경에서의 응용을 기대한다.

추후 센서식 모션 캡처 장비와 융합을 통해 다중 참여형 가상공간 이동플랫폼의 구축을 수행할 예정이다.

## References

- Angeli, A., Doncieux S., and Meyer J. (2009). Visual Topological SLAM and Global Localization, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, May. 12-17, Kobe, Japan, pp. 4300 - 4305.
- Chang, K. C., Chong, C. Y., and Mori, S. (2010). Analytical and Computational Evaluation of Scalable Distributed Fusion Algorithms, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 46(4), 2022 - 2034.
- Deng, Z., Zhang, P., Qi, W., Liu, J., and Gao,

Y. (2012). Sequential Covariance Intersection Fusion Kalman Filter, *Information Sciences*, 189, 293 - 309.

Jung, H, H. (2016). Multi-Camera Calibration Techniques for Motion Capture, *Proceedings of the Conference on the Institute of Electronics and Information Engineers*, Apr. 29-30, Yongin, South Korea, pp. 227-230.

Julier, J., and Uhlmann, K. (2007). Using Covariance Intersection for SLAM, *Robotics and Autonomous Systems*. 55(7), 3 - 20.

Kim, M, K. (2015). Performance Improvement of an AHRS for Motion Capture, *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, 21(12), 521-537.

Kim, S., and Lee, H. (2018). Implementation of Pattern Recognition Algorithm using Line Scan Camera for Recognition of Path and Location of AGV, *Korea Society of Industrial Information Systems*, 23(1), 13-21.

Lee, S., and Lee, C. (2014). Implementation of Game Interface using Human Head Motion Recognition, *Korea Society of Industrial Information Systems*, 19(5), 9-14.

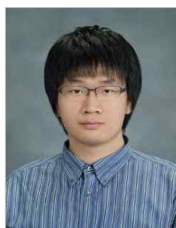
Hong, D., Cheon, M., and Lee, D. (2019). Image Processing based Virtual Reality Input Method using Gesture, *Korea Society of Industrial Information Systems*, 24(5), 129-137.

Sturm, P., and Maybank, S. (1999). On Plane-based Camera Calibration: A General Algorithm, Singularities, Applications. *CVPR '99: Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 1. June, 23-25, Fort Collins, USA, pp. 432 - 437.

Weng, Z., and Petar, D. (2012). A Bayesian Approach to Covariance Estimation and Data Fusion, *2012 Proceedings of the 20th European Signal Processing Conference*, Aug, 27-31, Bucharest, Romania, pp.

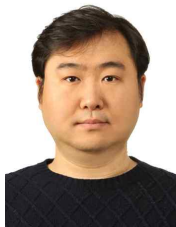
2352-2356.

Zhang, Z (2000). A Flexible New Technique for Camera Calibration, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22(11), 1330 - 1334.



**정 하 형 (HaHyoungh Jung)**

- 2010년 충남대학교 전자공학과 졸업
- 2017년 동 대학원 제어 및 항법 박사과정 졸업
- (현재) ㈜코어센스 연구원
- 관심분야 : 영상처리, 센서신호처리, 무인기



**박 진 하 (Jinha Park)**

- 2007년 충남대학교 전자공학과 졸업
- 2016년 동 대학원 제어 및 항법 석사과정 졸업.
- (현재) ㈜코어센스 대표이사
- 관심분야 : 모션 캡처, 영상 처리.



**김 민 경 (Min Kyong Kim)**

- 2007년 충남대학교 전자공학과 졸업
- 2016년 동 대학원 제어 및 항법 석사과정 졸업.
- (현재) ㈜코어센스 연구원
- 관심분야 : 동체 자세 제어, 모션 캡처.



**장 민 혁 (Min Hyuk Chang)**

- 조선대학교 전자공학과 공학 석사
- 조선대학교 전자공학과 공학 박사
- (현재) 전자부품연구원 IT융합부품연구센터 책임연구원
- 관심분야 : 휴먼컴퓨팅, 3D융합, VR/AR