

광학식 모션캡처를 위한 다중 카메라 보정 방법

신기영*, 문정환**

Multi-camera Calibration Method for Optical Motion Capture System

Ki-Young Shin *, Joung H. Mun **

요약

본 논문에서는 광학식 모션캡처 장비를 위한 다중 카메라 보정 방법을 제안한다. 이 방법은 DLT(Direct linear transformation) 알고리즘을 이용하여 7개의 마커가 있는 3축 보정틀의 영상을 획득하여 1차 카메라 보정을 한다. 그리고 2개의 마커가 있는 보정봉을 측정하고자 하는 영역에서 움직여서 2차 카메라 보정을 실시한다. 1차 카메라 보정에서는 카메라 보정뿐만 아니라 렌즈 왜곡 계수를 계산하여 2차 카메라 보정에서의 최적화를 위한 초기해로 사용한다. 2차 카메라 보정에서는 보정봉에 있는 마커사이의 거리가 일정하기 때문에 계산된 마커 거리와 실제 마커 거리의 차가 최소화 되도록 최적화를 수행한다. 제안한 방법에 의한 다중 카메라 보정 방법을 검증하기 위하여 재투영에러를 계산하였고 3축 보정틀에 있는 마커사이의 거리와 보정봉에 있는 마커사이의 거리를 계산하여 다른 상용장비의 값과 비교하였다. 3축 보정틀에 있는 마커를 복원하여 에러를 비교한 결과 평균오차가 상용장비의 1.7042mm에 비해 0.8765mm로 51.4% 수준으로 나타났고, 보정봉에 있는 마커를 복원하여 에러를 비교한 결과 상용장비의 평균에러 1.8897mm에 비해 2.0183mm로 0.1286mm 크게 나타났다.

Abstract

In this paper, the multi-camera calibration algorithm for optical motion capture system is proposed. This algorithm performs 1st camera calibration using DLT(Direct linear transformation) method and 3-axis calibration frame with 7 optical markers. And 2nd calibration is performed by waving with a wand of known length(so called wand dance) throughout desired calibration volume. In the 1st camera calibration, it is obtained not only camera parameter but also radial lens distortion parameters. These parameters are used initial solution for optimization in the 2nd camera calibration. In the 2nd camera calibration, the optimization is performed. The objective function is to minimize the difference of distance between real markers and reconstructed markers.

• 제1저자 : 신기영 교신저자 : 문정환

• 투고일 : 2009. 05. 20, 심사일 : 2009. 05. 21, 게재확정일 : 2009. 06. 20.

* 성균관대학교 생명공학부 ** 성균관대학교 생명공학부 부교수

※ 본 연구는 보건복지가족부 보건의료기술진흥사업의 지원에 의하여 이루어진 것임. (A060484)

For verification of the proposed algorithm, re-projection errors are calculated and the distance among markers in the 3-axis frame and in the wand calculated. And then it compares the proposed algorithm with commercial motion capture system. In the 3D reconstruction error of 3-axis frame, average error presents 1.7042mm(commercial system) and 0.8765mm(proposed algorithm). Average error reduces to 51.4 percent in commercial system. In the distance between markers in the wand, the average error shows 1.8897mm in the commercial system and 2.0183mm in the proposed algorithm.

- ▶ Keyword : 카메라보정(camera calibration), 다중카메라(multi-camera), 광학식 모션캡처(optical motion capture), 보정틀(control point), 보정봉(wand)

1. 서론

모션 캡처(motion capture)란 인간의 동작을 컴퓨터에 입력하기 위한 방법으로 인간뿐만 아니라 동물과 같이 다관절로 이루어진 복잡한 대상체의 3차원 자세의 시간에 따른 변화를 측정하는 것이다. 모션캡처 시스템은 컴퓨터 애니메이션과 같은 멀티미디어 콘텐츠 뿐만 아니라 산업, 의료, 스포츠, 인간공학, 생물역학 등 다양한 분야에서 사용되고 있으며 그 사용영역을 점차 확대시켜 나가고 있다[1].

이러한 모션 캡처 시스템의 종류로는 자기 센서를 이용하는 자기식(magnetic)[2,3], 기계적 링크 장치로 구성된 기계식(mechanical)[4,5], 그리고 카메라와 반사 물질을 입힌 작은 구 모양의 마커(marker)를 이용하는 광학식(optical)[6]이 있다.

자기식 시스템은 운용이 쉽고 장비 자체외의 시설 투자가 필요 없다는 장점이 있다. 그러나 센서를 몸에 부착한 경우 본체와 연결되어 있는 케이블이 연기자의 동작에 제한을 주며 주변 자기의 영향에 민감하여 노이즈의 발생 우려가 있다[6].

기계식 시스템은 다른 장치에 비하여 저가이며 높은 샘플링 속도로 모션 데이터를 획득 할 수 있고 초기 셋업 과정이 필요 없는 장점이 있다. 그러나 연기자의 몸에 기계장치를 부착하여 동작이 부자연스럽게 될 수 있고 기계 장치의 관절 부착에 따라 정확도가 달라지는 단점이 있다[6].

광학식 시스템은 고가이며 모션데이터의 획득이후 많은 후 처리작업이 필요한 단점이 있으나 높은 샘플링 속도와 많은 마커를 부착하여 정밀한 동작을 측정할 수 있고 연기자의 행동에 제약을 주지 않는 장점이 있다[6]. 이로 인하여 대부분의 모션캡처 시스템은 광학식을 채택하고 있다[7-9].

광학식 동작분석기는 카메라 보정, 모델 보정, 영상획득, 마커의 정합 및 추적, 후처리 작업 그리고 관절각 계산의 6단계의 과정을 거친다[10]. 카메라보정은 광학식 동작분석기 개발에 있어서 제일 먼저 선행되어야 하는 단계이다.

카메라 보정은 3×4 크기의 카메라 행렬 P 를 계산하는 것이다.

이 카메라 행렬 P 는 내부파라미터(intrinsic parameter)와 외부파라미터(extrinsic parameter)로 구성된다. 내부파라미터는 카메라의 초점거리(focal length, f), 주점(principle point), 기울어짐(Skew) 등으로 구성되며, 외부파라미터는 카메라의 회전(R)과 이동 성분(t)으로 구성된다[11]. 이러한 카메라 행렬은 광학식 동작 분석기를 포함하는 다중카메라 계측 시스템이나 스테레오 시스템 등에서 카메라와 카메라 사이의 기하학적 관계를 정확하게 계산하는데 필요하며, 카메라 보정의 오차는 3차원 계측 치수의 오차에 큰 영향을 미치게 된다[12].

카메라 보정 방법은 보정물체에 따라 2차원 격자를 이용하는 방법[13], 통제점 틀을 이용하는 방법[14], 보정봉(wand)을 이용하는 방법[15] 등이 있다. 2차원 격자를 이용하는 방법은 동시에 모든 카메라의 FOV(field of view)에 격자가 들어와야 하기 때문에 광학식 동작분석기를 위한 다중 카메라 보정에 적합하지 않다. 또한 통제점 틀을 이용하는 방법은 카메라 보정식이 간단하며 3차원 복원 시 정확도가 가장 높으나, 통제점 틀이 측정하고자 하는 영역의 크기만큼 커야하며 통제점 틀의 제작에 많은 비용이 소요되는 문제가 있다. 보정봉을 이용하는 방법은 보정 방법이 간편하고 큰 틀을 필요로 하지 않는 장점이 있으나 카메라 보정에 많은 시간이 소요되고 통제점 틀을 이용한 방법에 비해 정확도가 떨어지는 문제가 있다[15].

현재 대부분의 상용 광학식 모션캡처 장비의 경우 카메라 보정의 편리성으로 인해 보정봉을 이용한 카메라 보정 방법을 채택하고 있다. 그러나 보정봉을 이용한 방법은 보정틀을 이용한 방법에 비해 정확도가 떨어지기 때문에 보정봉과 보정틀을 이용한 방법의 장단점을 보완할 새로운 방법의 개발이 필요하다.

따라서 본 연구의 목적은 광학식 동작분석기를 위한 다중 카메라 보정에서 통제점 틀을 이용하는 방법과 보정봉을 이용한 방법의 장점을 융합한 새로운 다중 카메라 보정법을 제안한다. 이 알고리즘은 본 연구에서 개발한 3축 보정틀을 이용하여 DLT 알고리즘으로 1차 카메라 보정을 실시하며 보정봉에 있는 2개의 마커를 이용하여 렌즈의 왜곡 보정 및 카메라 파라미터의 최적화 과정을 수행한다.

II. 관련 연구

통계점 틀을 이용하는 방법은 1971년 Abdel-Aziz와 Karara에 의해 물체의 3차원 좌표와 카메라 영상에 찍힌 2차원 좌표사이에 선형적인 관계(Direct linear transformation, DLT)를 이용하여 카메라 보정을 하였다[16]. 이 방법은 카메라 행렬을 계산하기 위해 12개의 카메라 행렬 중 마지막 요소의 값을 1로 고정시켜 카메라 보정을 하였다. 그러나 이로 인해 특이해 문제가 발생하였기 때문에 Faugeras와 Toscani는 이 문제를 해결하기 위하여 카메라 행렬 3행의 행렬값의 제곱의 합을 1로 고정하여 카메라 보정을 하였다[17]. 그리고 Hartley는 특이값분해(Singular Value Decomposition, SVD)를 이용하여 제약조건 없이 12개의 DLT 파라미터를 계산하였다[18].

DLT방법은 렌즈 왜곡을 고려하지 않았기 때문에 Walton은 렌즈의 왜곡을 보정하기 위하여 기존의 11개 파라미터를 가지는 DLT 방법에 5개의 렌즈 왜곡 파라미터를 추가하여 총 16개의 파라미터를 가지도록 알고리즘을 보완하였다[19]. Hatze는 DLT방법이 실제 카메라 파라미터의 개수보다 많은 계산 파라미터를 가지기 때문에 실제 카메라 파라미터의 개수와 동일해지도록 MDLT(Modified DLT)방법을 연구하였다[20]. 또한 DLT방법으로 파라미터를 계산할 때 마커의 좌표를 정규화하지 않을 경우 특정 마커의 좌표 값이 다른 파라미터를 계산할 때 영향을 주기 때문에 마커의 좌표를 정규화한 후 DLT 방법을 적용한 연구가 있었다[11]. 그리고 방사형(radial)렌즈왜곡을 보정하기위하여 DLT 계산이후 비선형 최적화 과정을 추가한 연구도 진행되었다[21].

III. 다중카메라보정 알고리즘

1. 제안알고리즘

본 논문에서 제안한 알고리즘은 아래와 같이 7단계를 거쳐 다중 카메라 보정을 수행하는 방법이다.

1. 각 카메라에 찍힌 3축 보정틀에 있는 7개 마커의 중심점 좌표 계산 : (u_{ij}, v_{ij})
2. DLT 방법을 이용하여 각 카메라 보정 : P_1, P_2, P_3, P_4
3. 재투영에러를 계산하여 렌즈왜곡 계수 계산 : k_1, k_2, k_3
4. 보정틀을 이용하여 측정 공간에서 움직임
5. 보정틀에 있는 2개 마커의 중심점 좌표 계산 : (u_{ij}, v_{ij})
6. 3축 보정틀과 보정틀에 있는 마커의 3차원 좌표 계산 : $(X_i, Y_i, Z_i), (X_{0ij}, Y_{0ij}, Z_{0ij})$
7. 최적화를 수행하여 카메라 행렬 P와 렌즈왜곡 계수 갱신 : $\| P_j - \prod(u_{ij}, v_{ij}, b_1, b_2, b_3, b_4) \|$

2. DLT 알고리즘 및 카메라 보정

3차원 공간상의 점 X_i 와 2차원 이미지상의 점 x_i 사이에 선형적인관계(DLT)가 존재한다고 가정하면 식 (1)과 같은 관계식이 성립된다.

$$x_i = P X_i \dots\dots\dots (1)$$

2차원 카메라 좌표 $x_i = [u_i w_i \ v_i w_i \ w_i]^T$ 이고 3차원 마커의 좌표 $X_i = [X_i \ Y_i \ Z_i \ 1]^T$ 이기 때문에 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} u_i w_i \\ v_i w_i \\ w_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2)$$

식 (2)를 전개하고 w_i 를 대입하여 정리하면 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} u_i &= \frac{p_{11}X_i + p_{12}Y_i + p_{13}Z_i + p_{14}}{p_{31}X_i + p_{32}Y_i + p_{33}Z_i + p_{34}} \dots\dots\dots (3) \\ v_i &= \frac{p_{21}X_i + p_{22}Y_i + p_{23}Z_i + p_{24}}{p_{31}X_i + p_{32}Y_i + p_{33}Z_i + p_{34}} \end{aligned}$$

카메라 보정은 결국 카메라 행렬 P를 계산하는 것이기 때문에 식 (3)에서 카메라 행렬을 계산하기위해 식을 정리하면 식 (4)와 같다.

$$L p = 0 \dots\dots\dots (4)$$

여기서 L은 식 (5)와 같이 정리되면 카메라 행렬 p는 식(6)과 같다.

$$L = \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -X_1 u_1 - Y_1 v_1 - Z_1 w_1 - u_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & -X_1 v_1 - Y_1 v_1 - Z_1 v_1 - v_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_i & Y_i & Z_i & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -X_i u_i - Y_i v_i - Z_i w_i - u_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_i & Y_i & Z_i & 1 & -X_i v_i - Y_i v_i - Z_i v_i - v_i \end{bmatrix} \dots\dots\dots (5)$$

$$p = [p_{11}, p_{12}, p_{13}, p_{14}, p_{21}, p_{22}, p_{23}, p_{24}, p_{31}, p_{32}, p_{33}, p_{34}]^T \dots\dots\dots (6)$$

식 (4)에서 카메라행렬 P가 자명해(trivial solution)로 계산

되는 것을 방지하기 위하여 L 를 특이값분해(singular value decomposition)하고, 가장 작은 특이값과 대응되는 특이벡터(singular vector)가 카메라행렬 P 가 된다.

카메라 내부파라미터와 외부파라미터를 계산하기 위하여 카메라 행렬 P 를 QR 분해하여 6개의 내부파라미터(K)와 6개의 외부파라미터(R, t)를 계산할 수 있다. 3×4 크기의 카메라 행렬 P 에서 왼쪽 3×3 행렬을 A 라고 할 때 $A=KR^T$ 이 된다. 여기서 A^{-1} 을 QR 분해하면 식 (7)과 같다.

$$A^{-1} = QL \dots\dots\dots (7)$$

여기서 Q 는 직교(orthogonal)하고 L 은 상삼각(upper triangular)행렬이다. 식 (7)의 역행렬을 계산하면 식 (8)과 같다.

$$A = L^{-1}Q^{-1} = L^{-1}Q^T \dots\dots\dots (8)$$

여기서 $K=L^{-1}$ 이고 $R=Q^T$ 가 된다.

3. 렌즈왜곡 보정

카메라 렌즈의 물리적 특성에 의해 야기 되는 렌즈 왜곡은 식 (3)에 렌즈왜곡 계수를 추가함으로써 식 (9)와 같이 수학적으로 모델링될 수 있다.

$$u_i + \Delta u_i = \frac{p_{11}X_i + p_{12}Y_i + p_{13}Z_i + p_{14}}{p_{31}X_i + p_{32}Y_i + p_{33}Z_i + p_{34}} \dots\dots\dots (9)$$

$$v_i + \Delta v_i = \frac{p_{21}X_i + p_{22}Y_i + p_{23}Z_i + p_{24}}{p_{31}X_i + p_{32}Y_i + p_{33}Z_i + p_{34}}$$

Δu 와 Δv 는 식 (10)과 같이 렌즈왜곡계수($\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3, \kappa_4, \kappa_5$)로 표현된다.

$$\Delta u = \xi(\kappa_1 r^2 + \kappa_2 r^4 + \kappa_3 r^6) + \kappa_4 (r^2 + 2\xi^2) + \kappa_5 \xi \eta \dots\dots\dots (10)$$

$$\Delta v = \eta(\kappa_1 r^2 + \kappa_2 r^4 + \kappa_3 r^6) + \kappa_5 (r^2 + 2\eta^2) + \kappa_4 \xi \eta$$

여기서 $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$ 는 방사형왜곡(radial distortion)계수이고, κ_4, κ_5 는 탈중심왜곡(de-centering distortion)계수이다. 또한 $[\xi, \eta] = [u - u_0, v - v_0]$, $r^2 = \xi^2 + \eta^2$ 이고, u, v 는 마커의 좌표, u_0, v_0 는 주점의 좌표이다.

5개의 렌즈왜곡계수 중 방사형왜곡이 가장 큰 영향을 주기 때문에 본 연구에서 렌즈왜곡계수는 $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$ 까지 고려하였다.

4. 3차원 좌표 계산 및 최적화

카메라 보정을 통해 계산된 카메라 행렬 P 와 카메라에 찍

힌 마커의 좌표를 통해 3차원 좌표를 계산할 수 있다. 마커의 3차원 좌표를 계산하기 위한 식은 식 (11)과 같다.

$$\begin{bmatrix} p_{11}^m - u_j^m p_{31}^m & p_{12}^m - u_j^m p_{32}^m & p_{13}^m - u_j^m p_{33}^m \\ p_{21}^m - v_j^m p_{31}^m & p_{22}^m - v_j^m p_{32}^m & p_{23}^m - v_j^m p_{33}^m \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{11}^m - u_j^m p_{31}^m & p_{12}^m - u_j^m p_{32}^m & p_{13}^m - u_j^m p_{33}^m \\ p_{21}^m - v_j^m p_{31}^m & p_{22}^m - v_j^m p_{32}^m & p_{23}^m - v_j^m p_{33}^m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_j^m p_{34}^m - p_{14}^m \\ v_j^m p_{34}^m - p_{24}^m \\ \vdots \\ u_j^m p_{34}^m - p_{14}^m \\ v_j^m p_{34}^m - p_{24}^m \end{bmatrix} \dots\dots\dots (11)$$

여기서 카메라의 대수는 1, ..., m 대이고, 카메라 행렬 $P^m = [p_{11}^m, p_{12}^m, p_{13}^m, \dots, p_{34}^m]$ 인 벡터이다. u_j^m, v_j^m 는 카메라에 찍힌 마커의 2차원 좌표이고 j 는 마커의 번호이다.

식 (11)은 미지수의 개수보다 식의 수가 많은 과잉결정(over-determined) 방정식이 되므로 해를 구하기 위하여 의사역(pseudo inverse)행렬을 통해 3차원 좌표를 계산한다.

3차원 복원 에러를 최소화하기 위하여 최적화가 수행되었다. 디자인 변수는 식 (12)와 같이 4대의 카메라 행렬 P_1, P_2, P_3, P_4 와 각 카메라의 렌즈 왜곡 계수($\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$)로 하였다.

$$\text{Minimize } f = f(P_1, P_2, P_3, P_4, \kappa_1, \kappa_2, \kappa_3) \dots\dots\dots (12)$$

최적화 목적함수(cost function)는 식 (13)과 같이 3축 보정들의 절대 좌표와 복원된 3차원 좌표사이의 거리를 최소화하도록 하였으며 또한 이미 알고 있는 보정봉 사이의 거리(250 mm)와 복원된 보정봉 사이의 거리를 최소화하도록 설정하였다. 결국 복원오차합(Reconstruction Error Sum, RES)을 최소화하도록 목적함수를 결정하였다.

$$RES(b) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \| P_j - \prod(u_{ij}, v_{ij}, b_i) \|^2 \dots\dots\dots (13)$$

P_j 는 3차원 공간상에서 마커의 좌표이고 복원된 3차원 좌표는 $\prod(u_{ij}, v_{ij}, b_i)$ 으로 나타냈다. b_i 는 각 카메라 파라미터이고 u_{ij}, v_{ij} 는 카메라에 찍힌 마커의 좌표이다. b 는 식 (14)와 같이 4대 카메라의 보정파라미터로 구성된다.

$$b = \{b_1, b_2, b_3, b_4\} \dots\dots\dots (14)$$

b 를 구성한 카메라 보정파라미터는 $b_q = \{p_{11q}, p_{12q}, p_{13q}, p_{14q}, p_{21q}, p_{22q}, p_{23q}, p_{24q}, p_{31q}, p_{32q}, p_{33q}, p_{34q}, \kappa_{1q}, \kappa_{2q}, \kappa_{3q}\}$, $q=1, 2, 3, 4$ 로 카메라 행렬 12개와 카메라의 렌즈왜곡 계수 3개로 구성되어 있다. 본 연구에서는 4대의 카메라를 이용하였기 때문에 b 는 60개의 인자로 구성된다.

IV. 실험 및 분석

1. 실험

본 연구의 실험은 영상획득을 위해 4대의 IEEE1394 카메라 (Dragonfly Express, Point Grey Research, Canada)를 이용하였으며, Xeon 2.0 GHz CPU 컴퓨터에서 수행되었다. Dragonfly Express는 코닥의 1/3" progressive scan CCD 센서를 이용하고, 640x480의 해상도는 갖는다. 적외선조명을 위해 카메라에 적외선 조명이 부착되어 있고 렌즈에는 적외선통과필터가 장착되어있다. 렌즈의 초점거리는 6mm이다.

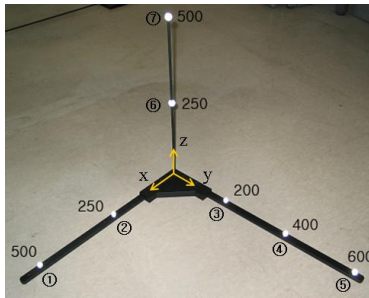


그림 1. 3축 카메라 보정틀
Fig. 1. 3-axis control points

카메라 보정을 위하여 먼저 그림 1의 보정 틀을 모든 카메라의 FOV에 들어가는 바닥에 놓고 3축 보정틀의 영상을 획득하였다. 3축 보정틀의 마커 번호와 위치는 그림 1과 같다. 3축 보정틀로 카메라보정을 한 후 z축에 해당하는 보정봉을 분리하여 측정공간에서 움직이며 영상을 획득하였다. 각 카메라의 영상에서 마커의 중심점을 계산하기 위하여 영상을 이치화한 뒤 라벨링 (labeling) 알고리즘을 적용하여 마커의 중심점을 추출하였다.

2. 카메라 보정

다중 카메라 보정을 위하여 제안한 알고리즘과 같이 먼저 DLT 방법을 이용하여 각 카메라 보정을 실시하였고 렌즈왜곡 계수를 계산하였다. 그리고 보정봉에 있는 2개 마커의 좌표와 카메라 행렬을 이용하여 3차원 좌표를 계산하였다. 또한 3축 보정틀의 3차원 좌표를 계산하여 최적화를 수행하였다.

최종적으로 계산된 카메라 내부 파라미터의 값은 표 1과 같이 각 카메라별로 초점 거리, skew값 그리고 주점의 위치로 나타내었다. 렌즈왜곡계수는 표 2와 같다. 렌즈왜곡에 의한 영향이 작기 때문에 $10^{-6} \sim 10^{-17}$ 범위로 계산되었다.

표 1. 각 카메라의 내부 파라미터

Table 1. Intrinsic parameters of each camera

Camera	f (pixels)		Skew	pp (pixels)	
	x	y		x	y
1	846.2	848.9	9.9	350.6	235.9
2	909.9	908.3	-0.0	271.1	271.5
3	884.4	893.8	15.5	418.7	238.1
4	808.1	805.5	-10.8	258.4	262.1

표 2. 각 카메라의 렌즈왜곡지수

Table 2. Lens distortion parameters of each camera

Cam.	k_1	k_2	k_3
1	-6.3020×10^{-7}	2.1149×10^{-12}	7.7766×10^{-17}
2	1.5803×10^{-6}	-7.9250×10^{-11}	1.2589×10^{-15}
3	1.7213×10^{-6}	-5.9458×10^{-11}	5.6692×10^{-16}
4	2.3726×10^{-7}	-2.2204×10^{-11}	2.0188×10^{-16}

각 카메라의 절대좌표에서의 위치와 3축 보정틀의 마커를 보정한 결과는 그림 2와 같다. 실험을 할 때 3축 보정틀을 중심으로 4대의 카메라를 배치시켰기 때문에 계산된 카메라의 위치와 3축 보정틀의 위치가 그림 2와 같이 나타났다.

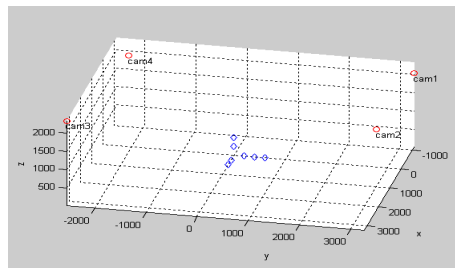


그림 2. 계산된 각 카메라의 위치와 복원된 3축 보정틀
Fig. 2. Calculated positions of each camera and reconstructed markers of 3 axis frame

렌즈왜곡 보정 유무에 따른 카메라 보정의 정확도를 계산하기 위하여 보정봉에 있는 두 마커사이의 거리를 계산하였다. 마커사이의 거리는 절대거리인 250mm를 기준으로 그림 3과 같이 나타났다.

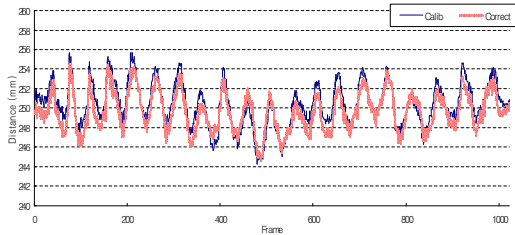


그림 3. 보정봉에 있는 마커 사이의 거리(최적화 전)
Fig. 3. Distance between wand markers(before optimization)

렌즈왜곡을 고려하지 않았을 경우 복원된 마커사이의 거리는 보정봉사이의 절대거리(250 mm)를 기준으로 RMSE(root mean square error)를 계산하였다. 이때 최소오차는 0.0063mm이고 최대오차는 5.7334mm로 나타났다. 평균오차는 1.7828mm이며 오차의 표준편차는 1.3667로 나타났다. 렌즈왜곡을 보정하였을 경우 마커사이 거리의 최소오차는 0.0006mm이고 최대오차는 5.2532mm로 나타났다. 평균오차는 1.5569mm이며 표준편차는 1.1701로 나타났다(표 3). 렌즈왜곡을 할 경우 그렇지 않을 경우에 비해 평균오차가 87.3% 수준으로 감소하였고 표준편차 역시 렌즈왜곡을 보정할 경우 작게 나타났다(표 3).

최적화를 수행하였을 경우 렌즈의 왜곡을 고려하지 않았을 경우 최소오차는 0.0035mm로 나타났고 최대오차는 5.3753mm로 나타났다. 절대거리에 대한 평균오차는 1.6581mm로 나타나 최적화를 수행하지 않았을 경우의 1.7828mm에 비해 작게 나타났다. 에러의 표준편차는 1.0851mm로 나타나 최적화를 수행하지 않았을 경우 보다 작게 나타났다. 반면 렌즈왜곡을 고려한 최적화의 경우 최소오차는 0.0015mm로 나타났고 최대오차는 4.5722mm로 나타났다. 평균오차는 1.4277mm로 최적화를 수행하지 않았을 경우의 1.5569mm보다 작게 나타났고 표준편차 역시 최적화를 수행하지 않았을 경우보다 작게 나타났다(표 3).

표 3. 보정봉의 마커 사이 거리 오차 비교
Table 3. Compare error about distance between markers in the wand

Error (mm)	Before optimization		After optimization	
	Calibration	Corrected	Calibration	Corrected
Min.	0.0063	0.0006	0.0035	0.0015
Max.	5.7334	5.2532	5.3753	4.5722
Avg.	1.7828	1.5569	1.6581	1.4277
S.D	1.3667	1.1701	1.0851	0.9572

최적화를 수행하였을 경우 렌즈왜곡을 고려하지 않았을 때와 렌즈왜곡을 보정하였을 때의 결과를 비교하기 위하여 보정봉사이의 거리를 계산한 결과는 그림 4와 같다.

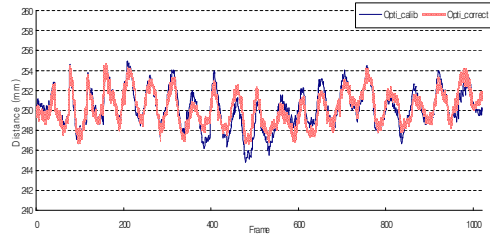


그림 4. 보정봉에 있는 마커 사이의 거리(최적화 후)
Fig. 4. Distance between wand markers(after optimization)

3. 카메라 보정 검증

카메라 보정 결과를 검증하기 위하여 2가지 방법을 사용하였다. 첫 번째는 재투영에러(reprojection error)를 계산하는 것이고 두 번째는 카메라 보정에 사용되지 않은 데이터를 이용하여 3차원 복원하여 상용장비의 결과와 비교하는 것이다. 먼저 재투영에러는 식 (15)와 같이 카메라로 측정된 마커의 2차원 좌표(xi)와 카메라 행렬(P)과 복원한 3차원 좌표(Xi)를 이용하여 계산된 2차원 좌표사이를 비교하는 것이다. 여기서 계산된 마커의 2차원 좌표는 렌즈 왜곡이 보정된 값이다.

$$Error_{rep} = \sum_i d(x_i, PX_i)^2 \dots\dots\dots (15)$$

재투영에러는 3축 보정틀에 대한 것과 보정봉에 있는 첫 번째 마커, 두 번째 마커에 대해 계산하였다.

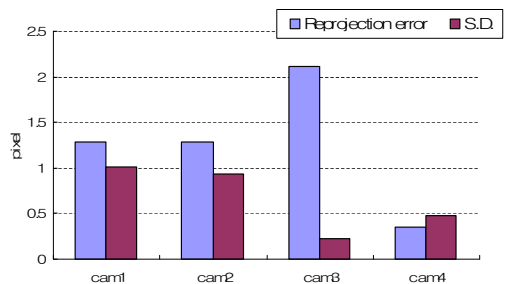


그림 5. 3축 보정틀에 있는 마커의 재투영에러
Fig. 5. Reprojection errors of markers in 3-axis frame

그림 5는 각 카메라에서 3축 보정틀에 있는 마커의 재투영에러와 표준편차를 나타내는 것으로 재투영에러는 2.1126pixel 보다 작게 나타났고 표준편차는 1.0147보다 작게 나타났다. 보정봉에 있는 첫 번째 마커의 재투영에러와 표준편차는 그림 6과 같다. 재투영에러는 4대의 카메라에서 1.8pixel보다 작게 나타났고 표준편차 역시 1.8보다 작게 나타났다. 가장 큰 재투영에러를 보이는 카메라는 cam3로 1.712pixel로 나타났고 가장 큰 표

준편차의 경우 cam4에서 1.642로 나타났다.

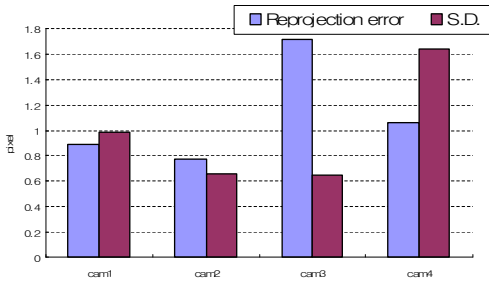


그림 6. 보정봉에 있는 첫 번째 마커의 재투영에러
Fig. 6. Reprojection errors of 1st marker in wand

보정봉에 있는 두 번째 마커의 재투영에러와 표준편차는 그림 7과 같다. 재투영에러는 4대의 카메라에서 1.6pixel보다 작게 나타났다고 표준편차는 1.2보다 작게 나타났다. 가장 큰 재투영에러를 보이는 카메라는 cam3로 1.5849pixel로 나타났다 가장 큰 표준편차의 경우 cam4에서 1.0869로 나타났다.

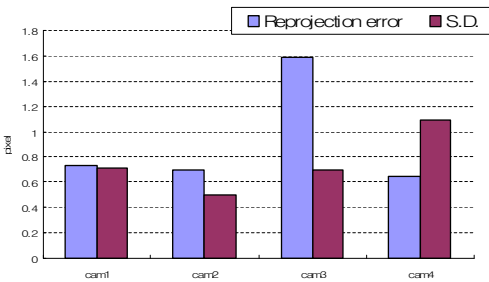


그림 7. 보정봉에 있는 두 번째 마커의 재투영에러
Fig. 7. Reprojection errors of 2nd marker in wand

카메라 보정 결과를 검증하기 위한 두 번째 방법으로 상용 장비의 결과와 비교하였다. 먼저 카메라 보정에 사용되지 않은 데이터를 획득하기 위하여 보정봉을 이용하여 추가 실험을 실시하였다. 대조군으로 사용될 상용 광학식 동작분석기 (Optitrack, NaturalPoint Inc., USA)는 본 연구에서 사용한 카메라와 유사한 해상도(752x480)의 것으로 선택하였다. 실험은 3축 보정봉에 있는 7개 마커의 영상을 획득하여 3차원 좌표를 계산하였고 보정봉을 움직여 마커사이의 거리 데이터를 획득하였다. 3축 보정봉의 결과 비교는 7개 마커 중에 2개씩 선택하여 나올 수 있는 총 21가지 경우의 마커사이 거리를 계산하여 비교 하였다. 그리고 마커사이의 거리 오차는 RMSE로 계산하였다.

상용장비와 3축 보정봉에 대한 RMSE를 비교하였을 때

결과는 표 4와 같이 상용장비는 1.7042mm로 나타났고 제안한 알고리즘은 0.8765mm로 상용장비의 51.4% 수준으로 나타났다. 상용장비의 에러와 제안한 알고리즘의 에러가 통계적으로 유의한 차이를 나타내는지 검증하기 위하여 t-test를 실시하였을 때 $p < 0.05$ 로 나타나 본 연구에서 제안하는 알고리즘이 상용장비의 에러와 비교하였을 때 통계적으로 유의한 차이가 나타났다.

표 4. 보정봉의 마커 사이 거리 오차 비교

Table 4. Distance among markers in the 3-axis frame

Marker pairs	Absolute distance (mm)	Commercial Mocap (mm)		Proposed method (mm)	
		Dist.	Error	Dist.	Error
1-2	250	250.8345	0.8345	250.4104	0.4104
1-3	320.1562	321.1886	1.0324	320.3696	0.2134
1-4	471.6991	472.6301	0.931	472.7775	1.0784
1-5	650	650.8701	0.8701	649.2456	0.7544
1-6	349.3365	351.0491	1.7126	350.1343	0.7978
1-7	553.6569	556.4368	2.7799	553.8078	0.1509
2-3	538.5165	542.5902	4.0737	539.1315	0.615
2-4	640.3124	643.8032	3.4908	641.3308	1.0184
2-5	781.0250	784.0261	3.0011	780.7037	0.3213
2-6	556.3596	559.074	2.7144	557.3401	0.9805
2-7	702.8769	705.2531	2.3762	703.4094	0.5325
3-4	200	200.0625	0.0625	201.3815	1.3815
3-5	400	400.3654	0.3654	399.0774	0.9226
3-6	315.4933	315.843	0.3497	315.3789	0.1144
3-7	532.9503	534.2071	1.2568	531.5211	1.4292
4-5	200	200.3053	0.3053	197.7019	2.2981
4-6	468.5467	469.288	0.7413	470.4812	1.9345
4-7	635.6383	637.3056	1.6673	636.1665	0.5282
5-6	647.7160	649.0713	1.3553	647.2538	0.4622
5-7	777.1975	779.861	2.6635	775.6267	1.5708
6-7	250	253.2063	3.2063	249.1079	0.8921
Mean error		1.7042		0.8765	

총 1005프레임에 대하여 보정봉사이의 거리를 상용장비와 비교한 결과는 그림 8과 같다. 이를 수치적으로 비교하면 상용장비의 최소오차는 0.0050mm로 나타났고 최대 오차는 13.9678mm, 평균오차는 1.8897mm, 표준편차는 1.5458로 나타났다. 반면 본 연구에 제안한 알고리즘은 최소오차 0.0010mm, 최대오차 6.9852mm, 평균오차 2.0183mm, 표준편차 1.5999로 나타났다(표 5). 최대 오차의 경우 상용장비의 50% 수준으로 나타났고 평균 오차의 경우 상용장비보다 0.1286mm 크게 나타났다. 그러나 t-test 결과 $p > 0.05$ 로 나타나 통계적으로 유의한 차이를 나타내지 않았다.

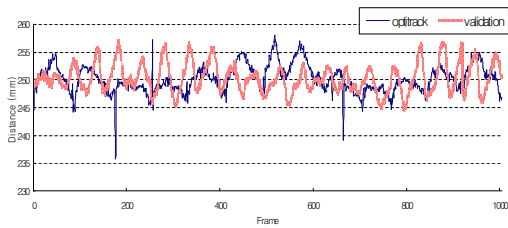


그림 8. 보정봉의 마커사이의 거리(상용장비와 비교)
 Fig. 8. Distance between wand markers(commercial motion capture system and proposed method)

표 5. 보정봉의 마커 사이 거리 비교(검증)
 Table 5. Distance between markers in the wand(verification)

Error (mm)	Commercial Mocap	Proposed method
Min.	0.0050	0.0010
Max.	13.9678	6.9852
Avg.	1.8897	2.0183
S.D	1.5458	1.5999

V. 결 론

본 연구에서는 광학식 동작분석기를 위한 다중카메라 보정 방법을 제안하였다. 이 방법은 통제점 틀을 이용한 DLT 방법으로 계산한 카메라 보정의 간편성과 보정봉으로 카메라 보정을 할 때의 장점인 커다란 통제점 틀을 필요로 하지 않는 것을 융합한 방법이다.

본 연구에서 제안한 카메라 보정 방법을 검증하기 위하여 재투영에러를 계산하였을 때 3축 보정틀에서 최대 에러는 2.1126이고 보정봉에서 1.712로 나타났다. 재투영에러가 다른 연구(0.2pixel) [22]보다 크게 나타난 이유는 선행 연구에서는 최적화과정에서 재투영에러를 최소화하도록 목적함수를 결정하였기 때문이다. 그러나 본 연구에서는 마커사이의 거리를 일정하게 유지 시키도록 최적화를 진행하였기 때문에 재투영에러가 크게 나타났다. 목적함수를 재투영에러로 하지 않고 3차원 좌표 사이의 거리로 한 이유는 후자가 더욱 엄격한 제약조건이기 때문이다[23].

제안한 방법으로 다중 카메라 보정을 하여 3축 보정틀에 있는 마커의 3차원 좌표를 계산하여 평균 오차를 계산한 결과 상용장비의 1.7042mm에 비해 0.8765mm로 51.4% 수준으로 나타났다. 또한 보정봉에 있는 2개 마커의 3차원 좌표를 계산하여 마커사이의 거리를 계산한 결과 상용장비의 경우 평

균오차가 1.8897mm로 나타났지만 제안한 알고리즘은 2.0183mm로 상용장비에 비해 0.1286mm 크게 나타났다. 그러나 $p > 0.05$ 로 나타나 통계적으로 유의한 차이가 나타나지 않았다. 결국 3축 보정틀의 복원 오차는 제안한 알고리즘과 상용장비 사이에 통계적으로 유의한 차이가 있으며 제안한 알고리즘이 향상된 결과를 보였다. 그리고 보정봉의 복원 오차는 제안한 알고리즘의 오차가 크게 나타났지만 통계적으로 유의한 차이가 나타나지 않았다. 따라서 본 연구에서 제안한 알고리즘이 상용장비보다 우수한 성능을 나타내었다. 보정봉의 오차가 상용장비보다 크게 나타난 것은 두 장비사이의 상의한 FPS에 기인한 것으로 볼 수 있다. 상용장비의 경우 100 FPS로 측정하였고 본 연구에서 사용한 카메라는 카메라의 특성상 60 FPS로 측정하였다. 따라서 본 연구에서 사용한 카메라가 보정봉이 움직이는 동안 블러링과 같은 에러에 더 민감하게 반응 할 수밖에 없기 때문에 상용장비보다 에러가 크게 나타난 것으로 사료된다. 추후에는 동일한 FPS 조건 하에서 제안한 알고리즘을 비교하여 성능을 평가하고자 한다.

참고문헌

- [1] J. L. Garrido Castro, R. Medina-Carnicer, Alfonso Martinez Galisteo, "Design and evaluation of a new three-dimensional motion capture system based on video," *Gait & Posture*, Vol. 24, No. 1, pp. 126-129, August 2006.
- [2] 임운빈, 조육, 허복희, "자기적 방법을 이용한 3차원 좌표 측정," *한국자기학회지*, 제 12권, 제6호, 206-211쪽, 2002년 12월.
- [3] S. Hashi, M. Toyoda, S. Yabukami, K. Ishiyama, Y. Okazaki, and K.I. Arai, "Wireless magnetic motion capture system for multi-marker detection," *IEEE transactions on magnetics*, Vol. 42, No. 10, pp. 3279-3281, October 2006.
- [4] T. Jan-Phillip and L. Jörn, "A mobile low-cost motion capture system based on accelerometers," *Lecture notes in computer science*, Vol. 4292, pp. 437-446, October 2006.
- [5] Inition, <http://www.inition.co.uk>
- [6] 최태준, 유석호, 이동열, 이원복, "광학식 모션 캡처방식을 이용한 디지털 캐릭터 움직임," *한국콘텐츠학회논문지*, 제 7권, 제 8호, 109-116쪽, 2007년 8월.
- [7] Vicon, <http://www.vicon.com>
- [8] Qualisys, <http://www.eualisys.com>

- [9] Optitrack, <http://www.naturalpoint.com/optitrack>
- [10] 안정현, 설창환, 박은광, 원광연, "LAN기반 광학식 모션 캡처 시스템 개발," HCI2000 학술대회, 429-432쪽, 2000.
- [11] 차정희, 이근수, "불변 특징모델을 이용한 카메라 동작인 수 측정," 한국컴퓨터정보학회논문지, 제 10권, 제 4호, 191-201쪽, 2005년 9월.
- [12] 강동중, "여러 장의 영상을 사용하는 3차원 계측용 카메라 교정방법," 제어 • 자동화 • 시스템공학논문지, 제 13권, 제 3호, 224-229쪽, 2007년 3월.
- [13] D. J. Kang, J. E. Ha, and M. H. Jeong, "Detection of calibration patterns for camera calibration with irregular lighting and complicated backgrounds," International journal of control, automation, and systems, Vol. 6, No. 5, pp.746-754, October 2008.
- [14] A. Kolahi, Mo. Hoviattalab, T. Rezaeian, M. Alizadeh, M. Bostan, H. Mokhtarzadeh, "Design of a marker-based human motion tracking system," Biomedical signal processing and control, Vol. 2, No. 1, pp.59-67, January 2007.
- [15] T. Pribani ć, P. Strum and M. Cifrek, "Calibration of 3D kinematic systems using orthogonality constraints," Machine vision and applications, Vol. 18, No. 6, pp. 367-381, November 2007.
- [16] Y. I. Abdel-Aziz & H. M. Karara, "Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry," Proceedings of the Symposium on close-range photogrammetry, Falls church, VA: American society of photogrammetry, pp.1-18, 1971.
- [17] O. D. Faugeras and G. Toscani, "Camera calibration for 3D computer vision," Proc. international workshop on industrial applications of machine vision and machine intelligence, Silken, Japan, pp.240-247, 1987.
- [18] R. I. Hartley, "Estimation of relative camera positions for uncalibrated cameras," Lecture notes in computer science, vol. 588, pp. 579-587, May 1992.
- [19] J.S. Walton, "Close-range cine-photogrammetry: a generalized technique for quantifying gross human motion". Ph.D. Dissertation, Pennsylvania State University, University Park, 1981.
- [20] H. Hatze, "High-precision three-dimensional photogrammetric calibration and object space reconstruction using a modified DLT-approach," J. Biomech., Vol. 21, Issue 7, pp.533-538. 1988.
- [21] L. Quan and S. Hang, "Correction of the asymmetrical circular projection in DLT camera calibration," Congress on image and signal processing, Vol. 2, pp.344-348, May 2008.
- [22] T. Svoboda, D. Martinec and T. Pajdla, "A convenient multicamera self-calibration for virtual environments," Presence: teleoperators and virtual environments, Vol. 14, No. 4, pp. 407-422, August 2005.
- [23] Z. Chuan, T. Dalong and G. Hogwei, "A high-precision calibration and optimization method for stereo vision system," 9th International conference on control, automation, robotics and vision, pp. 1-5, December 2006.

저 자 소 개

신 기 영



2004년 성균관대학교 바이오메카트로닉스학과 학사
 2006년 성균관대학교 생명공학부 석사
 2006년 ~ 현재 성균관대학교 생명공학부 박사과정
 <관심분야>컴퓨터 비전, 카메라 보정, 생체신호처리

문 정 환



1998년 University of Iowa 박사
 2002년 Tokyo Denki University 초빙교수
 2002년 ~ 현재 성균관대학교 생명공학부 부교수
 2006년 ~ 현재 성균관대학교 바이오메카트로닉스센터 센터장
 <관심 분야> 생체역학, 스포츠역학, 컴퓨터 비전, 인간공학