

# PSD센서를 이용한 모션캡처 시스템의 센서보정에 관한 연구

## A Study on the Sensor Calibration for Low Cost Motion Capture Sensor using PSD Sensor

\*김유건, \*최훈일, \*\*\*유영기, \*\*\*오춘석

\*Yu-Geon Kim, \*Hun-Il Choi, \*\*\*Young-Kee Ryu, \*\*\*Choonsuk Oh

**Abstract** - In this paper, we deal with a calibration method for low cost motion capture sensor using PSD (Position Sensitive Detection). The PSD sensor is employed to measure the direction of incident light from moving markers attached to motion body. To calibrate the PSD optical module, a conventional camera calibration algorithm introduced by Tsai. The 3-dimensional positions of the markers are measured by using stereo camera geometry. From the experimental results, the low cost motion capture sensor can be used in a real time system.

**Key Words** : PSD Sensor(PSD센서), Camera Calibration(카메라 보정), Stereo Vision(스테레오 비전)

### 1. 서론

최근 가속화된 멀티미디어 기술의 발전으로 인해 물체의 3차원 표현 기술의 필요성이 증대하고 있다. 3D 게임, 애니메이션, 영화 등의 캐릭터 제작과 산업현장에서 로봇제어 등에서 마우스나 키보드를 대신해 보다 직접적인 커뮤니케이션을 실현하고자 하는 새로운 인터페이스의 출현이 요구되고 있다. 모션캡처 기술은 모션캡처 센서에 의하여 물체의 위치와 동작을 캡처하고 캡처된 데이터를 컴퓨터에 의하여 제작한 3차원 모델에 맵핑시켜 캐릭터의 움직임을 생성하는 새로운 애니메이션 제작 방법은 새로운 인터페이스의 필요성을 만족하는 기술 중 하나가 될 것이다. 본 논문에서는 동작이 자유롭고 처리속도가 빨라 실시간 처리가 가능한 광학식 방식에서 고가의 고속 카메라 대신 저가의 PSD 센서를 사용하여 저가의 광학방식의 모션캡처 시스템을 구성하였고, Tsai의 카메라 보정방법을 사용하여 광학적 왜곡문제를 보정하는 연구를 하였다. [1][2][4]

### 2. PSD 모션캡처 시스템

시스템의 전체적인 구성은 Fig. 1의 블록도에 나타내는 것과 같이 PSD 센서부, 발광마커, 컴퓨터(PC)로 구성된다. 작동 순서를 간단히 설명하면, (1) 우선 컴퓨터에서 측정을 알리는 명령을 PSD 센서부로 통신 케이블을 통해서 전달되면, (2) PSD 센서부 내의 제어부(마이크로프로세서)는 외부의 발광마커에게 동작을 알리는 명령을 원격제어 적외선 발광부(IR LED)에 보낸다. (3) 적외선 발광부는 외부의 발광마커에게 전 방향으로 방사되고, 이 신호는 발광 마커의 원격제어

적외선 수신부(IR Receiver)에서 수신되고, (4) 발광마커 내부에 있는 제어부(마이크로프로세서)는 작동개시를 알리는 명령이 수신되었음을 알게 된다. 발광마커의 제어부는 적당한 지연시간 후에 (5) 적외선 발광부에 발광신호를 발생한다. (6) 발광마커로부터 전 방향으로 방사된 적외선 광 중 일부는 광학렌즈를 거쳐 PSD 센서에 초점으로 맺히게 되고, (7) PSD 센서의 아날로그 신호는 신호처리 회로를 거쳐 (8) 디지털 신호로 PSD 센서부의 제어부로 전달된다.

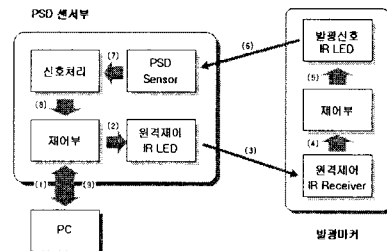


Fig. 1 PSD 모션캡처 시스템 블록도

PSD 센서부의 제어부에 얻어진 데이터가 컴퓨터로 전달되어 3차원 위치를 계산하게 된다. 이러한 일련의 반복 작업으로 발광마커의 위치를 실시간으로 측정하게 된다. 발광마커의 원격제어 적외선 수신부가 PSD 센서부로부터 원격제어 신호를 수신하면 발광마커의 적외선 발광부는 적당한 타이밍에 맞추어 구동한다. 발광마커로부터 펄스형 적외선 광이 PSD 센서부의 광학계에 전달되고 광학계를 통해 2차원 PSD 센서에 스폿이 맺히고, 이 센서 4개의 각 전극에서 전류가 발

저자 소개

\*鮮文大學 電子工學科 碩士課程

\*\*\*鮮文大學 情報通信工學部 副教授·工學博士

\*\*\*鮮文大學 情報通信工學部 教授·工學博士

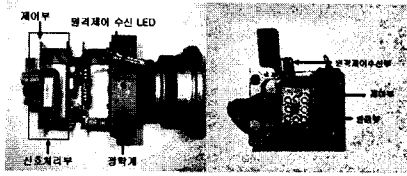


Fig. 2 PSD 센서부와 발광마커

생된다. 발광마커의 위치정보를 포함하는 전류는 신호처리부를 거쳐 컴퓨터에서 사용할 수 있는 디지털 값으로 변환되고 제어부를 통해 컴퓨터에 데이터를 전송한다.

### 3. 연구내용

본 논문에서는 Tsai의 카메라 보정 방법을 이용하여 PSD 센서에 대한 광학적 왜곡 수차를 보정하였다. 카메라 보정 방법을 통하여 얻은 인자를 이용하여 좌, 우에서 얻은 2차원의 PSD 센서의 데이터를 가지고 스테레오 비전을 이용하여 3차원 데이터를 산출하였다.<sup>[1]</sup>

#### 3.1 Tsai의 카메라 보정방법

Tsai의 카메라 보정 방법은 3차원 공간상에서 3차원 좌표 점들과 이미지상의 투영좌표를 이용하여 투영과정과 관련된 외부 및 카메라 내부 보정인자를 구하는 과정이다. 이러한 보정 과정은 Fig. 3와 같이 3차원 세계 좌표계(world coordinate)에서 2차원 이미지 좌표계(image coordinate)로 변환하는 4단계의 과정으로 나타낸다.

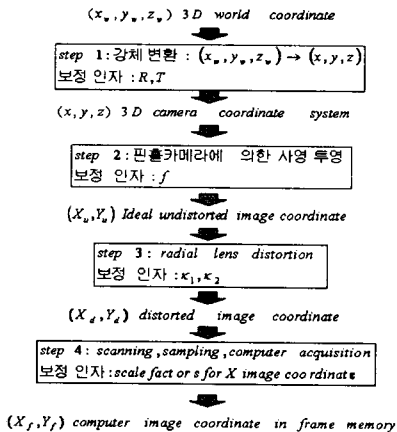


Fig. 3 3차원 절대 좌표계에서 2차원 이미지 좌표계로 변환하는 4단계

본 장에서는 여러 평면상의 점들을 이용하는 방법을 사용하여 Tsai의 카메라 보정 방법에 대하여 알아본다.

Tsai의 카메라 보정 방법은 크게 2 단계로 나누어진다. 첫 번째 과정은 3차원 회전 좌표(Rotation: R)와 3차원 좌표(x, y), 스케일 인자를 구하는 과정이고 두 번째 과정은 유효초점거리(f), 왜곡계수(k), 그리고 3차원 좌표(z)를 구한다. 첫 번째 과정을 단계별로 알아보면 다음과 같다.

1-1단계: 실제 이미지 좌표  $(X_d, Y_d)$ 를 구한다. 스케일 인자  $S_x$ 를 1로 설정한다.

1-2단계:  $T_y^{-1}S_x r_1, T_y^{-1}S_x r_2, T_y^{-1}S_x r_3, T_y^{-1}S_x T_x, T_y^{-1}S_x r_4, T_y^{-1}S_x r_5, T_y^{-1}S_x r_6$ 를 구한다. 각 점의 3차원 좌표 값  $(x_{wi}, y_{wi}, z_{wi})$ 과 1-1단계에서 구한  $(X_d, Y_d)$ 를 이용하여 (1)식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} Y_d^1 x_w & Y_d^1 y_w & Y_d^1 z_w & Y_d^1 -X_d^1 x_w & -X_d^1 y_w & -X_d^1 z_w \\ T_y^{-1}S_x r_1 \\ T_y^{-1}S_x r_2 \\ T_y^{-1}S_x r_3 \\ T_y^{-1}S_x T_x \\ T_y^{-1}r_4 \\ T_y^{-1}r_5 \\ T_y^{-1}r_6 \end{bmatrix} = X_d^1 \quad (1)$$

1-3단계: 1-2단계에서 구한  $T_y^{-1}S_x r_1, T_y^{-1}S_x r_2, T_y^{-1}S_x r_3, T_y^{-1}S_x T_x, T_y^{-1}S_x r_4, T_y^{-1}S_x r_5, T_y^{-1}S_x r_6$ 를 이용하여  $(r_1, \dots, r_6, T_x, T_y)$ 를 구한다.  $T_y$ 를  $T_y^{-1}S_x r_1, T_y^{-1}S_x r_2, T_y^{-1}S_x r_3, T_y^{-1}S_x T_x, T_y^{-1}S_x r_4, T_y^{-1}S_x r_5, T_y^{-1}S_x r_6$ 로부터 구한다.  $a = T_y^{-1}S_x r_1, a = T_y^{-1}S_x r_2, a = T_y^{-1}S_x r_3, a = T_y^{-1}S_x T_x, a = T_y^{-1}S_x r_4, a = T_y^{-1}S_x r_5, a = T_y^{-1}S_x r_6$ 일 때 회전 행렬의 성질에 의해  $T_y = -(a_5^2 + a_6^2 + a_7^2)^{-1/2}$ 을 구한 후  $T_y$ 의 부호를 결정한다. 이미지 좌표의 중심과 떨어져 있는 점들 중 한 점을 선택한 후  $T_y$ 의 부호를 +1로 가정하여 (1)식의 항들을 계산한다.

$$\begin{aligned} r_1 &= (T_y^{-1}r_1)T_y, & r_2 &= (T_y^{-1}r_2)T_y \\ r_4 &= (T_y^{-1}r_4)T_y, & r_5 &= (T_y^{-1}r_5)T_y \\ T_x &= (T_y^{-1}T_x)T_y \\ x &= r_1x_w + r_2y_w + T_x, & y &= r_4x_w + r_5y_w + T_y \end{aligned} \quad (2)$$

그 후 (2)식의  $S_x$ 를 계산한다.

$$S_x = (a_1^2 + a_2^2 + a_3^2)^{1/2} |T_y| \quad (3)$$

마지막으로 회전행렬 R을 구한다.

$$\begin{aligned} r_1 &= a_1 \frac{T_y}{S_x}, & r_2 &= a_2 \frac{T_y}{S_x}, & r_3 &= a_3 \frac{T_y}{S_x} \\ r_4 &= a_4 T_y, & r_5 &= a_6 T_y, & r_6 &= a_7 T_y \\ T_x &= a_4 T_y \end{aligned} \quad (4)$$

회전 행렬의 세 번째 행은 구해진 처음 두 행의 x(cross product)로 구할 수 있다.

두 번째 과정을 단계별로 알아보면 다음과 같다.

단계2-1: 렌즈의 왜곡이 없다고 가정할 후 초점거리  $f$ 와  $T_z$ 를 구한다. 각 점에 대해 다음의 식이 성립하게 된다.

$$\begin{bmatrix} y_i & -d_y Y_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f \\ T_z \end{bmatrix} = w_i d_y Y_i \quad (5)$$

(5)식을 Pseudo Inverse Matrix를 사용하여  $T_z$ 와  $f$  값을 계산할 수 있다.

단계 2-2 : 단계 2-1 에 구해진 근사화 해인  $f$  와  $T_z$  를 이용하여  $f, T_z, k_1$  을 구한다.

### 3.2 3차원 데이터 복원

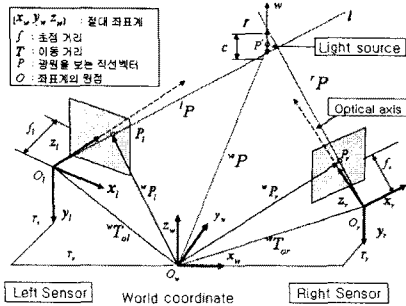


Fig. 4 2개의 센서를 사용한 3차원 위치 복원

Tsai 의 카메라 보정방법을 통해 카메라의 회전행렬 (Rotation Matrix: R)과 이동벡터(Transformation: T), 유효 초점거리(Effective focal length: f), 왜곡계수(Distortion factor: k) 등을 구한 후 스테레오 비전을 이용하여 데이터의 3 차원 좌표를 산출하였다.<sup>[3][4]</sup> Fig. 4 는 세계 좌표계의 원점 ( $O_w$ )을 중심으로 PSD 센서를 벡터만큼 이동 후 회전행렬 R 만큼 회전을 시킨 것이다. 3차원의 점  $P'$  을 구하기 위해 Fig. 4 을 이용하면 각 센서로부터 광원까지의 직선벡터인  $P$  가 만나는 점이 광원의 위치가 되므로 직선벡터  $P$  를 구해 교차 하는 점을 찾으면 된다. 하지만, 3차원 공간상에서는 서로 교차 하지 않을 수 있으므로 두 직선 벡터의 외적( $w$ )을 구하여 두 직선 벡터간의 최단거리를 구한 다음 그 중간을 광원( $P'$ )으로 근사화 하였다.  $P'$ 는 아래와 같은 순서로 구한다. 우선 세계좌표계로부터 왼쪽 PSD 센서 좌표계의 원점  $O_l$  과  $P_l$  의 좌표를 알고 있으므로 (6) 식으로 방향벡터를 계산할 수 있다. Fig. 3 에서와 이동벡터를 계산 후 (6) 식과 같이 방향 벡터를 계산 한다

$${}^w P_l = ({}^w R_l) \cdot {}^l P_l + {}^w T_{ol} \quad (6)$$

여기서  ${}^l P_l$ 는 PSD 센서로부터 얻을 수 있는 센서 좌표계의  $P'$ 에 대한 좌표 값으로 다음과 같이 정의 된다.

$${}^l P_l = [x_l, y_l, f_l] \quad (7)$$

보정을 통하여 알고 있는  ${}^w T_{ol}$  와 계산 하여 얻은  ${}^w P_l$  을 이용하여 (8)식과 같이 방향벡터를 구한 후 (9)식과 같이 방향 벡터의 단위벡터를 구한다.

$$v = ({}^w P_l \cdot x - {}^w O_l \cdot x)i + ({}^w P_l \cdot y - {}^w O_l \cdot y)j + ({}^w P_l \cdot z - {}^w O_l \cdot z)k \\ = v_x i + v_y j + v_z k \quad (8)$$

$$\hat{v} = \frac{v_x i + v_y j + v_z k}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}} = \hat{v}_x i + \hat{v}_y j + \hat{v}_z k \quad (9)$$

(9)식에서 구한 단위벡터( $\hat{v}_l$ )를 이용하여 왼쪽 PSD 센서의  $P'$ 에 대한 직선방정식을 구한다.

$$l = {}^w O_l + \hat{v}_l \cdot a \quad (10)$$

오른쪽 PSD 센서도 같은 방법으로 단위벡터( $\hat{v}_r$ )을 구한 후  $P'$ 에 대한 직선의 방정식을 구한다.

$$r = {}^w O_r + \hat{v}_r \cdot b \quad (11)$$

(여기서 a, b는 상수)

여기서 구한  $l$ 과  $r$ 을 이용하여  $w = l \times r$ 을 구한다. Fig. 4 을 보면 (12)식이 성립함을 볼 수 있다.

$${}^w T_{ol} + \hat{v}_l \cdot a + w \cdot c = {}^w T_{or} + \hat{v}_r \cdot b \quad (12)$$

(12)식을 행렬식으로 변환하여 a, b, c를 구한 후, a, c 값을 이용하여 (13)식을 계산하면 세계 좌표계를 기준으로 한 점  $P'$ 의 위치를 알 수 있다.

$${}^w P = {}^w T_{ol} + a \cdot \hat{v}_l + (c/2) \cdot w \quad (13)$$

## 4. 결론

본 논문에서는 기하학적 변형이 있지만 같은 점을 바라보고 있어 많은 양의 일치점을 가질 수 있는 수렴 이미지 센서 모델의 식을 이용하여 이미지 보정을 통하여 얻은 인자를 가지고 캘리브레이션 패턴의 발광마커를 3차원으로 복원을 하였다. 본 논문은 PSD 센서를 이용한 3차원 모션캡처 시스템의 센서보정 방법에 대해 연구한 것이다. 본 논문에 적용된 모션캡처 시스템은 PSD 센서를 기반으로 한 광학식 모션캡처 시스템이다. 광학적인 시스템은 렌즈의 광학적 왜곡 때문에 보정 작업이 필요하다. 이를 Tsai 의 카메라 보정 방법을 이용하여 인자들을 얻고 스테레오 비전을 사용하여 3차원 데이터의 복원을 통해 3차원 세계좌표 값을 얻었다.

## 5. 후기

렌즈의 왜곡 수치를 보정하기 위한 연구로 정밀도를 향상 시키고 광학식 시스템이 가지는 차폐문제와 하드웨어적인 최적화를 보완한다면 보다 다양한 분야에서 사용이 가능한 정밀한 모션캡처 시스템을 구현할 수 있을 것이다.

## 참 고 문 헌

- [1] Roger Y. Tsai, "A Versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-Shelf TV Camera and Lenses," IEEE Journal of Robotics and Automation, No. 4, August, 1987.
  - [2] Emanuele Trucco, Alessandro Verri, "Introductory Techniques for 3D Computer Vision", Prentice-Hall, 1998.
  - [3] 이준호, " PSD 를 이용한 실시간 3 차원 모션캡처 시스템 개발", 선문 대학교 일반대학원 전자공학 석사학위논문, 2003.
  - [4] Richard Paul, "Robot Manipulators : Mathematics, Programming, and Control", The MIT Press , 1982.
- 본 연구는 지역혁신 인력양성 사업지원(CN-31)으로 수행되었음.