

## 직교 좌표에서 카메라 시스템의 방향과 위치 결정

### Determination of Camera System

### Orientation and Translation in Cartesian Coordinate

이 용 중\*\*, 신 신 범\*, 이 양 범\*

창원기능대학 생산자동화과\*\*, 울산대학교 전기전자자동화공학부\*

#### Abstract

A new method for the determination of camera system rotation and translation from in 3-D space using recursive least square method is presented in this paper. With this method, the calculation of the equation is found by a linear algorithm, where the equation are either given or be obtained by solving five or more point correspondences. Good results can be obtained in the presence if more than the eight point.

A main advantage of this new method is that it decouple rotation and translation, and then reduces computation. With respect to error in the solution point number in the input image data, adding one more feature correspondence to required minimum number improves the solution accuracy drastically. However, further increase in the number of feature correspondence improve the solution accuracy only slowly.

The algorithm proposed by this paper is used to make camera system rotation and translation easy to recognize even when camera system attached at end effector of six degrees of freedom industrial robot manipulator are applied industrial field.

#### I. 서 론

화상입력장치로 사용되는 카메라 시스템이 오차를 포함하고 있거나 정확한 위치가 알려져 있지 않다면 화상입력장치를 이용한 산업용 6축 로봇에 대한 자세 보정은 적절히 이루어질 수 없다. 따라서 카메라시스템에 대한 렌즈의 광학적인 특성과 신호 처리상의 오차를 나타내는 내부 계수와 직교 좌표에 대한 카메라의 위치와 방향을 나타내는 외부 계수를 정확하게 측정할 필요가 있다. 카메라시스템에 대한 위치와 방향 결정에 관련된 과거의 연구 사례로 Sobel은 비선형 방정식으로 표현되는 카메라 시스템을 해석하여 위치와 방향을 결정하는 알고리즘을 제안하였으

며, Liu는 핀 홀 기하에 의한 투사 변환 모델에서 선과 점의 대응 관계를 이용하여 외부 계수를 결정하였고, 이러한 알고리즘을 로봇에 적용한 여러 사례가 있다[1, 2, 3, 4]. 또한 Tsai는 제안한 알고리즘에서 내부 계수를 렌즈 오차, 유효 초점 거리, 화상 스케일 계수로 나누었다[5].

한편, 카메라시스템에 대한 내부 계수를 결정하기 위해서는 카메라 시스템에 대한 모델링이 선행되어야 한다. 카메라 시스템의 모델링에 대한 과거의 연구 사례로 Puskorius는 투사 변환 오차 모델을 제안하여, 카메라시스템에 대한 계수를 내부 계수와 외부 계수를 나누어 각각 오차를 보정하였다[6]. 따라서 카메라시스템에서 렌즈 오차가 배제된 기하학적 투사 변환 핀 홀 모델을 설정하고 카메라 좌표와 화상 좌표의 대응 관계에서 공간상의 직선과 화상 평면사의 직선을 생성한 다음, 직교 좌표를 근간으로 하는 카메라시스템의 회전 변환 행렬과 초점 거리를 구하는 선형방정식을 구하고, 이 결과를 이용하여 카메라 시스템에 대한 위치와 로봇 6번 축 좌표에 위치 변환을 구하였다. 또한 시뮬레이션 방법에서는 새로운 데이터의 입력에 따라 전체 방정식을 취급하는 기존의 최소자승법과 다르게 즉, 이전 데이터의 처리 결과와 새로운 데이터 처리 결과를 포함하여 새로운 결과를 구하는 순환 최소자승을 적용하여 시뮬레이션 효율을 증대하였다 [7, 8, 9]. 그 결과 6축 산업용 로봇의 끝단에 카메라를 부착하고, 로봇 운용 모드를 직교 좌표로 설정한 다음, 일정한 간격으로 왜곡 현상이 배제된 상태로 8개 이상의 점이 배열된 캘리브레이션 마스크만 있으면 별도의 측정 장치가 없어도 직교좌표에 대한 카메라시스템의 위치와 방향을 인식할 수 있다. 따라서 산업현장에서 카메라시스템 자체에 대한 위치와 방향을 인식하지 못한 상태로 산업용 로봇에 적용할 경우 발생할 수 있는 로봇과 작업 대상물의 충돌이나 전혀 틀린 작업 대상물에 접근하는 등의 혼란이 발생할 수 있는 미연에 방지할 수 있게 되었다[3, 4].

#### II. 본 론

카메라시스템에서 렌즈 오차가 배제된 기하학적

투사 변환 핀 홀 모델은 다음 그림과 같다[6].

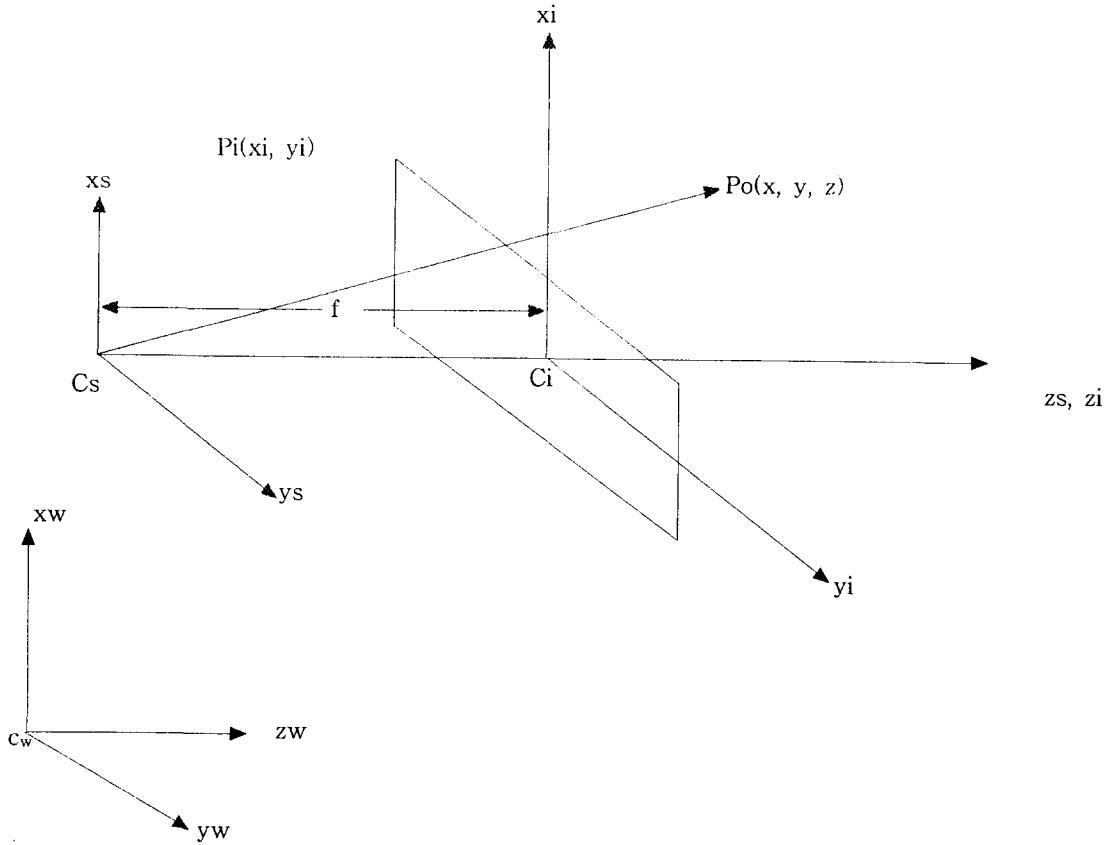


Fig. 1. Geometric perspective translation pin hole model excluding lens distortion

$$\frac{x_i}{x} = \frac{f}{z}, \quad \frac{y_i}{y} = \frac{f}{z} \quad (1)$$

또한, 화상 좌표 값  $p_i$ 에 대응하는 컴퓨터 프레임 버퍼상의 위치인  $p_f$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x_f &= S_x dx^{-1} x_i + c_x \\ y_f &= dy^{-1} y_i + c_y \\ dx &= dx' \frac{N_{cx}}{N_{fx}} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,

$S_x$  :  $x_i$  방향의 화상 스케일 계수

$(c_x, c_y)$  : 컴퓨터 메모리 중심의 행과

$dx'$  : 스캔 방향으로 배열된 카메라시스템의 CCD 센서 소자 간격

$dy$  : 스캔 방향과 직각 방향으로 배열된 카

$C_s$  : 카메라 좌표

$C_w$  : 직교 좌표

$C_i$  : 화상 좌표

$p_o$  : 카메라 좌표에서 본 임의의 한 점에 대한 좌표 값

$p_i$  :  $p_o$ 의 화상 좌표 값

$f$  : 유효 초점 거리

카메라 좌표에서 본 하나의 점  $p_o$ 와 이것에 대한 화상 좌표 값  $p_i$ 의 관계는 다음과 같다.

메라시스템 CCD 센서 소자 간격

- $dx$  : 스캔 방향으로 컴퓨터 버퍼 간격
- $N_{cx}$  : 스캔 방향으로 카메라시스템의 CCD 센서 소자 수
- $N_{fx}$  : 컴퓨터로 샘플링한 화소 수

확상 스케일 계수  $S_x$  는 카메라시스템의 CCD 센서 소자와 컴퓨터 프레임 버퍼의 비율을 나타

지 않는다는 것이 입증되었다[7]. 따라서 본 연구에서는 결정해야 할 내부 계수 중에 렌즈 오차는 고려하지 않았다. 산업용 6축 로봇의 끝단에 카메라를 부착한 다음, 직교 좌표에서 카메라 시스템의 위치와 방향을 결정하기 위하여 그림 1의  $p_o$ 에 인접하는 점  $p_{o1}$ 을 연결하는 공간상의 직선을  $r$ , 직선  $r$ 을 확장 평면으로 투사하였을 때 생성되는 직선이  $L$ 이면 점 대응 관계는 다음 그림과 같이 된다.

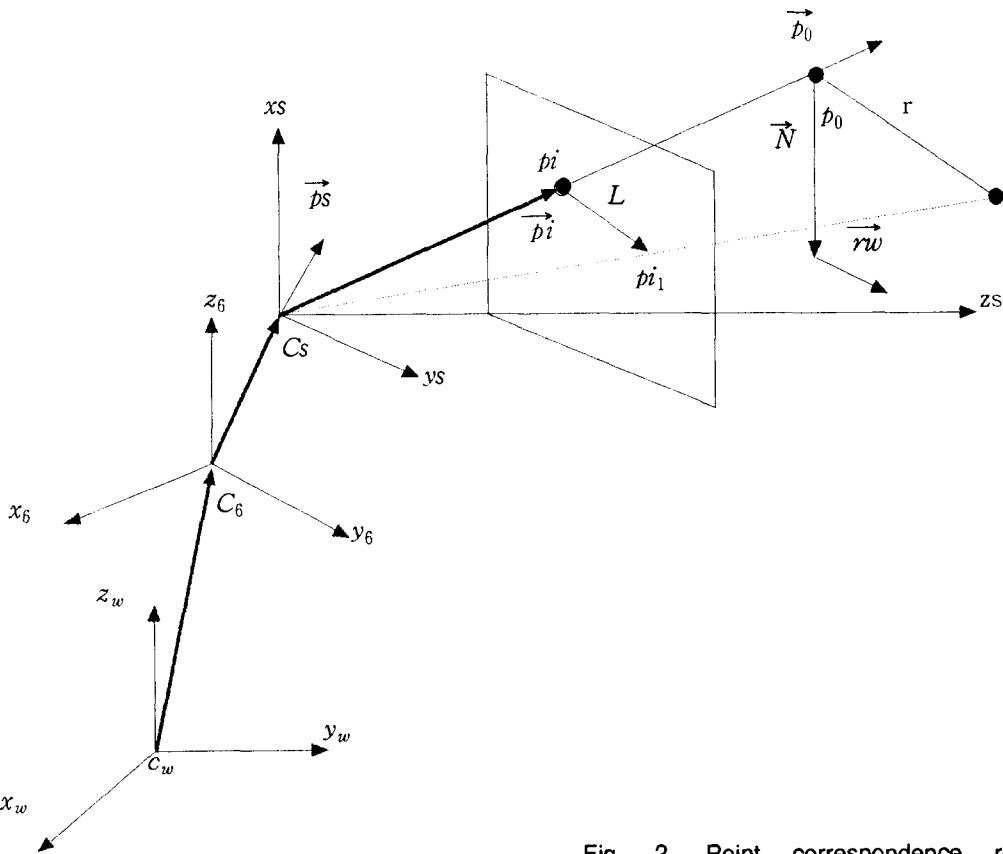


Fig. 2. Point correspondence relation in cartesian coordinate

여기서

$C_w$  : 직교 좌표 기준

$C_i$  : 확장 좌표

$C_s$  : 산업용 6축 로봇의 끝단에 부착된 카메라 좌표

$C_6$  : 로봇 6번 축 좌표

$r$  : 점  $p_s C_6$  2개를 연결한 공간상에 직선

$L$  : 확장 평면에  $r$ 의 투영으로 생성된 직선

내는 계수이다[5]. 최근에 상용화되고 있는 카메라시스템의 CCD 센서 소자는 일정한 간격으로 정밀하게 제작되어 있으므로 화소 간격은 컴퓨터 프레임 버퍼의 열과 행에 정확하게 1 : 1로 일치하므로 확장 스케일 계수를 결정할 필요가 없다 [5]. 또한 렌즈 왜곡 오차가  $\pm 0.01$  이하인 산업용 CCD 카메라의 경우 시스템에 거의 영향을 주

$\vec{N}$ : 직선  $r$ 의 투사 평면에 대한 법선 벡터

$\vec{r}_w$ : 직선  $r$ 의 방향 벡터

$\vec{p}_i$ : 점  $p_i$ 의 방향 벡터

<sup>w</sup>  
6  $T$ : 3차원 기준 좌표를 기준으로 하는 로봇

6번 축 좌표로 변환

<sup>6</sup>  
s  $T$ : 로봇 6번 축 좌표를 기준으로 하는 카

메라 좌표로 변환

이 그림에서 알려진 직교 좌표상의 직선  $r$ 과 화상 평면상의 직선  $L$ 에 대한 관계를 유도하고 이를 산업용 6축 로봇의 끝단에 부착된 카메라시스템의 위치와 방향 결정에 사용한다. 화상 좌표 값  $p_i$ 에 대한 방향 벡터  $\vec{p}_i$ 와 법선 벡터  $\vec{N}$ 는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\vec{p}_i \cdot \vec{N} = 0 \quad (3)$$

따라서 식 (3)의 관계식을 이용하여 직교 좌표를 근간으로 하는 카메라시스템의 회전 변환 행렬  $R$ 과 직선  $r$  및 직선  $L$ 의 관계는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$(\vec{r}_w^T R) \vec{N} = 0 \quad (4)$$

여기에서 알려져 있지 않은 카메라 시스템의 유효 초점 거리  $f$ 와 회전 변환 행렬  $R$ 을 결정하기 위하여 식 (4)에 대한 구성 요소를 다음과 같은 알고리즘으로 구한다.

[정리 1]: 회전 변환 행렬  $R$

오일러 24각도 법 중에서  $\alpha, \beta, \gamma$ 는 각각 tilt, swing, spin으로 다음과 같이 적용한다[2].

$$R_Z R_Y R_X(\alpha, \beta, \gamma) = R_Z(\alpha) R_Y(\beta) R_X(\gamma)$$

$$= \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (5)$$

[정리 2]: 법선 벡터  $\vec{N}$

$\vec{p}_i$ 는 그림 1에서  $(x_i, y_i, z_i)$ 이고, 법선 벡터  $\vec{N}$ 은  $(D, E, F)^T$ 의 값일 때 직선  $L$ 은  $y_s$ 축과 평행하며  $z_s$ 축에 일정한 값을 가지므로 식 (4)의 관계를 이용하면 다음과 같은 직선 방정식

으로 나타낼 수 있다[2].

$$Dx_i + Ey_i + F = 0 \quad (6)$$

식 (6)에 식 (1)의 관계를 대입하면 다음 식과 같이 되어 법선 벡터  $\vec{N}$ 은  $(D, E, f^{-1}F)^T$ 의 값으로 된다.

$$Dx + Ey + f^{-1}F = 0 \quad (7)$$

따라서 식 (5)에 [정리 1]과 [정리 2]의 결과와 직선  $r$ 의 방향 벡터  $\vec{r}_w$ 에 대한  $(l, m, n)$ 을 대입하면 다음과 같이 된다.

$$[l \ m \ n] \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D \\ E \\ f^{-1}F \end{bmatrix} = 0 \quad (8)$$

식 (8)을 풀어 선형방정식으로 만들면 다음과 같이 된다.

$$[lD \ mD \ nD \ lE \ nE \ lF \ mF \ nF] \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \\ q_5 \\ q_6 \\ q_7 \\ q_8 \end{bmatrix} = [-mE] \quad (9)$$

여기서

$$\begin{aligned} q_1 &= r_{11} r_{22}^{-1}, & q_2 &= r_{21} r_{22}^{-1} \\ q_3 &= r_{31} r_{22}^{-1}, & q_4 &= r_{12} r_{22}^{-1} \\ q_5 &= r_{32} r_{22}^{-1}, & q_6 &= f^{-1} r_{13} r_{22}^{-1} \\ q_7 &= f^{-1} r_{23} r_{22}^{-1}, & q_8 &= f^{-1} r_{33} r_{22}^{-1} \end{aligned}$$

한편, 그림 2에서 직선  $r$ 상의 점  $p_o$ 에 대한 방향 벡터  $\vec{p}_o$ 는 직교 좌표 기준  $C_w$ 에 대한 카메라시스템의 위치 변환 벡터  $\vec{p}$ 와 방향 벡터  $\vec{p}_s$  및 회전 변환 행렬  $R$ 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\vec{p}_o = R \vec{p}_s + \vec{p} \quad (10)$$

여기서

$$\begin{aligned}\vec{p}_o &= (x, y, z)^T \\ \vec{p}_s &= (x_s, y_s, z_s)^T \\ \vec{p} &= (p_x, p_y, p_z)^T\end{aligned}$$

식 (10)의 양변에  $R^{-1}$ 을 곱하면 다음과 같다.

$$\vec{p}_o' = \vec{p}_s + \vec{p}' \quad (11)$$

여기서

$$\begin{aligned}\vec{p}_o' &= R^{-1}\vec{p}_w = (x', y', z')^T \\ \vec{p}' &= R^{-1}\vec{p} = (p_x', p_y', p_z')^T\end{aligned}$$

식 (11)을 풀어쓰면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}x' &= x_s + p_x' \\ y' &= y_s + p_y' \\ z' &= z_s + p_z'\end{aligned} \quad (12)$$

식 (12)에 식 (1)의 관계를 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}fx' &= (z' - p_z')x_i + fp_x' \\ fy' &= (z' - p_z')y_i + fp_y'\end{aligned} \quad (13)$$

식 (13)을 미지수  $p_x', p_y', p_z'$ 을 구하기 위한 선형방정식으로 변환하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix} -f & 0 & x_i \\ 0 & -f & y_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_x' \\ p_y' \\ p_z' \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} x_i z' - fx' \\ y_i z' - fy' \end{bmatrix}\end{aligned} \quad (14)$$

식 (14)은 미지수가 3개이므로 최소한 2개 이상의 점 대응 관계가 주어져야 해가 존재함을 보이기 위하여 다음과 같은 알고리즘으로 구한다.

### [정리 1] : 점 대응 관계에 따른 해의 존재

그림 2에서 화상 좌표 값  $p_i$ 는  $(x_i, y_i)$  표현되고,  $p_{i1}$ 는  $(x_{i1}, y_{i1})$  표현되는 서로 다른 2개의 점이 있을 때 방정식  $Ax = b$ 에 대한  $x = (A^T A)^{-1} A^T b$  해가 존재하기 위해서는  $\det(A^T A)$  가 0이 아닌 값이 되어야 한다. 이것을 증명하기  $A^T A$ 에 대한 행렬

값을 다음과 같이 구한다.

$$\det(A^T A) = 2f^4 [(x_i - x_{i1})^2 + (y_i - y_{i1})^2] \quad (15)$$

이 식에서  $p_i$ 과  $p_{i1}$ 가 동일한 좌표 값이 아닌 점이면  $\det(A^T A)$ 가 0이 되지 않으므로 해가 존재함을 알 수 있다. 따라서 이렇게 구한 해를 이용하여 다음과 같이 위치 변환 벡터  $\vec{p}$  구할 수 있다.

$$\vec{p} = R\vec{p}' \quad (16)$$

### [정리 2] : 로봇 6번 축 좌표에 대한

### 카메라 좌표의 위치 변환 행렬 ${}^6_s T$

식 (16)을 이용하면 직교 좌표를 기준으로 하는 카메라 좌표의 변환 행렬  ${}^w_s T$ 는 다음과 같이 구성할 수 있다.

$${}^w_s T = \begin{bmatrix} R & \vec{p} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

또한 로봇 6번 축 좌표에 대한 카메라 좌표의 위치 변환 행렬  ${}^6_s T$ 는 다음과 같다.

$${}^6_s T = ({}^w_6 T)^{-1} \cdot {}^w_s T \quad (18)$$

### III. 시뮬레이션 및 결과 고찰

본 연구에 적용한 순환 최소자승은 기존의 최소 자승법과 같이 새로운 데이터의 입력에 따라 전체 방정식을 취급하는 방식과 달리 이전 데이터의 처리 결과와 새로운 데이터 처리 결과를 포함하는 새로운 결과를 구한다[7]. 그러므로 식 (9)의 미지수가  $q_1 - q_8$ 면 이것에 대한 해를 구하기 위해서는 5개 이상의 알려진 점이 정의되어야 하고, 이 점들을 증가시키면서 오차를 최소화하는 순환 최소자승법을 적용하면 구할 수 있다. 즉, 선형방정식 식 (9)과 식 (14)에 벡터  $\vec{p}_o$  점을 각각 증감하여 대입하면 카메라 시스템의 위치와 방향 결정에 어떤 영향을 미치는가를 쉽게 판단할 수 있게 된다. 따라서  $(k)$ 개의 점에 대한 결과가 식 (19)과 같을 때  $(k+1)$ 개와 같은 새로운 점의 증가에 따라 순환 최소자승 알고리즘은 식 (20)과 같이 된다.

$$x(k) = [A(k)^T A(k)]^{-1} A(k)^T b(k) \quad (19)$$

$$x(k+1) = x(k) + g(k+1) \quad (20)$$

$$[b_{k+1} - a(k+1)]^T x(k)$$

별도의 캘리브레이션 마스크를 이용한 실험은 마스크의 점 간격에 대한 계측과 모니터 좌표 값을 계측하는 작업이므로 본 연구에서는 카메라시스템으로 인식하는 데이터는 Tsai가 실험한 데이터를 적용한다[5]. 따라서 카메라 위치 변환 벡터  $\vec{p}$ 와 식 (5)의 tilt, swing, spin에 대한 회전 변환 행렬  $R$  및 유효 초점 거리와  $p_z$ 에 대한  $p_z/f$ 에 대한 설정 값은 Tsai가 100개의 점으로 실험한 결과를 이용하였다. 시뮬레이션 결과를 보면 카메라시스템의 설정 값에 대한 상대 인식 오차는 점의 개수가 5개에서 6개 사이에 오차가 커지고, 6개에서 7개 사이에는 오차가 거의 없으며 8개 이상이 되면 설정 값에 거의 근접하는 위치와 방향을 찾을 수 있다. 이 결과는 Liu의 시뮬레이션 결과와 비슷하다[2]. 따라서 산업용 6축 로봇의 끝단에 카메라를 부착하고, 로봇 운용 모드를 직교 좌표로 설정한 다음, 일정한 간격으로 왜곡 현상이 배제된 상태로 8개 이상의 점이 배열된 캘리브레이션 마스크만 있으면 별도의 측정 장치가 없어도 직교 좌표에 대한 카메라시스템의 위치와 방향을 인식할 수 있다. 따라서 본 연구에서 제안하는 알고리즘을 적용하면 로봇 끝단에 그림퍼와 카메라를 일체형으로 부착하여 불규칙하게 배열된 대상물을 핸들링하거나, 또는 그림퍼 대신 아크 용접용 토치를 카메라와 일체형으로 부착하여 용접 시작점이 불규칙한 대상물에 용접할 때 용이하게 적용할 수 있다[10, 11, 12].

#### IV. 결 론

본 연구는 산업용 6축 로봇의 끝단에 카메라를 부착하여 직교 좌표에서 카메라 시스템의 위치와 방향을 결정하는 알고리즘을 개발하였으며 주요 연구 결과는 다음과 같다.

(1) 제안한 알고리즘에 평가하기 위하여 직교 좌표를 기점으로 카메라 좌표에서 본 임의의 점을 증감함에 따라 이전 데이터의 처리 결과와 새로운 데이터 처리 결과를 포함하는 순환 최소자승법의 적용으로 직교 공간에서 점 2개를 연결한 직선 점에 대한 방향 벡터의 증감에 대응이 용이하였다.

(2) 산업용 로봇의 끝단에 카메라를 부착하여 생산 현장에 적용할 때 8개 이상의 점이 배열된 보정 마스크만 있으면, 별도의 측정 장치가 없어도 직교 좌표에 대한 카메라시스템의 위치와 방향을 인식할 수 있는 알고리즘을 개발하였다.

#### 참 고 문 헌

- [1] Sobel, I., "On the calibrating computer controlled cameras for perceiving 3-D scene," Artificial intelligence. pp. 185-198. 1974.
- [2] Liu, Y., Huang, T.S., Faugeras, O.D., "Determination of camera location from 2-D to 3-D line and point correspondences," IEEE. Jan, 1990.
- [3] Taylor, P.M., Selke, K.W., Taylor, G.E., "Closed loop control of an industrial robot using visual feedback from a sensory gripper," ISIR, pp. 79-86. 1981.
- [4] Loughlin, C., Hudson, E., "Eye in hand robot vision," 2nd ROVISEC, Stuttgart. pp. 264-270, 1982.
- [5] Puskorius, G.V., Feldkamp, L.A., "Camera Calibration methodology base on a linear perspective transformation error model," IEEE Conf. on Robotics and Automation .pp. 1,858-1860. 1988.
- [6] Lenz, R.K., Tsai, R.Y., "Calibrating a cartesian robot with eye-on-hand configuration independent of eye-to-hand relationship," IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 11. 1989.
- [7] Chang, Y.L., Liang, P., "On recursive calibration of cameras for robot hand-eye system," IEEE Conf. on Robotics and Automation .pp. 838-843. 1989
- [8] Stewart, G.W., "Introduction to Matrix Computation," Academic Press. 1973.
- [9] Press, W.H., Flannery, B.P., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T., "Numerical Recipes in C," 1988.
- [10] 이 용 중, 김 학 범, 이 양 범 "시각센서에 의한 로봇 매니플레이터의 툴 좌표계 보정에 관한 연구", 한국통신학회, 제19권 8호. pp. 1453 - 1463, 1994.
- [11] 이 용 중, 유 범 상, 이 양 범 "스포츠 및 아크 검출 로봇 시스템 개발", 한국정밀공학회 논문지, 제 12권, 제6호. pp. 13-19, 1995.
- [12] 이 용 중, 이 양 범 "로봇비전을 이용한 압연코일의 라벨링 자동화 구현", 제어·자동화·시스템공학회 논문지, 제 3권, 제4호, pp. 497-502, 1997.