

가변 작업 대상물의 핸들링을 위한 카메라 위치 결정과 로봇의 기하학적 자세보정*

이양범, 이용중**
전기 전자 및 자동화 공학부

<요 약>

본 연구에서는 로봇의 최종 링크에 부착된 이동형 카메라로 작업 대상물의 위치와 방향을 검출하고 이를 이용하여 로봇의 기하학적인 자세를 보정하는 알고리즘을 개발하였다.

로봇비전 시스템의 정밀도를 향상시키기 위하여 먼저 이동형 카메라 시스템의 물리적인 오차를 포함하는 카메라 내부 파라메타 오차 보정 알고리즘을 제안하였다. 또한 이동형 카메라의 위치를 결정하기 위하여 3차원 공간상의 직선 대응관계를 이용하여 로봇의 기저 좌표계를 기준으로 카메라의 위치 결정 알고리즘을 개발하였다.

작업 대상물의 위치와 방향 검출은 모멘트 불변치 알고리즘을 이용하였고, 이 정보를 로봇의 기하학적 자세 보정 기준 데이터로 적용하였다. 이를 위하여 컴퓨터 비전의 화상 좌표계로 검출한 작업 대상물의 위치와 방향 데이터는 이동형 카메라의 위치 결정 알고리즘을 이용하여 3차원 작업 공간상의 위치와 방향으로 변환하였다. 이와 같은 결과를 이용하여 로봇은 최종 링크 좌표계를 중심으로 기하학적인 자세를 보정하였다.

본 연구의 유용성과 실용성을 입증하기 위하여 미가공된 실린더 헤드를 핸들링하는 작업에 적용하였다.

Geometrical Posture Adjustment of a Robot and Determination of Camera Location for Handling Budged Object

Yang-Burm Lee, Yong-Joong Lee
School of Electrical Engineering and Automation

* 이 연구는 1997년도 울산대학교 학술 연구비 조성에 의하여 연구되었음

** 창원기능대학 전기과

<Abstract>

In this study, a robot control algorithm that adjusts the geometric posture using computer vision is proposed. The movable camera attached to the robot end effector is employed to detect the location and direction of the target object.

To improve the accuracy of the control, an error compensation methodology that corrects the inside parameters of movable camera is developed. The position of the movable camera is then calculated by the line correspondence relation in 3-dimensional vector space.

The moment invariance algorithm is applied to obtain the location and direction of the target object. The data that include both target object and movable camera are combined and analyzed to determine the absolute location and direction of the target object on a 3-dimensional working space. Then the control mechanism adjusts the geometrical posture of the robot before it access the target object.

The proposed algorithm is examined on a couple of practical working fields, such as raw-state cylinder head handling process. It has been shown that the proposed algorithm controls the robot efficiently for various application areas with better accuracy.

1. 서 론

지금까지 개발된 산업용 로봇비전 시스템은 일정한 위치에 고정시킨 카메라(이하 고정형 카메라)를 이용하기 때문에 로봇이 카메라의 검출 영역으로 진입할 때 검출 장애를 일으키거나, 혹은 작업 대상물이 멀리 떨어져 있을 경우에는 실효 분해능이 낮아져 측정 오차를 발생하게 된다. 또한 로봇비전 시스템을 주변에 있는 조명 조건이 심하게 변하거나 화상처리가 까다로운 미가공된 작업 대상물에 적용할 경우, 컴퓨터비전이 작업 대상물의 변경된 위치와 방향을 잘못 검출하여 로봇과 작업 대상물이 충돌하거나, 전혀 틀린 작업 대상물에 접근하는 등의 혼란이 발생할 수 있다[1,2].

본 연구의 목적은 과거의 산업용 로봇 비전의 문제점을 극복하고 실제 생산 현장에 적용이 용이한 시스템을 개발하는데 있다. 이를 위하여 고정형 카메라 대신 로봇 6축에 최종 링크와 일체형으로 부착한 카메라(이하 이동형 카메라)로 작업 대상물에 근접시켜 위치와 방향을 검출하고 이 데이터를 기준으로 로봇의 기하학적 자세를 보정하는 알고리즘을 개발한다. 또한, 실용성있는 시스템으로 구현하기 위하여 미가공된 상태에서 불규칙하게 적재되어 있는 승용차용 실린더 헤드를 작업 대상으로 선정하고, 이동형 카메라 시스템의 내부 파라메타 오차 보정과 위치 결정 알고리즘을 개발한다[3,4,5].

화상 입력 장치로 사용되는 카메라 시스템이 오차를 포함하고 있거나 정확한 위치가 알려지지 않다면 컴퓨터비전을 이용한 로봇의 자세 보정은 적절히 이루어질 수 없다. 따라서 카메라 렌즈의 광학적인 특성과 신호 처리상의 오차를 나타내는 내부 파라메타와 공간상의 카메라 위치를 나타내는 외부 파라메타를 정확하게 측정할 필요가 있다. 카메라 오차 보정과 위치 결정에 관련된 과거의 연구 사례로 Sobel은 비선형 방정식으로 표현되는

카메라 시스템을 해석하여 오차를 보정하는 카메라 보정 알고리즘을 제안하였다[6]. Liu는 핀 홀 기하에 의한 투사 변환 모델에서 선과 점의 대응 관계를 이용하여 외부 파라메타를 보정하였다[7]. 그러나 Liu가 제안한 알고리즘은 다음과 같은 문제점이 있으므로 실제 카메라 시스템에 적용하는 것은 한계가 있다.

1) 카메라 시스템이 포함하고 있는 내부 파라메타를 고려하지 않고, 입력 화상의 임계값이 변하는 시점까지 카메라의 방향만 가변하였다.

2) 카메라 렌즈에 투영된 2차원 화상으로 부터 공간상에 있는 작업 대상물에 대한 3차원 정보를 추출할 때, 실제 많은 오차를 갖는 화상 스케일 오차를 무시하였다.

본 연구에서는 Liu가 제안한 알고리즘의 문제점을 개선하여 카메라 내부 파라메타로 렌즈의 유효 초점 거리 및 화상 스케일 계수를 정밀하게 보정하고, 동시에 로봇의 최종 링크에 부착된 이동형 카메라의 위치를 정확하게 계산할 수 있는 알고리즘을 개발하고자 한다.

2. 카메라 시스템의 모델링과 내부 파라메타

내부 파라메타를 정의하기 위해서는 카메라 시스템에 대한 모델링이 선행되어야 한다. 카메라 시스템의 모델링에 대한 과거의 연구 사례로 Puskorius는 투사 변환 오차 모델을 제안하여[8], 카메라 파라메타를 내부 파라메타와 외부 파라메타를 나누어 각각 오차를 보정하였다. Lenz가 제안한 알고리즘에는 내부 파라메타를 렌즈 오차, 유효 초점 거리, 화상 스케일 계수로 나누었다[9]. 그러나 렌즈 오차는 최근에 상용화 되고 있는 CCD 카메라(렌즈 왜곡 오차 ± 0.01 이하)의 경우 시스템에 거의 영향을 주지 않는다는 것이 입증되었다[10]. 따라서 본 연구에서는 보정해야할 내부 파라메타중에 렌즈 오차는 고려하지 않았다. 렌즈 오차가 배제된 선형화된 투사 변환 모델은 다음 그림과 같다.

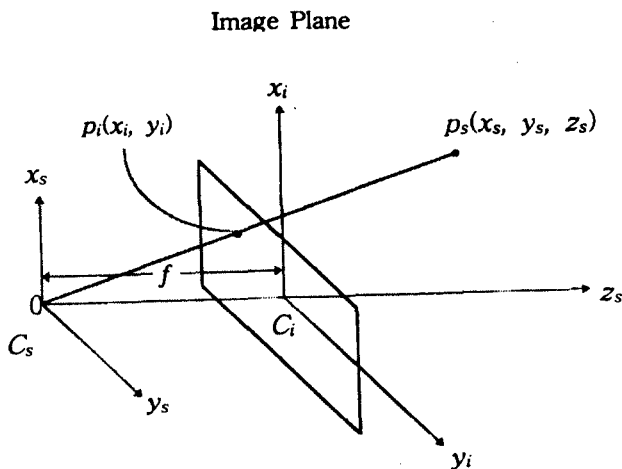


그림 2.1 렌즈의 왜곡을 배제한 선형화된 투사 변환 모델

여기서,

C_s : 카메라 좌표계

C_i : 화상 평면 좌표계

$p_s = (x_s, y_s, z_s)$: 카메라 좌표계상의 한점

$p_i = (x_i, y_i)$: 화상 평면상의 한점

J : 유효 초점 거리

카메라 좌표계상의 한점 p_s 에 대응하는 화상 평면상의 한점 p_i 의 관계는 다음과 같다.

$$x_i = f \frac{x_s}{z_s} \quad (2.1)$$

$$y_i = f \frac{y_s}{z_s}$$

또한, 화상 평면상의 한점 p_i 와 대응하는 컴퓨터 프레임 버퍼상의 위치 p_f 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x_f &= S_x dx^{-1} x_i + c_x \\ y_f &= dy^{-1} y_i + c_y \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$dx = dx' \frac{N_{cx}}{N_{fx}}$$

여기서

S_x : x_i 방향의 화상 스케일 계수

(c_x, c_y) : 컴퓨터 메모리 중심의 행과 열

dx' : 스캔 방향으로 배열된 CCD 센서 소자 간격

dy : 스캔 방향과 직각 방향으로 배열된 CCD 센서 소자 간격

dx : 스캔 방향으로 컴퓨터 버퍼 간격

N_{cx} : 스캔 방향으로 CCD 센서 소자수

N_{fx} : 컴퓨터로 샘플링한 화소수

식 (2.2) 에서 화상 스케일 계수 S 는 CCD 카메라 센서 소자와 컴퓨터 프레임 버퍼와의 비를 나타내는 계수이다. 최근에 상용화되고 있는 CCD 카메라의 센서 소자는 일정한 간격으로 정밀하게 제작되어 있으므로 화소 간격은 컴퓨터 프레임 버퍼의 행과 정확하게 1 : 1 로 일치한다. 따라서 y_i 방향 화상 스케일 계수는 보정할 필요가 없다. 그러나 x_i 방향의 화상 스케일 계수 S_x 는 신호 처리상의 이유로 일치하지 않는다. 즉, 각 행의 미크론 단위 센서 소자 배열에서 발생한 이산 신호가 아날로그 파형으로 바뀌고 컴퓨터에서는 식 (2.2) 의 N_{fx} 만큼 샘플링한다. 이때 화상 압축 하드웨어와 CCD 카메라 스캔 하드웨어 사이에 약간의 시간적 불일치와 스캔 자체의 시간 조절 간격의 부정확으로 인하여 오차가 발생한다. 만약 0.05% 의 오차가 발생하면 512 x 480 화소의 CCD 카메라가 전 해상도로 사용될 경우 약 3 화소 정도의 오차가 발생한다. 따라서 이 오차를 보정하기 위하여 화상 스케일 계수를 고려한 화상 평면 프레임상의 한점 p_i' 는 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} x_i' &= S_x x_i \\ y_i' &= y_i \end{aligned} \quad (2.3)$$

3. 카메라 위치 결정을 위한 대응관계

알려진 3차원 공간상의 직선과 이에 대한 화상 평면상의 직선과의 관계를 유도하고 이를 카메라 위치 결정에 사용한다. 공간상에 임의의 직선 r 이 있다고 가정하고, 이 직선 r 이 화상 평면에 투영되었을 때 화상 평면 프레임상의 직선을 L 이라고 하면, 두 직선의 대응 관계는 다음 그림 3.1과 같다.

직선 r 은 작업 공간 좌표계에서 정의된 r 의 방향 벡터 \vec{n}_u 와 r 상에 있는 한점에 대한 벡터 \vec{p}_{u0} 를 이용하여 직선 r 에 대한 작업 공간 좌표계상의 벡터 방정식 \vec{p}_u 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$r : \vec{p}_w = \vec{n}_w t + \vec{p}_{w0} \quad (3.1)$$

여기서,

t : 직선 r 을 표현하기 위한 매개변수(임의의 실수)

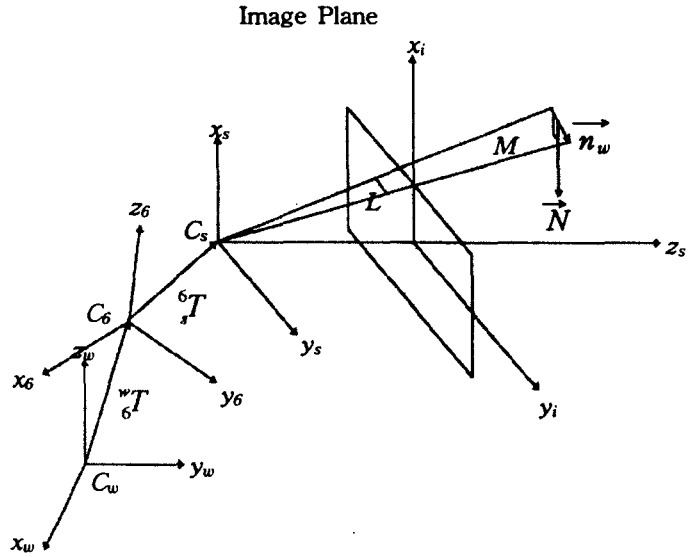


그림 3.1 3차원 공간의 직선 대응 관계

여기서,

r : 3 차원 공간상의 임의의 직선

L : 직선 r 에 대응하는 화상 평면상의 직선

M : 직선 r 의 투사 평면

\vec{N} : 평면 M 에 대한 법선 벡터

\vec{n}_w : 직선 r 의 방향 벡터

C_i : 화상 평면 좌표계

C_s : 이동형 카메라 좌표계

C_u : 작업 공간 좌표계

C_6 : 로봇 6 축 좌표계

wT_6 : 작업 공간 좌표계를 기준으로 한 로봇 6 축 좌표계 변환 행렬

6T_s : 로봇 6축 좌표계를 기준으로 한 카메라 좌표계 변환 행렬

화상 평면상의 직선 L 은 다음과 같은 직선 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$L : D x_i + E y_i + F = 0 \quad (3.2)$$

식 (3.2) 에 식 (2.1) 의 대응 관계를 대입하면 식 (3.3) 과 같이 원점과 직선 L 을 포함하는 카메라 좌표계상의 평면 방정식이 얻어진다.

$$M : D x_s + E y_s + f^{-1} F z_s = 0 \quad (3.3)$$

이때 평면 M 에 수직인 법선 벡터 \vec{N} 은 다음과 같다.

$$\vec{N} = (D, E, f^{-1} F)^T \quad (3.4)$$

평면 M 은 직선 r 의 투사 평면이므로 r 의 방향 벡터와 평면 M 의 법선 벡터는 수직 관계에 있다. 따라서 작업 공간상의 r 과 화상 평면상의 직선 L 의 관계는 다음의 식으로 표현할 수 있다.

$$(\vec{n}_w^T R) \vec{N} = 0 \quad (3.5)$$

여기서

R : 작업 공간 좌표계를 기준으로 한 카메라 좌표계의 회전 변환 행렬

4. 카메라 파라메타 결정 알고리즘

카메라 시스템의 내부 파라메타 (f, S_x) 와 카메라의 회전 변환 행렬 (R) 을 결정하기 위하여 식 (3.5) 의 직선 대응 관계를 이용한다. 작업 공간 좌표계의 2점 p_{w1} 및 p_{w2} 와 이에 대응하는 화상 스케일 계수를 고려한 화상 평면 좌표계상의 2점 p_{u1}' 및 p_{u2}' 가 주어졌다고 가정한다. 이때 p_{w1} 및 p_{w2} 를 포함하는 직선 r 의 방향 벡터 \vec{n}_w 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\vec{n}_w = (l, m, n)^T \quad (4.1)$$

여기서,

$$l = x_{u2} - x_{w1}$$

$$m = y_{u2} - y_{w1}$$

$$n = z_{u2} - z_{w1}$$

또한 투사 평면 M 에 수직인 법선 벡터 \vec{N} 은 다음과 같다.

$$\vec{N} = (D', S_x^{-1}E', S_x^{-1}f^{-1}F')^T \quad (4.2)$$

여기서,

$$D' = y_{i1}' - y_{i2}'$$

$$E' = x_{i1}' - x_{i2}'$$

$$F' = x_{i1}'y_{i2}' - x_{i2}'y_{i1}'$$

카메라 좌표계의 회전 변환 행렬 R 을 다음과 같이 표현하면,

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

직선 대응 관계식 (3.5) 에 의하여 다음과 같이 된다.

$$[l \ m \ n] \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D' \\ S_x^{-1}E' \\ S_x^{-1}f^{-1}F' \end{bmatrix} = 0 \quad (4.4)$$

여기에서 식 (4.4) 를 정렬하여 mE' 를 우변으로 옮겨 행렬식으로 만들면 다음과 같이 된다.

$$[lD' \ mD' \ nD' \ lE' \ nE' \ lF' \ mF' \ nF'] \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \\ q_5 \\ q_6 \\ q_7 \\ q_8 \end{bmatrix} = [-mE'] \quad (4.5)$$

여기서,

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

식 (4.5)를 보면 미지수가 $q_1, q_2, \dots, q_7, q_8$ 로 8 개인 반면, 1 개의 직선 정보밖에 없으므로 해를 구할 수 없다. 해를 구하기 위해서는 최소 8개 이상의 직선 대응 방정식은 구성되어야 하므로 5개 이상의 점이 정의되어야 한다. 이때 점들의 조합에 의하여 10개 이상의 직선을 생성할 수 있고 이로부터 10개 이상의 직선 대응 방정식을 구성하여 해를 최소 자승법에 의해 구할 수 있다. 구해진 해를 이용하여 카메라 내부 파라메타 f, S_x 와 회전 변환 행렬 R 을 결정하는 알고리즘은 다음의 가정하에서 4개의 스텝으로 이루어진다.

가정 : 식 (4.5) 에 공통적으로 포함되어 있는 r_{22} 는 0 이 아니다.

스텝 1 : r_{22} 는 다음과 같이 구한다.

$$|r_{22}| = (1 + q_4^2 + q_5^2)^{\frac{-1}{2}} \quad (4.6)$$

스텝 2 : 화상 스케일 계수 S_x 는 다음과 같이 구한다.

$$S_x = (q_1^2 + q_2^2 + q_3^2)^{\frac{1}{2}} |r_{22}| \quad (4.7)$$

스텝 3 : 유효 초점 거리 f 는 다음과 같이 구한다.

$$f = (q_6^2 + q_7^2 + q_8^2)^{\frac{-1}{2}} |r_{22}|^{-1} \quad (4.8)$$

스텝 4 : 회전 변환 행렬 R 은 스텝 1 에서 구한 r_{22} 와 다음의 식에 의해 구한다.

$$\begin{aligned} r_{11} &= q_1 \frac{r_{22}}{S_x} \quad , \quad r_{21} = q_2 \frac{r_{22}}{S_x} \\ r_{31} &= q_3 \frac{r_{22}}{S_x} \quad , \quad r_{12} = q_4 r_{22} \\ r_{32} &= q_5 r_{22} \quad , \quad r_{13} = q_6 f r_{22} \\ r_{23} &= q_7 f r_{22} \quad , \quad r_{33} = q_8 f r_{22} \end{aligned} \quad (4.9)$$

한편, 작업 공간 좌표계를 기준으로 한 이동형 카메라의 위치 변환 벡터 \vec{p} 는 $(p_x, p_y, p_z)^T$ 로 표현되는 것을 구하기 위하여 점 대응 관계를 이용한다. 3 차원 공간상의 한점에 대한 작업 공간 좌표계에서 정의된 위치 p_u 는 (x_u, y_u, z_u) 로 표현되는 것과 이에 대응하는 화상 스케일 계수를 고려한 화상 평면상의 위치 p_i' 는 (x_i', y_i') 로 표현된 것이 주어졌다고 가정한다. 한점에 대한 작업 공간 좌표계에서의 벡터 \vec{p}_u 와 카메라 좌표계에서의 벡터 \vec{p}_s 와의 관계식은 다음과 같다.

$$\vec{p}_w = R \vec{p}_s + \vec{f} \quad (4.10)$$

여기서,

R : 작업 공간 좌표계를 기준으로 한 카메라 좌표계의 회전 변환 행렬

\vec{f} : 작업 공간 좌표계를 기준으로 한 카메라 좌표계의 위치 변환 벡터

식 (4.10) 의 양변에 R^{-1} 을 곱하고 정렬하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x_w &= x_s + p_x' \\ y_w &= y_s + p_y' \\ z_w &= z_s + p_z' \end{aligned} \quad (4.11)$$

또한, 식 (4.11) 에 식 (2.1) 및 식 (2.3) 의 대응 관계를 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} f x_w' &= (z_w' - p_z') S_x^{-1} x_i' + f p_x' \\ f y_w' &= (z_w' - p_z') S_x^{-1} y_i' + f p_y' \end{aligned} \quad (4.12)$$

여기서, 식 (4.12) 를 미지수 p_x' , p_y' , p_z' 에 대한 행렬식으로 변환하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} -f & 0 & S_x^{-1} x_i' \\ 0 & -f & y_i' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_x' \\ p_y' \\ p_z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_x^{-1} x_i' z_w' - f x_w' \\ y_i' z_w' - f y_w' \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

식 (4.13) 에서 미지수가 3개 이므로 최소한 2개 이상의 점대응 관계가 주어지야 해를 구할 수 있다. p_{i1}' 는 (x_{i1}', y_{i1}') 로 표현되고, p_{i2}' 는 (x_{i2}', y_{i2}') 표현되는 서로 다른 2개의 점이 주어졌을 때 다음 식에 의하여 작업공간 좌표계를 기준한 위치 벡

터 \vec{p} 를 구할 수 있다.

$$\vec{p} = R\vec{p}' \quad (4.14)$$

이상의 결과에 의하여 작업 공간 좌표계를 기준으로 카메라 좌표계의 변환 행렬 ${}^w_s T$ 는 식 (4.9) 및 식 (4.14) 에 의하여 다음과 같이 구성할 수 있다.

$${}^w_s T = \begin{bmatrix} R & \vec{p} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

또한 로봇 6 축 좌표계에 대한 카메라 좌표계의 위치 변환 행렬 ${}^6_s T$ 는 다음과 같다.

$${}^6_s T = ({}^w_6 T)^{-1} \cdot {}^w_s T \quad (4.16)$$

5. 로봇 자세 보정 알고리즘

로봇은 컴퓨터비전이 검출한 위치와 방향 데이터를 기준으로 작업 대상물과 충돌하거나 간섭을 받지 않고 사용자가 원하는 작업을 원활하게 수행하여야 한다. 이를 위하여 컴퓨터 비전이 검출한 위치와 방향 데이터는 로봇에게 연속적으로 전달되어야 하고, 로봇은 교시된 기존 데이터와 새로운 검출 데이터를 비교하여 그 차이값 만큼 원활하게 자세가 보정되어야 한다.

그러므로 식 (4.10)에서 점 대응 관계를 이용하여 로봇의 기저에 해당하는 작업 공간 좌표계를 기준으로 이동형 카메라의 위치 변환 벡터 \vec{p} 를 구하였다. 또한 작업 공간 좌표계에서 실제 실린더 헤드의 위치와 방향 변화를 검출하기 위하여 다음을 고려하였다.

i) 실린더 헤드의 중심위치를 기준으로 x축과 y축의 위치 변화를 고려하였다.

ii) 컴퓨터 비전에 기억된 표준 실린더헤드의 방향을 기준으로 하였을 때 이동형 카메라로 검출한 새로운 실린더 헤드의 방향에는 약간의 변화가 있었다.

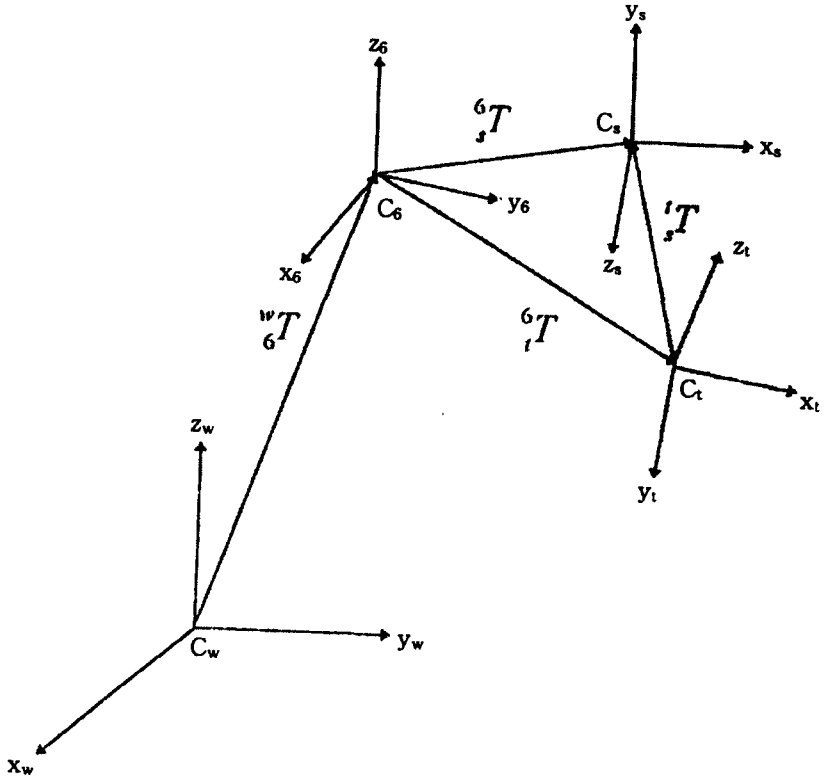


그림 5.1 이동형 카메라를 위한 로봇 비전 시스템 좌표계

여기서,

C_1 : 로봇 기저 좌표계

C_6 : 로봇 6축 좌표계

C_t : 로봇의 최종 링크 좌표계

C_s : 이동형 카메라 좌표계

w_6T : 로봇 기저와 6축간의 변환 행렬

6_tT : 로봇 6축과 최종 링크간의 변환 행렬

6_sT : 로봇 6축과 이동형 카메라간의 변환 행렬

t_sT : 로봇의 최종 링크와 이동형 카메라간의 변환 행렬

또한, 작업 공간 좌표계에서 정의된 실린더 헤드의 위치 p_u 와 이에 대응하는 가상 평면상의 위치 p'_i 에 대한 관계를 해석하였다. 따라서 이동형 카메라로 검출하는 실린더 헤드의 위치와 방향에 따라 로봇의 위치와 자세가 보정되는 알고리즘을 그림 5.1과 같은 좌표계를 이용하여 구한다.

로봇의 최종 링크 좌표계와 이동형 카메라 좌표계간의 변환 행렬 ${}^t_s T$ 는 식 (4.16)의

${}^6_s T$ 를 구하는 식을 대입하면 다음과 같이 구할 수 있다.

$${}^t_s T = ({}^6_t T)^{-1} \cdot {}^6_s T \quad (5.1)$$

따라서 초기에 샘플 실린더를 기준으로 이동형 카메라 좌표계 C_s 에 대한 교시 위치 벡터를 $\vec{\gamma}_s$ 로 하면, 로봇의 최종 링크 좌표계 C_l 에 대한 교시 위치 벡터 $\vec{\gamma}_l$ 는 다음과 같다.

$$\vec{\gamma}_l = {}^t_s T \cdot \vec{\gamma}_s \quad (5.2)$$

그러나 실린더 헤드의 위치와 방향이 변하게 되면 로봇의 자세와 위치 보정의 기준이 되는 로봇의 최종 링크 좌표계 C_l 는 C_s 의 변경된 위치 벡터 $\vec{\gamma}'_s$ 로 되어야 하고 실린더 헤드의 X축 방향에 해당되는 장축 기울기 θ'_s 는 방향 변화에 불변 모멘트를 이용한 식 (5.2)를 이용하여 다음과 같이 로봇의 최종 링크 좌표계 C_l 를 기준으로 보정되어야 하는 방향 θ'_l 로 되어야 한다.

$$\begin{aligned} \vec{\gamma}_l &= {}^t_s T \cdot \vec{\gamma}_s \\ \theta'_l &= \theta'_s \end{aligned} \quad (5.3)$$

여기서

$\vec{\gamma}'_s$: 이동형 카메라 좌표계 C_s 에 대한 변경된 위치 벡터
 θ'_s : 새로운 실린더 헤드의 방향

즉, 로봇은 최종 링크 좌표계 C_l 를 기준으로 보정되어야 하는 위치 벡터 $\vec{\gamma}'_l$ 와 θ'_l

의 자세에 있게 되므로, 실제 자세를 보정하는 로봇은 다음과 같이 $\Delta \vec{\gamma}_i$ 와 $\Delta \theta_i$ 만큼의 위치와 자세를 보정하여야 한다.

$$\begin{aligned} \vec{\gamma}_i' &= \vec{\gamma}_i \pm \Delta \vec{\gamma}_i \\ \theta_i' &= \theta_i \pm \Delta \theta_i \end{aligned} \tag{5.4}$$

여기서

$\Delta \vec{\gamma}_i$: 실린더 헤드의 위치 변화로 인한 로봇 최종 링크 좌표계의 위치 가변

$\Delta \theta_i$: 실린더 헤드의 방향 변화로 인한 로봇 최종 링크 좌표계의 방향 가변

이를 위하여 로봇의 6축 좌표계는 HR 8000에 대한 정기구학 해석을 이용하여 다음과 같이 구해야 한다.

$${}^w_6 T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{5.5}$$

만일, 실린더 헤드의 중심 위치가 변하지 않는다면 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = {}^6_t T^{-1} = {}^w_6 T \tag{5.6}$$

따라서 HR 8000의 역기구학 해석을 이용하여 각 조인트 값을 구할 수 있다. 여기에서 실린더 헤드에 관한 변환 행렬식은 로봇의 기저 좌표계에서 측정하여 구할 수 있다. 변경된 로봇의 최종 링크 좌표계 C_i 를 기준으로 보정되어야 하는 위치 벡터 $\vec{\gamma}_i'$ 와 θ_i' 에 따라 자세를 보정하는 것은 식 (5.4)를 이용하여 다음과 같은 관계식이 성립되어야 한다.

$$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = {}^w_6 T^{-1} {}^6_t T \begin{bmatrix} C \Delta \theta_i & -S \Delta \theta_i & 0 & \Delta \gamma_{tx} \\ S \Delta \theta_i & C \Delta \theta_i & 0 & \Delta \gamma_{ty} \\ 0 & 0 & 1 & \Delta \gamma_{tz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{5.7}$$

여기에서 식 (5.7)의 좌변의 식은 실린더 헤드의 위치와 방향 변화를 로봇 기저 좌표계로 표현한 것이다. 따라서 식 (5.7)을 로봇의 역기구학으로 해석하기 위하여 다음과 같이 정리한다.

$$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C\Delta\theta_t & -S\Delta\theta_t & 0 & \Delta\gamma_{tx} \\ S\Delta\theta_t & C\Delta\theta_t & 0 & \Delta\gamma_{ty} \\ 0 & 0 & 1 & \Delta\gamma_{tz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} {}_6^t T^{-1} = \frac{w}{6} T \quad (5.8)$$

그러므로 식 (5.8)을 이용하여 HR 8000의 역기구학에 각각 적용하면 실제 로봇의 자세를 보정할 수 있다. 이와 같은 로봇 자세 보정 알고리즘을 이용하여 실린더 헤드의 중심 위치가 이동하거나 방향이 변화하여도 로봇비전 시스템은 변경된 실린더 헤드를 핸들링할 수 있는 자세로 보정되어 원활하게 작업을 수행할 수 있다.

6. 카메라 위치 결정에 따른 시뮬레이션

식 (3.1)의 3 차원 공간상의 직선 γ 에 대한 대응점을 5, 6, 7, 8, 9 개로 증가시키므로서 생성되는 직선의 숫자를 증가시킨다. 이로 인하여 최소 자승법에 관한 정리에서 A 와 b 에 대한 정보를 증가시키므로서 $Ax = b$ 의 해인 x 에 대한 오차를 감소시킨다. 또한 외부 노이즈에 대한 시스템의 안정성을 평가하기 위하여 직선 γ 의 대응점에 화이트 노이즈를 점차 증가하였다. Liu는 256×256 픽셀에 대하여 -0.5 에서 $+0.5$ 의 범위로 노이즈를 첨가하여 시뮬레이션을 하였다. 따라서 본 연구에서는 대응점을 5, 6, 7, 8, 9 개로 증가시키고, 화이트 노이즈를 1% 증가시킨 다음 1,000 회 반복 계산하여 그 평균 데이터를 구하여 오차를 최소화 하였다.

유효 초점 거리 f , 화상 스케일 계수 S_x , 카메라의 위치 변환 \vec{f} , 카메라의 회전 변환 행렬 R 는 임의의 값으로 설정한다. 그 결과는 그림 6.1에서 그림 6.4와 같다. 시뮬레이션한 결과를 보면 1% 노이즈 환경에서 f 의 초기 입력값이 2.32 cm 일 때 대응점 5개 이면 2.3199 cm가 출력되어 0.0001 cm의 오차가 있고, 점이 6개 이상이면 2.32 cm가 출력되어 오차가 0이 되어 완전하게 보정된다. S_x 의 초기 입력값이 1.05 일 때, 대응점 5개 이면 1.05007이 출력되어 0.0007의 오차가 있고, 점이 6개 이상이면 1.0500001이 출력되어 0.0000001의 오차가 있으며 대응점 7개 이상이 되면 오차가 0이 되어 완전하게 보정된다. 회전 변환 행렬 R 과 위치 변환 벡터 \vec{f} 의 오차 보정 결과도 이와 거의 비슷하다. 결과적으로 대응점의 갯수가 5개에서 6개 되는 사이에 상대 오차 감소율이 커지게 되고, 6개에서 7개 사이는 감소율이 거의 없으며 7개 이상이 되면 정확한 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 이 결과는 Liu의 시뮬레이션 결과와 비슷하다. 또한 f, S_x, \vec{f}, R 을 초기에 설정한 값 대신 다른 값으로 설정하여도 오차 보정 결과는 동일하였다.

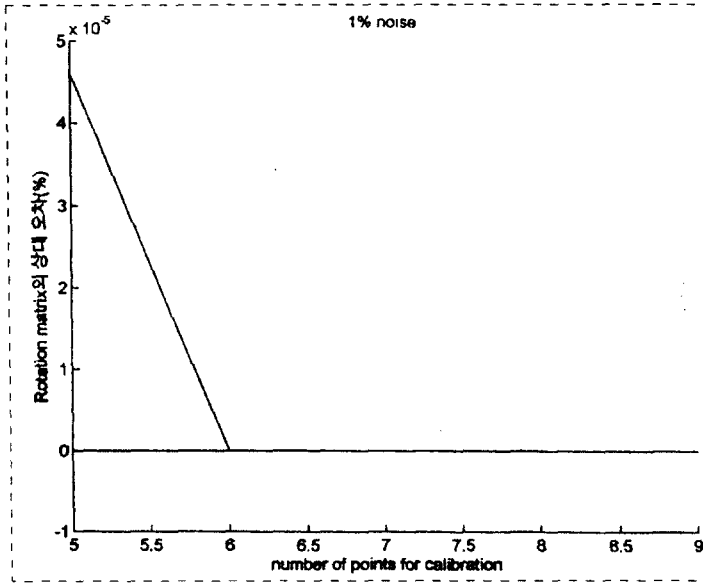


그림 6.3 1% 노이즈에서 회전 변환 행렬 R 의 보정

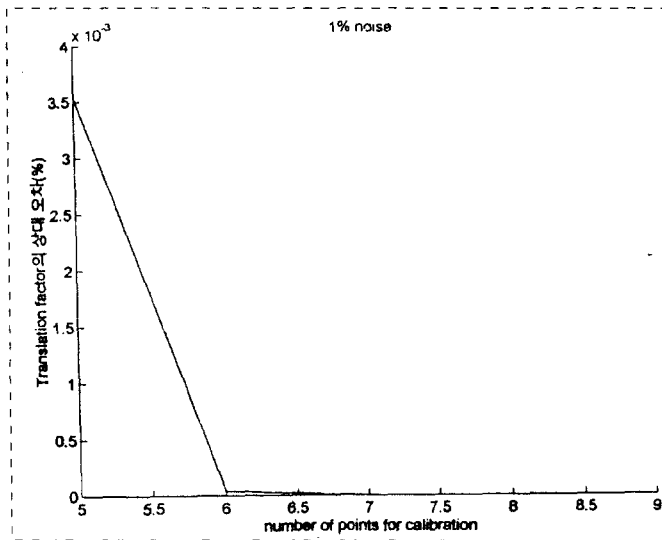


그림 6.4 1% 노이즈에서 위치 변환 벡터 \vec{b} 의 보정

7. 로봇 위치 결정에 따른 시뮬레이션

본 연구 결과를 실제의 생산 현장에 적용한 목적은 산업재해가 발생하는 생산설비를 24시간 안정되게 운용하기 위한 것이다. 기존의 실린더 가공을 위한 수작업 과정은 금형 공장에서 생산된 미가공 상태의 실린더 헤드를 지게차로 운반하여 지정된 위치에 하차 후 공작 기계류가 배열된 가공 공장에서 가공을 위하여 작업자가 지속적으로 10kg 가까운 실린더 헤드를 손으로 1개씩 들어올려 회전하고 있는 약 1.7m 높이의 콘베어 위에 올려 놓는다. 이에 따라 작업자의 허리부상 또는 실린더 헤드의 낙하로 인한 안전 사고가 발생할 수 있다. 이러한 수동작업을 자동화하기 위하여 먼저 실린더 헤드를 들어 올리는 작업은 작업영역과 가반중량(Handling Capacity)등을 고려하여 HR8000 로봇로 하여금 수행토록 하고, 금형틀에서 바로 취출된 실린더 헤드에는 BUR가 불규칙하게 붙어 있고 금형공장과 가공공장간의 이동은 지게차로 운반되어 방향이 불규칙하게 적재되어 있다. 이러한 실린더 헤드의 품질검사와 위치 및 방향의 변화량을 시각센서로 검출한다.

실린더 헤드는 주물로 제작되어진 미가공 상태이므로 표면은 상당히 거칠게 되어 있고, 요철도 심하며, 외부 형상도 조금씩 다르며, 이물질이 실린더 헤드 전체에 비정규적으로 붙어 있는 등의 자체적인 문제점을 안고 있다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여, 입력 화상에 대한 이치화는 Eshbach의 알고리즘에 공간 필터링 기법을 보완하여 검출하였다. 승용차용 실린더 헤드의 특징점으로 선정된 4개의 대표적인 구멍에 대한 윤곽선 검출 결과는 그림 7.1과 같다.

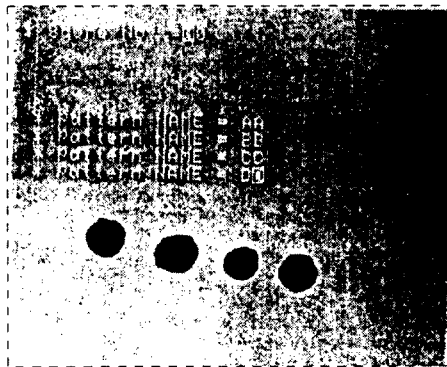


그림 7.1 실린더 헤드의 윤곽선 검출 결과

대표적인 4개 구멍의 각각에 대한 중심 위치는 그림 7.2과 같다.

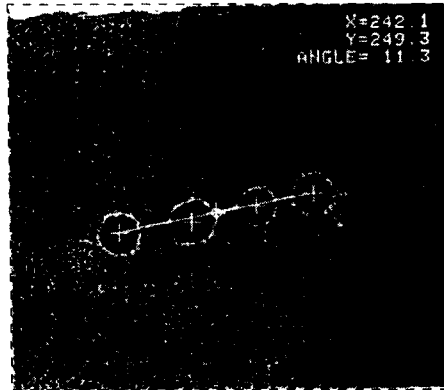


그림 7.2 실린더 헤드의 중심 위치와 방향 검출 결과

각 구멍에 대한 중심 위치는 + 로 표시하였다. + 표시를 연결한 선의 중앙에 있는 ϕ 표시는 4개 구멍에 대한 화소간의 거리를 연산하여 구한 실린더 헤드 전체의 중심 위치이다. 이때 실린더 헤드와 이동형 카메라의 거리를 일정하게 유지하면 + 표시를 연결한 선의 길이는 거의 동일한 값으로 구해진다. x 축에 대한 장축 기울기 θ_s 는 이 선을 기준으로 구하였다. 실린더 헤드의 전체의 중심 위치와 방향 데이터는 표 7.1과 같다.

표 7.1 실린더 헤드 검출 결과

(x_c') : 화상 좌표계 000-512 에서 x축 방향의 위치	(y_c') : 화상 좌표계 000-480 에서 y축 방향의 위치	(θ_s') : 512x480 화상 좌표 계에서 x축에 대한 장축 기울기
242.1	249.3	11.3

한편 실험실에서 로봇 비전 시스템을 이용하여 전체 시스템에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행한 후, 이 결과 데이터를 현장의 시스템에 적용하여 핸들링 작업 수행중 문제점이 발생하였다. 즉, 작업장 상부에 있는 창틀 사이에서 강렬한 직사 광선이 로봇비전의 검출 영역에 조사되었다. 이로 인하여 로봇으로 실린더 헤드 작업을 60회 수행하였을 때 로봇의 최종 링크 좌표계를 기준으로 실린더 헤드의 단축에 해당하는 x축 방향과 장축에 해당하는 y축 방향, 실린더 헤드의 적재 높이에 해당하는 z축 방향의 오차에 대한 기록은 그림 7.3부터 그림 7.5까지 나타내었다. x 축 방향으로 발생한 오차량은 최대 0.4mm이지만, 실제 로봇의 최종 링크가 잡는 방향은 y축 방향이므로 직사 광선에 영향은 거의 없었다. 그러나 초기에 y축 방향으로 설계 제작된 로봇의 최종 링크의 보상 여유값은 $\pm 5\text{mm}$ 임에 비하여

실제 발생한 최대 오차량은 +6.1mm의 유격 오차가 발생하였다. 이와 같은 문제점을 배제하기 위하여 로봇의 최종 링크의 솔레노이드 밸브를 취부하는 브라켓(Bracket)을 뒤로 이동시켜 클램핑 오차를 $\pm 8\text{mm}$ 보상 여유값으로 재 제작하였다. 또한 그림 7.5과 같이 z축 방향으로 발생한 오차는 실린더 헤드의 표면에 불규칙하게 흡착되어 있는 이물질로 인한 누적 오차이므로 다음과 같은 방법으로 해결하였다. 즉, 로봇의 최종 링크에 리미트 스위치(limit switch)를 부착하여 로봇을 지속적으로 수직 하강시키면서 리미트 스위치가 동작하는 시점에 로봇을 정지시킨 다음 솔레노이드 밸브를 구동시켜 실린더 헤드를 집을 수 있도록 하였다. 이와 더불어 창틀과 외부 출입구 등에 차광막을 설치한 후 동일한 방법으로 반복적인 핸들링 작업을 수행한 결과 양호한 시스템으로 구현 할 수 있었다.

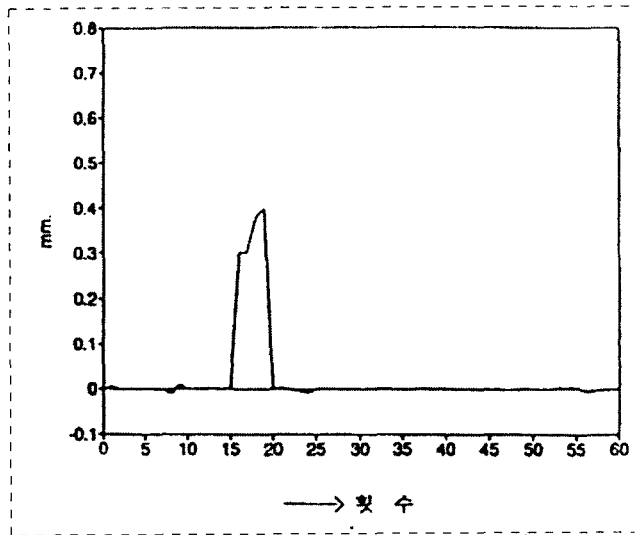


그림 7.3 로봇의 최종 링크 x축 방향 오차

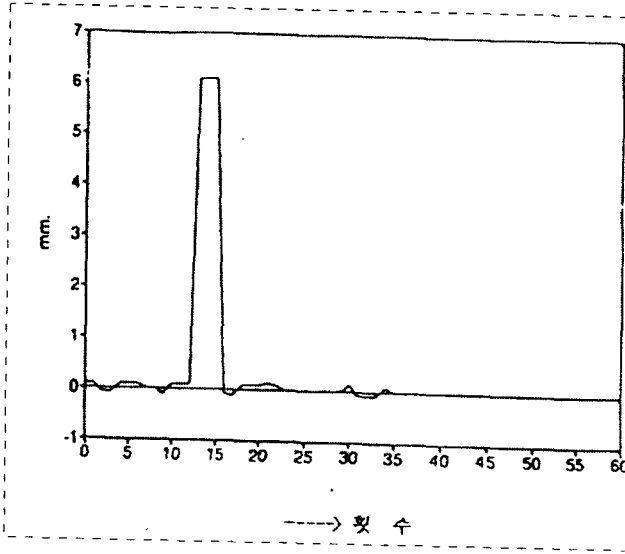


그림 7.4 로봇의 최종 링크 y축 방향 오차

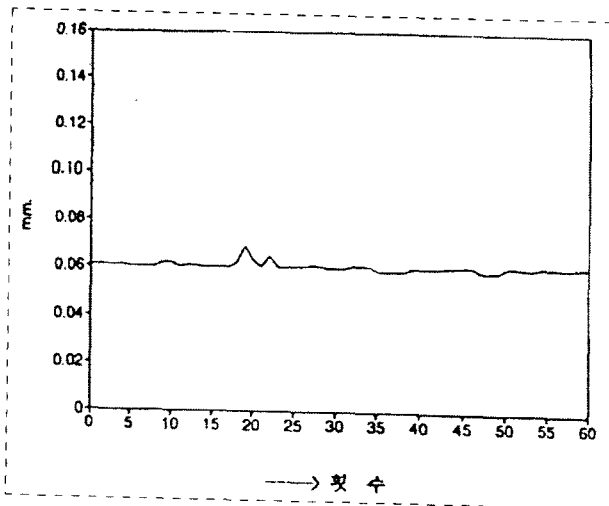


그림 7.5 로봇의 최종 링크 z축 방향 오차

8. 결 론

이동형 카메라로 검출한 작업 대상물의 위치와 방향 데이터를 기준으로 로봇의 기하학적인 자세를 보정하는 알고리즘을 개발하였다. 본 연구의 주요 결과는 다음과 같다.

(1) Liu 가 제안한 알고리즘에서 배제된 화상 스케일 계수를 내부 파라메타로 추가시켜 Liu 가 제안한 방법에 비하여 보다 실질적인 카메라 오차 보정을 할 수 있었다.

(2) HR 8000 로봇 매니플레이터의 6번째 측면에 핸드 홀드 방식으로 취부한 그리퍼와 카메라의 위치 데이터에 비례하게 틀 좌표계가 자동 위치 보정될 수 있는 알고리즘을 개발하였다.

(3) 본 알고리즘은 컴퓨터 시뮬레이션으로만 구현되어 실제 산업체에서 운용되는 로봇비전 시스템을 대상으로 적용하는 것은 다소 어려움이 있다. 이를 위해서는 카메라 시스템에 대한 정밀한 위치와 방향 제어를 위한 하드웨어적인 보강과 본 연구에서 개발한 운용 소프트웨어를 탑재할 수 있는 전용 프로세서가 구비되어야 한다.

참 고 문 헌

- [1] 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.
- [2] Loughlin,C., Hudson,E.," Eye in Hand Robot Vision," 2nd ROVISEC, Stuttgart. pp. 264-270, 1982.
- [3] Stewart,G.W.,"Introduction to Matrix Computation," Academic Press. 1973.
- [4] Press,W.H., Flannery,B.P., Teukolsky,S.A.,Vetterling ,W.T.,
"Numerical Recipes in C," 1988.
- [5] Y. J, Lee, H. P, Kim, Y. B, Lee. "The Tool Coordinate Adjustment Algorithm for Robot Manipulators with Visual Sensor," KICS, pp. 1453-1463, 1994.
- [6] Sobel,I.,"On the Calibrating Computer Controlled Cameras for Perceiving 3-D Scene," Artificial Intelligence. pp. 185-198. 1974.

- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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