

평면상에 있는 물체 위치 결정을 위한 컴퓨터 비전 시스템의 응용

장 완 식*, 장 종 근**, 신 광 수**

An Application of Computer Vision System for the Determination of Object Position in the Plane

Wan-Shik Jang*, Jong-Keun Jang**, Kwang-Soo Shin**

Abstract

This paper presents the application of computer vision for the purpose of determining the position of the unknown object in the plane. The presented control method is to estimate the six view parameters representing the relationship between the image plane coordinates and the real physical coordinates. The estimation of six parameters is indispensable for transforming the 2-dimensional camera coordinates to the 3-dimensional spatial coordinates. Then, the position of unknown point is estimated based on the estimated parameters depending on the cameras. The suitability of this control scheme is demonstrated experimentally by determining position of the unknown object in the plane.

Keywords : Computer vision(컴퓨터 비전), Image plane(이미지 평면), View parameter(시각 매개변수), Vision model(비전 모델), Calibration(보정), Weighting matrix(가중행렬), Object(물체)

1. 서 론

비전 시스템이 개발되기 시작한 것은 1973년에 PDP-10 컴퓨터를 이용한 물 펌프 조립이 시각정보를 이용하여 Stanford 연구진에 의해 수행되었다. 그 이후, 비

전 시스템이나 비전 센서가 활용되는 예로는 용접, 운반, 조립, 측정, 검사 등이 있으나, 지능로봇중의 한 분야로 로봇 비전 시스템을 생산 현장에 적용하는 경우가 늘고 있다. 비전을 사용하면 매니플레이터가 우주 공간이나 수중 등 실제 공간에서 그 위치와 방향이 불확실하게 알려

* 조선대학교 공과대학 기계공학부(수송기계 부품 공장자동화 연구센터)

** 조선대학교 대학원 기계공학과

저 있을지라도 작업을 수행할 수 있다. 따라서, 로봇 비전 시스템은 주로 대상물의 위치가 불규칙하거나 기구학적으로 위치결정을 하기 어려운 작업의 자동화에 적용이 널리 확대될 것으로 예상된다.⁽¹⁾⁽²⁾

물체 위치 결정을 위하여 비전을 적용할 때 실제 공간은 3차원인 반면에 비전 정보는 2차원이기 때문에 카메라 좌표계와 실제 공간 좌표계를 일치시켜 주는 보정은 가장 중요한 요소 중의 하나이다. 카메라 교체시나 카메라 위치 수정시에도 필히 보정을 다시 시켜줄 필요가 있다. 만약 보정이 정확하게 되어 있지 않으면 부적절한 보정 계수 산출로 인한 목표점의 추정이 어긋나게 된다.⁽³⁾

따라서 본 연구는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 6개의 시각 매개변수를 이용한 새로운 비전 시스템 모델을 제시하고, 2차원 평면상의 물체 위치 결정 실험을 통하여 제시한 비전 모델의 적합성을 검증한다. 본 실험에서 사용되는 비전 시스템은 두 대의 고정된 카메라를 작업공간에 설치하여 이용한다.

본 연구의 제한 조건은 평면상에 존재하는 알려지지 않은 물체(목표점)의 위치 결정을 위해서는 그 물체 주위에 알려진 몇 개의 좌표값이 존재해야하며, 또한 사용되는 시험 모형이 카메라 평면상에 존재해야 한다. 따라서 본 연구에서는 제시된 비전 시스템 모델을 사용하여 목표점으로부터 위치가 알려진 물체와의 거리에 대한 상관관계, 위치가 알려진 물체의 개수에 대한 상관관계 및 결정된 물체 위치의 정확성을 실험을 통하여 보이고자 한다.

2. 비전 시스템의 추정 모델 개발

2.1 카메라 모델

비전 시스템 모델은 6개의 불확실한 시각 매개변수들은 평면에 대한 카메라 위치, 자세 및 초점거리들의 불확실성을 설명할 뿐만 아니라, 실제 공간의 위치를 2차원 카메라 좌표계로 변환하는 관계를 나타낸다. 오일러 매개변수(Euler parameter) 향으로 나타내어진 방향 코사인 행렬(direction cosine matrix)을 사용한 카메라 회전모델은 다음과 같이 나타낸다.⁽⁴⁾

$$\begin{bmatrix} R_x \\ R_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11}(C_i) & K_{12}(C_i) & K_{13}(C_i) \\ K_{21}(C_i) & K_{22}(C_i) & K_{23}(C_i) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서, f_x, f_y, f_z 는 알려진 물체의 공간상에서 x, y, z 방향의 좌표값을 나타내고, R_x 와 R_y 는 알려진 물체의 2차원 카메라 공간에서의 위치를 나타내며, 또한 K_{ij} 요소들은 4개의 오일러 매개변수 (C_1, C_2, C_3, C_4)의 적절한 조합에 의해서 다음과 같이 결정된다.

$$\begin{aligned} K_{11} &= C_1^2 + C_2^2 - C_3^2 - C_4^2 \\ K_{12} &= 2(C_2C_3 + C_1C_4) \\ K_{13} &= 2(C_2C_4 - C_1C_3) \\ K_{21} &= 2(C_2C_3 - C_1C_4) \\ K_{22} &= C_1^2 - C_2^2 + C_3^2 - C_4^2 \\ K_{23} &= 2(C_3C_1 + C_1C_2) \end{aligned} \quad (2)$$

2.2 비전 시스템 모델

카메라 회전모델에 카메라 평면에 대한 시험 모형 위치의 불확실성을 보완하기 위해 X_{c_o} ($= C_5$)와 Y_{c_o} ($= C_6$)를 첨가시키면 비전시스템 모델은 다음과 같다.

$$X_c = (C_1^2 + C_2^2 - C_3^2 - C_4^2)f_x + 2(C_2C_3 + C_1C_4)f_y + 2(C_2C_4 - C_1C_3)f_z + C_5 \quad (3)$$

$$Y_c = 2(C_2C_3 - C_1C_4)f_x + (C_1^2 - C_2^2 + C_3^2 - C_4^2)f_y + 2(C_3C_1 + C_1C_2)f_z + C_6 \quad (4)$$

여기서, X_c 와 Y_c 는 물체의 공간상 위치 및 6개의 매개변수에 기초한 카메라 모델 X, Y 값을 나타낸다. 또한, 매개변수 ($C_1 \sim C_4$)는 카메라 자세 및 초점거리의 변화성을 나타내며, 마지막 2개의 매개변수 ($C_5 \sim C_6$)는 카메라에 대한 시험 모형 위치의 불확실성을 나타낸다.

2.3 매개변수 추정 모델

시험 모형 상의 위치벡터를 2차원 카메라 좌표계로 변환하는데 사용되는 6개 매개변수는 각 카메라에 대하여 아래 주어진 성능지수 $J(C)$ 를 최소화시킴으로써 구해진다.

$$J(C) = \sum_{i=1}^k \{ [X_c(t_i) - X_e(t_i)]^2 + [Y_c(t_i) - Y_e(t_i)]^2 \} \quad (5)$$

여기서, k 는 측정된 데이터 개수, $X_c(t_i)$ 와 $Y_c(t_i)$ 는 측정된 카메라 좌표계 X, Y 값, $X_e(t_i)$ 와 $Y_e(t_i)$ 는 물체의 공간상 위치 및 매개변수 C_i 에 기초한 카메라 모델 X, Y 값을 나타낸다.

식 (5)로부터 매개변수 수정 벡터 ΔC 는 다음과 같이 주어진다.⁽⁵⁾

$$\Delta C = (A^T W A)^{-1} A^T W R \quad (6)$$

여기서, W 는 가중 행렬(Weighting matrix)이고, $2k \times 1$ 요소를 갖는 유수 벡터(Residual vector) R 은 다음과 같이 주어진다.

$$R_{2i-1} = X_c(t_i) - X_e(t_i) \quad (7)$$

$$R_{2i} = Y_c(t_i) - Y_e(t_i) \quad (8)$$

또한 $2k \times 6$ 요소를 갖는 행렬 A 는 식(9)와 (10)에 의해서 주어진다.

$$A_{2i-1, j} = \partial X_c / \partial C_j \quad (9)$$

$$A_{2i, j} = \partial Y_c / \partial C_j \quad (10)$$

여기서, $i = 1, 2, \dots, k$ 이고 $j = 1, 2, \dots, 6$ 이다.

매개변수 추정은 근본적으로 $C_1 \sim C_6$ 를 계산하기 위해 다음과 같은 Newton-Raphson 방법이 적용되어진다.

$$C_{k+1} = C_k - \Delta C \quad (11)$$

2.4 가중행렬

가중행렬을 사용하는 이유는 매개변수를 추정하는데 있어 가장 최근에 얻은 데이터, 즉 목적지에 가장 가깝게 도달해 있을 때의 데이터에 더 큰 비중을 주기 위해서 사용되어진다. 이때 사용되어지는 크기가 $2n \times 2n$ 인 가중행렬 W 는 다음과 같이 정의된다.⁽⁶⁾

$$W = V^{-1} = \begin{bmatrix} V_{1,1} & & & & & \\ & V_{2,2} & & & & \\ & & V_{3,3} & & & \\ & & & V_{4,4} & & \\ & & & & \dots & \\ \emptyset & & & & & V_{2n-1, 2n-1} \\ & & & & & & V_{2n, 2n} \end{bmatrix}^{-1} \quad (12)$$

여기서, V 의 대각 요소는 다음과 같이 구해진다.

$$V_{2m-1, 2m-1} = \left[a_x \sum_{k=1}^3 |f_k(t_n) - f_k(t_m)| + a_{x_0} \right]^2$$

$$V_{2m, 2m} = \left[a_y \sum_{k=1}^3 |f_k(t_n) - f_k(t_m)| + a_{y_0} \right]^2 \quad (13)$$

여기서, $a_x, a_y, a_{x_0}, a_{y_0}$ 는 가중계수를 나타내며, 알려진 물체의 공간상에서의 좌표값을 나타내는 f 의 하첨자 $k=1, 2, 3$ 은 각각 x, y, z 방향을 의미한다. 또한, $m=1, 2, 3, \dots, n$ 은 알려진 물체의 수를 나타낸다. 본 실험에서 가중계수의 값은 $a_x = a_y = 0.1$ 로 하였고,

$a_{x_0} = a_{y_0} = 1$ 로 사용하였다.

2.5 알려지지 않은 물체 위치에 대한 추정 모델

매개변수 추정 절차에 의해서 구해진 매개변수 C_i 를 이용하여 알려지지 않은 목표지점의 실제 좌표값을 추정하는 방법은 아래 주어진 성능지수 $J(f)$ 를 최소화시키는 방법에 의해서 얻어진다.

$$J(f) = \sum_{i=1}^n \{ [X_c^i - X_c^i(f_k; C_i)]^2 + [Y_c^i - Y_c^i(f_k; C_i)]^2 \} \quad (14)$$

여기서, n 은 사용된 카메라 수, X_c^i 와 Y_c^i 는 목표 지점에 대한 i 번째 카메라에 대한 카메라 좌표값을 나타내며, 또한 X_c^i 와 Y_c^i 는 각 카메라에 대해 독립적으로 추정된 매개변수 C_i 에 근거한 카메라 모델값을 나타낸다.

알려지지 않은 물체 위치를 추정하기 위하여 매개변수 추정방법을 적용하면 위치 수정벡터 Δf 는

$$\Delta f = (B^T W B)^{-1} B^T W S \quad (15)$$

이며, W 는 가중행렬을 나타낸다. 또한 $2n \times k$ 의 크기를 갖는 행렬 B 는

$$B_{2i-1, k} = \partial X_c^i / \partial f_k \quad (16)$$

$$B_{2i, k} = \partial Y_c^i / \partial f_k \quad (17)$$

이다. 그리고 $2n \times 1$ 의 요소를 갖는 유수벡터 S 는

$$S_{2n-1} = X_c^i - X_c^i \quad (18)$$

$$S_{2n} = Y_c^i - Y_e^i \quad (19)$$

따라서 위에서 주어진 식 (11), (14)~(19)를 사용하여 Newton-Raphson 방법을 사용하여 허용오차 조건을 만족할 때까지 반복적으로 계산된다.

3. 실험 장치

3.1 실험 장치

본 논문에서 제시된 제어법의 적합성을 보이기 위해 행해진 실험장치 구성은 Fig. 1에서 보여준 것같이, CCD 카메라(유효화소수: 768(H)×494(V), 해상도: 570×485(TV) 분을 갖는 동경전자공업주식회사의 CS8320 모델)와 화상처리보드(CPU: TMS320C30, 해상도: 640×480, 256계조를 갖는 삼성전자의 FARA MVB-02 모델)를 포함하는 비전시스템, 시험모형 및 IBM PC 등 크게 3가지로 구분된다.

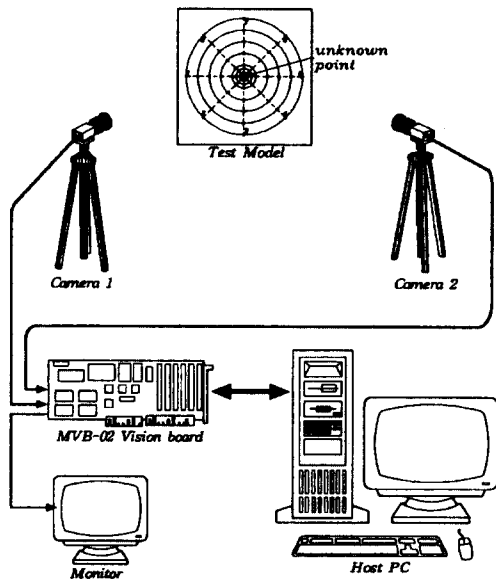


Fig. 1 Overall experimental set-up

3.2 시험 모형

평면상에 존재하는 목표점의 위치 결정을 위해서는 그

물체 주위에 알려진 몇 개의 좌표값이 존재해야 하며, 또한 주어진 시험 모형은 카메라 화면상에 존재해야 한다. 본 연구에서는 목표점으로부터 위치가 알려진 물체와의 거리에 대한 상관관계, 위치가 알려진 물체의 개수에 대한 상관관계 및 결정된 물체 위치의 정확성을 조사하기 위해서 Fig. 2와 같은 시험모형을 제작하여 실험하였다. Fig. 2에서 보여준 것같이 동심원상에 위치가 알려진 물체들을 각각 일정하게 45° 간격으로 배치하였으며 중앙에 위치한 점은 목표점을 나타낸다.

시험 모형 정면의 좌우 방향에서 2대의 카메라를 이용하여 각 물체의 비전 데이터를 얻고, 이를 토대로 6개의 시각 매개변수를 추정하고 나서 위치가 알려지지 않은 평면상의 9번 물체(목표점)의 좌표를 추정하게 된다. 또한, 목표점을 원점으로 1번 원의 직경 $\phi=34mm$, 2번 원의 직경 $\phi=68mm$, 3번 원의 직경 $\phi=102mm$, 4번 원의 직경 $\phi=204mm$, 5번 원의 직경 $\phi=306mm$, 6번 원의 직경 $\phi=408mm$, 7번 원의 직경 $\phi=510mm$ 로 설정하였다.

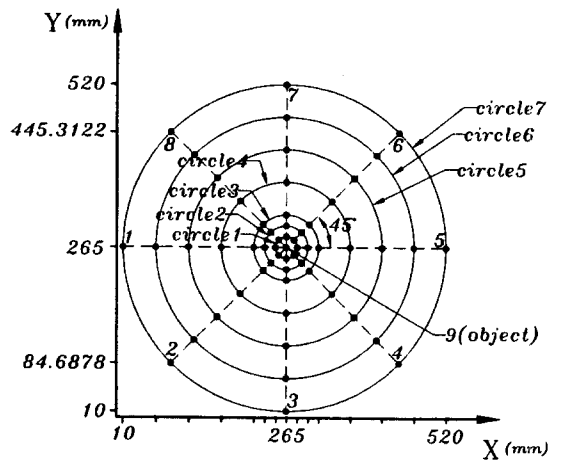


Fig. 2 Experimental Test model

4. 실험결과 및 토의

제2장에서 개발한 비전시스템 추정모델을 근거로 하여 실제 컴퓨터 비전시스템에 적용해 실험을 수행한 결과를 Fig. 3~Fig. 7과 Table. 1에 나타내었다.

본 실험에서는 가중계수를 0.1로 사용하여 목표점의

위치 추정 결과값과 실제값과의 평균오차 e 는 다음과 같이 정의된다.

$$e = \sqrt{e_x^2 + e_y^2} \quad (20)$$

여기서, e_x 는 x 좌표값의 오차, e_y 는 y 좌표값의 오차를 나타낸다. 본 실험에서 목표점의 실제 좌표값은 $F_x = 265mm$, $F_y = 265mm$ 이다.

Fig. 3은 1번 원부터 7번 원의 원호 상에 알려진 물체의 수(n)=1, 2일 때 결과값을 보여준다. 각 원호 상에 $n=1$ 일 때 x 좌표 오차값은 부호 ■의 실선, y 좌표 오차값은 부호 ■의 점선으로 나타낸다. 또한 $n=2$ 일 때 x 좌표 오차값과 y 좌표 오차값을 각각 부호 *의 실선과 점선으로 나타내었다. Fig. 4는 $n=1, 2$ 일 때 식(20)에서 정의된 평균오차값을 각각 부호 ■와 *을 사용하여 나타내었다. Fig. 3~Fig. 4에서 보여준 것같이 위치가 알려진 물체의 수가 2개 이하일 때는 목표점으로부터 거리가 멀어질수록 오차는 크게 증가하여 모든 동심원상에서 원하는 위치 결정에 대한 정확성을 얻을 수 없었다.

$n \geq 3$ 일 때 원의 직경 변화에 따른 x 좌표 오차값, y 좌표 오차값 및 평균오차를 Fig. 5~Fig. 7에 각각 나타내었으며, 각 그림에서 부호 *은 $n=3$, 부호 ★은 $n=4$, 부호 ■은 $n=6$, 부호 ▲은 $n=8$ 인 경우를 나타낸다. Fig. 5에서 보여준 것같이 4번 원까지의 x 좌표 오차는 0.3mm이내를 유지하다가 5번 원부터 0.6mm이상으로 나타났다. 또한, Fig. 6에서 4번 원까지의 y 좌표 오차는 0.5mm이내를 보이다가 5번 원부터 1.2mm이상 발생하였다. 즉, 알려진 물체의 데이터값을 이용하여 목표점 위치를 추정할 때는 일반적으로 목표점으로부터 거리(원의 반경)가 먼 경우에는 오차가 더 크게 나왔다. Fig. 5~Fig. 7에서 보여준 것같이 $n \geq 3$ 인 경우 5번원까지는 알려진 물체의 수에 관계없이 약 1mm내외의 평균오차를 보여주나, 일반적으로 반경이 더 큰 6번원부터는 알려진 물체의 개수에 좌우되어 평균오차값이 증가한다.

본 실험에서 수행한 모든 경우에 있어서 x 좌표의 오차값, y 좌표의 오차값 및 평균오차를 수치화하여 Table. 1에서 보여준다. Fig. 3 ~ Fig. 7과 Table. 1에서 보여준 것같이 실험 결과를 종합하면, 1번 원부터 5번 원까지

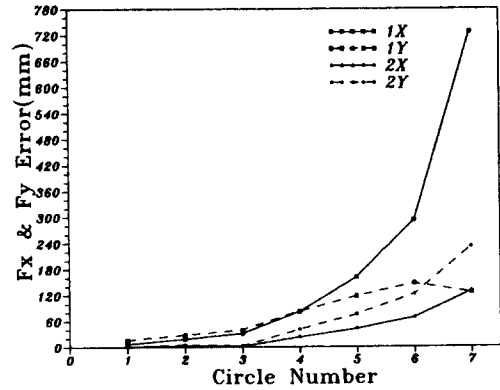


Fig.3 Fx & Fy Errors in the case of known position data $n=1, 2$

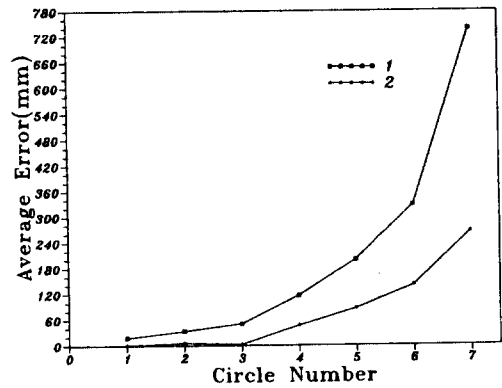


Fig.4 Average Errors in the case of known position data $n=1, 2$

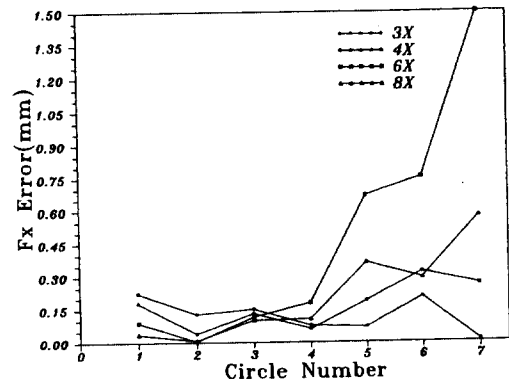


Fig.5 Fx Errors in the case of known position data $n=3, 4, 6, 8$

는 위치 정확도가 1 mm 이내에 들기 위해서는 최소한 $n \geq 3$ 이어야 하고, 대체로 더 큰 반경의 6번 원 이상인 경우 정확도를 유지하기 위해서는 더 많은 수의 비전 데이터의 획득이 필요하다. 이리하여 $n=3$ 일 때를 고려하면 평균 오차가 1 mm 내외의 정확도를 갖기 위한 조건은 임계원 5번원 이내에 있어야 한다. 반면에 $n=1, 2$ 인 경우는 원의 반경에 관계없이 목표점의 추정값은 많은 오차를 발생하였다.

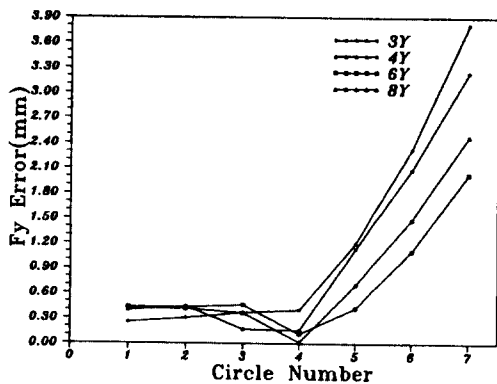


Fig. 6 Fy Errors in the case of known position data $n=3, 4, 6, 8$

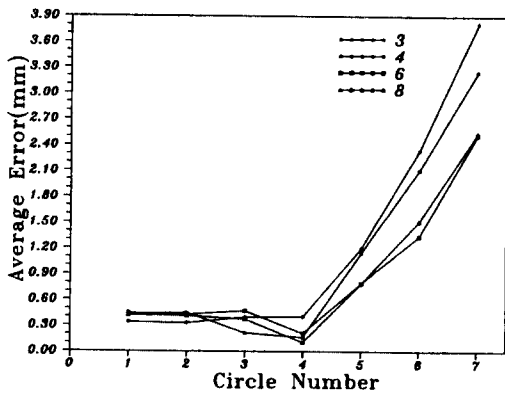


Fig. 7 Average Errors in the case of known position data $n=3, 4, 6, 8$

5. 결 론

본 논문에서 제시된 제어방법을 사용하여 목표점에 대한 위치결정 실험을 행하는데 있어 다음과 같은 결론을 얻었다.

Table 1. The estimated position errors of the object according to variation of number of the known object and circle diameter

		Fx Error	Fy Error	Av. error
circle #1 $\phi=34$	8points	-0.035951	0.417293	0.418839
	6points	0.088935	0.432991	0.442030
	4points	-0.179216	0.392258	0.431259
	3points	-0.224051	0.253001	0.37947
	2points	0.370245	0.465331	0.594655
	1point	6.970629	-16.428185	17.845866
circle #2 $\phi=68$	8points	-0.007319	0.413058	0.413123
	6points	0.004503	0.428760	0.428784
	4points	0.039169	0.443327	0.445054
	3points	-0.128786	0.301569	0.327917
	2points	-2.849940	-5.257161	5.979958
	1point	18.520392	-28.139081	33.686983
circle #3 $\phi=102$	8points	0.099999	0.361153	0.374742
	6points	0.115401	0.458981	0.473266
	4points	0.131256	0.170926	0.215508
	3points	0.151592	0.365364	0.395564
	2points	-1.363908	-2.654295	2.984213
	1point	31.677712	-39.942362	50.979111
circle #4 $\phi=204$	8points	0.106460	-0.014756	0.107478
	6points	0.180284	0.112602	0.212559
	4points	-0.059873	-0.154528	0.165722
	3points	-0.076369	-0.396920	0.404200
	2points	23.020117	40.958581	46.984371
	1point	81.678105	-82.861502	116.350081
circle #5 $\phi=306$	8points	0.365209	-0.697830	0.787619
	6points	0.669997	-0.419663	0.790578
	4points	-0.188401	-1.132479	1.148043
	3points	-0.068240	-1.200825	1.202762
	2points	42.340462	75.714126	86.748738
	1point	161.446309	-117.793918	199.850739
circle #6 $\phi=408$	8points	0.294203	-1.484114	1.512994
	6points	0.754341	-1.103903	1.337024
	4points	-0.321555	-2.079885	2.104595
	3points	-0.206131	-2.326443	2.335557
	2points	68.531189	122.764494	140.597457
	1point	292.953440	-147.358959	327.927402

(1) 알려진 물체의 수가 2개 이하일 때는 동심원의 환경에 관계없이 원하는 정밀도를 갖는 목표점의 위치결정을 할 수 없으므로 알려진 물체는 3개 이상 존재해야 한다.

(2) 목표점으로부터 3개 이상의 알려진 물체가 153

mm 이내(목표점을 기준으로 알려진 물체가 카메라 평면의 $\frac{1}{2}$ 이내)에 존재하면 평균오차가 $1mm$ 내외에서 발생하므로 이 영역에서는 가장 작은 3개의 알려진 물체를 사용함으로써 제시된 제어 알고리즘을 효과적으로 이용할 수 있다.

- (3) 모든 알려진 점들이 $153mm$ 밖에 존재할 때는 더 많은 알려진 점들이 있어야 원하는 정확성을 기할 수 있다.

이를 통하여 본 논문에서 제시된 알고리즘은 타당성을 보여주었으며, 향후 해상도가 더 좋은 CCD 카메라를 사용하면 공간상에 존재하는 물체 위치결정에도 적용될 수 있을 것으로 생각된다.

후 기

본 논문은 1996년도 조선대학교 학술 연구비를 지원 받아 연구되었음.

참 고 문 헌

1. W. Z. Chen, U. A. Korde, S. B. Skaar, "Position Control Experiments Using Vision", The International Journal of Robotics Research, Vol.13, No.3, pp.199-208, June 1994
2. Steven B. Skaar, William H. Brockman, R. Hanson, "Camera-Space Manipulation", The International Journal of Robotics Research, Vol.6, No.4, pp.20-32, Winter 1987
3. Li. Wang and Grier Lin, "An Application of On-line Calibration of Machine Vision for the Object Position Determination", The Fourth International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision(ICARCV '96), Singapore, 3-6 pp.105-109, December, 1996
4. Morton, H., Junkins, J. and Blanton, J., "Analytical Solutions for Euler Parameters", Celestial Mechanics, 10, D. Reidal Publishing Company, Dordrecht-Holland, pp.287-301, 1974
5. Junkins, J. L., "An Introduction to Optimal Estimation of Dynamical Systems", Sijthoff and Noordhoff International Publishers, Alphen Aan Den Rijn, pp.29-33, 1978
6. 장완식 외 3인, "평면상에 있는 점위치 결정을 위한 컴퓨터 비전의 응용", 한국정밀공학회 97년도 추계학술대회 논문집(II), pp 1124~1128, 1997, 11.