

평면상에 있는 점위치 결정을 위한 컴퓨터 비전의 응용

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

장 완식(조선대 공대), 장 종근*, 유 창규, 주 철(조선대 대학원)

W.S Jang(Chosun Univ), J.K Jang, C.G You, C. Joo(Graduate School, Chosun Univ)

ABSTRACT

This paper presents the application of computer vision for the purpose of determining the position of the unknown point in the plane. The presented control method is to estimate the six view parameters representing the relationships 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 of position the unknown point in the plane.

Key Words : computer vision(컴퓨터 비전), image plane(이미지 평면), view parameter(시각 매개변수), vision model(비전 모델), calibration(보정), weighting matrix(가중행렬)

1. 서 론

비전 시스템이 개발되기 시작한 것은 1973년에 PDP-10 컴퓨터를 이용한 물뿔프 조립이 시각정보를 이용하여 Stanford 연구진에 의해 수행되었다. 그 이후, 비전 시스템이나 비전 센서가 활용되는 예로는 용접, 운반, 조립, 측정 검사 등이 있으나, 지능로봇중의 한 분야로 로봇 비전시스템을 생산현장에 적용하는 경우가 늘고 있다. 비전을 사용하면 매니플레이터가 우주 공간이나 수중 등 실제 공간에서 그 위치와 방향이 불확실하게 알려져 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⁾

로봇에 비전을 적용할 때 실제 공간은 3차원인 반면에 비전 정보는 2차원이기 때문에 카메라 좌표계와 매니플레이터나 실제 공간 좌표계를 일치시켜 주는 보정은 가장 중요한 요소중의 하나이다. 카메라 교체시나 카메라 위치 수정시에도 필히 보정을 다시 시켜줄 필요가 있다. 만약 보정이 정확하게 되어 있지 않으면 매니플레이터의 경우 올바른 제어를 하지

못할 우려가 있고, 또한 부적절한 보정계수 산출로 인한 목표점의 추정이 어긋나게 된다.⁽³⁾

이리하여 본 연구는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 6개의 시각 매개변수를 이용한 새로운 비전 시스템 모델을 제시하고, 2차원 평면 점위치 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 물체의 위치 결정을 위해서는 그 물체 주위에 알려진 몇 개의 좌표값이 존재해야 한다는 것이고, 본 연구에서는 알려지지 않은 점으로부터 위치가 알려진 점과의 거리에 대한 상관관계, 위치가 알려진 점의 개수에 대한 상관관계 및 결정된 물체 위치의 정확성을 실험을 통하여 보고자 한다.

2. 비전 시스템의 추정 모델 개발

2.1 카메라 모델

비전 시스템 모델은 6개의 불확실한 시각 매개변수들은 평면에 대한 카메라 위치, 자세 및 초점거리

의 불확실성을 설명할 뿐만 아니라, 실제 공간의 위치를 2차원 카메라 좌표계로 변환하는 관계를 나타낸다. 오일러 매개변수(Euler parameter) 항으로 나타내어진 방향 코사인 행렬(direction cosine matrix)을 사용하여 카메라 회전모델을 나타내면 다음과 같다.⁽⁴⁾

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

여기서,

$$\begin{aligned} K_{11} &= C_1^2 + C_2^2 - C_3^2 - C_4^2 \\ K_{12} &= 2(C_2C_3 + C_1C_4) \\ K_{13} &= 2(C_2C_4 - C_1C_3) \\ K_{21} &= 2(C_2C_3 - C_1C_4) \\ K_{22} &= C_1^2 - C_2^2 + C_3^2 - C_4^2 \\ K_{23} &= 2(C_3C_4 + C_1C_2) \end{aligned} \quad \dots (2)$$

2.2 비전 시스템 모델

카메라 회전모델에 카메라 평면에 대한 시험 모형 위치의 불확실성을 보완하기 위해 X_{c_0} ($= C_5$)와 Y_{c_0} ($= C_6$)를 첨가시키면 비전시스템 모델은 다음과 같다

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

$$Y_e = 2(C_2C_3 - C_1C_4)f_x + (C_1^2 - C_2^2 + C_3^2 - C_4^2)f_y + 2(C_3C_4 + C_1C_2)f_z + C_6 \quad \dots (4)$$

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.

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

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 점의 공간상 위치 및 매개변수 C_i 에 기초한 카메라 모델 X, Y 값을 나타

낸다.

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

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

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

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

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

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

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

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

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.

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

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.

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

이라 할 때, V 의 대각 요소는 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} V_{2m-1, 2m-1} &= \left[a_x \sum_{k=1}^3 |F_k(t_n) - F_k(t_m)| + a_{x_0} \right]^2 \\ V_{2m, 2m} &= \left[a_y \sum_{k=1}^3 |F_k(t_n) - F_k(t_m)| + a_{y_0} \right]^2 \end{aligned} \quad \dots (13)$$

여기서, $a_x, a_y, a_{x_0}, a_{y_0}$ 는 가중계수이고, 하첨자

$k=1,2,3$ 은 각각 x, y, z 방향을 의미한다. 그리고, $m=1,2,3, \dots, n$ 은 알려진 점의 수를 나타낸다.

본 실험에서 가중계수의 값은 a_x, a_y 모두 0.1로 하였고, a_{x_0}, a_{y_0} 는 1로 사용하였다.

2.5 알려지지 않은 점 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.

$$J(F) = \sum_{i=1}^n \{ [X_c^i - X_e^i(F_k; C_i)]^2 + [Y_c^i - Y_e^i(F_k; C_i)]^2 \} \quad \dots (14)$$

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

매개변수 추정 방법을 알려지지 않은 위치 추정 방법에 적용하면 위치 수정벡터 ΔF 는

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

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

$$B_{2i-1, k} = \partial X_e^i / \partial F_k \quad \dots (16)$$

$$B_{2i, k} = \partial Y_e^i / \partial F_k \quad \dots (17)$$

이며, k 는 공간상 좌표계의 x, y, z 방향을 나타낸다.

그리고 $2n \times 1$ 의 요소를 갖는 유수벡터 S 는

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

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

이리하여 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 구성

본 논문에서 제시된 제어법의 적합성을 보이기 위해 행해진 실험장치 구성을 Fig. 1에서 보여준 것같이, 비전시스템 (CCD카메라, FARA MVB-02 화상

처리보드), 시험모형 및 IBM PC 등 크게 3가지로 구분된다.

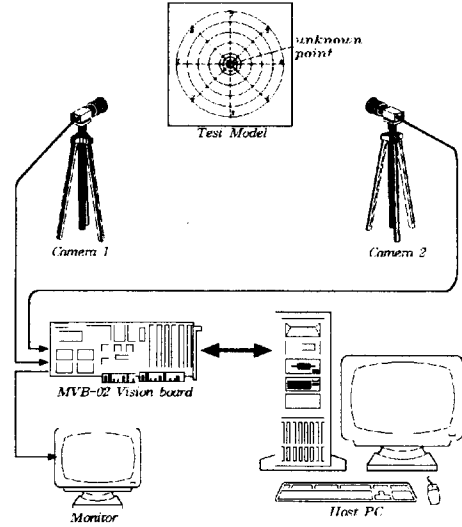


Fig. 1 Overall experimental set-up

3.2 시험 모형

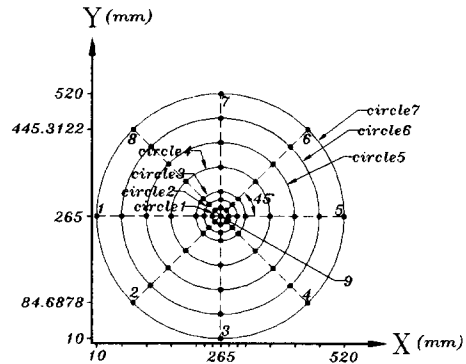


Fig. 2 Experimental Test model

평면상에 존재하는 알려지지 않은 점의 위치 결정을 위해서는 그 점 주위에 알려진 몇 개의 좌표값이 존재해야 한다. 본 연구에서는 알려지지 않은 점으로부터 위치가 알려진 점과의 거리에 대한 상관관계, 위치가 알려진 점의 개수에 대한 상관관계 및 결정된 점 위치의 정확성을 조사하기 위해서 Fig. 2와 같은 시험모형을 제작하여 실험하였다. Fig. 2에서 보여준 것같이 동심원상에 위치가 알려진 점들을 각각 일정하게 45° 간격으로 배치하였으며 중앙에 위치한 점은 알려지지 않은 점을 나타낸다.

시험 모형 정면의 좌우 방향에서 2대의 카메라를

이용하여 각 점의 비전 데이터를 얻고, 이를 토대로 6개의 시각 매개변수를 추정하고 나서 위치가 알려지지 않은 평면상의 9번 점의 좌표를 추정하게 된다.

4. 실험 결과 및 토의

Fig. 3~4는 가중계수 0.1을 사용하여 위치가 알려지지 않은 9번 점을 추정한 결과값과 실제값과의 평균오차를 나타내는 그래프이며, 평균오차 e 는 다음과 같이 정의된다.

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

여기서, e_x 는 x 좌표값의 오차, e_y 는 y 좌표값의 오차를 나타낸다.

Fig. 3은 각각의 동심원상에 위치가 알려진 점의 수(n)가 1개 및 2개일 때 평균오차를 나타낸다. 여기서, 부호 ■은 위치가 알려진 점의 수가 1개일 때 실제값과 비교한 평균오차이며, 부호 *은 알려진 점의 수가 2개일 때 평균오차를 나타낸다. 이 그래프에서 보여주는 것과 같이 위치가 알려진 점의 수가 2개 이하일 때는 알려지지 않은 점으로부터 거리가 멀어질수록 오차는 크게 발생하나 모든 동심원상에서 원하는 위치 결정에 대한 정확성을 얻을 수 없었다.

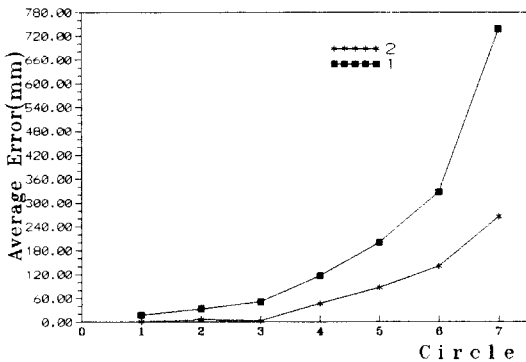


Fig. 3 Average error in case of known position data $n=1, 2$

Fig. 4는 각각의 동심원상에 위치가 알려진 점의 수가 3, 4, 6, 8개 동심원의 반경에 따른 평균오차를 나타낸다.

여기서, 부호 ▲는 $n=3$, 부호 ■는 $n=4$, 부호 ★는 $n=6$, 부호 *는 $n=8$ 일 때 평균오차를 나타낸다. 이 그래프에서 보듯이 위치가 알려진 점의 수가 3개 이상인 경우 4번원까지는 알려진 점의 수

에 관계없이 0.5 mm이내의 평균오차를 보여주나, 일반적으로 반경이 더 큰 5번원부터는 Table. 1에서 보여준 것 같이 평균오차는 알려진 점의 개수에 좌우되어 증가한다.

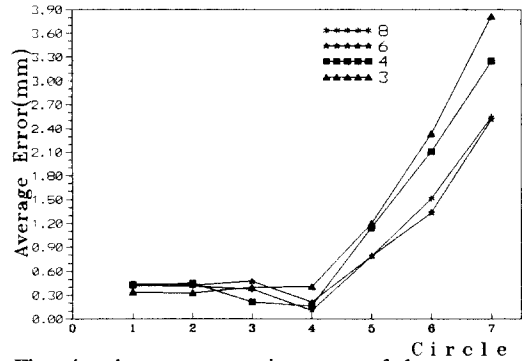


Fig. 4 Average error in case of known position data $n=3, 4, 6, 8$

5. 결론

본 논문에서 제시된 제어방법을 사용하여 알려지지 않은 점에 대한 위치결정 실험을 행하는데 있어 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 알려진 점의 수가 2개 이하일 때는 동심원의 반경에 관계없이 원하는 정밀도를 갖는 위치결정을 할 수 없었다.

(2) 3개 이상의 알려진 점이 알려지지 않은 점으로부터 153 mm이내에 존재하면 평균오차가 0.5 mm이내에서 발생한다.

(3) (2)의 경우에서는 알려진 점의 수에 상관없이 0.5 mm이내의 평균오차를 발생시키므로 이 영역에서는 가장 작은 개수인 3을 사용함으로써 제시된 제어 알고리즘을 효과적으로 이용할 수 있다.

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

(5) 이를 통하여 본 논문에서 제시된 알고리즘은 타당성을 보여주었으며, 향후 공간상에 존재하는 물체 위치결정에도 적용될 수 있을 것으로 생각된다.

Table 1. The estimated position of the unknown point according to variation of number of the known points and circle

		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	0.337947
	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

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, June 1994, pp.199-208.
2. Steven B. Skaar, William H. Brockman, R. Hanson, "Camera-Space Manipulation", The International Journal of Robotics Research, Vol.6,

No.4, Winter 1987, pp.20-32.

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 December, 1996, pp.105-109.

4. Morton, H., Junkins, J. and Blanton, J., "Analytical Solutions for Euler Parameters", Celestial Mechanics, 10, D. Reidal Publishing Company, Dordrecht-Holland, 1974, pp.287-301.

5. Junkins, J. L., "An Introduction to Optimal Estimation of Dynamical Systems", Sijthoff and Noordhoff International Publishers, Alphen Aan Den Rijn, 1978, pp.29-33.