

컬러 좌표계 변환을 이용한 이동로봇의 시각 서보 제어기의 설계

노 창 균*, 이 기 철*, 이 양 회**, 박 민 용*

*연세대학교 전기 컴퓨터공학과, **한국 산업기술대학교 자동화공학과

Tel:(02)361-2868 Fax:(02)312-2333, (0345)496-8244

backstepping@yahoo.com

Design of Visual Servo Controller using Color Coordinate System Transformation in Mobile Robot

Chang Kyun Noh*, Ki Chul Lee*, Yang Hee Yee**, Mignon Park*

*Dept. of Electrical and Computer Engineering Yonsei University, **Dept. of Automation Eng. Korea Polytechnic Univ.

backstepping@yahoo.com

Abstract

In this paper, color coordinate system transformation based visual servo controller has been considered. Mobile robot always has a position error and an orientation error resulted from wheel slipping etc.. Even more, the errors have accumulative properties. So feedback from environments is important. In this paper, by using $\langle L, a, b \rangle$ color model faster land mark extraction can be achieved. And the global position and the orientation of mobile robot can be known by only two land marks positions in image coordinate system. Finally, the adoption of visual information in path tracking problem makes visual servo control.

1. 서론

급격한 컴퓨터 처리능력 향상에 힘입어 컬러 CCD카메라를 탑재한 형태의 이동로봇에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이동로봇 시스템의 연구분야는 크게 주행경로생성 알고리즘에 관한 연구, 주어진 경로를 추종하는 경로추종 알고리즘에 관한 연구, 전역 좌표계 상에서 이동로봇의 위치와 방위에 관한 정보를 얻어내는 위치추정 알고리즘에 관한 연구 등으로 나누어 볼 수 있다.[1] 본 논문은 컬러 CCD카메라를 이용하여 환경 피드백을 구현한 위치추정 알고리즘을 제안하고, 이를 바탕으로 주어진 경로를 추종할 수 있는 경로추종 알고리즘에 응용한다. 기존의 제한된 복도 환경 하에서의 자연인식마크로 주로 사용되었던 수직, 수평 직선의 교점을 찾기 위해서는, 전처리 과정으로 Sobel 연산 등의 에지 검출 알고리즘 처리 후 다시 직선 선분 추출을 위해 Hough Transformation을 수행하여야 했다.[4] 그러나, Hough Transformation은 매우 처리시간이 긴 프로세싱이며, 실시간 비주얼 서보잉을 불가능하게 만드는 요소로 작용하였다. 더욱이 컬러 CCD가 일반화된 지금 컬러 정보를 다시 Gray 영상으로 바꿔서 처리하는 과정은 바람직하지 못하다. 본 논

문에서 사용한 컬러 좌표계 변환(Color Coordinate System Transformation)법은 색깔로써 구분이 가능한 인공 이정표를 로봇의 작업공간상에 위치시켜 이를 바탕으로 로봇의 현재 위치와 방향각에 관한 정보를 얻어내게 된다.[5] 여러 컬러 좌표계 중 본 논문에서는 컬러 정보의 차이를 극대화시킬 수 있는 $\langle L, a, b \rangle$ 칼라 모델을 사용하며, 매우 빠르게 이정표의 위치를 파악할 수 있다. 본 논문은 크게 세부분으로 구성된다. 2장에서는 컬러 모델과 컬러 좌표계 변환, 그리고 각 좌표계의 특징에 대해 언급하고, 3장에서는 단일 카메라로부터 이정표를 찾아내고 이동로봇의 전역 좌표계상의 위치와 방향각을 찾아내는 수식을 유도하며, 4장에서는 3장에서 얻어낸 정보를 바탕으로 주어진 경로를 추종하는 시각 서보 시스템을 구성한다.

2. 컬러 좌표계 변환

이 장에서는 컬러 좌표의 변환을 통한 빠른 이정표 추출 기법에 대해 다루었다.

2.1 컬러 좌표계 (Color Coordinate System)

■ C.I.E.X.Y.Z system

빛의 3원색으로 본 RGB 칼라 모델에서는 어떠한 주파수에서 tristimulus 값이 음수로 나오는 경우가 있는데, 이는 그 주파수에서의 빛은 재현이 불가능함을 의미한다. C.I.E.X.Y.Z system은 3개의 모든 tristimulus 값을 양으로 만드는 가상 원색의 집합을 찾아낸 결과이다. 이 3개의 원색은 물리적으로는 실현 불가능 할 지라도, 칼라 척도 계산을 위한 편리한 좌표계로 사용된다. Y는 휘도(luminance)를 나타낸다. X, Y, Z 좌표값은 C.I.E.R.G.B 모델과 선형 변환 관계에 있다. 변환 식은 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.490 & 0.310 & 0.200 \\ 0.177 & 0.813 & 0.011 \\ 0.000 & 0.010 & 0.990 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (1)$$

■ L^*, a^*, b^* system

C.I.E.X.Y.Z 모델에서 얻어낸 X, Y, Z 값으로 색깔의 차이를 부각시켜 주는 유용한 식을 제공한다. X, Y, Z를 다음과 같은 L^*, a^*, b^* 변환 식을 통하면, 밝기와 색에 관한 새로운 관계를 얻어낸다.

$$L^* = 25 \left(\frac{100Y}{Y_0} \right)^{1/3} - 16, \quad 1 \leq 100Y \leq 100 \quad (2)$$

$$a^* = 500 \left[\left(\frac{X}{X_0} \right)^{1/3} - \left(\frac{Y}{Y_0} \right)^{1/3} \right] \quad (3)$$

$$b^* = 200 \left[\left(\frac{Y}{Y_0} \right)^{1/3} - \left(\frac{Z}{Z_0} \right)^{1/3} \right] \quad (4)$$

L^* : brightness, a^* : red-green component

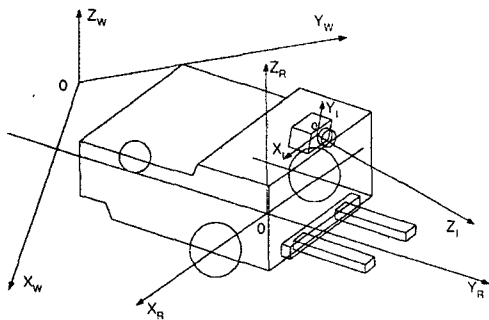
b^* : yellow-blue component

$$X_0 = Y_0 = Z_0 = 1$$

3. 이동로봇의 위치추정 시스템의 설계

3.1 CCD카메라를 탑재한 이동로봇시스템의 구성

본 논문에서 사용된 이동로봇은 아래의 PIONEER I 로보트로 CCD 카메라는 그림과 같이 로봇의 정면 상단에 위치하며 고정된 tilt 각을 가진다. 각 좌표계는 <그림 1> 과 같다.



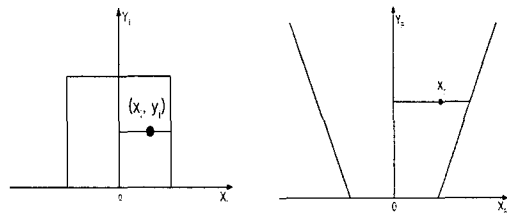
<그림 1>

3.2 화상좌표계와 로봇좌표계와의 관계

카메라는 3차원 공간으로부터 2차원의 평면으로 매핑을 시켜주기 때문에, 2차원의 평면으로 나타난 임의의 한 점은 3차원 공간상에서는 광선으로 대응이 된다. 이를 극복하기 위해 여러 카메라를 장치하거나, 하나의 카메라로부터 여러 장의 영상을 획득하거나, 또는 목표물, 주위환경의 여러 특징점을 획득하여 이들의 기하학적 관계를 사용하여 3차원상의 정보를 취득할 수 있다. 본 논문에서는 주위환경에서 인식마크를 추출하고 그 인식마크에 Z좌표계의 값을 0으로 두는 구속조건을 적용하여 3차원 공간상의 위치를 제약하는 방법을 사용한다. 이렇게 함으로써 카메라의 2차원 평면상에 나타나는 인식마크는 3차원 상의 광선으로 매핑되지 않고 특정 점으로 매핑된다. 본 논문에서 사용한 대응관계의 기본 가정은 다음과 같다.

- 1) 3차원 공간상의 직선은 카메라 영상에 직선으로 투사된다.
- 2) 인식마크는 전역좌표계상의 Z=0 평면에 위치한다.

3.2.1 x 좌표의 대응



<그림 2> 영상 좌표계

<그림 3> 로봇 좌표계

직선이 직선으로 대응된다는 가정에서 영상좌표계상의 임의의 점 (x_i, y_i) 는 로봇좌표계의 특징점으로 대응된다. x 좌표의 값은 영상좌표계상에서 y의 값이 증가할수록 더 커지게 되며 이 관계는 선형의 관계를 가진다. 로봇좌표계의 x값 x_r 이라고 하고 영상좌표계의 x값을 x_i 라 하면 다음의 관계를 가진다.

$$x_r = K * x_i + P \quad (5)$$

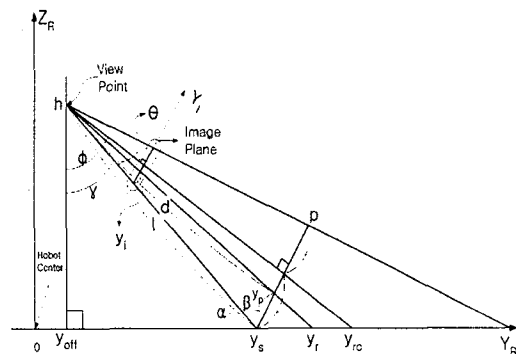
그런데, $x_i=0$ 일 때 $x_r=0$ 이므로 $P=0$ 이고, K 는 y_i 에 선형으로 변하는 특성을 가진다. 최종적인 x_r 과 x_i 의 관계는 다음과 같다.

$$x_r = (a * y_i + b) * x_i \quad (6)$$

여기서 a, b 는 매핑변수이며, 기준되는 점의 측정에 의해 구한다.

3.2.2 y 좌표의 대응

다음은 y좌표에 관한 대응관계를 유도한다.



<그림 4>

<그림 4>는 로봇좌표계상에서 $X_r=0$ 인 단면의 모습이다. Image Plane은 CCD카메라에 잡힌 화면의 모습을 가상의 평면으로 나타낸 것이다. 로봇좌표계상의 $Z_r=0$ 평면의 점들은 Image Plane으로 투사되고 있다.

■ 주요 변수 정의

- y_r : 로봇 좌표계의 y값
- y_i : 영상 좌표계의 y값
- y_{off} : 로봇 중심과 카메라 View Point와의 y축상 거리

- y_r : 카메라 중심에 투사되는 로봇좌표계의 y 값
- β : 이등변 삼각형 h, y_s, p 의 한 끝각
- $\gamma = \angle y_{off} h y_s$
- $\theta = \angle y_s h y_r$
- ϕ : 카메라의 tilt 각

y_r 은 <그림 4>의 기하학적 관계에 따라 다음과 같이 구해진다.

$$y_r = h \tan(\gamma + \theta) + y_{off} \quad (7)$$

View Point와 Image Plane으로 이루어지는 삼각형과 삼각형 h, y_s, p 는 닮은 관계에 있으므로,

$$y_p = m y_i \quad (m : \text{닮음비}) \quad (8)$$

$$m = \frac{\bar{y}_p}{\bar{y}_i} \quad (9)$$

m 은 알고 있는 실제 거리 \bar{y}_p 와 \bar{y}_i 의 비에 의해, 최초 한 번 계산된다. <그림 4>의 기하학적 관계에 의해

$$\gamma = 90^\circ - \tan^{-1}\left(\frac{h}{y_s - y_{off}}\right) \quad (10)$$

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{l - y_p \cos \beta}{\sqrt{l^2 + y_p^2 - 2ly_p \cos \beta}}\right) \quad (11)$$

y_r 을 구하기 위한 최종적인 식은 다음과 같다.

$$y_r = h \tan\left(90^\circ - \alpha + \cos^{-1}\left(\frac{l - m y_i \cos \beta}{\sqrt{l^2 + (m y_i)^2 - 2lm y_i \cos \beta}}\right)\right) + y_{off} \quad (12)$$

여기서

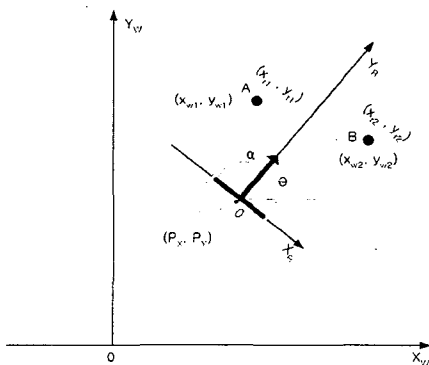
$$l = \sqrt{h^2 + (y_s - y_{off})^2} \quad (13)$$

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{h}{y_s - y_{off}}\right) \quad (14)$$

$$\beta = 180^\circ - \tan^{-1}\left(\frac{h}{y_s - y_{off}}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{y_r}{h}\right) \quad (15)$$

h, y_s, y_{off}, m 은 모두 측정에 의해 구해지므로, 위의 식은 화면상에 잡힌 영상좌표계상의 y_i 에 의해 고유하게 계산되는 y_r 의 비선형 방정식이 된다.

3.3 전역 좌표계상의 위치 추정



<그림 5>

<그림 5>와 같이 로봇 좌표계에서 관측된 두 이정표 A,

B의 좌표값을 각각 $(x_{r1}, y_{r1}), (x_{r2}, y_{r2})$ 라 하고 이 점의 전역 좌표계상의 좌표값을 각각 $(x_{w1}, y_{w1}), (x_{w2}, y_{w2})$ 라 하자. 이정표는 이미 그 위치를 알고 있는 점이므로 $(x_{w1}, y_{w1}), (x_{w2}, y_{w2})$ 는 알고 있는 값이다. 전역 좌표계상에서 A와 B는 로봇좌표계의 점을 α 만큼 회전시킨후 (P_x, P_y) 만큼 평행 이동시킨 결과로 볼 수 있다. 로봇 좌표계의 임의의 한 점을 전역 좌표계의 좌표값으로 매핑시켜 주는 행렬을 ${}^wT^r$ 라 하면,

$${}^wT^r = \begin{pmatrix} 1 & 0 & P_x \\ 0 & 1 & P_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & P_x \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & P_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (16)$$

$\alpha + \theta = 90^\circ$ 이므로,

$$\begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin \theta & \cos \theta & P_x \\ -\cos \theta & \sin \theta & P_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_r \\ y_r \\ 1 \end{pmatrix} \quad (17)$$

A, B 점에 위의 관계를 적용하면,

$$x_{w1} = x_{r1} \sin \theta + y_{r1} \cos \theta + P_x \quad (18)$$

$$y_{w1} = -x_{r1} \cos \theta + y_{r1} \sin \theta + P_y \quad (19)$$

$$x_{w2} = x_{r2} \sin \theta + y_{r2} \cos \theta + P_x \quad (20)$$

$$y_{w2} = -x_{r2} \cos \theta + y_{r2} \sin \theta + P_y \quad (21)$$

$\sin \theta$ 에 대해 정리하면,

$$\sin \theta = \frac{(x_{w1} - x_{w2})(x_{r1} - x_{r2}) + (y_{w1} - y_{w2})(y_{r1} - y_{r2})}{(x_{r1} - x_{r2})^2 + (y_{r1} - y_{r2})^2} \quad (22)$$

$\cos \theta$ 에 관해서도 정리하면,

$$\cos \theta = \frac{(y_{r1} - y_{r2})(x_{w1} - x_{w2}) + (x_{r1} - x_{r2})(y_{w1} - y_{w2})}{(x_{r1} - x_{r2})^2 + (y_{r1} - y_{r2})^2} \quad (23)$$

따라서,

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{(x_{w1} - x_{w2})(x_{r1} - x_{r2}) + (y_{w1} - y_{w2})(y_{r1} - y_{r2})}{(y_{r1} - y_{r2})(x_{w1} - x_{w2}) + (x_{r1} - x_{r2})(y_{w1} - y_{w2})}\right) \quad (24)$$

$$P_x = \frac{1}{2}(x_{w1} + x_{w2} - x_{r1} \sin \theta - y_{r1} \cos \theta - x_{r2} \sin \theta - y_{r2} \cos \theta) \quad (25)$$

$$P_y = \frac{1}{2}(y_{w1} + y_{w2} + x_{r1} \cos \theta - y_{r1} \sin \theta + x_{r2} \cos \theta - y_{r2} \sin \theta) \quad (26)$$

4. 시각 서보제어기의 설계

일반적으로 이동로봇의 위치와 방향각에 관한 상태 변수를 행렬 $p = (x \ y \ \theta)^T$ 로 정의한다.

$$\dot{p} = \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v \\ w \end{pmatrix} = Jq \quad (27)$$

Y. Kanayama[6]는 로봇 운동의 참조경로를 직선으로 제한하여 안정적인 제어기를 제안하였다.

$$q = \begin{pmatrix} v \\ w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v(p_e, q_r) \\ w(p_e, q_r) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_r \cos \theta_e + K_x x_e \\ w_r + v_r(K_y y_e + K_\theta \sin \theta_e) \end{pmatrix} \quad (28)$$

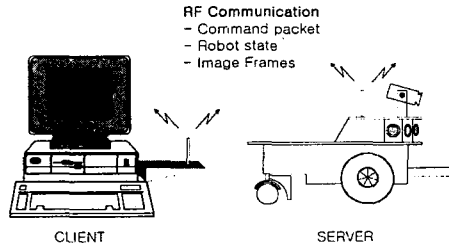
$$p_e = \begin{pmatrix} x_e \\ y_e \\ \theta_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_c & \sin \theta_c & 0 \\ -\sin \theta_c & \cos \theta_c & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} (p_r - p_c) \quad (29)$$

$p_r = (x_r \ y_r \ \theta_r)^T$ 은 로봇이 위치해야 할 참조상태를 나

타내고, $p_c = (x_c \ y_c \ \theta)^T$ 는 현재 로봇의 상태를 나타낸다. 이제 $p_c = (P_X, P_Y, P_\theta)^T$ 를 적용하여, 환경과의 피드백으로 이루어지는 강인한 이동로봇의 시각 서보 제어를 구성할 수 있다.

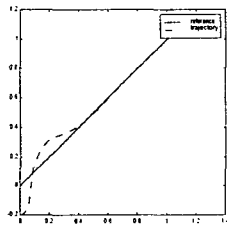
5. 실험 결과

<그림 6>은 이동로봇 PIONEER I 과 실험 환경의 모습이다.

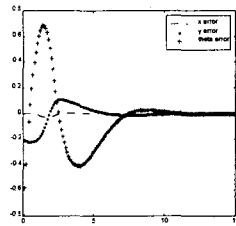


<그림 6>

아래 그림은 시뮬레이션 결과이다.



<그림 7>



<그림 8>

$$(K_x=10, K_y=64, K_\theta=12)$$

<그림 7>은 초기상태 $(0 \ 0.2 \ 0)^T$ 에 있는 이동로봇을, 초기위치 $(0 \ 0 \ \pi/4)^T$ 부터 $v=0.1, w=0$ 인 속도로 움직이는 경로를 추종시킨 결과이다. <그림 8>은 시간에 따른 기준상태와 로봇의 현 상태와의 차를 나타낸다.

<표 1> 매핑 파라미터와 이정표의 위치

a	b	y_s	$s \ h$	m	y_r	y_{off}	x_{u1}	y_{u1}	x_{u2}	y_{u2}
0.009125	1.2625	465	315	1.333	990	630	-133	915	224	904

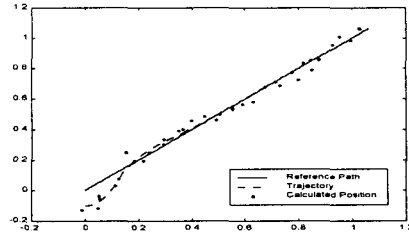
<표 2> 실제 위치 $(0 \ 0 \ 90^\circ)^T$ 에서 추정된 값

x_1	y_1	x_2	y_2	P_X	P_Y	θ
-66	79	116	81	-2.049 mm	10.019 mm	90.197°

<표 3> 실제 위치 $(-400 \ 100 \ 60^\circ)^T$ 에서 추정된 값

x_1	y_1	x_2	y_2	P_X	P_Y	θ
-86	64	62	97	-391.485 mm	105.809 mm	61.212°

<그림 9>는 실제 로봇 PIONEER I에 적용시킨 결과로 얻은 추종경로를 나타낸다.



<그림 9>

· 초기위치 : $(0 \ -0.1 \ 0)^T$
 · 초기경로 : $(0 \ 0 \ \pi/4)^T, v=0.1 \ w=0$

6. 결론

본 논문에서는 <L, a, b> 컬러 좌표계 변환을 통한 빠른 이정표 추출기법을 도입하고, 이동로봇과 카메라, 이정표와의 기하학적 관계에 의한 현재위치와 방향각을 찾아내어 이를 시각서보제어기에 응용하였다. 기존의 Look and Move방식의 이동로봇에서 구현할 수 없었던 빠른 전처리 과정으로 효율적인 시각서보시스템을 구성할 수 있었다. 바닥이 평평하다고 가정할 수 있다면 어떠한 환경에서도 두 점의 이정표를 추출함으로써 로봇의 주어진 경로를 환경과의 피드백을 통해 에러가 누적되지 않게 추종할 수 있었다. 실제 주행실험에서 주어진 경로를 100mm 이내의 오차범위로 추종하였다. 다음 위치를 예측함으로써 더욱 빠르게 이정표를 추출하는 과제와, 이정표를 놓쳤을 때를 대비한 센서융합 문제가 향후연구 과제로 남아 있다.

<참고 문헌>

- [1] Yuan F. Zheng, "Recent Trends in Mobile Robot", World Scientific, 1993
- [2] Seth Hutchinson, Member, IEEE, Gregory D.Hager, Member, IEEE, and Peter I. Corke Member, IEEE, "Tutorial on Visual Servo Control" in IEEE Transactions on RnA Vol. 12 NO. 5, October 1996
- [3] M.Arcardi, G.Gasolino, A.Bicchi, A.Balestrino "Closed Loop Steering of Unicycle-like Vehicles via Lyapunov Techniques" in IEEE Robotics & Automation Magazine, March 1995
- [4] 김현태, "단일 카메라와 2차원 환경 모델을 이용한 이동 로봇의 위치 추정과 복도 주행제어", 연세대학교 박사학위논문
- [5] Anil K.Jain, "Foundations of Digital Image Processing", prentice hall
- [6] Y.Kanayama, Y.Kimura, F.Miyazaki, T.Noguchi, "A Stable tracking Control Method for a Non-Holonomic Mibile Robot", IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robotics and Systems IROS'91
- [7] Mark W. Spong, "Robot Dynamics and Control"