

비전기술에 의한 모바일 로봇의 정밀 자세 제어 알고리즘 개발에 관한 연구

A study on Development of Precise Orientation control Algorithm of the Mobile Robot Based Vision Technology

심현석*, 김태관**

Hyun-Seok Sim, Tae-Gwan Kim

〈Abstract〉

This study describe a new method to control posture and velocity for a wheeled mobile robot using visual feedback control method with a position based visual feedback. To slove the problem of vibration phenomena which were shown in the previous researches using a simple switching function based on a threshold, the proposed visual servo control law introduces the fusion function based on a blending function. The chattering problem and rapid motion of the mobile robot can be eliminated. And we consider the nonlinearity of the wheeled mobile robot unlike the previous visual servo control laws using linear control methods to improve the performances of the visual servo control law. The proposed posture control law using visual servoing is verified by a theoretical analysis and simulation and experimental results.

* 정회원, 교신저자, (주)동산테크
Email : hs8388@dscast.co.kr

* Corresponding Author, DongsanTech co., Ltd.

** 정회원, (주)티엔지

** Tngi co., Ltd

1. 서 론

로봇이 어떠한 환경에서든 자율주행을 하기 위해 현재 상태와 주변 환경을 파악하고 인지하는 것이 중요하므로 비전시스템, 초음파센서, 레이저 스캐너 등 다양한 센서를 사용하여 정확한 정보를 얻기 위해 끊임없는 노력을 하고 있다[4-5]. 그 중에서 비전시스템은 영상만으로 장애물 또는 목표물을 구별할 수 있고 거리정보도 획득할 수 있는 장점으로 인해 많은 관심을 받고 있다[6]. 실제로 영상 정보는 로봇의 동작을 제어하기 위한 궤환 출력으로 간주되어지며, 영상 정보기반의 로봇 제어는 위치기반 시각적 제어와 이미지기반 시각적 제어 방식으로 구분되어 사용되어 왔다[7-9].

위치기반제어는 3차원 공간 속에 존재하는 대상과 2차원 공간으로 사영된 영상과의 관계를 이용하여 제어 기법을 설계하는 방식이다. 이 과정에서 카메라의 내부 와 외부 매개 변수를 알고 있어야 하며 영상 왜곡으로 인한 불확실성을 정확히 보상해주어야 한다. 위치기반제어 특성상 이동로봇이 이동함에 따라 표적이 시야각에서 벗어날 수 있는 문제점이 있다. 위치기반제어는 항상 표적이 시야각 안에 있어야 하므로 시야각 이탈문제는 반드시 해결되어야할 문제이다[10].

반면에 카메라를 통한 제어방식은 외부매개 변수를 필요로 하지 않는다. 이미지기반 제어는 표적영상에서 획득한 특징 점 들이 영상위의 목표위치로 이동하게 함으로써 이동로봇을 제어하는 방식이다. 기존에 목표로 정해진 목표 점 좌표와 현재 얻어진 위치 좌표와의 오차를 최소화하기 위해 오차 정보가 입력에 바로 영향을 주는 방법이다.

하지만 여기엔 내부 계산과정상의 특이성문제가 발생하여 같은 작업을 반복할 경우가 생기고, 로봇에 대한 모델이 사용되지 않기 때문에 비효율적인 동작이 발생할 수 있다[11].

위 두 제어방식의 각각의 단점을 보완하기 위

해 최근에는 두 가지 방법을 혼합하여 사용하는 연구가 진행 중에 있다. 두 가지 시각적 제어방식을 일정한 경계를 기준으로 스위칭 하기도 하고 [12], 기존의 방식의 단점을 보완하기 위해 이미지를 이용하여 카메라를 패닝 및 틸팅하며 카메라 시야각을 조절한다[13].

하지만 패닝과 틸팅을 하기 위하여 추가적으로 장비를 장착하여야 하고 이 모델 또한 이동로봇 제어에 영향을 주기 때문에 보다 복잡한 알고리즘을 설계해야 한다. 한편, 기존 연구에서 사용된 위치기반제어 방식으로 비선형성을 평형점 부근에서 선형화 시킨 모델[14]을 바탕으로 안정화 제어를 적용하였다[15-16]. 하지만 이 경우 비선형 영역에서의 제어 기능에 한계를 가져올 수 있다는 문제점을 가지고 있기 때문에 이를 해결하기 위하여 새로운 연구가 필요하다.

2. 본론

2.1 이동로봇의 특징점 추출

본 논문에서는 비전 시스템을 사용하며 미리 정해진 인공적인 마커와 이동로봇간의 상대적 위치 및 자세를 추정한다.

이동로봇 제어를 위해 특징점 들의 좌표를 구해야 하는데 본 논문에서는 해리스 코너 검출기법[21]을 사용하여 특징점 들의 좌표를 구하였다. 레이블링을통해서도 특징점 들의 좌표를 구할 수 있지만 영상에 보이는 마커 형태에 따라 오차가 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 정확한 정보 획득을 위해 앞서 설명한 코너 검출 방법을 사용하였다[6].

2.2 운동학적 분석

2.2.1 정보 획득

레이블링을 통해 획득한 코너의 좌표 정보와 실제 마커의 크기, 그리고 카메라의 내부 변수들을 이용하여 외부변수, 즉 회전 행렬과 병진 행렬을 구하여 카메라와 마커에 대한 상대적 위치와 방향을 추정한다.

카메라의 내부 변수와 외부 변수를 추정하기 위해 카메라 캘리 브레이션(calibration)을 이용하고, 주로 실험에 사용하고 있는 핀홀카메라 모델의 특성을 이용하여 자세 추정을 한다[7,8].

그림 1는 3차원 공간상에서 마커와 카메라의 시점, 그리고 카메라의 센서(CCD)에 투영되는 2차원의 이미지를 나타내고 있다. 마커 상의 한 점의 좌표를 $P_w = [x_w, y_w, z_w]$, 이미지에 투영된 점의 좌표를 $P_c = [x_c, y_c]$ 값 라고 하면 이 점들은 다음과 같은 관계식을 갖는다[9].

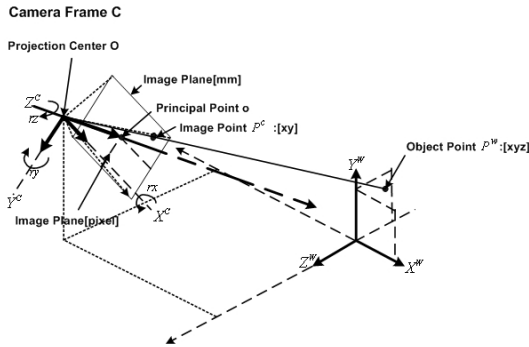


Fig. 1. camera model

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ 1 \end{bmatrix}^T = PM[X_w Y_w Z_w]^T \quad (1)$$

위 식 (1)은 3차원 공간상의 한 점이 2차원 이미지상에투영되는 것을 나타내며, 여기서

$$P = \begin{bmatrix} Asp \times f & s & x_c & 0 \\ 0 & f & y_c & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

이고, Asp는 카메라 CCD 센서의 중형비, s 는 CCD의 비틀림(skew) 계수지만 일반적으로 무시할 수 있다. 또한 M은 3차원 공간의 임의의점을 2차원 공간으로 투영시킨 것을 의미하고 x, y, z 축으로의 회전 변환 성분인 R과 역시 x, y, z 축으로의 병진 변환 성분인 T를 포함한 \times 행렬이다.

$$M = \begin{bmatrix} R_{(x,y,z)} & T_{(x,y,z)} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

위에서 $T = [t_x t_y t_z]$ 이고 회전변환 행렬인 R을 알고 있다는 가정하에 식 (4)에서 보여지는 것과 같이 x, y, z 축이 기준이 되는 오일러 각을 구할 수 있다[18].

$$\begin{aligned} r_x &= \alpha \tan 1 \left(\frac{-r_{32}}{\cos(r_y)}, \frac{r_{33}}{\cos(r_y)} \right) \\ r_y &= \sin^{-1}(r_{31}) \\ r_z &= \alpha \tan 2 \left(\frac{-r_{21}}{\cos(r_y)}, \frac{r_{11}}{\cos(r_y)} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

위에서 얻어진 회전 변환행렬, 병진 변환행렬과 카메라 캘리브레이션을 통하여 얻어진 내부, 외부 매개변수들의 관계로 부터 마커와 이동로봇의 상대적 위치정보를 얻을 수 있다[10].

2.2.2 로봇의 기구학

그림 5는 이동로봇의 기구학적 모델을 나타낸다. x, y 는 이동로봇의 위치를 나타내고 θ 는 자세 각이며 u_c 와 w_c 는 이동로봇의 선속도 및 각속도

를 나타낸다. 여기서 u_c 와 w_c 를 통해 이동로봇의 양바퀴의 속도값을 구할 수 있는데 식 (5)와 같은 관계식을 갖는다.

$$\begin{bmatrix} w_r \\ w_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{r} & \frac{l}{r} \\ \frac{1}{r} & -\frac{l}{r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_c \\ w_c \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서, r 은 바퀴의 반지름이고, l 은 양쪽 바퀴 사이의 거리를 나타낸다. 위의 그림 2와 같은 이동로봇의 기구학을 식 (6)과 같이 직교좌표계로 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{y}_c \\ \dot{\theta}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_c & 0 \\ \sin\theta_c & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_c \\ w_c \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서 임의의 제어를 통하여 u_c 와 w_c 입력 값을 결정하게 되고 이를 통해 이동로봇이 마커의 추종에 대한 안정화 제어를 한다.

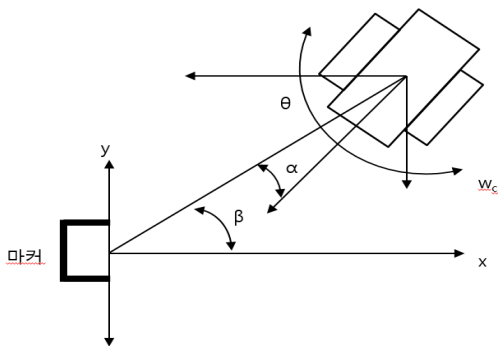


Fig. 2 Mobile robot kinematic model

2.3 제어기 설계

여기서 사용한 IBVS방식은 [8],[9]에서도 사용한 방식으로서, 이동로봇의 각속도와 선속도, 3차원공간상의 좌표를 각각 Ω, L, S 라 할 때

$$\begin{aligned} \Omega &= [w_x, w_y, w_z]^T \\ L &= [L_x, L_y, L_z]^T \\ S &= [x, y, z]^T \end{aligned} \quad (7)$$

와 같이 표현할 수 있으며, 또한 이동로봇의 좌표 변화량에 대한 관계식이 다음과 같이 성립된다 [11].

$$\dot{S} = \Omega * S + L \quad (8)$$

이때

$$\dot{S} = -K_w S + L \quad (9)$$

처럼 각속도 벡터와 카메라의 좌표 벡터의 외적 계산을 K_w 와 같이 가정한다.

$$K_w = \begin{bmatrix} 0 & -z & y \\ z & 0 & -x \\ -y & x & 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

여기서 2차원으로 사영된 좌표의 위치를 3차원 좌표계와의 관계식으로 표현하기 위해 임의로 2차원으로 사영된 좌표를

$$f = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \frac{\bar{\alpha}}{z} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (10)$$

여기서 $\bar{\alpha}$ 는 초점거리를 나타낸다. 다음과 같이 식 (10)을 미분하면 좌표의 변화량을 알 수 있다.

$$\dot{f} = [\dot{u}, \dot{v}]^T \quad (11)$$

또한 선속도와 각속도 벡터를 $U_r = [v \ w]^T$ 와 같이 나타낼 수 있고, 좌표의 변화량과 속도 벡터의 관계행렬을 자코비안 J 로 정의한다.

$$\dot{f} = J U_r \quad (12)$$

여기서 J 의 역행렬을 알면 위치변화에 따른 원하는 속도벡터 U_r 을 얻을 수 있다.

하지만 J 의 경우 정방행렬이 아니므로 역행렬이 존재하지 않는다. 따라서 임의로 역행렬을 만들기 위해 Moore-Penrose 유사역행렬을 사용한다. 즉, 다음과 같은 J 의 유사역행렬을 구할 수 있고, J^+ 라 표기한다[12].

$$J^+ = (J^T J)^{-1} J^T \quad (13)$$

또한 원하는 좌표로의 이동을 하기 위해 다음과 같이 오차를 표현한다.

$$f_e = f_d - f_c \quad (14)$$

여기서 f_d 는 목표하는 지점의 표적의 좌표위치이고 f_c 는 현재 상태의 표적의 좌표위치이다.

위와 같이 두 좌표의 위치가 같은 값을 가지도록 제어한다. 식 (12)을 J^+ 의 역행렬을 통해 U_r 을 정리하면

$$U_r = J^+ \dot{f}_c \quad (15)$$

가 되고, \dot{f}_c 은 식 (14)와 같이 오차 변수를 정의한 후 미분을 통해 얻을 수 있고, 또한 $\dot{f}_c = -K_p f_e$ 를 얻기 위해서는

$$\dot{f}_c = \dot{f}_d + K_p (f_d - f_c) \quad (16)$$

이 되어야 한다. 식 (16)를 식 (15)에 대입하면 \dot{f}_d 은 일정한 목표 좌표의 변화량으로서 0이므로

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_i \\ \dot{w}_i \end{bmatrix} = J^+ K_p f_e \quad (17)$$

으로 쓸 수 있고 이는 P 제어기 형태가 된다.

안정성 판별을 하기 위하여 다음과 같은 Lyapunov 함수를 가정한다.

$$V(\alpha, \beta) = \frac{1}{2} \alpha^2 + \frac{1}{2} \beta^2 \quad (18)$$

V 를 미분하면 다음과 같다.

$$\dot{V} = \alpha \dot{\alpha} + \beta \dot{\beta} \quad (19)$$

식 $\dot{\alpha}$ 와 $\dot{\beta}$ 를 식 (19)에 대입 하였을 때

$$\dot{V} = \alpha \left(\frac{\sin \alpha}{\rho} v_p - w_p \right) + \beta \left(\frac{\sin \alpha}{\rho} v_p \right) \quad (20)$$

되고, 식 (20)에 대입하며,

$$\dot{V} = \alpha \left(-\gamma \frac{\beta \sin \alpha}{\alpha} - k \gamma \alpha \right) + \beta \gamma \sin \alpha \quad (21)$$

이 되고, 전개하면

$$\dot{V} = -k \gamma \alpha^2 \quad (22)$$

된다, 여기서 γ, k 가 모두 양수이기 때문에 \dot{V} 은 음한정함수가 된다. 여기서 $t \rightarrow \infty$ 일 때 α 가 0으로 수렴함을 확인 할 수 있다. 다시 v_p 와 w_p 를 사용해 다시 정리하면

$$\dot{\rho} = -\cos\alpha\gamma\rho \quad (23)$$

$$\dot{\alpha} = -\gamma\left(\frac{\sin\alpha}{\alpha}\beta + k\alpha\right)$$

$$\dot{\beta} = \sin\alpha\gamma$$

이 되고, 여기서 α 가 0으로 수렴되므로 $\dot{\alpha} = -\gamma\beta$ 이기 때문에 Barbalat 보조정리를 적용하면 결국 $t \rightarrow \infty$ 일 때 $\dot{\alpha} = -\gamma\beta = 0$ 되어야 한다. 여기서 γ 는 상수 값이기 때문에

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \beta = 0 \quad (36)$$

이다. 또한 $\dot{\rho} = -\cos\alpha\gamma\rho$ 에서도 α 가 0으로 수렴 할 때 $\cos\alpha > 0$ 인 관계가 성립하므로 $\dot{\rho} = -\gamma\rho$ 가 되며, $\rho > 0$ 이고, γ 는 양의 상수이므로 ρ 는 0으로 수렴함을 알 수 있다.

결과를 정리하면 $t \rightarrow \infty$ 일 때 ρ, α, β 모두 0으로 수렴한다는 것을 알 수 있으므로 이동로봇이 목표 지점으로 이동하는데 있어 안정성이 보장된다.

본 논문에서는 제어기 혼합을 이용한다. 실시간으로 선속도 값과 각속도 값을 각각 구하여 다음과 같이 혼합하여 제안한다.

$$\begin{aligned} v &= (1-v)v_i + uv_p \\ \omega &= (1-v)\omega_i + v\omega_p \end{aligned} \quad (37)$$

여기서 v_i, ω_i 는 선속도와 각속도 값이고, v_p, ω_p 는 선속도와 각속도 값이다. 여기서 혼합 함수인 u 는 다음과 같이 하이퍼볼릭 탄젠트 값에 의하여 조절한다.

$$\begin{aligned} v(f_x, d) &= \frac{1}{2} \tanh\left(\frac{f_x - I_s}{d} \pi\right) \\ &+ \tanh\left(\frac{f_w - i_s - f_x}{d} \pi\right) \end{aligned} \quad (38)$$

혼합 함수는 영상에서 인식한 마커 중심점의 x 좌표를 기반으로 얻을 수 있다. 식 (38)에서 f_s 의 값은 마커의 x 좌표이고, f_w 는 영상의 x 축 최대 해상도이다. 또한 I_s 는 각각의 제어기를 혼합이 이뤄지기 위해 선택된 분할 지점 이며, d 는 I_s 주변에 혼합되는 범위를 나타낸다.

3. 실험 결과

3.1 모의 결과

본 절에서는 모의실험을 통해 제안한 제어기의 타당성을 보인다. 모의실험에서는 비선형 자세 제어를 적용하여 최단 거리로 수렴함을 보이고 본 논문에서 제안한 자세 제어기의 성능을 확인하기 위하여 다른 방법의 비선형 제어기(20)과 선형 제어기 (14-16)을 비교하였다. 그림 3을 통하여 제어기 각각의 성능을 비교한 결과 본 논문에서 제안한 제어기가 다른 제어기들보다 카메라 시야각과 목표지점으로의 입사각을 고려한 이동을 하는데 있어 나은 성능을 보임을 확인 하였다. y 축의 값이 x 축에 관하여 빨리 수렴 할수록 입사각에 대한 성능 측면으로 볼 때 안정하다.

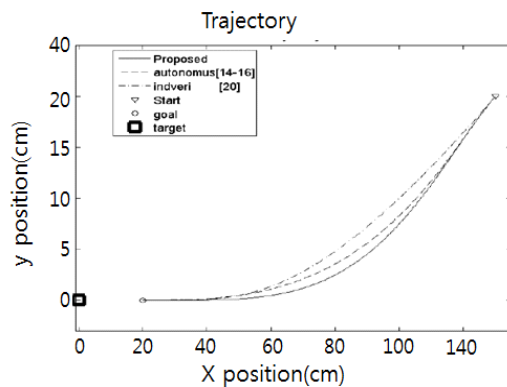


Fig. 3 The performance of the proposed posture controller and other controllers

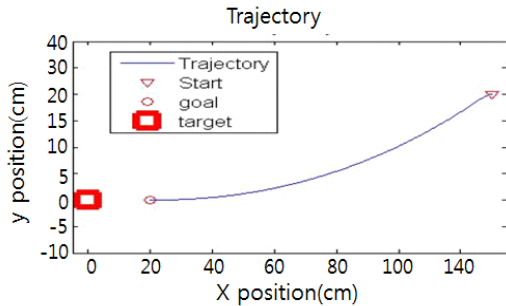


Fig. 4 According to trajectory angle

지금까지 모의실험을 할 때 로봇의 입사각은 $\theta_d = 0^\circ$ 이다. 하지만 위와 같은 고정된 2차원 좌표계에서 보면 입사각 160° 가 되어야 한다. 모의 실험에서 도착 각도가 160° 로 설정될 경우 그림 4(a)와 같은 큰 궤적을 그리며 이동하는 상황이 발생할 수 있는데 이것은 이동로봇의 목표점으로 수렴은 가능하지만 실제 영상 기반 이동로봇에 적용하기 힘들다.

본 논문에서는 자세 안정화 제어를 실제 이동로봇에 적용 가능하도록 다음과 같은 조건을 추가하였다. 위치 y축 좌표 값 y_p 를 기준으로 $y_p \geq 0$ 일 때 $\theta_d = -160^\circ$, $y_p < 0$ 일 때 $\theta_d = 160^\circ$ 로 설정한다. 위와 같이 설정을 하면 그림 4(b)와 같은 결과를 얻을 수 있다.

3.1 실험 결과

이동로봇의 상대적 관계를 추정하기 위해 본 논문에서는 그림 5와 같이 마커를 흰 바탕에 가로 6cm, 세로 10.5cm 크기이고, 두께 3cm의 검정색 테두리를 가진 사각형으로 설정하였다. 이 마커에는 그림 8에서 보는 것과 같이 각 4개의 외부 특징점과 내부 특징점을 가진다.

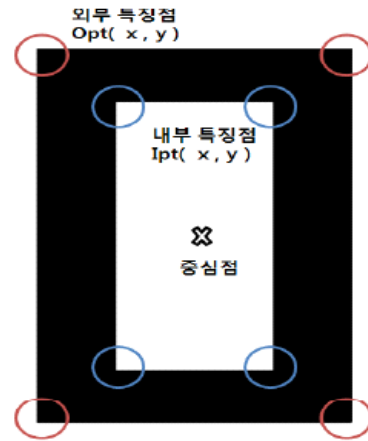
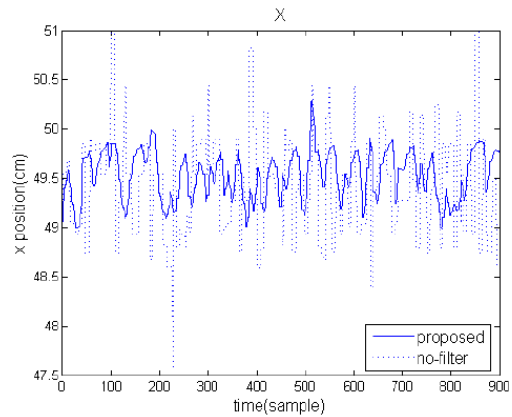
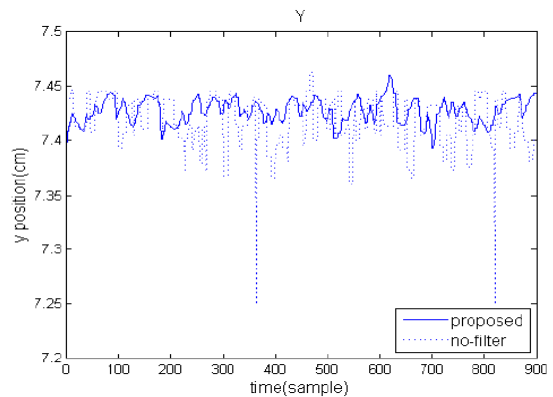


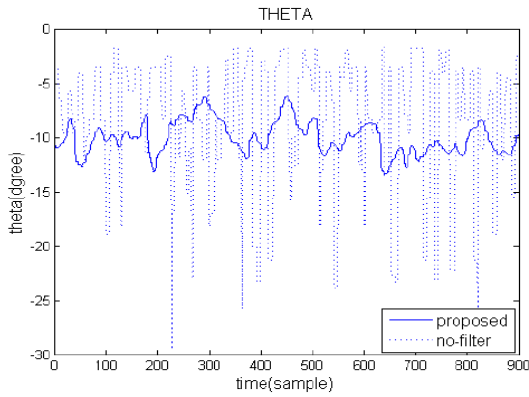
Fig. 5 Marker for relative location and estimation



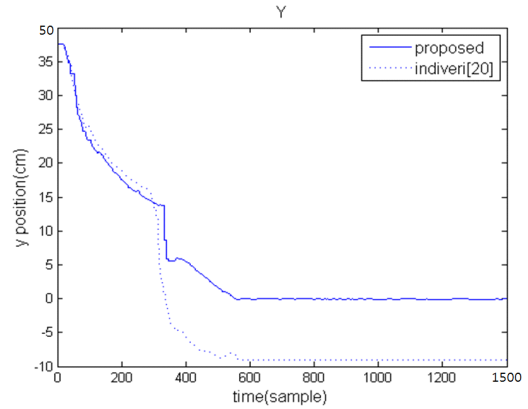
(a) x축 거리 추정



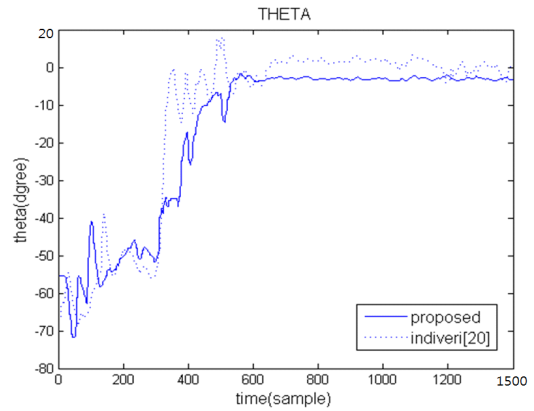
(b) y축 거리 추정



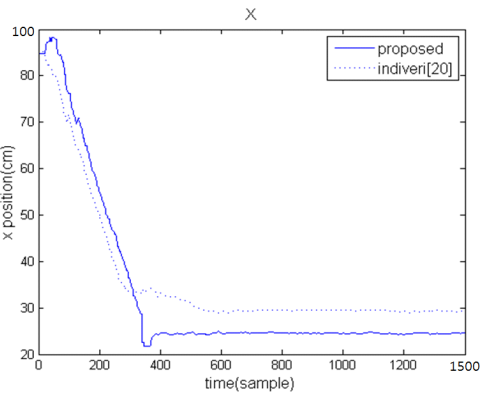
(c) θ 추정



(b) y축



(c) θ 축



(a) x축

Fig. 6 Estimation of the location and angle

Fig. 7 Experimental results

본 논문에서는 위치 추정 시 생길 수 있는 카메라의 오차보상을 위해 칼만필터 사용을 제안하였다. 실제 위치 x축으로 49cm, y축으로 7cm 상의 거리서 측정한 결과 그림 9를 통해 알 수 있듯이 칼만필터를 사용하여 영상정보로부터 위치를 추정한 결과가 필터를 사용하지 않은 결과 보다 정확하였다.

그림 7은 3차원 공간에서 로봇의 현재 상태를 x축,y축, θ 축을 기준으로 표시한 것으로 모의실험과 유사한 결과를 얻을 수 있으며, 두 제어기 모두 이동로봇이 목표점으로 수렴해 가는 것을 알 수 있다.

본 논문에서 제안한 자세 제어가 다른 비선형 제어기 보다 더 좋은 결과를 얻은 것을 볼 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 보다 정밀하고 향상된 성능을 보이기 위해 견실한 제어기법을 사용한 영상 피드백 제어 기법을 제안하였다. 이를 위하여 목표점

에 미리 정해진 인공의 마커를 설치하고 비전 카메라로부터 특징점을 찾아 검출하는 알고리즘을 사용하였고 검출된 결과를 이용해 마커와 이동로봇의 상대적인 위치와 자세정보를 추정한 후 추정 오차를 보완하기 위해 이미지기반 제어방법을 사용한 제어 방법을 제안하였다. 위치기반 비주얼 서보제어의 문제점인 카메라 시야각에서 벗어날 수 있는 단점을 해결하기 위한 위치기반 비주얼 서보제어와 이미지기반 비주얼 피드백제어방법을 결합한 방법을 사용하였고, 표적으로의 위치와 진입각을 고려하기 위하여 특정한 자세로의 비선형 안정화 제어기를 사용하였다. 모의실험을 통해 제시된 제어기의 안정성 검증과 성능 향상을 보일 뿐만 아니라, 이를 실제 로봇 실험에 적용하여 알고리즘의 성능을 검증하였다.

참고문헌

- 1) P. I. Corke and S. A. Hutchinson, "A new hybrid image-based visual servo control scheme," IEEE Conf. Decision and Control, vol. 3, pp. 2521-2526, Dec. 2000
- 2) A.H. Aabdul Hafez, E. Cervera and C. V. Jawahar, "Hybrid Visual Servoing by Boosting IBVS and PBVS," Information and Communication Technologies: From Theory to Applications, pp. 1-6, Apr. 2008.
- 3) Y. Wang, H. Lang, C. W. de Silva, "A Hybrid Visual Servo Controller for Robust Grasping by Wheeled Mobile Robots," IEEE/ASME Trans. Mechatronics, vol. 15, no. 5, pp. 757-769, 2010.
- 4) E. Malis, "Visual servoing invariant to changes in camera-intrinsic parameters," IEEE Trans. Robotics and Automation Magazine, vol 20, no. 1, pp. 72-81, Feb. 2004.
- 5) F. Chaumette and S. Hutchinson, "Visual servo Control Part II:Advanced approaches[tutorial]," IEEE Trans. Robotics and Automation Magazine, vol 14, no. 1, pp. 109-118, Mar. 2007.
- 6) F. Chaumette and S. Hutchinson, "Visual servo Control Part I:Basic approaches," IEEE Trans. Robotics and Automation Magazine, vol. 13, no. 4, pp, 82-90, Dec. 2006.
- 7) R. Cassinis, F. Tampalini, P. Bartolini and R.Fedrigotti, "Docking and charging system for autonomous mobile robots," Technical report, Universita degli Studi di Brescia, 2005.
- 8) 나두영, 김용태, "모듈형 로봇의 자가 결합을 위한 퍼지 주행제어 및 장애물 회피제어," 한국지능시스템학회 논문지, 제19권, 제 4호, pp. 470-477, 2009.
- 9) Z. Jiang and R. Ordonez. "On-line robust trajectory generation on approach and landing for reusable launch vehicles," Automatica, vol. 45, no. 7, pp.1668-1678, 2009.
- 10) B. Jung and G. S. Sukhatme, "Tracking multiple moving targets using a camera and laser rangefinder," Institute for Robotics and Intelligent Systems Technical Report IRIS-01-397, University of Southern California, 2001.

- 11) M. Kim, H. W. Kim, and N. Y. Chong, "automated robot docking using direction sensing RFID," Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 4588-4593, Apr. 2007.
- 12) A.K.Das, R. Fierro, V. Kumar, J.P.Ostrowski, J. Spletzer, and C. J. Taylor, "A vision-based formation control framework," IEEE Trans. Robotics and Automation, vol 18, no. 5, pp. 813-825, Oct. 2002.
- 13) K.G. Derpanis, "The Harris Corner Detector", Technical Report, York University, Oct. 2004.
- 14) D. Chwa, S. K. Hong and B. Song, "Robust posture stabilization of wheeled mobile robots in polar coordinates", The 17th International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems, pp. 343-348, Jul. 2006.
- 15) J. M. Toibero, C. M. Soria, F. Roberti, R. Carelli, P. Carelli, "Switching visual servoing approach for stable corridor navigation," Int. Conf. Advanced Robotics, pp. 1-6, Jun. 2009.
- 16) M. S. Park, J. W. Kwon, J. S. Kin, S. K. Hong, "Experimental Study on Camera Calibration and Pose Estimation for the Application to Vehicle's Wheel Alignment," Int. Joint Conf. SICE-ICASE, pp. 2952-2957, Oct. 2006.