논 문
60P-2-3

이동 로봇의 비젼 기반 제어

Vision Based Mobile Robot Control

김 진 환†
(Jin-Hwan Kim)

Abstract - This paper presents the mobile robot control based on vision system. The proposed vision based controller consist of the camera tracking controller and the formation controller. Th e camera controller has the adaptive gain based on IBVS. The formation controller which is designed in the sense of the Lyapunov stability follows the leader. Simluation results show that the proposed vision based mobile robot control is validated for indoor mobile robot applications.

Key Words : IBVS, Formation, Mobile Robot

1. 서 론

이동 로봇은 최근 산업 유발 효과를 높일 수 있는 서비스 분야에서 많이 활용되고 있다. 서비스 분야에 적용되는 로봇으로 의료용 로봇, 가사용 로봇 및 엔터테인먼트용 로봇 등이 있는데 대부분 공통된 로봇의 임무는 도우미 기능을 지원하여 정해진 목표 지점(target position)으로 이동하거나 또는 목표물(target object)을 추종하는 것이다. 이를 위해 주행 성능이 뒷받침되어야 하며 물체 인식 등의 기능을 요구한다. 초창기 로봇의 센서는 가격이 저렴하고 구성이 간편한 초음파 센서 또는 PSD 센서를 주로 사용하였다. 그러나 이러한 센서들은 제한된 범위내의 거리 감지는 가능하지만 물체 인식과 같은 응용 분야에는 활용될 수 없다.

최근 카메라 기반 비젼 센서의 가격이 낮아지고 제어기와의 인터페이스도 간편화되고 있어서 로봇 분야에 비젼 센서의 활용도가 높아지고 있다[1-3]. 로봇의 센서로 비젼 센서를 활용할 경우 주행을 위한 피드백 센서로의 활용과 물체 인식도 가능하여 로봇의 적용 분야를 더욱 다양화 할 수 있다. 특히, 비젼 기반의 로봇 시스템은 다양한 동적 환경에서 비정형적인 움직임을 갖는 물체를 추종함(tracking)과 동시에 장애물(obstacle) 회피 기능도 가능하여 서비스 분야에 적용하기에 적합하다. 비젼 시스템은 주로 움직이는 물체를 추종하는 비쥬얼 서보잉(visual servoing)의 관점에서 발전을 이루어왔고 주로 산업용 로봇의 매니플레이터(manipulator) 조작 등에 적용되어 왔다[4,5]. 이러한 비젼 시스템을 서비스 분야의 이동 로봇에 적용할 때 인식기능을 바탕으로 다양한 목적으로 활용이 가능하다.

본 논문에서는 비젼 기반의 이동 로봇 제어를 통해 서비스 분야에서 다양한 용도로 활용이 가능한 로봇 제어기 설계에 목표를 두고 있다. 물체를 카메라 시스템으로 추종하기 위해 게인 튜닝에 의한 IBVS(Image Based Visual Servoing) 카메라 추종 제어기를 설계하며 카메라 시스템으로부터 물체의 위치를 취득하여 물체와 일정한 대형(formation)으로 추종하기 위해 리더-추종자 접근방식(leader-follwer approach)으로 로봇의 백스테핑 제어기(backstepping controller)를 설계한다. 모의 실험을 통해 카메라 추종 성능과 카메라 시스템으로부터 취득한 리더의 위치를 가지고 이동 로봇의 대형 제어 결과를 확인하도록 한다.

† 교신저자, 정회원 : 인하공업전문대학 전기정보과 교수・공박
E-mail: jhkim@inhatc.ac.kr
접수일자 : 2011년 1월 31일
최종완료 : 2011년 3월 12일

2. 비젼 시스템

비젼 시스템으로 물체를 추종하여 위치를 얻기 위해 이동 로봇과 카메라 시스템간의 좌표 변환이 필요하다. 이러한 관계는 그림 1에 나타나 있다. 단순화를 위해 그림 1에서 이동 로봇의 좌표는 실세계 좌표가 같고 이동 로봇과 카메라는 같은 프레임에 놓이고 자세에 대해서만 x축으로 90^o 회전한다. 이동 로봇의 좌표와 카메라 좌표는 식(1)과 같다.

$$P = RP^c + O \tag{1}$$

여기서 $P=(x,y,z)$는 실세계 좌표, 즉 이동 로봇 좌표이고 $P^c=(x_c,y_c,z_c)$는 카메라 좌표이다. R은 회전 행렬이고 O는 이동 로봇과 카메라 시스템의 원점 변환값이다

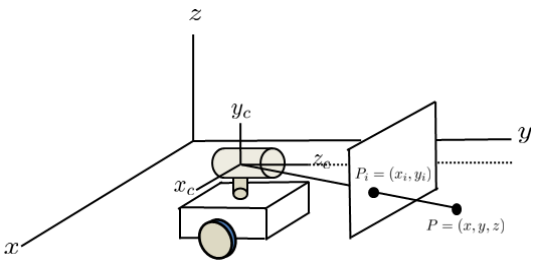

그림 1 이동 로봇과 카메라 좌표
Fig. 1 Mobile robot and camera coordinate

카메라에 물체가 투영되는 이미지 프레임(image frame)에서의 2차원 좌표를 (x_i, y_i)라 할 때 카메라 좌표와 이미지 좌표의 관계는 식(2)와 같다[6].

$$x_c = \frac{x_i z_c}{\lambda_c}, \quad y_c = -\frac{y_i z_c}{\lambda_c} \tag{2}$$

여기서 λ_c는 카메라의 초점거리(focal length)이다.

카메라 시스템의 물체 이미지 오차 e_i를 식(3)와 같이 정의한다[6].

$$e_i = s - s^* \tag{3}$$

여기서 s는 카메라의 중심 이미지이고 s^*는 목표물 이미지로서 s가 s^*와 같아질 때 목표물이 카메라 이미지의 중심에 잡히도록 물체를 추적한다. 이를 위해 이미지 오차인 $\dot{e}$와 카메라 속도와의 관계는 식(4)와 같다[6].

$$\dot{e}_i = L\xi \tag{4}$$

여기서 $\xi = [v_x\ v_y\ v_z\ \omega_x\ \omega_y\ \omega_z]^T$는 카메라의 선속도 성분과 회전 각속도 성분이고 L은 상호 관계(interaction) 행렬로서 카메라 이미지와 카메라 선속도 및 회전 각속도간의 관계를 삼각함수로 구하는 것으로 식(6)과 같다[6].

$$L = \begin{bmatrix} \frac{\lambda}{z_c} & 0 & -\frac{x_i}{z_c} & -\frac{x_i y_i}{\lambda} & \frac{\lambda^2 + x_i^2}{\lambda} & -x_i \\ 0 & \frac{\lambda}{z_c} & -\frac{y_i}{z_c} & -\frac{\lambda^2 + y_i^2}{\lambda} & \frac{x_i y_i}{\lambda} & x_i \end{bmatrix} \tag{5}$$

결국 식(5)에서 $\dot{e} \to 0$가 되도록 하기 위해 리야프노프 안정도 관점에서 $\dot{e} = -ke$의 관계로부터 식(6)을 구할 수 있다[6].

$$\xi = -k_c \hat{L}^+ e_i \tag{6}$$

여기서 $\hat{L}^+$은 $\hat{L}^+ = (L^T L)^{-1} L^T$의 관계를 가지는 준(pseudo) 역행렬이고 k_c는 IBVS 게인이며 이미지 오차 e_i가 커지면 k_c를 크게 하고 e_i가 작아지면 $k_c \to 1$로 하기 위해 식(7)과 같이 설정한다.

$$k_c = \mathrm{sat}(e^{\alpha |e_i|}, \mathrm{MAX}) \tag{7}$$

여기서 α에 따라 e_i에 비례하는 k_c 증감 정도를 정할 수 있는 파라미터이고, k_c의 최대값은 MAX를 한다.

3. 이동로봇

3.1 이동로봇 모델링

이동로봇의 모델링은 기구학과 동역학으로 구성된다[7]. 모델링을 위해 로봇의 좌표는 식(8)과 같이 2차원 카테시안(cartesian) 좌표계에서 3자유도를 갖는다. 그림 2에 이동로봇이 나타나 있다.

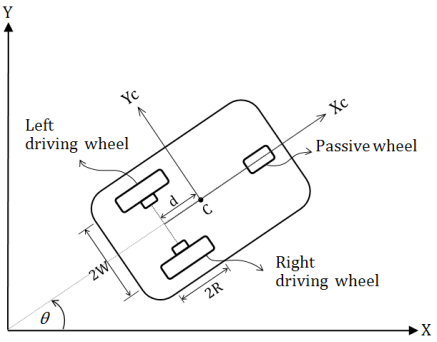

그림 2 카테시안 좌표계에서의 이동로봇
Fig. 2 Mobile robot on cartesian coordinate

$$q = [x\ \ y\ \ \theta]^T \tag{8}$$

여기서 (x, y)는 로봇의 기준 좌표계에서 위치이고 θ는 로봇의 이동 방향을 나타낸다. 로봇의 경로는 $(x(t), y(t))$의 전체 궤적이 로봇의 경로로 표현되고 $(\dot{x}, \dot{y})$가 존재한다면 $\theta = \tan^{-1}(\dot{y}/\dot{x})$로 정의된다.

이동로봇의 움직임은 선속도(linear velocity)와 회전속도(rotational velocity)에 의해 결정되고 식(9)의 기구학 모델로 정의된다.

$$\dot{q} = S(q)\nu(t) \tag{9}$$

$$S(q) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -d\sin\theta \\ \sin\theta & d\cos\theta \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{10}$$

여기서 $S(q)$는 자코비안(jacobian) 행렬이고 $\nu(t) = [v\ \ \omega]^T$이며 v와 ω는 각각 로봇의 선속도와 회전속도이다.

이동로봇이 동역학 모델은 식(11)과 같다[7].

$$M(q)\ddot{q} + V_m(q,\dot{q})\dot{q} + F(\dot{q}) + G(q) + \tau_d = B(q)\tau - A^T(q)\lambda \tag{11}$$

여기서 $M(q), V_m(q,\dot{q}), F(\dot{q}), G(q), \tau_d, B(q), \tau, A(q)$와 λ는 각각 로봇의 질량, 전향력, 마찰력, 중력, 외란, 입력, 제한조건과 구속력에 대한 행렬 또는 벡터이다.

식(9)를 미분하여 식(11)에 대입하여 S^T를 곱해주고 $S^T(q)A^T(q) = 0$를 이용하면 식(12)와 같이 정리되고 마찰력과 외란을 무시하면 식(13)의 토크입력을 구할 수 있다[7].

$$\bar{M}(q)\dot{\nu} + \bar{V_m}(q,\dot{q})\nu + \bar{F}(\dot{q}) + \bar{\tau_d} = \bar{B}\tau \tag{12}$$

$$\tau = \bar{B}^{-1}\left(\bar{M}(q)\dot{\nu} + \bar{V}_m(q,\dot{q})\nu\right) \tag{13}$$

여기서 $\nu = [v, \omega]^T$, $\bar{M} = S^T M S$, $\bar{V}_m = S^T(M\dot{S} + V_m S)$, $\bar{F} = S^T F$, $\bar{\tau}_d = S^T \tau$이고 $\bar{B} = S^T B$. v와 ω은 모바일 로봇의 선속도와 회전속도이다.

3.2 이동로봇 제어기

비전 기반 제어는 물체를 추종하기 위해 일정한 대형을 유지

하는 리더-추종자 형태를 가진다. 따라서 이동로봇은 카메라로부터 물체의 위치를 취득하여 일정한 대형을 유지하여 움직이게 된다. 그림 3에 보이는 바와 같이 이동로봇의 대형위치 및 자세는 식(14)와 같이 정의하고 이동로봇의 대형위 치 및 자세 오차식 e는 식(15)와 같다.

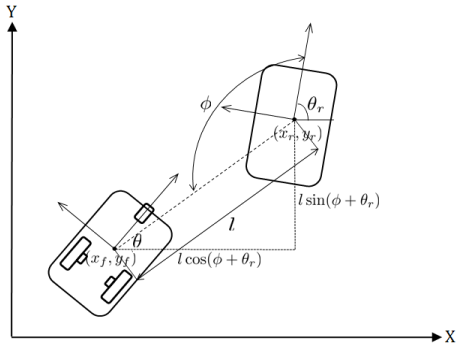

그림 3 리더와 이동로봇의 대형

Fig. 3 formation between leader and mobile robot

$$\begin{cases} x_f = x_r + l\cos(\phi+\theta_r) \\ y_f = y_r + l\sin(\phi+\theta_r) \\ \theta_f = \theta_r \end{cases} \tag{14}$$

$$e = \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \theta_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_f - x \\ y_f - y \\ \theta_f - \theta \end{bmatrix} \tag{15}$$

여기서 $(x_f\ y_f\ \theta_f)$, $(x_r\ y_r\ \theta_r)$, θ, l와 ϕ는 각각 이동로봇의 대형위치 및 자세, 목표물체의 위치 및 자세, 이동로봇의 자세, 목표물체와 이동로봇의 거리와 목표물체와 이동로봇의 대형자세이다.

$$\dot{e} = \begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \\ \dot{\theta}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_e\omega - v + v_r\cos\theta_e - l\sin(\phi+\theta_e)\omega_r \\ -x_e\omega + v_r\sin\theta_e + l\cos(\phi+\theta_e)\omega_r \\ \omega_r - \omega \end{bmatrix} \tag{16}$$

여기서 v_r과 ω_r은 목표물체의 선속도와 각속도이다.

정리) 이동로봇의 선속도와 회전속도가 식(17)의 제어입력을 가지고 K_x, K_y, K_θ가 양수일 때 $\lim_{t\to\infty} e(t) \to 0$을 만족하며 점근적으로 안정하다.

$$\begin{bmatrix} v_c \\ \omega_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_r\cos\theta_e + K_x x_e \\ \omega_r - K_y v_r y_e + K_\theta v_r \sin\theta_e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -l\sin(\phi+\theta_e)\omega_r + \dfrac{y_e}{x_e + e^{-x_e}} l\cos(\phi+\theta_e)\omega_r \\ 0 \end{bmatrix} \tag{17}$$

증명. 다음과 같은 양한정(positive definite) 리야프노프 함수를 정의한다[8].

$$V = \frac{1}{2}(x_e^2 + y_e^2) + (1-\cos\theta_e)/K_y \tag{18}$$

여기서 $\dot{V}$를 구하고 식(16)을 대입하면 식(19)와 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= x_e\dot{x}_e + y_e\dot{y}_e + \sin\theta_e/K_y \\ &= -x_e v + x_e v_r\cos\theta_e - x_e l\sin(\phi+\theta_e)\omega_r \\ &\quad + y_e v_r\sin\theta_e + y_e l\cos(\phi+\theta_e)\omega_r + \sin\theta_e(\omega_r - \omega)/K_y \end{aligned} \tag{19}$$

여기서 식(19)의 (v, ω)에 식(17)의 (v_c, ω_c)를 대입하면 식(20)과 정리되고

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -K_x x_e^2 - v_r\frac{K_\theta}{K_y} sin\theta_e^2 + y_e l\cos(\phi+\theta_e)\omega_r \\ &\quad - \frac{x_e y_e}{x_e + e^{-x_e}} l\cos(\phi+\theta_e)\omega_r \end{aligned} \tag{20}$$

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -K_x x_e^2 - v_r\frac{K_\theta}{K_y} sin\theta_e^2 + y_e l\cos(\phi+\theta_e)\omega_r \\ &\quad - \frac{x_e y_e}{x_e + 1} l\cos(\phi+\theta_e)\omega_r \end{aligned} \tag{21}$$

여기서 $\lim_{t\to\infty} x_e \to 0$에 따라 $\dot{V} \le 0$ 이 되고 리야프노프 안정도를 만족한다.

4. 모의실험

모의 실험을 통해 목표물에 대한 카메라 추종 성능과 리더를 카메라로 추종하여 리더의 위치를 취득하여 이동 로봇이 리더를 잘 추종하는지 확인하도록 한다.

그림 4와 그림 5는 목표물이 움직이면 카메라로 추종하여 목표물의 이동 위치를 궤적으로 나타낸 것이다. 카메라 시스템이 목표물을 추종하는지 보도록 한다. 그림 4는 식(7)에서 카메라 추종 게인인 k_c의 변화에 따른 카메라 추종 성능을 보여준다. k_c값이 커짐에 따라 카메라 추종 결과가 개선되지만 최적의 k_c는 알 수 없다. 오히려 큰 k_c는 카메라 추종 결과가 발산하여 불안정해질 수 있다. 따라서 식(7)의 k_c을 이미지 오차 e_i에 비례하여 일정한 상한 값을 주게 되면 안정된 결과를 얻을 수 있다. 그림 5는 식(7)에서 $\alpha = 5$로 하였을

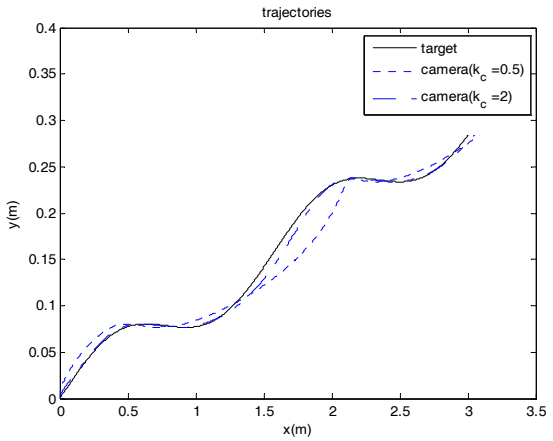

그림 4 k_c에 따른 카메라 추종

Fig. 4 Camera tracking with k_c

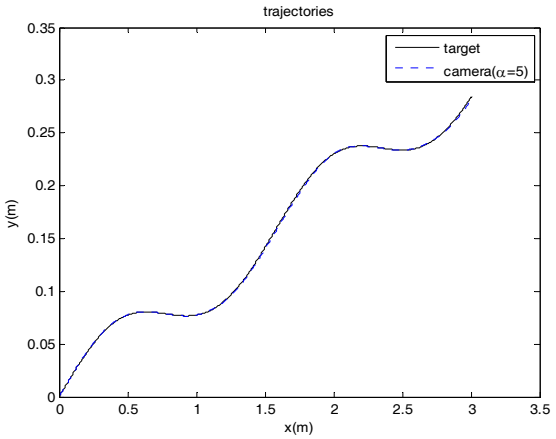

그림 5 k_c 튜닝에 따른 카메라 추종

Fig. 5 Camera tracking with k_c tuning

때의 추종 결과이다. 목표물의 이동 경로를 제대로 추종함을 알 수 있다. α에 따라 초기 카메라 추종 성능에 영향을 줄 수 있지만 큰 차이를 보이지는 않기 때문에 임의의 적당한 값으로 설정할 수 있다.

다음으로 대형 제어 결과를 보도록 한다. 그림 6은 식(17)을 적용하여 일정한 대형을 유지하여 직진하는 리더를 추종하는 2대의 로봇을 보여주고 있다. 리더에 대해 로봇 1은 식(14)에 대해 $(l=1(m), \phi=60^o)$의 대형을 유지하며 로봇 2는 $(l=1(m), \phi=-120^o)$의 대형을 유지하여 리더를 안정되게 추종함을 보이고 있다. 그림 6의 결과로부터 식(17)의 대형 제어기의 성능이 안정됨을 확인할 수 있다.

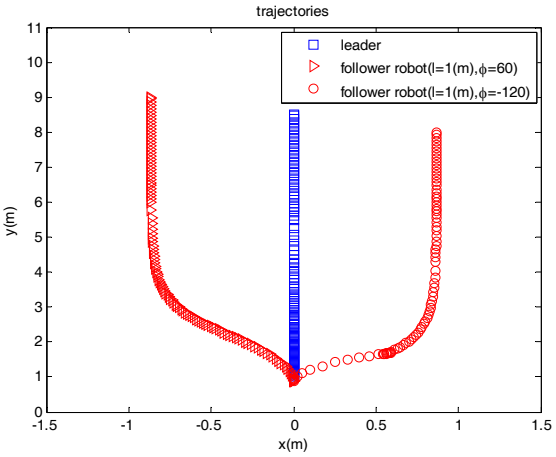

그림 6 직진하는 리더에 대한 대형 제어

Fig. 6 Formation control for the straight motioned leader

그림 7과 그림 8은 카메라 추종으로 리더의 위치를 취득하여 대형 제어를 보여주는 결과이다. 그림 7은 리더가 지그재그로 움직일 때 카메라로 추종하여 위치를 취득하고 대형을 유지하면서 리더를 추종하는 결과를 보여주고 있다. 식(7)의 카메라 추종 파라미터 설정으로 $\alpha=10$, 이동 로봇의 대형으로 $l=0.5(m)$, $\phi=120^o$, 식(17)의 로봇의 기구학 제어기 게인으로 $K_x=4$ $K_y=8$, $K_\theta=4$을 설정하였다. (K_x, K_y, K_θ)의 설정 변화에 따른 이동 로봇의 경로 추종 성능에는 큰 차이를 보이지 않는다. 그림 8은 리더가 곡선의 궤적으로 움직일 때 주어진 대형대로 로봇이 추종하는 결과를 보여주고 있다. 그림 7과 같은 파라미터를 설정하였고 대형 유지에서 $\phi=90^o$로 하여 리더가 이동하는 곡률 경로의 안쪽으로 추종하는 결과를 보이고 있다.

결론적으로 그림 4와 그림 5로부터의 제안한 카메라 추종 제어기의 안정된 성능을 확인할 수 있고 그림 6으로부터 대형 제어기의 성능을 확인할 수 있다. 그리고 카메라 추종으로부터 리더의 위치를 취득하여 안정된 대형 제어가 이루어짐을 그림 7과 그림 8로부터 확인할 수 있다.

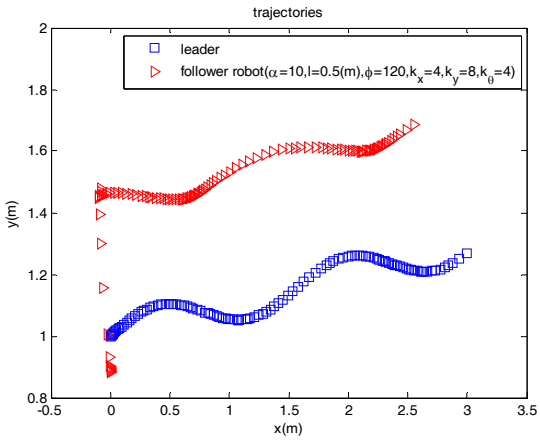

그림 7 비젼 기반 대형 제어 : 지그재그 경로 $(\alpha=10, l=0.5(m), \phi=120^o, K_x=4, K_y=8, K_\theta=4)$

Fig. 7 Vision based formation control : zig-zag path $(\alpha=10, l=0.5(m), \phi=120^o, K_x=4, K_y=8, K_\theta=4)$

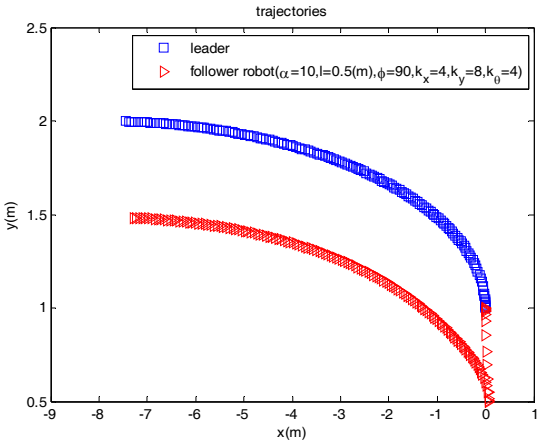

그림 8 비젼 기반 대형 제어 : 곡률 경로 $(\alpha=10, l=0.5(m), \phi=90^o, K_x=4, K_y=8, K_\theta=4)$

Fig. 8 Vision based formation control : curvature path $(\alpha=10, l=0.5(m), \phi=90^o, K_x=4, K_y=8, K_\theta=4)$

5. 결 론

본 논문에서는 카메라를 이용하여 비젼 기반으로 목표물의

추종하는 이동 로봇 제어기에 대해 제안하였다. 안정된 카메라 추종 제어를 위해 게인 튜닝 방법을 설계하였고 리더를 추종하는 대형 제어를 위해 리야프노프 관점에서의 제어기를 설계하였다.

모의 실험을 통해 카메라 추종 제어와 비젼 기반으로 리더를 추종하는 로봇의 대형 제어 결과를 확인할 수 있다. 이를 통해 서비스 분야에서 일정한 대형을 유지하면서 목표물을 안정하게 추종하는 비젼 기반의 이동 로봇 구현이 가능함을 확인할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2009학년도 인하공업전문대학 교내연구비 지원에 의하여 연구 되었음.

참 고 문 헌

[1] D. Xu, Y. F. Li, M. Tan, and Y. Shen, "A New Active Visual System for Humanoid Robots," IEEE Trans. on Sys. Man, and Cyber., vol. 38, no. 2, pp. 320-330, 2008.

[2] S. Kim and S.-Y. Oh, "Hybrid Position and Image Based Visual Servoing for mobile robots," Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, vol. 18, pp. 73-82, 2007.

[3] M. Abdellatif, "A Vision-Based Navigation Control System for a Mobile Service Robot," SICE Annual Conference, Kagwa Univ., Japan, pp. 1517-1522, Sept. 17-20, 2007

[4] K. Hashimoto, T. Ebine, and H. Kimura, "Visual Servoing with Hand-Eye Manipulator - Optimal Control Approach," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol. 12, no. 5, pp. 766-774, 1996.

[5] A. Castnao and S. Hutchinson, "Visual Compliance : Taske-Directed Visual Servo Control," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol. 10, no. 3, pp. 334-342, 1994.

[6] M. W. Spong, S. Hutchinson, and M. Vidyasagar, Robot Modeling and Control, Wiley, 2006.

[7] Y. Kanayama, Y. Kimura, F. Miyazaki, and T. Noguchi, "A Stable Tracking Control Method for an Autonomous Mobile Robot," in Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat., pp. 384-389, 1996.

[8] R. Fierro and F. L. Lewis, "Control of a Nonholonomic Mobile Robot Using Neural Networks," IEEE Trans. on Neural Networks, Vol. 9, No. 4, pp. 589-600, 1995.

저 자 소 개

김 진 환(金 眞 煥)

1967년 5월 15일생. 1991년 인하대 전기공학과 졸업. 1993년 인하대 전기공학과 대학원 졸업(석사). 1996년 동대학원 졸업(공박). 1997. 3 - 2001.8 두원공과대학 컴퓨터응용제어과. 2001.9 - 현재 인하공업전문대학 전기정보과 교수.

Tel : 032) 870-2193

FAX :032) 870-2507

E-mail : jhkim@inhatc.ac.kr