

영상 자코비안을 이용한 이동로봇의 주행 제어

Autonomous Mobile Robot Navigation Control using Image Jacobian

*박세용**, 유범재**, 서일홍*, 오상록**, 이종원**

* 한양대학교 전자공학과(Tel: +82-345-408-5802; Fax: +82-345-408-5803 ; E-mail: sypark@amadeus.kist.re.kr)
** 한국과학기술연구원(Tel: +82-2-958-5759; Fax : +82-2-958-5749)

Abstract : An image-based control scheme for autonomous navigation of wheeled mobile robots is considered. Visual servoing technique, which has been used for robot manipulators, is modified for a mobile robot equipped with a stereo camera system. Using image feature jacobian which describes the relationship between the velocity of a camera relative to camera frame and the velocity of feature point with respect to image plane, a visual feedback system is established. Our mobile robot has two wheels and a stereo head whose DOF is 2. The control system for visual navigation is verified through a computer simulation successfully.

Keywords : image-based navigation, mobile robot, image jacobian, visual feedback

1. 서론

이동로봇의 자율주행을 위해 제어구조, 경로 계획, 자기 위치 인식, 장애물 회피, 랜드마크 인식에 의한 주행기법, 다중 센서 융합에 의한 지능제어, 학습제어 등에 대한 폭넓은 연구가 있어 왔다. 최근에는 이동로봇의 주행을 위해 카메라로부터 얻은 영상 피드백을 이용한 시각기반 제어방법이 제시되었다[1, 2, 5, 7, 8].

Jorge Dias 등[2]은 이동로봇을 이용한 목표 추적에 있어서 스테레오 카메라로부터 구한 거리와 방향 정보를 이용하여 로봇을 제어하였고, Yasunori 등[7]은 천장의 영상으로부터 얻은 랜드마크 정보를 이용하여 주행하였으며, Yoshio 등[8]은 복도의 영상정보를 분차적으로 기억, 비교하여 이동로봇의 주행에 사용하였다. Dimitris 등[1]은 이동 로봇을 원하는 자세로 안정화시키기 위하여 영상 피드백을 사용한 visual servoing 기법을 소개하였다.

본 논문에서는 기존의 로봇 매니퓰레이터의 visual servoing에서 사용된 영상 자코비안 개념을 이용하여 스테레오 헤드를 장착한 이동로봇의 시각기반 제어 알고리즘을 제안한다. 즉 이동로봇과 스테레오 헤드의 모델링, 영상기반 제어를 위한 영상 자코비안, 영상 자코비안에 기초한 주행을 위한 피드백 제어 블록을 제시한다. 그리고, simulation을 통하여 제안된 제어 구조의 성능을 검증하였다.

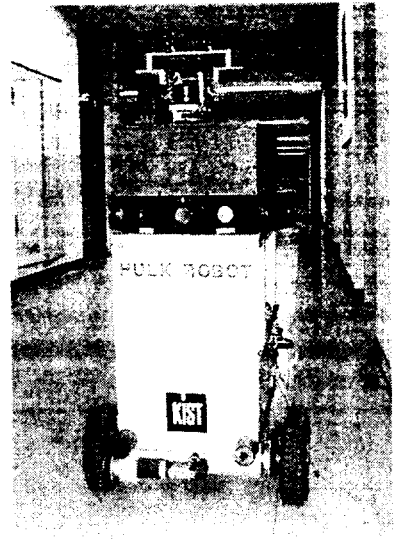


그림 1. 이동 로봇 HULK
Fig. 1. Mobile Robot HULK

되는 출력을 v, ω 로 나타내면, v 은 이동로봇이 진행방향으로 나

2. 자율이동로봇의 모델링

이동 로봇은 [4]와 [6]에서 사용한 평면모델에 기초하여 모델링한다. [9]에서 소개된 이동로봇(그림 1)을 구성하고 있는 (그림 2)의 mobile base와 (그림 3)의 스테레오 헤드의 구동 자코비안을 구하면 각각 식(1), 식(2), 식(4)과 같다.

2.1 Mobile base modeling

식(1)과 (2)는 (그림2)와 같이 좌표계를 설정한 후 이동로봇의 wheel jacobian으로부터 유도된다. 두 바퀴를 구동함으로써 얻게

$$\dot{q}_o = J_o \dot{p}$$

$$\begin{pmatrix} \dot{q}_{1x} \\ \dot{q}_{2x} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{r_1} & -\frac{l_o}{r_1} \\ 0 & \frac{1}{r_2} & \frac{l_o}{r_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \omega \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\dot{p} = J_p \dot{q},$$

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \omega \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ \frac{r_1}{2} & \frac{r_2}{2} \\ -\frac{r_1}{2l_o} & \frac{r_2}{2l_o} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{q}_{1x} \\ \dot{q}_{2x} \end{pmatrix} \quad (2)$$

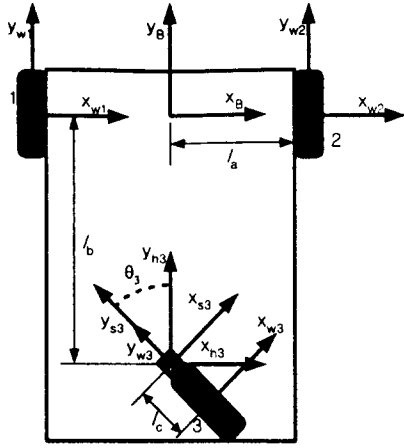


그림 2. 이동 로봇을 위한 좌표계

Fig. 2. Coordinate frame for a mobile robot

가는 선형속도를 나타내고, ω 는 주행평면에 대한 수직인 축에 대한 회전 각속도를 나타낸다. 이 두 변수에 의한 이동로봇의 속도는 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= v \sin \theta \\ \dot{y} &= v \cos \theta \\ \dot{\theta} &= \omega \end{aligned} \quad (3)$$

3.2 stereo head modeling

식(4)는 (그림 3)과 같이 스테레오 헤드의 각 카메라 좌표축에 좌표계를 할당했을 때 아래와 같이 각 축의 변화량에 대한 스테레오 카메라 시스템의 자세 변화량의 관계를 나타낸다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} {}^l v_l \\ {}^l \omega_l \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -h_3 \sin \theta_2 & 0 \\ -h_2 \sin \theta_2 & 0 \\ -h_2 \cos \theta_2 & -h_3 \\ 0 & 1 \\ -\cos \theta_2 & 0 \\ \sin \theta_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} {}^r v_r \\ {}^r \omega_r \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -h_3 \sin \theta_2 & 0 \\ h_2 \sin \theta_2 & 0 \\ h_2 \cos \theta_2 & -h_3 \\ 0 & 1 \\ -\cos \theta_2 & 0 \\ \sin \theta_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

3. 영상 자코비안

투영좌표계와 일반적으로 영상처리에서 사용되는 핀-홀 카메라 모델에 의해서 카메라 좌표계에 대한 물체의 3차원 좌표(${}^c P_o = [X, Y, Z]^T$)와 영상평면에서의 특징점의 위치($[u, v]^T$)와의 관계는 식(5)

< Hulk Stereo Head System >

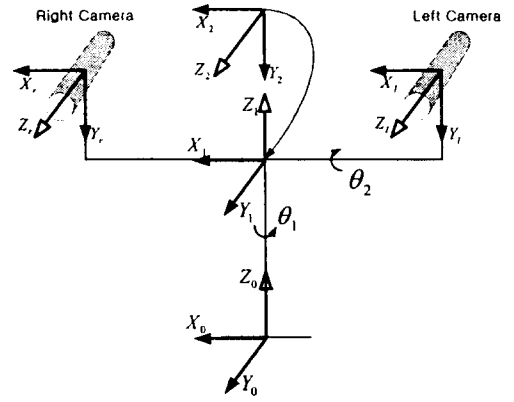


그림 3. 스테레오 헤드 시스템

Fig. 3. Stereo head system.

와 같이 주어지고, 식(5)를 선형화하기 위하여 미분함으로써 식(6)와 같은 영상 자코비안(image jacobian)을 구할 수 있다. 단, f 는 카메라의 초점 거리를 나타낸다.

$$\begin{pmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \end{pmatrix} = \frac{f}{Z} \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} \quad (5)$$

식(6)으로 주어지는 영상자코비안은 카메라의 자세 변화량에 대하여 영상에서의 특징점의 위치변화량의 관계를 설명한다. 식(6)의 영상 자코비안의 pseudo inverse를 구하면 주어진 특징점의 변화량에 대하여 카메라에서 요구되는 자세 변화량을 결정할 수가 있다.

$${}^l \dot{\mathbf{f}} = \mathbf{J}_1 {}^c \dot{\mathbf{P}}$$

$$\begin{pmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{f}{Z} & 0 & -\frac{u}{Z} & \frac{uv}{f} & -\frac{u^2 + f^2}{f} & v \\ 0 & \frac{f}{Z} & -\frac{v}{Z} & \frac{v^2 + f^2}{f} & -\frac{uv}{f} & -u \end{pmatrix} \begin{pmatrix} {}^c v_c \\ {}^c \omega_c \end{pmatrix} \quad (6)$$

식 (6)에서 거리 Z 는 스테레오 헤드 시스템의 기본 방정식인 식 (7)을 사용하여 결정한다. 단, b 는 좌, 우 카메라 사이의 거리이다.

$$Z = \frac{bf}{u_l - u_r} \quad (7)$$

4. Control Block for Navigation

4.1 제어 목적

본 논문에서는 영상기반 제어의 제어 목적은 이동로봇과 추적하는 물체와의 거리를 일정하게 유지하고, 이동 플랫폼과 헤드는 대상 물체가 이동로봇의 정면에 위치하도록 주행할 수 있도록 제어하는 데 있다.

4.2 Image-based control

영상 기반 제어 구조는 영상 상의 오차를 로봇제어를 위한 피드백 신호로 사용하는 것으로서, 식 (8)과 같은 제어 입력을 만들어 영상 자코비안을 통해 카메라의 자세 속도를 구한다. 단 k 는 Gain

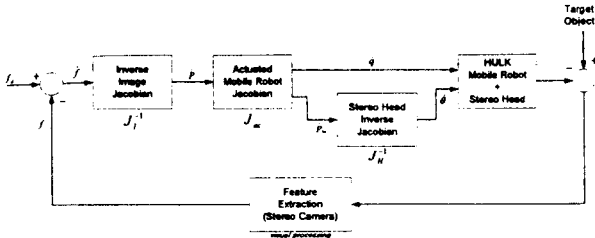


그림 4. 제어 블록도
Fig. 4. The Control Block Diagram

이다.

$$e(t) = k(f_d(t) - f(t)) \quad (8)$$

식(8)의 영상 피드백을 이용한 제어 구조를 (그림 4)와 같이 제안한다. 위의 구조에서는 역영상 자코비안(inverse image jacobian)에 의해서 구한 속도(카메라 좌표계에서 본 목표 물체와 카메라와의 상대속도)를 가지고, 먼저 mobile base를 이용하여 추종을 하고, mobile base에서 추종하지 못한 성분에 대한 추종을 2-DOF의 스테레오 헤드를 이용한다. 헤드와 이동 로봇의 협조에 의해 목표 물체를 계속적으로 시계에 보이도록 유지한다.

5. 시뮬레이션

앞 절에서 제안한 제어구조를 시뮬레이션을 통하여 검증하였다. 시뮬레이션은 실제 HULK 이동로봇의 모델링을 통하여 수행하였다. HULK의 제어를 통하여서 목표 물체까지의 거리는 1.5m를 유지하고, 이동 로봇의 정면에 물체를 위치하도록 하는 시뮬레이션을 다음 두 가지 경우에 대하여 수행하였다. 시뮬레이션에는 matlab과 simulink를 사용하였고, sampling time은 영상처리 시간을 고려하여 100ms로 해서 수행하였다.

5.1 고정 목표 물체의 추종

이동로봇으로부터 2.0m 전방, 0.3m 우측방에 위치한 물체를 이동 로봇이 추종하는 경우의 결과는 (그림 5)와 같다. 이 경우에는 약 2초 정도에서 이동 로봇이 목표에 대한 거리와 자세를 유지할 수 있었다.

5.2 이동 목표 물체의 추종

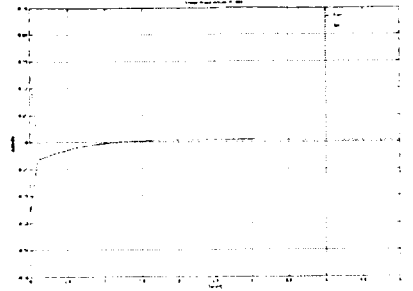
이동로봇이 (0m, 0m)에서 출발하고, 목표 물체는 식 (9)과 같은 경로를 가질 경우에는 (그림 6)과 같은 결과를 얻었다.

$$\begin{aligned} x &= 2 \sin(0.05t) \\ y &= 1.5 + 0.1t \end{aligned} \quad (9)$$

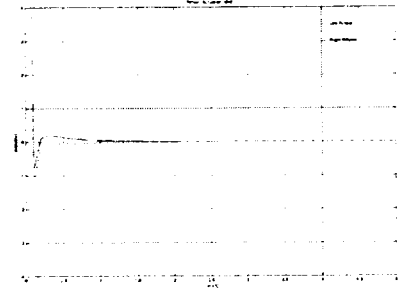
(그림 6)의 (e)에서 보면, 이동로봇이 목표를 대한 추종이 성공적임을 알 수 있다.

6. 결론 및 추후과제

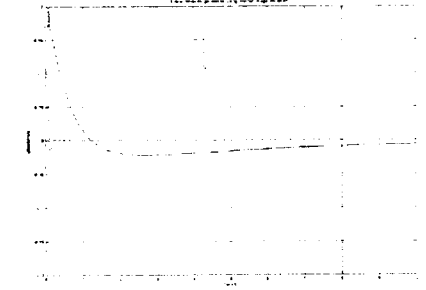
본 논문에서는 스테레오 카메라를 탑재한 이동 로봇에서 영상 자코비안을 이용한 영상 기반 주행 제어 구조를 제안하고, 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 추후 연구에서는 제안된 제어구조의 실험, 이동로봇과 헤드 시스템의 동역학에 대한 모델링, 이동로봇의



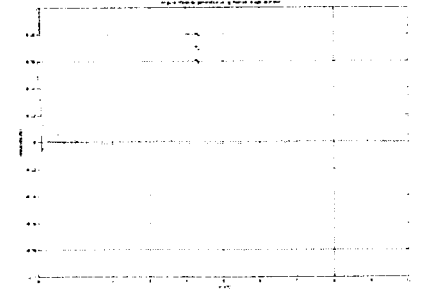
(a) Head Actuation $\Delta\theta$



(b) Wheel Actuation Δq



(c) Linear velocity in Δp of camera



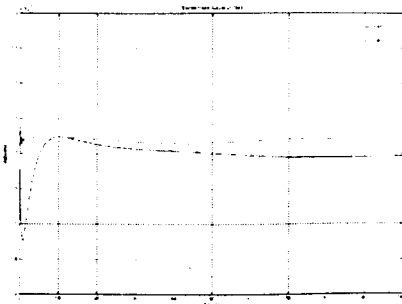
(d) Angular velocity in Δp of camera

그림 5. 고정 목표에 대한 추종 시뮬레이션
Fig. 5. Simulation for a static target

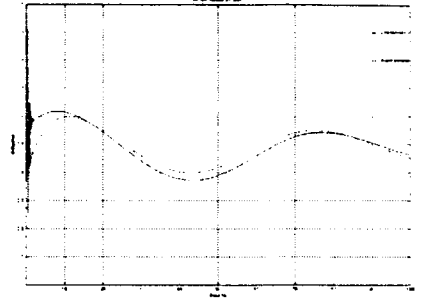
nonholonomic 특성에 의한 제한조건의 분석을 통해 고속 시각 기반 주행을 위한 동적제어 알고리즘을 제시하고자 한다.

참고문헌

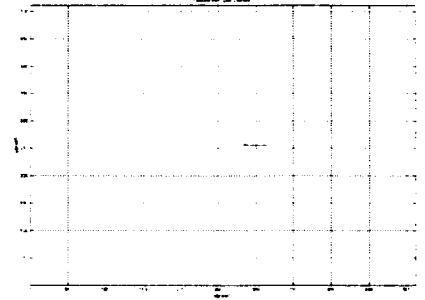
- [1] Dimitris P. Tsakiris, Patrick Rives and Claude Samson, "Applying Visual Servoing Techniques to Control Nonholonomic Mobile Robots," in *Workshops IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 21-32, Sep., 1997
- [2] Jorge Dias, Carlos Paredes, Inácio Fonseca, Helder Araújo, Jorge Batista, and Anibal T. Almeida, "Simulation Pursuit with Machine Experiments with Robots and Artificial Vision," *IEEE Trans. of Robotics and Automation*, vol. 14, no. 1, pp. 1-18, Feb., 1998.
- [3] Koichi Hashimoto ed., *Visual Servoing*, World Scientific, Singapore, 1993.
- [4] Patrick F. Muir and Charles P. Neuman, "Kinematic Modeling of Wheeled Mobile Robots," *J. of Robotic Systems*, vol. 4, no. 2, pp. 281-340, 1987.
- [5] Steven B. Skaar, Issac Yalda-Mooshabad, and William H. Brockman, "Nonholonomic Camera-Space Manipulation," *IEEE Trans. of Robotics and Automation*, vol. 8, no. 4, Aug., 1992.
- [6] Subir Kumar Saha and Jorge Angeles, "Kinematics and Dynamics of a Three-Wheeled 2-DOF AGV," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, vol. 3, pp. 1572-1577, 1989.
- [7] Yasunori Abe, Masaru Shikano, Toshio Tukuda, Fumihito Arai, and Yoshio Tanaka, "Vision based Navigation System by Variable Template Matching for Autonomous Mobile Robot," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 952-957, 1998.
- [8] Yoshio Matsumoto, Masayuki Inaba, Hirochika Inoue, "Visual Navigation using View-Sequenced Route Representation," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and automation*, vol. 1, pp. 83-88, April, 1997.
- [9] J. Yonho, P. Jungmin, C. Youngjo, O. Sangrok, "An Object-Oriented Implementation of Behavior-Based Control Architecture," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Apr., 1996.



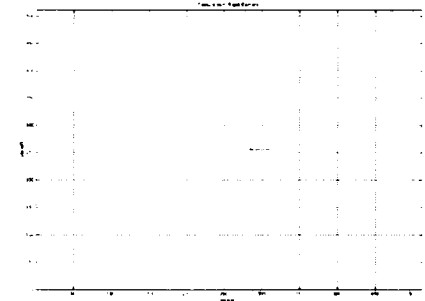
(a) Head Actuation $\Delta\theta$



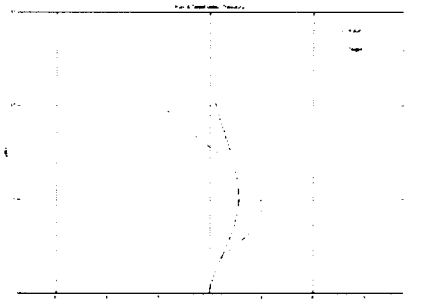
(b) Wheel Actuation Δq



(c) Feature in left camera



(d) Feature in right camera



(e) Trajectory of Mobile robot and target
 그림 6. 운동하는 목표 물체의 추종 시뮬레이션
 Fig. 6. Simulation for a moving target