

천장설치형 카메라 시스템을 사용한 장애물 회피용 이동 로봇의 경로설계법과 그 구현

트란안킴*, 김광주*, 중탄람*, 김학경#, 김상봉**

Path Design Method of Mobile Robot for Obstacle Avoidance Using Ceiling-mounted Camera System and Its Implementation

Anh Kim Tran *, Kwang Ju Kim*, Tan Lam Chung*, Hak Kyeon g Kim# and Sang Bong Kim**

ABSTRACT

In this paper, implementation of obstacle avoidance of a nonholonomic mobile robot in unstructured environment is introduced. To avoid obstacles, first, a reference collision-free path for the MR is generated off-line using HJB-based optimal path planning method. A controller is designed using integrator backstepping method for tracking the generated reference path. To implement the designed controller, a control system are needed and composed of camera system and PIC-based controller. The workspace is observed by a ceiling-mounted USB camera as part of an un-calibrated camera system. Thus the positional information of the MR is updated frequently and the MR can get the useful inputs for its tracking controller. The whole control system is realized by integrating a computer with PIC-based microprocessor using wireless communication: the image processing control module and path planning module serve as high level computer control while the device control serves as low level PIC microprocessor control. The simulation and experimental results show the effectiveness of the designed control system.

Key Words : Obstacle avoidance(장애물 회피), Mobile robot(MR:이동로봇), Integrator backstepping method(적분형 백스텝핑법), Path planning (경로계획), Ceiling-mounted camera system(천장설치형 카메라시스템)

1. 서론

이륜형 이동로봇(MR)은 여러 분야에 적용되어 왔다. 이동로봇은 매우 자율적이기 때문에 비정형화된(unstructured) 환경에 매우 널리 사용된다. 이동로봇의 자율적 또는 지능적인 행동에 대한 연구가 최근 10 년간 집중적으로 수행되어왔다. 초기에

는, 이동로봇의 운동학적 모델을 사용해, 많은 연구노력이 비홀로노믹 구속조건에서의 운동의 문제를 해결하는데 기울어져 왔다. 나중에는, 비홀로노믹 운동학적 제어기와 대차의 동력학의 통합에 대한 더욱 더 많은 연구가 이루어지게 되었다.^{1,2}

장애물 회피를 성공적으로 수행하기 위해, 이동로봇은 다음과 같은 3 가지의 강력한 주행능력

접수일: 2003 년 2 월 6 일; 게재승인일: 2004 년 5 월 7 일

* 부경대학교 기계공학과 대학원

김학경: 부경대학교 기계공학부

E-mail hakkyeong@hanmail.net Tel. (051) 620-1606

** 부경대학교 기계공학부

을 가져야 한다. 즉 첫째, 장애물을 회피할 수 있는 경로계획을 하여 목표궤적을 발생 시킬 것³, 둘째, 발생궤적을 추종할 것⁴, 마지막으로 특별한 경우에 주어진 한 점을 반드시 통과하도록 하기 위해 점안정화(point stabilization)를 도모할 것 등이다.

장애물회피를 위해서 지금까지는 초음파와 카메라센서를 사용해 영상기반 연구가 수행되었다.⁵ 초음파 센서기반법은 장애물이 근처에서 탐지되는 한 로봇의 제어를 수행한다. 현재, 새로운 영상처리법과 정밀한 영상장치를 이용한 여러 연구들이 있다.^{3, 6} 이러한 시스템을 적용함으로써, 이동로봇의 위치정보를 보다 정밀하게 얻어 제어기를 정밀하게 수행하여 계획된 경로를 따라 목표까지 이동로봇을 구동시킬 수 있었다. 최근에 게재된 몇 개의 문헌은 이러한 적용성의 성공적인 면을 반영하였다.^{7, 8, 13} 이러한 작업에서는, 최적성이 적절히 고려되지 않았으며, 주로 유선통신을 이용하였다.

그러므로 본 논문에서는, 헤밀턴-자코비-벨만 경로 계획법을 사용하여 이동로봇의 최적목표궤적궤적을 발생시킨 후⁹ 이 목표궤적궤적을 추종하는 적분형 백스텝핑 제어기를 설계하였다. 또한 이 제어기를 구현하기 위해 천장설치형 USB 카메라를 이용한 제어시스템을 개발하였다. 즉 장애물은 같은 크기의 원형이며 위치가 고정되어있는 것으로 고려했기 때문에, 한 개의 USB 카메라를 사용한 카메라시스템에 의해 이동로봇의 위치 및 회전각 정보가 얻어진다. 헤밀턴-자코비-벨만 경로 계획법을 이용하여 시뮬레이션에 의해 이동로봇의 최적목표궤적궤적을 off-line 적으로 미리 만들어진다. 최적목표궤적궤적을 추적하기 위해 설계된 적분형 백스텝핑 제어기를 실현시키기 위해, 제어시스템의 하드웨어와 소프트웨어의 설계 및 개발이 필요하다. 개발된 제어시스템은 무선통신을 사용해 컴퓨터와 PIC 기반 마이크로프로세서의 통합에 기반을 두고 있다. 영상처리제어모듈과 경로계획 모듈은 고 수준의 컴퓨터제어로, 장치제어는 저 수준의 PIC 마이크로 프로세서 제어로 각각 역할을 한다. I2C 를 통해 서로 통신하는 저 수준의 제어기는 두 개의 모듈로 구성된다. 하나는 마스터(master)로 다른 하나는 슬레이브(slave)로 행동한다. 마스터 마이크로프로세서는 Bluetooth 무선통신모듈 Promi SD202 을 통해 영상제어기로부터 신호를 받는다. 그리고 나서 속도조절신호를 왼쪽

모터 및 오른쪽모터를 구동시키기 위해 슬레이브 마이크로프로세서로 지시한다. 모터는 LMD18200 dual full-bridge driver 를 통해 구동된다. 개발된 제어기의 시뮬레이션 및 실험결과는 우수한 추적제어와 유효성을 보여준다.

2. 이동로봇의 모델링 및 문제제기

2.1 비홀로노믹 이동로봇

Fig. 1 은 이륜형 이동로봇을 나타낸다.

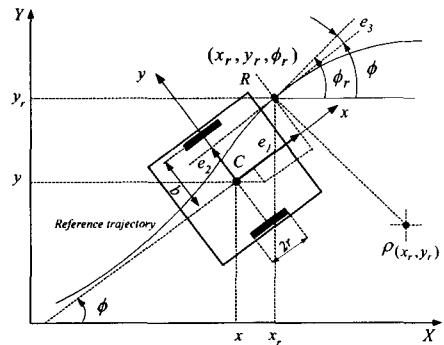


Fig. 1 Mobile robot with two actuated wheels

비홀로노믹 시스템의 모델링은 여러 문헌에서 언급되어 있다.^{2, 10, 11} 이동로봇은 다음과 같이 다섯 개의 일반화된 좌표로 표현될 수 있다.

$$\mathbf{q} = [x, y, \phi, \theta_r, \theta_l]^T = [\mathbf{q}_1^T, \theta_r, \theta_l]^T \quad (1)$$

여기서 \mathbf{q} 는 일반화 좌표벡터, (x, y) 는 점 C 의 좌표, ϕ 는 이동로봇의 전진각, θ_r 과 θ_l 는 오른쪽 과 왼쪽 구동바퀴의 회전각이다.

θ_r, θ_l 을 제외하고 x, y, ϕ 만을 고려하면, 시스템의 운동방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{\mathbf{q}}_1 = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 \\ \sin \phi & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \mathbf{S}_1(\mathbf{q}_1) \mathbf{v} \quad (2)$$

$$\mathbf{A}_1(\mathbf{q}_1) \dot{\mathbf{q}}_1 = 0 \quad (3)$$

$$\mathbf{A}_1(\mathbf{q}_1) \mathbf{S}_1(\mathbf{q}_1) = 0 \quad (4)$$

$$\mathbf{v} = [v \ \omega]^T \quad (5)$$

$$\mathbf{A}_1(\mathbf{q}_1) = [-\sin\phi \ \cos\phi \ 0] \quad (6)$$

여기서 $\mathbf{v} = [v \ \omega]^T$ 는 이동로봇의 중심점 C 에서의 접선속도 v 및 각속도 ω 를 성분으로 하는 속도벡터이다.

방정식(3)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$-\dot{x} \sin\phi + \dot{y} \cos\phi = 0 \quad (7)$$

식(7)은 대차는 대차의 대칭축에 대한 수직방향으로 직접 움직일 수 없다는 비홀로노믹 구속조건식이다. 더구나, 시스템의 동력학 방정식은 다음과 같이 요약될 수 있다.

$$\bar{\mathbf{M}}(\mathbf{q}_1)\dot{\mathbf{v}} + \bar{\mathbf{V}}_m(\mathbf{q}_1, \dot{\mathbf{q}}_1)\mathbf{v} + \bar{\mathbf{F}}(\mathbf{v}) + \bar{\boldsymbol{\tau}}_d = \bar{\mathbf{B}}(\mathbf{q}_1)\boldsymbol{\tau} \quad (8)$$

여기서

$$\bar{\mathbf{V}}_m = \begin{bmatrix} 0 & -2m_w d \dot{\phi} \\ 2m_w d \dot{\phi} & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\bar{\mathbf{M}} = \begin{bmatrix} m + 2\frac{I_w}{r^2} & 0 \\ 0 & I_1 \end{bmatrix}; \quad \bar{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} \frac{1}{r} & \frac{1}{r} \\ \frac{b}{r} & -\frac{b}{r} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$I_1 = I_c + 2I_w \frac{b^2}{r^2} + 2m_w b^2 + 2I_m \quad (11)$$

$$m = m_c + 2m_w$$

여기서 r 은 구동바퀴의 반지름, b 는 점 C 에서 바퀴까지의 거리, d 는 대차의 기하학적 중심과 무게중심과의 편차, I_c 는 점 C 를 관통하는 수직축에 대한 구동바퀴와 모터의 전기자(rotor)를 제외한 대차의 관성모멘트, I_w 는 바퀴축에 대한 각 구동바퀴와 모터의 전기자의 관성모멘트, I_m 은 지름에 대한 바퀴의 관성모멘트, m_c 는 바퀴를 제외한 대차의 질량, m_w 는 바퀴의 질량, $\boldsymbol{\tau} = [\tau_r \ \tau_l]^T$ 는 우측바퀴의 토크 τ_r 와 좌측바퀴의 토크 τ_l 를 성분으로 하는 토크벡터이며, $\bar{\boldsymbol{\tau}}_d$ 는 유계값을 가지는 미지의 매개변수를 가지는 추정외란벡터이다. $\bar{\mathbf{F}}$ 는 운동에 대한 마찰벡터이다.

2.2 문제제기

모든 장애물은 Fig. 2 에서 나타난 것처럼 같은 크기의 원형이라고 가정한다. 모든 장애물은 $1m \times 2m$ 평면 공간에 정렬되어 있고, 이륜형 이동로봇이 그 공간의 기지의 점에서 목표점에 도달하도록 해야 한다.

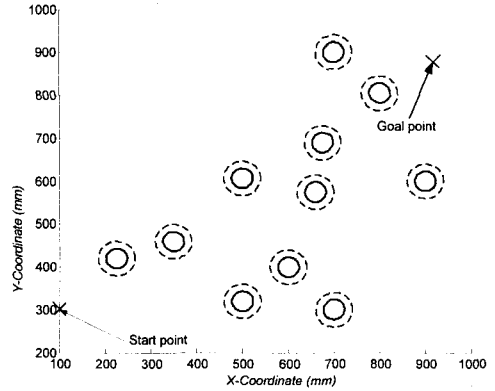


Fig. 2 Obstacle arrangement and task assignment for MR

이동로봇의 최적목표경로계획은 HJB 기반한 가상회귀함수(pseudo-return function)를 구함으로서 얻어지며, 추적제어기는 이동로봇이 그 최적목표경로계획을 따라가도록 한다. 이동로봇의 환경정보는 USB 카메라에 의해 빈번히 갱신되어 이동로봇의 목표추적데이터와 위치정보 또한 갱신되어서 입력으로서 이동로봇의 제어기에 송신된다. 그 환경정보는 이동로봇의 계획을 발생시키는 경로계획 모듈에 의해 처리된다. 이동로봇의 추적알고리즘은 계산토크와 적분형 백스텝핑 제어법(integrator backstepping control method)에 기반을 둔다.

3. 경로계획알고리즘과 추적제어기 설계

이동로봇은 초기점에서 목표점까지를 추적하기 위해 장애물을 회피하기 위한 경로를 따라가야 한다. 목표점까지의 최단 거리를 발생시키는 해밀턴-자코비-벨만(HJB:Hamilton-Jacobi-Bellman) 기반한 경로계획이 채택된다. 이 경로계획법은 가상회귀함수를 사용해 하나하나씩 장애물을 회피할 수 있는 경로를 빠르게 발생시킨다. 계획되어진 경로는 이동로봇이 추적할 수 있는 궤적을 발생시키기 위해 동시에 조작되어진다. 즉, 경로기하학적 구

속(예: 회전각(orientation), 곡률)과 이동로봇의 운동학적 구속조건(예: 속도, 가속도)이 시간 내력 궤적을 실현시키기 위해 고려된다. 각 순간마다 목표데이터집합(예: 좌표, 회전각, 속도)이 존재한다. 그 목표데이터는 이동로봇의 추적제어기의 목표입력이 된다. 적분형 백스텝핑법을 이용한 고전적인 계산 토크제어기는 본 논문에서의 이룬형 이동로봇의 추적제어기로서 적용된다. 제어기에 대한 상세한 설명은 참고문헌²에서 거론되며, 3.2 절에서 부연된다.

3.1 헤밀턴-자코비-벨만식을 이용한 최적 장애물 회피

Fig. 3 에서 반지름 r 과 중심 $Q \in R^2$ 을 가지는 **OB** 로 표시된 원형 장애물을 고려해보자.

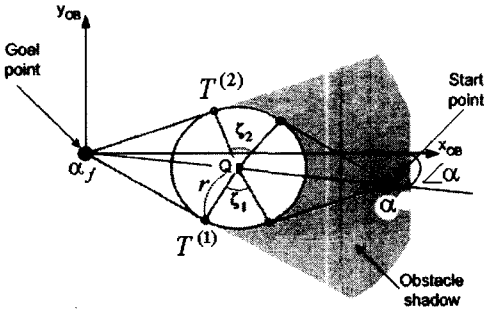


Fig. 3 One circular Obstacle

영역 S 는 장애물의 그림자로서 다음과 같이 정의된다.

$$S = \left\{ \alpha : \angle \alpha \in [\angle T^{(1)}, \angle T^{(2)}] \mid \|\alpha - Q\|^2 > r^2, \|\alpha - \alpha_f\| \geq \|Q - \alpha_f\| \right\} \quad (12)$$

여기서 $\angle \alpha$ 는 점 α 와 축 X_{OB} 사이의 각, $T^{(i)} \in R^2$ ($i=1,2$)는 목표점에서 **OB** 에 그어진 두 접선과의 교점이다. 임의의 점 $\alpha \in R^2$ 의 회귀함수 $\rho(\alpha, Q, r)$ 는 최적경로의 길이와 같다. 회귀함수는 다음과 같이 쓰여질 수 있다.

$$\rho(\alpha, Q, r) = \begin{cases} w_c(\alpha, Q, r) & \text{if } \alpha \in S \\ \|\alpha - \alpha_f\| & \text{if } \alpha \notin S \end{cases} \quad (13)$$

$$w_c(\alpha, Q, r) = \min \left\{ \sqrt{\|\alpha - Q\|^2 - r^2} + r\zeta_i(\alpha) + \sqrt{\|Q - \alpha_f\|^2 - r^2} \right\} \quad (14)$$

여기서 α 는 출발점의 위치, α_f 는 종착점의 위치, ζ_i ($i=1,2$)는 α 에서 **OB** 에 그어진 접선과의 교점과 점 $T^{(i)}$ 로 이루는 호의 중심각이다.

다중 원형 장애물의 회피문제를 풀기 위해, Sunder 와 Siller⁹ 는 한번에 한 개의 물체를 풀어 다중물체를 취급하게 돕는 가상회귀함수를 제안했다.

***가상회귀함수(Pseudo-return function)**

주어진 점에서 회피되는 가장 가까운 장애물은 다음과 같이 정의된 J 로부터 선택될 수 있다.

$$J = \left\{ j : \|\alpha - Q_j\| = \min_{\{i; \alpha \in S_i\}} \{\|\alpha - Q_i\|\} \right\} \quad (15)$$

반경 r_k 를 가지는 가장 가까운 장애물을 $Q_k \in R^2$ 로, 현재점을 α 이라고 하고, 가상회귀함수를 다음과 같이 정의 한다.

$$\psi(\alpha, k) = \begin{cases} d_1^{(k)} + d_2^{(k)} + r_k \min[\zeta_1^{(k)}, \zeta_2^{(k)}] & \text{if } k \neq 0 \\ \|\alpha - \alpha_f\| & \text{if } k = 0 \end{cases} \quad (16)$$

여기서

$$d_1^{(k)} = \sqrt{\|\alpha - Q_k\|^2 - r_k^2}, \quad d_2^{(k)} = \sqrt{\|Q_k - \alpha_f\|^2 - r_k^2} \quad (17)$$

k 는 집합 J 로부터 선택된 가장 가까운 장애물의 지수(index)이다. 만일 J 가 공집합이면 $k=0$ 이다. 가상회귀함수를 가지는 알고리즘은 다음과 같이 요약될 수 있다.

1 단계: Fig. 2 에서 보여지는 바와 같이 가장 가까운 장애물을 결정하라. $k=0$ 이면 3 단계로 가라.

2 단계: $k \neq 0$ 이면, 접점 $T_k^{(1)}, T_k^{(2)}$ 중 하나에 도달할 때까지 가상회귀함수(16)의 음의 gradient 를 추종하라. 1 단계로 가라. 경로가 다른 장애물과 교차할 때, 중간점으로서 다음 장애물까지의 접점을 정의함으로써 그 경로는 취급될 수 있다. 그리고 나서, 가장 최근에

증분점(incremental point)까지로 가는 이 증분목표를 사용해 부경로(subpath)를 풀어라.

3 단계: $k=0$ 이면, 목표점에 도달하기까지 비구속 회귀함수 $\|\alpha - \alpha_f\|$ (13)의 음의 gradient 를 추종하라. 이 방법은 가상회귀함수를 사용해 차례로 장애물을 회피하게 하기 때문에, 장애물의 수에 거의 의존하지 않는 경로를 빠르게 발생시키도록 한다.

3.2 궤적추적제어기 설계

완전한 이동로봇의 운동학은 운동학적 시스템 방정식(2)와 동력학 방정식(8)로 구성된다. \mathbf{u} 를 보조입력으로 두자. 적분형 백스텝핑과 계산된 토크를 적용함으로써 ², $\bar{\mathbf{B}}^{-1}(\mathbf{q}_1) \neq 0$ 이므로 식(8)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\boldsymbol{\tau} = \bar{\mathbf{B}}^{-1}(\mathbf{q}_1)[\bar{\mathbf{M}}(\mathbf{q}_1)\mathbf{u} + \bar{\mathbf{V}}_m(\mathbf{q}_1, \dot{\mathbf{q}}_1)\mathbf{v} + \bar{\mathbf{F}}(\mathbf{v}) + \bar{\boldsymbol{\tau}}_d] \quad (18)$$

동력학적 제어문제를 다음과 같은 운동학적 제어문제로 변환할 수 있다.

$$\dot{\mathbf{q}}_1 = \mathbf{S}_1(\mathbf{q}_1)\mathbf{v} \quad (19)$$

$$\dot{\mathbf{v}} = \mathbf{u} \quad (20)$$

경로계획단계에서, 대차의 목표모델을 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$\mathbf{q}_r = [x_r \ y_r \ \phi_r]^T, \quad \mathbf{v}_r = [v_r \ \omega_r]^T, \\ \dot{x}_r = v_r \cos \phi_r, \quad \dot{y}_r = v_r \sin \phi_r, \quad \dot{\phi}_r = \omega_r \quad (21)$$

여기서 \mathbf{q}_r 은 목표경로 위의 점 R 의 좌표 (x_r, y_r) 와 접선각 ϕ_r 을 성분으로 하는 목표경로 점 R 의 위치벡터, \mathbf{v}_r 은 목표경로 위의 이동로봇의 목표접선속도 v_r 과 목표각속도 ω_r 를 성분으로 하는 목표속도벡터이며, 추적오차벡터 \mathbf{e} 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\mathbf{e} \equiv \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi & 0 \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r - x \\ y_r - y \\ \phi_r - \phi \end{bmatrix} \quad (22)$$

오차의 도함수는 다음과 같다

$$\dot{\mathbf{e}} = \begin{bmatrix} \omega e_2 - v + v_r \cos e_3 \\ -\omega e_1 + v_r \sin e_3 \\ \omega_r - \omega \end{bmatrix} \quad (23)$$

백스텝핑법을 사용해, 식(19)와 (20)를 만족시키는 보조속도제어입력 \mathbf{v}_c 은 다음과 같다.³¹

$$\mathbf{v}_c = \begin{bmatrix} v_r \cos e_3 + k_1 e_1 \\ \omega_r + k_2 v_r e_2 + k_3 v_r \sin e_3 \end{bmatrix} \quad (24)$$

\mathbf{v}_c 의 도함수는 다음과 같이 된다

$$\dot{\mathbf{v}}_c = \begin{bmatrix} \dot{v}_r \cos e_3 \\ \dot{\omega}_r + k_2 \dot{v}_r e_2 + k_3 \dot{v}_r \sin e_3 \end{bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} k_1 & 0 & -v_r \sin e_3 \\ 0 & k_2 v_r & k_3 v_r \cos e_3 \end{bmatrix} \dot{\mathbf{e}} \quad (25)$$

여기서 k_1, k_2, k_3 는 양의 스칼라 값들이다. 비선형 피드백보조제어입력은 다음과 같다.

$$\mathbf{u} = \dot{\mathbf{v}}_c + k_4 \mathbf{I}(\mathbf{v}_c - \mathbf{v}) \quad (26)$$

여기서 k_4 는 양의 스칼라 값이며, \mathbf{I} 는 단위행렬이다.

정리: $n=3$, 일반화된 좌표 \mathbf{q}_1 , $m=1$ 독립구속조건, r 액추에이터를 가지는 주어진 비홀로노믹 시스템 (2)와 (8)에서, 다음의 가정을 고려하여 보자.

- a.1 액추에이터의 수는 자유도의 수($r=n-m$)와 같다.
 - a.2 모든 t 에서 목표선형속도는 0 이 아니고 유계인 $v_r > 0$ 이다.
 - a.3 완만한(smooth) 보조속도입력 \mathbf{v}_c 는 (24)에 의해 주어진다.
 - a.4 $\mathbf{K} = [k_1 \ k_2 \ k_3]^T$ 는 양의 상수 벡터이다
 - a.5 k_4 는 충분히 큰 양의 상수이다.
- 비선형 피드백제어입력 $\mathbf{u} \in R^{n-m}$ 이 식(26)으로 주어진다고 하자. 대차의 입력명령이 식(18)로 주어진다고 하다면, 원점은 균일 점근적으로 안정적이고(uniformly asymptotically stable), 이동로봇의 속도 벡터는 $t \rightarrow \infty$ 일 때 $\mathbf{v} \rightarrow \mathbf{v}_c$ 를 만족시킨다.

증명: 보조속도오차 e_c 를 다음과 같이 정의하자.

$$e_c \equiv v - v_c \equiv \begin{bmatrix} e_4 \\ e_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v - v_r \cos e_3 - k_1 e_1 \\ \omega - \omega_r - k_2 v_r e_2 - k_3 v_r \sin e_3 \end{bmatrix} \quad (27)$$

식(26)을 사용해, 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\dot{e}_c = -k_4 e_c \quad (28)$$

가정 a.5 하에서, 보조속도오차벡터는 지수적으로 0 으로 수렴한다. 그러므로, 이동로봇의 속도벡터는 $t \rightarrow \infty$ 일 때 $v \rightarrow v_c$ 을 만족시킨다.

다음과 같이 리아푸노프함수후보를 고려하자.

$$V = k_1(e_1^2 + e_2^2) + \frac{2k_1(1 - \cos e_3)}{k_2} + \frac{1}{2k_4} \left(e_4^2 + \frac{k_1}{k_2 k_3} e_5^2 \right) \quad (29)$$

여기서 $k_4 > 0, V \geq 0$ 이며, 만일 $e = 0$ 와 $e_c = 0$ 인 경우만, $V = 0$. 더구나, 식(23), (27), (28)를 사용해, 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\dot{V} = -k_1^2 e_1^2 - \frac{k_1 k_3}{k_2} v_r \sin^2 e_3 - (e_4 + k_1 e_1)^2 - \frac{k_1}{k_2 k_3 v_r} (e_5 + k_3 v_r \sin e_3)^2 \quad (30)$$

식(30)에서 분명히 $\dot{V} \leq 0$ 이며, 전체오차 $\epsilon = [e \ e_c]^T$ 는 유계이다. 식(23), (27), (30) 과 가정 a.3 을 사용해서, $\|e\|$ 와 $\|e_c\|$ 는 유계이다. 그래서, $\dot{V} < \infty$ 즉, \dot{V} 는 균일하게 연속적이다. $V(t)$ 는 증가하지 않고 어떤 값에 수렴하기 때문에, Barbalat 의 lemma 에 의해, $t \rightarrow \infty$ 일 때 $\dot{V} \rightarrow 0$ 이다. $t \rightarrow \infty$ 일 때, $e_c = [e_4 \ e_5]^T \rightarrow 0$ 임을 고려하면, 그때는, 식(30)은 식(31)이 된다.

$$0 = k_1 e_1^2 + \frac{k_1(k_3 + 1)}{k_2} v_r \sin^2 e_3 \quad (31)$$

식(31)은 $t \rightarrow \infty$ 일 때, $[e_1 \ e_3]^T \rightarrow 0$ 임을 의미한다. 결국, e_c 의 정의를 사용해, $e_2 \rightarrow 0$ 임을 쉽게 알 수 있다. 그러므로, 평형점(equilibrium point) $e = 0$ 은 균일하게 접근적으로 안정적이다.

Fig. 4 는 제안된 제어기의 블록선도이다.

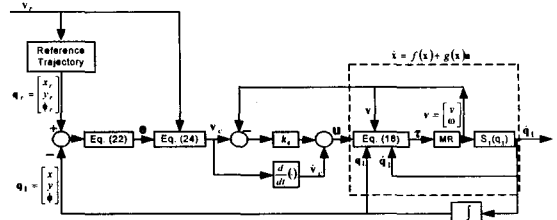


Fig. 4 Block diagram of tracking controller

4. 시뮬레이션 및 실험결과

이 장에서는 본 논문을 위해 실험장치의 구성, 개발된 제어시스템의 하드웨어 및 소프트웨어와 시뮬레이션 및 실험결과를 소개한다. 시뮬레이션은 이동로봇이 장애물과의 충돌 없이 임의의 시작점에서 목표점에 이르기 위한 HJB 기반한 경로설계법으로 최적목표경로계획을 구하기 위한 것이며, 이 경로계획을 추적하기 위한 제어를 포함한 제어시스템을 개발하여 실험을 통해 본 논문에서 제시한 제어기 및 제어시스템의 유효성을 검증한다.

4.1 실험방법

4.1.1 작업공간에서 카메라공간으로의 변환

이동로봇의 주행시 카메라를 이용하여 어떤 물체의 위치를 결정하는 기하학적 해석들이 소개된다. 즉 이동로봇의 작업공간과 카메라공간 사이의 변환을 공식화함으로써 이동로봇의 위치를 결정하는 기법을 설명한다.³

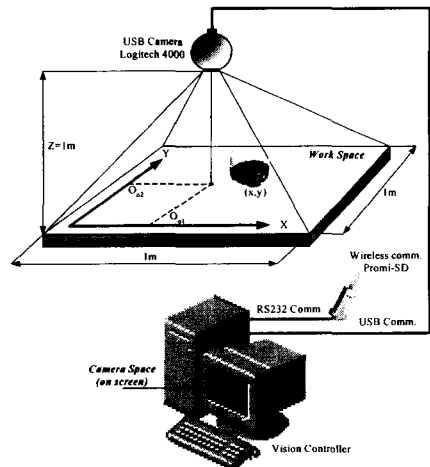


Fig. 5 Configuration of the control system

이동로봇은 카메라공간의 목표궤적을 추적하도록 구동되어서 카메라공간으로 이미 변환된 작업공간에서의 실제궤적을 추적할 수 있다. 목표궤적은 카메라공간에서 발생되어야 하고 제어페루프는 카메라공간에서 닫혀져야 한다. 핀홀렌즈 모델은 식(32)에서 제시된 바와 같이 작업위치벡터를 고려하여 이동로봇 카메라공간 위치벡터를 표현하기 위해 Fig. 5 에서 제시된 바와 같이 로봇카메라 시스템에 적용된다.

$$\begin{bmatrix} \bar{x}(t) \\ \bar{y}(t) \end{bmatrix} = \mathbf{HR}(\theta_0) \left(\begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} O_{o1} \\ O_{o2} \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} O_{i1} \\ O_{i2} \end{bmatrix} \quad (32)$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \alpha_1 & 0 \\ 0 & \alpha_2 \end{bmatrix} \quad (33)$$

$$\alpha_1 = \beta_1 \frac{f}{z}, \quad \alpha_2 = \beta_2 \frac{f}{z} \quad (34)$$

$$\mathbf{R}(\theta_0) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_0) & -\sin(\theta_0) \\ \sin(\theta_0) & \cos(\theta_0) \end{bmatrix} \quad (35)$$

여기서 $\mathbf{H} \in R^{2 \times 2}$ 은 대각, 정정상수행렬이며, $\alpha_1, \alpha_2 \in R^1$ 은 양수이다. $\mathbf{R}(\theta_0) \in R^{2 \times 2}$ 은 상수회전행렬이며, $z \in R^1$ 은 작업공간에 대한 카메라의 광학적 중심의 일정한 높이, $f \in R^1$ 은 카메라의 초점길이를 나타내는 상수, $\beta_1, \beta_2 \in R^1$ 를 나타내는 양의 상수들은 각각의 직교좌표계의 방향에 따른 카메라의 배율인자 ($pixel/m$), θ_0 는 작업공간 좌표계에 대한 카메라 좌표계의 시계방향으로의 회전각이며, $[O_{o1} \ O_{o2}] \in R^2$ 는 작업공간평면 위의 카메라 광학중심의 투영을 나타내며, $[O_{i1} \ O_{i2}]^T \in R^2$ 는 영상평면과 광학축과의 교차의 프레임 버퍼좌표로 정의되는 영상중심이다.

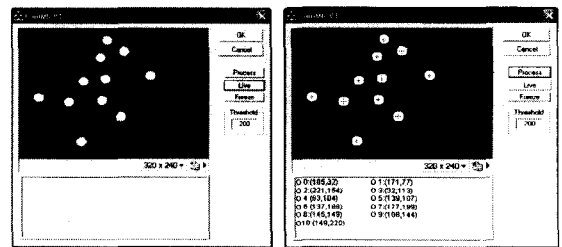
Table 1 은 USB 카메라의 제원을 보여준다.

Table 1 Specification of USB camera

Parameters	Value
Image size (<i>pixel x pixel</i>)	320×240
Branch name	Logitech 4000
Captured speed (<i>frames/second</i>)	30
Software	QuickCam SDK
Image processing library	Intel OpenCV
Resolution (<i>mm/pixel</i>)	3.5

4.1.2 제어시스템의 소프트웨어와 하드웨어

제어시스템은 무선통신을 사용해 컴퓨터와 PIC 기반 마이크로프로세서와의 통합을 기반으로 하고 있으며 두 부분으로 구성된다. 영상처리제어와 경로계획모듈은 고 수준의 컴퓨터로, 반면에 장치제어는 저 수준의 마이크로프로세서 제어로 역할을 한다. 전체 제어시스템의 구성은 Fig. 5 에 제시된다. 동작시 작업공간의 영상흐름이 QuickCam SDK 를 사용해 30fps 으로 USB 카메라 Logitech 4000 을 통해 크기 320×240 의 비트맵형태로 메모리에 획득된다. 획득영상은 최적궤적 장애물의 위치좌표와 시스템제어입력을 유도하기 위한 이동로봇의 위치좌표를 얻기 위해 영상처리 라이브러리 Intel OPenCV 에 의해 처리된다. 토크 명령은 무선통신을 통해 이동로봇의 운동을 제어하기 위해 저 수준으로 보내진다.



(a) Original frame (b) Obstacle detecting frame

Fig. 6 Computer interface of vision controller CamMR V1

전체제어작업은 Fig. 6 에 보여지는 Visual C++ Vision Controller CamMR V.1 에 의해 프로그램되어 한 개의 컴퓨터 인터페이스 속으로 통합된다.

4.2 실험장치

Fig. 7 은 실험장치를 보여준다.

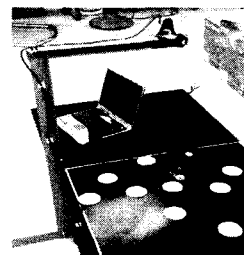


Fig. 7 Experimental setup

카메라는 작업공간 위 1 m 위치에 설치된다. 이동로봇의 자세의 데이터는 이동로봇의 칼라표시기(color marker)로 얻어진다. 칼라표시기의 위치는 특별 범위내의 픽셀의 밝기값(brightness value)을 비교하는 문턱값(threshold value)기반 해석법을 사용해 계산된다.¹² 이동로봇의 자세를 탐지하기 위해, 세 개의 표시기가 표시기의 중심에서 바퀴축에 수직한 선을 만들기 위해 이동로봇 위에 위치된다. 특히 하나는 그 선의 중심에 있고 두 개의 다른 표시기는 이동로봇의 자세가 약간의 기하학적 작업에 의해 쉽게 발견될 수 있도록 그들 자신의 끝에 있다.

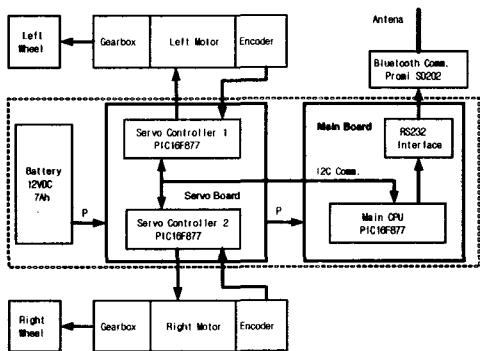


Fig. 8 Configuration diagram of low level control

저 수준의 제어를 위해, PIC 기반제어기가 개발된다. 이 제어기는 서보제어기와 주제어기로 두개의 부분으로 구성된다. 전체제어시스템의 구성도는 Fig. 8 에 제시된다. PIC16F877 을 사용한 두 개의 마이크로프로세서는 좌우 바퀴의 두 개의 모터용 서보제어기로서 한 개의 모듈함수로 통합된다. 모터는 LMD18200 dual full-bridge driver 에 의해 구동된다. 이 서보모터들은 각각 한 개의 엔코더를 사용하여 간접적인 속도제어를 수행한다. 더구나, 한 개의 마이크로프로세서 PIC16F877 는 Bluetooth 무선통신모듈 Promi SD202 를 통해 영상제어기(Vision controller)로부터 신호를 받는 main CPU 인 마스터로 사용된다.

4.3 시뮬레이션과 실험결과

이동로봇이 장애물을 회피하기 위해서는 HJB 기반 경로계획법에 의한 시뮬레이션으로 목표궤적을 발생시킨 후 본 논문에서 제시한 제어기가 발

생된 궤적을 추적하는 성능을 판별하기 위해 이동로봇을 이용하여 실험을 수행한다. 시뮬레이션과 실험에 사용된 매개변수값은 Table 2 에서 제시된다.

Table 2 Parameter values of MR

Parameters	Value	Parameters	Value
b [mm]	31.5	I_c [kgm ²]	0.4×10^{-3}
r [mm]	21.5	I_m [kgm ²]	0.23×10^{-6}
m_c [kg]	0.35	I_w [kgm ²]	0.1×10^{-5}
m_w [kg]	0.05		

제어기매개변수는 $k_1 = 5$, $k_2 = 3000$, $k_3 = 110$, $k_4 = 1$ 이다. 장애물의 구성도는 Fig. 2 에서 제시된다. 임의의 주어진 출발점 $[100 \ 300]^T$ 에서 목표점 $[900 \ 800]^T$ 까지 장애물과 충돌 없이 도달하도록 이동로봇을 제어하고자 한다.

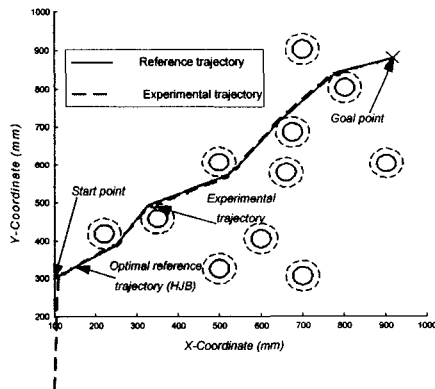


Fig. 9 Trajectory tracking of MR

Fig. 9 는 출발점에서 도착점까지의 시뮬레이션으로 얻어진 최적궤적과 이동로봇의 추적성능 실험결과를 보여준다.

Fig.10(a)-(c)는 목표궤적에 대한 추적오차를 보여준다. 궤적 위의 불연속 파편 때문에 돌발적인 오차들이 존재한다. 그러나, 돌발적인 오차가 생긴 후 1 초 내에 오차들이 일정한 값에 수렴함을 보여준다. 발생된 경로는 최적길이 1023.6 mm 를 가지고 있다. 대차목표속도는 장애물근처에서는 80 mm/sec 로 자유공간에서는 120 mm/sec 까지 변한다. 목표점까지 약 9.38 초 걸린다.

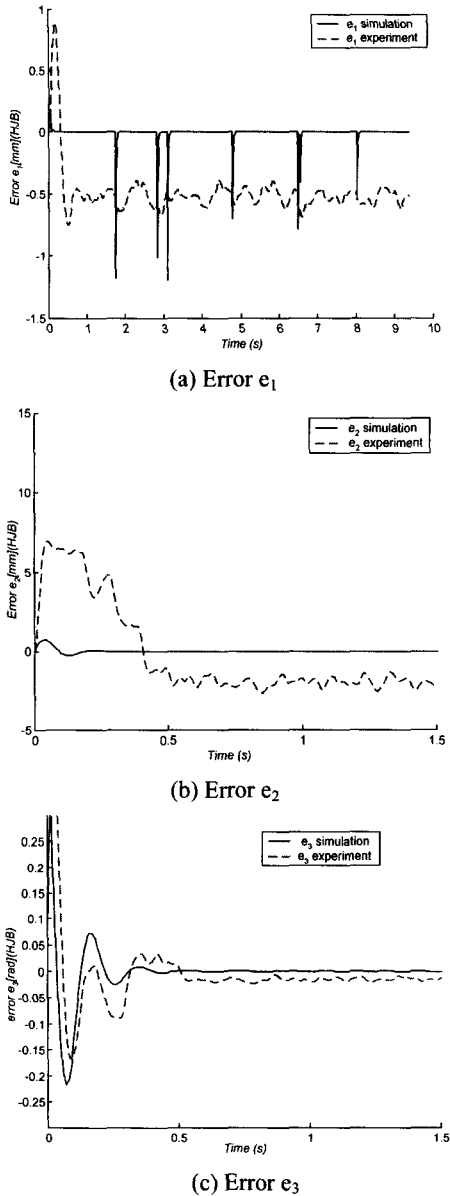


Fig. 10 Tracking error of MR along the path

또한 추적오차 e_1 의 변동이 시뮬레이션결과에서 크게 나타나지만, 실험결과는 1 mm 보다 적게 나타나며 시뮬레이션보다 완만하게 나타나고 있다. 추적오차 e_2 의 초기오차는 2.5pixels(~ 8mm) 이내에서 변동하며 정상상태에서는 1pixels(~ 3.5mm) 로 감소된다. 장애물과의 충돌위험을 감소시키기 위해 상기의 추적오차 e_2 를 보완시키는 더욱 안전한

공간으로의 경로계획이 요구된다. Fig. 10(c)에서, 추적오차 e_3 는 e_1 와 e_2 보다 즉시로 더 안전한 상태로 접근한다.

시뮬레이션과 실험결과를 통해, 본 논문에서 제시된 추적제어기로 HJB 기반 경로계획법으로 발생시킨 궤적을 이동로봇이 효과적으로 추적시킬 수 있음을 보여주고 있음을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서 제시된 비선형 적분형 백스텝핑 제어기로 HJB 기반 경로계획법으로 발생시킨 궤적을 이동로봇이 천장설치형 USB 카메라시스템으로 기지의 장애물 위치정보를 획득하여 충돌 없이 회피시킬 수 있음을 시뮬레이션과 실험을 통해 보였다. 개발된 제어시스템은 무선통신을 이용하여 고 수준의 컴퓨터제어와 저 수준의 PIC 기반 마이크로 프로세서의 통합을 기반으로 하고 있다. 고 수준의 컴퓨터 제어는 영상처리 제어모듈과 경로계획 모듈로 하며, 반면에 저 수준의 PIC 마이크로프로세서 제어는 장치제어로 한다. 시뮬레이션 및 실험을 통해 본 제어시스템이 효과적으로 장애물을 충돌 없이 회피시킬 수 있음을 보여주고 있다.

참고문헌

1. Bui, T. H., Chung, T. L., Nguyen, T. T. and Kim, S. B., "Adaptive Tracking Control of Two-Wheeled Welding Mobile Robot with Smooth Curved Welding Path," *KSME International Journal*, Vol. 17, No. 11, pp. 1682-1692, 2003.
2. Ferro, R. and Lewis, F. L., "Control of a Nonholonomic Mobile Robot: Backstepping Kinematics into Dynamics," *The 34th Conf. Dec. Ctrl.*, New Orleans, LA, pp. 3805-3810, 1995.
3. Dixon, W. E., Dawson, D. M. and Zergeroglu, E., "Adaptive Tracking Control of a Wheeled Mobile Robot Via an Uncalibrated Camera System," *IEEE Trans. on Sys. Man, Cybern.*, Vol. 31, pp. 341-352, 2001.
4. Carelli, R. and Oliveira, Freire, E., "Corridor Navigation and Wall-Following Stable Control for Sonar-Based Mobile Robots," *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 45, pp. 235-247, 2003.

5. Ohya, A., Kosaka, A. and Kak, A., "Vision-based Navigation by a Mobile Robot with Obstacle Avoidance Using Single-Camera Vision and Ultrasonic Sensing," *IEEE Trans. on Robot. and Auto.*, Vol. 14, No. 6, pp. 969-978, 1998.
6. Lee, W.-H., Roh, K. S. and Kweon, I.-S., "Self-Localization of a Mobile Robot without Camera Calibration Using Projective Invariants," *Pattern Recognition Letters*, Vol. 21, pp. 45-60, 2000.
7. Hoover, A. and Olsen, B. D., "Path Planning for Mobile Robots Using a Video Camera Network," presented at *IEEE/ASME Int. Conf. Adv. Intell. Mecha.*, Atlanta, USA, pp. 890-895, 1999.
8. Rimon, E. and Koditschek, D. E., "Exact Robot Navigation Using Artificial Potential Functions," *IEEE Trans. Robot. Automat.*, Vol. 8, pp. 501-518, 1992.
9. Sundar, S. and Shiller, Z., "Optimal Obstacle Avoidance Based on the Hamilton-Jacobi-Bellman Equation," *IEEE Trans. Robot. Automat.*, Vol. 13, pp. 305-310, 1997.
10. Kozlowski, K. and Majchrzak, J., "A Backstepping Approach to Control a Nonholonomic Mobile Robot," presented at *IEEE Int. Conf. on Robo. & Auto.*, Washington DC, pp. 3972-3977, 2002.
11. Fukao, T., Nakagawa, H. and Adachi, N., "Adaptive Tracking Control of a Nonholonomic Mobile Robot," *IEEE Trans. Robot. Automat.*, Vol. 16, pp. 609-615, 2000.
12. Kim, D. K., Kim, H. K. and Kim, S. B., "Image Processed Tracking System of Multiple Moving Objects Based on Kalman Filter," *KSME International Journal*, Vol. 16, No. 4, pp. 427-435, 2002.
13. Kim, E. H. and Oh, J. H., "A Study on Real-time Path Planning and Visual Tracking of the Micro Mobile Robot," *1997 Spring Conference of KSPE, Korea*, pp. 25-29, 1997.