

비전시스템을 이용한 이동로봇의 서보제어

Servo Control of Mobile Robot Using Vision System

°백승민*, 국태용*

* 성균관대학교 전자공학과(Tel:+82-331-290-7202; Fax:+82-331-290-7191; E-mail:hotshot@yurim.skku.ac.kr)

Abstracts In this paper, a precise trajectory tracking method for mobile robot using a vision system is presented. In solving the problem of precise trajectory tracking, a hierarchical control structure is used which is composed of the path planner, vision system, and dynamic controller. When designing the dynamic controller, non-ideal conditions such as parameter variation, frictional force, and external disturbance are considered. The proposed controller can learn bounded control input for repetitive or periodic dynamics compensation which provides robust and adaptive learning capability. Moreover, the usage of vision system makes mobile robot compensate the cumulative location error which exists when relative sensor like encoder is used to locate the position of mobile robot. The effectiveness of the proposed control scheme is shown through computer simulation.

Keywords Mobile robot, Vision system, Adaptive learning control

1. 서론

최근 20세기 후반에 들어서면서 이동로봇에 관한 관심이 높아졌고, 이에 대한 많은 연구들이 진행되었다. 이동로봇에 대한 구체적인 연구는 1968년과 1971년에 Stanford Research Institute에서 Nilsson이 SHAKEY를 설계·제작한 이후 20년 이상 지속되어왔으며, 특히 70년대 후반부터는 마이크로프로세서의 눈부신 발전에 힘입어 연구분야와 응용사례가 가시화되고 있다.

이동로봇에 대한 연구분야도 매우 다양한데 이동로봇의 주행에 관한 연구로는 실험실이나 복도와 같이 알려진 환경에서의 주행문제와 화성 탐사로봇의 작업환경 같이 구조화되지 않은 환경에서의 주행문제, 또 각각의 경우에 경로 계획이나 장애물회피문제 등에 대한 연구가 있었다[10]. 또한 초음파, 적외선, 시각센서 등을 이용한 이동로봇의 환경인식에 대한 연구와 이동로봇의 효율적인 제어구조 설계에 관한 연구가 진행되고 있으며[11,12,13], 이동로봇 제어기 설계에 있어서는 논홀로노믹 제약조건(Nonholonomic constraints)을 극복하는 동역학 제어기로서 비선형 제한 방법, 입·출력 제한 선형화 방법 등을 이용한 제어기 설계에 관한 연구가 있었다[1,2,3,4,5,6,7].

본 논문에서는 실험실 환경에서 비전시스템을 이용한 이동로봇의 정확한 궤적추종 문제를 해결하고자 하며, 이동로봇을 제어하고 모델링하는데 있어서 비이상적인 조건-파라미터 변동, 마찰력, 외부 외란 등에 대하여 적절히 반응하고 일정한 크기를 갖는 제어입력을 비롯하여 반복적 또는 주기적 동역학 제어입력을 학습할 수 있는 강인한 적응학습제어기를 설계하고자 한다.

2. 비전시스템

단일 센서로서 가장 다양한 정보를 줄 수 있는 센서가 시각센서인데 본 논문에서는 이동로봇의 시각센서로 CCD 카메라를 사용한다. 즉, 이동로봇 위에 한 개의 CCD 카메라를 장착하고 영상 그라버(image grabber)를 통해 영상을 인식하고 처리한다. 이러한 영상처리시스템은 매 샘플링시간마다 영상을 얻고, 그 가운데 연속된 두 개의 영상으로부터 공간상의 물체의 운동을 영상평면(image plane)상에서의 운동으로 나타내며, 이것을 분석하여 공간상에서 운동하고 있는 대상의 위치, 자세, 속도 등을 얻는다. 본 논문에서의 경우 환경은 고정되어 있고 이

동로봇이 움직임에 따라 영상평면 상의 물체들이 변화하므로 이러한 영상처리결과로부터 이동로봇의 위치에 대한 정보를 알 수 있다.

본 논문에서 카메라 모델은 그림1과 같이 렌즈를 하나의 작은 공명으로 간주한 이상적인 Pin hole 카메라로 했다. 그리고 공간상의 한 점을 영상평면으로 투영하는 방법은 원근투영법을 이용했다.

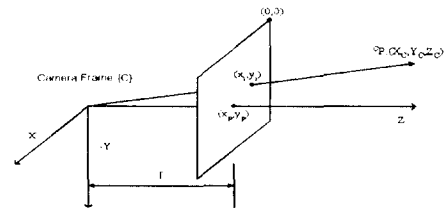


그림 1. 핀홀 카메라 모델

Fig. 1. Pin hole camera model

2.1 영상 자코비안

일반적인 eye-in-hand 카메라 구성의 경우에는 카메라의 직선운동과 회전운동에 따라 관측되는 카메라 좌표계에서의 점 ${}^C P$ 의 이동은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$${}^C \dot{P} = - {}^C V - {}^C \Omega \times {}^C P \quad (1)$$

여기서 ${}^C V = [\dot{x}_c \ \dot{y}_c \ \dot{z}_c]^T$ 이고 ${}^C \Omega = [\omega_{x_c} \ \omega_{y_c} \ \omega_{z_c}]^T$ 로서 카메라의 선속도와 회전속도를 나타낸다. 이제 영상평면 상의 속도관계식과 위 식(1)을 결합하면 카메라가 모든 방향으로 직선운동과 회전운동을 할 경우 영상평면 상의 점의 이동을 나타내는 자코비안을 얻을 수 있다. 하지만 이동로봇 위에 카메라가 고정되고 이동로봇이 이상적인 평면에서 움직인다고 가정할 때 카메라의 앞뒤방향으로의 선속도 (\dot{z}_c) 성분과 회전속도 중에서는 단지 y축 기준의 회전속도(ω_{y_c}) 성분만이 존재한다. 그러므로 이동로봇의 움직임에 따른 영상평면 상의 속도 관계식은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_s \\ \dot{y}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x_s}{Z_C} & -\left[\frac{f}{s_x} + \frac{s_x}{f} x_s^2\right] \\ \frac{y_s}{Z_C} & -\frac{s_x}{f} x_s y_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{z}_C \\ \omega_{y_c} \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 $x_s = x_i - x_p$, $y_s = y_i - y_p$, $x_i = \frac{fX_C}{s_x Z_C} + x_p$, $y_i = \frac{fY_C}{s_y Z_C} + y_p$, f 는 렌즈의 초점거리, s_x 와 s_y 는 CCD 어레이에서 화소의 수평과 수직 차원을 나타내며, (x_p, y_p) 는 광축의 CCD 통과점이다.

2.2 비전시스템을 이용한 이동로봇의 위치인식

크기와 위치를 알고 있는 표지가 이동로봇의 움직임으로 인해 화면에서 움직이면 위에서 살펴보았던 영상평면상의 속도 관계식에 따라 이동로봇의 선속도와 회전속도를 결정할 수 있다. 식(2)에서 카메라의 선속도와 회전속도성분을 이동로봇의 선속도와 회전속도와 같다고 놓고 자코비안을 계산하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_s \\ \dot{y}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{x_s}{Z_C} & -\left[\frac{f}{s_x} + \frac{s_x}{f} x_s^2\right] \\ -\frac{y_s}{Z_C} & -\frac{s_x}{f} x_s y_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서, η_1 과 η_2 는 각각 이동로봇의 선속도와 각속도를 나타낸다. 위의 식을 이용하면 자코비안의 역행렬이 존재하는 한 영상평면상의 점의 이동속도로부터 이동로봇의 선속도와 회전속도를 구할 수 있다. 위 식에서 자코비안의 역행렬이 존재하려면 Z_C 와 Y_C 가 모두 '0'이 아니면 된다. 영상의 샘플링 간격은 동력학제어기의 학습입력 갱신 시간간격(δ)보다 크므로 이동로봇의 주행중 순간적인 위치는 각 바퀴에서의 인코더 입력으로 dead reckoning 과정을 통해 구한다. 이전 영상 샘플에서의 위치에 이전 영상샘플에서 현재 영상샘플까지의 계산된 이동로봇의 선속도와 회전속도로부터 구해진 이동로봇의 변위를 더하여 현재 이동로봇의 위치를 결정할 수 있다. 비전시스템이 없이 인코더와 같은 상대센서만을 갖춘 이동로봇의 주행에서는 dead reckoning만으로 로봇의 위치를 구하게 되므로 출발위치에서 멀어지거나 이동량이 많아지면 위치오차가 누적이 되지만 본 논문에서와 같이 주기적인 영상입력을 이용하면 누적오차를 줄일 수 있다.

3. 동력학 제어기

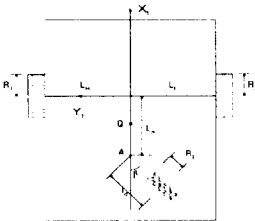


그림 2. 평면에서의 이동로봇의 구성도
Fig. 2. Planar robot model

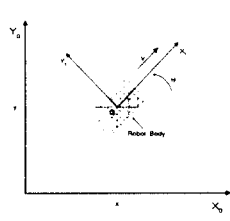


그림 3. 이동로봇의 좌표계
Fig. 3. Coordinates of the mobile robot

본 연구에서 고려하는 이동로봇은 그림2와 같이 1개의 보조 바퀴와 2개의 구동 바퀴를 지닌 2자유도 이동로봇이다. 먼저, 이동로봇의 동력학을 모델링하기 위하여 다음과 같은 가정을 도입한다.

가정 1) 이동로봇의 모든 부분은 강체로 구성되어 있다.

가정 2) 이동로봇의 바퀴는 순수한 회전과 비미끄럼 조건을 만족한다.

가정 3) 바닥과 바퀴의 회전축의 수직축은 항상 90°를 이룬다. 그림2와 같이 주어진 이동로봇의 기구학 및 동력학 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다[2].

$$\zeta \equiv \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = J(\theta) \eta \equiv \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\beta = \frac{1}{l_d} [\sin(\beta)\eta_1 + (l_d + L_a \cos \beta)\eta_2]$$

$$D(\beta)\dot{\eta} + C(\theta, \beta)\eta + f(\eta) + d = \tau \quad (5)$$

여기서 η_1, η_2 는 이동로봇의 선속도 및 회전속도이다. $D(\beta)$ 는 대칭인 양의 한정 관성 행렬[$D(\beta) \in R^{2 \times 2}$]이고, $C(\theta, \beta)\eta$ 는 구심력과 코리올리력[$C(\theta, \beta) \in R^{2 \times 2}$]을 나타내며, $f(\eta)$ 는 마찰력[$f(\eta) \in R^{2 \times 1}$], d 는 확정외란[$d \in R^{2 \times 1}$], 그리고 τ 는 입력토크 벡터[$\tau \in R^{2 \times 1}$]를 나타낸다. 제어기 설계를 위하여 유도된 이동로봇의 동력학 모델식이 다음과 같은 성질을 만족한다고 가정한다.

성질 1) $D-2C$ 는 비대칭(skew-symmetric)인 성질을 갖는다.

성질 2) $\tau - d = y(\eta, \dot{\eta})\psi$

여기서 $y(\cdot) \in R^{2 \times m}$ 과 $\psi \in R^{m \times 1}$ 는 각각 회기행렬과 미지의 파라미터 벡터를 나타낸다. 즉, 동력학식은 미지의 파라미터 벡터에 대하여 선형이다.

성질 3) 미지의 확정외란(d)은 유계되어 있으며, $d = d_0 + d_1$ 로 기술될 수 있고, $\|d_1\| \leq d_m$ 이고 d_0 는 상수이다.

그러면, 이동로봇의 제어문제는 $\zeta_d = J(\theta_d)\eta_d$ 를 만족하는 이동로봇의 요구계적(ζ_d, ζ_d)에 대하여, 시간이 흐름에 따라 ζ 가 ζ_d 를 추종하도록 하는 제어입력을 설계하는 문제로 요약된다.

3.1 속도추종 제어기

명령속도(η_d)와 이동로봇의 실제속도(η)에 대한 오차, 기준속도(S_r) 및 기준속도오차(S)를 다음과 같이 정의하자.

$$\begin{aligned} \dot{\eta} &= \eta_d - \eta, S = S_r - \eta \\ S_r &= \eta_d + a \int_0^t \dot{\eta} d\epsilon \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 a 는 양수이다. 위의 정리를 이용하여 이동로봇의 식(5)을 정리하면 동력학식은 다음과 같이 재배열된다.

$$D\dot{S} + CS + \Gamma S = Y\psi + \Gamma S + d - \tau \quad (7)$$

여기서 Γ 는 양의 요소를 지닌 대각행렬이고,

$$Y\psi = D\dot{S}_r + CS_r + f \quad (8)$$

또한 실제 파라미터와 기준속도로 이루어진 명령계적에 대한 역동력학 입력은 다음과 같다.

$$Y_d\psi = D\dot{\eta}_d + C\eta_d + f(\eta_d) \quad (9)$$

이제, 이동로봇에 대한 속도추종 제어기의 출력은 다음과 같이 설정하자.

$$\tau = Y_e p\tau[\hat{\psi}] + \Gamma S + p\tau[h] + p\tau[\gamma] \quad (10)$$

여기서 $Y_e = Y - Y_d$ 이고 $\hat{\psi}$ 는 추정된 파라미터, h 는 학습입력, γ 는 강인제어입력으로 아래에서 정의된다.

제어기의 출력은 식(8)에 대입하면 속도 오차 방정식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$D\dot{S} + CS + \Gamma S = Y_e \hat{\psi} + \tilde{h} + d_1 - \gamma \quad (11)$$

여기서 $\hat{\psi} = \psi - \hat{\psi}$, $\tilde{h} = h_d - h$ 이고 강인제어입력은

$\gamma = \text{pr}[\widehat{d}_m(t)] \text{sgn}(S)$ 과 같이 정의한다. $h_d = Y_d \psi + d_0$, $\widehat{d}_m(t)$ 은 d_m 의 추정값이다.

학습입력과 추정파라미터 그리고 외란의 경계치에 대한 학습법칙을 다음과 같이 정의하자.

$$\begin{aligned} h(t) &= \text{Pr}[h(t-\delta)] + \sigma \Lambda_1^{-1} S(t-\delta) \\ \widehat{\psi}(t) &= \text{Pr}[\widehat{\psi}(t-\delta)] + \sigma \Lambda_2^{-1} Y_e^T S(t-\delta) \\ \widehat{d}_m(t) &= \text{Pr}[\widehat{d}_m(t-\delta)] + \sigma \Lambda_3^{-1} S(t-\delta) \end{aligned} \quad (12)$$

여기서 Λ_1, Λ_2 는 양의 대각행렬인 학습이득이고, Λ_3, σ 는 양수인 학습이득, δ 는 갱신 시간간격, $\text{Pr}[\cdot]$ 은 무명 연산자이다.

위의 학습법칙에 있어서 갱신 시간간격(δ)의 선택은 목표 제어입력 값이 다음 조건이 만족하도록 선택한다.¹⁾

$$h_d(t) \cong h_d(t-\delta) \quad (13)$$

그러면, 제어입력(10)과 학습규칙(12)을 지닌 속도추종 제어기는 점근적으로 수렴한다.

정리1. 속도추종 제어입력(10)과 학습입력, 파라미터, 시변 외란의 경계치를 위한 학습규칙(12)로 구성된 속도추종 제어기에 의하여 오차시스템(11)은 점근적으로 수렴한다.

3.2 위치추종 제어기

이제 위치추종 제어기를 설계하기 위하여 기준자세벡터와 이동로봇의 현재 자세벡터를 정의하자. 기준 좌표계에서 본 자세벡터 오차는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_e = \begin{bmatrix} P_{e1} \\ P_{e2} \\ P_{e3} \end{bmatrix} = P_r - P_c = \begin{bmatrix} x_r - x_c \\ y_r - y_c \\ \theta_r - \theta_c \end{bmatrix}. \quad (14)$$

여기서 실제 이동로봇이 보정해야 할 오차는 이동로봇 좌표계에서 계산된 오차이므로 좌표 변환행렬에 의해 보정할 오차를 계산하여야 한다. 즉, 위치추종 오차를 이동로봇에 설정된 좌표계로 표현하면 다음과 같다.

$$e = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_c) & \sin(\theta_c) & 0 \\ -\sin(\theta_c) & \cos(\theta_c) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{e1} \\ P_{e2} \\ P_{e3} \end{bmatrix}. \quad (15)$$

위치추종을 위한 제어입력의 변수는 속도추종 제어기의 기준속도성분(η_d) 대신 보조속도성분(η_r)을 사용한다. 보조 속도성분의 구성은 기준 선속도, 회전속도, 변환된 자세벡터 오차로 이루어진다[1].

$$\eta_r = \begin{bmatrix} \eta_{1d} \cos(e_3) + K_1 e_1 \\ \eta_{2d} + K_2 \eta_{1d} e_2 + K_3 \eta_{1d} \sin(e_3) \end{bmatrix}. \quad (16)$$

여기서 K_1, K_2, K_3 는 양수이다.

그러면, 속도추종 제어기는 보조속도성분을 추종하게 되므로 기존의 제어변수를 η_d 에서 η_r 로 치환하여 다음과 같이 재정의한다

$$\tilde{h} = h_r - h, \quad \tilde{\eta} = \eta_r - \eta \quad (17)$$

$$S_r = \eta_r + a \int \tilde{\eta}, \quad S = S_r - \eta$$

$$Y_d \psi \equiv Y_r \psi = D \tilde{\eta}_r + C \eta_r + H(\eta_r) + f(\eta_r). \quad (18)$$

여기서 $h_r = Y_r \psi + d_0$ 이다. 또한, 위치추종 제어기의 출력은 다음과 같다.

주1) 목표속도(η_d)가 일정한 경우 또는 주기함수로서(즉, $\eta_d(t) = \eta_d(t+T)$) $\delta = T$ 로 설정할 수 있는 경우는 $h_d(t) = h_d(t-\delta)$ 을 만족한다.

$$\tau = Y_e \text{pr}[\widehat{\psi}] + I S + \text{pr}[\gamma] + \text{pr}[h]. \quad (19)$$

여기서 $Y_e = Y - Y_r$ 이다.

속도추종이 보장되는 속도추종 제어기에 추종속도로써 위의 보조속도 성분을 지닌 위치추종 제어기는 정확한 위치와 속도추종을 할 수 있다[1].

정리2. 학습규칙(12)과 제어입력(19)을 사용한 위치추종 제어기는 다음과 같이 수렴한다.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\eta} = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} e = 0.$$

5. 모의실험

모의실험에 사용된 이동로봇의 파라미터는 표1과 같다.

표 1. 모의 실험에 사용된 파라미터 값

Table 1. Parameter values used in computer simulation

표시	값	설명
M	35 Kg	이동로봇의 질량
L_a	0.19 m	보조바퀴의 위치
l_d	0.01 m	보조 바퀴의 회전축과 위치까지의 길이
R_2, R_3	0.055 m	구동 바퀴의 반경
R_1	0.02 m	보조 바퀴의 반경
m_2, m_3	0.2 Kg	구동바퀴의 질량
m_1	0.05 Kg	보조바퀴의 질량
p_1, p_2	0.05m	무게중심 위치
B_i	2	정지 마찰 계수
C_i	4	운동 마찰 계수

학습규칙에 의하여 추정된 파라미터의 수는 16개이고 유계된 외란 모델은 다음과 같이 설정하였다.

$$d_i = 5 + 0.5 \sin(1000t), \quad i=1,2 \quad (20)$$

이와 같은 외란 모델은 모터의 토크리플등 비선형 잡음으로 가정할 수 있다. 모의실험은 부정확한 파라미터에 대한 제어기의 적응성과 외란에 대하여 강인한 제어성능의 고찰을 목적으로 한다. 모의 실험시 추종 파라미터의 초기값을 모두 '0'으로 두었고, 학습규칙 갱신시간간격(δ)는 3.14ms로 하였다. 모의실험을 위한 기준 궤적은 일반적으로 이동로봇의 경로를 설계하는데 기본이 되는 직선궤적과 원궤적을 사용하였다. 우선 직선궤적에 대한 모의실험에서 가속도는 0.1%, 정속시 속도는 0.5%, 감속도는 -0.5%로 했다. 즉, 처음 5초간 가속하고 정속으로 달리다가 마지막 5초간 감속하는 형태이다. 그림4는 직선궤적에 대한 이동로봇의 응답특성을 보여준다. 그림5는 원궤적 추종시 추종 성능을 나타내며 선속도는 앞의 직선궤적의 경우와 동일하게 주었으며, 회전속도는 선속도와 비가 1:1임을 가정하고 선속도와 동일하게 주었다(반지름이 1m인 원궤적).

모의 실험에서는 두 종류의 기본궤적에 대한 이동로봇의 추종특성에 대해 고찰하였는데, 그 결과 유계된 외란과 바퀴의 마찰력 존재시에도 강인한 제어특성을 보임을 알 수 있다. 또한 이동로봇의 질량, 관성 그리고 질량중심 등, 파라미터에 대한 사전 정보 없이도 적절한 제어 입력을 구성하여 기준 궤적을 추종하는 것을 알 수 있다.

또한 비전시스템의 성능을 컴퓨터 모의실험으로 검증해 보았다. CCD 카메라는 전방 90도 영역을 볼 수 있다고 가정하였고, 초점거리는 1cm, 수평 수직 pixel의 수는 1000개로 가정하였다. 비전시스템의 샘플링 주기는 동력학제어기의 갱신시간간격의 10배인 31.4ms로 보았다. CCD 카메라의 위치는 이동로봇의 중앙에 바닥으로부터 30cm의 높이에 두었고, 표지는 로봇의 4.5m앞 95cm의 높이에 두었으며, 이동로봇이 동력학 제어기로 10초간 직선주행을 할 때 비전시스템을 통해 이동로봇의 위치와 방향을 측정해 보았다.

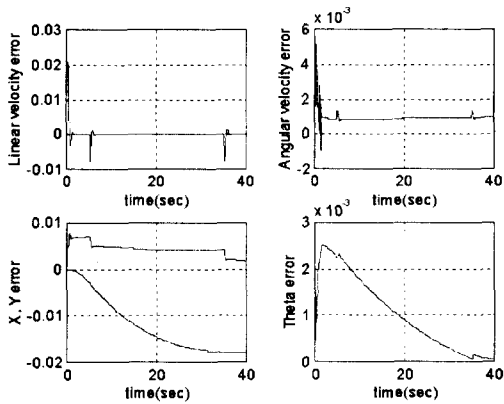


그림 4. 이동로봇의 응답 [직선궤적]

Fig. 4. Response of mobile robot [linear trajectory]

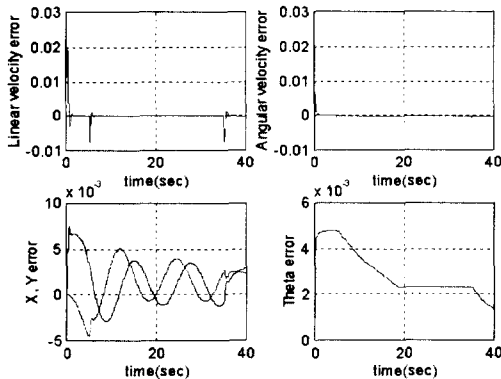


그림 5. 이동로봇의 응답 [원궤적]

Fig. 5. Response of mobile robot [circle trajectory]

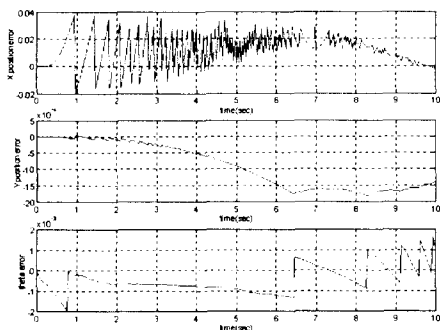


그림 6. 이동로봇의 위치와 방향에 대한 비전시스템의 측정오차

Fig. 6. Measurement errors of vision system for position & direction of mobile robot

그림6은 비전시스템으로부터 구한 이동로봇의 위치와 방향과 실제 로봇의 위치와 방향 사이의 차이를 나타낸다.

6. 결론

이제까지 이동로봇의 전체적인 구조를 설계하였고, 외란에 강인하고 불확실한 파라미터를 잘 추종할 수 있는 동력학제어기를 구성하였으며, 비전시스템을 이용한 이동로봇의 위치보정을 제안하였다. 또한 컴퓨터 모의실험을 통하여 동력학제어기의 성능과 비전시스템의 성능을 확인할 수 있었다. 본 논문에서 제안한 비전시스템은 단순히 초기에 위치를 알고 있는 한 점의 이동만으로 이동로봇의 위치를 추정할 수 있으므로 간단한 저가의 영상처리 하드웨어만으로도 구현할 수 있다. 또한 비전시스템과 동력학제어기를 병행하여 사용함으로써 부정확한 파라미터, 외란, 비이상적인 주행 조건 등을 극복할 수 있다.

7. 참고문헌

- [1] Y. Kanayama, Y. Kimura, F. Miyazaki and T. Noguchi, "A Stable Tracking Control Method for an Autonomous Mobile Robot," *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automat.*, pp. 384-389, 1990.
- [2] B. d'Andrea-Novet, G. Bastin and G. Campion, "Modelling and Control of Non Holonomic Wheeled Mobile Robots," *Proc. IEEE. Conf. Robotics and Automat.*, pp. 1130-1135, 1991.
- [3] Hyun-Sik Shim, Joung-Hwan Kim, Kwangil Koh, "Variable Structure Control of Nonholonomic Wheeled Mobile Robot", *Proc. IEEE. Conf. Robotics and Automat.*, pp. 1694-1699, 1995.
- [4] Yilin Zhao and Spencer L. BeMent, "Kinematics, Dynamics and Control of Wheeled Mobile Robots", *Proc. IEEE. Conf. Robotics and Automat.*, pp. 91-96, 1992.
- [5] R. Zulli, R. Fierro, G. Conte and F. L. Lewis, "Motion Planning and Control for Non-holonomic Mobile Robots", *Proc. IEEE IECON*, pp. 551-557, 1995.
- [6] P. Raoux, G. Bourouou, S. Delaplakce, N. Pons, J. Rabit, "A Rapid Mobile Robot Synthesis", *Proc. IEEE. Conf. Robotics and Automat.*, pp. 4073-4078, 1995.
- [7] Y. Kanayama, S. Yuta, "Vehicle Path Specification by a Sequence of Straight Lines", *IEEE Journal of Robotics and Automat.*, vol.4, no.3, pp 265-276.
- [8] R. W. Brockett, "Asymptotic Stability and Feedback Stabilization", *Differential Geometric Control Theory* R. W. Brockett, R. S. Millman and H. J. Sussmann (Eds.), Birkhauser : Birkhauser Boston, Inc., 1983.
- [9] F. L. Lewis, C. T. Abdallah, D. M. Dawson, *Control of Robot Manipulators*, Macmillan Publishing Co., 1993.
- [10] J. Vanderpe, H. V. Brussel, H. Xu, "LIAS: A Reflexive Navigation Architecture for an Intelligent Mobile Robot System", *IEEE Transactions on industrial electronics*, vol.43, no.3, pp 432-440, 1996.
- [11] U. Larsson, J. Forsberg, A. Wernersson, "Mobile Robot Localization: Integrating Measurements from a Time-of-Flight Laser". *IEEE Transactions on industrial electronics*, vol.43, no.3, pp 422-431, 1996.
- [12] T. Shibata, Y. Matsumoto, T. Kuwahara, "Development and Integration of Generic Components for a Teachable Vision-Based Mobile Robot", *IEEE/ASME Transactions on mechatronics*, vol.1, no.3, pp 230-236, 1996.
- [13] R. A. Brooks, "A Robust Layered Control System For A Mobile Robot", *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol. RA-2, no.1, pp 14-23, 1986.