

DC 모터의 센서리스 속도제어 및 그 응용에 관한 연구

김 창 세*

A Study on the Sensorless Speed Control and Its Application of DC Motor

Chang Se Kim

ABSTRACT

In this paper, a new speed control method for DC motor is proposed. This method uses motor parameters instead of using speed or position sensors. In this way, the angular velocity is estimated by the measurement values of the armature voltage and current, instead of measuring the sensor signal. This paper presents an algorithm for estimating the angular velocity of DC motor. The effectiveness of the proposed method is verified by experimental results. Also, the applicability of the proposed method is presented by applying to the velocity control of a wheeled mobile robot.

1. 서 론

일반적으로 회전 시스템의 속도 및 위치제어를 위해서는 타코제너레이터, 엔코더, 포텐션미터 등의 정도 높은 속도 혹은 위치검출용 센서가 요구된다. 그러나 이들 속도 또는 위치검출용 센서들을 이용할 경우 고가로 인한 경제적인 부담과 부피증대로 인한 공간적인 문제점들이 지적되고 있다. 따라서 제어시스템 설계시, 요구되는 사양을 만족하는 동시에, 저비용 시스템을 어떻게 구성하는가 하는 것은 무엇보다 중요하다고 할 것이다. 그 한가지 방법으로, 속도 또는 위치검출센서 없이 모터의 파라미터를 이용해 모터의 속도를 추정하는 방법을 생각할 수 있다. 이에 관련한 몇몇 연구결과가 보고되고 있으나 주로 AC 모터를 대상으로 하고 있다[1-3]. 또한 DC 모터 혹은 DC 서보

* 한국해양대학교 제어계측학과

모터를 대상으로 하고 있는 경우에 있어서도 실험적으로 그 응용 가능성을 제시한 경우는 드물고 시뮬레이션에 그치고 있다[4-6].

본 논문에서는 DC 모터의 속도를 제어함에 있어서 전기자 전압제어법을 채택하고 외부에 부가 장착된 속도검출 센서 대신 모터의 전기자 전압과 전류로부터 모터의 회전수를 추정하는 알고리즘을 제시하고, 실험을 통하여 추정치에 대한 오차를 분석, 검토하므로써 그 유용성을 증명한다. 또한 이를 최적제어 기법에 의해 설계된 제어를 갖는 실험용 이동로봇의 주행속도 제어 시스템에 적용하여 속도 추종 성능을 분석하고 검토한다.

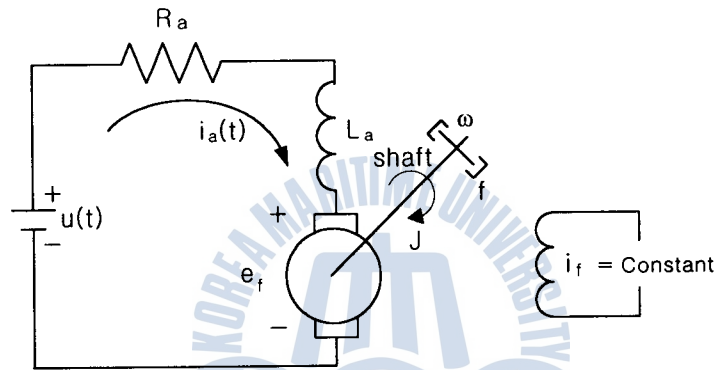


Figure 2.1 Equivalent circuit of DC motor

2. DC 모터의 수학적 모델링

전기자 전압제어법을 이용하는 DC 모터의 등가회로는 그림 2.1과 같이 표현되어진다. 그림 2.1에서 $u(t)$ 는 전기자에 인가해주는 입력전압이고, $i_a(t)$ 는 전기자 전류, R_a 와 L_a 는 각각 전기자 회로의 저항과 인덕턴스 성분들이다[7,8]. 또한 e_f 는 회전자가 회전할 때 전기자에 유도되는 역기전력을 나타낸다.

그림 2.1과 같은 등가회로로 표현되는 전기자 전압제어 DC 모터의 관계식을 정리하면 다음과 같다.

$$u - e_f = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} \quad (2.1)$$

$$e_f = k_v \omega \quad (2.2)$$

$$\tau = k_t i_a = J \frac{d\omega}{dt} + f\omega \quad (2.3)$$

단, e_f : 역기전력 k_v : 역기전력 상수 τ : 모터의 토크
 ω : 회전자의 각속도 k_t : 토크 상수 f : 마찰계수
 J : 모터의 회전자 및 부하의 관성능률

여기서 전기자 저항 R_a 와 역기전력 상수 k_e 가 일정하고, 모든 초기조건들이 영이라고 가정해서 식(2.1)~식(2.3)들을 Laplace 변환하여, 입력을 $U(s)$, 출력을 $\Omega(s)$ 로 하는 전달함수의 블록선도로 작성하면 그림 2.2와 같다.

여기서 $T_a = \frac{L_a}{R_a}$, $k_a = \frac{1}{R_a}$ 이다.

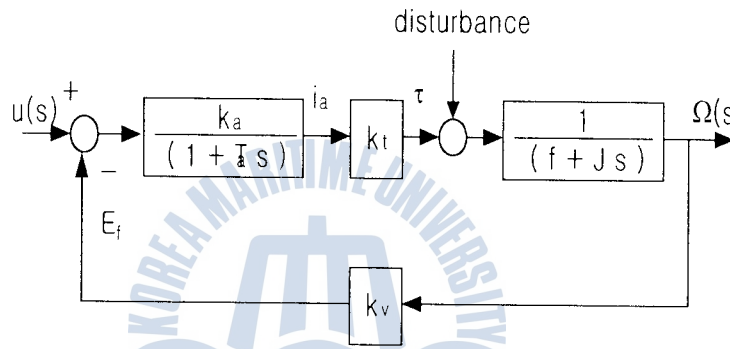


Figure 2.2 Block diagram of an armature voltage controlled DC motor

3. 센서리스 속도 추정 알고리즘

일반적으로 그림 2.1의 등가변환회로에서 인덕턴스 L_a 는 매우 작은 값으로 나타나므로 이를 무시할수 있다. 만일 인덕턴스 L_a 을 무시하게 된다면 $T_a = 0$ 가 된다. 만약 모터의 회전 각속도 ω 의 목표치를 ω_r 라 한다면 식(2.1)과 식(2.3)로부터 식(3.1), 식(3.2)을 얻을 수 있다.

$$i_a = k_a (u - k_v \omega) \tag{3.1}$$

$$i_r = k_a (u - k_v \omega_r) \tag{3.2}$$

단, i_r 은 ω 가 ω_r 일 때의 i_a 를 말한다.

식(3.1)과 식(3.2)로부터 다음과 같이 표현되어지는 식(3.3)을 얻을 수 있다.

$$i_a - i_r = k_a k_v (\omega_r - \omega) \tag{3.3}$$

따라서 k_a 와 k_v 의 값을 정확하게 파악할 수 있다면 각속도를 검출하지 않아도 전기자 전류 i_a 를 검출하여 i_a 가 i_r 이 되도록 전압 u 를 제어하면 ω 는 ω_r 에 접근하게 된다. 여기서 k_a, k_v 의 측정치를 각각 k'_a, k'_v 라 하고, DC 모터의 센서리스 속도 제어 시스템을 구성해보면 그림 3.1과 같은 블록선도를 얻을 수 있다.

전기자 전류 i_a 와 전기자 전압 u 의 측정치로부터 추정된 각속도 ω 의 추정치를 $\hat{\omega}$ 라 하면, 각속도 $\hat{\omega}$ 는 식(3.1)에서 식(3.4)와 같이 되고 식(3.3)은 식(3.5)와 같이 된다.

$$\hat{\omega} = \frac{1}{k'_v} \left(u - \frac{i_a}{k'_a} \right) \quad (3.4)$$

$$i_a - i_r = k'_a k'_v (\omega_r - \hat{\omega}) \quad (3.5)$$

여기서 k'_v, k'_a 는 실험을 통하여 혹은 모터의 정격치로부터 계산되어 질 수 있으므로, 모터의 각속도는 전기자 전압 u 와 전기자 전류 i_a 를 계측함으로써 구해질 수 있다. 따라서, 전기자 전류 i_a 가 목표치 전류 i_r 이 되도록 제어하는 것은 추정 각속도 $\hat{\omega}$ 가 ω_r 이 되도록 제어하는 것과 같게 된다.

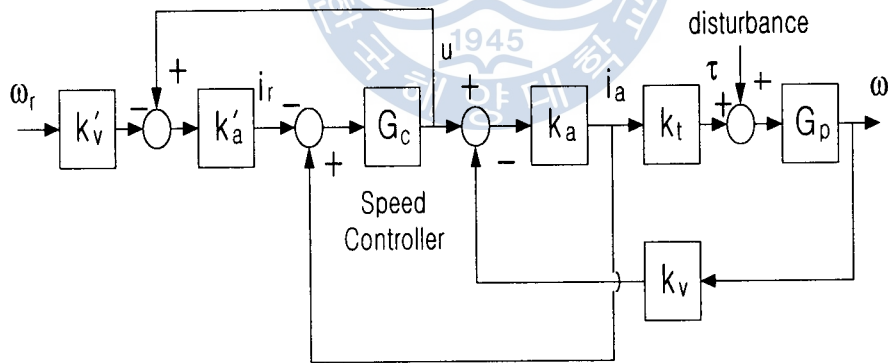


Figure 3.1 Sensorless speed control system of DC motor

단, $G_p = \frac{1}{f + Js}$

이상과 같은 식을 이용하여 전기자 전압제어법을 대상으로 하는 DC 모터의 센서리스 속도제어 시스템을 등가변환하면 그림 3.2와 같은 블록선도로 나타낼 수 있다.

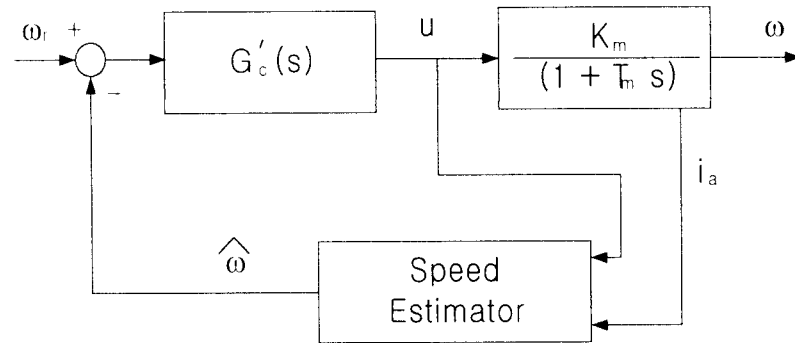


Figure 3.2 Block diagram of the proposed sensorless speed control system

$$\text{단, } G'_c(s) = k_v' k_a' G_c(s), \quad k_m = \frac{k_a k_t}{f + \frac{k_a k_t k_r}{k_a k_t k_r}}, \quad T_m = \frac{J}{f + \frac{k_a k_t k_r}{k_a k_t k_r}}$$

J : 모터축의 관성모멘트 f : 모터축의 마찰계수

4. 차륜형 이동로봇의 속도제어에의 적용

4.1 전체 시스템의 구성

그림 4.1는 차륜형 이동 로봇의 구동 및 제어를 위한 센서리스 속도제어 시스템의 전체 구성을 나타낸 것이다. 시스템은 크게 구동 모터를 포함한 로봇 몸체, PWM Generator을 포함한 모터 구동부, 전기자 전류검출을 위한 전류 검출부, 전기자 전압과 전류로부터 모터의 회전속도를 추정하는 속도 추정기와 제어기로 구성되어 있다. 여기서 속도 추정기와 제어기는 PC를 이용하고 있다. 로봇, 모터구동 및 전기자 전류 검출부, 제어기에 대한 상세를 아래에서 설명한다.

4.2 하드웨어

4.2.1 이동 로봇

그림 4.2은 실험에 이용된 로봇의 개략도로서, (A)는 앞쪽에서 본 모습이고, (B)는 옆에서 본 모습이다. 이동 로봇은 좌우의 구동륜과 전후의 자세보조륜을 가지며 구동륜은 감속기어를 거쳐 구동모터에 연결되어 있다. 또한 구동부와 본체 사이에는 Suspension Spring을 설치하여 주행시 노면의 돌출장애물에 의한 충격을 흡수하도록 설계되었다[9].

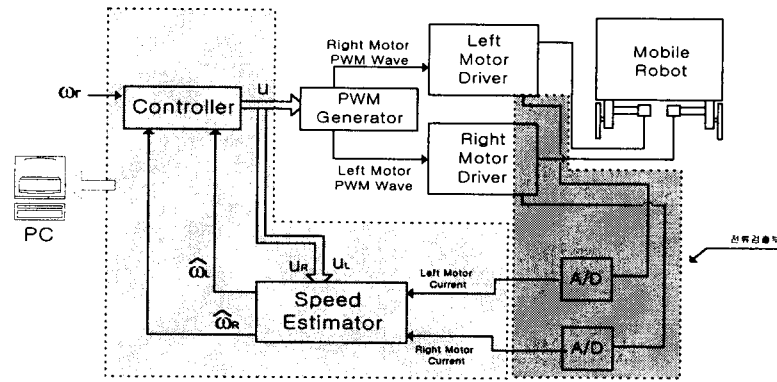


Figure 4.1 Block diagram of sensorless speed control system for a wheeled mobile robot

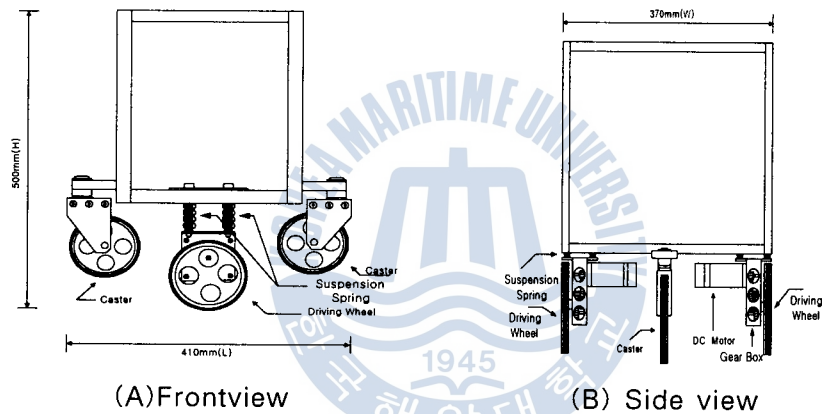


Figure 4.2 Configuration of the robot vehicle

4.2.2 모터 구동부 및 전기자 전류 검출부

그림 4.3은 이동 로봇의 차륜에 연결된 DC 모터 구동부 및 전기자 전류 검출부의 구성도이다. 모터의 전기자 전류를 측정하기 위해 모터의 양단에 전기자와 직렬로 1Ω , 5Watt 저항을 삽입하였다. 전기자 전류에 의해 이 저항 양단에서 일어나는 전압 강하는 A/D 변환기를 통하여 디지털 값으로 변환된 후 PC 내부의 속도 추정기로 들어간다. 이때 A/D 변환기로서는 8 Bit 칩인 ADC0802를 이용하고 있다[10,11].

4.3 제어기 설계

식(3.4)을 이용하여 추정된 각속도를 피드백하여 센서리스 속도제어 시스템을 구성했을 때의 응답을 관찰하기 위하여 제어기를 설계하였다. 속도 제어기는 최적 제어기

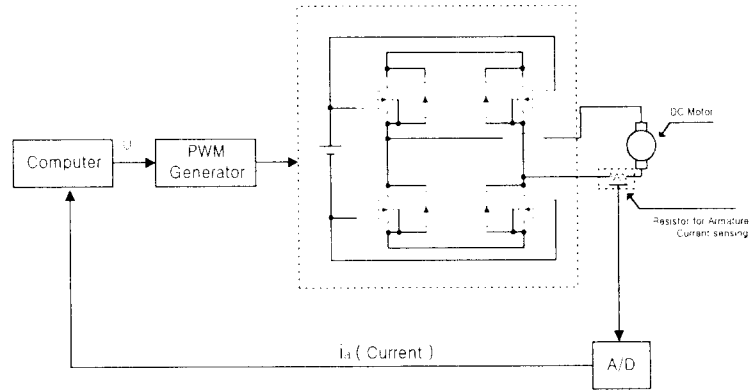


Figure 4.3 Block diagram of DC motor driver and armature current sensing system

법을 이용하여 설계되었는데, 모터의 회전각속도 ω 를 x_1 , 전기자 전압을 제어 입력 u 로 하고, 식(2.1)~(2.3)을 상태방정식으로 표현하고, 또한 목표 속도와 추정속도의 차에 대한 적분치를 하나의 상태변수로 추가한 확장된 시스템의 페루프 시스템을 점근적으로 안정시키는 동시에 평가함수 J

$$J = \int_0^{\infty} (\Delta \dot{x}^T(t) \tilde{Q} \Delta \dot{x}(t) + \Delta u^T(t) \tilde{R} \Delta u(t)) dt \quad (4.1)$$

단, $\tilde{Q} = \tilde{Q}^T \geq 0$, $\tilde{R} = \tilde{R}^T > 0$

을 최소로 하는 최적제어 입력은 다음과 같다.

$$\Delta u(t) = -\tilde{K} \Delta \hat{x}(t) \quad (4.2)$$

\tilde{K} 는 피이드백 계수로서 $\tilde{K} = \tilde{R}^{-1} \tilde{B}^T \tilde{P}$ 이고, \tilde{P} 는 Riccati 행렬 방정식

$$\tilde{P} \tilde{A} + \tilde{A}^T \tilde{P} + \tilde{Q} - \tilde{P} \tilde{B} \tilde{R}^{-1} \tilde{B}^T \tilde{P} = 0 \quad (4.3)$$

의 해이다. 따라서 본 시스템의 제어입력 $u(t)$ 을 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} u(t) &= u_r - \tilde{K} \Delta \hat{x}(t) \\ &= u_r - \tilde{k}_1(\omega(t) - \omega_r) - \tilde{k}_2 \int_0^t (\omega(t) - \omega_r) dt \end{aligned} \quad (4.4)$$

단, $\tilde{K} = [\tilde{k}_1 \quad \tilde{k}_2]$

여기서 ω 는 전술의 속도 추정기로 추정된다고 하면, 식 (4.4)로 표현되는 속도 제

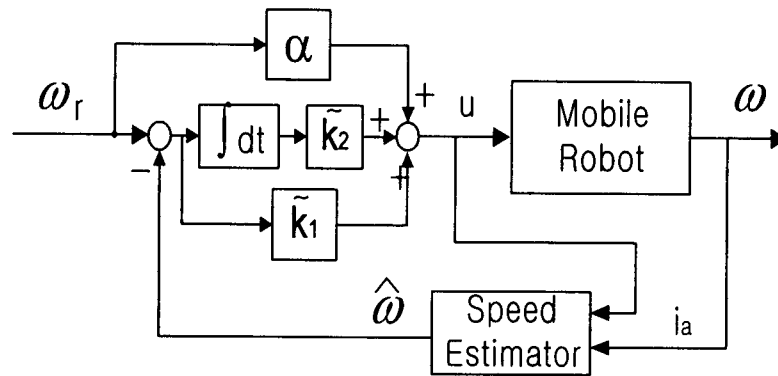


Figure 4.4 Block diagram of the speed control system for the mobile robot

어 시스템은 그림 4.4와 같이 나타낼 수 있다.

여기서 $\alpha = \frac{1}{K_m}$ 이다.

5. 실험 결과 및 검토

5.1 파라미터 결정

5.1.1 속도 추정기의 파라미터

식(3.4)로 표현되는 속도 추정기를 이용하여, 모터의 회전 속도를 추정하기 위해서는 모터의 전기자 저항(R_a)과 역기전력 상수(k_v)에 대한 정보가 주어져야 한다. 이 경우, 순수한 모터의 전기자 저항 및 역기전력 상수는 모터의 정격치로부터 계산되어질 수 있다. 그러나 본 논문에서와 같이 전류검출용 저항이 전기자와 직렬로 삽입되고, 또한 모터 드라이브 회로등의 영향을 무시할 수 없을 경우에는 실험을 통하여 구하는 것이 바람직하다.

표.1은 임의의 전기자 전압 u 를 인가하고 이때의 전기자 전류 i_a 와 각속도 ω 를 반복 실측한 data들을 토대로 최소자승법으로 구한 k_v' , k_a' 값들이다.

5.1.2 제어기 파라미터

그림 3.2에서 정상이득 K_m 과 시정수 T_m 은 인디셜 응답으로부터 표. 2와 같이 얻을 수 있다. 표.1의 파라미터들을 갖는 제어 대상에 대해 식(4.1)의 하중행렬 \hat{Q} , \hat{R} 을

변경해가면서, 모터 드라이버의 구동 능력을 감안해 제어 입력 u 가 $0V \leq u \leq 12V$ 의 범위를 만족하는 피드백 게인 \tilde{k}_1 , \tilde{k}_2 을 시뮬레이션을 통해 표. 3과 같이 구한 후, 이 파라미터를 실험에 이용하였다.

Table 1 Parameters of the speed estimator

구 분	Right	Left
k_r'	0.0145 [volt · sec/rad]	0.015 [volt · sec/rad]
k_a'	0.3466 [ㄷ]	0.3956 [ㄷ]

Table 2 Parameters of plant

구 분	Right	Left
K_m	0.845	0.876
T_m	0.428 [sec]	0.326 [sec]

Table 3 Parameters of Controller

구 분	Right Controller	Left Controller
\tilde{k}_1	1.1433	1.1052
\tilde{k}_2	1	1
α	1.183	1.1414

$$\tilde{Q} = \text{diag}[3 \ 1] \quad \tilde{R} = [1]$$

5.2 실험

5.2.1 속도 추정 실험

그림 5.1는 전기자 전압 u 를 6.18V로 주었을 때의 좌·우모터의 속도에 대한 실측치와 추정치 및 추정오차를 나타낸 것이다. —로 표시된 것은 1024 pulse/1회전의 분해능을 가지는 인크리멘탈 엔코더에 의해 계측된 속도이고, —로 표시된 것은 제안된 알고리즘에 의해 추정된 속도를 나타낸다. 또한 —로 나타낸 것은 추정오차(실측치 - 추정치)이다. 그림 5.1로부터 모터의 회전속도에 대한 추정 오차는 추정초기에는 다소 큰 오차를 보이거나 약 2초가 지나면서 매우 양호한 추정성능(3%미만)을

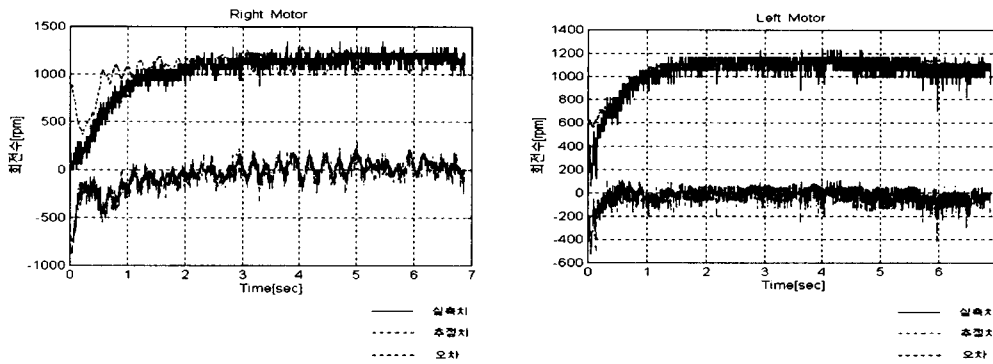


Figure 5.1 Measured and estimated value of right and left motor speed

보이고 있음을 알수가 있다. 이 오차는 속도 추정기의 파라미터를 최소자승법으로 구함에 있어서 샘플데이터의 부족 및 하드웨어 설계시 잡음대책등의 미숙에 의한 것으로 추정된다. 따라서 향후 이에 대한 대책을 보완함으로 보다 추정 정도를 향상시킬수 있을 것으로 생각된다.

5.2.2 속도 제어에 대한 실험

그림 5.2는 이상과 같이 추정된 속도를 그림 4.4의 차륜 속도 제어 시스템에 피이드백 했을 때, 제어 성능을 나타낸 것이다. 여기서 로봇의 목표 속도는 25 cm/sec 이고 피이드백 계인은 표. 4의 값을 이용했다. 그림 5.2로부터 로봇의 주행 속도는 약 1.6초 정도에서 정상상태에 도달함을 알수 있다.

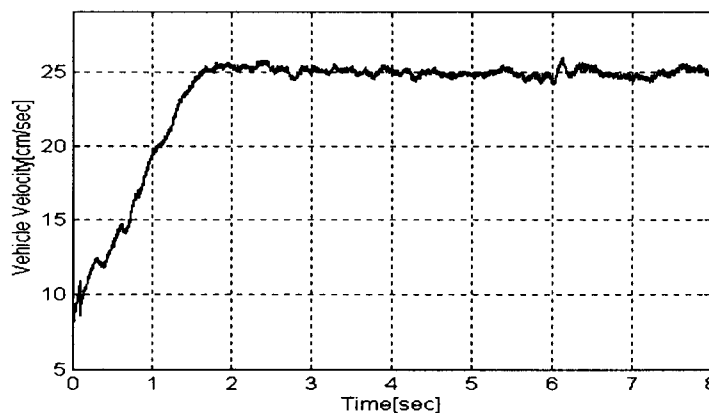


Figure 5.2 Step response for sensorless speed control of mobile robot control ($V_{ref} = 25\text{ cm/sec}$)

6. 결 론

본 논문에서는 DC 모터의 속도를 제어함에 있어서 속도 검출센서를 이용하는 대신에 모터의 전기자 전압과 전류로부터 DC 모터의 회전속도를 추정하는 알고리즘을 제시하고 이에 대한 타당성을 입증하기 위하여 속도 검출용 인크리멘탈 엔코더 센서로부터의 실측치와 제안된 알고리즘에 의해 추정된 속도를 비교, 검토하는 실험을 하였다. 또한 이를 실제의 차륜형 이동 로봇의 주행 속도 제어시스템에 적용함으로써 실례적인 응용예를 제시하였다.

그 결과 제안된 알고리즘에 의해 추정된 속도는 비교적 양호한 추정 오차(3%미만) 값을 얻을 수 있음을 알수 있다. 또한 추정치를 이용한 차륜형 이동 로봇의 주행 속도 제어 시스템에서도 목표치로 잘 추종하고 있음을 알수 있었다. 본 논문에서는 이상의 실험 결과로부터, 제안된 알고리즘을 이용함으로써 기존의 속도 검출용 센서를 이용한 DC 모터의 속도 제어시스템에 비해 보다 경제적인 시스템을 구성할 수 있다는 결론을 얻게 되었다.

참 고 문 헌

- [1] Young-Real Kim, Seung-Ki Sul, Min-Ho Park, "Speed sensorless vector control of induction motor using Extended Kalma Filter", IEEE VOL. 30, NO. 5 1994
- [2] Guo Qingding, Luo Ruifu and Wang Limei, "Neural network adaptive observer based position and velocity sensorless control of PMSM", AMC 1996-MIE, IEEE 1996
- [3] 최재영, 김성환, 권영안: 마이크로프로세서를 이용한 영구자석 동기전동기의 센서리스 속도제어, 韓國船用機關學會誌, 第 20卷, 第 3號(1996)
- [4] Satoshi Ogasawara and Hirofumi Akagi, "An Approach to position sensorless drive for brushless dc motors", IEEE Trans. On Ind. Appl., Vol. 27, No. 5, September/October 1991.
- [5] Nobuyuki Matsui and Masakane Shigyo, "Brushless dc motor control without position and speed sensors", IEEE Trans. On Ind. Appl., Vol. 28, No. 1, January /February 1992.
- [6] Hiroshi Watanabe, Hideyuki Katsushima & Tomoo Fujii, "An improved measuring system of rotor posion angles of the sensorless direct drive servomotor", IECON, 1991.

- [7] Katsuhiko Ogata, “Modern Control Engineering”, 문운당, 1993.
- [8] Benjamin C. Kuo, “Automatic control systems”, Prentice Hall, 1991.
- [9] Yun-Su Ha, “倒立振子型自立移動 ロボットの 走行制御システムに関する 研究”, 1996.
- [10] 谷腰欣司, “ DC 모터의 制御回路設計 ”, 機電研究社, 1993.
- [11] 李注憲, “ 모터제어기술 ”, 성안당, 1997.
- [12] Chi-Tsong Chen, “Linear system theory and design”, Saunders College publishing, 1997.
- [13] H. Kwarkernaak & R. Sivan, “Linear optimal control system”, 1988.

