

# 모바일 로봇 구동 시스템 제어를 위한 선형 및 비선형 모델 기반 PID 제어기 성능 비교

## Comparison of PID Controllers by Using Linear and Nonlinear Models for Control of Mobile Robot Driving System

장태호<sup>1</sup>, 김영식<sup>2,✉</sup>, 김현태<sup>3</sup>

Tae Ho Jang<sup>1</sup>, Youngshik Kim<sup>2,✉</sup>, and Hyeontae Kim<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 한밭대학교 생산융합기술연구소 (Transactions of Institute for Fusion Technology for Production, Hanbat National University)

<sup>2</sup> 한밭대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Hanbat National University)

<sup>3</sup> 한밭대학교 전자제어공학과 (Department of Electronics Control Engineering, Hanbat National University)

✉ Corresponding author: youngshik@hanbat.ac.kr, Tel: +82-42-821-1163

Manuscript received: 2015.4.29. / Revised: 2015.11.17. / Accepted: 2015.12.11.

*In this study, we conduct linear and nonlinear modeling of the DC motor driving system of a wheeled mobile robot, which is a nonlinear system involving dead zone, friction, and saturation. The DC motor driving system consists of a DC motor, a wheel, and gears. A linear DC motor driving system is modeled using a steady-state response and parameter measurements. A nonlinear DC motor driving model is identified with the use of the Hammerstein-Wiener method. By using these models, PID controllers for the DC motor system are then established. Each PID controller is applied as a low-level controller in order to achieve posture stabilization control for the real mobile robot. We also compare the performance of the proposed PID controllers in posture stabilization experiments by using several different final robot postures.*

KEYWORDS: DC motor driving part (DC 모터 구동부), System identification (시스템 식별), Linear and nonlinear system modeling (선형 및 비선형 시스템 모델링), Posture stabilization control (자세 안정화 제어)

### 기호설명

$\omega(s)$  = Angular velocity of a wheel

$V(s)$  = Input voltage

$r$  = Radius of the circular path manifold

$v_r$  = Reference linear velocity of a robot

$v_d$  = Desired linear velocity of a robot

$\dot{\phi}_r$  = Reference steering angular velocity

$\dot{\phi}_d$  = Desired steering angular velocity

$\phi$  = Steering angle of a mobile robot

$\phi_r$  = Reference steering angle of a mobile robot

### 1. 서론

DC 모터는 단순한 구조와 저렴한 가격 그리고 비교적 쉬운 제어 방식으로 산업 및 교육 분야에 널리 사용되고 있다. 그렇기 때문에 DC 모터의 제어 및 시스템 모델링에 대한 연구가 많이 진행

되었다. 많은 경우 DC 모터의 시스템은 2차 선형 모델로 표현되는데 이는 DC 모터 시스템의 Dead Zone, Saturated Zone 등 비선형적 요소를 무시한 단순한 모델이다. 하지만 DC 모터의 정밀한 제어를 위해서는 좀 더 실제 시스템에 가까운 모델링이 필요하다. 이를 위해 비선형성을 고려한 모델링 기법들이 많이 연구되고 있다. Cong<sup>1</sup>은 Compound Evolution Algorithms을 이용하여 DC 모터의 비선형 모델을 식별하였다. Ławryńczuk<sup>2</sup>은 Hammerstein-Wiener Model에 대한 Model Predictive Control (MPC) Algorithm을 제안한다. Dolanc<sup>3</sup>는 Piecewise-Linear Hammerstein Model로 비선형 제어를 설계했다. Dub<sup>4</sup>는 Nelder-Mead Simplex Method를 사용하여 DC 모터의 파라미터를 실험적으로 식별하였다.

이처럼 DC 모터의 시스템 모델링에 대한 연구가 많이 진행되었다. 하지만 많은 연구자들이 관심을 갖고 있는 모바일 로봇<sup>5</sup>에 실제 모델링을 적용한 사례, 특히 모델링 된 구동 시스템을 바탕으로 설계된 제어를 실제 로봇에 적용한 사례는 찾기 어렵다.

본 논문에서는 두 가지 방법 즉, (1) Steady-State 값에 근거한 시스템 선형 모델링 방식<sup>6</sup>과 (2) System Identification<sup>7</sup> 방식을 이용한 비선형 시스템 모델링을 수행한다. 위의 두 가지 방식으로 식별된 시스템 모델들을 이용하여 PID 제어를 설계하고 설계된 각 제어기들을 실제 모바일 로봇에 적용한다. 먼저 제어 시뮬레이션 값과 실험값을 비교하고 다음으로 설계된 PID 제어기들을 모바일 로봇의 자세 안정화 제어에 사용하여 실제 구동 결과를 비교한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 시스템 모델링을 수행한다. 3장에서는 모델링 된 시스템을 사용하여 PID 제어를 설계한다. 4장에서는 설계된 PID 제어기를 실제 모바일 로봇에 적용하여 자세 안정화 제어를 수행하고 결과를 비교한다. 최종적으로 5장에선 결론을 내린다.

## 2. 시스템 모델링

실험에 사용된 모바일 로봇은 Fig. 1과 같다. 크기는 220(W)×180(L)×200(H)mm이다. 모델링 할 모바일 로봇의 구동 시스템은 Fig. 2와 같이 기어, 바퀴 등 회전체 부하가 연결된 DC 모터로 구성된다.

### 2.1 Model 1: Steady State 값을 이용한 모델링

모터의 정확한 모델링을 위하여 일부 모터 제

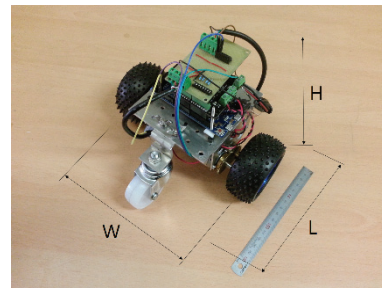


Fig. 1 Wheeled mobile robot

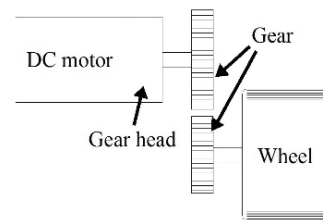


Fig. 2 Driving part of the mobile robot

조사에서는 정확한 파라미터들을 제공하지만 대부분의 DC 모터는 정확한 파라미터들이 제공되지 않는다. 보통 이러한 모터들의 제어를 위해서는 파라미터들을 직접 측정하여야 하나 정밀한 측정이 쉽지 않다. 이러한 문제를 해결하고자 저렴하고 단순한 방법으로 모터의 시스템을 파악하는 연구가 진행되었다. 강형석<sup>6</sup>은 모터의 파라미터들을 멀티 미터기로 측정 후 실험적으로 파라미터를 미세 조정하는 연구를 하였다.

본 논문에서도 위에서 언급된 방법<sup>6</sup>과 유사하게 Steady-State 값을 이용하여 시스템 모델링을 수행한다. 식(1)은 Fig. 2에 표시된 회전체 부하를 고려한 DC 모터의 일반적인 전달함수이다.<sup>6,8</sup>

$$\frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{K_T / (R J_m)}{s + \frac{1}{J_m} \left( D_m + \frac{K_T K_b}{R} \right)} \quad (1)$$

위에서  $\omega(s)$ 는 휠의 각속도,  $V(s)$ 는 모터의 입력 전압,  $K_T$ ,  $K_b$ 는 각각 토크 상수, 역기전력 상수이다.  $R$ 은 코일저항,  $J_m$ 은 등가 관성모멘트,  $D_m$ 은 등가 댐핑 상수이다. 파라미터를 구하기 위해 모터에 인가한 Step Input 전압( $V$ )은 10.24 V, 그 때 전류는 0.2 A, 휠의 Steady-State 속도( $\omega$ )는 790 rad/s이다. Table 1은 측정과 계산에 의해 얻은 회전체 부하가 연결된 DC 모터의 구동 시스템 파라미터

Table 1 Experimentally determined model parameters for the motor driving system

Parameters	Value
R (Ω)	2.3
K <sub>d</sub> (V/(rad/s))	0.012
D <sub>m</sub> (Nm / (rad/s))	3.139×10 <sup>-6</sup>
J <sub>m</sub> (Kg · m <sup>2</sup> )	6.563×10 <sup>-6</sup>

들이다. 순수 DC 모터 자체의 댐핑 상수(D)와 관성모멘트(J)는 각각 2.364×10<sup>-6</sup> Nm/(rad/s), 4.388×10<sup>-6</sup> Kg·m<sup>2</sup>이다. 따라서 Table 1의 등가 댐핑 상수(D<sub>m</sub>)와 등가 관성모멘트(J<sub>m</sub>)는 순수 DC 모터의 파라미터 대비 각각 -132.8%, -149.6% 증가하였다.<sup>8</sup> 식(2)는 이 모터 파라미터를 사용하여 얻은 전달함수이다.

$$\frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{5.391 \times 10^{-3}}{6.563 \times 10^{-6} s + 70 \times 10^{-6}} \quad (2)$$

**2.2 Model 2: System Identification 값을 이용한 모델링**

서론에서 언급하였듯이 일반적인 DC 모터 시스템과 같이 모바일 로봇의 DC 모터 구동 시스템도 마찬가지로, Dead Zone, Saturation 등의 비선형성이 존재하므로 정밀한 제어를 위해서는 비선형을 고려한 시스템 모델링이 필요하다.

Fig. 3은 실제 실험에 사용된 모바일 로봇에 존재하는 Dead Zone 현상을 보여준다. 참고로 실험용 모바일 로봇에 장착된 Arduino MCU는 PWM Signal로 모터를 제어한다. PWM Signal의 범위는 0-255이며 이 때 출력되는 제어 입력 전압의 범위는 0-5 V이다. 일반적으로 PWM Signal과 해당 출력 전압의 관계를 선형으로 가정하지만<sup>9</sup> 실제로는 비선형이다. Fig. 4는 PWM Signal과 출력 전압의 상관 관계 그래프이다. 그러므로 정밀 제어를 위해서는 이러한 실제 작동조건을 고려한 비선형 모델링이 필요하다.

본 논문에서는 두 번째 방법으로 비선형 모델링을 위해 Hammerstein-Wiener 방식을 사용하여 시스템 식별 (System Identification)을 수행한다. MATLAB System Identification Toolbox의 비선형 모델링 방식에는 Hammerstein-Wiener와 ARX 방식이 있다. 기존 연구들에서 Hammerstein-Wiener 방식이 ARX보다 더 정확한 것으로 알려져 있기 때문에 본 논문에서도 Hammerstein-Wiener 방식을 사용한다.<sup>10,11</sup>

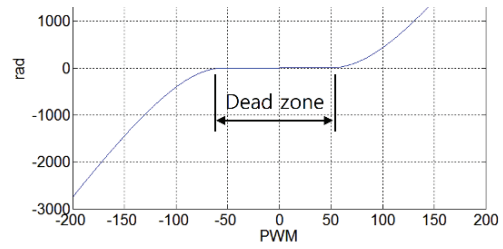


Fig. 3 Actual rotation of the mobile robot's DC motor for a linear PWM signal

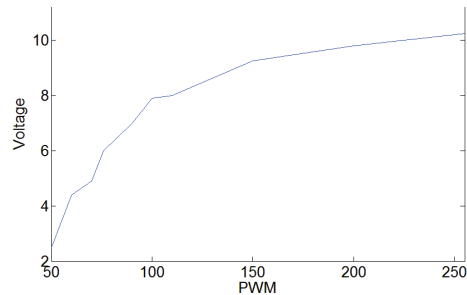


Fig. 4 Correlation between a PWM input and a resulting voltage output

Fig. 5는 비선형 Hammerstein-Wiener 구조다.<sup>12</sup> 여기서 N1, N2는 Static Nonlinearity Block이며 각각 입력 u(t)와 출력 y(t)의 비선형성을 표현한다. LS는 Linear Dynamic System Block이며 시스템의 선형성을 표현한다. Hammerstein-Wiener 모델은 실제 많은 공학분야에 적용될 수 있기 때문에 관련 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>7</sup> 출력 y(t)를 일반적인 벡터 행렬 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$y(t) = \phi^T(t, \rho) \rho \quad (3)$$

여기서, ρ는 각 모델 Block을 묘사하는데 필요한 모델 파라미터로 구성되며 φ<sup>T</sup>(t, ρ)는 각 Block의 입출력간의 관계를 표현하는 함수로 구성 되어있다. 그러므로 주어진 입력 u(t)와 출력 y(t)를 사용하여 이 모델을 식별할 수 있다.

Fig. 5에서 N1은 Sigmoid Network 방식을 사용한다. Sigmoid Network 방식은 단순하지만 다양한 동적 현상을 표현할 수 있다. 기존 연구<sup>12</sup>와 실제 System Identification 수행 결과에 의하면 다른 Network보다 Sigmoid Network 결과의 Fit 정확성이 더 좋았다. 정확한 System Identification을 위해 Sigmoid Network의 적절한 Units 개수도 선정해야



Fig. 5 Nonlinear Hammerstein-Wiener structure

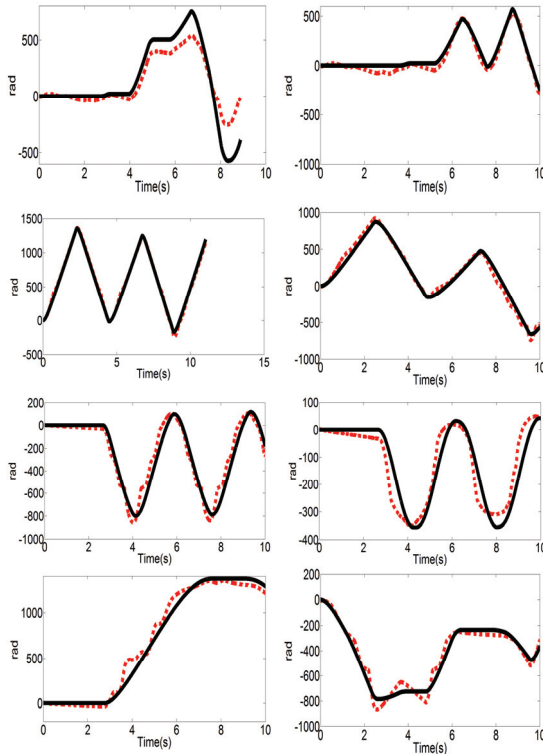


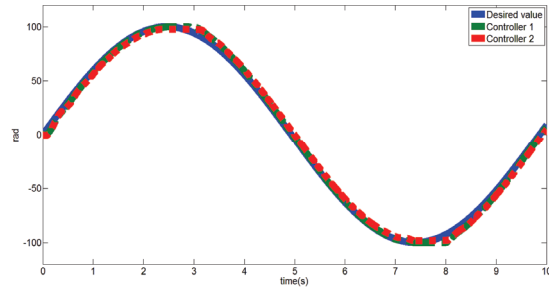
Fig. 6 Responses of the identified model for eight different PWM inputs (solid line: real DC motor driving system, dotted line: identified model)

한다. Units 개수는 20으로 한다. 참조 논문<sup>13</sup>에서 알 수 있듯이 Units 개수가 많을수록 System Identification 정확성이 더 높아지긴 하나 실험한 결과, 20이상일 때 System Identification의 정확성은 크게 증가하지 않고 Identification 소비 시간만 증가하므로 Abbasi<sup>14</sup>이 사용한 값과 같은 20을 사용한다. N2는 Piecewise Linear Network로 선정한다. Piecewise Linear Network의 Units 개수는 10이다. Fig. 5에서 LS의 Zero Order와 Poles Order는 각각 2와 4로 선정한다. Piecewise Linear Network의 Units 개수와 LS의 Zero Order와 Poles Order는 각각 Fit의 정확성을 높이기 위해 실험을 통해 선정하였다.

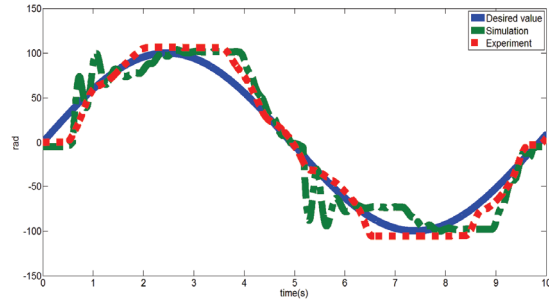
Fig. 5에서 Input은 임의로 선택된 8개의 서로 다른 PWM 값에 대한 DC 모터 시스템의 출력 각

Table 2 PID controller gains

	Controller 1	Controller 2
Kp	0.248	10.557
Ki	0.373	1.334
Kd	0.032	0.07



(a) Simulation



(b) Experiment

Fig. 7 Feedback responses of the DC motor driving system

도이다. Fig. 6은 Fig. 5에서 Input  $u(t)$ 와 System Identification으로 구해진 모델의 Output  $y(t)$ 이다. 완벽한 fit은 아니지만 상대적으로 Input과 Output이 거의 일치하므로 System Identification이 잘 되었다. 다음 장에서 Nonlinear Hammerstein-Wiener Model을 이용하여 제어를 설계한다.

### 3. PID Controller 설계

2장에서 구한 두 개의 시스템 모델에 대하여 각각 PID Controller를 설계한다. Steady State 값을 이용해 구해진 모델을 사용하여 설계된 PID 제어를 Controller 1이라하고, System Identification으로 구해진 모델을 사용하여 설계된 PID 제어를 Controller 2라 한다. 본 연구에서는 PID 제어기들이 Rise Time = 0.1초, Settling Time = 1초를 만족하도록 설계한다. Table 2는 설계된 PID 제어기의 Gain 값

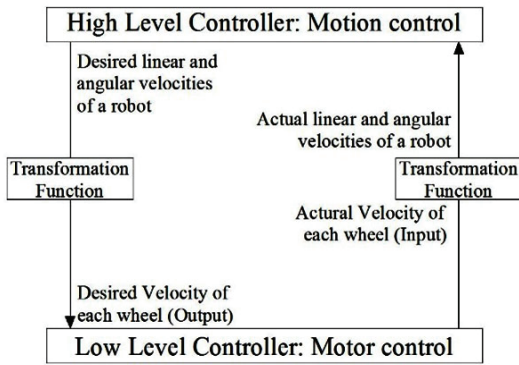


Fig. 8 Control scheme

이다. Controller 1은 Voltage를 Input으로 Controller 2는 PWM을 Input으로 계산되었기에 Controller 1의 Gain 값이 상대적으로 작다. Fig. 7은 Sine Wave를 Desired 출력 값으로 선정하고 Table 2의 PID 제어기 Gain 값들을 적용하였을 때 DC 모터 구동시스템의 피드백 제어 시뮬레이션과 실험결과이다. Fig. 7(a) Simulation에서 Controller 1을 적용한 선형 모델 (Model 1)의 반응은 Sine Wave의 정점 부분에서 Delay가 발생하며 상대적으로 Error가 커지는 현상이 발생하였다. 반면 Controller 2를 적용한 비선형 모델 (Model 2)의 반응은 전반적으로 약간의 떨림이 있으나 Controller 1을 적용한 Model 1에 비해 상대적으로 작은 추종 에러를 보이며 Desired 값을 잘 추종한다. Fig. 7(b) Experiment에서 Controller 1과 2를 적용했을 때의 실제 구동 시스템의 출력이 거의 비슷함을 확인할 수 있다. Controller 2를 적용했을 때의 반응은 Simulation과 달리 실험에서는 정점 부분에서 Delay Error가 생겼다.

#### 4. 모바일 로봇 자세 안정화 제어

3장에서 설계된 두 제어기의 성능을 비교하기 위해 모바일 로봇의 자세 안정화 제어를 수행한다. 자세 안정화 제어를 위한 Controller 구조는 Fig. 8과 같다.<sup>15</sup> 먼저 상위 레벨 제어기 (High-Level Controller)에서 실제 모바일 로봇의 현재 위치와 상태로부터 로봇의 직선 속도명령과 각속도 명령을 생성한다. 속도 변환함수를 통해 그 값을 좌, 우 DC 모터의 속도 값으로 변환하고 하위 레벨 제어기 (Low-Level Controller)에서 이를 PWM 값으로 변환하여 모터를 구동시킨다. 이 때 얻어지는 좌 우 DC 모터의 속도 값은 다시 속도 변환함수

를 통해 상위 레벨 제어기로 피드백한다. 여기서는 3장에서 설계된 PID Controller 1과 2를 하위 레벨 제어기로 각각 적용하고 다음의 Path Manifold 기반 모션 제어기를 상위 레벨 제어기로 적용한다.

#### 4.1 High Level Controller: Motion Control

상위 레벨의 제어기로 Path Manifold 기반 모션 제어기를 적용한다.<sup>15,16</sup> 이 제어기법을 모바일 로봇에 적용하면 원하는 (Desired) 로봇의 선형 속도와 각속도명령이 다음과 같이 구하여진다.

$$v_d = \frac{\begin{cases} k_1 \eta (z_1 + \sqrt{2} r \eta) \tanh z_1 + v_r (z_1 + \sqrt{2} r \eta) \cos \theta \\ + v_r r \sqrt{2} \sin \theta (\sin \theta + k_r (z_1 + \sqrt{2} r \eta)) \end{cases}}{\eta (z_1 + \sqrt{2} r \eta) \cos (z_2 - \theta) + r \sqrt{2} \sin 2\theta \sin (z_2 - \theta)} \quad (4)$$

$$\dot{\phi}_d = kv = k_2 \tanh z_2 + 2\dot{\theta} + \dot{\phi}_r \quad (5)$$

위 식에서  $k_1, k_2$ 는 Gain 값이며 아래 식(6)과 (7)로 표현된다. 변수  $r$ 은 실제 로봇의 수렴 경로 반경이며 0.05m로 한다.  $v_r$ 과  $k_r$  그리고  $\dot{\phi}_r$ 은 각각 모바일 로봇이 수렴할 최종 속도와 곡률 그리고 참조 각속도이다. 여기서는 자세 안정화를 위해 모두 0으로 설정 한다.  $z_1$ 과  $z_2$ 는 식(8)과 같다.

$$k_1 = (k_{1max} - k_{1min}) \left( 1 - \tanh \left( \frac{g_1}{e} \right) \right) + k_{1min} \quad (6)$$

$$k_2 = 0.3 \tanh \left( \frac{1}{e(0)} \right) \tanh \left( \frac{1}{2|\alpha|} \right) + 0.3 \tanh \left( \frac{1}{e} \right) \quad (7)$$

$$\eta = \sqrt{1 - \cos 2\theta}, \quad z_1 = e - \sqrt{2} r \eta, \quad z_2 = \theta + \alpha \quad (8)$$

식(6)에서  $g_1, k_{1max}, k_{1min}$ 은 제어기 파라미터이며 로봇의 물리적 제약조건을 고려하여 각각 1.3, 0.7, 0.2로 선정한다. 식(8)에서  $e$ 는 모바일 로봇의 현재 위치와 최종 위치 사이의 에러이며  $\theta, \alpha$ 는 극 좌표에서 로봇의 각도 상태를 나타낸 것이며 이들은 식(9)과 같다.<sup>16</sup>

$$\begin{aligned} e &= \sqrt{(x - x_r)^2 + (y - y_r)^2} \\ \theta &= ATAN2(-(y - y_r), -(x - x_r)) - \phi_r \\ \alpha &= \theta - \phi + \phi_r \end{aligned} \quad (9)$$

식(9)에서  $x, y$ 는 현재 모바일 로봇의 위치이며  $x_r, y_r$ 은 참조 (Reference) 위치 즉 최종 목표 위치이

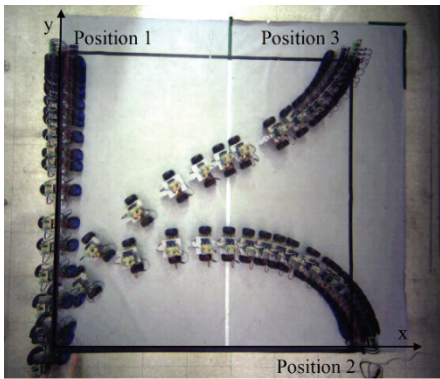


Fig. 9 Posture stabilization of the mobile robot

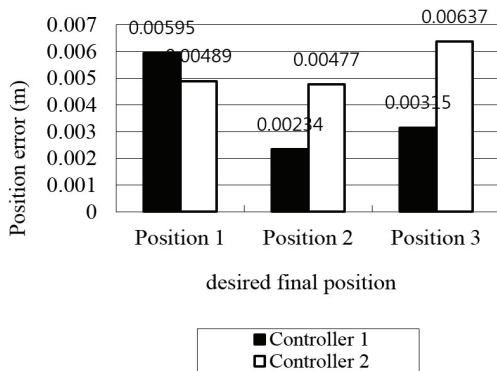


Fig. 10 Final position error of the robot

다. 변수  $\phi$ ,  $\phi_r$  은 현재 모바일 로봇의 조향 각도와 가상 참조 로봇 즉 최종 위치에서의 모바일 로봇의 원하는 최종 조향 각도이다.

### 5. 제어 결과

여기서는 4장에서 설명한 모바일 로봇 자세 안정화 제어를 실제 로봇에 적용하여 실험을 수행한다. 모바일 로봇의 최종 안정화 위치 (x, y)는 Position 1 (0m, 2m), Position 2 (2m, 0m), Position 3 (2m, 2m)로 선정했다. Fig. 9은 실제 모바일 로봇의 이동 궤적을 보여준다. 각 위치에 대해 3번의 반복실험을 하였으며 Fig. 10은 실제 최종 위치 에러 값의 평균이다. Position 1에서는 Controller 2를 적용한 경우 에러가 상대적으로 작았으며 Position 2, 3에서는 Controller 1을 적용한 경우 에러가 상대적으로 작았다. 이러한 최종 위치 에러는 엔코더 기반의 위치 센싱 방법이 Slip 현상을 검출하지 못하기 때문에 흔히 발생할 수 있다. 하지만 모든 경우 최대

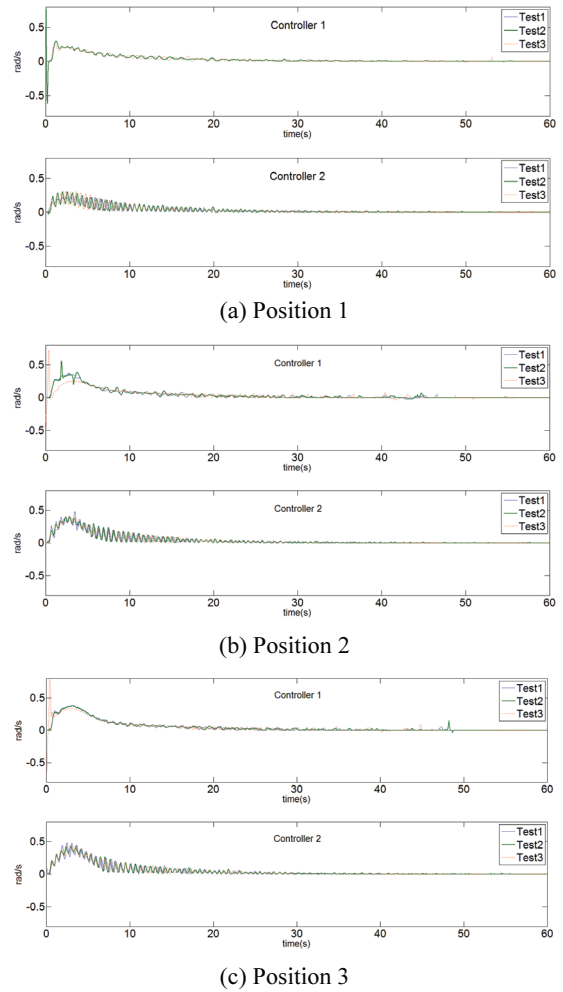


Fig. 11 Linear velocity of the mobile robot

에러는 약 6 mm 이하로 로봇의 크기와 궤적을 고려할 때 합리적인 에러 값이다. Figs. 11과 12는 세 개의 서로 다른 최종 위치에 대한 자세 안정화를 수행하였을 때 얻은 모바일 로봇의 직선 속도와 각속도이다.

Fig. 11에서 Controller 1을 적용한 경우 처음 시작 부분에서 속도가 크게 변하는 현상이 발생하였다. 또한 최종 위치가 Position 3일 때도 50초 부분에서 속도가 튀는 현상이 발생했다. Controller 2를 적용한 로봇의 반응은 전체적으로 Controller 1을 적용했을 때보다 떨림 현상이 크지만 Controller 1을 적용한 경우에서처럼 불연속적으로 크게 변하는 현상은 발생하지 않고 전반적으로 부드러운 주행을 하였다.

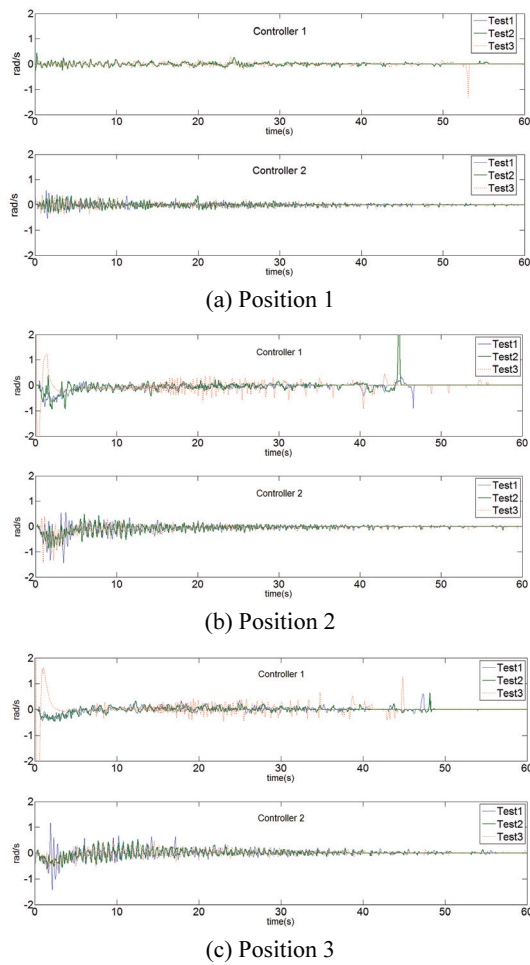


Fig. 12 Angular velocity of the mobile robot

Fig. 12로부터 Controller 1을 적용한 경우에는 각속도가 갑자기 크게 변하는 현상을 확실히 볼 수 있다. 최종위치가 Position 1일 때 Controller 1을 적용한 경우는 각속도가 튀는 현상이 비교적 적게 발생하였다. 하지만 최종위치가 Position 2와 3일 때에는 Controller 2를 적용한 경우보다 Controller 1을 적용한 경우에 각속도가 불연속적으로 크게 변하는 현상이 많이 발생하였고, 이에 따라 모바일 로봇의 자세 안정화도 경우에 따라 불안정하게 되었다. Controller 2를 적용한 경우는 전반적으로 떨림 현상이 있으나 Controller 1을 적용했을 때처럼 갑자기 크게 변하는 현상은 발생하지 않았으며 자세 안정화 제어도 오작동 없이 성공적으로 수행하였다. 이러한 순간적인 증가현상은 랜덤하게 발생할 수 있다. 이러한 현상은 Controller 1이 실제 시스템의 외란 및 비선형적 특성을 고려하

지 않기 때문에 발생한 것으로 판단된다.

## 6. 결론

본 논문에서는 모바일 로봇의 구동부 시스템을 선형 및 비선형으로 모델링하였다. 모델링 된 시스템을 사용하여 두 개의 PID 제어를 설계하였다. 그리고 이 제어기들을 실제 모바일 로봇의 하위 레벨 제어기로 적용하여 자세 안정화 제어를 수행하였다.

실험 결과, 선형 모델을 사용하여 설계된 PID 제어기 (Controller 1)를 적용한 자세 안정화 제어의 경우 최종 위치 에러는 상대적으로 작았다. 하지만 로봇의 선형 속도와 각속도가 불연속적으로 크게 변하는 현상이 자주 발생하였다. 따라서 이로 인해 모바일 로봇의 자세 안정화 제어도 경우에 따라 불안정하였다. 실제로 Controller 1을 적용하여 로봇의 자세 안정화 실험을 하였을 때 5번 중 2번은 최종 목표 위치 근처에서 불안정해지며 자세 안정화를 실패하였다. 비선형 모델을 사용하여 설계된 제어기 (Controller 2)를 적용한 자세 안정화 제어의 경우는 전반적으로 Controller 1을 적용하였을 때보다 로봇의 선형 속도 및 각속도에서 떨림 현상은 더 컸다. 하지만 Controller 1을 적용하였을 때와 달리 안정하게 자세 안정화 제어를 성공적으로 수행하였다. 향후 제안된 제어기를 경로 제어와 궤적 트래킹 제어에 확장하여 적용할 계획이다.

## REFERENCES

1. Cong, S., Li, G., and Feng, X., "Parameters Identification of Nonlinear DC Motor Model Using Compound Evolution Algorithms," Proc. of the World Congress on Engineering, Vol. 1, 2010.
2. Ławryńczuk, M., "Nonlinear Predictive Control for Hammerstein-Wiener Systems," ISA Transactions, Vol. 55, pp. 49-62, 2015.
3. Dolanc, G. and Strmčnik, S., "Design of a Nonlinear Controller Based on a Piecewise-Linear Hammerstein Model," Systems & Control Letters, Vol. 57, No. 4, pp. 332-339, 2008.
4. Dub, M. and Jalovecký, R., "DC Motor Experimental Parameter Identification Using the Nelder-Mead Simplex Method," Proc. of the 14<sup>th</sup> International Power Electronics and Motion Control Conference, pp. S4-9-S4-11, 2010.

5. Lee, S. and Jeong, B. K., "Research Trends in Robotics, Control, and Automation Based on 2011-2014 IEEE ICRA Proceedings (Part I)," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 32, No. 3, pp. 233-241, 2015.
6. Kang, H. S. and Shin, D. H., "DC Motor Model Parameter Identification and Experimental Adjustment for Motor Controller Design," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 31, No. 12, pp. 1147-1154, 2014.
7. Kara, T. and Eker, I., "Nonlinear Modeling and Identification of a DC Motor for Bidirectional Operation with Real Time Experiments," Energy Conversion and Management, Vol. 45, No. 7, pp. 1087-1106, 2004.
8. Nise, N. S., "Control Systems Engineering," John Wiley & Sons, 2011.
9. Recktenwald, G., "Basic Pulse Width Modulation," EAS 199, [http://web.cecs.pdx.edu/~gerry/class/EAS199A/topics/pdf/PWM\\_output\\_Arduino.pdf](http://web.cecs.pdx.edu/~gerry/class/EAS199A/topics/pdf/PWM_output_Arduino.pdf) (Accessed September 19 2016)
10. Andrijić, Ž. U. and Bolf, N., "Soft Sensors Application for Crude Distillation Unit Product Quality Estimation," Goriva I Maziva Vol. 30, No. 3, pp. 187-214, 2011.
11. Khalil, B. and Yesildirek, A., "System Identification of UAV under an Autopilot Trajectory Using ARX and Hammerstein-Wiener Methods," Proc. of the International Symposium on Mechatronics and Its Applications, pp. 1-5, 2010.
12. Vörös, J., "Iterative Method for Hammerstein-Wiener Systems Parameter Identification," Journal of Electrical Engineering, Vol. 55, No. 11-12, pp. 328-331, 2004.
13. Hagenblad, A., "Initialization and Model Reduction for Wiener Model Identification," Report No. LiTH-ISY-R-2150, 1999.
14. Abbasi-Asl, R., Khorsandi, R., and Vosooghi-Vahdat, B., "Hammerstein-Wiener Model: A New Approach to the Estimation of Formal Neural Information," Basic and Clinical Neuroscience, Vol. 3, No. 4, pp. 45-51, 2012.
15. Jang, T.-H. and Kim, Y., "Effects of the Sampling Time in Motion Controller Implementation for Mobile Robots," Journal of Society of Korea Industrial and Systems Engineering, Vol. 37, No. 4, pp. 154-161, 2014.
16. Kim, Y. and Minor, M. A., "Path Manifold-Based Kinematic Control of Wheeled Mobile Robots Considering Physical Constraints," The International Journal of Robotics Research, Vol. 26, No. 9, pp. 955-975, 2007.