

이동로봇의 조향위치 제어를 위한 PID 셀프튜닝

*¹박세준

¹ 목원대학교, sjpark@mokwon.ac.kr

PID Self-tuning for Steering Position Control of Mobile Robot

*¹Se-Jun Park

¹Department of Intelligent Robot Engineering, Mokwon University, Republic of Korea, sjpark@mokwon.ac.kr

요약

본 논문에서는 이동로봇 조향장치의 기계적 구조를 제안하고 조향위치 제어를 위한 PID 제어를 설계하였다. PID 제어기의 이득결정 방법에서 초기 시스템변수는 Ziegler-Nichols 계단응답 방법을 사용하여 측정하였다. 측정된 시스템변수와 시스템스케일상수를 디지털 PID 제어기 시스템전달함수에 대입하여 최종적인 비례, 미분 그리고 적분 이득을 얻었다. 이득을 이용하여 제안한 조향구조의 이동로봇을 셀프튜닝과 이득 결정 방법으로 실험했다. 조향장치의 셀프튜닝 시간은 1 회 평균 1 분 이내로 안정적인 성능을 보여주었다. 또한, 오버슈트, 언더슈트 그리고 정상상태에서 진동과 같은 불안정한 상태는 발생되지 않았다. 수렴 유지오차는 0.5° 이내로 적은 오차를 보여주었으며, 산술평균화를 이용한 셀프튜닝 이득의 시스템편차가 적게 나타났다. 실험을 통하여 PID 제어기는 이동로봇의 조향시스템에 사용이 가능하고 응답 시간이 빠르게 도달하여 안정하게 제어됨을 확인하였다.

Abstract

In this paper, I proposed a mechanical structure of a mobile robot steering system and designed a PID controller for steering position control. In the gain determination method of the PID controller, the initial system parameters were measured using the Ziegler-Nichols step response method. The measured system variables and system scale constants were assigned to the digital PID controller system transfer function to obtain the final proportional, differential, and integral gains. Using the gain, the proposed mobile robot with steerable structure was experimented by self-tuning and gain decision method. The self-tuning time of the steering system was stable within one minute on average. In addition, unstable conditions such as overshoot, undershoot, and vibration in steady state did not occur. The convergence error was less than 0.5° and the system deviation of self-tuning gain using arithmetic averaging was small. Through experiments, I confirmed that the PID controller can be used for the steering system of the mobile robot and the response time is reached quickly and is controlled stable.

Keywords: PID, Self-tuning, Steering Position Control, Mobile Robot, Gain

* Corresponding Author

Received: Oct. 30, 2017, Revised: Dec. 4, 2017, Accepted: Dec. 21, 2017

1. 서론

이동로봇의 이동방향은 기구구조와 구동방법에 의해 제어되며, 방향전환은 크게 세 가지 방법으로 구분된다[1]. 첫 번째는 바퀴의 회전축 위치를 회전시키는 조향구조이다. 두 번째는 바퀴 속도를 제어하는 차륜방향전환구조이다. 마지막으로 조향구조와 차륜방향전환구조의 장점을 결합한 조향차륜방향전환구조이다. 차륜방향전환구조는 기구적으로 방향전환 시 발생하는 미끄러짐 현상을 근본적으로 해결할 수 없다. 그러므로 주행 중 안정성을 높이고 정확한 이동경로를 알기 위해 조향구조를 사용한다.

이동로봇의 자기위치 인식은 자율주행 기술에서 중요한 구성요소이다[2]. 주행 중 이동로봇의 정확한 위치를 파악하기 위해서는 엔코더나 타코미터와 같은 센서를 사용하며[3][4], 속도나 위치를 제어하기 위한 여러 가지 알고리즘을 사용한다[5-8]. 이때, 조향구조 이동로봇은 주행 중 조향바퀴의 현재각도를 정확하게 인식하고 원하는 방향으로 오차를 최소화하여 제어해야 한다. 만약 조향장치가 미세한 떨림이나 조향 목표위치 도달시간이 지연되면 주행 중 이동방향과 이동궤적이 변화하여 이동로봇의 안정적인 자율주행 성능을 방해한다. 조향위치 제어는 목표위치와 현재위치의 오차를 이용한 PID 제어가 많이 사용된다[9-11].

PID 제어기 이득 결정은 사용자가 직접 설정하는 수동튜닝 방법과 알고리즘에 의해 결정되는 셀프튜닝 방법이 있다[12]. 첫 번째, 사용자가 직접 설정하는 수동튜닝 방법은 적절한 이득을 결정하기 위한 시간은 사용자의 숙련도에 반비례하고, 이득의 최적화는 사용자의 숙련도에 비례하여 적용된다. 그러나 이득을 결정하는 과정은 사용자의 수준에 의해 고려된 것으로 정량화하기가 매우 힘들다. 이러한 문제를 해결하기 위해 시정수, 적분시간 및 미분시간을 이용하는 Cohen-Coon 방법, Ziegler-Nichols 방법 그리고 보다 능동적으로 셀프튜닝 과정을 갖는 신경망, 퍼지와 같은 정량화된 방법이 연구되고 있다[13-16].

셀프튜닝의 과정에서 뉴런, 퍼지 등과 같은 고급제어기를 사용하면 시스템이 무거워지고 느려지는 단점을 가지고 있다. 이러한 문제로 고속의 시스템이나 하드웨어가 단순한 구조에서는 사용이 어려운 단점을 가지고 있다. PID 제어기는 가벼운 하드웨어 구현이 가능하다.

본 논문에서는 이동로봇 조향시스템 실험을 위해 조향형 이동로봇을 제작하였으며, PID 제어기와 셀프튜닝 과정을 구현하였다. 셀프튜닝 기법을 이용하여 이득을 최적화하고 실제 실험을 통해 빠르고 정확한 조향위치 제어성능을 검증한다.

2. 조향구조 이동로봇시스템

2.1. 이동로봇의 기구학

이동로봇은 회전할 경우 회전방향에 대하여 동적특성이 달라진다. 이동로봇의 속도와 회전조향각과의 관계는 왼쪽 바퀴의 선속도(V_l)와 오른쪽 바퀴 선속도(V_r)로 정의한다. 이동로봇의 기구학적 구조는 그림 1에서 보여준다. 이동로봇의 회전 반경(R_t)은 조향바퀴 중앙에서 구동바퀴와의 거리(L)와 회전 중심과 이루는 각도(θ)에 의해 결정된다. 이동로봇의 회전반경은 왼쪽바퀴의 각도와 오른쪽바퀴의 각도가 같을 때 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_t = L \cos \theta, \quad \therefore \theta = \theta_l = \theta_r \quad (1)$$

선속도(V)는 후륜 구동바퀴의 중심에서 회전반경(R_t)와 각속도(ω)에 비례한다. 왼쪽바퀴의 선속도(V_l)는 회전반경(R_t)에서 양쪽바퀴 중심의 폭(W)에 대하여 절반만큼

증가하고, 오른쪽바퀴의 선속도(V_r)는 반대로 절반만큼 감소하며, 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 결과적으로 왼쪽바퀴의 선속도가 오른쪽바퀴의 선속도보다 이동로봇의 폭(W)만큼 차이를 가진다.

$$V_l = (R_t + \frac{W}{2}) \times \frac{V}{R_t}, V_r = (R_t - \frac{W}{2}) \times \frac{V}{R_t} \tag{2}$$

식 (1)을 식 (2)에 대입하여 정리하면 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_l = V \times (1 + \frac{W}{2L \cos \theta}), V_r = V \times (1 - \frac{W}{2L \cos \theta}) \tag{3}$$

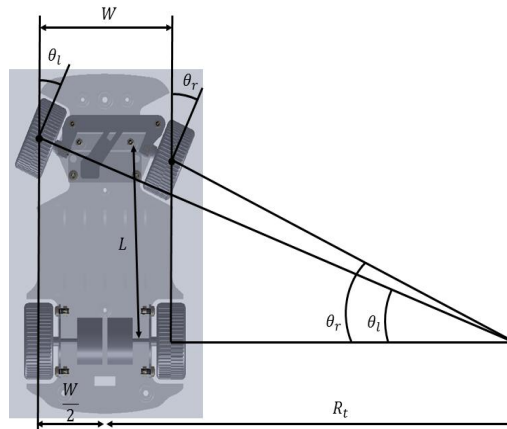


그림 1. 이동로봇의 회전 반경
Figure 1. Rotation radius of mobile robot

2.2. 조향구조의 회전각 결정

이동로봇의 조향구조는 L2와 L3에 고정되어 있다. L2와 L3는 L1양단에 회전 가능한 형태로 연결되어 있으며, L1중양하단에 회전 모터축과 연결되어 있다. 회전모터의 출력축은 L4와 연결되고, L4의 끝부분은 L1과 연결을 위한 U자형 홈이 있다. 그림 2는 이동로봇의 조향구조를 보여주고 있다.

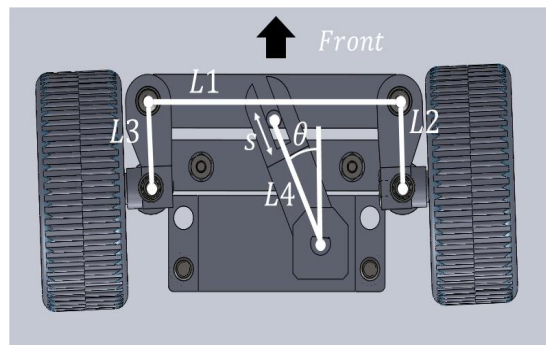


그림 2. 이동로봇의 조향구조
Figure 2. Steering structure of mobile robot

회전 조향바퀴의 회전각도는 전진방향과 모터출력축에 연결된 $L4$ 와 이루는 각도(θ)에 의해 결정된다. $L2$ 와 $L3$ 가 전진방향과 이루는 조향각도(θ_a)는 $L4$ 가 $L1$ 이 고정된 연결구조일 때 $L1$ 의 이동변위($S1$)는 $L4 \cos \theta$ 으로 결정된다. 모터의 회전각도에 모터출력축의 각도(θ)가 증가하면 s 의 변위가 증가하게 된다. 이를 식으로 표현하면 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta_a = (L4 - s \cos \theta) \quad (4)$$

조향장치를 구동하기 위한 힘(F_x)은 타이어에 발생하는 바퀴 지면과의 마찰력(μ)과 조향구조의 부속의 무게(m_t)에 대한 회전각속도(ω)의 비례관계를 나타내며 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$F_x = \mu m_t \omega (L4 - s) \quad (5)$$

2.3. 조향시스템 하드웨어 구성

조향시스템의 하드웨어 구성은 네 가지 요소로 이루어져 있다. 첫 번째, 출력을 위한 DC 기어모터이다. DC 기어모터는 4 단 기어방식으로 감속비는 1:250 이다. 또한, DC 기어모터의 최대 회전속도는 5200RPM 이고, 전압은 7.2V 이다. 두 번째, 위치측정을 위한 중공회전형 가변저항이다. DC 기어모터는 위치나 속도를 확인하기 위한 센서가 없기 때문에 중공회전형 가변저항을 모터 출력축에 동심원을 가지는 형태로 부착하였다. 가변저항의 전체 측정범위는 270° 이다. 조향모터의 출력축은 약 $\pm 30^\circ$ 범위를 갖기 때문에 아날로그신호를 디지털신호로 변환할 때 손실을 줄이고 측정범위를 최적화하기 위해 구간 선형증폭기를 사용하여 증폭한다.

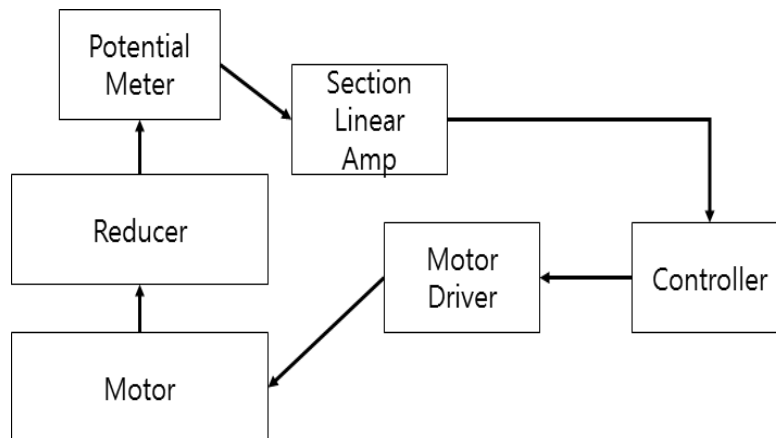


그림 3. 조향시스템의 하드웨어 구성
Figure 3. H/W configuration of steering system

세 번째, DC 기어모터에 전기적 신호를 출력하기 위한 모터드라이버로 출력은 PWM(Pulse Width Modulation) 방식을 사용한다. PWM 출력방식은 출력전압을 ON/OFF 하고, ON/OFF 비율에 따라 평균전압을 출력한다. 조향시스템의 H/W 구성은 그림 3에서 보여주며, 평균출력전압(V_o)은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, V_i 는 입력전압, ∇T 는 단위시간 그리고 T_{on} 은 출력유지시간을 나타낸다.

$$V_o = V_i \frac{T_{on}}{\nabla T} \quad (6)$$

마지막으로, 제어를 위해 8bit 마이크로컨트롤러를 사용했다. 클럭속도는 18.432Mhz 로 1MIPS 의 명령어 처리속도를 가진다. 가변저항으로부터 입력 받은 신호는 저주파통과필터를 이용해 잡음 신호를 필터링 한 후 디지털신호로 변환된다.

2.4. 조향시스템 소프트웨어 구성

조향시스템 제어를 위해 두 가지 프로그램 하였다. 하나는 PID 제어기를 포함하고 있는 임베디드 프로그램이고, 다른 하나는 마이크로컨트롤러와 통신을 이용하여 내부 데이터획득과 제어신호 전달을 위한 윈도우 환경의 GUI(Graphic User Interface) 프로그램이다. 조향시스템 제어를 위한 S/W 구성은 그림 4 에서 보여준다. 두 개의 프로그램은 통신을 통해 시스템 최소동작 시간을 마이크로프로세서의 최소동작 주기에 동기화 되어 동작된다.

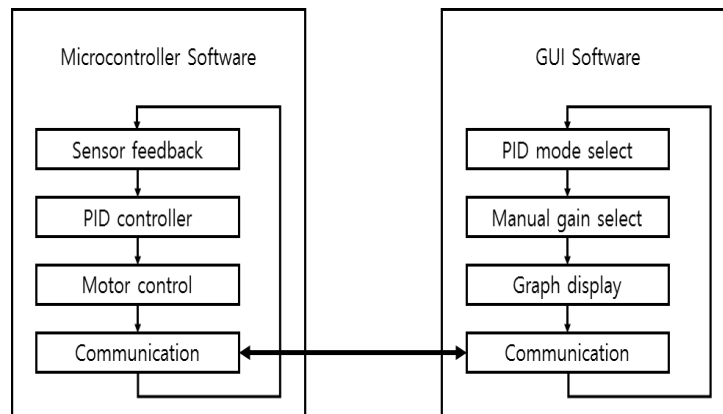


그림 4. 조향시스템의 소프트웨어 구성
Figure 4. S/W configuration of steering system

3. 조향 PID 제어기 셀프튜닝

3.1. 조향 PID 제어기 셀프튜닝 과정

본 연구에서는 이동로봇의 조향제어를 위해 PID 제어기 이득을 셀프튜닝 하기 위한 방법을 제시한다. 첫 번째, 시스템상수 확보를 위한 초기화 과정을 수행한다. 대표적인 시스템상수는 응답대기 지연시간, 오버슈트, 언더슈트, 수렴시간 그리고 유지오차율이 있다. 두 번째, Ziegler-Nichols 방법을 이용하여 비례이득, 적분시간, 미분시간을 계산한다. 마지막으로 시스템 전달함수를 이용하여 최종 PID 제어기의 이득을 결정한다. 계산된 PID 제어기의 이득값은 아날로그 PID 제어기의 최적화된다. 각 튜닝과정에서 시스템변수 검출 시 발생하는 편차를 줄이기 위해 산술평균화 방법을 선택하였다. 그림 5 는 조향 PID 제어기 셀프튜닝 과정을 보여준다.

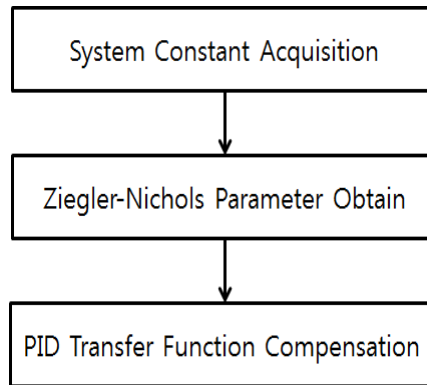


그림 5. 조향 PID 제어기 셀프튜닝 과정
Figure 5. Steering PID controller self-tuning process

3.2. 산술평균을 이용한 튜닝 상수

PID 제어기의 이득은 시스템전달함수를 이용하여 구해진다. 이 과정은 시스템에 대하여 비레이득(K_p)을 증가 시키면서 입력이득(K), 지연시간(L) 그리고 시정수(T)를 이용하여 구한다. 이 때, 조향장치의 기구 구조가 바닥과의 마찰력, 기계적인 유격 그리고 편차에 의해서 미세하게 변하게 되어 이득이 최적화 되지 못하는 결과가 발생된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 산술평균을 이용하여 n 횟수에 대해 평균화 과정을 수행한다. 튜닝은 결과 편차가 발생하므로 단일 횟수의 튜닝을 수행하지 않고 여러 번 반복한다. 조향시스템 입력이득(K), 지연시간(L) 그리고 시정수(T)는 식 (7)에서 구할 수 있다. 여기서, K_a 는 입력전압, L_a 는 단위시간 그리고 T_a 은 출력유지시간을 나타낸다.

$$K = \frac{1}{n} \sum_{a=1}^n K_a, L = \frac{1}{n} \sum_{a=1}^n L_a, T = \frac{1}{n} \sum_{a=1}^n T_a \quad (7)$$

평균화하여 얻어진 시스템상수 비레이득(K_p), 적분지연시간(T_i), 그리고 미분지연시간(T_d)은 Ziegler-Nichols 계단형 응답방식 튜닝표를 이용하여 식 (8)에서 구할 수 있다. 오차와 편차를 최소화하기 위해 시스템상수를 얻을 때 사용했던 평균화 과정을 동일하게 적용하였다.

$$K_p = \frac{1}{m} \sum_{b=1}^m K_{pb}, T_i = \frac{1}{m} \sum_{b=1}^m T_{ib}, T_d = \frac{1}{m} \sum_{b=1}^m T_{db} \quad (8)$$

3.3. 디지털 PID 제어기 이득

아날로그 PID 제어기는 연속적인 시간 개념으로 접근한다. 그러나 디지털 PID 제어기는 주기라는 시간 개념이 적용되어 아날로그 PID 제어기와 유사하지만 조금 다른 특징을 갖고 있다. 디지털 PID 제어기는 반복적인 주기의 시간 개념으로 수행하기 때문에 아날로그제어기에서 디지털제어기로의 근사화가 필요하다. 아날로그 PID 제어기는 시간에 대해 불연속적인 특징을 가지며 식 (9)와 같이 표현할 수 있으며, 식 (9)을 Z 변환하면 식 (10)과 같이 디지털 PID 제어기 형태로 변환된다.

$$u(nT) = K[e(n) + \frac{T}{T_i} \sum_{n=1}^e \frac{e(n-1) + e(n)}{2} + T_d \frac{e(n) - e(n-1)}{T}] \quad (9)$$

$$u(z) = [K_p + \frac{K_i}{1-z^{-1}} + K_d(1-z^{-1})]E(z) \quad (10)$$

여기서, K_p 는 비례이득, K_i 는 적분이득 그리고 K_d 는 미분이득을 나타내며 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_p = K - \frac{K_i}{2}, K_i = K \frac{T}{T_i}, K_d = K \frac{T_d}{T} \quad (11)$$

식 (11)을 디지털 PID 제어기 이득으로 적용하고, 마이크로컨트롤러 내부의 출력제어를 위한 스케일상수를 적용하여 최종적인 비례이득(K_p), 적분이득(K_i) 그리고 미분이득(K_d)이 결정되었다. 최종이득은 식 (12)에서 보여준다.

$$K_p = (K - \frac{K_i}{2}) \times K_{ps}, K_i = K \frac{T}{T_i \times K_{is}}, K_d = K \frac{T_d}{T \times K_{ds}} \quad (12)$$

여기서, K_{ps} 는 비례이득계수, K_{is} 은 미분이득계수 그리고 K_{ds} 는 적분이득계수로 이동로봇의 시스템제어계수를 의미한다.

4. 실험 및 결과고찰

실험을 위해 조향구조를 가지는 이동로봇은 ㈜새운의 알티노를 사용하였다[17]. 조향구조는 그림 2 와 같으며, 각 링크의 길이는 표 1 과 같다.

표 1. 조향구조의 링크 길이
Table 1. Link length of steering structure

순번	내용	항목	길이(mm)
1		L1	50
2		L2(L3)	15
3		L4	23

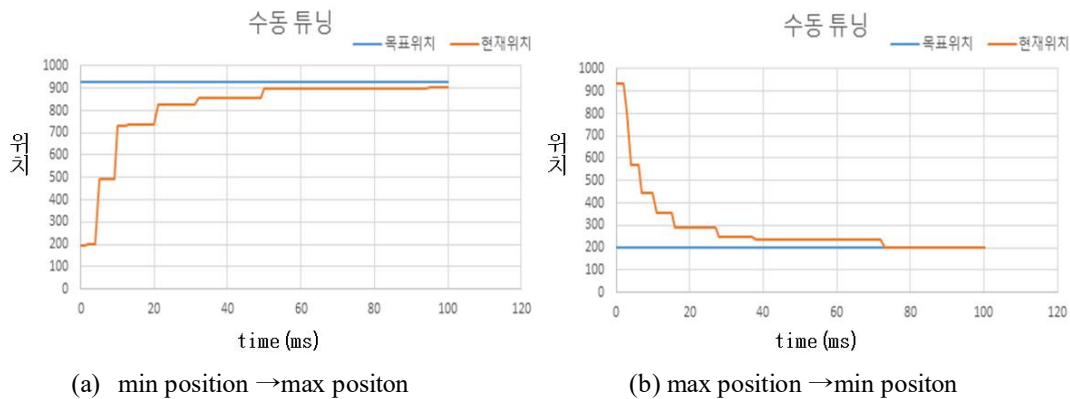
표 2. 조향위치 셀프튜닝 결과(10 회)
Table 2. Steering position self-tuning result (10times sampling)

회수	내용	최소위치	중앙위치 (계산값)	최대위치
1		199	569	939
2		201	570	939
3		200	569	939
4		198	568	939
5		200	569	939
6		199	568	938
7		199	569	939
8		197	567	938
9		200	569	939
10		199	569	940

조향위치 가변저항에서 출력되는 전압에 의해 측정되며 사용전압은 5V 이다. 가변저항 전압 출력라인은 전기적인 고주파 잡음 성분을 제거하기 위해 저주파통과필터가 직렬로 연결되어있다. 초기 위치는 중앙을 중심으로 최소치와 최대치 정보가 없기 때문에 초기 보정 과정을 셀프튜닝으로 수행하였다. 튜닝과정은 모터의 토크제어를 이용하여 최대출력의 50%를 (-)방향으로 일정시간 출력하여 최소 위치값을 설정한다. 반대로 최대 위치값은 (+)방향으로 최대출력의 50%를 일정시간 출력하여 설정한다. 데이터 샘플링은 표준편차를 줄이기 위해 1 회 측정하여 10 회 반복한 후 측정된 데이터를 다시 10 회 반복하여 측정하였으며, 결과는 표 2 에서 보여준다.

셀프튜닝을 시작하기 전 PID 이득을 확보하게 위해 수동튜닝으로 실험하였으며, 실험은 각각 비례이득(K_p), 적분이득(K_i) 그리고 미분이득(K_d) 순으로 수행하였다. 이동로봇의 조향위치 셀프튜닝으로 측정된 최소 위치값과 최대 위치값은 각각 203 과 934 이다. 이때, 알고리즘을 이용하여 계산된 중앙값은 568 이다.

첫 번째, 비례이득을 1 씩 증가 시키면서 시스템의 특징을 관찰하였다. 그림 6(a)는 최소 위치에서 최대 위치로 이동하였으며, 그림 6(b)는 최대 위치에서 최소 위치로 이동하였다. 그림 6(a)는 비례이득이 50 인 시점에서, 그림 6(b)는 비례이득이 38 인 시점 이후부터 비례이득 증가에 대하여 둔하게 반응하는 것을 알 수 있다. 결과적으로, 최대 위치에서 최소 위치로 이동과정의 비례이득이 최소 위치에서 최대 위치로 이동과정의 비례이득보다 적음을 확인하였다. 그림 6 은 이득에 대한 응답 특성을 보여준다.



(a) min position →max position

(b) max position →min position

그림 6. K_p 이득에 대한 응답 특성

Figure 6. Response characteristic to K_p gain

두 번째, 적분이득 증가에 의한 위치변화에 대하여 실험하였다. 실험방법은 비례이득 실험결과에서 얻어진 비례이득 값을 설정하고 적분이득을 1 씩 증가시키면서 시스템의 특징을 관찰하였다. 그림 7(a)는 최소 위치에서 최대 위치로 이동하였으며, 그림 7(b)는 최대 위치에서 최소 위치로 이동하였다. 그림 7(a)는 적분이득이 12 이후부터 목표위치에 수렴함을 보였다. 또한, 그림 7(b)는 적분이득 값이 10 이후부터 목표위치에 수렴함을 보였다. 결과적으로, 최대 위치에서 최소 위치로 이동과정의 적분이득이 최소 위치에서 최대 위치로 이동과정의 적분이득보다 적음을 확인하였다. 그림 7 은 K_i 이득에 대한 응답 특성을 보여준다.

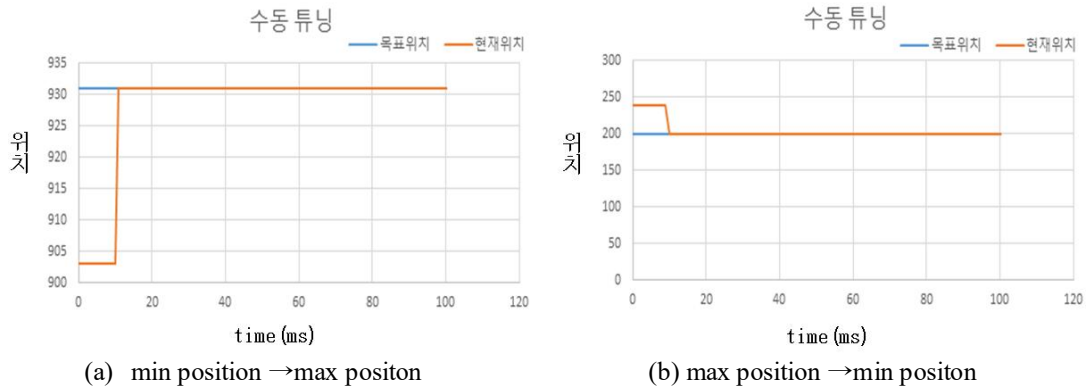


그림 7. K_i 이득에 대한 응답 특성

Figure 7. Response characteristic to K_i gain

마지막으로, 미분이득에 대해 실험하였다. 미분이득 실험은 PID 제어기 내에서 급격한 변화에 대한 특징이기 때문에 위 실험에서 결정된 비례이득 38 과 적분이득 12 를 이용하여 실험을 수행하였다. 시간은 이득의 변화가 안정화 되고 유지되는 시점을 확인한 후 목표위치의 변화를 설정하였다. 미분이득의 증가는 1 씩 증가시켰으며, 실험결과 전체적으로 미분이득은 제어기 시스템에서 적은 변화를 보여주었으며, 미분이득은 시스템에 크게 영향을 주지 못함을 확인하였다. 그림 8 은 미분이득이 각각 (a) 1 과 (b)100 일 때 PID 제어기의 목표위치와 현재위치를 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 미분이득 변화에 대한 위치 오차가 거의 없음을 확인하였다.

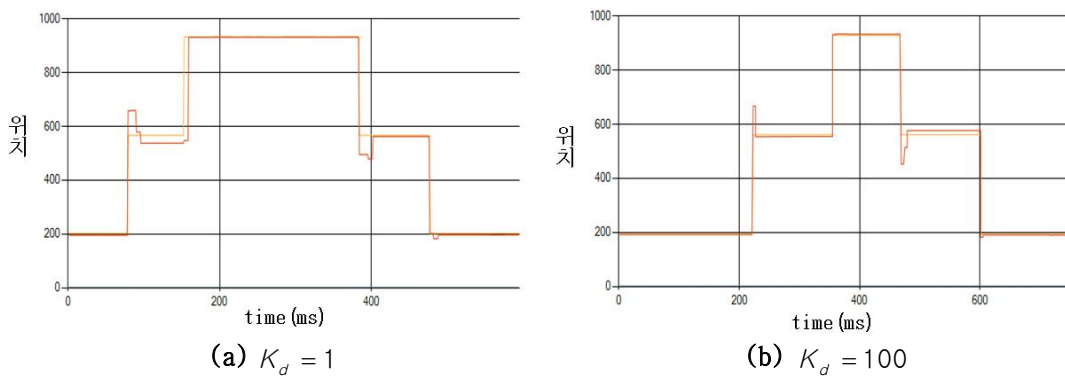


그림 8. K_d 이득에 대한 응답 특성

Figure 8. Response characteristic to K_d gain

셀프튜닝은 Ziegler-Nichols 계단형 응답특성을 이용하여 실험을 수행하였다. 시스템의 편차를 줄이기 위해 10 회 반복 측정하였으며 시정수, 지연시간 그리고 응답시간을 얻었다. 계단형 출력에 대한 현재위치 변화는 1 회 측정 당 약 1 분 정도의 시간이 소요됨을 확인하였다. 초기 출력에 대한 응답실험이 다음 회 출력 실험보다 약 1.5 배 시간이 소요됨을 확인하였으며, 그림 9 는 Ziegler-Nichols 이용한 특성 실험결과를 보여주며, 10 회 측정된 데이터의 시정수(T), 지연시간(L) 그리고 입력이득(K)은 표 3 에서 보여준다.

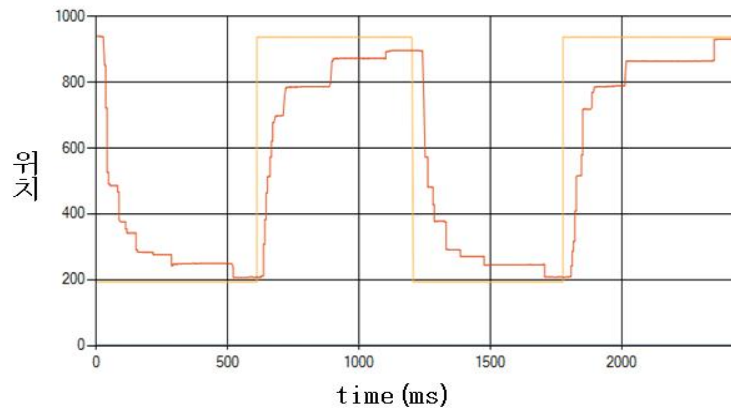


그림 9. Ziegler-Nichols 이용한 특성 실험
Figure 9. Characteristic experiment using Ziegler-Nichols

표 3. T , L and K 측정 데이터
Table 3. T , L and K measurement data

회수	내용	$T(sec)$	$L(sec)$	K
1		9.20	0.562	737
2		8.80	0.583	737
3		10.00	0.590	737
4		7.80	0.548	736
5		7.00	0.586	737
6		8.40	0.590	736
7		6.60	0.591	736
8		7.40	0.591	737
9		7.60	0.629	736
10		9.20	0.588	737

표 3의 데이터를 이용하여 평균값과 표준편차를 계산하였다. 지연시간의 평균은 약 0.6 초, 표준편차는 약 0.02로 양호함을 확인하였다. 이득의 평균은 736.6, 표준편차는 약 0.49로 작은 수치를 보여준다. 그리고 시정수 시간은 8.2초로 편차는 1.04초로 확인되었다. 시정수 값의 표준편차가 다른 계수의 편차에 비해 크다는 것을 알 수 있었다. 표 3에서 측정된 시정수(T), 지연시간(L) 그리고 입력이득(K)을 이용하여 비례이득(K_p), 적분지연시간(T_i) 그리고 미분지연시간(T_d)을 계산하여 정리하면 표 4와 같이 나타낼 수 있다.

표 4. 계산된 K_p , T_i and T_d 값
Table 4. Computed K_p , T_i and T_d value

회수	내용	K_p	T_i	T_d
1		0.026654	1.124	0.2810
2		0.024577	1.166	0.2915
3		0.027597	1.180	0.2950
4		0.023207	1.096	0.2740
5		0.019450	1.172	0.2930

6	0.023213	1.180	0.2950
7	0.018208	1.182	0.2955
8	0.020387	1.182	0.2955
9	0.019700	1.258	0.3145
10	0.025476	1.176	0.2940

계산된 값을 평균이득으로 적용하고, 시스템 내부 프로그램 스케일상수 $K_{ps} = 0.5$, $K_{is} = 250$, $K_{ds} = 0.25$ 대입하면 표 5 와 같이 PID 제어기의 최종이득이 구할 수 있다.

표 5. 셀프튜닝 실험 이득 값(10 회)
Table 5. Self-tuning experimental gain value (10 times)

회수	내용	K_p	K_i	K_d
1		36	26	44
2		34	27	64
3		36	26	42
4		33	28	78
5		37	25	24
6		32	29	108
7		37	25	21
8		32	29	106
9		34	27	63
10		37	25	22

10 회 측정된 결과를 비례이득, 적분이득 그리고 미분이득에 대해 산술평균화 과정을 통해 평균값을 적용하여 실험하였다. 비례이득은 평균이 약 34.8, 표준편차는 약 2.0 으로 측정되었다. 적분이득은 평균이 약 26.7, 표준편차는 약 1.4 그리고 미분이득은 평균이 57.2, 표준편차는 약 30.87 로 측정되었다. 측정된 이득값을 이용한 PID 제어기 동작특성은 그림 10 에서 보여준다. 결과적으로, 셀프튜닝은 수동튜닝과 비교했을 때 최소위치와 최대위치의 수렴구간에서는 유지오차가 거의 발생하지 않았다. 또한, 중앙위치에서 셀프튜닝이 수동튜닝보다 오버슈트와 언더슈트가 적게 나타났으며, 중앙 위치에서 수렴오차 범위도 약 0.5° 의 적은 오차임을 확인하였다.

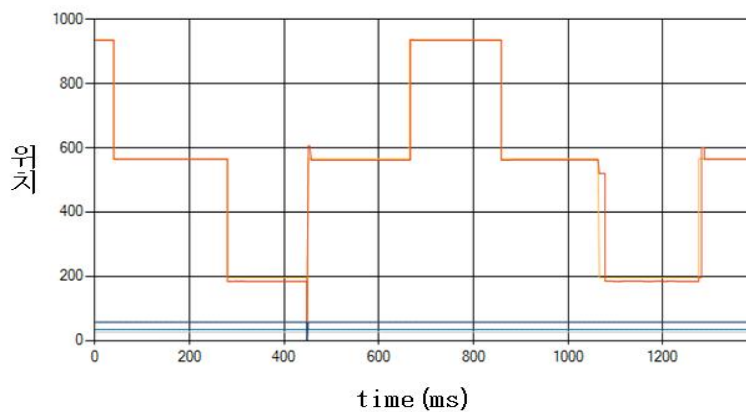


그림 10. 최종 이득을 이용한 실험 결과
Figure 10. Experimental result using final gain

5. 결론

본 논문에서는 이동로봇의 이동특성과 회전특성을 고려하여 기구학적인 조향구조를 제안하였다. 조향위치 제어를 위해 PID 제어기를 설계하였으며, 이득을 얻기 위해 셀프튜닝 방법을 제안하였다. PID 제어기는 이득의 최적화가 제어기의 성능을 결정한다. 시스템 전달함수를 알 수 없는 시스템에서 이득을 찾기 위해서 비례이득을 증가시키면서 시스템에 반응하는 응답대기시간, 시정수, 이득을 구하고 이를 이용하여 비례이득, 적분지연시간, 그리고 미분지연시간을 계산했다. 계산된 값을 디지털 PID 제어기의 시스템 전달함수에 적용하고, 이를 다시 시스템 스케일변수를 적용하여 디지털 PID 제어기의 최종 이득으로 튜닝을 하였다. 계산된 PID 제어기 이득을 이동로봇에 적용하여 실험한 결과 횡수 별 편차가 발생되었다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 산술평균화 과정을 사용하여 평균값을 적용하였다. 산술평균을 이용한 제어기는 응답속도, 수렴시간 그리고 유지오차 등에 대하여 만족할만한 성능이 보여주었다. 이때, 계단형 출력에 대한 현재위치 변화는 1회 측정 당 약 1 분 정도의 시간이 소요되었다. 또한, 수렴 유지오차는 0.5° 이내로 적은 오차를 보여주었으며, 산술평균화를 이용한 셀프튜닝 이득이 단일 셀프튜닝 이득에 비해 시스템편차가 적게 나타났다. 실험을 통하여 PID 제어기가 이동로봇 조향시스템에 사용이 가능함을 보였으며, 응답시간이 빠르게 도달하여 안정하게 제어됨을 확인하였다.

향후, 조향장치 위치제어를 위해 동력학적 특성을 고려한 시스템 해석과 이를 이용한 동적인 특성을 고려한 최적 이득 셀프튜닝과 운용 중 셀프튜닝을 수행하는 연구를 계속하고자 한다.

6. 참고문헌

- [1] A. Koshiyama, Y. Kmafujii, "Design and Control of an All-Direction Steering Type Mobile Robot", *The international Journal of Robotics Research*, Vol.12, No.5, pp.411-419, Oct, 1993.
- [2] Kyung-Hyun Kim, *The Teachers' Perception on the Educational Usability of Robot Based Education*, *Asia-pacific Journal of Multimedia Services Convergent with Art, Humanities, and Sociology*, ISSN:2383-5287, Vol.7, No.1, January (2017), pp. 731-742, <http://dx.doi.org/10.14257/AJMAHS.2017.01.10>
- [3] R. J. Hill and F. L. Luo, "stability analysis of thyristor current controller", *IEEE. Trans. Ind. Appl.* Vol. IA-23, No. 1, pp.49-56, 1987.
- [4] Hwi-Beom Shin, "New Anti-windup PI Controller for Variable Speed Motor Drives", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol45, No.3, pp.445-450, 1998.
- [5] Katsuhiko, Ogata, "Modern Control Engineering", Third-edition, Prentice Hall, 1996.
- [6] Richard. C. Dorf, Robert. H. bishop, "Modern Control System", ninth-edition, Prentice Hall, 2002.
- [7] K. Takahashi, T. Tamada, "Application of an immune feedback mechanism to control systems", *Int. Journal of JSME, Serise C*, Vol. 41, No. 2, pp.182-191, 1988.
- [8] H. K. Khalil. "Nonlinear Systems", second edition. Prentice Hall, New Jersey, 1996.
- [9] B. D. Tyreus, William L. Luybem, "Tuning PI controllers for integrator/dead time processes", *Ind. Eng. Chem. Res.*, 31, pp.2625-2628, 1992.
- [10] M. Zhuang, D. P Atherton, "Automatic tuning of optimum PID controllers", *IEE Proc. Control Theory App*, pp. 216-224, 1993.
- [11] W. TAN, J. Liu, W. SUN, and P. K. TAM, "PID tuning for integrating processes", *Proc. IEEE Int. Conf. on Control Applications*, pp.873-876, 1998.
- [12] C. C. Hang, K. J. Astrom, W. K Ho, "Refinements of the Ziegler-Nichols tuning formula", *IEE PROCEEDING-D*, Vol. 138, No. 2, pp. 111-118, Mar 1991.
- [13] T. Hagglund and K. J. Astrom. "Industrial adaptive controllers base on frequency response techniques", *Automatica*, 27(4), 599-609, 1991.
- [14] Lokesh Veeramacheni, "Information Security Risk Analysis Methods : AHP and Fuzzy Comprehensive Method", *Asia-pacific Journal of Convergent Research Interchange, HSST*, ISSN : 2508-9080, Vol.1, No.2, June (2015), pp. 19-24, <http://dx.doi.org/10.21742/APJCRI.2015.06.03>

- [15] L. R. Medsker, "Hybrid neural network and Expert systems", Kluwer Academic publishers, 2000.
- [16] Potla Revathi, "Analytical Hierarchy Process in Fuzzy Comprehensive Evaluation Method", Asia-pacific Journal of Convergent Research Interchange, HSST, ISSN : 2508-9080, Vol.1, No.3, September (2015), pp. 41-52, <http://dx.doi.org/10.21742/APJCRI.2015.09.04>
- [17] EduFun Robot ALTINO : <http://saeon.co.kr/shopinfo/product.html>