

조향형 이동로봇을 위한 PID 이득 자동 튜닝에 관한 연구

정세영*, 양태규**

A Study on PID Gain Auto Tuning for Steering Type mobile robot

Se-Young Jung*, Tae-Kyu, Yang**

요 약

본 논문은 조향구조를 갖는 이동로봇의 조향 제어를 위해 PID 제어기의 이득을 튜닝 방법을 제안한다. PID 이득을 설정하는 다양한 방법들이 제시되고 연구되고 있다. 이득은 지글러-니콜스의 계단형 입력으로부터 이득을 얻는 방법으로 얻어진 이득을 이동로봇에 적용하고 이를 시험하여 다시 2차 전달함수에 의해 새로운 이득을 계산하였다. 얻어진 새로운 이득으로 응답시간 및 유지오차율에 관한 실험을 수행하여 PID 자동 튜닝의 성능을 확인하였다. 유지시간, 응답시간 및 수렴시간에 대한 실험결과로 이동로봇의 조향 시스템에서 사용이 가능하고 응답 시간이 빠르게 도달할 수 있으며 안정하게 제어됨을 확인하였다.

Key Words : PID control gain, Auto tuning, Steering PID control, Steering mobile robot, Position control

ABSTRACT

In this paper, we propose PID gain auto tuning method in steering type mobile robot. PID controller gain select method are various methods. Ziegler-Nichols step tuning method is one method tuning in PID controller. Use step tuning method find a the first gain and did experiment in steering mobile robot. and Make a new the second gains from the first gains. After applying the second gain in PID controller, Where perform observe for convergence time and stabilization error. Experiments result the second gain are useful in real steering mobile robot system.

I. 서 론

바퀴형 이동 로봇에서 방향 전환을 위한 조향장치는 오래 전부터 사용된 기계적 방식이다. 이를 전자적으로 제어하기 위해서는 제어기가 필요하다[1]. 전자식 조향 방법은 조향 위치를 확인하는 위치 입력장치와 모터출력 장치로 구성되며, 이와 같은 입출력 시스템의 제어는 여러 가지 방법들로 제안되었다[2][3]. 여러 방법들 중에서 비례, 적분, 미분을 사용하는 PID제어기는 성능과 안정성이 우수하여 오래전부터 사용되었다. PID제어기는 비례, 적분, 미분 이득에 의해 제어되며 성능에 큰 영향을 미친다. 따라서 이득의 유효성이 제어기의 성능과 품질을 결정하는 요인이 된다. PID 이득은 수동 설정과 자동 설정 두 가지 방법이 있다[4]. 본 논문에서는 자동으로 이득을 설정하는 자동 이득 설정 방법과 시간 단축 방법을 제시하고 이를 실제 시험을 통하여 검증하였다.

II. 본론

본 논문에서는 PID에 1차 시스템 함수 지글러-니콜스 계단형 응답특성을 이용하여 1차 이득을 획득하였다[5]. 획득한 이득으로 2차 시스템 특성을 분석하여 시스템 전달함수에 이득을 적용하여 이동로봇의 조향을 제어기 실험을 통하여 응답속도, 수렴속도, 오버슈트, 언더슈트 및 상태별 오차에 대하여 시험하였다.

1. 모바일 이동로봇 조향 시스템

모바일 이동로봇의 전방 조향시스템은 좌우 구동 바퀴의 고정 축을 가로지는 바 타입의 구조다. 바 중앙에 돌출된 부분은 모터와 연결되는 축의 작용점 역할을 한다. 도출된 부분은 모터의 출력과 연결되는 바와 연결되어 조향시스템 동력을 전달하며, 조향구조는 그림 1에서 보여준다.

*목원대학교 대학원 IT공학과 (saeyoung3062@gmail.com),

**목원대학교 지능로봇공학과 (tkyang@mokwon.ac.kr) (교신저자)

접수일자 : 2016년 12월 5일, 최종게재확정일자 : 2016년 12월 8일

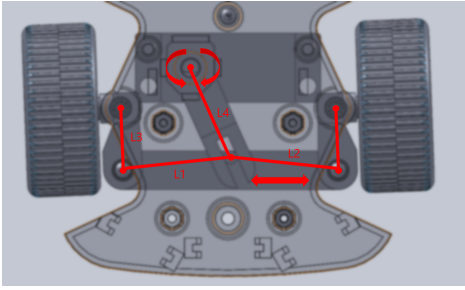


그림 1. 조향 구조

모터는 PWM(Pulse Width Modulation)으로 출력되고, 모터드라이버에서 ON/OFF의 비율을 이용하여 출력을 평균전압으로 나타낸다. 이때, 전압 V_v 는 식 1과 같이 나타낸다[6].

$$V = V_v \times \frac{T_{on}}{T[V]} \quad (1)$$

또한, 모터에 가해지는 제어 출력 u 는 식 2와 같이 나타낼 수 있다.

$$u = K_{pe} + K_i \sum_1^n e(i) + K_D \frac{e(n) - e(n-1)}{T_s} \quad (2)$$

위치 피드백은 모터의 출력에 가변저항이 직렬 연결된 형태로 시스템 구성은 그림 2와 같이 나타낼 수 있다.

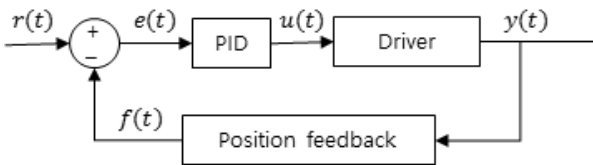


그림 2. PID 개념도

조향 위치에 따른 디지털 변환값 및 각도는 표 1에서 보여 주며, 이동변위의 각도는 $\pm 30^\circ$ 이고, 분해능은 약 0.082° 이다.

표 1. 위치에 따른 모터 값

위치	디지털 변환값	각도
최소값	202	-30°
중앙값	568	0°
최대값	935	$+30^\circ$

2. 조향 PID

PID 제어기는 현재값과 목표값을 비교하여 오차를 만든다. 오차는 다시 제어기로 입력되고, 입력된 오차는 비례이득(K_p), 적분이득(K_i), 미분이득(K_d)에서 계산된 결과에 의해 다시 오차를 재설정하여 지속적인 제어가 가능하다. 식 3

은 PID제어기를 나타낸다.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de}{dt} \quad (3)$$

또한, 시스템 전달함수를 고려하면 PID 제어기 구조는 그림 3과 같이 나타낼 수 있다.

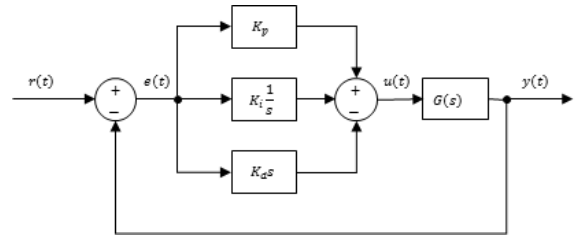


그림 3. PID 제어기 구조

그림 3에서, 비례이득(K_p)은 오차의 크기가 증가하면 출력에 직접적으로 영향을 주고 출력이 증가한다. 하지만 비례 제어는 작은 오차에 대하여 반응할 수 없다. 이러한 문제를 극복하기 위해서는 미분과 적분제어가 필요하다. 미분과 적분 제어는 시간 $T(s)$ 의 개념이 적용된다. 적분이득(K_i)는 누적 오차에 반응 한다. 누적오차는 방향의 변동이 없는 치우침과 같은 오차에 사용된다. 마지막으로 미분이득(K_d)은 급격한 변동에 대하여 반응한다. 진동과 같이 수렴하지 못할 때 반응하여 진동에 대하여 대처하고 급격한 변동과 오버슈트나 언더슈트에 대하여 반응한다.

이때 가장 중요한 제어는 비례제어다. 비례제어는 초기 제어기의 출력을 정의 한다. 시간의 개념이 적용되는 적분과 미분제어기는 초기 동작과 관련이 없기 때문에 비례제어 이득을 우선적으로 적용한다. 비례이득(K_p)이 충분하지 못할 때 그림 4와 같이 목표에 도달하지 못하는 상황을 보여 준다.

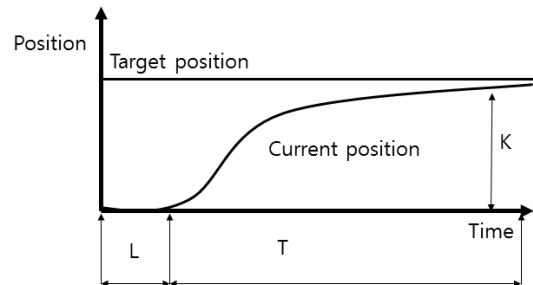


그림 4. 수렴하지 못하는 상태

만약 비례제어의 이득이 높을 때 목표값이 초과되어 그림 5와 같이 진동이 발생 되게 된다.

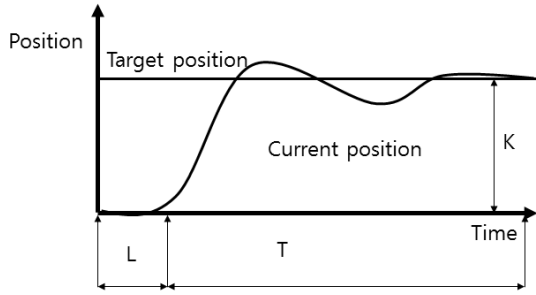


그림 5. 진동을 갖는 상태

이러한 문제를 해결하기 위하여 적절한 이득을 선택되어야 한다. 조향 장치의 경우 좌우로 흔들리는 진동이나 목표값에 수렴하지 못하는 상황이 발생하게 되면 이동시 방향이 변하는 문제가 있다. 그러므로 조향의 진동을 최소화 하고, 최소의 시간으로 목표위치에 수렴해야 한다. 그림 6은 그림 4와 그림 5에서 발생된 문제점을 해결하여 진동이 없는 수렴 상태를 보여준다.

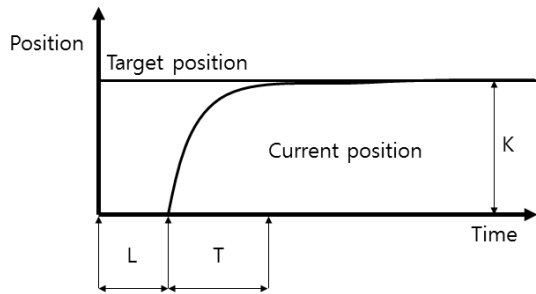


그림 6. 진동이 없는 수렴 상태

적절한 이득을 설정하기 위하여 수동 튜닝을 하거나 자동 튜닝을 사용한다. 튜닝과정은 시스템의 특성을 반영해야하기 때문에 대량 생산이나 시스템의 특성이 변화되면 새롭게 설정해야 하는 번거로움이 있다. 단일 시스템의 변동에 대해서는 적응제어나 신경망을 이용한 실시간 제어 방법들이 적용되고 있다. 하지만 대량 생산이나 특성이 조금씩 다른 특성의 시스템일 경우 개별 튜닝을 새롭게 해야 한다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 자동튜닝 방법을 사용한다.

3. 자동 튜닝

본 논문에서는 사용된 이득 설정 방법은 계단형 응답곡선을 이용하여 K_p 증가에 대한 목표값과 현재값의 변화량을 측정한다. 최초 응답지연시간(L), 시정수(T), 이득(K)에 대한 계단형 응답곡선을 그림 7에서 보여준다[7].

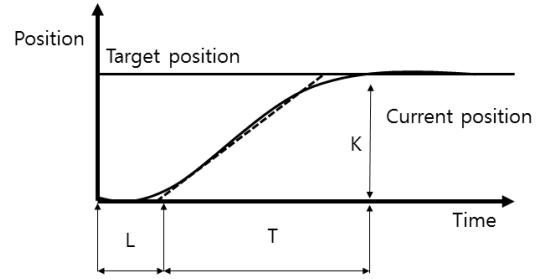


그림 7. 계단형 응답곡선

지연시간(L)과 시정수(T)의 응답곡선 변곡점에 접선을 긋고 접선과 시간축이 만나는 각 지점에 대한 값을 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

$$y(t) = K \tag{4}$$

식 (4)에서, 1차 근사식으로 표현하면 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = K \frac{e^{-Ls}}{T_s + 1} \tag{5}$$

식 (5)를 표 2에서와 같이 지글러-니콜스 계수 테이블을 이용하여 적용하면 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

표 2. 지글러-니콜스 계수 테이블

이득	K_p	T_i	T_u
제어기			
P	T/KL	∞	0
PI	$0.9T/KL$	$L/0.3$	0
PID	$1.2T/KL$	$2L$	$0.5L$

$$\begin{aligned} C(s) &= K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \\ &= \frac{1.2T}{KL} \left(1 + \frac{1}{2Ls} + 0.5Ls \right) \\ &= \frac{0.6T}{K} \frac{(s + 1/L)^2}{s} \end{aligned} \tag{6}$$

여기서, T_i 는 적분시간 T_d 는 미분시간을 나타낸다.

식 (7)은 적분시간(T_i), 미분시간(T_d)에 대한 평균화 식을 나타낸다.

$$T_i = \sum_{n=0}^{n=3} \frac{T_{ti}}{4}, T_d = \sum_{n=0}^{n=3} \frac{T_{dn}}{4} \tag{7}$$

식 (7)을 이용하여 10회 반복하여 T, L, K 를 측정 하였으며, 측정된 결과는 표 3에서 보여준다.

표 3. 측정된 T, L, K 테이블

회수 \ 이득	$T(sec)$	$L(sec)$	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

10회 평균 결과 $T=8.20, L=0.588, K=737$ 로 측정 되었다. T, L, K 값을 이용하여 K_p, T_i, T_d 값으로 계산하여 정리하면 표 4와 같이 나타낼 수 있다.

표 4. K_p, T_i, T_d 값

회수 \ 이득	K_p	T_i	T_d
1	0.026654	1.124	0.281
2	0.024577	1.166	0.2915
3	0.027597	1.18	0.295
4	0.023175	1.096	0.274
5	0.01945	1.172	0.293
6	0.023213	1.182	0.295
7	0.018208	1.182	0.2955
8	0.020415	1.258	0.2955
9	0.019673	1.232	0.3145
10	0.024351	1.1772	0.308

10회 평균 결과 $K_p = 0.022683, T_i = 1.1772, T_d = 0.2943$ 로 계산 되었다. 계산된 결과를 2차 시스템에 입력하여 전달함수를 구하면 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$C(s) = K_p + K_d s + \frac{K_i}{s} \tag{8}$$

$$= (1 + K_{d1}s)(K_{p2} + \frac{K_{i2}}{s})$$

여기서, $K_p = K_{p2} + K_{d1}, K_{i2}K_i = K_{i2}, K_d = K_{d1}K_{p2}$

또한, K_p, K_i, K_d 를 전달함수 이득 계수 K_{pr}, K_{ir}, K_{dr} 로 정리하면 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$K_p = (K_{p2} + K_{d1}K_{i2})K_{pr} \tag{9}$$

$$K_i = K_{i2}K_{ir}$$

$$K_d = K_{d1}K_{p2}K_{dr}$$

최종 계산된 이득계수의 값은 표 5에서 보여준다.

표 5. K_{pr}, K_{ir}, K_{dr} 계수값

이득항목	K_{pr}	K_{ir}	K_{dr}
계수값	1543.006	8.494733	339.7893

이득 계수값을 PID 이득으로 계산하면 표 6과 같이 나타낼 수 있다.

표 6. K_p, K_i, K_d 이득값

이득항목	K_p	K_i	K_d
이득값	35	10	100

4. 실험 및 성능평가

계산된 K_p, K_i, K_d 이득값을 시스템에 적용하여 자동 튜닝에 소요되는 시간을 측정하였으며 각 회수별 소요시간은 표 7에서 보여준다. 표 7에서 알 수 있듯이 자동 튜닝 소요시간은 평균 약 39초 소요됨을 알 수 있었다.

표 7. 회차별 자동 이득 튜닝 소요시간

회수	1회	2회	3회
소요시간(S)	41.97	36.44	38.25

자동 튜닝 완료 후 표 7의 이득으로 제어기의 성능시험을 진행 하였다. 시험의 방법은 조향 자동 이득 튜닝에 사용된 이동로봇 조향장치의 목표 위치를 두 가지로 상태로 설정하였다. 시험에 사용된 상태는 첫 번째 0°에서 -30°로의 이동이고, 두 번째는 0°에서 +30°로 이동이다. 제어기 성능 측정을 위한 항목은 수렴시간, 오버슈트, 언더슈트, 유지오차이다. 첫 번째로 0°에서 -30°로의 측정된 그래프는 그림 8과 같은 제어기의 특징을 보여주고, 성능에 관한 수치는 표 8과 같다.

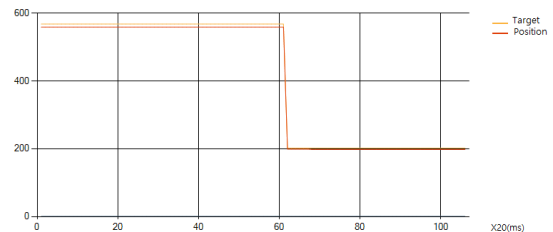


그림 8. 조향 위치 0° 에서 -30° 로 이동시 동작 특성

표 8. 조향 위치 0° 에서 -30° 로 이동시 성능측정

측정항목	수렴 시간	오버 슈트	언더 슈트	유지 오차
측정결과	80ms	0°	0°	0.081°

두 번째 0°에서 +30°으로 이동된다. 측정된 그래프는 그림 9와 같고 성능에 관한 수치는 표 9와 같은 결과를 볼 수 있다.

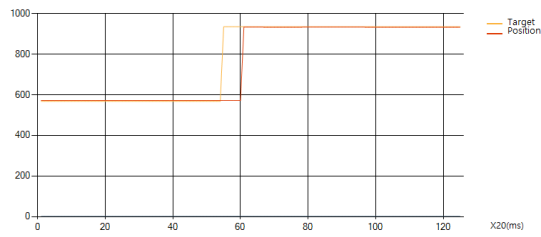


그림 9. 조향 위치 0° 에서+30° 로 이동시 동작 특성

표 9. 조향 위치 0° 에서+30° 로 이동시 성능측정

측정항목	수렴 시간	오버 슈트	언더 슈트	유지 오차
측정결과	100ms	0°	0°	0.081°

Ⅲ. 결 론

본 논문에서는 PID 제어를 사용하는 조향 시스템의 이동로봇에서 이득을 자동으로 튜닝하고 이득을 조정하여 오차에 의한 진동과 도달 시간 유지오차 최소화는 방법의 제어 기법을 제안 하였다. PID 이득을 자동 튜닝방법으로 지글러-니콜스 계단형 응답곡선을 이용하였다. 이득 획득 후 2차 시스템 전달 함수에서 전달 상수를 확인하고, 다회에 걸쳐 시스템의 PID제어기 이득을 자동 튜닝 한다.

자동 튜닝된 제어기의 이득은 PID 제어기의 자동 튜닝 소요 시간은 결과에서와 같이 1분 이내로 튜닝이 완료됨을 확인 하였다. 언더슈트와 오버슈트와 수렴에 대한 불안정 현상은 발생되지 않았다. 위치 유지 정밀도에서도 출력 목표 위치 0.5° 이내의 오차 성능을 보여주었다. 실험 성능에서와 같이 대량생산에 필요한 기반이 되는 튜닝 시간과 제어 정밀도를 보여주고 있고 시스템 전달 함수가 변화 하더라도 제어가 간단한 튜닝과정을 통해서 이득을 재설정 하여 시스템 안정성을 확보할 수 있음을 보여 준다.

참 고 문 헌

[1] K. Takahashi and T. Tamada, "Application of an immune feedback mechanism to control systems", int. Journal of JSME, Serise C, Vol41, No. 2, pp.182-191, 1988.
 [2] Tan.N, Kata.L, Atherlon. D.P. "Computation of stabilizing PI and PID controllers" Proceedings of 2003 IEEE Conference. Vol1, 23-25, pp.876-881, 2003.
 [3] Hwi-Beom Shin, "New Anti windup PI Controller for

Variable-Speed Motor Drives", IEEE Trans. Ind. Electron, Vol45, No.3, pp.445-450, 1998.

[4] G.Ellis, "Control System Design Guide-Using Your Computer to understand And Diagnose Feedback Controllers", Academic Press, 2000.
 [5] Ziegler, J. G. and N. B. Nichols, "Optimum setting for automatic controller", ASME Trans, 64, 99.759-768, 1942.
 [6] K.ohishi,M Nakao, K. ohnishi, K.Miyachi, "Microprocessor controlled DC motor ofr load insensitive position servo system"IEEE/IECON 85, conf.Rec, pp.339-344, 1985.
 [7] H. Hu, A. Datta and S. P. Bhattacharyya, "PID Stabilizaing of LIT Plants with Time-Delay", IEEE conference of Decision Control, Maul, Hawaii, USA, Dec. 2003.

저자

정 세 영 (Se-Young Jung)



- 2006년 8월 : 목원대학교 전자공학과 공학사
- 2008년 8월 : 동대학원 IT공학과 공학 석사
- 2010년 3월 ~ 현재 : 동대학원 IT공학과 박사과정

<관심분야> : 로봇, 모션제어, 인공지능, 영상처리

양 태 규(Tae-Kyu Yang)



- 1982년 : 광운대학교 전자공학과(공학사)
- 1984년 : 광운대학교 전자공학과(공학석사)
- 1989년 : 광운대학교 전자공학과(공학박사)

- 1991년 3월 ~ 2007년 4월 : 목원대학교 전자공학과 교수
- 2007년 5월 ~ 현재 : 목원대학교 지능로봇공학과 교수

<관심분야> : 지능제어, 로봇비전, 지능로봇, 센서네트워크