

이동로봇 선회를 위한 Type-2 Fuzzy Self-Tuning PID 제어기 설계 및 조향각 제어

Type-2 Fuzzy Self-Tuning PID Controller Design and Steering Angle Control for Mobile Robot Turning

박상혁 · 최원혁 · 지민석*
한서대학교 항공시스템공학과

Sang-Hyuk Park · Won-Hyuck Choi · Min-Seok Jie*

Aircraft System Engineering, Hanseo University, Chungcheongnam-do 31962, Korea

[요약]

이동로봇의 제어는 로봇 분야에 있어 중요한 이슈이다. 이동로봇의 자율주행은 다양한 작업 환경에서 중시되고 있다. 자율주행을 위해 이동로봇은 장애물을 감지, 회피하며 지능시스템을 도입한 제어 방식들을 사용해 충돌회피의 성능을 보완하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 논문에서는 이동로봇의 기구학적 모델을 분석하고 조향각 제어를 위한 type-2 fuzzy self-tuning PID 제어기를 설계하였다. Type-2 fuzzy 제어기는 type-1 fuzzy 제어기와 달리 복수 개의 값을 가지므로 언어표현의 모호함의 자유도가 높다. 본 논문에서는 설계된 제어기와 기존의 PID 제어기, type-1 fuzzy self-tuning PID 제어기를 비교하기 위한 방법으로 MATLAB Simulink를 사용하여 시뮬레이션을 하였다. 시뮬레이션 비교 결과 기존의 PID 제어기와 type-1 fuzzy self-tuning PID 제어기의 성능보다 type-2 fuzzy self-tuning PID 제어기의 성능이 우수하다는 것을 확인하였다.

[Abstract]

Researching and developing mobile robot are quite important. Autonomous driving of mobile robot is important in various working environment. For its autonomous driving, mobile robot detects obstacles and avoids them. Purpose of this thesis is to analyze kinematics model of the mobile robot and show the efficiency of type-2 fuzzy self-tuning PID controller used for controlling steering angle. Type-2 fuzzy is more flexible in verbal expression than type-1 fuzzy because it has multiple values unlike previous one. To compare these two controllers, this paper conduct a simulation by using MATLAB Simulink. The result shows the capability of type-2 fuzzy self-tuning PID is effective.

Key word : Mobile robot, Type-2 fuzzy controller, Self-tuning proportional-integral-derivative, Steering angle control, MATLAB simulink.

<http://dx.doi.org/10.12673/jant.2016.20.3.226>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 25 April 2016; Revised 25 May 2016
Accepted (Publication) 29 June 2016 (30 June 2016)

*Corresponding Author; Min-Seok Jie

Tel: +82-41-671-6231

E-mail: jiems@hanseo.ac.kr

1. 서론

이동 로봇 기술은 센싱 기술, 제어 기술, 정보 처리 기술, 기계 가공 기술, 전자 기술, 컴퓨터 기술 및 기타 기술들의 조합이며, 산업 자동화가 가속화되면서 로봇에 관한 연구가 널리 진행되었다. 초기 로봇은 작업공간의 한계로 인해 쓰임이 제한되었고, 특정한 작업에만 이용되는 경우가 대부분이었다. 예를 들어 미리 정해진 범위나 궤적을 따라서 작업 대상물을 이동시키거나 용접, 도장을 반복하는 정도였다. 로봇을 단순 반복 작업 수행에서 벗어나 보다 많은 자율성을 로봇에게 부여하는 움직임이 늘었다. 이로 인해 로봇 개발의 과정에서 제어기의 성능 향상은 항상 중요한 이슈가 되어 왔다.

이동 로봇을 제어하는 방법 중 고전적인 PID제어기는 로봇 분야에서 일반적으로 널리 사용되고 있다. PID 제어를 사용함으로써 안정성 제어 및 추적 제어를 모두 얻을 수 있다. 하지만 PID 제어기의 적절한 파라미터를 설정하는 것은 쉬운 일이 아니며, 지능적이지 못하다[1],[2]. 그렇기 때문에 지능 제어가 이슈화 되어왔으며, fuzzy logic을 이용한 지능 제어에 대한 연구가 활발히 진행 중이다[9],[10].

Fuzzy 제어는 복잡한 수학적 모델, 비선형, 지연과 연결을 가진 제어 대상에 유용하며, 일반적으로 fuzzy의 관계는 수학적 관계를 피지화한 개념이다[3].

Qing Xu의 연구에서 제안한 제어기는 type-1 fuzzy self-tuning PID 제어기로 피드백 오차에 따라 PID 제어기의 파라미터를 조정가능하게 제어기를 설계하였다[4]. PID 제어기와 type-1 fuzzy self-tuning PID 제어기를 비교하여 type-1 fuzzy self-tuning PID 제어기의 성능을 검증하였다. Qing Xu가 제안한 제어 시스템은 반 제밍 특성과 신속성, 적응성, 궤도 추적 제어의 정확성을 향상시킬 수 있음을 보여준다.

본 논문에서는 fuzzy logic을 이용하여 로봇의 선회 궤적을 빠르고 정확하게 수정하는 지능 제어기를 제안하였다. Type-1 fuzzy 제어기를 사용하여 PID 게인 값을 self-tuning 하였으나 type-2 fuzzy 제어기를 사용하여 PID 게인 값을 self-tuning 하는 제어기를 제안한다. Type-1 fuzzy 제어기의 경우 스칼라 값을 사용하나 type-2 fuzzy 제어기는 영역대의 값을 사용하며 type reducer가 추가되었다. 제안한 type-2 fuzzy self-tuning PID 제어기와 고전적인 PID 제어기, type-1 fuzzy self-tuning PID 제어기 성능을 비교하여 type-2 fuzzy self-tuning PID 제어기의 우수성을 MATLAB simulink 모의실험 결과로 확인하였다.

II. 로봇 기구학 및 제어기 설계

2-1 이동로봇의 기구학

본 논문에서 구성한 이동로봇의 구조는 그림 1과 같다. 이동 로봇의 모델링은 역학적 기반의 접근보다 기구학적 기반에서

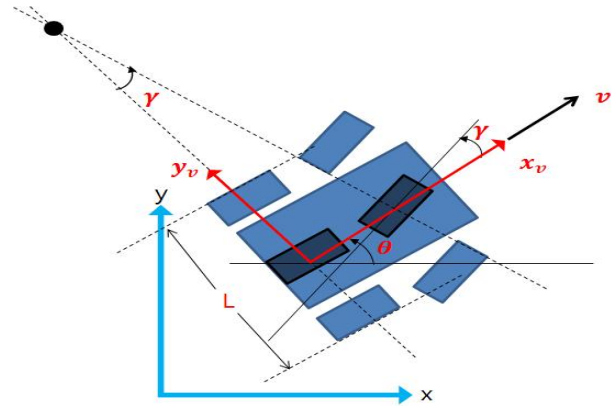


그림 1. 이동 로봇의 기구학적 모델링
Fig. 1. The mobile robot kinematics model.

간단히 모델링 될 수 있다. 기구학적 제어기반에서 이동로봇의 진행속도 v , 각속도는 w 로 표현 한다. 이동로봇의 위치는 직각좌표계의 (x, y, θ) 로 표현한다. 좌표 (x, y) 는 이동로봇의 중심점의 위치이고, θ 는 x 축을 기준으로 보았을 때 이동로봇의 방향각 (heading angle)이다. γ 는 조향바퀴의 회전이 선회 이동하는 조향각 (steering angle), L 은 좌우 바퀴 사이의 거리이다.

이동로봇의 바퀴가 지면과 맞닿아 이동할 때 미끄러짐 (slip) 현상이 없다고 가정하면 식 (1)을 구할 수 있다[5].

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v \cos \theta \\ v \sin \theta \\ \frac{v}{L} \tan \gamma \end{bmatrix} \quad (1)$$

식 (1)을 통한 평면상에서의 로봇 속도 (${}^t\dot{P}$)는 다음과 같다.

$${}^t\dot{P} = [x \ y \ \theta] \quad (2)$$

여기서 진행속도 v 와 각속도 w 는 제어입력으로 사용한다. 이동로봇은 미끄러짐이 없는 상태에서 다음과 같은 논홀로노믹 제약조건 (non-holonomic constraint)을 갖는다[5].

$$\dot{x} \sin \theta - \dot{y} \cos \theta = 0 \quad (3)$$

일반적으로 기준 좌표계에 대한 로봇의 자세는 직교 회전 행렬로 나타낼 수 있다. 평면상을 주행하는 이동 로봇의 경우 회전축을 z 로 생각할 수 있으므로 이동 (로봇)좌표계를 기준으로 본 기준 좌표계의 회전은 식 (4)와 같다.

$$R(\theta) = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

z 축을 중심으로 θ 만큼 회전한 경우, 로봇의 속도는 식(5)와

같다.

$${}^M\dot{P}_I = {}^M R_I^{-1} \dot{P} \tag{5}$$

식 (5)와 같이 이동로봇의 속도는 식 (4)의 이동 좌표계를 기준으로 회전행렬 R 과 평면상의 로봇 속도 식 (2)의 곱으로 이동로봇의 속도를 구할 수 있다.

평면에서 목표 지점 (x^*, y^*) 을 향해 이동의 문제를 고려할 때, 이동로봇의 목표점을 위한 각도 $\Delta\theta$ 는 다음 식과 같다.

$$\Delta\theta = \tan^{-1} \frac{y^* - y}{x^* - x} \tag{6}$$

$$\gamma = K_h (\Delta\theta - \theta), K_h > 0 \tag{7}$$

여기서 K_h 는 비례상수 값이며 식 (7)과 같으며 θ 와 $\Delta\theta$ 값으로 γ 를 구할 수 있다.

2-2 Type-2 fuzzy self-tuning PID 제어기 설계

퍼지 (fuzzy)는 ‘모호하다’ 혹은 ‘애매하다’는 것을 의미한다. 이러한 개념이 집합에 적용된 것이 fuzzy 집합이다[6]. 기본적인 fuzzy 제어기는 퍼지화기, 추론, 룰 베이스, 비 퍼지화기로 구성된다.

본 논문에서는 type-2 fuzzy 제어기를 사용하며 type-2 fuzzy 제어기의 구성은 그림 2과 같다. Type-1 fuzzy 제어기와 달리 스칼라 값이 아닌 영역대의 값을 가지며, type-reducer가 추가된다. 또한, type-1 fuzzy 논리 집합은 멤버십 함수의 크기가 크리습한 값으로 정의되어 있지만, type-2 fuzzy 논리 집합은 멤버십 함수의 크기가 fuzzy 집합으로 정의되어 있다.

Fuzzy 추론 시스템을 통해 오차, 오차율과 ΔK_p (비례상수), ΔK_i (적분상수), ΔK_d (미분상수) 파라미터들 사이에 비선형 함수를 달성하고 type-2 fuzzy 제어기와 self-tuning PID 제어를 결합한 제어 시스템의 원리는 그림 3과 같다[4].

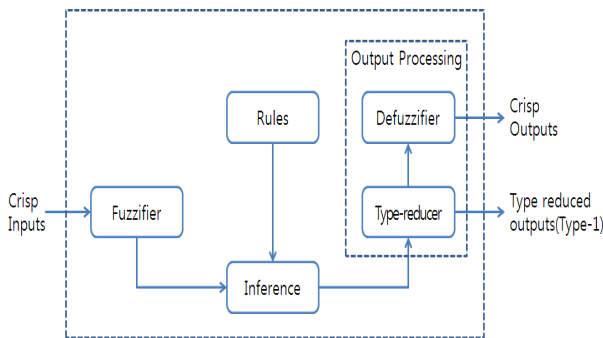


그림 2. Type-2 퍼지 제어기의 구조
Fig. 2. Structure of the type-2 fuzzy controller.

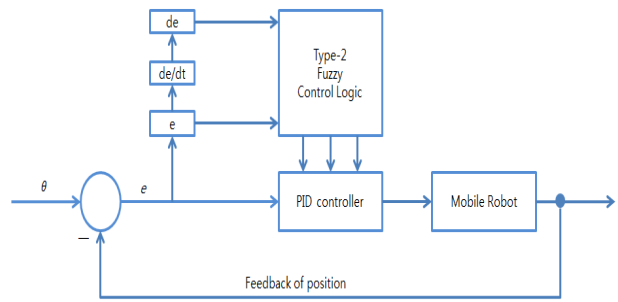


그림 3. Type-2 퍼지 self-tuning PID 제어기의 구조
Fig. 3. Structure of type-2 fuzzy self-tuning PID controller.

시스템의 제어 목표와 결합된 PID 자동 파라미터 설정 제어기 구조는 그림 4와 같다. 제어기의 입력은 방향각 θ 와 방향각 오차율 $\Delta\theta$ 이며, 제어기의 출력은 PID 제어기의 ΔK_p , ΔK_i , ΔK_d 매개 변수이다. 매개 변수를 PID 제어기에 사용하여 로봇의 조향각 γ 를 제어할 수 있다[4].

공정 제어에 사용되는 fuzzy 제어기는 일반적으로 제어 대상인 공정의 상태에 한 정보를 입력 받은 후, 지식베이스에 축적된 지식을 기반으로 추론을 하여 그 결과를 출력하는 구조이다 [7]. Fuzzy controller의 추론 규칙은 IF-THEN 조건문으로 표현된다.

$$\text{IF } \theta \text{ is NB and } \Delta\theta \text{ is PB, then } u \text{ is } S \tag{8}$$

입력함수로는 NB (negative big), NS (negative small), ZE (zero), PS (Positive small), PB (positive big)이고, 출력함수로는 S (Small), M (middle), B (big), VB (very big)의 의미를 갖는다. 오차 θ 와 오차율 $\Delta\theta$ 의 범위는 $[-1, 1]$, K_p 의 범위는 $[0, 50]$, K_i 의 범위는 $[0, 20]$, K_d 의 범위는 $[0, 1]$ 로 설정하였다.

입출력 멤버십 함수는 그림 5와 같고, 제어 규칙은 표 1과 같다.

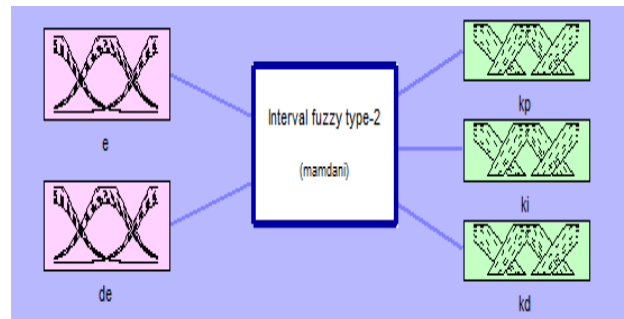


그림 4. PID gain tuning을 위한 fuzzy type-2 제어기 구조
Fig. 4. Fuzzy type-2 controller structures for PID gain tuning.

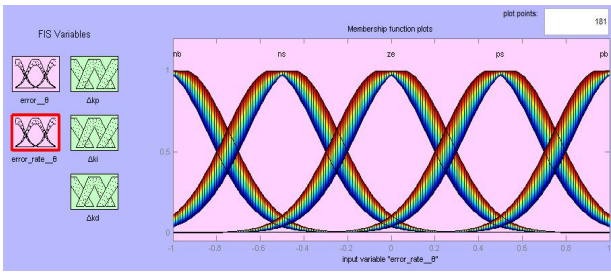


그림 5. Type-2 Fuzzy Logic의 멤버십 함수
Fig. 5. Membership functions of type-2 fuzzy logic.

표 1. PID gain 퍼지 규칙

Table 1. Fuzzy rule table of PID gain.

$K_p/K_i/K_d$		$\Delta\theta$				
		NB	NS	ZE	PS	PB
θ	NB	VB/S/S	VB/B/S	B/B/S	M/B/M	S/S/M
	NS	VB/M/S	B/B/S	M/B/M	S/B/B	S/M/VB
	ZE	S/M/VB	S/B/B	S/VB/B	S/B/B	S/M/VB
	PS	S/M/B	S/B/B	S/VB/M	M/B/S	B/M/S
	PB	M/S/S	B/B/S	VB/VB/S	VB/B/S	VB/S/S

III. 실험 및 결과

본 연구에서는 MATLAB simulink를 이용하여 시뮬레이션을 진행하였다. 이동 좌표계를 기준으로 한 기준 좌표계의 회전 행렬 식(4)와 평면상의 로봇 속도 식(2)의 곱은 로봇의 속도 식(5)와 같으며 MATLAB simulink를 통하여 표현하면 그림 6과 같다.

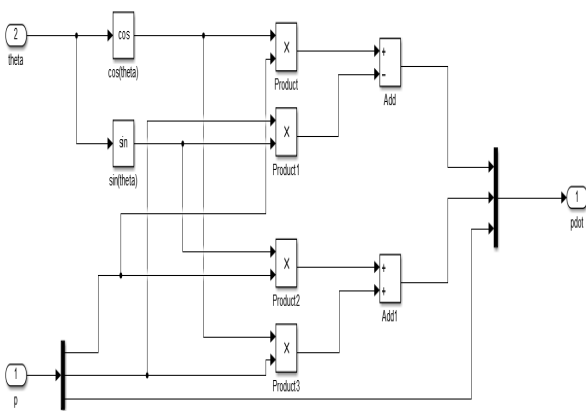


그림 6. 이동로봇 속도 모델링
Fig. 6. Mobile robot speed modeling.

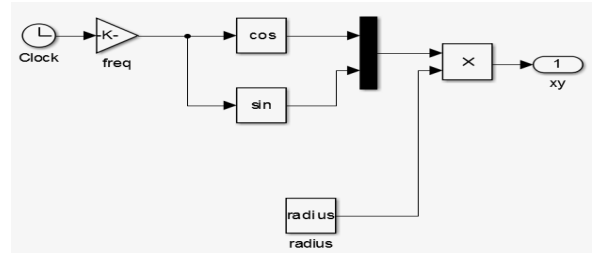


그림 7. 타겟 궤적 모델[8]
Fig. 7. Model of target trajectory[8].

이동 로봇이 추정해야 할 기준 입력은 실시간 이동 지점이 다. 이동 로봇은 목표점을 추적하여 트랙에 도달한다. 목표 궤도는 원, 타원, 직선을 설정하고, 원과 타원의 크기, 직선의 위치, 궤적 점의 속도 또한 임의로 설정할 수 있다[8]. 제어기의 기준 입력은 그림 7과 같다.

그림 8은 모바일 로봇 제어를 위해 설계된 type-2 fuzzy self-tuning PID 제어기이다. Type-2 fuzzy 제어기의 입력은 θ 와 $\Delta\theta$, 출력은 K_p , K_i , K_d 의 실시간 tuning 값으로 파라미터가 설정된다. 파라미터의 설정 값은 PID 제어기를 통해 조향각 γ 를 제어한다.

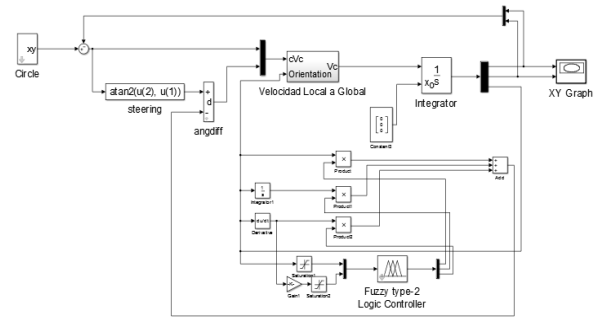


그림 8. Type-2 Fuzzy Self-Tuning PID 제어기 기반의 이동로봇 모델

Fig. 8. Type-2 fuzzy self-tuning PID controllers based mobile robot models.

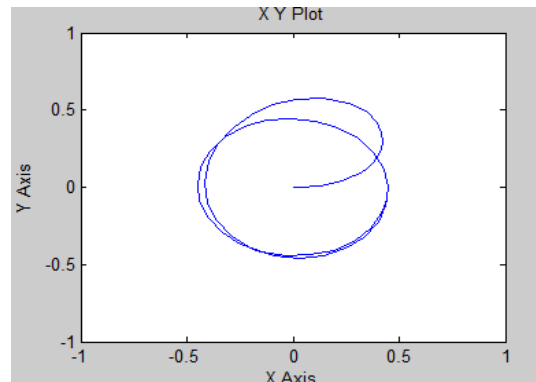


그림 9. PID 제어기의 궤적
Fig. 9. Trajectory of PID controller.

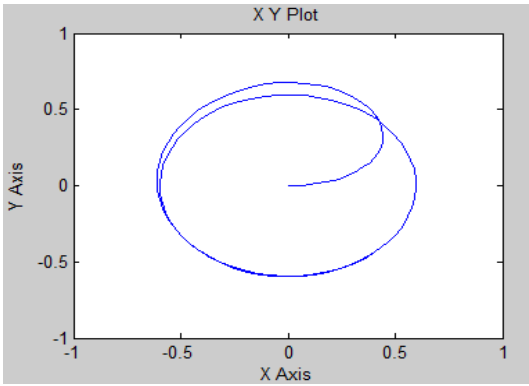


그림 10. Type-1 fuzzy PID 제어기의 궤적
 Fig. 10. Trajectory of type-1 fuzzy PID controller.

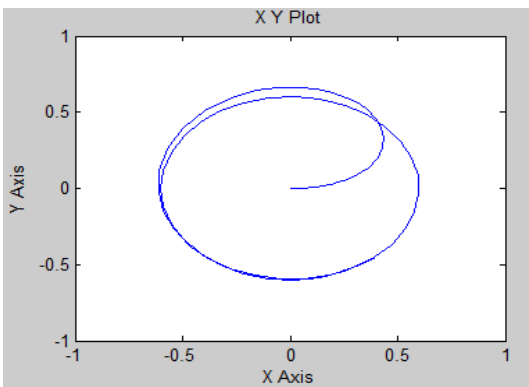


그림 11. Type-2 fuzzy PID 제어기의 궤적
 Fig. 11. Trajectory of type-2 fuzzy PID controller.

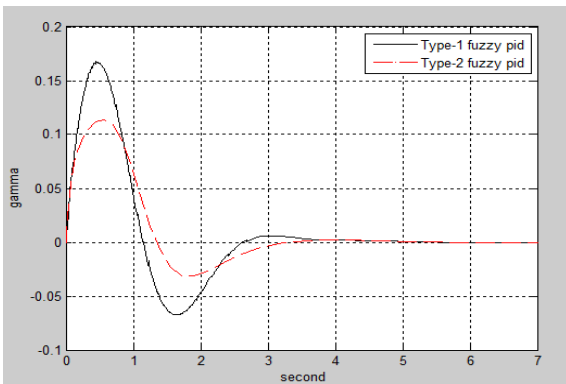


그림 12. Type-1과 type-2 조향각(γ)의 변화 비교 그래프
 Fig. 12. Comparing for steering angle(γ) of the type-1 and type-2 controller.

선회를 위해 반경이 1인 원을 기준입력으로 초기 설정하고, 로봇의 위치는 (0, 0)으로 한다. 그림 9는 PID 제어기, 그림 10은 type-1 fuzzy PID 제어기, 그림 11은 type-2 fuzzy PID 제어기를 적용 시 이동로봇의 궤적을 나타낸다.

그림 9 (PID)와 그림 10 (type-1 fuzzy), 그림 11 (type-2 fuzzy)

의 그래프에서 보는 것과 같이 fuzzy 제어기의 성능은 PID 제어기의 성능보다 우수하다는 것을 알 수 있다.

그림 12와 같이 type-2 fuzzy PID 제어기는 type-1 fuzzy PID 제어기 보다 오버슈트가 4%로 감소되었고 제어성능이 우수하다는 것을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 이동로봇의 조향각 제어를 위해 이동로봇의 기구학적으로 모델링하고 제어기를 설계하였다. 고전적인 PID 제어기와 fuzzy 제어기를 이용하여 매개변수 ΔK_p , ΔK_i , ΔK_d 각각의 게인 값을 튜닝하고, fuzzy 제어기는 복수 개의 값을 갖는 type-2 fuzzy 제어기를 사용하였다.

Type-2 fuzzy self-tuning PID 제어기의 성능을 검증하고자 type-1 fuzzy self-tuning PID 제어기와 비교하고, 고전적인 PID 제어기와 성능을 비교하여 본 연구에서 제안한 type-2 fuzzy self-tuning PID 제어기의 우수성을 확인하였다. 제어기의 우수성을 확인하기 위하여 MATLAB simulink를 통하여 모의실험을 하였다.

향후 연구는 제어 규칙의 수가 대폭 줄어들음으로 제어기의 계산량 축소에 따른 하드웨어 장비의 효율을 높이고자 한다.

감사의 글

본 연구는 2015년도 국토교통부의 「항공인력 양성을 위한 특성화 대학 지원사업」의 지원을 받아 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] A. A. Pervozvanski and L. B. Freidovich, "Robust stabilization of robotic manipulators by PID controllers," *Dynamics and Control*, Vol. 9, No. 3, pp. 203-222, 1993.
- [2] S. Bentalba, A. El Hajjaji and A. Rachid, "Fuzzy control of a mobile robot: a new approach," *IEEE Transactions on Control Applications*, Vol. 1, No. 3, pp. 69-72, 1997.
- [3] C. D. Jung, J. Mook, Kang and C. H. Park, "Study of engine oil replacement time estimate method using fuzzy and neural network algorithm in ubiquitous environment," *International Journal of Control and Automation (IJCA)*, Vol. 6, pp. 267-280, 2013.
- [4] Q. Xu, J. Kan, S. Chen and S. Yan, "Fuzzy PID based trajectory tracking control of mobile robot and its simulation in simulink," *International Journal of Control and Automation*

(IJCA), Vol. 7, pp. 233-244, 2014.

[5] Y. Kanayama, Y. Kimura, F. Miyazaki, and T. Noguchi, "A stable tracking control method for an autonomous mobile robot," in *Proceeding. of IEEE International. Conference. on Robotics and Automation*, Cincinnati: OH, pp. 384-389, 1990.

[6] L. A. Zadeh, "Fuzzy sets," *Information and Control*, Vol. 8, pp. 338-353, 1965.

[7] B. J. Choi and S. Kim, "Design of simple-structured fuzzy logic system based driving controller for mobile robot," *Korean Institute of Intelligent Systems*, Vol. 22, No. 1, pp. 1-6, 2012.

[8] P. Corke, *Robotics Vision and Control Fundamental Algorithms in MATLAB*, Berlin: Germany, Springer-Verlag, 2011.

[9] J. P. Laumond, P. E. Jacobs, M. Taix and R. M. Murry, "A motion planner for nonholonomic mobile robots," *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, Vol. 10, No. 5, pp. 557-593, 1994.

[10] S. Thongchai and K. Kawamura, "Application of fuzzy control to a sonar-based obstacle avoidance mobile robot," in *Proceeding. of IEEE International. Conference. on Robotics and Automation on Control Applications*, Anchorage: AL, pp. 425-430, 2000.



박 상 혁 (Sang-Hyuk Park)

2014년 2월 : 한서대학교 항공전자공학과 졸업 (공학사)
 2014년 ~ 현재 : 한서대학교 항공시스템공학과 석사과정
 ※ 관심분야 : 지능 제어, 지능형로봇



최 원 혁 (Won-Hyuck Choi)

2006년 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학박사)
 2008 ~ 2014년 두원공과대학교 스마트네트워크 교수
 2014 ~ 현재 : 한서대학교 항공전자공학과 교수
 ※ 관심분야 : 임베디드시스템, 홈네트워크



지 민 석 (Min-Seok Jie)

2006년 8월 : 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학박사)
 2007년 ~ 2008년 : 한국과학기술연구원 지능로봇연구센터 Post Doc.
 2015년 ~ 2016년 : Purdue University 방문 교수
 2008년 3월 ~ 현재 : 한서대학교 항공전자공학과 교수
 ※ 관심분야 : 강인제어, 로봇 비전, 무인항공기