

이동용 로봇의 퍼지 기반 추적 제어

이윤형¹ · 진강규² · 최형식³ · 박한일⁴ · 장하용⁵ · 소명옥[†]

(원고접수일 : 2009년 9월 30일, 원고수정일 : 2009년 12월 10일, 심사완료일 : 2010년 1월 28일)

Fuzzy Rule Based Trajectory Control of Mobile Robot

Yun-Hyung Lee¹ · Gang-Gyoo Jin² · Hyeung-Sik Choi³ · Han-Il Park⁴ · Ha-Lyong Jang⁵ ·
Myung-Ok So[†]

요 약 : 본 논문은 퍼지 제어를 통한 이동용 로봇에 대한 추적 제어에 대해서 다루고 있다. 이동용 로봇은 Mamdani 형식의 퍼지 제어기로 제어 된다. 퍼지 제어기에 있어서 이동용 로봇과 목표 사이의 각도와 각도의 변화율이 입력으로 사용되고, 출력으로 조향각이 추론되어 제어입력이 된다. 퍼지 규칙은 전문가의 경험적 지식을 참조하여 7개를 사용하였다. 또한 퍼지 제어기 설계에 있어서 하나의 관심 분야인 환산계수(scaling factor) 조정 방법에 대해 제안한다. 본 논문에서는 이를 위해 파라미터 최적화 분야에서 잘 알려진 실수코딩 유전알고리즘을 적용하였다. 시뮬레이션을 통해 다양한 초기 조향각이 주어진 경우, 목표치에 대한 추적 안정성을 보여 퍼지 제어기의 유효성이 확인된다.

주제어 : 이동용 로봇, 퍼지제어, 소속함수, 환산계수, 추적안정성, 실수코딩 유전알고리즘

Abstract: This paper deals with trajectory control of computer simulated mobile robot via fuzzy control. Mobile robot is controlled by Mamdani type fuzzy controller. Inputs of the fuzzy controller are angle between mobile robot and target, changed angle and output is the steering angle, which is control input. Fuzzy rules have seven rules and are selected by human experiential knowledge. Also we propose a scaling factors tuning scheme which is the another focus in designing fuzzy controller. In this paper, we adapt the RCGA which is well known in parameter optimization to adjust scaling factors. The simulation results show that the fuzzy control effectively realize trajectory stabilization of the mobile robot along a given reference target from various initial steering angles.

Key words: Mobile robot, Fuzzy control, Membership function, Scaling factor, Trajectory stabilization, RCGA

1. 서 론

만약 시스템의 출력이 원하는 목표치에 추종하는 제어 문제를 고려한다면, 일반적으로 오차, 오차의 미분, 오차의 적분 등을 제어기 입력으로 고려하게

된다. 이를 이용한 제어기로 가장 널리 사용되는 PID 제어기는 현재까지도 산업 현장에서 대부분을 차지하고 있다. 이는 조정해야 할 제어기 계수의 개수가 적을 뿐만 아니라 Ziegler-Nichols 동조

[†] 교신저자(한국해양대학교 선박전자계공학부, E-mail:smo@hhu.ac.kr, Tel: 051-410-4248)

1 한국항만연수원 부산연수원

2 한국해양대학교 IT 공학부

3 한국해양대학교 기계·정보공학부

4 한국해양대학교 해양공학과

5 한국해양대학교 대학원

법 등이 비교적 양호한 성능을 보이고 있기 때문이다[1-2]. 또한 PID 제어기는 오버슈트, 상승시간, 정정시간 등으로 표현되는 제어 성능을 어느 정도 가능할 수 있는 선형 제어기이므로 현장의 기술자가 다루기 친숙한 것도 큰 요인이라 할 수 있다.

퍼지 제어기(Fuzzy logic controller : FLC)는 L. A. Zadeh에 의해 처음으로 소개되고[3], 적용된[4] 것으로 역시 오차에 관련된 인자를 제어기의 입력으로 사용한다. 이후 FLC는 선형 제어기 만으로는 제어가 까다로운 구조적으로 모델링이 어려운 대상이나 비선형 대상을 제어하는 효과적인 도구이다. 왜냐하면 퍼지 제어기는 인간의 언어 및 사고와 관련된 애매함(Fuzziness)을 수리적으로 취급하는 것이 가능하며, 시스템의 특성이 복잡하여 정량적인 방법으로 해석하기 어렵거나 정보가 정성적이고 부정확한 경우에 유리하고, 전통적인 논리시스템보다 실제 현상의 근사적이고 부정확한 성질을 표현하는데 효과적인 장점을 가지기 때문이다. 따라서 많은 실제적인 문제에서 퍼지 제어를 적용하는 경우가 많이 있다.

특히, 평행 주차와 같은 경우 무인 차량의 조향 제어는 퍼지제어가 유용하게 적용될 수 있다. 이는 전문가의 조향은 수학적 모델을 이용하는 것이 아니라 경험과 지식을 기반으로 하기 때문이다. 실제적으로 Zadeh[1]는 차량의 주차에 퍼지 알고리즘을 이용한 방법을 적용하였다. 또한 Sugeno[5,6]는 처음으로 전문가의 경험적 지식을 추출한 퍼지제어를 실제 차량 모델에 적용하여 검증하였다. 이후에 몇몇의 연구에서 이와 관련한 연구를 선보였다[7-9].

본 논문에서는 이와 같은 퍼지제어를 이용하여 무인 차량을 제어하는 문제를 다루기로 한다. 퍼지 제어에 사용한 퍼지시스템은 Mamdani 형식을 사용하며, 2입력 1출력 퍼지시스템으로 구성한다. 또한, 퍼지 제어기 설계에 중요한 관심사항인 환산계수(Scaling factor)를 실수코딩 유전알고리즘으로 최적 조정하는 문제도 고려한다. 마지막으로 시뮬레이션을 통해 제안한 퍼지제어의 유효성을 살펴본다.

2. 이동용 로봇의 모델

본 연구에서 다루는 이동용 로봇(이하 로봇이라 함)은 다음과 같은 수학적 모델이 사용된다[10].

$$\begin{aligned}x_0(k+1) &= x_0(k) + v \cdot h \cdot \cos[x_2(k)] \\x_1(k+1) &= x_1(k) + v \cdot h \cdot \sin[x_2(k)] \\x_2(k+1) &= x_2(k) + v \cdot h / L \cdot \tan[u(k)]\end{aligned}\quad (1)$$

여기서 $x_0(k)$ 와 $x_1(k)$ 은 각각 로봇의 수평방향 위치와 수직방향 위치, $x_2(k)$ 는 로봇의 각도를 의미하며, $\theta(k)$ 는 로봇과 목표위치 사이의 각도, $u(k)$ 는 핸들의 조향각을 의미한다. 또한 v 와 h 는 각각 로봇의 속도와 샘플링 시간이고, L 은 로봇의 전장이다. Figure 1은 로봇과 좌표 시스템을 나타낸다.

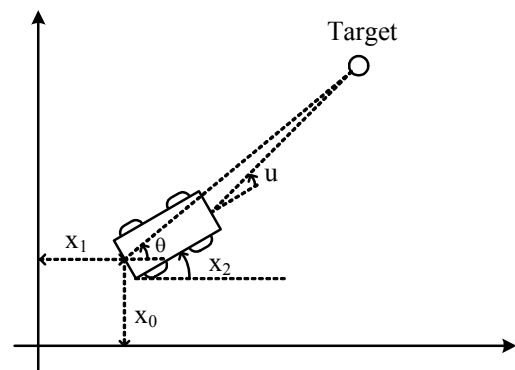


Figure 1: Mobile robot and its coordinate system

3. 퍼지 제어기 설계

3.1 문제의 정형화

본 논문에서는 로봇의 길이 $L=2.8$ (m), $h=1.0$ (s)로 설정한다. 또한, 문제를 간단하게 하기 위해서 로봇의 속도 $v=1.0$ (m/s)로 하고, 로봇의 자체의 후진기능은 고려하지 않으므로 초기위치와 목표위치와의 거리는 회전반경 이상의 거리가 되도록 가정한다. 결국, 제어문제는 로봇을 목표위치에 추종하기 위해 적절히 조향각을 변경하는 문제로 정형화 할 수 있다.

3.2 퍼지제어기 설계

일반적인 퍼지제어기의 구성은 Figure 2와 같이 오차와 오차의 변화율 신호를 입력으로 이용하는 2차원 퍼지제어를 채택하고 있다. 그림에서 KB는 지식 베이스부를 의미한다.

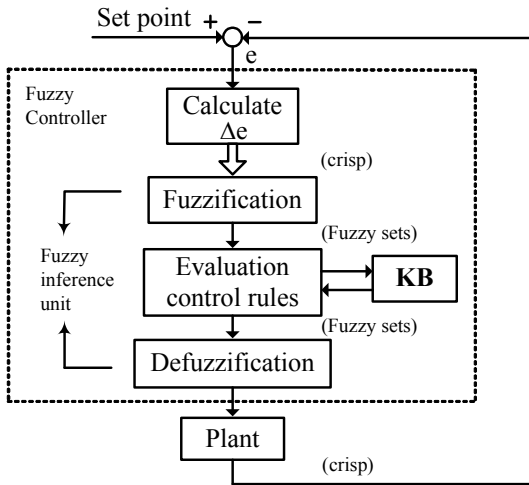


Figure 2: Fuzzy logic control system architecture

본 논문에서도 Figure 2와 같은 2차원 퍼지시스템으로 제어를 구성한다.

따라서 로봇 추종제어를 위한 퍼지시스템의 입력은 $\phi(k)$ 와 $\dot{\phi}(k)$ 를 가지며, 출력으로는 조향각 $u(k)$ 가 추론된다. 여기서 $\phi(k) = \theta(k) - x_2(k)$ 를 의미한다.

퍼지 입력 $\phi(k)$ 는 정규화된 영역 $[0,1]$ 에서 3개의 퍼지집합 {N, Z, P}를 가지며 N은 Negative를 Z는 Zero를, P는 Positive를 의미한다. 또 다른 퍼지 입력 $\dot{\phi}(k)$ 도 $\phi(k)$ 와 동일한 정규화된 영역 $[0,1]$ 에서 3개의 퍼지집합 {N, Z, P}를 가지며 퍼지변수의 의미도 동일하다. Figure 3은 이들의 소속함수(Membership function)를 나타낸 것이다.

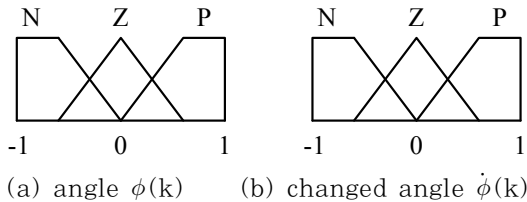


Figure 3: Membership functions of inputs

한편, 출력변수인 $u(k)$ 는 $[0,1]$ 사이의 값을 가지도록 추론되며, 입력변수의 퍼지집합과 동일한 소속함수를 가진다. Figure 4는 출력변수의 소속함수를 나타낸 것이다.

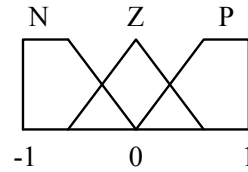


Figure 4: Membership functions of output

2 입력 $\phi(k)$ 와 $\dot{\phi}(k)$ 를 받아 $u(k)$ 를 출력하는 퍼지 시스템은 Mamdani 형의 퍼지규칙으로 기술되며, 경험과 지식을 기반으로 작성된 7개의 퍼지규칙은 다음과 같다.

- IF $\phi(k)$ is N and $\dot{\phi}(k)$ is N, THEN $u(k) = N$
- IF $\phi(k)$ is N and $\dot{\phi}(k)$ is Z, THEN $u(k) = N$
- IF $\phi(k)$ is Z and $\dot{\phi}(k)$ is N, THEN $u(k) = N$
- IF $\phi(k)$ is Z and $\dot{\phi}(k)$ is Z, THEN $u(k) = Z$
- IF $\phi(k)$ is Z and $\dot{\phi}(k)$ is P, THEN $u(k) = P$
- IF $\phi(k)$ is P and $\dot{\phi}(k)$ is Z, THEN $u(k) = P$
- IF $\phi(k)$ is P and $\dot{\phi}(k)$ is P, THEN $u(k) = P$

Figure 5는 구현된 퍼지제어의 입출력 관계를 보여주고 있다. 그림을 통해 확인할 수 있듯이 퍼지 제어기의 입력과 출력의 관계는 매우 큰 비선형성을 보이고 있다.

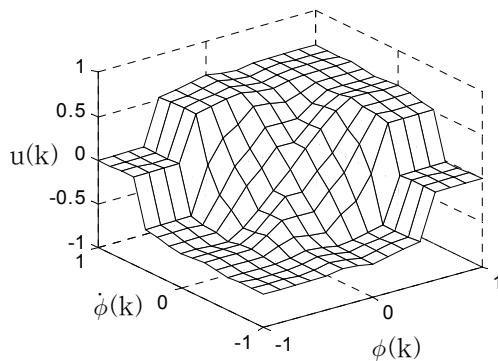


Figure 5: Control surface

이렇게 구성된 퍼지제어기의 구성은 Figure 6에 나타내었다.

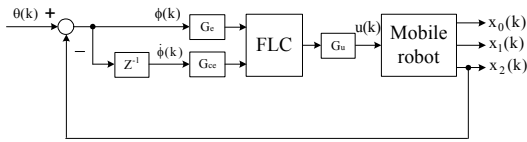


Figure 6: Mobile robot control system

3.3 환산계수(scaling factor)

환산계수의 선정은 퍼지 제어기 출력에 직접적으로 영향을 미치게 된다. 따라서 환산 계수의 적절한 선정이 중요하나 이는 단지 데이터의 특성에만 관계되는 것이 아니라 소속함수의 형태, 위치 플랜트의 동특성에도 관련이 되기 때문에 선정이 쉽지 않으므로 신중을 기해야 한다.

본 연구에서 다루는 퍼지 제어기는 Figure 6과 같은 구조이고, 제어기 출력은 다음과 같이 나타난다.

$$u(k) = F \{ G_e \cdot \phi_k, G_{ee} \cdot \dot{\phi}_k \} \cdot G_u \quad (2)$$

여기서 $F\{\cdot\}$ 는 퍼지 연산을 의미한다.

본 연구에서는 식 (2)로 표현되는 3개의 환산계수를 최적화 알고리즘으로 잘 알려진 실수코딩 유전 알고리즘(RCGA)을 이용하여 최적화하기로 한다.

그러면 RCGA는 다음과 같은 파라미터 벡터를 최적화하는 문제로 귀착된다.

$$\psi = [G_e, G_{ee}, G_u]^T \in \mathbf{R}^3 \quad (3)$$

적합도를 평가하기 위한 목적함수는 시간이 지남에 따라 $\phi(k)$ 와 $\dot{\phi}(k)$ 는 0으로 수렴해야 추종제어가 이루어지는 것이므로 식 (4)와 같이 선정하였다.

$$J(\psi) = \int_0^{t_f} (t|\phi(k)| + |\dot{\phi}(k)|) dt \quad (4)$$

여기서 t_f 는 충분히 큰 시간으로 선정하여 이후 시간에서의 적분크기가 무시될 정도로 한다.

Figure 7은 RCGA를 이용하여 환산계수를 조정하는 모습을 보이고 있다.

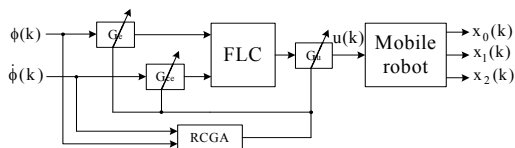


Figure 7: Optimal adjustment of scaling factors

4. 시뮬레이션

4.1 환산계수 조정

환산계수 조정을 위해 사용된 RCGA의 매개변수는 집단의 크기 20, 재생산계수 1.7, 교배확률 1.0, 돌연변이 확률 0.2, 스케일링 윈도우 $W_s=1$ 이 사용되었다. 유전 연산자로는 구배와 유사한 재생산, 수정단순교배, 동적 돌연변이를 채택했고, 엘리트전략도 사용하였다. RCGA가 환산계수를 탐색하는 범위는 $0 \leq G_e, G_{ee} \leq 1, 0 \leq G_u \leq 5$ 이다.

RCGA를 통해서 탐색된 조정계수는 $G_e=0.68, G_{ee}=0.51, G_u=1.67$ 이다.

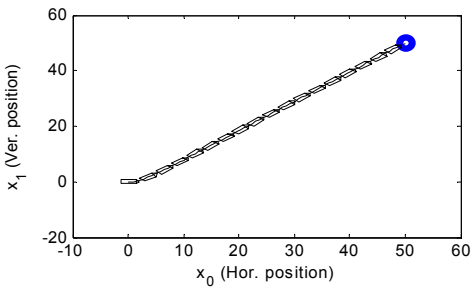
4.2 퍼지 제어기 성능

시뮬레이션 환경은 로봇의 속도 $v=1.0(m/s)$ 로 일정하게 유지한 상태에서, 1.0[s]의 샘플링 시간을 사용한다. 다양한 초기의 로봇 각도가 주어지는 경우 이동용 로봇이 목표위치($x=50, y=50$)까지 추종가능한지를 살펴본다.

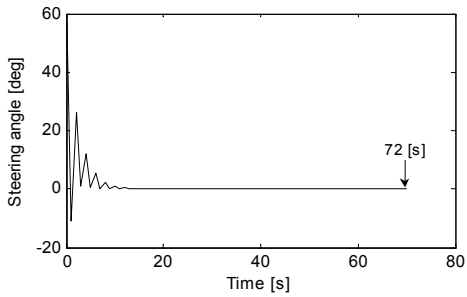
초기 각도는 양(+)의 각과 음(-)의 각을 포함하여 5개로 선정하였으며, 로봇이 목표위치까지 추종하는 데 소요되는 시간과 조향각도 동시에 나타내었다.

Figure 8은 초기의 각도가 0° 인 경우, Figure 9와 Figure 10은 각각 90° 와 180° 인 경우, Figure 11과 Figure 12는 음의 각으로 -45° 와 -120° 인 경우이다. 이때 로봇이 겹쳐져 나타나지 않도록 시뮬레이션을 실시 한 후에 로봇의 자취를 4.0[s]마다 선택해서 나타내었다.

특히, Figure 12에는 환산계수를 임의의 값인 $G_e=0.1, G_{ee}=0.1, G_u=2.0$ 으로 선정한 것과 RCGA로 조정한 환산계수를 사용한 결과를 비교하여 나타내었다. 전체적인 시뮬레이션을 통해 알 수 있듯이 퍼지 제어기는 다양한 초기조건에도 목표위치까지 이동용 로봇을 안정하게 추종 시키고 있다.

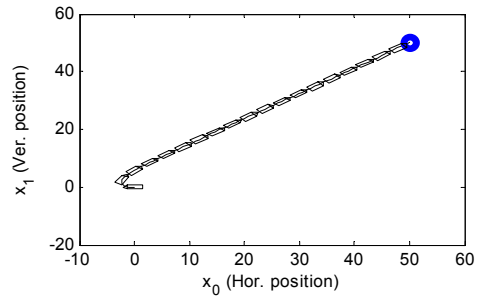


(a) Trajectory of mobile robot

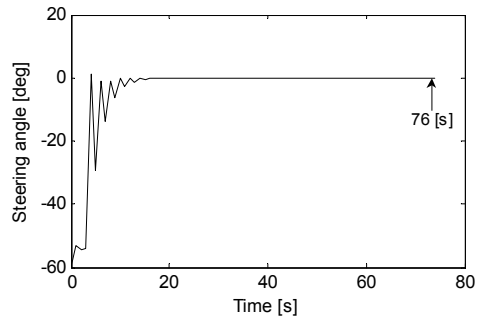


(b) Time vs. steering angle

Figure 8: Initial value $x_2(0) = 0^\circ$

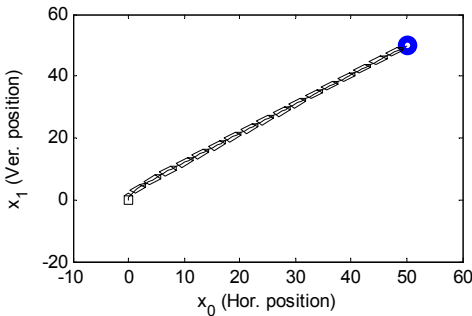


(a) Trajectory of mobile robot

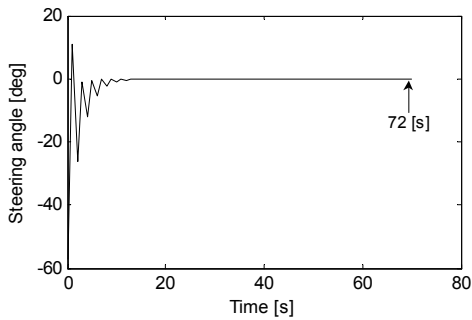


(b) Time vs. steering angle

Figure 10: Initial value $x_2(0) = 180^\circ$

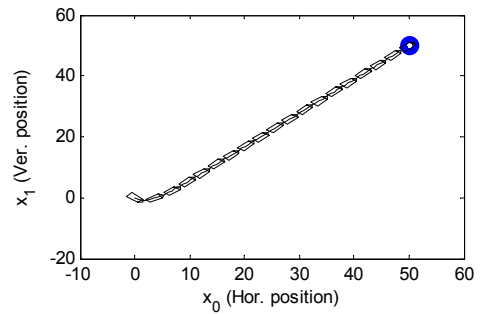


(a) Trajectory of mobile robot

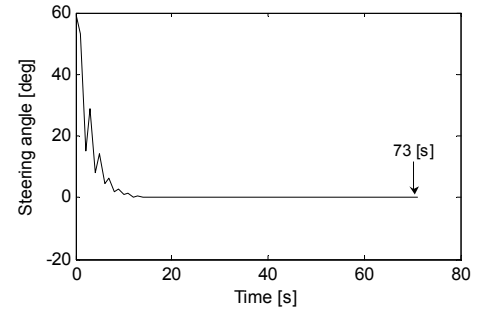


(b) Time vs. steering angle

Figure 9: Initial value $x_2(0) = 90^\circ$



(a) Trajectory of mobile robot



(b) Time vs. steering angle

Figure 11: Initial value $x_2(0) = -45^\circ$

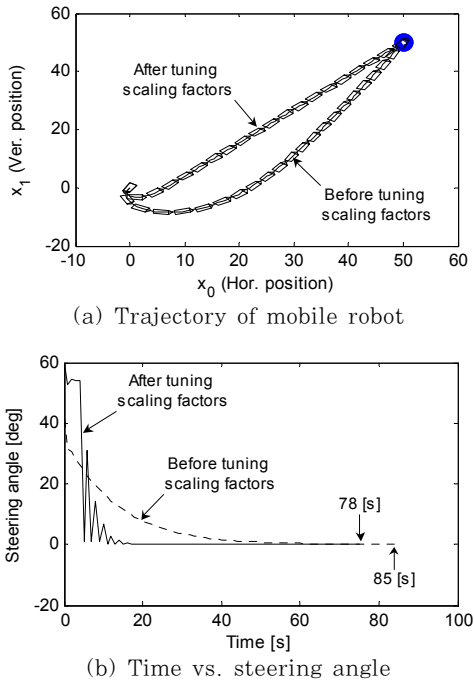


Figure 12: Initial value $x_2(0) = -120^\circ$

5. 결 론

본 논문에서는 이동용 로봇에 대한 목표위치 추종제어에 대한 문제를 다루었다. 이를 위해 목표위치와 차량 중심 사이의 각도와 각도의 변화율을 입력으로 하고, 조향각을 출력으로 하는 퍼지제어기를 설계하였다. 동시에 퍼지 제어기 설계에 있어서 하나의 중요 관심사인 환산계수를 RCGA를 통해 조정하는 방법을 제안하였다. 이 제어기를 다양한 로봇 초기 위치에서 시뮬레이션을 실시한 결과 목표위치까지 잘 추종하는 것을 확인하였다. 이후에는 입력으로 이동용 로봇의 속도와 후진알고리즘이 결합되는 연구와 장애물을 회피하는 연구가 진행되어야 할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 국토해양부 지역 MT 특성화사업의 연구비 지원(해양산업 고도화를 위한 핵심해양장비 개발 - 전기 모터기반의 해중 매니플레이터 및 추진시스템 개발)에 의해 수행되었음.

참고문헌

- [1] J. G. Ziegler and N. B. Nichols, "Optimum setting for PID controllers", Trans. ASME, vol. 64, pp. 759-768, 1942.
- [2] G. H. Cohen and G. A. Coon, "Theoretical considerations of retarded control," Trans. ASME, vol. 75, pp. 827-834, 1953.
- [3] L. A. Zadeh, "Fuzzy algorithm", Information and Control, vol. 14, pp. 94-102, 1968.
- [4] M. Sugeno and K. Murakami, An Experimental study of fuzzy parking control using a model car, North Holland, pp. 125-138, 1985.
- [5] M. Sugeno, M. Nishida, "Fuzzy control of model car", Fuzzy Sets and Systems, vol. 16, pp. 103-113, 1985.
- [6] M. Sugeno and T. Murofuzhi, "Fuzzy algorithmic control of a model car by oral instructions", Fuzzy Sets and Systems, vol. 32, pp. 207-219, 1989.
- [7] C. V. Altrock et al., "Advanced fuzzy logic control of a model car by oral instructions", Proceedings of 1st IEEE International Conference on Fuzzy Systems, pp. 835-842, 1992.
- [8] M. Murakami et al., "Fuzzy drive control of an intelligent robot", Proceedings of 6th Fuzzy System Symposium, pp. 45-48, 1990(in Japanese).
- [9] N. Kitano et., "A proposal of two-stage fuzzy control and it's application to parking control using model car", Journal of Japan Society for Fuzzy Theory and Systems, vol. 5, no. 1, pp. 129-138, 1993(in Japanese).
- [10] H. T. Nguyen, M. Sugeno, R. Tong

and R. R. Yager, Theoretical Aspects of Fuzzy Control, John Wiley & Sons, Inc., pp. 32-34, 1995.

저 자 소 개



장하용(張河龍)

2000년 한국해양대학교 해양경찰학과(공학사), 2002년 한국해양대학교 대학원 해양경찰학과(석사), 2009년 한국해양대학교 대학원 메카트로닉스공학과(박사수료), 현재 한국해양대학교 선박전자기계공학부 조교.



이윤형(李潤炯)

2002년 한국해양대학교 기관시스템공학부(공학사), 2004년 한국해양대학교 대학원 기관시스템공학과(석사), 2007년 한국해양대학교 대학원 메카트로닉스공학(박사), 현재 한국항만연수원 부산연수원 교수



진강규(陳康奎)

1977년 한국해양대학교 기관학과(학사), 1985년 Florida Institute of Technology, 전기·전자·컴퓨터공학과(석사), 1996년 University of Wales Cardiff, 전기·전자·시스템공학과 박사, 현재 한국해양대학교 IT 공학부 교수.



최형식(崔炯植)

1989년 5월 미국 University of South Carolina 기계공학과에서 석사, 1993년 2월 North Carolina State University 기계 및 항공 공학과 박사로 협조로봇의 제어, 보행로봇 개발, 수중 운동체 시스템 연구 및 공장자동화에 대한 연구를 수행



박한일 (朴漢一)

1957년생, 1981년 한국해양대학교 기관학과 졸업(학사), 1988년 서울대학교 대학원 해양학과 졸업(석사), 1992년 런던대학 대학원 조선해양공학과 졸업(박사), 1987.9~현재 한국해양대학교 해양공학과 교수



소명옥(蘇明玉)

1980년 한국해양대학교 기관학과(학사), 1989년 한국해양대학교 대학원 기관학과 석사, 1997년 동 대학원 박사, 한국항만·운송노동연구원 연구위원, 2005~2006년 University of Wales Cardiff 파견교수, 현재 한국해양대학교 선박전자기계공학부 교수, 관심분야 : 퍼지제어 등