

퍼지 추론 시스템을 기반한 AGV 주행 제어기 설계

이주원*, 이병로**

Design of the Driving Controller of Automatic Guided Vehicle based on Fuzzy Inference System

Ju-Won Lee*, Byeong-Ro Lee**

이 논문은 2020년도 경남과학기술대학교 교원 연구활성화 지원 사업의 예산지원으로 수행되었음

요 약

최근 산업현장은 스마트팩토리 체계로 변화하고 있으며, 스마트팩토리 체계를 실현하기 위해 가장 많이 도입되는 장비는 무인운반 로봇인 AGV이다. 일반적으로 AGV는 범용 PLC 또는 전용 제어기를 이용하여 개발되고 있으며, 대부분은 모터에 엔코더가 없는 저가형의 AGV를 많이 사용하고 있다. 이러한 AGV는 현재 속도 측정이 불가하여 종종 주행경로를 이탈하는 문제점이 발생된다. 이 문제점을 개선하기 위해 본 연구에서는 주행 오차의 누적값과 속도 값을 이용한 PD제어기와 퍼지 제어기 설계법을 제안하고, 산업현장에 사용되고 있는 AGV에 적용하여 성능 평가를 하였다. 그 결과, 직선주행과 곡선 주행에 있어 PD제어기 보다 10배 이상의 주행 안정성을 보였으며, 이 설계법을 엔코더리스형 AGV 제어에 사용한다면 높은 주행 안정성이 제공될 것으로 사료된다.

Abstract

Recently, industrial sites have become the smart factory systems, and the most frequently deployed equipment to realize the smart factory system is AGV that is the mobile robot. In general, AGV is developed using general-purpose PLCs or the dedicated controller, and most of them are used by low-cost AGVs that do not have an encoder in the motor. These AGVs often have a problem of the out-of-track from the driving route because the current speed is unable to measure the current speed. In order to improve this problem in this study, we propose a PD controller and a fuzzy controller design method using cumulative and speed values of driving errors, and its performance was evaluated by applying to AGV used in industrial sites. As results, it showed 10 times more driving stability than PD controller. If this design method is applied to the encoderless AGV, this controller will provide the high driving stability.

Keywords

smart factory, automatic guided vehicle, posture controller, speed control, fuzzy inference system

* 안동과학기술대학교 전기자동차학과 교수

- ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4402-0161>

** 경남과학기술대학교 전자공학과 교수(교신저자)

- ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0281-4994>

• Received: May 27, 2020, Revised: Jun. 12, 2020, Accepted: Jun. 15, 2020

• Corresponding Author: Byeong-Ro Lee

Dept. of Electronics Engineering, GyeonAndong Science College, Korea,

Tel.: +82-54-851-3573, Email: voyager@gntech.ac.kr

1. 서 론

스마트팩토리 공장에 가장 많이 도입되는 장비는 무인운반 로봇인 AGV(Automatic Guided Vehicle)이다[1]-[3]. 대부분의 산업현장에서 사용되는 AGV의 종류로는 자율 주행형과 마그네틱 가이드 센서 기반형이 있으며, 운반형태에 따라 운반물을 적재하여 운반하는 형태와 견인하는 형태로 구분되어지고 있다. 한편으로는 모터 구동과 제어방식에 따라 엔코더(Encoder) 기반의 구동방식과 엔코더리스형(Encoderless)으로 나누어지며, 가격과 유지보수 측면을 고려하여 엔코더리스형의 AGV를 많이 사용하고 있다.

특히, 엔코더리스형 AGV는 마그네틱테이프를 부착된 공장 노면을 주행하면서 자세제어를 하고 있으나, 현재 속도를 측정할 수 없어 AGV의 속도제어가 원활하지 못하고 주행로를 이탈하는 경우가 종종 발생한다. 또한 특히 노면이 불규칙한 공장 바닥환경과 급격한 곡선 주행경로에서는 자세제어가 불안정하여 경로이탈, 안전사고 발생 등이 발생한다.

이를 해결하기 위해 일반적으로 PID(Proportional-Integral-Differential) 제어를 가장 많이 사용하고 있다. 이 PID 제어를 설계함에 있어 동역학 모델과 제작되는 AGV의 중량, 모터 파라미터 등을 토대로 PID 제어 계수인 K_p , K_i , K_d 값을 산출하여 사용한다. 그러나 적재물 또는 운반물의 중량에 따라 다양하게 변화하므로 제조 현장에서 다양한 실험을 거쳐 파라미터를 조정하고 있으나, 운반물의 중량이 가변적이고, 급격한 곡선 주행과 바닥 노면의 불균형 등에 의하여 AGV의 자세제어 성능이 떨어지거나 불안정 해진다.

이러한 문제점을 개선하기 위해 퍼지추론(Fuzzy inference)과 칼만필터(Kalman filter)를 이용하여 PID 계수를 구하는 연구가 진행되었고, 다른 연구에서는 AGV의 적재 중량과 주행 속도 고려한 퍼지-PID 제어기 설계법이 연구되었다[4][5]. 그러나 이들 연구의 결과는 우수한 성능을 보였지만 엔코더 기반의 제어기로서 엔코더리스형 AGV에는 적용하기가 어렵다.

따라서 산업현장에서 사용되는 대부분의 엔코더

리스형 AGV의 주행자세 제어를 위한 제어기가 요구되고 있다. 따라서 본 연구에서는 적재물 또는 견인체의 중량, 급격한 회전반경을 가진 주행경로에서도 보다 안정적인 주행 자세제어를 위해 퍼지 추론 시스템을 기반한 AGV 자세 제어기를 제안하고 실제의 AGV에 적용하고 그 성능을 평가하여 제안된 설계기법의 효용성을 제시하였다.

II. AGV 모델링

본 연구에서 대상하는 AGV는 그림 1과 같이 강체(Rigid body)에 두 개의 휠-모터를 장착하여 주행하는 차동구동방식이며, 좌우 바퀴간의 거리 L 과 AGV의 속도 v 및 회전각 θ , 무게 중심점 C_p , 좌우 바퀴의 선속도 v_R 과 v_L 등을 고려한 운동학적 모델과 동역학 모델은 다음과 같다. 운동학적 모델은 그림 1을 기반으로 AGV의 속도 v 와 회전 각속도 ω 를 구하면 식 (1)과 식 (2)와 같이 간단한 모델로 정의된다[2].

$$v_R = \frac{v + \omega L}{2}, \quad v_L = \frac{v - \omega L}{2} \quad (1)$$

$$v = \frac{v_L + v_R}{2}, \quad \omega = \frac{v_L - v_R}{L} \quad (2)$$

식 (1)과 식 (2)의 AGV의 속도 v 와 회전 각속도 ω 를 토대로 $\dot{x} = v \cos \theta$, $\dot{y} = v \sin \theta$, $\dot{\theta} = \omega$ 로 정의하면, 직교좌표에서의 AGV의 속도와 위치의 관계인 운동학적 모델은 식 (3)으로 표현된다[6][7].

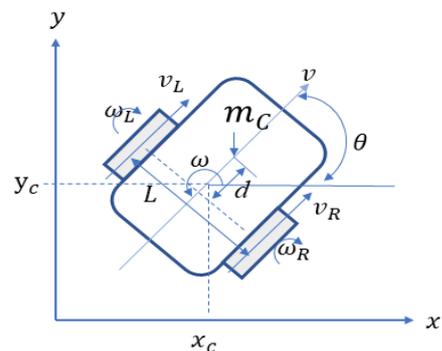


그림 1. AGV의 기구학적 모델
Fig. 1. Kinematics model of AGV

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{y}_c \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{matrix} RIGHT \\ \frac{r(\omega_R + \omega_L)}{2} \\ \frac{r(\omega_R - \omega_L)}{2} \end{matrix} \quad (3)$$

AGV의 동적모델은 AGV가 2-차원 평면에서만 주행(운동)하고, 위치에너지가 0이라고 가정하여, 라그랑지 방정식(Lagrange equation)을 기반한 동역학 모델은 구하면 식 (4)와 같다. 식 (4)에서 모터와 구동휠을 제외 AGV의 무게 m_c , 모터와 휠의 무게 m_w , AGV의 총무게를 $m = m_c + 2m_w$, AGV의 무게 중심과 좌표 (x_c, y_c) 점과의 거리 d , 모터 휠의 구동 모터의 토크를 각각 τ_L 와 τ_R , 각 구동 휠의 관성 모멘트 I_w , AGV의 전체 관성 I 등으로 정의한 것이다.

$$\begin{cases} \left(m + \frac{2I_w}{r^2} \right) \dot{v} + m_c d \omega^2 = \frac{1}{r} (\tau_R + \tau_L) \\ \left(I + \frac{L^2}{r^2} I_w \right) \dot{\omega} + m_c d \omega v = \frac{L}{2r} (\tau_R - \tau_L) \end{cases} \quad (4)$$

위와 같이 AGV 운동학과 동역학 모델을 정의할 수 있으며, 현재 AGV의 속도와 주행 자세 제어를 위해 PID 제어를 가장 많이 사용한다. PID 제어를 설계함에 있어 동역학 모델과 제작되는 AGV의 중량, 모터 파라미터 등을 토대로 PID 파라미터인 K_p , K_i , K_d 값을 산출할 수 있다.

한편, 현장에서는 운반 물품의 중량에 따라 AGV

의 물리적인 특성이 변화하고 사용 환경(급격한 주행경로, 바닥 노면의 불균형)에 따라서 AGV의 주행 및 자세제어 성능이 떨어진다. 특히, 마그네틱테이프 궤적을 주행하는 엔코더리스형의 AGV는 모터의 현재 속도를 실시간으로 측정할 수 없기 때문에 엔코더 내장형의 AGV 보다 궤적제어 성능이 현저하게 떨어지며, 경로 이탈의 경우가 빈번하게 발생하고 있다. 따라서 산업 현장에서 사용되는 대부분의 엔코더리스형 AGV의 주행자세와 속도제어를 위한 새로운 제어 방법이 요구된다.

III. 퍼지 추론시스템 기반의 AGV 제어기 설계

본 연구에서는 산업현장의 제조환경(운반물의 중량, 주행궤적의 급격한 회전반경)에서도 적용 가능한 엔코더리스형 AGV를 위한 주행자세 및 속도 제어기 설계법을 그림 2와 같이 제안한다. 제안된 기법은 AGV 자세제어를 위한 PD(Proportional - Differential) 제어기와 속도제어를 위한 퍼지추론시스템, 제어기의 출력을 두 개의 모터를 구동하기 위해 제어값을 분리하는 조향함수로 되어 있다.

여기서 사용된 PD제어기는 AGV 주행에 따른 자세 제어를 위한 것으로 $T_c[s]$ 간격으로 마그네틱 가이드 센서를 통하여 AGV의 현재 주행 방향각 $\theta_r(k)$ 을 추출한 다음, 식 (5)와 같이 센서의 중심을 0으로 설정하고, 제어 오차 θ_e 가 0이 되도록 제어량 $u_{PD}(k)$ 를 식 (6)과 같이 출력하여 자세제어를 하게 하였다.

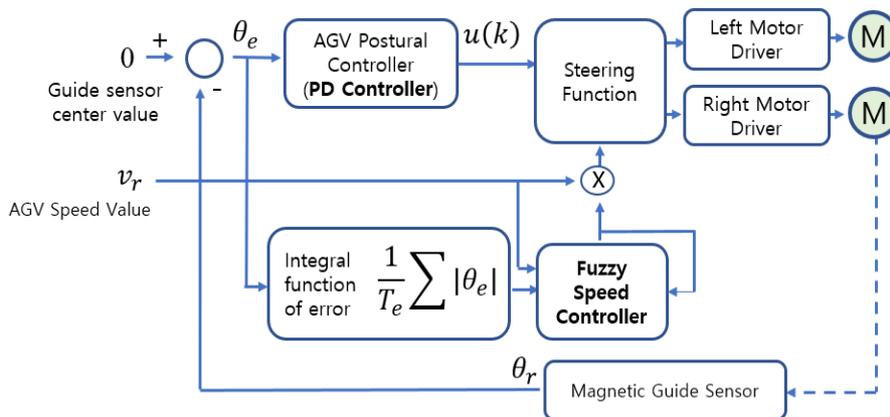


그림 2. 제안된 자세 제어기 구조
Fig. 2 Structure of the proposed postural controller

14 퍼지 추론 시스템을 기반한 AGV 주행 제어기 설계

$$\theta_e(k) = 0 - \theta_r(k) \quad (5)$$

$$u_{PD}(k) = K_p \theta_e(k) + K_d [\theta_e(k) - \theta_e(k-1)] \quad (6)$$

$$e_\theta(k) = \left[\frac{1}{T_e} \sum_{n=0}^{N-1} |\theta_e(k-n)| \right] \quad (7)$$

여기서 식 (7)과 같이 T_e 시간동안에 AGV의 주행 자세오차 θ_e 의 절대치를 누적 오차평균은 AGV의 주행의 오차가 증가할수록 누적오차는 증가하고 누적오차가 작을수록 AGV의 자세제어가 원활하게 이루어짐을 알 수 있다. 즉, 운반물의 중량 변화 또는 급격한 곡선주행 등에 따라 PD제어기로부터의 자세 제어가 원활하지 못할 때, 누적된 절대평균 오차가 크게 증가하는 특성을 이용하여 식 (8)~(9)와 같이 퍼지 추론시스템으로 AGV 속도 v_r 를 저감시키고 오차가 작을 때 AGV의 주행속도를 원하는 속도 $v_r(k)$ 까지 증가하도록 한 것이다.

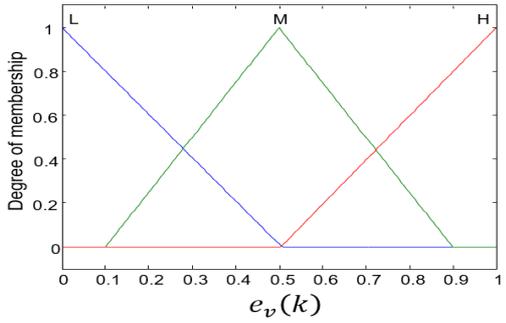
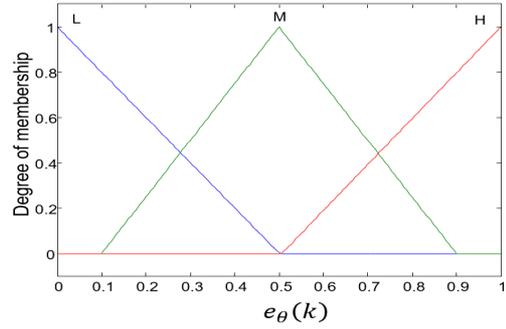
$$v_e(k) = |v_r(k) - f_o(k-1)| \quad (8)$$

$$u_v(k) = u_{PD}(k) + v_r f_Z\{e_v(k), e_\theta(k)\} \quad (9)$$

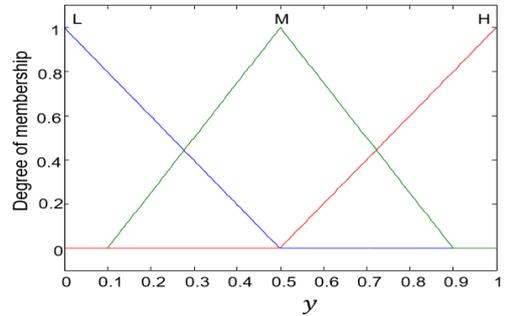
본 연구에서 사용된 퍼지 추론시스템[8] 기반의 퍼지 속도제어기는 누적된 오차에 값($e_\theta(k)$)과 이전의 퍼지출력 값 $f_o(k-1)$ 과 $v_r(k)$ 의 차를 입력 받아 퍼지 추론을 하게 하였으며, 이 입력에 대한 소속함수는 그림 3에 나타내었다.

그림 3에서 $e_\theta(k)$ 에 대한 입력의 범위 $e_\theta(k)$ 의 최대값을 나누어 0~1사이로 입력하게 하였으며, $e_v(k)$ 또한 $e_v(k)/v_r$ 으로 처리하여 0~1사이로 입력하게 하였다. 그리고 퍼지 속도제어기의 출력은 0~1로 출력되며, 퍼지 속도제어기를 위한 퍼지 속도 제어기의 추론 결과는 식 (10)인 무게 중심법으로 비퍼지화(Defuzzification)하여 AGV의 속도값을 추정하게 하였다. 이 추정된 값을 그림 4의 특성을 가진 조향함수를 통해 AGV의 주행 자세와 속도를 제어 하도록 하였다.

$$f_o(k) = f_z\{e_v(k), e_\theta(k)\} = \sum_{i=1}^N u(y_i) y_i / \left(\sum_{i=1}^N u(y_i) \right) \quad (10)$$



(a) 입력 소속함수 및 언어적 변수
(a) Input membership function



(b) 출력 소속함수 및 언어적 변수
(b) Output membership function

그림 3. 퍼지속도 제어기의 입·출력

Fig. 3. Inputs and output of fuzzy speed controller

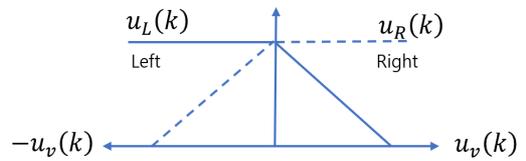


그림 4. 조향 함수

Fig. 4. Steering function

추론 규칙은 표 1과 같으며, 표 1에서 누적된 오차 $\theta_e(k)$ 가 증가하면 AGV의 주행제어가 불안정하다고 가정하여 속도를 감소토록 하였으며, $\theta_e(k)$ 가 작고 $v_e(k)$ 가 증가하면 주행 안정성이 높다고 가정하여 AGV의 속도를 기준 속도(지령속도 $v_r(k)$)로 주행하도록 한 것이다.

표 1. 퍼지 속도제어기의 규칙
Table 1. Rules of fuzzy speed controller

Input variables		$e_{\theta}(k)$		
		L	M	H
$e_v(k)$	L	H	L	L
	M	H	M	L
	H	H	M	L

이 규칙을 토대로 AGV는 주행 및 자세제어의 오차의 크기에 따라 속도를 가변제어를 하도록 한 것이다.

IV. 실험 및 성능평가

본 연구에서 제안한 퍼지 추론시스템 기반의 AGV 자세 제어기의 성능을 평가하기 위해 4000 rpm의 30:1 기어비를 가진 DC24V/300W 브러쉬-Wheel 모터 2개, 가이드 센서 등을 부착한 1.5m폭과 250[Kg] 중량의 AGV에 본 연구의 제어 알고리즘을 펌웨어(Atmega128 CPU)로 구현하고 그림 4와 같이 폭 30mm인 마그네틱테이프를 노면에 설치하고 AGV에 적용하여 실험하였다.

성능분석에서 PD계수는 $K_p=6$, $K_d=15.0$ 이며, 이 PD 제어기 성능과 제안된 PD+퍼지속도 제어기와 비교하기 위해 그림 4의 경로를 10회 주행하게 하였다. 그리고 AGV가 주행시에 블루투스 통신으로

가이드센서 오차를 데이터를 받아 주행 오차 정도를 판단하였다.

실험에서 궤적 주행을 30m/min 속도로 AGV를 10회 주행하게 하였으며, 이때 발생하는 제어기의 마그네틱 가이드 센서의 오차를 측정하여 그림 5에 나타내었다.

그림 5에서 제시된 것과 같이 일반적인 직선 주행에서는 PD제어기와 본 연구의 퍼지 제어기의 제어 오차가 각각 2.2mm와 2.3mm로 나타나 성능차는 크지 않았으나, 돌발적인 45deg. 각도에서는 PD 제어기가 최대 34mm, 퍼지 제어기는 최대 3.5mm의 오차를 보여 제안된 기법이 우수하다는 것을 알 수 있었다. 따라서 이 실험 결과로부터 자세와 속도 제어에 본 연구의 제어기법을 엔코더리스형 AGV의 제어기로 적용된다면 10배 이상의 주행 안정성을 제공할 것으로 사료된다.



(a) 직선주행 (b) 45deg. 경로 주행

그림 4. AGV 주행제어 결과

Fig. 4. Tracking results of AGV control in experimentation, (a) Straight driving, (b) 45deg. driving

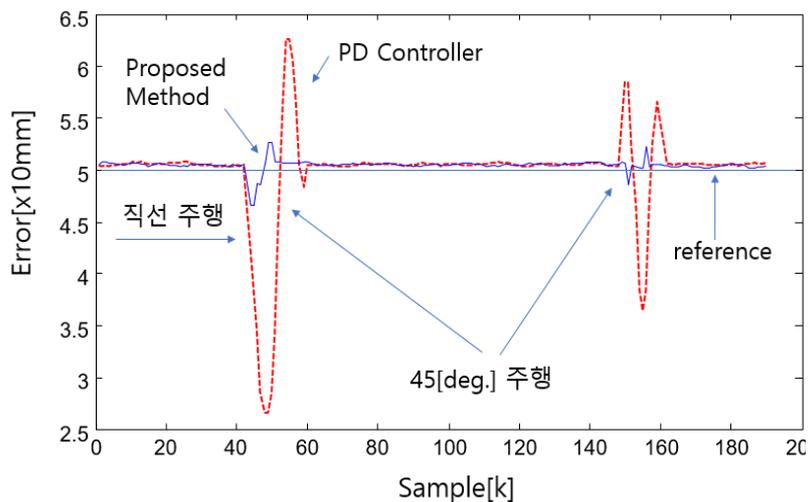


그림 5. 주행제어 오차

Fig. 5. Error of tracking results of AGV controller (PD controller, PD+fuzzy speed controller)

V. 결 론

산업현장에 도입되는 엔코더리스형 AGV는 운반 물의 중량의 변화와 바닥 노면의 불균형 등에 의하여 AGV의 자세제어 성능이 떨어진다. 특히, 마그네틱 테이프 기반의 엔코더리스형 AGV는 모터의 현재 속도를 실시간으로 측정할 수 없기 때문에 적재물 또는 견인체의 중량, 회전반경이 급격한 경로 등에서는 궤적제어 성능이 현저하게 떨어지거나 주행 경로를 이탈하는 경우가 빈번하게 발생하고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 연구에서 퍼지 추론 시스템을 기반한 AGV 주행 제어기의 설계법을 제안하고 그 성능을 평가하였다.

그 결과, 제안된 제어기는 직선 주행 및 곡선 경로에서도 보다 높은 주행 안정성과 자세제어의 우수성을 보였다. 이와 같이 본 연구에서 제안한 AGV 자세 제어기를 엔코더리스형 AGV에 적용한다면, 높은 주행 안정성을 제공할 것으로 사료된다.

References

[1] BERMAN Siga, SCHECHTMAN Edna, and EDAN Yael, "Evaluation of automatic guided vehicle systems", Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 25, No. 3, pp. 522-528, Jun. 2009.

[2] H. J. Tang, S. J. Shi, and P. L. Huang, D. Wang, and J. Zhou, "PID Control of Magnetic Navigation Differential AGV Trajectory", 2nd International Seminar on Applied Physics, Optoelectronics and Photonics (APOP 2017), Shanghai, China, pp. 500-506, Dec. 2017.

[3] Seong-Hoon Lee, "An Analysis on the Changes of Logistics Industry using Internet of Things", Journal of JAITS, Vol. 9, No. 1, pp. 57-66, Jul. 2019.

[4] A. R. Krisna, A. Rusdinar, S. Yuwono, and R. Nugraha, "Speed control system design using fuzzy-pid for load variation of automated guided vehicle (AGV)", In 2017 2nd International Conference on Frontiers of Sensors Technologies

(ICFST) IEEE, Shenzhen, China, pp. 426-430, Apr. 2017.

[5] Xinde Li, Chaomin Luo, Yefan Xu, and Pei Li, "A Fuzzy PID controller applied in AGV control system", International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM), IEEE, Macau, China, pp. 555-560, Aug. 2016.

[6] Ivanjko, Edouard, Toni Petrinic, and Ivan Petrovic. "Modelling of mobile robot dynamics", 7th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation, Prague, Czech Republic, Vol. 2. Sep. 2010.

[7] Rached Dhaouadi and Ahmad Abu Hatab, "Dynamic Modelling of Differential-Drive Mobile Robots using Lagrange and Newton-Euler Methodologies: A Unified Framework", Advances in Robotics & Automation, Vol. 2, No. 2, pp. 1-7, Jan. 2013.

[8] CHEN, Chieh-Li, Pey-Chung Chen, and Cha'o-Kuang Chen, "Analysis and design of fuzzy control system", Fuzzy sets and systems, Vol. 57, No. 2, pp. 125-140, Jul. 1993.

저자소개

이 주 원 (Ju-Won Lee)



2003년 2월 : 경상대학교
전자공학과 (공학박사)
2008년 9월 ~ 현재 : 안동과학
대학교 전기자동차과 부교수
관심분야 : 신호처리, 영상인식,
제어시스템

이 병 로 (Byeong-Ro Lee)



1999년 2월 : 경상대학교
전자공학과 (공학박사)
2000년 3월 ~ 현재 : 경남과학기술
대학교 전자공학과 교수
관심분야 : 신호처리,
전자응용시스템