

논문 2008-45SC-1-1

퍼지 PD+I 제어 방식을 적용한 Two-wheel Balancing Mobile Robot

(Fuzzy PD+I Control Method for Two-wheel Balancing Mobile Robot)

엄기환*, 이규윤**, 이현관***, 김주웅*

(Ki-Hwan Eom, Kyu-Yun Lee, Hyun-Kwan Lee, and Joo-Woong Kim)

요약

자유롭고 빠르게 이동할 수 있도록 도와주는 개인 이동 수단인 two-wheel balancing vehicle은 inverted pendulum 시스템의 원리를 이용한 것으로, 최근 들어 많은 연구가 이루어지고 있고 이를 이용한 제품이 실제 사용되고 있다. 본 논문에서는 일반적인 PID 제어이론을 이용한 two-wheel balancing vehicle에 대한 제어성능을 개선시키는 새로운 제어방식을 제안한다. 제안한 방식은 퍼지 PD+I 제어방식으로 향상된 PID 제어의 일종으로 2개의 입력과 1개의 출력을 가진 퍼지시스템에 적분 신호를 더함으로써 출력신호를 만든다. 퍼지시스템의 비선형성은 시간공정에서 비례신호와 미분신호의 가중치를 변화함으로써 최적의 출력제어신호를 만들어낸다. 제안한 퍼지 PD+I 제어방식의 유용성을 알아보기 위해 two-wheel balancing mobile robot에 대해 시뮬레이션과 실험의 결과를 통해, 제안한 퍼지 PD+I 제어방식이 일반적인 PID 방식보다 우수한 성능을 가지고 있음을 알 수가 있다.

Abstract

A two-wheel balancing vehicle, which helps people moving freely and fast, and is applied from inverted pendulum system, has been widely researched and developed, and some products are came into a market in actuality. Until now, the two-wheel balancing vehicles developed have chosen the general PID control method. In this paper, we propose a new control method to improve a control capacity for a two-wheeled balancing vehicle for human transportation. The proposed method is the fuzzy PD+I control that is one of the improved PID control, and it contains a 2input-1output fuzzy system. This fuzzy system processes signals from proportional and derivative controller, and the fuzzy output signal generates the final output by summing up integral signal. The non-linearity of the fuzzy system makes an optimal output control signal by changing weight of the proportional signal and the derivative signal in process of time. We have simulated the fuzzy PD+I control system and experimented by implementing the two-wheel balancing mobile robot to verify the advantages of the proposed fuzzy PD+I control method in comparison with general PID control. As the results of simulation and experimentation, the proposed fuzzy PD+I control method has better control performance than general PID in this system and improves it.

Keywords : Fuzzy, PD+I, PID, Two-wheel balancing vehicle, Inverted pendulum

I. 서론

* 정희원, 동국대학교 전자공학과
(Department of Electronic Engineering,
Dongguk University)

** 정희원, 삼성전자
(Samsung Electronics)

*** 정희원, 호남대학교 인터넷소프트웨어학과
(Department of Internet software,
Honam University)

접수일자:2007년8월2일. 수정완료일:2007년12월24일

최근 선진국을 중심으로 인간과 유사한 로봇 개발이 추진되면서 이른바 지능형 로봇에 대한 과학 기술계의 관심이 집중되고 있다. 지능형 로봇 산업의 근간을 이루는 것은 바로 자율 이동 로봇이다. 자율 이동 로봇은 자신의 위치와 주변 상황을 인식하고 스스로 판단하여 행동하는 지능형 로봇이다. 연구되고 있는 자율 이동

로봇의 종류에는 일정 규격의 미로 내에서 목표점을 찾아가는 마이크로 마우스, 영상 정보를 통해 경기장과 공의 위치를 판단하여 경기하는 축구 로봇, 가정의 청소를 위한 청소 로봇, 미지의 지역을 탐사하여 정보를 송신하는 탐사 로봇에서부터 일본에서 개발한 아이보와 같은 애완용 로봇까지 실로 그 종류나 용도가 다양하다^[1]. 최근에는 이러한 로봇 기술들을 실제 생활에 적용하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 근거리 개인 이동 수단의 연구에 로봇 기술들이 폭넓게 활용되고 있다. 근거리 개인 이동 수단은 개개인이 비교적 가까운 거리를 자유롭게 빠르게 이동할 수 있도록 하는 운송 수단의 한 종류로써 연구소, 사업장, 혹은 생산 현장에서 많은 수요를 내고 있다. 실제 구현되어 시판되고 있는 two-wheel balancing vehicle은 inverted pendulum system을 기반으로 하여 개발된 개인 이동 수단으로 현재 많은 국가에서 널리 사용되고 있다^[2~3]. 현재 개발된 two-wheel balancing vehicle의 제어 방식은 일반적으로 PID 제어 방식을 채택하고 있다^[3, 7]. PID 제어기는 비례, 미분, 적분 제어기로서 구조가 간단하고, 제어 성능이 우수 하여 일반 산업 현장에서 약 80% 이상을 차지한다. 하지만 비례 제어기는 정상상태 오차를 유발하고, 적분 제어기는 정상상태 오차를 소거할 수 있으나 오차의 누적으로 인해 과도 응답 특성의 불안정성을 가질 수 있으며, 미분 제어기는 안정성을 높일 수 있고 응답 속도를 빠르게 하지만 잡음 성분이 있을 경우 시스템에 문제가 된다^[4~6]. 이처럼 각각의 항이 장단점을 가지고 있으며 각 제어기의 이상적인 이득을 설정하는 것이 매우 어렵기 때문에 시스템의 안정성이나 강인성의 측면에서 취약한 문제를 가지고 있다. 이러한 이유로 일반적인 PID 제어의 구조적인 단점을 개선한 PID 제어 방식들이 많이 제안되고 있다.^[5, 7]

본 논문에서는 일반적인 PID 제어 방식을 채택하고 있는 two-wheel balancing vehicle의 제어 성능을 향상시키기 위해 퍼지 PD+I 제어 방식을 제안한다. 제안한 퍼지 PD+I 제어 방식은 시스템의 동적 특성에 큰 영향을 미치는 비례, 미분 제어기 부분에 퍼지시스템을 도입하고 그 위에 적분 제어기를 결합한 형태의 제어기이다. 제안한 퍼지 PD+I 방식의 제어 성능을 확인하기 위해 two-wheel balancing vehicle을 축소된 형태의 two-wheel balancing mobile robot을 설계하여 제작하고 시뮬레이션 및 실험을 통해 일반적인 PID 제어 방식과 비교, 검토한다.

II. Two-wheel Balancing Mobile Robot

Two-wheel balancing mobile robot은 inverted pendulum의 원리를 응용하여 만들어진 자율 이동 로봇으로 1축만으로 균형을 유지하며 자유로운 이동이 가능하다. 최근에는 이러한 기술을 이용해 연구 개발된 two-wheel balancing vehicle이 실제 산업 현장이나 사업체 등에서 널리 사용되고 있다. 그림 1은 실제 개발된 two-wheel balancing vehicle의 사진이다^[1].

Two-wheel balancing mobile robot은 그림 2에서 보여 지는 것과 같이 two-wheel balancing vehicle을 축소된 형태를 가지며 동일한 동역학적 특성을 가진다. 기존의 inverted pendulum system이 진자가 넘어지는 것을 방지하기 위해 전후로 움직이며 균형을 잡았다면 자율 이동 로봇은 차체가 넘어지는 것을 방지하기 위해 스스로 균형을 잡을 뿐만 아니라 원하는 방향으로의 이동이 가능하다^[2, 7].

Two-wheel balancing mobile robot의 모델링을 위

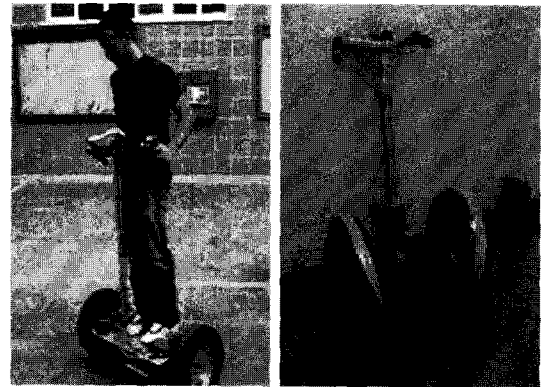


그림 1. 2륜 균형 개인 이동 수단

Fig. 1. Two-wheel balancing vehicle.

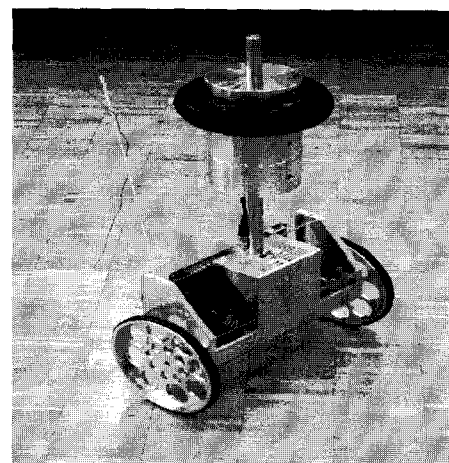


그림 2. 2륜 균형 자율 이동 로봇

Fig. 2. Two-wheel balancing mobile robot.

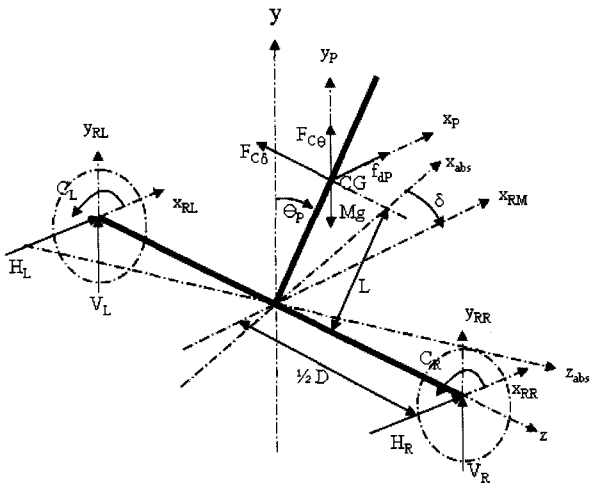


그림 3. 시스템의 역학 관계
Fig. 3. The Dynamic relations of the system.

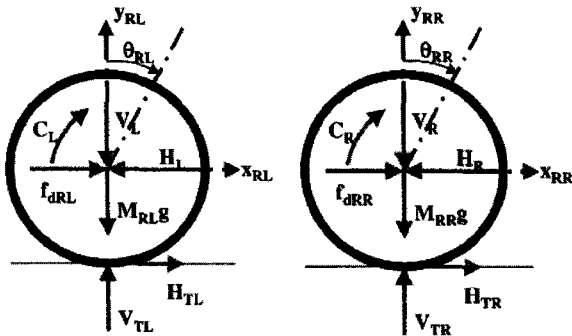


그림 4. 양쪽 바퀴에 걸리는 힘
Fig. 4. The forces in both wheels.

해 먼저 진행 방향(x_{RM})과 진행 속도(v_{RM}), 경사각 (θ_P)과 경사각 변화량(w_P), 방향각(δ)과 방향각 변화량 ($\dot{\delta}$), 총 6개의 상태 변수를 설정한다^[7]. 그 외의 기본적인 고려 사항으로써 차대의 무게(M_P)와 바퀴의 직경 (R), 양 바퀴 사이의 거리(D), 그리고 z 축으로부터 차체의 무게 중심까지의 높이(L) 등의 물리량을 측정해야 하며 z 축과 차체에 걸리는 관성 모멘트를 구해야 한다. 시스템은 진행 방향(Yaw), 즉 y 축에 대한 모델링과 경사도(Pitch), 즉 z 축에 대한 각각 모델링이 가능하다. 자율 이동 로봇의 역학 선도는 그림 3, 4와 같다^[6, 7].

각각의 바퀴에 가해지는 힘에 따라 차체는 방향을 잡게 되며 이는 식 (1)과 같다.

$$J\ddot{\delta} = (F_r - F_l)D \quad (1)$$

여기에서 F_r 과 F_l 은 각각 양쪽 바퀴에 주어지는 힘이고 단위는 [N]이다. J 는 관성 모멘트로 단위는 [kgm^2]이고 $\ddot{\delta}$ 는 y 축의 각속도이며 단위는 [rad/s^2]이다. 그리고 D 는

(3)

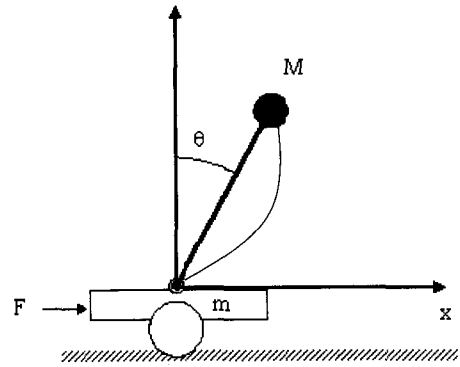


그림 5. 자율 이동 역진자 시스템
Fig. 5. Mobile inverted pendulum.

바퀴 사이의 거리이고 [m] 단위로 표시된다^[7]. 그림 5와 같은 형태의 mobile inverted pendulum을 가정하고, x 축상의 힘의 평형에 대한 관계식은

$$(M + m)\ddot{x} + ML\ddot{\theta}\cos\theta = F \quad (2)$$

$$F = F_l + F_r \quad (3)$$

이고, 추의 고정 축에 작용하는 힘의 관계식은 식 (4)와 같다.

$$\ddot{x}ML\cos\theta + ML^2\ddot{\theta} - MgL\sin\theta = 0 \quad (4)$$

위의 식을 two-wheel balancing mobile robot에 적용하면 $m[\text{kg}]$ 은 차대의 무게이고 $M[\text{kg}]$ 은 차대를 제외한 본체의 무게를 나타낸다. $L[\text{m}]$ 은 차대의 높이이고 $g[\text{m/s}^2]$ 는 중력 가속도이다^[7].

위 식을 선형화한 상태공간방정식은 식 (5)와 같고, z 축을 기준으로 하는 robot의 균형에 대한 방정식은 식 (6)이다.

$$\begin{bmatrix} \dot{y} \\ \dot{\delta} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{Mg}{m} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ \delta \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \\ 0 \\ -\frac{1}{mL} \end{bmatrix} [C_\theta] \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\delta} \\ \ddot{\delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \\ \dot{\delta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{m}{D} \end{bmatrix} [C_\delta] \quad (6)$$

III. 제안하는 퍼지 PD+I 제어 방식

일반적인 PID 제어 방식에서 적분 신호는 정상 상태 오차를 제거하기 위해 사용되며 시스템의 동적 특성에

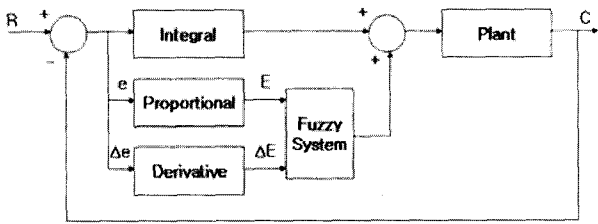


그림 6. 퍼지 PD+I 제어기의 블록선도
Fig. 6. Block diagram of fuzzy PD+I controller.

큰 영향을 미치지 않는다. 하지만 비례, 미분 신호는 시스템의 동적 특성에 큰 영향을 미치는 요인이다. 따라서 시스템의 과도 응답 시 동적 특성 개선을 위해 비례, 미분 제어기에 퍼지 시스템을 도입한 퍼지 PD+I 방식을 제안한다. 제안하는 퍼지 PD+I 제어 방식은 비례 제어기와 미분 제어기의 출력을 퍼지 시스템의 입력으로 하고 출력 신호를 적분 제어기의 출력 신호와 결합하여 최종적으로 Plant의 제어량을 조절한다^[8-9]. 본 시스템에서 퍼지 시스템의 비선형성은 상대적으로 추종 오차가 큰 제어 초기 단계에는 비례 이득을 강조하여 추종 오차를 빠르게 줄이며 정착 단계에는 미분 이득을 강조하여 오버슈트를 억제하고 감쇠 효과를 증가시킨다^[9]. 제안하는 퍼지 PD+I 제어기의 블록선도는 그림 6과 같다.

그림 6에서 퍼지시스템의 입력은 오차와 오차의 변화분이고, 출력은 PD제어기의 제어신호이다. 퍼지추론은 Min-Max 방식을 사용하고, 퍼지 규칙은 간단하게 9 개의 규칙을 사용하며, 비퍼지화는 무게중심법을 사용한다^[9].

IV. 시뮬레이션

실제 구현한 자율 이동 로봇의 파라미터는 차대의 무게 m 은 0.64[kg], 차대를 제외한 본체의 무게 M 은 0.25[kg], 차대의 높이 l 은 0.14[m], 바퀴의 반지름 r 은 0.098[m], 중력 가속도는 9.8[m/s²] 이다. 이상의 파라미터를 식(5), (6)에 대입하면 상태 공간 방정식은 다음과 같다.

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$= \begin{bmatrix} 01 & 0 & 0 \\ 00 & -3.6750 & 0 \\ 00 & 0 & 1 \\ 00 & 70 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ 1.25 \\ 0 \\ -8.9 \end{bmatrix} u \quad (7)$$

$$y = Cx + Du$$

$$= \begin{bmatrix} 1000 \\ 0010 \end{bmatrix} x \quad (8)$$

위식은 바퀴와 축, 지면의 마찰력을 고려하지 않은 선형 상태공간방정식이다. 주어진 시스템은 가제어 행렬과 가관측 행렬이 모두 정칙으로 가제어성과 가관측성을 확인하였다. 또한 특성방정식에 의한 안정도는 임계 상태임을 확인하였다. 시스템을 더욱 안정화하고 좋은 성능을 갖기 위해 설계한 제어기는 2입력-1출력의 퍼지 제어기이다. 퍼지화기에는 연산이 비교적 간단한 삼각형 퍼지화기(triangular fuzzifier)를 사용하여 삼각형 형태의 소속 함수를 생성하였다. 설정된 입력 소속 함수는 그림7, 8 이고, 출력 소속 함수는 그림9 이다. 입

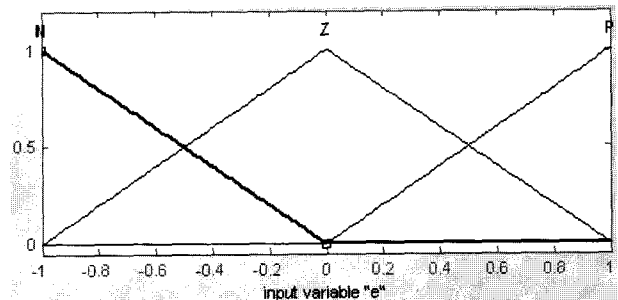


그림 7. 비례 입력 소속도 함수
Fig. 7 Membership function of prooportional input.

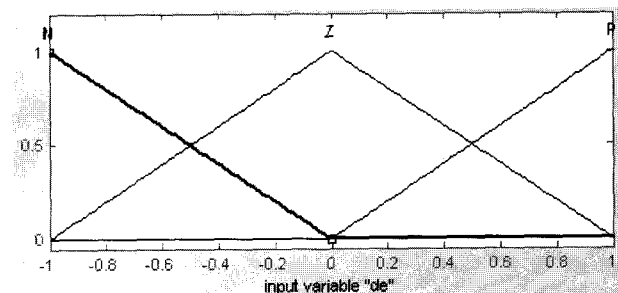


그림 8. 미분 입력 소속도 함수
Fig. 8. Membership function of derivative input.

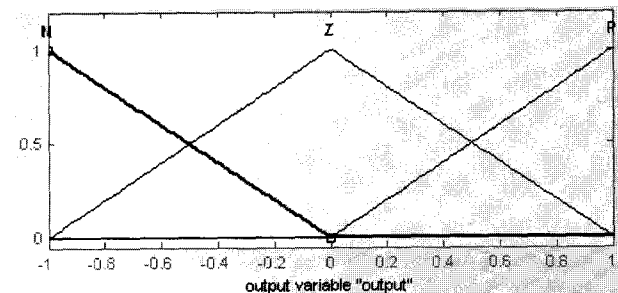


그림 9. 퍼지 출력 소속도 함수
Fig. 9. Membership function of fuzzy output.

표 1. 구현한 시스템의 퍼지 제어 규칙

Table 1. Fuzzy rule base of implemented system.

Δe \ e	N	Z	P
N	N	N	P
Z	N	Z	P
P	N	P	P

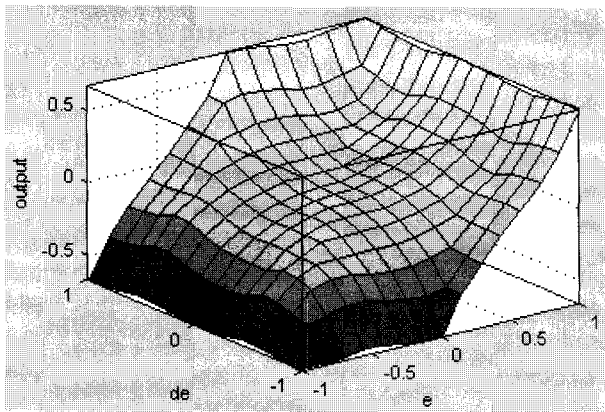


그림 10. 퍼지 시스템의 출력 표면
Fig. 10. Output surface of fuzzy system.

출력 각각의 언어변수는 N(Negative), Z(Zero), P(Positive)로 표현하였다.

각각의 소속도 함수는 -1부터 1까지의 정규화된 수치로 표시되며 별도의 정규화 과정을 거쳐 시스템에 사용 가능한 수치로 변환된다.

퍼지 제어 규칙은 3×3, 총 9개의 규칙으로 설계하였으며 각각의 규칙은 시행 착오법을 통해 간단하면서도 최적의 형태로 설정하였으며 다음의 표 1과 같고 퍼지 제어기의 출력 표면은 그림 10과 같다.

퍼지 추론 방식은 individual-rule base inference engine의 합집합을 이용하는 min-max 방식을 사용하고, 비퍼지화기는 무게 중심법(Center of Gravity)을 사용한다^[9].

제안한 방식의 유용성을 확인하기 위하여 스텝응답과 balancing에 대한 시뮬레이션을 통하여 일반적인 PID 제어 방식과 제어성능을 비교한다. PID의 파라미터는 시행착오를 거쳐 최적의 제어이득을 구한 결과 K_p 는 30, K_i 는 5, K_D 는 15이다. PID제어기를 사용한 경우의 차체의 기울어짐 출력에 대한 전달함수에서 pole은 5개 모두 좌반부에 존재하였으며, zero는 좌반부에 3개 우반부에 1개의 영점이 존재하였다. 스텝입력에 대

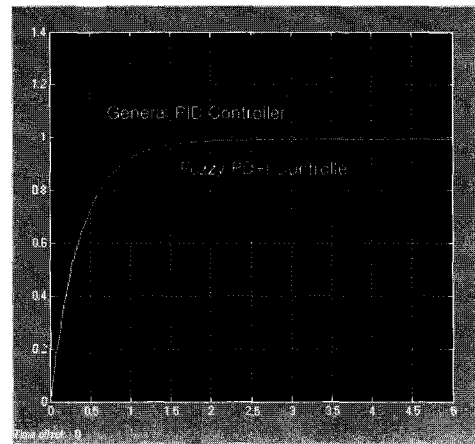


그림 11. 퍼지 PD+I 제어기와 일반 PID 제어기의 스텝 응답

Fig. 11. Step response of fuzzy PD+I and general PID controller.

표 2. 퍼지 PD+I 제어기와 일반 PID 제어기의 스텝 응답 결과

Table 2. Step response result of fuzzy PD+I and general PID controller.

	정착 시간	%오버슈트
퍼지 PD+I 제어기	2.5초	0%
일반적인 PID 제어기	3.3초	2.5%

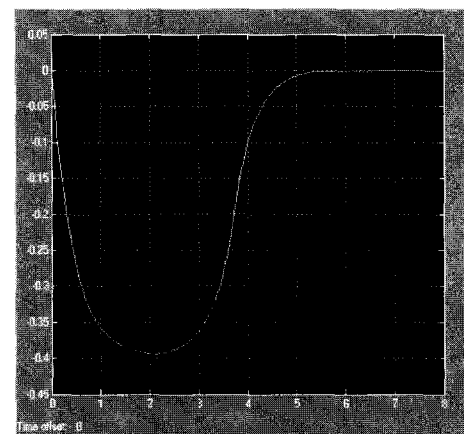


그림 12. 퍼지 PD+I 제어기의 balancing 곡선
Fig. 12. Balancing curve of fuzzy PD+I controller.

한 응답곡선은 그림 11이며, 표 2는 제어성능 비교표이다. 그림 11에서 x축은 시간[초], y축은 차체의 기울어짐, 즉 각도의 정규화된 수치이다.

표 2에서 제안한 제어방식의 제어성능이 우수함을 확인하였다. Balancing 시뮬레이션은 각 제어기에 앞서 얻어진 최적의 이득 수치, $K_p=30$, $K_i=5$, $K_D=15$ 를 적용

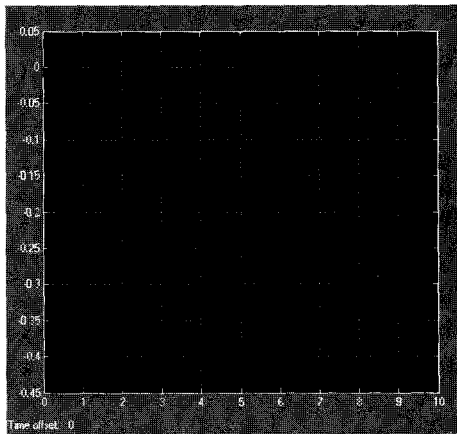


그림 13. 일반적인 PID 제어기의 balancing 곡선
Fig. 13. Balancing curve of general PID controller.

표 3. 퍼지 PD+I 제어기와 일반 PID 제어기의 balancing 시뮬레이션 결과

Table 3. Balancing simulation result of fuzzy PD+I and general PID controller.

	정착 시간	%오버슈트
퍼지 PD+I 제어기	5.4초	0%
일반적인 PID 제어기	10.8초	2.3%

하고 로봇의 각도 초기 값을 0으로 설정한 상태에서 동일한 외란 입력이 주어졌을 때의 로봇의 각도 변화를 확인하는 방식으로 하였다. 동일한 외란 입력 변화에 따른 퍼지 PD+I 제어기와 일반 PID 제어기의 balancing 시뮬레이션 결과는 그림 12, 13과 같고 그 결과는 표 3과 같다. 그림 12, 13에서 x축은 시간[초], y축은 차체의 기울어진 각도이다.

표 2, 3에서 제안한 방식의 제어성능이 정착시간 및 %오버슈트에서 우수함을 확인하였다.

V. 실험 및 검토

구현한 two-wheel Balancing Mobile Robot 시스템의 블록선도는 그림 14와 같다.

본 시스템에서는 micro controller로 Atmel사의 Atmega128을 사용하였으며, acceleration sensor는 Freescale사의 MMA7260Q를 사용하였다. MMA7260Q는 저중력 가속도 센서로써 가속도가 없을 경우 현재의 각도를 출력하며 움직임이 발생하면 x, y, z 3축의 각속도를 출력한다. 모터 구동 회로는 L298을 사용하여 구

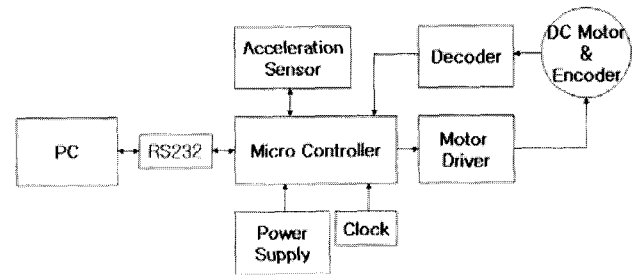


그림 14. 전체 시스템의 블록선도
Fig. 14. Block diagram of entire system.

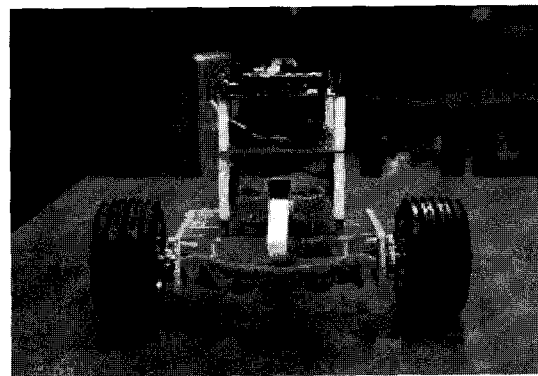


그림 15. 구현한 two-wheel balancing mobile robot
Fig. 15. Implemented two-wheel balancing mobile robot.

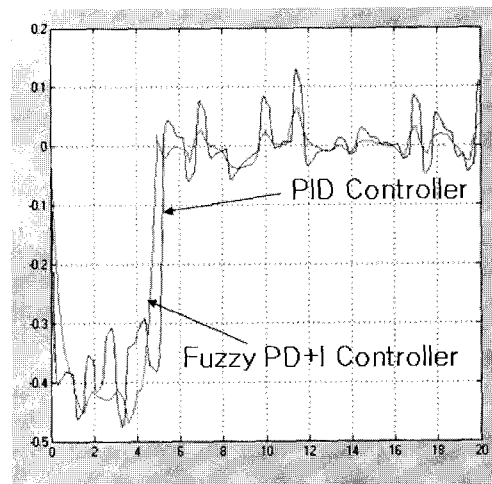


그림 16. Two-wheel balancing mobile robot의 balancing 실험
Fig. 16. Balancing experiment of two-wheel balancing mobile robot.

현하였고 Agilent사의 HCTL-2020을 이용하여 motor decoder 회로를 설계하였다. 구현한 two-wheel balancing mobile robot의 사진은 다음 그림과 같다.

Two-wheel balancing mobile robot의 balancing 실험 조건은 시뮬레이션 조건과 동일하게 주었다. 각 제어기의 이득을 $K_p=30$, $K_i=5$, $K_D=15$ 로 설정하고 초기 값을 0으로 하였으며 동일한 외란 입력이 주어지는 조건

표 4. Two-wheel balancing mobile robot의 balancing 실험 결과

Table 4. Balancing experiment result of two-wheel balancing mobile robot.

	정착 시간	%오버슈트
퍼지 PD+I 제어기	7.2초	2.5%
일반적인 PID 제어기	13.5초	13%

으로 실험을 진행하였다. 동일한 외란 입력 변화에 따른 퍼지 PD+I 제어기와 일반 PID 제어기의 balancing 실험 결과는 그림 16과 같다. 그림 16에서 x축은 시간 [초], y축은 차체의 기울어진 각도이다.

시뮬레이션 수치와의 비교를 위해 정착 시간 조건과 오버슈트 조건을 설정하였다. 목표점 ± 0.03 이내로 접근하여 2초간 지속되는 신호를 정착 신호로 설정하고 정착 지점 -2초 지점의 오버슈트 수치를 최대 오버슈트 수치로 가정하여 얻은 결과는 표 4와 같다.

표 4에서 제안한 제어방식이 실험을 통하여서도 제어성능이 정착시간 및 %오버슈트에서 우수함을 확인하였다.

본 논문에서 유도한 식(5)와 (6)의 상태 방정식은 바퀴와 축, 지면의 마찰력을 고려하지 않은 이상적인 상태에서 유도한 선형 상태 방정식으로 실제 실험에 의해 측정된 수치를 그래프화한 결과, 그림 16은 그림 12와 13에서 나타난 것처럼 이상적인 형태로 나타나지 않았고 진동이 계속적으로 나타나는 형태를 보였다. 하지만 제안한 퍼지 PD+I 제어기는 같은 조건에서의 PID 제어기보다 우수한 성능을 보이고 있음을 확인할 수 있다.

VI. 결 론

본 논문에서는 two-wheel balancing vehicle의 제어 성능을 개선하기 위한 제어 방식으로 퍼지 PD+I 제어 방식을 제안하였다. 제안한 퍼지 PD+I 제어방식은 시스템의 동적 특성에 크게 영향을 미치는 비례, 미분 제어기에 2입력-1출력의 퍼지 시스템을 사용하여 처리하고 적분 제어기를 부가하여 정상 상태 오차를 줄이는 제어 방식이다. 추가된 퍼지 시스템은 시간에 따른 추종 오차의 크기 변화에 따라 비례, 미분 신호의 비중을 조정하며 과도 응답 시 동적 특성 개선에 큰 역할을 하였다. 제안한 제어 방식의 유용성을 확인하기 위하여

two-wheel balancing mobile robot을 제작하고 이를 이용해 시뮬레이션 및 실험을 하여 일반적인 PID 제어 방식과 비교 검토한 결과는 다음과 같다.

- 1) 스텝 응답을 확인하였을 때, 퍼지 PD+I 제어기는 일반적인 PID 제어기에 비해 정착 시간이 약 24% 빠르게 나타났으며 %오버슈트는 약 2.5% 억제되었다.
- 2) Balancing 시뮬레이션 결과, 퍼지 PD+I 제어기는 일반적인 PID 제어기에 비해 정착 시간이 약 50% 빠르게 나타났으며 %오버슈트는 약 2.3% 억제되었다.
- 3) Balancing 실험 결과, 퍼지 PD+I 제어기는 일반적인 PID 제어기에 비해 정착 시간이 약 46% 빠르게 나타났으며 %오버슈트는 약 10.5% 억제되었다.

위의 결과에서 나타난 바와 같이 제안한 퍼지 PD+I 제어기는 일반적인 PID 제어기에 비해 제어 성능이 개선되었음을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] 유범재, "IT 기반 지능형 서비스 로봇 기술 동향," 지능로봇연구센터, 2005.
- [2] Meng Joo Er et al. , "Design and development of an intelligent controller for a pole-balancing robot," *Microprocessors and Microsystems* 26, pp. 433 - 448, 2002.
- [3] Scott M. Boskovich, "A Two Wheeled Robot Control System," *IEEE WESCON* 1995.
- [4] Richard C. Dorf, Robert H. Bishop, "Modern Control Sytem," Ninth-edition, Prentice Hall, 2002.
- [5] Qing-Guo Wang et al., "PID Tuning for Improved Performance," *IEEE Transactions On Control Systems Technology*, Vol. 7, No. 4, July 1999.
- [6] M. Fiacchini et al., "Design And Experimentation Of A Personal Pendulum Vehicle," *Control*, 7th Portuguese Conference on Automatic Control. Sep. 2006.
- [7] Felix Grasser et al., "JOE: A Mobile, Inverted Pendulum," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 49, No. 1, Feb. 2002.
- [8] Chen Wei Ji et al., "Fuzzy Logic Controller for An Inverted Pendulum System," *IEEE*

International Conference on Intelligent Processing Systems, Oct. 1997.

[9] Li-Xing Wang, "A Course in Fuzzy Systems and Control," International-edition, Prentice Hall, 1997.

저 자 소 개



엄 기 환(정회원)
1972년 동국대학교
전자공학과 학사 졸업
1986년 동국대학교
전자공학과 박사 졸업
1989년~1990 Toho Univ. Post
Doc.

2000년~2001년 Univ. of Canterbury Visiting
Professor.

1994년~현재 동국대학교 전자공학과 교수
<주관심 분야 : 시스템 응용, 홈 네트워크>



이 규 윤(정회원)
2004년 2월 동국대학교
전자공학과 학사 졸업
2007년 2월 동국대학교
전자공학과 석사 졸업
2008년 현재 삼성전자주식회사
재직중

<주관심분야 : 시스템 응용, 지능형 로봇>



이 현 관(정회원)
1991년 5월 인디애나주립대학교
전자공학과 학사 졸업
1992년 12월 인디애나주립대학교
전자공학과 석사 졸업
2001년 2월 동국대학교
전자공학과 박사 졸업

2001년 3월 호남대학교 인터넷소프트웨어학과
교수

<주관심분야 : 지능형 로봇, 신경회로망, 임베디
드시스템>



김 주 웅(정회원)
1996년 2월 동국대학교
전자공학과 학사 졸업
1998년 2월 동국대학교
전자공학과 석사 졸업
2003년 2월 동국대학교
전자공학과 박사 졸업

2008년 현재 뉴파워전자(주) 연구개발실 & 기획
마케팅실 실장

<주관심분야 : 인공지능시스템, 전력전자시스템,
RFID&USN, 로봇제어>