



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

석사학위논문

이동로봇에서 밸런싱 테이블의
수평유지를 위한 퍼지 제어시스템
설계

Fuzzy Control System Design for
Leveling Balancing Table in Mobile Robot

김 성 주

경남대학교 대학원

2022년 12월

석사학위논문

이동로봇에서 밸런싱 테이블의
수평유지를 위한 퍼지 제어시스템
설계

Fuzzy Control System Design for
Leveling Balancing Table in Mobile Robot

지도교수 김 동 현
이 논문을 공학 석사학위
논문으로 제출함

2022년 12월
경남대학교 대학원
메카트로닉스공학과
김 성 주

김 성 주의 석사학위 논문을 인준함

심사위원장 _____ 오 윤 식 (인) _____

심 사 위 원 _____ 나 준 홍 (인) _____

심 사 위 원 _____ 김 동 헌 (인) _____

2022년 12월

경남대학교 대학원

감사의 글

먼저 제어 자동화 로봇 연구실에 들어와 졸업하기까지 가장 큰 도움을 주신 김동헌 교수님께 감사의 말씀을 전합니다. 연구실 생활을 시작하면서 적응하기까지 교수님의 지도 덕분에 졸업까지 잘 할 수 있었습니다. 기초적인 부분부터 차근차근 지도해 주시고 각종 학회 및 대회에 참가할 수 있는 기회를 주셔서 로봇 제어 분야의 전문을 넓힐 수 있었습니다. 그리고 2년 동안 다른 분야에서 가르침을 수신 황선환 교수님, 임성일 교수님, 한상보 교수님, 정태욱 교수님, 오윤식 교수님, 나준홍 교수님께 감사의 말씀을 전합니다.

만날 때마다 밥을 사주시고 조교일을 할 때 많은 도움을 주신 연구실 선배 정하민 박사님에게도 감사의 말을 전합니다. 입학하고 얼마 후 졸업을 해 오랜 생활 같이 하진 못했지만 연구실 생활을 하며 대학원 입학을 선택하기까지 도움을 주고 연구실의 기본부터 세세한 것까지 모든 것을 알려준 동기 형, 준호 형, 현민이 형에게도 감사의 말을 전합니다. 8년이라는 시간 동안 삼천포에서부터 대학, 대학원까지 같이 졸업하는 연구실 생활의 가장 큰 힘과 활력소가 되었던 김영민 석사에게도 항상 감사하다는 말을 전하고 싶습니다. 졸업까지 한 학기 남아있는 동기 박기현, 옆에서 불평 없이 매번 일을 도와주고 따라주었던 김준형, 전병주, 오승우, 정종민 연구실 모두에게도 항상 감사하다는 말을 전하고 싶습니다.

그리고 마지막으로 못난 아들을 항상 믿어주시고 아낌없이 물질적, 정신적 지원을 해주신 부모님께 그리고 동생에게 항상 고맙고 사랑한다는 말을 전하고 싶습니다. 이외에도 일일이 언급하지 못했지만 그동안 저를 도와주신 모든 분들께 머리 숙여 감사드립니다.

목 차

국문요약

I. 서 론	1
II. 본 론	3
제1절 수평유지를 위한 제어시스템	3
1.1 수평유지 플랫폼	3
1.2 시스템 모델링	4
1.3 라그랑지안 방정식	5
1.4 수평유지 플랫폼 모델링	8
제2절 퍼지 제어기 설계	11
2.1 퍼지 제어기 설계	11
2.2 비퍼지화	18
III. 실험 결과	20
3.1 레퍼런스 값 추종	20
3.2 자율 주행 시 수평유지	25
IV. 결 론	27
참고문헌	28
ABSTRACT	30

표 목 차

(표-1) 수평유지 플랫폼 파라미터	5
(표-2) 퍼지 제어 규칙 테이블	12
(표-3) x 축 위치 오차(e)에 대한 언어적 표현	13
(표-4) y 축 위치 오차(e)에 대한 언어적 표현	14
(표-5) 속도(e')에 대한 언어적 표현	15
(표-6) x 축 출력에 대한 언어적 표현	16
(표-7) y 축 출력에 대한 언어적 표현	17

그 립 목 차

(그림-1) 수평유지 플랫폼의 하드웨어 구성	4
(그림-2) 수평유지 플랫폼의 물리적 모델	4
(그림-3) 모터 각도와 터치스크린 각도의 관계	8
(그림-4) 퍼지 제어기 구조	12
(그림-5) x 축 위치 오차 멤버십 함수	13
(그림-6) y 축 위치 오차 멤버십 함수	14
(그림-7) 속도(e')에 대한 멤버십 함수	15
(그림-8) x 축 출력에 대한 멤버십 함수	16
(그림-9) y 축 출력에 대한 멤버십 함수	17
(그림-10) (a) x 축에 대한 e, e' 의 출력면, (b) y 축에 대한 e, e' 의 출력면	19
(그림-11) 퍼지 제어기 기반의 전체 제어 블록도	20
(그림-12) (a) x 축 PID 제어기, (b) y 축 PID 제어기	21
(그림-13) (c) x 축 Fuzzy 제어기, (d) y 축 Fuzzy 제어기	22
(그림-14) (a) x 축 PID 제어기, (b) y 축 PID 제어기	23
(그림-15) (c) x 축 Fuzzy 제어기, (d) y 축 Fuzzy 제어기	24
(그림-16) 실험을 진행한 연구실과 모빌리티 진행방향	25
(그림-17) 주행 상태에서의 (a) x 축 Fuzzy 제어기, (b) y 축 Fuzzy 제어기	26

국문 요약

이동로봇에서 밸런싱 테이블의 수평유지를 위한 퍼지 제어시스템 설계

메카트로닉스공학과 김 성 주

지 도 교 수 김 동 현

본 논문은 작업물을 이송할 때 작업물이 수평유지를 하도록 하단에 플랫폼을 구현하는 것을 제안한다. 이송 패널에 축소 짐벌 메커니즘을 기반으로 수평유지 플랫폼을 설계한 후 하드웨어로 구현한다. 수평유지를 위하여 실시간으로 기준점에 공을 보다 빠르게 안정화 시킬 수 있는 연구에 대하여 제안한다. 사용된 플랫폼은 2개의 서보모터, 마이크로컨트롤러 및 17인치 터치스크린으로 구성한다. 플랫폼의 수평유지를 위한 방법으로 전문가 기반의 퍼지 제어(Fuzzy Control)기 설계를 제안한다. 퍼지 제어시스템의 성능 검증을 하기 위해 MATLAB의 Simulink를 사용해 실험과 같이 진행하였다. 연구의 결과로 제안된 수평유지 플랫폼이 기준점의 위치를 원하는 위치로 효과적으로 제어할 수 있음을 보여주었다.

I. 서론

공장 내 바닥에 레일이 아닌 오픈된 필드에서는 바닥의 표면이 고르지 않아 모빌리티가 롤(roll), 피치(pitch) 각도로 흔들리기 때문에 이송물의 안정적인 이송이 어렵다. 심한 경우 바닥에 떨어져 이송물이 파손될 수도 있다. 따라서, 반도체 공정에서 필요한 작업물 이송과 화학공정에서 생기는 비고체 작업물에 대한 이송을 현재의 모빌리티를 사용하기에는 부담이 있다. 왜냐하면 이송중 모빌리티의 상하좌우 흔들림에 의하여 작업물들이 섞여서 다른 화학적 특성이 나타날 수 있기 때문이다. 자동차를 대상으로 승객들의 편안함을 서스펜션 메커니즘을 사용하여 운전자의 승차감을 향상시키는 연구는 이미 많이 진행해 왔다[1, 2]. 하지만, 공장 내에서 작업물 이송을 위하여 모빌리티의 이송물을 수평유지시키는 연구는 그동안 많이 연구가 진행되지 않았다. 이것은 모빌리티의 연구가 아직 오래 진행되지 않아서 자율주행과 장애물 회피에만 초점이 맞추어져 있는 것에 기인한다[3].

본 논문에서는 위와 같은 문제를 해결하기 위해 이송 시 작업물의 수평유지를 위하여 이송 패널에 축소 짐벌 메커니즘을 기반으로 수평유지 플랫폼을 설계/해석한 후 하드웨어로 구현하는 것이다. 이를 구현하기 위해 사용된 수평유지 플랫폼은 2 개의 서보모터, 마이크로컨트롤러 및 17 인치 터치스크린으로 구성한다. 플랫폼의 수평유지를 위한 방법으로 전문가 기반의 퍼지 제어기(Fuzzy Control) 설계를 제안한다. 마이크로컨트롤러에서 전문가시스템(퍼지 제어기)을 통하여 모터 출력량을 결정한다. 모터의 회전수를 통하여 피칭, 롤링 각도 변환을 한다. 전문가시스템의 입력은 터치패널의 위치 오차(position error), 와 속도값(velocity)으로 설정하고 각도를 퍼지 제어의 출력값으로 롤링(평행) 모터와 피칭(상하) 모터의 회전수를 전문가시스템인 퍼지 규칙 기반으로 출력을 얻음으로써 2 개의 서보모터를 제어한다. 퍼지 제어

시스템의 성능 검증을 하기 위해 MATLAB의 Simulink를 사용해 실험과 같이 진행하였다. 연구의 결과로 제안된 밸런싱 제어시스템이 공의 위치를 원하는 위치로 효과적으로 제어할 수 있음을 보여준다.

최종적인 연구목표는 제안된 수평유지장치를 이용하여 모빌리티에 적재된 작업물 들이 비수평화된 바닥면에서도 이송 패널 자체가 수평으로 유지되어 있어서 흔들림을 줄임으로써 고부가 가치의 모빌리티를 개발하는 것이다.

본 논문의 구성은 2장의 1절에서는 수평유지 플랫폼의 모델링에 대하여 설명하고, 2절에서는 퍼지 제어기 설계를 다룬다. 3장에서는 MATLAB 시뮬레이션과 실험 결과를 제시하며, 4장에서는 결론으로 논문을 맺는다.

II. 본 론

제 1 절 수평유지를 위한 제어시스템

2장 1절에서는 수평유지 플랫폼 하드웨어 구성 및 시스템 모델링에 대하여 다룬다.

1.1 수평유지 플랫폼

수평유지 플랫폼은 터치스크린과 같은 접촉식 센서를 사용한 시스템과 IMU(Inertial Measurement Unit) 센서와 같은 관성 측정 센서를 사용한 시스템으로 나뉜다[4, 5, 12]. 관성 측정 센서는 접촉 없이 각도를 측정할 수 있지만 노이즈가 있어 정확한 산출값을 얻기 힘들다는 단점이 있다. 접촉식 센서는 관성 측정 센서 보다 제어 탐지 시간이 짧고 노이즈가 적어 본 연구에 적합하다.

이를 구현하기 위해 사용된 밸런싱 테이블은 2 개의 서보모터, 마이크로컨트롤러, 모터드라이버 모듈 및 17 인치 터치스크린으로 구성한다.

플랫폼의 x 축과 y 축을 제어하는 모터는 양쪽에 볼 조인트가 있는 링크를 통해 고정되어 있다. 2 자유도 회전 조인트를 통해 베이스 플레이트와 터치스크린이 연결되어 있다.

그림 1은 본 연구에서 제안한 수평유지 플랫폼이다. 사용된 터치스크린은 4선식 접촉 센서로 상하, 좌우의 수평 값인 롤(roll), 피치(pitch) 값을 측정한다. MCU(micro controller unit)는 퍼지 제어기로 계산된 값을 기반으로 이송패널 하부에 부착된 2개의 서보모터를 제어해 이송모빌리티에서의 플랫폼을 수평을 유지시킨다.

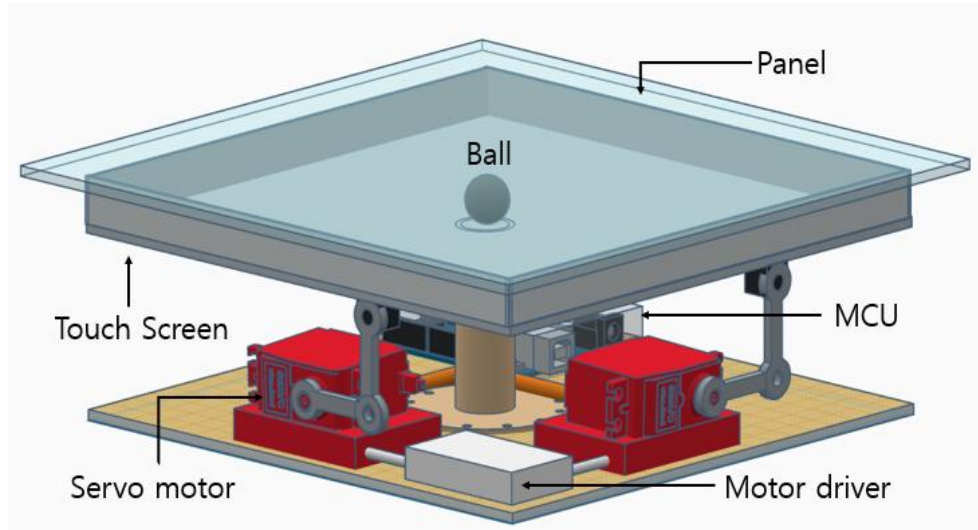


그림 1. 수평유지 플랫폼의 하드웨어 구성
Fig 1. Hardware configuration of leveling platform

1.2 시스템 모델링

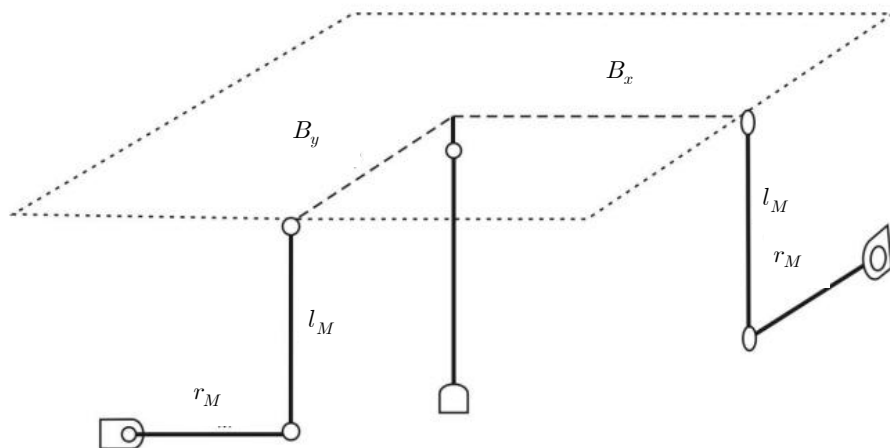


그림 2. 수평유지 플랫폼의 물리적 모델
Fig. 2. Physical model of leveling platform[6]

표 1. 수평유지 플랫폼 파라미터

Table 1. Leveling Balancing Table Parameters[6]

Symbols	Definition	Value	Unit
B_x	Beam Length in x-direction	0.134	[m]
B_y	Beam Length in y-direction	0.168	[m]
r_M	Motor Arm Length	0.0245	[m]
r_b	Radius of the Ball	0.02	[m]
m_b	Mass of the Ball	0.26	[kg]
J_b	Rotational inertia of the Ball	0.0000416	[kg*m ²]
g	Acceleration due to Gravity	9.81	[m/s ²]
α	Plate Angle about x-axis	(Variable)	[degrees]
β	Plate Angle about y-axis	(Variable)	[degrees]
ϑ_x	Motor Angle for x-axis	(Variable)	[degrees]
ϑ_y	Motor Angle for y-axis	(Variable)	[degrees]

그림 2의 물리적 모델은 시스템의 수학적 모델에 필요한 플랫폼의 연결 매개변수를 보여준다. 이러한 매개변수는 표 1과 같다.

수평유지 플랫폼 모델링의 첫 번째 단계는 운동 방정식을 도출하는 것이다. 운동 방정식은 공의 운동(x, y)과 테이블의 두 각도(α, β) 사이의 관계를 설명한다. 본 논문에서 운동 방정식은 라그랑지안 방정식을 사용하여 유도된다[6].

1.3 라그랑지안 방정식

라그랑지안 방정식은 시스템의 운동 에너지와 위치 에너지의 관계를 통해 운동 방정식을 유도한다. 일반적으로 Ball and Beam 처럼 1 자유도 시스템 보다는 본 연구에서 제안한 수평유지 플랫폼에 유용한 방정식이다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial L}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

L (라그랑지안)은 시스템의 운동 에너지와 위치 에너지의 차이이다.

$$L = E_{kin} - E_{pot} \quad (2)$$

운동 방정식을 유도하려면 시스템의 운동 에너지와 위치 에너지를 얻어야 한다. 총 운동 에너지는 다음과 같다.

$$E_{kin} = E_{kin,T} + E_{kin,R} = \frac{1}{2} m_b v_b^2 + \frac{1}{2} m_b w_b^2 \quad (3)$$

식 (4), 식 (5)에서 $E_{kin,T}$ 는 병진 운동 에너지이고 $E_{kin,R}$ 은 회전 운동 에너지이다.

$$E_{kin,T} = \frac{1}{2} m_b v_b^2 = \frac{1}{2} m_b (x_b'^2 + y_b'^2) \quad (4)$$

$$E_{kin,R} = \frac{1}{2} J_b w_b^2 = \frac{1}{2} J_b \frac{v_b^2}{r_b^2} = \frac{1}{2} J_b \frac{(x_b'^2 + y_b'^2)}{r_b^2} \quad (5)$$

따라서,

$$\begin{aligned} E_{kin} &= \frac{1}{2} m_b (x_b'^2 + y_b'^2) + \frac{1}{2} J_b \frac{(x_b'^2 + y_b'^2)}{r_b^2} \\ &= \frac{1}{2} \left(m_b + \frac{J_b}{r_b^2} \right) (x_b'^2 + y_b'^2) \end{aligned} \quad (6)$$

주어진 플레이트 각도에 대한 볼의 위치 에너지는 다음과 같이 설명할 수 있다.

$$\begin{aligned} E_{pot} &= m_b g h_b \\ &= -m_b g x_b \sin(\alpha) - m_b g y_b \sin(\beta) \end{aligned} \quad (7)$$

따라서 라그랑지안 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} L = E_{kin} - E_{pot} &= \frac{1}{2} \left(m_b + \frac{J_b}{r_b^2} \right) (x_b'^2 + y_b'^2) \\ &\quad + m_b g x_b \sin(\alpha) + m_b g y_b \sin(\beta) \end{aligned} \quad (8)$$

식 (1)에서의 x 방향에 대한 부분 도함수는 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial L}{\partial x'} \right) = \frac{\partial}{\partial t} \left(\left(m_b + \frac{J_b}{r_b^2} \right) x_b' \right) = \left(m_b + \frac{J_b}{r_b^2} \right) x_b'' \quad (9)$$

$$\frac{\partial L}{\partial t} = m_b g \sin(\alpha) \quad (10)$$

따라서 x 방향에 대한 미분 방정식은 다음과 같다.

$$\left(m_b + \frac{J_b}{r_b^2} \right) x_b'' - m_b g \sin(\alpha) = 0 \quad (11)$$

x_b'' 에 대한 방정식을 풀면 다음과 같다. y_b'' 는 식 (11)과 동일한 방식으로 구한다.

$$x_b'' = \frac{m_b g r_b^2}{m_b g r_b^2 + J_b} \sin(\alpha) \quad (12)$$

$$y_b'' = \frac{m_b g r_b^2}{m_b g r_b^2 + J_b} \sin(\beta) \quad (13)$$

1.4 수평유지 플랫폼 모델링

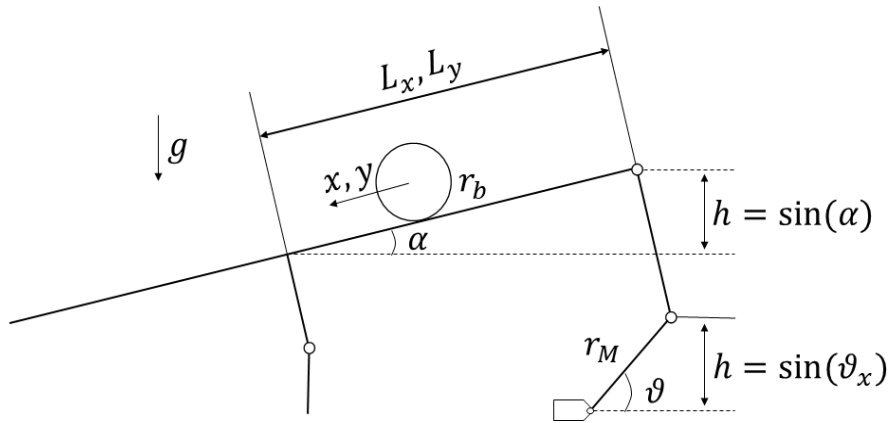


그림 3. 모터 각도와 터치스크린 각도의 관계

Fig. 3. Relationship between Motor Angles and Plate Angles

모델링의 목적은 시스템의 출력과 입력 간의 물리적 관계를 도출하는 것이다. 본 연구의 경우 시스템의 입력은 x 및 y 방향의 공 좌표이다(x_b, y_b). 시스템의 출력은 그림 3에서 볼 수 있듯이 모터 각도(ϑ_x, ϑ_y)이다[6].

$$\sin(\vartheta_x) r_M = \sin(\alpha) L_x = h \quad (12)$$

따라서 터치스크린 x, y 방향 각각의 각도와 모터 각도의 관계는 다음과 같다.

$$\sin(\alpha) = \frac{r_M}{L_x} \sin(\vartheta_x) \quad (13)$$

$$\sin(\beta) = \frac{r_M}{L_y} \sin(\vartheta_y) \quad (14)$$

시스템의 입력과 출력과의 관계를 설명하는 시스템의 미분 방정식은 식 (15), 식 (16)과 같다.

$$x_b'' = \frac{m_b g r_b^2 r_M}{(m_b r_b^2 + J_b) L_x} \sin(\vartheta_x) \quad (15)$$

$$y_b'' = \frac{m_b g r_b^2 r_M}{(m_b r_b^2 + J_b) L_y} \sin(\vartheta_y) \quad (16)$$

시스템의 전달 함수를 구하려면 미분 방정식이 작동점($x=0, y=0$)에 대해 선형화되어야 한다. 작동점의 작은 각도에서 움직이는 경우 식 (17)과 같다.

$$\sin(\vartheta_x) \approx \vartheta_x, \sin(\vartheta_y) \approx \vartheta_y \quad (17)$$

식 (15), 식 (16)은 식 (17)을 이용하여 다음과 같다.

$$x_b'' = \frac{m_b g r_b^2 r_M}{(m_b r_b^2 + J_b) L_x} \vartheta_x = K_{BBT,x} \vartheta_x \quad (18)$$

$$y_b'' = \frac{m_b g r_b^2 r_M}{(m_b r_b^2 + J_b) L_x} \vartheta_y = K_{BBT,y} \vartheta_y \quad (19)$$

식 (18) 및 식 (19)와 같이 시스템 변수는 분리되므로 모든 동작 모드를 구할 수 있다.

표 1에 나열된 시스템 매개변수의 값을 사용하여 $K_{BBT,x}$ 및 $K_{BBT,y}$ 을 각각 1 및 1.255로 설정한다.

x 방향에서 미분 방정식은 다음과 같다.

$$x_b'' = K_{BBT,x} \vartheta_x(s) \quad (20)$$

라플라스 변환을 하면 식 (21), 식 (22)과 같다.

$$s^2 X_b(s) = K_{BBT,x} \vartheta_x(s) \quad (21)$$

$$G_{BBT,x}(s) = \frac{X_b(s)}{\vartheta_x(s)} = \frac{K_{BBT,x}}{s^2} = \frac{1}{s^2} \quad (22)$$

y 방향의 전달 함수는 방정식은 다음과 같다.

$$G_{BBT,y}(s) = \frac{X_b(s)}{\vartheta_y(s)} = \frac{K_{BBT,y}}{s^2} = \frac{1.255}{s^2} \quad (23)$$

제 2 절 퍼지 제어기 설계

2장 2절에서는 퍼지 제어기 설계와 디퍼지화에 대하여 다룬다.

2.1 퍼지 제어기 설계

그림 4는 수평유지를 위해 제안된 퍼지 제어기의 구조를 보여준다. 퍼지 제어기에는 2개의 입력과 1개의 출력이 있다. 입력은 위치 오차(Position error)와 속도(Velocity)두 가지로 정의 하였고, 출력은 디퍼지화를 한 값으로 모터의 회전수가 결정된다[7, 9]. 퍼지 제어기의 입력 및 출력 멤버십 함수는 표 2을 통해 확인할 수 있다.

퍼지 제어의 핵심은 제어 규칙이며, 본 연구에서는 만다니(Mandani) 추론 방법에서 가장 일반적인 형태의 “if A and B then C” 문장을 사용한다[8]. 각 입력에는 위치 오차(e)에는 5개의 소속 함수 N(Negative), NS(Negative Small), Z(Zero), PS(Positive Small), P(Positive)가 있고, 속도(e')에는 3개의 소속 함수 N(Negative), Z(Zero), P(positive) 가 있다. 서보모터의 회전수를 결정하는 퍼지 제어기 출력은 N(Negative), Z(Zero), P(positive) 가 있다. 위치오차와 속도의 대한 퍼지 제어기 출력은 그림 4와 같다.

퍼지 제어기에서 멤버십 함수를 5x5 로 사용하는 경우 연산 속도가 느려지고, 메모리에 한계가 있다. 본 연구에서 사용한 MCU(32-bit ARM Cortex-M3)에서는 메모리 부족의 이유로 처리하는 속도가 느려져 5x3 소속 함수를 사용한다[13].

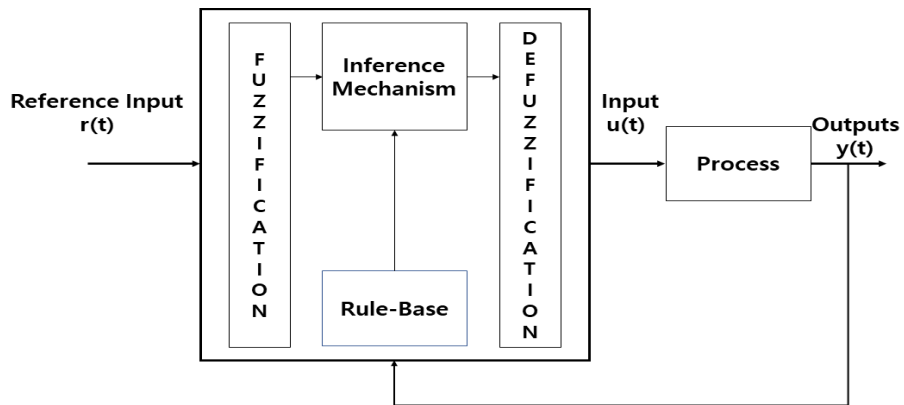


그림 4. 퍼지 제어기 구조

Fig. 4. Fuzzy Controller Structure[6]

표 2. 퍼지 제어 규칙 테이블

Table 2. Fuzzy control rule table

Output		e				
		N	NS	Z	PS	P
e'	N	P	P	P	Z	Z
	Z	P	Z	Z	Z	N
	P	Z	Z	N	N	N

x 축 위치 오차(e)에 대한 소속 함수 범위는 5단계에 걸쳐 표 3과 같이 나타낸다.

표 3. x 축 위치 오차(e)에 대한 언어적 표현

Table 3. Verbal expression for x position error[6]

	Distance[cm]
N	-35 ~ 35
NS	-35 ~ 0
Z	-10 ~ 10
PS	0 ~ 35
P	10 ~ 35

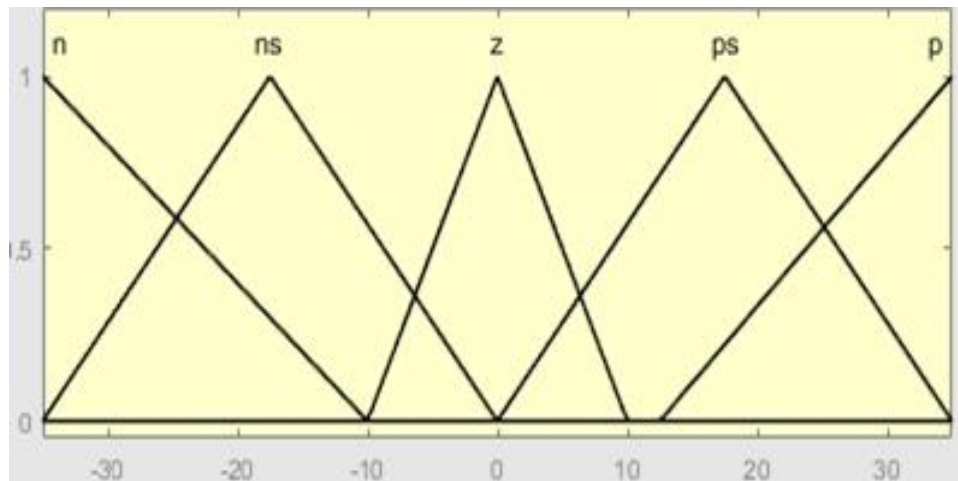


그림 5. x 축 위치 오차 멤버쉽 함수

Fig. 5. x -axis position error membership function

y 축 위치 오차(e)에 대한 소속 함수 범위는 5단계에 걸쳐 표 4와 같이 나타난다.

표 4. y 축 위치 오차(e)에 대한 언어적 표현

Table 4. Verbal expression for y position error[6]

	Distance[cm]
N	-25 ~ 25
NS	-25 ~ 0
Z	-10 ~ 10
PS	0 ~ 25
P	10 ~ 25

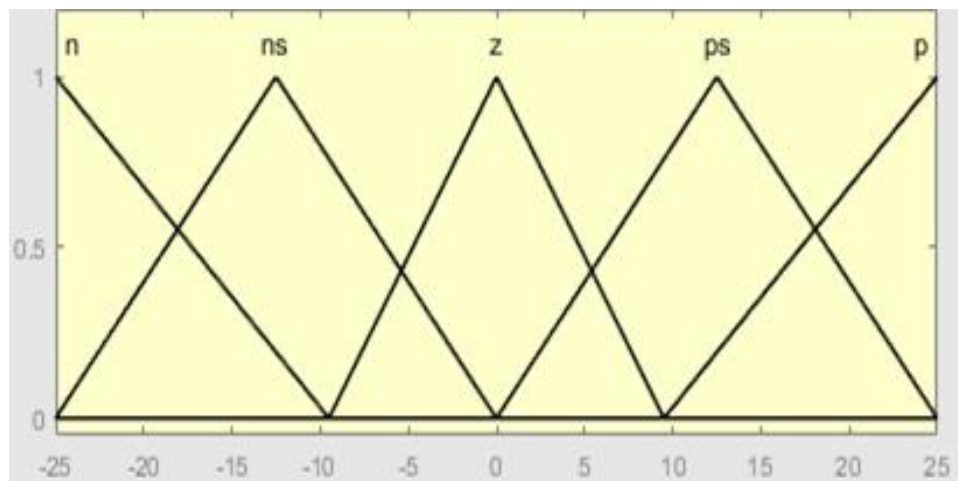


그림 6. y 축 위치 오차 멤버십 함수

Fig. 6. y -axis position error membership function[6]

x, y 축 속도(e')에 대한 소속 함수 범위는 3단계에 걸쳐 표 5와 같이 나타난다.

표 5. 속도(e')에 대한 언어적 표현
Table 5. Verbal expression for velocity[6]

	Velocity[cm/s]
N	-30 ~ 0
Z	-30 ~ 30
P	0 ~ 30

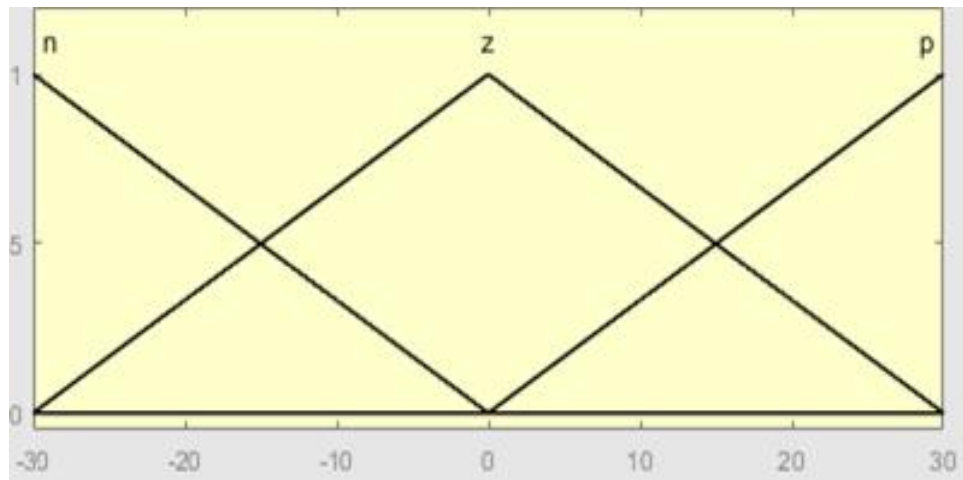


그림 7. 속도(e')에 대한 멤버쉽 함수
Fig. 7. Membership function for speed(e')

x 축 출력인 모터회전수에 대한 소속 함수 범위는 3단계에 걸쳐 표 6과 같이 나타낸다.

표 6. x 축 출력에 대한 언어적 표현

Table 6. Verbal representation of the x -axis output

	Velocity[cm/s]
N	-40 ~ 0
Z	-40 ~ 40
P	0 ~ 40

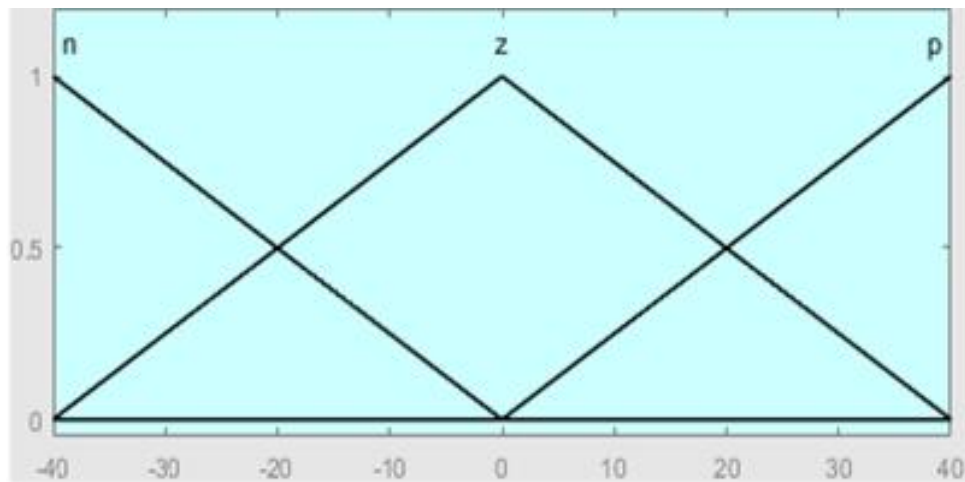


그림 8. x 축 출력에 대한 멤버십 함수

Fig. 8. Membership function for x -axis output

y 축 출력인 모터회전수에 대한 소속 함수 범위는 3단계에 걸쳐 표 7과 같이 나타낸다.

표 7. y 축 출력에 대한 언어적 표현

Table 7. Verbal representation of the y -axis output

	Velocity[cm/s]
N	-40 ~ 0
Z	-40 ~ 40
P	0 ~ 40

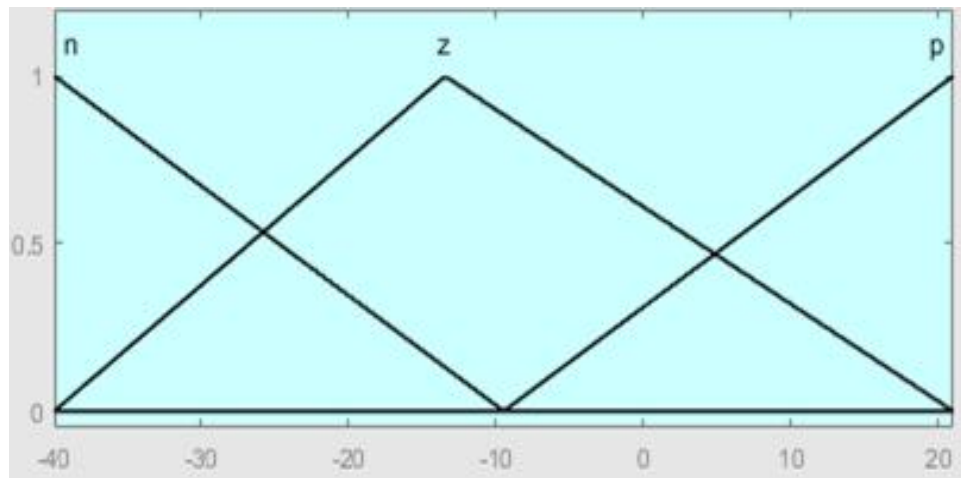


그림 9. y 축 출력에 대한 멤버십 함수

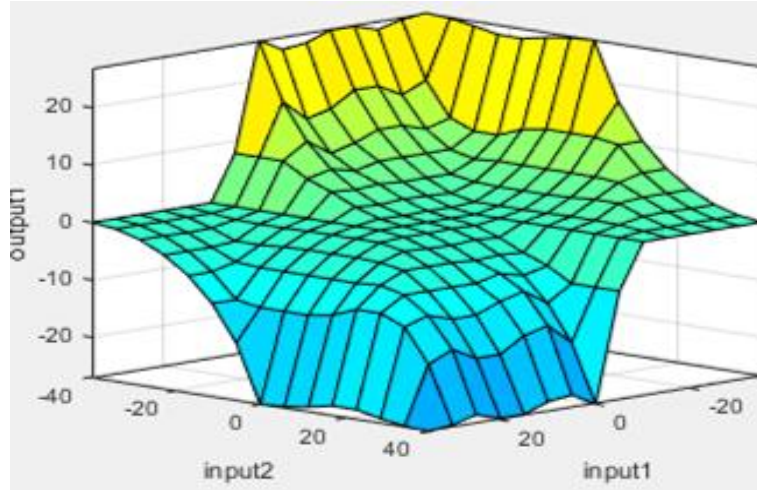
Fig. 9. Membership function for y -axis output

2.2 비퍼지화

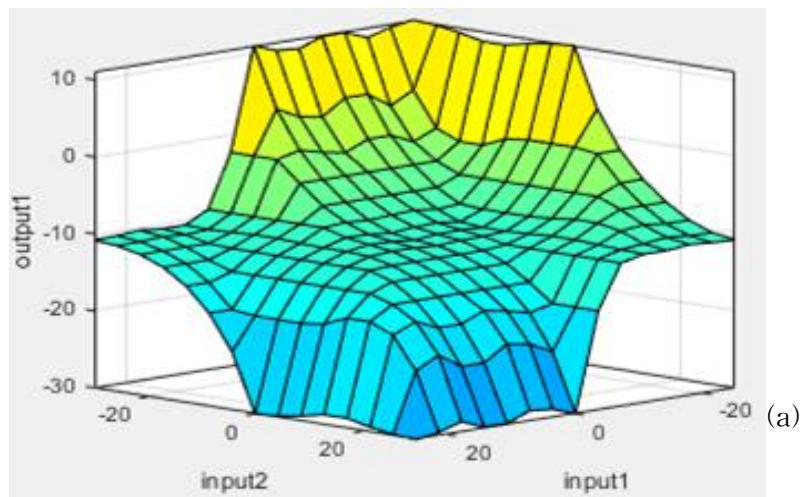
퍼지 추론에 의한 근사 추론 결과는 퍼지 집합 으로 출력되며 이를 명확한 수치로 나타내는 과정을 비퍼지화(defuzzification)라 한다. 비퍼지화 방법은 최대값법, 최대평균법, 무게중심법(centroid) 등이 있다. 본 연구에서는 비퍼지화 기법을 위하여 일반적으로 많이 사용하는 무게중심법을 사용한다 [8]. 무게중심법에 의한 비퍼지화 과정은 식 (24)와 같으며, 여기서 x_0 는 비퍼지화된 값이며, $\mu_s(x_i)$ 는 변수 x_i 가 집합 S 에 소속된 정도를 나타낸다[10].

설계된 15개의 제어 규칙과 퍼지 멤버십 함수에 따라 제어 규칙을 설계한다. 그림 10는 입력 e 와 e' 에 대한 본 논문에서 사용된 (x, y) 의 출력 표면(surface)을 보여준다.

$$x_0 = \frac{\sum_{i=0}^n \mu_s(x_i) \cdot x_i}{\sum_{i=0}^n \mu_s(x_i)} \quad (24)$$



(a)



(a)

(b)

그림 10. (a) x축에 대한 e , e' 의 출력면, (b) y축에 대한 e , e' 의 출력면

Fig. 10. Gain values for e , e' output surface about the y-axis

Ⅲ. 실험 결과

3장에서는 수평유지 플랫폼에서 제안한 제어기와 기존의 PID 제어기의 성능을 그래프를 통해 비교 하였다.

3.1 레퍼런스 값 추종

MATLAB Simulink 환경에서 실험을 진행하였다. 수평유지 플랫폼의 퍼지 제어 블록 다이어그램은 그림 11과 같다.

퍼지 제어기의 효율성을 보여주기 위해 터치스크린에 임의로 지정한 점인(-150, -120)에 볼을 위치해 중앙(0, 0)으로 제어하는 실험을 진행한다. 각각의 RMSE(Root Mean Square Error) 값을 구해 변화하는 값에서 퍼지 제어기와, 기존 PID 제어기를 비교하였다[11]. 그림 12~13은 기존에 사용된 PID 제어기의 결과이며, 그림 14~15는 제안된 퍼지 제어기의 결과이다.

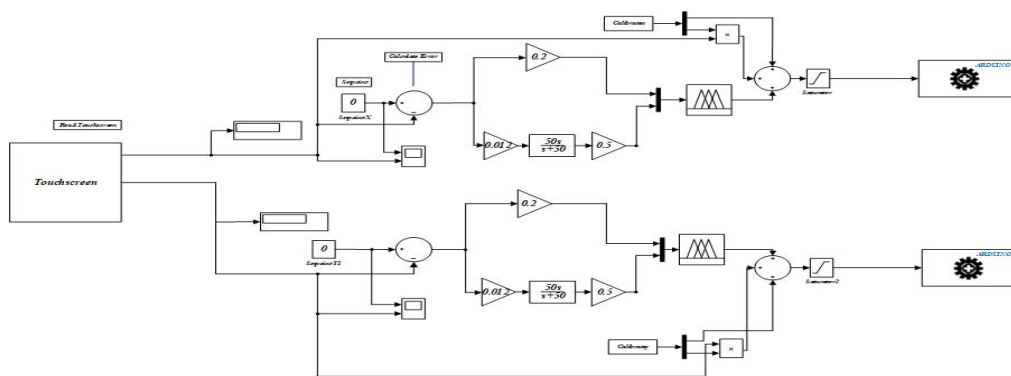


그림 11. 퍼지 제어기 기반의 전체 제어 블록도

Fig. 11. Full control block diagram based on fuzzy controller

그림 12(a), 12(b)에서는 x축 2.3초, y축 1.8초에 정상상태에 도달하였다. 제안된 퍼지 제어 결과인 그림 13(a), 13(b)를 보면 x축은 1.2초, y축 1.2초에 정상상태에 도달하였다. RMSE 값은 퍼지 제어가 각각 x축은 12.269, y축은 1.113 더 적은 수치를 보이며 더 효율적으로 수평을 유지하는 것을 보여준다.

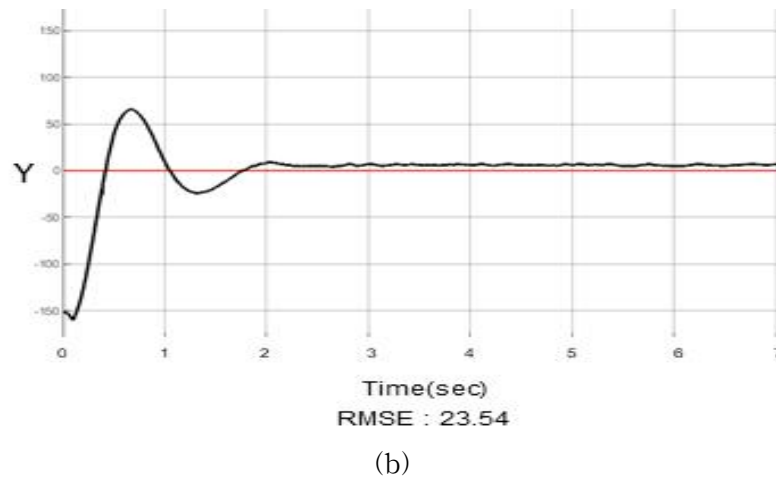
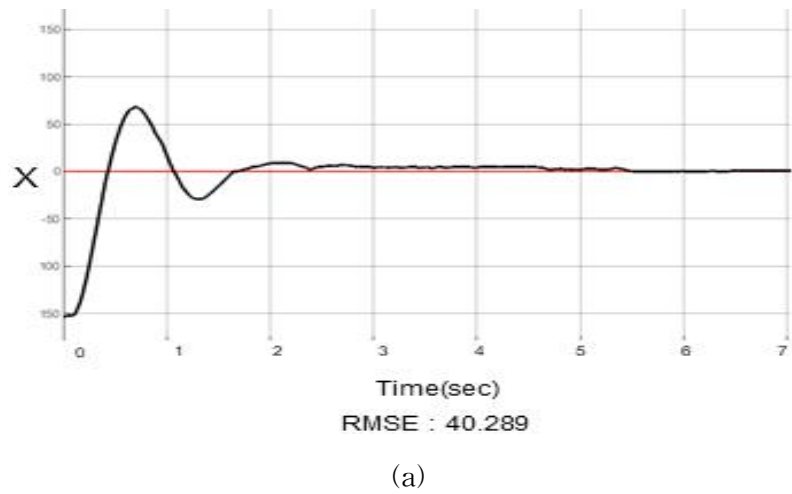


그림 12. (a) x 축 PID 제어기, (b) y 축 PID 제어기

Fig. 12. (a) x-axis PID controller, (b) y-axis PID controller

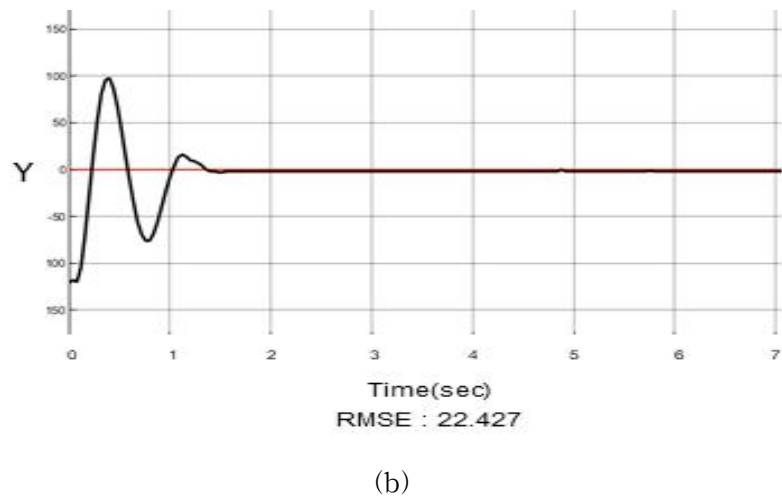
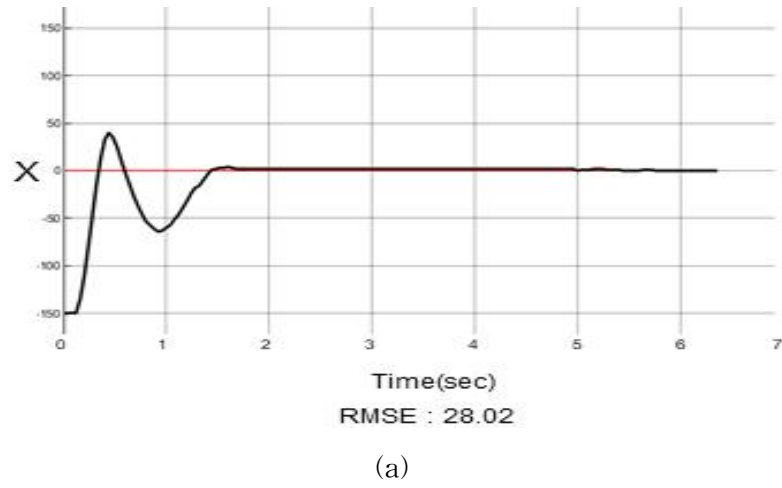
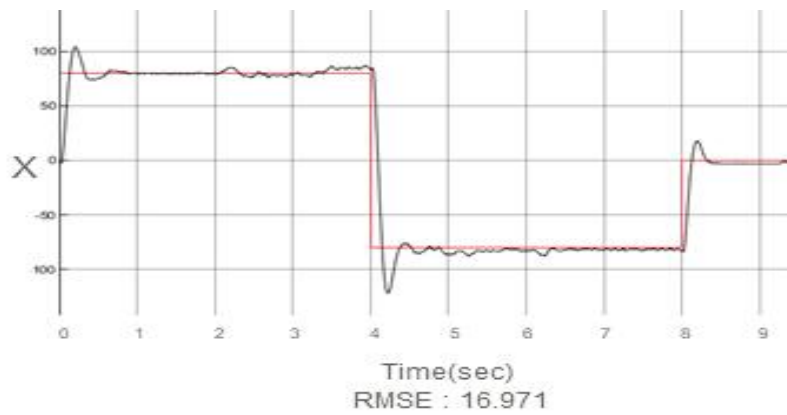


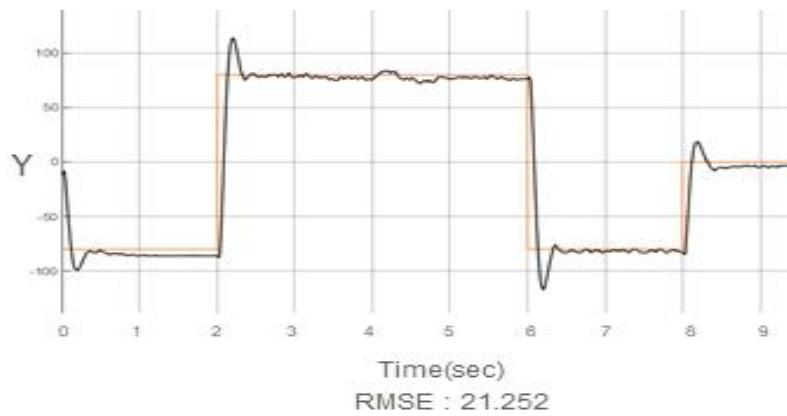
그림 13. (a) x 축 Fuzzy 제어기, (b) y Fuzzy 제어기

Fig. 13. (a) x -axis Fuzzy controller, (b) y -axis Fuzzy controller

그림 14, 15는 사각형의 레퍼런스 값을 주었을 때 볼이 레퍼런스 값을 따라 가면서 중심을 잡는 실험을 진행하였다. 레퍼런스 값으로는 x축(-80, 80), y축(-80, 80) 설정하였다. 마찬가지로 RMSE 값을 구해 변화하는 값에서 퍼지 제어기와, 기존 PID 제어기를 비교하였다. 그림 14(a), 14(b)는 기존에 사용된 PID 제어기의 x축 및 y축 궤적이며, 그림 15(a), 15(b)는 제안된 퍼지 제어기의 x축 및 y축 궤적이다.



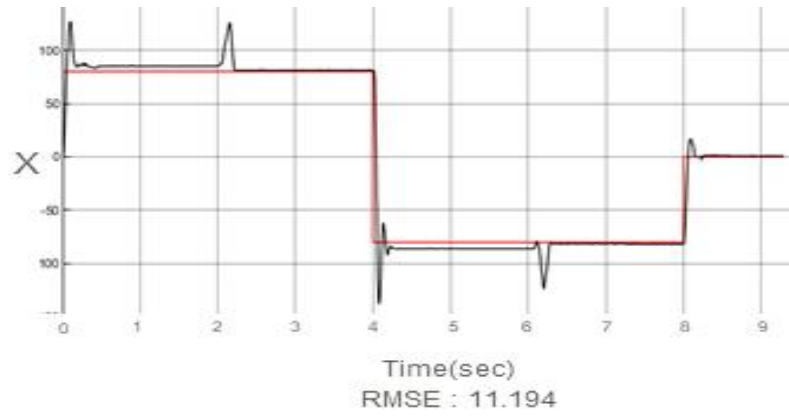
(a)



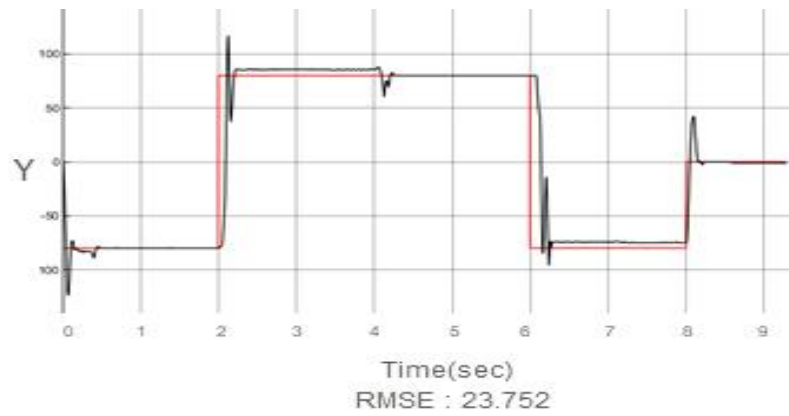
(b)

그림 14. (a) x 축 PID 제어기, (b) y 축 PID 제어기

Fig. 14. (a) x -axis PID controller, (b) y -axis PID controller



(a)



(b)

그림 15. (a) x 축 Fuzzy 제어기, (b) y 축 Fuzzy 제어기

Fig. 15. (a) x -axis Fuzzy controller, (b) y -axis Fuzzy controller

결과로서 퍼지 제어기가 PID 제어기 보다 원점과 사각형의 레퍼런스 값을 추종하는데 더 적은 RMSE값을 보여 주었다. 정상상태 오차는 지정한 점에서부터 2% 이하로 안정된 성능을 보인다.

3.2 자율 주행 시 수평유지

다음은 실내에서 장애물을 회피하며 자율주행을 하는 모빌리티에 탑재 된 수평유지 플랫폼의 성능을 보여준다. 그림 16은 실험을 진행한 연구실과 모빌리티의 진행 방향을 보여준다. 그림 17은 경로를 따라 자율주행을 할 때 제안된 퍼지 제어기의 성능을 보여준다.

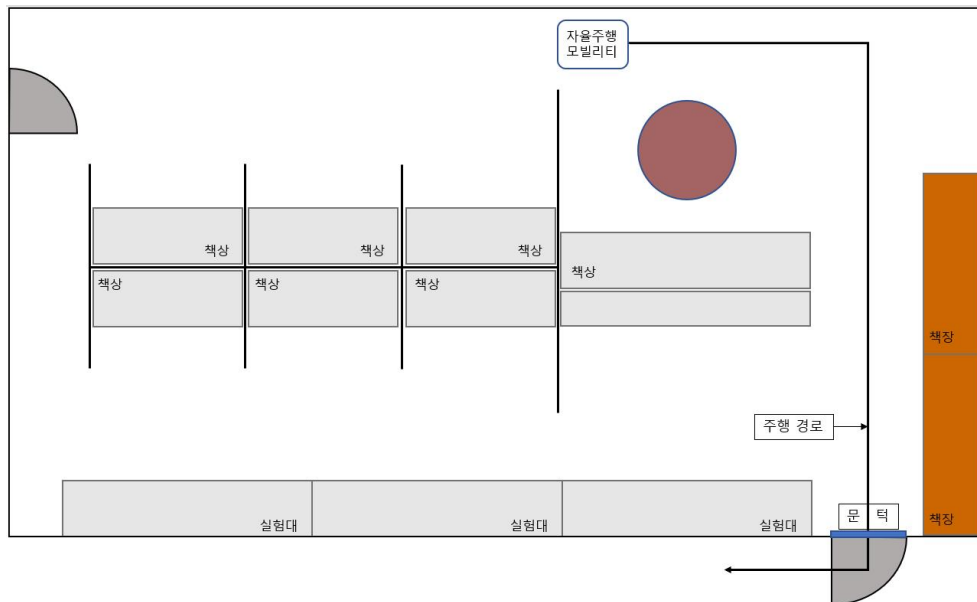
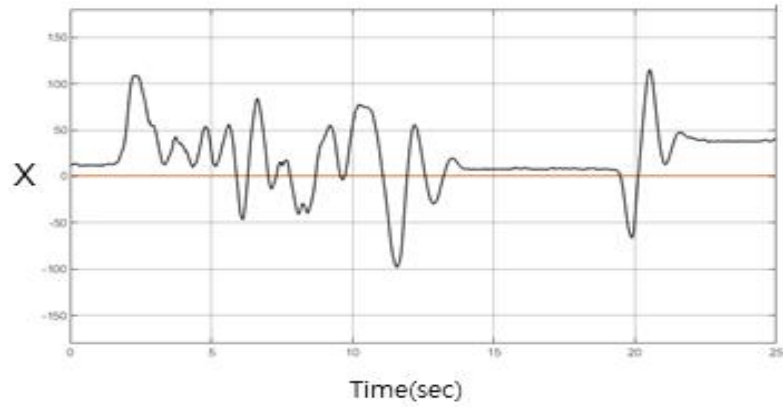
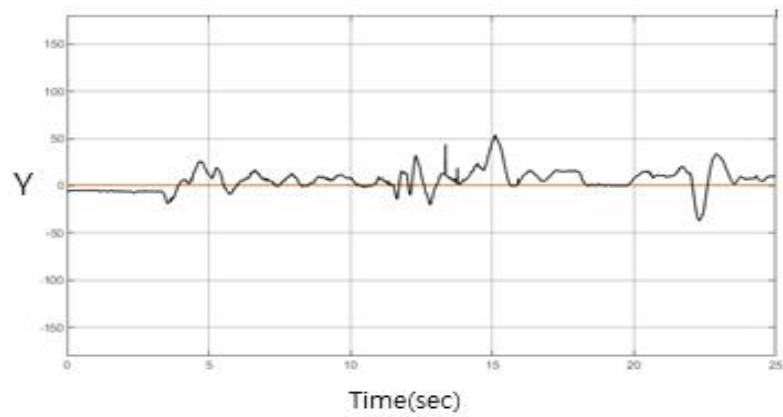


그림 16. 실험을 진행한 연구실과 모빌리티 진행방향

Fig. 16. The laboratory where the experiment was conducted and the direction of mobility



(a)



(b)

그림 17. 주행 상태에서의 (a) x 축 Fuzzy 제어기, (b) y 축 Fuzzy 제어기

Fig. 17. In driving condition (a) x -axis Fuzzy controller, (b) y -axis Fuzzy controller

결과로서 퍼지 제어기가 PID 제어기 보다 원점과 사각형의 레퍼런스 값을 추종하는데 더 적은 RMSE값을 보여 주었다. 정상상태 오차는 지정한 점에서부터 1% 이하로 안정된 성능을 보인다. 실제 자율주행 환경에서도 레퍼런스 값에서 크게 벗어나지 않고 수평을 유지하는 모습을 보여준다.

IV. 결 론

본 논문에서는 비수평화된 작업물을 이송할 때 작업물이 수평유지를 하도록 하단에 플랫폼을 구현하는 것을 제안하였다. 제안한 방법은 터치 스크린과 5×3 소속 함수를 사용한 퍼지 제어기 기반의 수평유지 플랫폼을 기반으로 하였다. 이에 대한 연구는 있었지만 관찰자 기반의 시뮬레이션만 실행해 결과값만 얻었다[14]. 실험을 통해 제안된 퍼지 제어기는 기존의 PID제어에 비해 더 빠른 응답 속도를 보여주었다. RMSE 수치도 기존의 PID 제어기 보다 제안된 퍼지 제어기가 더 좋은 결과값을 보여주었다. 연구의 결과로 제안된 퍼지 제어시스템이 공의 위치를 (0,0) 혹은 사각형의 원하는 위치로 효과적으로 제어할 수 있음을 보여주었다.

향후에는 더 좋은 성능의 MCU를 사용하여 5×5 이상의 소속 함수를 사용하여 이송 모빌리티에서 수평유지플랫폼을 설치하여 실험을 진행 할 예정이다. 최종적으로 저가(low cost)의 부품을 기반으로 수평유지 플랫폼을 설계하여 실제 제품에 탑재 가능한 실용적인 시스템을 설계해 이송 모빌리티에 탑재하여 고부가 가치의 모빌리티를 설계하고자 한다.

참 고 문 헌

- [1] S. Kim, M. Seo, B. Pyun, and H. Choi, “MR damper applied to improve ride comfort and steering stability of passenger vehicles Control logic actual vehicle evaluation,” Korean Society of Automotive Engineers, pp. 313–314. Jun. 2022.
- [2] C. Park, S. Kim, H. Kim, and S. Han, “A Study on the Optimal Vehicle Height Selection for Improving R&H of Air Suspension System,” The Korean Society of Automotive Engineers, pp.385–394, Nov. 2017.
- [3] J. Park, J. Kim, Y. Kim, Y. Han, D. Seo, and S. Jeon, “Implementation of an obstacle avoidance algorithm based on RC car for autonomous driving,” Proceedings of the Korean Information Science Society Conference, pp. 1247–1249. Dec. 2020.
- [4] J. Park, and Y. Lee, “Robust visual servoing for motion control of the ball on a plate, Mechatronics,” vol. 13, no. 7, pp. 723–738, Jul. 2003.
- [5] B. eon, H. Cho, “EXOSKELETON ROBOT ARM Control By Fuzzy Algorithm Using EMG Signal,” Journal of Korean Institute of Intelligent Systems, vol. 19, no. 2, pp. 218–221, Dec. 2009.
- [6] “Automation control robotics mechatronics,” Available: <https://www.acrome.net/ball-balancing-table>. [Accessed 20 Oct, 2020.]
- [7] J. Jang, S. Cho, and J. Kim, “Lumped Parameter Modeling and Analysis of Electromagnetic Linear Actuator,” Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, vol. 15, no. 5, pp. 18–24, Jun. 2016.
- [8] L Su, W J Huang, and M Hua, “Design of the portable diesel engine system based on the fuzzy PID algorithm,” Electronic Measurement Technology, vol. 28, no. 4, pp. 25–29, Apr. 2017.

- [9] J. Hwang, and C. Lee, "A Risk Management Method Using Fuzzy Theory for Early Construction Stage," Korean Journal of Construction Engineering and Management
vol. 5, no. 2, pp. 136-143, Apr. 2004.
- [10] S. Kwak, and B. Choi, "Defuzzification Scheme and Its Numerical Example for Fuzzy Logic based Control System," Journal of Korean Institute of Intelligent Systems, vol. 28, no. 4, pp. 350-354. Aug. 2018.
- [11] J. Lyu, M. Bae, S. Cho., "A Study on the Improvement of AVR Performance of Diesel Generators for Stand-alone Power Supply System using 1-cycle RMS," Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, vol. 35. no. 1, pp. 35-42. Nov. 2021.
- [12] J. Kim, J. Kim, J. Jeong, and J. Chung, "Development of the Metal Casting Processing Management System Based on Touch Screen," Journal of Korean Institute of Intelligent Systems, vol. 23, no. 1,
pp. 23-24. Mar. 2013.
- [13] S. Kim, T. Kim, J. Lee, and K. Cheoi, "Pet Doghouse Control Using Arduino Board And Mobile Phone," Journal of Korean Institute of Intelligent Systems, vol. 25, no. 2, pp. 110-112, 2018.
- [14] Hamdoun, M, and Abdallah, M.B., Ayadi, M. et al. "Functional observer-based feedback controller for ball balancing table," SN Appl. Sci. 3, pp. 614. May 2021.

ABSTRACT

Fuzzy Control System Design for Leveling Balancing Table in Mobile Robot

Kim Seong Ju

(Dept of Mechatronics Engineering)

Advisor : Kim Dong Hun

This paper proposes to implement a leveling platform at the bottom so that the moving workstation is horizontal while being transferred. A horizontal maintenance platform is designed on the transport panel based on a reduced gimbal mechanism and then implemented in hardware. For horizontal maintenance, we propose a leveling platform that can stabilize the ball more quickly at the reference point in real time. As a method for horizontal maintenance of the platform, an expert-based fuzzy control design is proposed. In order to verify the performance of the fuzzy control system, it was conducted as in the experiment using MATLAB's Simulink and its H/W. The results of the study show that the proposed horizontal maintenance platform can effectively control the position of the reference point to the desired position.

연 구 업 적

● Non-SCI Journal(기타 국제 & 국내 학술지)

1. Seong Ju Kim, Dong Hun Kim. (2023). "Fuzzy Control System Design for Leveling Platform." Journal of The Korean Institute of Intelligent Systems

● Domestic Conference(국내 학술지)

1. Seong Ju Kim, Dong-gi Son, Dong Hun Kim. (2021). "Autonomous Navigation of Unmanned Surface Vehicle Based on Fuzzy Control Considering COLREG." 대한전기학회 학술대회 논문집, (), 1751-1752.
2. Jun Hyung Kim, Seong Ju Kim, Yeong Min Kim, Dong Hun Kim. (2022). "Implementation of Composite IoT System for Ship Safety". 대한전기학회 학술대회 논문집, (), 135-136.
3. Seong Ju Kim, Jun Hyung Kim, Dong Hun Kim. (2022). "Design of stabilizing system for balancing table using fuzzy control". 한국조명·전기설비학회 추계학술대회 논문집, (), pp.19

● 특허등록

1. 김동현, 김성주, 퍼지제어 기반의 수평유지장치 S/W, 등록번호: 190131-0003884, 등록일자 : 2022.12.06

● 수상

1. 김성주, 경남대학교, 졸업 공로상
2. 김성주, 김영민 변종언, 배준수, 심규환, 2020년 ISW융합클러스터2.0 해커톤 대회, 최우수상
3. 김성주, 2021년 경남대학교 LINK+ 사업단 연구노트 경진대회, 장려상
4. 김성주, 김영민, 박기현 자율운항보트 경진대회 KABOAT 2021, 장려상
5. 김성주, 배상민, 연보, 홍성호, 2021년 ISW융합클러스터2.0 해커톤 대회, 우수상
6. 김성주, 김준형, 2022 추계학술대회, 우수추천논문

● **참여 프로젝트**

1. 거친 환경에서 운행가능한 HILS 기반의 운동 보상기를 갖춘 무인 반잠수정의 자율운항 연구
2. 족부 관절운동의 힘 측정을 위한 계측장치와 S/W개발
3. 소형 발전기 상태 모니터링을 위한 제어시스템 & HMI S/W 개발
4. 공장내에서 사용자 추종 기능을 가진 모빌리티 설계 및 운용
5. 인공지능 기법을 도입한 셀프스티어링 시스템 설계 및 개발
6. 선박에서 사고방지를 위한 속도관리 기반의 자동화 시스템 개발
7. 고급 ICT 기반의 수평유지 이송 모빌리티 설계 및 교육