



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 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](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

3륜 전방향 주행형 로봇의 곡선
경로 추적제어에 관한 연구



2013년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

메카트로닉스 협동과정

박 유 미

공 학 석 사 학 위 논 문

3륜 전방향 주행형 로봇의 곡선
경로 추적제어에 관한 연구

지도교수 김 상 봉

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2013년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

메카트로닉스 협동과정

박유미의 공학석사 학위논문을 인준함.

2013년 2월



목 차

목차	i
Abstract	iii
제 1 장 서론	1
1.1 연구 배경 및 동기	1
1.2 연구 목적 및 방법	6
1.3 연구 내용 및 범위	8
제 2 장 전방향 주행형 로봇의 구성 및 모델링	10
2.1 전방향 주행형 로봇의 구성	10
2.2 전방향 휠의 종류와 특징	16
2.3 레이저 기반 위치 측정 시스템의 특징	21
2.4 전방향 주행형 로봇의 제어시스템	25
2.5 전방향 주행형 로봇의 운동학적 모델링	28
2.5.1 전방향 주행형 로봇의 기하학적 구성	28
2.5.2 전방향 주행형 로봇의 운동학적 모델링	29
제 3 장 퍼지제어기법을 이용한 제어기 설계	34
3.1 퍼지제어시스템의 구성과 특징	34
3.2 곡선 경로 추적 퍼지 제어기의 설계	39

제 4 장 시뮬레이션 및 실험결과	46
4.1 시뮬레이션 결과	46
4.2 실험결과	51
제 5 장 결론	55
References	58
Conferences & Publications	69
부록	70
감사의 글	76



A Study on Trajectory Tracking Control of Three Wheeled Omnidirectional Mobile Robot

Yu Mi Park

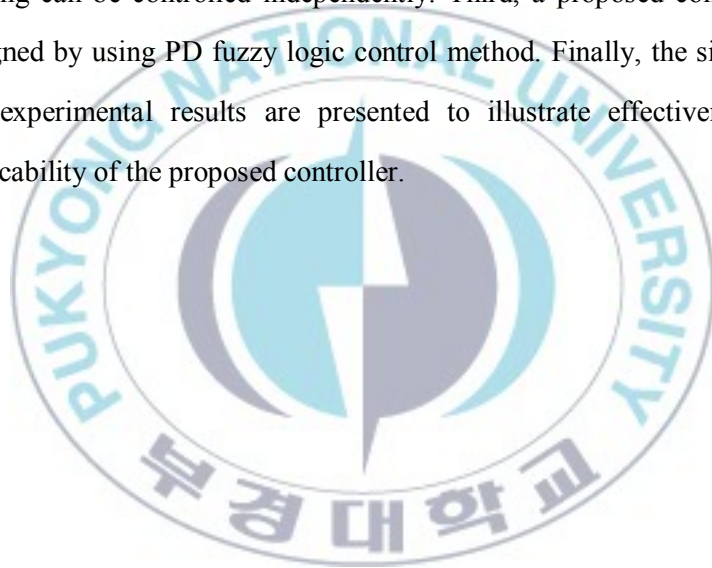
Dept. of Interdisciplinary Program of Mechatronics Engineering

The Graduate School, Pukyong National University

Abstract

In this paper, a decentralized motion control strategy based on fuzzy logic is applied to control an Omnidirectional Mobile Robot (OMR) to track a desired curved trajectory at a given bounded velocity. To do this work, first, an OMR is designed and manufactured. The OMR consists of body, driving part and control system. The driving part consists of three sets of omni wheel equally spaced at 120 degrees from one to another and three DC motor to drive them. The control system consists of industrial computer, motor driver and laser positioning system to implement the proposed controller. The laser positioning system calculates its own position and orientation on the basis of fixed reflectors positioned in the environment. Three detected reflectors in a layer are sufficient for position measurement. For position measurement, the laser positioning system measures the distance and angles from the OMR to the reflectors, and

works out its own position from this data. Second, kinematic modeling of the OMR is proposed. An error configuration including angle error, distance error and velocity error is defined and measured by using laser positioning system. Based on the error vector, a decentralized control strategy is developed. The motion of OMR is separated into three kind motions of moving including rotational moving, horizontal moving and vertical moving. By using omni wheel, the three kind motions of OMR moving can be controlled independently. Third, a proposed controller is designed by using PD fuzzy logic control method. Finally, the simulation and experimental results are presented to illustrate effectiveness and applicability of the proposed controller.



제 1 장 서 론

1.1 연구배경 및 동기

20세기 급속한 산업화 이후, 이동 및 수송수단의 발전은 가속화되고 있다. 현재 다양한 수의 바퀴(2~4륜, 6륜 등)를 이용한 차량이 개발되어 실용되고 있으며, 이와 함께 이동로봇에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

일반차량의 조향 원리는 전륜 및 후륜에 장착된 조향 장치를 이용하여 회전과 직선으로 이루어진 경로를 주행하는 것이다. 이러한 기존의 구동방식에는 움직임에 제약이 있게 된다. 예를 들어, 앞으로 움직이던 상태에서 차체를 직접 회전시키지 않고는 바로 옆으로 이동할 수 없게 된다. 따라서, 협소한 공간에서의 움직임이 어렵고, 원하는 위치에 도달하기 위하여 복잡한 경로의 계산이 필요하게 된다. 주행 중인 차량이 주어진 경로를 신속하게 주행하려면 홀로노믹(Holonomic) 시스템 특성이 필요하다. 홀로노믹 시스템은 별다른 회전과정없이 단순히 좌우로 이동만 하면 된다. 이러한 특성으로 우수한 기동성을 확보할 수 있고 좁은 공간에서 비홀로노믹 로봇보다 효율적이고 자유로운 주행이 가능하다. 전방향 휠(Omni-directional wheel)을 사용하면 민첩하고 원하는 방향으로 이동이 가능한 홀로노믹 이동로봇

시스템을 개발할 수 있다[1-5]. 그러므로 본 연구에서는 세 개의 전방향 휠을 이용한 홀로노믹 이동로봇을 개발한다. 전방향 휠은 바퀴의 회전에 의하여 자체적으로 구동력을 전달하는 능동 모드(Active mode)와 자체적으로 구동력을 전달하지 않고 자유롭게 회전할 수 있는 수동 모드(Passive mode)를 가짐으로서 평면상에서 3자유도(DOF: Degrees of freedom)를 갖는 바퀴이다[6]. 즉, 평면상에서 능동 구름(Active rolling) 방향의 자유도와 수동구름(Passive rolling) 방향의 자유도 및 접촉면에서의 미끄러짐(Slip)의 3자유도를 갖는다. 전방향 휠은 유니버설 휠(Universal wheel), 메카넘 휠(Mecanum wheel), 더블 휠(Double wheel) 등 여러 종류가 있다. 이 중에서 수직진동을 발생시키지 않고 3륜 구성이 가능한 더블 휠을 본 연구에 사용한다.

전방향 휠은 과거부터 현재까지도 적용 분야에 따라 다양한 형태가 연구 개발되고 있다[7-9]. 3자유도를 갖는 전방향 바퀴에 관한 연구는 Grabowiecki(1919), Blumrich(1974), Ilon(1975) 등에 의하여 기초적인 연구가 시작되어 Wheelon(Alvema,1982), Omni drive(Holland,1983), Ambulatory drive platform(Wier,1981) 등이 전동 휠체어에 적용을 시도하였다. 로봇에의 적용은 Unimation robot(Carlisle, 1983), Fetall(Johnsom, 1984) 등이 3륜 구조를 갖고 바퀴와 롤러가 90° 각도로 부착된 로봇을 개발하였다.

또한 주어진 경로를 정확히 추적하기 위한 전방향 주행형 차량의 제어에 관한 연구도 활발히 진행중이다. 먼저 N. Tlale 등은 4륜 구동 전방향 주행형 이동로봇 대차를 Fig. 1.1와 같이 구성하였으며, 운동학적 모델링과 동력학적 모델링을 제시하고, 2륜~4륜으로의 회전운동을 하기 위한 개념을 제시하였다[10].

하지만 엔코더, 3축 자이로미터, 3축 가속도 미터를 통합한 센서시스템으로 제시된 수학적 모델이 증명되었지만 구체적인 데이터를 제시하지 못했다. 또한 휠이 다양한 다른 속도를 가질 경우 이동대차의 거동을 제시하지 못했다. 또한 통합된 센서 시스템으로 직선운동의 휠 회전의 회전방향에 대해서만 제시하였다.

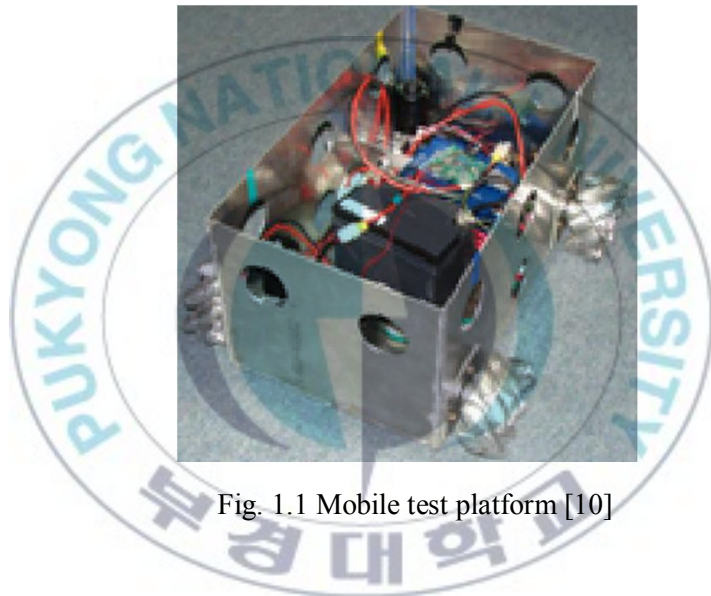


Fig. 1.1 Mobile test platform [10]

S. L. Dickerson 등은 기구학적 모델링을 사용하여 이동공간을 계산하여 전방향 구동을 하였으며, 전방향 휠의 롤러의 최대 및 최소반지름, 롤러의 수의 설계법을 제시하였다[11]. 하지만 시뮬레이션 결과가 부족하고 실험에 사용된 알고리즘 또한 불명확하다. P. Kiddee 등은 4륜 구동 전방향 주행형 차량로봇의 운동학적 모델링과 Lagrange 공식에 의한 동력학적 모델링을 제시하였고, 엔코더와 스테레오 비전시스템을 이용하여 이동물체인 사람을 추종하는 전방향 주행형 차량로봇의 제어기를

제시하였다[12]. 비전센서를 사용하여 목표점인 사람의 위치를 파악하여 추적하도록 하였는데, 위치오차는 차량이 이동할 때 발생하였으며, 카메라 측정시스템의 불정확성으로 측정된 데이터와 엔코더로 측정된 데이터와 큰 오차가 생기는 결과를 보여주었다. D. Tuan 등은 3륜 구동 전방향 주행 플랫폼의 경로추적을 슬라이딩 모드 제어기로 제어했지만 채터링(Chattering)이 많이 발생하였고, 파라미터가 많고 구하기가 어려웠다[13]. N. Hung 등도 슬라이딩 모드 제어기법을 이용하여 3륜 전방향 주행형 로봇을 제어했지만, 제어 입력의 급격한 스위칭(Switching)으로 인하여 진동(Vibration)이 많이 발생하였고, 동역학적 모델링을 제시했지만 과정이 복잡하였다[14]. 이외에도 현재 전방향 주행형 차량의 모델링 및 제어에 대한 많은 연구가 이루어져 있다[15-34].

기존의 전형적인 제어시스템은 제어 시스템의 수학적 모델을 알 수 있고, 규정된 제어환경에서는 성공적으로 작동하지만, 주위환경에 따른 파라미터의 변화 또는 외란에 대한 적응성이나, 시스템이 비선형이거나 모델을 얻을 수 없는 시스템에는 적용하기에 문제가 있다. 이에 반해 퍼지 제어기는 복잡한 수학적 모델링보다는 전문가의 지식이나 경험을 바탕으로 제어규칙을 생성하고 퍼지추론에 의해 제어 입력값을 도출하는 제어기다. 이러한 퍼지 제어기는 전문가의 지식을 기반으로 하며 종래의 수학적 모델링이 불가능하거나 비선형 특성을 갖는 계통의 시스템에서 제어가 가능하다[35-39]. 1965년 Zadeh가 퍼지집합을 소개한 후 퍼지집합과 퍼지 논리에 대한 이론적 실험적 연구결과가 많이 발표되었으며, 1973년 Mamdani가

퍼지논리를 스팀-엔진 제어에 처음으로 적용하였다. 네덜란드의 시멘트공장 제작회사인 F. L. Smith & Co.는 1979년 세계에서 최초로 퍼지논리를 시스템의 자동화에 적용하였다. 퍼지 제어기는 빠른 처리 속도와 강인성 등을 장점으로 갖고 있으며, 많은 산업 응용을 통하여 증명되었다. 노진석 등[40]은 이동 로봇의 장애물 회피를 위한 센싱 알고리즘과 퍼지 제어기를 제안하였다. 제안된 알고리즘은 여러 개의 초음파센서를 이용하여 위치 검출을 가능하게 하고, 알고리즘을 통해 얻은 데이터를 퍼지 제어기 기반의 이동로봇에 적용하였다. 하지만, 일반휠을 사용하여 장애물을 신속하게 피하지 못했고, 구체적인 실험 데이터를 제시하지 않았다. 김상대 등[41]은 세 개의 전방향 휠을 사용한 이동로봇의 동역학과 모터 비선형 운동방정식을 고려한 비선형 동역학 모델을 유도하여 제시하였고, 속도 제어로 퍼지 다층 제어(FMLC)시스템을 사용하였다. 하지만 시뮬레이션 결과가 충분하지 않고, 속도 제어만 하였고 위치 제어는 제시하지 않았다.

위와 같이 전방향 구동형 바퀴를 이용한 차량의 제어에 관한 연구와 그 구현에 대해 다양한 방법들이 연구되어 왔다. 위의 많은 연구로부터 바퀴의 전방향 구동성은 입증되었고, 이를 이용한 산업현장에서의 적용범위가 점차 확대되고 있다. 하지만 3륜 전방향 주행형 로봇의 곡선경로 추적 제어를 위해 퍼지 제어기를 적용한 연구는 아직 수행되지 않았다. 따라서, 퍼지 제어기에 의해 곡선 경로를 정확하게 추적할 수 있는 전방향 주행형 로봇의 연구가 절실히 필요하다.

1.2 연구목적 및 방법

지금까지 일반휠을 사용한 차량에 대한 연구는 수없이 많이 이루어진 상태이며[42-55], 그 실용성을 입증하여 차츰 산업 현장에서 그 활용범위를 넓혀 가고 있다. 마찬가지로 전방향 휠을 사용한 차량의 연구 또한 이미 많은 연구가 이루어진 상태이나 실용성과 안정성부재의 이유로 적용 범위와 활용도가 낮은 것이 사실이다.

위와 같은 단점을 극복하기 위해, 본 연구에서는 레이저 기반 위치 인식 시스템을 사용하여 전방향 주행형 로봇의 이점을 최대한 이용하면서 정확한 경로 추적 방법인 퍼지 경로 제어기를 제시한다. 이를 위해 세 개의 전방향 휠을 이용한 홀로노믹 이동로봇을 개발하고 레이저 기반 위치 측정 시스템을 적용한다. 전방향 휠은 바퀴의 회전에 의하여 자체적으로 구동력을 전달하는 능동모드와 자체적으로는 구동력을 전달하지 않고 자유롭게 회전할 수 있는 수동 모드를 가짐으로서 평면상에서 3자유도를 갖는 바퀴이다. 위치 인식 시스템 중 레이저 기반 위치 인식 시스템은 가장 높은 정확도와 정밀도를 가지고 있다. 레이저 기반 위치 인식 시스템인 SICK사의 NAV200을 이용하여 기준이 되는 위치 좌표를 선정하였다. NAV200은 정의된 위치에 미리 설치된 반사체(Reflector)를 회전하는 레이저를 이용하여 측정하고, 현재 위치를 내부 연산을 통하여 계산하여, 위치 및 방향을 RS-232통신을 이용하여 전송하는 시스템이다. 그리고

생성된 경로를 정확히 추적하기 위해서 로봇의 운동학적 모델링을 제시한다. 제시된 운동학적 모델링을 기준한 퍼지 제어기법을 이용한 경로 추적 제어기를 설계한다. 퍼지 제어기는 전문가의 지식을 기반으로 하며 종래의 수학적 모델링이 불가능하거나 비선형 특성을 갖는 계통의 시스템에서 제어가 가능하다.

위에서 설계된 제어기를 구현하기 위한 전방향 주행형 로봇의 제어시스템은 크게 메인컨트롤러부, 센서부, 모터드라이버부로 구성되어 있다. 제어시스템은 제어를 위한 Industrial computer와 차량의 위치를 구하기 위한 레이저 기반 위치 측정 시스템, 전방향 주행을 구현하기 위하여 각 휠마다 장착된 3개의 모터와 그 모터를 구동시키는 모터드라이브, 그리고 각 모터의 회전속도를 계산하기 위한 엔코더로 구성된다. 시스템은 센서 데이터와 엔코더 데이터를 수집하고, 3개의 모터를 구동하기 위해 각각 모터드라이브를 연결한다. 메인컨트롤러부와 모터드라이버부, 센서부는 RS232방식을 이용하여 데이터를 주고받는다.

마지막으로 전방향 주행형 로봇의 곡선 경로 추적을 위해 설계된 제어기의 유효성을 검증하기 위해 시뮬레이션과 실험 결과를 제시한다.

1.3 연구내용 및 범위

전방향 주행형 로봇의 구성과 운동학적 모델링을 제시하고, 이를 기준하여 전방향 주행형 로봇을 제어하기 위한 퍼지 경로 제어기를 제안하고, 제안된 제어기를 적용하여 시뮬레이션 및 실험을 통해 그 타당성을 검증한다. 본 연구의 구성은 다음과 같이 이루어 진다.

제 1장 : 서론 부분으로 전방향 휠과, 전방향 주행형 로봇의 연구 동향을 살펴보고 이에 따른 연구의 필요성과 목적을 제시한다. 그리고 연구 방법에 대한 간략한 소개와 함께 본 연구의 구성 및 그 내용을 개략적으로 제시한다.

제 2장 : 전방향 주행형 로봇의 전체적인 구성을 도면과 함께 설명한다. 그리고 전방향 휠의 종류와 구조적 특성 및 구동원리를 소개하고, 레이저 기반 위치 측정 시스템에 대해 설명한다. 그리고 메인컨트롤러부(Main controller), 모터드라이버부, 센서부로 구성된 제어 시스템을 설명한다. 마지막으로 로봇의 기하학적 구성을 설명한 뒤, 이를 바탕으로 운동학적 모델링을 제시한다.

제 3장 : 전방향 주행형 로봇의 곡선 경로를 정확히 추적하기 위해 운동학적 모델링을 바탕으로 퍼지 제어를 설계한다.

제 4장 : 전방향 주행형 로봇에 대한 시뮬레이션과 실험결과를 통하여 앞에서 제안된 제어기의 유효성을 보인다.

제 5장 : 본 연구의 결론 및 장래의 연구에 대한 내용을 기술한다.



제 2 장 전방향 주행형 로봇의 구성 및 모델링

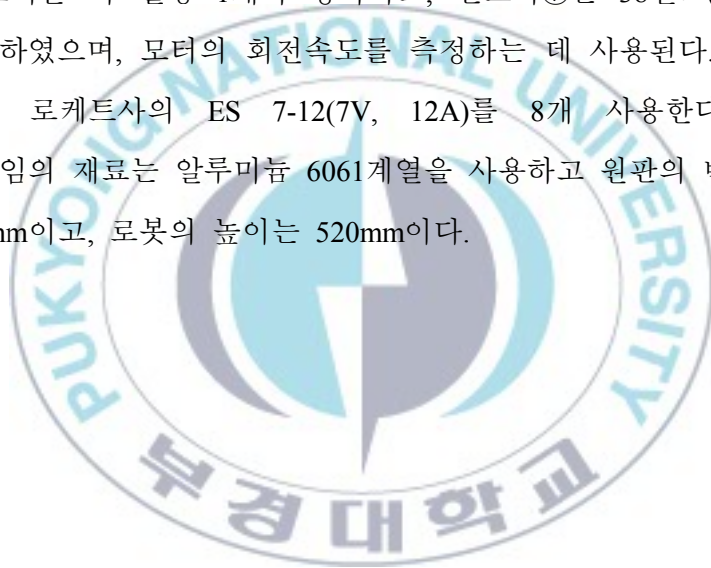
본 장은 전방향 주행형 로봇의 전체적인 구성을 도면과 함께 설명하고 전방향 휠의 종류와 구조적 특성 및 구동원리를 소개하며, 레이저 기반 위치 측정 시스템에 대해 설명한다. 그리고 메인컨트롤러부, 모터드라이버부, 센서부로 구성된 제어 시스템을 설명한다. 마지막으로 로봇의 기하학적 구성을 설명한 뒤, 이를 바탕으로 운동학적 모델링을 제시한다.

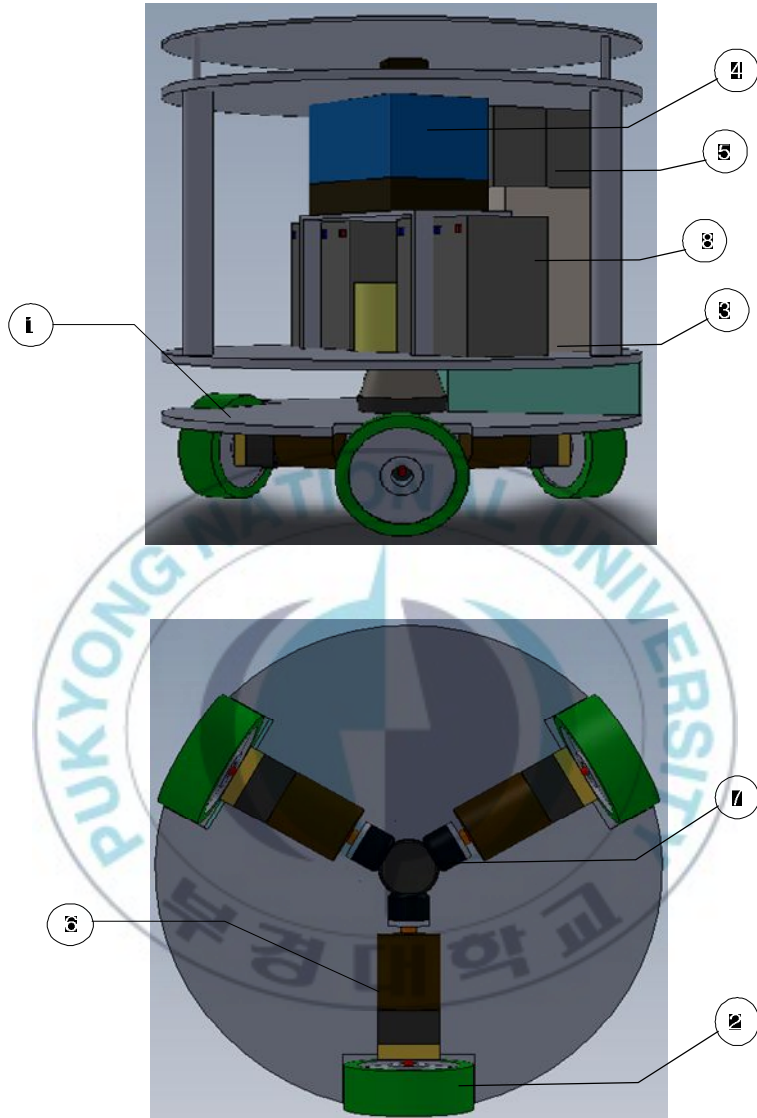
2.1 전방향 주행형 로봇의 구성

전방향 주행형 로봇의 전반적인 시스템 구성은 Fig. 2.1과 같이 나타낸다. 전방향 주행형 로봇의 구성은 기구시스템과 제어 시스템으로 나뉜다.

전방향 주행형 로봇의 기구시스템은 Fig. 2.1에서 나타내는 것과 같이 원 모양의 차체①에 3개의 구동 전방향 휠②을 장착한 형태로 구성되어 있다. 제어시스템은 메인컨트롤러부③, 센서부④, 모터드라이버부⑤로 구성되어 있다. 메인컨트롤러부는 센서부로부터 받은 위치 데이터에 근거하여 각각의 전방향 휠에 맞는 속도값을 모터 드라이버부로 전달한다. 센서부의 레이저 기반 위치 측정 시스템(NAV200)은 정의된 위치에 미리 설치된

반사체(reflector)를 회전하는 레이저를 이용하여 측정하고, 현재 위치를 내부 연산을 통하여 계산하여, 위치 및 방향을 RS-232 통신을 이용하여 전송하는 시스템이다. 모터드라이브는 각 모터당 하나씩 연결하여 세 개를 사용하였고 SMD(Surface Mount Devices)타입으로 개발하여 크기를 소형화한다. 모터드라이브의 컨트롤러는 PIC18F2431을 사용하고 레지스터는 IRF460을 사용한다. 또한, 모터⑥는 12:1의 감속기를 장착한 24V 4000rpm의 DC모터를 각 휠당 1개씩 장착하고, 엔코더⑦는 38펄스(Pulse)를 사용하였으며, 모터의 회전속도를 측정하는 데 사용된다. 배터리 ⑧는 로케트사의 ES 7-12(7V, 12A)를 8개 사용한다. 로봇 프레임의 재료는 알루미늄 6061계열을 사용하고 원판의 반지름은 275mm이고, 로봇의 높이는 520mm이다.





①	Body Frame	⑤	Motor Drive
②	Omni-wheel	⑥	Motor
③	Main controller	⑦	Encoder
④	Laser Sensor	⑧	Battery

Fig. 2.1 Configuration of omni-directional mobile robot

Fig. 2.2는 본 연구에 사용된 실제 전방향 주행형 차량을 나타내며, Fig. 2.3은 본 연구에 사용된 실제 모터와 엔코더 그리고 전방향 휠을 나타낸다. 여러 종류의 전방향 휠 중 더블휠을 사용하며, 휠은 120° 을 이루며 3개가 장착되어 각각 DC모터에 의해 구동된다. Fig. 2.4는 실제 사용된 메인 컨트롤러부와 센서부를 나타내고, Fig. 2.5는 모터 컨트롤러에 사용된 모터드라이버와 전원 연결선 부분을 나타낸다.



Fig. 2.2 Omni-directional mobile robot

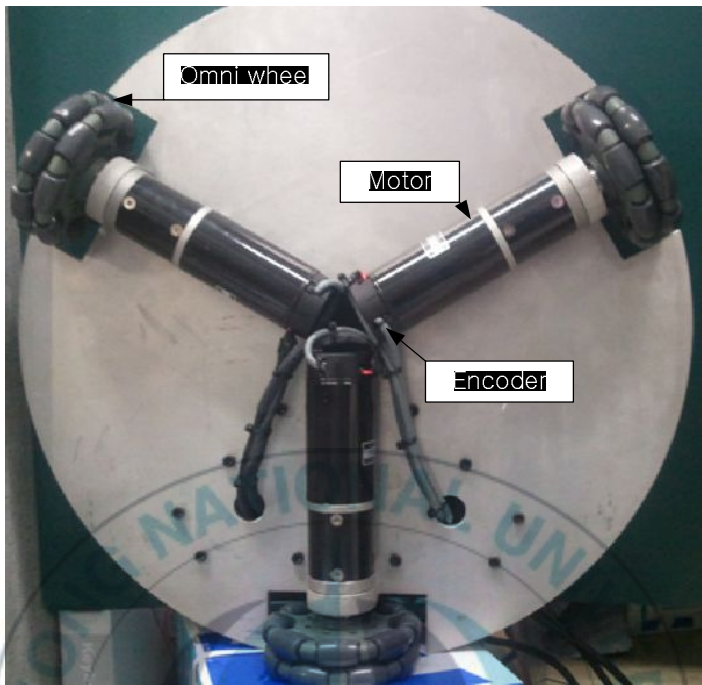


Fig. 2.3 Omni-wheel and motor of omni-directional mobile robot

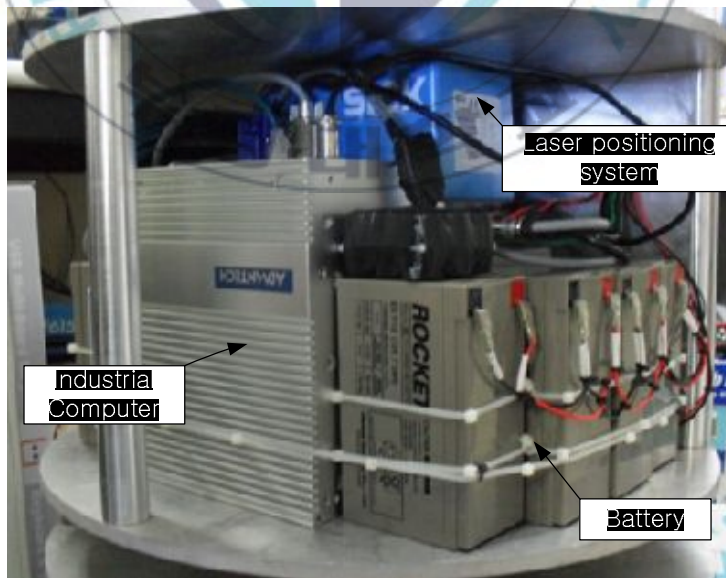


Fig. 2.4 Main controller and laser positioning system

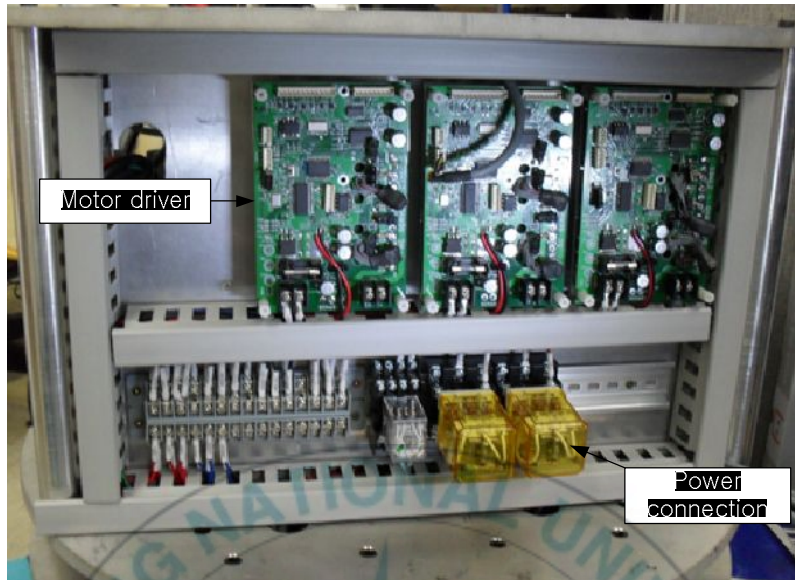
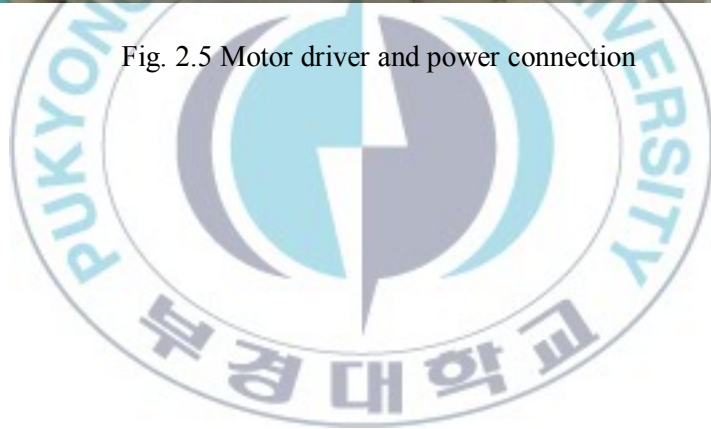


Fig. 2.5 Motor driver and power connection



2.2 전방향 휠의 종류와 특징

전방향 휠은 바퀴의 회전에 의하여 자체적으로 구동력을 전달하는 능동모드(Active mode)와 자체적으로 구동력을 전달하지 않고 자유롭게 회전할 수 있는 수동 모드(Passive mode)를 가짐으로서 평면상에서 3자유도(DOF: Degrees of freedom)를 갖는 바퀴이다. 즉, 평면상에서 능동 구름(Active rolling) 방향의 자유도와 수동구름(Passive rolling) 방향의 자유도 및 접촉면에서의 미끄러짐(Slip)의 3자유도를 갖는다. 이러한 전방향 휠의 운동은 바퀴의 회전과 롤러의 회전의 조합에 의하여 결정되기 때문에, 이동체에 각각 독립적으로 구동되는 3개 이상의 전방향 바퀴를 사용하게 될 경우, 이 이동체는 전방향으로 이동이 가능하게 된다.

전방향 휠은 과거부터 현재까지도 적용 분야에 따라 다양한 형태가 연구되어 개발되고 있으며, Figs. 2.6 ~ 2.8은 각각 유니버설 휠(Universal wheel)과 더블 휠(Double wheel)을 사용한 실험용 로봇, 메카넘 휠(Mecanum wheel)을 사용한 산업용 AGV(Automated guided vehicle)를 나타낸다.

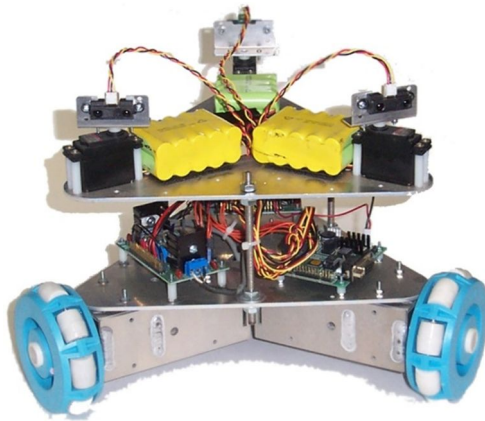


Fig. 2.6 Omni-directional robot using universal wheel

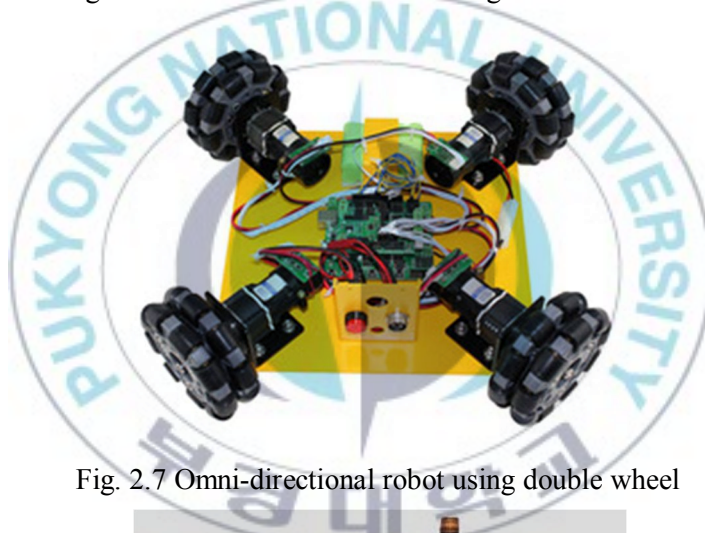


Fig. 2.7 Omni-directional robot using double wheel



Fig. 2.8 Omni-directional AGV using mecanum wheel

앞서 언급한 주요 전방향 휠의 특징은 다음과 같다[56].

첫 번째로 유니버설 휠은 전방향 바퀴 중 가장 고전적인 것으로서, Fig. 2.9과 같이 서로 다른 회전축을 자유롭게 회전할 수 있는 여러 개의 수동 롤러로 구성된다. 이때, 각 수동 롤러의 회전축은 바퀴의 원주와 접하는 방향으로 구성된다[57]. 유니버설 휠은 각 수동 롤러의 간격으로 인하여 지면과의 접촉이 불연속적으로 발생하게 되며, 따라서 차량의 병진 운동시에 수직방향의 진동이 발생하게 된다. 하지만, 바퀴의 구성이 단순하며, 수평진동이 발생하지 않는다는 장점이 있다.



Fig. 2.9 Universal wheel

두 번째로 메카넘 휠은 수직 방향의 진동을 제거하기 위하여 제안된 전방향 바퀴로 Fig. 2.10과 같이 수동 롤러를 바퀴 축에 대하여 45° 기울여 배치한 형태를 갖는다. 이는 역학적으로 휠 회전방향의 $\pm 45^\circ$ 방향으로 힘이 발행할 수 있도록 하기 위한 것이다. 또한 메커넘 휠은 차량의 좌측과 우측에 장착되는 휠이

좌우대칭을 이루도록 설계되어 있으며, 각각의 휠은 개별적으로 모터를 장착하고 있다. 각 휠의 회전방향과 회전속도를 독립적으로 다양하게 조절하여 전방향으로 주행할 수 있도록 하기 위함이다. 메카넘 휠의 수동 롤러와 지면은 연속적으로 접촉하기 때문에 수직 진동은 발생하지 않는다. 하지만, 지면과의 접촉점이 불연속이기 때문에 병진운동시에 수평방향의 진동이 발생하며, 수동 롤러의 간격에 의하여 굴곡지면에서의 주행이 제한되는 단점이 있다. 또한, 3륜 구성시에 3개의 메카넘 휠만으로 구성하여 주행이 불가능하며, 회전운동을 할 때에는 차량 몸체의 중심에서 바퀴까지의 반지름이 불연속 접촉시마다 변화되기 때문에 바퀴가 일정한 각속도로 회전하더라도 차량의 회전속도가 일정하지 않다는 단점이 있다. 더구나, 메카넘 휠은 바퀴 자체가 감속기 역할을 수행하기 때문에 바퀴의 관성 모멘트를 증가시키는 것과 동일한 효과를 나타내므로 주행시 구동효율을 저하시키게 된다.



Fig. 2.10 Mecanum wheel

마지막으로 더블 휠은 수직 방향의 진동을 제거하기 위하여 제안된 전방향 바퀴로서 Fig. 2.11과 같이 유니버설 휠을 두 개 겹쳐서 배치한 형태를 갖는다. 더블 휠은 역시 구성이 단순하고, 유니버설 휠과는 달리 수직 진동을 발생시키지는 않는다. 그리고 3륜 구성시에 3개의 메카넘 휠만으로 구성하여 주행이 불가능하나 더블 휠은 가능하다. 따라서 본 연구에서는 수직 진동을 발생시키지 않고 3륜 구성이 가능한 더블 휠을 사용한다.



Fig. 2.11 Double wheel

2.3 레이저 기반 위치 측정 시스템의 특징

Fig. 2.12는 본 연구에서 사용된 레이저 기반 위치 측정 시스템(NAV200)을 나타낸다. 위치인식 시스템 중 레이저 기반 위치 인식 시스템은 가장 높은 정확도와 정밀도를 가지고 있다.

NAV200은 SICK사에서 만든 레이저 기반 위치 측정 시스템(Laser positioning system)이다. 이는 실내 위치 인식을 위하여 만들어졌으며, Positioning mode에서 현재의 위치와 방향을 반복적으로 계산하여 연속적으로 시스템의 절대좌표를 알려 준다. NAV200은 레이저를 이용하여 현재 위치를 정확하게 측정할 수 있기 때문에 AGV의 Navigation system에 주로 사용된다.



Fig. 2.12 Laser positioning system NAV200

NAV200은 Fig. 2.13과 같이 정의된 위치에 미리 설치된 반사체(Reflector)를 회전하는 레이저를 이용하여 측정하고, 현재 위치를 내부 연산을 통하여 계산하여, 위치 및 방향각을 RS-232 통신을 이용하여 전송하는 시스템이다. 이 시스템은 정밀도가 높은 레이저를 이용하여 다른 전역 위치측정 장치들에 비해 외란에 강하며 정밀도가 높다. 측정에 사용되는 레이저는 $\lambda=855\text{mm}$ 의 적외선 영역의 파장을 이용함으로 사람의 눈이나 피부에 안전하면서도, 사람의 눈에 보이지 않는다.

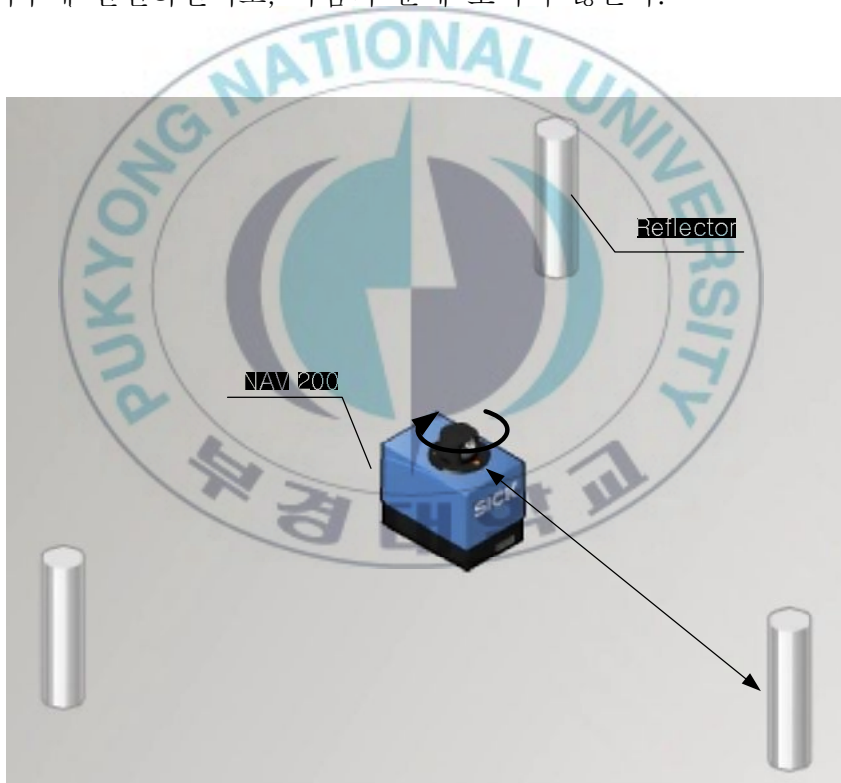


Fig. 2.13 Position measurement of the NAV200 by detection of reflector arrangements

NAV200의 회전 측정 헤드(rotating scanner head)는 360°을 8Hz(±10%) 주기로 회전하면서, 1.2m~28.5m 범위의 반사체를 측정한다. 이 때 측정 오차는 반사체와의 평균 거리에 따라 좌표 오차는 ±4mm~±25mm 이고, 각도 오차는 ±1° 이다. 이렇게 측정된 현재 위치 $C(x,y,\theta)$ 는 Fig. 2.14의 절대 좌표 위치 (x,y) 와 방향각 θ 이다[58].

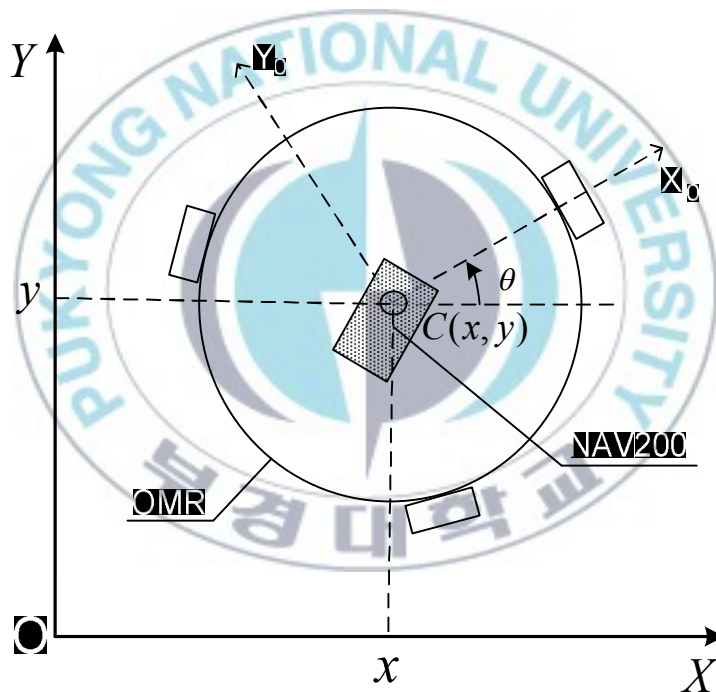


Fig. 2.14 Absolute and local coordinate system of the NAV200

Fig. 2.15은 NAV200의 전용 소프트웨어를 이용하여 작동시킨 결과이다. 반사체의 위치와 레이저 센서의 위치를 정확한 좌표로 알려준다. 레이저 기반 위치 측정 시스템의

헤더가 360° 회전하면서 레이저를 송신한 뒤 반사체에 반사되어 되돌아 오는 레이저를 수신해 반사체의 거리를 계측하고 이미 알고 있는 반사체의 정보와의 매칭을 통해 위치와 방향을 계산한다. 즉, 고정된 반사체를 통해 시스템의 위치와 방향을 알 수 있다.

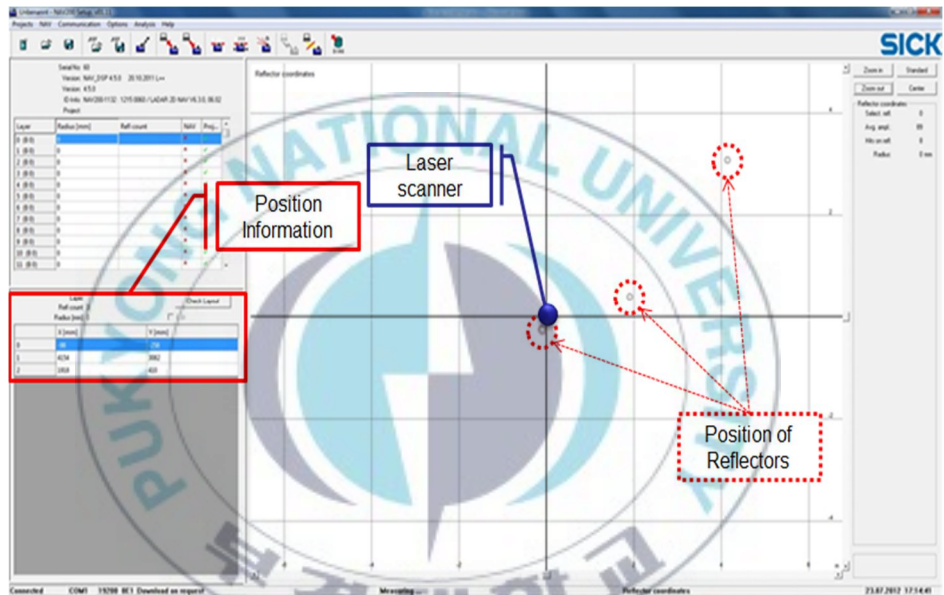


Fig. 2.15 Measured result of using NAV200 software

2.4 전방향 주행형 로봇의 제어시스템

전방향 주행형 로봇의 제어 시스템의 구성은 Fig. 2.16과 같다.

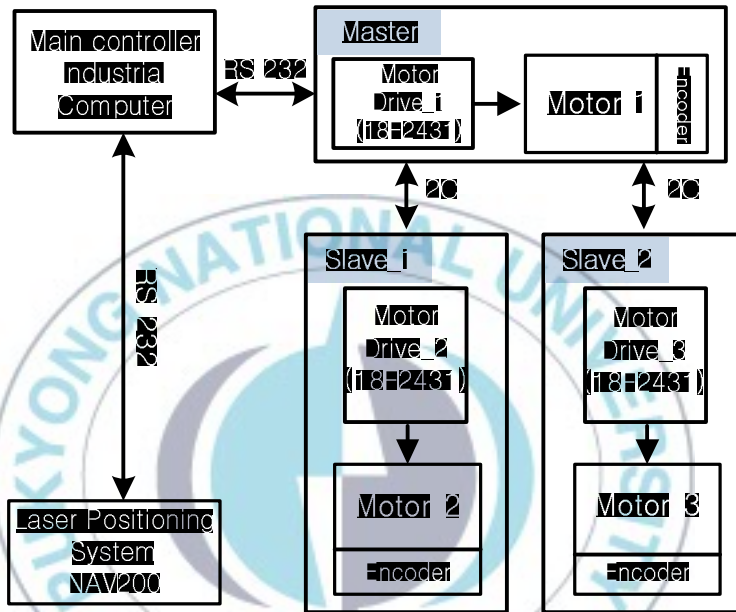


Fig. 2.16 Configuration of omni-directional mobile vehicle control system

전방향 주행형 로봇의 제어시스템은 크게 메인컨트롤러부, 센서부, 모터드라이버부로 구성되어있다. 제어시스템은 제어를 위한 Industrial computer와 차량의 위치를 구하기 위한 레이저 기반 위치 측정 시스템, 전방향 주행을 구현하기 위하여 각 휠마다 장착된 3개의 모터와 그 모터를 구동시키는 모터드라이브, 그리고 각 모터의 회전속도를 계산하기 위한 엔코더로 구성된다.

메인컨트롤러부와 모터드라이버부, 센서부는 RS232방식을 이용하여 데이터를 주고 받는다.

메인컨트롤러부의 Industrial computer는 경로 추적 제어에 사용될 차량의 위치를 구하기 위해 레이저 기반 위치 측정 시스템(NAV200)으로부터 데이터를 획득하고 모터드라이브로부터 계산된 휠의 회전속도를 반영하여 주어진 주행경로를 추종하기 위한 제어를 수행한다.

모터드라이버부는 각 휠에 장착된 엔코더로부터 휠의 회전수를 받아 샘플링 시간(10ms)동안의 회전속도를 계산한다. 엔코더는 모터 1회전당 38펄스(Pulse)를 발생시키며, 모터축에 연결하여 모터의 회전수를 측정한다. 각 모터를 구동시키기 위해 모터 드라이버로 PWM신호를 발생시킨다. 모터드라이브는 각 모터당 하나씩 연결하여 세 개를 사용하고, Fig. 2. 17에서 보듯이 SMD타입으로 개발하여 크기를 소형화한다.



Fig. 2.17 Motor driver

3개의 모터 드라이브를 구동하기 위해 Master용 1개의 PIC18F2431과 Slave용 2개의 PIC18F2431로 나누어 구성했으며, Master와 Slave는 I2C방식을 이용하여 데이터를 주고 받는다. 각 휠에 장착된 모터는 24V/15W 4000rpm의 DC모터로서 모터축과 휠은 별도의 기어와 풀리의 사용 없이 직접적으로 연결되어 있다.

센서부의 레이저 기반 위치 측정 시스템(NAV200)은 정의된 위치에 미리 설치된 반사체(Reflector)를 회전하는 레이저를 이용하여 측정하고, 현재 위치를 내부 연산을 통하여 계산하여, 위치 및 방향을 RS-232통신을 이용하여 전송하는 시스템이다. 즉, 레이저 기반 위치 측정 시스템의 헤더가 360° 회전하면서 레이저를 송신한 뒤 반사체에 반사되어 되돌아 오는 레이저를 수신해 반사체의 거리를 측정하고 이미 알고 있는 반사체의 정보와의 매칭을 통해 위치와 방향을 계산한다.

2.5 전방향 주행형 로봇의 운동학적 모델링

2.5.1 전방향 주행형 로봇의 기하학적 구성

본 절에서는 전방향 주행형 로봇의 기하학적 구성을 제시한다. 전방향 구동형 차량은 Fig. 2.18에서 보는 바와 같이 세 개의 전방향 구동형 휠이 각각 120° 로 구성된다. 로봇의 질량중심(C)은 좌우대칭점과 일치하다고 가정한다. Fig. 2.18의 OXY 은 고정좌표계이고, CX_0Y_0 은 이동좌표계이다. 세 개의 전방향 구동형 휠은 r 로 정의된 똑같은 반지름을 가지고 DC모터에 의해 구동된다. L 은 휠의 중심과 기하학 중심 C 사이의 거리이다.

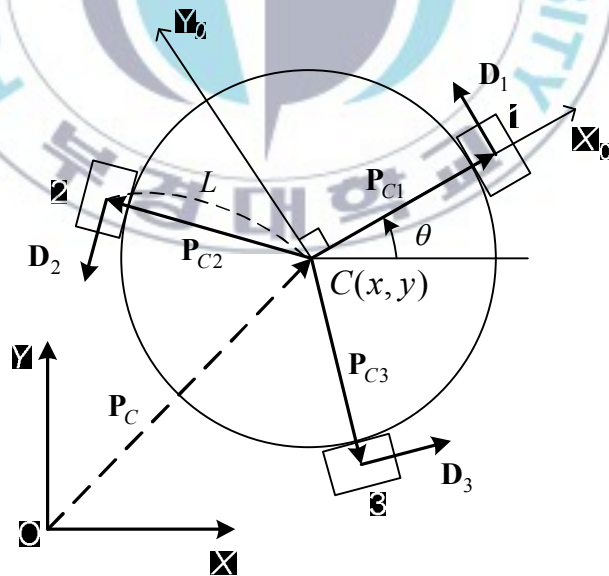


Fig. 2.18 Configuration for geometric model of the OMR

2.5.2 전방향 주행형 로봇의 운동학적 모델링

본 절에서는 전방향 주행형 로봇의 운동학적 모델링을 제시한다. 모델링을 위해 다음과 같이 가정한다.

- 전방향 휠은 회전하거나 미끄러지지 않는다.
- 전방향 주행형 로봇의 몸체는 강체이다.
- 전방향 주행형 로봇은 2차원 평면에서만 이동한다.
- 외부 외란은 존재하지 않는다.

각 휠의 위치 벡터는 이동좌표계의 \mathbf{P}_{Ci} ($i=1, 2, 3$)로 표현하며, 회전행렬과 함께 나타낼 수 있다. (θ 는 반시계 방향이다)

단위 회전 행렬 $R(\theta)$ 과 i 번째 휠 까지의 위치벡터(\mathbf{P}_{Ci})을 전방향 주행형 로봇의 무게 중심에 대한 이동 좌표계로 나타내어 보면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\mathbf{R}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix}, \quad (2.1)$$

$$\mathbf{P}_{C1} = L \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2.2)$$

$$\mathbf{P}_{C2} = \mathbf{R}\left(\frac{2\pi}{3}\right) \times \mathbf{P}_{C1} = \frac{L}{2} \begin{bmatrix} -1 \\ \sqrt{3} \end{bmatrix}, \quad (2.3)$$

$$\mathbf{P}_{C3} = \mathbf{R}\left(\frac{4\pi}{3}\right) \times \mathbf{P}_{C1} = -\frac{L}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ \sqrt{3} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

i 번째 휠에 대한 구동 방향 벡터 \mathbf{D}_i 은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{D}_i = \frac{1}{L} \mathbf{R}\left(\frac{\pi}{2}\right) \times \mathbf{P}_{Ci} \quad (2.5)$$

$$\mathbf{D}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{D}_2 = -\frac{1}{2} \begin{bmatrix} \sqrt{3} \\ 1 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{D}_3 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \sqrt{3} \\ -1 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

전방향 주행형 로봇의 고정좌표계에 대한 자세 벡터는 $\mathbf{q} = [x \ y \ \theta]^T$ 로 나타낸다. $\mathbf{P}_C = [x \ y]^T$ 는 고정좌표계에서 점 C 의 위치벡터로 정의된다.

$\mathbf{P}_C(x \ y)$ 는 로봇의 무게 중심에 대한 직각좌표계(Cartesian coordinate system)로 나타낸 점 C 의 위치좌표이며, 고정 좌표계에서 로봇의 위치이다.

i 번째 휠의 위치 벡터(\mathbf{P}_i)와 선속도 벡터($\mathbf{v}_i = \dot{\mathbf{P}}_i$)는 고정 좌표계에서 다음과 같이 나타낸다.

$$\mathbf{P}_i = \mathbf{P}_C + \mathbf{R}(\theta) \mathbf{P}_{Ci} \quad (2.7)$$

$$\mathbf{v}_i = \dot{\mathbf{P}}_C + \dot{\mathbf{R}}(\theta) \mathbf{P}_{Ci} \quad (2.8)$$

또한, i 번째 휠에 대한 선속도는 앞에서 구한 구동 방향

벡터(\mathbf{D}_i)를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{v}_i = \mathbf{v}_i^T (\mathbf{R}(\theta) \mathbf{D}_i) \quad (2.9)$$

Eq. (2.8)를 Eq. (2.9)에 대입하면, 다음 식을 구할 수 있다.

$$\mathbf{v}_i = \dot{\mathbf{P}}_C^T \mathbf{R}(\theta) \mathbf{D}_i + \mathbf{P}_{C_i}^T \dot{\mathbf{R}}^T(\theta) \mathbf{R}(\theta) \mathbf{D}_i \quad (2.10)$$

Eq. (2.10)의 오른쪽의 두 번째 항을 v_1 에 대하여 풀이해 보면, 아래 Eq. (2.11)과 같이 $L\dot{\theta}$ 로 구할 수 있다. Eq. (2.11)에 대한 증명은 부록A에 두 번째 항에 제시되어 있다.

$$\mathbf{P}_{C_i}^T \dot{\mathbf{R}}^T(\theta) \mathbf{R}(\theta) \mathbf{D}_i = L\dot{\theta} \quad (2.11)$$

각 휠의 선속도에 대하여, Eqs. (2.10)~(2.11)으로부터, Eq. (2.12)를 다음과 같이 구할 수 있다. Eq. (2.12)에 대한 증명은 부록 A에 제시되어 있다.

$$\mathbf{v}_i = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\theta & \cos\theta & L \\ -\sin(\pi/3-\theta) & -\cos(\pi/3-\theta) & L \\ \sin(\pi/3+\theta) & -\cos(\pi/3+\theta) & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

휠의 각속도 벡터는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\boldsymbol{\omega} = \frac{1}{r} \mathbf{v}_i, \quad (2.13)$$

$$\boldsymbol{\omega} = \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} -\sin\theta & \cos\theta & L \\ -\sin(\pi/3-\theta) & -\cos(\pi/3-\theta) & L \\ \sin(\pi/3+\theta) & -\cos(\pi/3+\theta) & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \frac{1}{r} \mathbf{A} \dot{\mathbf{q}} \quad (2.14)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\sin\theta & \cos\theta & L \\ -\sin(\pi/3-\theta) & -\cos(\pi/3-\theta) & L \\ \sin(\pi/3+\theta) & -\cos(\pi/3+\theta) & L \end{bmatrix}$$

$$\dot{\mathbf{q}} = r \mathbf{A}^{-1} \boldsymbol{\omega} \quad (2.15)$$

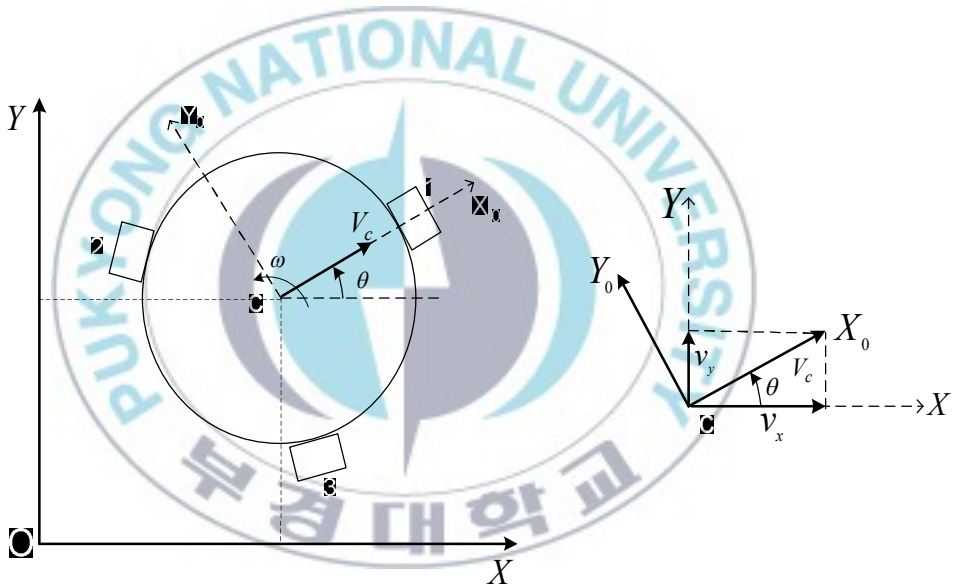


Fig. 2.19 Configuration for geometric model of the OMR

고정좌표계에서 V_c 와 ω 는 로봇중심 C 의 선속도와 각속도로 가정한다. 로봇의 선속도 벡터, $\mathbf{V}_c = [v_x \ v_y]^T$ 는 X_0 축 v_x 와 Y_0 축 v_y 로 두 개의 성분으로 나눌 수 있다.

고정좌표계에서 전방향 주행형 로봇의 운동방정식은 다음과 같다.

$$\dot{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (2.16)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{u} = [v_x \ v_y \ \dot{\theta}]^T$$

Eqs. (2.13)~(2.16)로부터 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\boldsymbol{\omega} = \frac{1}{r} \mathbf{A}\mathbf{B}\mathbf{u} \quad (2.17)$$

제 3장 퍼지제어기법을 이용한 제어기 설계

본 장에서는 퍼지 제어 시스템의 구성 및 특징을 설명하고 곡선 경로를 추적하기 위한 퍼지 제어기의 설계를 소개한다. 2장에서 제시한 운동학적 모델을 바탕으로 하여 퍼지제어기법을 이용하여 경로추적 제어기(Path tracking controller)를 설계한다.

3.1 퍼지 시스템의 구성 및 특징

퍼지 제어는 인간의 판단성, 애매성에 기초하여 불확실한 제어 대상의 모델링으로부터 전문가의 지식을 바탕으로 제어 알고리즘을 IF-Then 형식으로 표현되는 논리적 언어 형태의 제어이다. Fig. 3.1은 프로세서를 제어하는 퍼지 제어기의 구성도를 나타낸다.

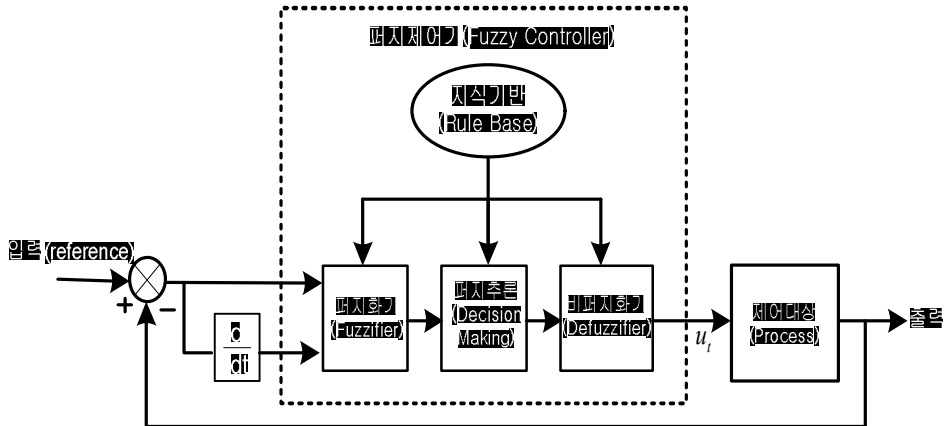


Fig. 3.1 Structure of fuzzy logic system

퍼지 제어기의 구성은 입력변수를 받아 양자화 하는 입력부분, 규칙을 추론하는 제어기 부분, 추론된 값을 비퍼지화하는 출력 부분으로 이루어진다. Fig. 3.1에서 퍼지 제어기 설계시 결정해야 할 주요사항은 다음과 같다[59].

- 퍼지제어기의 입출력변수들과 그들의 퍼지값 결정
- 지식기반(즉, 제어규칙)의 설계
- 수치적인 입력 변수값의 퍼지화 방법
- 추론 방법 결정
- 출력 퍼지값의 비퍼지화 방법의 결정

기존의 제어기와 퍼지 제어기의 차이점은 다음과 같다[60].

- a. 제어법칙은 제어대상의 수학적 모델을 기반으로 하여 작성되나, 퍼지제어규칙은 숙련자의 경험적 지식과 제어전문가의 지식을 활용하여 숙련운전자의 조작행위를 모델링하여, 제어대상의 퍼지모델을 작성하여, 제어가 자체적으로 제어규칙을 작성한다.
- b. 제어법칙은 제어기의 입력과 출력사이의 관계가 함수 관계이나, 퍼지제어규칙은 제어기의 입출력 관계가 if-then 형식의 퍼지관계이다. 특히 퍼지제어규칙은 입출력관계를 언어적으로 기술하기 때문에 정량적이라기보다는 정성적이다. 또한 퍼지제어기법은 입출력 사이의 관계를 애매한 언어로 표현하기 때문에 기존의 제어기법으로는 다루기 힘든 잘 정의되지 않는 시스템을 다루기에 적합하다.
- c. 제어법칙은 법칙 하나로 제어기의 입력과 출력 사이의 관계를 기술한다. 오차 e 의 모든 값에 대하여 함수로 제어기의 출력 u 를 결정한다. 그러나 퍼지제어기는 제어기의 입력 e 와 Δe 가 가질 수 있는 상황별로 제어규칙을 작성하고, 모든 상황에 대하여 제어기의 출력을 기술하므로 여러 개의 제어규칙이 필요하다.
- d. 제어법칙은 상태평가 제어법칙이나 퍼지제어규칙은 상태평가 또는 목적평가 제어규칙으로 작성할 수 있다.

- e. 퍼지제어에서는 근사추론과정이 필요하고 제어기의 하드웨어와 소프트웨어가 복잡하나, 제어규칙의 변경이 용이하고 제어기에 학습기능부여가 용이하다.
- f. 퍼지제어기는 기존의 제어기에 비하여 강인하다.

퍼지제어기는 관점에 따라 여러 가지로 분류할 수 있다. (1) 제어기에서 사용하는 신호의 종류에 따라 아날로그 퍼지제어기와 디지털 퍼지제어기로 분류할 수 있고, (2) 퍼지제어기가 제어규칙의 창출기능, 학습기능, 또는 자기동조기능을 보유 상태에 따라 일반적인 퍼지제어기, 자기학습 퍼지제어기, 자기동조 퍼지제어기, 적응 퍼지제어기로 분류할 수 있으며, (3) 제어규칙의 if 부분의 특성에 따라 상태평가 퍼지제어기와 목적 평가 퍼지제어기로 분류할 수 있다. 또한, (4) 제어규칙 결론부에 따라 위치형 퍼지제어기와 속도형 퍼지제어기로 분류할 수 있다.

본 연구에서는 위치형 퍼지 제어기 중 PD퍼지제어기를 사용한다. PD퍼지제어기는 다음과 같이 기술된다.

$$u = K_p \{e + T_d \dot{e}\} \quad (3.1)$$

K_p 는 비례이득, T_d 는 미분시간이라 한다.

PD퍼지제어기는 입력변수 e 와 그 도함수 \dot{e} 로부터 조작량 u 를 얻어내고 제어규칙은 'IF e is PB and \dot{e} is NS, THEN u is PM' 이다.

여기서 PB, NS, PM과 같이 명확하지 않은 언어적인 값은 퍼지 라벨(Fuzzy Label)이라고 한다. 일반적인 퍼지제어기에서는 이러한 퍼지 라벨을 Table. 3.1처럼 7가지 경우로 구분하여 사용한다.

Table 3.1 Fuzzy Label

PB	Positive Big
PM	Positive Medium
PS	Positive Small
Z0	Zero
NS	Negative Small
NM	Negative Medium
NB	Negative Big

3.2 곡선 경로 추적을 위한 퍼지 제어기의 설계

전방향 주행형 로봇의 추적 오차에 대한 구성이 Fig. 3.2와 Fig. 3.3에 나타나 있다. 제어기의 목표는 설계된 제어칙에 의해 전방향 주행형 로봇의 중심 C 가 곡선 추적 경로 위의 접점 $R(x_r, y_r)$ 을 목표 속도 v_r 로 로봇의 방향벡터 \mathbf{P}_{C1} 과 같은 방향으로 추종할 수 있도록 하는 것이다.

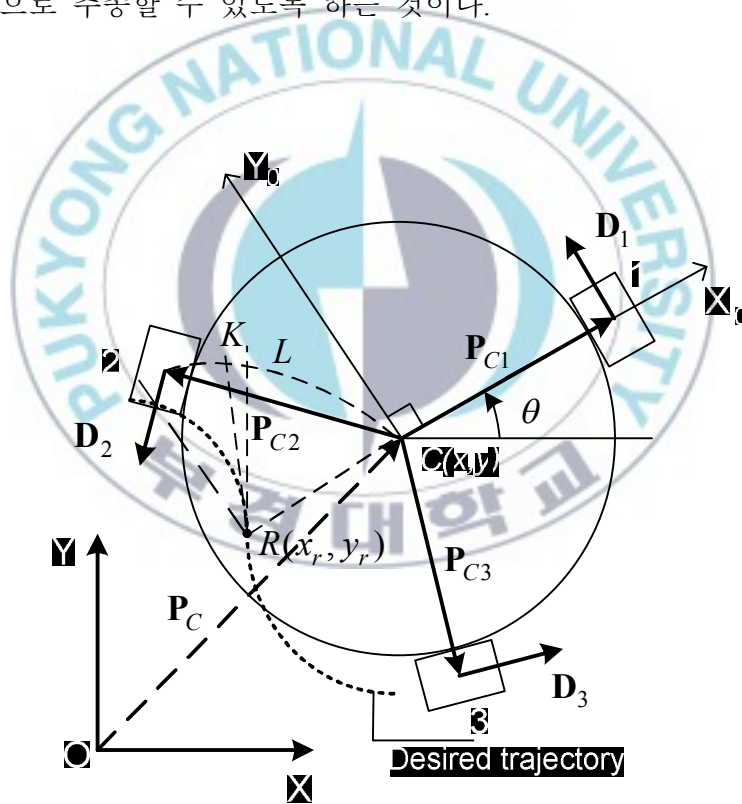


Fig. 3.2 Configuration of tracking errors

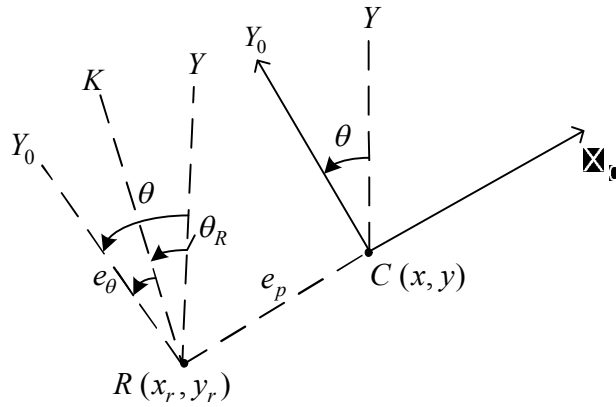


Fig. 3.3 Configuration of tracking errors

$\overline{CX_0}$ 는 목표 경로 위의 점 R과 교점이고, \overline{RK} 는 점 R의 접선 벡터이다.

전방향 주행형 로봇의 추적오차 벡터는 위치 오차(position error)와 방향각 오차(orientation angle error)를 포함하며, 다음과 같이 정의한다.

$$\mathbf{e} = [e_p \quad e_\theta]^T \quad (3.2)$$

위치 오차와 방향각 오차는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$e_p = \sqrt{(x - x_r)^2 + (y - y_r)^2} \quad (3.3)$$

$$e_\theta = \theta_R - \theta \quad (3.4)$$

전방향 주행형 로봇의 운동은 수평운동(horizontal moving), 수직운동(vertical moving), 회전운동(rotation moving)을 포함한다.

본 연구에서는 위치 제어와 방향각 제어를 위해 퍼지 제어기를 사용하여 구현한다.

Fig. 3.4은 본 연구에서 제안된 제어기의 블록선도로 나타낸 것이다.

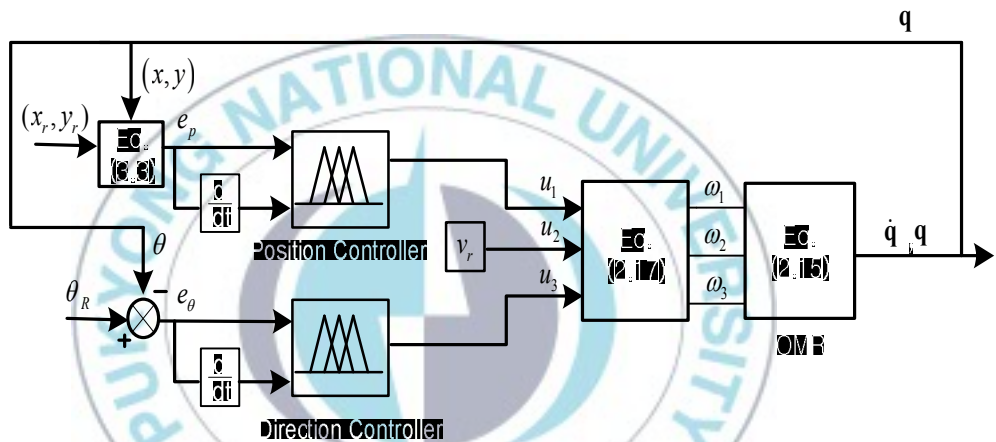


Fig. 3.4 Block diagram of control algorithm

2장에서 정의했듯이 $\mathbf{u} = [u_1 \ u_2 \ u_3]^T = [v_x \ v_y \ \dot{\theta}]^T$ 이다. 로봇의 목표 선속도는 v_r 로 일정하다.

제어시스템은 두 개의 퍼지 제어기를 포함한다. 하나는 위치 제어기(Position controller)이고, 또 다른 하나는 방향각 제어기(Direction controller)이다. 위치 제어기의 입력은 위치 오차 e_p 와 그 도함수 \dot{e}_p 이다. 위치 제어기의 출력은 전방향 주행형 로봇의 수평 속도 v_x 이다. 방향각 제어기의 입력은

방향각 오차 e_θ 과 그 도함수 \dot{e}_θ 이다. 방향각 제어기의 출력은 각 속도 $\dot{\theta}$ 이다.

본 연구의 퍼지 제어기에 적용한 멤버십 함수(membership functions)가 Fig. 3.5에 나타나 있다. 멤버십 함수는 퍼지 정도를 지정하여 퍼지 집합을 결정하는 요소이며, 제어규칙과 합성하여 퍼지데이터를 얻기 위해 이용되는데 이것은 설계자의 경험과 주관에 의하여 주관적으로 정의된다. 이 멤버십 함수는 연속 또는 이산적인 언어값과 모양에 따라서 여러 가지 형태가 있으나 본 연구에서는 일반적으로 많이 사용되는 삼각형 퍼지수를 사용하였다. 삼각형 퍼지수는 계산이 간단하다는 장점으로 대부분의 퍼지제어의 멤버십 함수를 나타내는 데 많이 사용되고 있다.

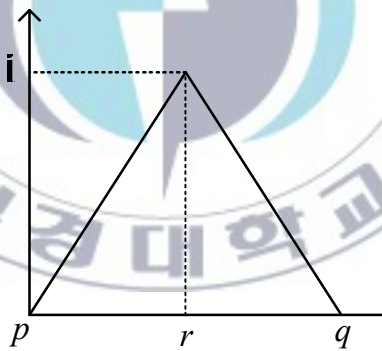


Fig. 3.5 Triangle fuzzy number

삼각형 퍼지수의 멤버십 함수는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \mu(s) &= \frac{1}{r-p}(x-r)+1 & p < x \leq r \\ &= -\frac{1}{(q-r)}(x-r)+1 & r < x \leq q \end{aligned} \quad (3.5)$$

이때 삼각형의 멤버십 함수는 p, r, q 세 개의 파라미터에 의해서 결정된다.

Fig. 3.6의 (a), (b)는 위치 제어기의 입력인 위치 오차 e_p 와 도함수 \dot{e}_p 를 정의한 것이고 (c)는 위치 제어기의 출력인 로봇의 수평 속도 v_x 를 정의한 것이다.

Fig 3.7의 (a), (b)는 방향각 제어기의 입력인 방향각 오차 e_θ 와 도함수 \dot{e}_θ 를 정의한 것이고 (c)는 방향각 제어기의 출력인 각 속도 $\dot{\theta}$ 를 정의한 것이다.

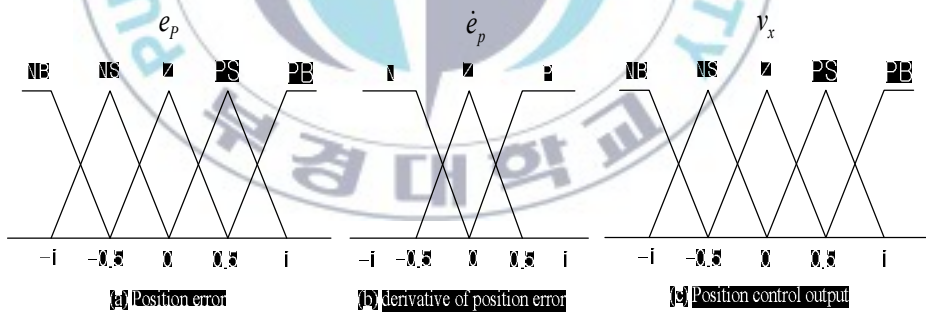


Fig. 3.6 Membership functions for position controller

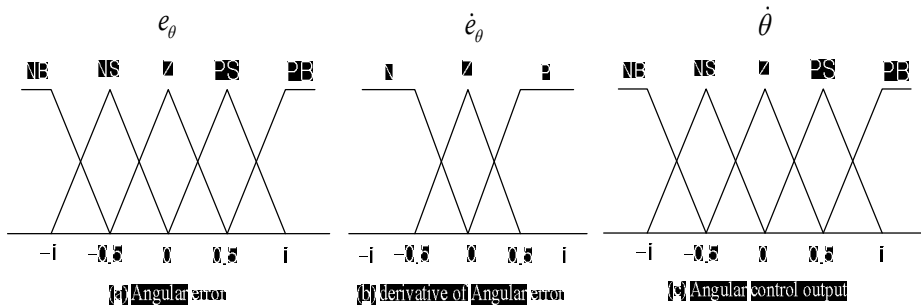


Fig. 3.7 Membership functions for direction controller

퍼지 제어에서 가장 중요한 것은 시스템을 효과적으로 수행할 수 있는 적절한 퍼지 규칙(Fuzzy rule)을 설정하는 것이다. 퍼지 규칙은 기존의 제어 시스템이 이진논리의 제한성 때문에 전문가의 지식을 효과적으로 표현하지 못하는 어려움을 극복할 수 있는 장점을 가지고 있다.

퍼지 규칙은 “IF – THEN”의 형식으로 구성되어 있다. 시스템에 기준입력이 가해지면 프로세스에서 작은 오버슈트와 빠른 응답특성을 갖도록 제어기에 정확한 제어규칙을 만들어야 한다. 제어규칙을 구하는 방법은 여러가지 방법이 있으나 본 연구에서는 전문가의 경험이나 제어 공학가의 지식을 이용하는 바탕으로 제어규칙을 설정하였다.

제어규칙의 기본 골격은 다음 3가지의 기본적인 제어특성을 나타내는 규칙을 사용하여 일반화된 규칙기반을 생성할 수 있다. Table 3.2은 본 논문에서 사용한 두 개의 퍼지 제어기의 제어규칙을 나타낸 것이며 다음의 원리를 기반으로 만들어 진다.

- a. 오차와 오차의 변화율이 0이면 제어입력신호는 현재의 값을 유지한다.
- b. 오차가 0이 아닌 경우에도 오차가 만족할 만큼의 변화율로 0에 접근한다면 현재의 값을 그대로 유지한다.
- c. 만약 출력이 목표치에 일치하지 않고 스스로 교정되지 않으면 오차와 오차 변화량에 따른 동작신호를 제어 입력에 가함으로써 목표치에 접근하게 한다.

Table 3.2 Fuzzy control rule for system

$\dot{e} \backslash e$	NB	NS	ZE	PS	PB
N	PB	PS	PS	NS	NB
Z	PB	PS	ZE	NS	NB
P	PB	PS	NS	NS	NB

제 4 장 시뮬레이션 및 실험결과

4.1 시뮬레이션 결과

본 장에서는 제안된 전방향 주행형 차량의 곡선 경로 추적 제어기에 대한 유효성을 보여주기 위해 시뮬레이션 결과를 보여준다. 시뮬레이션에 사용된 매개변수 값은 Table 4.1과 같다.

Table 4.1 Parameters of omni-directional mobile robot

Parameter	Description	UNIT
θ	-0.175	rad
x_0	0.2	m
y_0	-1.55	m
v_r	0.14	m/s
R	1.6	m
r	0.062	m
L	0.25	m

Fig. 4.1은 중심좌표가 $(X,Y) = (0,0)$ 이고 반지름이 1.6m인 원모양을 한 목표 추적 경로를 나타낸다.

Figs. 4.2~4.6는 시뮬레이션 결과를 나타낸다. Fig. 4.2는 위치 오차에 대한 시뮬레이션 결과를 보여준다. 위치 오차는 5초

이후부터 안정화되어 오차가 영으로 수렴하는 것을 볼 수 있다. Fig. 4.3은 방향각 오차에 대한 시뮬레이션 결과를 보여준다. 방향각 오차는 0.035rad 로 지속되는 것을 볼 수 있다. Fig. 4.4는 전방향 주행형 로봇이 목표경로를 추적하는 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 점선은 목표 주행경로이고, 실선은 시뮬레이션 결과이다. 로봇이 목표경로를 잘 추적하고 있음을 보인다. Figs. 4.5~4.6은 퍼지 제어기의 제어 입력인 로봇의 선속도와 각속도를 나타낸 것이며, 안정하다는 것을 보여준다. 8초 후에 각각 0.002 m/s 와 0.033 rad/s 로 일정하게 뒀을 보여준다. Fig. 4.7은 각 휠의 각속도를 나타낸다. 3초 후에 휠1의 각속도 값은 0.0123 rad/s , 휠2의 각속도 값은 -0.0946 rad/s 그리고 휠3의 각속도 값은 0.1479 rad/s 으로 일정하게 뒀을 보인다.

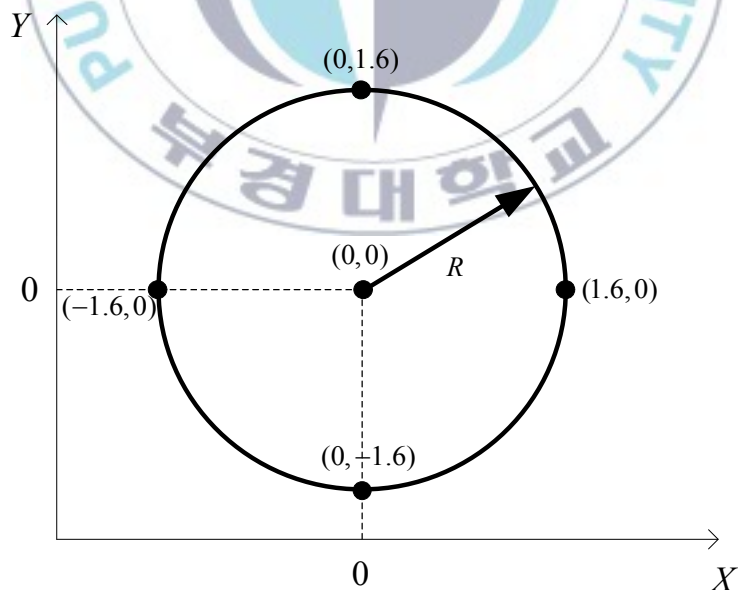


Fig. 4.1 Desired trajectory

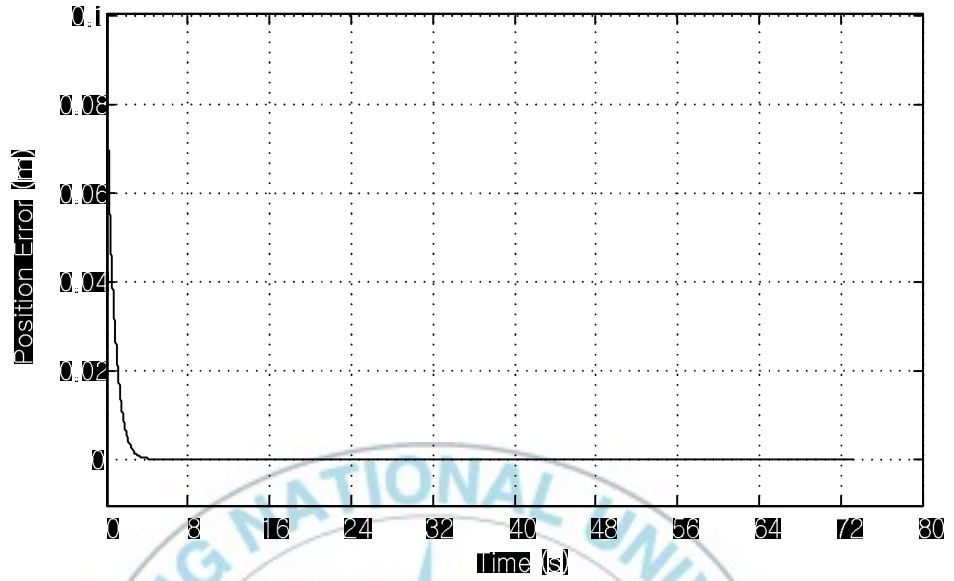


Fig. 4.2 Position error

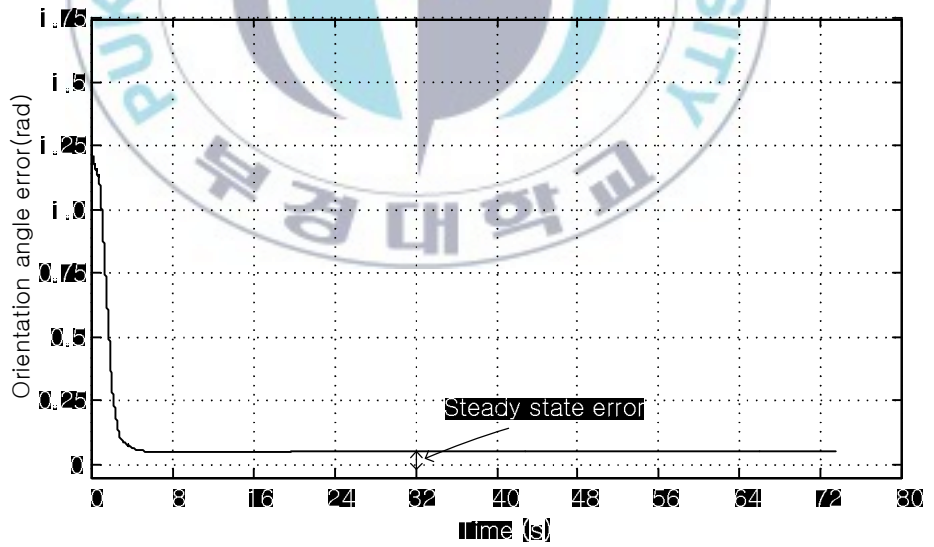


Fig. 4.3 Orientation angle error

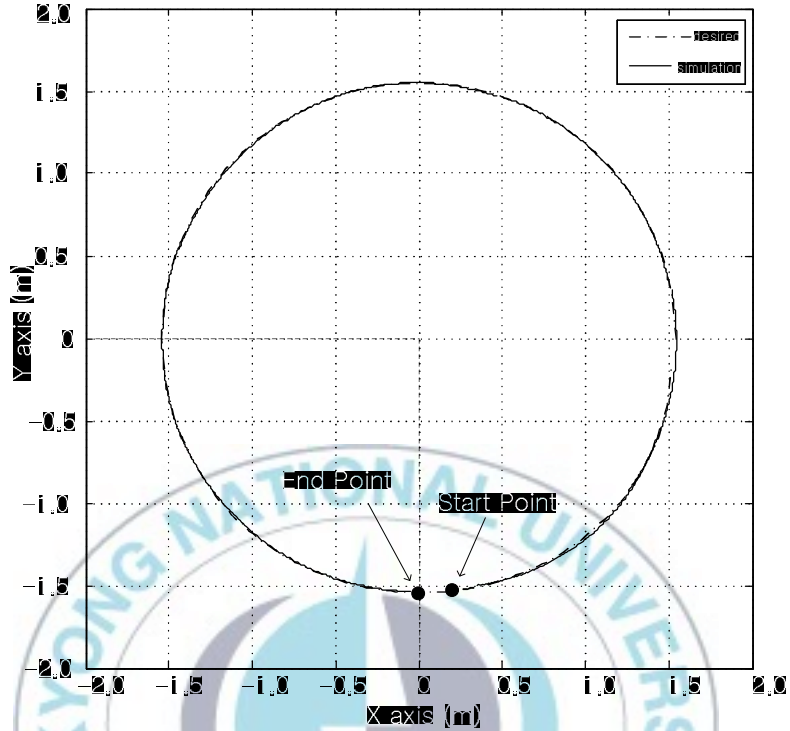


Fig. 4.4 Trajectory tracking

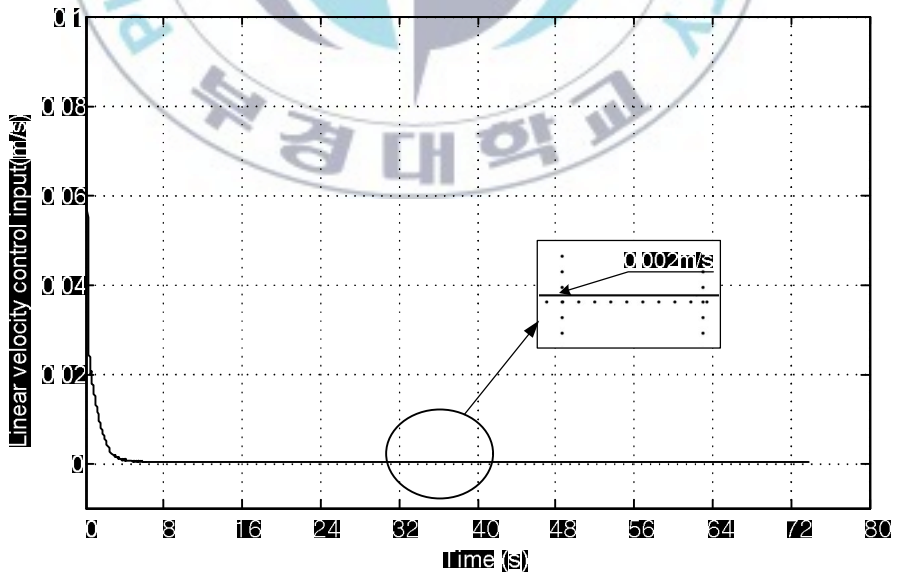


Fig. 4.5 Linear velocity control input

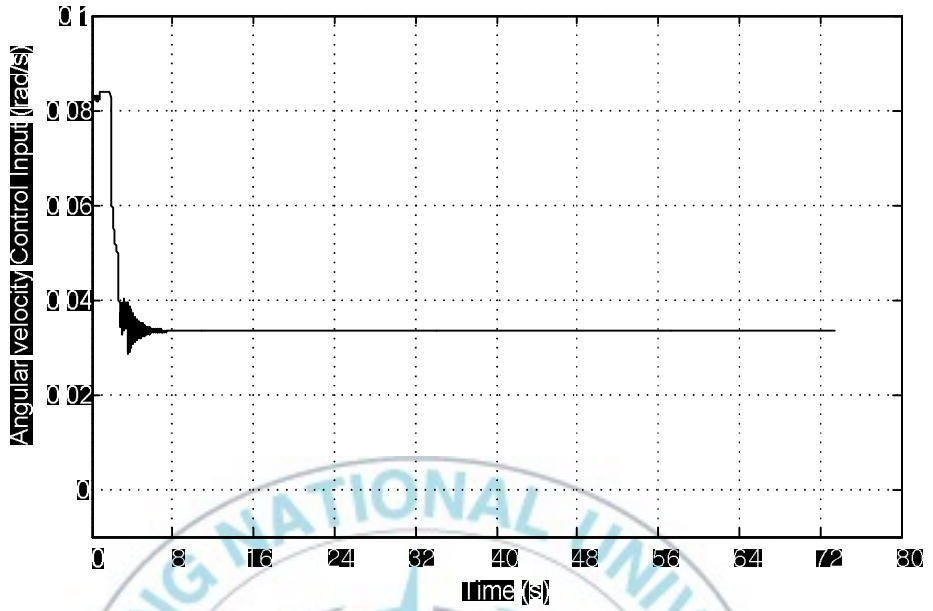


Fig. 4.6 Angular velocity control input

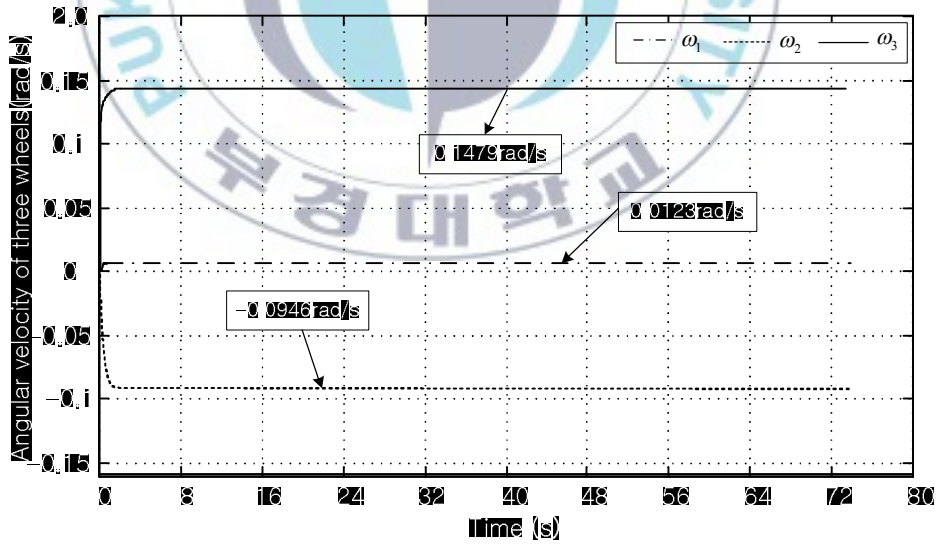


Fig. 4.7 Angular velocity of three wheels

4.2 실험 결과

본 장에서는 제안된 전방향 주행형 차량의 곡선 경로 추적 제어기를 적용한 실험 결과를 보여준다. 레이저 기반 위치 측정 시스템을 위해 반사체는 총 5개 설치하여 수행한다. 반사체의 반사율을 극대화하기 위해 지름이 3.5cm인 원통에 부착한다. 반사체가 설치된 환경의 크기는 6.5m × 7m이다. 실험 방법은 로봇의 주행속도를 0.14m/s로 고정한 상태에서 반지름이 1.6m로 주어진 원 모양의 목표 경로를 잘 추적하는지 실험한다. 실험에 사용된 매개변수 값은 앞에 제시된 Table 4.1과 같다. 로봇이 출발 지점부터 목표 지점까지 주행한 시간은 73초이다. Fig. 4.8은 원모양을 한 목표 경로를 로봇이 주행하는 실험 결과를 시뮬레이션값과 비교하여 나타낸다. 로봇이 목표 경로를 잘 추적하고 있음을 보여준다. Fig. 4.9는 로봇의 위치 오차에 대한 실험결과를 보여준다. 주행을 시작하고 약 5초까지 최대 3.3mm의 오차가 생겼지만 나중에는 $\pm 0.8\text{mm}$ 이내의 오차로 추적하고 있음을 알 수 있다. Fig. 4.10는 로봇의 방향각 오차에 대한 실험결과를 보여준다. 로봇이 주행하고 약 28초까지 $\pm 2.5^\circ$ 이내의 오차를 보이지만, 50초 이후부터 $\pm 1^\circ$ 이하로 수렴하는 것을 볼 수 있다. Figs. 4.11 ~ 4.13은 세 개의 전방향 휠의 각속도를 실험한 결과를 시뮬레이션 값과 함께 나타낸다. 처음 로봇이 주행을 시작할 때 구동 방향을 잡기 위해 회전을 하여 값이 크게 나타나지만 시뮬레이션 값과 차이가 $\pm 0.05 \text{ rad/s}$ 이내로 목표 각속도를 잘 추적하고 있음을 보여준다.

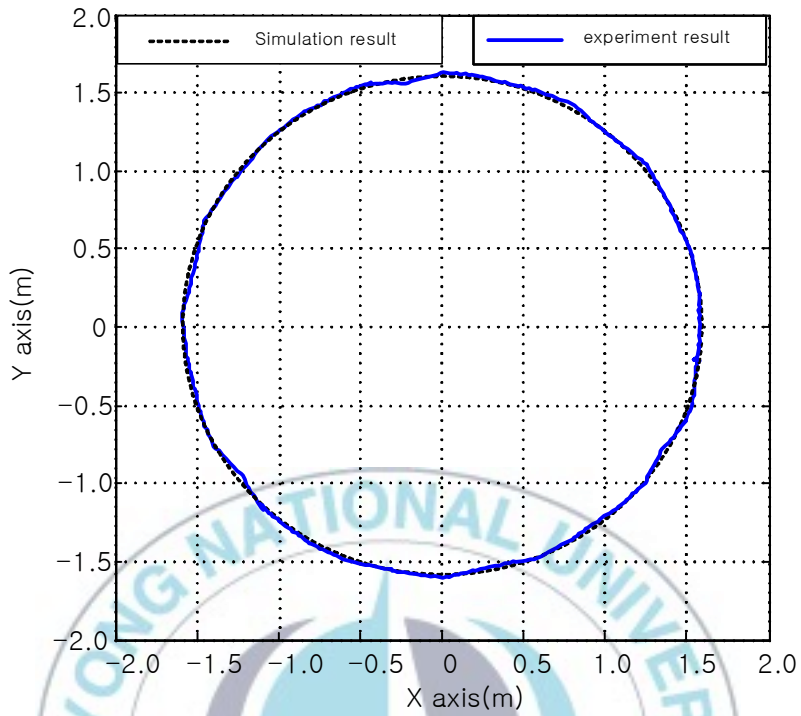


Fig. 4.8 Trajectory tracking

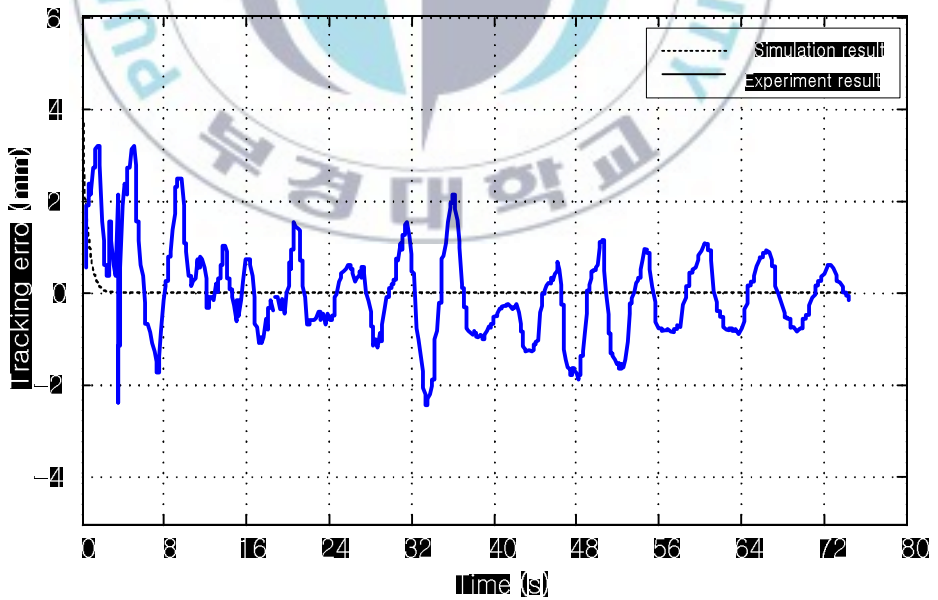


Fig. 4.9 Distance error

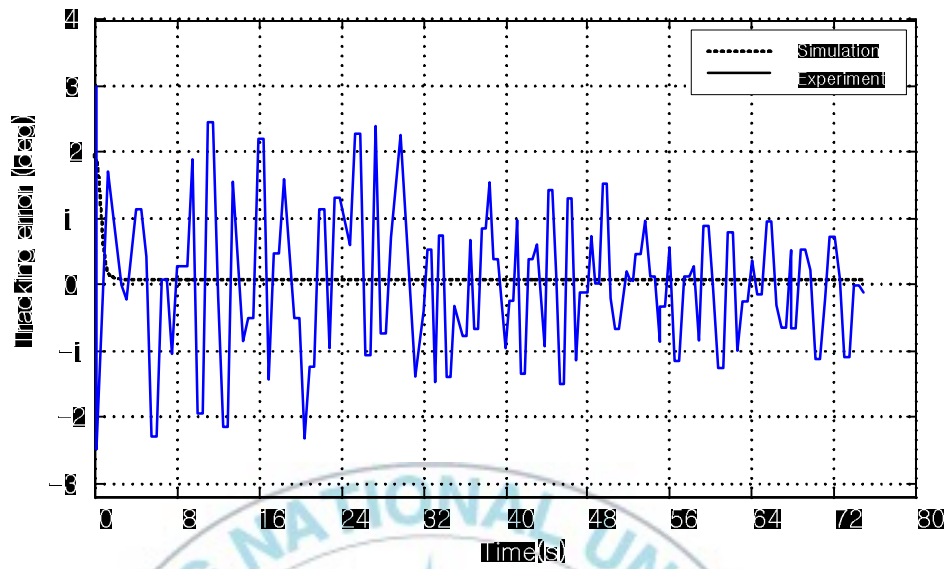


Fig. 4.10 Orientation angle error

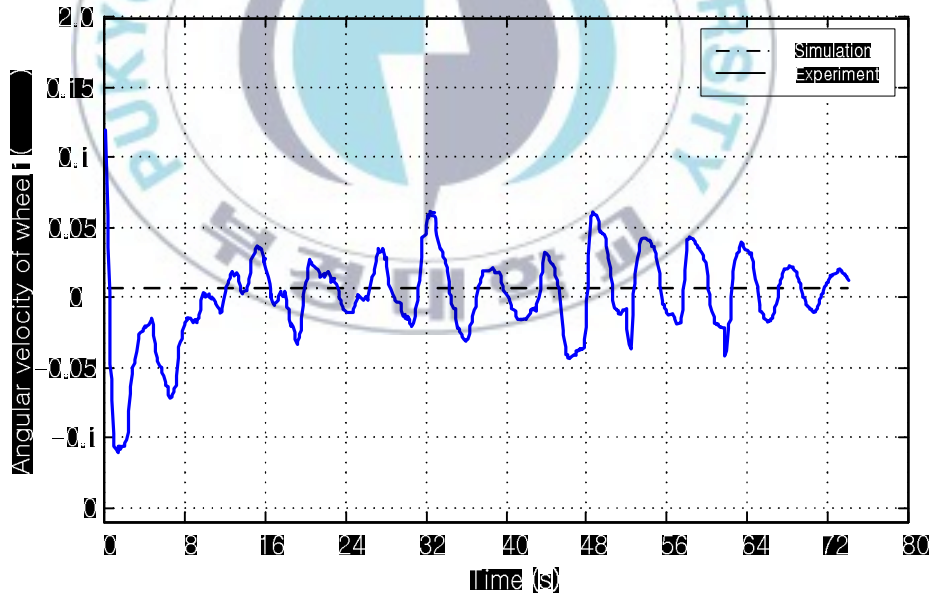


Fig. 4.11 Angular velocity of wheel1 (ω_1)

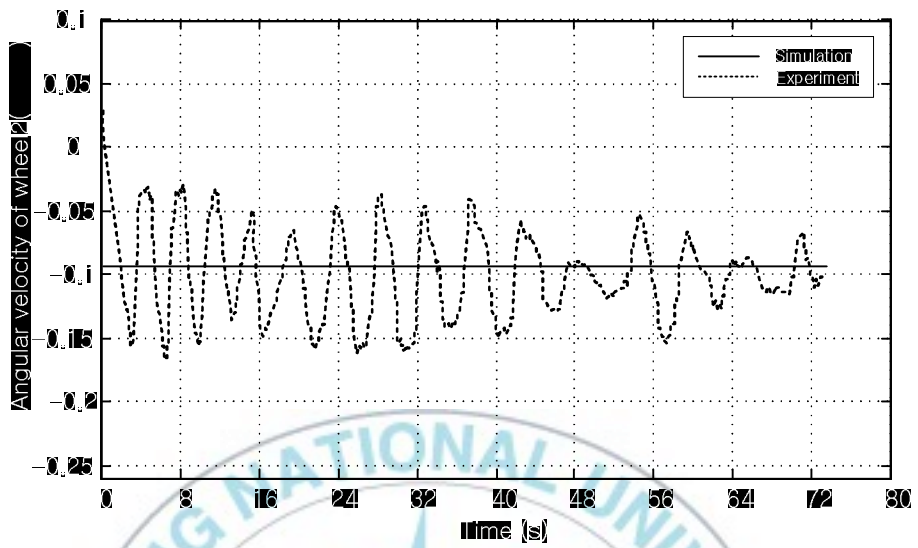


Fig. 4.12 Angular velocity of wheel2(ω_2)

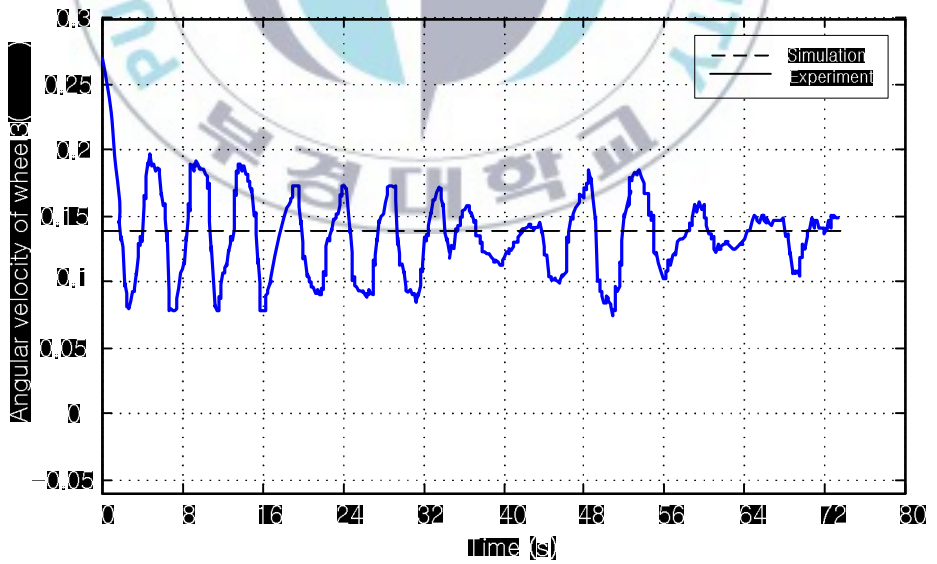


Fig. 4.13 Angular velocity of wheel3(ω_3)

제 5 장 결 론

본 연구에서는 이동경로의 단순화와 협소한 공간에서의 제한성을 극복하고 정확한 경로 추적을 위하여 전방향 휠을 이용한 전방향 주행형 로봇을 구동하기 위해 로봇의 운동학적 모델링과 이를 바탕으로 퍼지 제어기법을 이용한 경로 추적 제어기를 설계하는 방법을 제안하였고, 시뮬레이션과 실험을 통해서 제시된 제어기의 유효성을 검증하였다. 본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

- ◇ 세 개의 전방향 휠을 이용한 홀로노믹 이동로봇을 개발하였다. 전 방향 휠은 평면상에서 3자유도(DOF: Degrees of freedom)를 갖는 바퀴이기 때문에 이 바퀴를 이용해서 민첩하고 원하는 방향으로 이동이 가능한 홀로노믹 이동 로봇을 개발하였다.
- ◇ 목표 경로를 정확히 추적하기 위해서 로봇의 운동학적 모델링을 제시하였다. 제시된 운동학적 모델링을 바탕으로 하여 퍼지 제어기법을 이용한 경로 추적 제어기를 설계하였다.

✧ 설계된 제어기를 구현하기 위해 개발된 전방향 주행형 로봇의 제어시스템은 크게 메인컨트롤러부, 모터드라이버부, 센서부로 구성하였다. 제어시스템은 제어를 위한 Industrial computer와 차량의 위치를 구하기 위한 레이저 위치 측정 시스템, 전방향 주행을 구현하기 위하여 각 휠마다 장착된 3개의 모터와 그 모터를 구동시키는 모터드라이브, 그리고 각 모터의 회전속도를 계산하기 위한 엔코더로 구성하였다.

✧ 전방향 주행형 로봇의 곡선 경로 추적을 위해 설계된 제어기의 유효성을 검증하기 위해 시뮬레이션과 실험 결과를 제시하였다. 퍼지 제어기를 적용하여 시뮬레이션 한 결과 위치오차는 5초 이후부터 안정화되어 영으로 수렴하였고, 방향각 오차는 0.035rad로 지속되는 것을 볼 수 있었다. 실험 방법은 로봇의 주행속도를 0.14m/s로 고정한 상태에서 반지름이 1.6m로 주어진 회전경로를 정확히 추적하는지 실험하였다. 위치오차는 처음 주행하고 약 5초까지 최대 3.3mm의 오차가 생겼지만 나중에는 $\pm 0.8\text{mm}$ 이내의 오차로 추적하였다. 방향각 오차는 로봇이 주행하고 약 28초까지 최대 2.5°의 오차를 보이지만, 50초 이후부터 1°이하로 수렴하는 것을 볼 수 있었다.

본 연구에서 개발 되어진 전방향 주행형 로봇은 산업 현장에서 그 활용이 기대된다. 산업현장에 무인으로 화물의 이동 및 적재를 하는 차량인 무인운송차(AGV)에 적용하면 복잡하고 협소한 산업현장에서 보다 효율적인 작업이 가능하다. 또한 산업

현장 뿐만 아니라, 기타 여러 실제 현장에서 많은 기여가 있을 것으로 판단된다. 추후 연구과제로는 실제 산업현장이나 가정 환경에 적용하였을 때 발생할 수 있는 문제점들을 파악하여 해결한 후, 전방향 주행형 로봇에 로봇팔을 설치하여 물건을 자동적으로 옮겨 싣고 운반할 수 있고, 레이저 스캐너를 설치하여 장애물을 스스로 회피할 수 있는 로봇의 개발이다. 이는 현재 개발 된 로봇에 매니플레이터의 기능과 장애물 회피 기능을 추가함으로써 좀 더 자율적이고, 지능적으로 작업을 수행할 수 있을 것이다.



REFERENCE

- [1] F. G. Pin and S. M. Killough, "A New Family of Omnidirectional and Holonomic Wheeled Platforms for Mobile Robots", IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 10, No. 4, pp. 490~489, 1994
- [2] A. Betourne and G. Campion, "Dynamic Modelling and Control Design of a Class of Omnidirectional Mobile Robots", Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Minnesota, pp. 2810~2815, 1996
- [3] K. Watanabe, Y. Shiraishi, S. G. Tzafestas, J. Tang and T. Fukuda, "Feedback Control of an Omnidirectional Autonomous Platform for Mobile Service Robots", J. Intell. Robot. Syst., Vol. 22, pp. 315~330, 1998
- [4] Y. Kanayama, Y. Kimura, F. Miyazaki and T. Noguchi "A Stable Tracking Control Method for an Autonomous Mobile Robot" IEEE International Conference on Robotics & Automation, pp. 384~389, 1990
- [5] H. C. Huang and C. C. Tsai, "FPGA Implementation of an

- Embedded Robust Adaptive Controller for Autonomous Omnidirectional Mobile Platform”, IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 56, No. 5, pp. 1604~1616, 2009.
- [6] P. Muir and C. Neuman, “Kinematic modeling of wheeled mobile robots”, Journal of Robotic System, Vol. 4, No.2, pp.281~340,1987
- [7] 한국원자력연구소, “중하중 취급 및 미끄럼 방지용 전방향 바퀴”, 대한민국 등록 특허공보, 10-0155193, 1998
- [8] 송재복, “수동롤러를 갖는 전방향 바퀴”, 대한민국 등록특허공보, 10-0418427, 2004.
- [9] The united States Of America as represented by the Administrator of the National Aeronautics and Space Administration, “Omnidirectional wheel”, United Sates Patent, 3789947, 1974.
- [10] N. Tlale and M. D. Villiers, “Kinematics and Dynamics Modelling of a Mecanum Wheeled Mobile Platform”, 15th International conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice(M2VIP08), pp. 657~662, 2008
- [11] S. L. Dickerson and B. D. Lapin, “Control of an Omnidirectional Robotic Vehicle with Mecanum Wheels”, IEEE

Transaction of intelligent transportation systems, pp. 0323~0328,
1991

- [12] P. Kiddee and A. Shimada, "A Controller Design on Person Following Omni-directional Vehicle Robots", SICE Annual Conference, pp. 1043~1047, 2007
- [13] D. V. Tuan, N. Hung, S. M. Shin, H. K. Kim and S. B. Kim, "Tracking Control of Omni-directional Mobile Platform with Disturbance Using Differential Sliding Mode Controller", International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 13, No. 1, pp. 39~48, 2012
- [14] N. Hung, T. D. Viet, J. S. Im, H. K. Kim and S. B. Kim, "Motion Control of an Omni-directional Mobile Platform for Trajectory Tracking Using an Integral Sliding Mode Controller", International Journal of Control Automation and System, Vol. 8, No. 6, pp. 1221~1331, Dec. 2010
- [15] P. Kiddee and A. Shimada, "A Controller Design on Person Following Omni-directional Vehicle Robots", SICE Annual Conference, pp. 1043~1047, 2007
- [16] M. D. Villiers and N. Tlale, "Kinematics and Dynamics Modelling of a Mecanum Wheeled Mobile Platform",

International Conference on Mechatronics and Machine Vision
in Practice , pp. 1029~1035, 2009

[17] K. L. Han, O. K. Choi, J. W. Kim, H. S. Kim and J. S. Lee,
“Design and Control of Mobile Robot with Mecanum Wheel”,
ICROS-SICE International Joint Conference, pp. 2932~2937,
2009

[18] P. Viboonchaicheep, A. Shimada and Y. Kosaka, “Positoin
Rectification Control for Mecanum Wheeled Omni-directional
Vehicles”, Proceedings Of the 1998 IEEE International
Conference on Robotics & Automation, pp. 854~859, 2003

[19] R. Fierro and F. L. Lewis, “Control of a Nonholonomic Mobile
Robot: Backstepping Kinematics into Dynamics”, Journal of
Robotic Systems, pp. 149~163, 1997

[20] R. Gonzalez, F. Rodriguez, J. L. Guzman and M. Berenguel,
“Localization and Control of Tracked Mobile Robots under Slip
Conditions”, IEEE Transaction of Mechatronics, pp.978~983,
2009

[21] C. Samson and K. Ait-Abderrahim, “Feedback Stabilization of a
Nonholonomic Wheeled Mobile Robot”, IEEE/RSJ International

Workshop on Intelligent Robots and Systems(IROS), pp. 1242~1247, 1991

- [22] W. Oelen, H. Berghuis, H. Nijmeijer and C. Canudas de Wit, "Hybrid Stabilizing Control on a Real Mobile Robot," IEEE Rob. Autom. Mag., June, pp. 16~23, 1995.
- [23] 김종수, 문종우, "2자유도 차동 구륜 이동로봇의 기구학 모델링과 Backstepping 기법을 이용한 궤적추적", 한국정보기술학회논문지, 5 (2), pp. 202~208, 2007
- [24] C. Samson, "Velocity and Torque Feedback Control of a Nonholonomic Cart," in Lecture Notes in Control and Information Science, C. Canudas de Wit, Ed., Springer-Verlag, pp. 125~151, 1991
- [25] S. Koenig and M. Likhachev, "Incremental A*" In Advances in Neural Information Processing Systems 14, MIT Press, 2002.
- [26] P. Kiddee and A. Shimada, "A Controller Design on Person Following Omni-directional Vehicle Robots", SICE Annual Conference, pp. 1043~1047, 2007
- [27] E. Maalouf, M. Saad and H. Saliyah, "A Higher Level Path

Tracking Controller for a Four-wheel Differentially Steered Mobile Robot”, *Robotics and Autonomous Systems* 54, pp. 23~33, 2005

[28] R. Fierro and F. L. Lewis, “Control of Nonholonomic Mobile Robot: Backstepping Kinematics into Dynamics”, *Proceedings Of the 34th conference on Decision & Control*, pp. 3805~3810, 1995

[29] Y. Kanayama, Y. Kimura, F. Miyazaki and T. Noguchi, “A Stable Tracking Control Method for a Nonholonomic Mobile Robot”, *IEEE/RSJ International Workshop Intelligent Robots and Systems IROS '91*, pp. 1236~1241, 1991

[30] 김영규, “완만한 곡선 경로추적용 용접이동로봇의 비선형 적응제어”, 학위논문, 2005

[31] 서진호, T. H. Bui, T. T. Nguyen, 김상봉, “용접용 이륜 이동로봇의 모델링 및 적응 추종 제어”, 2003년도 춘계학술대회 강연 및 논문집, 대한기계학회, pp. 786~791, 2003

[32] B. D. Novel, G. Bastin and G. Campion, “Dynamic Feedback Linearization of Nonholonomic Wheel Mobile Robots”,

Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2527~2532, 1999

- [33] T. P. Tran, T. L. Chung, H. K. Kim S. B. Kim and M. S. Oh, “Trajectory Tracking of Mobile Manipulator for Welding Task Using Sliding Mode Control”, The 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2004
- [34] A. M. Bloch, M. Reyhanoglu and N. H. McClamroch, “Control and Stabilization of Nonholonomic Dynamic Systems,” IEEE Trans. Autom. Control, pp. 1746~1757, 1992
- [35] M. Morari, E.Zafirou, Robust process control, Prencice-Hall, 1989
- [36] Y. F. Li and C.C. Lau, “Development of fuzzy algorithms for servo systems”, IEEE Control Systems Magazine, April, pp. 65~71, 1989
- [37] C. C. Lee, “Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller – Part I and II”, IEEE Trans. Syst. Man. Cybern. Vol 20, pp. 404~435, 1995
- [38] E. H. Mamdani, “Application of fuzzy algorithm for simple dynamic plant”, IEE Proc. Vol 21, no. 12, pp. 1585~1588, 1974

- [39] T.J. Procyk and E. H. Mamdani, "Application of fuzzy control systems to industrial processes", *Automatica*. Vol 13, pp. 235~242, 1977
- [40] 노진석, "원격제어 이동로봇의 장애물 회피를 위한 센싱 알고리즘 및 퍼지제어에 관한 연구", 학위논문, 2011
- [41] 김상대, "옴니휠을 이용한 자율 네비게이션 플랫폼에 관한 연구", 학위논문, 2010
- [42] R. Fierro and F. L. Lewis, "Control of Nonholonomic Mobile Robot: Backstepping Kinematics into Dynamics", *Proceedings Of the 34th conference on Decision & Control, USA*, pp. 3805~3810, 1995
- [43] Y. Kanayama, Y. Kimura, F. Miyazaki and T. Noguchi, "A Stable Tracking Control Method for a Nonholonomic Mobile Robot", *IEEE/RSJ International Workshop Intelligent Robots and Systems IROS '91, Japan*, pp. 1236~1241, 1991
- [44] 이근유, 서진호, 오명석, 김상봉, "격자형 용접선 추적을 위한 용접 이동로봇의 모델링 및 제어", 2003년도 춘계학술대회 강연 및 논문집, 대한기계학회, pp. 923~928, 2003

- [45] 트란안킴, 김광주, 중탄람, 김학경, 김상봉, “천장설치형 카메라 시스템을 사용한 장애물 회피용 이동로봇의 경로설계법과 그 구현”, KSPE 한국정밀공학회, Vol. 21, No. 8, pp. 73~82, 2004
- [46] 서진호, T. H. Bui, T. T. Nguyen, 김상봉, “용접용 이륜 이동로봇의 모델링 및 적응 추종 제어”, 2003년도 춘계학술대회 강연 및 논문집, 대한기계학회, pp. 786~791, 2003
- [47] T. P. Tran, T. L. Chung, H. K. Kim S. B. Kim and M. S. Oh, “Trajectory Tracking of Mobile Manipulator for Welding Task Using Sliding Mode Control”, The 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Busan, 2004
- [48] 표종훈, 최진욱, 한민홍, “무궤도 자율 AGV 개발”, 92한국자동제어학술회의논문집, pp. 13~18, 1992
- [49] 임미섭, 임종훈, “경로 관측기를 이용한 차륜형 이동로봇의 경로 추종”, 전기학회논문지, 제48A권, 제11호, pp. 1448~1454, 1999
- [50] T. L. Chung, S. J. Ma, H. K. Kim, T. T. Nguyen and S. B. Kim, “Shortest Path Planning and Robust Sliding Mode Control of a

Two-Wheeled Mobile Robot”, 2006 The International Symposium on Advanced Mechatronics, Cybernetics and Automation, Vietnam, 2006

- [51] 양정민, “비홀로노믹 시스템을 위한 견실 추종 제어”, 전기학회논문지, 제52D권, 제1호, pp. 31~37, 2003
- [52] E. Maalouf, M. Saad, H. Saliha, “A higher level path tracking controller for a four-wheel differentially steered mobile robot”, Robotics and Autonomous Systems 54, pp. 23~33, 2005
- [53] F. G. Pin and S. M. Killough, “A New Family of Omnidirectional and Holonomic Wheeled Platforms for Mobile Robots”, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 10, No. 4, pp. 480~489, 1994
- [54] C. Samson and K. Ait-Abderrahim, “Feedback Stabilization of a Nonholonomic Wheeled Mobile Robot”, IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems(IROS), pp. 1242~1247, 1991
- [55] B. D. Novel, G. Bastin and G. Campion, “Dynamic Feedback Linearization of Nonholonomic Wheel Mobile Robots”, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics

and Automation, pp. 2527~2532, 1999

- [56] 최규만, “평균 3자유도를 갖는 전방향 자전거의 개발”, 학위논문, 2004
- [57] 송재복, “수동 롤러를 갖는 전방향 바퀴”, 대한민국 등록 특허공보, 10-0418427, 2004
- [58] 이상협, “고속 주행에서 정밀 제어를 위한 위치 측위 시스템”, 학위논문, 2011
- [59] H. J Zimmermann, Fuzzy set Theory and Its Applications, Kluwer-Nijhoff Publishing, 1985
- [60] 정현철, “퍼지 제어기를 이용한 원료 정량 추출 시스템” 학위논문, 1997

Publications and Conferences

- [1] Y. M. Park, P. T. Doan, H. K. Kim, and S. B. Kim, “Decentralized Motion Control of Omnidirectional Mobile Platform for Tracking the Curved Path Using PD Fuzzy Logic Controller”, International Symposium on Mechatronics and Robotics, pp.235~239, 2011
- [2] Y. M. Park, P. T. Doan, M. J. Bae, H. K. Kim, and S. B. Kim, “Fuzzy Logic Control of Omnidirectional Mobile Platform for Tracking The Circular Path”, International Symposium on Advanced mechanical and Power Engineering, pp.317~322, 2011
- [3] Y. M. Park, P. T. Doan, H. K. Kim, S. J. Oh, and S. B. Kim, “A Sensor Guided Parallel Parking System For Vehicles Using Omni Wheel”, International Symposium on Advanced mechanical and Power Engineering, pp. 85 , 2012
- [4] 김서광, 박유미, 김상봉, 박성재, 여태경, 윤석민, 홍섭, “Basic Design of Data Analysis S/W for Pilot Mining Robot Test Operating Using MATLAB”, 한국해양공학회 추계 학술대회, pp. 59, 2011
- [5] S. K. Kim, Y. M. Park, N. V. Giap, H. K. Kim and Sang Bong Kim, “Quad-Copter Controller Design Using Fusion Kalman Filter Sensor for Its Automatic Hovering”, International Symposium on Mechatronics and Robotics, pp. 137-143, 2011

부 록

부록 A 제2장 2.2절 식(2.12) 증명

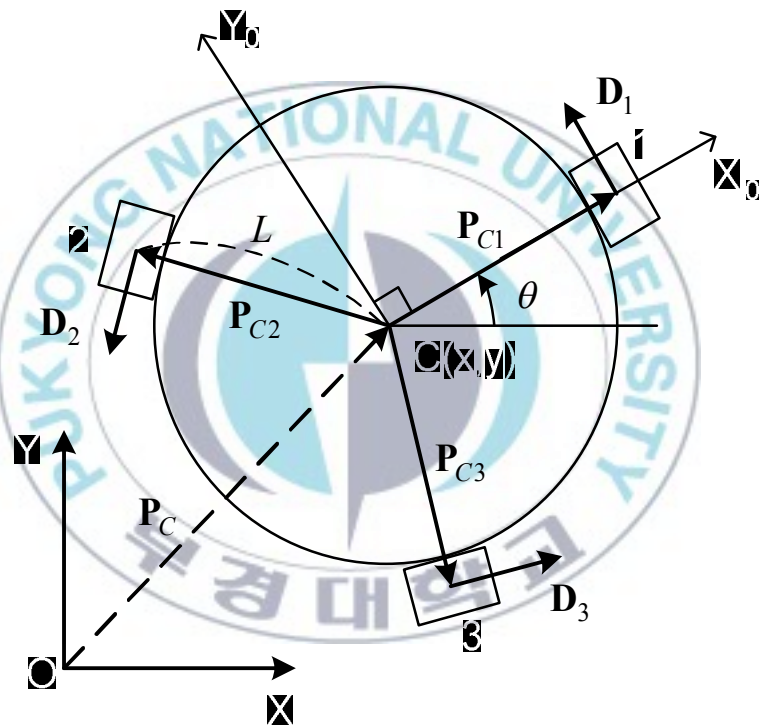


Fig. A.1 Geometry schematic of the OMR

식 (2.7)의 OMP의 운동방정식은 다음과 같다.

$$v_i = \dot{P}_C^T \times R(\theta) \times D_i + P_{Ci}^T \times \dot{R}^T(\theta) \times R(\theta) \times D_i \quad (A.1)$$

식 (2.1)~(2.3)으로 부터, 식(A.1)을 다음과 같이 구체적으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 v_1 &= \dot{\mathbf{P}}_C^T \times \mathbf{R}(\theta) \times \mathbf{D}_1 + \mathbf{P}_{C1}^T \times \dot{\mathbf{R}}^T(\theta) \times \mathbf{R}(\theta) \times \mathbf{D}_1 \\
 &= (\dot{x} \quad \dot{y}) \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \\
 &\quad + (L \quad 0) \begin{pmatrix} -\dot{\theta} \sin \theta & -\dot{\theta} \cos \theta \\ \dot{\theta} \cos \theta & -\dot{\theta} \sin \theta \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \dot{\theta} \cos \theta & -\dot{\theta} \sin \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \\
 &= -\sin \theta \dot{x} + \cos \theta \dot{y} \\
 &\quad + \dot{\theta} (L \quad 0) \begin{pmatrix} -\sin \theta & \cos \theta \\ -\cos \theta & -\sin \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \\
 &= -\sin \theta \dot{x} + \cos \theta \dot{y} + \dot{\theta} (L \quad 0) \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \\
 &= -\sin \theta \dot{x} + \cos \theta \dot{y} + L \dot{\theta}
 \end{aligned} \tag{A.2}$$

$$v_2 = \dot{\mathbf{P}}_C^T \times \mathbf{R}(\theta) \times \mathbf{D}_2 + \mathbf{P}_{C2}^T \times \dot{\mathbf{R}}^T(\theta) \times \mathbf{R}(\theta) \times \mathbf{D}_2$$

$$= (\dot{x} \quad \dot{y}) \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{-\sqrt{3}}{2} \\ \frac{-1}{2} \\ \frac{1}{2} \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned}
& +L \begin{pmatrix} -1 & \sqrt{3} \\ 2 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\dot{\theta} \sin \theta & -\dot{\theta} \cos \theta \\ \dot{\theta} \cos \theta & -\dot{\theta} \sin \theta \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ 2 \\ -1 \\ \frac{2}{2} \end{pmatrix} \\
& = (\dot{x} \quad \dot{y}) \begin{pmatrix} -\cos \theta \sin(\frac{\pi}{3}) + \sin \theta \cos(\frac{\pi}{3}) \\ \sin \theta \sin(\frac{\pi}{3}) - \cos \theta \cos(\frac{\pi}{3}) \end{pmatrix} \\
& +L \dot{\theta} \begin{pmatrix} -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ 2 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\sin \theta & \cos \theta \\ -\cos \theta & -\sin \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ 2 \\ 1 \\ -\frac{2}{2} \end{pmatrix} \\
& = (\dot{x} \quad \dot{y}) \begin{bmatrix} -\sin(\frac{\pi}{3}-\theta) \\ -\cos(\frac{\pi}{3}-\theta) \end{bmatrix} + L \dot{\theta} \begin{pmatrix} -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ 2 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ 2 \\ -1 \\ -\frac{2}{2} \end{pmatrix} \\
& = -\sin(\frac{\pi}{3}-\theta) \dot{x} + \cos(\frac{\pi}{3}-\theta) \dot{y} + L \dot{\theta} \tag{A.3}
\end{aligned}$$

$$v_3 = \dot{\mathbf{P}}_C^T \times \mathbf{R}(\theta) \times \mathbf{D}_3 + \mathbf{P}_{C3}^T \times \dot{\mathbf{R}}^T(\theta) \times \mathbf{R}(\theta) \times \mathbf{D}_3$$

$$= (\dot{x} \quad \dot{y}) \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} \\ 2 \\ 1 \\ -\frac{2}{2} \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned}
& +L \begin{pmatrix} -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \dot{\theta} \cos \theta & -\dot{\theta} \sin \theta \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} \end{pmatrix} \\
& = (\dot{x} \quad \dot{y}) \begin{pmatrix} \cos \theta \sin(\frac{\pi}{3}) + \sin \theta \cos(\frac{\pi}{3}) \\ \sin \theta \sin(\frac{\pi}{3}) - \cos \theta \cos(\frac{\pi}{3}) \end{pmatrix} \\
& +L \dot{\theta} \begin{pmatrix} -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\cos \theta & -\sin \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} \end{pmatrix} \\
& = (\dot{x} \quad \dot{y}) \begin{bmatrix} \sin(\frac{\pi}{3} + \theta) \\ -\cos(\frac{\pi}{3} + \theta) \end{bmatrix} + L \dot{\theta} \begin{pmatrix} -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} \end{pmatrix} \\
& = \sin(\frac{\pi}{3} + \theta) \dot{x} - \cos(\frac{\pi}{3} + \theta) \dot{y} + L \dot{\theta} \tag{A.4}
\end{aligned}$$

식 (A.2)~(A.4)으로 부터, 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \theta & \cos \theta & L \\ -\sin(\pi/3 - \theta) & -\cos(\pi/3 - \theta) & L \\ \sin(\pi/3 + \theta) & -\cos(\pi/3 + \theta) & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \tag{2.12}$$

부록 B 하드웨어

1.모터

전방향 주행형 로봇의 구동을 위해 사용되는 엔코더 결합형 DC모터는 Fig. B.1에 나타나 있고 제원은 Table B.1에 나타나 있다.



Fig. B.1 DC motor

Table B.1 Specification of motor

Items	Values
Rated Volt	24V
Rated Torque	11kg-cm
Rated Speed	285rpm
Rated Current	2,850mA
No load Speed	333rpm
No load Current	700mA
Rated Output	48.6W

2. Industrial Computer

Fig. B.2은 제어시스템 중 메인컨트롤러부인 Industrial Computer이다.



Fig. B.2 Industrial computer

Table B.2 Specification of industrial computer

Items	Values
Processor System	CPU : Intel® Atom™ D510 Max. Speed : 1.66 GHZ System Chipset : ICH8M BIOS : AMI 16Mb SPI Flash
Memory	Technology : DDR2 667 MHz Max. Capacity : 2 GB SODIMM Socket : 1 * 200-pin SODIMM
Dimensions	137*189*221 mm
Power Input	12VDC ~ 24VDC

감사의 글

공학도로서 갖추어야 할 자질을 위해 하나하나 아낌없는 지도와 격려를 주셨고, 본 논문이 완성되기까지 학문의 길을 이끌어 주신 김상봉 지도교수님께 감사의 말씀을 드립니다. 부족함이 많은 저를 학부시절부터 지금까지 연구활동에 대한 많은 가르침과 사람으로서의 도리를 배우게 해주셔서 감사합니다. 논문 심사 과정에서 진심어린 충고와 따뜻한 조언을 주신 권순재 교수님과 변기식교수님께 깊은 감사의 말씀을 드립니다. 그리고 항상 옆에서 연구를 지도하며 많은 조언을 해주신 김학경 교수님께도 진심으로 감사의 말씀을 드립니다. 그리고 항상 딸 같이 챙겨주시고 보듬어 주시는 사모님께 감사 드립니다.

CIMEC Lab.의 선배님들이신 이진우 선배님, 안휘웅 선배님, 이충환 선배님, 박순실 선배님, 유휘룡 선배님, 전봉환 선배님, 김성민 선배님, 김진호 선배님, 서진호 선배님, 감병오 선배님, 이근유 선배님, 정상권 선배님, 신승목 선배님, 박성재 선배님, 김석열 선배님, 이원기 선배님, 김성욱 선배님, 전양배 선배님, 김영규 선배님, 임재성 선배님, 김상찬 선배님, 박바다 선배님, 마성진 선배님, 김병용 선배님, 이희숙 선배님 께 감사 드립니다. 그리고 박사과정을 마치고 고국으로 돌아간 Phuc, Tung, Hieu, Lam, Dung, Duy, Phuong, Hung, Tuan 에게도 감사의 말씀 드립니다.

CIMEC Lab.에서 생활하면서 많은 도움을 주었던 선배님들, 후배님들 감사 드립니다. 지금은 다른 곳에 있지만 3년을 같이

생활하면서 힘이 되어준 하연이에게 감사 합니다. 4년을 같이 연구실 생활하면서 희로애락을 같이하고, 졸업을 함께 준비 하면서 고생한 민지와 우영이에게 고맙다는 말 전하고 싶습니다. 아는 것이 없던 학부시절부터 많은 것을 가르쳐 주신 윤석민 선배, 김대원 선배, 이도경 선배, 정준호 선배, 최낙순 선배, 이경목 선배, 박철한 선배, 김대환 선배, 김서광 선배에게 감사 드립니다.

그리고 학문적으로 많은 도움을 준 Think과 Luan에게 감사 드립니다. 그리고 같이 실험실 생활을 하면서 힘이 되어 주는 Sandi, Chetanraj, Giang, Waleed에게 감사 드립니다. 그리고 연구실에서 더 나은 미래를 위해 밤낮으로 열심히 공부하고 있는 후배님들인 정근오빠, 효준이, 진욱이, 지수에게 감사 드립니다. 그리고 실험실을 위해 수고하시고 따뜻하게 챙겨주시는 지화 선생님께 감사 드립니다.

마지막으로 저를 믿고 응원하시는 아버지, 착한 딸이라며 주위에 자랑하시는 어머니, 항상 응원해주고 조언해주는 재성 오빠 그리고 옆에서 믿어주고 힘이 되어 준 정우 오빠에게 감사 의 인사를 전합니다.

2013년 2월

박 유 미

