



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](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

RFID기술을 이용한 이동로봇의 맵 빌딩에 관한 연구



부 경 대 학 교 대 학 원

메카트로닉스공학과

이 도 경

공 학 석 사 학 위 논 문

RFID기술을 이용한 이동로봇의 맵 빌딩에 관한 연구

지도교수 김 상 봉

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2009 년 7 월

부 경 대 학 교 대 학 원

메카트로닉스공학과

이 도 경

이도경의 공학석사 학위논문을
인준함.



주 심 공학박사 변 기 식 (인)

위 원 공학박사 오 정 환 (인)

위 원 공학박사 김 상 봉 (인)

목 차

목 차	i
Abstract	iii
제 1 장 서 론	1
1.1 연구 배경 및 동기	1
1.2 연구내용 및 방법	5
제 2 장 RFID기반 이동로봇 시스템의 구성 및 모델링	7
2.1 RFID 시스템	7
2.1.1 RFID 시스템의 구성	7
2.1.2 적용한 RFID 시스템	12
2.2 이론 이동로봇 시스템의 구성 및 모델링	15
2.2.1 이론 이동로봇 시스템	15
2.2.2 이동로봇의 운동학적 모델링	21
제 3 장 이동로봇의 제어기 설계	28
3.1 운동학적 모델을 고려한 이동로봇의 백스테핑 제어기 설계	28
3.2 설계된 제어기의 시뮬레이션 결과	32
제 4 장 맵 빌딩을 위한 이동로봇의 위치 및 주행방향 모델링	38
4.1 이론 이동로봇의 주행 분석	39

4.1.1 이론 이동로봇의 주행계획 모델링	39
4.1.2 2차원 공간에서 이동로봇의 위치 및 주행 방향 모델링	40
제 5 장 RFID와 초음파센서를 이용한 맵 빌딩	45
5.1 1차 맵 빌딩 실험	45
5.2 2차 맵 빌딩 실험	52
제 6 장 결론	58
References	60
Publications and Conferences	64
감사의 글	66



A Study on Map Building of Mobile Robot Using RFID Technology

Do Kyoung Lee

*Dept. of Mechatronics Engennering, The Graduate School,
Pukyong National University*

Abstract

This dissertation is to present map building of mobile robot using RFID(Radio Frequency IDentification) technology. RFID technology is a remarkable method for mobile robot localization in indoor space. For mobile robot to perform map building, the mobile robot needs its localization and accurate driving in space. In this reason, firstly, kinematic modeling of mobile robot under non-holonomic constrains is introduced. Secondly, based on this modeling, a tracking controller is designed for tracking a given path connecting tag to tag based on backstepping method using Lyapunov function. The Lyapunov function is also introduced for proving the stability of the designed tracking controller. Thirdly, modeling for mobile robot to track trajectory in 2D space exactly is presented to estimate its absolute position because tracking error must be reduced for exact map building while the mobile robot is driving in indoor space. Fourthly, to implement the designed controller, a controller system

is developed based on microprocessor PIC18F452. Fifthly, 2D map building is performed by RFID system, mobile robot system and ultrasonic sensors. The RFID mobile robot system is composed of DC motor, encoder, ultra sonic sensor, digital compass, RFID receiver and RFID antenna. Finally, the path tracking simulation results and map building experimental results are presented to show the effectiveness of the designed controller.



제 1 장 서 론

1.1 연구 배경 및 동기

현재 이동로봇은 인간의 생활에 점차 적용되고 있다. 서비스 로봇, 청소 로봇, 안내로봇, 엔터테인먼트 로봇과 같은 이동로봇들은 인간의 생활을 더욱 편안하게 해줄 뿐 아니라 인간과 친밀한 상호작용이 가능하도록 구현되고 있다. 특히 최근 각광받고 있는 유비쿼터스(Ubiquitous) 환경에서 로봇은 컴퓨터 및 네트워크와의 정보교환을 통하여 공간을 주행하면서 각종 작업을 수행한다. 이를 위하여 이동로봇은 주변의 환경을 파악하고 원하는 지점으로의 이동하는 기능이 가장 핵심적으로 구현해야 할 부분이라고 할 수 있다. 이동로봇이 실내 공간상을 자유롭게 이동하기 위하여, 먼저 자신의 위치를 파악해야 하며(Localization), 파악된 자신의 위치정보를 이용하여 주변의 환경을 파악해야 한다(Map Building)[17]. 이동로봇이 자신의 위치와 주변환경을 파악한다면, 원하는 지점으로 로봇이 주행하는 자율주행을 구현할 수 있으며, 구현된 자율주행을 통하여 로봇은 실내공간을 이동하면서 각종 작업을 수행할 수 있다.

이동로봇이 자신의 위치를 파악하기 위해서 이용되는 방법에는 상대위치인식방법(Relative Localization Method)과 절대위치인식방법(Absolute Localization Method)이 있다. 상대위치인식방법으로는 주행기록계(Odometer)를 이용하여, 초기위치로부터 얼마만큼 이동했는가를 계산하는 추측항법(Dead Reckoning)을 많이 사용한다. 주로 모터에 연결된 엔코더로 측정하며, 측정된 바퀴의 회전량을 계산하여 위치를 측정한다. 상대위치인식방법은 적용이 쉽다는 장점이 있는 반면에, 바퀴에 슬립이 발생하거나 엔코더의 문제로 오차가 발생할 경우 오차가 누적된다는 단점이 있다. 상대위치인식방법만으로는 이동 로봇의 정확한 위치추정에 한계가 있으므로, 일반적으로 절대위치인식방법을 같이 사용하여 상대위치인식법의 오차를 보정하는 방법을 많이 사용하고 있다. 절대위치인식방법은 상대위치인식방법의 문제를 해결한 것으로 GPS(Global Positioning System), 초음파, 적외선, 비전(Vision)센서, RFID 등이 대표적인 위치인식방법 중 하나이다. 각 인식방법마다 장점과 단점이 존재하는데, GPS의 경우 실외 환경에서 적용되는 가장 대표적인 절대위치 인식법 중 하나이나 실내 환경에서 전파의 수신에 잘 되지 않는다는 단점이 있다. 초음파의 경우 반사파의 잡음이 발생하여 추측된 위치에 대한 오차가 발생하게 된다. 적외선 센서는 장거리의 인식이 힘들며 비전 센서의 경우, 조명의 영향을 많이 받으며 처리해야 할 데이터의 처리량이 크다는 단점이 존재한다.

RFID(Radio Frequency Identification)는 일정한 주파수 대역을 이용한 무선인식방식이다. 현재 물류 시스템 및 보안

시스템, 실시간 위치추적, 출입통제 시스템 등에 널리 사용되고 있다. 태그(Tag)와 수신기로 구성된 RFID 시스템은 태그(Tag)와 수신기를 이동로봇과 벽면 및 바닥에 설치하여 이동로봇이 주행 도중에 태그를 인식함으로써, 절대좌표계 내의 현재 위치 좌표를 추정하게 된다. 이러한 방식을 이용하여 이동로봇의 위치인식연구 및 주행제어기술, 맵 빌딩 등에 대한 적용이 주로 연구되고 있다. 대표적인 RFID를 이용한 이동로봇에 대한 연구내용으로 O. Kubitz와 M. O. Berger 등은 RFID 태그에 위치정보를 저장하여 시각 장애인을 위한 안내 로봇의 위치 및 경로 추종을 구현하였다[8]. D. Hanhel과 W. Burgard는 이동로봇에 두개의 RFID 안테나를 설치하고 레이저 스캐너를 이용하여 확률적으로 지도상의 태그의 위치를 추정하였으며, EKF(Extended Kalman Filter) 알고리즘을 사용하여 이동로봇을 정확한 위치를 측정하고 맵 빌딩 작업을 수행하였다[6]. 또한 A. Kleiner와 J. Prediger등은 RFID 태그와 IMU(Inertia Measurement Unit), 레이저 스캐너를 이용한 구조 로봇을 제작하여 SLAM(Simultaneous Localization and Mapping)을 구현하였다[10]. 그러나 고가의 레이저 스캐너를 사용한 맵 빌딩의 경우 이동로봇이 상용화될 때 가격문제가 발생할 우려가 있다. D. S. Seo등은 능동형(Active) RFID 태그를 바닥에 일괄적으로 배치하여 확률적 접근에 의한 이동로봇의 위치인식을 구현하였다[4]. 능동형 태그의 경우, 각 태그마다 전원을 연결해야 한다는 단점이 발생한다. T. Tsukiyama는 실내 복도에서 모노 카메라와 RFID 시스템을 이용하여 이동로봇의 글로벌 주행을 구현하였으며[11], S.B.Kim 등은 Active Beacon

System과 RFID시스템을 기반으로 이동로봇의 실내 위치를 추정하였다[3].

위와 같은 대다수의 연구결과에서 보면, 이동로봇의 절대위치 추정을 위하여 RFID 시스템을 적용하였다. 다른 절대위치 측정 시스템과 RFID 시스템을 비교해 보면 태그와 수신기, 안테나를 설치해야 한다는 번거로움이 있지만, 잡음의 우려가 거의 없으며, 태그내부의 메모리에 위치정보뿐 아니라 다른 정보까지도 저장할 수 있다는 장점이 있다. 또한 저가의 태그를 벽면이나 바닥에 부착하기만 하면, 어떤 환경에서도 이동로봇의 위치정보를 확인할 수 있다.

이와 같이 RFID를 시스템 기반의 이동로봇은 현재 이동로봇 연구에 있어 가장 중요하다고 할 수 있는 위치인식과 맵 빌딩에 적용하기 매우 용이하며, RFID 시스템을 이용한 지능형 홈 시스템 및 보안 시스템과 연계 및 통합시스템을 구축할 수 있다. 이는 이동로봇이 유비쿼터스 환경에서 적용될 수 있도록 하며, 앞으로의 연구가 더욱 필요한 부분이라고 할 수 있다. 특히 이동로봇을 통한 맵 빌딩의 경우 현재 이동로봇이 위치한 절대좌표를 추정하는 것이 매우 중요하다고 할 수 있으며, RFID 시스템의 경우 오차의 우려가 거의 없으며, 설치가 간단하다는 장점이 있다. 그러나 일반적으로 이동로봇의 맵 빌딩을 수행하기 위하여 사용하는 센서들은 고가의 레이저 센서들이 대다수이다.

따라서 본 논문은 이동로봇에 RFID 시스템을 적용한 것으로 특히, 실내 환경에서의 이동로봇의 안정적인 주행을 도모하며, 또한 미지의 주변환경을 이동로봇에 설치된 센서를 통하여 파악하는 맵 빌딩을 구현하는 것이다. 또한 고가의 장비가 아닌

사용한 센서는 일반 소형로봇에서 사용하는 저가의 초음파 센서와 디지털 나침반을 이용하였다.

1.2 연구 내용 및 방법

일반적으로 이동로봇의 맵 빌딩 구현방법으로는 이동로봇이 자신의 현재 위치를 파악하고 난 후 주어진 경로를 추정하면서 외부에 설치된 센서를 사용하여 맵 빌딩을 구현하는 것이다.

본 연구에서는 첫째, 이론 이동로봇의 제어 시스템을 구현하였다. 이론 이동로봇은 PIC 마이크로프로세서와 DC 모터, 로터리 엔코더, 초음파 센서, 디지털 나침반을 이용하여 구성하였다. RFID 시스템은 수신기와 안테나는 이동로봇에 각 1 개씩 설치하고, 태그는 실내공간의 바닥에 부착하여 이동로봇이 경로를 주행하면서 태그를 인식할 수 있도록 하였다. 둘째, non-holonomic 구속조건을 가지는 이론 이동로봇의 운동학적(kinematic) 모델링을 제시한 후, 제시된 운동학적 모델링을 바탕으로, 지정된 경로를 추종하는 제어기는 리아푸노프(Lyapunov) 함수를 사용하여 백스테핑(Backstepping)법에 의해 설계하고, 설계된 제어기의 시뮬레이션 결과를 제시하였다. 셋째, 이동로봇이 자신의 절대위치를 추정하기 위하여 2 차원 공간에서 이동로봇의 궤적에 대한 모델링을 제시하였다. 마지막으로 구현한 RFID 시스템과 이동로봇을 바탕으로 이동로봇의 좌우에 설치된 초음파센서로

벽면과 물체와의 거리를 측정하여, 이동로봇이 주행하는 실내 공간에 대한 2D 지도를 작성하고 그 결과를 제시하였다.



제 2 장 RFID기반 이동로봇 시스템의 구성 및 모델링

본 장에서는 RFID 기반 이동로봇 시스템의 구성을 서술하고, 또한 이를 이동로봇의 비홀로노믹 구속조건하의 운동학적 모델링을 제시한다. RFID기반 이동로봇 시스템은 RFID 시스템과 이를 이동로봇 시스템으로 구성되며, 이들은 다음에 나오는 각 절에 소개된다.

2.1 RFID 시스템

RFID 시스템은 안테나, 수신기, 태그로 구성되어 있으며, 태그는 바닥에 배치하고, 신호를 발생시켜 태그를 감지하는 안테나와 태그의 데이터를 수신하는 수신기는 이동로봇에 설치되어 있다. 본 절에서는 RFID 시스템의 구성과 본 연구에 적용된 RFID 시스템에 대하여 서술한다.

2.1.1 RFID시스템의 구성

RFID(Radio Frequency Identification)은 일정한 주파수 대역을 이용한 무선인식방식으로 편리하게 각종 인식정보를

주고받을 수 있는 기술 중 하나이다. 현재 물류 시스템 및 실시간 위치추적, 대여품 관리 및 출입통제 시스템 등에 광범위하게 적용되고 있다. 기존에 주로 사용되던 바코드(Barcode)의 단점을 극복한 것으로 현재 국제 표준화가 진행되면서 적용분야가 점차 늘어나고 있으며, 특히 USN(Ubiquitous Sensor Network)기술과 접목하며 많은 연구가 이루어지고 있다. 다른 무선인식 시스템과 비교했을 때 RFID는 여러 장점이 있으며, 세부적인 특징은 Table 2.1에 표시되어 있다[10].

일반적으로 RFID 시스템은 태그와 수신기, 안테나의 3가지 요소로 구성된다. Fig. 2.1은 일반적인 RFID 시스템의 구성을 나타낸 것이다.

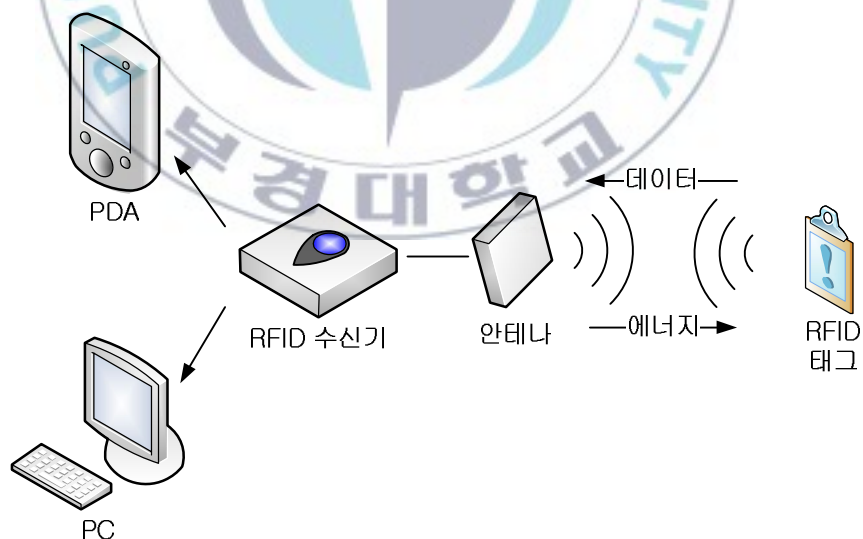


Fig. 2.1 Composition of RFID system

Table 2.1 Comparison of Other Identification System with RFID

시스템 요소	바코드	OCR	음성인식	생체인식	스마트 카드	RFID
데이터 용량(byte)	1~100	1~100	-	-	16~64K	16~64K
데이터 집적도	낮음	낮음	높음	높음	아주 높음	아주 높음
기계 인식률	좋음	좋음	가격대별 차이 큼	가격대별 차이 큼	좋음	좋음
환경에 대한 영향력	높음	높음	-	-	보통	영향받지 않음
물체 투과력	불가능	불가능	-	-	-	투과가능
인식기기 구입비용	낮음	중간	매우높음	매우높음	낮음	중간
사용에 따른 품질저하 가능성	사용기간 제한적	사용기간 제한적	-	-	접촉부 파손우려	영향받지 않음
운영비	낮음	낮음	없음	없음	보통	없음
불법복제/ 변조	가능성 있음	가능성 있음	가능함	불가능	불가능	불가능
인식속도	느림	느림	매우느림	매우느림	느림	매우빠름
최대인식 거리	0~0.5m	<0.01m	0~0.5m	직접접촉	직접접촉	0~0.5m

태그는 데이터를 저장할 수 있는 마이크로칩(Micro-Chip)과 코일 또는 전원부로 구성되어 있다. 반도체 관련 기술의 발전으로 인하여 마이크로칩의 소형화 기술이 발전되고 있으며 이에 따라 초소형 및 저가형 태그가 속속 개발되고 있다. 보통 인식이 필요한 물품이나 위치에 태그를 부착함으로써 RFID 수신기가 태그를 인식하게 된다. 태그는 적용 목적이나 부착지점에 따라 여러 형태로 생산되고 있으며, 전원의 보유 유무에 따라 수동형(Passive)태그와 능동형(Active)태그로 크게 분류할 수 있다. Fig. 2.2는 일반적인 스티커형 수동 RFID 태그의 모습이다. 태그의 외부를 둘러싸고 있는 코일은 자기장을 전기에너지로 변환시키고, 중앙에 마이크로칩이 위치하고 있다. 능동형 태그의 경우 전원부가 따로 구성되어 있다. 능동형 태그의 경우 긴 인식거리를 가진다는 장점이 있으나 태그의 크기가 커지며, 생산비가 비싸며, 수동 태그의 경우 인식거리는 짧으나 전원이 필요 없어 소형화가 가능하며, 생산단가가 저렴하다[1].

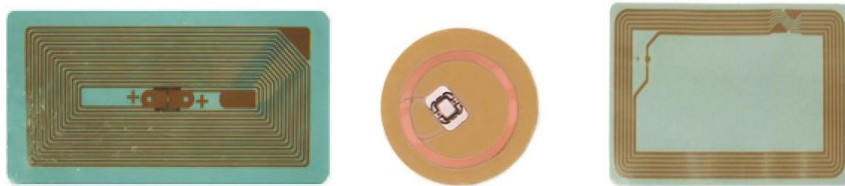


Fig. 2.2 Sticker Type Passive RFID Tags

RFID 수신기와 안테나는 태그로부터 신호를 전송하거나 수신받으며, 주파수와 자기장을 발생시킨다. RFID 시스템은 이용하는 주파수 대역에 따라 각기 다른 특징을 가지고 있으며 적용 목적에 따라 적절한 주파수 대역을 선정하여 사용한다. 각 주파수 대역에 따른 특징은 Table 2.2와 같다[8]. 일반적으로 수신기는 PC나 PDA등에 연결하여 사용한다.

Table 2.2 Comparison of RFID System with Frequency

주파수	저주파	고주파	극초단파		마이크로파
	125,134 kHz	13.56 MHz	433.92 MHz	860 ~ 960 MHz	2.45 GHz
인식거리	< 60 cm	약 60 cm	50~100m	3~10m	약 1m
특성	고가이며, 환경적 영향 없음	저주파보다 저가이며 다중태그 인식가능	긴 인식거리 및 실시간 정보추적이 가능	저가생산 가능 및 우수한 성능	900MHz와 유사하며 환경에 가장 민감
동작방식	수동형	수동형	능동형	능동/수동형	능동/수동형
적용분야	공장 자동화 및 출입통제	대여품 관리 및 교통카드	컨테이너 관리 및 실시간 위치추적	물류관리, 자동통행료 징수	위조방지, 실시간 위치추적, 전자봉인
인식속도	저속 ←-----→ 고속				
환경영향	강인 ←-----→ 민감				
태그크기	대형 ←-----→ 소형				

2.1.2 적용한 RFID 시스템

본 연구에 적용한 RFID 시스템은 Fig. 2.3에서 보여주며, Table 2.2의 13.56MHz의 주파수 특성을 가지는 수동형 RFID 시스템을 사용하였다. RFID 시스템은 이동로봇 시스템에 설치된 RFID 수신기와 안테나, 태그로 구성되어 이들은 각각 Figs. 2.3~2.6에 제시되어 있다. 태그를 쉽게 실내공간의 바닥에 부착할 수 있도록 Fig. 2.5와 같은 스티커 타입의 수동형 RFID 태그를 사용하였으며, Fig. 2.6와 같은 안테나와 수동형 태그와의 최대인식거리는 약 25cm정도이다. 안테나가 이동로봇에 설치되어 바닥의 태그를 감지하므로 25cm의 인식거리가 적당하며, 다중태그 인식이 가능하므로, 만약 태그를 촘촘히 배치할 경우에도 태그 인식에 문제가 없다. Fig. 2.4의 RFID 수신기는 이동로봇의 상부에 배치하였으며 안테나로 태그에 명령어를 전송한다.

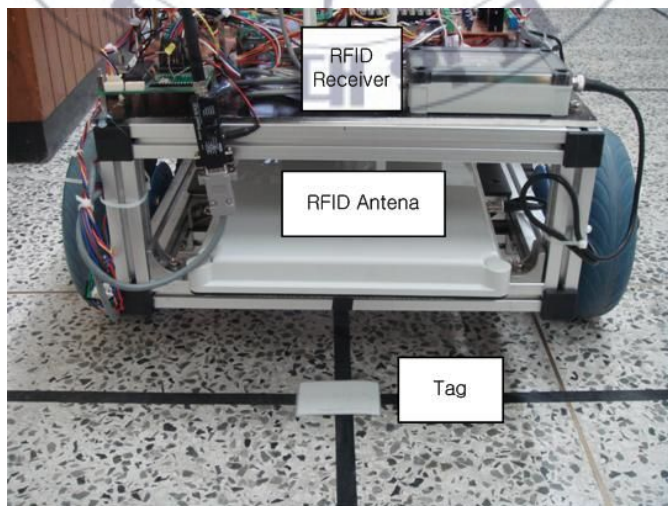


Fig. 2.3 RFID System in Mobile Robot



Fig. 2.4 Passive RFID Receiver



Fig. 2.5 Sticker Type Passive RFID Antenna



Fig. 2.6 Passive RFID Tag



2.2 이론 이동로봇 시스템의 구성 및 모델링

본 절에서는 이론 이동로봇 시스템의 구성과 비홀로노믹 조건하의 이동로봇의 운동학적 모델링(kinematic modeling)을 제시한다.

2.2.1 이론 이동로봇 시스템

이론 이동로봇 시스템은 플랫폼(Platform)에 2개의 구동바퀴와 이동로봇의 균형을 유지하기 위한 수동보조바퀴가 설치되어 있다. 또한 RFID 수신기, 디지털 나침반, 블루투스(Bluetooth) 통신모듈, 제어 시스템이 플랫폼 상부에 설치되어 있고, 안테나, 2개의 구동모터, 배터리, 엔코더가 플랫폼의 하부에 장착되어 있다. 맵 빌딩을 위해, 이동로봇과 벽면 및 물체와의 거리를 측정하는 2개의 초음파센서를 이동로봇의 좌측, 우측에 설치하였다. 이동로봇을 제어하기 위한 마이크로프로세서(Microprocessor)는 PIC18F452를 이용하여 구성하였으며, LMD18200을 이용한 DC 모터 드라이버를 사용하였다. 구동바퀴용 모터는 24V/15W 3000RPM의 DC 모터이며, 기어와 풀리를 통하여 이동로봇의 구동바퀴를 회전시킨다. 이동로봇의 상대위치측정을 위하여 로터리(Rotary) 엔코더를 구동모터에 설치하였으며, 이동로봇시스템의

구동전원을 공급하기 위하여 2개의 12V 배터리를 로봇의 하단에 장착하였고, 레귤레이터를 이용하여 모터 및 마이크로프로세서부, RFID 수신기에 작동전압을 공급한다. 이륜 이동로봇의 세부 구성은 Fig. 2.7과 같으며, 실제 사진을 Fig. 2.8과 같다.

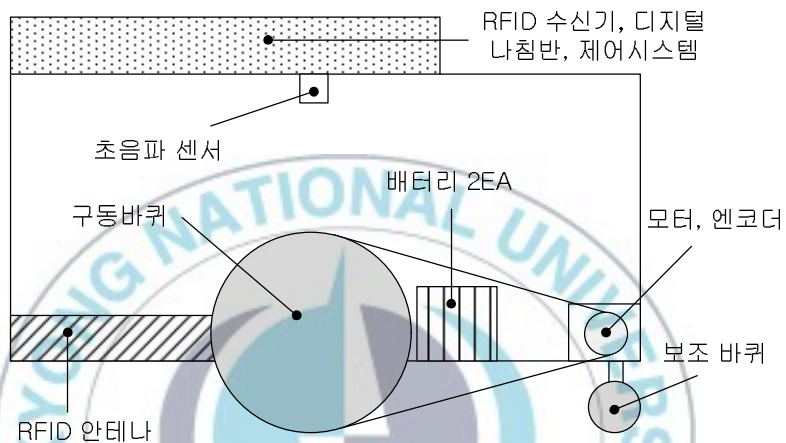


Fig. 2.7 Composition of Two-Wheeled Mobile Robot

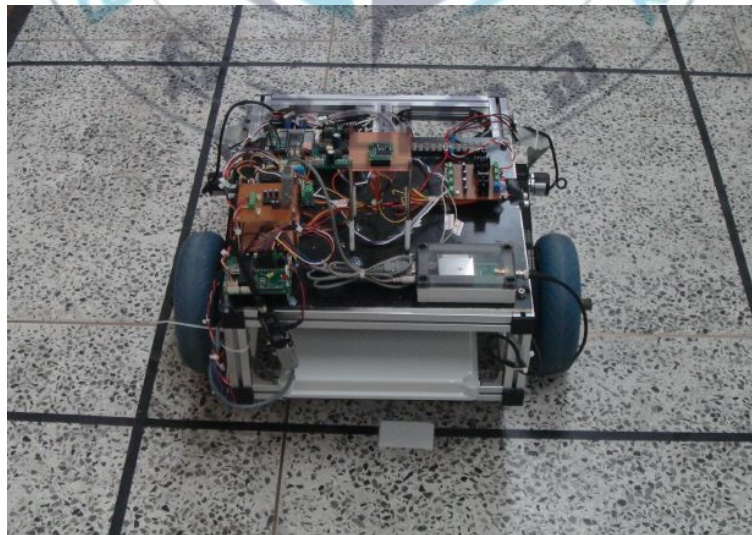


Fig. 2.8 Two-wheeled Mobile Robot

Fig. 2.9은 전체 제어시스템의 구성을 표현한 그림이며 실제 개발된 제어시스템의 사진은 Fig. 2.10과 같다. 제어 시스템은 4개의 PIC18F452와 2개의 초음파 센서, 디지털 나침반, DC모터, RFID 수신기 및 안테나로 구성되어 있다.

마스터(Master) CPU인 PIC18F452는 3개의 슬레이브(Slave) PIC18F452와 데이터를 주고받는다. 마스터와 슬레이브간 통신은 모터 제어용 슬레이브의 경우 I2C를 이용하며, RFID의 경우 병렬 연결을 이용한다. 마스터에는 초음파센서와 디지털 나침반이 I2C 방식으로 연결되어 있으며, 엔코더와 각 센서, RFID 시스템 데이터를 바탕으로 이동로봇의 위치를 계산하고, 벽이나 물체와의 거리를 측정하여, 제어 연산을 수행하게 된다.

LMD18200으로 구성된 모터 드라이버가 연결된 슬레이브는 마스터로부터 PWM 듀티비를 입력받아 구동모터를 작동시킨다.

RFID 시스템을 구동하는 슬레이브의 경우, 본 연구에서 적용한 RFID 시스템과 RS-232 통신을 이용하여 데이터를 주고받으며, 태그가 인식될 경우 태그의 정보를 마스터로 전송하여 마스터에서는 절대 좌표계의 좌표로 인식한다.

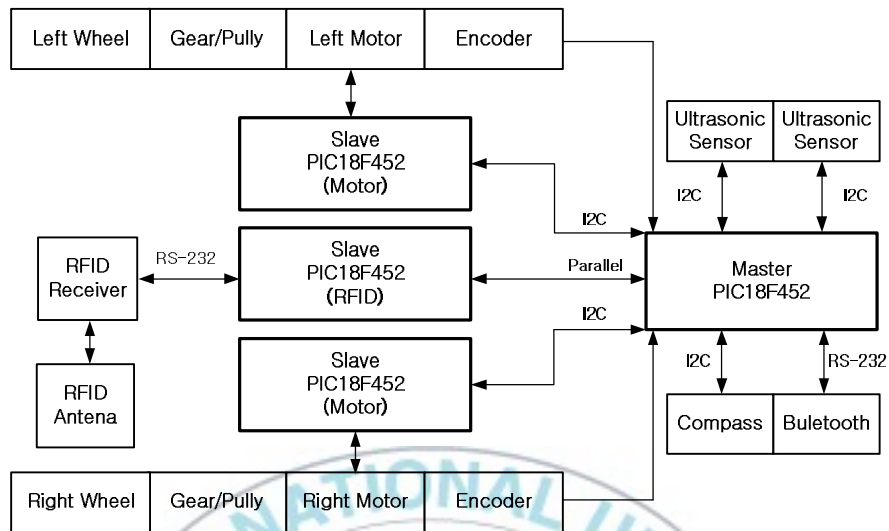


Fig. 2.9 Configuration of Control System

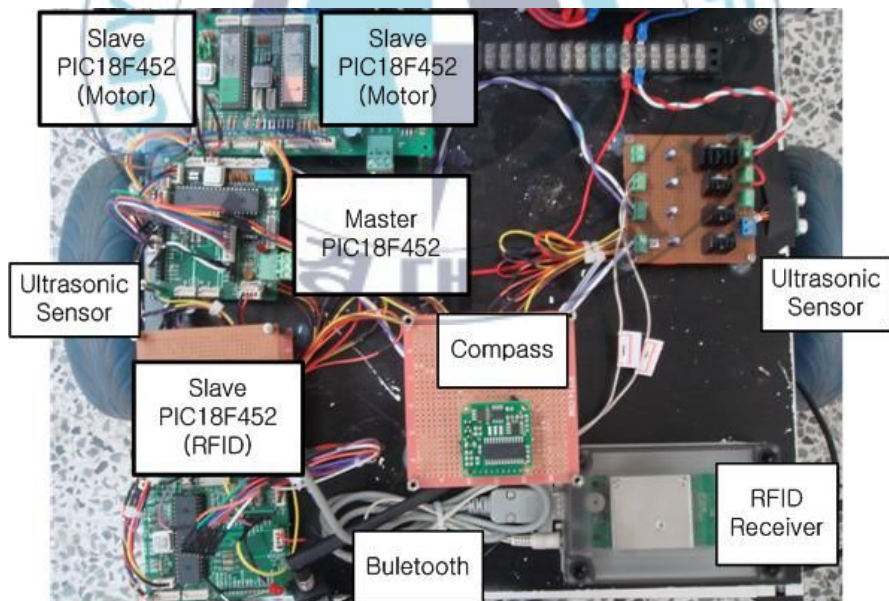


Fig. 2.10 Developed Control System

초음파 센서의 경우 최대 6m의 거리를 측정할 수 있는 SRF10 제품을 사용하였으며, 디지털 나침반은 0.1°의 분해능을 가지는 CMP03 제품을 사용하였다. 디지털 나침반은 경우 이동로봇이 초기위치일 때와 구동 중의 각도를 측정하여 그 변화량을 바탕으로 이동로봇의 각도변화량을 측정할 수 있다. Fig. 2.11와 Fig. 2.12은 각각 초음파 센서와 디지털 나침반을 보여준다.



Fig. 2.11 Ultrasonic Sensor



Fig. 2.12 Digital Compass

엔코더는 모터의 1회전당 360 펄스(Pulse)를 발생시키며, 모터의 축에 연결하여 모터의 회전수를 측정한다. 측정된 회전수는 마스터로 전송되어 마스터에서 주행바퀴의 각속도를 연산할 수 있게 하며, Fig. 2.12은 모터에 연결된 엔코더를 표시하고 있다.

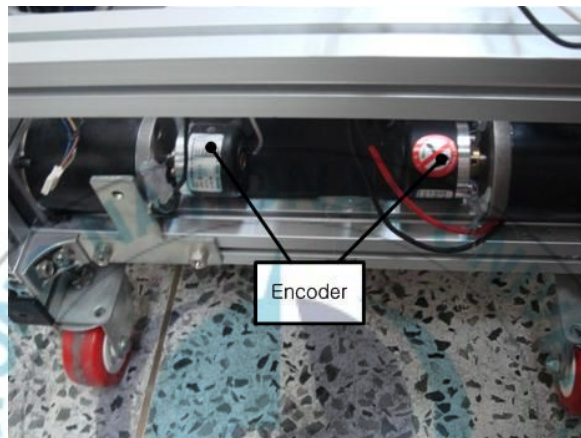


Fig. 2.13 Encoder

2.2.2 이동로봇의 운동학적 모델링

이 절에서는 비홀로노믹 구속조건을 가지는 이동로봇의 운동학적 모델링(Kinematic Modeling)을 제시한다. 비홀로노믹 시스템 모델링은 여러 문헌에서 소개되었다[13-14]. Fig. 2.14는 운동학적 모델링을 위하여 이동로봇의 움직임을 좌표계로 표현한 것이며, Table 2.3은 이동로봇의 시스템 모델링을 위한 매개 변수들을 표시한 것이다.

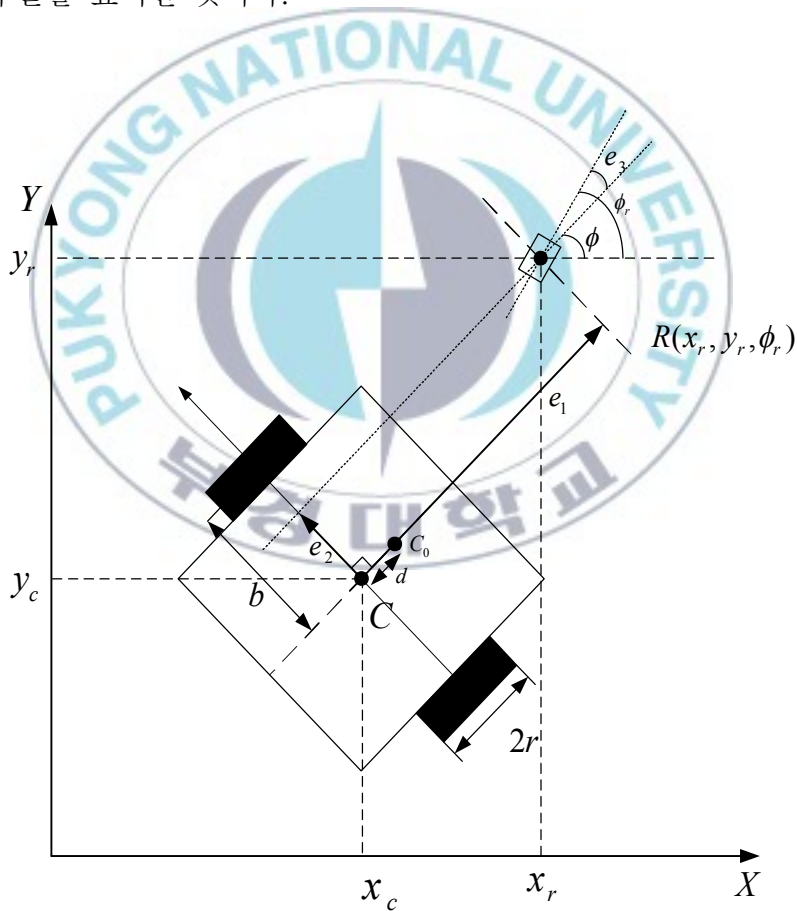


Fig. 2.14 Coordinates of Two-Wheeled Mobile Robot

Table 2.3 Parameters Used for Mobile Robot System Modeling

Parameter	Description
$C(x, y, \phi)$	이동로봇의 기하학적 중심좌표
C_0	이동로봇의 구속조건 정의를 위한 가상 무게 중심좌표
$R(x_r, y_r, \phi_r)$	이동로봇의 목표좌표
d [m]	C 에서 C_0 까지의 거리
b [m]	C 에서 바퀴까지의 거리
r [m]	바퀴의 반지름
ϕ [rad]	이동로봇의 전진방향이 X 축과 이루는 주행각
θ_r [rad]	우측 구동바퀴의 회전각
θ_l [rad]	좌측 구동바퀴의 회전각
ω_{rw} [rad/s]	우측 구동바퀴의 회전각속도
ω_{lw} [rad/s]	좌측 구동바퀴의 회전각속도
v [mm/s]	이동로봇의 전진속도
ω [rad/s]	이동로봇의 회전각속도

2개의 구동바퀴는 이동로봇의 기하학적인 중심을 지나는 축에 위치하고 있으며, 무게중심은 기하학적 중심에 위치한다고 가정한다. 또한 보조바퀴를 이동로봇의 앞부분에 설치하여

균형을 유지하고 있으며, 보조바퀴는 운동학적 모델링에서 무시된다. C 는 이동로봇의 기하학적 중심의 좌표이며 (x, y, ϕ) 로 표현된다.

이동로봇은 다음과 같이 일반화된 좌표로 표현할 수 있다.

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \phi \\ \theta_r \\ \theta_l \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

여기서 $\mathbf{q}$ 는 일반화된 좌표벡터이다. 이동로봇은 전진방향으로의 대칭축에 수직방향으로 움직일 수 없고(No slipping condition), 구동바퀴가 슬립이 없이 회전한다고 가정하면(Pure rolling condition), 다음 식이 유도될 수 있다.

$$\dot{y} \cos \phi - \dot{x} \sin \phi - d\dot{\phi} = 0 \quad (2.2)$$

$$\dot{x} \cos \phi + \dot{y} \sin \phi + b\dot{\phi} = r\dot{\theta}_r \quad (2.3)$$

$$\dot{x} \cos \phi + \dot{y} \sin \phi - b\dot{\phi} = r\dot{\theta}_l \quad (2.4)$$

위의 구속방정식에 의해 운동이 영향을 받는다고 하면, 구속방정식은 다음과 같은 벡터 형식으로 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{A}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} &= \mathbf{0} \\ \dot{\mathbf{q}} &= \mathbf{S}(\mathbf{q})\mathbf{z} \end{aligned} \quad (2.5)$$

여기서 $\mathbf{A}(\mathbf{q})$ 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{A}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} -\sin \phi & \cos \phi & -d & 0 & 0 \\ \cos \phi & \sin \phi & b & -r & 0 \\ \cos \phi & \sin \phi & -b & 0 & -r \end{bmatrix} \in \mathfrak{R}^{3 \times 5} \quad (2.6)$$

$\mathbf{S}(\mathbf{q})$ 는 $\mathbf{S}^T(\mathbf{q})\mathbf{A}^T = \mathbf{0}$ 을 만족하는 $\mathbf{A}(\mathbf{q})$ 의 영공간으로서 full rank 행렬이면, $\dot{\mathbf{q}}$ 또한 $\mathbf{A}(\mathbf{q})$ 의 영공간이다. 따라서 $\dot{\mathbf{q}}$ 또한 $\mathbf{S}(\mathbf{q})$ 와의 선형결합으로 표시할 수 있으며, $\mathbf{z}$ 는 선형결합을 위한 보조속도벡터이다.

좌우 구동바퀴의 회전각속도에 따른 이동로봇의 기하학적 중심 C 에서의 전진속도 v 와 C 에서의 회전각속도 ω 는 다음과 같은 관계가 있다.

$$v = \frac{(v_{wr} + v_{wl})}{2} = \frac{r}{2}(\omega_{wr} + \omega_{wl}) \quad (2.7)$$

$$\omega = \dot{\phi} = \frac{r}{2b}(\omega_{wr} - \omega_{wl}) \quad (2.8)$$

여기서 v_{wl}, v_{wr} 은 각각 좌우 구동바퀴에서의 선속도를 표시한다. v 와 ω 를 행렬식을 표시하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} & \frac{r}{2} \\ \frac{r}{2b} & -\frac{r}{2b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{wr} \\ \omega_{wl} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

위 식을 이용하여 v 와 ω 를 성분으로 보조속도벡터를 $\mathbf{z} = [v \ \omega]^T$ 라 하면 좌우 구동바퀴의 회전각속도 ω_l, ω_r 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{\mathbf{\theta}}(t) = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_r \\ \dot{\theta}_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_{wr} \\ \omega_{wl} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{r} & \frac{b}{r} \\ \frac{1}{r} & -\frac{b}{r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

비홀로노믹 구속조건 식으로부터 이동로봇의 운동학적 방정식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\dot{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\phi} \\ \dot{\theta}_r \\ \dot{\theta}_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & -d \sin \phi \\ \sin \phi & d \cos \phi \\ 0 & 1 \\ 1/r & b/r \\ 1/r & -b/r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \equiv \mathbf{S}(\mathbf{q})\mathbf{z} \quad (2.11)$$

본 논문에서 비홀로노믹 구속조건에 의한 모델링으로 설계한 경로추종 제어기는 x, y, ϕ 를 상태변수로 두었다.

$$\mathbf{q} = [x \quad y \quad \phi]^T \quad (2.12)$$

상태변수 $\mathbf{q}$ 를 식 (2.12)와 같이 선언하면, 식 (2.6)과 식 (2.11)로부터 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\mathbf{A}(\mathbf{q}) = [-\sin \phi \quad \cos \phi \quad -d] \quad (2.13)$$

$$\dot{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & -d \sin \phi \\ \sin \phi & d \cos \phi \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \mathbf{S}(\mathbf{q})\mathbf{z} \quad (2.14)$$

다시 $\mathbf{S}(\mathbf{q})$ 를 구하면 다음과 같다.

$$\mathbf{S}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} \cos \phi & -d \sin \phi \\ \sin \phi & d \cos \phi \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

구속조건에 의해 이동로봇의 기하학적 중심과 무게중심이 같을 때, 이동로봇의 운동학적 방정식(2.14)는 다음과 같이 주어진다.

$$\dot{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 \\ \sin \phi & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \equiv \mathbf{S}(\mathbf{q})\mathbf{z} \quad (2.16)$$

그러므로 $\dot{x}, \dot{y}, \dot{\phi}$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= v \cos \phi \\ \dot{y} &= v \sin \phi \\ \dot{\phi} &= \omega \end{aligned} \quad (2.17)$$

최종적으로 이동로봇이 도달하기 위한 목표좌표 $R(x_r, y_r, \phi_r)$ 에서의 목표전진속도는 v_r 이고 목표회전각속도가 ω_r 일 경우, 목표좌표에서 운동학적 방정식은 다음과 같다.

$$\dot{\mathbf{q}}_r = \begin{bmatrix} \dot{x}_r \\ \dot{y}_r \\ \dot{\phi}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi_r & 0 \\ \sin \phi_r & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_r \\ \omega_r \end{bmatrix} = \mathbf{S}_r(\mathbf{q}_r)\mathbf{z}_r \quad (2.18)$$

제 3 장 이동로봇의 제어기 설계

본 장에서는 2장에서 서술한 비홀로노믹 구속조건하의 운동학적 모델링을 바탕으로 한 이동로봇의 백스테핑 경로추종 제어기를 설계한 결과를 제시한다.

3.1 운동학적 모델을 고려한 이동로봇의 백스테핑 제어기 설계

운동학적 모델을 고려한 이동로봇의 경로추종 제어기를 설계하기 위하여 이동로봇의 목표모델을 식(2.18)로부터 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$\mathbf{q}_r = [x_r \quad y_r \quad \phi_r]^T, \mathbf{v}_r = [v_r \quad \omega_r]^T \quad (3.1)$$
$$\dot{x}_r = v_r \cos \phi_r, \dot{y}_r = v_r \sin \phi_r, \dot{\phi}_r = \omega_r$$

여기서 $\mathbf{q}_r$ 은 경로 위의 목표좌표 (x_r, y_r) 과 이동로봇의 진행방향이 X 축과 이루는 각 ϕ_r 를 성분으로 하는 목표 위치벡터이다. $\mathbf{v}_r$ 은 목표좌표 위의 이동로봇의 목표 선속도 v_r 과

목표회전각속도 ω_r 을 성분으로 하는 목표속도입력벡터다.

경로추종 제어기의 목적은 $t \rightarrow \infty$ 일 때, 이동로봇의 현 위치벡터 $\mathbf{q}$ 를 목표위치벡터 $\mathbf{q}_r$ 로 수렴시키도록 하는 것이다. 즉

$t \rightarrow \infty$ 일 때 추적오차 $e_i \rightarrow 0$ 이 되도록 설계하는 것과 같다.

추적오차벡터 e 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$e = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi & 0 \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r - x \\ y_r - y \\ \phi_r - \phi \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

추적오차벡터의 도함수 $\dot{e}$ 는 다음과 같다.

$$\dot{e} = \begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \\ \dot{e}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_r \cos e_3 \\ v_r \sin e_3 \\ \omega_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1 & e_2 \\ 0 & -e_1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

리아푸노프 함수를 다음과 같이 정의한다.

$$V_1 = \frac{1}{2} e_1^2 + \frac{1}{2} e_2^2 + \frac{1 - \cos e_3}{k_2} \geq 0 \quad (3.4)$$

식(3.4)의 도함수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
\dot{V}_1 &= e_1 \dot{e}_1 + e_2 \dot{e}_2 + \frac{\sin e_3}{k_2} \dot{e}_3 \\
&= e_1 (v_r \cos e_3 - v + \omega e_2) + e_2 (v_r \sin e_3 - \omega e_1) \\
&\quad + \frac{\sin e_3}{k_2} (\omega_r - \omega) \\
&= e_1 (v_r \cos e_3 - v) + \frac{\sin e_3}{k_2} (\omega_r - \omega + k_2 e_2 v_r)
\end{aligned} \tag{3.5}$$

k_1, k_2, k_3 는 양의 정수이며, $\dot{V} \leq 0$ 을 얻기 위해 이동로봇의 속도성분 v, ω 을 정의하면 다음과 같다.

$$\begin{cases} -k_1 e_1 = v_r \cos e_3 - v \\ -k_3 \sin e_3 = \omega_r - \omega + k_2 e_2 v_r \end{cases} \tag{3.6}$$

$$\begin{cases} v = v_r \cos e_3 + k_1 e_1 \\ \omega = \omega_r + k_3 \sin e_3 + k_2 e_2 v_r \end{cases} \tag{3.7}$$

v_d, ω_d 를 각각 목표 가상 추적 선속도와 목표 가상 추적 각속도라고 정의하면, $v = v_d, \omega = \omega_d$ 이며, 최종 제어칙은 다음과 같다.

$$\begin{cases} v_d = v_r \cos e_3 + k_1 e_1 \\ \omega_d = \omega_r + k_3 \sin e_3 + k_2 e_2 v_r \end{cases} \tag{3.8}$$

식 (3.8)과 (2.9)를 이용하면, 좌우 구동바퀴의 회전 각속도는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \omega_{wr} \\ \omega_{wl} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{r} & \frac{b}{r} \\ \frac{1}{r} & -\frac{b}{r} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} v_d \\ \omega_d \end{pmatrix} \quad (3.9)$$



3.2 설계된 제어기의 시뮬레이션 결과

본 절에서는 비홀로노믹 구속조건을 이용한 운동학적 모델링 결과를 바탕으로 설계된 백스텝핑 제어기를 효율성을 검증하기 위하여 Matlab을 이용한 시뮬레이션을 결과를 제시한다. 시뮬레이션에 사용된 매개변수 값은 Table 3.1과 같다.

Table 3.1. The Numeric Values of Initial Value for Simulation

Parameter	Value	Unit
b	0.27	[m]
r	0.11	[m]
x_1	0.25	[m]
y_1	0.25	[m]
v_r	0.05	[m/s]
ω_r	0	[rad/s]

목표 주행속도는 0.05 m/s 이며, 목표 경로는 Fig. 3.1에 표시되어 있다. 경로의 전체 추적 시간은 120초이다. 총 6개의 지점으로 나누고, 각각 직선구간과 곡선구간으로 나뉘어진다. 곡선구간의 반경은 1m이며 직선구간의 길이 또한 1m이다. 또한

이동로봇의 초기위치는 (0.25, 0.25)이며, 초기 진행방향 주행각은 30°로 지정하였다. 상수 매개변수 $k_1 = 0.5, k_2 = 100.5, k_3 = 0.8$ 로 두고 시뮬레이션을 실시하였다.

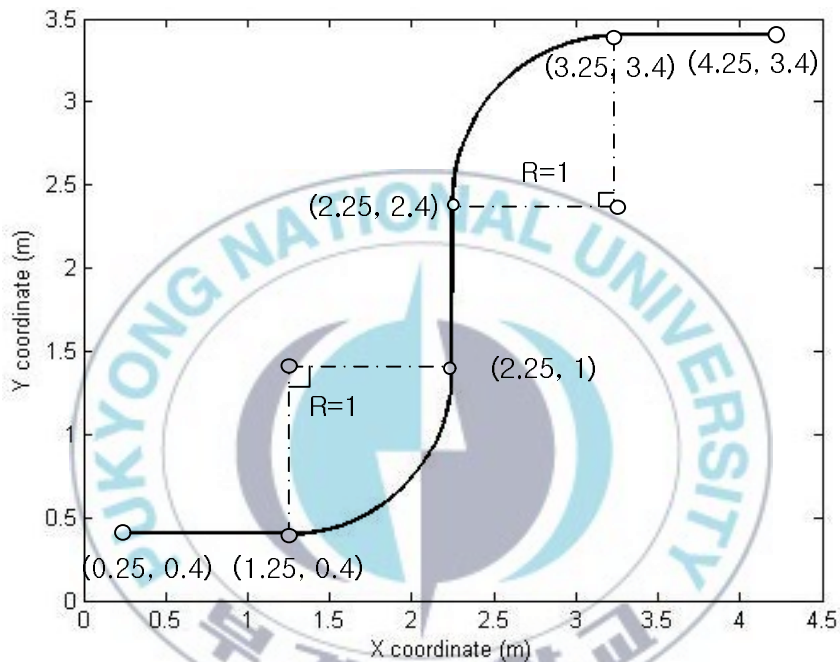


Fig. 3.1 Reference Path of Mobile Robot

Fig. 3.2는 이동로봇이 목표경로를 추적할 때, 식(3.2)에서 정의한 추적오차에 대한 시뮬레이션 결과를 보여준다. 약 15초 후에 모든 오차가 영으로 수렴하는 것을 보여준다. 또한 직선구간에서 곡선구간으로 변경 시 오차 또한 영으로 수렴되는 것을 보여주고 있다.

Fig. 3.3는 좌우 구동바퀴의 회전각속도를 나타내고 있다. 초기에 진행방향의 주행각은 30° 이므로 직선운동을 위해 좌측바퀴속도는 증가 후 감소하며, 우측바퀴속도는 감소 후 증가되는 요동운동 후 직선운동을 하고 있음을 보여준다. 이동로봇이 직선구간을 진행할 때 좌우 바퀴의 각속도는 동일하며, 곡선구간을 진행할 때마다 일정한 각속도로 변경되고 있음을 보여준다.

Fig. 3.4는 이동로봇의 주행각속도를 보여주고 있다. 직선구간을 이동할 때 주행각속도는 초기에는 감소 후 증가하다가 15초 후 영으로 나타나고 곡선구간을 주행시 이동로봇의 주행각속도가 $\pm 0.05\text{rad/s}$ 로 변함을 나타내고 있다.

Fig. 3.5는 이동로봇의 주행선속도를 표시하고 있다. 주행선속도의 경우 주행이 시작되고 10초 후 목표 선속도인 0.05m/s 로 일정하게 수렴함을 나타낸다.

Fig. 3.6는 이동로봇의 이동경로를 나타낸 것이며, 목표경로와 실제 시뮬레이션 경로를 같이 표시한 것이다. 주행이 시작되고 약 15초 후, 0.6m 진행 후 목표경로와 거의 오차 없이 진행함을 나타내고 있다. 또한 로봇의 경로가 직선 구간에서 곡선 구간으로 변경되더라도 목표 경로와 실제 경로의 차이가 거의 없음을 보여준다.

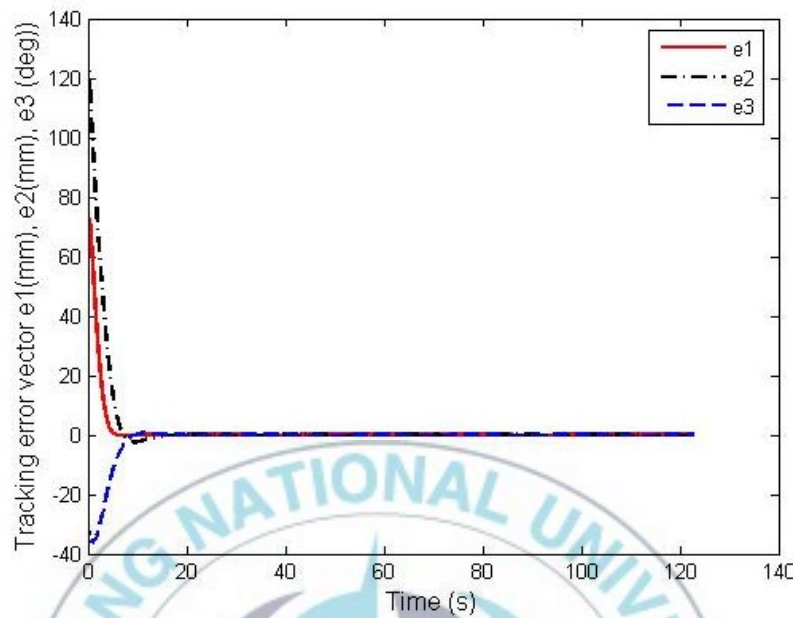


Fig. 3.2 Tracking Errors

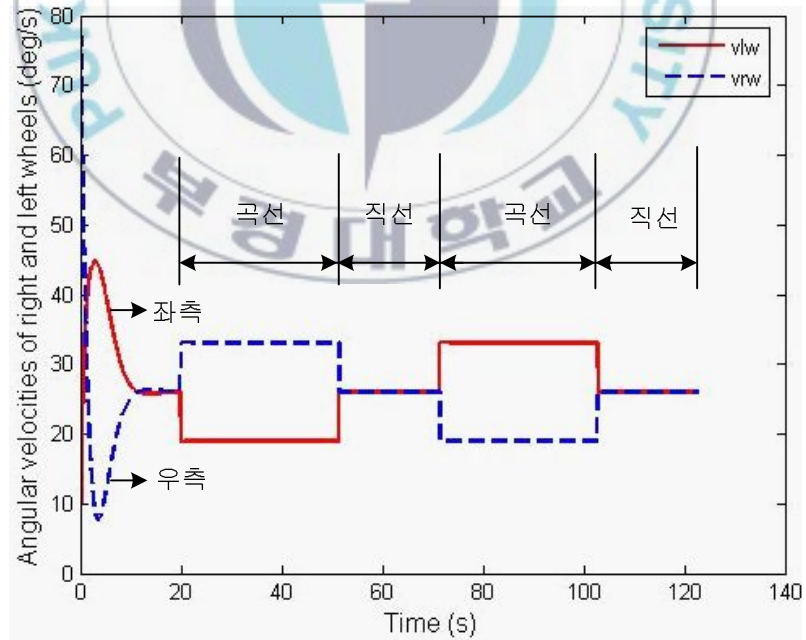


Fig. 3.3 Angular Velocity of Left/Right Wheel

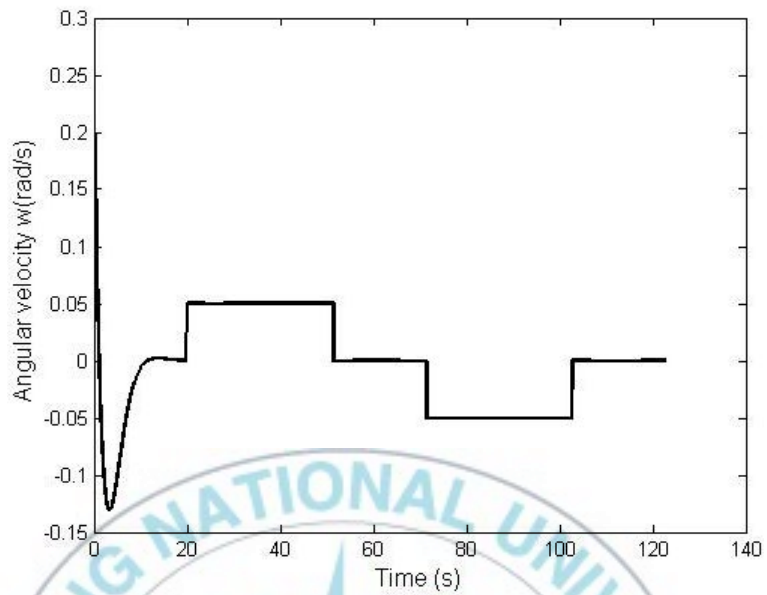


Fig. 3.4 Angular Velocity of Mobile Robot

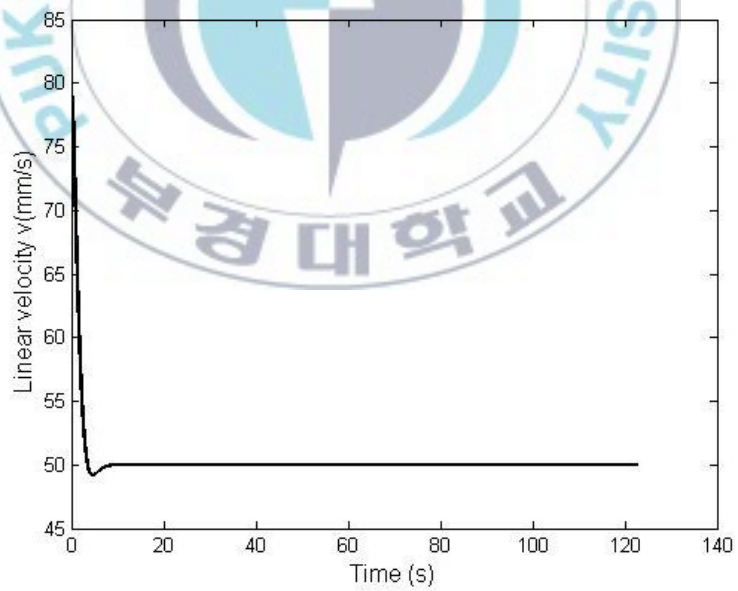


Fig. 3.5 Linear Velocity of Mobile Robot

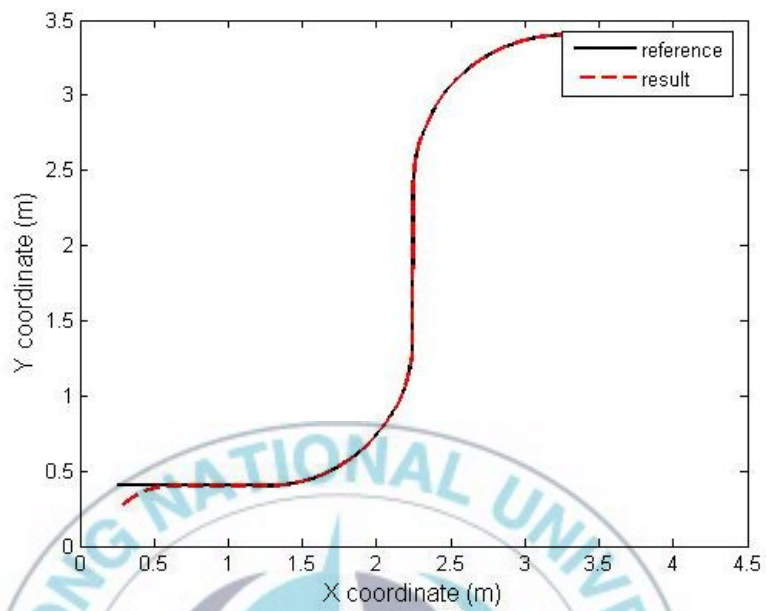


Fig. 3.6 Movement of Mobile Robot

제 4 장 맵 빌딩을 위한 이동로봇의 위치 및 주행방향 모델링

2장에서 서술한 비홀로노믹 구속조건에 의한 이론 이동로봇의 모델링 결과를 바탕으로 제어기를 설계한다. 설계된 제어기를 실제 실험으로 구현할 경우, 각종 원인으로 인해 주행오차가 발생하게 된다. 노면이 고르지 못하거나, 미끄러울 때 바퀴의 슬립이 발생할 수 있다. 또한, 이동로봇에 설치된 엔코더나 모터의 오차, 이동로봇 구조상의 오차로 인하여 이동로봇의 현재 위치를 정확하게 추정할 수 없다는 단점이 발생한다. 만약 오차가 계속적으로 발생하면 점점 오차는 누적되게 되고, 시간이 흐를수록 오차는 점점 증가한다. 이는 이동로봇이 실제 환경에서 구현되는데 큰 문제점으로 작용하고 있다.

맵 빌딩을 수행하기 위하여 가장 중요한 문제는 이동로봇이 자신의 위치를 정확하게 인식하는 것이다. 이동로봇이 자신의 위치를 정확하게 측정하지 못한다면, 실내공간을 주행하면서 주변환경을 측정하더라도 어디서 측정되었는지를 알지 못하므로 획득한 주변환경의 데이터는 의미가 없어진다. 그러므로 이동로봇이 주행 중 오차를 줄이기 위한 새로운 방법이 필요하다. 위와 같은 문제를 고려하여 본 장에서는 이동로봇의 위치 및 주행방향을 추정하기 위한 이동로봇의 모델링을 제시하였다.

4.1 이론 이동로봇의 주행 분석

4.1.1 이론 이동로봇의 주행궤적 모델링

Wang과 Tsumuru 등은 이동로봇의 주행오차를 추종하기 위하여, 이동로봇의 궤적을 다음과 같은 방법으로 제시하였다[15-16]. 이론 이동로봇이 점 O 를 중심으로 회전 운동을 한다고 가정하면, 이동로봇의 움직임은 Fig. 4.1과 같이 개념화할 수 있다. 좌우 바퀴의 위치를 각각 A, C 이며, 로봇의 중심은 B 이다. 또한 이동 로봇의 중심에서 각 바퀴까지의 거리는 같다고 가정한다.

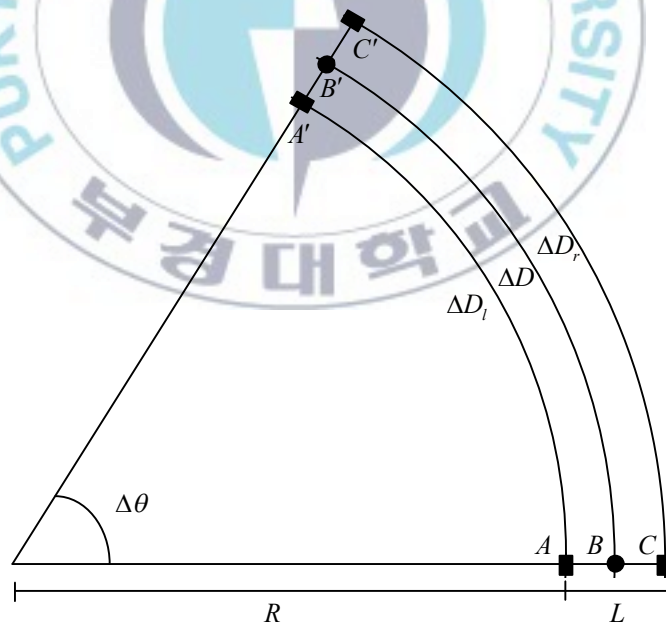


Fig. 4.1 Concept of the Drive System

위 그림에서 이동로봇의 중심이 B 에서 B' 로 이동한다고 하면, 이동 변위는 ΔD 라고 할 수 있다. 또한 좌우 바퀴 사이의 거리인 L 은 AC 와 $A'C'$ 의 길이와 같으며, 각각의 바퀴가 움직인 변위는 $\Delta D_r, \Delta D_l$ 로 표시된다. $\Delta D_r, \Delta D_l$ 은 다음과 같은 식을 만족한다.

$$\Delta D_r = (L + R)\Delta\theta, \quad \Delta D_l = R\Delta\theta, \quad \Delta D = (L/2 + R)\Delta\theta \quad (4.1)$$

이동로봇의 중심점의 이동변위와 각도변위는 좌우 바퀴의 이동변위를 이용하여 표시할 수 있다. 식 (4.1)의 ΔD_r 와 ΔD_l 을 합과 차를 이용하여 ΔD 와 $\Delta\theta$ 를 구하면 식 (4.2)와 같다.

$$\begin{aligned} \Delta D &= (\Delta D_r + \Delta D_l) / 2 \\ \Delta\theta &= (\Delta D_r - \Delta D_l) / L \end{aligned} \quad (4.2)$$

4.1.2 2차원 공간에서 이동로봇의 위치 및 주행방향 모델링

이동로봇의 이동공간을 시간 n 의 2차원 공간이라고 하면 이동로봇의 위치는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$U_n = (X_n \ Y_n \ \theta_n) \quad (4.3)$$

Fig. 4.2 Illustration of robot position

시간이 $n-1$ 일 때 점

4 1

있지만, 이동로봇의 궤적이 직선이 아닐 경우, ΔD_n 만으로 확실한 이동로봇의 2차원 위치좌표를 알 수 없다. 이동로봇의 정확한 위치좌표를 구하기 위하여, Fig. 4.2와 같이 시간이 $n-1$ 에서 n 으로 될 때 이동변위 ΔD_n 은 $\overline{OP}$ 이며, 각도변위 $\Delta\theta_n$ 은 $\angle ABP$ 이다. $\overline{BC}$, $\overline{DE}$, $\overline{OP}$ 가 평행하며, $\overline{BC}$ 가 $\angle ABP$ 를 이등분한다고 가정하면 식 (4.3)를 유도할 수 있다.

$$\angle ABC = \angle ADE = \angle AOP = \Delta\theta_n / 2 \quad (4.3)$$

$\angle POF$ 는 식 (4.4) 와 같다.

$$\angle POF = \angle AOF - \angle AOP = \theta_{n-1} + \Delta\theta_n / 2 \quad (4.4)$$

점 P 의 정확한 좌표값을 구하기 위해서는 $\overline{OP}$ 의 길이가 필요하다. $\overline{OP}$ 의 길이를 구하기 위하여 $\overline{OP} = \overline{OP'} = \Delta D_n$ 을 만족하는 점 P' 를 정의하면, 대략적으로 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta X_n &\approx \Delta D_n \cos(\theta_{n-1} + \Delta\theta_n / 2) = \overline{OF} \\ \Delta Y_n &\approx \Delta D_n \sin(\theta_{n-1} + \Delta\theta_n / 2) = \overline{P'F} \end{aligned} \quad (4.6)$$

위 식을 이용하여 근사화한 시간 n 일 때, 이동로봇의 위치를 정의하면 식 (4.7)과 같다.

$$\begin{aligned}
x_n &= x_{n-1} + \Delta x_n \approx x_{n-1} + \Delta D_n \cos(\theta_{n-1} + \Delta \theta_n / 2) \\
y_n &= y_{n-1} + \Delta y_n \approx y_{n-1} + \Delta D_n \sin(\theta_{n-1} + \Delta \theta_n / 2) \\
\theta_n &= \theta_{n-1} + \Delta \theta_n
\end{aligned} \tag{4.7}$$

그러나 실제로 로봇이 위치하는 좌표는 점 P 이기 때문에 $\overline{OP}$ 와 $\overline{OP}$ 의 관계식을 정의하면 점 P 에 위치한 이동로봇의 정확한 좌표를 계산할 수 있다. $\overline{OP}$ 와 $\overline{OP}$ 의 관계는 식(4.8)과 같다.

$$\frac{\overline{OP}}{\overline{OP}} = \frac{2(L/2 + R) \sin(\Delta \theta_n / 2)}{(L/2 + R) \Delta \theta_n} = \frac{\sin(\Delta \theta_n / 2)}{\Delta \theta_n / 2} \tag{4.8}$$

그러므로 $\overline{OP}$ 의 길이는 아래와 같다.

$$\overline{OP} = \Delta D_n \frac{\sin(\Delta \theta_n / 2)}{\Delta \theta_n / 2} \tag{4.9}$$

위 결과를 이용하여 ΔX_n 과 ΔY_n 을 재정의하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned}
\Delta x_n &= \frac{\sin(\Delta \theta_n / 2)}{\Delta \theta_n / 2} \Delta D_n \cos(\theta_{n-1} + \Delta \theta_n / 2) \\
\Delta y_n &= \frac{\sin(\Delta \theta_n / 2)}{\Delta \theta_n / 2} \Delta D_n \sin(\theta_{n-1} + \Delta \theta_n / 2)
\end{aligned} \tag{4.10}$$

그러므로 시간 n 일 때 이동로봇의 정확한 위치는 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned}x_n &= x_{n-1} + \frac{\sin(\Delta\theta_n / 2)}{\Delta\theta_n / 2} \Delta D_n \cos(\theta_{n-1} + \Delta\theta_n / 2) \\y_n &= y_{n-1} + \frac{\sin(\Delta\theta_n / 2)}{\Delta\theta_n / 2} \Delta D_n \sin(\theta_{n-1} + \Delta\theta_n / 2) \\ \theta_n &= \theta_{n-1} + \Delta\theta_n\end{aligned}\tag{4.11}$$



제 5 장 RFID와 초음파센서를 이용한 맵 빌딩

본 장에서는 RFID 시스템과 이동로봇 시스템을 바탕으로 한 실내공간의 맵 빌딩 결과를 제시한다. 맵 빌딩 실험을 위하여 실내공간의 벽면에 물체를 설치하고 RFID 태그와 디지털 나침반의 데이터를 이용하여 이동로봇이 절대위치를 보정하였다. 맵 빌딩 과정을 수행하기 위하여 이동로봇은 정확한 자신의 위치 파악이 무엇보다도 중요하다. 그러므로 엔코더를 이용한 상대위치인식 방법뿐 아니라, 디지털 나침반과 RFID를 이용하여 이동로봇의 절대위치의 측정이 필요하다. 맵 빌딩 실험은 2가지로 진행되었다. 먼저 디지털 나침반과 엔코더의 데이터를 이용한 맵 빌딩 실험과 RFID, 디지털 나침반 및 엔코더를 이용하여 맵 빌딩을 수행한 결과를 제시한다.

5.1 1차 맵 빌딩 실험

일반적으로 이동로봇이 공간상을 주행할 때, 바퀴의 오차나, 바닥면의 상태에 따라서 오차가 발생하게 되고, 발생하는 오차로 인해 이동로봇은 절대좌표계 내의 현재 자기위치를 알 수 없다. 실내공간의 맵 빌딩을 구현하기 위하여 가장 먼저 선행되어야 할 것은 이동로봇 자신의 위치를 아는 것이다. 1차 맵 빌딩 실험은

이동로봇이 유연한 곡선 주행에서 디지털 나침반과 엔코더의 데이터를 바탕으로 이동로봇의 정확한 위치를 파악하여 벽면과 물체의 형상을 파악하는 맵 빌딩을 수행하는 것이다. 이동로봇의 진행주행각은 엔코더로 측정이 가능하나, 이동로봇이 주행중 엔코더의 오차가 생길 수 있으므로, 절대좌표계 내의 각도를 알 수 있는 디지털 나침반에서 측정하였다.

본 연구에서 이동로봇이 주변 상황을 파악하기 위하여 사용한 초음파센서는 Fig. 2.7과 Fig. 2.10과 같이 이동로봇의 양 옆에 설치되어 있고, 이동로봇이 주행하면서 디지털 나침반으로 측정되는 이동로봇의 현재 주행각도와 각속도 데이터와 엔코더의 데이터를 바탕으로 이동로봇의 현재 위치를 파악하고, 초음파센서로 측정된 벽면 및 물체와의 거리를 이용하여 공간상의 2D 지도를 완성하였다. 실험을 실시한 공간의 형상은 Fig. 5.1에 나타나 있고 실제 사진은 Fig. 5.2와 같다. 이동로봇은 유연한 곡선을 그리며 이동하게 된다.

이동로봇이 출발하는 지점은 우측 벽면에서 2m 떨어진 곳이다. 이동로봇이 완전한 직진으로 주행할 때 실제 초음파센서의 데이터는 센서가 벽면에 수직한 방향을 측정하기 때문에 실제 벽면의 형상이라고 할 수 있으나, Fig. 5.1과 같이 이동로봇이 실제 직진으로 움직이는 것이 아니라 우측 벽면 쪽으로 곡선의 주행경로를 가지므로 실제 이동로봇의 절대좌표로 초음파 센서값을 보정하여 맵 빌딩을 수행한다.

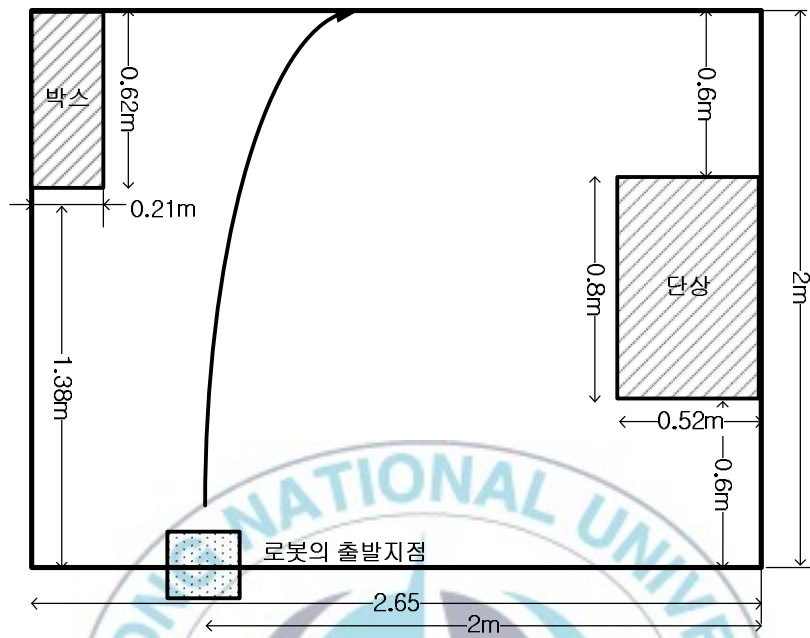


Fig. 5.1 Configuration of First Experimental Space

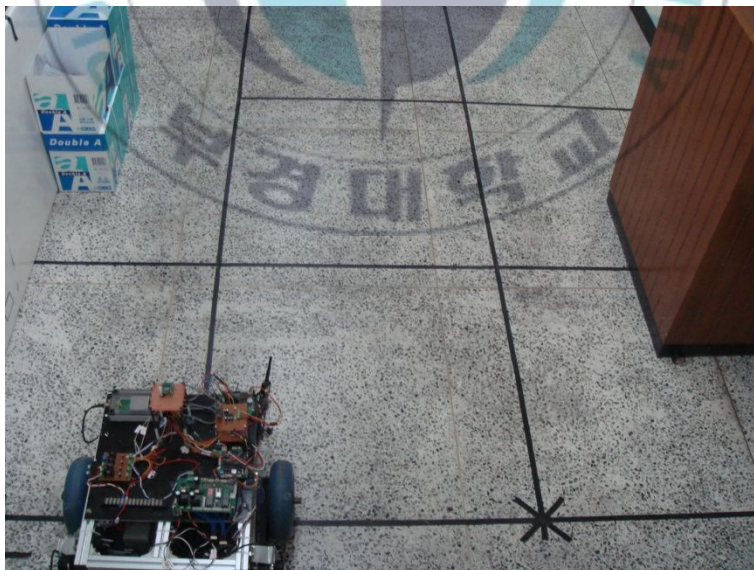


Fig. 5.2 Photograph of First Experimental Space

Fig. 5.3은 1차 주행실험에서 획득한 초음파 센서의 데이터를 나타내고 있다.

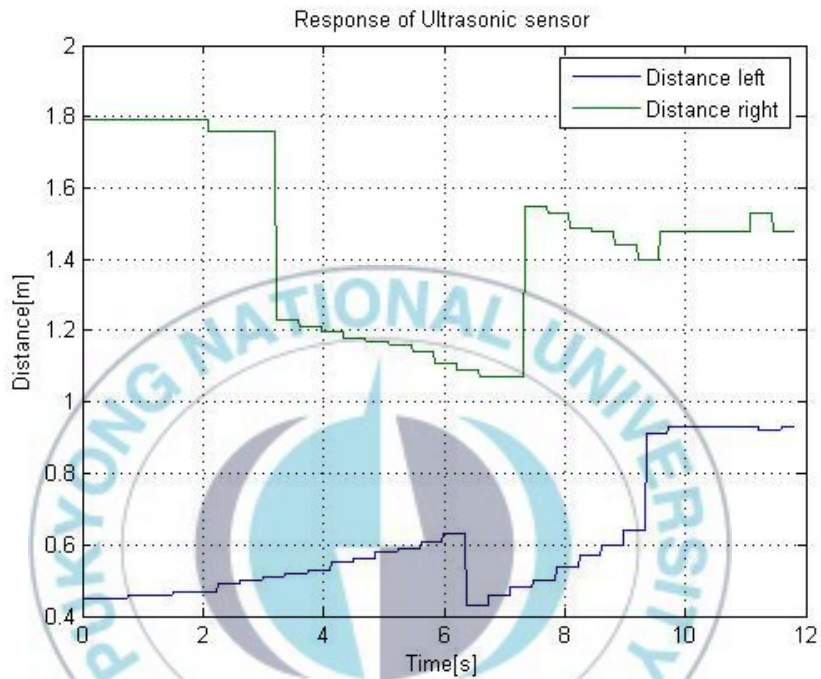


Fig. 5.3 Response of Ultrasonic Sensor of First Experiment

그래프의 위쪽에 나타난 데이터는 이동로봇의 우측에 설치된 센서에서 획득한 데이터이며, 아래쪽은 이동로봇의 좌측에 설치된 센서로부터 획득한 데이터이다. 두개의 데이터 모두 이동로봇이 곡선을 그리기 때문에 벽면과의 거리가 점점 증가하거나 감소하고 있다. 또한 벽면에 설치된 사각형의 물체 또한 사각형으로 표시되지 않고 있다. 이를 보정하기 위하여,

현재의 이동로봇의 좌표값을 바탕으로 이동로봇과 실제 벽면과의 거리변위를 계산한다.

Fig. 5.4는 이동로봇 중심점의 선속도를 나타내며, Fig. 5.5는 좌우 구동바퀴의 구동각속도를 나타낸다. 이동로봇이 주행을 시작하고 약 9.5초정도 주행한다. 중심점의 선속도는 약 0.3m/s로 일정하며 우측으로 휘는 유연한 곡선을 그리는 주행을 위해 우측 바퀴의 PWM 듀티비를 임의로 감소시켜 이동로봇의 곡선 주행을 실시하였다. 그러므로 각 바퀴의 이동 각속도는 좌측 바퀴가 약 2.9rad/s, 우측 바퀴가 약 2.6rad/s로 일정한 차이가 나타나게 된다.

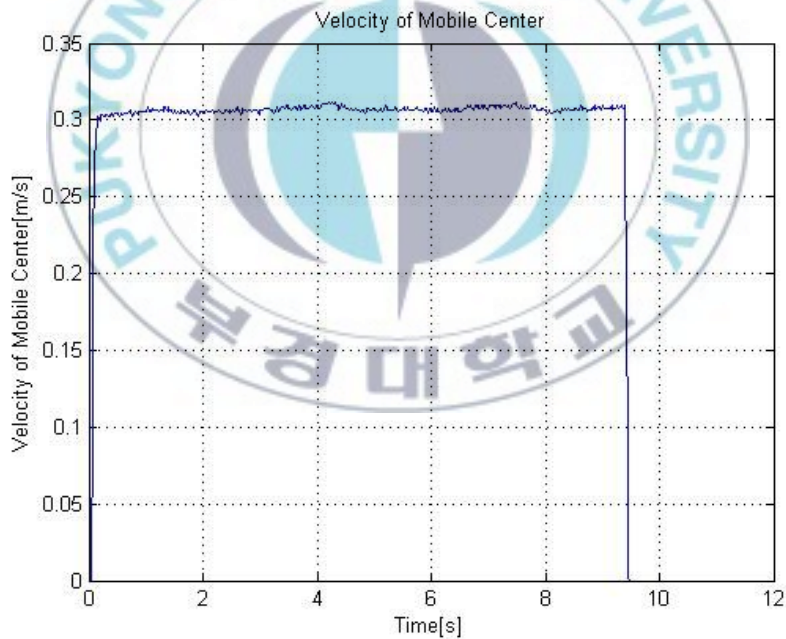


Fig. 5.4 Wheel velocity of First Experiment

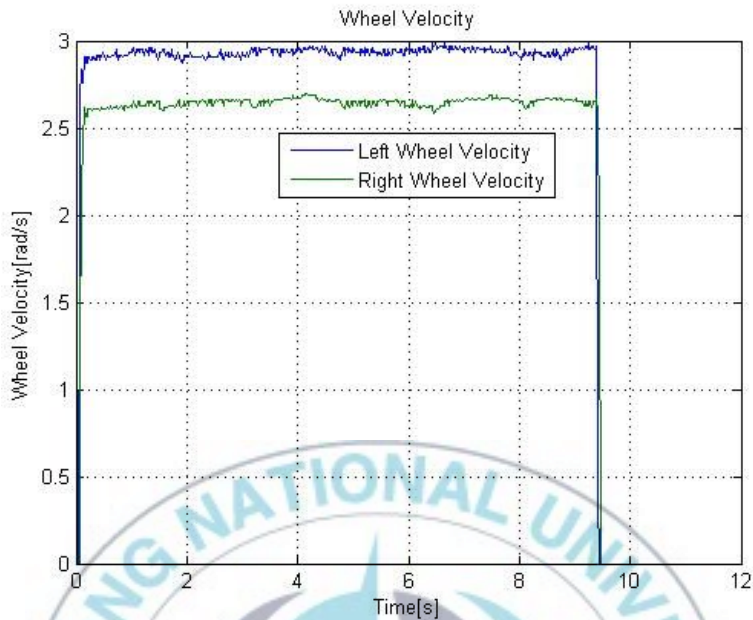


Fig. 5.5 Left/Right Wheel Velocity of First Experiment

Fig. 5.6은 1차 맵 빌딩 실험의 최종 결과이다. 단상과 박스의 물체와 벽면을 인식한 것으로, 주행 중 이동로봇의 좌표와 초음파센서와 로봇 중심과의 거리, 이동로봇의 현재 진행방향을 고려하여 그래프로 출력한 결과이다. 주행 공간상에 위치시킨 물체인 단상과 상자가 그래프에 표시되어 있으며, 초음파 센서값을 이용하여 맵 빌딩된 데이터는 점선으로 표시되어 있으며, 벽면에 부착된 물체와 점선이 비슷한 형상으로 나타나고 있다. 이동로봇의 주행결과와 주행한 공간의 대략적인 2D형상을 표현할 수 있다.

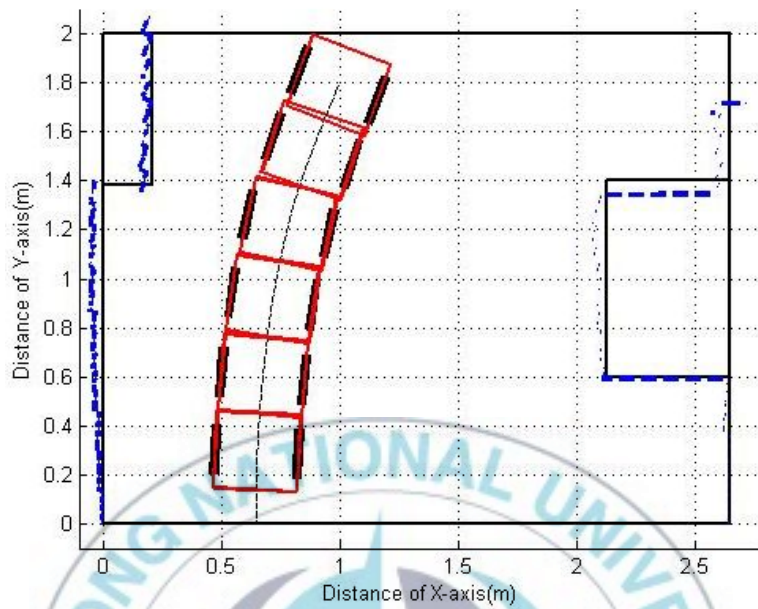


Fig. 5.6 Map Building Results of First Experiment

5.2 2차 맵 빌딩 실험

2차 맵 빌딩 실험은 이동로봇이 직선과 곡선 주행을 할 때 외부의 벽면과 물체를 인식하는 것이다. 물체의 경우 1차 실험에서 고려한 사각형의 물체 외에 원형의 물체를 추가하였으며, 주어진 경로로 이동하고 초음파센서로 벽면이나 벽면과 연결된 물체를 인식한다. 2차 맵 빌딩 실험을 실시하기 위해 구축된 환경의 구성은 Fig. 5.7과 같고 구현한 환경의 실제 사진은 Fig. 5.8과 같다.

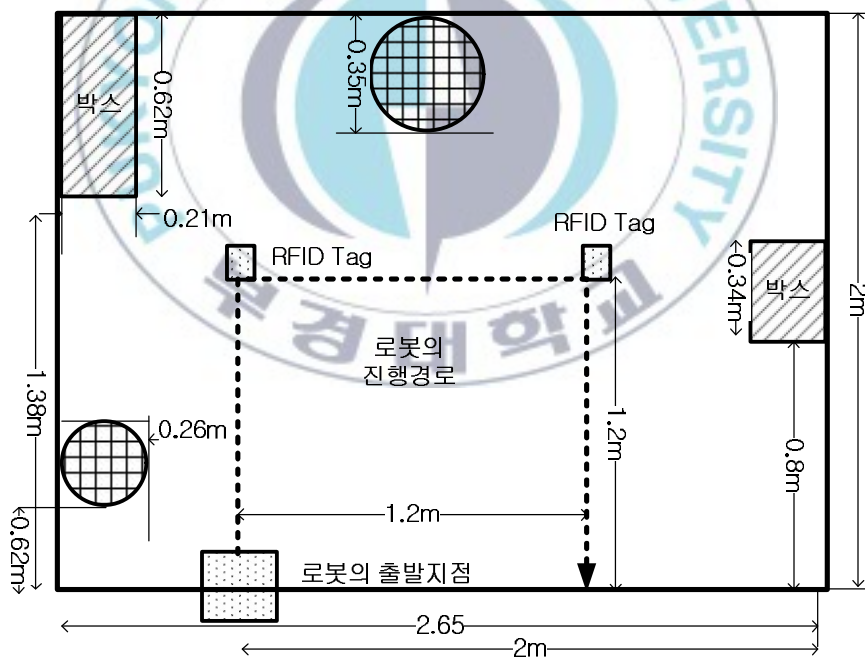


Fig. 5.7 Configuration of Second Experimental Space



Fig. 5.8 Photograph of Second Experimental Space

2차 실험에서는 이동로봇이 주행하면서 생기는 오차로 인해 측정된 절대좌표를 보정하기 위하여 RFID 태그를 바닥에 부착하였고, 태그를 인식함과 동시에 좌표마다 지정된 태그의 코드를 바탕으로 이동로봇의 절대좌표를 인식하여 보정한다. Fig. 5.9은 2차 주행실험에서 추출한 초음파 센서의 데이터이다. 이동로봇이 직선경로와 곡선경로를 이동하였고, 이동로봇의 좌측에 설치된 초음파 센서의 데이터를 표시하고 있다.

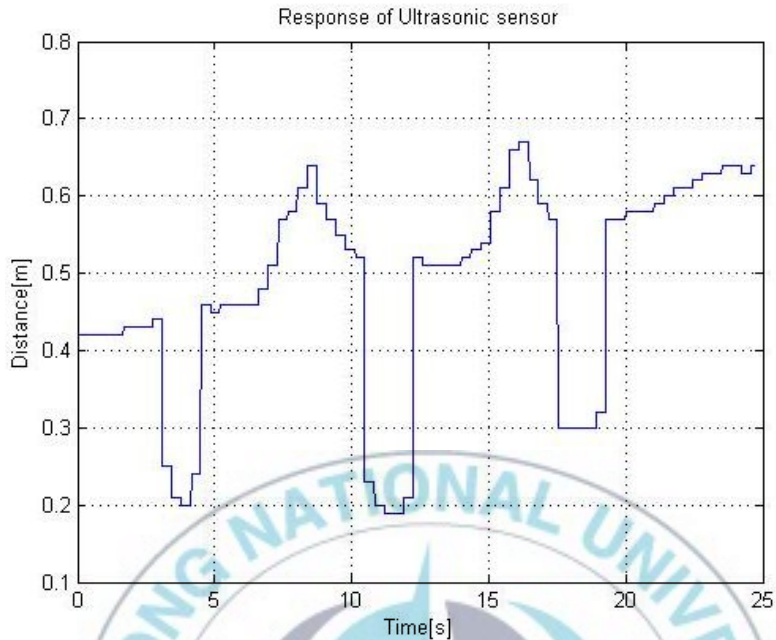


Fig. 5.9 Response of Ultrasonic sensor of second experiment

초기위치에서 이동로봇의 좌측 초음파센서와 벽과의 거리는 약 43cm이며, 주행 시작되고 4초 후 첫번째 물체인 원형 물체와의 거리가 표시되어 있다. 물체가 원형이고 이동로봇이 벽면과 평행하게 직선주행을 하고 있으므로, 거리가 감소하였다가 증가한다. 이동로봇이 약 7초 정도에 90° 회전을 시작하여 곡선을 주행하였으므로, 벽면의 모서리에 설치된 상자를 인식한 거리는 급격히 증가하였다가 감소한다. 약 12초후에 원형의 두번째 물체를 인식하였고 이 경우는 첫번째 원형 물체와의 거리를 측정한 경우와 같이 거리값이 감소하였다가 증가하고, 첫번째 원형 물체보다 지름이 큰 물체이므로 거리값의 증감시간이 첫번째보다 더 길다. 주행 시작

15초 후 두번째 90° 회전을 실시한다. 이동로봇이 회전함에 따라 벽면의 모서리를 기준으로 거리값이 증가하였다가 감소하고, 마지막 직진 주행시 사각형의 물체와의 거리가 직선에 가까운 모양으로 표현된다.

Figs. 5.10-11은 이동로봇 좌우 바퀴의 각속도를 이동로봇 중심점의 선속도를 각각 나타낸다. 직선 경로일 때 이동로봇의 주행 선속도는 약 0.27m/s이며, 곡선 경로일 경우 선속도는 약 0.13m/s이다. 이동로봇이 직선경로와 곡선 경로를 이동하였고, 곡선 경로의 경우 한쪽 바퀴가 완전히 정지하였음을 보여준다.

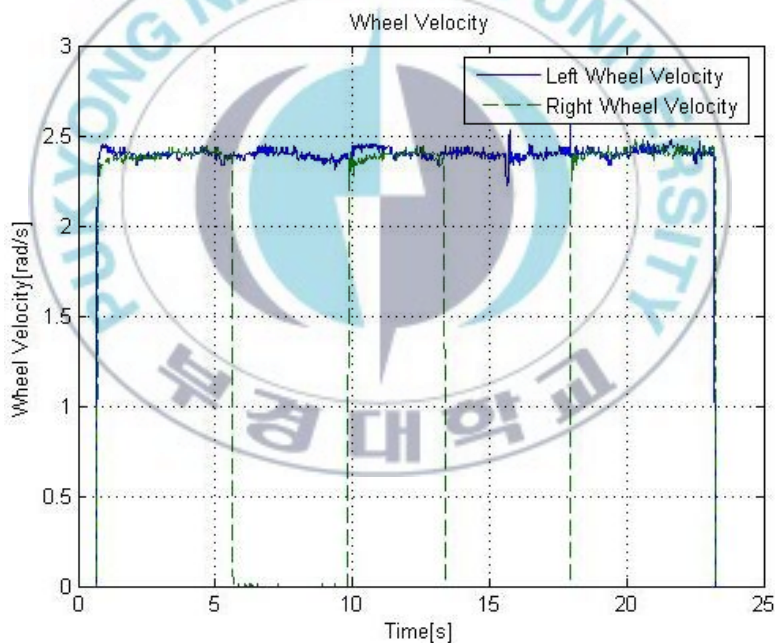


Fig. 5.10 Left/Right Wheel Velocity of Second Experiment

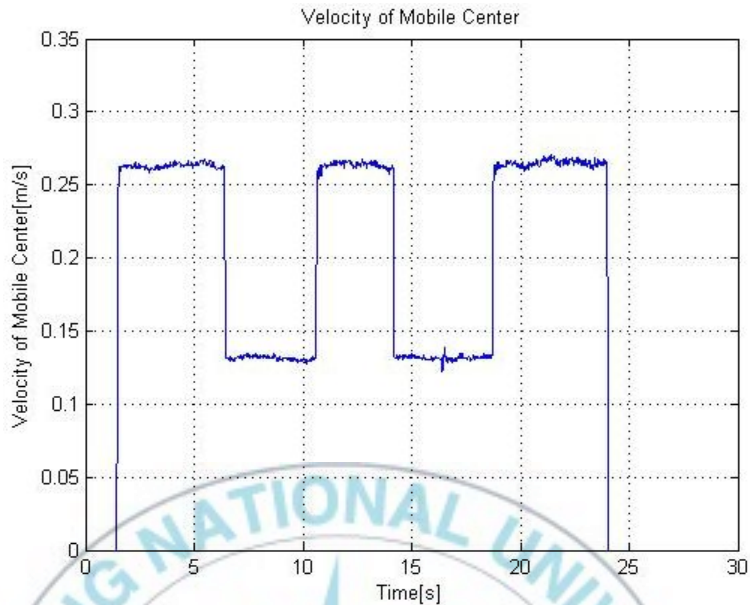


Fig. 5.11 Linear Velocity of Second Experiment

Fig. 5.12은 위의 환경에서 수행된 실제 맵 빌딩 결과이다. 거리를 측정하는 초음파센서로부터 측정된 데이터를 RFID, 엔코더, 디지털 나침반으로 추정된 이동로봇의 위치를 이용하여 보정한 결과이다. 최종적으로 획득한 맵 빌딩결과는 점으로 표시되어 측정된 데이터와 실제 위치한 벽면 및 물체와의 형상을 확인할 수 있다. 이동로봇의 위치 및 방향에 따라 측정된 센서값의 오차가 발생하나, 초음파 센서가 이동로봇의 중심축과 같은 방향으로 위치하고 있으며, 이동로봇이 회전할 때 벽을 원형으로 감지하고, 또한 초음파 센서라는 특징으로 인해 샘플링타임이 늦으며 음파가 정면으로 반사되지 않는 등 센서의 특성에 대한 오차에 기인한다. 이 때문에 모서리와 같은 환경에서 거리 오차가 발생하게 된다. 엔코더와 디지털 나침반을

이용한 이동로봇의 주행경로는 사각형의 로봇 형상으로 표시되어 있고, 이동로봇이 태그를 인식할 때 위치오차를 보정한다.

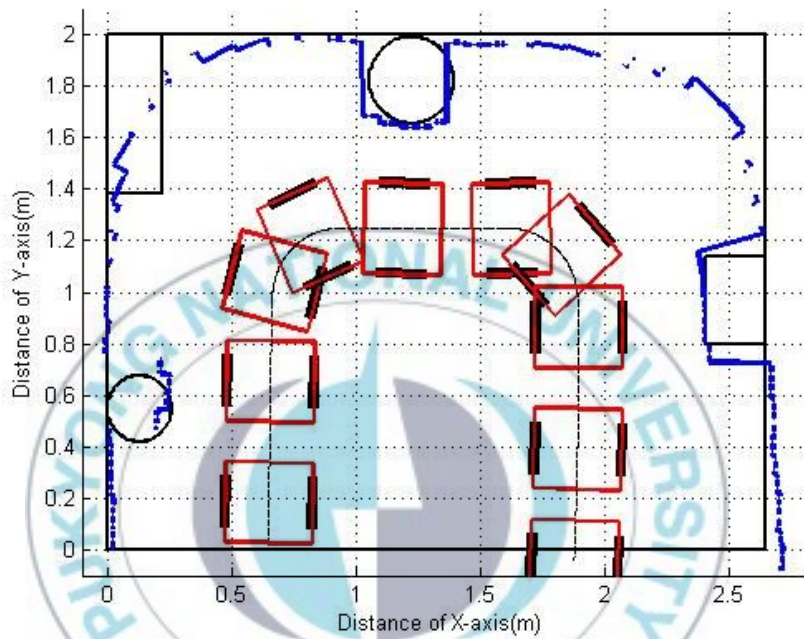


Fig. 5.12 Map Building Results of Second Experiment

제 6 장 결 론

본 연구에서는 RFID 시스템을 이용한 이동로봇의 맵 빌딩에 관한 연구 결과를 제시하였다. 본 연구의 결론을 요약하면, 다음과 같다.

- ◆ 이룬 이동로봇의 제어시스템을 마이크로프로세서를 이용하여 구축하였으며, 제어시스템에 RFID 시스템을 접목시켜, 비홀로노믹 구속조건 하에서 맵 빌딩을 수행하기 위한 이룬 이동로봇의 운동학적 모델링을 제시하였다.
- ◆ 제시된 운동학적 모델링을 바탕으로 백스텝핑법에 의한 경로추적용 단순 비선형 제어기를 제시하였다. 비선형 제어기의 설계를 위하여 오차 구조를 정의하고, 리아푸노프 함수를 이용하여 제어칙을 유도하였다. 또한 직선경로와 곡선 경로를 움직일 경우 이동로봇이 기준 경로를 추적하는 시뮬레이션 결과를 제시하였다.
- ◆ 이동로봇이 맵 빌딩 과정을 수행하기 위해서는 이동로봇 자신의 절대위치를 파악해야 하므로, 정확한 위치추정을 위하여 2차원 평면에서 이동로봇의 주행방향과 위치에 관한 모델링 결과를 제시하였다.

◆ 이동로봇이 유연한 곡선 경로를 움직일 때 엔코더, 디지털 나침반을 이용하여 벽면과 물체를 표시하는 2D 맵 빌딩 결과를 제시하였으며, RFID 시스템을 이용한 절대위치 보정을 통하여, 현재 이동로봇의 정확한 위치를 추정하고 초음파 센서를 이용하여 주행중인 공간 내의 원형 및 사각형의 물체와 벽면을 표시하는 2D 맵 빌딩 결과를 제시하였다. 제시된 2D 맵 빌딩 결과는 임의로 구성된 물체 및 벽면의 형상과 거의 일치함을 보였다.

일반적으로 맵 빌딩은 고가의 레이저 스캐너나 레이저 센서들이 대다수이다. 본 연구에서는 저가의 초음파센서 및 디지털 나침반, RFID 시스템을 이용하여 2D 맵 빌딩을 수행하였다.

추후 연구 과제로는 이동로봇의 주행오차 추정을 위한 각종 기법에 대한 연구 및 미지의 환경에 대한 효율적인 맵 빌딩알고리즘에 대한 연구가 필요하다.

REFERENCES

- [1] 송태승, 유준, “제어자동화 시스템에서의 RFID 기술 동향” 제어로봇 시스템학회지 vol. 15, no.1, March, 2009
- [2] 임형수, “RFID 센서공간에서 모바일 로봇의 위치인식을 위한 효율적인 태그 배치방식” 부산대학교, 석사학위 졸업논문, 2007.8
- [3] 김성부, 이장명, “Auti Calibration Algorithm을 이용한 이동로봇의 정밀 위치추정 시스템” 로봇공학회 논문제 제 2권 제 1호, March, 2007
- [4] D. S. Seo, H. G. Lee, H. S. Kim, G. W. Yang, D. H. Won, "Monte Carlo Localization for Mobile Robots Under RFID Tag Infrastructures", Journal of Control, Automation, and Systems Engineering Vol. , No. 1, pp 47-53, 2006.
- [5] S. B. Kim, D. H. Lee, J. M. Lee, "Indoor Localization Scheme of a Mobile Robot Applying RFID Technology", Journal of Control, Automation, and System Engineering Vol. 11, No. 12, pp. 996-1001, 2005
- [6] D.Hahnel, W.Burgard, C.Fox, K.Fishkin and

M.Philipose, “Mapping and Localizatio with RFID Technology”, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol. 1,pp. 1015-1020,May,2004.

[7] V.Kulyukin, C.Gharpure, J.Nicholson and S.Pavithran, “RFID in Robot-Assisted Indoor Navigation for the Visually Impaired”, Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, vol. 2, pp. 1979-1984, Sept-Oct, 2004.

[8] C.S. Pyo, J.S. Chae “RFID 기술 및 표준화 동향”, Telecommunication Technology Association(TTS) journal, vol.95, September,2004

[9] K. Yamano, K. Tanaka, et al, “Self-localization of Mobile Robots with RFID System by using Support Vector Machine”, IEEE/RSJ Ineternational Conference on Intelligent and Systems, September,2004

[10] 변상기, “RFID 태그 기술”, 한국전자과학회지, 15권 제2호, pp.32~43,2004.

- [11] T. Tsukiyama, "Global Navigation System with RFID Tags", Proc. SPIE, Vol.4573, pp.256-264, 2002.
- [12] O.Kubitz, M.O.Berger, M.Perlick, and R.Dumoulin, "Application of Radio Frequency Identification Devices to Support Navigation of Autonomous Mobile Robots", IEEE Vehicular Technology Conference, vol. 1, pp. 126-130, May, 1997
- [13] 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
- [14] 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
- [15] C. M. Wang, "Location estimation and uncertainty analysis for mobile robots," in Proc. 1988 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation,

Philadelphia, PA, pp. 1230–1235.

- [16] Tsumura, T. and Fujiwara, N.”An Experimental System for Processing movement information of Vehicle”, 28th IEEE Vehicle Technology Conference Proceeding, 163–168, Denver, Colorado.

- [17] San Mok Lee “Using vision sensor and sonar sensor of mobile robot Localization,”Chungnam National University, 2001



Publications and Conferences

- [1] Do Kyoung Lee, Suk Min Yoon, Sung Jae Park, Tae Hyeong Yeum, Sup Hong, Hak Kyeong. Kim. and Sang. Bong. Kim “Development of Coastal Test Miner Operating Program”, International Symposium on Mechatronics and Automatic Control, Busan, Oct., 2009
- [2] 이도경, 윤석민, 박성재, 여태경, 김학경, 김상봉, 홍섭, “시험집광기 운용 데이터베이스 시스템 개발”, 한국해양공학회 2008년도 춘계학술대회논문집, pp.231-234, 2008
- [3] Do Kyoung Lee, Suk Min Yoon, Sung Jae Park, Tae Hyeong Yeum, Sup Hong, Hak Kyeong. Kim. and Sang. Bong. Kim “Development of Database System for test Miner System”, Proceeding of 2008 International Symposium On Advanced Mechanical and Power Engineering, pp. 104-109, Oct, 2008
- [4] 윤석민, 여태경, 박성재, 홍섭, 이도경, “시험집광기 개별 센서 및 액츄에이터 성능시험 및 교정” 2008년도 한국해양과학기술협의회 공동학술대회, May, pp.193-196, 2008

- [5] Do Kyoung Lee, Vo. Hoang. Duy, Hak Kyeong. Kim. and Sang. Bong. Kim, “Development of Arrayer Machine for DNA Chips” International Symposium on Mechatronics and Automatic Control, Vietnam, Oct,pp.327-332, 2007



감사의 글

먼저, 학부 시절부터 지금까지 입학하여 지금까지 항상 충고와 격려를 아끼지 않으시며, 지도해 주신 김상봉 교수님께 진심으로 감사의 말씀을 드립니다. 교수님의 학교 생활 및 연구활동에 대한 많은 조언과 가르침이 큰 힘이 되었기에 더욱 더 감사의 말씀을 드립니다. 논문 심사과정에서 따끔한 질책과 격려를 아끼지 않으셨던 변기식교수님과 오정환교수님께도 감사드립니다. 또한 항상 옆에서 지켜봐 주시고 연구를 하는 데 많은 가르침을 주신 김학경 교수님께도 감사드립니다. 따뜻한 마음과 사랑으로 CIMEC Lab의 멤버들을 아껴주신 사모님께도 감사드립니다. 석사 과정 중 연구활동에 많은 도움을 주신 한국해양연구원 해양시스템안전연구소의 홍섭 박사님, 김형우 박사님, 최종수 박사님, 김성순, 성기영님께도 감사드립니다.

CIMEC Lab.의 선배님이신 전봉환 선배님, 김성민 선배님, 김진호 선배님, 서진호 선배님, 감병오 선배님, 이근유 선배님, 여태경 선배님, 박성재 선배님, 김석열 선배님, 신승목 선배님, 이원기 선배님, 김성욱 선배님, 전양배 선배님, 김영규 선배님, 임재성 선배님, 김상찬 선배님, 박바다 선배님, 마성진 선배님, 김병용 선배님, 이희숙 선배님께 감사 드립니다. 그리고 타지에서 고생하며 공부하셨던 외국인 유학생인 허철 선생님, Phuc선생님, Tung 선생님, Hieu, Lam, Dung, Duy와 Kang에게도 감사드립니다.

그리고 CIMEC Lab.에 몸 담고 있으면서 항상 도움을 주었던 선, 후배님들께 감사 드립니다. 특히 유일한 동기이며, 6년이라는 시간을 함께한 김대원, 어려운 일마다 항상 먼저 도와준 최낙순형에게 고마움을 전합니다. 또한 대학원 생활을 함께하며 많은 도움을 받은 Phuong, Hung, 윤석민형, 신종훈형, 김대환형과 후배로서 항상 옆에서 많은 것을 도와준 한정민, 박철한, 이경목, 김서광, 윤주호, 박유미, 최하연에게도 감사 드립니다.

마지막으로 저를 항상 응원해주는 할머니, 아버지, 어머니와, 누나, 매형, 조카 서현이에게 감사의 인사를 전하며, 돌아가신 할아버지께도 깊은 감사를 드립니다.

