



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](#)

博士學位論文

비 관성센서 기반 실외용 안내로봇의
위치평가 및 자율 안내에 관한 연구

濟州大學校 大學院

機 械 工 學 科

姜 昇 均

2017 年 8 月

비관성센서 기반 실외용 안내로봇의 위치평가 및 자율 안내에 관한 연구

指導教授 林 鍾 桓

姜 昇 均

이 論文을 工學 博士學位 論文으로 提出함

2017 年 6 月

姜昇均의 工學 博士學位 論文을 認准함

審査委員長	이연병	(인)	
委員	김종환	(인)	
委員	강창남	(인)	
委員	강천우	(인)	
委員	이세진	(인)	

濟州大學校 大學院

2017 年 8 月

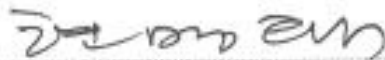
A Study on the Localization and Position-Based Autonomous Guidance of an Outdoor Guide Robot Based on Non-inertial Sensors

Seung-Kyoon Kang
(Supervised by professor Jong-Hwan Lim)

A dissertation submitted in partial fulfillment of the
requirement for the degree of Doctor of Engineering

2017. 6.

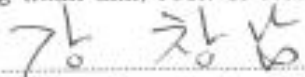
This dissertation has been examined and approved.




Dissertation director, Myung-taek Hyun, Prof. of Mechatronics Engineering



Dissertation director, Jong-hwan Lim, Prof. of Mechatronics Engineering



Dissertation director, Chang-nam Kang, Prof. of Mechanical Engineering



Dissertation director, Chul-ung Kang, Prof. of Mechatronics Engineering



Dissertation director, Se-jin Lee, Prof. of Mechanical & Automotive Engineering

August 2017

Department of Mechanical Engineering
GRADUATE SCHOOL
JEJU NATIONAL UNIVERSITY



초 록

본 논문에서는 실외에서 주행하는 이동로봇의 실용화 관점에서 경제적이고 유지관리가 쉬우며 적용이 용이한 비 관성센서 기반 실외용 위치평가 및 자율안내 방법을 제안한다. 실외 주행용 이동로봇은 우선 자율주행이 필요하며 이동 중 자신의 위치를 파악하여 다음 목적지까지 충돌을 회피하면서 이동이 가능하여야 한다. 또한 이동 중이나 필요한 위치에서 인간에게 필요한 정보를 제공할 수 있어야 하며 인간과 의사소통이 가능하여야 한다.

이러한 로봇을 서비스로봇이라하며, 서비스로봇 중 안내로봇이 대표적이다. 안내로봇이 올바른 안내를 수행하기 위해서는 무엇보다도 먼저 이동 중 자신의 위치를 항상 알 수 있어야 하며, 이동 중에 필요한 위치에서 내방객에게 필요한 안내를 하거나 정보를 제공할 수 있어야 한다. 따라서 위치평가(Localization)는 로봇의 현재 위치를 평가하고 추적하는 것으로서 모든 동작의 기본이 된다.

안내로봇 중 실내 전용 안내로봇은 다수 개발되어 있으나 위치를 인식하는 기능이 없거나 극히 제한적이다. 또한 특정 장소에만 작동 가능한 전용 안내로봇으로서 충돌회피 기능을 가지고 자율이동이 가능하나 그 기능이 단순하며 Land Mark나 사전에 제공되는 주변 환경에 대한 정보에 의존하는 것이 대부분이다. 더욱이 기존 안내로봇은 사전에 계획된 순서대로 안내를 수행하는 안내 시나리오 기반 로봇이다. 따라서 로봇의 자율성을 극대화 하기 위해서는 로봇의 현재 위치에 기반한 위치 기반 자율 안내로봇의 개발이 필요하다. 특히 실외에서 활용할 위치기반 범용 안내로봇은 아직 미개척 분야로서 무한한 가능성 및 시장성을 가지고 있다.

이와 같은 안내로봇의 실용화를 위해서는 무엇보다도 특히 현장적용이 가능한 위치인식(Localization) 기술의 개발이 가장 중요하다. 또한 카메라나 레이저와 같은 고가의 장비를 사용하지 않고 DGPS, Dead-Reckoning, Digital Compass 등 저가의 비관성 센서를 활용하여 경제적이고 친환경적인 위치인식 기술개발이 선행되어야 한다. 이 방법은 정밀도가 낮은 저가의 DGPS와 디지털 컴퍼스 및 로봇바퀴에 부착된 엔코더정보를 이용하여 로봇의 위치를 평가하는

것으로서, 기존 방법과는 달리 DGPS신호가 수신되지 못하는 곳에서도 위치평가 신뢰성이 보장될 뿐만아니라, 단순하고 일관성있는 정보신뢰성 평가방법을 제공함으로써 위치평가의 안정성을 확보할 수 있다.

본 연구에서는 실외에서 내방객을 안내하면서 위치에 따라 대응되는 안내를 수행하는 위치기반 범용 안내로봇 시스템을 개발하기 위해 실외에서 실용적으로 적용 될 수 있는 위치평가(Localization) 방법, 자율주행방법, 그리고 위치기반 자율안내 방법을 연구하였다. 아울러 안내로봇에 적합한 효율적인 안내 시나리오 설계 방법을 제시하고 이것을 바탕으로 안내 데이터베이스를 구축하고 안내로봇에 탑재하여 실제 현장에서 그 성능을 평가하였다.

본 연구의 세부내용은 다음과 같다. 첫 번째로, 비관성센서의 정보를 확장칼만 필터로 융합하여 로봇의 위치를 최적화 하는 localization 방법을 제시한다. 두 번째, 개발된 현재 위치평가를 바탕으로 사전경로 인식방법과 인식된 경로를 자율 주행하는 연구를 수행하였다. 또한, 로봇이 주행하면서 자신의 현재 위치를 평가하여 그 위치에 대응되는 안내 데이터를 스스로 탐색하여 안내를 수행하는 위치기반 자율안내 방법을 제시한다. 마지막으로, 안내로봇에 적합한 안내시나리오를 설계 및 제작하여 안내 데이터베이스를 구축하고 안내로봇에 적용하여 개발된 방법의 효율성과 적용 가능성을 실제 실험을 통하여 분석한다.

목 차

List of Tables

List of Figures

Abstract

제 1 장 서 론	1
1.1 연구개요	1
1.2 연구동향	2
1.3 연구의 필요성	4
1.3.1 범용 안내로봇의 필요성	4
1.3.2 Localization 필요성	5
1.3.3. 위치기반 안내로봇의 자율항법 개발 필요성	6
1.4 연구목적 및 범위	7
제 2 장 비 관성센서 기반 Localization	9
2.1 위치평가(Localization)	9
2.1.1 DR Localization	9
2.1.2 DGPS Localization	12
2.2 확장칼만필터(EKF) 기반 Localization	15
2.2.1 센서 융합의 필요성	15
2.2.2 EKF Localization	15
2.3 시뮬레이션 평가	22

2.3.1 Extended Kalman Filter 알고리즘	22
2.3.2 시뮬레이션 결과	24
2.4 실험 및 고찰	26
2.4.1 로봇 하드웨어 구성	26
2.4.2 안내로봇 센서부	28
2.4.3 안내로봇 주 제어부	30
2.4.4 센서 특성분석	32
2.4.5 실험방법 및 기준좌표 설정	33
2.4.6 실험 결과	36
제 3 장 경로 자율 항법	41
3.1 사전 경로인식방법	41
3.1.1 사전 경로인식의 필요성	41
3.1.2 사전 경로 인식방법	42
3.2 경로 평활화	44
3.2.1 경로 평활화 결과	46
3.3 경로 자율주행	51
3.3.1 경로 자율주행 필요성 및 문제점	51
3.3.2 경로 추적 알고리즘	51
3.3.3 자율 주행 결과	55
제 4 장 위치 기반 자율 안내	59
4.1 안내시나리오 기획	59
4.2 안내시나리오 구성	60

4.3 안내 시나리오 개발 결과	61
4.4 안내 데이터베이스 구축	67
4.5 위치기반 자율안내	68
4.5.1 자율안내 알고리즘	68
4.5.2 기준 안내경로 선택 및 안내시나리오 구성	70
4.6 자율 안내 실험 결과	73
제 5 장 결론	79
Refence	81

List of Tables

Table 1 Statistical characteristic of errors for simulation	22
Table 2 Specification of the robot platform	27
Table 3 Specifications of DGPS	29
Table 4 Specifications of Digital Compass	29
Table 5 The error characteristic of DGPS	32
Table 6 Specifications of digital compass	32
Table 7 The result of DGPS location data	34
Table 8 Coordinates of the reference position	35
Table 9 Distance error characteristics (Root Mean Square Error)	39
Table 10 Smoothing Methods	45
Table 11 Result of autonomous driving	57
Table 12 Composition of guide scenario by type	61
Table 13 Classification of guide form and characteristic	67
Table 14 Contents and guide types	70

List of Figures

Fig. 1 Dead Reckoning (DR) system	10
Fig. 2 System model and State variables	16
Fig. 3 Flowchart of EKF algorithm	23
Fig. 4 Simulation results	25
Fig. 5 Error characteristics	25
Fig. 6 Hardware configuration of the robot	26
Fig. 7 Dimension & Platform of the robot	27
Fig. 8 The driving unit of the robot platform	27
Fig. 9 The signal processing diagram of the guide robot	31
Fig. 10 The guide robot	31
Fig. 11 View of the experimental site	33
Fig. 12 Distribution characteristics of the DGPS position data	35
Fig. 13 Experimental locus of Localization	36
Fig. 14 Localization results without compass	37
Fig. 15 Localization results with compass	37
Fig. 16 Graphical representation of error characteristics	40
Fig. 17 Characteristics of error covariance	40
Fig. 18 The control screen of pre-path recognition	43
Fig. 19 The experimental of pre-path data recognition	43
Fig. 20 Example of moving average	46
Fig. 21 The result of path smoothing (1 time)	48
Fig. 22 The result of path smoothing (5 times)	48

Fig. 23 The result of path smoothing (10 times)	49
Fig. 24 The result of path smoothing (20 times)	49
Fig. 25 The result of path smoothing (40 times)	50
Fig. 26 Flowchart of autonomous path tracking	52
Fig. 27 Test environment of the autonomous driving	56
Fig. 28 Ramp in the test environment	56
Fig. 29 Results of autonomous path tracking	56
Fig. 30 Guidance Scenario of Engineering Building No. 4(#1)	63
Fig. 31 Guidance Scenario of Engineering Building No. 4(#2)	63
Fig. 32 Guidance Scenario of Engineering Building No. 4(#3)	64
Fig. 33 Guidance Scenario of the etc.	64
Fig. 34 Guidance Scenario of Information and Communication Center	65
Fig. 35 Guidance Scenario of the parking lot	65
Fig. 36 Guidance Scenario of visitor participation	66
Fig. 37 The Secondary Guidance Scenario	66
Fig. 38 Flowchart of autonomous guide	69
Fig. 39 Experimental place for autonomous guidance	71
Fig. 40 Result of pre-path selection	72
Fig. 41 Results of autonomous guidance experiment (the first)	74
Fig. 42 Results of autonomous guidance experiment (the second)	75
Fig. 43 Results of autonomous guidance experiment (the third)	76
Fig. 44 Results of autonomous guidance experiment (the fourth)	77
Fig. 45 Guide from the each location	78

Abstract

In this paper, we propose an outdoor position estimation and autonomous guide method based on non-inertial sensor which is economical, easy to maintain and easy to apply from the standpoint of practical use. An outdoor guide robot requires the autonomous navigation, by identifying its location while it moves and autonomous path tracking in order to get the next destination should be possible while avoiding collision with obstacles. In addition, the robot must be able to provide people with the information necessary by communicating with humans.

Guide robots are the most typical field of service robots. In order to perform the correct guidance, the robot should always know its position during movement. Therefore, the localization is the most important function for the guide robot. Although many guidance robots have been developed for indoor guidance robots, these robots have little or no ability to recognize the position. These guide robots can be operated only in specific place, and they have a collision avoidance function and can perform autonomous navigation depending on information about the landmark or the surrounding environment provided in advance. In addition, they are scenario-based guide robots that perform guidance in a predetermined order. Therefore, it is necessary to develop a position-based autonomous guide robot based on the current position of the robot in order to maximize the autonomy of the robot.

Since the outdoor location-based guide robot is still unexplored areas it has unlimited potential and marketability. For the practical use of such a guide robot, it is most important to develop a localization technology that can be applied to the actual field. In addition, it is necessary to develop cost-effective and environment-friendly location technology that uses low-cost non-inertial sensors such as DGPS and digital compass without using expensive equipment such as a camera or a laser. Unlike the conventional

methods, this method evaluates the position of the robot by using low-precision and low-cost DGPS, digital compass, and encoder information, and can guarantee the position reliability even when the DGPS signal is not received.

In this study, we developed a position-based guided robot system that performs guidance corresponding to the current position of the robot while guiding visitors. For this purpose, we have studied outdoor localization based on non-inertial sensors, autonomous navigation, and position-based autonomous guide method that can be practically applied to the outdoor environment. In addition, an efficient guide scenario was designed to build guide database, and mounted on a guide robot to evaluate its performance through actual field experiments.

The details of this study are as follows. We first suggest the outdoor localization that optimizes the position of the robot by fusing information from non-inertial sensors using extended Kalman filter. Based on the developed outdoor localization, we give methods of a guide route selection, guide route smoothing and autonomous tracking the guide route. We also suggest a position-based autonomous guiding method that the robot searches guide data corresponding to its current position and explain the data while it moves. Finally, the effective guide scenario suitable for the guide robot is presented and applied to the guide robot, and then the efficiency and applicability of the developed method will be analyzed through actual experiments.

제 1 장 서 론

1.1 연구개요

2016년 1월 스위스 다보스포럼에서 제4차 산업혁명이 대두되면서 자율 이동 로봇, 무인 항공기, 무인 자동차 등 무인 시스템에 대한 관심이 증가함에 따라 실외 환경하에서 무인 시스템의 정확한 위치 평가 및 인식을 위한 연구들이 활발하게 진행되고 있고 저가형 센서와 GPS(Global Positioning System)의 성능 향상으로 인하여 응용 분야의 활용폭은 점차 확대되고 있다. 이러한 위치 평가 및 인식 시스템들은 무인 자동차[1-4], 자율 이동로봇[5-9], 무인 항공기[10-15] 등의 항법 시스템에서 중요한 역할을 담당한다[16].

이러한 무인 시스템 중에서 가장 현실화가 가까운 분야인 자율 이동로봇을 실제에 적용하기 위한 연구가 다양하게 이루어지고 있다. 자율 이동로봇 분야 중 서비스로봇은 현재 세계적으로 급성장하는 분야이며, 서비스로봇의 응용분야 중 안내 로봇은 가장 현실성 있는 분야이다. 안내 로봇은 현장에 적합한 안내를 수행하기 위하여 우선 자율주행이 요구되며 주행 중 로봇의 위치를 평가하여 안내 목표지점까지 충돌을 회피하면서 이동 가능하여야 한다. 또한 로봇이 이동 중이거나 원하는 위치에서 내방객에게 필요한 안내 정보를 제공할 수 있어야 한다.

현재 활용되고 있는 안내 로봇들은 연구를 위한 안내 로봇들과 비교하면 그 기능이 떨어지고 있으며, 현장에서 활용되는 측면의 문제점으로는 제공되는 안내 정보가 위치와는 상관없는 일반적인 것들이다. 또한 내방객들을 안내가 필요한 위치로 이동하지 못하며 단순하게 충돌을 회피하는 수준의 자율주행만 한다는 것이다. 따라서 관광지와 같은 곳에서의 안내 로봇의 역할은 내방객을 필요한 장소로 안내하면서 그 장소에 적합한 안내를 해야 함에도 불구하고 이러한 역할을 하지 못한다. 이와 같이 현장에 적합한 안내 기능이 떨어지다 보니 안내 로봇을 운용하는 목적은 본래 목적인 안내보다 단순 이벤트성에 그치고 있다.

따라서 완전한 자율안내로봇의 실현을 위해서 필요한 필수적인 기능은 자신의 위치평가(Localization), 자율주행, 그리고 인간과의 소통(human interaction) 등 이다. Localization은 로봇의 현재 위치를 평가하고 추적하는 것으로서 모든 동작의 기본이 되며, 안내로봇은 여러 곳으로 내방객을 스스로 안내하여야 하므로 자율주행능력이 있어야하며 내방객과의 상호작용, 즉 자신이 위치한 장소에 대한 필요한 안내를 수행할 수 있는 능력이 필요하다. 이와 같은 자율주행이나 위치에 따른 필요한 안내를 수행하기 위해서는 기본적으로 로봇 자신의 위치를 인식하는 위치평가(Localization)가 가장 중요하다.

안내로봇은 실내와 실외에서 활용이 가능한 경우로 구분을 할 수 있으며, 실내에서 동작을 요구하는 안내로봇은 경로가 미리 설정이 되어 있거나 위치를 판단할 수 있는 표식이 되어 있어 로봇의 위치를 쉽게 인식이 가능하다. 그러나 실외에서 동작을 요구하는 로봇은 위치를 인식하고 판단하는데에 어려움이 따른다. 따라서 실외에서 동작이 가능한 안내로봇은 아직 미개척 분야로서 무한한 가능성 및 시장성을 가지고 있다.

1.2 연구동향

지금까지 실내에서 동작하는 안내로봇에 대한 연구는 많이 수행되어 왔다. 독일 본 대학의 Buhmann[17] 등은 정해진 지점으로 이동, 바닥에 있는 물건을 인식하여 쓰레기통에 담기 등의 기능을 갖고 있는 안내로봇을 연구하였다. 이 로봇은 24개의 초음파센서와 2대의 카메라가 장착되어 점령 그리드의 점령확률을 신경회로망을 이용하여 평가하고 장애물 지도를 형성하였다. 또한 초음파 데이터를 이용하여 충돌을 회피하며 빈 공간으로 이동경로를 선택하는 방법을 수행한다. 그러나 충돌회피는 어느 정도 성공적이었으나 위치평가가 되지 못하므로 단지 장애물 회피 수준에 그치고 있으며 초음파 데이터에만 의존하므로 위치평가가 어렵고 물체에 대한 데이터도 부정확하다. 이와 같은 단점을 보완하기 위해 기존 Rhino 로봇에 레이저 센서를 추가하여 주변 환경에 대한 정보를 강화하고 각 영역에 확률분포를 할당함으로써 로봇의 위치를 평가하고 확률이 높은 영역

을 위치로 선택하는 Markov 위치평가[18]를 적용하는 시도를 하였다[19].

Carnegie Mellon대학에서는 미네르바 로봇을 개발하였는데[20], 이 로봇은 관람객을 응대하고 박물관을 안내하면서 설명 및 전시물을 교육하는 역할을 한다. 항법은 Rhino 로봇과 유사하나 영상지도를 추가로 사용하여 점령 그리드지도를 형성하고 있다. 레이저, 초음파, 카메라, 그리고 주행계 등 다양한 센서를 사용하였으며 Markov 위치평가를 이용하여 항법을 수행한다.

이와 같은 기존의 안내로봇들은 실내에서 동작하는 안내로봇이기 때문에 실외에서 동작하는 안내로봇에 적용하기에는 적합하지 않다. 실외 환경은 실내 환경에서처럼 위치정보를 제공하기에 알맞은 벽과 같은 구조화된 물체가 없으며 물체와 로봇이 이동할 수 있는 자유공간의 구별이 뚜렷하지 못할 뿐만 아니라, 활동공간이 넓기 때문에 실내에서 주로 사용하는 스타게이지와 같은 위치센서 등을 설치하기가 어렵기 때문에 실내 위치평가와는 달리 정밀한 위치평가가 어렵다.

또한 실외환경은 실내와는 달리 구조화되지 않은 환경으로서 실내 위치평가에 많이 사용하는 환경지도와 같은 사전 환경정보 제공이 불가능하다. 아울러 실외지형은 실내바닥보다 평탄하지 못하며 요철이 심하기 때문에 실내 위치평가에 주로 이용되는 Dead-reckoning 위치평가 시에 오차가 심하게 발생한다. 이상과 같은 이유로 인해 실외 위치평가는 기존 실내 위치평가방법을 그대로 적용할 수 없으며 위치평가 성능 또한 실내보다 떨어질 수밖에 없다.

이에 따라 실외 위치평가는 GPS에 의존할 수밖에 없다. 그러나 GPS는 기본적으로 위치정밀도가 낮으며, 위성상태에 따라 일시적으로 위치정보를 주지 못하는 경우가 발생할 뿐만 아니라 위성궤도오차, 시계오차, 대기권 및 전리층영향, 수신기 오차, 그리고 수신 주변 환경에 따른 다중 반사효과 등으로 인해 위치정보의 신뢰성이 떨어지는 경우가 자주 발생한다. 따라서 자율주행을 위한 로봇의 위치평가에 GPS를 단독으로 이용하기에는 적합하지 않다.

이와 같은 GPS의 문제점을 보완하기 위해 실외 위치평가에는 자이로 및 가속도계 등으로 구성된 관성항법시스템(Inertial Navigation System: INS)을 추가적으로 이용하는 경우가 대부분이다. 그러나 관성항법시스템은 유지보수가 까다로울 뿐만 아니라 오차가 시간에 따라 누적되는 단점이 있다. 또한 영상 이미지나 레이저 스캐너를 GPS와 융합하여 위치평가를 수행하는 연구도 수행되었다[21-22].

반면에 비 관성센서 만을 GPS와 융합하여 위치평가를 하는 연구도 수행되었다. Ohno[23]와 Thrapp[24] DGPS와 주행계를 융합하여 위치평가를 시도하였다. 또한 Zhang[25]은 주행계와 지자기센서를 GPS와 융합하는 방법을 제시하였는데, 이들은 GPS 위치정보 신뢰성에 따라 위치평가방법을 달리하는 스위칭방법을 이용하였다. 이와 같은 비 관성센서들은 관성센서에 비해 정밀도가 떨어지므로 비 관성센서 기반 연구들은 대부분 정밀한 고가의 GPS를 이용하고 있으며, 위치정보의 신뢰성에 따른 일정한 조건을 경험적으로 정하고 그 조건에 따라 서로 다른 위치정보 융합방법을 이용하고 있다. 이와 같은 고가의 센서 사용, 그리고 시스템 및 환경에 따라 달라질 수 있는 경험적인 정보신뢰도 조건 설정 등은 안내로봇의 실용화라는 관점에는 적합하지 못하다.

Lim[26-27]의 저 정밀도 GPS와 엔코더정보를 융합하여 위치를 평가하는 실외 위치평가방법을 제안하였다. 이 연구에서는 저가의 비 관성센서 만을 사용함에도 불구하고 직선경로에서는 위치평가 성능이 어느 정도 보장되었지만 곡선경로에서는 그렇지 못하다는 결과를 보였다. 따라서 GPS는 위치정보를 제공하지만 방향정보를 제공하지 못하므로 로봇의 방향은 전적으로 엔코더정보에만 의존하기 때문에 보여지는 결과이다.

1.3 연구의 필요성

1.3.1 범용 안내로봇의 필요성

실내에서 동작을 요구하는 안내로봇은 이동경로 설정이 미리 되어있거나 위치인식을 위한 표식이 되어 있는 특정 장소에만 작동 가능한 전용 안내로봇으로서 다른 장소에 적용을 위해서는 전문가가 작동 프로그램을 수정해야 하므로 높은 로봇 가격과 함께 안내로봇 보급 확대에 커다란 걸림돌이 되고 있다. 실내에서 동작을 요구하는 안내로봇은 다수 개발되어 있으나 위치를 인식하는 기능이 없거나 극히 제한적이어서 대규모 학교나 관광지와 같은 곳에 적용되는 실외용 안내로봇의 개발이 필요하다.

이를 위해서는 사전에 제공되는 정보를 바탕으로 한 안내 시나리오 기반이 아닌 로봇의 현재 위치를 기반으로 하는 범용 안내로봇의 개발이 필요하다. 실외에서 동작하는 실외용 범용 안내로봇은 자신의 현재 위치를 판단하여 그 위치에 해당하는 안내 내용을 데이터베이스에서 로봇 스스로 찾아 안내함으로써 사전에 계획된 안내코스가 필요 없이 현재 위치에 대응하는 안내를 수행하는 자율적인 위치기반 범용 안내로봇의 개발이 필요하다. 이와 같은 실외용 범용 안내로봇의 실용화를 위해서는 무엇보다도 고해상도 카메라나 레이저와 같은 고가의 장비를 활용하지 않는 경제적이고 친환경적인 위치인식 기술개발을 토대로 현장 적용이 가능한 기술개발이 가장 중요할 것이다. 또한 실외용 범용 안내로봇은 인식된 로봇의 현재 위치를 기반으로 위치기반 안내정보 데이터베이스에서 대응되는 안내 내용을 자율적으로 찾아 안내하는 로봇을 개발함으로써 범용성을 갖는 안내로봇의 개발이 필요하다.

1.3.2 Localization 필요성

위치를 기반으로 하는 서비스의 수요가 급증함에 따라 다양한 종류의 위치평가 시스템 및 방법이 활발하게 연구되고 있다. 위치 기반 서비스를 제공함에 있어서 위치 평가는 가장 기본적이면서 핵심적인 기술이다. 위치평가 성능은 위치 기반 서비스의 질적인 문제와 직결된다. 이에 따라서 위치평가의 정확도를 향상시키기 위한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다[28].

안내로봇의 기능적 문제가 발생하는 근본적인 기술적 문제는 위치평가 기술이 실제 현장에 적용될 만큼 실용적이지 못하다는 것이다. 기존 안내 로봇들은 자신의 위치를 알지 못하기 때문에 그 장소에 맞는 적절한 안내를 할 수가 없고 위치와 무관한 일반적인 안내만 가능한 것이다. 또한 위치평가는 로봇이 올바른 경로로 이동하고 있는지에 대한 판단을 하는 기본 정보가 되기 때문에 위치평가를 제대로 하지 못하면 원하는 지점 또는 원하는 경로를 추적할 수 없게 된다[27].

본 연구에서 개발하고자 하는 대상은 실외 위치기반 범용 안내로봇이며, 이를 위해서는 로봇이 이동 중에 항상 현재 위치를 스스로 판단하여 그 위치에 해당하는 안내 내용을 데이터베이스에서 자율적으로 찾아 안내함으로써 사전에 계획된 안내코스가 필요 없는 특정한 위치/시설에만 국한되지 않는 범용성 있는

자율적인 위치기반 현장 적응형 실외용 안내로봇 개발이다.

이를 위해서는 먼저 실외에서 안정적으로 로봇 자신의 위치를 판단할 수 있는 Localization 기술 개발이 무엇보다도 중요하다. 실외에서의 위치정보는 일반적으로 DGPS를 이용하지만 이 경우 최대 오차가 5m 정도로 비교적 큰 편이며 경우에 따라서는 위성통신상태나 장애물 등으로 인해 DGPS 신호가 수신되지 못하는 경우가 있어 위치기반 안내로봇에 직접적으로 적용하기에는 문제가 있다. 따라서 DGPS 및 Dead-Reckoning, 그리고 디지털 컴퍼스 등 저가의 비관성 센서들을 이용하는 Localization 방법의 개발이 필요하다.

1.3.3. 위치기반 안내로봇의 자율항법 개발 필요성

위치기반 범용 안내로봇의 작동을 위해서는 Localization을 통해 인식된 위치를 기반으로 로봇이 자율적으로 내방객을 인식하여 이동하면서 위치에 대응되는 안내 내용을 찾아 안내를 수행하여야 한다. 이를 위해서는 먼저 안내경로를 인식하는 방법이 필요하며, 안내 경로인식은 사전에 경로정보를 프로그래밍하는 방법이 로봇의 주행 입장에서는 가장 효율적이거나 실제 사용자 입장에서는 전문가가 경로를 프로그램해야 하므로 사용이 번거로울 뿐만 아니라 범용성이 제한되는 단점이 있다. 따라서 사용자의 편의를 최대한 확보 하면서 범용성이 있는 경로인식방법이 필요하다.

자율 항법을 위해서는 인식된 경로를 따라 주행하는 경로 추적 방법의 필요하며, 이동 중에 인식된 자신의 위치에 대응되는 안내데이터를 자율적으로 찾아 내어 영상 및 음성 안내를 수행하는 방법이 필요하다. 안내 방법은 정지안내, 이동 중 안내 및 이동 중 내방객의 관심을 유도하기 위한 위치와 무관한 안내 등이 필요하다. 따라서 안내 데이터로부터 어떠한 형태로 안내를 할 것인지에 대한 판단을 자율적으로 하여 안내를 수행하는 방법의 개발이 필요하다.

결국 Localization, 안내경로 인식, 인식된 경로 추적, 그리고 안내 데이터 탐색 및 안내 방법까지 안내로봇 작동을 위한 여러 가지 필요한 기술을 개발하고 이것들을 유기적으로 작동할 수 있는 작동 알고리즘 개발이 필요하다.

1.4 연구목적 및 범위

본 연구에서는 실외용 안내로봇 실용화 관점에서 경제적이고 유지관리가 쉬우며 적용이 용이한 비 관성센서 기반 실외용 위치평가 및 자율안내 방법을 제안하고자 한다. 이 방법은 정밀도가 낮은 저가의 DGPS와 Digital compass 및 로봇 바퀴에 부착된 엔코더정보를 이용하여 로봇의 위치를 평가하는 것으로서, 기존 방법과는 달리 곡선경로 및 DGPS신호가 수신되지 못하는 곳에서도 위치평가가 신뢰성이 보장될 뿐만 아니라, 단순하고 일관성 있는 정보 신뢰성 평가방법을 적용함으로써 DGPS와 Digital compass의 오차에 따른 정보 신뢰성 변화에 대해 위치평가의 안정성을 확보할 수 있다. 또한 개발된 방법의 효율성과 적용 가능성을 실제 실험을 통하여 분석하기 위하여 다음과 같이 연구를 수행한다.

첫째, 실외에서 안정적으로 로봇 자신의 위치를 판단할 수 있는 비 관성센서 기반 Localization 기술을 개발한다. 이를 위해 로봇에 장착된 엔코더를 사용하여 자신의 위치를 알아내는 추측항법(Dead-Reckoning; DR)과 DGPS의 위치정보, Digital compass의 방향정보에 대하여 확장칼만필터(Extended Kalman Filter; EKF)를 이용하여 추측항법과 비 관성센서들의 융합을 통한 안내로봇의 최적의 위치를 평가하는 방법을 제시한다. 또한 제시한 방법을 검증하기 위하여 사용되는 센서의 오차특성을 분석한다.

둘째, 안내 로봇이 안내를 수행하기 위해서는 로봇이 주행 할 경로가 필요하며, 그 경로를 자율적으로 주행할 수 있어야 한다. 완전한 자율성을 갖기 위해서는 목표지점만 입력하면 로봇이 스스로 경로를 찾아 주행해야 하지만 현재의 기술 수준으로는 야외에서 로봇이 스스로 경로를 설정하여 주행하는 것은 불가능하다. 이와 같은 실외의 특성을 고려하여 로봇이 자율 주행할 수 있는 현실적인 방법으로 사전에 이동할 경로를 제공하여 로봇이 인식할 수 있는 방법을 다음과 같이 제시하고자 한다.

- 1) 안내로봇이 수행할 경로를 사전에 인식하는 방법으로 사용자가 사전에 수동으로 로봇을 조작하여 로봇이 주행할 경로를 주행시킴으로써 경로를 인식하는 방법이다. 이는 장소에따라서 사용자가 쉽게 경로를 인식시킬 수 있을 뿐만아니라 필요시에 쉽게 안내 경로를 바꿀 수 있는 방법을 개발하고

자 한다. 또한 이동 경로 중 경로가 심하게 변화하는 부분에서 위치오차가 크게 발생하는데 이를 최소화하기 위한 부분 경로의 최적 smoothing 방법을 개발하고자 한다.

- 2) 안내로봇이 안내경로를 자율적으로 주행하면서 안내를 수행하기 위해서는 사전에 설정된 안내경로를 로봇 스스로 추적할 수 있어야 한다. 그러나 로봇의 현재 위치뿐만 아니라 목표지점 조차도 위치오차가 개입되어 있기 때문에 단순히 현재위치와 목표점사이의 방향 및 거리 추종 제어만으로는 효과적인 경로 추적이 어렵다. 따라서 오차를 고려한 목표지점 도달여부 확인 방법 및 목표지점사이의 최적 거리 등을 위치오차의 불확실성 범위를 평가하여 이것을 기반으로 경로추적 방법을 도출하고자 한다.

셋째, 개발된 Localization 기술을 적용한 위치기반 범용 안내로봇을 개발하기 위하여 사전에 계획된 안내 시나리오가 필요 없는 특정한 위치/시설에만 국한되지 않는 범용성 있는 위치기반 안내로봇이 이동 중에 항상 현재 위치를 스스로 판단하여 그 위치에 해당하는 안내정보를 데이터베이스에서 자율적으로 찾아 안내를 수행하는 방법을 개발하고자 한다. 또한 선택된 한 지역의 안내 데이터베이스를 구축하여 오프라인 형태로 저장하고, 이동 중에 현재 위치를 스스로 판단하여 그 위치에 해당하는 안내정보를 데이터베이스에서 자율적으로 찾아 안내를 수행하는 방법을 제시한다.

넷째, 개발된 localization, 경로선택 및 경로 평활화, 자율 주행 및 위치기반 자율 안내 방법을 통합하여 실제 캠퍼스 환경에서 자율 안내를 수행하는 안내로봇을 개발하고 실험을 통해 그 성능을 분석한다.

제 2 장 비 관성센서 기반 Localization

2.1 위치평가(Localization)

위치평가 기술은 외부 환경적 요소의 도움을 받지 않고 로봇에 바퀴에 장착된 주행계만 사용하여 자신의 위치를 알아내는 추측항법(Dead-Reckoning; DR)과 인공위성의 신호를 이용한 위성항법이 있다. 추측항법은 누적오차가 연속적으로 발생하므로 긴 시간 위치정보 제공에는 적합하지 않지만 짧은 시간 동안에는 비교적 정밀한 정보를 제공한다. 반면에 위성항법은 단거리 이동에 대한 오차는 추측항법보다 크지만 오차가 시간에 따라 누적되어 커지지 않고 일정 범위를 유지한다는 장점이 있다.

본 절에서는 실외용 안내로봇 실용화라는 관점에서 경제적인 저 정밀도 DGPS와 디지털컴퍼스의 정보를 기반으로하는 위치평가방법으로서 DGPS의 위치정보(x, y) 및 디지털 컴퍼스의 방향정보(θ)에 대하여 확장칼만필터(Extended Kalman Filter; EKF)를 이용하고, 추측항법을 통하여 획득한 정보와 융합함으로써 로봇의 최적의 위치를 평가하는 방법을 제시한다. EKF기반 위치평가는 추측항법을 통한 정보로부터 로봇의 현재 위치를 추정하는 위치 추정 단계와 DGPS로부터 측정된 위치 정보를 이용하여 추정된 위치를 갱신하는 위치갱신단계로 구성된다.

2.1.1 DR Localization

DR localization은 로봇의 초기 위치를 설정한 후 바퀴에 부착된 센서(엔코더 등)들로부터 로봇의 이동 궤적을 검출하여 이동 거리와 회전한 방향을 추정하고 로봇의 현재 위치를 평가하는 방법이다. DR localization은 외부의 지원시설이 필요하지 않을 뿐 아니라 로봇이 이동한 위치를 연속적으로 계산할 수 있다. 이러한 위치평가는 로봇의 현재 위치에서 다음 위치로 이동 시에 양쪽 바퀴에 부착된 엔코더의 정보로부터 이동 거리 및 회전 각도를 계산하는 항법 시스템이다.

DR은 이미 알고 있는 위치에서 다음 단계로의 이동시에 이동 거리 및 회전 각도 정보와 양쪽 바퀴에 장착된 엔코더의 정보로부터 로봇의 새로운 위치를 계산하는 항법 시스템으로 오차가 누적되어 장기간 위치 정보 제공에는 적합하지 않지만 짧은 시간 동안에는 비교적 정밀한 정보를 제공한다.

Fig. 1과 같이 로봇의 엔코더 정보를 이용하여 양쪽 바퀴의 이동 거리를 각각 D_L , D_R , 바퀴 사이의 거리를 L 이라 하면 원주와 각의 관계에서,

$$D_R = R\alpha, \quad R_L = (L+R)\alpha \quad (1)$$

을 도출할 수 있다. 식 (1)에서 R 과 α 는 미지수이다.

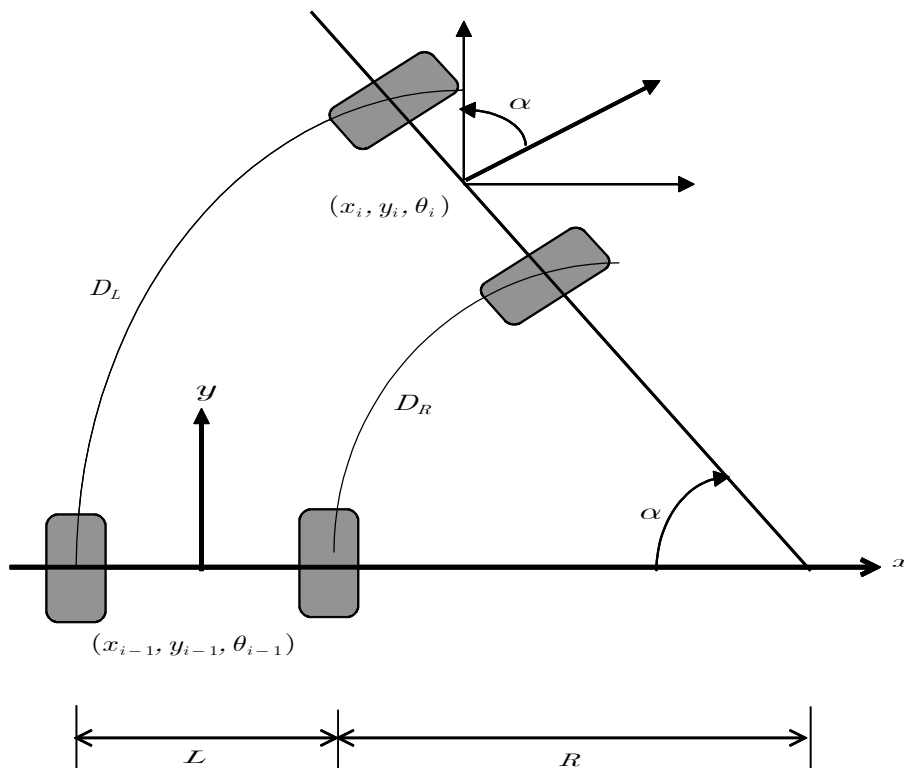


Fig. 3 Dead Reckoning (DR) system

다시 식(1)을 이용하여 미지수인 R 과 α 를 구하는 식은 다음 같다.

$$\alpha = \frac{D_L - D_R}{L}, \quad R = \frac{D_R L}{D_L - D_R} \quad (2)$$

로봇 중심에 대하여 이동하기 이전 위치인 $(x_{i-1}, y_{i-1}, \theta_{i-1})$ 에서 다음 위치인 (x_i, y_i, θ_i) 는 식(3)~식(5)와 같이 구해진다. 먼저 x_i 는,

$$x_i = \left(R + \frac{L}{2}\right)(1 - \cos\alpha) \quad (3)$$

같은 방법으로 y_i 는 식(4)와 같다.

$$y_i = \left(R + \frac{L}{2}\right)\sin\alpha \quad (4)$$

로봇의 진행 방향인 θ_i 는 식(5)와 같이 계산된다.

$$\theta_i = \theta_{i-1} - \alpha \quad (5)$$

또한 로봇 중심에 대한 로봇의 위치는 식(6)과 같이 계산된다.

$$\begin{pmatrix} x_i \\ y_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{i-1} \\ y_{i-1} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cos\theta_r & -\sin\theta_r \\ \sin\theta_r & \cos\theta_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (6)$$

여기서,

$$\theta_r = \theta_{i-1} - \frac{\pi}{2} \quad (7)$$

이다.

그러나 DR 위치평가는 로봇이 이동한 거리가 늘어남에 따라 위치 오차가 누적되어 무한히 커진다. 이러한 원인은 바닥의 불균일성, 바닥과 바퀴사이의 미끄러짐, 바퀴 모양의 불균형, 센서인 엔코더의 오차 등에 기인한다. 이러한 요인 중 양쪽 바퀴의 불균형은 계통오차이므로 이동거리에 따라 오차가 지속적으로 늘어나는 성질을 가진다. 반면에 그 외 오차 요인들은 무작위 특성이 있어 통계학적으로 처리가 가능하다.

2.1.2 DGPS Localization

GPS의 위치결정 원리를 간단하게 설명하면 추적된 궤도에 의해서 정확한 위치를 알고 있는 위성에서 발신하는 전파를 수신하여 위성에서 관측점까지의 전파 도달시간을 측정함으로써 공간적 위치를 구하는 것이다. 따라서, 위성과의 거리를 결정하는 가장 중요한 요소는 시간이며, GPS 위성에는 지극히 안정도가 높은 원자시계를 탑재하고 있다. 위성에 탑재된 시계와 수신기의 시계가 정확히 일치한다면, 3개의 위성과의 거리만으로도 3차원적인 위치를 결정할 수 있다. 그러나, 위성에 탑재된 원자시계는 매우 고가이므로 일반인이 사용하기에는 부적합하여 수신기에는 저가의 비교적 정도가 낮은 시계를 사용하고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 4개의 위성에서 전파를 수신하여 위성시각과 수신기 시각에서 발생하는 미지의 시간차를 제거하게 된다.

DGPS(Differential GPS)는 이미 위치를 알고 있는 기준점에 기준국용 GPS 수신기를 설치하여 정밀하게 측정된 자신의 위치 값과 GPS 위성 신호를 받아 수신기로 계산된 위치를 비교하여 오차를 계산함으로써 GPS보다 위치정밀도가 높다. 우리나라 DGPS는 1개소 통제국의 대전 중앙사무소와, 11개소의 기준국 및 8개소의 감시국으로 구성되어 운영되고 있다. 중앙사무소는 기준국과 감시국의 DGPS 운영상태를 PSDN망을 이용하여 실시간 원격 감시 및 제어함과 동시에 측위 정보에 대한 감시, 위성상태 Integrity 감시, 기준국 및 감시국 측위오차 분석을 통한 GPS 가용상태 확인과 함께 측위 보정 데이터 (Post Processing Data : PPS), RINEX(Receiver Independent Exchange data), SSF(Standard Storage Format)등의 정보를 웹(<http://www.ndgps.go.kr>)으로 24시간 무료 제공을 하고 있다.

기준국은 정확한 기준점에 GPS안테나를 설치하여 각각의 GPS위성 신호를 수신하여 측정된 거리와 이미 알고 있는 거리를 비교 후 위성 오차 값을 보정하여 RTCM SC-104(Radio Technical Commission for Maritime Services, Special Committee 104)의 포맷형식에 따라 중파(283.5~325KHz)을 이용하여 이용자에게 실시간으로 방송하고 있다. 감시국은 기준국으로 부터 약 100NM(180Km)떨어진 지점에 GPS안테나를 이용 위성오차 보정신호가 한계치를 벗어날 경우와 위성신호 이상시에 경보메시지를 중앙사무소에 전달로 위성상태 및 측위 정보 정확성 파악과 측위 기준점으로 활용하고 있다.

그러나 DGPS 위치정보 역시 여러 가지 오차요인을 포함하고 있어 위치오차가 존재한다. 주요 위치오차 요인으로는 위성자체의 시스템 오차, 전리층 오차, 통신오차 및 인위적 오차 등이 있으며 랜덤 특성을 갖는다. 이 중 인위적 오차는 군사적 목적 이외에 사용을 어느 정도 제한하기 위해 미국 위성관리센터에서 고의적으로 error function을 이용하여 오차를 개입시키는 것인데 수년 전부터는 민간에게도 정밀한 정보 제공을 위해 인위적 오차 개입을 중지하였다. 아울러 GPS localization은 최소 4개의 위성으로부터 정보를 수신하여야만 신뢰성 있는 위치 정보이용이 가능하다.

DGPS는 식(8) ~ (13)에 의해 기준국에서 보내는 신호를 이용하여 이용자의 위치를 추정한다[29]. 기준국에서 위성까지의 거리를 측정하는 의사거리(pseudo range) $r_{i,k}$ 는 식(8)과 같다.

$$r_{i,k} = D_{i,k} + e_k + o_k \quad (8)$$

여기서 $D_{i,k}$ 는 k 기준국과 i 위성 간의 거리, e_k 는 기준국 GPS 시스템 오차, o_k 는 시스템 시간과 기준국의 시간 간의 시계 오차를 나타낸다. 따라서 보정오차 $\Delta r_{i,k}$ 는 식(9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta r_{i,k} = e_k + o_k = r_{i,k} - D_{i,k} \quad (9)$$

이용자의 위치에서 위성까지의 거리를 측정하는 의사거리 $r_{i,user}$ 는 이용자와 i 위성 간의 거리 $D_{i,user}$, 이용자에서 얻게 되는 GPS 시스템 오차 e_{user} , 시스템 시간과 기준국간의 시계 오차 o_{user} 을 이용하여 식(10)과 같이 표현할 수 있다.

$$r_{i,user} = D_{i,user} + e_{user} + o_{user} \quad (10)$$

이용자와 기준국의 거리가 근접해 있고, 같은 GPS 위치 정보를 얻는다고 가정하면, 공통 오차를 보정한 이용자의 의사거리 $R_{i,user}$ 는 식(11)과 같다.

$$R_{i,user} = r_{i,user} - \Delta r_{i,k} = D_{i,user} + e_{resi} + o_{comb} \quad (11)$$

여기서 $D_{i,user}$ 는 이용자와 i 위성 간의 거리, e_{resi} 는 보정되지 않은 이용자 DGPS의 시스템 오차, o_{comb} 는 보정되지 않은 시계 오차를 나타낸다. t_j 시간에서의 보정 오차 $\Delta r_{i,k}(t_j)$ 는 식(12)와 같다.

$$\Delta r_{i,k}(t_j) = \Delta r_{i,k}(\tau_j) + C_{i,k}(\tau_j)(t_j - \tau_j) \quad (12)$$

여기서 기준국에서 의사 거리 보정 오차를 계산하는 시간 τ_j 동안에 기준국에서 보내는 시간 보정치 $C_{i,k}(\tau_j)$ 를 포함한다. 식(12)에 의해 보정된 오차를 식(11)에 대입하여 t 시간에 보정된 이용자의 의사거리 $R_{i,user}(t)$ 는 식(13)과 같이 구할 수 있다.

$$R_{i,user}(t) = r_{i,user}(t) - \Delta r_{i,k}(t) \quad (13)$$

DGPS 위치 정보는 GPS 신호에 나타나는 오차에서 공통 오차에 해당하는 부분을 보정하게 되므로 정밀도를 높일 수 있다.

2.2 확장칼만필터(EKF) 기반 Localization

2.2.1 센서 융합의 필요성

이전에 서술한 바와 같이 DR 만으로 위치를 평가할 경우 오차가 계속해서 누적되어 시간에 따라 점점 위치 오차가 커진다. 또한 DGPS만을 이용할 경우에는 시간에 따라 오차가 누적되지는 않지만 최대 5m이상의 오차가 발생할 수 있다. 또한 위성상태에 따라서 4개 이상의 위성으로부터 위치정보가 수신되지 못하는 경우가 발생하면 항법이 불가능한 상황이 발생할 수 있다. 따라서 전체 이동 경로 중 국부적인 단거리 주행에서의 위치는 DR항법이 오히려 효과적일 수 있으며, 장시간 이동에 대한 위치는 DGPS에 의한 localization이 더 우수하다. 따라서 두 방법의 장점만을 취하여 적절히 결합함으로써 최적의 localization을 수행할 수 있다.

DR과 DGPS를 결합한 localization은 이미 연구결과가 발표되었는데 직선 주행에서는 효과적으로 위치평가가 이루어지나 방향전환이 심한 코너 주행과 같은 경우에 오차가 크게 발생한다. 이것은 DGPS가 위치정보만 제공할 뿐 방향에 대한 정보를 주지 못하기 때문이다. 이와 같은 곡선주행의 단점을 보완하기 위해 본 연구에서는 디지털컴퍼스를 이용하여 각도 정보를 추가로 이용하는 Localization 방법을 개발한다. 이와 같은 DGPS나 디지털컴퍼스는 비 관성센서로서 자이로센서와 같은 관성센서의 단점인 바이어스오차에 의한 오차 누적이 없다는 장점이 있다.

두 가지 이상의 정보를 적절히 결합하여 최적의 값을 평가하는 방법은 칼만 필터가 가장 효율적이다. 확장 칼만 필터(Extended Kalman Filter : EKF)는 잡음이 포함된 다수의 측정값으로부터 오차가 최소화되는 최적 측정값을 평가하는 알고리즘으로서 정보융합에 널리 이용되는 방법이다.

2.2.2 EKF Localization

2.2.2.1 시스템 모델

Fig. 2는 로봇이 시간 k 에서의 위치와 시간 $k+1$ 위치로 이동한 상태를 나타낸다. 로봇의 위치를 나타내는 상태변수를 $X(k) = [x(k), y(k), \theta(k)]^T$ 로 정의하고 $d(k)$ 는 이동거리, 그리고 $\Delta\theta(k)$ 는 방향 증분으로 정의한다.

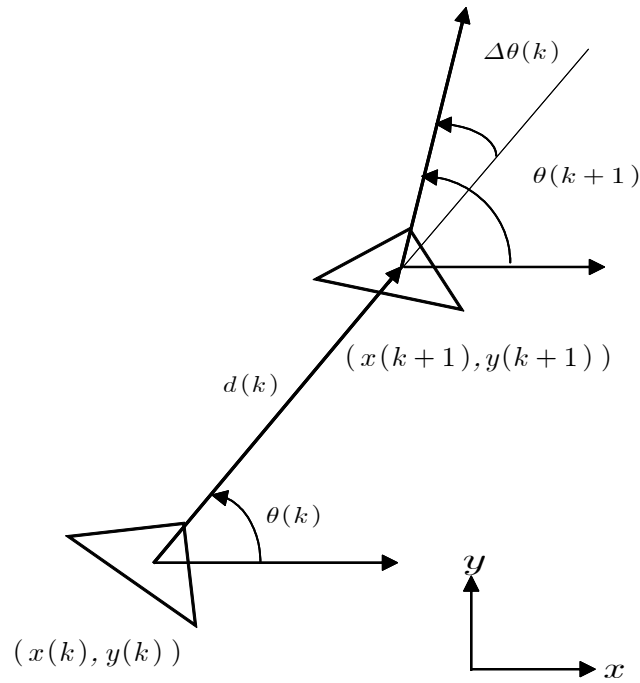


Fig. 4 System model and State variables

로봇의 위치에 대한 상태벡터 모델은 식(14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$X(k+1) = F(X(k), u(k)) + \omega(k) \quad (14)$$

여기서 상태전이 함수 $F(X(k), u(k))$ 는,

$$F(X(k), u(k)) = \begin{pmatrix} x(k) + d(k) \cos \theta(k) \\ y(k) + d(k) \sin \theta(k) \\ \theta(k) + \Delta \theta(k) \end{pmatrix} \quad (15)$$

이고 오차 $\omega(k)$ 는 식(16)과 같이 평균이 0이고 공분산이 $Q(k)$ 인 가우시안으로서 각 상태변수의 오차의 분산으로 구성되는 행렬이 된다.

$$\omega(k) \sim N[0, Q(k)] \quad (16)$$

2.2.2.2 측정모델

DGPS와 디지털 컴퍼스로부터 위치 및 방위 정보를 측정하는 측정모델을 식 (17)과 같이 정의한다.

$$Z(k) = H(k, X(k)) + \nu(k) \quad (17)$$

여기서 $\nu(k)$ 는 평균이 0이고 공분산이 $R(k)$ 인 가우시안 잡음이며, $R(k)$ 는 각 측정변수의 오차의 분산으로 구성되는 행렬로서 식(18)과 같이 표현된다.

$$\nu(k) \sim N(0, R(k)) \quad (18)$$

DGPS 및 디지털 컴퍼스의 측정값은 로봇의 특정 위치와 아무런 기하학적 관계가 없고 단지 현재 위치에 대한 측정 잡음(오차)만 개입되므로 $H(k, X(k))$ 를 식(19)와 같이 정의한다.

$$H(k, X(k)) = \begin{pmatrix} x \\ y \\ \theta \end{pmatrix} \quad (19)$$

또한 ∇H 는 다음과 같이 구해진다.

$$\nabla H = \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial x} & \frac{\partial x}{\partial y} & \frac{\partial x}{\partial \theta} \\ \frac{\partial y}{\partial x} & \frac{\partial y}{\partial y} & \frac{\partial y}{\partial \theta} \\ \frac{\partial \theta}{\partial x} & \frac{\partial \theta}{\partial y} & \frac{\partial \theta}{\partial \theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (20)$$

2.2.2.3 상태 벡터(로봇의 위치) 및 covariance 예측

$\hat{X}(k|k)$ 와 제어 입력 $u(k) = [d(k), \Delta\theta(k)]^T$ 로부터 시간 $k+1$ 에서의 로봇의 위치 $\hat{X}(k+1|k)$ 를 식(21)과 같이 예측한다.

$$\hat{X}(k+1|k) = F(\hat{X}(k|k), u(k)) = \begin{pmatrix} \hat{x}(k|k) + d(k) \cos \hat{\theta}(k) \\ \hat{y}(k|k) + d(k) \sin \hat{\theta}(k) \\ \hat{\theta}(k|k) + \Delta\theta(k) \end{pmatrix} \quad (21)$$

이 예측에 수반되는 공분산 행렬 $P(k+1|k)$ 는 선형화 된 식으로부터 식(22)와 같이 계산된다.

$$P(k+1|k) = \nabla F P(k|k) \nabla F^T + Q(k) \quad (22)$$

여기서 ∇F 는,

$$\nabla F = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_x}{\partial x} & \frac{\partial F_x}{\partial y} & \frac{\partial F_x}{\partial \theta} \\ \frac{\partial F_y}{\partial x} & \frac{\partial F_y}{\partial y} & \frac{\partial F_y}{\partial \theta} \\ \frac{\partial F_\theta}{\partial x} & \frac{\partial F_\theta}{\partial y} & \frac{\partial F_\theta}{\partial \theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -d(k) \sin \hat{\theta}(k) \\ 0 & 1 & d(k) \cos \hat{\theta}(k) \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (23)$$

이고 $Q(k)$ 는 다음과 같다.

$$Q(k) = \begin{pmatrix} ((\sigma_{tx} d(k))^2 + (\sigma_{rx} \Delta\theta)^2) & 0 & 0 \\ 0 & ((\sigma_{ty} d(k))^2 + (\sigma_{ry} \Delta\theta)^2) & 0 \\ 0 & 0 & ((\sigma_{r\theta} \Delta\theta)^2 + (\sigma_{t\theta} d(k))^2) \end{pmatrix} \quad (24)$$

여기서, σ 는 오차의 표준 편차, t 는 이동, r 은 회전을 나타내는 첨자이다. 즉, σ_{tx} 는 단위 m 이동 시에 x 방향으로 발생하는 오차의 표준편차, σ_{rx} 는 단위 라디안

회전 시 x 방향으로 발생하는 오차를 나타낸다. 즉 오차의 분산은 로봇의 이동뿐만 아니라 회전 시에도 발생하기 때문이다.

2.2.2.4 측정 값 및 수반되는 covariance 예측

예측된 로봇의 위치 $\hat{X}(k+1|k)$ 로부터 DGPS 및 Digital compass 측정값 $\hat{Z}(k+1)$ 을 예측한다. 이것은 (17)식에 의해 다음과 같이 나타내어진다.

$$\hat{Z}[k+1] = \begin{pmatrix} \hat{x}(k+1|k) \\ \hat{y}(k+1|k) \\ \hat{\theta}(k+1|k) \end{pmatrix} \quad (25)$$

또한 DGPS 및 디지털 컴퍼스로부터 실제 측정된 값은 다음과 같이 나타낸다.

$$Z(k+1) = \begin{pmatrix} x_{GPS}(k+1) \\ y_{GPS}(k+1) \\ \theta_{DC}(k+1) \end{pmatrix} \quad (26)$$

여기서 (x_{GPS}, y_{GPS}) 는 DGPS로부터 측정된 위치정보이고 θ_{DC} 는 디지털 컴퍼스의 방위정보이다. 이 예측에 수반되는 공분산 행렬 $S(k+1)$ 은 다음과 같다.

$$S(k+1) = E[\nu(k+1) \cdot \nu^T(k+1)] = \nabla H P(k+1|k) \nabla H^T + R(k+1) \quad (27)$$

여기서 ∇H 는 (19~20)식과 같은 단위행렬이며 $R(k+1)$ 은 DGPS와 Digital Compass의 측정 시 발생하는 오차 공분산으로서 다음과 같다.

$$R(k+1) = \begin{pmatrix} \sigma_{gps,x}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{gps,y}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{dc}^2 \end{pmatrix} \quad (28)$$

여기서 σ_{gps} 는 DGPS 측정 시 발생하는 오차의 표준편차, σ_{dc} 는 Digital Compass 측정 시에 발생하는 오차의 표준편차이다. (24)식과 비교하면 (28)식은 이동 거리나 회전각도가 고려되지 않고 있는데 이는 DGPS와 Digital Compass 측정 시 발생하는 오차는 이동거리나 회전 각도에 무관하게 발생하기 때문이다.

2.2.2.5 측정값의 유효성 (validation) 평가

실측 위치와 예측된 위치의 차로 구성되는 innovation 행렬 $\nu(k+1)$ 을 다음과 같이 구성한다.

$$\nu(k+1) = [Z(k+1) - \hat{Z}(k+1)] = \begin{pmatrix} x_{GPS}(k+1) - \hat{x}(k+1|k) \\ y_{GPS}(k+1) - \hat{y}(k+1|k) \\ \theta_{DC}(k+1) - \hat{\theta}(k+1|k) \end{pmatrix} \quad (29)$$

그러나 DGPS의 위치정보는 위성 상태나 기타 환경에 따라 큰 오차를 가질 수 있다. 따라서 이러한 경우의 잘못된 정보를 배제하기 위해 EKF는 측정값과 예측 값 사이의 연관성(correspondence)을 평가하여 어느 정도 이상의 연관성이 있을 때만 innovation을 이용하여 위치를 보정한다. 두 값의 연관성 평가는 다음과 같은 validation gate를 이용한다.

$$G_{k+1}(\gamma) \equiv \nu^T(k+1)S^{-1}(k+1)\nu(k+1) \leq \gamma \quad (30)$$

여기서, $G_{k+1}(\gamma)$ 는 validation region, 또는 probability distance를 의미한다. 즉, (30)식은 Innovation의 가중치 norm을 나타내는데, 실제 측정치 오차와 오차 불확실성범위의 비를 나타낸다고 할 수 있다.

$$P[Z(k+1) \in G_{k+1}(\gamma)] \quad (31)$$

식(31)은 $Z(k+1)$ 이 $G_{k+1}(\gamma)$ 영역 내에 발생할 확률을 의미하는데 $G_{k+1}(\gamma)$ 영역은 γ 가 커질수록 커지며 Chi-square 분포를 갖는다. $\sqrt{\gamma}$ 는 그 영역의 표준편차로 불리기도 한다. 즉 γ 가 커질수록 영역의 표준편차가 증가하여 $G_{k+1}(\gamma)$ 의 범위(오차 허용 범위)가 넓어져 정밀하지 아니한 측정도 유효한 것으로 간주한다는 뜻이다. 따라서 식(31)이 성립하는 측정값만 유효한 측정값으로 간주하고 그렇지 아니한 측정값은 단순히 버린다.

2.2.2.6 위치 및 covariance update

(30)식을 통과한 측정값에 대하여 다음과 같이 위치 및 covariance를 갱신한다. 먼저 kalman gain $W(k+1)$ 은 다음과 같다.

$$W(k+1) = P(k+1|k) \nabla H^T S^{-1}(k+1) \quad (32)$$

칼만 계인을 이용하여 예측된 위치를 다음과 같이 보정한다.

$$\hat{X}(k+1 | k+1) = \hat{X}(k+1 | k) + W(k+1)\nu(k+1) \quad (33)$$

마지막으로 이 위치보정에 수반된 공분산 행렬은 다음과 같이 갱신된다.

$$P(k+1 | k+1) = P(k+1 | k) - W(k+1)S(k+1)W^T(k+1) \quad (34)$$

이와 같은 방법으로 각 샘플링 시간마다 위치보정 및 공분산 행렬을 추정함으로써 최적의 위치 평가를 수행한다.

2.3 시뮬레이션 평가

2.3.1 Extended Kalman Filter 알고리즘

Fig. 3은 이상과 같은 EKF localization의 흐름도를 나타낸다. 먼저 이전 단계에서 평가된 $\hat{X}(k|k)$, $P(k|k)$ 및 $u(k)$ 로부터 상태 벡터 $\hat{X}(k+1|k)$ 및 공분산 $P(k+1|k)$ 를 예측한다. 다음으로 예측된 상태 벡터와 공분산을 이용하여 측정값 $\hat{Z}(k+1)$ 을 예측한다. 동시에 DGPS 및 디지털 컴퍼스로부터 위치 및 방위 정보를 획득하여 실제 측정 벡터값 $Z(k+1)$ 을 구성한다. 이 데이터로부터 innovation $\nu(k+1)$ 과 여기에 수반되는 공분산 $S(k+1)$ 을 계산한다.

식 (30)을 이용하여 현재 측정된 위치 정보의 신뢰성을 평가 한 다음 신뢰성이 있는 정보에 대해서 식(32)에서 (34)를 이용하여 위치정보 및 공분산을 갱신한다. 만약 (30)식을 통과하지 못한 위치정보는 신뢰성이 없는 것으로 간주하여 버리고 (21)식 및 (22)식으로 예측된 위치 및 공분산을 최종 평가된 것으로 간주한다.

이상과 같이 개발된 실외용 위치평가 방법의 성능을 시뮬레이션을 통하여 평가하였다. 표 1은 시뮬레이션에 필요한 통계학적 오차 특성을 나타낸다. DGPS 및 디지털컴퍼스의 오차 특성은 제조사가 제공한 값을 이용하였다. 또한 DR 위치평가에서는 방향에 대한 오차가 가장 크게 누적되므로 방향에 대한 계통오차를 회전각도의 10%정도로 크게 가정하였다.

Table 1 Statistical characteristic of errors for simulation

Sensor		Std.	Mean
DGPS	x(m)	3.0	0.0
	y(m)	3.0	0.0
Compass	$\theta(^{\circ})$	3.0	0.0
DR(encoder)	x(m)	0.2	0.0
	y(m)	0.2	0.0
	$\theta(^{\circ})$	0.2	0.1

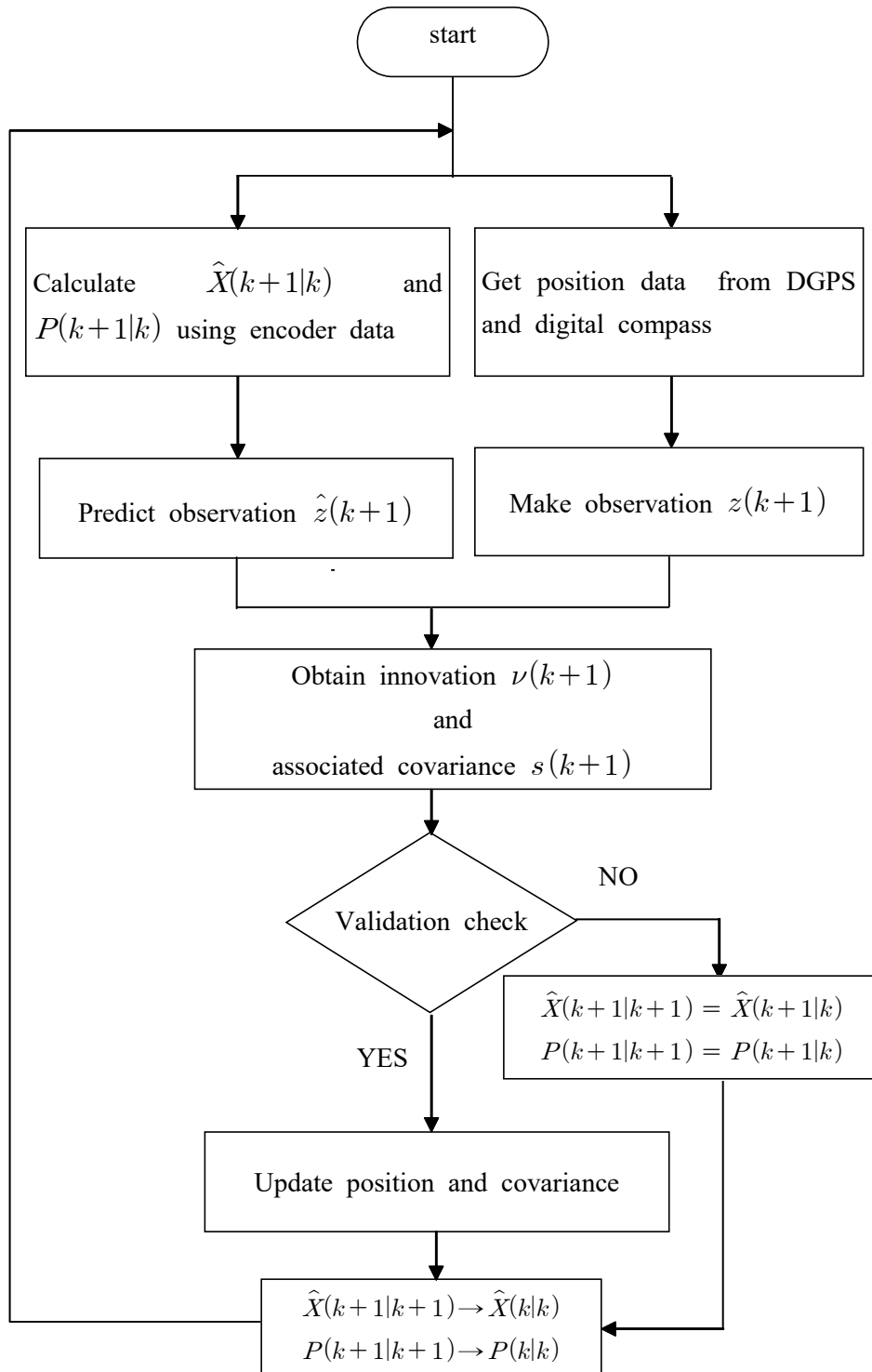


Fig. 5 Flowchart of EKF algorithm

2.3.2 시뮬레이션 결과

이상과 같이 설정된 오차 특성을 바탕으로 개발된 localization 방법을 시뮬레이션을 통해 성능을 분석하였다. 먼저 (30)식의 최적의 γ 를 찾기 위해 여러 번의 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과 γ 가 2에서 10사이의 값인 경우 안정한 위치평가가 이루어짐을 알 수 있었으며 이에 따라 그 중간 값인 5를 γ 값으로 설정하였다.

Fig. 4는 위치평가 시뮬레이션 결과를 나타낸다. Fig. 4에서 붉은색은 DGPS 및 디지털 컴퍼스 측정값을 모두 이용한 EKF 위치평가 결과이고 파란색은 디지털 컴퍼스를 제외한 EKF 위치평가 결과이다. Fig. 4에서 “No DGPS”로 표시된 구간은 DGPS 정보가 제공되지 아니하거나 오차가 큰 정보가 제공된 구간으로서 단지 엔코더와 디지털 컴퍼스만으로 EKF 위치평가가 수행된 구간을 나타낸다. 이 구간의 길이는 약 60m 정도이며 위성상태로 인해 DGPS 정보가 두절되거나 위성상태, 전리층 상태 또는 주변 장애물에 의해 DGPS 위치오차가 크게 발생한 상황을 시뮬레이션 한 것이다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 디지털 컴퍼스가 사용되지 아니한 위치 평가에서는 No DGPS 구간에서 위치 오차가 급격하게 발생하고 있지만 디지털 컴퍼스의 방향정보를 이용한 위치평가에서는 오차가 크지 않음을 보이고 있다.

일반적으로 엔코더 정보만으로 위치를 평가하는 경우 10m 이내의 단거리 주행 시에는 위치오차가 크게 발생하지 않지만 주행거리가 늘어남에 따라 방향오차가 누적되어 위치오차가 크게 발생한다. 그러나 Fig. 4의 결과는 엔코더만의 위치평가에 디지털 컴퍼스를 추가로 이용할 경우 방향오차가 누적되지 않기 때문에 위치오차가 현격히 줄어든다는 것을 나타낸다.

Fig. 5는 위치오차 특성을 나타낸다. Fig. 5에서 위치평가 스텝 300좌우에서 위치오차가 크게 발생한 것은 No DGPS 구간이기 때문이다. 디지털 컴퍼스가 없는 경우의 오차 평균과 표준편차는 각각 1.7m 및 1.1m였으나 컴퍼스가 사용된 경우는 평균이 0.8m, 표준편차가 0.5m로 나타났다. 따라서 엔코더와 DGPS만의 위치평가 보다 디지털 컴퍼스를 추가로 사용함으로써 위치오차를 현저히 줄일 수 있다는 것을 알 수 있다.

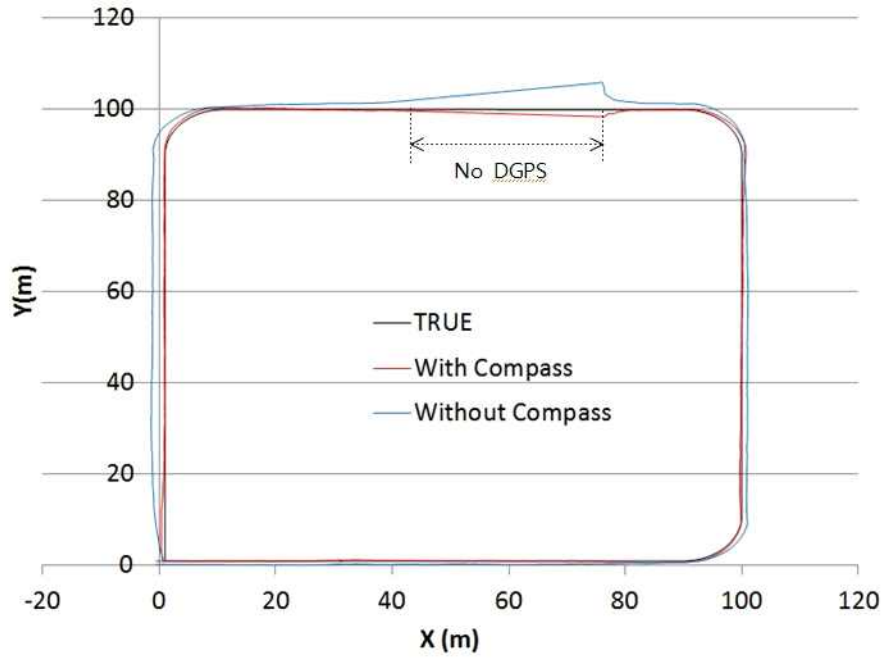


Fig. 6 Simulation results

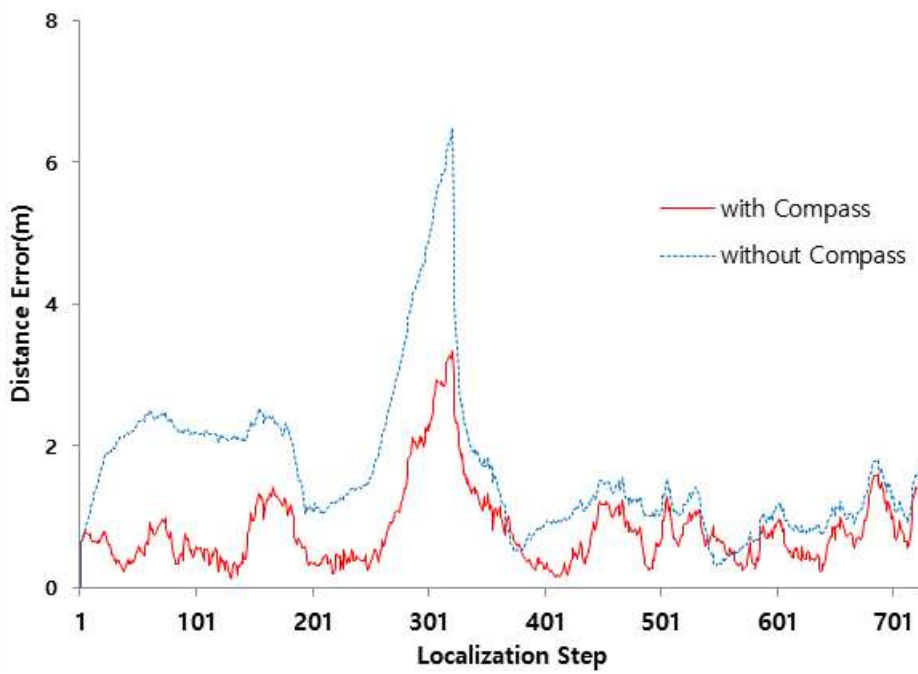


Fig. 7 Error characteristics

2.4 실험 및 고찰

2.4.1 로봇 하드웨어 구성

안내로봇은 Fig. 6과 같이 크게 구동부와 센서부 그리고 센서 값을 이용하여 로봇을 구동하고 안내영상을 처리하는 제어부로 구성되며 각 구성품 간의 연결은 USB 와 Serial 통신 방식으로 상호간의 정보를 교환하며 로봇의 구동 및 제어를 수행한다.

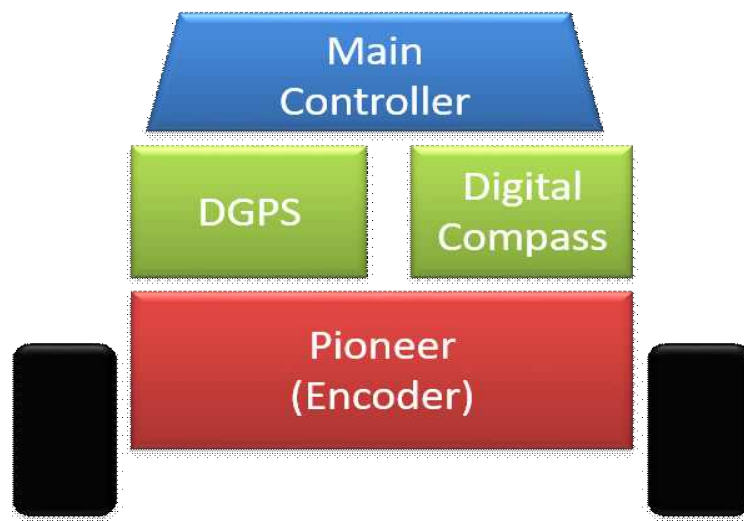


Fig. 8 Hardware configuration of the robot

안내로봇의 구동부는 Adept Technology사에서 제작한 Pioneer 로봇(P3-DX)을 사용하였다. Pioneer 로봇의 플랫폼은 Fig. 7과 같으며, 임베디드 컨트롤러, 500-tick encoder가 부착된 모터, 0.195m wheel, 8개의 전방 초음파센서, 8개의 후방 초음파센서 및 내장배터리를 포함하고 있어 1회 충전으로 8시간 정도 운용이 가능하다.

로봇 구동부의 무게는 약 9kg 이며 알루미늄 바디로 제작되어 있으며 구동부에는 ARCOS기반에 마이크로컨트롤러가 내장되어 구동제어를 담당하고 있다. 외부 인터페이스를 위한 RS-232 호환 serial port를 장착하고 있어 로봇의 상태

정보를 받거나 로봇에게 구동 명령을 이 serial port를 통해서 전달된다. 외부에서의 제어는 Windows기반의 PC에서 제공되는 ARIA Library를 활용하여 별도의 프로토콜 처리 없이 Library 함수를 이용하여 다양한 제어가 가능하다.

Table 2 Specification of the robot platform

Length (cm)	size (cm)	weight (Kg)	Payload (Kg)	Battery
44.5	39.3 x 23.7	9	25	12 VDC

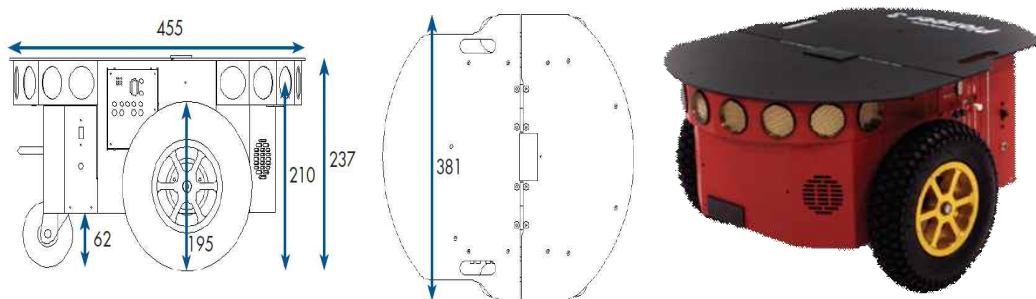


Fig. 9 Dimension & Platform of the robot

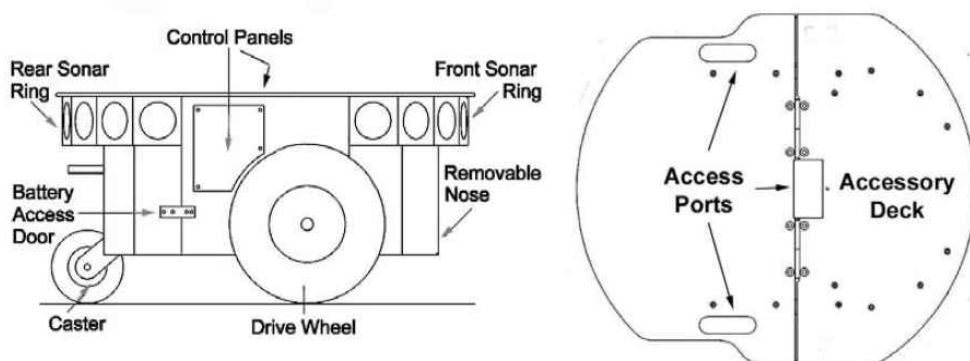


Fig. 10 The driving unit of the robot platform

2.4.2 안내로봇 센서부

센서부는 안내로봇의 위치정보를 얻기 위한 위성 DGPS와 로봇의 진행 방향을 알기위한 Digital Compass로 구성되어 있으며 위성 DGPS는 제어부와 USB 케이블로 연결되어 위성 정보를 수신하며 Digital Compass는 블루투스 통신을 이용한 Serial 방식으로 방향 정보를 수신한다.

2.4.2.1 위성 DGPS

실외에서 로봇의 위치정보를 얻기 위한 방법으로 GPS 위치정보 시스템을 이용한다. 일반적인 GPS위성의 신호는 24개의 저궤도 위성 정보를 이용하여 각 위성으로부터 사용자의 수신기까지 전파가 도달하는 시간을 삼각측량법으로 계산하여 이동 개체의 현재 위치를 구하고 지구 절대 좌표계 상에 표시가 가능하다. 그러나 GPS는 측정이 간헐적인 수신오류, 수신기 자체오차, 위성 시계 오차, 대기권에서의 전파 지연 등의 영향으로 10~20m정도의 오차가 발생하므로 로봇의 자율주행에 적용하기 어려울 정도로 위치오차가 크다. 이에 비해 기준국의 보정 정보를 이용하여 이동에 대한 제약이 적은 DGPS(Differential GPS)는 일반 GPS에 비해 5m 이내의 정밀도를 가지는 장점이 있어 DGPS를 이용한다.

DGPS는 GPS 기준국의 기준점 좌표를 이용하여 오차발생을 줄이고, 정밀한 위치를 얻는 방식을 이용하고 있다. GPS수신기 중 RTCM(Radio Technical Commission for Maritime services) 처리 가능한 수신기를 이용하여 ntrip 서비스로부터 받은 RTCM 신호를 수신기에 전달하여 최종 보정된 정보를 NMEA 0183으로 받는 형식이 있으나 지상국을 통해 중파대역으로 방송되는 신호를 수신해야 하므로 안테나가 크고 수신기 가격이 비싸 일반적으로 적용하기 힘든 단점이 있다.

위성 DGPS는 정지궤도 위성을 이용한 DGPS방식으로 지구 정지궤도 36,000km 상공의 위성을 사용하여 보정정보를 제공하는 광역 지상 기준국과 통신 위성이라는 두 개의 시스템으로 구성 되어 있으며 지상모니터링 기준국에서 GPS 위성 측위신호를 수신하여 제어감시 기지국에 데이터를 전송하고 광역 주제어 기지국에서는 보정데이터를 생성하여 다시 지상국(위성지구국)을 통하여 지구정지궤도위성으로 전송하고 이 보정데이터를 사용자에게 제공하는 방식으로서 WAAS(미국), EGNOS(유럽), MSAS(일본) 등의 방식은 SBAS(Satellite Based

Augmentation System)기능을 이용한 DGPS 위성신호를 사용가능하지만 우리나라에서는 MSAS를 이용하여 오차범위를 일반 GPS오차 보다 작은 범위로 줄일 수 있는 방법을 사용한다. 안내로봇에 사용한 DGPS의 주요사양은 표 3과 같다.

Table 3 Specifications of DGPS

모델	수신감도	프로토콜	위성 DGPS	위치정확도
ASCEN GPS 680	-163dBm	NMEA 0183	지원(MSAS)	2.5m

2.4.2.2 Digital Compass

위치 기반 자율안내를 수행하기 위해서는 목표점이 존재하며, 그곳을 찾아가는 기준이 필요하다. 그 기준을 방위로 사용하기 위해서 나침반을 사용하였다. 이런 기준을 위한 방위가 필요해서 나침반을 사용하는데, 일반 나침반의 경우 탐침의 흔들림이 심하기 때문에 정확하고 빠른 방위각 측정이 어렵다. 따라서 로봇의 방향정보를 얻기 위하여 지자기 센서를 내장한 전자나침반(Digital Compass) 모듈을 사용하였다. Digital Compass와 제어부와의 통신은 기기 간 블루투스 통신을 이용하여 Digital Compass 정보를 얻어 제어부로 실시간 전송하는 방식을 사용한다. Digital Compass는 주변 전자기 장치로부터의 자기장에 영향을 민감하게 받기 때문에 안내로봇 구동부의 모터에 의한 영향을 최소화하기 위해 구동부에서 자기장에 영향을 받지 않은 높이로 이격하여 설치하였다. 안내로봇에 사용한 HMC 모델의 주요사양은 표 4와 같다.

Table 4 Specifications of Digital Compass

Sampling Rate	Range	Communication	Heading Resolution	Accuracy
1~20Hz	±1.3~8 Gaussian	URAT	0.5 deg	±3 deg

2.4.3 안내로봇 주 제어부

안내로봇의 주 제어부는 Fig. 9와 같이 DGPS 및 Digital Compass의 위치와 방향정보를 수집하고 로봇의 모든 동작명령을 처리하는 기능을 하는데 Windows 8 기반으로 구성되어 USB 포트와 블루투스 통신을 지원하여 외부 센서들과의 통신이 가능하다. DGPS는 USB 포트와 주 제어부와 연결되며 제어부 내부에서 Serial 통신으로 변환되어 메인 프로그램에서 실시간으로 위치정보를 파악하고 이동경로를 위한 데이터 저장도 수행한다.

Digital compass 정보는 블루투스 통신을 이용하여 DGPS 통신과 마찬가지로 Serial 통신 방식으로 제어기에 수신되어 위치정보와 함께 안내로봇의 방향정보를 처리하고 저장한다. Pioneer 로봇은 연결 방식이 Serial Port 이므로 Serial 통신을 USB통신으로 변환하는 케이블을 이용하여 제어부의 USB 포트와 연결이 되며 로봇의 엔코더 정보를 수신하여 위성 DGPS의 위치오차를 보정하는데 사용한다. 제어부는 위성 DGPS의 위치정보와 구동부의 엔코더 정보, Digital Compass의 방향정보를 수신하여 localization을 수행하여 DGPS의 위치오차를 보정하여 보다 정확한 현재 위치를 계산하고 다음 목표지점 이동을 위한 명령을 구동부로 전달하는 역할을 한다.

또한 주 제어부는 안내를 위한 안내영상 정보 DB 공간을 확보하고 있으며 안내지점에 대한 위치정보를 안내영상과 매핑(mapping)하여 구동부 제어와 함께 안내 동작을 처리하는 역할을 한다. 메인 제어 프로그램은 터치 UI를 적용하여 안내로봇의 동작과 제어에 관한 파라미터의 변경과 현재 로봇의 상태 정보를 파악할 수 있으며 운영자 모드와 안내 모드로 구성되어 있다. 안내영상의 소리는 외부 스피커를 통하여 전달하며 외부 스피커와의 연결도 블루투스 방식을 적용하여 불필요한 케이블들을 최소화 하였다. Fig. 10은 개발에 사용된 안내로봇을 나타낸다. 맨 상단이 주 제어부이며 로봇 구동용 모터에서 발생하는 전자기파로부터 기타 기기의 교란을 최소화하기 위하여 아크릴 재질을 이용하여 센서부와 제어부가 로봇 구동부와 이격되어 설치되어있다. 주 제어부는 로봇 조작을 위한 user interface 기능과 함께 영상안내 기능을 동시에 하며 음성 안내를 위한 스피커는 로봇의 중간 단에 설치되어있다.

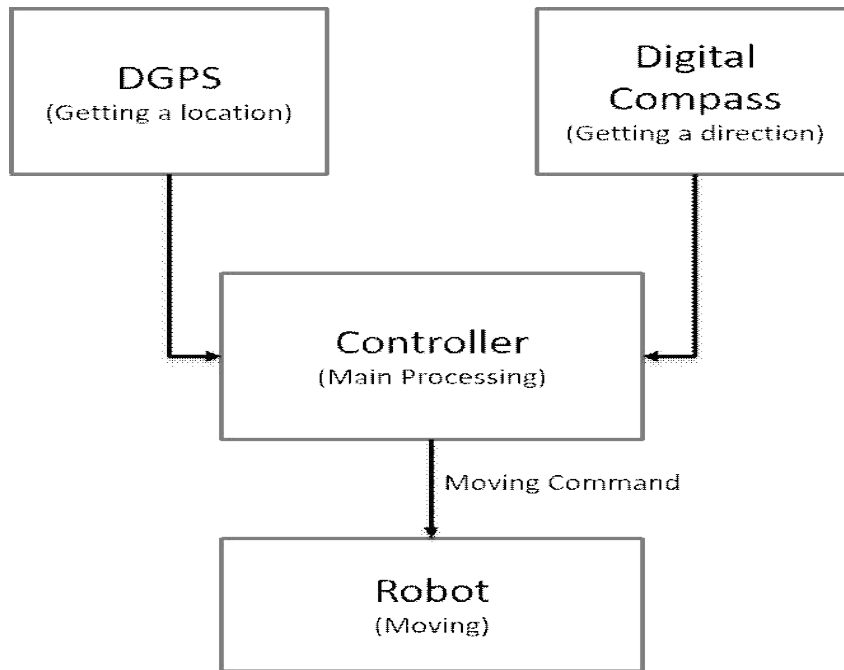


Fig. 11 The signal processing diagram of the guide robot



Fig. 12 The guide robot

2.4.4 센서 특성분석

Localization에 이용된 DGPS의 사양은 표 3에서와 같으며 DGPS는 그 방식에 따라서 정밀도가 차이가 나는데 정밀도가 높을수록 고가이다. 본 연구에서는 실제 실용화를 위해 정밀도가 떨어지는 저가 DGPS를 이용하였다. 표 5는 DGPS를 이용한 정밀도 사전 실험 결과이다. 제품 사양에는 위치정밀도가 2.5m이지만 실제 테스트 결과 최대 4.8m까지 오차가 발생하는 것이 관측되었다. 일반적으로 오차가 가우시안 분포를 보이는 무작위 (random)한 경우의 정밀도는 95.5%의 신뢰성 구간인 오차 표준편차의 2배로 표현되기 때문에 최대오차는 사양에서 제시된 오차보다는 큰 것으로 나타났다.

Table 5 The error characteristic of DGPS

Maximum	Mean	Standard deviation
4.8m	2.8m	1.65

Digital compass의 경우 방위의 실제 값을 측정하기가 대단히 어려우므로 통계학적인 특성들을 구체적으로 분석하기는 힘들다. 따라서 일정한 방향에 대해 측정된 값의 편차로서 그 특성을 유추하여 사용한다. 안내로봇에 적용된 디지털 컴퍼스도 상용화에 맞게 저가의 제품인 HMC 모델을 이용하였는데 방위 정밀도는 $\pm 3^\circ$ 로 사양서에 제시되고 있으나 실제 테스트 결과 표 6과 같이 편차가 6.2° 이상 발생하였다. 또한 digital compass는 기본적으로 자력선의 영향을 받으므로 주변의 전자기기나 전기기기의 간섭을 많이 받는다. 따라서 실제 로봇에 장착한 경우 편차는 더욱 커질 것으로 예상된다.

Table 6 The error characteristic of digital compass

모델	정밀도 (제품사양서)	평균편차 (실험)
HMC	$\pm 3^\circ$	$\pm 6.2^\circ$

로봇의 localization은 DGPS와 digital compass의 통계학적 특성이 필요한데 실제 localization에는 실험을 통해 분석된 통계학적 특성을 사용하였다.

2.4.5 실험방법 및 기준좌표 설정

개발된 localization 방법의 성능을 분석하기 위해 실제 주행실험을 수행하였다. 실험은 로봇이 사전에 위치를 알고 있는 다수의 기준 위치를 통과하게 주행하여 실제 위치와 로봇이 평가한 위치와의 오차를 평가하는 방법으로 수행하였다. 실험 장소는 Fig. 11과 같은 학교 운동장 트랙을 선정하였다. 이 운동장은 남북으로 길게 위치하고 있으며 Fig. 11에서 “x” 표시가 된 6곳의 위치오차를 측정하기 위한 기준 위치로 설정하였다.



Fig. 13 View of the experimental site

안내로봇의 지리 좌표계는 로봇의 DR 및 DGPS 위치, 그리고 localization 시스템의 단위와 통일시키기 위하여 미터단위로 사용 가능한 대표적인 평면직각 좌표계인 TM(Transverse Mercator) - GRS80을 적용하였다. 이 좌표계는 도/분/초로 표현된 위도 경도를 일정한 원점에 대해 m 단위로 환산된 좌표계이다. 좌표계의 원점은 중부원점인 위도 $38^{\circ}00'00''$, 경도 $127^{\circ}00'00''$ 를 사용하였다.

기준 위치의 정확한 위치좌표는 정밀 측량을 통해야 알 수 있지만 본 연구에서는 DGPS의 위치오차가 무작위라는 사실을 이용하여 기준 좌표들의 실제 위치를 추정하였다. 즉, DGPS 위치오차는 위성의 위치오차, 전리층 오차 및 통신 오차 등에 의해 발생하는데 이와 같은 오차요인들은 그 특성상 화이트 노이즈(random noise)이다. 화이트 노이즈 특성은 많은 데이터가 누적될수록 그 평균이 0에 수렴하므로 각 기준 위치에서 많은 위치데이터를 수집하여 그 평균값을 그 위치의 실제 위치로 하는 방법을 이용하였다.

기준 위치설정을 위한 데이터는 하루에 5분씩 3일에 걸쳐 수집하여 그 평균값을 실제 위치로 설정하였으며 각 위치 당 수집된 데이터 수는 약 200개이다. Fig. 12는 기준위치 설정 방법의 예를 나타내는 한 위치에서 수신된 위치데이터의 분포를 그래프로 보여주는 것이며 표 7에 그 결과를 나타내었다. 표 8은 이와 같은 방법으로 설정된 TM 좌표로 표현된 각각의 기준위치를 나타낸다. 기준위치 번호 순서는 Fig. 11에서 오른쪽 상단이 1번 위치이고 나머지 위치는 시계방향 순서이다. 표 8에서 각 좌표는 위치정보를 중부원점에 대해 m 로 환산한 값이다.

Table 7 The result of DGPS location data

수신 데이터수	수신위성 수	위도평균	경도평균
197	8~10	33.45	126.57

Table 8 Coordinates of the reference position (unit : m)

기준위치	TM_x(north)	TM_y (East)
1	45944.46	159005.61
2	45862.76	159005.18
3	45816.35	159049.59
4	45860.73	159091.39
5	45942.46	159089.33
6	45984.93	159050.41

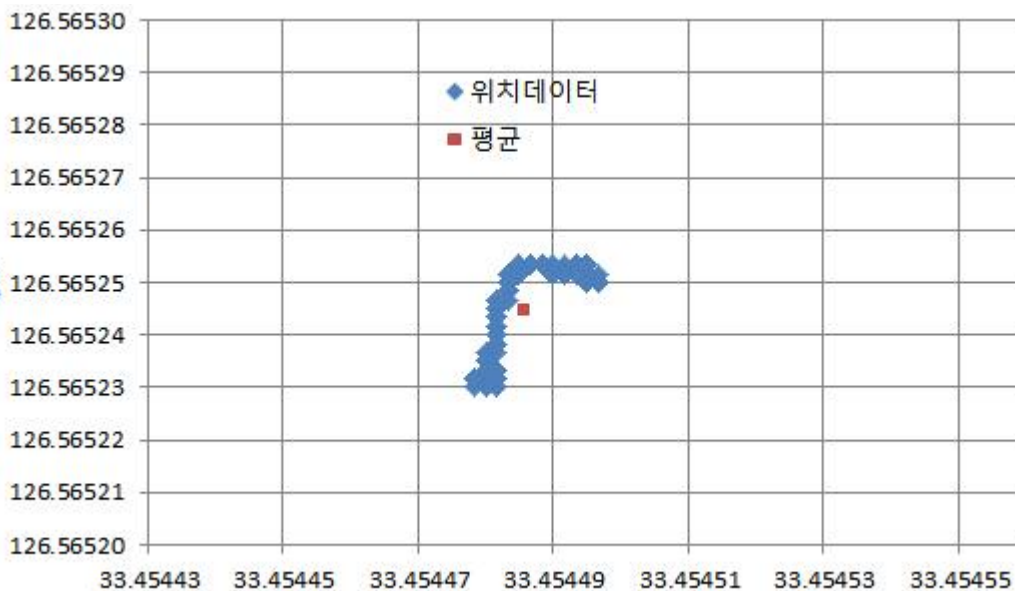


Fig. 14 Distribution characteristics of the DGPS position data

2.4.6 실험 결과

개발된 localization 방법을 선정된 트랙에서 수 회 실험을 수행하였으며 Fig. 13은 실험 시에 로봇이 지나간 궤적을 나타낸다. Fig. 14와 Fig. 15는 한번의 주행 시에 컴퍼스를 사용하지 아니한 경우와 사용한 경우의 위치평가를 동시에 수행하여 나타낸 결과이다. 실험 전체경로는 약 430m이며 각 그림에서 점선은 DGPS 단독에 의한 위치평가 결과이며 실선은 EKF 위치평가 결과를 나타낸다.

두 위치평가의 성능을 비교해보면 디지털 컴퍼스를 사용하지 아니한 경우는 4곳의 기준위치에서 DGPS 단독인 경우보다 위치평가 성능이 떨어지는데 반해 디지털 컴퍼스를 이용하는 경우에는 한곳의 기준위치를 제외하고는 모든 기준위치에서 DGPS 단독의 경우보다 우수한 결과를 보이고 있다.

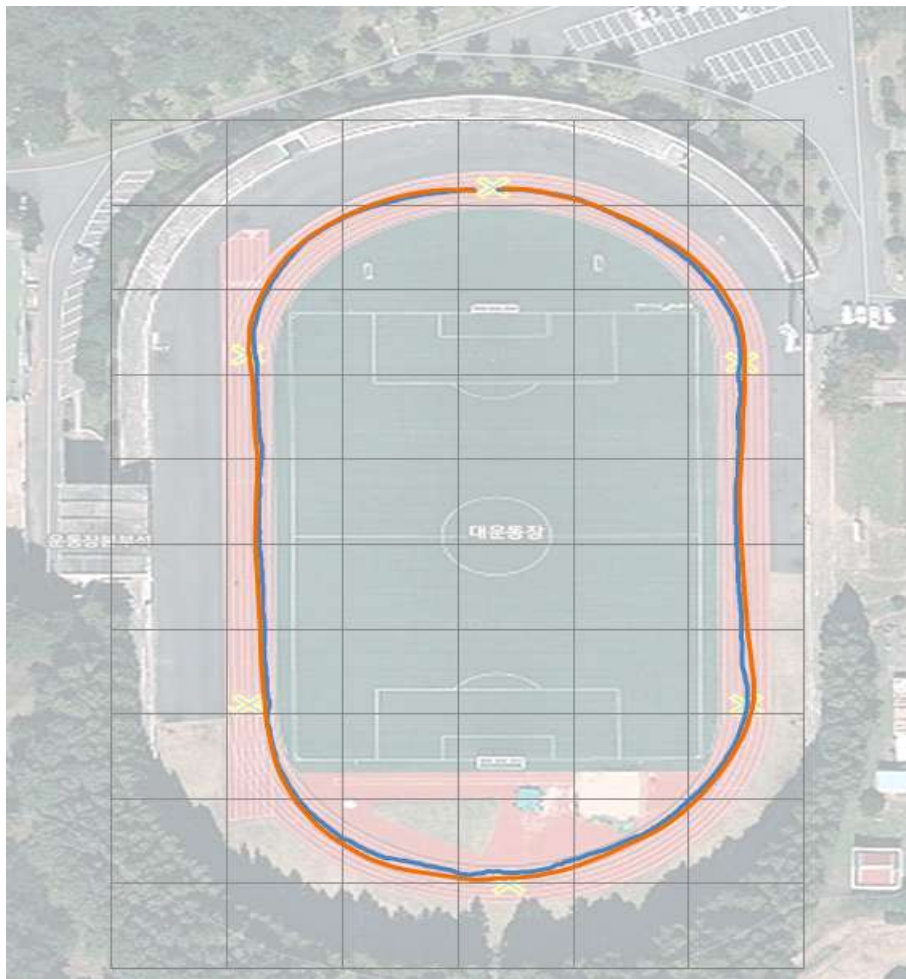


Fig. 15 Experimental locus of Localization

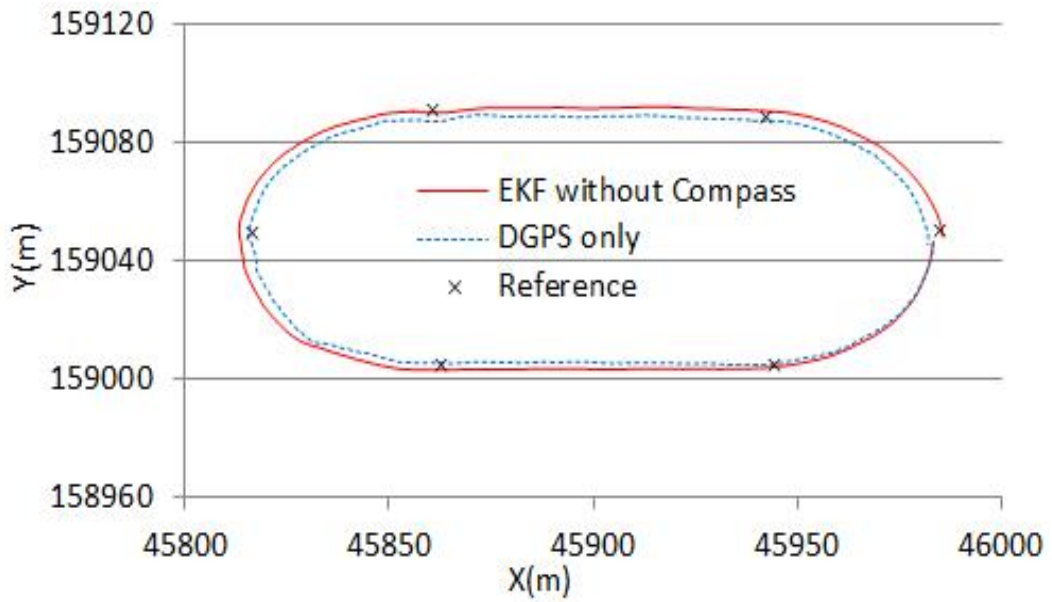


Fig. 16 Localization results without compass

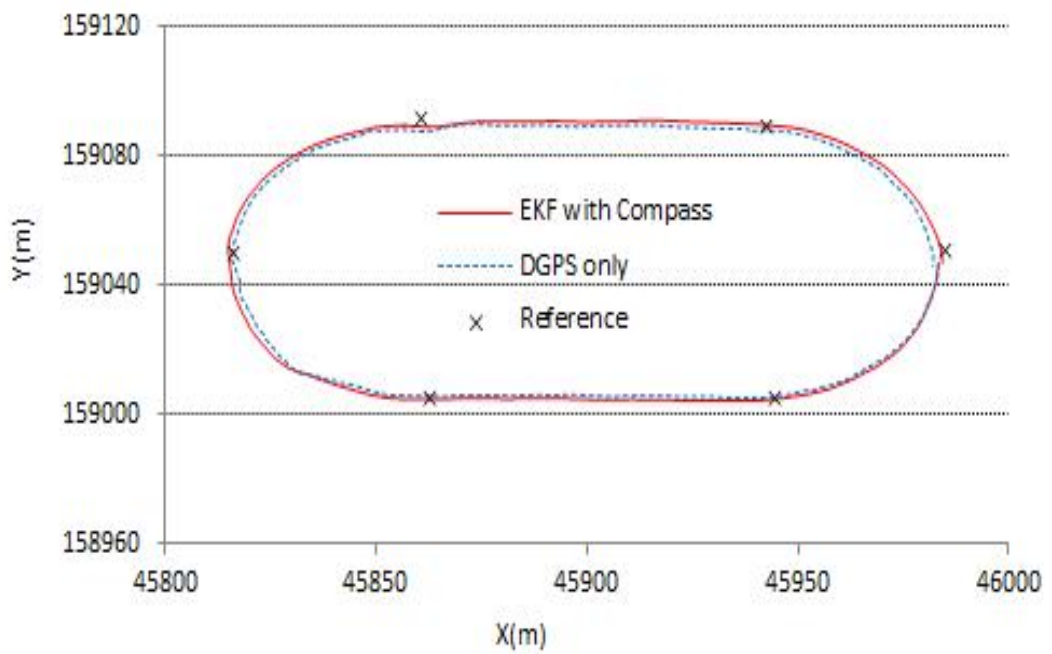


Fig. 15 Localization results with compass

표 9는 오차 특성을 분석한 결과이다. 표에서 기준위치 7의 오차는 로봇이 처음출발 위치인 기준위치 1에 다시 돌아왔을 때의 오차를 나타내며, EKF with DC는 digital compass가 추가된 localization 방법을 나타내고, EKF without DC는 기존의 digital compass가 추가되기 전의 localization 방법을 나타낸다. DGPS만의 localizaiton 최대 오차는 4.78m, 평균오차는 3.02m 인 반면에 수정된 EKF 오차는 최대가 1.71m, 평균이 0.86m 정도였다. 오차 비율은 평균오차 기준으로 EKF 오차가 DGPS 오차의 28%로서 약 1/4 정도 오차가 줄어들음을 알 수 있다. 또한 최대 오차도 EKF 오차가 DGPS 오차의 35% 정도이며 표준편차는 52%정도로서 두배 이상으로 정확도가 높아 지는 것으로 나타났다. 또한 digital compass가 추가된 localization 방법은 그렇지 아니한 경우에 비해 평균오차 기준으로 절반정도로 오차가 줄어드는 성능을 보였다. Fig. 16은 오차특성을 그래프로 나타낸 것이다.

통계학에서 95% 오차 신뢰구간 μ 는 다음식으로 구할 수 있다.

$$\bar{X}-t\frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{X}+t\frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (35)$$

여기서 \bar{X} 는 평균값, t 는 신뢰구간에 따른 임계치, σ 는 표준편차, 그리고 n 은 표본수이다. 95% 신뢰구간일 경우 임계치는 $t=1.96$ 이므로 이를 이용하여 구한 신뢰구간을 표 9에 나타내었다. 이 결과에서 알 수 있듯이 수정된 방법은 최대 1.26m 이내의 오차로 95% 신뢰를 갖고 위치를 평가 할 수 있음을 알 수 있다.

Localization의 오차 평가의 특성을 나타내는 또 다른 지표는 오차 공분산 분석이다. Fig. 17은 오차 공분산을 나타낸 것이다. 공분산은 North(이하 x 방향) 및 East(이하 y 방향) 모두 0.3 이내의 값을 가질 뿐만 아니라 거리의 증가에도 불구하고 수렴하고 있음을 나타낸다. 따라서 평가된 위치의 신뢰성이 양호함을 알 수 있다. Fig. 17에서 각 공분산이 교대로 증가 및 감소하고 있는데 이것은 주행경로가 출발 시에는 y 방향으로만 주행 하다가 다시 x 방향으로만 주행하는 패턴을 반복하였기 때문이다. 즉, y 방향으로만 주행할 때는 y 방향 오차가 커져 y 공분산

이 급격하게 증가하다가 다시 x 방향으로만 주행 할 때는 x 방향 공분산이 커지면서 y 방향 공분산은 줄어드는 패턴을 반복한 것이다. 따라서 개발된 DGPS, digital compass 및 로봇의 DR을 이용한 EKF localization 방법은 95% 신뢰를 가지고 로봇의 위치를 최대 1.26m 오차 이내로 위치평가가 가능함을 확인할 수 있으며, 이는 개발 목표치인 1.5m를 충분히 달성하였다고 판단된다.

Table 9 Distance error characteristics (Root Mean Square Error) [unit : m]

Position	Error		
	DGPS	EKF with DC	EKF without DC
1	2.50	0.22	1.26
2	1.74	0.73	2.10
3	2.61	1.71	1.98
4	4.78	0.64	1.32
5	0.57	0.19	2.13
6	1.45	1.21	2.23
7	4.18	1.35	0.92
RMS	3.02	0.86	1.71
Max.	4.78	1.71	2.23
Std.	1.05	0.54	0.46
95% confidence interval (μ)	$2.24 \leq \mu \leq 3.78$	$0.45 \leq \mu \leq 1.26$	$0.83 \leq \mu \leq 2.05$

* DC : Digital Compass

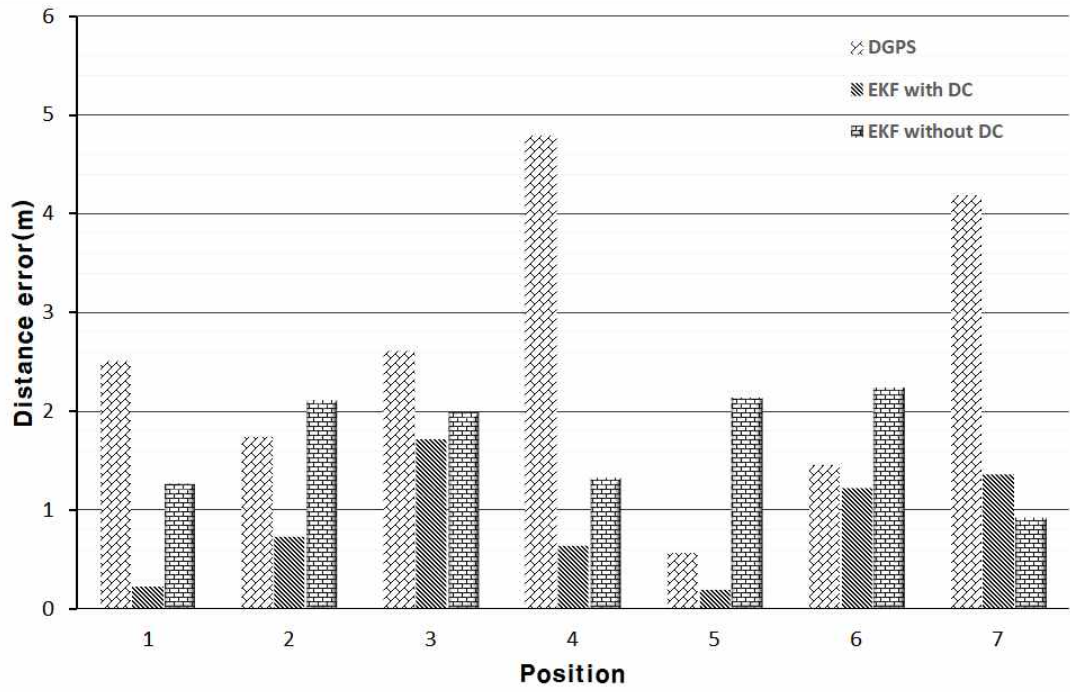


Fig. 18 Graphical representation of error characteristics

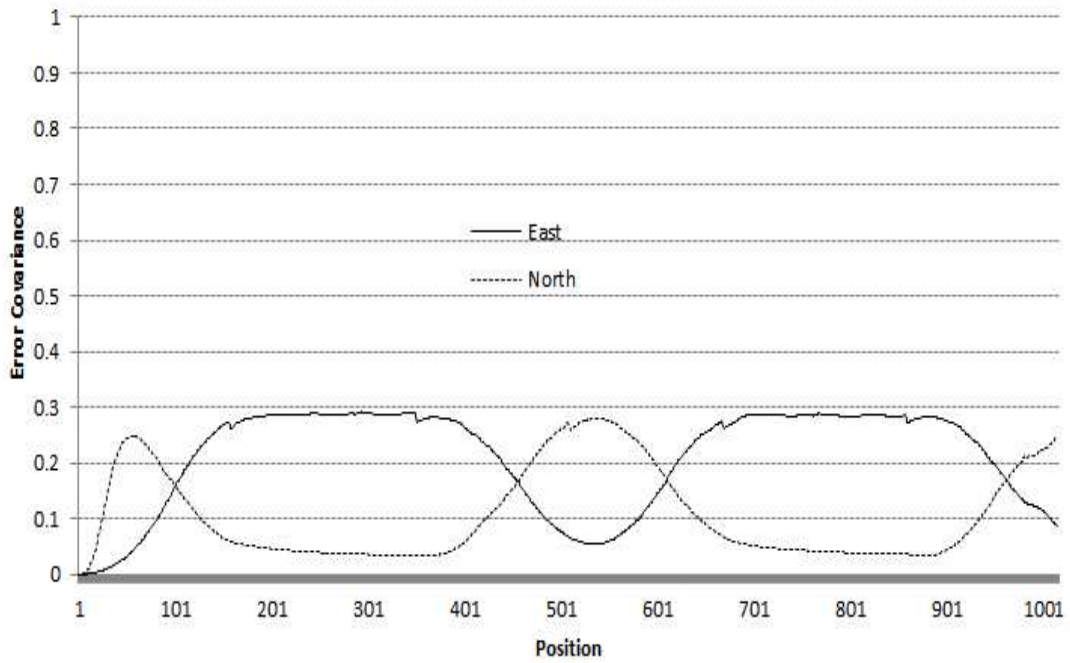


Fig. 19 Characteristics of error covariance

제 3 장 경로 자율 항법

3.1 사전 경로인식방법

3.1.1 사전 경로인식의 필요성

안내 로봇이 방문객을 인솔하여 안내를 수행하기 위해서는 로봇이 주행 할 안내 경로가 필요하다. 완전한 자율성을 갖기 위해서는 목표지점만 입력하면 로봇이 스스로 경로를 찾아 주행해야 하지만 현재의 기술 수준으로는 야외에서 로봇이 스스로 경로를 설정하여 주행하는 것은 불가능하다. 그 이유는 위치정밀도가 실내 로봇에 비하여 크게 떨어지고 장애물 인식 및 회피가 실외 환경에서는 어렵기 때문이다. 즉, 실내는 여러 가지 방법을 이용하여 로봇의 위치오차를 최소화 할 수 있을 뿐만 아니라 로봇이 주행할 수 있는 자유공간과 주행이 불가능한 장애물 구간이 명확히 구별되는 정돈된 환경이기 때문에 로봇이 자유공간을 쉽게 판단하여 목적지까지 주행이 가능하다.

그러나 실외 환경은 위치오차가 클 뿐만 아니라 자유공간과 장애물이 명확히 구분되지 못하므로 단지 로봇의 위치정보와 목적지 정보만으로 자율 주행이 불가능하다. 예를 들어 주행 도로와 도로 바깥이 로봇 입장에서는 명확히 구별되지 못하므로 로봇은 도로를 따라 주행하기 보다는 현재 로봇위치에서 목적지를 연결하는 직선 경로로 주행하려고 하기때문에 도로를 이탈한다. 물론 도로의 중앙선을 인식하는 비전시스템 등을 이용하면 어느 정도 가능하지만 고가에다 정보처리 양이 과다하므로 안내로봇에 적용하기는 무리이다. 또한 중앙선 표시가 없는 길에서는 적용이 불가능하다.

이와 같은 실외의 특성을 고려하여 로봇이 주행할 수 있는 현실적인 방법은 사전에 이동할 경로를 제공하는 것이다. 또한 실제로 안내로봇이 현장에 적용되기 위해서는 안내로봇을 사용하는 사용자의 편의성 및 범용성을 극대화하기 위해 별다른 수정 없이 사용자가 쉽게 로봇으로 하여금 사전 경로를 인식하는 방법의 개발이 필요하다.

3.1.2 사전 경로 인식방법

본 연구에서는 로봇이 안내를 수행해야 할 경로를 사전에 인식하는 방법을 사용자 관점에서 수행 할 수 있도록 하였다. 즉, 사용자가 사전에 수동으로 로봇을 조작하여 로봇이 주행하여야 할 경로를 주행시킴으로써 경로를 인식하는 방법이다. 이와 같은 방법은 전문적인 지식이 없는 안내로봇 사용자가 쉽게 경로를 인식시킬 수 있을 뿐만 아니라 필요시에 쉽게 안내 경로를 바꿀 수 있다는 장점이 있다. 또한 한 장소에서 작동하던 안내로봇을 새로운 장소에서 작동하게 할 때에도 사용자가 수동으로 새로운 경로를 주행시키는 것만으로 사전 경로가 인식되므로 범용성을 확보 할 수 있다.

사전경로 인식은 사용자가 리모컨을 이용하여 로봇을 주행시킴으로써 수행된다. Fig. 18은 사전경로 인식용 제어화면이다. 메인 화면에서 수동모드를 선택하면 그림과 같은 화면으로 전환되는데 화면의 “start”를 터치하고 리모컨으로 인식 시킬 경로를 주행시키면 로봇은 이동 중에 실시간으로 DGPS와 Digital Comapss 및 로봇 DR 정보를 바탕으로 2.4.3절에 기술한 방법으로 localization을 수행하여 로봇 자신의 최적 위치를 평가 하면서 주행한다. 주행 중 로봇은 매 0.5m 간격으로 로봇 자신의 위치를 저장함으로써 사전 경로 정보를 획득한다.

로봇의 전원을 ON 시키는 시점에서 로봇의 좌표는 (0, 0)로 초기화 되므로 데이터 저장 시작 전에 내부 프로그램에서 로봇 좌표계를 DGPS 좌표계인 TM 좌표계로 mapping하여 좌표와 방향 정보를 일치시킨다. 수동으로 사전경로 주행이 끝나면 사용자는 단순히 “start”를 다시 한 번 터치함으로써 경로 인식이 종료된다. 경로 인식이 종료되면 로봇은 데이터 저장을 종료하고 이동한 경로에 대한 경로 데이터를 경로 폴더에 최종 등록하여 이 후 자율주행 시에 추적 경로 데이터로 이용한다.

만약 정확한 경로 데이터가 파일 형태로 제공되는 경우에는 사전 주행 없이 경로 데이터를 메인 제어기의 경로 폴더로 다운로드 함으로써 사전 경로 데이터를 로봇에 제공할 수도 있다. Fig. 19는 사용자가 리모컨을 이용하여 사전 경로를 인식시키는 과정을 나타낸다.

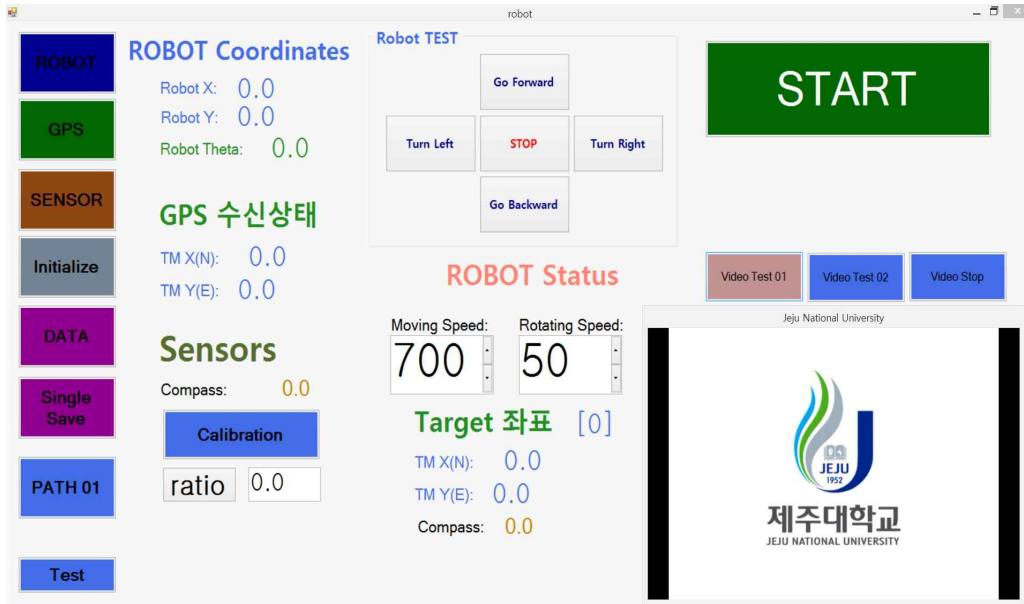


Fig. 20 The control screen of pre-path recognition



Fig. 21 The experimental of pre-path data recognition

3.2 경로 평활화

기존 안내로봇에 적용된 안내경로 선택방법은 로봇이 사전에 안내경로를 주 행하면서 자신의 위치를 평가하고 평가된 위치를 전부 기억하여 경로를 선정하는 방법이었다. 그러나 위치오차로 인해 선택된 경로의 변화가 실제 로봇의 주행 경로 변화보다 상당히 크게 나타나는 문제가 발생하였다. 기억된 경로를 평활화(smoothing)하여 변화를 줄임으로써 경로추적을 용이하게 할 필요가 있다.

경로 smoothing 방법은 기본적으로 곡선 최적화 방법을 이용하여야 하는데 긴 경로를 하나의 곡선으로 적합화 하기는 어렵다. 따라서 부분적으로 변화가 심한 경로를 분석하여 효과적으로 평활화 하는 것이 필요하기 때문에 부분 경로의 최적 smoothing 하는 방법을 연구하였다.

경로 smoothing는 곡선 최적화방법을 이용하는데, 곡선 최적화 방법에는 least square, time series 분석법, 지수평활화법(Exponential Smoothing), 이동평균법(Moving Average) 등이 있다. 표 10은 각 smoothing 방법의 특징을 나타낸다. 안내로봇의 이동경로는 비교적 장거리 이므로 구간이 넓은 데이터로부터 하나의 곡선으로 최적화하는 방법은 적합하지 않다. 실제 least square, 지수평활화 및 time series 등은 전체 데이터를 종합적으로 고려하여 최적화 하는 방법으로서 구간이 긴 데이터를 하나의 곡선으로 최적화 하는 방법으로는 적합하지 못한 것으로 나타났다. 따라서 전체 데이터를 모두 고려하지 않고 부분적인 데이터에 의한 평활화 방법인 이동평균법을 이용하여 경로 평활화 하는 방법을 연구한다.

이동 평균법이란 순차적으로 존재하는 각 데이터에서 현재 데이터를 중심으로 앞 뒤 일정수의 데이터 값을 평균값을 구하고 이것을 연결함으로써 불규칙 변동성을 제거하고 추세변동과 순환변동만을 가지는 추세선이나 경향선을 구할 때 주로 쓰이는 방법이다. 이동평균을 구하는 식은 다음과 같다.

$$\bar{d}_n = \frac{d_{n-m} + d_{n-(m-1)} + \dots + d_{n-1} + d_n + d_{n+1} + \dots + d_{n+m}}{2m+1} \quad (36)$$

Table 10 Smoothing Methods

Method	Contents	Characteristics
Non-linear Least Square	Method to obtain a function that minimizes the error between each data and the function	All data
Time Series	Method to derive an optimization function through time series analysis.	complicate
Exponential Smoothing	Weights are applied to each data to smoothing the data	All data
Moving Average	Averaging a certain number of data values before and after the data	Data within a certain range, simple and easy

여기서 \bar{d}_n 는 이동 평균하여 평활화 된 n 번째 데이터, d_i 는 각 데이터, 그리고 m 은 n 을 중심으로 평균할 좌우 데이터 개수를 나타낸다. Fig. 20은 $m=1$, 즉 2구간 이동평균방법을 이용한 평활화 예를 나타낸다. Fig. 20에서 옅은 색의 그래프는 원래 데이터를 나타내고 검은색은 이동평균을 이용하여 평활화된 데이터를 나타낸다. Fig. 20에서 나타나듯이 원래 데이터의 변화보다 이동평균된 데이터의 변화가 급격하게 줄어드는 경향을 보인다.

그러나 이 방법은 m 번째 이전 데이터에는 적용할 수 없기 때문에 첫 부분과 마지막 부분의 데이터 평활화는 할 수 없는 단점이 있다. 따라서 Fig. 20에서 알 수 있듯이 처음 데이터와 마지막 데이터는 평활화가 되지 못한다. 그러나 안내경로 평활화 경우에는 처음 출발 위치와 마지막 도착 위치는 사전에 정해지므로 오차가 크기 않기 때문에 평활화 과정에서 처음 데이터와 마지막 데이터는 원래 데이터를 그대로 이용할 수 있다.

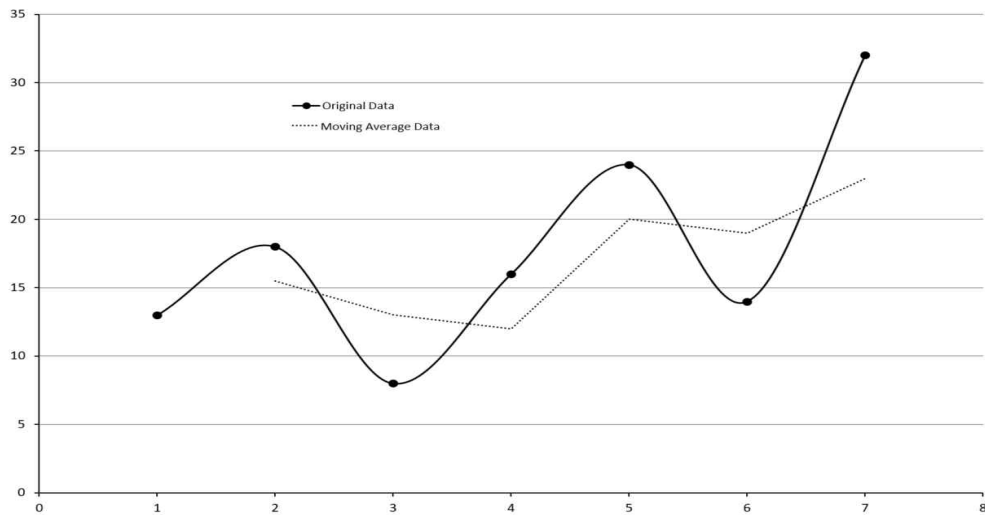


Fig. 22 Example of moving average

3.2.1 경로 평활화 결과

실제 로봇을 이용하여 획득된 경로데이터에 이동평균법을 적용하여 경로 평활화 성능을 테스트 하였다. 이동평균 데이터 개수가 큰 경우에는 실제 경로 왜곡이 발생하기 때문에 이를 최소화 하기 위해 $m=1$, 즉 2구간 이동 평균법을 적용하였다. m 이 커질수록 평활화 정도가 커지고 작을수록 평활화 정도가 떨어진다. 그러나 m 이 커지면 실제 경로 왜곡 가능성도 커지기 때문에 실제 경로 왜곡을 최소화 하기 위해 2구간 이동 평균법을 이용하였다. 또한 전술한 바와 같이 처음과 마지막 데이터는 사전에 위치가 정해지는 것이기 때문에 원래 데이터를 그대로 이용하였다. 2구간 이동평균의 경우 평활화 정도가 낮은 단점을 보완하기 위해 2구간 이동평균법을 반복적으로 적용하였다. 이동평균을 반복적으로 적용하는 것은 결국 이동 평균 시에 각 데이터에 가중치를 주어 이동평균을 구하는 결과가 된다. 예를 들어 2구간 이동평균을 2회 실시하는 경우 \bar{d}_n 은 다음과 같이 된다.

$$\bar{d}_n = \frac{d_{n-2} + 2d_{n-1} + 3d_n + 2d_{n+1} + d_{n+2}}{9} \quad (37)$$

즉, d_n 의 가중치가 가장 높고 n 에서 멀어질수록 가중치가 낮아지는 결과이다. 따라서 이 방법은 가중치 이동평균 (Weighted Moving Average : WMA)이라고 볼 수 있다. 결국 이 방법은 식 (37)과 같이 이동평균 시 모든 데이터에 동일한 가중치를 주는 단순 이동평균과는 달리 자신의 가중치를 가장 높게 설정함으로써 실제 경로 왜곡현상을 최소화 할 수 있다.

Fig. 21에서 Fig. 25는 이동평균 횟수에 따른 경로 평활화 결과를 나타낸다. 이동 평균을 1회 수행한 경우는 평활화 효과가 미미하여 원래 경로에 비해 차이가 없었다. 5회 반복의 경우는 잡음에 의한 변화가 점차 줄어들어 평활화가 눈에 띄게 나타나며 20회 반복한 경우가 가장 실제 경로에 대해 왜곡 없이 평활화됨을 확인하였다.

그러나 Fig. 25에서 알 수 있듯이 이동평균 횟수가 40회정도 되면 경로 평활화 측면에서는 만족스러우나 Fig. 25의 좌측 상단 코너 부근에서와 같이 실제 경로가 심하게 왜곡된다. 따라서 실제 경로를 왜곡시키지 않고 최대한 smoothing이 필요한 경우는 이동평균 반복횟수를 20여 회가 가장 적합하고 실제 경로가 왜곡되더라도 강제적으로 경로를 평활화 해야 할 경우는 이동평균 반복 횟수를 40회 이상으로 하는 것이 타당하다. 강제적 경로 평활화가 필요한 이유는 실제 안내경로를 선택할 때 로봇 운행 조작 미숙이나 로봇의 주행 오차로 인해 원하지 않게 실제 경로의 변화가 심해지는 경우가 발생하기 때문이다.

이상적인 안내경로는 실제 곡선 경로를 제외하고는 가능한 한 직선 경로가 바람직 한 만큼 안내경로 선택시에 조작 미숙이나 갑작스런 이동형 장애물 회피 등 기타 원인으로 인해 원하지 아니한 경로 변화가 개입 된 경우에 강제 경로 평활화가 효과적으로 적용 될 수 있을 것으로 판단된다.

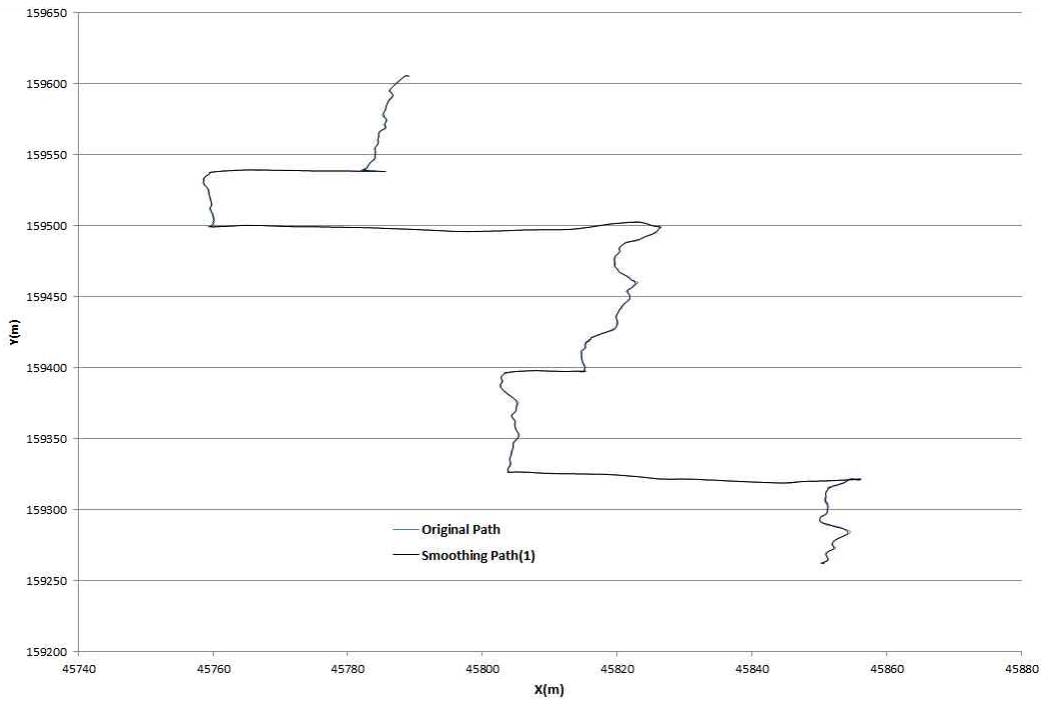


Fig. 23 The result of path smoothing (1 time)

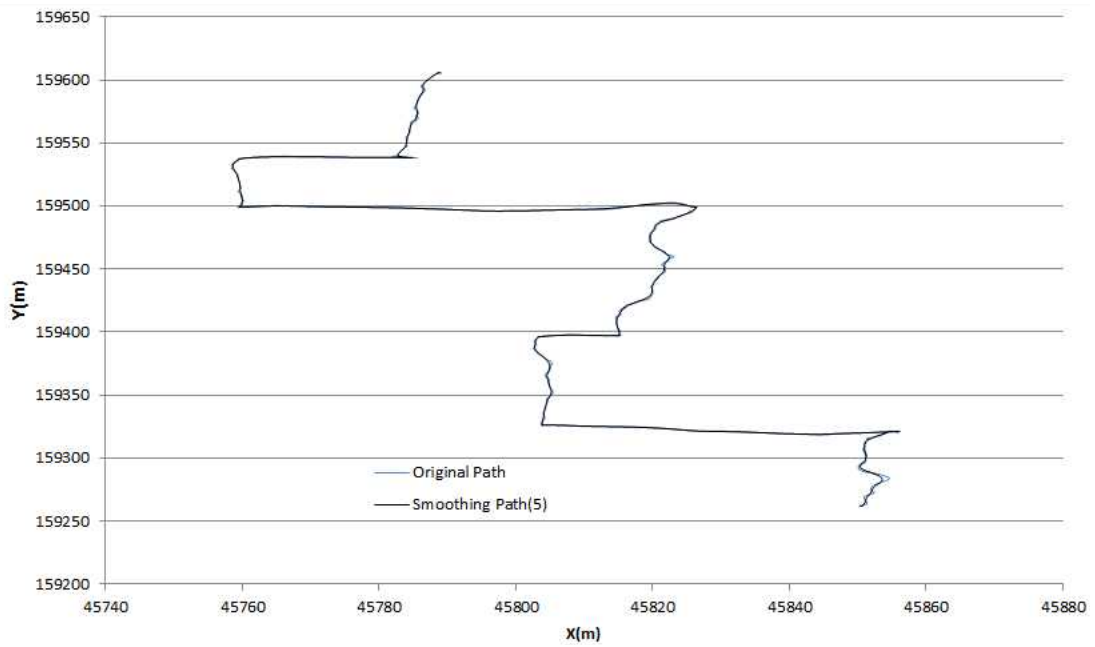


Fig. 24 The result of path smoothing (5 times)

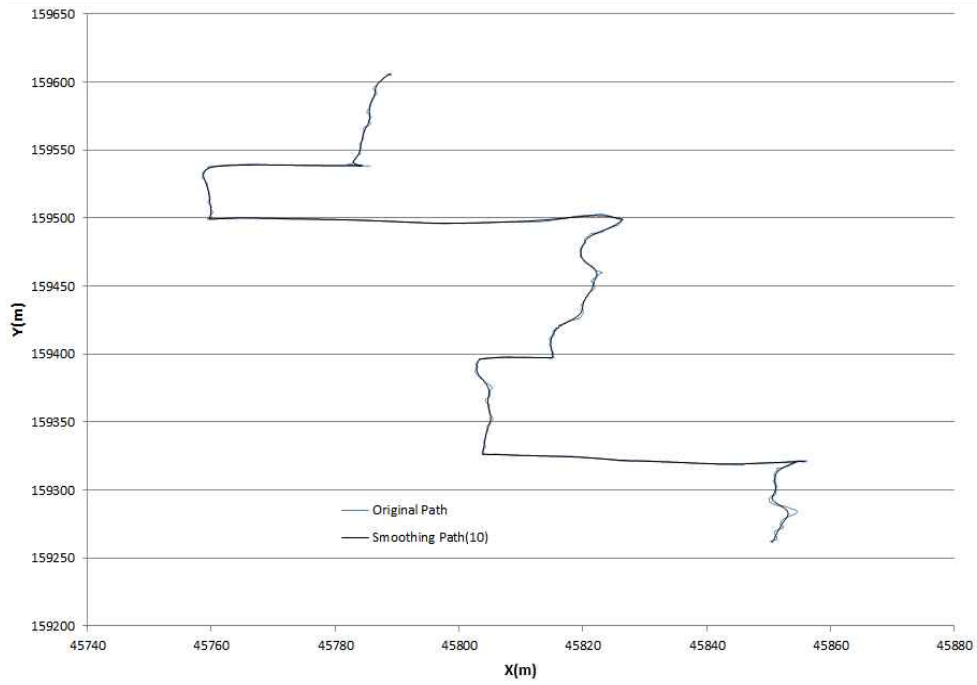


Fig. 25 The result of path smoothing (10 times)

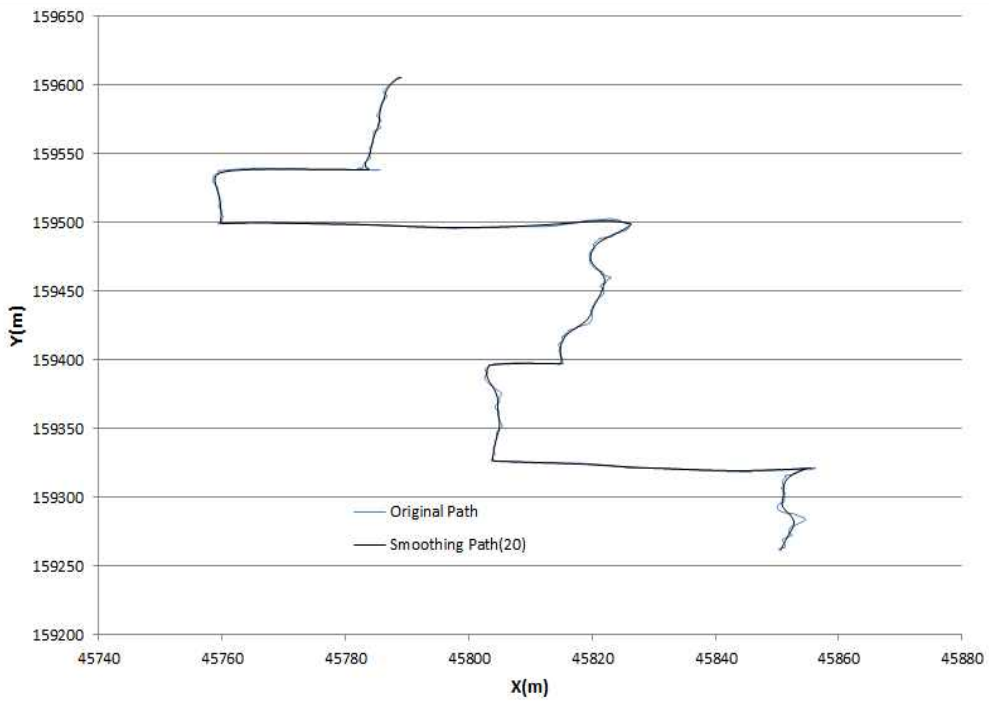


Fig. 26 The result of path smoothing (20 times)

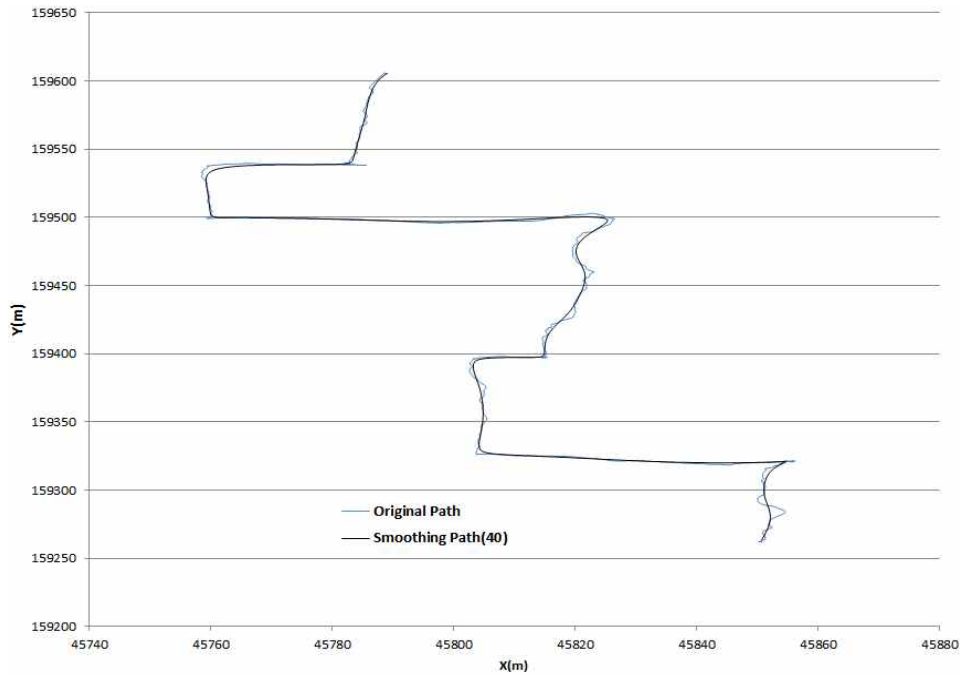


Fig. 27 The result of path smoothing (40 times)

3.3 경로 자율주행

3.3.1 경로 자율주행 필요성 및 문제점

안내로봇이 안내경로를 자율적으로 주행하면서 안내를 수행하기 위해서는 사전에 설정된 안내경로를 로봇 스스로 추적할 수 있어야 한다. 기본적으로 경로 추적은 로봇의 현재 위치와 목표지점 사이의 거리와 방향을 계산하여 그것을 수행하도록 로봇을 제어하는 것이다. 그러나 로봇의 현재 위치뿐만 아니라 목표지점 조차도 위치오차가 개입되어 있기 때문에 단순히 현재위치와 목표점사이의 방향 및 거리 추종 제어만으로는 효과적인 경로 추적이 어렵다.

또한 로봇이 목표지점에 도달했음에도 불구하고 그 순간 발생한 위치오차에 의해 도달 여부를 알지 못함으로 인해 오차에 해당하는 만큼의 또 다른 목표지점을 향하는 잘못된 방향으로 주행제어가 이루어져 추적 성능이 저하되거나 추적이 불가능해지는 경우가 자주 발생한다. 따라서 한번 도달된 목표지점과의 오차가 다시 커지는 방향으로 주행제어 목표가 설정되는 경우를 판단하여 주행제어 명령에서 제외시키는 방법이 필요하다.

또 다른 문제점은 도달한 목표점과 다음 목표점과의 거리 크기가 주행제어에 민감한 작용을 한다. 예를 들어 다음 목표지점까지의 거리가 로봇의 위치오차 범위보다 작다면 로봇은 다음 목표지점으로 추적이 불가능한 경우가 발생하는데 이러한 문제점을 고려하여 목표지점과 다음 목표지점 사이의 거리가 어느 정도가 가장 이상적인지도 연구가 되어야 할 부분이다. 따라서 본 연구에서는 오차를 고려한 목표지점 도달여부 확인방법 및 목표지점사이의 최적 거리 등을 위치오차의 불확실성 범위를 평가하여 이것을 기반으로 경로추적 방법을 도출한다.

3.3.2 경로 추적 알고리즘

안내로봇의 자율 주행은 사전에 수동으로 저장된 경로 데이터를 자율 주행시 메인 프로그램이 읽어 들여 초기 위치에서 최종 지점까지 저장된 경로 지점을 따라 이동함으로써 수행 된다. Fig. 26은 사전 경로 인식으로 저장된 경로 데이터를 이용하여 경로를 자율 주행하는 흐름도를 나타낸다.

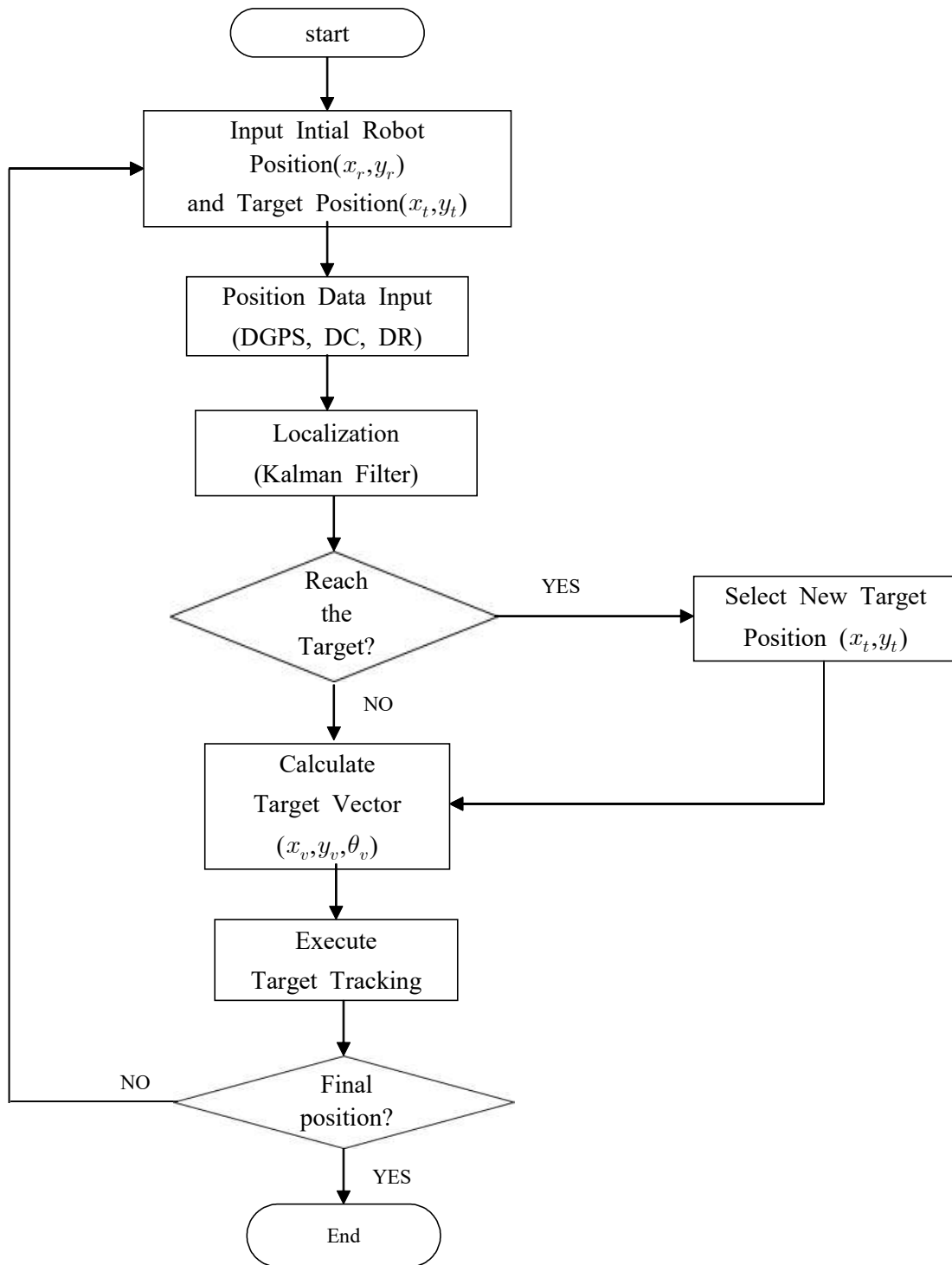


Fig. 28 Flowchart of autonomous path tracking

먼저 주행이 시작되면 로봇의 현재 위치 (x_r, y_r) 를 DGPS 위치정보로부터 설정한다. 또한 수동으로 선택된 사전경로 데이터베이스로부터 로봇의 현재 위치에 가장 가까운 목표지점을 탐색하여 초기 target position (x_t, y_t) 으로 설정하고 경로 추적을 시작한다. 이동 중에 로봇은 항상 DGPS, 디지털컴퍼스(DC), 그리고 로봇의 바퀴에 부착된 엔코더 정보로부터 계산된 위치정보 (DR)정보를 받아들여 Kalman Filter를 이용하여 최적의 위치 (x_r, y_r) 을 평가 하는 localization을 수행 한다. 다음으로 목표지점 도달 여부를 판단하는데, 평가된 로봇 위치와 현재 target position을 비교하여 거리 오차가 일정한 값 이하이면 로봇이 현재 target에 도달한 것으로 판단하고 사전경로 데이터베이스로부터 그 다음 target position을 탐색하여 목표지점으로 설정한다. 만약 현재 target에 도달하지 못한 경우이면 목표 지점을 현재 target을 유지한다.

다음 단계로 Localization 결과로부터 평가된 로봇 현재 위치 (x_r, y_r) 과 이동해야할 target position (x_t, y_t) 로부터 로봇이 이동해야 할 방향 벡터 (x_v, y_v, θ_v) 를 다음 식으로 계산한다.

$$\begin{pmatrix} x_v \\ y_v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_t - x_r \\ y_t - y_r \end{pmatrix}, \quad \theta_v = \tan^{-1} \frac{y_v}{x_v} \quad (38)$$

방향 벡터가 계산되면 로봇은 회전해야 할 방향 θ_v 만큼 로봇의 방향전환을 수행하고 이동한다. 안내로봇의 속력이 사람의 걸음걸이 정도이므로 목표지점으로 로봇의 속력은 일정하게 한 상태에서 연속적으로 목표지점에 대한 방향 전환만 수행한다. 이와 같은 과정을 반복수행하면서 이동 중에 지속적으로 최종목표지점에 도달했는지 여부를 목표지점 반경 내 일정 범위를 설정하여 확인하고 최종목표지점에 도달하면 자율 경로 주행을 종료한다.

목표지점 도달 여부는 위치오차를 고려하여 다음과 같이 판단한다. 즉, 로봇의 현재 위치와 목표지점사이의 거리가 d 일 때 다음 조건을 만족하면 로봇이 목표지점에 도달한 것으로 판단한다. 즉,

$$d \leq \max(\sqrt{P_{ij}}) + \sigma_{path} \quad (39)$$

여기서 $\sqrt{P_{ij}}$ 는 localization 과정에서 평가되는 위치 공분산의 제곱근 행렬을 의미하며, σ_{path} 는 경로설정 시에 추정된 최대 오차 평균 편차를 의미한다. 즉, 공분산이란 각 위치의 평균값에 대한 편차의 제곱을 의미하므로 그 제곱근 행렬의 각 요소는 표준편차의 의미를 내포하고 있으므로 오차의 범위(위치 불확실성 범위)를 나타낸다고 볼 수 있다.

따라서 위 식은 로봇의 현재 위치 오차 범위와 경로설정 시 최대 오차범위를 더한 총 오차 범위 이내이면 로봇은 목표지점에 도달하였다고 볼 수 있다. Fig. 17에 나타난 바와 같이 오차공분산 요소의 최대 크기가 약 0.3이므로 $\sigma_{path} = 0.55$ 로 설정하였으며 P_{ij} 는 로봇의 현재 위치에 대한 공분산 행렬에서 구해진다. 만약 목표지점이 안내를 수행해야하는 기준 위치나 최종 도착지점인 경우에는 그 위치의 위치불확실성이 0이므로 $\sigma_{path} = 0$ 이 된다. 따라서 이와 같은 지점에 도달하였을 때 로봇의 최종 위치오차는 일반 경로상의 목표지점에서 발생하는 위치오차보다 줄어든다.

또한 현재 목표지점과 다음 목표지점 사이의 거리 d_{min} 는 최소한 (39)식보다 커야 하므로 다음과 같은 조건식에서 구한다.

$$d_{min} > \eta(\max(\sqrt{P_{ij}}) + \sigma_{path}) \quad (40)$$

여기서 η 는 거리 보정계수로서 실험을 통하여 가장 효과적인 1.6으로 설정하였다. 따라서 목표지점과의 거리는 로봇의 현재 오차범위에 따라 달라지며 최소 0.9m에서 최대 1.8m 사이가 된다. 즉, 안내경로를 추적할 때 로봇은 경로상의 한 목표지점에 도달하면 현재 위치에서 d_{min} 거리만큼 떨어진 점을 안내경로상에서 찾아 그 위치를 다음 목표지점으로 설정하게 된다. 따라서 다음 목표지점까지의 거리 d_{min} 은 현재 로봇의 위치불확실성 범위에 따라 달라진다.

식 (39)와 식 (40)의 공분산 제곱근 행렬은 Cholesky 분해법을 이용하여 구한다[30]. 즉 공분산 행렬 P 는 대칭이고 positive definite 행렬이면서 각 요소가

실수이므로 다음과 같이 분해된다.

$$P = LU \quad (41)$$

여기서 여기서 L 은 하 삼각 행렬, U 는 상 삼각행렬이다. 그러면 P 가 대칭이므로 다음이 성립한다.

$$P = LU = P^T = U^T L^T \quad (42)$$

위 식은 $L = U^T$ (또는 $L^T = U$)일 때 성립한다. 그런데 P 가 positive definite 이면 Cholesky 분해는 유일하다[30]. 따라서 P 의 유일한 Cholesky 분해는 다음과 같이 된다.

$$P = LL^T \quad (43)$$

식 (40)에서 L 이 공분산 P 의 제곱근 행렬이 된다.

3.3.3 자율 주행 결과

이상과 같은 사전경로 선택 방법 및 자율 주행방법을 실제 실험으로 그 성능을 평가하였다. 실험은 Fig. 27과 같이 학교 내부의 한 도로에서 수행하였다. 총 이동거리는 약 150m정도이며 Fig. 27에서 붉은색으로 표시된 궤적을 리모컨을 이용하여 로봇을 주행시켜 선택된 사전 경로를 선택하였다. 로봇의 출발지점은 Fig. 27의 좌측 끝 부분이며, 이 도로는 Fig. 28에서 나타내는 것과 같이 약 20%의 경사도를 가지는데 우측이 좌측보다 높다. 수동으로 로봇을 주행시켜 사전경로를 선택 한 다음 자율주행을 수행하였다. 로봇의 출발점은 사전경로와 같은 지점이었으며 Fig. 29에 그 결과를 나타내었다. Fig. 29에서 실선으로 표시된 경로 궤적은 수동으로 주행하여 기억된 사전 경로를 나타내고 빨간색 경로는 로봇이 자율적으로 주행한 경로를 나타낸다.



Fig. 29 Test environment of the autonomous driving



Fig. 30 Ramp in the test environment

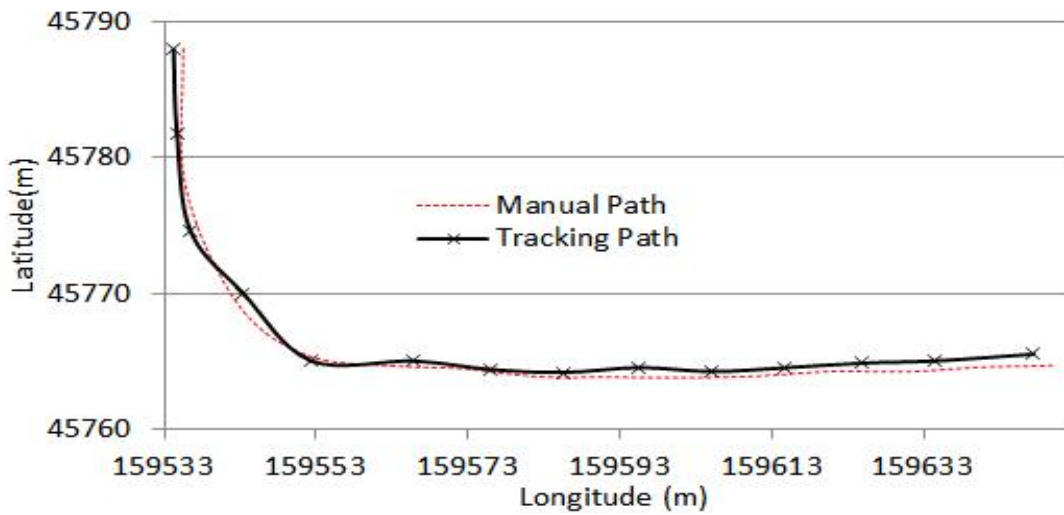


Fig. 31 Results of autonomous path tracking

사전 경로와 자율주행 경로는 둘 다 위치오차를 포함하고 있다. Localization 최대 오차가 2.2m정도 임을 감안하면 이론적으로 두 경로 사이에 실제 오차가 전혀 없는 경우에도 최대 4.4m까지 오차가 발생한 것으로 그래프 상에는 나타날 수 있다. 그 예로서 출발지점은 사전에 표시를 하고 동일 지점에서 출발을 했음에도 불구하고 사전경로선택 때와 자율주행 시에 로봇이 DGPS 정보로부터 인식한 출발위치가 서로 달라 Fig. 29에 나타난 것처럼 차이를 보인다.

로봇이 주행하기 전에는 로봇의 DR 정보가 없으므로 EKF localization이 불가능하며 단지 DGPS 정보만 이용 가능하기 때문에 초기 오차가 상당히 크게 나타났다. 따라서 Fig. 27에 나타난 경로 좌표로서는 실제 경로주행 오차를 평가할 수 없다.

주행 경로 오차를 평가하기 위해 본 연구에서는 다음과 같은 방법을 이용하였다. 즉, 사전 경로 선택 시에 로봇을 도로의 중앙 분리선을 따라 주행시키고 실제 자율 주행 시에 중앙 분리선으로부터 벗어나는 최대오차를 측정하는 방법으로 오차평가를 실시하였다.

Table 11은 자율주행 오차특성을 나타낸다. 각 궤적의 위치데이터 상의 최대 오차는 2.6m정도로 평가되었으나 실측 최대오차는 약 1.3m정도로 평가되었다. 사전경로주행 시에 중앙선 추적오차 및 측정오차가 포함되는데 이 오차를 최대 0.2m정도 이하일 것으로 예측되므로 실측 최대오차는 1.5m를 넘지는 않는 것으로 사료된다. 따라서 제안된 자율경로 주행방법은 도로 폭이 4m이상인 경로에서는 실제 적용에 무리가 없을 정도의 성능을 보인다고 사료된다.

Table 11 Result of autonomous driving

구분	최대오차 (사전경로주행 오차 불포함)	최대오차 (사전경로주행 오차 포함)
위치 데이터	2.6m	2.8m
실측 데이터	1.3m	1.5m

또한 자율주행 경로는 초기 20m 정도를 제외하고는 경사도 약 20% 정도의 경사로 임에도 불구하고 평지에서의 주행 오차특성과 별다른 차이가 없는 것으로 관측되었다. 따라서 제안된 localization과 자율주행방법은 어느 정도 경사로에서도 여전히 효과적이라고 판단된다.

제 4 장 위치 기반 자율 안내

4.1 안내시나리오 기획

실외용 범용 안내로봇의 역할 수행을 객관적으로 평가하기 위하여 안내 시나리오를 현실성있게 적용하기 위하여 시나리오의 초점을 대학 안내 및 홍보를 위한 로봇이라는 것에 맞추어 개발하였다. 안내 시나리오가 탑재된 안내로봇은 학교에 대한 객관적인 정보를 제공하는 navigator 및 guide로서 역할은 물론, 학교에 대한 긍정적인 이미지를 심어 줄 수 있는 상징체로서 홍보대사의 역할도 하게 된다. 따라서 정보제공의 차원이라는 점에서 기존의 커뮤니케이션 방식을 유지하되, 홍보의 역할로서 쌍방향 커뮤니케이션의 방식을 추가하는 방식으로 개발한다. 또한 안내 주 타깃은 학교 안내 로봇임을 고려하여 대학 입학의 목표로 하는 고등학생으로 설정하였다. 입시를 앞둔 고등학생들은 자신이 원하는 대학을 선택하기 위해 필요한 정보를 얻고자 할 뿐만 아니라 학교의 브랜드 이미지에 영향을 받기 쉬운 대상이므로 정보제공과 홍보성을 겸비한 시나리오를 통해 학교 및 안내로봇의 매력을 동시에 전달할 수 있는 시나리오로 개발하였다.

안내 기법으로는 단지 안내로봇만이 역할을 수행하는 것이 아니라 인물영상 등 멀티미디어 기법을 통해 안내 로봇에 등장을 하여 안내를 하게 함으로서 홍보 효과를 높이는 방법을 사용한다. 또한 해당 장소에 대한 안내 방식은 객관적인 정보 제공은 물론, 관련된 동영상, 사진, B.G.M(Back Ground Music)등 멀티미디어 요소를 최대한 활용하여 흥미유발을 극대화 하는 방법으로 개발하였다.

안내로봇은 음성안내 장치와 영상안내 장치를 함께 갖추고 있으므로 이 두 가지 멀티미디어를 동시에 이용한다. 오디오는 로봇음성과 B.G.M으로 구성되는데 로봇음성은 일반적으로 기계음이 들어가 있어 감정 이입이 쉽지 않을 것이라는 점을 감안하여 호감 있는 여성의 목소리로 활용하였다. B.G.M의 경우 음성만 들리게 되면 자칫 지루함을 느낄 수 있으므로 해당 시나리오 내용과 어울릴만한 B.G.M을 곁들여서 버라이어티 감을 형성할 수 있도록 하였다.

비디오에는 관련기관 로고, 관련 직원 및 홍보대사, 그리고 관련 사진이미지

등을 복합적으로 나타낼 수 있도록 구성하였다. 로봇이 안내 시에 해당 장소에 대한 음성만으로는 장소 인식이 부족하므로 홍보효과를 높이기 위해 단과대학 및 관련기관 로고 로고가 나타나게 하였다. 또한 안내로봇이 해당 장소에 대한 정보를 주로 제공하지만, 신뢰성을 더욱 더 높이기 위해 관련된 학교 직원 및 홍보대사 안내 동영상을 활용하였다. 아울러 로봇의 안내 음성만으로는 정보 제공이 부족할 경우의 보완 장치로서 기타 관련 사진 이미지를 함께 활용하여 비디오투어를 구성하였다.

4.2 안내시나리오 구성

안내 시나리오는 안내 로봇이 일정 위치에 도달하여 정지한 상태에서 안내를 수행하는 주 안내, 일정 위치에 도달한 후 안내를 수행하지만 정지하지 않고 이동하면서 안내를 수행하는 보조 안내, 그리고 로봇의 현재 위치와는 관계 없이 이동 또는 정지 중에 흥미를 유발시키는 기타 안내 등으로 이루어져 있다. 주 안내는 주요한 정보를 주어야 하는 곳의 안내형태인 반면에 보조 안내는 안내로봇이 그 주변을 지나갈 때 부가적인 정보 제공용으로 수행하는 안내형태이다.

표 12는 각 안내형태에 따른 시나리오를 나타낸다. 주 안내는 기본적으로 학교 홍보대사와 관련 직원이 안내 동영상형태로 안내를 수행하도록 기획하였다. 내용은 단과대학소개를 주로 하고 부수적으로 사회 각 분야에 진출해 있는 해당 단과대학 출신들을 영상으로 소개함으로써 홍보효과를 높이고자 하였다. 보조 안내는 이동 중에 소개되므로 영상보다는 음성안내로 구성하였다. 기타 안내는 주 안내나 보조안내가 이루어지지 않는 곳에서 수행되는 것으로서 관람객의 관심 및 흥미유발이 목적이므로 학교의 일반적인 정보뿐만 아니라 오락적인 요소들로 구성하였다.

안내로봇의 성능평가 장소는 제주대학교 공과대학 4호관에서 사회과학대를 연결하는 구간으로 설정하였다. 이 구간에서 주 안내는 공과대 4호관, 정보통신원, 주차장, 및 사회과학대학으로 설정하였고 보조안내는 성능평가 구간 부근에 위치한 사범대학으로 설정하였다.

Table 12 Composition of guide scenario by type

안내 형태	시나리오 구성	대상
주 안내	<ul style="list-style-type: none"> - 해당 장소에 대해 학교 홍보대사 및 교내 직원의 안내 동영상을 메인으로 소개. - 안내로봇에 의한 보조 설명도 추가 됨. - 각 단과대학 출신으로 사회 각 분야에서 활동하는 사람들을 영상으로 소개. - 영상과 B.G.M 등 멀티미디어 요소를 활용 	공대4호관, 정보통신원, 주차장, 사회과학대학
보조 안내	<ul style="list-style-type: none"> - 해당 장소에 대해 안내로봇이 정보 제공 - 영상과 B.G.M 등 멀티미디어 요소를 활용 	사범대학
기타 안내	<ul style="list-style-type: none"> - 해당 장소와 관계없이 흥미를 유발시키는 등 오락적 요소를 제공 - 학교 면적에 대한 객관적 정보를 멀티미디어 요소를 활용하여 소개. - 방문객들에게 말을 걸거나 행동 유발을 하게 하여 친근감을 느끼게 함 (음료수 제공, 안내로봇과의 포토타임 등) 	주 및 보조안내가 없는 구간

4.3 안내 시나리오 개발 결과

기획된 안내시나리오를 영상 및 음성으로 제작하였다. Fig. 30에서 32는 공과대학4호관에 대한 제작된 비디오 및 오디오 안내 내용이다. Fig. 30은 안내 장소에 대한 초기 안내 내용으로서 처음 방문한 사람들은 해당 위치의 이름을 한번의 설명으로 인지하기가 쉽지 않으므로 해당 장소의 위치를 관련 로고와 로봇의 음성을 통해 지속적으로 노출시킴으로서 해당 장소에 대한 인지도를 높일 수 있게 하였다.

Fig. 31은 안내 장소에 대한 구체적인 정보 제공을 위한 안내 내용으로서 메인 영상은 학교 홍보대사의 소개 영상으로 구성하였다. 또한 Fig. 32는 안내 장소에 대한 객관적 정보가 아닌 주관적 내용을 로봇이 언급하도록 구성 된 것이

다. 이와 같은 기법의 기대효과는 객관적 정보 이외에 주관적인 내용을 언급함으로써 로봇이 마치 감정을 갖고 있는 듯 한 신기함과 친근감을 동시에 느낄 수 있다는 것이다.

Fig. 33은 다음 안내 지점까지 이동 중에 수행되는 기타 안내 시나리오를 나타낸다. 기타 안내 내용으로는 이동 중에 보이게 되는 캠퍼스 전경과 관련하여 학교 면적에 대한 정보를 멀티미디어 요소를 활용하여 소개하고 있으며 방문객들에게 음료수를 제공한다는 안내로 구성되어 방문객의 관심을 유도하는 내용으로 구성되어 있다. 이 안내는 기타 안내 형태로서 이동 중에 실시되므로 방문객이 이동 중에는 비디오 영상에 대해 집중하기 어려우므로 비디오 보다는 오디오에 중점을 두고 있다.

Fig. 34은 정보통신원 안내 시나리오 내용이다. 이 안내는 주 안내로소 로봇이 정지 중에 수행한다. 안내장소의 교내 직원이 직접 등장하는 영상을 통해 자세한 정보를 제공하며, 안내로봇도 보조 설명을 하게 된다.

Fig. 35은 주차장에 대한 안내 시나리오로서 이 안내의 목적은 연속되는 건물 안내 도중에 방문객들이 잠시 휴식을 취할 수 있도록 하는 것이다. 안내 장소에 대한 간략한 소개 후에 방문객의 휴식을 위해서 사진과 B.G.M을 등의 멀티미디어 요소를 활용하여 사계절 풍경을 뮤직비디오 형식으로 보여준다. 이와 같은 기법의 기대효과는 객관적 정보 안내와 멀티미디어 기법을 통한 소개 형식을 더함으로써 방문객에 이성적, 감성적 어필이 가능하게 된다는 것이다.

Fig. 36은 같은 장소에서 방문객이 함께 참여하기 위한 안내 시나리오이다. 내용은 해당 장소에서 방문객들로 하여금 포토타임을 갖게 하고, 촬영된 사진을 통해 학교 SNS의 참여를 유도하는 것이다. 이와 같은 안내 기법은 정보 제공만이 아닌 방문객들에게 직접 참여를 유도함으로써 학교 홍보의 확장성에 효과를 기대할 수 있다.

Fig. 37은 로봇의 안내 경로 주변에 위치한 사범대학에 관한 보조안내 시나리오를 나타낸다. 이 안내는 단지 주변을 지나치므로 자세한 안내나 영상은 없으며 단지 객관적인 소개가 주 내용으로 구성되어있다.

공과대학 4호관 (파일명: 1공과대학1)



Video (Robot Monitor)		Audio (Robot)
		♪ 미래를 준비하는 곳! 젊음 이 있는 곳! 제주대학교 공과대학♪
 Innovation of the Science & Technology	제주대 logo ↓ 공대 logo (우에서 좌로 슬라이드 이동 반복)	안녕하세요? 저음 뵙겠습니다. 저는 여러분께 제주대학교를 소개해드릴 뭇말파입니다! 제주대학교를 여러분과 즐겁게 돌아볼 수 있도록 제가 만반의 준비를 했는데요. 여러분! 준비되셨나요?
Innovation of the Science & Technology In the fields of Mechanics & Engineering 제주대학교 공과대학		그럼 이제부터 제주대학교 투어를 시작하겠습니다! 저를 따라와주세요.

Fig. 32 Guidance Scenario of Engineering Building No. 4(#1)

공과대학 4호관 (파일명: 2공과대학2)






Video (Robot Monitor)		Audio (Robot&홍보대사)
	제주대 로고 공대 헤드카피 (우에서 좌로 슬라이드이동)	앞에 보이는 이곳은 공과대학 4호관 으로, 바로 제가 태어난 곳이라합니다. 공과대학 4호관에 대해 자세히 소개해드리기 전에 먼저 보여드릴 게 있는데요. 함께 보실까요~
	공대출신 저명인 리스트 사진 (디폴트 효과)	국방과학연구소 김재민, 하이닉스반도체 임현수, 삼성전자 최민석, 호원공과대학교 김수만, 자세대융합기술연구원 박태혁, 경북대학교 의료로봇연구소 이은주, 현대제철 고주영, RNS로봇연구소 이경주
	제주대 로고 공대 헤드카피 (우에서 좌로 슬라이드이동)	이들은 각 전문분야에서 활약하고 있는 제주대학교 공과대학 출신입니다. 그럼 이들이 다닌 공과대학은 어떤 곳일까요? 어? 여러분 참시만요~ 누군가 기다리고 계시네요.
	제주대 홍보대사 공대소개	5페이지 참조
	제주대 로고 공대 헤드카피 (우에서 좌로 슬라이드이동)	제주대학교 홍보대사 여러분들의 친절함 소개, 감사합니다. 그럼 다음 목적인 정보통신원으로 출발하겠습니다

Fig. 33 Guidance Scenario of Engineering Building No. 4(#2)

공과대학 4호관 (파일명: 3공과대학3)



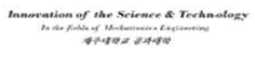
Video (Robot Monitor)		Audio (Robot)
	제주대 logo ↓ 공대 logo (우에서 좌로 슬라이드 이동)	떠나기 전, 잠시 뒤를 돌아보실까요? 조금 전에 둘러보았던 공과대학 4호관 건물이 여러분 뒤에 위치하고 있습니다. 홍보대사 분들의 소개내용처럼 건물 외관이 정말 멋지지 않나요?
		
		

Fig. 34 Guidance Scenario of Engineering Building No. 4(#3)

이동 중(파일명: 4학교면적음로타임)



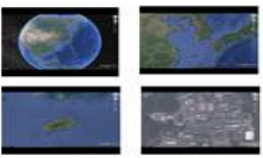


Video (Robot Monitor)		Audio (Robot)
 	제주대 국문 로고 제주대 영문 로고 우에서 좌로 슬라이드 이동 반복	오른쪽을 보시면 우리 제주대학교의 웅장한 캠퍼스와 함께 저 멀리 바다가 보이네요! 그 조화가 너무 아름답지 않나요? 아마 이런 광경은 국내 대학 중에서 유일하다고 자랑합니다!
	Google Earth에서 제주대학교 표시	참고로, 제주대학교는 학술원 면적이 1,582,169평방미터로 전국에서 다섯 손가락 안에 들 정도로 매우 넓습니다. 그리고, 교지와 체육장만 합친 면적은 874,975평방미터로 전국에서 네 손가락 안에 든답니다. 실제로 교내 버스가 운영될 정도인데요, 제주대학교는 Campus City라고 불려도 되겠죠?
 	제주대 국문 로고 제주대 영문 로고 우에서 좌로 슬라이드 이동 반복	여러분들 꼭 마르시지 않으세요? 앞으로 여정이 많이 남아 있어서 음료수를 나눠드릴까 합니다. 그럼 가이드님, 음료수 나눠주시기 바랍니다!

Fig. 35 Guidance Scenario of the etc.

정보통신원 (파일명: 6정보통신원)

Video (Robot Monitor)	Audio (Robot&직원)
	<p>제주대 logo</p> <p>↓</p> <p>정보통신원 logo (우에서 좌로 슬라이드 이동)</p>
	<p>정보통신원 직원</p> <p>정보통신원 소개</p>
	<p>제주대 logo</p> <p>↓</p> <p>정보통신원 logo (우에서 좌로 슬라이드 이동)</p>

Fig. 36 Guidance Scenario of Information and Communication Center

이동 중 (파일명: 7주차장사계절)




Video (Robot Monitor)	Audio (Robot)
	<p>제주대 극문 로고</p> <p>제주대 영문 로고</p> <p>우에서 좌로 슬라이드 이동 반복</p>
	<p>주차장 사계절 사진</p> <p>슬라이드 쇼 (디폴트 효과)</p>
	<p>제주대 극문 로고</p> <p>제주대 영문 로고</p> <p>우에서 좌로 슬라이드 이동 반복</p>

Fig. 37 Guidance Scenario of the parking lot

이동 중 (파일명: 8포토타임)





Video (Robot Monitor)	Audio (Robot)
 제주대학교  JEJU NATIONAL UNIVERSITY	제주대 국문 로고 제주대 영문 로고 우에서 좌로 슬라이드 이동 반복
	인터넷에서 제주대 페이스북 검색 페이스북 메인화면 (Alt 모바일로 제주대 페이스북 접속 장면)
 제주대학교 JEJU NATIONAL UNIVERSITY	제주대 국문 로고

Fig. 38 Guidance Scenario of visitor participation

이동 중(파일명: 5사범대학)



Video (Robot Monitor)	Audio (Robot)
 제주대학교 JEJU NATIONAL UNIVERSITY	잠시만 오른쪽을 봐 주세요! 예쁜 분홍색 건물이 하나 있는데요! 이곳은 바로 사범대학입니다! 미래의 교육자들이 열심히 공부하는 곳이죠. 제주대학교 사범대학은 1970년 중등교사 양성 교육기관을 토대로 현재 사범대학 부설 교육원 부설 중고등학교를 포함하고 있다고 합니다. 사범대학은 중등교사를 양성하는 목적대학으로서의 책임과 의무를 충실히 하며, 수많은 인재들이 국가의 중요기관 뿐만 아니라 다양한 학교에서 지역 사회와 국가의 발전을 이끌어 가고 있습니다! 자~그럼, 계속해서 저를 따라와 주세요!
 :대학교 JEJU NATIONAL UNIVERSITY	
Leader of 21C Education 제주대학교 사범대학	

Fig. 39 The Secondary Guidance Scenario

4.4 안내 데이터베이스 구축

이와 같이 기획 제작된 안내 영상 및 음성파일을 이용하여 위치기반 안내로봇의 자율 안내용 데이터베이스 (이하 DB)로 구축하였다. 표 13은 안내 데이터의 형태에 따른 특징 및 안내 위치 정보를 나타낸다. 주 안내는 전체 안내 공간에서 주요한 안내를 수행해야 할 곳으로서 로봇이 정지하여 안내를 수행하는 형태이며 보조 안내는 로봇이 안내 위치 부근에 도달 했을 때 보조적으로 주변상황을 설명할 필요가 있는 경우의 안내 형태를 나타낸다. 또한 기타 안내는 내방객의 관심 유도와 지루함을 달래기 위한 일반적인 내용으로서 위치와는 무관한 안내 형태이다.

Table 13 Classification of guide form and characteristic

안내형태	안내특징	안내방법	안내위치
주안내	주요한 안내	정지 안내	지정된 위치
보조안내	보조적인 주변상황 안내	이동 중 안내	지정된 위치 부근
기타안내	내방객의 관심을 유도하기 위한 일반적인 내용	이동 중 안내	위치와 무관

이와 같은 안내 데이터들을 위치기반으로 자율적 안내를 수행하기 위해서는 로봇이 자신의 위치를 평가 한 다음 자신의 위치에 대응되는 안내 데이터가 존재하는지를 안내데이터 DB로부터 탐색하여 대응되는 안내 데이터가 존재하면 그 데이터를 호출하여 안내를 수행하여야 한다. 따라서 안내 데이터가 형태 및 위치기반으로 DB가 구축 되어야 한다.

안내영상 및 음성 데이터는 그 데이터가 실행되어야 할 위치 (안내 대상 목표 지점) 및 형태를 기반으로 저장하여 안내 DB를 구축하였다. 즉 어떤 안내 데이터가 건물 A에 관한 것이라면 로봇이 건물 A에 도달하여 해당 안내를 수행할 위치 (x,y) 및 그 안내 형태가 해당 안내 데이터의 속성으로 하여 DB를 구축하였다. 안내 형태의 경우 주 안내는 A, 보조안내는 B를 부여하며, 기타 안내는 위

치와 무관하므로 별도의 DB로 구축한다. DB가 커지는 경우 안내 데이터 탐색 시간이 길어질 수 있는데 이 문제는 초기에 로봇이 사전경로 인식을 할 때는 안내가 불필요하므로 사전경로 인식과 동시에 그 경로에 필요한 안내 데이터를 안내 DB로부터 탐색하여 그 데이터 목록을 따로 저장함으로써 해결 가능하다. 즉, 로봇의 작동 장소가 정해지면 최초에 한번만 사전 경로 인식을 수행 할 때 전체 DB로부터 필요한 안내 데이터를 탐색하여 그 목록을 저장하는 방법으로 자신이 위치한 장소 기준으로 일정한 반경 이내의 안내 데이터를 탐색하여 새로운 지역 DB로 기억하는 방법으로 해결할 수 있다.

4.5 위치기반 자율안내

4.5.1 자율안내 알고리즘

안내로봇은 사전 인식된 경로데이터와 안내 DB를 바탕으로 자율안내를 수행하는데, Fig. 38은 안내수행 과정을 나타내는 flowchart이다. 로봇은 이동 중에 자신의 위치를 평가하면 그 위치에 해당하는 안내 데이터가 있는지를 DB로부터 항상 탐색한다. 만약 자신의 현재 위치에 대응되는 안내 데이터가 탐색되면 안내 형태에 따라 적절한 안내를 수행한다. 대응 되는 안내 데이터가 주 안내형태이면 로봇은 정지하고 안내를 수행하고 안내가 종료되면 다시 주행을 시작한다. 대응 되는 데이터가 보조안내인 경우에는 로봇은 정지하지 않고 주행을 계속하면서 안내를 수행한다.

만약 현재 위치에 대응되는 안내 데이터가 없으면 기타 안내 데이터를 데이터베이스로부터 랜덤하게 호출하여 안내 수행하는데, 이때 로봇은 멈추지 않고 계속 이동한다. 안내 우선순위는 주 안내가 가장 상위이고 그다음이 보조안내, 그리고 기타 안내 순이다. 즉, 기타 안내나 보조안내를 수행 하면서 이동 중에도 항상 안내 DB를 탐색하며, 만약 주 안내 데이터가 대응되면 현재 안내를 중단하고 주 안내를 수행한다. 기타 안내 수행 도중 보조안내가 대응 되는 경우에도 기타 안내를 중단하고 보조안내를 수행한다.

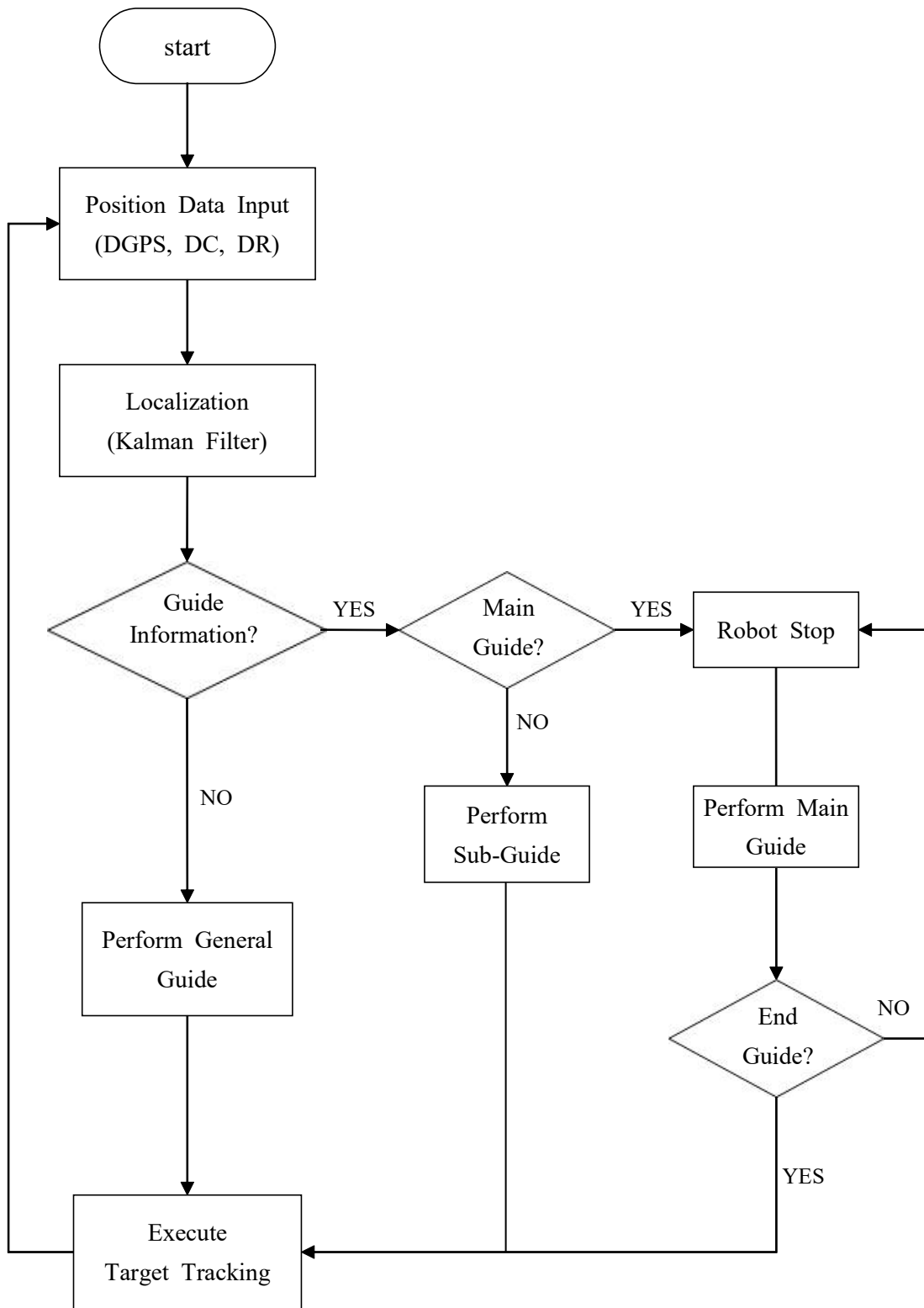


Fig. 40 Flowchart of autonomous guide

4.5.2 기준 안내경로 선택 및 안내시나리오 구성

이상과 같이 개발된 localization, 사전경로 선택 및 자율경로 주행, 그리고 자율 안내 수행 방법을 테스트하기 위해 Fig. 39와 같은 실험 공간에서 먼저 기준 안내 경로 선택을 수행하였다. Fig. 39에서 작은 원은 안내가 수행되어야 할 기준 위치를 나타낸다. 각 위치에 대한 안내 형태 및 내용은 Table 14에 나타내었으며, 4곳의 주 안내와 한곳의 보조안내, 그리고 일반안내로 구성되어있다.

이와 같이 설정된 환경에서 로봇을 수동으로 주행 시키면서 매 0.1m 간격으로 평가된 위치를 저장하여 안내경로를 설정하였다. 설정된 경로에 대해 3.2절의 평활화 방법을 적용한 최종 기준 안내경로를 Fig. 40에 나타내었다. 기준 안내경로의 길이는 약 700m 정도이며 출발점과 종착점 사이의 최대 표고차이는 약 25m 정도로 심한 경사가 존재하는 환경이다.

자율안내 시작위치는 Fig. 39의 상단(point #1)의 공과대학 4호관 중앙 현관이며 정보통신원을 거쳐 Fig. 39의 맨 하단의 사회과학대학 까지의 구간이다. Fig. 39에서 “○” 표시가 된 부분이 주 및 보조 안내가 수행 되어야 할 안내 기준 위치를 나타낸다. 안내 기준 위치는 Fig. 39의 맨 상단부터 공과대학 4호관, 정보통신원, 주차장, 사범대학, 그리고 사회과학대학 순서이며 각 기준위치에 대한 안내 형태는 표 14와 같다.

Table 14 Contents and guide types

Point	Contents	Guide Type
1	Engineering Building	main
2	Information Center	main
3	Parking Lot	main
4	College of Education	sub
5	College of Social Science	main
-	History of the University	general



Fig. 41 Experimental place for autonomous guidance

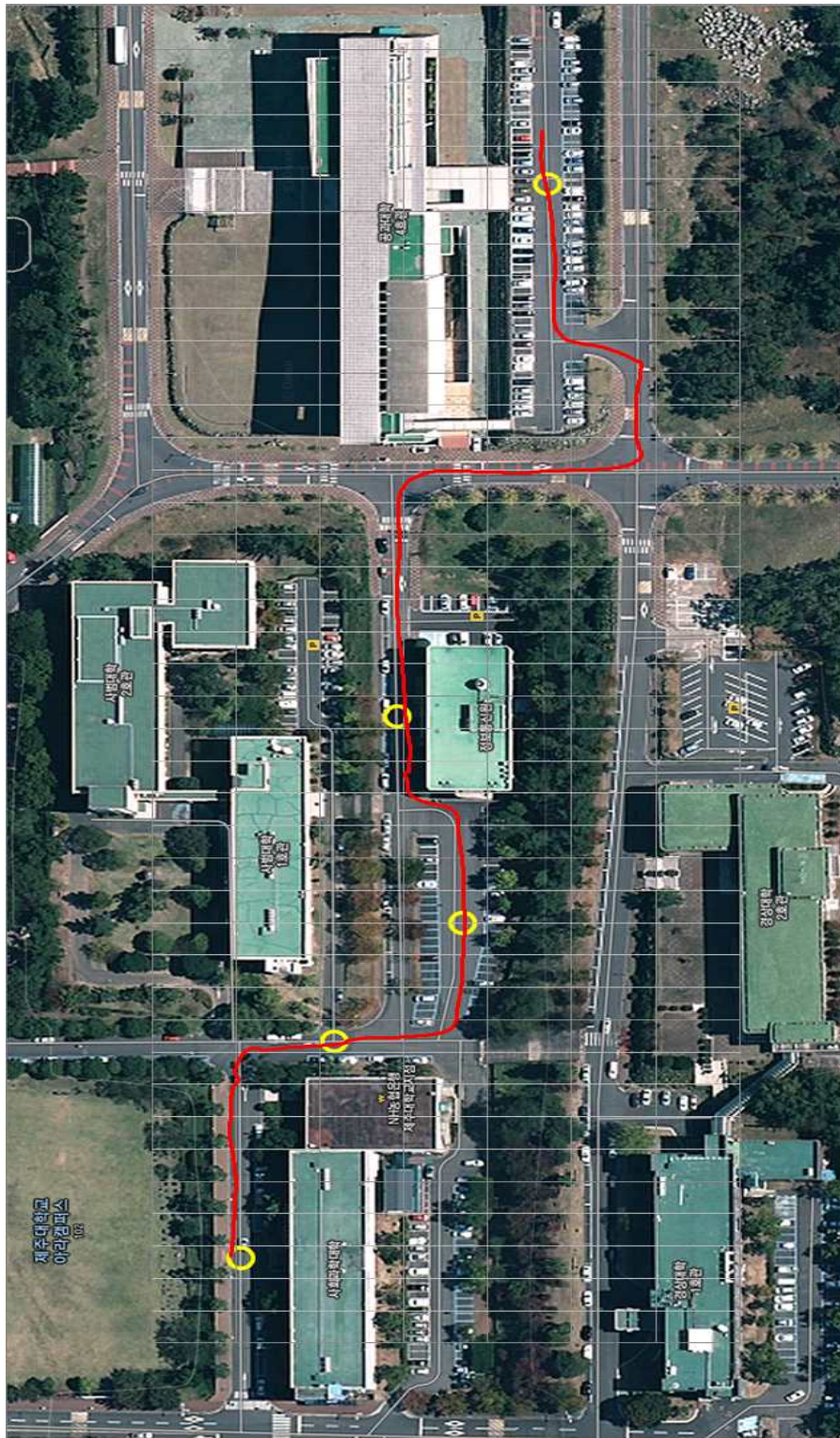


Fig. 42 Result of pre-path selection

4.6 자율 안내 실험 결과

이상과 같이 개발된 localization, 사전경로 선택 및 자율경로 주행, 그리고 자율 안내 수행 방법을 테스트하였으며 그 결과를 Fig. 41에서 Fig. 44에 나타내었다. 각 그림에서 “○” 표시가 된 부분은 안내 기준 위치이며 “X” 표시는 로봇이 실제로 안내를 수행한 위치이다. 로봇은 공과대 4호관에서 출발하여 사회과학대 중앙 현관에서 안내를 종료하였다. 공과대 4호관 출구부터 정보통신원까지는 경사도 30% 이상인 심한 경사인데도 불구하고 로봇은 자율 주행이 잘 수행되었으며 각 기준 위치에서의 자율 안내를 성공하였다.

그림에 나타난 실험결과 궤적은 로봇이 안내 주행 시에 저장된 위치데이터로 그려진 것으로서 위치오차가 포함되어 있으므로 실제 로봇의 위치와는 차이가 있을 수 있다. 예를 들어 Fig. 41과 Fig. 42에서 로봇이 처음 출발위치인 공과대 4호관에서 출발하여 이동한 궤적이 주차되어 있는 차량내부로 주행한 것처럼 보이지만 실제 로봇은 도로 가운데로 주행하였다. 마찬가지로 Fig. 42에서 마지막 주 안내 장소인 사회과학대학(기준위치 5)에서 기준위치와 실제 안내를 수행한 위치가 크게 차이가 나게 나타나 있지만 실제로는 2m 이내의 오차를 갖는 것으로 관측되었다.

네 번의 자율안내 실험 동안 총 20곳의 기준위치에 대한 안내 성공률은 100%였으며 자율 주행 역시 리모컨 조작용이 필요 없이 100% 자율적으로 수행되었다. 실제로 자율안내 성공여부는 자율안내 알고리즘에 의해 좌우되는 것이 아니라 로봇의 자기위치 평가 방법인 localization 성능에 크게 의존하기 때문에 localization 성능이 보장되는 한 자율안내는 성공률이 100%로 보장된다.

Fig. 45는 안내로봇이 내방객을 인솔하여 각 위치에서의 자율적으로 안내하는 모습을 나타낸다. Fig. 45의 (a)는 공과대학과 정보통신원 사이의 심한 경사로를 주행하며 안내하는 모습이며, Fig. 45의 (b)부터 (f)까지는 로봇이 차례로 출발지점인 공과대 4호관부터 사회과학대학까지 안내하는 모습이다.

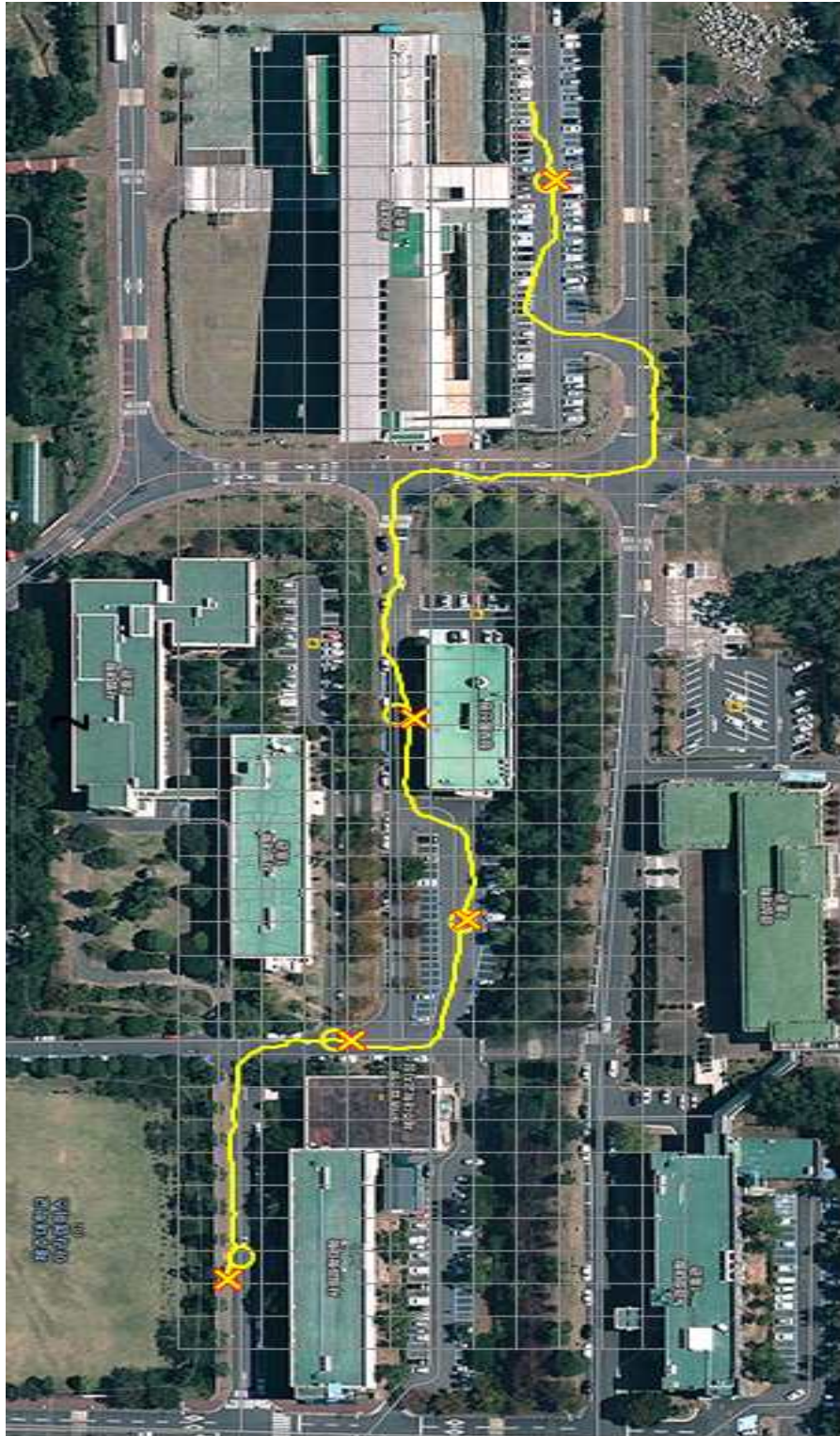


Fig. 44 Results of autonomous guidance experiment (the second)



Fig. 45 Results of autonomous guidance experiment (the third)

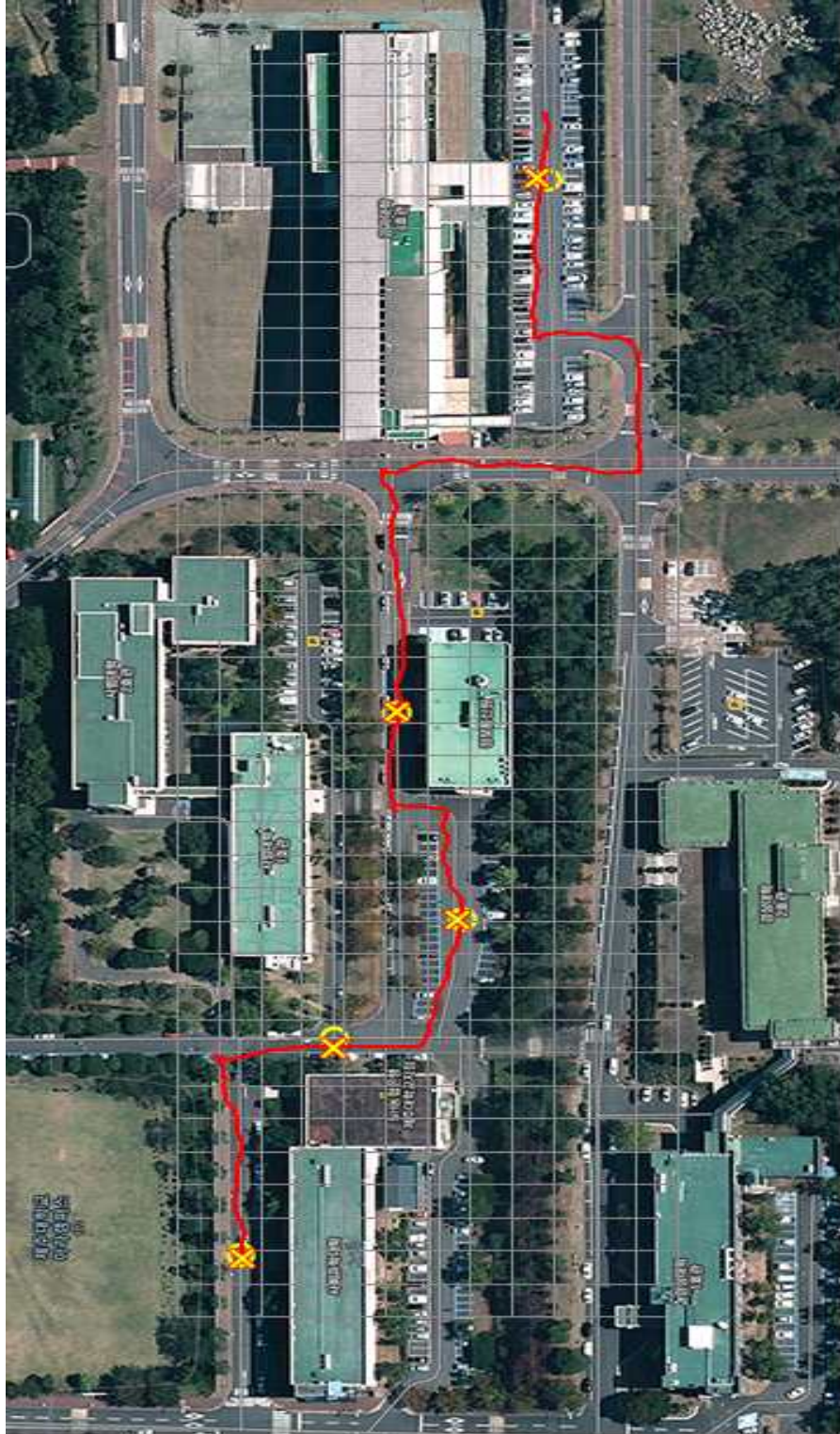


Fig. 46 Results of autonomous guidance experiment (the fourth)



(a) The driving on a ramp



(b) Engineering Building No. 4



(c) Information Telecommunication Center



(d) The parking lot



(e) College of Education



(f) College of Social Science

Fig. 47 Guide from the each location

제 5 장 결론

본 연구에서는 실외에서 내방객을 안내하면서 위치에 따라 대응되는 안내를 수행하는 위치 기반 범용 안내로봇 시스템을 개발하였다. 이를 위해 실외에서 실용적으로 적용 될 수 있는 localization 방법, 자율주행방법, 그리고 위치기반 자율안내 방법을 개발하였다. 아울러 안내 로봇에 적합한 안내 시나리오를 설계 및 제작하여 안내 DB를 구축하고 안내로봇에 탑재하여 실제 현장에서 그 성능을 평가 하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) Localization : DGPS, 디지털 컴퍼스 및 로봇 바퀴에 장착된 엔코더의 정보를 Extended Kalman Filter로 융합하여 로봇의 위치를 최적화 하는 방법을 개발 하였으며 성능 평가 결과 DGPS만 이용하는 경우 보다 실외용 로봇 위치결정에 실제적으로 적용할 수 있을 정도로 될 만큼 위치 오차가 개선됨을 확인하였다. 개발된 localization 방법은 일시적으로 DGPS정보가 수신되지 않는 경우에도 어느 정도 위치평가가 가능할 뿐만 아니라 실제 산업에 응용할 수 있을 정도로 경제적인 센서로도 위치평가가 가능한 방법이므로 그 응용성이 클 것으로 판단된다. 또한 DGPS정밀도가 더 개선되면 그만큼 더 개발된 localization 정밀도도 향상되는 방법으로서 향후 DGPS 정밀도 개선에 따라 안내로봇보다 더 정밀한 위치정보가 요구되는 무인 헬체어, 무인자동차 등에도 적용 될 수 있을 것으로 사료된다.
- 2) 자율 주행 : 개발된 현재 localization을 바탕으로 사전경로 인식방법, 경로 평활화 방법과 인식된 경로를 자율 주행하는 방법을 개발하고 실험으로 성능평가를 수행하였다. 실험 결과 학교 및 관광지 등 경로가 어느 정도 폭이 있는 장소에서는 로봇 스스로 자율주행이 가능함을 확인하였다. 개발된 자율주행방법은 현재 목표로 하고 있는 학교 홍보용 안내로봇 뿐만 아니라 관광지 안내로봇 등 그 적용 범위가 클 것으로 사료된다.

- 3) 위치기반 자율 안내 : 필요한 안내 데이터들을 위치기반으로 DB로 구축하고 로봇이 주행하면서 자신의 현재위치를 평가하여 그 위치에 대응되는 안내 데이터를 스스로 탐색하여 안내를 수행하는 방법을 제안하고 실험으로 성능을 평가 하였다. 자율 안내에 기본이 되는 위치는 개발된 localization 방법을 이용하였으며 제안된 사전경로선택방법과 자율주행방법을 적용함으로써 위치기반 자율 안내가 성공적으로 수행 될 수 있음을 입증하였다. 이와 같은 위치기반 자율안내 개념은 향후 공공기관 안내 및 홍보, 관광지 안내로봇, 골프장 캐디로봇, 실버산업관련 자율 휠체어 및 무인 자동차 등에 핵심적으로 적용될 수 있는 것으로서 그 유용성이 클 것으로 기대된다.
- 4) 안내 시나리오 개발 : 기존 인간이 수행하던 안내와는 달리 안내 로봇에 적합한 안내시나리오를 설계 제작하여 안내로봇에 적용 하였다. 안내형태를 주 안내, 보조안내 및 기타 안내 등 세 가지로 구분하여 안내 데이터베이스를 구축 함으로써 방문객의 관심을 유도하고 안내 효율을 높일 수 있을 것으로 기대 된다.

Refence

- [1] S. Y. Cho and W. S. Choi, "Robust positioning technique in lowcost DR/GPS for land navigation," *IEEE Trans. On Instrumentation and Measure*, vol 55, no. 4, pp. 1132-1142, Aug. 2006.
- [2] L. B. Cremean, et al., "Alice: An information-rich autonomous vehicle for high-speed desert navigation." *Journal of Robotic Systems*, vol. 23, no. 9, pp. 777-810, Sep. 2006.
- [3] D. M. Bevly, "Global Positioning System(GPS): A low-cost velocity Sensor for correcting inertial sensor errors on ground vehicle," *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control Trans, of The ASME*, vol. 126, no. 2, pp. 255-264, Jun. 2004.
- [4] J. P. Wang, W. F. Tiam, and Z. H. Jin, "Study on integrated micro inertial navigation systems/GPS for land vehicles." *Proc. intelligent transportation systems*, vol. 2, pp. 1650-1553, Oct. 2003.
- [5] G. Ippoliti, L. Jetto, and S. Longhi, "Localization of mobile robots: Development and comparative evaluation of algorithms based on odometric and inertial sensors," *Journal of Robotic Systems*, vol. 22, no. 12, pp. 725-735, Dec. 2005.
- [6] S. Panzieri, F. Pascucci, and G. Ulivi, "An outdoor navigation system using GPS and inertial platform." *IEEE Trans. On Mechatronics*, vol. 7. no.2, pp. 134-142, Jun. 2002.
- [7] S. I. Roumeliotis, G. S. Sukhatime, and G. A. Bekey, "Smoother based 3D attitude estimation for mobile robot localization." *Proc. of IEEE Int. Confon Robotics and Automation*, vol.3, pp. 1979-1986, Oct. 1999.
- [8] B. Barshan and H. Durrant-Whyte, "Inertial navigation systems for mobile robots, *IEEE Trans. On Robotics and Automation*, vol. 11, no.3, pp. 328-342, Jun. 1995.

- [9] 정광윤, 조영석, 심덕선, “무인탐사체 항법을 위한 GPS/INS 초강결합 성능분석” 제어·자동화·시스템공학 논문지 제12권 제8호, pp. 773-779, Aug. 2006.
- [10] P. Li, W. TianMiao, L. Jianh Hon, and W. Song, “An attitude estimate approach using MEMS sensors for small UAVs,” IEEE International Conference on Industrial Informatics, pp. 11131117, Aug. 2006.
- [11] A. K. Broun, “GPS/INS uses low-cost MEMS IMU, IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, vol. 20, no. 4, pp. 3-10, Sep. 2005.
- [12] N. Metni, J. M. Pflimlin, and T. Hamel, et al., “Attitude and gyro bias estimation for a VTOL UAV,” Control Engineering Practice, vol. 14, no. 12, pp. 1511-1520, Dec. 2004.
- [13] D. H. Lyon, “A military perspective on small unmanned aerial vehicles,” IEEE Instrumentation de Measurement Magazine, vol. 7, no.3, pp. 27-31, Sep. 2004.
- [14] S. K. Hong “Fuzzy logic based closed-loop strapdown attitude system for Unmanned Aerial Vehicle(UAV),” Sensors and Actuators A-Physical, vol. 107, no. 2, pp. 109-118, Oct. 2003.
- [15] G. Pang and HI Liu, “Evaluation of a low-cost MEMS accelerometer for distance measurement,” Journal of Intelligent and Robotic Systems, vol.30, pp. 249-256, 2001.
- [16] Ji-Wook Kwon, Mun-Soo Park, Taeun Kim, Songkyoung Chwa, Suk-Kyo Hong, “Localization of Outdoor Wheeled Mobile Robots using Indirect Kalman Filter Based Sensor fusion,” Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, vol.14, no. 8, pp. 800-808, Aug. 2008.
- [17] Buhmann, J., Burgard, W., Cremers, A.B., Fox, D., Hofmann,T., Schneider, F., Strikos, J. and Thrun, S., “The Mobile Robot RHINO,” AI Magazine, Vol.16, No.2, pp.31 - 38, 1995.
- [18] Fox, D., Burgard, W., and Thrun, S., “Markov localization for mobile robots in dynamic environments,” Journal of Artificial Intelligence Research, Vol.11, pp. 391-427, 1999.

- [19] Burgard, W., Cremers, A.B., Fox, D., Hahnel, D., Lakemeyer, G., Schulz, D., Steiner, W. and Thrun, S., "The Interactive Museum Tour-Guide Robot" In Proceedings of the AAAI Fifteenth National Conference on Artificial Intelligence, pp.11-18, 1998.
- [20] Thrun, S., Beetz, M., Bennewitz, M., Burgard, W., Cremers, A., Dellaert, F., Fox, D., Haehnel, D., Rosenberg, C., Roy, N., Schulte, J. and Schulz, D., "Probabilistic algorithms and the interactive museum tour-guide robot minerva," International Journal of Robotics Research, 2000.
- [21] Almagbile, A., Wang, J. and Ding, W., "Evaluating the performances of adaptive Kalman filter methods in GPS/INS integration," Journal of Global Positioning Systems, Vol.9, No.1, pp.33-40, 2010.
- [22] Han, S. and Wang, J., "Integrated GPS/INS navigation system with dual-rate Kalman filter," GPS Solutions, Vol.16, No.3, pp.389-404, 2012.
- [23] Ohno, K., Tsubouchit, T., Shigematsut, B., Maeyamas, S. and Yuta, S., "Outdoor Navigation of a Mobile Robot between Buildings based on DGPS and Odometry Data Fusion," Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics & Automation, Taipei, Taiwan, pp.1978-1984, 2003.
- [24] Thrapp, R., Westbrook, C. and Subramanian, D., "Robust localization algorithms for an autonomous campus tour guide," Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp.2065-2071, 2001.
- [25] Zhang, Y. and Chong, K. T., "A GPS/DR Data Fusion Method Based on the GPS Characteristics for Mobile Robot Navigation," International Journal of Control and Automation, Vol.7, No.10, pp.119-132, 2014.
- [26] J. H. Lim, "A Study on a Localization System for Tour Guide Robot," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 26, No.1, pp.1-8, 2009.
- [27] Jong Hwan Lim, "A Study on a Localization System for Tour Guide Robot," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, vol. 29,

- no. 7, pp. 762-769, 2012.
- [28] Hangoon Kang, Jaehoon Yun, Jihong Lee, "Localization for Mobile Robot by Selective Anchors in Indoor GPS and EKF," The Journal of Korea Robotics Society, vol. 6, no. 1, pp. 58-68, 2011.
- [29] Hyeon Seob Eom, Ji Yen Kim, Jun Young Baek and Min Cheol Lee, "Reduction of Relative Position Error for DGPS Based Localization of AUV using LSM and Kalman Filter," Journal of the Korean Society for Precision Engineering Vol. 27, No. 10, pp. 52-60, 2010.
- [30] S. H. Cheng and N. J. Higham, "A modified Cholesky algorithm based on a symmetric indefinite factorization," SIAM Journal of Matrix Analysis Applications, Vol.19, No.4, pp.1097 - 1110, 1998.
- [31] Ramjee, P. and Marina, R., "Applied Satellite Navigation System Using GPS, GALILEO, and Augmentation Systems," Artech House, Inc., pp. 53-70, 2005.
- [32] Leonard, J.J, and Durrant-White, H. F., "Direct Sonar Sensing for Mobile Robot Navigation," Kluwer Academic Publisher, PP. 10-15, 1992.
- [33] Bar-Shalom, Y. and Fortman, T. E., "Tracking and Data Association," Academic Press, 1988.
- [34] J. H., Lim, and C. U., Kang, "3-D localization of an Autonomous Underwater Vehicle Using Extended Kalman Filter, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 21, No. 7, pp.130-135,2004.
- [35] J. H., Lim, and C. U. Kang, "Grid Based Localization of a Mobile Robot using Sonar Sensors", KSME Int. J., Vol. 6, No.3, pp.302-309, 2002.
- [36] Cox, D. B. "Integration of GPS with Inertial Navigation Systems," Journal of the Institute of Navigation, vol. 1, pp. 144-153, 1978.
- [37] J. H. Lim, and Leonard, J. J., "Mobile Robot Relocation from Echolocation Constraints," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.22, No.9, pp.1035-1041, 2000.
- [38] Maxwell, B., Meeden, L., Addo, N., Brown, L., Dickson, P., Ng, J.,

- Olshfski, S., Silk, E., Wales, J.,” Alfred: The Robot Waiter Who Remembers You,” In Proceedings of AAAI Workshop in Robotics, July, 1999.
- [39] Simmons, R., Coldberg, D., Goode, A., Montemerlo, M., Roy, N., Sellner, B., Urmson, C., Schultz, A., Abramson, M., Adams, W., Atrash, A., Bugajska, M., Coblenz, M., MacMahon, M., Perzanowski, D., Horswill, I., Zubek, R., Kortenkamp, D., Wolfe, B., Milam, T. and Maxwell, B.,” GRACE: An Autonomous Robot for the AAAI Robot Challenge,” AI Magazine, Vol. 24, pp.51-72, 2003.
- [40] Toledo-Moreo, R., Zamora-Izquierdo, M. A., Ubeda-Miarro, B. and Gomez-Skarmeta, A. F., “High-integrity IMM-EKF-based road vehicle navigation with low-cost GPS/SBAS/INS,” IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol.8, No.3, pp.491-511, 2007.
- [41] Chen, X., Shen, C., Zhang, W. B., Tomizuka, M., Xu Y. and Chiu, K., “Novel hybrid of strong tracking Kalman filter and wavelet neural network for GPS/INS during GPS outages,” Measurement, Vol.46, pp. 3847-3854 , 2013.
- [42] Agraw, M. and Konolige, K., “Real-time localization in outdoor environments using stereo vision and inexpensive GPS,” Proceedings of the 18th International Conference on Pattern Recognition, pp. 1063-1068, 2006.
- [43] Limsoonthrakul, S., Dailey, M. N. and Parnichkun, M.,” Vehicle Localization Using GPS, Compass, and Machine Vision,” The 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, St. Louis, USA, pp. 3981-3986 , 2009.
- [44] Kümmerlem, R., Triebel, R., Pfaff, P. and Burgard, W., “Monte Carlo localization in outdoor terrains using multilevel surface maps”, Journal of Field Robotics, Vol.25, No.6, pp. 346-359, 2008.
- [45] Smith, R. and Cheeseman, P.,” On the Representation and Estimation of

- Spatial Uncertainty,” International Journal of Robotics Research, Vol.5, No.4, pp. 56-68, 1987.
- [46] 박세승, 김광진, 고낙용, 서동진, “전자나침반과 엔코더를 이용한 이동로봇의 위치추정,” 한국정보기술학회논문지, 제5권4호, pp. 10~17, 2007. 12.
- [47] 이영재, 지규인, 박찬식, 김일선, 이장규, 김춘식, “DGPS와 그 응용,” 한국항공우주학회지 제23권1호, pp.148-159, 1995.
- [48] 최승환, 김윤기, 황요섭, 김현우, 이장명, “다중 GPS를 이용한 EKF기반의 실외 위치 추정 시스템,” 로봇학회 논문지 제8권2호, pp.129-135, 2013.
- [49] 지용훈, 배지훈, 송재복, 유재관, 백주관, “GPS 정보와 차선정보의 정합을 통한 이동로봇의 실외 위치추정,” 제어로봇시스템학회 논문지 제18권6호, pp.594-600, 2012.
- [50] 배지훈, 송재복, 최지훈, “가중화된 GPS 정보와 지도정보를 활용한 실외 이동로봇의 위치추정,” 로봇학회 논문지 제6권3호, pp.292-300, 2011.
- [51] Hyeon-Seob Eom, Min-Cheol Lee, “Position Error Correction for DGPS Basec Localization using LSM and Kalman Filter,” Institute of Control Robotics and Systems, pp. 1576-1579, 2010.
- [52] Gelb, A. C., ”Applied Optimal Estimation,” The MIT Press, pp.123-156, 1973.

감사의 글

인생에서 가장 길었던 시간이었다. 꿈을 가지고 시작했던 이 길이 너무 멀리 돌고 돌아서 왔다. “왜?”라는 물음에 대한 대답도 마땅히 없다. 지금부터 새로운 시작이니까! 이 논문 한 권이 새로운 도전 의식을 깨웠다. 다시 달려볼까 한다.

지금하고 있는 일에 많은 영향을 끼친 한 분, 임중환교수님, 감사드립니다. 그리고 아버지, 어머니, 장인, 장모님, 우리 가족 - 아내, 아들, 딸 - 고맙습니다.

새로운 목표를 가지고 노력하면 언젠가는 달성하겠지요. 그러나 너무 돌아서 가지는 않으려고 합니다. 길고 길어지면 목표의식이 상실되거나 약해져서 힘들어 질 것입니다.

오늘 이 한편의 학위논문이 내 새로운 시작을 일깨웠듯이 모든 일에 동기가 있을 수 있습니다. 더 소중한 목표를 위해 한걸음 다가가는 계기가 되고자 합니다.

다시 한번 저를 도와준 모든 분들에게 감사드립니다.

2017년 7월 3일