



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](#)

碩士學位論文

GPS 기반 옥외용 로봇의 인간
추종 기술 개발

濟州大學校 大學院

메카트로닉스工學科

趙 仁 皓

2017年 02月

GPS 기반 옥외용 로봇의 인간 추종 기술 개발

指導教授 林 鍾 桓

趙 仁 皓

이 論文을 工學碩士學位 論文으로 提出함

2016年 12月

趙仁皓의 工學碩士學位 論文을 認准함

審査委員長

최성현

委 員

김동환

委 員

강철우

濟州大學校 大學院

2016年 12月

Development of GPS-based Human Following Technologies for Outdoor Robots

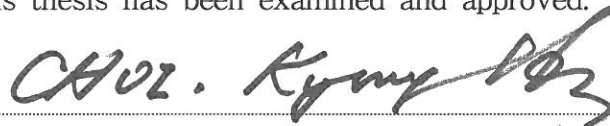
Inho Cho

(Supervised by professor Jong-Hwan Lim)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for
the degree of Master of Mechatronics Engineering

2016 . 12 .

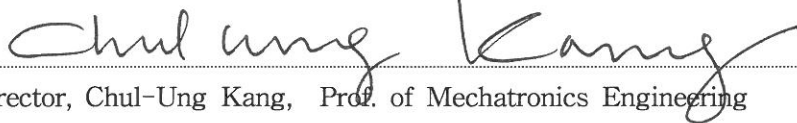
This thesis has been examined and approved.



Thesis Director, Kyung-Hyun Choi, Prof. of Mechatronics Engineering



Thesis Director, Jong-Hwan Lim, Prof. of Mechatronics Engineering



Thesis Director, Chul-Ung Kang, Prof. of Mechatronics Engineering

.....
Date

Department of Mechatronics Engineering

GRADUATE SCHOOL

JEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

LIST OF TABLES	iii
LIST OF FIGURES	iv
SUMMARY	vi
I. 서론	1
1. 연구 배경	1
2. 연구 동향	3
2.1 위치평가	3
2.2 인간 추종 기술	4
3. 연구목적 및 범위	7
II. 위치평가 및 추종방법	9
1. 인간 추종 로봇 시스템 구성	9
2. 로봇의 위치 평가	10
2.1 DR(Dead-Reckoning) 위치평가	10
2.2 확장칼만필터(EKF) 기반 로봇의 위치평가	12
2.2.1 센서 융합의 필요성	12
2.2.2 EKF 기반 위치평가	13
3. 궤적 생성 및 자율 추종 항법	18
III. 실험 및 고찰	22
1. 인간 추종 로봇	22
2. DGPS 특성 분석	25
3. 인간 추종 실험 결과	32
3.1 기초실험	32
3.1.1 직선 경로 추종 실험	32
3.1.2 곡선 경로 추종 실험	34
3.1.3 장애물 회피 실험	37

3.1.4 실제 환경 추종 실험	39
IV. 결론	42
V. 참고문헌	44

LIST OF TABLES

Table 1 State of arts for human following robot	4
Table 2 Specifications of Driving Parts	22
Table 3 Statistical characteristics of DGPS data	26
Table 4 Reference positions (unit : m)	28
Table 5 Error characteristics of localization (unit : m)	29
Table 6 Reference position of line (unit : m)	33
Table 7 Characteristics of position error (unit : m)	34
Table 8 Reference positions of curve path (unit : m)	35
Table 9 Characteristics of error for curve path(unit : m)	36

LIST OF FIGURES

Fig. 1 The human is outside of the sensing range	7
Fig. 2 Obstacle environments	7
Fig. 3 Slope Terrain	7
Fig. 4 Concept of human following robot system	9
Fig. 5 Dead Reckoning (DR) system	11
Fig. 6 State variables for system modeling	14
Fig. 7 Direct tracking method	18
Fig. 8 Obstacle avoidance method	18
Fig. 9 Human following navigation	19
Fig. 10 Flow chart of autonomous navigation	20
Fig. 11 Driving part of the robot	22
Fig. 12 View of the control monitor	23
Fig. 13 Picture of human following robot	24
Fig. 14 Characteristic of DGPS data	26
Fig. 15 Experimental environment for localization	27
Fig. 16 Localization results	29
Fig. 17 Graphical representation of error	30
Fig. 18 Characteristics of error covariance	31
Fig. 19 Experimental environment for line tracking	32
Fig. 20 Results of line tracking	33
Fig. 21 Graphical representation of position errors	34
Fig. 22 Experimental environment for curve tracking	35
Fig. 23 Results of curve tracking	36

Fig. 24 Experimental environment for obstacle avoidance	37
Fig. 25 Results of obstacle avoidance	38
Fig. 26 Results of experiments for complex outdoor environment (1st run)	
(a) Experimental environment	39
Fig. 26 (Continued) (b) Robot and human traces	40
Fig. 27 Results of experiments for complex outdoor environment (2nd run)	
(a) Experimental environment	40
Fig. 27 (Continued) (b) Robot and human traces	40

SUMMARY

Recently, various trials have been made to extend the applicability of the robotics technology in service area. Human following robot has been the most interesting research topics in this area. The purpose of the human following robot is to follow the trajectory of human. The human tracking robot should always be aware of the position of human beings and should have the ability to travel autonomously and reach that position. Thus, localization is the crucial issue for the guide robot researches because autonomous navigation is strongly dependent on the localization performance.

Another important issue for realization of the human following robot is how the robot always perceives the position of a human in an environment with many obstacles or in sloping terrain. The conventional methods that use image or range sensor such as a camera or a ultrasonic sensor could not solve this problems.

This thesis suggests an outdoor localization, a human position recognition method and a human trajectory tracking method based on GPS. For localization in outdoor environment, we develop an effective localization by using inexpensive GPS and odometry without using any INS system. Position and orientation information from DGPS and the digital compass are combined with encoder data from robot's wheels to estimate more accurate position of the robot using extended Kalman filter. The concept of "validation gate" will be introduced to ensure the reliability of the measured values for the error of DGPS.

The thesis also proposes a method to autonomously follow the human trajectory that is generated by connecting the positions of humans. In order to show the feasibility and effectiveness of the methods, we also present experimental results of various situations using a real robot in a real world.

I. 서론

1. 연구 배경

최근 지능로봇기술의 발달로 다양한 분야에 로봇을 응용하는 기술이 개발되고 있다. 그 중 한 분야인 인간 추종 로봇 기술은 야외 작업 시에 무거운 장비나 짐을 운반하면서 인간을 추종하는 작업보조 로봇뿐만 아니라 과수원이나 농업용으로 비료나 거름 및 작업장비 등을 운반하거나 수확물을 탑재하여 이동하면서 인간의 작업을 보조하는 로봇, 독거노인이나 장애인의 친구 또는 야외 운동이나 조깅을 할 때 주인을 따라다니면서 물건운반과 동시에 즐거움이나 심리적 안정감을 주는 로봇, 그리고 골프장에서 골퍼를 추종하는 캐디로봇 등으로 그 응용 분야가 다양한 기술이다.

인간 추종 로봇이 인간을 추종하기 위해서는 로봇 스스로가 이동 중에 항상 자신의 위치 및 추적할 인간의 위치를 평가하는 위치평가 기술, 그리고 평가된 인간의 위치를 기반으로 인간의 궤적을 추적하기 위한 경로계획(path planning) 기술, 계획된 경로를 추적하는 경로추적(path tracking) 기술, 이동 중 장애물을 감지하여 회피하는 장애물 회피 (obstacle avoidance) 기술이 필요하다. 이 중 위치평가는 로봇의 현재 위치를 평가하고 추적하는 것으로서 모든 동작의 기본이 되므로 가장 중요하다[1,2,3].

실내 환경은 벽이나 물건들이 확실하게 구별되는 환경이므로 주행할 수 있는 공간과 장애물 구분이 비교적 용이하기 때문에 최종 목표지점만 주어지면 로봇 스스로가 장애물 회피를 하면서 경로를 찾아 목표지점에 도달 할 수 있다. 아울러 실내에서는 이와 같은 장애물들을 이용하여 정밀 위치판단이 가능하기 때문에 현재 수십 cm 단위의 정밀도로 위치판단이 가능하다[4,5].

그러나 옥외 환경은 실내 환경에서처럼 위치정보를 제공하기에 알맞은 벽과 같은 구조화된 물체가 없으며 물체와 로봇이 이동할 수 있는 자유공간의 구별이 뚜렷하지 못할 뿐만 아니라, 활동 공간이 넓기 때문에 실내에서 주로 사용하는

스타게이저와 같은 위치 센서 등을 설치하기가 어렵기 때문에 실내 위치평가와는 달리 정밀한 위치평가가 어렵다. 또한 옥외환경은 로봇의 자율 주행이 용이하도록 변경이 가능하지도 않을 뿐만 아니라 구조화 되지 아니한 환경으로서 실내 자율주행에 주로 이용되는 사전 환경정보 제공도 거의 불가능하다. 더욱이 옥외 환경은 실내 환경에 비해 바닥의 평탄성이 극히 불량하기 때문에 엔코더 등에 의한 Dead-Recking 방법은 상당히 부정확하다. 이와 같은 여러 가지 이유로 인해 옥외 자율 주행은 실내 환경에 비해 그 성능이 현격히 떨어진다. 따라서 옥외에서 효과적인 GPS기반 위치평가 방법의 개발이 필요하다[6].

또한 옥외 환경에서 인간을 추적하기 위해서는 경사, 장애물 등 복잡한 환경에서도 신뢰성 있게 인간의 위치를 평가 할 수 있는 기술이 필요하며 평가된 인간의 위치를 기반으로 로봇이 장애물을 회피하여 인간을 추적할 최적의 궤적을 생성하는 기술이 필요하다. 또 다른 해결 과제는 복수의 인간과 추종로봇이 동일 공간에서 작업하는 복수 동시작업 기술이다. 복수 동시작업에서는 다수의 인간 중에 자신이 추종해야할 인간을 구별할 수 있어야 하며, 다른 인간이나 로봇은 위치판단 및 자율주행에 장애물 역할을 하므로 이를 해결 할 수 있는 방법의 개발이 필요하다.

2. 연구 동향

2.1 위치평가

옥외 위치평가는 최근 DGPS 정밀도 향상으로 인해 어느 정도 실용화 단계에 접어들고 있으나 자율주행은 현재 DGPS 정밀도로서는 한계가 있다. 실제 DGPS는 전리층 오차, 대류층 오차, 위성궤도 및 시계오차, 다중경로 오차, 사이클 슬립 등에 의한 랜덤한 오차가 개입된다. 그러나 외부환경은 로봇이 주행할 수 있는 공간과 장애물의 구별이 뚜렷하지 아니한 환경이 대부분으로 최종 목표 지점 정보만으로 경로를 스스로 찾아 주행하기는 거의 불가능하다. 아울러 실내와는 달리 외부환경에서는 장애물의 구별이 명확하지 않거나 로봇 가까이 장애물이 위치하지 않는 넓은 공간 등이 대부분으로서 위치평가에 이러한 장애물을 이용하기가 어려워 거의 DGPS 위치만을 이용하는 경우가 대부분이다. 따라서 인간 추종 로봇의 경우 정밀 위치평가가 어려워 자율 주행이 힘들다는 것이 커다란 걸림돌이 되고 있다.

이와 같은 DGPS의 문제점을 보완하기 위해 옥외 위치평가에는 자이로 및 가속도계 등으로 구성된 관성항법시스템(Inertial Navigation System: INS)을 추가적으로 이용하는 경우가 대부분이다[7, 8, 9, 10, 11, 12]. 그러나 관성항법시스템은 유지 보수가 까다로울 뿐만 아니라 오차가 시간에 따라 누적되는 단점이 있다. 또한 영상 이미지나 레이저 스캐너를 GPS와 융합하여 위치평가를 수행하는 연구도 수행되었다[13, 14, 15, 16, 17, 18].

반면에 비 관성센서만을 GPS와 융합하여 위치평가를 하는 연구도 수행되었다. Ohono[19]와 Thrapp[20] 등은 DGPS와 주행계를 융합하여 위치평가를 시도하였다. 또한 Zhang[21] 등은 주행계와 지자기센서를 GPS와 융합하는 방법을 제시하였는데, 이들은 GPS 위치정보 신뢰성에 따라 위치평가 방법을 달리하는 스위칭 방법을 이용하였다. 그러나 비 관성 센서들은 관성 센서에 비해 정밀도가 떨어지므로 비 관성센서 기반 연구들은 대부분 정밀한 고가의 GPS를 이용하고 있으며, GPS 위치정보의 신뢰성을 평가하기 위해 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 정보 신뢰도 판단 조건 설정 등은 인간 추종 로봇의 실용화라는 관점에는 적합하지 못하다. 따라서 경제적인 GPS를 이용하여 그 정보의 신뢰성을 일관성 있게 평가하는 위치평가 방법의 개발이 필요하다.

2.2 인간 추종 기술

인간 추종 로봇은 다른 로봇 기술에 비해 많은 연구가 이루어지지 않았다. 로봇이 인간을 추종하기 위해서는 인간의 위치를 인식해야 하며, Table 1은 지금까지 개발된 국내외 인간 위치평가 방법을 나타낸다.

Table 1 State of arts for human following robot

Sensor	Method	Problem	Multiple Simultaneous Operations
Ultrasonic or Infrared Sensor	<ul style="list-style-type: none"> - Scanning method -Sensing the distance and direction between the sensor and human 	<ul style="list-style-type: none"> - Impossible to distinguish between objects and human - human should be placed in front of robot - Large Direction error 	Impossible
Two Infrared Sensor	<ul style="list-style-type: none"> - Recognizing the distance and direction by using distance two ultrasonic sensors 	<ul style="list-style-type: none"> - Impossible to distinguish between objects and human - Target human should be placed in front of robot - Large Direction and Distance errors 	Impossible

LED + Camera	The LED attached to the human blink continuously, and the robot recognizes it	<ul style="list-style-type: none"> - Tracking performance is not good due to slopes, obstacles, etc. - Being influenced by the intensity of the light 	Impossible
Camera	The robot continuously specific parts or face	<ul style="list-style-type: none"> - Being influenced by the intensity of the light - Long processing time and difficult to image processing 	Impossible
Camera + Voice Recognition	<ul style="list-style-type: none"> - Same method as Camera - The voice sensor is used to detect the direction of a human 	<ul style="list-style-type: none"> - Same problem as Camera - Voice sensor cannot give distance information 	Impossible
Intelligence Space Method	Various types of fixed sensors are placed in advance and the position of human and robot are transmitted to the robot	<ul style="list-style-type: none"> - Expensive - Multiple sensors must be placed in the work space in advance - Low flexibility of work space 	Possible
Ultrasonic Sensor+RF Receiver	<ul style="list-style-type: none"> - RF sensor mounted on robot transmits radio wave -The distance and angle are calculated by using two ultrasonic waves 	<ul style="list-style-type: none"> - Same problem as ultrasonic sensor 	Impossible
Laser Sensor	It continuously the human's legs by using laser scanner	<ul style="list-style-type: none"> - Expensive - Impossible if there is a Obstacle - Human should be placed in front of robot 	Impossible

카메라를 이용하는 방법은 로봇이 추종할 사람의 얼굴이나 신체 특정부위, 또는 LED를 인간에 부착하여 그것을 목표로 하여 연속적으로 추적하면서 인간을 추종하는 방법이다[22, 23]. 그러나 인간과 로봇사이에 장애물이 존재하거나 언덕이나 경사지에서는 목표를 추적하지 못하는 경우가 자주 발생하여 추종 성능이 떨어지며, 비전 센서는 주변 빛 강도에 대단히 민감하여 조도가 일정하지 아니한 외부 환경에서는 적용이 거의 불가능하다.

초음파 센서 방법은 주로 두 개의 초음파 신호로부터 거리차를 계산하고 이를 이용하여 방향을 추측하는데 초음파 센서의 거리오차가 비교적 크기 때문에 방향 추적에 오차가 크고 인간과 로봇사이에 장애물이 존재하거나 로봇 전면에 인간이 위치하지 못하면 초음파 수신에 어려움이 있어 추종이 불가능하다[24].

레이저 및 적외선 방식은 레이저 스캐너로 연속적으로 인간의 다리를 추적하여 거리 및 방향을 계산하여 추종하는데 인간과 로봇사이에 장애물이 존재하거나 인간이 로봇의 전면에 위치하지 못하는 경우나 경사지에서는 인간의 다리를 추적할 수 없다는 단점이 있다[25, 26].

LED 방식은 카메라 방식 단점인 주변 환경 민감도에 대한 신뢰도를 높이기 위한 것으로서 LED를 인간의 몸에 부착하여 이 빛을 추적하는 방식으로 카메라의 환경민감도 문제는 어느 정도 해결되지만 중간에 장애물 위치할 경우나 경사지와 같은 곳에서는 추종이 불가능하다.

기존 연구에서의 문제점을 종합해 보면 Fig. 1, Fig. 2, Fig. 3과 같이 인간이 로봇의 전면에 위치하지 않거나 로봇과 인간 사이에 장애물이 존재하거나 경사지와 같은 곳에서는 인간을 감지하지 못하기 때문에 추종이 불가하며 다수의 로봇과 인간이 동일 공간에 작업을 수행 할 경우 자신이 추종해야 할 인간을 구별할 수 없을 뿐만 아니라 다른 로봇과 인간이 장애물 역할을 해 추종이 불가하다.

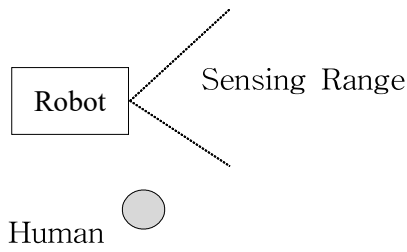


Fig. 1 The human is outside of the sensing range

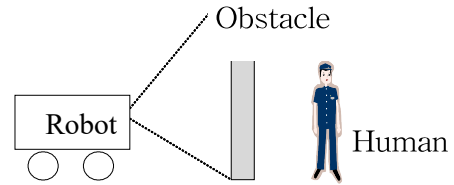


Fig. 2 Obstacle environments

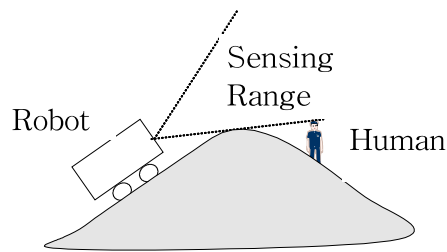


Fig. 3 Slope Terrain

3. 연구목적 및 범위

인간 추종 로봇이 가져야 할 필수적인 기술은 로봇 자신의 정밀한 위치평가 기술, 다수의 장애물 및 로봇이 공존하는 복잡한 환경에서도 인간의 위치를 판단하는 방법, 로봇이 인간을 추적하기 위해 추적궤적 생성방법 및 효율적인 경로 추적 제어 기술이 필요하며 본 연구에서는 이와 같은 기술을 개발하여 인간 추종 로봇을 구현한다.

본 논문에서는 DGPS를 이용하여 인간과 로봇의 위치를 독립적으로 평가함으로써 장애물 등에 의한 추종신뢰성 저하문제를 해결하며, DGPS 및 로봇 바퀴의 엔코더 정보로부터 자신의 최적 위치를 평가함으로써 로봇의 위치오차를 최소화 하는 방법을 개발한다. 또한 인간의 위치 정보로부터 추적궤적을 생성하는 방법 및 생성된 궤적을 추종하는 경로 추종 제어방법을 제안한다.

II장에서는 인간 추종 로봇 시스템 구성, 확장칼만필터(Extended Kalman Filter : EKF) 기반 로봇의 위치 평가방법(Localization), 그리고 인간 추종을 위한 인간 추종 궤적 생성 및 궤적 추종방법을 제안한다. III장에서는 II장에서 제안한 로봇의 위치평가 및 궤적 추종 방법을 기반으로 기초실험을 통하여 성능을 분석하고 실제 환경에서의 인간 추종 결과를 제시한다.

II. 위치평가 및 추종방법

1. 인간 추종 로봇 시스템 구성

기존 인간 추종 기술이 장애물이 존재하거나 경사지, 또는 로봇의 시야에 인간이 있지 못하면 인간의 위치를 인식하지 못하는 문제점을 해결하기 위해 본 논문에서는 Fig. 4와 같은 인간 추종 로봇 시스템을 구성한다. 즉, 인간은 DGPS를 장착한 모듈을 휴대하는데 DGPS로 인간의 위치를 인식하여 인간의 위치를 무선통신으로 로봇에게 전송한다. 따라서 로봇은 장애물이나 경사지 및 로봇 시야 범위 내외 상관없이 항상 인간의 위치를 인식 할 수 있다. 아울러 이 방법은 각 송신모듈에 ID를 부여함으로써 복수 동시 작업 시에도 자신이 추종해야 할 인간을 구별 할 수 있다.

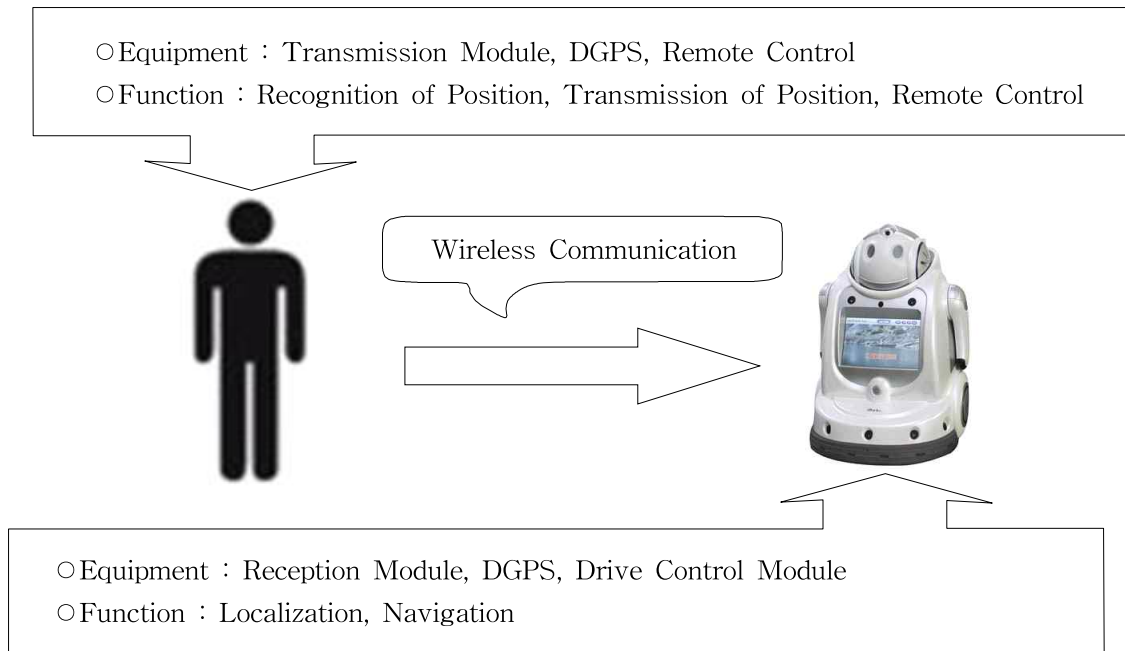


Fig. 4 Concept of human following robot system

로봇은 수신모듈, DGPS 및 주행제어 장치를 장착하고 인간을 추종한다. 로봇의 기능은 위치평가를 수행하여 자신의 정밀 위치를 인식하고 인간을 추종하기 위한 추종궤적 형성 및 주행 목표점을 설정하고, 설정된 목표점을 도달하는 자율 추종 항법(Navigation)을 수행한다. 또한 로봇은 인간으로부터 하달된 기타 지령을 수행 한다.

이와 같은 시스템 구현을 위해서는 로봇의 위치평가, 인간 추종 궤적생성 및 자율 추종 방법의 개발이 필요하다.

2. 로봇의 위치 평가

2.1 DR(Dead-Reckoning) 위치평가

DR 위치평가 원리는 로봇의 초기 위치를 설정한 후 로봇바퀴에 장착된 엔코더 정보만으로 로봇의 이동 거리와 방향을 검출하여 주행 로봇의 현재 위치를 추정하는 방법이다. DR은 외부의 지원 시설이 필요하지 않을 뿐 아니라 로봇의 위치를 연속적으로 검출할 수 있다.

DR은 이미 알고 있는 위치에서 다음 단계로의 이동 시에 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. 5와 같이 로봇의 왼쪽 및 오른쪽 바퀴의 이동거리를 각각 D_L , D_R 이라 하고 두 바퀴 사이의 거리를 L 이라 하면 원주와 각의 관계에서,

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

이 성립한다. 이 식에서 R 과 α 는 미지수이다. 이것으로부터 R 과 α 는 다음과 같이 구해진다.

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

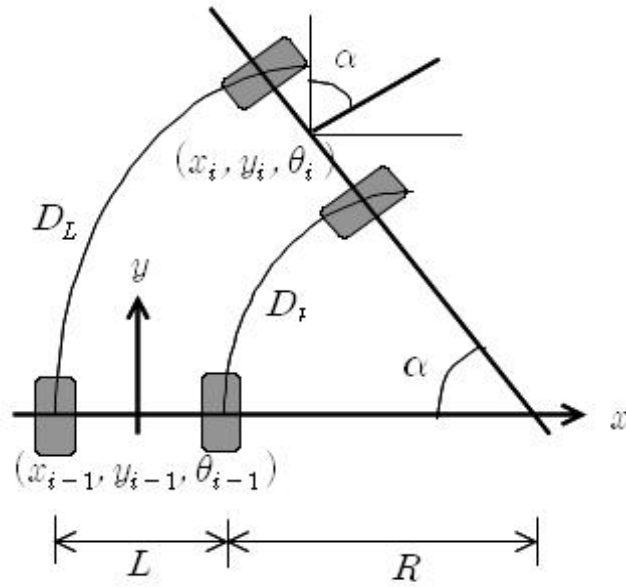


Fig. 5 Dead Reckoning (DR) system

이전 위치 $(x_{i-1}, y_{i-1}, \theta_{i-1})$ 의 로봇 중심에 대한 다음 위치 (x_i, y_i, θ_i) 는 다음과 같이 구해진다. 먼저 x_i 는,

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

같은 방법으로 y_i 는 다음과 같다.

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

다음으로 기준좌표에 대한 로봇의 진행 방향은 다음과 같이 계산된다.

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

또한 기준좌표에 대한 로봇의 위치는 다음으로 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 이와 같은 DR은 로봇의 이동거리가 늘어남에 따라 오차가 무한히 커진다. 그 이유는 바퀴의 불균형, 바퀴와 바닥사이의 미끄러짐, 바닥의 불균일성, 엔코더의 오차 등에 기인한다. 이 중 바퀴 불균형은 계통오차로서 이동거리에 따라 무한히 늘어나는 성질을 가진다. 반면에 그 외 오차 요인들은 무작위 특성이 있어 통계학적으로 처리가 가능하다.

2.2 확장칼만필터(EKF) 기반 로봇의 위치평가

2.2.1 센서 융합의 필요성

전술한 바와 같이 DR만으로 위치를 평가할 경우 오차가 계속해서 누적되어 시간에 따라 점점 위치 오차가 커진다. 또한 DGPS 위치정보를 여러 가지 오차 요인을 포함하고 있어 위치오차가 존재한다. 주요 위치오차 요인으로는 위성자체의 위치오차, 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 위치평가는 최소 4개의 위성으로부터 정보를 수신하여야만 신뢰성 있는 위치정보이용이 가능하다. 그러나 DGPS만을 이용할 경우에는 시간에 따라 오차가 누적되지는 않지만 최대 5m이상의 오차가 발생할 수 있다. 또한 위성상태에 따라서 4개의 위성으로부터 위치정보가 수신되지 못하는

경우가 발생하여 위치평가가 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 위치평가가 더 우수하다. 따라서 두 방법의 장점만을 취하여 적절히 결합함으로써 최적의 위치평가를 수행할 수 있다.

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

2.2.2 EKF 기반 위치평가

칼만필터 기반 위치평가는 서로 다른 방법으로 획득된 두 정보로부터 각 정보의 신뢰성을 기반으로 하여 오차를 보정하는 방법이다. Fig. 6은 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 이동방향으로 정의한다. 로봇의 위치에 대한 시스템 모델은 Fig. 6에 의해 다음과 같이 된다.

$$X(k+1) = F(X(k), u(k)) + \omega(k) \quad (8)$$

여기서 상태전이 함수 $F(X(k), u(k))$ 는,

$$F(X(k), u(k)) = \begin{pmatrix} x(k) + d(k) \cos \theta(k) \\ y(k) + d(k) \sin \theta(k) \\ \theta(k) + \Delta \theta(k) \end{pmatrix} \quad (9)$$

이고 오차 $\omega(k)$ 는 다음과 같이 가정한다.

$$\omega(k) \sim N[0, Q(k)] \quad (10)$$

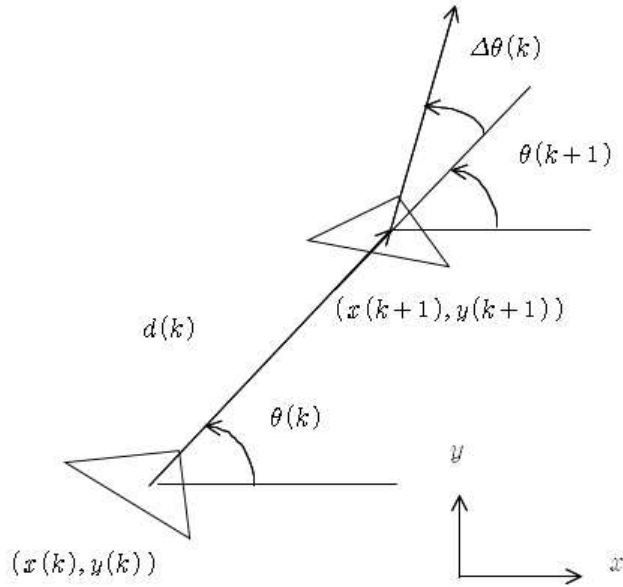


Fig. 6 State variables for system modeling

즉, $\omega(k)$ 는 평균이 0이고 공분산이 $Q(k)$ 인 가우시안이 된다. (9)식에서 $d(k)$ 와 $\Delta\theta(k)$ 는 제어입력으로서 상수로 가정한다. 또한 $Q(k)$ 는 각 상태변수의 오차 표준편차로서 대각 행렬이 된다.

다음으로 DGPS와 디지털 컴퍼스로부터 위치 및 방위 정보를 측정하는 측정 모델은 다음과 같다.

$$M(k+1) = Z(X(k), S_t) + \nu(k), \quad \nu(k) \sim N[0, R(k)] \quad (11)$$

여기서 $\nu(k)$ 는 평균이 0이고 공분산이 $R(k)$ 인 가우시안 잡음이며, $R(k)$ 는 각 측정변수의 오차의 표준편차로 구성되는 대각 행렬이다. DGPS는 정확한 위치에 단지 랜덤 잡음(오차)만 개입된 것으로 가정하여 $Z(X(k), S_t)$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$Z(X(k), S_t) = \begin{pmatrix} x \\ y \\ \theta \end{pmatrix} \quad (12)$$

이와 같이 정의된 시스템 모델과 측정모델을 EKF 알고리즘에 적용하여 다음과 같이 로봇의 위치를 평가한다.

먼저 시스템 모델과 제어 입력 $u(k)$ 로부터 시간 $k+1$ 에서의 로봇의 위치를 다음과 같이 예측한다.

$$\hat{X}(k+1|k) = F(\hat{X}(k|k), u(k)) = \begin{pmatrix} \hat{x}(k|k) + d(k) \cos \theta(k) \\ \hat{y}(k|k) + d(k) \sin \theta(k) \\ \hat{\theta}(k|k) + \Delta \theta(k) \end{pmatrix} \quad (13)$$

이 예측에 수반되는 공분산 행렬 $P(k+1|k)$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$P(k+1|k) = \nabla F P(k|k) \nabla F^T + Q(k) \quad (14)$$

여기서, ∇F 는 상태 천이함수 $F(\hat{x}(k|k), u(k))$ 의 자코비안으로서 아래 식과 같이 구해진다.

$$\nabla F = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -d(k) \sin \hat{\theta}(k|k) \\ 0 & 1 & d(k) \cos \hat{\theta}(k|k) \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (15)$$

다음으로는 시스템 모델과 제어 입력 $u(k)$ 로부터 예측된 측정모델은 다음과 같이 구한다.

$$\hat{Z}[k+1] = \begin{pmatrix} \hat{x}(k+1|k) \\ \hat{y}(k+1|k) \\ \hat{\theta}(k+1|k) \end{pmatrix} \quad (16)$$

또한 DGPS로부터 실제 측정된 센서 실측모델 다음과 같이 나타내어진다.

$$Z(k+1) = \begin{pmatrix} x_{GPS}(k+1) \\ y_{GPS}(k+1) \\ \theta(k+1) \end{pmatrix} \quad (17)$$

여기서 (x, y) 는 DGPS로부터 측정된 위치정보이며 DGPS는 방향에 대한 정보를 주지 못하므로 θ 는 식(13)으로 예측된 각도를 그대로 이용한다. 이 실측 위치와 시스템 모델로부터 예측된 위치의 차로 구성되는 innovation 행렬 $\nu(k+1)$ 를 다음과 같이 구성한다.

$$\nu(k+1) = [Z(k+1) - \hat{Z}(k+1)] = \begin{pmatrix} x_{GPS}(k+1) - \hat{x}(k+1|k) \\ y_{GPS}(k+1) - \hat{y}(k+1|k) \\ \theta(k+1) - \hat{\theta}(k+1|k) \end{pmatrix} \quad (18)$$

$\nu(k+1)$ 에 수반되는 공분산 행렬 $S(k+1)$ 은 다음과 같다.

$$S(k+1) = E[\nu(k+1) \cdot \nu^T(k+1)] = \nabla Z P(k+1|k) \nabla Z^T + R(k+1) \quad (19)$$

여기서 ΔZ 는 측정모델의 자코비안으로서 다음과 같이 단위행렬로 주어지는데 그 이유는 DGSP 및 디지털 컴퍼스의 정보는 시스템 모델과는 무관하게 독립적으로 정보를 주기 때문이다.

$$\nabla Z = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (20)$$

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.

$$\nu(k+1) S^{-1}(k+1) \nu^T(k+1) \leq e^2 \quad (21)$$

여기서 e 는 설계 파라메타이다. Validation gate의 의미는 측정값과 예측 값의 차와 측정오차의 분산과의 비를 나타내는데, 측정 오차 값이 오차의 분산 값보다 일정한 비율 이하일 때만 위치보정이 유효하게 된다.

식(21)을 만족하는 GPS 위치정보를 이용하여 예측된 위치 $\hat{x}(k+1|k)$ 로부터 $\hat{x}(k+1|k+1)$ 즉, 시간 $k+1$ 에서의 최적의 위치를 평가하고 거기에 수반된 공분산 행렬 $P(k+1|k+1)$ 을 갱신한다. 이를 위해 먼저 잘 알려진 칼만 게인 $W(k+1)$ 은 다음과 같이 정의된다.

$$W(k+1) = P(k+1|k) \nabla Z^T S^{-1}(k+1) \quad (22)$$

이 칼만 게인의 의미는 추측항법으로 예상된 위치에 대해 센서로 측정된 위치를 얼마만큼 비중을 두어 수정하느냐 하는 정도를 나타낸다.

칼만 게인을 이용하여 예측된 위치를 다음과 같이 보정한다.

$$\hat{X}(k+1|k+1) = \hat{X}(k+1|k) + W(k+1)\nu(k+1) \quad (23)$$

마지막으로 이 위치보정에 수반된 공분산 행렬은 다음과 같이 갱신된다.

$$P(k+1|k+1) = P(k+1|k) - W(k+1)S(k+1)W^T(k+1) \quad (24)$$

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

3. 궤적 생성 및 자율 추종 항법

인간을 추종하기 위한 추종궤적을 인간으로부터 수신된 DGPS 위치 정보를 기반으로 생성되는데 직접 추종 방식과 궤적 추종 방식으로 구분된다. 직접 추종 방식은 Fig. 7과 같이 로봇의 현재 위치에서 인간의 현재 위치까지 직접 직선으로 연결하는 경로를 생성하는 방법을 의미한다. 이 방법은 인간과 로봇사이에 장애물이 없는 경우에 가장 최단거리로 인간을 추적하는 경로이다.

궤적 추종 방식은 통상적인 고정 장애물 또는 다른 로봇이나 인간과 같은 이동형 장애물이 존재할 때 로봇이 그 장애물의 외곽을 추종 궤적으로 설정하는 방법이다. 즉, Fig. 8과 같이 인간과 로봇 사이에 장애물이 존재하는 경우 로봇은 인간의 이동 궤적을 추종하거나, 고정 장애물과 같이 장애물의 윤곽 정보가 이용 가능한 경우는 인간의 궤적과 상관없이 장애물의 윤곽을 따라 이동하다가 직접 추종이 가능한 상황이 되면 직접 추종을 수행한다.

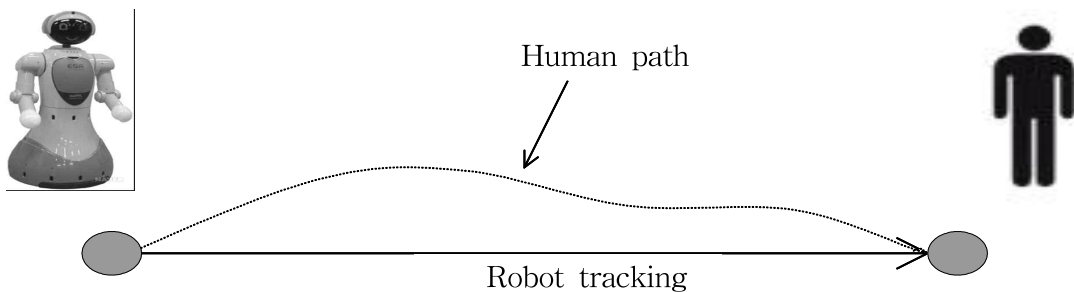


Fig. 7 Direct tracking method

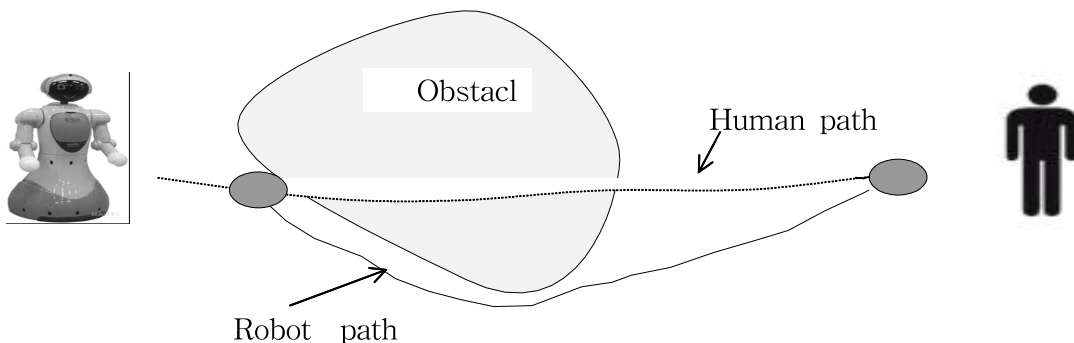


Fig. 8 Obstacle avoidance method

고정 형 장애물은 인간이 통과할 수 있는 장애물과 통과할 수 없는 장애물로 구분된다. 인간이 통과할 수 없는 장애물은 인간의 궤적을 추종하며, 인간이 통과할 수 있는 장애물은 장애물 윤곽을 따라 이동하는 방법으로 추종한다.

이동형 장애물 회피는 장애물이 궤적 상에서 사라질 때까지 기다리는 지연형 이동방식을 이용한다.

다음 Fig. 9는 인간 추종 항법의 개념도를 나타낸다. 위치평가 모듈로부터 인간의 위치가 평가되면 이것을 기반으로 추적경로를 형성한다. 경로가 생성이 되면 장애물의 감지 모듈이 활성화되어 장애물 유무에 따라 직접추종 방식 또는 궤적 추종 방식 중 효과적인 방식을 선택하게 된다. 다음으로 추종방식이 결정되면 목표지점이 설정 되고 로봇의 위치 정보와 실시간으로 비교하여 목표지점에 도달하였는지 판단을 하게 된다.

로봇의 자율 주행은 실시간의 들어온 인간의 위치정보를 저장한 경로 데이터를 자율 주행 시 메인 프로그램이 읽어 들여 초기 위치에서 최종 지점까지 저장된 경로 지점을 따라 이동함으로써 수행된다. Fig. 10은 흐름도를 나타낸다.

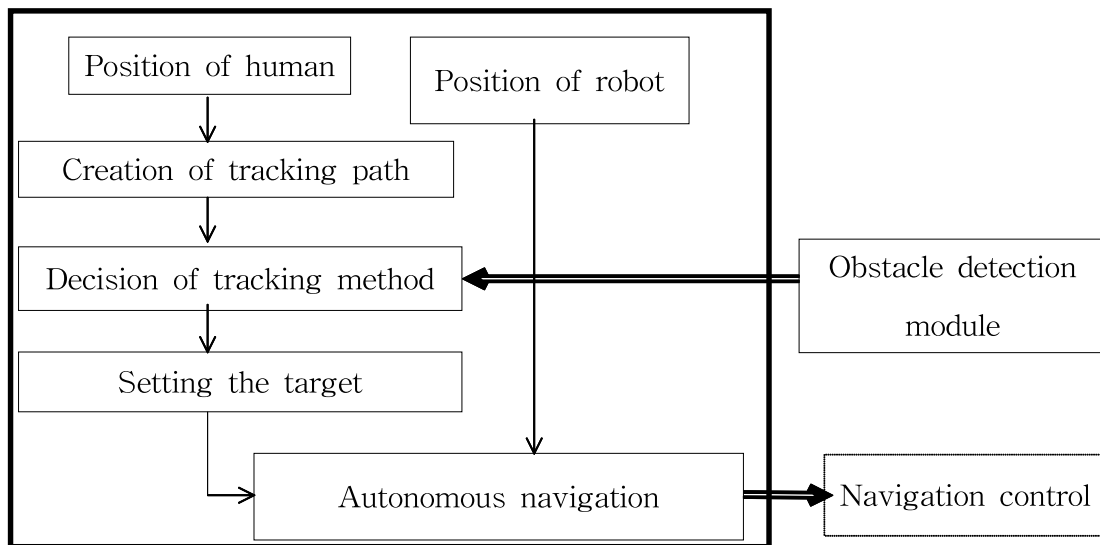


Fig. 9 Human following navigation

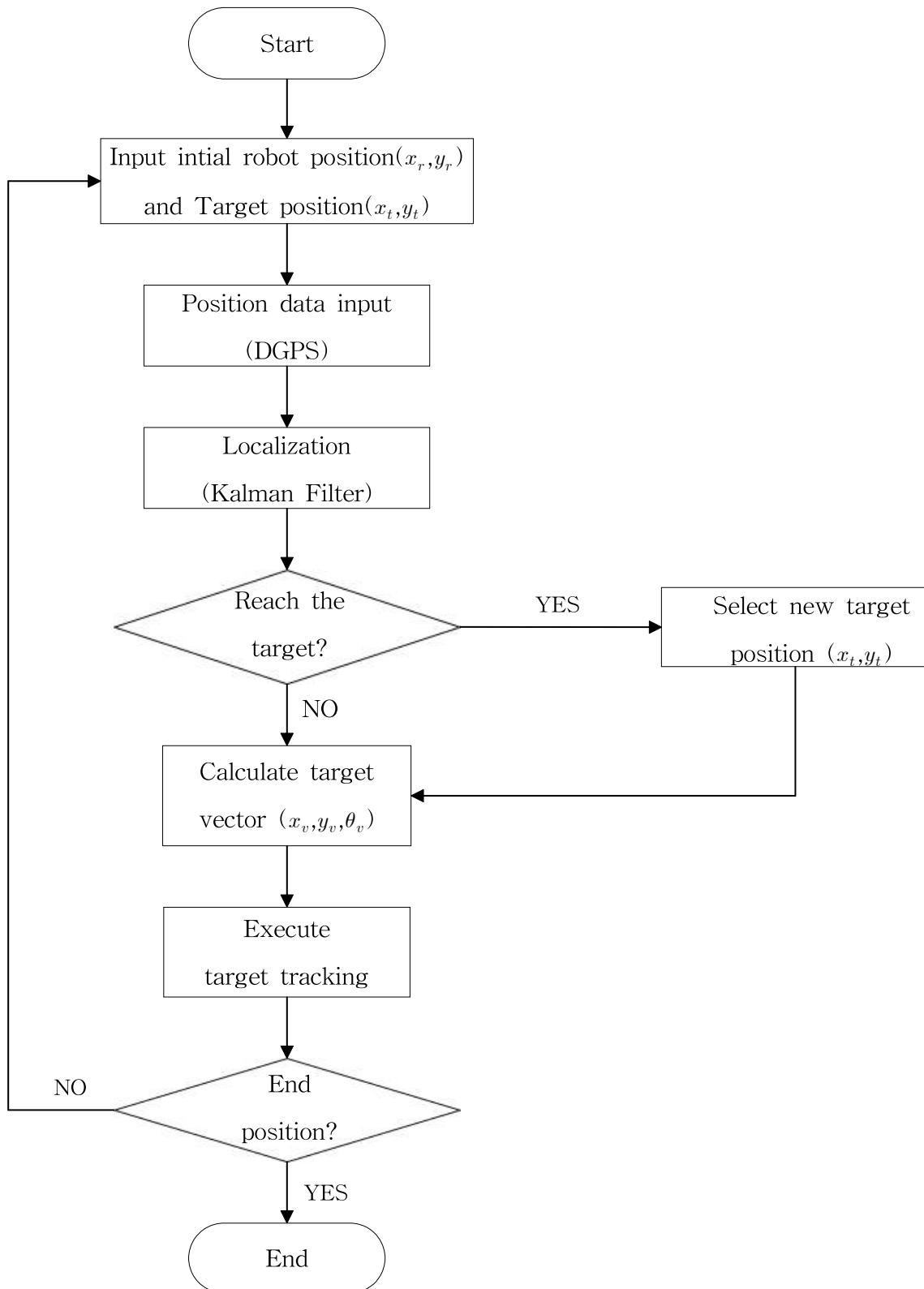


Fig. 10 Flow chart of autonomous navigation

먼저 주행이 시작되면 로봇의 현재 위치 (x_d, y_d) 를 설정한다. 또한 인간이 이동한 데이터베이스로부터 로봇의 현재 위치에 가장 가까운 목표지점을 탐색하여 초기 목표지점 (x_t, y_t) 으로 설정하고 경로 추적을 시작한다. 이동 중에 로봇은 항상 DGPS 그리고 로봇의 바퀴에 부착된 엔코더 정보로부터 계산된 위치정보 (DR)정보를 받아 들어 칼만 필터를 이용하여 최적의 위치 (x_e, y_e) 을 평가 하는 위치평가를 수행 한다.

다음으로 목표지점 도달 여부를 판단하는데, 평가된 로봇 위치와 현재 목표지점을 비교하여 거리 오차가 일정한 값 이하이면 로봇이 현재 목표지점에 도달한 것으로 판단하고 그 경로상의 다음 지점을 탐색하여 목표지점으로 설정한다. 목표지점 도달 조건은 다음식과 같다. $d \leq \sigma_{gps} + \sigma_{robot}$ 여기서 d는 목표지점과 로봇사이의 거리이고 σ_{gps} 와 σ_{robot} 는 각각 로봇과 인간 GPS의 표준편차이다.

만약 현재 목표지점에 도달하지 못한 경우이면 목표 지점을 현재 지점을 유지한다. 직접추종 방식은 현재 목표지점 도달 여부를 판단하지 않고 인간의 다음 위치 수신 여부에 따라 다음 목표 지점을 새롭게 설정한다.

다음단계로 위치평가 결과로부터 평가된 로봇 현재 위치 (x_e, y_e) 과 이동해야 할 목표지점 (x_t, y_t) 로부터 로봇이 이동해야 할 방향 벡터 (x_v, y_v, θ_v) 를 다음 식으로 계산한다.

$$\begin{pmatrix} x_v \\ y_v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_t - x_r \\ y_t - y_r \end{pmatrix}, \quad \theta_v = \tan^{-1} \frac{y_v}{x_v} \quad (25)$$

방향 벡터가 계산되면 로봇은 회전해야 할 방향 θ_v 만큼 로봇의 방향전환을 수행하고 이동한다. 로봇의 속력이 사람의 걸음걸이 정도이므로 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.

III. 실험 및 고찰

1. 인간 추종 로봇

인간 추종 로봇의 구동부는 Adept Technology사에서 제작한 Pioneer 로봇을 이용하였다. Pioneer 로봇은 Fig. 11에서 보는 것과 같이 구동을 위한 2개의 드라이브 휠(Drive Wheel)을 장착하고 있으며 자체 내장 배터리를 포함하고 있어 1회 충전으로 8시간 정도 운용이 가능하다.

로봇 구동부의 무게는 약 9kg이며 알루미늄 바디로 제작되어 있으며 구동부에는 ARCOS 기반에 마이크로컨트롤러가 내장되어 구동제어를 담당하고 있으며 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. 구동부의 주요 사양은 Table 2와 같다.

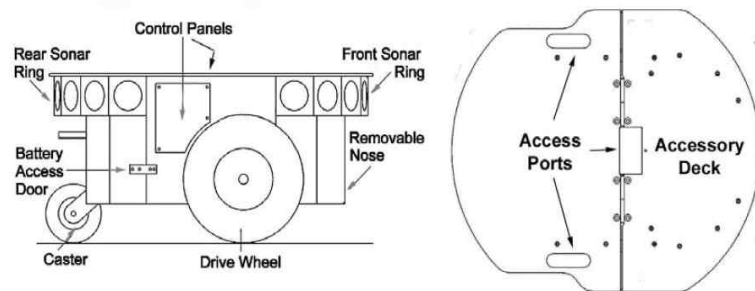


Fig. 11 Driving part of the robot

Table 2 Specifications of Driving Parts

Length(m)	Size(m)	Weight(Kg)	Payload(Kg)	Battery
0.445	0.393 x 0.237	9	25	12 VDC

Fig. 12는 인간 추종 로봇 프로그램을 구동시킨 화면이다. ROBOT, GPS는 컴퓨터와 전송속도가 미리 설정 된 상태이며, 버튼을 누를 때 각 센서들이 연결이 된다. 연결이 되면 버튼의 색깔이 변하며, 연결이 실패 하면 새로운 팝업이 뜬다. 또한 DATA Save를 누르면 로봇과 인간의 모든 위치정보가 태블릿PC에 저장이 되고, 수치를 입력하면 GPS의 값을 보정할 수 도 있다. 로봇에 장착된 GPS1과 인간이 휴대하는 GPS2의 좌표와 로봇의 위치, 목표의 위치를 화면에 실시간으로 표시하며 인간과 로봇의 거리와 각도까지 화면에 표시된다. 컨트롤러와 같은 기능으로 화면에서 터치로 로봇을 수동으로 조종을 할 수 있고, 로봇이 지나간 좌표들을 화면에 나타내준다.

개발한 프로그램을 태블릿PC에서 Pioneer 로봇, 각 센서들과 연결하면 로봇과 센서들에 전원이 연결되며, 데이터를 태블릿PC에 전송하기 시작한다. 프로그램은 로봇의 각 센서들의 데이터를 받아 칼만필터를 거쳐 위치를 보정하게 된다. 보정된 로봇의 위치와 인간의 위치정보를 비교하여 로봇은 인간을 추종하게 된다.

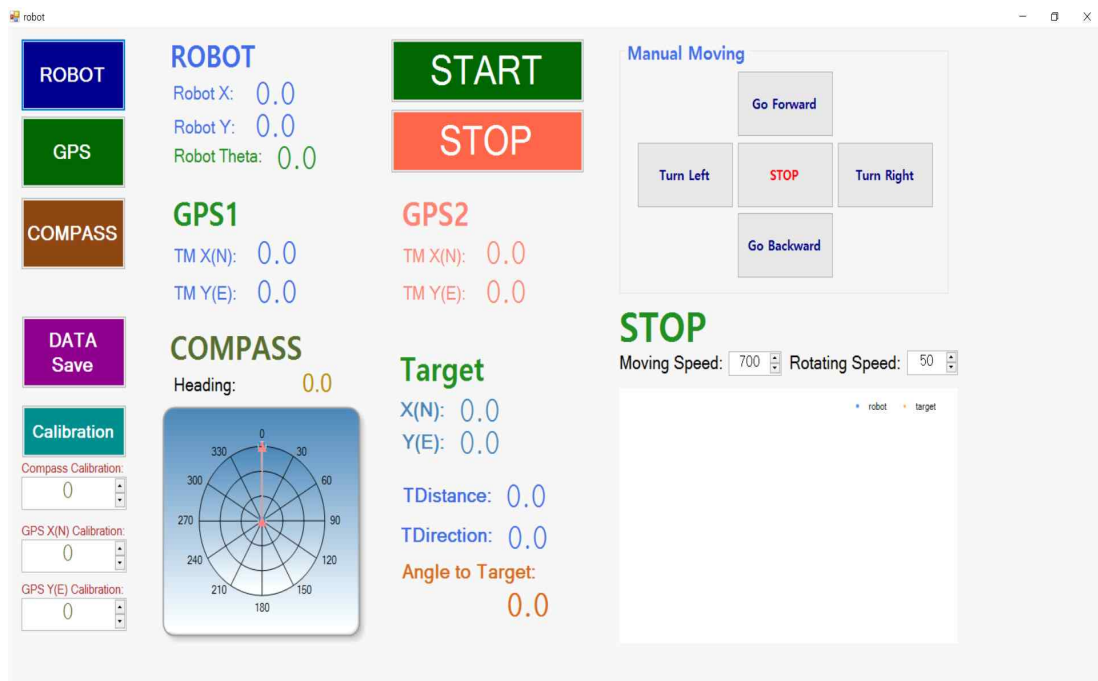


Fig. 12 View of the control monitor

이와 동시에 로봇과 인간의 위치정보는 태블릿PC에 실시간으로 저장된다.
Fig. 13은 실험을 위해 완성된 인간 추종로봇의 사진이다.



Fig. 13 Picture of human following robot

2. DGPS 특성 분석

GPS는 여러 가지 원인에 의해 정오차와 부정오차가 포함되어 있으며, 정오차는 크게 위성에 관계된 오차, 위성신호의 전달 매개물에 관계된 오차 및 수신기에 관계된 오차로 구분된다. 위성에 관계된 오차는 위성궤도오차, 위성시계오차를 들 수 있으며, 신호 전달 매개물에 관계된 오차는 대류권 굴절오차와 전리층 자연오차가 있다. 또한 수신기에 관계된 오차는 수신기시계오차와 안테나 위상중심의 변화에 따른 오차를 들 수 있다. 이외에도 GPS 측량 시 많은 문제를 야기시키는 사이클슬립, 멀티패스와 같은 우연오차들이 포함된다.

대부분의 정오차 성분들은 두 대 이상의 수신기에서 동시관측을 수행하는 GPS 측량을 통해 소거 될 수 있지만, 우연오차 성분들은 쉽게 소거되지 않는다. 로봇에 장착된 GPS는 아센코리아 GPS620 모델을 사용하였으며 이 모델은 USB 형식이며 위치정확도 2.5m(위성 DGPS 적용 시)의 사양을 가지고 있다. 또한 인간이 소지할 GPS는 아센코리아 GPS741 모델을 사용하였으며 블루투스 방식으로 위치정확도 2.50m(위성 DGPS 적용 시)의 사양을 가지고 있다. 위성 DGPS는 정지궤도 위성을 이용한 DGPS 방식으로 지구정지궤도 36,000km 상공의 위성을 사용하여 보정 정보를 제공하는 광역 지상 기준국과 통신위성이라는 두 개의 시스템으로 구성되어 있으며 지상모니터링 기준국에서 GPS 위성 측위신호를 수신하여 제어감시기지국에 데이터를 전송하고 광역 주제어 기지국에서는 보정 데이터를 생성하여 다시 지상국(위성지구국)을 통하여 지구정지궤도위성으로 전송하고 이 보정데이터를 사용자에게 제공하는 방식이다.

본 데이터의 원점은 중부원점인 위도 $38^{\circ}00'00''$, 경도 $127^{\circ}00'00''$ 이다. Table 3은 로봇과 인간의 GPS 특성을 나타내고, Fig. 14는 GPS를 고정 위치에서 약 10분의 데이터를 수집한 그래프이다. 그래프에서 x축은 왼쪽이 동쪽, 오른쪽이 서쪽 방향이며 y축은 아래쪽이 북쪽, 위쪽이 남쪽 방향이다. 분석 결과 GPS의 표준편차는 1.65이다.

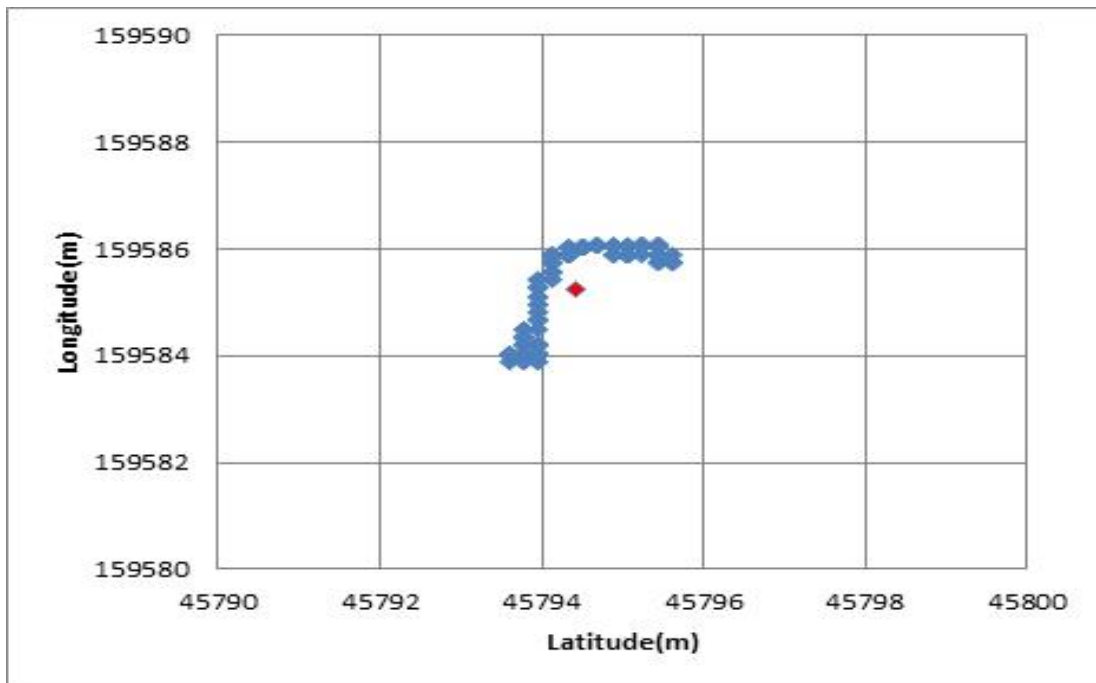


Fig. 14 Characteristic of DGPS data

Table 3 Statistical characteristics of DGPS data

Maximum error	Root mean square error	standard deviation
4.80m	2.80m	1.65

개발된 위치평가 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. 15와 같은 학교 운동장 트랙을 선정하였다. 이 운동장은 남북으로 길게 위치하고 있으며 Fig. 15에서 “x” 표시가 된 6곳을 위치오차를 측정하기 위한 기준 위치로 설정하였다.



Fig. 15 Experimental environment for localization

로봇의 지리 좌표계는 로봇의 DR 및 DGPS 위치, 그리고 위치평가 시스템의 단위와 통일시키기 위하여 미터 단위로 사용 가능한 대표적인 평면직각좌표계인 TM(Transverse Mercator) - GRS80을 적용하였다. 이 좌표계는 도/분/초로 표현된 위도 경도를 일정한 원점에 대해 m 단위로 환산된 좌표계이며, 좌표계 원점은 위도 38도, 경도 127도이다. 기준위치의 정확한 위치좌표는 정밀 측량을 통하여 알 수 있지만 본 과제에서는 DGPS의 위치오차가 무작위라는 사실을 이용하여 기준좌표들의 실제 위치를 추정하였다. 즉, DGPS 위치오차는 위성의 위치오차, 전리층 오차 및 통신오차 등에 의해 발생하는데 이와 같은 오차요인들은 그 특성상 화이트노이즈(random noise)이다. 화이트노이즈 특성은 많은 데이터가 누적될수록 그 평균이 0에 수렴하므로 각 기준위치에서 많은 위치데이터를 수집하여 그 평균값을 그 위치의 실제 위치로 하는 방법을 이용하였다. 기준위치설정을 위한 데이터는 하루에 5분씩 3일에 걸쳐 수집하여 그 평균값을 실제 위치로 설정하였으며 각 위치 당 수집된 데이터 수는 약 900개이다. Table 4는 이와 같은 방법으로 설정된 6곳의 기준위치 좌표 값을 나타낸다.

Table 4 Reference positions (unit : m)

Position No.	TM_x(North)	TM_y (East)
1	45944.46	159005.61
2	45862.76	159005.19
3	45816.35	159049.59
4	45860.74	159091.39
5	45942.46	159089.33
6	45984.93	159050.41

개발된 위치평가 방법을 선정된 트랙에서 실험을 수행하였으며 그 결과를 Fig. 16에 나타내며, 총 주행거리는 430m정도이다. Fig. 16에서 1점 쇄선은 로봇의 바퀴에 부착된 엔코더 정보만의 의한 DR 위치평가, 점선은 DGPS만의 위치평가, 그리고 실선은 EKF로 수행된 위치평가 위치궤적을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 DR 위치평가는 시간이 갈수록 오차가 누적되어 실제 궤적과는 엄청난 오차를 보인다. DGPS와 EKF 결과는 그림의 스케일 상 큰 차이가 없어 보이지만 설정된 기준위치에 대한 위치오차 분석 결과 EKF결과가 우수함을 알 수 있다.

Table 5는 오차 특성을 분석한 결과이다. 그림의 경우 DGPS 최대 오차 4.78m, 평균오차는 3.11m인 반면에 EKF 오차는 최대가 2.21m, 그리고 평균이 1.68m 정도였다. 오차 비율은 평균오차 기준으로 EKF 오차가 DGPS 오차의 약 50% 정도 오차가 개선됨을 나타낸다. 또한 최대 오차도 50% 정도 개선되는 것으로 분석되었다.

기준위치에 대한 전체 오차특성은 DGPS 위치는 최대오차 4.78m, 평균오차 3.11m, 그리고 표준편차가 1.11m인 반면에 EKF 위치평가의 경우는 최대오차 2.21m, 평균오차 1.68m, 그리고 표준편차가 0.46m로 나타났다. 결론적으로 EKF 위치평가는 최대오차 2.21m이고 95.4%의 신뢰성을 가지고 1.7m 이내의 오차로 로봇의 위치를 평가 할 수 있으며 DGPS 위치에 비해 약 50%의 오차 개선이 있는 것으로 분석된다. Fig. 17은 오차특성을 그래프로 나타낸 것이다.

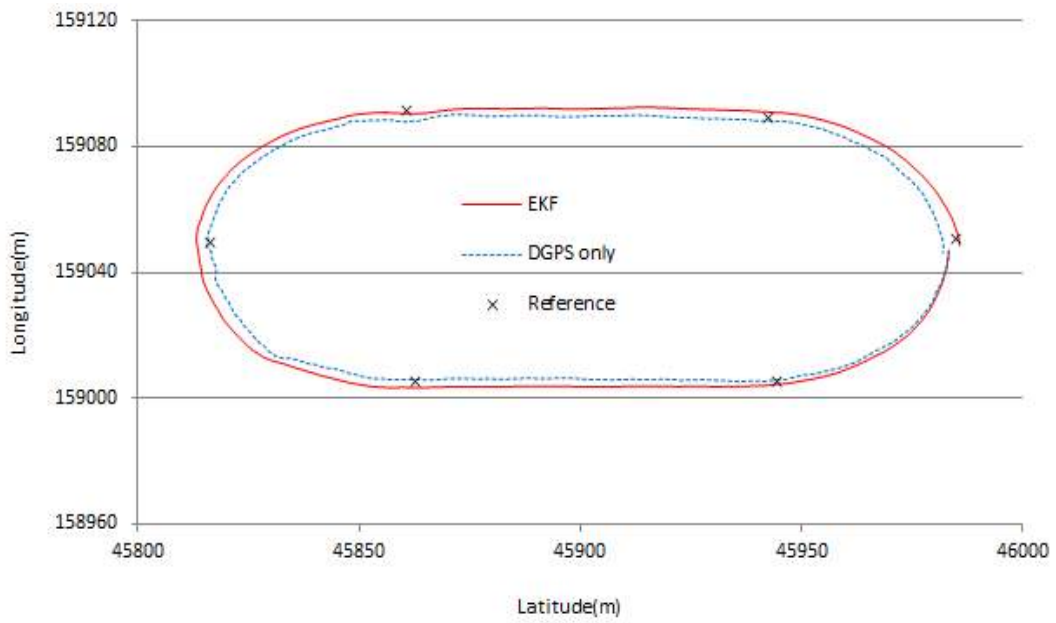


Fig. 16 Localization results

Table 5 Error characteristics of localization (unit : m)

Reference position	DGPS only	EKF
1	1.91	1.03
2	3.38	1.42
3	1.76	2.21
4	4.18	1.22
5	2.65	2.10
6	4.78	2.07
RMS	3.11	1.68
Max.	4.78	2.21
Std.	1.11	0.46

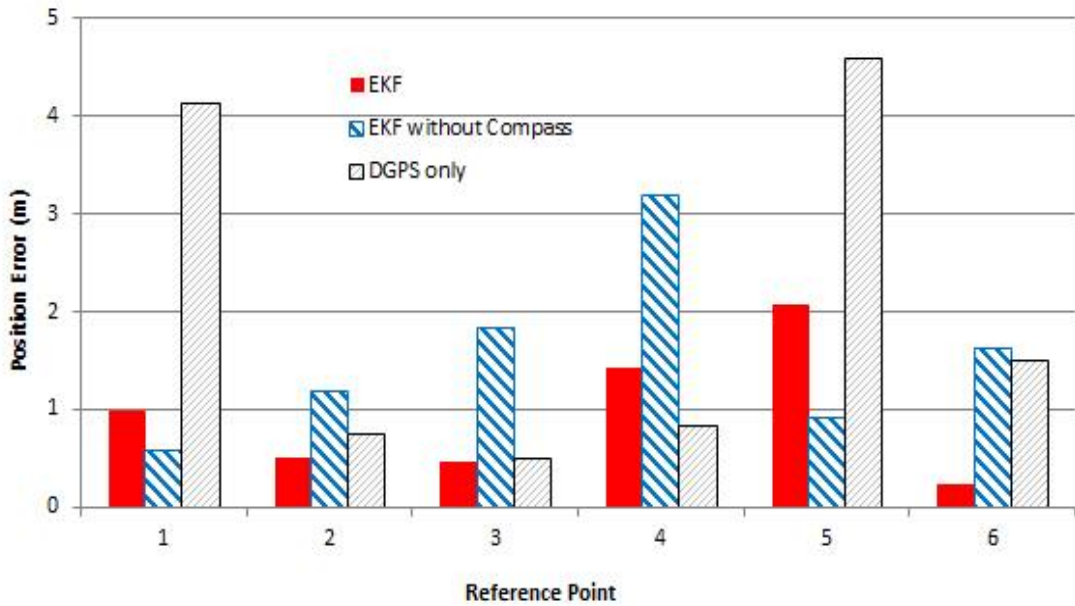


Fig. 17 Graphical representation of error

위치평가의 오차 평가의 특성을 나타내는 또 다른 지표는 오차 공분산 분석이다. Fig. 18은 Fig. 16에 대한 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. 그림에서 각 공분산이 교대로 증가 및 감소하고 있는데 이것은 주행경로가 출발 시에는 y 방향으로만 주행하다가 다시 x 방향으로만 주행하는 패턴을 반복하였기 때문이다. 즉, y 방향으로만 주행할 때는 y 방향 오차가 커져 y 공분산이 급격하게 증가하다가 다시 x 방향으로만 주행할 때는 x 방향 공분산이 커지면서 y 방향 공분산은 줄어드는 패턴을 반복한 것이다.

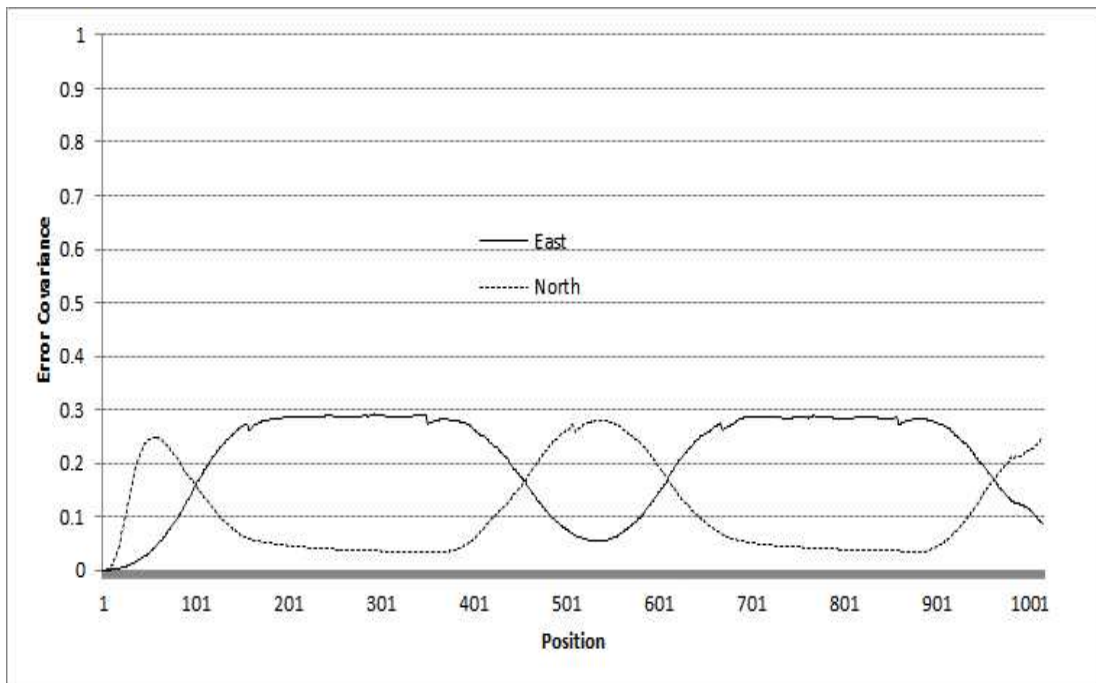


Fig. 18 Characteristics of error covariance

3. 인간 추종 실험 결과

3.1 기초실험

3.1.1 직선 경로 추종 실험

개발된 인간 추종 방법의 성능을 분석하기 위해 직선 경로에 대한 실험을 수행하였다. 직선경로의 실험 장소는 Fig. 19와 같이 대운동장이며, Table 6과 같이 출발지점과 도착지점을 사전에 DGPS를 이용하여 오차가 최소화되는 기준경로를 생성하기 위해 출발지점과 도착지점을 선정하고 3일 동안 동일 지점에서 약 5분 간 데이터를 수집하여 위치를 설정하였고, 이 두 지점을 이어 직선 경로를 생성하였다. 실험은 인간이 기준경로를 따라 이동하고 생성된 인간궤적을 로봇이 추종하는 방법으로 수행되었다.



Fig. 19 Experimental environment for line tracking

Fig. 20은 생성된 기준경로와 로봇과 인간의 이동 궤적을 나타낸다. 그래프에서 x축은 경도, y축은 위도를 나타내며, 그래프에서 검은색의 직선은 기준경로이며, 파란색의 선이 로봇의 이동 경로, 빨간색 선이 인간의 이동 경로이다. 실험 결과를 분석해보면 인간이 휴대한 DGPS의 위치 오차 및 로봇의 위치오차로 인해 기준경로에 대해 인간 및 로봇의 경로에 오차가 발생하고 있다. 인간 위치 오차는 최대 0.59m이며 로봇의 위치오차는 최대 0.26m 정도로 측정되었다. Fig. 21과 Table 7은 위치 오차 특성을 나타낸다. 인간위치 오차는 최대 0.59m 정도였으며 평균 0.14m, 표준편차가 0.13으로 나타났다. 또한 로봇의 위치오차는 최대 0.26m 정도였으며 평균 0.11m, 표준편차 0.09으로 분석되었다. 로봇의 위치 오차는 인간의 위치오차와 로봇 자체의 위치오차 및 경로추종 위치오차 등이 중첩되어 나타나는데 최대 오차가 0.26m 정도인 것은 사용된 DGPS의 정밀도를 고려할 때 양호한 결과라 할 수 있었다. 인간 추종 로봇의 성능을 더욱 향상시키기 위해서는 인간 경로 자체에 발생하는 오차 및 경로추종 오차를 최소화 할 필요가 있다.

Table 6 Reference position of line (unit : m)

	Reference position
Start point	(159015.43, 45903.21)
End point	(159030.36, 45903.58)



Fig. 20 Results of line tracking

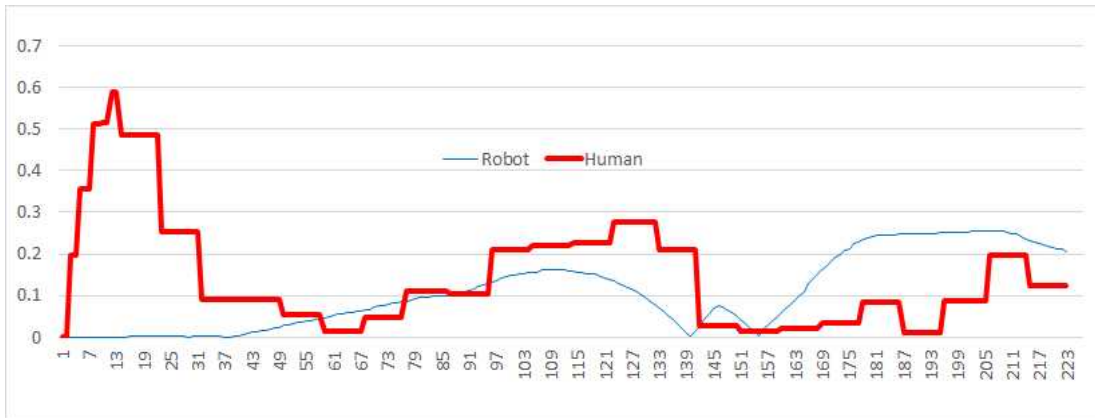


Fig. 21 Graphical representation of position errors

Table 7 Characteristics of position error (unit : m)

	Error	
	Robot	Human
RMS	0.11	0.14
Max.	0.26	0.59
Std.	0.09	0.13

3.1.2 곡선 경로 추종 실험

곡선경로의 실험 장소는 Fig. 22와 같이 대운동장 트랙의 곡선부이며, 직선경로 실험과 같은 방법으로 6곳의 위치를 추정하였다. Table 8은 설정된 TM 좌표로 표현된 6곳의 기준위치를 나타낸다. 기준위치 번호 순서는 Fig. 22에서 오른쪽 상단이 1번 위치이고 나머지 위치는 반시계방향 순서이다.

Fig. 23은 곡선 경로 추종 실험의 결과이다. 그래프에서 검은색의 곡선은 기준경로이며, 파란색의 궤적이 로봇, 빨간색의 궤적이 인간의 경로이다. 실험 결과를 분석해보면 인간이 휴대한 DGPS의 위치 오차로 인해 기준경로에 대해 인간 및 로봇의 경로에 오차가 발생하고 있다.

기준경로에 대한 인간 위치 오차는 최대 1.12m이며 기준경로에 대한 로봇 위치오차는 최대 1.31m 정도로 측정되었다. Table 9는 오차 특성을 나타낸다. 인

간위치와 로봇 위치 오차는 최대 0.21m 정도였으며 평균 0.15m, 표준편차가 0.20로 나타났다. 또한 기준경로에 대한 로봇의 위치오차는 최대 1.31m 정도였으며 평균 0.68m, 표준편차 0.57로 분석되었다. 또한 인간 경로와 기준 경로의 위치오차는 최대 1.12m 정도였으며 평균 0.60m, 표준편차가 0.47로 나타났다. 직선경로보다 곡선경로에서 오차가 더욱 크게 나타난 것은 곡선경로의 특성상 경로 추적에서 오차가 직선보다 크게 나타났기 때문이다. 따라서 곡선경로 추종성능을 향상시키기 위해서는 경로추적 성능을 개선 할 필요가 있다.



Fig. 22 Experimental environment for curve tracking

Table 8 Reference positions of curve path (unit : m)

No.	Reference Position
1	(159043.34, 45983.37)
2	(159030.15, 45978.39)
3	(159019.71, 45971.28)
4	(159012.51, 45962.09)
5	(159008.24, 45952.32)
6	(159006.76, 45940.74)

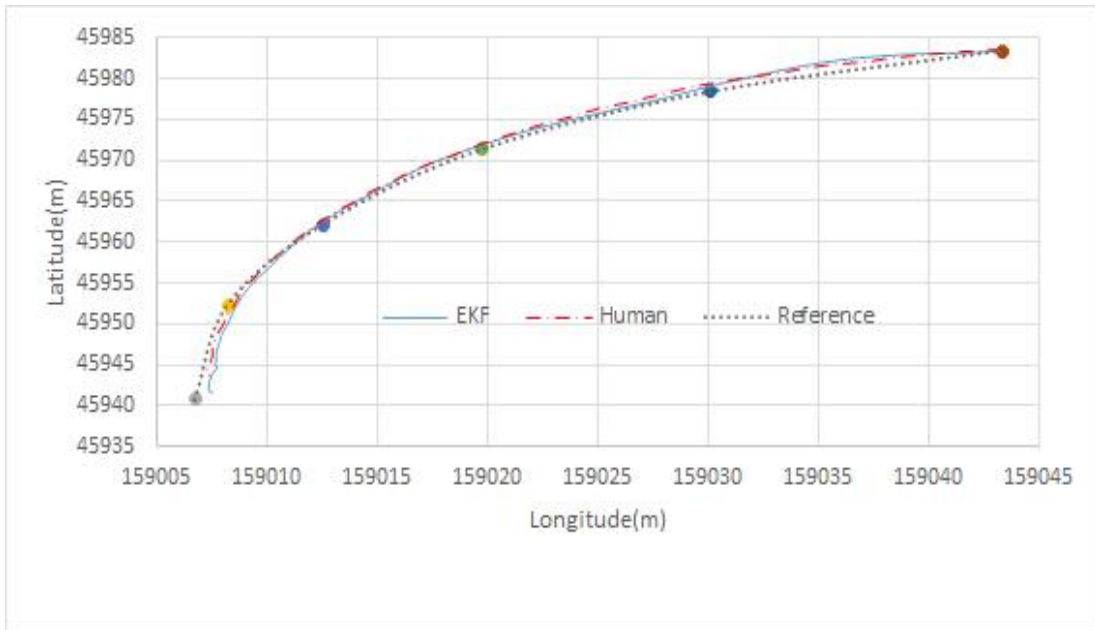


Fig. 23 Results of curve tracking

Table 9 Characteristics of error for curve path(unit : m)

Reference Position	The Reference Path and Human Position	The Reference Path and Robot Position	The Human Position and Robot
	Error	Error	Position Error
1	0.00	0.00	0.00
2	1.01	0.82	0.19
3	0.52	0.51	0.01
4	0.11	0.11	0.00
5	1.12	1.31	0.21
6	0.81	1.31	0.5
RMS	0.60	0.68	0.15
Max.	1.12	1.31	0.21
Std.	0.47	0.57	0.20

3.1.3 장애물 회피 실험

Fig. 24는 장애물 회피 실험 환경을 나타낸다. 실험 장소는 대운동장이며, 장애물의 위치를 도출하기 위하여 장애물1, 장애물2 지점을 선정하고 전술한 직선 경로 실험과 동일한 방법으로 데이터를 수집하였다. 수집된 데이터의 평균값을 장애물1, 장애물2의 중심 좌표로 가정하고 실제 장애물 크기 정보를 이용하여 장애물 윤곽을 설정하였다. 실험을 위한 인간의 이동경로는 그림과 같다. Fig. 25는 장애물 회피 실험의 결과이다. 그래프에서 파란색의 궤적은 로봇, 주황색의 궤적이 인간의 경로이며 굵은 검은색 선은 장애물을 나타낸다.

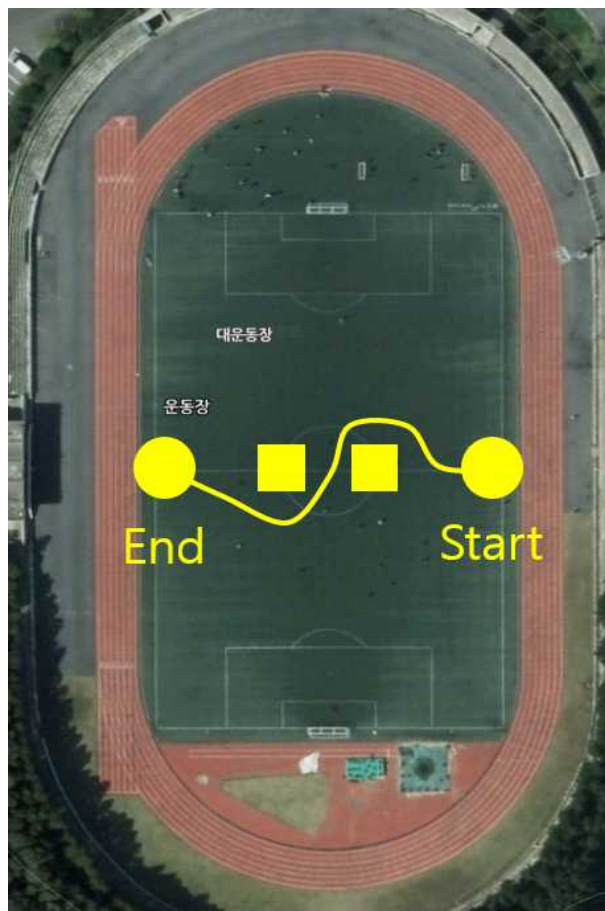


Fig. 24 Experimental environment for obstacle avoidance

본 연구에서는 장애물 윤곽의 위치 정보를 이용하여 로봇 스스로가 장애물 윤곽을 따라 회피하는 방법을 적용하지 않았으며 인간 궤적 추적 방식이 장애물 회피에 적용 될 수 있는지에 대한 가능성을 확인 하는 실험을 수행 하였다. 실험 은 장애물과 로봇과의 충돌을 피하기 위해 장애물 크기를 로봇 크기만큼 증가시 킨 후 인간은 그 외곽을 우회하는 방법으로 수행하였다.

실험결과 궤적 추적 방식으로 장애물 회피가 가능함을 확인하였으며 추가적 으로 장애물 감지 기능이나 장애물 윤곽정보가 주어진다면 더욱 효과적인 장애 물 회피가 가능할 것으로 사료된다.

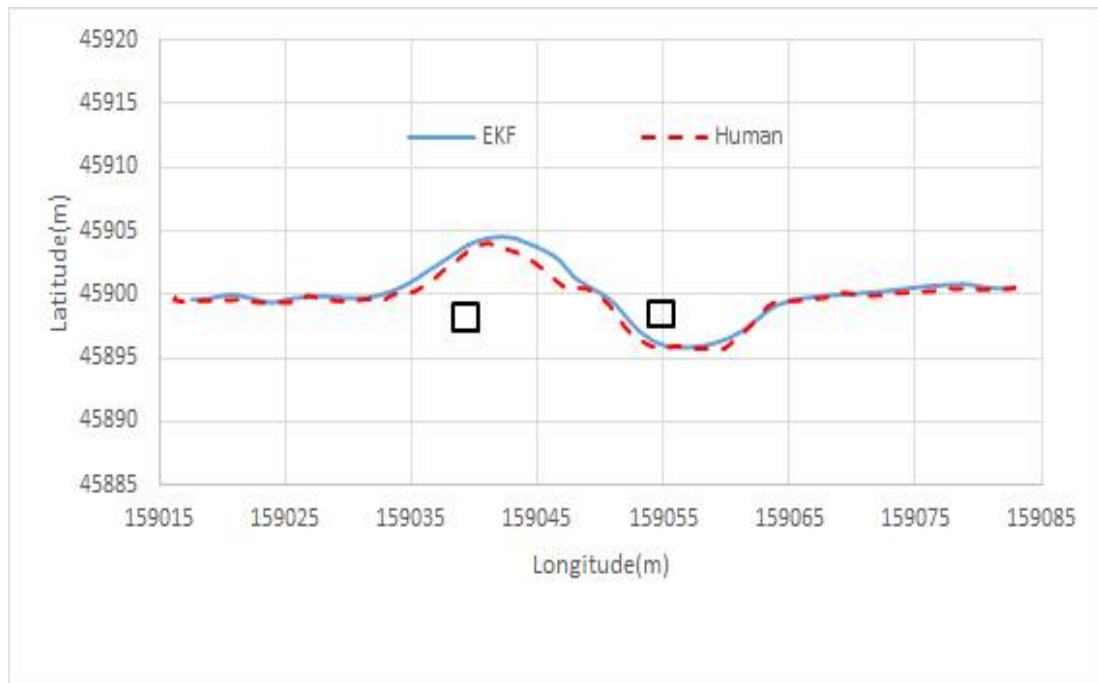
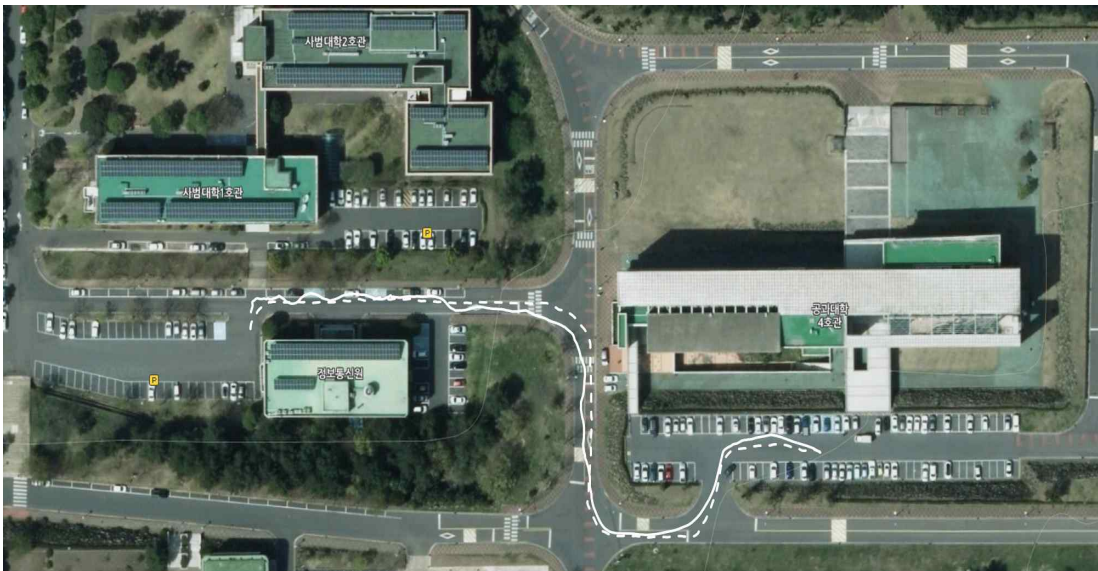


Fig. 25 Results of obstacle avoidance

3.1.4 실제 환경 추종 실험

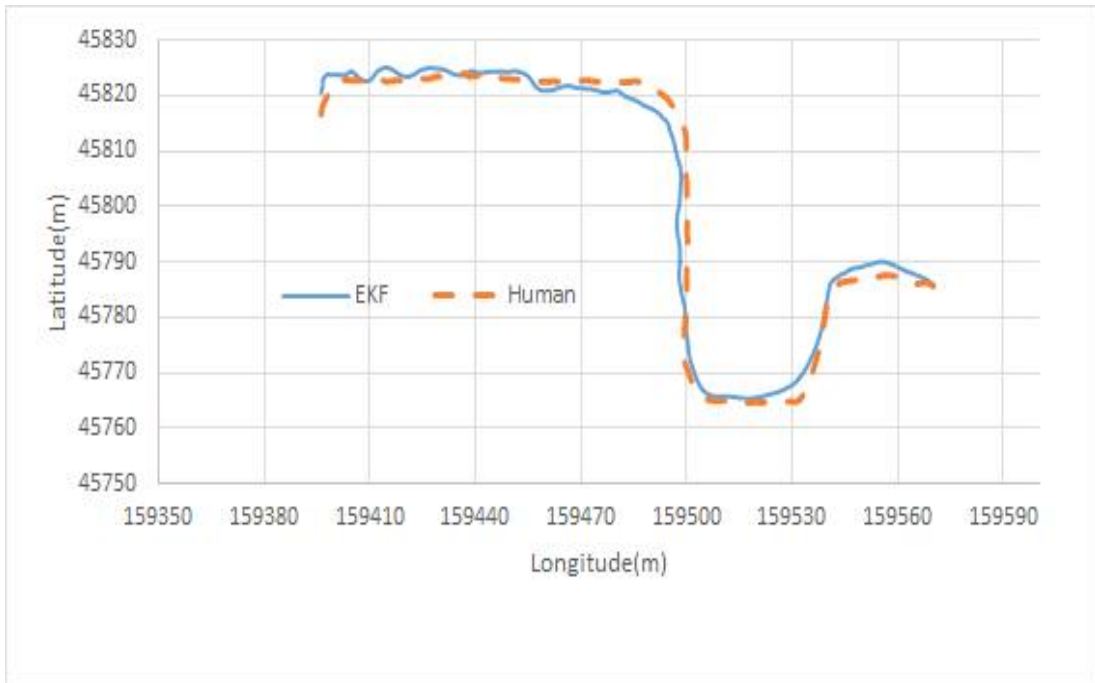
이상과 같이 수행된 기초실험을 기반으로 개발된 위치평가, 추종궤적 생성 방법, 궤적 추종방법 및 자율경로 주행 방법을 복잡한 실제 야외환경에서 그 성능을 확인하기 위해 Fig. 26 (a) 및 Fig. 27 (a)와 같은 환경에서 인간 추종 실험을 수행하였다. 출발 위치는 그림 맨 우측의 공과대학 4호관 중앙형관이며 정보통신원까지 약 300m 구간에서 실험을 수행하였다. 출발 지점과 도착 지점의 고도차는 약 10m 정도이며, 경로 상에 큰 건물 및 언덕, 그리고 기타 장애물로 인해 DGPS 위성 신호 수신에 방해받을 수 있는 환경이다.

Fig. 26에서 Fig. 27은 실험 결과를 나타낸다. 실험결과 궤적들은 인간의 DGPS 및 로봇의 위치평가 결과로 평가된 위치를 기반으로 나타낸 것으로서 오차가 포함되어 있으므로 인간 및 로봇의 실제 위치와는 차이가 있을 수도 있다. 예를 들어 Fig. 27 (a)에서 로봇 추종 궤적 중 정보통신원에서 이동한 궤적이 주차되어 있는 차량내부로 주행한 것처럼 보여 지지만 실제 로봇은 도로 가운데로 주행하였다.

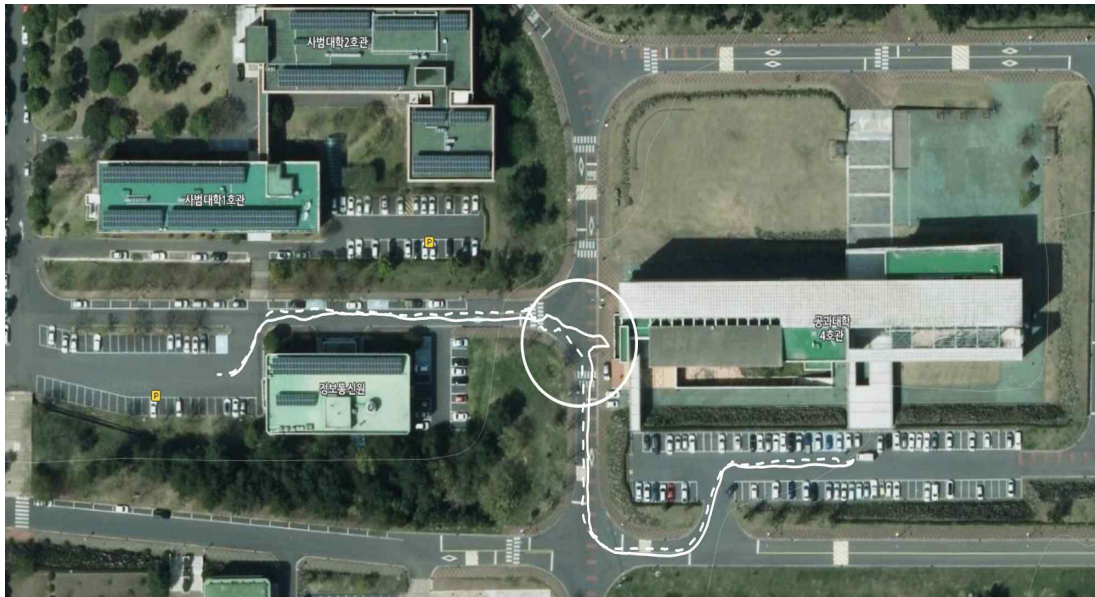


(a) Experimental environment

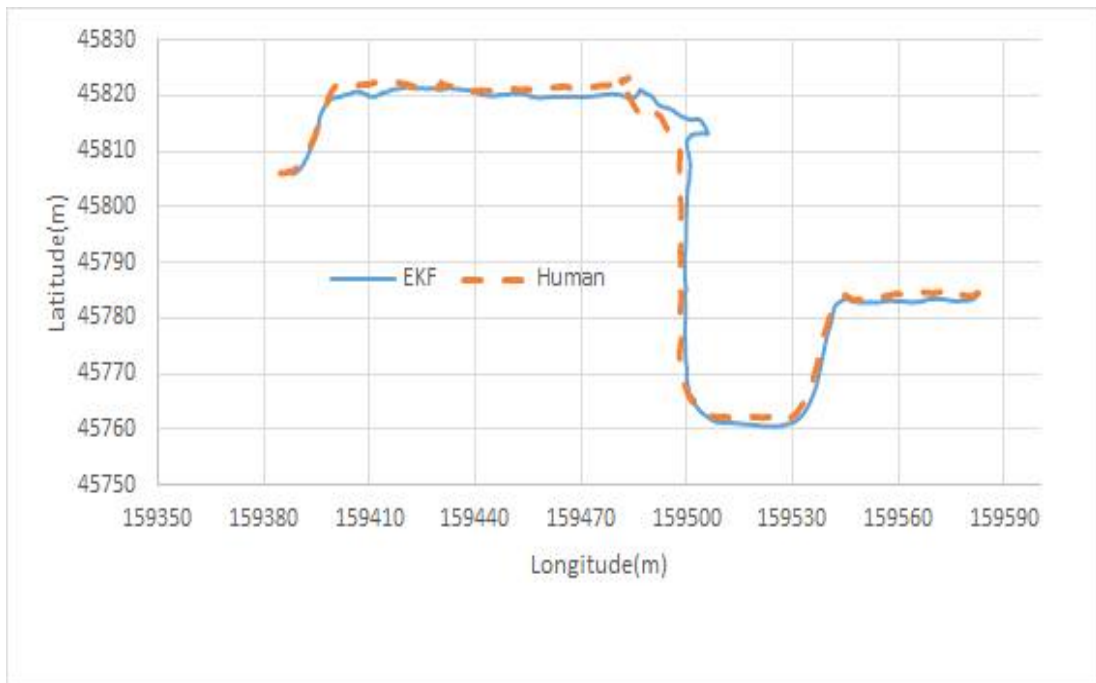
Fig. 26 Results of experiments for complex outdoor environment (1st run)



(b) Robot and human traces
Fig. 26 (Continued)



(a) Experimental environment
Fig. 27 Results of experiments for complex outdoor environment (2nd run)



(b) Robot and human traces
Fig. 27 (continued)

전체적으로 로봇은 인간을 무리 없이 추종하였으나 Fig. 27 (a)에 원으로 표시된 부분에서는 추종 성능이 저하됨을 보였다. 그 이유는 원 부분은 우측의 높은 건물로 인하여 DGPS 수신에 방해가 받아 DGPS 위치정보에 오차가 다른 곳보다 크게 발생하기 때문으로 사료된다.

IV. 결론

본 논문에서는 외부환경에서 로봇이 추종하여야 할 인간의 위치를 실시간으로 판단하여 인간이 이동한 궤적을 추종하는 로봇을 개발하였다. 이를 위해 외부환경에서 실용적으로 적용될 수 있는 위치평가 방법, 자율주행방법, 궤적생성방법 및 추종 제어방법을 연구 개발하였다. 실제 현장에서 그 성능을 평가하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. DGPS 및 로봇 바퀴에 장착된 엔코더의 정보를 EKF로 융합하여 로봇의 위치를 최적화하는 위치평가 방법을 개발하였으며 성능 평가 결과 DGPS만 이용하는 경우 보다 외부환경 로봇 위치결정에 실제적으로 적용할 수 있을 만큼 위치 오차가 개선됨을 확인하였다. 또한 제안된 정보 신뢰성 평가 방법을 적용함으로써 다양한 DGPS 오차 요인에도 불구하고 일관성 있게 위치평가를 할 수 있음을 확인되었다.

2. DGPS 기반 인간 위치 추적 방법은 장애물이나 지형의 경사에 무관하게 인간의 위치를 추적할 수 있음이 입증되었다. 또한 각 DGPS에 ID를 부여함으로써 여러 로봇과 인간이 동일 장소에서 복수 동시작업이 가능할 것으로 사료된다.

3. 인간의 이동 위치를 연결하여 추종 궤적을 생성하고 인간을 직접 추종하는 방법과 궤적을 추종하는 방법을 개발하였다. 직접 추종 방식은 장애물이 없는 환경에서 가장 효과적으로 인간을 추종할 수 있으며 궤적추종방법을 이용함으로써 장애물을 회피할 수 있음을 확인하였다. 따라서 두 가지 추종방식을 적절히 병행함으로써 옥외의 복잡한 환경에서 효과적으로 인간을 추종할 수 있을 것으로 사료된다.

4. 추종 성능 실험 결과 추종 성능은 인간의 위치오차 및 경로추종 제어 성능에 의존하는 것으로 확인되었다. 따라서 추종 오차를 최소화하기 위해서는 인간의 위치오차를 최소화하는 인간 위치평가 및 추적 제어 성능 향상 연구가 추가적으로 필요하다.

5. 개발된 위치평가 방법과 인간 추종 방법은 향후 무인 휠체어, 안내로봇, 캐디로봇, 농업 및 산업용 작업보조 로봇, 그리고 친구로봇 등과 같은 옥외용 서

비스 로봇에 다양하게 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

V. 참고문헌

- [1] Lim, J. H., 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.
- [2] Lim, J. H., and Kang, C. U., "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.
- [3] J.H. Lim, "A Study on a Localization System for Tour Guide Robots," J. of the KSPE, Vol.29, No.7, pp.762-769, 2012.
- [4] Lim, J. H., and Kang, C. U., "Grid Based Localization of a Mobile Robot using Sonar Sensors", KSME Int. J., Vol. 6, No.3, pp.302-309, 2002.
- [5] Leonard, J. J, and Durrant-White , H. F., "Direct Sonar Sensing for Mobile Robot Navigation," Kluwer Academic Publisher, PP. 10-15, 1992.
- [6] 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.
- [7] 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
- [8] Cox, D. B. "Integration of GPS with Inertial Navigation Systems," Journal of the Institute of Navigation, vol. 1, pp. 144-153, 1978.
- [9] Gelb, A. C., "Applied Optimal Estimation," The MIT Press, pp.123-156, 1973.
- [10] Bar-shalom, "Tracking and Data Association, "Academic Press, pp.86-120, 1988
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Liu, B., Admas, M., and Ibanez-Guzman, J., "Multi-aided Inertial Navigation for Ground Vehicles in Outdoor Uneven Environment," Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Barcelona, Spain, pp. 4703-4708, 2005.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] Hirai, N. and Mizoguchi, H., “Visual Tracking of Human Back and Shoulder for Person Following Robot,” Proc. IEEE/ASME Int. Conf. Advanced Intelligent Mechatronics, pp.527-532, 2003.
- [23] Yoshimi, T., Nishiyama, M. and Mizoguchi, H., “ Development of a Person Following Robot with Vision Based Target Detection,” Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems, pp.5286-5291, 2006.
- [24] Eriksson, J., Mataric, M. J. and Winstein, C. J., “Hands-off Assistive Robotics for Post-Stroke Arm Rehabilitation,” Proc. IEEE Int. Conf. Rehabilitation Robotics, pp.21-24, 2005.
- [25] Shinichi O. and Shigeyuki S.,”Human Tracking with a Mobile Robot using a Laser Range-Finder”, Journal of RSJ, Vol.24, No.5, pp.605-613, 2006.
- [26] Kazuyuki M., Yudai O. and Yuichi N., “Control of Human-Following Robot Based on Cooperative Positioning with an Intelligent Space”, IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems, Vol.131, No.5, pp.1050-1058, 2011.

감사의 글

대학원에 입학한지 벌써 2년이란 시간이 흘러 제 연구의 내용을 이렇게 정리하고 나서 보니 2년이라는 시간이 저에게 정말 빠르기만 합니다. 그동안 이곳 지능로봇실험실과 메카트로닉스공학과에서 좋은 인연을 만나 함께 지내며 즐거웠던 기억들과 인생의 큰 가르침을 얻을 수 있었던 시간들을 추억으로 간직하기에는 너무나 아쉽게만 느껴집니다. 지나온 시간들을 작은 결실로써 마무리하게 되는 지금, 항상 부족했던 저에게 많은 가르침과 뜻깊은 시간을 보내게 해주셨던 소중한 분들에게 감사의 마음을 전하고자 합니다.

대학원 생활을 해오며 많은 가르침을 주시고 격려해주신 임종환 교수님께 먼저 진심어린 감사의 마음을 전하고 싶습니다. 그리고 제가 학과 조교를 같이 진행하면서도 많은 격려를 해주신 학과 교수님들과 힘들 때면 옆에서 위로를 해준 대학원 선·후배, 동기들에게 진심으로 감사의 뜻을 전합니다. 또한 지금까지 저에게 많은 가르침을 주시고 옆에서 격려해주신 양경부박사님께 깊은 감사의 마음을 전합니다.

지나온 시간동안 힘들고 지칠 때마다 항상 옆에서 힘이 되어주고 아낌없이 응원해준 소중한 친구들 규준, 영수, 효태에게 진심으로 고마움의 뜻을 전합니다. 학부생일 때부터 오늘까지 동고동락했던 메카트로닉스공학과 의 현진이형, 보미누나, 형규, 민건을 비롯하여 나의 동생들인 정안, 부현, 정환, 유진, 지효에게도 고마움의 뜻을 전합니다. 또한 옆에서 많은 격려를 해준 정훈이형, 현범이형, 수완이형과 어려운 상황에서도 매일같이 실험을 도와 준 동생 진수에게 고맙다는 말을 하고 싶습니다.

끝으로 항상 누구보다 저를 먼저 위해주고 아껴주는 누나에게 깊은 감사의 마음을 전하고, 제가 오늘에 있기까지 끝없는 사랑으로 보살펴주시고 항상 지켜봐주신 아버지, 어머니께 진심으로 존경하고 사랑한다는 말과 함께 머리 숙여 감사의 마음을 전합니다.

2016년 12월 조 인 호