



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](#)

2010년 8월  
박사학위논문

수질환경 모니터링을 위한 자율  
주행 로봇의 위치경로 탐색과  
자세제어에 관한 연구

조선대학교 대학원

컴퓨터공학과

김 국 세

수질환경 모니터링을 위한 자율  
주행 로봇의 위치경로 탐색과  
자세제어에 관한 연구

A Study on Posture Control and Location Route of  
Autonomous Navigation Robot for Monitoring  
Water Quality Environment

2010년 8월 25일

조선대학교 대학원

컴퓨터공학과

김 국 세

수질환경 모니터링을 위한 자율  
주행 로봇의 위치경로 탐색과  
자세제어에 관한 연구

지도교수 이 준

이 논문을 공학 박사학위신청 논문으로 제출함

2010년 4월

조선대학교 대학원

컴퓨터공학과

김 국 세

# 김국세의 박사학위 논문을 인준함

위원장	조선대학교 교수	조범준 
위원	조선대학교 교수	배용근 
위원	조선대학교 교수	재채영 
위원	조선대학교 교수	김판구 
위원	조선대학교 교수	이완 

2010년 6월

조선대학교 대학원

# 목 차

I. 서 론 .....	1
1. 연구배경 .....	1
2. 연구개발의 내용 및 구성 .....	3
II. 시스템 개요 및 자세제어 알고리즘 .....	5
1. 국내·외 관련 연구 동향 .....	5
1) 장애물 회피 및 주행 .....	6
2) 지도 생성 .....	8
3) 자기 위치 추정 .....	9
4) 데이터 융합 알고리즘 .....	9
2. 환경 모니터링 시스템 .....	11
1) 환경 모니터링을 위한 컨트롤 시스템 .....	14
2) 센서 모니터링을 위한 A/D 컨버터 구성 .....	16
3) 수상 로봇의 모델링 .....	23
3. 자세제어를 위한 쿼드로터 원리 및 모델링 .....	30
1) 쿼드로터 원리 .....	30
2) 쿼드로터 수학적 모델링 .....	34
3) 수상자율 로봇에서 쿼드로터 모델링 .....	42

**Ⅲ. EVFF 알고리즘 및 항로 유지와 충돌 회피를 위한 퍼지 로직** ..... 47

- 1. VFF(Virtual Force Field) 알고리즘** ..... 47
  - 1) 포텐셜 필드 ..... 47
  - 2) 가상역장(Virtual Force Field) ..... 53
- 2. EVFF(Expansion Virtual Force Field) 알고리즘** ..... 57
- 3. 항로 유지와 충돌 회피를 위한 퍼지 로직** ..... 63
  - 1) 퍼지 논리 제어의 개념 ..... 63
  - 2) 퍼지제어 규칙과 추론 방법 ..... 64
  - 3) 퍼지수 및 삼각 퍼지수 ..... 66
  - 4) 비퍼지화기 ..... 67
  - 5) 입출력 변수의 정의 ..... 68
  - 6) 퍼지 소속 함수 및 제어 규칙 ..... 69

**Ⅳ. 실험 및 결과 고찰** ..... 73

- 1. 이동로봇 제어 시스템 구성** ..... 73
  - 1) 이동로봇의 전체 구조 ..... 73
  - 2) 이동로봇 시스템 구성 ..... 77
- 2. 이동로봇의 실험 및 결과 분석** ..... 79
  - 1) 쿼드콥터 자세제어 알고리즘을 이용한 추력 실험 분석 ..... 79
  - 2) 개선된 EVFF(Expansion Virtual Force Field) 알고리즘을 이용한 장애물 회피 및 항로 유지를 위한 지도 작성 실험 및 분석 ..... 81

3) EVFF를 이용한 수상 이동로봇의 자유공간에서의 자율주행 실험 및 분석 .....	85
3. 환경 센서 모니터링 실험 및 결과 분석 .....	87
4. 실제 수상 환경에서의 실험 및 분석 .....	91
V. 결론 .....	94
참고 문헌 .....	96

# 그림 목 차

그림 1. 산업용 자율이동 로봇 .....	5
그림 2. 서비스 로봇 및 특수목적 자율이동 로봇 .....	6
그림 3. 다중 센서를 포함하고 있는 Swiss K-TEAM사 Khepera-III .....	7
그림 4. 수상로봇 시스템 구상도 .....	11
그림 5. 로봇 시스템 개념도 .....	13
그림 6. ATmega128 블록 다이어그램 .....	15
그림 7. A/D 변환기 블록도 .....	16
그림 8. A/D 컨버터의 분해능 .....	18
그림 9. A/D 컨버터의 일반적 구성 .....	19
그림 10. A/D block schematic .....	21
그림 11. 수질 환경센서 모니터링을 위한 A/D 회로도 구성 .....	21
그림 12. 수질 환경센서 모니터링을 위한 센서 모니터링 시스템 .....	22
그림 13. 몸체 고정 그리고 지구 고정좌표 시스템 .....	25
그림 14. 호버링시의 쿼드로터 개념도 .....	31
그림 15. 추력 명령에 따른 고도상승 .....	32
그림 16. Roll 운동 .....	32
그림 17. Pitch 운동 .....	33
그림 18. Yaw 운동 .....	34
그림 19. Dragonfly의 도식화 .....	37
그림 20. 추력 테스트 Test-bed .....	42
그림 21. DC motor 회로 .....	43
그림 22. DC 모터 제어 PWM 및 디렉션 신호 파형 .....	44
그림 23. 물체에 의한 척력 포텐셜 롤오버 그리고 사이드슬립 제약 .....	48

그림 24. 포텐셜 필드 방법 개념도 .....	49
그림 25. 균일한 영역 .....	50
그림 26. 수직 영역 .....	50
그림 27. 인력 영역 .....	51
그림 28. 반발 영역 .....	52
그림 29. VFF 기본 개념도 .....	54
그림 30. 단순화한 VFF의 개념 .....	57
그림 31. VFF 충돌회피 알고리즘 순서도 .....	58
그림 32. 자유공간에 대한 가상 인력 기본 개념 .....	59
그림 33. EVFF 충돌회피 알고리즘 순서도 .....	61
그림 34. 수상 로봇의 제안된 제어 방법 .....	62
그림 35. 퍼지 제어기의 구조 .....	63
그림 36. 퍼지변수의 소속 함수 .....	65
그림 37. 삼각 퍼지수 .....	66
그림 38. 거리에 대한 소속 함수 .....	70
그림 39. 오차 각에 대한 소속 함수 .....	70
그림 40. 속도에 대한 출력 소속 함수 .....	70
그림 41. 환경 모니터링을 위한 수상 자율주행 로봇의 전면부 .....	73
그림 42. 수상 자율주행 로봇1 .....	74
그림 43. 수상 자율주행 로봇2 .....	74
그림 44. 로봇의 각종 센서 및 통신 시스템 배치도 .....	76
그림 45. 환경 센서 모듈 .....	76
그림 46. 시스템 구현 전체 구성도 .....	77
그림 47. 자세제어 DC motor 추력을 위한 PWM 제어 .....	79
그림 48. 기울기 방위각 $0^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 에 따른 모터 추력 .....	80

그림 49. 기울기 방위각 $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 에 따른 모터 추력 .....	80
그림 50. 기울기 방위각 $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 에 따른 모터 추력 .....	80
그림 51. 실내 실험 환경 .....	81
그림 52. EVFF를 이용한 Virtual Force에서 Certainty value1 .....	82
그림 53. EVFF를 이용한 Virtual Force에서 Certainty value2 .....	82
그림 54. EVFF를 이용한 Virtual Force에서 Certainty value3 .....	82
그림 55. EVFF를 이용한 충돌회피 및 자율주행1 .....	83
그림 56. EVFF를 이용한 충돌회피 및 자율주행2 .....	83
그림 57. VFF를 이용한 장애물 회피와 자율주행 .....	84
그림 58. VFF를 이용한 자유공간에서의 장애물 회피 및 자율주행 실험 .....	85
그림 59. 자유공간에서의 자율주행 실험 및 분석 .....	86
그림 60. USN ZigBee TI CC2431 module .....	87
그림 61. USN Sensor Module .....	87
그림 62. SHT7x .....	88
그림 63. SMBA-1000 .....	88
그림 64. SS1118 .....	88
그림 65. CHFS41-P1XX .....	88
그림 66. USN 환경센서 샘플링 신호 .....	89
그림 67. 로봇시스템 환경 센서 모니터링 구현 .....	89
그림 68. 로봇시스템 환경 센서 모니터링 .....	90
그림 69. 실제 실험 환경 .....	91
그림 70. 로봇의 시작 및 이동 1 .....	92
그림 71. 로봇의 이동 2 .....	92
그림 72. 로봇의 이동 3 .....	92
그림 73. 로봇의 목표점 도달 및 이동 4 .....	92

그림 74. 로봇의 이동 경로 ..... 93

그림 75. GPS를 이용한 로봇의 이동경로 및 실시간 환경 센서 데이터 전송 ..... 93

# 표 목 차

표 1. 로봇 특징 .....	12
표 2. A/D 변환기 진리표 .....	17
표 3. 수상로봇 6개의 운동 좌표 정의 .....	26
표 4. 자세제어 퍼지 소속 함수 .....	68
표 5. 항로 유지 및 충돌 회피 퍼지 소속 함수 .....	69
표 6. 자세 제어 퍼지 제어 규칙 .....	71
표 7. 항로 유지 및 충돌 회피 퍼지 제어 규칙 .....	72
표 8. 수상 자율이동 로봇의 규격 .....	75

# A B S T R A C T

## A Study on Posture Control and Location Route of Autonomous Navigation Robot for Water Quality Environment Monitoring

Kuk-Se Kim

Advisor : Prof. Joon Lee, Ph. D.

Department of Computer Engineering

Graduate School of Chosun University

A key point of mobile robot is the technology to build a map of the environment and to localize itself using a map. Moreover sensor fusion technique is essential to reduce error rate for environment mapping information. Using these technologies, there many robots (housing robot, security robot, industrial robot) were developed by companies and research centers. Nowadays people are worried about disaster by environmental pollution. Therefore robot that has autonomous driving and monitoring environment to check pollution in real time has being important issue. Recently, according to improving remote control and communication techniques, mobile robots are efficiently used to work on the water. One of these robots, autonomous driving on the water with posture control system robot gathers information and transmits data to destination point as it moves across the river, water-storage and sea. This robot has mobility, environment acceptance, communication tool, information gathering process, saving energy technologies. As view more detail

these technologies, robot used autonomous navigation, perception, self-localization, obstacle avoiding, posture control, efficient battery, and artificial intelligent process. All of these technologies are used in making monitoring robot which works on water environment.

In this study, I suggest quad-rotor algorithm for robot on the water environment perception. And using extended virtual force field algorithm for autonomous navigation, obstacle avoiding. If we assume there are same polar with obstacle and robot, repulsive force( $\vec{F}_r$ ) are engaged between robot and obstacle then absorption force( $\vec{F}_a$ ) are engaged between robot and target point. Robot safely reaches the target point with two forces. Also I made parameters with fuzzy to represent crush avoiding saturations for fixed or non-fixed obstacles while mobile robot has autonomous driving on the water.

# I. 서 론

## 1. 연구배경

로봇이란 말은 체코어의 ‘일하다(robota)’는 뜻으로 1920년 체코슬로바키아의 작가 K.차페크가 희곡 “로섬의 인조인간 : Rossum’s Universal Robots”을 발표한 이래 관심을 가지게 되었다. 인조인간(人造人間)이라고도 하는 본래 사람의 모습을 한 인형 내부에 기계장치를 조립해 넣고, 손발과 그 밖의 부분을 본래의 사람과 마찬가지로 동작하는 자동인형을 가리켰다. 인조인간을 만들려는 시도는 고대부터 있었으며, 그리스·로마 시대 및 기원전에는 종교의식의 한 도구로 만들어졌다. 중세 때에는 건물의 문을 열거나 악기를 연주하는 자동인형을 만들었다. 이들 자동인형은 장식용이었거나 또 사람들을 놀라게 하거나 또는 신(神)과 결부시켜 지배자의 권위를 과시하는데 이용되었다.

최근에 와서는 전자관(電子管)·광전관(光電管)·전화·테이프리코더 등을 조합하여 사람들의 질문에 대답하거나, 손발을 교묘히 움직여 걸거나, 무선에 의한 원격조정에 의하여 자유자재로 움직일 수 있는 인조인간이 제작되었다. 그러나 이렇게 사람과 같은 모습을 가진 것은 그 동작이 아무리 정교하게 만들어졌어도 동작에 한계가 있고 그다지 실용적이지 못하였다. 그리하여 실용 면에서 사람의 모습을 닮지는 않았지만 인간의 동작과 같은 동작을 하는 기계도 로봇이라고 하게 되고, 여러 방면에서 로봇을 응용하려는 경향이 강해졌다. 원래 기계는 생산수단으로 산업구조에 배치되었는데, 사회 환경의 다극화에 대응하여 로봇을 여러 가지 이상 환경(異常環境)에 적응하는 기계로 등장시키게 되었다. 또한 자동제어기술이나 원격조정기술의 진보에 따라 우주나 해저, 고온이나 저온 등의 위험한 환경에서의 작업 또는 아주 단조로운 작업 등은 모두 인간에게는 부적합한 것인데, 현재는 이런 이상 환경에서 로봇의 응용분야가 확대되고 있다.

기상 이변이나 환경오염에 대한 심각성이 커져가는 오늘날 강이나 댐과 같은 저수조의 오염은 인간의 삶을 파멸로 가져올 수 있다. 강이나 하천 저수조 같은 곳에서 자율적으로 움직이면서 기상 데이터 및 수질 오염의 척도를 실시간으로 조사해서 모니터링 하여 전송할 수 있는 로봇의 연구가 필요하게 되었다. 최근에는 작업의 요구 수심이 깊어지고 원격제어 및 통신 기술이 눈부시게 발전함에 따라 수상 작업 기술이 다양하게 이루어지고 있다[1, 2].

수상·중 정보 수집 로봇은 강이나, 하천, 저수조 그리고 해상의 다양한 환경에 적응하여 사용자가 원하는 데이터를 수집하여 정보를 전송 제공 하는 것이다. 이러한 역할을 하기 위한 로봇을 만들기 위해 필요한 기술은 목표지점으로 이동하는 이동 기술, 환경 적응 기술, 사용자와 통신기술, 정보채취기술, 에너지 절감 기술 등이 모든 것을 현 상황에 맞게 적용하고 판단하는 인공지능적인 기술이 필요하다.

이러한 기술을 다시 세부적으로 보면 자율주행, 내비게이션, 위치인식, 장애물회피, 자세제어, 통신, 저 전력 배터리 사용, 센서데이터 수집 및 모니터링 그리고 환경에 대한 환경 적응적 지능이 필요하다. 여러 기술들이 복합적으로 작용하여 기술 복합체로서 수상용 환경 모니터링 제어 로봇이 만들어진다. 통합로봇은 강이나 하천, 해상에서 자율적으로 위치를 인식하여 미션 로컬지역을 정하고 그에 맞게 환경에 적응하면서 환경, 수질 데이터를 수집 모니터링 하여 사용자에게 알려주는 역할을 수행 하게 된다.

기술의 복합체인 수상용 로봇은 각 요소 기술들을 제어하고 알고리즘을 수행하는 각 컨트롤러와 메인 컨트롤로, 거리측정 센서와 자세제어를 위한 자이로센서, 환경 모니터링을 위한 환경 센서, USN 및 무선 통신 서비스 등 다양한 하드웨어로 구성되어 있다. 이렇듯 서비스 로봇은 상기 기술한 소프트웨어와 하드웨어가 결합한 기술 복합체로서 각종 응용기술이 접목되어야 하는 최첨단 응용 기술이다.

## 2. 연구개발의 내용 및 구성

본 연구에서는 수질환경 모니터링을 위해 자율 주행 로봇 위치경로 탐색과 자세 제어 그리고 환경 센서 모니터링을 할 수 있도록 중점을 둔다. 이를 위해 수상용 이동 로봇을 실제 제작하고 정확한 위치 탐색을 위해 GPS를 사용하여 위치 데이터를 추정하고 쿼드로터 방법을 이용하여 4개의 럼블러급 프로펠러를 사용하여 자세제어를 한다. 또한 VFF 알고리즘의 자유공간에서의 문제점을 해결한 EVFF 알고리즘을 제안하여 자율이동로봇의 경로계획을 세워 자율이동하고 작업 공간 내에서 로봇 머니플레이터를 나타내는 포인터를 충돌 없이 목적지까지 이동시키기 위해 퍼지로그를 사용한다. 마지막으로 자율 주행에 필요한 태스크들을 소프트웨어적으로 구성 시뮬레이션하고 실제 모델을 구현하여 실험을 통해 그 성능을 평가한다.

본 연구에서 설계한 이동 로봇은 600MHz급의 PXA270 XScale ARM Processor를 사용하여 저 전력 고성능을 특징으로 오픈 소스 기반의 Linux kernel 2.6.xx 기반으로 하였으며, 센서 모니터링을 위해서는 AVR ATmega128 Processor 및 TI CC2431를 사용하여 ZigBee 및 A/D 시스템을 구성하고 GYRO, 초음파, 적외선 센서를 통해 자세제어 시스템을 구성하였다. 이동 로봇의 미션은 다음과 같다. 맵 상의 시작점과 목표점이 GPS Data를 통해 주어지고 맵 상에서 이동경로를 추정하고 자율주행이 이뤄지고 맵 상에 없는 장애물이나 파도 돌발 상황에 맞게 장애물, 자세제어를 하게 되고 이때 로봇은 실시간으로 계산되어 로봇은 목표점까지 안전하고 정확하게 자율 주행 하게 된다. 그리고 이동되는 로봇은 실시간 환경 센서로부터의 데이터를 해당 컴퓨터에 데이터를 WiFi 그리고 ZigBee를 통해 전송하게 된다.

본 논문은 총 5장으로 구성되어 있다. 제 1장에서는 논문 개요 및 연구배경과 연구개발의 내용 및 구성, 제 2장에서는 관련연구 및 논문에서 사용된 시스템 개요 및 쿼드로터를 이용한 자세제어 알고리즘에 대해서 논하고, 제 3장에서는 자율주행

및 충돌 회피를 위해 VFF 알고리즘과 EVFF 알고리즘 및 항로 유지와 충돌 회피를 위한 퍼지 로직으로 구성되어 있고, 제 4장에서는 실제 수상용 로봇을 제작하여 하천과 수질 환경에서 실험하여 이동로봇의 실험 및 결과 분석과 환경 센서 모니터링과 분석을 하였다. 마지막으로 5장에서는 결론 및 향후 연구 방향으로 구성되어 있다.

## Ⅱ. 시스템 개요 및 자세제어 알고리즘

### 1. 국내·외 관련 연구 동향

이동 로봇이 주행하고 주변 환경을 인식하며 자기 위치를 추정하는 것은 매우 기본적인데도 중요한 기술들이다. 또한 단일 센서만 사용할 경우 주행에 필요한 정보나 주변 환경정보에 대해서 부정확한 계산결과를 낼 수 있어서 여러 가지 다른 종류의 센서를 같이 사용하게 되는데 이때는 센서 융합기술도 필요하게 된다. 산업현장 뿐만 아니라 가정에서도 사람을 대신하여 작업을 해주는 청소로봇, 경비로봇 등 많은 서비스로봇이 개발되고 있고, 연구소와 기업 등에서 연구 개발이 활발히 이루어지고 있다.



그림 2. 산업용 자율이동 로봇



그림 3. 서비스 로봇 및 특수목적 자율이동 로봇

## 1) 장애물 회피 및 주행(Obstacle avoidance and navigation)

이동 로봇의 활동 영역에는 장애물이 존재하며, 이동 로봇이 임무를 완수하기 위하여 장애물 회피는 불가피하다. 이동 로봇의 장애물 회피 경로계획에는 크게 두 영역으로 나누며, 전역 경로계획과 국지적 경로계획이 있다. 전역 경로계획 문제는 환경에 대한 정보가 주어진 경우에 최단거리 경로 등 오프라인으로 최적 해를 구하는 문제이고 국지적 경로계획 문제는 미지의 환경에서 센서로 장애물을 인식하여 온라인으로 장애물 회피 경로를 구하는 문제이다. 장애물 회피 경로 계획에 관한 연구는 Visuality graph 방법, Voronoi diagram 방법, Cell decomposition 방법, Potential field 방법 등 매우 다양하다. 초음파 센서를 이용한 로봇의 장애물 회피 경로계획은 국지적 경로계획 문제에 해당하며 대부분 Potential field 방법을 기본틀로 하고 있다.



그림 4. 다중 센서를 포함하고 있는 Swiss K-TEAM사  
Khepera-III

벽 따르기는 이동로봇의 주행과 장애물 회피에 있어서 중요하면서도 가장 기본적인 방법이다. 벽 따르기는 로봇이 벽면과 일정한 거리를 유지하면서 이동하는 것이다[3]. 초음파 센서를 원형으로 배치하고 센서 배열의 수신 정보로부터 벽의 꺾인 정도를 판단하여 단순한 벽뿐만 아니라 꺾여 있는 벽면도 따라갈 수 있도록 한 경우도 있으나 이 경우에는 우측에 있는 장애물을 고려하지 않을 경우 좁은 통로 등은 지나갈 수 없다는 단점이 있다[4]. 우측에 있는 장애물과 초음파 센서 값의 부정확성을 고려하여 로봇의 주위환경을 신경망회로의 역 전파 학습기법을 사용하여 인식하는 알고리즘이 연구된 바도 있다[5].

## 2) 지도 생성(Map building)

초음파 센서를 이용한 지도 작성방법으로는 크게 격자지도 방법과 모델기반 지도 방법이 있다. 격자지도 방법은 공간을 일정한 크기의 격자로 나누고 각 셀이 장애물 영역인지에 대한 확신도 값을 부여하는 Certainty grid 방법을 기본으로 한다 [6, 7, 8].

대표적인 것으로는 히스토그램 격자 방법이 있다. 히스토그램 격자 방법은 실시간 처리를 위하여 간략화 된 방법을 사용하는데 초음파 센서에 의해 장애물이 검출된 경우 센서의 중심 축 상에 있는 한 셀의 확신도 값만 증가시킨다. 그리고 그 셀에 이르는 선상에는 장애물이 없다는 것을 의미함으로 확신도 값을 감소시킨다. 추가적인 지도상에 센서 오차 등에 의하여 최소 확신도 값을 갖는 셀들이 존재하게 되는데 이를 고르게 해주기 위하여 지역필터와 유사한 GRO(Growth Rate Operator)를 사용한다.

모델기반 지도는 공간을 평면 코너 모서리 등의 모델로 표현해서 그것을 기반으로 지도를 구성하는 방법이다[9]. 이 경우는 대부분 한 벽면이나 코너에 대한 여러 번의 측정값을 이용하여 평면, 코너, 모서리를 구분한다. 한 평면의 경우라도 측정된 여러 선분 조각들이 직선으로 연결되지 않는 방향으로 놓이게 되는데 이들 선분 조각들을 평면을 나타내는 하나의 성분으로 정합하는 방법을 사용한다[10, 11].

또 다른 방법으로는 작업영역의 부분 부분에서 얻는 초음파센서 정보를 신경회로망을 이용하여 분류하고 각 상황에 따른 이른바 상황지도를 만들어 작업영역의 비장애물 지역을 표현하는 방법도 있다[12]. 최근에는 지역 히스토그램 격자지도로부터 직선성분을 추출하여 직선 선분들로 구성된 모델기반 지도를 생성하는 격자지도 방법과 모델기반 지도방법을 혼합한 직선성분 지도 생성방법도 발표된 적이 있다[13].

### 3) 자기 위치 추정(Localization)

로봇이 자신의 위치를 파악하는 것은 장애물 회피와 경로 계획에 있어서 매우 중요한 문제로 연구되고 있다. 위치추정은 크게 상대위치 추정과 절대위치추정으로 나뉜다. 상대위치 추정은 이동로봇의 운동 즉, 이동량, 속도, 가속도만을 이용하여 로봇의 위치를 알아내는 것으로 엔코더, 타코메터, 가속도계, 자이로스코프 등의 로봇 내부 센서의 정보만을 사용하는 방법이다. 하지만 상대위치추정은 센서의 오차, 외란 등에 의해 오차가 누적된다는 단점이 있다. 그래서 주기적으로 절대 위치추정을 하여 위치를 보정할 필요가 있다. 초음파 센서를 이용한 절대위치추정방법으로는 지도 매칭법이 있다. 지도 매칭법이란 센서를 이용하여 만든 지역지도와 이미 알고 있는 전역지도를 서로 비교함으로써 로봇이 전역지도의 어느 부분에 있는지 알아내는 절대 위치추정 방법이다. 여기서 지역지도를 만들 때 선분 조각으로 만드는 방법, 벽, 코너, 모서리로 만드는 방법, 또는 부분적인 지역의 특징 랜드 마크를 이용하는 방법 등이 있다[14, 15, 16]. 한편 자기 위치인식은 지도생성과 불가분의 관계라 할 수 있다. 즉 로봇이 이동하면서 지도 생성을 할 때 자기위치가 정확히 인식되어야 지도가 정확히 만들어지고 정확한 지도를 생성해야 정확한 자기위치를 추정할 수 있는 것이다. 따라서 이 두 가지를 동시에 하는 경우에 대한 연구도 진행 중이며 이 경우 로봇의 불확실한 위치를 엔코더 센서와 초음파 센서정보로부터 확장 칼만 필터를 이용하여 추정하는 것이 주유를 이루고 있다[17, 18].

### 4) 데이터 융합 알고리즘(Sensor fusion)

센서의 종류에 따라 각각의 장·단점을 가진다. 따라서 보다 정확한 환경인식을 위하여 초음파 센서의 단점을 보완할 수 있는 다른 센서, 즉 비전센서나 적외선 센서 등을 함께 사용하고 이들 센서로부터의 정보를 융합하는 방법이 연구되어지고

있다. 센서융합과 센서조합은 구분되어지고 있다. 즉, 센서 융합의 경우는 동일한 측정량에 대하여 특성이 다른 두 개 이상의 센서로부터의 정보를 가공하여 보다 정확한 측정값을 구하는 것이고, 센서조합의 경우는 특성이 다른 두 개 이상의 센서를 상호보완적으로 상황에 따라 조합한 하나의 센서만을 사용하는 경우를 말한다.

초음파 센서와 다른 센서와의 센서조합에 관한 연구들을 살펴보면 다음과 같이 비전의 경우 하나의 센서를 가지고는 거리의 정보를 전혀 얻을 수 없다는 단점이 있어 두 개 비전 센서를 보통 사용하지만 그렇게 되면 처리해야 할 데이터양이 증가하여 처리하는 시간이 많이 소요된다는 단점이 있다. 그래서 거리정보를 빠르게 간단하게 얻을 수 있는 초음파 센서를 하나의 비전 센서와 같이 사용하는 경우가 있다[19].

비전 센서를 주 센서로 사용하여 장애물 인식을 하는 경우에도 정지 장애물인식은 상대적으로 정도가 좋은 비전 센서를 사용하나 움직이는 장애물의 인식을 위해 처리속도가 빠른 초음파 센서를 같이 사용하기도 한다[20]. 통상적인 초음파 센서의 측정 범위가 약 0.3m ~ 10m인 반면 적외선 센서의 경우에는 3m 이하의 범위에서 높은 정확도를 가진다. 이 두 센서 간에 측정 범위가 다른 것을 이용하여 각각의 센서가 정확히 측정 할 수 없는 범위의 주변 환경에 대한 보다 정확한 정보를 획득 할 수도 있다[21, 22].

센서 융합은 센서 정보의 불확실성에 대한 표현, 주변 환경에 대한 모델, 그리고 융합기법에 따라 다양하게 구별될 수 있다. 이중 융합기법에 관해 살펴보면, 융합기법에는 가장 간단하고 직관적인 방법인 가중평균기법 MLE(Maximum Likelihood Estimation), 베이시안 기법, 칼만 필터기법, 직관적 규칙기법 및 퍼지 기법 등이 있다[23, 24, 25, 26].

## 2. 환경 모니터링 시스템

국내의 환경 모니터링 시스템은 턱없이 부족한 실정이다. 본 연구 논문에서는 수상 모니터링에 적합하게 디자인하고 제작하였다. 그림 4는 본 연구에서 사용한 수상 자율 주행 로봇으로 일반적인 고정형 로봇이나 계측 로봇과는 여러 면에서 다른 모습을 보여주고 있고 수상 로봇에 맞게 수중 프로펠러 형식보다는 수상 프로펠러를 사용하였고 메인바디에 환경 센서를 장착하여 수질 환경 모니터링을 하였다. 메인 컨트롤 시스템은 임베디드 리눅스를 탑재한 ARM11 시스템을 사용하였고, 센서 및 모터 컨트롤을 위해 AVR ATmega128을 사용하였다. 그리고 통신을 위해 GPS, Wireless, ZigBee 통신 시스템을 사용하여 GateWay 시스템과 통신하였다.

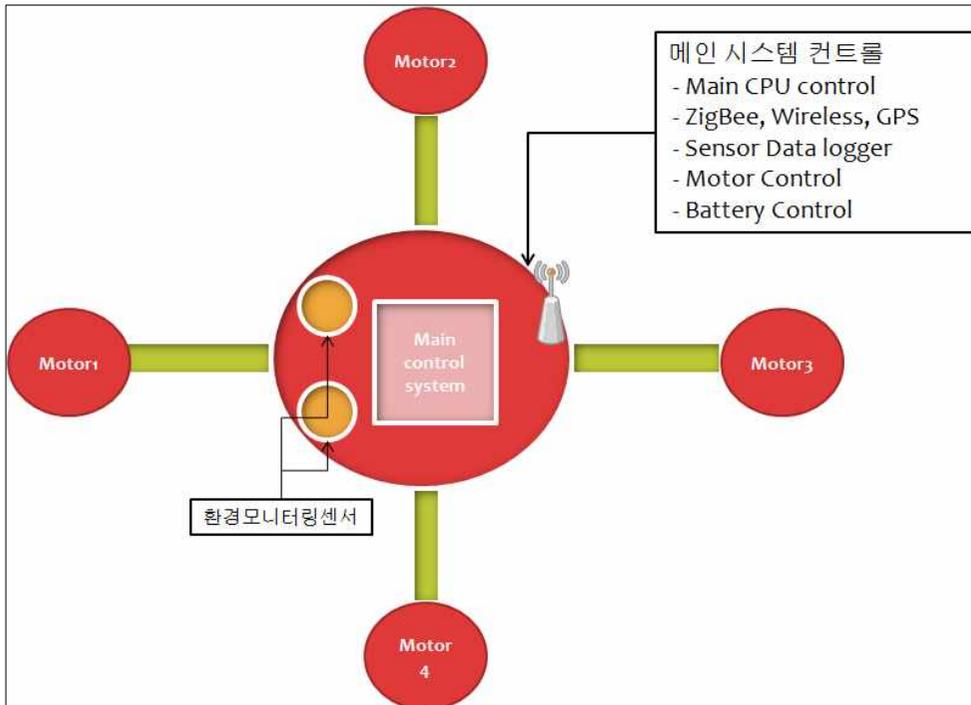


그림 5. 수상로봇 시스템 구상도

표 1은 본 연구에서 사용된 로봇의 사양을 나타내고 있다. 전체적 크기는 800mm X 800mm X 300mm 의 외형 크기를 가지고 있고, ARM11, ATmega128 processor, GPS, Wireless, ZigBee 통신으로 이루어져 있으며, Atmospheric pressure, O2, Co2, Ph, Do, 온도 그리고 습도를 측정할 수 있도록 디자인 되어 있다.

표 1. 로봇 특징

Division	Specification	
Dimension and weight	Length(mm)	800
	Height(mm)	800
	Width(mm)	300
	Dry Weight(kg)	5
Hardware	Processor1	ARM11 System
	Processor2	ATmega128 System
	3-Acceleration sensor	AM-3AXIS-P
Sensor	Atmospheric pressure	SMBA-1000
	O2	SS1118
	Co2	GHFS41-P1XX
	Ph	EGA133
	DO	YK-2001-DO
	Temperature	SHT7xx / PT100
	Humidity	SHT7xx
Motor	DC Motor	KTX-OPEN GEAR MOTOR
	Step Motor	NK243-01AT
Communication	GPS	GPS-PA2
	ZigBee	CC2431 TI
	Wireless	802.11b,g support

본 연구 논문에서 시스템은 크게 3가지로 나눌 수 있다. 첫 번째는 수상 자율 주행을 위한 자율 주행 로봇 시스템, 하천, 강이나 저수조 수질 모니터링을 위한 모니터링 시스템 그리고 환경 센서로 센싱된 데이터 전송 및 자율 주행을 위한 GPS 및 Wireless 데이터 송수신 시스템으로 나눌 수 있다. 그림 5에서는 메인 컨트롤 시스템과 센서 컨트롤 시스템 그리고 통신 시스템 개념도를 보여주고 있다.

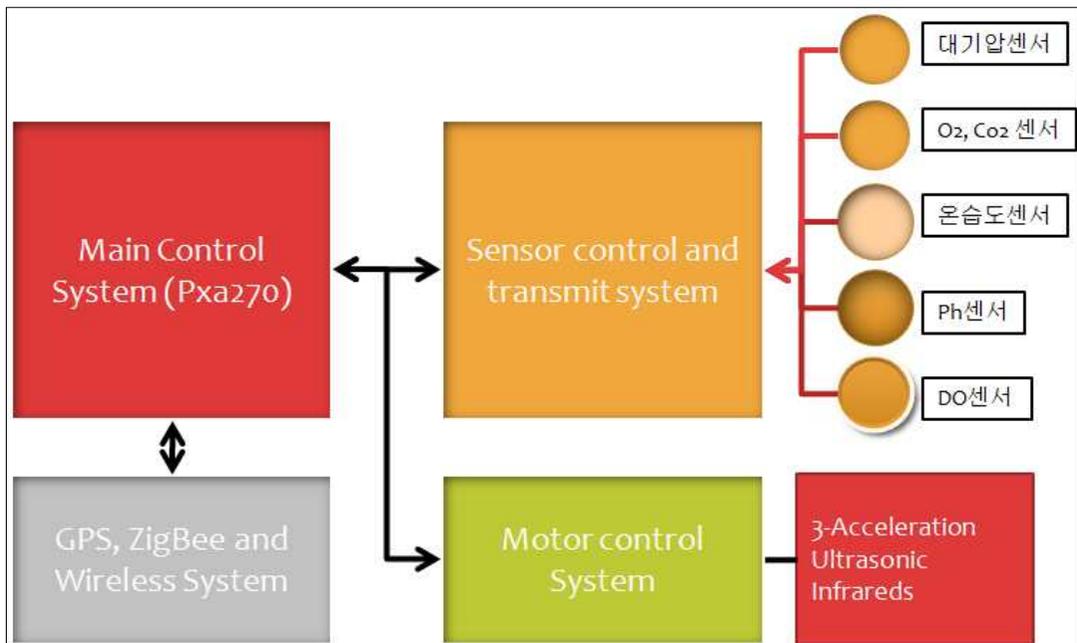


그림 6. 로봇 시스템 개념도

## 1) 환경 모니터링을 위한 컨트롤 시스템

환경 모니터링을 위한 컨트롤 시스템은 AVR ATmega128 시스템을 사용하였다. AVR은 Atmel사에서 만든 RISC 타입의 고성능 저 소비전력 형의 고속 8비트 마이크로 컨트롤러로 32개의 8비트 범용작업 레지스터를 가지고 있다. 개선된 RISC 구조로 대부분 단일 클럭에서 실행되는 133개의 명령어가 있으며, 8bit로 구성된 32개의 범용 작업 레지스터가 있고, 16MHz에서 16MIPS의 처리를 하며, 2 사이클에서 실행되는 곱셈장치가 있다. 프로그램 메모리와 데이터 메모리로 구분되어 있고, 10,000번의 쓰기/지우기를 할 수 있는 ISP가 지원되는 128KByte의 플래시 메모리가 있으며, 100,000번의 쓰기/지우기가 가능한 4K 바이트의 EEPROM과 4K바이트 내부 SRAM이 내장되어 있으며 JTAG 인터페이스를 통해 On Chip Debug를 지원하며 Flash, EEPROM, 퓨즈, Lock 비트를 설정할 수 있다. 그리고 내장 입출력 장치로는 별도로 동작하는 프리스케일러와 출력 비교 장치로 구성된 2개의 8비트 타이머/카운터가 있고, 프리스케일러, 출력 비교 장치와 입력 캡처로 구성된 2개의 16비트 타이머/카운터가 있으며, 외부 오실레이터에 의한 Real Time Counter가 내장되어 있다. 8개의 PWM 채널이 있으며, 8채널의 10비트 ADC가 있다. Two-Wired Interface 방식을 지원하며, USART와 SPI등의 모듈이 내장되어 있다. 그리고 별도의 오실레이터로 이루어진 Watchdog Timer와 Analog Comparator, 53개의 범용 입출력 포트 등이 내장 되어 있다. 그림 6은 ATmega128의 블록 다이어그램을 보여 주고 있다.

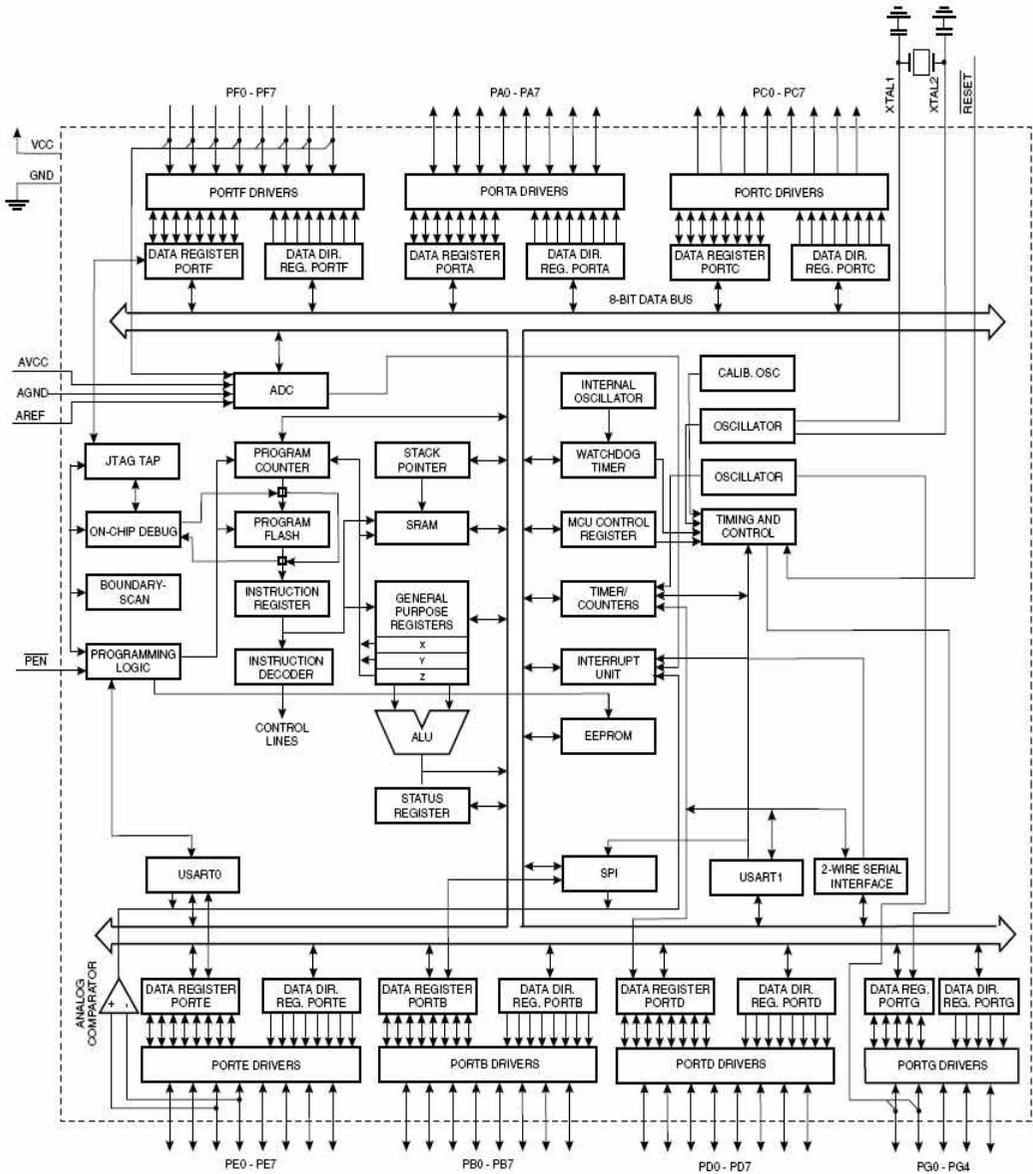


그림 7. ATmega128 블록 다이어그램

## 2) 센서 모니터링을 위한 A/D 컨버터 구성

### a) A/D 변환 장치의 원리

A/D 변환기(Analog-to-Digital Converter)는 아날로그 신호를 디지털 형태의 데이터로 변환하는 특수한 부호기이다. 그림 7은 A/D 변환기의 블록도를 보여주고 있다. A/D 변환기의 입력은 0 ~ 3V 범위에서 변하는 아날로그 전압이고, 출력은 2진수 이다. A/D 변환기는 아날로그 입력 전압을 4비트 2진 데이터로 변환하며, 다른 부호기와 마찬가지로 입력과 출력이 정확히 정의되어야 한다. 표 2는 A/D 변환기의 동작 상태를 보여주고 있다. 1행에서 A/D 변환기의 입력이 0V일 때 출력은 2진수 0000이고, 2행에서 입력이 0.2V일 때 출력은 2진수 0001이 된다. 입력 전압이 0.2V씩 증가할 때마다 출력의 2진수는 1씩 증가한다. 최대 3V가 입력될 때 출력은 2진수 1111이 된다.

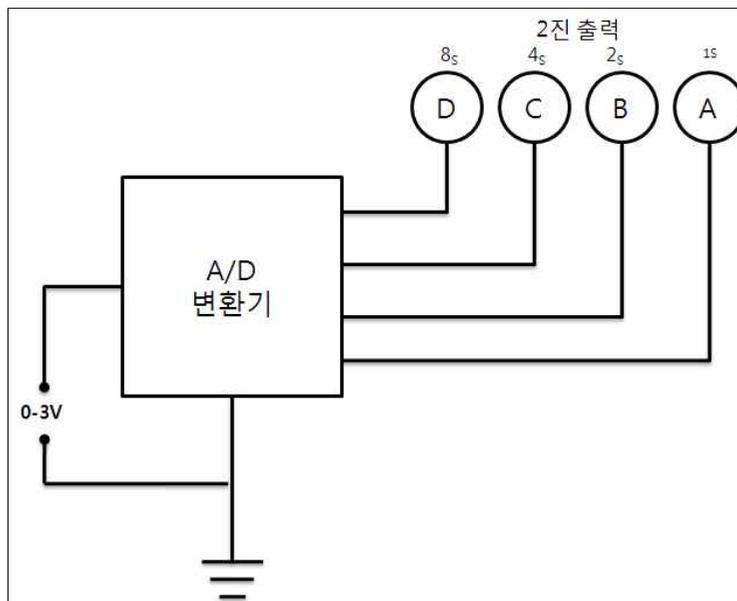


그림 8. A/D 변환기 블록도

표 2. A/D 변환기 진리표

	아날로그 출력 전압[V]	2진 출력			
		8	4	2	1
		D	C	B	A
1행	0	0	0	0	0
2행	0.2	0	0	0	1
3행	0.4	0	0	1	0
4행	0.6	0	0	1	1
5행	0.8	0	1	0	0
6행	1.0	0	1	0	1
7행	1.2	0	1	1	0
8행	1.4	0	1	1	1
9행	1.6	1	0	0	0
10행	1.8	1	0	0	1
11행	2.0	1	0	1	0
12행	2.2	1	0	1	1
13행	2.4	1	1	0	0
14행	2.6	1	1	0	1
15행	2.8	1	1	1	0
16행	3.0	1	1	1	1

A/D 컨버터는 그림 8과 같이 연속된 아날로그 입력을 불연속의 디지털 출력으로 변환하는 회로이다.

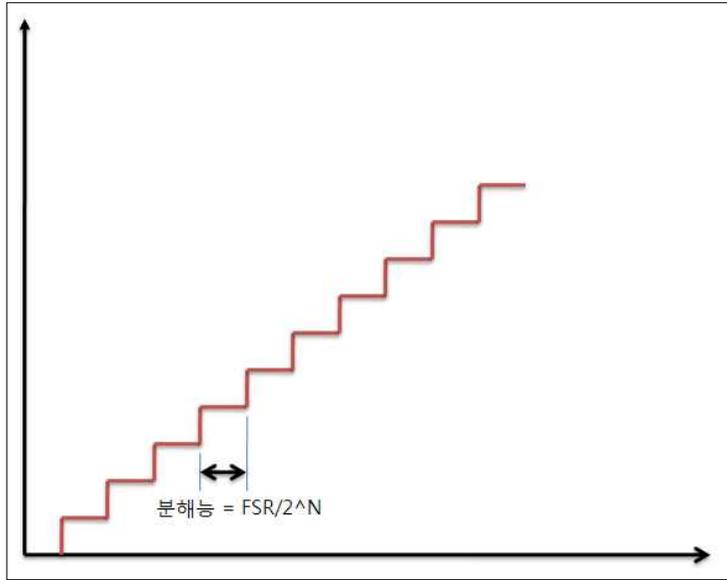


그림 9. A/D 컨버터의 분해능

중요한 것은 어느 범위 내의 아날로그 입력을 몇 비트의 디지털 값으로 변환하는가라는 점이다. 즉, A/D변환의 분해능이다. A/D 컨버터의 분해능이란 디지털 출력의 1비트에 대응하는 아날로그 입력의 변화량, 즉 그림 8의 1스텝에 해당하는 아날로그 전압의 최소 단위를 말한다. 그런데 아날로그 입력이 가해진 다음 디지털 출력 값이 얻어질 때까지는 어떠한 변환 시간이 필요하다. 디지털 출력의 스텝수가 많아질수록 변환 시간은 길게 걸린다. A/D 컨버터의 목적에 따라서는 변환 시간이 짧아야 한다는 것이 요구되는 수가 있다. 그래서 단위 시간당의 A/D 변환 횟수를 변환 레이트라 부르고 있다. 분해 능력을 높게 하면 변환 레이트는 저하되는 것이다. 또한 염가인 회로는 일반적으로 변환 레이트가 낮다. A/D 컨버터를 절약하기 위해 복수 개의 아날로그 입력을 하나의 A/D 컨버터에 가하는 경우가 있다. 단, 이것에는 아날로그 멀티플렉서가 필요한데, 아날로그 멀티플렉서란 몇 개인가의 아날로그 입력 가운데 하나를 선택하여 출력하는 선택 회로를 말하는 것이다. 그리고 선택된 아날로그 입력 전압은 A/D 변환이 종료할 때까지의 시간, 그 전압을 일정

하게 유지하지 않으면 안 된다. 시시각각 변환되어 가는 아날로그 전압의 어느 순간 값을 샘플링 하여 이것을 일정 시간 홀드하기 위한 회로가 샘플 홀드 회로이다.

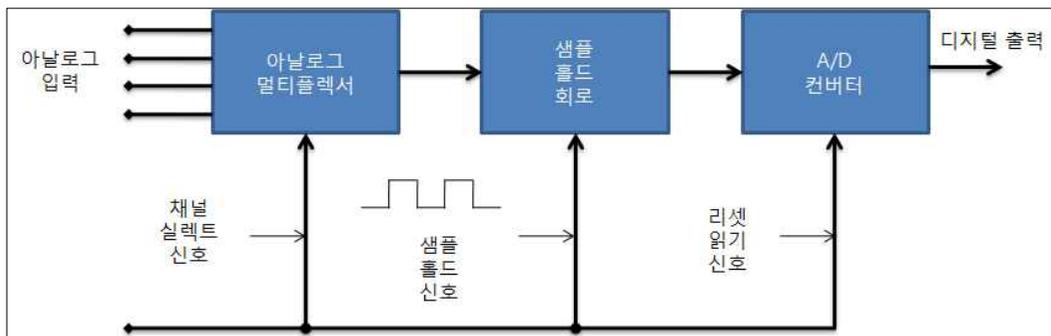


그림 10. A/D 컨버터의 일반적 구성

이렇게 해서 변환 시간 중에는 일정한 전압으로 유지한 아날로그 입력을 다음의 A/D 컨버터에 가하는 것이다. 이상과 같이 생각하면 A/D 컨버터는 일반적으로 그림 9와 같이 나타낼 수 있다. 물론 단일의 아날로그 입력일 경우, 아날로그 멀티플렉서는 필요 없고 또한 샘플 홀드 회로가 필요 없는 적분 형이나 병렬 A/D 컨버터도 있다.

#### b) A/D 변환장치를 이용한 회로 설계

AVR ATmega128의 ADC 특징은 10비트 분해능역에 0.5 LSB Integral Non-Linearity(적분 비선형성)과  $\pm 2$  LSB 정확도를 가지고 13 ~ 260usec 변환 시간(50KHz ~ 200kHz)에 15kSPS의 최대 분해 능력을 가지고 있다. 또한 8채널의 멀티플렉스된 단일 입력을 가지고 7채널의 차동 입력과 10배 또는 200배 증폭률을 가진 2채널의 차동 입력을 가진다. ADC 결과 값의 좌 정력과 0 ~ Vcc ADC 입력 전압 범위 그리고 선택 가능한 2.56V의 ADC 레퍼런스 전압 및 Free running

또는 Single Conversion Mode를 가진다.

AVR ATmega128은 8채널 10비트 축차 비교형 AD 변환기를 가지고 있다. 이들 8채널의 아날로그 입력신호는 모두 포트 F와 겸용 핀으로 사용하고 있으며, 단일 채널의 입력 전압은 0V(GND)이다. ATmega128은 16채널의 차동 전압을 사용할 수 있는데, ADC1, ADC0와 ADC3, ADC2 두 채널의 차동 입력은 0 dB(1x), 20dB(10x), 또는 46dB(200x)의 이득으로 증폭할 수 있으며, 7채널의 차동 입력은 ADC1의 공통의 음의 입력을 사용한다. 반면에, 나머지 입력 채널은 양의 입력 채널을 선택할 수 있다. 만약에 1x 또는 10x 이득이 사용되면 8비트 분해능 정도가 되고, 200x 이득이 사용되면 7비트 분해능 정도가 된다. ADC 모듈은 ADC 변환중 일 때 일정한 전압을 유지하도록 Sample & Hold 회로를 내장하고 있으며, 아날로그 공급 전압 핀인 AVCC와 분리하여야 하며, 이 전압은 Vcc와  $\pm 0.3V$  이상의 차이가 생겨서는 안 된다. 그림 10은 A/D 컨버터의 블록도를 보여주고 있으며 그림 11은 수질환경 센서 모니터링을 위한 회로도 이다. 그림 12는 실제 샘플링을 위해 사용된 A/D 시스템 이다.

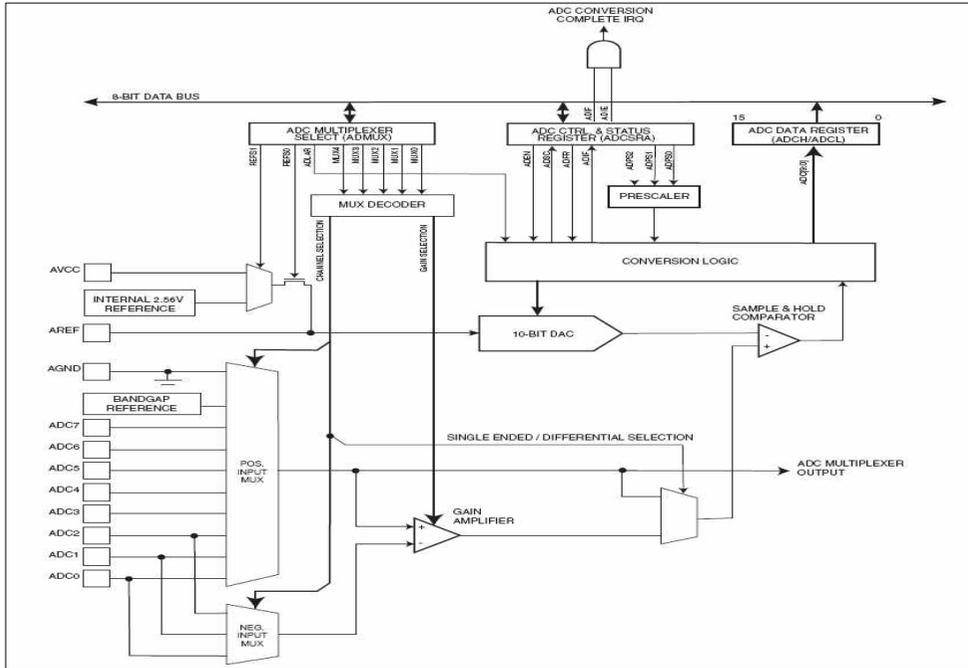


그림 11. A/D block schematic

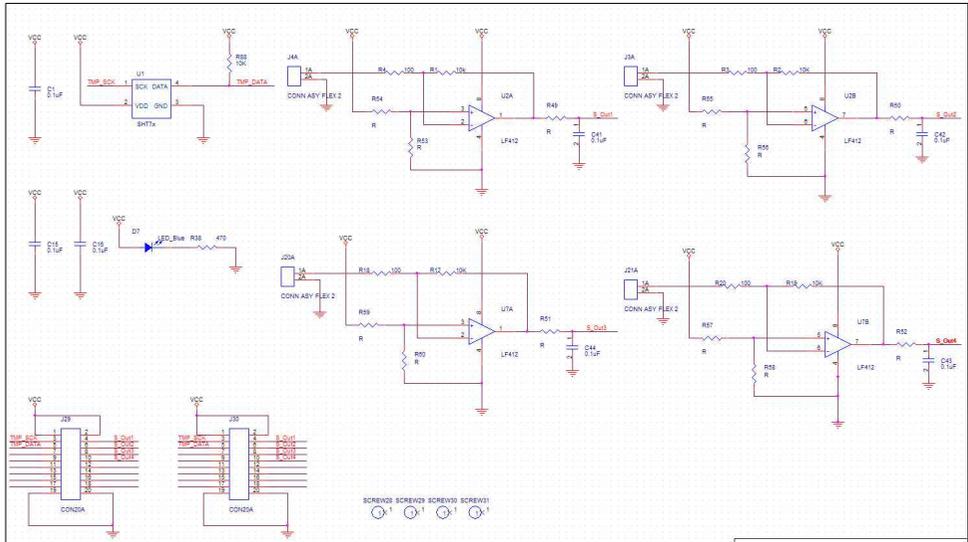


그림 12. 수질 환경센서 모니터링을 위한 A/D 회로도 구성

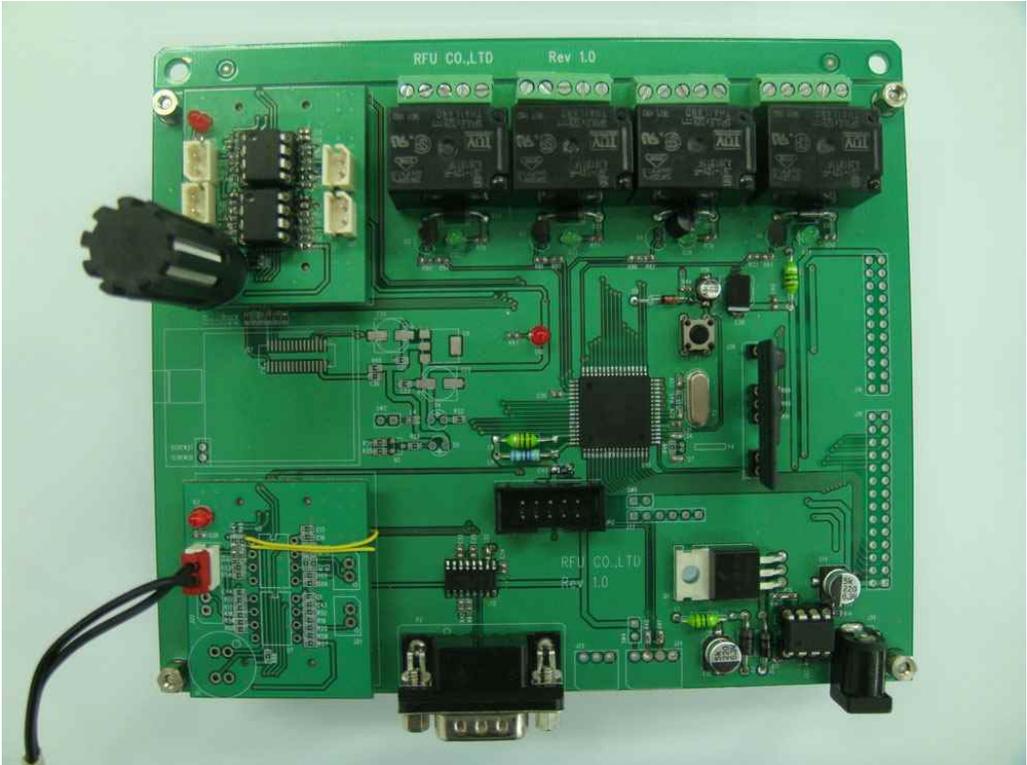


그림 13. 수질 환경 센서 모니터링을 위한 센서 모니터링 시스템

### c) ADC 변환 결과

ADC 모듈이 변환을 완료하면 그 변환 결과는 ADC Data 레지스터 ADCH 및 ADCL에 저장된다. Single channel 변환에서의 변환 결과는 식 1과 같이 변환 된다.

$$ADC = \frac{V_{IN} \times 1024}{V_{REF}} \quad (1)$$

$V_{IN}$ 은 선택된 Single channel 아날로그 입력 전압이고,  $V_{REF}$ 는 선택된 기준 전압

이다. 변환 결과는 10비트 양의 정수 표현법을 사용하여 0x000 ~ 0x3FF 범위의 값을 가진다. 여기서 0x000는 아날로그 입력 전압이 접지와 같은 값이라는 것을 나타내고 0x3FF는 아날로그 입력 전압이  $V_{REF}$ 에서 1LSB 만큼 뺀 값이다. Differential channel 변환에서의 변환 결과는 식 2와 같다.

$$ADC = \frac{(V_{POS} - V_{-}) \times GAIN \times 512}{V_{REF}} \quad (2)$$

$V_{POS}$ 는 선택된 Differential channel 입력의 양극성 단자 전압이고,  $V_{NEG}$ 는 음극성 단자 전압이다. 또한 GAIN은 선택된 아날로그 전압의 이득으로서 0x2000(-512d) ~ 0x1FF(+511d)의 값이다.

### 3) 수상 로봇의 모델링

#### a) 좌표 시스템

수상 로봇의 모델링은 정역학과 동역학의 연구를 필요로 한다. 정역학은 외부의 힘이 평형을 이루어 정지하고 있는 물체의 상태를 연구하는 학문이며, 동역학은 물체의 운동과 힘의 관계를 연구하는 학문이다. 동역학의 과학적인 기초는 17세기 말, 뉴턴에 의해서 확립되었다. 이는 운동을 해석하는 기구학과 운동을 발생시키는 힘을 다루는 운동역학으로 구분 짓는다. Euler가 강체 운동에 대한 연구를 하면서 처음 구분하였다[27]. 6자유도를 지닌 수상 로봇의 운동을 해석하기 위해서는 그림 13에 표현된 2개의 좌표 시스템이 더 필요하다. 수상 로봇에 고정된 이동 좌표 시스템인  $X_0, Y_0, Z_0$ 를 동체 고정 좌표 시스템이라고 부른다. 일반적으로 동체 고정 좌표 시스템에서 원점 O는 무게 중심(CG : Center of Gravity)과 일치 시킨다. 수

상 로봇을 위한 동체 축의  $X_0$ ,  $Y_0$  그리고  $Z_0$ 의 정의는 다음과 같다.

$X_0$  : 길이방향 축(Longitudinal Axis)

$Y_0$  : 횡방향 축(Transverse Axis)

$Z_0$  : 수직방향 축(Normal Axis)

동체 고정 좌표 시스템에서의 운동은 지구 고정 좌표 시스템에 관계하여 표현한다. 지구 자체의 공전과 자전에 의한 영향은 없는 것으로 가정하고 수상 로봇의 속도에 거의 영향을 미치지 않는다고 가정한다. 지구 고정좌표 시스템(Earth-fixed Coordinate System) XYZ는 관성 고정 좌표 시스템(Inertial-fixed Coordinate System)이라고도 한다. 따라서 수상 로봇의 위치, 자세는 관성 고정 좌표 시스템을 통해 표현하며, 수상 로봇의 선형 속도(Linear Velocity)와 각 속도(Angular Velocity)는 동체 고정 좌표 시스템에 의해 표현한다.

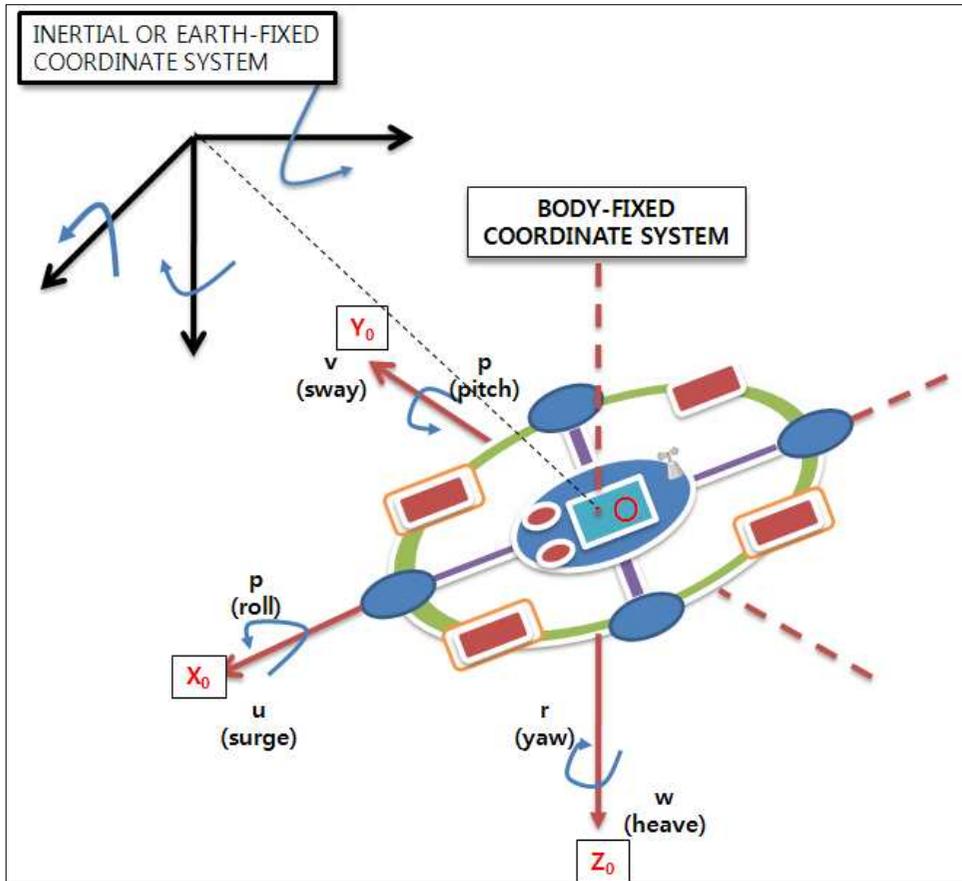


그림 14. 몸체 고정 그리고 지구 고정좌표 시스템

## b) 수상 로봇의 기구학

수상 로봇의 운동은 위치와 자세로 표현하는 6개의 독립 좌표를 사용한다.  $x$ ,  $y$ 축 그리고  $z$ 축으로 하는 위치와 병진 운동(Translation motion)을 하는 3개 좌표와 자세와 회전 운동(Rotational motion)을 하는 3개의 좌표가 사용된다. 수상 로봇을 위한 6개의 운동은 표 3과 같이 surge, sway, heavy, roll, pitch 그리고 yaw로 정의한다[28].

표 3. 수상로봇 6개의 운동 좌표 정의

번호	자유도	힘과모멘트	선형속도와각속도	위치와 오일러 각도
1	x방향 운동(surge)	X	u	x
2	y방향 운동 sway)	Y	v	y
3	z방향 운동(heavy)	Z	w	z
4	x축 회전(roll)	K	p	$\Phi$
5	y축 회전(pitch)	M	q	$\Theta$
6	z축 회전(yaw)	N	r	$\Psi$

$$\begin{aligned} \eta &= [\eta_1^T \eta_2^T]^T & \eta_1 &= [x \ y \ z]^T & \eta_2 &= [\Phi \ \Theta \ \Psi]^T \\ v &= [v_1^T \ v_2^T]^T & v_1 &= [u \ v \ w]^T & v_2 &= [p \ q \ r]^T \\ \tau &= [\tau_1^T \ \tau_2^T]^T & \tau_1 &= [X \ Y \ Z]^T & \tau_2 &= [K \ M \ N]^T \end{aligned}$$

$\eta$ 는 관성 혹은 지구 고정 좌표 시스템으로 표현하는 위치와 자세이고,  $v$ 는 동체 고정 좌표 시스템으로 표현하는 병진과 회전 속도이며,  $\tau$ 는 동체 고정 좌표 시스템으로 표현하는 수상 로봇의 전체 힘과 모멘트이다[29].

• 오일러 각도

동체 고정 좌표 시스템과 지구 고정 좌표 시스템 사이의 병진 속도(Traditional Velocity)의 좌표 변환(Coordinate Transform)은 식 3과 같다.

$$\dot{\eta}_1 = J_1(\eta_2)v_1 \tag{3}$$

식 3을 행렬로 표현하면 식 4와 같다.

$$\begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \\ \bar{z} \end{bmatrix} = J_1(\eta_2) \begin{bmatrix} \bar{u} \\ \bar{v} \\ \bar{w} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$J_1(\eta_2)$ 는 오일러 각도인 롤(Roll,  $\Phi$ ), 피치(Pitch,  $\Theta$ ) 그리고 요(Yaw,  $\Psi$ )의 함수를 통해 구성된 변환 행렬(Transformation Matrix)이다. 역 변환 형태인 속도 향상은 식 5와 같다.

$$v_1 = \overline{J_1(\eta_2)^{-1}} \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \\ \bar{z} \end{bmatrix} \quad (5)$$

각각의 축에 대한 기본적인 회전 행렬(Principal Rotational Matrix)은 식 6과 같이 일반적인 식 형태로 변환 행렬로 표현한다.

$$\begin{aligned} C_{x,\Phi} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\Phi & \sin\Phi \\ 0 & -\sin\Phi & \cos\Phi \end{bmatrix} \\ C_{y,\Theta} &= \begin{bmatrix} \cos\Theta & 0 & -\sin\Theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\Theta & 0 & \cos\Theta \end{bmatrix} \\ C_{z,\Psi} &= \begin{bmatrix} \cos\Psi & \sin\Psi & 0 \\ -\sin\Psi & \cos\Psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

- 선형 속도 변환

물체(Object)의 기준 좌표계에 대한 자세한 물체에 새로운 좌표계를 설정하여 이 좌표계의 기준 좌표계에 대한 회전으로 나타낼 수가 있다. 3축에 의한 자세 변화는 3x3 행렬로 나타내며 이러한 행렬을 회전 행렬이라고 한다. 직교 좌표 공간상에서 자세는 기준 좌표계의 축에 대한 연속적인 회전으로 일반화시켜서 생각할 수 있다. 이와 같이 기본 회전이 연속적으로 행하여지는 경우를 복합 회전(Compound Rotation)이라 하며, 이 경우의 전체 회전을 나타내는 복합 회전 행렬은 기본 행렬의 곱으로 나타낼 수 있다. 일반적으로 3회의 회전을 통해  $J_1(\eta_2)$ 의 표현하는 것이 통상적이다. 수상 로봇은 오일러 각도의 항들로 회전을 표현한다. 이는 z축을 중심으로  $\Phi$ 만큼 회전한 후, 새로운 y축을 중심으로  $\Theta$ 만큼 회전시키고 마지막으로 x축을 중심으로  $\Psi$ 만큼 회전하는 것이다. 회전 과정은 식 7과 같다.

$$J_1(\eta_2) = C_{z,\Psi}^T C_{y,\Theta}^T C_{x,\Phi}^T \quad (7)$$

식 7을 역 변환 하면 식 8과 같다.

$$J_1^{-1}(\eta_2) = J_1^T(\eta_2) = C_{x,\Phi} C_{y,\Theta} C_{z,\Psi} \quad (8)$$

- 각속도 변환

동체 고정 좌표계로 표현되는 각 속도 벡터  $V_2 = [pqr]^T$ 와 오일러 속도 벡터  $\overline{V}_2 = [\overline{\Phi} \ \overline{\Theta} \ \overline{\Psi}]^T$ 와의 관계는 변환 행렬  $J_2(\eta_2)$ 에 의해 이루어진다. 이를 표현하면 식 9와 같다.

$$\bar{\eta}_2 = J_2(\eta_2) V_2 \quad (9)$$

지구 고정 좌표 시스템에 대한 동체 고정 좌표 시스템의 자세는 식 10과 같다.

$$V_2 = \begin{bmatrix} \bar{\Phi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + C_{x,\phi} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{\Phi} \\ 0 \end{bmatrix} + C_{x,\phi} C_{y,\theta} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \bar{\Psi} \end{bmatrix} = J_2^{-1}(\eta_2) \bar{\eta}_2 \quad (10)$$

2개의 오일러 각도  $J_1(\eta_2)$ 과  $J_2(\eta_2)$  표현에 의해 기구학 방정식(Kinematic Equation)을 묘사할 수 있다. 이를 벡터 형태로 표현하면 식 11, 12와 같다.

$$\begin{bmatrix} \bar{\eta}_1 \\ \bar{\eta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1(\eta_2) & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & J_2(\eta_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\bar{\eta} = J(\eta) V \quad (12)$$

### 3. 자세제어를 위한 쿼드로터 원리 및 모델링

#### 1) 쿼드로터 원리

쿼드로터는 4개의 로터가 각각 상태 회전속도에 따라 비행운동이 제어되는 비교적 간단하게 제어할 수 있는 비행체이다. +자형을 갖는 구조로 각 로터를 연결하는 축들은 가볍고 얇은 재질로 이루어져 있지만, 모터에 직접 연결되어 있기 때문에 기계적으로 강성을 지녀야 한다. 4개의 로터는 각각 고정되어지고, 대칭 및 평행상태여야 한다. 또한 각 로터의 블레이드들은 고정된 피치 각을 갖고, 회전에 의해 공기를 아래쪽으로 밀어줌으로써 양력을 발생시킨다. 또한 각 모터의 회전 속도 및 방향을 다르게 함으로써 추력편향으로 발생하는 힘을 이용하여 6자유도 운동을 할 수 있게 된다[30, 31, 32].

#### a) 호버링

쿼드로터가 비행하는 기본 원리 및 이동 원리에 대하여 살펴보고자한다. 간단하게 도식화된 쿼드로터의 양력발생 및 토크를 상쇄시키기 위한 각 로터의 회전 방향은 그림 14와 같다.

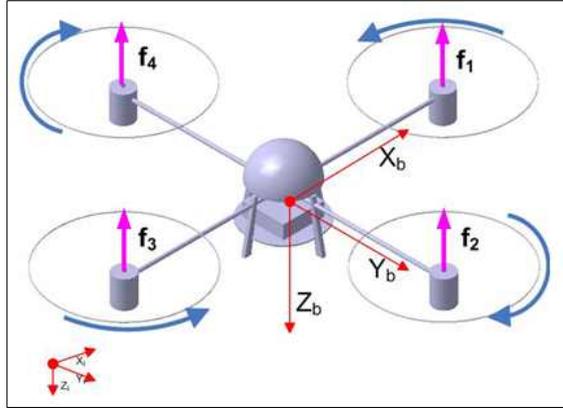


그림 15. 호버링시의 쿼드로터 개념도

4개의 로터는 각각  $\Omega_H[\text{rad/s}]$ 의 속도로 돌고 있으며 4개의 로터에서 발생하는 총 양력은 쿼드로터의 무게와 같다. 또한 회전으로부터 야기되는 토크를 상쇄하기 위하여 좌우 프로펠러는 시계방향으로, 앞뒤 프로펠러는 반시계방향으로 회전하도록 한다.

### b) 추력( $U_1[N]$ )

이 명령은 4개의 모터의 회전을 각각 같은 양만큼 회전시켜 증가(혹은 감소)시킬 수 있다. 추력은 동체고정좌표계에서 수직방향으로 힘을 나타내며, 추력의 증가 혹은 감소로 인해 쿼드로터는 고도의 상승 및 하강을 할 수 있다. 또한 동체고정좌표계와 지표고정좌표계의 Z축을 동일하다고 가정하면 동체 추력의 증가는 지표고정좌표계의 상하좌우(x-y 평면) 가속도를 증가시켜 쿼드로터의 고도를 제어할 수 있는 명령이 된다. 그림 15는 추력을 증가시켰을 때의 쿼드로터의 이동을 도식화한 것이다.

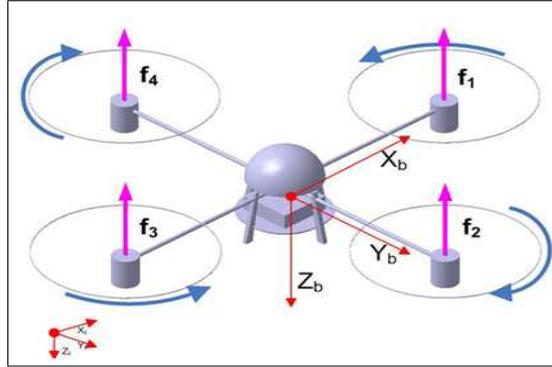


그림 16. 추력 명령에 따른 고도상승

### c) Roll ( $U_2$ [Nm])

이 명령은 좌우 모터의 속도를 증가 혹은 감소 시켜 나타나는 롤 운동을 나타낸다. 만약 왼쪽 모터의 속도를 증가 시키고 그 증가시킨 만큼의 속도를 오른쪽 모터를 통해 감소시키게 되면, 4개의 로터에서 나타나는 토크는 상쇄 되고 좌우 모터 속도 차에 의한 힘의 차이가 발생하게 되는데 이로 인해 좌우 운동의 가속도가 발생하게 되고 이는 쿼드로터의 Roll 운동을 야기 시킨다. 그림 16은 좌우 모터 속도 변화에 의한 Roll 운동을 도식화 한 것이다.

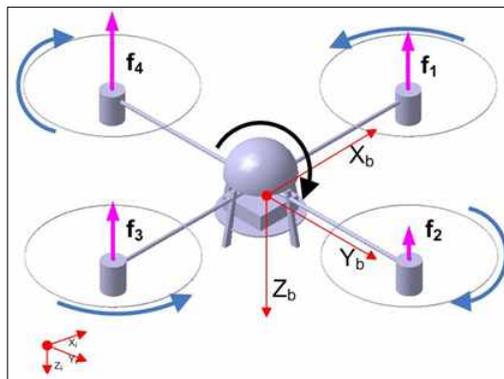


그림 17. Roll 운동

#### d) Pitch (U3[Nm])

이 명령은 상하 모터의 속도를 증가 혹은 감소 시켜 나타나는 피치 운동을 나타낸다. 만약 위쪽 모터의 속도를 증가 시키고 그 증가시킨 만큼의 속도를 아래쪽 모터를 통해 감소시키게 되면, 4개의 로터에서 나타나는 토크는 상쇄 되고 상하 모터 속도 차에 의한 힘의 차이가 발생하게 되는데 이로 인해 상하 운동의 가속도가 발생하게 되고 이는 쿼드로터의 Pitch 운동을 야기한다. 그림 17은 상하 모터 속도 변화에 의한 Pitch 운동을 도식화 한 것이다.

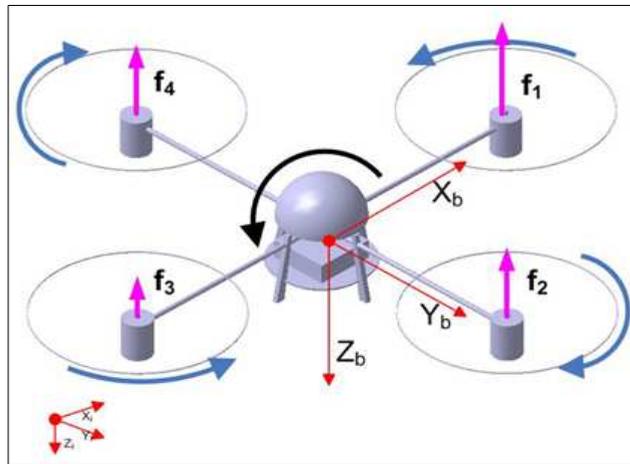


그림 18. Pitch 운동

#### e) Yaw(U4[Nm])

이 명령은 같은 방향으로 회전하는 양쪽의 모터의 속도를 증가 혹은 감소 시켜 나타나는 요 운동을 나타낸다. 만약 좌우 모터의 속도를 증가 시키고 그 증가시킨 만큼의 속도를 상하 모터를 통해 감소시키게 되면, 4개의 로터에서 나타나는 토크

차에 의해 평면상의 회전 운동의 가속도가 발생하게 되고 이는 쿼드로터의 Yaw 운동을 야기한다. 그림 18은 좌우 및 상하 모터 속도 변화에 의한 Yaw 운동을 도식화 한 것이다.

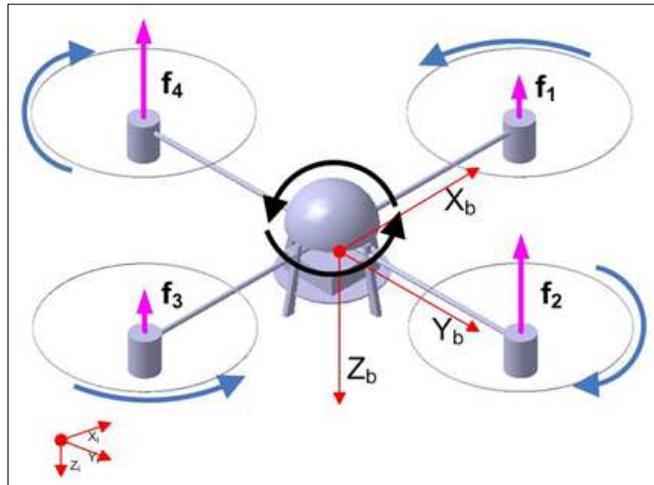


그림 19. Yaw 운동

## 2) 쿼드로터 수학적 모델링

이장에서는 쿼드로터에 관한 6자유도 운동방정식을 도출하고 수학적인 모델링을 하도록 한다. 사용되는 좌표계는 지표고정좌표계(E-Frame)와 동체고정좌표계(B-Frame)이다. 운동방정식은 일반적으로 지표고정좌표계를 기준으로 유도되어지는데, 그 이유는 다음과 같다.

- 지표고정좌표계는 시간에 의해 변화한다. (시변시스템)
- 동체의 구조가 대칭적으로 구성되어 있어 운동방정식을 유도하는데 간편하다.
- 동체에 고정된 센서로부터 나오는 데이터는 동체고정좌표계에 기인한다.
- 조종명령에 의한 조종력은 동체고정좌표계에서 발생한다.

식 13은 일반적인 6자유도 운동체의 운동학적인 식을 나타낸다.

$$\dot{\zeta} = J_{\theta} \nu \quad (13)$$

$\dot{\zeta}[+]$ 는 지표고정 좌표계에서 발생하는 속도 벡터이고,  $\nu[+]$ 는 동체고정좌표계에서 발생하는 속도 벡터이며,  $J_{\theta}$ 는 좌표변환 행렬이다.  $\zeta$ 는 쿼드로터의 위치  $\Gamma^E[m]$ 와 각  $\Theta^E[rad]$ 으로 다시 표현할 수 있으며 이를 지표 고정좌표계에서 표현 하면 식 14와 같다.

$$\zeta = [\Gamma^E \Theta^E]^T = [X \ Y \ Z \ \phi \ \theta \ \psi]^T \quad (14)$$

마찬가지로,  $\nu$ 는 쿼드로터의 동체고정좌표계의 선속도  $V^B[m/s]$ 와 각속도  $\omega^B[rad/s]$ 로 다시 식 15로 나타낼 수 있다.

$$\nu = [V^B \ \omega^B]^T = [u \ v \ w \ p \ q \ r]^T \quad (15)$$

또한, 좌표변환 행렬은 식 16으로 변형될 수 있다.

$$J_{\theta} = \begin{bmatrix} R_{\theta} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & T_{\theta} \end{bmatrix} \quad (16)$$

이때,  $R_{\theta}$  및  $T_{\theta}$ 는 식 17, 18과 같다.

$$R_\theta = \begin{pmatrix} c_\psi c_\theta & -s_\psi c_\theta + c_\psi s_\theta s_\phi & s_\psi s_\theta c_\phi \\ s_\psi c_\theta & c_\psi c_\theta + s_\psi s_\theta s_\phi & -c_\psi s_\phi + s_\psi s_\theta c_\phi \\ -s_\theta & c_\theta s_\phi & c_\theta c_\phi \end{pmatrix} \quad (17)$$

$$T_\theta = \begin{pmatrix} 1 & s_\phi t_\theta & c_\phi t_\theta \\ 0 & c_\phi & -s_\phi \\ 0 & s_\phi/c_\theta & c_\phi/c_\theta \end{pmatrix} \quad (18)$$

이러한 좌표계의 관계 및 변환 행렬 등을 이용할 수 있다. 소형 비행체의 경우에는 자세 변환시 프로펠러의 고속회전운동과 결합되어 발생하는 자이로 효과가 고려되어야 한다. 이번 장에서는 1차 가정 하에 라그랑즈 방정식을 이용하여 4중 로터 비행로봇의 간략한 운동방정식으로 유도한 다음 2차 가정을 통해 자이로 효과와 공기역학적 항력 그리고 동체의 질량 불균형을 고려한 상세한 운동방정식을 유도하였다.

### ※1차 가정

- 구조물은 강체이다.
- 공기저항은 무시한다.
- 자이로센서 데이터를 참고한다.
- 동체는 좌우대칭이며 전후대칭이다.
- 무게중심은 동체좌표계의 원점에 있다.

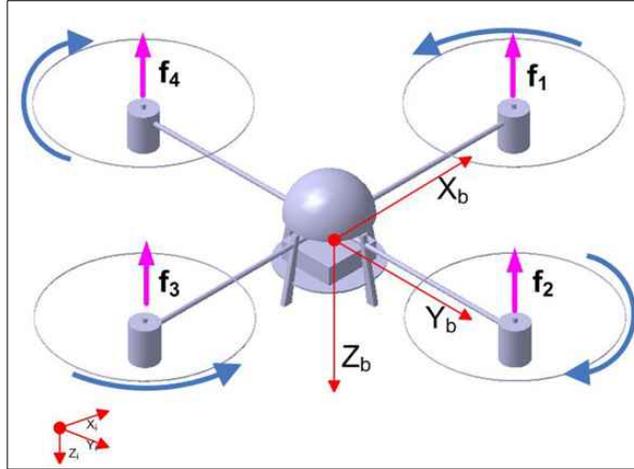


그림 20. Dragonfly의 도식화

4중 로터 비행로봇은  $xz$ 평면과  $yz$ 평면에 대해서 대칭인 형상이므로 관성곱들은 모두 0으로 가정할 수 있다. 따라서 관성모멘트는  $I_x, I_y, I_z$ 만 유효하다. 좌표변환관계를 이용해 회전운동에너지와 위치에너지를 표현하면 각각 식 19, 20과 같다[33, 34].

$$\begin{aligned}
 T &= \frac{1}{2} I_x (\dot{\phi} - \psi S_\theta)^2 & (19) \\
 &+ \frac{1}{2} I_y (\dot{\theta} C_\phi + \dot{\psi} S_\phi C_\theta)^2 \\
 &+ \frac{1}{2} I_z (\dot{\theta} S_\phi - \dot{\psi} C_\phi C_\theta)^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 U &= \int x dm(x) (-g S_\theta) & (20) \\
 &+ \int y dm(y) (g S_\phi C_\theta) \\
 &+ \int z dm(z) (g C_\phi C_\theta)
 \end{aligned}$$

식 19의 에너지를 라그랑즈 방정식을 이용하여 유도하면 운동방정식을 구할 수 있다. 라그랑즈 방정식은 라그랑즈 연산자 식 21을 도입하여 표현하면 식 22와 같이 약간 수정된 형태로 나타낼 수 있다[35].

$$L(q_i, \dot{q}_i) = T - U \quad (21)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = F_i \quad (22)$$

여기서  $q_i$ 는 일반화된 좌표이며,  $F_i$ 는 일반화된 힘이다. 라그랑즈 방정식으로 유도된 회전운동의 운동방정식은 식 23과 같다.

$$\begin{aligned} \ddot{\phi} &= \dot{\theta} \dot{\psi} \left( \frac{I_y - I_z}{I_x} \right) \\ \ddot{\theta} &= \dot{\phi} \dot{\psi} \left( \frac{I_z - I_x}{I_y} \right) \\ \ddot{\psi} &= \dot{\phi} \dot{\theta} \left( \frac{I_x - I_y}{I_z} \right) \end{aligned} \quad (23)$$

그러나 식 23은 관성모멘트만 고려된 것이고 2차 가정으로 고려하면 식 24과 같다[36, 37].

## ※ 2차 가정

- 롤운동과 피치운동은 서로 자이로 효과의 영향을 받는다.
- 자세 변환시 공기역학적인 항력이 존재한다.
- 동체에는 질량 불균형이 존재한다.

$$\begin{aligned}
 \ddot{\phi} &= \dot{\theta}\dot{\psi}\left(\frac{I_y - I_z}{I_x}\right) - \frac{I_p}{I_x}\dot{\theta}\Omega - \frac{c_x}{I_x}\dot{\phi} - \frac{k_x}{I_x} + \frac{l}{I_x}u_1 \\
 \ddot{\theta} &= \dot{\phi}\dot{\psi}\left(\frac{I_z - I_x}{I_y}\right) + \frac{I_p}{I_y}\dot{\phi}\Omega - \frac{c_y}{I_y}\dot{\theta} - \frac{k_y}{I_y} + \frac{l}{I_y}u_2 \\
 \ddot{\psi} &= \dot{\phi}\dot{\theta}\left(\frac{I_x - I_y}{I_z}\right) - \frac{c_z}{I_z}\dot{\psi} + \frac{l}{I_z}u_3
 \end{aligned} \tag{24}$$

여기서  $I_p$ 는 프로펠러의 관성모멘트,  $C_i$ 와  $k_i$ 는 각각 감쇠계수와 강성계수,  $l$ 은 프로펠러 추력에 대한 모멘트 암이다.  $m_c$ 는 질량 불균형에 해당하는 유효질량,  $g$ 는 중력가속도,  $l$ 는 유효질량에 대한 모멘트 암이다. 자세 각이 거의 0이라고 가정하면 강성계수를 식 25와 같이 축약해서 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}
 k_x &= m_c g (l_y + \phi l_z) \\
 k_y &= m_c g (l_x + \theta l_z)
 \end{aligned} \tag{25}$$

시스템의 제어입력  $u_i$ 는 식 26 또는 식 27과 같이 정의하며 자이로 효과를 초래하는 모터의 속도 차이는 식 28과 같다.

$$\begin{aligned}
 u_1 &= b(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \\
 u_2 &= lb(\Omega_4^2 - \Omega_2^2) \\
 u_3 &= lb(\Omega_3^2 - \Omega_1^2) \\
 u_4 &= d(\Omega_1^2 + \Omega_3^2 - \Omega_2^2 - \Omega_4^2)
 \end{aligned} \tag{26}$$

$$u_1 = f_1 + f_2 + f_3 + f_4 \quad (27)$$

$$u_2 = f_4 - f_2$$

$$u_3 = f_3 - f_1$$

$$u_4 = f_1 + f_3 - f_2 - f_4$$

$$\Omega = \Omega_2 + \Omega_4 - \Omega_1 - \Omega_3 \quad (28)$$

최종적으로 표시되는 동체고정좌표계에서의 6자유도 운동방정식은 식 29와 같다.

$$\dot{u} = (vr - wq) + gs_\theta \quad (29)$$

$$\dot{v} = (\wp - ur) - gc_\theta s_\phi$$

$$\dot{w} = (uq - vp) - gc_\theta s_\phi + \frac{U_1}{m}$$

$$\dot{p} = \frac{I_{YY} - I_{ZZ}}{I_{XX}} qr - \frac{J_{TP}}{I_{XX}} q\Omega + \frac{U_2}{I_{XX}}$$

$$\dot{q} = \frac{I_{ZZ} - I_{XX}}{I_{YY}} pr - \frac{J_{TP}}{I_{YY}} p\Omega + \frac{U_3}{I_{YY}}$$

$$\dot{r} = \frac{I_{XX} - I_{YY}}{I_{ZZ}} pq + \frac{U_4}{I_{ZZ}}$$

좌표변환 행렬을 이용하여 지표고정좌표계에서의 최종적인 운동방정식은 식 30과 같다.

$$\begin{aligned}
\ddot{X} &= (\sin\psi\sin\phi + \cos\psi\sin\theta\cos\phi) \frac{U_1}{m} \\
\ddot{Y} &= (-\cos\psi\sin\phi + \sin\psi\sin\theta\cos\phi) \frac{U_1}{m} \\
\ddot{Z} &= -g + (\cos\psi\sin\theta\cos\phi) \frac{U_1}{m} \\
\dot{p} &= \frac{I_{YY} - I_{ZZ}}{I_{XX}} qr - \frac{J_{TP}}{I_{XX}} q\Omega + \frac{U_2}{I_{XX}} \\
\dot{q} &= \frac{I_{ZZ} - I_{XX}}{I_{YY}} pr - \frac{J_{TP}}{I_{YY}} p\Omega + \frac{U_3}{I_{YY}} \\
\dot{r} &= \frac{I_{XX} - I_{YY}}{I_{ZZ}} pq + \frac{U_4}{I_{ZZ}}
\end{aligned} \tag{30}$$

### 3) 수상자울 로봇에서 쿼드로터 모델링

#### a) 매개변수 규명을 통한 모터 추력 측정 및 구동기

본 연구논문에서는 램블러 380급 폴딩 프로펠라를 사용하여 각 모터의 추력을 측정하였다. 전압을 인가하여 프로펠러를 돌리게 되면, 높은 전압에서 전류의 과부하가 생기게 되므로, PWM 제너레이터를 사용하여 PWM 신호를 인가하고, PWM에 의한 추력을 측정하였다. 원활한 실험을 위하여 테스트 베드를 직접 제작하였으며 최종적으로 구성된 테스트 베드는 그림 20과 같다.

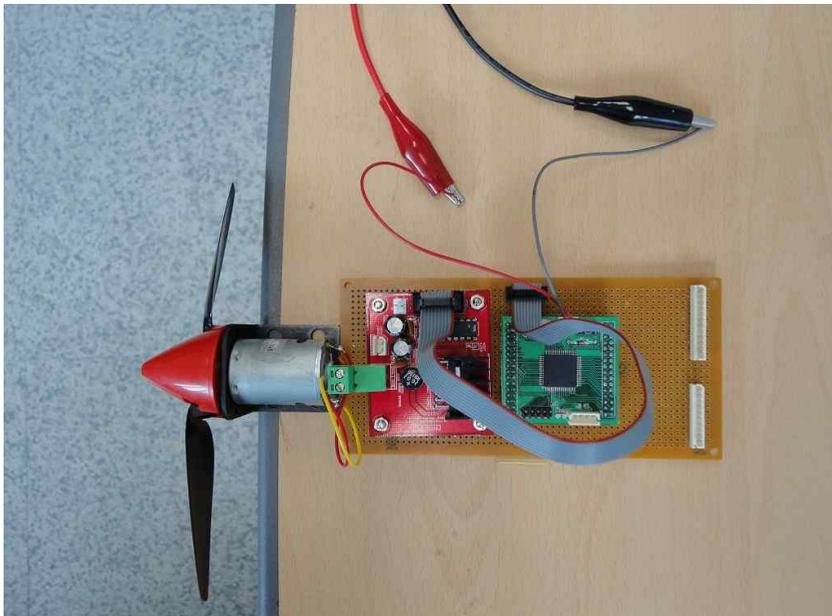


그림 21. 추력 테스트 Test-bed

각각의 모터에 의한 추력 실험의 결과를 토대로, 인가되는 PWM에 대한 추력의 결과를 1차함수로 가정하여 표현하고, 이는 시스템의 전체 입력으로 환산되어 시스템의 수학적 모델을 적용하게 된다. 관성모멘트 행렬은 식 31과 같다.

$$I = \begin{bmatrix} I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{yx} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -I_{zx} & -I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (31)$$

그리고 자세제어를 위한 구동기 부분에서 DC-Motor는 전기적인 에너지를 기계적인 에너지로 변환시켜주는 구동기이다. 따라서 전기적 회로상의 방정식과 기계적인 시스템을 구동시켜주는 부분의 기계적인 시스템을 구동시키는 부분의 기계적 방정식으로 나누어 모델링 할 수 있다[38]. DC-Motor의 회로와 신호 파형은 그림 21, 22와 같다.

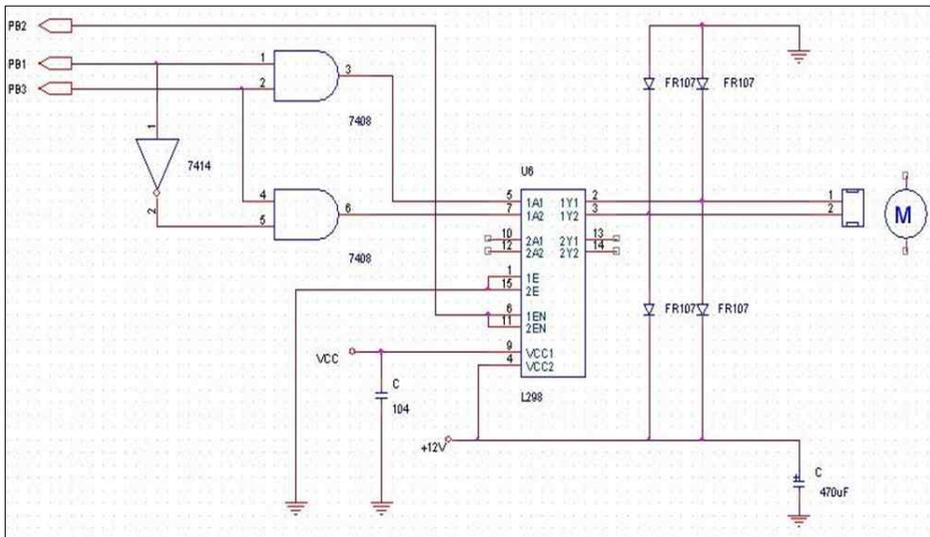


그림 22. DC motor 회로

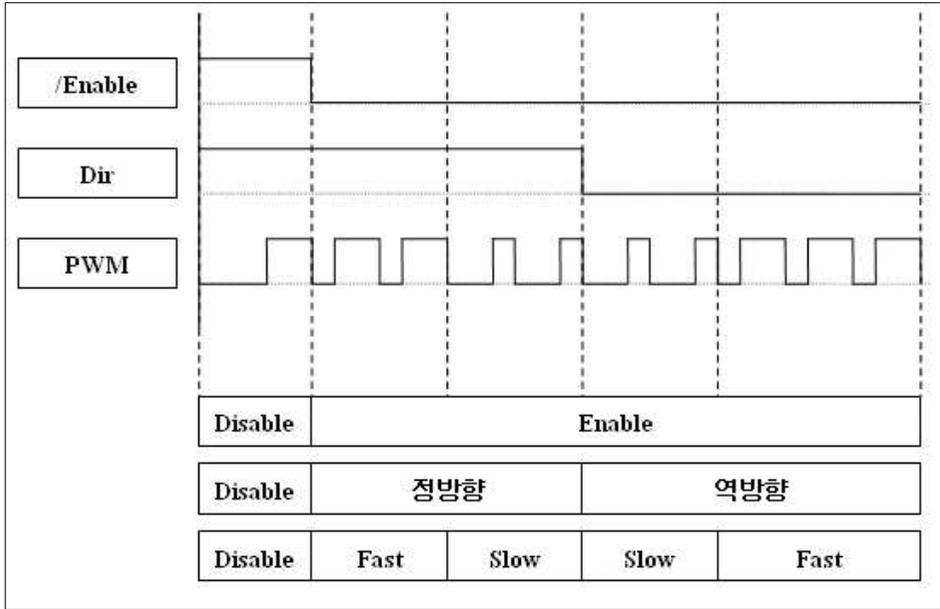


그림 23. DC 모터 제어 PWM 및 디렉션 신호 파형

역기전력(Back emf)  $V_{emf}$  : 회전자가 회전함에 따라 역기전력은 공급전압의 반대 방향으로 회전자 권선에서 유도됨, 역기전력은 모터의 회전속도( $\omega$ )에 비례함.

$$v_{emf}(t) = K_b \omega(t) \quad (32)$$

여기서,  $K_b$  : 모터 전기 상수 (back emf constant)이다. 모터의 전기적 방식 (electrical equation for the motor)은 키르호프의 전압법칙(KVL)을 이용하면 식 33을 유도할 수 있다.

$$v_{app}(t) - v_{emf}(t) = L \frac{di}{dt} + Ri(t) \quad \text{이므로,}$$

$$v = v_R + v_L + e = Ri + L \frac{\partial i}{\partial t} + K_{EoM} \quad (33)$$

여기서, L : 권선의 인덕턴스(inductance), R : 권선 저항 (resistance) 이다.

### b) DC-Motor의 기계적 방정식

DC 모터의 토크( $\tau$ )는 회전자의 전류  $i$ 에 비례적으로 발생한다.

$$\tau(t) = K_m i(t) \quad (34)$$

여기서,  $K_m$ 은 자기력이나 권선수 등에 결정되는 armature constant 이다. DC 모터의 동역학 방정식은 뉴턴의 제2법칙에 의해 관성 모멘트나 회전자 속도 미분의 곱은 모터 shaft에 전달되는 토크의 총합과 같다.

$$J \frac{d\omega}{dt} = \sum \tau_i = -K_f \omega(t) + K_m i(t) \quad (35)$$

위에서 구한 두 식을 각각 전류  $i$ 와 회전자의 각속도  $\omega$ 에 의한 미분방정식으로 표현하면 식 36, 37과 같다.

$$\frac{di}{dt} = -\frac{R}{L} i(t) - \frac{K_b}{L} \omega(t) + \frac{1}{L} v_{app}(t) \quad (36)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{1}{J} K_f \omega(t) + \frac{1}{J} K_m i(t) \quad (37)$$

State - Space Equation으로 표현하면 식 38, 39와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{K_b}{L} \\ \frac{K_m}{J} & -\frac{K_f}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} v_{app}(t) \quad (38)$$

$$y(t) = [0 \ 1] \begin{bmatrix} i \\ \omega \end{bmatrix} + [0] v_{app}(t) \quad (39)$$

구해진 구동기에 대한 모델을 실 모델에 적용하기 힘들기 때문에 시중에서 판매하는 5,000rpm 이상급의 모델을 구입하여 실험을 통하여 선정하였다. 시스템을 1차 함수로 가정하고, 시스템의 응답과 그에 대한 전달함수를 추출하여 구하였다.

### Ⅲ. EVFF 알고리즘 및 항로 유지와 충돌 회피를 위한 퍼지 로직

#### 1. VFF(Virtual force Field) 알고리즘

##### 1) 포텐셜 필드

포텐셜 필드 방법은 자율이동로봇의 경로계획이나 작업 공간 내에서 로봇 머니플레이터를 나타내는 포인트를 충돌 없이 목적지까지 이동시키는 문제에 주로 적용되었다. 포텐셜 필드 방법(Potential fields Method)은 로봇을 포텐셜 함수의 영향을 받는 물체로 취급하는 것이다. 물체는 척력의 포텐셜에 의해 모델링 되고, 목표점(goal)은 인력의 포텐셜에 의해 모델링 된다. 따라서 모든 작업 공간은 위의 두 전위 함수의 합에 의해 표현된다. 로봇에 작용하는 힘은 전위함수의 음의 구배(Negative Gradient) 와 같으므로 로봇은 종점으로 유도될 수 있다. 즉, 인력의 포텐셜 함수는 계곡과 같은 역할을 하고, 물체에 의한 척력의 포텐셜은 언덕과 같은 역할을 하여 로봇은 목표점으로 따라 흘러간다[39, 40]. 그림 23에서 이를 설명한다.

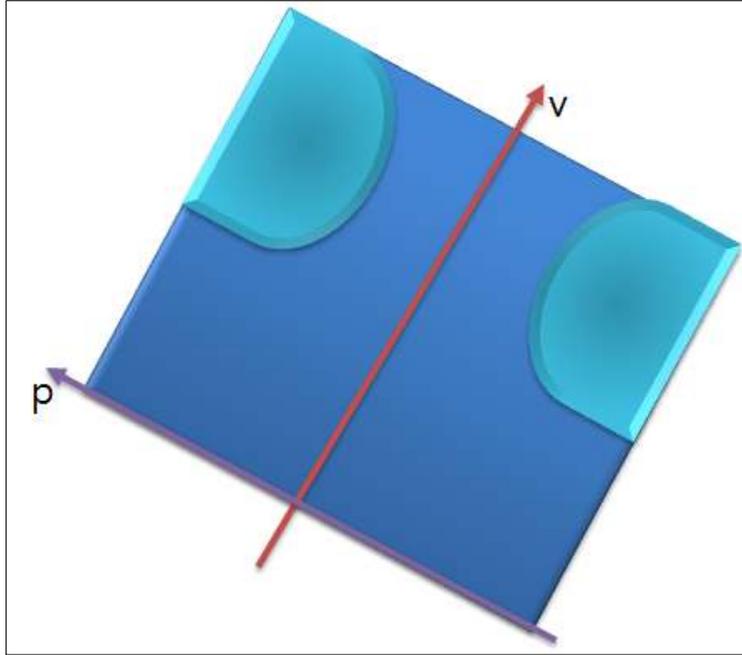


그림 24. 물체에 의한 척력 포텐셜 롤오버 그리고  
사이드슬립 제약

인력과 척력의 전위장에 착안점을 둔 이 방법은 형상공간의 모델링이 필요 없이 비교적 간단한 계산으로 로봇의 경로계획이 가능하다. 그림 24는 포텐셜 필드 내에서 로봇의 움직임을 나타내고 있다. 그러나 국소적 최소점을 발생시키는 큰 문제점이 있다. 많은 학자들이 이 문제점을 해결하고자 노력하였으며, 포텐셜 함수의 재정의 그리고 검색 기술의 사용 등의 방법을 제시하였다. 그러나 이런 방법들도 몇 가지 한계가 있어 현재까지 이 부분의 연구가 활발하게 진행되고 있다[41, 42, 43].

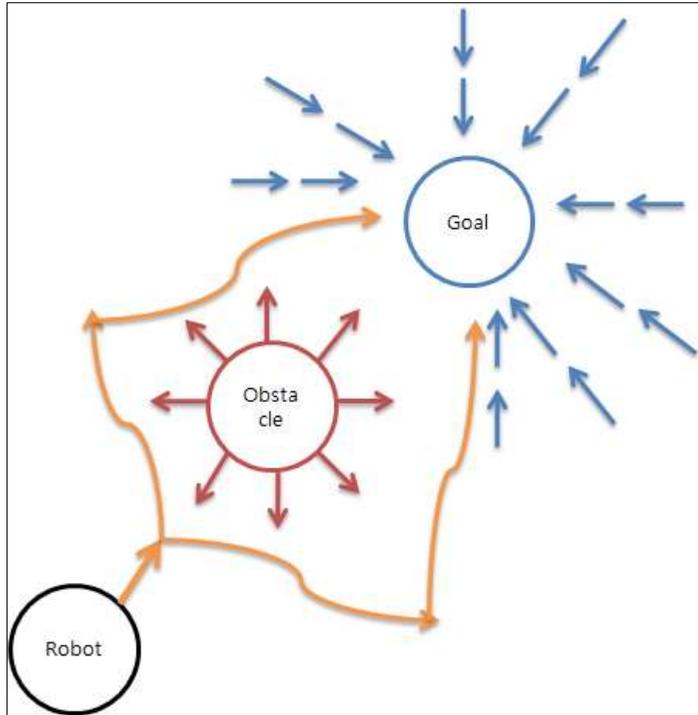


그림 25. 포텐셜 필드 방법 개념도

### a) 포텐셜 필드의 종류

포텐셜 필드의 종류는 크게 5가지로 분류한다. 균일 필드(Uniform Field), 수직 필드(Perpendicular Field), 인력 필드(Attractive Field), 반력 필드(Repulsive Field), 그리고 접선 필드(Tangential Field)이다.

균일 필드는 그림 25에서 보는 바와 같이 각 점들(points)에서의 벡터의 크기(Magnitude)와 방향(Direction)이 동일한 구조이다.

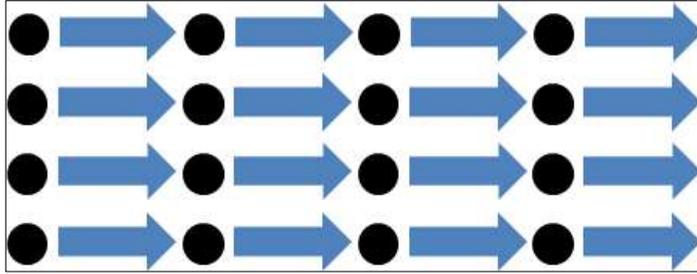


그림 26. 균일한 영역

그림 26은 수직 필드를 나타낸다. 수직 필드는 점의 벡터 방향이 선형준선 (Linear Diametric)을 향하거나 멀어지는 형태로서, 크기는 준선과 점사이의 거리 함수로 나타낸다.

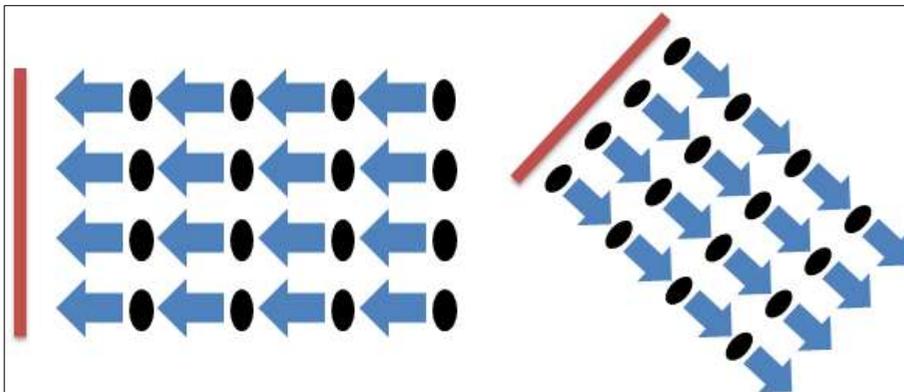


그림 27. 수직 영역

그림 27은 인력 필드를 나타낸다. 인력 필드는 각 점에서의 벡터 방향이 초점 (Focal Point)으로 향하는 형태이며, 크기는 초점과 점사이의 거리 함수로 나타낸다.

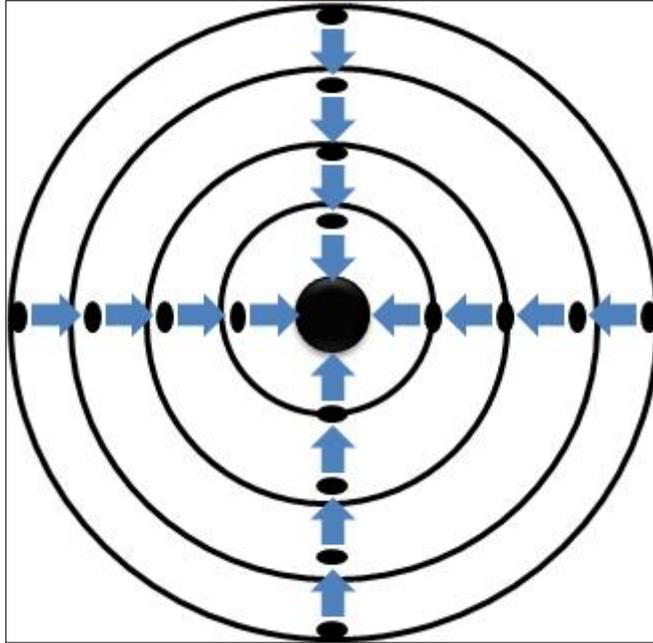


그림 28. 인력 영역

그림 28은 척력 필드를 나타낸다. 척력 필드는 각 점에서의 벡터 방향이 초점 (Focal Point)으로 멀어지는 형태이며, 크기는 초점과 점사이의 거리 함수로 나타낸다.

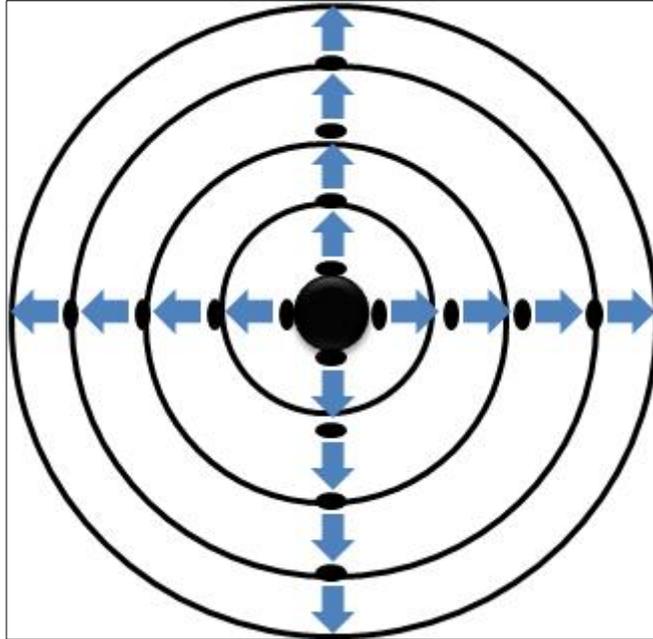


그림 29. 반발 영역

그림 28은 접선 필드를 나타낸다. 각 점에서의 벡터 방향은 초점에서 접선 방향의 형태이며, 방향은 시계방향 혹은 반시계방향이다. 크기는 초점에서 떨어진 거리 함수로 표현한다.

### b) 벡터 크기 (Vector Magnitude)

벡터의 방향은 포텐셜 필드의 종류에서 결정한다. 벡터의 크기는 일반적으로 상수(Constant), 직선(Linear), 그리고 지수(Exponential) 형태가 있으며, 최근에는 다양한 기법들이 제시 및 적용되어 활발한 연구가 진행되고 있다. 본 논문에서는 벡터의 크기를 퍼지 로직으로 구성하였다.

## 2) 가상역장(Virtual Force Field)

가상 역장 (VFF: Virtual Force Field)은 이동 로봇의 장애물 회피 문제에 적용된 방법으로서, Borenstein과 Korem이 장애물의 감지에 초음파 센서를 사용하기 위해 인공 전위계 방법을 응용한 것이다[44]. 이는 이동 로봇이 장애물과 충돌하지 않으면서 주어진 시작점에서 목표점까지 이동하도록 동작 계획하는 문제이다. 또한 로봇은 주어진 작업을 수행하면서 다른 로봇, 작업 대상물, 작업자 등이 장애물들과 충돌하지 않아야 한다. 가상 역장 방법은 시간에 따라 위치와 형상이 변하는 시변 장애물에 대한 실시간(Real-time) 충돌 회피의 문제로 대두되고 있다[45].

### a) 기본적인 VFF 방법(The Basic VFF Method)

기본적인 VFF 방법은 확실성 격자(Certainty Grid)를 가진 포텐셜 필드 방법의 조합(Combination)으로 설명된다. 이를 그림 29에서 표현하였다. VFF 방법은 이동 로봇의 강인 제어 구조(Robust Control Schematic)에 적합하다.

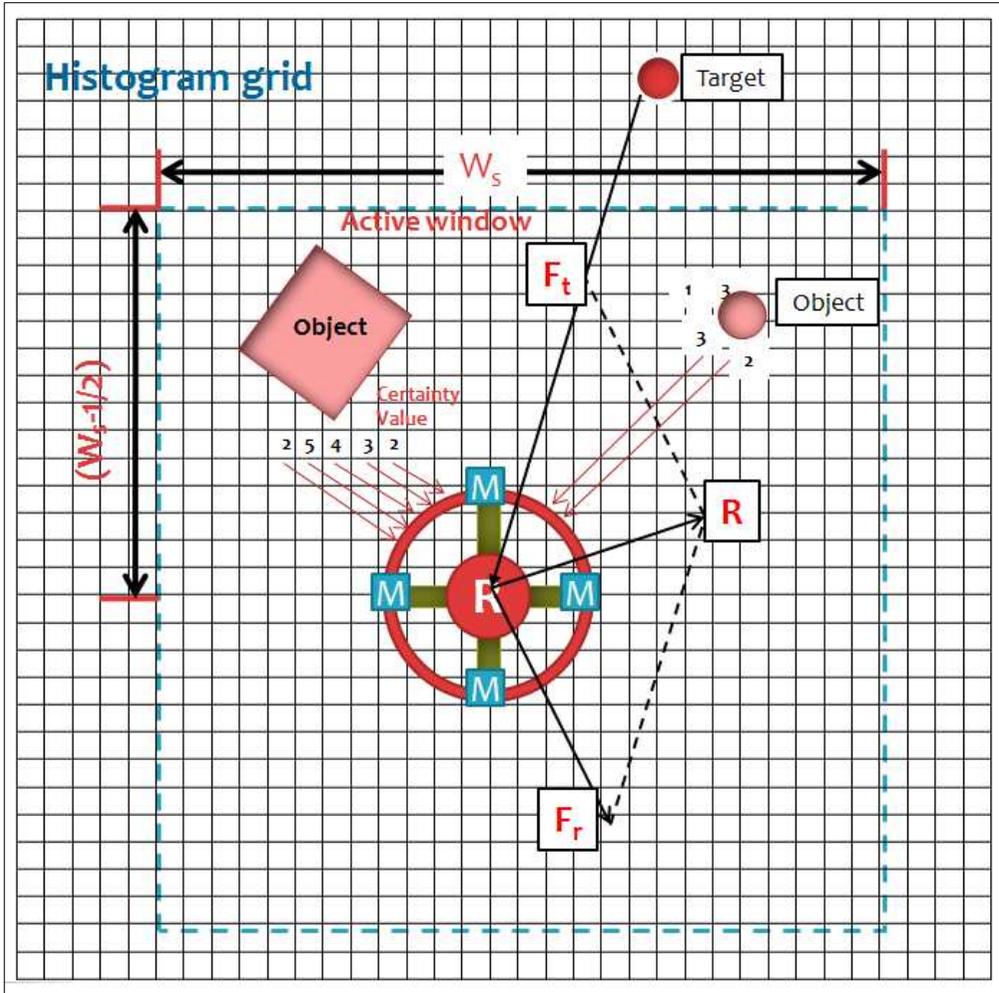


그림 30. VFF 기본 개념도

이동 로봇이 진행함에 따라 확실성 격자(certainty Grid)가 투영되어 그 값이 획득되고, 동시에 알고리즘에 의해 격자(Grid)의 작은 사각 창(Square Window)이 조사되어간다. 창(Window)안의 획득한 각 셀(Cell)은 로봇의 반력(Repulsive Force)이 적용되고, 이동 로봇을 측정된 셀들의 수치만큼 밀어낸다. 이 힘의 크기는 셀의 크리(Cell Contents),  $C(i, j)$ 에 비례하고, 셀과 로봇사이의 거리 제곱에 반비례한다. 이를 식 40으로 나타내었다.

$$F(i,j) = \frac{F_{cr} C(i,j)}{d^2(i,j)} \left[ \frac{x_t - x_0}{d(i,j)} \hat{x} + \frac{y_t - y_0}{d(i,j)} \hat{y} \right] \quad (40)$$

여기서,

$F_{cr}$  : 반발력 상수

$d(i,j)$  : Cell(i,j)과 로봇사이의 거리

$C(i,j)$  : Cell(i,j)의 확실성 정도(Certainty Level)

$x_0, y_0$  : 로봇의 현재 좌표

식 40에서 장애물에 대한 반발력 정도를 표현함을 알 수 있다. 식 40의 방법을 통해서 이동 로봇은 셀들에 근접했을 경우에는 반발력이 강해지고, 이동 로봇이 멀어질 경우에는 반발력이 약해진다. 반발력의 총 합력인  $F_r$ 은 모든 셀에 대한 각각의 힘의 벡터 합으로 표현한다. 이를 식 41에 표현하였다.

$$F_r = \sum_{i,j} F(i,j) \quad (41)$$

상수로 표현하는 흡인력  $F_t$ 는 로봇을 목표점(Target)으로 당긴다.

$$F_t = F_{ct} \left[ \frac{x_t - x_0}{d(t)} \hat{x} + \frac{y_t - y_0}{d(t)} \hat{y} \right] \quad (42)$$

여기서,

$F_{ct}$  : 흡인력 상수

$d(t)$  : 목표점(Target)과 로봇사이의 거리

$x_t, y_t$  : 목표점 좌표

흡인력  $F_t$ 는 절대 거리(Absolute Distance)와는 무관하다. 그림 29에서 보는 바와 같이 얻어진 셀로부터 발생한 힘의 벡터 총합인 반발력과 목표점으로 발생하는 흡인력이 더해져서 총 합력 벡터(Resultant force Vector)  $R$ 은 식 43과 같다.

$$R = F_t + F_r \quad (43)$$

R의 방향인  $\delta = R/|R|$  (degree로 표현)은 로봇의 조종율(Steering-rate)지시 (Command)  $\Omega$ 를 위한 기준으로 사용한다.

$$\Omega = K_s [\theta(-)\delta] \quad (44)$$

여기서,

$K_s$  조종을 위한 비례 상수 (Proportional constant)

$\theta$  현재 운동 방향 (Degree로 표현)

(-) 연산자(Operator)는  $\theta$ 와  $\delta$  사이의 가장 작은 회전이며,  $\Omega$ 는 항상  $-180^\circ < \Omega < 180^\circ$  범위에 존재한다.

## 2. EVFF(Expansion Virtual Force Field) 알고리즘

VFF 알고리즘의 기본 개념은 쿨롱의 법칙을 적용하는 것으로서, 이동 로봇 분야에서 널리 이용하였다. 이 기법은 로봇과 목표점 사이에는 다른 극성의 전하를 가지고, 로봇과 장애물 사이에는 같은 극성의 전하를 가진다고 가정하여 로봇과 목표점 사이에는 흡인력( $\vec{F}_a$ )이 작용하고, 로봇과 장애물 사이에는 반발력( $\vec{F}_r$ )이 작용하여 원하는 목표점에 도달하도록 하는 경로 계획 알고리즘으로서, 이를 표현하면 식 45와 같다. 그림 30은 단순화한 VFF의 개념을 나타낸다.

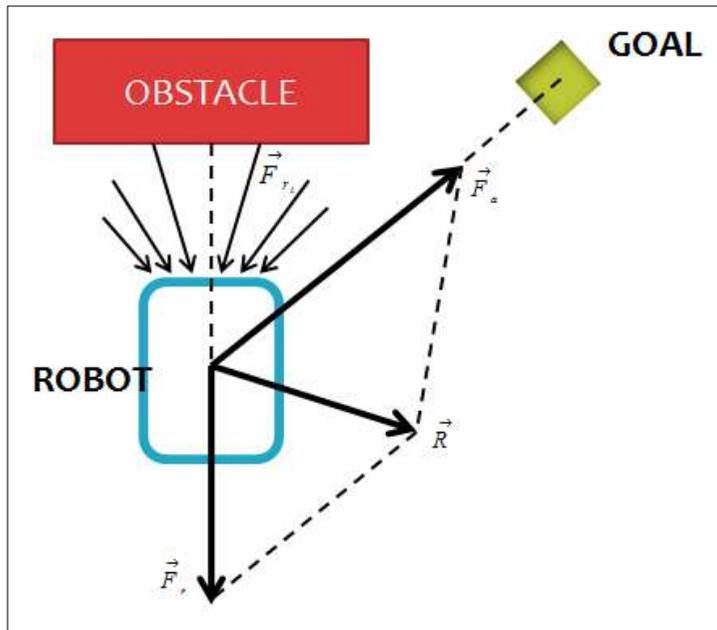


그림 31. 단순화한 VFF의 개념

$$\vec{R} = \vec{F}_a + \vec{F}_r \quad (45)$$

여기서,  $\vec{F}_a$ 는 로봇이 목적지로 향하는 흡인력이고,  $\vec{F}_r$ 은 로봇과 장애물 사이의

반발력이며,  $\vec{R}$ 은 총 합력을 의미한다. 일반적으로,  $\vec{F}_a$ 와  $\vec{F}_r$ 의 크기는 상수 혹은 고정된 수식으로 한다. 이 알고리즘은 경로 유지를 위한 기능은 없으며, 이동 로봇이 현재 위치에서 목적지로만 향한다. 또한, 고정 장애물에 대한 충돌 회피 능력은 가진다. 그러나 수질 환경 모니터링을 위해서 지형 탐사나 다양한 수상의 기구물 등의 조사등과 같은 임무를 수행할 경우에는 지정된 항로를 잘 추종해야 한다. 그리고 장애물 충돌 회피에서 자유공간에 대한 가상 인력을 해결하기 위해서는 기존의 VFF 방법으로는 해결할 수 없다. 그림 31은 일반적인 VFF를 이용한 충돌 회피 알고리즘이다.

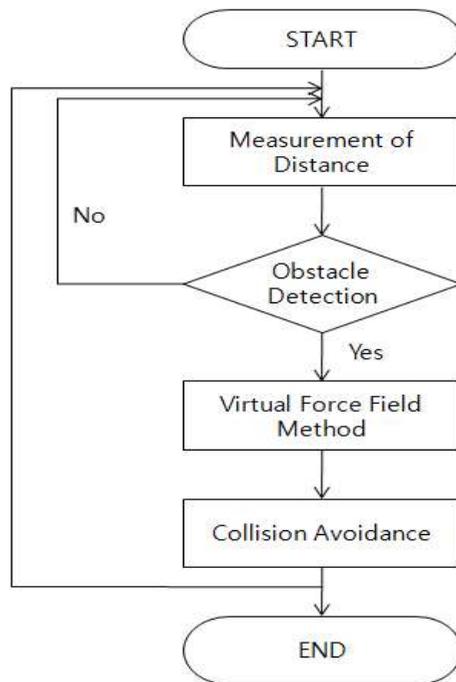


그림 32. VFF 충돌회피 알고리즘 순서도

※ Pseudo code of VFF

```

if any object in front of the robot then Vconst = 2 * certan_value max
      else if no objects then Vconst = desired dist - dist_sensor max
else Vconst = desired dist - dist_sensor reading

resulting in angle to turn = 1rad * Pconst * Vconst
  
```

본 논문에서는 항로 유지와 충돌 회피의 능력을 가지는 EVFF 방법을 제안한다. EVFF 방법은 로봇과 장애물 사이에는 같은 극성의 전하를 가진다고 가정하고 로봇과 목표점 사이에 흡인력( $\vec{F}_a$ )이 작용하며 로봇과 장애물 사이에는 반발력( $\vec{F}_r$ )이 작용하여 원하는 목표점에 도달한다. 그림 31과 식 46에서 자유공간에 대한 가상 인력에 대한 개념을 나타내고 있다.

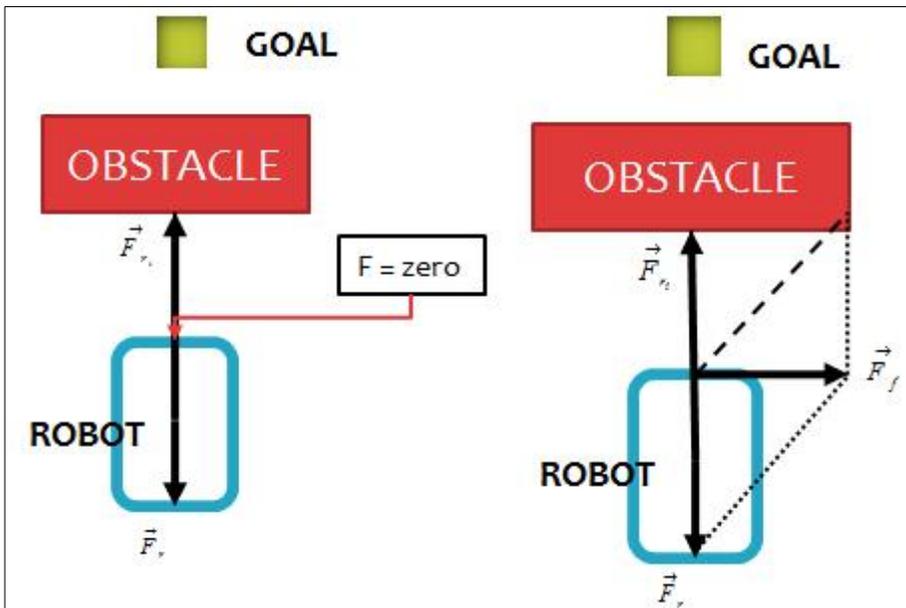


그림 33. 자유공간에 대한 가상 인력 기본 개념

$$\vec{R}' = \vec{R} + \vec{F}_f \quad (46)$$

여기에서,  $\vec{R}'$ 은 자유공간에 대한 벡터방향을 추가한 합성 벡터가 되며,  $\vec{R}$ 은 앞선 두 벡터의 합성 벡터방향과  $\vec{F}_f$ 는 자유공간으로의 합성 벡터방향이다. EVFF의 개념은 식 47과 같다.

$$F_l = F_d \left[ \left( \frac{x_t - x_0}{d(t)} \right)^x + \left( \frac{y_t - y_0}{d(t)} \right)^y \right] \quad (47)$$

여기서,

$(x_t, y_t)$  : 지역 최소점의 좌표

$(x_0, y_0)$  : 현재 로봇의 위치 좌표

$F_d$  : 지역 최소점과의 거리에 반비례하는 힘

식 47을 통해 전체적인 힘은 식 48과 같다.

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_a + \mathbf{F}_r + \mathbf{F}_f + \mathbf{F}_l \quad (48)$$

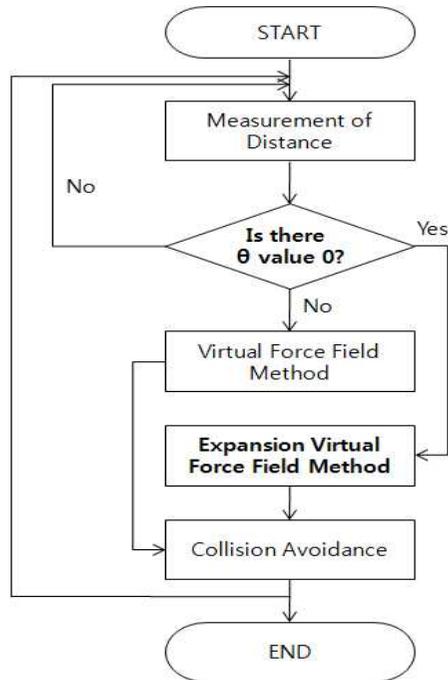


그림 34. EVFF 충돌회피 알고리즘 순서도

※ Pseudo code of EVFF

```

if any object in front of the robot then  $V_{const} = 2 * \text{certain\_value max}$ 
  if theta_value is 0 then  $V_{const} = \text{certain\_value min}$ 
    else  $V_{const} = \text{desired dist} - \text{dis\_sensor reading}$ 
  else if no objects then  $V_{const} = \text{desired dist} - \text{dist\_sensor max}$ 
else  $V_{const} = \text{desired dist} - \text{dist\_sensor reading}$ 

resulting in angle to turn =  $1\text{rad} * P_{const} * V_{const}$ 
  
```

그림 33에서는 EVFF를 이용한 충돌회피 알고리즘 순서도와 Pseudo code를 보여주고 있다. EVFF에서의 새로운 아이디어는 식 48에 주어진 힘들을 결정하는 것이다. 그림 34에서 보는 바와 같이 EVFF는 수상 로봇의 항로 유지와 충돌 회피를

동시에 가능케 한다.

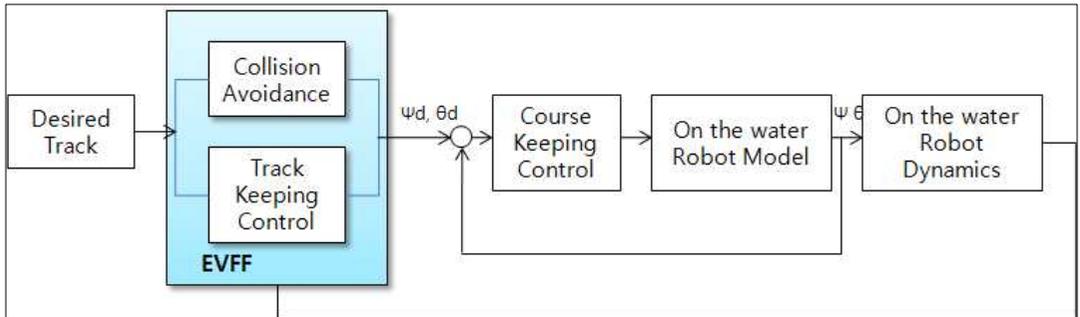


그림 35. 수상 로봇의 제안된 제어 방법

본 연구논문에서는 기본적인 항로 유지뿐만 아니라 수상 로봇이 자율 항해를 하는 동안 직면하게 되는 고정, 이동 장애물에 대한 다양한 충돌 회피 상황들을 표현하기 위해서 파라메타들을 퍼지론으로 구성하였다.

### 3. 항로 유지와 충돌 회피를 위한 퍼지 로직

#### 1) 퍼지논리제어의 개념

퍼지이론은 현상의 불확실한 상태를 그대로 표현해 주는 방법으로서 1965년 미국 버클리 대학의 자데(L. A. Zadeh)교수에 의해서 처음 소개되었다.

퍼지논리제어기는 퍼지이론을 응용한 것으로서 인간의 경험, 느낌을 기본으로 주관성을 이용한 해석이 불가능하거나, 또는 시스템으로부터 얻어지는 데이터가 부정확하거나 불확실한 경우 전문가의 지식과 경험에 의한 언어적인 제어 규칙을 수립, 적용함으로써 우수한 제어 결과를 나타내고 있다. 선형 시스템은 물론 비선형 특성을 가진 시스템에서도 유용하게 적용될 수 있다. 또한 퍼지제어기는 제어 규칙의 전반 조건부에 대한 다양한 조건 기술이 가능한 논리적 제어기이며 일련의 제어 규칙들에 의해 분산되어 적용할 수 있는 병렬 제어기이다[46].

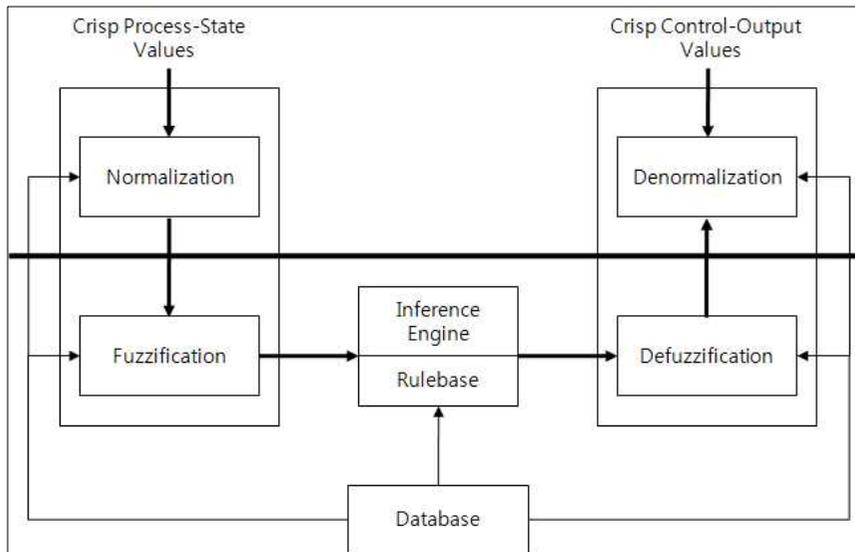


그림 36. 퍼지 제어기의 구조

지식기반 퍼지제어기의 기본적인 구조는 그림 35와 같다. 퍼지제어기는 규칙제어에 해당하는 퍼지 룰베이스가 있고, 계산 장치에 해당하는 추론장치를 기반으로 구성되어 있다. 단, 퍼지제어기가 플랜트 또는 오퍼레이터 등과 주고받는 데이터는 퍼지량이 아닌 크리습양이므로 퍼지량과 크리습양을 상호 바꾸어 줄 수 있는 변환 장치가 필요하다. 퍼지제어기의 경우, 퍼지화기(fuzzifier) 및 비퍼지화기(defuzzifier)가 그것이다. 실제의 퍼지제어기는 입력신호를 일단 표준규격화 시키는 정규화 모듈(normalization module)과 제어기 출력을 실제 액츄에이터/플랜트의 변수영역에 맞추는 비정규화 모듈(denormalization module)이 있고 이러한 여러 기능모듈(functional module)들이 상호 일관된 정보 체계 하에서 운영되도록 필요한 데이터를 제공하는 데이터베이스가 있다.

## 2) 퍼지제어 규칙과 추론방법

퍼지제어는 공정 제어 알고리즘을 제어 대상인 공정의 상태에 대한 정보 X, Y와 공정에 대한 입력 Z 사이의 퍼지 관계로 표현한다. 퍼지제어 알고리즘은 IF-THEN 조건문으로 주어진다. 즉, 'X가 작고 Y가 크면, Z는 중간이다.', 'X가 크고 Y가 중간이면, Z는 크다.'처럼 나타낸다.

이들을 퍼지제어 규칙(fuzzy control rule)이라 하고 이 규칙의 'IF'문을 선행조건(antecedent), 'THEN'문을 결론(consequent)이라 한다. 일반적으로 변수 X와 Y를 입력이라 하며 Z를 출력이라 한다. '작다'와 '크다'는 퍼지 변수로 X와 Y에 대한 퍼지값으로서 퍼지집합으로 표시된다. 퍼지논리제어기는 이들 퍼지 제어 규칙의 집단으로 구성되며 실제 입력이 주어질 때, 출력은 퍼지추론에 의하여 계산된다.

퍼지추론은 퍼지논리에 근거하는데 계산 시간을 고려하여 고속응답이 필요한 경우에는 간단한 방법이 이용된다. 퍼지제어기에서 사용하는 추론은 명제(퍼지논리제어기의 실제 입력)가 퍼지값이 아닌 보통의 수치라는 점에서 전형적인 퍼지추론과

는 다르다. 지식공학에서의 생성규칙(production rule)과 같은 분야에서 사용되는 방법들과 퍼지제어와 같은 분야에서 사용하는 방법의 주요한 차이점은 후자는 1단계 추론인 퍼지표현을 허용하나 전자는 거의 항상 다단계라는 점이다. 각 퍼지변수에는 고유의 소속 함수가 그림 36과 같이 부여된다.

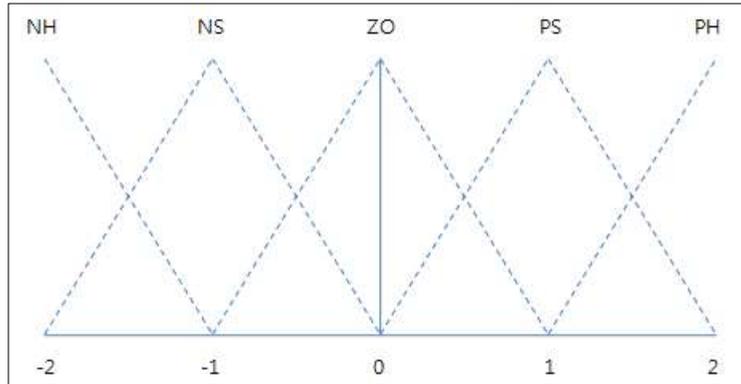


그림 37. 퍼지변수의 소속 함수

위의 그림 36에서 NH, NS, ZO, PS, PH는 각각 큰 음의 값(negative high), 작은 음의 값(negative small), 영(zero), 작은 양의 값(positive small), 큰 양의 값(positive high)들의 의미를 나타내며 이들 모두 구간[-2, 2]의 퍼지 부분집합(퍼지수)를 나타낸다.

퍼지제어의 경우 양이나 음의 값을 가질 수 있는 입력 변수와 출력 변수의 영역은 보통 [-2, 2]로 정규화되며 양의 값만을 갖는 경우에는 [0, 2]로 정규화된다. 따라서 스케일링 인자를 도입하면 모든 변수들에 대한 퍼지변수로 사용할 수 있다 [47].

### 3) 퍼지수 및 삼각 퍼지수

퍼지수(fuzzy number)란 ‘대략 다섯’, ‘서넛’, ‘여럿’ 등의 표현과 같이 수적개념 중에서 애매모호한 성질의 수량을 나타내며, 실용상 매우 유효한 것이다[48]. ‘약 10cm’는 구체적인 수치를 포함한 표현이며, 10cm를 중심으로 그 상하의 길이를 애매하게 가리키고 있다. 이와 같이 ‘약 10cm’를 길이 상의 집합, 퍼지집합으로서 기술하는 방법이 퍼지수의 고찰 방법이다.

소속 함수가 그림 37과 같이 삼각형인 퍼지수를 삼각 퍼지수(triangular fuzzy number)라 부른다.

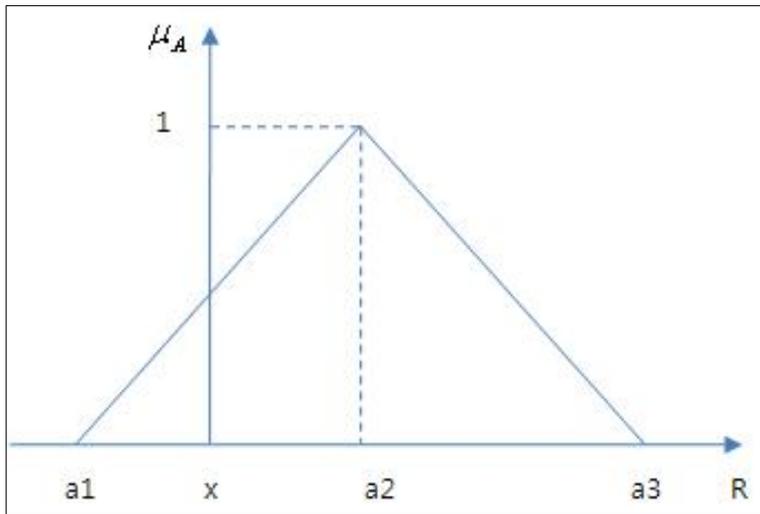


그림 38. 삼각 퍼지수

그림 37의  $\mu_A(x)$ 는 식 49와 같이 나타낼 수 있다.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a_1, \\ (x - a_1)/(a_2 - a_1), & a_1 \leq x \leq a_2, \\ (a_3 - x)/(a_3 - a_2), & a_2 \leq x \leq a_3, \\ 0, & a_3 \leq x \end{cases} \quad (49)$$

#### 4) 비퍼지화기

비퍼지화기는 퍼지집합으로 표시되는 퍼지량으로부터 크리슝양(crisp number data)을 얻는 변환장치이다. 비퍼지화기의 종류에는 무게중심법(center of gravity method), 합중심법(center of sums method), 높이법(height method), 최대면적 중심법(center of largest area method), 첫 최대값 방법(first of maxima method), 최대치 평균법(middle of maxima method)등이 있다.

본 논문에서는 간략화된 무게중심법(simplified center of gravity method)을 사용하기로 하며, 이 방법은 다음과 같다.

각각의 퍼지규칙  $R_i$ 에 의한 근사추론결과  $B_i'$ 을 식 50의 COG방법으로 비퍼지화된다.

$$u_i^* = COG(B_i'), i = 1, 2, \dots, N \quad (50)$$

전체규칙에 의한 비퍼지화된 추론결과를 식 51로 정의한다.

$$u^* = \frac{\sum_{i=1}^N u_i^* k_i}{\sum_{i=1}^N k_i} \quad (51)$$

여기서  $k_i$ 는 퍼지제어규칙  $R_i$ 의 적합도이다. 간략화된 COG 방법에서는 명제연산자 'also'를 정의한 것으로 이해할 수 있으며, 이 방법의 장점으로는 COG의 장점 이외에 구현이 쉽다는 점이 있다.

## 5) 입출력 변수의 정의

본 논문에서 사용한 입출력 변수와 소속 함수는 다음과 같다.

### 1) 자세제어 입출력 변수 정의

-입력 변수 : 방위각( $\theta_a$ ), 기울기각( $\theta_r$ )

-출력 변수 : 1, 2, 3, 4 프로펠러 속도( $v_1, v_2, v_3, v_4$ )

여기서 방위각은 이동로봇의 1, 2, 3, 4 프로펠러 중 파도에 의해 기울어진 프로펠러의 번호를 말하고 기울기각은 기울어진 프로펠러가 아래로 기울어진 각도를 말한다. 퍼지 소속 함수는 표 4와 같다.

표 4. 자세 제어 퍼지 소속 함수

방위각 (°)	Slope angle(°)
N(1)	VS : Very short (0~10)
E(2)	SH : short (5~15)
S(3)	NO : Normal (10~20)
	BI : big (15~25)
W(4)	VB : Very big (20~30)

### 2) 항로 유지 및 충돌 회피 입출력 변수 정의

-입력 변수 : 거리( $d$ ), 각도( $\theta$ )

-출력 변수 : 1, 2, 3, 4 프로펠러 속도( $v_1, v_2, v_3, v_4$ )

여기서 입력변수의 거리는 현재 이동로봇과 적외선 센서에 의해 감지된 장애물

과의 거리 중에 가장 작은 값이고, 각도는 장애물이 놓은 방향과 현재 이동로봇의 진행 방향 사이의 각도이다. 퍼지 소속 함수는 표 5와 같다.

표 5. 항로 유지 및 충돌 회피 퍼지 소속 함수

Distance (cm)	Error angle(°)
VN : Very near (0~60)	NB : Negative big (-30~-60)
NE : Near (0~120)	NS : Negative short (0~-45)
FA : Far (60~180)	ZZ : Zero (-30~30)
VF : Very far (120~180)	PS : Positive short (0~45)
	PB : Positive big (30~60)

## 6) 퍼지 소속 함수 및 제어 규칙

위와 같은 입력 변수와 출력 변수를 사용하여 퍼지 소속 함수를 그림 38, 39, 그리고 40과 같이 그래프로 나타내었다. 수상로봇의 1, 2, 3, 4 프로펠러 속도를 제어하는 경우의 제어 규칙을 표 6와 표 7에 나타내었다. 표 6과 같이 전조건부의 입력 변수  $\theta_a$ 와  $\theta_r$ 에 대해 각각 4개와 5개의 퍼지 변수를 선택했을 때 1, 2, 3, 4 프로펠러 rpm 속도의 출력에 적용된 제어 규칙은 총 80개이다.

표 7과 같이 전조건부의 입력 변수  $d$ 와  $\theta$ 에 대해 각각 4개와 5개의 퍼지 변수를 선택했을 때 1, 2, 3, 4 프로펠러 rpm 속도의 출력에 적용된 제어 규칙은 총 80개이다.

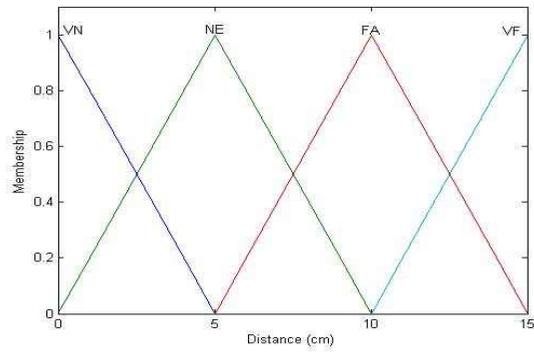


그림 39. 거리에 대한 소속 함수

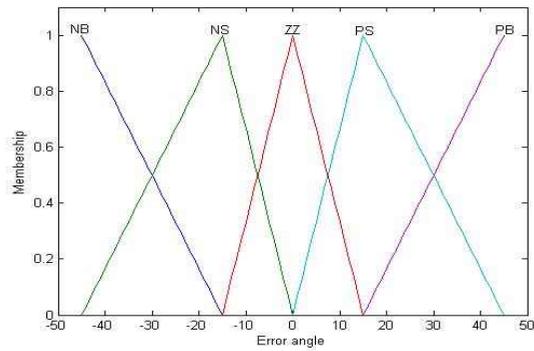


그림 40. 오차 각에 대한 소속 함수

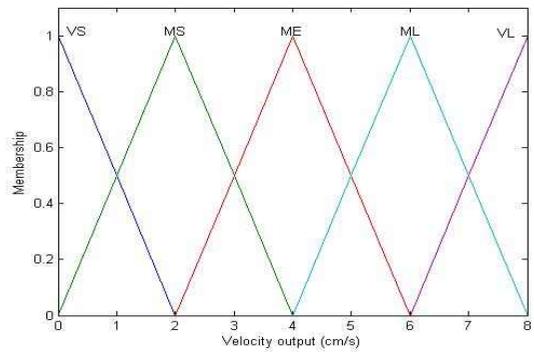


그림 41. 속도에 대한 출력 소속 함수

표 6. 자세 제어 퍼지 제어규칙

Fuzzy input		Fuzzy output			
Azimuth	Slope	1st propeller rpm	2nd propeller rpm	3rd propeller rpm	4th propeller rpm
N	VS	HS	VHS	VHS	VHS
N	SH	MS	VHS	VHS	VHS
N	NO	ML	VHS	VHS	VHS
N	BI	HL	VHS	VHS	VHS
N	VB	VHL	VHS	VHS	VHS
E	VS	VHS	HS	VHS	VHS
E	SH	VHS	MS	VHS	VHS
E	NO	VHS	ML	VHS	VHS
E	BI	VHS	HL	VHS	VHS
E	VB	VHS	VHL	VHS	VHS
S	VS	VHS	VHS	HS	VHS
S	SH	VHS	VHS	MS	VHS
S	NO	VHS	VHS	ML	VHS
S	BI	VHS	VHS	HL	VHS
S	VB	VHS	VHS	VHL	VHS
W	VS	VHS	VHS	VHS	HS
W	SH	VHS	VHS	VHS	MS
W	NO	VHS	VHS	VHS	ML
W	BI	VHS	VHS	VHS	HL
W	VB	VHS	VHS	VHS	VHL

표 7. 항로 유지 및 충돌 회피 퍼지 제어규칙(a가 기준일 경우)

Fuzzy input		Fuzzy output			
Distance	Angle	1st propeller rpm	2nd propeller rpm	3rd propeller rpm	4th propeller rpm
VN	NB	VHL	ML	VHS	VHS
VN	NS	VHL	HL	VHS	VHS
VN	ZZ	VHS	VHL	VHL	VHS
VN	PS	VHS	VHS	HL	VHL
VN	PB	VHS	VHS	ML	VHL
NE	NB	HL	MS	VHS	VHS
NE	NS	HL	ML	VHS	VHS
NE	ZZ	VHS	ML	ML	VHS
NE	PS	VHS	VHS	ML	HL
NE	PB	VHS	VHS	MS	HL
FA	NB	ML	HS	VHS	VHS
FA	NS	ML	MS	VHS	VHS
FA	ZZ	VHS	HS	HS	VHS
FA	PS	VHS	VHS	MS	ML
FA	PB	VHS	VHS	HS	ML
VF	NB	MS	VHS	VHS	VHS
VF	NS	MS	HS	VHS	VHS
VF	ZZ	VHS	VHS	VHS	VHS
VF	PS	VHS	VHS	HS	MS
VF	PB	VHS	VHS	VHS	MS

## IV. 실험 및 결과 고찰

### 1. 이동로봇 제어시스템 구성

#### 1) 이동로봇의 전체 구조

자율 주행 시스템을 구현하여 적용하기 위해 사용한 수상용 자율주행 로봇은 자체 제작하였으며 그림 41은 고정밀 모터 제어 및 주행거리 측정, 다양한 센서를 통한 근거리, 원거리 장애물 검출, GPS, WiFi 그리고 ZigBee 통신 시스템을 등을 탑재하고 있어 소규모 연구 및 개발에 적당한 형태의 소프트웨어와 하드웨어로 구성되어 있다. 그림 41은 로봇의 전면부 사진이고 그림 42, 43은 실제 로봇의 모습이다.

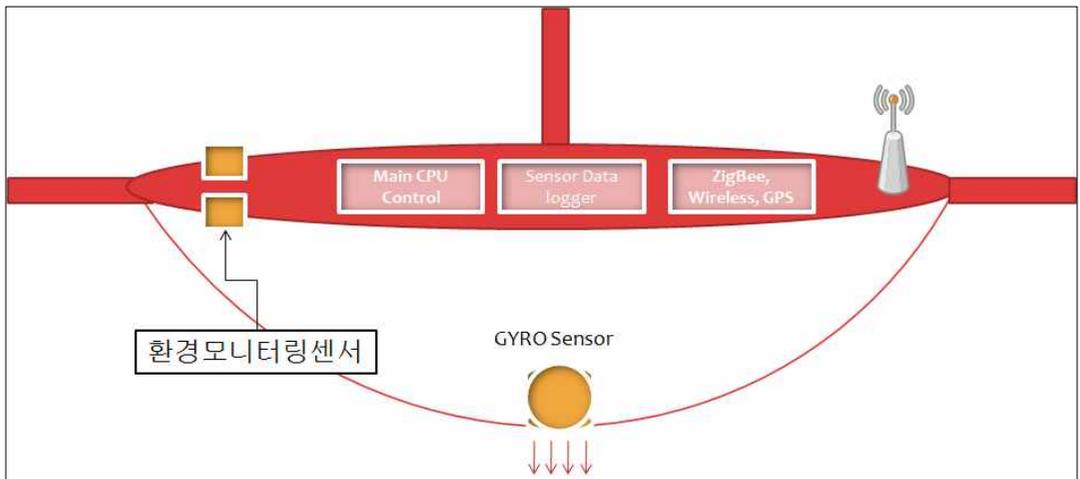


그림 42. 환경 모니터링을 위한 수상 자율주행 로봇의 전면부

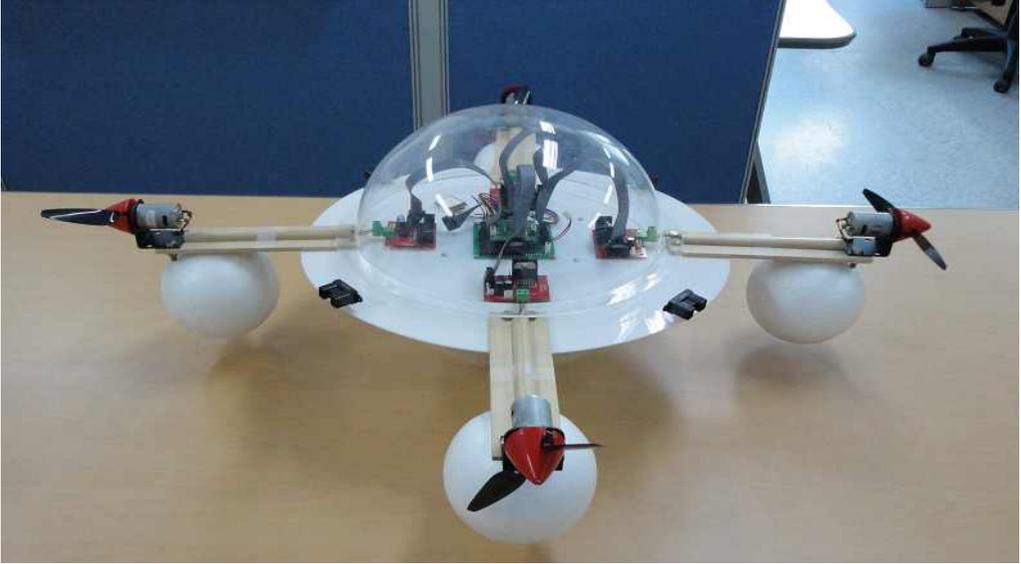


그림 43. 수상 자율주행 로봇1



그림 44. 수상 자율주행 로봇2

각 프로펠러를 독립적으로 제어할 수 있는 프로펠러 구동형(differential type)이다. 이동로봇의 제어구조는 Intel Xscale PXA270(600MHz)와 AVR Atmega128 프로세서를 사용한다. 그리고 O/S는 Embedded Linux 2.6.x이다. 실험에 사용된 이동로봇의 규격은 표 8과 같다.

표 8. 수상 자율이동 로봇의 규격

<b>Size</b>	Diameter: 800 mm, Height: 300 mm
<b>Weight</b>	Approx 725 g
<b>Payload</b>	Approx 2000 g
<b>Power</b>	Swappable Lithium-Polymer battery pack(1400 mAh)
<b>Autonomy</b>	~8 hours, moving continuously, using AVR PXA255 board power consumption: Idle: 500mW, Max: 1200mW
<b>Speed</b>	Max 0.5 m/s
<b>propeller motor rpm</b>	5,000

수상용 자율주행 로봇은 총 4개의 적외선 센서와 Atmospheric pressure , O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, Temperature, Humidity 센서, 자세제어를 위한 GYRO 센서가 설치되어 있다. 이동로봇의 센서배치도는 그림 44와 같고 그림 45는 환경 센서 모듈을 보여주고 있다.

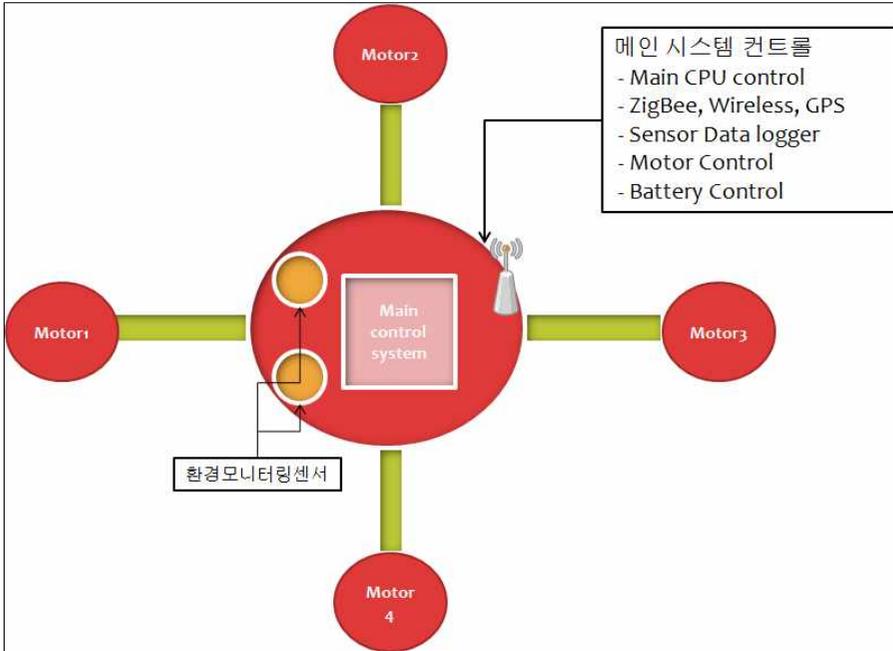


그림 45. 로봇의 각종 센서 및 통신 시스템 배치도



그림 46. 환경 센서 모듈

수상용 이동로봇이 이동할 때 다양한 각도로 장애물에 대한 정보를 측정할 수 있도록 하기 위해서 4개의 적외선 센서가 이동로봇 주위에 배치하고 있다. 적외선 센서는 최대 400cm까지 측정할 수 있다.

이동로봇은 주행 알고리즘을 구현하는 PXA270 임베디드 보드가 장착되어 있고 RS-232, ZigBee, WiFi, GPS 통신을 통한 무선 통신으로 로봇에 직접 구동 명령을 내린다.

## 2) 이동로봇 시스템 구성

이동로봇 시스템은 C&C++, JAVA 언어로 작성하였으며 크게 두 부분으로 나누어진다. 그림 46과 같이 지도 작성 프로그램과 주행 프로그램으로 분류된다.

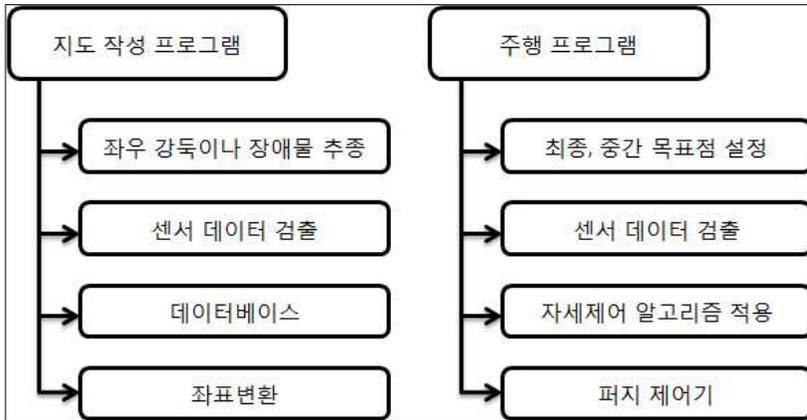


그림 47. 시스템 구현 전체 구성도

지도 작성 프로그램은 이동 로봇에 부착된 GPS 통신 데이터와 미리 작성된 맵 데이터를 이용하여 적외선 센서와 개선된 EVFF 알고리즘을 이용하여 자율적으로 물길의 흐름을 따라 이동하게 된다. 또한 이동하면서 적외선 센서로부터 장애물에 대한 거리와 엔코더 센서로부터 현재 로봇의 위치와 각도를 얻어서 데이터베이스

에 저장을 하게 된다. 그리고 저장된 정보를 통해서 좌표변환을 수행하여 지도 작성을 하게 된다. 주행 프로그램은 주행지도를 바탕으로 주행을 한다. 지도 작성 프로그램을 통해 주행지도 작성이 완성되며 지도 분석을 통하여 중간 목표점을 도출한다. 중간 목표점을 가지고 시작점에서 목표점까지 주행을 하게 된다. 주행 중에 적외선 센서를 통해서 감지된 고정 및 이동 장애물은 EVFF와 퍼지제어 알고리즘을 통해서 회피를 한다.

## 2. 이동로봇의 실험 및 결과 분석

### 1) 쿼드로터 자세제어 알고리즘을 이용한 추력 실험 분석

쿼드로터를 이용한 자세제어 알고리즘을 위해 4개의 프로펠러 및 DC 모터를 이용하여 PWM 신호 제어를 통해 실험 분석 하였다. 로봇에서 5000rpm 급의 DC 모터를 사용하여 각각 5°씩 30°까지 기울기를 주면서 자세제어를 하였다. 그림 47에서는 쿼드로터 자세제어를 위한 DC 모터 PWM 제어를 보여 주고 있다.

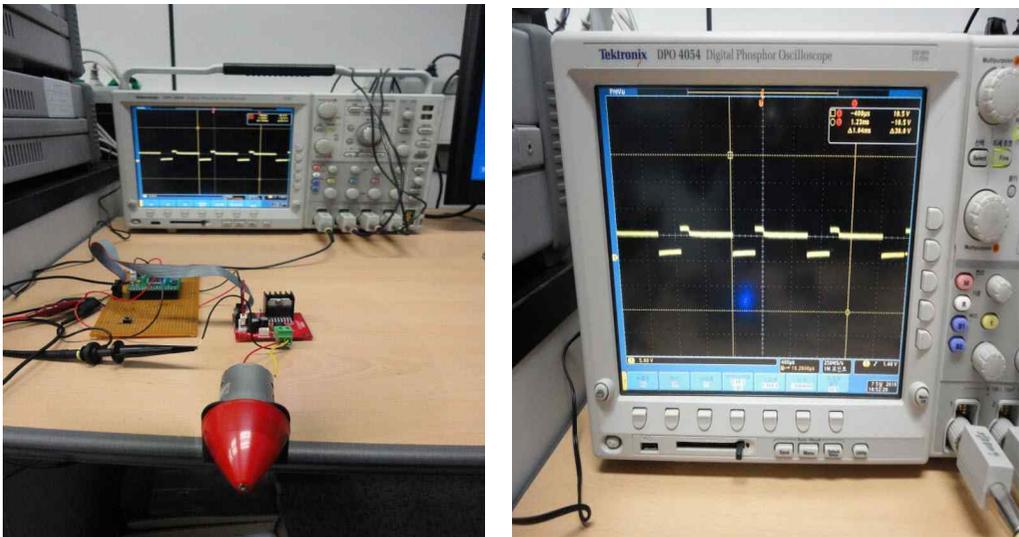


그림 48. 자세제어 DC motor 추력을 위한 PWM 제어

그림 48, 49, 50에서는 로봇의 기울기 방위각에 따른 모터 추력 값을 보여주고 있다. 각각 로봇의 기울기 방위각은 5°, 10°, 15°, 20°, 25°, 30°씩 6단계로 구성하였으며 로봇에 내장되어 있는 자이로센서를 통하여 방위 및 각에 대한 데이터를 수집하여 실시간으로 처리하게 되어 있다.

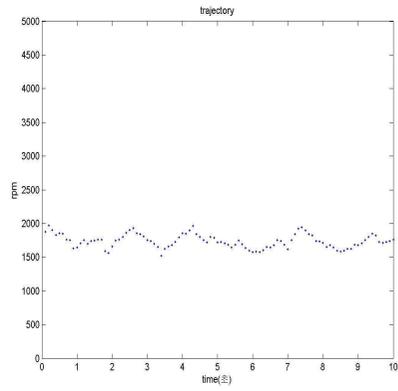
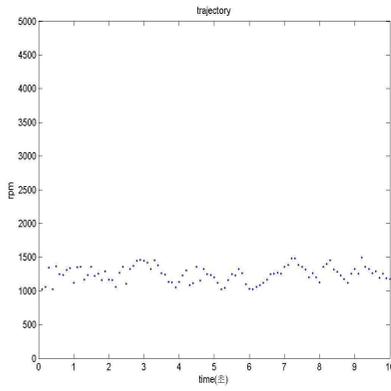


그림 49. 기울기 방위각  $0^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 에 따른 모터 추력

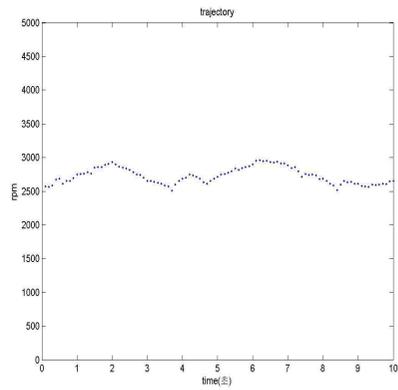
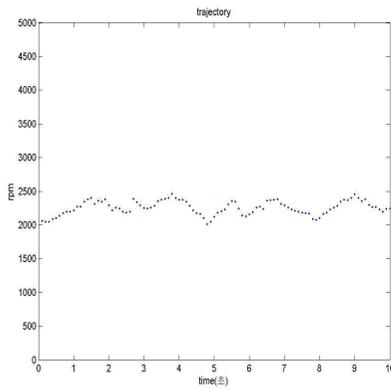


그림 50. 기울기 방위각  $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 에 따른 모터 추력

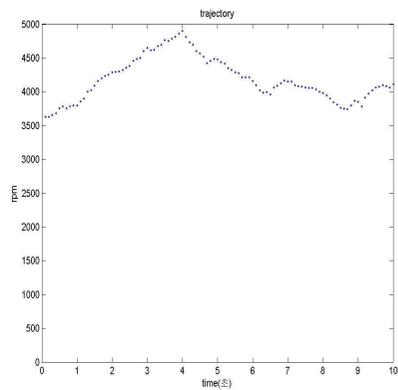
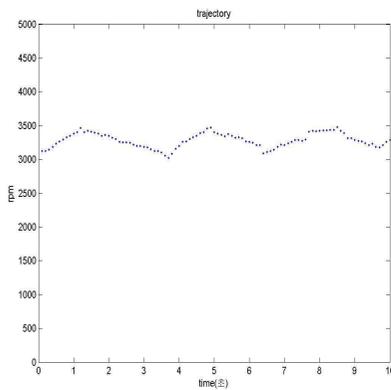


그림 51. 기울기 방위각  $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 에 따른 모터 추력

## 2) 개선된 EVFF(Expansion Virtual Force Field) 알고리즘을 이용한 장애물 회피 및 항로 유지를 위한 지도 작성 실험 및 분석

개선된 EVFF 알고리즘을 사용하여 이동로봇이 자율적으로 물길의 흐름을 타면서 실제 지도를 작성하는 실험을 수행하였다. 실내 환경에서 실험은 실제 커다란 수족관이 없는 관계로 실내 세트장을 구성하여 실험 환경은 그림 51과 같이 가로 2[m], 세로 3[m]의 공간에 50cm의 고정 장애물 두 개와 벽들로 구성되어있다. 실내 환경에서의 VFF와 EVFF를 비교 실험을 위해서 Swiss K-TEAM사 Khepera-III과 직접 제작한 시뮬레이션용 로봇을 사용하여 구동 실험 및 시뮬레이션 하였다.



그림 52. 실내 실험 환경

이동로봇은 (175, 0) 좌표에서 출발하여 목적지를 향해 이동하였다. 실제 환경에서는 강의 중심, 저수지나 담수호의 중심에서 환경 구성을 하여야 하나 자율주행에 목적이 있고 실제적으로 문제는 로봇이 이동 했을 경우 자율 주행에 문제가 발생함으로 실내 환경에 맞춰 장애물을 회피하면서 이동하는 세트를 구성하여 실험 하였다. 실험에서 장애물과 이동로봇 사이에 평균 10cm이상 간격을 유지하면서 20mm/s의 자율 속도로 이동하였다. 그림 52, 53, 54는 EVFF를 이용하여 Virtual Force Field 상에서 Certainty value를 구하는 것을 보여주고 있다.

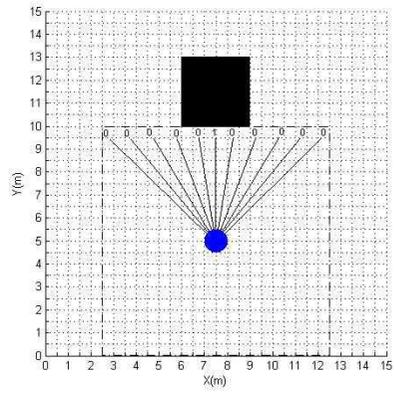
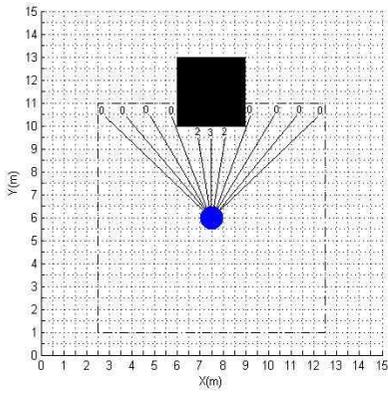


그림 53. EVFF를 이용한 Virtual Force Field에서 Certainty value1

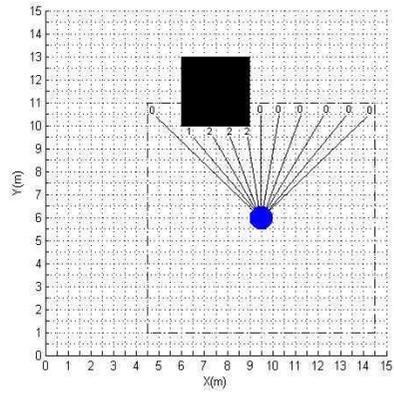
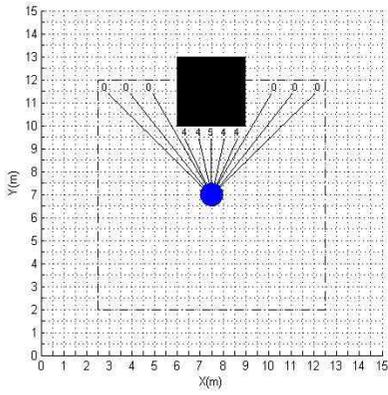


그림 54. EVFF를 이용한 Virtual Force Field에서 Certainty value2

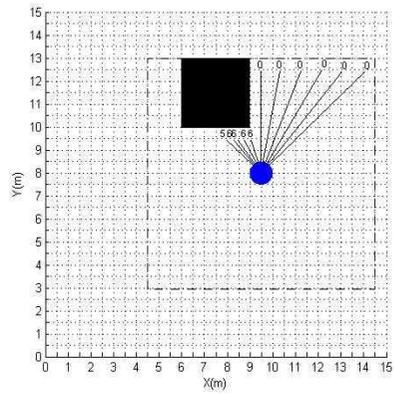
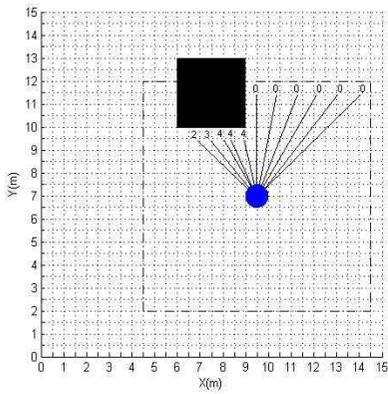


그림 55. EVFF를 이용한 Virtual Force Field에서 Certainty value3

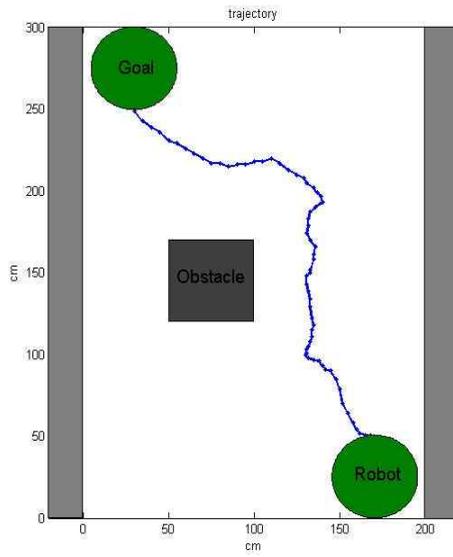


그림 56. EVFF를 이용한 충돌회피 및 자율주행1

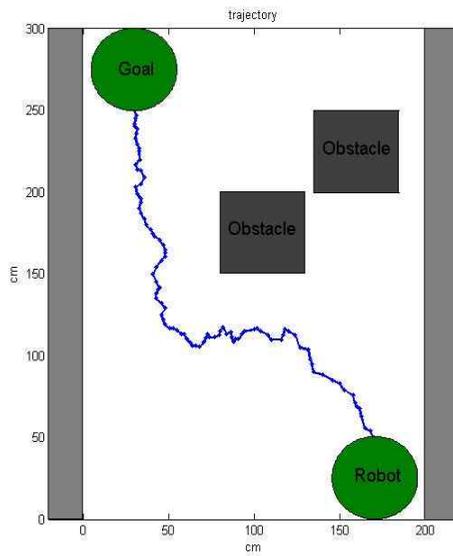


그림 57. EVFF를 이용한 충돌회피 및 자율주행2

그림 55와 그림 56은 실제 실험을 통하여 얻어낸 결과이다. 약 5cm~10cm 정도의 오차를 보이지만 목표점까지 잘 도착 했다는 것을 알 수 있다. 특히 코너 부분 회전 시에 발생하는 오차가 약간 있지만 거의 없이 대체적으로 맵핑되었다는 것을 알 수 있다. 반대로 VFF를 통한 장애물 회피와 자율 주행 맵핑한 결과는 그림 57과 같다. EVFF와는 달리 VFF는 다소 잘 이루어지지 않았다는 것을 보여 주고 있다.

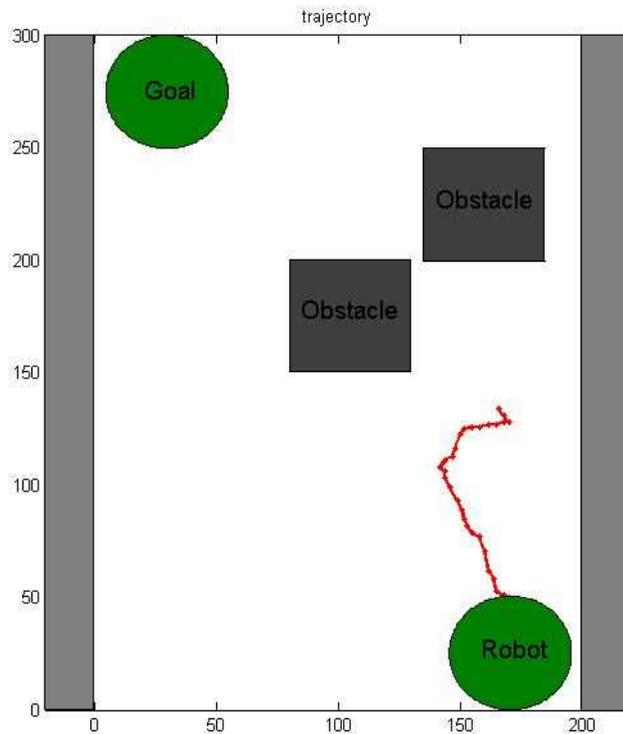


그림 58. VFF를 이용한 장애물 회피와 자율 주행

그림 55와 56에서 이동 로봇의 회전에 의한 오차가 나오지만 근소한 오차를 나타낸다. 다만, 블록 튀어 나온 부분에선 오차가 있다. 좀 더 정확한 맵핑을 위해서는 최적의 필터를 사용할 필요가 있을 것이다. 그림 58에서는 자유 공간에서의

VFF를 사용하여 자율주행에 실패한 것을 볼 수 있다.

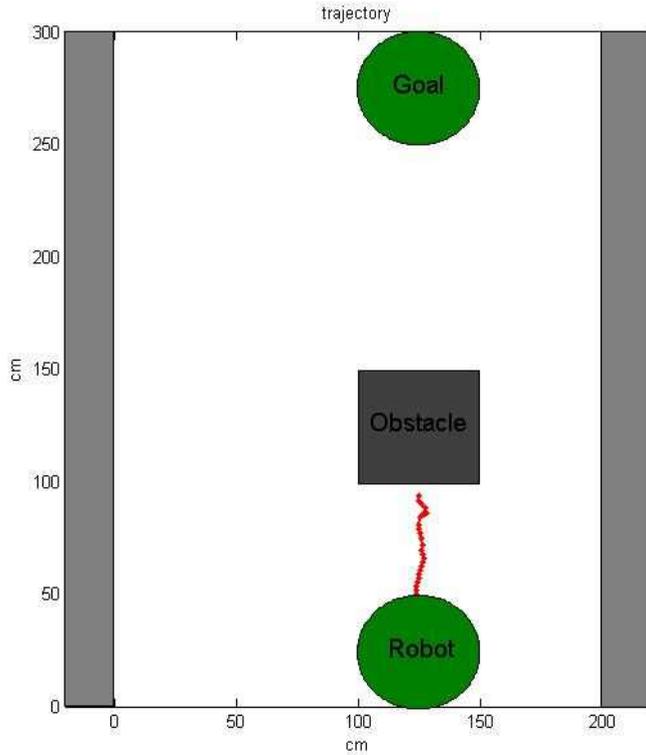


그림 59. VFF를 이용한 자유공간에서의 장애물 회피 및 자율 주행 실험

### 3) EVFF를 이용한 수상 이동로봇의 자유공간에서의 자율주행 실험 및 분석

수상 이동로봇의 자율주행은 EVFF 알고리즘과 퍼지로지식을 통해서 해당 로봇의 GPS 데이터와 자이로 센서의 데이터 값을 가지고 선행되어 맵이 매핑 되고 목표 점이 설정되어 주행 실험을 시뮬레이션 및 실험 하였다. 그림 55는 이동로봇의 실제 자율주행 실험에서 얻은 이동경로를 나타낸다. 주행 지도에서 보이는 바와 같이

최종 목표점에 대한 데이터를 가지고 경로 계획에 의해서 주행하였다. 또한 EVFF 알고리즘 및 퍼지로그직을 이용하여 중간 목표점들을 효율적으로 안전하게 경유하여 목표점까지 안전하게 도달하는 것을 볼 수 있다.

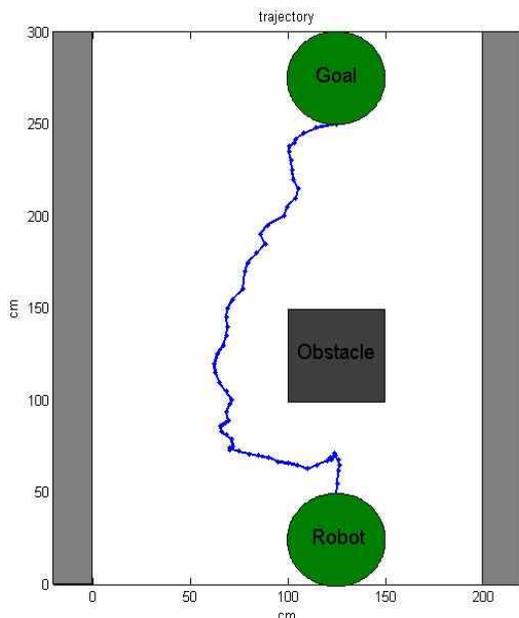


그림 60. 자유공간에서 자율주행 실험 및 분석

그림 59에서 EVFF를 통하여 x축 방향 (125, 0)에서 (125, 1000)로 이동하던 중 (125, 125) 중심에 지름이 50cm에 해당하는 사각 장애물을 놔두고 장애물을 회피하는 실험을 하였다. 그림 59에서처럼 자유공간에서 사각 장애물을 잘 회피하는 것을 볼 수 있다. 다만 회피 후에 목표점인 (300, 275)에 정확히 도달하지 못하고 오차가 발생하였다. 이것은 장애물 회피 할 때 생기는 궤적의 보상을 제대로 하지 못하면서 생긴 오차이지만 보완하면 로봇의 장애물 회피와 자율주행에 충분히 적용될 수 있을 것이다.

### 3. 환경 센서 모니터링 실험 및 결과 분석

환경 모니터링을 위한 센서는 Atmospheric pressure , O<sub>2</sub>, Co<sub>2</sub>, Temperature, Humidity 센서로 구성되어 있다. 모니터링된 센서 데이터는 ZigBee를 통해 전송된다. 그림 60은 USN ZigBee 통신 모듈을 보여주고 있다. 그림 61, 62, 63, 64, 65는 실험에 사용된 USN 센서모듈과 사용된 센서들을 보여주고 있다.



그림 61. USN ZigBee TI CC2431 module



그림 62. USN Sensor module

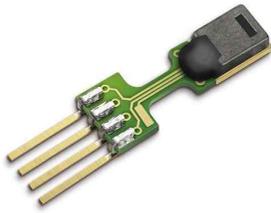


그림 63. SHT7x



그림 64. SMBA-1000



그림 65. SS1118



그림 66. GHFS41-P1XX

온·습도 센서는 SHT7x, Atmospheric pressure 센서는 SMBA-1000, O<sub>2</sub> 센서는 SS1118 Oxygen sensor를 사용하였으며, 마지막으로 Co<sub>2</sub> 센서로는 GHFS41-P1XX를 사용하였다. 그림 66에서는 환경 센서들로부터 센서 신호 샘플링을 그림 67, 68에서는 모니터링 한 화면을 보여 주고 있다.



그림 67. USN 환경센서 센서 샘플링 신호

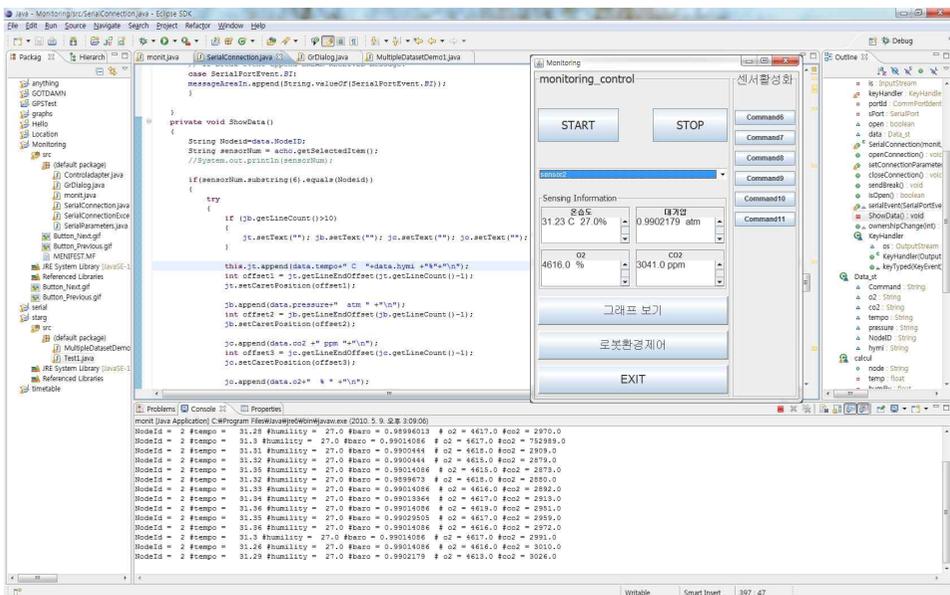


그림 68. 로봇시스템 환경 센서 모니터링 구현

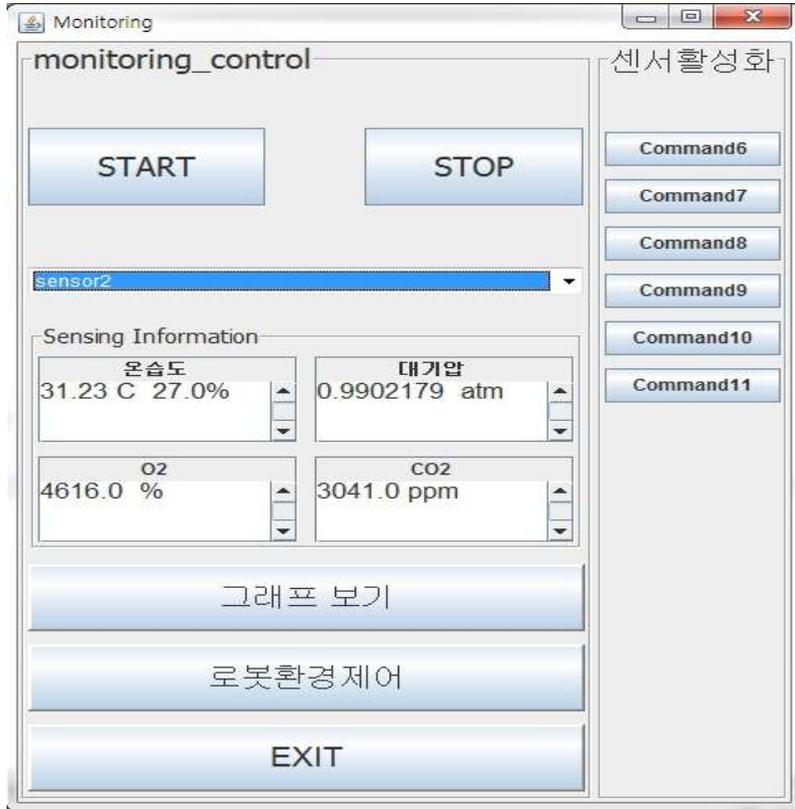


그림 69. 로봇시스템 환경 센서 모니터링

#### 4. 실제 수상 환경에서의 실험 및 분석

로봇의 실제 환경의 적응력과 자율주행 시험 성능 분석 및 센서 정보의 실시간 전송을 실험하기 위해 한국 아델리움 아파트 생태 정원 분수대를 대상으로 실험하였다. 실제 너비는 10m, 거리는 20m 정도 하며 중앙에는 그림 69와 같이 분수대가 5개 설치되어 있다.



그림 70. 실제 실험 환경

실험은 그림 69의 좌측 그림 시작에서 우측 그림 다리 앞면까지 실험을 하였다. 로봇에게 시작점의 위치정보와 목적지의 위치정보를 알려주고 로봇이 직선거리를 계산하게 하고 고정 장애물에 대한 정보는 제공하지 않고 로봇의 센서를 이용하여 검출하게 하였으며, 프로펠러를 이용하여 적절히 장애물을 회피하게 하였다. 그림 70, 71, 72, 73에서는 실제 분수대를 적절히 피하면서 목표점까지 이동하는 모습이다.



그림 71. 로봇의 시작 및 이동 1



그림 72. 로봇의 이동 2



그림 73. 로봇의 이동 3



그림 74. 로봇의 목표점 도달 및 이동 4

그림 74에서는 생태 정원 분수대를 지나 시작점에서 목표점까지의 이동경로를 보여주고 있다.



그림 75. 로봇의 이동 경로

그림 75에서는 로봇이 이동하면서 자신의 미션을 수행하기 위해 환경 센서를 실시간으로 전송하는 것과 이동 경로 GPS 데이터를 보여주고 있다.

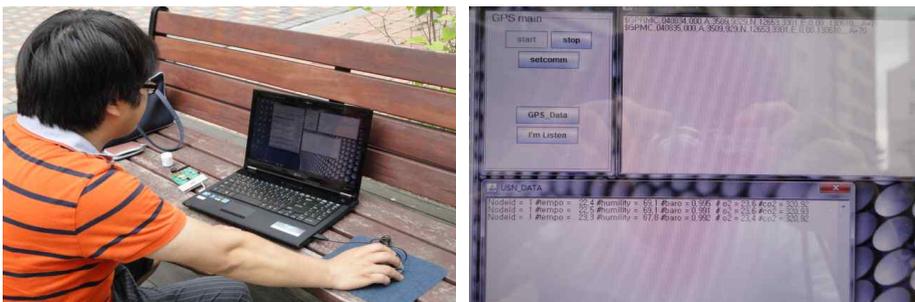


그림 76. GPS를 이용한 로봇의 이동경로 및 실시간 환경 센서 데이터 전송

## V. 결론

로봇은 오늘날 눈부신 산업 발전을 가능하게 한 밑거름이 되었다고 해도 과언이 아니다. 특히 인간을 대신하여 힘들고 어려운 일들을 대신하고 있다. 이러한 로봇의 연구에서 자율주행에 대한 연구는 로봇, 자동차, 항공, 선박 등에서 오래전부터 진행되어 왔으며 미래 인간이 꿈꾸는 현실적 기술이라고 할 수 있겠다.

본 논문에서는 다양한 환경이 존재하는 수상에서 안전하게 목적지까지 미션 해결을 위한 파도, 바람 또는 물결로 부터의 쿼드로터 모델을 제시하여 로봇의 자세 제어, 자율주행을 위해 정보를 인식할 수 있는 능력과 EVFF 알고리즘과 퍼지 장애물 회피 알고리즘을 적용하여 목표점까지 안전하게 이동할 수 있는 방법을 제안하였다.

제안한 알고리즘과 방법론을 통하여 실제 수상용 환경 센서 모니터링 수상 로봇을 제작하여 작성된 주행 지도의 중간 목표점을 설정하여 주행 경로를 생성하며, 적외선 센서를 이용하여 예상치 못한 장애물에 대한 회피를 위해 EVFF 알고리즘과 퍼지 제어를 통하여 이동 중에 마주치는 장애물을 회피하여 로봇이 원하는 목표점까지 자율적으로 주행할 수 있도록 하였다. 로봇은 자세제어를 위한 4개의 프로펠러를 이용하여 자이로센서로부터 들어오는 데이터를 토대로 기울기에 따른 추력을 통하여 쿼드로터 모델을 및 알고리즘 적용을 하여 구현하였다. 또한 자율주행을 위한 실험 테스트 베드는 1차로 광주천, 2차로 소형 분수가 5개가 있는 곳에서 자율주행 실험을 하였다. 초기 GPS 데이터로부터 시작 및 종점 GPS 데이터를 미리 입력하여 로봇은 최적의 직선거리를 계산하고 이동하였으며 이동 중 장애물에 대한 회피는 제안한 EVFF 알고리즘 및 퍼지를 통하여 잘 이루어짐을 확인하였다. 하지만 수상 로봇이고 아직 기구적 해결이 완벽히 이루어지지 않아 1차 실험 시 소나기를 만나 로봇에 커다란 장애를 안겨주기도 했다. 본 로봇은 수상 자율주행 중 환경 모니터링을 위해 온·습도, 대기압, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> 센서를 이용하여 실시간 환

경 모니터링을 하였으며, USN ZigBee 시스템을 통하여 전달된 데이터는 데이터베이스에 저장되어 환경 모니터링에 사용되었다.

향후 연구로서는 로봇의 자율성을 높이기 위해 실시간 지도갱신과 경로계획을 동시에 할 수 있는 연구가 필요하다. 이를 위해 초음파 센서, 레이저 센서, 비전 시스템 등 서로 다른 장·단점을 가진 센서들의 통합으로 더욱 효율적이고 정확한 환경정보를 검출함으로써 긴 거리를 검출할 수 없는 단점을 가진 적외선 센서의 보완이 이뤄져야 한다. 또한 수질 환경 모니터링을 위해 Ph, Do, 탁도 및 유량 센서의 확보로 더욱더 정밀한 수질환경 모니터링 시스템에 대한 연구와 로봇 특성상 배터리로 구동되어야 함으로 장시간 환경에 노출 되어야 하는 단점을 극복하기 위해 효율적 에너지 사용 등 태양광 자가 발전 시스템에 대한 연구가 필요하다.

## 참 고 문 헌

- [1] 서승정, 홍석원, 오상록, 이장규, 박영일, 서일홍, “Development of Technologies for Navigation and Manipulator System of a Semi-Autonomous Underwater Vehicle,” *대양전기공업(주)*, pp. 766, 2003.
- [2] 이관목, “Development an Advanced Deep-Sea Unmanned Underwater Vehicle,” *한국해양연구원*, pp. 349, 2003.
- [3] P. van Turennout and G. Honderd, “Wall-following control of a mobile robot,” *Process, IEEE International Conf. on Robotics and Automation*, vol. 1, pp. 280-285, 1992.
- [4] Y. Ando and S. Yuta, “Following a wall by an autonomous mobile robot with a sonar-ring,” *Process, IEEE International Conf. on Robotics and Automation*, vol. 3, pp. 2599-2606, May, 1995.
- [5] 홍기범, 홍석교, “초음파 센서를 이용한 이동로봇의 간단한 벽면 따르기 알고리즘,” *Proc. of the 13th KACC*, pp. 760-763, October, 1998.
- [6] J. Borenstein and Y. Korean, “Histogramic In-Motion Mapping for Mobile Robot Obstacle Avoidance,” *IEEE Trans. on Robotics Automation*, vol. 7, pp. 535-539, August, 1991.
- [7] 범희락, 조형석, “초음파센서 배열을 이용한 이동로봇의 지도 작성,” *한국자동차제어 학술회의 논문집*, pp. 119-124, 1993.
- [8] M. Kulich, p. stepan and L. Preucil, “Feature Detection and Map Building Using Ranging Sensors,” *IEEE*, pp. 201-206, 1999.
- [9] O. Bozma and R. Kuc, “Building a Sonar Map in a specular Environment Using a Single Mobile Sensor,” *IEEE Trans, On Pattern Analysis*

- Machine Intelligence*, vol. 13, pp. 1260-1269, December, 1991.
- [10] J. L. Crowley, "World-Modeling and Position Estimation for a Mobile Robot Using Ultrasonic Ranging," *IEEE International Conf. on Robotics and Automation*, pp. 674-680, 1989.
- [11] J. Gasos and A. Martin, "A Fuzzy Approach to Build Sonar Maps for Mobile Robots," *Computers in Industry*, vol. 32, pp. 157-167, 1996.
- [12] A. Kurz, "Constructing Maps for Mobile Robot Navigation based on Ultrasonic Range Data," *IEEE Trans, on System, Man, Cybernetics-Part B: Cybernetics*, vol. 26, pp. 233-242, April, 1996.
- [13] 홍현주, 권석근, 노영식 "초음파 센서를 이용한 이동 로봇의 직선선분 지도 작성," *Journal of Control, Automation, and Systems Engineering*, vol. 7, pp. 783-789, September, 2001.
- [14] M. Drumheller, "Mobile Robot Localization Using Sonar," *IEEE Trans. on Pattern Analysis Machine Intelligence*, vol. PAMI-9, pp. 325-332, March, 1987.
- [15] L. Kleeman and R. Kuc, "An Optimal Sonar Array for Target Localization and Classification," *Proc. 1994 IEE International Conf. on Robotics Automation, SanDiego, CA*, pp. 3130-3135, May, 1994.
- [16] J. H. Ko, W. J. Chung, "A Method of Aucostic Landmark Extraction for Mobile Robot Navigation," *IEEE Trans, On Robotics and Automation*, vol. 12, pp. 478-485, 1996.
- [17] W. D. Rencken, "Concurrent Localization and Map Building for Mobile Robots Using Ultrasonic Sensor," *Procs. IEEE/RSJ International Conf. on Intelligent Robot and System*, pp. 2192-2197, July, 1997.
- [18] G. C Anousaki and K. J. Kyriakopoulos, "Simultaneous Localization and

- Map Building for Mobile Robot Navigation,” *IEEE Robotics and Automation Magazine*, pp. 42-53, September, 1999.
- [19] T. Chou, c, Wykey, “An Integrated vision/ultrasonic sensor for 3D target recognition and measurement,” *IRA97, Conf. Publication No. 443, IEEE 1997*, pp. 189-193, July, 1997.
- [20] 최우창, 류춘우, 김학일, “다중센서를 이용한 자율주행 로봇의 위치정보 및 장애물 회피,” *Proc. of the 13th KACC*, pp. 1016-1019, October, 1998.
- [21] A. Curran, K. J. Kyriakopoulos, “Sensor-based self-localization for wheeled mobile robots,” *Procs. IEEE International Conf. on Robotics Automation*, pp. 8-13, 1993.
- [22] L. Yenilmez and H. Temeltas, “Real time multi-sensor fusion and navigation for mobile robots,” *Mediterranean Electrotechnical Conf., 9th*, vol. 1, pp. 221-226, 1998.
- [23] H.F. Durrnat-Whyte, “Sensor Models and Multisensor Integration,” *The International Journal of Robotics Research*, vol. 7, no. 6, pp. 97-3930, 2000.
- [24] W. Wen and H. F. Durrant-Whyte, “Model-based Multi-sensor Data Fusion,” *Proc. IEEE International Conf. on Robotics Automation*, pp. 1720-1726, May, 1992.
- [25] A. M. Flynn, “Combining Sonar and Infrared Sensors for Mobile Robot Navigation,” *The International Journal of Robotics Research*, vol. 7, pp. 5-14, 1988.
- [26] 김완주, 박사학위논문 “지능로봇 시스템을 위한 센서 데이터 융합의 퍼지적 접근,” *KAIST*, 1994.
- [27] T. I, “Guidance and Control of Ocean Vehicles,” *John Wiley & Sons*

*Ltd, Chichester, 1994.*

- [28] J. J. Craig, "Introduction to Robotics : Mechanics and Control," *2nd ed., Addison-Wesley, 1989.*
- [29] 이석규, 도용태, 박창용, 이재원, "로봇공학의 이해," *사이텍미디어, 2008.*
- [30] Tommaso Bresciani, "Modeling, Identification and Control of a Quadrotor Helicopter," *M.S. thesis, Lund University, 2008.*
- [31] 황종현, 석사학위논문 "쿼드로터형 무인비행로봇의 통합자세제어기 구성연구," *세종대학교 대학원, 2009.*
- [32] 정재훈, 석사학위논문, "피치제어를 사용하는 쿼드로터 항공기 제어 특성 연구," *인하대학교 대학원, 2009.*
- [33] Phillip McKerrow, "Modeling the Draganflyer four-rotor helicopter," *International conf., Robotics & Autoc, April, 2004.*
- [34] 이호길 외3, "전방향 소형비행로봇의 개발," *한국정밀공학회 춘계학술대회, 2003.*
- [35] William T. Thomson, Marie Dillon Dahleh, "Theory of Vibration with Applications," *5th Ed., Prentice Hall.*
- [36] Yunsoo Park외 5, "Dynamic analysis and control for an UAV of DC motor type," *ICCAS, October, 2002.*
- [37] Abdellah Mokhtari "Dynamic Feedback Controller of Euler Angles and Wind parameters estimation for a Quadrotor Unmanned Aerial vehicle," *IEEE, April, 2004.*
- [38] M. Alak ula, "Power Electronic Control," *KFS, 2003.*
- [39] 권경엽, 박사학위논문, "MVFF를 이용한 자율 수중 로봇의 제어에 관한 연구," *창원대학교 대학원, 2005.*
- [40] 전재현, "Artificial Potential Field와 Simulated Annealing을 이용한 이동

- 로봇의 실시간 경로계획,” *제어자동화시스템공학회 제15차 학술회의논문집*, 2000권, pp. 256, 2000.
- [41] Shimoda, S., Kuroda. Y., and Iagnemma. K., “Potential Field Navigation of High Speed Unmanned Ground Vehicles on Uneven Terrain,” *Proceedings of the 2005 IEEE International conference on Robotics and Automation(ICRA 2005), Barcelona, Spain*, pp. 2839-2844, April, 2005.
- [42] Y. Koren, J. Borenstein, “Potential Field Methods and Their Inherent Limitations for Mobile Robot Navigation,” *Proceedings of the IEEE Conferences on Robotics and Autonomous, Sacramento, California*, pp. 1398-1404, April, 1991.
- [43] Borenstein and Y. Korean, “Real-time obstacle avoidance for fast mobile robots,” *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern*, vol. 19, no. 5, pp. 1179-1187, 1989.
- [44] 김성철, 고낙용, 김재열, “이동 로봇의 지역 장애물 회피를 위한 새로운 방법,” *한국공작기계학회 98년도 춘계학술대회 논문집*, pp. 88-93, 1998.
- [45] 고낙용, 이범희, “충돌 회피 가능성을 이용한 로봇의 이동 장애물 회피,” *Journal of Control, Automation and Systems Engineering*, vol. 3, no. 2, pp. 169-178, April, 1997.
- [46] Gisbert Lawitzky, “A Navigation System for Cleaning Robots,” *Autonomous Robots*, vol. 9, no. 3, pp. 255-260, 2000.
- [47] L. A. Zadeh, “Fuzzy Sets,” *Information & control*, vol. 8, pp. 338-353, 1965.
- [48] 양상기, 석사학위논문 “차륜형 이동로봇을 위한 자율 주행 시스템 설계 및 구현,” *조선대학교 대학원*, 2009.

[49] KAIST 시스템 제어 연구실 <http://ctrgate.kaist.ac.kr/>, 2008.

[50] [http://en.wikipedia.org/wiki/Braitenberg\\_Vehicles](http://en.wikipedia.org/wiki/Braitenberg_Vehicles), 2008.

## 감사의 글

2010년 무더운 여름 제 인생에 있어 큰 숙제를 하나 해결 할까 합니다. 철없이 공부하던 때가 엇그제 같은데 그때는 박사 졸업을 하게 되면 다 끝날 줄만 알았습니다. 마치 어린 아이가 어른이 되면 세상의 모든 일들이 다 제 뜻대로 이뤄 질 것 같이 말입니다. 아이가 어른이 되듯 이제 학문의 시작을 알리는 졸업을 하게 되어 다시 책임감 있는 시작을 하려 합니다. 많은 시간 동안 저의 앞과 뒤 그리고 보이지 않는 곳에서 많은 도움을 주신 분들께 감사의 마음을 전하려고 합니다.

먼저 하느님께 감사기도 드립니다. 아직 제가 많이 부족하지만 항상 저와 저희 가족과 세상을 사랑해 주심에 감사기도 드립니다. 다음으로 항상 학부, 석사, 마지막으로 박사까지 저의 부족함을 항상 채워 주시고 많은 도움과 지도로서 이곳까지 이끌어 주신 지도 교수님 이준 교수님께 진심으로 감사드립니다. 그리고 논문이 완성될 때까지 바쁘신 와중에도 세심한 지도를 해 주신 조범준 교수님, 논문의 초점과 방향을 알려주신 배용근 교수님, 논문의 깊이를 알려주신 김판구 교수님, 학위 논문 작성법과 흐름을 알려주신 정채영 교수님과 컴퓨터 공학과의 여러 교수님들의 배려와 가르침에 감사드립니다.

항상 열심히 연구자로서 한 몫을 다하시는 홍성표 박사님, 친구로서 먼저 박사가 된 이철승 박사님, 누님 같지만 조금 높은 신명숙 박사님, 좋은 말씀과 지도를 잘 해 주시는 송기범 박사님, 멀리 있지만 항상 마음으로 가까운 이광 교수님과 이호영 교수님, 그리고 우리 왕 박영옥 박사님, 곁에서 많은 도움을 주고 계신 이정기 박사님과 멋진 안성수 교수님, 정문수 석사와 논문에 많은 도움을 준 양상기 석사, 마지막으로 시스템 소프트웨어 연구소 연구원들께 감사드립니다.

오늘이 있기까지 불철주야 후원과 기도해 주신 부모님과 제 사랑스런 아내 강승주, 너무 귀여워 가끔은 질투 나는 아들 선우와 하연 그리고 동생 세정, 현호, 장모님과 처가식구들에게도 감사드립니다.

감사의 글을 쓰고 있는 제가 지금 자격이 있는지 다시 한 번 물어 봅니다. 앞으로 부끄럽지 않게 저의 학문과 인격을 발전해 나갈 것이고, 한 가정의 가장으로서 부끄럽지 않는 아버지가 되겠습니다. 사랑해 강승주.

## 저작물 이용 허락서

학 과	컴퓨터공학과	학 번	20067324	과 정	석사 <input checked="" type="radio"/> 박사
성 명	한글 김 국 세      한문 金 國 世      영문 Kim Kuk-Se				
주 소	광주광역시 북구 임동 한국아델리움 203동 906호				
연락처	e-mail : kks@rfu.co.kr				
논문제목	한글 수질환경 모니터링을 위한 자율 주행 로봇의 위치경로 탐색과 자세제어에 관한 연구				
	영문 A Study on Posture Control and Location Route of Autonomous Navigation Robot for Monitoring Water Quality Environment				
본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건 아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.					
- 다                      음 -					
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함.</li> <li>2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집과 형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함.</li> <li>3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함.</li> <li>4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함.</li> <li>5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함.</li> <li>6. 조선대학교는 저작물 이용의 허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음.</li> <li>7. 소속 대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함.</li> </ol>					
동의여부 : 동의( <input type="radio"/> )    반대( <input type="radio"/> )					
2010    년    8    월    25일					
저작자 : 김 국 세					
					
<h3 style="margin: 0;">조선대학교 총장 귀하</h3>					