

碩 士 學 位 請 求 論 文

청소로봇의 에너지 효율 향상을 위한  
시스템 설계

System Design for Energy Efficiency  
Improvement of Cleaning Robot

指導教授      金 炯 漢

慶熙大學校    大學院  
電子電波工學科

金    正    完

2012年 2月    日

# 청소로봇의 에너지 효율 향상을 위한 시스템 설계

System Design for Energy Efficiency  
Improvement of Cleaning Robot

指導教授      金 炯 漢

이 論文을 電子電波工學科 碩士學位請求論文으로  
提出함

慶熙大學校 大學院  
電子電波工學科 自動制御 專攻

金    正    完

2012年 2月    日

金正完의 工學碩士 學位 論文을 認准함

主審教授 ⑩

副審教授 ⑩

副審教授 ⑩

慶熙大學校 大學院

2012年 2月 日

## 감사의 글

석사 과정을 마무리 하며 제가 이 자리에 있기까지 도움을 주신 많은 분들께 감사드립니다. 많은 가르침을 주신 교수님들과 함께 고생하며 연구실의 발전을 위해 노력했던 동료들, 곁에서 응원해주던 친구들이 있었기에 지난 2년 많은 것을 배울 수 있었고 저에게 너무나도 소중한 시간이었다고 생각합니다.

학업의 길을 열어주시고 학문적인 문제에 봉착하였을 때마다 저에게 새로운 길을 안내해 주시던 김동한 교수님께 진심으로 감사드립니다. 그리고 본 논문의 심사를 해주신 김진상, 홍상훈 교수님께도 감사의 인사드립니다.

지능로봇 연구실에서 대학원 생활을 하였던 것은 저에게 인성적으로나 학문적으로 큰 행운이라 생각합니다. 대학원 생활동안 저에게 많은 충고와 가르침을 주신 문병준 선배님, 한주동 선배님 그리고 이경희 선배님께 감사의 인사드리고 싶습니다. 또한 지능로봇연구실을 추천해주고 훌륭한 연구를 할 수 있도록 많은 도움을 준 병철이와, 함께 연구실 생활을 하며 좋은 성과들을 이루어 낸 바트, 김용호, 강수혁, 이상엽, 김동희, 윤재석, 최경민 학형에게 앞으로도 좋은 학문적 결과와 함께 고맙다는 인사 전하고 싶습니다. 특히, 미국에서 공부하며 더 넓은 세상을 배울 수 있게 기회를 주신 에릭 교수님께도 감사드리고 싶고, 항상 제 곁에서 큰 힘이 되어주는 유경이에게 고맙고 사랑한다는 말을 전하고 싶습니다.

마지막으로 저를 올바른 길로 인도해 주시고, 지원을 아끼지 않으신 부모님께 진심으로 머리 숙여 감사드립니다.

저는 이제 지금까지 받아온 사랑과 관심을 기반으로 새로운 도전을 시작하려고 합니다. 스스로에게 부끄럽지 않는 사람이 되기 위해 노력하고, 지능로봇 연구실을 더욱 빛내기 위해 노력하겠습니다.

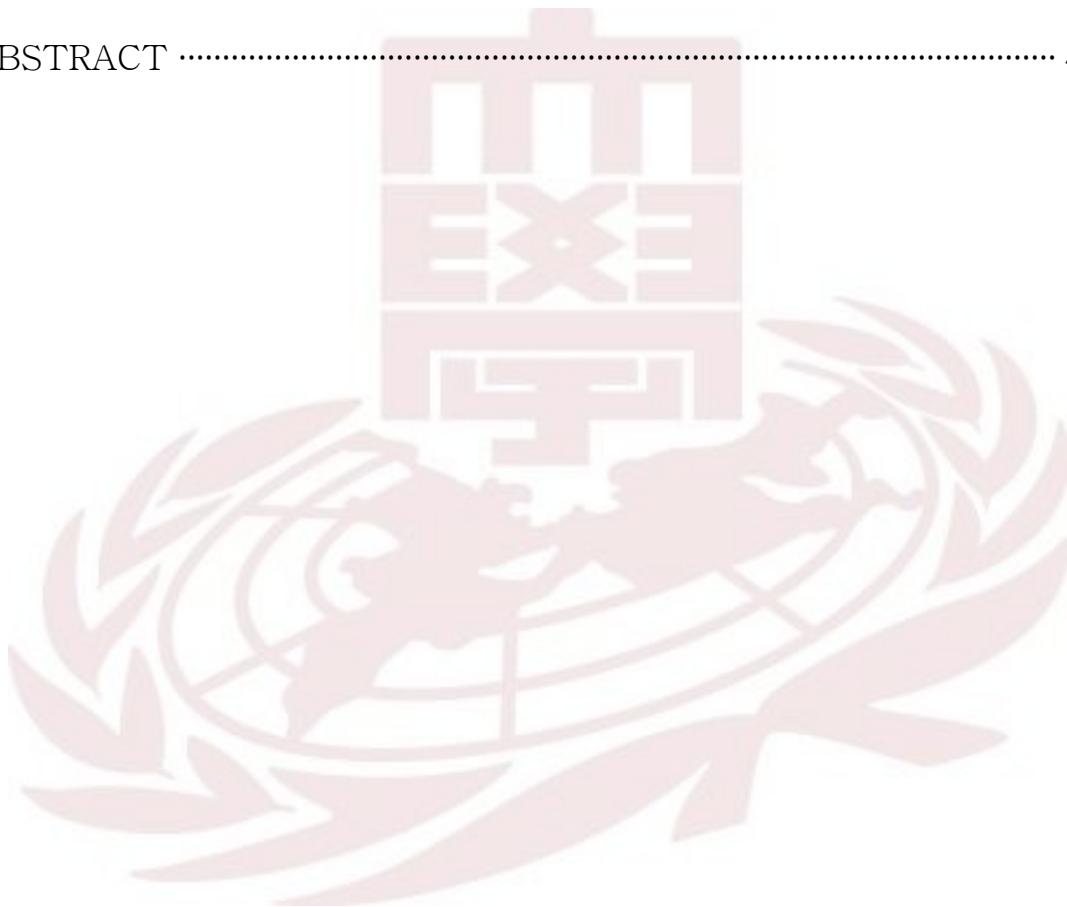
이 논문을 나의 아버지와 어머니께 두 손 모아 바칩니다.



# 목 차

|   |    |
|---|----|
| 제 1 장 서 론 .....                                 | 1  |
| 1.1 연구 배경 .....                                 | 1  |
| 1.2 연구의 방향 및 구성 .....                           | 2  |
| 제 2 장 다수의 로봇을 위한 관습적 항법 .....                   | 4  |
| 2.1 Limit-cycle 항법 .....                        | 4  |
| 2.1.1 Limit-cycle의 특징 .....                     | 4  |
| 2.1.2 Limit-cycle을 이용한 경로 생성 기법 .....           | 7  |
| 2.1.3 이동 장애물의 회피를 위한 Limit-cycle 경로 예측 기법 ..... | 11 |
| 2.2 다수의 로봇을 위한 관습적 항법 .....                     | 17 |
| 2.3 Simulation .....                            | 20 |
| 2.3.1 다수의 로봇을 위한 관습적 항법과 기존 항법의 비교 .....        | 20 |
| 2.3.2 다수의 로봇을 위한 관습적 항법의 출발 위치 .....            | 22 |
| 제 3 장 청소로봇을 위한 먼지 센서 .....                      | 25 |
| 3.1 광학식 먼지센서 .....                              | 25 |
| 3.2 베르누이 방정식 .....                              | 27 |
| 3.3 테스트 베드 .....                                | 29 |
| 3.3.1 테스트 베드의 세부사항 .....                        | 29 |
| 3.3.2 먼지량의 측정 .....                             | 31 |
| 3.4 실험 결과 .....                                 | 32 |
| 3.4.1 유속을 알기위한 압력의 측정 .....                     | 32 |
| 3.4.2 향상된 먼지센서에 의해 측정된 빛의 양과 먼지량의 관계 .....      | 34 |

|                     |    |
|---------------------|----|
| 제 4 장 결론 및 고찰 ..... | 37 |
| 참고문헌 .....          | 39 |
| ABSTRACT .....      | 41 |



## 그 립 목 차

|  |    |
|--|----|
| 그림 1. 리미트 사이클 특성 .....                                     | 5  |
| 그림 2. 리미트 사이클 (시계 방향) .....                                | 6  |
| 그림 3. 리미트 사이클 (반시계 방향) .....                               | 6  |
| 그림 4. 리미트 사이클 경로 생성의 개념 .....                              | 7  |
| 그림 5. 리미트 사이클의 방향 결정 및 경로 이탈 지점 P .....                    | 9  |
| 그림 6. 두 개의 움직이는 물체 사이의 충돌 검출 .....                         | 11 |
| 그림 7. 로봇과 장애물 사이에 충돌이 없는 경우 .....                          | 14 |
| 그림 8 (a). 리미트 사이클을 이용한 이동 장애물 회피 .....                     | 14 |
| 그림 8 (b). 리미트 사이클을 이용한 이동 장애물 회피 .....                     | 15 |
| 그림 9. 오른쪽으로만 회피하는 청소로봇 .....                               | 17 |
| 그림 10. 잠시 동안 기다림으로써 충돌 방지 .....                            | 18 |
| 그림 11. (a) conventional navigation method를 사용한 충돌 방지 ..... | 19 |
| 그림 11. (b) tacit navigation method를 사용한 충돌 방지 .....        | 19 |
| 그림 12 (a). 리미트 사이클만 이용한 항법(3 vs 3) .....                   | 21 |
| 그림 12 (b). 다수의 로봇을 위한 관습적 항법(3 vs 3) .....                 | 21 |
| 그림 13 (a). 리미트 사이클만 이용한 항법(5 vs 5) .....                   | 21 |
| 그림 13 (b). 다수의 로봇을 위한 관습적 항법(5 vs 5) .....                 | 21 |
| 그림 14. 실험을 위한 좁은 통로 .....                                  | 22 |
| 그림 15. 관습적 항법을 이용한 일반 경로 및 시간 .....                        | 23 |
| 그림 16. 관습적 항법을 이용한 최단 경로 .....                             | 23 |
| 그림 17. 관습적 항법을 이용한 최단 시간 .....                             | 24 |
| 그림 18. 광학식 먼지센서 .....                                      | 25 |
| 그림 19. 향상된 광학식 먼지센서 .....                                  | 26 |
| 그림 20. 정압과 동압의 측정을 위한 피토관 .....                            | 27 |



|  |    |
|--|----|
| 그림 21. 정압, 동압, 정체압 .....               | 29 |
| 그림 22. 먼지의 양과 유속을 측정하기 위한 테스트 베드 ..... | 30 |
| 그림 23. 테스트 베드의 실제 모습 .....             | 30 |
| 그림 24. 테스트 베드의 크기 .....                | 32 |
| 그림 25. 측정된 빛의 양과 먼지량의 관계 .....         | 35 |



## 표 목 차

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 표 1. 리미트 사이클에 사용되는 용어 정의 ..... | 8  |
| 표 2. 항법 비교를 위한 시뮬레이션 결과 .....  | 20 |
| 표 3. 출발 위치에 따른 시뮬레이션 결과 .....  | 22 |
| 표 4. 피토크 1의 실험 결과 .....        | 33 |
| 표 5. 피토크 2의 실험 결과 .....        | 33 |
| 표 6. 먼지센서를 통과하는 유속 .....       | 34 |
| 표 7. 측정된 빛의 양과 먼지량의 관계 .....   | 35 |



# 청소로봇의 에너지 효율 향상을 위한 시스템 설계

慶熙大學校 大學院  
電子電波工學科  
金正完

로봇 산업의 발전에 따라, 항법이나 sensor등의 청소로봇 에너지 효율에 대한 연구가 활발하게 진행되어 왔다.

효율적인 로봇의 움직임을 위한 방법 중에 ‘다수 로봇을 위한 관습적 항법 (Tacit Navigation for Multi-Robots System)’은 최적의 path로 로봇을 원하는 목적지에 도착하게 하는 방법이다. 이 항법은 국제 항공법을 기초로 하여 만들었다. 국제 항공법은 ‘만약 비행기가 서로 반대쪽에서 접근을 하면 서로의 충돌을 회피하기 위하여 각각 오른쪽으로 이동하고, 만약 비행기가 서로 나란히 날아가 충돌하는 길을 오고 있다면 왼쪽에 있는 비행기가 오른쪽으로 회피하여 길을 양보한다.’ 라는 방법이다. 국제 항공법을 기반으로 만든 관습적 항법은 ‘이동 로봇이 서로 반대쪽에서 접근을 하면 각각 오른쪽으로 이동하고, 나란히 이동하여 충돌하는 길을 오고 있다면 왼쪽에 있는 로봇이 오른쪽으로 회피하여 길을 양보하는 방법’이다. 이 방법을 사용하면, 다수의 로봇이 최적의 경로를 생성하기 때문에 효과적으로 이동하여 에너지를 절약할 수 있다.

청소로봇이 효율을 증가시키기 위한 또 다른 방법은 먼지가 많은 지역만 집중적으로 청소를 하는 것이다. 이를 위해서는 청소로봇의 먼지 흡입관을 통과하는 순간적인 먼지의 양을 알아야 한다. 기존의 광학식 먼지센서는 에어컨이나 지하철 대합실 등에 설치되어 정적인 공간 안에 있는 먼지만을 측정하였다. 하지만, 먼지 센서를 진공청소기나 청소로봇 등에 적용하여 흡입관을 지나는 동적인 먼지의 양을

측정하기 위해서는, 관을 통해 흡입되는 먼지에 의한 먼지센서의 빛의 양 뿐만 아니라 흡입관을 통해 흐르는 유속도 알아야 한다.

본 연구에서는 청소로봇 에너지 효율을 향상시키기 위해, 최적의 path로 다수의 로봇이 원하는 목적지에 도착할 수 있도록 Limit-cycle과 이동 장애물의 충돌 예상 지점 예측 방법 등에 의한 다수 로봇의 관습적 항법을 소개하였다. 또한, 청소로봇이 먼지가 많은 지역만 집중적으로 청소할 수 있도록, 광학식 먼지센서와 유체역학을 이용하여 향상된 먼지 센서를 개발하고 실험을 통해 증명하였다.



# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구 배경

로봇 산업의 발전에 따라, 항법이나 sensor등의 청소로봇 에너지 효율에 대한 연구가 활발하게 진행되어 왔다.

로봇의 에너지 효율 향상을 위한 항법 연구 활동의 예는 다음과 같다. D-H Kim과 J-H Kim [1] 은 A real-time limit-cycle navigation method for fast mobile robots and its application to robot soccer를 설계 하여 로봇이 빠르게 움직일 수 있도록 limit-cycle 항법을 개발하였다. B-C Min 등은 [2] Fuzzy Logic Path Planner and Motion Controller by Evolutionary Programming for Mobile Robots을 통해 퍼지 제어를 이용하여 Mobile Robot들의 움직임을 제어하였다. Shingo Shimoda 등은 [3] High-speed navigation of unmanned ground vehicles on uneven terrain using potential fields를 통해서 potential fields를 이용한 UGV의 빠른 이동에 대해서 연구하였다. 이러한 항법들은 로봇들이 최단 경로로 이동하고 최소시간에 목적지에 도달할 수 있게 도와주지만, 로봇간의 충돌 확률을 최소화 시키지는 못하였다. 만약 충돌 기회마저 줄어든다면, 위의 항법들과 같이 복잡한 환경에서 최단경로와 최소시간으로 목적지에 도달하는 것보다 훨씬 더 시간과 경로를 단축시킬 수 있다.

청소로봇의 에너지 효율을 더욱 좋게 하는 또 다른 방법은, 먼지의 많고 적음을 구별할 수 있는 먼지센서를 장착하는 것이다. [4][5][6][7] 기존의 먼지 센서는 에어컨 등의 장비나 지하철 대합실 등 공기 중의 먼지농도를 측정하여 환경오염 정도를 파악하는데 유용하게 사용되고 있다. 그 중에서 광학식 먼지 센서는 가장 간편하고 정확하게 먼지의 농도를 측정할 수 있어서 대중적으로 사용되고 있다. [8] 광학식 먼지 센서는 발광부와 수광부로 구성되어있는데, 발광부에서 발산된 빛을 가로막는 먼지들의 양에 의해서 수광부에 입사되는 빛의 양이 결정된다. 이 빛의 양을 통해서 우리는 에어컨이나 지하철 대합실 등 정적인 공간 안에 있는 먼지의

양을 측정할 수 있다. 하지만, 이 먼지센서를 진공청소기나 청소로봇 등에 설치하였을 때, 흡입되는 먼지는 동적으로 움직이기 때문에 정적인 먼지만 측정할 수 있는 광학식 먼지센서로는 동적인 먼지의 전체 양을 정확하게 측정할 수 없다. 청소 로봇이 이동하며 청소를 할 때에 먼지의 많고 적음을 구별할 수 있다면, 청소로봇은 집중적으로 청소해야하는 지역을 구분할 수 있기 때문에 에너지 효율을 높일 수 있다.

이와 같이 충돌기회를 최소화 하는 관습적 항법과 먼지가 많은 지역을 감지할 수 있는 먼지센서를 개발하여 청소로봇에 적용시킨다면, 청소로봇은 최단경로와 최소시간으로 목적지에 도달 할 것이고, 먼지가 많은 지역만 집중적으로 청소할 것이다. 그렇기 때문에 청소로봇의 에너지 효율이 극대화 될 수 있다.

## 1.2 연구의 방향 및 구성

본 논문에서는 충돌 조사와 [9] limit-cycle항법 [10], 그리고 항공법 [11] 을 이용하여 ‘다수의 로봇을 위한 관습적 항법(Tacit Navigation for Multi-agent System)’을 개발하였다. 이 항법을 사용하면 청소로봇을 비롯한 모든 UGV(Unmanned Ground Vehicle)는 충돌 기회를 최소화 하고, 목적지까지 짧은 시간 안에 효과적으로 도착한다.

‘Rules of the air’ of the International Civil Aviation Organization (ICAO) annex 2와 ‘Right of way’ of Federal Aviation Regulation (FAR) 91.113 에 의하면 다음과 같은 항공법이 제시되어있다: ‘만약 비행기가 서로 반대쪽에서 접근을 하면 서로의 충돌을 회피하기 위하여 각각 오른쪽으로 이동하고, 만약 비행기가 서로 나란히 날아가 충돌하는 길을 오고 있다면 왼쪽에 있는 비행기가 오른쪽으로 회피하여 길을 양보한다.’ 다수의 로봇을 위한 관습적 항법은 이 항공법을 청소로봇을 포함한 모든 UGV에 적용하였다. ‘만약 UGV가 반대쪽에서 서로 접근을 하면 충돌을 회피하기 위하여 각각 오른쪽으로 이동하고, 만약 UGV가 서로 나란히 충돌하는 길을 가고 있다면 왼쪽에 있는 UGV가 길을 양보하기 위하여 잠시 동안 기다린다.’ 본 논문에서는 다수의 로봇을 위한 관습적 항법(Tacit Navigation Method for

Multi-Robots System)을 적용하여 다수의 UGV가 효과적으로 이동하는 모습을 증명한다.

또한, 더욱 효율적인 청소로봇을 만들기 위해서 동적인 먼지의 양을 측정할 수 있는 먼지센서를 개발하였다. 이 먼지센서는 감지되는 먼지에 의한 빛의 양 뿐만 아니라, 흡입관을 통과하는 먼지의 유속도 알아야 한다. [12] 우리는 동적인 먼지의 양을 정확하게 측정하는 먼지센서를 개발하고 테스트 하기 위해서, 먼지의 양과 유속을 정확하게 측정할 수 있는 테스트 베드를 개발하였다. 본 논문에서는 테스트 베드가 어떠한 방법으로 먼지의 양을 정확하게 측정하는지 또한 설명하고, 실험을 통해서 그 원리를 증명한다.

1장에서는 본 논문의 연구 배경 및 연구의 방향 및 구성에 대하여 설명한다. 2장에서는 Limit-cycle과 충돌 조사법 등을 적용한 다수 로봇을 위한 관습적 항법 (Tacit Navigation Method for Multi-Robots System)에 대해서 소개하며, 기존의 항법들보다 다수 로봇을 위한 관습적 항법이 우수함을 시뮬레이션과 실험을 통하여 증명한다. 3장에서는 이동 중인 청소로봇이 먼지의 양을 정확하게 측정할 수 있는 향상된 광학식 먼지센서의 개발을 위한 테스트 베드에 대해 설명하며, 실험을 통하여 동적인 먼지의 양을 정확하게 측정한 결과를 보여준다. 4장에서는 결론과 고찰에 대해 논한다.



## 제 2 장 다수 로봇을 위한 관습적 항법

제 2장에서는 limit-cycle 항법 [10]과 항공법 [11]을 적용하여 개발한 다수의 로봇을 위한 관습적 항법을 소개한다. 이 항법을 사용하면 다수의 청소로봇들은 충돌 기회를 최소화 하고, 목적지까지 짧은 시간 안에 에너지 효율적으로 도착한다. 지금부터 Limit-cycle과 다수의 로봇을 위한 관습적 항법에 대해 설명한 후, 시뮬레이션으로 다수의 로봇을 위한 관습적 항법의 우수성에 대해 증명한다.

### 2.1 Limit-cycle 항법

#### 2.1.1 Limit-cycle의 특징

본 절에서는 Limit-cycle에 대해서 설명한다. Limit-cycle은 2차 선형/비선형 시스템의 그래픽적인 해석 방법인 phase portrait을 이용하여 시스템의 안정도를 판별하는 과정에서 생성되는 원과 같은 독특한 형태로 생성된 궤적을 말한다.

예를 들어 2차 비선형 시스템이 다음과 같이 주어졌다고 하고, [13]

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= x_2 + x_1(r^2 - x_1^2 - x_2^2) \\ \dot{x}_2 &= -x_1 + x_2(r^2 - x_1^2 - x_2^2)\end{aligned}\tag{2.1.1}$$

안전성 검증을 위해 Lyapunov 함수를 다음과 같다고 하자.

$$V(x) = x_1^2 + x_2^2\tag{2.1.2}$$

식 (2.1.2)의  $V(x)$ 에 대하여 미분을 구하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}\dot{V}(x) &= 2x_1\dot{x}_1 + 2x_2\dot{x}_2 = 2x_1x_2 + 2x_1^2(r^2 - x_1^2 - x_2^2) \\ &\quad - 2x_1x_2(r^2 - x_1^2 - x_2^2) \\ &= 2V(x)(r^2 - V(x))\end{aligned}\tag{2.1.3}$$



이때 식 (2.1.3)에서,  $V(x) < r^2$ 인 경우  $\dot{V}(x)$ 는 양의 값을 갖게 되고, 반대로  $V(x) > r^2$ 인 경우에는  $\dot{V}(x)$ 는 음의 값을 갖게 된다. 식(2.1.1)에서  $r$ 을 1로 가정 하고,  $0 < c_1 < 1$ 일 때,  $V(x) = c_1$ 에 있는 모든 점들은 바깥쪽으로 향하게 되고,  $c_2 > 1$  일 때는,  $V(x) = c_2$ 에 있는 모든 점들은 안쪽으로 향하게 된다. 이는 다음과 같은 주기적인 영역에서 positively invariant하다는 것을 의미한다.

$$M = \{x \in \mathbb{R}^2 \mid c_1 \leq V(x) \leq c_2\}$$

또한, 닫혀있고, 유계(bounded)를 가지며, 원점에서 유일한 평형점 (equilibrium point)이다. 그러므로 Poincare-Bendixson 이론[14]에 의해  $M$ 에 주기적인 궤도가 존재한다. 그리고 이는  $c_1 < 1$ ,  $c_2 > 1$ 에서 항상 성립하기에,  $c_1$ 과  $c_2$ 가 1로 접근 한 다면, 집합  $M$ 은 반지름이 1인 원으로 수렴하게 된다.

식2.1.1의 반지름  $r$ 을 50으로 임의로 정하고 이에 대한 phase portrait을 그리 면 그림 1과 같이 나타낼 수 있다. 이때 각 좌표에서 반지름  $r$ 이 50으로 수렴 하는 원이 생성되는데 이를 Limit-cycle 이라고 한다.

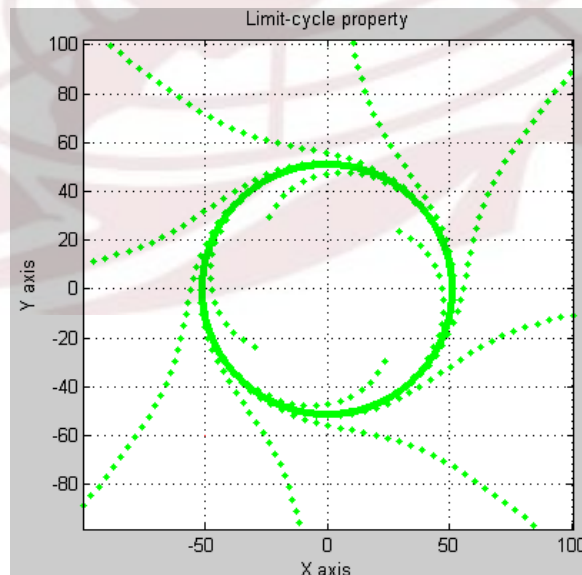


그림 1. 리미트 사이클 특성

Fig. 1. Limit-cycle property

식(2.1.1)의 경우 각 좌표에서 Limit-cycle로 시계 방향으로 수렴하는 것을 확인할 수 있다.

그림 1과 같이 시계 방향으로 Limit-cycle에 수렴하는 특성을 반 시계 방향으로 변경하기 위해서는 식(2.1.1)을 다음과 같이 변경하면 된다.

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= -x_2 + x_1(r^2 - x_1^2 - x_2^2) \\ \dot{x}_2 &= x_1 + x_2(r^2 - x_1^2 - x_2^2)\end{aligned}\quad (2.1.4)$$

그림 2와 그림 3은 식(2.1.1)과 식(2.1.4)에 대한 phase portrait을 이용하여 그렸을 때 생성되는 Limit-cycle에 수렴하는 각 좌표의 방향이다. 주어진 식의 변화에 의해 Limit-cycle로 수렴하는 방향은 각각 시계 방향과 반시계 방향으로 변화되는 것을 확인할 수 있다.

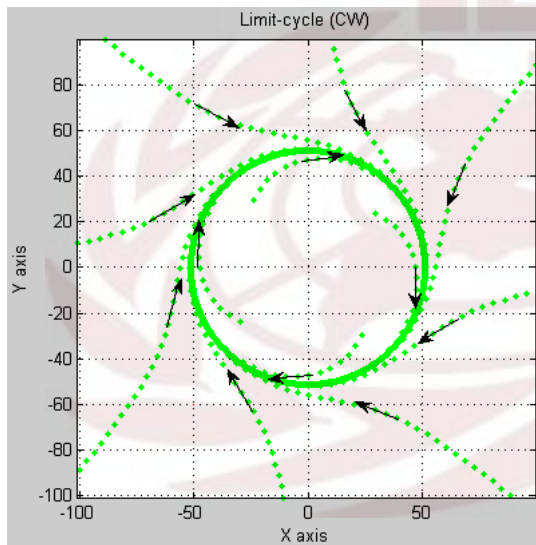


그림 2. 리미트 사이클 (시계 방향)  
fig. 2. Limit-cycle (CW)

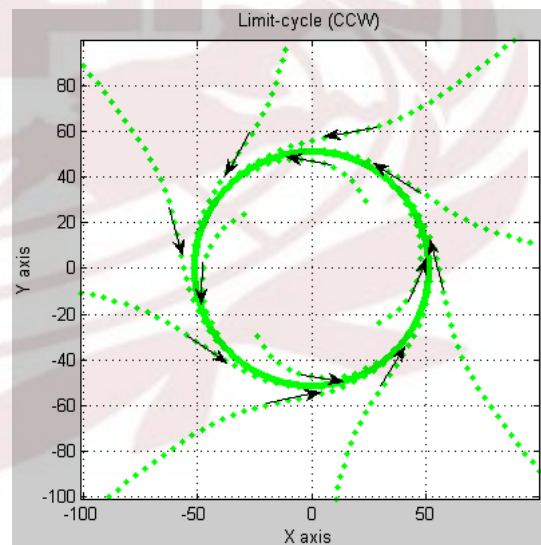


그림 3. 리미트 사이클 (반시계 방향)  
fig. 3. Limit-cycle (CCW)

### 2.1.2 Limit-cycle을 이용한 경로 생성 기법

본 절에서는 Limit-cycle의 특성을 이용하여 로봇과 목표지점 사이에 장애물이 있을 때, 로봇이 장애물과 충돌하지 않고 안전하게 경로를 회피하기 위한 경로 계획(path planning) 방법에 대하여 소개한다.

그림 4는 로봇이 목표 지점(target)으로 이동하는 과정 중 만나는 장애물을 회피하기 위해 Limit-cycle을 이용한 경로 생성(path planning)의 기본적인 개념을 보여주고 있다.

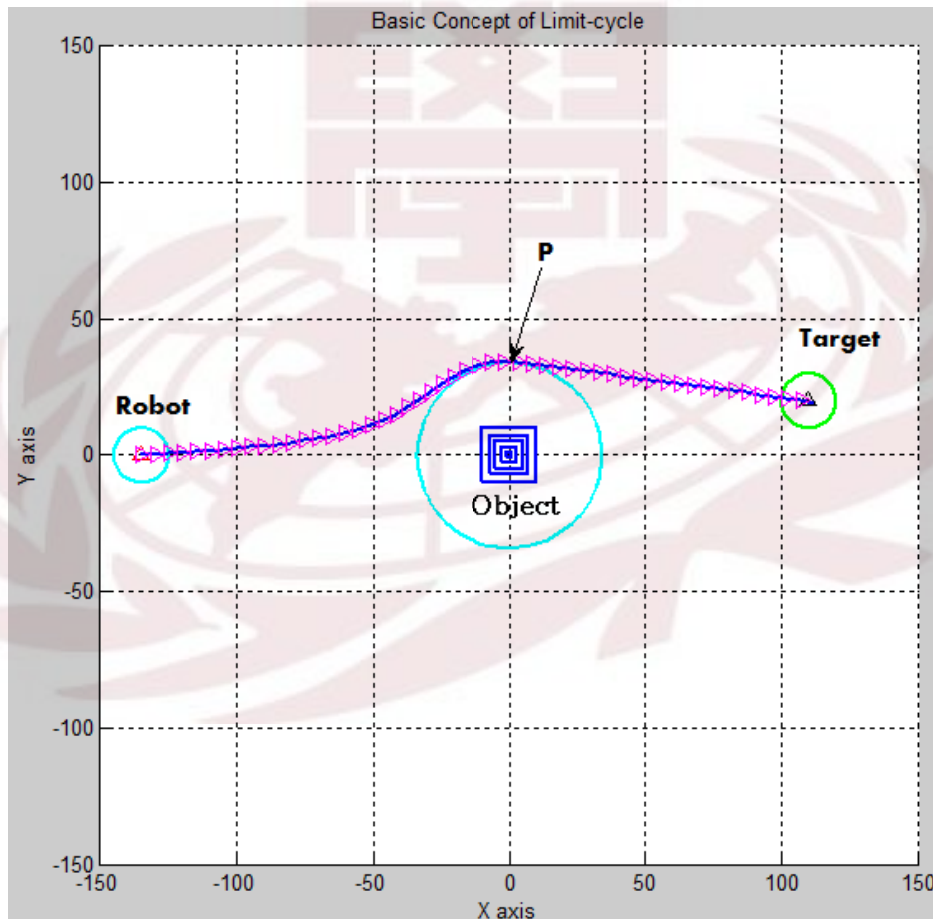


그림 4. 리미트 사이클 경로 생성의 개념

fig. 4. Basic concept of Limit-cycle path planning

그림 4와 같이 로봇이 장애물 회피를 생성된 Limit-cycle 경로 계획을 따라 이동 중 이동로봇이 목표 지점을 직접 확인할 수 있는 지점, 즉 P에 위치하였을 때, 더 이상 생성된 Limit-cycle의 궤도를 따라 이동하지 않고 생성된 직선의 경로를 따라 이동함으로써 최종 목표 지점으로 도달할 수 있다.

Limit-cycle을 이용한 경로 생성 기법 중 장애물을 회피하는 방향을 결정하는 방법을 설명하기에 앞서 Limit-cycle에 사용되는 용어의 정의는 표 1과 같다.

표 1. 리미트 사이클에 사용되는 용어 정의

Table. 1. Terminology definition of Limit-cycle

| 용어                           | 설명  |
|------------------------------|---|
| 회전방향 ( $R_d$ )               | 장애물을 회피하기 위해 시계 방향(CW)이나 반시계 방향(CCW)으로 설정한 회전 방향.   |
| 회전방향 ( $R_d$ )               | 장애물을 회피하기 위해 시계 방향(CW)이나 반시계 방향(CCW)으로 설정한 회전 방향.   |
| Variable 장애물 ( $O_v$ )       | 모의실험에서 장애물을 점질량으로 가정하게 되는 경우 실제 모델에 적용하였을 때, 예상치 못한 충돌이 발생할 수 있기에 본 연구에서는 장애물을 사각형 형태의 장애물로 설정. |
| Variable 반지름 ( $r_v$ )       | Variable 장애물의 반지름으로 이는 로봇의 반지름 + 장애물의 반지름 + 충돌 여유도로 설정.   |
| Disturbing 장애물 ( $O_d$ )     | 로봇이 목표지점까지 직선 이동시 반드시 만나게 되는 장애물.   |
| Non-disturbing 장애물 ( $O_n$ ) | 로봇이 목표지점까지 직선 이동시 만나지 않는 장애물.   |
| 접점 ( $T_{n1}$ , $T_{n2}$ )   | Variable 장애물의 접점 중 목표점을 지나는 접선의 접점.   |

그림 5는 이동 로봇이 목표지점을 확인하고, Limit-cycle에 의해 생성된 경로를 이탈하기 위한 지점 P를 찾기 위한 방법을 나타내고 있다.

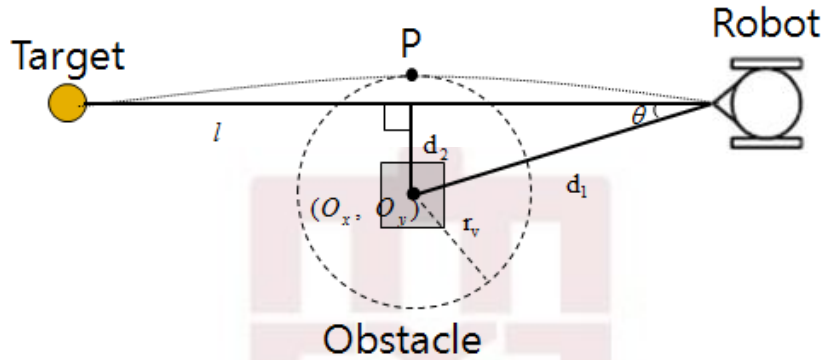


그림 5. 리미트 사이클의 방향 결정 및 경로 이탈 지점 P

Fig. 5. Direction selection of Limit-cycle & breakaway point P

경로 이탈 지점을 찾기 위한 과정과 회전 방향을 찾기 위한 과정은 다음과 같다.

- 1) 로봇과 목표 지점 사이에 직선( $l$ )의 방정식을  $ax+by+c=0$ 과 같이 정한다.
- 2) 만약 직선( $l$ )사이에 Variable 장애물( $O_d$ )가 없으면 생성된 직선( $l$ )을 따라 목표 지점으로 이동한다. 만약 로봇과 목표 지점 사이에 variable 장애물( $O_d$ )가 존재하면 다음의 과정을 따른다.
- 3) 장애물의 중점( $O_x, O_y$ )와 생성된 직선( $l$ )이 직교하는 거리  $d_2$ 를 구하기 위해 로봇의 위치에서 장애물까지의 거리  $d_1$ 의 거리를 직선의 방정식을  $aQ_x+bQ_y+c=0$ 으로 정한다.

4) 다음의 식 (2.3.1)을 이용하여  $d_2$ 의 거리를 구한다.

$$d_2 = \frac{aQ_x + bQ_y + c}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (2.1.5)$$

5) 경로 이탈 지점 P는 직선  $l$ 과 직선 $d_1$ 이루는 각  $\theta$ 가  $90^\circ$ 가 되는 지점이 된다.

6) 식(2.1.1)에서  $x_1$ 과  $x_2$ 를 global 좌표계의  $x$ 와  $y$ 로 바꾸어 식(2.1.6)을 구한다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \frac{d_2}{|d_2|}y + x(r^2 - x^2 - y^2) \\ \dot{y} &= -\frac{d_2}{|d_2|}x + y(r^2 - x^2 - y^2) \end{aligned} \quad (2.1.6)$$

식(2.1.6)에서  $|d_2|$ 의 값이 양수이면, 로봇은 생성된 Limit-cycle의 경로에서 시계 방향으로 회전하며 장애물을 회피하게 되고, 반대로  $|d_2|$ 의 값이 음수이면, 로봇은 생성된 Limit-cycle의 경로에서 반시계 방향으로 회전하며 장애물을 회피하게 된다.

### 2.1.3 이동 장애물의 회피를 위한 Limit-cycle 경로 예측 기법

본 절에서는 움직이는 장애물이 있는 경우, Limit-cycle을 이용하여 이동 중인 로봇이 최적의 경로를 생성하고 장애물을 회피하는 기법에 대하여 소개한다.

그림 6은 두 개의 움직이는 물체(로봇, 장애물) 사이의 충돌 검출 과정을 간략하게 나타낸 그림이다. 두 물체가 시간  $t=0$ 에서  $t=1$  사이에 직선으로, 그리고 각각 일정한 속도로 이동한다고 하고, 두 물체는 초기에 서로 교차하지 않고, 한 물체가 다른 물체와 서로 겹쳐지지도 못한다고 가정하였다.

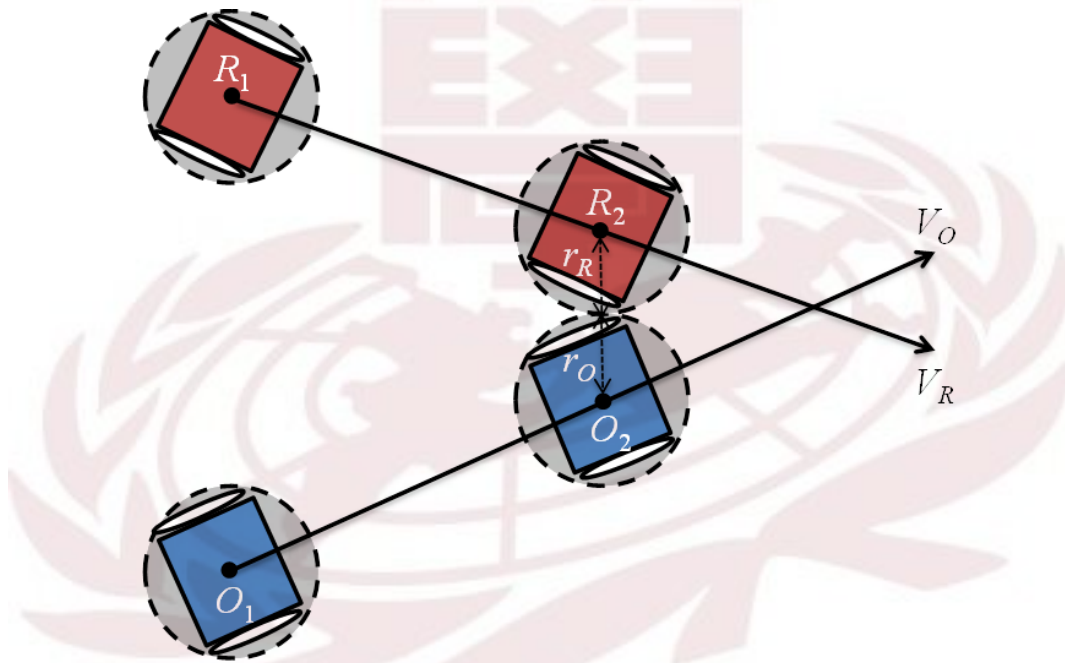


그림 6. 두 개의 움직이는 물체 사이의 충돌 검출

Fig. 6. Collision detection between two moving objects

로봇 중심의 초기 및 최종 위치를 각각  $R_1$ ,  $R_2$ 라 하고, 이동하는 장애물의 초기 및 최종 위치를  $O_1$ ,  $O_2$ 라고 하자. 이 때 각 물체의 속도 벡터  $V_O$ ,  $V_R$ 는 다음과 같다.



$$V_R = R_1 - R_2 \quad (2.1.7)$$

$$V_O = O_1 - O_2$$

로봇에 반경( $r_R$ )의 중심  $R(t)$ 과 이동하는 장애물의 반경( $r_O$ )의 중심  $O(t)$ 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$R(t) = R_1 + tV_R \quad (2.1.8)$$

$$O(t) = O_1 + tV_O$$

이때  $R(t)$ 와  $O(t)$  사이의 거리가  $r_R + r_O$ 가 되는 시간  $t$ 가 바로 이동 중에 있는 로봇과 장애물이 만나게 되는 시간이 된다. 우선  $R(t)$ 와  $O(t)$  사이의 거리의 제곱이 다음과 같을 때,

$$d^2 = \|R(t) - O(t)\|^2 \quad (2.1.9)$$

식(2.1.8)를 식(2.1.9)에 대입하면 다음과 같다.

$$d^2 = \|R_1 + tV_R - O_1 - tV_O\|^2 \quad (2.1.10)$$

식의 계산의 편의를 위해 A, B를 다음과 같이 도입하면 다음과 같다.

$$A = R_1 - O_1 \quad (2.1.11)$$

$$B = V_R - V_O$$

식(2.1.11)을 이용하여 식(2.1.10)을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$d^2 = \|A + tB\|^2 \quad (2.1.12)$$

$$= A^2 + 2t(A \cdot B) + t^2 B^2$$



주어진 식(2.1.12)를  $t$ 에 대한 2차 방정식으로 보고  $t$ 를 구하면 다음과 같은 식을 구할 수 있다.

$$t_1 = \frac{-(A \cdot B) - \sqrt{(A \cdot B)^2 - B^2(A^2 - d^2)}}{B^2} \quad (2.1.13)$$

$$t_2 = \frac{-(A \cdot B) + \sqrt{(A \cdot B)^2 - B^2(A^2 - d^2)}}{B^2}$$

여기서 제곱근 안에 값이 음인 경우, 로봇과 장애물은 충돌하지 않는 것이고,  $B^2=0$ 이면, 이동하는 로봇과 장애물이 움직이지 않는 경우 이거나, 두 구가 같은 방향으로 같은 빠르기고 움직이는 경우이다. 이와 같은 경우 로봇과 장애물은 만나지 않는다.

여기서 로봇과 장애물이 충돌하는 시간은  $d=r_R+r_O$ 일 때 발생하므로, 두 물체가 접하는 시간  $t_1$ 과  $t_2$ 는 식(2.1.13)을 이용하여 구할 수 있다. 초기 시점에서 로봇과 장애물이 충돌하지 않는 상태라고 가정하였기에, 이동하는 로봇과 장애물이 처음 충돌하는 시간인  $t_1$ 만 알면 된다. 결국 최종적으로 이동하는 장애물이 충돌하는 시간은 식(2.1.14)와 같이 구할 수 있다.

$$t = \frac{-(A \cdot B) - \sqrt{(A \cdot B)^2 - B^2(A^2 - (r_R + r_O)^2)}}{B^2} \quad (2.1.14)$$

그림 7은 로봇과 장애물의 이동속도를 각각 30, 20으로 주었을 경우에 장애물의 충돌 여부를 실험 결과를 통해 나타낸 것이다. 그림 7과 같이 로봇과 장애물은 충돌을 하지 않았기에 Limit-cycle을 이용하지 않고 원하는 목표지점으로 직선의 경로를 생성하여 이동하는 것을 시뮬레이션 결과를 통해 확인할 수 있다.

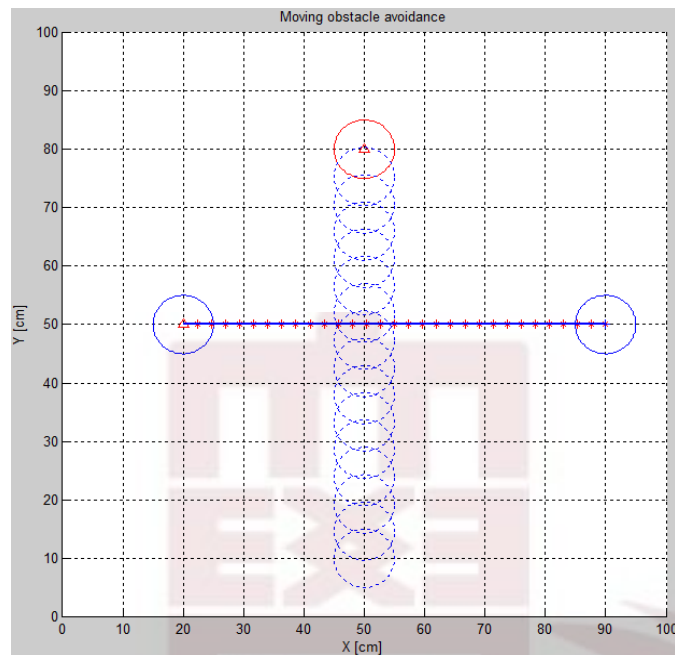


그림 7. 로봇과 장애물 사이에 충돌이 없는 경우

Fig. 7. In case no collision happened between a robot and obstacle

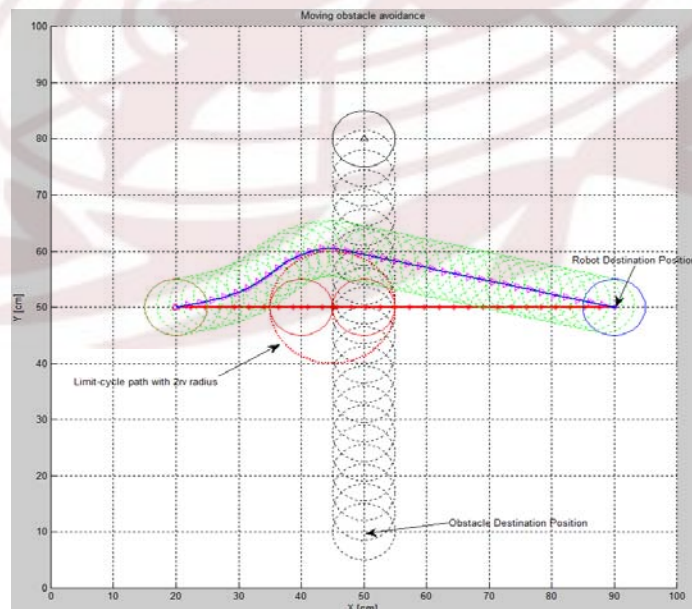


그림 8. (a) 리미트 사이클을 이용한 이동 장애물 회피

Fig. 8. (a) Moving obstacle avoidance using Limit-cycle

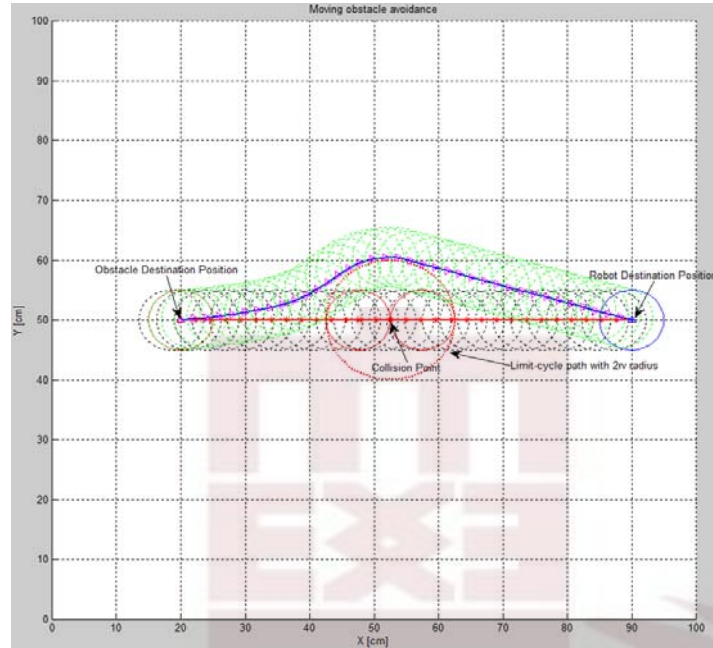


그림 8. (b) 리미트 사이클을 이용한 이동 장애물 회피

Fig. 8. (b) Moving obstacle avoidance using Limit-cycle

반면 그림 8. (a), (b)는 동일한 속도로 이동하는 로봇과 장애물이 충돌을 하였을 때 Limit-cycle을 이용하여 경로를 회피하는 과정을 나타내고 있다.

본 시뮬레이션에서 로봇과 장애물의 이동특성을 아래와 같이 가정하고, 로봇이 장애물 회피하기 위한 Limit-cycle 경로 생성과 생성된 Limit-cycle의 회전 방향은 다음의 조건에 의해서 결정된다.

- 1) 로봇과 장애물은 직선 방향으로 목적지로 이동한다.
- 2) Limit-cycle 경로를 생성하기 전 충돌시간  $t$ 를 식 (2.1.14)를 이용하여 구한다.
- 3) 로봇과 장애물이 충돌하는 시간  $t$ 에서의 로봇과 장애물의 위치에 대하여 무게 중심법을 통해 구하고 구해진 무게중심에 대해  $2r_v$ 를 반지름으로 하는 Limit-cycle 경로를 생성한다.

4) 장애물 초기 좌표  $O_1$ 의  $y$  축이 로봇의 초기 좌표  $R_1$ 의  $y$ 축 보다 위에 있거나 동일한 위치에 있고, 장애물의 최종 목적지 좌표  $O_2$ 의  $y$ 축이 로봇의 목적지 좌표  $R_2$ 의  $y$ 축보다 아래에 있을 경우 Limit-cycle의 회전 방향은 시계 방향으로 한다. 그렇지 않은 경우 반시계 방향으로 회전한다.

5) 만약 로봇의 초기위치  $R_1$ 이 장애물의 최종 목적지  $O_2$  와 같고 로봇의 최종 위치  $R_2$ 가 장애물의 초기위치  $O_1$ 와 동일한 경우 Limit-cycle의 회전 방향은 시계 방향으로 한다.

그림 8. (a)는 로봇과 장애물의 위치가 수직을 이루고 있는 상태에서 로봇과 장애물의 이동속도가 상이할 경우( $V_R < V_O$ ) 장애물의 Limit-cycle 경로 및 회전방향을 위의 조건에 따라 확인한 경우를 나타내고 있다. 조건에 따라 Limit-cycle 회피 경로는 시계방향으로 설정되었고, 로봇은 목적지까지 충돌 없는 효율적인 경로 생성과정을 보여주고 있다. 그림 8. (b)는 로봇과 장애물의 위치가 수평을 이루고 있는 상태에서의 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 조건 5)에 의해 Limit-cycle 경로 및 회전 방향은 시계방향으로 경로를 생성하고 목적지까지 충돌 없이 도달하는 것을 실험 결과 확인할 수 있었다.

## 2.2 다수의 로봇을 위한 관습적 항법

본 절에서는 앞에서 설명한 limit-cycle항법에 국제 항공법을 적용하여 개발한 다수의 로봇을 위한 관습적 항법(Tacit navigation for Multi-Robots System)을 소개한다. 로봇이 원하는 목표 지점까지 이동하기 위한 경로를 생성하는 과정에서 장애물을 만나게 되는 경우 장애물과 충돌 없이 가장 짧은 경로를 통해 이동하는 방법이 가장 효과적인 경로 생성(path planning) 방법이라고 할 수 있다. 2.1.2절에서 소개된 Limit-cycle 경로 생성 기법은 2차 선형/비선형 시스템의 안전성 판별을 위한 그래픽적인 해석기법인 phase portrait을 이용하여 시스템의 안전성을 판별할 때 생성된 Limit-cycle의 특성을 이용하여 장애물과의 충돌 없이 안정적으로 로봇이 원하는 목표 지점까지 이동하게 하였다. 본 절에서는 다수의 로봇이 충돌을 효과적으로 회피하기 위하여 오직 오른쪽으로만 limit-cycle을 사용하는 다수의 로봇을 위한 관습적 항법을 소개 할 것이다. 이 protocol은 ‘Rules of the air’ of ICAO annex 2와 ‘right of way’ of FAR 91.113을 수정하여 개발하였다.

항공법에 따르면, ‘만약 비행기가 서로 반대쪽에서 접근을 하면, 서로 충돌을 회피하기 위하여 각각 오른쪽으로 이동하고, 만약 비행기가 서로 나란히 날아가 충돌하는 길을 오고 있다면, 왼쪽에 있는 비행기가 오른쪽으로 회피하여 길을 양보한다.’라고 되어있다. Multi-agent system을 위한 관습적 항법은 이러한 규칙들을 아래와 같이 변형 한다.

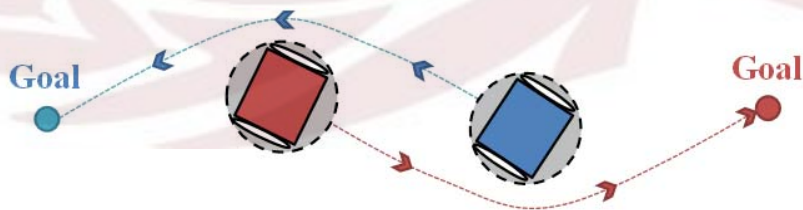


그림 9. 오른쪽으로만 회피하는 청소로봇

Fig. 9. Cleaning robots turning right only

(1) 청소 로봇들이 서로 반대 방향에서 접근 하는 상황을 고려 해보자(90도 이상일 때). 로봇들은 그림 9와 같이 충돌을 피하기 위하여 반시계 방향으로만 limit-cycle 항법을 사용하여 서로의 오른쪽으로만 이동한다.



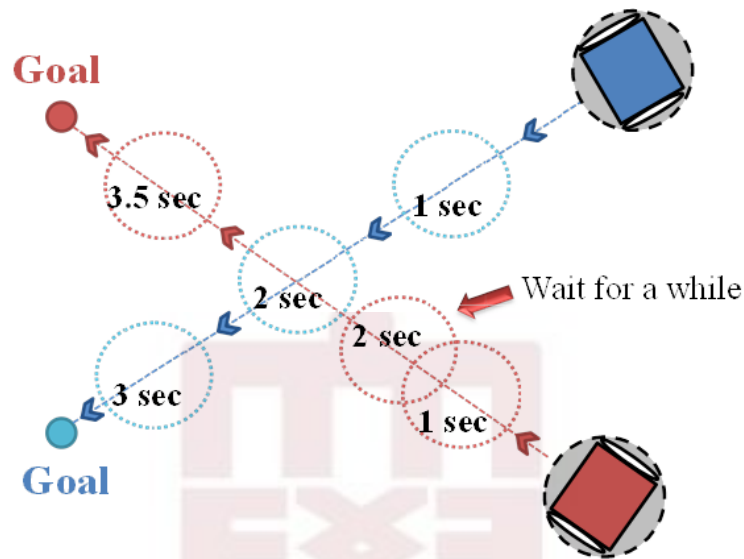


그림 10. 잠시 동안 기다림으로써 충돌 방지  
Fig. 10. Collision avoidance by waiting for a while

(2) 청소로봇들이 서로 나란히 충돌하는 길에 움직인다고 고려하면(90도 보다 작을 때), 그림 10과 같이 왼쪽 청소로봇이 오른쪽 청소로봇이 지나갈 때까지 잠시 기다린다.

기존의 항법과 관습적 항법은 그림 11에서 비교되어진다. 그림 11(a)는 limit-cycle 항법과 충돌 조사를 사용하여 기존의 대부분의 항법을 재연한 청소로봇들의 충돌 회피이다. 첫 번째 청소로봇은 3번의 충돌을 피하고, 나머지 로봇들도 또한 3번의 충돌을 피해간다. 그래서 이동할 때마다 항로는 명확하지 않고 목적지까지 어렵게 도착 한다. 하지만, 다수의 로봇을 위한 관습적 항법(Tacit Navigation for Multi-Robots System)을 사용하였을 때, 그림 11(b)에서와 같이 청소로봇들은 최적의 path로 이동하며 충돌 기회를 최소화 한다. 그림 11(b)의 첫 번째 청소로봇을 보면, 그림 11(a)에서 이동하는 로봇에 비하여 시간이 많이 걸리는 것 같이 보인다. 하지만, 그림 11(b)의 두 번째, 세 번째 로봇들은 첫 번째 로봇의 path를 따라서 오른쪽으로 이동하며 최소의 충돌 기회를 가지게 된다. 결과적으로 그림 11(b)에서의 두 번째, 세 번째 청소로봇은 충돌의 기회 없이 일직선으로 이동하며 짧은 시간 안에 효율적으로 목적지에 도착한다.

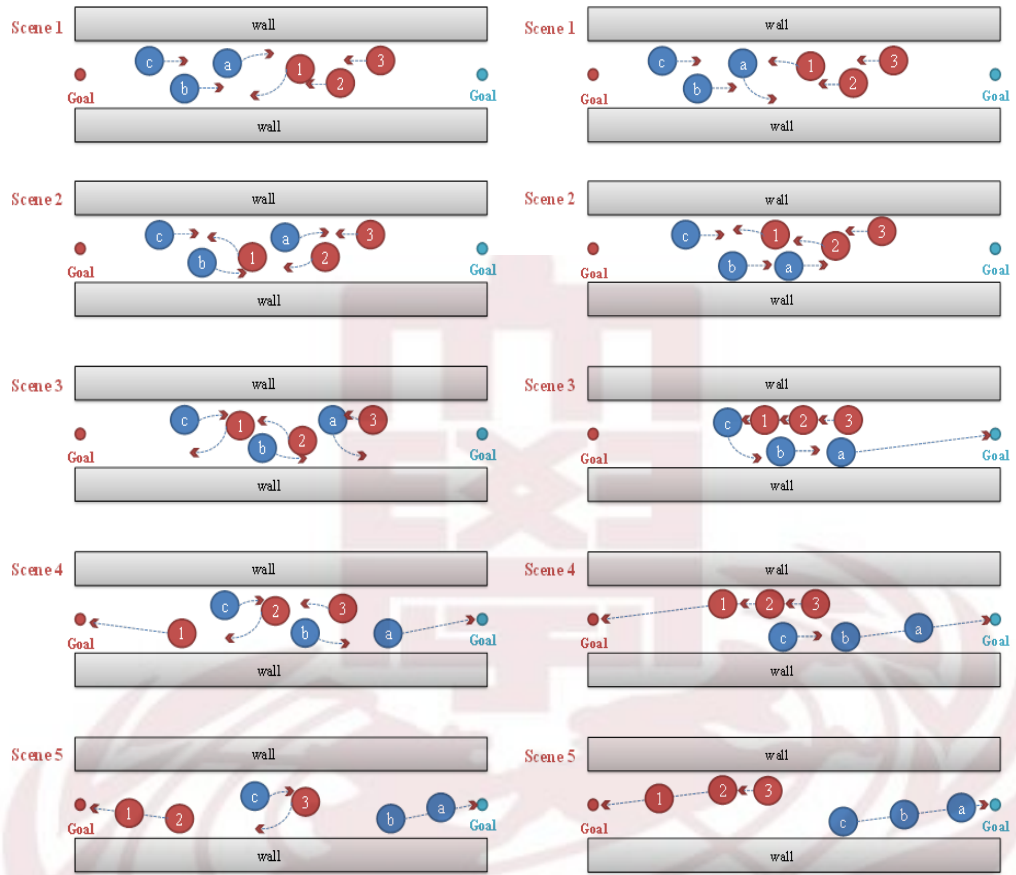


그림 11. (a) 리미트 사이클을 사용한 항법에 의한 충돌 회피  
 (b) 다수의 로봇을 위한 관습적 항법을 사용한 충돌 회피  
 Fig. 11. (a) Avoid collision using limit-cycle navigation method  
 (b) Avoid collision using tacit navigation method

## 2.3 Simulation

### 2.3.1 다수의 로봇을 위한 관습적 항법과 기존 항법의 비교

본 절에서는 다수의 로봇을 위한 관습적 항법(Tacit navigation method for Multi-Robots System)의 우수함을 시뮬레이션을 통해 증명한다. 시뮬레이션을 실행하기 위해, 우리는 좁은 통로 안에서 2개의 항법을 비교하였다. 첫 번째 그림 12. (a)의 항법은 리미트 사이클과 충돌 조사만을 적용한 항법을 시뮬레이션 한 것이다. 그림 12. (b)의 항법은 본 논문에서 정한 다수의 로봇을 위한 관습적 항법이다. 시뮬레이션 결과, 관습적 항법의 사용으로 청소로봇은 충돌을 최소화 하고 다른 항법 보다 목적지에 빠르게 도착한다.

그림 12. (a) (b)와 그림 13. (a) (b)는 여러 대의 청소로봇이 목적지에 도착하는 모습을 보여준다. 그림 12. (a)와 그림 13. (a)는 리미트 사이클과 충돌 조사만을 적용한 항법의 시뮬레이션이다. 그리고 그림 12. (b)와 13. (b)는 관습적 항법에 따라 여러 대의 청소로봇이 limit-cycle을 사용하여 오른쪽으로 회피하는 것을 보여준다. 이 시뮬레이션에서는 두 대의 청소로봇이 나란히 있을 때, 왼쪽의 청소로봇이 오른쪽 청소로봇을 지나가기 전까지 기다리는 항법도 증명해 준다

시뮬레이션 결과는 기존의 항법보다 관습적 항법을 사용 했을 시, 대부분의 청소로봇이 충돌 확률을 최소화 하고 보다 빠르게 도착하는 것을 보여준다. 실제로 다수의 로봇을 위한 관습적 항법은 10.578초에 목적지에 도착하였는데, 리미트 사이클만을 사용한 항법은 11.765초를 소비하여 에너지 효율이 좋다는 사실을 증명하였다.

표 2. 항법 비교를 위한 시뮬레이션 결과

Table. 2. Simulation result for navigation comparison

| Case                      | Time(sec) |
|---------------------------|-----------|
| Only Limit-cycle (3 vs 3) | 11.218    |
| Tacit Navigation (3 vs 3) | 10.234    |
| Only Limit-cycle (5 vs 5) | 11.765    |
| Tacit Navigation (5 vs 5) | 10.578    |



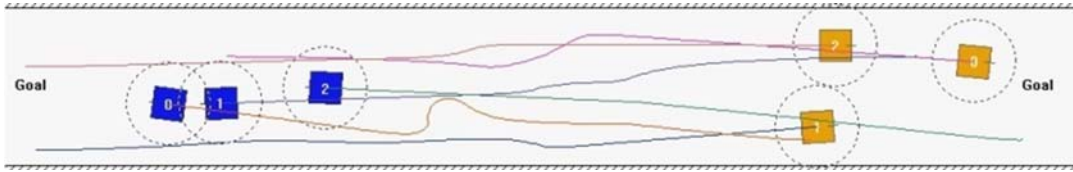


그림 12. (a) 리미트 사이클만 이용한 항법(3 vs 3)

Fig. 12. (a) The navigation method using only limit cycle (3 vs 3)

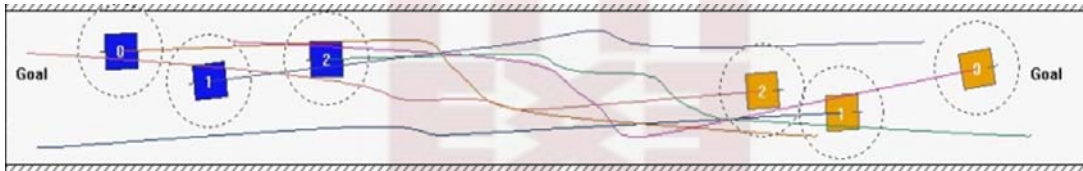


그림 12. (b) 다수의 로봇을 위한 관습적 항법(3 vs 3)

Fig. 12. (b) The tacit navigation method for Multi-Robots system(3 vs 3)

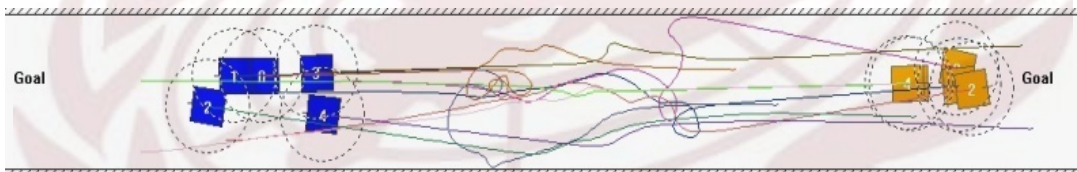


그림 13. (a) 리미트 사이클만 이용한 항법(5 vs 5)

Fig. 13. (a) The navigation method using only limit cycle (5 vs 5)

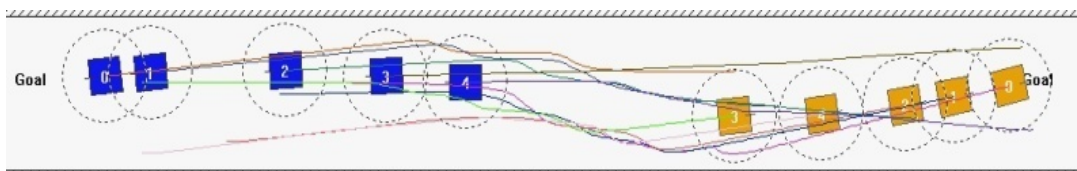


그림 13. (b) 다수의 로봇을 위한 관습적 항법(5 vs 5)

Fig. 13. (b) The tacit navigation method for Multi-Robots system (5 vs 5)

### 2.3.2 다수의 로봇을 위한 관습적 방법의 출발 위치

본 절에서는 청소 로봇들의 처음 출발위치에 따른 최단 경로와 최소 이동시간을 찾기 위한 시뮬레이션을 실행한다. 이 실험은 그림 14과 같은 환경에서 실행한다. 각각의 5대씩의 로봇을 왼쪽과 오른쪽 칸에 각각 위치시키고, 로봇 한 대당 좌우 5칸을 이동하며  $5^{10}$  번의 모든 경우의 수를 실험하였다.

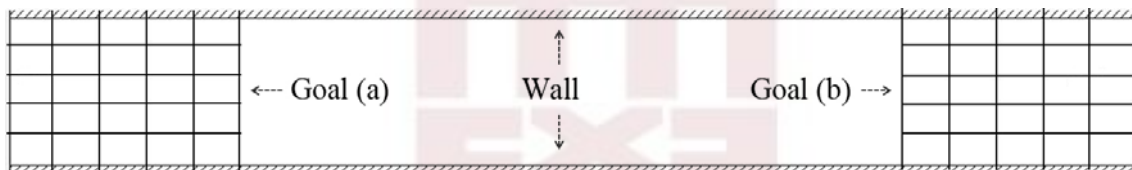


그림 14. 실험을 위한 좁은 통로

Fig. 14. Narrow path for the experiment

실험 결과는 표 3에서 볼 수 있다.

표 3. 출발 위치에 따른 시뮬레이션 결과

Table. 3. Simulation result according to starting point

| Case          | Time(sec) | Total Distance(mm) |
|---------------|-----------|--------------------|
| Normal path   | 18.102    | 7828.366           |
| Shortest path | 17.347    | 7508.296           |
| Shortest time | 16.806    | 7525.926           |

표 3의 Normal path는  $5^{10}$ 번의 실험을 한 후, 모든 시간과 거리의 값을 평균 낸 값과 가장 가까운 path이다. 그림 16에서 나타난 초기 위치에서 다수의 로봇을 위한 관습적 방법은 가장 최단 경로로 이동하였다. 또한, 그림 17에서 나타난 초기 위치에서 다수의 로봇을 위한 관습적 방법은 최단 시간에 목적지에 도착하였다. 이 결과를 통해, 최적의 방법을 위한 초기 위치의 중요성이 또한 증명되었다.

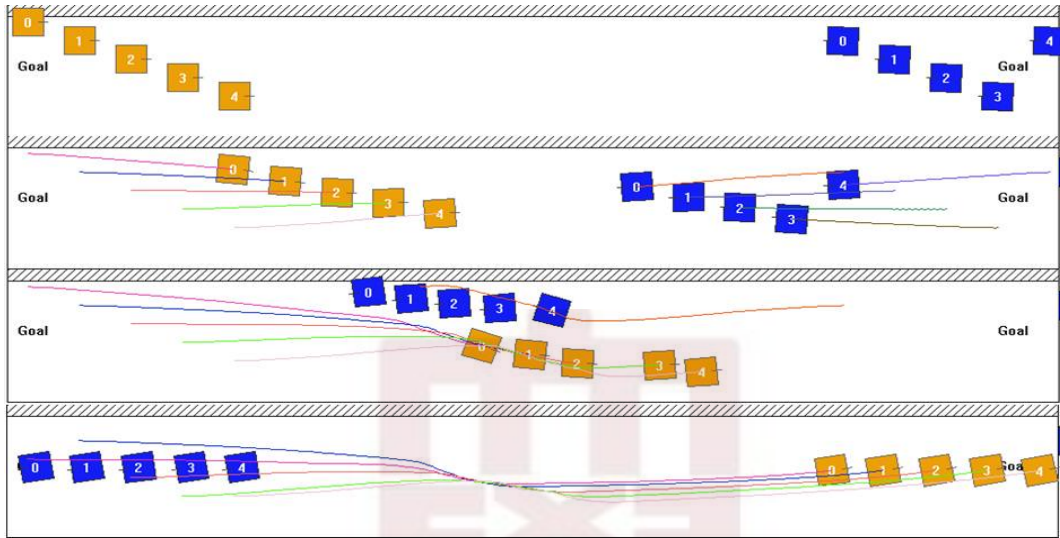


그림 15. 관습적 항법을 이용한 일반 경로 및 시간  
Fig. 15. Normal path and time using tacit navigation

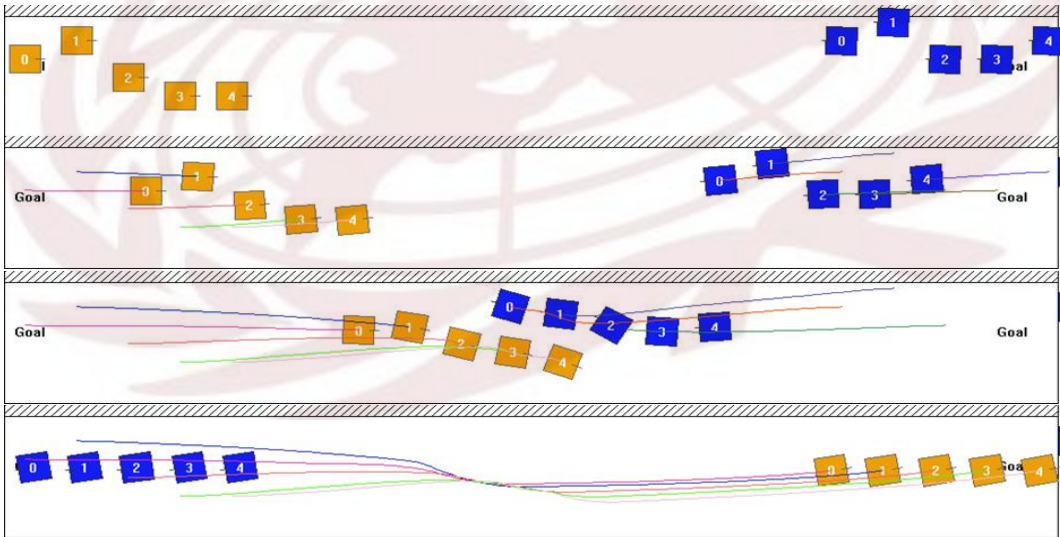


그림 16. 관습적 항법을 이용한 최단 경로  
Fig. 16. Shortest path using tacit navigation

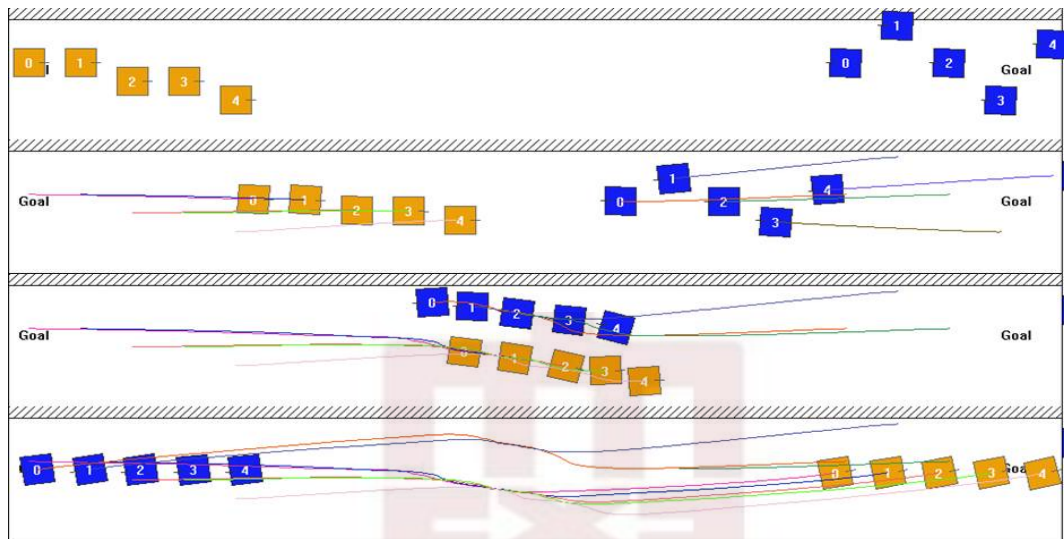


그림 17. 관습적 항법을 이용한 최단 시간  
 Fig. 17. Shortest time using tacit navigation



## 제 3 장 청소로봇을 위한 먼지센서

제 3장에서는 광학식 먼지센서와 베르누이 방정식을 이용하여 청소로봇이 이동하면서 먼지의 양을 측정하는 향상된 먼지센서에 대해 소개한다. 이 먼지센서를 사용하면 청소로봇은 먼지가 많은 지역을 구별하여 집중적으로 청소하여 에너지 효율을 증가시킬 수 있다. 지금부터 광학식 먼지센서와 베르누이 방정식을 설명한 후, 실험을 통해 향상된 먼지센서에 대해 소개한다.

### 3.1 광학식 먼지센서

본 절에서는 기존의 광학식 먼지센서에 대해서 설명한다. 기존의 광학식 먼지센서는 그림 18과 같이 동작한다. LED에서 빛이 발산되고 Light receptor는 빛을 수광한다. 수광되는 빛의 양은 Output을 나타내는 표시장치에 image로 표시된다. 이를 위해서, 센서의 아래쪽에 있는 Resistor가 열을 발생시켜서 먼지를 updraft시키고, updraft되는 먼지는 수광되는 빛에 간섭하게 되며, 먼지에 의해 달라지는 빛의 양에 따라서 output은 달라진다.

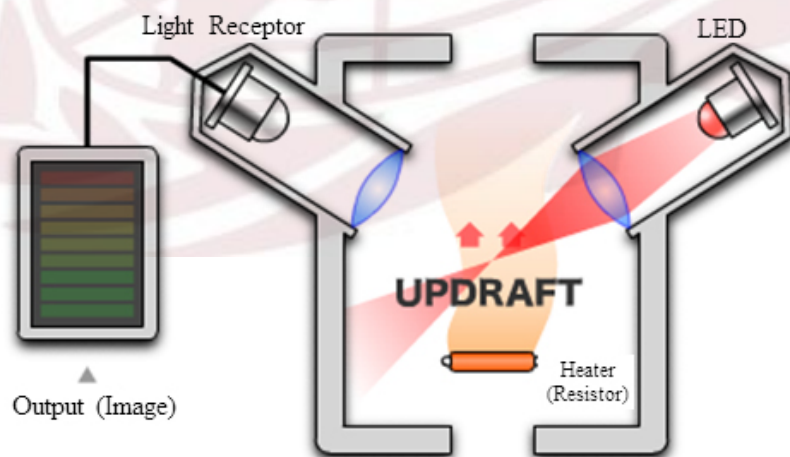


그림 18. 광학식 먼지 센서

Fig. 18. Opitcal dust sensor

이 광학식 먼지센서는 우수한 측정능력을 보여주지만, 열을 발생시켜 updraft되는 먼지만을 측정하기 때문에 에어컨이나 지하철 대합실 등에 설치되어 정적인 먼지만을 측정할 수 있다는 단점이 있다. 청소로봇의 에너지 효율성을 증가시키기 위해서는 이동 중에 측정되는 먼지의 양을 알아야 한다. 그래서 우리는 위와 같은 원리의 먼지센서를 업그레이드 하여 테스트 베드에 적용하였다. 기존의 먼지센서보다 더욱 정확한 값을 얻기 위해서 우리는 그림 19와 같이 8개의 발광부와 8개의 수광부를 설치하였다. 또한, output은 컴퓨터를 통해서 수치적인 데이터 값을 얻을 수 있게 하였다.

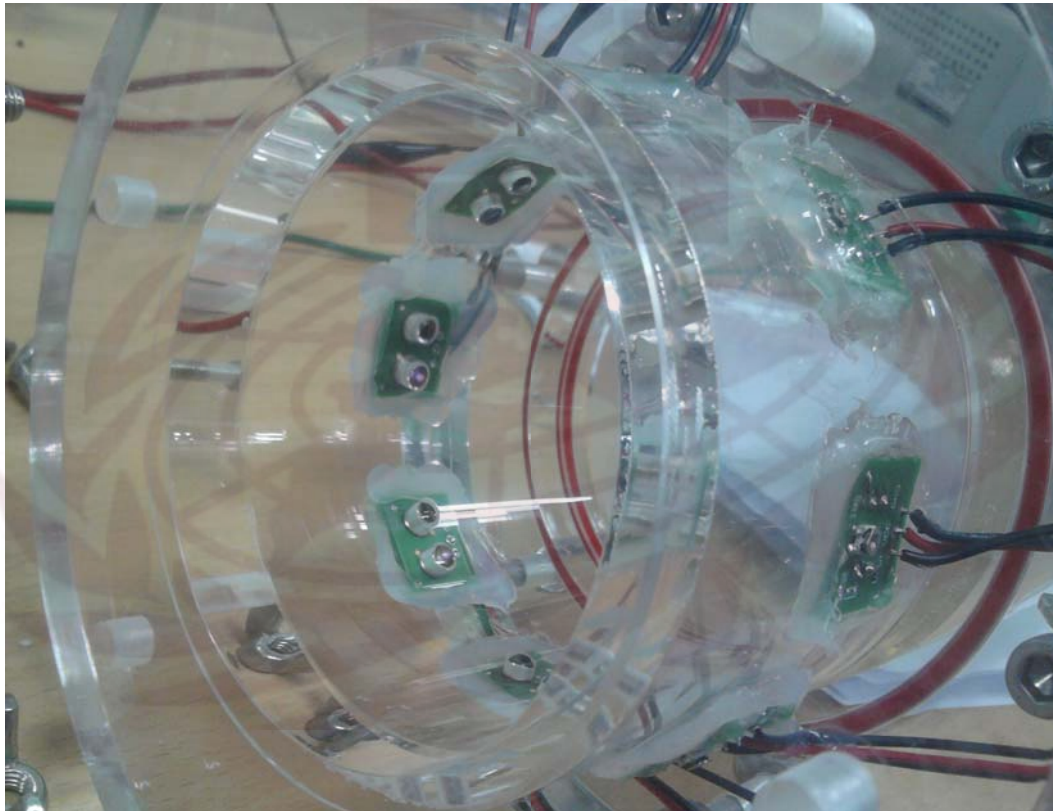


그림 19. 향상된 광학식 먼지 센서

Fig. 19. Upgraded Optitcal dust sensor

### 3.2 베르누이 방정식

본 절에서는 피토관에서 측정된 유속을 결정해주는 베르누이 방정식에 대해서 설명한다. 유속을 측정하기 위해서 그림 20과 같이 테스트 베드에 피토관을 설치하였다. 피토관은 holes를 이용하여 stagnation pressure와 static pressure를 측정할 수 있다. 이 압력들을 Bernoulli Equation에 적용하면 테스트 베드의 관을 순회하는 먼지의 유속을 알 수 있다.

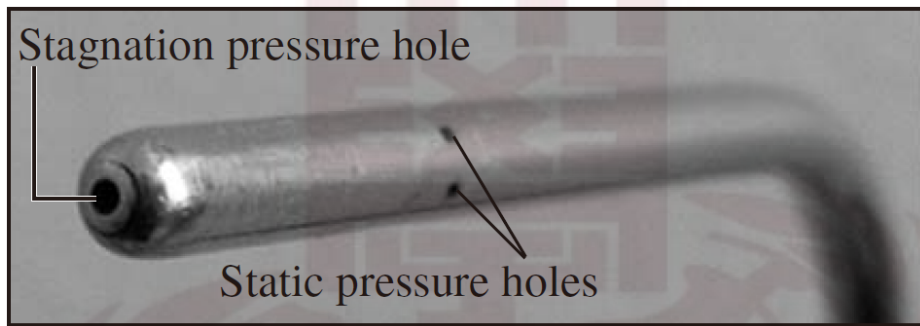


그림 20. 정압과 동압의 측정을 위한 피토관

Fig. 20. Pitot tube for Measurements of Static pressure and Dynamic pressure

Bernoulli Equation은, 정상유동에서 유선을 따르는 유체입자의 유동에너지, 운동에너지, 및 위치에너지의 합은 일정하다는 것을 나타내는 식이다. 따라서, 유동에서 유체의 운동에너지와 위치에너지는 유동에너지로 변환되어 압력이 변할 수 있다. Bernoulli Equation에 밀도  $\rho$ 를 곱하여, 이 현상을 더 자세하게 살펴볼 수 있다.

$$P + \rho \frac{V^2}{2} + \rho g z = \text{Fixed} \quad (3.2.1)$$

이 식에서, 각각의 항들은 압력 단위이므로 이들은 각각 어떤 압력을 나타낸다.

- $P$ 는 static pressure이다; 이는 실제의 열역학적 압력을 나타내며, 열역학과 상태량 표에서 사용하는 압력과 동일하다.
- $\rho V^2/2$ 은 dynamic pressure이다; 이는 운동하는 유체가 등엔트로피 과정을 거쳐 정지하였을 때의 압력상승을 나타낸다.
- $\rho g z$ 는 hydrostatic pressure이다; 이는 임의로 선택한 기준 위치에 대한 값이므로, 진정한 의미에서 압력이 아니다; 즉, 이는 위치에 의한 유체 무게의 효과가 압력에 미치는 영향을 나타낸 것이다.

정압, 동압, 및 정수압의 합을 total pressure라고 한다. 그러므로, Bernoulli Equation은 유선을 따른 전압은 일정하다는 의미로 해석할 수도 있다. 정압과 동압의 합을 stagnation pressure라고 하며, 다음과 같이 표현한다.

$$P_{stag} = P + \rho \frac{V^2}{2} \quad (kPa) \quad (3.2.2)$$

정체압이란, 움직이는 유체가 등엔트로피 과정을 거쳐 완전히 정지되는 곳에서의 압력이다. 정압, 동압, 및 정체압이 그림 21에 나타나 있다. 어떤 특정한 위치에서 정압 및 정체압을 측정하여, 그 위치에서의 유체 속도를 식 (3.2.3)으로 계산할 수 있다.

$$V = \sqrt{\frac{2(P_{stag} - P)}{\rho}} \quad (3.2.3)$$

식 (3.2.3)은 그림 21과 같이 정압 탭과 피토관을 함께 사용함으로써, 유체의 속도를 측정하는데 유용한 식이다. 본 논문에서는 이 공식들을 이용하여 폐회로관속을 흐르는 유체의 속도를 계산한다.



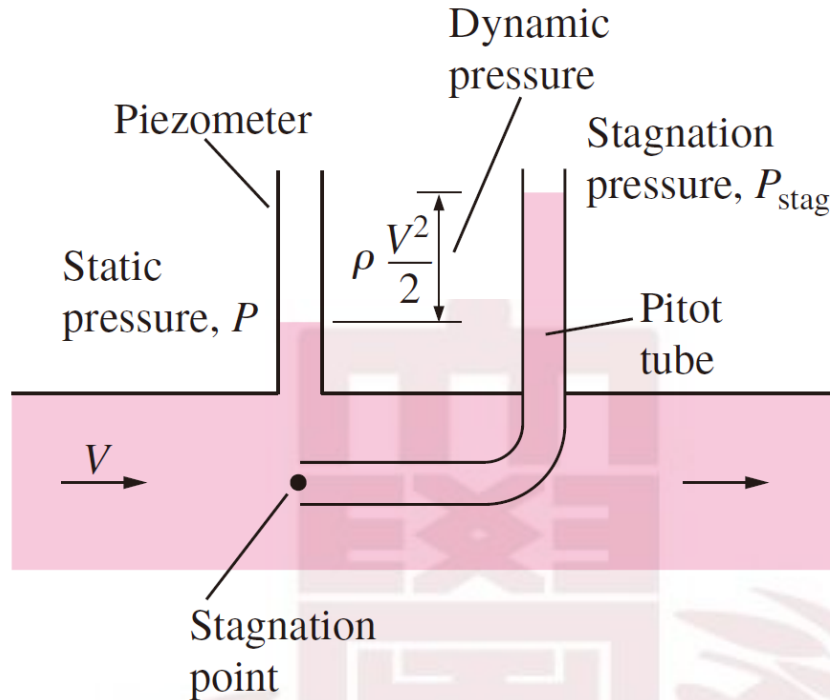


그림 21. 정압, 동압, 정체압

Fig. 21. Static pressure, Dynamic pressure, and Stagnation pressure

### 3.3 테스트 베드

#### 3.3.1 테스트 베드의 세부사항

본 절에서는 Upgraded Optical Dust Sensor와 Pitot tube를 장착한 테스트 베드에 대해서 설명한다. 테스트 베드의 구성은 그림 22와 같다. 완전히 밀폐된 테스트 베드 관 안에 바람을 불게하는 fan이 하나 설치하였다. fan의 위치는 먼지센서와 가장 멀리 있는 곡선이 끝나는 지점에 있다. 이와 같이 설치한 이유는 fan앞에서는 바람이 소용돌이치기 때문에 먼지가 일정하게 퍼져서 먼지센서를 통과하지 않기 때문이다. 가장 멀리 있는 곡선 앞에 설치함으로써 피토관과 먼지센서가 있는 부분에서는 유속이 일정하고, 먼지의 양도 고르게 퍼질 수 있다. 정확한 유속을 측정하기 위해 두 개의 피토관을 Upgraded Optical Dust Sensor의 앞에 일정 간격으로 설치하여 유속과 먼지의 양을 측정한다.

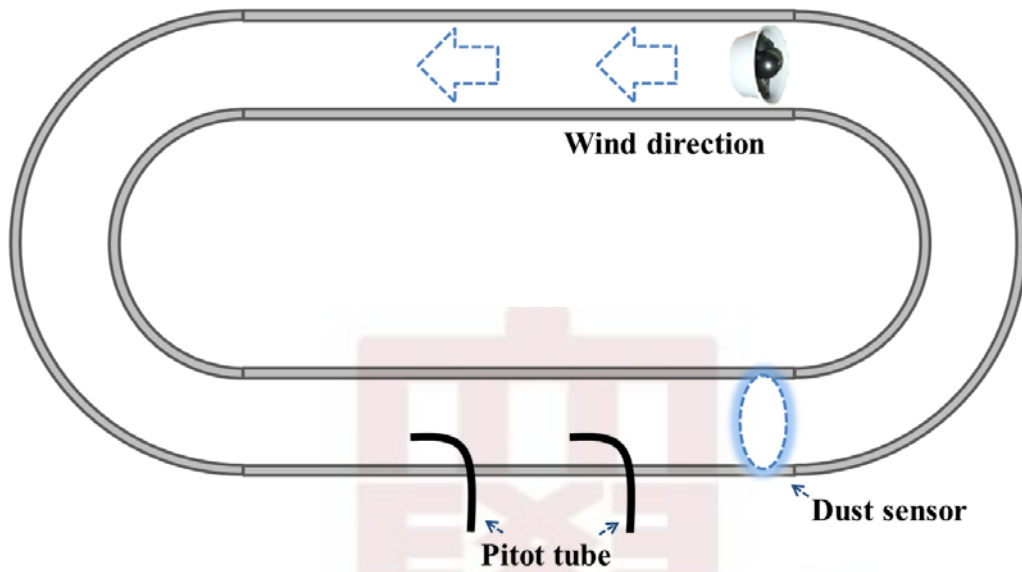


그림 22. 먼지의 양과 유속을 측정하기 위한 테스트 베드

Fig. 22. Test bed for measurements of flow velocity and dust loading

Upgraded Optical Dust Sensor와 Pitot tube를 장착한 테스트 베드의 실제 모습은 그림 23과 같다.

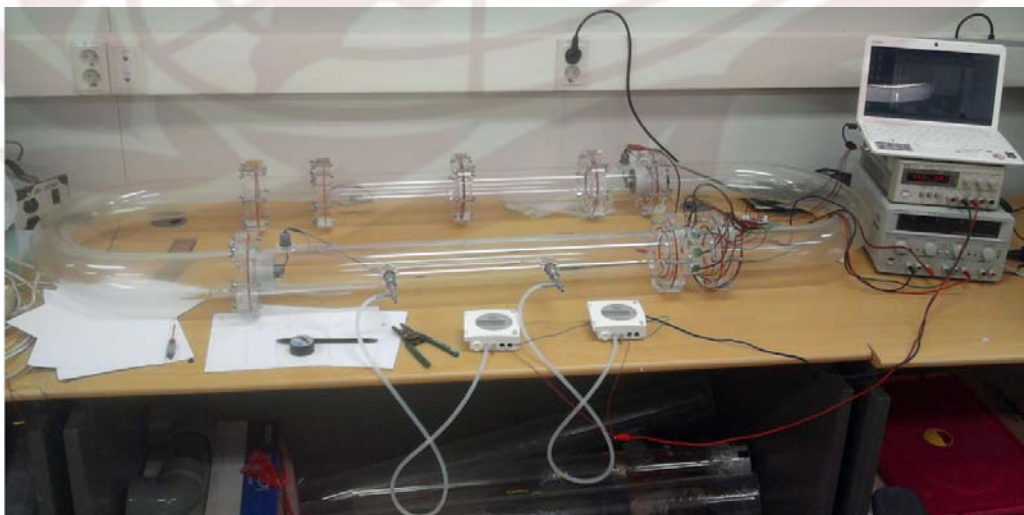


그림 23. 테스트 베드의 실제 모습

Fig. 23. Test bed

두 개의 피토관은 ISO의 요구조건에 의해 평가하여 AFAQ에서 공인된 압력계와 연결되어 정확한 정압과 동압을 표시한다. 또한, Upgraded Optical Dust Sensor는 테스트 베드를 통과하는 먼지의 상대적인 양을 컴퓨터에 수치적으로 display한다.

### 3.3.2 먼지량의 측정

본 절에서는 향상된 먼지센서에 감지되는 빛의 양과 실제 먼지량의 관계를 파악하여 먼지량을 판단하는 방법에 대해서 소개한다. 전체 먼지량과 검출된 먼지량의 관계는 식 (3.3.1)로 얻을 수 있다.

$$G_P = \frac{G_t}{V_t} \times V_P \quad (3.3.1)$$

(G<sub>p</sub>: Dust sensor에 감지된 먼지량, G<sub>t</sub>: 폐회로관에 투입된 전체 먼지량, V<sub>t</sub>: 폐회로관 전체 부피, V<sub>p</sub>: Dust sensor가 감지하는 부분의 부피)

테스트 베드 폐회로관의 사이즈는 그림 24와 같다. 이를 바탕으로 식 (3.3.1)을 이용하면 폐회로관의 부피를 구할 수 있다. 회로관 단면적 내부 반지름 r=3.75cm 이므로 단면적의 내부 넓이는 약 44cm<sup>2</sup>이다. 여기에 두 직선관의 길이와 곡선의 중심의 길이를 더한 311.4cm 를 곱하면 전체 부피 V<sub>t</sub>는 약 13750cm<sup>3</sup>가 된다. 먼지센서가 감지하는 부분은 0.5cm이기 때문에 감지되는 부분의 부피 V<sub>p</sub>는 약 22cm<sup>3</sup>이므로,

$$G_P = 0.0016 \times G_t \quad (3.3.2)$$

이 된다. 식 (3.3.2)로 우리는 쉽게 G<sub>p</sub>를 얻을 수 있다.

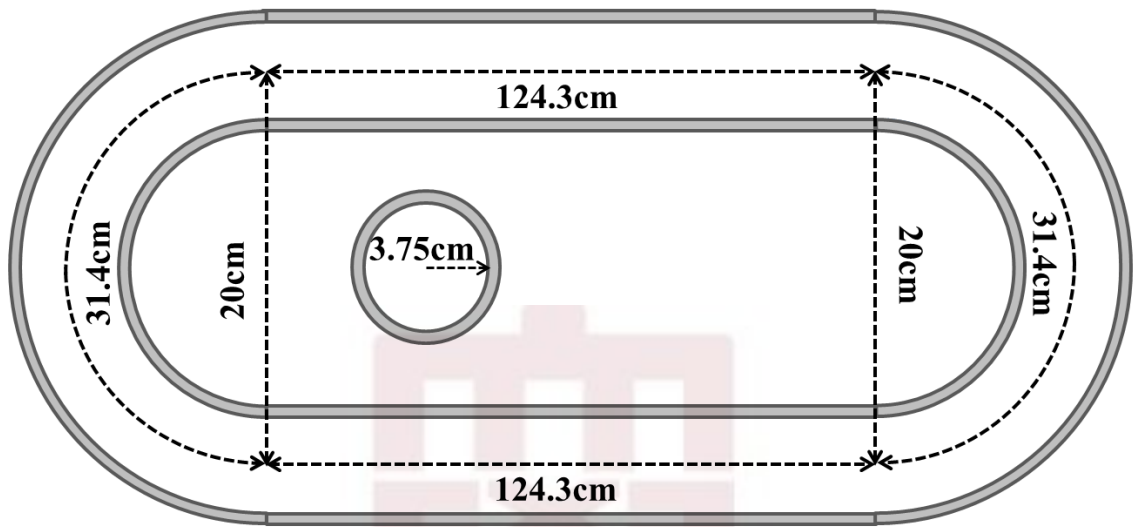


그림 24. 테스트 베드의 크기

Fig. 24. Size of Test bed

### 3.4 실험결과

#### 3.4.1 유속을 알기위한 압력의 측정

본 절에서는 피토관을 이용해서 측정된 압력으로 유속을 계산하고 향상된 먼지 센서부에 유속을 유추한다. 압력을 측정하고 테스트 베드로 동적인 먼지의 양의 표준을 정하기 위해서, ISO standard dust를 사용하여 실험을 하였다. 첫 번째 실험으로 측정된 압력을 통해 유속을 계산하고, 먼지센서 위치에서의 유속도 유추한다.

실험 결과는 표 4, 5, 6을 통해서 알 수 있다. Pitot Tube1은 팬에서 먼 쪽의 Tube이고, Pitot Tube2는 팬에서 가까운 쪽에 있는 Tube이다. 팬의 속도를 조절하며 두 Tube의 압력들을 측정하였고, 표 4, 5와 같은 수치를 얻었다. 두 개의 Tube와 먼지센서는 일정한 간격을 가지고 있기 때문에, 표 4, 5를 통해서 먼지센서를 통과할 때의 속도를 예측할 수 있다. 이를 통해 알 수 있는 먼지센서를 통과하는 유속은 표 6과 같다.

표 4. 피토관 1의 실험 결과

Table. 4. Experimental Result of Pitot Tube1

| static pressure(pa) | dynamic pressure(pa) | Velocity of Dust(m/s) |
|---------------------|----------------------|-----------------------|
| 4                   | 45                   | 7.071                 |
| 5                   | 71                   | 8.882                 |
| 7                   | 94                   | 10.220                |
| 9                   | 107                  | 10.904                |
| 11                  | 120                  | 11.547                |
| 13                  | 124                  | 11.738                |

표4와 같이 첫 번째 피토관에서는 정압과 동압이 모두 정확하게 측정되어서 유속을 쉽게 계산할 수 있다.

표 5. 피토관 2의 실험 결과

Table. 5. Experimental Result of Pitot Tube2

| static pressure(pa) | dynamic pressure(pa) | Velocity of Dust(m/s) |
|---------------------|----------------------|-----------------------|
| 0                   | 26                   | 5.375                 |
| 0                   | 40                   | 6.667                 |
| 0                   | 52                   | 7.601                 |
| 0                   | 61                   | 8.233                 |
| 3                   | 70                   | 8.819                 |
| 6                   | 78                   | 9.309                 |

표5에서는 팬의 속도가 약할 때에 정압이 측정되지 않아서 난감했다. 하지만, 유속의 (3.2.2)와 (3.2.3)식을 함께 계산하면 정압이 상쇄되기 때문에 유속을 계산할

수 있었다. 이처럼 정압이 없어도 유속은 측정할 수 있지만, 실제로 향상된 먼지센서가 개발되었을 때에는 정리된 테이블에 의해 정압만으로 유속을 판단해야 하기 때문에 정압의 값도 중요한 의미를 가진다.

표 6. 먼지센서를 통과하는 유속  
Table. 6. Velocity of Dust Sensor

| Velocity of Dust(m/s) |
|-----------------------|
| 3.679                 |
| 4.452                 |
| 4.982                 |
| 5.562                 |
| 6.091                 |
| 6.880                 |

결과적으로, 두 개의 피토관과 일정한 간격으로 배치되어 있는 먼지센서의 유속은 표5와 같다. 표5에 표시되어 있는 유속은 피토관1과 피토관2의 차이로 유추하였다.

#### 3.4.1 향상된 먼지센서에 의해 측정된 빛의 양과 먼지량의 관계

본 절에서는 테스트 베드에 투입된 먼지의 양과 향상된 먼지센서에 의해 측정된 빛의 양의 관계를 설명한다. 이 실험은 표 6을 통해서 알 수 있다. 폐회로에 퍼져있는 먼지의 양은 일정하기 때문에 감지되는 빛의 양은 단지 투입한 먼지의 양과 비례한다. 일정량의 먼지를 넣었을 때, 향상된 먼지센서에 감지되는 빛의 양은 다음과 같이 상대적인 값을 가진다.



표 7. 측정된 빛의 양과 먼지량의 관계

Table. 7. Correlation of Dust loading and Sensing value

| Total Dust loading(g) | Sensing value(lx) |
|-----------------------|-------------------|
| 10                    | 1.400505          |
| 20                    | 1.33825           |
| 30                    | 1.275994          |
| 40                    | 1.213738          |
| 50                    | 1.151482          |

실험을 통해서 테스트 베드에 투입된 전체 먼지의 양과, 각 먼지의 양에 의해서 향상된 먼지센서가 측정한 빛의 양의 관계를 알 수 있다. 전체 먼지의 양을 알고있기 때문에 테스트 베드를 통과하는 먼지의 양은 (3.3.2)의 식으로 계산할 수 있다. 테스트 베드에 투입되는 전체 먼지의 양이 50g이상이 될 때, 센서값이 더 이상 변화하지 않음을 알 수 있었다. 이를 바탕으로 그래프를 그려보면 다음과 같다.

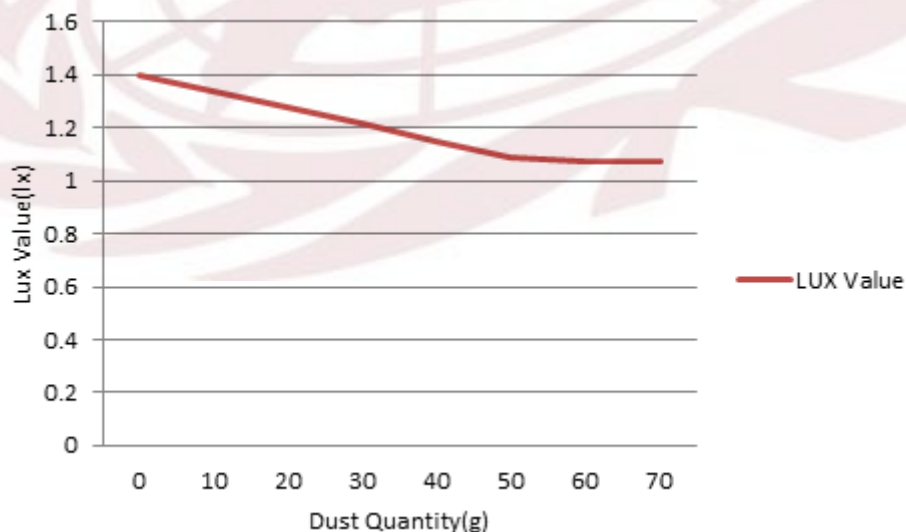


그림 25. 측정된 빛의 양과 먼지량의 관계

Fig. 25. Correlation of Dust loading and Sensing value



다양한 먼지로 실험하여 표준 데이터를 만들기 위해 운동장에 있는 모래먼지와 밀가루로 실험을 해 보았다. 모래먼지를 곱게 걸러서 실험을 하였을 때는 ISO 표준 먼지와 오차 5%이내의 거의 비슷한 결과가 나왔다. 하지만 밀가루는 폐회로관의 벽에 모두 붙어서 측정값을 얻을 수 없었다.

두 실험을 통해서 정압, 동압 그리고 유속의 관계를 파악하였고, 먼지센서를 통과하는 먼지의 양과 측정되는 빛의 관계도 파악하였다. 이 테스트 베드를 통해서 우리는 속도와 감지되는 빛의 양을 알면 얼마나 많은 먼지를 흡입하였는지 알 수 있다.



## 제 4 장 결 론 및 고찰

본 연구에서는 청소로봇 에너지 효율의 향상을 위하여, 최적의 경로를 생성하여 가장 짧은 시간동안 최단거리로 이동하는 다수의 로봇을 위한 관습적 항법(Tacit Navigation for Multi-Robots System)에 대하여 소개하였고, 청소로봇이 먼지가 많은 지역만 집중적으로 청소하기 위하여 이동중인 청소로봇을 위한 먼지센서를 개발하였다.

다수의 로봇을 위한 관습적 항법은 충돌 조사, limit-cycle, 그리고 국제 항공법과 같은 이론과 법들을 인용하여 만들었다. 시뮬레이션 결과, 관습적 항법을 사용하였을 때, 목적지에 짧은 시간 안에 정확히 도착하는 것을 볼 수 있었다. 특히, 관습적 항법은 로봇들을 항상 오른쪽으로 이동하도록 하였기 때문에, 충돌기회를 최소화하고 이동 시간을 감소시킨다. 또한, 청소로봇의 처음 위치에 따라서 관습적 항법은 더욱 짧은 시간과 짧은 거리로 이동할 수 있다. 미래에 로봇이 대중화 되어 개개인이 하나씩 소장 할 정도로 인기가 많아진다면, 로봇들도 인간처럼 사회적 관습이 필요하기 때문에 관습적 항법은 더욱 유용할 것이다.

또한 광학식 먼지센서와 피토크, 그리고 유체역학 등을 이용하여 청소로봇을 위한 향상된 먼지센서를 개발하였다. 기존의 광학식 먼지센서가 정적인 먼지량만 측정할 수 있는 것과는 달리, 향상된 먼지센서는 이동 중에 먼지의 양을 측정하기 때문에 측정되는 빛의 양 뿐만 아니라 흡입되는 유속도 알아야 한다. 이를 위해 본 논문에서는 유속과 먼지량을 알 수 있는 테스트 베드를 개발하였다. 실험 결과와 같이 테스트 베드는 피토크와 압력계로 유속을 측정하고, 개발된 먼지 센서를 이용하여 먼지의 양을 파악할 수 있다. 현재의 먼지센서를 발전시켜서 앞으로는 먼지의 종류까지도 알 수 있는 먼지센서를 개발 할 것이다. 이 먼지센서는 하나의 LED로부터 발산되는 빛이 8개의 수광부에 수광된다. 이때 먼지의 종류에 따라서 산란되는 빛의 양이 달라지는데, 이때 수광되는 빛을 2차원 그래프로 나타내면 먼지의 종류를 알 수 있다. 우리는 산란이 잘 되는 물질부터 빛을 산란하지 않는 물질까지 다양하게 실험하여, 각 물질들의 특징에 의해 수광되는 빛을 2차원 그래프로 정리 할 것이다.

추후에는 향상된 먼지센서의 기능을 더욱 향상시키고, 다수 로봇을 위한 관습적

항법이 적용된 청소로봇에 탑재시켜서, 청소로봇 에너지 효율의 극대화를 증명할 것이다.



## 참 고 문 헌

- [1] D-H. Kim and J-H Kim, "A real-time limit-cycle navigation method for fast mobile robots and its application to robot soccer", *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 42, pp. 17-30, 2003.
- [2] B.C. Min, M. Kim, and D. Kim, "Fuzzy Logic Path Planner and Motion Controller by Evolutionary Programming for Mobile Robots," *International Journal of Fuzzy Systems*, Vol. 11, No. 3, September 2009.
- [3] Shingo Shimoda, Yoji Kuroda, and Karl Iagnemma, "High-speed navigation of unmanned ground vehicles on uneven terrain using potential fields", *Robotica*, Vol. 25, pp. 409-424, 2007.
- [4] A. Bader, C. H. Skinner, A. L. Roquemoire, and S. Langish, "Development of an electrostatic dust detector for use in a tokamak reactor", *Review of Scientific Instruments*, Vol.75(2), p. 370-375 (2004).
- [5] N. Meyer-Vernet, M. Maksimovic, A. Czechowski, I. Mann, I. Zouganelis, K. Goetz, M. L. Kaiser, O. C. St. Cyr, J.-L. Bougeret and S. D. Bale, "Dust Detection by the Wave Instrument on STEREO: Nanoparticles Picked up by the Solar Wind?" *Solar Physics*, Vol.256(1-2), p.463-474 (2009)
- [6] C. Voinier, C.H. Skinner, and A.L. Roquemoire, "Electrostatic dust detection on remote surfaces" *Journal of Nuclear Materials* Vol.346(2-3), p.266-271 (2005)
- [7] S Ratynskaia, C Castaldo, E Giovannozzi, D Rudakov, G Morfill, M Horanyi, J H Yu and G Maddaluno, "In situ dust detection in fusion devices", *Plasma Physics and Controlled Fusion*, Vol.50(12), p.11-21 (2008)

- [8] H. Kruger, E. Grun, A. Heck, S. Lammers, “Analysis of the sensor characteristics of the Galileo dust detector with collimated Jovian dust stream particles”, *Planetary and Space Science* 47, 1015-1028 (1999)
- [9] Chanhoo Cho, “Obstacle Avoidance of an Omni-directional Robot using Limit-cycle Navigation Method”, M.S. thesis, Kyung Hee University, February 2010.
- [10] 김동한, 류근호, “이동로봇을 위한 Limit-cycle 항법”, *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, Vol. 14, No. 8, 2008.
- [11] D-S Jang, S-J Cho, M-J Tahk, H-J Koo and J-S Kim, “Fuzzy based Collision Avoidance against Multiple Threats for Unmanned Aerial Vehicles,” *Proceedings of the Aircraft Symposium*, Vol. 43, No. 26 (2005), FIG.9, TBL.4, REF.4
- [12] CENGEL CIMBALA, MCGRAWHILL Publishers, Chapter 5, pp.183-184 (2009)
- [13] Hassan K Khalil, *Nonlinear System*, 2nd ed, *Prentice Hall*, chap. 7, pp.289-312, 1996.
- [14] Arkin R C, *Behavior Based Robotics*, *the MIT Press*, 1998.

## ABSTRACT

# System Design for Energy Efficiency Improvement of Cleaning Robot

Jeong Wan Kim

Department of Electronics Engineering  
Graduate School of Kyung Hee University, Korea  
(Supervised by Prof. DongHan Kim Ph.D.)

According to development of the robot industry, the navigation method and sensor have been studied actively for efficiency of robot movement.

Robots move effectively according to Tacit navigation method and reach the destination in a optimal path. Tacit navigation method applies “Rules of the air” of the International Civil Aviation Organization (ICAO) annex 2 and “Right of way” of Federal Aviation Regulation (FAR) 91.113 to the UGV(Unmanned Ground vehicle). ICAO and FAR require the following: “If both airplanes approach from opposite sides, they are supposed to give way by turning right away from each other to avoid a collision, and if flying airplanes come into conflicting paths side by side, the left airplane turns right to yield.” Tacit navigation method for multi-agent system applies them to the UGV. “If two UGVs approach each other from opposite sides, they are supposed to give way by turning right away from each other to avoid a collision, and if moving UGVs come into conflicting paths side by side, the left UGV waits for a while to yield.” According to this method, robots make

optimal path and save energy by effective moving.

Another method for save energy of cleaning robot is robot cleans polluted area intensively. To achieve this, robot should measure dust loading that passes an induction pipe of robot. Most dust sensors are used to understand the degree of environmental pollution by measuring dust concentration in air conditioners or subway waiting rooms. However, when such dust sensors are utilized in vacuum cleaners or vacuum robots, it is very difficult to accurately measure the total amount of moving dust with optical dust sensors as dust sensors can only detect static dust. In order to build more intelligent vacuum cleaners or vacuum robots, dust sensors which can detect moving dust are truly necessary.

In this research, in order to improvement of robot's efficiency, tacit navigation method makes robot to keep to the right, it minimizes the chance of a collision and reduces moving time. In addition how such a test bed can measure the amount of dust, and prove this theory through the experiments.