

# 랜드마크 기반의 전방향 청소로봇 설계 및 제어

## Design and Control of an Omni-directional Cleaning Robot Based on Landmarks

김동원, 유이고르, 강은석, 정슬\*†

Dong Won Kim, Yugay Igor, Eun Seok Kang, and Seul Jung†

충남대학교 메카트로닉스공학과

†Department of Mechatronics Engineering, Chungnam National University

### 요약

본 논문에서는 3개의 바퀴를 취하는 삼각형 구조의 전방향 청소로봇의 설계와 제어에 대해 소개한다. 시뮬레이션과 실험을 통해 제안하는 방법의 동작을 검증한다. 전방향 구조는 어느 방향으로 움직일 수 있다. 천장의 마커를 사용하는 StaGazer 센서를 사용하여 로봇의 위치와 헤딩각을 알아냈다. 추가로 초음파 센서를 부착하여 장애물을 검출할 수 있도록 하였다. 실험을 통해 시스템의 성능을 평가하였다.

**키워드:** 전방향 청소 로봇, 자기위치인식, 장애물 회피.

### Abstract

This paper presents design and control of an ‘Omni-directional Cleaning Robot (OdCR)’ which employs omni-wheels at three edges of its triangular configuration. Those omni-wheels enable the OdCR to move in any directions so that lateral movement is possible. For OdCR to be localized, a StarGazer sensor is used to provide accurate position and heading angle based on landmarks on the ceiling. In addition to that, ultrasonic sensors are installed to detect obstacles around OdCR’s way. Experimental studies are conducted to test the functionality of the system.

**Keywords :** Omni-directional Cleaning Robot(OdCR), Localization, Collision Avoidance

## 1. 서론

인간의 삶의 수준이 높아지면서 인간의 일을 대신 처리할 수 있는 로봇에 대한 필요성이 높아지고 있다. 최근에는 자동화의 욕구가 증대되고 있고 사람의 손으로 직접 하지 않고 로봇이 대신해주는 작업들이 증가하고 있다. 이에 따라 인간의 삶에 가장 근접한 가정용 서비스 로봇의 필요성이 증대되고 있다.

이러한 필요성의 증대는 이동로봇분야의 급격한 발전을 가져왔고 그 중에서도 청소 로봇은 로봇이 실생활에 쓰이는 대표적인 예라 할 수 있다. 많은 대기업, 외국기업들의 참여로 그림 1에 보여진 LG전자의 로보킹, 삼성전자의 탱고 등이 판매되고 있다.

이러한 청소 로봇의 특징은 인간의 개입이 없이 스스로 영역을 인식하여 모든 곳을 주행하고 장애물을 회피하며 청소하는 특징을 가지고 있다. 청소로봇의 가장 핵심적인 기능은 청소기능, 자율주행과 장애물 회피기능이다.

전역 센서를 통해 로봇의 위치를 파악하고 자율주행으로 전체 영역을 청소하는 것과 이동 중에 장애물을 피하여

주행하는 것이 핵심기술이다. 장애물을 인식하고 자율주행을 하면서 방 전체를 청소한다면 가사의 부담을 줄일 수 있을 것이다. 또한 청소로봇의 지능이 발달함에 따라 가격이 비례하게 된다.

이동로봇의 자율 주행에 대한 연구는 많이 이루어져 왔다. 반면, 전방향 이동로봇의 자율 주행에 대한 연구는 그리 많이 이루어져 있지 않으며, 동역학 유도 및 제어 부분에 치중되어 있다[1-12].

전방향 이동로봇의 기구학과 동역학을 유도하여 제어하고 [1], 축구로봇에 사용하고 [2], 비선형 제어를 설계하여 제어하기도 하였다 [4]. 주어진 경로를 추종하도록 제어를 설정하고 [5,7,8], 장애물 회피를 실시간으로 처리하는 방법을 제시하였다 [10]. 특별한 형태의 설계, 즉 구형대의 전방향 이동로봇을 설계하고 분석하였으며[11], 거친 환경에서 주행할 수 있는 전방향 이동로봇을 소개하였다[12].

이렇듯 대부분의 전방향 이동로봇에 대한 연구는 경로 추종 제어에 국한된 것이 사실이다. 본 논문에서는 전방향 이동로봇을 기반으로 청소로봇을 설계하고 제작하여 제어한다.

접수일자: 2013년 1월 11일

심사(수정)일자: 2013년 2월 4일

게재확정일자 : 2013년 2월 6일

†Corresponding author

※ 본 논문은 2010년도 한국연구재단(KRF)의 일반연구지원사업의 일부 지원으로 수행되었습니다.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

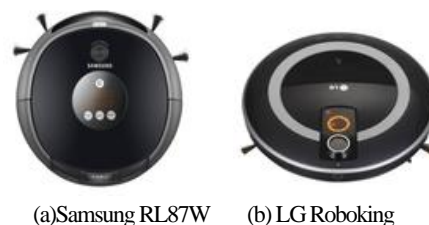


그림 1. 상용 청소로봇  
Fig. 1. Commercial cleaning robots

로봇의 바퀴에 의존한 dead-reckoning 움직임은 천장에 있는 랜드마크를 사용하는 전역 센서인 StarGazer 센서를 이용하여 보상한다. 장애물은 초음파 센서를 사용하여 검출하고 피할 수 있도록 한다. 실제 다양한 실험을 통해 제작한 OdCR의 자율주행과 장애물 회피 그리고 청소 성능을 평가한다.

## 2. 기구학 설계

전 방향으로 움직이는 청소로봇을 구현하기 위해서는 3개의 모터를 일정한 각도로 배치해야 한다. 청소로봇을 움직이는 DC모터는 120° 간격으로 삼각형을 이루어 부착되어 있다. 두 바퀴 구동의 일반적인 이동로봇은 nonholonomic 시스템의 경우 측면으로의 움직임이 구속되어 움직임이 제한적이다. 전 방향이동로봇은 holonomic 시스템으로서 기구학의 구속이 없어 모든 방향으로의 제어가 쉽다. 그림 2는 OdCR의 좌표계를 나타낸다.

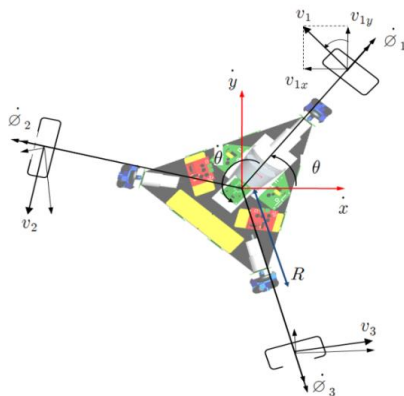


그림 2. 기구학 모델  
Fig. 2. Kinematics Model

각 링크에서의 속도는 바퀴에 위치한 지점의 속도와 모바일의 각속도를 이용해서 구할 수 있다. 위 시스템에서 속도 관계를 나타내면 식(1)과 같다.

$$v_i = -\dot{x} \sin \theta + \dot{y} \cos \theta + R \dot{\theta} \quad (1)$$

여기서  $\theta$  는 헤딩각이고 R은 무게중심점과 바퀴 사이의 거리이다.

각 바퀴에 대한 선속도를 행렬식으로 표현하면 식(2)와 같다.

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \theta & \cos \theta & R \\ -\sin(\theta + 120^\circ) & \cos(\theta + 120^\circ) & R \\ -\sin(\theta + 240^\circ) & \cos(\theta + 240^\circ) & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (2)$$

각 바퀴의 선속도와 좌표계에서의 속도와 관계는 식(3)과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin(\theta) & \cos(\theta) \\ -\frac{\sqrt{3}}{2} \cos(\theta) - \frac{1}{2} \sin(\theta) & -\frac{\sqrt{3}}{2} \sin(\theta) + \frac{1}{2} \cos(\theta) \\ \frac{\sqrt{3}}{2} \cos(\theta) + \frac{1}{2} \sin(\theta) & \frac{\sqrt{3}}{2} \sin(\theta) - \frac{1}{2} \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (3)$$

바퀴의 각속도로 표현하면 식(4)와 같다.

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin(\theta) & \cos(\theta) \\ -\frac{\sqrt{3}}{2} \cos(\theta) - \frac{1}{2} \sin(\theta) & -\frac{\sqrt{3}}{2} \sin(\theta) + \frac{1}{2} \cos(\theta) \\ \frac{\sqrt{3}}{2} \cos(\theta) + \frac{1}{2} \sin(\theta) & \frac{\sqrt{3}}{2} \sin(\theta) - \frac{1}{2} \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ R \\ R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \\ \dot{\phi}_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서  $\dot{\phi}_i$  는 i바퀴의 회전각속도이다.

## 3. 전방향 청소로봇 시스템

### 3.1 전체 시스템 설계

전체 시스템 설계는 그림 3과 같다. 가운데 StarGazer를 중심으로 각 꼭지점에 모터가 장착되어 있다. 이 3개의 모터구동은 omni-wheel을 사용하여 어떠한 방향으로든지 자유롭게 이동 할 수 있다. StarGazer의 Heading 방향에는 청소기가 장착되어 있고 그 밑에는 주회로가 놓여있다.

또한 시스템 가장자리에는 총 9개의 초음파 센서가 장착되어 장애물 회피에 사용된다. 시스템 내부의 빈 공간에는 배터리를 장착하여 시스템의 무게중심에 위치할 수 있도록 하였다. 그림 3 (a)는 위에서 (b)는 로봇을 측면에서 바라본 모습이다.

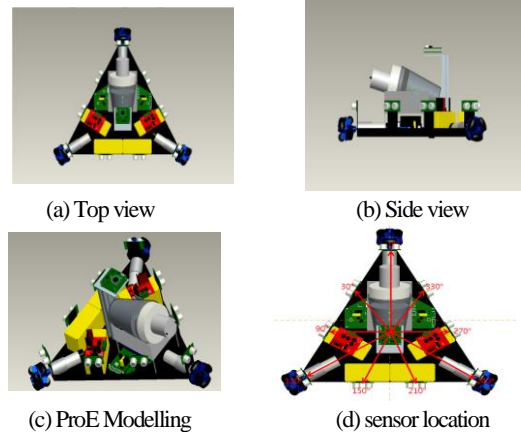


그림 3. 전체 시스템  
Fig. 3. Overall system

### 3.2 전체 시스템 구성

그림 4에 보여진 실제 청소로봇은 현재 위치를 정확히 알 수 있도록 중앙에 StarGazer 센서를 사용하였다.

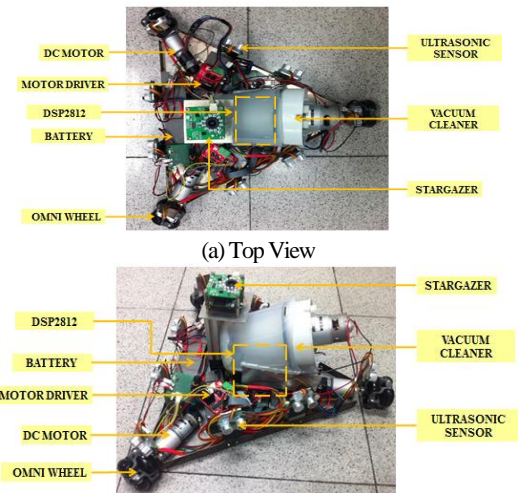


그림 4. 전체 시스템  
Fig. 4. Overall system

또한 주변 장애물을 피하기 위해 초음파센서(SRF05)를 가장자리에 3개씩 부착하여 모든 방향에서 장애물을 인식하고 피할 수 있도록 하였다.

### 3.3 하드웨어 구성

그림 5는 전체 하드웨어 구조를 나타낸 것이다. StarGazer 센서의 좌표 값은 RS232통신으로 DSP에서 수신한다. 또한 초음파센서(SRF05)의 센서 값은 DSP로

수신한다. StarGazer 센서 값은 DSP내부에서 처리한 후 Bluetooth를 사용해 Notebook으로 전송한다. 이 데이터는 Notebook에서 로봇의 현재 위치를 표시하고 Notebook에서 DSP로 목표 좌표를 전송함으로써 조종이 가능하게 한다. 또한 장애물 회피가 가능한 자율주행 코드를 적용함으로써 Notebook에서 동작버튼을 통해 별도의 조종이 필요없이 자율주행이 가능하다.

초음파 센서 값은 DSP에서 처리하여 장애물 회피가 가능한 주행을 구현한다. 이 모든 구동은 3개의 Omni-Wheel이 부착된 DC모터를 통해 구동된다.

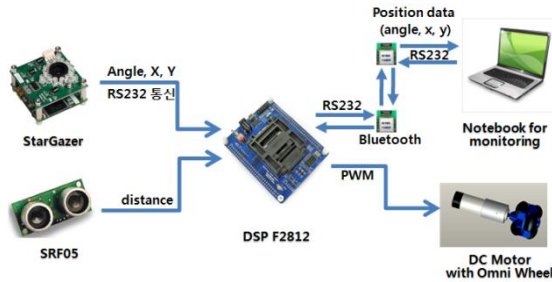


그림 5. 전체 하드웨어 구성  
Fig. 5. Overall hardware structure

그림 6은 시스템 주회로의 모습이다. 청소로봇의 특성상 전체 높이가 높아지면 안되므로 1단으로 구성하고 최대한 모든 부분을 밀집시켜 놓았다. 사용이 편리하게 중앙에는 DSP(TMS320F2812)를 탑재했고 모터드라이브 전원부와 DSP와 StarGazer용 전원부를 구성하여 전원공급을 원활하게 해주었다. 좌측에는 초음파와 센서 커넥터를 장착하고 우측에는 Bluetooth 모듈을 장착하였다.



그림 6. 주회로  
Fig. 6. Main circuit

3.4 제어 구조

각 바퀴의 속도 제어는 그림 7과 같다. 원하는 좌표값을 입력하면 청소로봇은 StarGazer센서를 사용해 현재 위치를 전송하고 이 값과 목표 값을 비교한다. 모터의 움직임은 PID 제어를 사용하여 제어하였다. 또한 기구학을 통하여 얻은 식을 통해 그림 8과 같은 제어 알고리즘(flow chart)을 구성하였다.

먼저 주변 센서(StarGazer센서, 초음파 센서)가 초기화 된 후에 PC에서 명령을 받으면 경로를 설정하는 알고리즘을 통하여 desired angle, desired x, desired y data를 생성한다. 이는 StarGazer센서를 통한 좌표값과 비교되어 오차를 생성한다.

$$e(t) = q_d(t) - q(t) \quad (5)$$

여기서  $q(t) = [x, y, \theta]^T$ ,  $q_d(t) = [x_d, y_d, \theta_d]^T$  이다. 생성된 오차는 PID제어기로 입력되어 제어 입력  $u(t)$ 를 생성한다. 정확한 위치제어를 위한 PID 제어기는 식(6)과

같다.

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int e(t)dt + k_d \dot{e}(t) \quad (6)$$

여기서  $k_p, k_i, k_d \in R^{3 \times 3}$  는 이득행렬로 diagonal 값을 갖는다. 표1에는 실험적으로 구한 diagonal 이득값들이 나타나 있다.

표 1. 시스템의 PID 이득값  
Table 1. PID gain for the system

	P gain	I gain	D gain
X	900	0.5	7
Y	900	0.6	8
Angle	570	0.15	2

식(5)의 기구학을 통하여 얻은 수식을 통해 각 모터에 필요한 회전속도를 계산하게 되고 이를 통해 PWM제어를 하게 된다.

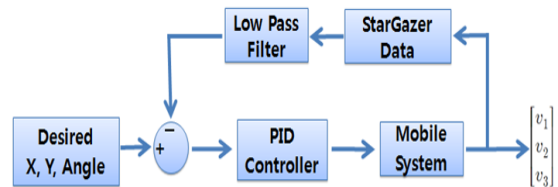


그림 7. 바퀴의 속도제어  
Fig. 7. Velocity control of wheels

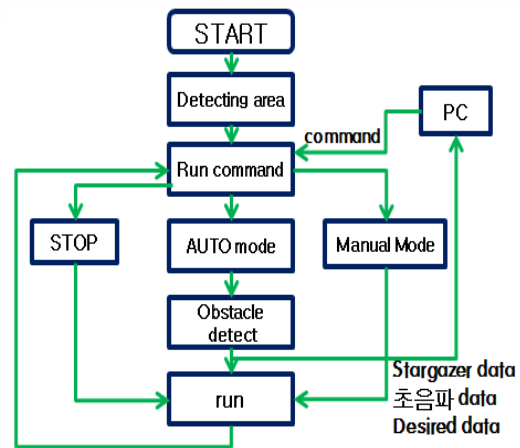


그림 8. 제어 알고리즘  
Fig. 8. Control algorithm

4. 실험 결과

먼저 조이스틱을 사용하여 원하는 목표 값에 도달할 수 있는 실험을 진행하였고, 그것에 맞는 개인 값과 실험을 진행한 이후에 자율주행이 가능한 실험으로 진행을 하였다.

4.1 사각형 경로 추종

그림 9는 사각형 경로를 움직이는 실험이다. 좌측에는 실제 OdCR의 움직임의 image가 보여지고 오른쪽에는 StarGazer센서로부터 정보를 통해 그려진 로봇의 경로가

GUI를 통해 나타난다.

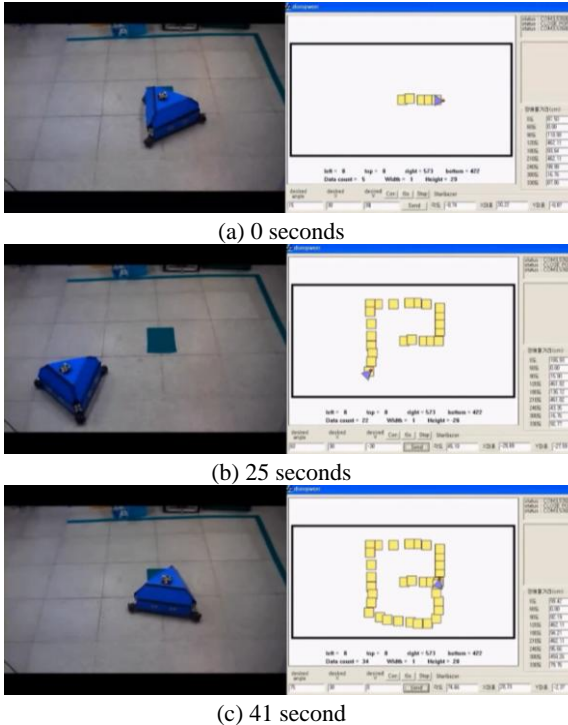


그림 9. 사각형 경로 실험  
Fig. 9. Rectangular trajectory

GUI에 그려진 로봇의 이동경로를 확인하면 목표 값을 추정하는 것을 확인할 수 있었다. 다소 오차가 있지만 최종 목표값에 도달한 것을 확인할 수 있었다.

4.2 삼각형 경로 추종

사각형의 실험에 이어서 삼각형 구동을 실험하였다. 하지만 삼각형 실험은 그림 9에 나타나듯이 사각형만큼 정확하게 움직이지 못하였다.

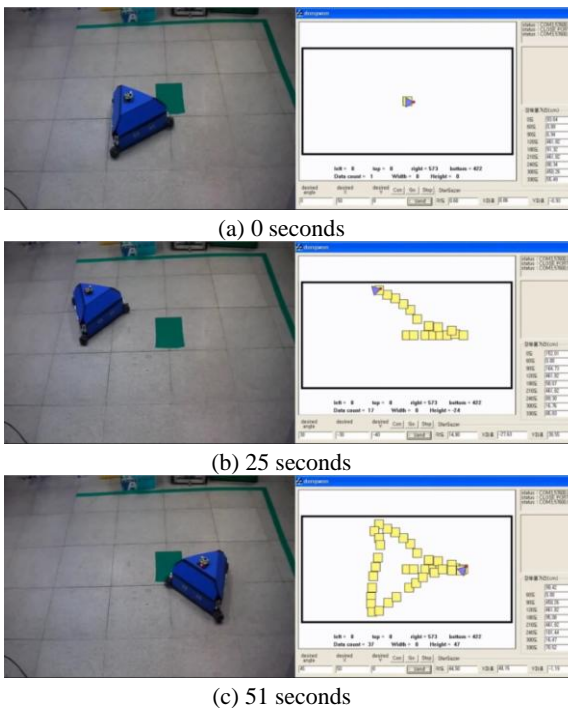


그림 10. 삼각형 경로 추종 실험  
Fig. 10. Triangular trajectory tracking

대각선으로의 움직임은 직선과 다르고 바퀴의 슬립으로 인한 오차때문이다. 최종적으로 목표한 지점에는 도달하지만 다소 추종이 정확하지 않은 것을 확인하였다.

4.3 자율주행 구동 실험

4.3.1 장애물 없이 구동

자율 주행은 청소하는 패턴을 수행하도록 하였다. 그림 11과 같이 처음 움직임을 시작으로 y축으로 먼저 이동한 이후에 장애물이 없을 경우에 목표 지점까지 이동한 다음, x축으로 이동하는 것을 확인할 수 있다. 그림 11의 (c)에서 보면 약 3분이후에 로봇이 원하는 영역을 모두 움직인 것을 볼 수 있다.

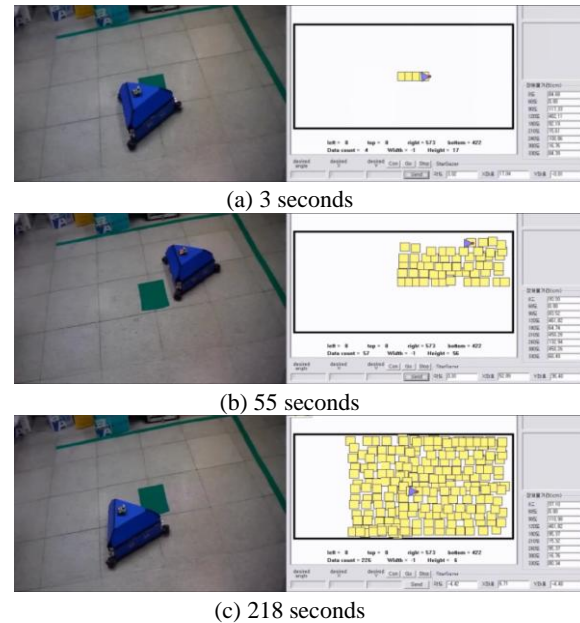
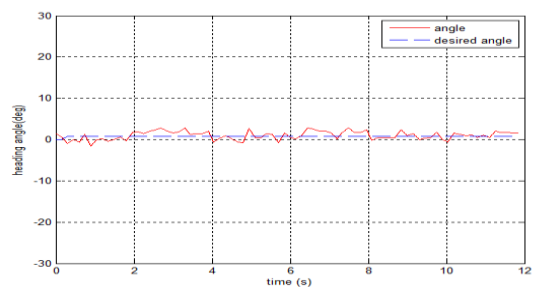
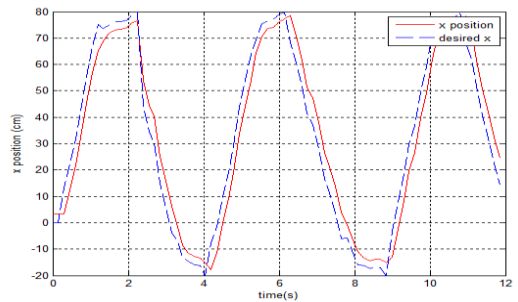


그림 11. 구동 실험 - 장애물 없음  
Fig. 11. Test - no obstacle

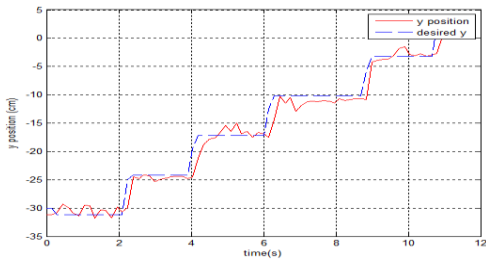
그림 12는 그림 11에서 로봇의 움직임을 데이터로 나타낸 것이다. 점선은 desired값이고 실선은 실제 stargazer 센서를 통하여서 받은 data이다.



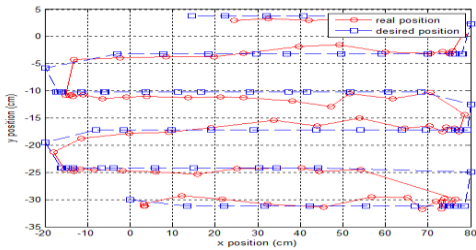
(a) autonomous - heading angle



(b) autonomous - x position data



(c) autonomous - y position data



(d) autonomous - mapping data

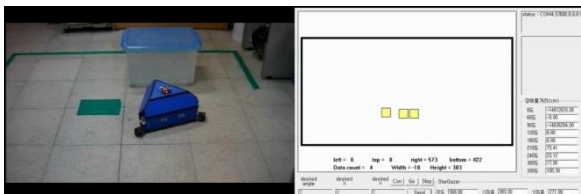
그림 12. 실험 데이터 장애물 없음

Fig. 12. Data no obstacle

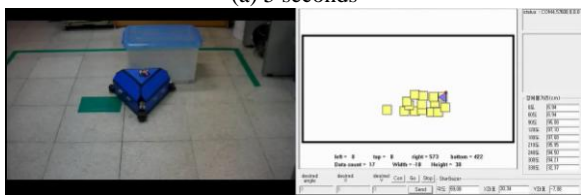
그림 12의 (d)에서 보면 약간의 오차가 있지만 목표 경로를 잘 추종하는 것을 볼 수 있다. 이 오차는 바퀴의 미끄러짐에 의해 발생하는 것을 볼 수 있다.

#### 4.3.2 장애물 회피 구동 실험

장애물을 회피하면서 움직이는 실험을 수행하였다. 그림 13은 실제 동영상 image이고 그림 14는 이를 data로 plot한 그림이다. 그림 13을 보면 OdCR이 장애물을 피해가는 것을 볼 수 있다.



(a) 5 seconds



(b) 19 seconds



(c) 53 seconds



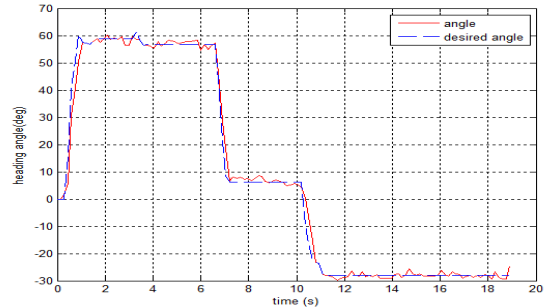
(d) 74 seconds

그림 13. 구동실험-장애물 회피

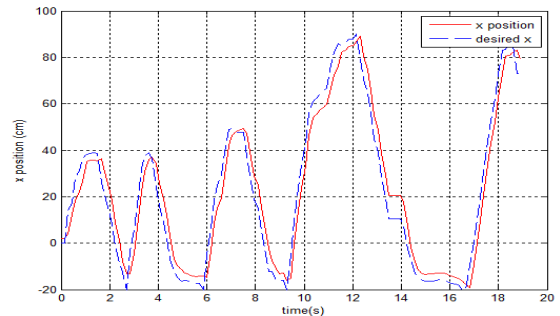
Fig. 13. Test avoiding obstacle

그림 14에서 angle data를 통해서 장애물에 접근 할수록 값이 변화하는 것을 확인 할 수 있다. 또한 그림 14 (d)의 mapping data를 통해서 오른쪽 아래 부분에 장애물이 위치한 곳에는 경로가 생성되지 않는 것을 확인 할 수 있다.

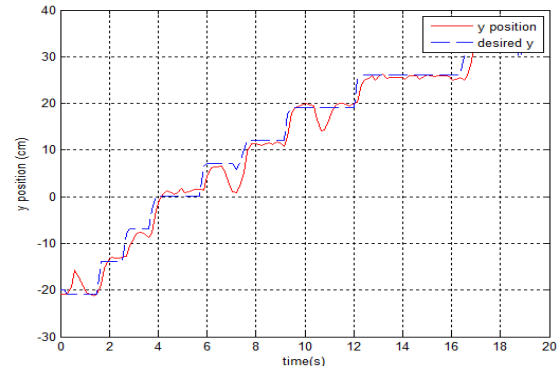
자율주행으로 주행을 하다가 장애물을 만날 경우에 회전하여 장애물에 가깝게 이동한 후, x축으로 이동하는 알고리즘을 구현하여 실험하였다. 그림 14를 통해서 장애물이 위치한 부근에 이동로봇의 경로가 나타나지 않고 회피하는 모습을 확인하였다.



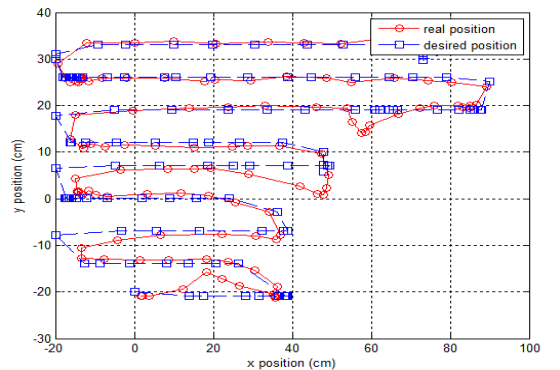
(a) avoiding obstacle - Heading angle



(b) avoiding obstacle - x position data



(c) avoiding obstacle - y position data



(d) avoiding obstacle - mapping data

그림 14. 실험 데이터 장애물 회피

Fig. 14. Data avoiding obstacle

#### 4.4 청소 성능 실험

그림 15는 청소 성능을 실험한 모습이다. 지정된 공간 안에서 주행을 할 때에 바닥에 있는 이물질들을 청소기를 통해 제거하는 실험을 하였다. 그림 15에서 확인할 수 있듯이 이물질이 비교적 깨끗하게 청소됨을 볼 수 있다.

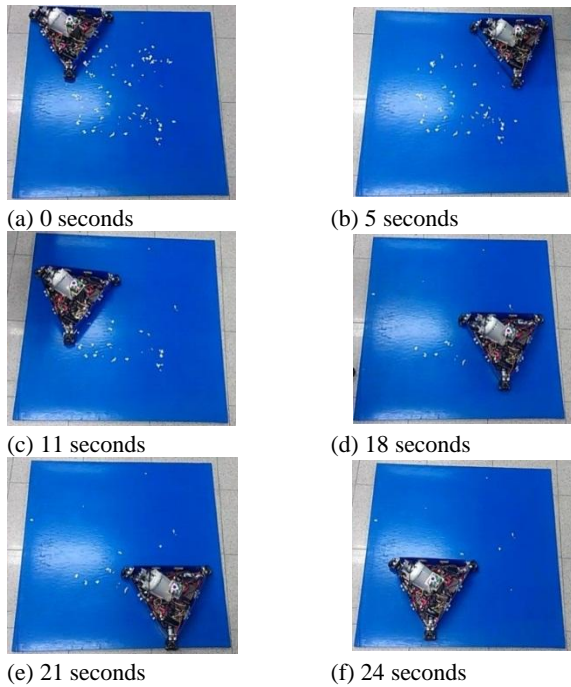


그림 15. 청소 성능 실험

Fig. 15. Test of cleaning performance

### 5. 결론

본 논문에서는 자율주행이 가능한 청소로봇을 위해 초음파 센서를 이용한 장애물 인식 및 회피 알고리즘과 이동로봇의 위치를 제어하기 위해 StarGazer 센서를 사용하였다. 전방향 이동로봇을 실제 가정용 청소로봇에 적용하여 가능성을 확인하였다.

전방향 바퀴의 특성상 슬립이나 지면의 상태에 영향을 많이 받기 때문에 Encoder기반의 dead-reckoning으로 정확한 위치제어가 어렵다는 것을 알 수 있었다. Dead-reckoning 문제를 해결 하기 위해 로봇의 절대 좌표를 알 수 있는 StarGazer의 센서값을 이용하였다. 실제 다양한 실험을 통해 청소기로서의 로봇의 역할을 검증하여 보았다.

### References

[1] K. Watanabe, "Control of an omnidirectional mobile robot", *Second International Conference on Knowledge-Based Intelligent Electronic Systems*, pp. 51-60, 1998.

[2] H. A. Samani, A. Andollahi, H. Ostadi, and S. Z. Rad, "Design and development of a comprehensive omnidirectional soccer player robot", *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol.1. no. 4, pp. 191-200, 2004.

[3] J. H. Wu, R. L. Williams II, and J. Lew, "Velocity and Acceleration Cones for Kinematic and Dynamic Constraints on Omni-Directional Mobile Robots", *Transactions of the ASME*, Vol.128, pp. 788-799, 2006

[4] D. Stonier, S. H. Cho, S. L. Choi, N. S. Kuppaswamy, and J. H. Kim, "Nonlinear slip dynamics for an omnidirectional mobile robot platform", *IEEE Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2367-2372, 2007.

[5] D. H. Kim, "Integrated Path Planning and Collision Avoidance for an Omni-directional Mobile Robot", *INTERNATIONAL JOURNAL of FUZZY LOGIC and INTELLIGENT SYSTEMS*, vol. 10, no.3, 2010.9, pp 210-217

[6] D. S. Kim, H. C. Lee, and W. H. Kwon, "Geometric Kinematics Modeling of Omni-directional Autonomous Mobile Robot and Its Applications", *IEEE International Conference on Robotics & Automation*, pp. 2033-2038, 2000

[7] K. B. Kim and B. K. Kim, "Minimum time trajectory for three-wheeled omnidirectional mobile robot following a bounded curvature path with a referenced heading profile", *IEEE Trans. on Robotics*, vol. 27, no.4, pp.800-808, 2011.

[8] Y. Liu, J. J. Zhu, R. L. Williams, and J. H. Wu, "Omni-directional mobile robot controller based on trajectory linearization", *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 56, pp.461-479, 2008.

[9] H. C. Huang and C. C. Tsai, "Adaptive trajectory tracking and stabilization for omnidirectional mobile robot with dynamic effects and uncertainties", *The 17th World Congress of IFAC*, pp. 5383-5388, 2008.

[10] B. A. Huacan, A. P. Quispe, P. C. Perez, S. L. Alvarado, and C. I. Valer, "Omnidirectional mobile robot with avoid of obstacles in real time", *International Symposium on Multibody Systems and Mechatronics*, 2005.

[11] Y. C. Lee, D. V. Lee, J. H. Chung, and S. Velinsky, "Control of redundant, reconfigurable ball wheel drive mechanism for an omnidirectional mobile platform", *Robotica*, vol. 25, pp. 385-395, 2007.

[12] M. Udengard and K. Lagnemma, "Analysis, design, and control of an omnidirectional mobile robot in rough terrain", *ASME Journal of Mechanical Design*, vol. 131, 2009.

### 저 자 소 개



**김 동 원 (DongWon Kim)**

2012년 : 충남대학교 메카트로닉스공학과 졸업

2012년~현재: (주)삼성디스플레이 소프트웨어엔지니어 재직

관심분야 : 인공지능알고리즘, 생산자동화공정, Real Time Dispatching  
 Phone : +82-41-623-4446  
 E-mail : dw88a.kim@samsung.net



**유 이 고 르 (Igor Yugay)**

2012년:충남대학교 메카트로닉스공학과 졸업.

2013년~현재: 삼성 엔지니어링 사원

관심분야 : 지능 시스템 및 지능 로봇 시스템, 자동차 에어컨

시스템.

Phone : +82-10-3317-0517

E-mail : igor.yugay@samsung.com



**강 은 석 (Eun Seok Kang)**

2012년:충남대학교 메카트로닉스공학과 졸업.

2012년 ~ 현재:한라공조(주) 연구원

관심분야 : 지능 시스템 및 지능 로봇 시스템, 자동차 에어컨 시스템.

Phone : +82-42-930-6720

Fax : +82-42-930-6619

E-mail : eskang@mail.hcc.co.kr



**정 슬 (Seul Jung)**

1988년:미국 웨인 주립대 전기 컴퓨터공학과 졸업.

1991년:미국 캘리포니아대 데이비스 전기 컴퓨터공학과 석사 졸업.

1996년:미국 캘리포니아대 데이비스 전기 컴퓨터공학과 박사 졸업.

1997년 ~ 현재: 충남대학교 메카트로닉스공학과 교수

관심분야 : 지능 시스템 및 지능 로봇 시스템, 밸런싱 시스템응용, 미래형 운송 시스템, 재활로봇, 로봇 교육.

Phone : +82-42-821-6876

Fax : +82-42-823-4919

E-mail : jungs@cnu.ac.kr