

마그네틱 콤파스 기반의 전 방향 로봇의 방위각 제어

Azimuth Tracking Control of an Omni-Directional Mobile Robot(ODMR) Using a Magnetic Compass

이 정 형, 정 슬*

(Jeong Hyeong Lee and Seul Jung)

Abstract : In this paper, control of an omni-directional mobile robot is presented. Relying on encoder measurements to define the azimuth angle yields the dead-reckoned situation which the robot fails in localization. The azimuth angle error due to dead-reckoning is compensated and corrected by the magnetic compass sensor. Noise from the magnetic compass sensor has been filtered out. Kinematics and dynamics of the omni-directional mobile robot are derived based on the global coordinates and used for simulation studies. Experimental studies are also conducted to show the correction by the magnetic compass sensor.

Keywords : azimuth tracking, global frame, magnetic compass, omni-directional mobile robot, robot frame

I. 서론

이동로봇은 이동성의 장점으로 인해, 로봇 연구에서 많은 관심을 끌고 있는 분야 중의 하나이다. 하지만, 기존 차동 휠 기반 이동로봇이 가지는 이동성의 한계로 인해 새로운 방식의 이동로봇에 대한 필요성이 대두되었고, 최근 들어 전 방향 이동 로봇에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 차동 휠 기반의 이동 로봇이 방위각과 진행 방향이 서로 의존적인 반면, 전 방향 이동 로봇은 방위각과 진행 방향이 서로 독립적이므로, 몸체의 회전 없이도 전 방향으로 이동이 가능하다는 장점을 가진다[1-8]. 이러한 장점으로 인해, 전 방향 이동 로봇은 좁은 공간에서도 이동성의 제약을 받지 않고 이동이 가능하게 된다.

전 방향 이동 로봇은 다양한 구조, 다양한 제어 알고리즘의 적용을 통해 많은 사람들에 의해 활발히 연구되고 있다. Watanabe는 직교좌표 기준의 동역학을 유도했으며, 다양한 제어 알고리즘들을 상태 방정식 기반으로 모델링했다[5]. Wu 등은 시스템의 최대 속도 및 가속도를 이용하여 기구학 및 동역학 제약 조건을 구성하였다[8].

잘못된 방위각 정보는 이동 로봇이 잘못된 위치로 움직이게 만들기 때문에 정확한 방위각 정보의 획득이 이동 로봇의 성능을 결정짓는 중요한 요소가 된다[9]. 로봇의 방위각을 결정짓는 센서로는 자이로 센서와 마그네틱 콤파스, 엔코더 센서가 일반적으로 사용된다. 비록 엔코더 센서가 높은 샘플링 속도와 정확성을 가지고 있다 하더라도 누적에 의한 내부 오차 및 슬립에 의한 외부 오차에 취약한 단점을 가지고 있다. 시간이 지날수록 이러한 오차들이 커지게 되고, 결국 이동 로봇의 성능을 심각하게 저하시키게 된다. 특히, 이러한 오차들로 인해 이동 로봇의 방위각이 달라지게 되면 로봇이 잘못된 방향으로 움직이는 문제를 야기하게 된다. 따라서, 자이로 센서나 콤파스 센서로부터 나오는 데이터를 로봇의 방

위각으로 채택하거나, 엔코더 센서 데이터를 보정해주는 방법들이 널리 사용되고 있다[9,10].

[9]에서는 정확한 로봇의 경로 추종을 위해 콤파스 센서 자이로 및 가속도 센서와 함께 사용되었지만, 콤파스 센서의 노이즈 및 실제 시스템 적용시의 문제에 대해 언급하지 않았다. [10]에서는 시스템 적용시 발생하는 콤파스 센서의 노이즈 문제 해결을 위한 방법론을 제시했지만, 실제 이동 로봇의 경로 추종에는 적용되지 않았다.

본 논문에서는, 실제 시스템 적용시 발생하는 콤파스 센서의 노이즈 문제 및 해결책, 그리고 실제 전 방향 이동 로봇의 전역 경로 추종시의 방위각 오차 보정에 관심을 두었다. 엔코더 센서의 오차로 인해 발생하는 로봇의 방위각에 대한 오차를 보정해 주기 위해 절대 좌표를 나타내는 마그네틱 콤파스를 이용하였으며, 실험을 통해 그 효용성을 입증했다. 먼저, 전 방향 이동로봇의 기구학을 전역 좌표에서 유도하여 로봇이 움직일 경우 방위각도 함께 움직일 수 있도록 하였다. 또한 동역학을 유도하여 로봇의 움직임을 시뮬레이션 하고 실험으로 검증하였다.

II. 기구학과 동역학

1. 기구학

그림 1에서, 바퀴 축 선 속도 V_w 와 롤러 축 선 속도 V_0

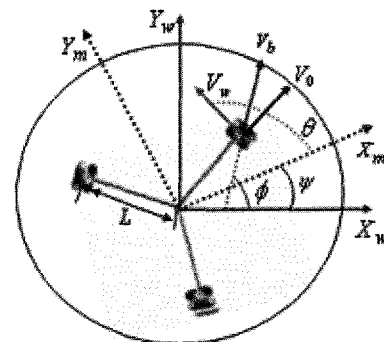


그림 1. ODMR의 좌표와 변수.

Fig. 1. Coordinates and parameters of an ODMR.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2008. 7. 17., 채택확정 : 2008. 11. 25.

이정형, 정슬 : 충남대학교 BK21 메카트로닉스그룹

(twinsda99@hotmail.com/jungs@cnu.ac.kr)

※ 본 연구는 교육과학기술부 지역대학우수과학자 지원(2006-D00166) 사업에 의하여 연구되었음.

가 항상 수직이고, V_0 에 대한 제 2 코사인 법칙을 이용하여 정리하면, (1)을 구할 수 있다.

$$V_w = V_b(\cos\theta\cos\phi + \sin\theta\sin\phi) \quad (1)$$

여기서, θ 는 각 바퀴의 배열 각도이고, ϕ 는 이동 로봇의 이동 방향을 의미한다. 여기에, 전 방향 이동 로봇의 독립적인 회전 각속도, $\dot{\psi}$ 을 고려하여 (1)에 더해지게 되면, 전 방향 이동 로봇의 완전한 속도 관계식이 나오게 된다.

$$V_w = V_b(\cos\theta\cos\phi + \sin\theta\sin\phi) + L\dot{\psi}$$

$$\begin{bmatrix} V_{w1} \\ V_{w2} \\ V_{w3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & L \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 & L \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_m \\ \dot{y}_m \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서, L 은 이동 로봇의 무게 중심에서 각 바퀴까지의 거리를 의미하고, ψ 는 회전 각도, 즉 전 방향 이동 로봇의 방위각을 나타낸다.

(2)는 로봇 좌표 기반의 기구학식으로, (3)과 같은 회전 행렬을 이용하여 절대 좌표 기반의 기구학식을 구할 수 있다. 여기서, 첨자 m, w 는 각각 로봇 좌표와 절대 좌표를 나타낸다.

$$R_m^w = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

따라서, 절대 좌표 기준의 기구학식은 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V_{w1} \\ V_{w2} \\ V_{w3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi & L \\ -\frac{1}{2}\cos\psi - \frac{\sqrt{3}}{2}\sin\psi & \frac{\sqrt{3}}{2}\cos\psi - \frac{1}{2}\sin\psi & L \\ -\frac{1}{2}\cos\psi + \frac{\sqrt{3}}{2}\sin\psi & -\frac{\sqrt{3}}{2}\cos\psi - \frac{1}{2}\sin\psi & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_w \\ \dot{y}_w \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (4)$$

2. 동역학

전 방향 이동 로봇의 동역학도 앞선 기구학 유도과 마찬가지로, 로봇 좌표계와 절대 좌표계 기준으로 분리하여 유도될 수 있다.

이동 로봇의 중심 벡터를 $Z_m = [x_m \ y_m]^T$, 힘 벡터를 $F_m = [f_x^m \ f_y^m]^T$ 라 하면, 운동방정식은 (5)와 같이 표현될 수 있으며, 힘 벡터의 각 성분은 (6)과 같이 각 바퀴에 의해 생성되는 구동력 및 직교 좌표 공간에서의 속도와 가속도에 대한 관계식으로 표현될 수 있다.

$$\dot{Z}_m = R_m^w \dot{Z}_w \Leftrightarrow \dot{Z}_w = \dot{R}_m^w Z_m + R_m^w \dot{Z}_m$$

$$F_w = M \dot{Z}_w \quad (5)$$

$$f_x^m = M(\ddot{x}_m - \dot{y}_m \dot{\psi}) = D_1 - \frac{1}{2}D_2 - \frac{1}{2}D_3$$

$$f_y^m = M(\ddot{y}_m + \dot{x}_m \dot{\psi}) = \frac{\sqrt{3}}{2}D_2 - \frac{\sqrt{3}}{2}D_3 \quad (6)$$

$$M_1 = I_b \ddot{\psi} = (D_1 + D_2 + D_3)L$$

여기서, M 은 이동 로봇의 질량이고, I_b 는 로봇의 관성 모멘트를, D_i 는 각 바퀴에 의해 생성되는 힘을, F_m , F_w 는 각 좌표계에서의 x, y 방향의 힘 벡터를 의미한다.

일반적으로, 이동 로봇은 (7)과 같이 표현될 수 있다[5].

$$I_w \ddot{q}_i + c \dot{q}_i = k u_i - r D_i \quad (7)$$

여기서, I_w 는 바퀴의 관성 모멘트를, \dot{q}_i , \ddot{q}_i 은 각각 바퀴의 속도와 가속도를, k 는 개인 상수, u_i 는 바퀴의 입력 토크, r 은 바퀴의 반지름, 첨자 i 는 바퀴 번호를 의미한다. 속도와 가속도는 앞서 구한 기구학을 이용하여 구할 수 있으며, (6)을 이용하면 D_i 를 구할 수 있다. 즉, (2)-(7)을 이용하여 \ddot{Z}_m 에 대해 정리하면, (8)과 같이 로봇 좌표 공간에서의 동역학 식을 유도할 수 있다.

$$\ddot{x}_m = a_1 \dot{x}_m + a_2 \dot{y}_m \dot{\psi} + a_3(2u_1 - u_2 - u_3)$$

$$\ddot{y}_m = -a_2 \dot{x}_m \dot{\psi} + a_4 \dot{y}_m + a_5 \sqrt{3}(u_2 - u_3) \quad (8)$$

$$\ddot{\psi} = a_4 \dot{\psi} + a_5(u_1 + u_2 + u_3)$$

여기서, $a_1 = -3c/(2Mr^2 + 3I_w)$, $a_2 = 2Mr^2/(2Mr^2 + 3I_w)$

$$a_3 = kr/(2Mr^2 + 3I_w), \quad a_4 = -3cL^2/(3L^2I_w + r^2I_b)$$

$$a_5 = Lrk/(3L^2I_w + r^2I_b)$$

앞선 기구학식 유도와 마찬가지로, 로봇 좌표 공간에서 구해진 식을 절대좌표 공간에서 표현하기 위해서는 회전 행렬을 이용하면 된다. (8)은 (9)와 같이 행렬식으로 표현될 수 있으며, (10)은 가속도에 대한 로봇 좌표와 절대 좌표와의 관계를 나타낸 것이다. 여기서, K_1 , K_2 는 각각 (9)의 두 행렬을 의미한다.

$$\ddot{Z}_m = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 \dot{\psi} & 0 \\ -a_2 \dot{\psi} & a_1 & 0 \\ 0 & 0 & a_4 \end{bmatrix} \dot{Z}_m + \begin{bmatrix} 2a_3 & -a_3 & -a_3 \\ 0 & a_5 \sqrt{3} & -a_5 \sqrt{3} \\ a_5 & a_5 & a_5 \end{bmatrix} U \quad (9)$$

$$\dot{Z}_w = [\dot{R}_m^w(R_m^w)^{-1} + R_m^w K_1 (R_m^w)^{-1}] \dot{Z}_m + R_m^w K_2 U \quad (10)$$

(10)을 정리하면 아래와 같이 절대 좌표 공간에서의 이동 로봇의 동역학을 유도해낼 수 있다.

$$\ddot{Z}_w = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 \dot{\psi} - 1 & 0 \\ 1 - a_2 \dot{\psi} & a_1 & 0 \\ 0 & 0 & a_4 \end{bmatrix} \dot{Z}_w$$

$$+ \begin{bmatrix} a_3(2u_1 \cos\psi - \beta_1 u_2 - \beta_2 u_3) \\ a_3(2u_1 \sin\psi - \beta_3 u_2 - \beta_4 u_3) \\ a_5(u_1 + u_2 + u_3) \end{bmatrix} \quad (11)$$

여기서, $\beta_1 = \cos\psi + \sqrt{3}\sin\psi$, $\beta_2 = \cos\psi - \sqrt{3}\sin\psi$
 $\beta_3 = -\sqrt{3}\cos\psi + \sin\psi$, $\beta_4 = \sqrt{3}\cos\psi + \sin\psi$

III. 마그네틱 콤파스

그림 2는 본 논문에 사용된 마그네틱 콤파스 센서, KVH C-100 모델을 나타낸 것이다.

마그네틱 콤파스는 지구 자기장 영역을 감지하는 센서로,



그림 2. 마그네틱 콤파스.
Fig. 2. Magnetic compass (KVH C-100).

진북(0도)을 기준으로, 반 시계 방향으로 절대 방위각을 나타낸다. 사용된 마그네틱 콤파스 C-100 모델은 KVH사에서 제공하는 전용 프로그램을 이용하여 '8-point calibration' 방식을 이용하였으며, 여러 번의 캘리브레이션 과정을 거쳐, 정지 상태에서 $\pm 1^\circ$ 이내의 데이터 신뢰성을 갖도록 했다.

콤파스에 영향을 미치는 외부적인 요인으로는 모터와 전선, 주변 물질의 종류 등을 들 수 있으며, 모터와 파워부분을 절당하고, 사용된 전선에 절연 튜브를 씌우는 등의 방법을 이용하면, 외부 환경으로부터 콤파스에 미치는 자기장의 영향을 좀 더 줄일 수 있다.

본 논문에서와 같이, 콤파스가 이동 로봇에 사용될 경우, 이동 로봇이 움직일 때 발생하는 진동에 의해 센서 데이터에 그림 3(a), (b)와 같이 고주파 성분의 잡음이 발생할 확률이 높아지게 된다. 본 논문에서는 저역 통과 필터 설계에 사용된 데이터를 실제 전 방향 이동 로봇의 주행 실험을 통해 얻은 데이터에 기반을 두었다. 즉, 전 방향 이동 로봇이 정지해 있을 경우와 조이스틱 명령에 의한 주행을 통해 얻은 데이터를 이용하여 오프라인으로 설계하였다.

본 논문에서 사용한 IIR 필터는 3차 Butterworth IIR 저역 통과 필터로, 표 1은 필터 설계에 사용된 변수값을 나타낸 것이다. 여기서, N 은 필터 차수를, F_c 는 컷오프 주파수, F_s 는 샘플링 주파수를 의미한다.

표 1과 같이 설정된 변수를 이용하여 설계된 3차 Butterworth IIR 저역통과 필터는 식 (12)와 같다.

$$H_{LPF}(z) = \frac{0.0007z^3 + 0.0021z^2 + 0.0021z + 0.0007}{z^3 - 2.6236z^2 + 2.3147z - 0.6855} \quad (12)$$

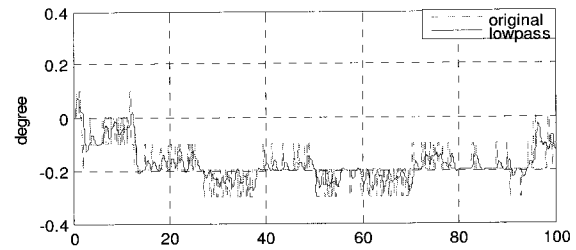
그림 3은 이동 로봇이 정지해 있을 경우와 이동하는 경우 각각에 대한 로봇의 방위각을 나타낸 것으로 앞서 설계한 저역 통과 필터의 성능을 볼 수 있다. 그림 3(a)는 이동 로봇이 정지해 있는 상태에서의 콤파스 데이터를 나타낸 것으로, 적색 점선은 순수 콤파스 데이터를, 푸른색 실선은 저역 통과 필터를 적용한 결과를 보여준다.

그림 3(b)는 이동 로봇이 특정 각도로 움직일 때의 데이터로, 적색 점선은 desired heading angle을 연한 녹색선은 측정된 엔코더 데이터에 의해 계산된 방위각을, 푸른 실선은 콤파스 데이터를 나타낸다. 그림에서 보면 알 수 있듯이, 이동 로봇

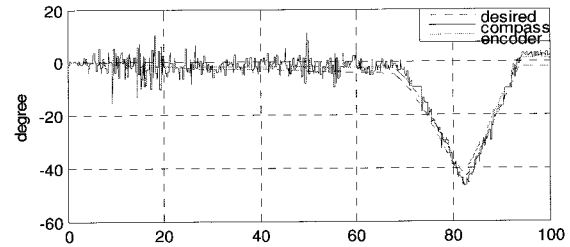
표 1. 저역 통과 필터에 사용된 변수.

Table 1. Parameters for low pass filter.

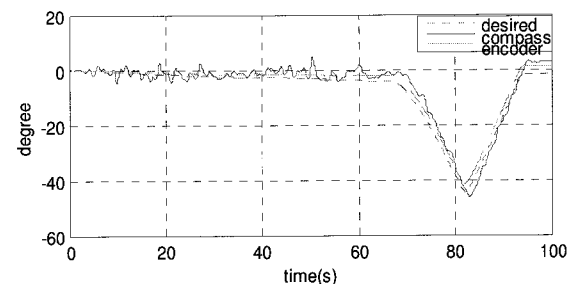
파라미터	N	F_c	F_s
설정 값	3	0.6 [Hz]	20 [Hz]



(a) stop



(b) moving (original)



(c) moving (low pass)

그림 3. 전 방향 이동로봇의 방위각.

Fig. 3. Heading angle for mobile robot.

이 움직일 때 발생하는 진동으로 인해 콤파스 데이터에 잡음이 심하게 발생하게 된다. 그림 3(c)는 설계한 저역 통과 필터를 적용한 결과로, 푸른 실선이 저역 통과 필터를 적용한 콤파스 데이터를 나타낸다. 그림 3(b)에 나타난 순수 콤파스 데이터와 비교하면, 이동 로봇의 이동 시 발생했던 고주파 성분의 잡음이 상당히 줄었음을 볼 수 있다.

IV. 제어 구조

1. 전체 시스템 구조

그림 4는 본 논문에서 구성한 시스템 제어기의 개략도로, 전체적인 데이터의 흐름을 보여준다.

시스템 제어는 DSP2812와 FPGA로 구성된 제어기에서 담당하게 되며, 경로 및 알고리즘 연산과 센서 데이터 처리를 기준으로 나누었다. 그림 4에서 볼 수 있듯이, DSP 내에서 경로 계획 및 PID 알고리즘 연산이 이루어지며, 모터의 구동 PWM 신호를 보내주는 역할을 담당한다. 데이터 병렬처리가 가능한 장점을 가진 FPGA는 시스템에 사용되는 엔코더 및 마그네틱 콤파스 센서로부터의 측정된 여러 데이터 정보를 처리해주는 동시에, 외부와 이동 로봇 제어 정보 및 명령을 교환한다. 즉, 엔코더 인터페이스는 3개의 32bit 엔코더 정보를 받아들이고, 시리얼 통신으로 받은 아스키 코드화된 콤파스 데이터를 정수형 데이터로 변환시킨다. 이와 동시에, 블

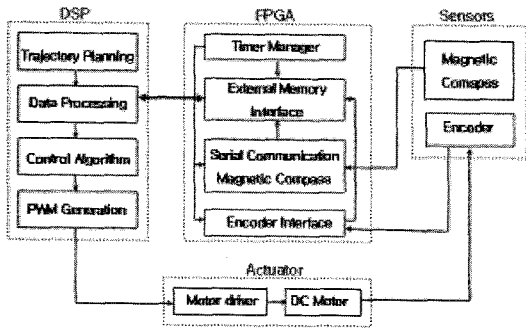


그림 4. 전제 시스템 구조.
Fig. 4. Data flow of overall system.

루투스 통신을 통해 조이스틱 및 PC와 이동 로봇의 제어 정보 및 명령을 교환한다. FPGA에서 처리된 데이터는 외부 메모리 인터페이스 방식을 통해 매 샘플링 시간마다 DSP와 서로간의 정보를 교환하게 된다.

2. 제어기 설계

본 논문에서는 간단한 PID 제어기만을 이용하여 이동 로봇의 제어를 수행하였다. 그림 5는 콤팩스 센서를 이용한 이동 로봇의 제어를 개략적으로 도시화한 것으로, 이동 로봇은 앞서 유도한 기구학을 기반으로 PID 제어에 의해 정해진 목표 지점이나 경로를 추종하도록 제어된다.

직교좌표 공간으로 생성된 경로는 역기구학 계산을 통해 조인트 공간으로 변환이 가능하므로, 엔코더 데이터를 직접적으로 사용할 수 있다. 콤팩스는 이동 로봇의 슬립이나 엔코더의 누적 오차를 보정해 주기 위한 센서로, 엔코더 데이터로부터 얻어진 이동 로봇의 방위각 오차를 보정하게 된다. 콤팩스 센서에 의해 보정된 새로운 목표 방위각 ψ'_d 은 (13) 과 같이 표현될 수 있다.

즉, 새로운 목표 방위각은 경로 계획이나 외부 명령에 의해 생성된 목표 방위각과 이전 목표 방위각에 대한 방위각 오차들의 합으로 표현될 수 있다.

$$\psi'_d(n) = \psi_d(n) + (\psi_d(n-1) - \psi_{en}(n-1)) + K_c \psi_e(n-1) \quad (13)$$

여기서, n 은 현재 상태를, $n-1$ 은 이전 상태를 의미하며, ψ_{en} 은 3개의 엔코더 센서를 이용하여 계산된 이동 로봇의 방위각을 의미한다. K_c 는 콤팩스와 엔코더로부터 얻은 이동

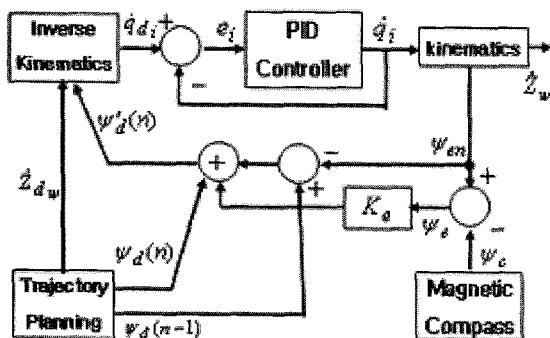


그림 5. 제어블록도.
Fig. 5. Control block with magnetic compass.

로봇의 방위각 오차에 대한 가중치 상수를 의미하며, 본 논문에서는 실험을 통해 0.8로 설정했다.

V. 시뮬레이션

시뮬레이션은 그림 6과 같은 PID 제어 블록을 구성하여 수행했다. 앞서 유도한 동역학은 직교좌표 기준으로 유도되어 있다. 하지만, 변수 u_i 는 조인트 공간으로 표현되는 각 바퀴의 토크를 의미하므로, 제어 입력을 토크 입력 u_i 에서 힘 벡터 f_i 로 변환시켜야만 한다.

$$u = \tau = J_w^T F \quad (14)$$

경로 추종을 위해 시뮬레이션에서 사용된 경로는 원 경로로 설정되었으며, 일정한 속도로 회전하면서 반경 1m의 원 경로를 PID 제어에 의해 추종하게 된다. 초기 위치는 $[x, y] = [0, 0]$, $\psi = 0^\circ$ 로 설정했으며, (15)에 의해 생성되는 경로를 따르게 된다.

$$\begin{aligned} x_d &= 0.5 \sin(t) \\ y_d &= -0.5 + 0.5 \cos(t) \\ \dot{\psi}_d &= 0.018 [\text{rad/s}] \end{aligned} \quad (15)$$

시뮬레이션에 사용된 변수들은 표 2에 나타낸 것과 같이 설정되었으며, 이는 실제로 구성된 시스템의 규격에 맞도록 계산된 값이다. PID 이득값의 설정은 시뮬레이션상에서 여러 추종 양상에 따라 설정된 것으로, 각각 $k_p = 10$, $k_i = 3$, $k_d = 2.5$ 로 설정되었다.

그림 7은 시뮬레이션 결과를 나타낸 것으로, 그림 7(b), (c)를 보면 x 축과 y 축의 오차가 $\pm 0.001\text{m}$ 에, 방위각의 오차가 $\pm 0.01^\circ$ 정도로 제어됨을 볼 수 있다.

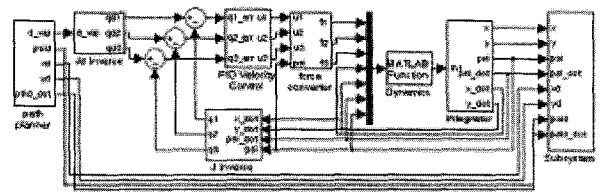


그림 6. ODMR의 PID 제어 블록.
Fig. 6. PID Control block for ODMR.

표 2. 시뮬레이션에 사용된 로봇 변수들.
Table2. Robot system parameters for simulation.

변수	Value	변수	Value
M	50kg	I_b	3.92kgm ²
m	0.1kg	I_w	0.0016 kgm ²
L	0.28m	c	0.01Nm
r	0.04m	k	1

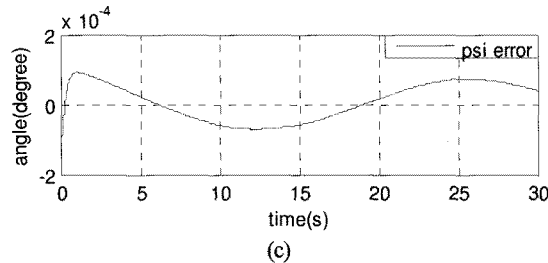
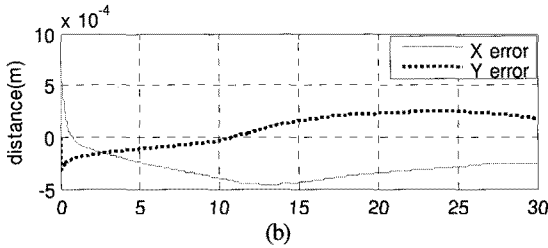
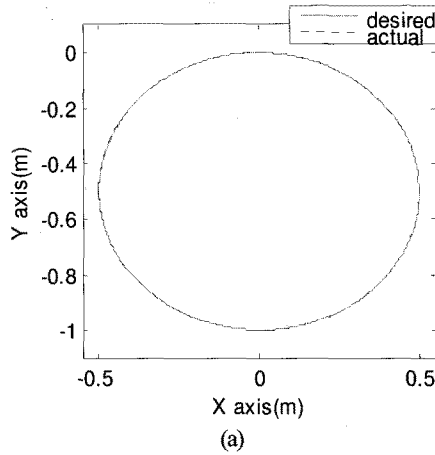


그림 7. 시뮬레이션 결과 (a) circle path (b), (c): errors.
Fig. 7. Simulation results (a) circle path (b), (c): errors.

VI. 실험결과

1. 실험환경

로봇의 외형은 그림 8과 같다. 모터는 특수 설계된 옴니휠과 커플링으로 연결되어 있으며, 바퀴축의 파손을 방지하기 위한 하중의 분산을 위해 바퀴 양쪽을 베어링으로 지지하도록 설계했다. 전방향 이동 로봇의 전방에는 방위각 측정을 위한 마그네틱 콤파스 센서와 주변 환경과의 거리 측정을 위한 레이저 센서가 부착되어 있으며, 본 논문에서는 레이저



그림 8. ODMR의 실제 외관.
Fig. 8. Omni-directional mobile robot.

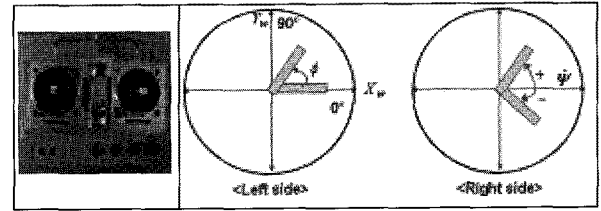


그림 9. 조이스틱을 위한 좌표변환.
Fig. 9. Signal conversion of each lever of Joystick.

센서는 사용하지 않고, 마그네틱 콤파스만을 사용하였다.

주 제어기로는 TI사의 DSP 2812와 Altera사의 FPGA 가 사용되었으며, DSP는 실제 제어 알고리즘 연산을 담당하고, FPGA는 센서 데이터 수신 및 이동 로봇의 제어에 관련된 데이터 정보를 처리하는 역할을 수행한다. 이동 로봇의 전방에는 절대 좌표계 기준의 방위각을 나타내기 위한 콤파스 센서가 부착되어 있으며, 이 센서를 이용하여 로봇의 방위각 오차를 보정해주게 된다.

실험은 두 가지 형태로 진행되는데, 하나는 RC (Radio Control) 무선 조종기의 실행 명령 추종 제어이고, 다른 하나는 미리 프로그램된 원 경로를 추종하도록 제어하는 것이다. 그림 9는 무선 조종기 각각의 레버의 위치를 이동 로봇의 제어에 필요한 명령 신호로 정의한 것을 보여주며, 로봇의 이동방향, ϕ 는 (16)과 같이 탄젠트함수 대신 코사인함수를 이용하여 정의했다. 로봇의 제어 주기는 2ms이고 원 경로 추종에서 이동 로봇이 움직이는 속도는 약 5cm/sec로 설정되었다.

$$V_b = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$\phi = \begin{cases} a \cos(x/V_b) & , \text{for 1st quad.} \\ a \cos(y/V_b) + 0.5\pi & , \text{for 2nd quad.} \\ a \cos(-x/V_b) + \pi & , \text{for 3rd quad.} \\ a \cos(-y/V_b) + 1.5\pi & , \text{for 4th quad.} \end{cases} \quad (16)$$

2. 실험결과

그림 10은 조이스틱으로부터 전송된 특정 명령을 추종하도록 제어한 결과를 나타낸 것이다. 그림 10(a), (b)는 콤파스 센서 데이터를 이용하여 보정하지 않고 엔코더 데이터만을 이용하여 제어한 결과이며, 그림 10(c), (d)는 50ms마다 콤파스 센서로 보정한 결과를 나타낸 것이다. 엔코더는 1회전당 372,000 펄스를 내보내므로 한 펄스당 약 0.001°의 정확도를 나타낸다. 그림 10(a), (c)의 적색 실선은 조이스틱으로부터 보내진 목표 방위각이고, 푸른 점선은 콤파스 센서 데이터를 나타내며, 그림 10(b), (d)는 두 데이터간의 오차를 나타낸 것이다. 이번 실험은 엔코더 데이터의 오차 및 슬립 등을 유도하기 위해 조이스틱으로부터 나오는 속도 및 이동 방향, 그리고 방향각의 변화를 크게 주었다. 그래프에서 볼 수 있듯이, 콤파스 센서를 이용하지 않을 경우, 오차가 발생해도 보정하지 못하고, 10° 정도를 유지하게 되는 반면, 콤파스 센서 보정이 포함된 실험에서는 명령 데이터의 변화가 더욱 심함에도 불구하고, 엔코더 데이터의 오차를 보정하기 때문에 방위각의 오차가 줄어들었음을 볼 수 있다. 표 3은 각각의 오차에 대한 오차 평균 및 분산, 표준편차를 나타낸 것으로, 보정하기 이전의 오차 평균이 약 5° 인데 반해, 보정후의 오

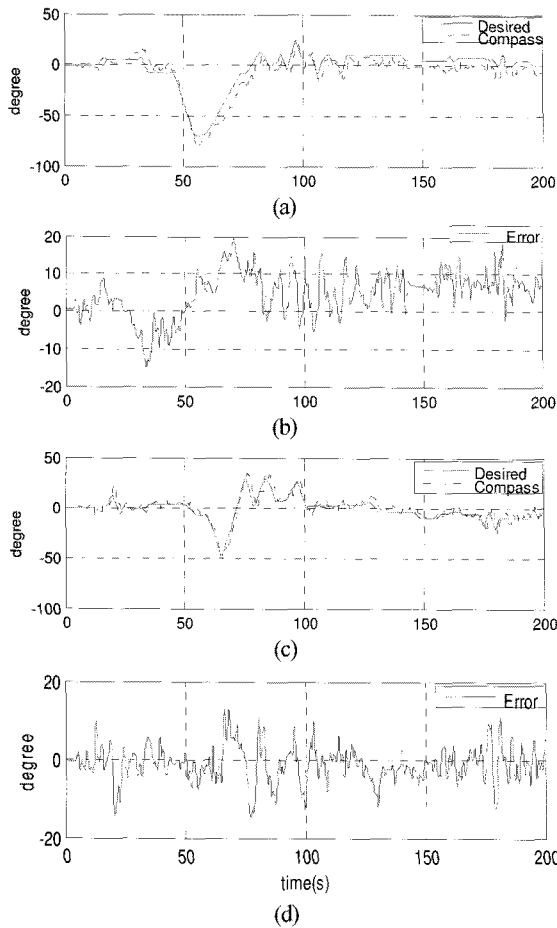


그림 10. 조이스틱으로 ψ_d 제어.

Fig. 10. ψ_d tracking control results with Joystick (a), (b):without compass, (c),(d):with compass.

표 3. 각각의 오차에 대한 통계적 분석.

Table 3. Statistical analysis for an each error.

구분	평균	분산	표준편차
no compensation	4.79°	59.07	7.69
compensation	-1.03°	20.80	4.56

차 평균이 -1° 정도로 향상되었음을 볼 수 있다. 또한, 분산과 표준편차에서도 알 수 있듯이, 콤파스 센서로 보정한 후의 오차가 줄었음을 알 수 있다.

앞선 실험 결과에서 알 수 있듯이, 콤파스 센서를 이용하여 보정하였을 경우, 이동 로봇의 방위각 오차가 많이 줄어듦을 확인할 수 있었다. 이에 근거하여 원경로 추종에서는 마그네틱 콤파스에 의한 방위각 보정을 이용한 상태에서의 실험만을 수행하였다.

그림 11과 12는 마그네틱 콤파스를 이용하여 엔코더 센서의 방위각 정보를 보정한 상태에서의 실험 결과로, 각각 $\dot{\psi} = 0$, $\dot{\psi} = 0.05[\text{rad/s}]$ 의 회전 속도로 주어진 원 경로를 추종한 결과를 나타낸 것이다. 각각의 결과 그래프에서, (a)는 주어진 경로와 실제 제어된 경로를, (b), (c), (d)는 각각 x축, y축, ψ 에 대한 오차를 보여준다.

회전 속도의 설정은 절대좌표계 기준에서 단위 시간당 목표 위치에 대한 변위 각을 고려하여 설정하였다. 즉, 이동 로봇의 heading angle, ψ 와 이동 방향, ϕ 가 같아지도록 고려했다. 그림 11에서, 이동 로봇이 회전하지 않는 상태에서는 x축과 y축에 대한 오차범위가 각각 $\pm 0.01\text{m}$ 정도였으며, heading각의 오차도 원 경로를 추종하기 시작할 때를 제외하고는 작음을 알 수 있다. 이에 반해, 그림 12에서, 이동 로봇이 회전하면서 주어진 경로를 추종할 경우, 각각에 대한 오차가 더 커졌음을 볼 수 있으며, 특히, 추종 경로가 한쪽으로 치우치는 것을 볼 수 있다. 이는, 회전과 이동을 동시에 할 경우, 옴니휠의 구조적인 문제점으로 인해 오차가 발생하는 것으로 보인다. 즉, 옴니 휠을 구성하는 롤러와 롤러 사이의 틈으로 인한 진동 문제 및 바퀴의 회전과 롤러의 회전에 의한 이동으로 발생하는 슬립이 더욱 심하게 발생하기 때문에, 회전하지 않고 이동하는 경우보다 오차가 더욱 커지게 되는 것이다.

표 4는 회전이 있는 경우와 없는 경우의 방위각 추종 결과에 대한 오차 평균과 분산, 표준편차를 나타낸 것이다. 두 경우의 오차 평균은 $\pm 0.06^\circ$ 로 비슷했지만, 시작 부분을 제외한 오차가 거의 0° 에 가깝게 분포된 회전이 없는 경우의 분산 및 표준 편차가 더 작게 나온 것을 확인할 수 있다.

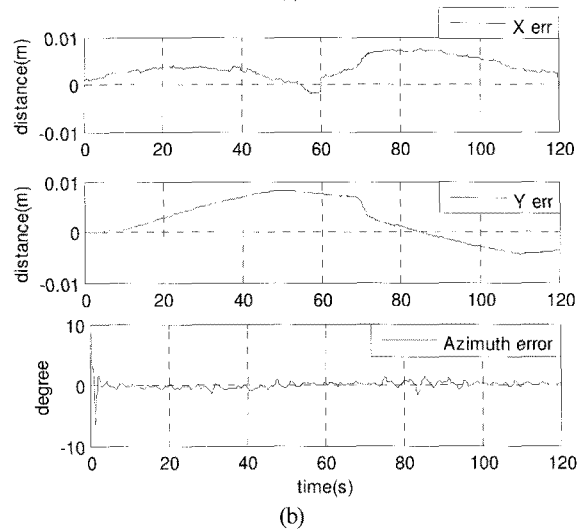
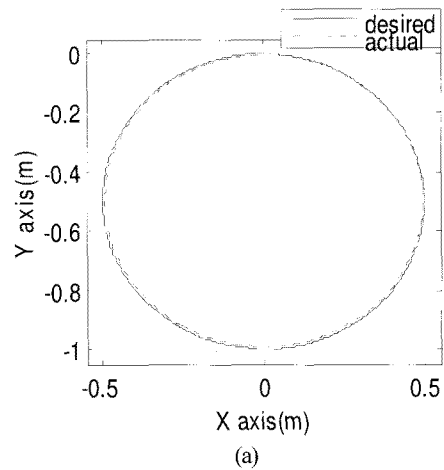
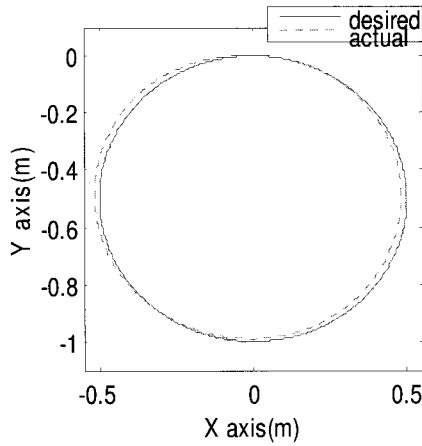
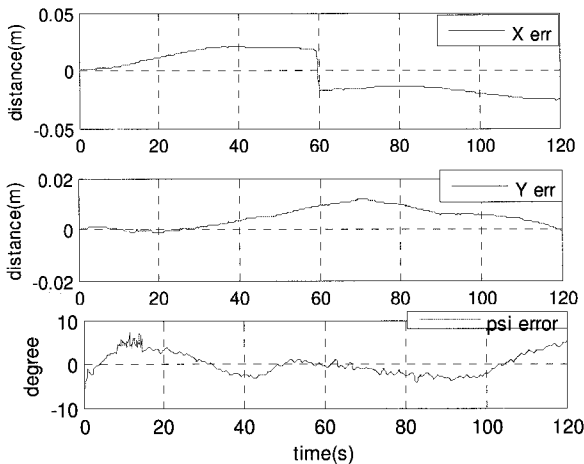


그림 11. 회전이 없을 경우의 원경로 추종.

Fig. 11. Circle trajectory tracking results without rotation.



(a)



(b)

그림 12. 회전이 있을 경우의 원 경로 추종.
Fig. 12. Circle trajectory tracking results with rotation.

표 4. 원 경로 추종 오차에 대한 통계적 분석.
Table4. Statistical analysis for an each error for a circle path.

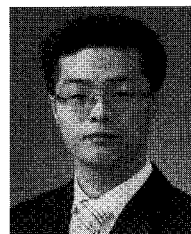
구분	평균	분산	표준편차
without rotation	-0.06°	0.70	0.83
with rotation	0.06°	6.08	2.46

VII. 결론

본 논문에서는 절대 좌표 기준의 기구학과 동역학을 유도했으며, 이를 기반으로 PID 제어를 통해 전 방향 이동 로봇을 제어했다. 이동 로봇이 절대 좌표계를 기반으로 제어될 경우, 로봇 좌표계와 절대 좌표계의 오차를 보상해주어야만 목표 지점까지 정확한 제어가 가능하다. 엔코더 데이터의 오차를 절대 방위각 센서인 콤파스로 보정해 주었다. 또한, ‘8-point calibration’ 방식의 캘리브레이션과 3rd order butterworth low pass filter를 적용하여, 콤파스 사용시 나타나는 노이즈 문제를 줄여주었다. 시뮬레이션 및 실제 실험을 통해 절대 좌표계에서 이동 로봇의 제어를 보였으며, 마그네틱 콤파스를 이용하여 이동 로봇의 방위각 오차를 줄일 수 있음을 보였다.

참고문헌

- [1] O. Diegel, A. Badve, G. Bright, J. Potgieter, and S. Tlale, “Improved Mecanum Wheel Design for Omni-direction Robots,” *Australasian Conference on Robotics and Automation*, pp. 117-121. Nov. 2002.
- [2] F. Ribeiro, I. Moutinho, P. Silva, C. Fraga, and N. Pereira, “Controlling Omni-directional Wheels of a MSL RoboCup Autonomous Mobile Robot,” *ROBOTICA*, 2004.
- [3] C.-C. Wong, S.-A. Li, and H.-Y. Wang, “Description of TKU-ITRI Team for Middle-Size League of RoboCup 2006”
- [4] M. Ashmore and N. Barnes, “Omni-drive robot motion on curved paths: The Fastest Path between Two Points is not a straight-Line,” *15th Australian Joint Conference on Artificial Intelligence*, pp. 225-236, 2002.
- [5] K. Watanabe, “Control of an Omni Directional Mobile Robot,” *International Conference on Knowledge-Based Intelligent Electronic Systems*, pp. 51-60, 1998.
- [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, April 2000.
- [7] Y. Liu, X. Wu, J. J. Zhu, and J. Lew, “Omni-Directional Mobile Robot Controller Design by Trajectory Linearization,” *The American Control Conference*, pp. 3423-3428, 2003.
- [8] J. 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.
- [9] L. Ojeda and J. Borenstein, “Experimental Results with the KVH C-100 Fluxgate Compass in Mobile Robot,” *LASTED International Conference Robotics and Applications*, pp. 1-7, 2000.
- [10] J. Lobo, P. Lucas, J. Dias, A. Traca de Almeida, “Inertial Navigation System for Mobile Land Vehicles,” *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, vol. 2, pp. 843-846, 1995.



이정형

1980년 9월 9일생. 2006년 충남대학교 메카트로닉스공학과 졸업. 현재 충남대학교 메카트로닉스공학과 석사과정. 관심분야는 이동로봇의 장애물 회피, 모바일 매니플레이터 제어 및 원격 햅틱 제어.



정슬

1964년 9월 11일생. 1988년 미국 웨인 주립대 전기 및 컴퓨터 공학과 졸업. 1991년 미국 캘리포니아대 데이비스 전기 및 컴퓨터 공학과 석사. 동 대학 박사. 1997년~현재 충남대학교 메카트로닉스공학과 교수. 관심분야는 지능지능 로봇 시스템, 임베디드 제어기 설계, 로봇과 인간의 상호작용.