

논문 2017-12-24

# Beacon System과 Encoder를 이용한 Omniwheel 연마 로봇의 주행 제어

## (Driving Control of an Omniwheel a Polishing Robot Using Beacon System and Encoder)

송 준 우, 최 병 찬, 김 태 언, 스리지드, 이 장 명\*

(Jun-Woo Song, Byeong-Chan Choi, Tae-Eon Kim, Sreejith M.S., Jang-Myung Lee)

Abstract : Utilizing the existing polishing robot prevents unrestricted change of direction, driving, and identification of driving pathway. To overcome this barrier, driving mechanism has been designed with Omniwheels with encoders and RSSI method of beacon system has been utilized to identify the driving path by position recognition. Due to the wheel characteristics, the Omniwheel mobile robot generates greater slip than the conventional mobile robot, which reduces its driving accuracy. Therefore, to improve the driving accuracy, the localization is conducted through the fusion of encoder and RSSI of beacon data to compensate for the errors caused by Dead Reckoning and inaccuracy of sensors. Finally, the localization accuracies of the proposed and conventional indoor localization method are compared to show effectiveness of the proposed driving control for a polishing robot.

Keywords : Omniwheel, Driving control, Beacon, Localization, Dead reckoning

### 1. 서 론

선박이나 건물에 들어가는 금속의 표면 연마는 핸드연마용 그라인더를 사용하여 작업해왔으나 오랜 시간 동안 작업, 가공 부위에서의 이물질, 분진 등의 발생문제, 그리고 넓어진 연마작업 면적으로 작업자의 피로 누적과 위험성을 항상 가지고 있다. 최근에는 이러한 문제를 해결하기 위해 로봇형 연마로봇의 필요성이 대두되고 있으며, 로봇 기술 연구가 지속적으로 수행되고 있다 [1-4].

기존의 표면 연마로봇은 이륜이나 사륜 바퀴를 장착하고 있다. 이러한 바퀴 장치는 직진 주행 시에는 제어하기 쉬운 이점이 있으나, 제한된 공간에서

의 연마 작업 중 90° 방향 전환이나, 벽이 있는 모서리 부분의 표면 연마는 어려운 단점이 있다. 또한 원거리에서 연마 로봇에 단순히 작업을 지시할 경우, 연마 로봇이 작업한 시간은 확인이 가능하나 로봇의 위치를 인식하여 실질적으로 작업한 경로와 면적을 확인하기 어려움이 있어 작업 후 사용자가 직접 작업 현장에서 로봇의 이동 경로를 확인해야 하는 번거로움이 있다.

먼저 제한된 공간에서의 자유로운 방향전환 및 이동을 해결하기 위해 Omniwheel을 사용하였다. 하지만 Omniwheel의 구조적 특성상 방향전환에 이점이 있으나 적절한 제어방법이 없다면, 슬립(Slip)이 일어나 로봇의 주행성을 잃어버리게 된다. 따라서 이러한 단점을 보완하기 위해 PI 속도 제어를 사용하여 Omniwheel 로봇의 직진 주행성을 향상시킬 것이다. Omniwheel 모바일 로봇의 직진 주행성이 향상되면, 로봇의 작업 현장의 이동경로 확인을 위한 위치 인식도 필요하다. Dead Reckoning을 이용한 위치 추정 기술은 기존의 측정된 값을 계산에 사용하기 때문에 기존의 값에 오차가 발생하면 시간이 지날수록 오차가 누적되어 정확한 위치를 인식할 수 없다 [5]. 그래서 Beacon의 RSSI

\*Corresponding Author (jmlee@pusan.ac.kr)

Received: Apr. 17 2017, Revised: May 18 2017,

Accepted: June 20 2017.

J.W. Song, B.C. Choi, T.E Kim, M.S. Sreejith,

J.M. Lee: Pusan National University

※ 본 연구는 산업통상자원부가 지원하는 산업융합·연계형 로봇창의인재양성사업의 연구결과로 수행되었음 (N0001126).

(Received Signal Strength Indicator) 데이터를 이용하여 삼변측량법을 통해 위치를 인식하고 최종적으로 Beacon과 Dead Reckoning을 이용하여 얻은 두 위치 데이터를 융합하여 최종적으로 로봇의 위치를 인식할 것이며, 이 좌표값을 이용하여 로봇의 시간당 이동거리와 작업한 경로를 확인 할 수 있다. 2절에서는 PI 제어기를 사용한 Omniwheel 모바일 로봇 (mobile robot)의 직진주행성 향상에 대해 설명한다. 3절은 Dead Reckoning 과 Beacon을 사용하여 로봇의 위치를 인식하는 알고리즘을 설명한다. 4절에는 이러한 이론을 실험으로 증명하고, 마지막 5절에서 결론을 맺는다.

## II. 직진 주행성 향상

Omniwheel 모바일 로봇의 경우 일반적인 바퀴와 같은 회전축을 중심으로 회전하는 주 바퀴와 일반적인 바퀴에 없는 보조 바퀴가 주 바퀴 주변에 달려 있다. 이러한 바퀴로 움직이기에 일반적인 모바일 로봇과는 달리 홀로노믹 (Holonomic)형태로 움직이며 방향전환 및 이동이 자유로워 민첩하게 움직일 수 있지만, 바퀴마다 슬립 (Slip)이 심한 단점이 있다. 이러한 단점은 정확한 직진 주행성을 보장하지 못하며 결과적으로는 로봇의 주행으로 위치를 인식하는 Dead Reckoning의 데이터를 신뢰하지 못하게 된다. 그렇기에 신뢰성 높은 데이터를 얻기 위해 우선적으로 Omniwheel 로봇의 직진주행성을 향상시켜야 하며, 본 논문에서는 Yaw Angle 값을 이용한 PI 제어기를 적용시켜 주행성을 향상시킨다.

### 1. PID 제어기

컨트롤러의 발전으로 인해서 현재의 상황에 맞게 모터의 입력을 제어하는 많은 제어 기법이 생겨났다 [6-9]. 이러한 제어기법은 상당히 복잡하거나 많은 연산이 필요하다. 하지만 제어 변수와 기준 입력 사이의 오차를 이용하여 출력을 유지하는 피드백 제어의 일종으로 비례, 적분, 미분 제어를 조합하여 사용하는 기본적인 PID (Proportional Integral Derivative) 기법은 복잡하게 로봇의 모델링을 따로 할 필요가 없어, 매우 간단하고 효과적인 제어 방법으로 알려져 있다. 그렇기에 지금도 산업 현장에서 사용되는 실질적인 제어기법이다 [10].

### 2. PI 속도 제어기

그림 1은 Yaw Angle Data를 이용하여 오른쪽

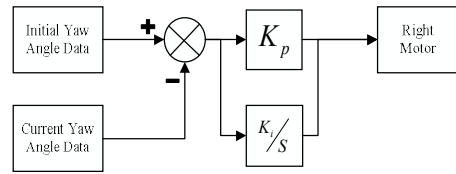


그림 1. PI 속도 제어기 블록도

Fig. 1 PI speed controller block diagram

모터의 속도를 변화 시키는 PI 속도 제어기의 블록도를 나타낸 것으로 직진 주행 시에는 초기에 저장된 Yaw Angle 데이터와 실시간으로 측정된 Yaw Angle 데이터의 차이를 수렴시켜야 하므로 적분 (Integral) 제어가 필수불가결적으로 들어가며, 미분 (Derivative) 제어의 경우 응답속도를 빠르게 할 수 있는 장점이 있으나 시스템 특성상 미분 제어를 사용할 만큼 빠른 제어응답은 필요 없으며, 시스템에 고주파 노이즈가 들어오게 되면 노이즈 증폭으로 인해 제어기를 포화시키는 단점이 있기에 PI 제어만을 사용하기로 한다.

PI 제어기는 이득의 변화 여부에 따라 고정이득 (Fixed gain)을 가지는 것과 가변이득 (Variable gain)을 가지는 것으로 나뉜다. 여기서는 고정이득 PI 제어기를 사용하기로 한다. PI 제어기의 전달함수는 식 (1)과 같으며,  $T = \frac{K_p}{K_i}$  이고 적분시간상수 (integral time constant)를 나타낸다.

$$G(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{sT} \right) \quad (1)$$

여기서 속도 제어기의 출력을 모터의 입력으로 적용하면 다음과 같다.

$$u(s) = \left( K_p + \frac{K_i}{s} \right) e(s) \quad (2)$$

또한 에러 값  $e(s)$ 는 속도에 대한 목표치와 실제치와의 차이를 나타내며,  $e(s) = w_r^*(s) - w_r(s)$ 으로 나타낼 수 있다. 연속시간시스템 (Continuous time system)에서 이산시간시스템 (Discrete time system)으로 변환하기 위해 식 (2)를  $s = \frac{1-z^{-1}}{T}$ 를 적용한 뒤 변환하여 다음과 같은 식으로 나타낸다.

$$su(s) = sK_p e(s) + K_i e(s) \quad (3)$$

$$\left(\frac{1-z^{-1}}{T}\right)u(z) = \left(\frac{1-z^{-1}}{T}\right)K_p e(z) + K_i e(z) \quad (4)$$

식(4)를 이산시간형태를 가지기 위해 변환하면 다음과 같은 식이 나온다.

$$\frac{u(k)-u(k-1)}{T} = K_p \left[\frac{e(k)-e(k-1)}{T}\right] + K_i e(k) \quad (5)$$

$$u(k) = u(k-1) + k_p [e(k) - e(k-1)] + K_i e(k) T \quad (6)$$

$$u(k) = K_p e(k) + K_i T \sum_{n=0}^k e(n) \quad (7)$$

식 (6)에서 현재 출력 값은 이전 출력 값과 에러 값 및 에러 차이 값에 대해 이득을 곱한 형태로 표현되며,  $u(k-1) = u(k-2) + K_p [e(k-1) - e(k-2)] + K_i e(k-1) T$  의 이전 상태 출력 식을 대입하여 정리하면 식 (7)로 나오며 여기서  $K_p$ ,  $K_i$ 와 샘플링 시간  $T$  를 고정하여 제어기를 구성한 것이 고정이득 PI 제어기이다 [11].

이렇게 구성한 PI 제어기를 Omniwheel 모바일 로봇에 적용하여 직진 주행성을 높이도록 하였다. 로봇의 왼쪽 앞, 뒤 두 바퀴 속도를 약 0.2 m/sec 로 고정시켜 기준으로 정한다. 그리고 주행 중 Yaw Angle이 변화 하였을 때, Omniwheel 모바일 로봇이 직선 경로에서 이탈하였다고 판단하여, Yaw Angle 변화 값을 PI 제어기에 입력한다. PI 제어기는 오른쪽 앞, 뒤 두 바퀴의 속도를 가변시켜 주행 경로 이탈을 지속적으로 보상하여 최종적으로 로봇의 직진성을 유지하도록 한다.

### III. Dead Reckoning 및 RSSI 융합 위치인식

#### 1. 칼만 필터

위치인식 센서의 성능 요인 가운데 가장 중요한 부분이 정밀도이다 [12]. 그렇기에 로봇의 단일 센서 데이터를 활용하는 것보다 다중 센서 정보들을 통합할 경우, 보다 정밀한 위치추정이 가능하다 [13]. 그래서 Dead Reckoning과 같이 단일 데이터 만으로는 Omniwheel 로봇의 위치를 확정하기에는 부족하여, 추가적인 센서 데이터를 받아 융합하기로 한다. 본 논문에서는 블루투스 (Bluetooth) Beacon을 사용하여 위치 인식데이터를 추가하기로 하며, Omniwheel 모바일 로봇의 속도를 고정, 선형적으로 움직이기에 칼만 필터를 사용하여 융합하도록

한다.

칼만 필터는 상태 천이 방정식과 측정 방정식 두 개의 식으로 나타내며, 선형 시스템에서는 다음과 같은 형식을 취한다.

$$x(k+1) = \Phi x(k) + w(k+1) \quad (8)$$

$$y(k+1) = Mx(k+1) + v(k+1) \quad (9)$$

여기서  $\Phi$ 는 상태 천이 행렬,  $M$ 은 측정 행렬이며,  $w(k+1)$ 은 상태잡음,  $v(k)$ 는 측정 잡음이다.

$$E[w(k+1)] = 0, E[w(k+1)w(k+1)^T] = Q(k) \quad (10)$$

$$E[v(k)] = 0, E[v(k+1)v(k+1)^T] = R(k) \quad (11)$$

$E[\cdot]$ 는 기대 값이며,  $Q$ 와  $R$ 은 상태 잡음과 측정 잡음의 대각 분산 행렬이다. 칼만 필터는 상태예측과 측정된 데이터를 처리하여 융합과정을 수행한다.

상태 예측과 오류 예측은 식 (8) 상태 천이 방정식을 이용하여 시간 상태  $k$ 가 주어지면 다음 식으로 나타내며,  $y(k+1)$ 의 새로운 측정값과 지속적으로 비교하여  $e(k+1)$ 을 나타낸다.

$$\hat{x}(k+1|k) = \Phi(k+1, k)\hat{x}(k|k) \quad (12)$$

$$e(k+1) = y(k+1) - M(k+1)\hat{x}(k+1|k) \quad (13)$$

이후 칼만 이득  $K(k+1)$ 의 행렬 환산계수를 더 하여 식 (14)로 나타 낼 수 있으며, 칼만 이득은 식 (15)로 나타 낼 수 있다.

$$\hat{x}(k+1|k) = \hat{x}(k+1|k) + K(k+1)e(k+1) \quad (14)$$

$$K(k+1) = P(k+1|k)M^T(k+1) [M(k+1)P(k+1|k)M^T(k+1) + R(k+1)]^{-1} \quad (15)$$

$$P(k+1|k+1) = [I - K(k+1)]P(k+1|k) = [I - K(k+1)M(k+1)]P(k+1|k)[I - K(k+1)M(k+1)]^T + K(k+1)R(k+1)K^T(k+1) \quad (16)$$

새로운 공분산 행렬은 최종적으로 식 (16)으로 계산된다 [14, 15].

그림 2는 위치인식 융합 시스템을 블록도로 나타낸 것이다. Omniwheel 모바일 로봇의 주행이 시작되면 Encoder가 Dead Reckoning을 계산하게 된다. 그리고 Beacon에서 측정된 RSSI값을 측정하게 되는데, RSSI의 특성상 노이즈로 인한 수치 변화 등에서 좀 더 정확한 값을 추정하기 위해 평균 필터를 사용하여 RSSI의 10회 평균값을 도출한다. 그렇게 측정된 4개의 Beacon 평균값 중 신호가 강한

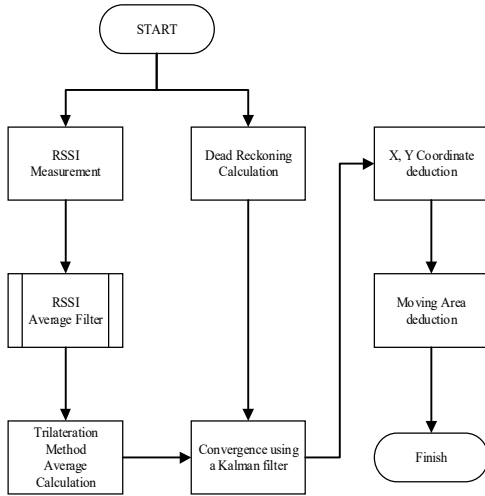


그림 2. 전체 시스템 구조

Fig. 2 Overall system structure

3개의 값으로 삼변측량을 이용해 위치를 계산하게 된다. Dead Reckoning 값과 삼변측량 값에 각각의 가중치를 주어 융합하게 된다. 가중치는 로봇의 직접적인 주행실험을 통해 얻은 Dead Reckoning은 0.7로 정했다. 연마로봇의 작업 장소에 기둥이나 장애물이 있는 경우를 고려하였고, 이러한 경우 ToA (Time of Arrival), TDoA (Time Difference of Arrival)등의 방식보다 수신이 좋은 RSSI를 선정하였다. 하지만 RSSI은 위치인식 불확실성이 높아 0.3으로 정한다.

이렇게 설정된 값을 칼만 필터를 이용하여 융합하여 최종적인 X, Y의 좌표를 도출하게 된다. 그리고 도출된 최종 좌표값을 이용하여 로봇이 이동할 때의 작업면적을 계산하여 사용자가 확인을 할 수 있게 한다.

## 2. Encoder를 이용한 Dead Reckoning

로봇의 위치를 인식하는 방법 중 하나인 Dead Reckoning은 GPS, Beacon 등과 같이 외부의 센서 장치를 이용하지 않고 로봇 내부의 센서를 이용하여 현재위치를 인식하는 방법을 말한다.

Dead Reckoning 측정방법을 식 (17-20)으로 정리했으며, 먼저 Encoder의 1 Pulse당 이동거리를 계산한다.

$$D_{op} = \frac{\pi \times D_w}{R_G \times R_E \times Q_E} [mm] \quad (17)$$

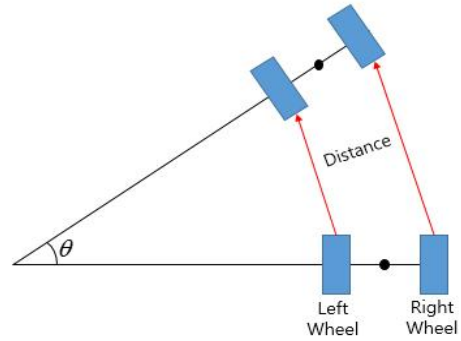


그림 3. Dead reckoning 도식화

Fig. 3 Dead reckoning schematization

여기서  $D_{OP}$ 는 Encoder의 1 Pulse당 이동거리,  $D_W$ 는 바퀴지름,  $R_G$ 는 모터 기어비,  $R_E$ 는 Encoder 분해능,  $Q_E$ 는 Encoder의 분주율이며, 모바일 로봇의 양쪽바퀴의 이동거리를 계산한다.

본 실험에서는 Omniwheel 모바일 로봇은 4개의 바퀴를 가지고 있지만, 그림 3의 도식화 내용처럼 로봇의 앞쪽 두 바퀴를 기준으로 정하고 측정 및 계산한다.

$$D_R = D_{OP} \times (E_R - E_{PR}) [mm] \quad (18)$$

$$D_L = D_{OP} \times (E_R - E_{PL}) [mm] \quad (19)$$

$D_R$ 은 오른쪽 바퀴가 이동한 거리,  $D_L$ 은 왼쪽 바퀴가 이동한 거리,  $E_R$ 은 오른쪽 바퀴의 현재 Encoder 값,  $E_{PR}$ 은 오른쪽 바퀴의 이전 Encoder 값,  $E_L$ 은 왼쪽 바퀴의 현재 Encoder 값,  $E_{LP}$ 은 왼쪽 바퀴의 이전 Encoder 값을 나타내며, 이동거리를 계산하고 나서는 Omniwheel 모바일 로봇이 이동했을 때의 이동 각도를 구한다.

$$\theta = \frac{D_R - D_L}{D_W} [^\circ] \quad (20)$$

마지막으로  $\theta$ 는 로봇의 이동 각도,  $D_T$ 는 로봇의 중심을 기준으로 이동한 거리 Omniwheel 모바일 로봇의 X, Y 값을 계산하여 최종 좌표 값을 도출한다.

$$D_T = \frac{D_R - D_L}{2} [mm] \quad (21)$$

$$X = D_T \times \cos \theta [mm] \quad (22)$$

$$Y = D_T \times \sin \theta [mm] \quad (23)$$

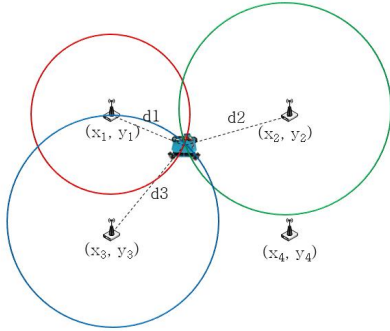


그림 4. 삼각 측량법 도식화

Fig. 4 Trilateration schematization

이렇게 구해진 X, Y 좌표를 통해 Omniwheel 모바일 로봇의 주행에 따른 현재 위치를 추정하게 된다.

### 3. RSSI를 이용한 위치 추정 보상

Beacon은 주변 일정 반경 범위 내에서 블루투스 (Bluetooth)를 이용하여 사물의 정보를 주기적으로 전송하는 근거리 무선통신 기술을 말하며, 블루투스에서 방출하는 정보는 ID, Tx Power, RSSI (Received Signal Strength Indication)등의 데이터들이 있다.

그림 4는 실험에 이용된 삼변측량법을 나타낸 그림으로 위치 인식 계산 방법 중 하나인 삼변측량법은 삼각측량법과 마찬가지로 삼각형 기하학을 사용하여 물체의 상대 위치를 구하는 방법이다 [16, 17].

두 개 이상의 기준점, 물체와 각 기준점 사이의 거리를 이용한다. 2차원 면에서는 최소 3개의 기준점이 필요하여 실험장소의 모서리 네 곳에 Beacon을 설치하고 그 중에서 RSSI 신호가 강한 세 곳의 Beacon의 데이터를 이용하여 삼변 측량법을 이용하기로 하였다.

RSSI 데이터를 이용하여 세 점의 거리를 구하기 위해 다음과 같은 공식을 사용한다.

$$RSSI = -(10 \log_{10}(d) - A) \quad (24)$$

$$d = 10^{\frac{A - RSSI}{10n}} \quad (25)$$

여기서  $d$ 는 두 지점 사이의 거리,  $n$ 은 신호감쇠 상수,  $A$ 는 Offset 값이다.

삼변측량법으로 계산하기 위해 측정하는 지점에서 Beacon 까지의 거리를 RSSI로 구하고, 이를 Beacon 좌표로 나타내면 다음과 같다.

$$d_1^2 = (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 \quad (26)$$

$$d_2^2 = (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 \quad (27)$$

$$d_3^2 = (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 \quad (28)$$

위의 식 (26-28)을 풀어 최종적으로 로봇의 위치 X, Y 좌표를 구할 수 있다. 이 과정에서 오차를 줄이기 위하여 평균 필터를 통해 데이터를 구할 수 있다.

## IV. 실험 및 검토

본 논문에서 제안한 방법을 실험하기 위해 사용한 Omniwheel 모바일 로봇은 그림 5와 같다. 4개의 모터와 각 모터마다 Omniwheel 바퀴와 Encoder가 부착되어 있다. Omniwheel 모바일 로봇 Encoder의 1 Pulse 당 이동거리는 앞서 정리한 식을 바탕으로 계산한 최종 식 (29)을 이용한다.

$$D_{OP} = \frac{\pi \times 58}{80 \times 4 \times 12} = 0.047 [mm] \quad (29)$$

단순 직진 주행성 실험의 환경은 그림 6의 부산대학교 제10공학관 7층의 평평한 실내복도에서 진행하였으며, 1 M 마다 기준 경로에서 얼마나 이탈하였는지에 대한 이격 거리를 측정하였다.

위치인식 실험의 환경은 부산대학교 삼삼산학협력단 1층 로비에서 그림 7과 같이 실험을 진행하였으며 총 면적 3.0 x 3.0 m에 경로를 지정하였다.

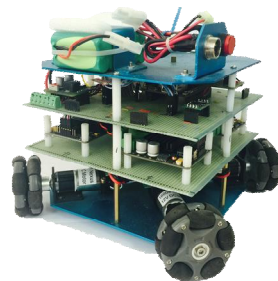


그림 5. 옴니휠 모바일 로봇

Fig. 5 Omniwheel mobile robot



그림 6. 직진 주행 실험 환경  
Fig. 6 Straight line driving

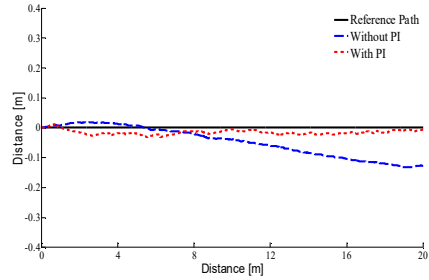


그림 8. 결과 그래프 1  
Fig. 8 Result graph 1

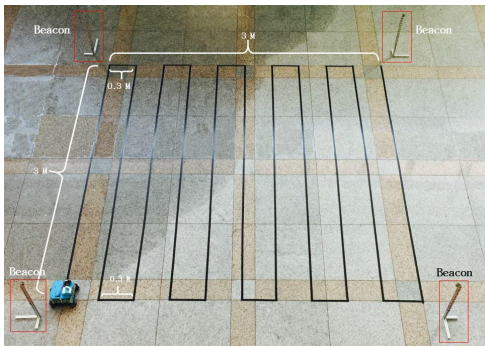


그림 7. 위치 인식 실험 환경  
Fig. 7 Navigation experiment

로봇의 한 면의 크기가 약 30 cm 로, 주어진 면적을 빈틈없이 연마하기 위하여 3.0 m 직진 주행 후 30 cm 우측으로 이동 후 다시 직진 주행을 반복하는 형식으로 그림 7과 같이 경로를 구성하였다. 실험에 사용한 Beacon은 (주)칩센의 BoT-cle 110 제품이며, 모든 실험 데이터는 UART통신으로 받았고 각각의 Beacon은 3.3 m의 거리를 두고 네 모서리에 위치하였다. 두 실험 모두 Omniwheel 모바일 로봇의 속도는 약 0.2 m/s로 고정하여 주행하였다.

1. 직진 주행성 실험

그림 8은 PI 제어기를 사용한 직진 주행성 실험에 대한 결과 그래프를 보여준다. Yaw Angle의 Error 값을 사용하여 PI 제어를 보상하지 않았을 때는 거리가 길어짐에 따라 점점 기준경로를 이탈하여 20 m를 진행 하였을 경우 좌측으로 10 cm 이상 향한 것을 확인 할 수 있다.

하지만 Yaw Angle의 Error값을 이용한 PI 제어를 활용 하였을 경우는 거리가 길어져도 기준경로를

따라 움직이는 것을 알 수 있다. 따라서 Omniwheel 모바일 로봇 Encoder의 Dead Reckoning 값에 신뢰성을 확보 할 수 있다.

2. 위치 인식 및 이동 거리 실험

그림 9는 경로를 정한 Reference path와 Omniwheel 로봇의 실제 주행하여 얻은 Dead Reckoning을 비교한 그래프이다. Dead Reckoning의 경우 기존의 측정된 값을 이동 거리 구하는 계산에 지속적으로 사용하기에 기존의 값에 오차가 발생하면 시간이 지날수록 오차가 누적된다. (0.6 m, 3.0 m) 부분에서 90°로 방향 전환 후 주행부터 오차가 누적되어 기준 경로를 점점 벗어나 단순히 Dead Reckoning만으로 정확한 위치를 알 수 없음을 확인 하였다.

그림 10과 같이 Dead Reckoning과 Beacon의 RSSI 방식으로 얻은 데이터를 최종적으로 융합한 시스템의 그래프로 나타내었다. 이 그래프에서는 주행 거리가 길어지고, 방향이 바뀌어도 실제 주행과 크게 벗어나지 않는 것을 보여준다.

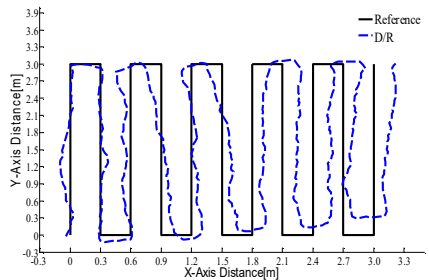


그림 9. 결과 그래프 2  
Fig. 9 Result graph 2

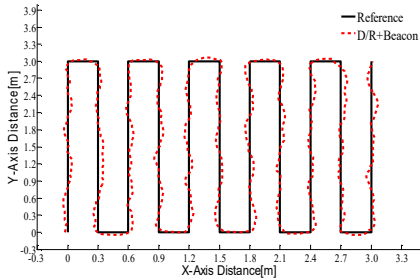


그림 10. 결과 그래프 3  
Fig. 10 Result Graph 3

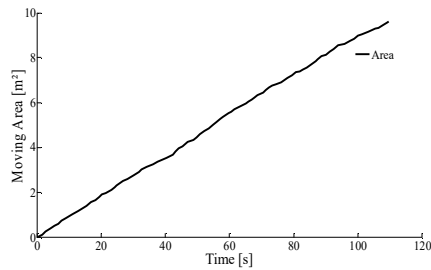


그림 11. 결과 그래프 4  
Fig. 11 Result Graph 4

그림 11은 시간에 따른 Omniwheel 모바일 로봇의 시간당 이동 면적을 보여주는 그래프이다. 로봇의 바닥 전면에 연마장치가 있다 가정 하였으며, 본체의 크기가 30 cm임을 고려하여, 0.1 m 움직일 때 마다 0.03 m<sup>2</sup>의 바닥면을 연마한다. 그림 10에서의 변화하는 좌표값을 이용, 로봇의 이동 면적을 계산 하였으며, 그 결과 총 120초 주행에 약 10 m<sup>2</sup>의 면적 작업을 그래프로 확인 할 수 있었다.

## V. 결 론

본 논문에서는 연마 로봇의 자유로운 방향전환과 이동을 위해 Omniwheel 모바일 로봇의 직진주행성을 향상 시켰다. 그리고 작업한 경로를 확인하기 위해서는 로봇의 단일 정보만을 사용하지 않고, Beacon의 데이터와 Dead Reckoning의 데이터를 융합하여 Omniwheel 모바일 로봇의 위치를 인식하는 시스템을 제안하였다. 로봇의 기본적인 이동과 Encoder의 Dead Reckoning의 신뢰성을 높이기 위해 IMU 센서의 Yaw Angle의 Error 값을 이용하여 보상 피드백을 주어 주행성을 향상시키고 Beacon

의 RSSI 데이터를 평균필터를 거쳐 그 값을 삼변측량하여 X, Y 좌표를 구하였다. 최종적으로는 Dead Reckoning을 이용하여 얻은 X, Y 좌표와 삼변측량하여 얻은 X, Y 좌표를 칼만 필터를 사용하여 융합한다. 최종 결과 그래프를 통해 제안한 방법이 단순히 하나의 데이터를 사용했을 때 보다 나은 것을 확인할 수 있었고, 이 좌표 값을 이용하여 Omniwheel 모바일 로봇의 이동 거리를 그래프로 나타내어 시간당 로봇의 작업면적도 확인이 가능하였다. 하지만 여전히 주행과 모서리부분의 회전 시에 측정된 데이터는 오차가 발생한 것을 확인하였다. 향후에는 Beacon 및 Dead Reckoning의 정밀도를 높여 장애물이 밀집해 있는 환경에서의 위치 인식과 고르지 않은 바닥 면에서 정밀한 위치 인식을 할 수 있는 알고리즘을 연구할 것이다.

## References

- [1] T.S. Jin, "Motor Drive Control Unit for Robotic Vacuum Sweeping," Proceedings of KIIS Fall Conference. Vol. 21, No. 2, 2011 (in Korean).
- [2] R. Siegwart, I.R. Nourbakhsh, "Three Engineers, Hundreds of Robots, one Warehouse," IEEE Spectrum, 2008.
- [3] J.Y. Kim, W.C. Lee, "Real-Time Obstacle Avoidance of Autonomous Mobile Robot and Implementation of User Interface for Android Platform," IEMEK J. Embed. Sys. Appl., Vol. 9, No. 4 pp. 237-243, 2014 (in Korean).
- [4] C.U. Kang, S.J. Ko, "Development of Location Identification System for Moving Robot in the Sensor Space under KS Illumination Intensity Environment," IEMEK J. Embed. Sys. Appl., Vol. 9, No. 2 pp. 67-73, 2014 (in Korean).
- [5] S.W. Jeon, S. Jung, "Localization and Control of an Outdoor Mobile Robot Based on an Estimator With Sensor Fusion," IEMEK J. Embed. Sys. Appl., Vol. 4, No. 2 pp. 69-78, 2009 (in Korean).
- [6] C. Lin, C. Hung, C. Liu, "Fuzzy PI Controller for BLDC Motors Considering Variable Sampling Effect," Proceedings of IEEE Conference of Industrial Electronics Society (IECON), pp. 1180-1185, 2007.

- [7] N. Hemati, J. S. Thorp, M. C. Leu, "Robust Nonlinear Control of Brushless DC Motors for Direct-drive Robotic Applications," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 37, pp. 460-468, 1990.
- [8] P. M. Pelczewski, U. H. Kunz, "The Optimal Control of a Constrained Drive System With Brushless DC Motor," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 37, pp. 342-348, 1990.
- [9] Y. LU., J. CHEN, "A Self-organizing Fuzzy Sliding-mode Controller Design for a Class of Nonlinear Servo System," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 41, No. 5, pp. 492-502, 1994.
- [10] K. Ang, G. Chong, Y. Li, "PID Control System Analysis, Design, and Technology," IEEE Transactions on Control System Technology, Vol. 13, pp. 559-576, 2005.
- [11] S.Y. Yun, J. Lee, "Speed Control of Permanent Magnet Brushless DC Motor Using Variable Gain PI Controller," The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 62, No. 9 pp. 1234-1239, 2013 (in Korean).
- [12] J.W. Ahn, J.Y. Jin, W.J. Chung, "Experimental Research on the Characteristics of Indoor Positioning Systems and Mobile Robot Navigation," The Journal of Korea Robotics Society. Vol. 5, No. 3, 2010 (in Korean).
- [13] K.h. Jo, J.H Lee, C.S. Jang, "Cooperative Localization in 2D for Multiple Mobile Robots by Optimal Fusion of Odometer and Inexpensive GPS Data," The Journal of Korea Robotics Society, Vol. 2, No. 3, 2007 (in Korean).
- [14] A. Lobo, R Kadam, S. Shajahan, K. Malegam, K. Wagle, S. Surve, "Localization and Tracking of Indoor Mobile Robot With Beacons and Dead Reckoning Sensors," Proceedings of IEEE Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science, pp. 1-4, 2014.
- [15] L. Kleeman, "Optimal Estimation of Position and Heading for Mobile Robots Using Ultrasonic Beacons and Dead-reckoning," Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2582-2587, 1992.
- [16] J. Hightower, G. Brriello, "A Survey and Taxonomy of Location Systems for Unoquitous Computing," IEEE Computer, Vol. 34, No.8, pp. 57-66, 2001.
- [17] G.D. Hong, J. Park, "Novel Embedded OS for Soccer Robot System," Journal of Embedded Systems, Vol. 1, No. 1, pp. 1-12, 2004.

### Jun-Woo Song (송 준 우)



He is received B.S. degree in Electronic Engineering from Inje University in 2016. He is currently a M.S. student in Electronics Engineering at Pusan

National University. His research interests include robotic control and localization.

Email: junwoo7379@pusan.ac.kr

### Byeong-Chan Choi (최 병 찬)



He is received B.S. degree in Electronic Engineering from Inje University in 2016. He is currently a M.S. student in Electronics Engineering at Pusan

National University. His research interests include robotic control and balancing control.

Email: byeongchan1696@pusan.ac.kr



**Tae-Eon Kim (김 태 언)**

He is received B.S. degree in Mechanical Engineering from Temple University in 2014. He is currently a M.S. student in Electronics Engineering at Pusan National University. His research interests include balancing control and motor control.

Email: taeon7379@pusan.ac.kr

**Sreejith Manalipadam Sreenivasan**

He is received B.S. degree in Electronic Engineering from mahatma Gandhi University in 2012. He is currently a M.S. student in Electronics Engineering at Pusan National University. His research interests include artificial intelligence system and manipulator control.

Email: sreejith1696@pusan.ac.kr

**Jang-Myung Lee (이 장 명)**

He is received B.S. and the M.S. in Electronic Engineering from Seoul National University in 1980 and 1982, respectively, and the Ph.D. in Computer Engineering from the University of Southern California(USC) in 1990. He has been a professor with the Intelligent Robot Laboratory, Pusan National University, Busan, Korea. His research interests include intelligent robotic systems, ubiquitous ports, and intelligent sensors.

Email: jmlee@pusan.ac.kr