

# 마찰 보상과 지도 정합에 의한 미끄럼 조향 이동로봇의 실내 주행

## Indoor Navigation of a Skid Steering Mobile Robot Via Friction Compensation and Map Matching

소창주, 유준\*

(Chang Ju So<sup>1</sup> and Joon Lyoo<sup>2</sup>)

<sup>1</sup>R&D Center, Higen Motors Ltd.

<sup>2</sup>Dept. of Electronics Eng., Chungnam National University

**Abstract:** This paper deals with the indoor localization problem for a SSMR (Skid Steering Mobile Robot) subjected to wheel-ground friction and with one LRF (Laser Range Finder). In order to compensate for some friction effect, a friction related coefficient is estimated by the recursive least square algorithm and appended to the maneuvering command. Also to reduce odometric information based localization errors, the lines are extracted with scan points of LRF and matched with the ones of the corresponding map built in advance. The present friction compensation and scan map matching schemes have been applied to a laboratory SSMR, and experimental results are given to validate the localization performance along an indoor corridor.

**Keywords:** SSMR, LRF, indoor localization, friction compensation, scan map matching

### I. 서론

미끄럼 조향 이동로봇(SSMR: Skid Steering Mobile Robot)은 별도의 조향장치 없이 각 바퀴의 속도차이에 의해 발생하는 지면과 타이어 사이의 미끄러짐을 통해 조향하는 로봇이다. 이 로봇은 조향 장치가 없어 구조가 간단하고 기계적으로 강인한 구조를 가지므로 다양한 지형에 활용되고 있다[1]. SSMR은 미끄러짐을 최소화하기 위하여 바퀴의 전 후륜에 같은 크기의 속도 명령을 주므로 2륜 로봇으로 단순화 할 수 있다. 하지만 2륜 로봇과 달리 진행 방향을 바꾸기 위하여 횡방향의 마찰을 이겨내야 한다[2]. 또한, 이러한 지면마찰은 대상 환경에 따라 다르며 정확한 모델링 및 센서를 이용한 추정이 쉽지 않다.

SSMR의 마찰을 보상하는 기존 연구로는 순간 회전중심을 특정한 지점에 위치시키는 구속조건을 설정하고 3자유도 기구학 모델에 기반하여 제어하는 방법이 진행되어 왔다[3]. 하지만 일반적인 실내복도 환경은 직선경로가 주를 이루어 회전 경로의 길이가 짧고 짧은 시간안에 끝나는 특성 때문에 기존의 기구학적 경로추종 방법은 정착시간에 영향이 커 적합하지 않다.

한편 이동로봇이 실내 복도를 주행함에 따라 오도메트릭(Odometric) 오차가 누적되기 때문에 엔코더 정보만으로는

이동로봇의 정확한 위치를 알기 어렵다. 따라서 이러한 오차를 보상하기 위하여 여러 위치추정 방법들이 시도되어 왔다[4,5,6].

이에 본 논문에서는 미끄럼 조향 이동로봇의 지면마찰 비례상수를 RLS (Recursive Least Square) 알고리즘을 이용하여 추정하고 이동로봇의 입력 명령을 보정하는 방식으로 지면마찰을 보상하였다. 또한 지도 정합을 통해 실내 복도 환경에서 이동로봇의 위치를 추정한다. 이동로봇의 지면마찰을 보상하기 전의 실험결과와 보상한 후의 실험결과를 비교하여 지면마찰이 보상되었음을 실험결과를 토대로 검증한다. 또한, 위치 추정전의 레이저 거리계(LRF: Laser Range Finder) 데이터와 위치추정을 통해 수정한 데이터를 지도와 함께 나타내어 지도 정합이 잘되었음을 확인한다.

### II. 지면마찰 보상

#### 1. 지면마찰 분석

이동로봇이 회전운동 중에 작용하는 지면마찰을 분석하기 위하여 로봇의 각 바퀴 옆에 속도 명령을 주었을 때 이동로봇에 부착된 요측 자이로센서를 통하여 지면마찰을 분석하였다.

그림 1은 지면마찰을 보상하기 전의 실험 결과이다. 이동로봇에 선속도( $v$ )와 각속도( $w$ )를 명령하였을 때 모터 속도를 통해 계산한 이동로봇의 이상적인 각속도( $\dot{\theta}_{motor}$ )와 요측 자이로 센서를 통해 얻은 이동로봇의 실제 각속도( $\dot{\theta}_{gyro}$ )를 그림 1에 나타내었다. 그림 1은  $w = 30 \text{deg/s}$ ,  $v = 0 \text{cm/s}$ 의 입력 명령을 주었을 때 나온 결과이다. 실선(30deg/s 근방의 그래프)은 이동로봇의 모터 속도를 통해 계

\* 책임저자(Corresponding Author)

Manuscript received February 28, 2013 / revised March 8, 2013 / accepted April 2, 2013

소창주: 하이젠 모터(cjso@higenmotor.com)

유준: 충남대학교 전자공학과(jlyoo@cnu.ac.kr)

※ 본 논문은 2012년 ICROS 대전총칭지부 학술대회에서 초안이 발표되었음.

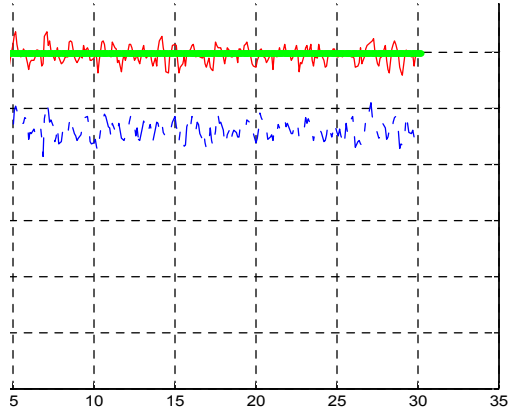


그림 1. 입력 :  $w = 30\text{deg/s}$ ,  $v = 0\text{cm/s}$  (마찰 보상 전).

Fig. 1. Input :  $w = 30\text{deg/s}$ ,  $v = 0\text{cm/s}$  (before compensation).

표 1. 마찰 보상 전의 평균 각속도 오차 (단위 : deg/s).

Table 1. Mean angular velocity before friction compensation.

속도	0cm/s	10cm/s	20cm/s
10deg/s	2.6031	2.2921	2.3353
20deg/s	4.0577	4.2204	3.9037
30deg/s	6.9326	7.0507	6.5612

산된 이상적인 각속도이고 점선(23deg/s 근방의 그래프)은 요측 자이로센서를 통해 얻은 이동로봇의 실제 각속도이다. 마찰로 손실된 각속도는 약 6.93deg/s이다.

표 1은 이동로봇의 마찰을 보상하기 전의 실험 결과를 정리한 것이다. 5초부터 30초까지 평균을 낸 결과로, 선속도와 무관하게 입력 각속도와 지면마찰로 저하된 각속도간의 비례 관계가 있음을 발견하였다.

이제 이동로봇의 실제 각속도와 이상적인 각속도의 관계를  $\alpha$ 로 나타내었다.  $\alpha$ 는 지면마찰 비례상수로 손실되는 정도를 의미하며 이로 로봇의 각속도 명령을 보정하여 지면마찰을 보상한다.

$$\alpha = \frac{\dot{\theta}_{gyro}}{\dot{\theta}_{motor}}, \quad \dot{\theta}_{gyro} = \dot{\theta}_{motor} - (1 - \alpha)\dot{\theta}_{motor} \quad (1)$$

## 2. 지면마찰 보상 방식

실내복도 환경의 특성을 고려하여 이동로봇의 입력 명령을 보정하고 이동로봇에 작용하는 지면마찰을 보상하였다.

$$v_{input} = \frac{v_R + v_L}{2}, \quad \dot{\theta}_{motor} = \frac{v_R - v_L}{L} \quad (2)$$

식 (2)는 이동로봇의 기구학 식이다.  $v_R$ 과  $v_L$ 은 오른쪽 바퀴 열과 왼쪽 바퀴열의 속도이다.

$$\dot{\theta}_{input} = \hat{\alpha}\dot{\theta}_{motor} = \hat{\alpha}\frac{v_R - v_L}{L} \quad (3)$$

로봇에 속도 입력( $v_{input}$ ,  $\dot{\theta}_{input}$ )을 주었을 때 (1)과 (3)으로 부터 모터에 전달하는 속도명령( $v_R$ ,  $v_L$ )을 보정한다.

$$v_R = v_{input} + \frac{L}{2\hat{\alpha}}\dot{\theta}_{input}, \quad v_L = v_{input} - \frac{L}{2\hat{\alpha}}\dot{\theta}_{input} \quad (4)$$

$\alpha$ 는 상수로 간주하였고, 이제  $\alpha$ 를 추정하기 위하여 RLS(Recursive Least Square) 알고리즘을 도입하였다. 모터 속도를 통해 계산한 이상적인 각속도에  $\hat{\alpha}$ 를 곱하여 마찰로 손실된 후의 각속도를 식 (5)와 같이 추정한다.

$$\hat{\theta}_R = \hat{\alpha}_n \dot{\theta}_{motor} \quad (5)$$

추정한 이동로봇의 각속도( $\hat{\theta}_R$ )와 실제 로봇의 각속도간의 오차를 식 (6)과 같이 계산한다.

$$e_n = \dot{\theta}_{gyro} - \hat{\theta}_R \quad (6)$$

오차와 이득  $k_n$ 를 구하고 다음의 RLS 알고리즘에 입력하여  $\alpha$ 와  $P$ 를 갱신한다. 여기서  $\lambda$ 는 망각 인자이다.

$$k_n = P_n \frac{\dot{\theta}_{motor}}{(\lambda + P_n \dot{\theta}_{motor}^2)} \quad (7)$$

$$\hat{\alpha}_{n+1} = \hat{\alpha}_n + k_n e_n \quad (8)$$

$$P_{n+1} = \lambda^{-1} P_n - \lambda^{-1} k_n \dot{\theta}_{motor} P_n \quad (9)$$

## 3. 지면마찰 보상 실험 결과

이동로봇의 지면마찰 비례상수( $\alpha$ )를 추정하고 입력 각속도를 보정하여 얻은 결과이다. 이동로봇을 30초 동안 회전운동 시켜 얻은 그래프로, 가로축은 시간(sec), 세로축은 각속도(deg/sec)이다.

그림 2는 이동로봇에  $w = 30\text{deg/s}$ ,  $v = 0\text{cm/s}$ 의 입력 명령을 주었을 때, 지면마찰을 보상한 결과이다. 이동로봇의 이상적인 각속도(실선)는 약 38deg/s이지만 마찰로 손실되어 실제 각속도(점선)는 입력각속도에 근접한 것을 확인할 수 있다. 입력 각속도와 요측 자이로 센서를 통해 얻은 각속도의 차이는 평균 0.74deg/s이다.

이때 RLS 방식으로 추정된  $\alpha$ 는 그림 3의 점선(빨간선)과 같다. x축은 시간(sec)으로,  $\alpha$ 는 약 0.769~0.78 사이에서 변하며 평균 0.776으로 추정되었다. 속도에 비례하는 마찰인 점성 마찰을 제외한 다른 마찰은 고려하지 않으므로 상수로 모델링한  $\alpha$ 가 수렴하지 않는 결과를 얻었지만 크기의 변화가 크지 않다.

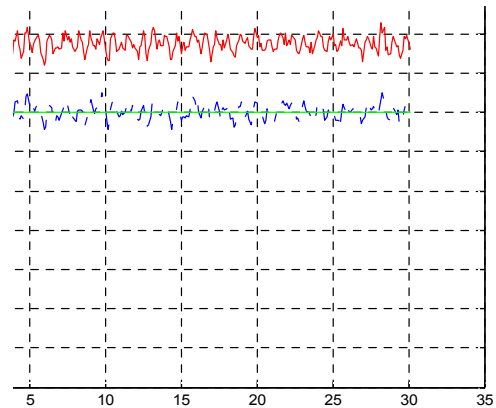


그림 2. 입력 :  $w = 30\text{deg/s}$ ,  $v = 0\text{cm/s}$  (마찰 보상 후).

Fig. 2. Input :  $w = 30\text{deg/s}$ ,  $v = 0\text{cm/s}$  (after compensation).

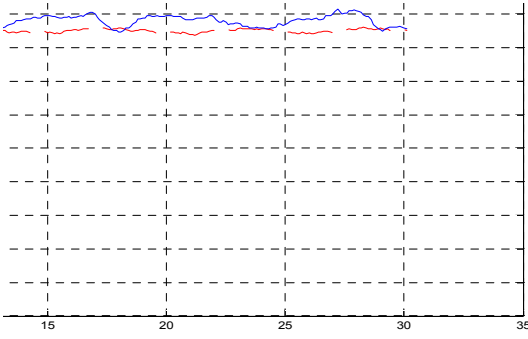


그림 3. 입력 :  $w = 30\text{deg/s}$ ,  $v = 0\text{cm/s}$  일 때 추정된  $\alpha$ .  
Fig. 3. Estimated  $\alpha$  when  $w = 30\text{deg/s}$ ,  $v = 0\text{cm/s}$ .

표 2. 마찰 보상 후 평균 각속도 오차 (단위 : deg/s).

Table 2. Mean angular velocity after friction compensation.

속도	0cm/s	10cm/s	20cm/s
10deg/s	0.4683	0.5335	0.6605
20deg/s	0.6316	0.7652	0.7405
30deg/s	0.7412	0.7002	0.6696

표 3. 마찰 보상 후 평균 각속도 오차 (단위 : deg/s).

Table 3. Mean angular velocity after friction compensation.

속도	0cm/s	10cm/s	20cm/s
10deg/s	0.7650	0.7598	0.7485
20deg/s	0.7660	0.7497	0.7598
30deg/s	0.7905	0.7386	0.7462

로봇의 입력 각속도 명령을 보정하여 마찰을 보정한 실험 결과를 표 2에 정리하였다. 표 1과 표 2를 비교하면 마찰을 보상하기 전과 후의 평균 각속도 오차가 확연히 준 것을 볼 수 있다.

표 3은 표 2의 실험환경과 다른 지면환경에서 이동로봇의 지면마찰을 보정한 실험 결과이다. 표의 결과를 통해 지면 마찰이 충분히 보상됨을 확인할 수 있다. 이때 추정된  $\alpha$ 는 그림 3의 실선(파란선)과 같다. 지면 환경에 따라 추정된  $\alpha$ 가 변하며 환경에 적응하는 것을 확인할 수 있다.

### III. 지도 정합을 통한 위치 추정

이동로봇의 엔코더와 요측 자이로센서는 오차가 발생하며, 주행이 지속됨에 따라 오차의 누적으로 인해 이동 로봇의 정확한 위치를 알기 어렵다. 따라서 주행 중에 이동로봇의 위치를 추정하기 위하여 레이저 거리계(LRF)를 이용해 지도 정합을 수행한다.

#### 1. 선분추출

레이저 거리계를 통하여 획득한 데이터는 점으로 된 데이터이므로 전역지도와 선 대 선으로 정합하기 위해서는 스캔 데이터에서 선분을 추출하여야 한다. 추출하는 방법은 다음의 순서와 같다.

① 레이저 거리계를 통해 스캔한 N개의 점들로 이루어진 집합  $S_1 = \{p_i | i = 1, \dots, N\}$ 에서 시작점  $p_1$ 과 끝점  $p_N$ 을 지나는 선분을 긋는다.

② ①에서 구한 선분과 가장 거리가 멀리 떨어진 점  $p_k$ 를 찾는다.

③ ①에서 구한 선분과 ②에서 구한  $p_k$ 간의 거리가 임계값을 넘어가면, 점  $p_k$ 를 기준으로 두 개의 집합으로 나눈다.

④ 각 집합에 대하여 위의 과정을 반복하며, 모든 데이터가 각각의 선분으로 분해된 경우 종료한다.

⑤ 각 그룹은 Least square fitting하고 양 끝점을 직선에 투영하여 선분을 얻는다.

#### 2. 정합

레이저 거리계를 통해 얻은 선분과 지도를 정합하기 위하여 먼저 지도에서 정합할 영역을 추출한다. 엔코더와 자이로센서를 이용하여 추정중인 이동로봇의 위치를 기준으로 이동로봇의 조향 각에 대한 범위를 설정하여 정합할 영역을 추출한다.

전역지도에서 추출한 직선  $M_k$ 와 레이저 거리계를 통해 추출한 직선  $L_i$ 간의 유사도를 비교하고 그 중 거리적으로 가장 근접한 선분끼리 정합을 한다. 식 (10), (11)은 각 선분별로 정보를 모은 집합이다.

$$M_k = \{\theta_k^M, \rho_k^M, (X_k^s, Y_k^s), (X_k^e, Y_k^e)\} \quad (10)$$

$$L_i = \{\theta_i^L, \rho_i^L, (X_i^s, Y_i^s), (X_i^e, Y_i^e)\} \quad (11)$$

선분을 정합하는 과정은 아래와 같다.

① 아래의 조건을 만족하는 선분을 정합 후보군으로 묶는다.  $\sigma_\theta, \sigma_\rho$ 는 임계값으로 사용자가 환경에 맞게 정한다.

$$|\theta_i^L - \theta_k^M| < \sigma_\theta \quad (12)$$

$$|\rho_i^L - \rho_k^M| < \sigma_\rho \quad (13)$$

② ①의 조건을 만족하는 선분들 중에 선분의 중심 간의 거리가 임계값( $\sigma_{distance}$ )보다 작으면서 그 중 최소가 되는 직선  $L_i, M_k$ 은 정합 되었다고 한다[4].

#### 3. 이동로봇 위치추정

3.2절에서 얻은 정합 쌍을 이용하여 전역지도의 선분과 레이저 거리계를 통해 얻은 선분간의 거리 오차 제곱 합이 최소가 되도록 위치를 보정한다.

로봇 좌표계(X, Y)에서 어떤 점(위치)에 대해  $[\Delta X \Delta Y]^T$ 만큼 병진 이동시키고  $\Delta \Phi$ 만큼 회전시켰을 때, 두점 사이의 관계는 식 (14)와 같이 주어진다.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \Delta \Phi & -\sin \Delta \Phi \\ \sin \Delta \Phi & \cos \Delta \Phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{X} \\ \hat{Y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \end{bmatrix} \quad (14)$$

여기서  $\Delta \Phi$ 가 작은 값이라 가정하여 선형화하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} \Delta X + \hat{X} - \Delta \Phi \hat{Y} \\ \Delta Y + \hat{Y} + \Delta \Phi \hat{X} \end{bmatrix} \quad (15)$$

전역 지도에서 추출한 선분  $M_k$ 를 직선의 방정식  $a_k x + b_k y + c_k = 0$ 으로 나타내고  $L_i$  위의 점들  $p_i = [X_i \ Y_i]$ 을 (15)로 회전 이동시켰을 때  $M_k$ 와의 수직거리 d는 식

(16)과 같이 구해진다.

$$d = |a_k X_i + b_k Y_i + c_k| = |a_k (\Delta X + X_i + \Delta \Phi Y_i) + b_k (\Delta Y + Y_i + \Delta \Phi X_i) + c_k| \quad (16)$$

레이저 거리계를 통해 얻은 데이터와 전역지도의 직선간의 거리가 최소가 되는  $\Delta \Phi$ 와  $[\Delta X \Delta Y]^T$ 를 찾기 위하여 거리의 제곱 합을 구하고 각 변수에 대해 편미분하여 정리하면 다음과 같다.

$$A = \begin{bmatrix} \sum 2a_k^2 & \sum 2a_k b_k & \sum 2(b_k \hat{X} - a_k \hat{Y}) a_k \\ \sum 2a_k b_k & \sum 2b_k^2 & \sum 2(b_k \hat{X} - a_k \hat{Y}) b_k \\ \sum 2(b_k \hat{X} - a_k \hat{Y}) a_k & \sum 2(b_k \hat{X} - a_k \hat{Y}) b_k & \sum 2(b_k \hat{X} - a_k \hat{Y})^2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta \Phi \end{bmatrix} = A^{-1} \begin{bmatrix} -2 \sum (a_k \hat{X} + b_k \hat{Y} + c_k) a_k \\ -2 \sum (a_k \hat{X} + b_k \hat{Y} + c_k) b_k \\ -2 \sum (a_k \hat{X} + b_k \hat{Y} + c_k) (b_k \hat{X} - a_k \hat{Y}) \end{bmatrix} \quad (17)$$

4. 위치추정 실험결과

그림 4에서 빨간선(실선)은 전역지도에서 이동로봇의 위치와 조향 각을 기준으로 추출한 선분이고, 파란선(점선)은 레이저 거리계를 통해 얻은 선분이다. 이동로봇의 위치 오

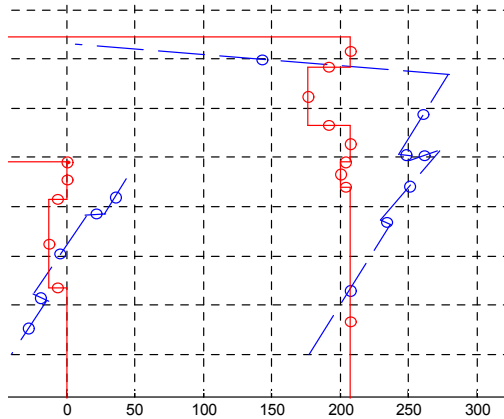


그림 4. 위치추정 전의 획득한 선분 및 지도.  
Fig. 4. Acquired segment and map before localization.

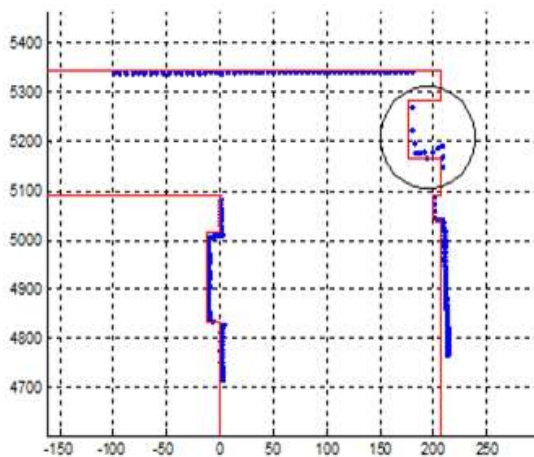


그림 5. 위치추정 후의 레이저거리계 데이터 및 지도.  
Fig. 5. LRF data and map after localization.

차로 인해 두 데이터간의 오차가 발생한다. 그림 5는 정합과 위치추정을 통해 이동로봇의 위치를 추정하고 레이저 거리계를 통해 얻은 점 데이터를 보정한 결과이다. 레이저 거리계의 스캔 데이터와 지도와의 정합이 잘 되었음을 확인하였다.

IV. 결론

본 논문에서는 미끄럼 조향 이동로봇의 지면마찰을 보상하기 위하여 지면마찰 관련 비례상수를 순환형 최소자승 알고리즘으로 추정하고 이동로봇의 각속도명령을 보정함으로써, 지면마찰로 인하여 손실되는 각속도를 보상하였다. 또한, 지도와 레이저 거리계의 정보간의 정합과정을 통해 실내 주행 시에 이동로봇의 위치를 추정하는 지도 정합 알고리즘을 구현하였다. 지면마찰을 보상하기 전(표 1)과 지면마찰을 보정한 후(표 2)의 결과를 제시함으로써 미끄럼 조향 이동로봇의 회전 주행 시에 발생하는 지면마찰 보상을 검증하였고, 표 3을 통해 다양한 환경에서 지면마찰의 보상이 가능함을 보였다. 그림 4와 그림 5을 통해 이동로봇의 위치 추정을 위한 지도 정합이 잘 되었음을 확인하였다.

하지만 이동로봇의 속도에 비례하는 점성마찰만을 고려하여 지면마찰 비례상수를 추정한 결과, 이동로봇의 마찰은 완전히 보상되지 않았다. 이동로봇의 실내 주행에는 문제가 발생하지 않지만, 세밀한 제어가 필요한 환경에서는 이를 개선하는 연구가 필요하다. 또한, 그림 5에서 검은 원은 라디에이터를 스캔한 영역이다. 레이저 거리계가 라디에이터를 스캔하는 방향에 따라 정보가 달라지므로 실제 지도와의 정합이 완벽하게 되지 않는다. 상황에 따라 오차 요인이 크게 부각될 경우 추정된 위치 오차가 커지게 되는 현상이 발생하며, 이를 보완하기 위하여 다른 센서와의 융합이 필요하다.

참고문헌

- [1] E. J. Hwang, H. S. Kang, C. H. Hyun, and M. Park, "Robust backstepping control based on a lyapunov redesign for skid-steered wheeled mobile robots," *Int. J. Adv. Robotic Systems*, vol. 10, pp. 1-8, Jan. 2013.
- [2] D. Pazderski, K. Kozlowski, and M. Law-niczak, "Practical stabilization of 4WD skid steering mobile robot," *Fourth Int. Workshop on Robot Motion and Control*, pp. 175-180, Jun. 2004.
- [3] K. Kozlowski, D. Pazderski, I. Rudas, and J. Tar, "Modeling and control of a 4-wheel skid-steering mobile robot: From theory to practice," *Int. J. Appl. Math. Comput. Sci.*, vol. 14, no. 4, pp. 477-496, 2004.
- [4] H. J. Sohn et al., "A robust localization algorithm for mobile robots with laser range finders," *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics & Automation*, pp. 3545-3550, Apr. 2005.
- [5] M. Y. Choi, J. W. Choi, and W. K. Chung, "Direction augmented probabilistic scan matching for reliable localization," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 17, no. 12, pp. 1234-1239,

Dec. 2011.

- [6] S. Y. Kim and K. S. Yoon, "Improved ultrasonic satellite system for the localization of mobile robots," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 17, no. 12, pp. 1140-1247, Dec. 2011.
- [7] C. J. So and J. Lyou, "Indoor localization of a skid steering mobile robot through friction compensation and scan map matching," *Proc. of Daejeon & Chungcheong Regional Conference of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, pp. 122-125, Dec. 2012.



#### 소창주

2011년 충남대학교 전자공학과(공학사). 2013년 동 대학원 석사. 2013년 3월~현재 하이젠 모터 주식회사 기술연구소 연구원. 관심분야는 이동로봇 자율 주행, 산업용 로봇, 모션 컨트롤러 등임.



#### 유준

1978년 서울대학교 전자공학과(공학사). 1984년 한국과학기술원 전기전자공학과(공학박사). 1984년 9월~현재 충남대학교 전자공학과 교수. 1989년 2월~1990년 2월 미취건 주립대학교 객원교수. 1993년 12월~1994년 2월 독일 IPA 연구소 방문연구원. 1997년 2월~1998년 2월 캘리포니아 주립대학교(데이비스) 객원교수. 관심분야는 산업공정 제어, 센서신호처리, IT기반 로봇, 항법시스템 등임.