
이동 로봇의 슬립 감소를 위한 이동 경로 계획 및 슬립 보상방식

엄기환* · 강성호** · 정경권***

The Path Plan for Slip Reduction of Mobile Robot and Slip Compansation Method

Ki Hwan Eom* · Seong Ho Kang** · Kyung Kwon Jung***

요 약

본 논문에서는 이동로봇의 슬립감소를 위한 이동경로계획 및 슬립으로 인해 발생하는 기록센서 오차를 보상하는 방식을 제안하였다. 제안하는 로봇의 이동경로계획은 로봇의 슬립을 고려하여 퍼텐셜 필드 방식에서 장애물에 대한 퍼텐셜 장벽을 평탄 화합으로써 로봇의 슬립을 감소하였다. 또한 슬립으로 인해 발생하는 기록센서의 오차를 퍼지 논리 시스템을 이용하여 보상하였다. 제안한 방식의 유용성을 시뮬레이션 및 제작한 이동로봇을 이용하여 실험을 통하여 확인하였다.

ABSTRACT

In this paper, propose for mobile robot path planning and the reduction in sleep caused by a sleep history suggested a way to compensate for record sensor error. The proposed path plan reduces the robot slip to smooth a potential barrier in the potential field method, and compensates the tachometer error by robot slip using the fuzzy logic system. The efficiency of the proposed method is verified by means of simulations and experiments for path plan and slip revision.

키워드

mobile robot, path plan, slip, potential field, fuzzy logic system

I. 서 론

최근에는 산업 구조가 다양한 형태로 바뀐에 따라 특정 작업만을 할 수 있는 로봇 보다는 여러 가지 일이나 환경에 대처할 수 있는 로봇이 필요하게 되었다. 이동성을 갖고 있는 이동 로봇은 장난감, 청소, 안내, 서류 운반, 탐색 등 여러 분야에서 다양하게 응용되고 있다[1-3]. 이

동로봇은 어떤 환경 하에서 미리 알고 있는 장애물을 피해 안전하게 원하는 목적지까지 움직여야 하며, 이동경로계획은 환경인식에 의해 작성된 지도의 정보 등을 이용해 안전하게 목적지까지 도착할 수 있는 경로를 찾는 것이다. 이동경로계획은 장애물에 대한 정보에 따라 전역 이동경로계획(global path planning), 지역 이동경로계획(local path planning), 혼합 이동경로계획(hybrid path

* 동국대학교 전자공학과

** (주)마스터 연구소

*** 한림대학교 전자공학과

planning) 등으로 분류한다. 전역적인 방식은 로봇과 이동경로 상에 환경은 알려져 있고, 접근방식은 로봇으로부터 목적지까지 완전한 이동경로를 계산할 수 있다. 지역적인 방식은 로봇이 이동경로 상에 알려져 있지 않은 장애물을 만날 때 장애물을 회피하기 위한 이동경로계획을 의미한다. 혼합형은 전역적인 방식과 지역적인 방식이 혼합된 방식을 의미한다[1][3].

장애물 회피 방식에 따른 이동경로계획은 roadmap, skeleton, cell decomposition, potential field, vector field 등으로 분류되며 주위환경에 따라 다양하게 이용되고 있다. 특히, 퍼텐셜 필드(potential field)방식은 이동로봇의 출발지와 목적지 사이에 장애물이 존재하는 경우 퍼텐셜 장벽을 형성하여 로봇의 충돌을 예방한다. 그러나 일반적인 퍼텐셜 장벽은 로봇의 슬립을 고려한다면 가파른 장벽이므로, 이는 로봇의 이동 경로 상에 슬립이 발생할 확률이 클 수 있는 문제점이 발생한다[5-8]. 그러므로 로봇의 이동경로계획은 로봇의 슬립을 고려하여 퍼텐셜 필드 방식에서 장애물에 대한 퍼텐셜 장벽을 평탄화 하여 로봇의 슬립을 최소화 하도록 한다. 이동로봇의 슬립은 표면 마찰력, 로봇 속도와 지면 속도의 차이 등 여러 원인에 의해 발생하며, 일반적으로 이동로봇 분야에서 로봇의 슬립은 고려하지 않는 것이 보편화 되어 있다. 하지만, 오늘날 이동로봇의 이동속도는 빨라지고 있으며 이는 과거의 로봇에 비해 로봇의 슬립이 발생할 확률이 높다는 것이다. 로봇의 위치를 감지하는 센서가 주행 기록 센서라고 가정하면 슬립 발생 시 로봇은 슬립을 기록하지 못하여 기록센서 오차가 발생하게 된다[1][3].

본 논문에서는 이러한 문제점들을 해결하기 위해 바퀴로 구성된 이동로봇의 슬립감소를 위한 이동경로계획 및 슬립으로 인해 발생하는 기록센서 오차를 보상하는 방식을 제안한다. 제안하는 로봇의 이동경로계획은 로봇의 슬립을 고려하여 퍼텐셜 필드 방식에서 장애물에 대한 퍼텐셜 장벽을 평탄화 함으로써 로봇의 슬립을 최소화 하도록 한다. 또한 슬립으로 인해 발생하는 기록센서의 오차를 퍼지 논리 시스템을 이용하여 보상한다. 이동로봇의 슬립은 로봇이 회전할 때 발생하는 lateral force와 슬립 각에 의해 슬립이 발생하는 것으로 가정한다. 제안한 방식의 유용성을 확인하기 위하여 로봇의 슬립감소를 위한 이동경로계획과 Pacejka의 Magic 식을 이용하여 differential 구동형 로봇의 슬립을 모델링 하고,

모델링된 시스템 상태방정식을 이용하여 퍼지 논리 시스템을 이용한 추정오차에 대한 보상을 시뮬레이션 및 제작한 자율이동로봇을 이용하여 실험을 통하여 비교 검토한다.

II. 이동로봇

2-1. 이동로봇의 운동모델과 구조

로봇의 위치는 그림 1과 같이 전역 참조 프레임과 지역 참조 프레임으로 구분한다.

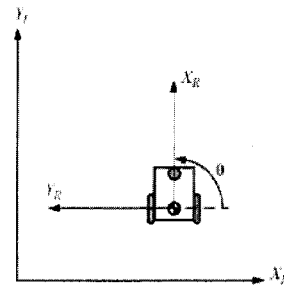


그림 1. 전역참조 프레임과 지역참조 프레임
Fig. 1 The global reference frame and the local reference frame.

그림에서 전역 참조 프레임은 평면상에 임의의 관성 기준으로 X_I 축과 Y_I 축으로 정의하며, 지역 참조 프레임은 로봇 차대를 기준으로 X_R 축과 Y_R 축으로 정의한다[3].

전역 참조 프레임에서 로봇의 위치는 x, y 좌표로 주어지고, 전역 참조 프레임과 지역 참조 프레임 사이의 각도 차는 θ 로 주어진다. 따라서 전역 참조 프레임에서 로봇의 위치는 식 (2.1)과 같이 하나의 벡터로 나타낸다 [2][3].

$$\xi_I = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

전역 참조 프레임에서 지역 참조 프레임으로 사상(mapping)은 식 (2.2)와 같은 회전 행렬(rotation matrix)을 사용하여 달성된다.

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

전형적인 differential 구동형 이동로봇의 좌우 바퀴는 로봇을 움직이게 하기 위해 구동모터로 구성되고 바퀴의 회전수를 셀 수 있도록 증가형 엔코드를 탑재한다. Differential 구동형 로봇의 기구학적인 구조 방정식은 식 (2.3)이다[2].

$$c_m = \frac{\pi D_n}{\eta C_e} \quad (2.3)$$

여기서, c_m 은 모터 엔코드의 펄스를 선형 바퀴의 변위로 전송하기 위한 변환인자, D_n 은 바퀴 지름, C_e 는 엔코드의 해상도(바퀴의 회전당 펄스수), η 는 바퀴와 모터사이의 기어비(gear ratio)이다. 왼쪽 바퀴와 오른쪽 바퀴에 대하여 로봇의 주행거리는 식 (2.4)와 같이 표현한다.

$$\Delta U_{L/R} = c_m N_{L/R} \quad (2.4)$$

여기서, N_L, N_R 은 각각 왼쪽 바퀴와 오른쪽 바퀴의 모터 엔코드의 펄스 증가량이며, $\Delta U_L, \Delta U_R$ 은 각각 왼쪽 바퀴와 오른쪽 바퀴의 주행거리이다. 로봇의 중심점에서 선형 변위는 식 (2.5)와 같이 나타낸다.

$$\Delta U = \frac{(\Delta U_R + \Delta U_L)}{2} \quad (2.5)$$

로봇의 방향변화는 식 (2.6)과 같이 나타낸다.

$$\Delta\theta = \frac{(\Delta U_R - \Delta U_L)}{b} \quad (2.6)$$

여기서, b 는 양 바퀴 사이의 거리이다. 로봇의 새로운 상대적인 방향은 식 (2.7)과 같다.

$$\theta_k = \theta_{k-1} + \Delta\theta_k \quad (2.7)$$

로봇의 중심점에서 새로운 상대적인 위치좌표는 식 (2.8)과 같이 계산할 수 있다[2][3][7].

$$\begin{aligned} x_k &= x_{k-1} + \Delta U_k \cos\theta_k \\ y_k &= y_{k-1} + \Delta U_k \sin\theta_k \end{aligned} \quad (2.8)$$

2.2 퍼텐셜 필드 이동경로계획

퍼텐셜 필드는 초기에 실시간 장애물 회피 접근방식으로 개발되었으나, 로봇이 장애물에 대한 사전 정보를 갖고 있지 않다면 실행할 수 없었다. 그러나 퍼텐셜 필드는 그래프 검색 기술과 통합될 수 있었고, 이동로봇의 전역적인 이동경로계획에 이용되고 있다. 퍼텐셜 필드에서 로봇은 목적지 지형과 C-obstacles에 의해 만들어진 인위적인 퍼텐셜)의 영향 하에 움직이는 지형공간에 존재하는 미립자로 표현된다[5]. 일반적으로 목적지에서는 로봇을 목적지로 당기기 위해 인력 퍼텐셜(attractive potential)이 발생되고, C-obstacles에서는 로봇을 그들로부터 밀기 위해 척력 퍼텐셜(repulsive potential)이 발생한다. 전체 퍼텐셜의 음(negated)의 기울기는 로봇에 적용된 인위적인 힘으로 처리되고, 이 힘의 방향은 로봇이 움직여야 할 최적의 방향으로 여겨진다.

인력 퍼텐셜은 로봇과 목적지 사이의 Euclidean 거리에 대하여 포물선 함수 관계를 갖는 것으로 정의하며, 식 (2.9)과 같다[5].

$$U_{att}(q) = \frac{1}{2} \xi \rho_{goal}^2(q) \quad (2.9)$$

여기서, $U_{att}(q)$ 는 인력 퍼텐셜, ξ 는 양의 가중치 인자, $\rho_{goal}(q)$ 는 Euclidean 거리 $\| \mathbf{q} - \mathbf{q}_{goal} \|$ 이고, \mathbf{q} 는 로봇의 위치, \mathbf{q}_{goal} 목적지를 의미한다. 인력에 대한 인위적인 힘은 인력 퍼텐셜을 미분하여 구하고, 목적지에 대하여 수렴하며 식 (2.10)와 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{att}(q) &= -\nabla U_{att}(q) \\ &= -\xi \rho_{goal}(q) \nabla \rho_{goal}(q) \\ &= -\xi (\mathbf{q} - \mathbf{q}_{goal}) \end{aligned} \quad (2.10)$$

여기서, $\nabla \mathbf{U}$ 는 기울기(gradient) 벡터로 식 (2.11)과 같다.

$$\nabla U = \begin{bmatrix} \frac{\partial U}{\partial x} \\ \frac{\partial U}{\partial y} \end{bmatrix} \text{ or } \begin{bmatrix} \frac{\partial U}{\partial x} \\ \frac{\partial U}{\partial y} \\ \frac{\partial U}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

척력 퍼텐셜은 **C-obstacle** 주위에 로봇이 진행할 수 없도록 퍼텐셜 장벽을 만드는 것이며, 일반적으로 로봇이 **C-obstacle**로부터 충분히 떨어져 있을 경우 영향을 주지 않는다. 식 (2.12)는 척력 퍼텐셜을 나타내는 식이다.

$$U_{rep}(q) = \begin{cases} \frac{1}{2} \eta \left(\frac{1}{\rho(q)} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2 & \text{if } \rho(q) \leq \rho_0 \\ 0 & \text{if } \rho(q) > \rho_0 \end{cases} \quad (2.12)$$

여기서, η 는 양의 가중치 인자, $\rho(q)$ 는 **C-obstacle** 지역으로부터 로봇의 위치 q 까지 최소거리, ρ_0 는 **C-obstacle** 영향의 거리로 양의 상수이다. 척력 퍼텐셜 함수는 양수이거나 제로이며 로봇의 위치 q 가 객체에 가까워지면 무한대로 접근한다. 척력 퍼텐셜로부터 인위적인 힘은 식 (2.13)과 같다.

$$\mathbf{F}_{rep}(q) = -\nabla U_{rep}(q) = \begin{cases} \eta \left(\frac{1}{\rho(q)} - \frac{1}{\rho_0} \right) \frac{1}{\rho^2(q)} \nabla \rho(q) \\ 0 \end{cases} \quad (2.13)$$

장애물을 회피하면서 목적지까지 도착하게끔 로봇을 이끄는 힘은 앞에서 유도한 인력과 척력에 대한 인위적인 힘의 합으로 구성되고 식 (2.14)로 표현된다.

$$\mathbf{F}(q) = \mathbf{F}_{att}(q) + \mathbf{F}_{rep}(q) \quad (2.14)$$

III. 제안하는 이동경로 및 슬립 보상

3.1 슬립 감소를 위한 이동경로계획

로봇의 슬립이 lateral force와 슬립 각에 의해서 발생한다고 가정하면, 일반적인 퍼텐셜 필드 이동경로계획

방식에 따라 장애물을 회피하는 경우 슬립 각이 상대적으로 커질 수 있다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해 퍼텐셜 필드 이동경로계획에서 척력에 대한 인위적인 힘은 평탄화될 필요가 있어, 척력에 대한 인위적인 힘을 평탄화시키는 방식을 제안한다. 앞에서 설명한 척력 퍼텐셜에 관한 식을 다시 쓰면 식 (3.1)과 같고 이 경우 그림 2와 같은 형태이다[5].

$$U_{rep}(q) = \begin{cases} \frac{1}{2} \eta \left(\frac{1}{\rho(q)} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2 & \text{if } \rho(q) \leq \rho_0 \\ 0 & \text{if } \rho(q) > \rho_0 \end{cases} \quad (3.1)$$

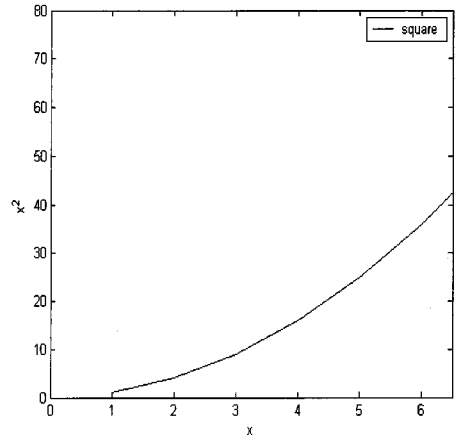


그림 2. 척력 퍼텐셜의 제곱형
Fig. 2 The quadratic form of repulsive force potential.

식 (3.1)과 같은 척력 퍼텐셜을 평탄화하기 위하여 식 (3.2)과 같이 대수의 지수 승을 제안한다.

$$U_{rep}^p(q) = \begin{cases} \frac{1}{2} \eta e^{\left(\frac{1}{\rho(q)} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2} & \text{if } \rho(q) \leq \rho_0 \\ 0 & \text{if } \rho(q) > \rho_0 \end{cases} \quad (3.2)$$

여기서, U_{rep}^p 는 제안된 척력 퍼텐셜을 의미한다. 그림 3은 제안한 대수 지수형의 척력 퍼텐셜이다.

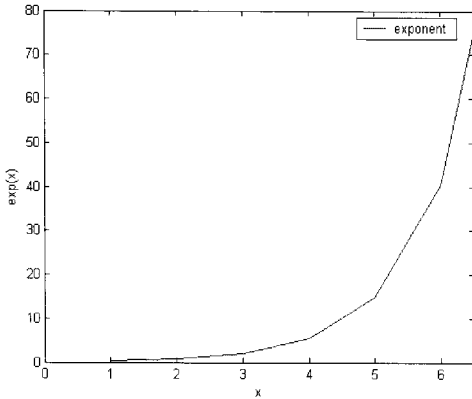


그림 3. 척력 퍼텐셜의 대수지수형
Fig. 3 The exponential form of repulsive force potential.

대부분의 경우 로봇이 움직이는 경로는 척력의 퍼텐셜에 대하여 퍼텐셜 장벽이 시작되는 부분 즉, 그림 2와 그림 3에서 수평축의 좌표값 1인 점 주위에서 움직이게 될 것이다. 이 좌표값의 주위에서 퍼텐셜 장벽의 기울기를 비교하면 제안한 방식이 좀 더 평탄하다. 따라서 로봇이 움직이는 경로가 완만해져 슬립을 좀 더 방지할 수 있다.

식 (3.2)로부터 척력에 대한 인위적인 힘을 구하면 식 (3.3)과 같다.

$$F_{rep}^p(q) = -\nabla U_{rep}^p(q) = \begin{cases} \eta e^{\left(\frac{1}{\rho(q)} - \frac{1}{\rho_0}\right)} \left(\frac{1}{\rho(q)} - \frac{1}{\rho_0}\right) \frac{1}{\rho^2(q)} \nabla \rho(q) \\ 0 \end{cases} \quad (3.3)$$

여기서, $F_{rep}^p(q)$ 는 제안된 척력에 대한 인위적인 힘을 의미한다. 식 (3.3)으로부터 보다 평탄화된 퍼텐셜 장벽을 얻으며, 인력에 대한 인위적인 힘은 슬립 각에 영향을 주지 못하는 것으로 가정하면 이때 로봇을 이끄는 힘은 식 (3.4)와 같다.

$$F(q) = F_{att}(q) + F_{rep}^p(q) \quad (3.4)$$

여기서, $F_{att}(q)$ 는 인력에 대한 인위적인 힘을 의미하며 일반적인 퍼텐셜 필드 방식과 동일한 값이다.

3.2 퍼지 논리 시스템을 이용한 슬립 보상

본 논문에서는 이동로봇의 슬립을 고려하여 슬립 발생시 이동로봇의 위치를 퍼지 논리 시스템을 이용하여 보상하는 방식을 제안한다. 로봇 슬립은 Pacejka의 Magic식에 의해 로봇이 회전할 때 발생하는 lateral force와 슬립 각에 지배를 받는 다고 가정하며, 제안한 퍼지 논리 시스템의 블록선도는 그림 4와 같다[4].

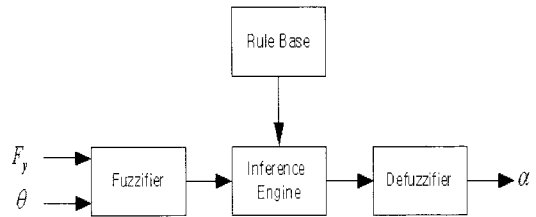


그림 4. 제안한 퍼지 논리 시스템
Fig. 4 The proposed fuzzy logic system.

그림에서 F_y 는 로봇이 회전할 때 발생한 lateral force, θ 는 로봇의 슬립 각을 의미하며, 퍼지 논리 시스템의 입력이 된다. α 는 퍼지 논리 시스템의 출력으로 슬립으로 발생한 로봇의 센싱 오차를 보정하기 위한 값으로 오차 보정거리이다.

결론적으로 보정된 주행 기록센서의 출력값을 식으로 표현하면 식 (3.5)와 같다.

$$y_{ck} = y_{rk} + f_k \quad (3.5)$$

여기서, y_{ck} 는 k번째 보상된 측정값, y_{rk} 는 k번째 측정값, f_k 는 k번째 퍼지 논리 시스템의 출력값이며, 비퍼지화 과정에서 무게중심법을 이용하므로 α_k 는 식 (3.6)과 같이 표현할 수 있다[4].

$$f_k = \frac{\sum_{i=1}^R b_i^k \mu_i}{\sum_{i=1}^R \mu_i} \quad (3.6)$$

여기서, R 은 규칙의 수를 나타내며, b_i^k 는 소속함수의 중심을 나타내고, μ_i 는 입력값에 대한 소속의 정도를 나타내는 인자이다.

IV. 실험 및 검토

제안한 방식의 유용성을 확인하기 위해 **MATLAB** 프로그램을 이용하여 시뮬레이션한다. 시뮬레이션을 하기위한 로봇 구동용 **DC**모터는 입력전압에 대하여 모터의 속도에 관한 식으로 전개하였으며, 식 (4.1)과 같다.

$$w_m = K_v \left\{ V_{in} - R_m \left(I_0 + \frac{\tau_m}{k_r} \right) \right\} \quad (4.1)$$

여기서, K_v 는 속도 상수, V_{in} 은 인가 전압, R_m 은 종단저항, I_0 는 초기 전류, k_r 은 토크 상수, τ_m 은 토크이며 토크에 관한 식은 식 (4.2)와 같다.

$$\tau_m = k_r (I_m - I_0) \quad (4.2)$$

여기서, I_m 은 인가전류이다. **MATLAB**에 이용한 로봇 구동용 **DC**모터의 사양은 표 1과 같으며, 이는 **Maxonmotor**사의 118730모델이다.

시뮬레이션에 적용한 이동로봇은 **differential** 구동형이며 상태 방정식은 식 (4.3)과 같다

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 \\ \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

여기서, v 는 로봇의 선형 속도, ω 는 로봇의 각속도이고, 식 (4.6)과 같다.

$$v = \frac{r_\omega}{2\eta} (\omega_l + \omega_r) \quad (4.4)$$

$$\omega = \frac{r_\omega}{l\eta} (\omega_l - \omega_r)$$

여기서, r_ω 는 로봇바퀴의 반지름, η 는 기어비, ω_l 은 왼쪽 바퀴의 각속도, ω_r 은 오른쪽 바퀴의 각속도, l 은 로봇 바퀴간의 거리이다. 시뮬레이션에서 로봇바퀴의 반지름은 **0.04m**, 기어비는 **48:1**로 자체 제작한 실제 시스템 파라미터를 사용하였다.

표 1. 시뮬레이션에 사용된 DC모터 사양
Table 1. DC motor specification.

| Motor Data | Unit | Value |
|------------------------|-------|-------|
| Assigned power rating | W | 4.5 |
| Nominal voltage | volt | 12.0 |
| No load speed | rpm | 13900 |
| No load current | mA | 46 |
| Starting current | mA | 3550 |
| Max. continuous torque | mNm | 4.98 |
| Torque constant | mNm/A | 8.11 |

4.1 개선된 퍼텐셜 필드 이동경로계획

이동로봇의 활동영역에 3개의 인위적인 **C-obstacle**이 존재하는 경우에 대하여 일반적인 퍼텐셜 필드 이동경로계획과 제안한 평탄화된 퍼텐셜 필드 이동경로계획에 대하여 비교 시뮬레이션을 한다. 시뮬레이션에서 이용한 퍼텐셜 함수의 파라미터는 사용 목적에 따라 인위적으로 선택가능하며, 장애물을 회피 하면서 목적지까지 이동로봇이 도달할 수 있는 시행착오방식에 따라 실험적으로 구한 값을 사용하였다[5]. 식 (2.9)의 인력에 대한 가중치 ξ 는 15, 식 (2.12)의 척력 퍼텐셜에 대한 인위적인 힘의 가중치 η 는 0.01로 선택하였고, **C-obstacle** 영향의 거리 ρ_0 는 5[cm]로 정하였다. 그림 5는 2차원으로 나타낸 일반적인 퍼텐셜 필드 이동경로계획에 의해 추적된 로봇의 이동경로이며, 그림 6은 목표지점에서 바라본 로봇의 추적 경로를 3차원으로 나타낸 그림이다.

그림 7은 출발지점에서 바라본 로봇의 추적 경로를 3차원으로 나타낸 그림이다.

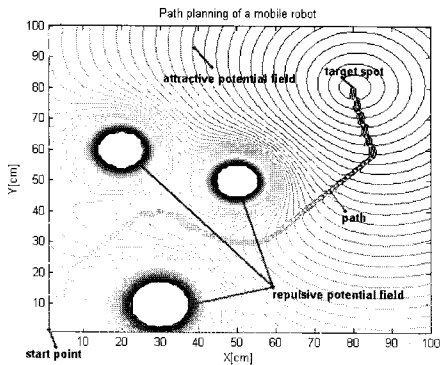


그림 5. 퍼텐셜 필드 추적 경로
Fig. 5 Potential field trajectory.

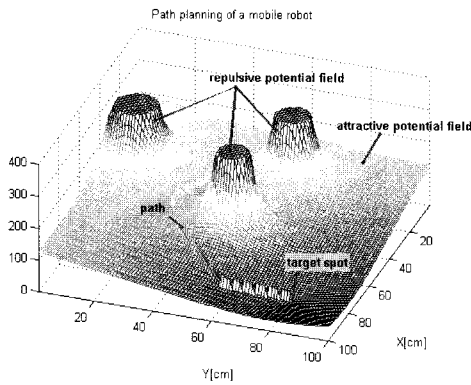


그림 6. 목표지점에서 바라본 3차원 추적 경로
Fig. 6 3-dimensional trajectory for target spot viewpoint.

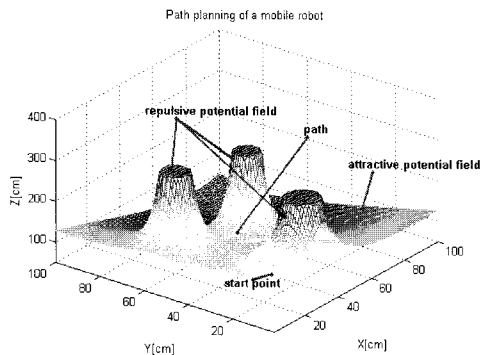


그림 7. 출발지점에서 바라본 3차원 추적 경로
Fig. 7 3-dimensional trajectory for start-point viewpoint.

그림 6과 그림 7에서 확인할 수 있듯이 퍼텐셜장벽의 아랫 부분은 가파른 곡선을 이루고 있으며 이는 로봇이 큰 슬립각으로 이동한 것이다. 그림 8은 제안된 방식에 의해 2차원으로 나타낸 추적된 로봇의 이동경로이다.

그림 5와 그림 8에 대하여 추적 경로를 비교하면 일반적인 퍼텐셜 필드 방식은 퍼텐셜 장벽과 만나는 지점에서 제안한 방식에 비해 회전각이 큼을 알 수 있다. 이는 일반적인 퍼텐셜 필드 방식은 제안한 방식에 비해 로봇의 슬립이 발생할 수 있는 확률이 크다는 것을 의미한다.

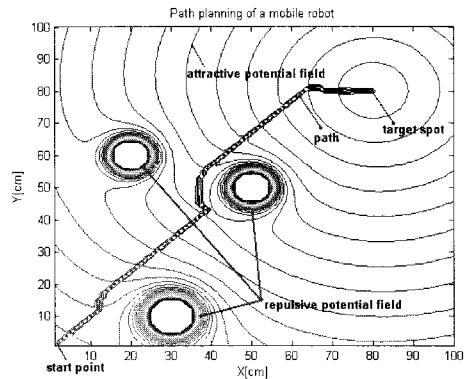


그림 8. 제안된 방식에 의한 추적 경로
Fig. 8 Trajectory by the proposed method.

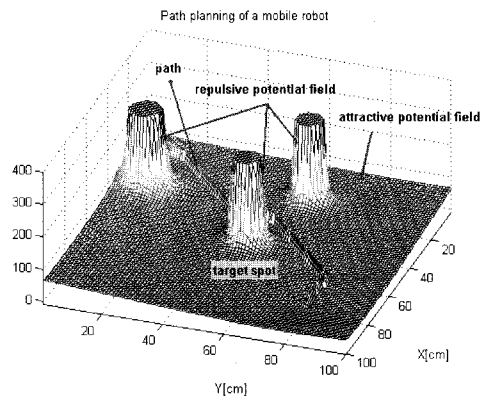


그림 9. 제안한 방식에 대한 목표지점에서 바라본 3차원 추적 경로
Fig. 9 3-dimensional trajectory of the proposed method for target spot viewpoint .

그림 9는 제안한 방식으로 목표지점에서 바라본 로봇의 추적 경로를 3차원으로 나타낸 그림이며, 그림 10은 출발지점에서 바라본 로봇의 추적 경로를 3차원으로 나타낸 그림이다. 3차원 그래프에서 확인할 수 있듯이 제안한 방식은 일반적인 퍼텐셜 필드 방식에 비해 퍼텐셜 장벽의 밑부분이 완만하다. 이는 로봇 이동시 완만한 슬립 각이 생기므로 잠재적으로 슬립이 발생할 수 있는 확률을 낮게 한다.

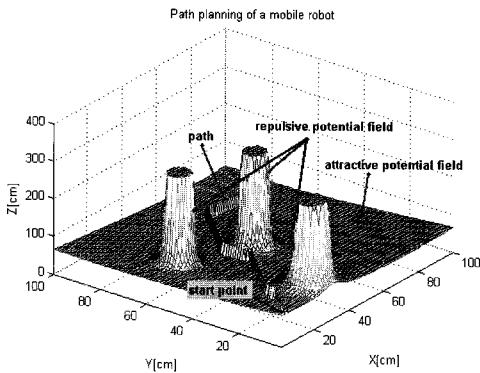


그림 10. 제안한 방식에 대한 출발지점에서 바라본 3차원 추적 경로
Fig. 10 3-dimensional trajectory of the proposed method for start-point viewpoint.

4.2 퍼지 논리 시스템을 이용한 슬립 보정

Pacejka의 Magic식에 대하여 differential 구동형 로봇의 상태 방정식은 식 (4.5)과 같다[8].

$$\begin{bmatrix} \ddot{y} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{C_l + C_r}{m\dot{x}} & -\dot{x} \\ 0 & \frac{a2C_l + b2C_r}{I_x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

여기서, C_l 은 왼쪽 바퀴의 코너링 강성(cornering stiffness), C_r 은 오른쪽 바퀴의 코너링 강성, m 은 로봇의 질량, \dot{x} 는 전방향 속도, a 는 로봇의 무게 중심에서 왼쪽 바퀴와의 거리, b 는 로봇의 무게 중심에서 오른쪽 바퀴와의 거리, I_x 는 관성 모멘트, \dot{y} 는 lateral 속도, \ddot{y} 는 lateral 가속도, $\dot{\theta}$ 는 로봇의 각속도, $\ddot{\theta}$ 는 로봇의 각가속도를 의미한다. 코너링 강성은 슬립각과 lateral force사이

의 비율을 의미하며, 슬립 각(slip angle)은 바퀴가 향하고 있는 방향과 실제 움직이는 방향 사이의 각도차를 의미하며 단위는 도(°)이다. 그림11은 퍼지 논리 시스템의 입력 소속함수에 대한 그림이다.

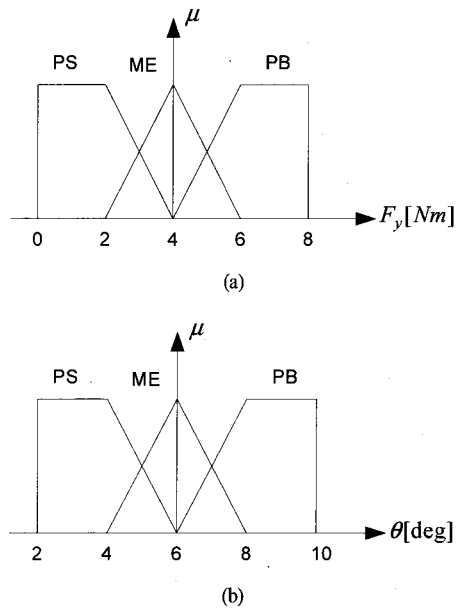


그림 11. 퍼지 논리 시스템의 입력소속함수.
(a) 입력 F_y 에 대한 소속함수, (b) 입력 θ 에 대한 소속함수
Fig. 11 The input membership function of the fuzzy logic system. (a) The membership function for the input F_y , (b) The membership function for the input θ .

그림에서 F_y 는 lateral force, θ 는 슬립각이다. PS는 “positive small”, ME는 “medium”, PB는 “positive big”을 의미하는 언어적인 변수이다. 표 2는 시뮬레이션 및 실험 데이터를 토대로 구축한 퍼지 논리 시스템의 규칙기반을 나타내는 표이다.

표 2. 규칙기반
Table 2. The rule base.

| $F_y \backslash \theta$ | PS | ME | PB |
|-------------------------|----|----|----|
| PS | SM | SM | ME |
| ME | SM | ME | LA |
| PB | ME | LA | LA |

출력에 대한 소속함수는 그림 12와 같다.

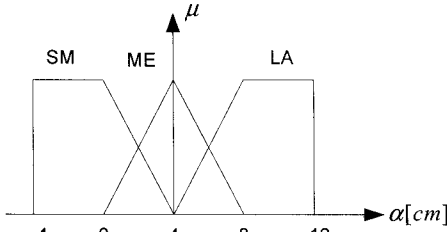


그림 12. 출력소속함수
Fig. 12 The output membership function.

그림 12에서 SM은 “small”, ME는 “medium”, LA는 “large”를 의미하는 언어적인 변수이다. α 는 퍼지 논리 시스템의 출력으로 측정 보정 가중치이며, 비퍼지화는 무게 중심법을 이용하였다. 시뮬레이션에 이용한 코너링 강성을 정규화한 식은 (4.6)과 같다[8].

$$F_y(t) = 1.18(1 - e^{-10\theta}) - \frac{\theta}{2} \quad (4.6)$$

여기서, F_y 는 lateral force를 의미하고, θ 는 슬립각을 의미한다. 그림 13은 정규화된 이론적인 코너링 강성을 나타내는 그림이다.

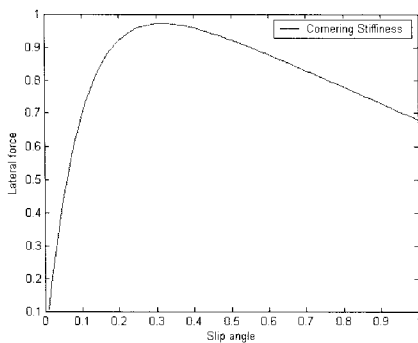


그림 13. 정규화된 코너링 강성
Fig. 13 The normalized cornering stiffness.

그림 13에서 기울기가 양에서 음으로 변화하는 경우에는 바퀴의 슬립이 발생함을 의미한다. 그림 14는 로봇 슬립에 대하여 시뮬레이션한 결과로 로봇의 좌,우

바퀴의 회전 비율은 1:2로 슬립각을 일정하게 유지하고, 시간에 비례하여 전압을 인가하여 바퀴속도를 증가하였다.

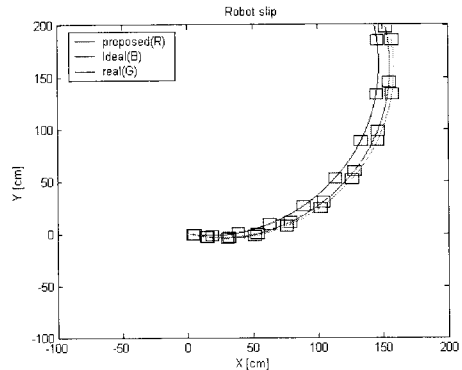


그림 14. 로봇 슬립
Fig. 14 The robot slip.

그림 15는 각 좌표축에 따른 이동의 변화를 나타내는 그림이다.

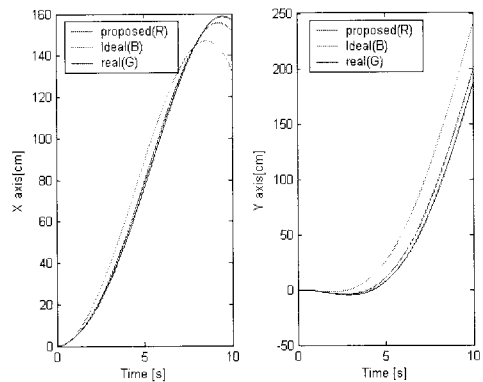


그림 15. 축에 따른 로봇의 이동
Fig. 15 The motion of the robot in regard to axis.

그림에서 확인할 수 있듯이 슬립 발생시 제안한 방식은 상당히 근사하게 슬립을 추정함을 확인할 수 있다. 제안한 방식은 X축에 대하여 평균 약 -1.24[cm], Y축에 대하여 평균 약 2.39[cm]의 위치 오차가 발생했으며, 슬립을 고려하지 않을 시 X축에 대하여 평균 약 -4.26[cm], Y축에 대하여 평균 약 8.91[cm]의 위치 오차가 발생했다.

V. 실험 및 검토

이 장에서는 시뮬레이션에서 검토한 방식들을 제작한 실제 시스템에 적용하고 기존의 방식과 제안한 방식을 비교 검토한다. 표 3은 실험에 이용한 시스템 사양을 나타내는 표이다.

표 3. 시스템 사양
Table 3. System specification.

| 시스템 사양 | |
|-----------|----------------------------|
| 프로세서 | AVR(Atmega 128), 16MHz |
| 모터 | Maxonmotor(118730) |
| 모터엔코드 | Maxonmotor encoder(201937) |
| 엔코드 분해능 | 512(counts per turn) |
| 기어비 | 48:1 |
| 차대 가공오차 | 평균 0.15mm미만 |
| 모터구동IC | L298 |
| 가속센서 | Analog device(ADXL202E) |
| 병렬확장포트 | Intel(82C55A) |
| 정전압 레귤레이터 | On semiconductor(LM2575) |
| 전체 무게 | 2.5 kg |
| 모터 구동방식 | PWM 방식 |

그림 16과 17은 각각 주변장치와 센서부, 자체 제작한 이동로봇을 나타내는 사진이다.

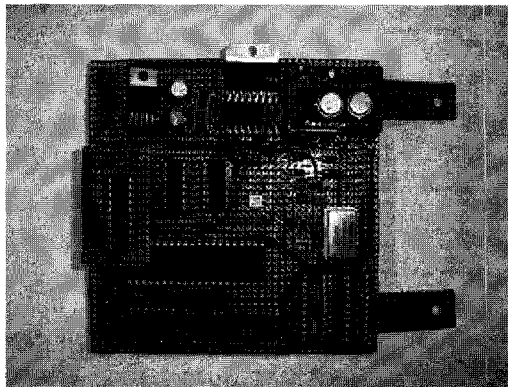


그림 16. 주변장치와 센서
Fig. 16 Peripheral and sensor.

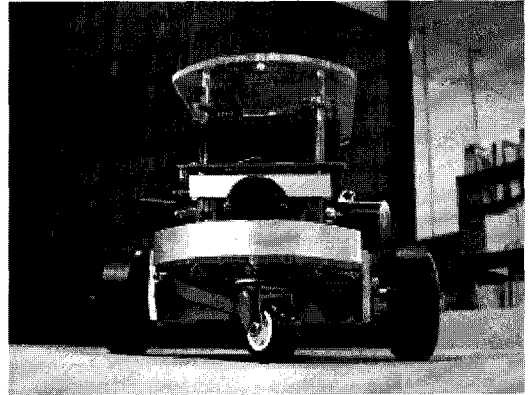


그림 17. 이동로봇
Fig. 17 The mobile robot.

제작한 이동로봇은 이동시 시스템에 의한 위치오차가 적게 발생하도록 하였으며, 바퀴와 모터사이의 기어비를 48:1로 크게 함으로써 모터가 큰 토크를 얻도록 하였다. 장애물 감지를 위한 센서로 초음파 센서와 적외선 센서를 이용함으로써 초음파 센서가 감지할 수 없는 blind 영역을 적외선 센서가 감지하도록 하였다.

피지 논리 시스템은 시뮬레이션과 같은 조건으로 설정하였으며, 로봇은 초기에 일정한 속도로 움직인 후 2초 후 슬립 각을 약 35도로 크게 하여 슬립이 발생하도록 하였다. 그림 18은 슬립 발생 시 실험 결과이고 그림 19는 각 좌표축에 따른 이동의 변화를 나타내는 그림이다.

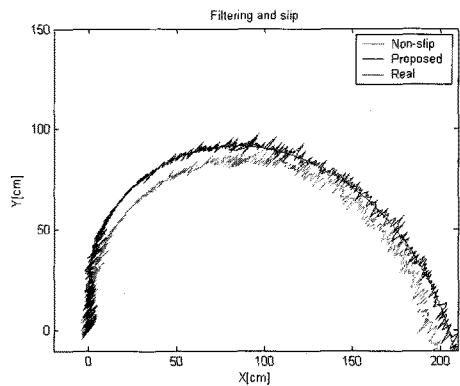


그림 18. 로봇 슬립
Fig. 18 The robot slip.

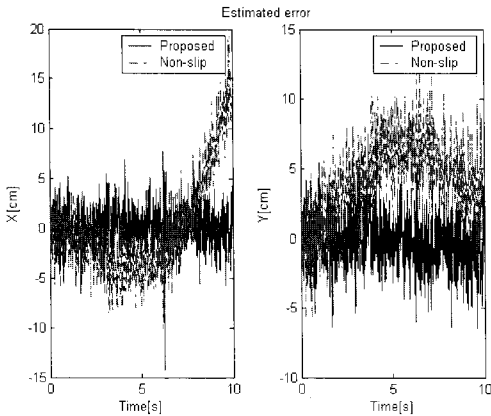


그림 19. 축에 따른 로봇의 이동
Fig. 19 The motion of the robot in regard to axis.

제안한 방식은 X축에 대하여 평균 -1.52[cm], Y축에 대하여 평균 2.73[cm]의 위치 오차가 발생했으며, 슬립을 고려하지 않은 경우 X축에 대하여 평균 -7.23[cm], Y축에 대하여 평균 9.12[cm]의 위치 오차가 발생했다.

VI. 결론

본 논문에서는 바퀴로 구성된 이동로봇의 슬립 감소를 위한 이동경로계획 및 슬립으로 인해 발생하는 기록 센서 오차를 보상하는 방식을 제안하였다. 제안하는 로봇의 이동경로계획은 로봇의 슬립을 고려하여 퍼텐셜 필드방식에서 장애물에 대한 퍼텐셜 장벽을 평탄화 하여 로봇의 슬립을 감소시켰다. 또한 슬립으로 인해 발생하는 기록센서의 오차를 퍼지 논리 시스템을 이용하여 보상하였다. 로봇의 슬립은 로봇이 회전할 때 발생하는 lateral force와 슬립 각에 의해 슬립이 발생하는 것으로 가정하였다.

제안된 방식의 유용성을 확인하기 위하여 자율이동 로봇의 슬립방지를 위한 경로계획과 슬립으로 인해 발생하는 기록센서 오차 보상에 대하여 시뮬레이션 하고, 제작한 자율이동로봇을 이용하여 슬립을 고려한 위치 추정에 대한 실험 결과는 다음과 같다.

- 로봇의 슬립방지를 위한 로봇 이동경로계획에 대하여 제안한 방식은 일반적인 퍼텐셜 필드 방식에 비해 퍼

텐셜 장벽의 밑 부분이 완만하므로, 이는 로봇 이동시 완만한 슬립 각이 생기므로 슬립을 감소시킬 수 있다.

- Pacejka의 Magic 식을 이용하여 differential 구동형 로봇의 슬립을 모델링하였고, 모델링된 시스템 상태방정식을 퍼지 논리 시스템을 이용하여 추정오차에 대한 보상에 관하여 제안한 방식은 위치 추정 평균오차가 시뮬레이션 결과 약 28.1%, 실험 결과 약 25.1% 감소를 확인하였다.

참고문헌

- [1] Jose A. Castellanos and Juan D. Tardos, Mobile robot localization and map building (A Multisensor Fusion Approach), Kluwer academic publishers, 1999.
- [2] Craig Sayers, Remote Control Robotics, Springer, 1999.
- [3] Roland Siegwart and Illah R. Nourbakhsh, Introduction to Autonomous Mobile Robots, The MIT Press, 2004.
- [4] Kevin M. Passino and Stephen Yurkovich, Fuzzy Control, Addison-Wesley, 1997.
- [5] S.S. Ge and Y.J. Cui, "Dynamic Motion Planning for Mobile Robots Using Potential Field Method," Autonomous Robots, Volume 12, Number 3, pages 207-222, July 2002.
- [6] Maarja Kruusmaa and Jan Willemson, "Covering the path space: a casebase analysis for mobile robot path planning," Knowledge-Based Systems, Volume 16, Issues 5-6, pages 235-242, July 2003.
- [7] G. N. Marichal, L. Acosta, L. Moreno, J. A. Méndez, J. J. Rodrigo and M. Sigut, "Obstacle avoidance for a mobile robot: A neuro-fuzzy approach," Fuzzy Sets and Systems, Volume 124, Issue 2, ages 171-179, December 2001.
- [8] IPacejka H.B. and Besseling I., "Magic Formula Tyre Model with Transient Properties," 2nd International Tyre Colloquium on Tyre Models for Vehicle Dynamic Analysis, 1997.

저자소개



엄기환(Ki Hwan Eom)

1972년 동국대학교 전자공학과
(공학사)

1985년 동국대학교 전자공학과
(공학박사)

1989년 ~ 1990년 Toho Univ. Post Doc.

2000년 ~ 2001년 Univ. of Canterbury Visiting Professor

1994년 3월 ~ 현재 동국대학교 전자공학과 교수

※관심분야: 시스템응용, 통신전자제어설비



강성호(Seong Ho Kang)

2000년 진주산업대학교 전자공학과
(공학사)

2000년 동국대학교 전자공학과
(공학석사)

2006년 동국대학교 전자공학과(공학박사)

2008년 현재 (주)마스타 연구소 기술개발부

※관심분야: 지능 시스템, 비전관련 통합시스템



정경권(Kyung Kwon Jung)

1998년 동국대학교 전자공학과
(공학사)

2000년 동국대학교 전자공학과
(공학석사)

2003년 동국대학교 전자공학과(공학박사)

2005년 3월 ~ 2008년 2월 동국대학교 밀리미터파신기
술연구센터 연구원

2008년 3월 ~ 현재 한림대학교 전자공학과 전임강사

※관심분야: 디지털신호처리, 인공지능, 임베디드
시스템, 센서 네트워크