단일곡률궤적과 칼만필터를 이용한 이동로봇의 동적물체 추종

Moving Object Following by a Mobile Robot using a Single Curvature Trajectory and Kalman Filters

임 현 섭, 이 동 혁, 이 장 명*
(Hyun-Seop Lim¹, Dong-Hyuk Lee¹, and Jang-Myung Lee¹)

¹Department of Electrical Engineering, Pusan National University

Abstract: Path planning of mobile robots has a purpose to design an optimal path from an initial position to a target point. Minimum driving time, minimum driving distance and minimum driving error might be considered in choosing the optimal path and are correlated to each other. In this paper, an efficient driving trajectory is planned in a real situation where a mobile robot follows a moving object. Position and distance of the moving object are obtained using a web camera, and the rotation angular and linear velocities are estimated using Kalman filters to predict the trajectory of the moving object. Finally, the mobile robot follows the moving object using a single curvature trajectory by estimating the trajectory of the moving object. Using the estimation by Kalman filters and the single curvature in the trajectory planning, the total tracking distance and time saved amounts to about 7%. The effectiveness of the proposed algorithm has been verified through real tracking experiments.

Keywords: Kalman filter, robot trajectory, single curvature

I. 서론

과거의 로봇은 주로 산업 현장의 생산 자동화 목적으로 쓰이는 머니플레이터의 형태로써 작업공간이 국한되었지만 최근에는 주행을 하면서 다양한 기능을 하는 지능형 이동로봇의 연구 및 개발이 이루어지고 있다. 지능형 이동로봇은 산업계의 자동화, 무인화 추세와 더불어 산업현장의 무인창고 시스템이나 물자 운반용, 그리고 서비스 로봇으로서 청소용이나 안내용으로 각 분야에서 그 활용성과 필요성이 높아지고 있다. 특히 서비스 로봇을 중심으로 지능형 이동로봇은 우리의 일상 생활에 빠르게 자리매김되고 있다[1,2].

이동로봇은 주행을 하며 주어진 임무를 수행하기 때문에 로봇의 위치추정, 속도 및 가속도, 장애물 인식, 이동경로설정 등 여러 가지 사항이 고려될 수 있다. 따라서 이동로봇에 대한 연구는 주행에 관련된 경로계획, 위치추정, 주행제어로 크게 구분된다[3]. 이 중에서도 이동로봇의 주행 경로계획은 초기위치에서 목표지점까지 최적의 경로를 설계하는데 목적이 있다. 일반적으로 최적의 경로를 설정할 때는 최소주행시간, 최소주행거리, 최소주행오차를 고려할 수 있다. 이 3가지는 서로 상관관계를 가지는데 주행시간 및 주행거리를 줄이기 위해 속도를 높이면 주행오차가 증가하고 오차보정이 필요하다. 통상 기존의 이동로봇에 대한 연구는 이동로봇에 장착된 IMU 센서를 이용하여 주행 중의 오차를 보정하는 데드레커닝(Dead-Reckoning)을 쓴다. 그러나 데드레커닝은 이동

로봇의 슬립현상과 구조적 오차로 인해 시간이 지남에 따라 오차가 누적된다는 단점이 있다. 이를 보정하기 위해 필터링 알고리즘을 사용하더라도 외부 환경 영향에 의한 IMU오차로 인해 그 성능을 보장하기 어렵다[4,5]. 그래서 이 단점을 보완하고 주행오차나 주행거리 및 주행시간을 줄일 수 있는 주행궤적에 대한 연구가 필요하다.

본 논문에서는 이동로봇이 실시간으로 이동물체를 추종하는데 있어서 앞에서 언급된 세 가지 요소에 대해 효율적인 주행궤적에 대해 다루었다. 먼저 이동로봇에 장착된 단일카메라로부터 직교 평면 상의 이동물체 위치와 이동물체까지의 거리를 구하고 상태추정기인 칼만 필터(Kalman filter)를 이용해 이동물체의 회전각속도와 선형속도를 추정한다[6,7]. 추정된 이동물체의 선형속도와 회전각속도로부터 이동물체의 궤적을 추정하여 단일곡률궤적을 이용한 주행으로서 목표물을 추종하는 것을 제안한다[3]. 실험 환경은 S자 코스를 선택하였다. 실험을 통해 카메라를 이용해 이동물체를 검출하고 단일곡률궤적을 이용한 주행을 실시한 것과 이동물체의 궤적 추정을 위해 칼만필터를 적용시키고 단일곡률궤적을 이용한 주행실험을 비교하였다.

본 논문은 총 VI 장으로 이루어져 있으며 II 장에서는 이동로봇의 구성과 이동로봇의 모델링에 대해서 알아본다. III 장에서는 이동물체에 대한 위치추정과 칼만 필터를 통한 상태추정에 대해 설명하고 IV 장은 주행기법인 단일곡률궤적에 대해서 다룬다. V 장은 제안한 방법의 우수함을 보이고 마지막 결론으로서 마무리된다.

II. 이동로봇의 설계

1. 이동로봇의 구성

본 절에서는 이동로봇의 구성과 이동로봇이 이동물체를 추종하기 위해 필요한 이동로봇 모델링에 대해서 다룬다. 먼

* 책임저자(Corresponding Author)

Manuscript received January 25, 2013 / revised April 18, 2013 / accepted March 7, 2013

임현섭, 이동혁, 이장명: 부산대학교 전자전기공학부

(goodguy12@pusan.ac.kr/ldh0917@pusan.ac.kr/jmlee@pusan.ac.kr)

※ 본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원 융복합형 로봇전문인력양성 “특수환경 Navigation/Localization 로봇기술연구센터” 지원사업의 연구결과로 수행되었음(NIPA-2012-H1502-12-1002).

저 하드웨어 구성과 주요 사양은 표 1과 같으며 하드웨어는 크게 MCU, IMU 센서, 모터드라이브, 웹 카메라, PC로 구성된다. 시스템 구성은 그림 1과 같으며 카메라의 영상데이터는 USB2.0 통신을 통해 실시간으로 PC로 전송되고 PC는 이동물체 검출 및 이동물체까지의 거리 및 각도를 계산한다. 그리고 이동물체를 추종하며 주행하도록 구동명령을 UART 통신을 이용하여 마이크로 컨트롤러로 전송한다. 마이크로 컨트롤러는 하달 받은 구동명령에 따라 이동로봇의 모터를 제어한다. 또한 모터의 인코더에서 위치 값(position data)과 IMU 센서의 yaw값은 실험 후 주행레직 도식을 위해 UART 통신을 통해 PC로 전송된다.

구성된 이동로봇의 모습은 그림 2와 같다. 이동로봇의 크기는 350×320×450mm의 크기로서 마이크로 컨트롤러, 모터

표 1. 하드웨어 구성요소와 주요사양.

Table 1. The configuration parts of hardware.

하드웨어 구성요소(부품명)	주요사양
MCU (myCortex-LM8962)	코어: Cortex-M3 50MHz로 동작
IMU (Ebimu-9DOF)	Pitch/Roll/Yaw 각도 출력
Motor driver (AM-DC2-2D)	동작전압5V, 2개 모터 제어
Web camera (Logitech c920)	화소: 1920*1080 속도: 30fps
PC (NT-Q45A/W220)	CPU: 2.0GHz, 메모리: 2GB

그림 1. 시스템 구성.

Fig. 1. System configuration.

그림 2. 실제 이동로봇.

Fig. 2. The real mobile robot.

드라이브 등 구동부가 장착되어 있는 이동로봇 본체의 상단에 노트북을 설치하였다. IMU 센서는 테스트 결과 모터가 구동 중일 때 자기장의 영향을 받으므로 이동로봇 본체부분과 약 260mm의 간격을 두고 설치하였다.

2. 이동로봇의 모델링

이동로봇이 실시간으로 이동물체를 추종하기 위해서는 XY좌표 평면 상의 이동물체의 위치를 알아야 한다. 이는 카메라의 영상 데이터로부터 이동물체까지의 거리와 방향각으로부터 구할 수 있으며 그 이후 이동로봇이 실시간으로 동적 물체를 추종하기 위해서는 이동로봇의 제어변수와 이동로봇의 위치 및 속도와의 관계를 알아보는 기구학 해석이 필요하다. 기구학 해석을 바탕으로 차륜구동(differential driving) 형태를 가지는 이동로봇의 주행특성을 살펴본다. 그림 3은 이동로봇이 위치한 공간에서 나타나는 좌표이고 X1-Y1좌표계는 이동로봇 외부에 기준점을 둔 절대 좌표이다. 그리고 X2-Y2좌표계는 이동로봇의 중심점을 원점으로 하고 이동로봇이 향하는 방향을 X축으로 기반하는 좌표계이다. 이동로봇의 구조를 분석하기 위해 다음 식 (1)과 같이 자세 P를 정의한다.

$$p = (x \ y \ \theta) \quad (1)$$

이동로봇의 자세는 절대 위치(X, Y)와 이동로봇이 향한 방향각(θ)으로 이루어지며, 이 세 가지 값은 이동로봇을 위치를 결정짓는 요소들이다. 본 연구에서 사용된 이동로봇의 구조는 4륜 구동이나 각각 양쪽의 앞과 뒷바퀴는 같은 속도로 움직임으로 2자유도에 해당하며 이동로봇의 기구학적 모델은 그림 4와 같이 표현될 수 있다.

왼쪽 바퀴와 오른쪽 바퀴의 각속도를 ω_L , ω_R 이라고 하면 Non-slipping 조건에 의해 왼쪽 바퀴와 오른쪽 바퀴의 지면과의 접촉점의 속도는 다음 식 (2)와 같다.

그림 3. XY공간상의 이동로봇위치.

Fig. 3. The position of mobile robot in XY axis.

그림 4. 이동로봇의 기구학적 모델.

Fig. 4. The kinematic modeling of mobile robot.

$$V_R = r\omega_R, \quad V_L = r\omega_L \quad (2)$$

여기서 r 은 바퀴의 반지름, 이동로봇 중심의 선속도는 v 이고 V_R, V_L 은 각각 오른쪽, 왼쪽바퀴의 선속도이다. 반시계 방향으로의 로봇의 각속도를 ω 라고 하면 v, ω 와 ω_R, ω_L 은 다음 식 (3)과 같은 관계를 가진다[8,9].

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & 0 \\ \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v \\ \omega \end{pmatrix} \quad (3)$$

$(x \ y \ \theta)^T$ 와 $(v \ \omega)^T$ 은 다음 식 (4)과 같은 기구학 식에 의해 연관 관계를 가지게 된다. 이러한 기구학 모델을 바탕으로 이동로봇의 양쪽 바퀴의 각각 속도 값을 조절하여 이동로봇이 동적 물체를 추종할 수 있도록 제어할 수 있다.

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{V_R - V_L}{L} = r \frac{\omega_R - \omega_L}{L} \\ v &= \frac{V_R + V_L}{2} = r \frac{\omega_R + \omega_L}{2} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, L 은 양 바퀴 사이의 거리이다.

III. 이동물체의 상태추정

1. 이동물체에 대한 위치추정

직교좌표 공간상에서 운동하는 이동물체에 대하여 각 방향의 속도 및 가속도를 추정한 뒤 이동물체의 예측되는 다음 위치 (P_x, P_y, P_z) 는 식 (5)-(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{P}_{x+\delta t} = \hat{P}_x + \hat{V}_x \delta t + \frac{1}{2} \hat{A}_x \delta t^2 \quad (5)$$

$$\hat{P}_{y+\delta t} = \hat{P}_y + \hat{V}_y \delta t + \frac{1}{2} \hat{A}_y \delta t^2 \quad (6)$$

$$\hat{P}_{z+\delta t} = \hat{P}_z + \hat{V}_z \delta t + \frac{1}{2} \hat{A}_z \delta t^2 \quad (7)$$

여기서 δt 는 샘플링 시간이며 $(P_x, P_y)(V_x, V_y)(A_x, A_y)$ 는 이동물체의 위치, 속도 및 가속도의 추정치를 나타낸다. xy- 평면상에서 이동하는 물체의 움직임은 진행속도 성분 v_k 와 각속도 성분 w_k 로 분해하면, 식 (8)-(10)의 이산형 시변 방정식으로 나타낼 수 있다. 이동물체의 운동을 일으키는 v_k 와 w_k 의 변화는 식 (11)-(12)과 같이 랜덤한 운동으로 정의한다.

$$\begin{aligned} \delta x_{k+\delta t} &= v_k \delta t \cos\left(\theta_k + \frac{1}{2} \omega_k \delta t\right) \\ &\approx v_k \cos(\theta_k) \delta t - \frac{1}{2} \omega_k v_k \sin(\theta_k) \delta t^2 \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \delta y_{k+\delta t, k} &= v_k \delta t \sin\left(\theta_k + \frac{1}{2} \omega_k \delta t\right) \\ &\approx v_k \sin(\theta_k) \delta t + \frac{1}{2} \omega_k v_k \cos(\theta_k) \delta t^2 \end{aligned} \quad (9)$$

$$\delta \theta_{k+\delta t, k} = \omega_k \delta t \quad (10)$$

$$\delta v_{k+\delta t, k} = \zeta_v \quad (11)$$

$$\delta \omega_{k+\delta t, k} = \zeta_\omega \quad (12)$$

여기서 ζ_v, ζ_ω 는 가우시안 랜덤변수이다[6,7].

2. 칼만 필터에 의한 이동물체의 상태추정

이동물체의 상태추정을 칼만 필터에 적용하기 위해서는 식 (13), (14)의 이산시간 상태전이 모델이 필요하다. 여기에서는 상태를 강인하게 추정하는 관측기로 칼만 필터를 사용한다. 입력정보, 즉 영상정보는 처리과정 가운데 불확실성 잡음을 포함하고 있으며 상태전이 자체도 불규칙한 성분이 존재하므로 이에 대해 강인하게 상태를 추정하는 관측기로는 칼만 필터가 적합하다. 칼만 필터는 추정 값과 측정값의 오차에 필터이득을 곱하여 상태전이 모델에 수정함으로써 추정 오차를 최소화하도록 한다. 이동물체의 상태추정 문제에서 칼만 필터의 측정벡터는 이미지에서 구한 이동물체의 x, y 위치, 방향, 진행속도, 회전각속도를 추정한다.

$$x_k = \Phi_{k,k-1} x_{k-1} + \omega_{k-1} \quad (13)$$

$$z_k = H_k x_k + v_k \quad (14)$$

필터이득을 구하기 위해 추정오차의 공분산 행렬이 필요하며 이는 식 (15)로 이전과정의 공분산행렬의 상태전이에 시스템잡음의 공분산 행렬 Q_{k-1} 이 부가된 형태로 추정된다.

$$P'_k = \Phi_{k,k-1} P_{k-1} \Phi_{k,k-1}^T + Q_{k-1} \quad (15)$$

추정오차의 공분산 행렬 P'_k 와 관측행렬 H_k , 측정잡음의 공분산 행렬 R_k 로 추정오차를 최소로 하는 최적의 필터이득 K_k 을 구하며 이는 식 (16)의 형태이다.

$$K_k = P'_k H_k^T [H_k P'_k H_k^T + R_k]^{-1} \quad (16)$$

다음은 상태를 추정하는 과정으로 식 (17)과 같이 추정벡터의 상태전이 모델에 이전단계의 추정벡터와 측정벡터 Z_k 간의 오차에 필터이득을 곱한 이노베이션항이 부가되어 최적의 상태를 추정한다.

$$\hat{x}_k = \Phi_{k,k-1} \hat{x}_{k-1} + K_k [z_k - H_k \Phi_{k,k-1} \hat{x}_{k-1}] \quad (17)$$

최종적으로 식 (18)의 추정오차의 공분산 행렬을 수정하는 과정을 거치고 다시 (15)의 과정으로 순환한다[6,7].

$$P_k = P'_k - K_k H_k P'_k \quad (18)$$

3. 이동물체 궤적 예측

이동물체의 상태전이 모델에서 초기상태와 입력이 주어지면 물체의 상태를 예측할 수 있다. 칼만 필터를 사용한 상태 추정기로부터 이동물체의 속도와 회전 각속도를 추정하고 근사함수로 모델링한 후 식 (19)-(20)와 같이 다음 입력을 예측한다.

$$v_{k+n} = \hat{v}_k + \hat{a}_k nT \quad (19)$$

$$\omega_{k+n} = \hat{\omega}_k + \hat{a}_{\omega k} nT \quad (20)$$

예측된 입력과 상태전이 모델인 차분방정식으로 식 (21)과 같이 이동물체의 이후의 궤적을 예측할 수 있다.

$$\hat{x}_{k+m} = x_k \sum_{h=0}^m v(h) \cos[\theta(h)]T, \quad \hat{y}_{k+m} = y_k + \sum_{h=0}^m v(h) \sin[\theta(h)]T$$

$$v(h) = \hat{v}_k + \hat{a}_{ik} hT, \quad \theta(h) = \hat{\theta}_k + \omega_k hT + \frac{1}{2} \hat{a}_{\omega k} hT^2 \quad (21)$$

IV. 단일곡률계적

먼저 곡률이란 그림 5와 같이 일정속력으로 곡선 위의 한 점(P)에서 다른 점(Q)로 곡선을 따라 이동할 때, 얼마나 빠른 속도로 곡선을 회전하는 것의 측도이다. 곡률을 k 로 표시했을 때, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$k = \lim_{\Delta s \rightarrow 0} \left| \frac{\Delta \theta}{\Delta s} \right| = \left| \frac{d\theta}{ds} \right| \quad (22)$$

곡률반경은 일정한 곡률을 가진 원의 반경으로 회전 반경이라고도 하며 곡률반경 ρ 는 식 (23)과 같이 정의된다.

$$\rho = 1/k \quad (23)$$

여기서 k 는 $k > 0$ 이고 식 (22)에서 곡선을 따라 총 이동한 거리 Δs 는 곡선의 호의 길이이므로 곡선의 반지름에 비례하고 곡률 k 는 Δs 에 반비례하므로 전체적으로 곡률 k 는 곡선의 반지름에 반비례하다. $k=0$ 이면 곡률반경은 무한이므로 직선이 되고 무한반경을 가진 원으로 가정될 수 있다. 이동로봇이 곡률계적을 따라서 주행할 때 회전반경은 주행 오차에 크게 영향을 미친다. 이동로봇은 직선주행 ($k=0$)보다는 곡선주행 ($k \neq 0$)시 많은 오차가 발생되며 회전 반경이 작고 주행속도가 빠를수록 주행오차가 크다.

그림 6은 단일곡률계적을 나타낸다. 이동로봇이 단일곡률계적을 이용하여 이동할 때 회전반경이 작을수록 주행속도가 빠를수록 오차가 커진다[3].

V. 실험 및 결과

1. 실험환경 구성

그림 5. 곡선의 곡률.

Fig. 5. The curvature of a curve.

그림 6. 단일곡률계적.

Fig. 6. The single curvature trajectory.

실험환경은 그림 7과 같으며 3 m×6 m의 크기인 S자 형태의 코스로서 카메라의 원활한 이동물체 인식을 위해서 빛이 일정한 실험실 지하주차장에서 실험하였다. 이동로봇이 이동물체 즉, 인식표식을 추종하며 주행을 하는데 이는 카메라로 입력되는 실내 환경의 기하학적인 외란으로부터 강인한 추종을 위해서다. 이동물체의 속도는 약 0.3 m/Sec로 제한하였다. 인식표식의 모습은 그림 8과 같으며 반지름이 70 mm인 원 테두리 안에 가로와 세로가 각각 50 mm 크기의 H 마크가 들어가 있는 형태이다. 이동물체가 S자 코스의 선을 따라서 이동을 하면 이동로봇이 인식표식을 추종하면서 주행하는 형태로 실험은 진행되었다[10,11].

2. 실험 및 결과

실험은 다음과 같이 2가지로 각각 5번씩 진행되었다.

1. 단일곡률계적만을 이용한 주행 실험(실험 A)
2. 인식표식의 중심좌표 위치의 상태추정을 위한 칼만 필터를 적용한 단일곡률계적 주행실험 (실험 B)

그림 9는 실제 실험 중 영상프레임상의 인식표식을 검출하는 그림으로서 실험자가 실제로 인식표식을 들고 S자 코스를 따라서 이동하였다. 실험자의 움직임에 기인한 오차를 줄이기 위해 인식표식 상단 중앙에 표시를 하여 실험 코스의 라인과 최대한 겹치도록 실험을 진행하였다. 그림 10은 다섯 번 실험 중 두 번째 실험결과로서 실험 코스인 S의 기준선은

그림 7. 실제 실험환경.

Fig. 7. The real experimental environment.

그림 8. 인식표식.

Fig. 8. The identification mark.

그림 9. 인식표식을 검출하는 영상 프레임.

Fig. 9. The image frame detecting the identification mark.

표 2. 총 주행거리 (m).

Table 2. The total driving distance (m).

	실험1	실험2	실험3	실험4	실험5	평균
실험A	9.86	9.57	9.45	9.94	9.76	9.72
실험B	8.98	9.06	9.24	8.96	9.21	9.09

그림 10. 두 번째 실험의 이동로봇의 궤적.

Fig. 10. Trajectory of mobile robot of second experiment.

검은색, 단일곡률계측으로만 주행한 실험결과(실험 A)는 파란색으로, 칼만 필터를 적용한 단일곡률계측 주행실험(실험 B)은 빨간색으로 도식하였다.

첫 번째 곡선구간에서는 실험 A의 오차가 144 mm 발생하였고 칼만 필터로 이동물체의 궤적을 예측한 단일곡률계측 주행에서는 101 mm로 오차가 줄어들음을 알 수 있다. 좌표 (-0.5, -3)에서 (0.5, -3)까지의 직선구간에서는 k 가 거의 0에 가깝기 때문에 곡률주행의 특성상 두 번째 곡선 시작점까지 최대 주행속도, 최단거리(직선)로 주행하였다. 오차로서는 실험 B가 191 mm이며 실험 A가 212 mm로서 두 실험간의 차이가 거의 없었다. 결국 두 실험 간의 차이는 곡선 코스에서 발생하였다. 단일 곡률 궤적만으로 주행한 실험 A는 곡선 구간에서 슬립현상으로 인해 기준점 외각으로 벗어나는 반면에 이동물체의 궤적을 예측한 실험 B는 오히려 기준점 안

표 3. 주행거리 오차율 (%).

Table 3. The error rate of driving distance (%).

	실험1	실험2	실험3	실험4	실험5	평균
실험A	-4.67	-1.59	-0.32	-5.52	-3.61	-3.15
실험B	4.67	3.82	1.91	4.88	2.23	3.5

쪽으로 추종하였다. 실험코스의 기준점 총 주행거리는 9.42 m인데 총 실험 A, B의 총 5번의 주행거리는 표 2와 같다. 실험 A의 총 주행거리의 평균은 9.72 m로 실험 B의 9.09 m보다 0.63 m를 더 주행하므로 제안한 방법이 더 우수함을 볼 수 있다.

실험 A, B의 실험 코스의 레퍼런스 거리에 대한 오차율은 표 3과 같다. A, B 각각의 평균오차는 -3.15 %, 3.5 %으로 이전 결과와 동일하게 제안한 방법이 더 우수함을 볼 수 있다.

VI. 결론

일반적으로 이동로봇이 초기지점에서 목표지점까지 주행할 때 이동로봇 자체오차, 위치추정오차, 슬립현상 등이 발생하여 주행오차, 주행시간 및 거리가 늘어난다. 이 문제를 해결하기 위해 기존의 연구된 방법은 IMU 센서를 이용한 데드 레커닝 기법으로 그 오차를 보정해왔다. 하지만 이 방법은 외부 환경 영향에 의한 IMU 오차로 인해 그 성능을 보장하기 어려운 단점이 있다. 본 논문에서는 이동로봇이 이동물체를 추종하는 동안 목표점까지의 주행시간, 주행오차, 주행거리를 줄이는데 초점을 두고 연구하였다. 이동물체를 추종하기 위해서 주행기법으로는 단일곡률계측을 적용하였다. 그리고 칼만 필터로 추정된 이동물체의 선형속도와 회전각속도로부터 이동물체의 궤적을 추정하여 주행할 때 주행시간 및 거리를 줄이고자 하였다. 직선보다는 곡선에서 슬립현상으로 인한 오차가 더욱 발생하기에 곡선형태의 코스를 단일곡률계측을 이용한 주행실험을 하였고 칼만 필터의 예측을 통해 주행거리 및 주행시간이 약 7% 차이가 있음을 입증하였다.

REFERENCES

- [1] T.-S. Jin and J.-M. Lee, "Object position estimation and optimal moving planning of mobile manipulator based on active camera," *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, vol. 42, no. 5, pp. 1-12, Sep. 2005.
- [2] N.-Y. Ko, D.-J. Seo, and Y.-S. Moon, "A method for real time target following of a mobile robot using heading and distance information," *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, vol. 18, no. 5, pp. 624-631, Oct. 2008.
- [3] B.-S. Choi and J.-M. Lee, "A capturing algorithm of moving object using single curvature trajectory," *Journal of Control, Automation, and Systems Engineering (in Korean)*, vol. 12, no. 2, pp. 145-153, Feb. 2006.
- [4] J.-P. Ko, J.-M. Yun, and J.-M. Lee, "Precision calibration of gyroscopes for improving dead-reckoning accuracy in mobile robots," *Journal of Control, Automation, and Systems Engineering (in Korean)*, vol. 11, no. 5, pp. 463-470, May 2005.
- [5] J.-Y. Choi and S.-G. Kim, "Study on the localization improvement of the dead reckoning using the INS calibrated by the fusion sensor network information," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 18, no. 8, pp.

744-749, Aug. 2012.

- [6] C.-H. Hwang, S.-H. Lee, B.-T. Cho, and J.-M. Lee, "Optimal trajectory planning for capturing a mobile object," *Journal of Control, Automation, and Systems Engineering (in Korean)*, vol. 10, no. 8, pp. 696-702, Aug. 2004.
- [7] J.-W. Park, J.-H. Park, K.-S. Yun, and J.-M. Lee, "Tracking and capturing a moving object using active camera mounted on a mobile robot," *Journal of Control, Automation, and Systems Engineering (in Korean)*, vol. 7, no. 9, pp. 741-748, Sep. 2001.
- [8] H.-J. Yi and Y.-K. Choi, "A navigation algorithm for mobile robots in unknown environments," *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, vol. 16, no. 3, pp. 275-284, Jun. 2006.
- [9] Y.-S. Oh, C.-H. Lee, J.-H. Park, J.-H. Kim, and W.-Y. Huh, "Formation control of mobile robot for moving object tracking," *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, vol. 60, no. 4, pp. 856-861, Apr. 2011.
- [10] K.-J. Yoon, G.-J. Jeong, S.-H. Kim, and I.-S. Kweon, "Color landmark based self-localization for indoor mobile robots," *Journal of Control, Automation, and Systems Engineering (in Korean)*, vol. 7, no. 9, pp. 749-758, Sep. 2001.
- [11] T.-S. Jin and J.-M. Lee, "Control of mobile robot navigation using vision sensor data fusion by nonlinear transformation," *Journal of Control, Automation, and Systems Engineering (in Korean)*, vol. 11, no. 4, pp. 304-313, Apr. 2005.

임 현 섭

2011년 동서대학교 전자공학과 졸업. 2011년~현재 부산대학교 전자전기공학과 대학원 석사과정 재학 중. 관심분야는 마이크로 컨트롤러 응용, 이동로봇의 자율주행.

이 동 혁

2011년 경남과학기술대학교 메카트로닉스공학부 졸업. 2013년 부산대학교 공학석사. 2013년~현재 부산대학교 박사과정 재학중. 관심분야는 지능로봇 제어, 센서 융합, 마이크로프로세서 응용.

이 장 명

1980년 서울대학교 전자공학과 졸업. 1982년 동 대학원 석사. 1990년 USC 공학박사. 1992년~현재 부산대학교 전자전기공학부 교수. 관심분야는 특수 환경 Localization 및 Navigation, 마이크로프로세서 응용, 지능로봇 시스템 제어.