

이동 로봇의 최적 위치 측정에 관한 연구

盧瑩植* · 朴京燮**
電氣工學科 · 制御計測科

<요 약>

PSD(Position Sensitive Detector) 센서는 입사된 광의 위치를 매우 정밀하게 실시간으로 측정할 수 있는 장점을 지니고 있다. 본 논문에서는 알려진 위치에 있는 외부 광을 이동 로봇에 탑재된 2차원 PSD로 검출하여 주행중에 있는 로봇의 위치를 보정하는 데 사용하였다. 위치 보정 알고리즘을 구하기 위하여 먼저 실제의 이동 로봇의 위치와 바퀴의 회전량 측정으로부터 계산된 위치의 오차 원인을 분석하고 이를 모델링 하여 계산된 위치 오차의 확률적 진행 과정을 구하였다. 다음으로 외부광의 위치와 PSD 센서의 검출 신호의 관계식을 구하고 확장된 칼만 필터를 이용하여 최적 위치 보정 알고리즘을 유도하였다.

제안된 방법의 특성과 유용성을 확인하기 위하여 이동 로봇 주행에 대한 시뮬레이션을 수행 하였다. 여기서 샘플링 시간과 광원의 위치를 결정하는 데 필요한 조건들을 제시하였다.

A Study of Optimal Position Estimation for Mobile Robots

Ro, Young Shick* · Park, Kyung Sup**
Dept. of Electrical Engineering* · Dept. of Control & Instrumentation Engineering**

<Abstract>

The Position Sensitive Detector(PSD) is a useful sensor that can be used to measure the position of an incident light precisely and in real-time. In this paper, light sources, fixed at predefined positions, are used as landmarks and the 2-D PSD signals are used to compensate the position estimation of a running mobile robot. To induce the position compensation algorithm, first, we inspect the error factor, make

the error model, and evaluate the error covariance matrix between the real position and the estimated position in dead reckoning system. An Iterative Extended Kalman Filter is applied to the light source and dead reckoning data to estimate optimal values of position and heading, given a model for the external light position and it's PSD signals.

Through the simulation of navigating a robot the effectiveness of the proposed method is confirmed. Also we propose necessary conditions to determine the sampling time and light source positions.

1. 서 론

이동 로봇의 목적지 및 주행 경로는 공간 좌표로 주어지므로 현재의 이동 로봇의 공간상의 위치를 정확하게 측정하는 것은 매우 중요하다. 특히 주행중에 있는 이동 로봇의 위치 측정은 실시간으로 처리되어야 한다. 위치 측정에 있어 기본적으로 채택되고 있는 방법으로는 바퀴의 회전량을 휠 엔코더로 측정하여 이동 로봇의 위치를 계산하는 방법(Dead-Reckoning System)이 있다. 이 방법은 초기 위치오차가 거의 없고 주행량이 적은 경우에는 유용하나 주행량이 증가하면 바퀴의 미끄러짐 등의 원인으로 오차가 발생하고 이 오차가 누적되어 사전에 계획된 경로를 따라가기 어려워진다. 따라서 로봇의 공간상의 위치를 직접 측정할 수 있는 외계 인식 센서가 필요하고 이에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다.

외계 인식 센서에 의한 이동 로봇의 위치 측정은 주위의 자연환경 중에 알려진 위치에 있는 특정 물체에 대한 검출을 이용하는 방법과 인위적인 표식의 검출을 이용하는 방법으로 크게 나뉜다. 자연물을 이용하는 실질적인 방법으로 거리 감지 센서를 이용하여 통로의 벽, 모퉁이 등을 검출하여 위치를 보정하는 방법들이 제시

되었고[1-4], 거리감지 센서에 의해 측정된 2 차원 맵의 매칭을 이용한 방법들이 개발되었다[5]. 그러나 이러한 방법들은 주위 물체가 비교적 단순한 형태(직선 성분으로 이루어진 형태)인 경우에 가능하고 주위의 상황이 변화하거나 검출할 적절한 물체가 없는 경우(예를 들어 사람이 많이 있는 넓은 로비의 경우)에는 적용이 불가능하다. 이러한 문제는 인위적인 표식을 주행 경로 주위에 설치하고 이를 센서로 검출하는 방식으로 해결할 수 있다. 현재 실용화된 방법중의 하나는 레이저 스캐너에 의해 주위에 설치된 반사물체를 검출하는 방식[6]이 있으나 이는 주행평면상의 경로 주위에 인위적인 표식을 설치해야 하므로 적용에 한계가 있다. 이러한 문제는 비전 센서를 이용한 방법[7-10]으로 어느정도 해결할 수 있으나 비전 센서는 주위 조명의 영향을 많이 받고 실시간 처리에 어려움이 있으며 정밀성이 떨어지므로 실용적이지 못하다. 한편 최근에 주목받고 있는 PSD(Position Sensitive Detector)는 특정 파장의 입사된 광의 위치를 아날로그 방식으로 매우 정밀하게 검출할 수 있는 소자로 이를 이동 로봇의 위치보정으로 사용하는 경우 표식이 광원이므로 에너지가 필요한 단점은 있으나 주위조명에 거의 영향을 받지않고 실시간으로 정보를 제공하며 특히 설치의 제

제한이 거의 없는(천정, 벽, 등 어디든 가능하고 높이도 수 m에서 수십 m까지 자유롭게 설치 가능함) 장점이 있다.

따라서 본 연구에서는 이동 로봇의 위치 보정용 센서로 PSD를 채택 하였고 이를 이용하여 주행중에 있는 이동 로봇의 위치를 실시간으로 보정하는 방법에 대하여 다루었다. 먼저 이동 로봇의 운동에 대한 기하학적 모델로 부터 근사화된 모델을 유도하고 이에 필요한 조건을 제시한다. 근사화된 모델과 바퀴의 이동량 측정을 이용하여 이동 로봇의 위치를 계산하고 이때 위치 측정 오차의 원인분석 및 오차에 대한 모델링을 통하여 오차 분산 행렬을 구한다. 다음으로 알려진 광의 위치와 PSD 센서의 측정 신호의 기하학적 관계식을 유도하고 확장된 칼만 필터에 기초한 위치보정 알고리즘을 유도한다. 제안된 방법의 유용성과 특성을 확인하기 위하여 본 시험실에서 기 제작된 이동 로봇을 대상으로 컴퓨터 시뮬레이션을 수행한다. 여기서 이동 로봇의 제어기 실현시 적절한 계산 주기(샘플링 시간) 설정에 대한 조건을 제시하고, 주행 경로상에 광원의 배치 방법에 따른 위치보정의 특성을 분석한다.

2. 이동 로봇의 위치 계산

그림 1과 같이 샘플링시간 동안 이동 로봇의 좌표계가 kC 에서 ${}^{k+1}C$ 로 변화하였을 때 양 바퀴 중심의 이동량을 각각 u_k^r, u_k^l 이라 하고, 다음과 같이 가정하면,

가정 1. 샘플링 시간 동안 회전속도가 일정하다.

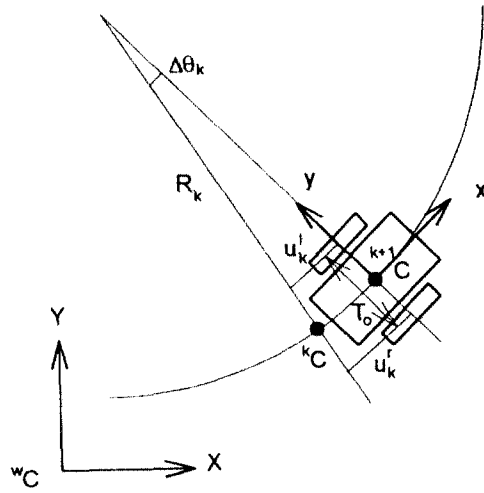


그림 1. 이동로봇의 기구학 모델
Fig. 1. Kinematic Model of a Mobile Robot

$$\Delta\theta_k \frac{u_k^r - u_k^l}{T_0}, R_k = \frac{u_k^r + u_k^l}{2\Delta\theta_k} \quad (1)$$

이고,

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= x_k + 2R_k \cos\left(\theta_k + \frac{\Delta\theta_k}{2}\right) \times \sin\frac{\Delta\theta_k}{2} \\ x_{k+1} &= x_k + 2R_k \sin\left(\theta_k + \frac{\Delta\theta_k}{2}\right) \times \sin\frac{\Delta\theta_k}{2} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\theta_{k+1} = \theta_k + \Delta\theta_k$$

이다. 또한 다음과 같이 가정하면,

가정 2. 샘플링 시간 동안 회전량은 매우 작다.

식 (2)는 다음과 같이 근사화 된다.

$$\begin{aligned}
 x_{k+1} &\cong x_k + \frac{u_k^r + u_k^l}{2} \cos(\theta_k) \\
 y_{k+1} &\cong y_k + \frac{u_k^r - u_k^l}{2} \sin(\theta_k) \\
 \theta_{k+1} &\cong \theta_k + \frac{u_k^r - u_k^l}{T_0}
 \end{aligned} \quad (3)$$

식(3)을 상태변수 표현법을 이용하여 다시 쓰면,

$$\begin{aligned}
 x_{k+1} &= f_k(x_k, u_k) w_k \\
 x_k &= \begin{pmatrix} x_k \\ y_k \\ \theta_k \end{pmatrix} \\
 u_k &= \begin{pmatrix} u_k^r \\ u_k^l \end{pmatrix}
 \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 w_k 는 근사화 오차 및 기타 모델링 되지 않은 효과를 나타낸다.

바퀴 중심의 이동거리는 휠 엔코더를 이용하여 바퀴의 회전량을 측정함으로써 구할 수 있으므로 이동로봇의 위치는 식(3)로부터 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \hat{x}_{k+1} &= f_k(\hat{x}_k, \hat{u}_k) \\
 \hat{u}_k &= \frac{2\pi R_0}{C_0} Z_k
 \end{aligned} \quad (5)$$

여기서

Z_k : 휠 엔코더의 증분
 C_0 : 바퀴 1 회전당 펄스 수
 R_0 : 바퀴의 반경

그러나 실제 바퀴 중심축의 이동거리와 측정된 거리는 다음의 원인으로 인하여 오차가 발생하며 이러한 오차는 장시간 운행시 누적되어 이동로봇의 실제 위치 x_k 와 계산된 위치 \hat{x}_k 와의 커다란 차이를 발생시킨다.

- 1) 휠 엔코더의 양자화 오차
- 2) 파라미터 부정확성 혹은 변화
- 3) 바퀴의 미끄러짐.

1)에 의한 오차는 저속 운행시 위치측정오차의 주요 원인이 되고 이동량과 관계없이 발생된다. 한편 2) 및 3)은 이동량에 비례하여 오차를 증가시키므로 고속 운행시 위치오차의 주요 원인이 된다. 휠 엔코더를 이용한 이동로봇의 위치측정에 있어서 오차 정도를 계산하기 위하여 바퀴 중심의 이동량을 다음과 같이 모델링 한다.

$$u_k = \hat{u}_k + v_k \quad (6)$$

$$v_k = \begin{pmatrix} \hat{u}_k^r s_k^r + q_k^r \\ \hat{u}_k^l s_k^l + q_k^l \end{pmatrix}$$

여기서 q_k 는 휠 엔코더의 양자화 오차로 분산은

$$\sigma_q^2 = \frac{1}{12} \left(\frac{2\pi R_0}{C_0} \right)^2$$

이다. 또한 s_k 는 파라미터의 부정확성 및 바퀴의 미끄러짐에 의하여 이동량에 비례하여 발생하는 오차를 표시하기 위한 오차량이다. 식(4)를 식(5)에 대하여 선형화하면,

$$\begin{aligned}
 \Delta x_{k+1} &= \frac{\partial f_x(\hat{x}_k, \hat{u}_k)}{\partial \hat{x}_k} \Delta x_k + \\
 &\quad \frac{\partial f_x(\hat{x}_k, \hat{u}_k)}{\partial \hat{u}_k} v_x + w_k \\
 &= A_k \Delta x_k + B_k v_k + w_k
 \end{aligned} \quad (7)$$

$$A_k = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -\Delta l_k \sin \hat{\theta}_k \\ 0 & 1 & \Delta l_k \cos \hat{\theta}_k \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

$$\Delta \hat{i}_k = \frac{\hat{u}_k^i + \hat{u}_k^j}{2}$$

$$B_k = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \cos \hat{\theta}_k & \frac{1}{2} \cos \hat{\theta}_k \\ \frac{1}{2} \sin \hat{\theta}_k & \frac{1}{2} \sin \hat{\theta}_k \\ \frac{1}{T_0} & \frac{-1}{T_0} \end{pmatrix} \quad (9)$$

이다. 그러므로 휠 엔코더에 의한 위치 계산은 다음과 같은 오차 분산 행렬을 갖는다.

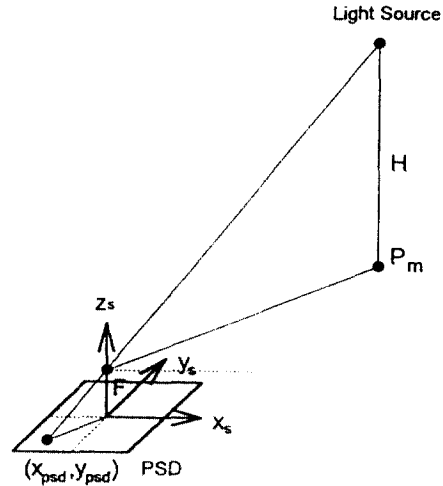
$$P_{k+1} = A_k P_k A_k^T + B_k V_k B_k^T + W_k \quad (10)$$

이상의 방법과 같이 이동 로봇 내부의 상태 변화량을 측정하여 위치를 계산하는 방법을 Dead Reckoning System 이라 하며 이러한 방법은 식 (10)에서 보는 바와 같이 시간이 경과할 수록 혹은 주행량이 증가할 수록 계속적으로 오차를 증가시키는 경향이 있다. 따라서 오차를 일정한 범위 내로 제한하기 위하여는 외부 상태를 감지하여 위치오차를 보정해 주는 방법이 필요하다.

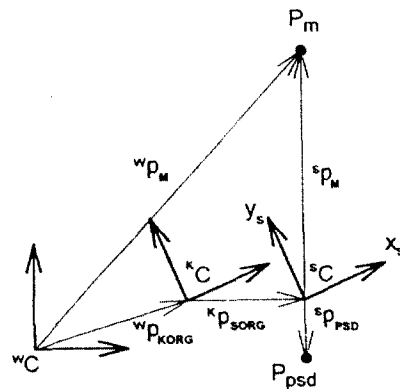
3. PSD(Position Sensitive Detectors)를 이용한 위치 보정

PSD는 광원의 위치를 검출하기 위한 반도체 소자이다. 본 연구에서는 알려진 위치에 놓여진 광원의 위치검출을 통하여 평면상의 이동로봇 위치를 감지하기 위하여 2차원 PSD를 사용하였다. 장애물에 의한 간섭을 피하기 위하여 광원은 이동로봇 주행 공간의 상부에 위치시켰다. 또한 PSD는 주행 평면과 평행하고 이동 로봇 좌표계와 방향이 일치하도록 로봇에 부착하였다. 그림 2 a)와 같이 렌즈의 초점거리를 F, 광원의 높이를 H, PSD 상에 맺

힌 광원 위치를 (X_{psd}, Y_{psd}) 라 할 때, 광원 (8)의 주행 평면상의 위치와 검출된 위치의 관계는 그림 2. b)로 부터 식(11)과 같이 구할 수 있다.



a) 광원과 PSD 좌표계



b) 주행평면으로의 투영

그림 2. PSD 센서 시스템
Fig. 2. The PSD Sensor System

$${}^s P_M = {}^K W R ({}^W P_M - {}^W P_{KORG}) - {}^K P_{SORG} = -\frac{1}{\alpha} {}^s P_{PSD} \quad (11)$$

여기서 $\alpha = F/H$ 이고,

$${}^K_w R = \begin{pmatrix} \cos \theta_k & \sin \theta_k \\ -\sin \theta_k & \cos \theta_k \end{pmatrix}$$

: 이동로봇계를 기준으로한 작업계의 회전행렬

$${}^w P_M = \begin{pmatrix} x_m \\ y_m \end{pmatrix}$$

: 광원위치에 대한 작업계 벡터

$${}^w P_{KORG} = \begin{pmatrix} x_k \\ y_k \end{pmatrix}$$

: 이동로봇계의 원점에 대한 작업계 벡터

$${}^K P_{SORG} = \begin{pmatrix} X_s \\ Y_s \end{pmatrix}$$

: 센서계의 원점에 대한 이동로봇계 벡터

$${}^S P_{PSD} = \begin{pmatrix} x_{psd} \\ y_{psd} \end{pmatrix}$$

: 입사광 위치에 대한 센서계 벡터

이다. 식 (11)을 PSD 상에 입사된 광원의 위치에 대해 풀어 쓰면,

$$\begin{aligned} x_{psd} &= \alpha \{ (x_k - x_m) \cos \theta_k + (y_k - y_m) \sin \theta_k + X_s \} \\ y_{psd} &= \alpha \{ -(x_k - x_m) \sin \theta_k + (y_k - y_m) \cos \theta_k + Y_s \} \end{aligned} \quad (12)$$

이므로 다음과 같은 PSD 센서의 출력 신호에 대한 벡터식으로 나타낼 수 있다.

$$y = g(x_k) + e$$

$$y = \begin{pmatrix} \hat{x}_{psd} \\ \hat{y}_{psd} \end{pmatrix}$$

여기서 e는 측정 오차를 표시한다. 측정 오차는 단순히 PSD 센서의 측정 정밀도 및 신호의 측정 잡음뿐 아니라 주행면의 상태에 따라 다르게 발생하는 이동로봇의 진동 및 흔들림에 의한 복합적인 요인에 의하여 발생된다. PSD 센서에 의하여 검출된 위치정보를 이용하여 휠 엔코더로 계산된 위치를 보정하기 위하여 식 (13)을 계산된 위치에 대하여 선형화 하면,

$$\begin{aligned} y - g(\hat{x}_k) &= \frac{\partial g(\hat{x}_k)}{\partial \hat{x}_k} (x_k - \hat{x}_k) + e \\ &= C_k (x_k - \hat{x}_k) + e \end{aligned} \quad (14)$$

$$C_k = \alpha \begin{pmatrix} \cos \hat{\theta}_k, \sin \hat{\theta}_k, (\hat{x}_m - \hat{x}_k) \\ \sin \hat{\theta}_k - (\hat{y}_m - \hat{y}_k) \cos \hat{\theta}_k \\ -\sin \hat{\theta}_k, \cos \hat{\theta}_k, (\hat{x}_m - \hat{x}_k) \\ \cos \hat{\theta}_k + (\hat{y}_m - \hat{y}_k) \sin \hat{\theta}_k \end{pmatrix}$$

이다. 이때 모든 오차항을 기대값이 영인 가우시안 백색잡음으로 가정하면 다음과 같이 확장된 칼만 필터(extended Kalman filter)를 이용하여 최적 위치를 측정할 수 있다.

$$\hat{x}_k(+) = \hat{x}_k(-) + K_k [y - g(\hat{x}_k(-))]$$

$$P_k(+) = P_k(-) - K_k C_k P_k(-) \quad (15)$$

$$K_k = P_k(-) C_k^T [C_k P_k(-) C_k^T + E_k]^{-1}$$

여기서 (-)는 보상전 값을, (+)는 보상 후 값을 나타낸다.

4. 시뮬레이션 및 고찰

본 연구 대상으로 사용된 이동 로봇은 시험실에서 자체 제작된 모델로 그림 3과 같이 이에 대한 사양은 표 1에 나타나 있다.

표 1. 이동 로봇 사양

Table 1. Spec. of the Mobile Robot

항목	기호	단위	값
크기	L×W×H	m	0.4×0.4×0.7
질량	M ₀	kg	30
관성 모멘트	J ₀	kg·m ²	0.8
바퀴축 길이	T ₀	m	0.4
바퀴 반경	R ₀	m	0.08
기어비	N ₀	-	10
모터 최대 토크	Γ _{max}	kg·m	0.04
모터 최대 속도	Ω _{max}	rad/sec	100
모터 최소 속도	Ω _{min}	rad/sec	10
엔코더 펄스수	C _m	p/rev	640

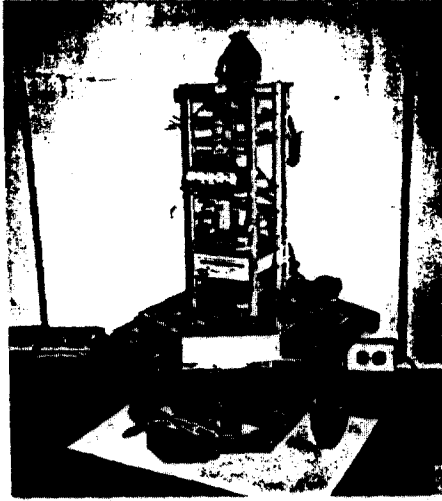


그림 3. 이동 로봇
Fig. 3. A Mobile Robot

또한 PSD 센서의 구조는 그림 4에 나타나 있으며 사양은 표 2에 제시하였다. 광원으로는 파장 920 nm인 IR 광을 사용하고, IR 필터는 광원 이외의 다른 광에 의한 영향을 제거하는 데 사용된다.

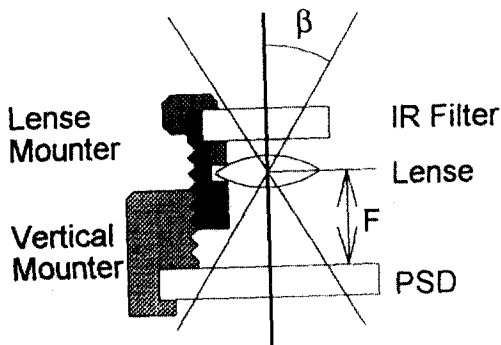


그림 4. PSD 센서
Fig. 4. A PSD Sensor

표 2. PSD 센서 사양

Table 2. Spec. of the PSD Sensor

항목	기호	단위	값
중심 파장	λ	nm	920
유효 반경	r	m	0.01
측정 정밀도	σ_{psd}	nm	50
초점 거리	F	m	0.01335
감지 각도	β	deg	25°
센서의 위치	(X_s, Y_s)	m	(0,0)

4-1. 샘플링 시간 선정에 대한 고찰

휠 엔코더 측정에 의한 이동 로봇의 위치계산은 식 (5)와 같이 샘플링 시간 t 와 무관하나 위치계산 오차는 샘플링 시간과 밀접한 관계가 있다. 위치계산 오차의 주요 원인은 식 (10)에서 보는 바와 같이 근사화 오차 w 와 이동량 측정오차 v 이다. 근사화 오차 w 를 감소시키기 위해서는 가정 1 및 2를 만족해야 한다. 즉 가정 1.에서

$$\Delta\theta = \int_{t_k}^{t_{k+\tau}} \ddot{\theta} dt < \tau \dot{\theta}_{\max} = \tau \frac{T_0 N_0 \Gamma_{\max}}{2J_0 R_0} \ll 1 \quad (16)$$

이다. 또한 가정 2.에서

$$\Delta\theta = \int_{t_k}^{t_{k+\tau}} \ddot{\theta} dt < \tau \dot{\theta}_{\max} = \tau \frac{2R_0 \Omega_{\max}}{T_0 N_0} \ll 1 \quad (17)$$

이다. 한편 식 (6)의 바퀴 중심 이동량에 대한 측정 오차는 휠 엔코더의 양자화 오차 q 의 영향으로 샘플링 시간이 감소할 수록 신호 대 잡음비(signal to noise ratio)를 감소시켜 결과적으로 위치오차가 증가된다. 따라서 다음과 같은 조건이 필요하다.

$$\begin{aligned} SNR_{\min} &= \frac{1}{\sigma_q^2} \left(\tau \frac{R_0 \Omega_{\min}}{N_0} \right)^2 \gg 1 \\ \tau &\gg \frac{\pi}{\sqrt{3} C_m \Omega_{\min}} \end{aligned} \quad (18)$$

그러므로 샘플링 시간은 식 (16), (17), 및 (18)을 만족하도록 적절히 선정한다. 본 연구의 경우 표 1의 값을 각각 대입하여 샘플링 시간을 0.02 sec로 하였다.

4-2. 주행 시험 및 고찰

제안한 알고리즘의 유용성을 보이고 광원의 위치에 따른 특성을 분석하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 주행 시험을 수행 하였다. 시험시 사용한 분산 행렬은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} W_k &= 0 \\ V_k &= \begin{pmatrix} (0.05 \hat{u}_k^r + 4.5 \cdot 10^{-5})^2 & 0 \\ 0 & (0.05 \hat{u}_k^l + 4.5 \cdot 10^{-5})^2 \end{pmatrix} \\ E_k &= \begin{pmatrix} (1 \cdot 10^{-5})^2 & 0 \\ 0 & (1 \cdot 10^{-5})^2 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

주행 공간 내에 광원은 PSD 센서의 렌즈로부터 3m 높이에 설치된 것으로 간주하였고 이때 PSD 센서에서 광원을 감지할 수 있는 주행 평면상의 반경은 약 1.4m 이다.

시험 1. 직사각형 경로의 주행

그림 5 및 6의 a)는 이동 로봇가 x 축 길이 10m, y축 길이 5m의 직사각형 경로를 시계방향으로 주행하면서 광원을 감지하여 위치 보정을 한 결과(여기서 타원은 측정된 이동로봇의 위치에 대하여 실제의

위치에 대한 확율이 동일한 위치들을 보여주며 실제의 위치가 타원내에 있을 확율이 90%가 되도록 타원의 크기를 정하였음.[11])이고, b)는 광원의 x축 좌표값이 8m이고 이동 로봇가 x축 방향으로 이동 중인 경우에 광원 감지 영역 내에서 이동 로봇의 x축 좌표값에 따른 위치 및 방향 오차에 대한 표준편차를 보여준다. 그림 5의 CASE 1-1은 주행경로의 직각 방향으로 두개의 광원을 배치하여 주행중 두개의 광원을 감지할 수 있는 영역을 통과하도록 한 경우이고, 그림 6의 CASE 1-2는 주행중 하나의 광원만 감지하도록 배치한 경우이다. CASE 1-1의 경우는 광원 감지 영역 내에서 위치 오차 1mm 이내, 방향오차 0.1° 이내로 PSD 센서에 의한 위치 보정이 적절히 이루어 지고 있음을 볼 수 있으나, CASE 1-2의 경우는 CASE 1-1보다 10 배의 오차를 보이고 있으며 진입시의 오차에 따라 유동적이였다. 이러한 원인은 이동 로봇의 자유도가 3 인데 반하여 PSD 센서는 하나의 광원의 검출로부터 2차원 정보만 얻을 수 있기 때문으로 해석된다. 시험 2에서는 이러한 현상을 보다 명확히 보여준다.

시험 2. 직선 경로의 주행

그림 7, 8, 및 9의 a)는 이동 로봇가 x 축 길이 10m의 직선 경로를 20회 왕복주행한 결과를 보여주며 b)는 각 횟수 마다의 최대 측정 오차를 보여 준다. 그림 7의 CASE 2-1은 주행경로 직각 방향으로 두개의 광원을 배치하여 주행중 두개의 광원을 검출할 수 있는 영역을 통과하도록 한 경우로 위치 및 방향 보정이 정확하게 이루어져 측정 오차를 일정한 범위 내로 제한함을 볼 수 있다. 반면 그림 8의 CASE 2-2는 주행경로 상에 하나의 광원을 배치한 경우로 광원으로 부터 얻을 수 있는 정보의 부족으로 특히 방향오

차에 대한 보상이 적절히 이루어 지지 않고 있음을 볼 수 있다. 한편 그림 9의 CASE 2-3은 주행경로상에 두개의 광원을 감지범위가 서로 겹치지 않도록 배치한 경우로 CASE 2-1과 같이 측정오차가 적절히 제한됨을 알 수 있다.

이상의 시험으로부터 제안된 PSD 센서를 이용한 위치보정 알고리즘을 이용하여 이동 로봇의 위치를 보정하기 위하여는 최소한 두개의 광원의 검출이 필요하며 이를 한 위치에서 감지할 수 있는 경우와 그렇지 않은 경우 모두 적절한 보정이 이루어 짐을 알 수 있다. 이러한 시험 결과는 외부 마크(landmark) 인식에 의한 로봇의 위치의 가관측성 검토 결과[12]와도 잘 일치한다.

5. 결 론

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 바퀴 이동량 측정을 통한 이동 로봇의 위치계산시 실제의 위치와의 오차가 발생하는 원인을 분석하고 이에 대한 모델을 제시하여 확률적 오차 진행 과정을 유도하였다.
- 2) 1)의 경우 위치계산 오차 발생을 가급적 억제하기 위한 계산 주기(샘플링 시간) 선정에 있어서 필요한 조건들을 제시하였다.
- 3) 알려진 위치에 배치된 광원을 PSD로 검출한 경우 검출 신호와 이동 로봇의 실제의 위치와의 관계식을 구하고 PSD 신호를 이용한 최적 위치보정 알고리즘을 개발하였다.
- 4) PSD에 의해 검출된 광원의 위치 오차 원인을 분석하였다.
- 5) PSD를 이용한 위치보정시 광원의 배치에 따른 특성을 고찰하였다.
- 6) 제안된 방법의 유용성을 시뮬레이션

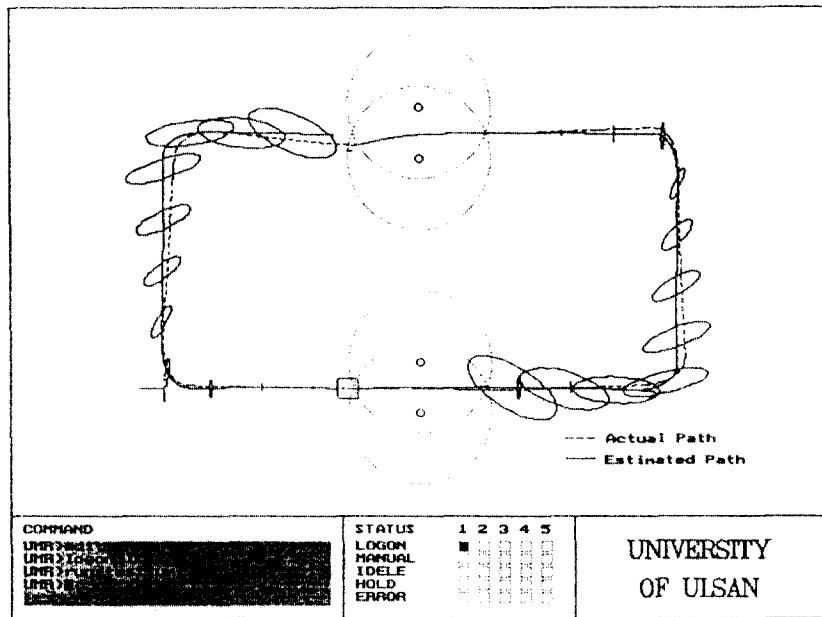
을 통하여 확인하였다.

제안된 방법은 위치 보정용 광원을 자유롭게 배치(수 m에서 수십 m에 이르기까지) 할 수 있고 주위 환경에 의해 제약을 거의 받지 않으므로 산업용 이동 로봇(무인 운반차)의 주행 유도뿐 아니라 일반 서비스용 에서도 폭넓게 이용가능하다. 향후 보다 적극적인 위치 보정을 위하여 불확실한 파라미터의 자동 보정에 대한 연구, 보다 응용 영역을 넓히기 위한 3차원 상에서 움직이는 로봇의 위치측정에 대한 연구, 등이 필요하다.

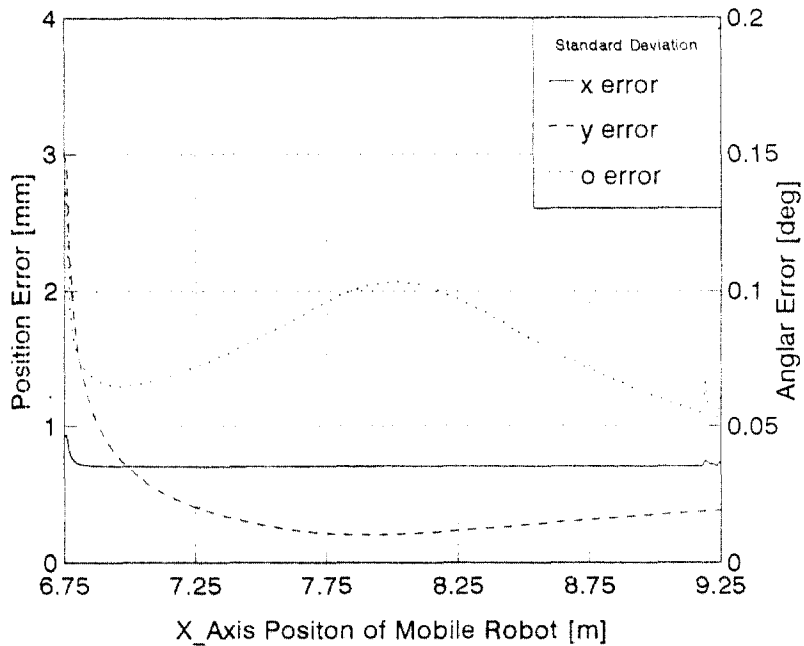
6. 참고문헌

- [1] K. Komoriya, E. Oyama and K. Tani, "Planning of landmark measurement for the navigation of a mobile robot", Proceedings of the 1992 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 1476-1481, 1992.
- [2] J. Crowley, "Word modelling and position estimation for a mobile robot using ultrasonic ranging", Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 674-680, 1989.
- [3] Y. Watanabe and S. Yuta, "Position estimation of mobile robots with internal and external sensors using uncertainty evolution technique", Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2011-2016, 1990.
- [4] S. Borthwick and H. Durrant-Whyte, "Simultaneous localisation and map building for autonomous guided vehicles", Proc. of the 1994 IEEE/RSJ International Conference

- on Intelligent Robots and Systems, pp. 761-768, 1994.
- [5] I. J. Cox, "Blanche - an experiment in guidance and navigation of an autonomous robot vehicle", IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 7, No. 2, pp. 193-204, 1991.
- [6] T. Tsumura, and M. Hashimoto, "Positioning and guidance of ground vehicle by use of laser and corner cubes", Pros. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1986.
- [7] M. R. Kabuka, and E. Arenas, "Position verification of a mobile robot using standard pattern", IEEE Journal on Robotics and Automation, vol. RA-3, pp. 505-516, 1987.
- [8] E. Krotkov, "Mobile robot localization using a single image", Pros. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 978-983, 1989.
- [9] F. Chenavier and J. L. Crowley, "Position estimation for a mobile robot using vision and odometry", Pros. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2588-2593, 1992.
- [10] 홍문성, 이상용, 및 한민용, "이동로봇의 궤도관제기법", '89 한국 자동제어 학술회의 pp. 226-229, 1989.
- [11] R. C. Smith and P. Cheeseman, "On the representation and estimation of spatial uncertainty", Int. J. of Robotics Research, Vol.5, No.4, pp.56-68, 1986.
- [12] S. R. Lee, Position estimation of wheeled industrial vehicles, Ph. D. Thesis, 1989.



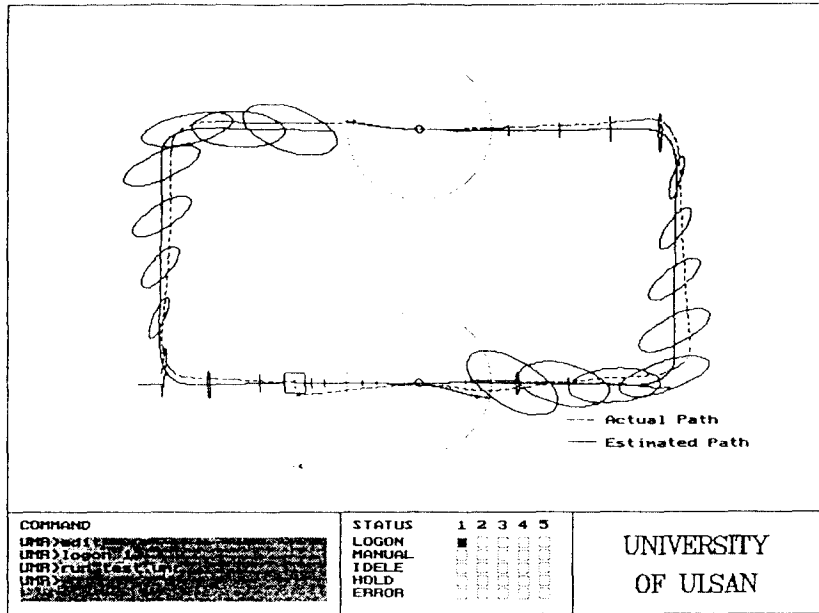
a) 주행 실험 결과



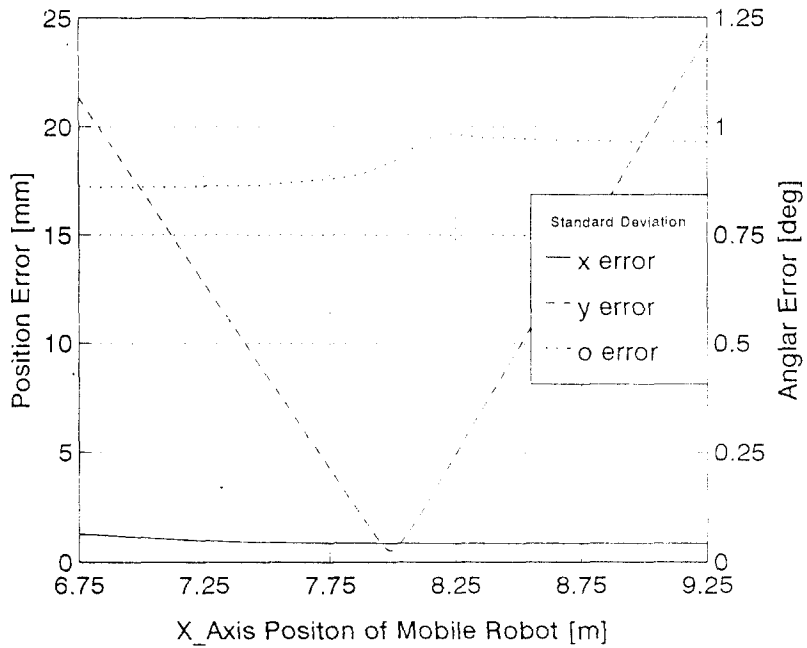
b) 광원 감지 영역에서의 측정 오차에 대한 표준편차

그림 5. 직사각형 경로의 주행 시험(CASE 1-1)

Fig. 5. The Navigation Test of the Rectangular Path(CASE 1-1)



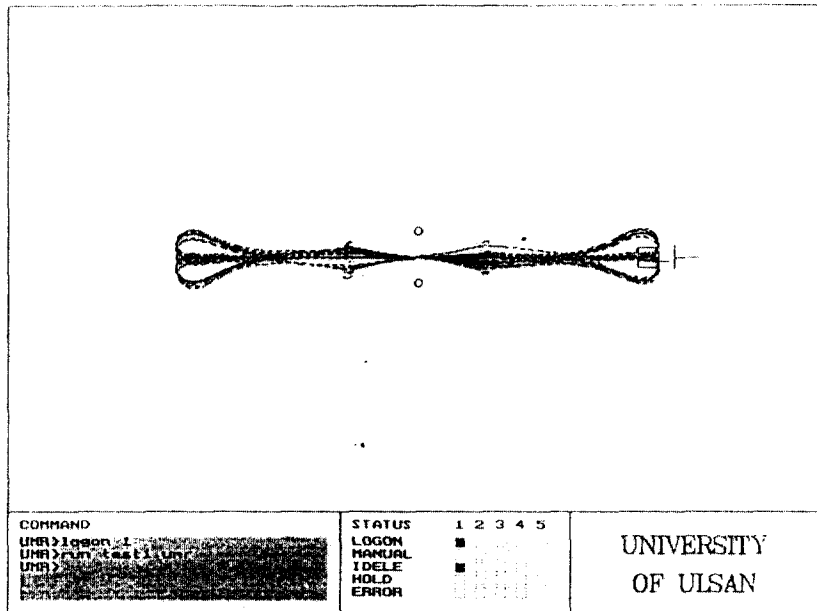
a) 주행 실험 결과



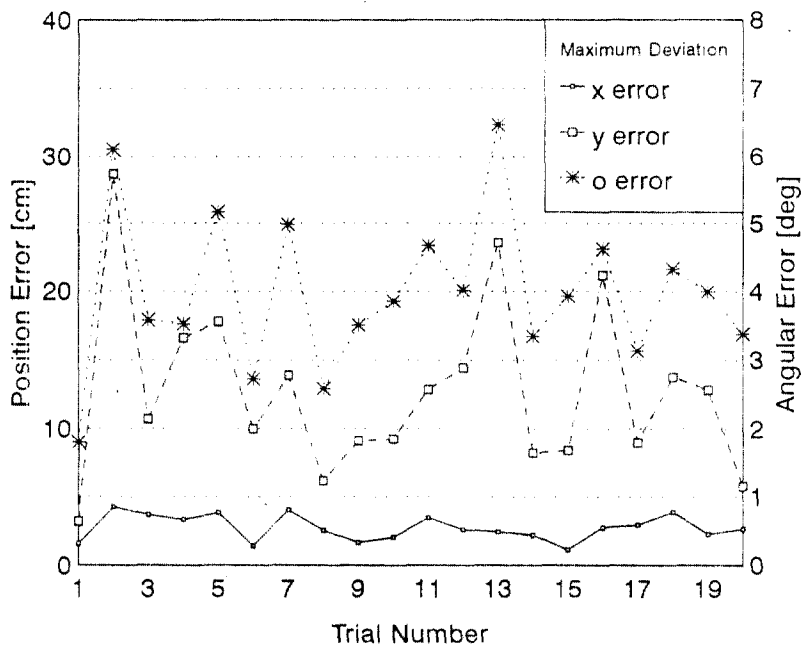
b) 광원 감지 영역에서의 측정 오차에 대한 표준편차

그림 6. 직사각형 경로의 주행 시험(CASE 1-2)

Fig. 6. The Navigation Test of the Rectangular Path(CASE 1-2)



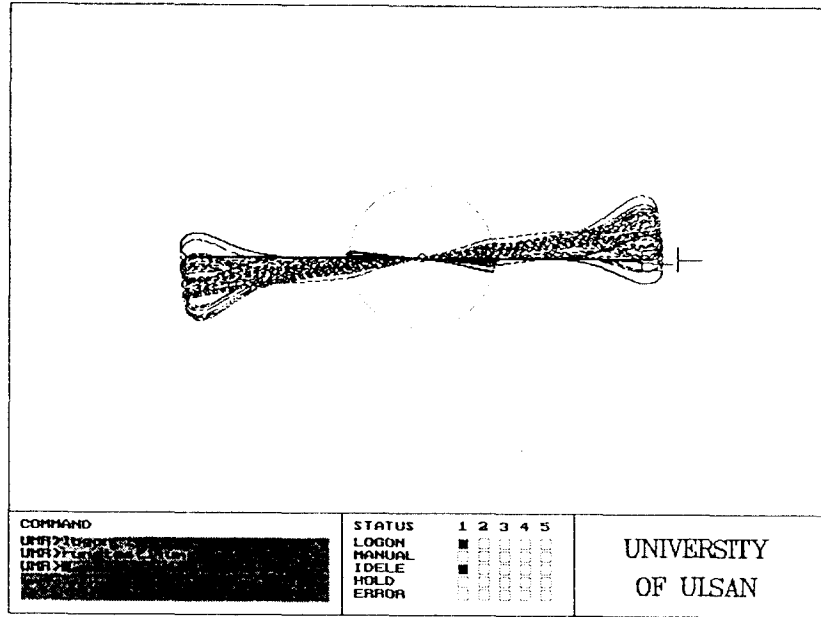
a) 주행 실험 결과



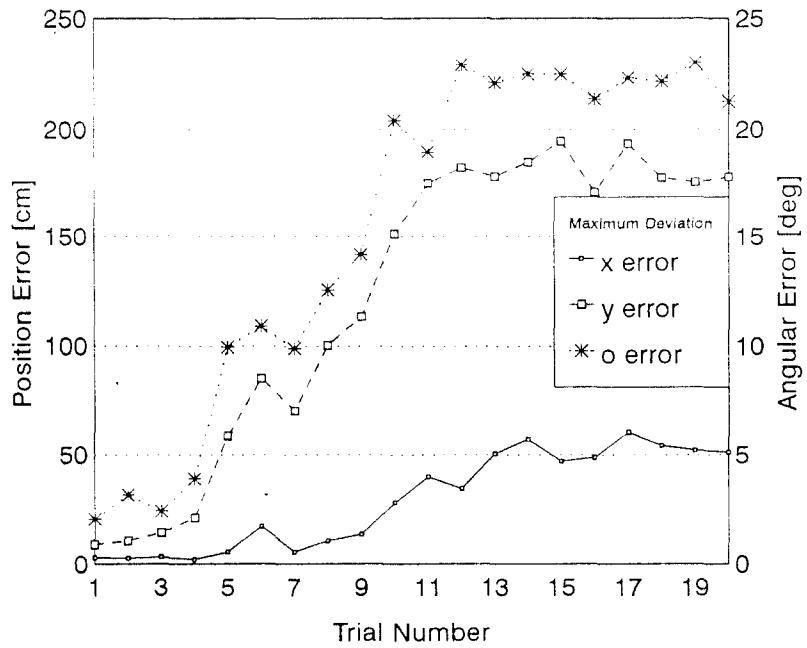
b) 왕복 횟수에 따른 최대 측정 오차

그림 7. 직선 경로의 주행 실험(CASE 2-1)

Fig. 7. The Navigation Test of the Straight Path(CASE 2-1)



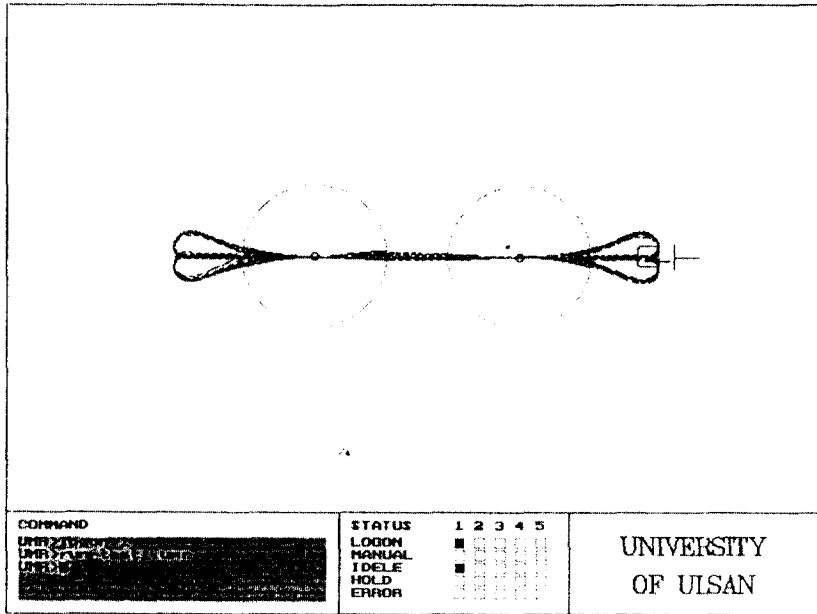
a) 주행 실험 결과



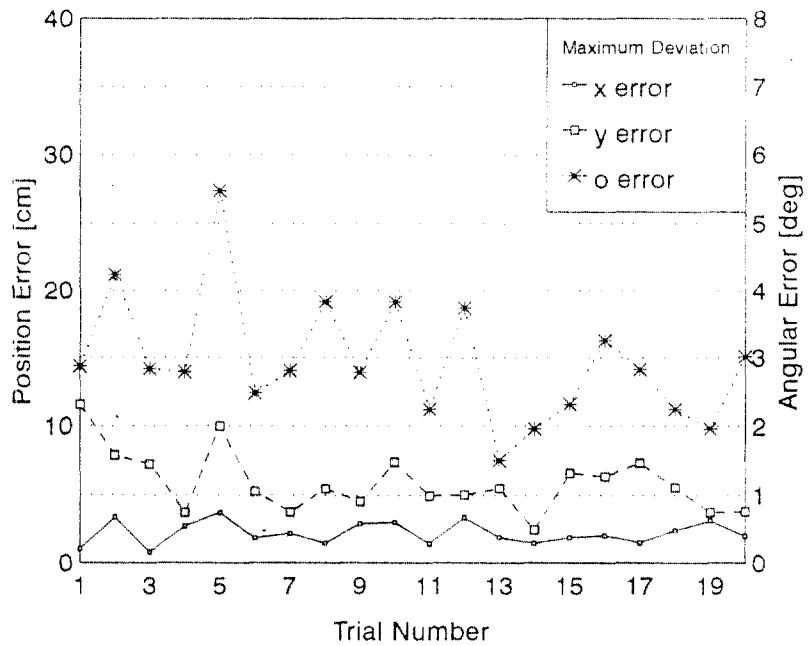
b) 왕복 횟수에 따른 최대 측정 오차

그림 8. 직선 경로의 주행 실험(CASE 2-2)

Fig. 8. The Navigation Test of the Straight Path(CASE 2-2)



a) 주행 실험 결과



b) 왕복 횟수에 따른 최대 측정 오차

그림 9. 직선 경로의 주행 실험(CASE 2-3)

Fig. 9. The Navigation Test of the Straight Path(CASE 2-3)