

이동물체의 위치측정을 위한 PSD 센서 시스템 연구¹

盧瑩植

電氣工學科

<요 약>

평면상에서 이동하는 물체(이동로봇, 등)가 공간상에 놓여진 자신의 위치를 측정하기 위하여 사용되는 능동 등대 방식의 센서 시스템을 PSD(Position Sensitive Detector)를 이용하여 개발하였다. 여러 광원들을 이동공간 상부에 드문드문 배치하고 이들을 이동체상의 PSD 센서로 검출함으로써 상대적인 위치를 측정하도록 하였다. 광원과 이동체의 위치에 대한 모델의 내부 파라미터 캘리브레이션을 위하여 LSE(Least Square Estimation) 방법이 도입되었다. 이동체의 초기위치가 알려져 있지 않은 경우 위치가 알려진 두개 이상의 광원 검출에 의하여 초기위치를 측정하였다. 또한 이동 중에는 광원 정보와 Dead Reckoning 정보를 이용한 확장된 칼만 필터로 계산하였다. 이동로봇을 이용한 실제 실험을 통하여 제안된 시스템으로 부터 얻은 위치 정보는 충분히 활용 가능한 정도의 정확성이 있음을 보였다.

A Study on the PSD Sensor System for the Position Measurements of Moving Objects

Ro, Young Shick

Dept. of Electrical Eng.

<Abstract>

An active beacon localization system using PSD(Position Sensitive Detector) is developed that estimates position for moving objects - mobile robots *et al.* - in 2D plane. We place several light sources sparsely over the work space as beacons(or landmarks), so that the moving object can correct its estimated position when detecting the beacon by PSD sensor. An LSE(Least Square Estimation) method is introduced to calibrate internal parameters of a model for the beacon and the object position. When the object position is unknown, the initial position can be estimated by the detection of two or more light sources which positions are known. During movement, the

¹ 이 논문은 1995 학년도 울산대학교 학술연구조성비에 의하여 연구 되었음.

position can be calculated by the IEKF(Iterated Extended Kalman Filter) applied to the beacon and dead-reckoning data. Practical experiments show that the estimated position obtained by this system is precise enough to be useful.

Key Words : Mobile Robot, Position Estimation, Extended Kalman Filter, Position Sensitive Detector(PSD)

1. 서 론

이동로봇, 무인운반차, 등 평면상에서 이동하는 물체의 공간상의 위치 정보는 이동체의 자율화 및 지능화를 위하여 필수적인 요소이다. 이동중 위치의 변화는 바퀴의 회전량 감지, 등의 내부센서를 이용하여 계산할 수 있으나 장거리 주행시 오차가 심해지므로 공간상의 위치를 직접 측정할 수 있는 외계 인식 센서가 필요하다.

외계 인식 대상으로 자연적으로 형성된 주위의 물체나 인위적으로 설치한 표식이 이용된다. 자연물을 이용하는 실질적인 방법으로 통로의 벽, 모퉁이, 특정 형상의 물체 등을 검출하여 위치를 보정하는 방법[1-4], 측정된 주위 환경과 사전에 기억된 주행환경과의 2차원 혹은 3차원 맵 매칭을 이용한 방법[5-6], 등이 제시되고 있다. 그러나 이러한 방법들은 물체인식에 많은 시간을 소요하고 전적으로 주위 환경에 의존하므로 적용에 제한을 많이 받는다. 이러한 문제는 인위적인 표식을 이동 경로 주위에 설치하고 이를 센서로 검출하는 방식으로 해결할 수 있다. 현재 실용화된 방법중의 하나는 레이저 스캐너를 사용하여 주위에 설치된 반사물체를 검출하는 방식[7]이 있으나 이는 이동평면 상의 경로 주위에 표식을 설치해야 하는 제약이 있고 장애물의 간섭을 받을 수 있다. 이러한 문제는 비전 센서를 이용한 방법[8-11]으로 어느정도 해결할 수 있으나 비전 센서는 주위 조명의 영향을 많이 받고 실시간 처리에 어려움이 있으며 정밀성이 떨어지므로 실용적이지 못하다. PSD(Position Sensitive Detector)는 입사된 광의 위치를 아날로그 방식으로 매우 정밀하게 검출할 수 있는 최근에 개발된 반도체 소자로 다양한 용도의 활용이 검토되고 있다. PSD를 이동체의 위치측정을 위한 외계 인식 센서로 사용하는 경우 표식이 광원이므로 에너지가 필요한 단점은 있으나 표식의 설치에 제한이 거의 없고(천정, 벽, 등 어디든 가능하고 높이도 수 m에서 수십 m까지 자유롭게 설치 가능함) 실시간으로 표식 위치 측정이 가능한 장점이 있다.

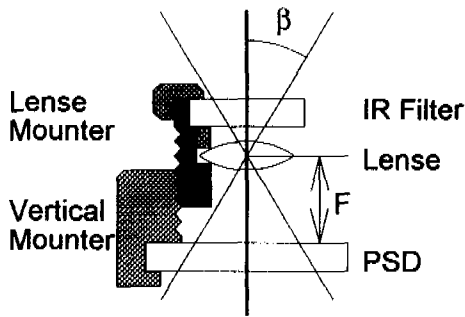
본 연구에서는 바퀴를 이용하여 평면상을 이동하는 물체의 위치 측정용 센서 시스템을 PSD를 이용하여 개발하였다. 주변광과 광원을 구분하기 위하여 적외선 광원을 사용하였고 배경광의 영향을 제거하기 위한 특별한 고려가 있었다. 특히 평면상에서 이동하는 물체의 위치자유도는 3인데 광원의 위치정보는 2차원 이므로 동일 위치에서 두개 이상의 광원의 검출이 가능하도록 센서 시스템을 설계하였다. PSD 센서를 이동체에 설치하고 광원을 검출하였을 경우 광원 및 이동체의 위치와 PSD 센서 출력과의 관계식을 유도하고, 이때 관계식에 포함된 센서 관련 파라미터와 광원 관련 파라미터의 캘리브레이션 방법을

개발하였다. PSD 센서 시스템에 의한 이동체 위치측정 방식으로 두개 이상의 광원 검출에 의한 초기 위치 측정 알고리즘과 이동중 위치보정을 위한 연속 위치 보정 알고리즘을 제시하고 PSD 센서의 광원 위치 측정 오차 원인과 정도를 분석하였다. 제안된 PSD 센서 시스템의 프로토타입을 제작하여 이동로봇을 대상으로 초기 및 주행중 위치측정 실험을 수행하였고 결과를 평가하였다.

2. PSD 센서 시스템

PSD(Position Sensitive Detector) 는 표면층이 광전효과를 지닌 반도체 소자이다. PSD 표면의 한 점에 입사된 광은 광전류를 발생시키고 이를 여러 위치에 설치된 전극에서 검출하여 연산 처리함으로써 광의 입사위치를 정밀하게 측정할 수 있다. 본 연구에서는 이동 평면 상부의 알려진 위치에 드문드문 놓여진 광원의 입사위치를 측정하여 평면상의 이동체 위치를 계산하기 위하여 평면형 PSD (Hamamatsu사의 S1880)를 사용한 PSD 센서 시스템의 프로토타입을 개발하였다. 수광부인 PSD Unit는 그림 1과 같이 PSD, 파장 920nm의 광원 이외의 외란 광(자연광, 형광등광, 등)을 제거하는 IR Filter, 입사광을 PSD 상의 한 점에 모아주는 렌즈, 렌즈의 초점을 조정하기 위한 Mounter 들로 구성되고 사양은 표 1과 같다.

표 1 PSD Unit 사양



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
최대 감지 각도	β	deg	25°

그림 1 PSD Unit

위치 측정 대상이 되는 광원은 항상 ON 상태인 DC광과 펄스형인 AC광의 두가지 형태을 고려해 볼 수 있다. DC 광을 사용하는 경우 광원 및 PSD 센서의 구조가 간단하고 연속적인 계측이 가능하나 PSD 의 광원감지 영역내에 두개 이상의 광원이 존재하는 경우 위치측정이 불가능해 진다. 반면 AC광은 광원감지 영역내에 다수의 광원이 존재하더라도 시분할(Time Devision Multiflexing) 기법으로 하나의 광만 PSD에 입사하도록 제어하면 동일한 위치에서 여러개의 광원의 입사위치를 계측할 수 있다. 또한 IR Filter에 의해 제거되지 않은 배경광 신호와 광원에 의한 입사광 신호를 분리할 수 있으므로 보다 정밀한 계측이 가

능하다. 그러나 광의 입사시점과 계측 시점의 동기를 고려해야 하므로 광원과 PSD 센서의 구조가 다소 복잡해 지는 단점이 있다. 본 연구에서는 동일위치에서 여러 광원의 입사 위치를 측정할 수 있도록 하기 위하여 AC광을 사용하였다.

그림 2는 개발된 PSD 센서 시스템의 구성을 보여주며 그림 3은 주요 동작 타이밍도를 보여준다. PSD 센서에 동작신호를 주면 센서 제어부는 38kHz의 리모콘광을 250 μ s 동안 광원부로 송신하고 광원부는 리모콘광을 수신한 후 320 μ s 지나서 폭이 500 μ s, 파장이 920nm 인 펄스형 IR 광을 센서부로 송신한다. 센서부는 동작신호를 받은 후 280 μ s 에 배

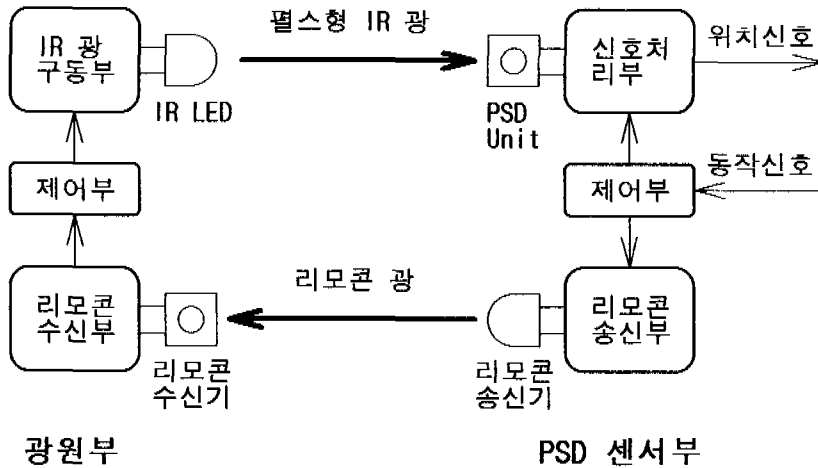


그림 2. PSD 센서 시스템 구성

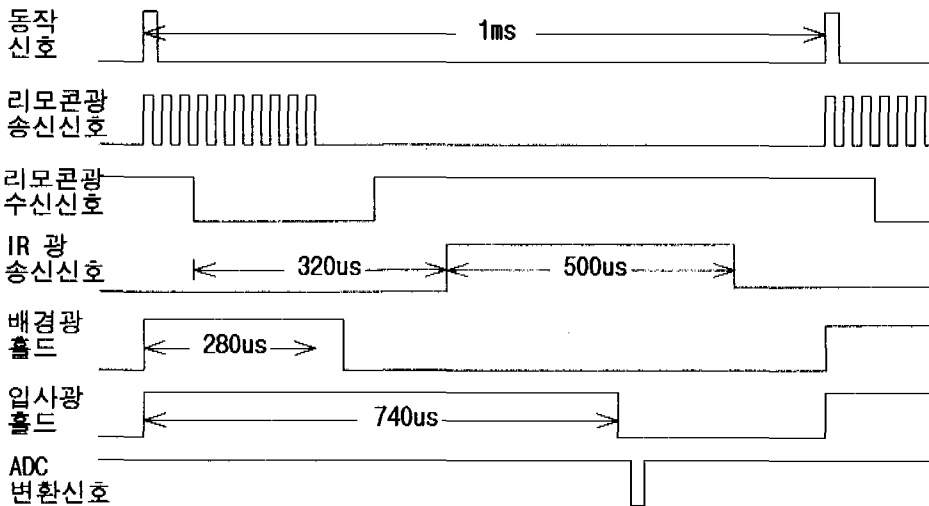
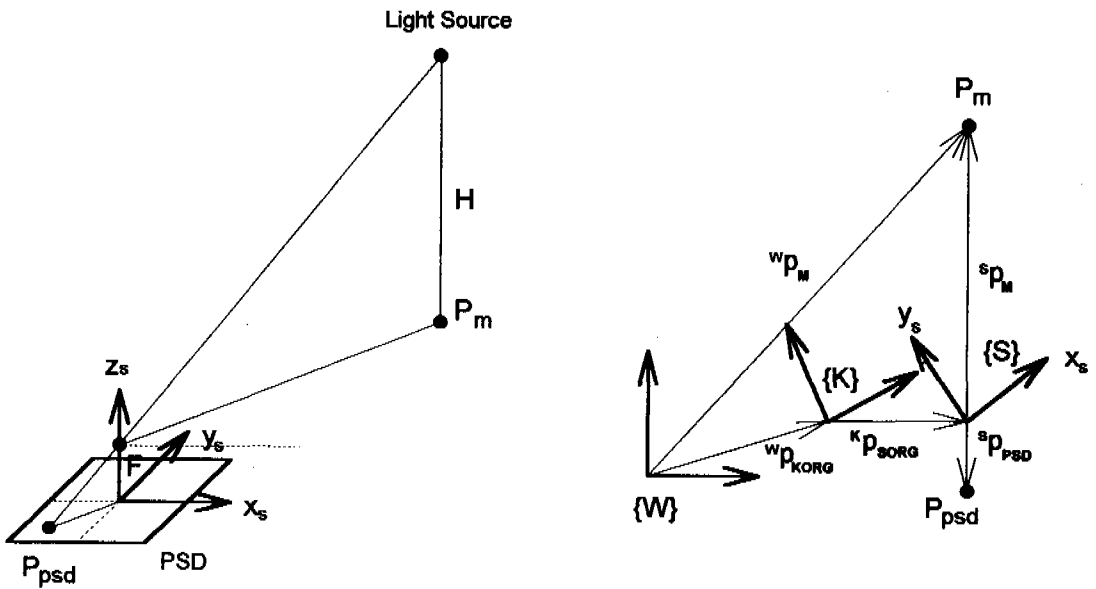


그림 3. PSD 센서 시스템의 동작 타이밍도

경광에 의해 PSD 전극에 나타난 신호를 홀드하고 740 μ s 에 입사광에 의해 PSD 전극에 나타난 신호를 홀드한다. 배경광의 영향을 제거하기 위하여 두 신호의 차를 구하고 아날로그 연산기에 의해 입사광의 위치(x_{psd}, y_{psd})에 비례하는 아날로그 신호를 발생 시킨다. 이는 ADC에 의하여 디지털 신호로 변환된 후 출력된다. 개발된 PSD 센서 시스템은 입사광의 위치 측정이 1ms 이내에 이루어 지고 주변광의 영향을 거의 받지 않음을 특성실험을 통하여 확인하였다.

3. PSD 센서 시스템 모델링 및 켈리브레이션

PSD 센서에서 측정된 입사광의 위치를 이용하여 이동체의 이동평면 상의 위치를 계산하기 위하여 광원위치, 이동체 위치, 이동체 상의 센서위치 및 센서 출력신호 사이의 정확한 기하학적 모델링이 필요하다. PSD 센서의 표면은 주행 평면과 일치하고 센서의 위치는 이동체 좌표계의 원점 부근에 놓이도록 한 것으로 가정한다. 그림 2 a) 와 같이 렌즈의 초점거리를 F , 광원의 높이를 H , PSD 상의 위치를 P_{psd} 라 할 때, 광원의 주행 평면상의 위치(P_m)와 PSD 평면에 입사된 위치(P_{psd})의 관계는 그림 4. b) 로 부터 식(1) 과 같이 구할 수 있다.



a) 광원과 PSD 좌표계

b) 이동평면으로의 투영

그림 4. PSD 센서 시스템

$${}^S P_M = {}^S R \left\{ {}^K R \left({}^W P_M - {}^W P_{KORG} \right) - {}^K P_{SORG} \right\} = -\gamma {}^S P_{PSD} \quad (1)$$

여기서

{W} : 작업계

{K} : 이동체계

{S} : PSD 센서계

$x_k = (x_k, y_k, \theta_k)^T$: 작업계를 기준으로한 이동체계의 위치벡터

$x_s = (x_s, y_s, \theta_s)^T$: 이동체계를 기준으로한 센서계의 위치벡터

$\gamma = H/F$: PSD 스케일 계수

${}^S R = \begin{pmatrix} \cos \theta_s & \sin \theta_s \\ -\sin \theta_s & \cos \theta_s \end{pmatrix}$: 센서계를 기준으로한 이동체계의 회전행렬

${}^K R = \begin{pmatrix} \cos \theta_k & \sin \theta_k \\ -\sin \theta_k & \cos \theta_k \end{pmatrix}$: 이동체계를 기준으로한 작업계의 회전행렬

${}^W P_M = (x_m, y_m)^T$: 광원위치에 대한 작업계 벡터

${}^S P_M$: 광원위치에 대한 센서계 벡터

${}^W P_{KORG} = (x_k, y_k)^T$: 이동체계의 원점에 대한 작업계 벡터

${}^K P_{SORG} = (x_s, y_s)^T$: 센서계의 원점에 대한 이동체계 벡터

${}^S P_{PSD} = (x_{psd}, y_{psd})^T$: 입사광 위치에 대한 센서계 벡터

이다. PSD 센서는 광원의 입사위치에 비례하는 디지털 신호를 출력한다. 이때 신호처리 부의 증폭이득의 불일치에 의하여 x축 신호의 스케일 계수와 y축 신호의 스케일 계수는 약간의 차이가 발생할 수 있다. 이를 고려하여 식(1)의 우변항을 다시 표현하면 다음과 같다.

$${}^S R \left\{ {}^K R \left({}^W P_M - {}^W P_{KORG} \right) - {}^K P_{SORG} \right\} = -y \quad (2)$$

여기서

$y = \gamma (x_{psd}, y_{psd})^T = \alpha (x_{adc}, y_{adc})^T$: PSD 센서에 의한 광원위치 측정벡터

(x_{adc}, y_{adc}) : PSD 센서 출력신호

- α : x축 출력 신호 스케일 계수
- ρ : y축 스케일 계수/ x축 스케일 계수

식 (2)를 이동체의 위치계산에 사용하기 위해서는 센서와 관련된 고정 파라미터 $(x_s, y_s, \theta_s, \rho)$ 와 광원에 관련된 고정파라미터 (x_m, y_m, α) 를 정확하게 조정하는 것이 매우 중요하다. 이러한 파라미터의 캘리브레이션을 위하여 식(2)를 다음 형태의 선형방정식으로 표현한다.

$$A(x_k, y_k, \theta_k, y_{adc})q(x_s, y_s, \theta_s, x_m, y_m, \alpha, \rho) = b(x_{adc}) \quad (3)$$

여기서,

$$A = \begin{pmatrix} x_k c\theta_k + y_k s\theta_k & -x_k s\theta_k + y_k c\theta_k & -c\theta_k & -s\theta_k & 1 & 0 & 0 \\ -x_k s\theta_k + y_k c\theta_k & -x_k c\theta_k - y_k s\theta_k & s\theta_k & -c\theta_k & 0 & 1 & -y_{adc} \end{pmatrix}$$

$$q = \frac{1}{\alpha} \begin{pmatrix} c\theta_s \\ s\theta_s \\ x_m c\theta_s + y_m s\theta_s \\ -x_m s\theta_s + y_m c\theta_s \\ x_s c\theta_s + y_s s\theta_s \\ -x_s s\theta_s + y_s c\theta_s \\ \alpha\rho \end{pmatrix}, \quad b = \begin{pmatrix} x_{adc} \\ 0 \end{pmatrix}$$

이다. 따라서 4곳 이상의 알려진 이동체의 위치 (x_k, y_k, θ_k) 에서 기준광원에 대한 PSD 센서의 출력 (x_{adc}, y_{adc}) 을 검출하면 8개 이상의 7차 선형방정식을 구성할 수 있고 벡터 q 에 대한 최소자승해[12]를 구할 수 있다. 구해진 해를 이용하여 고정 파라미터를 구하는 식은 다음과 같다.

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{q_1^2 + q_2^2}}$$

$$x_m = \alpha^2(q_1 q_3 - q_2 q_4)$$

$$y_m = \alpha^2(q_1 q_4 + q_2 q_3)$$

$$x_s = \alpha^2(q_1 q_5 - q_2 q_6) \quad (4)$$

$$y_s = \alpha^2(q_1 q_6 + q_2 q_5)$$

$$\theta_s = \tan^{-1}(q_2 / q_1)$$

$$\rho = q_7$$

다른 위치에 있는 광원에 대해서는 광원위치에 관련된 파라미터인 (x_m, y_m, α) 만 캘리브레이션 하면 된다. 이를 위하여 식(3)을 다음과 같은 형태로 변형한다.

$$C(x_s, y_s, \theta_s, x_k, y_k, \theta_k) \mathbf{r}(x_m, y_m, \alpha) = \mathbf{d}(x_{adc}, y_{adc}, \rho) \quad (5)$$

여기서,

$$C = \begin{pmatrix} x_s c \theta_s + y_s s \theta_s + x_k c \theta_{s+k} + y_k s \theta_{s+k} & -c \theta_{s+k} & -s \theta_{s+k} \\ -x_s s \theta_s + y_s c \theta_s - x_k s \theta_{s+k} + y_k c \theta_{s+k} & s \theta_{s+k} & -c \theta_{s+k} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{r} = \frac{1}{\alpha} \begin{pmatrix} 1 \\ x_m \\ y_m \end{pmatrix}, \quad \mathbf{d} = \begin{pmatrix} x_{adc} \\ \rho y_{adc} \end{pmatrix}$$

$$\theta_{s+k} = \theta_s + \theta_k$$

이다. 따라서 2곳 이상의 알려진 이동체의 위치 (x_k, y_k, θ_k) 에서 위치를 조정하고자 하는 광원에 대한 PSD 센서의 출력 (x_{adc}, y_{adc}) 을 검출하면 4개 이상의 3차 선형방정식을 구성할 수 있고 벡터 \mathbf{r} 에 대한 최소자승해를 구할 수 있다. 구해진 해를 이용하여 고정 파라미터를 구하는 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \alpha &= 1/r_1 \\ x_m &= \alpha r_2 \\ y_m &= \alpha r_3 \end{aligned} \quad (6)$$

4. PSD 를 이용한 이동체의 위치 측정

이동로봇과 같은 이동체의 이동경로는 일반적으로 작업 공간 상의 좌표점들로 정의되고 유도(Guidance) 기능은 이러한 사전에 정의된 경로를 따라 가도록 바퀴의 구동 및 조향 명령값을 계산한다. 항행(Navigation) 기능은 공간상의 위치를 계산하며 그림 5 와 같이 정지 상태에서 광원 위치 정보로 이동체의 위치를 직접 계산하는 초기 위치 측정과 이동중 바퀴 회전량 정보와 광원 위치 정보를 결합하여 위치를 평가하는 연속 위치 보정을 포함한다.

초기위치측정

초기위치 측정은 이동체의 위치가 알려져 있지 않은 경우 필요하다. 초기위치 측정을 위하여 필요한 조건은 다음과 같다.

1) 이동체는 정지상태이다.

2) PSD 센서에 입사되는 광은 최소한 2개 이상이며 광원의 위치는 알려져 있다.

광원의 위치에 따른 정보 (x_m, y_m, α) 를 이용하여 이동체의 초기위치를 계산하기 위하여 식(2)로부터 다음 형태의 선형방정식을 유도한다.

$$E(x_m, y_m) p(x_k, y_k, \theta_k) = f(x_{adc}, y_{adc}, \alpha) \tag{7}$$

여기서,

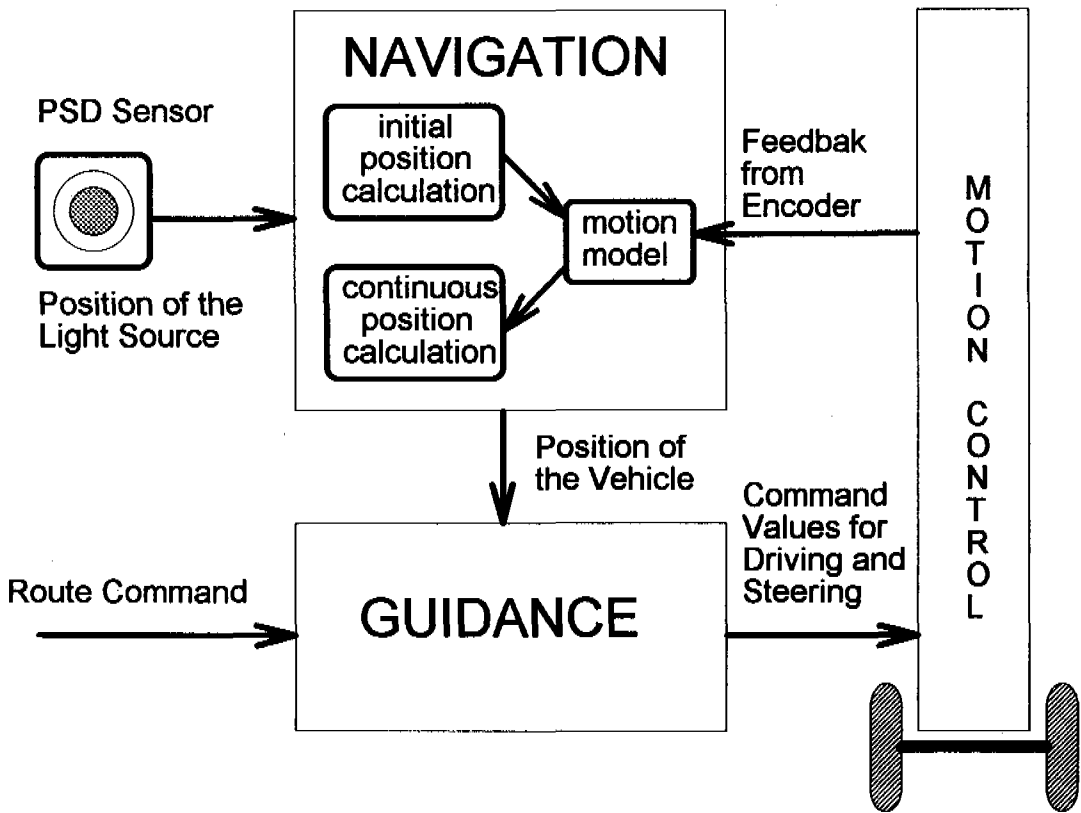


그림 5 이동체의 운행 및 유도 기능

$$E = \begin{pmatrix} c\theta_s & s\theta_s & -x_m c\theta_s - y_m s\theta_s & x_m s\theta_s - y_m c\theta_s \\ -s\theta_s & c\theta_s & x_m s\theta_s - y_m c\theta_s & x_m c\theta_s + y_m s\theta_s \end{pmatrix}$$

$$P = \begin{pmatrix} x_k c\theta_k + y_k s\theta_k \\ -x_k s\theta_k + y_k c\theta_k \\ c\theta_k \\ s\theta_k \end{pmatrix}, \quad f = \begin{pmatrix} \alpha x_{adc} - x_s c\theta_s - y_s s\theta_s \\ \alpha \rho y_{adc} + x_s s\theta_s - y_s c\theta_s \end{pmatrix}$$

이다. 정지상태의 이동체의 PSD 상에 입사되는 광원이 2개 이상일 때 4개 이상의 4차 선형방정식을 구성할 수 있고 잘알려진 최소자승법에 의하여 벡터 p 를 구할수 있다. 이때 이동체의 위치는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x_k &= p_1 p_3 - p_2 p_4 \\ y_k &= p_1 p_4 + p_2 p_3 \\ \theta_k &= \tan^{-1}(p_4 / p_3) \end{aligned} \quad (8)$$

연속 위치 보정

바퀴를 이용하여 이동하는 이동체는 Dead Reckoning 으로 위치를 계산할 수 있다. 이 방법은 바퀴의 회전량 및 조향각으로부터 위치의 변화량을 측정하는 방법으로 측정시 발생되는 오차는 위치오차를 누적시킨다. 따라서 위치오차를 적절한 범위내로 제한시키기 위해서는 적정거리 마다 외부 기준점을 인식하여 Dead Reckoning 으로 계산된 위치를 실시간으로 보정하는 것이 필요하다. PSD 센서는 광원의 위치를 실시간으로 측정할 수 있으므로 이러한 목적에 적합하다.

PSD 센서에서 측정된 광원의 위치정보를 이용하여 Dead Reckoning 에 의해 계산된 이동체의 위치정보를 보정하기 위하여 Extended Kalman Filter 기법[13]을 사용하였다. 식(2)를 벡터식으로 나타내면,

$$y = g(x_k) + e \quad (9)$$

여기서,

$$g(x_k) = \begin{pmatrix} (x_k - x_m)c\theta_{s+k} + (y_k - y_m)s\theta_{s+k} + x_s c\theta_s + y_s s\theta_s \\ -(x_k - x_m)s\theta_{s+k} + (y_k - y_m)c\theta_{s+k} - x_s s\theta_s + y_s c\theta_s \end{pmatrix}$$

이다. e 는 광원 위치 측정 오차를 표시한다.(5장 참조) 식 (9)를 Dead Reckoning 으로 계

산된 이동체의 위치 \hat{x}_k 에 대하여 선형화 하면,

$$\begin{aligned} y - g(\hat{x}_k) &\cong \frac{\partial g(\hat{x}_k)}{\partial \hat{x}_k} \cdot (x_k - \hat{x}_k) + e \\ &= C_k \cdot (x_k - \hat{x}_k) + e \end{aligned} \quad (10)$$

여기서,

$$C_k = \begin{pmatrix} c\hat{\theta}_{s+k} & s\hat{\theta}_{s+k} & -(\hat{x}_k - x_m)s\hat{\theta}_{s+k} + (\hat{y}_k - x_m)c\hat{\theta}_{s+k} \\ -s\hat{\theta}_{s+k} & c\hat{\theta}_{s+k} & -(\hat{x}_k - x_m)c\hat{\theta}_{s+k} - (\hat{y}_k - x_m)s\hat{\theta}_{s+k} \end{pmatrix}$$

이다. 이때 광원위치측정 오차항을 기대값이 영인 가우시안 백색잡음으로 가정하면 Extended Kalman Filter 에 의한 최적 위치 보정량은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta \hat{x}_k &= \hat{x}_k(+)-\hat{x}_k(-) = K_k[y - g\{\hat{x}_k(-)\}] \\ P_k(+)&= P_k(-) - K_k C_k P_k(-) \\ K_k &= P_k(-) C_k^T [C_k P_k(-) C_k^T + E_k]^{-1} \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 (-) 는 보정전 값을, (+) 는 보정후 값을 나타낸다.

5. PSD 센서 측정오차 분석

광원의 위치측정 오차는 단순히 PSD 센서의 측정 정밀도 및 신호의 측정 잡음뿐 아니라 이동중에 발생하는 이동체의 바퀴 진동 및 흔들림에 의한 다양한 요인에 의하여 발생된다.

신호처리 오차

PSD 센서의 신호처리 오차는 H/W 와 밀접한 관련이 있으며 다음의 3가지 오차발생 요인이 있다.

- ① PSD 센서의 정밀도(σ_{psd})
- ② 신호처리부의 잡음(σ_{pro})
- ③ ADC(Analog to Digital Convertor) 에 의한 양자화 오차(σ_{adc})

$$\sigma_{adc} = \frac{1}{\sqrt{12}} \left(\frac{2r}{2^b} \right)$$

여기서 r 은 PSD 센서의 유효반경이고 b 는 ADC의 비트수이다.

바퀴의 진동에 의한 오차

이동체의 주행시 발생하는 양 바퀴의 진동은 이동체 중심부를 상하로 변위시키고 좌우로 기울임을 야기시킨다. 그림 6과 같이 양바퀴의 미소 변위량을 각각 $\Delta z_r, \Delta z_l$ 이라하고 이에 의한 중심부의 변위량을 Δz_c , 기울기를 $\Delta \phi_c$ 라 하면,

$$\Delta z_c = \frac{\Delta z_r + \Delta z_l}{2}$$

$$\Delta \phi_c = \tan^{-1} \left(\frac{\Delta z_r - \Delta z_l}{T_0} \right) \cong \frac{\Delta z_r - \Delta z_l}{T_0}$$

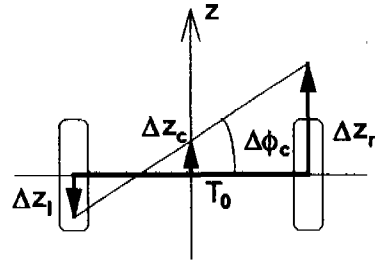


그림 6. 바퀴의 변위에 의한 중심부의 변위 및 기울임

이다. 이때 바퀴 변위의 표준편차를 $\sigma_r = \sigma_l = \sigma_w$ 라 하면 중심부의 변위 및 기울임의 편차는 각각

$$\sigma_z = \frac{\sigma_w}{\sqrt{2}}$$

$$\sigma_\phi = \frac{\sqrt{2}\sigma_w}{T_0}$$

이다. PSD 센서가 이동체의 중심부에 놓여 있을 때 중심부 변위에 의한 광원의 측정 오차는 그림 7에서,

$$\Delta l = \frac{\Delta z_c}{H - \Delta z_c} F \tan \beta \cong \frac{\Delta z_c}{\gamma} \tan \beta$$

$$\sigma_l = \sigma_w \frac{\tan \beta}{\sqrt{2} \gamma}$$

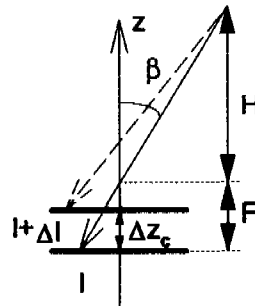


그림 7. 중심부 변위에 의한 측정오차

이다. 중심부 기울임에 의한 영향은 근사적으로 그림 8 에서

$$\Delta l' = F \{ \tan(\beta + \Delta\phi_c) - \tan\beta \} \cong \frac{F\Delta\phi_c}{\cos^2\beta}$$

$$\sigma_{l'} = \sigma_w \frac{\sqrt{2}F}{T_0 \cos^2\beta}$$

이다.

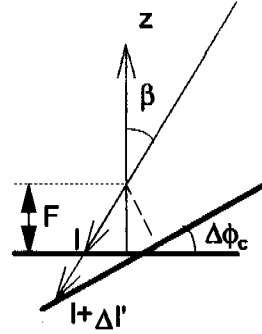


그림 8. 중심부 기울임에 의한 측정오차

전체오차

이러한 오차들은 발생 원인이 서로 독립적이므로 PSD 센서의 광원 위치측정오차는 다음과 같다.

$$\sigma_e^2 = \gamma^2 (\sigma_l^2 + \sigma_{l'}^2 + \sigma_{psd}^2 + \sigma_{pro}^2 + \sigma_{adc}^2)$$

본 연구의 경우 $\sigma_w = 0.1 \text{ mm}$, $T_0 = 0.8\text{m}$, $\beta = 25^\circ$, $b = 12$, $r = 10\text{mm}$, $H = 3 \text{ m}$, $F = 13.35\text{mm}$ 일 때 오차정도는 다음과 같았다.

$$\sigma_l = 0.14 \mu\text{m}$$

$$\sigma_{l'} = 2.8 \mu\text{m}$$

$$\sigma_{psd} = 0.05 \mu\text{m}$$

$$\sigma_{pro} = 50 \mu\text{m}$$

$$\sigma_{adc} = 1.4 \mu\text{m}$$

$$\sigma_e = 11.31\text{mm}$$

그러므로 광원위치 측정오차의 주 원인은 신호처리부의 노이즈이고, 주행중 이동체의 진동, ADC에 의한 측정 신호의 양자화 오차도 무시할 수 없는 요인이거나 PSD 자체의 정밀도는 상대적으로 거의 오차에 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

6. 실험 및 결과고찰

그림 9와 같이 TRC 사의 이동로봇인 LABMATE를 대상으로 이동체의 위치측정 실험을 실시하였다. 제안된 PSD 센서를 이동로봇 상에 설치하고 위치계산 및 주행제어용으로 Notebook PC 를 이용하였다. 광원은 약 2.2m 높이의 천정에 설치하였고 이때 PSD 센서에 의한 광원 감지영역은 반경 600mm 정도 이었다. 그림 10과 같이 광원 AC1 및 AC2는 두 개의 광원을 감지할 수 있는 영역(중첩영역)이 존재하도록 배치하였고, AC3 및 AC4는 중첩되지 않도록 배치하였다.

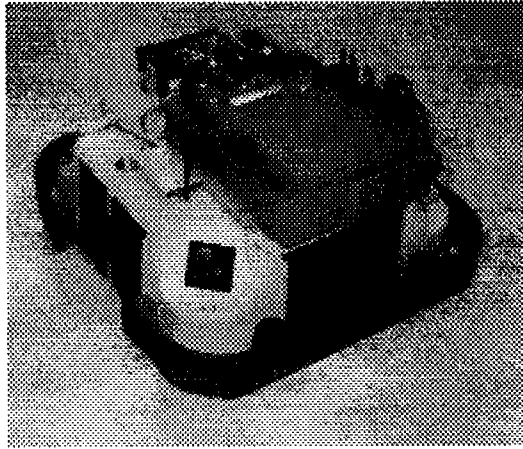


그림 9 이동로봇

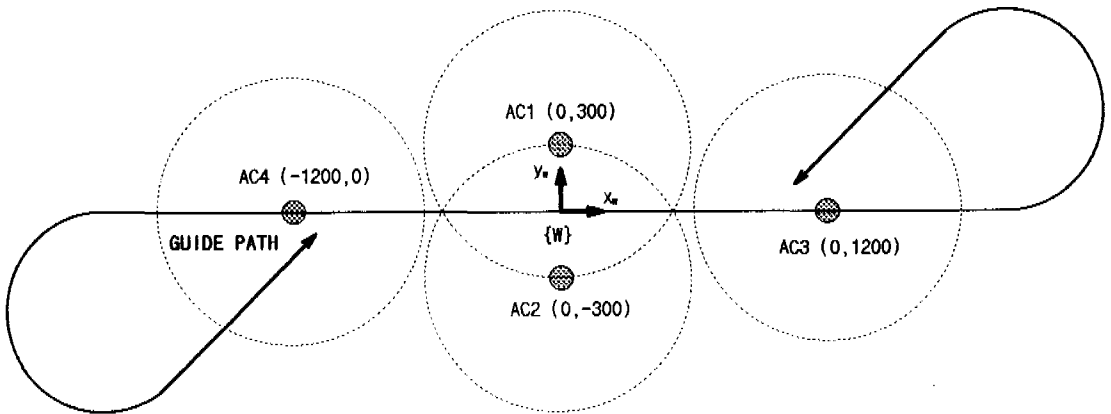


그림 10 광원 배치 및 주행경로(단위는 mm)

PSD 센서 및 광원 파라미터 캘리브레이션

PSD 센서에 관한 파라미터를 정밀조정하기 위하여 광원 AC1 주위 100mm 간격으로 이동로봇을 이동시키면서 PSD 센서 출력을 측정하였다. 측정된 정보를 이용하여 식(3) 및 식(4)에 의하여 PSD 센서에 관련된 고정 파라미터를 구한 결과 다음과 같았다.

$$x_s = 10.7mm$$

$$y_s = 20.4mm$$

$$\theta_s = -5.6^\circ$$

$$\rho = 1.0113$$

또한 광원에 관련된 파라미터를 정밀조정하기 위하여 4개의 광원 주위 300mm 간격으로 이동로봇을 이동시키면서 PSD 센서 출력을 측정하였다. 측정된 정보와 앞서 구한 PSD 센서의 고정 파라미터를 이용하여 광원과 관련된 고정 파라미터를 식(5) 및 식(6)에 의하여 구한 결과 표 2 와 같았다.

표 2 광원 파라미터 캘리브레이션 결과

광 원	$(x_m, y_m) \alpha$
AC1(0, 300)	(19.0, 285.9) 0.225
AC2(0, -300)	(20.2, -336.7) 0.218
AC3(1200, 0)	(1236.4, -14.4) 0.227
AC4(-1200, 0)	(-1209.0, -33.7) 0.224

초기 위치 측정

초기 위치 측정 정확도를 알아보기 위하여 두개의 광원을 검출할 수 있는 중첩영역내의 알려진 위치에서 각 광원에 대한 PSD 센서의 출력을 측정하였다. 측정된 정보로 식(7) 및 식(8)에 의하여 계산된 이동로봇의 위치와 실제 위치와의 오차는 표 3 과 같다. 실험 결과로부터 제안된 위치측정 시스템은 두개의 광원을 검출하는 경우 초기위치 측정오차가 거리 10mm 이내, 방향 1°이내 임을 알 수 있다.

표 3 초기위치 측정오차

θ_k (x_k, y_k)	0°	180°
(0,0) [mm]	(-2.5,-1.3) 0.3°	(-0.3, 1.8) -0.2°
(200,0) [mm]	(-3.2, 9.3) -0.1°	(-2.1,-2.0) 0.0°
(-200,0) [mm]	(8.1,-0.8) -0.6°	(-2.0, 1.7) 0.5°
(0,100) [mm]	(-5.9,-4.5) 0.6°	(0.6, 1.6) 0.4°
(0,-100) [mm]	(0.5, 4.7) -0.0°	(3.8, 5.9) -0.6°

연속 위치 보정

제안된 연속 위치 보정 시스템의 유용성을 보이기 위하여 주행 경로를 그림 9 와 같이 동일한 경로를 반복 주행하도록 선정하였다. 이동로봇은 4m 의 직선경로를 따라 주행한 후 경로 끝에서 정지없이 180° 회전하여 다시 직선경로를 따라 움직이도록 프로그램 하였고 이때 주행 속도는 0.5m/s 위치측정 및 주행제어 주기는 10ms 로 하였다. 주행 실험은 광원 배치 형태에 따른 위치보정 효과를 관찰하기 위하여 표 4 와 같은 조건에서 각각 20 회 반복 실시하였고 이때 계획된 경로로 부터의 이탈거리를 측정하였다. 실험 결과 반복 횟수에 따른 경로 오차는 그림 11 과 같다.

표 4 실험 방법

실험종류	사용 광원				경로 오차 측정점 (x, y) [mm]
	AC1	AC2	AC3	AC4	
DR	OFF	OFF	OFF	OFF	(1200,0) 및 (-1200,0)
실험 1	ON	OFF	OFF	OFF	(1200,0) 및 (-1200,0)
실험 2	ON	ON	OFF	OFF	(1200,0) 및 (-1200,0)
실험 3	OFF	OFF	ON	ON	(0,0)

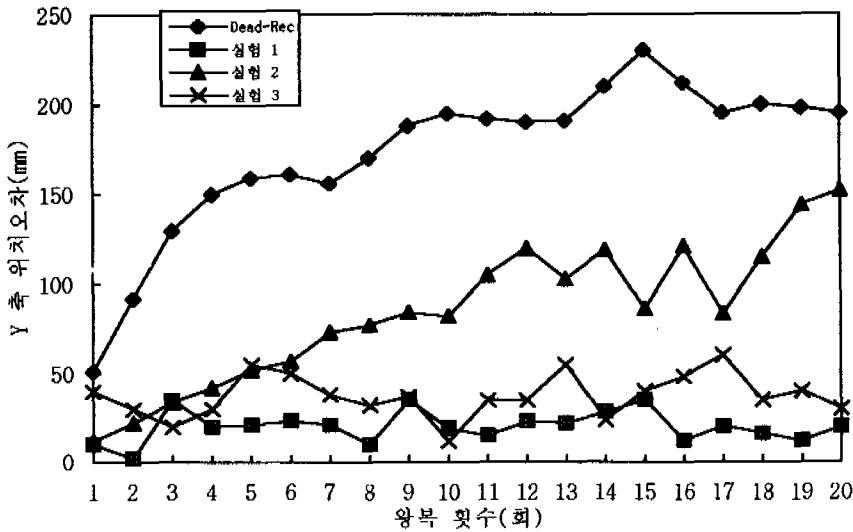


그림 11 경로 오차 비교

DR은 광원 검출없이 Dead Reckoning에만 의존하여 주행하는 경우로 반복횟수가 증가함에 따라 위치 오차의 누적에 의하여 경로 오차가 심해지는 것을 알 수 있다. 실험 1은 주행중 하나의 광원만을 검출하여 위치보정 한 경우로 횟수의 증가에 따라 역시 경로 오차가 증가하고 있는데 이는 광원의 2차원 정보로 이동로봇의 3차원 위치(거리 2, 방향 1)를 적절히 보정할 수 없기 때문이다. 실험 2는 이동로봇이 동일위치에서 두개의 광원을 검출할 수 있는 중첩영역을 통과하도록 한 경우로 반복횟수에 관계없이 계획된 경로를 잘 따라가고 있음(경로 이탈 거리 5cm 이내)을 볼 수 있다. 즉 적절한 위치보정이 이루어지고 있다. 실험 3은 주행중 2개의 광원이 각각 다른 위치에서 검출되도록 한 경우로 실험 2와 유사한 결과를 보이고 있다. 이상의 실험을 통해 주행중 서로 다른 2개의 광원이 검출되는 경우 적절한 위치 보정이 이루어짐을 알 수 있다.

7. 결 론

평면상을 이동하는 물체의 공간상의 위치를 결정하기 위하여 광원의 위치를 측정할 수 있는 PSD 센서 시스템을 제안하였다. 이동체 위치, 광원 위치, PSD 센서 출력, 사이의 관계식을 구하고 파라미터 캘리브레이션, 초기 및 연속 위치측정 알고리즘, 측정오차의 원인분석, 등을 제시하였다. 제안된 PSD 센서의 프로토타입을 제작하고 이동로봇을 대상으로 여러가지 위치측정 및 주행실험을 수행하였다. 실험 결과 실내 주행에 필요한 충분한 정도의 정확한 위치측정을 할 수 있음을 확인하였다.

제안된 시스템은 위치보정용 표식(여기서는 광원)의 설치가 용이하고 경제적이며 실시간 위치측정이 가능하므로 비교적 이동공간이 큰 이동로봇, 무인운반차, 등의 자율주행용으로 실용화가 기대되며, 향후 두개의 PSD 센서를 사용한 광원의 3차원 위치측정에 대한 연구를 통하여 산업용 로봇(매니플레이터)의 최종 작용부 위치 측정 및 자세보정, 크레인 위치제어, 등에 응용할 수 있으리라 본다.

참고 문헌

- [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] E. Krotkov and M. Hebert, "Mapping and positioning for a prototype lunar rover", Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2913-2919, 1995.
- [7] T. Nishizawa, A. Ohya, and S. Yuta, "An implementation of on-board position estimation for a mobile robot", Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.395-400, 1995.
- [8] 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.
- [9] E. Krotkov, "Mobile robot localization using a single image", Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 978-983, 1989.
- [10] F. Chenavier and J. L. Crowley, "Position estimation for a mobile robot using vision and odometry", Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2588-2593, 1992.
- [11] 문순환 및 한민용, "블록 거울을 이용한 이동 로봇트 주행 제어", '94 한국 자동제어 학술회의 논문집 pp. 323-329, 1994.

- [12] G. Golub, "Numerical method for solving linear least squares problems", *Numerische Mathematik*, vol. 7, no. 3, pp.206-216, 1965.
- [13] P.S. Maybeck, *Stochastic Models, Estimation, and Control*, (Vol. 141-2 in MATHEMATICS IN SCIENCE AND ENGINEERING), Academic Press, 1982.