

이동 로봇의 위치측정을 위한 PSD 센서 시스템에 관한 연구

A Study on the PSD Sensor System for Localization of Mobile Robots

노영식
(Young-Shick Ro)

Abstract : An real-time active beacon localization system for mobile robots is developed and implemented. This system permits the estimation of robot positions when detecting light sources by PSD(Position Sensitive Detector) sensor which are placed sparsely over the robots work space as beacons(or landmarks). An LSE(Least Square Estimation) method is introduced to calibrate the internal parameters of a model for the beacon and robot position. The proposed system has two operational modes of position estimation. One is the initial position calculation by the detection of two or more light sources positions of which are known. The other is the continuous position compensation that calculates the position and heading of the robot using 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 for the navigation of robots.

Keywords : mobile robot, position estimation, extended kalman filter, position sensitive detector(PSD)

I. 서론

이동 로봇의 공간상의 위치 정보는 이동로봇을 정해진 경로를 따라 목적지까지 이동시키기 위하여 사용된다. 이동 중 위치의 변화는 바퀴의 회전량을 측정하여 계산할 수 있으나 장거리 주행시 오차가 심해지므로 로봇의 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 2 차원 혹은 3차원 맵 매칭을 이용한 방법[5-6], 등이 제시되고 있다. 그러나 이러한 방법들은 물체 인식에 많은 시간을 소요하고 전적으로 주위 환경에 의존하므로 적용에 제한을 많이 받는다. 이러한 문제는 인위적인 표식을 주행 경로 주위에 설치하고 이를 센서로 검출하는 방식으로 해결할 수 있다. 현재 실용화된 방법 중의 하나는 레이저 스캐너를 사용하여 주위에 설치된 반사 물체를 검출하는 방식[7]이 있으나 이는 주행 평면 상의 경로 주위에 표식을 설치해야 하는 제약이 있고 장애물의 간섭을 받을 수 있다. 이러한 문제는 비전 센서를 이용한 방법[8-11]으로 어느 정도 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 이동 로봇의 외계 인식 센서로 사용하는 경우 표식이 광원이므로 에너지가 필요한 단점은 있으나 표식의 설치에 제한이 거의 없고(천정, 벽, 등 어디든 가능하고 높이도 수 m 에서 수십 m 까지 자유롭게 설치 가능함) 실시간으로 표식 위치 측정이 가능한 장점이 있다.

본 연구에서는 평면형 PSD 를 이용한 이동 로봇의 위치 측정용 센서 시스템을 개발하였다. 주변광과 광원을 구분하기 위하여 특정 파장의 적외선 광원을 사용 하였고 외관광

의 영향을 제거하기 위한 특별한 고려가 있었다. 이동로봇 위치의 자유도는 3인데 반하여 PSD에 의한 광원의 위치 정보는 2차원 이므로 동일 위치에서 두개 이상의 광원의 검출이 가능하도록 하여야 한다. 이를 위하여 펄스형 광을 이용하여 시분할 형식으로 다수의 광원의 위치를 측정할 수 있는 센서 시스템을 설계하였다. PSD 센서를 이동로봇에 설치하고 광원을 검출하였을 경우 광원 및 이동로봇의 위치와 PSD 센서 출력과의 관계식을 유도하고, 이때 관계식에 포함된 센서 관련 파라미터와 광원 관련 파라미터의 캘리브레이션 방법을 개발하였다. PSD 센서 시스템에 의한 이동로봇 위치측정 방식으로 두개 이상의 광원 검출에 의한 초기 위치 측정 알고리즘과 주행 중 위치보정을 위한 연속 위치 보정 알고리즘을 제시하고 PSD 센서의 광원 위치 측정 오차 원인과 정도를 분석하였다. 제안된 PSD 센서 시스템의 프로토타입을 제작하여 초기 및 주행 중 이동로봇의 위치측정 실험을 수행하였고 결과를 평가하였다.

II. PSD 센서 시스템

PSD(Position Sensitive Detector) 는 표면 층이 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 주행공간 상부의 알려진 위치에 드문드문 놓여진 광원의 입사위치를 측정하여 주행평면 상의 이동로봇 위치를 계산하기 위하여 평면형 PSD (Hamamatsu사의 S1880)를 사용한 PSD 센서 시스템의 프로토타입을 개발하였다. 수광부인 광검출부는 그림 1과 같이 PSD, 파장 920nm의 광원 이외의 외관 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.

위치 측정 대상이 되는 광원은 항상 ON 상태인 DC광과 펄스형인 AC광의 두가지 형태를 고려해 볼 수 있다. DC 광을 사용하는 경우 광원 및 PSD 센서의 구조가 간단하고 연속적인 측정이 가능하나 PSD 의 광원감지 영역 내에 두개 이상의 광원이 존재하는 경우 위치측정이 불가능해진다. 반면 AC광은 광원감지 영역 내에 다수의 광원이 존재 하더라도 시분할(Time Division Multiplexing) 기법으로 하

접수일자 : 1996. 4. 15., 수정완료 : 1996. 10. 20.

노영식 : 울산대학교 전기공학과

* 이 논문은 1995년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

나의 광만 PSD에 입사하도록 제어하면 동일한 위치에서 여러 개의 광원의 입사위치를 계측할 수 있다. 또한 IR Filter에 의해 제거되지 않은 배경광 신호와 광원에 의한 입사광 신호를 분리할 수 있으므로 보다 정밀한 계측이 가능하다. 그러나 광의 입사 시점과 계측 시점의 동기를 고려해야 하므로 광원과 PSD 센서의 구조가 다소 복잡해 지는 단점이 있다. 본 연구에서는 동일 위치에서 여러 광원의 입사위치를 계측할 수 있도록 하기 위하여 AC광을 사용하였다.

표 1. 광검출부 사양.

Table 1. Specification of light detector part.

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°

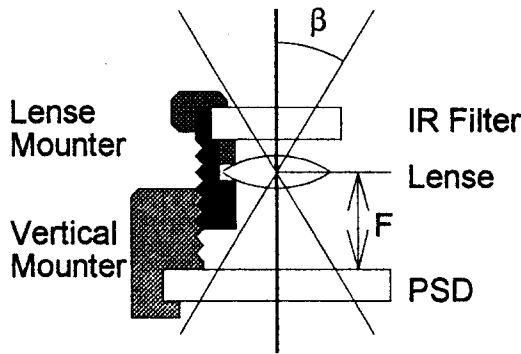


그림 1. 광검출부.
Fig. 1. A light detector part.

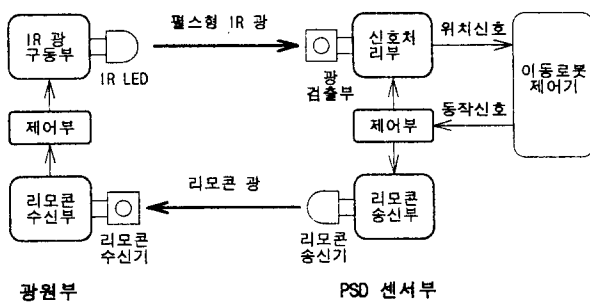


그림 2. PSD 센서 시스템 구성.
Fig. 2. Structure of the PSD sensor system.

그림 2는 개발된 PSD 센서 시스템의 구성을 보여주며 그림 3은 주요 동작 타이밍도를 보여준다. 이동로봇 제어기에서 PSD 센서에 동작신호를 주면 센서 제어부는 38 kHz의 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 배경광에 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 위치에 비례하는 아날로그 신호를 발생 시킨다. 이는

ADC에 의하여 디지털 신호로 변환된 후 이동로봇의 제어기에 입력된다. 개발된 PSD 센서 시스템은 입사광의 위치 계측이 1ms 이내에 이루어 지고 주변광의 영향을 거의 받지 않음을 특성실험을 통하여 확인하였다.

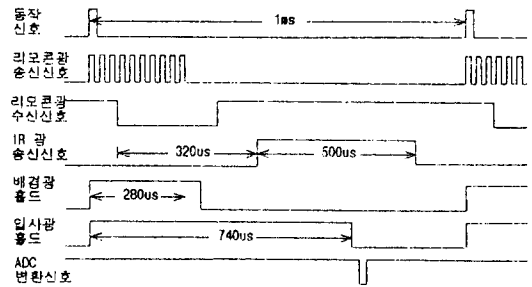


그림 3. PSD 센서 시스템의 동작 타이밍도.
Fig. 3. Timing diagrams of the PSD sensor system.

III. 기하학적 모델링 및 캘리브레이션

PSD 센서에서 측정된 입사광의 위치를 이용하여 이동로봇의 주행평면 상의 위치를 계산하기 위하여 광원위치, 이동로봇 위치, 이동로봇 상의 센서위치 및 센서 출력신호 사이의 정확한 기하학적 모델링이 필요하다. PSD 센서의 표면은 주행 평면과 일치하고 센서의 위치는 이동로봇 좌표계의 원점 부근에 놓이도록 한 것으로 가정한다. 그림 2a) 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 (1) 과 같이 구할 수 있다.

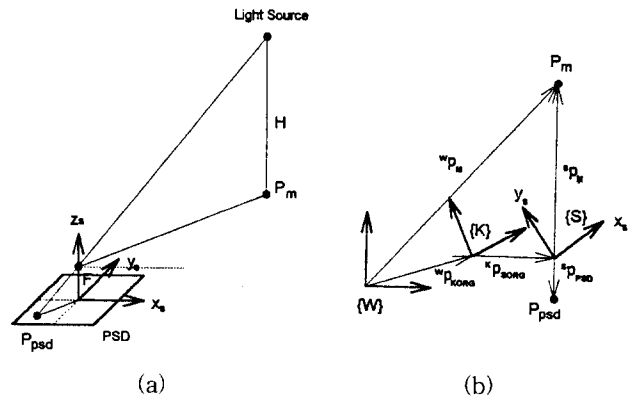


그림 4. (a) 광원과 PSD 좌표계, (b) 주행평면으로의 투영.
Fig. 4. (a) Light source and PSD coordinates, (b) Projection to navigation planes.

$${}^S \mathbf{p}_M = {}^S \mathbf{K} \mathbf{R} \{ {}^K \mathbf{R} ({}^W \mathbf{p}_M - {}^W \mathbf{p}_{KORG}) - {}^K \mathbf{p}_{SORG} \} = -\gamma {}^S \mathbf{p}_{PSD} \quad (1)$$

여기서

- {W} : 작업계
- {K} : 이동로봇계
- {S} : PSD 센서계

$\mathbf{x}_k = (x_k, y_k, \theta_k)^T$: 작업계를 기준으로 한 이동로봇계의 위치벡터

$\mathbf{x}_s = (x_s, y_s, \theta_s)^T$: 이동로봇계를 기준으로 한 센서계의 위치벡터

$\gamma = \frac{H}{F}$: PSD 스케일 계수

${}^S_k R = \begin{pmatrix} \cos \theta_s & \sin \theta_s \\ -\sin \theta_s & \cos \theta_s \end{pmatrix}$: 센서계를 기준으로 한 이동로봇
계의 회전행렬

${}^K_w R = \begin{pmatrix} \cos \theta_k & \sin \theta_k \\ -\sin \theta_k & \cos \theta_k \end{pmatrix}$: 이동로봇계를 기준으로 한 작업
계의 회전행렬

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

${}^S p_M$: 광원위치에 대한 센서계 벡터

${}^w p_{KORG} = (x_k, y_k)^T$: 이동로봇계의 원점에 대한 작업계
벡터

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

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

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

$${}^S_k R \{ {}^K_w R ({}^w p_M - {}^w p_{KORG}) - {}^K p_{SORG} \} = -y \quad (2)$$

여기서

$$y \equiv \gamma (x_{psd}, y_{psd})^T = \alpha (x_{adc}, \rho y_{adc})^T$$

(x_{adc}, y_{adc}) : PSD 센서 출력신호

α : x축 출력 신호 스케일 계수

ρ : y축 스케일 계수/ x축 스케일 계수

(2)를 이동로봇의 위치계산에 사용하기 위해서는 센서위치 및 이득비와 관련된 고정 파라미터 $(x_s, y_s, \theta_s, \rho)$ 와 광원의 위치에 관련된 고정 파라미터 (x_m, y_m, α) 를 정확하게 조정하는 것이 매우 중요하다. 이러한 파라미터의 캘리브레이션에 의하여 (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 이동로봇의 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.

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{1}{\sqrt{q_1^2 + q_2^2}} \\ x_m &= \alpha^2 (q_1 q_3 - q_2 q_4) \\ y_m &= \alpha^2 (q_1 q_4 + q_2 q_3) \\ x_s &= \alpha^2 (q_1 q_5 - q_2 q_6) \\ y_s &= \alpha^2 (q_1 q_6 + q_2 q_5) \\ \theta_s &= \tan^{-1}(q_2/q_1) \\ \rho &= q_7 \end{aligned} \quad (4)$$

다른 위치에 있는 광원에 대해서는 광원위치에 관련된 파라미터 (x_m, y_m, α) 만 캘리브레이션 하면 된다. 이를 위하여 (2)를 다음과 같은 형태로 변형한다.

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

여기서,

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

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

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

이다. 따라서 2곳 이상의 알려진 이동로봇의 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 r 에 대한 최소자승해를 구할 수 있다. 구해진 해를 이용하여 고정 파라미터를 구하는 식은 다음과 같다.

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

IV. PSD를 이용한 이동로봇의 위치 측정

이동로봇의 주행경로는 작업 공간 상의 좌표점들로 정의되고 로봇의 유도(Guidance) 기능은 이러한 사전에 정의된 경로를 따라 가도록 구동 및 조향 명령값을 계산한다. 항행(Navigation) 기능은 이동로봇의 공간상의 위치를 계산하며 그림 5와 같이 정지상태에서 광원 위치 정보로 로봇 위치를 직접 계산하는 초기 위치 측정과 주행 중 바퀴 회전량 정보와 광원 위치 정보를 결합하여 위치를 평가하는 연속 위치 보정을 포함한다.

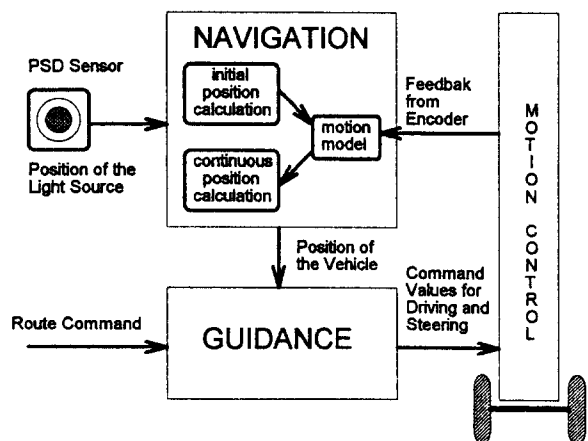


그림 5. 이동로봇의 운행 및 유도 기능.
Fig. 5. Navigation and guidance of mobile robots.

초기위치측정

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

- 1) 이동로봇은 정지상태이다.
- 2) PSD 센서에 입사 되는 광은 최소한 2개 이상이며 광원의 위치는 알려져 있다.

광원의 위치에 따른 정보 (x_m, y_m, α) 및 PSD 센서출력 (x_{adc}, y_{adc}) 를 이용하여 이동로봇의 초기위치 (x_k, y_k, θ_k) 를 계산하기 위하여 (2)로 부터 다음 형태의 선형방정식을 유도한다.

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

여기서,

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

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

이다. 정지상태의 이동로봇의 PSD 상에 입사 되는 광원이 2개 이상일 때 4개 이상의 4차 선형방정식을 구성할 수 있고 잘 알려진 최소자승법에 의하여 벡터 \mathbf{p} 를 구할 수 있다. 이때 이동로봇의 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

주행 중인 이동로봇은 Dead Reckoning 으로 위치를 계산할 수 있다. 이 방법은 바퀴의 회전량 및 조향각으로부터 위치의 변화량을 측정하는 방법으로 측정 시 발생하는 오차는 위치오차를 누적 시킨다. 따라서 위치오차를 적절한 범위 내로 제한 시키기 위해서는 적정 거리마다 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 이동로봇의 위치정보를 보정하기 위하여 Extended Kalman Filter 기법[13]을 사용하였다. (2)를 벡터식으로 나타내면,

$$\mathbf{y} = \mathbf{g}(\mathbf{x}_k) + \mathbf{e} \quad (9)$$

여기서,

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

이다. \mathbf{e} 는 광원 위치 측정 오차를 표시한다(5장 참조). (9)를 Dead Reckoning 으로 계산된 이동로봇의 위치 $\hat{\mathbf{x}}_k$ 에 대하여 선형화 하면,

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

여기서,

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

이다. 이때 광원위치측정 오차항을 기대값이 영인 가우시안 백색잡음으로 가정하면 Extended Kalman Filter 에 의한 최적 위치 보정량 $\Delta \hat{\mathbf{x}}_k$ 은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta \hat{\mathbf{x}}_k &\equiv \hat{\mathbf{x}}_k(+)-\hat{\mathbf{x}}_k(-) = \mathbf{K}_k[\mathbf{y} - \mathbf{g}(\hat{\mathbf{x}}_k(-))] \\ \mathbf{P}_k(+)&= \mathbf{P}_k(-) - \mathbf{K}_k \mathbf{C}_k \mathbf{P}_k(-) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k(-) \mathbf{C}_k^T [\mathbf{C}_k \mathbf{P}_k(-) \mathbf{C}_k^T + \mathbf{E}_k]^{-1}$$

여기서 $\mathbf{P}_k, \mathbf{E}_k$ 는 각각 이동로봇 위치측정오차 분산행렬 및 광원 위치측정오차 분산행렬이고 (-)는 보정전 값을, (+)는 보정후 값을 나타낸다.

V. PSD 센서 측정오차 분석

광원의 위치측정 오차는 단순히 PSD 센서의 측정 정밀도 및 신호의 측정 잡음뿐 아니라 주행 중에 발생하는 이동로봇의 진동 및 흔들림에 의한 다양한 요인에 의하여 발생된다.

신호처리 오차

PSD 센서의 신호처리 오차는 하드웨어와 밀접한 관련이 있으며 다음의 3가지 오차발생 요인이 있다.

- ① PSD 센서의 정밀도(σ_{psd})
- ② 신호처리부의 잡음(σ_{pro})
- ③ ADC(Analog to Digital Converter)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

이동로봇의 주행시 발생하는 양 바퀴의 진동은 이동로봇 중심부를 상하로 변위 시키고 좌우로 기울임을 야기시킨다. 그림 6과 같이 양 바퀴의 미소 변위량을 각각 $\Delta z_r, \Delta z_l$ 이라 하고 이에 의한 중심부의 변위량을 Δz_c , 기울기를 $\Delta \phi_c$ 라 하면,

$$\begin{aligned} \Delta z_c &= \frac{\Delta z_r + \Delta z_l}{2} \\ \Delta \phi_c &= \tan^{-1} \left(\frac{\Delta z_r - \Delta z_l}{T_0} \right) \cong \frac{\Delta z_r - \Delta z_l}{T_0} \end{aligned}$$

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

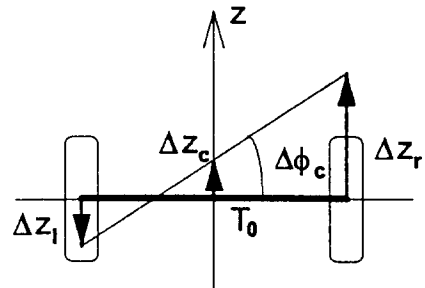


그림 6. 바퀴의 변위에 의한 로봇의 변위 및 기울임.
Fig. 6. Displacement and tilt of the Robot induced motion by wheel displacements.

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

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

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

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

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

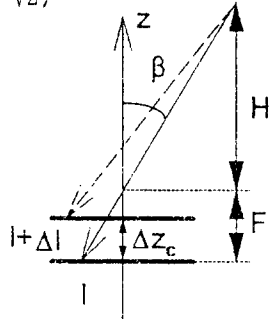


그림 7. 중심부 변위에 의한 측정오차.
Fig. 7. Measurement error due to displacement.

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.

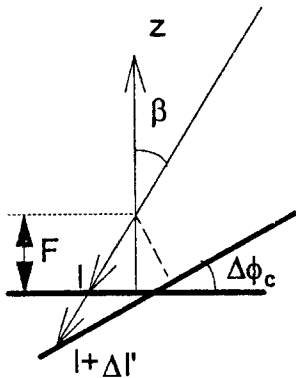


그림 8. 중심부 기울임에 의한 측정오차.
Fig. 8. Measurement error due to tilt.

전체오차

이러한 오차들은 발생 원인이 서로 독립적이므로 PSD 센서의 광원 위치 측정 오차는 다음과 같다.

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

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

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

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

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

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

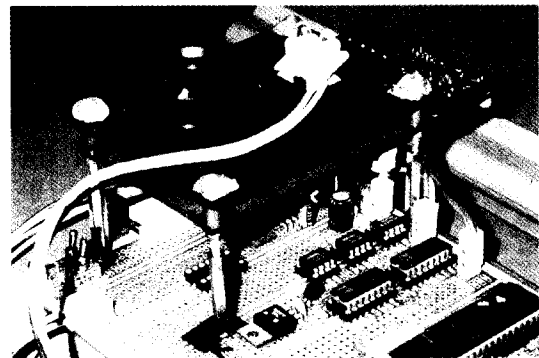
$$\sigma_{adc} = 1.4\mu\text{m}$$

$$\sigma_e = 11.3\text{mm}$$

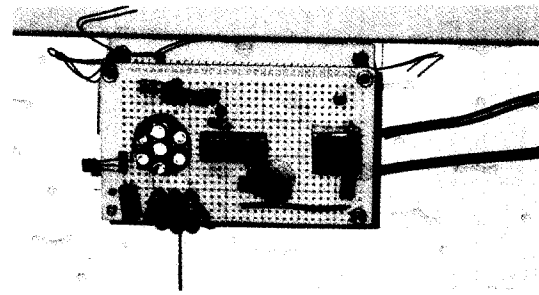
그러므로 광원위치 측정오차의 주 원인은 신호처리부의 노이즈이고, 주행 중 이동로봇의 진동에 의한 기울어짐, ADC에 의한 측정 신호의 양자화 오차 순이며, PSD 자체의 정밀도는 상대적으로 거의 오차에 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

VI. 실험 및 결과고찰

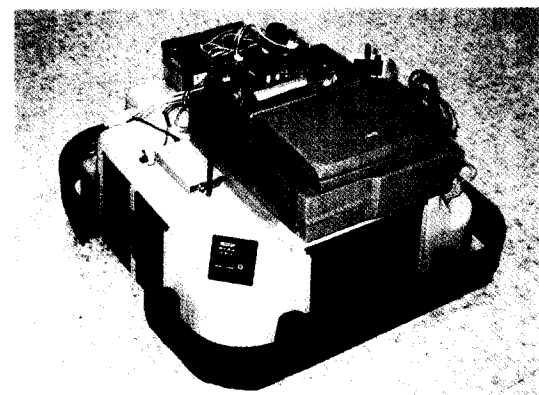
제안된 PSD 센서를 그림 9와 같이 TRC 사의 이동로봇인 LABMATE에 설치하였고 위치계산 및 주행제어용으로 Notebook PC 를 이용하였다. 광원은 약 2.2m 높이의 천정에 설치하였고 이때 PSD 센서에 의한 광원 감지영역은 반경 600mm 정도 이었다. 그림 10과 같이 광원 AC1 및 AC2 는 두개의 광원을 감지할 수 있는 영역(중첩영역)이 존재하도록 배치하였고, AC3 및 AC4는 중첩되지 않도록 배치하였다.



a) PSD 센서부(PSD sensor part)



b) 광원부(Light source part)



c) 이동로봇(Mobile robot)

그림 9. 이동로봇 시스템.
Fig. 9. Mobile robot system.

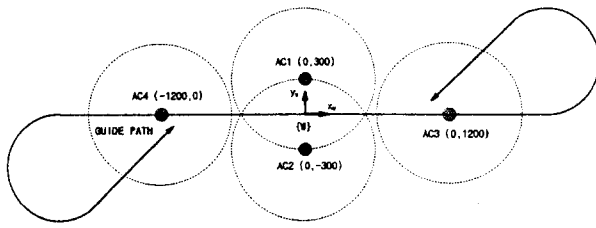


그림 10. 광원 배치 및 주행경로(단위는 mm).
Fig. 10. Placements of light sources and navigation paths(unit: mm).

PSD 센서 및 광원 파라미터 캘리브레이션

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

$$x_s = 10.7\text{mm}$$

$$y_s = 20.4\text{mm}$$

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

$$\rho = 1.0113$$

또한 광원에 관련된 파라미터를 정밀 조정하기 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 (5) 및 (6)에 의하여 구한 결과 표 2 와 같았다.

표 2. 광원 파라미터 캘리브레이션 결과.
Table 2. Parameter calibration results of light sources.

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 (7) 및 (8)에 의하여 계산된 이동로봇의 위치와 실제 위치와의 오차는 표 3 과 같다. 실험 결과로 부터 제안된 위치측정 시스템은 두개의 광원을 검출하는 경우 초기위치 측정오차가 거리 10mm 이내, 방향 1°이내 임을 알 수 있다.

표 3. 초기위치 측정오차.
Table 3. Errors of the initial position calculation.

$(x_k, y_k) \theta_k$	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 4m의 직선경로를 따라 주행한 후 경로 끝에서 정지 없이 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 20회 반복 실시하였고 이때 계획된 경로로부터의 이탈거리를 측정하였다. 실험 결과 반복 횟수에 따른 경로 오차는 그림 11과 같다.

표 4. 실험 조건.
Table 4. Epermental conditions.

	사용광원				경로 오차 측정점 (x,y)[mm]
	AC1	AC2	AC3	AC4	
실험 1	OFF	OFF	OFF	OFF	(1200,0) 및 (-1200,0)
실험 2	ON	OFF	OFF	OFF	(1200,0) 및 (-1200,0)
실험 3	ON	ON	OFF	OFF	(1200,0) 및 (-1200,0)
실험 4	OFF	OFF	ON	ON	(0,0)

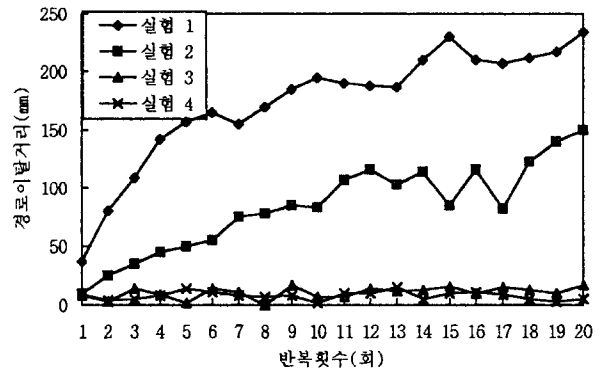


그림 11. 경로 오차 비교.
Fig. 11. Comparison of navigation path errors.

실험 1은 광원 검출 없이 Dead Reckoning 에 만 의존하여 주행하는 경우로 반복 횟수가 증가함에 따라 위치 오차의 누적에 의하여 경로 오차가 심해지는 것을 알 수 있다. 실험 2는 주행 중 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 3은 이동로봇이 동일위치에서 두개의 광원을 검출할 수 있는 중첩영역을 통과하도록 한 경우로 반복 횟수에 관계없이 계획된 경로를 잘 따라가고 있음(경로 이탈 거리 2cm이내)을 볼 수 있다. 즉 적절한 위치보정이 이루어지고 있다. 실험 4는 주행 중 2개의 광원이 각각 다른 위치에서 검출되도록 한 경우로 실험 3과 유사한 결과를 보이고 있다. 이상의 실험을 통해 주행 중 서로 다른 2개의 광원이 검출되는 경우 적절한 위치 보정이 이루어짐을 알 수 있다.

Ⅶ. 결론

광원의 위치검출을 통하여 이동로봇의 위치를 측정하기 위한 PSD 센서 시스템을 제안하였다. 먼저 이동로봇 및 광원의 위치와 PSD 센서 출력과의 관계식을 구하고 파라미터 캘리브레이션, 초기 및 연속 위치측정 알고리즘, 측정오차의 원인분석, 등을 제시하였다. 제안된 PSD 센서의 프로

토타입을 개발하고 이를 이동로봇에 장착하여 여러가지 실험을 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 생산현장, 크린룸, 사무실, 병원, 등 다양한 환경에서 이동로봇의 위치측정용으로 활용이 기대된다. 향후 두개의 PSD 센서를 사용한 광원의 3차원 위치측정에 대하여 연구를 계획하고 있으며 이는 산업용 로봇(매니플레이터)의 최종 작용부 위치 측정 및 자세보정, 크레인 위치제어, 등에 응용할 수 있으리라 본다.

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 modeling 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 localization 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 odometer," *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.



노 영 식

1959년 2월 8일생. 1981년 연세대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 석사. 1977년 동 대학원 박사. 1987년 ~ 1991년 삼성전자 생산기술연구소 선임연구원. 1991년 ~ 현재 울산대학교 전기공학과 부교수. 주관심분야는 로봇틱스 및 자동화.