

# 이동로봇 속도 추정 성능 향상을 위한 광 마우스의 최적 배열

## Optimal Optical Mouse Array for High Performance Mobile Robot Velocity Estimation

김성복\*, 김현빈  
(Sungbok Kim<sup>1</sup> and Hyunbin Kim<sup>1</sup>)

<sup>1</sup>Dept. of Digital Information Eng., Hankuk University of Foreign Studies

**Abstract:** This paper presents the optimal array of optical mice for the accurate velocity estimation of a mobile robot. It is assumed that there can be some restriction on the installation of two or more optical mice at the bottom of a mobile robot. First, the velocity kinematics of a mobile robot with an array of optical mice is derived, which maps the velocity of a mobile robot to the velocities of optical mice. Second, taking into account the consistency in physical units, the uncertainty ellipsoid is obtained to represent the error characteristics of the mobile robot velocity estimation owing to noisy optical mouse measurements. Third, a simple but effective performance index is defined as the inverse of the volume of the uncertainty ellipsoid, which can be used for the optimization of the optimal optical mouse placement. Fourth, simulation results for the optimal placement of three optical mice within a given elliptical region are given.

**Keywords:** optical mice, mobile robot, velocity estimation, uncertainty ellipsoid, optimal placement

### I. 서론

이동로봇의 자율 주행을 위해서는 위치 추정 기술이 지도 작성 기술 및 장애물 탐지 기술과 함께 매우 중요하다고 할 수 있다. 이동로봇의 속도 추정을 위해 전통적으로 사용되어 온 센서로는 엔코더, 초음파 센서, 카메라 등을 들 수 있으나[1,2], 제각기 극복하기 어려운 근본적 한계를 지니고 있다. 최근까지 이동로봇의 속도 추정을 위해 광 마우스를 사용하고자 하는 시도가 다수 이루어져 왔는데[3-12], 광 마우스가 이동로봇 밑바닥에 설치되게 되므로 기존 센서에서의 바퀴 미끄러짐, 시계 확보, 연산 복잡성 등의 문제로부터 자유로울 수 있다. 광 마우스 1개 당 종횡 방향으로의 2개의 선속도 성분이 제공되므로, 전방향 이동로봇의 속도 추정을 위해서는 최소 2개의 광 마우스가 필요하게 된다.

광 마우스를 이용한 이동로봇의 속도 추정에 관한 기존 연구로는 다음을 들 수 있다. 바퀴 미끄러짐이 있는 상황에서 간단하면서도 효과적인 대응 수단으로서 한 쌍의 광 마우스 사용이 제안되었다[3,4]. 2개 광 마우스로부터의 잉여 속도 측정을 이용하여 이동로봇 속도 추정 오차를 탐지하여 감소시키기 위한 간단한 절차가 개발되었다[5]. 필요 보다 많은 개수의 광 마우스를 사용하여 속도 측정 시 잡음의 영향을 줄이고 광 마우스의 부분적 오동작에 대처하는

방안이 제시되었다[6]. 광 마우스 위치간의 기하학적 관계를 이용하여, 시스템적 오류를 보정하는 방법과 신뢰성 있는 속도 측정을 선별하는 방법이 기술되었다[7]. 이 외에도, 광 마우스와 함께 엔코더, 거리 센서, 그리고 카메라 등을 사용하는 센서 퓨전에 관한 연구가 있어 왔다[8-10].

한편, 이동로봇 속도 추정 성능 향상을 위한 광 마우스의 최적 배치에 관한 연구도 이루어져 왔다. 광 마우스의 속도 측정 잡음으로 인해 발생하는 이동로봇 추정 속도 성분별 최대 절대 오차의 합이 최소가 되도록 2개 광 마우스의 설치 위치가 결정되었다[3]. 광 마우스를 정다각형 형태로 배열함으로써, 이동로봇 추정 속도가 성분별로 광 마우스 측정 속도의 평균으로 얻어짐을 보였다[6]. 설치상 제약을 전제로 하여, 광 마우스 최적 설치 문제가 체계적으로 다루어진 바 있으나[11], 제시된 최적화는 광 마우스 배열의 기하학적 중심이 이동로봇의 중심과 일치하는 경우로 국한되고 있다.

밑바닥이 원형인 이동로봇의 경우, 정다각형의 광 마우스 배열이 자연스럽고 또한 바람직한 광 마우스 배치라 할 수 있다. 예컨대, 한 쌍의 광 마우스는 이동로봇 중심에 대해 대칭적으로 배치되고,  $N(\geq 3)$ 개 이상의 광 마우스는 정  $N$  각형 형태로, 광 마우스 배열의 기하학적 중심이 이동로봇의 중심과 일치되도록 배치되게 된다. 그러나, 광 마우스 설치상의 제약이 따를 수 있는데, 이는 이동로봇 밑바닥이 원형이 아니거나 밑바닥에 다른 구조물이 있는데 기인한다. 설치상의 제약이 있는 경우에는, 비정다각형의 광 마우스 배열이 더 나은 선택일 수도 있을 것이다.

설치상 제약을 전제로 하여, 본 논문에서는 이동로봇 속도 추정을 위한 광 마우스 최적 배치에 대해서 기술하고자 한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서는 광 마우스

\* 책임저자(Corresponding Author)

Manuscript received September 17, 2012 / revised January 24, 2013 / accepted April 26, 2013

김성복, 김현빈: 한국외국어대학교 디지털정보공학과

(sbkim@hufs.ac.kr/rlagusqls@gmail.com)

※ 이 논문은 2012년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 사업임(NRF-2012R1A1A2002175).

스가 설치된 이동로봇의 속도 기구학을 유도한다. III 장에서는 불확실성 타원 개념을 이용하여 이동로봇 속도 추정의 오차 특성을 표현한다. IV 장에서는 불확실성 타원의 체계적으로 정의된 성능 지수를 이용하여 광 마우스 배치를 최적화한다. IV 장에서 3개 광 마우스의 최적 배치에 대한 시뮬레이션 결과를 제시한다. 마지막으로, V 장에서는 본 논문의 결론을 내린다.

## II. 속도 기구학

이동로봇 밑바닥에 설치된  $N(\geq 2)$ 개의 광 마우스 배열에 의한 속도 측정 정보를 이용하여 평면 주행 이동로봇의 속도를 추정할 수 있다. 그림 1은 이동로봇과  $i$  번째 광 마우스 기술을 위해 사용될 3개 좌표계를 보이고 있다. 주행 평면에 고정된 세계 좌표계의 원점,  $x$  축, 그리고  $y$  축을 각각  $O_W$ ,  $X_W$ , 그리고  $Y_W$ 라 하고, 이동로봇에 고정된 이동로봇 좌표계의 원점,  $x$  축, 그리고  $y$  축을 각각  $O_R$ ,  $X_R$ , 그리고  $Y_R$ 이라 하고, 그리고  $i$  번째 광마우스에 고정된 광 마우스 좌표계의 원점,  $x$  축, 그리고  $y$  축을 각각  $O_i$ , 그리고  $X_i$ 와  $Y_i$ 라 하자. 편의 상, 두개의 원점  $O_W$ 와  $O_R$  모두 이동로봇의 중심  $O$ 와 일치한다고 하고, 원점  $O_i$ 는  $i$  번째 광 마우스의 설치 지점,  $P_i$ ,  $i=1, \dots, N$ , 과 일치한다고 하자. 또한, 세계 좌표계, 이동로봇 좌표계, 그리고  $i$  번째 광마우스 좌표계 모두 정렬되어 있다고 하자.  $i$  번째 광 마우스의 위치 벡터,  $\mathbf{p}_i = [x_i \ y_i]^t$ ,  $i=1, \dots, N$ , 을 표현하면

$$\mathbf{p}_i = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_i \times \cos \varphi_i \\ \rho_i \times \sin \varphi_i \end{bmatrix}, \quad i=1, \dots, N \quad (1)$$

여기서  $\rho_i$ 와  $\varphi_i$ 는  $i$  번째 광 마우스의 설치 지점  $P_i$ 에 대한 극좌표이다.

$i$  번째 광 마우스의 종 방향과 횡 방향의 선속도를  $v_{ix}$ 와  $v_{iy}$ ,  $i=1, \dots, N$ , 이라 하고, 이동로봇의  $x$  축과  $y$  축 방향의 선속도를 각각  $v_{rx}$ 와  $v_{ry}$ 라 하고, 그리고  $z$  축에 대한 각속도를  $w_r$ 이라 하자. 이동로봇과  $i$  번째 광 마우스간의 속도 관계를 표현하면

$$v_{rx} - w_r \times y_i = v_{ix}, \quad i=1, \dots, N \quad (2)$$

$$v_{ry} + w_r \times x_i = v_{iy}, \quad i=1, \dots, N \quad (3)$$

식 (2)와 (3)으로부터,  $N$ 개 광 마우스가 설치된 이동로봇의 속도 기구학은 다음과 같이 얻어진다.

$$\mathbf{A} \mathbf{v}_r = \mathbf{v}_s \quad (4)$$

여기서  $\mathbf{v}_r = [v_{rx} \ v_{ry} \ w_r]^t \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ 은 이동로봇의 속도 벡터를 나타내고,  $\mathbf{v}_i = [v_{ix} \ v_{iy}]^t$ ,  $i=1, \dots, N$ ,라 할 때,  $\mathbf{v}_s = [\mathbf{v}_1^t \ \mathbf{v}_2^t \ \dots \ \mathbf{v}_N^t]^t \in \mathbb{R}^{2N \times 1}$ 는  $N$ 개 광 마우스의 속도 벡터를 나타내며, 그리고  $\mathbf{A}$ 는  $\mathbf{v}_r$ 을  $\mathbf{v}_s$ 로 매핑시키는 자코비안 행렬로서

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -y_1 \\ 0 & 1 & x_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & -y_N \\ 0 & 1 & x_N \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{2N \times 3} \quad (5)$$

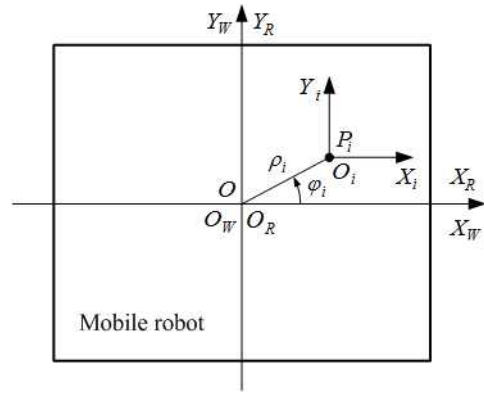


그림 1. 이동로봇과  $i$  번째 광 마우스의 기술을 위한 좌표계.

Fig. 1. Three coordinate frames for a mobile robot and the  $i^{\text{th}}$  optical mouse.

행렬  $\mathbf{A}$ 는  $N$ 개 광 마우스의 위치,  $\mathbf{p}_i = [x_i \ y_i]^t$ ,  $i=1, \dots, N$ 의 함수로서 매우 간단한 형태임에 주목할 필요가 있다.

식 (4)에 의거하면,  $N$ 개 광 마우스에 의한 측정 속도  $\mathbf{v}_s$ 로부터 이동로봇의 주행 속도  $\mathbf{v}_r$ 을 알아낼 수 있다.

$$\tilde{\mathbf{v}}_r = \begin{bmatrix} \tilde{v}_{rx} \\ \tilde{v}_{ry} \\ w_r \end{bmatrix} = \mathbf{A}^+ \mathbf{v}_s \quad (6)$$

여기서

$$\mathbf{A}^+ = (\mathbf{A}^t \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^t \in \mathbb{R}^{3 \times 2N} \quad (7)$$

식 (6)은  $\|\mathbf{A} \tilde{\mathbf{v}}_r - \mathbf{v}_s\|$ 을 최소화 하는 식 (5)에 대한 최소 자승해를 나타낸다.

## III. 불확실성 타원

본 논문에서는  $N$ 개 광 마우스의 속도 측정 잡음으로 인한 이동로봇 속도 추정 시 오차 정도를 나타내기 위해 소위 불확실성 타원의 개념을 이용하도록 한다. 불확실성 타원은 식 (4)로 주어진 속도 기구학에 의거하여, 단위 구로 주어지는 광 마우스의 속도 범위에 대응하는 타원 형태의 이동로봇의 속도 범위로 정의된다. 한편, 식 (4)에서, 광 마우스의 속도 벡터  $\mathbf{v}_s$ 가 선속도 성분만으로 구성되어 있는 반면 이동로봇 속도  $\mathbf{v}_r$ 은 선속도와 각속도 성분으로 구성되어 있음을 알 수 있다. 벡터 norm 정의 시 물리적 단위 불일치 문제를 해소하기 위해, 다음과 같이 특성 길이  $L$ 을 도입하도록 한다.

$$\hat{\mathbf{A}} \hat{\mathbf{v}}_r = \mathbf{v}_s \quad (8)$$

여기서,  $\hat{\mathbf{v}}_r = [v_{rx} \ v_{ry} \ (L \times w_r)]^t \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$  이고

$$\hat{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\frac{1}{L} \times y_1 \\ 0 & 1 & \frac{1}{L} \times x_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & -\frac{1}{L} \times y_N \\ 0 & 1 & \frac{1}{L} \times x_N \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{2N \times 3} \quad (9)$$

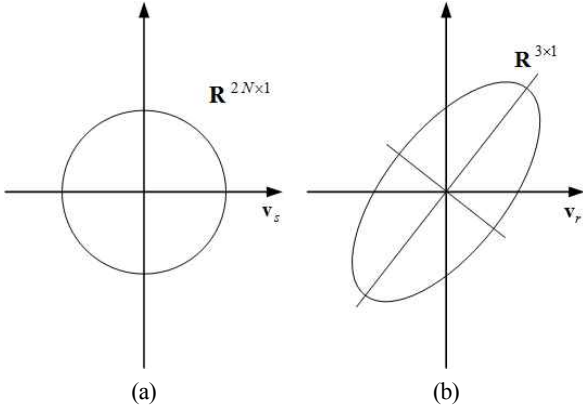


그림 2. 속도 추정 오차 특성 표현: (a) 광 마우스의 속도 공간상의 단위 구  $E_S$ 와 (b) 이동로봇의 속도 공간상의 타원  $E_R$ .

Fig. 2. The uncertainty ellipsoid: (a) the unit sphere  $E_S$  in the optical mouse velocity space, and (b) the ellipsoid  $E_R$  in the mobile robot velocity space.

위에서 특성 길이  $L$ 은 가속도를 등가 선속도로 변환시키는 일종의 유효 반경으로 간주할 수 있다.

먼저,  $N$ 개 광 마우스의  $2N$  차원 속도 공간상의 단위 구  $E_S$ 를 표현하면

$$E_S : \|\mathbf{v}_s\|^2 = \mathbf{v}_s^T \mathbf{v}_s = 1 \quad (10)$$

식 (8)의 속도 기구학에 의거하여, 불확실성 타원은 광 마우스의 속도 공간상의  $2N$  차원 단위 구  $E_S$ 에 대응하는 이동로봇의 3차원 속도 공간상의 타원  $E_R$ 로 정의된다.

$$E_R : \mathbf{v}_r^T (\mathbf{A}'\mathbf{A}) \mathbf{v}_r = 1 \quad (11)$$

그림 2는 광 마우스의 속도 공간상의 단위 구  $E_S$ 와 이동로봇의 속도 공간상의 타원  $E_R$ 을 도시하고 있다. 식 (11)로 주어지는 불확실성 타원  $E_R$ 의 형태와 방위는  $3 \times 3$  행렬인  $\mathbf{A}'\mathbf{A}$ 의 고유치와 고유 벡터에 의해 결정된다. 행렬  $\mathbf{A}'\mathbf{A}$ 의 3개의 고유치를  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ , 그리고  $\lambda_3$ 라 하고, 각 고유치에 대응되는 고유 벡터를  $\mathbf{u}_1$ ,  $\mathbf{u}_2$ , 그리고  $\mathbf{u}_3$ 라 하면

$$(\mathbf{A}'\mathbf{A}) \mathbf{u}_k = \lambda_k (\mathbf{A}'\mathbf{A}) \mathbf{u}_k, \quad k=1,2,3 \quad (12)$$

3차원상의 불확실성 타원  $E_R$ 의 주축 방향은  $\mathbf{u}_1$ ,  $\mathbf{u}_2$ , 그리고  $\mathbf{u}_3$ 로 정해지고, 각 주축의 길이는  $\frac{1}{\sqrt{\lambda_1}}$ ,  $\frac{1}{\sqrt{\lambda_2}}$ , 그리고

$\frac{1}{\sqrt{\lambda_3}}$  이 된다. 불확실성 타원  $E_R$ 은 광 마우스의 속도 측정 잡음으로 인한 이동로봇의 속도 추정 시 오차 특성을 3차원적으로 나타내고 있다.

#### IV. 광 마우스 배치 최적화

이동로봇 밑바닥에 광 마우스를 설치하는데 있어, 이동로봇 속도 추정 시 오차에 대한 간단하면서도 효과적인 척도로서 식 (11)로 주어지는 불확실성 타원  $E_R$ 의 체적  $V$ 를 고려할 수 있다.

$$V = \frac{4\pi}{3} \frac{1}{\sqrt{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3}} \quad (13)$$

광 마우스 위치 최적화를 위해서는 체적  $V$ 를 최소화하여야 하지만, 본 논문에서는 대신 행렬  $\mathbf{A}'\mathbf{A}$ 의 3개의 고유치의 곱  $\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3$ 을 최대화하기로 한다.

$$\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = \left( \frac{4\pi}{3} \frac{1}{V_r} \right)^2 \quad (14)$$

식 (9)로부터, 행렬  $\hat{\mathbf{A}}^t \hat{\mathbf{A}}$ 를 표현하면 다음과 같다.

$$\hat{\mathbf{A}}^t \hat{\mathbf{A}} = N \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\frac{1}{L} \times C_y \\ 0 & 1 & \frac{1}{L} \times C_x \\ -\frac{1}{L} \times C_y & \frac{1}{L} \times C_x & \frac{1}{L^2} \times R^2 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{3 \times 3} \quad (15)$$

여기서

$$C_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (16)$$

$$C_y = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \quad (17)$$

$$R = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i^2 + y_i^2)} \quad (18)$$

위에서  $C_x$ 와  $C_y$ 는 각각  $N$ 개 광 마우스 설치위치의 기하학적 중심의  $x$  좌표와  $y$  좌표의 합을 나타내고,  $R$ 은 이동로봇 중심으로부터  $N$ 개 광 마우스의 설치 위치까지 거리의 RMS (Root Mean Square) 값을 나타낸다. 식 (15)로부터, 행렬  $\hat{\mathbf{A}}^t \hat{\mathbf{A}}$ 의 특성 다항식을 쓰면

$$(\lambda - N) \times \left\{ \lambda^2 - (N + \frac{1}{L^2} \times R^2) \lambda + N \times \frac{1}{L^2} \times R^2 - \frac{1}{L^2} \times (P_x^2 + P_y^2) \right\} = 0 \quad (19)$$

위 식의 해가 바로 행렬  $\mathbf{A}'\mathbf{A}$ 의 3개 고유치  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ , 그리고  $\lambda_3$ 이므로

$$(\lambda - \lambda_1)(\lambda - \lambda_2)(\lambda - \lambda_3) = 0 \quad (20)$$

식 (19)와 (20)간의 계수 비교를 통해

$$\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = \frac{1}{L^2} \times N \times \{ N \times R^2 - (P_x^2 + P_y^2) \} \quad (21)$$

특성 길이  $L$ 의 값이 사전에 주어진다든 전제 아래, 광 마우스 위치 최적화를 위한 성능 지수  $PI$ 를 다음과 같이 정의하기로 한다.

$$PI = N^3 \times \{ R^2 - (C_x^2 + C_y^2) \} \quad (22)$$

성능 지수  $PI$ 가  $N$ 개 광 마우스의 위치 벡터  $\mathbf{p}_i = [x_i, y_i]^T$ ,  $i=1, \dots, N$ , 의 함수이므로, 성능 지수  $PI$ 의 값을 최대화함으로써  $N$ 개 광 마우스의 설치 위치를 결정할 수 있다. 여기서, 광 마우스 개수  $N$ 이 증가할수록 성능 지수  $PI$ 의 값이 커지게 되며, 이는 그 만큼 이동로봇 속도 추정 성능이 향상되게 됨을 의미한다.

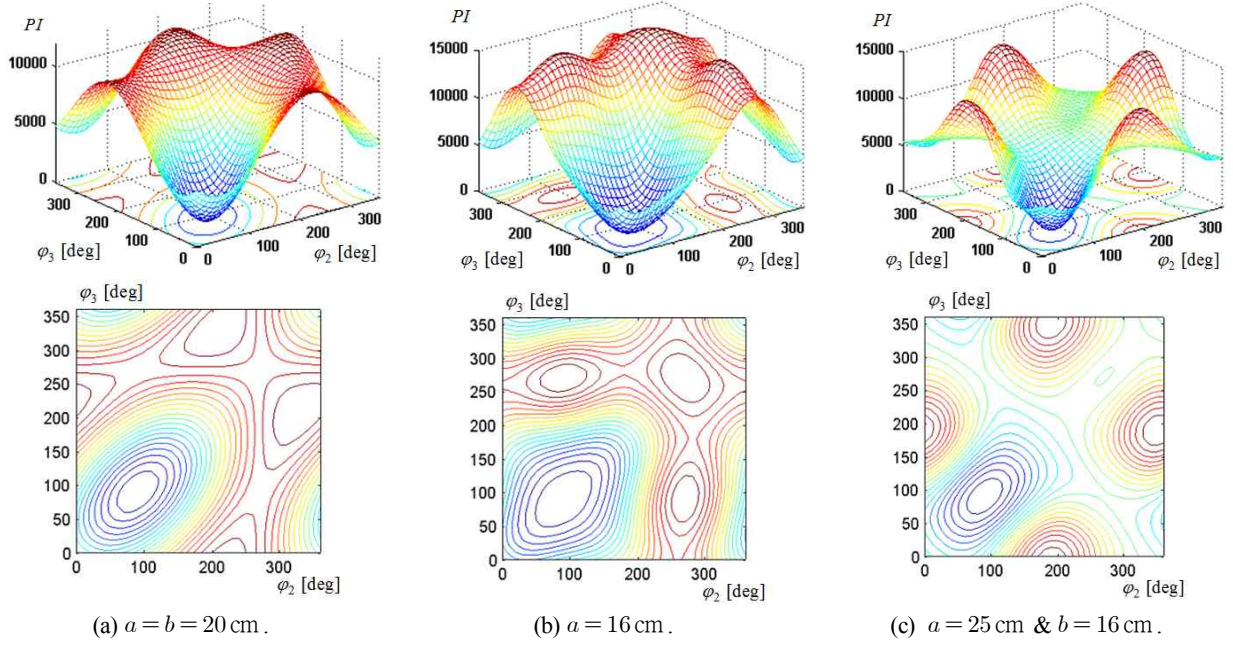


그림 3.  $\varphi_1 = 90^\circ$  로 고정된 경우, 설치 각도  $\varphi_2$  와  $\varphi_3$  에 따른 성능 지수  $PI$  의 변화.

Fig. 3. With  $\varphi_1 = 90^\circ$ , the changes of the performance index  $PI$ , depending on two angles,  $\varphi_2$  and  $\varphi_3$ .

식 (22)에서 보듯, 성능 지수  $PI$ 는 음이 아닌 2개 항인  $R^2$  과  $(C_x^2 + C_y^2)$  의 차이로서 표현되어 있다. 성능 지수  $PI$ 를 최대화하기 위해서는  $R^2$  의 값이 가능한 커지도록 하여야 하는데, 이는  $N$  개 광 마우스의 설치 위치가 이동로봇 중심  $O$ 에서 최대한 멀어져야 함을 의미한다. 또한, 성능 지수  $PI$ 를 최대화하기 위해서는  $(C_x^2 + C_y^2)$  의 값이 가능한 적어지도록 하여야 하는데, 이는  $N$  개 광 마우스 설치 위치의 기하학적 중심이 이동로봇 중심  $O$ 에 최대한 가까워야 함을 의미한다. 이는 광 마우스 설치상의 제약이 없는 상황에서는,  $N$  개 광 마우스가 이동로봇의 중심  $O$ 를 기준으로 정다각형 형태로 배치되어야 하고, 또한 정다각형의 크기가 클수록 이동로봇 속도 추정 성능이 향상에 도움이 되게 된다[6].

$N$  개 광 마우스의 최적 배치를 효율적으로 찾기 위해서는 성능 지수  $PI$ 의 값이 현재 보다 증가되는 방향으로 광 마우스 설치를 변경해 가야 한다.  $N$  개 광 마우스 가운데  $k$  번째 광 마우스의 설치 위치를 다음과 같이 변경시킨다 고 하자.

$$\mathbf{p}_k = \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \end{bmatrix} \rightarrow \mathbf{p}_k + \Delta \mathbf{p}_k = \begin{bmatrix} x_k + \Delta x_k \\ y_k + \Delta y_k \end{bmatrix} \quad (23)$$

$k$  번째 광마우스의 설치 위치 변경에 따른 성능지수  $PI$ 의 값의 총 변화분을 표현하면 다음과 같다[12].

$$\Delta PI = 2N \times (\mathbf{p}_k - \mathbf{p}_c)^t \Delta \mathbf{p}_k \quad (24)$$

여기서

$$\mathbf{p}_c = \begin{bmatrix} C_x \\ C_y \end{bmatrix} \quad (25)$$

로서 설치 위치 변경 이전  $N$  개 광 마우스의 기하학적 중심을 나타낸다. 식 (24)로부터,  $k$  번째 광마우스의 설치 위

치 변경에 따라 성능 지수  $PI$ 가 증가되기 위한 조건은 다음과 같이 얻어진다.

$$(\mathbf{p}_k - \mathbf{p}_c)^t \Delta \mathbf{p}_k > 0 \quad (26)$$

이는 설치 위치 변경이  $\Delta \mathbf{p}_k$ 가 벡터  $(\mathbf{p}_k - \mathbf{p}_c)$ 와의 내적이 양의 값을 갖도록 이루어져야 함을 의미한다.

설치상 제약을 전제로 하여 이동로봇 속도 추정을 위한 광 마우스 최적 배치를 다룬 이전 연구로 Camino와 Pagilla의 논문을 들 수 있다[11]. 해당 논문에서는 A'A의 3개 고유치  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ , 그리고  $\lambda_3$ 에 대한 명시적 표현식을 얻은 후 그들 간의 대소 관계를 분석한 후, 광 마우스 최적 배치를 최대 고유치인  $\max_{j=1}^3 \lambda_j$ 를 아래 식을 포함한 일련의 제약 조건 아래서 최대화하는 최적화 문제로 제시하였다.

$$\min_{j=1}^N \lambda_j = N \Leftrightarrow \sum_{i=1}^N x_i = \sum_{i=1}^N y_i = 0 \quad \text{or} \quad P_x = P_y = 0 \quad (27)$$

식 (27)은 제시된 광 마우스 배치 최적화가  $N$  개 광 마우스의 기하학적 중심이 이동로봇의 중심  $O$ 와 일치되는 특별한 경우로 국한되어 있음을 말하고 있다.

## V. 시뮬레이션 결과

통상, 연구용 이동로봇의 밑바닥이 원형 형태인 것과 달리, 개인용 로봇의 모바일 플랫폼은 비원형으로 통상 타원 혹은 직사각형 형태를 취한다. 이를 감안하여, 3개의 광 마우스를( $N=3$ ) 설치 제약상  $x$  축 방향과  $y$  축 방향의 주축의 길이가 각각  $a$ 와  $b$ 인 타원의 내부 영역  $\Omega$ 에 최적 배치하는 문제를 다루어 보기로 한다.

$$\mathbf{p}_i = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} \in \Omega, \quad i = 1, 2, 3 \quad (28)$$

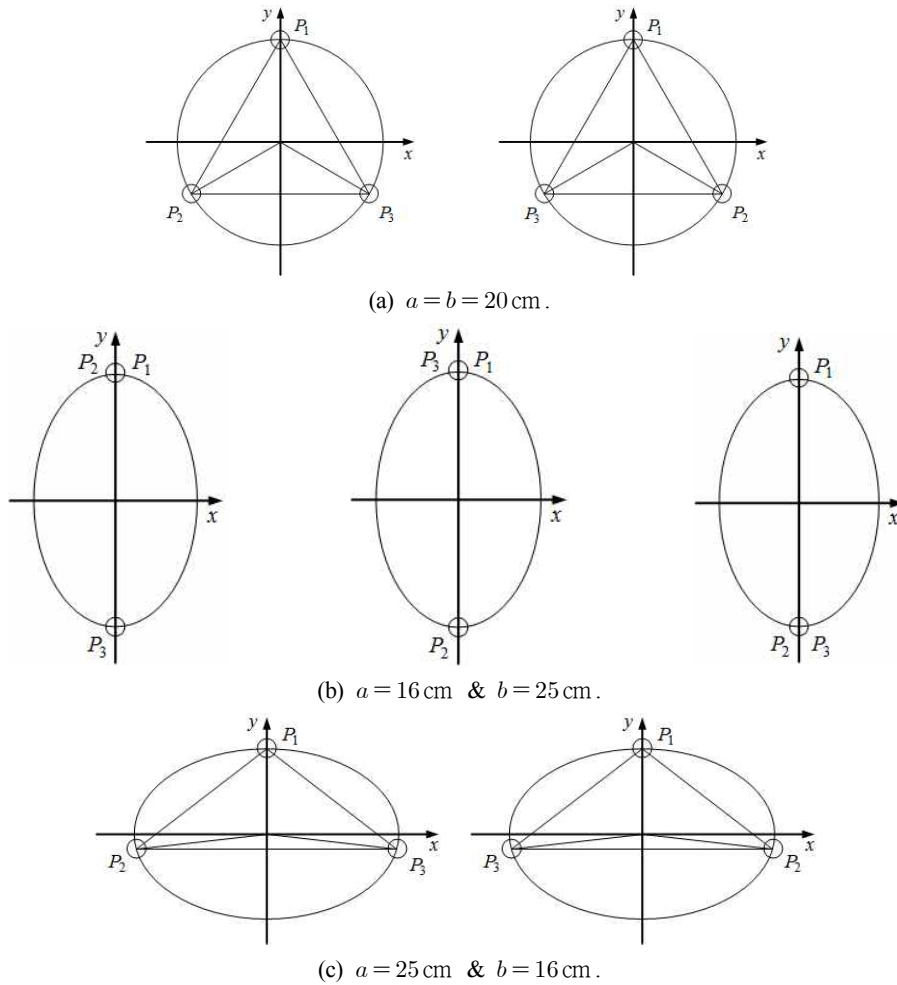


그림 4.  $\varphi_1 = 90^\circ$  로 고정된 경우, 3개 광 마우스의 최적 배치 결과.

Fig. 4. With  $\varphi_1 = 90^\circ$ , the optimal placements of three optical mice.

여기서

$$\Omega = \left\{ (x, y) \mid \left(\frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 \leq 1 \right\} \quad (29)$$

추가적인 설치상 제약 조건으로 첫 번째 광 마우스의 위치가  $y$  축 상에  $\mathbf{p}_1 = [0 \ b]^t$ 로 고정된다고 하자. 식 (22)의 성능 지수  $PI$ 를 기준으로 한 광 마우스 최적 배치를 위해서는, 전술한 바와 같이 각 광 마우스의 설치 위치가 가능한 이동로봇의 중심  $O$ 에서 떨어지도록 하여야 한다. 식 (28)과 (29)로 주어진 타원 내부 영역  $\Omega$ 가 중심  $O$ 에 대해 대칭인 점을 감안하면, 이는 효율적인 최적화를 위해서는 각 광 마우스의 가용 위치 집합이  $\Omega$ 의 경계선으로 축소될 수 있음을 의미한다. 이제,  $i$  번째 광 마우스의 위치 벡터  $\mathbf{p}_i = [x_i \ y_i]^t, i = 1, 2, 3$ , 을 표현하면

$$\mathbf{p}_i = \begin{bmatrix} a \times \cos \varphi_i \\ b \times \sin \varphi_i \end{bmatrix}, i = 1, 2, 3 \quad (30)$$

여기서

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= 90^\circ \\ 0^\circ &\leq \varphi_2, \varphi_3 \leq 360^\circ \end{aligned} \quad (31)$$

첫 번째 광 마우스의 설치 각도가  $\varphi_1 = 90^\circ$ 로 고정되어

있다고 하고, 식 (22)로 주어진 성능 지수  $PI$ 의 값이 최대가 되도록 두 번째와 세 번째 광 마우스의 최적 설치 각도  $\varphi_2^*$ 와  $\varphi_3^*$ 를 정해 보기로 하되, 2개 주축의 길이가 상이한 다음 3가지 경우를 대상으로 한다. 1)  $a = b = 20$  cm로서  $x$  축 방향과  $y$  축 방향의 주축 길이가 같은 경우, 2)  $a = 16$  cm와  $b = \frac{20 \times 20}{a} = 25$  cm로서  $y$  축 방향의 주축 길이가  $x$  축 방향 비해 긴 경우, 그리고 3)  $a = 25$  cm와  $b = 16$  cm로서  $y$  축 방향의 주축 길이가  $x$  축 방향 보다 짧은 경우로, 모두 타원의 면적이 동일한 점에 유의하라. 3개 경우에 대해 그림 3은 두 번째와 세 번째 광 마우스의 설치 각도  $\varphi_2$ 와  $\varphi_3$ 에 따른 성능 지수  $PI$ 의 변화를 보이고 있으며, 그리고 그림 4는 성능 지수가 최대값  $PI^*$ 를 갖게 되는 3개 광마우스의 최적 배치 결과를 보이고 있다. 전체적으로, 그림 3에 보인 3차원 플롯과 등고선 지도가 모두  $\varphi_3 = \varphi_2$ 에 대해 대칭적이고, 또한 그림 4에 보인 광 마우스 최적 배치가  $y$  축에 대해 대칭적임을 관찰할 수 있다.

먼저,  $(a, b) = (20, 20)$  [cm]의 경우, 그림 3(a)에서 보듯이 2 세트의 광 마우스 설치 각도  $(\varphi_1, \varphi_2^*, \varphi_3^*) = (90^\circ, 210^\circ, 330^\circ)$ 와  $(90^\circ, 330^\circ, 210^\circ)$ 에서 성능 지수가 최대값  $PI^* = 10,800$ 을 갖게



되고, 그림 4(a)에서 보듯이 3개 광마우스의 최적 배치 결과는 정삼각형의 형태를 이루고 있다. 다음,  $(a,b) = (16,25)$  [cm]의 경우, 그림 3(b)에서 보듯이 3 세트의 광 마우스 설치 각도  $(\varphi_1, \varphi_2^*, \varphi_3^*) = (90^\circ, 90^\circ, 270^\circ)$ ,  $(90^\circ, 270^\circ, 90^\circ)$ , 그리고  $(90^\circ, 270^\circ, 270^\circ)$ 에서 성능 지수가 최대값  $PI^* = 15,000$ 을 갖게 되고, 그림 4(b)에서 보듯이 최적 배치 결과는 3개 광마우스가 모두 장축인  $y$  축 상에 위치하되 장축 양단에 각각 1개와 2개의 광 마우스가 나누어 있게 된다. 마지막으로,  $(a,b) = (25,16)$  [cm]의 경우, 그림 3(c)에서 보듯이 2 세트의 광 마우스 설치 각도  $(\varphi_1, \varphi_2^*, \varphi_3^*) = (90^\circ, 189.1^\circ, 350.9^\circ)$ 와  $(90^\circ, 350.9^\circ, 189.1^\circ)$ 에서 성능 지수가 최대값  $PI^* = 13,020$ 을 갖게 되고, 그림 4(c)에서 보듯이 최적 배치 결과는 두 번째와 세 번째 광 마우스가  $xy$  평면 하반부에 장축인  $x$  축에 근접하여 위치하여  $y$  축 상의 첫 번째 광 마우스와 함께 둔각 이등변 삼각형을 이루고 있다.

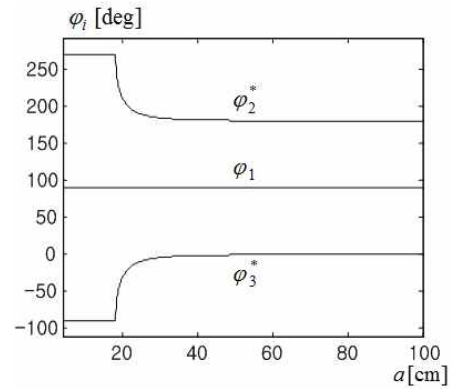
식 (22)의 성능 지수  $PI$ 를 기준으로 한 광 마우스 최적 배치를 위해서는, 전술한 바와 같이 3개 광 마우스의 기하학적 중심이 이동로봇의 중심  $O$ 에 근접하도록 해야 한다. 이는 첫 번째 광 마우스가  $y$  축 상에 존재하는 경우  $(\varphi_1 = 90^\circ)$ , 두 번째와 세 번째 광 마우스는 각각  $xy$  평면의 삼사분면과 사사분면에 위치되어야 함을 의미한다. 따라서, 최적화의 효율성을 높이기 위해서는 3개 광 마우스의 가용 각도 집합을 다음과 같이 축소시킬 수 있다.

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= 90^\circ \\ 180^\circ \leq \varphi_2 &\leq 270^\circ \\ 270^\circ \leq \varphi_3 &\leq 360^\circ \end{aligned} \quad (32)$$

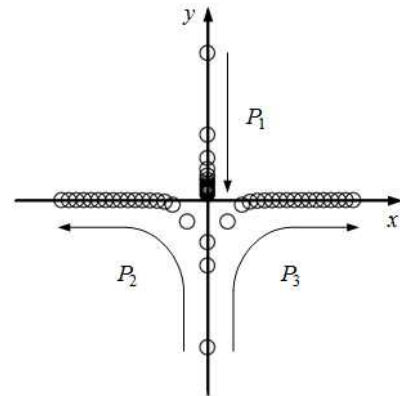
식 (32)로 주어지는 최적화 탐색 영역의 크기는 식 (31)의 경우에 비해 16분의 1로 대폭 축소되게 되지만, 광 마우스 최적 배치 결과에는 영향을 미치지 않음에 주목해야 한다.

$\varphi_1 = 90^\circ$ 로 고정된 상태에서, 식 (30)과 (32)로 주어지는 타원의 형태에 따른 3개 광마우스 최적 배치 결과의 변화 양상을 살펴보기로 한다.  $x$  축 방향의 주축의 길이를  $a = 4\text{cm}$  ( $b = 100\text{cm}$ )에서부터  $a = 100\text{cm}$  ( $b = 4\text{cm}$ )까지 증가시키며, 그림 5는 3개의 광 마우스의 최적 설치 각도  $(\varphi_1, \varphi_2^*, \varphi_3^*)$ 의 변화를 보이고 있다. 그림 5(a)와 5(b)에서 보듯이,  $4 \leq a \leq 18$  [cm] 구간에서는 3개 광 마우스 모두 장축인  $y$  축 상에 있거나  $y$  축에 매우 근접해 있다가,  $18 \leq a \leq 30$  [cm] 구간에서는 예각 이등변 삼각형을 거쳐  $a = 20\text{cm}$ 에서 정삼각형을 이룬 후 둔각 이등변 삼각형으로 변하고,  $30 \leq a \leq 100$  [cm] 구간에서는 3개 광 마우스 모두 장축인  $x$  축에 매우 근접하거나  $x$  축 상에 있게 된다.

3개 광 마우스의 최적 배치 결과를 이용하여 식 (7)의 최소 자승법에 의거한 이동로봇 속도 추정을 실시해 보도록 한다. 광 마우스 최적 배치 예로 그림 3(b)에 보인  $\varphi_1 = 90^\circ$  고정 상태에서 최적 결과인  $(\varphi_1, \varphi_2^*, \varphi_3^*) = (90^\circ, 270^\circ, 270^\circ)$ 를 택하였다. 편의상, 이동로봇이  $y$  축 방향으로 직진하도록 명령되었다고 하자( $v_{rx} = 0\text{ cm/sec}$ ,  $v_{ry} = 20\text{ cm/sec}$ , 그리고  $w_r = 0\text{ deg/sec}$ ). 광 마우스의 속도 측정에 수반되는 잡음이 랜덤하다는 가정 아래, 3개 광 마우스의 측정 속도



(a) The optimal angles  $(\varphi_1, \varphi_2^*, \varphi_3^*)$ .



(b) The corresponding optimal placements.

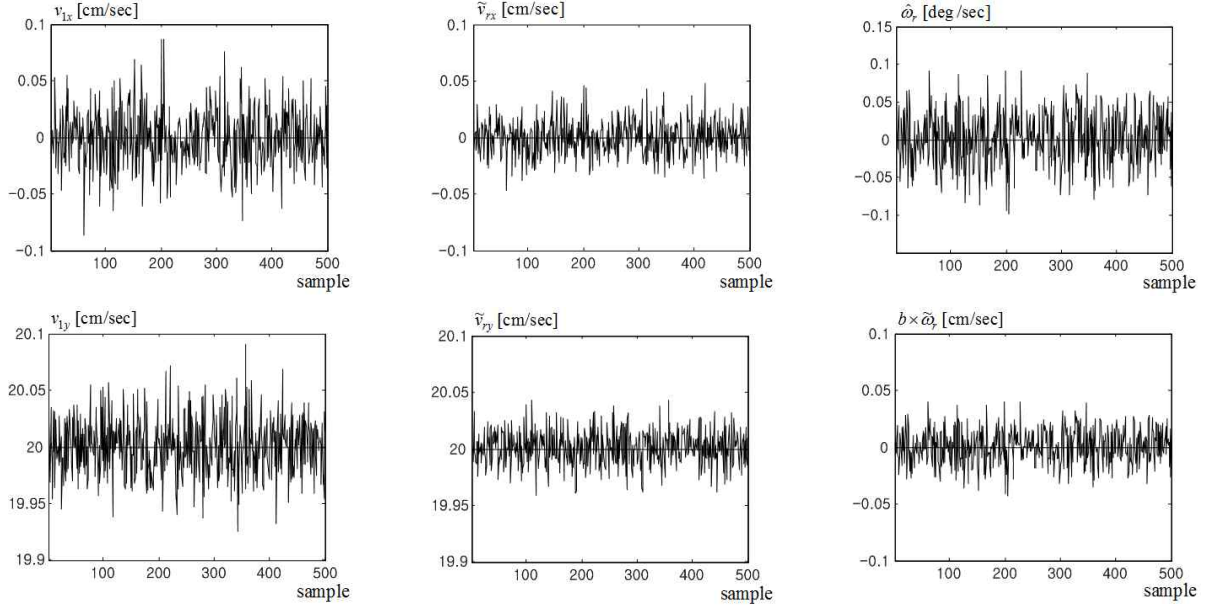
그림 5.  $\varphi_1 = 90^\circ$ 로 고정된 경우,  $a$ 의 값에 따른 3개 광 마우스의 최적 배치 결과 변화.

Fig. 5. With  $\varphi_1 = 90^\circ$ , the changes of the optimal placements of three optical mice, depending on the value of  $a$ .

를 인위적으로 생성시키도록 한다. 먼저, 식 (4)를 이용하여 주어진 이동로봇 속도 명령에 대응되는 3개 광 마우스의 속도를 계산한 후, 각 마우스의 횡축과 종축 방향의 속도 성분별로 각각 평균이 0이고 표준 편차가 0.025인 정규 분포 랜덤 수  $n_{ix}$ 와  $n_{iy}$ ,  $i=1,2,3$ , 을 더한다. 주어진 이동로봇 속도 벡터  $\mathbf{v}_r = [v_{rx} \ v_{ry} \ \omega_r]^t = [0 \ 20 \ 0]^t$ 에 대한, 3개 광 마우스의 잡음이 수반된 측정 속도는

$$\mathbf{v}_s = \mathbf{A} \mathbf{v}_r + \mathbf{n}_s \quad (33)$$

여기서  $\mathbf{n}_i = [n_{ix} \ n_{iy}]^t$ ,  $i=1,2,3$ ,이라 할 때  $\mathbf{n}_s = [\mathbf{n}_1^t \ \mathbf{n}_2^t \ \mathbf{n}_3^t]^t \in \mathbf{R}^{6 \times 1}$ 은 3개 광 마우스에 수반되는 랜덤 잡음 벡터를 나타낸다. 그림 6(a)는 3개 광 마우스 중 첫 번째 광 마우스의 측정 속도를 보이고 있고, 그림 6(b)와 6(c)는 식 (6)과 (7)에 의거한 최소 자승 이동로봇 속도 추정 결과를 보이고 있다. 실제 시뮬레이션에서는 총 10,000개의 샘플이 취급되었지만, 도표의 가시성을 위해 그 중 500개 샘플만을 도시하였다. 그림 6(a)를 6(b) 및 6(c)과 비교하여 보면, 최소 자승 속도 추정으로 인해 광 마우스의 속도 측정에 수반된 잡음의 영향이 현저히 감소되었음을 관찰할 수 있다. 구체적으로, 각 광 마우스 측정 속도의 2개의 선형 성분인  $v_{ix}$ 와  $v_{iy}$ ,  $i=1,2,3$ 의 표준 편차가 0.0251 [cm/sec]인데 반해, 이



(a) The measured velocity components. (b) The estimated linear velocity components,  $\tilde{v}_{rx}$  and  $\tilde{v}_{ry}$ . (c) The estimated angular velocity component,  $\tilde{\omega}_r$  &  $b \times \tilde{\omega}_r$ .

그림 6.  $(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3) = (90^\circ, 270^\circ, 270^\circ)$ 의 경우, 잡음이 수반된 광 마우스 속도 측정으로부터의 최소 자승 이동로봇 속도 추정 결과.

Fig. 6. In the case of  $(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3) = (90^\circ, 270^\circ, 270^\circ)$ , the least squares mobile robot velocity estimation from the noisy optical mouse velocity measurements.

동로봇 추정 속도 중 2개의 선형 성분인  $\tilde{v}_{rx}$ 와  $\tilde{v}_{ry}$ 의 표준 편차는 각각 0.0152 [cm/sec]와 0.0144 [cm/sec]로 잡음 수준이 57~61% 정도로 낮아졌음을 알 수 있다.

마지막으로, 광 마우스 배치 최적화의 효과를 확인하기 위해 최적 배치 경우와 비최적 배치 경우의 최소 자승 이동로봇 속도 추정 성능을 비교해 보기로 한다. 그림 3(b)을 참조하여, 최적 배치로는  $(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3) = (90^\circ, 270^\circ, 270^\circ)$ 를 비최적 배치로는  $(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3) = (90^\circ, 0^\circ, 180^\circ)$ 를 택하여 각각  $\Pi^*$ 와  $\Pi$ 로 표기하도록 한다. 표 1은  $\Pi^*$ 와  $\Pi$ 의 두 경우에서의 추정 속도 성분인  $v_{1x}$ 와  $v_{1y}$ , 그리고 추정 속도 성분인  $\tilde{v}_{rx}$ ,  $\tilde{v}_{ry}$ , 및  $\tilde{\omega}_r$ 의 표준 편차를 제시하고 있다. 표 1에서  $b \times \tilde{\omega}_r$ 는 각속도 성분인  $\tilde{\omega}_r$ 에 대응하는 최대 선속도 크기를 나타내며, 물론 모든 속도 성분별로 표준 편차의 값이 작을수록 잡음 수준이 낮음을 의미한다. 표 1로부터, 다음 사항을 관

표 1. 측정 속도 및 추정 속도 성분의 표준 편차.

Table 1. The standard deviations of the measured and estimated velocity components.

	$(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3) = (90^\circ, 270^\circ, 270^\circ)$	$(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3) = (90^\circ, 0^\circ, 180^\circ)$
$v_{1x}$ [cm/sec]	0.0251	0.0248
$v_{1y}$ [cm/sec]	0.0251	0.0251
$\tilde{v}_{rx}$ [cm/sec]	0.0152	0.0160
$\tilde{v}_{ry}$ [cm/sec]	0.0144	0.0144
$\tilde{\omega}_r$ [deg/sec]	0.0355	0.0469
$b \times \tilde{\omega}_r$ [cm/sec]	0.0155	0.0205

찰할 수 있다. 1)  $\Pi^*$ 와  $\Pi$  두 경우 모두,  $\tilde{v}_{rx}$ ,  $\tilde{v}_{ry}$ , 그리고  $b \times \tilde{\omega}_r$ 의 잡음 수준이  $v_{1x}$ 와  $v_{1y}$ 에 비해 현저히 낮은 바, 이는 광 마우스 배열의 일반적인 잡음 억제 효과를 입증하고 있다고 하겠다. 2)  $\Pi^*$ 와  $\Pi$  두 경우 모두,  $\tilde{v}_{ry}$ 의 잡음 수준이  $\tilde{v}_{rx}$ 에 비해 낮게 나타나고 있는 바, 이는 아래 보인 바와 같이  $\Pi^*$ 와  $\Pi$ 에 대한 불확실성 타원 모두  $y$  축 방향 길이가  $x$  축 방향에 비해 짧은 데 기인한다. 3) 잡음 억제 측면에서  $\tilde{v}_{rx}$ 에서는  $\Pi^*$ 가  $\Pi$ 보다 우수한 반면,  $\tilde{v}_{ry}$ 에서는  $\Pi^*$ 와  $\Pi$  간의 차이가 두드러지지 않는 바, 이는  $\Pi^*$ 에 대한 불확실성 타원이  $x$  축 방향 길이에 있어  $\Pi$ 의 경우보다 짧은 반면  $y$  축 방향 길이에 있어서는 서로 대등한데서 기인한다.

## VI. 결론

본 논문에서는 평면 주행 이동로봇의 정밀한 속도 추정을 위해 광 마우스의 최적 배열에 대해 기술하였다. 기본적으로, 이동로봇 밑바닥에 광 마우스 설치상 제약이 따를 수 있다고 가정하였다. 본 논문의 주요 기여 내용으로는 1) 광 마우스가 설치된 이동로봇의 속도 기구학 유도, 2) 광 마우스 속도 측정 잡음으로 인한 이동로봇 속도 추정 오차 특성의 표현, 3) 광 마우스 배치 최적화를 위한 간단하면서도 효과적인 성능 지표 정의, 그리고 4) 광 마우스 최적 배치 결정 및 최소 자승 이동로봇 속도 추정에서의 적용 등을 들 수 있다. 본 논문의 후속 연구로서 주행 표면의 특성 변화에 대해 강인한 이동로봇 속도 추정 방법에 대한 연구가 진행 중이다.

## REFERENCES

- [1] J. Borenstein, H. R. Everett, and L. Feng, "Where Am I?": Sensors and Methods for Mobile Robot Positioning, The University of Michigan, 1996.
- [2] S. Thrun, W. Burgard, and D. Fox, Probabilistic Robotics, The MIT Press, 2005.
- [3] S. Lee and J. Song, "Mobile robot localization using optical flow sensors," *International Journal Control, Automation, and Systems*, vol. 2, no. 4, pp. 485-493, Aug. 2004.
- [4] A. Bonarini, M. Matteucci, and M. Restelli, "A kinematic-independent dead-reckoning sensor for indoor mobile robotics," *Proc. IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 3750-3755, 2004.
- [5] A. Bonarini, M. Matteucci, and M. Restelli, "Automatic error detection and reduction for an odometric sensor based on two optical mice," *Proc. IEEE Int. Conference on Robotics and Automation*, pp. 1687-1692, 2005.
- [6] S. Kim and S. Lee, "Robust velocity estimation of an omnidirectional mobile robot using a polygonal array of optical mice," *International Journal Control, Automation, and Systems*, vol. 6, no. 5, pp. 713-721, Oct. 2008.
- [7] J. Hu, Y. Chang, and Y. Hsu, "Calibration and on-line data selection of multiple optical flow sensors for odometry applications," *Sensors and Actuators A*, vol. 149, pp. 74-80, 2009.
- [8] S. Lee and J. Song, "Robust mobile robot localization using optical flow sensors and encoders," *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1039-1044, 2005.
- [9] S. Baek, H. Park, and S. Lee, "Mobile robot localization based on consecutive range sensor scanning and optical flow measurements," *Proc. International Conference on Advanced Robotics*, pp. 17-22, 2005.
- [10] D. Sekimori and F. Miyazaki, "Self-localization for indoor mobile robots based on optical mouse sensor values and simple global camera information," *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, pp. 605-610, 2005.
- [11] M. Cimino and P. R. Pagilla, "Location of optical mouse sensors on mobile robots for odometry," *Proc. of IEEE Int. Conference on Robotics and Automation*, pp. 5429-5434, 2010.
- [12] S. Kim and H. Kim, "Optimization strategy of optical mouse placement for mobile robot velocity estimation," *Proc. of Conference on Information and Control Systems (in Korean)*, pp. 417-418, 2012.



김성복

1980년 서울대학교 전자공학과 졸업. 1982년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사. 1993년 미국 University of Southern California 전기공학과 박사. 1994년~현재 한국외국어대학교 디지털정보공학과 교수. 관심 분야는 지능형 로봇시스템의 분석, 설계 및 제어.



김현빈

2011년 한국외국어대학교 디지털정보공학과 졸업. 2013년 한국외국어대학교 대학원 전자정보공학과 석사. 2013년~현재 (주)아이디스 주임연구원. 관심 분야는 임베디드 기반 자율 주행 이동로봇의 구현 및 제어, 지능형 카메라 시스템 개발.