

여유 개수의 광 마우스를 이용한 이동로봇 주행속도 추정

Mobile Robot Velocity Estimation Using Redundant Number of Optical Mice

김성복*, 정일화**, 이상협***

Sungbok Kim, Ilhwa Jeong, Sanghyup Lee

Abstract - 본 논문에서는 이동로봇 바닥에 설치된 여유 개수의 광 마우스를 이용하여 주행 중인 이동로봇의 속도를 효율적으로 추정하는 방안에 대해 기술한다. 먼저, 이동로봇의 속도 벡터와 광 마우스의 속도 벡터간의 관계를 과결정 선형시스템(Overdetermined Linear System)으로 표현한다. 다음, 과결정 시스템에 대한 최소자승 해(Least Squares Solution)로써 이동로봇의 주행 속도를 효율적으로 추정한다. 마지막으로 시뮬레이션을 통해 제안된 이동로봇 주행 속도 추정법의 유효성을 확인한다.

Key Words : 이동로봇, 속도 추정, 광 마우스, 최소자승 해

1. 서 론

상용 이동로봇의 위치추정을 위해 널리 사용되어 온 위치 센서로는 엔코더, 초음파 센서(beacon), 카메라 등을 들 수 있으나[1], 제각기 극복하기 어려운 근본적 한계를 지니고 있다. 엔코더의 경우 바퀴 미끄러짐으로 인해 주행 거리에 따른 누적 오차가 너무 커지는 단점이 있고, 초음파 센서의 경우 초음파 진행을 위해 직선 시계가 확보되어야 한다는 제약이 따르며, 카메라의 경우 영상처리에 소요되는 연산이 복잡하여 실시간 적용이 용이치 않다는 문제가 제기되고 있다.

PC용 광 마우스의 경우 주행 표면에 대한 고성능 영상처리를 통해 이동 정보가 제공된다는 점에 착안하여 광 마우스를 이동로봇의 바닥에 설치하여 주행 중인 이동로봇의 현재 위치를 추정하고자 하는 시도가 있어 왔다[2-6]. 광 마우스를 이용한 이동로봇의 위치추정은 바퀴 미끄러짐의 영향, 시계 확보의 제약, 위치추정 연산의 복잡성 등의 문제로부터 자유로울 뿐 아니라 광 마우스의 저렴한 가격으로 인해 경제성이 동시에 확보된다는 장점이 따른다.

광 마우스를 이용한 이동로봇의 위치추정에 관한 기존 연구 사례로는 Rowan 대학의 연구[2], Texas A&M 대학의 연구[3], Milano 대학의 연구[4,5], Stanford 대학의 연구[6] 등을 들 수 있다. 첫 번째 경우 1개의 광 마우스만을 사용하였으며, 나머지 세 경우에는 모두 2개의 광 마우스를 사용하였다. 평면 주행 중인 이동로봇의 위치추정을 위해서 위치 좌표 2개, 조향 각도 1개 등 3개의 미지수가 정해져야 하므로

광 마우스 1개 당 2개의 이동 정보가 제공됨을 감안하면 이론적으로는 1.5개의 광 마우스가 필요하게 된다. 그러나 최소개수(2개)의 광 마우스만을 사용하는 경우 광 마우스의 이동 정보에 수반되는 측정 오차의 영향이 크게 나타날 뿐 아니라 광 마우스의 국부적인 오동작 시 추정 오차가 심화되는 현상이 발생할 수 있다.

본 논문에서는 이동로봇 바닥에 3개의 광 마우스를 정삼각형 형태로 설치하여 이동로봇의 위치를 강건하게 추정하는 방법을 제안하고자 한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 이동로봇의 속도 벡터와 광 마우스 속도 벡터간의 관계를 과결정 선형시스템(Overdetermined Linear System)으로 표현한다. 3장에서는 과결정 시스템에 대한 최소자승 해(Least Squares Solution)로써 이동로봇의 주행 속도를 효율적으로 추정할 수 있음을 보인다. 4장에서는 시뮬레이션을 통해 제안된 방법의 유효성을 확인하고, 마지막으로 본 논문의 결론을 내린다.

2. 속도 기구학

[그림 1]에 보인 바와 같이 xy 평면을 주행하는 이동로봇의 바닥에 3개의 광 마우스가 이동로봇의 중앙 O_b 를 중심으로 한 정삼각형의 꼭지점 P_1, P_2, P_3 에 설치되어 있다고 하자. 주행 평면에 고정된 x 방향과 y 방향의 단위 벡터를 각각 $\mathbf{u}_x = [1 \ 0]'$ 와 $\mathbf{u}_y = [0 \ 1]'$ 라 하면, O_b 지점으로부터 $P_i, i=1,2,3,$ 지점까지의 위치 벡터 $\mathbf{p}_i = [p_{ix} \ p_{iy}]'$ 는 다음으로 표현된다.

저자 소개

* 김성복: 韓國外國語大學校 디지털情報工學科 教授·工博

** 정일화: 韓國外國語大學校 電子情報工學科 碩士課程

*** 이상협: 韓國外國語大學校 電子情報工學科 碩士課程

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_1 &= \begin{bmatrix} p_{1x} \\ p_{1y} \end{bmatrix} = d \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} \\ \mathbf{p}_2 &= \begin{bmatrix} p_{2x} \\ p_{2y} \end{bmatrix} = d \begin{bmatrix} \cos(\theta + \frac{2}{3}\pi) \\ \sin(\theta + \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix} \\ \mathbf{p}_3 &= \begin{bmatrix} p_{3x} \\ p_{3y} \end{bmatrix} = d \begin{bmatrix} \cos(\theta + \frac{4}{3}\pi) \\ \sin(\theta + \frac{4}{3}\pi) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 d 는 정삼각형의 중심으로부터 꼭지점까지의 거리이며, 3개의 위치벡터 \mathbf{p}_i , $i=1,2,3$, 사이에 다음 관계식이 성립된다.

$$\sum_{i=1}^3 p_{ix} = \sum_{i=1}^3 p_{iy} = 0 \quad (2)$$

또한, \mathbf{p}_i , $i=1,2,3$, 을 반시계 방향으로 90° 회전시킨 위치 벡터를 \mathbf{q}_i 라 하자.

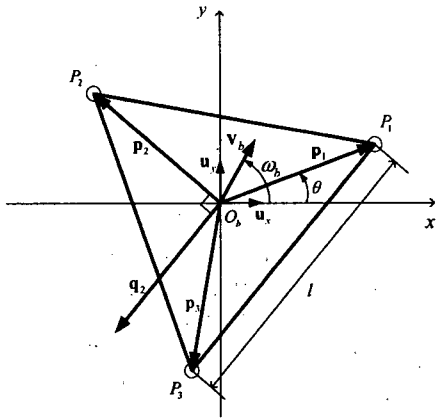


그림 1. 세 개의 광센서를 갖는 거리주행계

O_b 지점에서의 이동로봇의 선속도를 $\mathbf{v}_b = [v_{bx} \ v_{by}]^t$ 라 하고 그리고 각속도를 ω_b 라 하고, 그리고 P_i , $i=1,2,3$, 지점에 설치된 광 마우스의 선속도를 $\mathbf{v}_i = [v_{ix} \ v_{iy}]^t$ 라 하면 다음의 관계식이 성립된다.

$$\mathbf{v}_b + \omega_b \mathbf{q}_i = \mathbf{v}_i \quad (3)$$

식 (3)에 \mathbf{u}_x^t 와 \mathbf{u}_y^t 를 곱하면 각각 다음 식이 얻어진다.

$$\mathbf{u}_x^t \mathbf{v}_b + \omega_b \mathbf{u}_x^t \mathbf{q}_i = \mathbf{u}_x^t \mathbf{v}_i \quad (4)$$

$$\mathbf{u}_y^t \mathbf{v}_b + \omega_b \mathbf{u}_y^t \mathbf{q}_i = \mathbf{u}_y^t \mathbf{v}_i \quad (5)$$

식 (4)과 (5)를 다시 표현하면

$$v_{bx} - \omega_b \times p_{iy} = v_{ix} \quad (6)$$

$$v_{by} + \omega_b \times p_{ix} = v_{iy} \quad (7)$$

이 얻어진다.

식 (6)와 (7)로부터, 3개 광 마우스로 구성된 광학식 거리 주행계의 속도 기구학은 다음과 같이 얻어진다.

$$\mathbf{A} \dot{\mathbf{x}} = \Theta \quad (8)$$

여기서 $\dot{\mathbf{x}} = [v_b \ \omega_b]^t \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ 은 이동로봇의 속도 벡터이고, $\Theta = [v_{1x} \ v_{1y} \ v_{2x} \ v_{2y} \ v_{3x} \ v_{3y}]^t \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$ 는 광학 마우스의 속도 벡터이며, \mathbf{A} 는 $\dot{\mathbf{x}}$ 과 Θ 간의 자코비안 행렬

로서 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_x^t & \mathbf{u}_x^t \mathbf{q}_1 \\ \mathbf{u}_y^t & \mathbf{u}_y^t \mathbf{q}_1 \\ \mathbf{u}_x^t & \mathbf{u}_x^t \mathbf{q}_2 \\ \mathbf{u}_y^t & \mathbf{u}_y^t \mathbf{q}_2 \\ \mathbf{u}_x^t & \mathbf{u}_x^t \mathbf{q}_3 \\ \mathbf{u}_y^t & \mathbf{u}_y^t \mathbf{q}_3 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{6 \times 3} \quad (9)$$

이를 다시 쓰면

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -p_{1y} \\ 0 & 1 & p_{1x} \\ 1 & 0 & -p_{2y} \\ 0 & 1 & p_{2x} \\ 1 & 0 & -p_{3y} \\ 0 & 1 & p_{3x} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{6 \times 3} \quad (10)$$

식 (1)과 (10)에서 보듯, 자코비안 행렬 \mathbf{A} 는 3개 광 마우스의 조향 각도 θ 의 함수로서 매우 간단한 형태임에 주목할 필요가 있다.

3. 속도 추정

식 (8)은 미지수가 3개인데 반해 주어진 식의 수가 6개인 과결정 선형시스템(Overdetermined Linear System)으로, 최소자승법(Least Squares Solution)에 의거하여 그 해를 구할 수 있다. 3개의 광 마우스로부터의 속도 벡터 Θ 가 주어질 때, 이동로봇의 속도 벡터 $\dot{\mathbf{x}}$ 을 최소자승법에 의해 구하면 다음과 같이 얻어진다.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{J} \Theta \quad (11)$$

여기서

$$\mathbf{J} = (\mathbf{A}^t \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^t \in \mathbb{R}^{3 \times 6} \quad (12)$$

으로 표현되며 역자코비안 행렬을 나타낸다. 식 (2)를 이용하면,

$$\mathbf{A}^t \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 3 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 3d^2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

이 얻어지며, 이는 대각 행렬 형태로서 이동로봇의 조향 각도 θ 와 무관한 상수임에 주목하여야 한다. 식 (10)와 (13)를 (12)에 대입하면 역자코비안 행렬 \mathbf{J} 는

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & 0 & \frac{1}{3} & 0 & \frac{1}{3} & 0 \\ 0 & \frac{1}{3} & 0 & \frac{1}{3} & 0 & \frac{1}{3} \\ -\frac{p_{1y}}{l^2} & \frac{p_{1x}}{l^2} & -\frac{p_{2y}}{l^2} & \frac{p_{2x}}{l^2} & -\frac{p_{3y}}{l^2} & \frac{p_{3x}}{l^2} \end{bmatrix} \quad (14)$$

로 얻어지고, 여기에 (2)를 대입하면 다음으로 표현된다.

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & 0 & \frac{1}{3} & 0 & \frac{1}{3} & 0 \\ 0 & \frac{1}{3} & 0 & \frac{1}{3} & 0 & \frac{1}{3} \\ -\frac{\sin \theta}{3d} & \frac{\cos \theta}{3d} & -\frac{\sin(\theta + \frac{2\pi}{3})}{3d} & \frac{\cos(\theta + \frac{2\pi}{3})}{3d} & -\frac{\sin(\theta + \frac{4\pi}{3})}{3d} & \frac{\cos(\theta + \frac{4\pi}{3})}{3d} \end{bmatrix} \quad (15)$$

마지막으로, (11)과 (15)로부터, 광 마우스의 속도 벡터 $\Theta = [v_{1x} v_{1y} v_{2x} v_{2y} v_{3x} v_{3y}]'$ 와 이동로봇의 속도 벡터 $\dot{\mathbf{x}} = [v_{bx} v_{by} \omega_b]'$ 간의 관계식은 다음과 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned} v_{bx} &= \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 v_{ix} \\ v_{by} &= \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 v_{iy} \\ \omega_b &= \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \omega_i \end{aligned} \quad (16)$$

여기서

$$\omega_i = \frac{1}{d} \left[-\sin\left(\theta + (i-1) \times \frac{2\pi}{3}\right) \times v_{ix} + \cos\left(\theta + (i-1) \times \frac{2\pi}{3}\right) \times v_{iy} \right] \quad (17)$$

식 (17)은 i 번째 광 마우스의 선속도에 등가적인 각속도를 나타낸다.

식 (16)에서 보듯 속도 벡터 추정 시점에서의 이동로봇의 현재 자세, 즉 조향 각도가 θ 일 때, 광 마우스의 측정 이동 정보 ($v_{1x} v_{1y} v_{2x} v_{2y} v_{3x} v_{3y}$)가 주어지면 이동 로봇의 추정 속도 ($v_{bx} v_{by} \omega$)는 매우 단순한 연산을 통해 계산 될 수 있음을 알 수 있다. 또한, 6 개의 측정 정보로부터 최소자승 해에 기반을 두어 3 개의 변수를 추정하고 있으므로 광 마우스의 이동 정보에 수반되는 측정 오차의 영향이 감소된다.

4. 시뮬레이션

3개의 광 마우스의 이동 정보에 일정 수준의 랜덤 노이즈를 첨가하여 측정 오차가 이동로봇의 위치추정에 미치는 영향을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 앞서 기술한 바와 같이 이동로봇의 바닥에 3개의 광 마우스가 한 변의 길이가 30 cm인 정삼각형 형태로 설치되어 있다고 하였다 ($l = 30$ cm).

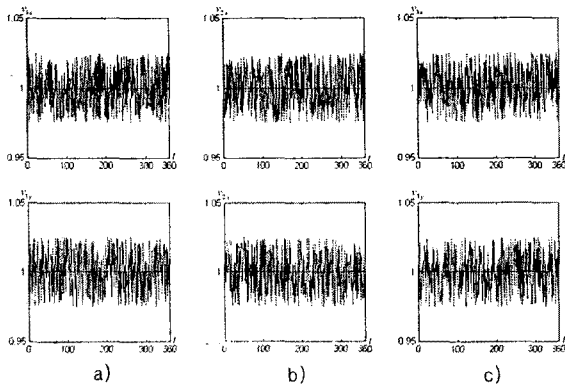


그림 2. 정속 직선 주행의 경우 랜덤 노이즈가 첨가된 광 마우스의 출력

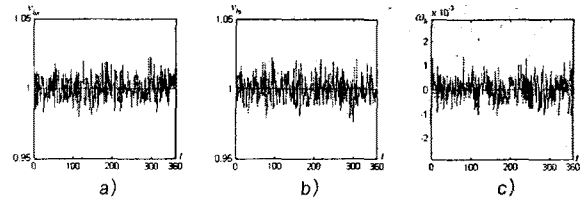


그림 3. 정속 직선 주행의 경우 이동로봇의 추정 속도

[그림 2]는 이동로봇이 $v_{bx} = v_{by} = 1$ cm/sec의 속도로 직선 주행하는 경우 ($\omega_b = 0$ rad/sec) 3개의 광 마우스의 출력, $v_{ix} = v_{iy}$, $i = 1, 2, 3$, 에 각각 ± 0.25 cm/sec ($\pm 2.5\%$ 의 측정 잡음에 해당)이하의 랜덤 노이즈가 첨가된 상태를 보인다. [그림 3]은 식 (9)를 통해 얻어진 이동로봇의 추정 속도, v_{bx} , v_{by} , 그리고 ω_b 를 보인다. [그림 3]과 [그림 4]를 비교하여 보면 최소자승법을 적용함으로써 광 마우스의 이동 측정 오차에 비해 이동로봇의 속도 추정 오차가 약 30% 정도 감소되었음을 관찰할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 이동로봇의 바닥에 3개의 광 마우스를 정삼각형 형태로 설치하여 마우스로부터의 획득되는 이동 정보를 이용하여 이동로봇의 주행 속도를 효율적으로 추정하는 방안을 제시하였다. 먼저, 이동로봇의 속도 벡터와 광 마우스 속도 벡터간의 관계를 과결정 선형시스템(Overdetermined Linear System)으로 표현하였다. 다음, 과결정 시스템에 대한 최소자승 해(Least Squares Solution)로써 이동로봇의 주행 속도를 효율적으로 추정하였다. 마지막으로, 시뮬레이션 결과를 통해 제안된 방법의 유효성을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] J. Borenstein, H. R. Everett, L. Feng, Where am I?: Sensors and Methods for Mobile Robot Positioning, Dept. Mechanical Eng. Michigan University, 1996.
- [2] K. O'Hara, "An Inexpensive Positioning Device for Educational Robotics," Dept. Computer Science Eng. Rowan University, 2001.
- [3] D. K. Sorensen, V. Smukala, M. Ovinis, and S. Lee, "On-Line Optical Flow Feedback for Mobile Robot Localization/Navigation," Proc. IEEE Int. Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 1246-1251, 2003.
- [4] A. Bonarini, M. Matteucci, and M. Restelli, "A Kinematic-independent Dead-reckoning Sensor for Indoor Mobile Robotics," Proc. IEEE Int. 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. P. N. Singh and K. J. Waldron, "Design and Evaluation of an Integrated Planar Localization Method for Desktop Robotics," Proc. IEEE Int. Conference on Robotics and Automation, pp. 1109-1114, 2004.