

## 3개의 광 마우스를 이용한 강건한 광학식 거리주행계

### Robust Optical Odometry Using Three Optical Mice

김성복\*, 김형기

(Sungbok Kim and Hyunggi Kim)

**Abstract :** This paper presents the robust mobile robot localization method exploiting redundant motion information acquired from three optical mice that are installed at the bottom of a mobile robot in a regular triangular form. First, we briefly introduce a low-cost optical motion sensor, HDNS-2000, and a commercial device driver development tools, WinDriver, to be used in this research. Second, we explain the basic principle of the mobile robot localization using the motion information from three optical mice, and propose the least squares based localization algorithm which is robust to the noisy measurement and partial malfunctioning of optical mice. Third, we describe the development of the experimental optical odometer using three PC optical mice and the user-friendly graphic monitoring program. Fourth, simulations and experiments are performed to demonstrate the validity of the proposed localization method and the operation of the developed optical odometer. Finally, along with the conclusion, we suggest some future work including the installation parameter calibration, the optical mouse remodelling, and the high-performance motion sensor adoption.

**Keywords :** mobile robot, localization, optical mouse, redundancy, robustness

#### I. 서론

국내의 우수 경제전망 기관의 보고에 따르면 머지않은 미래에 비산업용 로봇의 시장 규모가 반도체 산업을 상회할 것으로 예측되고 있다. 비산업용 로봇 가운데도 가정용 로봇(청소로봇, 경비로봇 등)이 차지하는 비중이 매우 클 것으로 전망되는데, 가정용 로봇의 경우 대부분 자율주행기능이 필수적 요건이라 간주할 수 있다. 2002년도 발표된 우리나라의 국가기술지도에도 인공지능 및 지능로봇 기술이 포함되어 있으며, 특히 자기위치인식기술을 해당 분야의 요소기술의 하나로서 지정하고 있다.

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[2] 광 마우스를 이동로봇의 바닥에 설치하여 주행 중인 이동로봇의 현재 위치를 추정하고자 하는 시도가 있어 왔다. 광 마우스를 이용한 이동로봇의 위치추정은 바퀴 미끄러짐의 영향, 시계 확보의 제약, 위치추정 연산의 복잡성 등의 문제

로부터 자유로울 뿐 아니라 광 마우스의 저렴한 가격(내장된 고성능 영상처리 칩의 가격은 개당 \$5 수준[3])으로 인해 경제성이 동시에 확보된다는 장점이 따른다.

광 마우스를 이용한 이동로봇의 위치추정에 관한 기존 연구 사례로는 Rowan 대학의 연구[4], Texas A&M 대학의 연구[5], Milano 대학의 연구[6,7], Stanford 대학의 연구[8] 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 최소 개수(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 본 연구에서 사용하는 광 마우스의 저가형 모션 센서와 상용 디바이스 드라이버 개발 도구에 대해 간략히 소개한다. 3장에서는 3개의 광 마우스로 구성된 광학식 거리주행계의 기본 원리와 잉여 개수의 이동 정보를 활용하는 강건한 이동로봇 위치추정 알고리즘에 대해 설명한다. 4장에서는 실험용으로 제작한 광학식 거리주행계와 사용자 인터페이스가 강화된 모니터링 프로그램에 대해 기술한다. 5장에서는 시뮬레이션과 실제 실험을 통해 제안된 이동로봇의 위치추정 방법의 유효성과 제작된 광학식 주행계의 동작을 확인한다. 마지막으로 결론과 함께 본 연구의 향후 과제를 제시한다.

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2006. 5. 2., 채택확정 : 2006. 6. 10.

김성복 : 한국외국어대학교 전자정보공학부(sbkim@hufs.ac.kr)

김형기 : 나래나노텍(주) 기술연구소(hufshg@hufs.ac.kr)

※ 본 논문은 2006년도 한국외국어대학교 교내학술연구비의 지원에 의해 연구되었음.

II. 광 마우스와 윈드라이버

1. 광 마우스

PC용 광 마우스는 LED 및 렌즈 그리고 두뇌에 해당하는 광 모션 센서로 구성되어 있으며, 저렴한 가격에 비해 성능이 매우 우수한 위치 센서라 할 수 있다. 본 연구에서 사용하는 Agilent사의 저가형 광 모션 센서인 HDNS-2000은 [9] 12 inch/sec(약 30 cm/sec에 해당)의 이동 속도에서 400 cpi(counts per inch)의 해상도를 나타낸다. 그림 1(a)의 기능 블록도에서 보듯이 영상취득시스템(image acquisition system)에서 그림 1(b)와 같이 주행 표면의 영상을 시차를 두어 획득한 다음[10], 디지털신호처리기(digital signal processor)에서 영상간의 차이를 이용하여 이동 정보(방향 및 거리)를 추정하여 최종적으로 출력변환기를 통해 PS/2 혹은 QUAD 방식으로 출력한다.

호스트는 내부 명령어를 이용하여 HDNS-2000의 동작 파라미터 값을 설정 혹은 변경할 수 있다. 100 samples/sec가 기본값인 샘플링율은 "Set Sample Rate"(0xF3) 명령어를 사용하여 10, 20, 40, 60, 80, 200 samples/sec로 변경할 수 있다. 8 counts/mm가 기본값인 해상도는 "Set Resolution" (0xE8) 명령어를 사용하여 2, 4, 16 counts/mm로 변경할 수 있다. 또



(a) Functional block diagram



(b) Two surface images acquired with time interval of 0.67 ms.

그림 1. 광 모션 센서.  
Fig. 1. Optical motion sensor.

표 1. HDNS-2000의 파라미터 설정값.

Table 1. Parameter values of HDNS-2000.

파라미터	설정값
sampling rate	100 samples/sec
resolution	2 counts/mm
scaling	1:1 (linear)

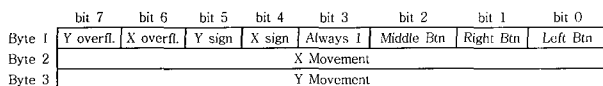


그림 2. 광 마우스로부터 호스트로 전송되는 3바이트 데이터 패킷 형식.

Fig. 2. 3-byte data packet format transmitted from optical mouse to host.

한 호스트로 전송되는 이동 정보의 스케일은 1:1(linear)이 기본이나 "Set Scale"(0xE7) 명령을 사용하여 2:1(pseudo log)로 변경할 수 있다. 본 논문에서는 표 1과 같이 HDNS-2000의 파라미터 값을 설정하였다.

본 논문에서는 HDNS-2000이 스트리밍 모드로 동작하도록 하여 마우스 상태에 변화가 발생하는 경우에 한해 호스트로 데이터 패킷을 전송되도록 하였다. 여기서 마우스의 상태 변화란 좌측, 우측, 중간 버튼의 클릭 상태와 마우스의 X(좌우), Y(상하) 방향으로의 이동을 포함한다. HDNS-2000에는 2개의 이동 카운터를 갖으며, 데이터 패킷 전송과 함께 리셋 되어 전송 이후 발생한 마우스의 이동 정보를 기록한다. 이동 카운터의 값은 9 비트 2의 보수로 표현되고 MSB는 사인 비트로 사용되므로 -255에서 +255까지의 값을 나타낸다. 그림 2는 호스트로 전송되는 3 바이트의 데이터 패킷의 형식을 보이며, 초당 전송되는 최대 데이터 패킷 수는 앞에서 설정한 샘플링율에 의해 정해진다.

2. 윈드라이버

MS 윈도우즈 기반 컴퓨터에 여러 개의 광 마우스를 연결하면 모든 마우스는 기본적으로 HID(Human Interface Device)로 인식된다. 본 논문에서는 호스트에 연결된 광 마우스를 HID가 아닌 일반 디바이스로 인식해야 하므로 이를 위해서는 윈도우즈의 HID 드라이버 부분을 수정할 필요가 있다.

Jungo Software사의 윈드라이버(windriver)는 윈도우즈 환경에서 디바이스 드라이버 생성 작업을 아주 간편하게 해 주는 상용 개발 도구이다[11]. 윈드라이버는 장치 마법사를 사용하여 연결된 하드웨어를 자동적으로 탐지하고 애플리케이션이 해당 하드웨어에 접근할 수 있도록 디바이스 드라이버 생성을 지원해 준다. 윈드라이버는 Windows 95/98/2000/XP/CE/CE.NET, Linux, Solaris, Vx Works 등 다양한 OS에 대해 호환성을 갖는 소스 코드를 생성하며, 또한 USB를 포함하여 PCI, CardBus, ISA, ISAPnP, EISA, CompactPCI, USB 등 다양한 버스 구조를 지원한다. 따라서 개발자는 자신에게 친숙한 환경(OS 및 버스 구조)에서 디바이스 드라이버 개발할 수 있다는 장점이 있다. 그림 3에 보인 바와 같이 윈드라이버를 사용하면 디바이스 드라이버

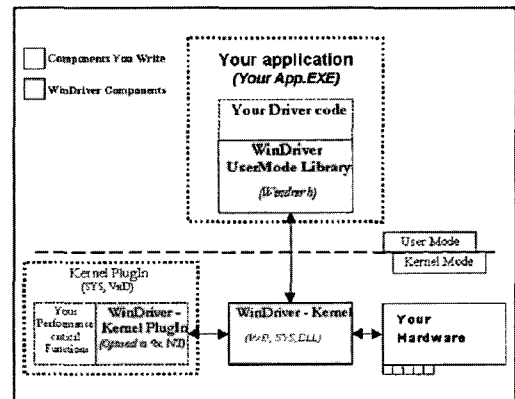


그림 3. 윈드라이버를 이용한 디바이스 드라이버의 개발.  
Fig. 3. Development of device driver using WinDriver.

의 코드를 유저 모드에서 작성하여, 완성된 코드를 커널에 플러그 인하면 되므로 개발자의 부담이 크게 경감된다. 또한 윈드라이버는 최적의 속도로 인터럽트 및 I/O를 처리하는 고성능 디바이스 드라이버를 생성해 주므로 특히 OS 내부, 커널 프로그래밍, DDK, ETK, DDI/DKI 등에 대한 전문 지식이 부족한 초심자들에게 매우 유용하다고 하겠다.

III. 광학식 거리주행계

1. 기본 원리

본 논문에서는 3개의 광 마우스를 이동로봇 바닥에 설치하여 광 마우스들로부터 수신되는 이동 정보를 이용하여 주행 중인 이동로봇의 현재 위치를 추정하고자 한다. xy 평면을 주행하는 이동로봇의 위치추정을 위해서는 위치 좌표(x 및 y)와 조향 각도(θ)를 포함하여 3개의 미지수가 결정되어야 한다. 1개의 광 마우스로부터 2개의 이동 정보(좌우 이동 및 상하 이동)가 수신됨을 감안하면 이론적으로는 1.5개의 광 마우스가 필요하게 된다. 기존 연구에서와 같이 2개의 광 마우스를 사용하는 경우[5-8] 마우스의 이동 정보에 필연적으로 수반되는 측정 잡음의 크기에 따라 추정 오차가 과도해 질 수 있다. 반면 본 논문에서와 같이 잉여 개수(3개)의 광 마우스를 사용하면 측정 잡음의 영향을 현저히 감소시킬 수 있을 뿐 아니라 일부 마우스의 국부적인 오동작에도 효과적으로 대처할 수 있게 된다.

그림 4는 이동로봇의 주행 패턴에 따라 달라지는 3개의 광 마우스로부터의 이동 정보 즉 속도 벡터를 나타낸다. 그림 4(a)에서와 같이 이동로봇이 바깥에 위치한 ICR (Instantaneous Center of Rotation)을 중심으로 하여 회전 주행하는 경우, 3개의 광학 마우스로부터 얻어지는 속도 벡터는 모두 크기와 방향이 서로 다르게 된다. 그림 4(b)와 같이 이동로봇이 직선 주행하는 경우(ICR이 무한대에 위치) 3개의 광학 마우스로부터 얻어지는 속도 벡터는 모두 크기와 방향이 같게 된다. 그림 4(c)와 같이 이동로봇이 자체 회전하는 경우(ICR이 이동로봇의 중심과 일치) 3개의 광학 마우스로부터 얻어지는 속도 벡터가 크기는 같되 방향이 상이하게 된다. 이와 같은 이동로봇의 주행 패턴과 광학 마

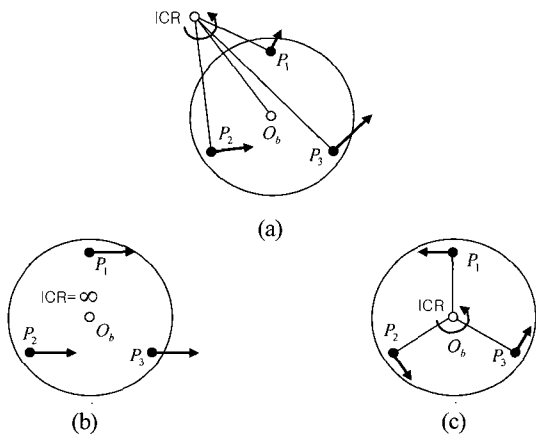


그림 4. 광학식 거리주행계의 기본 원리.  
Fig. 4. Basic principle of optical odometer.

우스의 속도 벡터간의 상호 관계를 이용하면 이동로봇의 속도를 추정할 수 있고, 또한 추정 속도를 적분함으로써 이동로봇의 현재 위치를 추정할 수 있다.

2. 강건한 위치추정 알고리즘

그림 5에 보인 바와 같이 xy 평면을 주행하는 이동로봇의 바닥에 3개의 광 마우스가 이동로봇의 중심  $O_b$ 를 중심으로 한 변의 길이가 l인 정삼각형의 꼭지점  $P_1, P_2, P_3$ 에 설치되어 있다고 하자. 주행 평면에 고정된 x 방향과 y 방향의 단위 벡터를 각각  $u_x = [1 0]^t$ 와  $u_y = [0 1]^t$ 라 하면,  $O_b$  지점으로부터  $P_i, i=1,2,3$ , 지점까지의 위치 벡터  $p_i = [p_{ix} p_{iy}]^t$ 는 다음으로 표현된다.

$$\begin{aligned} p_1 &= \begin{bmatrix} p_{1x} \\ p_{1y} \end{bmatrix} = \frac{l}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} \\ p_2 &= \begin{bmatrix} p_{2x} \\ p_{2y} \end{bmatrix} = \frac{l}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta + \frac{2}{3}\pi) \\ \sin(\theta + \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix} \\ p_3 &= \begin{bmatrix} p_{3x} \\ p_{3y} \end{bmatrix} = \frac{l}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi) \\ \sin(\theta - \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1)$$

또한,  $p_i, i=1,2,3$ , 을 반시계 방향으로  $90^\circ$  회전시킨 위치 벡터를  $q_i$  라 하자.

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

$$v_b + \omega_b q_i = v_i \quad (2)$$

(2)에  $u_x^t$ 와  $u_y^t$ 를 곱하면

$$u_x^t v_b + \omega_b u_x^t q_i = u_x^t v_i \quad (3)$$

$$u_y^t v_b + \omega_b u_y^t q_i = u_y^t v_i \quad (4)$$

이 얻어진다. (3)과 (4)를 다시 표현하면

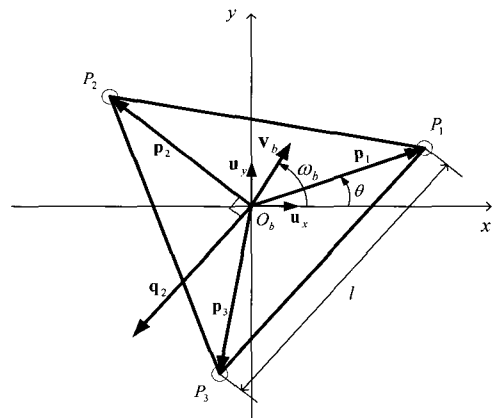


그림 5. 세 개의 광센서를 갖는 거리주행계.  
Fig. 5. Optical odometer having three optical mice.

$$v_{bx} - w_b \times p_{iy} = v_{ix} \tag{5}$$

$$v_{by} + w_b \times p_{ix} = v_{iy} \tag{6}$$

으로 나타낼 수 있다.

(5)와 (6)으로부터, 3개 광 마우스로 구성된 광학식 거리 주행계의 속도 기구학은 다음과 같이 얻어진다.

$$A \dot{x} = \theta \tag{7}$$

여기서  $\dot{x} = [v_b \ \omega_b]^t \in R^{3 \times 1}$ 은 이동로봇의 속도 벡터이고,  $\theta = [v_{1x} \ v_{1y} \ v_{2x} \ v_{2y} \ v_{3x} \ v_{3y}]^t \in R^{6 \times 1}$ 는 광학 마우스의 속도 벡터이며, A는  $\dot{x}$ 과  $\theta$ 간의 자코비안 행렬로서 다음과 같이 표현된다.

$$A = \begin{bmatrix} u_x^t & u_x^t q_1 \\ u_y^t & u_y^t q_1 \\ u_x^t & u_x^t q_2 \\ u_y^t & u_y^t q_2 \\ u_x^t & u_x^t q_3 \\ u_y^t & u_y^t q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -p_{1y} \\ 0 & 1 & p_{1x} \\ 1 & 0 & -p_{2y} \\ 0 & 1 & p_{2x} \\ 1 & 0 & -p_{3y} \\ 0 & 1 & p_{3x} \end{bmatrix} \in R^{6 \times 3} \tag{8}$$

(8)의 자코비안 행렬 A는 3개 광 마우스의 현재 자세, 즉  $p_i \ i=1,2,3$ ,의 함수로서 매우 간단한 형태임에 주목하여야 한다.

(7)은 중충결정시스템(overdetermined system)으로 최소자승법(least squares solution)에 의거하여 해를 구할 수 있다. 3개의 광 마우스로부터의 속도 벡터  $\theta$ 이 주어질 때, 이동로봇의 속도 벡터  $\dot{x}$ 을 최소자승법에 의해 구하면 다음과 같이 얻어진다.

$$\dot{x} = J \theta \tag{9}$$

여기서

$$J = (A^t A)^{-1} A^t \in R^{3 \times 6} \tag{10}$$

으로 표현된다. (10)에서

$$A^t A = \begin{bmatrix} 3 & 0 & -\sum_{i=1}^3 p_{iy} \\ 0 & 3 & \sum_{i=1}^3 p_{ix} \\ -\sum_{i=1}^3 p_{iy} & \sum_{i=1}^3 p_{ix} & \sum_{i=1}^3 \|p_i\|^2 \end{bmatrix} \tag{11}$$

이고

$$\frac{1}{3} \times \sum_{i=1}^3 \|p_i\|^2 < \sum_{i=1}^3 \|p_i\|^2 \tag{12}$$

이므로,  $A^t A$ 의 역행렬이 광학식 거리주행계의 자세와 상관없이 항상 존재하고 또한 닫힌 형태(closed form)로 구해 질 수 있다. 따라서, 최소자승 해인 (9)를 이용하여 이동로봇의 속도 벡터를 추정함으로써 광 마우스의 이동 정보에 수반되는 측정 잡음의 영향이 최소화될 수 있고 또한 소요 되는 계산량이 매우 적다는 이점이 있음을 알 수 있다.

여유 개수(3개)의 광 마우스를 사용하면, 광 마우스의 측정 잡음에 대해 강인할 뿐 아니라 일부 마우스의 국부적인 오동작에도 효과적으로 대처할 수 있다. 예를 들어 3개 중 1개 마우스에 고장이 발생하는 경우 광학식 거리주행계의 속도 기구학은 (7)의 형태로 얻어지되 이 때 자코비안 행렬 A는  $4 \times 3$  행렬이 되고, 이동로봇의 속도 벡터의 최소자승해도 (9)로 구해지되 이 때 역자코비안 행렬 J는  $3 \times 4$  행렬이 된다.

마지막으로 시간  $t$ 에서의 이동로봇의 추정 위치를  $x(t)$ 라 하면, 샘플링 간격  $\Delta t$  후의 추정 위치  $x(t + \Delta t)$ 는 다음과 같이 얻어진다.

$$x(t + \Delta t) = x(t) + \dot{x} \Delta t \tag{13}$$

#### IV. 광학식 거리주행계 제작 및 모니터링

##### 프로그램 개발

##### 1. 광학식 거리주행계 제작

본 논문에서는 상용 이동로봇에 적용하고자 PC용 광 마우스 3개를 이용하여 광학식 거리주행계를 제작하였다. 그림 6에 보인 바와 같이 3개의 광 마우스를 이동로봇의 중심을 기준으로 변의 길이가 30 cm인 정삼각형 형태로 설치하였으며, 기 설치된 이동로봇의 3개의 바퀴와의 기계적 간섭을 줄이도록 노력하였다. 광 마우스로부터 이동 정보를 획득하고 이동로봇의 위치추정 연산을 수행하는 호스트로서 이동로봇에 탑재된 MS 윈도우즈 기반 노트북 컴퓨터를 사용하였다. Jungo Software사의 윈드라이버를 개발 도구로 사용하여 3개의 광 마우스에 대한 디바이스 드라이버를 개발하였으며, 이를 통해 개발 시간을 단축하고 아울러 성능이 우수한 디바이스 드라이버를 생성할 수 있었다.

##### 2. 광학식 거리주행계 모니터링 프로그램

이동로봇의 현재 위치(위치 좌표 및 조향각도), 이동 경로 등을 도시하고 3개 광 마우스의 상태(이동 정보 및 오동작 여부)를 일목요연하게 보이도록 제작된 광학식 거리주행계의 모니터링 프로그램을 제작하였다. OpenGL 라이브러리를 사용하여 GUI(Graphic User Interface)를 구현하였으며 그림 7은 완성된 모니터링 프로그램의 화면을 보인다.

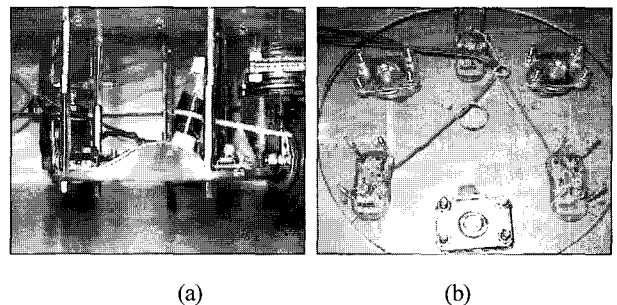


그림 6. 3개의 PC용 광 마우스를 사용하여 제작한 실험용 광학식 거리주행계.

Fig. 6. Experimental optical odometer built using three PC optical mice.

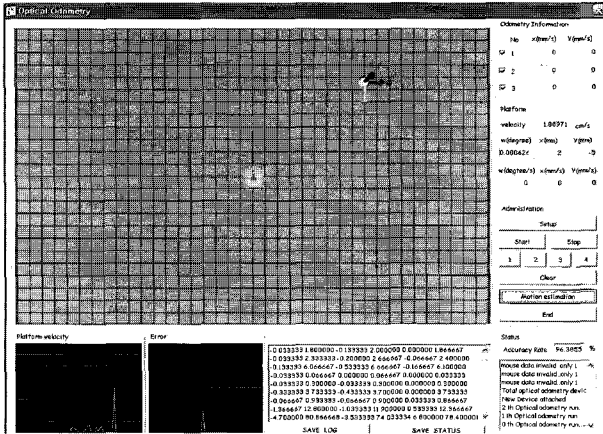


그림 7. 광학식 거리주행계의 모니터링 프로그램.  
Fig. 7. Monitoring program for optical odometer.

모니터링 프로그램의 화면 구성은 다음과 같다. 왼쪽 상단 화면에서 단추 모양은 이동로봇을 표시하며 단추안쪽의 화살표는 로봇의 이동 방향을 나타내고 단추 뒤의 선은 로봇의 이동 궤적을 나타낸다. 이 된다. 오른쪽 상단 화면은 위로부터 아래쪽 방향으로 3개 광 마우스의 이동 속도, 광학식 거리주행계의 추정 속도 및 위치, 초기화/실행시작/위치추정 메뉴, 광학식 거리주행계의 상태 등으로 구성하였다. 하단 화면은 왼쪽에서 오른쪽 방향으로 광학식 거리주행계의 추정 속도 변화, 광 마우스의 오동작 여부, 그리고 3개 광 마우스의 출력값을 나타낸다.

V. 시뮬레이션 및 실제 실험

1. 시뮬레이션 결과

3개의 광 마우스의 이동 정보에 일정 수준의 랜덤 노이즈를 첨가하여 측정 오차가 이동로봇의 위치추정에 미치는 영향을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 이동로봇의 주행 패턴을 선형, 회전, 그리고 선형/회전으로 바꾸어 가며 측정 오차의 영향이 어떻게 달라지는지 검토하였다. 앞서 기술한 바와 같이 이동로봇의 바닥에 3개의 광 마우스가 한 변의 길이가 30 cm인 정삼각형 형태로 설치되어 있다고 하였다 ( $l=30$  cm).

그림 8은 이동로봇이  $v_{bx} = v_{by} = 1$  cm/sec의 속도로 직선 주행하는 경우( $w_b = 0$  rad/sec) 3개의 광 마우스의 출력,  $v_{ix} = v_{iy}$ ,  $i=1,2,3$ , 에 각각  $\pm 0.25$  cm/sec ( $\pm 2.5\%$ 의 측정 잡음에 해당)이하의 랜덤 노이즈가 첨가된 상태를 보인다. 그림 9는 (9)를 통해 얻어진 이동로봇의 추정 속도,  $v_{bx}$ ,  $v_{by}$ , 그리고  $w_b$ 를 보인다. 그림 8과 9를 비교하여 보면 최소자승법을 적용함으로써 광 마우스의 이동 측정 오차에 비해 이동로봇의 속도 추정 오차가 약 30% 정도 감소되었음을 관찰할 수 있다.

그림 10은 이동로봇이  $w_b = \frac{\sqrt{6}}{l} = \frac{\sqrt{6}}{30}$  rad/sec의 각속도로 자체 회전 주행하는 경우( $v_{bx} = v_{by} = 0$  cm/sec) 3개의 광 마우스 출력에  $\pm 2.5\%$  이하의 측정 잡음이 첨가된 상태를

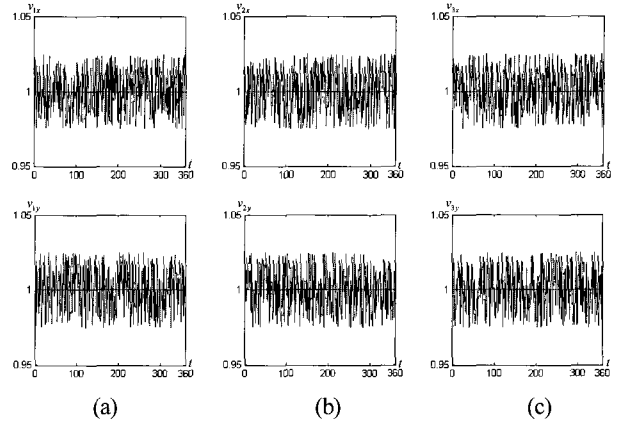


그림 8. 정속 직선 주행의 경우 랜덤 노이즈가 첨가된 광 마우스의 출력.

Fig. 8. Noisy outputs from three optical mice in the case of constant linear velocity navigation.

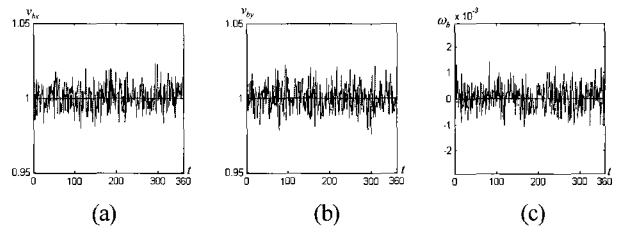


그림 9. 정속 직선 주행의 경우 이동로봇의 추정 속도.  
Fig. 9. Estimated velocities of mobile robot moving with constant linear velocity.

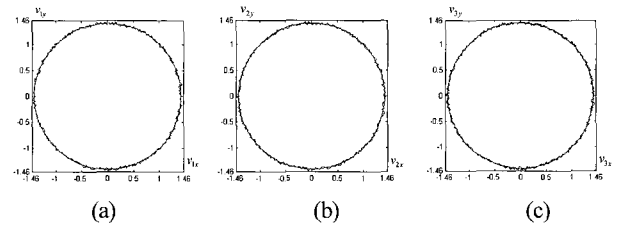


그림 10. 정속 회전 주행의 경우 랜덤 노이즈가 첨가된 광 마우스의 출력.

Fig. 10. Noisy outputs from three optical mice in the case of constant angular velocity navigation.

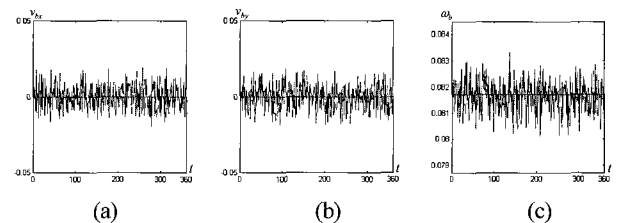


그림 11. 정속 회전 주행의 경우 이동로봇의 추정 속도.  
Fig. 11. Estimated velocities of mobile robot moving with constant angular velocity.

를 보인다. 광 마우스의 출력이  $(v_{ix}, v_{iy})$ ,  $i=1,2,3$ , 좌표

상에서 중심이 (0, 0)이고 반경이  $w_b \times \frac{1}{\sqrt{3}} = \sqrt{2}$ 인 원으로 나타남에 주목하라. 그림 11은 (9)에 의한 이동로봇의 추정 속도,  $v_{bx}$ ,  $v_{by}$ , 그리고  $w_b$ 을 보이는데, 그림 10과 비교하여 보면 추정 오차가 선속도의 경우 30% 정도 감소된 반면 각속도의 경우는 약 20% 정도 감소되었음을 관찰 할 수 있다. 이동로봇이  $v_{bx} = v_{by} = 1$  cm/sec의 선속도와  $w_b = \frac{\sqrt{6}}{30}$  rad/sec의 각속도로 주행하는 경우, 그림 12와

그림 13은 각각 랜덤 노이즈가 첨가된 광 마우스의 출력과 (9)에 의한 이동로봇의 추정 속도를 보이고 있는데, 앞서 기술한 경우와 유사한 추정 오차 감소를 관찰할 수 있다.

2. 실험 결과

제작된 실험용 광학식 거리주행계의 동작 여부를 확인하기 위해 광학식 거리주행계를 직선으로 왕복 이동하는 실험을 반복하여 실시하였다. (x, y) = (0, 0) 지점에서 정지 상태인 광학식 거리주행계를 y 축을 따라 가속시킨 후 다시 감속시켜 (0, 30) 지점에서 정지하도록 하였다. 표 2는 3개의 광 마우스로부터 획득된 데이터를 보이며, 그림 14는 (9)에 의거하여 추정된 광학식 거리주행계의 속도와 위치를 보인다. 광학식 거리주행계를 이동로봇이 아닌 손으로 직접 이동시켰기 때문에 정확한 가감속 운동이 어려웠으나, 제작된 거리주행계가 정상적으로 동작한다는 사실은 확인할 수 있었다. 또한 광학식 거리주행계를 정사각형 궤적을 따라 주행시키는 실험을 실시하였는데, 그림 7은 이 때 얻어진 모니터링 프로그램의 화면을 보이고 있다. 반복 실험결과 정사각형 궤적 출발 지점과 귀환 지점간의 오차가 근소한 것으로 관찰되었다.

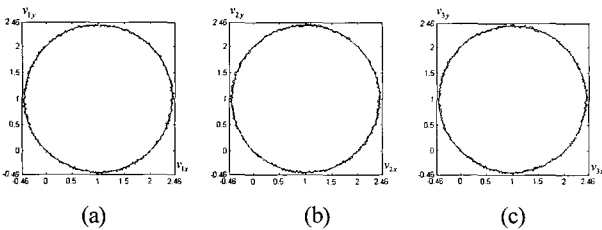


그림 12. 정속 직선/회전 주행의 경우 랜덤 노이즈가 첨가된 광 마우스의 출력.

Fig. 12. Noisy outputs from three optical mice in the case of constant linear/angular velocity navigation.

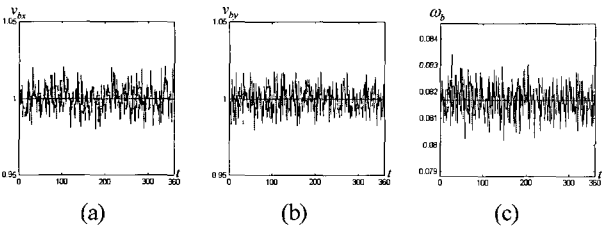


그림 13. 정속 직선/회전 주행의 경우 이동로봇의 추정 속도.

Fig. 13. Estimated velocities of mobile robot moving with constant linear/angular velocity.

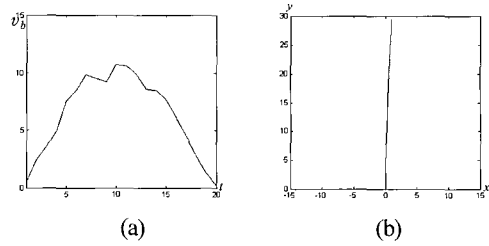


그림 14. 광 마우스의 실제 출력으로부터 얻어진 광학식 거리 주행계의 추정 속도 및 위치.

Fig. 14. Estimated velocity and position obtained from actual optical mouse outputs.

표 2. 3개 광 마우스의 실제 출력 데이터.

Table 2. Actual output data of three optical mice.

첫 번째 마우스		두 번째 마우스		세 번째 마우스	
$v_{1x}$	$v_{1y}$	$v_{2x}$	$v_{2y}$	$v_{3x}$	$v_{3y}$
0.000000	0.050000	0.000000	0.600000	0.000000	1.050000
0.000000	1.250000	0.050000	2.750000	0.100000	3.250000
0.050000	2.500000	0.000000	3.600000	0.050000	4.600000
0.000000	3.650000	0.150000	5.600000	0.300000	5.450000
0.000000	6.950000	0.350000	7.900000	0.050000	7.850000
0.100000	8.300000	0.250000	8.850000	0.500000	8.350000
0.000000	10.300000	0.300000	9.550000	0.050000	9.700000
0.050000	9.400000	0.200000	9.250000	0.650000	9.950000
0.300000	9.300000	0.550000	9.050000	0.600000	9.350000
0.100000	11.600000	0.400000	10.000000	0.150000	10.450000
0.100000	11.150000	0.350000	10.500000	0.650000	10.150000
0.200000	10.550000	0.450000	9.400000	0.650000	9.900000
0.250000	9.250000	0.250000	8.150000	0.250000	8.450000
0.100000	9.100000	0.500000	8.250000	0.400000	8.100000
0.050000	8.150000	0.300000	7.850000	0.650000	7.100000
0.150000	5.900000	0.100000	6.550000	0.000000	5.700000
0.000000	4.750000	0.000000	4.050000	0.050000	4.500000
0.000000	2.550000	0.000000	3.300000	0.100000	2.550000
0.000000	1.000000	0.050000	1.350000	0.000000	1.400000
0.000000	0.050000	0.000000	0.300000	0.000000	0.300000

VI. 결론 및 향후 과제

본 논문에서는 이동로봇의 바닥에 여유 개수의 광 마우스를 설치하여 마우스로부터의 획득되는 이동 정보를 이용하여 이동로봇의 현재 위치를 강건하게 추정하는 방안을 제시하였다. 첫째, 본 연구에서 사용한 광 마우스의 저가형 모션 센서인 HDNS-2000과 상용 디바이스 드라이버 개발 도구인 윈드라이버에 대해 소개하였다. 둘째, 정삼각형으로 설치된 3개의 광마우스를 이용한 이동로봇의 위치추정의 기본 원리를 설명하고 최소자승법에 의거한 강건한 위치추정 알고리즘을 고안하였다. 셋째, PC용 마우스를 이용하여 제작한 실험용 광학식 거리주행계와 사용자 인터페이스가 강화된 모니터링 프로그램에 대해 기술하였다. 마지막으로 시뮬레이션과 실제 실험을 통해 제안된 이동로봇의 위치추정 방법의 유효성과 제작된 광학식 거리주행계의 동작을

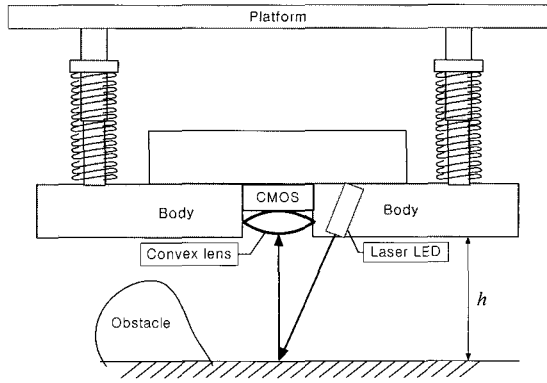


그림 15. PC용 광 마우스의 개조.  
Fig. 15. Remodelling of PC optical mouse.

확인하였다. 참고로 본 논문의 보다 상세한 내용은 참고 문헌 [12]에서 찾아 볼 수 있다. 광 마우스 기반 이동로봇의 위치추정은 성능과 경제성을 겸비한 실용적 기법이라고 할 수 있으며, 특히 중저가대의 가정용 로봇(청소로봇, 경비로봇 등)에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구의 향후 과제로는 다음을 들 수 있다. 이동로봇 바닥에 광 마우스를 가급적 정밀히 설치하고자 노력하였으나 실질적으로는 정밀도에 한계가 있으며 따라서 정확한 설치 위치를 알아내기 위해서는 보정 작업이 요구되게 된다[6]. PC용 광 마우스는 바닥 면에 접촉한 상태에서 동작하도록 제작되어 있어 본 연구에 그대로 사용할 경우 주행 노면의 노출 부위와의 충돌 시 광 마우스 훼손 가능성이 있으며, 노면과의 적정 거리 확보하고 노면 적응성을 높이기 위해서는 그림 15와 같이 고풍력 LED, 적절한 렌즈, 스프링 등을 사용하여 광 마우스를 개조할 필요가 있다. 마지막으로 본 연구에서는 Agilent사의 저가형 모션 센서인 HDNS-2000을 사용하여 이동 속도가 12 inch/sec, 해상도가 400 cpi로 제한되었으나, 동사의 고성능 모션 센서인 ADNS-2051을 채택할 경우 14 inch/sec, 400/800 cpi로 향상시킬 수 있다[13].

**참고문헌**

[1] J. Borenstein, H. R. Everett, and L. Feng, *Where am I?*:

*Sensors and Methods for Mobile Robot Positioning*, Dept. Mechanical Eng. Michigan University, 1996.

[2] B. K. P. Horn and B. G. Schunck, "Determining optical flow," *Artificial Intelligence*, vol. 16, no. 1-3, pp. 185-203, 1981.

[3] M. Alden, "Agilent technologies ships 100 million optical mouse sensor," *EE Times*, Dec. 17, 2002.

[4] K. O'Hara, "An inexpensive positioning device for educational robotics," *Dept. Computer Science Eng. Rowan University*, 2001.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 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.

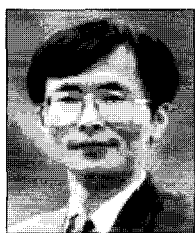
[9] *Solid-State Optical Mouse Sensor with PS/2 and Quadrature Outputs: HDNS-2000*, Agilent Technologies, 2004.

[10] *Optical Mice and how they Work.*, Agilent Technologies, 2001.

[11] *WinDriver Version 5.X User's Guide*, Jungo Software Technologies.

[12] 김형기, 광 마우스를 이용한 광학식 거리추행계의 설계 및 구현, 석사학위논문, 전자정보공학과, 한국외국어대학교, 2005.

[13] *Agilent ADNS-2051 Optical Mouse Sensor*, Agilent Technologies, 2001.



**김성복**  
1980년 서울대학교 전자공학과 졸업. 1982년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사. 1993년 미국 University of Southern California 전기공학과 박사. 1994년~현재 한국외국어대학 전자정보공학부 교수. 관심분야는 지능형 로봇 시스템의 분석, 설계 및 제어.



**김형기**  
2003년 한국외국어대학교 디지털정보공학과 졸업. 2005년 동 대학원 석사. 현재 나래나노텍(주) 기술연구소 연구원. 관심분야는 전방향성 이동로봇의 설계 및 제어.