

## 천장 전등패널 기반 로봇의 주행오차 보정과 제어

### Control and Calibration for Robot Navigation based on Light's Panel Landmark

진태석\*

Tae-Seok Jin

#### 〈Abstract〉

In this paper, we suggest the method for a mobile robot to move safely from an initial position to a goal position in the wide environment like a building.

There is a problem using odometry encoder sensor to estimate the position of a mobile robot in the wide environment like a building. Because of the phenomenon of wheel's slipping, a encoder sensor has the accumulated error of a sensor measurement as time. Therefore the error must be compensated with using other sensor. A vision sensor is used to compensate the position of a mobile robot as using the regularly attached light's panel on a building's ceiling. The method to create global path planning for a mobile robot model a building's map as a graph data type. Consequently, we can apply floyd's shortest path algorithm to find the path planning. The effectiveness of the method is verified through simulations and experiments.

*Keywords : Mobile Robot, Navigation, CCD Camera, Landmark*

---

\* 교신저자, 정회원, 동서대학교 메카트로닉스공학과 교수\*\* Corresponding Author, Professor Dept. of Mechatronics  
부산대학교 졸업(공학박사), Ph.D Dongseo University  
47011 부산광역시 사상구 주례로47 E-mail : jints@dongseo.ac.kr, 051-320-1541

### 1. 서론

본 논문에서 사용된 지능로봇은 빌딩 내에서 인간과의 상호작용을 위해 인공적인 위치인식용 랜드마크를 사용하지 않고 천장에 배치된 전등 패널을 활용하여 주행 보정하는 방법을 활용하고자 한다. 인공적 랜드마크를 이용하는 대신 정형화된 패널의 패턴에 따른 방향에 따라 방향 및 위치를 인식할 수 있고 고정된 높이 값으로 인하여 인식에 따른 에러값을 최소화 할 수 있는 장점이 있다 [1-3]. 그러므로 엔코더 센서의 측정오차로 인한 시간에 따른 누적오차는 주행거리가 길면 길수록 그 정도가 심하여 서비스로봇이 초기지점에서 목적지점까지 도달할 수 없는 결과를 초래할 수 있다 [3-4]. 따라서 주행 중에 서비스로봇의 위치 에러를 보상할 수 있는 센서 알고리즘을 제시한다. 그 방법은 빌딩내 특정 위치 정보를 알 수 있는 천장 전등패널을 이용하여 이동로봇의 위치를 추정하는 것이다 [5-6]. 즉, 엔코더 센서의 측정오차로 인한 시간에 따른 누적오차의 정도를 영상센서를 이용하여 천장 전등 패널로부터 이동로봇의 위치를 추정하여 그 위치 에러를 보상하는 이론적 근거와 실험결과를 제시하였다.

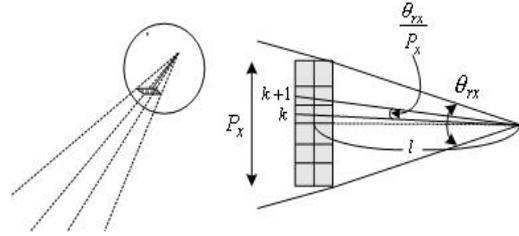


Fig. 1. Pin-hole camera model.

본 논문에서는 영상정보로서 빌딩의 천장에 달려있는 전등 패널을 이용하며 카메라는 천장과 직교하는 방향으로 로봇에 장착한다. 그림 2는 천장의 전등 패널의 영상정보를 이용하여 카메라의 중심 위치를 추정 할 수 있는 방법을 나타낸다 [6].

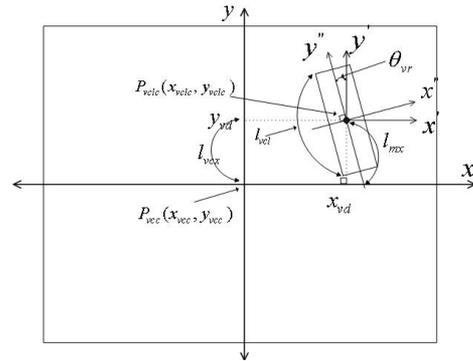


Fig. 2 Camera position's estimation using vision information from the light's panel of ceiling.

### 2. 패널인식 모델링

#### 2.1 영상기반 로봇위치보정

영상정보에서 실제물체의 위치를 추정하기 위하여 핀 홀 카메라 모델을 사용하였다. 핀 홀 카메라 모델에서는 그림 1과 같이 모든 영상은 하나의 점으로 모여서 영상센서의 각 셀 들은 중심과의 각으로 모델링된다 [5-6].

획득한 영상의 중심점  $P_{vac}$ 를 천장 전등 패널의 중심으로 하는 좌표 축  $x', y'$ 를 기준으로 보았을 때, 즉  $x_{vdc} = 0, y_{vdc} = 0$ 이라 두었을 때  $P_{vac}$ 는 식(1)과 같이 정의 할 수 있다.

$$x'_{vac} = x_{vac} - x_{vdc} \tag{1}$$

$$y'_{vac} = y_{vac} - y_{vdc}$$

$y$ 축의 값이 바뀐 이유는 실제 수학적인  $y$ 축은 밑에서부터 위로 올라가면서 증가한다. 그러나 컴퓨터 화면의  $y$ 축은 위에서부터 내려오면서 수가 증가하기 때문이다. 천장의 전등 패널은 그림 2와 같이 화면에서 보면  $\theta_{vr}$ 만큼 회전되어져 있다. 즉, 회전되어진 축  $x'', y''$ 에 대한 회전행렬  $R$ 과  $P''_{vcc}$ 는 다음과 같다.

$$R = \begin{pmatrix} \cos\theta_{vr} & -\sin\theta_{vr} \\ \sin\theta_{vr} & \cos\theta_{vr} \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} x''_{vcc} \\ y''_{vcc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_{vr} & -\sin\theta_{vr} \\ \sin\theta_{vr} & \cos\theta_{vr} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x'_{vcc} \\ y'_{vcc} \end{pmatrix} \quad (3)$$

그리고  $\theta_{vr}$ 은 식(4)를 이용하여 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$l_{mx} = \sqrt{(x_{vdc} - x_{vcc})^2 + (y_{vdc} - y_{vcc})^2} \quad (4)$$

$$l_{vcc} = |y_{vdc} - y_{vcc}|$$

$$\theta_{vr} = \cos^{-1} \frac{l_{vcc}}{l_{mx}} \quad (5)$$

단,  $\theta_{vr}(+)$  오른쪽 회전,  $\theta_{vr}(-)$ 는 왼쪽회전.

건물내의 천장의 모든 전등 패널의 크기와 전역 좌표 계에서의 전등 패널의 중심위치  $P_{dc}(x_{dc}, y_{dc})$ 를 알고 있을 때, 영상정보의 천장 전등 패널의 길이는  $l_{vcd}$ 과  $l_{rd}$ 의 관계는 그림 2에서 제시한 것과 같이 핀 홀 모델에 의해서 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$l_{vcd} = k \cdot l_{rd} \quad (6)$$

영상 좌표계부터 카메라 중심 위치와 천장의 전등패널의 중심위치와의 관계는 식(7)과 같다.

$$x_{rcx} = x_{rdc} + \frac{1}{k} \cdot x''_{vcc} \quad (7)$$

$$y_{rcx} = y_{rdc} + \frac{1}{k} \cdot y''_{vcc}$$

전역 좌표계에서 빌딩 내 천장에 부착된 모든 전등 패널의 중심 위치는  $P_{rdc}^n(x_{rdc}^n, y_{rdc}^n)$ 이고  $n$ 은 전등 패널의 인덱스를 가리킨다. 여기서  $n$ 은  $n=1, \dots, n$ 이다. 카메라의 위치  $P_{rcx}(x_{rcx}, y_{rcx})$ 은 식(2)와 식(3)을 이용하여 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

## 2.2. 천장 패널인식 알고리즘

### 2.2.1 방향추정

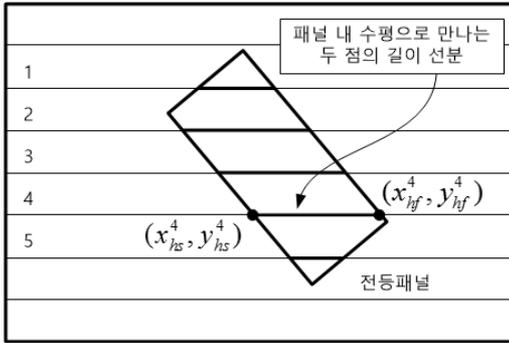
천장 전등 패널의 영상 정보로부터 서비스로봇의 주행 방향과 위치를 추정하기 위해서 전등 패널의 중심점과 길이를 추출해야 한다[2]. 추출 알고리즘은 먼저 천장 전등 패널인지 아닌지를 판별하는 인식이 먼저 선행되어야 하고 패널의 중심점과 길이로부터 목적하는 정보들을 추정한다.

그림 3은 천장 전등 패널의 영상입력에 따른 예지정보와 좌표관계를 나타낸다. 그림 3(a)은 10개의 수평선을 그어 한 선분 당 만나는 두 점을 찾고, 그림 3(b)는 수직선을 그어 한 선분당 만나는 두 점들을 찾아낸다.

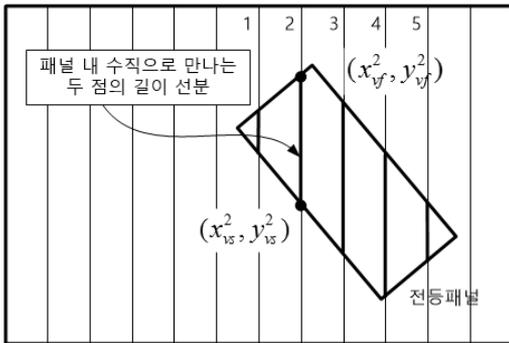
두 점 사이의 길이를  $l_h^n, l_v^n$ 이라 하고  $l_h^n, l_v^n$ 은 식(8)과 같다. 그리고  $l_h^n, l_v^n$ 의 길이는 식 (9)와 같이 각각 나타낼 수 있다.

$$\{l_h^n\} = \{l_h^1, l_h^2, \dots, l_h^n\}, \{l_v^n\} = \{l_v^1, l_v^2, \dots, l_v^n\} \quad (8)$$

$$l_h^n = \sqrt{(x_{hf}^n - x_{hs}^n)^2}, l_v^n = \sqrt{(x_{vf}^n - x_{vs}^n)^2} \quad (9)$$



(a)



(b)

Fig. 3 Simulated edge's vision information of ceiling light's panel.

- (a) Two contact points on horizontal line.
- (b) Two contact points on vertical line.

영상 정보로부터 천장 전등 패널 인식은 *Recognition*의 값으로 식(10)과 같다.

$$\begin{aligned}
 & Recognition = \\
 & \{ \text{if } l_{hx}^n \geq n_{th} \text{ or } l_{vx}^n \geq n_{th} \} \quad (10) \\
 & \{ Recognition = 1 \} \\
 & \{ Recognition = 0 \}
 \end{aligned}$$

### 2.2.2 최단경로계산

본 논문에서는 플로이드 최단경로 알고리즘(floyd's shortest path algorithm)을 적용하였다.

그래프 내의 시작점과 목표점을 정하고 두 지점간의 경로(①→②→③→④→⑤→②)를 직접 연결점에 대한 가중치를 적용한 경로설정 방법이다.  $x_d, y_d$ 는 목적지 좌표,  $x_c, y_c, \theta_c$ 는 현재 로봇의 위치와 방향을 나타내며  $v$ 는 로봇속도  $v = v_{max} - k * |\theta_c - \theta|$ 이다. 속도에 대한 명령은 회전운동에 대해서 반비례관계로 최고속도  $v_{max}$ 에서 회전운동에 대한 감속비  $k$ 의 감속관계로 설정하였다.

$$\begin{aligned}
 E_d(\theta) = & (x_c + v * \Delta t * \cos(\theta_c + \theta) - x_d)^2 \quad (11) \\
 & + (y_c + v * \Delta t * \sin(\theta_c + \theta) - y_d)^2
 \end{aligned}$$

명령으로 표현되는 비용함수는 그림 4와 같이 방향  $\theta$ 에 따라  $v$ 의 크기로 이동했을 때의 비용평면에서의 값들이 된다.

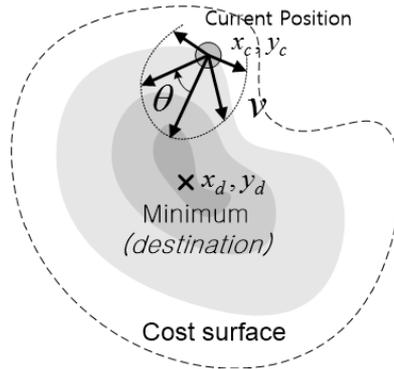


Fig. 4 Function of  $\theta, v$  in cost surface.

### 2.3. 천장 패널 정보 추출

전역 좌표계에서의 서비스로봇 중심 위치를 추정하기 위해서 천장 전등 패널의 에지 영상 정보로부터 전등 패널의 중심점과 길이를 추출해야 한다. 그림 5는 영상정보로부터 전등 패널의 중심점과 길이를 추출하는 방법을 나타낸다.

패널의 두 수평접점  $(x_{hs}^2, y_{hs}^2)$ 과  $(x_{hs}^5, y_{hs}^5)$ 으로부터 전등 패널의 기울기를 식(12)와 같이 구할 수 있다. 그리고 패널의 상위 탐색 시작점  $(x_{shs}, y_{shs})$ 과 하위 탐색점  $(x_{sls}, y_{sls})$  두 점을 지나는 직선의 방정식을 이용하여 천장 전등 패널의 상위점  $(x_{dhe}, y_{dhe})$ 과 천장 전등 패널 하위점  $(x_{dle}, y_{dle})$ 을 찾아내면 천장 전등 패널의 중심점과 길이를 각각 그림 5와 같이 나타낼 수 있다.

$$Gradient = \frac{y_{hs}^5 - y_{hs}^2}{x_{hs}^5 - x_{hs}^2} \quad (12)$$

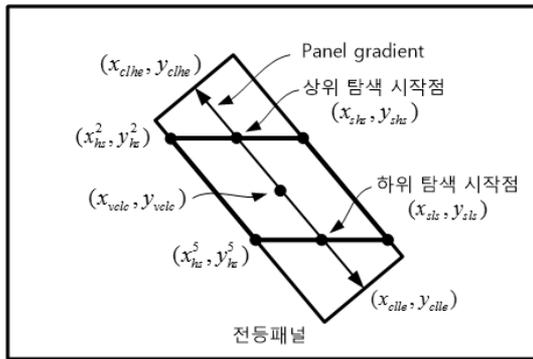


Fig. 5 Center point and length of ceiling light's panel.

### 3. 실험 및 결과

#### 3.1 엔코더 누적오차

실험 환경은 그림 6과 같이 사각 원심이 있는 건물내부에서 순환할 수 있는 곳을 설정하였고, 측정 위치는 숫자로 표시하였다.

그림 7은 이동로봇의 주행 및 센싱 위치를 ①→②→③→④→⑤→②로 2회 걸쳐 주행으로 획득한 엔코더 센서의 누적오차를 나타내고 있다. 주행에서 후반부로 갈수록 누적오차의 정도가 급격

히 크기 때문에 주행거리가 긴 환경에서는 엔코더 센서만으로 이동로봇의 위치를 추정하기가 곤란하다. 따라서 이동로봇의 위치 추정하는데 있어서 엔코더의 누적오차의 정도를 천장 전등 패널 인식 알고리즘을 적용하여 개선된 실험결과를 제시하였다.

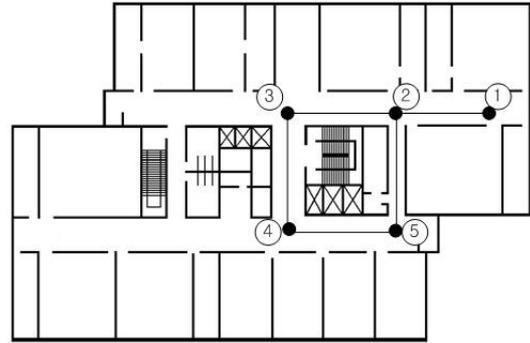


Fig. 6 Sensing position ①~⑤ for the accumulated error of navigation.

엔코더 센서의 위치 추정에 대한 누적오차를 보상하기 위해서 본 논문에서는 빌딩 내에 규칙적으로 천장에 부착된 전등 패널의 위치정보를 이용한다.

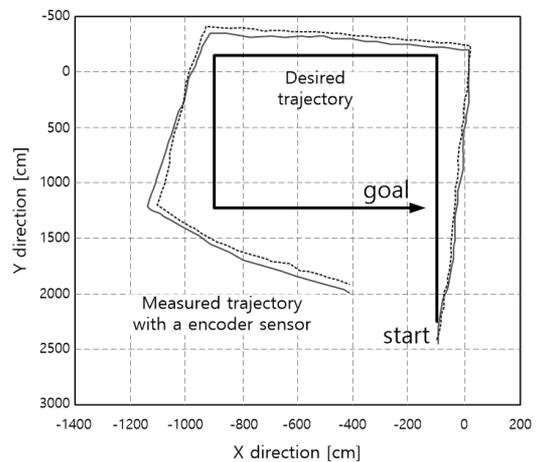


Fig. 7 Accumulated errors of an encoder sensor.

### 3.2 오차보정

본 실험은 건물 복도에서 엔코더 데이터의 누적오차의 정도에 대한 실험결과와 실제 천장의 전등 패널을 이용하여 보정한 누적오차의 정도를 비교하였다. 그림 8은 그림 6에서 제시한 환경에서 설정한 주행방향 ①→②→③에 대해서 관측된 좌표 위치를 CLP(Ceiling Light Panel)로 표시하였고 ①과 ③사이에 CLP1~CLP7와 같이 측정되었다.

초기지점(0,0)에서 목적지점(0,2500)까지의 직선주행을 하여 50ms마다 엔코더의 값을 계수하여 얻은 실험 결과이다. 그림 9는 이동로봇의 주행에 대한 엔코더의 누적오차의 정도를 나타낸다. 목적 지점으로부터 누적 오차가  $x$ 축으로 200cm 이상,  $y$ 축으로 -300cm 이상 벗어나 있는 걸 볼 수 있다.

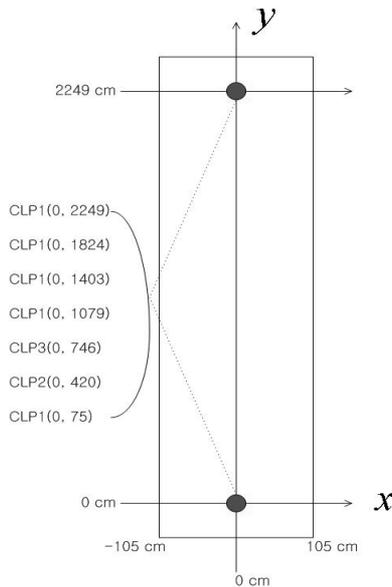


Fig. 8 Distance measurement between point ① and point ③.

본 실험은 복도를 주행하는데 있어서 천장의 전등 패널과 이동로봇의 기하학적인 관계를 이용하여 엔코더 센서의 누적오차를 보상하여 최종적으로 목적지점까지 근사적으로 도달할 수 있다. 그림 10은 주행 중 누적오차를 보상하여 이동로봇의 자율이동 성능을 개선된 것을 알 수 있다.

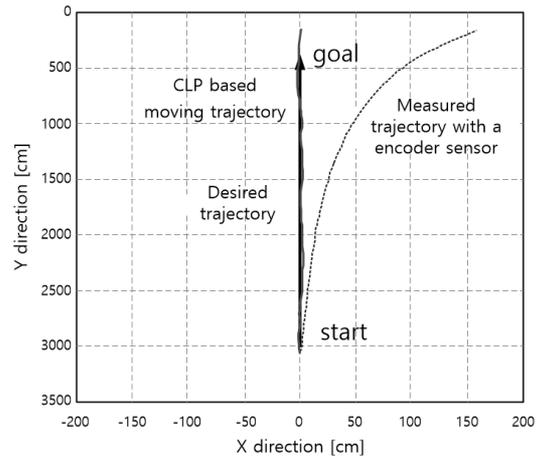


Fig. 9 Accumulated errors of an encoder.

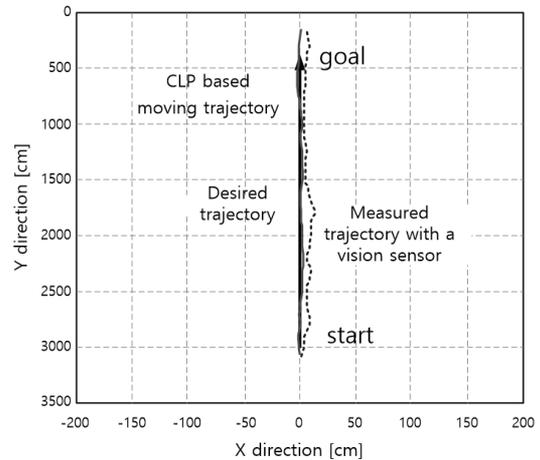


Fig. 10 Compensation of the accumulated error using a vision sensor.

## 4. 결론

본 논문에서는 빌딩과 같은 주행거리가 긴 환경 내에서 동작되는 자율이동로봇에 대한 위치 추정 문제점으로서 바퀴의 미끄럼 오차로 인한 엔코더 센서의 측정 누적오차를 보상하는 방법을 이용하여 이동로봇의 위치 추정의 정도를 개선하는 이동로봇의 초기지점에서 목적지점까지에 대한 전역 경로계획을 수립하기 위해서 빌딩내의 천장 전등 패널 인식하는 방법을 제안하였다. 제안한 방법의 타당성을 검증하기 위해서 시뮬레이션과 실험 결과를 통하여 만족할 만한 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 이동로봇의 위치 추정을 위한 엔코더 센서의 측정 누적오차의 정도를 영상센서를 이용하여 개선함으로써 본 논문에서 사용된 지능형 서비스로봇의 주 기능으로써 원하는 목적지점까지 물건을 안정적으로 운반할 수 있었다.

## 사 사

본 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2016R1D1A1B04932124).

## 참고문헌

[1] Hongbo Wang, Hongnian Yu, Lingfu Kong, "Ceiling Light Landmarks Based Localization

and Motion Control for a Mobile Robot," 2007 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, pp. 285-290, (2007).

- [2] Joel Vidal, Chyi-Yeu Lin, "Simple and robust localization system using ceiling landmarks and infrared light," 2016 12th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA), pp.583-587, (2016).
- [3] H. B. Wang, L. L. Zhang, "Path Planning Based on Ceiling Light Landmarks for a Mobile Robot," 2008 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, pp. 1593-1598, (2008).
- [4] N. Stoll and K. Ritterbusch with Kerstin Thurow, "A fast optical method for the determination of liquid levels in microplates," J. Autom. Methods Manag. Chem., vol.2011, pp.1-6, (2011).
- [5] H. Liu, N. Stoll, S. Junginger, and K. Thurow, "Mobile robot for life science automation," Int. J. Adv. Robot. Syst., vol. 10, pp.1-14, (2013).
- [6] A. A. Abdulla, H. Liu, N. Stoll, and K. Thurow, "A New Robust Method for Mobile Robot Multi-Floor Navigation in Distributed Life Science Laboratories," Journal of Control Science and Engineering, vol. 2016, pp.1-17, (2016).
- [7] K.H. Cho, D.J. Ahn, G.S. Kim, and Y.I. Kim, "Developments of a Path Planning Algorithm for Unmanned Vehicle," Journal of the Korean Society of Industry Convergence, vol.14, no.2, pp. 53-57,(2011).
- [8] T.S. Jin, "Onboard Active Vision Based Hovering Control for Quadcopter in Indoor Environments," Journal of the Korean Society of Industry Convergence, vol.20, no.1, pp.19-26, (2016).

(접수:2017.03.29. 수정: 2017.05.09. 게재확정: 2017.05.12.)