

건물 복도의 비전기반로봇 주행

배 성 훈, 최 경 진, *이 용 현, 박 종 국
경희대학교 전자공학과, *강남대학교
전화 : 031-234-8764 / 핸드폰 : 016-878-6906

The Mobile Robot For Vision-Based Navigation In a Corridor

Sung-Hoon Bae, Kyung-Jin Choi, Young-hyun Lee, Chong-Kug Park
Dept. of Electronic Engineering, Kyunghee University
E-mail : rosyyj@hanmail.net

Abstract

This paper describes a path tracking method for vision-based and autonomous mobile robot in a corridor. At first, we extract the ceiling-lamp of the corridor through simple preprocessing (gray, thresholding, labeling, etc.) for robot position and orientation. Then, we design the controller for path-tracking. Simulations conducted, and acceptable vehicle localization results were obtained to prove the feasibility of the proposed approach.

1. 서론.

현재 산업현장에서 사용되고 있는 매니플레이터는 작업환경의 제약으로 인해 작업수행에 한계를 가지고 있다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 주행기능을 갖춘 구륜이동로봇에 대한 연구가 이루어지고 있다. 구륜이동로봇에 대한 연구방향은 수학적 모델링, 동작 및 경로설계, 위치추정에 대해 이루어지고 있다. 본 논문에서는 비전(vision)을 이용, 로봇의 제어에 필요한 정보를 추출한 후, 구륜이동로봇의 안전한 경로 추정을 위한 제어법칙이 제시된다. Lyapunov 함수를 이용하여 안정하게 경로

추적을 위한 제어법칙(control rule)을 구성하고, 선형화된 모델을 이용하여 제어기 매개변수(controller parameter)의 조건을 결정함으로써 제어입력을 구성한다. 또한 모의실험을 통하여 본 논문에서 제안된 data 추출 및 제어법칙의 유용성을 입증한다.

2. 구륜이동로봇의 기구학

2.1 구륜이동로봇의 구조

본 논문에서 연구되어진 4륜구륜이동로봇의 좌표할당은 그림 1과 같다. 2개의 전륜은 구동구륜이고, 2개의 후륜은 구륜이동로봇의 안정을 위한 보조구륜이다. 구륜이동로봇의 방향전환은 두 개의 독립적인 구동구륜의 속도차에 의해 이루어진다.

구륜이동로봇의 위치는 $X=(x, y, \theta)$ 로 표현된다. 여기서 (x, y) 는 제어점(controlled-point)의 직각좌표이며, θ 는 기준좌표계의 x 축에 대한 구륜이동로봇의 x축의 방향각을 나타낸다.

2.2 기구학 모델링

기구학 모델링의 단순화를 위해 구륜이동로봇은 평지에서 이동하며, 구륜의 변형과 미끄러짐이 발생하지 않는 것으로 가정한다.

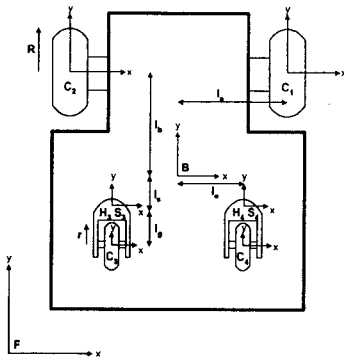


그림 1 구륜이동로봇의 좌표할당
Fig. 1 Coordinate assignment for Wheeled Mobile Robot

2.2.1 전향기구학

전향기구학에서는 엔코더에서 측정된 구륜의 속도로부터 구륜이동로봇 본체의 속도를 구한다. 구륜이동로봇의 전향기구학의 해는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_{B_x} \\ v_{B_y} \\ \omega_{B_z} \end{bmatrix} = \frac{R}{2l_a} \begin{bmatrix} -l_b & l_b \\ -l_a & -l_a \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \omega_{W_{1x}} \\ A_2 \omega_{W_{2x}} \end{bmatrix} \quad (1)$$

2.2.2 역기구학

역기구학에서는 구륜이동로봇이 주어진 기준궤적을 추적하기 위한 구륜의 속도를 구한다. 구륜이동로봇의 역기구학은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} A_1 \omega_{W_{1x}} \\ A_2 \omega_{W_{2x}} \end{bmatrix} = \frac{1}{R(l_b^2 + 1)} \begin{bmatrix} -l_a l_b & -l_b^2 - 1 & -l_a \\ l_a l_b & -l_b^2 - 1 & l_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{B_x} \\ v_{B_y} \\ \omega_{B_z} \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 ω 는 구륜의 속도이며, R은 구동구륜의 반지름이다.

3. 제어기 구성

3.1 오차에 대한 정의

본 논문에서의 제어시스템에서는 기준궤적에서의 위치 오차 $P_e = (x_e, y_e, \theta_e)^T$ 에 대해 다음과 같이 정의하며 그림 2와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_e = \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \theta_e \end{bmatrix} = T_e(P_r - P_c) = \begin{bmatrix} -\cos \theta_c & \sin \theta_c & 0 \\ -\sin \theta_c & \cos \theta_c & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r - x_c \\ y_r - y_c \\ \theta_r - \theta_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서 T_e 는 기준좌표계에 대한 위치오차의 변환 행렬이다. 경로추적 제어기의 목적은 위에서 정의한 오차가 0으로 수렴하게 하기 위한 것이다.

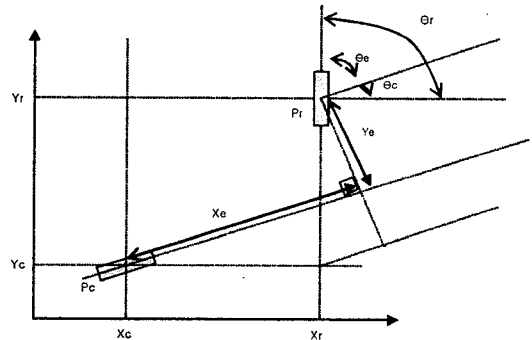


그림 2. 위치 오차
Fig. 2. Position Error

3.2 제어 규칙(control rule)

식 (3)에서 각각의 성분 P_e , P_r , P_c 는 모두 시간에 대한 함수이므로 시간에 대해 미분, 정리하여 시스템에 대한 기준입력 $q = (v_r, \omega_r)^T$ 과 오차를 보상하기 위해 필요한 입력 $q = (v(p_e, q_r), \omega(p_e, q_r))^T$ 으로 나타내면 다음과 같다.

$$P_e \triangleq f(t, p_e) = \begin{bmatrix} \omega(p_e, q_r) y_e - v(p_e, q_r) + v_r \cos \theta_e \\ -\omega(p_e, q_r) x_e + v_r \sin \theta_e \\ \omega_r - \omega(p_e, q_r) \end{bmatrix} \quad (4)$$

식(4)에서의 비선형 시스템에 대해 점근적으로 안정하기 위한 입력 $q = (v(p_e, q_r), \omega(p_e, q_r))^T$ 을 결정하기 위하여 다음의 Lyapunov 함수를 제안한다.

$$V = \frac{1}{2} (k_x x_e^2 + k_y y_e^2) + k_\theta (1 - \cos \theta) \quad (5)$$

여기서 k_x, k_y, k_θ , 는 양의 상수이다.

시스템을 안정하게 하기 위한 입력, 즉 제어규칙은 제안된 Lyapunov 함수에 대한 다음의 조건, 즉 시스템이 안정하기 위한 조건을 만족하여야 한다.

$$\dot{V} \geq 0 \quad \text{and} \quad \forall \epsilon > 0 \quad (6)$$

식 (6)의 조건을 만족하는 제어법칙은 다음과 같이 제시

될 수 있다.

$$q = \begin{bmatrix} v(p_e, q_r) \\ w(P_e, q_r) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_r \cos \theta_e + y_e w_r + \frac{k_y}{k_\theta} y_e^2 v_r - \frac{k_y}{k_x} y_e w_r - \frac{k_y^2}{k_x k_\theta} y_e^2 v_r + k_x x_e \\ w_r + \frac{k_y}{k_\theta} y_e v_r \end{bmatrix} \quad (7)$$

제시된 제어법칙을 이용하여 제안된 Lyapunov 함수가 식(6)의 조건을 만족함을 알 수 있다. 그러나 식(6)에서의 조건은 시스템이 점근적으로 안정함을 보장하지 못한다. 따라서 선형화된 모델과 Routh-hurwitz 안정도 판별법을 이용하여 제시된 제어법칙에 의해 시스템이 점근적으로 안정하기 위한 k_x, k_y, k_θ 에 대한 조건을 구하기 위해 식(7)을 식(4)에 대입하여 평형점에 대해 선형화하면 다음과 같다.

$$P_e \dot{A} P_e = \begin{bmatrix} -k_x & \frac{k_y}{k_x} w_r & 0 \\ -w_r & 0 & v_r \\ 0 & -\frac{k_y}{k_\theta} v_r & 0 \end{bmatrix} P_e \quad (8)$$

식(8)에서 행렬 A에 대해 특성방정식을 구성하고, Routh-Hurwitz 안정도 판별법을 이용하여 선형화된 시스템이 점근적으로 안정하기 위한 조건을 구하면 다음과 같다.

$$k_x > 0 \text{ and } k_y > 0 \left(\frac{k_y w_r^2}{k_x} > 0 \right) \quad (9)$$

4. 위치추정

일반적으로 구륜 이동로봇의 위치추정은 엔코더(encoder)를 이용한 dead-reckoning에 의하여 추정된다.

그러나 이동로봇의 모델링 불확실성(uncertainty)과 측정잡음등으로 기인한 오차와 수학적 적분에 의한 오차가 발생한다. 이동로봇이 장시간 주행시에는 이러한 누적오차는 정확한 경로추적을 불가능하게 한다. 따라서 위치추정의 정밀도를 향상시키기 위하여 비전(vision)을 이용하여 이러한 문제를 해결할 수 있다.

4.1 복도이미지에서 전등추출 방법

일반적으로 대부분 실내복도 천정에 전등이 켜져 있으며 전등을 이용하여 이동로봇의 위치와 진행방향에 따른 관련 data를 추출 할 수 있다.

우선 복도이미지에서 전등만을 추출하는 image process과정은 그림 3.와 같다. Labeling과정에서 전등 pixel과 비슷한 pixel 크기를 선택한 후, 각각의 labeling

된 image에 대한 중심에서 경계선까지의 거리 표준편차를 구한다. 일정 표준편차 이하만 선택함으로써 전등이 미지만 추출할 수 있다.

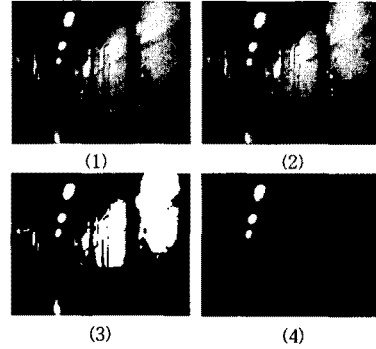


그림 3. 전등 추출위한 프로세서 이미지

(1) 컬러이미지 (2) 흑백이미지

(3) Thresholding 이미지 (4) 레이블링 이미지

Fig. 3. Image Process for Lamp Extraction

(1) Color Image (2) Gray Image

(3) Thresholding Image (4) Labeling Image

그림 4.는 복도에서의 camera의 다양한 위치와 방향을에 대한 실제적인 이미지를 보여준다.

복도이미지에서 (2),(5),(8)과 같이 복도의 동일한 위치 이미지는 이동방향과는 관계없이 전등의 기울기가 거의 일정하다. 그리고 (4),(5),(6)과 같이 로봇의 동일한 이동 방향의 이미지는 복도에서의 위치와는 관계없이 거의 일정한 기하학적인 소멸점(vanish point) 위치를 갖는다.

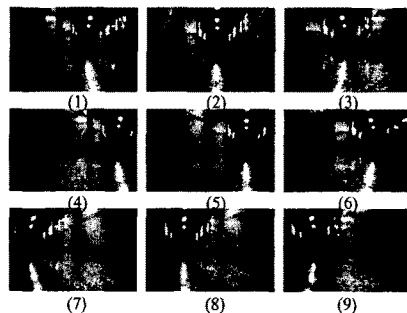


그림 4. 다양한 복도 이미지

Fig. 4. Various Corridor Image

4.2 전등을 이용한 위치 및 이동방향 추출

그림 5는 복도의 이미지에서 천정의 전등만을 나타내며, 복도에서의 이동로봇의 위치는 천정의 2개 전등의 중심점 $(X1,Y1)$, $(X2,Y2)$ 을 지나는 직선을 구한 후, Y축과의 각도(theta)를 구한다. 즉, 로봇의 복도에서의 위치가 변화함에 따라서 각도 또한 같이 변화하게 된다.

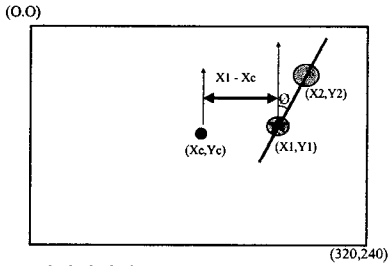


그림 5. 이미지에서 로봇의 위치와 진행방향 추출방법
Fig. 5. Extraction Method of Robot's Position & Orientation on Image

그리고 로봇의 이동방향은 복도의 소멸점(vanish point)를 대체할 수 있는 전등(이미지에서 세로로 가장 아래에 있는 전등) 중심점 $(X1,Y1)$ 의 가로축 $X1$ 에서 이미지의 중심점 (Xc,Yc) 의 가로축 Xc 까지의 거리(pixel 갯수)를 구한다. 즉, 로봇의 복도에서의 이동방향이 변화함에 따라서 $X1$ 과 Xc 사이의 거리 또한 같이 변화하게 된다.

5. 제어기의 설계

구원이동로봇이 기준궤적을 벗어남이 없이 경로오차를 최소화하며 신속히 추적하는 것이 제어기의 목적이다. 제어시스템의 블록선도는 다음과 같다.

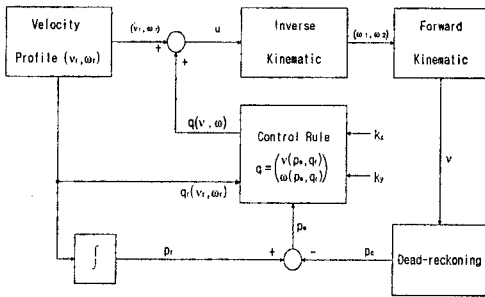


그림 7. 제어기의 블록선도
Fig. 7. Block diagram of controller

6. 위치, 이동방향 정보추출 및 모의실험

6.1 위치와 이동방향 정보 추출

camera 이미지에서 로봇의 위치와 이동방향을 추출하기 위해서 camera 이미지는 다음과 같이 sampling 하였다. 즉, 위치는 복도의 중앙을 기준으로 왼쪽(-), 오른쪽(+) 각각 20cm 간격으로 80cm까지, 방향은 정면을 기준으로 왼쪽(-), 오른쪽(+) 각각 5도 간격으로 최소 10도에서 25도까지 camera 이미지를 얻었다.

그림 8은 camera 이미지에서 전등의 기울기(slope of lamp)에 대한 실제 복도중앙에서의 위치(real position)와 이동방향(real orientation)과의 관계가 기울기를 가진 면으로 나타나고 있음을 알 수 있다.

즉, 동일한 전등의 기울기에 대응하는 실제 위치와 방향이 대략적으로 하나의 직선으로 나타난다. 전등의 기울기에서 복도에서의 로봇의 위치를 추출할 수 있다.

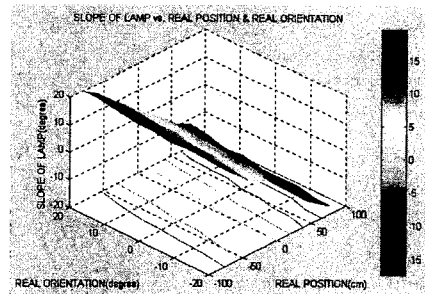


그림 8. 실제위치, 방향과 전등의 기울기와의 관계
Fig. 8. Relation for Real Image, Orientation and Slope of Lamp

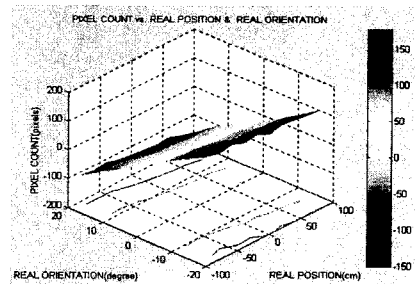


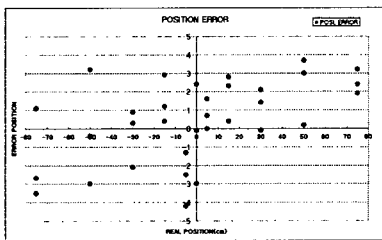
그림 9. 실제위치, 방향과 픽셀 갯수와의 관계
Fig. 9. Relation for Real Image, Orientation and Pixel Count

그림 9.은 camera 이미지에서 이미지 중앙의 X점과 세로축으로 가장 아래에 있는 전등(vanish point를 대신함)의 X점까지의 거리(이미지상에서 pixel 갯수)에 대한 실제 복도중앙에서의 위치(real position)와 이동방향(real orientation)과의 관계가 기울기를 가진 면으로 나타나고 있음을 알 수 있다. 즉, 동일한 거리(pixel 갯수)에 대응하는 실제 위치와 이동방향이 대략적으로 하나의 직선으로 나타난다. 그러므로 거리(pixel 갯수)에서 로봇의 이동방향을 추출할 수 있다.

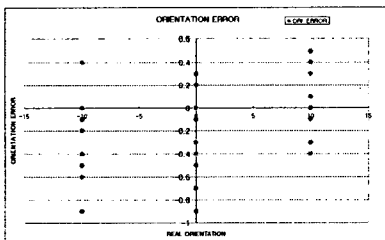
한 개의 복도 이미지에서 전등에 대한 기울기와 이미지 중앙의 X점과 세로축으로 가장 아래에 있는 전등의 X점까지의 pixel 갯수를 추출한 후, 추출된 2개의 parameter를 그림8, 9에서의 실제위치(real position)측과 실제 이동방향(real orientation)측상에 있는 직선에 대입하여 교점에 해당하는 X, Y 좌표를 구한다. 이때 X좌표는 로봇의 위치가 되며, Y좌표는 이동방향이 된다.

위의 방법을 이용하여 camera calibration을 한 후, 임의의 camera 이미지에서 로봇위치와 이동방향을 추출한 후, 위치 오차를 보면 복도 중앙에서 실제 위치 -75cm(왼쪽)와 +75cm(오른쪽) 사이에서의 이미지에서 추출한 위치오차는 최대 ±4cm, 약 ±5% 정도이다.

그리고 이동방향 오차는 복도 정면에서 실제 방향 -10도(왼쪽)와 +10도(오른쪽) 사이에서의 오차는 최대 ±1.0도, 약 ±10% 정도이다. (그림 10. 참조)



(a) 위치 오차



(b) 이동방향 오차

그림 10. 임의의 이미지에 대한 오차

Fig 10. Error of random image

6.2 모의 실험결과

모델링의 유효성과 제어 알고리즘의 효율성을 증명하기 위하여 모의실험을 수행한다.

그림 11.은 제어 알고리즘을 이용, 기준궤적(복도중앙 직진 주행)에 대한 경로 추적 궤적을 나타낸 것이다.

초기 이동방향과 관계없이 초기 위치 ±40cm,에 대한 최종 위치 오차는 약 ±5cm 이며 약 10% 정도로 기준궤적을 급격한 변화 없이 추적하고 있음을 보여주고 있다.

기준궤로에 수렴을 하지 않고 시간이 지나도 일정한 오차를 유지하는 정상상태 오차가 계속 유지되고 있다.

앞으로는 기준궤로에 수렴을 하는 controller design을 하는 것이 과제이다.

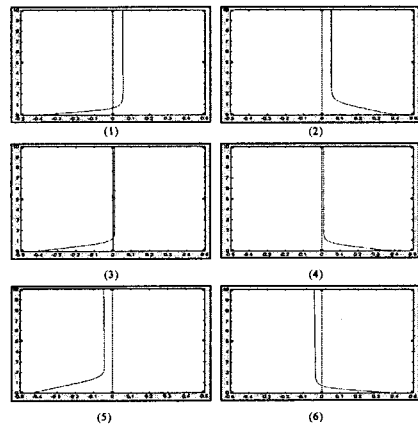


그림 11. 경로 추적

Fig 11. Path Tracking

참고문헌

- [1]Rafael C.Gonzalez and Richard E. Woods, "Digital Image Processing", Addison Wesley, 1993
- [2] 김희승, "영상인식", 생능출판사. 1998.6.30
- [3] 장동혁, "디지털 영상처리의 구현", 정보게이트. 2001.7.5
- [4] Yue Wang, Dinggang Shen and Eam Khwang Teoh, "Lane Detection Using Catmull-rom Spline"
- [5] Alberto Broggi, "Parallel and Local Feature Extraction : A Real-Time Approach to Road Boundary Detection" IEEE transactions on image processing, vol4, No2. February 1995.