

Systematic Odometry Error Correction을 이용한 이동로봇의 위치오차 보정

강형석^o, 이쾌희
 서강대학교 전자공학과

A Study on Mobile Robot Posture Error Reduction
 Using Systematic Odometry Error Correction

Hyung-suk Kang^o, Kwae-Hi Lee
 Department of Electronic Engineering, Sagang University

Abstract - In this paper we will introduce an posture error reduction algorithm for Mobile Robot. We classified odometry error into two categories, and focus on systematic odometry error correction only. Because it is the primary reason for mobile robot navigation. For this procedure, we used some robot specifications and modeled robot behavior. Through some experiment, we could obtain new system specs. After modeling, Robot navigation precision was improved.

1. 서 론

이동로봇(Mobile Robot)은 구동부에 장착된 바퀴에 의해 비교적 쉽게 이동을 할 수 있다는 장점 때문에 최근에 그에 대한 연구가 활발하다. 또한 매니퓰레이터 등과 같은 일련의 제어기 등과 결합하여 보다 복잡하고 다양한 작업을 수행할 수 있다. 그러나 이동로봇의 동 특성상 나타날 수 있는 움직임 제한요소 혹은 바닥상태의 특성 등으로 인해 실제 로봇이 이동할 경우 위치 및 속도를 정확하게 제어하기가 쉽지 않다.[1]

본 논문에서는 이동로봇의 기구학적 구조에 제한 받지 않고 별도의 외부 센서의 사용 없이 이동로봇의 위치오차를 최소화하여 환경에 대한 이동로봇의 주행특성을 모델링 하는 방법을 적용한다. 실험을 통해 취득한 데이터를 기반으로 로봇의 주 제어기가 인식할 수 있는 위치추정 변환계수(Conversion factor)를 구하였고 이를 주 제어기에 재 적용하여 주행 오차를 최소화하였다.

2. Odometry error definition

2.1 자율이동 로봇 시스템

다음의 그림 1은 일반적인 이동로봇 시스템의 기능별로 구성도이다.

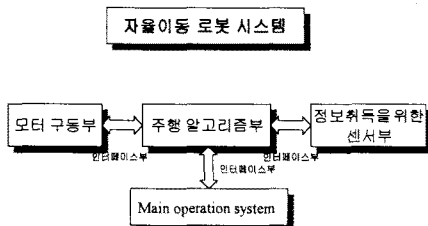


그림 1 자율이동 로봇의 시스템 구성

시스템은 크게 로봇의 행동을 제어하는 주행 알고리즘부, 센서들로부터 외부의 환경정보를 취득하는 센서부, 구동력을 얻기 위해 장착된 모터를 제어하는 모터 구동부 등 4 부분으로 나뉜다.

2.2 오차발생 원인

이동로봇이 주행 시 발생하는 위치, 속도오차의 발생 원인은 크게 두 가지로 구분된다. 첫째는 로봇 시스템의 제작시의 하드웨어적인 불완전성으로 인한 구동오차이고 둘째는 외부 환경의 영향 즉, 바닥상태의 불균일, 기울어짐, 급격한 가/감속 등으로 인한 미끄러짐 등으로 인한 오차이다. 한편, 로봇이 Dead-reckoning 방법을 이용하여 스스로자신의 위치를 추정 한 결과와 실제로 로봇이 존재하는 위치 사이에는 상당한 오차가 존재할 수 있다. 여기서는 로봇 주행 시 발생하는 오차를 Systematic error와 Non-systematic error로 구분하였다.[1]

2.3 위치 추정방법

이동로봇의 구동 방법은 바퀴의 회전에 의한 현상이므로 로봇의 위치추정을 위해서는 바퀴의 회전량을 2차원 거리량으로 환산할 수 있는 수식관계가 필요하다. 식 1은 일반적인 이동로봇 시스템에서 바퀴의 회전량을 수평 거리로 환산하는 관계식이다.

$$\Delta U_{L/R,i} = c_m N_{L/R,i} \tag{1}$$

여기서 첨자 i는 엔코더의 Sampling interval을 의미하며, 좌/우 모터에 대해서 $\Delta U_{L/R,i}$ 및 $N_{L/R,i}$ 는 각각 이동로봇의 수평이동거리와 엔코더의 Pulse increment를 의미한다. 즉, 이동로봇의 거리 및 회전량 변환계수 c_m 값만 알고 있으면 주행 중에 엔코더의 펄스열을 카운트하여 이론적으로 로봇이 이동한 수평거리를 계산해 낼 수 있다.[2][3] 그러나 실제 로봇이 주행한 결과와 이론상의 결과는 차이를 보이게 되며 이러한 오차는 로봇이 주행하려고 하는 환경에 대해 적당한 행동모델을 세워 로봇이 사용하게 되는 몇 가지의 시스템 파라미터를 수정함으로써 주행오차를 감소시킬 수 있다. 따라서 오차보정 계수 $c_{L/R}$ 을 실험적으로 추출하여 다음의 식 2와 같이 보정을 수행한다.

$$\Delta U_{L/R,i} = c_{L/R} c_m N_{L/R,i} , c_m = \frac{\pi D_n}{n c_e} \tag{2}$$

여기서

c_m : Conversion factor

D_n : Nominal wheel diameter

c_e : Encoder resolution n : Gear ratio

3. Systematic error correction (System calibration)

3.1 주행오차 Type 정의

Odometry 오차를 다음과 같이 두 가지로 정의한다.

1. 양쪽 바퀴의 지름 차에 의해 발생하는 오차

$$E_d = D_R/D_L \quad (3)$$

D_R, D_L : right and left actual wheel diameters

2. 휠 베이스의 불균형에 의해 발생하는 오차

$$E_b = b_{actual}/b_{nominal} \quad (4)$$

b : is the wheelbase of the vehicle

E_b 에 의해 발생하는 오차와 E_d 에 의해 발생하는 오차를 각각 Type A, Type B로 정의하였다. Type A는 이동로봇이 회전이동을 수행할 경우 휠 베이스의 불균형에 의해 회전각 오차를, Type B는 직선주행 시 양 바퀴의 지름 차에 의해 기준경로를 벗어나는 오차를 유발한다.

3.2 실험 방법

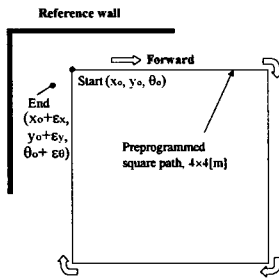


그림 2 실험 환경

그림 2는 Systematic odometry error 측정을 위한 실험 환경을 나타낸다. 로봇은 시작점을 중심으로 각각 시계방향, 반 시계방향으로 사각형 경로를 주행하고 시작점을 기준으로 도착점에서의 절대위치와 로봇이 스스로 판단한 위치를 취득한다. 절대위치 측정은 기준 벽면을 지정된 위치에 세운 뒤 초음파 센서를 이용하는 방법을 사용하였다. 측정되는 데이터는 식 5와 같다. 첨자 abs는 로봇이 실제 존재하는 위치를, 첨자 calc은 엔코더에 의해 로봇이 자체적으로 추정된 위치이다.

$$\epsilon x = x_{abs} - x_{calc}, \quad \epsilon y = y_{abs} - y_{calc}, \quad \epsilon \theta = \theta_{abs} - \theta_{calc} \quad (5)$$

이러한 과정을 n 번 수행하여 얻은 $2n$ 개의 결과를 얻고 다시 이 값들의 평균값과 기준점으로부터 평균 오차 거리를 식 (6)과 같이 취득할 수 있다.

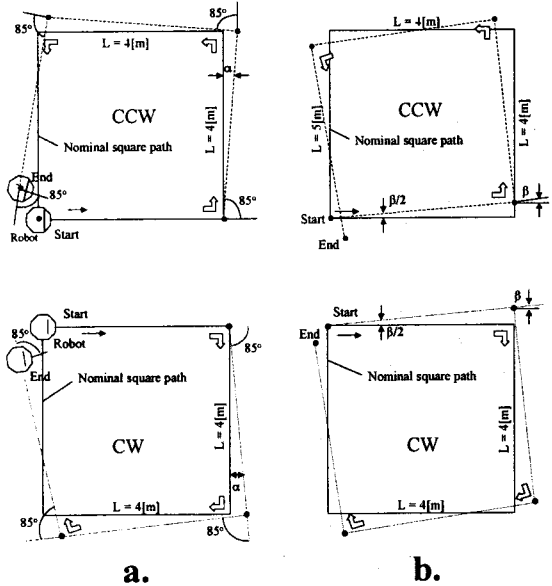
$$\begin{aligned} x_{c.g., cw} &= \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \epsilon x_{i, cw} & x_{c.g., ccw} &= \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \epsilon x_{i, ccw} \\ y_{c.g., cw} &= \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \epsilon y_{i, cw} & y_{c.g., ccw} &= \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \epsilon y_{i, ccw} \\ r_{c.g., cw} &= \sqrt{(x_{c.g., cw})^2 + (y_{c.g., cw})^2} \\ r_{c.g., ccw} &= \sqrt{(x_{c.g., ccw})^2 + (y_{c.g., ccw})^2} \end{aligned} \quad (6)$$

3.3 보정계수(Correction factor) 취득

그림 3은 이동로봇의 주행 중 발생하는 오차를 발생 원인에 의해 구분하기 위한 개념도이며 식 7은 오차의 Type을 결정하는 기준을 제시한다.

$$\begin{aligned} |\theta_{total, cw}| < |\theta_{nominal}| \quad \text{and} \quad |\theta_{total, ccw}| < |\theta_{nominal}| & \text{ Type A} \\ |\theta_{total, cw}| > |\theta_{nominal}| \quad \text{but} \quad |\theta_{total, ccw}| < |\theta_{nominal}| & \text{ Type B} \end{aligned} \quad (7)$$

Correction factor $C_{L/R}$ 을 구하기 위해 앞 절의 그림 3에서 정의한 α, β 값을 구한다. α 는 각 90도 회전 당 발생하는 회전오차 값으로 Type A의 원인에 의해 발생하며 E_b 에 의해 결정된다. β 는 직선주행이 아닌 실제의 커브주행 결과로 생기는 오차각도로서 Type B의 원인에 의해 발생하며 E_d 에 의해 결정된다. 따라서 실험 결과를 토대로 α, β 는 식 8과 같이 유도된다. [1]



a. Type A : E_b 에 의해 발생하는 odometry error
b. Type B : E_d 에 의해 발생하는 odometry error

그림 3 Type A and Type B errors

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{x_{c.g., cw} + x_{c.g., ccw}}{-4L} \frac{180^\circ}{\pi} \quad [\text{deg}] \\ \beta &= \frac{x_{c.g., cw} - x_{c.g., ccw}}{-4L} \frac{180^\circ}{\pi} \quad [\text{deg}] \end{aligned} \quad (8)$$

한편 E_d 의 영향으로 생성되는 이동로봇의 실제경로는 곡률이 매우 완만한 커브형태를 띄며 로봇이 반지름 R 인 원호를 주행한다고 가정하면 간단한 기하학적 관계식을 통해 $R = \frac{L/2}{\sin \beta/2}$ 임을 유도할 수 있으며 결과적으로 E_d 을 R 과 b 로 가능하며 다음의 식 9가 성립한다.

$$E_d = \frac{D_R}{D_L} = \frac{R + b/2}{R - b/2} \quad (9)$$

여기서 b : wheelbase (robot spec.)

비슷한 방법으로 Actual wheelbase ratio E_b 를 구할 수 있다. E_b 는 회전량에 직접적으로 비례하므로 간단한 비례식을 이용하여 식 10을 얻을 수 있다. [1]

$$\begin{aligned} \frac{b_{actual}}{90^\circ} &= \frac{b_{nominal}}{90^\circ - \alpha} \quad \Rightarrow \quad b_{actual} = \frac{90^\circ}{90^\circ - \alpha} b_{nominal} \\ E_b &= \frac{90^\circ}{90^\circ - \alpha} \end{aligned} \quad (10)$$

3.4 파라미터 적용

취득한 E_d, E_b 를 토대로 오차보정 계수를 구하기 위

해 $D_a = (D_R + D_L)/2$ 과 같이 정의되는 평균 바퀴지름 D_a 와 식 9를 이용하면 최종 결과는 식 11과 같다.

$$c_L = \frac{2}{E_d + 1} \quad c_R = \frac{2}{(1/E_d) + 1}$$

$$C_{L/R} = \frac{C_L}{C_R} \quad (11)$$

4. Pioneer Mobile Robot의 구성

Pioneer 2-AT Mobile Robot은 4-wheel drive type의 지능형 이동로봇이다. 주 제어기로는 Simens 88C166 Micro controller를 사용하였고 이를 통해 4개의 DC motor 및 16개의 초음파 센서를 제어한다. 주행 알고리즘을 위한 프로그램은 외부의 Lab-top PC를 사용하여 구현하였고 이를 주 제어기와 연결하여 사용하였다. 표 1은 실험에 사용한 이동로봇의 하드웨어 구성 요소이다.[4]

표 1. Pioneer 2-AT Mobile Robot의 재원

Physical Characteristic	Pioneer 2-AT
Wheel diameter	220 [mm]
Gear ratio	65.5 : 1
Position encoder	6500 ticks/rev
Wheel base	$b_{nominal} = 40[cm]$

5. 실험 및 결과분석

실험은 실내환경에서 수행하였으며 로봇의 기준속도는 30 [cm/sec]로 하였다. 로봇은 User에 의해 짜여진 프로그램을 통해 기준 사각형 경로(4[m]×4[m])를 주행하며 Dead reckoning으로 위치를 스스로 인식한다. 바닷면은 편평한 것으로 가정하고 주행중의 로봇에는 어떠한 외란도 가해지지 않는 것으로 가정하였다.

5.1 데이터 취득 및 Calibration 결과

표 2. 취득된 결과값

	$E_d = D_R/D_L$	$E_b = \frac{b_{actual}}{b_{nominal}}$	$C_{L/R}$
Initial value	1.000		
After modeling	1.002	0.998	0.998

실험 결과 E_d 와 E_b 값은 각각 1.002, 0.998로 이상적인 값과는 약간의 차이만을 보인다. 그러나 모터의 한 회전당 6500 개의 펄스를 엔코더에서 생성하므로 저속적인 주행 시 오차의 발생은 필연적이다. 따라서 본 실험 결과로 얻어지는 오차보정 계수를 적용하면 주행오차를 감소시킬 수 있다. 또한 최종적으로 오차보정 계수 $C_{L/R}$ 값은 0.998 측정되었다.

5.2 주행 테스트 결과 및 분석

로봇의 모델링 후 주행오차 성능개선 여부를 판단하기 위해 모델링 전, 후의 파라미터 값을 토대로 주행 정확도를 평가하였다.

그림 4는 사각형 기준경로 주행 후 최종 도착점에서의 return position을 취득하여 그 위치를 2차원 평면 분포로 나타낸 그림이다. 시스템 모델링 후 로봇의 위치 이동 정확도가 증가하였음을 볼 수 있다. 그림 5는 4개의 직선 세그먼트를 갖는 기준경로를 주행한 후 취득한 로봇의 위치를 기준경로와 비교하여 나타낸다.

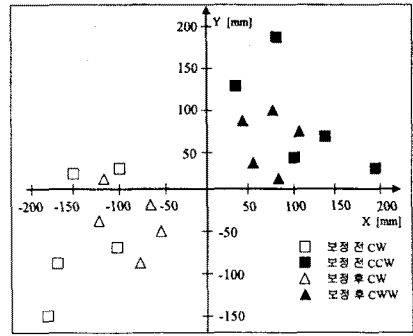


그림 4 Return position plot

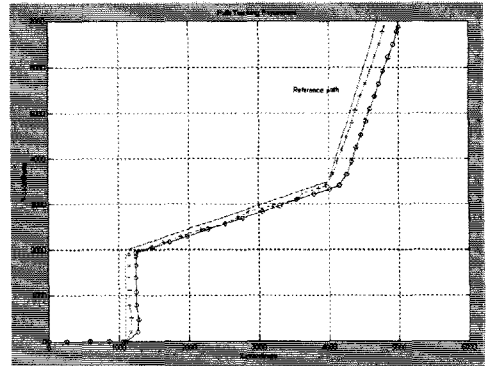


그림 5 경로추종 실험결과

결과를 보면 모델링 전 ('o' 표시)과 비교해 모델링 후 ('**' 표시) 주행성능이 개선되었음을 알 수 있다.

6. 결론

로봇이 주행할 환경에는 예기치 못한 현상을 일으키는 변수가 다분히 존재하며 이를 특정한 수학적 형태로 모델링하는 것은 사실상 불가능 한 일이나 반복적인 경험을 토대로 유사한 해석 식을 도출하는 작업은 가능하다. 따라서 여기서는 수회에 걸친 이동로봇의 주행에 의해 취득되는 Posture 데이터를 토대로 시스템을 모델링 하여 만족할 만한 결과를 얻었다. 그러나 보다 정확하게 이동로봇이 주행 중에 발생하는 오차를 온라인으로 제어하기 위해서는 비전센서를 사용하는 절대위치추정 시스템 등의 부가적인 방법이 필요하다.

(참 고 문 헌)

- [1] Johann Borenstein, Liqiang Feng, "Correction of Systematic Odometry Errors in Mobile Robots", Pro. of the 1995 Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems August 5-9, 1995, pp. 569-574
- [2] F. Chenavier, J. L. Crowley, "Position Estimation for a Mobile Robot using Vision and Odometry", IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 2588-2593, 1992
- [3] M. Oussalah, C. Barret, H. Maaref, "Absolute Position Estimation of Mobile Robot", ICARCV 1996, pp. 1130-1134
- [4] Activmedia, Pioneer Mobile Robot Saphira Software Manual ver. 6.1, 1999
- [5] 고경철, "자율 주행방식의 이동 로봇을 위한 경로제어 알고리즘에 관한 연구", 박사학위논문, 한국과학기술원, 1993