

# 로봇의 기구학적 계수 추정을 위한 실험적 방법에 대한 연구

## Research for experimental methods of mechanical parameters estimation of the mobile robots

최종미, 박중언, 이지홍, 김지용  
Jong-Mi Choi, Joong-un Park, Jihong Lee, Ji-Yong Kim

**Abstract** - In this paper, we handle automatic estimation of mechanical parameters for mobile robots. Most estimation methods are based on the sequence and move-measurement-estimation. Estimated accuracy is largely dependent on the paths. Mathematical conditions minimizing estimation errors are derived, and then a method finding optimal paths for mechanical parameters estimation is proposed.

**Key Words** :condition number, singular value, norm, mechanical parameters, mobile robot, genetic algorithm

### 1. Introduction

로봇의 개발과 운용에 있어서 수학적 모델을 정확하게 안다는 것은 매우 중요한 일임에 틀림없다[1]. 최근 로봇의 수학적 모델링과 모델링된 로봇 파라미터를 실제와 유사하게 추정하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 로봇을 움직여서 추정하는 기존의 연구들은 한 번의 실험으로는 오차가 크다는 문제들이 있어 여러 번 실험을 해서 오차를 줄여야 한다는 단점이 있다[3]. 그래서 본 연구에서는 실험 횟수가 적으면서, 오차가 적은 방법을 찾아내어, 이동 로봇의 주행계수 추정해보려 한다.

### 2. Background

#### 2.1 Modeling of Mobile Robot

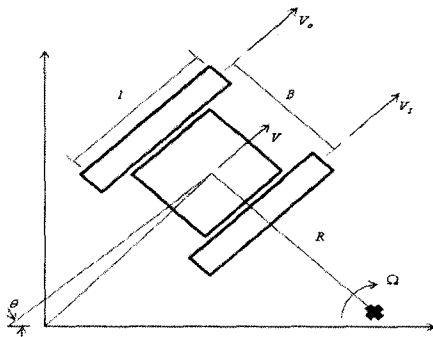


그림 1 Principles of skid steering

본 연구에 사용된 바퀴가 4개인 이동로봇은 앞과 뒷바퀴의 속도가 같도록 하였기에 그림1과 같은 skid steering의 모델을 사용하였다. 양쪽 바퀴의 속도와 바퀴의 반지름과 바퀴 사이의 거리의 값으로 차체의 이동속도와 각속도를 알 수 있다.  $i_o$ 와  $i_i$ 는 양쪽 바퀴의 미끄러짐을 나타낸 것이다.

$$R' = \frac{B[rw_o(1-i_o) + rw_i(1-i_i)]}{2[rw_o(1-i_o) - rw_i(1-i_i)]} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \Omega_z' &= \frac{rw_o(1-i_o) + rw_i(1-i_i)}{2R'} \\ &= \frac{r}{B}(w_o(1-i_o) - w_i(1-i_i)) \end{aligned} \quad (2)$$

$$K_s = \frac{w_o}{w_i} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} V &= \frac{rw_i[K_s(1-i_o) + (1-i_i)]}{2} \\ &= \frac{r}{2}(w_o(1-i_o) + w_i(1-i_i)) \end{aligned} \quad (4)$$

위의 차체의 이동속도와 각속도를 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Omega \\ V \end{bmatrix} = c \begin{bmatrix} w_o(1-i_o) \\ w_i(1-i_i) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$c = \begin{bmatrix} \frac{r}{B} & -\frac{r}{B} \\ \frac{r}{2} & \frac{r}{2} \end{bmatrix} \quad (6)$$

저자 소개

- \* 崔 鐘 美 : 忠南大學 메카트로닉스工學科 學府課程
- \*\* 朴 重 彦 : 忠南大學 메카트로닉스工學科 學府課程
- \*\* 李 智 勇 : 忠南大學 BK21 메카트로닉스 사업단 正教授
- \*\*\*金 智 勇 : 忠南大學 BK21 메카트로닉스 사업단 碩士課程

## 2.2 Parameter Estimation Technique

이 모델의 기구학적 식은 (7)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= v \cos(\theta) \\ \dot{y} &= v \sin(\theta) \\ \dot{\theta} &= \Omega \end{aligned} \quad (7)$$

(7)식을 적분하면 다음과 같이 로봇의 x, y,  $\theta$ 를 알 수 있다.

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= x_k + Tv \cos(\theta_k + Tw_k/2) \\ y_{k+1} &= y_k + Tv \sin(\theta_k + Tw_k/2) \\ \theta_{k+1} &= \theta_k + Tw_k \end{aligned} \quad (8)$$

로봇의 각 샘플 시간의 각도  $\theta$ 는 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta_1 = \theta_0 + Tc_{1,1}w_{R,0} + Tc_{1,2}w_{L,0} \quad (9)$$

식 (9)를 이용하여 N번의 샘플 시간 후에  $\theta$ 를 식 (10)과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} \theta_1 - \theta_0 &= Tc_{1,1}w_{r,0} + Tc_{1,2}w_{L,0} \\ \theta_2 - \theta_1 &= Tc_{1,1}w_{r,1} + Tc_{1,2}w_{L,1} \\ \theta_3 - \theta_2 &= Tc_{1,1}w_{r,2} + Tc_{1,2}w_{L,2} \\ &\vdots \\ \theta_N - \theta_{N-1} &= Tc_{1,1}w_{r,N-1} + Tc_{1,2}w_{L,N-1} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\theta_N - \theta_0 = \Phi_\theta \begin{bmatrix} c_{1,1} \\ c_{1,2} \end{bmatrix}$$

위의 식을 (11)번과 같이 정리 할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \theta_1 - \theta_0 \\ \vdots \\ \theta_N - \theta_{N-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_{\theta,1} \\ \vdots \\ \Phi_{\theta,N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{1,1} \\ c_{1,2} \end{bmatrix} = \bar{\Phi} \begin{bmatrix} c_{1,1} \\ c_{1,2} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$\Phi$ 을 역 행렬 취해 (12)과 같이 나타내면  $c_{1,1}$ 과  $c_{1,2}$ 를 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \hat{c}_{1,1} \\ \hat{c}_{1,2} \end{bmatrix} = (\bar{\Phi}^T \bar{\Phi})^{-1} \bar{\Phi}^T \begin{bmatrix} \theta_1 - \theta_0 \\ \vdots \\ \theta_N - \theta_{N-1} \end{bmatrix} \quad (12)$$

x, y도 위와 같은 방법을 통해  $c_{2,1}$ 와  $c_{2,2}$ 을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} x_1 &= x_0 + Tv_0 \cos(\theta_0 + Tw_0/2) \\ y_1 &= y_0 + Tv_0 \sin(\theta_0 + Tw_0/2) \end{aligned} \quad (13)$$

$$\Phi_{xy} = T \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^{N-1} w_{R,i} \cos(\theta_i + Tw_i/2) & \sum_{i=0}^{N-1} w_{L,i} \cos(\theta_i + Tw_i/2) \\ \sum_{i=0}^{N-1} w_{R,i} \sin(\theta_i + Tw_i/2) & \sum_{i=0}^{N-1} w_{L,i} \sin(\theta_i + Tw_i/2) \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} x_1 - x_0 \\ y_1 - y_0 \\ \vdots \\ x_N - x_{N-1} \\ y_N - y_{N-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_{xy,1} \\ \vdots \\ \Phi_{xy,N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{1,1} \\ c_{1,2} \end{bmatrix} = \bar{\Phi}_{xy} \begin{bmatrix} c_{1,1} \\ c_{1,2} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{c}_{2,1} \\ \hat{c}_{2,2} \end{bmatrix} = (\bar{\Phi}_{xy}^T \bar{\Phi}_{xy})^{-1} \bar{\Phi}_{xy}^T \begin{bmatrix} x_1 - x_0 \\ y_1 - y_0 \\ \vdots \\ x_N - x_{N-1} \\ y_N - y_{N-1} \end{bmatrix} \quad (16)$$

즉,  $\theta$ 을 이용해  $c_{1,1}$ 과  $c_{1,2}$ 를, x, y을 이용해  $c_{2,1}$ 와  $c_{2,2}$ 을 구할 수 있다는 이론이다.[1]

## 3. Path planing for Parameter estimation

### 3.1 Concept

위에서는 P번의 실험을 거쳐 로봇의 기구학적 계수를 구하게 된다. 우리가 제안하고자 하는 방법은 P번의 실험을 거쳐지지 않고, 미리 어느 경로가 로봇의 기구학적 계수를 구하기에 최적의 경로인지를 알아내어 실험횟수와 추정 소모시간을 줄이고자 한다.

### 3.2 Estimated condition

(11)번과 (15)번 식을  $y = Wc$  라는 선형화된 식으로 나타낼 수 있다. 이에 실제 차원에서 발생하는 오차  $\rho$ 을 더해  $y = Wc + \rho$ 로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\|\bar{c}\|}{\|c\|} \leq \text{cond}(W) \frac{\|\rho\|}{\|y\|} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} E[\bar{c}\bar{c}^T] &= \sigma_P^2 [W^T W]^{-1} \\ \|E[\bar{c}\bar{c}^T]\| &= \left( \frac{\sigma_P}{\lambda_{\min}(W)} \right)^2 \end{aligned} \quad (18)$$

여기에서  $\bar{c}$ 는 estimation error ( $\bar{c} = c - \hat{c}$ )이고,  $\text{cond}(W)$ 는 W의 condition number이다.

$\sigma_P$ 는 singular value 이고,  $\lambda_{\min}(W)$ 는 W의 minimum eigen value 이고,  $E[\ ]$ 는 추정치를 나타내는 것이다. [2],[4]

(17)식에서 보면  $\|y\|$ 이 크면 클수록 오차가 작아지고, (18)식에서 보면 W의 minimum singular value값이 클 때, W의 condition number가 작을수록 오차가 가장 작아지는 것을 알 수 있다. 그런데, W는 양쪽 바퀴의 속도로 이루어져 있으므로 결국 그런 W와 y를 구한다는 것은 경로 계획, 즉, 로봇의 바퀴 속도를 매 순간 어떻게 계획하느냐가 경로를 만들게 되고, 그 경로에 따라 오차의 최소값이 달라진다.

우리는 경로를 설정하기 위해, 최적의 W를 구해보려고 한다. 이를 위해, 우리는 genetic Algorithm이라는 것을 사용해 보았다[6].

### 3.3 About Genetic Algorithm

최적화 문제를 해결하는 기법의 하나로, 생물의 진화를 모방한 기법인 진화 연산의 대표로서, 생명체에 적용되는 많은 방식을 차용하여, 돌연변이, 교배 연산 등이 존재하며, 세대, 인구나 같은 용어도 사용한다.

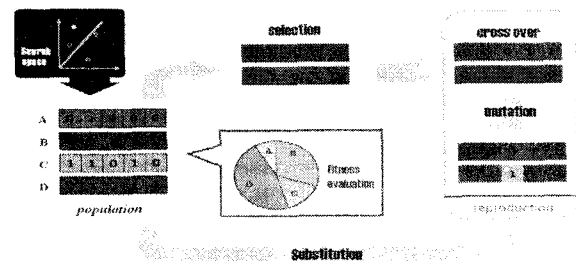


그림 2 Genetic Algorithm

#### 4. Experiment

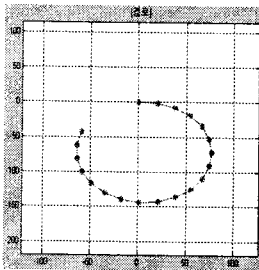
간단한 이동로봇에서는 실측이 가능한 부분들 이므로, 앞에서 구하려고 하는 c의 값을 실측을 하여, 이에 얼마나 가깝게 결과값이 나오는지 시뮬레이션을 해보았다. 양 바퀴 지름이 9.8cm이고, 바퀴 사이간 거리는 18cm로 정하고 계산을 하였다.

$$c = \begin{bmatrix} \frac{r}{B} \\ -\frac{r}{B} \\ \frac{r}{2} \\ \frac{r}{2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{4.9}{18} \\ -\frac{4.9}{18} \\ \frac{4.9}{2} \\ \frac{4.9}{2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.2722 \\ -0.2722 \\ 2.45 \\ 2.45 \end{bmatrix} \quad (19)$$

실제 실험에서는 바닥의 마찰 등등의 요인으로 인해 오차가 생길 수 있다. 이에 그 오차까지 고려하여, 시뮬레이션을 해보았다. 차체의 x, y 방향으로 10cm,  $\theta$ 는 10도 정도의 오차가 날 수 있도록 하였다.

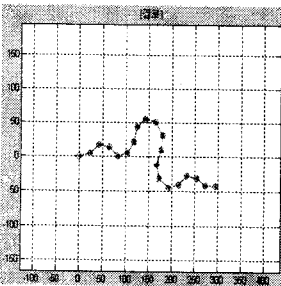
Genetic Algorithm을 통해 나온 결과 값과 이와 같은 길이의 임의의 경로를 비교해 보았다.

##### 4.1 대조군

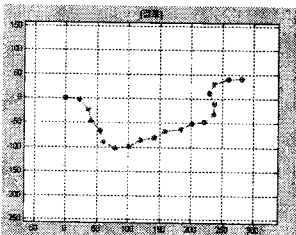


Condition number of W	1.33e+16
Singular value of W	1.92e-15
Norm of Y	87.6656
c =	0.2730
	-0.2728
	2.1109
	2.7140

##### 4.2 실험군



Condition number of W	3.35
Singular value of W	8.70
Norm of Y	100.83
c =	0.2722
	-0.2722
	2.4506
	2.4497



Condition number of W	3.36
Singular value of W	8.64
Norm of Y	100.68
c =	0.2722
	-0.2722
	2.4497
	2.4505

비교군의 2번째 경로에 대해 실제로 실험을 수행 했을 때 얼마만큼 비슷하게 가는지 비교해 보았다.

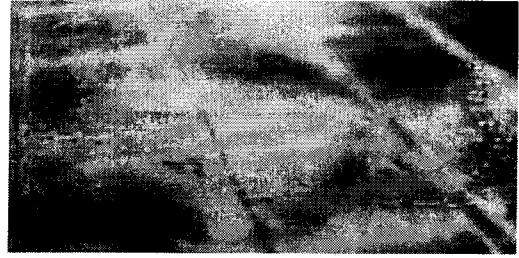


그림 3 실제 실험 수행한 경로

#### 5. Conclusion

시뮬레이션 결과, 똑같은 경로는 도출되지 않았지만, 유선형을 띄는 비슷한 유형의 경로들이 많이 도출 되었다. 실제 실험을 수행해 본 결과 미끄러짐들의 외부요인으로 인해 약간의 오차가 나는 것을 확인할 수 있었다. 원형의 경로와 비교해 보았을 때, 큰 차이는 없지만, 바퀴의 미끄러짐과 외부적인 오차의 요인까지 고려한 상황에서 우리가 제안한 경로가 좀 더 실제 값에 가깝다는 것을 확인할 수 있다.

#### 6. After Study

실험결과의 정확성을 위해 Laser Tracker를 이용하여, 로봇의 x, y,  $\theta$ 를 측정하여 시뮬레이션과 비교해 볼 것이다. 추후에는 좀 더 복잡한 구조를 가진 로봇을 이용하여, 이 연구를 적용해 볼 예정이다.

#### 감사의 글

본 연구는 방위사업청/민군경용기술센터와 정보 통신부/정보통신 연구진흥원의 민군경용기술개발 사업의 일환으로 수행하였음 [06-DU-LC-01, 네트워크 기반 다목적 견마형 로봇 기술 개발].

#### 참 고 문 헌

- [1] Antonelli, G. Chiaverini, S. Fusco, G., "A calibration method for odometry of mobile robots based on the least-squares technique: theory and experimental validation" IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS., vol. 21, Oct, 2005.
- [2] C. Presse and M. Gautier, "New criteria of exciting trajectories for robot identification", in Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom., Atlanta, GA, 1993, pp. 907-912.
- [3] Antonelli, G., Fusco, G., "Linear estimation of the physical odometric parameters for differential-drive mobile robots", Auton Robot, Oct. 2007
- [4] Yoshihiko Nakamura "Advanced Robotics Redundancy and Optimization", Addison-wesley Publishing Company, pp. 30 - 35, 1991.
- [5] J.Y. Wong "Theory of ground vehicles second edition", Dept. of Mechanical & Aerospace Engineering, Carleton University in Ottawa, Canada
- [6] Genetic Algorithm Tool of Matlab