

강인 · 적응제어 방식에 의한 이동로봇의 동력학 제어

Dynamic Control of Mobile Robots Using A Robust · Adaptive Control Method

°남재호*, 백승민*, 국태용*

성균관 대학교 전자공학과(Tel: 0331-290-7202; E-mail: tykuc@yurim.skku.ac.kr)

Abstract: In this paper, a robust · adaptive control scheme is presented for precise trajectory tracking of nonholonomic mobile robots. In the controller, a set of desired trajectory is defined and used in constructing the control input which constitutes the main part of the proposed controller. The stable operating characteristics such as precise trajectory tracking, parameter estimation, disturbance suppression, etc., are shown through experiments as well as computer simulation.

Keywords : nonholonomic mobile robots, adaptive control

1. 서론

산업현장을 비롯하여 다양한 분야에서 이용되고 있는 로봇 머니플레이터는 고정된 위치에서 작업을 수행하므로 작업공간이 제한되는 단점을 갖는다. 이러한 문제점을 해결하고 로봇의 기능을 확장하기 위해 이동기능을 갖춘 이동로봇에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나, 기구학적 논홀로노믹 구속 방정식(nonholonomic constraints)으로 인해 구동바퀴를 지닌 이동로봇 시스템에 대한 제어기의 설계는 쉽지 않다. 이는 연속 신호의 상태 제한으로 논홀로노믹 시스템을 안정화시킬 수 없기 때문이다 [7]. 이에 대하여 Y. Kanayama[1]는 안정한 궤적추적을 위해 Lyapunov함수를 이용하여 제어입력을 결정하였으며, 비선형 모델의 선형화방법을 통하여 임계감쇠비(Critical damping ratio)를 결정하였다. 그러나, 이 방법은 단순한 형태의 기구학 모델을 이용하였으며, 정확한 속도추종이 이루어진다는 가정이 필요하다. 따라서, 이동로봇의 동력학 특성을 고려한 제어기가 필요하다. 기존의 동력학을 고려한 제어기의 설계는 비선형 궤환 방법, 입 · 출력 궤환 선형화 방법, 가변구조 제어 방법을 이용하였다 [3,5,6]. 그러나, 위와 같은 방법은 정확한 이동로봇의 모델과 정확한 이동로봇의 매개변수를 필요로 하므로 모델 파라미터와 외란의 불확실성에 대한 강인성이 부족하다. 또한, 실제 환경에서 이동로봇의 매개변수는 이동로봇이 수행하는 작업에 따라 변한다. 그러므로, 정확한 궤적 추종을 위해서는 이동로봇의 매개변수를 추정하여 이에 따른 제어입력을 구성하여야 하며, 모델링되지 않은 부분과 외란에 대한 보상이 필요하다.

본 논문에서는 이동로봇을 제어하고 모델링하는데 비 이상적인 조건, 파라미터의 변동, 마찰력, 외부 외란, 유연성 등에 대하여 이동로봇의 안정한 운영을 위해 적절히 반응할 수 있는 강인 · 적응 제어기를 제시하고자 한다.

2. 이동로봇의 기구학 및 동력학

본 논문에서는 그림 2와 같이 1개의 보조 바퀴와 2개의 구동 바퀴를 지닌 2자유도 이동로봇을 고려한다. 먼저, 이동로봇의 동력학 모델링하는데 있어서 다음과 같은 가정을 한다.

가정 1) 이동로봇의 바퀴는 순수한 회전과 비미끄럼 조건을 만족한다.

가정 2) 바닥과 바퀴의 회전축의 수직축은 항상 90° 를 이룬다.

가정 3) 이동로봇의 모든 부분은 강체로 구성되어 있다.

이동로봇에 대한 기구학 및 동력학 방정식은 식(1)과 식(2)에 나타나있다.

$$\xi = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \equiv f(\theta)\eta = \begin{bmatrix} -\sin\theta & 0 \\ \cos\theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$D(\beta)\dot{\eta} + C(\theta, \beta)\eta + f(\eta) + d = \tau \quad (2)$$

여기서, η_1, η_2 는 이동로봇의 선 속도 및 회전 속도이다. $D(\beta)$ 는 대칭 양의 한정 관성 행렬 [$D(\beta) \in R^{2 \times 2}$]이며, $C(\theta, \beta)$ 는 구심력과 코리올리력 [$C(\theta, \beta) \in R^{2 \times 2}$]을 나타내며, $f(\eta)$ 는 마찰력 [$f(\eta) \in R^{2 \times 1}$], d 는 확정외란 [$d \in R^{2 \times 1}$], 그리고 τ 는 입력 벡터 [$\tau \in R^{2 \times 1}$]를 나타낸다. 제어기 설계를 위하여 유도된 이동로봇의 동력학 모델식은 다음과 같은 성질을 만족한다.

성질 1) $\dot{D} - C$ 는 비대칭(skew-symmetric)인 성질을 갖는다.

성질 2) $\tau - d = y(\eta, \dot{\eta})\psi$,

여기서, $y(\cdot) \in R^{2 \times m}$ 과 $\psi \in R^{m \times 1}$ 는 각각 회기행렬과 미지의 파라미터 벡터를 나타낸다.

성질 3) 미지의 확정외란은 유계되어 있으며, d 는

$d = d_0 + d_1$ 로 기술될 수 있고, $\|d_1\| \leq d_m$ 이고 d_0 는 상수이다.

그러면, 이동로봇의 제어문제는 다음과 같이 요약된다:

$\zeta_d = J(\theta_d)\eta_d$ 을 만족하는 이동로봇의 요구되는 궤적($\zeta_d, \dot{\zeta}_d$)에 대하여, 시간이 흐름에 따라 ζ 가 ζ_d 을 추종하도록 하는 제어입력을 설계하는 것이다.

3. 강인 · 적응 제어기

3.1 속도 추종

요구되는 궤적을 정확히 추종하기 위하여, 우선 속도 추종이 이루어져야 한다. 따라서, 선 속도와 회전 속도 추종 제어기를 설계하기 위하여 속도 오차($\tilde{\eta}$)와 S 를 다음과 같이 정의한다.

$$\tilde{\eta} = \eta_d - \eta, \quad S = S_r - \eta. \quad (3)$$

여기서, $S_r = \eta_d + \alpha \int \tilde{\eta}$ 이다.

그러면, 이동로봇의 동력학 식(2)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$D\dot{S} + CS + \Gamma S = y\psi + \Gamma S + d - \tau \quad (4)$$

여기서, Γ 는 제어이득 행렬이고, $y\psi = DS_r + CS_r + f$ 이다. 이제 제어기의 출력을 다음과 같이 정의하자.

$$\tau = y_e \hat{\psi} + \Gamma S + \gamma + h \quad (5)$$

여기서, $y_e = y - y_d$, $y_d \psi = D\eta_d + C\eta_d + f(\eta_d)$ 이고, h 는 보조입력, γ 는 외란 보상항, 그리고, $\hat{\psi}$ 는 추정된 파라미터를 나타낸다. 그러면, 식(5)의 제어 입력을 적용한 이동로봇 시스템의 오차 시스템은 다음과 같다.

$$D\dot{S} + CS + \Gamma S = y_e \tilde{\psi} + d_1 + \tilde{h} - \gamma \quad (6)$$

여기서, $\tilde{\psi} = \psi - \hat{\psi}$, $\gamma = \hat{d}_m \operatorname{sgn}(s)$, $\tilde{h} = h_d - h$,

$h_d = y_d \psi + d_0$ 이다. 보조입력과 파라미터와 외란 보상항의 적응 법칙은 다음 식과 같다.

$$\dot{h}(t) = \operatorname{Pr}[h(t-\delta)] + \sigma \Gamma S(t) \quad (7)$$

$$\dot{\hat{\psi}}(t) = \operatorname{Pr}[\hat{\psi}(t-\delta)] + \sigma y_e^T S(t)$$

$$\dot{\hat{d}}_m(t) = \operatorname{Pr}[\hat{d}_m(t-\delta)] + \sigma |S(t)|$$

여기서, σ 는 적응이득($\sigma > 0$)이며, δ 는 적응간격($\delta > 0$)이다. 또한, $\operatorname{Pr}[\cdot]$ 는 추정된 파라미터를 유계시키기 위한 투영연산자이다. 이는 적응된 신호들의 과도한 변화를 방지함으로써 안정된 적응이 가능하게 한다. 적응 간격(δ)의 선택은 다음 조건이 만족되도록 선택한다.

$$h_d(t) \cong h_d(t-\delta) \quad (8)$$

그러면, 적응 법칙[식 7]과 제어기의 출력[식 5]에 의하여 시스템은 정리 1.과 같이 수렴함을 알 수 있다.

정리 1. 알 수 없는 파라미터, 제한된 외란을 가진 시스템 (1),(2)에 대하여 제어 입력[식(5)]과 적응 법칙[식(7)]에 의한 속도 제어기는 다음 조건을 만족한다.

i) $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\eta} = 0$.

ii) $\tilde{\psi}, \tilde{h} \in L_2 \cap L_\infty$.

만일 h_d 가 uniformly bounded되어 있으면, 시간이 흐름에 따라서 $h(t) \rightarrow h_d(t)$ 로 수렴한다.

3.2 위치 추종

Kanayama[1]는 안정한 궤적 추종을 위해서 기준 속도를 식 (9)와 같이 정의하였다.

$$\eta_r = \begin{bmatrix} \eta_{1d} \cos(\xi_{c3}) + k_1 \xi_{c1} \\ \eta_{2d} + k_2 \eta_{1d} \xi_{c2} + k_3 \eta_{1d} \sin(\xi_{c3}) \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서, $k_1, k_2, k_3 > 0$ 이며,

$$\tilde{\xi}_c = R(\theta_c) \begin{bmatrix} x_d - x \\ y_d - y \\ \theta_d - \theta_c \end{bmatrix} = R(\theta_c) \xi \quad (10)$$

$$R(\theta_c) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_c) & \sin(\theta_c) & 0 \\ -\sin(\theta_c) & \cos(\theta_c) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$\tilde{\xi}_c$ 은 이동로봇 위에 정의된 좌표계에서 표현된 위치오차이다.

따라서, η_d 를 η_r 로 치환하면, $\tilde{h} = h_r - h$, $\tilde{\eta} = \eta_r - \eta$,

$S_r = \eta_r + \sigma \int \tilde{\eta}$, $y_d \psi = y_r \psi = D\eta_r + C\eta_r + f(\eta_r)$ 이 된다.

여기서, $h_r = y_r \psi + d_0$ 이다. 또한, 제어기의 출력은 다음과 같다.

$$\tau = y_e \hat{\psi} + \Gamma S + \gamma + h \quad (11)$$

여기서, $y_e = y - y_r$ 이다.

그러면, 적응 법칙[식 7]과 제어기 출력[식 11]을 지닌 시스템은 정리 2.와 같이 속도 와 위치 추종이 가능하다 :

정리 2.: 기준 궤적(η_r)을 지닌 강인 · 적응 제어기는 다음과 같이 수렴한다.

i) $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\eta} = 0$ and $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\xi}_c = 0$

ii) $\tilde{\psi}, \tilde{h} \in L_2 \cap L_\infty$

iii) 만일 h_r 이 uniformly bounded면, $h(t)$ 는 $h_r(t)$ 로 수렴한다.

4. 실험 결과

본 절에서는 이동로봇에 대한 모의 실험과 실험을 통하여 제시된 제어기의 성능을 알아본다. 모의 실험에서는 2절에서 유도된 이동로봇의 기구학과 동력학을 사용하였고 사용된 이동로봇의 매개변수는 표 1에 나타나 있다. 추정 매개변수의 수는 16개이며 외란입력으로 다음과 같은 모델을 선정하였다.

$$d_i = 5 + 0.5 \sin(1000t), \quad i=1,2. \quad (13)$$

이와 같은 외란 모델은 구동기의 비선형입력 잠음으로 생각할 수 있다. 모의실험은 부정확한 매개변수에 대한 제어기의 적응 성능과 외란에 대한 강인한 제어 성능을 고찰하기 위하여 외란의 존재 유무로 나누어 고려하였다. 그림[3-5]는 외란이 없는 경우 원 궤적시 추종 제어기의 추종 응답을 보여준다. 초기 위치

오차가 없는 경우로써, 예측한 바와 같이 위치와 속도 오차가 수렴함을 알 수 있다. 그림[6-8]은 외란과 초기오차가 있는 경우의 추종 응답을 보여 준다. 초기 위치오차로 인해 발생된 궤적 오차는 시간이 흐를수록 수렴함을 알 수 있다. 또한, 그림[9-10]은 실제 제작된 이동로봇의 속도 추종 제어기의 선 속도와 회전 속도 응답을 보여준다. 실험시 두 개의 구동 바퀴의 제어는 각 구동바퀴에 측정된 엔코더 값을 80c196에서 486PC로 전송하고 제어입력을 계산하여 80c196 모터 구동 프로세서로 다시 전송하는 방법을 사용하였다. 각 데이터의 전송은 시리얼 케이블로 하며, 엔코더는 7500P/R고, 샘플링 시간은 60ms이다.

5. 결론

이동로봇의 정확한 속도와 위치 추종에 대하여 적응 강인 제어를 제시하였고, 모의 실험과 실험을 통하여 그 성능을 확인하였다. 또한, 제안된 제어기의 미지의 매개변수에 대한 적응성과 외란에 대한 강인성이 효과적이라는 것을 알 수 있다. 실험 결과에서도 입증하듯이 속도 추종제어기 수렴하는 것을 보여준다. 추후 연구과제로 상위 제어기와 하위 서보제어기의 통신 속도를 높이기 위하여 병렬 통신을 실현하는 문제와 엔코더외에 초음파, 시각센서를 사용하여 다양한 작업환경에 대한 적응능력과 장애물 회피능력을 갖추도록 하는 문제를 해결할 예정이다.

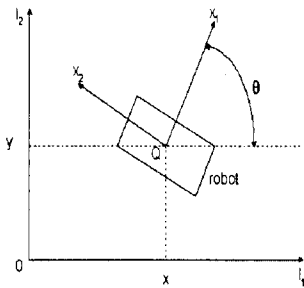


그림 1. 이동로봇의 좌표계

Fig 1. Coordinates of the mobile robot

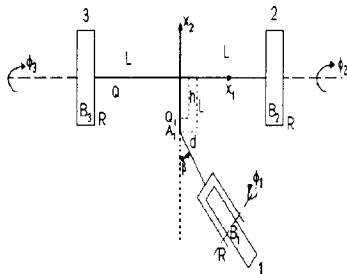


그림 2. 평면에서의 이동로봇의 구성도

Fig 2. Position of the robot in the plane

표 1. 모의 실험에 사용된 변수 값
Table 1. Parameter value used in simulation

표시	값	설명
M	30 Kg	이동로봇의 질량
l	0.19 m	보조바퀴의 위치
d	0.01 m	보조 바퀴의 회전축과 위치까지의 길이
r ₂ ,r ₃	0.055 m	구동 바퀴의 반경
r ₁	0.01 m	보조 바퀴의 반경
m ₂ ,m ₃	0.2 Kg	구동바퀴의 질량
m ₁	0.05 Kg	보조바퀴의 질량
e ₁	0.05 m	무게중심의 x ₁ 위치
e ₂	-0.05 m	무게 중심의 x ₂ 위치
B _i	2	정지 마찰 계수
C _i	4	운동 마찰 계수

References

- [1] Y. Kanayama, Y. Kimura, F. Miyazaki and T. Noguchi, "A Stable Tracking Control Method for an Autonomous Mobile Robot," *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automat.*, pp. 384-389, 1990.
- [2] B. d'Andrea-Novell, G. Bastin and G. Campion, "Modelling and Control of Non Holonomic Wheeled Mobile Robot," *Proc. IEEE. Conf. Robotics and Automat.*, pp. 1130-1135, 1991.
- [3] Hyun-Sik Shim, Joung-Hwan Kim, Kwangil Koh, "Variable Structure Control of Nonholonomic Wheeled Mobile Robot", *Proc. IEEE. Conf. Robotics and Automat.*, pp. 1694-1699, 1995.
- [4] Yilin Zhao and Spencer L. BeMent, "Kinematics, Dynamics and Control of Wheeled Mobile Robots", *Proc. IEEE. Conf. Robotics and Automat.*, pp. 91-96, 1992.
- [5] R. Zulli, R. Fierro, G. Conte and F. L. Lewis, "Motion Planning and Control for Non-holonomic Mobile Robots", *Proc. IEEE IECON*, pp. 551-557, 1995.
- [6] P. Ruaux, G. Bourooun, S. Delaplakce, N. Pons, J. Rabit, "A Rapid Mobile Robot Synthesis", *Proc. IEEE. Conf. Robotics and Automat.*, pp. 4073-4078, 1995.
- [7] R. W. Brockett, "Asymptotic Stability and Feedback Stabilization", *Differential Geometric Control Theory* R. W. Brockett, R. S. Millman and H. J. Sussmann (Eds.), Birkhauser : Birkhauser Boston, Inc., 1983.

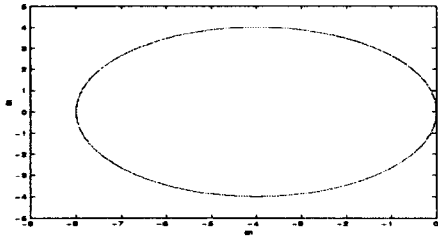


그림 3. 원 궤적 응답(외란이 없을 시)
Fig 3. Circle trajectory (without disturbances)

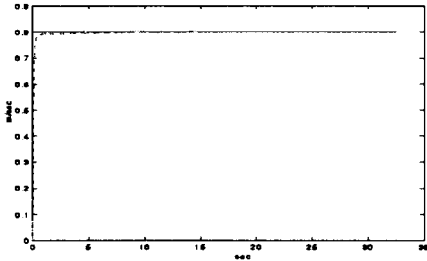


그림 4. 선속도 응답(외란이 없을 시)
Fig 4. Linear velocity response (without disturbances)

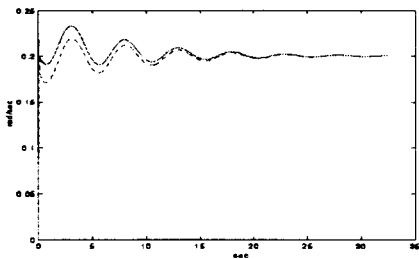


그림 5. 각 속도 응답(외란이 없을 시)
Fig 5. Angular velocity response (without disturbances)

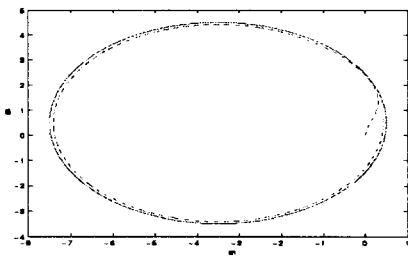


그림 6. 원 궤적 응답 (외란 과 초기오차 존재시)
Fig 6. Circle trajectory response (with disturbance and initial error)

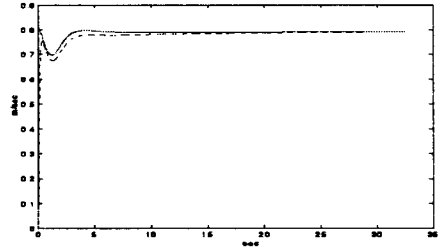


그림 7. 선 속도 응답(외란 과 초기오차 존재시)
Fig 7. Linear velocity response (with disturbance and initial error)

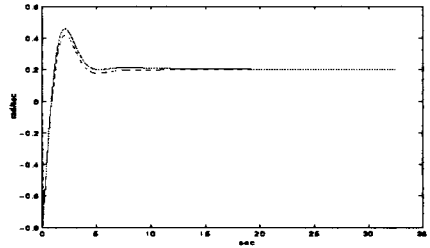


그림 8. 각 속도 응답((외란 과 초기오차 존재시)
Fig 8. Angular velocity response (with disturbance and initial error)

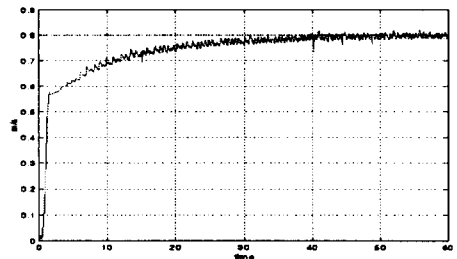


그림 9. 속도 제어기에 의한 선속도 추종
Fig 9. Linear velocity tracking with velocity controller

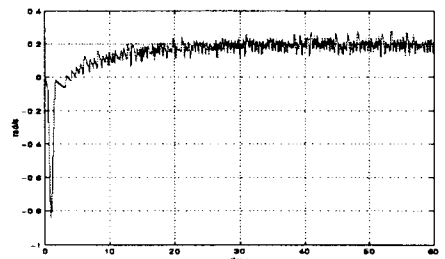


그림 10. 속도 제어기에 의한 각속도 추종
Fig 10. Angular velocity tracking with velocity controller