

선도 로봇 속도를 모르는 상태에서의 이동 로봇을 위한 적응 군집 제어

문씨래*, 최윤호**, 박진배*

연세대학교 전기전자공학과*, 경기대학교 전자공학과**

Adaptive Formation Control for Mobile Robots with Unknown Velocities of Leader Robot

Ssurey Moon*, Yoon Ho Choi**, Jin Bae Park*

Dept. of Electrical and Electronic Eng., Yonsei University*, Dept. of Electronic Eng., Kyonggi University**

Abstract - 본 논문에서는 이동 로봇의 군집 제어를 위해 선도-추종 로봇 방법에 기반한 적응 군집 제어 방법을 제안한다. 제안된 제어 방법에서는 선도 로봇의 선형 속도와 각 속도를 추정하기 위해 투영 법칙에 기반한 적응 기법을 이용하며, 또한 백스테핑 제어 기법을 이용하여 이동 로봇의 제어 입력인 토크를 구한다. 마지막으로, 컴퓨터 모의실험을 통해 본 논문에서 제안한 제어기의 성능을 검증하고자 한다.

1. 서 론

군집 제어(formation control) 기법은 비행기, 선박, 잠수함 등 여러 분야에 적용 가능하므로 현재 많은 연구들이 활발히 수행되고 있다. 군집 제어를 위한 접근 방법은 크게 가상 구조(virtual structure)를 이용하는 방법, 행동 기반(behavior-based) 방법, 선도-추종 (leader-following) 로봇 방법으로 나누어진다. 가상 구조를 이용하는 방법은 미리 군집 로봇들의 구조를 정해두고 개개의 로봇에게 경로를 부여하는 방법이며, 행동 기반 방법은 개개의 로봇이 주변 로봇의 위치 변화에 따라 목표하는 구조를 만들기 위해 이동하는 방법이다. 선도-추종 로봇 방법은 추종 로봇이 선도 로봇의 행동에 무관하게 선도 로봇과 일정한 거리와 상대 각도를 유지하는 방법으로서, 군집 제어 기법의 세가지 접근 방법 중 가장 간단하고 확장성을 가지므로 널리 사용되고 있다 [1].

선도-추종 로봇 방법을 사용하기 위해서는 선도 로봇의 선형 속도(linear velocity)와 각 속도(angular velocity)를 알아야 하며, 이 정보들은 이동 로봇간의 통신을 통해 전송 받을 수 있으나, 통신 과정에서 오차가 발생하여 잘못된 정보를 전송받거나, 정보를 받지 못하면 추종 로봇들을 정확하게 제어할 수 없는 문제점이 발생하게 된다. 또한 군집 제어 기법은 군집을 이루는 개개의 로봇이 원하는 성능으로 제어가 가능하다는 가정을 가지기 때문에 이동 로봇 자체를 제어하는 연구가 같이 병행되어 왔으며, 많은 연구들이 이동 로봇의 제어기 설계 시에 계산의 편리함을 이유로 기구학적 모델만을 고려하여 제어기를 설계하고 있다. 그러나 실제 이동 로봇은 관성, 구심력 등의 동역학적 특성의 영향으로, 정해진 속도로 동작하지 않기 때문에 동역학적 모델이 고려된 제어기가 필요하다 [2].

따라서 본 논문에서는 이와 같은 문제점들을 해결하기 위해, 선도-추종 로봇 방법에 기반한 적응 군집 제어 방법을 제안한다. 본 논문에서 제안한 방법에서는 제어기 설계 시에 선도 로봇으로부터 전송 받은 정보에만 의존하지 않고, 선도 로봇의 선형 속도와 각 속도를 추종 로봇 내에서 투영 법칙(projection rule)에 기반한 적응 제어 기법을 이용하여 추정한다. 또한 기구학적 모델과 동역학적 모델을 연결하는 백스테핑 제어(backstepping control) 기법을 이용하여 이동 로봇의 실제 제어 입력인 토크를 유도한다 [3]. 마지막으로, 컴퓨터 모의실험을 통해 제안한 제어기의 성능 및 효율성을 검증하고자 한다.

2. 군집 로봇 시스템 모델

2.1 단일 로봇의 기구학적 모델

본 논문에서 사용할 비 홀로노믹(nonholonomic) 이동 로봇의 기구학적 모델은 식 (1)과 같다.

$$\dot{q} = S(q)\nu \quad (1)$$

여기서,

$$q = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix}, S(q) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -d\sin\theta \\ \sin\theta & d\cos\theta \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \nu = \begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix}$$

x, y 와 θ 는 각각 이동 로봇의 중심점의 위치와 방위각이며, d 는 이동 로봇의 중심점과 바퀴의 축 사이의 거리이다. v 와 w 는 각각 이동 로봇의 선형 속도와 각 속도이다.

2.2 단일 로봇의 동역학적 모델

한편, 비 홀로노믹 이동 로봇의 동역학적 모델은 식 (2)와 같다.

$$M(q)\ddot{q} + V_m(q, \dot{q}) = B(q)\tau \quad (2)$$

여기서,

$$M(q) = \begin{bmatrix} m & 0 & mds\sin\theta \\ 0 & m & -md\cos\theta \\ mds\sin\theta & -md\cos\theta & I \end{bmatrix}, V_m(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & md\dot{\theta}^2 \cos\theta \\ 0 & 0 & md\dot{\theta}^2 \sin\theta \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B(q) = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\theta \\ \sin\theta & \sin\theta \\ R & -R \end{bmatrix}, \tau = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix}, I = md^2 + I_c$$

m, I_c, R, r 은 각각 이동 로봇의 무게, 중심점에 대한 관성 모멘트, 너비, 바퀴의 반지름이며, τ 는 이동 로봇의 토크이다.

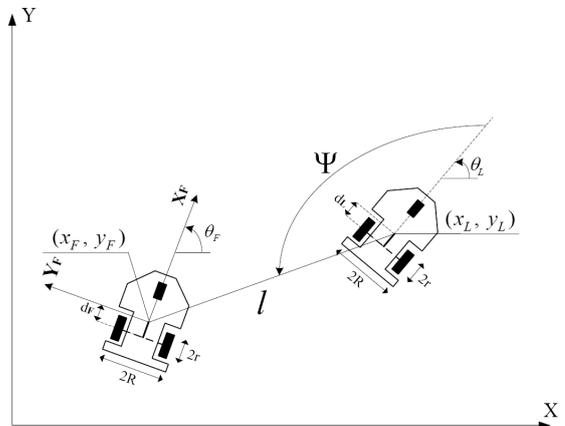
식 (1)을 식 (2)에 대입하여 속도 ν 에 대한 미분 방정식으로 표현하면 식 (3)과 같이 된다.

$$\overline{M}\dot{\nu} + \overline{V}_m\nu = \overline{B}\tau \quad (3)$$

여기서, $\overline{M} = S^T M S$, $\overline{V}_m = S^T (M \dot{S} + V_m S)$, $\overline{B} = S^T B$ 이다.

2.3 선도-추종 로봇의 거리-각도 모델

선도-추종 로봇간의 거리-각도 모델은 <그림 1>과 같이 직교 좌표계(Cartesian coordinates)로 표현 가능하다.



<그림 1> 선도-추종 로봇 모델

그림에서 x_L, y_L 와 θ_L 은 선도 로봇의 중심점의 위치와 방위각이며, x_F, y_F 와 θ_F 는 추종 로봇의 중심점의 위치와 방위각이다. 또한 v_L 와 w_L 는 선도 로봇의 선형 속도와 각 속도이며, v_F, w_F 는 추종 로봇의 선형 속도와 각 속도이다.

선도-추종 기반 군집 제어의 목적은 선도 로봇과 추종 로봇의 중심점 간의 거리 l 과 선도 로봇으로부터의 상대각도 Ψ 가 원하는 거리 l_d 와 각도 Ψ_d 에 일치하도록 하는 것이다.

이를 위해, 거리-각도 모델의 오차를 식 (4)와 같이 정의한다.

$$\begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{dx} - l_x \\ l_{dy} - l_y \\ \theta_F - \theta_L \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서,

$$l_x = -l \cos(\Psi + \theta_L), l_y = -l \sin(\Psi + \theta_L), l_{dx} = -l_d \cos(\Psi_d + \theta_L), l_{dy} = -l_d \sin(\Psi_d + \theta_L) \text{ 이다.}$$

3. 제어기 설계

3.1 기구학적 모델 기반 가상 제어기 설계

e_x, e_y 와 e_θ 의 유계성(Boundedness)을 만족시키는 가상 제어기를 식 (5)와 같이 설계할 수 있다.

$$\bar{v} = f(e_x, e_y, e_\theta, \hat{v}_L, \hat{w}_L) \quad (5)$$

여기서, $f \in \mathbb{R}^2$ 이고, $\bar{v} = [\bar{v}_F \ \bar{w}_F]^T$ 이며, \hat{v}_L, \hat{w}_L 는 각각 적응 기법을 통해 추정된 선도 로봇의 선형 속도와 각 속도이다.

3.2 백 스텝핑 기법을 이용한 동역학적 모델 기반 제어기 설계

식 (5)에서 설계된 제어기를 이용해 동역학 모델의 오차를 식 (6)과 같이 정의한다.

$$\begin{bmatrix} e_4 \\ e_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{v}_F - v \\ \bar{w}_F - w \end{bmatrix} \quad (6)$$

식 (6)을 식 (3)에 대입하면 식 (7)과 같다.

$$M\dot{\nu}_F - \bar{M}e_d + \bar{V}_m\nu_F - \bar{V}_m e_d = \bar{B}\tau \quad (7)$$

식 (7)을 통해 $e_4 \rightarrow 0, e_5 \rightarrow 0$ 을 만족시키는 제어기를 다음과 같이 설계할 수 있다.

$$\tau = B^{-1} \left[K \begin{bmatrix} e_4 \\ e_5 \end{bmatrix} + \overline{V}_m \nu_F + \overline{M} \dot{\nu}_F + f_\tau \right] \quad (8)$$

여기서, $f_\tau(e_x, e_y, e_\theta, \hat{v}_L, \hat{w}_L) \in \mathbb{R}^2$.

한편 이와 같이 설계된 제어기를 통해 기구학적 모델 시스템과 동역학적 모델 시스템 오차들의 유계성은 리아프노프(Lyapunov) 함수를 이용하여 증명할 수 있다.

4. 컴퓨터 모의실험

본 논문에서 제안된 방법에 의해 설계된 제어기의 성능을 검증하기 위해 이동 로봇 2대로 구성된 군집 제어 시스템에 대해 모의실험을 수행하였으며, 이 때 사용된 매개 변수들의 값은 $r=0.15$ (m), $R=0.75$ (m), $d=0.3$ (m), $m=30$ (kg), $I_c=15.625$ (kg·m²)이다.

한편, 선도 로봇의 선형 속도와 각 속도는 다음과 같다.

$$0 \leq t < 7.5: v_L = \frac{0.4}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi}{15} t \right), w_L = \frac{0.03}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi}{15} t \right)$$

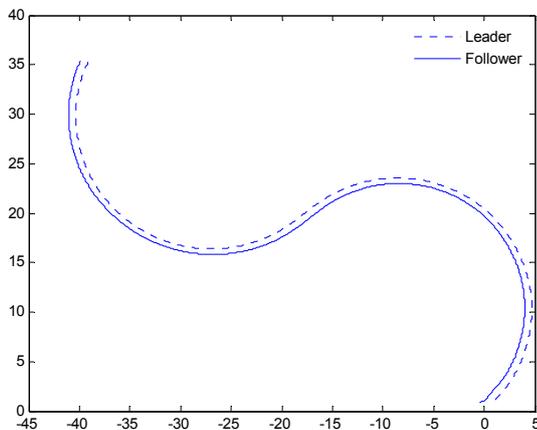
$$7.5 \leq t < 100: v_L = 0.4, w_L = 0.03$$

$$100 \leq t < 115: v_L = 0.4, w_L = 0.03 \cos \left\{ \frac{\pi}{15} (t - 100) \right\}$$

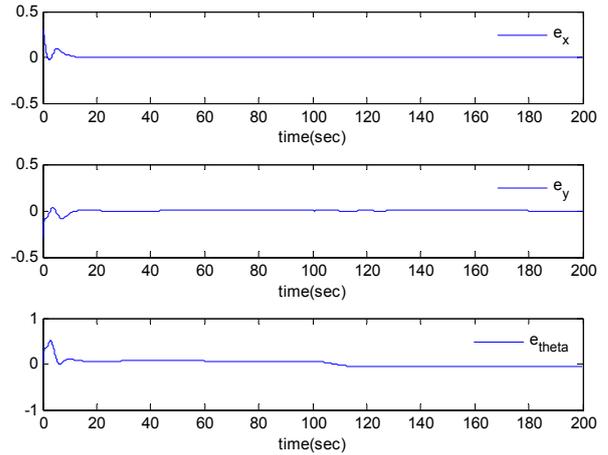
$$115 \leq t < 200: v_L = 0.4, w_L = -0.03$$

또한 선도 로봇과 추종 로봇의 초기 위치와 방위각은 각각 $(x_L, y_L, \theta_L) = (1, 1, \pi/4)$, $(x_F, y_F, \theta_F) = (0.6, 1, \pi/4)$ 로 설정하였다. 선도-추종 로봇 간의 목표 거리 및 상대 각도는 $l_d = 1, \psi_d = 3\pi/4$ 로 설정하였다.

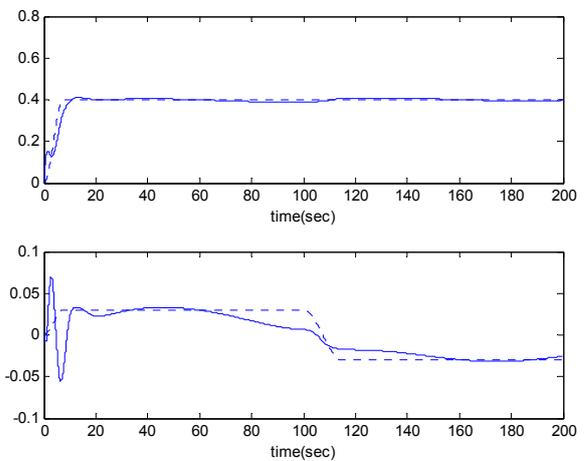
<그림 2>는 군집 로봇 시스템의 제어 결과이며, 그림의 결과로부터 추종 로봇이 선도 로봇과 일정한 거리와 상대 각도를 유지하며 추종하는 것을 확인할 수 있다. <그림 3>은 거리와 상대 각도의 오차를 나타내며, 10초 이내에 오차가 0 근처로 수렴하는 것을 확인할 수 있다. <그림 4>는 추정된 매개 변수를 나타내며, 추종 로봇이 선도 로봇의 정보를 정확하게 추정하여 매개 변수로 사용하고 있음을 확인할 수 있다.



<그림 2> 선도-추종 로봇의 궤적



<그림 3> 거리 오차와 상대 각도 오차



<그림 4> 추종 로봇의 매개 변수 추정

(상단 그래프: 점선은 선도 로봇의 실제 선형 속도 v_L 을 나타내고, 실선은 추정된 선도 로봇의 선형 속도 \hat{v}_L 을 나타냄, 하단 그래프: 점선은 선도 로봇의 실제 각 속도 w_L 을 나타내고, 실선은 추정된 선도 로봇의 각 속도 \hat{w}_L 을 나타냄)

5. 결 론

본 논문에서는 선도-추종 로봇 방법에 기반한 적응 군집 제어 기법을 제안하였고 제안한 방법을 이용하여 이동 로봇을 제어하였다. 제안한 제어 방법에서는 투영 법칙에 기반한 적응 기법을 이용하여 선도 로봇의 선형 속도와 각 속도를 추정하고, 추정된 매개 변수와 백스텝핑 제어 기법을 이용하여 이동 로봇의 토크를 구하였다. 마지막으로 컴퓨터 모의 실험을 통해 본 논문에서 제안한 제어기의 성능을 검증하였다.

감사의 글

이 논문은 2009년도 교육인적자원부 BK21사업의 일환인 연세대학교 전기전자공학부 TMS사업단의 지원을 받아 연구되었음.
이 논문은 지식경제부의 지원에 의하여 기초전력연구원(과제관리 번호: 08124) 주관으로 연구되었음.

[참 고 문 헌]

- [1] A. K. Das, R. Fierro, V. Kumar, J. P. Ostrowski, J. Spletzer and C. J. Taylor, "A Vision-Based Formation Control Framework", IEEE. Trans. Robotics. Automation, vol. 18, no.5, pp. 813-825, 2002.
- [2] R. Fierro and F. L. Lewis, "Control of a Nonholonomic Mobile Robot: Backstepping Kinematics into Dynamics", Journal of Robotic Systems, vol. 14, no. 3, pp. 149-163, 1997.
- [3] T. Fukao, H. Nakagawa and N. Adachi, "Adaptive Tracking Control of a Nonholonomic Mobile Robot", IEEE. Trans. Robotics. Automation, vol. 16, no. 5, pp. 609-615, 2000.