

이동로봇의 대형제어를 위한 장애물 회피

오영석*, 박종훈*, 김진환**, 허옥열*
 인하대*, 인하공업전문대학**

Obstacle Avoidance for Formation of Mobile Robot

Young-Suk Oh*, Jong-Hun Park*, Jin-Hwan Kim**, Uk-Youl Huh*
 Inha University*, Inha Technical College**

Abstract - 본 논문에서는 리더-추종자 대형제어에서 추종자 로봇의 장애물 회피에 관해 다룬다. 추종자 로봇은 리더 로봇과의 대형유지 뿐만 아니라 장애물이 감지되면 회피한다. 추종자 로봇의 제어기는 리아프노프 안정성이 고려된 백스테핑 방법을 이용해서 동역학 요소도 고려된 제어기로 설계한다. 장애물 회피 시에는 리더 로봇과 추종자 로봇의 위치 그리고 장애물의 인지에 따른 거리와 방향각을 이용하여 장애물을 회피한다. 시뮬레이션 실험을 통해 제안된 제어기의 안정된 성능을 확인할 수 있다.

1. 서 론

현재 이동로봇이 가장 활발히 활용되는 분야 중 하나가 실내 서비스용 분야이다. 서비스용 분야 로봇들은 목표물과의 일정한 거리를 두고 서비스를 제공하게 된다. 그러나 일정한 거리 유지뿐만 아니라 사람 또는 물체 등 이동로봇의 이동방향에 방해가 되는 장애물이 감지가 되면 이동로봇의 안전을 위해 장애물을 회피할 필요가 있다. 따라서 이동로봇은 대형유지와 함께 장애물 회피도 고려해야 한다.

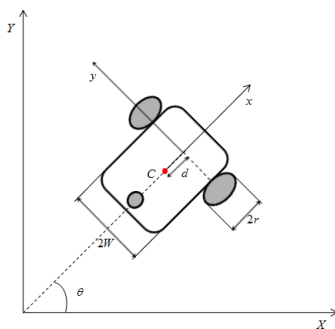
본 논문에서는 리더-추종자 접근방법 (Leader-Follower Approach)을 이용해서[1], 리더를 목표물인 이동물체 또는 사람으로, 추종자를 이동로봇으로 두고 장애물의 유무와 위치에 따라 목표물과의 대형 유지 및 장애물을 회피할 수 있는 알고리즘을 제시한다. 이를 리아프노프 안정성 (Lyapunov Stability)이 고려된 백스테핑 (Backstepping) 방법을 이용해서 동역학 요소도 고려된 제어기를 설계하고 시뮬레이션을 통해 설계한 제어기의 성능을 확인하여 제어기의 효용성을 검증하도록 한다.

2. 본 론

2.1 이동로봇의 모델링

이동로봇의 운동학과 동역학 모델링을 위해 로봇의 좌표는 식(1)과 같고, 그림1에 이동로봇을 나타내 있다.

$$\mathbf{q} = [x \ y \ \theta]^T \quad (1)$$



<그림 1> 이동로봇

이동로봇의 선속도와 각속도에 의해 이동이 결정되고 식(2)의 운동학 모델로 정의된다.

$$\dot{\mathbf{q}} = S(\theta) \mathbf{V}(t) = \begin{bmatrix} \cos\theta & d\sin\theta \\ \sin\theta & -d\cos\theta \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix} \quad (2)$$

이동로봇이 m 개의 제안에 대해 n 차원의 일반화된 좌표계를 가질 때 로봇의 동역학은 식(3)과 같이 정의된다[2].

$$M(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + V_m(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + F(\dot{\mathbf{q}}) + G(\mathbf{q}) + \tau_d = B(\mathbf{q})\tau - A^T(\mathbf{q})\lambda \quad (3)$$

$$M(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} m & 0 & mds\sin\theta \\ 0 & m & -mdc\cos\theta \\ mds\sin\theta & -mdc\cos\theta & I \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$V_m(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \begin{bmatrix} md\dot{\theta}^2 \cos\theta \\ md\dot{\theta}^2 \sin\theta \\ 0 \end{bmatrix}, \quad F(\dot{\mathbf{q}}) = G(\mathbf{q}) = \tau_d = 0$$

$$B(\mathbf{q}) = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\theta \\ \sin\theta & \sin\theta \\ W & -W \end{bmatrix}, \quad \tau = [\tau_r \ \tau_l]^T$$

$$A^T(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} -\sin\theta \\ \cos\theta \\ -d \end{bmatrix}, \quad \lambda = -m(\dot{x}\cos\theta + \dot{y}\sin\theta)\dot{\theta}$$

여기서 M 은 질량, V_m 은 구심력과 전향력에 관련된 행렬이고, F 는 마찰과의 마찰력, G 는 중력에 관련된 벡터이고 τ_d 는 외란이다. 또한 B 는 입력에 대한 변환행렬, A 는 제약에 관련된 행렬이고 τ 는 좌우 바퀴에 대한 입력 토크 벡터, 그리고 λ 는 구속력에 관련된 벡터이다. m 은 로봇의 무게이고, r, W, d 는 그림1에서 보여 지는 바와 같다. 이상적인 경우를 가정하면 로봇이 평평한 바닥에서만 이동하고 로봇에 가해지는 외부의 힘은 없으며 바퀴의 미끄러짐이 없는 상태일 때 식(2)의 미분식과 $S(\theta)$ 의 행렬을 이용해서 식(5)와 같이 로봇의 토크입력을 나타낼 수 있다.

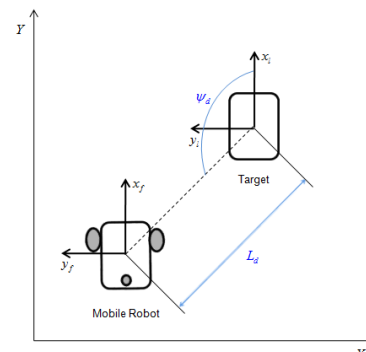
$$\tau = \overline{B}^{-1}[\overline{M}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{v}} + \overline{V}_m(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\mathbf{v}] \quad (5)$$

여기서 $\overline{M} = S^TMS$, $\overline{V}_m = S^T(M\dot{S} + V_mS)$ 이고 $\tau = [\tau_r \ \tau_l]^T$ 는 이동로봇의 좌우 양 바퀴에 가해지는 토크벡터이다. 이때 이동로봇의 토크를 구하기 위해서 이동로봇의 속도 \mathbf{v} 와 가속도 $\dot{\mathbf{v}}$ 이 필요하게 된다.

2.2 이동로봇의 대형제어

리더-추종자 접근방법을 이용해서 목표물에서 어느 일정한 거리와 각도를 유지할 수 있도록 이동로봇을 제어한다. 리더 로봇의 위치 및 자세를 $[x_l \ y_l \ \theta_l]^T$ 할 때 추종자 로봇의 위치 및 자세 $[x_f \ y_f \ \theta_f]^T$ 는 식(6)과 같이 표현된다[1]. 그림2는 리더-추종자 대형제어를 나타낸다.

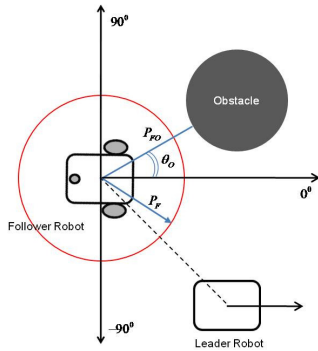
$$\mathbf{q}_f = \begin{bmatrix} x_f \\ y_f \\ \theta_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_l + L_d \cos(\psi_d + \theta_l) \\ y_l + L_d \sin(\psi_d + \theta_l) \\ \theta_l \end{bmatrix} \quad (6)$$



<그림 2> 리더-추종자 대형제어

2.3 추종자 로봇의 장애물 회피

장애물의 유무에 따라 정해진 대형제어의 거리(L_d)와 방향각(ψ_d)의 변화를 가지고 대형을 유지하거나 장애물을 회피한다. 그림3은 추종자 로봇의 장애물 감지를 보여준다.



<그림 3> 추종자 로봇의 장애물 감지

식(7)과 식(8)은 장애물 감지에 따른 거리(L_d)와 방향각(ψ_d)의 값을 식으로 나타낸 것이다.

$$L_d^* = \begin{cases} L_d + K_{Ld} \left(\frac{1}{P_{FO}} - \frac{1}{P_F} \right)^2 \text{sgn}(\theta_o - \frac{\pi}{2}) & \text{if } P_{FO} \leq P_F \\ L_d & \text{if } P_{FO} > P_F \end{cases} \quad (7)$$

$$\psi_d^* = \begin{cases} \psi_d - K_{\psi d} \left(\frac{1}{P_{FO}} - \frac{1}{P_F} \right)^2 \text{sgn}(\psi_d - \pi) & \text{if } P_{FO} \leq P_F \\ \psi_d & \text{if } P_{FO} > P_F \end{cases} \quad (8)$$

식(7)과 식(8)을 사용해서 식(6)을 장애물 회피가 고려된 대형제어에 관한 식으로 다시 정리 하면 다음 식(9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$q_f = \begin{bmatrix} x_f \\ y_f \\ \theta_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_l + L_d^* \cos(\psi_d^* + \theta_l) \\ y_l + L_d^* \sin(\psi_d^* + \theta_l) \\ \theta_l \end{bmatrix} \quad (9)$$

2.4 추종자 로봇의 제어기

추종자 로봇의 제어기는 리아프노프 안정성(Lyapunov Stability)이 고려된 백스텝핑(Backstepping) 방법을 이용해서 제어기를 설계하고, 운동학 제어기로부터 추종하려는 궤적에 대해 기준 명령을 구하고 동역학 제어기에서 이동로봇의 바퀴 구동 토크를 계산한다. 식(10)은 추종자 로봇의 기준위치 $\{q_f\}$ 와 실제 위치 $\{q_e\}$ 의 오차이다.

$$\dot{e} = \begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \\ \dot{\theta}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_e w_c - v_c + v_l \cos \theta_e - L_d^* \sin(\psi_d^* + \theta_e) w_l \\ -x_e w_c + v_l \sin \theta_e + L_d^* \cos(\psi_d^* + \theta_e) w_l \\ w_l - w_c \end{bmatrix} \quad (10)$$

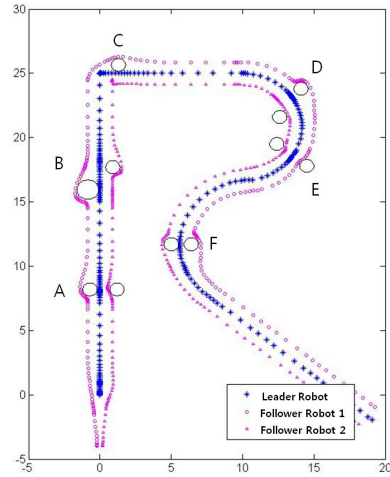
여기서 리더 로봇의 속도와 실제 추종자 로봇의 속도 그리고 대형과 장애물 회피에 관련된 항이 포함하는 것을 볼 수 있다. 식(10)에서 제어 입력 v_c , w_c 는 식(11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_c \\ w_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_l \cos \theta_e + K_1 x_e - L_d^* \sin(\psi_d^* + \theta_e) w_l \\ w_l + K_2 v_l y_e + K_3 v_l \sin \theta_e - |y_e| K_2 L_d^* w_l \end{bmatrix} \quad (11)$$

2.5 시뮬레이션 결과

시뮬레이션을 통해서 리더-추종자 대형제어와 장애물 회피에 관한 성능을 확인한다. 시뮬레이션에서 사용하는 물리적 요소 값은 Pioneer3 DX 제원 값을 적용하였다. 이때 로봇의 길이(Length)의 중심을 무게중심이라고 가정해서 d 의 거리 값을 계산하였고, 관성모멘트 I 는 로봇이 원통이라고 가정 하에 계산하였다. 이동로봇의 물리적 요소 값은 질량 $[m] = 9Kg$, 바퀴반지름 $[r] = 0.0925m$, 관성모멘트 $[J] = 0.2278Kg m^2$, 로봇 폭 $[2W] = 0.38m$, 무게중심과 휠 축 중심사이의 거리 $[d] = 0.0505m$ 이다.

그림4는 R패턴에 대한 대형제어와 장애물회피를 보여준다. 리더 로봇과 추종자 로봇 간의 거리와 방향각은 추종자 로봇 1번은 $1m/120^\circ$, 추종자 로봇 2번은 $1m/240^\circ$ 로 설정하였다. 리더 로봇은 직선운동→급격한 90° 방향회전→직선운동→우회전운동→좌회전운동의 움직임을 보여주며, 이때 직선속도는 $0.5[m/s]$, 우회전속도는 $0.12[rad/s]$, 좌회전속도는 $0.1[rad/s]$ 이다.



<그림 4> 대형제어와 장애물 회피

추종자 로봇은 로봇의 위치와 장애물의 위치에 따라 장애물을 최적 거리로 회피한다. 추종자 로봇이 장애물을 만났을 때 회피하는 모습을 A~F 구간별로 보여준다. A와 B 구간은 직선운동 시에 장애물을 감지하였을 때 장애물 회피를 보여준다. A 구간에서는 목표물 기준으로 1번 추종자 로봇은 바깥쪽으로 2번 추종자 로봇은 안쪽으로 장애물 지름이 $1[m]$ 인 원을 회피하는 것을 보여준다. B 구간에서는 추종자 로봇 모두 리더 로봇의 기준으로 바깥쪽으로 회피하지만 1번 추종자 로봇은 장애물 지름이 $1.5[m]$ 인 원이고, 2번 추종자 로봇은 장애물 지름이 $1[m]$ 인 원을 감지했을 때 이다. 장애물의 크기는 다르지만 추종자 로봇의 감지 범위인 $0.4[m]$ 안에 장애물이 감지되면 장애물을 회피하는 것을 볼 수 있으며, 로봇과 장애물의 위치에 따라서는 리더 로봇의 기준으로 안쪽 또는 바깥쪽으로 회피하는 것을 확인 할 수 있다. C 구간은 급격한 90° 방향전환 이후 대형을 유지하기 위한 위치에 장애물이 있을 때 장애물을 감지하고 회피하는 모습을 보여준다. D~F 구간은 회전운동 시에 장애물을 감지하였을 때 장애물 회피를 보여준다. D~F 구간에서는 추종자 로봇의 위치와 장애물 위치에 따라 추종자 로봇들이 리더 로봇의 기준으로 안쪽 또는 바깥쪽으로 회피하는 것을 확인 할 수 있다. 이때 장애물 크기는 지름이 $1[m]$ 인 원이다.

3. 결 론

본 논문에서는 대형 유지와 동시에 장애물을 회피할 수 있는 제어기를 설계하였다. 리더 로봇과 추종자 로봇 그리고 장애물 위치에 따라 최적의 경로로 장애물을 회피하고, 장애물의 크기에 상관없이 장애물이 감지되면 회피한다. 또한 이동로봇의 물리적 요소도 고려한 동역학적 모델을 사용하였으며, 리아프노프 안정성이 고려된 백스텝핑 방법을 이용해서 설계한 제어기를 가지고 시뮬레이션을 통해 제어 가능성을 확인하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] H. Takahashi, H. Nishi and K. Ohnishi, "Autonomous Decentralized Control for Formation of Multiple Mobile Robots Considering Ability of Robot," IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 51, No. 6, pp 1272-1279, Dec. 2004.
- [2] R. Fierro and F. L. Lewis, "Control of A Nonholonomic Mobile Robots: Backstepping Kinematics into Dynamics," Decision and Control IEEE Conf., pp. 3805-3810, Dec. 1995.
- [3] Y. Kanayama, Y. Kimura, F. Miyazaki and T. Noguchi, F.N. Najm, "A Stable Tracking Control Method for an Autonomous Mobile Robot," IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 384-389, 1990.
- [4] 오영석, 이충호, 박종훈, 김진환, 허옥열, "이동물체 추적을 위한 이동로봇의 대형제어," 대한전기학회논문지 제60권 제04호, pp. 856-861, 2011년 04월