Obstacle Avoidance of Leader-Follower Formation

오 영 석* · 박 종 훈** · 김 진 환*** · 허 욱 열†

(Young-Suk Oh · Jong-Hun Park · Jin-Hwan Kim · Uk-Youl Huh)

Abstract - This paper presents obstacle avoidance of Leader-Follower formation. The follower robot maintain the formation with leader robot and avoid the detected obstacle. When obstacle is detected, follower robot avoid it considering leader robot and follower robot position and follower robot and obstacle position. In addition, follower robot avoid obstacle irrespective of obstacle size. Controller of follower robot is designed to satisfy Lyapunov stability by backstepping method. Simulation results shows that the designed controller has a stable performance.

Key Words : Mobile robot, Leader-follower formation control, Obstacle avoidance

1. 서 론

현재 이동로봇이 가장 활발히 활용되는 분야는 실내 서비스용 로봇분야이다. 보통 서비스용 분야 로봇들은 목표물과의 일정한 거리를 두고 서비스를 제공하게 된다. 예를 들면 안내용 혹은 의료용 로봇의 경우 목표물과 일정한 간격을 유지하면서 서비스를 제공하고 보조하게 된다. 뿐만 아니라 서비스용 분야 이외에 협업용 혹은 군사용 로봇의 경우에도 일정한 간격을 유지하면서 이동, 집합 및 산개를 하게 된다 [1]. 그러나 일정한 거리 유지뿐만 아니라 사람 또는 물체 등 로봇의 이동방향에 방해가 되는 요소가 감지가 되면 이동로봇의 안전을 위해 장애물 회피를 할 필요가 있다. 따라서 이동로봇은 대형유지와 함께 장애물 회피도 고려해야 한다.

기존의 장애물 회피 관련된 연구를 살펴보면, O. Khatib는 장애물이 로봇에 척력을 목표 지점에 인력을 발휘한다고 생각하고 전위장 방법(Potential Field method: PFM)을 제안하였다[2]. J. Borenstein과 Y. Koren은 이동로봇의 실시간 동작 계획을 위하여 인공 전위계(Artificial Potential Field: APF) 개념에 장애물을 표현하기 위한 확실성 격자 개념을 합쳐서 가상 역장(Virtual Force Field: VFF)을 도입한 방법이 제안되었고[3], 이것을 발전시킨 벡터장 히스토그램(Vector Field Histogram: VFH) 방법이 제안되었다[4]. 그 외에 미리 정해진 간격으로 벽면을 따라 주행하는 벽 따라가기(Wall Following Method: WFM) 개념이 들어간

버그 알고리즘(Bug Algorithm)[5]과 퍼지 알고리즘(Fuzzy Controller Algorithm) 방법도 있다[6]. 하지만 전위장을 이용한 방법은 로봇의 동역학적인 요소들이 고려되지 않았으며, 로봇이 이동할 때 좁은 통로를 빠져나가지 못하는 문제를 발생시킨다. 또한 버그 알고리즘은 실제적으로 비효율적이며, 퍼지 알고리즘은 여러 가지 규칙 유도 방법에 따라 각각의 단점을 가지고 있다.

본 논문에서는 안정성 보장이 가능하고 하나의 이동로봇뿐 아니라 집단 로봇에 적용이 가능한 리더-추종자 접근방법(Leader-Follower Approach)을 이용해서[7], 리더를 목표물인 이동물체로, 추종자를 이동로봇으로 두고 장애물의 유무와 위치에 따라 이동로봇이 목표물과의 대형 유지하면서 장애물이 감지되면 회피할 수 있는 알고리즘을 제시한다. 이를 리아프노프 안정성(Lyapunov Stability)이 고려된 백스테핑 방법(Backstepping Method)을 이용해서 동역학 요소도 고려된 제어기를 설계하고 시뮬레이션을 통해 설계한 제어기의 성능을 확인하여 제어기의 효용성을 검증하도록 한다.

2. 이동로봇의 장애물 회피

이동로봇의 기구학 요소뿐만 아니라 동역학 요소도 고려된 이동로봇의 모델링을 설계하고[1], 리더-추종자 접근방법을 이용해서 리더 로봇과 추종자 로봇이 어느 일정한 거리와 각도를 유지할 수 있도록 추종자 로봇을 제어한다. $\mathbf{q}_l = [x_l \ y_l \ \theta_l]^\top$ 은 목표물(리더)의 위치 및 자세이고, $\mathbf{q}_f = [x_f \ y_f \ \theta_f]^\top$ 는 리더의 이동 궤적을 이용해서 생성한 이동로봇(추종자)의 대형유지를 위한 위치 및 자세라고 한다면 식(1)과 같이 대형을 정의할 수 있다[7].

$$\mathbf{q}_f = \begin{bmatrix} x_f \\ y_f \\ \theta_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_l + L_d \cos(\psi_d + \theta_l) \\ y_l + L_d \sin(\psi_d + \theta_l) \\ \theta_l \end{bmatrix} \quad (1)$$

* 준 회 원 : 인하대학교 로봇공학전공 석사과정
 ** 정 회 원 : 인하대학교 로봇공학전공 박사과정
 *** 정 회 원 : 인하공업전문대학 전기정보과 교수
 † 교신저자, 펠로우회원 : 인하대학교 공과대학 전기공학과 교수

E-mail : uyhuh@inha.ac.kr
 접수일자 : 2011년 6월 2일
 최종완료 : 2011년 8월 16일

그림 1은 리더-추종자 대형제어를 나타내며, L_d 는 리더 로봇과 추종자 로봇 사이의 거리이고, ψ_d 는 리더 로봇의 진행방향에 따른 추종자 로봇의 방향각이다.

그림 1 리더-추종자 대형제어

Fig. 1 Leader-Follower formation control

장애물의 유무에 따라 정해진 대형제어 거리(L_d)와 방향각(ψ_d)을 가지고 대형을 유지하거나 기존의 거리와 방향각에서 장애물을 감지했을 때 회피에 관한 식을 추가해서 변화된 거리와 방향각을 가지고 장애물을 회피한다.

그림 2 추종자 로봇의 장애물 감지

Fig. 2 Obstacle encounter

그림 2는 추종자 로봇이 장애물을 감지했을 때를 보여주며, 장애물은 고정된 원이라고 가정한다. P_{FO} 는 추종자 로봇과 장애물 사이의 거리, P_F 는 추종자 로봇이 장애물을 주의해야 할 범위거리 그리고 θ_o 는 추종자 로봇의 직선속도 방향과 P_{FO} 사이의 각을 나타낸다. 여기서 추종자 로봇이 리더 로봇을 장애물로 인식할 가능성이 높으므로 $P_F < L_d$ 를 만족해야 한다.

식(2)와 식(3)은 장애물 감지에 따른 거리(L_d)와 방향각(ψ_d)의 값을 식으로 나타낸 것이다[8].

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

$$\psi_d^* = \begin{cases} \psi_d - K_{\psi d} \left(\frac{1}{P_{FO}} - \frac{1}{P_F} \right)^2 \text{sgn}(\psi_d - \pi) & \text{if } P_{FO} \leq P_F \\ \psi_d & \text{if } P_{FO} > P_F \end{cases} \quad (3)$$

K_{Ld} 와 $K_{\psi d}$ 는 장애물 회피에 관한 이득 값으로 실제 환경에 맞게 설정된 장애물 감지 범위거리(P_F)와 이동로봇의 센서로 측정된 거리(P_{FO})에 따라서 정해진다. K_{Ld} 와 $K_{\psi d}$ 값에 따라서 장애물과의 충돌 위험성을 감소시키고 장애물을 원만하게 회피할 수 있다.

그림 3은 추종자 로봇과 장애물의 위치에 따른 이동로봇의 장애물 회피를 보여준다.

(a) $0 < \theta_o < \frac{\pi}{2}$ 인 경우

(b) $-\frac{\pi}{2} < \theta_o \leq 0$ 인 경우

그림 3 장애물 위치에 따른 추종자 로봇의 장애물 회피

Fig. 3 Obstacle position based on obstacle avoidance of follower robot

그림 4는 리더 로봇과의 대형 위치에 따른 추종자 로봇의 장애물 회피를 보여준다.

(a) $\psi_d < \pi$ 인 경우

(b) $\psi_d \geq \pi$ 인 경우

그림 4 ψ_d 에 따른 추종자 로봇의 장애물 회피

Fig. 4 ψ_d based on obstacle avoidance of follower robot

식(2)와 식(3)을 사용해서 식(1)을 장애물 회피에 관한 식으로 다시 정리 하면 다음 식(4)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 $\mathbf{q}_l = [x_l \ y_l \ \theta_l]^T$ 는 리더 로봇의 위치 및 자세이고, $\mathbf{q}_f = [x_f \ y_f \ \theta_f]^T$ 는 추종자 로봇의 위치 및 자세이다.

$$\mathbf{q}_f = \begin{bmatrix} x_f \\ y_f \\ \theta_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_l + \left[L_d + K_{Ld} \left(\frac{1}{P_{FO}} - \frac{1}{P_F} \right)^2 \text{sgn} \left(\theta_o - \frac{\pi}{2} \right) \right] \cos \left[\psi_d - K_{\psi d} \left(\frac{1}{P_{FO}} - \frac{1}{P_F} \right)^2 \text{sgn}(\psi_d - \pi) \right] + \theta_l \\ y_l + \left[L_d + K_{Ld} \left(\frac{1}{P_{FO}} - \frac{1}{P_F} \right)^2 \text{sgn} \left(\theta_o - \frac{\pi}{2} \right) \right] \sin \left[\psi_d - K_{\psi d} \left(\frac{1}{P_{FO}} - \frac{1}{P_F} \right)^2 \text{sgn}(\psi_d - \pi) \right] + \theta_l \\ \theta_l \end{bmatrix} \quad (4)$$

3. 장애물 회피 제어기 설계

추종자 로봇의 제어기는 리아프노프 안정성(Lyapunov Stability)이 고려된 백스테핑(Backstepping) 방법을 이용해서 제어기를 설계한다. 이때 운동학 제어기에서는 추종하려는 궤적에 대해 기준 명령을 구하고 동역학 제어기에서는 추종자 로봇의 바퀴 구동 토크를 계산한다. 제어기를 설계하기 위해서 추종자 로봇의 위치 $\mathbf{q}_f = [x_f \ y_f \ \theta_f]^\top$ 와 실제 로봇의 위치 $\mathbf{q} = [x \ y \ \theta]^\top$ 의 오차식과 이에 대한 미분식을 보면 다음과 같다[1][9].

$$\mathbf{e} = \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \theta_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_f - x \\ y_f - y \\ \theta_f - \theta \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\dot{\mathbf{e}} = \begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \\ \dot{\theta}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_e w - v + v_f \cos \theta_e \\ -x_e w + v_f \sin \theta_e \\ w_l - w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -w_l \left\{ L_d + K_{Ld} \left(\frac{1}{P_{FO}} - \frac{1}{P_f} \right)^2 \operatorname{sgn}(\theta_o - \frac{\pi}{2}) \right\} \sin \left\{ \left[\psi_d - K_{\psi d} \left(\frac{1}{P_{FO}} - \frac{1}{P_f} \right)^2 \operatorname{sgn}(\psi_d - \pi) \right] + \theta_e \right\} \\ w_l \left\{ L_d + K_{Ld} \left(\frac{1}{P_{FO}} - \frac{1}{P_f} \right)^2 \operatorname{sgn}(\theta_o - \frac{\pi}{2}) \right\} \cos \left\{ \left[\psi_d - K_{\psi d} \left(\frac{1}{P_{FO}} - \frac{1}{P_f} \right)^2 \operatorname{sgn}(\psi_d - \pi) \right] + \theta_e \right\} \\ 0 \end{bmatrix}$$

식 (5)에서 리더 로봇의 속도와 실제 추종자 로봇의 속도 그리고 대형 유지와 장애물 회피에 관련된 항이 포함하는 것을 볼 수 있다. 식(5)에서 제어입력인 직선속도 v 와 회전속도 w 는 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_f \cos \theta_e + K_1 x_e \\ w_l + K_2 v_l y_e + K_3 v_l \sin \theta_e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \gamma_v \\ \gamma_w \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\gamma_v = -w_l \left\{ L_d + K_{Ld} \left(\frac{1}{P_{FO}} - \frac{1}{P_f} \right)^2 \operatorname{sgn}(\theta_o - \frac{\pi}{2}) \right\} \sin \left\{ \left[\psi_d - K_{\psi d} \left(\frac{1}{P_{FO}} - \frac{1}{P_f} \right)^2 \operatorname{sgn}(\psi_d - \pi) \right] + \theta_e \right\} \quad (7)$$

$$\gamma_w = -|y_e| K_2 \left\{ L_d + K_{Ld} \left(\frac{1}{P_{FO}} - \frac{1}{P_f} \right)^2 \operatorname{sgn}(\theta_o - \frac{\pi}{2}) \right\} \quad (8)$$

식(8)에서 $|y_e|$ 가 항상 0보다 큰 값을 가지면서 다른 로봇과의 충돌 위험성이 감소된다. 그리고 제어 이득 값은 $K_1 > 0$, $K_2 > 0$, $K_3 > 0$ 조건을 가진다[1].

정리 1. $v_l > 0$ 일 때, 추종자 로봇의 v 와 w 가 식(6)의 제어입력을 가질 때 $\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{e}(t) \rightarrow 0$ 을 만족한다.

증명. 다음과 같은 리아프노프(Lyapunov) 함수를 취하도록 한다.

$$V = \frac{1}{2} (x_e^2 + y_e^2) + \frac{1 - \cos \theta_e}{K_2} \quad (9)$$

여기서 $V \geq 0$ 을 만족하고 $\dot{V}$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= x_e \dot{x}_e + y_e \dot{y}_e + \frac{\sin \theta_e}{K_2} \dot{\theta}_e \\ &= -x_e v + x_e v_f \cos \theta_e - x_e w_l \left\{ L_d + K_{Ld} \left(\frac{1}{P_{FO}} - \frac{1}{P_f} \right)^2 \operatorname{sgn}(\theta_o - \frac{\pi}{2}) \right\} \sin \left\{ \left[\psi_d - K_{\psi d} \left(\frac{1}{P_{FO}} - \frac{1}{P_f} \right)^2 \operatorname{sgn}(\psi_d - \pi) \right] + \theta_e \right\} \\ &\quad + y_e v_f \sin \theta_e + y_e w_l \left\{ L_d + K_{Ld} \left(\frac{1}{P_{FO}} - \frac{1}{P_f} \right)^2 \operatorname{sgn}(\theta_o - \frac{\pi}{2}) \right\} \cos \left\{ \left[\psi_d - K_{\psi d} \left(\frac{1}{P_{FO}} - \frac{1}{P_f} \right)^2 \operatorname{sgn}(\psi_d - \pi) \right] + \theta_e \right\} \\ &\quad + \frac{\sin \theta_e}{K_e} (w_l - w) \end{aligned} \quad (10)$$

식(10)에 설계한 제어기 식(6)과 (7)을 적용하면 식(11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -K_1 x_e^2 - \frac{K_3}{K_2} v_f \sin^2 \theta_e - \gamma_w \frac{\sin \theta_e}{K_2} \\ &\quad + y_e w_l \left\{ L_d + K_{Ld} \left(\frac{1}{P_{FO}} - \frac{1}{P_f} \right)^2 \operatorname{sgn}(\theta_o - \frac{\pi}{2}) \right\} \cos \left\{ \left[\psi_d - K_{\psi d} \left(\frac{1}{P_{FO}} - \frac{1}{P_f} \right)^2 \operatorname{sgn}(\psi_d - \pi) \right] + \theta_e \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

식(11)을 다시 정리하면 식(12)와 같이 나타낼 수 있다 [10].

$$\dot{V} \leq - \left(K_1 x_e^2 + \frac{K_3}{K_2} v_f \sin^2 \theta_e \right) + \left\{ |y_e| w_l \left\{ L_d + K_{Ld} \left(\frac{1}{P_{FO}} - \frac{1}{P_f} \right)^2 \operatorname{sgn}(\theta_o - \frac{\pi}{2}) \right\} + \gamma_w \frac{1}{K_2} \right\} \quad (12)$$

식(12)에 식(8)을 적용하면 $\dot{V} \leq 0$ 되면서 $\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{e}(t) \rightarrow 0$ 이 됨을 만족한다.

4. 시뮬레이션 결과

R모양의 궤적패턴을 가지고 추종자 로봇의 장애물 회피에 관한 성능을 확인한다[1]. 표 1은 Pioneer3-DX 이동로봇의 물리적 요소 값이다.

표 1 Pioneer3-DX 이동로봇의 물리적 요소 값

Table 1 The practical physical parameters of Pioneer3-DX mobile robot

물리적 요소	약호	값
질량	m	9 Kg
관성 모멘트	I	0.2278 kg.m ²
바퀴 반지름	r	0.0925 m
로봇 폭	$2W$	0.38 m
무계중심과 휠 축 중심 사이의 거리	d	0.0505 m

표 2는 추종자 로봇의 제어기에 적용한 제어 이득 값과 장애물 회피 이득 값이다. 제어 이득 값은 이동물체 추적에 위한 이동로봇의 대형제어 논문에서의 제어 이득 값을 적용하였다. 여기서 제어 이득 값이 크거나 작은 경우 진동이 발생하고 리더의 속도에 추종하는 시간이 길어지면서 대형을 유지하기 위해 걸리는 시간이 길어지기 때문에 대형 유지를 위해 표 2와 같이 값을 설정하였다[1]. 장애물 회피 이득 값은 장애물을 로봇이 장애물을 감지할 수 있는 범위 (P_f)가 0.4[m]와 이외에 로봇의 속도, 센서측정시간 등을 고려해서 최소한의 거리로 장애물을 회피하기 위한 값을 설정하였다.

표 2 제어 이득 값과 장애물 회피 이득 값

Table 2 Controller gains and Obstacle avoidance gains

	1번 추종자 로봇	2번 추종자 로봇
K_1	1.2	2
K_2	10	12
K_3	8	10
K_{Ld}	0.84	0.82
$K_{\psi d}$	0.08	0.08

그림 5 추종자 로봇의 대형제어와 장애물 회피

Fig. 5 Formation control and obstacle avoidance of follower robot

그림 5는 R모양의 궤적으로 움직이는 리더 로봇과 추종자 로봇의 대형제어 및 장애물 회피 성능을 보여준다. 리더 로봇과 각각의 1번과 2번 추종자 로봇의 거리(L_d)는 1[m], 1[m] 방향(ψ_d)은 120°, 240°이다. 리더 로봇은 직선운동(50초)→급격한 90°방향전환→직선운동(20초)→우회전운동(25초)→좌회전운동(25초)→직선운동으로 움직이며, 이때 리더 로봇의 직선속도는 0.5[m/s], 우회전 속도는 0.12[rad/s], 그리고 좌회전 속도는 0.1[rad/s]로 설정했다. 추종자 로봇은 로봇의 위치와 장애물의 위치에 따라 장애물을 최적 거리로 회피한다.

또한 그림 5에서는 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 때이다. 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.

표 3은 장애물 회피 이득 값이며, 그림 6은 장애물 회피 이득 값에 따른 1번 추종자 로봇의 장애물 회피를 보여준다.

표 3 장애물 회피 이득 값

Table 3 Obstacle avoidance gains

	K_{Ld}	$K_{\psi d}$
Gain 1	1.0	0.10
Gain 2	0.8	0.08
Gain 3	0.6	0.06
Gain 4	0.4	0.04

그림 6 이득 값에 따른 1번 추종자 로봇의 장애물 회피

Fig. 6 Obstacle avoidance gains based on obstacle avoidance of follower robot 1

그림 6은 직선운동(B구간), 급격한 90°방향전환(C구간), 우회전운동(E구간), 좌회전운동(F구간) 4가지 경우에 대해 장애물 회피 이득 값에 따른 추종자 로봇의 장애물 회피를 보여준다. 검은색 원은 장애물을 나타내고 검은색 원 밖의 원은 최소안전거리(정지거리)를 나타낸다. 장애물 회피 시에 로봇의 최소안전거리를 고려해서 장애물을 회피한다.

$$d_l = d_b + \nu(t_s + t_c + t_a) \quad (13)$$

식(13)은 최소안전거리에 대한 식이다[11]. 여기서 d_b 는 로봇의 여유거리이고, ν 는 로봇의 속도이다. t_s 는 센서 측정 시간, t_c 는 연산 시간, 그리고 t_a 는 구동 대기 시간이다. 이때 여유거리와 연산 시간 그리고 대기 시간이 없다고 가정하고, 로봇의 속도는 0.5[m/s], 센서 측정 시간(Pioneer3-DX 로봇의 초음파 주기=25Hz)은 0.3초라고 할 때 로봇의 정지 거리는 0.15[m]가 된다. 따라서 로봇은 장애물과 최소한 0.15[m] 이상의 거리를 뒤편하기 때문에 장애물 회피 이득 값 K_{ld} 와 $K_{\psi d}$ 는 0.8 이상의 값을 가져야한다. 장애물 회피 이득 값이 클수록 장애물과의 충돌 위험성은 감소하지만 필요 이상으로 장애물과 멀리 떨어져서 회피를 하고, 장애물 회피를 한 이후에 리더 로봇과 대형을 유지하기 위한 위치로 이동하는 시간이 길어진다. 따라서 이동로봇과 장애물과의 충돌 위험성을 고려해서 이득 값을 설정해야 한다.

5. 결 론

본 논문에서는 물체 추적과 대형을 유지하기 위한 리더-추종자 대형제어 제어기에서 추종자 로봇의 장애물 회피가 고려된 제어기로 설계하였다. 이때 이동로봇의 물리적 요소도 고려한 동역학적 모델을 사용하였으며, 리아프노프 안정성이 고려된 백스테핑 방법을 이용해서 설계한 제어기를 가지고 시뮬레이션 결과를 통해 제어 가능성을 확인하였다. 시뮬레이션 결과에서는 리더 로봇이 직선운동, 급격한 90°방향전환, 우회전/좌회전 운동 등 여러 패턴의 경우로 이동해도 추종자 로봇은 장애물이 감지되면 회피하고 다시 리더 로봇과 대형을 유지하는 것을 보였다. 이때 리더 로봇과 추종자 로봇의 위치, 추종자 로봇과 장애물 위치 그리고 장애물의 인지에 따라 거리(L_d)와 방향각(ψ_d)을 이용해서 장애물을 회피하였다. 또한 로봇과 장애물의 최소 안전거리 0.15[m]를 고려해서 장애물 회피 이득 값을 설정하였고 여기서 이득 값이 크면 장애물과의 충돌 위험성은 감소하지만 필요 이상으로 장애물과 멀리 떨어져서 회피하며, 대형을 유지하기 위한 시간이 길어지는 것을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. 2011-0016212)로서, 관계부처에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 오영석, 이충호, 박종훈, 김진환, 허옥열, “이동물체 추적을 위한 이동로봇의 대형제어,” 대한전기학회논문지 제60권 제04호, pp. 856-861, 2011년 04월
- [2] O. Khatib, “Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots,” Int. J. Robotics Res., vol. 5, no. 1, pp 90-98, 1986.
- [3] J. Borenstein and Y. Koren, “Real-time Obstacle Avoidance for Fast Mobile Robots in Cluttered Environment,” In Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, Vol CH-2876, pp 572-577, 1990.
- [4] J. Borenstein and Y. Koren, “The Vector Field Histogram Fast Obstacle Avoidance for Mobile Robots,” IEEE Transaction on Robotics and Automation, Vol. 7, No. 3, pp 278-288, 1991
- [5] V. Lumelsky and T. Skewis, “Incorporating range sensing in the robot navigation function,” IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics, vol. 20, pp. 1058 - 1068, 1990.
- [6] Thongchai, S. and Kawamura, K., “Application of fuzzy control to a sonar-based obstacle avoidance mobile robot,” IEEE Int. Conf. Control Applications, pp. 425-430, 2000.
- [7] 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.
- [8] LENG-FENG LEE, “DECENTRALIZED MOTION PLANNING WITHIN AN ARTIFICIAL POTENTIAL FRAMEWORK (APF) FOR COOPERATIVE PAYLOAD TRANSPORT BY MULTI-ROBOT COLLECTIVES,” MASTER OF SCIENCE, 2004
- [9] 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.
- [10] J.-J. E. Slotine and W. Li, Applied Nonlinear Control. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1991
- [11] M. Sadou, V. Polotski, and P. Cohen, “Occlusions in obstacle detection for safe navigation,” in Proc. IEEE Intell. Veh. Symp., pp. 716 - 721, 2004

저 자 소 개

오 영 석 (吳 泳 錫)

1984년 3월 4일 생. 2010년 두원공과대학 정보통신공학과 학사졸업. 2010년~현재 인하대학교 로봇공학전공 석사과정 재학 중.

Tel : 032-860-7394

Fax : 032-864-6442

E-mail : o_dudtjr@naver.com

박 종 훈 (朴 鐘 勳)

1978년 9월 15일 생. 2001년 순천대학교
전기공학과 학사졸업. 2004년 인하대학원
전기공학과 석사졸업. 2011년~현재 인하
대학원 로봇공학전공 박사과정 재학 중.

Tel : 032-860-7394

Fax : 032-864-6442

E-mail : patch_han1@naver.com

김 진 환 (金 眞 煥)

1967년 5월 15일 생. 1991년 인하대학교
전기공학과 학사졸업. 1993년 동 대학원
전기공학과 석사졸업. 1996년 동 대학원
전기공학과 박사졸업. 1997~2001년 두원
공과대학 근무. 2001~현재 인하공업전문
대학 전기정보과 교수.

Tel : 032-870-2193

Fax : 032-870-2507

E-mail : jhkim@inhatec.ac.kr

허 욱 열 (許 旭 烈)

1951년 12월 13일 생. 1974년 서울대학교
전기공학과 학사졸업. 1978년 동 대학원
전기공학과 석사졸업. 1982년 동 대학원
전기공학과 박사졸업. 1985~1986년 (美)
일리노이대학 전기 및 컴퓨터 공학과 방
문교수. 2004년 1월~2004년 12월 대한전

기학회 부회장 겸 정보 및 제어부문회 회장. 2007년 1월
~2009년 12월 제어로봇시스템학회 부회장. 2008년 1월~
2008년 12월 대한전기학회 부회장. 1980년~현재 인하대
학교 전기공학부 교수.

Tel : 032-860-7394

Fax : 032-864-6442

E-mail : uyhuh@inha.ac.kr