# 포텐셜 필드와 유동적인 대형제어를 이용한 선도-추종자 로봇의 장애물회피

**박재형***, 허욱열*
인하대학교*

# Obstacle Avoidance of Leader-Follower Robots Based on Potential Field and Flexible Formation

Jae-Hyung Park*, Uk-Youl Huh*
Inha University*

**Abstract** - 본 논문에서는 선도-추종자 로봇의 대형을 유동적으로 변형하며 장애물을 효과적으로 회피하는 방법을 제안한다. 로봇이 장애물을 회피함에 있어서 고정된 대형으로 이동하는데 어려운 문제가 발생한다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기위해 장애물 회피시 선도로봇의 방향각과 위치, 선도로봇과 추종자 로봇의 거리를 이용하여 대형을 유동적으로 변형하여 장애물과의 충돌을 회피하는 방법을 사용하고 로봇의 경로계획을 위하여 포텐셜 필드 알고리즘을 사용하였다. 본 논문에서는 Matlab을 이용한 모의실험을 통하여 제안된 방법의 성능을 확인하였다.

## 1. 서 론

로봇산업이 발전하면서 자율 이동 로봇에 대한 관심과 연구가 지속해서 증가하고 있다. 이동로봇은 상황과 지형에 따라 동일한 목적을 수행하기 위해 일정한 대형을 갖추어 이동해야 하는 경우와 대형을 변형해가며 이동해야하는 경우가 있다. 단일 로봇으로 작업 또는 임무를 수행하기 힘들거나 더 나은 효율성을 필요로 하는 경우 군집로봇이 필요하며, 따라서 군집로봇을 제어하는 연구가 진행되고 있다. 군집로봇의 대형을 제어하는 방식은 가상구조 접근방법(Virtual structure approach), 행위기반 접근방법(Behavior based approach), 선도-추종자 접근방법(Leader-Follower)으로 분류된다[1]. 가상구조 방법은 군집로봇을 하나의 로봇으로 규정하고 제어하는 방법으로 Lyapunov 이론을 이용하여 안정성을 증명하였지만 대형변형이 어려운 단점을 가지고 있다. 행위기반 접근방법은 상황에 따른 행동을 취할 수 있도록 로봇을 제어하는 방법으로 다수의 임무를 수행하기 좋으나 수학적으로 표현하기 어려운 단점을 가진다. 선도-추종자 접근방법은 하나의 로봇을 선도자(Leader)로 지정하고 나머지 로봇을 추종자(Follower)로 지정하여 선도자를 추종하며 이동하는 제어방법 으로 분산제어가 가능한 장점이 있다.

본 논문에서는 선도-추종자 접근방법 중 선도자의 방향각과 선도자와 추종자 사이의 거리를 이용하여 군집형태를 갖추어 임무를 수행하는 $l-\theta$방법(Separation - bearing control)을 사용한다. 먼저 선도로봇이 포텐셜 필드 알고리즘을 사용하여 목표점까지의 경로를 계획하고 추종자 로봇들은 선도로봇을 따라 대형을 형성하고 선도로봇을 이동 목표점으로 인식하고 장애물을 피하여 선도로봇을 추종한다. 추종자 로봇들은 대형을 따라 이동하는 중 골목길과 같이 기존의 대형을 유지하며 이동할 수 없는 지형이나 장애물을 감지할 시 대형을 유동적으로 변형하여 선도로봇을 따라 장애물을 회피하고 모의실험을 통해 제안된 방법의 성능을 확인하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 포텐셜 필드 알고리즘

본 논문에서는 선도-추종자 로봇의 경로계획을 위해 포텐셜 필드 알고리즘을 사용한다[2-3][5]. 포텐셜 필드 알고리즘은 목표점과 이동로봇 사이의 끌어당기는 힘인 인력(Attractive force)과 장애물과 이동로봇 사이의 충돌을 피하기 위한 척력(Repulsive force)로 표현된다. 이동로봇과 장애물의 위치와 속도, 가속도는 측정된다고 가정한다.

인력장 함수(Attractive potential field)는 목표점과 이동로봇의 상대위치와 속도, 가속도를 이용하며 아래 식 과 같이 표현할 수 있다.

$$F_{att}(p,v,a) = F_{att1}(p) + F_{att2}(v) + F_{att3}(a) \quad (1)$$

$$F_{att1}(p) \equiv m\xi_p \| p_{tar}(t) - p_{rob}(t) \|^{m-1} n_{RT} \quad (2)$$

$$F_{att2}(v) = n\xi_v \| v_{tar}(t) - v_{rob}(t) \|^{n-1} n_{VRT} \quad (3)$$

$$F_{att3}(a) = k\xi_a \| a_{tar}(t) - a_{rob}(t) \|^{k-1} n_{ART} \quad (4)$$

식(1)은 인력장 함수를 나타내고 식(2,3,4)는 각각 로봇과 목표점사이의 상대위치,속도, 가속도에 대한 인력장 함수의 요소를 나타낸다. $\xi_p$,$\xi_v$, $\xi_a$는 위치와 속도, 가속도에 대한 인력장 상수이며, $m$,$n$,$k$는 인력장의 모양을 결정하는 상수이다. $\| p_{tar}(t) - p_{rob}(t) \|$ 와 $\| v_{tar}(t) - v_{rob}(t) \|$, $\| a_{tar}(t) - a_{rob}(t) \|$는 목표점과 로봇사이의 거리와 상대속도, 가속도를 나타내며 $n_{RT}$, $n_{VRT}$,$n_{ART}$는 이동로봇과 목표지점사이의 단위벡터(unit vector)이다.

장애물과 이동로봇사이의 척력장 함수(Repulsive potential field)는 아래 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{rep} = F_{repp} + F_{repv} + F_{repa} \quad (5)$$

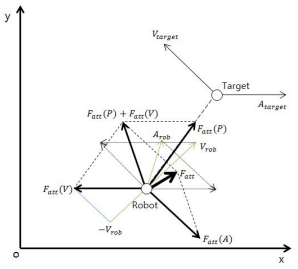
$$F_{repp} = \frac{-\eta_1 e_{ro}}{(\| p_{obs}(t) - p_{rob}(t) \| - R_s)^2} + \frac{\eta_2 v_{ro\perp} e_{ro\perp}}{\| p_{obs}(t) - p_{rob}(t) \|} + \frac{\eta_3 a_{ro\perp} e_{ro\perp}}{\| p_{obs}(t) - p_{rob}(t) \|} \quad (6)$$

$$F_{repv} = -\eta_2 e_{ro} \quad (7)$$

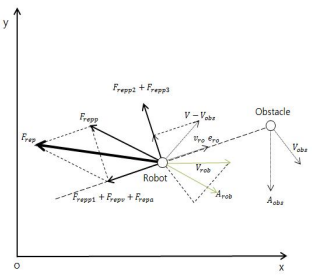
$$F_{repa} = -\eta_3 e_{ro} \quad (8)$$

$$F_{rep} = \begin{cases} 0 & , \text{if}(\| p_{obs}(t) - p_{rob}(t) \| - R_s) \geq R_0 \\ & \text{or } v_{ro} \leq 0 \\ F_{repp} + F_{repv} & , \text{if}(\| p_{obs}(t) - p_{rob}(t) \| - R_s) < R_0 \\ & \text{and } v_{ro} > 0 \text{ and } a_{ro} \leq 0 \\ F_{repp} + F_{repv} + F_{repa} & , \text{if}(\| p_{obs}(t) - p_{rob}(t) \| - R_s) < R_0 \\ & \text{and } v_{ro} > 0 \text{ and } a_{ro} > 0 \\ not\ defined & , \text{if}(\| p_{obs}(t) - p_{rob}(t) \|) < R_s \\ & \text{and } v_{ro} < 0 \end{cases} \quad (9)$$

식(5)는 척력장 함수를 나타내며 식(6,7,8)은 위치,속도,가속도에 대한 척력장 함수 요소를 나타낸다. $\eta_1$,$\eta_2$,$\eta_3$는 상수로써 척력장 가중치를 나타내고 $R_s$는 이동로봇이 최대로 감속할 때의 정지거리,$R_0$는 장애물의 영향범위를 나타낸다. 그림[1,2]는 인력장 함수와 척력장 함수를 나타낸 그림이다.



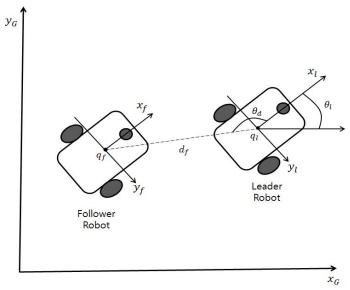

<그림 1> 인력장 함수




<그림 2> 척력장 함수

### 2.2 선도-추종자 로봇의 대형

본 논문에서는 선도-추종자 로봇이 대형을 변형하며 장애물을 회피하기위한 방법을 제안한다. 추종자 로봇은 선도로봇을 움직이는 목표점으로 간주하고 선도-추종자 접근방법에서 $l-\theta$방법을 사용하여 절대좌표에서 선도로봇과 일정한 거리와 각도를 유지할 수 있도록 로봇을 제어한다.




<그림 3> 선도-추종자 로봇의 대형

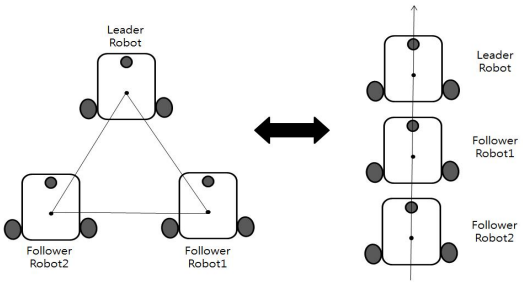
여기서 $d_f$는 선도로봇과 추종자 로봇사이의 거리이고 $\theta_l$은 선도로봇의 방향각이며 추종자 로봇의 위치는 다음과 같이 정의할 수 있다..

$$q_{follower} = \begin{bmatrix} x_f \\ y_f \\ \theta_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_l + d_f \cos(\theta_d + \theta_l) \\ y_l + d_f \sin(\theta_d + \theta_l) \\ \theta_l \end{bmatrix} \quad (10)$$

식(10)에서 $q_l = [x_l \ y_l \ \theta_l]^T$는 선도로봇의 위치이고 $q_f = [x_f \ y_f \ \theta_f]^T$는 추종자 로봇의 위치이다.

$$\theta_d^* = \begin{cases} \theta_d = \theta_d + K_P(\dfrac{1}{\| p_{obs}(t) - p_{rob}(t) \|} - \dfrac{1}{R_0})^2 sgn(\theta_o - \dfrac{\pi}{2}) \\ \qquad \text{if, } \| p_{obs}(t) - p_{rob}(t) \| \leq R_0 \\ \theta_d = \theta_d \\ \qquad \text{if, } \| p_{obs}(t) - p_{rob}(t) \| > R_0 \end{cases} \quad (11)$$

식(11)은 로봇이 이동 중 장애물을 감지하였을 경우 변화되는 방향각 $\theta_d$의 값을 나타낸 것이다[4]. $K_p$는 장애물 회피에 관한 상수로 로봇과 장애물 사이의 거리와 장애물 감지범위거리($R_0$)에 따라 설정한다. 로봇이 이동 중 기존의 대형을 유지하며 지나갈 수 없는 지형 또는 장애물을 감지할 경우 추종자 로봇은 장애물 회피와 로봇간의 충돌 방지를 위해 대형을 [그림 4]와 같이 변형하여 이동한다.




<그림 4> 장애물 감지에 따른 로봇의 대형변경

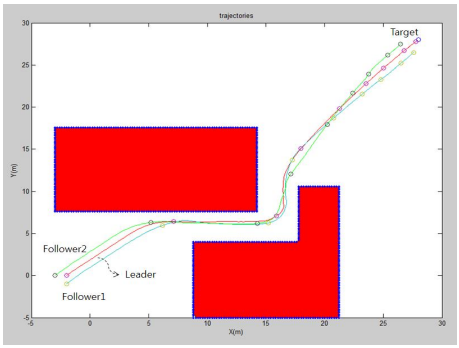
식(11)은 로봇이 대형을 변형할 시 추종자 로봇의 위치를 나타낸 식이다. 추종자2 로봇은 대형 변형시 추종자1 로봇을 선도로봇으로 간주하고 추종을 시작한다.

$$q_{follower1} = \begin{bmatrix} x_{f1} \\ y_{f1} \\ \theta_{f1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_l + d_f \cos(\theta_d^* + \theta_l) \\ y_l + d_f \sin(\theta_d^* + \theta_l) \\ \theta_l \end{bmatrix}$$
$$q_{follower2} = \begin{bmatrix} x_{f2} \\ y_{f2} \\ \theta_{f2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{f1} + d_f \cos(\theta_d^* + \theta_l) \\ y_{f1} + d_f \sin(\theta_d^* + \theta_l) \\ \theta_l \end{bmatrix} \quad (11)$$

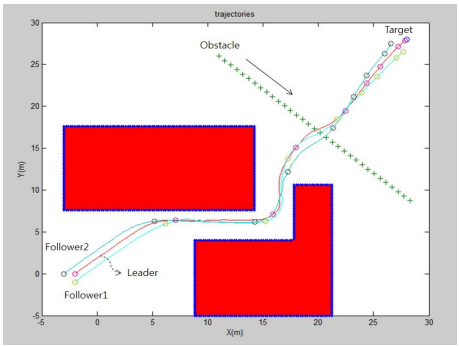
## 3. 모의실험 및 결과

본 논문에서 모의실험은 MATLAB을 이용하여 하였다. 모의실험은 정적인 장애물과 동적인 장애물을 두고 실시하였으며 선도로봇의 초기위치는(-2,0)이며 추종자 로봇들의 초기위치는 각각 (-2,-1),(-3,0)이다. 선도로봇의 목표점의 위치는 (28,28)이고 이동로봇의 장애물 감지거리는 3m이고 초기속도는 (0.1 0.1) 장애물의 초기 위치는(11 26) 속도는(0.054 -0.054)이다.[그림 5]는 모의실험 결과를 그림으로 나타내고 있다. 로봇이 장애물 감지거리 밖에 있을 경우 삼각 대형을 유지하며 목표점을 향해 이동하고 장애물 감지거리 이내로 장애물이 들어온 경우 추종자 로봇은 대형을 변형하여 이동한다. 이 때 추종자1 은 추종자2의 목표점으로 변경되며 추종자2는 추종자1의 방향각과 추종자1과 추종자2사이의 일정거리를 유지하며 이동하게 되며 이동로봇이 장애물감지 거리를 다시 벗어난 경우 삼각대형으로 변형하는 모습을 볼 수 있다. 또한 이동로봇간의 충돌을 방지하기 위해 각 로봇간 거리가 0.5m이내일 경우 척력장 함수를 발생시켜 충돌을 방지하였다.

.




(a)




(b)

<그림 5> 선도-추종자 로봇의 대형제어 결과
(a : 고정장애물, b: 이동장애물)

## 4. 결 론

본 논문에서는 포텐셜 필드를 이용하여 이동로봇의 경로를 계획하고 선도-추종자 로봇의 대형을 제어하며 장애물을 회피하는 방법을 제안하였다. 경로계획시 로봇과 목표점, 장애물간의 위치, 속도, 가속도에 관련된 인력장과 척력장 함수를 만들었고, 고정장애물과 동적장애물의 회피방법을 나타내었다. 또한 선도로봇의 방향각과 선도로봇과 추종자로봇간의 거리를 이용하여 대형을 제어하였으며, 장애물 감지시 추종자 로봇의 대형을 변형함으로써 장애물을 회피하는 방법을 사용하였다. 이로써 상황에 알맞은 대형을 선택하여 군집로봇이 이동할 수 있는 가능성을 증명하였다.

## [참 고 문 헌]

[1] H.Takahashi, H.Nishi and K.Ohnish,"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] Yin, Lu, Yixin Yin, and Cheng Jian Lin. "A new potential field method for mobile robot path planning in the dynamic environments." Asian Journal of Control 214-225, 11.Feb(2009)

[3] Ge, Shuzhi Sam, and Yan Juan Cui. "New potential functions for mobile robot path planning." IEEE Transactions on robotics and automation 615-620, 16.Oct (2000)

[4] Lee, Leng-Feng. Decentralized motion planning within an artificial potential framework (APF) for cooperative payload transport by multi-robot collectives. Diss. State University of New York at Buffalo, 2004.

[5] 우경식, 박종훈, 허욱열, “퍼지 포텐셜 필드를 이용한 이동로봇의 동적 경로 계획”, 2012,2, 291-297, 전기학회논문지 제61권 제2호