

## 지역 좌표에서 랭크기반의 다개체 로봇 포메이션 제어

### Rank-based Formation for Multiple Robots in a Local Coordinate System

정하민\* · 김동현\*\*†

Hahmin Jung, and Dong Hun Kim<sup>†</sup>

\*경남대학교 첨단공학과, \*\*경남대학교 전기공학과

<sup>†</sup> Department of Electrical Engineering, Kyungnam University

#### 요 약

본 논문은 다개체 로봇을 위한 랭크 기반의 포메이션을 다룬다. 여기서 제안되는 방법은 이웃한 두 대 로봇의 지역 위치를 이용한다. 전통적인 다개체 로봇의 포메이션을 위한 연구는 모든 로봇의 위치를 파악하기 위해 로봇과 중앙 컴퓨터사이의 통신을 필요로 한다. 그리고 전역좌표에서 모든 로봇의 위치를 참조하여 포메이션 형성 및 로봇 경로가 만들어 진다. 기존의 연구들과는 다르게 제안된 포메이션 형성 방법은 지역좌표에서 이웃한 두 대의 로봇 위치를 사용 한다. 따라서 제안된 방법은 여러 모양의 포메이션을 형성할 때 모든 로봇의 협력 관계는 필요하지 않고 주변의 이웃 로봇 위치를 개별적으로 이용한다. 시뮬레이션 결과는 제안된 방법이 효과적으로 포메이션을 형성할 수 있음을 보여준다.

**키워드** : 포메이션, 다개체 로봇, 지역좌표 시스템, 포텐셜 함수, 협력

#### Abstract

This paper presents a rank-based formation for multiple agents based on potential functions, where the proposed method uses the relative position of two neighboring agents. The conventional formation scheme of multiple systems requires communication between agents and a central computer to get the positions of all multiple agents. In the study, differently from previous studies, the formation scheme uses the relative position of two neighboring agents in a local coordinate system. In addition, it introduces a singular agent association that considers only the relative position between an agent and its neighboring agents, instead of multiple associations among all information about all agents. Furthermore, the proposed framework explores the benefits of different formation types. Extensive simulation results show that the proposed approach verifies the viability and effectiveness of the proposed formation.

**Key Words** : Formation, Swarm Agents, Local Coordinate System, Potential Functions, Association

## 1. 서 론

포메이션은 다개체 로봇의 협력과 미션수행에 도움을 준다. 포메이션은 한 대의 로봇이 미션을 수행하는 것 보다 믿을 수 있고 신속하게 일을 처리 가능하게 해

준다[1]. 게다가 다개체 로봇 사이의 포메이션은 군집형성과 이동에 필요하고 로봇의 손실을 예방한다. 다개체 로봇 포메이션 연구는 크게 세가지로 분류 할 수 있다. (a) 다양한 센서를 활용한 행동 기반 접근법은 장애물이 놓여 있을지 모르는 실시간 환경에 적합하다[2]. (b) 가상 구조물 접근법은 포메이션을 하나의 몸처럼 간주한다[3]. 이 방법은 포메이션 모양이 미리 정의 되었을 때 로봇의 이동이 용이하지만 유연성과 적응성이 부족하다. (c) 리더 추종 접근법은 추종자가 리더로 부터의 속도와 위치를 받는다[4]. 이 방법으로 제안된 통신 환경에서 칼만(kalman) 필터는 이웃 로봇의 위치를 얻기 위해 잘 사용된다[5]. 그리고 2차 슬라이딩 모드(second order sliding mode)는 리더 로봇의 절대적 속도 측정을 하지 않기 위해 사용된다[6].

다개체 로봇을 위한 리더 추종 접근법은 지난 몇 년간 자율 이동 로봇 분야에서 많은 도전적인 과제를 수행해 왔다[7-9]. 최근 몇몇 연구들은 포메이션 형성과 무리 이동을 위해 포텐셜 필드를 사용한다[10-12]. 그

Received: Sep. 15, 2014

Revised : Feb. 15, 2015

Accepted: Feb. 17, 2015

† Corresponding author(dhkim@kyungnam.ac.kr)

본 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2013R1A1A2005206).

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

리고 고정된 로봇 번호를 사용하는 고리형 포메이션 제어가 연구 되었다[7,8]. 또한 낮은 레벨의 피드백 선형 제어 알고리즘은 로봇의 이동을 위한 행동 규합과 기초적인 행동을 개발하기 위해 사용되었다[9]. 여기서 분산 제어 방법은 전역 포텐셜 경로 계획을 위해 사용되고 포텐셜은 로봇마다 개별적으로 사용된다[10]. 하지만 이러한 방법은 고리형 포메이션 중 고정된 포메이션을 만들 때 모든 로봇의 위치를 알아야한다.

이전의 연구들 [13,14]에서 각각의 로봇은 성공적인 그룹 행동을 위해 모든 로봇의 위치를 사용한다. [15]에서는 포메이션의 모양은 미리 정의되고 모든 로봇은 전역좌표계에 위치한다. 그리고 로봇은 중앙 컴퓨터에 의해 제어된다. 게다가 논문 [13]과 [14]는 가장 연결가능성이 높은 로봇이나 가장 근처의 로봇을 추적하는 경로 계획을 고려한다. 협력 방법에 관계없이 이러한 방법들은 환경에 대해 공간 적응력이 부족하다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구는 랭크 기반의 리더 추종 방법을 사용한다. 리더 추종방법의 기본적인 문제점은 로봇의 고정된 랭크를 사용한다는 점이다. 고정된 랭크를 사용하면 포메이션 형성이 쉬워진다[16, 17]. 하지만 만약 높은 랭크 로봇이 로봇 주변에 없다면 포메이션을 만드는 것이 불가능 할 지도 모른다. 그러므로 유동적인 환경에서 확장성이 보장되지 않는다.

[18]에서 저자는 포메이션 제어와 관련된 [12, 16]과 다르게 포텐셜 필드와 리더 추종하는 방법을 다루었다. 하지만 포메이션이 절대적 좌표를 이용하는 전역 좌표에 국한되어 제한적이다. 본 논문은 두 대의 이웃 로봇의 상대적 위치를 이용하여 두 가지 포메이션에 적용한다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서는 포텐셜 함수에 대해 설명하고, 3장은 포메이션 제어를 위해 제안된 방법을 제시한다. 4장은 제안된 방법의 시뮬레이션을 다루고, 결론은 5장에서 제시된다.

## 2. 로봇 모델과 포텐셜 함수 디자인

본 연구에서 그룹 이동, 장애물 회피, 그리고 다개체 포메이션을 위해 포텐셜 함수는 사용된다. 인력 포텐셜  $U_i^a$ 는 이웃로봇과의 인력을 위해 필요하고 척력 포텐셜  $U_i^r$ 은 로봇 사이의 충돌을 회피하기 위해 필요하다.

포텐셜 함수는 다음과 같다.

$$U_i = U_a + U_r \tag{1}$$

$$= c_a \left(1 - e^{-\frac{\|\psi_i^a\|^2}{l_a^2}}\right) + \sum_{j=1} \left\{ c_r e^{-\frac{\|\psi_i^r\|^2}{l_r^2}} \right\} \quad (j \neq i)$$

여기서  $U_i^a = c_a \left(1 - e^{-\frac{\|\psi_i^a\|^2}{l_a^2}}\right)$ ,  $U_i^r = \sum_{j=1} \left\{ c_r e^{-\frac{\|\psi_i^r\|^2}{l_r^2}} \right\}$ ,

$\psi_i^a = P_i - P_j$ , 그리고  $\psi_i^r = P_i - P_j$  이다.  $c_a$ 와  $c_r$ 은 각각 인력과 척력 함수의 크기 상수 이다.  $l_a$ 와  $l_r$ 은 각각 인력과 척력 함수의 범위 상수 이다.  $P_i^f$ 는 로봇  $P_i$ 의 목표 위치이다.

$U_i$ 와 관련된 힘 함수는  $F_i$ 는 다음과 같다.

$$F_i = -\nabla U_i = -\frac{2c_a\psi_i^a}{l_a^2} e^{-\frac{\|\psi_i^a\|^2}{l_a^2}} + \sum_{j=1} \left\{ \frac{2c_r\psi_i^r}{l_r^2} e^{-\frac{\|\psi_i^r\|^2}{l_r^2}} \right\} \tag{2}$$

포메이션을 만들기 위해 로봇의 경로는 식 (2)를 사용해 다음처럼 생성할 수 있다.

$$\Delta x_i = \alpha F_i^x, \Delta y_i = \alpha F_i^y \tag{3}$$

여기서  $\alpha$ 는 힘의 크기 이고  $F_i(F_i^x, F_i^y)$ 는 포텐셜 함수에 의해 정의 된다.  $F_i^x$ 와  $F_i^y$ 는  $x$ 축  $y$ 축의 힘이다.

본 논문에서 로봇은  $P_i$ 로 정의하고 벡터  $(x_i, y_i, \phi_i)$ 로 구성된다. 여기서  $i$ 는 로봇의 인덱스(index)이고  $(x_i, y_i)$ 는 로봇 무게 중심이다. 그리고  $\phi_i$ 는 로봇의 회전각을 의미한다.  $P_i$ 는 현재의 위치에서 지면에 대한 미끄러짐이 없다고 가정하면, 로봇의 중심 위치  $(x_i, y_i)$ 에 대해 로봇 모델은 다음과 같다[19]. 서 다음과 같은 논홀로노믹(nonholonomic) 구속조건을 얻을 수 있다.

$$\dot{x}_i \sin \phi_i - \dot{y}_i \cos \phi_i = 0. \tag{4}$$

로봇의 선속도  $v_i$ 와 각속도  $\omega$ 는 다음과 같다.

$$v_i = \dot{x}_i \cos \phi_i + \dot{y}_i \sin \phi_i, \omega_i = \dot{\phi}_i \tag{5}$$

따라서 로봇 모델은 식 (4)와 (5)에 의해 다음과 같다.

$$\dot{P}_i = \begin{bmatrix} \dot{x}_i \\ \dot{y}_i \\ \dot{\phi}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi_i & 0 \\ \sin \phi_i & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_i \\ \omega_i \end{bmatrix}. \tag{6}$$

그림 1은 식 (1)과 (2)에서 구해지는 포텐셜과 힘의 크기를 보여준다. 여기서  $d_m$ 은 장애물과 로봇 사이의 충돌을 피하기 위한 최소 거리이다. 최소 거리  $d_m$ 은 상수  $l_r$ 에 의해 설정된다.

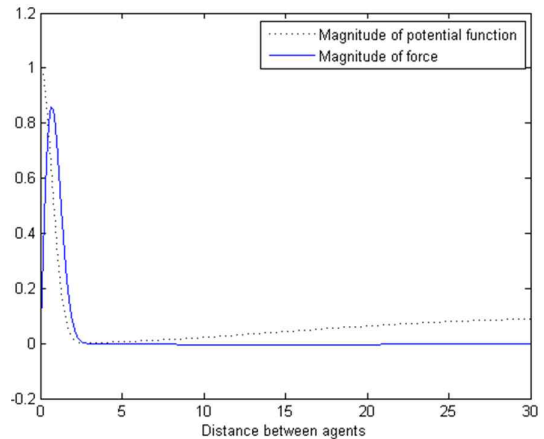


그림 1. 식 (1)과 (2)에 의한 포텐셜과 힘의 크기  
Fig. 1. Potential function and force for group formation using Equation (1) and (2)

### 3. 포메이션 형성을 위한 위치 선정

#### 3.1 로봇의 랭크

로봇의 초기 위치를 고려해 랭크를 정의한 후 상대좌표를 이용하여 포메이션 제어를 하기 위해 다음과 같이 로봇의 인식 범위 안에 다른 로봇을 집합으로 정의한다.  $S_i \equiv \{P_j | \|\psi_{ij}\| \leq l, j \neq i\}$ , 여기서  $l$ 은 로봇의 인식 범위이다. 로봇의 범위 밖의 로봇은 다음과 같은 집합으로 표현된다.  $I_i \equiv \{P_j | P_i \subset S_j, \overline{P_i P_j}, \text{ intersects with neighboring robots}\}$  따라서, 직진 시야안의 로봇 집합은  $N_i = S_i - I_i$ 이다. 각각의 로봇 랭크는 포메이션에서 로봇의 이상적인 위치를 정할 때 사용된다. 제안되는 방법에서 로봇 랭크는 프로그래밍 되는 것이 아니고 로봇의 위치에 의해 변한다. 각 로봇의 랭크  $r$ 은 그림 2와 같은 조건문에 의해 정해진다. 본 논문에서 로봇의 배치는 랭크 1을 기준으로 올림차순으로 위치한다. 그림 3은 랭크가 직선과 V포메이션에서 올림차순으로 위치하는 것을 보여준다.

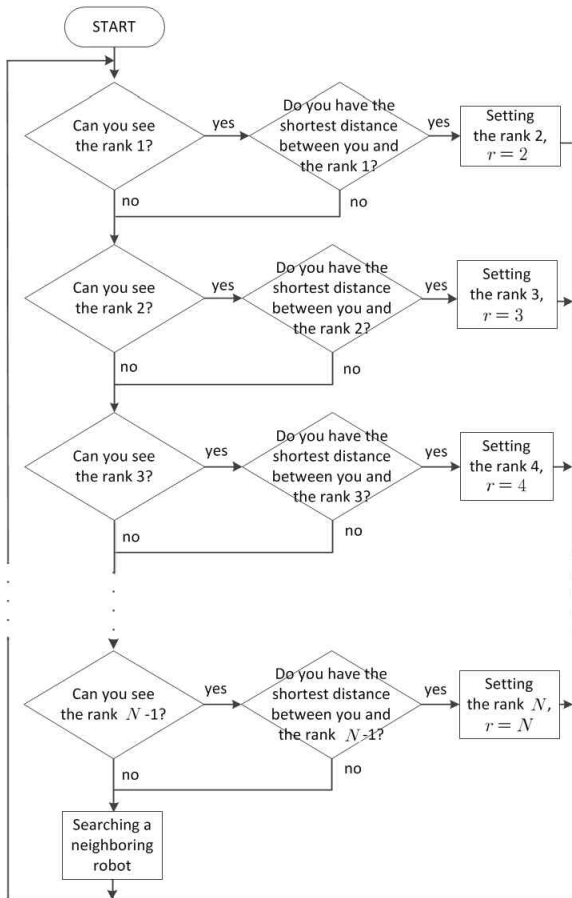


그림 2. 로봇 랭크 선정 방법  
Fig. 2. Selection method of robot rank

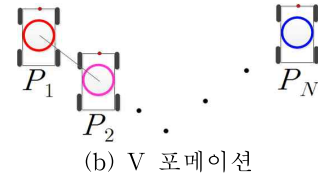
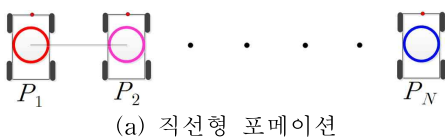


그림 3. 포메이션에서 로봇랭크의 배치  
Fig. 3. Robot positioning for line and V formation

#### 3.2 로봇의 위치 선정

$r=1$  경우 위치 선정: 랭크 1 로봇은 포메이션을 형성할 때 리더로 사용되고 포메이션의 기준이 된다. 식 (2)의  $P_r^f$ 는 랭크 번호에 의해  $P_r^f$ 로 표현 가능하고,  $P_1^f$ 는 랭크 1 로봇의 지역 목표점이 된다. 랭크 1 로봇은  $P_1^f$  위치의 인력에 의해 이동된다. 그리고 랭크 1로봇은 후 순위 랭크들의 길잡이 역할을 함으로 랭크 1로봇의 이동은 포메이션 전체의 이동에 관여한다. 따라서 로봇 그룹의 이동은 랭크 1 로봇에 의해서 결정된다.

$r=2$  경우 위치 선정: 최소한의 포메이션을 형성하려면 두 개의 꼭지점과 하나의 변이 필요하다. 여기서 두 개의 꼭지점은  $P_1$ 과  $P_2$ 이고 하나의 변은  $P_1$ 과  $P_2$ 에 의해 형성된다. 포메이션 모양의 방향은 그림4처럼  $P_2$ 의 위치에 의해 결정된다.  $P_2$ 의 포메이션 형성을 위한 지역 목표점  $P_r^f$ 는 다음 식에 의해 정해진다.

$$P_2^f = \begin{bmatrix} d^r \cos \theta_2^f \\ d^r \sin \theta_2^f \end{bmatrix} + P_1 \quad (7)$$

여기서  $d^r$ 은  $P_1$ 을 기준으로  $P_2^f$ 가 척력의 범위에서 벗어날 수 있는 거리이므로 최소 척력의 범위  $d_m$ 보다 크게 설정된다. 그리고  $\theta_2^f$ 는 포메이션 모양의 방향을 설정할 때 사용되고 그림 4처럼 포메이션 모양의 방향 변화에 영향을 준다.

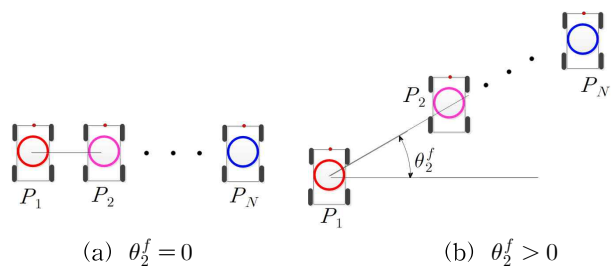


그림 4.  $P_2$ 에 의한 포메이션 모양의 방향 변화  
Fig. 4. Direction of changing of a formation shape by a position of  $P_2$

$r \geq 3$  경우 위치 선정:  $size(N_i) \geq 2$ 를 만족할 때, 로봇의 위치는 그림 5처럼 로봇  $P_3$ 에 대해 두 개의 후보 위치가 발생 할 수 있다. 두 개의 후보 위치는 다음처럼 구해진다.

$$\begin{aligned} P_r^{f1} &= M(-\theta_{r-n1}^f) \psi_{n1}^{n2} + P_{n1} \\ P_r^{f2} &= M(\theta_{r-n1}^f) \psi_{n1}^{n2} + P_{n1} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서  $P_r^{f1}$ 은 랭크의 포메이션 후보 위치 1번이고  $P_r^{f2}$ 는 랭크의 포메이션 후보 위치 2번이다.  $n1$ 과  $n2$ 는 랭크 번호이다. 그리고  $M(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\pi+\theta) & -\sin(\pi+\theta) \\ \sin(\pi+\theta) & \cos(\pi+\theta) \end{bmatrix}$ 이다.  $\theta_{r,n1}^f$ 는  $\overline{P_r P_{n1}}$ 와  $\overline{P_{n1} P_{n2}}$ 사이의 각도이다. 예를 들어  $\theta_{5,4}^f$ 는  $\overline{P_5 P_4}$ 와  $\overline{P_4 P_3}$ 사이의 각도를 의미한다. 포메이션을 만들기 위한  $\theta_{r,n1}^f$ 는 표1과 같다.

위치 선정시  $n1=r-1$ ,  $n2=r-2$ 로 찾을 수 있다. 예를 들어  $N=5$ 이고  $r=4$ 일 때  $n1=3$ ,  $n2=2$ 이다.

포메이션 형성을 위해 두 개의 후보 위치  $P_r^{f1}$ 과  $P_r^{f2}$  중 하나의 위치는 다음의 조건으로 선택된다.

$$P_r^f = \begin{cases} P_r^{f1}, & \|P_r - P_r^{f1}\| > \|P_r - P_r^{f2}\| \\ P_r^{f2}, & \|P_r - P_r^{f1}\| \leq \|P_r - P_r^{f2}\| \end{cases} \quad (9)$$

본 논문에서 제안되는 포메이션은 그림 6과 같다. 그림 6은 로봇 랭크의 배열과 어떤 모양의 포메이션을 형성하는지 보여준다.

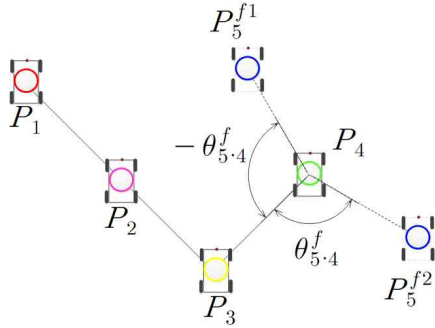
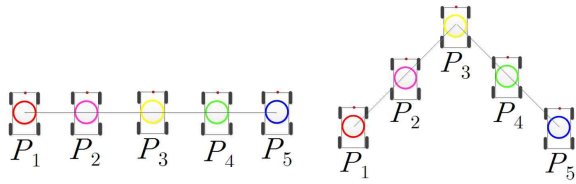


그림 5. 후보위치 설정  
Fig. 5. Setting candidate positions



(a) line type (b) V type  
그림 6. 포메이션 형성시 랭크의 순서  
Fig. 6. Rank order of the proposed method

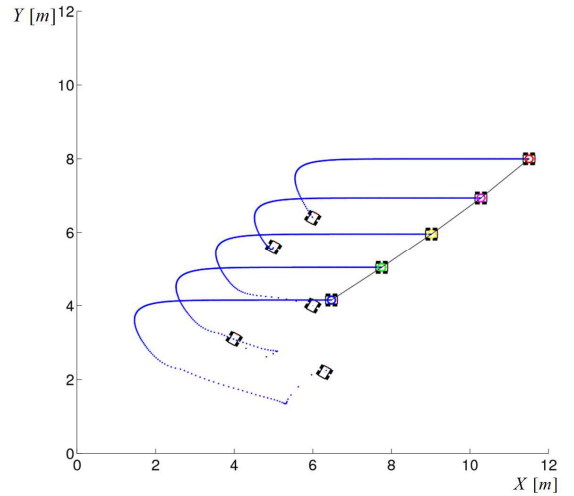
### 4. 시뮬레이션

시뮬레이션에서는 모바일 로봇 모델을 대상으로 직선, V 포메이션 형성을 위해 제안된 방법을 매트랩 프로그램으로 시뮬레이션 하였다. 그림 7은 제안된 방법으로 두 가지 포메이션을 형성 후 직선 이동한 궤적을 각각 보여준다. 시뮬레이션에 소요된 스텝은 7000이다. 작은 점은 로봇의 이동 궤적을 의미하고 점들의 간격은 20 스텝이다. 로봇간에 연결된 선은 후순위 로봇이 선순위 로봇의 상대적 위치를 이

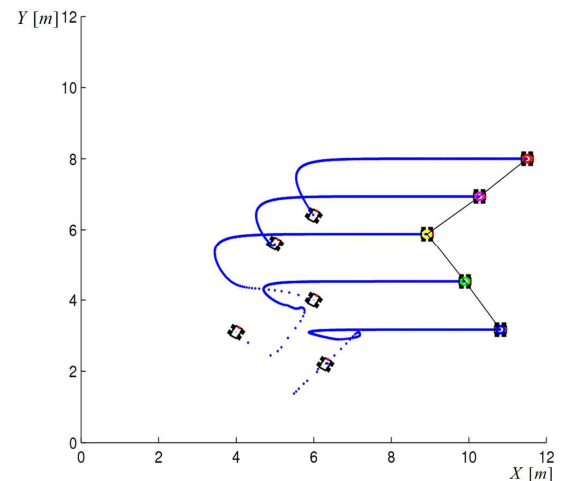
용한다는 의미이다. 로봇의 속도는 랭크의 순위가 낮을수록 더 빠르게 설정하였다. 로봇의 초기값은  $P_1 = (6, 6.4, 60)$ ,  $P_2 = (4, 3.1, 60)$ ,  $P_3 = (6.3, 2.2, 60)$ ,  $P_4 = (6, 4, 60)$ ,  $P_5 = (5, 5.6, 60)$ 이다. 포텐셜 파라미터는  $c_a = 1$ ,  $l_a = 16$ ,  $c_r = 0.05$ ,  $l_r = 0.5$ 의 값이 사용되었다. 그리고  $\theta_r^d$ 의 값은 표 1의 값이 사용되었다.

표 1. 포메이션 모양을 결정하는 각도 값  
Table 1. Angle value to decide formation shape

	$\theta_2^f$	$\theta_{3,2}^f$	$\theta_{4,3}^f$	$\theta_{5,4}^f$
line	$\frac{5\pi}{4}$	$\pi$	$\pi$	$\pi$
V	$\frac{5\pi}{4}$	$\pi$	$\frac{\pi}{2}$	$\pi$



(a) 직선형 포메이션 형성 후 궤적 이동



(b) V형 포메이션 형성후 궤적 이동  
그림 7. 포메이션 형성 후 궤적 이동

Fig. 7. Moving trajectory after making formation

제안된 방법을 평가하기 위해 다음과 같은 로봇간의

거리 변화 평균 식을 사용한다.

$$D_g = \frac{\sum_i^N \sum_{j=i}^N \|\psi_i^j\|}{N-1}, \quad (j \in N_i) \quad (10)$$

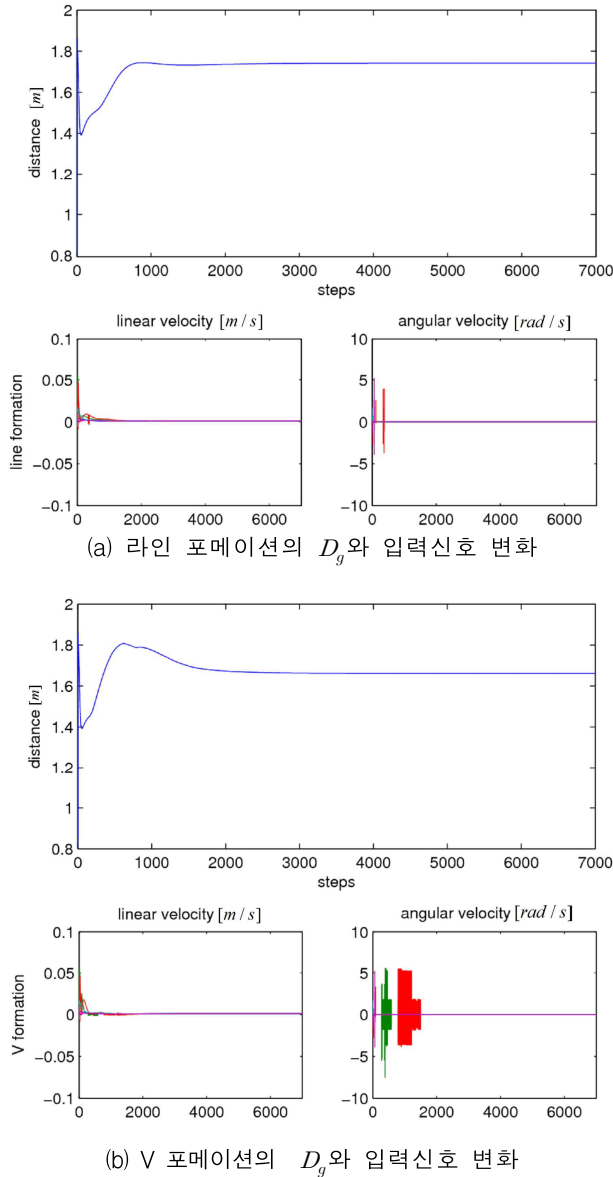


그림 8. 라인과 V 포메이션 형성시  $D_g$ 와 입력 신호 변화  
 Fig. 8. Changing  $D_g$  and input signals when making line and V formation

그림 8은 제안된 방법을 사용하여 직선과 V포메이션을 만들 때의  $D_g$ 와 로봇의 입력 값인 속도  $v$ 와 각속도  $w$  값의 변화에 대한 그래프를 보여준다. 그림 8에서  $D_g$ 의 그래프는 불규칙하게 변하는 구간과 일정하게 유지되는 구간으로 나누어진다. 포메이션이 형성되기 전인 1000스텝의 이전에는 로봇간에 거리가 일정하지 않아 큰 변화를 보여주고 포메이션이 형성된 후 로봇간의

평균거리가 일정하게 되어 포메이션이 유지됨을 보여준다. 그리고 입력 값은 로봇의 포메이션 형성 전 변화가 크게 나타나고 포메이션이 형성된 후 변화가 줄어들고 일정하게 유지되므로 포메이션 유지가 되는 것을 알 수 있다. 그림 8(a)의 약 30, 400스텝에서 채터링(chattering)을 보이는 것은 그림 7 (a)의 직선형 포메이션을 형성하기 위해 직선으로 가기 전까지 두 번의 큰 회전이 있을 때 생기는 경우이다. 그림 8 (b)의 경우 약 2000 스텝에 도달하기 전까지 채터링을 보이는 것은 그림 7 (b)의 V형 포메이션을 위해 직선으로 가기 전까지 즉, 약 2000 스텝에 도달하기 전까지 계속해서 회전이 있기 때문이다.

### 5. 결 론

본 논문은 유니사이클 로봇을 대상으로 랭크를 이용한 포텐셜 함수 기반의 포메이션 형성 방법을 제안하였다. 여기서 포텐셜 함수는 각 로봇마다 다른 목표점의 인력과 이동 중 로봇간에 충돌을 회피하는 척력으로 구성된다. 기존의 고정된 랭크를 이용한 포메이션 형성법은 프로그래밍 된 로봇이 주변에 없다면 포메이션을 만드는 것이 불가능 할 지도 모른다. 제안된 방법은 로봇의 포메이션 형성을 위해 로봇의 상대 좌표와 로봇의 유동적 랭크를 이용한다. 따라서, 환경에 유연성 있는 포메이션 형성이 가능하여 확장성이 보장된다. 제안된 방법의 시뮬레이션 결과는 직선, V 포메이션 형성에 적절하게 사용됨을 보여주었다. 포메이션 형성시 로봇간의 간격이 일정하게 유지되는 것으로 보아 제안된 방법은 포메이션 형성에 효과적으로 작용하는 것을 알 수 있다.

### References

- [1] D. H. Kim, H. O. Wang, and E. S. Kim, "Cascade Observer for Nonlinear Systems and Application to Nonlinear Output Feedback Control," *JSME International Journal Series C*, vol. 49, no. 2, pp. 463-472, 2006.
- [2] T. Balch and R.C. Arkin, "Behavior-based formation control for multirobot teams," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 14, no. 6, pp. 926-939, 1998.
- [3] K. H. Tan and M. A. Lewis, "Virtual structures for high-precision cooperative mobile robotic control," *International Conference on Intelligent Robots and Systems '96*, vol. 1, pp. 132-139, 1996.
- [4] Y. Wang, W. Yan, and W. Yan, "A leader-follower formation control strategy for AUVs based on line-of-sight guidance," *International Conference on Mechatronics and Automation*, pp. 4863-4867, 2009.
- [5] P. Vela, A. Betser, J. Malcolm, and A. Tannenbaum, "Vision-Based Range Regulation of a Leader-Follower Formation," *IEEE Transactions*

- on *Control Systems Technology*, vol. 17. no. 2, pp. 442-448, 2009.
- [6] M. Defoort, T. Floquet, A. Kokosy, and W. Perruquetti, "Sliding-Mode Formation Control for Cooperative Autonomous Mobile Robots," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 11, pp. 3944-3953, 2008.
- [7] S. M. Cristescu, C. M. Ionescu, B. Wyns, R. D. Keyser, and I. Nascu, "Leader-follower string formation using cascade control for mobile robots," *2012 20th Mediterranean Conference on Control & Automation (MED)*, pp. 1092-1098, 2012.
- [8] F. Bravo, D. Patino, K. Melo, and C. Parra, "Switching control and modeling of mobile robots formation," *Robotics Symposium, 2011 IEEE IX Latin American and IEEE Colombian Conference on Automatic Control and Industry Applications (LARC)*, pp. 1-6, 2011.
- [9] G. W. Gamage, G. K. I. Mann, R. G. Gosine, "Discrete event systems based formation control framework to coordinate multiple nonholonomic mobile robots," *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 4831-4836, 2009.
- [10] X. B. Chen and W. Xu, "Formation Control of Multiple Mobile Robots Based on Orientation Bias," *IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics*, pp. 683-687, 2008.
- [11] K.H. Kowdiki, R.K. Barai, and S. Bhattacharya, "Leader-follower formation control using artificial potential functions: A kinematic approach," *International Conference on Advances in Engineering, Science and Management*, pp. 500-505, 2012.
- [12] J. Shao, G. Xie, J. Yu, and L. Wang, "Leader-Following Formation Control of Multiple Mobile Robots," *Proceedings of the 2005 IEEE International Symposium on, Mediterrean Conference on Control and Automation Intelligent Control*, pp.808-813, 2005.
- [13] G. Ye, H. O. Wang, and K. Tanaka, "Coordinated motion control of swarms with dynamic connectivity in potential flows," *In Proceedings of the 16th International Federation of Automatic Control World Congress*, vol. 16, pp. 1562-1562, 2005.
- [14] G. Ye, H. O. Wang, K. Tanaka, and Z. Guan, "Managing group behaviors in swarm systems by associations," *In Proceedings of the 25th American Control Conference*, pp. 3537-3544, 2006.
- [15] H. Guo, Y. Meng, and Y. Jin. "A cellular mechanism for multi-robot construction via evolutionary multi-objective optimization of a gene regulatory network," *Journal of Bio Systems*, vol. 3, pp. 193-203, 2009.
- [16] S. S. Ge, C. Fua, and W. Liew, "Swarm formations using the general formation potential function," *2004 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics*, vol. 2, pp. 655-660, 2004.
- [17] M. Wang, Z. Jia, H. Ma, and M. Fu, "Three-robot minimum-time optimal line formation," *2011 9th IEEE International Conference on Control and Automation*, pp. 1326-1331, 2011.
- [18] H. Jung and D. H. Kim, "Formation Algorithm with Local Minimum Escape for Unicycle Robots," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 19, no. 4, pp. 349-356, 2013.
- [19] D. H. Kim, "Self-organization of unicycle swarm robots based on a modified particle swarm framework," *International Journal of Control, Automation and Systems*, vol. 8, no. 3, pp. 622-629, 2010.

## 저 자 소 개



**정하민(Hahmin Jung)**

2009년 : 경남대학교 전기전자 공학부 졸업

2009년~현재 : 동 대학원 첨단공학과 박사 과정

관심분야 : 스웸 시스템, 지능제어&로봇, 행동제어 알고리즘



**김동현(Dong Hun Kim)**

2001년 : 한양대학교 전기공학과(공학 박사)

2001년~2003년 : 미국 듀크 대학교 연구원

2003년~2004년 : 미국 보스턴 대학교 연구원

2004년~2005년 : 일본 동경대학교 박사 후 과정

2012년~2013년 : 영국 에식스대학교 방문교수

2005년~현재 : 경남대학교 전기공학과 교수

관심분야 : 스웸 시스템, 이동로봇 경로계획, 지능 로봇 제어, 비선형 적응제어

Phone : +82-55-249-2629

Fax : +82-505-999-2161

E-mail : dhkim@kyungnam.ac.kr