

유니사이클 로봇을 위한 지역최소점 탈출을 갖춘 포메이션 알고리즘

Formation Algorithm with Local Minimum Escape for Unicycle Robots

정 하 민, 김 동 헌*

(Hahmin Jung¹ and Dong Hun Kim¹)

¹Kyungnam University

Abstract: This paper presents formation control based on potential functions for unicycle robots. The unicycle robots move to formation position which is made from a reference point and neighboring robots. In the framework, a local minimum case occurred by combination of potential repulsed from neighboring robots and potential attracted from a formation line is presented, in which the robot escapes from a local minimum using a virtual escape point after recognizing trapped situation. As well, in the paper, potential functions are designed to keep the same distance between neighboring robots on a formation line, i.e. the relative distance between neighboring robots on a formation line is controlled by a potential function parameter. The simulation results show that the proposed approach can effectively construct straight line, V, and polygon formation for multiple robots.

Keywords: multiple robot, formation, potential functions, local minimum, unicycle robots

I. 서론

다개체 로봇은 하드웨어의 발전으로 공동 작업을 수행하는 산업현장, 위험지역, 육해공군의 군사용 작전 등에서 많이 활용될 것으로 기대되고 있다. 여기서 다개체 로봇은 다수의 자율 로봇이나 다수의 에이전트를 의미 한다[1]. 다개체 로봇에 대한 연구는 육지에서의 이동로봇(mobile soldier)과 바다에서의 무인 해저로봇(unmanned underwater robot), 무인 비행체(unmanned aerial vehicle)의 무리이동과 군사 작전용 등이 있다[2]. 다개체 로봇에 대한 연구 분야에는 다개체 로봇의 경로 이동, 혹은 그룹으로 모이기(swarming), 이동 혹은 모이기를 위한 포메이션 형성이 있다[3]. 다개체 로봇의 효과적 이동을 위해서는 이웃 로봇간의 절대적 혹은 상대적 위치를 아는 것이 필요하다. 이러한 위치 정보를 얻기 위하여 컬러마커[4], 리더 로봇[5], 비콘(beacon) [6], 센서 네트워크[7] 혹은 가상의 구조물[8]을 사용하였다. 또한, 얻어진 위치 정보는 PSO (Particle Swarm Optimization) [9], 포텐셜[10], 퍼지[11]등의 알고리즘을 통하여 다개체 로봇의 경로 계획에 사용되었다.

포메이션 제어는 로봇이 목표물로 이동하는 동안 이웃로봇 간에 충돌을 회피하며 정해진 포메이션으로 다수의 로봇 위치를 결정하는 것이다[12]. 포메이션에 대한 연구는 위치인식(localization)과 로봇간의 복잡한 통신문제등으로 실제로 구현되어 상용화된 연구는 많이 있지 않다. 하지만 추후 하드웨어적인 기술적 문제가 극복되면 포메이션 구현

은 가능하게 때문에, 알고리즘에 의한 포메이션 연구가 현재 활발하게 진행 중에 있다.

멀티 로봇의 포메이션은 비 정형화된 포메이션과 정형화된 포메이션으로 분류 된다. 비 정형화된 포메이션방법은 로봇들이 목표를 향해 이동 할 때 장애물과의 충돌 방지에서 효과적인 포메이션을 형성 한다[13]. 반면 정형화된 포메이션은 다개체 로봇의 이동 혹은 모이기 행동을 할 때, 정해진 형태대로 포메이션을 유지하며 로봇이 이동하는 것을 다룬다[14]. 비 정형화된 포메이션의 연구는 이웃 로봇 간에 충돌 방지만 설계하면 되므로 비교적 간단하다. 정형화된 포메이션은 다개체 로봇이 정해진 위치로 모인 후에 설정된 포메이션 형태를 유지하여야 하므로 설계가 다소 복잡하다. 정형화된 포메이션을 설계하기 위해서는 이웃 에이전트들의 위치 정보가 필요하다[15]. 에이전트들의 위치 정보는 통신을 이용하여 쉽게 알 수 있다[16]. 무선통신을 사용하면 에이전트의 위치를 쉽게 알 수 있도록 도와주지만 실제 적용할 때 하드웨어는 점점 복잡해진다. 이를 극복하기 위해 초음파 센서를 사용하여 로봇의 위치를 인식하는 연구들이 진행되었다[17,18]. 하지만, 이러한 연구들에서는 다개체 로봇들을 필요에 따라 여러 가지 포메이션 형태로 변경하는 것이 어려웠다.

본 논문은 정형화된 포메이션 형성을 위해 포텐셜 필드를 사용한다. 경로 계획법에서 포텐셜 필드를 이용할 때 생기는 지역최소점 문제를 해결하는 연구들은 이루어져 왔다 [19]. 하지만 다개체 로봇의 포메이션 문제에서 생기는 지역최소점 해결 연구는 아직 많이 다루어 지지 않았다. 관련된 연구로서 에이전트(점과 같은 파티클)를 대상으로 포텐셜 필드를 이용한 정형화된 다섯 가지의 포메이션은 연구 되었다[20]. 하지만 에이전트가 이동하면서 발생할 수 있는 지역 최소점(local minimum) 문제는 다루어지지 않고 있다.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2012. 11. 28., 수정: 2013. 3. 15., 채택확정: 2013. 3. 25.

정하민: 경남대학교 첨단공학과(zerofull1@naver.com)

김동헌: 경남대학교 전기공학과(dhkim@kyungnam.ac.kr)

※ 본 연구는 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2010-0007945).

따라서 본 논문은 이러한 점을 극복하기 위해 다개체 로봇의 포메이션 형성을 위해 포텐셜 함수를 사용할 때 나타날 수 있는 지역 최소점 문제 해결 방법을 제시한다. 그리고 다양한 포메이션 모양을 만들기 위해 포메이션을 구성하는 라인을 점의 집합으로 고려하고, 점의 집합에 대한 인력을 각각의 로봇에 사용하여 다개체 로봇이 일정한 거리를 유지하며 포메이션 형태대로 정렬하는 방법을 제안한다. 또한 실제의 로봇 시스템 구현을 위해 점 형태의 에이전트가 아닌 유니사이클 로봇 모델을 대상으로 포메이션 문제를 다룬다.

II. 포텐셜함수 설계와 문제 정의

1. 유니사이클 로봇 모델

본 논문에서 제안된 방법은 유니사이클 로봇 모델에 적용된다. 유니사이클 로봇 모델은 벡터 $P_i = (x_i, y_i, \phi_i)^T$ 로 묘사된다. 여기서 벡터 P_i 는 위치 x, y 그리고 기준 프레임에 대한 방위각 ϕ 로 표현되고, i 는 로봇의 인덱스(index)이다. 로봇 i 는 현재의 위치에서 지면에 대한 미끄러짐이 없다고 가정하면, 로봇의 중심 위치 (x_i, y_i) 에서 다음과 같은 로봇의 중력에 대한 수식을 얻게 된다[1].

$$\dot{x}_i \sin \phi_i - \dot{y}_i \cos \phi_i = 0 \tag{1}$$

로봇의 속도 v_i 와 각속도 w_i 는 다음과 같이 계산된다.

$$\dot{x}_i \cos \phi_i + \dot{y}_i \sin \phi_i = v_i, \quad \dot{\phi}_i = w_i \tag{2}$$

따라서 운동 모델은 (1)과 (2)로부터 다음과 같이 계산된다.

$$\dot{P}_i = \begin{bmatrix} \dot{x}_i \\ \dot{y}_i \\ \dot{\phi}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi_i & 0 \\ \sin \phi_i & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_i \\ w_i \end{bmatrix}. \tag{3}$$

입력 v_i 와 w_i 는 다음과 같다[21].

$$v_i = \gamma \rho_i \cos \Delta \phi_i, \quad w_i = k \Delta \phi_i + \dot{\phi}_{di} \tag{4}$$

여기서 $\rho_i = \sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2}$, $\Delta x = x_{di} - x_i$, $\Delta y_i = y_{di} - y_i$, $\Delta \phi_i = \phi_{di} - \phi_i$, $\phi_{di} = \tan^{-1}(\Delta y_i, \Delta x_i)$ 그리고 $k, \gamma > 0$ 이다. $P_{di}(x_{di}, y_{di})$ 는 좌표의 궤도이다. 이러한 궤도는 가상의 리더로 사용 된다. 여기서 파라미터 k 와 γ 값을 적당히 설정하면, 다음 조건처럼 오차상수 ρ_i 와 $\Delta \phi_i$ 는 일정한 범위 안에 있다[22].

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \rho_i(t) \leq d, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \|\Delta \phi_i\| \leq \delta \tag{5}$$

본 논문에서 그룹이동, 장애물회피, 포메이션형성에 대한 포텐셜함수는 식 (6)처럼 유니사이클 로봇의 좌표 궤도에 적용된다.

$$x_{di} = \alpha_1 F_{xi}, \quad y_{di} = \alpha_1 F_{yi} \tag{6}$$

여기서 α_1 은 포텐셜 함수의 크기를 조절하는 가중치 상수이다. $F_i(F_{xi}, F_{yi})$ 는 포텐셜 함수에 의해 설계되는 힘의 함수이다.

2. 포메이션 라인 정의 및 사용

본 연구에서 사용되는 포메이션은 그림 1처럼 정의된다. 그림 1(a)는 이상적인 포메이션 라인이고 (b)는 실제 로봇 인식하는 포메이션 라인이다. 그림 1(a)에서 *모양은 기준 점이고 직선은 로봇을 위한 포메이션 라인이다. 여기서 포메이션 라인은 실제 시스템에서 이산(discrete)적으로 구현해야 하므로 연속적인 점으로 구성된다. 따라서 그림 1(b)처럼 연속된 점으로 구성되고, $P^\epsilon = [P_1^\epsilon, P_2^\epsilon, P_3^\epsilon, \dots, P_n^\epsilon]$ 와 같이 점의 집합으로 표현 할 수 있다. 그림 1(b)에서 ϵ 은 P^ϵ 에서 요소들 간의 거리를 의미한다. θ^ϵ 은 기준점의 수평축과 기준점과 P^ϵ 의 직선이 이루는 각도 이고, $\theta^\epsilon = [\theta_1^\epsilon, \theta_2^\epsilon, \theta_3^\epsilon, \dots, \theta_n^\epsilon]$ 로 표시된다. n 은 포메이션 점의 총 수이다. θ^ϵ 은 가장 큰 각에서 작은 각으로 표현된다.

포메이션 라인과 기준점의 데이터는 로봇의 동작 전에 미리 할당되거나 로봇의 동작 후 할당될 수 있다. 동작 전에 할당하는 방법은 프로그래밍에 미리 설정되어 적용되고, 동작 후에 할당하는 방법은 통신을 통해 변경되는 기준점에 대해 로봇에게 전달된다. 두 가지 방법 모두 장점과 단점이 존재하기 때문에 본 논문에서는 알고리즘에 초점을 맞춘다. 그리고 포메이션 라인과 기준점 데이터는 정확함 값으로 주어지고 활용되는 것으로 가정한다.

로봇이 포메이션을 구성할 때, P^ϵ 은 P_i^f 를 구하기 위하여 사용된다. P_i^f 는 로봇 P_i 가 포메이션을 이루기 위한 포메이션 점이고, P_i^f 에 가장 가까운 P^ϵ 이 P_i^f 을 대신하여 사용된다. 따라서, P_i^f 선정을 위해 다음 조건이 사용된다.

$$\bar{\theta}^\epsilon = \min(\theta_i - \theta_j^\epsilon) \tag{7}$$

여기서 θ_i 는 그림 1(c)와 같이 기준점의 수평축과 P_i 의 직선이 이루는 각도이다.

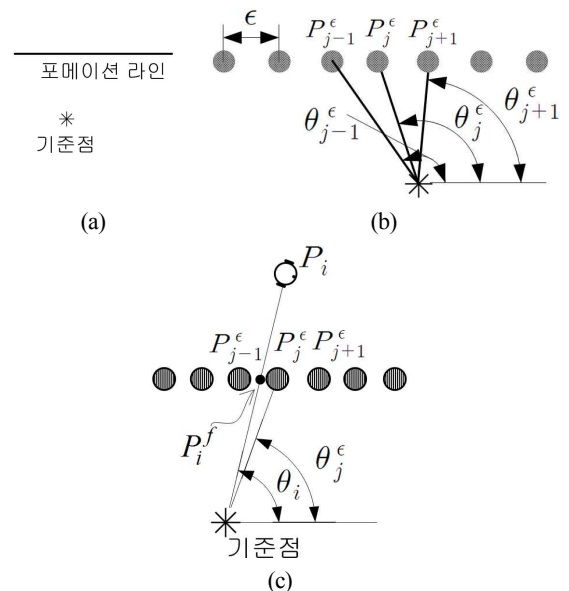


그림 1. 포메이션 라인 정의.
Fig. 1. Definition of formation line.

3. 포텐셜 함수

본 연구에서 모든 로봇은 기준점의 위치와 근접한 다른 로봇의 위치를 알고 있다고 가정한다. 이러한 가정은 로봇이 다른 모든 로봇들의 절대 좌표를 알고 있어야 한다는 가정보다는 적은 정보를 활용한다. 로봇간의 근접한 정도는 로봇이 비전을 사용한다는 가정에서 각 로봇이 자신의 위치에서 볼 수 있는 영역의 상대로봇까지의 거리를 의미한다. 모든 로봇은 로봇의 현재 위치 P_i 와 포메이션의 기준 점을 이용하여 자신이 위치해야 하는 포메이션 라인 위의 점 P_i^f 를 결정 할 수 있다. 포메이션 라인 위의 점 P_i^f 는 기준점에 대하여 포메이션 라인과 접하는 점으로 정의된다. 그림 1(c)에서 로봇은 P_i^f 에 가장 가까운 P^e 으로 이동한다.

포메이션 형성을 위해 각 로봇은 포메이션 라인 위로 위치하기 위한 인력 포텐셜 U_a 가 필요하다. 또한, 각 로봇간의 충돌 방지를 위한 척력 포텐셜 U_r 이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 지수(exponential) 함수 기반의 포텐셜 함수를 다음과 같이 구성한다.

$$U_i = U_a + U_r = c_a(1 - e^{-\frac{\|\psi_i^a\|^2}{l_a^2}}) + \sum_{j=1} \left\{ c_r e^{-\frac{\|\psi_i^r\|^2}{l_r^2}} \right\} \quad (j \neq i) \quad (8)$$

여기서 $\psi_i^a = P_i - P^e$ 이고, $\psi_i^r = P_i - P_j$ 이다. c_a, l_a, c_r, l_r 은 각각 인력 포텐셜과 척력 포텐셜 함수에 사용되는 상수 값이다. c_a 와 c_r 은 인력과 척력 포텐셜의 강도를 각각 의미하고 l_a 와 l_r 은 인력과 척력 포텐셜의 범위를 각각 의미한다. 3장에서 로봇 사이의 거리를 균등하게 만들기 위해 각 포메이션에 맞는 적절한 l_r 값을 설계한다. U_i 대한 힘 F_i 는 다음과 같다.

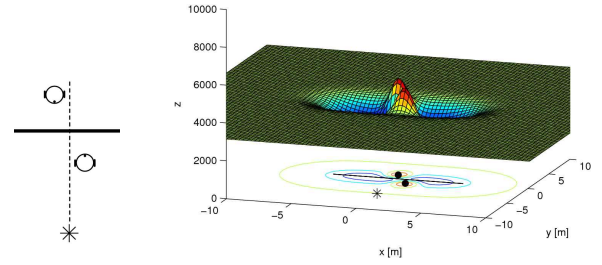
$$F_i = -\nabla U_i = -\frac{2c_a\psi_i^a}{l_a^2} e^{-\frac{\|\psi_i^a\|^2}{l_a^2}} + \sum_{j=1} \left\{ \frac{2c_r\psi_i^r}{l_r^2} e^{-\frac{\|\psi_i^r\|^2}{l_r^2}} \right\} \quad (9)$$

포메이션 형성과 로봇간의 충돌 방지를 위하여 지수함수를 쓰는 이유는 척력 포텐셜의 경우 포텐셜 범위 밖의 로봇에게 영향을 주지 않고, 범위 안의 로봇에게만 큰 변화를 줄 수 있다. 다시 말해 척력의 범위를 설정할 수 있다. 이 특징은 포메이션 설정시 로봇간의 균등한 거리를 유지하게 해준다. 인력 포텐셜의 경우에는 로봇이 기준점과 멀리 있을 때 빨리 이동하고, 기준점과 가까워지면 서서히 움직이게 한다.

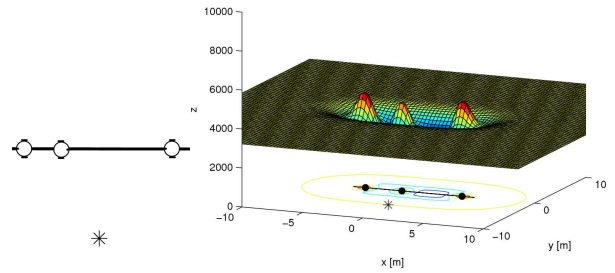
본 논문에서 로봇이 주변의 장애물과 충돌하지 않기 위한 척력 포텐셜은 다루지 않는다. 장애물회피 문제는 적외선 센서 혹은 초음파 센서로 쉽게 해결할 수 있는 문제이기 때문에 다루지 않고, 본 논문에서는 로봇간의 포메이션 형성에 초점을 맞춘다.

4. 포메이션 형성이 원치 않는 상황에 놓이게 되는 경우

로봇이 포메이션을 형성할 때 로봇은 원치 않는 상황에 놓이게 될 수 있다. 그림 2는 포메이션 형성을 위해 생길 수 있는 원치 않는 상황과 그에 따른 포텐셜 분포를 각각 보여준다. 그림 2에서 검은 점은 로봇이고, 직선은 포메이



(a) A case that robots are trapped in local minima.



(b) A case that robots are unequally displaced.

그림 2. 포메이션 형성에서 원치 않는 상황에 놓이게 되는 경우. Fig. 2. Worst-case scenario in formation process.

션 라인이며, *모양은 기준점을 의미한다. 예를 들어 다수의 로봇들이 기준점으로 동시에 같은 방향에 놓인 경우 동일한 포메이션 라인 위의 점 P_i^f 가 설정될 수 있다. 포메이션 라인을 기준으로 안쪽에 혹은 바깥쪽에 있는 로봇들 간에는 서로 충돌을 회피하기 위하여 이동하면서 로봇 간에 다른 P_i^f 가 설정되며, 포메이션 라인의 안과 밖에 로봇들이 놓여 P_i^f 가 같은 경우는 지역 최소점에 고착되며 그림 2(a)에 해당된다. 그림 2(a)는 포메이션 라인의 안과 밖에서 비슷한 θ_i 를 가지고 로봇들이 포메이션 라인에 접근하는 경우를 보여준다. 즉 두 로봇이 포메이션 형성을 위해 근처의 포메이션 라인 위의 점 P_i^f 을 갖게 되면, 서로 충돌하지 않으려는 척력으로 인해 포메이션 라인에 들어오지 못하는 경우가 생긴다. 따라서, 두 로봇은 지역 최소점에 빠져서 더 이상 움직이지 못하게 된다. 그림 2(a)의 포텐셜 분포도는 두 로봇이 포메이션 라인 근처에 멈추어 선 경우를 보여준다. 원치 않는 또 다른 경우는 로봇이 포메이션 라인에 위치해 있어도 그림 2(b)처럼 서로 균등하게 위치해 있지 않으면 올바른 포메이션 형성이 어려워진다. 그림 2(b) 경우는 모든 로봇이 각각의 포메이션 점 P_i^f 에 도달한 경우이다. 하지만 균일한 포메이션 형성을 위해 로봇들 간에 동일한 거리를 유지하는 것이 필요하다.

III. 포텐셜 기반의 포메이션 형성

1. 포메이션 형성에서 지역최소점을 벗어나게 하는 방법

포텐셜 기반의 포메이션 형성에서 각 로봇의 P_i^f 는 각각 다르다. 하지만 그림 2(a)경우처럼 두 로봇이 비슷한 위치의 P_i^f 를 사용할 경우 로봇간의 척력과 기준점의 인력에 의해 지역 최소점에 빠질 수 있다. 따라서 두 로봇이 서로의 척력에 의해 포메이션 라인 위로 이동하지 못하고 정지

상태를 유지한다. 즉, 두 로봇은 서로의 척력에 의해 지역 최소점에 빠진 것이다. 이러한 경우는 제안된 다음의 조건 문에 의해 지역 최소점에 빠졌는지의 여부를 확인 할 수 있다. 로봇의 현재 상태가 식 (10)의 조건에 맞는 경우 로봇은 P_i^f 에 도달하지 못하고, 지역 최소점에 빠진 경우이다.

$$\|\psi_i^f\| > D_m \text{ and } \|F_i\| < F_m \quad (10)$$

여기서 D_m 은 P_i 가 현재 정지 상태에 있다는 판단을 위한 P_i 와 P_i^f 의 최소 거리이고 F_m 은 P_i 의 최소 힘이다. 식 (9)를 사용하였을 때 지역 최소화 문제는 최소 두 대의 로봇이 목적으로 이동할 경우 발생 될 수 있다[23]. 그림 2의 로봇이 식 (10)의 조건을 만족시켜 지역 최소점에 빠졌다고 판단되면, 식 (11)의 수식을 사용하여 가상의 탈출점을 정한다. 그림 3(a)는 P_i 가 지역 최소점에서 탈출하기 위한 방향과 거리를 보여준다. P_i^e 는 P_i 의 탈출 위치가 되고 P_j^e 는 P_j 의 탈출 위치이다. 그림 3(b)는 그림 3(a) 상황에서의 포텐셜을 나타낸다. 그림 3(b)에서 빨간 두 봉우리는 로봇의 위치를 표시한 것이다. P_i^e 은 다음 수식으로 구해진다.

$$P_i^e = P_i + D_e \begin{bmatrix} \cos(\phi - \phi_m) \\ \sin(\phi - \phi_m) \end{bmatrix} \quad (11)$$

여기서 D_e 는 P_i 가 지역 최소점을 벗어나기 위한 거리 상수 값이다. ϕ 는 로봇이 포메이션 라인을 바라본 각도이고, ϕ_m 은 그림 3의 지역 최소점 탈출을 위한 임의의 각도이다. ϕ_m 은 ϕ 보다 작게 설정하여 포메이션 라인 반대편에

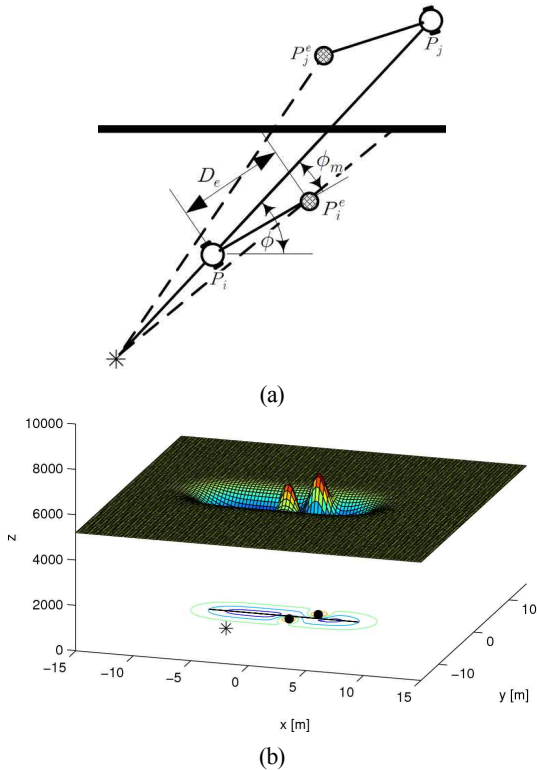


그림 3. 지역 최소점 탈출.
Fig. 3. Escape from a local minimum.

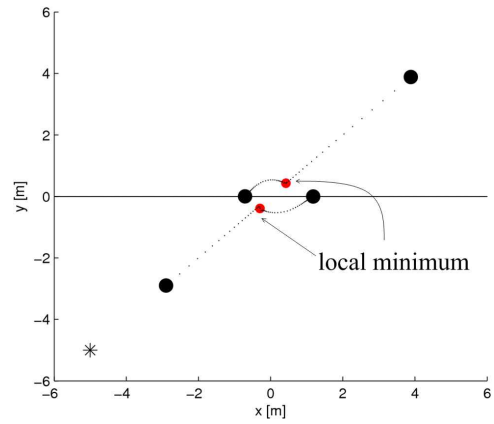


그림 4. 지역 최소점 상황에서 로봇의 위치 변화.
Fig. 4. Changing robot position in a local minimum case.

있는 로봇과 서로 멀게 포메이션 라인으로 향하게 한다. P_i 가 P_i^e 로 향하는 도중에도 식 (10)의 지역 최소점 여부 조건은 계속 검색된다. 지역 최소점 여부 조건에 벗어나게 되면 P_i 는 원래의 포메이션라인 위의 점으로 향하게 된다.

로봇이 지역 최소점에 고착 되었을 때, 로봇에 랜덤한 탈출 위치를 정해준 후 시뮬레이티드 어닐링(simulated annealing)을 사용하여 로봇이 지역 최소점을 벗어나게 하였다[24]. 하지만, 랜덤한 위치 선정은 최악의 경우 로봇이 다시 지역 최소점으로 이동하여 지역 최소점 문제를 악화시킬 수 있는 가능성을 만든다. 하지만 본 논문의 (11)식은 현재 위치를 기본으로 적정 수준의 값을 설정하고 P_i^e 를 바탕으로 적절한 P_i^f 를 찾기 때문에 다시 지역 최소점으로 돌아가는 상황은 발생되지 않는다. 그림 3의 경우 로봇 i 에 적용되는 힘은 식 (9)에서 ψ_i^f 대신 $\psi_i^e = P_i - P_i^e$ 를 사용한다. 로봇 i 가 지역 최소점에서 탈출하면 그림 2(b)처럼 포메이션 라인 위에 위치하게 된다. 여기서 지역 최소점이란 로봇이 원하는 포메이션 라인 위에 위치하려고 하였지만 이동하지 못하고 고착된 상태를 의미한다. 로봇이 포메이션 라인 위에 위치할 때 로봇간에 균등한 거리를 유지하면 이상적이지만 로봇의 총 개수와 로봇의 초기 위치에 따라서 포메이션 라인 위의 위치가 달라지기 때문에 그림 2(b)와 같은 상황이 된다. 그림 4는 로봇이 지역 최소점에 고착된 그림 3의 상황에서 로봇이 식 (11)을 이용하여 어떻게 탈출하는지 보여주는 모의실험 결과이다.

2. 로봇간에 균등한 포메이션 형성

본 연구에서 로봇 사이의 거리를 균등하게 만들기 위해서는 로봇간의 거리 정보가 필요하다. 로봇은 거리정보를 사용하여 적절한 l_r 값을 취한다. 따라서 l_r 과 로봇간에 거리정보에 대한 데이터가 필요하다. 그림 5는 5대의 로봇이 균등한 위치 설정을 위해 데이터를 얻는 방법을 보여준다. 그림 5에서 두 로봇의 위치는 P_i 와 P_j 이고, 포메이션 형성에 사용되는 로봇의 수는 $N=5$ 이다. g 는 기준점으로 가정한다. 이 때 두 로봇과 기준점과의 기준각도는 θ_a 이다.

따라서 $\theta_a = \frac{360}{N}$ 로 설정 된다. 그림 5에서 $\theta_a = 72^\circ$ 이다.

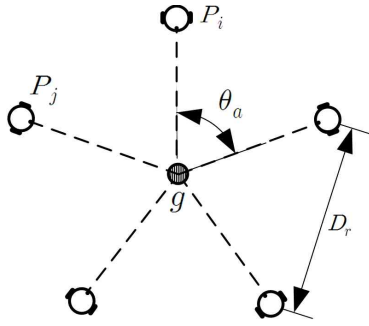


그림 5. 5대 로봇을 위한 포메이션의 예.
Fig. 5. Example of formation for five robots.

D_r 은 두 로봇 사이의 거리이다.

그림 5에서 로봇 P_i 에 적용되는 힘은 식 (9)에서 ψ_i^f 대신 $\zeta_i^e = P_i - g$ 를 사용한다. ζ_i^e 는 P_i 와 P_j 의 방향 벡터이고, $\zeta_i^j = P_i - P_j$ 이다. P_i 는 식 (9)에 의해 위치가 이동되고 로봇 사이의 거리는 l_r 에 의해 결정된다.

포메이션 라인 위에서 로봇간의 거리 D_r 은 닫혀진 모양일때 다음과 같이 정의된다. 여기서 닫혀진 모양은 포메이션 라인의 시작과 끝이 만나는 것을 의미한다.

$$D_r = \frac{D_c}{N} \quad (12)$$

여기서 D_c 는 포메이션 라인의 둘레이고, N 은 로봇의 수이다. 만약 열려진 포메이션 모양일 때 식 (12)의 분모는 $N-1$ 이 된다.

로봇간격 D_r 은 포텐셜 함수 설계에서 사용되는 l_r 에 의해 조정된다. 따라서, 포메이션 라인 위에서 로봇간의 거리를 제어하기 위해서는 적합한 l_r 을 선택하는 것이 필요하다. 로봇간격을 설정하기 위해 그림 5의 관계 그래프를 사용한다. 그림 6은 그림 5의 상황에서 c_r 이 0.1, 0.5, 1의 경우에 대해 l_r 과 로봇간격 D_r 을 보여준다. 그림 5에서 c_r 이 1일 경우 다른 경우에 비해 가장 선형성을 보이고, 가장 넓은 포메이션을 형성할 수 있어서 본 연구에서 c_r 은 1의 값을 사용한다. 그림 6에서 $c_r = 1$ 일 때, l_r 에 대한 D_r 을 구하기 위하여 라그랑지 보간법을 사용한다. 적절한 로봇간의 거리인 D_r 이 식 (9)에서 사용하는 l_r 에 의해 조정된다. 라그랑지 보간법을 사용하는 이유는 D_r 에 상응하는 l_r 값을 구하기 위해 사용한다. D_r 과 l_r 의 관계는 완전한 선형관계가 아니어서 라그랑지 보간법에 의하여 D_r 에 상응하는 l_r 값을 구할 수 있기 때문이다. 라그랑지 보간법은 k 개의 $(x_1, y_1), \dots, (x_j, y_j), \dots, (x_k, y_k)$ 좌표 샘플들에 대해 다음과 같은 수식으로 구성된다[25].

$$L(x) = \sum_{j=1}^k y_j l_j(x), \quad l_j(x) = \prod_{\substack{1 \leq m \leq k \\ m \neq j}} \frac{x - x_m}{x_j - x_m} \quad (13)$$

여기서 x 와 y 는 각각 샘플 데이터의 x 축 y 축 좌표의 데이터 이다. 그리고 k 는 라그랑지 보간법에 사용되는 샘플

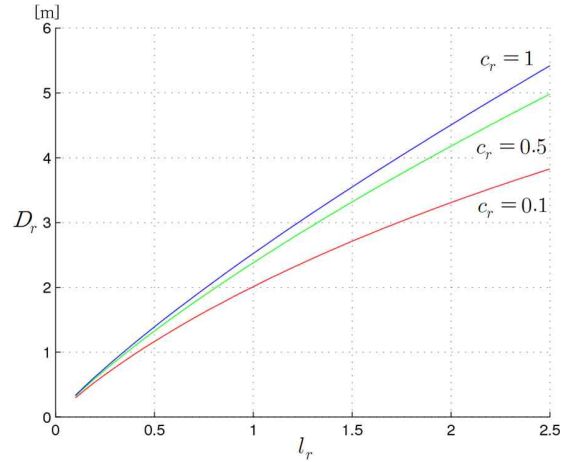


그림 6. l_r 에 대한 로봇간의 거리.
Fig. 6. Distances between robots to l_r .

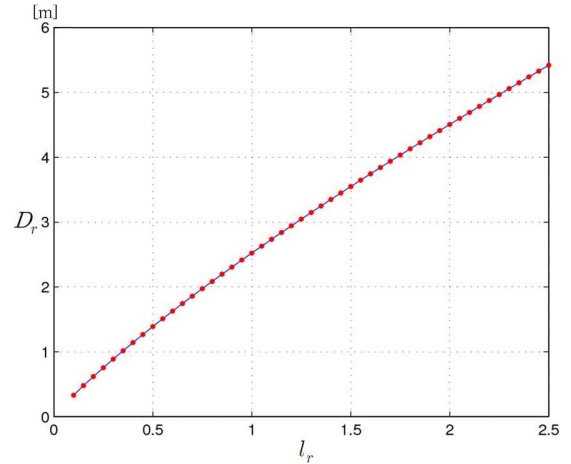


그림 7. D_r 과 라그랑지 보간법에 의한 데이터 비교.
Fig. 7. Comparison between D_r and data by Lagrange interpolation.

데이터의 총 수이다. 그림 7은 c_r 이 1일 때 얻은 그림 6의 데이터 값과 식 (13)의 라그랑지 보간법을 이용하여 얻은 결과의 비교를 보여준다. 그림 7에서 점은 보간법에 사용되는 그림 6의 데이터 이고 실선은 보간법으로 구한 궤적이다. 그림 7은 그림 6에서 얻은 데이터 값과 보간법으로 구한 궤적이 차이가 거의 없음을 보여준다.

IV. 시뮬레이션

시뮬레이션에서는 유니사이클 로봇 모델을 대상으로 직선, V, 다각형 포메이션 구성을 위해 제안된 방법을 매트랩 프로그램으로 시뮬레이션 하였다. 열려진 모양의 포메이션으로 그림 8은 직선 형태의 포메이션을 보여주고 그림 9는 V형태의 포메이션을 보여준다. 닫혀진 모양의 포메이션으로 그림 10은 오각형 형태의 포메이션을 보여 준다. 각 그림에서 1 스텝은 무작위로 결정된 로봇의 초기 위치를 보여준다. 최종적으로 마지막 스텝에서 모든 로봇은 정해진 포메이션 라인 위에서 로봇간에 서로 균등한 거리를 유지

하며 위치하였다. 포텐셜 파라미터는 $c_a = 10$, $l_a = 10$, $c_o = 1$ 의 값이 사용되었다. 그림 8, 9, 10에서 포메이션의 둘레는 10m이다. 따라서 이상적인 D_r 은 각각 2.5m, 2.5m, 2m 이고, 시뮬레이션에서는 표 1과 같은 결과를 얻었다. 표준편차는 정해진 포메이션 라인과 마지막 스텝에서의 로봇들과의 위치 차이를 보여준다. 그림 11에서는 표 1처럼 더 큰 l_r 값이 사용되었다. 따라서 포메이션 라인이 그림 10 보다 그림 11이 더 크다는 것을 알 수 있다. 그림 11에서 내부에 있는 오각형은 그림 10의 포메이션 라인이고 그림 11의 포메이션 라인과 크기 비교를 위하여 사용되었다. 그

림 11의 결과로서 제안된 방법은 포텐셜 함수 설계시 사용하는 파라미터 l_r 값을 사용하여 로봇의 수에 맞게 포메이션 크기를 조절할 수 있다.

표 1. 시뮬레이션 결과.

Table 1. The results of simulation.

	l_r	평균 D_r	표준 편차
그림 8.	0.9897	2.4075	0.0626
그림 9.	0.9897	2.4565	0.0965
그림 10.	0.6054	1.6399	0.0648
그림 11.	1.2751	3.0968	0.0240

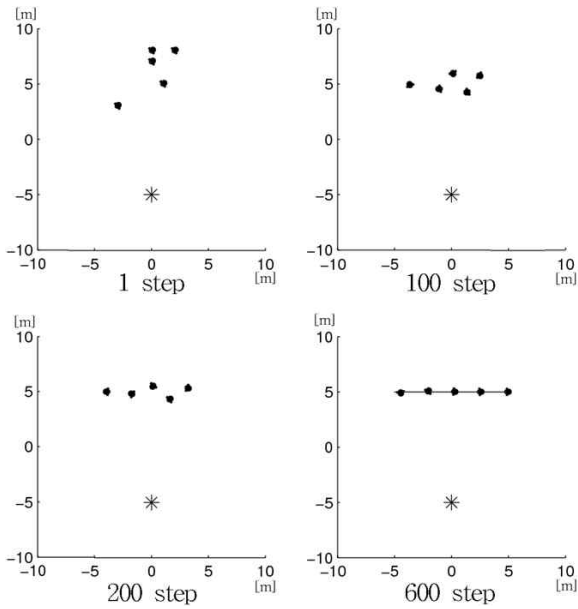


그림 8. 다섯 대 로봇에 대한 직선 포메이션.

Fig. 8. Line formation for five robots.

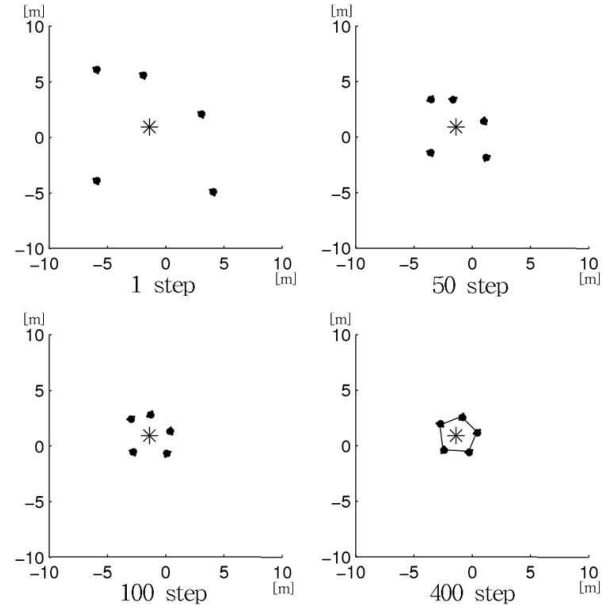


그림 10. 다섯 대 로봇에 대한 오각형 포메이션.

Fig. 10. Pentagon formation for five robots.

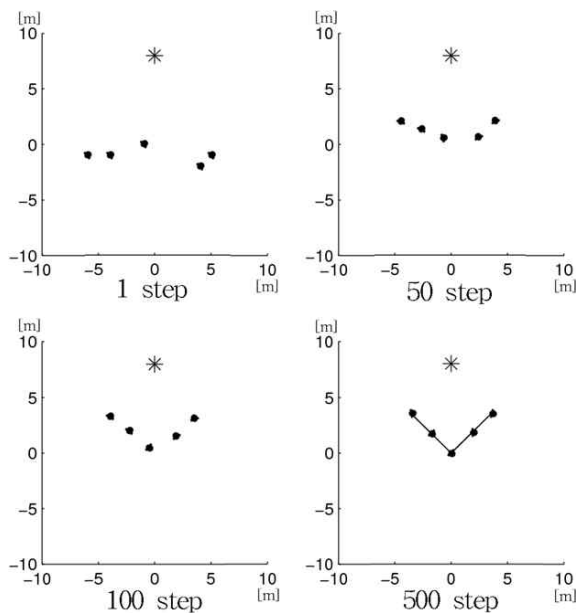


그림 9. 다섯 대 로봇에 대한 V 포메이션.

Fig. 9. V formation for five robots.

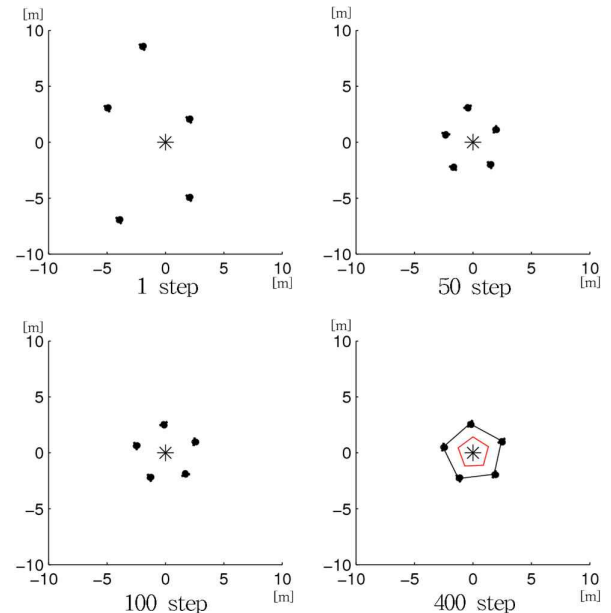


그림 11. 다섯대 로봇에 대한 커다란 오각형 포메이션.

Fig. 11. Big pentagon formation for five robots.

V. 결론

본 논문에서는 유니사이클 로봇을 대상으로 포텐셜 함수 기반의 포메이션 구성 방법을 제안하였다. 모든 로봇의 이동과 로봇간의 충돌 회피와 포메이션 구성을 위해 통합된 포텐셜 함수를 설계하였다. 제안된 방법에서는 로봇이 이웃 로봇과의 척력과 기준점에서의 인력에 의해 생기는 포텐셜 함수로부터 지역 최소점에 빠졌을 때, 로봇이 지역 최소점을 검출한 후 가상의 탈출점을 이용하여 지역 최소점을 탈출할 수 있었다. 또한 포메이션 라인에서도 로봇이 동일한 거리를 유지하며 위치 할 수 있었다. 연구의 결과로 제안된 방법에서는 포텐셜 함수 파라미터를 통하여 포메이션 크기 도 가변 조절 할 수 있었다. 제안된 포메이션 알고리즘은 이웃 로봇 혹은 이웃 에이전트의 위치를 알고 있는 다개체 이동로봇의 네비게이션과 같은 응용 시스템들에서 다양하게 사용될 수 있다. 시뮬레이션은 제안된 방법이 직선, V, 다각형 모양의 포메이션 형성에 잘 적용됨을 보여주었다. 추후 연구는 제안된 알고리즘을 로봇간의 위치인식, 무선통신 등을 갖추어 하드웨어로 구현하는 것이다.

참고문헌

- [1] 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, Jun. 2010.
- [2] M.-A. Fields, E. Haas, S. Hill, C. Stachowiak, and L. Barnes, "Effective robot team control methodologies for battlefield applications," *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 5862-5867, 2009.
- [3] J. S. Kim and Y. H. Joo, "Asynchronous behavior control algorithm of the swarm robot for surrounding intruders," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 18, no. 9, pp. 812-818, 2012.
- [4] T. Schmickl and K. Crailsheim, "Trophallaxis among swarm-robots: A biologically inspired strategy for swarm robotics," *International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics*, pp. 377-382, 2006.
- [5] M. N. Soorki, H. A. Talebi, and S. K. Y. Nikravesh, "A leader-following formation control of multiple mobile robots with active obstacle avoidance," *2011 19th Iranian Conference on Electrical Engineering*, pp. 1-6, 2011.
- [6] A. Marjovi, J. Nunes, P. Sousa, R. Faria, and L. Marques, "An olfactory-based robot swarm navigation method," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 4958-4963, 2010.
- [7] M. H. Tak and Y. H. Joo, "Localization for cooperative behavior of swarm robots based on wireless sensor network," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 18, no. 8, pp. 725-730, 2012.
- [8] R. W. Beard, J. Lawton, and F. Y. Hadaegh, "A coordination architecture for spacecraft formation control," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 9, no. 6, pp. 777-790, 2001.
- [9] H. Xu, H. Guan, A. Liang, and X. Yan, "A multi-robot pattern formation algorithm based on distributed swarm intelligence," *2010 Second International Conference on Computer Engineering and Applications*, vol. 1, pp. 71-75, 2010.
- [10] D. H. Kim, H. O. Wang, and S. Shin, "Decentralized control of autonomous swarm systems using artificial potential functions : Analytical design guidelines," *Int. Journal of Intelligent and Robotic Systems*, vol. 45, no. 4, pp. 369-394, 2006.
- [11] B. Ranjbar-Sahraei, F. Shabaninia, A. Nemati, and S. D. Stan, "A novel robust decentralized adaptive fuzzy control for swarm formation of multiagent systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 8, pp. 3124-3134, 2012.
- [12] 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.
- [13] V. T. L. Rampinelli, A. S. Brandão, M. Sarcinelli-Filho, F. N. Martinsy, and R. Carelliz, "Embedding obstacle avoidance in the control of a flexible multi-robot formation," *2010 IEEE International Symposium on Industrial Electro Nics*, pp. 1846-1851, 2010.
- [14] R. Haghghi and C. C. Chien, "Asynchronous dynamic multi-group formation for swarm robots," *Decision and Control and European Control Conference*, pp. 2744-2749, 2011.
- [15] T. Eren, W. Whiteley, B. D. O. Anderson, A. S. Morse, and P. N. Belhumeur, "Information structures to secure control of rigid formations with leaderfollower architecture," *Proc. of the American Control Conference*, vol. 4, pp. 2966-2971, 2005.
- [16] C. Lei and W. Yongji, "Robotics and vision conference," *Robotics and Vision Conference*, vol. 1, pp. 729-734, 2004.
- [17] A. R. Pourshoghi and H. A. Talebi, "A new distributed coverage algorithm based on hexagonal formation," *IEEE International Conference on Systems*, pp. 740-744, 2009.
- [18] F. Rivard, J. Bisson, and D. Letourneau, "Ultrasonic relative positioning for multi-robot systems," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 323-328, 2008.
- [19] S. H. Kim, G. Lee, I. P. Hong, Y. J. J. Kim, and D. Y. Y. Kim, "New potential function for multi robot path planning : SWARM or SPREAD," *The 2nd International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE)*, pp. 557-561, 2010.

- [20] S. S. Ge, C. H. Fua, and W. M. Liew, "Swarm formations using the general formation potential function," *IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics*, vol. 2, pp. 655-660, 2004.
- [21] M. Egerstedt and X. Hu, "A hybrid control approach to action coordination for mobile robots," *Automatica*, vol. 38, no. 1, pp. 125-130, 2002.
- [22] M. Egerstedt and X. Hu, "Formation constrained multi-agent control," *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, vol. 17, pp. 947-951, 2001.
- [23] H. Jung, Y. Kim, and D. H. Kim, "Visual cooperation based on LOS for self-organization of swarm robots," *International Journal of Control, Automation, and System*, vol. 2, no. 1, pp. 216-224, Feb. 2013.
- [24] Q. Zhu, Y. Yan, and Z. Xing, "Robot path planning based on artificial potential field approach with simulated annealing," *International Conference on Intelligent Systems Design and Applications, IEEE Computer Society*, pp. 622-627, 2006.
- [25] L. R. Burden and J. D. Faires, *Numerical Analysis*, 9th Ed., Thomson Learning, 2010.



정 하 민

2009년 경남대 전기전자 공학부 졸업.
2011년 동 대학원 석사. 2011년~현재
경남대학교 첨단공학과 박사 과정. 관
심분야는 스웩 시스템, 지능제어&로봇,
디지털 신호처리, 영상처리.



김 동 현

2001년 한양대학교 전기공학과 공학박
사. 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. 관심분야는 스웩
시스템, 다개체 로봇, 이동로봇 경로계획, 지능제어, 비선형
적응제어.