

네트워크 연결성 유지를 위한 군집 로봇의 행동 제어 알고리즘

Behavior Control Algorithm of Swarm Robots to Maintain Network Connectivity

김 종 선, 정 준 영, 지 상 훈, 주 영 훈*

(Jong Seon Kim¹, June Young Jeong¹, Sang Hoon Ji², and Young Hoon Joo^{3,*})

¹Department of Control and Robotics Engineering, Kunsan National University

²Applied Robot Technology, Korea Institute of Industrial Technology

³Department of Control and Robotics Engineering, Kunsan National University

Abstract: In swarm robot systems, it is vital to maintain network connectivity to ensure cooperative behavior between robots. This paper deals with the behavior control algorithm of the swarm robots for maintaining network connectivity. To do this, we divide swarm robots into search-robots, base-robots, and relay-robots. Using these robots, we propose behavior control algorithm to maintain network connectivity. The behavior control algorithms to maintain network connectivity are proposed for the local path planning using virtual force and global path planning using the Delaunay triangulation, respectively. Finally, we demonstrate the effectiveness and applicability of the proposed method through some simulations.

Keywords: swarm robots system, maintaining network connectivity, relay robot, virtual forces, delaunay triangulation

I. 서론

최근, 다수의 로봇으로 이루어진 군집 로봇을 이용해 다양한 분야에 적용하려는 연구가 활발히 진행되고 있다[1]. 군집 로봇은 단일 로봇 시스템의 단점을 보완하기 위한 새로운 접근 방법으로 로봇이 임무 및 작업 수행 시 작업의 효율성, 시스템의 강인함 및 유연성을 확보할 수 있다는 장점을 가진다. 군집 로봇이 이러한 장점을 보장받기 위해서는 동적인 환경에서 로봇간 네트워크가 정/동적 토폴로지를 구성할 수 있어야 하며, 구성된 네트워크의 한계를 넘지 않는(통신이 두절되는 로봇이 없는 상태) 범위 내에서 작업을 수행하도록 로봇을 제어해야 한다. 특히, 작업 공간내에 통신 네트워크가 구축되어 있지 않은 경우 군집 로봇의 운용을 위해서는 이와 같은 네트워크의 연결성 확보가 반드시 선행되어야 한다[10-18]. 본 논문에서는 이러한 군집 로봇의 네트워크 연결성(network connectivity)을 유지하기 위해 기존의 행동 제어 연구를 살펴보고 효과적 네트워크 연결성 유지 기법을 연구하고자 한다.

먼저, Uchimura 등은 CVP (Centroidal Voronoi Partition)와

가상의 힘(virtual force)을 이용해 베이스-중계-탐색 로봇간의 중계 위치 배치 방법을 제안했다[4]. 이 연구는 로봇간 간격을 균등하게 유지시키는 장점이 있지만 가상의 힘에 의한 장애물 회피에 한계성을 갖고 있다. Zavlanos 등은 네트워크 연결성을 대수적 그래프 이론을 기반으로 정의하고 네트워크 링크 유지를 위해 Potential field를 사용한 방법을 제안하였다[5]. 상기의 연구는 다양한 네트워크 형태에서 이웃하는 로봇과의 연결 방법을 제시했으나 장애물에 의한 로봇의 회피 이동시 네트워크의 연결성을 보장할 수 없는 문제점이 있다. Nguyen 등은 Lead 로봇의 통신을 가능케 하도록 Lead 로봇의 주행 경로를 네트워크 중계 로봇이 주행하면서 가시선(LOS: Line of Sight)과 네트워크 전송 범위(network radius range)내에 존재시키는 연구를 수행하였다[6]. 이 연구는 전파 범위 기반의 단순한 제어구조를 가지며 실제 로봇에 적용하여 그 효용성을 입증한바 있다. 그러나, Leader 로봇의 주행 경로가 복잡하거나 이미 지나간 경로를 가로지르는 경우 최적의 중계 위치를 선정하지 못하는 단점이 있다. Hsieh 등은 전역 지도상의 전파 지도(map)를 분석해 중계 로봇의 위치를 선정하고 이를 이용한 로봇 팀의 행동 제어 전략을 제안했으며 실제 로봇 팀 운용을 통해 제안한 기법이 우수함을 입증했다[6,7,9].

본 논문에서는 상기 연구들의 가상의 힘에 의한 장애물 회피 한계, 최적의 네트워크 중계 위치 할당 문제점 등을 해결하기 위해 로봇간에 LOS가 존재하도록 하는 중계 로봇을 사용한 네트워크 연결성 유지를 위한 행동 제어 기법을 제안한다. 제안하고자 하는 방법은 다음과 같다: 먼저, 효과적인 네트워크 연결성 유지 제어를 위해 군집 로봇 시스템

* Corresponding Author

Manuscript received August 12, 2012 / revised September 12, 2012 / accepted September 25, 2012

김종선, 정준영: 군산대학교 전자정보공학과

(robinside@kunsan.ac.kr/young30@naver.com)

지상훈: 한국생산기술연구원 실용로봇연구그룹(robot91@kitech.re.kr)

주영훈: 군산대학교 제어로봇공학과(yhjoo@kunsan.ac.kr)

* 이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단(과제번호: NRF-2012R1A2A2A01014088)과 지식경제부의 지원을 받아 수행된 연구임.

을 베이스 로봇(base-robot), 중계 로봇(relay-robot), 탐색 로봇(search-robot)으로 나누어 구성한다. 두 번째로, 주어진 작업 환경의 로봇 위치 및 장애물 탐지 정보를 이용해 전역 경로(global path) 및 지역경로(local path) 계획을 수립하고 중계 로봇을 제어하는 알고리즘을 제안한다. 마지막으로 본 연구에서 제안한 기법은 시뮬레이션을 통해 효용성 및 응용 가능성 보여 준다.

상기의 제안한 기법을 기술하기 위한 본 논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서 로봇의 구성과 로봇 제어를 위한 모델링에 대해 기술하고 III 장에서는 주어진 작업 공간의 로봇 위치를 이용해 중계 로봇의 네트워크 중계 위치를 할당하는 전역 경로 계획과 장애물 회피를 위한 지역 경로 계획 기법을 기술한다. 마지막으로 IV 장에서는 시뮬레이션을 통해 제안한 기법의 효용성 및 응용 가능성을 보이고 V 장에서 결론을 맺는다.

II. 군집 로봇 시스템 구성과 로봇 모델링

1. 군집로봇 시스템의 구성

본 연구에서 군집 로봇을 운용하고자 하는 작업 공간은 통신 네트워크가 구축되어 있지 않지만, 각 군집 로봇의 위치 측정이 제공되는 환경으로 가정한다. 본 논문은 이와 같은 환경에서 군집 로봇 시스템을 그림 1과 같이 운용자가 원격 조종 가능한 탐색 로봇, 운용자의 인터페이스 및 원격 조종을 담당하는 베이스 로봇, 베이스 로봇과 탐색 로봇간에 네트워크를 중계하는 다수의 중계 로봇들로 구성한다 (각 로봇은 무선 네트워크를 통해 연결된다고 가정한다). 각 로봇들이 구성하고 있는 내부 제어 모듈은 다음과 같다: 탐색, 중계 로봇은 주행 도중 발생하는 장애물을 탐지하는 LRF (Laser Range Finder) 분석기, 장애물 회피 및 목표 위치로 이동하기 위한 지역경로계획(local path planning) 및 주행 제어를 포함하고 있다. 베이스 로봇은 중계 로봇들의 중계 위치를 할당하는 전역경로계획(global path planning)을 포함하고 있다.

2. 로봇의 기구학 모델

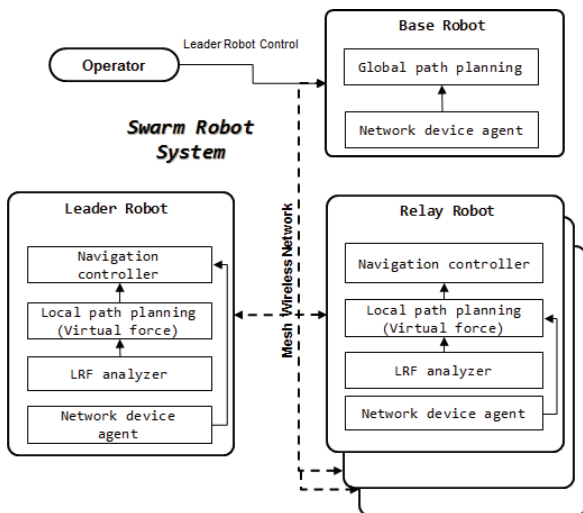


그림 1. 군집 로봇 시스템의 블록 구성도.
Fig. 1. Block diagram for swarm robot system.

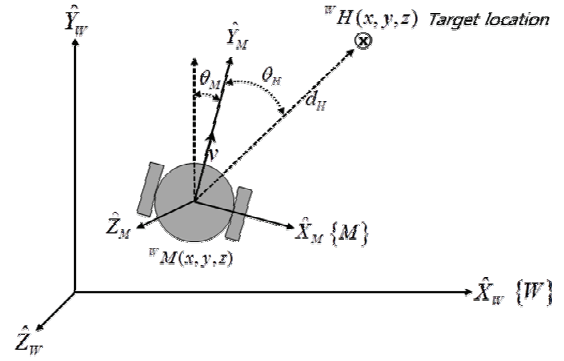


그림 2. 로봇의 기구학.
Fig. 2. Kinematics of robot.

본 논문에서는 작업 공간에서 군집 로봇의 주행 제어를 위해 작업 공간의 좌표계와 각 군집 로봇의 좌표계로 표현한다.

그림 2는 작업 공간 좌표계 $\{W\}$ 에 기준한 로봇 계 $\{M\}$ 의 기구학을 도시한 그림이다. 본 연구에서는 작업 공간 좌표계로부터 로봇의 위치는 ${}^W M$ 만큼 전위하고 ${}^W R_z(\theta_M)$ 만큼 회전한 ${}^W T(\theta_M)$ 으로, 목표 위치는 ${}^W H$ 로 나타내었다. 그러면, 작업 공간 좌표계로 표현된 목표 위치는 역변환 ${}^M T^{-1}$ 를 이용해 로봇 계로 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$${}^M H = {}^M T^{-1} {}^W H \quad (1)$$

여기서, ${}^M T = {}^W T^{-1}$ 이다.

로봇의 진행 방향 \hat{Y}_M 으로부터 목표 위치 ${}^M H$ 의 거리 d_H 및 방향 θ_H 는 식 (2)-(3)과 같다.

$$d_H = \| {}^M H \| \quad (2)$$

$$\theta_H = \begin{cases} \frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{{}^M H(y)}{{}^M H(x)}\right), & {}^M H(x) \geq 0 \\ -\frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{{}^M H(y)}{{}^M H(x)}\right), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

여기서, $|\theta_H| \leq \pi$, $\theta_H > 0$ 이면 시계방향, $\theta_H < 0$ 이면 시계 반대 방향이다.

각 군집 로봇은 위와 같이 작업 공간 좌표계 기준의 로봇 위치 ${}^W M$, 회전각 θ_M , 속도 v 를 갖고 로봇 좌표계에서의 목표 위치 ${}^M H$, 방향 θ_H , 거리 d_H 를 갖게 되며 식 (4), (5)와 같이 작업 공간 좌표계(WFS) 기준 및 로봇 좌표계(RFS) 기준 정보로 나타낼 수 있다. 즉, 군집 로봇이 작업 공간 내에서 기동하는 정보는 식 (4)를 통해 알 수 있으며, 각 로봇이 이동해야할 위치, 주행 각, 속도는 식 (5)를 이용해 알 수 있다. 본 논문에서는 식 (4)와 (5)의 로봇 제어 파라미터를 통해 각 군집 로봇의 주행을 제어한다.

$$WFS = \{ {}^W M, \theta_M, v \} \quad (4)$$

$$RFS = \{ {}^M H, \theta_H, d_H, v \}$$

III. 네트워크 연결성 유지를 위한 행동 제어

1. 행동제어 흐름도

무선 신호는 장애물에 의한 반사, 회절, 굴절, 분산에 의해 왜곡된다. 특히, 무선 네트워크 노드 사이에 시야가 확보되지 않아 송신한 신호를 직접 수신하지 못하는 NLOS (Non-Line Of Sight), 신호간 간섭으로 수신 신호의 진폭과 위상이 불규칙적으로 변하는 다중경로 페이딩(multipath fading) 등은 무선 신호의 감쇠를 심화시키는 주요 원인이다.

본 논문에서는 이러한 무선 신호의 감쇠를 최소화시키기 위해, 로봇간에 LOS가 존재하도록 중계 로봇의 행동을 제어하는 네트워크 연결성 유지를 위한 행동 제어 기법을 제안한다. 제안하는 기법은 그림 3과 같이 전역 경로 계획과 지역 경로 계획 기법으로 나누어진다. 전역 경로 계획은 각 로봇의 들로네 삼각형을 이용해 이웃 로봇간의 통신 중계를 위한 위치 wH 를 생성하며 각 중계 로봇에 할당한다[3, 4]. 또한, 지역 경로 계획은 가상의 힘 기반으로 수행되며 인력 U_A 와 척력 U_R 의 합 U_S 방향으로 로봇을 주행시킨다. 인력은 할당된 wH 의 각 로봇 좌표계 ${}^M H$ 로부터 발생하고 척력은 각 로봇이 탐지한 장애물의 위치 ${}^M RO$ 로부터 발생한다.

2. 들로네 삼각형 기반 전역 경로 계획

제안하는 전역경로계획은 중계 로봇의 네트워크 연결성을 균등하게 유지하기 위해 들로네 삼각형의 무게 중심을 이용한다. 들로네 삼각형의 무게 중심점은 이웃하는 로봇과의 균등한 거리를 생성하고 탐색 로봇과 베이스 로봇간의 최단 거리의 중계 위치를 생성하는 특성이 있다. 이를 사용하여 본 연구에서는 베이스 로봇과 탐색 로봇간을 중계 로봇이 이웃하도록 연결하고 각 중계 로봇은 베이스 로봇 측과 탐색 로봇 측 1개씩 연결을 하도록 정의한다. 그림 4에

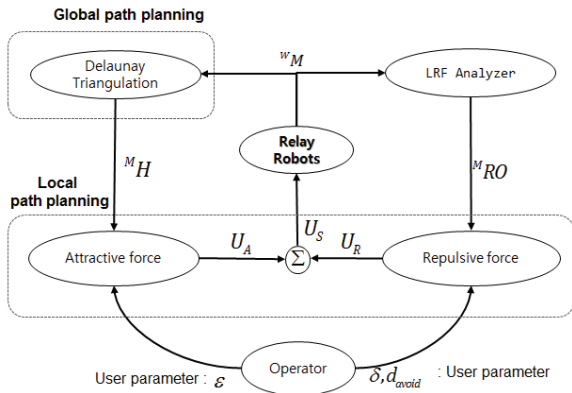


그림 3. 네트워크 연결성 유지를 위한 행동 제어 흐름도.
Fig. 3. Flowchart of behavior control for maintaining network connectivity.

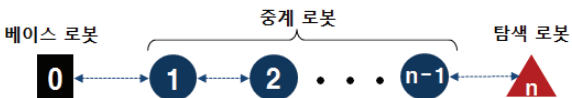


그림 4. 이웃한 로봇의 연결.
Fig. 4. Connectivity between neighboring robots.

n 개의 군집 로봇을 베이스, 탐색 로봇 각 1대와 중계 로봇 $n-2$ 대의 로봇 연결 예를 나타내었다.

상기의 구조에서 들로네 삼각형의 무게중심 위치는 이웃한 로봇들의 위치 ${}^wM_{k-1}$, ${}^wM_{k+1}$ 과 해당 k 로봇의 위치 wM_k 를 이용해 구할 수 있다. 구해진 무게 중심 위치는 중계 로봇이 이동해야 하는 작업 공간상의 목표 위치 wH 이며 식 (1)을 통해 ${}^M H$ 로 변환되어 각 중계 로봇에 할당 된다.

$${}^wH_i = \frac{\| {}^wM_{k-1} + {}^wM_{k+1} + {}^wM_k \|}{3} \quad (8)$$

여기서, k 는 로봇 번호, i 는 중계로봇 번호이며, $0 < i < k$ 이다.

그림 5는 장애물이 없는 공간에서 제안한 전역경로계획 기법을 총 8대의 군집 로봇(탐색 1대, 중계 6대, 베이스 1)에 적용한 예를 나타낸 것으로 1번 중계 로봇의 목표 위치가 wH_0 으로 할당되고 있음을 보여주는 그림이다. 그림 6은

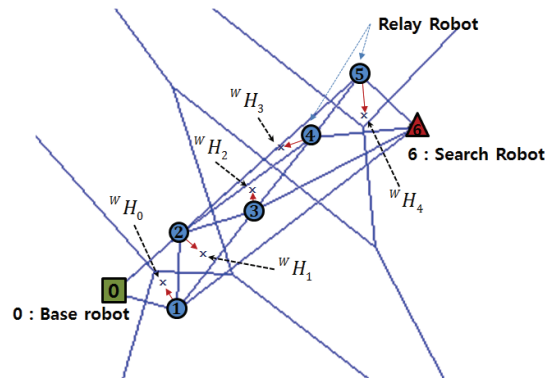


그림 5. 군집 로봇의 전역 경로 계획.
Fig. 5. Global path planning of the swarm robots.

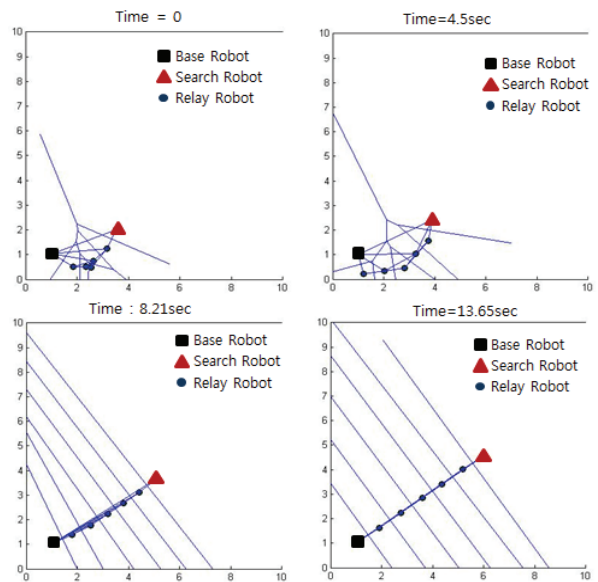


그림 6. 들로네 삼각형을 이용한 중계 로봇의 전역 경로 계획.
Fig. 6. Global path planning of the relay robots using Delaunay triangulation.

그림 5와 같은 로봇구성에서 탐색 로봇(적색 삼각형)이 이동함에 따라 중계 로봇(파란색 원)이 베이스 로봇(검은색 사각형)과 탐색 로봇간 중계 위치를 균등하게 분할하며 이동하는 과정을 보여주고 있다.

3. 가상의 힘 기반 지역 경로 계획

본 논문에서는 로봇이 주행 도중 발생하는 장애물을 회피하고 목표 위치까지 이동하는 지역경로계획을 가상의 힘으로 제어하고자 한다[2,8]. 가상의 힘은 인력과 척력으로 나누어지며 이들 인력과 척력의 벡터 합으로써 로봇이 이동해야 할 방향을 가리키게 된다. 로봇이 목표 위치로 이동하기 위해 인력은 로봇의 목표 위치 ${}^M H$ 로부터 작용시키고 척력은 탐지된 장애물 위치로부터 작용시킨다. 인력 U_{Att}^i 는 식 (9)와 같이 사용자가 정의한 인력 상수 ϵ 와 로봇간 거리 d_h 및 방향 벡터 $\vec{M}H$ 를 이용해 발생시킨다.

$$U_{Att}^i = \epsilon d_h \vec{M}H \quad (9)$$

여기서, i 는 중계 로봇 번호를 나타낸다.

척력 U_R^i 는 주행도중 LRF에 의해 탐지된 모든 장애물 중 사용자가 정의한 회피 거리 d_{avoid} 내에 존재하게 될 때 발생한다. LRF에 의해 탐지된 장애물과 로봇과의 거리는 식 (10)과 같이 LRF 센서로부터 획득한 j 번째 데이터는 거리 ρ , 측정 각 θ 를 이용해 탐지한 로봇의 기준 좌표계로 변환할 수 있다.

$${}^M RO_j = [\rho \cos \theta \ \rho \sin \theta]^T, \theta \in [0, \pi] \quad (10)$$

탐지된 로봇 좌표계 기준 장애물의 위치 ${}^M RO_j$ 에 의한 척력은 식 (11)과 같이 회피 거리 d_{avoid} 거리와 로봇과 장애물과의 유클리디언 거리 d_{O_j} , 사용자가 정의한 척력 상수 δ 를 통해 발생한다.

$$U_R^i = \sum_{j=1}^N \left[\delta \left(-1 + \tanh \left(\left| d_{O_j} \right| \frac{\pi}{d_{avoid}} \right) \right) \vec{M} RO_j \right] \quad (11)$$

여기서 j 는 탐지된 장애물 번호, i 는 로봇 번호, N 은 탐지된 장애물 개수를 나타낸다.

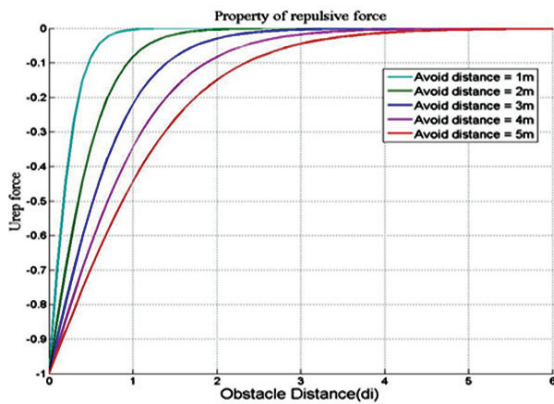


그림 7. 척력의 거리 및 회피 거리에 따른 특성 곡선.
Fig. 7. Characteristic curve according to distance of the attractive force and the avoidance.

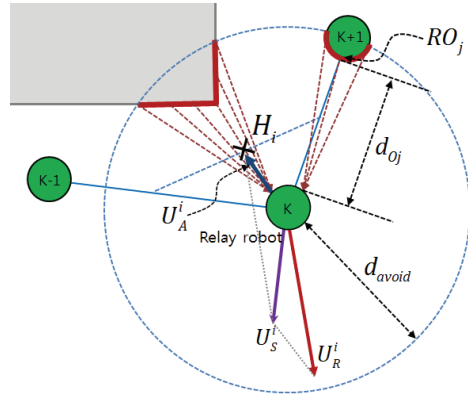


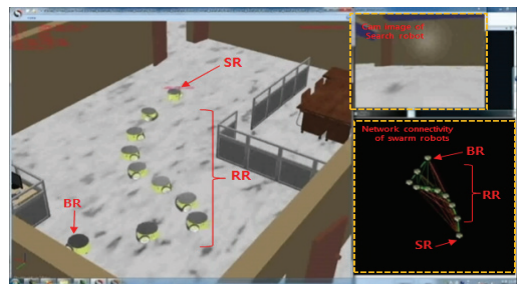
그림 8. 로봇 k에 대한 가상의 힘 작용.
Fig. 8. The effect of the virtual forces for the k robot.

그림 7은 탐지된 장애물 1개, $\delta=1$ 일 때 회피 거리와 탐지된 장애물과의 거리에 따라 변화하는 척력의 변화를 나타낸 그래프이다. 그림에서 알 수 있듯이 최종적으로 중계 로봇은 인력과 척력의 합 $U_s = U_R + U_A$ 방향으로 주행함을 알 수 있다. 그림 8은 k 로봇의 목표 위치 H_i 에 대한 인력과 탐지한 장애물 RO_j 에 의해 발생된 척력 U_R^i 의 합 U_s^i 를 도시한 그림이다.

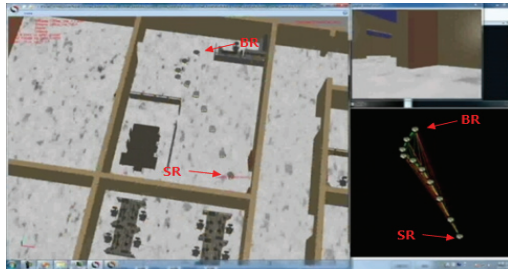
IV. 시뮬레이션 및 결과 고찰

군집 로봇의 시뮬레이션에 사용된 시스템은 Quad Core 3.4GHz, 8GByte RAM에서 (주)심랩의 Robotics-Lab 이라는 시뮬레이션 SDK를 사용했다[19]. 시뮬레이션 환경은 단층 구조의 실내 환경을 구성했다. 기동할 군집 로봇은 베이스 로봇 1대, 탐색 로봇 1대에 중계 로봇 8대, 사용자 정의 상수는 각각 $\epsilon=1.5$, $\delta=1.5$, $d_{avoid}=1.0m$ 로 선정했다. 시뮬레이션 수행은 사용자가 탐색 로봇을 그림 9와 같이 주행 시키는 동안 네트워크의 연결성 및 유지 여부를 확인하기 위해 이웃하는 중계 로봇의 무선 신호 감쇠비(dbm) 변화, 네트워크로 연결된 로봇 수를 검토하였다.

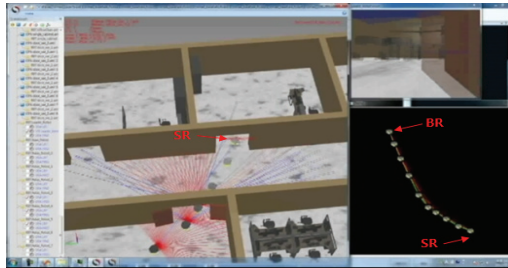
제한한 기법을 이용한 시뮬레이션 수행 결과는 그림 9에서 보는 바와 같이 탐색 로봇이 이동함에 따라 중계 로봇이 전역 경로 계획에 의해 할당된 네트워크 중계 위치로 이동하면서 탐지된 장애물을 지역 경로 계획을 통해 회피함을 알 수 있다. 그림 9의 우측 하단에 나타낸 네트워크 연결도는 탐색 로봇이 진행함에 따라 연결 가능한 로봇과의 RSSI 강도를 표현한 것이다.



(a) 80 sec.



(b) 190 sec.



(c) 240 sec.



(d) 630 sec.



(e) 800 sec.

그림 9. 실내 건물에서의 시뮬레이션 결과.

Fig. 9. Simulation results in indoor environment.

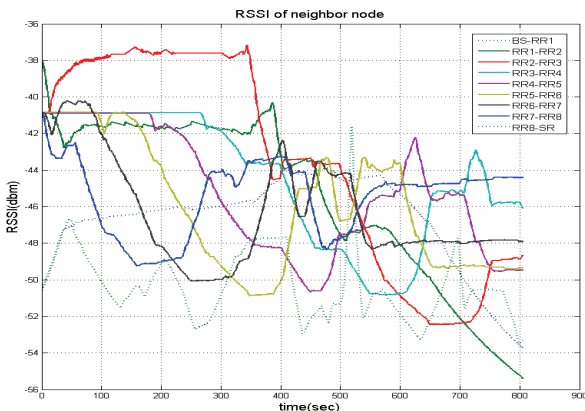


그림 10. 이웃 로봇간 RSSI 감도 변화.

Fig. 10. The change of the RSSI sensitivity in neighbor robots.

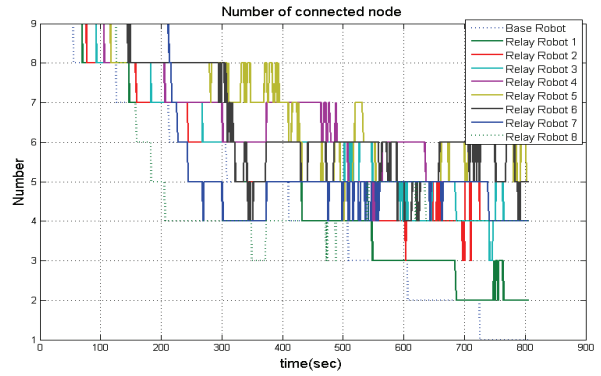


그림 11. 각 로봇의 네트워크 연결 노드 수.

Fig. 11. Number of connected network nodes of each robot.

그림 10은 시뮬레이션 수행 중 각 로봇의 이웃 로봇간 RSSI 감도 변화를 나타낸 것으로, 탐색 로봇이 베이스 로봇과 멀어짐에 따라 각 중계 로봇의 RSSI 감도가 낮아지는 것을 볼 수 있다. 또한, 시뮬레이션 수행이 끝날 때까지 이웃 로봇간 네트워크 연결이 끊기지 않고 있어 제안한 기법의 네트워크 연결성 유지 방법은 효과적임을 알 수 있다. 또한, 그림 11은 작업 환경에서 기동 중 각 로봇이 연결 가능한 모든 네트워크 노드의 수를 나타낸 것으로, 베이스 로봇을 제외한 중계 로봇들이 이웃 로봇 연결에 필요한 최소 2개의 네트워크 연결을 갖고 있음을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 통신 네트워크가 구축되어 있지 않은 작업 공간에서 군집 로봇을 운용하기 위해 네트워크 연결성 유지를 위한 행동 제어 기법을 제안했다. 제안한 기법은 효과적인 행동 제어를 위해 로봇 구성을 베이스, 중계, 탐색 로봇으로 나누고 탐색 로봇이 이동할 때 베이스 로봇과 탐색 로봇간 네트워크의 연결성 유지를 내부 연결이 정의된 중계 로봇이 수행하도록 하는 방법을 제안했다. 또한, 네트워크 연결성 유지는 로봇간에 LOS를 갖고 균등한 로봇간 거리를 유지하는 들로네 삼각형 기반의 전역 경로와 탐지된 장애물을 회피하기 위한 가상의 힘 기반의 지역 경로 계획을 수행함으로써 중계 로봇의 최적 위치를 할당하는 방법을 제안했다. 마지막으로, 본 논문에서 제안한 기법이 군집 로봇의 네트워크 연결성을 유지하는데 있어서 효과적이며 응용 가능성이 있음을 가상의 시뮬레이션 실험을 통해 입증했다.

REFERENCES

- [1] L. E. Parker, "Multiple mobile robot systems," Springer Handbook of Robotics, Springer, Ed. By B. Siciliano and O. Khatib, pp. 921-936, 2008.
- [2] Y. Koren and J. Borenstein, "Potential field methods and their inherent limitations for mobile robot navigation," *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, vol. 2, pp. 1398-1404, Apr. 1991.
- [3] Q. Du, V. Faber, and M. Gunzburger, "Centroidal Voronoi tessellations: Applications and algorithms,"

- Society for Industrial and Applied Mathematics Review*, vol. 41, no. 4, pp. 637-676, 1999.
- [4] Y. Uchimura, T. Imaizumi, and H. Murakami, "Mobile robot deployment based on Voronoi diagram," *ISAS 2011 1st Int. Symposium on*, DOI: 10.1109/ISAS.2011.5960923, Jul. 2011.
- [5] M. M. Zavlanos, M. B. Egerstedt, and G. J. Pappas, "Graph-theoretic connectivity control of mobile robot networks," *Proc. of the IEEE*, vol. 99, no. 9, pp. 1525-1540, Sep. 2011.
- [6] H. G. Nguyen, N. Pezeshkian, M. Raymond, A. Gupta, and J. M. Spector "Autonomous communication relays for tactical robots," *Proc. of ICAR 2003*, pp. 35-40, Jul. 2003.
- [7] M. A. Hsieh, A. Cowley, V. Kumar, and J. C. Taylor, "Maintaining network connectivity and performance in robot teams," *Journal of Field Robotics*, vol. 25, no. 1-2, pp. 111-131, 2008.
- [8] F. E. Schneider, D. Wildermuth, and H. L. Wolf, "Motion coordination in formations of multiple mobile robots using a potential field approach," in *Distributed Autonomous Robotic Systems*, L. E. Parker, G. Bekey, and J. Barhen, Eds., Springer-Verlag, vol. 4, pp. 305-314, 2000.
- [9] J. S. Kim, Y. J. Jo, and Y. H. Joo, "Formation control algorithm for swarm robots," *Proc. of KIIS Fall Conference*, vol. 21, no. 2, pp. 175-176, Dec. 2011.
- [10] V. Kumar, D. Rus, and G. S. Sukhatme, "Networked robots," in *Springer Handbook of Robotics*, B. Siciliano and O. Khatib, Eds. Berlin: Springer-Verlag, Chapter 4, 2008.
- [11] M. Schwager, J. C. Metzger, R. Siegwart, and D. Rus, "Voronoi coverage of non-convex environments with a group of networked robots," *2010 IEEE Int. Conference on Robotics and Automation*, pp. 4982-4989, May 2010.
- [12] Y. Mostofi, M. Malmirchegini, and A. Ghaffarkhah, "Estimation of communication signal strength in robotic networks," *Proc. IEEE Int'l Conf. Robotics and Automation (ICRA '10)*, pp. 1946-1951, May 2010.
- [13] 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.
- [14] M. H. Tak and Y. H. Joo, "Behavior control algorithm for space search based on swarm robots," *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers (in Korean)*, vol. 60, no. 11, pp. 2152-2156, 2011.
- [15] B. H. La and Y. H. Joo, "Formation motion control for swarm robots," *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers (in Korean)*, vol. 60, no. 11, pp. 2147-2151, 2011.
- [16] H. S. Kim, Y. H. Joo, and J. B. Park, "Formation con-

rol for swarm robots using artificial potential field," *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems (in Korean)*, vol. 22, no. 4, pp. 476-480, 2012.

- [17] M. H. Tak and Y. H. Joo, "Error revision of the unknown tag location in smart space," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 16, no. 2, pp. 158-163, 2010.
- [18] 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.
- [19] Robotics-Lab: <http://www.simlab.co.kr>, Simlab Inc.



김 종 선

2007년 군산대학교 전기전자공학과 졸업. 2009년 동 대학원 석사 졸업. 2013년 현재 동 대학원 박사 9학기. 관심분야는 군집로봇 제어, 로봇 비전, 인간-로봇 상호작용, 재설계, 전력 계통 제어.



정 준 영

1987년 연세대학교 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 석사 졸업. 2013년 현재 군산대학교 대학원 박사 10학기. 현재 (주)조은샘교육 전무이사. 관심분야는 영상 인식, 로봇 비전, 인간-로봇 상호작용, 터치 스크린.



지 상 훈

1995년 서울대학교 제어계측공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학부 졸업. 2007년 동대학원 전기컴퓨터공학과 졸업. 2008년~현재 한국생산기술연구원 수석연구원. 2010년~현재 대한전기학회 정보제어부문 이사. 관심분야는 생산자동화로봇, 의료 검진용로봇, 로봇소프트웨어 플랫폼, 군집로봇.



주 영 훈

1982년, 1984년, 1995년 연세대학교 전기공학과 졸업(공학사, 공학석사, 공학박사). 1986년~1995년 (주)삼성전자 자동화연구소 책임연구원. 1998년 2월~1999년 1월 미국 휴스턴대학 전기 및 컴퓨터공학과 박사 후 박사과정. 2009년 한국지능시스템학회 회장. 1995년~현재까지 군산대학교 제어로봇공학과 정교수. 제어·로봇·시스템학회 지능시스템 연구회장, Int. Journal of Control, Automation, Systems (IJCAS) Editor. 대한전기학회 부회장, 대한전기학회 정보제어부문 회장. 관심분야는 지능형로봇, 인간-로봇 상호작용, 지능 제어, 로봇 비전, 지능형 감시 시스템, 풍력 발전 제어 등.