

군집 로봇의 침입자 포위를 위한 비동기 행동 제어 알고리즘

Asynchronous Behavior Control Algorithm of the Swarm Robot for Surrounding Intruders

김 종 선, 주 영 훈*

(Jong Seon Kim¹ and Young Hoon Joo¹)

¹Kunsan National University

Abstract: In this paper, we propose an asynchronous behavior control algorithm of the swarm robot for surrounding intruders when detected an intruder in a surveillance environment. The proposed method is divided into three parts: First, we proposed the method for the modeling of a state of the swarm robot. Second, we proposed an asynchronous behavior control algorithm for the surrounding an intruder by the swarm robot. Third, we proposed a control method for the collision avoidance with the swarm robot. Finally, we show the effectiveness and feasibility of the proposed method through some experiments.

Keywords: swarm robots, behavior control, fuzzy control, collision avoidance, surrounding formation

I. 서론

최근, 다수의 로봇(이하, 군집 로봇)을 이용한 연구 개발이 활발히 진행되고 있다. 군집 로봇은 단일 로봇에 비해 주어진 임무 수행 시 로봇 자체의 결함 및 고장이 발생해도 다른 로봇이 이를 대체 할 수 있기 때문에 높은 임무 달성률을 갖는 특성을 가지며 단일 로봇으로 수행하기 어려운 광범위한 영역(해저, 행성, 빌딩 등)의 탐사 및 감시 등에서 높은 시간적 효율성을 보이고 있다[9,12]. 이러한 군집 로봇 시스템의 기술은 군집 행동제어 기술, 군집 상황인지 기술, 군집 네트워킹 기술, 군집 시스템통합 기술 등 크게 4부분으로 분류될 수 있으며[15-19], 본 연구에서는 군집 행동 제어 기술에서 감시 영역의 침입자 포위 행동 제어에 대해 기술하고자 한다.

군집 로봇의 행동 제어는 중앙 제어 방식과 분산 제어 방식으로 나누어진다. 중앙 제어 방식은 군집 로봇의 목표 위치 및 충돌회피 제어를 중앙 로봇(또는 서버)이 처리하는 방식으로 주어진 환경 정보 및 센싱 정보가 정밀할 경우 높은 작업 정밀도를 유지할 수 있다[1,2]. 그러나 로봇의 대수가 늘어나면 제어 시스템이 복잡해지고 연산량이 급격하게 증가하는 문제점을 갖는다. 분산 제어 방식은 중앙제어 방식에 비해 높은 정밀도를 제공하진 못하지만 제어 시스템을 비교적 쉽게 구축할 수 있고 로봇의 대수가 증가해도 전체 시스템이 복잡해지지 않는 장점이 있지만 임무 완료 소요 시간을 보장 받지 못하며, 각 개체간의 협조 체계를 구축하는 것이 쉽지 않다[7,8,10,11]. 이러한 문제점을 해결하기 위해 근래에는 하이브리드 방식(중앙+분산, 연속시간+

이산시간 등)과 관련한 연구가 진행 되고 있다.

군집 로봇을 이용한 침입자 포위 행동 제어와 관련한 연구를 살펴보면, 중앙 제어 방식으로는 Guo 등은 군집 로봇이 특정 로봇의 주위를 포위하기 위해 목표 로봇의 이동 속도, 거리를 이용한 바 있으며, Lin 등은 가상의 공간(potential field)을 이용한 로봇의 충돌 회피와 전역 경로 계획을 수행한 바 있다[4,13]. 분산 제어 방식으로는 Linda 등이 퍼지 이론을 이용해 군집 로봇의 군집성을 영역 기반으로 모델링하여 로봇간 충돌 회피 및 목표 위치로의 가상의 힘(virtual force)을 모델링한바 있으며, Sabattini 또한 가상의 힘이 존재하는 공간을 생성하고 로봇이 특정 라인위를 수행하는 연구를 진행한바 있다[3,6]. 하이브리드 방식으로 McClintock 등은 주어진 공간에서 군집 로봇의 행동을 제어하기 위해 이벤트 플랜트/제어기, 상태 플랜트/제어기 구조를 설계하고 주행중인 로봇의 센싱 정보로부터 이벤트 발생여부를 분석해 개별 로봇의 행동 제어 연구를 수행한 바 있다[5].

본 논문에서는 연산량이 비교적 적고 시스템이 복잡해지지 않는 분산제어 방식의 비동기 포위 행동 제어 기법을 제안하고자 한다. 앞서 언급한 분산 제어 방식이 갖는 문제점을 해결하기 위해, 군집 로봇의 구조를 Leader 로봇과 Follow 로봇들로 나누어 각 로봇의 임무를 비동기적으로 수행하도록 각 로봇을 설계한다. 이후, Leader 로봇은 협조 제어 및 Follow 로봇들의 임무 할당을 수행하도록 설계하며 Follow 로봇들은 할당된 임무를 수행하고 완료하도록 설계한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II 장은 제안하는 시스템을 간략히 설명하고, III 장에서 로봇 상태 모델링을 통해 제어의 파라미터를 선정한 뒤 IV 장에서 군집 로봇의 침입자 포위를 위한 비동기 포위 행동 제어 알고리즘을 설명한다. V 장에서는 제안한 기법의 시뮬레이션 결과에 대해 설명하고 VI 장에서 결론을 맺는다.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2012. 6. 5. 수정: 2012. 8. 6. 채택확정: 2012. 8. 15.

김종선, 주영훈: 군산대학교 제어로봇공학과

(robinside@kunsan.ac.kr/yhjoo@kunsan.ac.kr)

※ 이 논문은 2012년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2012014088).

II. 제안하는 시스템

본 논문에서 제안하는 군집 로봇의 비동기 포위 행동 제어 알고리즘은 크게 4부분으로 나누어진다.

먼저, 군집 로봇과 목표(침입자)를 작업 공간(우주 좌표계)에서 군집 로봇의 좌표계로 변환하고 작업 공간내에 존재하는 도주로 정보를 분석한다. 비동기 포위 행동제어 알고리즘은 탐지된 침입자의 위치 및 작업 공간의 상태 정보(WFS)와 로봇의 상태 정보(RFS)를 입력받아 포위 대형 목표점을 생성한다. 이때, 목표점은 각 로봇의 목표 위치와의 거리를 고려해 비동기적으로 생성되며 최종적으로 로봇이 이동해야할 방향 θ_H 및 거리 d_H 를 출력한다. 충돌회피는 로봇간의 충돌회피 제어만을 수행하며 로봇간의 거리 d_O 와 방향 θ_O 를 고려해 충돌회피 제어각 θ_C 를 생성한다. 마지막으로 퍼지 주행제어기는 θ_C 와 d_C 를 이용해 목표위치로 이동하기 위한 주행각 및 속도를 제어한다.

III. 로봇 상태 모델링

군집 로봇은 작업 공간에서 특정 상황이나 임무 수행 시 작업 공간을 우주 좌표계로 기준하여 표현된 목표 위치로 이동해야 한다. 이때, 각 군집 로봇의 계로 표현된 목표 위치의 방향, 떨어진 거리를 알 수 있다면 군집 로봇의 제어가 용이해진다. 본 논문에서는 이를 위해 군집 로봇에서 바라본 작업 공간상 목표 위치를 기하학적 변환을 이용해 변환하고 이를 모델링 한다. 기하학을 이용해 우주계(World frame) $\{W\}$ 에 기준한 로봇 계 $\{M\}$ 는 그림 2와 같이 나타낼 수 있다. 우주계로부터 로봇의 위치는 $M(x, y, z)$ 만큼 전위하고 ${}^WR_z(\theta_M)$ 만큼 회전한 ${}^MT(\theta_M)$ 로 목표 위치는 ${}^WH(x, y, z)$ 로 나타낼 수 있다. 우주계로 표현된 목표 위치는 역변환 ${}^MT^{-1}$ 를 이용해 로봇 계로 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$${}^MH = {}^MT^{-1}{}^WH \quad (1)$$

여기서 ${}^MT = {}^MT^{-1}$ 이다.

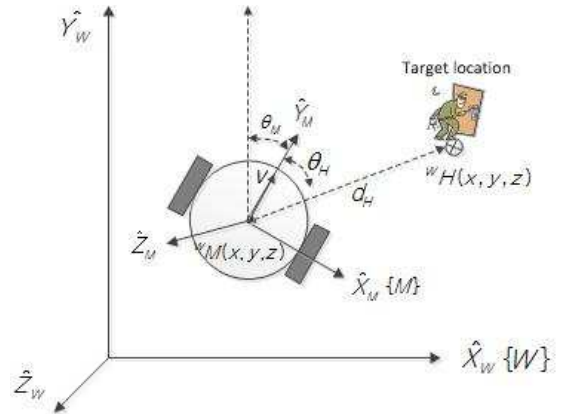


그림 2. 로봇의 기하학 모델링.

Fig. 2. Kinematics modeling of robot.

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

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

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

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

각 군집 로봇은 위와 같이 우주계 기준의 로봇 위치 WM , 회전각 θ_M , 속도 v ,를 갖고 로봇 계에서의 목표 위치 MH , 방향 θ_H , 거리 d_H 를 갖게 되며 식 (4), (5)와 같이 우주계 기준(WFS) 및 로봇계(RFS) 기준 정보로 나타낼 수 있다.

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

$$RFS = \{{}^MH, \theta_H, d_H, v\} \quad (5)$$

IV. 군집 로봇의 침입자 포위를 위한 비동기 행동 제어 알고리즘

1. 비동기 포위 행동제어 알고리즘

포위 행동 제어는 침입자 발생 시 침입자 주위를 에워싸거나 도주가 불가능하도록 빠르게 대처해야하는데, 이러한 제어는 각 로봇들의 위치, 이동 상태, 작업 공간의 특성, 침입자의 이동 등에 따라 달라지며 변화된 포위 행동 제어 전략은 군집 로봇에 즉시 반영되어 포위 행동 제어의 성공률을 높일 수 있어야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 Leader 로봇이 로봇의 상태와 침입자의 상태, 작업공간의 상태 등에서 최적의 포위 행동 전략 및 임무를 판단하고 각 Follow 로봇에 생성된 포위 행동 제어 전략을 할당하여 임무를 달성케 하고자 한다. 먼저, 군집 로봇은 감시 중인 영역에 침입자가 발생할 경우 침입자의 주변을 둘러싸는 포위 행동과 도주 가능한 탈출로를 차단하는 임무를 수행해야 한다. 그러나 침입자의 위치는 예측 불가능하고 무작

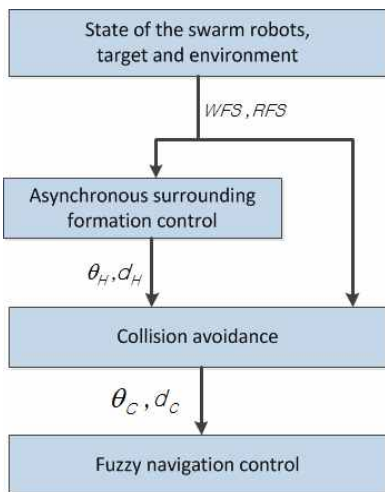


그림 1. 전체 시스템 블록도.

Fig. 1. System block diagram.

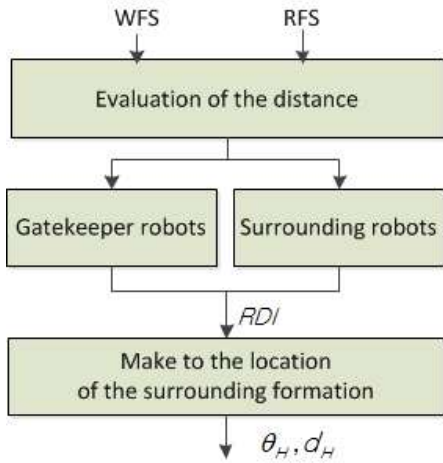


그림 3. 비동기 포위 행동 제어 블록도.
Fig. 3. Block diagram of the asynchronous behavior control algorithm.

위적이다. 이는 침입자와 각 군집 로봇간 거리가 일정하지 않고, 포위를 위해 임무 수행 위치(포위 및 도주로 차단)로 이동하는데 소요되는 시간이 서로 다르게 되는 특성을 야기한다. 때문에 수행할 임무 목표 위치와의 거리를 고려한 포위 대형 목표점(로봇이 이동해야할 위치)을 로봇의 위치를 평가해 동적으로 할당해야 한다. 본 절에서는 이를 위해 Leader 로봇이 포위 행동 제어에 적합하도록 각 로봇의 위치를 평가해 각 로봇의 임무 할당하는 비동기 포위 행동 제어 알고리즘을 제안하며 제안하는 알고리즘은 크게 임무 할당, 위치 평가, 포위 대형 목표점 함수로 나뉜다. 그림 3은 본 논문에서 제안하는 비동기 포위 행동 제어 블록도를 나타낸다.

임무 할당은 침입자가 도주 가능한 문, 창문 등의 도주로를 차단하는 임무 할당과 침입자를 둘러싸는 포위 행동 임무 할당으로 나누어진다. 본 논문에서는 이들 도주로 및 침입자의 위치를 각각 WEL , WIL 로 할당될 로봇 임무를 RDI 이라 정의한다. RDI 은 로봇의 임무 rd (Robot duty), 임무 위치 요청 fr (Formation request), 임무 상태 ds (Robot duty state), 임무 위치 dl (Robot duty location), 임무 거리 dd (duty distance) 정보를 갖는다. 또한, WEL 및 WIL 은 식 (1)을 이용해 i 번째 로봇 좌표계에서 바라본 도주로의 위치 ${}^MEL^i$, 침입자 위치 ${}^MIL^i$ 로 나타낼 수 있다.

도주로 차단 임무는 식 (6)과 같이 k 도주로로부터 가장 가까운 거리에 있는 i 로봇이 임무를 할당받게 된다. 이때 RDI^i 에 할당 임무에 대한 거리, 위치 정보를 식 (7)과 같이 입력 받는다.

$$RDI^i(dl) = \min(\|{}^MEL_k^i\|) \quad (6)$$

$$RDI^i \begin{cases} rd = Gate\ keeper \\ dd = \|{}^MEL_k^i\| \\ rl = {}^MEL_k^i \end{cases} \quad (7)$$

여기서 i 는 로봇 번호, k 는 도주로 번호이다. 도주로 차단 임무를 수행하는 이외의 로봇은 침입자를

포위하는 임무를 할당 받게 된다. 포위 임무를 수행하는 로봇은 식 (8)과 같이 침입자의 위치 및 거리 정보를 입력 받게 된다.

$$RDI^j \begin{cases} rd = Besieger \\ dd = \|{}^MIL^j\| \\ rl = {}^MIL^j \end{cases} \quad (8)$$

여기서 j 는 도주로 차단 임무 로봇 번호이다. 임무 할당이 완료되면 군집 로봇은 각 로봇이 할당 받은 dl 을 MH 로 선정하고 목표위치로 이동을 시작한다. 이때 군집 로봇과 침입자와의 거리가 다르기 때문에 이들이 도착하는 시간도 다르다. 즉, 침입자 주변에 군집 로봇이 위치하게 될 때 해당 로봇들에게 포위 위치를 지정해주어야 한다. 포위 임무가 할당된 이후 로봇과 침입자간의 위치를 평가해 포위 임무 수행을 위한 대형 목표점을 생성한다. 침입자-로봇간 거리는 식 (8)에서 나타낸 $RDI^j(rl)$ 이며 주기적으로 로봇이 정보를 갱신하고 있다. 침입자로 향하던 로봇은 사용자가 설정한 파라미터 udl 보다 작을 때 임무 위치 요청을 보내게 되며 간단히 식 (9)와 같다.

$$RDI^j(fr) \begin{cases} 1, RDI^j(dl) \leq udl \\ 0, otherwise \end{cases} \quad (9)$$

여기서 j 는 포위 임무 할당 로봇 번호이며 $ul > 0$ 이다. 임무 위치 요청이 발생하게 되면 시스템은 매개변수 함수 ${}^WY = g(n, ufl, {}^WIL)$ 를 이용해 포위 대형을 생성한다. 여기서 WY 는 우주좌표계에서 n 개의 목표점이며 n 은 임무 위치 요청 로봇의 수, ufl 은 사용자 정의 파라미터, WIL 은 우주좌표계에서 침입자의 위치이다. 본 논문에서는 포위 대형을 원형으로 설정했으며 그림 4는 3대 로봇 포위 대형 목표점 생성 위치(WY)를 보여주고 있다. 군집 로봇에게 목표점을 할당하는 방법은 로봇의 위치 $RS({}^WM)$ 와 목표점 WY_k 들과의 거리에서 최소 거리를 갖는 목표 점을 할당하는 것이다. 이때 다른 로봇에게 할당된 위치가 최소 거리를 갖는 목표점일 경우 그 다음 최소 거리를 갖는 목표점을 선택하게 된다. 이는 식 (10)과 같다.

$$RDI^i(dl) = \min(\|{}^WY_k - RS^i({}^WM)\|) \quad (10)$$

where, ${}^WY_k \neq RDI^{i-1}(dl)$

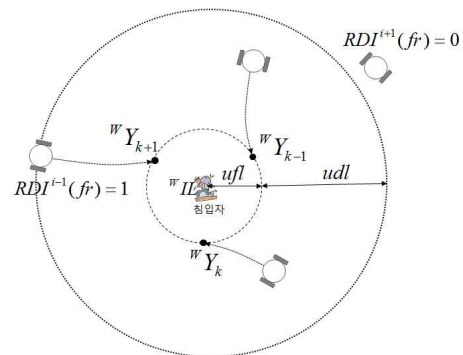


그림 4. 침입자 포위 행동 제어 모식도.
Fig. 4. Mimetic diagram of a surrounding behavior control.

2. 충돌 회피 제어

군집 로봇은 이동해야 할 목표 지점이 주어지면 이동을 시작한다. 본 논문에서 제안하는 충돌 범위 제어 기법은 각 군집 로봇에 충돌 회피 영역 D_c 를 두고 D_c 영역에 장애물이나 다른 로봇의 존재 여부를 판단해 충돌을 회피하는 비교적 간단한 방법을 사용한다.

그림 5는 로봇의 위치 M 과 충돌 범위 D_c 를 나타낸 그림으로, 충돌 영역에 존재하는 장애물의 위치는 우주 좌표계로 표현되는 ${}^W O$ 로 표현된다. 앞서 언급한 식 (1)을 이용해 장애물의 위치 ${}^W O$ 는 로봇 좌표계 $\{M\}$ 로 변환할 수 있으며 로봇 진행 방향에 대한 장애물의 방향 θ_o , 거리 d_o 를 알 수 있으며 식 (11)과 같이 로봇 좌표계를 기준한 장애물 상태 OS 로 나타낼 수 있다. 회피 계획은 탐지된 장애물 방향 합의 반대 방향으로 로봇의 주행 각을 설정하여 회피하며 식 (12)와 같다.

$$OS_j = \{ {}^M O^i, \theta_o^i, d_o^i \} \quad (11)$$

$$\theta_M = \begin{cases} \theta_M, & N=0 \\ \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N \theta_o^i \right) + \pi, & N>0 \end{cases} \quad (12)$$

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

3. 퍼지 주행 제어

회피 제어를 거친 군집 로봇의 목표 위치는 최종 목표 위치와 이동할 거리를 알고 있다. 본 절에서는 이들 군집 로봇의 주행 제어를 위한 퍼지 주행 제어 기법을 사용하고 자 한다. 먼저, 퍼지 이론은 퍼지 집합의 사고방식을 기초로 하고 있다. 퍼지 집합은 0또는 1이라는 이진법 논리에서 대상이 갖는 각 소속 정도를 소속 함수로 나타냄으로써 기존의 수학적 모델링이 어려운 비선형 시스템, 패턴인식 등 많은 분야에서 활용되고 있는 이론이다. 본 연구에서는 선형 추론을 이용해 퍼지 주행 제어기를 설계한다. 퍼지 주행 제어기는 군집 로봇의 목표 위치간 거리(d_T) x_1 , 목표 위치와의 각도차(θ_T) x_2 를 입력으로 하고 로봇의 조향각 (θ_M)

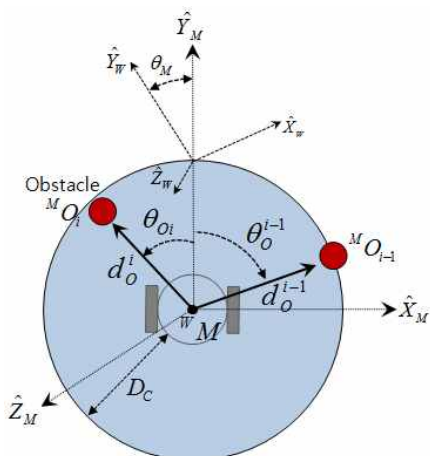


그림 5. 충돌 영역과 회피 방법.
Fig. 5. Collision area and avoidance method.

표 1. 군집 로봇의 주행 제어를 위한 퍼지 규칙.

Table 1. Fuzzy rule for navigation control of swarm robots.

		θ_C		
		Big	Middle	Small
d_C	Near	Very High	Medium High	Medium
	Middle	Medium High	Medium	Medium Low
	Far	Medium	Medium Low	Very Low

을 출력 y 로 하여 설계한다. 퍼지 모델의 구조를 살펴보면 선형추론의 경우 아래와 같은 규칙으로 이루어진다.

$$R^i: \text{If } x_1 \text{ is } A_{i1}, \dots, \text{ and } x_k \text{ is } A_{ik}, \quad (13)$$

$$\text{Then } y_i = f_i(x_1, \dots, x_k)$$

여기서 R_i 는 $i(i=1, \dots, n)$ 번째 규칙, A_{ij} 는 소속함수, $x_j(j=1, \dots, k)$ 는 입력 변수, $f_i(x_1, \dots, x_k) = a_{i0} + a_{i1}x_1 + \dots + a_{ik}x_k$ 는 후반부 파라미터, n 은 퍼지 규칙의 수를 나타낸다.

각 규칙은 식 (14)-(16)과 같이 전반부 적합도를 계산하고 추론 결과를 얻은 뒤 비퍼지화를 거쳐 최종 추론 결과를 얻게 된다.

$$w_i = \mu_{A_{i1}}(x_1) \wedge \dots \wedge \mu_{A_{ik}}(x_k) \quad (14)$$

$$y_i = w_i \times f_i(x_1, \dots, x_k) = w_i \times (a_{i0} + a_{i1}x_1 + \dots + a_{ik}x_k) \quad (15)$$

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n w_i f_i(x_1, \dots, x_k)}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (16)$$

여기서 w_i 는 적합도, y 는 최종 추론 결과이다.

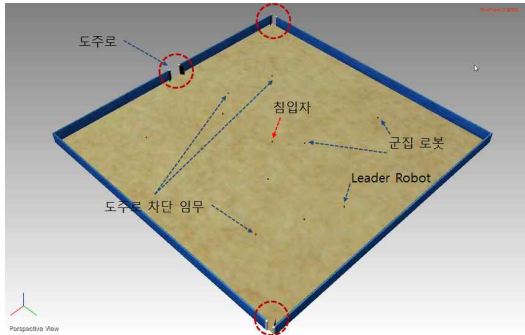
퍼지 입력으로 사용하기 위한 목표위치와의 거리(d_T) x_1 , 방향(θ_T) x_2 의 문턱치는 식 (17)과 같다.

$$\begin{cases} x_1 = d_t : 0 < d_t \leq 10 \\ x_2 = \theta_T : 0 < \theta_T \leq \pi \end{cases} \quad (17)$$

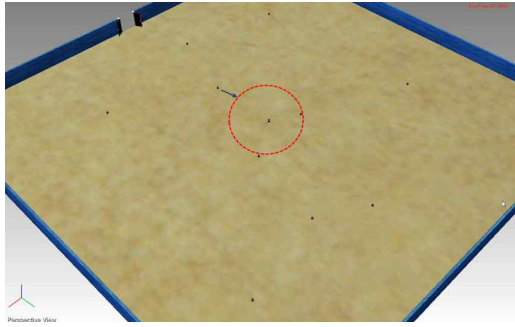
설계한 퍼지 멤버십 함수는 표 1과 같다.

V. 시뮬레이션 및 결과고찰

본 연구에서 제안한 기법을 실험 및 검증하기 위해 로봇 시뮬레이터 툴(Robotics Lab.)을 이용한다. 실험 환경은 로봇 10대, 실험 공간 $100m^2$, 도주로 2개, 1명의 침입자(이동 제어가 가능한 로봇으로 구현)를 가정했다. 실험은 제안한 침입자 포위를 위한 비동기 포위 행동 제어 알고리즘을 사용한 결과와 사용하지 않았을 때를 보여주며 그림 6과 7에 그 결과를 나타내었다. 그림 6은 제안한 알고리즘을 사용하지 않고 포위 행동을 했을 때 결과를 나타낸 것으로 그림 6(a)는 초기 위치를 보여준다. 그림 6(b)-(d)는 침입자를 이동시켰을 때 군집 로봇이 갖는 포위 대형을 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 포위 임무 위치를 할당해 주지 않은 포위 행동 제어는 각 로봇이 침입자를 추종하는 이동 형태를 가짐을 알 수 있다. 본 논문에서 제안하는 침입자 포위를 위한 비동기 행동 제어 알고리즘의 실험 결과는 그림 7과 같으며, 그림 7(a)는 초기 위치로 실험 1의 초기 위



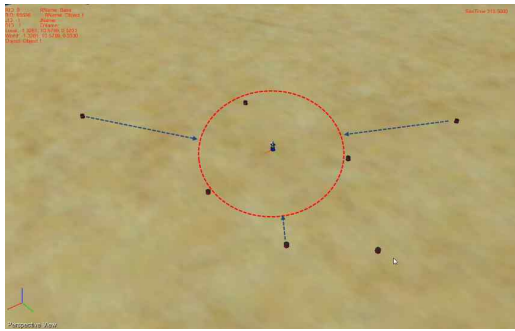
(a)



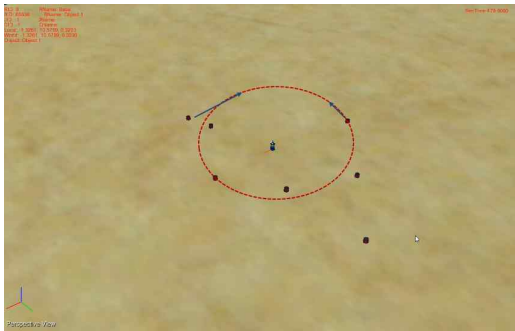
(b)



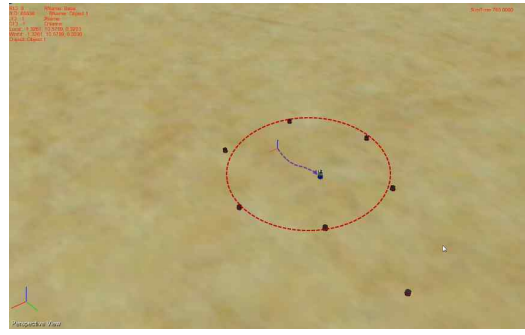
(c)



(d)



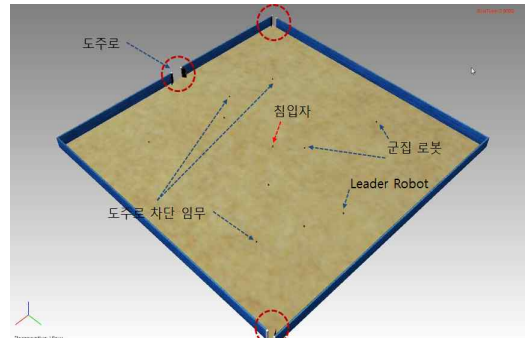
(e)



(f)

그림 6. 비동기 포위 행동 제어 실험 결과.

Fig. 6. Experiment result of the asynchronous behavior control for surrounding intruder.



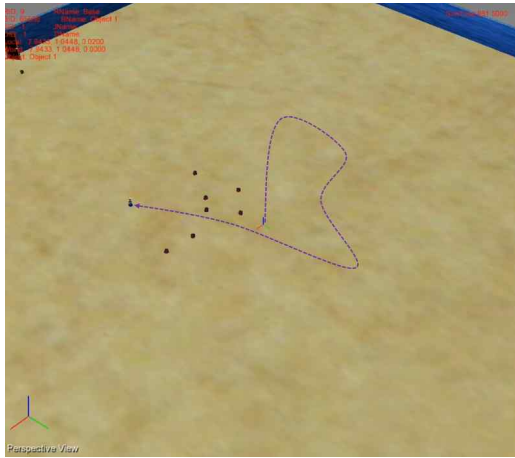
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 7. 제안한 알고리즘을 사용하지 않았을 때의 실험 결과.
 Fig. 7. Experiment result when the proposed algorithm is not used.

치와 동일하게 설정했다. 침입자 탐지 이후 도주로 차단 임무를 할당 받은 로봇은 각 도주로의 차단 위치로 이동을 시작하고 포위 임무 로봇 할당된 임무 수행 위치로 이동을 시작한다. 그림 7(b)-(d)는 포위 임무를 수행하는 로봇의 이동 형태를 보여주고 있으며 그림 7(c)에서 침입자 주위에 3대~5대의 로봇이 서로 다른 시간에 도달하고 포위 대형(정삼각형 모양)을 생성하는 과정, 그림 7(e)는 로봇 6대가 침입자 주위로 모여들어 포위를 위한 대형을 생성하는 과정을 보여주고 있다. 마지막으로 그림 6(f)는 6대의 로봇이 침입자를 원형으로 포위하고 침입자가 이동할 때에도 포위 대형을 유지한다는 것을 알 수 있다.

VI. 결론

본 논문에서는 감시 중인 공간에서 군집 로봇을 이용해 침입자의 포위 행동 제어를 위한 군집 로봇 상태 모델링, 비동기 포위 행동 제어 알고리즘 및 각 군집 로봇간의 충돌 회피 제어 기법을 제안했다. 실험 결과에서 알 수 있듯이 본 연구에서 제안한 기법은 침입자를 포위하는데 있어서 로봇의 대수 변화 및 침입자의 이동시 포위 대형을 효과적으로 유지 시켜주는 결과를 보여주었다. 따라서 본 논문에서 제안한 기법의 효용성 및 응용 가능성을 입증하였다.

참고문헌

[1] L. E. Parker, "Multiple mobile robot systems," in *Springer Handbook of Robotics*, pp. 921-941, 2008.
 [2] D. Miklic, S. Bogdan, and R. Fierro, "Decentralized grid-based algorithms for formation reconfiguration and synchronization," *ICRA 2010 International Conference*, pp. 4463-4468, 2010, 5.
 [3] L. Sabattini, C. Secchi, C. Fantuzzi, and De M. Possamai, "Tracking of closed-curve trajectories for multi-robot systems," *IROS 2010*, pp. 6089-6094, Oct. 2010.

[4] J. Guo, G. Yan, and Z. Lin, "Cooperative control synthesis for moving-target-enclosing with changing topologies," *ICRA 2010 International Conference*, pp. 1468-1473, May 2010.
 [5] J. McClintock and R. Fierro, "A hybrid system approach to formation reconfiguration in cluttered environments," *Control and Automation 2008 Mediterranean Conference*, pp. 83-88, Jun. 2008.
 [6] O. Linda and M. Manic, "Fuzzy manual control of multi-robot system with built-in swarm behavior," *HSI-2009: 2nd International Conference on Human System Interactions*, pp. 4-9, May 2010.
 [7] M. Schwager, J. McLurkin, and D. Rus, "Distributed coverage control with sensory feedback for networked robots," *Proceedings of Robotics: Science and Systems*, pp. 49-56, 2006.
 [8] M. Schwager, B. J. Julian, and D. Rus, "Optimal coverage for multiple hovering robots with downward facing cameras," *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3515-3522, May 2009.
 [9] L. E. Parker, "Alliance: An architecture for fault tolerant multi-robot cooperation," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 14, no. 2, pp. 220-240, Apr. 1998.
 [10] J. R. T. Lawton and R. W. Beard, "A decentralized approach to formation maneuvers," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 19, no. 6, pp. 933-941, Dec. 2003.
 [11] 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.
 [12] M. Mataric, M. Nilsson, and K. Simsarian, "Cooperative multi-robot box pushing," *Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 556-561, 1995.
 [13] C. C. Lin, P. Y. Hsiao, and K. C. Chen, "A motion planning of swarm robots using genetic algorithm," *2010 Int. Conf. on Broadband, Wireless Computing, Communication and Applications*, pp. 538-543, Nov. 2010.
 [14] M. S. Bang and Y. H. Joo, "The Cooperate Navigation for Swarm Robot Using Centroidal Voronoi Tessellation," *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, vol. 61, no. 1, pp. 130-134, 2012.
 [15] 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.
 [16] 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*, vol. 60, no. 11, pp. 2152-2156, 2011.

- [17] H. Y. La and Y. H. Joo, “Formation motion control for swarm robots,” *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, vol. 60, no. 11, pp. 2147-2151, 2011.
- [18] H. S. Kim, Y. H. Joo, and J. B. Park, “Formation control for swarm robots using artificial potential field,” *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems (in Korean)*, vol. 22, no. 4, pp. 476-480, 2012.
- [19] 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.



김 종 선

2007년 군산대학교 전자정보공학부 졸업(학사). 2009년 동 대학원 전기전자 제어과 졸업. 2009년~현재 동 대학원 박사과정재학. 관심분야는 군집 로봇, 영상 감시 시스템, 지능 시스템등.



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 박사후박사과정. 2009년 한국지능시스템학회 회장. 1995년~현재까지 군산대학교 제어로봇공학과 정교수. 현재, 군산대학교 Post BK21 사업팀장, 제어·로봇·시스템학회 지능시스템연구회장, Int. Journal of Control, Automation, Systems (IJCAS) Editor. 대한전기학회 정보제어부문 부회장, 관심분야는 지능형로봇, 인간-로봇 상호작용, 지능 제어, 감정 인식, 네트워크 기반 제어기설계 등.