

지상 로봇의 분산형 임무할당과 무인기의 네트워크 연결성 추정 및 제어를 통한 협업

Cooperation with Ground and Aerial Vehicles for Multiple Tasks: Decentralized Task Assignment and Graph Connectivity Control

문성원, 김현진*
(Sungwon Moon¹ and Hyoun Jin Kim¹)
¹Seoul National University

Abstract: Maintenance and improvement of the graph connectivity is very important for decentralized multi-agent systems. Although the CBBA (Consensus-Based Bundle Algorithm) guarantees suboptimal performance and bounded convergence time, it is only valid for connected graphs. In this study, we apply a decentralized estimation procedure that allows each agent to track the algebraic connectivity of a time-varying graph. Based on this estimation, we design a decentralized gradient controller to maintain the graph connectivity while agents are traveling to perform assigned tasks. Simulation result for fully-actuated first-order agents that move in a 2-D plane are presented.

Keywords: decentralized task assignment, decentralized connectivity control, multi-agents

I. 서론

현재까지 다중 개체 시스템의 협업제어에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 지난 수년간 flocking [1], consensus, coverage and pattern formation [2,3], 다중로봇의 경로계획[4] 등 다양한 연구들이 발표되었고, 최근 다수의 연구들이 전체 시스템의 목적에 대해 분산형 제어 기법을 설계하는 것에 초점을 맞추고 있다.

분산형 제어 기법에 있어서, 수렴성은 매우 중요한 문제이다. 합의기반 번들 알고리즘(consensus-based bundle algorithm)은 로봇의 임무 할당에 있어서, 빠른 수렴 성과 근최적해를 보장한다[5]. 특히 임무의 개수가 로봇보다 많은 경우에 대한 할당이 가능하다. 이때 수렴성과 최적 성능은 전체 시스템의 그래프가 connected 일때만 보장된다. 따라서 그래프의 연결성 제어 역시 분산형 제어 기법에서 필수적인 역할을 하게 된다.

그래프 연결성 제어를 위한 중앙집중형 방식으로 Zavalanos와 Pappas [6,7]는 주어진 그래프에 대해 k-연결행렬을 계산하여 off-diagonal 성분이 양수로 유지되도록 하거나[6], 또는 connectedness는 축소형 Laplacian 행렬의 행렬값이 양수로 유지되는 것과 동일하다는 성질을 이용하여[7] gradient 제어를 설계하였다. Spanos와 Murray [8]는 각각

의 에이전트가 분산형 방식으로 2-hop 연결을 유지하는 제어를 설계하였다. Zavalanos와 Pappas [9]는 그래프 연결의 추가와 끊어짐을 확인하기 위해 전체 그래프 연결성을 예측하는 지역적 추정을 이용하였고, 포텐셜 필드를 이용하여 각 에이전트의 움직임을 제어하였다.

본 논문에서는 CBBA 알고리즘과 분산형 통신 연결성 제어기법[10]을 소개하고 이를 다중 개체 시스템의 임무 수행 시나리오에 적용하고자 한다. 특히, 본 논문에서는 통신 topology가 시간에 따라 변하는 상황의 시나리오를 고려하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서는 구체적인 문제 정의를 기술한다. III 장과 IV 장에서 각각 CBBA와 분산형 통신 연결성 제어 기법을 소개하고, V 장에서는 제시된 제어 기법을 통한 수치 시뮬레이션 결과와 이에 대한 논의를 기술한다. 마지막으로 VI 장에서 결론을 맺는다.

II. 문제 정의

본 논문에서는 2차원 평면의 작전지역 안에 M 개의 임무 지점이 존재할 때, N개의 지상 무인 로봇이 이들 임무를 효율적으로 수행하는 문제를 다룬다. 특히 $M > N$ 일 때, 즉 무인 로봇 보다 많은 수의 임무 지점이 존재하는 경우에 대해 전체 로봇의 이동거리를 최소화 하고자 한다. 각각의 로봇은 다음과 같이 등속도 V 로 움직이는 질점 모델로 가정하였다.

$$\dot{p} = u \quad (1)$$

$p = [x, y]^T$ 는 로봇의 현재 위치를 의미하고, 입력 $u = [u_x, u_y]^T$ 는 $u_x^2 + u_y^2 = V$ 를 만족한다. 분산형 임무할당을 위해서 각각의 로봇은 서로 이웃한 로봇들과 지역적인 통신을 통하여 정보를 교환한다. 이때 지상 로봇 사이의 통

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2011. 10. 14., 수정: 2012. 1. 5., 채택확정: 2012. 1. 25.

문성원, 김현진: 서울대학교 기계항공공학부

(sungwon.moon1@gmail.com/hjinkim@snu.ac.kr)

※ This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MEST) (No.2011-0001276) and supported in part by a grant for Unmanned Air Vehicles Research funded by the Agency for Defense Development (ADD-09-01-03-04).

신 거리는 r_{ground} 로 일정한 한계를 가지고 있으며, 무인기는 지상 로봇들 간에 원활한 정보 교환이 이루어지도록 하는 역할을 담당한다. 무인기 역시 식 (1)의 완전 감응식 질점 모델을 가지며, r_{aerial} 의 통신 거리를 가진다. 제어 입력인 무인기의 속도에는 제한이 없으며, 지상 로봇의 움직임에 따라 통신 연결성(graph connectivity)을 유지하도록 무인기의 제어 입력을 계산한다. 이에 따라 무인기의 속도 입력은 0이 될 수 있으며, 따라서 무인기의 종류는 정지 비행이 가능한 헬리콥터나 쿼드콥터로 가정한다.

III. 합의기반 번들 알고리즘

합의 기반 번들 알고리즘(consensus-based bundle algorithm)은 시장 경매 알고리즘에 기반한 분산형 임무 할당 기법이다[5]. 특히, CBBA는 다수의 순차적인 임무에 따른 경로를 고려하여 전체 임무의 할당이 이루어지도록 한다. 전체 알고리즘은 크게 두 단계로 이루어져 반복적으로 계산된다. 첫 번째는 번들의 구성(bundle construction) 단계이고, 두 번째는 지역적인 통신을 이용한 의사 합의(conflict resolution) 단계이다. 각각의 iteration 마다 수행되는 구체적인 알고리즘은 표 1과 같다.

우선 1 단계에서 각각의 로봇은 보상이 가장 큰 임무 순서대로 자신이 수행할 수 있는 임무를 모두 자신의 번들 b_i 와 경로 p_i 에 포함한다. 번들 b_i 는 로봇 i 가 수행할 임무가 저장된 벡터로 표 1의 5번 줄에서와 같이 임무로 선택된 순서대로 원소들이 쌓인다. 연산 \oplus_{end} 는 뒤의 리스트를 앞의 리스트의 마지막 원소 바로 뒤에 붙인다. 경로 p_i 는 로봇 i 가 수행할 임무들이 수행 되어야할 순서대로 쌓여있는 벡터이다. 이때 각 로봇이 수행할 수 있는 최대 임무수는 L_i 로 제한될 수 있다. 임무가 추가 될 때 마다 로봇은 자신의 지식 벡터를 구성한다 (표 1의 7번줄). 로봇 i 의 지식

표 1. CBBA 알고리즘[5].

Table 1. CBBA algorithm.

CBBA Phase 1 for agent i at iteration t :	
1:	procedure Build bundle($z_i(t-1), y_i(t-1), b_i(t-1)$)
2:	$z_i(t) = z_i(t-1); y_i(t) = y_i(t-1); b_i(t) = b_i(t-1);$
3:	while $ b_i(t) < L_i$
4:	Find task J_i which gives the most marginal score improvement, c_{i,J_i} for given $b_i(t)$, and $p_i(t)$;
5:	$b_i(t) = b_i(t) \oplus_{end} \{J_i\};$
6:	$p_i(t) = p_i(t) \oplus_{n_{i,J_i}} \{J_i\};$
7:	$y_{i,J_i}(t) = c_{i,J_i}; \quad z_{i,J_i}(t) = i;$
8:	end while; end procedure;
CBBA Phase 2 : agent i 's action for task j	
9:	Local communication exchanging (y, z, s) with agent k
10:	Decide action by update rules shown in Table 2.
11:	1) update : $y_{ij} = y_{kj}, z_{ij} = z_{kj};$
	2) reset : $y_{ij} = 0, z_{ij} = 0;$
	3) leave : $y_{ij} = y_{ij}, z_{ij} = z_{ij};$

벡터는 각 임무에 대해 낙찰 값을 저장하는 벡터 $y_i \in R^N$ 와 낙찰자를 기억하는 벡터 $z_i \in R^N$ 로 구성된다. 여기서 N_i 는 전체 임무의 개수를 의미한다. 표 1의 4번째 줄에서, 현재 구성된 경로 p_i 에 대해 한계 효용값 $c_{i,j}(p_i)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$c_{i,j} = \begin{cases} \max_{n \leq |p_i|+1} S_i^{n \oplus_n \{j\}} - S_i^{p_i}, & \text{if } j \notin p_i \\ 0, & \text{if } j \in p_i \end{cases} \quad (2)$$

$|\cdot|$ 은 리스트의 cardinality를 나타내고, 연산 \oplus_n 은 뒤의 리스트를 앞의 리스트의 n -번째 원소 바로 뒤에 삽입한다. $S_i^{p_i}$ 는 주어진 경로 p_i 에 따른 로봇 i 가 가지는 전체 보상값을 의미하며, 본 논문에서는 다음 예제와 같이 경로 거리에 반비례하는 값을 가진다.

$$S_i^{[1,2,3]} = \frac{M}{d_{i,1}} + \frac{M}{d_{i,1} + d_{1,2}} + \frac{M}{d_{i,1} + d_{1,2} + d_{2,3}} \quad (3)$$

여기서 M 은 임무의 큰 수를 나타내고 $d_{i,n}$ 은 로봇 i 로부터 임무 n 까지의 거리, $d_{n,m}$ 은 임무 n 으로부터 임무 m 까지의 거리를 의미한다.

각각의 로봇이 구성한 경로와 그에 따른 지식 벡터를 가지고 분산형 경매 과정이라고 할 수 있는 2단계를 거쳐 각 로봇의 지식 벡터에 관한 합의를 이루게 된다. 지역적인 통신에서 로봇은 총 세 가지 벡터 y_i, z_i , 그리고 통신시각 마커 벡터 $s_i \in R^{N_i}$ 를 교환한다. 이때 N_i 는 전체 로봇의 개수를 의미하고, 벡터 s_i 의 k 번째 성분 s_{ik} 에 로봇 i 와 로

표 2. 로봇 i 의 action rule : 임무 j 에 대한 로봇 k 와의 통신[5].
Table 2. Action rule for the robot i : communication with the robot k about the task j .

Sender's z_{kj}	Receiver's z_{ij}	Receiver's action
k	i	if $y_{kj} > y_{ij} \rightarrow \text{update}$
	k	update
	$m \notin \{i, k\}$	if $s_{km} > s_{im}$ or $y_{kj} > y_{ij} \rightarrow \text{update}$
i	none	update
	i	leave
	k	reset
$m \notin \{i, k\}$	$m \notin \{i, k\}$	if $s_{km} > s_{im} \rightarrow \text{reset}$
	none	leave
	i	if $s_{km} > s_{im}$ and $y_{kj} > y_{ij} \rightarrow \text{update}$
$m \notin \{i, k\}$	k	if $s_{km} > s_{im} \rightarrow \text{update}$ else $\rightarrow \text{reset}$
	m	if $s_{km} > s_{im} \rightarrow \text{update}$
	$n \notin \{i, k, m\}$	if $s_{km} > s_{im}$ and $s_{kn} > s_n \rightarrow \text{update}$ if $s_{km} > s_{im}$ and $y_{kj} > y_{ij} \rightarrow \text{update}$ if $s_{kn} > s_n$ and $s_{im} > s_{km} \rightarrow \text{reset}$
	none	if $s_{km} > s_{im} \rightarrow \text{update}$
	i	leave
none	k	update
	$m \notin \{i, k\}$	if $s_{km} > s_{im} \rightarrow \text{update}$
	none	leave

봇 k 간의 통신 시각을 저장한다. 로봇 i 의 동작은 update, reset, 또는 leave의 세 가지 경우를 가지고 동작을 결정하는 구체적인 action rule은 표 2로 주어진다.

각 로봇이 환경에 대한 정보, 즉 자신의 위치, 임무 지점의 위치 등을 정확히 알고 있을 경우, 그리고 전체 로봇 시스템의 통신 네트워크가 연결된 경우(connected), CBBA 알고리즘은 50%의 최적해를 보장한다[5]. 또한 합의 수렴 시간 T_c 는 $N_{\min} = \min\{L_t N_u, N_t\}$ 과 통신 네트워크의 지름 D 에 대해 최대 $N_{\min} D$ 로 상한을 가지며 이때 수렴하는 중앙 집중형의 Sequential Greedy Algorithm과 같은 해를 가진다.

IV. 분산형 통신 연결성 제어

1. 그래프 이론

통신 연결성 해석을 위해, 통신 환경은 Laplacian 행렬 L 로 표현할 수 있다. $L = D - A$. 이때 인접행렬 A 의 원소 A_{ij} 는 로봇 i 와 로봇 j 가 통신 연결이 되어있을 경우 통신 강도에 따라서 0에서 1사이의 값을 가진다. 행렬 D 는 대각행렬로 $D_{ii} = \sum_{j=1 \dots N} A_{ij}$ 로 계산된다. N 개의 로봇에 대해서 양방향 통신을 가정하고 인접 행렬 A_{ij} 를 양수로 제한할 때, Laplacian 행렬 L 은 다음을 만족한다.

$$(1) L\hat{1} = 0$$

(2) spectrum of L , $\{\lambda_i | i = 1, \dots, n\}$ 에 대해, 모든 고유값은 양의 값을 가지며, $0 = \lambda_1 \leq \lambda_2 \leq \dots \leq \lambda_n$ 을 만족한다. 그리고 $\lambda_2 \geq 0$ 이면, 그래프는 연결되었다고 할 수 있고, 그 역도 성립한다. 또한 λ_2 의 값이 증가할수록 그래프 연결성이 증대된다.

2. 분산형 연결성 추정 및 제어 입력 생성

통신 연결성을 유지 또는 증대시키기 위하여 우선 분산형 추정기를 설계한다. $x = (x^1 \dots x^N)^T \in R^N$ 를 고유벡터 v_2 의 추정값으로 정의한다. 시간 연속적 추정 알고리즘은 다음의 세 가지 항목으로 이루어져 있다[10].

$$(1) \text{Deflation} : \dot{x} = -Ave(\{x^i\})\hat{1}.$$

$$(2) \text{Direction update} : \dot{x} = -\alpha Lx.$$

$$(3) \text{Renormalization} : \dot{x} = -(Ave(\{(x^i)^2\}) - 1)x$$

여기서 $Ave(\{q^i\}) \equiv (\sum_i q^i)/n$ 을 의미한다. 최종적인 추종기 구성은 식 (3)과 같다.

$$\dot{x} = -k_1 Ave(\{x^i\})\hat{1} - k_2 Lx - k_3 (Ave(\{(x^i)^2\}) - 1)x \quad (3)$$

k_1, k_2, k_3 는 스칼라 상수의 제어 이득이다. 식 (3)으로부터 분산형 추정기를 유도해 낼 수 있으며, 로봇 i 의 업데이트 식은 다음과 같다.

$$\dot{x}^i = -k_1 a^{i,1} - k_2 \sum_{j \in N^i} A_{ij} (x^i - x^j) - k_3 (a^{i,2} - 1) x^i \quad (4)$$

여기서 $a^{i,1}$ 는 각각의 로봇이 추정하는 x 원소들의 평균, 즉 $Ave(\{x^i\})$ 의 추정값이고, $a^{i,2}$ 는 x 원소들의 제곱의 평균, $Ave(\{(x^i)^2\})$ 의 추정이다. 이 두 변수는 각각 다음과

같은 PI 추정기 시스템으로부터 계산될 수 있다[11].

$$\dot{q}^i = \gamma(\alpha^i - q^i) - K_p \sum_{j \in N^i} [q^j - q^i] + K_I \sum_{j \in N^i} [w^i - w^j] \quad (5)$$

$$\dot{w}^i = -K_I \sum_{j \in N^i} [q^j - q^i] \quad (6)$$

N^i 는 로봇 i 의 one-hop 이웃노드들의 집합을 의미하고, K_p 와 K_I 는 각각 상수값을 가지는 비례, 적분 추정기 이득값이다. $a^{i,1}$ 과 $a^{i,2}$ 는 각각 (5)-(6) 식에 의해 계산될 때, 첫 번째 경우($a^{i,1}$ 의 추정)는 입력으로 $\alpha^i = x^i$ 와 상태변수로 ($q^i = a^{i,1}, w^{i,1}$)를 가지며, 두 번째 경우에는 ($a^{i,2}$ 의 추정)는 입력으로 $\alpha^i = x^i$ 와 상태변수로 ($q^i = a^{i,1}, w^{i,1}$)를 가진다. 앞에서 구성된 v_2 의 추정으로부터, algebraic connectivity λ_2 가 식 (7)로부터 얻어진다.

$$\lambda_2 = \frac{k_3}{k_2} (1 - a^{i,2}) \quad (7)$$

이제 최종적으로, fully-actuated 1차 모델을 가지는 로봇에 대해 다음과 같은 제어입력을 얻을 수 있다[10].

$$\dot{p}^i = u^i = \sum_{j \in N^i} -A_{ij} (x^i - x^j)^2 \frac{p^i - p^j}{\sigma^2} \quad (8)$$

p^i 는 로봇 i 의 위치 벡터를 의미하고, σ 는 인접행렬 A_{ij} 의 정으로부터 계산된다. 인접행렬 A_{ij} 는 다음과 같이 거리에 따라 지수적으로 감소하도록 정의하였다.

$$A_{ij} = \begin{cases} e^{-\|p^i - p^j\|_2 / 2\sigma} & \text{if } \|p^i - p^j\|_2 \leq r, \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (9)$$

r 은 최대 통신 가능 거리를 의미하고 σ 는 미리 정의된 통신이 가능한 통신 강도의 한계값 ϵ 에 대해 $e^{-r^2/2\sigma^2} = \epsilon$ 를 만족하는 상수이다.

식 (4)-(8)을 통해 λ_2 를 완전한 분산형 기법으로 제어할 수 있게 되고, 각 로봇 i 는 제어 입력 계산에 사용하기 위해 이웃한 로봇으로부터 ($p^j, x^j, a^{j,1}, w^{j,1}, a^{j,2}, w^{j,2}$)의 6개 변수 정보를 교환한다.

V. 수치 시뮬레이션

1. CBBA를 통한 임무 할당

식 (1)로 주어진 지상 로봇 모델에 대해 III에서 제시된 CBBA 알고리즘을 이용하여 2차원 평면상에서 4대의 지상 무인 로봇이 12개의 임무지점으로 이동하는 시나리오를 고려하였다. 12개의 임무지점은 $7000 \text{ m} \times 7000 \text{ m}$ 의 평면상에 임의로 분포되어 있으며, 지상로봇의 속도는 20 m/s , 로봇 간의 통신 거리 $r_{\text{ground}} = 500 \text{ m}$ 로 제한하였다.

초기 로봇의 위치는 (0,0) 근방에서 다이아몬드 형태의 편대를 이루고 있으며, 모두 통신이 연결되어 있는 상태에서 출발한다. 그림 1은 $t=0$ 일 때, CBBA를 통한 임무할당 결과를 보여주고 있다. 모든 로봇이 중복되거나 누락된 임무가 발생하지 않도록 합의를 이루고 있음을 보여준다.

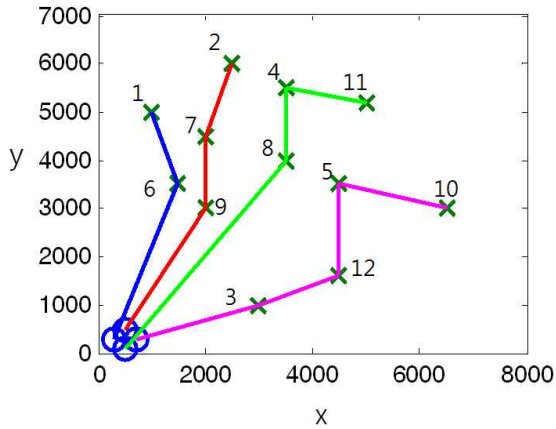


그림 1. $t=0$ sec일 때, 각 로봇의 임무 할당 결과. 청색의 동그라미가 각각의 지상 로봇을 나타내며, 녹색의 x 표시는 임무 지점을 나타낸다.

Fig. 1. Task assignment result at $t=0$ sec. Blue circles represent ground robots, and green x's show task locations.

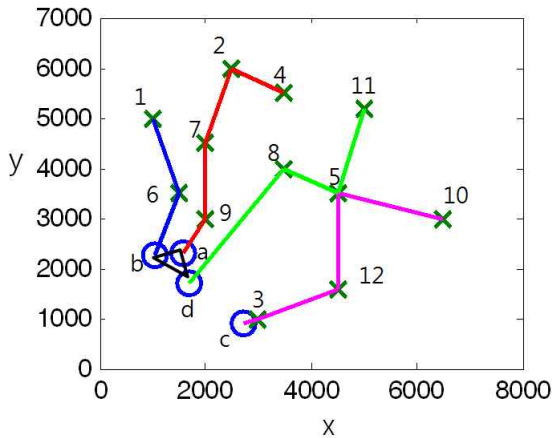


그림 2. $t=100$ sec일 때, 각 로봇의 위치와 임무할당 결과. 소문자 a, b, c, d는 각 지상로봇을 의미하고, a, b, d를 연결하는 검정색 실선은 통신 연결을 나타내고 있다.

Fig. 2. Task assignment result at $t=100$ sec. Each letter a, b, c, and d denotes the ground robot, and black solid lines connecting a, b, and d represent communication links.

CBBA 알고리즘을 로봇이 임무 지점으로 순차적으로 움직이는 동안 반복적으로 수행함으로써 충돌 회피 등으로 인하여 경로가 변경되는 경우 그 상황에 맞도록 실시간으로 새롭게 임무를 동적으로 할당시킬 수 있다. 하지만 CBBA의 성능은 전적으로 통신 연결성에 의존한다.

그림 2는 각각의 로봇이 할당된 임무지점으로 이동하는 동안 변경된 임무 할당 결과를 보여준다. 통신 거리는 일정한 반경으로 제한되기 때문에, 로봇이 임무 수행을 위해 움직이는 동안 서로 간의 거리가 멀어 질 수 있고, 이에 따라 통신이 끊기는 상황이 발생하게 된다. 그림 2에서, 로봇 c는 다른 로봇들과의 통신이 끊어진 상태로 이로 인해 CBBA를 통한 임무할당 결과 다른 로봇 (로봇 d)과 서로 중복된 임무를 수행하는 비효율성이 발생함을 보여주고 있

다. 로봇 d의 입장에서 로봇 c의 갱신된 정보를 얻지 못하는 상황에서, 자신의 위치가 임무 지점 5번과 가까워짐에 따라 임무 5에 대해 큰 보상값을 계산하게 되고, 이에 따라 원래 가지고 있던 경로에서 임무지점 5번이 추가된 새로운 경로를 생성하게 된다. 위의 시뮬레이션 상황에서는 미지의 장애물이나, 외란을 고려하지 않으므로, 전체 로봇의 통신 연결성이 보장되는 경우, 초기의 임무할당 결과가 시간에 따라 동일한 결과를 나타낸다. 그러나 로봇의 이동에 따라 통신이 끊어지는 경우, 그림 2의 5번 임무지점과 같이 충돌이 발생하거나, 통신의 단절/재연결의 반복으로 서로 다른 임무지점 사이를 왔다갔다하는 현상이 발생할 수 있다.

2. CBBA + 분산형 통신 연결성 제어

두 번째 시뮬레이션 시나리오에서는 4대의 지상 로봇과 분산형 통신 연결성 제어 입력을 받아 움직이는 2대의 무인기를 가정하여 지상 로봇과 무인기 전체의 통신 연결성을 유지하고자 한다. 시뮬레이션 조건들은 앞의 경우와 동일하며, 무인기와 지상 로봇간, 그리고 무인기 간의 통신 거리 $r_{aerial} = 2000$ m로 가정하였다.

분산형 통신 연결성 제어를 위해 무인기만이 생성된 제어 입력에 따라 움직이지만, 각각의 지상 로봇 역시 식 (4)-(7)의 추정기의 연산을 수행하고 통신이 연결된 무인기와 정보를 교환한다. 또한 무인기 역시 통신이 연결된 지상 로봇과 CBBA 벡터 (y_i, z_i, s_i) 의 세 정보를 서로 교환한다. 그림 3에서 $t=100$ sec에서의 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 무인기를 포함한 전체 시스템의 대하여 그래프는 connected 되어 있으며, 각 로봇의 임무 할당의 결과는 $t=0$ sec에서의 결과와 같다. 그림 4는 식 (8)로부터 계산된 무인기의 제어 입력을 나타내고 있으며, 그림 5에서는 이에 따라 각 무인기가 이동한 경로를 보여준다.

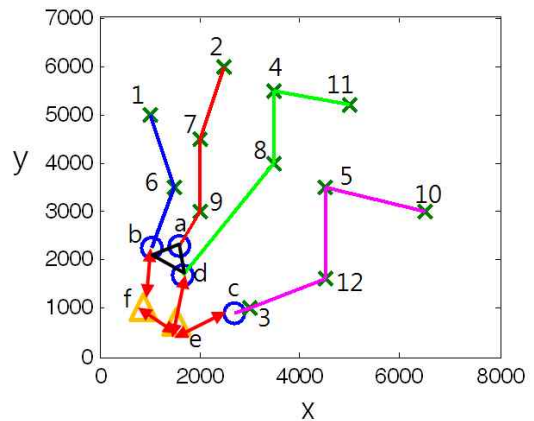


그림 3. $t=100$ sec일 때, 각 로봇의 위치와 무인기의 위치, 그리고 임무할당 결과와 통신 연결 상태. 삼각형의 e, d는 무인기를 나타내고 있으며, 붉은색의 화살표는 무인기와의 통신 연결을, 검정색 실선은 지상 로봇끼리의 통신 연결을 나타내고 있다.

Fig. 3. Task assignment result at $t=100$ sec. The letters e and d marked with triangles represent UAVs, red arrows show the communication links with UAVs, and black solid lines communication among ground robots.

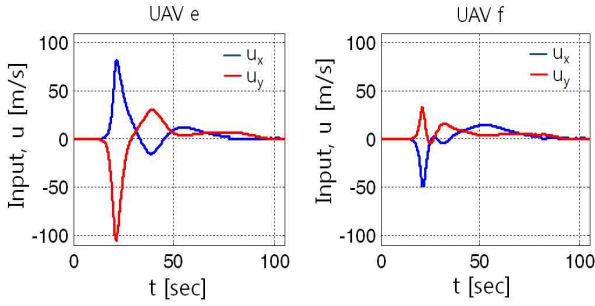


그림 4. $t=0$ sec에서 $t=100$ sec 동안의 무인기 제어 입력.
Fig. 4. Control input history for UAVs from $t=0$ to 100 sec.

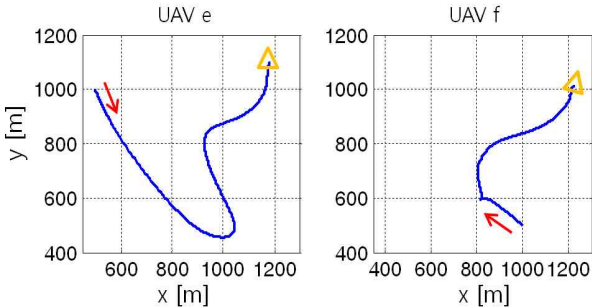


그림 5. $t=0$ sec에서 $t=100$ sec 동안의 무인기 이동경로. 각각 초기 위치 [500,1000], [1000,500]으로부터 붉은색 화살표 방향으로 이동하였다.
Fig. 5. Trajectory of UAVs from $t=0$ to 100 sec. The arrows show their direction starting from their initial position [500,1000], [1000,500].

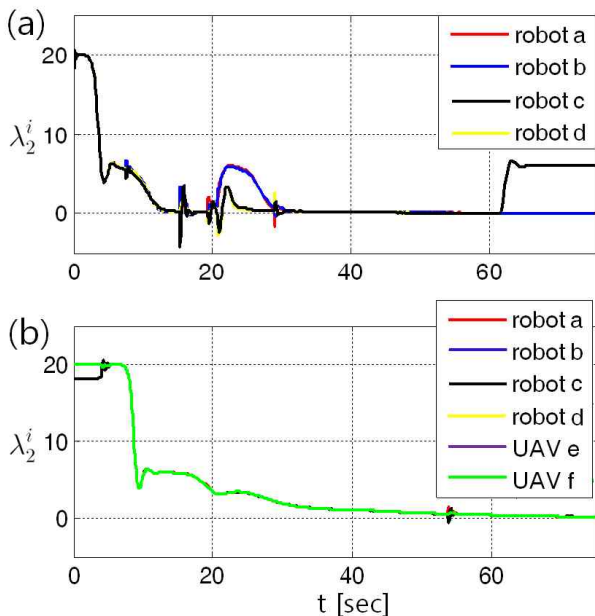


그림 6. 시간에 따른 각 로봇과 무인기의 λ_2 에 대한 추정. (a) 무인기가 없는 경우, (b) 무인기와의 협업.
Fig. 6. Estimation of λ_2 by each ground robot/UAV. (a) when there is no UAV, (b) when ground robots collaborate with UAVs.

그림 6은 식 (7)으로부터 계산된 algebraic connectivity λ_2 의 추정결과를 나타내고 있다. 그림 6(a)는 무인기가 없는 경우 4대의 지상로봇 각각의 λ_2 추정값을 보여주고, 그림 6(b)의 경우 무인기와의 협업이 있는 경우 지상로봇과 무인기 각각의 λ_2 추정값을 보여준다. 그림 6(a)의 경우, 통신 연결성이 끊어지거나 로봇 간 거리가 멀어짐에 따라 각각의 추정값이 서로 다른 값을 가지는 모습을 보인다. 또한 지상로봇 c의 경우 60초를 지나면서 λ_2 의 추정이 크게 달라지고 있어 다른 로봇들과의 통신이 단절되었음을 알 수 있다. 그림 6(b)는 무인기의 협업으로 초기 시간 5초 정도에서 각 로봇의 추정값이 서로 같은 값으로 빠르게 수렴하고 있음을 알 수 있다. λ_2 는 connectivity가 유지됨에 따라 0보다 큰 값을 유지하고 있으나, 지상 로봇이 각각의 임무수행을 위해 서로 흩어지는 움직임으로 인해 λ_2 의 값은 시간이 지남에 따라 작아지는 모습을 보인다.

VI. 결론

지상 무인 로봇에 대하여, 다수의 임무지점이 존재하는 경우, 분산형의 효율적인 임무할당이 이루어지도록 CBBA 알고리즘을 적용하였다. 분산형 합의 과정을 통하여, 서로 충돌이 없는 임무할당 결과를 확인하였다. 충돌이 없는 합의와 수렴 시간, 최적화정도 등의 성능은 전체 로봇 시스템의 통신 연결성에 크게 의존한다. 이에 따라 로봇의 이동에 따른 통신 연결성 확보를 위한 분산형 통신 연결성 제어 기법을 소개하였고, 시뮬레이션 결과로부터 통신 연결 역할의 무인기와 지상 로봇의 협업을 통해 주어진 임무 수행이 효율적으로 이루어 질 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

- [1] F. Cucker and S. Smale, "Emergent behavior in flocks," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 52, no. 5, pp. 852-862, May 2007.
- [2] C. Belta and V. Kumar, "Abstraction and control for groups of robots," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 20, no. 5, pp. 865-875, Oct. 2004.
- [3] J. B. Park and B. S. Park, "Leader-following based adaptive formation control for multiple mobile robots," vol. 16, no. 5, pp. 428-432, May 2010.
- [4] J. S. Kim and B. K. Kim, "Time-efficient trajectory planning algorithms for multiple mobile robots in nuclear/chemical reconnaissance system," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 15, no. 10, pp. 1047-1055, Oct. 2009.
- [5] L. Brunet, H. L. Choi, and J. P. How, "Consensus-based auction approaches for decentralized task assignment," *presented at the AIAA Guidance, Navigation, Control Conference*, vol. AIAA-2008-6839, Aug. 2008.
- [6] M. M. Zavallanos and G. J. Pappas, "Controlling connectivity of dynamic graphs," *In IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 6388-6393, Dec. 2005.

- [7] M. M. Zavalanos and G. J. Pappas, "Potential fields for maintaining connectivity of mobile networks," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 23, no. 4, pp. 812-816, Aug. 2007.
- [8] D. P. Spanos and R. M. Murray, "Robust connectivity of networked vehicles," *In IEEE international conference on decision and control*, pp. 2893-2898, Dec. 2004.
- [9] M. M. Zavalanos and G. J. Pappas, "Distributed connectivity control of mobile networks," *IEEE Transactions in Robotics*, vol. 24, no. 6, pp. 1416-1428, Dec. 2008.
- [10] P. Yang, R. A. Freeman, G. J. Gordon, K. M. Lynch, S. S. Srinivasa, and R. Sukthankar, "Decentralized estimation and control of graph connectivity for mobile sensor networks," *Automatica*, vol. 46, no. 2, pp. 390-396, Feb. 2010.
- [11] R. A. Freeman, P. Yang, and K. M. Lynch, "Stability and convergence properties of dynamic consensus estimators," *In IEEE International Conference on Decision and Control*, pp. 338-343, Dec. 2006.



문 성 원

2007년 서울대학교 기계항공공학 학사. 2007년~현재 서울대학교 대학원 기계항공공학부 석·박사 통합과정 재학중. 관심분야는 다중로봇 제어와 분산형 협력제어 알고리즘.



김 현 진

1995년 KAIST 기계공학 학사. 1999년과 2001년 University of California, Berkeley 기계공학 석사, 박사. 2002년~2004년 University of California, Berkeley EECS 박사 후 연구원 및 강사. 2004년~현재 서울대학교 기계항공공학부 조교수, 부교수. 관심분야는 이동 로봇 플래닝 및 지능 제어 알고리즘.