特輯論文 DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2012.40.11.988

CBBA 기반 SEAD 임무를 위한 이종무인기의 분산형 임무할당 알고리듬 연구

이창훈*, 문건희*, 유동완*, 탁민제**, 이인석***

Distributed Task Assignment Algorithm for SEAD Mission of Heterogeneous UAVs Based on CBBA Algorithm

Chang-Hun Lee*, Gun-Hee Moon*, Dong-Wan Yoo*, Min-Jea Tahk** and In-Seok Lee***

ABSTRACT

This paper presents a distributed task assignment algorithm for the suppression of enemy air defense (SEAD) mission of heterogeneous UAVs, based on the consensus-based bundle algorithm (CBBA). SEAD mission can be modeled as a task assignment problem of multiple UAVs performing multiple air defense targets, and UAVs performing SEAD mission consist of the weasel for destruction of enemy's air defense system and the striker for the battle damage assessment (BDA) or other tasks. In this paper, a distributed task assignment algorithm considering path-planning in presence of terrain obstacle is developed for heterogeneous UAVs, and then it is applied to SEAD mission. Through numerical simulations the performance and the applicability of the proposed method are tested.

초 록

본 논문에서는 CBBA 알고리듬을 이용하여 SEAD 임무를 위한 이종무인기의 분산형 임무할당 알고리듬을 다룬다. SEAD 임무는 다수의 무인기를 다수의 대공 방어망 목표물에 할당 시키는 임무할당문제로 정의 할 수 있으며, 작전에 참여하는 무인기는 대공 방어망 파괴를 주목표 하는 위즐(weasel)과 주요 작전 및 전투 피해 평가를 수행하는 스트라이커(striker)로 구성된다. 본 논문에서는 최단경로생성 알고리듬과 CBBA 알고리듬을 이용하여 지형 장애물(terrain obstacle)이 있는 환경에서의 경로계획이 고려 된 이종 무인기의 분산형 임무할당 기법을 개발하고 SEAD 임무에 적용한다. 수치 시뮬레이션을 통하여 개발 된 기법의 성능과 적용가능성에 대해 검토한다.

Key Words : Distributed Task Assignment(분산형 임무할당), SEAD(적 방공망 제압), Heterogenous UAV(이종무인기), CBBA(합의기반 묶음 알고리듬)

Ⅰ. 서 론

현대 공군의 작전을 분류할 때 크게 주 임무(main mission)와 부임무(support mission)로 구분할 수 있다. 주임무는 타격(strike) 임무를 의미하며, 미 공군은 타격 임무를 크게 근접 항공 지원(Closed Air Support, CAS), 전장 항공 차단

† 2012년 8월 29일 접수 ~ 2012년 10월 25일 심사완료
* 정회원, KAIST 항공우주공학전공 대학원
** 정회원, KAIST 항공우주공학전공
*** 정회원, 한국기술교육대학교
교신저자, E-mail : mjtahk@kaist.ac.kr
대전 유성구 과학로 335 항공우주공학전공 2312

(Battle Area Interdiction, BAI), 후방 차단(Interdiction, INT)으로 분류하고, 이를 지원하는 부임무를 전장 상공 초계(Combat Air Patrol, CAP), 전장 탐색 및 구조(Combat Search And Rescue, CSAR), 적 대공 방어망 제압(Suppression of Enemy Air Defense, SEAD)으로 분류한다. 이 중 적 대공 방어망 제압 작전(이하 SEAD 임무)은 적의 대공 방어시설을 파괴하여 무력화시키거나 일시적인 기능을 저하시키는 임무를 의미하며, 베트남 전쟁 이후 이 임무의 중요성이 대두되었다. 현재 미 공군 항공 작전 중 SEAD 임무는 전체 임무의 20% 이상의 비중을 자치하고 있는데, 이는 과거에 비해 약 5배 이상 증가한 수치로 SEAD 임무의 중요성이 점차 증대되고 있음을 시사하고 있다[1]. SEAD 임무는 중요한 임무중 하나로 작전의 수요가 점차 늘어나고 있지만, 이 작전의 성격상 작전에 참여하는 항공기가 적의 대공 방어체계의 위협에 크게 노출되기 때문에 매우 위험한 작전으로 분류되고 있다. 최근 다양한 무인 시스템의 기술이 비약적으로 발전되어, 유인기(manned aerial vehicle)에 의해 수행되던 SEAD 임무를 무인기(unmanned aerial vehicle, UAV)로 대체하는 연구가 수행되고 있다[2].

SEAD 임무에 참여하는 항공기는 적 대공 방어망 파괴를 주요 임무로 수행하는 위즐(weasel)과 부임무를 수행하는 스트라이커(striker)로 구성된다. SEAD 임무는 이종의 무인기를 다수의 표적에 효과적으로 할당시키는 임무할당문제로 표현될 수 있다. 무인기의 임무할당을 위한 전통적인 접근 방법은 중앙집중형(centralized) 방식이다[3-5]. 이 방식에서는 리더 역할을 하는 특정한 무인기가 의사결정권을 소유하고 나머지 무인기들에 대한 임무계획을 세워서 통신채널을 이용하여 전달하게 된다. 이러한 접근 방법에서는 특정한 리더 무인기에서 복잡한 계산을 수행하기 때문에 나머지 무인기의 시스템을 단순화 시킬 수 있는 장점이 있는 반면, 중요한 계산이 리더 무인기에서 수행되므로 리더 무인기의 계산 부하가 발생한다. 또한 리더 무인기가 격추되거나 고장나는 상황에서 임무계획을 수행할 수 없게 되는 단점이 존재한다. 이러한 문제점들로 인해 리더 무인기가 없이 다수의 무인기가 의사결정권을 갖고 임무를 할당하는 분산형(distributed) 임무할당 기법이 연구되어 왔다[6-7]. 이러한 방식은 불확실한 전장환경에서 무인기의 고장에 의한 강인성(robustness)을 증대 시킬 수 있다. 하지만, 이러한 대부분의 분산화 된 임무할당 알고리즘은 혼합 정수 선형계획법(Mixed Integer Linear Programming, MILP)으로 모델링 되어 알고리듬의 확장성(scalability)이 제한된다. 또한, 각 무인기들 간의 합의(consensus) 과정[8]을 통해 완벽한 상황 인식(situational awareness) 일치를 가정하고 있기 때문에 실제 SEAD 임무에서 통신이 단절 될 경우 임무 스케줄이 서로 상충(conflict)하는 결과가 발생될 수 있다.

이러한 단점을 보완하는 방법으로 경매 알고리듬(auction algorithm) 기반 분산형 임무할당 기법이 연구 되고 있는데, 이러한 방식은 최적(optimal) 해를 제공하지 못하지만 준최적(suboptimal) 해를 제공하면서 실시간 적용 가능성, 확장성 및 유연성(flexibility)을 보장할 수 있다. 대표적인 알고리듬으로는 합의 알고리듬[8]과 분산 경매 알고리듬[9]을 결합한 합의기반 묶음 알고리듬 (Consensus-Based Bundle Algorithm, CBBA)[10] 이다. 이 방식에서는 임무할당을 위해 무인기간의 규칙(rule)을 설정해 놓고, 이 규칙 안에서 무인기가 합의 과정을 통해 자율적으로 임무를 할당하기 때문에, 다양한 구속조건을 만족해야 하는 임무할당문제에 대해 확장성이 좋다는 장점이 있다.

본 논문에서는 이러한 CBBA 기법을 기반으로 이종(heterogeneous) 무인기의 SEAD 임무에 적용 가능한 분산형 임무할당 알고리듬을 개발하고자 한다. SEAD 임무는 장애물, 표적, 경로계획 등을 동시에 고려해야 하는 복잡한 최적화 문제로 표현되는데, 기존의 CBBA 기법은 장애물 회피를 위한 경로계획이 고려되어 있지 않기 때문에 이 문제에 직접적인 적용이 불가능하다. 따라서 본 논문에서는 최단경로생성 알고리듬과 CBBA 기법을 효율적으로 이용하여 지형 장애물이 있는 환경에서의 경로계획이 고려 된 이종 무인기의 분산형 임무할당 기법을 제안한다. 제안한 방법에서는 무인기의 시작점, 장애물, 경로점(waypoint)을 직선으로 연결한 선을 무인기가 가질 수 있는 경로라고 가정하고, 가시 그래프(visibility graph)를 통해 무인기가 물리적으로 지날 수 있는 모든 경로를 생성한 후 최단경로생성 알고리듬을 통해 각 경로점까지 갈 수 있는 최단경로정보를 생성한다. 이러한 정보를 바탕으로 SEAD 임무수행을 위한 보상값(reward)을 생성하고, CBBA 기법을 활용하여 최종적인 임무할당을 수행한다. 제안한 기법을 활용하면 임무할당과 경로계획의 연동 특성을 유지할 수 있고, CBBA 기법이 가지는 장점을 그대로 활용할 수 있는 이점이 있다. 본 논문에서는 수치 시뮬레이

션을 통해 제안한 알고리듬의 성능 및 실제 SEAD 임무에 적용가능성을 검토한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2.1 장에서는 SEAD 임무의 개관 및 본 논문에서 고려하는 SEAD 임무상황을 기술하고, SEAD 임무를 정수최적화(integer program) 문제로 정식화 한다. 2.2 장에서는 제안한 분산형 임무할당 알고리즘의 설계에 대해서 다룬다. 2.3 장에서는 제안한 기법의 성능 및 적용가능성에 대해 분석한다. 마지막으로 3장에서는 본 연구의 결론을 다룬다.

II. 본 론

2.1 문제 정의

2.1.1 SEAD 임무 개관

현대 항공 작전에서 SEAD 임무가 도입되게 된 직접적인 계기는 베트남(Vietnam) 전쟁을 통해서였다. 1965년 7월 24일 북 베트남 하노이(Hanoi) 서북방 55 마일 지점을 비행하던 미 공군 소속 F-4C 편대 중 1대가 SA-2 지대공 미사일에 격추되고 나머지 편대는 심각한 피해를 입게 되는 사태가 발생되었다[11]. 이를 계기로 미 공군은 와일드위즐(Wild Weasel) 이라는 지대공 미사일(surface-to-air missile, SAM) 제압 부대를 창설하게 되며, 이것이 SEAD 임무의 시초가 되었다. 와일드위즐1은 F-100F와 F-105D 전투기를 이용한 최초의 SEAD 임무를 말하며, 이 임무에서는 헌터(hunter)-킬러(killer) 형식으로 임무를 나누어 작전을 수행하였다. F-100F는 헌터 전투기로 적 레이더 사이트(site)를 찾아내는 임무를 담당한다. F-105D는 킬러 전투기로 헌터가 발견한 레이더 사이트 주변 시설을 파괴하기 위해 투입된다. 초기 와일드위즐1은 헌터 전투기 1대와 킬러 전투기 4~8대로 구성되었다.

이후 와일드위즐은 아이언핸드(Iron Hand)로 불리기도 했는데 이는 베트남 전쟁 당시 지대공 미사일 사이트 제압 작전의 미 해/공군의 공통 작전명이었다. 아이언핸드 임무는 4대의 전투기로 구성되며, 2대의 F-100F 위즐과 2대의 F-105D 스트라이커가 작전에 투입되었다. 이후 위즐은 F-100F를 대체하여 F-105F, F-105G, F-4C, F-4G로 기체가 점차 개량 되었다. 최근의 SEAD 임무에서는 F-4G 위즐과 AGM-88 HARM(high speed anti radiation missile)을 탑재한 F-16, A-7, F/A-18 등이 활용되고 있다. 미 해군에서는 전파교란기(jammer)인 EF-111, EA-6B를 이용하여 적의 교전 레이더를 전파방해(jamming) 한 후 F/A-18, A-7E 등을 활용하여 타격하는 전술을 구사하고 있다.

SEAD 임무는 임무계획의 성격에 따라 크게 사전계획(pre-planned)/동적(reactive) SEAD로 분류될 수 있다[12-13]. 또한 작전수행 순서에 따라 동시적인(concurrent)/순차적인(sequential) SEAD로 분류되며, 작전수행 방법에 따라 파괴적인(destructive)/교란적인(disruptive) SEAD로 분류된다.

2.1.2 SEAD 임무환경

SEAD 임무를 위한 실제 전장 환경은 Fig. 1과 같다. 가로, 세로 각각 11km의 산과 같은 지형에 지대공 미사일 사이트(삼각형), 조기 경보 레이더(점), 지휘통제제대 등의 적 대공 방어망 표적이 배치된다. 이러한 전장 환경을 임무할당 알고리듬에 직접 적용하기 어렵기 때문에 전장 환경은 Fig. 2와 같이 축약화(abstraction) 할 수 있다. Fig. 2에서는 산과 같은 지형 장애물은 고정 된 장애물(fixed obstacle)로, 지대공 미사일 사이트는 비행 접근 금지 구간(no-fly-zone)으로 간주된다.

Fig. 2에서 회색의 육각형은 고정 된 지형 장

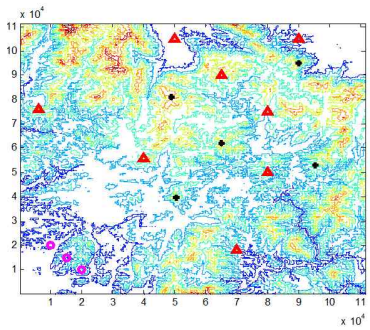


Fig. 1. SEAD 임무 작전환경

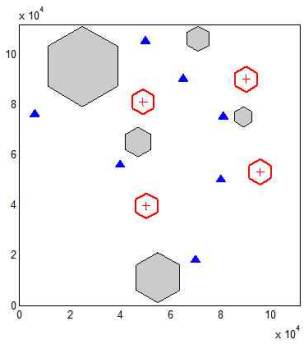


Fig. 2. SEAD 임무 작전환경 축약화

애물을 축약화 한 것 이며, 중앙에 + 마크(mark)가 있는 육각형은 지대공 미사일 사이트를 도시한다. 파란색의 삼각형은 주변에 있는 또 다른 공격 표적 또는 탐색 지역을 나타낸다.

본 연구에서는, 실제 SEAD 임무를 반영하여 SEAD 임무에 참여하는 무인기로 서로 특성이 다른 이종의 무인기(위즐과 스트라이커)를 고려한다. 위즐은 대공 방어망을 파괴시키기 위한 무장을 탑재하고 있고, 지대공 미사일 사이트를 파괴하는 것을 주목표로 한다고 가정한다. Fig. 3은 위즐의 전장 상황 인식을 도시하며, 위즐은 지형 장애물을 회피하면서 지대공 미사일 사이트를 신속하게 파괴한 후 작전지역을 빠져 나간다. 스트라이커는 지대공 마사일 사이트 주변에 있는 표적을 공격하거나 탐색 지역을 순찰하는 임무(Fig. 2의 파란색 삼각형)를 수행하며, 또한 위즐이 대공 방어망을 파괴하면, 대공 방어망이 제거 되었는지 전투 피해 평가(Battle Damage Assessment, BDA)를 수행한다고 가정한다. 스트라이커는 기본적으로 대공 방어망과의 교전 능력이 없기 때문에, Fig. 4와 같이 지형 장애물뿐만 아니라 지대공 미사일 사이트도 비행 금지 구역으로 설정하여 임무를 수행하게 된다.

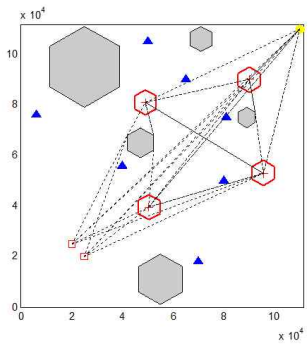


Fig. 3. 위즐의 전장 상황 인식

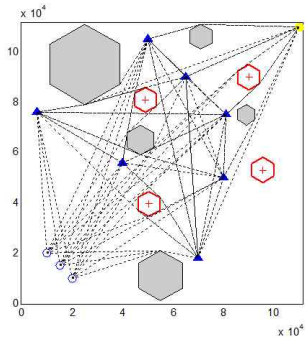


Fig. 4. 스트라이커의 전장 상황 인식

2.1.3 임무할당문제

SEAD 임무는 Fig. 2의 + 마크로 주어지는 여러 개의 적 대공 방어망 표적에 대한 공격 임무와 삼각형으로 주어지는 주변임무에 대해, 비행 장애물을 고려하여 작전에 투입되는 이종의 무인기들을 효과적으로 할당하는 문제로 정의 될 수 있다.

일반적인 임무할당문제의 목표는 N_t 개의 총 임무와 N_u 개의 총 무인기들이 주어진 경우, 각 무인기가 중복으로 임무를 수행하지 않도록 임무를 할당하면서 전체적인 보상함수(reward function)를 최대화 하는 것이다. 총 보상함수는 개별 무인기가 자신에게 할당된 임무를 수행했을 때 얻게 되는 보상함수의 총 합으로 표현될 수 있다. 이러한 임무할당문제는 다음과 같은 정수 최적화 문제로 수식화 될 수 있다.

$$\max J = \sum_{i=1}^{N_u}\left(\sum_{j=1}^{N_t} c_{ij}\left(t_{ij}\left(p_i\right)\right)x_{ij}\right) \tag{1}$$

제한조건:

$$\sum_{j=1}^{N_t} x_{ij} \le L_t, \quad \forall i \in 1,\ldots,N_u \tag{2}$$

$$\sum_{i=1}^{N_u} x_{ij} \le 1, \quad \forall j \in 1,\ldots,N_t \tag{3}$$

위 식에서 x_{ij}는 결정 변수(decision variable)로 무인기 i가 임무 j를 수행하게 될 경우 1의 값을 갖으며, 아닌 경우 0의 값을 갖는다.

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \quad \forall (i,j) \in 1,\ldots,N_u \times 1,\ldots,N_t \tag{4}$$

식 (1)에서 c_{ij}는 무인기 i가 임무 j를 수행한 후 얻게 되는 보상값(reward value)을 나타내며, 이 값은 임무지역 도착시간 t_{ij}에 대한 함수로 표현 될 수 있다. 임무지역 도착시간은 무인기의 경로 p_i의 함수로 다시 기술 될 수 있다. 즉, 무인기의 임무할당문제는 임무할당과 경로계획이 연동 되어 있는 복잡한 최적화 문제로 표현 된다. 식 (2)에서 L_t는 각 무인기가 수행할 수 있는 최대임무의 수를 나타내며, 식 (2)는 모든 무인기에 대해 자신이 수행할 수 있는 능력 범위 밖의 임무가 할당되지 않도록 하는 제한조건이다. 식 (3)은 모든 임무에 대해서 무인기간 서로 상충되는 임무할당이 일어나지 않도록 하는 제한 조건이다. 이 식은 하나의 임무에 대해 복수의 무인기의 임무할당을 방지한다.

2.2 분산형 임무할당 알고리듬 설계

2.2.1 CBBA 기법

CBBA 기법[10]은 합의 알고리듬[8]과 분산화된 경매 알고리듬[9]을 효율적으로 결합하여 각 무인기들 간의 통신이 단절되는 경우에도 서로 상충 되지 않는 임무할당 결과를 도출 할 수 있다. CBBA 기법은 Fig. 5에서 도시 된 것과 같이 두 단계로 구성된다.

단계 1(phase 1)은 묶음(bundle) 구성 단계로, 모든 무인기들이 자신의 상황 인식을 바탕으로 탐욕-기반(greedy-based) 알고리듬을 통해 자신의 임무 계획을 세우고, 각 임무별로 보상값을 계산한다. CBBA 기법에서 각각의 무인기들은 네 가지의 리스트(list)를 유지하며, 단계 2(phase 2)에서 서로의 정보를 공유하게 된다. 첫 번째 리스트 b_i는 무인기 i의 임무의 묶음으로, 무인기 i가 수행해야 하는 임무들의 정보를 담고 있다. 두 번째 리스트는 p_i로 무인기 i가 수행하는 임무들의 경로순서의 정보를 담고 있다. 다음으로, z_i는 길이가 N_t인 리스트로 각 임무에 대해서 임무를 수행했을 때 가장 큰 보상값을 얻을 수 있는 무인기의 인덱스(index) 정보를 저장한다. 마지막으로, y_i는 각 임무에 대해서 임무를 수행했을 때 가장 큰 보상값을 얻을 수 있는 무인기의 보상값 정보를 담고 있다.

무인기 i에서는 다음의 계산 과정을 통해 임무의 묶음을 생성하게 된다. 먼저 이미 수행하고자 하는 임무의 묶음 b_i와 임무의 경로 p_i에서 새로운 임무 j를 추가 했을 때 증가 되는 최적의 보상값을 다음과 같이 계산한다.

$$c_{ij}[b_i] = \max_{n \le |p_i|} S_i\left(p_i \oplus_n \{j\}\right) - S_i\left(p_i\right) \tag{5}$$

위 식에서 $S_i(p_i)$는 무인기 i가 자신의 임무 경로 p_i를 수행했을 때 얻게 되는 총 보상값을 나타내며, $S_i(p_i \oplus_n \{j\})$는 새로운 임무 j를 자신의 임무 경로상의 n번째 위치에 추가했을 때 얻게 되는 총 보상값을 나타낸다. 따라서 식 (5)는 새로운 임무 j를 자신의 임무 경로상 최적의 위치에 배치했을 때 얻게 되는 최적의 추가적인 보상값을 나타낸다. 이 식을 바탕으로 무인기 i는 자신의 임무 묶음에 추가할 작업을 탐욕-기반 기법을 통해 다음과 같이 선택한다.

$$J_i = \arg\max_j \left(c_{ij}[b_i] \times 1\left(c_{ij} > y_{ij}\right)\right)$$
$$b_i \leftarrow b_i \oplus_{|b_i|} J_i \tag{6}$$

즉, 자신이 취할 수 있는 여러 새로운 임무 j 중에서 기존의 무인기가 수행한 결과 보다 자신이 이 임무에 더 적합하다고 판단되는 임무들을 우선 선별하고(식 (6)에서 $c_{ij} > y_{ij}$ 부분 참고), 다음으로 선별된 임무 중에서 추가로 얻을 수 있는 보상값이 가장 최대가 되도록 하는 하나의 임무 j 선택하여 자신의 임무 묶음에 추가하게 된다.

단계 2는 합의 기반 상충 해소 단계로서 각 무인기들은 주변의 무인기들과 통신을 통해, 각 임무 수행에 가장 적합한 무인기의 인덱스 정보 및 보상값을 저장하고 있는 z_i와 y_i 정보들을 교환하게 된다. 이러한 정보들을 지속적으로 교환하게 되면, 각 무인기들은 각 임무에 대해 가장 적합한 무인기들의 정보를 공유하게 되어 임무 할당에서 다른 무인기들과 상충이 발생하지 않도록 한다. 상충 해소와 관련된 자세한 규칙은 참고문헌[10]에서 살펴 볼 수 있다.

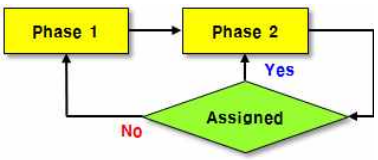


Fig. 5. CBBA 기법 구조

2.2.2 분산형 임무 할당 알고리듬

본 절에서는 앞 절에서 다루었던 CBBA 기법을 이용하여 실제 SEAD 임무에 활용 가능한 분산형 임무 할당 알고리듬의 설계를 다룬다.

기존의 CBBA 기법에서, 경로계획은 비행 장애물을 고려하지 않고, 임무를 수행해야 하는 위치와 현재 무인기의 위치를 직선으로 연결한 선을 경로로 간주 한다. 이러한 경로계획을 통한 임무 할당 결과는 비행 장애물을 고려하지 않고 계산 된 결과 이므로, 실제 전장 환경의 상황을 완벽하게 반영하지 못한다. 따라서 본 연구에서는 CBBA 기법에 비행 장애물 회피 경로를 고려한 분산형 임무 할당 알고리듬을 개발한다.

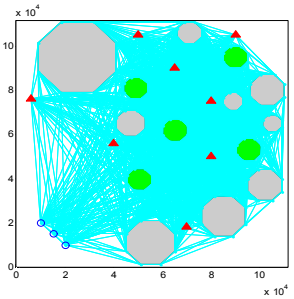
2.1.3 절에서 언급했듯이 무인기의 임무 할당 문제는 임무할당과 경로계획이 연동 되어 있는 복잡한 최적화 문제이다. 이러한 임무 할당 문제를 다루는 고전적인 방법들은 복잡한 최적화 문제로 표현되는 임무 할당 문제에 대해 모든 가능한 임무 경로를 탐색하는 방법이다. 이 방법은 전역(global)의 최적 해를 구할 수 있지만 계산 시간이 큰 단점이 있다. 따라서 임무할당과 경로계획을 동시에 고려하는 것은 매우 복잡하고 어

려운 일이다. 따라서 본 논문에서는 페탈(petal) 알고리듬[3]에서 적용 되었던 아이디어를 기반으로, 임무할당과 경로계획의 연동 특성을 유지하면서 경로계획과 임무할당의 최적화를 분리시켜 계산하는 방법을 활용한다. 제안한 알고리듬은 크게 경로계획 근사(approximation)와 임무할당 알고리듬 단계로 구성 된다. 경로계획 근사단계에서는 무인기의 시작점, 장애물, 경로점을 직선으로 연결한 선을 무인기의 경로라 가정하고, 가시 그래프를 통해 무인기가 물리적으로 지나갈 수 있는 모든 경로를 탐색한다(Fig. 6(a) 참고). 이렇게 얻어진 경로의 집합에서 각 무인기의 시작점으로부터 각 임무 지역 까지 갈 수 있는 최단 경로를 DIJKSTRA 알고리듬을 이용하여 생성한다(Fig. 6(b)).

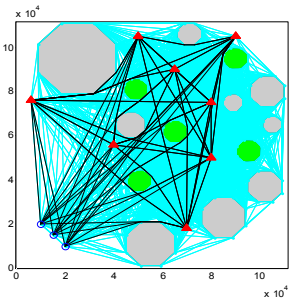
다음으로, 임무 할당 알고리듬 단계에서는 이렇게 얻어진 최단경로정보들을 활용하여 세부적인 임무 할당 최적화를 수행하게 되는데, 이때 CBBA 기법을 활용한다. 최적 임무 할당을 위해 무인기 i가 임무 j를 수행할 경우의 보상값 c_{ij}을 다음과 같이 설정한다.

$$c_{ij} = \lambda^{t_{ij}} s_{ij} \tag{7}$$

여기에서 s_{ij}는 무인기 i가 임무 j를 수행했을 때 기본적으로 받게 되는 보상값을 나타낸다. t_{ij}는 무인기 i가 임무 j를 수행할 때 시간을 나타낸다. SEAD 임무에서 시간이 경과될수록 아군 무인기가 받는 위협이 증가하고, 또한 표적은 숨거나 이동하기 때문에 시간에 따라 표적의 불확실성이 증가한다. 따라서 이러한 경우 임무를 수행했더라도 큰 보상값을 받지 못한다. 이를 반영하기 위해 λ라는 변수를 도입한다. 이 값은 1보다 작은 수로 시간이 경과함에 따라 기본적으로 얻게 되는 보상값을 감소시키는 역할을 한다. 제안한 분산형 임무 할당 알고리듬의 흐름도(flow chart)는 Fig. 7과 같이 도시된다.



(a) 가시 그래프



(b) 최단경로

Fig. 6. 장애물을 고려한 경로 근사

2.3 수치 시뮬레이션

본 절에서는 제안한 알고리듬의 성능과 SEAD 임무의 적용가능성을 판단하기 위해 실제와 유사한 SEAD 임무를 가정한 후, 제안한 알고리듬을 적용한다. 본 시뮬레이션에서 고려하는 SEAD 전장 환경은 Fig. 2와 동일하며, 5개의 고정 된 지형 장애물과, 4개의 지대공 미사일 사이트, 7개의 임무 지역으로 구성된다. 작전에 참여하는 무인기는 2대의 위즐, 3대의 스트라이커를 고려하였으며, 위즐의 속도는 250 m/s, 스트라이커의 속

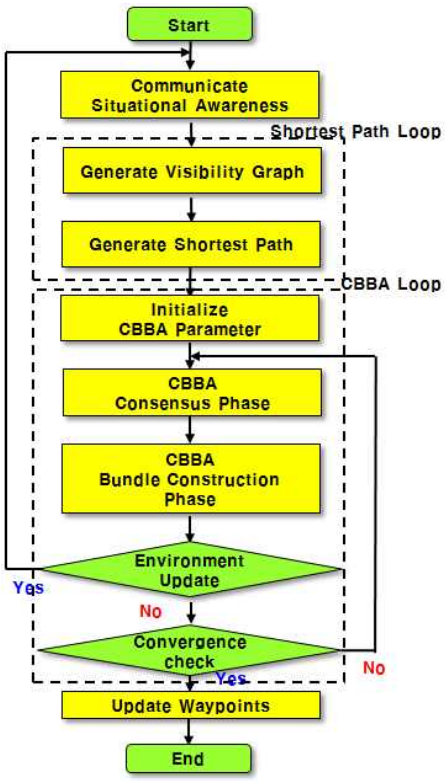
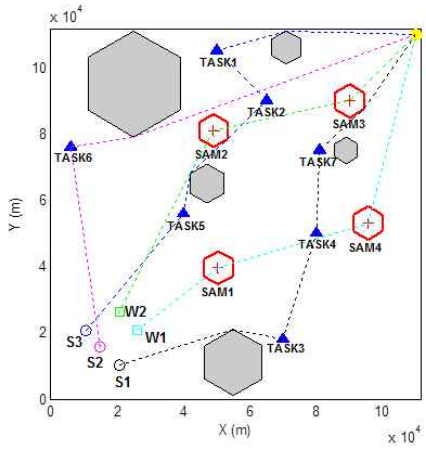
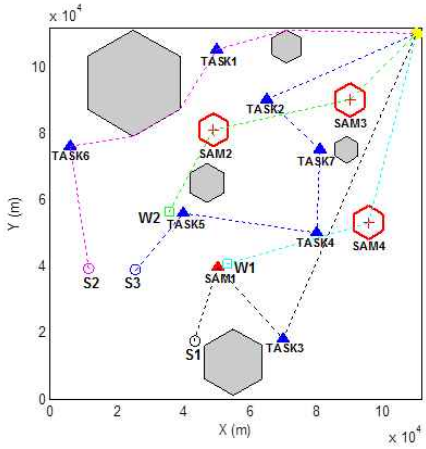


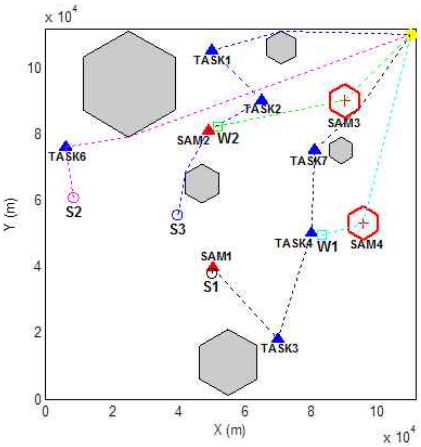
Fig. 7. 임무 할당 알고리듬 흐름도



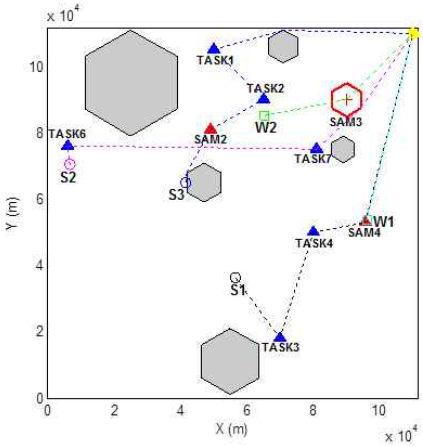
(a) t = 0초일 때 임무 할당 결과



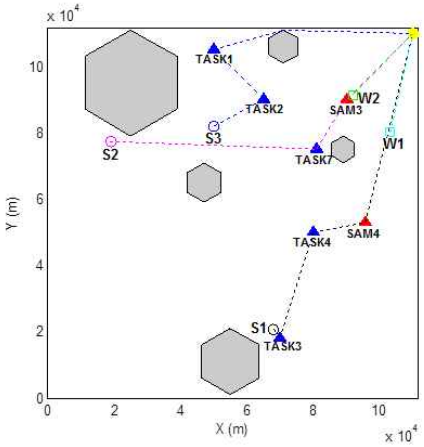
(b) t = 140초일 때 임무 할당 결과



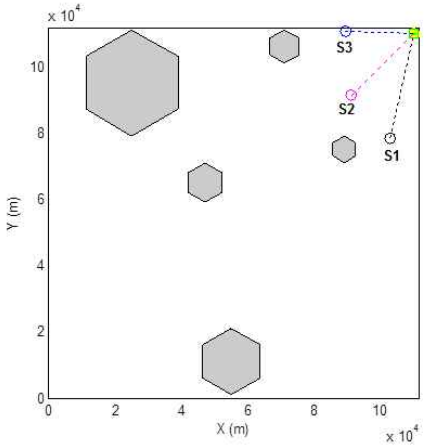
(c) t = 265초일 때 임무 할당 결과



(d) t = 320초일 때 임무 할당 결과



(e) t = 430초일 때 임무 할당 결과



(f) t = 895초일 때 임무 할당 결과

Fig. 8. 임무 할당 시뮬레이션 결과

도는 175 m/s로 가정하였다. 본 시뮬레이션에서는 동적인 SEAD 임무 상황을 가정하여, 지대공 미사일 사이트가 위즐에 의해 파괴되면 BDA를 추가적으로 수행하도록 임무를 설정하였다.

Fig. 8(a)는 t = 0 초 일 때 임무 할당 결과를 도시한다. 스트라이커는 지대공 미사일 사이트를 파괴되기 전까지 비행 금지 구역으로 인식하기 때문에 스트라이커의 경로계획을 살펴보면 지대공 미사일 사이트를 회피하도록 경로가 생성 됨을 확인할 수 있다. Fig. 8(b)는 t = 140 초 일 때의 결과를 나타내는데, 위즐1(W1)에 의해 첫 번째 지대공 미사일 사이트(SAM1)가 파괴되고, 이 지대공 미사일 사이트에 대한 BDA가 스트라이커1(S1)에게 할당된 결과를 살펴 볼 수 있다. 이 때 스트라이커3(S3)는 스트라이커1이 수행해야 하는 임무를 보조하도록 경로계획을 수정하게 됨을 확인할 수 있다. Fig. 8(c)는 t = 265 초 일 때 임무 할당 결과를 나타내는데, 위즐2(W2)에 의해 두 번째 지대공 미사일 사이트(SAM2)가 파괴되어, BDA 임무가 스트라이커3에게 할당된 결과를 볼 수 있다. BDA 임무가 추가됨에 따라 스트라이커1과 스트라이커2(S2)의 임무 경로가 수정 된다. Fig. 8(d)는 위즐1에 의해 네 번째 지대공 미사일 사이트(SAM4)가 파괴되고, 이로 인해 새로운 BDA 임무가 추가 되었을 때 임무 할당 결과를 보여준다. 스트라이커1이 BDA 임무를 수행하도록 임무 계획을 수정하고, 이로 인해 스트라이커 2번이 스트라이커 1번의 임무를 지원하도록 임무 할당이 수정됨을 확인할 수 있다. Fig. 8(e)는 세 번째 지대공 미사일 사이트(SAM3)가 파괴된 직후 임무 할당 결과를 보여준다. 스트라이커2가 추가적인 BDA 임무를 수행하게 된다. Fig. 8(f)는 t = 895 초의 시뮬레이션 결과를 보여주는데, 작전에 참여했던 스트라이커는 모든 임무를 완수하고 작전지역을 빠져나오게 된다.

Fig. 8에서 살펴 볼 수 있듯이, 제안한 분산형 임무 할당 알고리듬은 동적인 SEAD 임무 환경, 비행 장애물과 비행 금지 구역이 있는 환경에 대해서 지형 장애물 회피를 고려한 임무 할당 결과를 효과적으로 도출함을 확인하였다. 또한, 이종의 무인기의 협업 상황에서도 효과적으로 동작함을 확인할 수 있다. 또한 제안한 알고리듬은 CBBA 기법의 특성을 그대로 유지하기 때문에 문제의 크기가 커지더라도 다항-시간의 계산 시간이 요구되며, 각 무인기간의 통신이 단절 되는 상황에서도 강건한 임무 할당 결과를 도출 할 수 있다.

Ⅲ. 결 론

본 연구에서는 CBBA 기법과 최단경로생성 알고리듬을 효과적으로 이용하여 이종 무인기의 SEAD 임무를 위해 지형 장애물 회피를 고려한 분산형 임무 할당 알고리듬을 제안하였다. 제안한 알고리듬에서는 SEAD 전장 상황 인식 정보를 바탕으로, 무인기가 비행할 수 있는 모든 경로를 생성한 후, 최단경로생성 알고리듬을 이용해 각 임무 지역에 도달하는 최단경로의 정보를 도출한다. 이러한 정보를 바탕으로 CBBA 기반 임무 할당을 수행하게 된다. 제안한 방법에서는 지형 장애물을 고려한 비행경로를 기반으로 임무 할당을 수행하기 때문에 실제 SEAD 임무를 더 효과적으로 모사할 수 있다. 제안한 알고리듬의 SEAD 임무 적용 가능성을 분석하기 위해 위즐과 스트라이커가 협업하는 동적인 SEAD 임무 상황에 대해 제안한 알고리듬을 테스트 하였다. 서로 특성이 다른 무인기가 협업하는 상황과, 동적으로 새로운 임무들이 발생되는 상황에 대해서 효과적인 경로계획이 수행됨을 확인할 수 있었고, SEAD 전장 지역에 존재하는 지형 장애물을 효과적으로 반영한 임무 할당 결과를 도출함을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 대해 깊이 감사를 드립니다. (계약번호 UD100048JD)

참고문헌

1) Bolkmon, C., "CRS Report for Congress Military Suppression of Enemy Air Defense (SEAD): Assessing Future Needs," *Congressional Research Service*, Library of Congress, Washington, D.C., 2006.

2) Hathaway, D. C., "Germinationg a New SEAD: the Implications of Executing the SEAD Mission in a UCAV," *MS Thesis*, School of Advanced Airpower Studies, Air University Maxwell Air Force Base, AL, 2001.

3) Bellingham, J., Tillerson, M., Richards, A., and How, J., "Multi-Task Assignment and Path Planning for Cooperating UAVs," *Conference on Coordination, Control and Optimization*, Nov.,

2001.

4) Jin, Y., Minai, A., and Polycarpou, M., "Cooperative Real-Time Search and Task Allocation in UAV Teams," *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, Maui, Hawaii, Dec. 2003, pp. 7-12.

5) Schumacher, C., and Chandler, P., "Task Allocation for Wide Area Search Munitions," *Proceedings of the IEEE American Control Conference*, Anchorage, Alaska, June, 2002, pp. 1917-1922.

6) Chandler, P., "Decentralized Control for an Autonomous Team," *AIAA Unmanned Unlimited Systems, Technologies, and Operations*, San Diego, California, 2003.

7) Alighanbari, M., and How, J., "Decentralized Task Assignment for Unmanned Aerial Vehicles," *Proceeding of 44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference*, Dec. 2005.

8) Ren, W. Beard, R. W., and Atkins, E. M., "Information consensus in multivehicle control," IEEE Control System Magazine, Vol. 27, No. 2, 2007.

9) Parkes, D. C., and Ungar, L. H., "Iterative combinational auctions: theory and practice," *National Conference on Artificial Intelligence*, 2000.

10) Choi, H. L., Brunet, L., and How, J. P., "Consensus-based decentralized auctions for robust task allocation," IEEE Transactions on Robotics, Vol. 25, No. 4, 2009.

11) 유용원의군사세계:http://bmil.chosun.com

12) U.S. Marine Corps, *Suppression of Enemy Air Defense (SEAD)*, Marine Corps Warfighting Publication 3-22.2 (Coordinating Draft), Washington, DC, Oct. 1999.

13) Joint Chiefs of Staff, *JTTP for Joint Suppression of Enemy Defenses (J-SEAD)*, Joint Publication 3-014, Washington, DC, July, 1995.