

論文

DOI:10.5139/JKSAS.2010.38.5.427

혼합정수 선형계획법과 유전 알고리즘을 이용한 다수 무인항공기 임무할당

최현진*, 서중보*, 김유단**

Task Assignment of Multiple UAVs using MILP and GA

Hyunjin Choi*, Joongbo Seo* and Youdan Kim**

ABSTRACT

This paper deals with a task assignment problem of multiple UAVs performing multiple tasks on multiple targets. The task assignment problem of multiple UAVs is a kind of combinatorial optimization problems such as traveling salesman problem or vehicle routing problem, and it has NP-hard computational complexity. Therefore, computation time increases as the size of considered problem increases. To solve the problem efficiently, approximation methods or heuristic methods are widely used. In this study, the problem is formulated as a mixed integer linear program, and is solved by a mixed integer linear programming and a genetic algorithm, respectively. Numerical simulations for the environment of the multiple targets, multiple tasks, and obstacles were performed to analyze the optimality and efficiency of each method.

초 록

본 논문은 다수의 목표물과 다수의 임무가 존재하는 상황에서의 다수 무인항공기의 임무할당 문제를 다룬다. 다수 무인항공기의 임무할당 문제는 순회 세일즈맨 문제, 차량 라우팅 문제와 같은 조합최적화 문제의 일종으로 NP-hard의 계산 복잡도를 가지고 있다. 이런 성격의 문제는 문제의 크기가 커질수록 계산시간이 급격히 증가하는 특징을 지니기 때문에 문제를 효율적으로 풀기 위해서 근사화 방법 또는 발견적인 방법을 사용한다. 본 연구에서는 임무할당 문제를 혼합정수 선형계획 문제로 정식화하고, 혼합정수 선형계획법과 유전 알고리즘으로 해를 구하였다. 다수의 목표물, 다수의 임무, 장애물이 존재하는 환경에 대한 수치 시뮬레이션을 수행하여 각 방법의 최적성과 효율성에 대해 검토하였다.

Key Words : UAV(무인항공기), Task Assignment(임무할당), Combinatorial Optimization (조합최적화), Mixed Integer Linear Programming(혼합정수 선형계획법), Genetic Algorithm(유전 알고리즘)

I. 서 론

다수의 무인항공기(Unmanned Aerial Vehicle)를 이용한 협조제어(Cooperative Control)에 대한 관심이 증가하면서 이와 관련된 연구가 활발히 수행되고 있다. 무인항공기가 가지는 높은 잠재력으로 인해 군사 분야뿐만 아니라 민간 분야에

†2010년 2월 11일 접수 ~ 2010년 4월 12일 심사완료

* 정희원, 서울대학교 기계항공공학부 대학원

** 정희원, 서울대학교 기계항공공학부

교신저자, E-mail : ydkim@snu.ac.kr

서울시 관악구 신림동 산 56-1

이르기까지 무인항공기를 활용하고자 하는 시도가 늘고 있고, 이에 따라 단일 무인항공기가 가지는 한계를 보완하기 위해 다수의 무인항공기의 협동을 통한 임무수행과 관련된 연구가 미국을 비롯한 여러 나라에서 진행되고 있다. SEAD (Suppression of Enemy Air Defence)와 같은 군사적 임무수행에 다수의 무인항공기를 활용하려는 연구가 하나의 예이다. 다수의 무인항공기를 이용하면 단일 무인항공기에 비해 복잡한 임무를 효과적으로 수행할 수 있는 장점이 있다[1,2].

다수의 무인항공기를 효과적으로 운용하기 위해서는 개별 무인항공기에 적합한 임무를 할당하는 의사결정 과정이 선행되어야 한다. 이때 주어진 무인항공기 자원을 효율적으로 배분하여 임무를 할당할 필요가 있다. 이를 다수 무인항공기의 임무할당 문제로 정의한다.

다수 무인항공기의 임무할당 문제는 계산복잡도 관점에서 문제를 이해할 수 있다. 이에 대한 연구로 크게 혼합정수 선형계획법(MILP, Mixed Integer Linear Programming) 또는 메타-휴리스틱(Meta-heuristic) 방법 등을 사용해 왔다. 혼합정수 선형계획법으로는 다수의 목표물과 단일 임무, 장애물이 존재하는 상황에 대한 임무할당[5], 타이밍 제한조건이 존재하는 경우의 임무할당[6,7] 등의 연구가 수행되었고, 메타 휴리스틱 방법으로는 개체 군집 최적화 알고리즘[8], 트리 서치 알고리즘[9], 유전 알고리즘(GA, Genetic Algorithm)[10-12] 등의 방법을 사용한 연구가 수행되었다.

본 논문에서는 다수의 목표물, 다수의 임무, 그리고 장애물이 존재하는 상황에서의 다수 무인항공기의 집중형 임무할당 문제를 혼합정수 선형계획법과 유전 알고리즘을 사용하여 풀고 두 기법의 효율성과 최적성을 분석하였다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. I 절에서는 연구배경과 동향, 연구내용을 서술하였고, II 절에서는 다수 무인항공기의 임무할당 문제를 정리하였다. III 절에서는 혼합정수 선형계획법과 유전 알고리즘을 이용해서 본 연구에서 고려한 문제를 구성하였다. IV 절에서는 수치 시뮬레이션을 통해 두 방법을 비교 분석하고, V 절에서 결론을 지었다.

II. 다수 무인항공기 임무할당 문제

2.1 임무할당 시나리오

다수 무인항공기의 임무할당 문제는 무인항공기, 목표물, 그리고 주어진 임무 사이의 조합을

통하여 해를 구하기 때문에 조합최적화 문제로 해석할 수 있다. 조합최적화 문제는 해의 영역이 이산집합에 속하거나 이산화 될 수 있는 조건에서 최적해를 찾는 문제이다. 이 문제는 순회 세일즈맨 문제, 차량 라우팅 문제와 같은 NP(Non-deterministic Polynomial-time)-hard 문제를 다루기 때문에 계산 복잡도 이론과 연관이 깊다.

문제의 특성상 임무할당은 무인항공기의 수, 목표물의 수, 임무의 수에 따라 고려해야 할 사항이 달라진다. 본 연구에서는 다수의 무인항공기의 임무할당 시나리오로 경로점 통과 임무와 일정지역을 탐색하고 위험시설을 공격한 후 이를 검증하는 WASM(Wide Area Search Munitions) 임무[6]를 고려하였다. 경로점 통과 임무는 무인항공기가 주어진 지역을 한번만 통과해도 되는 임무임에 반해, WASM 임무는 하나의 목표물에 복합적인 임무를 수행해야 하므로 임무 수행순서와 같은 타이밍 제한조건을 가진다. 본 연구에서는 WASM 임무로서 목표물을 분류하고 공격하는 {Classification and Attack}, 공격 결과를 검증하는 {Target Damage Assessment}로 임무를 분류하였다.

다수 무인항공기의 임무할당을 위하여 다음과 같은 기본조건을 설정하였다.

1. 하나의 목표물에 수행되어야 할 임무가 다수인 경우, 임무가 순서대로 수행되어야 한다.
2. 각각의 임무는 해당 목표물에 한 번씩만 수행된다.
3. 임무가 할당되지 않거나, 할당된 임무를 모두 수행한 무인항공기는 종료 지점에서 임무를 종료한다.
4. 무인항공기의 최대 임무수행 횟수는 제한이 없다고 가정한다.
5. 무인항공기 사이의 충돌은 없다고 가정한다.

2.2 임무할당과 경로계획 분리

무인항공기가 소모하는 비용은 무인항공기의 경로와 직접적인 연관이 있기 때문에 임무할당 문제와 경로계획 문제를 분리하여 생각하기 어렵다. 다수의 무인항공기에 최적적으로 임무를 할당하기 위해서는 비용함수가 정의되고, 이 비용함수를 최소화하는 해를 구해야 한다. 여기서 임무할당과 경로계획의 순서에 모순점이 발생한다. 임무할당을 위해서는 무인항공기의 전체 경로에 따른 비용을 알아야 하는데, 임무할당이 이루어

진 후에야 할당된 결과에 따른 경로를 생성하고 비용을 계산할 수 있다. 결국 임무할당과 경로계획을 연계하여 문제를 풀어야 한다. 그러나 이 경우 문제가 복잡해지고, 비대해지기 때문에 문제를 풀기위해 많은 노력과 시간이 요구된다.

본 연구에서는 계산시간을 줄이기 위해서 비용을 예측하고 예측된 비용을 임무할당에 적용함으로써 임무할당 문제를 경로계획과 분리하였다.

1) 비용예측

임무할당 문제에서 고려할 수 있는 비용(성능지수)으로는 에너지 소모량, 연료 소모량, 비행시간 등이 될 수 있다. 비용함수는 문제의 성격에 따라 다르게 설정될 수 있는데, 본 문제에서는 임무를 적절히 분배하여 무인항공기의 비행시간을 줄이는 것이 제한된 무인항공기의 비행시간을 최대한 활용하는 하나의 방법이라 간주하였다. 일반적으로 다수 무인항공기의 비행시간에 관련된 성능지수는 가장 오래 비행한 무인항공기의 비행시간을 줄이거나 개별 무인항공기의 비행시간의 합을 줄이도록 선택할 수 있다[11]. 본 연구에서는 개별 무인항공기의 비행시간을 줄이면서 무인항공기 그룹의 비행시간을 줄일 수 있도록 개별 무인항공기의 임무 수행시간의 총 합을 예측해야 할 비용으로 설정하였다.

$$J = \sum_{v=1}^{N_v} T_v \tag{1}$$

여기서, T_v 는 무인항공기 v 의 임무 수행시간, N_v 는 무인항공기의 수이다.

무인항공기의 속도는 일정하다고 가정하여, 총 이동거리를 속도로 나누어 임무 수행시간을 계산하였다. 비용예측 시에는 임무할당 결과를 알 수 없기 때문에 노드와 노드사이의 비용을 선형 조합하여 전체 할당된 비용을 예측하였다. 노드와 노드 사이의 거리 d 는 Euclidean distance와 무인항공기의 최소 회전반경을 통해 근사화하였다.

$$d(N_1, N_2) = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \tag{2}$$

$$d(N_1, N_1) = 2\pi R_{\min} \tag{3}$$

노드와 노드사이의 비용을 조합하는 경우 Fig. 1과 같이 무인항공기의 운동특성을 반영시키지 못하는 단점이 존재하지만, 비용예측을 통해 무인항공기의 임무할당과 경로계획을 분리시켜 문제를 효율적으로 다룰 수 있다.

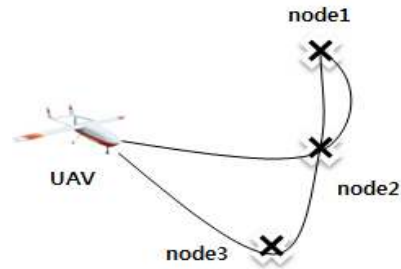


Fig. 1. Path of Nodes to Nodes

2) 경로생성

본 논문에서는 할당된 임무에 대한 경로생성을 위해 2차원 Dubins 모델을 고려하였다. Dubins 모델의 운동방정식은 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} \dot{x} = v \cos \psi \\ \dot{y} = v \sin \psi \\ \dot{\psi} = \omega_{\max} u \end{pmatrix}, |u| \leq 1 \tag{4}$$

$$R_{\min} = \frac{v}{\omega_{\max}} \tag{5}$$

위의 Dubins 모델에 Bang-off-Bang 제어입력을 고려하여 Fig. 2와 같이 입력을 최소로 하는 경로를 생성하였다. 이 궤적은 무인항공기의 출발점의 위치와 방향을 알고, 도착점의 위치를 아는 경우의 Dubins 모델의 최소거리에 해당하는 궤적과 동일하다.

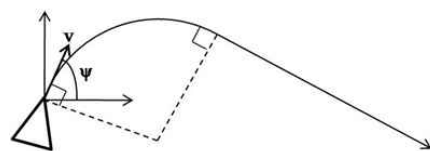


Fig. 2. Dubins Model and its Path

3) 장애물 회피

장애물이 존재하는 경우에는 장애물 회피를 고려하여 노드와 노드사이의 비용을 예측해야 한다. 비용을 예측하기에 앞서 장애물과의 충돌에서 안전한 범위를 설정한 후에 가시성 그래프(Visibility Graph)를 Fig. 3과 같이 구성하였고, 목표물과 목표물 사이의 최소거리를 테이크스트라(Dijkstra) 알고리즘으로 계산하였다[13].

무인항공기의 경로생성은 구성된 가시성 그래프를 바탕으로 충돌에서 자유로운 노드를 경로점으로 설정하여 경로를 생성하였다.

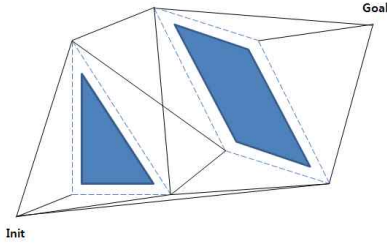


Fig. 3. Visibility Graph

Ⅲ. 집중형 임무할당 기법

3.1 혼합정수 선형계획법

혼합정수 선형계획법은 선형계획법과 정수계획법을 혼합한 방법으로 주어진 제한조건 내에서 성능지수를 최대 또는 최소로 하는 실수 및 정수 조건의 해를 구하는 방법이다. 이 방법은 정수인 조건의 해를 포함하기 때문에 계산의 복잡도가 증가하게 되는데, 이를 효과적으로 풀기 위해 분기한정법(Branch and Bound)을 사용한다[3,4].

혼합정수 선형계획법을 통한 문제의 구성은 제한된 조건의 임무할당 문제[6]에 대해 본 문제에 적합하도록 수정, 보완하여 식을 구성하였다. 식을 구성하는 파라미터들은 Table 1에 정리하였다.

비용함수

비용함수는 개별 무인항공기의 임무 수행시간의 총 합으로서 다음 식 (6)과 같이 노드와 노드

에 대한 비용 $t_{i,j}^{(v,k)}$ 와 이진 결정변수 $x_{i,j}^{(v,k)}$ 의 선형 조합으로 구성된다. 무인항공기 v 가 노드 i 와 j 사이에 k 의 임무가 할당되면 $x_{i,j}^{(v,k)}$ 가 1, 그렇지 않으면 $x_{i,j}^{(v,k)}$ 는 0이 되어 할당된 임무에 대한 비용만 더해지도록 구성되어 있다.

$$J = \sum_{k=1}^2 \sum_{v=1}^{N_v} \sum_{i=1}^{N_i+1} \sum_{j=1}^{N_i+1} t_{i,j}^{(v,k)} x_{i,j}^{(v,k)} \quad (6)$$

타이밍 제한조건

타이밍 제한조건은 임무 수행시간 $t_j^{(k)}$ 를 결정하기 위한 조건으로 다음과 같은 부등식 제한조건으로 구성된다.

$$T \equiv \max_v \{T_v\}_{v=1}^{N_v} \quad (7)$$

$$t_j^{(1)} \leq t_j^{(2)}, \quad \forall j=1, \dots, N_i \quad (8)$$

식 (7)의 T 는 무인항공기의 최대 임무 시간을 나타내는 값으로 식 (9)-(14)의 부등식 조건의 상한, 하한의 범위를 설정하기 위해 사용된다. 식 (8)은 임무의 순서를 나타내는 부등식 조건으로 기본적으로 임무 1이 임무 2보다 빨리 수행되어야 함을 나타낸다.

무인항공기가 목표물과 목표물 사이에서 임무를 수행한 시간을 결정짓기 위해서 다음과 같은 제한조건을 고려해야 한다.

$$t_j^{(k)} \geq t_i^{(1)} + t_{i,j}^{(v,k)} - (2 - x_{i,j}^{(v,k)} - \sum_{l=1}^{N_i+1} x_{l,i}^{(v,1)}) N_v T \quad (9)$$

$$t_j^{(k)} \leq t_i^{(1)} + t_{i,j}^{(v,k)} + (2 - x_{i,j}^{(v,k)} - \sum_{l=1}^{N_i+1} x_{l,i}^{(v,1)}) N_v T \quad (10)$$

$$t_j^{(k)} \geq t_i^{(2)} + t_{i,j}^{(v,k)} - (2 - x_{i,j}^{(v,k)} - \sum_{l=1}^{N_i+1} x_{l,i}^{(v,2)}) N_v T \quad (11)$$

$$t_j^{(k)} \leq t_i^{(2)} + t_{i,j}^{(v,k)} + (2 - x_{i,j}^{(v,k)} - \sum_{l=1}^{N_i+1} x_{l,i}^{(v,2)}) N_v T, \quad (12)$$

$$\forall (i, j, v, k); i=1, \dots, N_i; j=1, \dots, N_i; v=1, \dots, N_v; k=1, 2$$

여기서, 식 (9)와 (10)은 각각의 무인항공기 v 에 대해 노드 j 에 임무 k 가 수행된 시간 $t_j^{(k)}$ 를 결정하기 위한 부등식 조건으로서 노드 i 에 임무 1이 수행된 시간 $t_i^{(1)}$ 에 노드 i 에서 노드 j 로 이동할 때의 비용 $t_{i,j}^{(v,k)}$ 와 이진 결정변수

Table 1. MILP Parameters

J	= cost function
i	= index for assignment start nodes
j	= index for assignment completion nodes
v	= index for vehicles
k	= index for tasks
N_i	= number of targets
N_v	= number of UAVs
$x_{i,j}^{(v,k)}$	= binary task assignment variable
$t_{i,j}^{(v,k)}$	= time cost of node-to-node
$t_j^{(k)}$	= time task k is completed on target j
T	= maximum endurance of any UAV
T_v	= endurance of UAV v

$x_{i,j}^{(v,k)}$, 그리고 임의의 노드 l 에서 노드 i 로 임무 1이 수행되는 모든 경우에 대한 이진 결정변수의 합 $\sum_{i=1}^{N_i+1} x_{i,j}^{(v,1)}$ 으로 이루어진 상한, 하한으로 구성되어 있다. 만약 무인항공기 v 가 i 노드에 1번 임무가 할당되고 j 노드에 대해 k 임무가 할당되면 $x_{i,j}^{(v,k)}$ 와 $\sum_{i=1}^{N_i+1} x_{i,j}^{(v,1)}$ 가 모두 1이 되어 상한과 하한의 범위가 0으로 수렴하여 $t_j^{(k)}$ 가 결정되고, 그렇지 않으면 $t_j^{(k)}$ 는 미지의 값으로 남게 된다. 식 (11) 과 (12)도 마찬가지로 방법으로 노드 i 에 임무 2가 수행된 시간 $t_i^{(2)}$ 를 통해 $t_j^{(k)}$ 가 결정될 수 있도록 하였다.

또한, 무인항공기가 출발점에서 처음으로 목표물을 통과할 때의 임무수행 시간을 결정짓도록 다음과 같은 제한조건을 고려하였다. 식 (13)과 (14)도 앞의 식 (9)-(12)와 마찬가지로 출발점 N_i+1 에서 노드 j 로 임무 k 를 수행하면 상한과 하한이 수렴하여 $t_j^{(k)}$ 가 결정되고, 그렇지 않으면 $t_j^{(k)}$ 가 결정되지 않도록 구성하였다.

$$t_j^{(k)} \geq t_{N_i+1,j}^{(v,k)} - (1 - x_{N_i+1,j}^{(v,k)})N_v T \quad (13)$$

$$t_j^{(k)} \leq t_{N_i+1,j}^{(v,k)} + (1 - x_{N_i+1,j}^{(v,k)})N_v T, \quad (14)$$

$$\forall (j, v, k); j=1, \dots, N_i; v=1, \dots, N_v; k=1, 2$$

모든 무인항공기에 임무가 할당된 경우 타이밍 제한조건인 $t_j^{(k)}$ 가 일정한 값으로 수렴하게 되어 임무 할당시간 $t_j^{(k)}$ 가 결정된다.

비타이밍 제한조건

비타이밍 제한조건은 무인항공기의 임무할당 관계를 나타내는 이진 결정변수 $x_{i,j}^{(v,k)}$ 로 구성된다. 식 (15)는 목표물 j 에 대해 임무 k 가 한번 수행되도록 하는 조건이며, 식 (16)은 중복 임무수행을 방지하기 위한 추가 조건이다.

$$\sum_{v=1}^{N_v} \sum_{i=1}^{N_i+1} x_{i,j}^{(v,k)} = 1, \forall (j, k); j=1, \dots, N_i; k=1, 2 \quad (15)$$

$$x_{i,j}^{(v,1)} = 0, \forall (i, v); i=1, \dots, N_i; v=1, \dots, N_v \quad (16)$$

또한, 다음은 출발점과 종료점의 경계조건을 설정하는 식들이다.

$$\sum_{k=1}^2 \sum_{j=1}^{N_i+1} x_{N_i+1,j}^{(v,k)} = 1, \forall v=1, \dots, N_v \quad (17)$$

$$\sum_{i=1}^{N_i+1} x_{i,N_i+1}^{(v,2)} = 1, \forall v=1, \dots, N_v \quad (18)$$

$$\sum_{k=1}^2 \sum_{v=1}^{N_v} x_{N_i+1,N_i+1}^{(v,k)} \leq 2 \quad (19)$$

$$x_{i,j}^{(v,k)} \leq 1 - x_{N_i+1,N_i+1}^{(v,2)}, \quad (20)$$

$$\forall (i, j, v, k); i=1, \dots, N_i; j=1, \dots, N_i; v=1, \dots, N_v; k=1, 2$$

식 (17)은 무인항공기 v 가 출발점에서 임의의 j 노드로 임무 k 를 수행할 때 단 한번 이동함을 의미하고, 식 (18)은 도착점으로 단 한번 이동함을 의미한다. 또한, 식 (19)와 (20)은 무인항공기가 출발점에서 도착점으로 이동하는 경우와 출발점에서 목표물로 이동하는 경우가 동시에 발생할 수 없음을 나타내는 제한조건이다.

그리고 다음 식들은 무인항공기 궤적의 연속성을 위한 제한조건으로 노드 i 에서 노드 l 로 이동한 경우 반드시 노드 l 에서 노드 j 로 이동하는 경우가 존재함을 이진 결정변수의 합으로 식 (21)과 같이 나타내었고, 무인항공기가 임무를 할당받지 못하고 도착점으로 가는 경우를 보완하기 위해 식 (22)와 같은 부등식 조건을 추가하였다.

$$\sum_{k=1}^2 \sum_{i=1}^{N_i+1} x_{i,l}^{(v,k)} = \sum_{k=2=1}^2 \sum_{j=2=1}^{N_i+1} x_{l,j}^{(v,k,2)} \quad (21)$$

$$\sum_{i=1}^{N_i+1} x_{i,l}^{(v,2)} \leq \sum_{k=2=1}^2 \sum_{j=2=1, j \neq l}^{N_i+1} x_{l,j}^{(v,k,2)}, \quad (22)$$

$$\forall (l, v); l=1, \dots, N_i; v=1, \dots, N_v$$

3.2 유전 알고리즘

유전 알고리즘은 자연계의 선택, 교배, 발생 등의 유전법칙을 모사한 알고리즘으로 선택, 교차, 돌연변이, 치환 연산자를 통하여 다음 세대에 보다 좋은 특성의 해가 발생될 확률을 높이는 메타-휴리스틱 기법의 한 종류이다. 이 방법은 특정 문제가 갖는 속성이나 정보에만 한정되지 않고, 다양한 영역에 활용이 가능한 장점을 가진다.

유전 알고리즘은 염색체(Chromosomes)로 불리는 해 집단과 선택, 교차, 돌연변이, 치환 연산자로 구성된 유전자 연산자(Genetic Operators)를 통해 최적화 문제의 해를 구한다. 각각의 염색체는 비용함수와 관련된 적합도를 가지고, 이를 기

반으로 선택되고, 교차, 돌연변이, 치환을 통해 보다 좋은 해가 발견된다.

1) 비용함수와 적합도

최적화를 위한 비용은 2.2절과 동일하게 개별 무인항공기의 임무 수행시간의 총 합으로 설정하였다.

$$J = \sum_{v=1}^{N_v} T_v \tag{23}$$

각각의 염색체는 주어진 목적에 얼마나 적합한지를 나타내는 적합도를 가진다. 적합도는 전체 염색체의 관계를 통해 가장 좋은 해의 적합도가 가장 나쁜 해의 적합도의 k 배가 되도록 다음과 같이 구성하였다.

$$f_i = (J_w - J_i) + \frac{(J_w - J_b)}{(k - 1)}, k > 1 \tag{24}$$

여기서 J_w 는 가장 나쁜 해의 비용이고, J_b 는 가장 좋은 해의 비용, J_i 는 i 번째 해의 비용, f_i 는 i 번째 해의 적합도를 나타낸다. k 는 선택압을 나타내는데, 선택압이 높으면 우수한 해가 선택될 확률이 높아지고, 선택압이 낮으면 우수한 해가 선택될 확률이 상대적으로 낮아진다. 일반적으로 k 는 경험적으로 결정되는데, 본 문제에서는 k 를 3으로 두어 최대 적합도가 최소 적합도의 3배가 되도록 하였다.

2) 염색체 표현

염색체의 표현방법으로는 이진수 표현, 그레이(Gray) 표현방법에서부터 k -진수 표현, 실수 또는 정수 표현, 다차원 표현 등에 이르기까지 다양한 표현법이 존재한다. 본 연구에서는 무인항공기의 임무할당을 표현하기 위해 자연수의 배열로 염색체를 표현하였다. 즉, Fig. 4와 같이 목표물과 목표물에 해당하는 임무(하점자)를 자연수로 표현하였다.

임무할당 문제에서는 위의 염색체가 하나의 해로 간주된다. 기본적으로 다수의 염색체가 하나의 해 집단으로 구성되고, 해 집단 내에서 염색체들을 선택하여 배열을 변화시키는 작업을 수

	2 ₁	3 ₁	4 ₁	3 ₂	1 ₁	1 ₂	2 ₂	4 ₂
UAV1	2 ₁	-	4 ₁	-	-	1 ₂	-	-
UAV2	-	-	-	3 ₂	-	-	2 ₂	-
UAV3	-	3 ₁	-	-	1 ₁	-	-	4 ₂

Fig. 4. Chromosome Representation

행하기 때문에 염색체의 표현 방법이 해의 수렴에 큰 영향을 준다. 다수 무인항공기에 다수의 임무를 할당하는 경우, 무인항공기에 할당된 임무의 순서를 조정하는 것과 무인항공기 간의 임무를 교환하는 것이 이루어져야한다. 그래서 위와 같이 행으로 각각의 무인항공기를 나타내고 열로 목표물과 임무의 순서를 나타내는 염색체 표현법을 고려하였고, 염색체가 생성될 때 제한 조건(임무의 순서)을 만족하도록 염색체 내부 배열이 조정되도록 하였다.

3) 유전자 연산자

유전자 연산자는 선택, 교차, 돌연변이, 치환 연산자로 구성되고, 네 개의 연산자가 한 사이클을 구성하여 하나의 새로운 해를 발생시킨다.

선택 연산의 방법으로는 품질비례 룰렛휠 선택을 사용하였다. 품질비례 룰렛휠 선택 방법은 각각의 염색체가 적합도에 비례하는 룰렛휠 상의 공간을 가지고 있고, 랜덤 함수를 이용하여 룰렛휠 상의 염색체를 선택하는 방법이다. 문제에서는 선택 연산을 통해 부모 해 2개를 선택하게 된다.

교차 연산은 부모 해들의 임무 순서에 대한 부분적인 특징을 교차시킬 수 있도록 Fig. 5와 같은 순서교차 방법을 사용하였다. 순서교차는 순회 세일즈맨 문제와 같이 순서가 중요한 문제에 주로 쓰이는 교차 연산자로서 그림과 같이 2점 기반의 순서 교차를 사용하여 무인항공기에 할당된 임무의 순서를 변경하게 된다.

돌연변이 연산은 Fig. 6과 같이 일정한 확률로 임무할당 순서를 변화시키거나 개별 무인항공기의 할당 결과를 교환하는 방식으로 구현하였다. 특히 개별 무인항공기 간의 임무를 교환하는 확률을 높여 교차연산의 단점을 보완하였다.

p1: 5	8	3	4	1	6	7	2
		3	4	1	6		
p2: 5	↗	↘	8	7	↗	2	↘
	2	5				8	7
s: 2	5	3	4	1	6	8	7

Fig. 5. Order Crossover

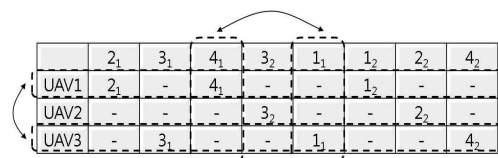


Fig. 6. Mutation

치환은 지식해의 품질을 기존 탐색체 집단의 품질과 비교하여 가장 낮은 적합도를 가지는 탐색체와 치환되도록 하였다. 치환이 일어날 때 우수한 품질의 해는 보존되므로 엘리티즘(Elitism)은 따로 두지 않았다.

IV. 수치 시뮬레이션

4.1 시뮬레이션 환경

본 연구에서는 경로점 통과 임무와 WASM 임무를 고려하여 시나리오를 구성하였으며, 혼합정수 선형계획법(MILP)과 유전 알고리즘(GA)을 이용하여 해를 구하였다.

임무수행 지역에는 3대의 동종의 무인항공기와 6개의 목표물이 존재하고, 무인항공기는 25m/s의 일정한 속도로 비행하며, 최소 회전반경은 100m로 가정하였다.

유전 알고리즘의 해집단 탐색체 개수는 30개로 설정하였고, 모든 탐색체가 동일한 적합도를 가진 상태에서 100번의 발생과정 동안 변화가 없으면 알고리즘을 종료하도록 하였다. 시뮬레이션은 2.6GHz dual core CPU, 2GB RAM의 컴퓨터에서 MATLAB 프로그램으로 수행하였다.

4.2 경로점 통과 임무 (Case 1)

경로점 통과 임무의 경우 목표물에 수행해야 할 임무가 1개이므로 타이밍 제한조건을 고려할 필요가 없다. 이 경우 Fig. 7과 8과 같이 무인항공기가 목표물을 한 번씩만 통과하게 된다.

Fig. 7과 8은 각각 MILP와 GA로 구한 임무할당 결과를 나타낸다. 혼합정수 선형계획법의 임무할당 결과 UAV1은 목표물 5와 목표물 4를 통과, UAV2는 목표물 3과 목표물 6을 통과,

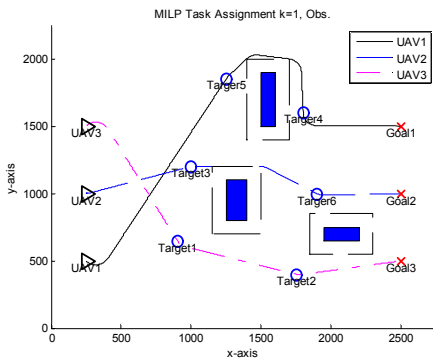


Fig. 7. Assignment Result of MILP(Case 1)

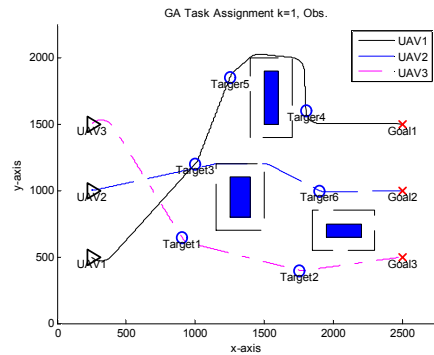


Fig. 8. Assignment Result of GA(Case 1)

Table 2. Comparison of MILP and GA(Case 1)

	MILP	GA
Total Cost (sec)	333.9075	335.4295
Computation Time (sec)	0.5037	0.4763
Average Cost (sec)	-	334.4046
Standard Deviation (sec)	-	1.0202

UAV3은 목표물 1과 목표물 2를 통과하여 각각 도착점으로 향하게 된다. 이 결과는 선형 가정에서 최소의 비용을 가지는 임무 할당결과이다. 유전 알고리즘의 경우 UAV1은 목표물 3, 5, 4를 UAV2는 목표물 6을 UAV3은 목표물 1, 2를 지나 도착점으로 향한다. 이 경우 혼합정수 선형계획법의 결과보다 비용이 조금 더 증가한 것을 Table 2를 통해 알 수 있지만, 기하학적으로 유사한 경로가 생성된 것을 볼 수 있다.

경로점 통과 임무의 경우 혼합정수 선형계획법과 유전 알고리즘의 계산 시간이 서로 비슷한 것을 Table 2를 통해 알 수 있다. Fig. 9는 유

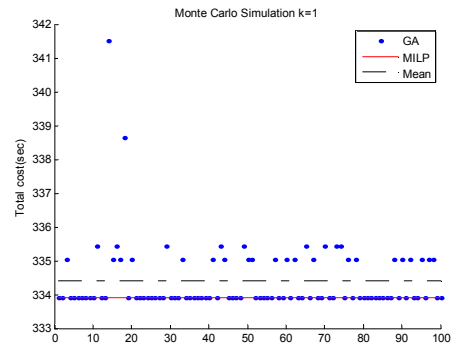


Fig. 9. Monte-carlo Simulation of GA(Case 1)

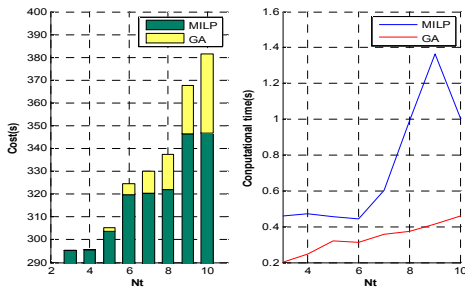


Fig. 10. Cost and Calculation time of the two methods with variation of Nt(Case 1)

전 알고리즘으로 Monte-carlo 시뮬레이션을 한 결과로 최적해 근처의 해를 구할 수 있지만, 최적해를 보장하지 못하는 것을 보여준다. Fig. 10은 목표물의 수를 변화시켰을 때 두 방법의 해와 계산시간의 변화에 대한 그래프로 좌측 그래프의 유전 알고리즘 부분은 해의 범위가 밝은 색 부분에 분포함을 나타낸다. 유전 알고리즘이 혼합정수 선형계획법에 비해 전반적으로 계산시간이 빠르지만 목표물의 수가 증가함에 따라 해의 수렴도가 취약해짐을 볼 수 있다.

4.3 WASM 임무 (Case 2)

Fig. 11과 12는 각각 MILP와 GA로 구한 임무 할당 결과이다. 혼합정수 선형계획법과 유전 알고리즘에 의한 임무할당 결과는 Table 3과 같이 목표물과 임무에 대한 무인항공기의 번호로 정리하였다. 기본적으로 하나의 무인항공기가 임무 1을 수행하면 다른 무인항공기가 임무 2를 수행하게 되고, 주변에 다른 무인항공기가 없는 경우 하나의 무인항공기가 임무 1과 임무 2를 순차적으로 수행하는 것을 볼 수 있다.

Table 3. Target-Task Assignment Results of MILP and GA(Case 2)

	MILP		GA	
	Task1 (C&A)	Task2 (TDA)	Task1 (C&A)	Task2 (TDA)
Target1	UAV1	UAV3	UAV1	UAV2
Target2	UAV1	UAV3	UAV2	UAV3
Target3	UAV2	UAV3	UAV2	UAV3
Target4	UAV2	UAV1	UAV1	UAV3
Target5	UAV2	UAV2	UAV3	UAV3
Target6	UAV1	UAV2	UAV3	UAV2

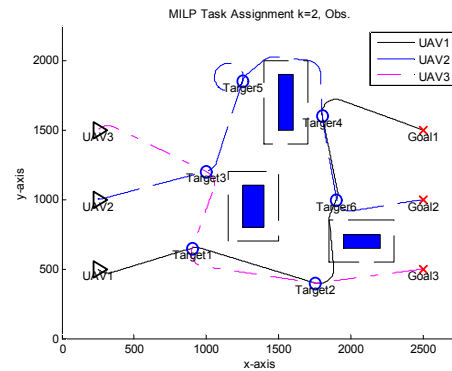


Fig. 11. Assignment Result of MILP(Case 2)

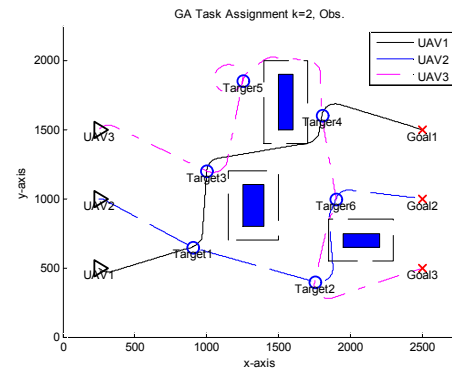


Fig. 12. Assignment Result of GA(Case 2)

Table 4. Comparison of MILP and GA(Case 2)

	MILP	GA
Total Cost (sec)	429.2263	430.7648
Computation Time (sec)	183.2043	1.4631
Average Cost (sec)	-	443.9000
Standard Deviation (sec)	-	9.8799

WASM 임무의 경우 목표물에 수행해야 할 임무를 2개로 설정하였기 때문에 혼합정수 선형계획법의 타이밍 제한조건을 고려해야 한다. 이 경우, 혼합정수 선형계획법은 최적의 해를 구할 수 있지만, 타이밍 제한조건에 추가로 인해 계산시간이 크게 증가한 것을 Table 4를 통해 확인할 수 있다. 유전 알고리즘의 경우 혼합정수 선형계획법에 비해 계산시간이 크게 증가하지는 않았지만, 문제의 크기가 커지면서 최적해로의 수렴성이 나빠진 것을 Fig. 13의 Monte-carlo 시뮬레이션 결과를 통해 알 수 있다.

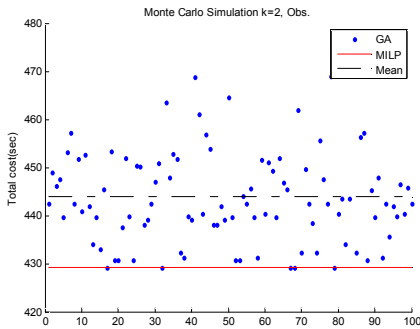


Fig. 13. Monte-carlo Simulation of GA(Case 2)

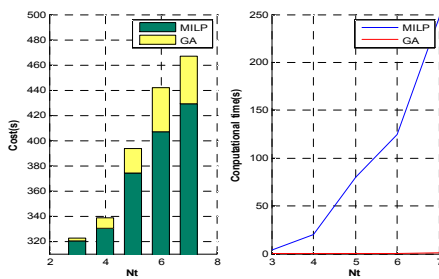


Fig. 14. Cost and Calculation time of the two methods with variation of Nt(Case 2)

혼합정수 선형계획법은 분기한정법을 통해 해의 탐색 영역을 최소화하는데, 타이밍 제한조건과 같이 실수해 조건이 존재하면 분기한정법을 일률적으로 적용시킬 수 없다. 따라서 해를 탐색하는 영역을 효과적으로 줄일 수 없게 되고, 이러한 문제로 인해 계산시간이 급격하게 증가하게 된다.

이러한 문제는 목표물의 수에 변화를 주었을 때의 해와 계산시간을 나타낸 Fig. 14를 통해 확인할 수 있다. 해의 성질은 앞의 Case 1과 유사하지만 계산시간이 혼합정수 선형계획법의 실수해 조건으로 인해 크게 증가한 것을 볼 수 있다.

V. 결 론

다수의 목표물, 다수의 임무가 존재하는 상황에서의 다수 무인항공기 임무할당 문제는 조합최적화 문제의 한 종류로 이러한 문제를 효과적으로 풀기 위해서는 계산의 복잡도 측면을 고려해야 한다. 본 논문에서는 혼합정수 선형계획법과 유전 알고리즘을 이용하여 계산 복잡도 측면을 고려한 시나리오에 대해 임무할당 문제를 구성하고 해를 구하였다.

혼합정수 선형계획법은 임무할당 문제에 대해 정수 조건과 실수 조건의 해를 도입하여 식을 구성하고 최적해를 하나하나 탐색하는 방법으로 선형 가정 하에서 최적해를 구하게 된다. 따라서 문제의 크기에 따라 탐색시간이 크게 증가할 수 있고, 이를 해결하기 위해 분기한정법과 같이 탐색영역을 효과적으로 줄이는 방법을 통해 탐색시간을 줄이게 된다. 하지만 간단한 임무의 순서 결정 문제에 대해서도 복잡한 제한조건을 구성해야 하므로 다양한 임무 조건에 적용하기 어려운 단점이 있고 변화하는 환경에 대한 응용력도 떨어진다. 또한, 제한조건에 따라서 계산시간이 급격히 증가하는 단점도 존재한다.

이에 반해 유전 알고리즘은 메타-휴리스틱 기법의 한 종류로 문제의 속성에 크게 얽매이지 않고 다양하게 문제를 구성할 수 있고 문제의 변경에도 유리하여 다양한 임무할당 문제에 적용이 가능하다. 그리고 계산 복잡도를 가지는 문제에 대해서도 비교적 짧은 계산시간 내에 쓸만한 해를 구할 수 있다. 하지만 기법의 특성상 최적해를 보장하지 못하고, 문제의 구성에 따라 해의 수렴도가 크게 영향을 받는 단점이 존재한다.

실제 다수 무인항공기의 임무할당은 임무를 수행하기 전에 중앙 컴퓨터에서 집중적으로 모든 무인항공기에게 임무를 할당하는 오프라인 방식과 비행 중에 무인항공기가 개별적으로 임무를 할당하는 온라인 방식으로 나눌 수 있고, 이 무인항공기의 임무할당 방식에 따라 정확한 해를 구하는 것과 효율적으로 해를 구하는 것에 대한 비중에 차이가 생기게 된다. 그래서 본 연구를 통해 효율성과 최적성 측면에서 혼합정수 선형계획법과 유전 알고리즘을 비교, 분석하고 임무할당 문제의 조건에 따른 각각의 방법의 특징과 한계를 조명하였고, 온라인과 오프라인 시스템에 적용 가능한 임무할당 기법에 대한 단서를 제시하였다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부/한국연구재단 우수 연구센터 육성사업의 지원으로 수행되었음(과제번호 R11-2008-007-02003-0).

참고문헌

1) R. M. Murray, "Recent Research in Cooperative Control of Multivehicle Systems", *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and*

Control, Vol. 129, No. 5, 2007, pp. 571-583.

2) F. Giulietti, L. Pollini, and M. Innocenti, "Autonomous Formation Flight", *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 20, No. 6, 2000, pp. 34-44.

3) C. H. Papadimitriou, and K. Steiglitz, *Combinatorial Optimization: Algorithms and Complexity*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1982.

4) T. H. Cormen, C. E. Leiserson, R. L. Rivest, and C. Stein, *Introduction to Algorithms, 2nd Ed.*, MIT Press, Cambridge, MA, 2001.

5) A. Richards, J. Bellingham, M. Tillerson, and J. P. How, "Coordination and Control of Multiple UAVs", *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, Monterey, CA, Aug. 2002.

6) C. Schumacher, P. Chandler, M. Pachter, and L. Pachter, "Constrained Optimization for UAV Task Assignment", *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, Providence, RI, Aug. 2004.

7) M. Alighanbari, Y. Kuwata, and J. P. How, "Coordination and Control of Multiple UAVs with Timing Constraints and Loitering", *American Control Conference*, Denver, CO, June 2003.

8) A. Salman, I. Ahmad, and S. Al-Madani, "Particle Swarm Optimization for Task

Assignment Problem", *Microprocessors and Microsystems*, Vol. 26, No. 8, 2002, pp. 363-371.

9) S. J. Rasmussen, and T. Shima, "Tree Search Algorithm for Assigning Cooperating UAVs to Multiple Tasks", *International Journal of Robust Nonlinear Control*, Vol. 18, No. 2, 2007, pp. 135-153.

10) J. Y. Protvin, "Genetic Algorithms for the Travelling Salesman Problem", *Annals of Operations Research*, Vol. 63, No. 3, 1996, pp. 339-370.

11) T. Shima, S. J. Rasmussen, A. G. Sparks, and K. M. Passino, "Multiple Task Assignments for Cooperating Uninhabited Aerial Vehicles using Genetic Algorithms", *Computers & Operation Research*, Vol. 33, No. 11, 2006, pp. 3252-3269.

12) Y. Eun, and H. Bang, "Cooperative Task Assignment/Path Planning of Multiple Unmanned Aerial Vehicles Using Genetic Algorithms", *Journal of Aircraft*, Vol. 46, No. 1, 2009, pp. 338-343.

13) H. Alt, and E. Welzl. "Visibility Graphs and Obstacle-Avoiding Shortest Paths", *Mathematical Methods of Operations Research*, Vol. 32, No. 3-4, 1988, pp. 145-164.

14) 문병로, 쉽게 배우는 유전 알고리즘 진화적 접근법, 한빛미디어, 2008.