

## 시간 제한 조건을 고려한 유전 알고리즘 기반 다수 무인기 임무계획기법

정병민<sup>1</sup>, 장대성<sup>2</sup>, 황남웅<sup>3</sup>, 김준원<sup>3</sup>, 최한림<sup>1†</sup><sup>1</sup>한국과학기술원,<sup>2</sup>한국항공대학교,<sup>3</sup>한화시스템

## Genetic algorithm based multi-UAV mission planning method considering temporal constraints

Byeong-Min Jeong<sup>1</sup>, Dae-Sung Jang<sup>2</sup>, Nam-Eung Hwang<sup>3</sup>, Joon-Won Kim<sup>3</sup> and Han-Lim Choi<sup>1†</sup><sup>1</sup>Korea Advanced Institute of Science and Technology(KAIST),<sup>2</sup>Korea Aerospace University(KAU),<sup>3</sup>Hanwha Systems Co.

## Abstract

For Multi-UAV systems, a task allocation could be a key factor to determine the capability to perform a task. In this paper, we proposed a task allocation method based on genetic algorithm for minimizing makespan and satisfying various constraints. To obtain the optimal solution of the task allocation problem, a huge calculation effort is necessary. Therefore, a genetic algorithm-based method could be an alternative to get the answer. Many types of UAVs, tasks, and constraints in real worlds are introduced and considered when tasks are assigned. The proposed method can build the task sequence of each UAV and calculate waiting time before beginning tasks related to constraints. After initial task allocation with a genetic algorithm, waiting time is added to satisfy constraints. Multiple numerical simulation results validated the performance of this mission planning method with minimized makespan.

## 초 록

다수 무인기 체계에서 임무할당은 임무 수행 능력을 결정하는 중요한 요인이다. 본 논문은 유전 알고리즘에 기반한 임무계획기법을 제안한다. 본 기법을 통해 제한 조건을 만족하면서, 임무 완료 시간을 최소화하는 해를 구할 수 있다. 임무 할당 문제의 최적해를 구하기 위해서는 계산량이 많이 필요하므로 본 기법이 해를 구하는 대안이 될 수 있다. 본 기법은 현실 세계의 다양한 종류의 무인기, 임무, 제한 조건을 고려하였다. 제안된 기법은 각 무인기의 임무 시퀀스와 제한 조건 만족을 위한 임무 별 대기 시간을 도출한다. 다양한 수치적 시뮬레이션 결과를 통해 임무 종료 시간을 최소화하는 임무계획 기법의 성능을 확인하였다.

**Key Words** : Multi-UAV System(다수 무인기 체계), Task Allocation(임무 할당), Genetic Algorithm(유전 알고리즘)

## 1. 서 론

다수 무인기 체계는 현대에 이르러, 많은 용도로 활용되고 있다. 감시 임무[4], 물품 배송 임무[5], 드론 쇼[6], 재난 치안용[16-17] 등에서 다수 무인기 체계가 이용되고 있다. 이 때, 다수 무인기 체계를 구성하는 무인기들이 수행해야 할 임무나 방문 위치들이 사

전에 지정되어 있고 설계된 경로대로 비행하는 경우에는 별도의 임무계획이 필요하지 않다. 그러나 이 체계가 통합적으로 수행해야 할 다양한 임무들이 주어져 있는 상황에서는 무인기들 각각이 수행해야 할 임무를 적절히 할당하고 수행 순서를 계획해야 하는 문제가 발생한다. 또한, 여러가지 환경 조건이나 운용상의 제한 조건들이 존재하므로, 이를 만족하면서 다수 무인기 체계의 임무 수행 성능을 최대화하는 기법의 개발과 적용이 요구된다.

임무 계획은 조합적 최적화인 임무 할당 문제를 포

Received: Jan. 10, 2023 Revised: Feb. 28, 2023 Accepted: Mar. 02, 2023

† Corresponding Author

Tel: +82-42-350-3727, E-mail: hanlimc@kaist.ac.kr

© The Society for Aerospace System Engineering

함하고 있고 이는 NP-hard 문제이므로 [3], 다양한 방법을 통해 최적 및 준최적해를 구하는 연구들이 진행되었다. 특히 제한 조건이 있는 임무 할당 문제를 푸는 것은 많은 계산시간을 필요로 한다. 이를 해결하기 위해 문제를 혼합정수계획법(Mixed Integer Linear Program: MILP)으로 정식화하여 접근하는 것을 시도한 연구[8]가 있었고, Tabu Search 방법[9], 개미군락 최적화[10], 유전알고리즘[11] 등의 메타휴리스틱을 활용해 해를 구한 연구가 있었다.

무인기의 임무계획에 있어 가장 빈번하게 설정되는 제한 조건은 임무 수행에 대한 시간적인 제약이다. 시간적 제한 조건의 사례를 들면, 물품 수송 상황에서 물품을 싣는 임무가 배달하는 임무보다 항상 앞에 수행되어야 하는 것이나 무거운 화물 수송을 위해 두 무인기가 동시에 임무를 수행하는 것 등이 있다. 이론적인 최적화의 관점에서 시간적 제한조건을 분석한 연구 [7]에서는 임무계획 문제의 결정변수를 시각(time point) 또는 시구간(interval)으로 설정함에 따라 다양하게 분류하였다. 무인기 임무 계획에서 발생하는 주요 상황을 고려하면 이러한 제한조건들은 임무를 특정 시간 이전 또는 이후에 수행해야 하는 것, 두 임무 수행 간의 선후 조건이 있는 것, 두 임무의 동시 수행이 필요한 것으로 분류할 수 있다.

무인기 임무 계획에 대한 기존의 많은 연구에서는 시간적 제한조건들이 대부분 고려되지 않거나, 고려되더라도 한정적으로 다루어지는 경우가 많았다. 시간 제한 조건이 설정된 임무 할당 문제를 푸는 방법으로는 주로 유전 알고리즘이 채택되었다. 사전 수행 제한 조건을 고려하여 임무를 할당하고 무인기의 경로 생성을 수행한 연구[13]도 있고, 다양한 정보를 유전자에 반영하여 대기 시간을 고려한 무인기 임무 순서를 도출하는 연구[14]도 있었다. 그러나 대부분의 연구에서 사전 수행 조건[13], 동시 수행 조건[9], 시간 제한 조건을 각각 고려하지만, 모든 제한 조건을 동시에 고려할 수 있는 알고리즘은 없었다.

따라서 본 논문에서는 여러 시간적 제한조건이 고려된 무인기 임무 계획에서 준최적해를 도출하기 위해 유전 알고리즘에 기반한 기법을 제시한다. 임무 계획 문제를 최적화 문제로 정식화할 때, 시간적 제한 조건을 효율적으로 다루기 위해 임무의 할당 및 수행 순서를 나타내는 변수와 함께 각 임무 수행 전 대기 시간을 결정 변수로 설정하였다. 이 대기 시간은 연속변수이고 유전 알고리즘의 탐색 영역을 크게 증가시키게 된다. 따라서 임무 할당과 수행 순서만을 염색체에 표현하고, 대기 시간은 유전 알고리즘의 적합도 계산 단계에서 휴리스틱 규칙을 통해 결정하는 방식을 사용하였다. 이를 통해 유전 알고리즘에서 고려하는 변수의

크기는 줄이면서 시간적 제한조건을 만족하는 해를 도출할 수 있다.

본 논문은 아래와 같이 구성된다. 2장에서 논문에서 다룰 임무계획 문제에 대해 설명하고 정식화한다. 3장에서는 임무의 할당과 순서가 결정되었을 때 유효한 해를 도출하기 위한 대기 시간 계산 기법을 설명한다. 4장에서는 본 논문에서 제안하는 유전 알고리즘 기반 임무계획 기법에 대해 설명하며, 5장에서는 시뮬레이션 결과를 통해 기법의 유효성을 확인한다. 그리고 6장에서 논문의 결론을 서술한다.

## 2. 문제 정의 및 정식화

### 2.1 문제 정의 및 제한 조건

본 논문에서 다루고자 하는 문제는 다수의 무인기가 다수의 임무를 수행할 때 임무 전체 종료 시간(Makespan)을 최소화하면서 시간적 제한 조건을 만족하는 해를 찾는 문제이다. 임무 전체 종료 시간은 다중 무인기 체계를 통해 주어진 모든 임무를 완료하는 시간을 뜻한다. 모든 무인기의 제원은 동일하고, 동일한 임무를 수행할 수 있다고 가정하였다.

무인기가 맡을 수 있는 다양한 현실적 임무에서는 여러 형태의 시간적 제한 조건이 있다. 제한 시간이 설정되어 있어 특정 시간 이전 또는 이후에 수행해야 하는 임무가 있을 수 있고, 임무 2개 간 선후 관계가 지정되는 경우도 있을 수 있다. 그리고 두 가지 임무를 동시에 수행해야 할 필요가 있는 경우도 있다. 이러한 제한 조건을 아래와 같이 정리할 수 있다.

- 1) A before t (시간 t 이전에 임무 A 수행)
- 2) A after t (시간 t 이후에 임무 A 수행)
- 3) A before B (임무 B 이전에 임무 A 수행)
- 4) Simultaneously A & B (임무 A,B 동시 수행)

위 4 가지 제한조건을 각각 제한시간 이전 수행, 제한시간 이후 수행, 사전 수행, 동시수행 제한조건이라고 칭한다. 이러한 조건들을 본 논문에서 고려하였고, 이를 만족하는 해를 찾을 수 있도록 하였다.

### 2.2 문제 정식화

2.1절에서 제시한 제한 조건을 고려하면서 임무 전체 종료 시간  $T_{max}$ 을 최소화하는 문제를 아래 수식(1~7)과 같이 정식화하였다. 다수 무인기 체계를 구성하는 무인기의 총수는  $N_u$ 이고, 임무의 수는  $N_t$ , 제한 조건의 수는  $N_c$ 로 정의한다. 그리고 무인기  $i$ 가 최대로 수행할 수 있는 임무의 수는 임무의 총수와 같다.

$$\min T_{max}(P, W) \quad (1)$$

where:

$$T_{max}(P, W) = \max_i T_i(p_i, w_i), \forall i \in I \quad (2)$$

subject to:

$$\sum_{j=1}^{N_t} x_j = L_{p_i} \leq N_t, \forall i \in I \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^{N_u} \sum_{l=1}^{L_{p_i}} x_{i,p_l} = N_t \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^{N_u} x_j = 1, \forall j \in J \quad (5)$$

$$w_i \geq 0, \forall (i, l) \in I \times p_i \quad (6)$$

$$V_k(P, W) = 0, \forall k \in C \quad (7)$$

$x_j$  는  $i$  번째 무인기가  $j$  번째 임무를 맡았는지 여부를 나타내는 이진 변수이다.  $p_i$  은  $i$  번째 무인기가  $l$  번째로 맡은 임무의 인덱스를 의미한다.  $w_l$  은  $i$  번째 무인기가  $l-1$  번째 임무 수행 이후  $l$  번째로 맡은 임무를 수행하기 전의 대기시간을 의미한다. 따라서 대기시간은 음수가 아니어야 한다(수식 (6)). 그리고  $i$  번째 무인기가 맡은 임무의 수는  $L_{p_i}$  로 나타낼 수 있다(수식 (3)). 이때,  $i$  번째 무인기가 맡은 임무 순서는  $p_i = \{p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iL_{p_i}}\}$ , 임무 순서대로 저장한 임무 수행 전 대기시간은  $w_i = \{w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{iL_{p_i}}\}$  라는 벡터 형태로 나타낼 수 있다. 이를 각각 전체 무인기에 대해 행렬 형태로 나타낸 것이  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_{N_u}\}$ ,  $W = \{w_1, w_2, \dots, w_{N_u}\}$  이다.  $P$  는 전체 무인기의 임무 순서를 기록한 정수 변수( $p_i$ )의 집합이고,  $W$  는 임무별 수행 전 대기 시간을 기록한 실수 변수( $w_i$ )의 집합으로 간주할 수 있다. 그리고  $I$  는 무인기의 인덱스,  $J$  는 임무의 인덱스,  $C$  는 제한조건의 인덱스를 저장한 집합이다. 임무 수행 시간에 연관된 변수  $T_i(p_i, w_i)$  는  $i$  번째 무인기의 임무 순서와 수행 전 대기 시간을 이용해 계산한 임무 종료 시간이다. 그리고  $T_{max}(P, W)$  는 전체 무인기의 임무 순서와 수행 전 대기 시간을 바탕으로 계산한 임무 전체 종료 시간이다.  $V_k(P, W)$  는 전체 무인기의 임무 순서와 대기 시간이 주어졌을 때  $k$  번째 시간적 제한 조건이 만족했을 때만 0이고 그 외에는 양의 값을 가지는 페널티 함수이다.

### 3. 대기 시간 계산

#### 3.1 대기 시간 계산 기법

2.2절에 정식화된 문제를 풀기 위해서는 정수 변수( $p_i$ )와 실수 변수( $w_i$ )를 모두 구해야 한다. 하지만, 실수 변수를 유전 알고리즘을 통해 구하기 위해서는 시간이 많이 소요된다. 그리고 동시 수행 조건과 같이 정확한 시간 계산이 필요한 경우에 순수한 유전 알고리즘을 통한 접근 방식은 효과적이지 않다. 따라서, 유전 알고리즘에서 고려하는 변수의 크기는 줄이면서 해의 정확도는 높이기 위하여, 임무의 할당과 수행 순서는 유전 알고리즘을 통해 결정하고, 대기 시간은 별도로 계산하는 방식을 사용하였다. 우선, 유전 알고리즘에서 사용되는 염색체에는 어떤 무인기가 어떤 임무를 어떤 순서로 수행할 것인지를 나타내는 유전자 표현을 사용한다. 이후 각 염색체의 적합도를 계산하는 과정에서 염색체에 설정된 임무의 할당과 수행순서를 준수하면서 시간적 제한조건들을 만족하는 유효한 해를 찾기 위해 대기 시간을 계산한다.

임무의 할당과 수행순서가 결정되어 있을 때 제한조건을 만족하는 유효한 해(대기 시간)가 있는지 확인하는 문제는 하나의 최적화 문제가 되므로 매번 유효해를 구하는 것은 많은 계산량을 요구하게 된다. 따라서 전역 최적해를 구하는 대신 간단한 규칙에 따라 순차적으로 대기시간을 계산하는 방식을 사용하였다. 대기시간은 임무별로 계산하는데, 임의의 순서로 수행할 경우, 이전에 계산한 임무 앞에 대기 시간이 추가되면서 다른 제한 조건이 위배될 수 있다. 따라서, 임무의 시작 시간이 빠른 순서대로 제한 조건을 확인하고 대기 시간을 추가한다.

각 임무의 대기 시간은 다음과 같이 제한 조건별로 규칙에 따라 계산된다.

- 1) 제한시간 이전 수행의 경우, 제한조건을 만족하지 못할 때, 큰 페널티를 부여한다.
- 2) 제한시간 이후 수행의 경우, 해당 임무가 제한시간 이후에 수행될 수 있도록 해당 임무 앞에 대기 시간을 추가한다.
- 3) 사전 수행의 경우, 앞에 수행되어야 할 임무가 나중에 수행된다면, 차이나는 만큼 뒤에 수행되어야 할 임무 앞에 대기 시간을 추가한다.
- 4) 동시 수행의 경우, 둘 중 빨리 시작하는 임무 앞에 차이나는 만큼의 대기 시간을 추가한다. 다만, 두 임무가 모두 한 무인기에 할당될 경우, 제한조건 만족할 수 없으므로, 큰 페널티를 부여한다.

### 4. 유전 알고리즘 기반 임무 계획

#### 4.1 알고리즘 시행 순서

본 논문에서는 다수 무인기의 임무 할당과 순서를 결정하기 위해 유전 알고리즘을 활용한다. 유전 알고리즘은 생물의 진화 방식을 모방하는 알고리즘으로 전역적 최적해를 구할 수 있는 메타 휴리스틱이다[1]. 유전 알고리즘은 임의의 최초해 생성 후 선택, 교차, 변이, 적합도 계산, 다음 세대 구성, 종료 조건 확인을 지속적으로 반복하여 해를 구한다[2].

본 논문에서 사용하는 유전 알고리즘의 시행 순서는 Fig.1과 같다. 먼저, 임의의 난수를 통해 최초 세대 집단을 생성하고 각 염색체의 적합도를 계산한다. 적합도를 기반으로 부모 염색체 쌍들을 선택하고, 각 쌍마다 교차(Crossover)와 변이(Mutation) 연산을 수행한다. 교차는 부모 세대의 유전자를 부분적으로 포함하는 새로운 자식 염색체를 구성하기 위함이고, 변이 연산은 새로운 유전자를 도입하기 위한 연산이다. 부모 염색체 선택과 교차, 변이를 거쳐 복수의 자식 염색체가 생성되며, 새로 생성된 자식들의 적합도를 계산한다. 적합도를 계산할 때는 먼저 3장에서 설명된 방법에 따라 대기 시간을 계산하고, 제한조건에 따른 페널티를 고려하여 제한조건을 만족하지 않는 해가 자연스럽게 도태될 수 있도록 하였다. 계산된 적합도에 따라 새로운 세대 집단을 구성하고, 종료조건을 만족할 때까지 반복한다.

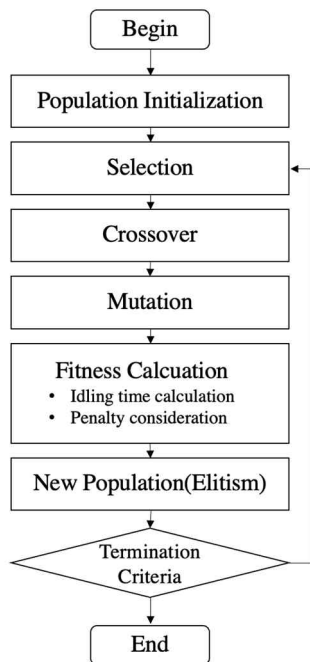


Fig. 1 Flow chart of genetic algorithm in this paper

#### 4.2 염색체 표현

본 논문에서는 유전자를 담고 있는 해인 염색체를 두 부분으로 구성하였다. 이는 임무 스케줄링 문제를 유전 알고리즘으로 해결하고자 했던 연구[15]의 방식을 일부 활용한 것이다. 염색체는 각각  $N_t$ 만큼의 정수들로 이루어진 두 부분으로 구성된다. 전반부는 무인기의 번호가 할당되며, 후반부는 임무의 번호가 할당된다. 편의상 전자를 무인기부, 후자를 임무부로 표기한다. 무인기부에서는 유전자 값이 중복되거나 해당하는 무인기의 번호가 없어도 무방하지만, 임무부에서는 1부터  $N_t$ 까지의 정수가 중복없이 나타나야 한다.

Fig. 2는 4개의 임무를 가지는 문제에서 염색체의 예시이다. 두 개의 행 중에서 두 번째 행(Index)이 염색체이며, 첫 번째 행(#)은 무인기와 임무를 짝짓기 위한 열의 번호이다. 무인기부에서 각 열의 값은 임무부의 같은 번째 열에 표기된 임무를 수행할 무인기의 번호를 나타낸다. 예를 들어 무인기부와 임무부의 첫 번째 열은 각각 1과 3이므로 1번 무인기가 3번 임무를 수행한다는 것을 의미한다. 따라서 모든 열을 읽으면 임무 1,3은 1번 무인기가, 임무 2,4는 2번 무인기가 수행함을 의미한다. 또한 임무의 수행 순서는 후반부인 임무부에서 임무가 나타난 순서에 따라 결정된다. 1번 무인기에 의해 수행되는 1,3번 임무 중에서 3번 임무가 첫번째 열에 1번 임무가 세번째 열에 나타나므로, 1번 무인기는 임무 3을 먼저 수행하고 임무 1을 수행한다. 같은 방식으로 2번 무인기는 임무 4, 2 순서로 임무를 수행한다.

#	1	2	3	4	1	2	3	4
Index	1	2	1	2	3	4	1	2

UAV
Task

UAV1 [Task3, Task1]  
 UAV2 [Task4, Task2]

Fig. 2 Graphical Illustration of chromosome

이와 같은 방식으로 전체 임무 순서를 구성할 수 있다. 완성된 임무 순서는 Fig. 2의 아래쪽에 도시되어 있다. 이와 같은 염색체 표현 방식을 통해 임무 순서의 무작위성과 임무 순서로의 용이한 변환을 동시에 도모하였다.

최초 염색체 집단은 이러한 염색체 구조를 이용해 무작위로 선택된다. 무인기 인덱스는 중복이 가능한 랜덤 수열을 사용하고, 임무 인덱스는 중복이 불가능한 랜덤 수열을 사용하여 지정된 수의 염색체를 생성한다.

### 4.3 선택 및 교차 수행 방안

새로운 자식 세대를 생성하기 위한 부모 선택과 염색체의 교차는 다음과 같은 순서로 진행된다.

- 1) 부모 염색체 쌍 선정(Roulette wheel 방식)
- 2) 무인기부 교차지점 선정 및 교차 수행
- 3) 임무부 교차지점 선정 및 교차 수행

부모 염색체는 적합도에 따라 선택확률이 높아지는 Roulette wheel 방식을 사용하여 선택하였다. 한 쌍의 부모가 선택되면, 교차연산을 통해 하나의 자식해를 생성한다. 먼저 무인기부에서 임의의 교차 위치를 선택하여, 첫번째 부모 염색체로부터 교차 위치 앞부분을 물려받고, 두번째 부모 염색체로부터 교차 위치 뒷부분을 물려받는다. 임무부에서는 모든 유전자가 서로 다른 값을 가져야 하는데, 두 부모의 유전자를 교차를 통해 받게 되면 값이 중복될 수 있다. 그래서 교차 위치 앞부분은 첫번째 부모로부터 물려받고, 두번째 부모로부터는 앞부분에 속하지 않은 유전자를 순서대로 물려받는다. 이 과정은 Fig. 3에 도시되어 있다.

Parent 1	#	1	2	3	4	1	2	3	4
	Index	1	2	1	2	3	4	1	2
Parent 2	#	1	2	3	4	1	2	3	4
	Index	1	1	2	1	1	3	2	4
Offspring	#	1	2	3	4	1	2	3	4
	Index	1	2	2	1	3	1	2	4

Fig. 3 Graphical Illustration of crossover operation

### 4.4 변이 수행 방안

변이는 기존의 유전자 값을 무작위적으로 변경하여 염색체 집단에 새로운 염색체를 도입하기 위한 연산이다. 무인기부에서 변이를 수행할 때는 무인기 번호를 나타내는 하나의 유전자를 선택하여 값을 무작위로 변경하고, 임무부에서 변이를 수행할 때는 무작위로 두 위치를 택하여 값을 교환하는 방식을 사용한다.

Fig. 4는 무인기부에서 변이를 수행하는 예를 보이고 있다. 변이가 일어나면 특정 임무를 맡은 무인기의 번호가 바뀌게 된다. 따라서 2번 무인기가 수행하던 1번 임무를 변이 이후에는 1번 무인기가 수행하게 된다. 이때 1번 임무는 임무부에서 두 번째 열에 있으므로, 1번 무인기의 임무 수행 순서는 3,1,4가 된다.

임무부의 변이는 임무의 수행 순서를 변경하게 되며, 경우에 따라서는 해당 임무를 수행하는 무인기도 바뀌게 된다. Fig. 5를 보면 임무부의 변이로 2번과 3번 임무의 열이 교환되었다. 무인기부의 1,3번 열은 각각 1번과 2번 무인기에 할당되어 있으므로, 변이를 통해 두 무인기는 2,3번 임무를 바꿔서 수행하게 된다. 한편, 특정 무인기에 할당된 임무들 간의 수행 순서를 변경하는 것이 전체적으로 좋은 결과를 낼 수 있는 경

우가 많기 때문에 Fig. 6처럼 2개 이상의 임무가 할당된 무인기를 우선 고르고, 그 무인기에 할당된 임무부의 열 2개를 임의로 골라서 위치를 바꾸는 방식도 사용하였다. 이 경우 임무들에 할당된 무인기의 변동은 없고, 같은 무인기에서 교환된 두 임무의 순서만 변동된다.

Before	#	1	2	3	4	1	2	3	4
	Index	1	2	2	1	3	1	2	4
After	#	1	2	3	4	1	2	3	4
	Index	1	1	2	1	3	1	2	4

UAV1 [Task3, Task4] → [Task3, Task1, Task4]  
UAV2 [Task1, Task2] → [Task2]

Fig. 4 Graphical Illustration of mutation operation-1

Before	#	1	2	3	4	1	2	3	4
	Index	1	1	2	1	3	1	2	4
After	#	1	2	3	4	1	2	3	4
	Index	1	1	2	1	2	1	3	4

UAV1 [Task3, Task1, Task4] → [Task2, Task1, Task4]  
UAV2 [Task2] → [Task3]

Fig. 5 Graphical Illustration of mutation operation-2

Before	#	1	2	3	4	1	2	3	4
	Index	1	1	2	1	2	1	3	4
After	#	1	2	3	4	1	2	3	4
	Index	1	1	2	1	4	1	3	2

UAV1 [Task2, Task1, Task4] → [Task4, Task1, Task2]  
UAV2 [Task3] → [Task3]

Fig. 6 Graphical Illustration of mutation operation-3

### 4.5 적합도 계산 및 세대 구성

각 염색체의 적합도는 수식 8을 이용해 계산한다.

$$\text{fitness} = - \left( m \sum_{i=1}^{N_u} a_i(T_i) + \eta \sum_{i=1}^{N_u} T_i + \sum_{k=1}^{N_c} V_k \right) \quad (8)$$

2.1과 2.2절에서 정의한 임무계획 문제의 목적함수는 무인기별 임무 종료 시간( $T_i$ )의 최대값을 최소화하는 것이므로, 적합도를 표현하기 위해서 음수를 취하였다. 또한 경로 최적화 및 제한조건의 만족을 위해 두 가지 항을 추가하였다. 수식 8의 두 번째 항은 무인기들 임무 종료 시간의 총합이며, 원래 목적함수인 최대 종료 시간만 반영될 경우, 가장 긴 임무 종료 시간을 갖는 무인기의 경로만 최적화되고 나머지 무인기들의 경로가 최적화되지 않는 현상이 발생할 수 있기 때문에 추가하였다. 이 때  $\eta$ 는 1보다 매우 작고, 0보다 큰 수로 설정해야 최대 임무 종료 시간을 단축하는 해를 얻을 수 있다. 그리고 제한조건을 고려하기 위해서

페널티 함수  $V_k$ 도 반영하였다. 임무 종료 시간( $T_i$ )은 3.1절에서 설명한 절차를 통해 임무 종료 전 대기 시간을 추가하여 계산한다. 그리고 페널티 함수( $V_k$ )는 대기 시간을 추가하여도 제한조건을 만족시킬 수 없는 경우 큰 상수로 정의되고, 대기 시간을 통해 제한조건이 만족되는 경우, 0으로 정의된다. 이 때 페널티 상수는 문제를 풀 때 발생 가능한 임무 종료 시간보다 크도록 정의한다. 이와 같은 과정을 통해서, 제한조건을 만족하지 못한 탐색체에 매우 낮은 값의 적합도가 계산되어 다음 세대 구성 과정에서 선택되지 못하도록 한다.

새로 생성된 자식 탐색체들의 적합도 계산이 완료되면, 기존 세대의 모든 탐색체와 함께 적합도를 기준으로 정렬하고, 적합도가 높은 탐색체들만으로 다음 세대를 구성한다.

#### 4.6 종료 조건

이 논문에서의 종료 조건은 두 가지이다. 첫째는 최대 반복 계산 횟수를 초과하면 정지하는 것이고, 둘째는 적합도 개선이 이뤄지지 않는 연산이 일정 횟수 반복되면 정지하는 것이다. 상대적으로 작은 문제에서는 빠르게 해가 수렴하여 적합도 개선이 이뤄지지 않고, 무인기와 임무의 대수가 많아지면, 해의 수렴속도가 느려지기 때문에 최대 반복횟수는 크게 설정하고, 개선이 이뤄지지 않는 횟수를 통해 수렴을 확인하였다.

### 5. 시뮬레이션 및 결과

본 논문에서 제안한 알고리즘과 탐욕 기반 알고리즘(Greedy)의 성능을 다양한 문제를 통해 상호 비교하였다. 이상적으로 임무가 균등하게 분포해 있다면, 무인기당 맡는 임무의 수는 동일하게 된다. 그런 상황을 가정하여 무인기당 맡는 임무의 수를 기준으로 무인기와 임무의 수를 늘려 가며 시뮬레이션을 수행하였다.

임무가 발생하는 영역은 임무의 수에 맞추어 조금씩 커지는 것으로 가정하였다. 임무의 영역이 동일한 채로 임무의 수가 증가하게 되면, 임무 간 간격이 좁아져서 전체 임무 종료 시간이 줄어드는지, 알고리즘의 성능이 우수해서 전체 임무 종료 시간이 줄어드는지 알기 어렵기 때문이다. 따라서 임무는 한 번이 무인기의 수 \* 0.3 km 인 정사각형 영역 내에 존재하고, 초기에 무인기는 정사각형 중앙에서 반경 5 m 내에 무작위로 배치된다. 그리고 임무는 제자리에서 30초간 수행하고, 무인기의 속도는 5m/s로 정했다. 동일한 조건의 문제를 무인기, 임무 조합, 제한조건 설정 여부에 따라 100개씩 생성하고 풀어보았다.

이 문제를 풀 때 전체 탐색체 집합은 80개이고, 교

차연산을 통해 한 쌍의 부모 탐색체에서 하나의 자식 탐색체만 생성하여 자식 탐색체는 40개가 생성된다. 돌연변이 연산은 무인기부 변이 발생의 경우 1%, 임무부 변이 발생도 1%, 같은 무인기 내 임무 변동은 5%의 확률을 적용하였고, 그리고 1000회 계산 초과 시 연산이 종료되도록 하였다. 다만, 1000회 반복 이전에 최대 적합도가 250회 동안 개선 없이 반복되어도 연산이 종료되도록 하였다. 식 (8)의  $\eta$ 는 0.01로 설정하였다.

그리고 유전 알고리즘의 성능을 평가하기 위해 간단한 탐욕 기반 알고리즘(Greedy)을 도입하였다. 이 알고리즘은 매 단계마다 임무 순서의 모든 위치에 임무를 배정하여 적합도가 가장 높게 되는 위치에 임무를 배정하는 식으로 하였다. 적합도 계산 방법 및 대기 시간 계산 방법은 유전 알고리즘과 동일하다.

Fig.7 은 무인기 3대에 10개 임무를 할당하는 문제를 풀어본 결과이고, 제한 조건을 설정하지 않았다. 좌측 그래프는 무인기의 공간적인 경로를 공간 영역에 나타낸 것이고, 우측은 무인기의 임무 수행 시간을 시간 영역에 나타낸 것이다.

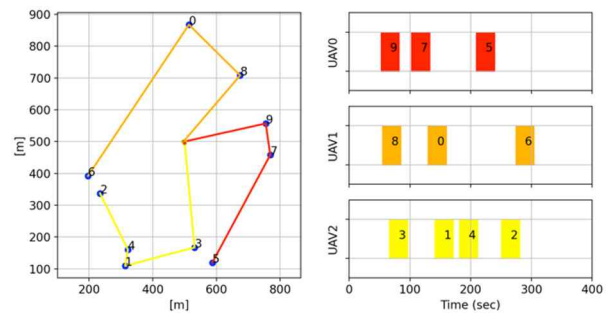


Fig. 7 Example of Task Sequence at 3 Agents, 10 Tasks case without constraints

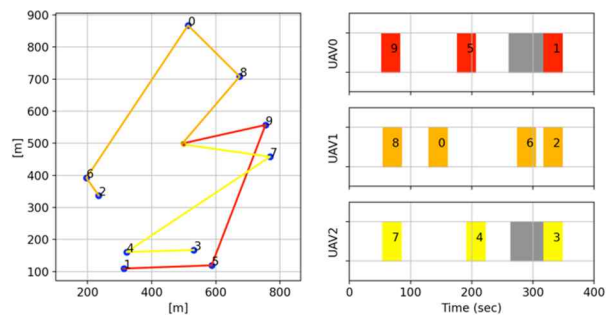


Fig. 8 Example of Task Sequence at 3 Agents, 10 Tasks case with 3 constraints

Fig.8 은 동일한 조건인데 제한 조건을 부여한 것이다. 회색으로 표시된 부분이 해당 위치에 도착한 후 대기하는 시간을 나타낸 것이다. 이 때 적용한 제한

조건은 임무 1, 2, 3 동시 수행과 3번보다 4번 임무의 선행 수행하는 것이다.

Fig.9~11은 탐욕 기반 알고리즘(Greedy)과 유전 알고리즘 기반 기법 간 성능을 비교한 그래프이다. 무인기의 수에 따라 임무의 수가 증가하고, 임무가 분포되어 있는 영역도 증가하여 예상되는 전체 임무 종료 시간이 증가한다. 그리고 제한조건이 있는 경우에 전체 임무 종료 시간이 더 길다. 이는 탐욕 기반 알고리즘(Greedy)이나 유전 알고리즘이나 마찬가지이다. 그래프에는 각각 50회 시뮬레이션한 결과의 50% percentile을 가운데, 위 아래 25%, 75% percentile을 표시하였다. 이 때 붉은 색의 탐욕 기반 알고리즘(Greedy)의 전체 임무종료 시간 대비 유전 알고리즘의 그것이 더 적은 것을 볼 수 있다. 모든 경우에 제한 조건은 임무 1, 2, 3 동시 수행과 3번보다 4번 임무의 선행 수행하는 것으로 적용하였다.

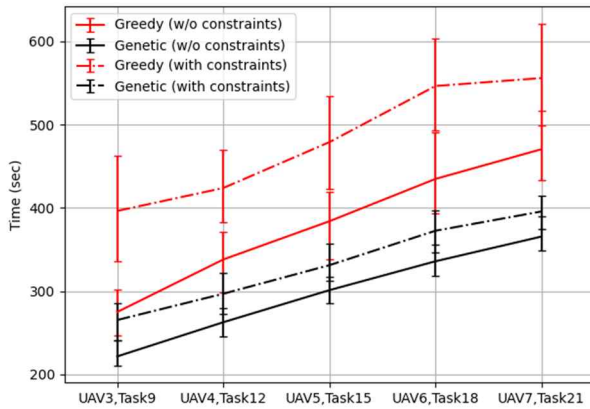


Fig. 9 Makespan Comparison between greedy algorithm and genetic based algorithm ( $N_t/N_u = 3$ )

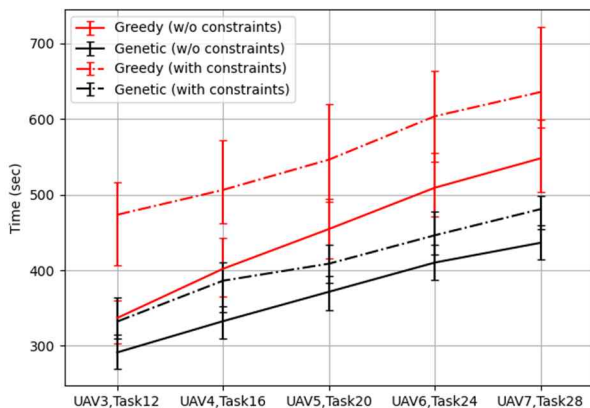


Fig. 10 Makespan Comparison between greedy algorithm and genetic based algorithm ( $N_t/N_u = 4$ )

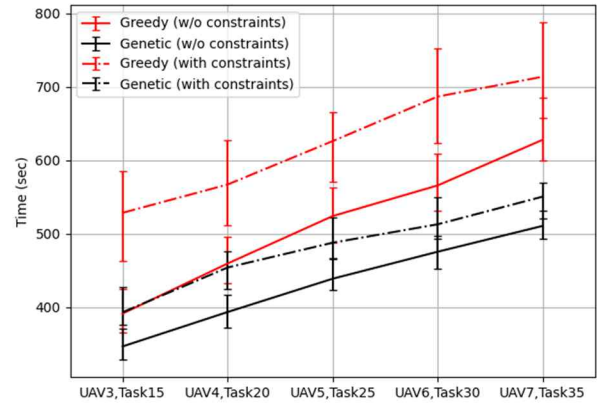


Fig. 11 Makespan Comparison between greedy algorithm and genetic based algorithm ( $N_t/N_u = 5$ )

Fig.9는 임무의 수가 무인기의 수보다 3배 많은 경우, Fig.10은 4배, Fig.11은 5배인 경우에 대한 그래프이다. 그래프의 경향성이 모두 임무가 증가할 수록 전체 임무 종료 시간이 증가하고, 탐욕 기반 알고리즘(Greedy) 대비 유전 알고리즘의 성능이 우수하다. 그리고 제한조건이 있는 경우에 없는 경우보다 탐욕 기반 알고리즘(Greedy) 대비 더 나은 결과를 도출 가능하다는 것을 관찰할 수 있다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 시간 제한을 고려한 유전 알고리즘 기반 다수 무인기 임무계획 기법을 제안하였다. 제한 조건 만족 및 대기 시간 변수의 효율적인 계산을 위해 유전자의 적합도를 계산할 때 대기 시간을 별도로 계산하였다. 이 기법을 통해 전체 임무 종료 시간을 최소화하고 제한 조건을 만족하는 해를 도출할 수 있었다. 간단한 알고리즘을 적용하여 본 논문의 유전 알고리즘 기반 기법과 비교를 수행하였고, 기법의 효용성을 확인하였다. 제한 조건이 있을 때의 해의 개선 효과가 높아서 제한 조건이 있을 때 적합한 기법이라고 할 수 있다.

## 후 기

이 논문은 2022년도 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. KRIT-CT-21-009), 전장정보 기반 실시간 자동임무 실행/수정기술 개발)

## References

- [1] Katoch, Sourabh, Sumit Singh Chauhan, and Vijay Kumar. "A review on genetic algorithm: past, present, and future." *Multimedia Tools and Applications* 80.5 (2021): 8091-8126.
- [2] Kramer, Oliver. "Genetic algorithms." *Genetic algorithm essentials*. Springer, Cham, 2017. 11-19.
- [3] Onn Shehory, Sarit Kraus, "Methods for task allocation via agent coalition formation," *Artificial Intelligence*, Volume 101, Issues 1–2, pp. 165-200, 1998.
- [4] Scherer, Jürgen, and Bernhard Rinner. "Multi-UAV surveillance with minimum information idleness and latency constraints." *IEEE Robotics and Automation Letters* 5.3 (2020): 4812-4819.
- [5] Das, Dyutimoy Nirupam, et al. "Synchronized truck and drone routing in package delivery logistics." *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 22.9 (2020): 5772-5782.
- [6] Waibel, Markus, Bill Keays, and Federico Augugliaro. *Drone shows: Creative potential and best practices*. ETH Zurich, 2017.
- [7] Schwalb, Eddie, and Lluís Vila. "Temporal constraints: A survey." *Constraints* 3.2 (1998): 129-149.
- [8] Schumacher, Corey, et al. "UAV task assignment with timing constraints via mixed-integer linear programming." *AIAA 3rd "Unmanned Unlimited" Technical Conference, Workshop and Exhibit*. 2004.
- [9] M. Alighanbari, Y. Kuwata and J. P. How, "Coordination and control of multiple UAVs with timing constraints and loitering," *Proceedings of the 2003 American Control Conference*, 2003.
- [10] Attiya, Gamal, and Yskandar Hamam. "Task allocation for maximizing reliability of distributed systems: A simulated annealing approach." *Journal of parallel and Distributed Computing* 66.10 (2006): 1259-1266.
- [11] Eun, Yeonju, and Hyochoong Bang. "Cooperative task assignment/path planning of multiple unmanned aerial vehicles using genetic algorithm." *Journal of aircraft* 46.1 (2009): 338-343.
- [12] Lipowski, Adam, and Dorota Lipowska. "Roulette-wheel selection via stochastic acceptance." *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 391.6 (2012): 2193-2196.
- [13] Xu, Guangtong, et al. "Target-bundled genetic algorithm for multi-unmanned aerial vehicle cooperative task assignment considering precedence constraints." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering* 234.3(2020): 760-773.
- [14] Zhao, Yiyang, et al. "Cooperative multiple task assignment problem with target precedence constraints using a waitable path coordination and modified genetic algorithm." *IEEE Access* 9 (2021): 39392-39410.
- [15] Omara, Fatma A., and Mona M. Arafa. "Genetic algorithms for task scheduling problem." *Foundations of Computational Intelligence Volume 3*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2009. 479-507.
- [16] Kim, J. H. "Mid to Long Term R&D Direction of UAV for Disaster." *Journal of Aerospace System Engineering*, 14(5), (2020): 83–90.
- [17] Kim, M. J., & Lee, M. K. "Conceptual Design and Study on the Performance Enhancement of Tilt Rotor UAV for Disaster and Policing Operation." *Journal of Aerospace System Engineering*, 15(1), (2021): 40–46.