

論文

효율적인 위성 임무 스케줄링 운영을 위한 스케줄링 최적화 알고리즘 비교 연구

백승우*, 조겸래**, 이대우**, 김해동***

A Comparison of Scheduling Optimization Algorithm for the Efficient Satellite Mission Scheduling Operation

Seung-Woo Baek*, Kyeum-Rae Cho**, Dae-Woo Lee** and Hae-Dong Kim***

ABSTRACT

A comparison of two kinds of scheduling optimization algorithms is presented in this paper. As satellite control and operation techniques have been developed, satellite missions became more complicated and overall quantity of missions also increased. These changes require more specific consideration and a huge amount of computation for the satellite mission scheduling. Therefore, it is a good strategy to make a scheduling optimization algorithm for the efficient satellite mission scheduling operation. In this paper, two kinds of scheduling optimization algorithms are designed with tabu-search algorithm and genetic algorithm respectively. These algorithms are applied for the same mission scenario and the results of each algorithm are compared and analyzed.

초 록

본 논문에서는 위성 임무 스케줄링을 효율적으로 수행하기 위한 스케줄링 최적화 알고리즘을 타부탐색 알고리즘과 유전 알고리즘을 이용해 디자인하고, 시물레이션을 수행한 비교 결과를 기술하였다. 위성 임무 스케줄링은 위성에게 요구된 작업들과 그에 따른 제한사항 및 다양한 변수들을 종합적으로 고려하여 상호간의 시간, 조건 등의 충돌을 회피함과 동시에 위성의 자원을 최대한 활용하여 운용할 수 있는 최적의 작업시간표를 생성하는 것이다. 위성 임무 스케줄링은 동시에 많은 변수를 고려해야 하기 때문에 연산양이 많고, 매 스케줄링 시 마다 동일한 과정을 반복적으로 수행해야 하므로, 스케줄링 최적화 알고리즘과 같은 위성 운영 자동화, 자율화가 요구되는 분야이다. 다양하게 이용되고 있는 두 가지 스케줄링 기법을 위성 임무 스케줄링 최적화에 적용해 보았다.

Key Words : Scheduling Method(스케줄링 기법), Satellite Mission Scheduling(위성 임무 스케줄링), Genetic Algorithm(유전자 알고리즘), Tabu-search Algorithm(타부탐색 알고리즘)

† 2009년 11월 21일 접수 ~ 2009년 12월 21일 심사완료

* 정회원, 부산대학교 항공우주공학과 대학원

** 정회원, 부산대학교 항공우주공학과, 기계기술연구원
교신저자, E-mail : baenggi@pusan.ac.kr
부산광역시 금정구 장전2동

*** 정회원, 한국항공우주연구원 우주응용미래기술센터

1. 서 론

인류 최초의 인공위성 '스푸트니크'호가 발사된 이후, 수천 개의 위성이 발사, 운영되었고 위성의 운영과 제어에 관련된 기술들이 비약적으로

향상되었다.

우주개발의 초기에는 위성들이 수행하는 임무들은 대부분 간단하고 반복적인 것들이 많았으나, 오늘날의 IKONOS과 Orbview-3와 같은 고해상도 위성들은 다양한 모드에서 영상을 획득할 수 있기 때문에, 수행요구되는 임무가 다양하며, 임무를 수행하기 위해 필요한 조건과 제약사항이 각각 다르다. 또한, 위성 운용기술과 관련 서비스 산업이 빠르게 발달함에 따라, 위성 활용도와 의존도가 급격히 증가하고, 위성에 요구되는 임무의 전체적인 양 자체가 증가하고 있다[1]. 이러한 위성 운용상황의 변화에 따라 위성의 효율적인 운용을 위한 연구가 필요하다.

위성 임무 스케줄링은 위성에게 요구된 작업들과 그에 따른 제한사항 및 다양한 변수들을 종합적으로 고려하여 상호간의 시간, 조건 등의 충돌을 회피함과 동시에 위성의 자원을 최대한 활용하여 운용할 수 있는 최적의 작업시간표를 생성하는 것이다[2, 3]. 위성 임무 스케줄링은 동시에 많은 변수를 고려해야 하기 때문에 연산양도 많은 편이며, 스케줄링을 수행할 때마다 동일한 과정을 반복적으로 수행해야 하므로, 스케줄링 최적화 알고리즘과 같은 위성 운영 자동화, 자율화가 요구되는 분야이다[4]. 따라서 위성 임무 스케줄링 최적화 알고리즘은 이러한 어려움을 해결해 줌과 동시에, 효율적인 위성 임무 스케줄링을 수행할 수 있는 좋은 해법이 될 수 있다[5, 6].

유전 알고리즘은 유전 알고리즘은 환경에 잘 적응한 개체가 좀 더 많은 자손을 낳길 수 있다는 '자연선택 과정'과 유전시의 변화를 통해서 개체가 좋은 방향으로 발전해 나간다는 '자연진화 과정'을 모방한 최적화 알고리즘이다. 유전 알고리즘은 항상 최적해를 보장하지 않지만, 주어진 시간 내에 근사 최적해를 찾아내며, 국지적 최적해에 빠지지 않아 스케줄링 문제의 해법으로 적합하다.

타부탐색 알고리즘은 국지적 최적해를 찾은 뒤 탐색이 불가능한 지역 탐색법의 단점을 보완하기 위해 개발되었으며, 시뮬레이티드 어닐링, 유전 알고리즘과 함께 조합최적화와 같은 복잡한 문제를 푸는데 적합한 방법으로서 많은 문제에 적용되고 있다.

본 논문에서는 위성 임무 스케줄링을 효율적으로 수행하기 위한 스케줄링 최적화 기법을 유전 알고리즘과 타부탐색 알고리즘을 이용해 연구하였으며, 두 최적화 알고리즘을 적용한 시뮬레이션 결과를 기술하였다.

II. 위성 임무 스케줄링 문제

2.1 위성 임무 스케줄링

2.1.1. 위성 임무 스케줄링 문제와 해법

발사된 인공위성의 임무 스케줄링을 포함한 모든 관제와 운영은 위성의 지상관제국을 통해 이루어진다. 지상관제국은 임무 분석 및 계획 서브시스템, 위성 운용 서브시스템, 영상수신 처리국, 위성 추적 및 통신국들과 각각의 하위 부서들로 구성되어 있는데 그 중, 위성 임무 스케줄링을 담당하는 임무 계획 부서(Mission Planning Segment)의 전체적인 업무 흐름은 그림 1과 같다.

임무 계획 부서는 이벤트 예측(Event Prediction) 부분, 임무 스케줄링(Mission Scheduling)부분, 명령 계획(Command Planning)부분의 3단계로 나뉘는데, 이벤트 예측 부분에서는 위성의 궤도를 예측하고, 사용자의 새로운 요구를 받아들이며, 필요에 따른 위성궤도 및 자세 수정 요구 등의 정보를 모아, 임무 스케줄링 부분으로 넘겨 임무 스케줄링 시스템의 전체적인 입력(Input)을 제공한다. 임무 스케줄링 부분에서는 이벤트 예측 부분으로부터 전달된 입력 데이터들을 미리 정의한 규칙에 따라 각각 임무, 작업, 제한사항으로 할당하고, 자체적인 스케줄링 알고리즘에 따라 적합한 스케줄링 해를 도출하여, 수행 할 임무와 그에 따른 작업을 시간순서에 따라 정리하게 된다. 명령계획 부분에서는 임무 스케줄링의 결과를 입력 받아서 임무에 포함된 각종 작업들을 위성이 수행할 수 있도록 명령으로 바꾸어주는 기능을 수행한다.

본 연구는 임무 계획의 두 번째 과정에 해당하는 위성 임무 스케줄링의 최적화에 관한 내용

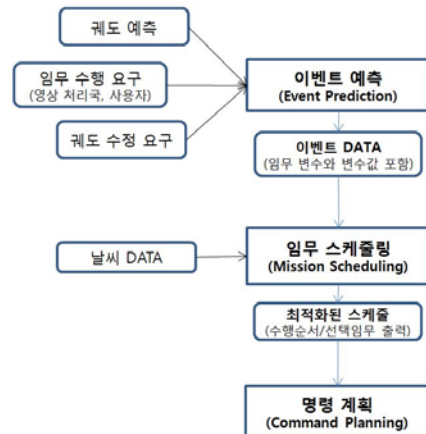


그림 1. 임무계획 스케줄링의 전체적인 흐름

표 1. 위성 임무 스케줄링의 구성요소

임무 (Mission)	영상촬영, 궤도유지 등	
작업 (Task)	자세조정, 위성 안테나 지향, 영상데이터 덤프, 원격측정데이터 덤프, 관제국과의 교신 등	
제한사항 (Constraint)	식(eclipse), 위성과 지상국의 통신 가능여부, 자세기동 능력, 전력소모 등	
자원 (Resource)	재사용 자원	영상촬영용 메모리, 충전 전력
	소모 자원	궤도조정용 연료

을 다루고 있으며, 위성 임무 스케줄링의 간단한 구성요소는 표 1과 같다.

그러나 실제 위성의 임무 스케줄링은 많은 연산이 필요하다. 예를 들어, 위성 임무의 대부분을 차지하고 있는 영상획득 임무의 경우, 일반적인 스케줄링 변수 외에도 각 영상획득 임무 수행 시 소모되는 메모리와 영상획득 장비를 구동하기 위한 소모전력, 그리고 위성 자체의 영상저장용량, 영상촬영요구 지역의 날씨를 다 함께 고려해야 한다. 또한, 제한되어 있는 위성과의 교신 시간 때문에 주어진 임무 정보와 위성 상황 정보를 토대로 최적의 임무 수행 시간표를 빠른 시간 내에 생성해 내야 한다는 특징을 가진다. 뿐만 아니라, 어느 정도 기간 동안 수행할 임무 스케줄링을 하느냐에 따라 다른 스케줄링 기준과 고려변수를 가지게 될 것이다.

이와 같이 임무 스케줄링은 많은 임무 변수와 제한조건들이 존재하고, 최적화할 명확한 동역학적 모델이 없다는 점에서 해결이 어려운 복잡한 문제이며, 흔히 비결정성 난해(NP-hard)에 해당한다. 대부분의 의사결정 문제에서는 실제 물리적 한계를 반영한 수많은 제한조건들이 있으며, 이를 표현한 일반식은 식(1)과 같다. $x_i^{(L)}$ 와 $x_i^{(U)}$ 는 각각 x_i 의 하한값과 상한값이다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Maximize} \\
 & f_m(\mathbf{x}), \quad m = 1, 2, \dots, M; \\
 & \text{subject to} \\
 & g_j(\mathbf{x}) \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, J; \\
 & h_k(\mathbf{x}) \geq 0, \quad k = 1, 2, \dots, K; \\
 & x_i^{(L)} \leq x_i \leq x_i^{(U)}, \quad i = 1, 2, \dots, n.
 \end{aligned} \tag{1}$$

2.1.2. 스케줄링 문제의 단순화

위성 임무 스케줄링 문제를 최적화 알고리즘을 이용해 시뮬레이션 하기 위해, 다음의 세 가

지 가정을 통해 단순화(simplification)시켰다.

1) 모든 위성의 임무는 영상 촬영 임무이며, 각 임무(mission) 당 하나의 작업(task)만이 존재한다.

2) 위성 임무는 하나씩 순차적으로 수행되며, 동시에 진행할 수 없다.

3) 임무 시나리오의 임무들은 모두 수행 가능한 임무이며, 시간상 충돌이 없다.

위성 임무 스케줄링 문제는 본 가정을 통해, 0-1 배낭문제(0-1 knapsack problem)으로 단순화할 수 있다. 배낭문제는 조합 최적화의 유명한 문제로, 배낭에 담을 수 있는 무게의 최대값이 정해져 있고, 일정 가치와 무게가 있는 짐들을 배낭에 넣을 때, 가치의 합이 최대가 되도록 짐을 고르는 방법을 찾는 문제이다[11, 12]. 이 문제는 연산의 형태와 최종해의 형태가 숫자 '0'과 '1'로 구성된다. 만약, n 개의 위성 임무와 m 개의 제한조건이 있다면, 본 배낭문제의 일반식은 식(2)와 같다.

Maximize

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n s_i x_i$$

subject to

$$\sum_{i=1}^n w_k x_i \leq C_k$$

$$x_i \in \{0, 1\}, \forall i$$

(2)

여기서, s_i 는 i 번째 임무를 수행했을 경우, 얻을 수 있는 점수를 나타내며, 스케줄링 고려변수와 가중치의 곱들의 합으로 계산된다. x_i 는 i 번째 임무의 선택여부를 숫자 '0'과 '1'을 이용하여 나타내게 된다. 따라서 스케줄을 수행했을 때, 얻을 수 있는 점수의 총합 $f(\mathbf{x})$ 가 가장 큰 해가 최적해가 될 것이다. w_k 는 스케줄링에서의 여러 가지 제한조건 중, k 번째 제한조건에 대한 가중치를 의미한다. 즉, 하나의 도출된 스케줄은 k 번째 제한조건에 해당되는 값의 총합이 C_k 를 넘지 않아야 한다.

배낭문제의 풀이법에는 일반적으로 수리계획법, 우선 순위법 등이 있으나, 수리계획법의 경우 연산시간이 상대적으로 길고, 복잡한 문제에 적용하기 어렵다는 단점이 있다. 우선 순위법은 실제 현장에서 가장 널리 사용 중이나, 좋은 성능을 일관되게 보장하는 우선순위 규칙이 존재하지 않는다는 단점이 있다. 위성 임무 스케줄링은 고려해야 할 변수와 제한조건이 많고 최적화를 위한 동역학 모델 수립이 어렵기 때문에 전역해 탐

색이 가능한 발견적 귀납법이 좋은 해법이 될 수 있다.

본 연구에서는 작업 공정 스케줄링과 시간표 작성과 같이 광범위한 문제에 적용되어 온 타부 탐색(Tabu-search)과 진화의 원리를 문제 해결에 이용하는 유전 알고리즘(Genetic Algorithm)을 이용한 위성 임무 스케줄링 시뮬레이션을 수행하고 그 결과를 비교분석하였다.

2.2 위성 스케줄링 변수

실제 위성 임무 스케줄링을 할 때, 고려해야 할 스케줄링 변수와 각각의 중요도는 위성의 운영 목적에 따라 다를 수 있다. 본 연구에서는 아래와 같이 위성 스케줄링의 주요 고려변수 8개를 p_1 에서 p_8 까지 선정하고 시뮬레이션에 반영하였다.

a. 고객 우선도(priority, p_1)

고객 우선도는 스케줄링 매니저가 임무 요청자의 기관분류 및 위성 스케줄링 목적과의 관계를 고려하여 나누는 것으로, 등급 혹은 등급에 따른 임의의 점수로 표현할 수 있다. 본 논문에서는 3가지 등급으로 고객 우선도를 분류하고 각각 1, 3, 5점의 점수로 표현하였다.

b. 임무완료기한(deadline, p_2)

임무완료기한은 중요한 스케줄링 변수로써, 모든 임무는 피할 수 없는 경우를 제외하고는 각각에 주어진 임무완료기한 전에 수행되어야 한다. 임무완료까지 남은 날짜가 적을수록 해당 임무가 선택될 확률이 높아지도록 하였다.

c. 보상(profit, p_3)

보상은 해당 임무를 수행했을 때, 임무수행기관에 돌아오는 금전적 수입을 의미하며, 위성의 운영목적에 따라, 고려하지 않을 수도 있다. 대개, 보상이 큰 임무일수록 임무 수행 선호도가 높기 때문에, 보상 변수 값이 클수록 해당 임무의 선택 가능성을 높아지도록 하였다.

d. 촬영면적(area, p_4)

촬영면적은 위성의 영상획득 장비가 촬영할 면적을 나타낸다. 촬영면적 변수는 촬영된 면적의 개념에 따라 다양하게 적용할 수 있다. 본 연구에서는 획득 영상 총 면적과 목표로 했던 부분의 면적의 비율, R_{valid} 을 채택하였다.

표 2. 임무완료기한에 따른 가중치

완료기한까지 남은 날짜	가중치
1~2일	0.22
3일 혹은 그 이상	0.11

e. 임무의 긴급성(emergency, p_5)

임무의 긴급성은 재난·재해, 전시상황과 같은 긴급한 임무여부를 나타내는 것으로, 0과 1의 점수로 구분하였다.

f. 에너지 소모(energy consumption, p_6)

위성이 임무를 수행할 때, 어떤 형태로든 에너지를 소모하게 된다. 따라서 에너지 소모는 매우 주의 깊게 고려되어야 하며, 하나의 물리적 제한 조건이다. 실제 위성의 경우, 전력과 같이 소모되었다가 다시 충전되는 경우도 있으나, 본 연구에서는 시뮬레이션을 단순화하기 위하여 일정한 값을 가진다고 가정하였다.

$$\sum_{i=1}^n (w_6 \times x_i) \leq Energy_{MAX}, \quad x_i \in 0, 1, \quad \forall i \quad (3)$$

g. 메모리 소모(memory consumption, p_7)

메모리 소모 또한 물리적 제한조건이며, 스케줄 수행 시, 사용된 메모리의 총합은 위성 보유 메모리 양을 넘지 않아야 한다. 실제 운용에서는 지상의 위성관제국과의 메모리 덤프를 통해 가용한 메모리양이 유동적이지만, 일반적으로 위성의 임무 스케줄 작성 시 사용가능한 메모리의 총량은 한정되어 있다고 가정하여 스케줄을 작성하기 때문에 본 논문에서도 일정한 값을 가진다고 가정하였다.

$$\sum_{i=1}^n (w_7 \times x_i) \leq Memory_{MAX}, \quad x_i \in 0, 1, \quad \forall i \quad (4)$$

h. 구름의 양(weather condition, p_8)

위성 영상획득 장비의 특성에 따라 영향의 정도는 다르나, 일반적으로 구름의 양이 많고 기후 조건이 좋지 않을수록 촬영 요구 지역의 영상을 획득하기 어렵다. 따라서 구름의 양에 따라 가중치를 차등 적용하며, 촬영 예상 지역의 구름의 양이 70%를 넘을 경우, 해당 미션을 수행하지 않도록 한다. 단, 구름의 양과 같은 날씨 변수는 예측할 수 있는 기간이 짧기 때문에 다른 고려변수와는 달리 스케줄링 시뮬레이션을 수행할 때, 정보를 받아온다고 가정하였다.

표 3. 날씨(구름의 양)에 따른 가중치

구름의 양	가중치
0 ~ 20 %	1
21 ~ 70 %	0.75
71 ~ 100 %	0

III. 스케줄링 최적화 알고리즘

3.1 타부탐색 알고리즘

3.1.1. 타부탐색 알고리즘

타부탐색 알고리즘은 Glover에 의해 제안된 공간 탐색 방법으로서 지역 최적점을 벗어나는 효율적 방법 중 하나이다[14, 15]. 지역 탐색법의 경우, 주변의 모든 값보다 현재 값이 더 나은 국지적 최적해가 발견되면, 그것이 전역 최적해가 아닐에도 불구하고 더 이상 탐색이 불가능하다는 단점이 있었다. 이 같은 단점을 보완하기 위하여 타부탐색 알고리즘이 개발되었다. 타부탐색 알고리즘은 이미 찾은 국지점이 있다고 하더라도, 그 값을 저장해 두고 주변의 탐색을 다시 허용하여 국지적 최적해로 프로그램이 종료되지 않고 전역 최적해를 찾을 수 있는 기회를 제공한다. 그림 1에서, 초기 값에서 해를 찾기 위해 탐색을 해 나갈 때 국지값인 A값을 찾았더라도 탐색을 마치지 않고 A값 까지 탐색 과정을 저장한 후에 A'라는 새로운 값으로의 탐색을 허용해 갈 수 있게 프로그래밍 하게 한다. 그렇게 하여 최적 값인 B의 값을 탐색해 낼 수 있게 한다.

타부탐색 알고리즘의 특징은 탐색과정이 복잡하지 않아 값에 대한 수렴시간이 빠르다는 것이다. 유전 알고리즘의 경우 1번의 반복 연산을 수행하기 위해 3~4번의 연산 과정을 거치게 되나 타부탐색의 경우에는 그 과정이 비교적 단순화되어 있기 때문에 수렴시간이 빠를 수 있다. 그러나 탐색범위가 광범위하다면 국지적 최적해로 수렴할 가능성이 있으며, 비교 탐색을 기반으로 하기 때문에 직접 차기 해집단을 구성하여 해를 탐색하는 유전 알고리즘에 비해 정확한 최적해 도출의 확률이 떨어진다.

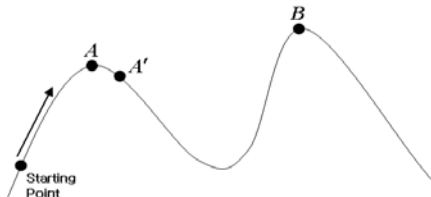


그림 2. 타부탐색의 기본 개념

3.1.2. 타부탐색 알고리즘의 구성

타부탐색 알고리즘의 기본 구성 요소는 이웃해 생성, 타부 목록, 정지조건이 있다. 위성 임무의 스케줄 선택여부를 나타내는 '0'과 '1'의 나열로 이루어진 초기해들을 생성해 내고, 그 중 최고점수를 가지는 해를 타부목록에 저장한다. 초기

생성 해 및 이웃해들은 고려대상 임무들의 시간에 대한 배열이며 그 자체로 하나의 스케줄을 의미한다. 타부 목록(tabu list)은 한번 검색되어 제시된 값을 따로 저장하여 재방문하는 것을 막도록 하는 것으로, 결과 값 도출을 용이하도록 한다. 타부 목록의 크기가 클수록 더 많고 다양한 결과 값들을 비교할 수 있다. 반면에 타부 목록의 크기가 작다면 같은 지역을 재방문 할 가능성이 높아질 수 있으므로, 타부 목록의 크기를 적절히 설정할 필요성이 있다. 정지조건인 경우, 최대 연산 횟수에 제한을 두고, 일정 시간동안 탐색한 최적해가 저장된 최적해 보다 발전이 없으면 종료되도록 하였다. 타부탐색의 전형적 구조는 다음과 같다.

```

s = 초기해;
T = ∅;
repeat {
    s' = the best solution in N(s);
    if (s' ∉ T or f(s') > A(s))
    then {
        s = s';
        update T and A;
    }
} until (종료조건);

```

- * $N(s)$: solution s 의 이웃 해
- * T : 타부 목록
- * A : 흡기 함수(aspiration function)

여기서 흡기 함수는 어떤 해가 특별히 매력적인 경우 예외를 두기 위한 것으로, 적당한 함수를 고안함으로써 강약을 조절할 수 있다.

3.1.3. 스케줄링 알고리즘 디자인-타부탐색

타부탐색 알고리즘을 이용하여, 위성 임무 스케줄링을 수행할 수 있는 알고리즘을 디자인 하였다. 초기 임무 집단을 무작위로 연산해 낸 후 비교 값 생성을 통하여 값을 비교하여 최적해를 도출해 내며, 알고리즘의 흐름은 그림 3과 같다.

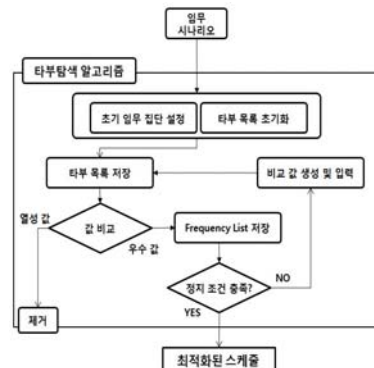


그림 3. 스케줄링 최적화 알고리즘(타부탐색)

3.2 유전 알고리즘

3.2.1. 유전 알고리즘

유전 알고리즘은 발견적 귀납법 알고리즘 (Heuristic Algorithm)이 발전한 진화 알고리즘 (Evolutionary Algorithm)의 하나이다. 유전 알고리즘은 자연계의 생명체 중 환경에 잘 적응한 개체가 좀 더 많은 자손을 남길 수 있다는 자연선택 과정과 자연계의 생명체 설계도와 같은 유전의 변화를 통해서 좋은 방향으로 발전해 나간다는 자연 진화 과정을 모방하여 컴퓨터로 모의 수행을 하는 최적화 알고리즘의 하나이다. 즉, 문제를 풀기 위해 잠재적인 해들을 코딩된 개체로 변환하고, 여러 개의 해집합들을 모아 개체군을 형성한 뒤, 세대를 거듭하면서 이들의 유전 정보를 서로 교환하거나 새로운 유전 정보를 부여하면서 적자생존의 법칙에 따라 모의 진화를 시킴으로써, 주어진 문제에 대한 최적의 해를 찾는 계산 모델이다.

3.2.2. 유전 알고리즘의 구성

유전 알고리즘의 진행과정은 선택 연산자, 교배 연산자, 돌연변이 연산자와 적합도 함수 (Fitness Function)를 이용한다.

선택 연산은 부모에 해당하는 해를 골라내 다음 세대의 해를 만들어 낸다. 교배 연산은 두 부모 염색체를 조합하여 다음 세대의 해를 만들어 내며, 돌연변이 연산은 염색체를 무작위로 변화시켜 다음 세대의 해를 만들어 낸다.

적합도 함수는 식 (5), (6)과 같다. 적합도 함수는 스케줄링 변수와 가중치의 weighted sum 형식으로 구성하였다. 이 같이 적합도 함수를 구성할 경우, 스케줄링 변수의 추가, 수정 여부에 관계없이 적합도 함수의 틀을 유지할 수 있고, 부수적인 프로그램 수정이 불필요하다는 운영 면에서의 장점이 있다. $f(x)$ 의 값이 클수록 적합도 함수의 값은 작아지기 때문에, 결과값이 작게 나올수록 최적해에 가깝다.

$$Fitness\ Function = \frac{1}{f(x)} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n s_i x_i} \quad (5)$$

$$, x_i = \begin{cases} 0, & \text{해당 임무가 선택되지 않았을 때} \\ 1, & \text{해당 임무가 선택되었을 때} \end{cases}$$

$$s_i = w_8 \times [(w_1 \times p_{i1}) + (w_2 \times (p_{2,max} - p_{i2})) + (w_3 \times p_{i3}) + (w_4 \times p_{i4}) + (w_5 \times p_{i5})] \quad (6)$$

, w_k 는 각 변수들의 가중치

유전 알고리즘의 전형적 구조는 다음과 같다.

n 개의 초기 염색체 생성;

repeat {

for $i = 1$ to k

{ 두 염색체 c_1, c_2 선택;

$offspring_i = crossover(c_1, c_2)$;

$offspring_i = mutation(offspring_i)$; }

$offspring_1, \dots, offspring_k$ 을 population 내의 k 개의 염색체와 대치;

} until (정지 조건 만족);

남은 염색체 중 최상의 염색체를 return;

유전 알고리즘이 정지하기 위한 조건은 다양하게 줄 수 있다. 가장 대표적인 두 가지는 연산을 일정한 횟수만큼 수행한 다음 정지시키는 방법과 해집단에 있는 해들의 다양성이 어느 정도 이하로 떨어지는 시점에 정지시키는 방법이다. 본 논문에서는 두 가지 정지 조건을 모두 적용하였다.

3.2.3. 크로모솜 구성과 스케줄링 문제 적용

유전 알고리즘은 예상 해를 크로모솜의 형태로 표현하여 최적해를 찾아가게 된다. 즉, 크로모솜 자체가 하나의 해이며, 이렇게 문제의 해가 될 수 있는 크로모솜 집단을 해집단(population)이라고 한다. 초기 집단의 초기화 방법에는 무작위 초기화와 유도된 초기화 방법이 있다.

그림 4는 위성 임무 스케줄을 이진 스트링 방식의 크로모솜으로 표현한 것이다. 이진 스트링으로 표현된 크로모솜은 유전 알고리즘의 크로모솜 표기법 중 가장 기본적인 형태이다.

그림 4의 크로모솜은 10개의 임무의 나열과 각각의 고유값 '0' 또는 '1'을 가지고 있다. 그림 6에 제시된 크로모솜을 기준으로 스케줄을 해석하면 다음과 같다.

1) 임무의 수행 순서에 따른 재배열

임무 10개를 수행하는 시간에 맞추어 다시 배열하고 M1부터 M10까지의 라벨링을 수행한다. 즉, 크로모솜의 왼쪽부터 임무를 수행하고자 하는 시간대가 빠른 순서대로 재배열되게 된다.

2) 임무 수행 여부

고유값 '0'과 '1'은 각각 해당 임무의 수행여부를 나타낸다. 숫자 '1'은 해당 임무가 스케줄링을

M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10
1	1	0	0	1	1	0	0	1	1

그림 4. 이진 스트링으로 표현된 영상획득 임무 스케줄

하면서 선택이 되어 수행이 될 것이라는 것을 의미하며, '0'은 스케줄링 시 선택이 되지 않아 수행될 예정이 없음을 나타낸다. 그림 5를 기준으로 M1, M2, M5, M6, M9, M10의 임무가 스케줄링이 되어 차후 수행되고 나머지는 수행되지 않을 것임을 알 수 있다.

3) 임무 수행 순서

임무를 수행시간대별로 재배열하면서 하나의 시간표의 역할을 해주고 있다. 그림 6에 제시된 스케줄에 따르면, 숫자 '1'로 표기된 6개의 임무를 왼쪽에서부터 M1 > M2 > M5 > M6 > M9 > M10의 순서로 수행될 것임을 알 수 있다.

유전 알고리즘의 큰 특징인 크로모솜의 이진 스트링 표기법을 이용해, 위성 임무 스케줄을 표현하는데 성공하였다. 이로써 유전 알고리즘의 장점을 그대로 살린 효율적인 위성 임무의 스케줄링을 수행할 수 있을 뿐 아니라, 기존의 유전 알고리즘과 같이 크로모솜의 인코딩, 디코딩이 연산이 별도로 필요하지 않아 연산속도도 한층 더 빨라질 수 있다.

3.2.4. 스케줄링 알고리즘 디자인 - 유전 알고리즘

유전 알고리즘을 이용하여, 위성 임무 스케줄링을 수행할 수 있는 알고리즘을 그림 5와 같이 디자인 하였다. 스케줄링 매니저가 위성 운영 목적이나 스케줄링 기준에 따라 가중치를 변경할 수 있다.

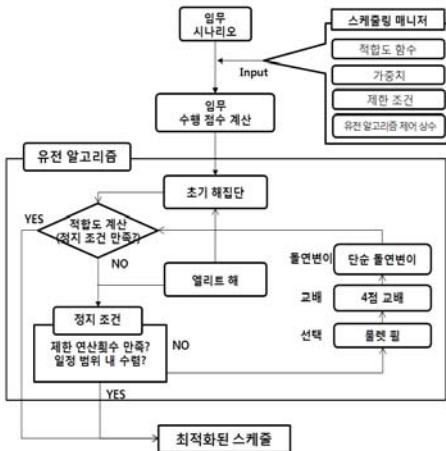


그림 5. 스케줄링 최적화 알고리즘 (유전 알고리즘)

IV. 위성 임무 스케줄링 시뮬레이션

4.1 스케줄링 시뮬레이션

위성 임무 스케줄링은 최적의 작업시간표를 적절한 시간 내에 생성해야 할 뿐만 아니라, 위

성의 운용목적이나 활용방안에 따라 스케줄링 변수와 임무 선택기준이 변하여도 타당한 스케줄을 생성해 내야 한다. 또한, 고려해야 할 임무 수에 따라서 성능에 크게 차이가 없을수록 실제 운영에 유리하기 때문에, 이러한 점 또한 고려해야 한다. 단, 본 연구에서 하나의 임무는 단일 작업으로 이루어져 있다고 가정하였기 때문에, 임무의 개수는 '실제 위성 임무의 개수'라기보다는 '스케줄링 고려대상의 양적 크기' 혹은 '스케줄링 문제의 복잡한 정도'로 이해할 수 있다.

본 연구에서는 앞서 연구한, 타부탐색 알고리즘과 유전 알고리즘을 각각 이용하여 위성 임무 스케줄링 알고리즘을 디자인하고 시뮬레이션을 수행하여 그 결과를 비교하였다.

4.2 최적화 알고리즘 타당성 검증

4.2.1. 시뮬레이션 A 설계

알고리즘 연산에 앞서 쉽게 확인하여 볼 수 있는 예제를 통해 각각의 스케줄링 최적화 알고리즘이 적절히 구성되었는지 확인하여 보았다. 임무 시나리오는 표 6과 같으며, 스케줄링 변수에 면적(p_5)는 포함되어 있지 않다. 메모리와 에너지의 최대 보유 값은 각각 1000과 150으로 설정하였다. 따라서 최적해의 스케줄을 수행하였을 경우, 메모리와 에너지 소모량의 총합은 각각의 최대 보유 값을 넘지 않아야 한다. 여기서, 메모리와 에너지 소모량을 나타내는 수치는 단순히 정도를 나타내기 위한 표현법일 뿐, 어떤 특정한 물리적 의미를 가지지는 않는다.

표 6. 10개의 임무로 구성된 가상 시나리오

	p_1	p_2	p_3	p_5	p_6	p_7	p_8
M1	1	1	13	1	24	123	15
M2	3	1	25	0	32	214	25
M3	4	4	35	0	64	330	35
M4	2	3	14	0	35	243	14
M5	6	2	56	0	13	37	56
M6	7	6	87	0	36	240	87
M7	8	3	97	0	75	350	97
M8	4	1	34	0	39	270	34
M9	5	7	25	0	35	230	25
M10	7	2	57	0	26	150	57

표 7. 스케줄링 변수 고려 정도와 가중치

스케줄링 변수	가중치
고객 중요도	0.3
임무완료기한	표 1 참조
보상	0
임무 긴급성	6
날씨	표 2 참조

스케줄링 매니저가 스케줄을 수행할 때 표 6의 가중치에 따라, 고객 우선도(p_1)와 임무완료기한(p_2), 임무의 긴급성을 고려하여 스케줄을 구성한다면, 임무 1, 2, 5, 8, 10번이 선택되어야 적절히 선택되었다고 할 수 있을 것이다. 따라서 스케줄링 최적화 알고리즘을 통한 스케줄링 결과 또한, 임무 1, 2, 5, 8, 10번을 선택해야 알고리즘이 타당하다고 볼 수 있을 것이다.

4.2.2. 스케줄링 결과

아래 표 5는 시뮬레이션 A를 수행한 결과이다. 최종적으로 선택되어 스케줄을 구성하는 임무는 '1', 선택되지 못한 임무는 '0'으로 표기하였다. 선택된 임무를 살펴보면, 타부탐색 알고리즘과 유전 알고리즘을 이용한 두 가지 스케줄링 최적화 알고리즘 모두 적합한 결과를 도출해 냈음을 알 수 있다. 이 같은 결과를 통해, 두 알고리즘 모두 적절히 구성되었고 제대로 작동한다는 것을 확인하였다.

동일한 임무를 선택했기 때문에, 최종 스케줄을 수행했을 시, 소모되는 에너지와 메모리의 총합은 134, 794로 같다. 또한, 앞서 예상했듯이, 타부탐색의 간단한 연산방법 때문에, 상대적으로 연산량이 많은 유전 알고리즘 보다 결과를 도출해 내기까지의 시간이 확연히 짧다. 그러나 이 같은 차이는 고려대상 임무 수에 따라 차이가 있을 수 있기 때문에, 보다 다양한 환경에서의 비교가 필요하다.

표 8. 스케줄링 결과

	최종 스케줄 1 (타부탐색 알고리즘)	최종 스케줄 2 (유전 알고리즘)
M1	1	1
M2	1	1
M3	0	0
M4	0	0
M5	1	1
M6	0	0
M7	0	0
M8	1	1
M9	0	0
M10	1	1
에너지 사용량 (최대 150)	134	134
메모리 사용량 (최대 1,000)	794	794
연산 시간(s)	0.15	15.2

4.3 스케줄링 알고리즘 성능 비교

4.3.1. 스케줄링 B 설계

시뮬레이션 A의 결과를 토대로, 보다 복잡한 문제에서의 성능을 비교하기 위해, 임의의 위성 임무 300개로 이루어진 가상 스케줄링 시나리오를 생성하였다. 두 가지 스케줄링 최적화 알고리즘을 적용하고 결과를 비교하였다. 표 9은 유전 알고리즘의 제어 상수를 정리한 것이다.

표 9. 유전 알고리즘 제어 상수

교배 확률	85%
돌연변이 확률	1%
해집단의 크기	200개
고려대상 임무 수	300개
최대 연산반복	1000회

4.3.2. 스케줄링 결과

아래 표 10은 시뮬레이션 B를 수행한 결과이다. 시뮬레이션 A의 결과와 마찬가지로 선택된 임무는 '1', 선택되지 못한 임무는 '0'으로 표기하였으며, 고려대상 임무가 300개인 관계로 결과의 일부를 발췌하여 기록하였다.

시뮬레이션 A와 마찬가지로, 타부탐색 알고리즘을 이용한 최적화 알고리즘과 유전 알고리즘을 이용한 최적화 알고리즘을 적용한 스케줄링 결과는 최종 선택된 임무 번호 면에서는 큰 차이를 보이지 않았다. 다만, 임무 번호 M279, M299, M300과 같이 선택된 임무가 다른 부분이 있는데, 이는 타부탐색 알고리즘이 유전 알고리즘과 달리, 해들을 변형 시켜가며 더 나은 해를 찾아내는 것이 아니라 해들을 단순히 비교하는 방법을 쓴다는 점에서 원인을 찾을 수 있다. 실제로, 선택된 임무들의 변수와 그 값들을 살펴보면 유전 알고리즘을 이용하여 선택된 임무 집단들이 타부탐색의 결과보다 더 적절한 값들이 선택되었음을 확인할 수 있으며, 최종해의 적합도 값 또한, 유전 알고리즘을 이용한 결과가 더 좋다.

특기할만한 점은 두 가지 스케줄링 최적화 알고리즘이 적합도 값 및 최종 선택된 임무 수, 에너지와 메모리 사용량에서는 큰 차이를 보이지 않으나, 연산 시간에서 큰 차이를 보인다는 것이다. 시뮬레이션 A의 결과와는 반대로 유전 알고리즘을 이용한 결과가 타부탐색 알고리즘을 이용한 결과보다 연산 시간이 훨씬 빠르다는 것을 보여준다. 타부탐색 알고리즘은 비교적 연산 과정이 단순해, 연산 과정에서 해를 하나의 값만을 생성하고 비교하기 때문에, 고려 대상 임무 수가

표 10. 스케줄링 결과

	최종 스케줄 1 (타부탐색 알고리즘)	최종 스케줄 2 (유전 알고리즘)
M3	1	1
M16	1	1
M22	1	1
M26	1	1
~	~	~
M278	0	1
M293	1	1
M297	1	1
M299	0	1
M300	0	1
에너지 사용량 (최대 3,300)	3,213	3,294
메모리 사용량 (최대 25,000)	22,339	24,063
연산 시간(s)	2033.7	66.59
연산 반복 횟수	256	135
최종해 적합도 (10^{-3})	4.623	4.472
선택된 임무 수	85	85

많아 졌을 때, 다양한 해를 한 과정에서 생성하여 연산을 진행하는 유전 알고리즘 보다 느리게 연산 결과를 제시했기 때문이다.

V. 결 론

본 연구에서는 위성 임무 스케줄링을 효율적으로 수행하기 위한 스케줄링 최적화 알고리즘을 타부탐색 알고리즘과 유전 알고리즘을 이용해 디자인하고, 시뮬레이션을 수행한 비교 결과를 기술하였다. 두 종류의 시뮬레이션을 통해, 디자인된 스케줄링 최적화 알고리즘들의 타당성을 검증하였고, 검증된 알고리즘의 성능을 연구하였다.

첫 번째 시뮬레이션에서는 임무 10개로 이루어진 단순한 시나리오를 적용하였고, 타부탐색 알고리즘과 유전 알고리즘을 이용한 스케줄링 최적화 알고리즘들이 타당하고 논리적인 결과를 도출함을 확인할 수 있었다. 단순한 문제를 적용했을 때는, 비교적 적은 연산량을 가지는 타부탐색 알고리즘이 같은 수준의 결과 값을 더 빠르게 도출해 주었으나, 두 번째 시뮬레이션에서 임무 300개로 이루어진 시나리오를 적용한 결과에서는 유전 알고리즘이 타부탐색 알고리즘보다 더 나은 수준의 결과를 더 빠른 시간 안에 도출함을 확인

할 수 있었다. 이 같은 결과가 나타난 원인은 유전 알고리즘이 단순히 해를 비교하지 않고 더 좋은 해를 만들어나간다는 사실과, 한 번에 하나의 값만을 비교하는 타부탐색과는 달리, 한 번의 연산에 여러 개의 해집단을 탐색한다는 점 때문이다. 유전 알고리즘을 이용한 스케줄링 최적화 알고리즘의 경우가 복잡한 문제에 적용 시, 연산 시간을 많이 줄여주었다.

trade-off 관계가 있는 해의 질과 연산 시간 중, 어떤 부분에 위성 임무 스케줄링 최적화 알고리즘이 더 중점을 두어야 하는가에 대해서는 위성 운영 환경에 따라 차이가 있을 수 있다. 본 연구에서 다룬 두 알고리즘의 타당한 선택 또한 고려변수와 제한 조건의 수에 따라 달라질 수 있으며 충분한 시뮬레이션 및 경험에 의해 판단되어야 할 것이다. 만약, 위성의 임무 스케줄링이 빠른 시간 안에 운영자의 목적에 맞는 다양한 결과를 제시해야 할 것을 기본 원칙으로 둔다면, 본 연구에서 다룬 유전 알고리즘을 이용한 스케줄링 최적화 알고리즘이 타당한 연산시간 안에 다양한 해를 생성해서 비교해 볼 수 있다는 점에서 좋은 해결법이 될 수 있다.

후 기

본 논문은 한국항공우주연구원 “다목적 실용 위성 5호 시스템 종합개발사업”의 지원으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) 최수미, “우주분야 연구개발 및 산업동향”, 한국항공우주연구원, 항공우주산업기술동향 제 6 권 1호, 2008. pp. 3-13.
- 2) 김해동, 최해진, 김은규, “다목적 실용위성 1호의 임무계획 및 운영”, 한국항공우주학회지 제 29권 7호 pp. 118-126.
- 3) 김해동, 최해진, 김은규, “다목적 실용위성 1호의 임무계획 및 자동 명령계획표 생성기 개발”, 한국항공우주학회지, 제 30권 1호, pp. 139-146.
- 4) Daryl G. Boden and Wiley J. Larson, Cost-Effective Space Mission Operation, McGraw-Hill, Inc. 1996.
- 5) Seung-woo Baek, Kyeum-rae Cho, Dae-woo Lee, Peter M. Bainum and Hae-dong Kim, "Development of Scheduling Algorithm and GUI for the Autonomous Satellite Mission

Operation", *60th International Astronautical Congress*, Daejeon, Korea, Oct. 2009.

6) Seung-woo Baek, Kyeum-rae Cho, Dae-woo Lee, Peter M. Bainum and Hae-dong Kim, "Heuristic Approach for Satellite Mission Scheduling", *19th AAS-AIAA Space Flight Mechanics Meeting*, Savannah, Georgia, U.S.A., Feb. 2009.

7) Byung-Sun Lee and Jae-Hoon Kim, "Design and Implementation of the Mission Planning Functions for the KOMPSAT-2 Mission Control Element", *Journal of Astronomy and Space Science*, Vol. 20, No. 3, 2003, pp. 227-238.

8) Kalyanmoy Deb, *Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms*, John&Sons, Ltd., 2001.

9) Paula Moss, Bruce Baker, Deepak Khosla, and Alex Dow, "Multi-mission Prioritization Using Cost-based Mission Scheduling", *11th International Command and Control Research and Technology Symposium*, Cambridge, UK, Sep. 2006.

10) Oscar H. Ibarra and Chul E. Kim, "Fast Approximation Algorithms for the Knapsack and Sum of Subset Problems", *Journal of the ACM (JACM)*, Vol. 22, No. 4, 1975.

11) Maya Hristakeva and Dipti Shrestha, "Different Approaches to Solve the 0/1 Knapsack Problem", *38th Midwest Instruction and Computing Symposium*, Apr. 2005.

12) Michel Gendreau, "An Introduction to Tabu Search", *International Series in Operations Research and Management Science*, Vol. 57. Springer New York, 2003.

13) Glover, F., "Tabu Search - Part I", *ORSA Journal on Computing* 1, 190-206. 1989.

14) Glover, F. (1990), "Tabu Search - Part II", *ORSA Journal on Computing* 2, 4-32.

15) Wei-Chen Lin, Da-Yin Liao, "A Tabu Search Algorithm for Satellite Imaging Scheduling", *Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, pp.1601-1606, 2004.

16) Michel Vasquez, Jin-Kao Hao, "A "Logic-Constrained" Knapsack Formulation and a Tabu Algorithm for the Daily Photograph Scheduling of an Earth Observation Satellite", *Computational Optimization and Applications*, 2001.

17) 진강규, 유전알고리즘과 그 응용, 교우사, 2004.

18) 문병로, 쉽게 배우는 유전알고리즘, 한빛미디어, 2008.

19) 백승우, 한순미, 조겸래, 이대우, 김해동, "유전알고리즘을 이용한 전술위성 임무계획 스케줄링", 한국군사과학기술학회, 종합학술대회 논문집, 2008.

20) 한순미, 백승우, 조선영, 조겸래, 이대우, 김해동, "유전 알고리즘을 이용한 위성 임무 스케줄링 최적화", 한국항공우주학회지, Vol. 36, No. 12, 2008, pp. 1163-1170.