휴리스틱 기법을 적용한 촬영계획 최적화에 대한 연구

배희진*[†] · 전정남** · 채태병**

*한국항공우주연구원 위성지상시스템개발팀, **한국항공우주연구원 위성정보확산팀

Development of Image Collection Planning Optimization Using Heuristic Method

Heejin Bae*[†], Jungnam Jun** and TaeByeong Chae**

*Ground System Development Team, Korea Aerospace Research Institute,

**Satellite Information Proliferation Team, Korea Aerospace Research Institute

Abstract : Satellite operation is divided as user's request, image collection planning, product generation, distribution. Image collection planning is to make image collection plan of satellite to reflect user's request in proper time based on NTO (New Task Order) and AO (Archive Order) using limited satellite resources. Image collection planning has high computational cost because of considering several variables simultaneously, is to be performed identical process repeatedly. In this paper, optimization research of image collection planning is performed for efficient planning. First, formulation of image collection planning is made to require satellite image as much as possible and then Heuristic algorithm is suggested for solution of formulation.

Key Words : Image Collection Planning, Heuristic, Optimization

요약 : 위성영상 운영은 주문접수, 촬영계획, 영상처리, 영상 배포의 과정으로 구분하며 촬영계획은 주문 접수 과정에서 전달된 신규 주문과 이미 진행 중인 주문을 바탕으로 한정된 위성자원을 최대한 활용하여 사용자의 촬영요청을 가능한 적절한 시기에 반영할 수 있도록 위성의 촬영계획을 수립하는 과정으로 위성 자원의 효율적인 활용이라는 취지와 가장 밀접한 관계를 갖는 과정에 해당한다. 촬영계획은 동시에 많은 변수를 고려해야 하기 때문에 연산량도 많은 편이며, 스케줄링을 수행할 때마다 동일한 과정을 반복적으로 수행해야 한다. 본 논문에서는 촬영계획의 효율성을 높이기 위해 촬영계획의 최적화 연구를 수행하였다. 먼저 촬영계획 수행과정과 제약조건을 정리하여 가능한 많이 촬영할 수 있도록 촬영계획 모형을 수립하고 그 모형을 해결하기 위해 휴리스틱 알고리즘을 제안하였다.

접수일(2012년 4월 21일), 수정일(1차 : 2012년 6월 7일, 2차 : 7월 10일), 게재확정일(2012년 7월 29일).

[†] 교신저자: 배희진(chelry@kari.re.kr)

1. 서론

위성정보를 이용한 정보 처리기술의 세계적인 발전 방향은 1 m급 또는 그 이상의 공간해상도를 요구하는 모니터링 체계구축과 병행하여 다양한 다중 위성정보를 처리하여 부가 가치를 높이는 방향으로 선회하고 있다. 세계 주요 위성 선진국들은 IT 기술을 바탕으로 공간영상정보의 체계적인 구축 및 활용을 통한 다양한 콘텐츠 사업을 발굴함과 동시에 이를 통하여 관련시장을 잠식해 나가고 있다. 따라서 대한민국도 과학기술 투자의 전략적 확대 및 효율성 제고를 위해 보다 적극적인 위성영상 서비스 체계 구축과 이의 효율적인 활용방안이 요구된다.

최근 위성개발의 경향은 동일한 궤도 또는 연속궤도를 주기적으로 선회하면서 운용하는 위성군(Constellation) 개념을 갖고 있다. 현재 우리나라 또한 1 m급의 아리랑 위성 2호를 2006년에 발사하여 현재까지 성공적으로 운영하고 있으며, 국내 최초로 기상상태에 제약을 받지 않고 영상획득이 가능한 SAR (Synthetic Aperture Radar) 시스템을 장착한 아리랑 5호와 60 cm급의 고해상도 광학영상인 아리랑 3호를 2012년에 발사하여 위성군 개념으로 운영할 예정이다. 이러한 국가의 중장기적인 지구관측위성개발 계획에 의하여 지속적으로 개발, 발사 및 운영될 아리랑 위성군의 효율적인 활용을 위해서는 위성별 특성을 기초로 하여 전체 아리랑위성 시리즈의 영상을 복합적으로 처리할 수 있는 운영모델 수립에서부터 기초, 핵심, 응용 기술 개발 및 활용까지 체계적으로 이루어져야 한다. 특히, 위성영상의 효율적 활용은 체계화된 운영 시나리오 및 처리 시스템을 기반으로 이루어지는 만큼 다중위성의 자원(Resource)을 최대한 활용하기 위한 높은 수준의 위성 운영 능력이 요구된다.

2. 본론

1) 위성영상 촬영계획

위성영상 운영은 주문접수, 촬영계획, 영상처리, 영상 배포의 과정으로 구분하며 촬영계획은 주문접수 과

정에서 전달된 신규 주문과 이미 진행 중인 주문을 바탕으로 한정된 위성자원을 최대한 활용하여 사용자의 촬영요청을 가능한 적절한 시기에 반영할 수 있도록 위성의 촬영계획을 수립하는 과정으로 위성 자원의 효율적인 활용이라는 취지와 가장 밀접한 관계를 갖는 과정에 해당한다. 촬영계획은 여러 사용자의 요구에 따른 촬영 임무를 수행할 수 있도록 위성에 요구되는 작업들과 그에 따른 제한사항 및 다양한 변수들을 종합적으로 고려하여 상호간의 시간, 운영상의 조건 등의 충돌을 회피함과 동시에 위성의 자원을 최대한 활용하여 운용할 수 있는 최적의 작업시간표를 생성하는 것이다. 특히, 촬영계획은 동시에 많은 변수를 고려해야 하기 때문에 연산량도 많은 편이며, 스케줄링을 수행할 때마다 동일한 과정을 반복적으로 수행해야 한다. 한편 위성의 수가 증가하게 되면 다양한 위성을 보유함에 따라 각 위성의 특성을 고려하여 다수의 위성을 하나의 시스템에서 동시에 운영하게 될 때 복잡도가 증가해 촬영계획의 효율성을 저해할 수 있다.

따라서 촬영계획의 효율성을 높이기 위해 다양한 위성운영 상황 변화와 사용자 요구사항에 유기적으로 대처할 수 있도록 촬영계획의 자동화, 자율화가 요구된다. 이를 위해 촬영계획 최적화 알고리즘은 이러한 어려움을 해결해 줌과 동시에, 효율적인 촬영계획을 수행할 수 있는 좋은 해법이 될 수 있다. 이미 촬영계획에 대한 최적화 알고리즘은 위성 선진국을 중심으로 관련 알고리즘들에 대한 연구가 어느 정도 진행되어 왔다. 그러나 촬영계획을 위한 기존의 최적화 알고리즘은 특정 위성의 운영정책에 특화되어 개발되어 왔고 그 정보 또한 구체적으로 공개되어 있지 않아 그대로 적용하기에는 어려움이 있다.

따라서 해외의 기술에 의존하지 않고 국내의 독자적인 촬영계획 최적화 기술에 대한 연구가 필요하다.

2) 촬영계획 모형 설정

촬영계획의 처리 과정은 주문정보 접수, simulated scene 생성, 촬영가능성 분석, 최적화 알고리즘 적용, 촬영계획 생성으로 요약된다.

주문정보는 요청하고자 하는 촬영지역의 지리좌표 정보, 주문일자, 촬영종료 일자, 운량조건, 촬영각(tilt angle) 조건을 포함한다. Simulated scene이란 주문을

요청 받은 관심 영역에 대해 각 위성의 관측폭(swath)을 기준으로 하여 시뮬레이션을 통해 가로 세로 동일한 크기의 위성 영상을 산출하는 것이다. 촬영가능성 분석은 각 촬영지역의 simulated scene을 기준으로 수행된다. 촬영계획을 수행하고자 하는 기간내의 궤도정보, 각 궤도별 가능한 모든 촬영각 정보, 구름정보를 simulated scene 별로 산출해 낸다. 주문정보, simulated scene 정보와 촬영가능성 분석 결과를 바탕으로 최적화 알고리즘을 적용하여 촬영계획을 생성해낸다. 촬영계획은 몇 개의 연속된 simulated scene에 대해 수행되며 이를 세그먼트라 부르기로 한다.

촬영계획 최적화를 수행하기에 앞서 촬영계획 모형을 설정하기로 한다. 최적화 모형은 모든 변수가 이진변수로 구성되는 정수계획문제(Integer program problem)로 구성하였다. 촬영계획 시 발생하는 목적식과 현실제약을 바탕으로 최적화 모형을 아래와 같이 수립하였다.

$$Z = (1-\beta) (\sum_{q \in Q} \sum_{k \in K_q} c_k^q y_k^q) + \beta (\sum_{q \in Q} \sum_{j \in J_q} f_j^q x_j^q), 0 \leq \beta \leq 1 \quad (1)$$

$$x_j^q \in \{0, 1\}, \forall j \in J_q, \forall q \in Q \quad (2)$$

$$y_j^q \in \{0, 1\}, \forall j \in J_q, \forall q \in Q \quad (3)$$

$$\sum_{(j,q) \in O_i} p_j^q x_j^q \leq ol, \forall i \in L \quad (4)$$

$$\sum_{(j,q) \in D_i} p_j^q x_j^q \leq dl, \forall i \in I \quad (5)$$

$$\sum_{(j,q) \in O_i} x_j^q \leq sl, \forall i \in L \quad (6)$$

$$x_j^q + x_{j'}^{q'} \leq 1, \forall ((j,q), (j',q')) \in C \quad (7)$$

$$y_k^q - \sum_{j \in S_k^q} x_j^q \leq 0, \forall j \in K_q, \forall q \in Q \quad (8)$$

제시된 최적화 모형은 결정변수 x_j^q 와 y_k^q 를 갖는다. x_j^q 는 관심영역 q 에 속하는 세그먼트 j 의 촬영여부를 의미하며 y_k^q 는 관심영역 q 를 구성하는 simulated scene k 의 촬영여부를 의미한다.

식 (1)은 simulated scene과 관련된 $(\sum_{q \in Q} \sum_{k \in K_q} c_k^q y_k^q)$ 항과 세그먼트와 관련된 $(\sum_{q \in Q} \sum_{j \in J_q} f_j^q x_j^q)$ 항의 합으로 구성된다.

$(\sum_{q \in Q} \sum_{k \in K_q} c_k^q y_k^q)$ 항은 simulated scene에 대한 항목으로 선택되는 모든 simulated scene을 의미한다. 주문정보는 simulated scene을 포함하므로 주문 정보에 대한 가중치는 simulated scene에 대한 비용값으로

설정하였다. simulated scene의 비용상수값 c_k^q 는 (선호도에 대한 가중치) $\times$ (남은 촬영영역에 대한 가중치) $\times$ (촬영종료 일자에 대한 가중치) $\times$ (주문일자에 대한 가중치)로 계산하게 된다. 그리고 우수한 품질의 영상을 획득하기 위해 촬영각의 가중치는 어떠한 요소의 가중치보다 우선시되어야 한다. 촬영각은 어떤 세그먼트를 선택하느냐에 따라 결정되는 값이므로 촬영각에 대한 가중치를 고려하기 위해 $(\sum_{q \in Q} \sum_{j \in J_q} f_j^q x_j^q)$ 는 세그먼트에 대한 항을 설정하였다. 세그먼트에 대한 비용상수값 f_j^q 은 $-(\text{촬영각의 크기})$ 로 설정하여 계산한다. 결국 설정한 목적식은 선택되는 simulated scene들을 최대화 하는 것을 목표로 삼고 있으나 촬영각을 고려하게 되면 β 가 커지게 되어 simulated scene이 희생되는 것을 보여준다.

(4)는 시간제약으로 궤도당 최대 촬영시간으로 선택된 세그먼트와 해당 세그먼트의 처리시간의 합이 각 궤도당 처리시간을 넘지 말아야 함을 나타내었으며, (5)는 시간제약으로 하루 최대 촬영시간으로 선택된 세그먼트와 해당 세그먼트의 처리시간의 합이 각 날짜에서의 처리시간을 넘지 말아야 함을 나타내었고, (6)은 궤도당 최대 촬영 세그먼트의 개수를 나타내고 있으며, (7)은 충돌방지 제약으로 충돌이 발생하는 2개의 세그먼트는 둘 중 하나만 선택될 수 있도록 하였다. 충돌 발생 시 1개의 세그먼트를 선택하는 기준은 주문의 우선순위, 주문의 순서 (먼저 들어온 주문을 나중에 들어온 주문보다 선호), 남은 촬영종료 일자 (촬영종료 일자가 얼마 남지 않은 주문을 선호), 촬영각의 차 (주문요청 촬영각과 가능한 촬영각의 차가 작을수록 선호), AOI의 남은 영역 (남은 영역이 적은 것을 선호)의 순이다. 그리고 제약식 (8)은 세그먼트와 simulated scene의 관계를 표현하는 제약식으로 2가지 조건을 만족하도록 한다; 1) simulated scene을 포함하는 세그먼트가 최소한 하나는 선택되어야 simulated scene이 선택가능 2) 세그먼트가 선택될 경우 해당 세그먼트를 구성하는 simulated scene은 모두 선택.

위의 모형에 대한 변수 설명은 다음과 같다.

$I = \{1, 2, \dots, i\}$: 촬영계획 기간의 집합

$L = \{1, 2, \dots, l\}$: 궤도의 집합

$Q = \{1, 2, \dots, q\}$: 관심영역의 집합

- $J_q = \{1, 2, \dots, j_q\}$: 관심영역 $q \in Q$ 에서의 세그먼트의 집합
- $K_q = \{1, 2, \dots, k_q\}$: 관심영역 $q \in Q$ 에서의 simulated scene의 집합
- D_i : 촬영계획 일자 $i \in I$ 에서의 관심영역 $q \in Q$ 의 세그먼트 $j \in J_q$ 의 (i, q) 쌍의 집합
- O_l : 궤도 $l \in L$ 에서의 관심영역 $q \in Q$ 의 세그먼트 $j \in J_q$ 의 (i, q) 쌍의 집합
- C : 관심영역 $q \in Q$ 에서의 세그먼트 $j \in J_q$ 와 관심영역 $q' \in Q$ 에서의 세그먼트 $j' \in J_{q'}$ 의 충돌 $((j, q), (j', q'))$, $j \neq j' \vee q \neq q'$ 이 발생할 수 있는 쌍의 집합
- S_k^q : 관심영역 $q \in Q$ 에서 세그먼트 $j \in J_q$ 가 scene $k \in K_q$ 을 커버하는 i 의 집합
- C_k^q : 관심영역 $q \in Q$ 에서 scene $k \in K_q$ 의 비용값 (가중치는 우선순위, 촬영종료일자, 주문일자, 커버리지와 같은 다양한 요소들이 반영될 수 있음)
- β : 촬영각에 대한 가중치
- α_k^q : 관심영역 $q \in Q$ 에서 scene $k \in K_q$ 의 커버리지
- w_q : 관심영역 $q \in Q$ 의 우선순위
- f_j^q : 관심영역 $q \in Q$ 에서 세그먼트 $j \in J_q$ 의 비용값 (촬영각과 같은 요소가 반영될 수 있음)
- P_j^q : 관심영역 $q \in Q$ 에서 세그먼트 $j \in J_q$ 의 처리시간
- ol: 각 궤도에서의 처리시간 제약
- dl: 각 날짜에서의 처리시간 제약
- sl: 각 궤도마다 스케줄링이 반영된 세그먼트 수의 제약
- x_j^q : 관심영역 $q \in Q$ 에서 세그먼트 $j \in J_q$ 의 스케줄이 반영된 상태 (스케줄되었다면 1, 그렇지 않다면 0의 값을 가짐)
- y_k^q : 관심영역 $q \in Q$ 에서 scene $k \in K_q$ 의 스케줄이 반영된 상태 (스케줄되었다면 1, 그렇지 않다면 0의 값을 가짐)

3) 최적화 알고리즘 설계

현재 위성의 촬영계획 최적화를 위한 국내연구는 백승우 외(2010)의 연구에서 수행된 바 있는데 개념정립 단계의 수준에 머물러 있어 실제 위성을 운영하기 위해서는 제한적인 범위 안에서 활용될 수 밖에 없다. 국외 연구의 경우 촬영계획 최적화에 대한 연구가 국내보다 활발하게 진행되어 왔다. 먼저 Martin (2002)은 위성의

촬영계획의 최적화를 위해 전체 촬영계획 업무를 정의하였다. 그리고 Rao *et al.* (1998)은 다중위성계획시스템 (MSS: Multi-Satellite Scheduling System) 설계에 대해 설명하였다.

Jufang *et al.* (2009)과 Lin *et al.* (2005)은 촬영계획 문제를 업무 분배문제로 보고 단일위성 스케줄링의 부분제로 나누어 해결하고자 하였다. 한편 Garbel *et al.* (2002)은 촬영계획 문제를 다준기준경로 문제 (multiple criteria path problem)로 보고 비순환적 네트워크를 구성하여 효과적인 경로의 선택권들을 고려하는 방식으로 가장 효율적인 경로를 찾아내었고 Bresina (1996)와 Frank *et al.* (2001)은 지구관측위성의 촬영계획 문제를 휴리스틱 기법을 적용하여 문제를 풀고자 하였다.

위성의 촬영계획은 많은 변수와 제약조건들을 고려해야 할 뿐만 아니라 위성마다 고려해야 할 변수와 제약조건이 다르기 때문에 정형화된 모형이 아닌 각 위성의 특화된 모형만 제시되어 있다. 본 연구에서 제안한 모형은 NP-Complete의 복잡도(Complexity)에 해당하는 문제로, 크기에 따라 제약식이 기하급수적으로 증가한다. 본 연구에서는 합리적인 시간 내에 근사해를 제공하는 휴리스틱 알고리즘(Heuristic algorithm)을 설계하여 모형의 하한(Lower bound)을 얻고자 했다. 위성의 촬영계획은 복잡도의 특성 때문에 휴리스틱 알고리즘을 사용하는 것이 일반적이다(Smith and Cheng, 1993). 위성별로 설정한 모형의 형태가 다르기 때문에 모형을 해결하기 위한 방법을 동일하게 적용할 수 없으며 최적화된 해를 구하기 위해서는 같은 알고리즘을 적용할 수가 없다. 이렇게 휴리스틱 알고리즘은 다양한 접근 방식으로 설계가 가능하나 본 연구에서는 계산시간 및 해 도출 가능성을 우선적으로 고려하였다. 이는 대규모 사이즈의 문제를 다루어야 하는 환경을 반영한다. 이러한 환경을 반영하여 근시안적 접근방식인 탐욕 휴리스틱 알고리즘(Greedy Heuristic Algorithm)에 기반을 두고 기존 논문에서 연구된 바 없는 새로운 기법인 삭제(Deletion)와 삽입(Insertion)방식을 적용한 두 가지 휴리스틱 알고리즘을 설계하였다.

삽입 방식은 빈 스케줄을 시작으로 순차적으로 현재 스케줄에서 제일 최적인 세그먼트를 스케줄에 추가하는 알고리즘으로, 더 이상 추가할 수 없을 때까지 반복하여

Fig. 1. Flow chart of deletion.

Fig. 2. Flow chart of insertion.

세그먼트를 스케줄에 추가한다. 삽입방식의 알고리즘 흐름도는 과 같다. Fig. 1에서 feasibility check에서 적용되는 기준은 제약식을 만족하는 것과 충돌여부이다.

삭제 방식은 모든 세그먼트가 스케줄에 있다고 가정하여 순차적으로 목적함수를 최소로 감소시키는 세그먼트를 스케줄에서 삭제하는 알고리즘으로, 스케줄이 주어진 제약식을 만족할 때까지 세그먼트를 삭제한다. 삭제방식의 알고리즘 흐름도는 Fig. 2와 같다.

3. 구현 및 검증

본 연구에서 제시한 휴리스틱 알고리즘의 성능을 평

가하기 위해 이를 Microsoft C#으로 구현하였으며 4 GB의 RAM을 지닌 Intel Core2 i7-870 (2.93 Hz) PC에서 실행되었다.

알고리즘을 검증하기 위해 위성임무 300개를 구성하여 그 중 충돌 발생이 가능한 임의의 위성임무 39개를 선택하여 모의실험을 수행하였다. 은 모의 실험을 위한 가상 시나리오이다.

촬영계획을 위해 위성의 궤적을 예측한 궤도전파는 2011.03.01의 TLE를 사용해 2011.03.01~2011.03.05까지의 계획을 수립해보았다(Table 1).

Table 2는 모의실험에서 궤도전파를 위해 사용한 2011.03.01의 TLE이다.

휴리스틱 알고리즘의 삽입방식과 삭제방식은 매번

Table 1. Scenario for simulation test

Order ID	Priority	Requested Tilt angle	Cloud Condition	Due Date
NTO20111212033331	2	± 10	10	2011.03.15
NTO20111212033429	3	± 12	10	2011.03.31
NTO20111212033541	2	± 5	20	2011.04.30
NTO20111212033643	3	± 25	20	2011.04.25
NTO20111212033752	3	± 30	0	2011.03.25
NTO20111212033845	2	± 6	0	2011.04.25
NTO20111212034057	2	± 4	0	2011.04.30

Table 1. Continud

Order ID	Priority	Requested Tilt angle	Cloud Condition	Due Date
NTO20111212034151	3	± 10	10	2011.04.30
NTO20111212034322	3	± 12	10	2011.03.20
NTO20111212034412	2	± 20	0	2011.03.31
NTO20111212034459	2	± 15	20	2011.03.28
NTO20111212034554	3	± 4	20	2011.03.31
NTO20111212034705	3	± 8	0	2011.03.31
NTO20111212034808	3	± 24	10	2011.04.28
NTO20111212034858	2	± 5	10	2011.04.30
NTO20111212034947	3	± 10	20	2011.03.28
NTO20111212035039	2	± 30	0	2011.03.31
NTO20111212035131	2	± 15	20	2011.03.31
NTO20111212035226	3	± 20	0	2011.04.30
NTO20111212035319	3	± 7	20	2011.03.30
NTO20111212035409	2	± 30	20	2011.04.28
NTO20111212035502	2	± 25	10	2011.04.24
NTO20111212035620	3	± 6	10	2011.03.17
NTO20111212035710	3	± 8	0	2011.03.22
NTO20111212035843	2	± 16	20	2011.04.29
NTO20111212035216	2	± 5	10	2011.05.15
NTO20111212033572	4	± 3	10	2011.04.30
NTO20111212035386	3	± 5	20	2011.04.30
NTO20111212035458	3	± 20	10	2011.03.25
NTO20111212034060	2	± 14	20	2011.03.25
NTO20111212035305	4	± 8	10	2011.04.25
NTO20111212035559	3	± 23	10	2011.05.30
NTO20111212035731	2	± 4	20	2011.04.30
NTO20111212035563	2	± 17	10	2011.06.20
NTO20111212033200	3	± 7	10	2011.03.31
NTO20111212034685	4	± 25	20	2011.04.28
NTO20111212035961	3	± 12	10	2011.05.31
NTO20111212033736	2	± 6	20	2011.03.31
NTO20111212034105	2	± 10	10	2011.03.25

Table 2. TLE file

KOMPSAT
1 29268U 06031A 11061.00000000 .00003782 00000-0 76574-3 0 00001
2 29268 098.3226 306.0781 0016003 020.9183 248.4191 14.61335973245054

최적의 세그먼트를 결정해야 할 때 그 순간에 가장 최적이라고 생각하는 세그먼트를 스케줄에 할당함으로써 최종적인 스케줄을 도출하게 되는데, 그 순간의 선택은 그 당시에는 최적(Local optima)이나, 최적이라고 생각했던 세그먼트들을 모아서 최종적인 스케줄을 만들었다고 해서, 그 스케줄이 궁극적으로 최적(Global optima)이

라는 보장이 없다.

따라서 본 연구에서는 알고리즘의 적정성 검증(feasibility check)을 위해 모형의 최적해를 보장하는 최적화 솔버의 결과와 위의 두 알고리즘의 결과를 비교함으로써 해법의 타당성을 검증한다. 최적화 솔버는 COIN-OR(Computational Infrastructure for

Table 3. Comparison of heuristic algorithm and optimization solver

	Mean Processing Time (sec)		Optimality		
	Heuristic Algorithm	Optimization Solver	Heuristic Algorithm (A)	Optimization Solver (B)	(A/B) $\times 100$ %
$\beta = 0$	0.03	443.47	336.850	341.678	98.59%
$\beta = 0.1$	0.02	225.68	314.579	319.186	98.56%
$\beta = 0.2$	0.02	92.40	284.854	292.265	97.46%
$\beta = 0.3$	0.02	89.00	255.967	261.038	98.06%
$\beta = 0.4$	0.02	57.81	218.047	220.874	98.72%
$\beta = 0.5$	0.02	48.66	174.795	176.961	98.78%
$\beta = 0.6$	0.02	54.72	141.798	141.798	100%
$\beta = 0.7$	0.02	43.53	124.070	124.070	100%
$\beta = 0.8$	0.02	38.41	112.699	112.699	100%
$\beta = 0.9$	0.02	35.26	104.521	104.521	100%
$\beta = 1.0$	0.02	35.64	104.522	104.522	100%

Operation Research)의 CBC(Coin-or Branch and Cut)을 사용하였다.

제안한 모형과 휴리스틱 알고리즘의 적정성 검증을 위해 최적화 모형에서 β 값(촬영각에 대한 가중치)을 변화시켜 최적화 모형의 결과값과 처리시간을 비교해보았다. 최적화 모형은 가능한 많은 simulated scene을 선택하도록 설계되었기 때문에 최적화 모형의 결과값이 최적화도의 척도가 된다.

Table 3은 휴리스틱 알고리즘과 최적화 솔버의 처리 시간 및 최적화도의 결과를 비교한 것이다.

위의 결과의 최적화도를 비교해보면 휴리스틱 알고리즘 결과가 최적해를 보장하는 최적화 솔버의 결과에 98% 이상 근접함을 확인할 수 있다. 그리고 평균 처리 시간을 비교해 볼 때 휴리스틱 알고리즘의 연산이 최적화 솔버보다 훨씬 빨리 처리되는 것을 알 수 있다. 특히, 휴리스틱 알고리즘의 연산은 1초 이하의 속도로 처리가 가능한 것을 볼 수 있다. 촬영각에 대한 가중치를 증가시켜도 처리시간이 더 이상 단축되지 않는 것은 주어진 데이터를 처리하기 위해 최소한 0.02초는 소요되어야 하는 것으로 추정된다. 실제로 최적화 솔버는 입력 데이터의 양이 급격하게 증가하게 되면 메모리 부족과 같은 현상이 발생하게 되어 활용이 불가능하게 된다.

따라서 본 연구에서 제안한 휴리스틱 알고리즘은 최적화 솔버의 결과와 비교해 봤을 때 거의 근사한 최적해를 도출하였으며 연산속도는 훨씬 더 빠른 것을 확인하였으므로 많은 양의 주문을 처리해야 하는 촬영계획 최

Fig. 3. Optimality comparison of heuristic algorithm and optimization solver.

적화 모형에 적합한 적정성을 가지는 것으로 판단된다.

한편 촬영각에 대한 가중치 β 를 변화시키에 따라 영상 품질을 우선시하게 되는 경향이 증가하게 되어 촬영각이 작은 segment를 촬영계획에 반영하고자 하게 된다. 따라서 β 값이 증가할수록 segment를 적게 선택하게 되어 최적화모형의 목적식 값은 작아지게 된다. Fig. 3은 Table 3의 결과 중 최적화도에 해당하는 부분을 그래프로 나타낸 것으로 β 가 증가하면 최적화도가 감소하다가 어느 순간 일정한 값으로 수렴하게 되는 것을 알 수 있다. 이는 β 가 증가하다가 어느 순간부터는 촬영각이 0도일 때의 segment만을 선택함으로써 최적화를 수행하게 되고 이후로 β 를 아무리 증가시켜도 촬영각이 0도일 때보다 더 나은 품질의 영상은 얻을 수 없게 되기 때문에 계속 동일한 값을 표출하게 되는 것을 보여준다.

β 가 증가할수록 최적화도는 떨어지게 되어 보다 적은

영상을 획득할 수 밖에 없지만 우수한 영상품질의 영상만을 획득할 수 있도록 촬영계획에 반영할 수 있기 때문에 이는 운영자가 운영정책에 맞게 선택해서 조절해야 하는 부분이다.

4. 결 론

본 논문에서는 촬영계획의 효율성을 높이기 위해 촬영계획의 최적화 연구를 수행하였다. 먼저 촬영계획 수행과정과 제약조건을 정리하여 가능한 많이 촬영할 수 있도록 촬영계획 모형을 수립하고 그 모형을 해결하기 위해 휴리스틱 알고리즘을 제안하였다. 그리고 최적화 솔버를 사용해 성능 검증을 수행하였다. 최적화 솔버와 성능을 비교해본 결과 제안한 휴리스틱 알고리즘은 최적화 성능뿐 아니라 처리시간에서 우수한 성능을 보였다. 이는 촬영계획에서 처리해야 할 주문의 양이 기하급수적으로 증가할 경우 적절하게 활용가능하다.

본 논문에서 제안하고 연구한 촬영계획 최적화 알고리즘은 추후 촬영계획 시스템 개발에 효율적으로 활용될 것으로 기대된다.

사 사

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고문헌

백승우, 조겸래, 이대우, 김해동, 2010. 효율적인 위성 임무 스케줄링 운영을 위한 스케줄링 최적화 알고리즘 비교 연구, 한국항공우주학회지, 38(1): 48-57.

Bresina, J., 1996. Heuristic-biased stochastic sampling, *In Proceedings of the 13th National Conference on*

Artificial Intelligence, AAAI-96, 271-278.

Frank, J., A. J?nsson, R. Morris, and D.E. Smith, 2001. Planning and scheduling for fleets of earth observing satellites. *International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics, Automation and Space*.

Gabrel, V. and D. Vanderpooten, 2002. Enumeration and interactive selection of efficient paths in a multiple criteria graph for scheduling an earth observing satellite, *European Journal of Operational Research*, 139(3): 553-542.

Jufang, L., Y. Feng, B. Baocun, and H. Renjie, 2009. A decomposition-based algorithm for imaging satellites scheduling problem, *ICIECS*, 1-6.

Lin. W., D. Liao, C. Liu, and Y. Lee, 2005. Daily imaging scheduling of an earth observation satellite, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans*, 35(2): 213-223.

Lin, W. and S. Chang, 2005. Hybrid algorithms for satellite imaging scheduling, *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 3: 2518-2523.

Martin, W., 2002. Satellite image collection optimization, *Optical Engineering*, 41(9): 2083-2087.

Pemberton, J., 2000. Towards scheduling over-constrained remote sensing satellites. *In Proceedings of the 2nd International Workshop on Planning and Scheduling for Space*, 4.

Rao, J.D., P. Soma, and G.S. Padmashree, 1998. Multi satellite scheduling system for LEO satellite operations. SpaceOps, Thokyo, Japan, 2b002.

Smith, S. and C. Cheng, 1993. Slack-based heuristics for constraint satisfaction scheduling, *In Proceedings of the Eleventh National Conference on Artificial Intelligence*, AAAI-93, 139-144.