

수렴각에 따른 KOMPSAT-3 · 3A호 영상 간 정밀 상호좌표등록 결과 분석

Fine Co-registration Performance of KOMPSAT-3 · 3A Imagery According to Convergence Angles

한유경¹⁾ · 김태헌²⁾ · 김예지³⁾ · 이정호⁴⁾

Han, Youkyung · Kim, Taeheon · Kim, Yeji · Lee, Jeongho

Abstract

This study analyzed how the accuracy of co-registration varies depending on the convergence angles between two KOMPSAT-3 · 3A images. Most very-high-resolution satellite images provide initial coordinate information through metadata. Since the search area for performing image co-registration can be reduced by using the initial coordinate information, in this study, the mutual information method showing high matching reliability in the small search area is used. Initial coarse co-registration was performed by using multi-spectral images with relatively low resolution, and precise fine co-registration was conducted centering on the region of interest of the panchromatic image for more accurate co-registration performance. The experiment was conducted by 120 combination of 16 KOMPSAT-3 · 3A 1G images taken in Daejeon area. Experimental results show that a correlation coefficient between the convergence angles and fine co-registration errors was 0.59. In particular, we have shown the larger the convergence angle, the lower the accuracy of co-registration performance.

Keywords : KOMPSAT3 · 3A, Fine Co-registration, Convergence Angle, Mutual Information

초 록

본 연구는 KOMPSAT-3 및 3A호 영상 간 상호좌표등록을 수행할 당시에 두 영상이 보이는 수렴각(convergence angle)의 크기에 따라서 상호좌표등록의 정확도가 어떻게 달라지는지에 대한 분석을 수행하였다. 고해상도 위성 영상의 메타데이터에서 제공하는 영상의 좌표정보를 이용하여 영상 정합을 수행하기 위한 탐색영역을 줄일 수 있으므로, 본 연구에서는 좁은 탐색영역에서 정합 신뢰도가 높은 영역기반 정합쌍 추출 기법 중 하나인 상호정보(mutual information) 기법을 활용하였다. 상대적으로 해상도가 낮은 다중분광 영상을 이용하여 초기 상호좌표등록을 수행하여 초기 위치관계를 파악하고, 보다 정밀한 상호좌표등록을 위해 전정색 영상의 관심대상지역을 중심으로 정밀 상호좌표등록을 수행하였다. 대전지역에서 촬영된 16장의 KOMPSAT-3 및 3A호 영상으로 120개의 조합을 구성하여 실험을 수행하였다. 실험결과, 영상 간 수렴각 크기와 상호좌표등록 정확도 사이의 상관계수 값은 0.59를 보였고, 영상 간의 수렴각 크기가 클수록 상호좌표등록 정확도가 떨어지는 경향을 보이는 것을 확인하였다.

핵심어 : KOMPSAT3 · 3A, 상호좌표등록, 수렴각, 상호정보

Received 2019. 11. 20, Revised 2019. 12. 03, Accepted 2019. 12. 06

1) Member, School of Convergence & Fusion System Engineering, Kyungpook National University (E-mail: han602@knu.ac.kr)

2) Member, Dept. of Geospatial Information, Kyungpook National University (E-mail: rlxogjs73@knu.ac.kr)

3) Member, Satellite Application Division, Korea Aerospace Research Institute (E-mail: jlyjkim@kari.re.kr)

4) Corresponding Author, Member, Satellite Application Division, Korea Aerospace Research Institute (E-mail: jeongho@kari.re.kr)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

고해상도 위성영상은 높은 공간해상도를 기반으로 정보의 불확실성을 감소시킬 수 있으며 객체 추출(object extraction), 변화 탐지(change detection), 재난 및 재해 모니터링, 위치 기반 서비스 등 4차 산업혁명 시대의 고부가가치를 창출하는 핵심 데이터이다. 전 세계적으로 고해상도 위성영상의 높은 활용 가치를 인지하여 WorldView, IKONOS, GeoEye 등 고해상도 센서를 장착한 지구관측위성이 개발되었다. 이로 인해 시계열 다중센서 빅데이터 고해상도 위성영상의 시대가 도래하였다. 우리나라도 시대적 흐름에 발맞추어 KOMPSAT-1호 및 KOMPSAT-2호 개발을 통해 확보한 기술력을 바탕으로 세계적인 수준의 고해상도 다중센서인 AEISS (Advanced Earth Imaging Sensor System)와 AEISS-A (Advanced Earth Imaging Sensor System-A)를 탑재한 지구관측위성인 KOMPSAT-3·3A호를 발사·운용 중이며, 추후 고해상도 센서를 탑재한 KOMPSAT-7호와 차세대 중형위성 및 소형군집위성의 개발, 발사, 운용이 계획되어 있다.

이로 인해 국내 자체적으로 시계열 다중센서 빅데이터 고해상도 위성영상 취득이 가능해짐과 동시에 고해상도 위성영상의 활용 가치가 더욱 높아지고 있다. 하지만 플랫폼의 자세 및 고도, 촬영 각도, 지구의 자전 등 외부요인으로 인해 취득된 고해상도 위성영상은 기하오차가 발생한다. 특히, 지상기준점이나 관심지역에 대한 높이값 정보 없이 영상 간 존재하는 상대적인 기하오차를 최소화하는 상호좌표등록(co-registration) 기술 개발의 필요성이 대두되고 있다.

상호좌표등록은 영상 간 좌표값을 통일시켜 주는 과정을 말하며, 특징요소 추출(feature extraction), 특징요소 간 정합(feature matching), 변환모델 구성(transformation model estimation), 그리고 영상 등록(image registration)의 네 단계로 구성된다(Zitová, 2003). 여기서 특징요소 추출과 특징요소 간 정합 과정은 상호좌표등록 수행에 있어 핵심 단계인 정합쌍(tie-points) 추출 과정으로 구분된다. 일반적으로 영상 간 정합쌍을 추출하기 위해 사용자가 직접 개입하여 추출하는 방식으로 수행되었다. 하지만 이는 사용자의 숙련도에 의존적이고 인력 및 시간 비용의 소모가 크다. 이러한 단점은 본격적인 다중 위성 시대의 도래로 위성영상의 종류가 더욱 다양해지고 취득 주기 감소로 영상의 양이 급격히 늘어나면서 더욱 부각되고 있다. 따라서, 정합쌍 추출 및 정합을 자동으로 수행하는 자동 매칭 기술과 관련된 상호좌표등록에 관한 다양한 연구가 수행되고 있다.

자동 특징요소 추출 및 정합 방법은 크게 특징기반 정합기

법(feature-based matching method)과 영역기반 정합기법(area-based matching method)으로 구분된다. 특징기반 정합기법은 영상 내에 두드러진 점, 선, 면 기반의 특징요소를 추출한 후 유사도를 판단하여 정합쌍을 추출하는 방식이다. 특징기반 정합기법은 영상 간 초기 좌표정보가 없어도 적용이 가능한 장점이 있는 반면, 영상 내에 특이점이 적은 지역의 경우 신뢰도 높은 결과를 도출하기 어려운 단점이 있다(Ma *et al.*, 2015). 대표적인 기법으로는 SIFT (Scale-Invariant Feature Transform), SURF (Speeded-Up Robust Features) 기법 등이 있다. 영역기반 정합기법은 영상 간 일정 크기의 템플릿(template)을 설정하고, 템플릿을 중심으로 영상 간 유사도를 측정한다. 그리고 측정된 유사도가 가장 높은 위치의 템플릿 중심점을 정합쌍으로 추출하여 변환모델을 구성하는 방식으로 수행된다. 영역기반 정합기법은 영상 내 특징요소가 적어도 적용이 가능한 장점이 있으나, 초기 위치관계에 대한 정보가 없으면 정합쌍 탐색영역이 넓어져 신뢰할만한 결과를 얻기 어렵다(Chen *et al.*, 2003). 대표적인 기법으로는 교차상관(cross correlation), 상호정보(mutual information), 최소제곱정합(least square matching), 위상상관(phase correlation) 기법 등이 있다.

고해상도 위성영상 간 상호좌표등록은 위성영상의 센서 자세 및 스테레오 기하요소, 방사 특성, 촬영 시간 등 외부요소의 영향을 많이 받으며, 특히 센서의 자세와 위성영상의 스테레오 기하요소 중 하나인 수렴각(convergence angle)의 영향을 많이 받는다(Jeong *et al.*, 2014; Jeong, 2016). 수렴각은 각 영상이 취득될 당시에 센서에서 지상점으로 향하는 두 벡터가 이루는 사이각을 말하며, 수렴각이 클수록 각 영상에서 보이는 기복변위의 방향과 크기의 차가 크다(Jeong *et al.*, 2014). 이에 고해상도 위성영상 간 정밀한 상호좌표등록을 수행하기 위해서는 위성의 촬영각, 특히 수렴각에 따른 정확도 분석이 필요하다.

본 연구에서는 각 영상 촬영 당시의 촬영각 환경과 상호좌표등록 정확도 간의 관계를 분석하고자 한다. 대부분의 고해상도 위성영상은 메타데이터를 통해 영상의 초기 위치 정보를 알 수 있다. 이러한 좌표정보를 이용하여 영상 정합을 수행하기 위한 탐색영역을 줄일 수 있으므로, 본 연구에서는 좁은 탐색영역에서 정합 신뢰도가 높은 영역기반 정합쌍 추출 기법 중 하나인 상호정보 기법을 활용하였다. 상대적으로 해상도가 낮은 다중분광 영상을 이용하여 초기 상호좌표등록을 수행하여 초기 위치관계를 파악하고, 보다 정밀한 상호좌표등록을 위해 전색 영상에 대한 관심대상지역을 중심으로 정밀 상호좌표등록을 수행하였다. 대전지역에서 촬영된 총 16장의 KOMPSAT-3·3A호 영상을 조합하여 120가지 경우에 대하여 실험을 수행하였다.

2. 실험 방법

본 연구는 고해상도 위성 영상 취득 당시의 위성의 자세, 특히 촬영각에 따른 영상 간 상호좌표등록의 결과를 분석한다. 촬영각 요소 중에서, 기복변위의 크기와 방향에 가장 큰 영향을 주는 위성영상의 스테레오 기하를 설명하는 대표적인 각도인 수렴각에 초점을 맞춰서 분석을 수행한다. 고해상도 영상 간 상호좌표등록은 우선적으로 상대적으로 공간해상도가 낮은 다중분광영상의 Red 밴드를 이용하여 초기 상호좌표등록을 수행한 후, 전정색 영상의 관심지역에 대하여 보다 정밀한 상호좌표등록을 수행하는 형태로 진행한다(Fig. 1). 대전지역에서 촬영된 총 16장의 KOMPSAT-3 및 3A 영상의 모든 조합에 대하여 상호좌표등록을 수행하였으며, 수행 결과와 수렴각과의 관계를 분석하였다.

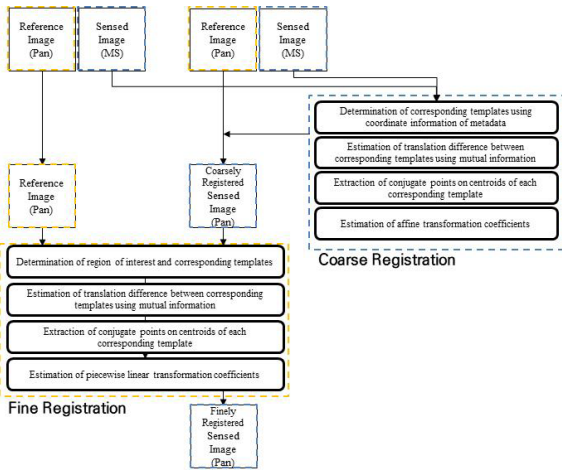


Fig. 1. Flowchart of the proposed coarse-to-fine co-registration approach

2.1. 수렴각(convergence angle)

위성영상의 스테레오 기하의 크는 크게 3가지 각도, 즉, 수렴각, 이등분선고도각(bisector elevation angle), 비대칭각(asymmetry angle)으로 설명될 수 있다. 수렴각은 스테레오를 구성하는 각 센서에서 지상점으로 향하는 두 벡터가 이루는 사잇각을 의미한다(Jeong, 2016). 수렴각의 경우 오래전부터 스테레오 기하 안정성을 설명하는 요소로 많은 논의가 진행되어 왔으며, 수렴각이 적정 범위를 벗어나게 되면 3차원 좌표의 수직 정확도에 크게 영향을 미칠 수 있음이 증명된 바 있다(Li et al., 2007; Li et al., 2009). 스테레오 기하와는 달리, 영상 간 2차원 상호좌표등록을 수행할 때에는 수렴각의 크기가 크면 높이가 변화

가 큰 건물이나 산지에서 발생하는 기복변위의 방향과 크기가 각 영상마다 달라져서 오히려 상호좌표등록의 결과를 떨어뜨릴 수 있다.

두 센서가 이루는 수렴각은 Fig. 2와 같이 위성의 고도각(elevation angle)과 방위각(azimuth angle)으로 표현할 수 있다. 우선, 지상점을 기준으로 위성에 대한 위치벡터를 각각 S_1 과 S_2 라고 할 때, 두 위치에 대한 단위벡터 \hat{S}_1 과 \hat{S}_2 는 각각 Eq. (1)과 같이 표현할 수 있다(Oh et al., 2018).

$$\hat{S}_1 = \begin{bmatrix} \cos(E_1)\sin(A_1) \\ \cos(E_1)\cos(A_1) \\ \sin(E_1) \end{bmatrix}, \hat{S}_2 = \begin{bmatrix} \cos(E_2)\sin(A_2) \\ \cos(E_2)\cos(A_2) \\ \sin(E_2) \end{bmatrix} \quad (1)$$

where,

E_1, E_2 : elevation angles of satellite 1 and 2,

A_1, A_2 : azimuth angles of satellite 1 and 2.

두 위성이 이루는 수렴각 δ 은 두 벡터의 내적으로 구할 수 있다(Eq. (2)).

$$\cos(\delta) = \frac{S_1 \cdot S_2}{|S_1||S_2|} = \hat{S}_1 \cdot \hat{S}_2 \quad (2)$$

Eq. (2)를 정리하면, 다음 Eq. (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\cos(\delta) = \sin(E_1)\sin(E_2) + \cos(E_1)\cos(E_2)\cos(A_1 - A_2) \quad (3)$$

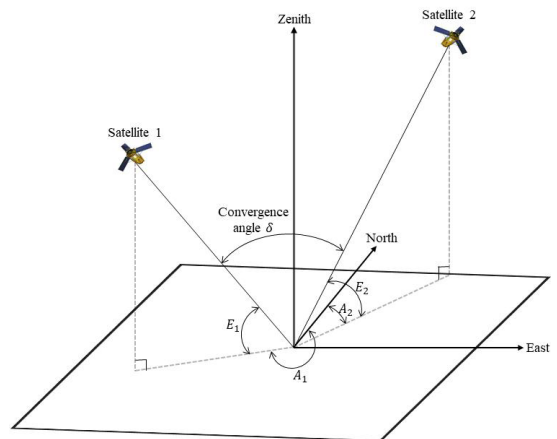


Fig. 2. Representation of relationship among azimuth, elevation, and convergence

2.2. 정밀 상호좌표등록

본 연구는 전정색 영상의 관심지역에 대한 좌표를 정밀하게

일치시키기 위하여, 초기(coarse) 상호좌표등록과 정밀(fine) 상호좌표등록 두 단계에 걸쳐서 상호좌표등록을 실시하였다. 고 해상도 위성영상의 메타데이터에서 제공하는 영상의 좌표정보를 이용하여 영상 정합을 수행하기 위한 탐색영역을 줄일 수 있으므로, 좁은 탐색영역에서 정합 신뢰도가 높은 영역기반 정합쌍 추출 기법을 활용하여 상호좌표등록을 수행하였다. 본 연구에서는 이중 센서 영상 간의 유사도를 측정하는데 적합한 대표적인 영역기반 유사도 측정 방식인 상호정보기법을 활용하였다.

상호정보기법은 다중센서 및 다시기로부터 획득된 영상의 기하보정을 위해 소개된 강도기반 유사도 측정 기법으로, 두 영상의 통계적인 상관관계를 측정하여 정합을 실시한다(Viola et al., 1997; Han, 2013). 두 영상 A, B 에 대하여 상호정보 값은 Eq. (4)로 계산되며, 측정된 값이 높을수록 두 영상 간 유사도가 큰 것을 의미한다.

$$\begin{aligned} MI(A, B) &= H(A) - H(A|B) \\ &= H(B) - H(B|A) \\ &= H(A) + H(B) - H(A, B) \end{aligned} \quad (4)$$

where,

$H(A), H(B)$: marginal entropy of image A and B,
 $H(A, B)$: joint entropy between image A and B.

여기서 $H(A)$ 와 $H(B)$ 는 각각 영상 A, B 에 대한 엔트로피(entropy)를 나타내고 $H(A, B)$ 는 영상 A 와 B 의 결합 엔트로피(joint entropy)를 나타내며, 아래 Eq. (5)로 계산될 수 있다.

$$\begin{aligned} H(A) &= -\sum_a p_A(a) \log p_A(a) \\ H(B) &= -\sum_b p_B(b) \log p_B(b) \\ H(A, B) &= -\sum_{a,b} p_{A,B}(a,b) \log p_{A,B}(a,b) \end{aligned} \quad (5)$$

where,

$p_A(a), p_B(b)$: marginal probability density function of image A and B,

$p_{A,B}(a,b)$: joint probability density function between image A and B.

$p_A(a), p_B(b)$ 와 는 각각 영상 A, B 의 확률분포를, $p_{A,B}(a,b)$ 는 A 와 B 의 결합확률밀도함수(joint probability density function)를 의미한다. 이는 Eq. (6)과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} p_{A,B}(a,b) &= h(a,b) / \sum_{a,b} h(a,b) \\ p_A(a) &= \sum_b p_{A,B}(a,b) \\ p_B(b) &= \sum_a p_{A,B}(a,b) \end{aligned} \quad (6)$$

where,

$h(a,b)$: joint histogram between image A and B.

여기서 $h(a,b)$ 는 두 영상 A, B 에 대한 결합 히스토그램(joint histogram)을 의미한다. 결합 히스토그램은 2차원으로 구성되며, 영상 A 에 대한 화소값 a 를 하나의 축으로, 영상 B 에 대한 화소값 b 를 다른 하나의 축으로 표현한다.

영역기반 정합쌍 추출 기법을 활용하기 위해서는 두 영상 간의 탐색영역을 최소화하여야 신뢰할 만한 결과를 얻을 수 있다. 이를 위해, 두 영상 좌표관계를 우선적으로 맞춰주기 위한 초기 상호좌표등록 단계에서는 메타데이터에서 제공하는 위성영상의 좌표정보를 이용하여 초기 중첩 영역을 선정한다. 선정된 중첩 영역에 대하여, 피라미드 기법을 통해 원영상의 해상도를 떨어뜨린 영상을 바탕으로 상호정보 기반의 정합쌍 추출을 수행한다. 상호정보 기반의 정합쌍을 추출하기 위해서, 기준영상을 일정한 크기를 갖는 템플릿 격자로 나누고, 이에 대응되는 동일한 크기의 템플릿을 입력영상의 좌표정보를 이용하여 추출한다. 대응되는 격자 템플릿의 중심점을 각각 정합쌍의 초기 위치로 판단하며, 입력영상의 격자 템플릿을 탐색영역 내에서 움직이면서 상호정보 값을 계산하여 가장 높은 유사도를 보이는 위치를 최종 정합쌍으로 추출한다. 추출된 정합쌍에서 변환모델식 구성 과정에서 보이는 RMSE (Root Mean Square Error)가 큰 정합쌍을 반복적으로 제거하는 오정합쌍 제거기법(Han et al., 2019)을 적용한 후, 남은 정합쌍을 이용하여 어핀변환 계수를 추정한다. 추정된 어핀변환 계수를 통해 입력영상의 전정색 영상을 기준영상의 좌표로 변환한다.

초기 상호좌표등록을 수행한 전정색 입력영상과 기준영상에 대해서, 관심영역의 좌표정보를 기준으로 정밀 상호좌표등록을 수행한다. 상호정보 기반 정합쌍 추출 및 오정합쌍 제거 과정은 위의 초기 상호좌표등록과정에서 수행한 것과 동일하게 진행된다. 최종적으로 추출된 정합쌍을 이용하여 입력영상의 좌표를 기준영상의 좌표로 변환한다.

3. 실험 데이터

본 연구에서는 KOMPSAT 3 및 3A호 영상을 이용하여 연구 지역을 선정하고 실험을 진행하였다. KOMPSAT 3·3A호

는 지구관측 용도의 광학센서를 탑재하고 있으며, RGB(Red, Green, Blue)와 NIR(Near-InfRared) 분광영역의 파장대 정보를 포함하는 4개의 다중분광 밴드와 1개의 진정색 밴드로 이루어진 영상 번들을 제공한다. KOMPSAT 3·3A호 영상의 상세한 정보는 Table 1과 같다. 본 연구에서는 KOMPSAT 3·3A호 레벨 1G 영상을 사용하였으며, 1G 영상은 센서 간 대기보정 및 SRTM DEM(Shuttle Radar Topography Mission Digital Elevation Model)을 통한 기하보정 등이 수행된 영상 제품이다 (KARI and SIIS, 2019a; KARI and SIIS, 2019b).

Table 1. The specification of KOMPSAT 3·3A

Specification	Channel	KOMPSAT 3	KOMPSAT 3A
Spectral Range (nm)	MS1	450-520	450-520
	MS2	520-600	520-600
	MS3	630-690	630-690
	MS4	760-900	760-900
	PAN	450-900	450-900
Product GSD (m)	MS	2.80	2.20
	PAN	0.70	0.55

다양한 촬영 환경을 가지는 영상에 대한 평가를 위해 11장의 KOMPSAT 3호 영상과 5장의 KOMPSAT 3A호 영상 등 총 16장의 영상이 실험에 사용되었다. 영상 자료는 모두 2013년 1월부터 2019년 2월까지 대전광역시 유성구의 연구단지를 중심으로

로 취득되었으며, 대학교, 연구소, 주거지역, 상업지역, 도로, 공원, 숲 등이 존재한다. 본 연구에서 사용된 KOMPSAT 3 및 3A호 영상자료의 촬영날짜와 센서명, 촬영각 정보는 Table 2와 같고, 수렴각을 구하기 위한 촬영각 요소인 고도각과 방위각을 시각적으로 표현하면 Fig. 3과 같다.

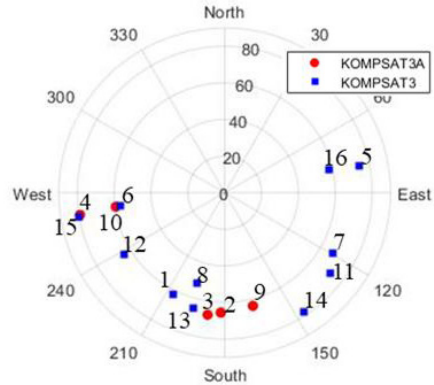


Fig. 3. Satellite elevation (plotted radially from the center: ground nadir = 90, ground horizon = 0) and azimuth (plotted angularly clockwise: north = 0, east = 90, south = 180, west = 270) angles used in the experiment

4. 실험 결과 및 분석

대전지역에 대해 2013년 1월부터 2019년 2월까지 획득된 16

Table 2. Collection dates, sensors, and acquisition angles of KOMPSAT-3·3A dataset

No.	Collection Date	Sensor Type	Off-nadir Angle (°)	Elevation Angle (°)	Azimuth Angle (°)
1	2019-02-26	KOMPSAT-3	24.846	62.206	206.615
2	2019-01-20	KOMPSAT-3A	22.431	65.580	181.835
3	2019-01-02	KOMPSAT-3A	20.812	67.333	187.908
4	2018-07-07	KOMPSAT-3A	9.761	79.422	261.197
5	2017-02-24	KOMPSAT-3	13.840	74.628	78.750
6	2016-04-11	KOMPSAT-3	29.457	56.933	262.550
7	2016-02-07	KOMPSAT-3	20.165	67.547	119.333
8	2015-12-29	KOMPSAT-3	33.688	51.998	196.846
9	2015-10-28	KOMPSAT-3A	24.080	63.733	166.107
10	2015-10-18	KOMPSAT-3A	27.839	59.585	262.558
11	2015-03-25	KOMPSAT-3	16.118	72.094	127.541
12	2014-10-23	KOMPSAT-3	22.955	64.394	238.065
13	2014-09-07	KOMPSAT-3	22.058	65.368	195.096
14	2014-03-03	KOMPSAT-3	10.896	77.901	146.352
15	2013-11-16	KOMPSAT-3	9.076	79.934	260.585
16	2013-01-02	KOMPSAT-3	28.528	58.077	77.303

장의 KOMPSAT-3 및 3A IG 영상에서 서로 다른 2장의 영상을 선택할 수 있는 모든 조합을 고려하여, 결과적으로 총 120개의 영상 조합에 대한 상호좌표등록 실험을 수행하였다. 120개 영상 조합의 수렴각 범위는 최소 0.524°에서 최대 64.91°의 분포를 보였고, 10°에서 30° 사이에 87개 조합이 분포하여 가장 집중되어 나타났다. 모든 영상 조합에 대해서 상호좌표등록과정을 거친 후, 상호좌표등록 결과와 수렴각의 관계에 대하여 분석을 진행하였다.

정밀 상호좌표등록을 수행하기 위한 관심지역으로는 한국항공우주연구원 일대로 선정하였다. 다중분광 영상 중에서, 유사도를 추정하는 데 있어서 Red 밴드 영상을 활용하는 것이 다른 밴드 영상을 이용하는 것보다 상대적으로 안정적인 결과를 도출한다고 규명된 바 있다(Han and Oh, 2018). 따라서 이미지 피라미드 기법을 이용하여 원 다중분광 영상의 4배 축소된 Red 밴드 영상을 이용하여 초기 상호좌표등록을 수행하였다. 상호정보 기법으로 정합쌍을 추출하기 위한 템플릿의 크기와 간격을 초기 상호좌표등록의 경우 500×500 화소, 250×250 화소로 선정하였다. 정밀 상호좌표등록의 경우 초기 상호좌표등록을 수행한 전정색 영상을 활용하였으며, 상호정보 기법 적용을 위한 템플릿 크기와 간격을 각각 250×250 화소, 50×50 화소로 선정하여 실험을 진행하였다. 정확도 평가를 위해서, 최종적으로 추출된 정합쌍에 대하여 임의로 추출한 50% 정합쌍으로 어핀변환모델식을 구성하였고, 나머지 50%를 이용하여 RMSE를 계산하였다.

선정된 두 영상에 대해서 상호좌표등록 후 계산된 총 120가지의 영상 조합에 대한 초기 상호좌표등록 오차(RMSE)는 0.82 화소에서 6.23 화소까지 나타났고 평균 RMSE 값은 2.79 화소를 보였다. 정밀 상호좌표등록 오차는 0.50 화소에서 3.38 화소까지 나타났고 평균 RMSE 값은 2.27 화소를 보였다.

정밀 상호좌표등록 후 RMSE 값과 두 영상 간의 수렴각 크기를 분석하여 Fig. 4로 나타내었다. 120가지 조합에 대한 상관관계수가 0.59를 보임을 통해 수렴각의 크기와 상호좌표등록 정확도는 양의 상관관계가 있음을 확인할 수 있다. 이는 영상 간 상호좌표등록을 수행할 때 신뢰할만한 정확도를 얻기 위해서는 두 영상 간의 수렴각의 크기가 작아야 한다는 것을 의미한다. 수렴각의 크기를 10° 단위로 나뉘서, 각 범위에 대한 최소, 최대, 평균 정밀 상호좌표등록 RMSE를 계산하여 Table 3에 정리하였다. 수렴각의 크기가 큰 경우에 대한 영상 조합의 수가 적어서 일반화하기 어렵지만, 전반적으로 수렴각의 크기가 커질수록 RMSE 값도 커지는 경향을 보임을 알 수 있다. 특히, RMSE 값이 평균 2 화소 이하의 정밀 상호좌표등록 결과를 얻기 위해서는 수렴각의 차는 20° 이하이어야 한다는 것을 실

험을 통해 확인하였다.

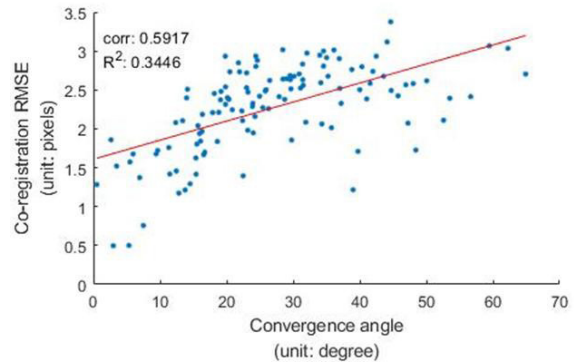


Fig. 4. Relationship between convergence angles and co-registration performance

Table 3. Convergence angles and co-registration errors (RMSE)

Convergence Angle (°)	Co-registration RMSE (pixel)		
	Minimum	Maximum	Average
0 ~ 10	0.50	1.86	1.31
10 ~ 20	1.17	2.93	1.96
20 ~ 30	1.40	3.02	2.44
30 ~ 40	1.22	3.01	2.54
40 ~ 50	1.73	3.38	2.60
50 ~ 60	2.11	3.07	2.52
60 ~ 70	2.70	3.03	2.87

수렴각에 따른 상호좌표등록 결과의 시각적 분석을 위해, 수렴각의 크기가 큰 조합(Fig. 5 (a))과 작은 조합(Fig. 5 (b))에 대한 정밀 상호좌표등록 결과를 모자이크 영상으로 생성하여 Fig. 5에 나타내었다. 모자이크 영상은 기준영상과 상호좌표등록된 대상영상을 반복적인 사각형 형태로 교차하여 표현함으로써 사각형의 경계지역에 대한 시각적 분석을 통해 상호좌표등록에 대한 평가가 가능하다. Fig. 5 (a)는 2013년 1월 2일에 촬영된 KOMPSAT-3 영상과 2016년 4월 11일에 촬영된 KOMPSAT-3 영상을 각각 기준영상, 대상영상으로 선정하였으며 두 영상의 수렴각은 약 64.913°이다. Fig. 5 (b)는 2019년 1월 2일과 2019년 1월 20일에 촬영된 KOMPSAT-3A 영상을 각각 기준영상, 대상영상으로 선정하였을 때의 정밀 상호좌표등록 결과이며, 두 영상의 수렴각은 2.991°이다. 수렴각의 크기가 작은 경우, 두 영상에 존재하는 건물의 기복변위의 방향이 유사한 것을 확인할 수 있고, 반대로 수렴각의 크기가 큰 경우에는 기복변위의 방향이 다른 것을 알 수 있다. 기복변위의 방향이 다른 지역에서 추출

된 정합쌍, 예를 들어 Fig. 5(a)의 건물 상단부에서 참정합쌍이 제대로 추출이 되었다 하더라도, 이를 변환모델식을 구성하는데 사용할 경우 정합쌍 주변 지역에서 기하오차가 발생할 수 있다. 반면 Fig. 5(b)와 같이 유사한 기복변위 방향을 보이는 경우 이러한 참정합쌍의 위치는 지표면에서 추출되는 정합쌍의 위치와 유사하게 정의되므로 변환모델식을 구성하는데 활용되어도 좋은 변환 결과를 얻을 수 있다.

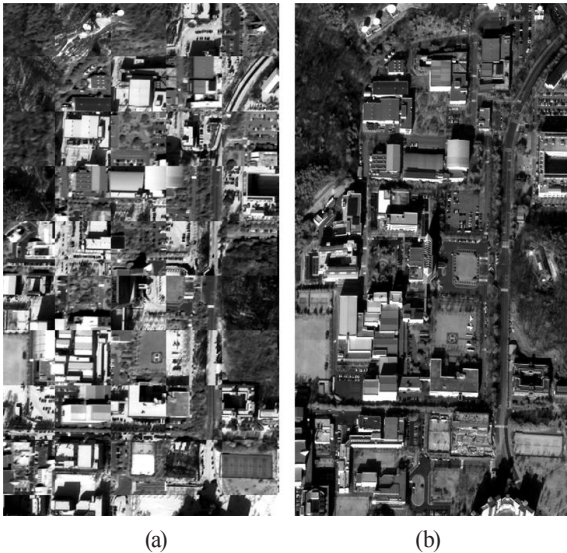


Fig. 5. Examples of co-registration results according to convergence angles; (a) reference image: 2013-01-02, sensed image: 2016-04-11, convergence angle: 64.913°, (b) reference image: 2019-01-20, sensed image: 2019-01-02, convergence angle: 2.991°

5. 결론

본 연구는 KOMPSAT-3 및 3A호 영상 간 정밀 상호좌표등록 정확도와 영상 취득 당시의 영상 간 보이는 수렴각과의 관계를 분석하였다. 이를 위해, 두 단계에 걸친 상호정보기반 정합기법을 적용하였으며, 대전지역에서 촬영된 총 16장의 위성영상을 조합하여 실험을 진행하였다. 제안 기법을 통해 약 2.27 화소의 RMSE를 얻을 수 있었다.

수렴각의 크기에 따른 결과 분석을 통해서, 영상 간의 수렴각의 크기가 크면 클수록 상호좌표등록 정확도는 떨어지는 것을 확인하였고 이에 대한 상관계수는 0.59를 보였다. 이는 스테레오 영상을 이용하여 3차원 정보를 추출하기 위한 수렴각 조건과는 상반되는 결과이다. 특히, 정밀 상호좌표등록 결과에 대

하여 평균 2화소 이하의 RMSE를 도출하기 위해서는 영상 간 보이는 수렴각의 크기가 20°이하여야 한다는 것을 실험을 통해 확인하였다. 제안 연구 결과의 일반화를 위해서는 다양한 대상 지역에 대한 추가 실험이 필요하다. 이는 향후 연구를 통해서 진행할 계획이며, 수렴각 조건뿐만 아니라 고해상도 영상의 상호좌표등록에 영향을 줄 수 있는 센서 차이, 계절 차이 등에 따른 분석 또한 수행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 한국항공우주연구원의 위성정보활용사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- Chen, H.M., Arora, M.K., and Varshney, P.K. (2003), Mutual information-based image registration for remote sensing data, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 24, No. 18, pp. 3701-3706.
- Han, Y.K. (2013), *Automatic Image-to-image Registration between High-resolution Multisensor Satellite Data in Urban Areas*, Ph.D. dissertation, Seoul National University, Seoul, Korea, 146p
- Han, Y.K., Kim, T.H., and Yeom, J.H. (2019), Improved piecewise linear transformation for precise warping of very-high-resolution remote sensing images, *Remote Sensing*, Vol. 11, No. 19, pp. 2235.
- Han, Y.K. and Oh, J.H. (2018), RNCC-based fine co-registration of multi-temporal RapidEye satellite imagery, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 36, No. 6, pp. 581-588. (in Korean with English abstract)
- Jeong, J.H. (2016), Analysis of correlation between geometry elements for the efficient use of satellite stereo images, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 34, No. 5, pp. 471-478. (in Korean with English abstract)
- Jeong, J., Yang, C., and Kim, T. (2015), Geo-positioning accuracy using multiple-satellite images: IKONOS, QuickBird, and KOMPSAT-2 stereo images, *Remote Sensing*, Vol. 7, No. 4, pp. 4549-4564.

- KARI and SIIS, (2019a), KOMPSAT-3 Product Specifications: Image Data Manual, *SI Imaging Services*, <http://si-imaging.com/resources/?uid=336&mod=document> (last date accessed: 18 November 2019).
- KARI and SIIS, (2019b), KOMPSAT-3A Product Specifications: Image Data Manual, *SI Imaging Services*, <http://si-imaging.com/resources/?uid=337&mod=document> (last date accessed: 18 November 2019).
- Li, R., Niu, X., Liu, C., Wu, B., and Deshpande, S. (2009), Impact of imaging geometry on 3D geopositioning accuracy of stereo IKONOS imagery, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 75, No. 9, pp. 1119-1125.
- Li, R., Zhou, F., Nui, X., and Di, K. (2007), Integration of Ikonos and QuickBird imagery for geopositioning accuracy analysis, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 73, No. 9, pp. 1067-1074.
- Ma, J., Zhou, H., Zhao, J., Gao, Y., Jiang, J., and Tian, J. (2015), Robust feature matching for remote sensing image registration via locally linear transforming, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 53, No. 12, pp. 6469-6481.
- Oh, K.Y., Jeong, E.C., Lee, K.J., Kim, Y.S., and Lee, W.J. (2018), Comparison and analysis of matching DEM using KOMPSAT-3 in/cross-track stereo pair, *Korean Journal of Remote Sensing*, Vol. 34, No. 6-3, pp. 1445-1456. (in Korean with English abstract).
- Viola, P. and Wells III, W.M. (1997), Alignment by maximization of mutual information, *International journal of computer vision*, Vol. 24, No. 2, pp. 137-154.
- Zitová, B. and Flusser, J. (2003), Image registration methods: a survey, *Image and Vision Computing*, Vol. 21, No. 11, pp. 977-1000.