

고해상도 광학영상과 SAR 영상 간 자동 변위량 추정

Automatic Estimation of Geometric Translations Between High-resolution Optical and SAR Images

한유경* · 변영기** · 김용일***

Han, You Kyung · Byun, Young Gi · Kim, Yong Il

要 旨

고해상도 위성영상을 공간정보 분야에 효과적으로 활용하기 위해서는 다중센서와 다시기 영상 데이터를 공간분석에 함께 사용하여 이들 데이터의 장점을 최대한 활용하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 고해상도의 다중센서자료를 동시에 활용하기 위해, 영상 간 존재하는 변위량을 자동으로 추정하여 다중센서 영상 간 기하보정을 수행하는 새로운 영상정합기법을 개발하였다. 영상의 취득 방식과 방사적 특성이 다른 광학영상과 SAR 영상 간의 유사도를 효과적으로 계산하기 위하여 기하적, 방사적 전처리 과정을 수행하였고, 두 영상 간 변위량 측정은 상호정보기법을 통해 계산하였다. 또한, 변위량 측정방식의 계산 효율과 정확도 향상을 위하여 영상 피라미드 방식을 적용하여 상위 피라미드 영상부터 차례로 x, y 방향에 대한 변위량을 최적화기법을 통해 추정하였다. 이러한 과정을 피라미드의 최하부인 원영상에까지 반복적으로 수행함으로써 두 영상 간 정밀한 변위량을 추정하였으며, 수동으로 추출된 검사점을 통해 제안기법에 대한 정확도 평가를 수행한 결과, 영상간 변위량에 대한 고려만으로도 약 5m 이내 (RMSE)의 기하보정 정확도를 도출할 수 있었다.

핵심어 : 영상 간 자동 기하보정, 고해상도 다중센서자료, 상호정보기법, 최적화기법

Abstract

Using multi-sensor or multi-temporal high resolution satellite images together is essential for efficient applications in remote sensing area. The purpose of this paper is to estimate geometric difference of translations between high-resolution optical and SAR images automatically. The geometric and radiometric pre-processing steps were fulfilled to calculate the similarity between optical and SAR images by using Mutual Information method. The coarsest-level pyramid images of each sensor constructed by gaussian pyramid method were generated to estimate the initial translation difference of the x, y directions for calculation efficiency. The precise geometric difference of translations was able to be estimated by applying this method from coarsest-level pyramid image to original image in order. Yet even when considered only translation between optical and SAR images, the proposed method showed RMSE lower than 5m in all study sites.

Keywords : Image-to-image registration, High-resolution multi-sensor images, Mutual Information, Optimization method

1. 서 론

최근에 IKONOS-2, QuickBird-2, KOMPSAT-2, WorldView-1, TerraSAR-X 등 고해상도 위성영상의 상업적 이용이 가능해짐에 따라, 이러한 고해상도 다중센서(multi-sensor)영상의 통합 분석 및 활용에 대한 관심이 증가하고 있다. 다중센서자료를 분석에 함께 이용

할 경우 단일한 센서데이터만으로는 취득하기 어려운 여러 유용한 공간 및 속성정보들을 종합적으로 취득하고 분석할 수 있다. 이로 인해 다중센서자료 분석은 영상의 품질향상(영상융합), 도심지 모니터링 및 3D 모델링, 건물 및 도로의 형상정보 구축·갱신, 멀티센서 모델링, 수치표고모델 구축 및 정확도 개선 등 다양한 공간정보 분야에서 유용하게 활용될 수 있다.

2012년 6월 25일 접수, 2012년 8월 17일 채택

* 정희원 · 서울대학교 건설환경공학부 박사과정(han602@snu.ac.kr)

** 교신저자 · 한국항공우주연구원 위성정보 연구센터 선임연구원(ygbyun@kari.re.kr)

*** 정희원 · 서울대학교 건설환경공학부 교수(yik@snu.ac.kr)

이렇듯, 고해상도 위성영상을 공간정보 분야에 효과적으로 활용하기 위해서는 다중센서와 다시기 영상을 함께 사용하여 이들 데이터의 장점을 극대화하고 한계를 극복하는 것이 중요하다. 이를 위해서는 다중센서 영상 간의 성공적인 기하보정(image-to-image registration)이 선행되어야 한다. 영상 간 기하보정은 두 개나 그 이상의 같은 지역에 대한 다른 시기, 다른 관점, 다른 센서에 의해서 추출된 영상을 중첩하는 과정을 말한다(Zitová 등, 2003). 최근 대다수의 위성들은 정보보정(ortho-rectified)된 데이터를 제공하고 있으나, 보정에 사용된 DEM의 특성이나 정확도 등에 따라서 여전히 지형학적 위치 오차를 포함하고 있다. 따라서, 이러한 지형적 위치 차이를 보정하는 영상 간 기하보정기술은 다중센서 영상 분석에 앞서 반드시 선행되어야 하는 중요한 연구 주제 중의 하나이다.

일반적으로 능동형(active) 센서인 SAR(Synthetic Aperture Radar) 영상의 경우, 기상조건에 영향을 받지 않고 야간에도 촬영이 가능하여 고해상도 광학영상만으로는 취득이 불가능한 정보를 얻을 수 있는 장점이 있다. 하지만 SAR 영상은 마이크로파와 관측대상과의 복잡한 상호작용으로 인해 영상에 상당히 많은 스펙클 잡음(speckle noise)이 포함되어 있을 뿐만 아니라, 측면관측(side-looking) 데이터 취득 방식에 따른 동일지역의 광학영상과 큰 지형적 위치차이를 보이므로, 이러한 다중센서 영상을 동시에 이용하기에는 많은 어려움이 따른다.

영상 간 기하보정은 매칭쌍(tie points)을 추출하여 이들 간의 변환식을 구성하는 개체기반(feature-based) 기법을 통해 수행하는 것이 일반적이다(Han et al., 2012). 하지만 SAR 영상의 경우 광학영상과는 다른 지형적, 방사적 특성을 가지고 있기 때문에 특징점을 추출하기 어려울 뿐만 아니라, 이들의 특성이 광학영상의 특성과 다르기 때문에 자동으로 매칭쌍을 추출하기에는 한계가 있다(Chen et al., 2003). 뿐만 아니라, 이러한 두 데이터 특성차이는 영상에서 시각적 판단에 의해 수동으로 매칭쌍을 추출하는 경우에도 어려움을 준다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 대부분의 광학영상과 SAR 영상 간 정합(matching)을 수행하는 연구에서는 다중 센서나 다중 시기로부터 획득된 영상 간 유사도를 측정하는데 강점을 보인다고 알려진 강도기반(intensity-based) 기법을 주로 이용하였다.

대표적인 강도 기반 기법 중 하나인 상호정보(Mutual Information)기법은 의학 분야에서 처음 소개된 영상 간 유사도 측정 기법으로, 특성이 다른 영상 간의 유사도를 측정하는데 강점을 보인다(Viola 등,

1997; 변영기 등, 2007). 원격 탐사 분야에서도 상호정보기법을 활용하여 광학영상과 SAR 영상 간 기하보정을 수행하기 위한 다양한 연구가 진행되었다. Chen 등(2003)은 상호정보기법을 이용하여 방사적 특성이 다른 두 영상 간의 x, y 방향에 대한 변위량(translation)과 회전량(rotation) 차이를 구하였으나, 상대적으로 기복변위의 영향이 적은 중·저해상도 영상에만 적용이 가능한 한계를 갖는다. 그 외에도, 계산 비용이 큰 상호정보기법에 대하여 임계치를 적용함으로써 효율적으로 계산 복잡도를 줄이는 연구를 수행하거나(Suri et al., 2010) 매칭쌍 추출을 통한 센서모델의 정확도를 개선하여 결과적으로 약 5m 내외의 기하보정 정확도를 얻을 수 있었다(Reinartz et al., 2011).

강도 기반 기법을 이용한 연구 외에도, 두 영상의 초기 위치가 어느 정도 일치한다는 가정 하에 선이나 면 개체 기반의 특징점을 추출하여 이들 간의 매칭을 통한 두 영상 간 기하보정을 실시하기 위한 많은 연구들이 수행되었다. 영상에서 패치(patch)를 추출하여 이의 면적이나 둘레, 가로/세로 길이 비 등의 형상정보(shape information)를 이용하여 패치 간의 유사도를 측정하거나(Dare et al., 2001) 선형개체를 이용하여 매칭쌍을 추출하는 연구가 수행되었다(Hong et al., 2005; 한유경 등, 2011). 하지만 이러한 개체 기반의 방법들은 두 영상 간 초기 위치 차이를 최소화하는 사전 기하보정(pre-registration) 단계가 포함되는 만큼, 완전히 자동화된 기법이라고 할 수 없다.

본 연구에서는 대표적인 고해상도 위성영상인 Quick Bird-2 영상과 IKONOS-2 영상을 기준으로 Terra SAR-X 영상에 대한 자동 변위량 추정과정을 통한 영상 간 기하보정을 수행하는데 연구의 목적이 있다. 영상의 취득 방식과 방사적 특성이 다른 광학영상과 TerraSAR-X 영상 간의 유사도를 효과적으로 계산하기 위한 전처리 과정을 수행한 후, 두 영상 간의 변위량 차이를 상호정보기법을 통해 추정한다. 두 영상 모두에 대하여 영상피라미드(image pyramids) 방식을 적용하여, 상위 피라미드 영상부터 차례로 x, y 방향에 대한 변위량을 최적화기법을 통해 추정하였다. 이러한 과정을 피라미드의 최하부인 원영상에까지 반복적으로 수행함으로써 두 영상 간 정밀한 변위량을 추정하고자 하였다.

2. 연구 방법

본 연구에서 제안한 고해상도 위성영상과 Terra SAR-X 영상 간 자동 변위량 추정 과정을 통한 영상

간 기하보정 기법은 크게 두 단계의 처리과정으로 구성된다. 우선, 영상의 취득 방식과 방사적 특성이 다른 광학영상과 SAR 영상 간의 유사도를 효과적으로 계산하기 위한 전처리 과정이 필요하다. 측면관측방식에 의해 취득된 SAR 영상의 경우 range 방향과 azimuth 방향에 대한 공간해상도가 달라 이를 일치시켜주는 과정이 필요하다. 이를 위해, 광학영상의 범위에 해당하는 좌표를 헤더정보(header information)를 통해 취득하여 이에 해당하는 SAR 영상의 범위를 선택한 후, x, y 방향으로 광학영상과 동일한 화소 크기를 갖도록 재배열(resampling)하는 과정을 거친다. 두 영상 간 방사적 특성의 차이는 히스토그램 조정을 통해 최소화한다. 전처리 과정이 완료된 두 영상 간의 변위량 차이를 상호정보기법을 통해 추정한다. 두 영상 모두에 대하여 피라미드 영상을 생성하여, 최적화기법을 통해 x, y 방향에 대한 변위량을 계산한다. 두 영상 간 초기 위치차이가 크기 때문에 피라미드의 최상부 영상에서는 전역적 최적값(global extrema)을 도출하는데 유용한 담금질 모사(simulated annealing) 기법을 이용하였고, 이를 통해 추출된 x, y 방향에 대한 변위량을 다음 피라미드 영상의 초기 위치로 설정하였다. 그 이후의 피라미드 영상에서는 심플렉스(simplex) 기법을 이용하여 같은 방식으로 최적의 변위량을 계산하였다. 이러한 과정을 피라미드의 최하부인 원영상에까지 반복적으로 수행하여 두 영상 간 정밀한 변위량을 추정하고자 하였다.

2.1 전처리과정

고해상도 광학영상과 SAR 영상 모두 취득당시의 센서의 자세나 위치, 기하학적 영상 처리 수준 등에 따라서 최종적으로 보이는 위치정확도가 다르다. 예를 들어, 고해상도 광학영상인 IKONOS-2의 standard GEO product로 처리된 평평한 지역에 대한 영상의 경우 약 50m 정도의 위치오차를 보인다고 알려져 있고, 지형기복이 심한 지역의 경우에는 이보다 큰 위치오차를 야기한다(GeoEye, 2006). 측면관측방식에 의해 취득되는 SAR 영상의 경우, DEM(Digital Elevation Model)이나 GCP(Ground Control Point)를 이용하여 좌표체계를 일치시켰다 하더라도, 사용된 DEM의 공간해상도나 GCP의 정확도에 따라서 작게는 수 m에서 크게는 수백 m에 이르는 위치오차를 보일 수 있다(DLR, 2008). 대표적인 고해상도 SAR 영상인 TerraSAR-X의 GEC(Geocoded Ellipsoid Corrected) 영상의 경우, 촬영시기의 위성의 위치나 해당 지역의 지형고도, 기복 등에 따라서 azimuth와 range 방향의 해상도가 달라진다. 이를 고해상도 광학영상이 갖는 좌표체계와 일치시켜주

기 위해서, 본 연구에서는 광학영상의 연구지역에 해당하는 UTM 좌표를 이용하여 이에 해당하는 지역의 TerraSAR-X의 GEC 영상을 취득한 후, 고해상도 광학영상의 x, y 방향 각각에 대한 화소 크기와 일정하게 만드는 재배열하는 전처리 과정을 수행하였다.

고해상도 광학영상과 SAR 영상은 취득방식의 차이에 따른 지형이나 위치의 차이뿐만 아니라, 취급하는 파장대의 차이로 인해 방사적인 특성 또한 다르게 나타난다. 즉, 같은 지역에서 측정된 반사값이라 하더라도 그들의 분광적인 특성이 다름을 의미하며, 이는 영상 간 유사도를 측정하는데 많은 문제를 야기한다. 특히 도심지역의 건물과 같은 인공지물에서는 이중산란(double scattering)에 의해 다른지역에 비해서 SAR 영상의 반사값이 높게 나타난다. 이는 건물 지역에 대한 분광정보가 다른 지역에 비해 집중되어 있음을 뜻하며, 영상 전역에 대한 유사도를 측정하는데 불필요한 정보가 될 뿐만 아니라, 건물 지역과 같이 높이변화가 큰 지역은 광학영상과 SAR 영상 모두에서 큰 기복변위를 발생하므로, 두 영상의 유사도를 측정하는데 있어 이들 지역에 대한 영향력을 줄여야 한다. 반면, 상대적으로 지형이 평평하거나 거칠기가 작아서 SAR 영상의 반사값이 작은 지역에 대해서는 많은 분광정보를 포함하지 않기 때문에 이러한 지역에 대한 유사도를 측정하는데 어려움이 따른다. 뿐만 아니라, IKONOS-2나 Quick Bird-2와 같은 고해상도 광학영상은 11bits의 방사해상도(radiometric resolution)를, TerraSAR-X의 GEC 영상은 16bits의 방사해상도를 갖기 때문에, 이를 통일시켜주는 과정이 필요하다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 본 연구에서는 일정 화소값 이상의 높은 반사값을 갖는 화소에 대해서는 건물지역이라고 판단하여, 아래와 같이 화소값을 강제적으로 할당하는 방식으로 16bits의 TerraSAR-X 영상을 8bits 영상으로 변환하였다.

$$DN = \begin{cases} DN_{original} & (\text{if } DN_{original} \leq 255) \\ 255 & (\text{if } DN_{original} > 255) \end{cases} \quad (1)$$

여기서, $DN_{original}$ 은 TerraSAR-X 원영상에서의 화소값을 말한다. 이를 통해, 측면관측에 의해 다양한 크기의 높은 반사값을 갖는 건물지역에 대해서 유사한(혹은 같은) 값을 할당할 수 있을 뿐만 아니라, 상대적으로 낮은 밝기값을 갖는 평평한 지역에 대한 밝기값의 변화량을 상대적으로 크게 고려하는 효과를 줌으로써 영상 전역에 대해서 광학영상과 유사도를 측정하는데 도움을 주고자 하였다. 11bits의 방사해상도를 갖는 고해상

도의 광학영상 또한 높은 화소와 낮은 화소에 대하여 노이즈를 포함할 가능성이 높다. 이에 대한 영향을 최소화하기 위해 광학영상에 대해서 2% 선형 스트레칭(linear stretching)을 수행한 후 8bits 영상으로 변환하였다.

2.2 상호정보기법을 통한 영상 간 변위량 추정

2.2.1 상호정보기법

방사적 특성이 다른 두 영상의 x, y 방향에 대한 변위량을 추정하기 위해서, 본 연구에서는 대표적인 강도 기반 유사도 측정 기법 중 하나인 상호정보기법을 이용하였다. 상호정보기법은 다중 센서 및 다중 시기로부터 획득된 영상의 기하보정을 위해 소개된 강도 기반 유사도 측정 기법으로, 두 영상의 통계적인 상관관계를 측정하여 정합을 실시한다(Viola 등, 1997). 두 영상 A, B에 대하여 상호정보 값은 다음과 같은 식으로 계산되며, 측정된 값이 높을수록 두 영상 간 유사도가 큰 것을 의미한다.

$$\begin{aligned} MI(A, B) &= H(B) - H(B|A) \\ &= H(A) + H(B) - H(A, B) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $H(A)$ 와 $H(B)$ 는 각각 영상 A, B에 대한 엔트로피(entropy)를 나타내고 $H(A, B)$ 는 영상 A와 B의 결합 엔트로피(joint entropy)를 나타내며, 이는 아래 식으로 계산될 수 있다.

$$\begin{aligned} H(A) &= -\sum_a p_A(a) \log p_A(a) \\ H(B) &= -\sum_b p_B(b) \log p_B(b) \\ H(A, B) &= -\sum_{a,b} p_{A,B}(a,b) \log p_{A,B}(a,b) \end{aligned} \quad (3)$$

$p_A(a)$ 와 $p_B(b)$ 는 각각 영상 A, B의 확률분포를, $p_{A,B}(a,b)$ 는 A와 B의 결합확률밀도함수(joint probability density function)를 의미한다. 결합확률밀도함수는 아래와 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} p_{A,B}(a,b) &= h(a,b) / \sum_{a,b} h(a,b) \\ p_A(a) &= \sum_b p_{A,B}(a,b) \\ p_B(b) &= \sum_a p_{A,B}(a,b) \end{aligned} \quad (4)$$

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

상호정보기법기반의 기하보정은 결합 히스토그램을 얼마나 효율적으로 구성하느냐에 따라서 기하보정의 변수를 최적화하는데 영향을 끼칠 수 있다. 기하보정 변수를 최적화하기 위해서는 대상영상(sensed image)이 수차례에 걸쳐서 기준영상(reference image)의 좌표 체계에 맞게 재배열되어야 한다. 이러한 재배열 과정에 있어서 두 영상이 정확하게 일치하지 않는 경우 정확한 결합히스토그램을 추정하는데 어려움을 보일 수 있다. 따라서, 두 영상이 가지고 있는 스케일 및 방사적 차이를 최소화하는 전처리과정은 필수적으로 적용되어야 한다.

2.2.2 최적화기법을 통한 피라미드 단계별 변위량 추정

기준영상과 대상영상 간의 화소단위의 변위량을 추정하기 위해서, 본 연구에서는 영상피라미드 방식과 상호정보기법을 통합한 형태의 방법론을 제안하였다. 원영상에 대해서 상호정보 값을 계산한 경우 많은 계산시간이 소요될 뿐만 아니라 탐색범위의 한계로 인해 지역적 최적값(local extrema)을 도출할 우려가 있다. 따라서 영상을 단계적으로 축소시키는 영상피라미드 방식을 통해 생성된 피라미드의 상부영상에 대하여, 상호정보 값을 목적함수로 하는 최적화기법을 통해 초기 변위량을 추정하였고, 이 변위량을 두 번째 피라미드 영상에 대한 초기값으로 설정하여 같은 방식으로 변위량을 계산하였다. 상호정보 값을 목적함수로 설정하여 최적화기법을 적용하는 방식을 피라미드 단계 별로 적용하는 방식을 통해, 계산 비용을 줄임과 동시에 넓은 지역의 탐색 범위를 통해서 초기 두 영상의 위치 차이가 많이 나더라도 전역적 최적값을 찾을 수 있는 장점이 있다.

제안한 기법의 경우, 같은 위치좌표에 대한 대상지역이라 하더라도 영상이 취득되는 방식이나 기하보정의 처리 정도에 따라서 초기 위치차이가 클 수 있기 때문에, 최상부의 피라미드 영상에서 초기 변위 차이를 얼마나 제대로 찾아내느냐가 가장 중요한 문제가 된다. 따라서, 전역적 최적값을 찾는데 적합하다고 알려진 담금질 모사 기법을 이용하여 피라미드 최상부에 대한 두 영상 간 변위량의 최적값을 추정하였다(Gonzalo et al., 2008). 이렇게 추정된 변위량을 두 번째 피라미드에 대한 초기값으로 설정한 후에, 담금질 모사 기법에 비해 계산효율성 측면에서 우수할 뿐만 아니라 탐색범위 설

정과정의 불필요한 심플렉스 최적화기법을 적용하여 보다 정밀한 두 영상 간 x, y 방향에 대한 변위량을 추정하였다(Lagarias et al., 1998; Nelder et al., 1965). 이후의 피라미드 영상에서는 같은 방법을 반복적으로 적용함으로써 피라미드 하부로 갈수록 보다 정밀한 변위 차이가 추정가능하며, 최종적으로 원영상에 대한 변위량을 추정한 결과가 두 영상 간 최종 변위량이 된다. Figure 1은 n 차의 피라미드 영상에 대하여 목적함수 $f = -MI(A, B)$ 를 최적화기법을 이용하여 최소화하는 과정을 통해 최종 변위량 x_f, y_f 을 추정하는 과정을 보여준다. 가장 상부의 피라미드 영상을 A_n, B_n , 이때의 목적함수를 계산하기 위한 초기값 X_0 을 x_0, y_0 이라고 하고, 피라미드의 하부로 순차적으로 진행하며, 최종적으로 원영상 A, B에 대한 변위량 x_f, y_f 을 추정함으로써 알고리즘이 종료된다.

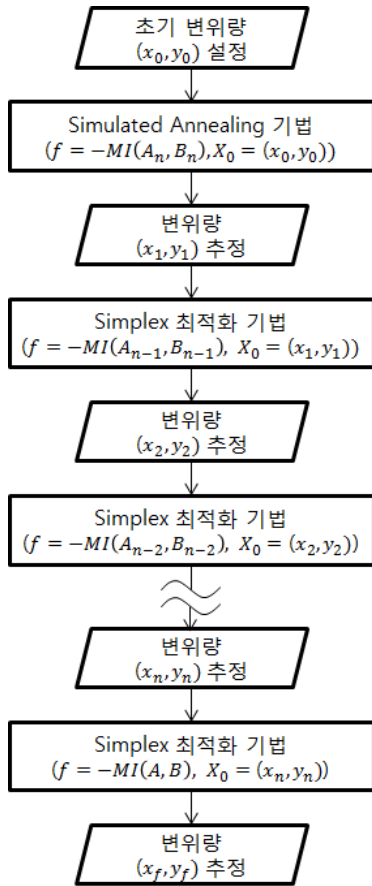


Figure 1. Estimation process of geometric translations by optimization method

3. 실험 결과 및 분석

3.1 사용 데이터

본 연구에서 사용한 데이터는 대전 지역으로, 1m의 공간해상도를 가지는 IKONOS-2 흑백 영상과 0.6m의 공간해상도를 가지는 QuickBird-2 흑백 영상에 대하여 TerraSAR-X 영상과의 정합을 수행하고자 하였다. TerraSAR-X 영상의 경우 동일한 높이값을 가정한 DEM을 이용하여 UTM 좌표로 투영시킨 GEC 영상으로, 2008년 7월 11일 촬영되었으며, 대상지역에서는 평균 28.01°의 입사각(incident angle)을 보인다. TerraSAR-X 영상은 Range 방향으로 2.62m, azimuth 방향으로 2.21m의 공간해상도를 가지며 1m의 화소간격으로 표현된다. IKONOS-2 영상은 2007년 5월 10일 촬영되었으며, TerraSAR-X 영상과 비슷한 29.68°의 off-nadir angle을 갖는다. QuickBird-2 영상은 2006년 10월 28일 촬영되었으며, 13.5°의 평균 off-nadir angle을 보인다. 각 영상에 대한 특성은 Table 1과 같다.

실험 대상지역은 총 두 지역을 선정하였다. 첫 번째 지역은 기준영상과 대상영상을 각각 IKONOS-2와 TerraSAR-X 영상으로 구성하였고, 상대적으로 높낮이가 일정한 경작지를 포함한 식생지역과 도로, 건물이 혼재된 대상지역이다. 두 번째 대상지역은 QuickBird-2 영상과 TerraSAR-X 영상으로 구성하였으며, 식생, 수계, 도로, 건물 등이 포함된 대상지역이다. 각각 1m와 0.6m의 공간해상도를 갖는 IKONOS-2와 QuickBird-2 영상에 제안 기법을 적용해봄으로써 공간해상도의 차이가 다중센서 영상 간 기하보정에 미치는 영향을 판단해보고자 하였다.

앞서 언급하였다시피 광학영상과 SAR 영상 간의 촬영 방식 및 방사적 특성의 차이로 인해 두 영상 간의 효과적인 기하보정을 위해서는 전처리과정이 필수적이다. TerraSAR-X의 GEC 영상의 경우, UTM 좌표에 맞게 투영되었지만 지형적 특성에 대한 보정(terrain correction)은 수행되어있지 않을 뿐만 아니라, range 방향과 azimuth 방향에 대한 공간해상도가 다르기 때문에 광학영상에 맞게 좌표를 일치시켜주는 과정이 필요하다. 이를 위해, 광학영상에 해당하는 좌표를 이용하여 TerraSAR-X 영상을 추출한 후, 광학영상과 같은 화소 크기로 재배열한다. 본 연구에서는 두 대상지역 모두 광학영상을 1000×1000 화소의 크기로 선택하였고, 이와 같은 크기로 SAR 영상을 최근린보간(Nearest Neighbor) 기법을 이용하여 재배열하였다.

두 영상 간 방사적 특성의 차이를 제거하기 위해서, 모든 광학영상에 대하여 2% 선형 스트레칭을 수행하

Table 1. Specification of TerraSAR-X, IKONOS-2, and QuickBird-2 images

	TerraSAR-X	IKONOS-2	QuickBird-2
공간해상도	1m(pixel spacing) / 2.62m(Range), 2.21m(Azimuth)	1m	0.6m
방사해상도	16 bits	11 bits	11 bits
촬영각	28.01°(Incidence angle)	29.68°(Off-nadir angle)	13.50°(Off-nadir angle)
촬영 날짜	2008-07-11	2006-03-25	2006-10-28
영상 처리 수준	GEC product	Standard geometrically corrected	Standard product

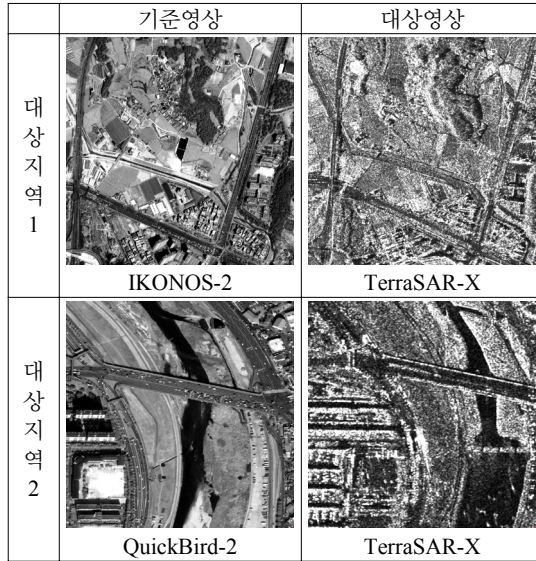


Figure 2. Study sites

였고 8bits 영상으로 변환하였다. 16bits의 방사해상도를 갖는 SAR 영상의 경우 대부분의 지역에서는 낮은 방사 강도를 보이는 반면, 건물지역과 같이 이중산란이 발생하는 지역에서 높은 화소값을 갖는다. 본 연구에서는 건물지역에 대한 방사적 강도에 대한 영향을 줄이고, 상대적으로 낮은 방사 강도를 보이는 식생, 도로, 나대지 등 영상에 전반적으로 존재하는 지역에 대한 대비를 강조하기 위해서, 화소값이 255가 넘는 화소에 255의 화소값을 강제 할당하는 방식을 통해 8bits 영상으로 변환하였다. 이와 같은 전처리 과정을 수행한 결과는 Figure 2와 같다.

3.2 실험 결과

전처리가 수행된 영상에 대하여 영상 간 변위량을 추정하였다. 모든 실험 대상지역에 대하여, 가우시안 피라미드기법(Gaussian pyramid)을 이용하여 원영상의 1/4 크기의 영상 피라미드를 2 단계에 걸쳐 생성하였다 ($n = 2$). 생성된 최종 단계(coarsest level)의 피라미드

영상에 대하여 상호정보 값을 목적함수로 하는 담금질 모사 최적화기법을 적용하였다. 최적화기법을 적용하기 위해서는 영상 간 변위량 초기값이 필요하므로, 두 영상 간 초기 변위량 차이를 $(x_0, y_0) = (0, 0)$ 으로 할당하였고, 고해상도 위성영상과 TerraSAR-X GEC 영상의 기하학적 위치오차를 고려하여 변위량 탐색범위를 x, y 방향 모두 120m로 설정하였다. 재배열 기법은 상호정보 값에 대한 계산을 수행하는데 시간 효율 대비 정확한 결과를 도출한다고 알려진 최근린보간 기법을 이용하였다(Chen 등, 2003).

담금질 모사기법을 통해 추정된 초기 x, y 방향에 대한 변위량은 첫 번째 대상지역에서는 $(x_1, y_1) = (-74.33, -20.88)m$, 두 번째 대상지역에서는 $(x_1, y_1) = (-100.35, -27.34)m$ 만큼 차이를 보였다. 이렇게 계산된 변위량은 심플렉스 최적화기법을 통해 추정된 두 번째 피라미드 영상에서의 변위량 계산을 위한 초기값으로 설정된다. 심플렉스 최적화기법은 탐색범위를 지정할 필요가 없고 계산효율성 측면에서 우수하여 보다 넓은 영상에서 최적값을 찾는 데 적합하다. 심플렉스 최적화기법을 사용할 경우 지역적 최적값을 찾을 우려가 있지만, 이러한 문제는 담금질 모사기법을 통해 추정된 변위량을 심플렉스 최적화기법 적용을 위한 초기값으로 이용함으로써 효과적으로 해결하였다. 피라미드별로 최적의 변위량을 찾는 작업을 반복적으로 수행한 결과는 Table 2와 같고, 원영상에서 추출된 최종 변위량은 첫 번째 대상지역에서는 $(x_f, y_f) = (-71.24, -23.19)m$,

Table 2. Estimated translations of each pyramid level

피라미드 단계	대상지역 1	대상지역 2	최적화기법
2 (coarsest level)	(-74.33, -20.88)m	(-100.35, -27.34)m	Simulated Annealing
1	(-76.88, -20.81)m	(-112.97, -16.26)m	Simplex
0 (original)	(-71.24, -23.19)m	(-113.77, -16.82)m	Simplex

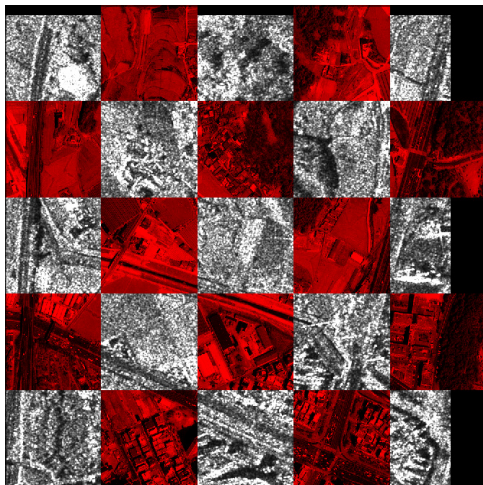
두 번째 대상지역에서는 $(x_f, y_f) = (-113.77, -16.82)m$ 를 도출하였다.

3.3 정확도 평가 및 결과 분석

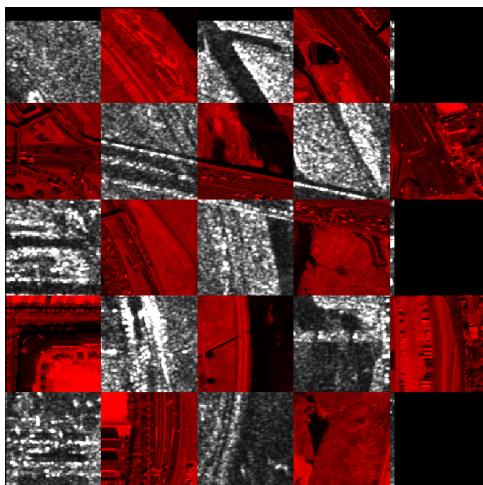
본 연구를 통해 추정된 x, y 방향에 대한 변위량을 이용하여 TerraSAR-X 영상을 광학영상의 좌표체계로 기하보정한 후, 두 영상을 중첩하여 표현한 결과는 Figure 3과 같다. 광학영상을 빨간색 블록으로, SAR 영상을 회색 블록으로 표현하였다. 두 영상의 방사적 특성이 달라서 모자이크 영상을 통해 기하보정이 얼마나 정확하게 수행되었는지를 객관적으로 평가하는 것은 어렵지만, 대상지역 1과 2 모두 두 영상에 공통으로

존재하는 선형정보나 특정 객체의 형상이 유지되는 것을 볼 때 기하보정이 어느 정도 제대로 이루어졌음을 확인할 수 있었다.

보다 정량적인 평가를 위해서 대상지역 별로 각각 10개의 검사점을 추출하여 x, y 방향에 대한 오차, RMSE 및 CE90을 계산한 결과는 Table 3과 같다. 계산 결과, 대상 지역 1, 2에 대하여 각각 3.95m와 4.87m의 RMSE 값과 5.64m, 5.91m의 CE90 값을 도출하였고, 이는 관련연구의 정확도평가 결과와 비교해 보았을 때 만족할만한 수준임을 알 수 있었다(Reinartz et al., 2011). 하지만 대상지역 1에 비해 대상지역 2에서 보다 높은 RMSE와 CE90 값을 도출하였는데, 이는 대상지역의 특성에서 비롯된 것으로 생각된다. 영상 촬영 시기에 따라서 위치나 높이의 차이를 보이는 수계지역이 다수 분포하는 대상지역 2의 경우 촬영방식이 다른 두 영상에서 상대적인 위치차이가 발생할 수 있다(Figure 4의 흰색 원 부분). 뿐만 아니라, 대상지역 2의 왼쪽 하단부분에 높은 건물이 다수 분포하는데, 이는 촬영방식이 다른 두 영상에서 다른 형태의 기복변위를 야기함으로써 단순히 영상 간 변위량의 차이만을 보정할 경우 만족할 만한 정확도를 얻기 어려운 한계가 있다.



(a)



(b)

Figure 3. Mosaic image generation (a) site 1 (b) site 2

Table 3. Registration accuracy

대상 지역	ΔX (m)	ΔY (m)	RMSE (m)	CE90 (m)
1	2.20	2.23	3.95	5.64
2	3.66	2.28	4.87	5.91

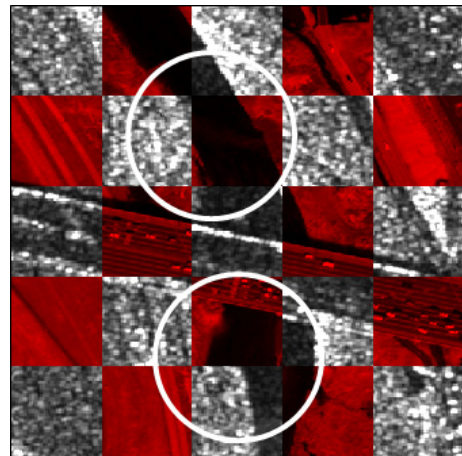


Figure 4. Magnified mosaic result of site 2

4. 결론

본 연구에서는 대표적인 강도기반 유사도측정기법인 상호정보기법과 최적화기법을 이용하여 고해상도 광학영상과 TerraSAR-X 영상 간 변위량을 자동으로 추정하여 다중센서 영상 간 기하보정을 수행하였다. 본 연구를 통해서, 기하보정 요소 중 오직 변위량 차이에 대한 보정만으로도 고해상도 광학영상과 TerraSAR-X 영상 간의 기하보정 결과를 5m 이내의 RMSE 정확도로 도출할 수 있음을 확인하였다. 특히, 피라미드 영상을 생성하여 단계적으로 변위량을 추정함으로써 계산 소요시간을 줄일 수 있었고, 영상 간 초기 변위 차이를 효과적으로 찾을 수 있었다. 보다 넓은 대상 지역에 알고리즘을 적용할 때에는 더욱 많은 단계의 피라미드 영상을 생성하여 해결할 수 있을 것으로 생각된다. 하지만 고층건물이 밀집된 도심지역이나 기복이 심한 대상지역에 제안 기법을 적용할 경우에는 변위량에 대한 보정만으로는 높은 정확도를 도출할 수 없다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 영상 간 변위량 차이뿐만 아니라 스케일(scale), 회전(rotation) 등의 기하보정 요소를 추가적으로 고려하거나 매칭쌍을 추출하여 비선형의 변환모델식을 적용함으로써 해결할 수 있을 것으로 생각된다. 향후 연구에서는 보다 기복이 심한 대상지역과 넓은 대상지역에 대한 연구를 수행하여 이러한 문제를 해결하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단(No. 2011-0027595)의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

참고문헌

1. 변영기, 어양담, 유기윤, 2007, 분광 상호정보를 이용한 하이퍼스펙트럴 영상분류, 한국지형공간정보학회지, 제 15권, 3호, pp. 33-39.
2. 한유경, 변영기, 채태병, 김용일, 2011, KOMPSAT-2 영상과 TerraSAR-X 영상 간 기하보정, 한국측량학회지, 제 29권, 6호, pp. 667-675.
3. Chen, H., Arora, M. and Varshney, P., 2003, Mutual information-based registration for remote sensing data, International Journal of Remote Sensing, Vol. 24, No. 18, pp. 3701-3706.
4. Dare, P. and Dowman, I., 2001, An improved model for automatic feature-based registration of SAR and SPOT images, Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, Vol. 56, No. 1, pp. 13-28.
5. DLR, 2008, TerraSAR-X ground segment basic product specification document, TX-GS-DD-3302, v1.5, February 24, 2008.
6. GeoEye, 2006, IKONOS imagery products and product guide, URL: http://www.geoeye.com/Whitepapers_pdfs/GeoEye_Ikonos_Product_Guide_v17.pdf.
7. Gonzalo, C. and Lillo-Saavedra, M., 2008, A directed search algorithm for setting the spectral-spatial quality trade-off of fused images by the wavelet a trous method, Canadian Journal of Remote Sensing, Vol. 34, No. 4, pp. 367-375.
8. Han, Y., Byun, Y., Choi, J., Han, D. and Kim, Y., 2012, Automatic registration of high-resolution images using local properties of features, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 78, No. 3, pp. 211-221.
9. Hong, T. and Schowengerdt, A., 2005, A robust technique for precise registration of radar and optical satellite images, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 71, No. 5, pp. 585-593.
10. Lagarias, J., Reeds, J., Wright, M. and Wright, P., 1998, Convergence properties of the Nelder-Mead simplex method in low dimensions, SIAM Journal of Optimization, Vol. 9, No. 1, pp. 112-147.
11. Nelder, J. A. and Mead, R., 1965, A simplex method for function minimization, The Computer Journal, Vol. 7, No. 4, pp. 308-313.
12. Reinartz, P., Müller, R., Schwind, P., Suri, S. and Bamler, R., 2011, Orthorectification of VHR optical satellite data exploiting the geometric accuracy of TerraSAR-X data, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 66, pp. 124-132.
13. Suri, S. and Reinartz, P., 2010, Mutual-information-based registration of TerraSAR-X and Ikonos imagery in urban area, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 48, No. 2, pp. 939-949.
14. Viola, P. and Wells, W., 1997, Alignment by maximization of mutual information, International Journal of Computer Vision, Vol. 24, No. 2, pp. 137-154.
15. Zitová, B. and Flusser, J., 2003, Image registration methods: a survey, Image and Vision Computing, Vol. 21, No. 11, pp. 977-1000.