creative commons
COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

공학석사 학위논문

SAR-SIFT와 DLSS를 활용한 고해상도 광학 및 SAR 영상 정합 연구

A Study on Image Registration between High Resolution Optical and SAR Images Using SAR-SIFT and DLSS

2018년 8월

서울대학교 대학원

건설환경공학부

전 형 주

SAR-SIFT와 DLSS를 활용한 고해상도 광학 및 SAR 영상 정합 연구

A Study on Image Registration between High Resolution Optical and SAR Images Using SAR-SIFT and DLSS

지도교수 김 용 일

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2018년 5월

서울대학교 대학원

건설환경공학부

전 형 주

전형주의 공학석사 학위논문을 인준함

2018년 5월

위 원 장 _____ (인)

부위원장 _____ (인)

위 원 _____ (인)

국문초록

최근 위성센서 기술의 발달로 다양한 센서를 탑재한 지구관측위성이 발사되면서, 다중센서 위성영상을 융합 분석하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, 광학영상과 SAR영상은 취급하는 파장대가 달라 동시에 활용할 경우 지표면에 대해 보다 구체적인 정보를 취득할 수 있으며, 더 나아가, 객체 추출, 변화탐지, 재난재해 모니터링 등 원격탐사 분야에 폭넓게 적용이 가능하다. 이를 위해서는 전처리 작업으로 두 영상 간 정합이 필수적으로 이루어져야 한다. 그러나, 광학영상과 SAR영상은 영상 취득시 위성센서 자세 및 취급하는 파장대의 상이함으로 기하 및 분광 정보 차이를 유발하여 영상 정합에 있어 유독 어려움이 존재한다. 이러한 차이는 건물이 밀집된 도심지역에서 부각되며, 중·저해상도 영상보다 고해상도 영상에서 두드러진다. 따라서, 본 연구에서는 도심지역에 대한 고해상도 광학영상과 SAR영상 간 정합에 효과적인 방법론을 제안하였다.

기존 광학영상과 SAR영상 간 정합 관련 연구는 크게 특징기반 정합기법과 강도기반 정합기법으로 진행되었다. 강도기반 정합기법은 분광 특성이 다른 영상 간 정합에 효과적이나, 영상 간 왜곡이 존재하지 않거나 기하학적 위치 차이가 적을 때에만 적용 가능하다. 고해상도 광학영상과 SAR영상은 지역적 왜곡이 존재하며, 두 영상 간 수십m 이상의 기하학적 위치 차이가 발생할 수 있다. 따라서, 고해상도 광학영상과 SAR영상 간 정합 연구는 강도기반 정합기법 보다 특징기반 정합기법이 중점적으로 진행되고 있다. 그러나, 특징기반 정합기법은 분광 특성이 다른 광학영상과 SAR영상에서 오정합쌍을 다수 추출하여 정합 성능이 떨어진다. 이를

해결하기 위해, 강도기반 정합기법과 특징기반 정합기법을 결합한 기법들이 제안되었으나, 도심지역에서 원 형상이 존재하는 지역이나 건물밀집지역을 제외한 지역 등과 같이 제한된 지역에서만 적용 가능하다는 한계점을 보였다. 이를 개선하기 위해, 본 연구에서는 특징기반 정합기법인 SAR-SIFT 기법과 강도기반 정합기법인 DLSS 기법을 결합한 정합기법을 제안하였다. 또한, 정합쌍을 추출하기 위해, 전처리 단계, 후보 정합쌍 추출 단계, 정밀 정합쌍 추출 단계인 총 세 단계를 추가하였다.

고해상도 광학영상과 SAR영상 간 정합을 위해서, SAR-SIFT 기법을 이용하여 특징점을 추출하고, 추출된 특징점에서 DLSS 기법을 이용하여 정합쌍을 추출하였다. 그러나, 추출된 정합쌍에 다수의 오정합쌍이 포함되는 문제점이 존재하였다. 이를 해결하기 위해, 추출된 정합쌍에서 임계치와 특징점 간 변위량을 이용한 전처리 단계와 후보 정합쌍 추출 단계를 통해 후보 정합쌍을 추출하고, 후보 정합쌍에 RANSAC 기법을 적용하여 정밀 정합쌍을 추출하는 방법을 제안하였다. 최종적으로 추출된 정밀 정합쌍을 이용하여 어핀 변환식(affine transformation)을 구성하고, 이를 적용하여 광학영상에 정합된 SAR영상을 생성하였다.

본 연구의 정확도를 검증하기 위하여, 대표적인 고해상도 광학영상인 KOMPSAT-2영상과 고해상도 SAR영상인 TerraSAR-X, Cosmo-SkyMed영상을 사용하였고, 시각적, 정량적 평가를 진행하였다. 시각적 평가를 위해서 모자이크 영상을 생성하였으며, 두 영상 간 경계에서 객체의 형상이 유지됨을 통해 정합이 우수하게 수행됨을 확인하였다. 정량적 평가를 위해서 수동 검사점을 통한 RMSE Ⅰ과 교차검증을 통한 RMSE Ⅱ를 사용하였으며, 모든 실험지역에 대해 RMSE Ⅰ은 1.51m에서 2.04m, RMSE Ⅱ는 1.34m

에서 1.69m로 정확도가 도출되었다. 이는, 선행연구결과와 비교하였을 때 우수한 수준의 정확도로 확인되었다. 이를 통해, 제안 기법이 고해상도 광학영상과 SAR영상 간 정합에 효과적이며, 두 영상 간 융합 분석을 위해 효과적인 정합 기술로 활용될 것으로 사료된다.

주요어 : 고해상도 위성영상, 광학영상, SAR영상, 영상정합, SAR-SIFT, DLSS

학 번 : 2015-22933

목 차

1. 서 론 ····· 1

1.1 연구배경 ····· 1

1.2 연구동향 ····· 4

1.3 연구의 목적 및 범위 ····· 7

2. 특징점 추출 ····· 10

2.1 영상 전처리 ····· 10

2.2 SAR-SIFT 기법을 통한 특징점 추출 ····· 11

2.2.1. SIFT 기법의 문제점 ····· 11

2.2.2. SAR-SIFT 기법 ····· 15

3. 정합쌍 추출 ····· 18

3.1 DLSS 기법을 통한 정합쌍 추출 ····· 18

3.1.1. 형상 서술자 LSS ····· 19

3.1.2. 형상 서술자 벡터 DLSS ····· 21

3.1.3. DLSS 기법의 문제점 ····· 22

3.2 제안된 정합쌍 추출 방법 ····· 24

3.2.1. 전처리 단계 ····· 24

3.2.2. 후보 정합쌍 추출 단계 ····· 26

3.2.3. 정밀 정합쌍 추출 단계 ····· 28

3.3 정합 및 정확도 평가 방법 ····· 29

3.3.1. 어핀 변환식 ····· 29

3.3.2. 정확도 평가 방법 ····· 31

4. 실험의 적용 및 평가 ····· 32
4.1 실험지역 및 자료 ····· 32
4.2 특징점 추출 결과 ····· 35
4.2.1. SIFT 기법을 통한 특징점 추출 결과 ····· 35
4.2.2. SAR-SIFT 기법을 통한 특징점 추출 결과 ····· 37
4.3 정합쌍 추출 결과 ····· 40
4.3.1. 기존 기법을 통한 정합쌍 추출 결과 ····· 40
4.3.2. 제안 기법을 통한 정합쌍 추출 결과 ····· 44
4.4 정합 결과 및 평가 ····· 49

5. 결론 ····· 55

Abstract ····· 67

표 목 차

[표 4-1] 실험에 사용된 고해상도 광학영상과 SAR영상 제원 ····· 33
[표 4-2] 제안 기법을 통한 추출된 정합쌍 수 ····· 45
[표 4-3] 정합시 x, y 이동 변위량 ····· 50
[표 4-4] 검사점을 통한 RMSE Ⅰ, Ⅱ ····· 54

그 림 목 차

[그림 1-1] 연구 흐름도 ····· 9
[그림 2-1] 스케일 가우시안 공간 ····· 12
[그림 2-2] 방향성에 따른 $G_{x,\alpha}$, $G_{y,\alpha}$ ····· 15
[그림 3-1] 광학영상과 SAR영상 간 분광 비선형성 ····· 18
[그림 3-2] LSS 생성 과정 (a) 국부적 영역 원영상 (b) 상관관계 표면 ($S_q(x,y)$) (c) 로그 폴라 좌표계 (d) 벡터 ····· 19
[그림 3-3] 광학영상과 SAR영상 간 형상 비교 ····· 20
[그림 3-4] DLSS 생성 과정 ····· 21
[그림 4-1] 전처리 과정 후 광학영상과 SAR영상의 실험지역 ····· 32
[그림 4-2] SIFT 기법을 통한 특징점 추출 결과(왼쪽: 광학영상, 오른쪽: SAR영상) ····· 36
[그림 4-3] SAR-SIFT 기법을 통한 특징점 추출 결과(왼쪽: 광학영상, 오른쪽: SAR영상) ····· 39
[그림 4-4] SIFT 기법을 통한 정합쌍 추출 결과(왼쪽: 광학영상, 오른쪽: SAR영상) ····· 42
[그림 4-5] SAR-SIFT 기법을 통한 정합쌍 추출 결과(왼쪽: 광학영상, 오른쪽: SAR영상) ····· 43
[그림 4-6] SAR-SIFT 기법을 통한 정합쌍 추출 결과 확대 영상 ····· 44
[그림 4-7] 전처리 단계를 통한 정합쌍 추출 결과(왼쪽: 광학영상, 오른쪽: SAR영상) ····· 46
[그림 4-8] 후보 정합쌍 추출 결과(왼쪽: 광학영상, 오른쪽:

SAR영상) ····· 47
[그림 4-9] 정밀 정합쌍 추출 결과(왼쪽: 광학영상, 오른쪽: SAR영상) ····· 48
[그림 4-10] 정합 전/후 영상 ····· 49
[그림 4-11] 모자이크 영상 ····· 53
[그림 4-12] 확대된 모자이크 영상(빨강: 광학영상, 흑백: SAR영상) ····· 54

1. 서 론

1.1 연구배경

최근 고해상도 광학영상인 Pleiades, GeoEye-1, Worldview, QuickBird영상과 고해상도 SAR(Synthetic Aperture Radar)영상인 TerraSAR-X, Cosmo-SkyMed영상 등 고해상도 다중센서 위성영상들이 상용화되어, 위성영상 간 융합 분석에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 다중센서 위성영상 중 마이크로파 파장대역의 능동(active) 센서로 취득되는 SAR영상은 주야 및 기상조건과 관계없이 촬영이 가능하며, 광학센서와 다른 파장대를 취급하여 광학영상에서 획득할 수 없는 정보를 SAR영상에서 취득할 수 있다(한유경, 2013). 따라서, 광학영상과 SAR영상을 동시에 활용할 때 지표면에 대한 구체적인 정보를 취득할 수 있다. 이에 두 영상을 활용한 융합 분석이 중요시되고 있으며, 재난재해 모니터링, 영상 융합, 객체 추출 등 다양한 분야에 적용되고 있다(Amarsaikhan *et al*., 2010; Hasan *et al*., 2012; Sportouche *et al*., 2009). 이를 위해서는 높은 정확도를 가지는 영상 간 정합이 우선시 되어야 한다(Dai and Khorram, 1998). 그러나 광학영상과 SAR영상은 취득시 위성센서의 자세의 상이함으로 수십m 이상의 기하학적 위치 차이가 발생한다. 따라서, 광학영상과 SAR영상을 융합 분석하기 위해서는 두 영상 간 정합 연구가 선행되어야 한다.

영상 정합은 다른 시기 및 다른 센서로부터 취득된 두 개 혹은 그 이상의 영상을 중첩시켜 동일 지역에 대해 기하학적 위치를 일치시키는 과정이다(Zitova and Flusser, 2003). 광학영상과 SAR영상 간 정합에는 세 가지 문제점이 존재한다. 첫째, 취급하는 파장대의 상이함

으로 지표면에 대한 다른 분광 특성을 보여 두 영상 간 분광적으로 비선형성을 이룬다. 둘째, 영상 취득시 위성센서의 자세 차이로 인해 동일 지역에 대한 기하학적 위치 차이가 발생한다. 셋째, 영상 해석에 악영향을 미치는 스페클잡음(speckle noise)이 광학영상에는 미흡하게 존재하나, SAR영상에는 영상 전반에 걸쳐 존재한다(Sui *et al.*, 2015). 특히, 이러한 문제점들은 건물이 밀집된 도심지역에서 부각되며, 중·저해상도 영상보다 고해상도 영상에서 더욱 두드러지게 나타난다(Merkle, *et al.*, 2015). 이에 본 연구에서는 도심지역에서 고해상도 광학영상과 SAR영상 간 정합에 효과적인 방법을 제안하고자 한다.

SIFT(Scale Invariant Feature Transform) 기법은 대표적인 영상 정합기법으로 컴퓨터비전 분야 외 위성영상 간 정합에도 활발히 적용되고 있다(Mikolajczyk and Schmid, 2005). 이 기법은 축척, 회전, 그리고 이동에 강인한 기법으로 중·저해상도 광학영상과 SAR영상 간 정합에도 적용되었으며, 우수한 정합 결과를 도출하였다(Xiang *et al.*, 2018). 그러나, 고해상도 광학영상과 SAR영상 간 정합에는 SIFT 기법을 적용할 경우 SAR영상에 존재하는 스페클잡음을 특징점으로 오추출하고 두 영상 간 정합에 낮은 정합 정확도를 보인다(Huo *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2012).

Dellinger *et al.*(2012)는 기존 SIFT 기법을 SAR영상에 적합하도록 개선한 SAR-SIFT 기법을 제안하였다. SAR-SIFT 기법은 SIFT 기법의 차분 기울기 연산자(gradient operator)를 영역비 기울기 연산자로 대체하여 스페클잡음의 영향을 감소시켰다. 이 기법은 SAR 센서 이외 다른 센서로 취득된 영상 간 정합에도 정합을 성공적으로 수행하였다(Ma *et al.*, 2017). 그러나, SAR-SIFT 기법은 분광 비선형성을 고려하지 않는 단점을 지니고 있어, 분광 특성이 다른 광학영상과 SAR영상 간 정합에 적용시 오정합쌍(outlier)[1]을 다수 추출하거나 정

1) 오정합쌍은 두 영상 간 특징점의 위치가 동일 지역이 아닌 정합쌍을 의미한다.

합쌍을 추출하지 못하는 한계점을 보인다(Chen *et al.*, 2017).

이러한 문제점을 해결하기 위해, 분광 비선형성에 강인한 형상 서술자를 이용한 기법들이 제안되었다(Huang *et al.*, 2010; Rui *et al.*, 2016). 형상 서술자(shape descriptor)를 이용할 경우, 영상 간 분광 비선형성이 존재하여도 정합쌍을 올바르게 추출하였다(Ye *et al.*, 2017a; Ye and Shen, 2016; Ye *et al.*, 2017b). 그러나, 이 기법은 스페클잡음의 영향을 고려하지 않고 있으며, 영상 간 변위량이 적은 경우에만 적용되는 한계점이 존재한다. 또한, 이 기법은 강도기반 정합기법으로 일정 영역 내에 있는 모든 화소를 고려해야 하므로 계산량이 많다는 단점을 지니고 있다. 본 연구에서는 특징기반 정합기법인 SAR-SIFT 기법과 강도기반 정합기법인 DLSS(Dense Local Self Similarity) 기법을 상호 보완적인 결합을 통하여 개선된 광학 및 SAR 영상 정합기법을 제안하였다.

1.2 연구동향

광학영상과 SAR영상 간 정합 연구는 특징기반 정합기법과 강도기반 정합기법으로 두 가지 기법으로 진행되었다(Zitova and Flusser, 2003). 특징기반 정합기법은 영상의 특징 요소를 추출하고 특징 요소에서의 서술자를 생성하여, 서술자 간 유사도를 통해 정합을 수행하는 방법이다. 특징요소로는 점, 선, 면이 있으며(Gong *et al.*, 2014), 선과 면이 점에 비해 스페클에 영향을 덜 받고 구분하기 용이하여, 이를 활용한 연구가 많이 진행되었다(Cheng *et al.*, 2004; Habib and Al-Ruzoup., 2005; Pan *et al.*, 2008). 그러나, 광학영상과 SAR영상 간 분광 특성의 상이함으로 동일한 선 또는 면을 추출하는 것 또한 어려운 문제이며(Rui *et al.*, 2016; Sui *et al.*, 2015), 제한된 영상 및 지역에서만 정확도가 높게 나타나는 경향을 보였다.

이에 따라 최근에는 대표적인 정합기법인 SIFT 기법을 개선하여 영상의 크기나 위치 등이 변하여도 쉽게 식별 가능하며, 분광값에 둔감한 특징점을 추출하여 정합을 수행하는 연구가 제안되고 있다(Fan *et al.*, 2013; Ma *et al.*, 2017; Xiang *et al.*, 2018; Xu *et al.*, 2015). Fan *et al.*(2013)은 SAR영상에 존재하는 스페클잡음의 영향을 줄이기 위해 SAR영상의 해상도를 낮춰 특징점을 추출하였다. 그 후, 두 영상 간 추출된 특징점에서 공간적 특징을 이용하여 광학영상과 SAR영상 간 정합을 수행하였다. Xu *et al.*(2015)은 분할(segmentation) 기법과 SIFT 기법을 결합하여 두 영상 간 정합을 성공적으로 수행하였으나, 강, 호수, 도로와 같은 특징을 포함하지 않는 영상에서는 정확도가 낮게 나오는 한계점을 보였다. 기존 SIFT 기법은 스페클잡음에 취약한 차분 기울기 연산자를 사용하여, SAR영상에 적용할 경우 스페클잡음을 특징점으로 오추출한다(Xiang *et al.*, 2018). 이를 해결하기 위해, Ma *et al.*(2017)와 Xiang *et al.*(2018)은 스페클잡음에 영향

을 감소시킨 기울기 연산자를 개발하여 기존 SIFT 기법의 문제점을 개선하고 두 영상 간 정합을 우수하게 수행하였다.

특징기반 정합기법은 왜곡이 심한 경우에도 적용 가능하다는 장점을 지녀 다중센서 위성영상 간 정합에 활발히 적용되고 있다(Cheng *et al.*, 2004; Gong *et al.*, 2014; Habib and Al-Ruzoup., 2005; Pan *et al.*, 2008; Shen *et al.*, 2017; Sui *et al.*, 2015). 그러나, 이 기법은 영상 내 공간 특성이 없는 경우 적용하기 어려우며, 광학영상과 SAR영상 간 분광 특성이 상이하여 다수의 오정합쌍을 추출한다. 이와 다르게, 강도기반 정합기법은 특징기반 정합기법에 비해 분광 특성이 상이함에 강인하여 고해상도 광학영상과 SAR영상 간 정합에 활용되었다(Lehureau *et al.*, 2008; Suri and Reinartz, 2008).

강도기반 정합기법은 기준영상의 특징점 또는 전체를 기준으로 탐색 영역을 설정하고, 설정된 영역 안에서 유사도를 측정하여 정합지점을 찾는 기법이다. 이 기법에는 교차상관(cross-correlation) 기법 또는 상호정보(mutual information) 기법 등이 존재한다. Shi *et al.*(2012)는 정규교차상관 기법을 이용하여 광학영상과 SAR영상 간 정합을 수행하였으나, 이 기법은 분광 비선형성에 취약하다는 단점을 지닌다(Ye *et al.*, 2017b). 이에 비해 상호정보 기법은 분광 비선형성에 강인함을 보여 광학영상과 SAR영상 간 정합에 많이 활용되었다(Chen *et al.*, 2003; Reinartz *et al.*, 2011; Shu *et al.*, 2005; Siddique *et al.*, 2012; Suri and Reinartz., 2010). 그러나, 이 기법은 두 영상 간 정합에 빈번히 오정합지점을 추출하는 한계점을 지닌다(Ye *et al.*, 2017b). Hasan *et al.*(2012)은 CCRE(Cross-Cumulative Residual Entropy)를 적용하여 중·저해상도 광학영상과 SAR영상 간 정합을 수행하였다.

대부분의 강도기반 정합기법은 정합지점을 추출하기 위해 분광 정보의 유사도를 활용한다. 이 경우, 정합될 두 영상이 분광적으로 비선

형성을 이룰 때, 영상에서 오정합지점이 다수 추출될 수 있다. 이에, Ye and Shen(2016) 그리고 Ye *et al.*(2017a)은 분광 비선형성에 강인한 형상 서술자를 이용하여 광학영상과 SAR영상 간 정합에 효과적인 기법을 제안하였다. 그러나, 이 기법은 여러 방향과 여러 스케일에 대한 고려가 필요하여 많은 계산량이 요구된다. 이를 개선하기 위해, Ye *et al.*(2017b)은 형상 서술자 LSS(Local Self-Similarity)를 연결하여 형상 서술자 벡터 DLSS를 개발하였다. 그러나, 이 기법은 영상 간 큰 변위량이나 회전량이 존재할 때 적용이 어려우며, 탐색 영역 안에 존재하는 모든 화소를 고려하므로 이 역시 특징기반 정합기법에 비해 많은 계산량이 필요하게 된다.

최근에는 강도기반 정합기법과 특징기반 정합기법을 결합한 기법들이 제안되고 있다(Han and Byun, 2015; Hong and Zhang, 2008; Merkle *et al.*, 2015). Han and Byun(2015)은 강도기반 정합기법인 상호정보 기법으로 초기 변위량을 측정하고, 특징기반 정합기법으로 선형 객체를 이용하여 정합쌍을 추출하였다. 그러나, 이 기법은 건물밀집지역이나 선형 특성이 없는 지역에서 정확도가 다소 감소하는 단점을 보였다. Hong and Zhang(2008)은 웨이블렛 기법과 교차상관 기법을 결합하여 성공적으로 정합을 수행하였으나, 기복변위를 유발하는 건물지역에서는 정합의 정확도가 현저하게 감소하는 문제점을 보였다. Merkle *et al.*(2015)은 특징기반 정합기법으로 원 형상을 추출하고, 이를 강도기반 정합기법을 이용하여 정합지점을 추출하여 정합을 수행하였다. 그러나 이 기법은 원 형상이 존재하는 특정한 상황에서만 적용되는 한계점이 존재한다.

1.3 연구의 목적 및 범위

최근 광학영상과 SAR영상 간 융합 분석이 중요시되면서, 두 영상 간 정합 연구가 활발히 진행되고 있다(Xiang *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2016). 그러나, 광학영상과 SAR영상 간 정합 연구는 대부분 중·저해상도 영상을 이용하여 수행되었으며, 기존 특징기반 및 강도기반 결합기법들은 도심지역을 제외한 평평한 지역, 도심지역에서 건물밀집지역을 제거한 지역 또는 원 형상이 존재하는 지역 등 제한된 지역에서만 정합이 가능하다는 한계점을 지닌다. 또한, 도심지역 중 건물밀집지역에서는 다수의 오정합쌍이 추출되는 문제점을 지닌다. 따라서, 본 연구에서는 도심지역에 대한 1m급 고해상도 광학영상과 SAR 영상 간 정합을 수행하기 위해, 특징기반 정합기법인 SAR-SIFT 기법과 강도기반 정합기법인 DLSS 기법을 결합하였다. 더 나아가, 오정합쌍을 줄이기 위해, 추출된 정합쌍에 총 세 과정인 전처리 단계, 후보 정합쌍[2] 추출 단계, 정밀 정합쌍[3] 추출 단계를 적용하였다.

SAR-SIFT 기법은 스페클잡음의 영향을 고려하나, 영상 간 분광 비선형성을 반영하지 못하는 문제점을 지닌다. DLSS 기법은 분광 비선형성을 고려하지만, 스페클잡음의 영향을 고려하지 않는다는 문제점을 지닌다. 또한, 이 기법은 영상 간 위치 차이가 클 때 적용하기 어려우며, SAR-SIFT 기법에 비해 많은 계산량이 요구된다.

이를 해결하기 위해서, 제안 기법은 SAR-SIFT 기법을 통해 광학영상과 SAR영상에서 공통된 특징점을 추출하고, 추출된 특징점에서 DLSS 기법을 이용하여 정합쌍을 추출하였다. 추출된 정합쌍에는 오정합쌍이 다수 포함되었으나, 오정합쌍 제거 과정을 통해 정밀한 정

2) 후보 정합쌍은 DLSS 기법을 통해 추출된 정합쌍 중 전처리 단계를 거쳐 추출된 정합쌍으로, 참정합쌍을 추출하기 위한 후보군으로 사용된다.

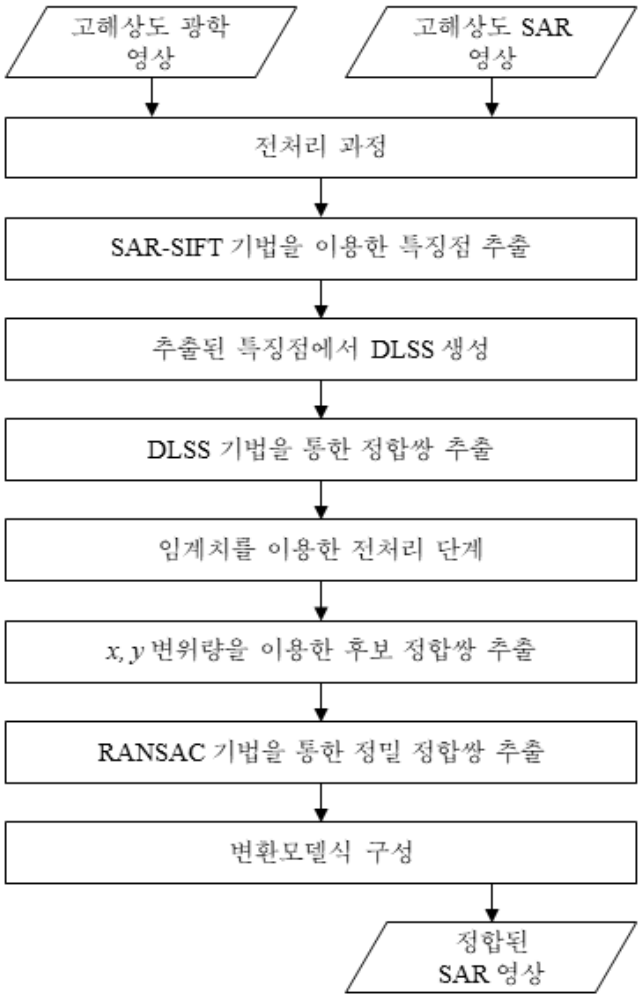
3) 후보 정합쌍에서 RANSAC 기법을 적용하여 추출된 정합쌍을 의미하며, 참정합쌍으로 간주되어 사용된다.

합쌍을 추출하였다. 추출된 정합쌍에 최소제곱법을 적용하여 어핀 변환식(affine transformation)을 추정하여, 정합을 수행하였다. 구체적인 본 연구의 흐름도는 [그림 1-1]과 같다.

본 기법의 다중센서 영상 간 정합에 적합성을 검증하기 위해, 고해상도 광학영상인 KOMPSAT-2영상과 SAR 영상인 TerraSAR-X, Cosmo-SkyMed영상을 사용하였다. 실험대상지역으로는 대전 지역 일대로 선정하였으며, 밀집된 건물이 포함된 지역 혹은 하천, 건물, 농경지 등 다양한 토지피복을 지니는 지역 등 도심지역에 존재할 수 있는 다양한 실험지역을 선정하였다. 이를 통해 다양한 센서 및 장소에 대하여 제안 기법을 적용함으로써, 다양한 조건에서 제안 기법의 적용 가능 여부를 평가하고자 하였다.

기존 기법인 SIFT 기법과 SAR-SIFT 기법을 제안 기법과의 정합쌍 추출 결과를 비교평가하여 제안 기법의 적합성을 평가하였다. 또한, 제안 기법의 정확도를 평가하기 위해서, 시각적 및 정량적 정확도 평가를 수행하였다. 시각적 평가를 위해 광학영상과 정합된 SAR영상을 통해 모자이크 영상을 생성하였으며, 정량적 평가를 위해서는 RMSE(Root Mean Square Error)를 측정하여 제안 기법의 우수성을 평가하였다.

1장에서는 연구배경과 연구동향을 통해 선행연구의 문제점을 파악하고 이를 해결하기 위한 연구 방법과 범위를 구체화하였다. 2장에서는 특징점 추출 방법으로 기존 SIFT 기법의 문제점을 파악하고, SAR-SIFT 기법에 대해 서술하였다. 3장에서는 정합쌍 추출 방법으로 기존 DLSS 기법의 문제점을 파악하고, 이를 개선한 제안 기법에 대해 설명하였다. 4장에서는 제안 기법을 대전 일대 실험지역에 대하여 수행한 결과를 비교분석하였다. 마지막으로, 5장에서는 본 연구의 의의와 결론, 향후 방향성에 대해 서술하였다.


고해상도 광학 영상
고해상도 SAR 영상
전처리 과정
SAR-SIFT 기법을 이용한 특징점 추출
추출된 특징점에서 DLSS 생성
DLSS 기법을 통한 정합쌍 추출
임계치를 이용한 전처리 단계
x, y 변위량을 이용한 후보 정합쌍 추출
RANSAC 기법을 통한 정밀 정합쌍 추출
변환모델식 구성
정합된 SAR 영상

[그림 1-1] 연구 흐름도

2. 특징점 추출

2.1 영상 전처리

광학영상과 SAR영상은 취급하는 파장대 및 취득시 센서 자세의 상이함으로 기하 및 분광 특성 차이가 발생한다. 두 영상 간 정합을 효율적으로 수행하기 위해서는 이를 최소화시키는 전처리 과정이 필수적이다(한유경, 2013). 전처리 과정은 기하 정보를 통일시키는 과정과 분광 차이를 최소화시키는 과정으로 구성된다. 기하 정보를 통일시키기 위해서 두 영상의 좌표계를 WGS84 타원체의 UTM 좌표계로 통일시키고 공간해상도를 일치시킨다. 분광 차이를 최소화하기 위해 다음과 같은 네 과정을 거친다. 첫 번째 과정으로 SAR영상의 분광값을 데시벨(dB) 단위로 변환시킨다. 이는, SAR영상의 분광값 범위가 광학영상에 비해 매우 크므로 줄여 주기 위함이며, SAR영상의 분광값 분포를 광학영상의 분광값 분포와 유사하게 만들기 위함이다(Gomez-Chova *et al.*, 2006). 두 번째 과정으로, SAR영상에 존재하는 스페클잡음의 영향을 줄이기 위해 enhanced Lee 필터를 SAR영상에 적용한다. 이는, 광학영상에는 미흡한 영향을 미치는 스페클잡음이 SAR영상에서는 영상 전반에 걸쳐 존재하여 영상 해석에 악영향을 미치므로 스페클잡음의 영향을 최소화시켜주기 위함이다(Byun *et al.*, 2013; Merkle *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2016). 마지막으로, 두 영상 간 분광 범위를 일치시키기 위해 두 영상을 2% 선형 스트레칭을 수행한 후 8비트(0-255) 영상으로 변환시킨다.

2.2 SAR-SIFT 기법을 통한 특징점 추출

2.2.1 SIFT 기법의 문제점

SIFT 기법은 스케일에 불변(Invariant)한 특징점을 추출하여 정합을 수행하는 기법으로, 영상의 축척, 회전, 그리고 이동에 강인한 장점을 지녀 컴퓨터비전 분야에서 활발히 이용되고 있다(Lowe, 2004). SIFT 기법에서 특징점을 추출하는 과정은 두 단계로 이루어진다. 첫 번째 단계는 스케일 공간상에서 극값을 갖는 점을 후보 특징점으로 추출한다. 이는 스케일 공간상에서 극값을 갖는 점은 영상의 변화가 발생하여도 반복적으로 추출될 확률이 높기 때문이다. 이를 위해서 가우시안 필터 $G(x, y, \sigma)$를 입력 영상 $I(x, y)$에 적용하여 스케일 공간상의 가우시안 영상 $L(x, y, \sigma)$을 생성한다(Koenderink, 1984; Lindeberg, 1994). $L(x, y, \sigma)$은 식 (2-1)과 같이 정의된다.

$$L(x, y, \sigma) = G(x, y, \sigma) * I(x, y) \tag{2-1}$$

여기서 $*$는 컨볼루션 연산을 나타내며, σ는 스케일 인자를 의미하며, x, y는 영상에서의 좌표를 나타내며, 가우시안 필터 $G(x, y, \sigma)$는 식 (2-2)와 같이 정의된다.

$$G(x, y, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}} \tag{2-2}$$

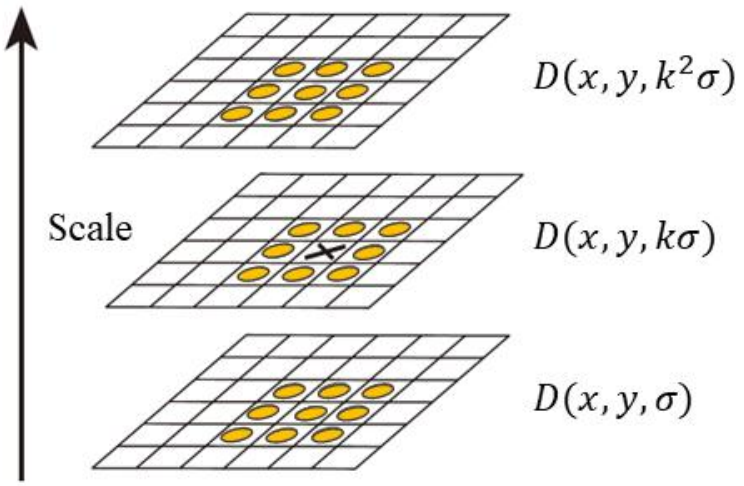
다음으로, $L(x, y, \sigma)$을 스케일 공간상에서 인접한 영상인

$L(x, y, k\sigma)$와의 차를 계산하여 차영상을 생성한다. 차영상 $D(x, y, \sigma)$은 식 (2-3)과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} D(x, y, \sigma) &= (G(x, y, k\sigma) - G(x, y, \sigma)) * I(x, y) \\ &= L(x, y, k\sigma) - L(x, y, \sigma) \end{aligned} \tag{2-3}$$

여기서 k는 스케일에 관여하는 일정한 상수를 의미한다.

스케일 공간상에서 극점을 추출하기 위해, [그림 2-1]과 같이 스케일 공간에서 인접한 총 26개의 화소와 비교하여 극대값 혹은 극소값을 가지는 점을 후보 특징점으로 추출한다.



[그림 2-1] 스케일 가우시안 공간

두 번째 단계는 후보 특징점에서 불안정한 특징점을 제거하는 단계이다. 불안정한 특징점은 낮은 대비를 갖는 점과 에지(edge) 부분에 위치한 점으로, 임계값과 Hessian 행렬을 통해 제거된다. 또 다른 방

법으로는 Harris 행렬을 사용하여 불안정한 특징점을 제거하는 방법이 존재한다(Dufournaud *et al.*, 2000). Harris 행렬 $C(x,y,\sigma)$는 식 (2-4)로 표현된다.

$$C(x,y,\sigma) = \sigma^2 \cdot G_{\sqrt{2}\cdot\sigma} * \begin{bmatrix} (\frac{\partial I_\sigma}{\partial x})^2 & (\frac{\partial I_\sigma}{\partial x}) \cdot (\frac{\partial I_\sigma}{\partial y}) \\ (\frac{\partial I_\sigma}{\partial x}) \cdot (\frac{\partial I_\sigma}{\partial y}) & (\frac{\partial I_\sigma}{\partial y})^2 \end{bmatrix} \quad (2\text{-}4)$$

여기서 $G_{\sqrt{2}\cdot\sigma}$는 표준편차 $\sqrt{2}\cdot\sigma$를 갖는 가우시안 함수를 의미하며, I_σ는 표준편차 σ를 지니는 가우시안 함수를 입력 영상 $I(x,y)$에 컨볼루션한 영상을 의미한다.

다음으로, Harris 행렬 $C(x,y,\sigma)$을 통해 응답함수 $R(x,y,\alpha)$를 생성한다. 응답함수 $R(x,y,\alpha)$는 식 (2-5)와 같이 정의된다.

$$R(x,y,\alpha) = \det(C(x,y,\sigma)) - \alpha \cdot trace^2(C(x,y,\sigma)) \quad (2\text{-}5)$$

여기서 $\det(C(x,y,\sigma))$는 $C(x,y,\sigma)$의 행렬식을 의미하며, $trace^2(C(x,y,\sigma))$는 행렬의 대각 요소의 합의 제곱을 나타내며, α는 임의의 변수를 나타낸다.

불안정한 특징점을 제거하기 위해, Harris 행렬을 통해 생성된 응답함수 $R(x,y,\alpha)$가 특정 임계치를 넘지 못할 경우 불안정한 특징점으로 간주하고 제거한다.

이를 이용하여 다른 공간해상도를 갖는 위성영상 간 특징점을 효율적으로 추출하였다(Dufournaud *et al.*, 2000). 그러나, 이 기법을 SAR영상에 적용할 경우, 스페클잡음을 물방울(blob) 모양의 특징점으

로 간주하여 특징점이 오추출되는 문제점을 보인다(Dellinger *et al.*, 2015; Hong and Schowengerdt, 2005; Xiang *et al.*, 2018).

2.2.2 SAR-SIFT 기법

$G_{x,\alpha}$ $G_{y,\alpha}$

[그림 2-2] 방향성에 따른 $G_{x,\alpha}$, $G_{y,\alpha}$

SAR-SIFT 기법은 SIFT 기법을 SAR영상에 적합하도록 개선시킨 기법이다. 이 기법은 SIFT 기법에서 사용하는 Harris 행렬을 SAR-Harris 행렬로 대체하여, 후보 특징점들에서 스페클잡음과 같은 불안정한 특징점을 제거시킨다.

SAR-Harris 행렬은 식 (2-6)으로 정의되며, 기존 Harris 행렬에서 사용하는 차분 기울기(Gradient by Difference) 부분을 스페클잡음의 영향을 줄이기 위해 영역비 기울기(Gradient by Ratio, GR)로 대체하여 변형한 행렬이다.

$$C_{SH}(x,y,\sigma) = G_{\sqrt{2}\cdot\sigma} * \begin{bmatrix} (G_{x,\alpha})^2 & (G_{x,\alpha}) \cdot (G_{y,\alpha}) \\ (G_{x,\alpha}) \cdot (G_{y,\alpha}) & (G_{y,\alpha})^2 \end{bmatrix} \qquad (2\text{-}6)$$

여기서 $G_{x,\alpha}$, $G_{y,\alpha}$은 각각 x, y방향에 따른 GR값을 의미한다([그림 2-2]). GR은 로그 ROEWA(Ratio Of Exponentially Weighted Averages) 연산자를 사용하여 계산되며, 식 (2-7)로 정의된다.

$$G_{x,\alpha} = \log(R_{x,\alpha})$$
$$G_{y,\alpha} = \log(R_{y,\alpha}) \tag{2-7}$$

여기서, $R_{x,\alpha}$, $R_{y,\alpha}$는 ROEWA를 의미하며, 하나의 예시로 $R_{y,\alpha}$는 식 (2-8)로 정의된다.

$$R_{y,\alpha} = \frac{M_{1,\alpha}}{M_{2,\alpha}} \tag{2-8}$$

$$M_{1,\alpha} = \iint_{x=R,y=R^{+}} I(a+x,b+y) \times e^{-\frac{|x|+|y|}{\alpha}}$$
$$M_{2,\alpha} = \iint_{x=R,y=R^{-}} I(a+x,b+y) \times e^{-\frac{|x|+|y|}{\alpha}} \tag{2-9}$$

여기서, α는 지수 가중 변수이다. 여기서 $M_{1,\alpha}$과 $M_{2,\alpha}$는 영역의 평균값에 지수 가중치를 의미(식 (2-9))하며 [그림 2-2]에 표현되었다. (a,b)는 영역에서의 중심 좌표를 의미하고, R은 영상의 영역 안을 나타내며, +, -는 반대되는 영역을 나타내는 표현이다.

식 (2-7)을 통해 계산된 GR을 이용하여 SAR-Harris 행렬이 식 (2-6)과 같이 표현된다. 이를 이용하여 특징점 추출에 사용되는 응답 함수 $R_{SH}(x,y,\sigma)$를 생성한다(식 (2-10)).

$$R_{SH}(x,y,\sigma) = \det(C_{SH}(x,y,\alpha)) - d \bullet trace^2(C_{SH}(x,y,\alpha)) \qquad (2\text{-}10)$$

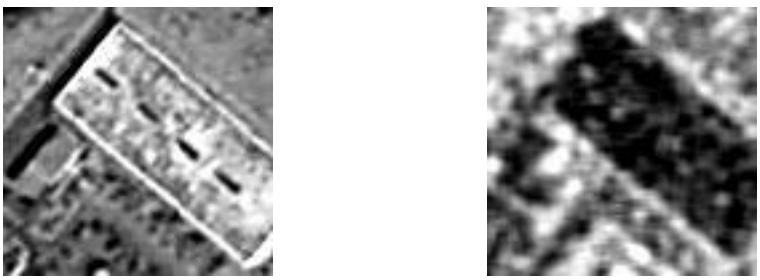
여기서, d는 임의 변수 값을 가리킨다.

SAR-SIFT 기법은 SAR-Harris 행렬을 계산하기 위한 스케일 공간을 형성하고, 각 스케일에서 3×3 크기의 윈도우 안에서 지역적 극점이면서 특정 임계값(d_{SH})을 넘는 지점을 특징점으로 추출한다.

본 연구에서는 SAR-SIFT 기법을 개발한 Dellinger *et al.*(2015)이 제안하는 변수값을 적용하여 실험을 수행하였다. 스케일 공간을 형성하기 위한 초기 스케일 σ는 2로 설정하였으며, 스케일 비율은 $2^{1/3}$, d는 0.04, d_{SH}는 0.8로 설정하였다.

3. 정합쌍 추출

3.1 DLSS 기법을 통한 정합쌍 추출

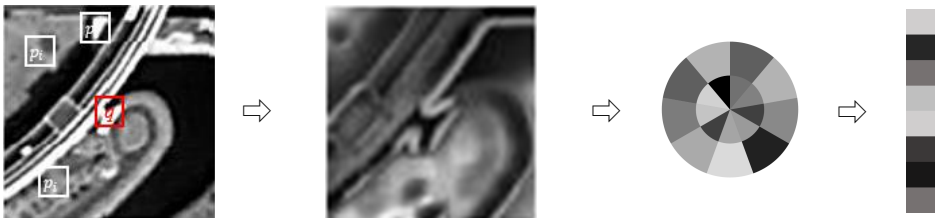


광학영상 SAR영상

[그림 3-1] 광학영상과 SAR영상 간 분광 비선형성

SAR-SIFT 기법은 추출된 특징점에서 분광정보의 유사도를 통해 정합쌍을 추출한다. 이 경우, 영상 간 분광 특성이 다를 시 SAR-SIFT 기법을 적용하는데 어려움이 존재한다. [그림 3-1]과 같이 광학영상과 SAR영상에는 분광 비선형성을 보인다. 따라서, SAR-SIFT 기법을 통하여 두 영상에서 정합쌍을 추출하는 것은 어렵다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 개선하기 위해, SAR-SIFT 기법을 통해 추출된 특징점에서 분광 비선형성에 강인한 형상 서술자 벡터를 생성하여 정합쌍을 추출하고자 하였다.

3.1.1 형상 서술자 LSS



[그림 3-2] LSS 생성 과정
(a) 국부적 영역 원영상 (b) 상관관계 표면 ($S_q(x,y)$) (c) 로그 폴라 좌표계 (d) 벡터

LSS는 국부적(local) 영역에서 영상 내 중심 패치를 기준으로 주변 패치들과의 유사성을 통해 형상 정보를 표현한다(Ye and Shan, 2014). LSS가 생성되는 과정은 [그림 3-2]에서 표현되었다. 우선, SSD(Sum of Square Difference)가 일정 영역 안에서 5×5 크기의 중심 지점 패치(q)와 영역 안 모든 주변 지점 패치(p_i)와의 차이의 제곱합으로 계산된다([그림 3-2]의 (a)). 그 후, 상관관계 표면(correlation surface) $S_q(x,y)$는 SSD를 중심 패치의 분광 분산값와 허용가능한 잡음값 중 최대값으로 정규화하여 식 (3-1)로 표현된다.

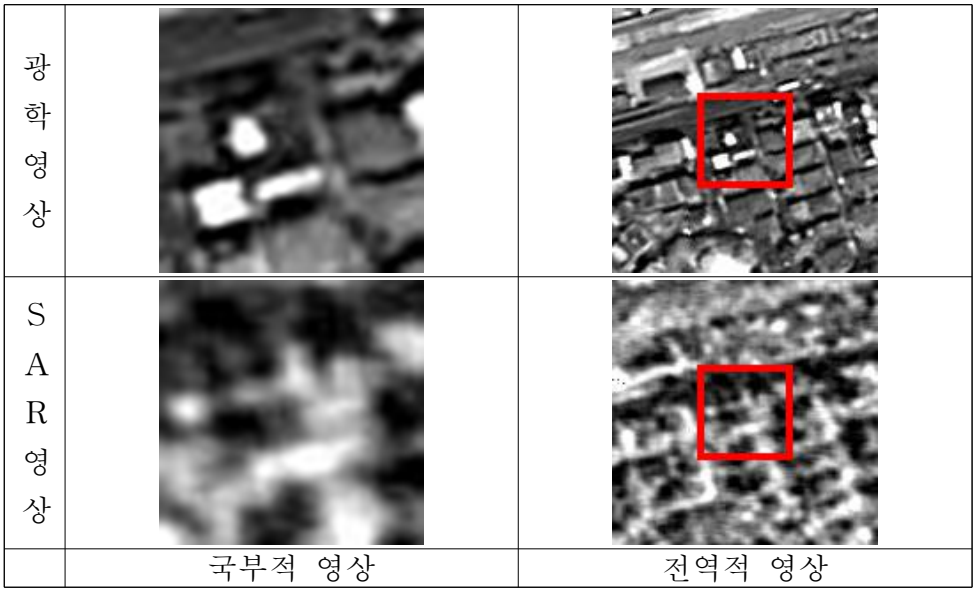
$$S_q(x,y) = \exp\left(-\frac{SSD_q(x,y)}{\max(var_{noise}, var_{auto}(q))}\right) \qquad (3\text{-}1)$$

여기서, $SSD_q(x,y)$는 (x,y)에서의 SSD(sum of square difference) 값을 의미하고, var_{noise}는 허용가능한 잡음값을 의미하며, $var_{auto}(q)$은

중심 패치 q의 분산값을 나타낸다.

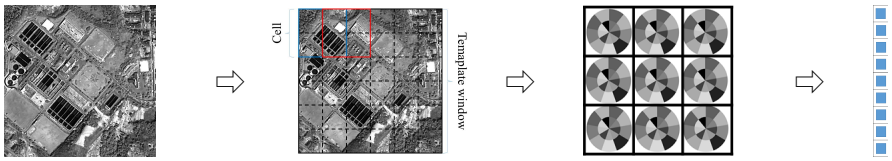
정규화된 $S_q(x,y)$은 크기 및 회전 변환된 객체를 동일하게 표현하는 로그 폴라(log-polar) 좌표계로 변환되고([그림 3-2]의 (c)), 세부 영역으로 분할된다. 각 분할된 영역은 영역 내에서 최대값으로 표현되며, LSS를 표현하는 구성요소로 사용된다([그림 3-2]의 (d)). 최종적으로, LSS는 분광값에 불변하게 표현하기 위해 0부터 1까지의 범위로 선형 스트레칭 된다.

LSS는 국부적 영역에서의 영상의 형상을 표현한다. 그러나, LSS는 [그림 3-3]과 같이 광학영상과 SAR영상에서는 국부적 영역에서의 형상이 달라, 두 영상 간 정합하는데 있어 충분한 정보를 제공할 수 없다(Ye *et al.*, 2017b). 이에 비해, [그림 3-3]에 국부적 영역 보다 넓은 전역적 영상에서는 두 영상 간 형상이 유사함을 확인할 수 있다.



[그림 3-3] 광학영상과 SAR영상 간 형상 비교

3.1.2 형상 서술자 벡터 DLSS



[그림 3-4] DLSS 생성 과정

이러한 한계점을 개선하기 위해 LSS 값들을 벡터 형태로 연결한 DLSS가 제안되었다(Ye *et al.*, 2017b). DLSS는 LSS와 같이 국부적 영역 보다 확장된 영역을 설정하고, 설정된 영역 안에서의 LSS 값들을 연결하여 생성한 벡터이다. DLSS는 세 과정을 통해 생성된다([그림 3-4]). 첫째, 템플릿 윈도우(template window)의 크기를 설정하고, 영상에서 템플릿 윈도우로 영역을 설정한다. 둘째, 템플릿 윈도우를 $n \times n$ 화소 크기의 칸(cell)으로 분할한다. 셋째, 템플릿 윈도우 안에서 칸의 절반 크기 간격으로 칸의 LSS 값을 계산하고, 이 값을 정규화시킨다. 마지막으로, 템플릿 윈도우 안에 존재하는 LSS 값들을 벡터로 연결하여 DLSS를 생성한다.

본 연구에서 LSS 서술자를 형성하기 위한 변수들은 Ye *et al.*(2017b)에서 제안하는 변수 값을 사용하였다. LSS를 계산하기 위해 필요한 변수인 허용 잡음값 var_{noise}은 3000, 칸의 크기는 7×7 크기로 설정하였으며, 로그 폴라 변환에서는 2개 반경과 9개 각으로 분할하였다. 템플릿 윈도우 크기는 40×40에서 150×150까지 10단위씩 증가시켜 실험하였고, 크기가 120×120 일 때 정합쌍이 가장 많이 추출되었다. 따라서, 본 연구에서는 템플릿 윈도우 크기를 120×120 크기로 설정하여 실험을 수행하였다.

3.1.3 DLSS 기법의 문제점

기존 DLSS 기법은 다음과 같은 과정을 통해 정합쌍을 추출한다. 첫 번째 단계는 기준영상에서만 Harris 기법을 통해 특징점을 추출한다. 두 번째 단계는 추출된 특징점 좌표를 기준으로 목적영상에서 탐색 영역을 설정한다. 여기서, 탐색 영역은 x, y방향으로 ± 10화소로 제한하였다. 설정된 탐색 영역 내에서 DLSS 간 상관관계(ρ)를 계산하여, 목적영상에서 최댓값을 지니는 점을 정합지점으로 추출한다. 두 영상에서의 DLSS 간 상관관계(ρ)는 식 (3-2)와 같이 계산된다.

$$\rho(A,B) = \frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(\frac{\overline{A_i-\mu_A}}{\sigma_A})(\frac{\overline{B_i-\mu_B}}{\sigma_B}) \qquad (3\text{-}2)$$

A_i는 광학영상에서의 특징점의 DLSS 요소를 나타내며, B_i는 SAR 영상에서의 탐색 영역 내 화소의 DLSS 요소를 나타내며, N은 DLSS의 차원 수를 의미한다. μ_A, μ_B은 DLSS인 A, B 값의 평균을 의미하며, σ_A, σ_B은 DLSS인 A, B 값의 표준편차를 나타낸다.

기존 DLSS를 이용한 강도기반 정합기법의 경우, 정합쌍을 추출하는데 세 가지 한계점을 지닌다. 첫째, 탐색 범위가 x, y방향으로 ± 10화소 이상일 시 적용하는데 어려움이 존재한다(Ye *et al.*, 2017b). 광학영상과 SAR영상은 좌표계가 일치하더라도 수십m이상 차이가 발생한다(DLR, 2008). 따라서, 1m급 고해상도 광학영상과 SAR영상은 기하학적 위치 차이가 수십 화소이상 발생할 수 있으며, 기존 기법을 고해상도 두 영상 간 정합에 적용하기 어렵다. 둘째, 탐색 범위로 설정된 영역 안의 모든 화소를 고려해야하므로 계산량이 많으며, 탐색 범위가 늘어날 시 계산량이 급격히 증가한다. 셋째, 탐색 범위 증가할

경우 두 영상에서 오정합쌍이 다수 추출될 수 있다.

3.2 제안된 정합쌍 추출 방법

다수의 오정합쌍이 존재할 경우, 오정합쌍 제거에 유용한 RANSAC 기법의 성능이 현저히 감소하는 한계점이 존재한다. 이를 해결하기 위해, 본 연구에서는 전처리 단계와 후보 정합쌍 추출 단계를 적용하여 개략적인 오정합쌍을 제거한 후 RANSAC 기법을 최종적으로 적용하여 정밀 정합쌍을 추출하고자 하였다.

3.2.1 전처리 단계

본 연구에서는 1m급 고해상도 광학영상과 SAR영상 간 정합을 위해, DLSS를 이용하여 기존 기법의 한계점을 개선한 방법론을 제안하였다. 우선, SAR-SIFT 기법을 통해 광학영상과 SAR영상에서 공통된 특징점을 추출하였다. 기존 DLSS 기법은 기준영상의 좌표를 기준으로 탐색 영역 안에 존재하는 모든 화소를 고려하였으나, 본 연구에서는 탐색 영역 안에 있는 특징점들만 고려하였다. 이를 통해, 제안 기법의 계산의 효율성을 높일 수 있으며, 탐색 범위를 넓게 설정할 수 있다. 그러나, 탐색 범위가 증가하게 되면, 오정합쌍이 추출될 수 있는 가능성 또한 증가하게 된다. 이에, 전처리 단계를 적용하여 신뢰도가 낮은 정합쌍을 제거하였다.

추출된 정합쌍 중 DLSS 간 상관관계가 낮은 값을 가질수록 정합쌍의 신뢰도가 낮을 가능성이 크다. 이를 전처리 단계로 임계치를 설정하여, 이를 넘지 못하는 정합쌍은 오정합쌍으로 간주하여 제거하였다.

3.1.2에서 언급하였듯이, 고해상도 광학영상과 SAR영상 간 기하학적 위치 차이가 수십 화소이상 발생 가능하므로, 고해상도 광학영상

과 SAR영상 간 정합을 위해서는 탐색 영역을 넓게 설정하여야 한다. 따라서, 고해상도 광학영상과 SAR영상 간 정합에는 임계치를 이용한 전처리 단계가 필수적이다. 임계치 값이 높을 경우 정합쌍 수가 급감하고 낮을 경우 신뢰성이 떨어지는 정합쌍이 추출되는 문제점을 지닌다. 따라서, 임계치 값으로는 0.3에서 0.45까지의 값이 권장되며, 본 연구에서는 임계치 값을 0.45로 설정하여 실험을 수행하였다. 또한, 탐색 범위를 x, y방향으로 ±200화소를 설정하여 실험을 진행하였다.

3.2.2 후보 정합쌍 추출 단계

전처리 단계를 통해 추출된 정합쌍은 단순한 임계치 방법을 적용하여 추출된 것으로, 오정합쌍을 포함하고 있을 가능성이 크다. 이에 전처리 단계를 통해 추출된 정합쌍에서 개략적으로 오정합쌍을 제거하고 후보 정합쌍을 추출하고자 한다. 후보 정합쌍을 추출하는 방법으로는 정합쌍을 이루는 특징점 간 x, y 변위량을 이용하였다. 참정합쌍[4]들을 이루는 특징점 간 x, y 변위량은 유사하므로(Kupfer *et al.*, 2015; Ma *et al.*, 2017), 본 연구에서는 이를 이용하여 후보 정합쌍을 추출하였다. 후보 정합쌍을 추출하는 방법은 다음과 같다.

우선, 정합쌍을 이루는 특징점 간 x, y 변위량를 계산한다(식 (3-3)).

$$\begin{aligned} \triangle x_i &= x_i - \hat{x_i} \\ \triangle y_i &= y_i - \hat{y_i} \end{aligned} \tag{3-3}$$

여기서 $\triangle x_i$, $\triangle y_i$는 정합쌍 i를 이루는 특징점 간 x, y 변위량을 의미하며, $\hat{x_i}$와 $\hat{y_i}$은 기준영상의 특징점 좌표를 나타내며, x_i와 y_i는 목적영상의 특징점 좌표를 나타낸다.

참정합쌍들을 이루는 특징점 간 x, y 변위량은 유사하므로, 참정합쌍들을 구성하는 특징점들 간 변위량의 분포는 일정 영역 안에 밀집되어 있을 것이다. 따라서, 본 연구에서는 계산된 변위량이 임계치 범위에 존재할 시 후보 정합쌍으로 추출하고(식 (3-4)), 나머지 정합쌍은 오정합쌍으로 간주하여 제거한다.

---

4) 참정합쌍은 두 영상 간 특징점의 위치가 동일 지역인 정합쌍을 의미한다.

$$x_{thresh1} \leq \triangle x_i \leq x_{thresh2}$$
$$y_{thresh1} \leq \triangle y_i \leq y_{thresh2} \quad (3\text{-}4)$$

여기서 $x_{thresh1}$와 $x_{thresh2}$은 x방향 변위량의 임계 범위를 나타내며, $y_{thresh1}$와 $y_{thresh2}$는 y방향 변위량의 임계 범위를 나타낸다.

임계 범위를 나타내는 값은 다음과 같은 과정으로 계산된다. 첫째, 전처리 단계에서 추출된 정합쌍에서 8쌍을 임의로 추출한다. 둘째, 임의로 추출된 정합쌍들을 이루는 특징점들 간 x와 y 변위량을 계산하고 평균값을 구한다. 셋째, 평균값에서 x, y 방향으로 ±15화소 영역을 설정하고, 영역 안에 존재하는 정합쌍 수를 측정한다. 넷째, 충분한 수의 반복 과정을 통해 첫째부터 셋째 과정을 반복한다. 다섯째, 가장 많은 수의 정합쌍을 지니는 변위량 평균값을 선택하고, 선택된 값에서 x, y방향 ±15화소 영역을 임계 범위로 설정한 후 영역 안에 존재하는 정합쌍을 후보 정합쌍으로 추출한다.

이 과정은 정밀한 정합쌍을 추출하는 과정이 아닌, 개략적인 후보 정합쌍을 추출하는 과정으로 임계치 범위를 x, y 방향으로 ±15화소로 설정하였다. 본 연구에서는 충분한 반복 수로 2,000을 입력하여 실험을 수행하였다.

3.2.3 정밀 정합쌍 추출 단계

본 연구에서는 후보 정합쌍 중 정밀 정합쌍을 추출하기 위해 오정합쌍 제거에 유용한 RANSAC 기법을 적용하였다. RANSAC 기법은 변환 모델식을 설정하고, 무작위 샘플을 추출하고 반복 과정을 통해 목적 변환 모델식에 최대 일치하는 샘플을 추출하는 기법이다 (Fischler *et al.*, 1981). 이 기법은 컴퓨터비전 분야 이외에 위성영상 정합에도 오정합쌍을 제거하기 위해 활발히 적용되고 있다(Kim and Im, 2003).

본 연구에서는 정합 변환 모델식으로 어핀 변환식을 적용하므로, 목적 변환 모델식을 어핀 변환식으로 설정하였다. RANSAC 기법은 다음과 같은 과정으로 적용된다. 첫째, 어핀 변환식을 구성하기 위해 최소 세 쌍이 필요하므로, 후보 정합쌍 중 무작위로 3쌍의 정합쌍을 추출한다. 둘째, 무작위로 추출된 정합쌍을 이용하여 어핀 변환식을 구성하고, 구성된 변환식으로 나머지 정합쌍에서의 목적영상 좌표를 기준영상 좌표로 변환된 좌표를 산출한다. 셋째, 변환된 좌표값이 기준영상의 좌표값과의 차이가 임계치보다 작을 때 일치점으로 간주하고 일치점 수로 측정한다. 넷째, 충분한 수의 반복 과정을 통해 첫째에서 셋째 과정을 반복한다. 다섯째, 가장 많은 수의 일치점을 포함하는 어핀 변환식 모델을 선택하고, 일치점에 해당하는 정합쌍들을 최종 정합쌍으로 추출한다.

이렇게 추출된 정합쌍은 정밀 정합쌍으로 간주하고, 정밀 정합쌍을 통해 어핀 변환식을 구성하여 정합을 수행하였다. 본 연구에서는 정밀한 정합쌍을 추출하기 위해 셋째 과정에서의 임계치를 2(m)로 설정하였으며, 충분한 반복 수로 2,000을 입력하여 실험을 수행하였다.

3.3 정합 및 정확도 평가 방법

3.3.1 어핀 변환식

어핀 변환은 직선, 거리의 비와 평행성을 보존하는 변환으로, 연산 과정이 단순하고 기하관계를 정확히 나타내어 위성영상 간 정합에도 활발히 적용되고 있다(Fonseca *et al.*, 1996). 어핀 변환식은 식 (3-5)와 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a\,b \\ c\,d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e \\ f \end{bmatrix} \tag{3-5}$$

여기서, x, y는 기준영상의 좌표를 나타내며, x', y'는 목적영상의 좌표를 나타낸다. a, b, c, d, e, f는 어핀변환계수를 의미한다. a, b, c, d는 회전과 크기에 대한 정보를 갖는 변수이며, e와 f는 이동에 대한 변수이다.

식 (3-5)를 하나의 행렬로 표현하기 위해 homogeneous 형태로 표현하면 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a\,b\,e \\ c\,d\,f \\ 0\,0\,1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \tag{3-6}$$

여기서, 어핀 변환의 자유도는 6이므로, 어핀 변환 계수를 구하기 위해서는 최소 3쌍의 정합쌍이 필요시 된다. 임의의 정합쌍 3쌍의 좌표가 기준영상 좌표 세 점 (x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3) 목적영상 좌표

세 점 (x_1', y_1'), (x_2', y_2'), (x_3', y_3')이 주어졌을 때, 어핀 변환 계수에 대해 정리한 식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & x_1 & y_1 & 0 & 1 \\ x_2 & y_2 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & x_2 & y_2 & 0 & 1 \\ x_3 & y_3 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & x_3 & y_3 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1' \\ y_1' \\ x_2' \\ y_2' \\ x_3' \\ y_3' \end{bmatrix} \tag{3-7}$$

여기서, 기준영상 좌표 행렬을 A로 목적영상 좌표 행렬을 B로 설정하고, 어핀 변환 계수 행렬을 X로 표현하면 식 (3-8)과 같이 정리된다. 어핀 변환식은 식 (3-9)와 (3-10)의 과정을 통해 도출된다.

$$AX = B \tag{3-8}$$

$$A^T AX = A^T B \tag{3-9}$$

$$X = (A^T A)^{-1} A^T B \tag{3-10}$$

추정된 어핀 변환식은 기준영상 좌표를 목적영상 좌표로 변환하기 위한 식으로, 추정된 어핀 변환식의 역행렬을 이용하여 투영변환을 통해 정합을 수행한다.

정합쌍의 수가 3개를 초과할 경우는 최소제곱법을 통하여 어핀 변환계수를 추정할 수 있다. 본 연구에서는 RANSAC 과정을 통해 최종적으로 추출된 정합쌍에 최소제곱법을 적용하여 어핀 변환식을 추정하였다.

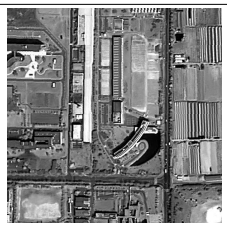
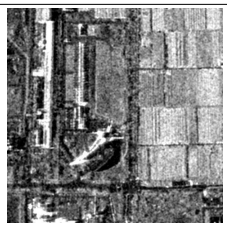
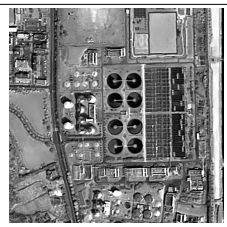
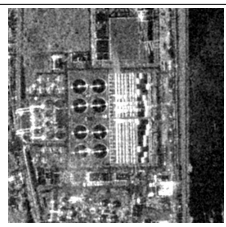
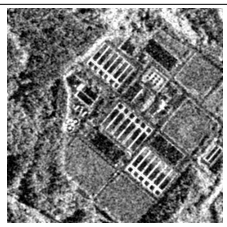
3.3.2 정확도 평가 방법

RMSE는 평균 제곱근 오차로, 기준영상의 좌표와 목적영상의 좌표 차의 평균값에 제곱근으로 정의된다. RMSE는 광학영상과 SAR영상 간 정합의 정확도를 정략적으로 측정하는 대표적인 지표로 많은 연구에서 사용되고 있다(Han and Byun, 2015; Merkle *et al.*, 2015; Reinartz *et al.*, 2011). RMSE는 식 (3-11)과 같이 표현된다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\|(x_i, y_i) - (\hat{x_i}, \hat{y_i})\|^2} \qquad (3\text{-}11)$$

여기서, (x_i, y_i)는 정합된 목적영상의 좌표이며, $(\hat{x_i}, \hat{y_i})$는 기준영상의 좌표를 나타내며, n은 총 검사점 수를 의미한다.

4. 실험의 적용 및 평가

실험지역 1		실험지역 2	
			
KOMPSAT-2	Cosmo-SkyMed	KOMPSAT-2	Cosmo-SkyMed
실험지역 3		실험지역 4	
			
KOMPSAT-2	TerraSAR-X	KOMPSAT-2	TerraSAR-X

[그림 4-1] 전처리 과정 후 광학영상과 SAR영상의 실험지역

4.1 실험지역 및 자료

본 연구에서는 고해상도 광학 및 SAR영상 간 정합을 수행하기 위해서 대전 지역 일대를 실험 지역으로 선정하였고, 실험 지역은 도심지역에 존재하는 다양한 지역으로 구성하였다. 실험영상으로는 광학영상인 KOMPSAT-2 흑백영상과 SAR영상인 Cosmo-SkyMed와 TerraSAR-X영상이 사용되었다. 2009년 04월 12일에 촬영된 KOMPSAT-2영상은 공간해상도 1m를 지니며, 16.82°의 촬영각을 가진다. 2009년 07월 23일에 촬영된 Cosmo-SkyMed영상은 공간해상도 1m를 지니며, 평균입사각(Incidence angle) 29.23°를 지닌다. 2009

년 8월 25일 촬영된 TerraSAR-X영상은 공간해상도 1m를 지니며, 평균입사각(Incidence angle) 39.17°를 지닌다. 실험에 사용된 고해상도 광학영상과 SAR영상에 대한 제원은 [표 4-1]과 같다.

[표 4-1] 실험에 사용된 고해상도 광학영상과 SAR영상 제원

제원	KOMPSAT-2	Cosmo-SkyMed	TerraSAR-X
공간해상도	1m	1m	1m
분광해상도 (bit)	10	16	16
촬영각 (광학영상)	16.82°	×	×
평균입사각 (SAR영상)	×	29.23°	39.17°
촬영 날짜	2009.04.12	2009.07.23	2009.08.25

실험대상지역은 대전 일대의 총 네 지역으로 선정하였으며, 각 지역은 600×600 화소의 크기로 광학영상과 SAR영상의 중복되는 영역으로 구성하였다([그림 4-1]). 첫 번째와 두 번째 실험지역은 KOMPSAT-2영상과 Cosmo-SkyMed영상으로 구성하였으며, 세 번째와 네 번째 실험지역은 KOMPSAT-2영상과 TerraSAR-X영상으로 구성하였다. 본 연구에서는 도심지역에서 광학영상과 SAR영상 간 정합을 성공적으로 수행하는데 있다. 따라서, 도심지역에 존재할 수 있는 다양한 장소를 실험지역으로 선정하고자 하여, 실험지역으로는 인공구조물이 적게 분포하는 지역, 다양한 토지 피복이 존재하는 지역, 원, 네모와 같은 뚜렷한 형상이 존재하는 지역, 인공구조물이 밀집된 지역을 선정하였다. 실험지역 1은 인공구조물이 적게 분포하는 지역

으로, 대체로 평평한 지역으로 농경지와 낮은 건물로 구성된 지역이다. 실험지역 2는 다양한 토지 피복이 존재하는 지역으로, 원 형상이 뚜렷한 하수처리시설과 도로, 식생 등으로 구성된다. 실험지역 3은 네모 형상이 뚜렷한 지역으로, 상수도처리시설과 산림지역으로 구성된다. 실험지역 4는 인공구조물이 밀집된 지역으로, 높은 건물과 낮은 건물이 혼재되어 구성된다.

광학영상과 SAR영상 간 존재하는 기하 및 분광 차이를 최소화시키기 위해 전처리 과정을 적용하였다. 모든 실험영상을 WGS84 타원체의 UTM 52N 좌표계로 통일 시켰으며, 공간해상도를 1m로 일치시켰다. 또한, 분광 차이를 줄이기 위해 SAR영상의 분광값에 로그를 취해 데시벨 단위로 변환 후, 스페클잡음의 영향을 줄이기 위해 5×5 크기의 enhanced Lee 필터를 적용하였다. 3×3 enhanced Lee 필터를 이용할 경우, 스페클잡음의 영향이 미미하게 감소하고, 7×7 enhanced Lee 필터를 이용할 경우, 스페클잡음의 영향이 크게 감소하나 공간해상도가 감소하는 문제점이 존재하므로 5×5 크기의 enhanced Lee 필터를 적용하였다. 최종적으로, 두 영상 간 분광 범위를 일치시키기 위해, 2% 선형 스트래칭 후 8비트영상으로 변환시켰다. 전처리 과정을 적용하여 두 영상 간 차이를 최소화시켰음에도, 기하 및 분광 정보 차이가 존재함을 [그림 4-1]을 통해 확인할 수 있다.

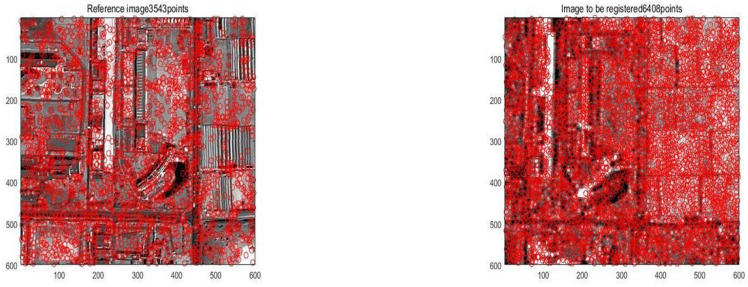
4.2 특징점 추출 결과

본 연구에서는 기존 SIFT 기법은 SAR영상에 적용시 스페클잡음을 특징점으로 추출하기 때문에, SAR영상에 적합하도록 개선된 SAR-SIFT 기법을 통해 광학영상과 SAR영상 간 특징점을 추출하였다. 본 장에서는 두 기법을 통해 두 영상에서 특징점을 추출하여, SAR-SIFT 기법이 SIFT 기법에 비해 광학영상과 SAR영상에서의 특징점 추출에 적합함을 비교평가하고자 하였다.

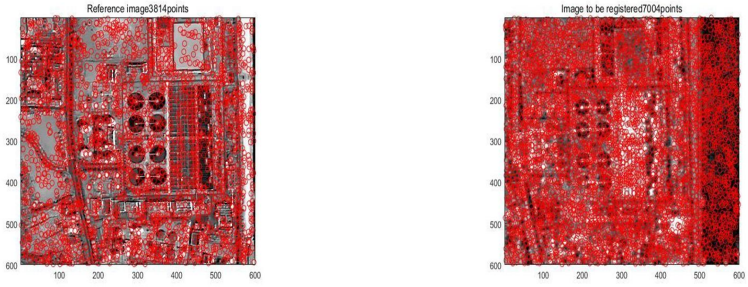
4.2.1 SIFT 기법을 통한 특징점 추출 결과

[그림 4-2]는 네 실험지역에 대해 SIFT 기법을 통해 광학영상과 SAR영상에서 특징점을 추출한 결과이다. 네 실험지역에 대해 광학영상에서는 특징점이 각각 3,543개, 3,814개, 4,318개, 4,049개 추출되었으며, SAR영상에서는 6,408개, 7,004개, 7,583개, 6,858개 추출되었다. 모든 실험지역에 대해 SAR영상에서 광학영상에 비해 특징점이 평균 3,032개 많이 추출되었다. 이는 SAR영상에서 스페클잡음이 특징점으로 오추출된 것으로 판단되며, [그림 4-2]의 SAR영상에서 과도하게 많은 특징점이 추출됨을 시각적으로 확인할 수 있다.

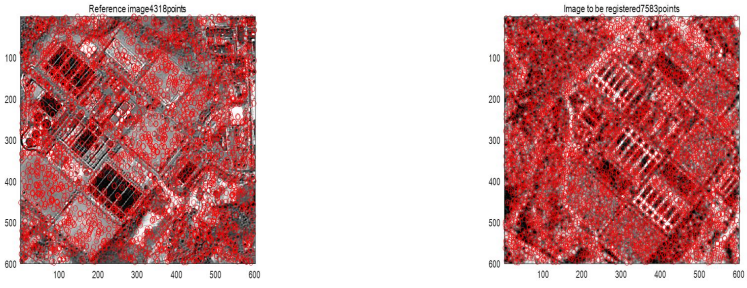
다수의 특징점이 오추출될 시 두 영상 간 공통된 특징 요소가 추출되어도, 오정합쌍이 다수 추출될 수 있다. 또한, 제안 기법을 적용하는데 계산량 또한 급증하는 단점을 유발한다. 따라서, SIFT 기법을 통해 광학영상과 SAR영상 간 특징점을 추출하는 것은 적합하지 않다.



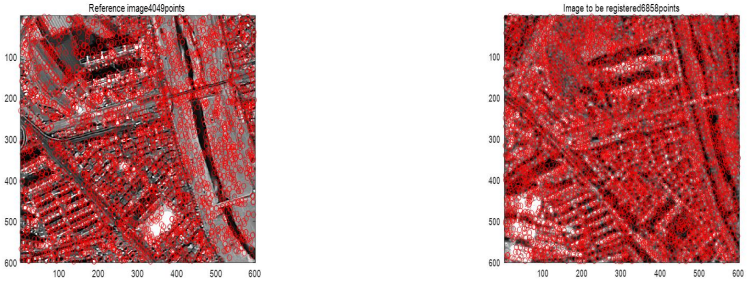
실험지역 1(광학영상: 3,543개, SAR영상: 6,408개)



실험지역 2(광학영상: 3,814개, SAR영상: 7,004개)



실험지역 3(광학영상: 4,318개, SAR영상: 7,583개)



실험지역 4(광학영상: 4,049개, SAR영상: 6,858개)

[그림 4-2] SIFT 기법을 통한 특징점 추출 결과
(왼쪽: 광학영상, 오른쪽: SAR영상)

4.2.2 SAR-SIFT 기법을 통한 특징점 추출 결과

[그림 4-3]은 SAR-SIFT 기법을 통해 네 실험지역에서 특징점이 추출된 결과를 보여준다. 총 네 실험지역에 대해 광학영상에서는 각각 2,046개, 2,172개, 2,364개, 2,867개 추출되었으며, SAR영상에서는 2,202개, 2,633개, 3,522개, 3,280개 추출되었다. 모든 실험지역에 대해 광학영상과 SAR영상 모두에서 SIFT 기법에 비해 특징점 수가 적게 추출되었으며, 광학영상과 SAR영상 간 특징점 수 차이가 현저하게 감소되었다.

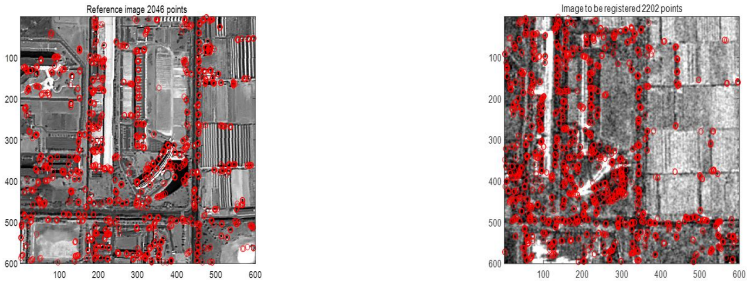
각 실험지역에 대해서는 광학영상 중 실험지역 4에서 특징점이 최대로 추출되었다([그림 4-3]). 실험지역 4는 건물이 밀집된 지역으로, 다양한 인공구조물이 존재하여 특징점이 가장 많이 추출된 것으로 판단된다. 실험지역 1에서는 가장 적은 수의 특징점이 추출되었다. 이는, 인공구조물이 다른 실험지역에 비해 적게 분포하여, 특징점이 적게 추출된 것으로 판단된다.

SAR영상에서는 실험지역 3에서 가장 많은 특징점이 추출되었다. 이는 실험지역 3에서 광학영상과의 기하학적 위치 차이로 인해 영상의 왼쪽 부분에 산림지역이 분포하고 있다. 이로 인해, 산림지역의 물방울(blob) 모양 지역들이 특징점으로 다수 추출되어, 다른 실험지역에 비해 많은 수의 특징점이 추출된 것으로 보인다. 광학영상에서와 동일하게 실험지역 1에서 특징점이 가장 적게 추출되었다. 이는, 앞서 언급한 이유와 동일할 것으로 보인다.

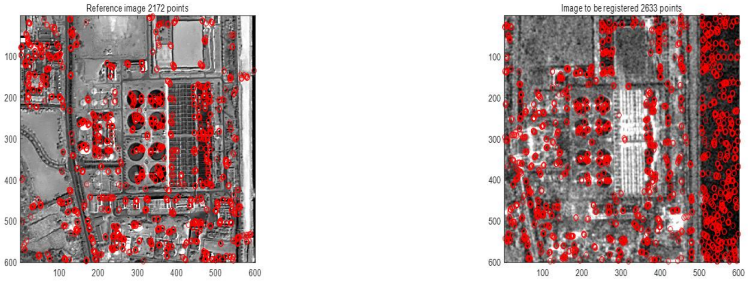
모든 실험지역에서 광학영상과 SAR영상에서 대체로 인공구조물 혹은 물방울(blob) 모양의 점들이 특징점으로 추출되었다([그림 4-3]). 또한, 모든 실험지역에 대해 두 영상에서 추출된 특징점 분포가 유사하다([그림 4-3]). 이를 통해, SAR영상에 존재하는 스페클잡음의 영향을 줄여 SAR-SIFT 기법이 분광 특성이 다른 광학영상과 SAR영

상에서 공통된 특징점을 추출할 수 있음을 보여주었다.

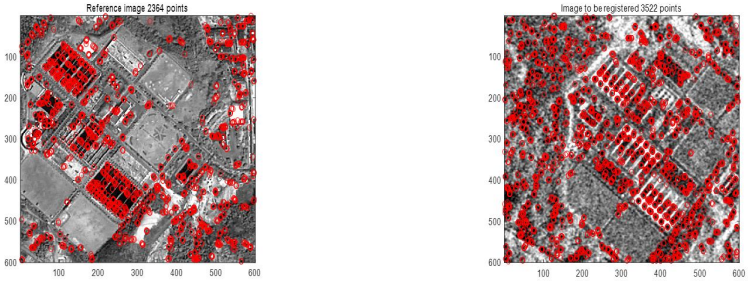
그러나, 특징점 분포가 인공구조물의 모서리에 밀집되어 추출되는 한계점을 보이며, 이를 통해 인공구조물이 존재하지 않는 영상에서는 SAR-SIFT 기법을 적용하는데 어려움이 존재할 것으로 추측된다.



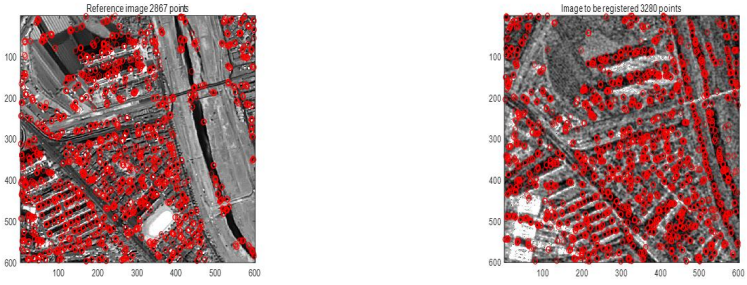
실험지역 1(광학영상: 2,046개, SAR영상: 2,202개)



실험지역 2(광학영상: 2,172개, SAR영상: 2,633개)



실험지역 3(광학영상: 2,364개, SAR영상: 3,522개)



실험지역 4(광학영상: 2,867개, SAR영상: 3,280개)

[그림 4-3] SAR-SIFT 기법을 통한 특징점 추출 결과
(왼쪽: 광학영상, 오른쪽: SAR영상)

4.3 정합쌍 추출 결과

광학영상과 SAR영상은 영상 간 분광 비선형성을 이루기 때문에 분광 정보의 유사도를 통해 정합쌍을 추출하는데 어려움이 존재한다. 이를 해결하기 위해, 추출된 특징점에서 강도기반 정합기법인 DLSS 기법을 이용하여 정합쌍을 추출하였다. 제안 기법의 적합성을 평가하기 위해, 분광 정보의 유사도를 이용하는 기존 기법인 SIFT 기법과 SAR-SIFT 기법을 이용하여 정합쌍 추출결과를 비교평가하였다.

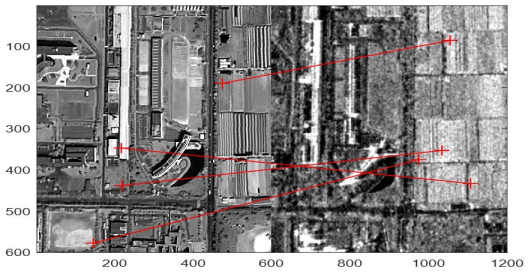
4.3.1 기존 기법을 통한 정합쌍 추출 결과

SIFT 기법과 SAR-SIFT 기법은 분광 정보의 유사도를 이용하여 정합쌍을 추출하는 기법으로 제안 기법에 비해 오정합쌍을 추출할 것으로 예측된다. [그림 4-4]은 SIFT 기법을 통해 총 네 실험지역에서 정합쌍을 추출한 결과이며, [그림 4-5]은 SAR-SIFT 기법을 적용하여 총 네 실험지역에 정합쌍 추출 결과를 보여준다.

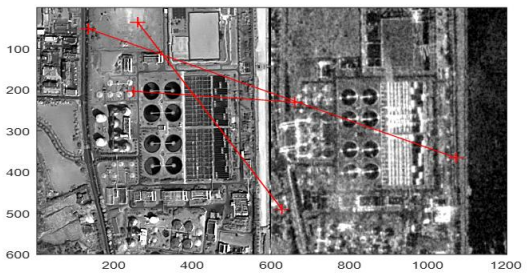
SIFT 기법을 통해서는 네 실험지역에 대해 각각 4, 3, 4, 5쌍의 정합쌍이 추출되었다([그림 4-4]). 실험지역 1, 2, 3에서는 추출된 정합쌍 모두 오정합쌍으로 구성되었으며, 실험지역 4에서는 5쌍 중 2쌍의 참정합쌍과 3쌍의 오정합쌍으로 구성되었다. SAR-SIFT 기법을 통해서는 네 실험지역에 대해 각각 4, 4, 3, 6쌍의 정합쌍이 추출되었다. 실험지역 1에서는 정합쌍이 4쌍 추출되었으며, 2쌍의 참정합쌍과 2쌍의 오정합쌍으로 구성되었다. 참정합쌍 2쌍은 밀집되어 정합쌍이 추출되어 식별이 어려워 [그림 4-5]에 파란색 선으로 표현하였으며, 초록색 네모 부분을 확대하여 [그림 4-6]에 표현하였다. 실험지역 2에서는 4쌍 모두 오정합쌍으로 구성되며, 식별이 어려운 정합쌍은 파란색

선으로 표현하였으며([그림 4-5]), 초록색 네모 부분을 확대하여 [그림 4-6]에 표현하였다. 실험지역 3에서는 정합쌍 모두 오정합쌍으로 구성되었다. 실험지역 4에서는 6쌍의 정합쌍 중 3쌍의 참정합쌍과 3쌍의 오정합쌍으로 구성되었으나, 3쌍의 참정합쌍이 밀집되어 추출되었다. 밀집되어 추출된 정합쌍은 [그림 4-5]에서 파란색과 초록색으로 구분하여 표현하였으나, 구분이 어려워 [그림 4-6]에 확대하여 표현하였다.

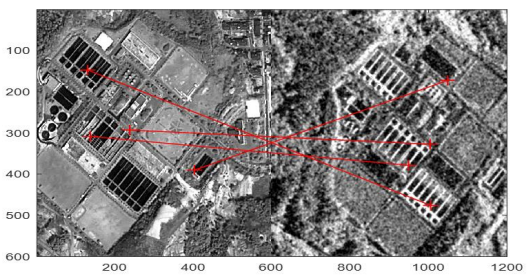
이를 통해, 기존 SIFT 기법과 SAR-SIFT 기법을 광학영상과 SAR 영상 간 정합쌍 추출에 적용시 소수의 정합쌍이 추출됨을 확인할 수 있었다. 또한, 추출된 소수의 정합쌍 중 참정합쌍이 드물게 추출됨을 확인하였다. 어핀 변환을 위해서는 최소 정합쌍 3쌍이 필요하다. 실험결과를 통해 추출된 정합쌍 수가 모두 3쌍 이상 추출되었으나, 참정합쌍의 수가 3쌍 이상 추출된 실험 결과는 오직 하나만 존재하였다. 그 결과 또한 밀집된 분포로 참정합쌍이 추출되었고, 나머지 정합쌍은 오정합쌍으로 구성되었다. 따라서, 기존 SIFT 기법과 SAR-SIFT 기법을 통해 추출된 정합쌍으로 어핀 변환을 구성하여 정합을 수행하였을 때, 큰 왜곡이 발생할 수 있으며 정합 정확도 또한 현저히 낮을 것으로 판단된다. 이는, 기존 기법인 SIFT 기법과 SAR-SIFT 기법들은 광학영상과 SAR영상 간 정합에 적용이 어려움을 보여준다.



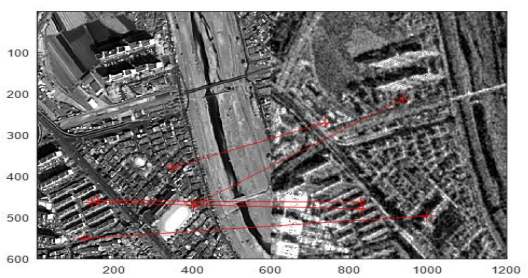
실험지역 1



실험지역 2

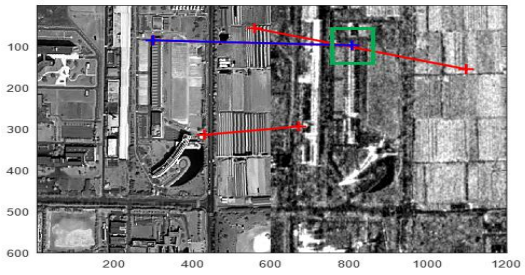


실험지역 3

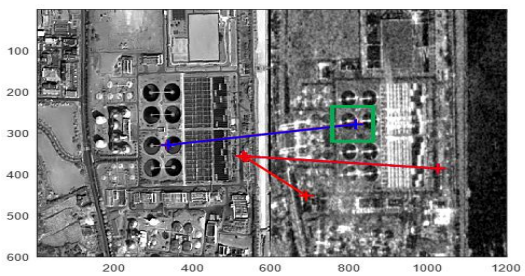


실험지역 4

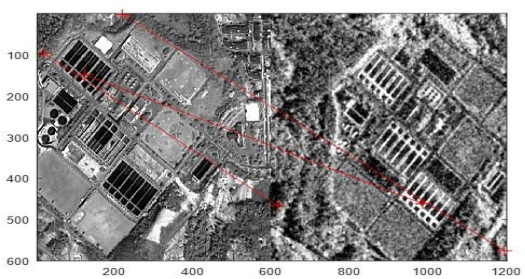
[그림 4-4] SIFT 기법을 통한 정합쌍 추출 결과
(왼쪽: 광학영상, 오른쪽: SAR영상)



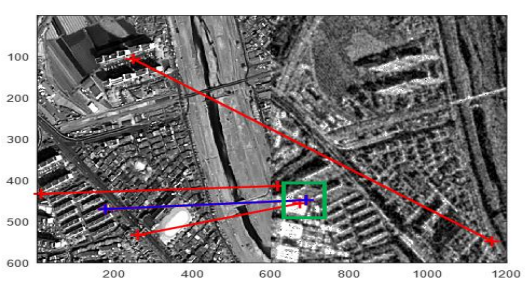
실험지역 1



실험지역 2

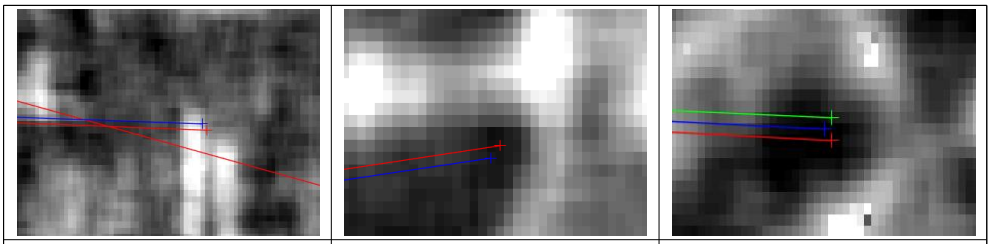


실험지역 3



실험지역 4

[그림 4-5] SAR-SIFT기법을 통한 정합쌍 추출 결과
(왼쪽: 광학영상, 오른쪽: SAR영상)



실험지역 1	실험지역 2	실험지역 4

[그림 4-6] SAR-SIFT기법을 통한 정합쌍 추출 결과 확대 영상

4.3.2 제안 기법을 통한 정합쌍 추출 결과

본 연구에서는 정합쌍을 추출하기 위해, 추출된 특징점에서 분광 비선형성에 강인한 DLSS 기법을 사용하여 정합쌍을 추출하였다. 정합쌍을 추출하는 과정은 크게 세 가지 단계로 이루어진다. 첫 번째 단계는 임계치를 이용한 전처리 단계이며, 두 번째 단계는 정합쌍을 이루는 특징점 간 변위량을 이용한 후보 정합쌍 추출 단계이다. 마지막으로 셋 번째 단계는 RANSAC 기법을 통한 정밀 정합쌍 추출 단계이다. 본 과정을 통해 추출된 정합쌍 수는 [표 4-2]에 표현되었다. 광학영상과 SAR영상에서 추출된 정합쌍 결과는 [그림 4-7], [그림 4-8], [그림 4-9]에서 확인할 수 있다.

첫 번째 단계인 전처리 단계를 통해 추출된 정합쌍에서 모든 실험지역에 대해 다수의 오정합쌍이 추출되었음을 [그림 4-7]을 통해 확인할 수 있다. 총 네 실험지역에 대해 추출된 정합쌍 수는 각각 707, 762, 322, 801 개로 추출되었다([표 4-2]). 실험지역 3을 제외하고 나머지 지역에서는 정합쌍 수가 비슷하게 추출되었다. 실험지역 3에서는 산림지역이 많이 존재하여 신뢰도가 낮은 정합쌍이 추출되어 전처리 단계에서 오정합쌍이 다수 제거된 것으로 판단된다.

두 번째 단계인 후보 정합쌍 추출 단계를 통해 전처리 단계에 존

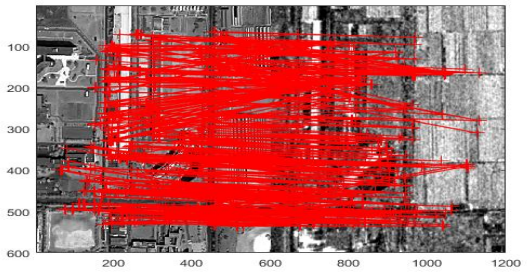
재하는 다수의 오정합쌍이 제거되었음을 [그림 4-8]에서 확인할 수 있다. 총 네 실험지역에 대해 추출된 정합쌍 수는 각각 341, 290, 173, 376 개로 추출되었다([표 4-2]).

마지막 단계로, 정밀 정합쌍 추출 단계를 통해 최종 정합쌍 수가 각 실험지역에서 32, 50, 62, 39쌍 추출되었으며, [그림 4-9]를 통해 정밀한 정합쌍이 추출되었음을 확인할 수 있다. 첫 번째와 두 번째 단계에서 정합쌍 수가 가장 적은 실험지역 3에서 62쌍으로 가장 많은 정합쌍이 추출되었다. 실험지역 3의 영상에서 광학영상과 SAR영상에서 다른 지역에 비해 왜곡된 지역이 비교적 적어, 정합쌍이 다수 추출된 것으로 판단된다.

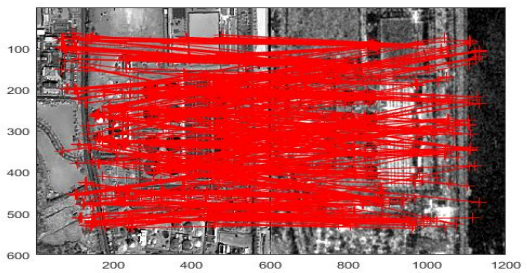
본 실험결과를 통해, 영상 간 분광 비선형성을 이룰 때도 제안기법을 통해 정합쌍이 다수 추출됨을 확인하였다. 또한, 기존 DLSS 기법은 탐색 범위를 ±10이상 설정시 적용하는데 어려움이 존재하였으나, 본 연구에서는 탐색 범위를 최대 ±200까지 실험하여 성공적으로 정합쌍을 추출하였다. 그러나, 특징점이 인공구조물 모서리 부분에서 밀집되어 추출됨으로, 정합쌍의 분포도 동일한 경향을 보였다.

[표 4-2] 제안 기법을 통한 추출된 정합쌍 수

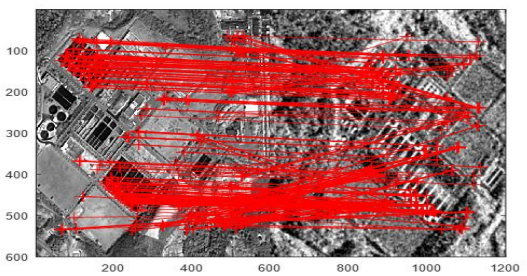
정합쌍 수	전처리 단계	후보 정합쌍	정밀 정합쌍
실험지역 1	707	341	32
실험지역 2	762	290	50
실험지역 3	322	173	62
실험지역 4	801	376	39



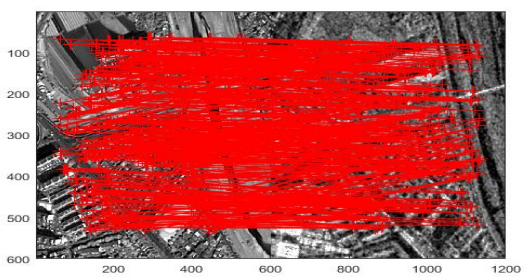
실험지역 1



실험지역 2

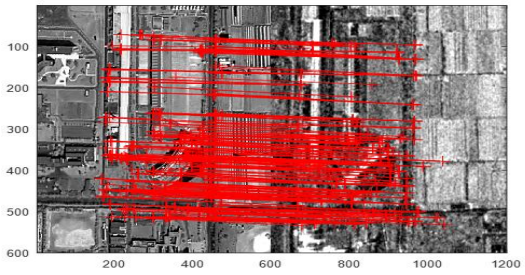


실험지역 3

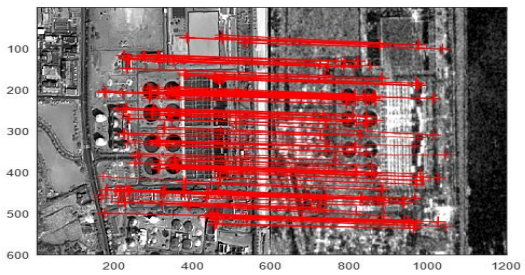


실험지역 4

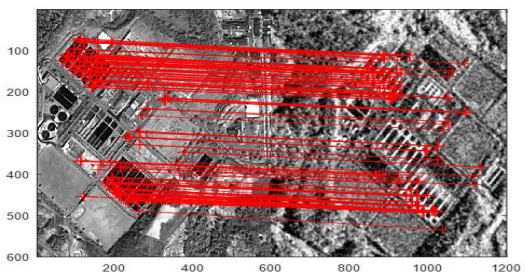
[그림 4-7] 전처리 단계를 통한 정합쌍 추출 결과
(왼쪽: 광학영상, 오른쪽: SAR영상)



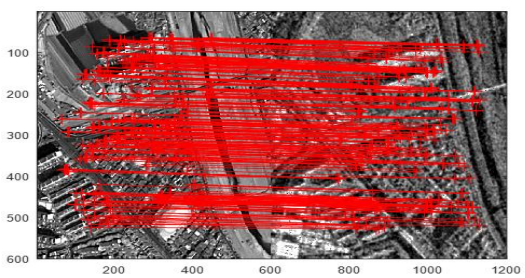
실험지역 1



실험지역 2

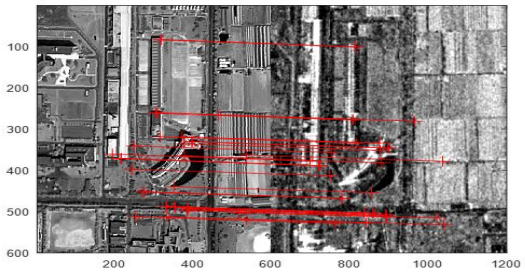


실험지역 3

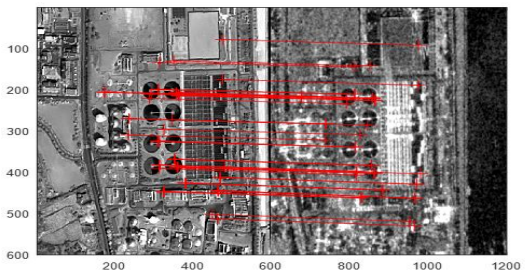


실험지역 4

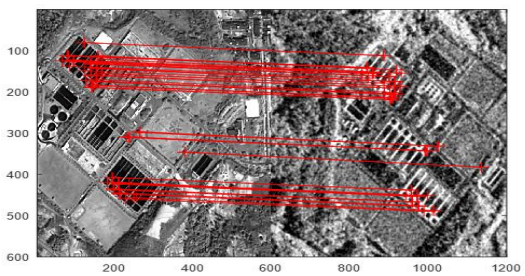
[그림 4-8] 후보 정합쌍 추출 결과
(왼쪽: 광학영상, 오른쪽: SAR영상)



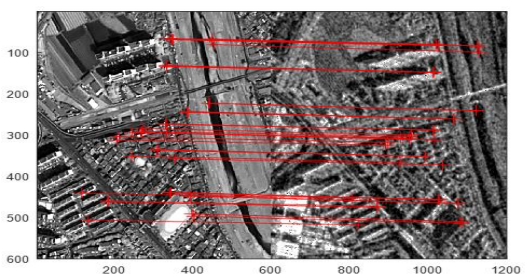
실험지역 1



실험지역 2



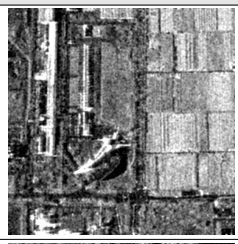
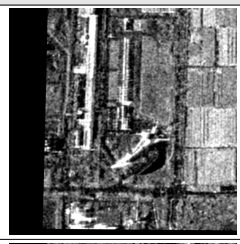
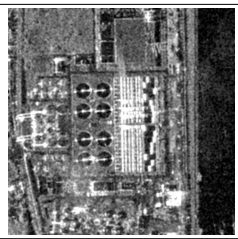
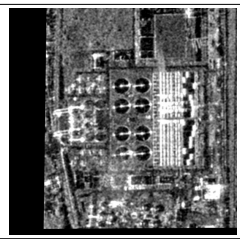
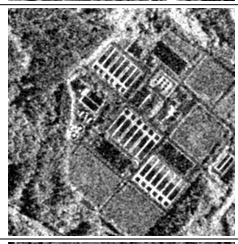
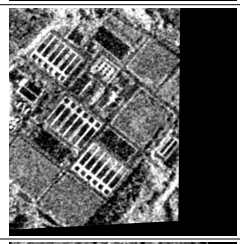
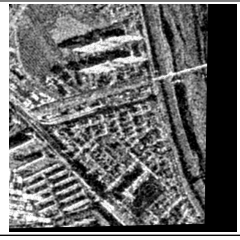
실험지역 3



실험지역 4

[그림 4-9] 정밀 정합쌍 추출 결과
(왼쪽: 광학영상, 오른쪽: SAR영상)

4.4 정합 결과 및 평가

(+방향)	정합 전	정합 후
실험지역 1 (Cosmo-SkyMed)		
실험지역 2 (Cosmo-SkyMed)		
실험지역 3 (TerraSAR-X)		
실험지역 4 (TerraSAR-X)		

[그림 4-10] 정합 전/후 영상

[표 4-3] 정합시 이동 변위량

변위량(m)	x (+방향: E)	y (+방향: S)
실험지역 1	102.69	-19.06
실험지역 2	98.79	-8.68
실험지역 3	-173.63	-18.43
실험지역 4	-85.07	-4.14

제안 기법을 통해 추출된 정합쌍을 이용하여 어핀 변환을 SAR영상에 적용하여 정합한 결과를 정합 전과 비교하여 [그림 4-10]에 표현하였다. 총 네 실험지역에 대한 (x, y) 방향으로의 변위량을 [표 4-3]에 표현하였다. 실험지역 1과 2는 KOMPSAT-2영상과 Cosmo-SkyMed영상으로 구성된 지역으로, 실험지역 1은 x방향으로 102.69m, y방향으로 -19.06m 이동하였으며, 실험지역 2는 x방향으로 98.79m, y방향으로 -8.68m 이동하였다. 실험지역 3과 4는 KOMPSAT-2영상과 TerraSAR-X영상으로 구성된 지역으로, 실험지역 3은 x방향으로 -173.63m, y방향으로 -18.43m 이동하였으며, 실험지역 2는 x방향으로 -85.07m, y방향으로 -4.14m 이동하였다. 네 실험지역 변위량 중 x방향으로 최대 -173.63m 이동하였으며, y방향으로 최대 -19.06m 이동하였다. 이를 통해, 제안 기법이 광학영상과 SAR영상 간 기하학적 위치 차이가 크게 존재할 경우에도 적용 가능함을 확인할 수 있다.

제안 기법의 정확도를 평가하기 위해 본 연구에서는 시각적 및 정량적으로 정확도를 평가하였다. 시각적 평가 방법으로는 모자이크 영상을 생성하여 평가하였다. 모자이크 영상은 광학영상은 빨간색 격자로, 정합된 SAR영상은 회색 격자로 반복적으로 표현하였다([그림 4-11]). 두 영상의 격자 간 경계에서 객체의 선형성을 통해 정합 결과

를 시각적으로 판단하였다. [그림 4-12]는 모자이크 영상을 확대한 영상으로, 이를 통해 도로지역과 같은 선형 특징이나 객체 특징이 자연스럽게 표현되며, 객체의 형상이 유지됨을 확인할 수 있다.

정량적 평가를 위해서 제안 기법에서는 RMSE를 측정하였다. 본 연구에서는 RMSE를 측정하기 위한 검사점(check point)을 두 가지 방법으로 추출하였다. 첫 번째 방법으로는 수동으로 검사점을 10쌍 찍는 방법이다. 그러나, 실제 시각적 판독을 통한 검사점은 관점에 따라 약 10m의 위치 오차를 유발할 수 있어(Suri *et al.*, 2010), 본 연구에서는 두 번째 방법으로 교차검증법을 통하여 RMSE를 측정하였다. 이 방법은 제안 기법을 통해 추출된 정합쌍 중 임의의 70% 정합쌍을 이용하여 변환 모델을 구성하고, 나머지 30% 정합쌍에 변환 모델을 적용하여 총 10번의 반복 실험을 통해 평균값 RMSE를 적용하였다(한유경, 2013). 편의를 위해 수동 검사점을 통해 산출된 RMSE와 교차검증을 통해 산출된 RMSE를 각각 RMSE Ⅰ, Ⅱ로 명명하였다. 본 연구에서 산정된 RMSE Ⅰ, Ⅱ는 [표 4-4]에 나와있다.

수동으로 추출한 검사점을 통해 측정된 RMSE Ⅰ은 네 실험지역에서 1.51m에서 2.04m로 도출되었으며, 교차검증으로 산출된 RMSE Ⅱ는 1.34m에서 1.69m로 도출되었다. 두 RMSE Ⅰ, Ⅱ가 실험지역 3에서 가장 높은 정확도를 보였으며, 실험지역 4에서 가장 낮은 정확도를 보였다.

실험지역 3은 상수도 시설과 산림지역으로 구성된 실험지역으로, 정합쌍이 62쌍 추출되어 정밀한 정합을 수행한 것으로 판단된다. 또한 형상 왜곡이 영상에서 존재하지 않아 다른 실험지역에 비해 정밀한 정합쌍이 추출된 것으로 판단된다. 이로 인해, 다른 실험지역에 비해 우수한 정합 결과가 도출된 것으로 보인다.

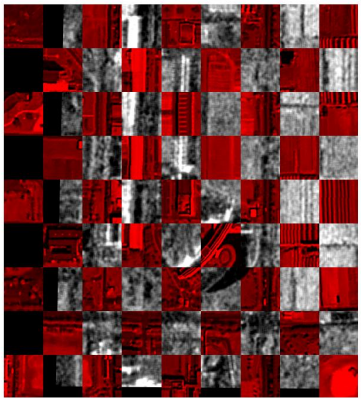
실험지역 2에서는 두 번째로 높은 정확도 값이 도출되었다. 실험지역 2가 하수처리 시설장으로, 다수의 원형 객체가 존재하여 50쌍의

다수의 정합쌍이 추출된 것으로 판단되며, 이로 인해 정합 정확도 또한 높게 산출된 것으로 보인다.

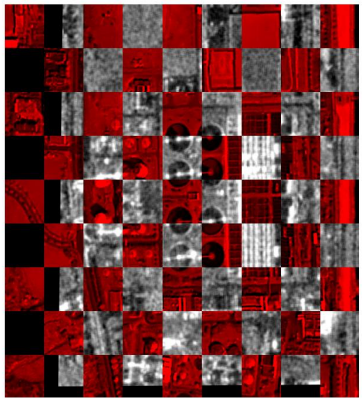
실험지역 1은 세 번째로 높은 정확도를 보였다. 실험지역 1은 연구단지 주변으로 낮은 건물과 농경지로 구성된 지역으로, 인공구조물이 다른 지역에 비해 적게 분포하여, 32개의 정합쌍으로 가장 적은 수의 정합쌍이 추출되었다. 이로 인해, 실험지역 2, 3에 비해 낮은 정합 정확도를 보인 것으로 추정된다.

실험지역 4는 네 실험지역 중 가장 낮은 정확도를 보였다. 실험지역 4는 건물의 밀집도가 높은 지역으로 높이가 높고 낮은 건물이 혼재된 지역이다. 건물이 밀집된 지역에서는 영상 왜곡이 발생하고, 정합쌍을 추출하기 어렵다. 따라서, 제안 기법을 통해서도 정합쌍이 실험지역 2, 3에 비해 적게 추출된 것으로 판단된다. 실험지역 1에 비해 많은 정합쌍이 추출되었으나, 정합의 정확도가 실험지역 1 보다 낮게 도출되었다. 이는 추출된 정합쌍의 정밀도가 실험지역 1에 비해 낮다는 것을 의미할 수 있다.

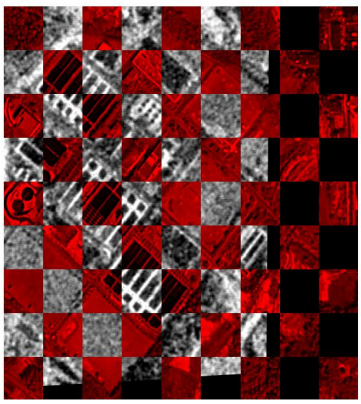
본 실험결과를 통해 건물이 밀집된 도심지역과 다양한 토지피복이 존재하는 도심지역에서 1m급 고해상도 광학영상과 SAR영상 간 정합이 성공적으로 이루어짐을 시각적 및 정량적으로 확인할 수 있었다. 이와 관련된 선행연구에서는 RMSE가 1.5m에서 5m로 도출되었다 (Han and Byun, 2015; Merkle *et al.*, 2015; Reinartz *et al.*, 2011). 이와 비교하였을 때, 제안 기법의 결과가 유의미한 결과임을 확인할 수 있다.



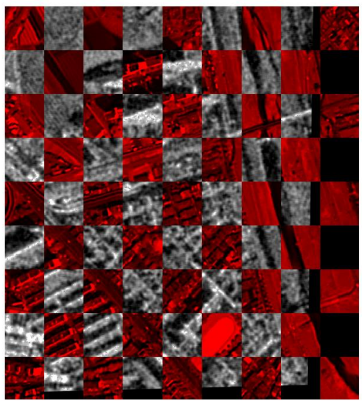
실험지역 1



실험지역 2

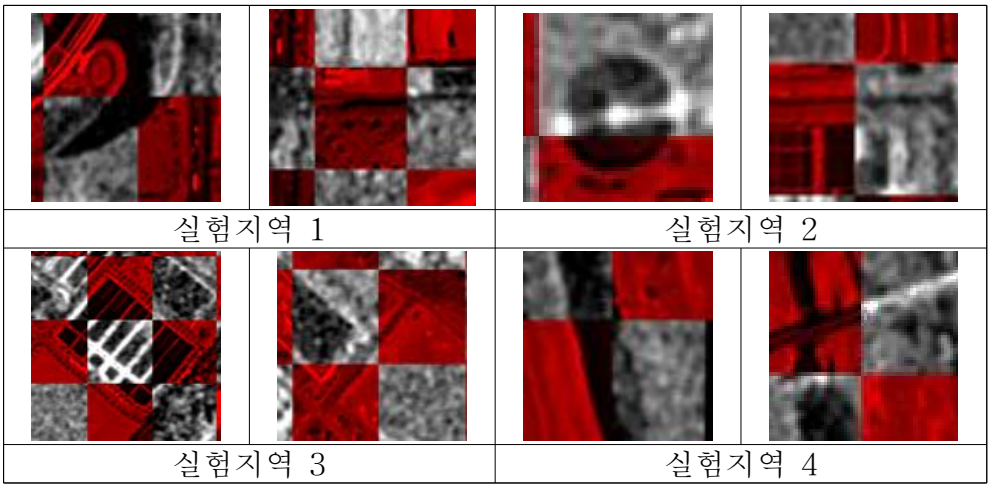


실험지역 3



실험지역 4

[그림 4-11] 모자이크 영상
(빨강: 광학영상, 흑백: SAR영상)



[그림 4-12] 확대된 모자이크 영상
(빨강: 광학영상, 흑백: SAR영상)

[표 4-4] 검사점을 통한 RMSE Ⅰ, Ⅱ

	RMSE Ⅰ (m)	RMSE Ⅱ (m)
실험지역 1	1.90	1.43
실험지역 2	1.89	1.39
실험지역 3	1.51	1.34
실험지역 4	2.04	1.69

5. 결론

최근 고해상도 다중센서 위성영상들이 상용화되어, 위성영상 간 융합 분석에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 다중센서 위성영상 중 광학영상과 SAR영상은 동시에 활용할 경우 지표면에 대한 구체적인 정보를 취득할 수 있어 다양한 원격탐사 분야에 폭넓게 적용이 가능하다. 이를 위해서는 광학영상과 SAR영상 간 정합 연구는 필수적이다. 대표적인 정합기법인 SIFT 기법은 SAR영상에 존재하는 스페클 잡음의 영향을 고려하지 않으며, 영상 간 분광 특성이 다른 경우 적용이 어렵다는 문제점이 존재하여 광학영상과 SAR영상 간 정합에 적합하지 않다. 이에 본 연구에서는 기존 SIFT 기법을 SAR영상에 적합하도록 개선한 SAR-SIFT 기법과 분광 비선형성에 강인한 DLSS 기법을 결합하여, 도심지역에 대하여 1m급 고해상도 광학영상과 SAR영상 간 정합기법을 제안하였다.

광학영상과 SAR영상 간 정합을 위해서, 특징기반 정합기법인 SAR-SIFT 기법을 이용하여 다수의 공통된 특징점을 추출하였으며, 추출된 특징점에서 강도기반 정합기법인 DLSS 기법을 이용하여 다수의 정합쌍을 추출하였다. 추출된 정합쌍에는 다수의 오정합쌍이 포함되어 있어, 추가적으로 임계치, 특징점 간 변위량 및 RANSAC 기법을 적용하여 오정합쌍을 제거한 정밀 정합쌍을 추출하였다. 추출된 정밀 정합쌍에 최소제곱법을 적용하여 정합을 위한 어핀 변환식을 추정하였고, 최종적으로 광학영상에 정합된 SAR영상을 생성하였다.

고해상도 광학영상인 KOMPSAT-2영상과 고해상도 SAR영상인 TerraSAR-X, Cosmo-SkyMed영상을 사용하였으며, 도심지역 영상에 대하여 본 연구에서 제안한 정합기법을 적용하여 다양한 조건에서 정합기법의 적용가능성을 평가하고자 하였다. 정합쌍 추출 결과 비교를 위해서는 광학 및 SAR 영상 정합에 주로 적용되었던 SIFT 기법과

SAR-SIFT 기법을 이용하였다. 또한, 제안 기법의 우수성을 평가하기 위해, 시각적 및 정량적 정확도 평가를 진행하였다.

제안기법은 기존 기법과 다르게 분광 비선형성을 이루는 광학영상과 SAR영상에서 모든 실험지역에 대하여 정합쌍을 다수 추출하였다. 또한, 모자이크 영상에서 도로와 같은 선형 객체의 연결성과 객체 형상이 유지됨을 통해 정합이 우수하게 수행되었음을 시각적으로 확인할 수 있었으며, 정량적으로는 RMSE가 1.34m에서 2.06m로 우수한 결과값으로 도출되었다. 총 네 실험지역 중 건물밀집지역에서 비교적 낮은 정확도로 도출되었으나, 수동 검사점을 통한 RMSE Ⅰ은 2.04m와 교차검증을 통한 RMSE Ⅱ는 1.69m로 정합 결과가 도출되었다. 이는, 기존 선행연구결과 값과 비교하였을 때, 우수한 정확도임을 확인할 수 있다. 기존 특징기반 및 강도기반 결합기법은 원 형상이 존재하는 특정 지역이나 건물밀집지역이 제외된 지역 등 제한된 지역에서만 적용 가능하다는 단점을 지니고 있다. 본 연구의 결과를 통해 제안 기법은 기존 결합기법의 단점을 개선하였음을 확인할 수 있다. 따라서, 제안 기법이 도심지역에 대한 1m급 고해상도 광학영상과 SAR영상 간 정합에 효과적인 기법으로 판단된다.

본 연구의 결과는 제안 기법이 도심지역에 대해서 고해상도 광학영상과 SAR영상 간 정합에 효과적임을 보여주었다. 선행연구들은 변위량이 큰 경우에 정합 정확도가 다소 낮게 나왔으나, 제안 기법은 두 영상 간 변위량이 큰 경우에도 정합을 효과적으로 수행하였다. 따라서, 고해상도 광학영상과 SAR영상의 융합 분석을 위한 전처리 과정으로 제안 기법이 활용될 수 있는 가능성을 보여주었다. 이는, 제안 기법이 재난재해 모니터링, 객체 추출, 변화 탐지 등 다양한 분야에 전처리 과정으로 활용되어, 본 연구가 융합 분석 연구에 초석이 될 것으로 보인다.

향후 연구로서 광학영상과 SAR영상에서 인공구조물 이외 지역에

서도 특징점이 추출할 수 있는 기법에 관한 연구가 필요시 된다. 또한, 광학영상과 SAR영상 간 융합 분석을 위한 전처리 과정에 적용하여 융합 분석에 대한 제안 기법의 적용가능성을 검증할 필요가 있다. 나아가, 추후에 제안 기법을 광학영상과 SAR영상 외 다중센서 위성영상 간 정합에도 적용하여 제안 기법의 우수성을 검증하고자 한다.

참 고 문 헌

한유경, 도심지역에 대한 고해상도 다중센서 위성영상의 자동 기하보정, 서울대학교 공학박사 학위논문, 2013.

Amarsaikhan, D., Blotevogel, H. H., Van Genderen, J. L., Ganzorig, M., Gantuya, R., and Nergui, B., Fusing high-resolution SAR and optical imagery for improved urban land cover study and classification, *International Journal of Image and Data Fusion*, Vol. 1, No. 1, 2010, pp. 83-97.

Byun, Y., Choi, J., and Han, Y., An area-based image fusion scheme for the integration of SAR and optical satellite imagery, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, Vol. 6, No. 5, 2013, pp. 2212-2220.

Chen, H. M., Arora, M. K., and Varshney, P. K., Mutual information-based image registration for remote sensing data, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 24, No. 18, 2003, pp. 3701-3706.

Chen, M., Habib, A., He, H., Zhu, Q., and Zhang, W., Robust feature matching method for SAR and optical images by using Gaussian-Gamma-Shaped bi-windows-based descriptor and geometric constraint, *Remote Sensing*, Vol. 9, No. 9, 2017, pp. 882.

Cheng, H., Zheng, S., Yu, Q., Tian, J., and Liu, J, Matching of SAR

images and optical images based on edge feature extracted via SVM, *7th International Conference on Signal Processing*, China, 2004.

Dai, X., and Khorram, S., The effects of image misregistration on the accuracy of remotely sensed change detection, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing*, Vol. 36, No. 5, 1998, pp. 1566-1577.

Dellinger, F., Delon, J., Gousseau, Y., Michel, J. and Tupin, F., SAR-SIFT: A SIFT-like algorithm for applications on SAR images. *In Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Germany, 2012.

Dellinger, F., Delon, J., Gousseau, Y., Michel, J., and Tupin, F., SAR-SIFT: a SIFT-like algorithm for SAR images, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 53, No. 1, 2015, pp. 453-466.

DLR, TerraSAR-X ground segment basic product specification document, CLUSTER APPLIED REMOTE SENSING, Germany, 2008.

Dufournaud, Y., Schmid, C., and Horaud, R., Matching images with different resolutions, *In IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, USA, 2000.

Fan, B., Huo, C., Pan, C., and Kong, Q., Registration of optical and SAR satellite images by exploring the spatial relationship of

the improved SIFT, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, Vol. 10, No. 4, 2013, pp. 657-661.

Fischler, M. A., and Bolles, R. C., Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *In Readings in computer vision* Vol. 24, No. 6, 1981, pp. 381-395.

Fonseca, L. M., and Manjunath, B. S., Registration techniques for multisensor remotely sensed imagery, *PE and RS-Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 62, No. 9, 1996, pp. 1049-1056.

Gomez-Chova, L., Fernandez-Prieto, D., Calpe, J., Soria, E., Vila, J., and Camps-Valls, G., Urban monitoring using multi-temporal SAR and multi-spectral data, *Pattern Recognition Letters*, Vol. 27, No. 4, 2006, pp. 234-243.

Gong, M., Zhao, S., Jiao, L., Tian, D., and Wang, S., A novel coarse-to-fine scheme for automatic image registration based on SIFT and mutual information, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 52, No. 7, 2014, pp. 4328-4338.

Habib, A., and Al-Ruzouq, R., Semi-automatic registration of multi-source satellite imagery with varying geometric resolutions, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 71, No. 3, 2005, pp. 325-332.

Han, Y., and Byun, Y., Automatic and accurate registration of VHR optical and SAR images using a quadtree structure, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 36, No. 9, 2015, pp. 2277-2295.

Hasan, M., Pickering, M. R., and Jia, X., Robust automatic registration of multimodal satellite images using CCRE with partial volume interpolation, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 50, No. 10, 2012, pp. 4050-4061.

Hong, G., and Zhang, Y., Wavelet-based image registration technique for high-resolution remote sensing images, *Computers and Geosciences*, Vol. 34, No. 12, 2008, pp. 1708-1720.

Hong, T. D., and Schowengerdt, R. A., A robust technique for precise registration of radar and optical satellite images, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 71, No. 5, pp. 585-593.

Huang, L., Li, Z., and Zhang, R., SAR and optical images registration using shape context, *In Geoscience and Remote Sensing Symposium*, USA, 2010.

Huo, C., Pan, C., Huo, L., and Zhou, Z., Multilevel SIFT matching for large-size VHR image registration, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, Vol. 9, No. 2, 2012, pp. 171-175.

Kim, T., and Im, Y. J., Automatic satellite image registration by combination of matching and random sample consensus, *IEEE*

transactions on geoscience and remote sensing, Vol. 41, No. 5, 2003, pp. 1111-1117.

Koenderink, J., The structure of images, *Biological Cybernetics*, Vol. 50, 1984, pp. 363-396.

Kupfer, B., Netanyahu, N. S., and Shimshoni, I., An efficient SIFT-based mode-seeking algorithm for sub-pixel registration of remotely sensed images, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters,* Vol. 12, No. 2, 2015, pp. 379-383.

Lehureau, G., Tupin, F., Tison, C., Oller, G., and Petit, D., Registration of metric resolution SAR and optical images in urban areas, *7th European Conference on Synthetic Aperture Radar*, Germany, 2008.

Lindeberg, T., Scale-space theory: A basic tool for analysing structures at different scales, *Journal of Applied Statistics*, Vol. 21, No. 2, 1994, pp. 224-270.

Lowe, D. G., Distinctive image features from scale-invariant keypoints, *International journal of computer vision*, Vol. 60, No. 2, 2004, pp. 91-110.

Ma, W., Wen, Z., Wu, Y., Jiao, L., Gong, M., Zheng, Y., and Liu, L., Remote sensing image registration with modified sift and enhanced feature matching, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, Vol. 14, No. 1, 2017, pp. 3-7.

Merkle, N., Müller, R., Schwind, P., Palubinskas, G. and Reinartz, P., A new approach for optical and SAR satellite image registration, *ISPRS Annals of the Photogrammetry*, Germany, 2015.

Mikolajczyk, K. and Schmid, C, A performance evaluation of local descriptors, *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, Vol. 27, No. 10, 2005, pp. 1615-1630.

Pan, C., Zhang, Z., Yan, H., Wu, G., and Ma, S., Multisource data registration based on NURBS description of contours, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 29, No. 2, 2008, pp. 569-591.

Reinartz, P., Müller, R., Schwind, P., Suri, S., and Bamler, R.,. Orthorectification of VHR optical satellite data exploiting the geometric accuracy of TerraSAR-X data, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 66, No. 1, 2011, pp. 124-132.

Rui, J., Wang, C., Zhang, H., and Jin, F., Multi-sensor SAR image registration based on object shape, *Remote Sensing*, Vol. 8, No. 11, 2016, pp. 923.

Shen, D., Zhang, J., Yang, J., Feng, D., and Li, J., SAR and optical image registration based on edge features, *4th International Conference on Systems and Informatics*, China, 2017.

Shi, W., Su, F., Wang, R., and Fan, J., A visual circle based image

registration algorithm for optical and SAR imagery, *In Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Germany, 2012.

Shu, L., Tan, T., Tang, M., and Pan, C., A novel registration method for SAR and SPOT images, *IEEE International Conference on mage Processing*, Italy, 2005.

Siddique, M. A., Sarfraz, M. S., Bornemann, D., and Hellwich, O., Automatic registration of SAR and optical images based on mutual information assisted Monte Carlo, *In Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Germany, 2012

Sportouche, H., Tupin, F., and Denise, L., Building detection by fusion of optical and SAR features in metric resolution data. *In Geoscience and Remote Sensing Symposium*, South Africa 2009.

Sui, H., Xu, C., Liu, J., and Hua, F., Automatic optical-to-SAR image registration by iterative line extraction and Voronoi integrated spectral point matching, *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, Vol. 53, pp. 11, 2015, pp. 6058-6072.

Suri, S., and Reinartz, P., Application of generalized partial volume estimation for mutual information based registration of high resolution SAR and optical imagery, *11th International Conference on Information Fusion*, Germany, 2008.

Suri, S., and Reinartz, P., Mutual-information-based registration of TerraSAR-X and Ikonos imagery in urban areas, *IEEE*

Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 48, No. 2, 2010, pp. 939-949.

Wang, L., Niu, Z., Wu, C., Xie, R., and Huang, H., A robust multisource image automatic registration system based on the SIFT descriptor, *International journal of remote sensing*, Vol. 33, No. 12, 2012, pp. 3850-3869.

Xiang, Y., Wang, F., and You, H., OS-SIFT: A Robust SIFT-Like Algorithm for High-Resolution Optical-to-SAR Image Registration in Suburban Areas. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,* to be published (early access), 2018.

Xu, C., Sui, H., Li, H., and Liu, J., An automatic optical and SAR image registration method with iterative level set segmentation and SIFT, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 36, No. 15, 2015, pp. 3997-4017.

Ye, Y., Shan, J., Bruzzone, L., and Shen, L., Robust registration of multimodal remote sensing images based on structural similarity, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 55, No. 5, 2017a, pp. 2941-2958.

Ye, Y., and Shen, L., HOPC: A novel similarity metric based on geometric structural properties for multi-modal remote sensing image matching. *ISPRS Annals of the Photogrammetry,* Czech, 2016.

Ye, Y., Shen, L., Hao, M., Wang, J., and Xu, Z., Robust optical-to-SAR image matching based on shape properties, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, Vol. 14, No. 4, 2017b, pp. 564-568.

Zhang, H., Li, G., and Lin, H., An automatic co-registration approach for optical and SAR data in urban areas, *Annals of GIS*, Vol. 22, No. 3, 2016, pp. 235-243.

Zitova, B. and Flusser, J.,Image registration methods: a survey, *Image and vVsion Computing*, Vo. 21. No. 11, 2003, pp. 977-1000.

Abstract

A Study on Image Registration between High Resolution Optical and SAR Images Using SAR-SIFT and DLSS

Hyeongju Jeon
Department of Civil and Environmental Engineering
The Graduate School
Seoul National University

With the recent development of satellite sensor technology, researches have been actively conducted on the fusion analysis of multisensor satellite images as the earth observation satellites equipped with various sensors are launched. Among multisensor satellite images, optical and SAR images can provide more detailed information about the surface of the earth due to different wavelengths to be handled. Furthermore, optical and SAR images can be applied to various remote sensing fields, such as object extraction, change detection, and disaster monitoring. The first step in integration analysis is image registration between optical and SAR images. However, registration of optical and SAR images can be challenging due to geometric and radiometric differences among these

images. These differences are highlighted in high-resolution images rather than mid- and low-resolution images. Therefore, we proposed an effective method for image registration between high-resolution optical images and SAR images over urban areas.

Image registration methods are classified into two categories: feature- and intensity-based registration methods. Although Intensity-based registration methods are effective for matching images with different radiometric characteristics, the methods are applicable only when there is no image distortion or little geometric position difference. High-resolution optical and SAR images have local distortion, and geometric position differences of more than several tens of meters can occur between these images. Therefore, feature-based registration methods are more focused than intensity-based registration methods in high resolution optical image and SAR image registration researches. However, feature-based registration methods have a poor performance by extracting a large number of mismatched pairs from optical and SAR images having different radiometric characteristics. Although registration methods combining feature- and intensity-based registration methods have been proposed to improve the poor performance, the methods have a limitation in that it can only be applied to the restricted areas such as the area where a circle shape exists in urban areas or where dense building areas is eliminated in urban areas. To improve this, we proposed a method that combined SAR-SIFT method, which is one of feature-based registration methods, and DLSS method, which is one of intensity-based registration methods. In addition, in order to extract the matching pairs, three steps, which consist of preprocessing step, candidate matching pair extracting step, and accurate matching pair extracting step, are added.

In this paper, we propose the image registration method combining SAR-SIFT, which is one of feature-based matching methods, and DLSS, which is one of intensity-based matching methods, for matching between high-resolution optical images and SAR images. Feature points are extracted using SAR-SIFT method, and matching pairs are extracted from the extracted feature points using DLSS method. However, there is a problem that a large number of outliers are included in the extracted matching pairs. To solve this problem, we propose a method of extracting candidate matching pairs method using the threshold and feature point displacements in extracted matching pairs, and apply RANSAC method to candidate matching pairs to extract accurate matching pairs. Finally, an affine transformation was estimated using the accurate matching pairs extracted, and the SAR image matched to the optical image was generated by applying the affine transformation.

To assess the accuracy of the proposed method, we used KOMPSAT-2, which is a high-resolution optical image, and TerraSAR-X and Cosmo-SkyMed images, which are high resolution SAR images. To evaluate visually and quantitatively the accuracy of the proposed method, a mosaic image is used to evaluate visually and showed that matching is performed well by keeping the shape of the object at the boundary between two images. For the quantitative evaluation, we used RMSE Ⅰ through the passive checkpoint and RMSE Ⅱ through the cross-validation. For all test sites, RMSE Ⅰ is from 1.51m to 2.04m and RMSE Ⅱ is from 1.34m to 1.69m accuracy, respectively. The results were confirmed to be a reliable accuracy when compared with the results of previous studies. It was identified that the proposed method is effective for matching between

high resolution optical images and SAR images and will be used as an effective registration method for fusion analysis between these images.

keywords : high-resolution satellite imagery, optical image, SAR image, image registration, DLSS, SAR-SIFT
Student Number **: 2015-22933**