

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 46(5), 427-435(2018)

DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2018.46.5.427

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

영상 처리를 이용한 고해상도 영상 내 위성의 고속 검출

신승혁*, 이종민**, 이상욱***, 양태석****, 김희율*****

High-Speed Satellite Detection in High-Resolution Image Using Image Processing

Seunghyeok Shin*, Jongmin Lee**, Sangwook Lee***, Taeseok Yang**** and Whoi-Yul Kim*****

Department of Electronics and Computer Engineering, Hanyang University*,*****

Ground Based Observation R&D Lab, LIGNex1**

Weapon Systems Modeling and Analysis Team, LIGNex1***

Seeker & EO/IR R&D Lab, LIGNex1****

ABSTRACT

Many countries are trying to deploy satellite surveillance systems for their national defense, and one of these system uses optical systems to observe the satellites above their territories. The optical satellite surveillance system requires the coordinates of the satellites in an acquired image and expects that those coordinates to be delivered to the tracking system. The proposed method detects the satellite sources in a high-resolution image with fast image processing for the optical surveillance system. To achieve faster detection, the proposed method reduces the size of the original image and approximates the trajectory of a satellite, so image processing methods are only applied to the nearby area of the approximated trajectory in the original image. The proposed method shows the similar detection performance faster than the previous method.

초 록

국토 방위를 위해 국가들은 자국 상공을 지나가는 위성 감시 시스템을 구축하고 있으며 이 시스템들 중 하나는 광학계를 이용한 위성 감시 시스템이다. 광학계를 이용할 경우, 획득한 영상 내에 존재하는 위성 광원을 제한된 시간 내에 검출하여 그 위치를 추적 시스템에 전달하여야 한다. 제안하는 방법은 광학계를 이용한 위성 감시 시스템을 이용해 획득한 고해상도 상공 촬영 영상을 고속으로 영상 처리하여 위성 광원을 검출한다. 이를 위해 고해상도 영상 처리에 앞서 영상을 축소하여 저해상도 영상을 생성하여 위성의 궤적을 추정하고 고해상도 원본 영상에서는 궤적 근방 영역에서만 영상 처리 방법들이 적용되도록 하였다. 제안하는 방법은 기존에 위성 검출을 위해 사용되는 방법과 유사한 위성 검출 정확도를 보이면서 검출을 더 빠르게 수행하였다.

Key Words : Image processing(영상 처리), Satellite detection(위성 검출), Line fitting(직선 맞춤)

† Received : November 29, 2017 Revised : March 18, 2018 Accepted : March 19, 2018

***** Corresponding author, E-mail : wykim@hanyang.ac.kr

1. 서론

위성은 관측하고자 하는 국가의 영토, 영해, 영공을 침범하지 않으면서도 감시를 수행할 수 있는 군사적으로 중요한 전략 정찰자산이며, 국가들은 국가 방위를 위하여 자국 영토 위를 지나가는 위성을 감시하여 가상적국의 정찰 경로를 파악하는 등의 과정을 통해 국방 계획을 조정한다. 위성 감시를 위해서는 일정 시간마다 위성이 어느 위치에 존재하는지 파악하는 추적 과정을 필요로 하며, 이 추적 과정은 위성이 검출된 위치를 요구한다. 이를 위해 레이저, 레이더, 광학계 등을 이용한 위성 감시 시스템이 사용되고 있으며, 이 중 광학계를 이용한 위성 감시 시스템은 다른 시스템보다 저렴하며 비교적 구성이 간편하다는 장점이 있다[1].

광학계를 이용한 위성 감시 시스템은 망원 카메라 등 광학 장비를 이용하여 상공을 촬영하고, 촬영한 영상에서 위성의 위치를 검출, 이를 추적 시스템에 전달하여 위성 감시를 달성하는 시스템이다. 촬영한 영상 내에는 천체, 위성, 노이즈 등이 광원 형태로 나타나게 된다. 감시 시스템에 사용되는 이미지 센서가 저해상도일 경우, 적은 수의 픽셀로 인해 발생하는 광원 위치의 모호성으로 인하여 위성 위치를 계산 시 오차가 크게 발생하므로 광학계를 이용한 위성 감시 시스템은 고해상도 영상을 사용하여 이러한 모호성을 최대한 줄인다. 상공을 촬영한 고해상도 영상의 특징은 긴 Read-out 시간으로 인하여 이동 중인 물체는 점이 아닌 Streak 형태의 광원으로 나타난다는 특징이 있다. 만약 광학 장비에 자전 보상 기능이 적용되어 있다면, 천체는 점 형태의 광원으로, 위성은 다수의 Streak 형태의 광원으로 나타나게 되며[2], 이는 위성 검출을 수행하는데 중요한 특징이 된다.

기존의 방법들에서는 광원 추출을 위하여 주로 SExtractor[3]가 사용되었다. 이는 영상을 여러 개의 구획으로 분할하고 각 구획을 위해 배경을 모

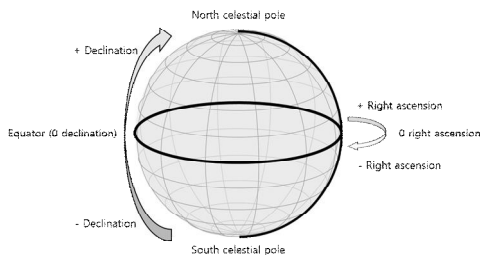


Fig. 1. The graphical explanation of the equatorial coordinate system

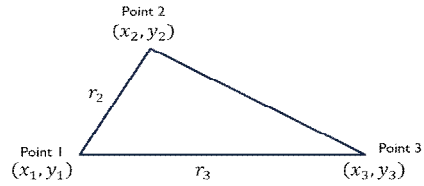


Fig. 2. A triangle generated by three coordinates

텔링하여 전경을 분리한다. 그 후 전경에 필터를 적용하여 노이즈를 제거, 광원을 추출하고 영상 촬영을 위해 사용한 광도측정법(photometry)와 광원 반지름 정의 방식을 고려하여 광원의 위치를 추정한다. 추출한 광원 중 천체에 해당하는 광원을 찾기 위해서는 Guide Star Catalog (GSC)[4]가 사용되었다. GSC는 허블 천체 망원경을 이용해 촬영한 천체를 영상 처리를 이용해 검출하고 이들 위치를 가상의 천구(celestial sphere)에 투영, 이들을 적도 좌표계(equatorial coordinate system)의 좌표 Right ascension과 Declination으로 기록한 천체 좌표 기록이다. 적도 좌표계의 형태는 Fig. 1과 같다.

GSC 1은 약 2천만 개의 천체를 기록하였다. 추출한 광원 중 천체 광원을 찾아 위성 Streak 광원만을 남기기 위해서 Image Reduction and Analysis Facility(IRAF) 라이브러리가 사용되었다. IRAF 라이브러리에서는 광원 셋과 GSC 좌표 셋을 골라 삼각형을 구성, 이들을 패턴 매칭 [5]하는 알고리즘을 사용하였다. 사용된 패턴 매칭 알고리즘은 Fig. 2와 같이 구성한 삼각형의 최단선분을 r_2 , 최장선분을 r_3 , 그 사이의 점을 점 1이라 정의하고 r_2 에 대한 r_3 의 비율 R , 점 1에서의 각도로 생성된 코사인값 C 와 사인값 S 를 저장한다. 그리고 이들을 아래 식을 이용해 Tolerance t_R 과 t_C 를 정의한다.

$$(t_R)^2 = 2R^2 \epsilon^2 \left(\frac{1}{(r_3)^2} - \frac{C}{r_2 r_3} + \frac{1}{(r_2)^2} \right)$$

$$(t_C)^2 = 2S^2 \epsilon^2 \left(\frac{1}{(r_3)^2} - \frac{C}{r_2 r_3} + \frac{1}{(r_2)^2} \right)$$

$$+ 3C^2 \epsilon^2 \left(\frac{1}{(r_3)^2} - \frac{C}{r_2 r_3} + \frac{1}{(r_2)^2} \right)^2$$

여기서 R 이 너무 클 경우 점 1과 점 2가 매우 가까워 매칭의 신뢰성이 낮으므로 매칭 과정에서 해당 삼각형을 매칭 과정에서 제외한다. 두 삼각형 A 와 B 가 매칭되어 삼각형의 세 점이 각각 매칭되는 조건은 아래와 같다.

$$(R_A - R_B)^2 < (t_{R_A})^2 + (t_{R_B})^2$$

$$(C_A - C_B)^2 < (t_{C_A})^2 + (t_{C_B})^2$$

만약 두 개 이상의 삼각형이 위 조건을 만족한다면, $(R_A - R_B)$ 와 $(C_A - C_B)$ 를 가장 작게 하는 삼각형을 매칭 대상으로 고른다. IRAF는 삼각형 매칭을 위하여 다음과 같은 과정을 거친다.

1. 구성 가능한 삼각형 R 순서대로 내림차순으로 정렬하고 목록 상위부터 매칭을 시작한다. 만약 목록 상위의 매칭이 실패하면 그로부터 하위에 있는 삼각형은 매칭 조건을 만족하지 못하므로 매칭을 시도하지 않는다.
2. 매칭된 삼각형들 중 잘못된 매칭을 제거하기 위해서 매칭된 삼각형 간 외곽선 길이의 비율이 사용된다. 잘못된 매칭은 그렇지 않은 매칭에 비해 그 비율이 큰 차이를 보이므로 이러한 매칭은 제거된다.
3. 각 점이 매칭에 관여된 횟수, 즉 매칭된 삼각형에 포함된 횟수를 정렬하여 일정 수 이상 관여한 점이 신뢰성 있는 광원이라 판단하여 이들 광원만을 최종 매칭 결과로 간주하고 광원 위치를 추출한다.

제안하는 방법에서는 기존에 사용되는 위성 Streak 광원 검출 방식의 연산 시간이 길다는 점을 해결하기 위하여, 영상을 Max-pooling을 이용, 광원의 손실을 최소화하며 저해상도로 변환하여 광원들의 위치를 검출하고 위성의 이동 궤적을 추정한다. 이후 궤적 추정 결과를 이용해 고해상도 영상에서의 영상 처리 영역을 위성 이동 궤적 인근으로 제한, 광원 검출을 수행하여 천체 광원과 위성 광원을 검출한다. 이후 천체 위치가 기록된 GSC와 검출한 광원과의 비교를 이용해 천체 광원을 제거, 결과적으로 위성 Streak 광원만을 검출한다. 제안하는 방법을 이용해 위성 검출을 수행한 결과, 기존의 방법과 유사한 정확도로 더 짧은 시간 내에 검출할 수 있었다.

본 논문에서는 본문에서 위성 고속 검출 알고리즘의 상세 내용을 저해상도 영상에서의 위성 궤적 추정 과정과 고해상도 영상에서의 위성 검출 과정으로 나누어 설명하고 그 실험 결과를 기재하였다. 결론에서는 실험 결과에 대한 분석과 수행한 연구의 응용 분야, 제안하는 방법의 개선 여지에 대해서 논한다.

II. 본 론

2.1 저해상도 영상 위성 궤적 추정

2.1.1 Max-pooling 영상 축소

위성 광원 검출을 위해 고해상도인 원본 영상

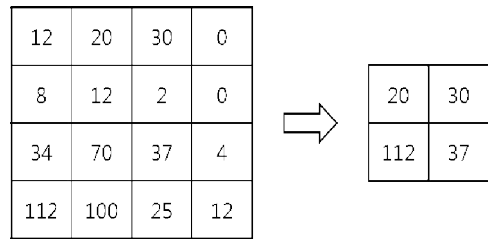


Fig. 3. Example of 2-by-2 max-pooling operation

을 영상 처리하는 것은 많은 연산량을 요하나, 위성은 영상 내에서 직선 형태로 이동하므로 실질적으로 위성 광원이 나타나는 영역은 위성의 궤적 근방으로 한정되어 있다. 따라서 위성의 궤적을 빠르게 추정하고자 원본 영상이 축소된 영상을 생성한다. 영상 축소 방법에는 Subsampling, 중간값 사용, 평균값 사용 등 여러 방법이 있으나, 이들 방법은 위성 광원의 밝은 픽셀 값을 손상시킬 가능성이 존재한다. 따라서 영상 축소 과정에서는 밝은 픽셀값을 최대한 보존하는 Max-pooling을 사용하여 위성 광원의 손실을 최소화한다. Max-pooling의 예시는 Fig. 3과 같다.

2.1.2 배경 모델링

영상 내 광원은 배경보다 밝은 값을 지니고 있으므로 특정한 값을 문턱값으로 지정하여 광원이 되는 전경과 배경을 분리하는 방법을 사용할 수 있으나 축소된 영상 전체에 단일 문턱값을 사용할 경우 고르지 못한 노이즈 분포로 인해 잘못된 전경 픽셀이 다수 검출된다. 따라서 기존의 방법 [3]과 유사하게 영상을 여러 개의 구획으로 분할, 각 구획에 각자 다른 문턱값을 적용하여 배경을 모델링한다. 배경 모델링 과정은 아래와 같다.

1. 영상 내 모든 픽셀을 배경 픽셀이라 설정하는 초기화를 수행한다.
2. 영상을 여러 개의 구획으로 분할한다.
3. 각 구획의 배경 픽셀들의 평균 및 표준편차를 계산한다.
4. 픽셀값과 픽셀이 속해있는 구획의 배경 픽셀 평균의 차이가 표준편차에 비례하는 일정 값 이상인 경우 해당 픽셀을 전경 픽셀으로 설정한다.
5. 4번 단계에서 추가되는 전경 픽셀이 있을 경우, 3번 단계부터 반복한다. 그렇지 않거나 3번 단계부터의 반복이 일정 횟수 이상 수행되었을 경우, 배경 모델링을 종료한다. 배경 모델링 결과는 Fig. 4와 같다.

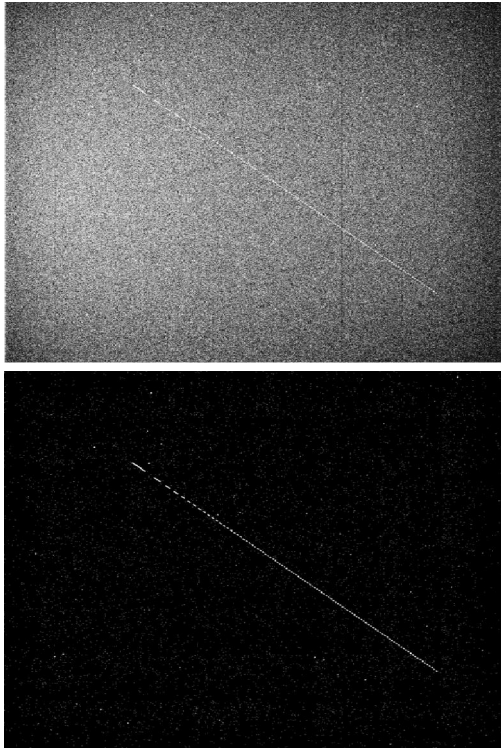


Fig. 4. The histogram-equalized original image (top) and the foreground image (bottom)



Fig. 5. The foreground image (top) and the foreground image that single pixels are removed (bottom)

2.1.3 단일 전경 픽셀 제거

영상 획득 과정에서의 노이즈로 인해 위의 배경 모델링 과정을 통해 생성되는 노이즈 전경 픽셀이 다수 존재한다. 이들은 Streak 광원일 가능성이 매우 낮으나 추후 수행되는 레이블링 과정에서 연산량을 소모하므로 이러한 노이즈 전경을 최대한 제거할 필요성이 있다. 노이즈 전경 픽셀은 대부분 다른 전경 픽셀과 인접해 있지 않다는 가정을 이용하여 픽셀에 인접한 8개 픽셀 모두가 배경인 단일 전경 픽셀 픽셀을 제거하여 배경 픽셀로 간주한다. 단일 전경 픽셀 제거 결과는 Fig. 5와 같다.

2.1.4 Two-pass 레이블링

서로 인접해 있는 전경 픽셀들은 하나의 광원에 속한다고 할 수 있으므로, 인접 픽셀들의 집단화를 위해 Two-pass 레이블링[6]을 수행한다. 그 과정은 아래와 같다.

1. 레이블 번호 카운터를 1로 설정하고, 전체 픽셀의 레이블을 0(레이블링 되지 않음)으로 설정한다.
2. 전체 영상 내 전경 픽셀 중 좌측 상단의 픽셀

로 이동한다.

3. 현재 픽셀에서의 좌상단, 좌단, 우상단, 상단의 네 픽셀 중 레이블이 0이 아닌 픽셀이 존재하는지 확인한다.
4. 3번 단계에서의 결과는 아래의 둘 중 하나의 속한다.
 - 가. 네 픽셀 모두가 레이블이 0일 경우, 현재 레이블 번호 카운터를 현재 픽셀에 레이블링하고, 카운터를 1 증가시킨 후 우측 전경 픽셀로 이동한다.
 - 나. 레이블이 0이 아닌 픽셀이 하나라도 존재할 경우, 레이블링 된 픽셀 중 가장 작은 번호를 현재 픽셀에 레이블링하고 이들을 동등한 관계로 정의한다.
5. 모든 전경 픽셀이 레이블링되었으면, 각 픽셀의 레이블을 동등한 관계를 가진 레이블 번호 중 가장 작은 번호로 변경한다.

위의 과정은 Fig. 6으로 확인할 수 있으며, 레이블링 결과 같은 레이블을 가지는 픽셀은 같은 광원에 속하게 된다. 단일 전경 픽셀이 제거된 영상에 Two-pass 레이블링을 수행한 결과는 Fig. 7에서 확인할 수 있다.

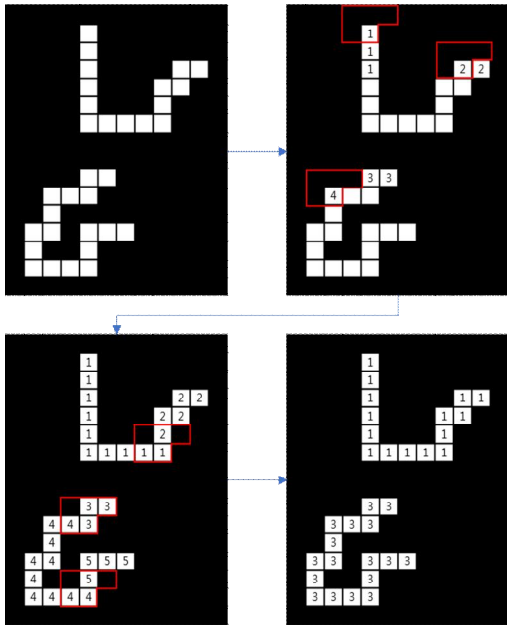


Fig. 6. Example of two-pass labeling

2.1.5 소형 광원 제거

영상 내 광원은 노이즈 광원, 천체 광원, 위성 Streak 광원이 존재하며 일반적으로 위성 Streak 광원이 다른 광원들에 비해 큰 크기를 가지므로 이를 이용해 대부분의 노이즈 광원 및 낮은 밝기를 지니는 천체 광원을 제거할 수 있다. 광원의 크기를 이용한 히스토그램을 구성하고, 비어있는 상자(bin)는 생략한다. 이 중 하위의 일정 비율 상자에 속하는 광원을 Non-streak 광원으로 정의하고, 배경으로 설정한다. Non-streak 광원을 걸절하는 예시는 Fig. 8과 같다.

2.1.6 직선 맞춤을 이용한 위성 궤적 추정

소형 광원의 제거로 인해 대부분의 노이즈 광원과 낮은 밝기를 지닌 천체 광원은 사라지게 되며, 대부분의 위성 Streak 광원과 높은 밝기를 지닌 천체 광원만이 남게 된다. 위성 Streak은 위성의 이동으로 인해 생성되므로 위성 궤적에 인접하지 않은 영역에는 Streak이 존재하지 않을 것이다. 따라서 위성 궤적 인근 영역에만 영상 처리를 수행하면 위성 Streak을 검출할 수 있으며 위성 궤적은 영상 내에서 직선과 유사한 형태로 나타나므로 광원 위치에 기반한 직선 맞춤을 이용해 위성 궤적을 추정할 수 있다. 제안하는 방법에서는 직선 맞춤을 위해 Random sampling consensus[7]를 이용하였으며, 직선 맞춤의 과정은 아래와 같다.

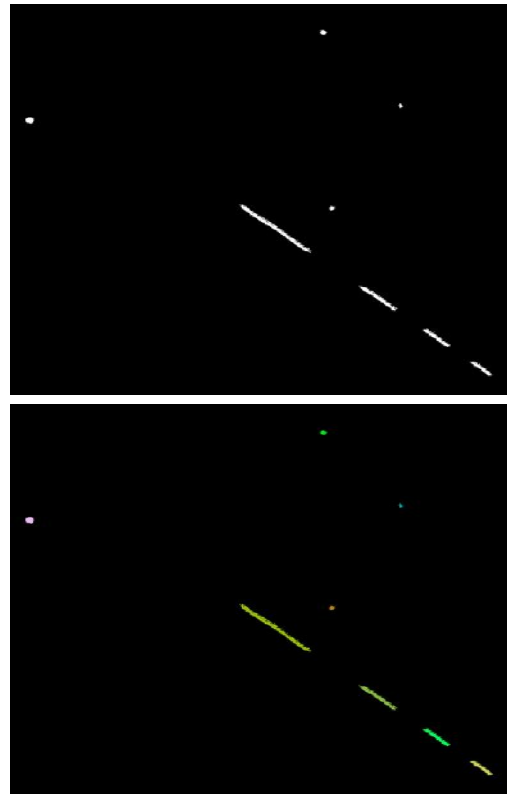


Fig. 7. The foreground image that single pixels are removed (top) and the labeled foreground image (bottom)

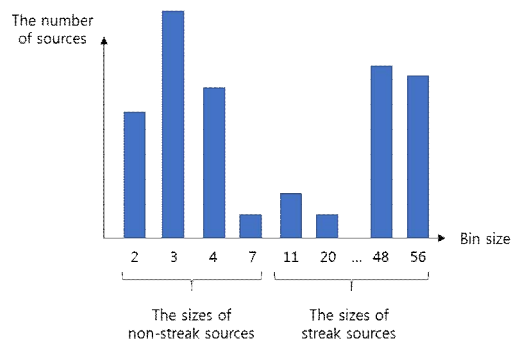


Fig. 8. Non-streak source determination with a histogram for the size of sources

1. 샘플링 비율, Inlier 광원 비율, 맞춤 허용 거리를 설정하고 맞춤 직선의 최소 오차를 매우 높은 값으로 초기화한다.
2. 천체 광원을 설정한 샘플링 비율에 따라 무작위로 샘플링한다.
3. 샘플링 된 광원의 위치와 최소자승법(least

- square method)을 이용하여 직선과 광원 간 오차를 최소화하는 직선 맞춤을 수행한다.
4. 맞춤 결과로 생성한 직선으로부터 광원까지의 거리가 맞춤 허용 거리 이하인 Inlier 광원 수가 전체 광원 수에서 차지하는 Inlier 광원 비율을 계산한다.
 5. 4번 단계에서의 Inlier 비율 계산 결과에 따라 다음과 같은 작업을 수행한다.
 - 가. Inlier 광원 비율이 설정한 값 이상일 경우, 현재 직선을 직선 맞춤 결과로 설정하고 직선 맞춤을 종료한다.
 - 나. Inlier 광원 비율이 설정한 값 미만일 경우, 현재 직선과 광원 간 오차를 계산하여 맞춤 직선의 최소 오차보다 작을 경우 현재 직선을 직선 맞춤 결과로 설정한다.
 6. 2번 단계부터의 반복이 일정 횟수 이상 수행되었을 경우 직선 맞춤을 종료한다.
- 이의 과정을 설명한 다이어그램은 Fig. 9와 같으며 직선 맞춤 결과와 이를 확대한 영상은 Fig. 10과 같다.

직선 맞춤 결과로 생성된 직선을 위성 궤적으로 간주한다. 이후 고해상도 영상에서 위성을 검출하기 위해 생성한 위성 궤적 인근에서만 영상 처리를 수행하면 연산시간을 크게 감소시킬 수 있다.

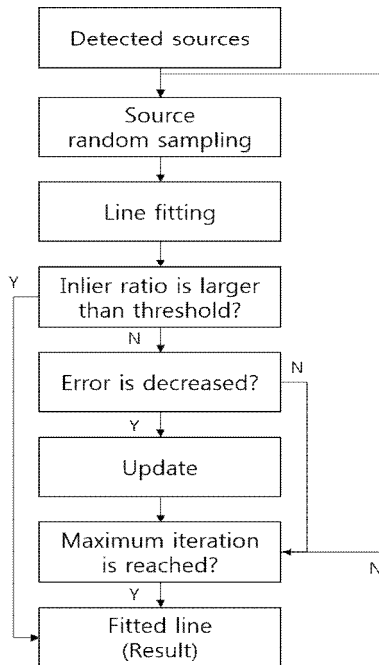


Fig. 9. A diagram for line fitting process

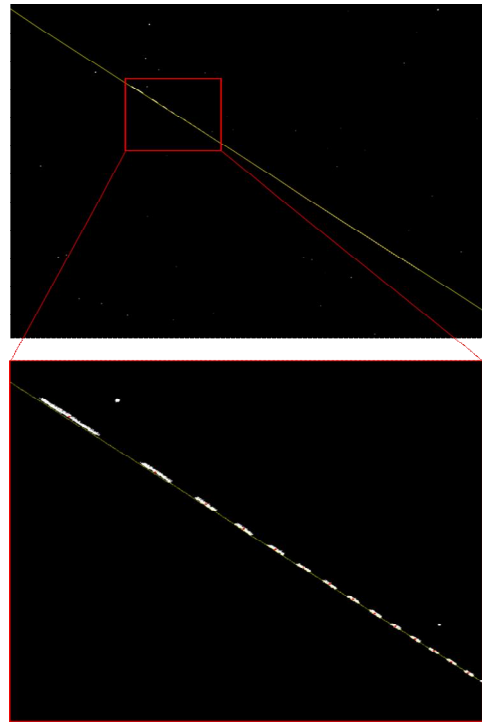


Fig. 10. The line fitting result (the line) and the enlarged area (the rectangle)

2.2 고해상도 영상 위성 검출

2.2.1 배경 모델링

저해상도 영상 처리와 동일하게 고해상도 영상 역시 전경과 배경을 분리할 필요성이 있다. 저해상도의 경우와 동일하게 영상 전체를 다수의 구획으로 분할하고 각 구획에서의 평균과 표준편차를 이용하여 배경 모델링을 수행한다.

2.2.2 Streak 존재 구역 외 전경 제거

저해상도 영상 처리를 통해 위성 궤적을 추정하였다. 따라서 궤적의 인근 영역만을 영상 처리하면 위성 광원의 손실 없이 영상 처리에 소요되는 연산량을 감소시킬 수 있다. 저해상도 영상을 대상으로 한 직선 맞춤을 통해 생성한 직선까지의 거리가 일정 이상인 픽셀은 모두 배경으로 설정한다.

2.2.3 단일 전경 픽셀 제거

저해상도 영상 처리와 동일하게 고해상도 영상의 단일 전경 픽셀을 제거한다. 단 이 경우에는 전경 픽셀 검색 영역을 영상 전체가 아닌 위성 궤적 인근 영역으로 한정하여 연산량 소모를 감소시킨다.

2.2.4 Two-pass 레이블링

고해상도 영상 내의 픽셀 집단을 위해 저해상도 영상의 경우와 동일하게 Two-pass 레이블링을 수행한다. 레이블링 영역 역시 위성 궤적 인근 영역으로 한정된다.

2.2.5 소형 광원 제거

고해상도 영상에서의 소형 광원 제거는 저해상도 영상을 처리하는 경우와 유사하나, 해상도 차이로 인해 천체 광원과 위성 Streak 광원의 크기는 증가하나 노이즈 광원 크기는 저해상도와 큰 차이가 없다. 이러한 성질을 고려하여 저해상도 영상과 동일하게 광원 크기를 이용한 히스토그램을 구성하고 하위 일정 비율의 상자에 해당하는 광원을 제거하되 하위 비율을 저해상도보다 감소시켜 노이즈 광원만을 집중적으로 제거할 수 있도록 한다.

2.2.6 적도 좌표계로의 좌표 변환

남아있는 광원은 천체 광원 또는 위성 Streak 광원이며 천체 광원은 GSC와의 비교를 통해 제거할 수 있다. GSC는 적도 좌표계 기준으로 작성되어 있으므로 천체 광원을 제거하기에 앞서 지금까지 검출한 광원의 영상 좌표계에서의 x 좌표, y 좌표를 적도 좌표계의 Right ascension 좌표(Ra 좌표), Declination 좌표(Dec 좌표)로 그놈론 변환(gnomonic transformation)할 필요가 있다. 변환 식은 아래와 같다[8].

$$Ra = Ref_{Ra} + \tan^{-1}\left(\frac{a}{\cos(Ref_{Dec}) - b \times \sin(Ref_{Dec})}\right)$$

$$Dec = \tan^{-1}\left(\frac{\sin(Ref_{Dec}) + b \times \cos(Ref_{Dec})}{\cos(Ref_{Dec}) - b \times \sin(Ref_{Dec})} \times \cos(Ra - Ref_{Ra})\right)$$

$$a = Rot_{11} \times (x - Ref_x) + Rot_{12} \times (y - Ref_y)$$

$$b = Rot_{21} \times (x - Ref_x) + Rot_{22} \times (y - Ref_y)$$

위 식에서 Ref 는 영상 기준점을 의미하며, 이의 아래첨자는 각 좌표계에서 기준점이 가진 값을 의미한다. Rot 은 영상에 가해진 회전을 나타내는 2×2 크기의 행렬이다. 좌표 변환을 수행하여 모든 광원의 Ra , Dec 좌표값을 구한다.

2.2.7 GSC를 이용한 천체 광원 제거

천체 광원과 GSC에 기록된 천체는 비슷한 위치에 존재하므로 두 위치를 나타내는 벡터 간의 각도는 매우 작은 값을 지닌다. 따라서 각 광원의 천체 좌표와 GSC에 기록된 좌표와의 일대일 매칭을 수행하여 매칭에 성공하는 광원은 천체 광원이라 판단하여 제거한다. GSC 1의 경우 약

2천만 개의 천체 좌표가 저장되어 있으며 이들을 매칭을 위해 모두 비교하는 것은 매우 비효율적이다. 제안하는 방법에서는 소형 광원을 제거하면서 낮은 밝기의 광원을 최대한 제거하였으므로 처리하는 영상 내에 존재 가능한 GSC 천체 좌표를 골라 이들을 밝기 순으로 정렬하고 가장 밝은 천체 일부만을 추출하여 광원과 비교하여 연산량을 최소화한다. 적도 좌표계에서의 두 지점을 나타내는 벡터 사이의 각도 θ 는 아래 식을 이용해 계산할 수 있다.

$$diff_1 = \cos(Ra_1) \times \cos(Dec_1) - \cos(Ra_2) \times \cos(Dec_2)$$

$$diff_2 = \sin(Ra_1) \times \cos(Dec_1) - \sin(Ra_2) \times \cos(Dec_2)$$

$$diff_3 = \sin(Dec_1) - \sin(Dec_2)$$

$$diff = \frac{(diff_1)^2 + (diff_2)^2 + (diff_3)^2}{4}$$

$$\theta = \begin{cases} \pi & diff > 1 \\ 2 \times \tan^{-1}\left(\frac{diff}{1 - diff}\right) & else \end{cases}$$

영상 내에는 여러 개의 광원이 존재하므로 가능한 모든 매칭 조합을 고려하여야 하나 아무런 제한조건이 없을 경우 조합 수가 증가하여 많은 연산량을 소요하므로 각 광원은 광원으로부터 일정 각도 안에 존재하는 GSC 천체 좌표와만 매칭을 수행한다. 광원과 천체 사이의 각도 제한을 적용하여 가능한 모든 조합을 검토한 후, 매칭된 광원과 GSC 천체 좌표 사이의 각도의 합이 가장 작은 매칭을 최종 매칭으로 선택하고 매칭된 광원을 천체 광원으로 간주하여 제거한다.

광원에 인접한 GSC 천체들과의 매칭 수행 예시는 Fig. 11과 같다. 본 예시에서는 $\theta_1 < \theta_2$ 이므로 광원은 1번 천체에 매칭된다.

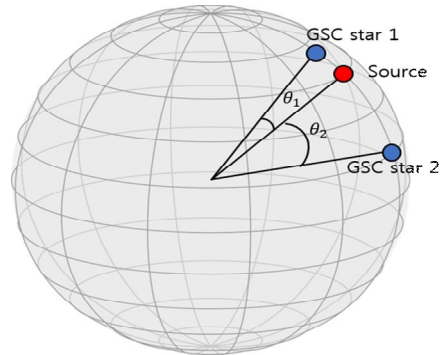


Fig. 11. Example of the matching between the source and the GSC stars

2.3 위성 광원 검출 실험

2.3.1 실험 조건

실험을 위해 4096x4096의 크기를 가진 원본 영상을 사용하였으며 Max-pooling을 이용해 축소된 영상의 크기는 1024x1024로 설정하였다. 배경 모델링을 위하여 저해상도 영상과 고해상도 영상 모두 8x8개, 총 64개의 구획으로 분할되었으며, 배경 모델링 과정은 최대 10회 반복하도록 하였다. 전경 픽셀로 설정되기 위한 평균과 픽셀값의 차이는 최소 ($3 \times$ 표준편차)로 설정하였다. 노이즈 광원 제거는 저해상도 영상의 경우 히스토그램의 하위 25% 상자에 속하는 광원을 제거함으로써 수행하였고, 고해상도 영상의 경우 6.25% 상자에 속하는 광원을 제거함으로써 수행하였다. 직선 맞춤을 위한 샘플링 비율은 70%, Inlier 광원 비율은 80%, 맞춤 허용 거리는 10픽셀로 설정하였다. 고해상도 영상에서 영상 처리가 수행되는 광원 존재 후보 영역은 직선 맞춤 결과로 생성된 직선으로부터 x축 거리 기준 102픽셀 이내의 영역으로 설정하였다. 광원의 기준점은 광원에 Bounding box를 형성하고 이의 중심을 사용하였다. 천체 광원 제거를 위한 GSC 천체 광원 위치 벡터와 검출 광원 위치 벡터 간의 각도 제한은 0.001° 로 지정하였다.

제안하는 방법의 비교 대상은 영상 내 광원 추출을 위해 사용되는 SExtractor 라이브러리, GSC 천체 좌표와 추출 광원 좌표 간의 매칭을 수행하는 영상 좌표계 상에서의 삼각 패턴 매칭이다. 제안하는 방법과의 비교를 위한 실험을 위해 SExtractor에서는 3x3 크기의 Gaussian 필터가 사용되었으며 문턱값은 (평균+ $3 \times$ 표준편차)로 설정하였고 광원으로 정의되기 위한 인접한 전경 픽셀 개수는 50으로 지정하였다. 또한 Deblending은 적용하지 아니하였다. 그 이외의 파라미터는 기본값으로 주어졌다. IRAF를 이용한 매칭의 경우, 매칭된 삼각형에서 각각 대응하는 점의 픽셀 좌표 차이가 3 이내이면 제대로 매칭이 되었다고 판단하였다.

본 실험은 Intel Core i5-4670K 3.40GHz CPU와 8GB RAM이 장착된 PC에서 Ubuntu 16.04 LTS 운영체제를 가상환경에 실행하여 수행하였다.

2.3.2 실험 결과

실험은 3개의 4096x4096 크기를 가진 16비트 영상을 대상으로 수행하였다. 각 영상 내의 위성 Streak 광원 개수와 기존의 방법[3]이 검출한 Streak 광원 개수, 제안한 방법이 검출한 Streak 광원 개수는 Table 1과 같다.

Table 1. The number of streaks in test images and the number of streaks detected by the proposed method and the previous method

	Image 1	Image 2	Image 3
# of streaks	101	95	90
Detected (Proposed)	101	95	90
Detected (Previous)	101	95	90
False detection (Proposed)	0	0	0
False detection (Previous)	0	0	0

Table 2. The mean, the standard deviation, and the maximum difference of the coordinates of the streaks detected by the proposed method and the previous method

	Image 1	Image 2	Image 3
<i>x</i> (Mean)	0.878612 (px)	0.958706 (px)	0.974718 (px)
<i>y</i> (Mean)	1.076528 (px)	1.070196 (px)	1.05184 (px)
<i>Ra</i> (Mean)	0.000644°	0.000529°	0.000453°
<i>Dec</i> (Mean)	0.000286°	0.000315°	0.000320°
<i>x</i> (Std. dev)	0.441105 (px)	0.429589 (px)	0.512712 (px)
<i>y</i> (Std. dev)	0.415951 (px)	0.450642 (px)	0.459902 (px)
<i>Ra</i> (Std. dev)	0.000282°	0.000269°	0.000241°
<i>Dec</i> (Std. dev)	0.000125°	0.000122°	0.000142°
<i>x</i> (Max. diff)	2.233400 (px)	2.017100 (px)	2.279100 (px)
<i>y</i> (Max. diff)	2.626200 (px)	1.980200 (px)	2.602400 (px)
<i>Ra</i> (Max. diff)	0.001696°	0.001183°	0.001273°
<i>Dec</i> (Max. diff)	0.000668°	0.000600°	0.000660°

또한 제안한 방법과 기존 방법에서 검출한 위성 Streak 광원 위치를 비교하였을 때의 좌표값 차이의 평균, 표준편차, 최대 차이는 Table 2와 같다. 이 비교는 두 방법이 모두 검출한 위성 Streak 광원의 경우만을 고려하였다.

Table 3. The computation time or source detection

	Proposed method	Previous method
Image 1	1.852 s	6.9 s
Image 2	1.739 s	6.1 s
Image 3	1.741 s	7.3 s

각 방법이 Streak 광원을 추출하기까지 소요된 시간은 Table 3과 같았다.

III. 결 론

제안하는 방법은 저해상도 영상에서 직선 맞춤을 이용하여 위성 궤적을 추정, 고해상도 영상에서의 영상 처리 영역을 제한함으로써 기존의 방법보다 더 적은 시간을 소요하면서 유사한 광원 추출 결과를 얻을 수 있었다. 광원 추출의 위치는 최대 x 축, y 축, Ra 축, Dec 축 기준으로 약 2.28 픽셀, 2.63 픽셀, 0.001696, 0.000668° 차이가 발생하였다. 이러한 차이는 제안하는 방법에서의 광원 위치 결정이 Bounding box의 중심점을 이용하기에 발생한 현상으로, 제안하는 방법의 전경 픽셀 노이즈 제거 방식에 따라 이 차이는 변화할 수 있다. 연산 시간의 경우, 제안하는 방법은 기존 방법의 약 1/4을 소요함을 확인할 수 있었다. 따라서 제안하는 방법을 이용한 위성 검출 시스템은 더 적은 시간 내에 추적 시스템에 검출한 위성 광원 위치를 전달할 수 있으며 추적 시스템은 동일 시간 내에 더 많은 광원 정보를 전달 받을 수 있으므로 기존 방법을 사용하는 경우보다 더 정확한 위성 추적을 수행할 수 있을 것으로 생각된다. 또한 위성의 광원 검출을 다수의 위성 감시 시스템에서 수행하여 광원 위치 보정을 수행할 경우 빠른 광원 검출 속도는 각 감시 시스템에서 획득한 광원 좌표를 통합하는데 필요한 시간을 기존의 방법에 비해 더 많이 확보할 수 있도록 도와줄 것이다.

본 연구에서 제안한 위성 Streak 광원 검출 방법과 기존의 방법은 영상 내에 단 하나의 위성으로 인한 Streak이 발생한다는 가정 하에 사용되었다. 만약 영상 내에 둘 이상의 영상이 포함될 경우 제안하는 방법의 직선 맞춤이 둘 이상의 위성을 분류해 내는데 도움이 될 것으로 생각한다. 예를 들어 각 시스템 별 최대 검출 가능한 위성 개수를 지정하고 그 수만큼 직선 맞춤을 수행한

다면, 각 직선에 맞추어지는 광원을 별도로 레이블링 함으로써 각 위성의 Streak 광원을 추출하고 이동 경로를 추정, 추적 시스템에 전달할 수 있을 것이다. 직선 맞춤은 약 0.01초 이내로 수행되므로 연산량 소요가 크지 않을 것으로 생각된다.

References

- 1) Ciurte, A., and Danescu, R., "Automatic Detection of MEO Satellite Streaks from Single Long Exposure Astronomic Images," 2014 International Conference on Computer Vision Theory and Applications, January 2014, pp. 538~544.
- 2) Helin, E.F., and Shoemaker, E.M., "The Palomar Planet-crossing Asteroid Survey, 1973-1978," *Icarus*, Vol. 40, No. 4, December 1979, pp. 321~328.
- 3) Bertin, E., and Arnouts, S., "SExtractor: Software for Source Extraction," *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, Vol. 117, No. 2, June 1996, pp. 393~404.
- 4) Lasker, B.M., Sturch, C.R., McLean, B.J., Russell, J.L., Jenkner, H., and Shara, M.M., "The Guide Star Catalog. I - Astronomical Foundations and Image Processing," *Astronomical Journal*, Vol. 99, June 1990, pp. 2019~2058, 2173~2178.
- 5) Groth, E.J., "A pattern-matching algorithm for two-dimensional coordinate lists," *Astronomical Journal*, Vol. 91, May 1986, pp. 1244~1248.
- 6) Shapiro, L., and Stockman, G., "Computer Vision," 1st Ed., Prentice Hall, New Jersey, 2001, pp. 69~74.
- 7) Fischler, M.A., and Bolles, R.C., "Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography," *Communications of the ACM*, Vol. 24, No. 6, June 1981, pp. 381~395.
- 8) Calabretta, M.R., and Greisen, E.W., "Representations of celestial coordinates in FITS," *Astronomy and Astrophysics*, Vol. 395, December 2002, pp. 1077~1122.