

고속이동천체 검출을 위한 궤적탐지 알고리즘 및 YSTAR-NEOPAT 영상 분석 결과

김대원^{1†}, 변응익¹, 김수영¹, 강용우¹, 한원용², 문홍규², 임홍서²
¹연세대학교 천문대/천문우주학과
²한국천문연구원

AUTOMATED STREAK DETECTION FOR HIGH VELOCITY OBJECTS: TEST WITH YSTAR-NEOPAT IMAGES

Dae-Won Kim^{1†}, Yong-Ik Byun¹, Su-Yong Kim¹, Yong-Woo Kang¹,
WonYong Han², Hong-Kyu Moon², and Hong-Suh Yim²

¹Yonsei University Observatory and Department of Astronomy, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

²Korea Astronomy & Space Science Institute, Yusong, Daejeon 305-348, Korea

E-mail: coati@yonsei.ac.kr

(Received September 12, 2005; Accepted October 18, 2005)

요 약

천구상에서 빠르게 움직이는 인공위성, 우주잔해물 및 빠른 속도의 지구접근천체 등과 같은 고속이동천체들은 별들을 추적하며 관측한 영상에서 선 형태의 궤적으로 나타나게 된다. 이 논문에서는 이러한 궤적을 검출해내기 위해 개발한 궤적탐지 알고리즘에 대한 소개와, 개발된 알고리즘을 이용한 YSTAR-NEOPAT 영상분석결과에 대해 기술하였다. 알고리즘은 기본적으로 외곽선 추적방법을 이용하였으며, 별들이 밀집한 곳에서의 검출효율을 높이기 위해 차감영상기법을 사용하였다. 알고리즘의 수행속도 테스트 결과, 궤적탐지에 소요되는 시간은 1초 미만으로 대용량 자료의 실시간 분석에도 사용이 가능한 것으로 나타났다. 또한, 검출 결과를 GIF 영상으로 저장함으로써, 눈으로 직접 확인할 수 있도록 하였다. 총 7,000여 장의 YSTAR-NEOPAT 영상을 분석한 결과, 약 700개의 궤적을 발견하였으며 발견된 궤적들 중 고속이동천체는 시계열 영상에서 여러 장에 걸쳐 연속적으로 나타나는 특성을 이용하여 기타 다른 궤적들과 구별해 낼 수 있었다. 이렇게 발견된 고속이동천체는 모두 인공위성 혹은 우주잔해물인 것으로 나타났으며, 기타 궤적들은 우주선 및 유성인 것으로 분류되었다.

ABSTRACT

We developed an algorithm to efficiently detect streaks in survey images and made a performance test with YSTAR-NEOPAT images obtained by the 0.5m telescope stationed in South Africa. Fast moving objects whose apparent speeds exceed 10 arcsec/min are the main target of our algorithm; these include artificial satellites, space debris, and very fast Near-Earth Objects. Our algorithm, based on the outline shape of elongated sources employs a step of image subtraction in order to reduce the confusion caused by dense distribution of faint stars. It takes less than a second to find and characterize streaks present in normal astronomical images of 2K format.

[†]corresponding author

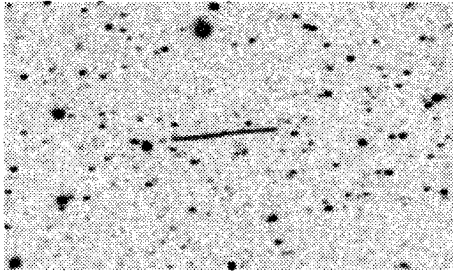


그림 1. 지구접근천체 중 하나인 1998WT의 궤적.

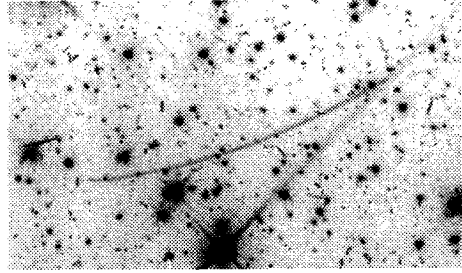


그림 2. 허블 우주 망원경으로 관측된 소행성의 궤적(Evans et al. 1998).

Comparison with visual inspection proves the efficiency and completeness of our automated detection algorithm. When applied to about 7,000 time-series images from YSTAR telescope, nearly 700 incidents of streaks are detected. Fast moving objects are identified by the presence of matching streaks in adjoining frames. Nearly all of confirmed fast moving objects turn out to be artificial satellites or space debris. Majority of streaks are however meteors and cosmic ray hits, whose identity is often difficult to classify.

Key words: streak, detection algorithm, near-earth object

1. 서 론

일반적으로 별 같이 먼 거리에 있는 물체들을 망원경으로 추적하며 관측하게 되면, 결과 영상에서 점 형태로 나타나게 된다. 그러나, 천구 상에서 상대적으로 별들보다 빠르게 움직이는 물체들(이하 고속이동천체)은 선 형태의 궤적으로 나타나게 되는데, 이런 물체들로는 인공위성, 우주잔해물(space debris) 및 빠르게 움직이는 지구접근천체(Near-Earth Object) 등이 있다. 이들은 그림 1에서와 같이 대부분의 지상 망원경에서는 직선 형태로써 나타나며, 허블 우주 망원경과 같은 우주 망원경에서는 그림 2와 같이 곡선의 형태로 나타나기도 한다(Evans et al. 1998).

이러한 물체들을 찾아내기 위해 개발된 알고리즘(Rabinowitz 1991, Schildknecht et al. 1995, Milani & Villani 1996)들이 이미 존재하지만 수행속도가 느리거나, 궤적탐지에만 특화되어 있지 않지 않기 때문에, 우리가 필요로 하는 알고리즘과는 차이가 있다. YSTAR-NEOPAT 망원경은 YSTAR(Yonsei Survey Telescope for Astronomical Research) 프로젝트의 일환으로 광시야 망원경을 이용하여 전천탐사를 목표로 관측 중이며, 하루에도 수 Gbyte에 달하는 영상을 저장한다. 따라서, 검출효율이 높아야 함은 물론 수행속도도 빠른 분석 알고리즘이 필요하다. 이 목적에 부합하기 위해서 우리는 기존의 알고리즘과는 독립적인 새로운 알고리즘을 개발하였으며, 개발된 알고리즘을 이용하여 YSTAR-NEOPAT 관측영상을 분석하였다.

2장에서는 개발된 알고리즘에 대해 설명하였으며, 3장에서는 알고리즘을 이용하여 YSTAR-NEOPAT 관측영상을 분석한 결과를 기술하였다.

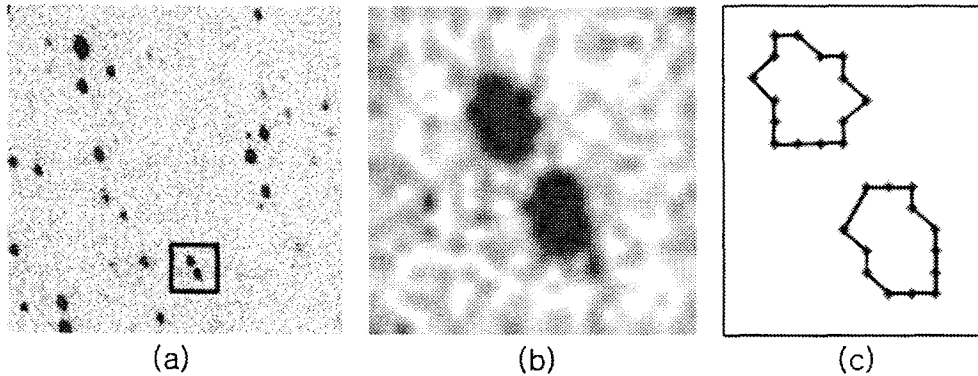


그림 3. (a) 원본영상, (b) (a)의 box 영역을 확대한 영상, (c) 외곽선 추적방법을 이용하여 구한 (b) 별들의 외곽선.

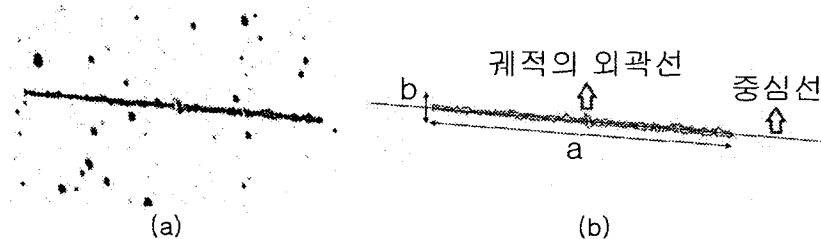


그림 4. (a) YSTAR-NEOPAT 영상에 나타난 직선 형태의 궤적, (b) (a)영상으로부터 구한 외곽선 및 중심선.

2. 고속이동천체 검출 방법

2.1 궤적탐지 알고리즘

궤적탐지를 위한 기본 알고리즘은 외곽선 추적방법(border tracing method)으로, 이를 이용하면 관측영상에서 특정 값을 경계로 하는 외곽선들을 구해낼 수 있다. 보다 자세한 내용은 그림 3에 설명해 놓았다. 우리가 사용한 경계값은 하늘의 표준 편차의 3배에 해당하는 값이며, 이 값을 경계값으로 사용하면 대부분의 밝은 별들은 물론 눈으로는 찾아내기 힘든 어두운 물체들의 외곽선 추적도 가능하게 된다. 외곽선 추적방법으로 얻어진 외곽선은 별의 경우에는 원형의 형태로 나타나지만, 우리가 찾아내고자 하는 고속이동천체들의 경우는 대부분 직선에 가까운 형태로 나타나게 된다. 따라서, 구해진 외곽선을 분석하면 길쭉한 형태의 궤적만을 따로 분리해 낼 수 있다. 표 1에 이러한 궤적을 분류하기 위해 사용한 매개변수들을 나열해놓았으며, 그림 4에는 영상에서 얻어진 외곽선의 예를 실어 놓았다. 그림 4와 표 1에 명시된 중심선은 구해진 외곽선의 최소자승 직선(least square fitting line)을 나타낸다.

또한 시계열 영상(time-series images)의 경우, 각각의 영상에서 찾아진 궤적간의 상관관계를 분석함으로써 여러 장에 걸쳐 연속적으로 나타나는 궤적과 한 장의 영상에서만 나타나는 궤적을 구별해 낼 수 있게 된다. 따라서 짧은 시간 동안 나타났다 사라짐으로써 한 장의 영상에만 나타나는 유성이나 우주선(cosmic ray)으로부터, 여러 장에 걸쳐 나타나는 지구접근천체나 인공위성을 분리해 내는 것이 가능해진다.

표 1. 궤적을 검출하기 위해 사용하는 매개변수들

매개변수	정의
a	궤적의 길이
b	궤적의 두께
Flattening	편평도 ($1 - b/a$)
AvStd	중심선과 외곽선 각 pixel 간 수직 거리의 평균 표준 편차
Round	궤적의 길이와 AvStd의 비 ($AvStd/a$)

표 2. 궤적탐지 알고리즘의 수행속도 테스트 결과

수행단계	평균소요시간(second)
FITS 영상 읽기	1.6
궤적탐지	0.3

위의 과정을 거쳐 개발된 궤적탐지 알고리즘의 장점 중 하나는 매우 빠른 수행속도로, YSTAR-NEOPAT의 2048×2048 CCD에서 얻어진 약 8Mbyte의 영상을 1초 내에 분석해 낼 수 있다.

2.2 차감영상기법(Image subtraction method)

2.1절에서 언급한 궤적검출 알고리즘의 단점은 별들이 밀집한 곳에서 오검출(false detection)이 많아진다는 점이다. 즉, 인접한 별들의 외곽선이 연결되면서 선 형태의 궤적이 만들어지는 경우가 발생하는데, 이런 경우에 고속이동천체에 의한 궤적으로 오인할 수 있다는 단점을 가진다. 이러한 단점은 차감영상기법(Alard & Lupton 1998)을 사용함으로써 줄일 수 있는데, 차감영상기법은 같은 영역을 관측한 두 장 이상의 영상을 이용, 별과 같이 정적인 물체를 제거함으로써 밝기나 위치의 변화를 가지는 물체만을 보다 쉽게 찾아낼 수 있도록 도와주는 기법이다. 개발된 궤적탐지 알고리즘에 사용된 차감영상기법은 최소 3장의 영상을 필요로 하며, 최대 장수의 제한은 없다. 차감영상기법에 대한 보다 자세한 내용은 Oh & Byun(2005)에 설명되어 있다.

2.3 알고리즘 수행속도 테스트 결과

개발된 알고리즘의 성능 분석을 위하여 남아프리카에 위치한 YSTAR-NEOPAT 망원경으로 관측한 영상 400여 장을 분석하였으며, 이 영상은 YSTAR에서 TCNGC로 명명된 영역을 찍은 영상이다. TCNGC는 관측 가능한 New General Catalogue(Dreyer 1888) 천체를 기준으로 정한 영역으로 총 19개의 TCNGC가 정의되어 있다.

테스트는 순수하게 궤적탐지 알고리즘의 속도만을 측정하기 위해 2.2절에서 언급한 차감영상기법은 사용하지 않고 진행하였다. 테스트 OS는 Linux 및 Cygwin이 설치된 WindowXP 두 가지였으며, 테스트에 사용된 컴퓨터의 CPU는 AMD AthlonXP 1700+이고, 메모리는 512Mbyte 였다. 표 2는 테스트 결과로, 알고리즘의 수행시간은 1초 미만인 것을 볼 수 있다. 또한, 테스트 OS에 따른 수행시간의 차이는 거의 나타나지 않았다.

3. YSTAR-NEOPAT 영상 분석 결과

3.1 YSTAR-NEOPAT 영상

2장에서 설명한 궤적탐지 알고리즘으로 YSTAR-NEOPAT 관측영상 약 7,000여장을 분석하였

표 3. YSTAR-NEOPAT 망원경의 제원

YSTAR-NEOPAT	망원경의 사양
위치	남아프리카 공화국, 케이프 타운 서덜랜드 천문대
검출기	2048 x 2048 CCD (Apogee)
주경 제원	직경 0.5m, F/2.0
시야각	1.8° x 1.8° (3.05"/pixel)
한계 등급	17 등급
사용 필터	R

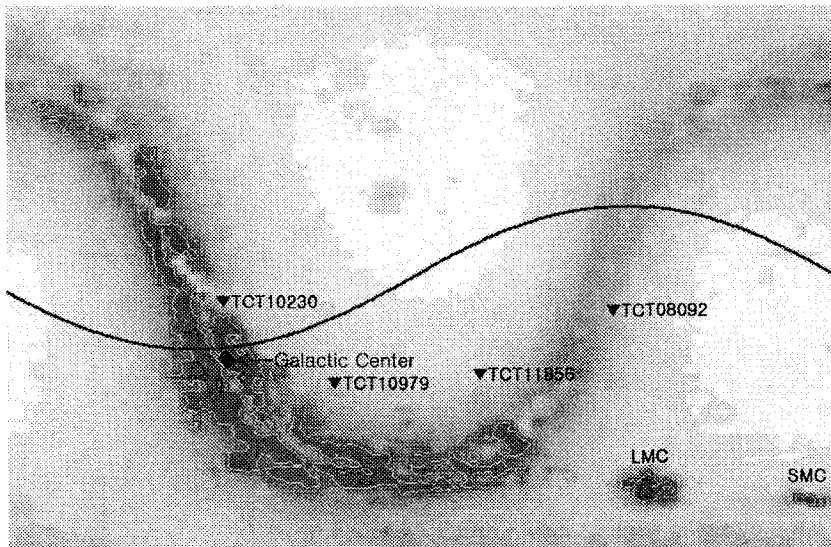


그림 5. 분석한 영상의 관측 영역인 TCT10230, TCT10979, TCT11856 및 TCT08092.

으며, 이 영상은 2003년 3월 17일 부터 2003년 5월 2일 까지 관측되었고, 총 관측 일수는 16일이다. YSTAR-NEOPAT 망원경의 제원은 표 3에서 볼 수 있다. 모든 영상의 노출 시간은 30초이고, 전후 영상 간의 시간 차는 약 20초로 차감영상기법을 이용하여 분석하기에 적합한 형태로 관측이 되었다. 각 영상은 YSTAR 관측 시스템 내에서 TCT로 정의되어진 영역을 관측한 영상으로, 원래의 관측 목적은 Optical Transient(Hudec 1999)를 찾아내기 위해서이지만, 영상의 수가 7,000여 장으로 매우 많기 때문에 통계적인 결과를 내기에 적합하고, 또한 시계열 영상이므로 차감영상기법을 이용하여 보다 정확한 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대되었기 때문에 해당 영상을 분석에 사용하였다.

그림 5는 Guide Star Catalog 2.2를 이용하여 만들어진 전천 등고선 지도 위에 분석에 사용된 영상의 관측 영역을 표시한 그림이다. 관측 영역 중 TCT10230이 황도대에 가까운 것을 볼 수 있는데, 관측된 많은 수의 소행성이 황도대 근처에 분포(Sykes et al. 2002)하는 것을 감안한다면 몇몇 매우 빠른 천체들이 선 형태의 궤적으로 영상에 관측되었을 것으로 예상해 볼 수 있다. 그러나 실제로는 TCT10230의 총 관측 시간이 약 5시간에 불과하기 때문에, 그러한 천체는 거의 나타나지 않을 것으로 생각된다. 또한, 적도대를 관측한 영상이 없기 때문에 정지위성 역시 발견되지 않을 것으로 예측할 수 있다.

표 4. 인공위성의 궤도에 따른 궤적의 길이.

궤도	높이(km)	YSTAR-NEOPAT 영상에 나타나는 궤적의 길이(pixel)	speed (°/hour)
저궤도 위성(LEO)	500 ~ 1500	1790 ~ 2195	182 ~ 223
중궤도 위성(MEO)	5000 ~ 15000	401 ~ 1031	41 ~ 105
정지위성(GEO)	35786	144	15

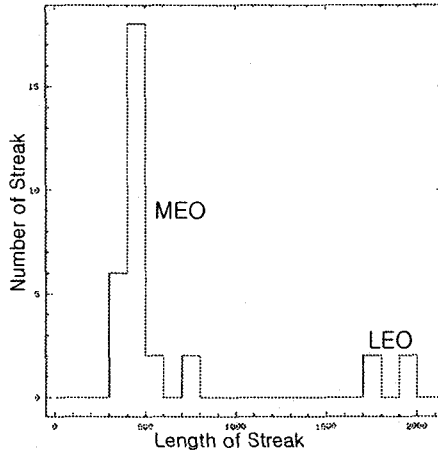


그림 6. 인공위성의 길이에 따른 히스토그램.

3.2 발견된 고속이동천체

분석 결과 총 700여 개의 선 형태의 궤적이 발견되었는데, 그 중 30여개가 고속이동천체였으며, 이들은 모두 인공위성 혹은 우주잔해물인 것으로 판명되었다. 고속이동천체는 시계열 영상에서 여러 장에 걸쳐 나타나야 한다는 점을 이용하여 기타 다른 궤적들과 구분하였다. 모든 고속이동천체들을 인공위성 및 우주잔해물로 구분 지은 이유는 영상에 나타난 궤적의 길이 때문이다. 분석 결과, 발견된 고속이동천체의 최소길이는 약 300pixel로, YSTAR-NEOPAT 망원경에서 이 정도의 길이로 나타나는 물체는 천구 상에서 약 $30.5^\circ/\text{hour}$ 의 속도를 가지게 되는데, 이 정도 속도를 가질 수 있는 천체는 인공위성이나 우주잔해물 이외에는 없기 때문이다.

인공위성의 궤도 높이에 따라 YSTAR-NEOPAT 영상에 나타날 수 있는 길이를 표 4에 명시해 놓았다. 표 4는 인공위성의 궤도를 원 궤도로 가정하고 계산한 결과로, 실제 인공위성이 가지는 값과는 약간 차이가 있을 수 있다. 표 4에서 볼 수 있듯이 중궤도 위성(Medium-Earth Orbit)과 정지위성(Geostationary-Earth Orbit) 및 저궤도 위성(Low-Earth Orbit)은 궤적의 길이 상에 차이가 존재하며, 정지위성이 저궤도 위성보다 확연히 짧은 길이를 가지는 것을 알 수 있다. 그림 6은 발견된 고속이동천체들을 길이에 따라 그린 히스토그램으로, 크게 두 개의 그룹이 존재하며 각 그룹은 표 4에서 계산한 저궤도 및 중궤도 위성 궤적의 길이 범위 안에 들어가는 것을 확인할 수 있다. 즉, 발견된 고속이동천체들을 인공위성으로 판별한 것이 틀리지 않았음을 알 수 있으며, 또한 정지위성의 길이인 144 pixel 부근에서는 히스토그램 상의 갯수가 0으로, 이는 3.1절에서 예상 했듯이 정지위성은 관

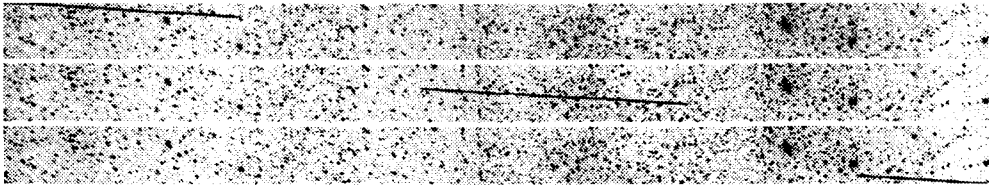


그림 7. 시계열 영상에서 연속적으로 나타나는 인공위성.

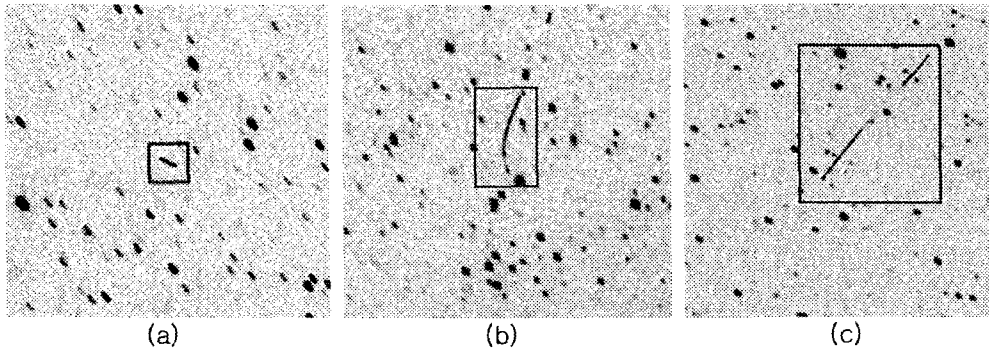


그림 8. 발견된 궤적 중 인공위성이 아닌 궤적의 사례.

측되지 않았음을 말해준다. 그림 7은 이렇게 발견된 인공위성들 중 하나의 예로써, 시계열 영상에서 연속적으로 나타나는 특성을 보여주고 있다. 이처럼 연속적인 영상에 걸쳐 나타나는 궤적은 서로 간의 기울기 및 상관관계를 이용하여 하나의 고속이동천체로 인식하도록 프로그램 작업을 하였다. 그림 7은 개발한 프로그램이 자동 생성한 animation GIF를 각 프레임별로 분리하여 표시한 그림이다.

3.3 기타 궤적들

발견된 궤적들 중 인공위성을 제외한 나머지 모든 궤적들은 시계열 영상에서 한 장의 영상에서만 나타났으며, 이들 중 대부분은 우주선인 것으로 생각된다. 이러한 우주선들의 형태 및 제거법은 이미 다수의 논문에 언급되어 있지만(Fixsen et al. 2000, Pieter 2001), 궤적탐지 알고리즘의 짧은 궤적 탐지효율을 검증하기 위해 따로 제거하지 않았다. 이들 우주선의 경우 대부분 길이가 상당히 짧았으며, 최저 3pixel 길이의 궤적도 검출되었다. 그 외에 유성으로 생각되는 궤적들도 소수 검출되었는데 이들은 우주선에 비해 비교적 길이가 긴 특성을 가지고 있었다. 발견된 기타 궤적 중 우주선으로 생각되는 사례들을 그림 8에 실어 놓았다.

4. 요약 및 토의

이 논문에서는 YSTAR-NEOPAT 관측영상에서 선 형태의 궤적으로 나타나는 천체들의 검출을 위해 개발된 알고리즘에 대하여 기술하였다. 이 알고리즘을 이용하여 약 7,000여 장의 YSTAR-NEOPAT 영상을 분석하였으며, 총 700여 개의 궤적을 찾아내었다. 발견된 대부분의 궤적은 우주선 및 유성으로 판명되었으며, 소수의 인공위성 및 우주잔해물이 발견되었다. 아쉽게도 관측 영역과 총

관측 시간의 제한으로 인해 빠른 속도의 지구접근천체 및 소행성은 발견되지 않았다. 하지만, 개발된 알고리즘이 짧은 길이의 궤적들을 잘 찾아내었음은 물론, 인공위성과 같은 길이가 긴 궤적들 역시 잘 찾아내었기 때문에 고속이동천체 검출을 위한 알고리즘으로써의 성능은 충분히 검증된 것으로 보인다.

모든 분석을 마친 후 인공위성의 경우에만 차감영상기법을 적용하지 않고 다시 분석해 보았다. 2.2절에서 언급했듯이 차감영상기법을 사용하지 않게 되면, 별들이 밀집한 영상에서 오검출이 많아지게 된다. 하지만 단일 영상 분석이 가능하기 때문에 관측영상이 3장 미만일 경우에 유용하게 사용될 수 있다. 또한 인공위성의 경우는 궤적의 길이가 상대적으로 길기 때문에 검출시 길이 제한을 두면, 차감영상기법을 사용하지 않고도 오검출 없이 인공위성만을 찾아 내는 것을 확인할 수 있었다.

궤적탐지 알고리즘의 빠른 수행속도 및 탐지성능을 감안해 볼 때, 개발된 알고리즘은 지상 망원경을 이용한 실시간 위성 감시 프로그램이나 우주잔해물 및 유성우의 감시 프로그램에 유용하게 사용될 수 있을 것이다. 또한 이 알고리즘은 어느 정도의 수정을 통해 비선형의 궤적이나 패턴을 찾는 데도 적용될 수 있으며, 중력렌즈 탐색을 위한 아크 검출에도 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글: 이 연구는 한국천문연구원 학연협력사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- Alard, A. & Lupton, R. H. 1998, ApJ, 503, 325
 Dreyer, J. L. E. 1888, MmRAS, 49, 1
 Evans, R. W., Stapelfeldt, K. R., Peters, D. P., & Trauger, J. T. 1998, ICARUS, 131, 261
 Hudec, R. 1999, A&AS, 138, 593
 Fixsen, D. J., Offenberg, J. D., Hanisch, R. J., Mather, J. C., & Nieto-Santisteban, M. A. 2000, PASP, 112, 1350
 Milani, A. & Villani, A. 1996, EM&P, 72, 257
 Oh, S. H. & Byun, Y. I. 2005, in preparation
 Pieter, G. V. D. 2001, PASP, 113, 1420
 Rabinowitz, D. L. 1991, AJ, 101, 1518
 Schildknecht, T., Hugentobler, U., & Verdun, A. 1995, Advances in Space Research, 16, 47
 Sykes, M. V., Asphaug, E., Bell, J. F., Binzel, R. P., Bottke, W., Bus, S. J., Cellino, A., Clark, P., Davis, D. R., de Sanctis, M. C., Durda, D. D., Emery, J., Fevig, R. A., Fink, U., Granahan, J., Harris, A. W., Hartmann, W. K., Jedicke, R., Kelley, M., Larson, S. M., Lien, D. J., Magri, C., Ostro, S. J., Reed, K. L., Rivkin, A. S., Sears, D. W. G., Storrs, A., Tholen, D. J., Walker, R., Whiteley, R., & Yano, H. 2002, in ASP Conference Proceedings, vol.272, The Future of Solar System Exploration, ed. M. V. Sykes (San Francisco: Astronomical Society of the Pacific), pp.159-176