

이동천체 후보 검출을 위한 알고리즘 개발: YSTAR-NEOPAT 탐사프로그램

배영호^{1†}, 변용익¹, 강용우¹, 박선엽¹, 오세현¹, 유성열¹, 한원웅², 임홍서², 문홍규²

¹연세대학교 천문대/천문우주학과
²한국천문연구원 지구접근천체 연구실

ALGORITHMS FOR MOVING OBJECT DETECTION: YSTAR-NEOPAT SURVEY PROGRAM

Young-Ho Bae^{1†}, Yong-Ik Byun¹, Yong-Woo Kang¹, Sun-Youp Park¹, Se-Heon Oh¹,
Seoung-Yeol Yu¹, Wonyong Han², Hong-Suh Yim², and Hong-Kyu Moon²

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

²Near Earth Object PATrol Lab., Korea Astronomy and Space Science Institute, Daejeon 305-348, Korea

E-mail: yhbae@galaxy.yonsei.ac.kr

(Received September 13, 2005; Accepted October 19, 2005)

요 약

YSTAR-NEOPAT 탐사프로그램에서는 관측된 영상으로부터 지구접근천체와 소행성 등의 이동천체 후보를 검출하기 위해 두 가지 자동검출 알고리즘을 개발하였다. 영상들의 측광자료를 이용하여 이동천체 후보를 검출하는 측광자료비교방법과 영상들을 정렬시킨 후 영상간 차감 과정을 통해 이동천체 후보를 검출하는 영상차감방법이 그것이다. 두 가지 알고리즘의 이동천체 후보 자동검출효율을 시험, 비교하기 위하여, YSTAR-NEOPAT 자동관측 루틴에 의해 관측된 영상들의 일부를 사용하였다. 시험 영상들의 지역좌표와 등급은 기준목록인 USNO-B1.0의 좌표와 등급에 비교되었으며, 이 과정에서 광시야망원경의 심각한 영상왜곡현상들이 1.5 초각 이상의 정밀도로 모두 보정되는 것을 검증하였다. 두 알고리즘을 시험 영상에 적용한 결과, 측광자료 비교방법을 적용한 경우 1차 후보군들이 과다 검출되었고, 이들로 인해 오검출되는 이동천체 최종후보가 다수 발생하였다. 반면, 영상차감방법을 적용한 경우에는 이동천체 후보의 오검출 비율이 측광자료비교방법을 적용했을 때보다 월등히 감소하였음을 확인하였다. 마지막으로 육안확인 과정을 거친 결과, 측광자료비교방법에 의해 검출된 이동천체 후보의 총개수는 검출문턱값에 따라 각각 60개(2.0 σ), 6개(4.0 σ)이며, 육안확인에 의해 실제 이동천체로 분류된 것은 각각 27개와 6개이다. 반면, 영상차감방법에서 이동천체 후보는 모두 34개(2.0 σ)와 12개(4.0 σ)가 검출되었으며, 이 가운데 육안확인에 의해 실제 이동천체로 분류된 것은 각각 32개와 12개이다. 따라서 YSTAR-NEOPAT 영상으로부터 이동천체 후보를 효율적으로 검출하기 위해서는 절대개수측면에서나 검출효율측면에서 측광자료비교방법보다 영상차감방법이 더 적합하다는 것을 확인할 수 있다.

ABSTRACT

We developed and compared two automatic algorithms for moving object detections in the YSTAR-NEOPAT sky survey program. One method, called starlist comparison method, is to identify moving object candidates by comparing the photometry data tables from successive images. Another method, called image subtraction method, is to identify the candidates by subtracting one image from another which isolates sources

[†]corresponding author

moving against background stars. The efficiency and accuracy of these algorithms have been tested using actual survey data from the YSTAR-NEOPAT telescope system. For the detected candidates, we performed eyeball inspection of animated images to confirm validity of asteroid detections. Main conclusions include followings. First, the optical distortion in the YSTAR-NEOPAT wide-field images can be properly corrected by comparison with USNO-B1.0 catalog and the astrometric accuracy can be preserved at around 1.5 arcsec. Secondly, image subtraction provides more robust and accurate detection of moving objects. For two different thresholds of 2.0 and 4.0σ , image subtraction method uncovered 34 and 12 candidates and most of them are confirmed to be real. Starlist comparison method detected many more candidates, 60 and 6 for each threshold level, but nearly half of them turned out to be false detections.

Keywords: asteroids, moving object detection, photometry

1. 서 론

현재 소행성과 지구접근천체, 그리고 혜성 등 지구에 위협을 가할 수 있는 천체들의 추적 및 감시를 위해 LINEAR(Stokes et al. 2000), NEAT(Pravdo et al. 1999), LONEOS(Koehn & Bowell 2000) 등 여러 개의 전천 탐사 프로그램들이 운영되고 있다. 이들 천체들이 지구 또는 행성과 충돌을 할 가능성(Gehrels, Matthews, & Schumann 1994)과 이들이 태양계 형성시의 원시 물질을 포함한다는 점(Pravdo et al. 1999) 등이 중요하게 고려되고 있으나 아직 많은 소행성들이 발견되지 않은 상태로 남아있다. 전천탐사 프로그램에서는 이들 이동천체 후보를 검출하기 위해서 동일한 하늘 영역을 일정한 시간간격을 두고 주기적으로 관측하고 있다. 관측된 영상으로부터 이동천체 후보를 검출하기 위해서는 동일한 하늘 영역을 촬영한 영상이 최소한 2장이 필요하다(Millis et al. 2002). 이는 육안으로 이동천체 후보를 검출하기 위한 최소 필요 영상의 개수이며, 사용된 관측기기의 신호 대 잡음비 근처의 이동천체 후보까지 검출하기 위해서는 최소한 3장의 동일한 하늘 영역을 촬영한 영상이 필요하다(Petit et al. 2004).

현재 시행 중인 대부분의 프로그램에서는 관측된 영상으로부터 이동천체 후보를 검출하기 위해 수동 또는 자동으로 영상을 조사하고, 최종적으로 육안 확인을 거쳐 이들의 위치 및 밝기 정보를 MPC(Minor Planet Center)에 보고하고 있다. 관측 및 분석 방법에는 서로 약간의 차이를 보이고 있는데, 예컨대 LINEAR 계획에서는 약 30분 간격으로 같은 하늘 영역을 5회 촬영하여 이동천체를 검출하고 있으며, NEAT의 경우에는 15 ~ 30분 간격으로 촬영하여 하나의 삼중영상(triplet, 3장의 동일한 하늘 영역을 촬영한 영상)을 구성하고 이를 바탕으로 이동천체 후보를 검출하고 있다. 검출된 이동천체의 육안 확인을 위해 자체 개발한 소프트웨어(PATCHVIEW)를 사용하고 있다. 한편 LONEOS 프로그램에서는 4장의 영상을 이용하여 이동천체 후보를 검출하는데, 각 영상의 광원퍼짐함수(Point Spread Function)를 결정하고, 이를 이동천체후보의 결정여부에 활용한다.

이와 같이 대부분의 탐사 프로그램에서는 관측된 영상으로부터 이동천체 후보를 검출하기 위해,

표 1. TCNGC6809관측영역 내 영상들과 삼중영상 개수.

관측일	영상개수	삼중영상 개수
2003년 8월 16일	114	38
2003년 8월 17일	114	38
2003년 9월 28일	99	33
2003년 10월 8일	96	32

최소한 하나의 삼중영상 세트를 필요로 하며, 이에 대한 영상처리 과정과 이동천체후보의 자동검출 과정을 거친다. 일반적으로 자동검출 알고리즘은 이동천체들이 거의 직선상의 경로를 따라 일정한 속도로 등급변화없이 운동한다는 일반적인 특성(Petit et al. 2004)을 이용한다. 이렇게 발견된 후보들은 육안확인이라는 수순을 거치게 된다. 육안확인을 하는 가장 중요한 이유는 영상의 잡음 등으로 인해 발생한 많은 오검출을 제거하기 위함인데, 이때문에 전체 분석과정의 훨씬 더 많은 시간을 소요하게 된다. 따라서 오검출의 발생을 원천적으로 최소화 할 수 있는 자동검출 알고리즘이 필요하다.

이 논문에서는 YSTAR-NEOPAT 프로그램(Byun et al. 2001)에서 자체 개발한 두 가지의 이동천체 후보 자동검출 알고리즘을 이용하여, 직접 관측한 영상을 대상으로 검출효율을 비교하였다. 이 두 알고리즘 중 한 가지는 대부분의 탐사프로그램에서 사용하고 있는 측광자료비교에 의한 이동천체 후보 자동검출 알고리즘이며, 다른 한 가지는 영상차감방법을 이용한 알고리즘이다. 2장에서는 이동천체 후보 검출효율 시험에 사용된 영상들과 그 전처리 과정에 대해 서술하였고, 3장에서는 각 알고리즘에 대해 서술하였다. 4장에서는 두 알고리즘으로부터 검출된 나홀로 별과 이동천체 후보들을 이용하여 각 알고리즘에 따른 검출효율에 대해 서술하였다.

2. 관측 자료와 영상 전처리

이 연구에 사용된 자료는 2002년 4월 남아공 Sutherland 천문대에 설치된 YSTAR-NEOPAT 50cm 광시야망원경을 이용해 얻어진 것이다. 관측시 사용된 필터는 존슨 필터시스템의 R필터이고, 노출 시간은 60초이다. 관측시야의 크기는 약 $1.8^{\circ} \times 1.8^{\circ}$ 이다. 탐사관측은 미리 정의된 30~40개의 관측영역들을 한 묶음으로 하는 타겟 클러스터(TC, Target Cluster)를 대상으로 진행되는데, 한개의 관측시퀀스는 주어진 타겟 클러스터 내의 관측영역들을 약 1~1시간 30분 간격으로 3번씩 관측하는 것으로 되어 있다.

이동천체 후보 검출효율 비교를 위해 시험에 사용된 자료는 2003년 8월 16일, 8월 17일, 9월 28일, 그리고 10월 8일에 관측된 TCNGC6809 영상자료들이다. TCNGC는 타겟 클러스터와 같은 개념의 관측영역 묶음으로, 특정 NGC 구상성단을 중심으로 직경 15도내에 있는 관측영역을 모아놓은 것이다. 표 1은 해당 관측 날짜에 촬영된 TCNGC6809 내에 있는 영상들과 삼중영상 개수이며, 그림 1은 TCNGC6809의 관측영역을 표시한 것이다. 그림 가운데 'x' 표시는 NGC 6809($\alpha = 19^{\text{h}}39^{\text{m}}59.40^{\text{s}}$, $\delta = -30^{\circ}57'43.5''$)의 중심 위치이며, 그림에 포함되어 있는 작은 사각형들은 관측영역들을 나타낸 것이다.

각 영상 자료는 미리 촬영된 바닥퍼기 영상과 영점 영상에 대해 보정되었고, 기기좌표를 천구좌표로 변환하기 위해 wcstools의 imwcs 프로그램(Mink 1997)과 기준목록 GSC 1.1(Lasker et al. 1990)을

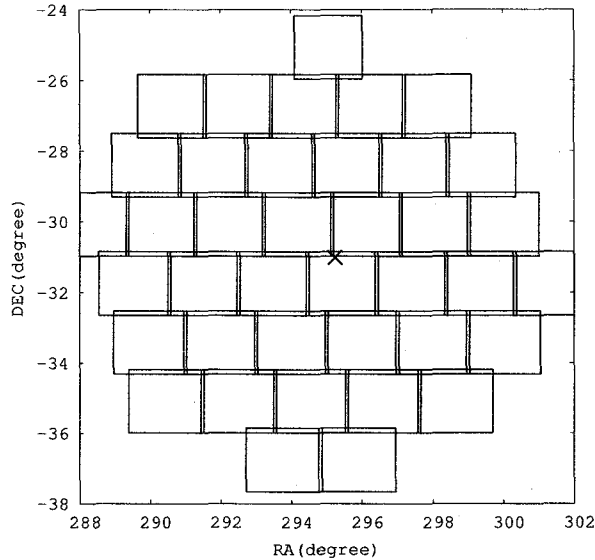


그림 1. TCNGC6809 관측영역. 가로축은 적경, 세로축은 적위이며, 모두 도(degree) 단위이다. 그림의 가운데에 있는 'x' 표시는 NGC 6809의 중심위치이다. 그림 내에 있는 각 사각형은 타겟필드의 관측영역을 나타낸다. 관측영역 하나의 크기는 $1.8^{\circ} \times 1.8^{\circ}$ 이며, 인접한 관측영역과는 약간씩 중첩되어 있다. TCNGC6809의 관측영역 전체의 넓이는 약 126.4평방도이다.

사용하였다. 영상에 나타나는 우주선을 제거하기 위해 자체 개발된 프로그램을 사용하였다.

3. 이동천체 후보 자동검출 알고리즘

관측된 영상으로부터 이동천체 후보를 검출하기 위해서는 일정한 시간 간격을 두고 촬영된 최소한 3장의 영상이 필요하다. 같은 영역의 하늘을 촬영하였다고 하더라도 촬영된 영상간에는 관측기기의 지향 오차로 인해 주어진 천체들의 기기좌표계가 다르게 된다. 같은 하늘 영역을 촬영한 영상들의 좌표계를 하나의 기준 영상의 좌표계로 변환시킬 경우, 대부분의 고정천체들은 동일한 좌표상에 나타나게 되지만, 이동천체 후보는 서로 다른 영상에서 다른 좌표에 나타나게 된다.

이러한 특징을 이용하여 한 영상에서만 유일하게 나타나는 천체를 검출하게 되며, 이들 천체들 중 성상(star-like object) 형태를 가지는 천체를 나홀로 별(lone star)이라고 한다. 여러 장의 천체 시계열 영상들 중 하나의 영상에서만 검출 될 수 있는 것으로는 소행성과 혜성, 격변 변광성, 그리고 광학적 일시현상 등과 같이 움직이거나 짧은 시간내에 극심한 등급 변화를 일으키는 천체들, 그리고 우주선과 같은 불규칙한 일회성 이벤트, 핫 픽셀, 주변의 밝은 천체나 광원에 의한 고스트 영상과 같은 관측 시스템 상의 결함 또는 주변여건에 의해 나타나는 현상들, 그리고 관측 시스템으로 검출 가능한 한계 등급 근처의 등급을 가지는 천체 등 매우 다양하다. 이들 중, 시스템상의 결함에 의한 현상들과 일회성 이벤트들은 하드웨어 상의 보완과 자체 개발된 제거 알고리즘으로 충분히 제거되고, 최종적으로 성상형태를 가지는 천체, 즉 소행성, 혜성, 격변변광성, 그리고 광학적 일시현상 등이 나

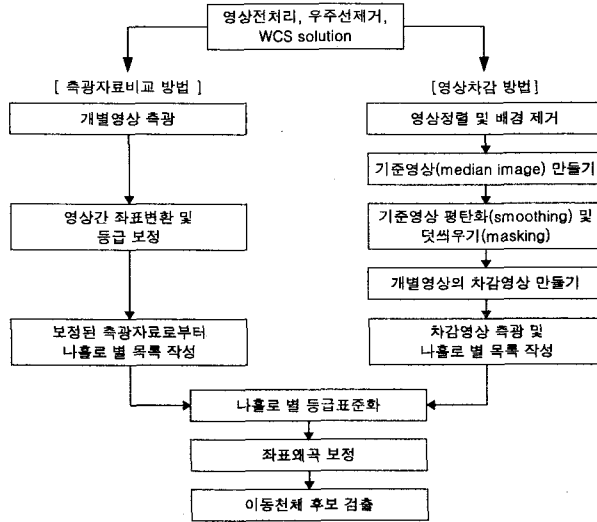


그림 2. 측광자료 비교 방법과 영상차감 방법에 의한 나홀로 별과 이동천체 후보 검출 알고리즘 흐름도.

홀로 별로 분류된다.

해당 영상들로부터 나홀로 별 목록이 작성되면, 목록들을 서로 비교하여 이들로부터 영상간 시간차와 등급 변화, 직진성등을 고려하여 이동천체 후보를 검출한다. 따라서 적절한 이동천체 후보를 검출하기 위해서는 적절한 나홀로 별 검출 과정이 매우 중요하다. 우리가 개발한 두개의 알고리즘, 측광자료비교방법과 영상차감방법의 가장 큰 차이는 바로 나홀로 별을 골라내는 과정에 있으며, 이 과정이 전체효율과 오검출확률에 미치는 영향이 가장 큰 것으로 판단된다.

그림 2는 영상의 전처리과정부터 이동천체 후보 검출까지의 과정을 흐름도로 나타낸 것이다. 두 알고리즘은 모두 공통적으로 영상 전처리와 우주선 제거, 그리고 천구좌표 변환을 위한 과정을 거치게 된다. 측광 자료 비교 방법에서는 단순히 영상 측광 자료를 사용하며, 좌표 및 등급 변환과정을 거쳐, 나홀로 별과 이동천체 후보를 검출한다. 영상차감방법에서는 영상을 정렬한 뒤, 기준영상을 만들고, 기준영상과 원래 영상간의 차감 영상을 새롭게 측광함으로써 나홀로 별과 이동천체 후보를 검출한다.

3.1 측광자료 비교 방법

이 방법은 일정한 시간 간격으로 관측된 같은 영역의 하늘 영상 3장을 측광하여, 생성된 측광자료를 바탕으로 각 영상의 지역좌표계를 기준 영상의 좌표계로 정렬하고, 정렬된 각 영상들의 좌표와 등급을 이용하여 나홀로 별을 검출하는 방법이다. 그 후, 각 영상으로부터 검출된 나홀로 별들의 좌표와 영상 간 등급 변화 등을 기준으로 이동천체 후보를 검출하게 된다.

영상 측광을 위해 Source Extractor 패키지를 사용하였다. 이 패키지는 방대한 양의 관측영상에 대한 측광을 위해 개발된 패키지로서, 시간과 속도면에서 상당한 이점을 갖고 있다(Bertin & Arnouts 1996). 이 패키지를 사용하여 YSTAR-NEOPAT 영상 자료를 측광하기 위해서는 이 패키지가 요구하는 몇 개의 중요한 매개변수와 추출되는 측광등급계를 지정해 주어야 한다. 이 패키지는 다음과

같은 과정을 거쳐 영상을 측광하게 된다. 측광을 위해 입력되는 영상의 배경지도를 구하고, 입력영상으로부터 이 배경지도를 빼주고, 배경지도가 빠진 영상으로부터 검출문턱값을 적용하여, 최종적으로 천체들의 측광자료를 출력한다. 따라서 적절한 측광자료를 얻기 위해서는 배경값 측정 과정과 배경지도를 구하기 위한 매개변수 설정이 중요하다. 측광과정에서 주어진 영상에 대해 적절한 배경지도를 구하기 위해서는 적절한 배경의 크기를 지정해 주어야 하며, 배경의 크기는 측광된 천체들의 크기의 평균값보다 크게 주었다. 이 패키지는 5가지의 측광등급계를 제공하는데 우리는 이중 자동등급(auto magnitude)을 사용하였다. 자동등급은 검출된 천체들에 대해 타원구경을 적용하고, 이 구경내의 플럭스를 계산하여 출력되는 등급이다.

영상간 좌표 변환과 등급보정 과정에서는 YSTAR-NEOPAT 영상에 적합하게 수정된 DAOMATCH, DAOMASTER(Stetson 1987)를 사용하였다. 같은 하늘영역을 촬영한 3장의 영상들 사이에는 약 1~1시간 30분 정도의 시간 간격이 있다. 이 시간 간격동안 하늘변화와 기기상의 지향오차로 인해 영상간 등급차이가 나타나게 되고, 관측된 영역이 완전히 일치하지 않는다. 그러한 영역과 등급 불일치를 보정하기 위해 삼중영상 가운데 시간상 가장 이른 영상의 좌표와 등급을 기준으로 하고, 나머지 두 장의 영상의 좌표와 등급을 이 기준 영상에 대해 변환하는 과정을 거치게 된다. 좌표 변환 과정에서는 수정된 DAOMATCH가 사용되며, DAOMATCH는 영상간 좌표변환 계수를 구해준다. 그리고, 등급보정 과정에서는 수정된 DAOMASTER가 사용되며, DAOMATCH가 구한 좌표변환 계수를 바탕으로 하여 각 영상간 등급보정량을 구하고, 이를 각 영상의 천체등급에 적용해 주게 된다.

이 등급보정 과정은 삼중영상간 등급보정 과정이므로 이 보정된 등급들을 다시 표준등급으로 한번 더 변환시켜야 한다. YSTAR-NEOPAT 프로그램의 경우 등급표준화를 위해 기준 목록으로 USNO-B1.0(Monet et al. 2003)을 사용하였다. 이 과정에서는 기준 목록의 등급을 기준으로 기준영상의 등급 보정값을 구하고, 이 보정값을 기준영상을 포함해서 나머지 두 장의 영상들에 일괄적으로 보정해 주었다. 이 과정을 거침으로써 삼중영상의 등급은 대략적인 표준등급으로의 변환이 가능하다.

이상과 같이, 영상간 좌표변환과 등급보정, 그리고 등급 표준화 과정을 거치게 되면, 삼중영상의 좌표계가 기준좌표계와 동일하게 되며, 3장의 영상 중 하나의 영상에서만 나타나는 나홀로 별들을 검출할 수 있다. 이렇게 작성된 각 영상의 나홀로 별 목록들은 좌표왜곡 보정과정을 거쳐 상호 위치관계와 등급변화 등이 고려되어 이동천체 후보로 등록된다.

3.2 영상차감 방법

이 방법은 측광자료만으로 나홀로 별과 이동천체를 검출하는 앞서의 방법과는 달리, 하늘영역이 정확히 일치하지 않는 영상들을 정렬하고, 영상 상호간 차감과정을 거쳐, 최종적으로 출력되는 각 영상별 잔차영상으로부터 나홀로 별과 이동천체를 새롭게 검출하는 방법이다. 이 방법 역시 그 과정 중간에 Source Extractor 패키지를 이용한 측광과정을 거치지만, 측광자료비교 방법과는 달리 측광과정 자체가 나홀로 별 검출에는 영향을 미치지 않는다. 즉, 이들 측광자료는 영상들을 정렬시키기 위한 과정에만 사용되며, 실제 나홀로 별 목록을 작성하기 위한 측광과정은 영상간 상호 차감한 결과로 만들어지는 잔차영상 측광시에만 적용된다.

영상간 차감 방법을 사용하여 하나의 영상에서만 나타나는 천체를 검출하기 위해서는 영상간 정

렬 과정과 각 영상들로부터 검출되는 천체들의 광량기준 조절 과정이 중요하다. 동일한 하늘 영역을 관측한 영상이라도 각 영상들 사이에는 일정한 시간간격이 존재하며, 검출기의 상태와 하늘의 상태가 일정하지 않기 때문에 각 영상들로부터 검출되는 천체들의 광량과 위치가 영상마다 다르게 된다. 따라서 이러한 영상들을 먼저 기준영상에 대해 정렬시키고, 영상마다 다른 광량값의 척도 조절을 통해 영상간 상호 차감과정이 수행되었다. 영상 정렬과정에서는 영상간 좌표변환계수를 구하기 위해 수정된 DAOMATCH와 DAOMASTER를 사용하였고, 이렇게 구해진 좌표변환계수에 따라 영상들을 정렬시키기 위해 XVISTA의 shift와 imrotate를 사용하였다. 이렇게 정렬된 영상들을 중간값 합치기(median combine)방법으로 결합시켜 기준영상으로 만들고, 각 영상들로부터 검출되는 천체들의 광량은 기준영상에서 검출되는 천체들의 광량에 대해 척도 조절 과정을 거친후 기준영상과 상호 차감을 하게 된다.

정렬된 서로 다른 영상들을 상호 차감하기 위해서는 일반적으로 포갬방법(convolution method)을 사용한다(Alard & Lupton 1998). 포갬방법은 광원퍼짐함수(Point Spread Function)를 기반으로 하는 측광과정에서 수행되어지는 방법으로, YSTAR-NEOPAT 영상과 같이 화소척도(pixel scale)가 크고, 단일 영상 내에서 광원퍼짐함수가 일정하지 않은 경우에는 적합하지 않을 수 있다. 따라서 YSTAR-NEOPAT 영상을 이용한 영상차감 방법으로는 덧씌우기 방법(masking method)을 사용하였다. 덧씌우기 방법으로 원래 영상에서 기준영상을 차감하여 잔차영상을 만들며, 이 잔차영상에는 기준 영상에서는 나타나지 않는 천체와 잡음만이 남게 된다. 최종적으로 이 잔차영상을 측광함으로써 3장의 영상 중 다른 영상에는 나타나지 않는 이들, 즉 나홀로 별에 대한 측광자료를 얻게 된다.

3.3 좌표왜곡 보정

소행성이나 혜성의 경우, 후속관측 및 추적을 위해서는 보다 정확한 천구좌표(world coordinate)가 필요하다. YSTAR-NEOPAT 영상은 그 시야각이 약 $1.8^\circ \times 1.8^\circ$ 로 상당히 넓으며 왜곡보정을 위한 보정렌즈의 기능이 완벽하지 않은 한, 관측된 각 천체의 기기좌표는 실제 하늘의 좌표에 대해 왜곡현상이 있을 것이라고 예상되었고, 기준목록 USNO-B1.0(Monet et al. 2003)과의 좌표 비교를 통해 그 경향을 확인하였다. 따라서 이러한 좌표왜곡 현상을 최소화하기 위해 기준목록과의 좌표비교를 통한 좌표왜곡 보정 과정이 필요하다. 그림 3은 기준목록에서의 천체의 위치와 시험 영상에서의 천체의 위치간 차이를 시각적으로 보여주는 벡터그림이다. 그림 3의 위 그림은 좌표왜곡 보정 전, 아래 그림은 좌표왜곡 보정 후의 벡터 그림이다. 화살표의 크기는 기준목록인 USNO-B1.0과 YSTAR-NEOPAT 영상에 있는 천체들의 좌표간 차이를 나타내며, 화살표의 시작부분은 시험 영상에서의 천체의 위치를, 끝부분은 기준목록에서의 천체의 위치를 나타낸다. 좌표왜곡 현상의 경향을 육안으로 확인하기 위해 화살표의 크기는 실제 크기보다 30배 확대된 것이다. 그림 3의 위 그림에서, 영상의 네 모서리 부분을 포함한 광범위한 영역에서 방사상으로 심각한 좌표왜곡이 있음을 볼 수 있다. 아래 그림은 좌표왜곡 현상이 보정된 후의 그림이다.

그림 4는 이러한 좌표왜곡 현상의 크기를 영상의 중심으로부터 방사상의 거리에 대해 나타낸 것이다. 가로축은 시험 영상의 중심좌표로부터 시험 영상에서 검출된 천체까지의 거리(단위는 픽셀), 세로축은 기준목록의 천체의 좌표와 시험 영상의 천체의 좌표간 거리(단위는 픽셀)를 나타낸 것이다. 그림 4a에서 보는 바와 같이, 좌표왜곡 현상을 보정해 주기 전에는 중심으로부터의 거리에 따라 증가와 감소를 반복하는 좌표오차의 변화를 볼 수 있다. 그림 4b는 이러한 좌표왜곡 현상을 보정해

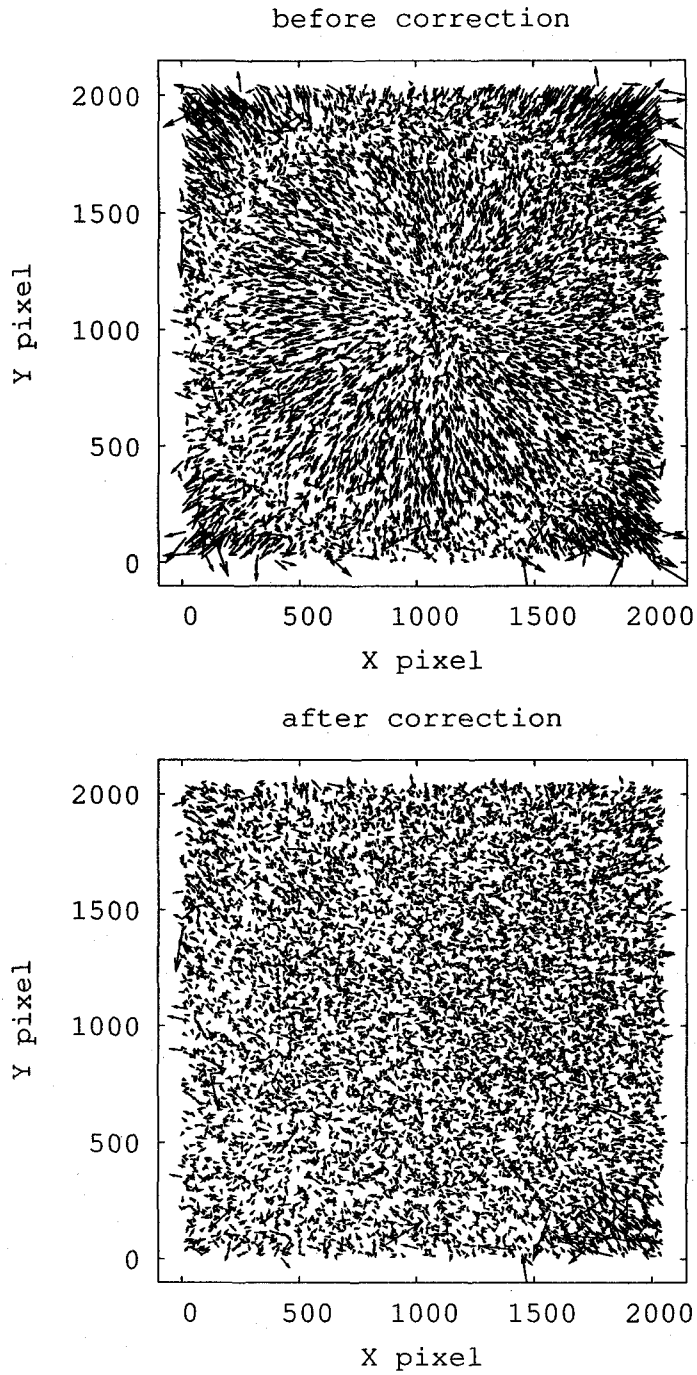


그림 3. 좌표왜곡 보정 전(위)과 보정 후(아래) 벡터그림. 가로축과 세로축은 영상의 픽셀단위이다. 벡터의 크기는 기준목록인 USNO-B1.0과 YSTAR-NEOPAT 영상에 있는 천체들의 좌표간 차이를 나타내며, 육안확인을 위해 실제 크기보다 30배 확대되었다. 좌표왜곡 보정 후 벡터의 크기가 상당히 줄어든것을 확인할 수 있다.

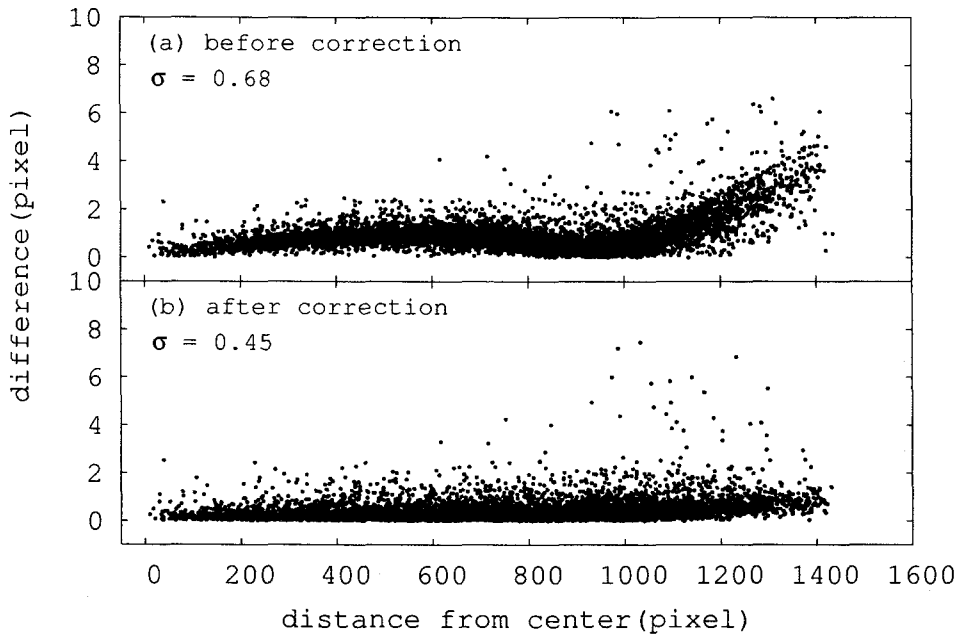


그림 4. 좌표왜곡 현상의 크기를 영상의 중심으로부터 방사상의 거리에 대해 그린 그림. 좌표왜곡 보정 전(a)과 보정 후(b). 가로축은 영상중심으로부터 천체까지의 거리이며, 세로축은 기준목록상의 천체의 좌표와 시험 영상의 천체 좌표간의 차이이다. 목록좌표와 큰 차이를 보이는 천체들이 매치오류에 의해 일부 발생한 것으로 보이나, 그 수가 적어 좌표보정방정식에 주는 영향은 거의 없다.

주고 난 뒤 다시 기준목록과 비교 한 후, 시험 영상 천체의 보정된 좌표와 기준목록의 천체의 좌표간 차이를 그 중심으로부터 거리에 따라 그린 그림이다. 그림 4b로부터 좌표왜곡 현상의 크기가 컸던 네 모서리 부분과 영상 중심반경 수백 픽셀 둘레 부분에서 좌표왜곡현상의 크기가 상당히 감소하였음을 알 수 있다. 좌표왜곡의 보정에는 IRAF의 geomap 태스크를 사용하였으며, 다수의 YSTAR 영상에 대한 시험 결과 좌표보정의 정밀도는 대부분 0.5 픽셀미만, 즉 1.5 각초보다 우수한 것으로 밝혀졌다.

3.4 이동천체 후보 검출

시험 영상에 대해 두 가지 알고리즘을 적용한 후 검출된 나홀로 별들의 좌표를 위와 같은 방식으로 보정 해 준 뒤, 보정된 나홀로 별 목록을 이용하여 이동천체 후보를 검출하게 된다. 이 과정은 두 알고리즘으로부터 검출된 나홀로 별 목록에 동일하게 적용된다. 일반적으로 이동천체는 짧은 시간 간격 동안에는 거의 직선 경로를 따라 등속으로 움직이며, 급격한 회전운동을 하지 않는 한 등급변화도 거의 없다고 볼 수 있다. 따라서, 이러한 이동천체의 운동 특성과 측광학적인 특성을 이용하여 나홀로 별 목록으로부터 이동천체 후보를 검출하게 된다.

나홀로 별 목록으로부터 이동천체 후보를 검출하기 위해 사용된 제한 조건은 다음과 같다. 각 영상의 나홀로 별들간 최소거리는 2픽셀로 하였다. 이는 시험 영상 측광시 검출된 천체의 FWHM 값의

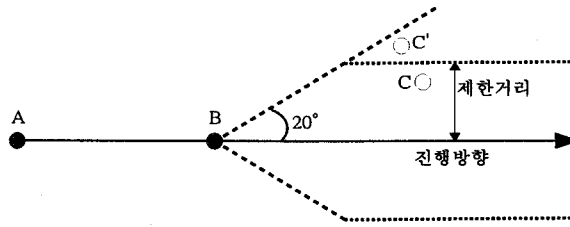


그림 5. 이동천체 후보 검출시 적용된 직진성 제한 조건. 하나의 천체가 두 개의 이동천체 후보로 등록될 수 있기 때문에, 이를 방지하기 위해 처음 두 천체 A, B가 이루는 직선과 마지막 천체 C, C'와의 거리에 대한 제한 조건을 첨가하였다. 이 그림에서 최종적으로 A-B-C 세트가 이동천체 후보로 등록된다.

평균값으로, 측광시 발생할 수 있는 위치 오차에 의해 이동천체 후보로 잘못 분류될 수 있는 가능성을 제거하기 위함이다. 이 제한 조건은 검출가능한 이동천체의 최소 속도에 해당한다. 최대 속도는 LINEAR프로그램에서 이동천체를 속도에 따라 분류 할 때 사용하는 최대 속도인 150"/시간으로 두었다. 직진성 조건은 세 개의 나홀로 별이 이루는 중심각이 160도 이상이 되는 것을 이동천체 후보로 구분하였으며, 등급변화량은 한계등급 근처에서의 측정오차를 충분히 허용하여 1등급으로 두었다.

이들 제한 조건들 중에서 직진성 조건에는 한 가지 조건이 더 첨가되었다(그림 5). 그림 5에서, 나홀로 별 A와 B 사이의 거리와 B와 C, 그리고 B와 C' 사이의 거리가 같다고 가정하면, A-B-C, A-B-C' 세트는 모두 앞서 밝힌 이동천체 후보 분류 제한 조건내에 들어오게 되고, 각각을 이동천체 후보로 검출하게 된다. 하지만, 두 개의 이동천체 후보 중 보다 직선경로에 가깝게 움직이는 것이 실제 이동천체일 확률이 높으므로, 보다 직선경로에 가깝게 움직이는 것을 이동천체 후보로 등록하도록 하였다. 이 그림에서 이동천체 후보 분류시 C, C'과 A-B가 이루는 직선과의 수직거리를 제한조건으로 두게 되면, 보다 정확한 이동천체 후보 검출이 가능하다. 따라서 그림 5에서 최종적으로 실제 검출되는 이동천체 후보는 A-B-C 세트가 된다.

4. 이동천체 후보 검출효율 비교

최종적인 이동천체 후보 검출 효율 비교에 앞서, 우선 각 영상에서 검출된 나홀로 별들의 검출효율의 비교가 선행되어야 한다. 이동천체 후보는 각 영상에서 검출된 나홀로 별 목록으로부터 검출되기 때문에 적절치 않은 나홀로 별의 검출은 곧 이동천체 후보의 오검출을 유발 할 수 있다. 따라서 우선, 각 알고리즘으로부터 검출된 나홀로 별의 검출효율에 대해 비교하고, 이들 나홀로 별 목록으로부터 실제 이동천체 후보를 검출하는 효율을 검토하였다.

4.1 나홀로 별 검출효율 비교

실험영상들로부터 나홀로 별을 검출하기 위해 각 알고리즘별로 2가지 검출문턱값(2.0σ와 4.0σ)을 적용하였다. 측광자료비교 방법에서는 영상의 전처리가 끝난 후 측광자료를 얻기 위한 과정에서 적용된 문턱값이고, 영상차감 방법에서는 차감영상을 얻은 후, 차감영상을 측광할 때 적용된 문턱값이다.

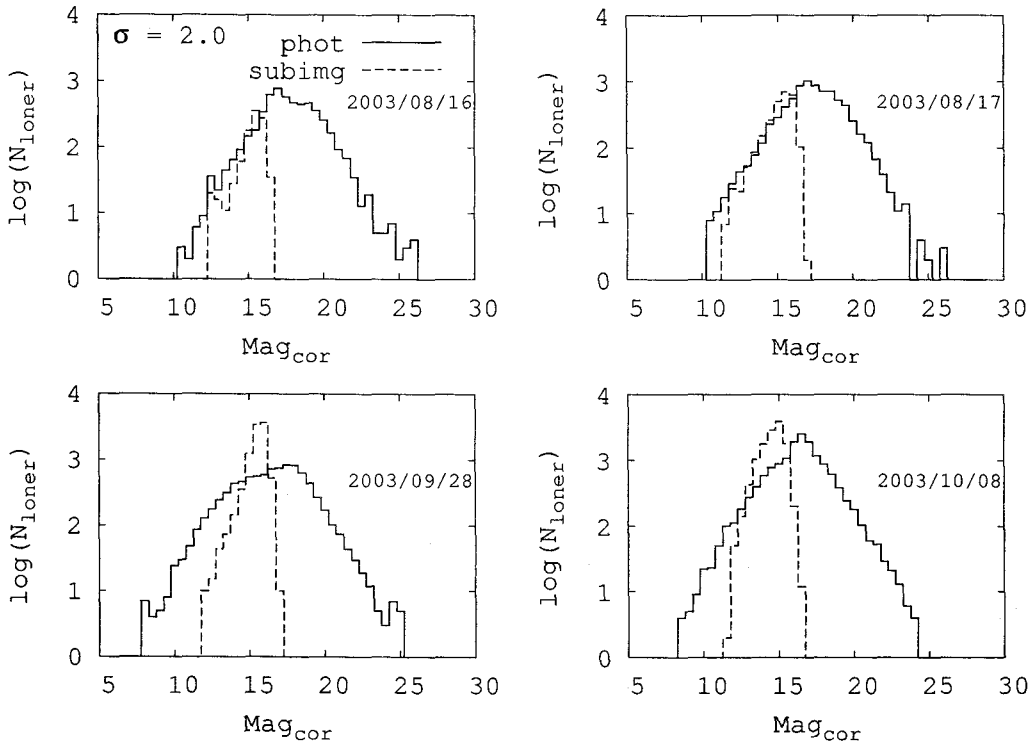


그림 6. 낮은 검출문턱값(2.0σ)을 적용한 경우 각 알고리즘 별 검출된 나홀로 별의 등급-개수분포도. 실선과 점선은 각각 측광자료비교 방법과 영상차감 방법에 의해 검출된 나홀로 별의 등급-개수분포도이다. 가로축은 기준목록과의 등급비교를 통해 보정된 등급, 세로축은 검출된 나홀로 별 개수를 로그척도로 나타내었다.

그림 6과 7은 각 관측일에 해당하는 삼중영상들에 적용한 검출문턱값에 따른 나홀로 별들의 광도함수를 나타낸 것이다. 각 그림에서 가로축은 USNO-B1.0목록의 R등급과의 비교를 통해 보정된 것이며, 세로축은 검출된 나홀로 별들의 등급에 따른 개수로 로그척도로 나타내었다. 실선과 점선은 각각 측광자료비교 방법과 영상차감 방법에 의해 검출된 나홀로 별의 개수분포이다. 그림 6은 적용된 두 가지 검출문턱값 가운데 낮은 검출문턱값(2.0σ)을 적용한 경우로써, 측광자료비교 방법에 의해 검출된 나홀로 별의 개수가 영상차감 방법에 의해 검출된 나홀로 별의 개수보다 훨씬 많으며, 특히 어두운 나홀로 별의 개수에서 현저한 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. YSTAR-NEOPAT 관측 시스템의 한계등급은 R필터 사용시 약 18등급으로, 검출된 18등급보다 어두운 등급을 가지는 나홀로 별들은 과측정된 것이라고 볼 수 있다. 실제로 이렇게 어두운 나홀로 별들의 좌표표시 시험영상에 표시 한 후 육안으로 확인해 본 결과, 대부분 어두워서 잘 보이지 않거나, 영상의 흠에 의해 천체로 잘못 인식된 것들이었다. 이처럼 낮은 등급을 가지는 천체들이 나홀로 별로 잘못 인식된 것은 실제 불박이 별이라고 하더라도 관측 당시의 주변 여건에 의해 영상에 나타나는 빈도수가 일정하지 않기

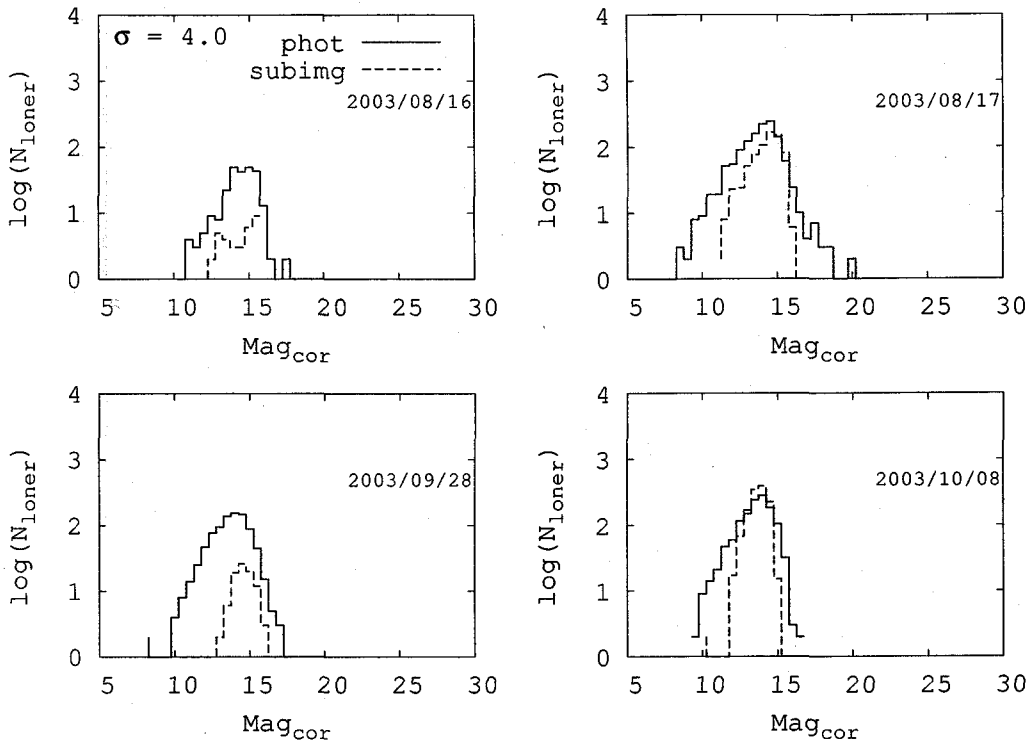


그림 7. 높은 검출문턱값(4.0σ)을 적용한 경우 각 알고리즘 별 검출된 나홀로 별의 등급-개수분포도. 실선과 점선은 각각 측광자료비교 방법과 영상차감 방법에 의해 검출된 나홀로 별의 등급-개수분포도이다. 가로축은 기준목록과의 등급비교를 통해 보정된 등급, 세로축은 검출된 나홀로 별 개수를 로그척도로 나타내었다.

때문인것으로 추측된다. 또한 배경 하늘값과 비슷한 값을 가지는 어두운 천체들에 대한 측광상의 오류인것으로 추측 할 수 있다.

밝은 나홀로 별의 개수에서도 측광자료비교 방법이 대체적으로 과다 검출하고 있음을 알 수 있다. 육안확인을 위해 실험영상 위에 밝은 나홀로 별들의 좌표를 표시해 본 결과, 이들 밝은 나홀로 별들 중에는 실제 나홀로 별들도 포함되어 있었으나, 대부분 밝은 천체에 인접한 어두운 천체의 등급이 과측정된 것이거나, 측광과정에서 인접한 두 개의 밝은 천체를 제대로 분해하지 못한 경우, 또는 밝은 천체가 노광되어 나타난 잡광들을 하나의 천체로 잘못 인식함으로써 발생한 것들이었다.

다음으로 높은 검출문턱값(4.0σ)을 적용한 경우 나홀로 별들의 개수분포를 조사하였다(그림 7). 높은 검출문턱값 적용시에는 예상했던대로 두 알고리즘 모두 한계등급보다 낮은 등급의 나홀로 별들은 거의 검출하지 않았지만, 밝은 나홀로 별들에 있어서는 측광자료비교 방법을 적용했을 때 다소 많이 검출했음을 알 수 있다. 그 원인은 낮은 검출문턱값을 적용했을 때와 비슷하게 대부분 측광상의 오류인것으로 추측된다.

표 2. 검출된 이동천체 후보 개수.

검출문턱값 검출방법	2.0 σ			2.0 σ			4.0 σ			4.0 σ		
	측광자료비교 방법			영상차감 방법			측광자료비교 방법			영상차감 방법		
관측일/구분	T	R	F	T	R	F	T	R	F	T	R	F
2003/08/16	8	8	0	11	11	0	2	2	0	2	2	0
2003/08/17	12	10	2	15	15	0	3	3	0	7	7	0
2003/09/28	15	6	9	4	4	0	0	0	0	2	2	0
2003/10/08	25	3	22	4	2	2	1	1	0	1	1	0
계	60	27	33	34	32	2	6	6	0	12	12	0

T: 검출된 이동천체 후보 총 개수

R: 육안 확인에 의해 실제 이동천체로 분류된 개수

F: 육안 확인에 의해 오검출된 이동천체로 분류된 개수

이상에서 살펴본 바와 같이, 영상으로부터 이동천체 후보를 검출하기 위한 단계인 나홀로 별 검출과정에서는 영상차감 방법이 더 적합함을 알 수 있었다. 영상차감 방법에서는 오차의 발생소지가 있는 측광자료에 의존하지 않고, 영상의 특성을 직접 이용함으로써 나홀로 별의 검출에 오차를 줄일 수 있기 때문이다.

4.2 검출된 이동천체 후보군 비교

다음으로, 각 알고리즘에 의해 검출된 나홀로 별 목록을 이용하여 이동천체 후보 검출효율을 조사하였다. 이동천체 후보는 나홀로 별들간 등속성과 직진성, 그리고 등급변화 등을 고려하여 검출되었으며, 이동천체 후보 검출 후, 이들에 대한 육안 확인 과정을 거쳐 실제 이동천체 후보를 분류하였다. 표 2에는 검출문턱값 별, 검출알고리즘 별, 관측일 별로 검출된 이동천체 후보의 총 개수(T)와 육안확인에 의해 실제 이동천체로 분류된 개수(R), 그리고, 잘못 검출된 개수(F)를 나타내었다. 우선, 검출문턱값 별로 검출된 이동천체 후보의 개수를 비교하면, 검출문턱값을 2.0 σ 로 주었을 때, 측광자료비교 방법에서는 모두 60개의 이동천체 후보를 검출했고, 이 가운데 육안으로 확인된 실제 이동천체 후보의 개수는 27개, 잘못 검출된 이동천체 후보의 개수는 33개였다. 반면, 영상차감 방법을 사용했을 경우에는 모두 34개의 이동천체 후보를 검출했고, 이 가운데 실제 이동천체는 32개, 잘못 검출된 개수는 2개로 분류되었다.

검출된 후보의 총 개수를 단순 비교하면, 측광자료비교방법을 사용했을 때 영상차감방법을 사용했을 때보다 2배 가까이 많이 검출했지만, 육안확인에 의해 실제 이동천체로 분류된 개수를 비교해보면, 영상차감 방법을 사용했을 경우에 더 많았으며, 오검출율도 크게 감소하였음을 알 수 있다. 검출문턱값을 4.0 σ 로 주었을 때, 두 가지 검출방법에서 검출된 모든 이동천체 후보가 실제 이동천체로 분류되었지만, 영상차감 방법을 사용했을 경우 약 2배가 많았다.

각 검출문턱값에 대해 영상차감 방법에서는 각 날짜별로 검출된 거의 모든 이동천체 후보들이 실제 이동천체로 분류된 반면, 측광자료비교방법에서는 낮은 검출문턱값의 경우 오검출율이 날짜별로 많은 차이를 보이고 있다. 특히, 10월 8일 관측영상들에서 다른 관측일의 영상에서보다 오검출이 많았음을 알 수 있다. 그림 8은 나홀로 별과 이동천체 검출을 위해 사용된 시험영상들의 배경하늘값과 배경하늘값의 편차를 표시한 것이다. 가로축에는 영상의 개수를, 세로축에는 배경값을 나타내었다. 그림 8에서, 10월 8일 영상들의 경우, 그 배경값이 다른 관측일에 비해 대체적으로 높다는 것과 배경

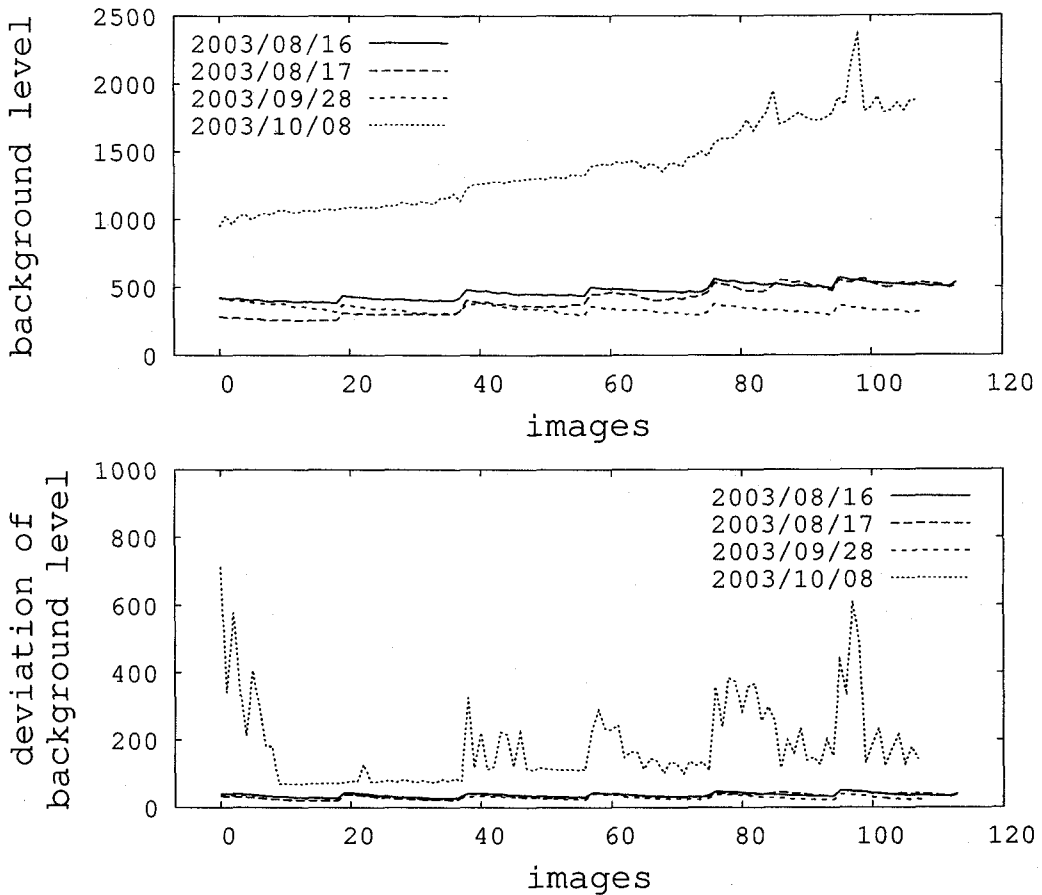


그림 8. 나홀로 별과 이동천체 검출을 위해 사용된 시험영상들의 배경하늘값(위)과 배경하늘값의 편차(아래). 가로축은 영상의 개수를, 세로축은 배경값을 나타낸다. 10월 8일 영상들의 경우, 그 배경값과 편차가 다른 관측일의 영상들에 비해 높으며, 고르지 않고 많은 변화를 보이고 있다.

값의 편차가 다른 관측일의 영상들에 비해 고르지 못하고, 많은 변화를 보이고 있음을 알 수 있다. 해당 영역 관측당시에 달이 가까이 있었거나, 관측과 상관없는 다른 광원에 의해 영상이 영향을 받았을 것으로 추정된다. 배경값의 편차는 영상 측광시에 중요한 변수가 되는데, 편차가 클 경우 영상을 제대로 측광하기 힘들게 된다. 따라서 10월 8일 시험영상들에서는 잘못 검출된 많은 나홀로 별들로 인해 이동천체의 오검출이 많았던 것으로 판단되며, 같은 상황에서 영상차감법은 오검출을 최대한 억제하였음을 알 수 있다.

한편 표 2에서 실제 이동천체로 분류된 최종 검출개수를 비교하면, 8월 16일과 17일의 자료로부터 검출된 이동천체의 개수가 나머지 두 관측일의 개수보다 월등히 많음을 알 수 있다. 이는 8월 16일과 17일의 해당 관측영역과 태양 사이의 각거리가 약 150도이고, 9월 28일과 10월 8일은 각각 약

110도와 100도로, 8월달의 관측영역이 총의 위치에 더 가까이 있어, 소행성대의 관측이 보다 용이했기 때문으로 추정된다(Jedicke 1996).

5. 결 론

YSTAR-NEOPAT 프로그램에서는 관측된 영상으로부터 이동천체 후보를 실시간으로 자동검출하기 위해 두 가지 알고리즘을 개발하였다. 한 가지는 시계열 영상들을 측광한 후 출력된 측광자료와 기준목록을 이용하여 이동천체를 검출해내는 측광자료비교방법이고, 다른 한 가지는 같은 영역의 영상들을 정렬시킨 후, 영상간 차감 과정을 통해 결과 영상에 남은 잔차를 측광하여 이동천체 후보를 검출하는 영상차감방법이다. 이 두 가지 알고리즘의 공통점은 이동천체 후보 검출에 앞서 3장의 시계열자료에서 유일하게 하나의 영상에서만 나타나는 나홀로 별들을 검출하고, 이들 검출된 나홀로 별들을 이동천체의 운동특성과 측광학적인 특성에 적용하여 최종적으로 이동천체 후보를 검출해낸다는 것이다. 따라서 나홀로 별의 검출효율은 이동천체 후보 검출에 영향을 미치게 된다.

측광자료비교방법은 상대적으로 많은 수의 나홀로 별들을 생산해내는데, 대부분의 경우 측광오류 등에 의한 것이어서 전체적으로 오검출을 야기하는 원인이 된다. 실제 자료를 활용한 시험에서 차감영상방법에 비해 많은 이동천체 후보를 찾아내었으나 그중 약 반 정도가 육안확인에서 오검출로 판정이 되었으며, 결과적으로 최종 선택된 이동천체는 차감영상보다 적은 수였다.

차감영상법은 영상의 특성을 매우 직접적으로 이용하여 효율적인 나홀로 별 검출에 도움을 주고, 배경하늘의 변화 혹은 그 편차의 심한 변화와 같은 악조건에서도 무난한 결과를 보여주고 있다. 한편 이 연구의 일환으로 YSTAR-NEOPAT 광시야광학계의 광학왜곡현상이 조사되었으며, USNO-B1.0과 같은 기준목록과의 비교와 좌표변환을 통해 대부분의 왜곡현상이 보정될 수 있음을 확인하였다.

감사의 글: 이 연구는 한국천문연구원 학연협력사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Alard, C. & Lupton, R. H. 1998, ApJ, 503, 325
- Bertin, E. & Arnouts, S. 1996, A&AS, 117, 393
- Byun, Y. I., Han, W., & Kang, Y. W. 2001, in ASP Conference Series, vol.246, Small Telescope Astronomy on Global Scales, eds. B. Paczynski, W. P. Chen, & C. Lemme (San Francisco: Astronomical Society of the Pacific), p.83
- Gehrels, T., Matthews, M. S., & Schumann, A. M. 1994, in Space Science Series, Hazards due to comets and asteroids, eds. T. Gehrels, M. S. Matthews, & A. M. Schumann (Tucson: Univ. of Arizona Press)
- Jedicke, R. 1996, AJ, 111, 970
- Lasker, B. M., Sturch, C. R., McLean, B. J., Russell, J. L., Jenkner, H., & Shara, M. M. 1990, AJ, 99, 2019
- Koehn, B. W. & Bowell, E. L. G. 2000. BAAS. 32. 1018

- Millis, R. L., Buie, M. W., Wasserman, L. H., Elliot, J. L., Kern, S. D., & Wagner, R. M. 2002, *AJ*, 123, 2083
- Mink, D. J. 1997, in *ASP Conference Series*, vol.125, *Astronomical DataAnalysis Software and Systems VI*, eds. H. Gareth & H. E. Payne (SanFrancisco: Astronomical Society of the Pacific), p.249
- Monet, D. G., Levine, S. E., Canzian, B., Ables, H. D., Bird, A. R., Dahn, C. C., Guetter, H. H., Harris, H. C., Henden, A. A., Leggett, S. K., Levison, H. F., Luginbuhl, C. B., Martini, J., Monet, A. K. B., Munn, J. A., Pier, J. R., Rhodes, A. R., Riepe, B., Sell, S., Stone, R. C., Vrba, F. J., Walker, R. L., Westerhout, G., Brucato, R. J., Reid, I. N., Schoening, W., Hartley, M., Read, M. A., & Tritton, S. B. 2003, *AJ*, 125, 984
- Petit, J.-M., Holman, M., Scholl, H., Kavelaars, J., & Gladman, B. 2004, *MNRAS*, 347, 471
- Pravdo, S. H., Rabinowitz, D. L., Helin, E. F., Lawrence, K. J., Bambery, R. J., Clark, C. C., Groom, S. L., Levin, S., Lorre, J., Shaklan, S. B., Kervin, P., Africano, J. A., Sydney, P., & Soohoo, V. 1999, *AJ*, 117, 1616
- Stetson, P. B. 1987, *PASP*, 99, 191
- Stokes, G. H., Evans, J. B., Viggh, H., Shelly, F. C., & Pearce, E. C. 2000, *Icarus*, 148, 21