J. Space Technol. Appl. 5(1), 35-46 (2025)
https://doi.org/10.52912/jsta.2025.5.1.35

우주기술과 응용
Journal of Space Technology and Applications
pISSN 2765-7469 eISSN 2799-3213

연구논문

미지 우주물체의 궤도 산출을 위한 광학 관측 기반 Streak 영상 획득 운용 기법

현 철[1†], 김동건[1], 김현승[1], 박승욱[2]

[1]엘아이지넥스원 해양연구소
[2]엘아이지넥스원 광정보융합연구소

Optical Observation-Based Streak Image Acquisition Operation Method for Orbit Determination of Unknown Space Objects

Chul Hyun[1†], Donggeon Kim[1], Hyunseung Kim[1], Seungwook Park[2]

[1]Maritime R&D Center, LIG Nex1, Seongnam 13488, Korea
[2]EO/IR Systems R&D Center, LIG Nex1, Seongnam 13488, Korea

Received: January 18, 2025
Revised: January 31, 2025
Accepted: February 1, 2025

†**Corresponding author :**
Chul Hyun
Tel : +82-31-5178-4293
E-mail : chul.hyun@gmail.com

Copyright © 2025 The Korean Space Science Society. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ORCID
Chul Hyun
https://orcid.org/0009-0006-7300-0740
Donggeon Kim
https://orcid.org/0009-0005-2374-1252
Hyunseung Kim
https://orcid.org/0000-0003-4021-5914
Seungwook Park
https://orcid.org/0009-0009-8817-7284

요 약

광학 측정을 이용하여 미지 우주 물체의 궤도 산출을 하기 위해서는 여러 개의 streak 영상을 확보해야 하며, 이를 위해 표적을 놓치지 않고 연속적으로 추적할 수 있는 광학 추적 기법이 필요하다. 기존 방법은 개별 촬영 후 망원경을 이동시키는 방식이었으나, 본 연구에서는 일정 구간에서 고정된 상태에서 표적을 촬영하고, 표적이 FOV(field of view)를 벗어나기 직전에 망원경을 이동하여 다시 촬영하는 방식을 적용하였다. 이를 통해 표적을 지속적으로 추적하면서 사전 정보가 없는 미지 우주 표적의 streak 촬영을 안정적으로 수행할 수 있도록 하였다. 적용한 기법의 성능을 검증하기 위해 한반도 지상 관측소에서 관측 가능한 저궤도(low Earth orbit, LEO) 위성의 다양한 궤적을 이용한 시뮬레이션을 수행하였으며, 그 결과로 극단적인 조건을 제외하면 대부분의 경우 표적을 안정적으로 추적하면서 streak 촬영을 수행할 수 있음을 확인하였다. 실제 관측 실험을 통해, 본 연구에서 적용한 방법의 실용성을 평가하였으며, 연속적인 추적을 통해 streak 촬영이 성공적으로 이루어졌음을 확인하였다.

Abstract

To determine the orbit of an unknown space object using optical measurements, multiple streak images must be obtained, requiring an optical tracking method that ensures continuous target tracking without loss. The previous approach involves capturing individual images and then repositioning the telescope. In this study, we apply a method in which the telescope remains fixed while capturing the target over a certain interval and then moves just before the target exits the field of view (FOV) to continue imaging. This approach minimizes unnecessary telescope movements while ensuring continuous target tracking and stable streak imaging. To validate the performance of the applied method, simulations were conducted using various trajectories of low Earth orbit (LEO) satellites observable from ground stations in Korea. The results confirm that, except for extreme cases, the method allows stable target tracking and successful streak imaging. Furthermore, real

observation experiments were performed to assess the practical applicability of the applied method, demonstrating that continuous tracking enabled successful streak imaging.

핵심어: 미지 우주 물체, 광학 추적, streak 영상, 구간별 추적, 초기 궤도 산출
Keywords: unknown space object, optical tracking, streak image, stepwise tracking, initial orbit determination

1. 서론

우주 환경에의 감시 및 추적 기술은 점점 더 중요해지고 있다. 인공위성 및 우주 파편의 증가로 인해 지구 저궤도(low Earth orbit, LEO)의 지속적인 모니터링이 필수적이며, 이를 위한 다양한 탐색 및 추적 기법이 연구되고 있다[1-7]. 레이더 기반 감시 시스템은 거리 및 속도 정보를 직접 획득할 수 있는 장점이 있으나, 넓은 탐지 범위를 확보하기 위해서는 대규모 인프라가 필요하며, 특정 고도 이상에서는 탐지 성능이 제한될 수 있다. 반면, 광학 관측 시스템은 비교적 간단한 장비로도 광범위한 우주 물체를 추적할 수 있는 장점이 있으며, 이러한 특성으로 미지의 우주 물체(unknown space object, USO)에 대한 탐색 및 초기 궤도 산출(initial orbit determination, IOD) 과정에 적용되고 있다.

광학 관측을 통한 우주 물체의 궤도 결정은 일반적으로 streak 영상을 이용하여 수행된다. Streak 영상은 일정 시간 동안 노출을 유지하여 촬영된 이미지로, 표적이 이동한 궤적을 밝은 선형 구조로 나타낸다. 이를 별지도(star map)와 비교하면 표적의 정확한 적경(right ascension, RA) 및 적위(declination, Dec)를 추출할 수 있으며, 서로 다른 시점에서 획득한 세 개 이상의 streak 영상을 이용하면 고전적인 IOD 방법(laplace, Gauss, gooding 등)을 적용하여 표적의 궤도를 추정할 수 있다[8,9]. 따라서, 미지 우주 물체의 초기 궤도 결정을 위해서는 지속적으로 streak 영상을 획득하는 것이 필수적이다.

기존 연구에서는 미지 우주 물체의 탐색 및 연속 추적을 위해 다양한 접근법이 제안되어 왔다. 초기 연구에서는 단일 streak 영상을 이용하여 다음 촬영 지점을 예측하는 방법이 검토되었으나, 관측 간격이 길어질 경우 예측 오차가 증가하여 연속적인 촬영이 어려워지는 문제가 있었다[3]. 이후, 연속적인 centralized tracking 기법이 적용되었으며, 이는 초당 수십 프레임의 연속 촬영을 통해 표적을 이미지 중심에 있도록 추적하는 방식이다[4,5]. 이 방법은 streak 촬영을 수행하기 전까지 망원경의 연속적인 움직임이 필요한 단점이 있었다.

본 연구에서는 기존 방식의 단점을 보완하고, 보다 효율적인 streak 영상을 획득할 수 있는 운용 기법을 검토하였다. 적용한 방법에서는 고정된 위치에서 연속적인 촬영을 수행한 후, 표적이 시야각을 벗어나기 직전에 망원경을 다음 예상 위치로 이동하여 다시 촬영하는 방식을 사용하였다. 이를 통해 마운트의 불필요한 움직임을 최소화하면서도 연속적인 추적이 가능하도록 구성하였다. 특히, guide 카메라를 활용하여 표적을 지속적으로 추적하고, 고해상도 영상을 획득할 수 있는 EO 카메라를 이용해 일정 시간 간격으로 streak 촬영을 수행함으로써, 연속적인 추적과 streak 영상 획득을 동시에 만족할 수 있도록 하였다.

본 논문에서는 제안된 운용 기법의 성능을 검증하기 위해 다양한 궤적 조건을 적용한 시뮬레이션을 수행하였으며, 실제 촬영 데이터를 이용하여 방법의 적용 가능성을 검토하였다. 성

능 평가는 표적을 연속적으로 추적할 수 있는지를 성공/실패 기준으로 설정하고, 다양한 고각 및 속도 조건에서 연속 추적이 가능한지를 분석하였다.

본 연구는 기존의 광학 기반 우주 감시 방법이 갖는 한계를 보완하고, 보다 실용적인 streak 영상 획득 운용 기법을 제시하는 데 초점을 둔다. 이후 장에서는 제안된 시스템의 세부적인 운용 개념을 설명하고, 시뮬레이션 및 실험 결과를 기반으로 성능을 평가한다.

2. 제안 광학 추적 운용 기법

2.1 기존 방식과 제안 기법 비교

사전 정보가 없는 우주 표적의 궤도 정보를 광학 관측을 통해 산출하기 위해서는 여러 개의 streak 영상을 확보하는 과정이 필수적이다. 이를 위해서는 표적을 지속적으로 추적하면서 안정적으로 관측할 수 있는 기법이 필요하다.

기존의 접근 방식(이하 중심 유지 추적, centralized tracking)은 표적을 FOV(field of view) 중앙에 유지하면서 연속적으로 추적하는 방식이다. 이를 위해 망원경 마운트를 지속적으로 조정하며 표적이 중앙에서 벗어나지 않도록 한다. 이 방식은 표적이 안정적으로 유지된다는 장점이 있지만, 마운트가 계속해서 움직여야 하므로 기계적인 부담이 크고, 운용 과정이 복잡해지는 단점이 있다.

본 논문에서는 이러한 문제를 고려하여 구간별 추적(stepwise tracking) 방식을 광학 관측 환경에 적용하고 성능을 분석하였다. Stepwise tracking 방식에서는 망원경이 지속적으로 움직이지 않고, 표적이 FOV 내부에서 관측되는 동안 정지한 상태에서 연속적으로 이미지를 촬영한다. 이후, 표적이 FOV 경계를 벗어나기 직전에 현재까지의 속도 정보를 이용하여 다음 관측 지점을 예측하고, 마운트를 해당 위치로 이동한 후 다시 동일한 과정을 반복한다. 이를 통해 마운트의 불필요한 움직임을 최소화하면서도 표적을 연속적으로 추적할 수 있으며, 궁극적으로 streak 영상을 안정적으로 촬영할 수 있다.

기존 방식과 적용한 방식의 차이를 개념적으로 도식화한 결과를 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1(a)는 중심 유지 추적 방식을, Fig. 1(b)는 stepwise tracking 방식을 나타낸다. 기존 방식에서는 표적을 FOV 중앙에 유지하기 위해 마운트를 지속적으로 조정해야 하며, 표적의 이동에 따라 계속해서 움직여야 한다. 반면, stepwise tracking 방식에서는 표적이 FOV 내부에서 관측되는 동안 망원경이 정지한 상태를 유지하며 연속적으로 촬영한 후, 적절한 시점에 다음 위치로 이동한다. 이를 통해 망원경의 움직임을 최소화하면서도 연속적인 표적 추적이 가능하다.

Stepwise tracking 방식의 가장 큰 장점은 마운트의 움직임을 줄여 기기적 부담을 낮추고 운용을 단순화할 수 있다는 점이다. 일반적으로, 이 방식은 표적이 비교적 선형적인 궤적을 따를 때 효과적이며, 비선형적인 움직임이나 관측 오차가 포함될 경우 추적 성능이 저하될 것으로 예상된다. 이를 확인하기 위해, 실제 운용 환경에서 stepwise tracking 방식이 어느 정도의 연속 추적 성능을 발휘할 수 있는지를 평가하였다. 본 논문에서는 다양한 조건에서 연속 추적 가능 여부를 평가하는 시뮬레이션을 수행하였으며, 해당 결과는 3장에서 상세하게 제시한다.

2.2 구간별 추적을 위한 중심점 결정 알고리즘

본 연구에서 적용한 stepwise tracking에서는 표적이 FOV 내에서 관측되는 동안 망원경을

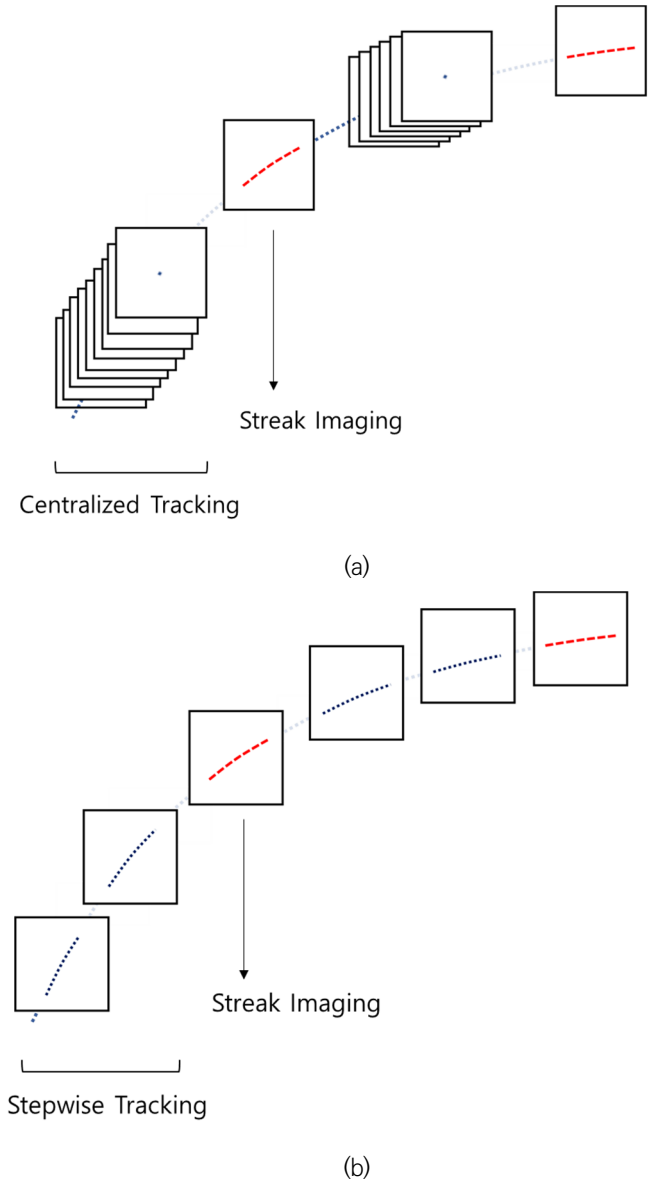


Fig. 1. Comparison of tracking methods for streak imaging. (a) Previous approach: centralized tracking, (b) applied method: stepwise tracking.

고정한 상태로 유지하다가, 표적이 시야를 벗어나기 직전에 새로운 중심점으로 이동하는 방식으로 동작한다. 이를 위해서, 마지막 관측된 표적의 속도를 기반으로 다음 중심점을 예측하는 과정이 필요하다.

우선, 표적이 FOV를 벗어나기 직전의 두 개의 관측 데이터를 이용하여 방위각(azimuth) 및 고각(elevation) 속도를 각각 계산할 수 있다.

$$v_{az} = \frac{az_{end} - az_{end-1}}{\Delta t}, \qquad v_{el} = \frac{el_{end} - el_{end-1}}{\Delta t} \tag{1}$$

여기에서 v_{az}와 v_{el}는 각각 방위각 속도(azimuth velocity)와 고각 속도(elevation velocity)를 의미하며, Δt는 두 관측 지점 사이의 시간 간격을 의미한다.

속도 벡터의 방향을 결정하기 위해, 방위각과 고각 속도의 비율을 식 (2)와 같이 정의할 수 있다.

$$slope_v = \frac{v_{el}}{v_{az}} \tag{2}$$

이제, 표적이 FOV 내에서 이동하는 예상 거리를 계산할 수 있다. 마진을 고려한 시야 범위와 속도 벡터의 기울기를 이용하면 FOV를 가로지르는 거리는 다음과 같이 표현된다.

$$d_{FOV} = \theta_{FOV} \times \sqrt{1 + slope_v^2} \tag{3}$$

표적의 총 속도는 다음 식 (4)와 같이 계산되므로,

$$v_{total} = \sqrt{v_{az}^2 + v_{el}^2} \tag{4}$$

식 (3), (4)를 이용하면 망원경이 새로운 중심점으로 이동한 후, 다음 스텝에서 표적이 시야 내에서 유지되는 시간을 계산할 수 있다. 이는 망원경이 이동한 이후, FOV 내에서 표적이 촬영될 수 있는 지속 시간을 의미하며, 촬영 가능 시간($t_{capture}$)으로 정의한다.

$$t_{capture} = \frac{d_{FOV}}{v_{total}} \tag{5}$$

새로운 중심점의 위치를 결정하기 위해서는 망원경 마운트가 다음 스텝의 위치로 이동하는 시간을 고려해야 한다. 이를 마운트 이동시간(t_{mount})이라 정의하면, 기존 마지막 관측점에서 다음 중심점까지의 표적이 이동하는 시간 t_{next}은 다음 식 (6)과 같이 표현된다.

$$t_{next} = t_{mount} + \frac{t_{cpature}}{2} \tag{6}$$

여기서 t_{mount}는 마운트가 이동하는 데 걸리는 시간으로, 이동의 신속성과 정확성에 중요한 영향을 미친다. 일반적으로 t_{mount}가 작을수록 다음 촬영을 빠르게 시작할 수 있어 예측 오차를 줄일 수 있다. 그러나 마운트가 물리적으로 움직이는 시간이 필요하므로, 지나치게 작은 값은 현실적으로 적용하기 어렵다. 반대로 t_{mount}가 클 경우, 마운트는 충분한 시간을 두고 부드럽게 이동할 수 있으나, 이로 인해 표적 위치 예측 오차가 증가할 가능성이 있다. 이러한 영향은 이후 시뮬레이션 결과 분석에서 더욱 상세히 다루어진다.

마지막으로, 새로운 중심점의 방위각 및 고각을 계산하면 식 (7)과 같다.

$$\begin{aligned} az_center_{next} &= az_{pre} + v_{az} \times t_{next} \\ el_center_{next} &= el_{pre} + v_{el} \times t_{next} \end{aligned} \tag{7}$$

여기에서 az_{pre} 및 el_{pre}는 기존 마지막 관측 지점의 방위각 및 고각 값이며, 계산되는 az_center_{next}와 el_center_{next}는 망원경 마운트가 이동해야 할 새로운 중심점을 나타낸다.

이러한 방식으로 stepwise tracking 기법에서 각 관측 스텝의 중심점을 결정하는 과정이 수행되며, 이후 실험과 시뮬레이션을 통해 제안된 기법의 성능을 평가한다.

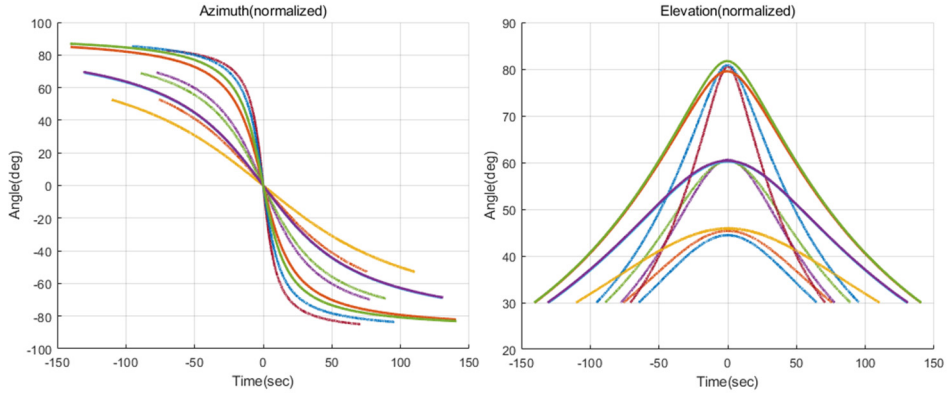
3. 시뮬레이션을 통한 성능 검증

본 연구에 적용한 stepwise tracking 기법이 실제 운용에서 저고도 위성을 연속적으로 추적할 수 있는지를 검증하기 위해, MATLAB을 활용한 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에서는 망원경이 다음 예측된 중심점으로 이동한 후에도 표적이 시야내에서 연속적으로 추적될 수 있는지를 확인하고, 이를 반복적으로 수행할 수 있는지를 검증하는 것을 주요 목적으로 하였다. 이를 위해 일정 시간이 지난 후 예상되는 표적의 위치를 예측하고, FOV 내에서 지속적으로 탐지할 수 있는지를 평가하는 방식으로 진행되었다.

측정 과정에서 발생할 수 있는 오차를 반영하기 위해 ±1.5픽셀 범위에서 균등 분포(uniform distribution)를 따른다고 가정하였다. 일반적으로 표적 크기(N픽셀)에서 밝기 중심(centroid)을 계산할 때 발생하는 오차는 $1/\sqrt{N}$ 픽셀 수준으로 추정된다. 본 연구에서 관측되는 표적 크기(45-60픽셀)에 대해 이론적으로 0.13-0.15 픽셀 수준의 오차가 예상되지만, 실제 영상에서의 센서 노이즈, 광학계의 PSF(point spread function) 효과, 영상 처리 과정에서의 불확실성 등을 고려하여 보다 보수적인 가정으로 ±1.5픽셀 범위의 균등 분포로 설정하였다.

3.1 시뮬레이션 환경 및 궤적 설정

시뮬레이션 대상 궤적은 한반도 내 지상 관측소에서 관측 가능한 다양한 특성의 저궤도(LEO) 위성 궤적 12개를 선정하여 생성하였다. 궤적의 특성은 최대 고각 및 고도(altitude)를 기준으로 분류되었으며, 궤적 데이터는 STK(systems tool kit)를 활용하여 생성하였다. 선정된 12개의 궤적은 정규화하여 Fig. 2(a)에 표적의 방위각, Fig. 2(b)에 고각을 각각 도시하였다. 고각 30도 이상부터 관측 가능하다고 가정하였으며 Fig. 2(b)와 같이 최대고각은 45도부터 80도 이상까지 다양한 케이스를 고려하였다.



(a) (b)

Fig. 2. Normalized azimuth and elevation profiles of target motion. (a) Azimuth, (b) elevation.

최대 고각이 클수록 표적의 관측 궤적은 비선형성이 증가하는 경향을 보이며, 이에 따라 실제 관측 시 예측 오차가 커지거나 표적을 놓칠 가능성이 높아진다. 또한, 고도가 낮을수록 관측 궤적의 변화가 더욱 급격해지는 경향이 있어, 최대 고각이 크면서 고도가 낮은 조건이 가장 가혹한 환경이 된다. 이러한 조건은 시스템의 성능을 검증하기에 다소 까다로울 수 있지만, 다양한 시나리오에서의 추적 가능성을 평가하는 데 의미가 있다.

추가적으로, 제안된 기법에서 다음 촬영 지점으로 이동하는 시간인 t_{mount}가 연속 추적 성능에 미치는 영향을 평가하기 위해, 이를 0.1초부터 5초까지 변화시키며 시뮬레이션을 수행하였다. 본 실험은 마운트 성능을 직접 고려한 것은 아니며, 이론적으로 t_{mount} 변화가 추적 성능에 미치는 영향을 확인하는 차원에서 진행되었다. 일반적으로 t_{mount}가 작을수록 속도를 선형으로 가정한 예측 오차가 작아지는 경향을 보이고, 반대로 t_{mount}가 커질 경우 마운트 운용에는 여유가 생기는 대신 촬영 지점 예측 오차가 증가할 가능성이 있다.

3.2 시뮬레이션 수행 및 분석 방법

각 시뮬레이션 조건에 대해 몬테카를로(Monte Carlo) 방식으로 조건별 100회 반복 실험을 수행하였으며, 실험의 구성은 다음과 같다.

- 12개의 궤적(최대 고각 및 고도별로 분류)
- 각 궤적별 50개의 마운트 이동 시간 설정(t_{mount} = 0.1초- 5.0 초)
- 각 조합당 100회씩 반복 실행
- 총 12 × 50 × 100 = 60,000개의 개별 시뮬레이션 수행

초기에는 예측된 중심점과 실제 표적의 위치 차이를 성능 지표로 고려하였으나, 시뮬레이션 과정에서 이러한 값이 반드시 성능을 판단하는 절대적인 기준이 될 수 없음을 확인하였다. 오차가 다소 크더라도 표적이 FOV 내에서 관측되면 추적이 가능하며, 일정한 관측 데이터만 확보되면 다음 스텝을 예측하고 연속적인 추적을 유지할 수 있기 때문이다. 따라서, 본 연구에서는 연속 추적이 가능한지를 보다 직관적으로 평가하기 위해, 전체 추적 과정에서 단 한 번이라도 표적을 놓쳤다면 실패(miss)로, 전 구간에서 성공적으로 추적이 유지되었다면 성공(success)으로 판단하는 방식으로 성능을 평가하였다.

3.3 시뮬레이션 결과 및 분석

Fig. 3에 시뮬레이션 전체 결과를 도시하였다. Y축 값이 1인 것은 특정 시점에서 추적 실패가 발생했음을 의미하며, 0인 것은 전 구간 동안 실패 없이 연속적인 추적이 가능했음을 의미한다. 총 12개의 궤적 중 9개 궤적(4-12번 궤적)에서는 모든 실험에서 연속 추적이 성공적으로 수행되었으며, 이 경우 Y축 값이 0으로 겹쳐져 표시되었다. 반면, 1, 2, 3번 궤적에서는 t_{mount} 값이 특정 값보다 커지면 추적 실패가 발생하는 패턴을 보였다.

총 60,000번의 실험 중 3,271번의 추적 실패 결과가 나왔는데, 이는 모두 최대 고각이 80도 이상인 가혹한 조건에서 발생한 결과이다. Traj 1에서는 2,169번, Traj 2에서는 1,096번, Traj 3에서는 6번의 실패가 발생하였으며, 각각 마운트 이동 시간이 2.7, 3.6, 4.9초보다 커

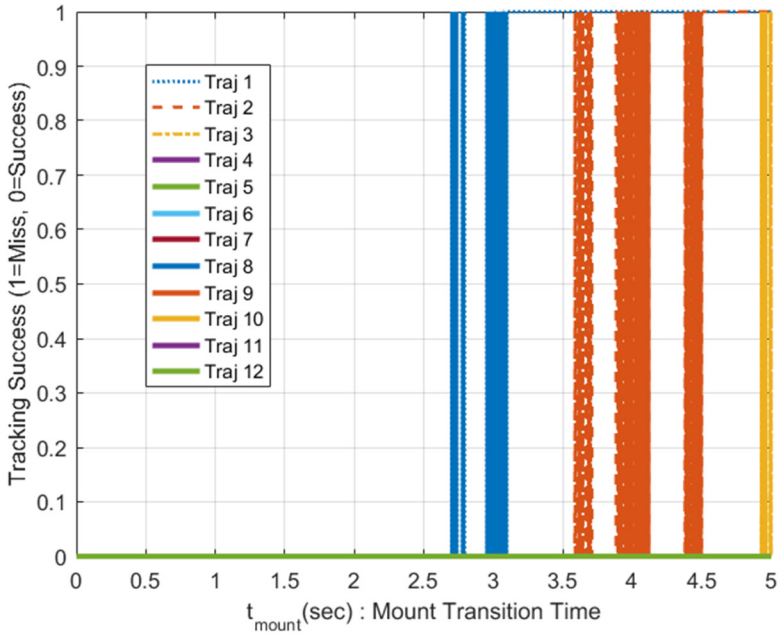


Fig. 3. Tracking success per trajectory as a function of t_{next} (mount transition time).

지는 구간부터 추적 실패가 시작되었다. 이는 높은 고각에서 비선형적인 빠른 이동 속도로 인해 예측 오차가 증가하는 극단적인 조건에서 발생한 결과로 해석할 수 있다. 반면, 가혹조건 외의 일반적인 조건에서는 본 연구에서 적용한 stepwise tracking 기법만으로도 안정적인 연속 추적이 가능함을 확인할 수 있었다.

Fig. 3에서 실패가 발생한 3개 궤적에서도 추적 실패는 마운트 이동 시간(t_{mount})이 특정 시간 보다 크게 설정된 경우에만 발생하는 경향을 보였다. 이는 이동 시간이 길어질수록 속도 기반 예측의 오차가 증가하면서, 실제 표적 위치와 예측 위치 간의 편차가 커지는 결과를 초래하기 때문이다. 단순한 속도 기반 예측 방식보다 정교한 궤적 보정 기법을 적용할 경우 이러한 한계를 완화할 가능성이 있다. 다만 본 연구에서는 추가적인 보정 없이도 일반적인 조건에서는 충분한 성능을 제공함을 입증하는 데 초점을 맞추었다.

4. 망원경 적용 및 시험 결과

본 연구에서는 실제 관측 환경에서 적용한 stepwise tracking 기법의 성능을 검증하기 위해, 위도 36.00°, 경도 129. 00 °, 고도(약 1,000 m)의 위치한 관측소에서 시민박명(civil twilight) 시간대에 실측 실험을 수행하였다. 대상 위성은 Cosmos 367으로, 약 970 km의 고도를 가지며, 관측 당시 최대 고각이 약 80°에 도달하는 궤적을 나타냈다.

광학 추적 과정에서는 촬영된 영상에서 표적을 효과적으로 검출하는 과정이 필요하다. 일반적으로, 표적 위성과 배경 천체를 구분하기 위해, 연속된 영상 프레임을 비교하여 움직이는 물체를 탐지하고, 후보 표적을 선정하는 방식이 적용된다. 본 연구에서는 탐지 과정에서 일정 프레임 이상 동안 지속적으로 움직이는 물체를 표적으로 인식하였으며, 신호 강도와 크기 정

보를 함께 고려하여 검출 신뢰도를 높였다. 이후, 위치 변화 및 속도를 분석하여 안정적인 연속 추적이 가능하도록 구성하였다.

실험에서는 초기 탐색 단계에서 공개된 TLE 정보를 이용하여 추적 시작점을 설정하였으나, 이후 탐지 및 추적 과정에서는 사전 궤도 정보를 활용하지 않고, 실시간 관측 데이터만을 기반으로 수행하였다. 실험의 효율성을 고려하여 탐색 과정은 생략하고, 탐지 알고리즘부터 철저하게 사전 정보 없이 진행하여서 실시간 관측 데이터만으로 안정적인 추적이 가능한지를 확인하였다.

최대 고각이 80°에 이르는 경우에도 상승 구간에서 최대 고각을 지나 하강 구간까지 연속적으로 추적할 수 있었음을 실측 결과를 통해 확인할 수 있었다. Fig. 4는 이러한 stepwise tracking 방식으로 획득된 streak 영상을 나타낸다. 본 연구에서 적용한 방법을 이용하여 사전 정보 없이 연속적인 추적이 수행되었으며, 특정 시점에서 고해상도 EO 카메라를 통해 streak 촬영이 이루어졌다.

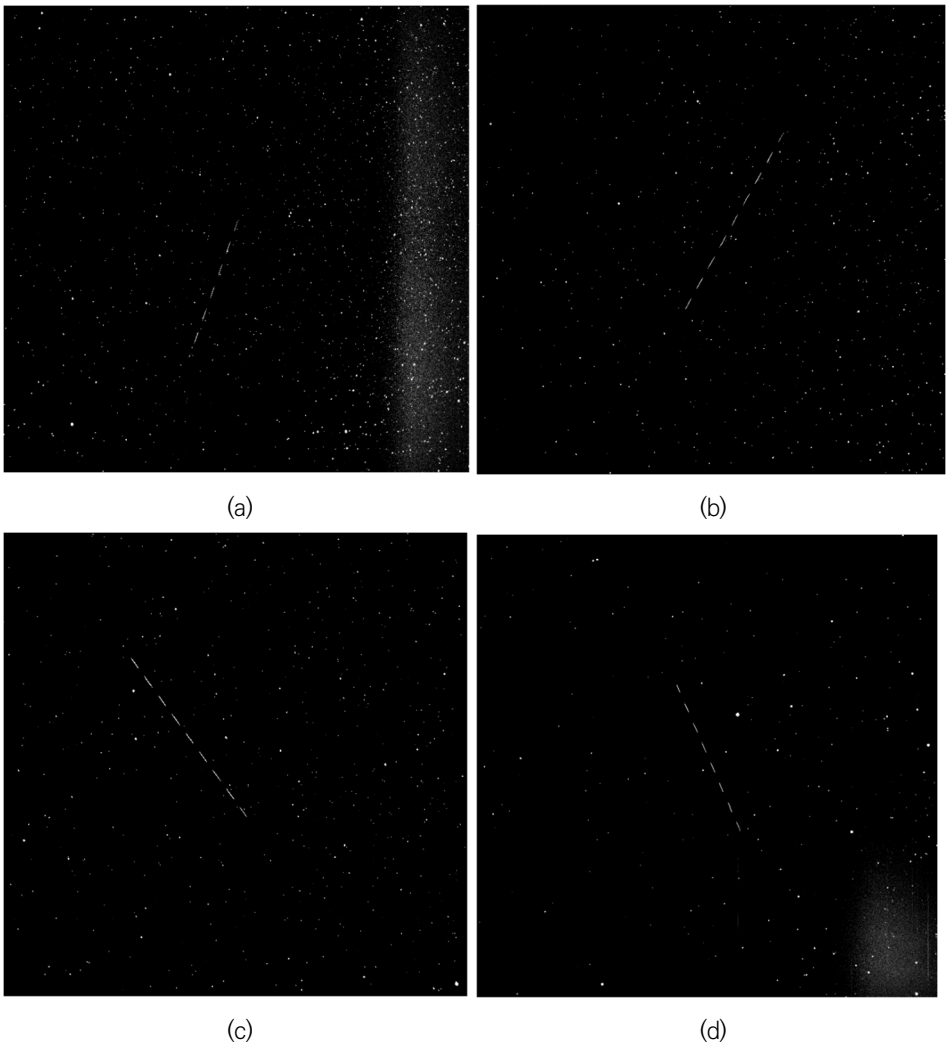


Fig. 4. Streak images captured through stepwise tracking. (a) Streak 1, (b) streak 2, (c) streak 3, (d) streak 4.

Fig. 5는 관측 중 guide 카메라로 촬영된 영상을 누적하여 표적의 이동 경로를 시각적으로 보여준다. 각 guide 촬영 시점에서 표적이 지속적으로 탐지되었으며, 촬영 샘플은 최소 22개에서 최대 90개까지 확보되었다. 예를 들어, Fig. 5(a)는 18시 55분 26초에서 18시 55분 34초에 걸쳐 촬영된 것이며, 총 84개의 촬영 샘플을 한 장에 누적하여 도시한 결과이다.

실제 실험에서는 사전 궤도 정보를 활용하지 않은 상태에서 stepwise tracking 기법을 적용하였음에도 불구하고, 상승 구간에서 최대 고각을 지나 하강 구간까지 연속적인 추적이 성공적으로 수행되었다. 본 실험 대상인 위성은 최대 고각이 80°까지 도달하는 궤적을 보였으나, 상대적으로 높은 고도의 표적이기 때문에 3장 시뮬레이션의 가혹조건 보다는 급격한 속도 변화가 발생하지 않았다. 이런 연유로 전 구간에 걸쳐 지속적인 관측 및 streak 영상 획득이 이루어질 수 있었다.

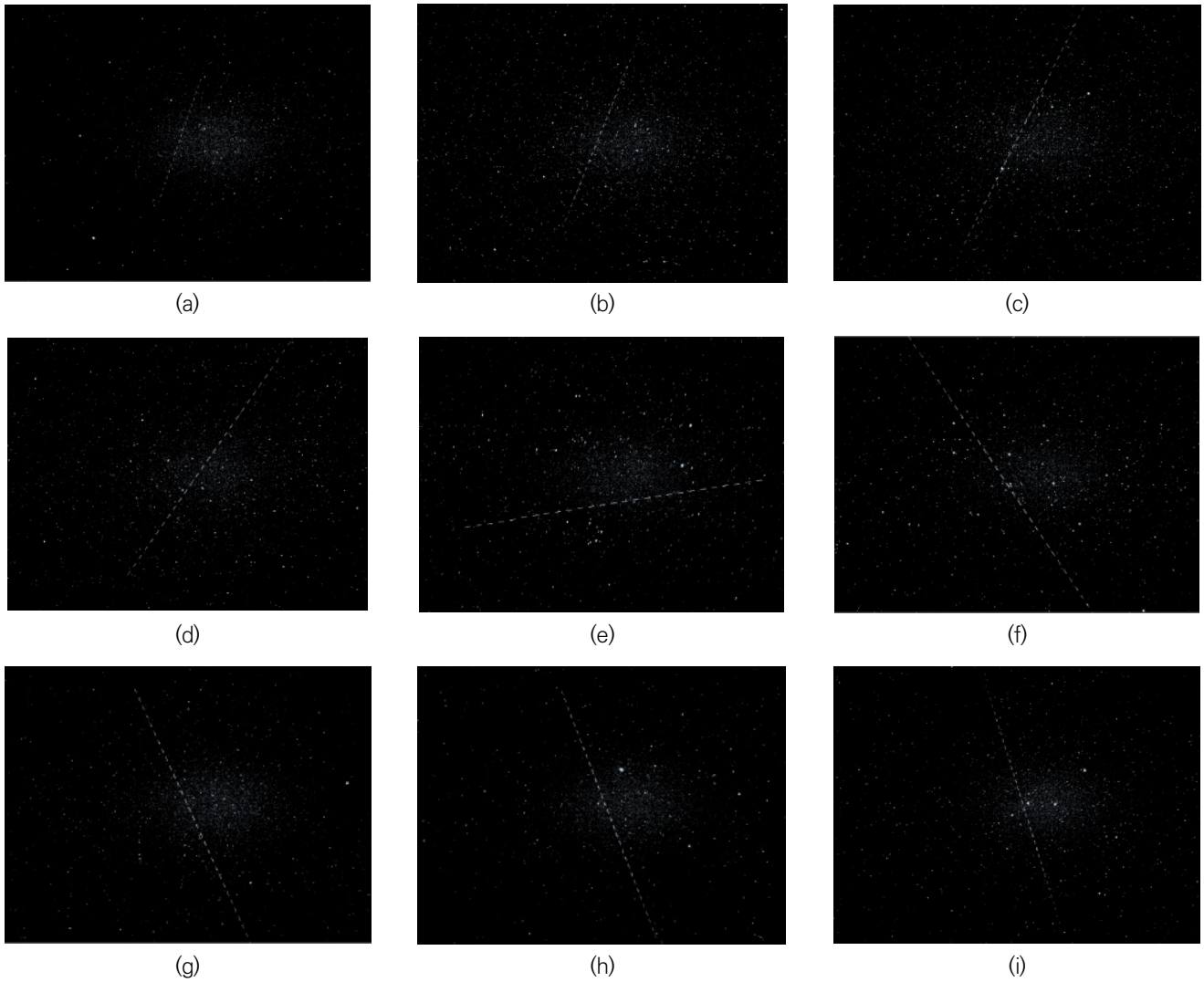


Fig. 5. Composite images of stepwise tracking. (a) Intermediate frame, (b) streak timing, (c) intermediate frame, (d) streak timing, (e) intermediate frame, (f) streak timing, (g) intermediate frame, (h) streak timing, (i) intermediate frame.

5. 결론

본 연구에서는 사전 정보 없이 미지의 우주물체를 추적하고 streak 영상을 획득하기 위한 광학 추적 기법을 적용하고 평가해 보았다. 기존 방식은 개별 촬영 후 망원경을 이동시키는 방식으로, 연속적인 마운트 조정이 필요하여 기계적 부담이 컸다. 이에 반해, 본 연구에서 적용한 방법은 일정 구간 동안 망원경을 고정하여 표적을 촬영하고, 표적이 FOV를 벗어나기 직전에 망원경을 이동하는 방식으로 동작한다. 이를 통해 마운트의 불필요한 움직임을 줄이면서도 표적을 지속적으로 추적하여 streak 촬영을 안정적으로 수행할 수 있음을 보였다.

적용된 stepwise tracking 기법의 성능을 검증하기 위해 한반도 지상 관측소에서 관측 가능한 다양한 저궤도(LEO) 위성 궤적을 이용한 시뮬레이션을 수행하였으며, 극단적인 조건을 제외하면 대부분의 경우 표적을 안정적으로 추적하면서 streak 촬영이 가능함을 확인하였다. 또한, 실제 관측 실험을 통해 본 연구에서 제안한 기법의 실용성을 평가하였으며, 연속적인 추적을 통해 streak 촬영이 성공적으로 이루어졌음을 확인하였다.

향후 연구에서는 보다 정교한 속도 예측 기법을 적용하여 표적의 이동을 더욱 정확하게 보정하고, 다양한 관측 조건에서의 성능을 평가하는 방향으로 확장할 예정이다. 이를 통해 본 연구에서 적용한 기법을 보다 넓은 범위의 우주 감시 및 추적 시스템에 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

이 논문에 대하여 중요한 지적과 코멘트를 하여 주신 익명의 심사위원님들께 감사드립니다.

References

1. Yu KY, Chung DW, Tracking and orbit determination of International Space Station using radar, J. Korean Soc. Aeronaut. Space Sci. 44, 447-454 (2016). https://doi.org/10.5139/JKSAS.2016.44.5.447
2. Krag H, Klinkrad H, Flohrer T, Fletcher E, The European surveillance and tracking system - services and design drivers, Proceedings of the SpaceOps 2010, AIAA, Huntsville, AL, 25-30 Apr 2010.
3. Hyun C, Lee S, Lee H, Lee J, Streak estimation method for obtaining orbital information of unknown space objects, J. Korea Inst. Inf. Commun. Eng. 22, 1448-1454 (2018). https://doi.org/10.6109/jkiice.2018.22.11.1448
4. Hyun C, Lee S, Lee H, Park SW, Tracking analysis of unknown space objects in optical space observation systems, J. Korea Inst. Inf. Commun. Eng. 25, 1826-1834 (2021). https://doi.org/10.6109/jkiice.2021.25.12.1826
5. Hyun C, Lee S, Lee H, Park SW, Combination analysis of optical tracking system design variables for unknown space objects using effectiveness analysis simulation, J. Korea Inst. Inf. Commun. Eng. 26, 1312-1319 (2022). https://doi.org/10.6109/jkiice.2022.26.9.1312

6. Wishnek SW, Optimal information theoretic techniques for electro-optical space domain awareness, PhD Dissertation, University of Colorado (2021).
7. Hyun C, Kim DG, Lee S, Park SW, Continuous streak image acquisition optical observation system design for initial orbit determination of uncharted space objects, J. Korea Inst. Inf. Commun. Eng. 27, 620-627 (2023). https://doi.org/10.6109/jkiice.2023.27.5.620
8. Vallado DA, Fundamentals of Astrodynamics and Applications (Microcosm Press, Hawthorne, CA, 2013).
9. Hwang H, Park SY, Lee E, Angles-only initial orbit determination of low Earth orbit (LEO) satellites using real observational data, J. Astron. Space Sci. 36, 187-197 (2019). https://doi.org/10.5140/JASS.2019.36.3.187

Author Information

현 철 chul.hyun@gmail.com

2011년 서울대학교에서 전기컴퓨터공학부 공학박사 학위를 취득한 후, 2011년부터 엘아이지넥스원에서 수석연구원으로 근무하고 있다. 비행 제어 및 유도, 모델링/시뮬레이션을 통한 무기체계 효과도 분석, 딥러닝을 활용한 수중운동체 및 항법, 우주 물체 추적 및 감시 관련 연구를 수행하고 있다.

김 동 건 donggeon.kim@lignex1.com

2016년 중앙대학교에서 기계공학부 공학박사학위를 취득한 후, 2016년부터 엘아이지넥스원에서 수석연구원으로 근무하고 있다. 광학, 적외선, 열전달 관련 모델링/시뮬레이션을 통한 전자광학감시장비 효과도 분석을 수행 중이며, Generative AI를 적용한 감시체계 성능 분석 연구를 중점적으로 수행하고 있다.

김 현 승 hyunseung.kim2@lignex1.com

2016년 인하대학교에서 항공우주공학과 제어 및 유도 전공으로 석사학위를 취득한 후, 2016년부터 엘아이지넥스원에서 선임연구원으로 근무하고 있다. 비행 제어 및 유도, 모델링/시뮬레이션을 통한 무기체계 효과도 분석을 수행 중이며, 딥러닝을 활용한 제어기 설계 관련 연구를 하고 있다.

박 승 욱 seungwook.park@lignex1.com

2007년 고려대학교 전기전자전파공학부에서 학사 학위를 취득한 후, 2007년부터 엘아이지넥스원에서 수석연구원으로 근무하고 있다. 감시 · 정찰용 EO/IR 센서 연구개발을 중심으로, 장거리 감시 시스템 및 고해상도 광학 시스템의 설계와 성능 개선을 수행해왔다. 대구경 망원경 개발을 비롯한 정밀 광학 시스템 최적화 및 운용 기술 연구에 참여하고 있다.