

모델링 및 시뮬레이션을 활용한 우주 광학 추적 시스템 설계 변수 분석

현 철^{1)*}, 장재덕¹⁾, 이호진¹⁾, 김현승²⁾

1) LIG넥스원 수석연구원, 2) LIG넥스원 선임연구원

Design Variable Analysis of Space Optical Tracking System Using Modeling and Simulation

Chul Hyun^{1)*}, Jae Deok Jang¹⁾, Hojin Lee¹⁾, Hyun Seung Kim²⁾

1) Principal Researcher, LIG Nex1, 2) Senior Researcher, LIG Nex1

Abstract : This study investigates the design of an optical observation system for continuously tracking unknown space object targets within the telescope's field of view at a short cycle rate of several to tens of frames per second. Through modeling and integrated simulation by design variables, we aim to identify combinations that satisfy the performance effectiveness scale. The study demonstrates the effectiveness of a model-based simulation analysis approach in rapidly identifying design parameters that meet specific performance requirements. By leveraging numerical models tailored to the desired performance analysis level, the approach provides a robust foundation for decision-making, eliminating reliance on empirical methods or vague estimations.

Key Words : Modeling and Simulation, Performance Index, Space Object Tracking, Optical Observation

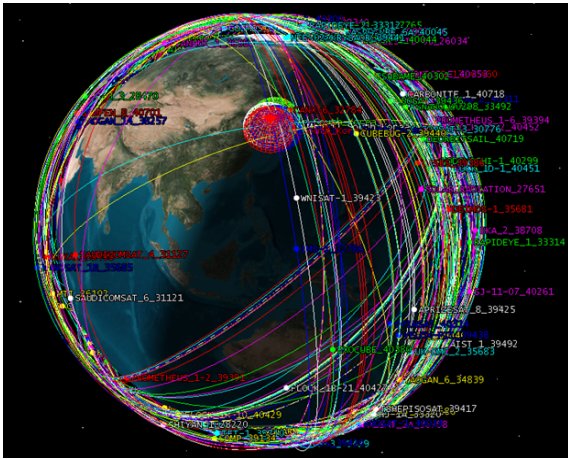
Received: June 14, 2024 / **Revised:** June 25, 2024 / **Accepted:** June 28, 2024

* corresponding author : Chul Hyun / LIG Nex1 / chul.hyun@gmail.com

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited

1. 서론

지구로부터 200km에서 2000km 고도 범위에는 저궤도(LEO: Low Earth Orbit) 위성뿐만 아니라 발사체, 우주선 등의 여러 인공 물체가 이미 수만 개 이상 존재하고 있다. 군사적 또는 상업적 목적을 위한 우주 공간의 개발이 활발해지고 있는 결과이다. 한반도 상공에서 관측 가능한 저궤도 위성들의 궤적을 상용 도구를 이용하여 도시한 결과를 그림 1에 도시하였다.



[Figure 1] Orbits of a Low Earth Orbit(LEO) satellites

세계 여러 나라에서 다양하게 우주 진출을 하고 있고, 민간 기업까지 참여하는 뉴스페이스 시대로 들어서면서 우주물체로 인한 위험성 역시 커지고 있다. 이와 관련한 우주상황인식(Space Situation Awareness)과 관련한 연구가 국내외에서 활발하게 진행되고 있다[1-3].

인공위성을 비롯한 우주 물체의 추적은 보통 지상 기반 레이더를 사용하여 수행하지만[4], 광학 관측 시스템은 다른 방식의 추적 시스템보다 저렴하게 구성할 수 있고 검출 대상의 고도의 범위가 넓은 장점이 있기 때문에[5] 이와 관련된 연구도 계속하여 수행되고 있다.

광학 관측의 저렴한 장점을 이용한 상용 기성품 활용 관측 시스템 구성 연구가 애리조나 대학[6]과 미국 해군 대학원[7]에서 진행된 바 있다. 이런 연

구들은 구성된 시스템의 성능에 주로 초점이 맞추어져 있고, 목표 성능을 위한 설계 측면은 고려되지 않았다. 그리고 광학 관측을 이용한 기존의 추적 시스템들은, 대부분 알려진 궤도 정보를 기반으로 하여 기존 궤도를 수정, 보완하기 위한 목적으로 하였다[8,9]. 본 논문은 사전에 궤도 정보가 알려져 있지 않은 미지의 우주 물체를 대상으로 하여, 광학 관측으로 연속 추적하는 시스템에 대하여 다룬다.

광학 관측을 이용한 우주 물체 추적은 망원경과 카메라를 포함한 광학계, 영상신호 처리와 표적 위치 예측 알고리즘 및 망원경 구동 제어 까지를 포함하는 복잡한 시스템으로 구성된다. 이렇게 여러 성격의 구성품들이 조합되는 체계를 설계, 개발할 때는 각 구성품별 목표 요구 성능 산출이 언제나 쉽지 않은 문제가 된다.

광학관측 추적 시스템의 설계와 관련하여 요구사항 분석 연구가 있었지만[10], 정지궤도 영역의 상시 감시를 위한 광학 관측 시스템의 사양을 경험 기반 단순 분석을 통하여 도출된 정도였다. 유럽우주국(European Space Agency)이 제공하는 시뮬레이션 도구(Program for Radar and Optical Forecasting)를 활용하여 광학 시스템 조합을 설계했던 연구도 있으나[11] 이는 주로 광학계에 대한 내용으로서, 추적이나 제어쪽을 아우르지 못하였다.

본 연구에서는 모델링 기반 시뮬레이션을 이용한 성능 예측을 통하여 부체계들의 상관관계를 분석하고 목표 성능에 대한 변수별 성능 영향성을 검토해 본다. 2장에서 고려되는 표적 데이터와 특징을 소개하고, 3장에서 광학 추적 시스템의 구성과 내용을 검토하고 4장에서 설계변수로 설정된 항목들과 모델링에 대해서 설명한다. 통합 시뮬레이션 결과를 5장에서 살펴보고 6장에서 결론을 내린다.

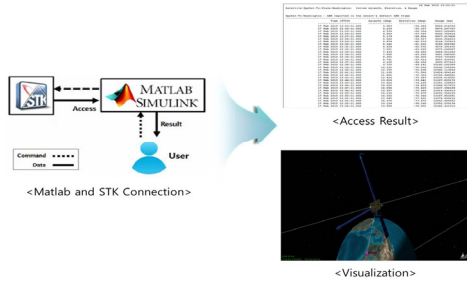
2. 대상 우주 표적

본 논문에서 광학 시스템으로 관측하고 추적하는 대상 우주물체는 한반도 내의 관측소에서 관측이 가

능한 저궤도 위성으로 결정하였다. 표적의 고도와 관측소에서 관측되는 표적 궤적의 최대 고각의 크기에 따라서 표적의 동적 특성이 달라지므로, 이를 기준으로 하여 다양한 여러 가지 궤적에 대한 모의 관측 자료를 생성하였다.

AGI(Analytical Graphics, Inc)사에서 만든 상용 툴인 STK(Systems Tool Kit)를 활용하여 위성 궤도 운동이 모사되었다. 모의 관측 데이터는 이미 공개되어 있는 위성 목록에서 선택하였으며, 고도 약 300km~400km 부근의 ISS(Interantional Space Station)와, 약 500km 부근의 고도를 갖는 지구관측 위성 WV-1(WorldView 1), 그리고 700km 정도의 고도를 갖는 국내 위성인 KOMPSAT-3호가 주로 활용되었다.

STK 프로그램에서 그림 2와 같이 Matlab과 연동하여 망원경 지향 방위 및 범위에 따라 조우 시간, 방위각, 고각 등의 위성과의 조우관련 정보를 생성하고 시뮬레이션에 활용하였다.



[Figure 2] Satellite Trajectory Generation with MATLAB and STK

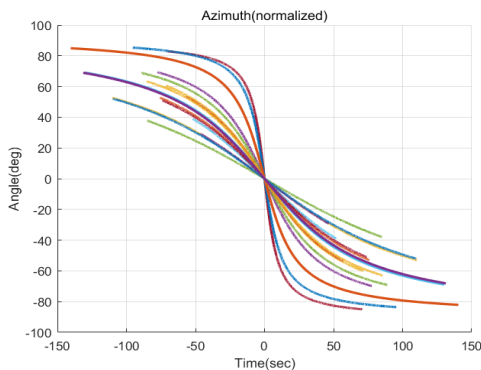
본 연구에서 생성되고 모델링 및 시뮬레이션에 활용된 위성 데이터의 특성은 그림 3에 겹쳐서 도시하였다. 그림 3(a)와 그림 3(b)는 각각 방위각 방향과 고각 방향의 궤적 특성이다. 각각의 그래프는 상호 비교가 용이하도록 정규화되어 있다.

각각의 궤적들은 대상 표적의 고도와 최대 고각이 크기에 따라서 보여지는 비선형성의 차이가 크게 나타났다. 고각 궤적보다는 방위각 궤적이 상대적으로 더 큰 비선형성을 보인다.

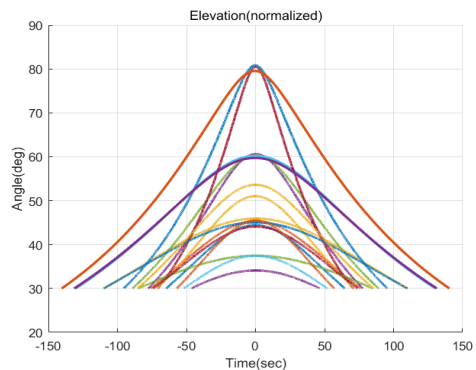
3. 광학 추적 시스템

1초에 수~수십 프레임의 짧은 주기 단위로 궤도 정보가 알려져 있지 않은 우주 표적을 협시계 망원경 시야각(FOV:Field of View)안에서 연속적으로 추적 및 촬영하려는 광학 관측 시스템이 본 논문의 대상이다. 이에 대한 개념도는 그림 4에 나타내었다. 망원경 시야각이 넓지 않은 시스템이기 때문에 표적 정보를 반영하여 정확하게 추적하지 않으면, 표적이 망원경 시야각 외부로 벗어날 수 있다. 사전 정보가 제공되지 않는 표적을 대상으로 하므로, 정확한 위치 추정과 빠른 망원경 구동이 필요하다.

우주 물체 광학 관측 및 추적 시스템은 기능적인 면에서 촬영 영상을 얻어내는 광시야 망원경과 카메라를 포함한 광학계, 영상신호 처리를 통하여 표적을 식별하고 표적의 위치나 속도 정보를 산출해주는



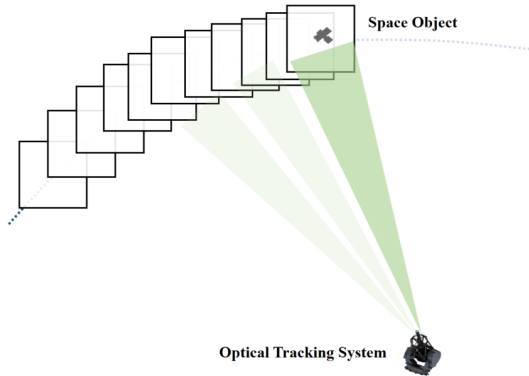
(a) Azimuth



(b) Elevation

[Figure 3] Trajectories of LEO Targets

영상처리부, 산출된 정보를 통해 다음 망원경 위치를 예측하고 망원경 구동 명령을 생성하는 망원경 제어 시스템(TCS, Telescope Control System), 그리고 TCS의 명령대로 망원경을 구동시키는 마운트 제어 시스템(MCS, Mount Control System)으로 구성된다.



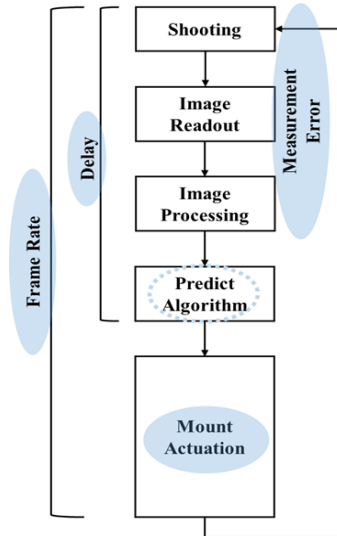
[Figure 4] Schematic Diagram of Optical Tracking System

해당 시스템의 세부 과정은 그림 5에 블록다이어그램으로 표현되어 있다. 우주물체 표적을 광학 관측 시스템으로 연속 촬영하고 추적하는 과정은 다음과 같다. 표적에 대한 촬영(Shooting)을 하고, 촬영된 이미지 데이터를 읽어내고(Image Readout) 영상처리 장치까지 데이터가 전송된다. 이후 영상처리 과정을 통하여 이미지 내의 대상 표적의 위치 정보를 산출해 내고, 이를 추적을 위한 예측 알고리즘(Predict Algorithm)에 적용하여 다음 프레임 시간대에 촬영할 수 있는 망원경의 지향점을 예측한다. 이 값은 마운트에 이동 명령값으로 전달된다. 김발은 명령값에 따라서 다음 촬영 위치로 마운트를 구동(Mount Actuation)시키고, 다시 표적에 대한 촬영을 반복하는 형태로 구성된다.

4. 광학 추적 시스템 모델링

광학 추적 시스템 전체 성능에 영향을 줄 수 있는 설계 변수를 프레임 레이트(Frame Rate), 마운트

구동 성능, 표적 관측 오차, 지연 시간 등으로 선정하고, 각각에 대한 모델링을 수행하였다. 각 설계 변수는 그림 5의 블록다이어그램에서 색깔이 입혀진 타원형으로 표시하였다. 설계변수일 수 있지만, 본문에서는 한 방법으로 고정된 표적위치예측 알고리즘은 점선 타원형으로 표시되어 있다.



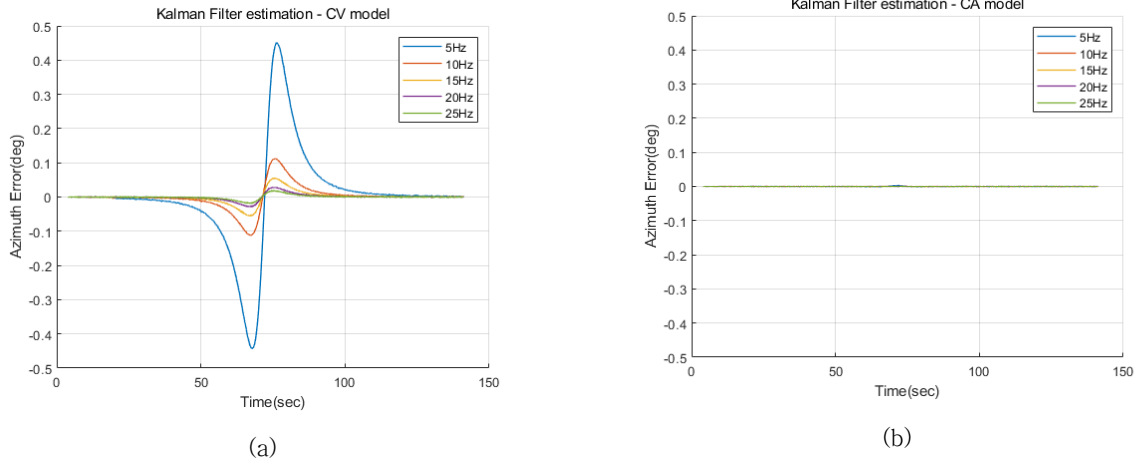
[Figure 5] Block Diagram of Optical Tracking System

4.1 프레임 레이트

프레임 레이트는 그림 5에 도시된 일련의 과정이 반복되는 주기와 관계가 있다. 주기가 짧아질수록 마운트 구동에 할당되는 시간이 줄어들기 때문에 마운트 구동 속도에 부담이 생길 수 있는 반면, 표적 위치 예측 정확도는 시간 간격이 줄어들수록 정확해질 수 있다.

기존 연구에서는 표적 위치 예측을 등속도(Constant Velocity: CV) 모델, 등가속도(Constant Acceleration: CA) 모델을 각각 기반으로 하여 선형칼만필터(Linear Kalman Filter)를 적용한 바 있다[12]. 프레임레이트가 5Hz에서 25Hz까지 변할 때, 특정 궤적에 대해서 표적의 위치 예측 오차를 모의한 결과를 그림 6에 나타내었다.

그림 6(a)가 등속도(CV) 모델 기반 예측 결과이다. 레이트 값이 줄어들어서 예측 주기가 길어질수

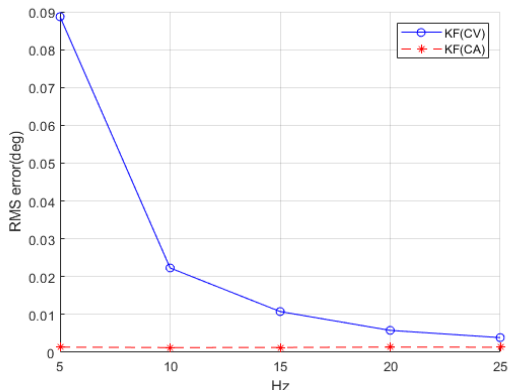


[Figure 6] Estimation errors for frame rates

록 예측 정확도 오차가 커지는 것을 확인할 수 있다. 반면 그림 6(b)는 등가속도(CA)모델 기반 예측 결과인데, 그림 6(a)와 같은 스케일로 도시된 결과로서, 오차가 매우 작고 프레임레이트 값에 따라서 큰 변동값을 보이지 않는다.

그림 3에 도시된 모든 궤적에 대한 프레임레이트 별 RMS(Root Mean Square) 예측 값을 그림 7에 도시하였다. 그림 7로부터 프레임레이트에 의한 주기값에 대한 일반적인 예측오차의 특성(파란실선)을 확인할 수 있고, 이를 극복할 수 있는 표적 예측 알고리즘 특성(빨간점선) 역시 확인 가능하다.

본 연구에서는 표적위치예측은 선행연구에서 검토되었던 등가속도 모델기반 칼만필터를 고정하여 사용하였다.



[Figure 7] Total estimation error for frame rates

4.2 마운트 구동 속도

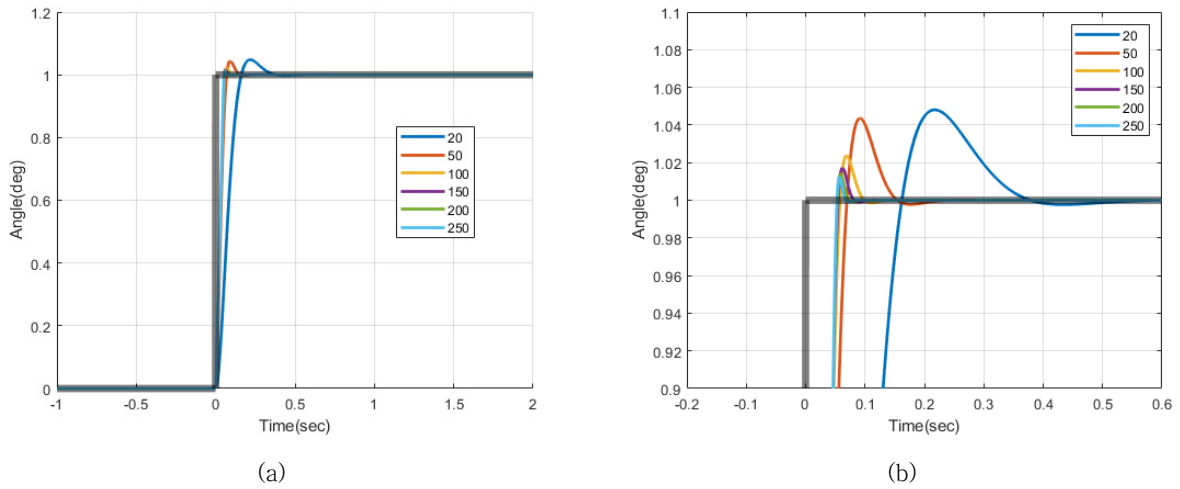
망원경이 결합되어 있는 마운트 김발의 구동 특성은 식(1)과 같이 표현되는 2차 전달함수로 가정하였다.

$$H(s) = \frac{\omega_n}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (1)$$

마운트 구동 제어는 내부적으로 잘 되고 있다는 가정하에 댐핑비 ζ 의 값을 0.7로 고정하고, 전달함수의 고유진동수 부분(ω_n)을 마운트 기동 특성을 나타내는 대표 변수로 설정하였다.

그림 8에 고유진동수 값이 20~250까지 변하는 2차 모델의 1deg의 입력에 대한 계단 응답을 나타내었다. 그림 8(b)는 (a)의 주요 부분을 확대한 결과이다. 고유진동수 값이 커서 구동 속도가 클수록 다음 촬영위치로 빠르게 움직여서 촬영이 가능할 것을 예상할 수 있다. ω_n 값이 100이상에서는 0.1초 이내의 수렴 시간을 보인다.

그림 3에 도시된 표적특성에서, 10Hz 프레임 레이트 동작을 가정했을 때, 0.1초 동안 가장 큰 표적의 변위는 대략 0.8deg 정도이고, 5Hz 동작, 0.2초 간격의 최대 변위는 1.6deg 가량이었다. 그림 8의



[Figure 8] Mount simulation results

1deg에 대한 계단 응답특성으로부터, 100이상의 ω_n 값을 갖는 김발 마운트는 미지 우주물체 추적 시에 안정적인 성능을 보일 것으로 예상할 수 있다.

4.3 측정 오차

측정오차는 영상처리 결과로 획득한 표적 위치 정보와 실제 표적 위치의 차이로 정의된다. 표적에서 망원경까지의 대기효과로 발생하는 오차, 영상처리과정에서 발생하는 오차, 마운트 위치 산출시의 엔코더 오차 등이 복합적으로 작용한다.

실제 체계종합성능분석 모델 도구에서는 광학계 모델, 검출기 모델, 지구 대기환경 모델 등이 포함되어 측정오차부분도 모의가 되지만, 본 연구는 그 중에서 관측관측을 이용한 연속 추적문제에 한정적인 분석을 수행하기 때문에, 분석의 용이함을 위하여 측정 오차들을 통합하여 가우시안 분포를 갖는 랜덤 잡음으로 가정하였다. 5arcsec ~ 20arcsec 범위의 표준편차를 갖는 랜덤 잡음이 적용하여 분석에 활용되었는데, 10arcsec 이상의 잡음은 실제보다 과도하게 적용된 정도라 할 수 있다.

4.4 지연 시간

표적을 촬영한 후에 다음 표적 촬영을 위하여 마

운트를 구동하기 시작하는 시점까지의 소요시간을 지연시간으로 정의하였다. 여기에는 촬영된 표적 영상을 읽어내고(Readout), 영상처리 알고리즘을 수행하여 표적 위치를 산출하고, 표적 위치를 이용하여 마운트 구동 명령을 생성하는 시간이 모두 포함된다. 시스템의 연산 능력에 따라 조절할 수 있는 값이므로 설계 변수의 하나로 가정되었으며, 지연시간의 랜덤요소는 크지 않아서 고정값으로 적용되었다. 프레임레이트 주기의 반을 넘지 않는 최대 20ms까지를 고려하였다.

4.5 기타 모델

망원경 시야각이나 예측 알고리즘도 광학 관측 및 추적 시스템 전체 성능에 영향을 주는 요소이지만, 분석 범위의 한정을 위하여 시야각은 수 deg 정도의 특정 값으로 고정하였고 예측 알고리즘은 4.1 절에서 언급된 바와 같이 등가속도 운동모델을 기반으로 한 칼만필터만을 적용하였다.

5. 광학 추적 시스템 성능 시뮬레이션

앞장에서 각각의 설계요소 별로, 시스템 전체 성능에 미칠 수 있는 영향은 간단하게 검토해 볼 수

있었지만, 모든 설계요소가 통합된 시스템의 최종 성능과 바로 연결된다고 할 수는 없다. 본 장에서는 통합모델의 성능 시뮬레이션을 수행하고 각 요소별 성능 기여도를 통하여 목적에 맞는 설계 값을 도출해 보았다.

추적이 수행될 때, 표적이 촬영 이미지의 중심에 항상 위치하는 것이 이상적인 상황이라 볼 수 있다. 그러나 측정 오차, 마운트 오차, 예측 오차, 표적 기동특성 등이 복합적으로 작용하여 망원경의 시야각 내에는 있지만 중심에서는 떨어져 있을 수 있다. 본 연구에서는 전체 시야각 대비 표적의 중심점으로부터의 거리 비율을 성능 효과 척도로 정의하였다.

위치 오차 값과 더불어 촬영 시점에서의 마운트 속도를 성능 효과 척도로 정의하였다. 망원경의 마운트가 다음 단계의 촬영 위치로 미리 움직인 후, 안정된 상태에서 촬영이 되어야 영상품질을 보장할 수 있다.

이렇게 광학 관측을 이용한 추적 시스템의 성능 효과 척도를 망원경 중심점으로부터의 표적 오차와 촬영 시점의 마운트 속도로 설정하고 4장에서 모델링된 설계 변수를 통합하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에 적용된 설계 변수들의 범위 값은 표 1에 정리되어 있다.

<Table 1> Simulation parameter range

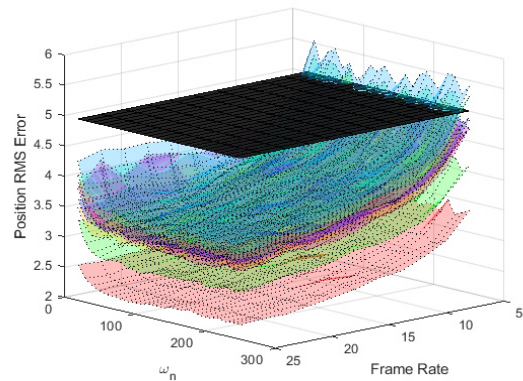
ITEM	Value
Frame Rate	5~25 Hz
Natural Frequency of Mount	20~250
Image Processing Delay	10, 20 msec
Measurement Noise	5~20 arcsec
Target Max Elevation	35~85 deg
Target Altitude	300km~1000km

광학 관측 시스템에서, 정의된 성능 효과 척도에 대한 설계 변수들 즉, 표적 궤적 특성 / 측정 오차

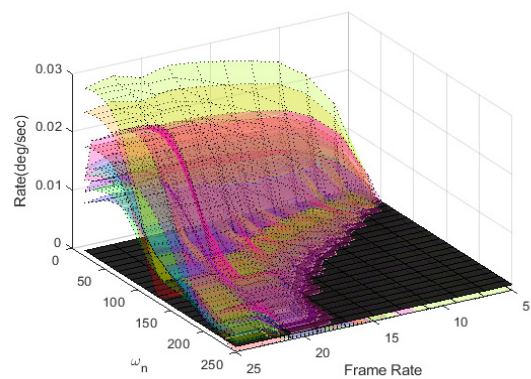
/ 시간 지연 / 마운트 구동 성능 / 프레임 레이트 등의 영향성을 분석하기 위하여 표 1의 범위 조합의 모든 경우에 대하여 경우별로 300회 썩의 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하고 결과를 획득하였다.

그림 9은 성능 척도 중 위치 오차값에 대해서 시뮬레이션 결과를 중첩하여 도시한 결과이다. 연속 추적을 위한 위치 오차 허용 범위를 시야각의 5%로 설정하였고 그림 9에 검은면으로 표시하였다. 프레임 레이트가 매우 작은 경우를 제외하고는 대부분 이를 만족하고 있음을 확인할 수 있다.

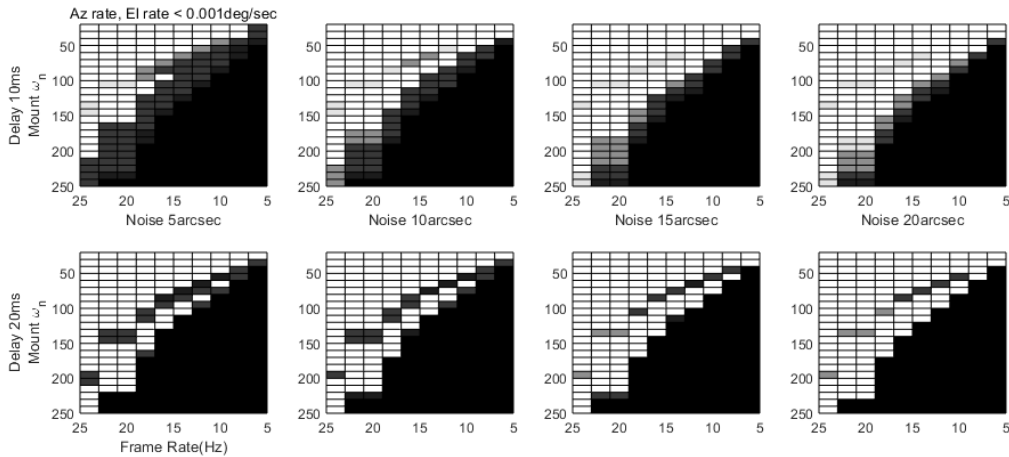
세부적으로는 표적 궤적의 비선형성이 클수록, 프레임 레이트가 작을수록 결과 값이 안 좋아지는데, 이는 표적의 위치가 급격하게 변동하는 구간에서 촬영 주기가 길면 오차가 발생하기 때문으로 판단된다.



[Figure 9] Monte Carlo Simulation Results for Position Error



[Figure 10] Monte Carlo Simulation Results for Mount Velocity



[Figure 11] Simulation results for mount gimbal velocity

그림 10은 같은 조건의 시뮬레이션을 촬영시점에서 마운트 속도 값에 대해서 도시한 결과이다. 성능 척도 만족 기준을 촬영 시점의 마운트 구동 속도가 0.001deg/sec보다 작은 값으로 설정하였고, 그림 9와 마찬가지로 3D 그래프 내에서 검은 면으로 표현되어 있다. 그림 10에서 기준면 아래쪽 부분이 마운트 속도 관점의 요구 성능을 만족하는 범위이다. 마운트 속도 척도에서는 단순히 마운트 고유진동수 값이 클수록, 프레임레이트가 클수록 기준을 만족하는 것이 아니라, 두 변수 사이의 적정 조합이 필요한 것을 확인 가능하다.

그림 11은 마운트 속도 척도를 기준으로 모든 궤적에 대해서 만족하는 부분만 중첩하여 표현한 결과이다. 그림 11에서 첫 번째 행은 지연시간이 10ms인 경우이고, 두 번째 행은 지연시간이 20ms인 경우이다. 그리고 각 열은 적용된 관측 오차 값 별로 도시되었는데, 왼쪽부터 5/10/15/20 arcsec의 관측오차가 적용된 결과이다.

마운트 속도 척도 기준으로 봤을 때, 지연시간이나 관측오차 값이 전체적인 결과에는 큰 영향을 주지는 않지만, 엄밀하게 마운트 고유진동수 값과 프레임레이트 조합에 따라서 일부 궤적에서는 조건을 만족하지만 다른 궤적에서는 조건을 만족하지 않는 경우도 찾아볼 수 있었다. 본 연구에서는 이 결과를 이용하여 프레임레이트 10Hz와 마운트 고유진동수

값 150을 설계 값으로 선정하였다. 통합 시뮬레이션을 통하여 도출된 설계 값은, 검토한 궤적특성 범위 내에서는 안정적인 성능을 기대할 수 있을 것으로 예상된다.

6. 결론

초당 수~수십 프레임의 짧은 주기 단위로 미지의 우주 물체 표적을 망원경 시야각 안에서 연속적으로 촬영하고 추적하는 광학 관측 시스템을 대상으로, 설계 변수별로 모델링을 하고, 통합 시뮬레이션을 수행하여 성능 효과 척도를 만족할 수 있는 조합을 분석적으로 찾아보았다. 분석 결과 광학 관측 시스템의 연속 추적 성능은 프레임 레이트와 마운트 특성의 조합에 특히 의존적임을 확인할 수 있었다.

모델 기반 시뮬레이션 분석 접근법을 통하여 주어진 요구 성능에 맞는 설계치를 정확하고 빠르게 찾아낼 수 있었다. 원하는 성능 분석 수준에 맞게 모사된 수치적 모델을 이용한 시뮬레이션 분석은 경험적인 접근이나 막연한 예상이 아닌 판단 근거로 활용이 가능하고, 반대로 실제 부체계의 요구 조건을 산출해 내는데도 활용할 수 있을 것이다.

References

1. S. Lee, Y. J. Kong, S. Park, and S. Lee, "Domestic Development Trend of Space Surveillance System for Space Security (Electro Optical Satellite surveillance System, EOSS)," in Proceeding of the KSAS 2022 Spring Conference, pp.456–457, 2022.
2. H. Krag, H. Klinkrad, E. Fletcher, and T. Flohrer, "The European Surveillance and Tracking System – Services and Design Drivers," in Proceeding of SpaceOps, Alabama: AL, pp. 1–12, 2010.
3. W. S. Wishnek, "Optimal Information Theoretic Techniques for Electro–Optical Space Domain Awareness," Ph. D. dissertation, University of Colorado Boulder, CO, 2021.
4. K. Y. Yu and D. W. Chung, "Tracking and Orbit Determination of International Space Station using Radar," Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences, vol. 44, no. 5, pp. 447–454, May. 2016.
5. J. Choi, B. Y. Kim, H. S. Yim, H. Y. Chang, J. N. Yoon, M. J. Kim, and O. J. Hwang, "Orbit Determination Using Angle–Only Data for MEO & GEO Satellite and Obsolete," Journal of Astronomy and Space Sciences, vol. 26, no. 1, pp.111–126, Mar. 2009.
6. T. S. Campbell, V. Reddy, and et al., "Optical Tracking of Artificial Earth Satellites with COTS Sensors," in Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, Maui: HI, USA, 2018.
7. L. G. Anderson, "Satellite tracking with telescope and software," M. S. Theses, Naval Postgraduate School, Monterey: CA, USA, 2019.
8. J. Choi, J. H. Jo, H. S. Yim, E. J. Choi, S. Cho and J. H. Park, "Optical Tracking Data Validation and Orbit Estimation for Sparse Observations of Satellites by the OWL–Net," Journal of Sensors, vol. 18, no. 6, 2018.
9. I. Prochazka, K. Hamal, and et al, "Space Objects Optical Tracking 3D Solution," Proceedings of the Fourth European Conference on Space Debris, April 2005.
10. J. H. Jo, J. H. Park, and et al., "Requirement analysis of a low budget dedicated monitoring telescope to support the Geosynchronous Earth Orbit region optical surveillance," Journal of Satellite, Information and Communications, vol. 10, no. 4, pp.128–135, Dec. 2015.
11. T. Hasenohr, "Initial Detection and Tracking of Objects in Low Earth Orbit," M. S. thesis, University of Stuttgart, Germany, 2016.
12. C. Hyun, S. W. Lee, H. J. Lee, and S. W. Park, "Tracking Analysis of Unknown Space Objects in Optical Space Observation Systems," Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering, vol. 25, no.12, pp. 1826– 1834, Dec. 2021.