

## 광학 우주감시체계의 성능향상 방안

# A Novel Method for Improvement of Optical Space Surveillance Systems

조태환<sup>1</sup> · 이성섭<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>국방대학교 국방정책연구센터

<sup>2</sup>세종대학교 항공우주시스템공학과

Taehwan Cho<sup>1</sup> · Soungsub Lee<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Defense Policy Research Center, Korea National Defense University, Seoul, 04353, Korea

<sup>2</sup>Department of Aerospace System Engineering, Sejong University, Seoul, 05006, Korea

### [요 약]

광학 우주감시체계는 인공위성 등을 포함한 우주물체의 영상촬영 및 위치추적에 사용된다. 이러한 광학 우주감시체계는 높은 고도의 인공위성 영상 촬영이 가능하다는 장점이 있지만, 레이저나 레이더 우주감시체계에 비해 위치추적 성능이 떨어진다는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 광학 우주감시체계의 위치추적 오차를 줄여 인공위성의 위치추적 성능을 높일 수 있는 기법을 제안하였다. 이 기법은 칼만필터를 2개 활용하여 등속원운동 및 가속운동을 모델링하였고, 광학 우주감시체계의 데이터에 이를 적용하여 성능을 개선하였다. 논문에서 제안한 기법을 적용했을 때 평균 17.34%의 성능향상이 있었다.

### [Abstract]

The optical space surveillance systems are used for image capture and location tracking of space objects including satellites. Such an optical space surveillance systems have the advantage of capable of capturing high-level satellite images, but have a disadvantage in that its location tracking performance is lower than that of laser or radar space surveillance systems. Therefore, in this paper, we proposed a method to improve the location tracking performance of the satellite by reducing the location tracking error of the optical space surveillance systems. In this method, two Kalman filters were used to model the constant velocity circular motion and the acceleration motion, and the performance was improved by applying them to the data of the optical space surveillance systems. The proposed method in this paper shows an average of 17.34% improvement in performance.

**Key word** : Space surveillance system, Satellite maneuver, Orbit determination, Interacting multiple model, Kalman filter.

<https://doi.org/10.12673/jant.2021.25.2.125>



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.

Received 24 March 2021; Revised 12 April 2021

Accepted (Publication) 28 April 2021 (30 April 2021)

\*Corresponding Author; Soungsub Lee

Tel: +82-2-3408-4403

E-mail: spacein0320@sejong.ac.kr

## I. 서론

전 세계적으로 약 3,000여 개의 수많은 인공위성이 우주궤도를 돌고 있다. 우주공간은 매우 넓지만 우주물체가 지속적으로 증가함에 따라 여러 가지 문제가 발생하고 있다. 최근에는 중국 우주정거장 등 우주물체 및 우주잔해물의 추락, 인공위성간 충돌, 인공위성과 우주물체의 충돌 등이 우주선진국들의 중요한 관심사로 떠오르고 있다. 이러한 상황에서 각국은 자국의 우주 자산을 지키기 위해 인공위성 추적, 미확인 우주물체 탐지 및 식별, 우주물체 추락감시 등을 위한 우주감시체계 개발을 적극적으로 진행하고 있다[1].

우리나라의 경우에도 하루 평균 700개 이상의 인공위성이 한반도 상공을 지나가고 있으며, 10여기의 국가위성이 우주공간에서 임무를 수행하고 있기 때문에, 우주감시체계는 절대적으로 필요하다. 이러한 우주감시체계는 우리나라 위성의 안정적인 운용에도 도움을 줄 뿐만 아니라 적성 인공위성 감시에도 효과적이다.

이러한 우주감시체계는 광학, 레이저 및 레이더 체계가 있으며, 각각의 체계는 장단점이 있다[2]. 광학 우주감시체계는 비교적 적은 비용으로 구축이 가능하지만, 인공위성 추적 성능이 떨어진다는 단점이 있으며, 레이저 우주감시체계는 정확도가 뛰어나지만, 기상애 많은 영향을 받는다는 단점이 있다[3]. 레이더 우주감시체계는 24시간 전천후 우주감시가 가능하다는 장점이 있지만 구축비용이 크기 때문에 쉽게 접근하기 어렵다는 단점이 있다[4].

본 논문에서는 광학 우주감시체계를 대상으로, 인공위성 위치추적 성능을 향상시킬 수 있는 기법을 제안한다. 인공위성은 궤도운동을 하기 때문에 등속원운동 모델을 적용한 칼만필터를 사용하면 위치추적 성능향상이 가능하지만, 군사용 정찰위성과 같이 고도를 수시로 오르내리면서 궤도를 바꾸는 경우에는 등속원운동 모델을 적용하기 어렵다[5]. 이에 따라 본 논문에서는 등속원운동 및 가속운동 모델을 적용한 칼만필터를 2개를 사용하여 광학 우주감시체계의 위치추적 성능을 향상하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 광학 우주감시체계 및 구축동향에 대해서 설명하고, 3장에서는 필터링 기법 연구동향을 설명한다. 4장에서는 본 논문에서 제안하는 광학 우주감시체계 성능향상 기법에 대해서 설명하고, 5장에서는 제안된 기법을 광학 우주감시체계에 적용한 시뮬레이션 결과를 제시한다. 마지막으로 6장에서는 본 논문의 결론 및 향후 연구내용에 대해서 설명한다.

## II. 광학 우주감시체계 및 구축동향

### 2-1 광학 우주감시체계

광학 우주감시체계는 본격적으로 우주개발을 추진하고 있는 우리나라에 필수적인 우주기술이다. 또한 광학 우주감시체계는 우주물체의 궤도력 등 우주 정보의 획득에 필수적인 체계로 우리나라 기술로서 독자적인 우주정보 생성에서 있어서 꼭 필요하다. 현재 이러한 체계에 대한 확보는 우주개발뿐만 아니라 국가 안보와도 밀접한 관계가 있기 때문에 각 국가는 경쟁적으로 체계 개발을 추진하고 있다. 국내에서는 천문연구원에서 시스템을 구축했으며, 공군에서도 유사한 시스템을 구축 중에 있다.

서론에서도 설명한 바와 같이 우주감시체계는 광학, 레이저, 레이더 체계로 나뉘며, 현재 우리에게 가장 유리한 체계는 상대적으로 저렴하고 기술개발이 용이한 광학체계이다. 광학 우주감시체계에 사용되는 기술은 집적된 광학관측 기술, 망원경 운영 기술, 관측자료 처리 기술, 궤도 전파 기술, 궤도 추정 기술 등이다.

### 2-2 국내 광학 우주감시체계 동향

국내에서는 한국천문연구원이 주도적으로 광학 우주감시체계를 구축하고 있다. 한국천문연구원은 독자적 전자광학 감시 시스템을 구축하여 운영 중이다[6]. 또한 독자적 우주정보 생성 및 자국위성 충돌 방지를 위한 연구, 인공위성 등 우주물체 추락 시 관련 팀에서 위성추락상황실을 운영, 광시야 망원경을 활용한 소행성 탐색 기초연구, 우주위협대응 시스템 개발 등을 추진하고 있다.

한국항공우주연구원은 상당수의 우리나라 국가위성을 운영하고 있으며, 위성의 우주 잔해물과의 충돌방지 및 회피에 대한 많은 연구경험을 가지고 있다.

공군은 우리나라 우주감시를 위해 전자광학 위성감시체계 전력화를 추진하고 있으며, 미 공군과 협력하여 미공군의 우주감시체계에서 획득된 자료를 미 연합우주작전센터로부터 제공받고 있다. 공군에서 구축 추진 중인 전자광학 위성감시체계는 LIG 넥스원에서 개발 중이며, 탐색망원경, 식별망원경, 통제시스템 등으로 구성되어 있다[7].

### 2-3 국외 감시체계 동향

전 세계적으로 우주감시기술의 중요성이 높아짐에 따라, 우주감시체계 구축도 크게 증가하는 추세이다. 우주산업을 국가의 기간산업으로 추진하고 있는 미국을 비롯한 우주선진국의 경우, 보다 정확하고 안정적인 우주감시를 위해 지속적으로 노력하고 있다.

미국은 전 세계적으로 우주감시를 주도하고 있지만 주로 미 우주군 위주로 운영되고 있다. 미 우주군은 끊임없는 우주감시를 위해 세계 곳곳에 우주감시체계를 운영 중에 있으며, 광학, 레이저, 레이더 등 다양한 우주감시체계를 보유하고 있다[8]. 그림 1은 미 우주군의 우주감시네트워크를 나타낸다.

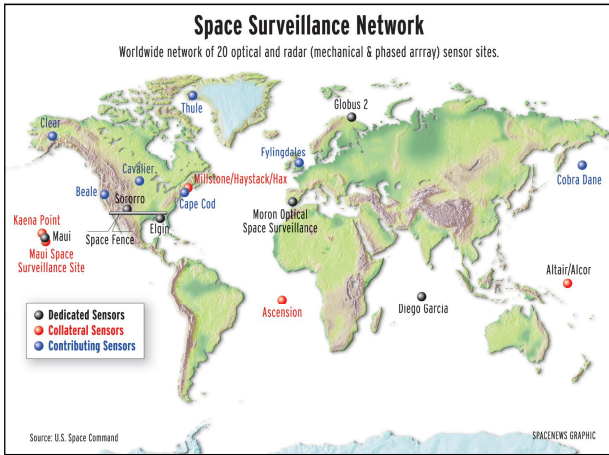


그림 1. 미국의 우주감시네트워크  
 Fig. 1. Space surveillance network in the U.S.

유럽은 군 주도의 우주감시에 대한 한계가 있음을 예상하고, 유럽우주청을 통한 민간 주도의 종합적인 계획을 마련하였다 [9]. 10여년 전에 유럽우주청 장관급 위원회에서 우주위협에 대처하기 위한 우주상황인식 프로그램을 승인하였고, 독일에 공식사무소를 설치하여 운영하고 있다.

### III. 필터링 기법 연구동향

#### 3-1 칼만필터

칼만필터는 크게 보면 예측과 추정의 단계로 나뉘며, 칼만필터 계산을 위해서는 시스템 모델이 필요하다. 따라서 칼만필터를 사용할 때는 시스템 모델, 즉 운동 모델이 중요한 비중을 차지한다. 특히, 칼만필터는 모델이 선형인 경우에만 좋은 성능을 기대할 수 있으며, 비선형 시스템에서는 사용할 수 없다. 비선형 시스템에는 선형화 칼만필터나 언센티드 칼만필터를 사용해야 한다[10].

칼만필터는 여러 분야에 이용되고 있는데, 특히 항공기 등과 같은 물체 추적에 많이 사용된다[11]. 이전의 항공기 위치와 현재의 위치를 이용하여 항공기의 경로를 예측할 수 있다. 또한 우주 탐사를 위한 로켓의 제어에도 사용된다. NASA에 칼만필터의 개발자인 칼만이 방호하여 아폴로 우주선의 궤도 예측에 대한 해결책을 제시하면서 칼만필터가 현재 거의 모든 탐사로켓에 사용되고 있다.

칼만필터는 공학뿐만 아니라 경제 및 의료 분야에서도 많이 사용되고 있다. 경제 전망을 예측할 때 여러 데이터를 확률 변수로 취급하여 칼만필터를 통해 사후적인 평균 및 분포를 도출한다. 이를 통해 경제 전망의 신뢰도를 높일 수 있다. 또한 의료 분야에서도 사용되는데, 측정치에 섞여있는 잡음을 제거하는데 주로 사용된다. 심장 박동수, 땀이 나는 정도, 체온, 혈액의 흐름과 같은 데이터를 수집할 때 칼만필터를 이용하여 측정하

면 잡음제거가 가능하며, 정확한 신호를 얻을 수 있다.

#### 3-2 선형화 칼만필터

선형화 칼만필터는 비선형 시스템에 적용하기 위한 칼만필터이다[12]. 선형화 칼만필터의 선형화란 칼만필터의 시스템 모델을 선형화했다는 의미이다. 즉, 칼만필터 시스템 모델은 당연히 선형이지만, 선형화 칼만필터에서의 시스템 모델은 비선형 시스템을 선형화한 시스템 모델이란 의미이다. 이렇게 시스템 모델을 선형화하면 기존의 칼만필터를 그대로 사용하더라도 좋은 성능을 얻을 수 있다. 그러나 선형화 칼만필터는 비선형 시스템을 선형화했기 때문에 선형화 모델의 기준점 근처에서만 원하는 성능을 얻을 수 있다. 기준점을 많이 벗어나면 시스템 모델이 더 이상 선형화 모델이 아닌 비선형 모델이 되어 버리기 때문에 원하는 성능을 얻을 수 없다. 따라서 선형화 칼만필터를 비선형 시스템에 적용하기에는 다소 한계가 있다.

#### 3-3 언센티드 칼만필터

언센티드 칼만필터는 비선형 시스템 모델을 구하기 위해 언센티드 변환(unscented transformation)을 사용하며, 언센티드 변환이 언센티드 칼만필터의 전부라 해도 과언이 아니다[13].

언센티드 변환이란 몬테카를로 시뮬레이션을 사용하여 비선형 시스템 모델식의 평균과 공분산을 계산하는 방법이다. 그러나 일반적으로 사용되는 몬테카를로 시뮬레이션과는 다르다. 몬테카를로 시뮬레이션은 많은 수의 샘플을 랜덤하게 추출하지만, 언센티드 변환은 각 샘플의 가중치를 고려하여 몬테카를로 시뮬레이션의 샘플보다 적은 수의 샘플만을 선정한다. 즉, 가중치가 높은 수의 샘플만 선택하여 계산에 활용하는 것이다. 결국 언센티드 변환은 몬테카를로 시뮬레이션보다 적은 수의 샘플만을 사용하기 때문에 계산량이 몬테카를로 시뮬레이션에 비해 매우 적다[14].

### IV. 제안된 기법

#### 4-1 IMM 필터

3장에서 언급한 필터링 기법은 시스템 모델이 1개인 단수모델 필터이다. 시스템 모델이 1개인 경우에는 기본적으로 비선형 시스템에 적용하기 어려운 측면이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 본 논문에서는 IMM(interacting multiple model) 필터를 적용하였다. IMM 필터는 다수모델 기반의 필터이며, 1990년대부터 항공기를 추적하는 레이더에 사용하여 우수한 성능을 보였다[15].

IMM 필터의 한 사이클은 혼합(interaction), 예측(prediction), 쇄신(update), 결합(combination)의 4가지 단계로 구성되며 반복

적으로 처리되는 구조를 가진다[16]. IMM 필터는 시스템이 가지는 운동 모델의 개수만큼 필터를 생성하여 각 필터에서 추정된 모델별 확률을 가중치로 표기하여 최종적인 항공기 위치 추정치를 계산하는 과정을 반복한다[17]. 즉, n개의 운동 모델에 대해 n개의 필터를 생성하여 현재의 기동 모드를 가장 잘 표현하는 운동 모델의 확률을 가중치 순으로 계산하여 인공위성의 궤도운동 상태와 공분산 추정치를 계산한다. 관측값과 시스템 모델에 영향을 받는 가중치는 운동 모델에 따라 지속 변화하게 된다.

작동범위가 넓은 시스템에 IMM 필터를 사용하게 되면 많은 모델이 소요되며 계산량도 증가는 단점이 있다. 이러한 경우에 대비하여 모델을 여러 개의 중복되는 모델그룹으로 나눈 후 초기에는 하나의 모델그룹에 들어있는 모델에 바탕을 둔 필터로 구성된 IMM 필터를 동작시키다가 다른 모델그룹과 중복되는 모델의 확률이 미리 정한 기준값을 넘어서면 중복되는 모델이 존재하는 모델그룹을 동시에 활성화시킨다. 두 개의 모델그룹을 이용한 IMM 필터가 동작되다가 두 개의 모델그룹에 소속된 모델의 확률에 따라 어느 한 모델그룹을 중단시키는 방법을 취하는 가변구조의 IMM 필터를 사용하여 IMM 필터의 계산량을 줄일 수도 있다.

먼저 혼합과정에서는 혼합 확률  $\mu_{ij}$ 를 계산해야 하는데, 이전 단계에서 계산된 모델별 확률에 마코프 천이 확률을 곱하여 계산한다.  $\pi_{ij}$ 가 i 모델에서 j 모델로 천이되는 확률을 나타내는 마코프 천이 확률 행렬이고,  $\mu_{ij}$ 는 현재 모델이 i 모델일 확률을 나타낸다. 계산된 확률을 가중치로 하여 IMM 필터의 초기 입력값으로 사용될 상태변수와 공분산인  $\hat{x}_{k-1}^i$ 와  $\hat{P}_{k-1}^i$ 를 계산한다.

예측과정에서는 각 모델별로 상태변수와 공분산을 계산한다. 각 모델의 정확도를 알기 위해 모드 우도함수를 결정한다. 예측과정의  $\Phi(M_k^i)$ 는 각 모델의 상태 천이 행렬, Q는 시스템 잡음, B는 시스템 모델이다. 예측과정은 기본적으로 칼만필터의 수행과정과 동일하며, IMM 필터에서는 운동 모델별로 칼만필터를 2가지로 구분하여 사용한다.

쇄신과정에서  $\hat{x}_k^i$ 는 측정치를 이용하여 예측값을 쇄신한 최종 추정값을 의미하며,  $K_k^i$ 는 칼만게인으로 예측값의 가중치를 의미한다.  $H(M_k^i)$ 는 시스템 모델이다.

마지막으로 결합과정에서는 계산된 추정값을 모델별 확률인  $P(M_k^i, Z_k)$ 에 따라 결합하게 된다. 마찬가지로 공분산도 모델별 확률인  $P(M_k^i, Z_k)$ 에 따라 계산된다.

본 논문에서는 IMM 필터를 광학 우주감시체계에 적용하여 우주감시 성능을 개선하고자 한다. 광학 우주감시체계의 데이터에 IMM 필터를 사용하면 기존의 광학 우주감시체계 데이터보다 정확한 인공위성의 위치를 획득할 수 있다. 이를 통해 우주물체의 충돌, 우주쓰레기로부터의 회피 등을 정확하게 수행할 수 있다.

### 4-2 운동 모델링

IMM 필터를 광학 우주감시체계에 적용하기 위해서는 운동 모델이 필요하며, 운동모델은 인공위성의 움직임에 기초하여 만들었다.

인공위성의 운동 모델은 등속원운동 모델, 가속운동 모델이며, 이 운동 모델들을 통해 IMM 필터를 광학 우주감시체계에 적용할 수 있다. 등속원운동 모델은 인공위성이 등속으로 회전하는 운동상태를 가정한 것이며, 가속운동 모델은 인공위성이 임무수행을 위해 가속되는 상태를 가정한 것이다. 예를 들어 군사적인 목적의 정찰위성을 고려해 보자. 평상시 정찰위성은 자신의 고유 궤도를 따라 운동하지만, 정찰임무를 수행하기 위해서 낮은 고도의 궤도로 천이하였다가 임무 종료 후 다시 자신의 궤도로 돌아오는 경우가 있다. 이러한 경우에는 등속원운동을 하던 인공위성이 궤도천이를 위해 가속해야 되는 상황이 발생하므로 기존 칼만필터로는 좋은 성능을 기대하기 어려우며, IMM과 같은 다수모델을 통해 등속원운동과 가속운동을 모두 고려해야 한다.

그림 2는 제안된 IMM 필터 구조도이다. 그림 2와 같이 IMM 필터는 2개의 칼만필터를 가지는데, 각각의 칼만필터는 운동 모델별로 구분되어 있다. 먼저 이전 단계에서 계산된 결과가 IMM 필터로 입력되면 혼합과정을 통해 초기값을 결정하고 각 초기값은 등속원운동, 가속운동 모델별로 칼만필터로 입력된다. 이 때 측정치가 입력되면 측정치를 통한 쇄신과정을 수행하고, 각각의 추정값은 결합과정을 통해 하나의 최종적인 추정값이 된다. 마찬가지로 공분산 역시 각각의 모델별로 계산된 값을 결합과정을 통해 하나로 결합하게 된다.

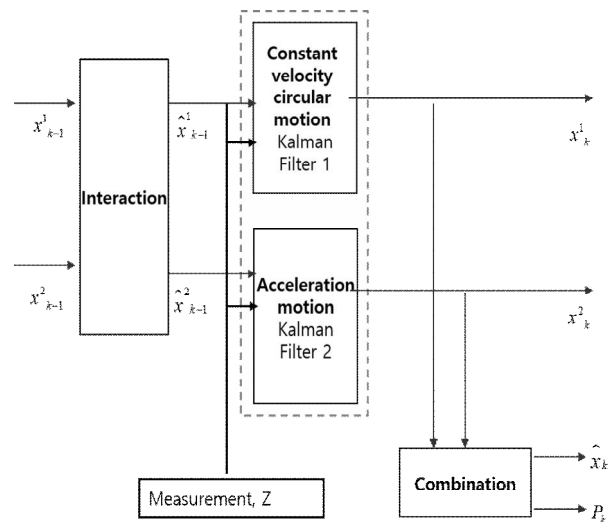


그림 2. 제안된 IMM 필터 구조도  
Fig. 2. The block diagram of proposed IMM filter.

## V. 성능평가

### 5-1 시뮬레이션 환경

제안된 IMM 필터를 활용한 알고리즘의 성능평가를 위해 MATLAB을 이용하였으며, 시뮬레이션은 2개의 시나리오로 구분하여 진행하였다. 시뮬레이션 데이터는 우주분야에서 널리 사용되는 소프트웨어인 STK(system tool kit)를 이용하여 가상의 우주감시 데이터를 생성하여 사용하였다. 가상의 데이터는 각각의 시나리오에 적합하도록 참값을 먼저 생성하고, 이 값에 센서 성능에 기반한 랜덤한 오차를 추가하여 센서의 측정치를 생성하였다.

오차 모델은 가우시안 분포를 사용하였으며, MATLAB의 randn 함수를 이용하여 오차를 생성하였다. 오차의 평균과 표준편차는 Vallado의 연구에 따라 표 1과 같이 설정하였으며, 몬테카를로 시뮬레이션을 사용하였다 [18]. 오차의 평균은 122.37이며, 표준편차는 1.8이다.

### 5-2 시뮬레이션

제안된 기법에 대한 성능을 평가하기 위해 2개의 시나리오를 만들었으며 시나리오 별로 성능을 평가하였다. 시나리오 1은 인공위성의 통상적인 움직임을 가정한 등속원운동 모델에 기반하고 있고, 시나리오 2는 인공위성이 특정한 임무를 수행하기 위해 궤도를 변경하는 상황을 가정한 가속운동 모델에 기반하고 있다.

#### 1) 시나리오 1

시나리오 1에서는 인공위성의 운동 경로를 그림 3과 같이 설정하였다. 그림 3에는 인공위성 운동 경로의 참값, 광학 우주감시체계의 데이터, 제안된 기법을 적용한 데이터 등이 나타나 있다. 인공위성은 통상 등속원운동을 한다고 가정할 수 있기 때문에 시나리오 1에서는 인공위성의 등속원운동 상태를 가정하였다. 평균적으로 참값과 광학 우주감시체계 데이터의 오차는 120.03이고, 제안된 기법을 적용한 광학 우주감시체계 데이터의 오차는 101.86이다. 제안된 기법을 적용한 광학 우주감시체계의 데이터가 기존 광학 우주감시체계 데이터에 비해 15.14% 정확하다. 그림 4는 오차를 나타낸다.

표 1. 오차의 평균과 표준편차

Table 1. The average and standard deviation of errors.

| Systems                            | Average of errors (m) | Standard deviation of errors (m) |
|------------------------------------|-----------------------|----------------------------------|
| Optical space surveillance systems | 122.37                | 1.8                              |

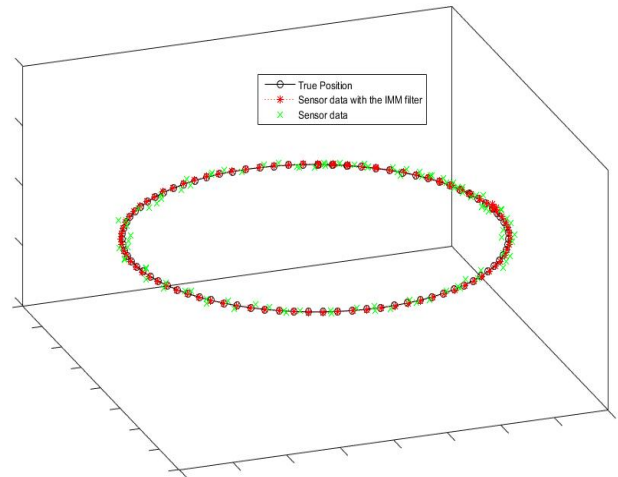


그림 3. 등속원운동 상태의 인공위성 운동경로  
Fig. 3. The satellite path in constant velocity circular motion.

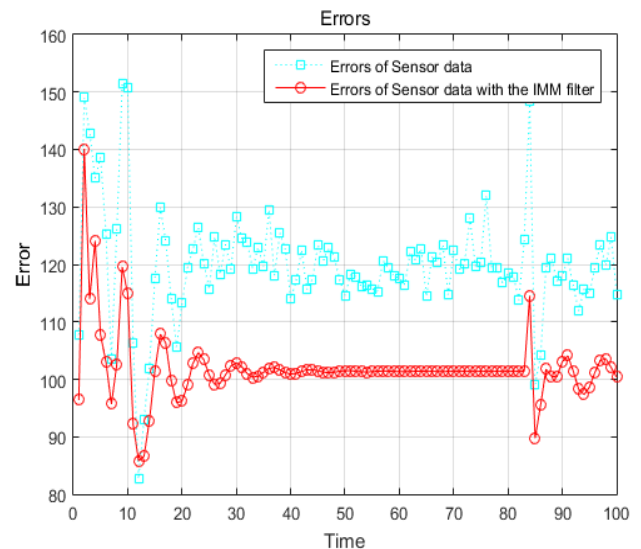


그림 4. 시나리오 1에서의 오차 비교  
Fig. 4. Errors comparison in scenario 1.

#### 2) 시나리오 2

시나리오 2에서는 인공위성의 운동 경로를 그림 5와 같이 설정하였다. 그림 5에는 인공위성 운동 경로의 참값, 광학 우주감시체계의 데이터, 제안된 기법을 적용한 데이터 등이 나타나 있다. 인공위성은 통상 등속원운동을 하지만, 특정 임무수행을 위해서는 고도를 바꾸거나 정해진 궤도를 변경해야 하는 경우가 발생한다. 특히 군사적인 목적에서는 변경되는 경우가 자주 발생한다. 따라서 시나리오 2에서는 이러한 상황을 가속운동 상황이라 가정하였다. 평균적으로 참값과 광학 우주감시체계 데

이터의 오차는 129.01이고, 제안된 기법을 적용한 광학 우주감시체계 데이터의 오차는 103.80이다. 제안된 기법을 적용한 광학 우주감시체계의 데이터가 기존 광학 우주감시체계 데이터에 비해 19.54% 정확하다. 그림 6은 오차를 나타낸다.

3) 종합평가

표 2는 시나리오 1과 시나리오 2의 결과를 나타낸다. 표2와 같이 시나리오 1와 시나리오 2에서 제안된 기법을 적용한 광학 우주감시체계의 데이터가 기존의 광학 우주감시체계 데이터에 비해 성능이 우수하였다. 시나리오 1에서는 15.14%, 시나리오 2에서는 19.54%로, 평균적으로 17.34% 성능이 우수하였다.

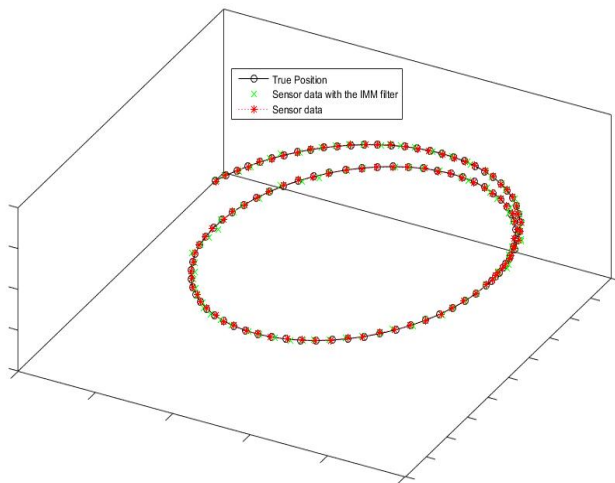


그림 5. 가속운동 상태의 인공위성 운동경로  
Fig. 5. The Satellite path in acceleration motion.

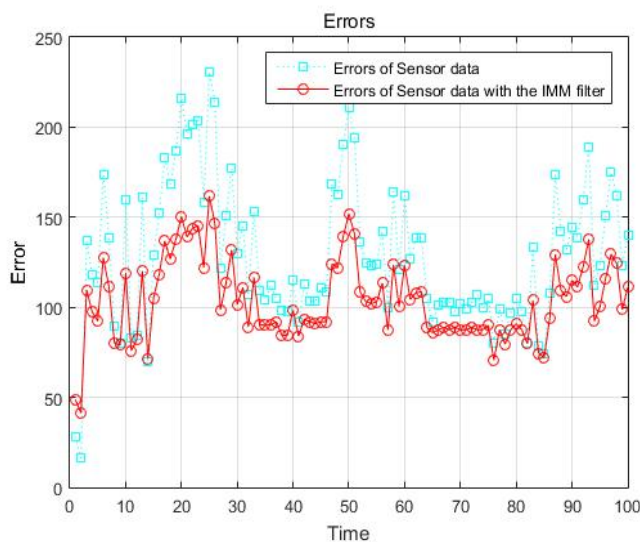


그림 6. 시나리오 2에서의 오차 비교  
Fig. 6. Errors comparison in scenario 2.

표 2. 시나리오 1, 2의 시뮬레이션 결과

Table 2. The simulation results of scenario 1, 2, 3.

| Scenario   | Sensor data (m) | Sensor data with proposed method (m) | Performance (%) |
|------------|-----------------|--------------------------------------|-----------------|
| Scenario 1 | 120.03          | 101.86                               | 15.14           |
| Scenario 2 | 129.01          | 103.80                               | 19.54           |
| Average    | 124.52          | 102.83                               | 17.34           |

VI. 결론

우주분야에 대한 관심이 급격히 증가함에 따라 인공위성의 발사 또한 증가하고 있다. 이러한 상황에서 광학 우주감시체계를 이용한 인공위성의 정확한 위치추적 기술은 필수적이다. 본 논문에서는 인공위성의 위치를 추적하는 광학 우주감시체계의 성능 향상을 위한 기법을 제시하고 성능을 평가하였다.

제안된 기법은 2개의 칼만필터를 활용한 IMM 필터로, 등속 원운동을 모델로 한 칼만필터와 가속운동을 모델로 한 칼만필터를 사용하였다. 이를 광학 우주감시체계에 적용하여 인공위성의 위치추적 성능을 향상시켰다.

제안된 기법의 성능평가를 위해 총 2개의 시나리오를 작성하였다. 2개의 시나리오에서 제안된 기법을 광학 우주감시체계에 적용하였고, 평균 17.34%의 성능 향상이 있었다.

본 논문에서 제안한 기법은 기존의 광학 우주감시체계 데이터 보다 정확한 인공위성의 위치정보를 제공할 수 있기 때문에 전 세계적으로 유용하게 사용되리라 생각한다.

추가 연구사항으로는 제안된 기법의 칼만필터를 더욱 상세히 구현하여 최적화하는 연구가 필요할 것이고, 제안된 기법을 광학 우주감시체계 외의 시스템, 즉 레이저 우주감시체계나 레이더 우주감시체계에 적용할 필요가 있다. 또한, 향후 우주감시체계구축이 완료되면 실제 데이터를 활용하여 성능을 평가할 필요가 있다.

References

[1] C. Y. Hwang and J. Lee, "Comparative analysis of space policy system between south Korea and the U.S.," *Journal of Aerospace System Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 1-6, 2021.

[2] G. Sciré, F. Santoni and F. Piergentili, "Analysis of orbit determination for space based optical space surveillance system," *Advances in Space Research*, Vol. 56, No. 3, pp. 421-428. 2015.

- [3] H. J. Lee and S. W. Lee, "Detection performance analysis of the telescope considering pointing angle command error," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, Vol. 21, No. 1, pp. 237-243, 2017.
- [4] J. H. Lee, E. J. Choi et al., "Design of L-band-phased array radar system for space situational awareness," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, Vol. 29, No. 3, pp. 214-224, 2018.
- [5] T. Behling and K. McGruther, "Planning satellite reconnaissance to support military operations," *American Intelligence Journal*, Vol. 19, No. 3, pp. 13-21, 1999.
- [6] J. Choi, J. H. Jo, H. S. Yim, E. J. Choi, S. K. Cho, and J. H. Park, "Optical tracking data validation and orbit estimation for sparse observations of satellites by the OWL-net," *Sensors*, Vol. 18, No. 6, pp. 1868-1889, 2018.
- [7] LIG NEX1 homepage [Internet]. available: <https://www.lignex1.com/web/kor/>.
- [8] L. Nicholas, and L. Johnson, "U.S. space surveillance," *Advances in Space Research*, Vol. 13, No. 8, pp. 5-20, 1993.
- [9] P. Faucher, R. Peldszus and A. Gravier, "Operational space surveillance and tracking in Europe," *Journal of Space Safety Engineering*, Vol. 7, No. 3, pp. 420-425, 2020.
- [10] F. Auger, M. Hilaret, J. Guerrero, E. Monmasson, T. Orłowska-Kowalska and S. Katsura, "Industrial applications of the kalman filter: a review," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 60, No. 12, pp. 5458-5471, 2013.
- [11] T. L. Song, "Filtering theory," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, Vol. 9, No. 2, pp. 413-419, 2003.
- [12] M. Pachter, and P. Chandler. "Universal linearization concept for extended kalman filters," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 29, No. 3, pp. 946-962, 1993.
- [13] O. Straka, J. Dunik, and M. Šimandl, "Unscented kalman filter with controlled adaptation," *The International Federation of Automatic Control*, Vol. 45, No. 16, pp. 906-911, 2012.
- [14] T. H. Cho, K. S. Kim, W. O. Yoon, and S. B. Choi, "The improvement of aircraft position information with the unscented kalman filter," *International Journal of Database Theory and Application*, Vol. 5, No. 2, pp. 75-82, 2012.
- [15] H. A. P. Blom, and Y. Bar-Shalom, "The interacting multiple model algorithm for systems with markovian switching coefficients," *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 33, No. 8, pp. 780-783, 1988.
- [15] Y. Boers and H. Driessen, "A multiple model multiple hypothesis filter for markovian switching systems," *Automatica*, Vol. 41, No. 4, pp. 709-716, 2015.
- [16] H. Liu and W. Wu, "Interacting multiple model (IMM) fifth-degree spherical simplex-radial cubature kalman filter for maneuvering target tracking," *Sensors*, Vol 17. No. 6. pp. 1374-1385, 2017.
- [18] D. Vallado, *Fundamentals of Astrodynamics and Applications*, 3rd ed. Berlin, Germany: Springer Science & Business Media, 2001.



**조 태 환 (Taehwan Cho)**

2001년 2월 : 인하대학교 항공우주공학과 (공학사)  
 2014년 2월 : 인하대학교 전자공학과 (공학박사)  
 2014년 12월 ~ 2017년 7월 : 공군사관학교 전자통신공학과 조교수  
 2021년 1월 ~ 현재 : 국방대학교 국방정책연구소 연구원  
 ※ 관심분야 : Avionics, Space Electronic Systems, Space Policy



**이 성 섭 (Soungsub Lee)**

1990년 2월 : 공군사관학교 항공우주공학과 (공학사)  
 2003년 3월 : 연세대학교 천문우주학과 (이학석사)  
 2009년 3월 : 버지니아공대 항공우주공학과 (공학박사)  
 2021년 3월 ~ 현재 : 세종대학교 항공우주시스템공학과 부교수  
 ※ 관심분야 : Dynamics and Control of Satellite Relative Motions