

Received: 2024/05/29
Revised: 2024/06/10
Accepted: 2024/06/28
Published: 2024/06/30

***Corresponding Author:**

Min-Seok Han

Dept. of Electronics and Control Engineering,
Republic of Korea Naval Academy

1 Jungwon-ro, Jinhae-gu, Changwon-si,
Gyung-sangnam-do, 51704, Republic of Korea

Tel: +82-55-907-5323

E-mail: mshan1024@navy.ac.kr

저궤도 위성 측위 정밀도 향상을 위한 선형성 판단에 따른 칼만 필터 적용 시스템 설계

Design of a Kalman Filter Application System Based on Linearity Judgment for Improving Low-earth Satellite Positioning Precision

김승주¹, 이재혁¹, 정재우¹, 황세진¹, 한민석^{2*}

¹해군사관학교 전자제어공학과 사관생도

²해군사관학교 전자제어공학과 부교수

Seung-Ju Kim¹, Jae-Hyeok Lee¹, Jae-Woo Jeong¹, Se-Jin Hwang¹,
Min-Seok Han^{2*}

¹Midshipman, Dept. of Electronics and control Engineering, Republic of Korea Naval Academy

²Associate Professor, Dept. of Electronics and Control Engineering, Republic of Korea Naval Academy

1. 서론

본 연구는 칼만 필터를 활용하여 저궤도 위성의 측위 정밀도를 향상하는 새로운 접근 방법을 제안한다. 무인체의 정확한 위치 파악은 국방, 구조, 탐사 등 다양한 분야에서 중요한 역할을 하며, 특히 국방 분야에서는 무인체의 정확한 위치 파악이 전략적으로 중요하다. 그러나 기존의 GNSS 기반 측위 기술은 실내 환경에서 사용할 수 없고, 정밀도가 낮은 편이며, 무인체의 움직임을 반영하지 못하는 한계가 있다[1].

본 연구에서는 이를 해결하기 위해 확장형 칼만 필터(extended Kalman filter, EKF)와 무향 칼만 필터(unscented Kalman filter, UKF)를 활용하여 저궤도 위성을 통한 무인체 측위의 정밀도를 개선하는 방법을 모색한다. MATLAB 시뮬레이션을 통해 무인체의 움직임을 모델링하고, 저궤도 위성을 통한 측위 오차를 줄이기 위한 칼만 필터의 설계 및 적용을 시험한다. 이를 통해 유·무인 복합 체계에서 무인체의 통제 정확도와 측위 정밀도를 향상시키는 것을 목표로 한다.

Abstract

본 논문은 칼만 필터를 활용하여 저궤도 위성의 측위 정밀도를 향상하는 방법을 제안한다. 위성으로 측정된 무인체의 이동 변화율을 계산하여 선형성을 판단한 후 확장형 칼만 필터와 무향 칼만 필터를 선택·적용하여 위성으로 측정된 움직임의 오차를 보정하고 최종적으로 확장형 칼만 필터를 적용하여 오차를 보정하였다. 연구 결과, 제안한 방법을 적용하여 약 75.4%의 정밀도 향상을 달성할 수 있었다.

This paper proposes a method to improve the positioning precision of low-orbit satellites by using Kalman filters. After determining the linearity by calculating the rate of change in movement of the unmanned aerial vehicle measured by satellite, an extended Kalman filter and an unscented Kalman filter were selected and applied to correct the error measured by satellite, and the error was finally corrected by applying an extended Kalman filter. As a result of the study, about 75.4% of precision improvement could be achieved by applying the proposed method.

Keywords

위성 항법 시스템(Satellite Navigation System), 선형성 판단(Determining Linearity), 확장형 칼만 필터(Extended Kalman Filter), 무향 칼만 필터(Unscented Kalman Filter)

Acknowledgement

이 논문은 2024년도 해군사관학교 해양연구소 및 해사교육진흥재단 지원을 받아 수행된 논문임.

본 연구는 무인체의 측위 정밀도를 향상시키기 위한 새로운 접근 방법을 제시하며, 이를 통해 무인체의 활용 범위를 넓히고, 관련 기술의 발전에 기여할 것으로 기대된다.

2. 이론적 배경 및 관련 연구

2.1. 이론적 배경

2.1.1. 위성 항법 시스템

위성 항법 시스템이란 위성에서 방송하는 측위 신호를 이용하여 이를 이용하는 사용자가 자신의 정확한 위치와 시각을 알 수 있게 하는 시스템을 지칭한다. 즉 위성에서 발신된 전파를 수신기에서 수신하고 위성으로부터의 거리를 구하여 수신기의 위치와 고도를 추정하는 기술이다[2].

대표적인 위성 항법 시스템에는 미국의 GPS, 유럽의 Galileo, 러시아의 GLONASS, 중국의 Beidou 등이 있다. 이러한 시스템들은 정지궤도 위성을 활용한 위성 항법 시스템이다. 정지궤도 위성을 활용한 시스템은 극지방을 제외한 대부분의 지구 지역에서 안정적인 신호 및 서비스 제공이 가능하지만, 지구와의 거리가 멀기 때문에 시간 지연이 발생하여, 전리층과 대류층에 의한 굴절이 발생하여 오차가 발생한다는 단점이 있다.

2.1.2. 확장형 칼만 필터

확장형 칼만 필터의 경우 비선형 시스템을 마지막 예측값의 근처에서 선형으로 근사화해 칼만 필터를 적용한 것으로, 선형으로 근사화된 시스템에 대해 칼만 필터의 장점을 이어받고 다른 비선형 필터와 비교해서 연산속도가 빠르다. EKF는 비선형 시스템을 타임 스텝마다 선형화하여 칼만 필터의 기본 원리를 적용한다. 이 과정에서 선형적 운동과 같은 시스템에서도 효과적으로 작동한다.

추정과 업데이트 메커니즘은 다음과 같다. EKF는 시스템의 상태를 추정하고 측정값을 통해 이를 업데이트하는 과정을 반복함으로써, 시간에 따른 시스템의 상태를 정확하게 추적할 수 있다.

칼만 필터 알고리즘은 비선형성 시스템에 적용하

도록 고안된 것이다. 위 그림은 확장형 칼만 필터의 알고리즘이다. EKF만의 특징은 비선형 미분 방정식을 각각의 추정 상태변수 값에서 선형화시켜 선형 칼만 필터 방법을 적용하는 것이다. 또한 project ahead 부분에서 비선형 미분방정식을 이용한다는 점이다.

상태방정식을 식 (1), 식 (2)와 같이 표현하면 식 (1)이 프로세스를 보이고 식 (2)가 메저먼트를 표현한다. 이때 u 와 v 는 평균이 0인 가우시안 화이트 노이즈이다.

$$\dot{x}(t) = F(t)x(t) + G(t)u(t) \quad (1)$$

$$Z(t) = Hx(t) + v(t) \quad (2)$$

보통의 물리적 시스템은 연속시스템이나 디지털 칼만 필터가 continuous-time 형태의 칼만 필터보다 많이 사용된다. 보통 디지털 프로세서에 의해 적용되기 때문이다. 디지털 칼만 필터를 위해서는 시스템방정식을 discrete-time 방정식 형태로 변경해야 한다. 디지털 칼만 필터를 수행하기 위해서 식 (1)을 이산화하면 식 (3)처럼 표현된다.

$$x_{k+1} = \phi(t_{k+1}, t_k)x(t_k) + \int_{t_k}^{t_{k+1}} \phi(t_{k+1}, \tau)G(\tau)u(\tau)d\tau \quad (3)$$

여기서, $\phi(t_{k+1}, t_k)$ 는 state transition matrix으로 이를 ϕ_k 라 하고 $w_k = \int_{t_k}^{t_{k+1}} \phi(t_{k+1}, \tau)G(\tau)u(\tau)d\tau$ 라 하면

$$x_{k+1} = \phi_k x_k + w_k \quad (k = 1, 2, 3 \dots) \quad (4)$$

와 같이 표현할 수 있다.

한편 이산화 메저먼트 모델은

$$Z_k = H_k x_k + v_k \quad (5)$$

로 표현될 수 있다[3,4].

2.1.3. 무향칼만 필터

무향 칼만 필터의 경우 확장 칼만 필터와 알고리즘은 동일하지만 비선형 모델을 이용할 때 선형화 과정 없이 확률분산 표본을 선정하여 비선형 방정식을 그

대로 사용한다.

평균 \bar{x} , 공분산 P_{xx} 를 갖는 랜덤 변수 $x \in R^n$ 와 $y \in R^m$ 의 범위를 갖는 비선형 방정식 $y = h(x)$ 가 있을 때, $(2n+1)$ 개의 다음과 같은 sigma point χ_i 를 구한다.

$$x_0 = \bar{x} \quad (i = 0) \quad (6a)$$

$$x_i = \bar{x} + \left(\sqrt{(n+k)P_{xx}}\right) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (6b)$$

$$x_i = \bar{x} - \left(\sqrt{(n+k)P_{xx}}\right) \quad (i = n+1, n+2, \dots, 2n) \quad (6c)$$

이러한 sigma point들은 i 에 따라 다음과 같은 weight를 가진다.

$$W_0 = k/(n+k) \quad (i = 0) \quad (7a)$$

$$W_i = 1/2(n+k) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (7b)$$

$$W_i = 1/2(n+k) \quad (i = n+1, n+2, \dots, 2n) \quad (7c)$$

위에서 얻은 χ_i 를 비선형 방정식 $y = h(x)$ 에 직접 넣어 다음을 얻는다.

$$Y_i = h(\chi_i) \quad (i = 1, 2, \dots, 2n) \quad (8)$$

$(2n+1)$ 개의 Y_i 와 W_i 를 이용하여 y 의 추정된 값 (\bar{y}, P_{yy}) 을 구할 수 있다. 이렇게 얻은 값을 확장 칼만 필터 식에 적용한 것이 칼만 필터의 장점과 unscented transformation의 장점을 결합한 UKF이다[5,6].

2.2. 관련 연구

2.2.1 저궤도 위성을 이용한 정밀 측위 방식의 GDOP 향상 기법[7]

이 연구에서는 고층 건물 사이에서의 GDOP(geometric dilution of precision)와 위치오차 상관계수가 높은 것을 발견하고 GDOP를 줄이기 위해 GPS 위성과 저궤도 위성을 같이 활용하였다. 이를 위해 GPS 위성 31대와 저궤도 위성 97대를 활용하였다. 특정 시간대에 수신기와 연결된 위성의 수가 일정함에도 불구하고 GDOP 값이 높아지는 것을 발견하고 이러한 상황에 저궤도 위성을 추가 이용하여 GDOP 값을 개선하였다. 하지만 이 연구에서는 저궤도 위성의 빠른 속도 때문에 발생하는 도플러 효과로 인한

오차에 대한 해결책은 제시하지 않고 있다.

2.2.2. 저궤도 위성의 실시간 on-board 궤도 결정 성능 분석[8]

이 연구에서는 확장형 칼만 필터를 활용하여 on-board 상에서 궤도 결정을 적용 가능한 방안을 제시하고, GPS 수신기에 적용하여 결과를 분석하였다. 분석한 결과로 GPS로부터 규칙 없이 나오는 수 km의 무시하지 못할 오차가 제거되었고, 위치 오차는 65 % 감소하였으며, 속도 오차는 96 % 감소하여 정밀도가 향상된 것을 확인하였다.

2.2.3 관련 연구 적용

본 논문에서는 2.2.1의 연구를 통해 정지궤도 위성이 가지고 있는 시간 지연이 존재하고 건물 사이 또는 건물 안에서는 정확한 위치 추정이 어렵다는 단점을 저궤도 위성을 활용함으로써 해결할 수 있다는 방향을 정하였고, 2.2.2의 연구를 통해 칼만 필터를 저궤도 위성 측위에 적용함으로써 저궤도 위성의 궤도를 포함한 위치, 속도 정보에 존재하는 오차를 원활하게 보정할 수 있다는 가능성을 확인하였다.

3. 시스템 설계

3.1. 제안된 시스템의 순서도

Fig. 1의 제안된 시스템의 순서도는 시스템의 작동 원리를 시각화한 것으로, 위성을 통해 무인체의 움직임을 측정하고, 그 변화율을 비교하여 움직임의 선형성을 판단한다. 만약 물체가 비선형적 움직임을 보일 경우, 무향 칼만 필터를 적용하여 오차를 보정하고 선형적 움직임을 보일 경우에는 확장형 칼만 필터를 적용하여 오차를 보정한다. 이 과정을 통해 도출된 움직임에 확장형 칼만 필터를 한 번 더 적용하여 오차를 더 확실하게 보정한다.

이 설계는 모든 움직임을 단일 필터로 처리하는 대신, 움직임을 크게 선형적인 경우와 비선형적인 경우로 나누어 각각에 가장 적합한 필터를 적용하는 것이 특징이다. 이 접근 방식은 측위의 효율성과 정확도를 크게 향상시키는 데 중요한 역할을 한다. 또

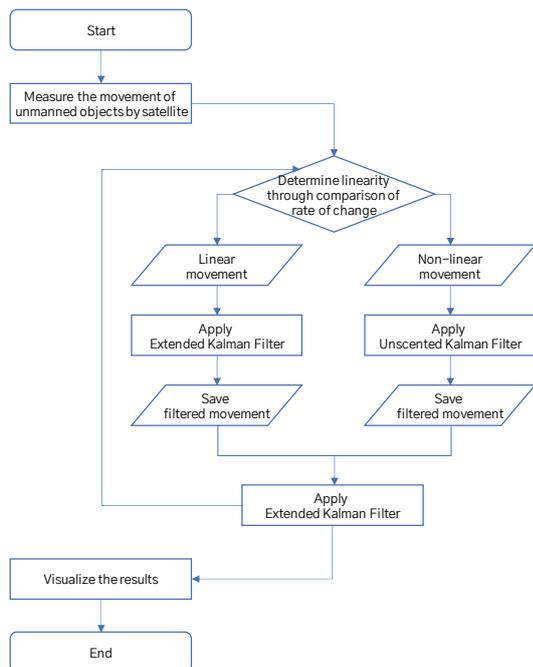


Fig. 1. Flow chart of proposed system

한, 움직이고 있는 물체의 IMU 정보를 수신하여 물체의 현재 상태를 업데이트함으로써 측위정밀도를 향상한다. 마지막으로 한 번 더 확장형 칼만 필터를 적용하여 선형성 판단을 보정한 무인체의 움직임을 추가적으로 보정한다.

3.2. 제안된 시스템의 주요 프로그래밍 코드

Figs. 2-4는 본 논문에서 설계한 시스템의 주요 프로그래밍 코드 구성이다.

Code of linearity judgment

```

1: check_interval = 5;
2: filtered_measurements = zeros(steps, 3);
3: for i = 1:check_interval:steps
4:   if i + check_interval <= steps
5:     start_time = (i - 1) * dt;
6:     velocity_change = (satellite_measurements
7:       (i + check_interval, :) - satellite_measurements(i, :)) /
8:       (check_interval * dt);
9:     if max(std(velocity_change)) < 0.3
  
```

Fig. 2. Code of linearity judgment

Fig. 2는 프로그램에서 선형성을 판단하는 주기와 방법, 기준이 들어가 있는 코드이다. 이 중 선형성을 판단하는 주기는 5번의 스텝이다. 시뮬레이션에서 한 번의 스텝이 0.01초이기 때문에 선형성 판단의 주

기는 0.05초이고 각 주기마다 스텝의 변화율을 계산하여 그 값이 0.3보다 작다면 선형적인 움직임으로 판단하고, 0.3보다 크다면 비선형적인 움직임으로 판단한다.

IMU data generation and storage code

```

1: imu_data = zeros(steps, 3);
2: for i = 1:steps
3:   imu_data(i, :) = [vx, vy, vz];
4: end
  
```

Fig. 3. IMU data generation and storage code

Fig. 3는 무인체로부터 각 스텝마다의 IMU 정보를 수신하여 저장하는 코드이다.

IMU data Kalman filter application code

```

1: vz_ext = vz + imu_data(j, 3) * dt;
2: vz_ext = vz + imu_data(j, 3) * dt;
3: vz_ext = vz + imu_data(j, 3) * dt;
  
```

Fig. 4. IMU data Kalman filter application code

Fig. 4는 앞서 저장하고 있던 IMU 데이터를 필터의 효율을 높이기 위해 각각의 칼만 필터의 예측 단계에 적용한 코드이다. IMU 데이터를 예측 단계에 적용하여 실제 무인체의 속도, 가속도를 통해 무인체의 움직임을 예측하는 데에 활용하는 것이다.

3.3. 연구결과

Fig. 5와 Fig. 6는 프로그램 코드를 실행한 첫 번째 결과를 시각화한 그림이다. Fig. 5는 2차원 즉, x 축과 y 축의 움직임만을 표현한 것이고, Fig. 6는 x , y , z 축 모두 표현하여 무인체의 실제 움직임을 나타낼 수 있도록 하였다.

파란색 선은 무인체의 실제 움직임을 시각화한 것이며, 빨간색 점들은 위성을 통해 무인체의 움직임을 측정된 것을 시각화한 것이다. 연두색 선과 점은 본 논문에서 설계한 프로그램을 적용하여 위성으로 측정된 위치의 오차를 보정한 결과를 시각화하여 나타냈다. 점들의 주기는 앞서 프로그램 코드의 설명에서 나온 것처럼 0.05초 즉, 5스텝마다 점이 찍혀 있는 것이며, 그 점들을 연결하여 하나의 움직임으로 보여준 것이 연두색 선이다.

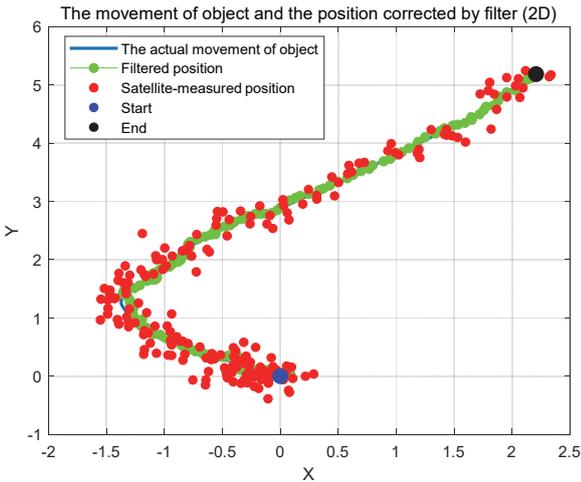


Fig. 5. Code execution result(2D)

Table 1은 프로그램을 사용해 진행한 10번의 시뮬레이션 결과를 표로 정리한 것이다. 첫 번째 시뮬레이션 결과, 보정 전과 후의 RMSE(root mean square error)가 약 81.3 % 향상되었다. 이러한 시뮬레이션을 총 10회 실시한 결과, 평균적으로 약 75.4 %의 정밀도가 향상된 것으로 나타났다.

Table 1. RMSE and efficiency of simulations 1 to 10

No. of simulation	Before correction RMSE	After correction RMSE	Efficiency (%)
1	0.2626	0.0491	81.3
2	0.2606	0.0575	78.0
3	0.2579	0.0564	78.1
4	0.2591	0.0520	80.0
5	0.2620	0.0621	76.3
6	0.2614	0.0510	80.5
7	0.2554	0.0964	62.2
8	0.2592	0.0745	71.3
9	0.2563	0.0745	70.1
10	0.2628	0.0646	75.4

4. 결론

본 논문에서는 저궤도 위성을 활용한 측위 정밀도 향상을 위해, 객체의 운동 선형성을 시간에 따라 판단하고 확장형 칼만 필터 및 무향 칼만 필터를 적용

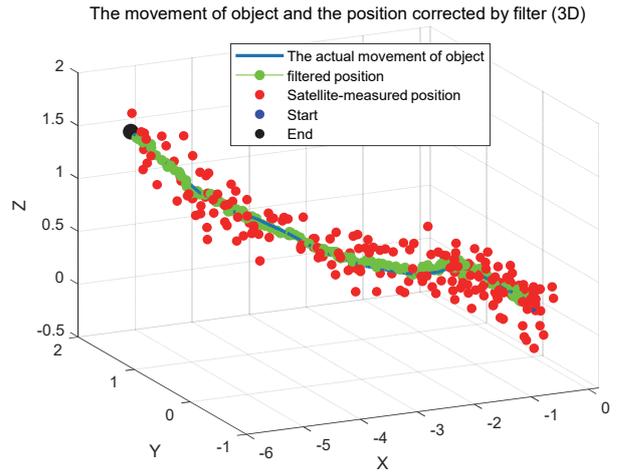


Fig. 6. Code execution result(3D)

하여 IMU 데이터의 잡음을 조정하는 방법을 성공적으로 사용하였다. 선형성 판단을 통해 필터를 적용하여 오차를 보정한 움직임에 한 번 더 확장형 칼만 필터를 적용하여 더 확실하게 오차를 보정하도록 하였다. 이 방법을 적용하지 않았을 때와 비교하여, 약 75.4 %의 정밀도 향상이라는 주목할 만한 결과를 얻을 수 있었다. 이는 본 연구 방법의 유효성을 뚜렷하게 입증하는 것으로, 저궤도 위성을 이용한 무인체 운영의 정밀도와 효율성을 높이는 데에 중요한 기여를 할 것으로 기대된다.

또한, 본 연구는 최적화 작업을 통해 계산 시간을 줄이는 동시에 정밀도를 더욱 향상시킬 수 있는 가능성을 제시하였다. 이러한 최적화는 무인체 운영의 효율성을 높이는 데 결정적인 역할을 할 수 있으며, 향후 저궤도 위성을 이용한 다양한 응용 분야에서의 정밀한 위치 결정과 관련된 연구에 중요한 기초 자료를 제공할 것이다.

본 연구의 결과는 저궤도 위성을 활용한 측위 정밀도 향상 방법의 개발뿐만 아니라, 무인체 운영의 효율성과 안정성을 높이기 위한 기술적 접근 방식에 있어서도 의미 있는 진전을 나타낸다. 앞으로도 지속적인 연구와 기술 개발을 통해 저궤도 위성을 활용한 무인체 운영의 정밀도와 효율성을 더욱 향상시킬 수 있기를 기대한다.

참고문헌

[1] 한진희, 곽수진, 김강석, 안병규. (2021). “스마트GNSS 리피터를

이용한 실내 위성항법 시스템의 구현,” 항법시스템학회지 IPNT Conference, pp. 269-272.

[2] 이형근. (2007). 위성항법시스템(GNSS) 기술 동향 및 전망. 전자공학회지, 34(11), 29-36.

[3] 김대환. (2004) “심해저 집광차량의 위치 추정을 위한 확장칼만필터(EKF) 알고리즘 개발.” 국내석사학위논문 충남대학교대학원. 대전

[4] 이정두. “Extended Kalman Filter를 이용한 이동 물체의 추적에 관한 연구.” 국내석사학위논문 금오공과대학교 대학원, 2006. 경상북도

[5] 백정호, 박상영, and 최규홍. (2004) “EKF와 UKF를 통한

KSLV- I 실시간 궤적추정 비교” 한국항공우주학회 학술발표회 논문집, pp. 370-373.

[6] 조영석. “GPS/INS 초강결합 기법에 대한 UKF의 성능분석.” 국내석사학위논문 중앙대학교대학원, 2007. 서울

[7] 이상목, M. Humayun Kabir, 신원재. (2022-11-16). 저궤도 위성을 이용한 기존 정밀 측위 방식의 GDOP 향상 기법. 한국통신학회 학술대회논문집, 경북.

[8] 김은혁, 고동욱, 정영석, 박성백, 진현필, 이현우. (2015). 저궤도 위성의 실시간 On-board 궤도 결정 성능 분석. 한국항공우주학회지, 43(1), 79-87.