

항행시스템 성능향상을 위한 강인한 필터링 알고리즘

Robust Filtering Algorithm for Improvement of Air Navigation System

조태환^{1*} · 김진혁² · 최상방²

¹공군사관학교 전자공학과

²인하대학교 전자공학과

Taehwan Cho^{1*} · Jinhyuk Kim² · Sangbang Choi²

¹Department of Electronics Engineering, Republic of Korea Air Force Academy, Chungcheongbuk-do 360-849, Korea

²Department of Electronics Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea

[요 약]

CNS/ATM(communication navigation surveillance / air traffic management)의 감시 분야에서는 ADS-B(automatic dependent surveillance - broadcast) 시스템, MLAT(multilateration) 시스템, WAM(wide area multilateration) 시스템이 구축되고 있다. ADS-B, MLAT, WAM 시스템의 항공기 추적 성능이 기존의 레이더에 비해 매우 우수하지만 여전히 오차를 포함하고 있다. 따라서 본 논문에서는 차세대 항행시스템의 오차를 줄이고 항공기 추적 성능을 높일 수 있는 필터링 알고리즘을 제안하였다. 필터링 알고리즘 중에서 가장 유용하다고 알려진 IMM(interacting multiple model) 필터를 개선한 Robust IMM 필터를 사용하였으며, ADS-B, MLAT, WAM 시스템 등의 차세대 항공기 추적 시스템에 적용하였다. Robust IMM 필터는 항공기 추적 성능을 향상시킬 뿐만 아니라 항공기 위치 데이터가 손실되더라도 필터에서 계산한 추정값을 이용하여 지속적인 위치 추적을 가능하게 한다. 필터링 알고리즘을 차세대 항행시스템에 적용했을 때 평균 19.21%의 성능향상이 있었다.

[Abstract]

Among various fields of the CNS/ATM, the surveillance field which includes ADS-B system, MLAT system, and WAM system is implemented. These next generation systems provide superior performance in tracking aircrafts. However, They still have error. In this paper, filtering algorithm is proposed in order to enhance aircraft tracking performance of ADS-B, MLAT, and WAM systems. The proposed method is a Robust Interacting Multiple Model filter, called Robust IMM filter, that improves IMM filter. The Robust IMM filter can not only improves the aircraft tracking performance but also track aircraft continually using estimates calculated from the filter when data losses occur. The simulation results of the proposed aircraft tracking methods show that the filtering data provides a better performance up to an average of 19.21%.

Key word : Automatic dependent surveillance - broadcast, Multilateration, Wide area multilateration, Interacting multiple model filter, Aviation system block upgrade.

<http://dx.doi.org/10.12673/jant.2015.19.2.123>



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 14 April 2015; Revised 14 April 2015
Accepted (Publication) 24 April 2015 (30 April 2015)

*Corresponding Author; Sangbang Choi

Tel: +82-32-860-7417

E-mail: sangbang@inha.ac.kr

I. 서론

새로운 개념의 항행시스템인 CNS/ATM(communication navigation surveillance / air traffic management)의 연구가 매우 활발하게 이루어지고 있다. CNS/ATM 기술은 전 세계적으로 연속적인 항공교통관리시스템을 지원하기 위해 적용되는 다양한 자동화 시스템, 위성시스템, 디지털 기술들을 이용한 통신, 항법, 감시 시스템이다[1]. CNS/ATM으로의 전환은 공역의 수용능력 증대뿐만 아니라 효율적인 항로 선정 등 항공교통관리의 기술적인 측면과 관련 분야의 경제적인 파급효과도 크기 때문에 ICAO 회원국은 지역별, 국가별 구축계획을 수립하여 기술개발 및 이와 관련된 인프라 구축을 진행 중에 있다. CNS/ATM으로의 전환은 항공교통 분야의 혁신적인 변화이며, 항공교통의 경제성, 효율성, 안전성 등을 향상시키는 강력한 수단이기 때문에 국내에서도 국토교통부를 중심으로 국가기관, 연구기관, 학계 등에서 CNS/ATM 연구를 진행 중에 있다.

CNS/ATM에서 감시 분야는 종속 감시(dependent surveillance), 독립 감시(independent surveillance) 및 협동 감시(cooperative surveillance)로 분류된다[2],[3]. 조종사가 음성으로 보고하거나 항공기의 디지털 데이터 통신을 이용한 항공기의 위치 정보를 참조하며 감시하는 방법이 종속 감시이고, 1차 감시 레이더에 의한 항공기 감시 방법은 독립 감시이며 2차 감시 레이더에 의한 감시는 협동 감시이다. 현재 CNS/ATM의 감시 분야에서는 종속 감시 시스템인 ADS-B(automatic dependent surveillance - broadcast) 시스템, MLAT(multilateration) 시스템, WAM(wide area multilateration) 시스템 등을 중심으로 디지털 데이터 통신을 기반으로 하는 차세대 항행시스템이 구축되고 있다. 즉, 기존의 항공기 감시 방법으로 음성보고, 시계포착, 1차 및 2차 감시 레이더 등이 있었다면, CNS/ATM에서는 디지털 데이터 통신 기반의 차세대 시스템으로 변화하게 되는 것이다[4]. 이러한 차세대 시스템들은 항공 데이터의 통합관리를 추구하는 ASBU(aviation system block upgrade)의 핵심 데이터가 된다.

따라서 본 논문에서는 차세대 항행시스템의 오차를 줄이고 항공기 추적 성능을 높일 수 있는 향상된 항공기 추적 기법을 제안하고 이를 ADS-B, MLAT, WAM 시스템 등의 차세대 항행시스템에 적용하였다. 필터링 알고리즘은 잡음이 포함되어 있는 측정치로부터 정확한 시스템 상태변수를 추정하기 위해 사용되는 알고리즘으로써 기존의 레이더를 이용한 항공기 위치 추적에 많이 사용되고 있으며, 오차가 포함된 항공 감시센서의 측정치로부터 항공기의 위치를 정확하게 추정해 내는 역할을 한다[5]. 본 논문에서는 필터링 알고리즘 중에서 가장 유용하다고 알려진 IMM(interacting multiple model) 필터를 개선한 Robust IMM 필터를 사용하였으며, 이를 ADS-B, MLAT, WAM 시스템 등의 차세대 항행시스템에 적용하였다[6]-[8]. Robust IMM 필터는 항공기 추적성능을 향상시킬 뿐만 아니라 항공기 위치 데이터가 손실되더라도 필터에서 계산한 추정값을 이용

하여 지속적인 위치 추적을 가능하게 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 관련 연구로 항행 시스템 및 기존의 항공기 추적 기법에 대해서 설명하고, 3장에서는 본 논문에서 제안하는 향상된 항공기 추적 기법에 대해서 설명한다. 필터링 알고리즘인 Robust IMM 필터 및 이를 ADS-B, MLAT, WAM 시스템에 적용하기 위한 방법을 먼저 설명하고, 5장에서는 제안된 항공기 추적 기법을 ADS-B, MLAT, WAM 시스템 등의 차세대 항행시스템에 적용한 시뮬레이션 결과를 제시한다. 마지막으로 6장에서는 본 논문의 결론 및 향후 연구내용에 대해서 설명한다.

II. 차세대 항행시스템

2-1 ADS-B 시스템

ASBU의 핵심 시스템으로, 차세대 항행시스템 중에서 가장 주목받고 있는 ADS-B 시스템은 항공 교통량 증가로 인해 기존의 레이더로는 효율적인 항공교통관리를 하지 못할 것으로 예측됨에 따라 레이더의 대체 혹은 이를 보완하기 위한 차세대 항행시스템이다[9]. 최근 전 세계적으로 비 레이더 공역과 대양 항로에 ADS-B 시스템 도입을 추진하고 있으며, 2015년에는 모든 공역으로 확대될 예정이다. 국내는 기존의 레이더에 의해서 항공교통관제가 가능하지만 국제적인 발전 방향에 맞추어 우리나라도 향후 ADS-B 시스템 도입이 필요하다. ADS-B 전환 초기 단계에서는 1차 및 2차 감시 레이더를 ADS-B와 병행하여 운용하면서 ADS-B의 가용성, 무결성 및 성능 등을 검증하고, 궁극적으로 ADS-B 장비가 2차 감시 레이더를 대체하면서 1차 감시 레이더와 ADS-B로만 감시 시스템을 운용하는 절차가 이루어져야 한다. 또한, 정확도 면에서도 기존의 방법에 비해 ADS-B의 성능이 우수하다. ADS-B의 항공기 위치정보는 위성 항법시스템(GNSS; global navigation satellite system)으로부터 제공받으며, ADS-B는 제공받은 정확한 위치정보를 다른 항공기 및 지상 관제소로 실시간 전달하게 된다. ADS-B의 항공기 위치정보는 기존의 레이더를 이용한 항공감시 기술에 비해 약 6배 정도 정확한 것으로 알려져 있으며, 기존의 레이더 위치정보 획득 주기는 5~10 초인데 반해, ADS-B는 0.5~1 초로 레이더에 비해 우수하다.

2-2 MLAT 시스템

MLAT 시스템은 레이더의 설치 및 운용이 불가능하거나 항공교통관제의 사각지대를 보완하기 위한 시스템이다. MLAT 시스템은 공항 및 주요 항로에 설치하여 운용하는 레이더 시설의 전파 특성으로 인해 항공기의 감시가 불가능한 사각지대가 발생하거나, 추가 항행안전시설의 설치에 따른 많은 비용이 소요될 때 유용하다. 또한 산악장애물 등에 의한 전파 방해로 낮은 고도에서 항공기 탐지가 어려운 경우에도 유용하다

[10],[11]. 미국과 유럽의 경우 MLAT 시스템을 개발하여 적용 중이나 아직은 초기 단계이다. 향후 레이더, ADS-B, MLAT 등이 융합된 항공감시체제로 전환될 것으로 예상되며, 넓은 범위에 걸친 항공기 감시가 가능해지므로 저비용 고효율의 항공교통 감시망이 구축될 것이다.

2-3 WAM 시스템

WAM 시스템은 MLAT 시스템을 넓은 지역에 적용한 시스템이다. MLAT 시스템이 주로 공항과 공항 인근의 항공기 감시가 주목적이라면, WAM 시스템은 레이더와 같이 공항에서 멀리 떨어진 공역에서의 항공기를 감시하는 것이 주목적이다 [12]-[13]. 따라서 MLAT 시스템의 지상 감시 센서가 주로 공항에 위치하는 반면 WAM 시스템의 지상 감시센서는 광역 감시를 위해 원거리에 설치된다.

2-4 차세대 항행시스템의 오차

ADS-B, MLAT, WAM 시스템의 항공기 추적 성능이 기존의 레이더에 비해 매우 우수한 것은 사실이지만, 오차가 없을 수는 없다. ADS-B는 GNSS 기반이기 때문에 필연적으로 GNSS의 오차가 포함되며, GNSS의 오차는 대략 30 m 수준으로 알려져 있다[14]. MLAT와 WAM은 TDOA(time difference of arrival)를 이용하여 항공기 위치를 계산하는데, 이 때 항공기 위치 오차는 공항 인근에서 3~6 m, 공항 20 km 부근에서는 10~13 m, 공항에서 매우 멀리 떨어진 200 km 부근에서는 50 m로 알려져 있다 [15].

III. 제안된 알고리즘

3-1 Robust IMM 필터

기존의 IMM 필터를 개선하여 강인성을 향상시킨 Robust IMM 필터를 사용하였다. Robust IMM 필터를 ADS-B, MLAT, WAM 시스템 등에 적용하여 항공기 추적성능을 향상시켰다. IMM 필터는 주로 레이더에 많이 적용되어 왔지만, 차세대 항행시스템인 ADS-B 시스템, MLAT 시스템, WAM 시스템에는 적용된 사례가 없었다. 레이더와 달리 차세대 항행시스템은 항공기 추적성능이 우수한 반면 전파되는 신호의 손실이 자주 발생하기 때문에 이에 대한 보완책이 필요한데, 이를 해결한 것이 Robust IMM 필터이다.

Robust IMM 필터의 수행과정은 표 1에 나타나 있다. 혼합과정, 예측과정 및 결합과정은 기존의 IMM 필터와 동일하게 수행되며, 쇄신과정은 기존의 IMM 필터와 구분된다.

먼저 혼합과정에서는 혼합 확률 μ_{ij} 를 계산해야 하는데, 이전 단계에서 계산된 모델별 확률에 마코프 천이 확률을 곱하여 계산한다. π_{ij} 가 i 모델에서 j 모델로 천이되는 확률을 나타내는

표 1. Robust IMM 필터 흐름도

Table 1. The flowchart of Robust IMM filter.

Interacting
Mixing probability : $\mu_{ij} = \pi_{ij} \mu_k^i / \sum_i \pi_{ij} \mu_k^i$ New initial state/covariance : $\tilde{x}_{k-1}^i = \sum_{j=1}^N \hat{x}_{k-1}^j \mu_k^{ij}$ $\tilde{P}_{k-1}^i = \sum_{j=1}^N (\hat{P}_k^j + \hat{x}_{k-1}^j \hat{x}_{k-1}^{jT}) \mu_k^{ij}$
Filtering
Prediction : $\bar{x}_k^i = \Phi(M_k^i) \tilde{x}_{k-1}^i$ $\bar{P}_k^i = \Phi(M_k^i) \tilde{P}_{k-1}^i \Phi^T(M_k^i) + B(M_k^i) Q_{k-1} B^T(M_k^i)$
Updating
Update including measurement z_k : $\hat{x}_k^i = \bar{x}_k^i + K_k^i (z_k - H(M_k^i) \bar{x}_k^i)$ $P_k^i = (I - K_k^i H(M_k^i)) \bar{P}_k^i (I - K_k^i H(M_k^i))^T + K_k^i R_k K_k^{iT}$ $K_k^i = \bar{P}_k^i H^T(M_k^i) (H(M_k^i) \bar{P}_k^i H^T(M_k^i) + R_k)^{-1}$ Update not including measurement z_k : $\hat{x}_k^i = \bar{x}_k^i$ $P_k^i = \bar{P}_k^i$
Combination
Final estimates : $\hat{x}_k = \sum_{i=1}^N \hat{x}_k^i P(M_k^i Z_k)$ $P_k = \sum_{i=1}^N (P_k^i + (\hat{x}_k^i - \hat{x}_k)(\hat{x}_k^i - \hat{x}_k)^T) P(M_k^i Z_k)$

마코프 천이 확률 행렬이고, μ_{ij} 는 현재 모델이 i 모델일 확률을 나타낸다. 계산된 확률을 가중치로 하여 Robust IMM 필터의 초기 입력값으로 사용될 상태변수와 공분산인 \tilde{x}_{k-1}^i 와 \tilde{P}_{k-1}^i 를 계산한다.

예측과정에서는 각 모델별로 상태변수와 공분산을 계산한다. 각 모델의 정확도를 알기 위해 모드우도함수(mode likelihood function)를 결정한다. 예측과정의 $\Phi(M_k^i)$ 는 각 모델의 상태 천이 행렬, Q 는 시스템 잡음, B 는 시스템 모델이다. 예측과정은 기본적으로 칼만필터의 수행과정과 동일하며, Robust IMM 필터에서는 운동 모델별로 칼만필터를 3가지로 구분하여 사용한다.

쇄신과정은 기존의 IMM 필터와 다르다. 기존의 IMM 필터는 측정치 z 가 반드시 필요하지만 Robust IMM 필터는 측정치가 없어도 알고리즘을 계속 수행할 수 있다. 따라서 ADS-B 시스템에서 항공기 위치 데이터가 손실되어도 이전 단계의 항공

기 위치를 이용하여 필터에서 계산한 예측값을 결과값으로 사용할 수 있다. \hat{x}_k^i 는 측정치를 이용하여 예측값을 쇠신한 최종 추정값을 의미하며, K_k^i 는 칼만게인으로 예측값의 가중치를 의미한다. $H(M_k^i)$ 는 시스템 모델이다. 만약 측정치가 들어오지 않는 경우에 Robust IMM 필터는 필터에서 계산한 예측값을 최종 추정값으로 사용한다. 즉, \bar{x}_k^i 를 \hat{x}_k^i 로 사용하고, \bar{P}_k^i 를 P_k^i 로 사용하는 것이다.

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.

결론적으로 기존의 IMM 필터는 필터링 과정을 통해 추정치를 계산하고, 센서로부터 측정치가 전달되어야만 최종적인 결과를 표시하지만, Robust IMM 필터는 센서로부터 측정치가 전달되지 않아도 최종 결과를 표시할 수 있다. ADS-B 시스템의 신호가 손실되면, IMM 필터는 최종 결과를 표시하지 않고 다음 추정치를 기다리는 반면, Robust IMM 필터는 계산한 추정치를 이용해 최종 결과를 표시하게 된다. 따라서 시스템의 신호가 손실되더라도 추정치를 이용해 항공기의 위치를 표시할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 차세대 항행시스템인 ADS-B 시스템, MLAT 시스템 및 WAM 시스템에 Robust IMM 필터를 적용하여 항공기 위치추적 성능을 향상시키고자 한다. Robust IMM 필터를 사용하게 되면, 기존의 차세대 시스템에서 제공하는 항공기 위치보다 정확한 항공기 위치를 획득할 수 있으며, 차세대 시스템의 신호가 손실되더라도 필터에서 계산한 항공기의 추정 위치를 표시할 수 있다.

3-2 운동 모델링

Robust IMM 필터를 차세대 시스템의 항공기 위치추적에 적용하기 위해서 항공기 움직임에 기초한 운동 모델을 만들었다.

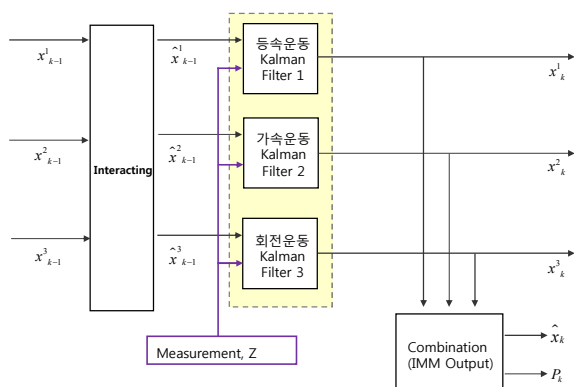


그림 1. 제안된 Robust IMM 필터 구조도
 Fig. 1. The block diagram of proposed Robust IMM filter.

운동 모델은 등속운동 모델, 가속운동 모델 및 회전운동 모델이며, 이 운동 모델들을 통해 Robust IMM 필터를 차세대 항공기 위치추적 시스템에 적용할 수 있다. 등속운동 모델은 항공기가 일정한 속도로 운동하는 상태를 가정한 것이고, 가속운동 모델은 항공기의 속도가 가속되는 상태를 가정한 것이다. 마지막으로 회전 운동 모델은 항공기가 등속으로 회전하는 운동 상태를 가정한 것이다. 그림 1은 제안된 Robust IMM 필터 구조도이다.

그림 1과 같이 Robust IMM 필터는 3개의 칼만필터를 가지는데, 각각의 칼만필터는 운동 모델별로 구분되어 있다. 먼저 이전 단계에서 계산된 결과가 Robust IMM 필터로 입력되면 혼합과정을 통해 초기값을 결정하고 각 초기값은 등속운동, 가속운동, 회전운동 모델별로 칼만필터로 입력된다. 이 때 측정치가 입력되면 측정치를 통한 쇠신과정을 수행하고, 측정치가 입력되지 않으면 필터에서 계산된 예측값을 이용해서 추정값을 출력한다. 각각의 추정값은 결합과정을 통해 하나의 최종적인 추정값이 된다. 마찬가지로 공분산 역시 각각의 모델별로 계산된 값을 결합과정을 통해 하나로 결합하게 된다.

IV. 성능평가

4-1 시뮬레이션 환경

제안된 알고리즘의 성능평가를 위해 MATLAB을 이용하였으며, 시뮬레이션은 3개로 구분하여 진행하였다. 시뮬레이션 데이터는 가상의 센서 데이터를 생성하여 사용하였다. 가상의 데이터는 각각의 시나리오에 적합하도록 참값을 먼저 생성하고, 이 값에 랜덤한 노이즈를 추가하여 센서의 측정치를 생성하였다. 보다 실제적인 시뮬레이션을 위하여 센서의 신호 손실을 시뮬레이션에 포함하였다.

센서의 신호 손실은 포아송 과정을 따른다고 가정하였으며, 이때의 평균 도착률은 λ 이다. 포아송 과정에서 센서의 신호 손실 발생 사이의 시간을 Y 라고 하면, t 초가 지난 후 Y 시간 동안의 센서의 신호손실 발생 확률은 t 초 동안 센서의 신호가 손실되지 않을 확률과 같다. 이와 같은 과정을 통해 센서의 신호 손실을 센서 데이터에 포함시켰다.

오차 모델은 가우시안 분포를 사용하였으며, MATLAB의 randn 함수를 이용하여 오차를 생성하였다. 오차의 평균과 표준편차는 각 시스템의 특성을 고려하여 표 2와 같이 설정하였다. 각 센서는 거리에 따라 오차의 평균과 표준편차가 달라지므로 이를 적용하여 시뮬레이션을 진행하였다. ADS-B는 MLAT와 WAM과는 달리 거리에 관계없이 오차가 일정하지만, 신호 손실을 고려하여 거리에 따라 오차와 표준편차를 달리하였다. 그림 2는 오차가 가우시안 분포임을 나타내며, 시뮬레이션은 몬테카를로 시뮬레이션을 사용하여 진행하였다.

표 2. 오차의 평균과 표준편차

Table 2. The average and standard deviation of errors.

구 분		오차의 평균 (m)	오차의 표준편차 (m)
ADS-B	공항 인근	27.39	1.8
	공항 10 마일	28.74	4.0
	항로	30.21	6.4
MLAT	공항 인근	4.30	1.5
	공항 10 마일	10.16	2.0
WAM	항로	48.18	7.5

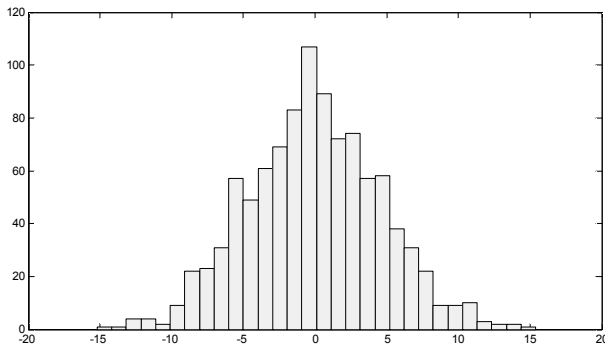


그림 2. 오차의 가우시안 분포

Fig. 2. The Gaussian Distribution of the errors.

4-2 시뮬레이션

제안된 항공기 추적 기법에 대한 성능평가를 위해 3개의 시나리오를 만들었다. 시나리오 별로 Robust IMM 필터를 ADS-B 시스템, MLAT 시스템, WAM 시스템에 각각 적용하여 성능을 평가하였다.

1) 시나리오 1

시나리오 1에서는 필터링 알고리즘인 Robust IMM 필터를 ADS-B에 적용하였다. ADS-B 데이터는 공항에서 항공기가 멀어질수록 오차의 표준편차가 증가하기 때문에 시뮬레이션을 세 부분으로 나누어 진행하였다. 첫 번째는 공항 인근에서의 ADS-B 데이터를 이용하였고, 두 번째는 공항 10 마일 부근에서의 ADS-B 데이터를 이용하였으며, 세 번째는 항로에서의 ADS-B 데이터를 이용하여 시뮬레이션 하였다. 각각의 경우에 대해 기존의 ADS-B 데이터와 Robust IMM 필터를 적용한 ADS-B 데이터의 오차를 비교하였다.

공항 인근의 항공기 궤적은 그림 3과 같이 생성하였다. 그림 3에는 항공기 궤적의 참값, ADS-B 데이터, Robust IMM 필터를 적용한 ADS-B 데이터 등이 나타나 있다. 보다 실제적인 시뮬

레이션을 위해 시뮬레이션 환경에서 설명한 ADS-B의 신호 손실을 가정하여 시뮬레이션에 포함시켰다. ADS-B의 신호가 손실되어도 Robust IMM 필터를 적용하면 그림 4와 같이 항공기를 지속적으로 추적할 수 있다. 항공기 운동은 등속운동 → 가속운동 → 감속운동 → 선회 → 가속운동 → 감속운동 → 선회 → 등속운동 → 가속운동 → 감속운동 순으로 설정하였다. 각 구간은 10 초로 설정하였으며 ADS-B 신호는 매 1 초마다 수신되는 것으로 설정하였다. 평균적으로 기존의 ADS-B 데이터 오차는 29.41 m이고 Robust IMM 필터를 적용한 ADS-B 데이터의 오차는 25.71 m이다. Robust IMM 필터를 적용한 ADS-B 데이터가 기존의 ADS-B 데이터에 비해 12.58% 정확하다.

공항 10 마일 부근의 항공기 궤적은 그림 5와 같이 생성하였다. 그림 5에는 항공기 궤적의 참값, ADS-B 데이터, Robust IMM 필터를 적용한 ADS-B 데이터 등이 나타나 있다.

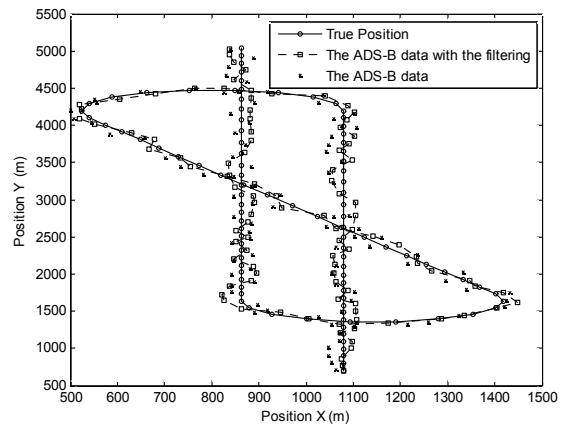


그림 3. 공항 인근에서의 ADS-B 항공기 궤적

Fig. 3. The aircraft trajectories of ADS-B near the airport.

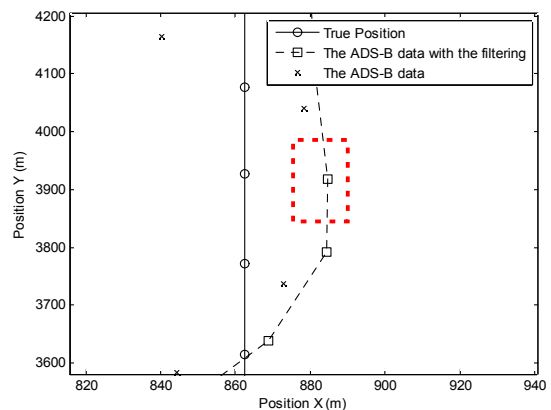


그림 4. 공항 인근에서의 ADS-B 항공기 궤적(확대)

Fig. 4. The aircraft trajectories of ADS-B near the airport(zoom in).

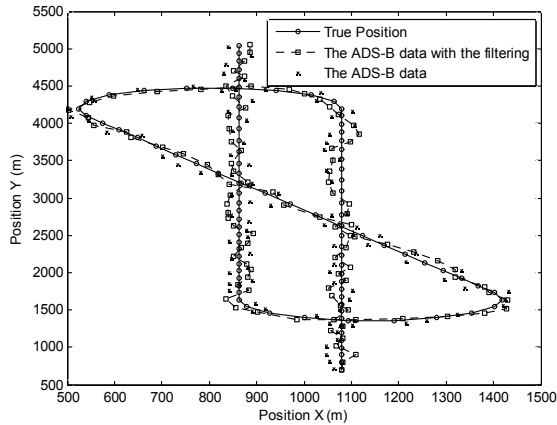


그림 5. 공항 10 마일 부근에서의 ADS-B 항공기 궤적
Fig. 5. The aircraft trajectories of ADS-B around 10 miles of the airport.

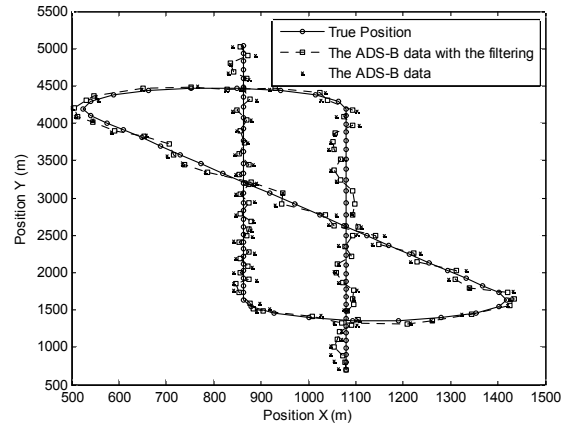


그림 7. 항로에서의 ADS-B 항공기 궤적
Fig. 7. The aircraft trajectories of ADS-B in en-route.

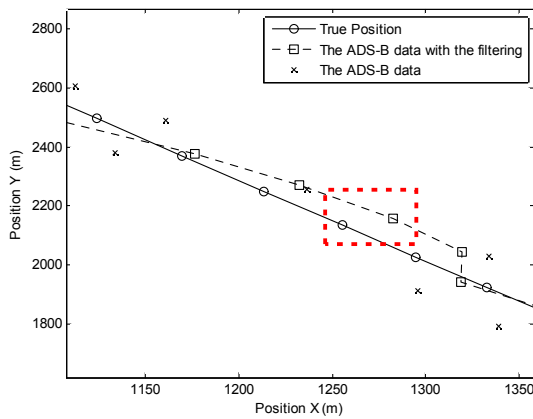


그림 6. 공항 10 마일 부근에서의 ADS-B 항공기 궤적(확대)
Fig. 6. The aircraft trajectories of ADS-B around 10 miles of the airport(zoom in)

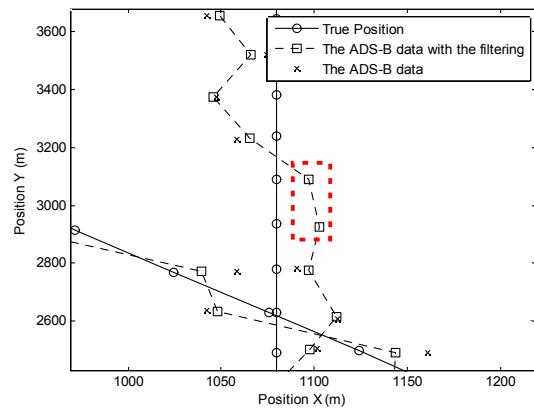


그림 8. 항로에서의 ADS-B 항공기 궤적(확대)
Fig. 8. The aircraft trajectories of ADS-B in en-route(zoom in).

기타 사항은 공항 인근에서의 시뮬레이션과 동일하다. ADS-B의 신호가 손실되어도 Robust IMM 필터를 적용하면 그림 6과 같이 항공기를 지속적으로 추적할 수 있다. 평균적으로 기존의 ADS-B 데이터 오차는 30.21 m이고 Robust IMM 필터를 적용한 ADS-B 데이터의 오차는 26.04 m이다. Robust IMM 필터를 적용한 ADS-B 데이터가 기존의 ADS-B 데이터에 비해 13.80% 정확하다.

항로에서의 항공기 궤적은 그림 7과 같이 생성하였다. 그림 7에는 항공기 궤적의 참값, ADS-B 데이터, Robust IMM 필터를 적용한 ADS-B 데이터 등이 나타나 있다. 기타 사항은 공항 인근에서의 시뮬레이션과 동일하다. ADS-B의 신호가 손실되어도 Robust IMM 필터를 적용하면 그림 8과 같이 항공기를 지속적으로 추적할 수 있다. 평균적으로 기존의 ADS-B 데이터 오차는 31.75 m이고 Robust IMM 필터를 적용한 ADS-B 데이터

의 오차는 27.12 m이다. Robust IMM 필터를 적용한 ADS-B 데이터가 기존의 ADS-B 데이터에 비해 14.58% 정확하다.

2) 시나리오 2

시나리오 2에서는 필터링 알고리즘인 Robust IMM 필터를 MLAT에 적용하였다. MLAT 데이터는 수신기에서 항공기가 멀어질수록 오차가 증가하기 때문에 시뮬레이션을 두 부분으로 나누어 진행하였다. 첫 번째는 공항 인근에서의 MLAT 데이터를 이용하였고, 두 번째는 공항 10 마일 부근에서의 MLAT 데이터를 이용하여 시뮬레이션 하였다. 각각의 경우에 대해 기존의 MLAT 데이터와 Robust IMM 필터를 적용한 MLAT 데이터의 오차를 비교하였다.

공항 인근의 항공기 궤적은 그림 9와 같이 생성하였다. 그림 9에는 공항 인근의 항공기 궤적의 참값, MLAT 데이터, Robust IMM 필터를 적용한 MLAT 데이터 등이 나타나 있다. 보다 실

제적인 시뮬레이션을 위해 시뮬레이션 환경에서 설명한 MLAT의 신호 손실을 가정하여 시뮬레이션에 포함시켰다. MLAT의 신호가 손실되어도 Robust IMM 필터를 적용하면 그림 10과 같이 항공기를 지속적으로 추적할 수 있다. 항공기 운동은 가속운동 → 감속운동 → 선회 → 등속운동 → 선회 → 등속운동 순으로 설정하였다. 각 구간은 10 초로 설정하였으며 MLAT 신호는 매 1 초마다 수신되는 것으로 설정하였다. 평균적으로 MLAT 데이터의 오차는 4.30 m이며 Robust IMM 필터를 적용한 MLAT 데이터의 오차는 2.65 m이다. 따라서 Robust IMM 필터를 적용한 MLAT 데이터가 공항 인근에서는 38.37% 성능이 우수한 것으로 분석되었다.

공항 10 마일 부근의 항공기 궤적은 그림 11과 같이 생성하였다. 그림 11에는 공항 10 마일 부근의 항공기 궤적의 참값, MLAT 데이터, Robust IMM 필터를 적용한 MLAT 데이터 등이 나타나 있다. 보다 실제적인 시뮬레이션을 위해 시뮬레이션 환경에서 설명한 MLAT의 신호 손실을 가정하여 시뮬레이션에

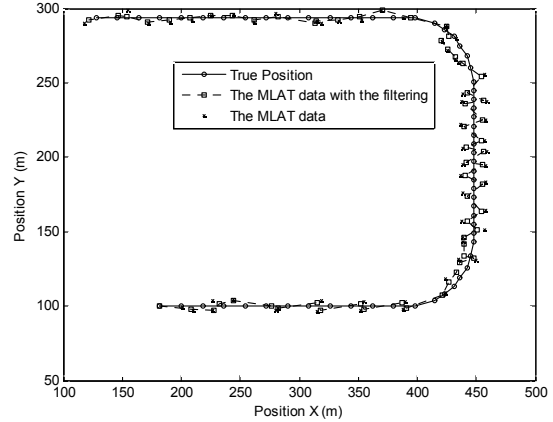


그림 11. 공항 10 마일 부근에서의 MLAT 항공기 궤적
Fig. 11. The aircraft trajectories of MLAT around 10 miles of the airport.

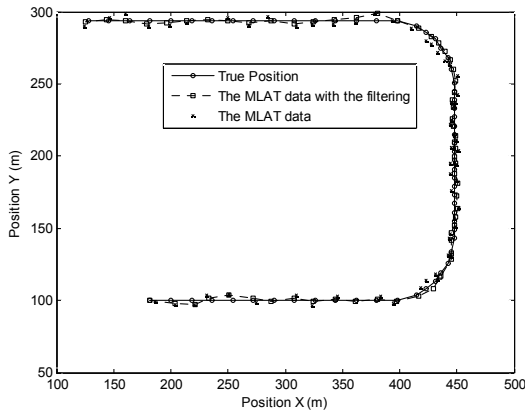


그림 9. 공항 인근에서의 항공기 궤적
Fig. 9. The aircraft trajectories near the airport.

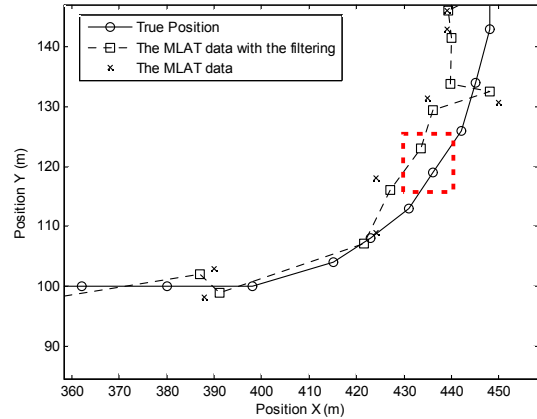


그림 12. 공항 10 마일 부근에서의 MLAT 항공기 궤적(확대)
Fig. 12. The aircraft trajectories of MLAT around 10 miles of the airport(zoom in).

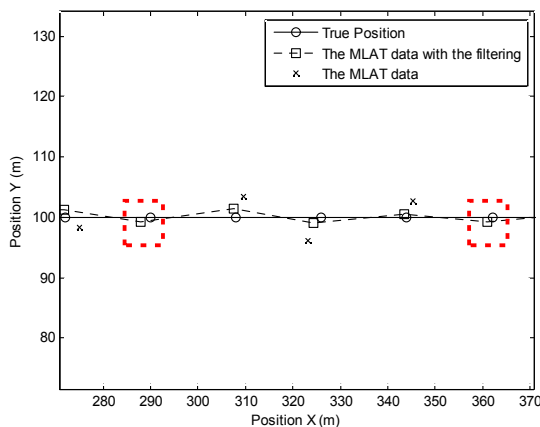


그림 10. 공항 인근에서의 MLAT 항공기 궤적(확대)
Fig. 10. The aircraft trajectories of MLAT near the airport(zoom in).

포함시켰다. 마찬가지로 그림 12와 같이 MLAT의 신호가 손실 되더라도 Robust IMM 필터를 통해 선회 중인 항공기도 지속적으로 추적할 수 있다. 항공기 운동은 공항인근에서와 마찬가지로 가속운동 → 감속운동 → 선회 → 등속운동 → 선회 → 등속운동 순으로 설정하였다. 각 구간은 10 초로 설정하였으며 MLAT 신호는 매 1 초마다 수신되는 것으로 설정하였다.

평균적으로 MLAT 데이터의 오차는 10.16 m이며 Robust IMM 필터를 적용한 MLAT 데이터의 오차는 8.04 m이다. 마찬가지로 Robust IMM 필터를 적용한 MLAT 데이터가 20.86% 성능이 우수한 것으로 분석되었다.

3) 시나리오 3

시나리오 3에서는 필터링 알고리즘인 Robust IMM 필터를 WAM에 적용하였다. 항공기 궤적은 그림 13과 같이 생성하였다. 그림 13에는 항공기 궤적의 참값, WAM 데이터, Robust

IMM 필터를 적용한 WAM 데이터 등이 나타나 있다. 보다 실제적인 시뮬레이션을 위해 시뮬레이션 환경에서 설명한 WAM의 신호 손실을 가정하여 시뮬레이션에 포함시켰다. 그림 14와 같이 WAM의 신호가 손실되어도 Robust IMM 필터를 적용하면 항공기를 지속적으로 추적할 수 있다. 항공기 운동은 가속운동 → 감속운동 → 선회 → 등속운동 → 선회 → 등속운동 순으로 설정하였다. 각 구간은 10 초로 설정하였으며 WAM 신호는 매 1 초 마다 수신되는 것으로 설정하였다. 평균적으로 기존의 WAM 데이터 오차는 48.18 m이고 Robust IMM 필터를 적용한 WAM 데이터의 오차는 40.92 m이다. Robust IMM 필터를 적용한 MLAT 데이터가 기존의 MLAT 데이터에 비해 15.06% 정확하다.

시뮬레이션의 시나리오 1, 2, 3과 같이 본 논문에서 제안한 기법을 적용한 센서 데이터가 기존의 센서 데이터 보다 항공기 추적성능이 우수하다. 표 3은 시나리오 1, 2, 3의 결과를 나타내었다. 각 시나리오에서 최대 38.37%, 평균 19.21%의 성능 향상이 있었고 3개의 시나리오에서 모두 항공기 추적성능이 향상되었음을 알 수 있다.

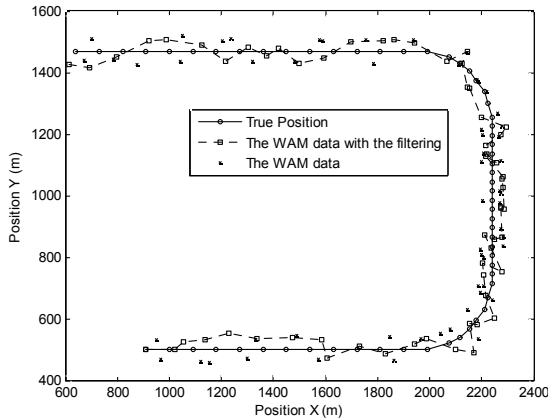


그림 13. WAM 항공기 궤적
Fig. 13. The aircraft trajectories of WAM.

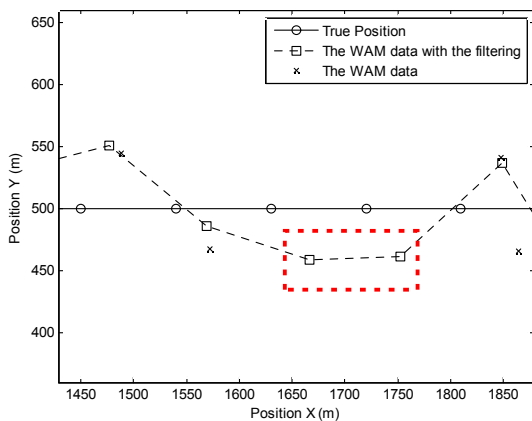


그림 14. WAM 항공기 궤적(확대)
Fig. 14. The aircraft trajectories of WAM(zoom in).

표 3. 시나리오 1, 2, 3의 시뮬레이션 결과

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

		센서 데이터 (m)	필터링 알고리즘을 적용한 센서 데이터 (m)	성능 향상 (%)
시나리오 1 (ADS-B)	공항 인근	29.41	25.71	12.58
	공항 10마일	30.21	26.04	13.80
	항로	31.75	27.12	14.58
시나리오 2 (MLAT)	공항 인근	4.30	2.65	38.37
	공항 10마일	10.16	8.04	20.86
시나리오 3 (WAM)	항로	48.18	40.92	15.06

표 4. 알고리즘의 수행시간 측정결과

Table 4. The results of the algorithm execution time.

구 분	최대 (ms)	최소 (ms)	평균 (ms)
알고리즘 수행시간	0.552	0.411	0.487

4) 시스템의 지연시간 측정

필터링 알고리즘을 기존의 시스템에 적용하면 모든 경우에서 항공기 추적성능이 향상되지만, 알고리즘 수행시간으로 인해서 약간의 지연시간이 발생하게 된다. 정확한 지연시간을 측정하기 위해 MATLAB에서 제공하는 TIC/TOC 함수를 이용하여 알고리즘 수행시간을 측정하였다. 알고리즘 수행시간은 필터링 알고리즘을 10회 수행하여 평균값을 계산하였다. 표 4는 알고리즘의 수행시간 측정결과를 나타낸다. 필터링 알고리즘의 수행시간은 평균 0.487 ms이다. 약간의 지연시간은 발생하지만, 항공기 추적성능에 영향을 미칠 큰 값은 아니다. 또한 하드웨어의 성능에 따라 알고리즘의 수행시간은 달라지므로 향후 지연시간은 더욱 줄어들 것으로 예상된다.

V. 결 론

위성시스템, 다양한 디지털 기술 등을 적용한 CNS/ATM에 있어서 항공기의 정확한 위치추적 기술은 필수적이다. 본 논문에서는 항공기의 추적성능 향상을 위한 필터링 알고리즘과 정보융합 알고리즘을 제안하고 이를 차세대 항행시스템에 적용하였다.

필터링 알고리즘은 기존의 IMM 필터를 개선한 Robust IMM 필터를 사용하였고, ADS-B, MLAT, WAM 시스템에 적용하여 항공기 추적성능을 향상시켰다. Robust IMM 필터는 항공기 추적성능을 향상시킴과 더불어 항공기 위치 데이터가 손실되더라도 필터에서 계산한 추정값을 이용하여 지속적으로 항공기

를 추적할 수 있다.

제안된 기법의 성능평가를 위해 총 3개의 시나리오를 작성하였다. 3개의 시나리오에서 ADS-B, MLAT, WAM 시스템에 Robust IMM 필터를 적용하였고, 최대 38.37%, 평균 19.21%의 성능 향상이 있었다.

본 논문에서 제안한 향상된 항공기 추적 기법은 보다 정확한 항공기의 위치정보를 제공할 수 있고, 항공기 위치 신호가 손실 되더라도 필터링을 통해 지속적으로 항공기 위치를 추적할 수 있기 때문에 전 세계적으로 구현되는 CNS/ATM에 매우 유용하게 사용될 것이다. 또한 항공데이터를 통합관리하는 ASBU의 핵심시스템에 대한 연구를 진행했다는 점에서 의미가 깊다.

추가 연구사항으로는 제안된 기법을 각 시스템별로 최적화하여 성능을 향상시키고, MLAT 및 WAM 시스템을 구축할 때 제안된 기법을 적용하여 항공기 위치추적 성능을 향상시킬 필요가 있다. 향후 MLAT 및 WAM 시스템 구축이 완료되면 MLAT 및 WAM 시스템의 실제 항공기 위치 데이터를 이용해 성능을 평가하는 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 항공안전기술개발사업의 연구비 지원(12항공-항행01)에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] CNS/ATM ground station and service status reports, SUR.ET1.ST05. 2000-STD-16-01; European air traffic management, Brussels, Belgium, 2009.
- [2] SESAR consortium, The ATM target Concept, SESAR definition phase deliverable 3, 2007.
- [3] ERA, Proven multilateration and ADS-B surveillance solutions, 2011.
- [4] H. S. Jun, D. M. Kim, and C. H. Yeom "Analysis of CNS/ATM technology trend," *Current Industrial and Technological Trends in Aerospace*, Vol. 8, No. 2, pp. 113-123, 2010.
- [5] T. L. Song, "Filtering theory," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, Vol. 9, No. 2, pp. 413-419, 2003.
- [6] 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, pp. 780-783, 1988.
- [7] 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.
- [8] T. H. Cho, I. S. Song, E. M. Jang, W.O. Yoon, and S. B. Choi, "A Study on the improvement of the multilateration data by employing an IMM filter," *The Journal of Korea Navigation Institute*, Vol. 16, No. 4, pp. 578-585, 2012.
- [9] Radio technical commission for aeronautics, minimum aviation system performance standards (MASPS) for automatic dependent surveillance-broadcast (ADS-B); RTCA/DO 242A, 2002.
- [10] SRA International, Multilateration & ADS-B Executive Reference Guide, 2009.
- [11] P. Klaus, A. Mathias, and R. Heidger, "Investigation of measurement characteristics of MLAT/WAM and ADS-B," in *Proceedings of the Tyrrhenian International Workshop on Digital Communications-Enhanced Surveillance of Aircraft and Vehicles(TIWDC/ESAV)*, Capri: Italy, pp. 203-206, 2011.
- [12] Eurocontrol, Generic safety assessment for ATC surveillance using wide area multilateration, 2008.
- [13] J. M. Abbud, G. Miguel, and J. Besada, "Correction of systematic errors in wide area multilateration," in *Proceedings of the 2011 Tyrrhenian International Workshop on Digital Communications-Enhanced Surveillance of Aircraft and Vehicles(TIWDC/ESAV)*, Capri: Italy, pp. 173-178, 2011.
- [14] J. Zhang, W. Liu, and Y. Zhu, "Study of ADS-B data evaluation," *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 24, pp. 461-466, 2011.
- [15] C. H. Kim, J. H. Han, and J. Y. Kang, "Air surveillance using mode-s multilateration," *Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics*, Vol. 18, No. 3, pp. 9-20, 2010.



조 태 환 (Taehwan Cho)

2001년 2월 : 인하대학교 항공우주공학과 (공학사)
2014년 2월 : 인하대학교 전자공학과 (공학박사)
2014년 12월 ~ 현재 : 공군사관학교 전자공학과 교수
※ 관심분야 : 항공전자 시스템, 항공통신



김 진 혁 (Jinhyuk Kim)

2009년 2월 : 인하대학교 전자공학과 (공학사)
2011년 2월 : 인하대학교 전자공학과 (공학석사)
2011년 3월 ~ 현재 : 인하대학교 전자공학과 박사과정
※ 관심분야 : 병렬 및 분산 컴퓨팅, 컴퓨터 네트워크



최 상 방 (Sangbang Choi)

1981년 2월 : 한양대학교 전자공학과 (공학사)
1988년 : University of washington (공학석사)
1990년 : University of washington (공학박사)
1991년 ~ 현재 : 인하대학교 전자공학과 교수
※ 관심분야 : 컴퓨터 구조, 컴퓨터 네트워크