

비행시험용 실시간 데이터 융합필터 성능분석

원종훈¹⁾, 이자성²⁾, 이용재³⁾, 김홍범³⁾

1) 아주대학교 정보전자기술연구소, 2) 아주대학교 전자공학부, 3) 국방과학연구소

Performance Analysis on the Real-time Data Fusion Filter for Flight Test

Jong Hoon Won¹⁾, Ja Sung Lee²⁾, Yong Jae Lee³⁾, and Heung Bum Kim³⁾

1) CIE, Ajou Univ., 2) Electronics Eng. Ajou Univ., 3) Defense System Test Center 1 Team, ADD

Abstract - 본 논문에서는 21차 상태변수를 갖는 칼만필터 형태의 비행시험용 데이터 융합필터 알고리즘의 성능을 분석하였다. 실측 데이터에 대한 분석을 통하여 상태변수 선택의 적절성을 검증하였다. 공분산 해석기법을 통하여 개발된 데이터 융합 알고리즘의 추정값의 오차범위를 구하였다. 수치적인 성능값을 구하고자 간단한 시뮬레이터를 설계하였다. 20회 몬테칼로 시뮬레이션과 공분산 해석결과에 기반하여 필터 계수를 튜닝하였고 이를 기설계된 분산형 칼만필터에 적용하였다. 실시간 소프트웨어 모듈의 수행결과를 동일한 실측데이터를 적용한 후처리 실험결과와 비교하였다.

1. 서 론

FTC (Flight Test Computer)에 탑재되는 기동표적 추적용 데이터 융합 알고리즘의 성능은 내부에 탑재된 칼만필터의 성능에 좌우된다. 데이터 융합 알고리즘의 설계 및 구현은 센서의 실측 데이터 참값을 알 수 없는 경우로서 설계된 소프트웨어의 성능을 시험하기 위해서는 항체의 동역학과 각종 센서 측정오차의 확률정보에 근거한 공분산 해석 및 시뮬레이션을 통한 검증이 필수이다 [1-3]. 고속 비행체를 추적 관찰하고 통제하기 위한 FTC 소프트웨어(S/W)는 GPS, Radar, INS 등 다양한 계측 장비들로부터 들어오는 비행체제 정보를 실시간으로 처리·전시해야하는 실시간 분산 시스템인 동시에 시험 중 계측장비의 고장 및 오동작 출력에 강인하게 동작하여야 하는 시스템이다 [4,5]. FTC의 전체 시스템 개요를 그림 1에 나타내었다. FTC SW용 데이터 융합 알고리즘은 시간지연, 시간동기, 다중 출력속도 등을 고려하고자 그림 2와 같이 부필터와 주필터로 구현된 2단계의 분산형 칼만필터 구조로 설계되었다 [4].

2. 성능 분석

부필터는 3차원 위치-속도-가속도(PVA)의 9차 모델을 이용한다. 주필터는 앞서 말한 9차 상태변수 외에 Radar와 INS의 바이어스 오차성분을 위치-속도(PV)로 각각 모델링하여 12차의 오차 성분을 포함한 최종 21차 형태를 갖는다. 성능분석은 그림 3과 같은 순서로 실시하였다 [6].

2.1 상태변수 적절성 검사

항법용 칼만필터의 상태변수는 항체의 기동상태 및 측정 센서의 오차분석을 통하여 적절한 차수 및 기타 계수들을 선택해야 한다. 항체 운동방정식을 PVA 모델로 정하는 것의 타당성을 검증하기 위하여 각 센서의 위도, 경도, 고도 위치출력결과를 ENU 좌표계로 변환 한 후, 시간축에 대한 차분을 통하여 위치, 속도, 가속도 궤적을 확인하였다. 그림 4에 Radar의 가속도 추정치를 도시하였다. 가속도 궤적에서 백색잡음과 유사한 특성을 보이는 것으로 보아 PVA 모델이 타당하다.

정상적으로 동작하는 구간에서의 GPS를 기준 센서로 이용하여 다음 식과 같이 Radar와 INS의 센서 오차특성을 파악하였다.

$$\begin{aligned} \text{Radar Bias} &= \text{Radar Meas} - \text{GPS Meas} \\ \text{INS Bias} &= \text{INS Meas} - \text{GPS Meas} \end{aligned}$$

그림 5에 Radar의 센서 오차특성을 도시하였다. 거리, 방위 각 및 앙각을 측정하여 항체의 위치를 추정하는 Radar 센서의 경우 항체-Radar 사이의 거리가 멀어질 수록 각도 센서 분해능의 저하 현상으로 수직방향 오차가 커지는 현상을 확인할 수 있다. INS의 경우 누적적분오차의 증가로 시간경과에 따라 오차가 커진다. 이와 같은 센서 오차특성을 갖는 Radar와 INS는 간단한 PV 모델을 이용하는 것이 타당하다. 센서 오차의 동역학적 특성을 필터에 고려하여 좀 더 강한 필터 성능을 얻는다 [7].

2.2 공분산 해석

일반적인 공분산 해석기법은 시스템의 참 모델과 필터 모델 사이의 성능을 비교함으로써 최적의 필터 차수를 정하는 과정이다. 시스템의 참 모델은 모든 시스템 오차 상태변수를 포함하는 것으로서 개개 센서들의 정확한 오차 모델이 없는 경우 적용하기 어렵다. 따라서 기 설계된 21차 필터 상태변수 모델의 적절성 판단은 앞절의 실측데이터 분석을 통하여 수행한 결과를 이용하였다. 실제 구현되는 실시간 분산형 칼만필터의 성능을 직접 분석할 수 없으므로 수학적으로 잘 정의되는 중앙집중식 칼만필터의 성능을 분석하여 실시간 분산형 칼만필터의 성능을 예측하는 방식을 택하였다. 즉, 최고로 좋은 성능을 내는 분산형 칼만필터는 중앙집중식 칼만필터의 성능과 일치한다. 본 논문에서는 공분산 해석을 통하여 필터 계수튜닝 및 최종 상태변수 해의 해석적 오차범위를 정하는데 이용하였다. 필터 튜닝계수와 관련된 상태변수 공분산 행렬(P), 시스템 오차 공분산 행렬(Q), 추정치 오차 공분산 행렬(R)들은 단지 실제 시스템 오차 및 측정치 오차값만을 의미하는 것이 아니라, 가정된 필터 모델이 실제 모델에 어느 정도 적합한가를 나타내는 요소이다. 더욱 간단하고 덜 정확한 모델을 사용할수록 더욱 강력하게 오차를 지정해 주어야 한다. 그림 6의 공분산 궤적 결과는 위치 오차가 10m 정도들 만족하도록 필터 계수를 튜닝했을 때의 결과이다.

2.3 몬테칼로 시뮬레이션

실제 알고리즘의 시스템 시뮬레이션 기능 제공과 공분산 해석의 단점인 비선형 시스템의 선형화 과정에서 고려하지 않은 여러 오차요소 효과들에 대한 평가를 위하여 20회 몬테칼로 시뮬레이터를 제작하였다. 항체에 대한 정보없이 가급적 실제에 가까운 비행궤적을 얻고자 센서의 측정값을 이용하여 비행궤적을 구한 후 내삽법을 적용하여 스무딩(smoothing)하여 참 비행궤적을 생성하였다. GPS 오차는 간단한 백색잡음으로 고려하였고, Radar와 INS 오차는 2차 마코프 프로세스로 모델링 하였다. 그림 4와 5에서 보듯이 다른 축과 상이한 오차특성을 갖는 Radar의 수직방향 오차 특성은 항체-Radar 사이의 거리에 비례하는 크기를 갖는 사인함수로 모델링 하였다. 그림 7에 시뮬레이션에 생성한 참 비행궤적 및 센서 측정치를 나타내었다. 그림 8에 공분산 해석에서 구한 필터 계수로 21차 칼만필터를 튜닝하였을 경우의 20회 몬테칼로 시뮬레이션 결과의 3차원 위치오차를 도시하였다. 충분한 여유를 갖도록 튜닝된 필터 계수를 사용한 경우이므로 백색잡음 오차 가정이 만족하지 않더라도 공분산 해석결과와 시뮬레이션 결과가 성공적으로 일치하는 것을 볼 수 있다.

2.3 후처리 및 실시간 실험

공분산 해석 및 몬테카를로 시뮬레이션을 통하여 얻은 필터의 실제 동작 성능을 확인하고자 실측데이터에 대한 후처리 실험과 최종 실시간 처리 실험을 수행하였다.

후처리 실험은 Matlab을 이용하여 구현된 중앙집중형 칼만필터와 C언어를 이용하여 구현된 분산형 칼만필터에 기수집된 GPS, Radar, INS 실측데이터를 입력하는 방식으로 수행되었다. 후처리 방식 실험에서는 실시간 처리 방식과 비교하여 계산 시간의 제약이 없으므로 측정데이터가 발생할 때마다 칼만필터의 상태전파 및 개선식을 구동한다. 분산형 칼만필터에서는 융합 알고리즘 함수의 호출 시간간격을 짧게하여 가급적 주필터에서 시간지연이 발생하지 않도록 설정하였다. 그림 9와 10에 각각 중앙집중식 칼만필터와 분산형 칼만필터의 후처리 실험 결과를 나타내었다. 중앙집중형 칼만필터의 경우 초기 발사구간에서 GPS 오동작을 검출하지 못하므로 발산하는 모양의 궤적을 그린다. 분산형 칼만필터의 경우 센서 오동작 검출을 통하여 초기 GPS 오동작 구간에서도 성공적으로 위치추정을 행하는 것을 볼 수 있다.

실시간 처리 실험은 C언어를 이용하여 구현된 분산형 칼만필터를 중앙통제컴퓨터 (MCC : Master Control Computer)에 WindRiver사의 실시간 OS인 VxWorks 기반으로 Task Scheduling하여 이식한 후 실측데이터를 실제 통신 시스템을 통하여 입력받아 처리하는 방식으로 수행되었다. 실시간 처리 S/W 모듈은 후처리 방식과는 달리 센서간 시차동기 및 통신 지연을 고려하여 설계하였다. 즉, 20ms 단위로 부필터 및 주필터가 동작하며 다음 데이터가 들어오기 전까지 모든 계산을 성공적으로 수행한다. 그림 11에 분산형 칼만필터의 실시간 처리 결과를 나타내었다. 실시간 처리 실험의 경우도 후처리 실험 경우와 유사한 궤적을 그리는 것으로 보아 성공적인 위치추정을 행하는 것을 확인할 수 있다.

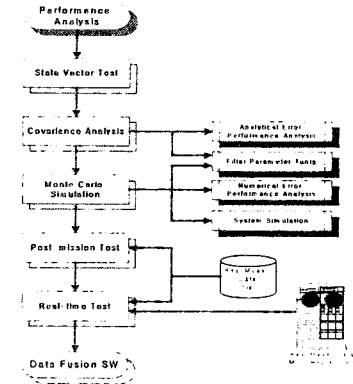


그림 3. 성능분석 절차

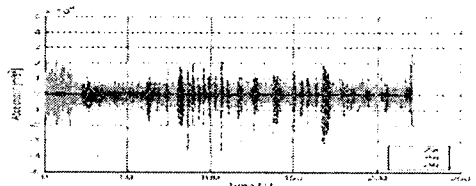


그림 4. Radar 가속도 추정치

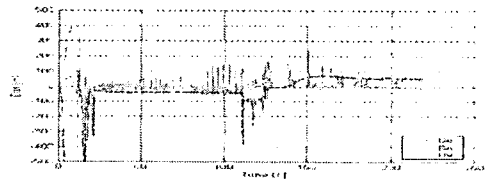


그림 5. Radar 바이어스 오차 추정

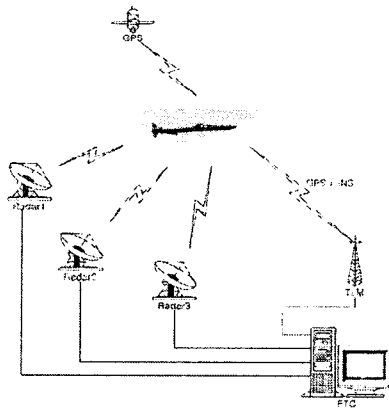


그림 1. FTC 시스템 개요

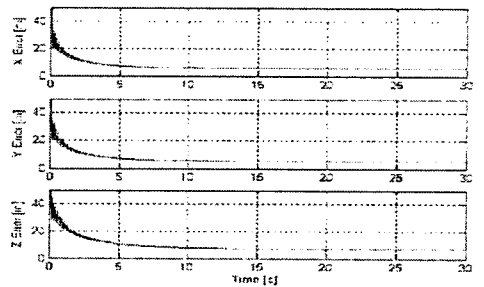


그림 6. 공분산 해석 결과

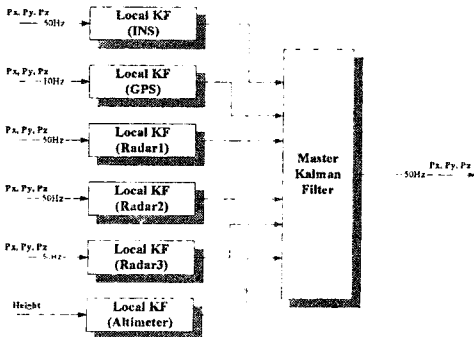


그림 2. FTC 데이터 융합 알고리즘 개요

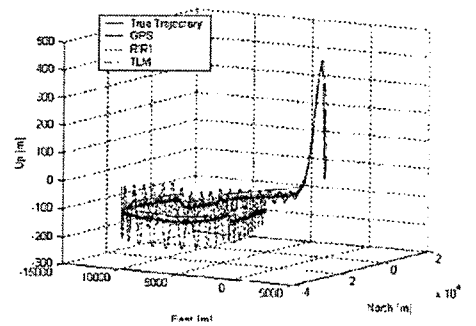


그림 7. 참 비행궤적 및 생성된 센서 추정치

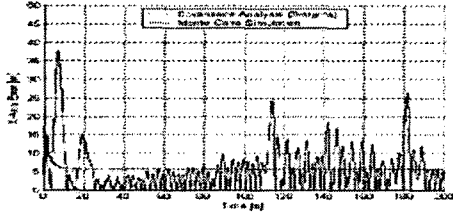


그림 8. 공분산 해석 및 몬테칼로 시뮬레이션 결과 비교

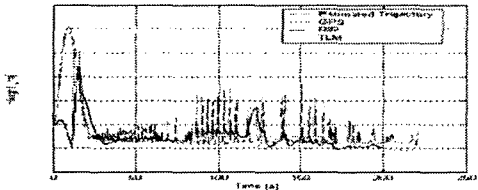
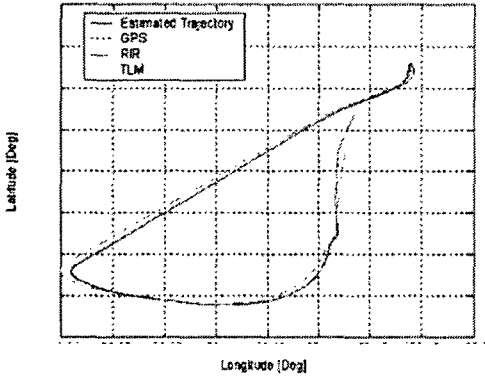


그림 9. 후처리 실험 결과 - 중앙집중식 칼만필터

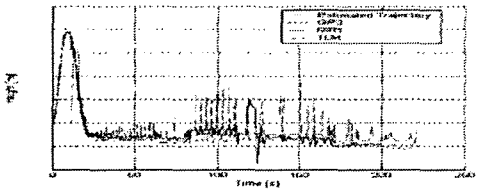
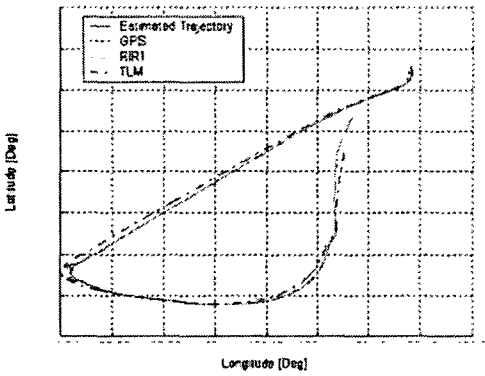


그림 10. 후처리 실험 결과 - 분산형 칼만필터

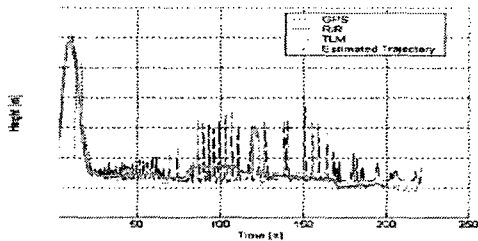
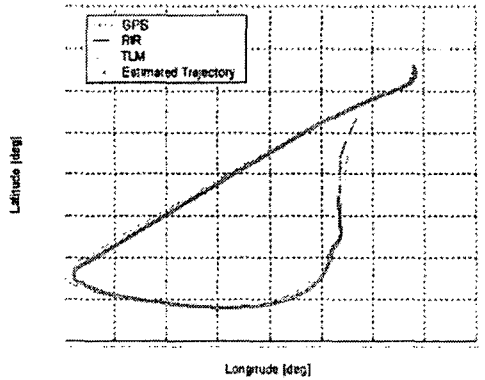


그림 11. 실시간 처리 실험 결과 - 분산형 칼만필터

3. 결 론

본 논문에서는 FTC에 탑재되는 기동표적 추적용 데이터 융합 알고리즘인 2차 부/주 2단계 칼만필터의 성능을 검증하였다. 실험데이터에 대한 분석을 통하여 상태변수의 적절성을 검증하였다. 공분산 해석을 통하여 얻은 해석적 오차 특성을 이용하여 최종 필터계수 튜닝을 하였으며 몬테칼로 시뮬레이션의 수치적 오차 성능과 비교하였다. 설계된 칼만필터에 대하여 실험데이터를 적용하는 후처리 실험 및 데이터 통신지원까지는 포함하는 실시간 실험을 통하여 최종 FTC 데이터 융합 알고리즘의 동작성능을 시험하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] Gelb, A., *Applied Optimal Estimation*, The MIT Press, 1992.
- [2] Maybeck, P. S., *Stochastic Models, Estimation, and Control*, Vol. 1, Academic Press, 1979.
- [3] Siouris, G. M., *An Engineering Approach to Optimal Control and Estimation Theory*, A Wiley-Interscience Publication, 1996.
- [4] 김동윤, 이자성 외, *합대함 비행시험용 실시간 전서 소프트웨어 개발* (국방과학연구소 위탁과제 보고서), 아주대학교, 2001. 6.
- [5] 이자성, 원종훈, 고선준, 김주영, *비행시험용 실시간 데이터 융합필터 구현* (국방과학연구소 위탁과제 보고서), 아주대학교, 2002. 11.
- [6] Felner, S. C., "A Covariance Analysis Technique for the Federated Kalman Filter," CH3158-3/92/0000-0399, IEEE, 1992.
- [7] Friedland, B., "Treatment of Bias in Recursive Filtering," *IEEE Trans. on Automatic Control*, Vol. AC-14, No. 4, Aug 1969, pp. 359-367.