

Unscented 칼만필터의 INS/GPS 적용

김 광 진, 박 찬 국

서울대학교 기계항공공학부

1. 서론

외부의 도움 없이 자동차, 비행기, 선박 등 다양한 항체에 필요한 위치, 속도, 자세 정보를 제공하는 관성항법시스템(INS : Inertial Navigation System)은 자이로와 가속도계로 구성된 관성센서유닛(IMU : Inertial Measurement Unit)과 신호처리, 항법 알고리즘 연산 등을 수행하는 전자회로부로 구성된다[1]. INS의 항법 정보에는 관성센서와 전자 회로 소자에 의해서 발생된 오차들과 연산 과정에서 발생하는 오차가 포함되어 있으며, 그 중에서 저주파수 잡음인 센서 바이어스 오차 성분은 시간이 증가함에 따라 증폭되는 특성이 있다. 이로 인하여 요구되는 INS의 성능이 우수해질수록 고가의 자이로 및 가속도계가 필요하며, 이는 INS의 사용 범위를 제한하는 요인이 되었다.

최근에 들어와 INS는 그 사용 범위가 급격하게 확장되고 있으며, 이것은 GPS(Global Positioning System)와 MEMS(Micro Electronic Mechanical Sense) 기술의 발전에 기인한다[2]. GPS는 항상 일정한 오차 범위 내에서 항법 정보를 제공하는 시스템으로 고가의 INS와 동등 수준 이상의 위치 정확도를 가지면서 가격은 INS와 비교하여 매우 저렴하다. 그러나 안정적인 위치해를 제공하기 위해서는 GPS 가시위성의 개수가 4개 이상이어야 하며, 고속으로 위치 정보를 획득하거나 항체의 자세 정보를 획득하기 위해서는 부가적인 회로나 알고리즘이 요구된다[3]. 이러한 이유로 GPS와 함께 MEMS 관성 센서를 이용한 저가의 INS를 통합하여 사용하는 경우에는 GPS의 단점을 보완하면서 기존의 고정밀 INS와 유사한 성능의 위치, 속도 정보를 획득할 수 있다.

INS와 GPS를 통합한 결합 항법시스템은 INS의 오차 추정을 위하여 칼만필터를 사용한다. 칼만필터는 상태변수의 구현 방식에 따라 직접(direct) 칼만필터와 간접(indirect) 칼만필터로 나눌 수 있으며, INS/GPS 결합 항법시스템에서는 INS의 오차 모델을 이용하는 간접 칼만필터 방식을 사용한다[4]. INS의 오차 모델은 위치, 속도 및 자세 운동 방정식을 섭동(perturbation)하여 유도하며 대부분의 경우 고차항은 무시한

선형 모델을 이용한다[5]. 그러나, 저가의 MEMS를 관성 센서로 사용하는 경우에는 다양한 오차원에 의하여 모델의 선형성이 보장되지 않는다. 또한 INS/GPS 결합 방식으로 사용되고 있는 강결합(tightly coupled)과 심층 결합 기법(deeply coupled)에서는 예측치 모델 자체가 기존의 약결합(loosely coupled)과 다르게 비선형 형태를 가진다[6,7].

지금까지 설명한 INS 오차 모델의 비선형성 증가와 결합 기법 자체의 비선형 예측치 모델을 위해서는 비선형 필터링 기법이 요구된다. 본 논문에서는 최근 많은 연구가 이루어지고 있는 비선형 필터링 기법인 unscented 칼만필터(UKF : Unscented Kalman Filter)에 대하여 살펴보고 INS/GPS 결합 항법시스템의 적용 사례를 소개한다.

2. Unscented 칼만 필터

UKF는 1995년 Julier와 Uhlmann에 의하여 제시된 UT(Unscented Transformation)에 기반을 두고 있다. UT는 시그마 점이라고 부르는 확정적인 선택 점인 SP(Sigma Point)의 집합을 비선형 모델을 이용하여 변환한 후 그 결과를 이용하여 평균과 분산을 계산한다[8]. SP들에 의하여 발생된 비선형 변환 값들은 적절한 가중치를 사용하여 평균과 공분산을 계산하는데, 이를 위하여 가중치와 SP는 다음의 세 가지 조건을 만족하여야만 한다[9].

조건 1. 가중치 W_i 의 합은 1이다.

$$\sum_{i=0}^{2N} W_i = 1$$

조건 2. SP X_i 로 계산된 평균은 이전 평균과 일치

$$\sum_{i=0}^{2N} W_i X_i = \bar{\mathbf{x}}$$

조건 3. SP로 계산된 공분산은 이전의 공분산과 일치

$$\sum_{i=0}^{2N} W_i (X_i - \bar{\mathbf{x}})(X_i - \bar{\mathbf{x}})^T = \mathbf{P}_{xx}$$

위의 세 가지 조건을 만족하면서 현재 가장 많이 사용되고 있는 SP 선정 기법이 2N+1개의 SP를 다음과 같이 스케일하여 선택하는 스케일 UT 기법이다[10].

$$\begin{cases} X_0 = \bar{\mathbf{x}} \\ X_i = \bar{\mathbf{x}} + \mu \cdot \sigma_i, & i=1, 2, \dots, N \\ X_i = \bar{\mathbf{x}} - \mu \cdot \sigma_i, & i=N+1, \dots, 2N \end{cases}$$

여기서 $\mu = \alpha\sqrt{N}$ 이며 σ_i 는 공분산 \mathbf{P}_{xx} 를 Cholesky 분해한 행렬의 열 또는 행을 의미한다. 이때 α 는 SP의 존재 범위를 결정하는 스케일 변수로써 0과 1사이의 값으로 결정한다. 또한 선정된 SP를 이용한 평균과 공분산 계산을 위한 가중치는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{cases} W_0^{(m)} = 1 - \frac{N}{\mu^2} \\ W_0^{(c)} = W_0^{(m)} + 1 - \alpha^2 + \beta \\ W_i^{(m)} = W_i^{(c)} = \frac{1}{2\mu^2}, & i=1, 2, \dots, 2N \end{cases}$$

여기서 $W^{(m)}$ 과 $W^{(c)}$ 는 각각 평균과 공분산을 계산하기 위한 가중치이며, $W_0^{(c)}$ 계산에 사용되는 β 의 최적값은 2이다.

스케일 UT 기법과 가중치의 관계를 확률밀도함수를 이용하여 간략히 도시하면 그림 1과 같다.

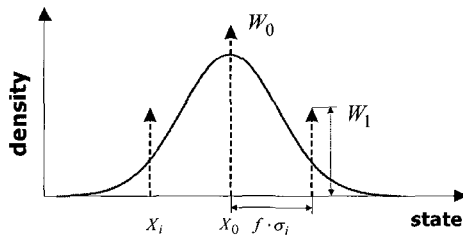


그림 1. 스케일 UT 기법의 SP와 가중치와의 관계

그림 1에서 SP들 중 X_0 는 가우시안 분포를 가지는 1차원의 확률밀도함수의 최대 지점에 존재하므로 가중치도 매우 큰 값을 가지게 된다. 그러나 스케일 변수 μ 에 의하여 결정되는 SP는 평균값에서 멀어질수록 가중치의 크기가 작아짐을 알 수 있다.

SP를 선정하는 기법으로 스케일 UT 기법 이외에 시스템 차수 N의 2배인 2N개의 SP를 선정하는 기법과 2N 보다 작은 SP를 선정하는 기법, 2N 보다 많은 SP를 선정하는 기법이 있다. 이 중에서 2N+1개의 SP를 가지는 스케일 UT 기법과 2N개의 SP를 가지는 UT 기법, 그리고 EKF와의 성능을 비교해 보기 위하여 $(x, y) = (r \sin \theta, r \cos \theta)$ 로 표현되는 레이더 모델에 대하여 시뮬레이션을 수행하면 그림 2와 같다. 이때 $r \sim (1, 0.02^2)$, $\theta \sim (\pi/2, (\pi/12)^2)$.

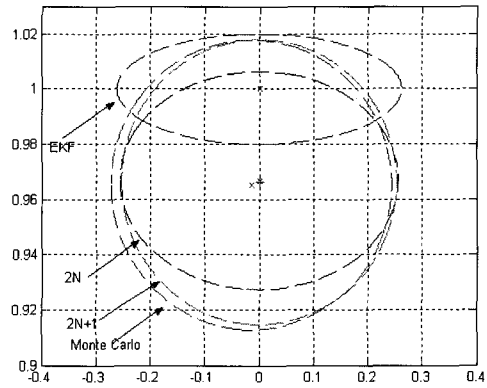


그림 2. UT 기법에 따른 평균과 표준 편차

그림 2에서 몬테칼로 결과는 오차원을 랜덤으로 1000회 발생시켜 변환된 결과이며, EKF는 몬테칼로 시뮬레이션 결과와 비교하여 평균과 표준 편차 모두 크게 차이가 나타남을 알 수 있다. 그리고 2N개의 SP를 사용하는 UT는 몬테칼로 결과와 평균은 유사하나 표준 편차는 y축 방향으로 오차가 크게 발생한다. 그러나 2N+1개를 사용하는 스케일 UT 기법은 평균과 표준 편차 모두 몬테칼로와 유사한 결과를 보인다.

지금까지 설명한 스케일 UT 기법을 이용한 UKF의 계산 흐름도는 그림 3과 같다. 그림 3에서 알 수 있듯이 UKF는 기존의 EKF에서 요구된 선형화 과정을 거치지 않게 된다.

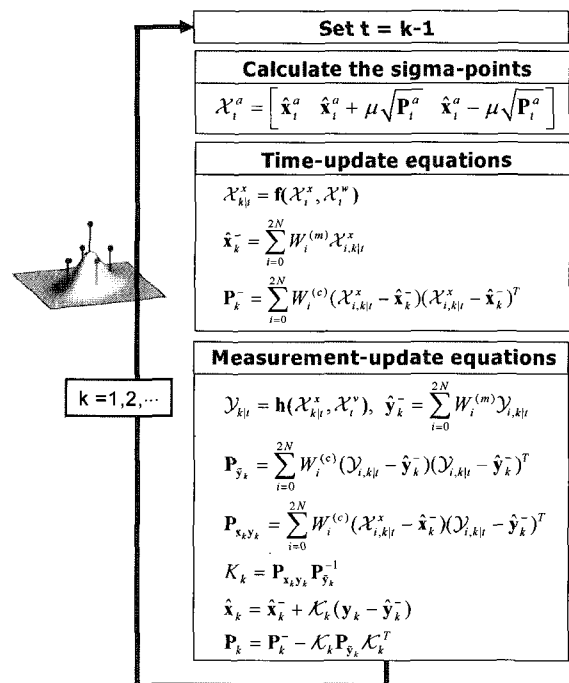
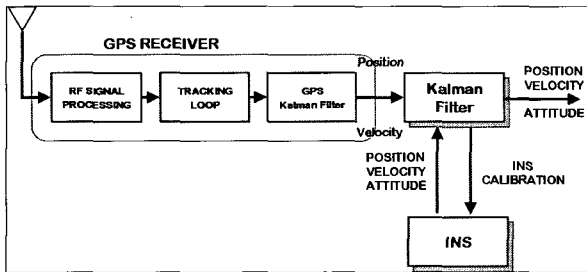


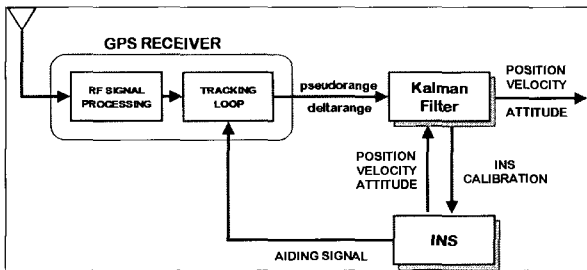
그림 3. 스케일 UT 기법을 이용한 UKF 계산 흐름도

3. INS/GPS 결합시스템

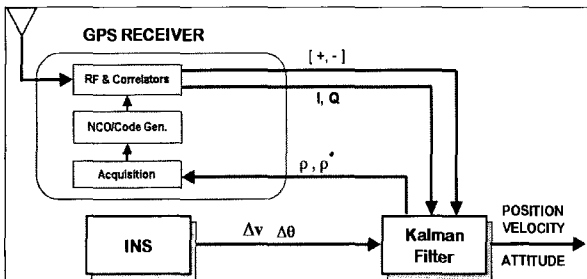
INS와 GPS의 결합 기법은 측정치로 사용되는 GPS의 출력 신호의 특성에 따라서 분류가 된다. 먼저 약결합 기법에서는 GPS 수신기에서 출력되는 위치 및 속도 정보가 측정치로 사용되며 INS와 GPS의 최종 출력을 사용하므로 구성이 매우 용이하다. 다음으로 강결합 기법에서는 GPS 수신기 내부의 의사 거리(pseudo range)와 의사 거리 변화율 정보가 측정치로 사용되므로 가시 위성의 개수가 1개 이상만 되면 보정 항법이 가능하다. 마지막으로 심층 결합 기법에서는 GPS 내부의 신호 추적 루프 I(In-phase)와 Q(Quadrature)를 INS 정보와 결합하는 것으로 외부 재밍 신호에 가장 강인한 특성을 지니게 된다. 세 가지 결합 기법을 개념적으로 도시하면 그림 4와 같다.



(a) 약결합 기법



(b) 강결합 기법



(c) 심층 결합 기법

그림 4. INS/GPS 결합 기법

그림 4에서 나타난 INS/GPS 결합 기법들은 MEMS 관성 센서의 발달과 전자 회로들의 집적화, 소형화로 인하여 일반적인 항법시스템 뿐만 아니라 고회전, 고충격 환경이 존재하는 지능탄과 같은 무기체계에서도 적용이 되고 있다. 그림 5는 1995년부터 현재까지 미국에서 개발 및 연구되고 있는 GPS와 MEMS INS의 규격 및 적용 기술을 분류한 것이다 [11]. 그림에서 알 수 있듯이 현재 심층 결합 기법과 초소형 MEMS 관성센서를 이용하여 20,000g에서도 운용이 가능한 통합 항법 장치 개발이 진행되고 있는 상태이다.

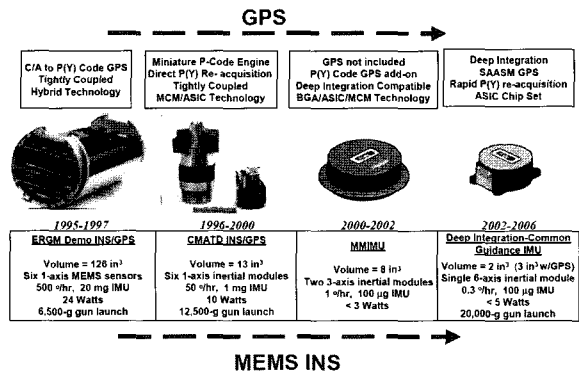


그림 5. 무기체계에서의 INS와 GPS의 기술 발전도

4. UKF를 이용한 INS/GPS 결합 시스템

INS/GPS 결합 시스템은 선형으로 가정된 시스템 오차 모델에 비선형성이 존재하거나 측정치가 비선형으로 표현되는 경우에 기존의 칼만필터와는 다른 비선형 칼만필터가 요구된다. 본 절에서는 시스템 오차 모델에 비선형성이 존재하는 운항 중 정렬(IFA : In-Flight Alignment)과 측정치가 비선형인 강결합 기법에 대한 UKF 적용 결과에 대하여 살펴본다.

먼저 비선형성이 존재하는 대표적인 경우로 수직축 자세오차가 매우 큰 경우에 수행되는 IFA 알고리즘을 들 수 있다. 이 경우에는 계산 좌표계 c와 플랫폼 좌표계 p 사이의 좌표변환 행렬을 아래와 같은 비선형 형태로 둔다[12].

$$C_c^p = \begin{bmatrix} \cos \psi_z & \sin \psi_z & -\psi_y \\ -\sin \psi_z & \cos \psi_z & \psi_x \\ \psi_y \cos \psi_z + \psi_x \sin \psi_z & -\psi_x \cos \psi_z + \psi_y \sin \psi_z & 1 \end{bmatrix}$$

여기서, ψ_x, ψ_y, ψ_z 는 자세 오차를 나타낸다.

이때 초기 수직축 자세 오차가 60[도]인 항체가 그림 6과 같은 S자 모양의 궤적을 가지고 운동을 하는 경우 UKF를 적용한 IFA와 EKF를 적용한 IFA 알고리즘의 결과는 그림 7과 같다. 그림에서 알 수 있듯이 2N+1개의 SP를 사용한 UKF의 결과가 EKF와 비교하여 매우 우수함을 알 수 있다.

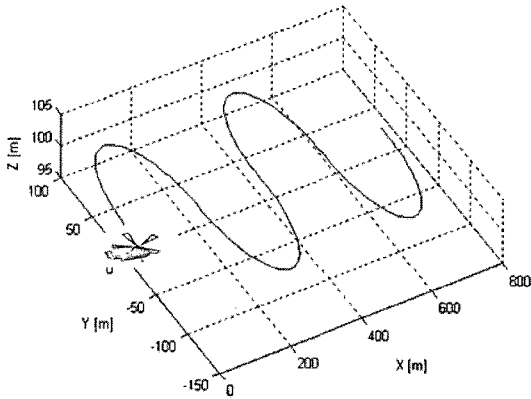
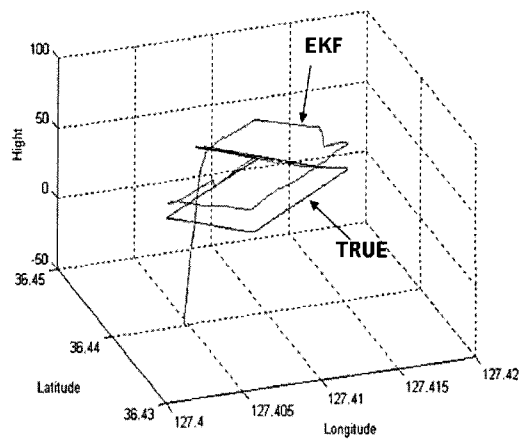


그림 6. S자 모양의 궤적 운동



(a) 앞먹임 방식의 EKF 3차원 항법 결과

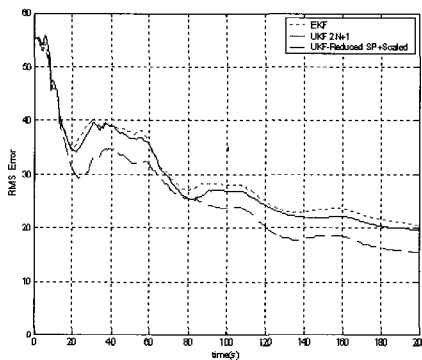
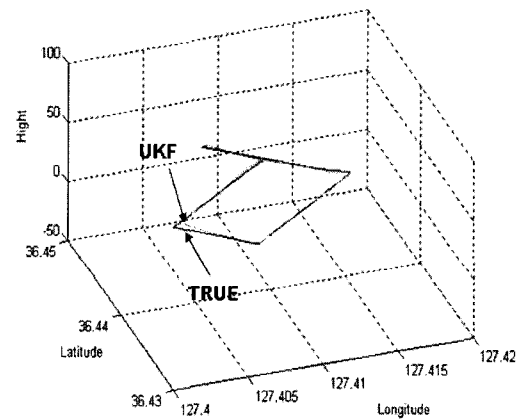


그림 7. 초기 수직축 자세오차 60[도]인 경우 EKF와 UKF 결과



(b) 앞먹임 방식의 UKF 3차원 항법 결과

다음으로 측정치 모델이 비선형인 강결합 기법에 대하여 UKF 적용 알고리즘의 성능을 시뮬레이션 한 결과는 그림 8, 9와 같다. 그림 8은 되먹임(feedback) 방식의 UKF와 EKF의 적용 결과이며 그림 9는 앞먹임(feedforward) 방식의 UKF와 EKF의 결과이다. 시뮬레이션 결과 항법 오차의 선형성이 유지되는 되먹임 방식은 EKF와 UKF의 성능이 유사하나, 앞먹임 방식과 같이 항법 오차가 발산하는 경우에는 UKF의 성능이 EKF와 비교하여 매우 우수함을 알 수 있다[6].

그림 9. 앞먹임 방식의 EKF와 UKF 결과

5. 결론

지금까지 INS/GPS 결합 항법시스템과 시스템의 성능 향상을 위하여 적용되고 있는 UKF에 대하여 살펴보았다. 현재 개발되고 있는 INS/GPS 항법시스템은 GPS 수신기의 내부 정보를 이용하기 위하여 강결합 및 심층 결합의 예에서와 같이 측정치 모델이 비선형이며 이와 함께 저가의 MEMS 관성센서로 인하여 시스템 오차 모델도 비선형성 형태를 가지게 된다. 이러한 비선형성이 존재하는 경우 UKF를 적용하면 기존의 EKF와 비교하여 우수한 성능을 가짐을 알 수 있었다. 이는 향후 INS/GPS와 함께 영상 등의 다양한 정보를 통합하여 항법시스템을 구성하는 경우에도 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

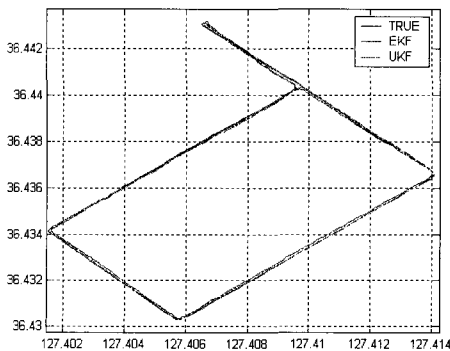


그림 8. 되먹임 방식의 EKF와 UKF 결과

참고문헌

[1] D. H. Titterton and J. L. Weston, Strapdown Inertial Navigation Technology, IEE Radar, Sonar, Navigation and Avionics Series, 1997.

[2] G. T. Schmidt, INS/GPS Technology Trends, NATO RTO Report, RTO-EN-SET-064, 2004.

[3] J. A. Farrel and M. Barth, The Global Positioning System & Inertial Navigation, McGraw-Hill, 1998.

[4] P. S. Maybeck, Stochastic Models, Estimation, and Control: Vol. 1, Academic Press, 1979.

[5] G. M. Siouris, Aerospace Avionics Systems: A Modern Synthesis, Academic Press, 1993.

[6] 김광진, 박찬국, 유명종, 박영범, "INS/GPS 강결합 기법에 대한 EKF와 UKF의 성능 비교," 제어·자동화·시스템공학 논문지, 제 12권, 제 8호, 2006년 8월

[7] 박찬국, "발사체 항법," 우주기술 단기강좌 논문집, 서울대, 2004년 7월

[8] S. Julier and J. Uhlmann, "Unscented Filtering and Nonlinear Estimation," Proceedings of IEEE, Vol. 92, No. 3, August 2004.

[9] E. A. Wan and R.V. Merwe, "The Unscented Kalman Filter," in Kalman Filtering and Neural Networks, Wiley Inter Science, 2001.

[10] 박찬국 등, 지상항법용 다중센서 오차 추정 알고리즘 개발, 연구보고서, 서울대학교, 2006년 8월

[11] R. Anderson, et. al., "Evolution of Low-Cost MEMS Inertial Systems," NATO ROT Symposium, Istanbul, Trukey, October 2002.

[12] C. G. Park, K. Kim and W. Y. Kang, "UKF-based

In-Flight Alignment using Low Cost IMU," Proceedings of AIAA Guidance, Navigation & Control Conference, Keystone, August, 2006.

..... 저자약력



〈김 광 진〉

- 1995년 광운대 제어계측공학과 학사
- 1997년 광운대 대학원 제어계측공학과 석사
- 1997년~2004년 국방과학연구소 연구원
- 2004년~현재 서울대학교 기계항공공학부 박사과정.
- 관심분야 : 관성항법시스템, INS/GPS 결합항법시스템, 비선형 필터링 등.



〈박 찬 국〉

- 1985년 서울대 제어계측공학과 학사
- 1987년 서울대 대학원 제어계측공학과 석사
- 1993년 서울대 대학원 제어계측공학과 박사
- 1994년~2002년 광운대학교 정보제어공학과 조교수/부교수
- 1998년 미국 UCLA 기계항공공학과 방문연구원
- 1994년~2003년 서울대학교 자동제어특화연구센터 책임연구원
- 2003년~현재 IEEE AES Korea Chapter Chair
- 2003년~현재 서울대학교 기계항공공학부 부교수/교수
- 관심분야 : INS/GPS 결합항법시스템, MEMS IMU 응용시스템 개발, 영상항법시스템, USN을 이용한 Ubiquitous Positioning, 필터링 기법.