

MEMS 기반 관성항법장치의 칼만 필터 설계 문제점과 해결방안 고찰

† 임정빈

† 목포해양대학교 해사대학 해상운송시스템학부 교수

요 약 : MEMS 기반 관성 센서를 이용한 항법장치를 개발하는 경우, 칼만 필터(Kalman Filter, KF) 구축 여부에 따라 그 성능이 결정된다. 특히 해상에서 이러한 MEMS 기반 관성항법 장치를 사용하는 경우에는, 육상과 달리 다양한 제약조건이 따르게 된다. KF는 선형과 비선형으로 구분되고, 비선형은 다시 확장 KF와 Unscented KF, Particle KF 등 다양한 것이 연구 개발되어 있는데, 해상에 적용하기 위해서는 이러한 다양한 필터들의 특징과 추가 요청사항 등을 사전 조사할 필요가 있다. 본 연구에서는 기존 개발된 KF를 조사하여 해상용 MEMS 기반 관성 항법장치를 개발하는 경우 필요한 필터 구성 방법을 조사하여 문제점을 살펴보고, 이 문제 해결을 위한 방안을 검토하였다.

핵심용어 : 해상, 선박, MEMS, 관성센서, 관성항법장치, 칼만필터

1. 서 론

최근 반도체 형태의 MEMS(Micro-Electro-Mechanical Systems) 기술을 이용한 자이로스코프(gyroscope)와 가속도계(accelerometer)가 관성측정장치(Inertial Measurement Unit, IMU)에 적용되어 항공, 로봇, 국방 등에 활용되고 있다. 한편 기존 기계식/광진기식 자이로스코프나 가속도계가 수천만 원대 입에 반하여 MEMS 관성센서는 수 만원에서 수십만 원대 정도로 대단히 저렴하고, 향후 반도체 기술 발전으로 정밀도의 급속한 향상이 전망되어 다양한 분야에서의 연구가 진행되고 있다. 일반적으로 MEMS 형태의 관성센서는 GPS와 결합시켜서 오차를 상호 보완적으로 감소시키는 방식으로 개발되고 있다(Walid Abdel-Hamid, 2005; Chris Goodall etc., 2005).

한편, 국내에서도 관련 연구가 간헐적으로 보고되고 있는데, 박 등(2004)은 완벽한 자유 gyroscope를 가정한 위치 결정 방법을 보고한 바 있고, 이 등(2010)은 모바일 하버 계류안정 장치에 GPS/DGPS를 적용 개념을 보고한 바 있다. 따라서 국내에서도 MEMS 기반 IMU의 개발이 필요한 실정이다.

본 연구의 최종 목적은 MEMS 형태의 소형 저가 관성센서를 사용하여 소형선박용 항법장치를 개발하여 최근 증가하고 있는 소형 요트나 소형 작업선 등에 적용하기 위한 것이다. 본 논문에서는 관성항법장치 모델을 구성하는데 가장 중요한 칼만 필터(Kalman Filter)에 대해서 살펴본다.

2. 칼만 필터

2.1 칼만 필터의 개요

칼만 필터(Kalman Filter, KF)는 R. E. Kalman(1960)이 이산형 데이터의 선형 필터링 문제를 재귀적 방법으로 제안한 것

으로, 선박에서는 자동항법장치(autopilot)에 적용되고, 항공기나 미사일, 잠수함, 함포 제어 등에 널리 적용되고 있다.

한편, 선형 KF는 선형의 차분방정식에 의해 지배되는 이산 시간제어 과정에서 상태를 추정하기 위한 것으로 비선형인 경우에는 문제가 발생한다. 이러한 비선형 문제를 해결하기 위한 것이 확장형 KF(Extended KF, EKF)인데, 평균과 공분산행렬을 선형으로 처리하기 위하여 야코비안(Jacobian) 행렬을 사용하기 때문에 계산이 복잡하다. 이에 대한 해결방안으로 최근 개발된 것이 UKF(Unscented Kalman Filter)인데, UKF는 시그마 점(Sigma Point, SP)들의 집합을 비선형 모델을 이용하여 변환하는 Unscented 변환을 사용하는 것이 특징이다(Yafei Ren etc., 2010; Brown Robert Grover etc., 1997).

2.2 선형 칼만필터

선형 KF에 관한 공식은 식(1)과 식(2)로 나타낸 시간갱신(time update)과 식(3)부터 식(5)까지에 나타낸 측정갱신(measurement update)으로 구별된다. 식(1)은 스텝 k 에서의 시스템의 상태 \mathbf{x}_k 을 추정하고, 식(2)는 오차의 공분산 행렬 \mathbf{P}_k 을 추정하며, 식(3)은 스텝 k 에서의 칼만 이득 \mathbf{K}_k 를 계산하고, 식(4)는 \mathbf{z}_k 를 측정하여 \mathbf{x}_k 를 갱신하며, 식(5)는 오차의 공분산 행렬 \mathbf{P}_k 를 갱신하기 위한 것이다(Greg Welch etc., 2001; Jouni Hartikainen, 2008)

$$\hat{\mathbf{x}}_k^- = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}_{k-1} + \mathbf{B}\mathbf{u}_k \quad (1)$$

$$\mathbf{P}_k^- = \mathbf{A}\mathbf{P}_{k-1}\mathbf{A}^T + \mathbf{Q} \quad (2)$$

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}^T (\mathbf{H}\mathbf{P}_k^- \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} \quad (3)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{x}}_k^- + \mathbf{K}_k (\mathbf{z}_k - \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}_k^-) \quad (4)$$

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}) \mathbf{P}_k^- \quad (5)$$

2.3 확장 칼만 필터

EKF는 선형 KF와 유사한데, 선형화를 위하여 야코비안 (Jacobian) 행렬을 사용하는 것이 특징이다. 선형 KF에 대한 식(1)부터 식(5)에 대응하는 것이 다음 식(6)부터 식(10)까지이다 (Greg Welch etc., 2001; Jouni Hartikainen etc., 2008)

$$\hat{\mathbf{x}}_k^- = f(\hat{\mathbf{x}}_{k-1}, \mathbf{u}_{k-1}, 0) \quad (6)$$

$$\mathbf{P}_k^- = \mathbf{A}_k \mathbf{P}_{k-1} \mathbf{A}_k^T + \mathbf{W}_k \mathbf{Q}_{k-1} \mathbf{W}_k^T \quad (7)$$

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}_k^T (\mathbf{H}_k \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}_k^T + \mathbf{V}_k \mathbf{R}_k \mathbf{V}_k^T)^{-1} \quad (8)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{x}}_k^- + \mathbf{K}_k (\mathbf{z}_k - h(\hat{\mathbf{x}}_k^-, 0)) \quad (9)$$

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \mathbf{P}_k^- \quad (10)$$

여기서, \mathbf{A} , \mathbf{W} , \mathbf{H} , \mathbf{V} : 야코비안 행렬

2.4 Unscented 칼만 필터

최근 저비용의 관성항법장치 구현을 위하여 UKF가 개발되었는데, UKF는 계산이 간단하다. Naserel-Sheimy 등(2006)과 Jouni Hartikainen 등(2008)은 이러한 선형 KF, EKF 및 UKF를 비교 및 평가한 바 있는데, 다음 식(11)부터 식(15)까지이다.

$$\mathbf{P}_{vv} = \sum_{i=0}^{p-1} \mathbf{w}_i^c [\Delta \mathbf{Z}_{i,k}^-] [\Delta \mathbf{Z}_{i,k}^-]^T + \mathbf{R}_k \quad (11)$$

$$\mathbf{P}_{xz} = \sum_{i=0}^{p-1} \mathbf{w}_i^c [\chi'_{i,k} - \hat{\mathbf{x}}_k^-] [\Delta \mathbf{Z}_{i,k}^-]^T \quad (12)$$

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{xz} \mathbf{P}_{vv}^{-1} \quad (13)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_k^+ = \hat{\mathbf{x}}_k^- + \mathbf{K}_k (\mathbf{z}_k - \mathbf{z}'_k^-) \quad (14)$$

$$\mathbf{P}_k^+ = \mathbf{P}_k^- - \mathbf{K}_k \mathbf{P}_{vv} \mathbf{K}_k^T \quad (15)$$

여기서, \mathbf{z}_k 는 측정, \mathbf{R}_k 는 \mathbf{z}_k 에 대한 잡음 공분산 행렬, \mathbf{K}_k 는 칼만 이득에 대한 행렬.

3. 결 론

본 논문에서는 저가의 MEMS 관성센서를 이용한 소형 선박용 항법장치를 개발하는 경우 적용할 칼만 필터(KF)에 관해서 살펴보았다. KF는 선형 KF와 EKF, UKF 등이 개발되어 있고, 저가면서 성능이 우수한 MEMS 관성항법장치를 개발하기 위해서는 UKF가 적합한 것으로 조사되었다.

현재 MEMS 기반 3축 gyroscope와 3축 accelerometer를 이용한 관성항법 시스템을 제작 중에 있으며, 여기에 UKF를 적용하여 소형이면서 저가이고, 저전력의 소형 선박용 항법장치를 개발할 예정이다.

후 기

이 논문은 2011년도 국토해양부지정 호남지역 Sea Grant 사업단 연구개발사업 과제 지원에 의해 수행된 연구임.

참 고 문 헌

- [1] 박석주, 정태권(2004), "자유자이로를 이용한 위치결정에 관한 기초연구," 한국항해항만학회 제28권 제8호, pp.653~667
- [2] 이윤석, 정태권, 정창현, 김세원(2010), "모바일하버 선박의 계류안정화시스템 및 의장장치 개념설계," 한국항해항만학회 제34권 제5호, pp.311~317
- [3] Brown Robert Grover and Hwang Patrick Y. C.(1997), *Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering*, 3rd Edition, pp.94~96
- [4] Chris Goodall, Naser El-Sheimy and Kai-Wei Chiang(2005), "The Development of a GPS/MEMS INS Integrated System Utilizing a Hybrid Processing Architecture," Proceedings of the 18th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation(ION GNSS 2005), pp.1444~1455
- [5] Greg Welch and Gary Bishop(2001), "An Introduction to the Kalman Filter", SIGGRAPH 2001 Course8, University of North Carolina at Chapel Hill, Department of Computer Science, (URL: <http://www.cs.unc.edu>)
- [6] Jouni Hartikainen and Simo Särkkä(2008), *Optimal filtering with Kalman filters and smoothers - a Manual for Matlab toolbox EKF/UKF*, Department of Biomedical Engineering and Computational Science, Helsinki University of Technology, Finland, Version1.2
- [7] Naserel-Sheimy, Eun-Hwan Shin and Xiaojinlu(2006), *Kalman Filter Face-Off - Extended vs. Unscented Kalman Filters for Integrated GPS and MEMS Inertial*, InsideGNSS March 2006, pp.48~54, (URL: www.insidegnss.com)
- [8] R. E. Kalman(1960), "A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems," Trans. of the ASME - Journal of Basic Engineering, 82 (Series D): pp.35~45
- [9] Walid Abdel-Hamid(2005): *Accuracy Enhancement of Integrated MEMS-IMU/GPS Systems for Land Vehicular Navigation Applications*, UCGE Reports Number 20207, Thesis for PhD. Department of Geomatics Eng., Calgary, Alberta, Canada
- [10] Yafei Ren and Xizhen Ke(2010), "Particle Filter Data Fusion Enhancements for MEMS-IMU/GPS," Intelligent Information Management, pp.417~421