

다중 센서 항법 시스템에서의 센서 측정 실패 감지 시스템에 관한 연구

Failure Detection of Multi-Sensor Navigation System

오 재 석(한국과학기술원), 이 판 목(한국기계연구원), 오 준 호(한국과학기술원)
Jea-Seok Ohu(KAIST), Pan-Mook Lee(KIMM), Jun-Ho Oh(KAIST)

ABSTRACT

This study is devoted to developing navigation filter for detecting sensor failure in multi-sensor navigation system. In multi-sensor navigation system, Kalman filter is generally used to fuse data of each sensors. Sensor failure is fatal in case that the sensor is used as external measurement of Kalman filter therefore detection and recovery of sensor failure is one of the important feature of navigation filter. Generally each sensors have its specific feature in measuring navigational information. Fuzzy theory is proposed to detect external sensor failure and provide valid external measurement to Kalman filter avoiding filter divergence and instability. This idea is applied to Autonomous Underwater Vehicle(AUV) which has two navigation sensors i.e self contained inertial sensor and acoustic external sensor. 2 dimensional simulation result shows acceptable failure detection and recovery.

Key Words : navigation filter(항법필터), AUV(자율무인잠수정), failure detection(센서 측정 실패 감지)
kalman filter(칼만필터), fuzzy theory(퍼지 이론)

1. 서 론

일반적으로 항법 시스템의 구성에서 센서의 특징과 시스템의 안정성을 고려하여 한개 이상의 항법센서를 사용하는 다중 센서 항법 시스템이 널리 사용된다. 이러한 다중 센서 항법 장치의 경우 각 항법 센서의 항법 정보를 통합하는 방법에 따라 최종적으로 얻는 항법 정보의 정확도와 안정성이 결정 된다. 대부분의 다중 센서 항법 장치는 한개의 내부 항법 장치를 기본적으로 갖고 그 외에 한개 이상의 외부 또는 내부 보조 센서를 사용하게 된다. 각각의 센서는 서로 다른 동적 특성, 측정 범위, 주파수 대역, 정밀도, sampling time 등을 갖는다. 그러므로 이러한 특성들에 따라서 센서의 혼합 알고리즘이 결정 되어야만 만족할만 한 결과를 얻을 수 있다.

주 항법 장치로서 많이 사용되는 관성 항법 센서를 이용한 항법 센서 유닛은 외부의 영향에 민감하지 않고 자체적으로 내장 가능한 특징을 가지고 있다. 반면 관성 항법 장치는 매우 정밀하며 고가인 관성 센서를 요구한다.

저정밀도를 갖는 관성 센서를 이용하여 관성 항법 장치를 제작하는 경우 보조 항법 장치를 이용하면 정밀한 측정을 할 수 있으며 관성 항법 장치와 외부 보조 항법 장치의 혼합은 다중 센서 항법 장치의 대표적인 예이다. 저가의 관성 항법 장치는 일반적으로 개개의 관성 센서들의 정렬오차 (alignment error), 바이어스 드리프트 (bias drift) 등을 수반하게 되므로 시간이 지남에 따라 이와 같은 오차들이 누적되어 발산하게 된다. 이러한 오차의 누적이 없는 외부 보조 항법 장치를 이용하는 경우에는 외적인 요인으로 인하여 항법 정보를 얻을 수 없는 경우가 발생하며 비교적 긴 sampling time을 갖게 되므로 연속적인 항법 정보를 얻을 수 없는 단점이 있다. 이러한 상호 단점을 보완하기 위하여 칼만 필터를 이용한 센서 혼합 알고리즘이 주로 사용 된다. 칼만 필터를 사용하는 경우 불연속적이며 비교적 발산하지 않는 외부 항법 정보를 이용하여 관성 항법 장치를 보정하여 관성 항법 장치가 발산하는 것을 막아준다.⁽¹⁾⁽²⁾

칼만 필터의 측정치로 외부 항법 장치의 항법 정보가 주로 사용되며 이는 저정밀도의 관성 센서를 이용하여 정밀한 위치 측정을 가능하게 해준다. 그러나 칼만 필터의 측정치 즉 외부 항법 장치의 항법 정보가 불연속적이며 외부의 영향을 받는 경우에는 잘못된 항법 정보를 바탕으로 내부 관성 항법 장치가 보정되므로 오히려 오차가 증가되거나 예측하지 못하는 항법 정보를 출력하게 된다. 이로 인해 외부 항법 장치의 항법 정보가 획득 불가능 하거나 외부적인 영향으로 인하여 잘못 된 값을 얻었을때 이를 판단하고 보정하여 칼만 필터의 측정치에 예측하지 못한 오차가 포함되는 것을 막아주는 필터의 기능이 필수적으로 요구된다. 이러한 예측하지 못하는 오차는 외부 보조 항법 장치의 센서가 외부적인 요인에 의하여 측정에 실패하는 경우에 발생한다. 따라서 항법 장치에 포함된 각각의 항법 센서에 대한 설계자의 지식과 외부 요인에 대한 분석을 바탕으로 측정 실패가 발생 하였을 경우의 처리 방향을 결정해야 한다.⁽³⁾

본 연구는 이러한 센서 측정 실패의 감지와 보정에 센서에 대한 설계자의 지식과 외부 요인에 대한 분석 결과가 반영 될 수 있도록 퍼지 이론을 도입하여 이러한 측정 실패로 인한 항법 필터의 오동작을 막을 수 있는 시스템을 제안하였다. 저정밀도의 관성 항법 장치와 외부 항법 장치를 이용한 다중 센서 항법 장치를 바탕으로 제안된 이 시스템은 측정값을 미리 퍼지 필터를 통해 얼마만큼의 신뢰도를 갖는 정보인지 판단 한 뒤에 칼만 필터의 외부 측정치로 사용하므로 센서 측정 실패가 항법 필터에 영향을 주지 않는다.

센서 측정 실패 감지 시스템 (FDIR : Failure Detection, Isolation and Reconfiguration) 을 포함한 칼만 필터를 내부 관성 항법 장치와 외부 음향 항법 장치를 갖는 자율 무인 잠수정 (AUV:Autonomous Underwater Vehicle)의 항법 시스템에 적용 하였으며 이에 대한 2차원 모의 실험을 하였다. 원 궤적에 대한 모의 실험의 결과는 센서 측정 실패 감지 시스템이 포함되지 않은 경우 항법 필터의 순간적인 발산을 피할 수

없었으나 본 연구에서 제안한 필터를 사용하는 경우 80% 이상의 오차를 보정 할 수 있었다.

2. 항법 필터의 설계

2-1.문제 설정 및 접근 방법

저가의 관성 센서를 이용한 관성 항법 장치의 경우에는 개개의 관성 센서들의 오차값 누적을 피하기 위해 외부 항법 장치를 이용한다. 관성 항법 장치의 누적 오차는 제한되어 있지 않은 반면 외부항법 장치의 경우에는 오차가 있더라도 누적되지는 않기 때문이다. 따라서 단주기의 항법 정보는 관성 항법 장치로 부터 얻는 반면 장주기의 항법 정보는 외부 항법 장치로 부터 얻어 관성 항법 장치를 보정해 주는 방식이 주로 이용되고 있다. 비관성 외부 보조 항법 장치로는 위치 정보를 제공하는 GPS(Global Positioning System), OMEGA, LORAN, TACAN 등이 있으며 속도 정보를 제공하는 도플러 레이더 등이 있다. 일반적으로 사용되는 칼만 필터는 Fig.1과 같다.⁽⁴⁾

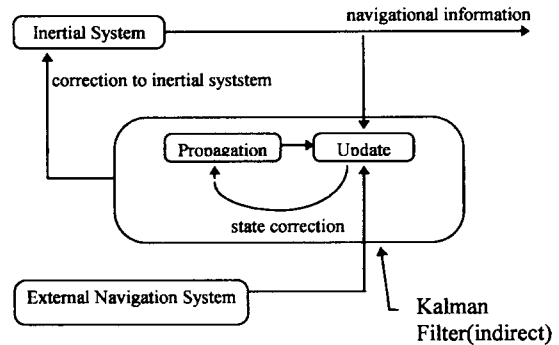


Fig.1 Kalman filter for multi sensor navigation system

Fig.1에서 보는 바와 같이 외부 항법 장치의 정보는 바로 칼만 필터를 보정 하여 주는데에 쓰여지므로 외부 항법 장치의 예상치 못한 오동작 즉 항법 센서 장치의 자체 오차가 아닌 측정 실패에 의한 오차가 발생 하였을 경우 항법 필터는 불안정 하게 된다. 따라서 센서의 측정

실패 유무를 판단하고 이를 격리하는 것(FDIR)은 매우 중요하다.

퍼지이론을 이용하여 측정 실패 여부를 판단 할 경우, 시스템의 차수나 비선형성, 시변특성에 영향을 받는 기존의 방법과는 달리 적절한 퍼지 입력 집합을 선택하고 이에 설계자의 지식을 포함 시킴으로서 실시간으로 더 나은 성능을 얻을 수 있다. 또한 기존의 확률 적인 방법이 soft failure에 대해서 민감하지 못한 반면 퍼지 이론을 이용한 FDIR 시스템은 퍼지이론의 특성상 hard failure와 soft failure에 대해 모두 민감하다.

2-2 퍼지 항법 필터의 구성 및 특징

일반적으로 FDIR 시스템을 설계하는 데에 있어서 고려해야 할 중요한 사항들은 다음과 같이 요약 될 수 있다

- ① soft failure에 대한 민감성
- ② 측정값에 포함된 failure의 가관측성
- ③ failure를 감지 시간
- ④ failure의 실시간 회복 능력

현재까지 개발된 FDIR의 방법으로는 stochastic한 방법인 Generalized likelihood method, Maximum-likelihood method 등이 있다. 그러나 이와 같은 방법들은 시스템의 차수가 높은 경우, 비선형 시스템 또는 시변인 시스템에 대해서는 시스템의 근사화와 선형화에서 오는 모델링의 부정확성이 증가 하여 FDIR 시스템으로 사용하기 어려워 진다는 단점이 있다. 이 외에 신경회로 망을 이용한 FDIR 시스템도 제안되고 있다.⁽³⁾⁽⁴⁾

본 연구에서 제안한 퍼지 이론을 이용한 센서 측정 실패 시스템은 Fig.2에서 보는 바와 같이 시스템의 특성에 따라 퍼지 입력 함수를 결정하고 이를 퍼지화 시켜 퍼지 추론을 통해 외부 입력 값의 측정 실패 발생 유무를 결정 한 뒤, 이 결정의 비퍼지화된 값을 바탕으로 외부 측정치와 내부 측정치 간에 가중치를 실시간으로 결정하여 이 가중 평균치를 외부 측정 값으로 함으로서 측정 실패로 인한 외부 항법 장치로부터 필터의 발산을 유발하는 입력값이 입력되는 것을 막고

필터를 안정화 시키면서도 만족할 만한 성능을 얻을 수 있다.

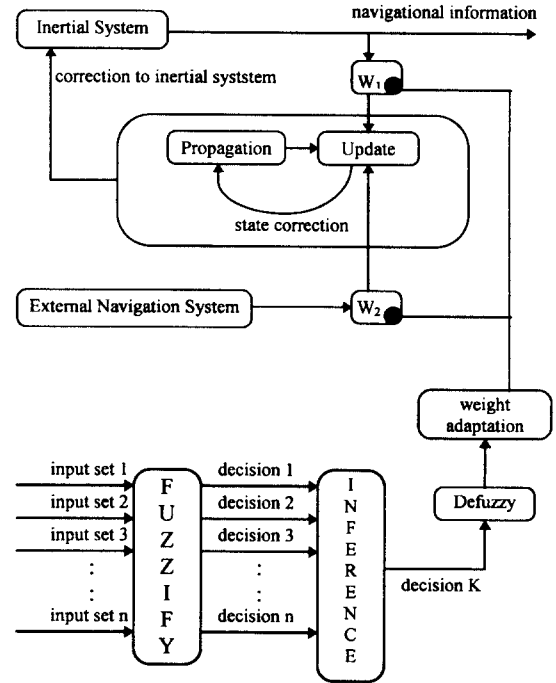


Fig.2 Kalman Filter with Fuzzy FDIR system

3. 모의 실험

3-1. AUV 항법 시스템

자율 무인 잠수정(AUV)은 수상 모선으로 부터 무선으로 명령을 받아 주어진 임무를 수행 할 수 있도록 설계된 수중 선체이다. AUV의 항법 시스템은 Fig.3 같이 구성된다.

① MRU(Motion Reference Unit):저정밀도를 가진 3개의 가속도계과 3개의 자이로스코프 그리고 자기 나침반으로 이루어진 센서 유니트로서 동체 좌표계에서의 피치각, 롤각, 요각을 측정할 수 있으며 가속도계의 바이어스 드리프트로 인하여 상대적인 위치 측정은 어렵다.

② SSBL 위치 추적 시스템:모선에서 수중의 물체에 대한 상대적인 거리와 방위각 그리고 침하각을 측정할 수 있는 음향 장비이다

③ 속도계:잠수정과 잠수정을 둘러싼 액체 사이의 상대적인 속도를 측정한다. 가속과 감속

구간에서의 동적 특성은 좋지 않으나 정적인 구간에서는 만족할만한 특성을 갖는다.

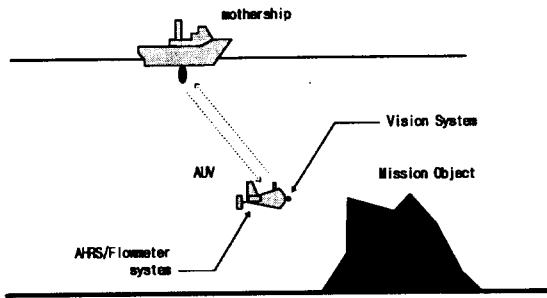


Fig.3 Navigation System of AUV

AUV의 항법 장치는 MRU와 속도계를 이용한 추측 항법으로 내부적인 자체 항법 장치를 운용하고 외부 항법 장치로 SSBL 위치 추적 시스템을 이용하여 칼만 필터를 설계한다. 추측 항법 장치에 비해 SSBL을 통해서 얻는 음향파의 속도 등으로 인해 상대적으로 약 10배의 샘플링 타임을 갖는다. SSBL은 음향 장치의 특성상 지형 지물의 영향으로 인한 반사파와 공진 등의 영향으로 가용한 항법 정보를 측정할 수 없다. 이러한 경우 FDIR 시스템을 사용하지 않으면 칼만 필터는 발산 하게 된다.⁽⁵⁾

3-2. 모의 실험 결과

MRU, SSBL 및 속도계를 각각의 특성에 따라 모델링 하고 이를 바탕으로 칼만 필터를 Fig.1과 같은 방법으로 설계 하였다. SSBL에서 측정되는 항법 정보를 바탕으로 3개의 퍼지 입력 집합을 선정 하였다.

- ① SSBL의 측정치를 바탕으로 계산된 방위각과 MRU에서 측정된 평균 방위각의 차이의 RMS.
- ② 속도계의 평균 전진 방향 속력과 SSBL로 측정된 동체 좌표계에서의 평균 속력의 차이의 RMS.
- ③ t번째에서 측정된 속도계의 속도와 방위각을 이용해 예측한 AUV의 t+1번째 위치와 SSBL의 t+1번째 위치 정보의 차이의 RMS.

이러한 세가지의 퍼지 입력 집합을 퍼지화 하여 그 결과를 Mamdani의 MAX-MIN방법으로 추론 하여 센서 측정 실패 유무를 판단 하였다. 이를 바탕으로 최대 평균법을 사용하여 비퍼지화 하였고 그 값을 센서 측정 실패의 정도로 판단하여 가중치 결정에 사용하였다.⁽⁶⁾

이러한 FDIR 시스템을 적용하지 않은 결과와 적용한 결과가 Fig.4, Fig.5, Fig.6, Fig.7 에 원궤적에 대하여 나타나 있다.

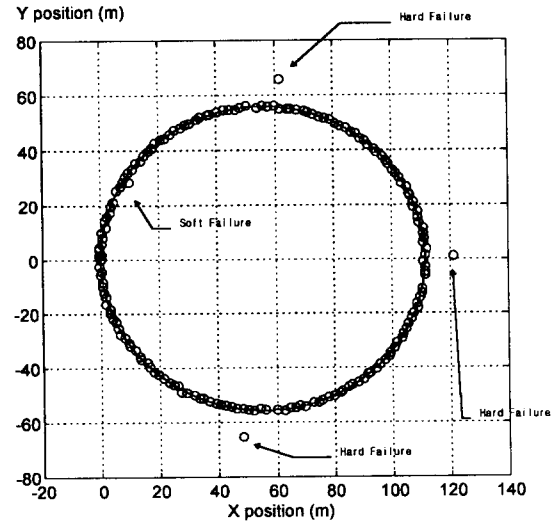


Fig.4 Position Data of SSBL (sampling time:1sec)

Fig.4 에서 보는 바와 같이 SSBL은 1초마다 한번씩의 오차 1.0m 내외의 위치 정보를 측정하나 4번의 측정 실패가 발생한다. 이러한 정보를 그대로 항법 필터에 입력할 경우 Fig.5 에서 보는 바와 같이 측정 실패가 발생한 부분에서는 순간적인 발산이 일어나는 것을 볼 수 있다. 이러한 외부 측정치를 퍼지 FDIR 시스템을 이용하여 보정해줄 경우 Fig.3에서의 가중치값 W_1 은 Fig.6과 같이 결정되며 W_1 과 W_2 와의 합을 1로 하여 가중 평균 값을 구하여 이를 칼만 필터에 입력하면 Fig.7과 같이 순간적인 발산을 80% 이상 보정 한 결과를 얻을 수 있다.

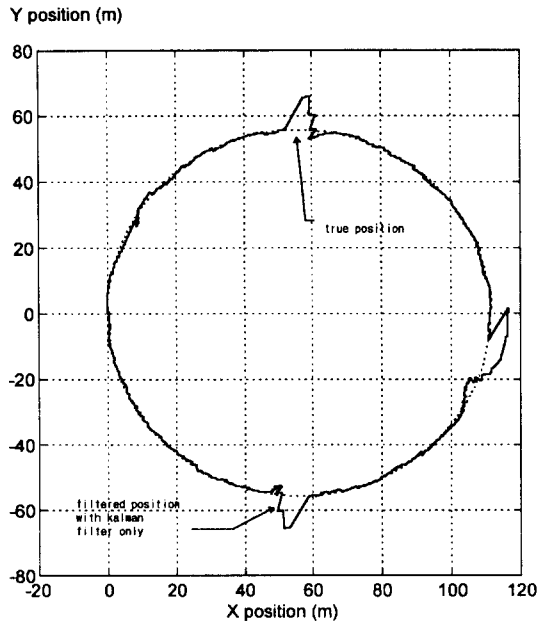


Fig.5 Position Data Filtered with Kalman Filter only

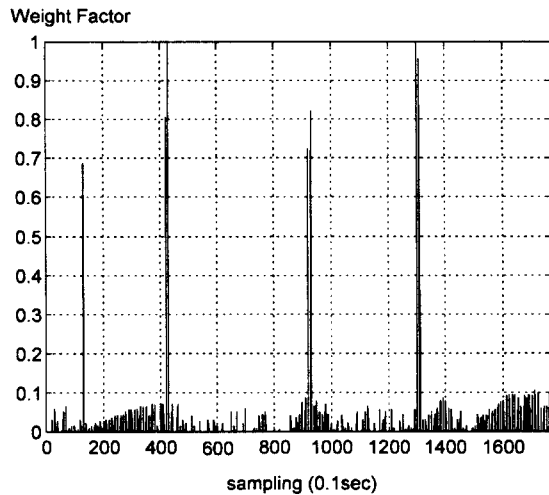


Fig.6 Weight Factor determined by Fuzzy FDIR System

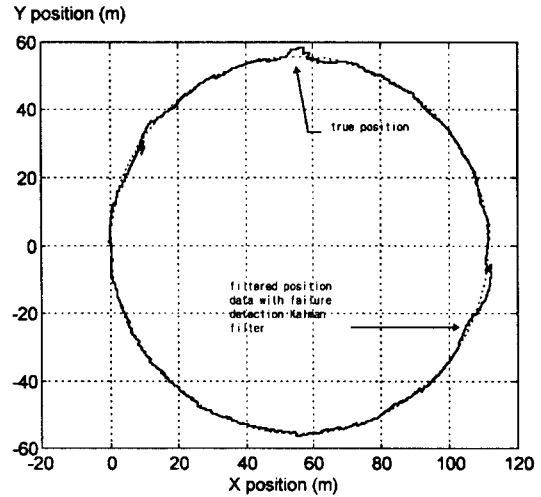


Fig.7 Filtered Position Data with Fuzzy FDIR system

4. 결 론

일반적으로 다중 센서 항법 시스템에 사용되는 칼만 필터의 경우 외부 측정치의 정보가 믿을만 하지 못할 때 항법 필터로서의 역할을 해낼 수 없다. 특히 외부 측정치가 관성 항법 장치와 같은 오차가 누적 되는 내부 항법 장치의 값을 보정 해 주는 경우에는 이러한 측정 실패로 인한 영향은 치명적이다.

본 연구에서는 퍼지 이론을 이용한 FDIR 시스템을 제안하고 이를 AUV의 항법 시스템에 적용하여 모의 실험을 하였다. 원래적에 측정 실패가 발생 한 경우 퍼지 이론을 이용한 FDIR 시스템은 모델의 차수나 비선형성에 관계 없이 이를 효과적으로 보정하는 것을 알 수 있었다. 이러한 결과는 퍼지 입력 집합의 선택에 크게 좌우되며 이 과정에서 설계자의 지식이 크게 작용 함을 알 수 있었다.

참고 문헌

1. P.S. Maybeck, *Stochastic Models, Estimation and Control:vol1*, Academic press Inc, 1979
2. G.M. Siouris, *Aerospace Avionics System : Modern Synthesis*, Academic Press Inc, 1993
3. Thomas K. , *Decentralized Filtering and Redundancy Management for Multisensor Navigation. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol.AES-23, No.1, Jan. 1987
4. 오재석, 자율 무인 잠수정 항법 시스템 개발, 공학석사학위논문, 한국과학기술원, 1997