creative commons

COMMONS DEED

저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

[UCI]I804:24011-200000266910

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2018년 8월

碩士學位 論文

무인이동체의 항법을 위한 확장칼만필터의 개선

조선대학교 대학원

제어계측공학과

송 경 섭

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

무인이동체의 항법을 위한 확장칼만필터의 개선

Improvement of Extended Kalman Filter for Navigation of an Unmanned Vehicle

2018년 8월 24일

조선대학교 대학원

제어계측공학 과

송 경 섭

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

무인이동체의 항법을 위한 확장칼만필터의 개성

지도교수 고 낙 용

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2018년 6월

조선대학교 대학원

제어계측공학 과

송 경 섭

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

송경섭의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 최한수 (인)

위 원 조선대학교 교수 이진이 (인)

위 원 조선대학교 교수 고낙용 (인)

2018년 5월

조선대학교 대학원

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

목차

제1장 서론
제1절 연구 배경 및 목적 ····· 1
제2절 논문의 구성 ····· 3

제2장 지자기 편차 추정
제1절 편차추정을 위한 상태천이와 측정 모델 유도 ···· 4
제2절 무향 칼만 필터를 사용하여 편차 추정 ····· 5

제3장 Invariant Extended Kalman filter(IEKF)
제1절 자세와 속도 추정을 위한 IEKF방법 ····· 9
제2절 위치, 자세, 속도 추정을 위한 IEKF방법 ····· 14

제4장 실험 및 결과
제1절 실험 환경 및 조건 ····· 19
제2절 UKF방법을 이용한 추정 및 지자기 편차 결과 ·· 22
제3절 IEKF방법을 이용한 자세, 속도추정 ····· 27
제4절 IEKF방법을 이용한 자세, 위치, 속도추정 ····· 34
제5장 결론 및 향후 계획 ····· 44
참고문헌 ····· 45
후기 ····· 47

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 목차

표 2.1 측정된 지자기 편차에 대한 UKF알고리즘 ····· 6
표 3.1 자세와 속도를 추정에 사용되는 IEKF방법의 의사코드 ····· 12
표 3.2 위치를 추가한 IEKF방법의 의사코드 ····· 18
표 4.1 AHRS 측정 규격 ····· 19
표 4.2 DVL 측정 규격 ····· 20
표 4.3 GPS 규격 ····· 21
표 4.4 FCU 규격 ····· 21
표 4.5 측정된 지자기 편차의 평균 ····· 23
표 4.6 WMM과 측정된 지자기의 비교 및 방향 지자기의 편차 ····· 24
표 4.7 위치 추정 오차의 비교 ····· 26
표 4.8 칼만이득에 대한 평균, 절대값의 평균, 표준편차, 표준편차 대 평균의 비율, peak to peak 32
표 4.9 칼만이득에 대한 평균, 절대값의 평균, 표준편차, 표준편차 대 평균의 비율, peak to peak 42

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

그림 목차

그림 2.1 UUV실험에 대한 연구과정 ····· 3
그림 2.2 UAV실험에 대한 연구과정 ····· 3
그림 3.1 자세와 속도 추정에 대한 상태값, 입력값, 측정값 각 요소의 의미 ····· 9
그림 3.2 자세, 위치, 속도 추정에 대한 상태값, 입력값, 측정값 각 요소의 의미 ····· 14
그림 4.1 로봇 항법 실험 및 궤도 실험용 탱크 ····· 19
그림 4.2 무인기 실험 경로 및 규격 ····· 20
그림 4.3 각 축에서 측정된 지자기와 추정된 편차 ···· 22
그림 4.4 시간에 따른 추정된 편차 ····· 23
그림 4.5 자세와 위치 추정에 사용한 보정된 측정 지자기 ····· 25
그림 4.6 보정된 지자기를 사용한 결과와 보정되지 않은 지자기를 이용한 위치추정 결과 ····· 25
그림 4.7 IEKF방법과 PX4를 통해 추정된 자세 결과 ·· 27
그림 4.8 IEKF방법과 PX4를 통해 추정된 속도 결과 ·· 28
그림 4.9 IEKF방법과 PX4를 통해 추정된 각속도의 편차 결과 ····· 29
그림 4.10 IEKF방법과 PX4를 통해 추정된 Scale factor 결과 ····· 30
그림 4.11 IEKF방법에서 사용된 칼만이득 quaternion x

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

와 지자기의 관계 ····· 30
그림 4.12 PX4에서 사용된 칼만이득 속도 z와 지자기의 관계 ····· 31
그림 4.13 IEKF방법에서 사용된 칼만이득 각속도 y의 편차와 지자기의 관계 ····· 31
그림 4.14 IEKF방법과 PX4를 통해 추정된 위치 비교 34
그림 4.15 IEKF방법과 PX4를 통해 추정된 속도 ····· 35
그림 4.16 IEKF방법과 PX4를 통해 추정된 자세 ····· 36
그림 4.17 IEKF방법과 PX4를 통해 추정된 각속도 편차 ····· 37
그림 4.18 IEKF방법과 PX4를 통해 추정된 Scale factor, 고도의 편차 ····· 38
그림 4.19 IEKF방법에서 사용된 measurement innovation ····· 39
그림 4.20 PX4과 IEKF에서 사용되는 쿼터니언 y와 지자기의 칼만이득 ····· 40
그림 4.21 PX4과 IEKF에서 사용되는 속도 x와 지자기의 칼만이득 ····· 40
그림 4.22 PX4과 IEKF에서 사용되는 위치 y와 지자기의 칼만이득 ····· 41
그림 4.23 PX4과 IEKF에서 사용되는 각속도 x의 편차와 지자기의 칼만이득 ····· 41

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

ABSTRACT

Improvement of Extended Kalman Filter for an Unmanned Vehicle

Song Gyeongsub
Advisor : Prof. Ko, Nak Yong, Ph.D.
Department of Control and Instrumentation Eng.,
Graduate School of Chosun University

This research uses Invariant Extended Kalman Filter(IEKF) for estimation of attitude and velocity of an unmanned aerial vehicle(UAV). the invariant EKF uses the measurement of acceleration, angular rate, magnetic field, and velocity. Invariant EKF is more stable than usual EKF and the value of Kalman gain is kept constant with time admitting instantaneous fluctuation. Experiments using fixed wing AUV and multicopter fight show the performance of the estimation by the invariant EKF.

This paper describes an unscented Kalman filter approach to estimate the bias in magnetic field measurements. A microelectromechanical systems attitude heading reference system (MEMS AHRS) was used to measure the magnetic field, together with the acceleration and angular rate. A magnetic field is usually used for yaw detection, while the acceleration serves to detect the roll and pitch. Magnetic field measurements are vulnerable to distortion due to hard-iron effect and soft-iron effect. The bias in the measurement accounts for the hard-iron effect, and this paper focuses on an approach to estimate this bias. The proposed method is compared with other methods through experiments that implement the navigation of an underwater robot using an AHRS and Doppler velocity log. The results verify that the compensation of the bias by the proposed method improves the navigation performance more than or comparable to the compensation by other methods.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 1장 서론

제 1절 연구 배경 및 목적

자율 주행 로봇은 주어진 작업 목적에 맞게 주변 환경을 인식하여 경로를 결정하고 이동하는 목표를 가진다. 이러한 목표를 수행하기 위해서 주행(navigation)기능이 중요시된다. navigation은 한 장소에서 다른 장소로의 이동 과정을 감시하고 제어하는 것을 의미한다. 이러한 navigation은 다양한 단계를 적용하여 구현되며, 구현에 대한 단계는 다음과 같다. 첫 번째로 위치 추정(localization)을 통해 이동체의 현재 위치를 파악한다. 제어(control)를 통한 목표 지점까지 어떻게 갈지를 스스로 판단한다. 지도 작성(map building)은 목표 지점까지의 지도를 만든다. 계획(planning)을 통해 목표지점까지의 경로를 이동체가 스스로 판단하여 만든다. 마지막으로 정해진 경로로 주행 도중 발생하는 장애물을 회피(obstacle avoidance)하여 목표지점까지 도달하게 된다. 본 논문은 이러한 자율주행에서 필요로 하는 navigation 중 위치와 자세 추정을 구현한다.

위치추정(localization)은 센서를 통해 추정하는 방법이 있다. 하지만, 이러한 방법은 측정되는 센서가 외부환경에 의해 측정이 불가능해질 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 위치 센서를 사용하지 않고 기체의 자세를 이용하여 위치를 추정하게 된다. 이러한 이유로 정밀한 자세 추정은 위치추정에서 중요한 과제로 대두되고 있다.

본 논문은 무인이동체 중 무인잠수정(Unmanned Underwater Vehicle, UUV), 무인항공기(Unmaned Aerial Vehicle, UAV)의 위치 추정의 구현을 목표로 한다.

첫 번째로는 무인잠수정 실험을 통한 위치 추정에 대한 내용이다.

수중에서의 위치 추정은 수상과 달리 특징점(landmark 또는 feature)이 제한적으로 사용된다. 이러한 이유로 수중에서 위치 추정 시, 특징점을 부분적으로 이용하며 속도와 자세를 사용하는 추측항법(Dead reckoning)이 가장 많이 사용된다[1]. 추측항법을 이용한 위치 추정은 자세 정보의 영향을 크게 받기 때문에 자세 추정 방법이 중요한 요소로 작용된다[2].

기존 자세를 추정에 대한 실험은 z축의 회전(yaw)의 정확성이 문제가 되어왔다. 이러한 문제점은 yaw값을 추정할 때 사용되는 센서의 측정값이 지자기 물리량 외 다양한 요소들이 같이 측정된다. 그중에서 편차 요소는 기체와 외부에서 지자기의 영향을 받아 측정되는 현상이다. 기준의 지자기는 참값에 편차가 추가되어 측정된다. 편차가 포함된 지자기는 자세 중 z축의 회전(yaw)값을 보정할 때 사용된다. 그러므로 좀 더 정확한 자세추정을 위하여 측정된 지자기에서 편차를 보정하여 사용

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

하여야 한다[3]. 측정값으로 사용한 지자기의 오차가 적어지면 추정하는 yaw값에 대한 오차가 줄어 들게 된다. 즉, 편차 보정을 통하여 좋은 성능을 가진 자세 추정이 가능하게 되고, 이는 위치 추정의 성능을 향상시키는데 도움이 된다[4].

사용하는 센서들 중 자세와 방향의 관계 시스템(Attitude and heading reference system, AHRS)에서 지자기 센서는 가벼운 무게, 높은 신뢰성, 낮은 전력을 요구한다. 그러나 지자기 센서가 다양한 현상들에 의해 지구지자기에 오차가 포함한 상태로 측정이 된다[5]. 원인으로는 다음과 같다. 내부에서 생성된 자기장에 의해 지자기를 왜곡하는 hard iron 효과, 외부에서 자성이 띄고 있는 물체에 의해 측정된 지가지가 왜곡되는 soft iron 효과, 각 축마다 측정되는 자기장의 양이 실제 측정량과 다를 경우를 환산계수오차(scale factor error), 센서에 기재된 좌표가 실제 측정된 자기자의 좌표가 다를 때 발생한 측정 축 정렬오차(miss alignment)가 있다. 본 연구에서는 그중에서 가장 큰 원인으로 작용하는 hard iron 효과에 의해 발생하는 편차를 추정한 다음, 편차가 보정되지 않은 실험과 비교하여 보정에 따른 자세 추정의 정밀성을 확인한다.

기존의 편차 추정 방법은 TWOSTEP, Centering, 최소자승법, 확장 칼만 필터(Extended Kalman Filter)들이 있다[6]. TWOSTEP방법은 측정의 가중치 평균을 기반으로 중심 편차 추정을 먼저 계산함으로써 편차를 결정한다[7]. 본 연구에서는 기존의 방법 대신 새로운 방법을 제시한다. 무향 칼만 필터(Unscented Kalman Filter, UKF)를 사용하여 편차를 추정한다.

두 번째로는 무인잠수정과 다른 무인항공기의 실험에 위치 추정을 적용한다.

최근 드론의 관심이 증가함에 따라 멀티콥터 비행체에 대한 관심도가 증가되었다. 그에 따라 이동형 플랫폼의 정확한 위치 추정이 중요한 임무가 되었다[8]. 위치 추정 방법으로는 GPS센서가 있지만 심해, 공중에서의 기후 조건에 따라 GPS센서의 추정이 어려운 상황이 생긴다. 이러한 점을 고려한 방법으로 무인기의 자세를 추정한 뒤 deadreckoning방법을 사용한다[9]. 정밀한 자세 추정 시 위치추정 역시 정밀한 추정이 가능해지며, 자세 추정이 중요한 과제가 된다. 본 논문은 최근 이슈가 되는 Invariant Extended Kalman Filter(IEKF)방법을 성공적으로 구현하는 것을 목표로 한다. IEKF방법 사용하여 자세, 위치, 속도를 추정한다. 이때 추정의 성공을 유무를 확인할 수 있는 위치, 속도, 자세의 참값이 없다. 이러한 점을 고려하여 IEKF 방법의 특징으로는 추정 과정에서 사용된 Kalman gain과 mesurement innovation이 일정한 값에 수렴해지는 특성을 가지고 있다. 이러한 특성은 동일한 실험을 이용하여 구현한 ecl EKF방법의 Kalman gain과 mesurement innovation를 비교하여 보다 수렴성이 보장됨을 보여준다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2절 논문의 구성

본 논문의 2장에서는 지자기 편차 추정하는 방법에 대해서 서술한다. 3장에서는 IEKF방법을 사용하여 자세와 속도를 추정하여 무인이동체의 위치를 추정한다. 4장 실제 무인이동체를 이용한 실험을 바탕으로 2,3장에서 다룬 방법들을 적용한다. 그림 2.1, 그림 2.2은 각 실험에 대한 연구과정이다.

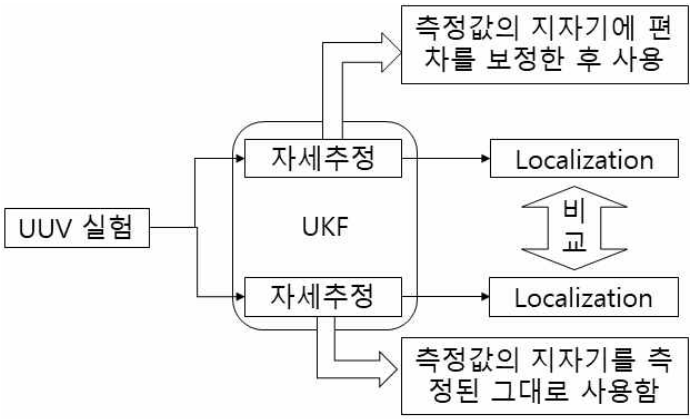


그림 2.1 UUV실험에 대한 연구과정

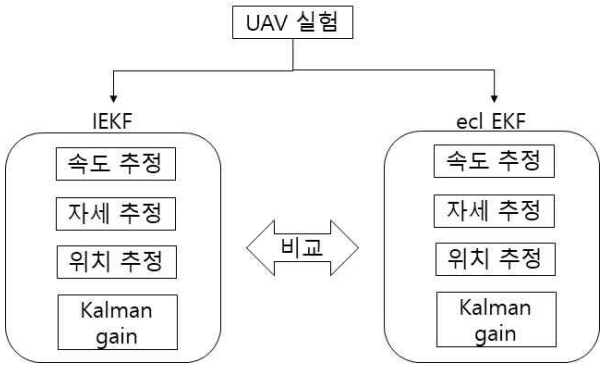


그림 2.2 UAV실험에 대한 연구과정

5장에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

제2장 지자기 편차 추정

제1절 편차추정을 위한 상태천이와 측정 모델 유도

본 절은 추정을 위한 도구들 중에서 상태천이 모델과 측정모델에 대한 공식을 유도한다[10]. 본 논문은 벡터에 대한 표기를 볼드(bold)체로 기재한다. $\boldsymbol{m}$은 센서에 의해 측정된 지자기 벡터이며 $\boldsymbol{m}(t)=[m_x(t)\ m_y(t)\ m_z(t)]^T$로 표기된다. 본 논문에서는 특별히 혼동의 염려가 없는 경우 시간에 관한 parameter t를 생략하여 사용한다. $\boldsymbol{b}$는 지자기 측정값의 편차를 나타내며 $\boldsymbol{b}(t)=[b_x(t)\ b_y(t)\ b_z(t)]^T$로 표기된다. $\boldsymbol{w}$는 센서에 의해 측정된 회전 각속도 벡터이며 $\boldsymbol{w}(t)=[w_x(t)\ w_y(t)\ w_z(t)]^T$로 표기된다.

$$\boldsymbol{m}(t)=\widetilde{\boldsymbol{m}}(t)+\boldsymbol{b} \tag{2.1}$$

$$\boldsymbol{m}_0=R(t)(\widetilde{\boldsymbol{m}}(t)+\boldsymbol{b}) \tag{2.2}$$

식 2.1에서 센서에 의해 측정된 지자기 벡터 값 $\boldsymbol{m}(t)$은 참값 $\widetilde{\boldsymbol{m}}(t)$에 편차 $\boldsymbol{b}$가 더해져 나타난다. 이는 센서좌표계에서 사용되는 식이며 식 2.2는 고정좌표계에서 나타내어진 지자기 벡터의 참값 $\boldsymbol{m}_0$을 구하는 과정이다. $\boldsymbol{m}_0$는 위치의 변화에 따라 고유 지구자기장 벡터의 크기를 의미한다. 여기서 $R(t)$은 센서좌표계에서 고정좌표계로의 회전행렬이다. 이를 통해 센서에 의해 측정된 지자기 벡터에서 편차를 빼준 결과에 회전행렬을 곱해줌으로써 고정좌표계에서 나타내어진 지자기 벡터의 참값을 구한다.

식 2.2를 미분하면 식 2.3이 된다.

$$0=\dot{R}(t)(\boldsymbol{m}(t)-\boldsymbol{b})+R(t)\dot{\boldsymbol{m}}(t) \tag{2.3}$$

회전행렬을 미분한 $\dot{R}(t)$은 식 (2.4)처럼 표현된다.

$$\dot{R}(t)=R(t)S(\boldsymbol{w}(t)) \tag{2.4}$$

여기서 $S(\boldsymbol{w})$은 반대칭 행렬(Skew symmetric matrix)이며 식 2.5처럼 측정된 회전 각속도 $\boldsymbol{w}$요소를 사용하여 구성된 행렬이다.

$$S(w)=\begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix} \tag{2.5}$$

식 2.4를 사용하면, 식 2.3을 식 2.6으로 변경된다.

$$\dot{m}(t)=-S(w)\times(m(t)-b) \tag{2.6}$$

편차는 시간에 따라 변하지 않는다고 가정하여 $\boldsymbol{b}(t)=\boldsymbol{b}$로 표기한다. 식 2.6을 이

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

용하면 식 2.7과 같은 상태천이 모델이 구해진다.

$$\underbrace{\begin{bmatrix}\dot{\boldsymbol{m}}\\ \dot{\boldsymbol{b}}\end{bmatrix}}_{x_t} = \underbrace{\begin{bmatrix}-S(\boldsymbol{w}) & S(\boldsymbol{w})\\ 0 & 0\end{bmatrix}}_{A} \underbrace{\begin{bmatrix}\boldsymbol{m}\\ \boldsymbol{b}\end{bmatrix}}_{x_{t-1}} \tag{2.7}$$

본 연구에서는 지자기를 측정값으로 사용하며 지자기 편차를 추정하므로, 측정변수 z는 $z=m$이 된다. 따라서 측정모델은 식 2.8과 같이 구해진다.

$$\boldsymbol{z} = \underbrace{[I \;\; 0]}_{H} \begin{bmatrix}\boldsymbol{m}\\ \boldsymbol{b}\end{bmatrix} \tag{2.8}$$

최종적으로 상태천이 모델을 식 2.9로 표현하며 측정모델은 식 2.10으로 표현된다.

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t) = A(t)\boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{\nu_1}(t) \qquad \boldsymbol{\nu_1}(t) \sim N(0, Q) \tag{2.9}$$

$$\boldsymbol{z} = Hx + \boldsymbol{\nu_2}(t) \qquad \boldsymbol{\nu_2}(t) \sim N(0, R) \tag{2.10}$$

제2절 무향 칼만 필터를 사용하여 편차 추정

본 절은 무향 칼만 필터를 통해 편차를 추정하는 방법에 대해 서술한다[11]. 무향 칼만 필터를 통해 편차 추정하는 알고리즘에서 추정 상태변수는 $\boldsymbol{x} = [m_x\, m_y\, m_z\, b_x\, b_y\, b_z]^T$로 지자기 센서 정보와 지자기에 대한 편차로 구성된다. 추정 상태변수에서 $\boldsymbol{m} = [m_x\, m_y\, m_z]^T$에 대한 초기 값은 AHRS에서 측정된 지자기를 사용한다. $\boldsymbol{w}$는 로봇의 회전 각속도를 나타내며 $\boldsymbol{w} = [w_x\, w_y\, w_z]^T$이다. $\boldsymbol{z}$는 측정된 지자기 벡터인 $\boldsymbol{z} = [m_x\, m_y\, m_z]^T$이다. 표 1에 무향 칼만 필터를 이용한 편차 추정 방법을 의사코드로 나타내었다. 무향 칼만 필터는 t시각의 상태변수와 그에 대한 오차공분산을 출력하는 방법으로서, $t-1$시각의 상태변수와 그에 대한 오차공분산, t시각의 회전각속도 벡터와 그 시각의 측정값을 이용한다.

표 2.1 측정된 지자기 편차에 대한 UKF 알고리즘

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

UKF bias estimation Algorithm $(\mu_{t-1}, \Sigma_{t-1}, u_t, z_t)$

1. $\mu^a_{t-1} = (\mu^T_{t-1}\ (0\ 0)^T\ (0\ 0)^T)^T$
2. $\Sigma^a_{t-1} = \begin{pmatrix} \Sigma_{t-1} & 0 & 0 \\ 0 & M_t & 0 \\ 0 & 0 & Q_t \end{pmatrix}$
3. $\chi^a_{t-1} = (\mu^a_{t-1}\ \mu^a_{t-1} + \gamma\sqrt{\Sigma^a_{t-1}}\ \mu^a_{t-1} - \gamma\sqrt{\Sigma^a_{t-1}})$
4. $\overline{\chi}^x_t = g(u_t + \chi^u_t, \chi^x_{t-1})$
5. $\overline{\mu}_t = \sum_{i=0}^{2L} q_i^{(j)} \overline{\chi}^x_{i,t}$
6. $\overline{\Sigma}_t = \sum_{i=0}^{2L} q_i^{(c)} (\overline{\chi}^x_{i,t} - \overline{\mu}_t)(\overline{\chi}^x_{i,t} - \overline{\mu}_t)^T$
7. $\overline{Z}_t = h(\overline{\chi}^x_t) + \chi^z_t$
8. $\hat{z}_t = \sum_{i=0}^{2L} q_i^{(j)} \overline{Z}_{i,t}$
9. $\Sigma^{z,z}_t = \sum_{i=0}^{2L} q_t^{(c)} (\overline{Z}_{i,t} - \hat{z}_t)(\overline{Z}_{i,t} - \hat{z}_t)^T$
10. $\Sigma^{x,z}_t = \sum_{i=0}^{2L} q_i^{(c)} (\overline{\chi}^x_{i,t} - \overline{\mu}_t)(\overline{Z}_{i,t} - \hat{z}_t)^T$
11. $K_t = \Sigma^{x,z}_t \left(\Sigma^{z,z}_t\right)^{-1}$
12. $\mu_t = \overline{\mu}_t + K_t(z_t - \hat{z}_t)$
13. $\Sigma_t = \overline{\Sigma}_t - K_t \Sigma^{z,z}_t K^T_t$

$return(\mu_t, \Sigma_t)$

1번 줄은 시그마 포인트(sigma point)의 초기 요소들의 구성을 결정하는 단계이다. μ^T_{t-1}는 시각 $t-1$의 추정 상태변수를 뜻한다. 2번 줄의 Σ^a_{t-1}는 추정된 상태변수 μ_{t-1}에 대한 오차 공분산 Σ_{t-1}과 예측과정에 대한 오차 공분산 M_t, 그리고 측정값에 대한 오차 공분산 Q_t로 이루어져있다. 회전각속도 w는 평균값이 0이고 공분산이 M_t인 가우시안 확률변수$(w \sim N(0, M_t))$이며, 측정값 z는 평균값이 0이고 공분산이 Q_t인 가우시안 확률변수$(z \sim N(0, Q_t))$이다.

3번 줄은 시그마 포인트를 생성하는 단계이다. μ^a_{t-1}의 요소 개수를 n이라고 하면 $2n-1$개 시그마 포인트가 생성된다. 1열의 μ^a_{t-1}는 시그마 포인트 초기 정보이다. $\sqrt{\Sigma^a_{t-1}}$는 2번 줄에서 구한 Σ^a_{t-1}을 Cholesky 분해한 결과이다. γ는 다음 식을 통해 구해진다[12].

$$\lambda = \alpha^2(n+\kappa) - n \tag{2.11}$$

$$\gamma = \sqrt{n+\lambda} \tag{2.12}$$

식 2.11에서 α는 $10^{-4} \sim 1$까지 범위의 수이며 κ는 0에 근접한 수를 사용한다.

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

α, κ는 시그마 포인트의 범위를 조절하는데 사용된다. 3번 줄을 통해 μ_{t-1}를 기준으로 분포된 시그마 포인트가 생성된다.

4~6번 줄까지는 상태에 대한 시그마 포인트들을 구하고 그들의 평균과 평균에 대한 오차공분산을 구하는 과정이다. 4번 줄은 모션모델을 적용하여 상태에 대한 시그마 포인트들을 구하는 과정이다. 여기서 u_t는 회전각속도의 벡터를 의미한다. χ_t^u는 3번 줄에서 생성된 회전각속도에 대한 시그마 포인트를 뜻한다. 식 2.9인 상태천이 모델을 4번 줄에 적용한다.

$$\overline{\chi}_t^x = g(u_t + \chi_t^u, \chi_{t-1}^x)$$
$$\overline{\chi}_t^x = A(t)\chi_{t-1}^x \cdot \Delta t + \chi_{t-1}^x \tag{2.13}$$

식 2.13에서 χ_{t-1}^x는 시그마 포인트에서 추정 상태변수만으로 구성된다. Δt는 t 시각과 $t-1$시각의 차이를 뜻한다. 식 2.14에서 $A(t)$는 식 2.5에서 사용한 반대칭 행렬 $S(w)$로 구성된 행렬이며 $S(w)$는 회전 각속도 벡터 u_t로 구성된다.

$$A(t) = \begin{bmatrix} -S(w) & S(w) \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{2.14}$$

5번 줄은 4번 줄에서 예측된 상태에 대한 시그마 포인트들의 평균을 구하는 과정이다. 예측된 상태에 대한 시그마 포인트에 가중치$\left(q_i^{(j)}\right)$을 통해 평균을 구한다.

$$q_0^{(j)} = \frac{\lambda}{n+\lambda} \tag{2.15}$$

$$q_i^{(j)} = \frac{1}{2(n+\lambda)} \quad (i = 1, 2, 3, \cdots, 2n) \tag{2.16}$$

6번 줄은 5번 줄에서 구한 $\overline{\mu}_t$에 대한 오차공분산을 구한다. 오차 공분산을 구할 때 사용되는 가중치$\left(q_i^{(c)}\right)$는 다음과 같다.

$$q_0^{(c)} = \frac{\lambda}{n+\lambda} + 1 - \alpha^2 + \beta \quad (\beta \cong 2) \tag{2.17}$$

$$q_i^{(c)} = q_i^{(j)} \quad (i = 1, 2, 3, \cdots, 2n) \tag{2.18}$$

식 2.17에서 β는 2에 근접한 값을 사용한다. 식 2.18에서 $q_i^{(c)}$과 $q_i^{(j)}$는 $i = 1, 2, 3, \cdots, 2n$에 대하여 동일하다. 본 논문에서 추정 상태변수 μ_{t-1}^T의 요소는 6개이며 $\overline{\Sigma}_t$는 6×6 크기의 행렬이 된다.

7~9번 줄은 측정값에 대한 시그마 포인트들을 구하고 그들의 평균과 평균에 대한 오차공분산을 구하는 과정이다. 7번 줄은 측정 모델을 사용하여 측정값에 대한 시그마 포인트를 구하는 단계이다.

$$\overline{Z}_t = h(\overline{\chi}_t^x) + \chi_t^z$$

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

$$\overline{Z}_t = H\overline{\chi}_t^x + \chi_t^z \qquad \because H = [I \;\; 0] \tag{2.19}$$

식 2.19은 측정모델인 식 2.10을 적용한 결과이다. 여기서 $H=[I \;\; 0]$임으로 예측된 상태에 대한 시그마 포인트 $\overline{\chi}_t^x$에서 지자기 벡터만을 사용하게 되어 측정값에 대한 시그마 포인트들이 생성된다. 8번 줄은 측정값에 대한 시그마 포인트들의 평균을 구한다. 9번 줄은 8번 줄의 측정값에 대한 시그마 포인트의 평균에 대한 오차 공분산을 구한다. 8,9줄 모두 5,6줄과 동일한 방법으로 구해지며 측정값으로 사용되는 지자기 벡터는 3개이므로 $\Sigma_t^{z,z}$는 3×3 행렬이다.

10번 줄은 추정한 상태변수와 측정값의 시그마 포인트에 대한 오차 공분산을 구하는 과정이다. $\overline{\Sigma}_t$는 6×6 행렬이며 $\Sigma_t^{z,z}$는 3×3 행렬이므로 연산의 결과는 $\Sigma_t^{x,z}$는 6×3 행렬이 된다. 11번 줄은 칼만 이득을 구하는 과정이다.

12번 줄은 시각 t에서의 상태변수 μ_t을 구하는 과정이다. 예측한 상태변수에 칼만 이득을 사용하여 보정함으로써 최종적으로 시각 t에서의 상태가 추정된다. 이 과정에서 구한 결과 μ_t는 다음 시각의 추정 알고리즘에서 μ_{t-1}로 사용된다. 13번 줄은 시각 t에서의 $\sum_t$를 구하는 과정이다. 오차 공분산 $\sum_t$는 다음 시각의 추정 알고리즘에서 $\sum_{t-1}$로 사용된다.

추가적으로 성능 비교를 위해 추정한 편차를 보정한 지자기 벡터와 편차를 보정하지 않는 지자기 벡터를 사용하여 자세를 추정한다. AHRS센서 측정값을 사용하며, 추정 방법으로는 무향 칼만 필터를 사용한다. 추정 상태변수는 $[\phi, \theta, \psi]^T$이며 측정 정보는 가속도 $a=[a_x, a_y, a_z]^T$와 편차가 보정된 지자기 $\overline{m}=[\overline{m}_x, \overline{m}_y, \overline{m}_z]^T$를 사용한다. 마지막으로 추정한 자세 정보와 DVL(Doppler velocity log)센서 정보를 사용하여 추측항법을 사용하여 위치를 추정한다.

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

제3장 Invariant Extended Kalman filter(IEKF)

제1절 자세와 속도 추정을 위한 IEKF방법

IEKF방법은 기존의 EKF방법에서 파생된 방법이다. EKF방법에서 오일러 각을 이용하여 자세를 추정할 경우, Pitch부분에서 허수가 발생되는 경우가 존재한다. 해결방안으로 사원수(quaternion)를 이용하여 자세를 추정한다. 하지만, EKF방법을 통해 추정된 quaternion은 추가적으로 표준화(unit norm)과정을 걸친다.

MEKF(Multiplicative Extended Kalman Filter)방법은 추정되는 quaternion이 표준화가 유지된 상태로 추정된다. 추가적으로 level 그림ht(수평 비행)일 경우, 칼만 이득이 일정한 값에 수렴해진 결과를 가진다. 하지만, 이러한 결과는 각속도의 불변량(invariant quantity)이 0에 근사 값이며, 가속도의 불변량이 중력과 반대가 되어야한다. 즉, 고도의 변화가 없으며, 자세 또한 변화가 없는 상태에서만 칼만 이득이 일정한 값에 수렴해진다[13].

IEKF방법은 MEKF방법의 특징과 동일하며, 추가적으로 MEKF방법의 문제점을 해결한 방법이다. IEKF방법은 수평 비행뿐만 아니라 모든 영구궤도에서도 일정한 칼만 이득을 가지는 방법이다[14]. IEKF방법은 LEKF(Left Invariant Extended Kalman Filter)방법[15], RIEKF(Left Invariant Extended Kalman Filter)방법으로 나누어진다. 두 방법의 차이점은 칼만 이득이 일정한 값에 수렴하는 조건의 가지 수가 다르다. 본 논문 칼만 이득이 일정한 값에 수렴해지는 조건의 가지 수가 적은 RIEKF방법을 사용한다.

그림 3.1은 사용되는 state와 입력값, 측정값에 대한 세부요소를 나열한 그림이다.

- state

$$\boldsymbol{q}\begin{cases} q_x : \textit{estimation quaternion } x \\ q_y : \textit{estimation quaternion } y \\ q_z : \textit{estimation quaternion } z \end{cases}$$

$$\mathbf{v}\begin{cases} v_x : \textit{estimation velocity } x \\ v_y : \textit{estimation velocity } y \\ v_z : \textit{estimation velocity } z \end{cases}$$

$$\boldsymbol{\omega_b}\begin{cases} \omega_{b_x} : \textit{estimation angular rate } x \\ \omega_{b_y} : \textit{estimation angular rate } y \\ \omega_{b_z} : \textit{estimation angular rate } z \end{cases}$$

$$a_s : \textit{estimation scale factor}$$

- input

$$\boldsymbol{\omega_m}\begin{cases} \omega_{m_x} : \textit{input sensor angular rate } x \\ \omega_{m_y} : \textit{input sensor angular rate } y \\ \omega_{m_z} : \textit{input sensor angular rate } z \end{cases}$$

$$\boldsymbol{a_m}\begin{cases} a_{m_x} : \textit{input sensor accelerometer } x \\ a_{m_y} : \textit{input sensor accelerometer } y \\ a_{m_z} : \textit{input sensor accelerometer } z \end{cases}$$

- measurement

$$\boldsymbol{z_v}\begin{cases} z_{v_x} : \textit{measurement velocity } x \\ z_{v_y} : \textit{measurement velocity } y \\ z_{v_z} : \textit{measurement velocity } z \end{cases}$$

$$\boldsymbol{z_B}\begin{cases} z_{B_x} : \textit{measurement magnetic field } x \\ z_{B_y} : \textit{measurement magnetic field } y \\ z_{B_z} : \textit{measurement magnetic field } z \end{cases}$$

그림 3.1 자세와 속도 추정에 대한 상태값, 입력값, 측정값 각 요소의 의미

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

IEKF방법에서 사용되는 process model이며 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\dot{\boldsymbol{q}} &= \tfrac{1}{2}\boldsymbol{q} * (\boldsymbol{\omega_m} - \boldsymbol{\omega_b}) \\ \dot{\mathbf{v}} &= g + \tfrac{1}{a_s}\boldsymbol{q} * \boldsymbol{a_m} * \boldsymbol{q}^{-1} \\ \dot{\boldsymbol{\omega}}_{\boldsymbol{b}} &= 0 \\ \dot{a}_s &= 0\end{aligned} \tag{3.1}$$

식 3.1에서 첫 번째 식은 자세의 변화량에 대한 process model이다. 물리적으로 각속도는 자세의 변화량에 영향을 준다. 각속도는 입력값이며, 추정되는 편차를 통해 보정한 후 사용된다. 다음으로 속도의 변화량에 대한 process model이다. 물리적으로 중력과 가속도는 속도의 변화량에 영향을 준다. 가속도는 로봇좌표계에서 측정된 입력값이다. 이러한 가속도를 월드좌표계로 변경하여 사용하게 된다. 다음으로는 각속도 편차, scale factor의 변화량에 대한 process model이다. 두 식은 물리적으로 영향을 받는 요소가 없다.

다음은 IEKF방법에서 사용되는 measurement model이며 다음과 같다.

$$\boldsymbol{z}_{\mathbf{v}} = \mathbf{v} \tag{3.2}$$

$$\boldsymbol{z}_{\boldsymbol{B}} = \boldsymbol{q}^{-1} * \boldsymbol{B} * \boldsymbol{q} \tag{3.3}$$

식 3.2는 속도에 대한 measurement model이며, 추정된 속도를 사용한다. 식 3.3은 지자기에 대한 measurement model이다. B는 WMM(Wold Magnetic Model)[16]에서 실험 장소의 좌표에 대한 지구자기장이며, 월드 좌표계에서 측정된 값을 로봇좌표계로 변경하여 사용된다.

다음으로는 앞에서 설명한 process model과 measurement model를 IEKF방법에 적용한 알고리즘이다. 식 3.4은 IEKF방법에서 추정하는 state에 대한 변화량을 구하는 공식이다.

$$\begin{aligned}\dot{\hat{\boldsymbol{q}}} &= \tfrac{1}{2}\hat{\boldsymbol{q}}_{t-1} * (\boldsymbol{\omega_m} - \hat{\boldsymbol{\omega}}_{\boldsymbol{b}_{t-1}}) + \boldsymbol{K_q}\boldsymbol{E} * \hat{\boldsymbol{q}}_{t-1} \\ \dot{\hat{\mathbf{v}}} &= g + \tfrac{1}{\hat{a}_{s_{t-1}}}\hat{\boldsymbol{q}}_{t-1} * \boldsymbol{a_m} * (\hat{\boldsymbol{q}}_{t-1})^{-1} + \boldsymbol{K}_{\mathbf{v}}\boldsymbol{E} \\ \dot{\hat{\boldsymbol{\omega}}}_{\boldsymbol{b}} &= (\hat{\boldsymbol{q}}_{t-1})^{-1} * \boldsymbol{K_\omega}\boldsymbol{E} * \hat{\boldsymbol{q}}_{t-1} \\ \dot{\hat{a}}_s &= \hat{a}_{s_{t-1}}\boldsymbol{K}_a\boldsymbol{E}\end{aligned} \tag{3.4}$$

식 3.4에서의 첫 번째 식은 자세의 변화량을 구하는 식이다. 자세는 각속도와 물리적으로 연관이 있다. 이러한 점을 고려하여 입력값으로 사용되는 angular rate에 추정하는 angular rate의 편차를 보정한다. 보정된 각속도와 이전시각의 쿼터니언을 연산하여 현 시각의 변화량을 구한다. 다음으로는 선속도의 변화량을 구하는 식이다. 선속도는 가속도와 물리적으로 연관이 있다. 이러한 점을 고려하여 입력값으로 사용되는 accelerometer를 이전 시각의 추정된 자세와 연산하여 월드좌표계에서 로봇좌표계로 변경한다. 변경된 가속도에 중력을 더한 다음 보정함으로써 현 시각의 변화량을 구한다. 다음으로는 각속도의 편차의 변화량을 구하는 식이다. 각속도의

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

편차는 무인기에서 측정된 센서를 기준으로 발생하므로 로봇좌표계에서 측정된 편차이다. 이러한 점을 고려하여 로봇좌표계에서 월드좌표계로 변경해준다. 마지막으로 가속도에 대한 scale factor의 변화량을 구하는 식이다. 이전 시각에 추정된 scale factor에 보정함으로써 현 시각의 변화량을 구한다.

다음 식 3.5 ~ 식 3.7은 IEKF방법에서 measurement innovation이다. 추후에 state을 보정할 때 사용되며, 칼만이득과 같이 사용된다.

$$\boldsymbol{E}_{\mathbf{v}} = \hat{\mathbf{v}}_{t-1} - \boldsymbol{z}_{\mathbf{v}} \tag{3.5}$$

$$\boldsymbol{E}_B = \boldsymbol{B} - \hat{\boldsymbol{q}} * \boldsymbol{z}_B * \hat{\boldsymbol{q}}^{-1} \tag{3.6}$$

$$\boldsymbol{E} = [\boldsymbol{E}_{\mathbf{v}}\ \boldsymbol{E}_B] \tag{3.7}$$

식 3.5은 속도에 대한 measurement innovation이다. 이전 시각에 추정된 속도에 측정된 속도의 차이를 구한다. 식 3.6은 지자기에 대한 measurement innovation이다. 측정된 지자기를 로봇좌표계에서 월드좌표계로 변경하여 사용하며, 이때 사용되는 rotation에 추정된 자세를 사용한다. 월드좌표계로 변경된 지자기를 WMM와의 차이를 구한다. 식 3.7은 식 3.5, 식 3.6까지의 결과 모두를 state의 변화량 구할 때 사용되는 E matrix로 사용된다.

$$\dot{\boldsymbol{P}} = \boldsymbol{AP} + \boldsymbol{PA}^T + \boldsymbol{MM}^T - \boldsymbol{PC}^T(\boldsymbol{NN}^T)^{-1}\boldsymbol{CP} \tag{3.8}$$

식 3.8은 추정된 state에 대한 오차공분산의 변화량을 구하는 식이다. 각 요소 다음 식을 통해 추가적으로 설명한다.

$$\hat{\boldsymbol{I}}_{\boldsymbol{\omega}} = \hat{\boldsymbol{q}} * (\boldsymbol{\omega}_{\boldsymbol{m}} - \hat{\boldsymbol{\omega}}_{\boldsymbol{b}}) * \hat{\boldsymbol{q}}^{-1} \tag{3.9}$$

$$\hat{\boldsymbol{I}}_{\boldsymbol{a}} = \frac{1}{\hat{a}_s}\hat{\boldsymbol{q}} * \boldsymbol{a}_{\boldsymbol{m}} * \hat{\boldsymbol{q}}^{-1} \tag{3.10}$$

식 3.9은 측정된 각속도에 편차를 보정한 다음 로봇좌표계에서 월드좌표계로 변경한다. 월드좌표계로 변경된 각속도는 state 변화량을 구할 때 입력값으로 사용된다. 식 3.10은 측정된 가속도를 월드좌표계로 변경한다. 변경된 가속도에 scale factor를 보정하여 사용된다. 보정된 가속도는 state 변화량을 구할 때 입력값으로 사용된다. 식 3.9, 식 3.10은 A matrix에 사용된다.

$$\boldsymbol{A} = \begin{pmatrix} 0_{33} & 0_{33} & 0_{33} & -\frac{1}{2}\boldsymbol{I}_3 \\ -2\hat{\boldsymbol{I}}_{\boldsymbol{a}\times} & 0_{33} & 0_{33} & -\hat{\boldsymbol{I}}_{\boldsymbol{a}} \\ 0_{33} & 0_{33} & \hat{\boldsymbol{I}}_{\boldsymbol{\omega}\times} & 0_{31} \\ 0_{31} & 0_{31} & 0_{31} & 0_{31} \end{pmatrix} \tag{3.11}$$

식 3.11은 EKF방법에서 선형화된 process model의 역할을 한다. 즉, EKF방법에서 state error 시간 변화율과 동일한 역할을 하며, 미분된 state의 변화량을 구할 때 기울기에 사용된다.

$$\boldsymbol{C} = \begin{pmatrix} 0_{33} & \boldsymbol{I}_3 & 0_{33} & 0_{31} \\ 2\boldsymbol{B}_{\times} & 0_{33} & 0_{33} & 0_{31} \end{pmatrix} \tag{3.12}$$

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

식 3.12은 EKF방법에서 선형화된 measurement model의 역할을 한다. 죽, EKF방법에서 measurement error 시간 변화율과 동일한 역할을 하며, 미분된 state의 변화량을 구할 때 기울기에 사용된다.

$$\boldsymbol{M} = Diag(\boldsymbol{M_q}, \boldsymbol{M_v}, \boldsymbol{M_\omega}, \boldsymbol{M}_a) \tag{3.13}$$

식 3.13은 process의 오차공분산이다. 대각요소로 자세, 속도, 각속도의 편차, scale factor순으로 오차 공분산으로 구성된다. 나머지 요소는 0로 diagonal matrix이다.

$$\boldsymbol{N} = Diag(\boldsymbol{N_v}, \boldsymbol{N_B}) \tag{3.14}$$

식 3.14은 measurement의 오차공분산이다. 대각요소로 속도, 지자기순으로 오차 공분산으로 구성된다. 나머지 요소는 0로 diagonal matrix이다.

$$\boldsymbol{K} = \boldsymbol{P}\boldsymbol{C}^T(\boldsymbol{N}\boldsymbol{N}^T)^{-1} \tag{3.15}$$

식 3.15은 칼만이득을 구하는 식이다. state와 measurement의 관계를 의미하며 state의 변화량을 구하는 과정에서 보정되는 값에 사용된다. 다음 식 3.16은 칼만이득의 구성에 대한 식이다.

$$\boldsymbol{K} = -(\boldsymbol{K_q}, \boldsymbol{K_v}, \boldsymbol{K}_\omega, \boldsymbol{K}_a)^T \tag{3.16}$$

표 3.1 자세와 속도를 추정에 사용되는 IEKF방법의 의사코드

$$state : [\ q_x\ \ q_y\ \ q_z\ \ \mathbf{v}_x\ \ \mathbf{v}_y\ \ \mathbf{v}_z\ \ \omega_{b_x}\ \ \omega_{b_y}\ \ \omega_{b_z}\ \ a_s\ ]^T$$

$$input : \boldsymbol{\omega_m} = [\ \omega_{mX}\ \ \omega_{mY}\ \ \omega_{mZ}\ ]^T,\ \ \boldsymbol{a_m} = [\ a_{mX}\ \ a_{mY}\ \ a_{mZ}\ ]^T$$

$$\boldsymbol{C} = \begin{pmatrix} 0_{33} & \boldsymbol{I}_3 & 0_{33} & 0_{31} \\ 2\boldsymbol{B}_\times & 0_{33} & 0_{33} & 0_{31} \end{pmatrix}$$

$$\boldsymbol{M} = Diag(\boldsymbol{M_q}, \boldsymbol{M_v}, \boldsymbol{M_\omega}, \boldsymbol{M}_a)$$

$$\boldsymbol{N} = Diag(\boldsymbol{N_v}, \boldsymbol{N_B})$$

$$\hat{\boldsymbol{\chi}}_t^- = [\ \hat{\boldsymbol{q}}\ \ \hat{\mathbf{v}}\ \ \hat{\boldsymbol{\omega}}_b\ \ \hat{a}_s\ ]^T$$

$$for\ \ t = 1, 2, \cdots$$

$$\boldsymbol{E_v} = \hat{\mathbf{v}}_{t-1} - \boldsymbol{z_v}$$

$$\boldsymbol{E}_B = \boldsymbol{B} - \hat{\boldsymbol{q}} * \boldsymbol{z}_B * \hat{\boldsymbol{q}}^{-1}$$

$$\boldsymbol{E} = [\boldsymbol{E_v}\ \ \boldsymbol{E}_B]$$

$$\boldsymbol{K} = \boldsymbol{P}\boldsymbol{C}^T(\boldsymbol{N}\boldsymbol{N}^T)^{-1}$$

$$\dot{\hat{\boldsymbol{q}}} = \tfrac{1}{2}\hat{\boldsymbol{q}}_{t-1} * (\boldsymbol{\omega_m} - \hat{\boldsymbol{\omega}}_{b_{t-1}}) + \boldsymbol{K_q}\boldsymbol{E} * \hat{\boldsymbol{q}}_{t-1}$$

$$\dot{\hat{\mathbf{v}}} = g + \tfrac{1}{\hat{a}_{s_{t-1}}}\hat{\boldsymbol{q}}_{t-1} * \boldsymbol{a_m} * (\hat{\boldsymbol{q}}_{t-1})^{-1} + \boldsymbol{K_v}\boldsymbol{E}$$

$$\dot{\hat{\boldsymbol{\omega}}}_b = (\hat{\boldsymbol{q}}_{t-1})^{-1} * \boldsymbol{K_\omega}\boldsymbol{E} * \hat{\boldsymbol{q}}_{t-1}$$

$$\dot{\hat{a}}_s = \hat{a}_{s_{t-1}}\boldsymbol{K}_a\boldsymbol{E}$$

$$\hat{\boldsymbol{\chi}}_t = \hat{\boldsymbol{\chi}}_{t-1} + \left[\ \dot{\hat{\boldsymbol{q}}}\ \ \dot{\hat{\mathbf{v}}}\ \ \dot{\hat{\boldsymbol{\omega}}}_b\ \ \dot{\hat{a}}_s\ \right]^T \Delta t$$

$$\hat{\boldsymbol{I}}_{\boldsymbol{\omega}} = \hat{\boldsymbol{q}}_{t-1} * (\boldsymbol{\omega}_{m_{t-1}} - \hat{\boldsymbol{\omega}}_b) * (\hat{\boldsymbol{q}}_{t-1})^{-1}$$

$$\hat{\boldsymbol{I}}_{\boldsymbol{a}} = \tfrac{1}{\hat{a}_{s_{t-1}}}\hat{\boldsymbol{q}_{t-1}} * \boldsymbol{a_m} * (\hat{\boldsymbol{q}}_{t-1})^{-1}$$

$$\boldsymbol{A} = \begin{pmatrix} 0_{33} & 0_{33} & 0_{33} & -\frac{1}{2}\boldsymbol{I}_3 \\ -2\hat{\boldsymbol{I}}_{\boldsymbol{a}\times} & 0_{33} & 0_{33} & -\hat{\boldsymbol{I}}_{\boldsymbol{a}} \\ 0_{33} & 0_{33} & \hat{\boldsymbol{I}}_{\boldsymbol{\omega}\times} & 0_{31} \\ 0_{31} & 0_{31} & 0_{31} & 0_{31} \end{pmatrix}$$

$$\dot{\boldsymbol{P}} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{P} + \boldsymbol{P}\boldsymbol{A}^T + \boldsymbol{M}\boldsymbol{M}^T - \boldsymbol{P}\boldsymbol{C}^T(\boldsymbol{N}\boldsymbol{N}^T)^{-1}\boldsymbol{C}\boldsymbol{P}$$

$$\boldsymbol{P}_t = \boldsymbol{P}_{t-1} + \dot{\boldsymbol{P}}\Delta t$$

$$return\ \ \hat{\boldsymbol{\chi}}_t^-,\ \ \boldsymbol{P}_t^-$$

$$output : [\ q_X\ \ q_Y\ \ q_Z\ \ \mathbf{v}_X\ \ \mathbf{v}_Y\ \ \mathbf{v}_z\ \ \omega_X\ \ \omega_Y\ \ \omega_Z\ \ a_s\ ]^T$$

표 3.1는 본 연구에 사용된 IEKF방법에 대한 의사코드이다. 표 3.1를 통해 IEKF

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

방법을 이용하여 자세와 속도를 추정할 수 있다. 다음으로 위치를 추가한 IEKF방법에 대해서 서술한다.

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

제2절 위치, 자세, 속도 추정을 위한 IEKF방법

그림 3.2은 사용되는 state와 입력값, 측정값에 대한 세부요소를 나열한 그림이다.

- state

$$\boldsymbol{q}\begin{cases} q_x : estimation\ quaternion\ x \\ q_y : estimation\ quaternion\ y \\ q_z : estimation\ quaternion\ z \end{cases}$$

$$\mathbf{v}\begin{cases} v_x : estimation\ velocity\ x \\ v_y : estimation\ velocity\ y \\ v_z : estimation\ velocity\ z \end{cases}$$

$$\boldsymbol{x}\begin{cases} x_x : estimation\ position\ x \\ x_y : estimation\ position\ y \\ x_z : estimation\ position\ z \end{cases}$$

$$\boldsymbol{\omega_b}\begin{cases} \omega_{b_x} : estimation\ angular\ rate\ x \\ \omega_{b_y} : estimation\ angular\ rate\ y \\ \omega_{b_z} : estimation\ angular\ rate\ z \end{cases}$$

$a_s : estimation\ scale\ factor$

$h_b : estimation\ height\ bias$

- input

$$\boldsymbol{\omega_m}\begin{cases} \omega_{m_x} : input\ sensor\ angular\ rate\ x \\ \omega_{m_y} : input\ sensor\ angular\ rate\ y \\ \omega_{m_z} : input\ sensor\ angular\ rate\ z \end{cases}$$

$$\boldsymbol{a_m}\begin{cases} a_{m_x} : input\ sensor\ accelerometer\ x \\ a_{m_y} : input\ sensor\ accelerometer\ y \\ a_{m_z} : input\ sensor\ accelerometer\ z \end{cases}$$

- measurement

$$\boldsymbol{z_v}\begin{cases} z_{v_x} : measurement\ velocity\ x \\ z_{v_y} : measurement\ velocity\ y \\ z_{v_z} : measurement\ velocity\ z \end{cases}$$

$$\boldsymbol{z_x}\begin{cases} z_{x_x} : measurement\ velocity\ x \\ z_{x_y} : measurement\ velocity\ y \\ z_{x_z} : measurement\ velocity\ z \end{cases}$$

$z_h : measurement\ height$

$$\boldsymbol{z_B}\begin{cases} z_{B_x} : measurement\ magnetic\ field\ x \\ z_{B_y} : measurement\ magnetic\ field\ y \\ z_{B_z} : measurement\ magnetic\ field\ z \end{cases}$$

그림 3.2 자세, 위치, 속도 추정에 대한 상태값, 입력값, 측정값 각 요소의 의미

IEKF방법에서 사용되는 process model이며 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{q}} &= \tfrac{1}{2}\boldsymbol{q} * (\boldsymbol{\omega_m} - \boldsymbol{\omega_b}) \\ \dot{\mathbf{v}} &= g + \tfrac{1}{a_s}\boldsymbol{q} * \boldsymbol{a_m} * \boldsymbol{q}^{-1} \\ \dot{\boldsymbol{x}} &= \mathbf{v} \\ \dot{\boldsymbol{\omega}}_{\boldsymbol{b}} &= 0 \\ \dot{a}_s &= 0 \\ \dot{h}_b &= 0 \end{aligned} \tag{3.17}$$

식 3.17에서 첫 번째 식은 자세에 대한 process model이다. 물리적으로 각속도는 자세의 변화량에 영향을 준다. 각속도는 입력값이며, 추정되는 편차를 통해 보정한 후 사용된다. 다음으로는 속도에 대한 process model이다. 물리적으로 중력과 가속도는 속도의 변화량에 영향을 준다. 가속도는 로봇좌표계에서 측정된 입력값이다. 이러한 가속도를 월드좌표계로 변경하여 사용하게 된다. 다음으로는 위치에 대한 process model이다. 물리적으로 속도는 위치의 변화량에 영향을 준다. 다음은 각속도의 편차이며, 마지막으로는 scale factor, 고도의 편차이다. 각속도와 scale factor, 고도의 편차는 물리적으로 영향을 받는 요소가 없다.

다음은 IEKF방법에서 사용되는 measurement model이며 다음과 같다.

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

$$
\begin{aligned}
\boldsymbol{z}_{\mathbf{v}} &= \mathbf{v} \\
\boldsymbol{z}_{\boldsymbol{x}} &= \boldsymbol{x} \\
\boldsymbol{z}_h &= \langle \boldsymbol{x}, \boldsymbol{e}_3 \rangle - h_b \\
\boldsymbol{z}_{\boldsymbol{B}} &= \boldsymbol{q}^{-1} * \boldsymbol{B} * \boldsymbol{q}
\end{aligned} \tag{3.18}
$$

식 3.18에서 첫 번째와 두 번째 식은 속도와 위치에 대한 measurement model이다. 두 식 모두 추정된 값으로 사용한다. 다음으로는 고도에 대한 measurement model이다. 고도는 추정된 위치에 고도에 해당하는 Z좌표만을 사용하며, 추정된 편차를 보정하여 사용된다. 마지막으로 지자기에 대한 measurement model이다. B는 WMM(Wold Magnetic Model)이며, 월드 좌표계에서 측정된 값을 로봇좌표계로 변경하여 사용된다.

다음으로는 앞에서 설명한 process model과 measurement model를 IEKF방법에 적용한 알고리즘이다. 식 3.19은 IEKF방법에서 추정하는 state에 대한 변화량을 구하는 공식이다.

$$
\begin{aligned}
\dot{\hat{\boldsymbol{q}}} &= \tfrac{1}{2}\hat{\boldsymbol{q}} * (\boldsymbol{\omega_m} - \hat{\boldsymbol{\omega}}_{\boldsymbol{b}}) + \boldsymbol{K_q E} * \hat{\boldsymbol{q}} \\
\dot{\hat{\mathbf{v}}} &= g + \tfrac{1}{\hat{a}_s}\hat{\boldsymbol{q}} * \boldsymbol{a_m} * \hat{\boldsymbol{q}}^{-1} + \boldsymbol{K}_{\mathbf{v}}\boldsymbol{E} \\
\dot{\hat{\boldsymbol{x}}} &= \hat{\mathbf{v}} + \boldsymbol{K_x E} \\
\dot{\hat{\boldsymbol{\omega}}}_{\boldsymbol{b}} &= \hat{\boldsymbol{q}}^{-1} * \boldsymbol{K_\omega E} * \hat{\boldsymbol{q}} \\
\dot{\hat{a}}_s &= \hat{a}_s \boldsymbol{K}_a \boldsymbol{E} \\
\dot{\hat{h}}_b &= \boldsymbol{K}_h \boldsymbol{E}
\end{aligned} \tag{3.19}
$$

식 3.19에서 첫 번째 식은 자세의 변화량을 구하는 식이다. 자세는 각속도와 물리적으로 연관이 있다. 이러한 점을 고려하여 입력값으로 사용되는 angular rate에 추정하는 angular rate의 편차를 보정한다. 보정된 각속도와 이전시각의 쿼터니언을 연산하여 현 시각의 변화량을 구한다. 다음으로는 선속도의 변화량을 구하는 식이다. 선속도는 가속도와 물리적으로 연관이 있다. 이러한 점을 고려하여 입력값으로 사용되는 accelerometer를 이전 시각의 추정된 자세와 연산하여 월드좌표계에서 로봇좌표계로 변경한다. 변경된 가속도에 중력을 더한 다음 보정함으로써 현 시각의 변화량을 구한다. 다음은 위치의 변화량을 구하는 식이다. 위치는 선속도와 물리적으로 연관이 있다. 이러한 점을 고려하여 이전 시각의 추정된 선속도를 보정함으로써 현 시각의 변화량을 구한다. 다음은 각속도의 편차의 변화량을 구하는 식이다. 각속도의 편차는 무인기에서 측정된 센서를 기준으로 발생하므로 로봇좌표계에서 측정된 편차이다. 이러한 점을 고려하여 로봇좌표계에서 월드좌표계로 변경해준다. 다음으로는 가속도에 대한 scale factor의 변화량을 구하는 식이다. 이전 시각에 추정된 scale factor에 보정함으로써 현 시각의 변화량을 구한다. 마지막으로는 고도의

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

편차 변화량을 구하는 식이다. 보정을 통해 현시각의 변화량을 구한다.

다음 식 3.20은 IEKF방법에서 measurement innovation이다. 추후에 state을 보정할 때 사용되며, 칼만이득과 같이 사용된다.

$$\begin{aligned} \boldsymbol{E_v} &= \hat{\mathbf{v}} - \boldsymbol{z_v} \\ \boldsymbol{E_x} &= \hat{\boldsymbol{x}} - \boldsymbol{z_x} \\ \boldsymbol{E_h} &= \langle \hat{\boldsymbol{x}}, \boldsymbol{e_3} \rangle - \hat{h}_b + \boldsymbol{z_h} \\ \boldsymbol{E_B} &= \boldsymbol{B} - \hat{\boldsymbol{q}} * \boldsymbol{z_B} * \hat{\boldsymbol{q}}^{-1} \\ \boldsymbol{E} &= [\boldsymbol{E_v}\ \boldsymbol{E_x}\ \boldsymbol{E_h}\ \boldsymbol{E_B}] \end{aligned} \tag{3.20}$$

식 3.20에서의 첫 번째 식은 속도에 대한 measurement innovation이다. 이전 시각에 추정된 속도에 측정된 속도의 차이를 구한다. 다음으로는 위치에 대한 measurement innovation이다. 이전 시각에 측정된 위치에 측정된 위치의 차이를 구한다. 다음으로는 고도에 대한 measurement innovation이다. 추정된 위치에서 Z성분에 추정된 고도의 편차를 보정한다. 다음으로 추정된 고도와의 차이를 구한다. 다음으로는 지자기에 대한 measurement innovation이다. 측정된 지자기를 로봇좌표계에서 월드좌표계로 변경하여 사용하며, 이때 사용되는 rotation에 추정된 자세를 사용한다. 월드좌표계로 변경된 지자기를 WMM와의 차이를 구한다. 마지막으로 위의 식들을 state의 변화량 구할 때 사용되는 E matrix로 사용된다.

$$\dot{\boldsymbol{P}} = \boldsymbol{AP} + \boldsymbol{PA}^T + \boldsymbol{MM}^T - \boldsymbol{PC}^T(\boldsymbol{NN}^T)^{-1}\boldsymbol{CP} \tag{식 3.44}$$

식 3.44은 추정된 state에 대한 오차공분산의 변화량을 구하는 식이다. 각 요소 다음 식을 통해 추가적으로 설명한다.

$$\hat{\boldsymbol{I}}_{\boldsymbol{\omega}} = \hat{\boldsymbol{q}} * (\boldsymbol{\omega_m} - \hat{\boldsymbol{\omega}}_{\boldsymbol{b}}) * \hat{\boldsymbol{q}}^{-1} \tag{식 3.45}$$

$$\hat{\boldsymbol{I}}_{\boldsymbol{a}} = \frac{1}{\hat{a}_s}\hat{\boldsymbol{q}} * \boldsymbol{a_m} * \hat{\boldsymbol{q}}^{-1} \tag{식 3.46}$$

식 3.45은 측정된 각속도에 편차를 보정한 다음 로봇좌표계에서 월드좌표계로 변경한다. 월드좌표계로 변경된 각속도는 state 변화량을 구할 때 입력값으로 사용된다. 식 3.46은 측정된 가속도를 월드좌표계로 변경한다. 변경된 가속도에 scale factor를 보정하여 사용된다. 보정된 가속도는 state 변화량을 구할 때 입력값으로 사용된다. 식 3.45 ~ 식 3.46은 A matrix에 사용된다.

$$\boldsymbol{A} = \begin{pmatrix} 0_{33} & 0_{33} & 0_{33} & -\frac{1}{2}\boldsymbol{I}_3 & 0_{31} & 0_{31} \\ -2\hat{\boldsymbol{I}}_{\boldsymbol{a}\times} & 0_{33} & 0_{33} & 0_{33} & -\hat{\boldsymbol{I}}_{\boldsymbol{a}} & 0_{31} \\ 0_{33} & \boldsymbol{I}_3 & 0_{33} & 0_{33} & 0_{31} & 0_{31} \\ 0_{33} & 0_{33} & 0_{33} & \hat{\boldsymbol{I}}_{\boldsymbol{\omega}\times} & 0_{31} & 0_{31} \\ 0_{13} & 0_{13} & 0_{13} & 0_{13} & 0_{11} & 0_{11} \\ 0_{13} & 0_{13} & 0_{13} & 0_{13} & 0_{11} & 0_{11} \end{pmatrix} \tag{식 3.47}$$

식 3.47은 EKF에서 선형화된 process model의 역할을 한다. 죽, EKF방법에서

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

state error 시간 변화율과 동일한 역할을 하며, 미분된 state의 변화량을 구할 때 기울기에 사용된다.

$$\boldsymbol{C} = \begin{pmatrix} 0_{33} & \boldsymbol{I}_3 & 0_{33} & 0_{33} & 0_{31} & 0_{31} \\ 0_{33} & 0_{33} & \boldsymbol{I}_3 & 0_{33} & 0_{31} & 0_{31} \\ 0_{13} & 0_{13} & \boldsymbol{e}_3^{\boldsymbol{T}} & 0_{13} & 0_{11} & -\boldsymbol{I}_1 \\ 2\boldsymbol{B}_\times & 0_{33} & 0_{33} & 0_{33} & 0_{31} & 0_{31} \end{pmatrix} \quad \text{(식 3.48)}$$

식 3.48은 EKF에서 선형화된 measurement model의 역할을 한다. 즉, EKF방법에서 measurement error 시간 변화율과 동일한 역할을 하며, 미분된 state의 변화량을 구할 때 기울기에 사용된다.

$$\boldsymbol{M} = Diag(\boldsymbol{M_q}, \boldsymbol{M_v}, \boldsymbol{M_x}, \boldsymbol{M_\omega}, \boldsymbol{M}_a, \boldsymbol{M}_h) \quad \text{(식 3.49)}$$

식 3.49은 process의 오차공분산이다. 대각요소로 자세, 속도, 위치, 각속도의 편차, scale factor, 고도의 편차 순으로 오차 공분산으로 구성된다. 나머지 요소는 0로 diagonal matrix이다.

$$\boldsymbol{N} = Diag(\boldsymbol{N_v}, \boldsymbol{N_x}, \boldsymbol{N}_h, \boldsymbol{N_B}) \quad \text{(식 3.50)}$$

식 3.50은 measurement의 오차공분산이다. 대각요소로 속도, 위치, 고도, 지자기순으로 오차 공분산으로 구성된다. 나머지 요소는 0로 diagonal matrix이다.

$$\boldsymbol{K} = \boldsymbol{P}\boldsymbol{C}^T(\boldsymbol{N}\boldsymbol{N}^T)^{-1} \quad \text{(식 3.51)}$$

식 3.51은 칼만이득을 구하는 식이다. state와 measurement의 관계를 의미하며 state의 변화량을 구하는 과정에서 보정되는 값에 사용된다. 다음 식 3.52은 칼만이득의 구성에 대한 식이다.

$$\boldsymbol{K} = -(\boldsymbol{K_q}, \boldsymbol{K_v}, \boldsymbol{K_x}, \boldsymbol{K}_\omega, \boldsymbol{K}_a, \boldsymbol{K}_h)^T \quad \text{(식 3.52)}$$

표 3.2 위치를 추가한 IEKF방법에 대한 의사코드

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$state : [\ q_x\ \ q_y\ \ q_z\ \ \mathbf{v}_x\ \ \mathbf{v}_y\ \ \mathbf{v}_z\ \ x_x\ \ x_y\ \ x_z\ \ \omega_{b_x}\ \ \omega_{b_y}\ \ \omega_{b_z}\ \ a_s\ \ h_b\ ]^T$$

$$input : \boldsymbol{\omega_m} = [\ \omega_{mX}\ \ \omega_{mY}\ \ \omega_{mZ}\ ]^T,\ \ \boldsymbol{a_m} = [\ a_{mX}\ \ a_{mY}\ \ a_{mZ}\ ]^T$$

$$\boldsymbol{C} = \begin{pmatrix} 0_{33} & \boldsymbol{I}_3 & 0_{33} & 0_{33} & 0_{31} & 0_{31} \\ 0_{33} & 0_{33} & \boldsymbol{I}_3 & 0_{33} & 0_{31} & 0_{31} \\ 0_{13} & 0_{13} & \boldsymbol{e}_3^T & 0_{13} & 0_{11} & -\boldsymbol{I}_1 \\ 2\boldsymbol{B}_\times & 0_{33} & 0_{33} & 0_{33} & 0_{31} & 0_{31} \end{pmatrix}$$

$$\boldsymbol{N} = Diag(\boldsymbol{N_v}, \boldsymbol{N_x}, \boldsymbol{N_h}, \boldsymbol{N_B})$$

$$\boldsymbol{M} = Diag(\boldsymbol{M_q}, \boldsymbol{M_v}, \boldsymbol{M_x}, \boldsymbol{M_\omega}, \boldsymbol{M_a}, \boldsymbol{M_h})$$

$$\hat{\boldsymbol{\chi}}_t^- = \left[\ \hat{\boldsymbol{q}}\ \ \hat{\mathbf{v}}\ \ \hat{\boldsymbol{x}}\ \ \hat{\boldsymbol{\omega}}_b\ \ \hat{a}_s\ \ \hat{h}_b\ \right]^T$$

$$for\ \ t = 1, 2, \cdots$$

$$\boldsymbol{E_v} = \hat{\mathbf{v}}_{t-1} - \boldsymbol{z_v}$$

$$\boldsymbol{E_x} = \hat{\boldsymbol{x}}_{t-1} - \boldsymbol{z_x}$$

$$\boldsymbol{E}_h = \langle \hat{\boldsymbol{x}}_{t-1}, \boldsymbol{e}_3 \rangle - \hat{h}_{b_{t-1}} + \boldsymbol{z}_h$$

$$\boldsymbol{E_B} = \boldsymbol{B} - \hat{\boldsymbol{q}} * \boldsymbol{z_B} * \hat{\boldsymbol{q}}^{-1}$$

$$\boldsymbol{E} = [\boldsymbol{E_v}\ \boldsymbol{E_x}\ \boldsymbol{E}_h\ \boldsymbol{E_B}]$$

$$\boldsymbol{K} = \boldsymbol{P}\boldsymbol{C}^T(\boldsymbol{N}\boldsymbol{N}^T)^{-1}$$

$$\dot{\hat{\boldsymbol{q}}} = \tfrac{1}{2}\hat{\boldsymbol{q}}_{t-1} * (\boldsymbol{\omega_m} - \hat{\boldsymbol{\omega}}_{b_{t-1}}) + \boldsymbol{K_q}\boldsymbol{E} * \hat{\boldsymbol{q}}_{t-1}$$

$$\dot{\hat{\mathbf{v}}} = g + \tfrac{1}{\hat{a}_{s_{t-1}}}\hat{\boldsymbol{q}}_{t-1} * \boldsymbol{a_m} * (\hat{\boldsymbol{q}}_{t-1})^{-1} + \boldsymbol{K_v}\boldsymbol{E}$$

$$\dot{\hat{\boldsymbol{x}}} = \hat{\mathbf{v}}_{t-1} + \boldsymbol{K_x}\boldsymbol{E}$$

$$\dot{\hat{\boldsymbol{\omega}}}_{\boldsymbol{b}} = (\hat{\boldsymbol{q}}_{t-1})^{-1} * \boldsymbol{K_\omega}\boldsymbol{E} * \hat{\boldsymbol{q}}_{t-1}$$

$$\dot{\hat{a}}_s = \hat{a}_{s_{t-1}}\boldsymbol{K}_a\boldsymbol{E}$$

$$\dot{\hat{h}}_b = \boldsymbol{K}_h\boldsymbol{E}$$

$$\hat{\boldsymbol{I}}_{\boldsymbol{\omega}} = \hat{\boldsymbol{q}}_{t-1} * (\boldsymbol{\omega}_{\boldsymbol{m}_{t-1}} - \hat{\boldsymbol{\omega}}_{\boldsymbol{b}}) * (\hat{\boldsymbol{q}}_{t-1})^{-1}$$

$$\hat{\boldsymbol{I}}_{\boldsymbol{a}} = \tfrac{1}{\hat{a}_{s_{t-1}}}\hat{\boldsymbol{q}_{t-1}} * \boldsymbol{a_m} * (\hat{\boldsymbol{q}}_{t-1})^{-1}$$

$$\boldsymbol{A} = \begin{pmatrix} 0_{33} & 0_{33} & 0_{33} & -\frac{1}{2}\boldsymbol{I}_3 & 0_{31} & 0_{31} \\ -2\hat{\boldsymbol{I}}_{\boldsymbol{a}\times} & 0_{33} & 0_{33} & 0_{33} & -\hat{\boldsymbol{I}}_{\boldsymbol{a}} & 0_{31} \\ 0_{33} & \boldsymbol{I}_3 & 0_{33} & 0_{33} & 0_{31} & 0_{31} \\ 0_{33} & 0_{33} & 0_{33} & \hat{\boldsymbol{I}}_{\boldsymbol{\omega}\times} & 0_{31} & 0_{31} \\ 0_{13} & 0_{13} & 0_{13} & 0_{13} & 0_{11} & 0_{11} \\ 0_{13} & 0_{13} & 0_{13} & 0_{13} & 0_{11} & 0_{11} \end{pmatrix}$$

$$\dot{\boldsymbol{P}} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{P} + \boldsymbol{P}\boldsymbol{A}^T + \boldsymbol{M}\boldsymbol{M}^T - \boldsymbol{P}\boldsymbol{C}^T(\boldsymbol{N}\boldsymbol{N}^T)^{-1}\boldsymbol{C}\boldsymbol{P}$$

$$\hat{\boldsymbol{\chi}}_t = \hat{\boldsymbol{\chi}}_{t-1} + \left[\ \dot{\hat{\boldsymbol{q}}}\ \ \dot{\hat{\mathbf{v}}}\ \ \dot{\hat{\boldsymbol{x}}}\ \ \dot{\hat{\boldsymbol{\omega}}}_b\ \ \dot{\hat{a}}_s\ \ \dot{\hat{h}}_b\ \right]^T \Delta t$$

$$\boldsymbol{P}_t = \boldsymbol{P}_{t-1} + \dot{\boldsymbol{P}}\Delta t$$

$$return\ \ \hat{\boldsymbol{\chi}}_t^-,\ \ \boldsymbol{P}_t^-$$

$$output : [\ q_X\ \ q_Y\ \ q_Z\ \ \mathbf{v}_X\ \ \mathbf{v}_Y\ \ \mathbf{v}_z\ \ x_X\ \ x_Y\ \ x_Z\ \ \omega_X\ \ \omega_Y\ \ \omega_Z\ \ a_s\ \ h_b\ ]^T$$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제4장 실험 및 결과

제1절 실험 환경 및 조건

첫 번째 실험으로 선박해양플랜트연구소(KRISO)에 설치된 수조에서 실행되었다. 그림. 4.1에 보인바와 같이 'ㄹ'모양의 운항경로로 수중로봇을 이동시키며 AHRS와 DVL을 사용하여 측정값을 구하였다. 운항경로는 $1.4m \times 2.2m$의 크기를 가진다. 다양한 궤적의 운항으로 실험했지만 그중에서 'ㄹ'모양의 지그재그 경로가 작은 공간에서 이동거리가 길며, 직선운동을 하면서 다양한 방향으로 회전이 가능하기 때문에 다른 이동경로보다 큰 변화량을 가진다.

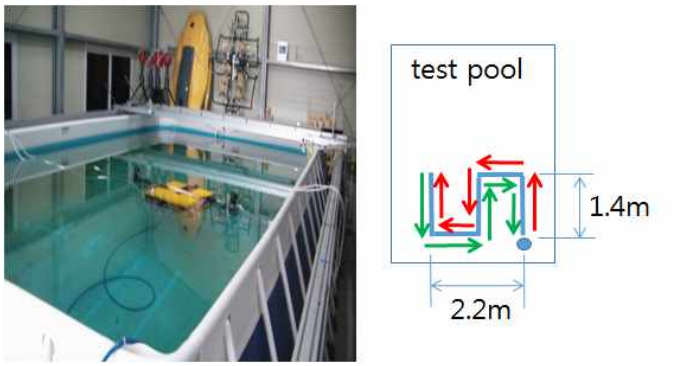


그림 4.1 로봇 항법 실험 및 궤도 실험용 탱크

표 4.1,2은 본 실험에서 사용한 센서에 대한 정보이다. AHRS센서로는 3DM-Gx3-25를 사용하며 DVL센서로는 NavQuest 600 Micro를 사용하였다.

표 4.1 AHRS 측정 규격

Attitude heading range	360° about all 3 axes
Accelerometer range	$\pm 5g$ standard
Gyroscope range	$\pm 300°/\mathrm{sec}$ standard
Data output rate	up to 1000 Hz
Filtering	sensors sampled at 30kHz

표 4.2 DVL 측정 규격

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Frequency	600kHz
Accuracy	1%± 1mm/s
Maximum Altitude	110m
Minimum Altitude	0.3m
Standard Depth	800m
Maximum Ping Rate	5/second

두 번째 실험으로 무인항공기에 대한 실험이다. 한국항공우주연구소(KARI)에서 직접 회적익과 고정익을 이용하였으며. 본 연구는 한국항공우주연구소에서 측정된 센서를 받아서 본 실험에 적용한다. 회전익 실험은 고도 30m까지 이륙한 후 ‘ㄹ’모양의 지그재그 경로로 가로 220m, 세로 25m의 실험이다. 고정익 실험은 고도 150m까지 이륙한 후 ‘ㄹ’모양의 지그재그 경로로 가로 1600m, 세로 200m의 실험이다. 그림 4.2는 실험의 경로와 무인기에 사양이다. 먼저, 실험에서 사용된 회전익은 사양으로는 모터와 중심점까지 거리는 480mm이며, 높이는 170mm이며, 무게는 1405g이다. 다음으로는 실험에서 사용된 고정익의 사양으로 무게 4kg(카메라와 배터리를 포함), 날개길이는 1800mm이며, 비행시간은 90분이다.

그림 4.2 무인기 실험 경로 및 규격

표 4.3는 실험에 사용된 GPS센서에 대한 사양이다. 표 4.4은 실험에서 사용한 FCU의 사양이다. FCU의 main board에 대한 내용이며, 사용되는 가속도, 각속도, 고도계, 자력계의 명칭을 포함하고 있다.

표 4.3 GPS 규격

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

parameter		GPS
Time-To-First-Fix	Cold start	29s
	Hot start	1s
	Aided starts	2s
Sensitivity	Tracking & Navigation	160dBm
	Reacquisition	160dBm
	Cold start	148dBm
	Hot start	157dBm
Max navigation update rate	RTK	8Hz
	PVT	10Hz
	RAW	10Hz
Convergence Time	RTK	3.5min

표 4.4 FCU 규격

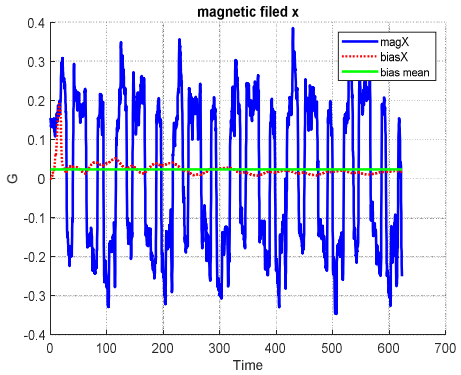
	Main board
CPU	STM32F427
Accelerometer / Gyro	MPU9250
Barometer	MS5611
External Magnetometer	HMC5983

Collection @ chosun

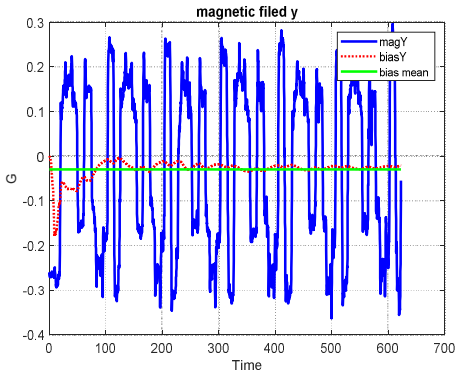
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제2절 UKF방법을 이용한 추정 및 지자기 편차 결과

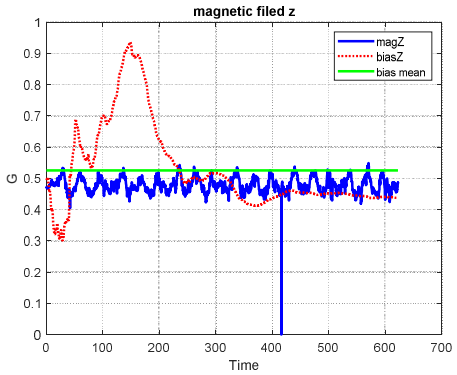
그림. 4.4에서 (a)~(c)는 시각에 따른 x축, y축, z축 방향의 지자기 벡터를 표현하고 있으며 파랑색 선은 각 축방향의 지자기 벡터를 뜻하며 빨강색 점선은 추정한 편차성분을 뜻한다. 마지막으로 녹색 선은 편차의 평균을 뜻한다. 그림. 4.2에서 (d)는 m_x와 m_y를 동시에 표현하였다. 지자기가 왜곡 되지 않았을 경우에는 $(0,0)$지점을 기준으로 하는 원형이 그려진다. 하지만, 본 실험에서는 기체 내부에서 지자기에 영향을 받아 왜곡된 상태인 hard iron 효과에 의해 지자기의 중심점이 $(0,0)$에서 벗어난 타원 모양을 보여준다. 이러한 측정 결과로부터 본 실험에서 사용되는 지자기 측정값에 편차 요소가 존재함을 알 수 있다.



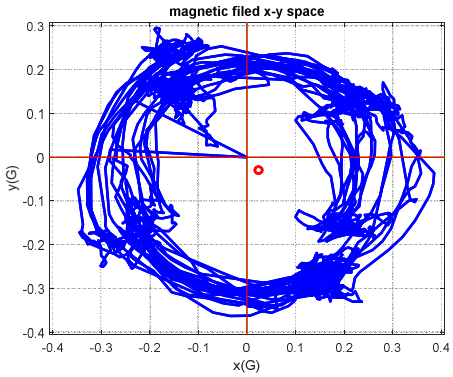
(a)



(b)



(c)



(d)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

그림 4.4 각 축에서 측정된 지자기와 추정된 편차 (a) x 축의 지자기, (b) y 축의 지자기, (c) z 축의 지자기, (d) xy 평면의 지자기.

그림. 4.5은 UKF 편차 추정 알고리즘의 결과 값을 그래프로 나타내고 있으며 표 4.5은 x축, y축, z축에서 추정된 편차의 평균을 나타낸다.

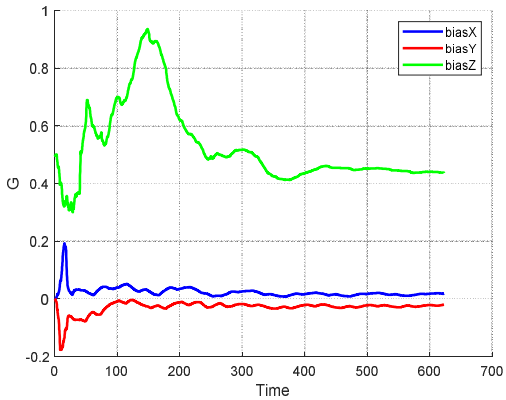


그림 4.5 시간에 따른 추정된 편차

표 4.4 측정된 지자기 편차의 평균

	average of result
estimated b_{mx}	0.0237 (G)
estimated b_{my}	-0.0295 (G)
estimated b_{mz}	0.5251 (G)

본 실험은 roll, pitch 각이 $(0,0)$각도에서 크게 벗어나지 않기 때문에 표 4.4의 결과 값 중 b_{mx}와 b_{my}는 이론상 문제가 없다. 하지만, 지자기 z정보는 일정한 값으로 출력이 되기 때문에 실험에서 사용된 센서 정보로는 편차를 추정할 수 없다. 그러므로 편차의 z요소를 구하기 위해서는 실험에서 측정된 지자기 벡터와 World Magnet Model (WMM)에서 구한 지자기 벡터를 비교한다.

표 4.5 WMM과 측정된 지자기의 비교 및 z방향 지자기의 편차

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

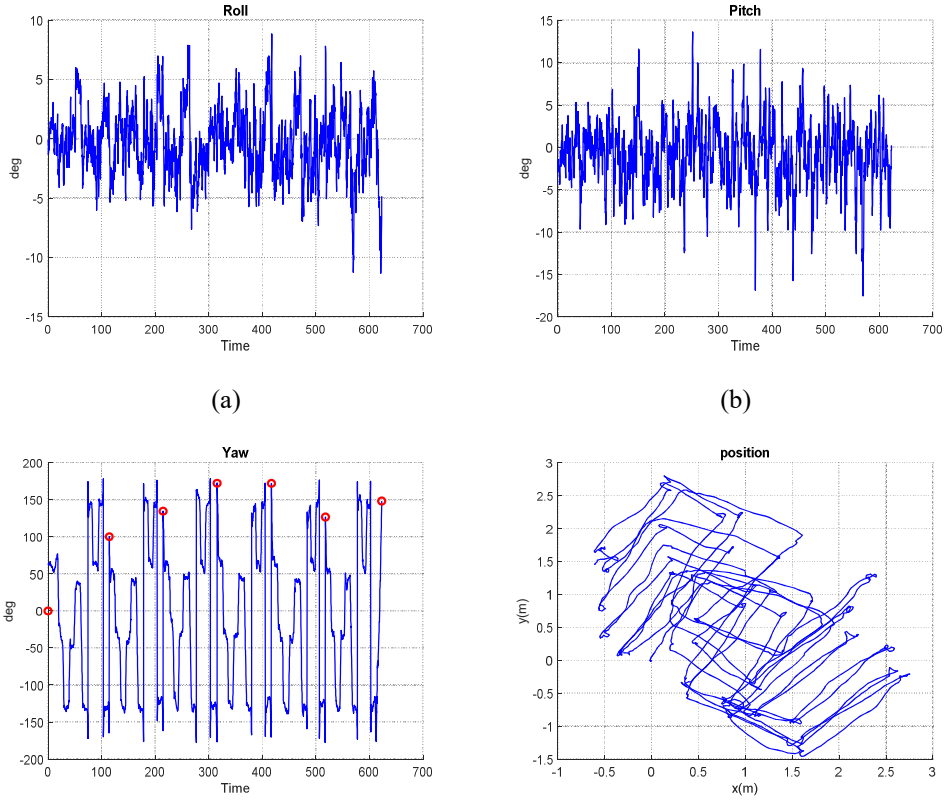
	WMM	Measurement
Magnetic_field_xyz	0.46575 (G)	0.4821 (G)
Magnetic_field_xy	0.24044 (G)	0.2724 (G)
Bias_z	0.0799 (G)	

표 4.5에서 지자기 z축의 편차를 구하기 위해 실험에서 측정한 지자기 z축의 편차와 WMM에서 구한 지자기 z축의 편차를 연산한다. 그 결과 값은 표 4.5에 마지막 Bias_z로 기제 되어있다. 마지막으로 실험에서 측정된 지자기 벡터에서 추정한 편차를 제거한 후 자세를 추정한다. 자세 추정 방법 또한 UKF방법을 사용한다.

그림. 4.6에서 (a)와 (b)는 roll, pitch요소를 추정한 결과이다. 본 실험은 실제 바다가 아닌 만들어진 수조에서 실시되며 수중 로봇이 직선으로 운행했기 때문에 roll과 pitch의 변화량이 적다. 그림. 4.6에서 (c)는 yaw요소를 추정한 결과이다. 수중로봇이 동일한 깊이에서 이동하였으므로 변화량이 가장 큰 요소는 yaw이며 -180～180사이의 변화량을 가지고 있다. 그래프 중에서 빨간색 원은 수중 로봇이 ‘ㄹ’모양의 경로로 움직이기 시작한 지점을 뜻한다. 그림. 4.6에서 (d)는 수중 로봇의 위치를 추정한 결과이다. 추정된 자세와 실험에서 DVL에 의해 측정된 속도를 사용하여 추측항법에 의해 로봇의 위치를 추정하였다. 총 7번의 ‘ㄹ’모양의 경로를 왕복 운항한 실험이며 운항의 최종점은 운항의 시작점과 동일하다.

Collection @ chosun

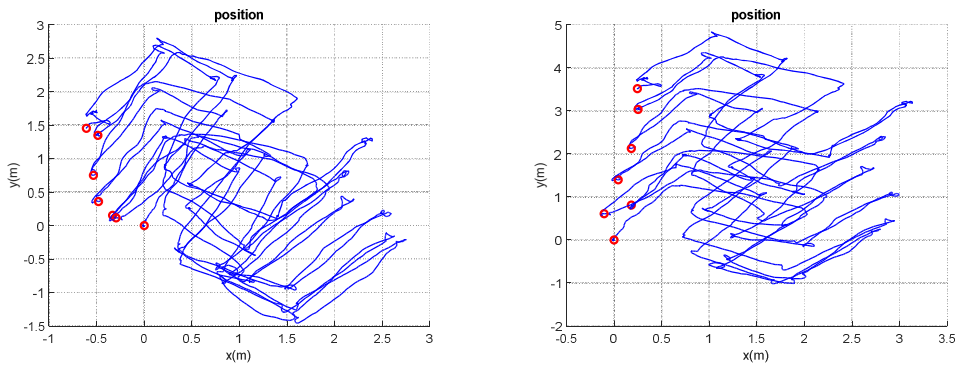
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) (b)

(c) (d)

그림 4.6 자세와 위치 추정에 사용한 보정된 측정 지자기



(a) (b)

그림 4.7 보정된 지자기를 이용한 위치추정과 보정되지 않은 지자기를 이용한 위치추정 결과

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

그림. 4.7에서 (a)는 편차가 보정된 지자기 벡터를 사용하여 위치를 추정한 결과이며 그림. 4.7에서 (b)는 편차가 보정되지 않는 지자기 벡터를 사용하여 위치를 추정한 결과이다. 성능비교 결과는 표 4.7과 같다. 표 4.7은 'ㄹ'모양의 지그재그 경로로 운항하기 시작한 지점과 마지막 운항이 끝나는 지점사이의 거리를 구한다. 거리를 비교함으로써 편차가 보정된 지자기 벡터를 사용한 위치 추정결과가 편차가 보정되지 않은 지자기 벡터를 사용한 위치 추정결과보다 좋은 성능을 보인다.

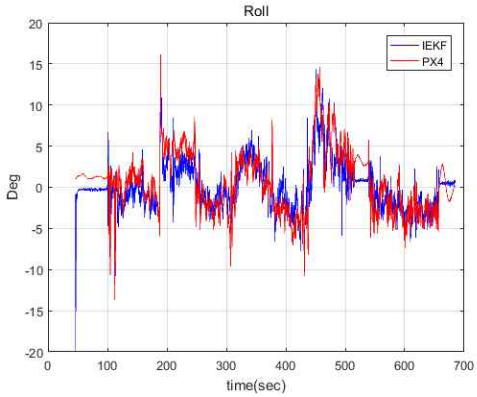
표 4.6 위치 추정 오차의 비교

	Calibrated magnetic field measurement	Raw magnetic field measurement
Distance between two points in meters	1.6530(m)	3.5329(m)

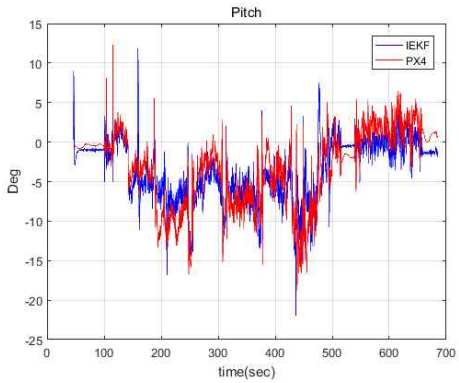
Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

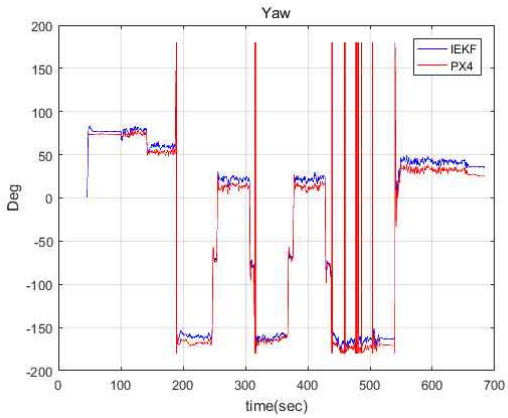
제3절 IEKF방법을 이용한 자세, 속도추정



(a)



(b)



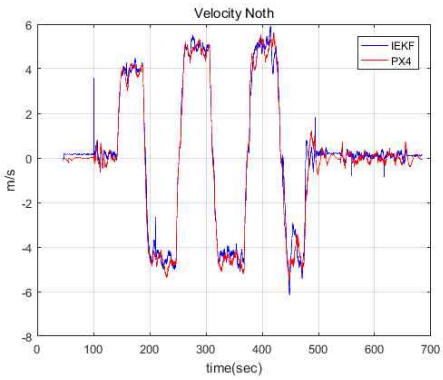
(c)

그림 4.8 IEKF방법과 ecl EKF를 통해 추정된 자세 결과

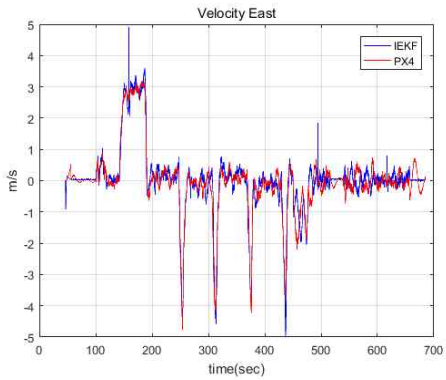
그림 4.8 (a)은 IEKF방법과 ecl EKF를 이용하여 추정된 Roll에 대한 결과이다. y축 기준으로 Deg 1~2도 차이를 가지고 있다. 차이가 존재하지만 단위를 고려한다면 상대적으로 차이가 난다. 그림 4.8 (b)는 IEKF방법과 ecl EKF를 이용하여 추정된 Pitch에 대한 결과이다. y축 기준으로 Deg 2~3도 차이를 가지고 있다. 차이가 존재하지만 단위를 고려한다면 상대적으로 차이가 난다. 그림 4.8 (c)는 IEKF방법과 ecl EKF를 이용하여 추정된 Yaw에 대한 결과이다. ecl EKF 같은 경우, 400~500초 사이에 값에서 차이가 심하다. 하지만 이러한 점은 무인기의 heading이 최소, 최대로 움직일 수 있는 각도가 −180도에서 +180사이이다. 연산 도중 결과값이 −190도가 나올 경우, 갑도 변경에 의해 +10도의 결과를 갖게 된다.

Collection @ chosun

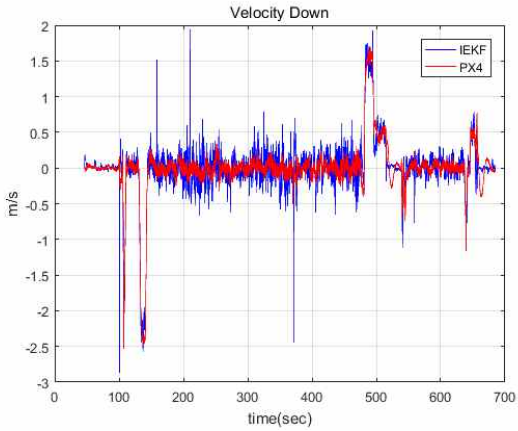
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a)



(b)



(c)

그림 4.9 IEKF방법과 ecl EKF를 통해 추정된 속도 결과

그림 4.9 (a)는 IEKF방법과 ecl EKF를 이용하여 추정된 속도 Noth에 대한 결과이다. 속도의 차이는 미소한 차이밖에 없다. 그림 4.9 (b)는 IEKF방법과 ecl EKF를 이용하여 추정된 속도 East에 대한 결과이다. 속도의 차이는 미소한 차이밖에 없다. 그림 4.9 (c)는 IEKF방법과 ecl EKF를 이용하여 추정된 속도 Down에 대한 결과이다. 속도의 차이는 미소한 차이밖에 없다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

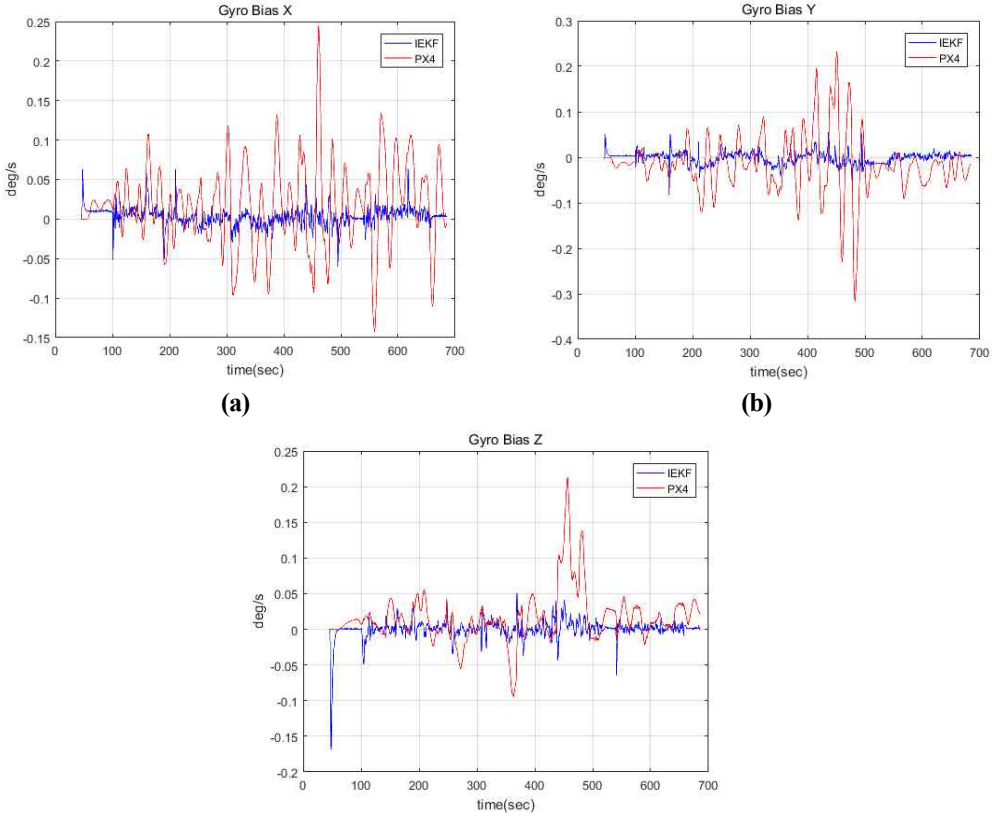


그림 4.10 IEKF방법과 ecl EKF를 통해 추정된 각속도의 편차 결과

그림 4.10 (a)는 IEKF방법과 ecl EKF를 이용하여 추정된 각속도 x축의 편차에 대한 결과이다. ecl EKF가 IEKF방법에 비해 큰 값으로 추정되지만 상대적으로 큰 값이 단위에 의해 그 차이는 적은 차이이다. 그림 4.10 (b)는 IEKF방법과 ecl EKF를 이용하여 추정된 각속도 y축의 편차에 대한 결과이다. ecl EKF가 IEKF방법에 비해 큰 값으로 추정되지만 상대적으로 큰 값이 단위에 의해 그 차이는 적은 차이이다. 그림 4.10 (c)는 IEKF방법과 ecl EKF를 이용하여 추정된 각속도 z축의 편차에 대한 결과이다. ecl EKF가 IEKF방법에 비해 큰 값으로 추정되지만 상대적으로 큰 값이 단위에 의해 그 차이는 적은 차이이다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

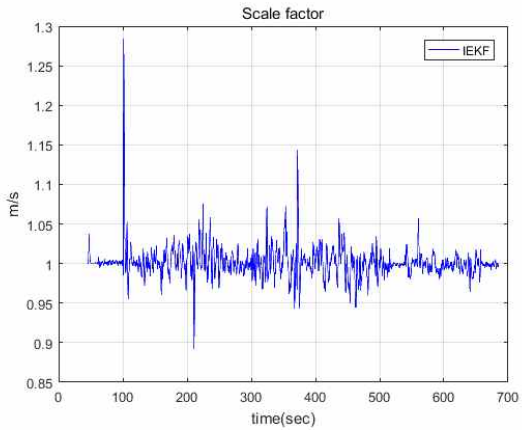
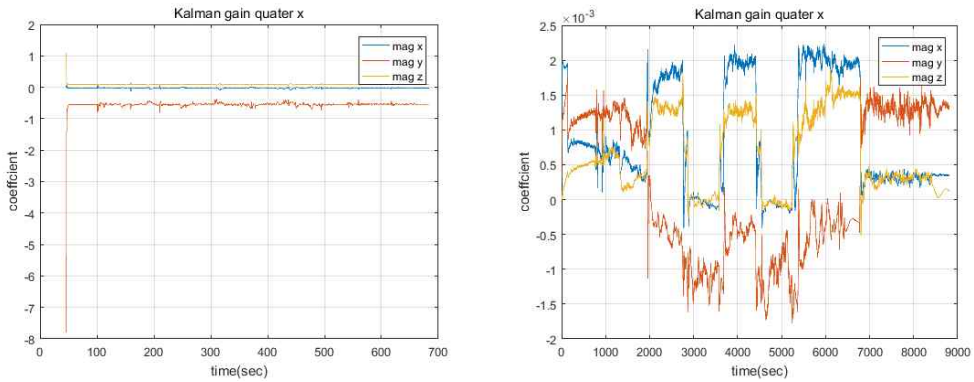


그림 4.11 IEKF방법을 통해 추정된 Scale factor 결과

그림 4.11은 IEKF방법에서 추정된 가속도의 Scale factor의 값이다. Scale factor는 이론상 1에 근사한 값이 출력된다. 무인기 이륙할 때를 제외하고 1에 근사한 값이 출력된다.



(a) **(b)**

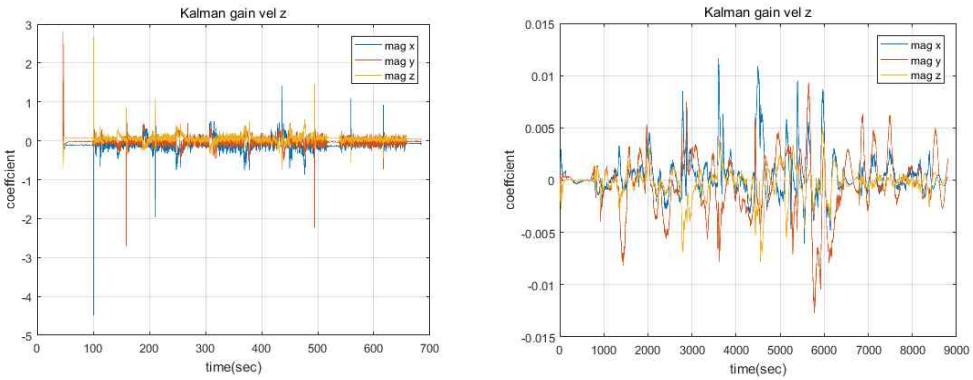
그림 4.12 IEKF방법과 ecl EKF에서 사용된 칼만이득 quaternion x와 지자기의 관계

그림 4.12 (a)은 IEKF방법에서 사용된 칼만이득 quaternion x와 지자기의 관계를 보여준다. 초기 값이 굉장히 크지만 시간이 지남에 따라 지자기 x는 0.001에 근사한 값이 출력되며, 지자기 y는 0에 근사한 값이 출력, 마지막으로 지자기 z는 −1.6에 근사한 값이 출력된다. 그림 4.12 (b)은 ecl EKF방법에서 사용된 칼만이득 quaternion x와 지자기의 관계를 보여준다. ecl EKF는 IEKF방법과 다르게 변화가 심한 칼만이득을 사용하지만 이러한 변화는 IEKF방법보다 상대적으로 적은 량을 사

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

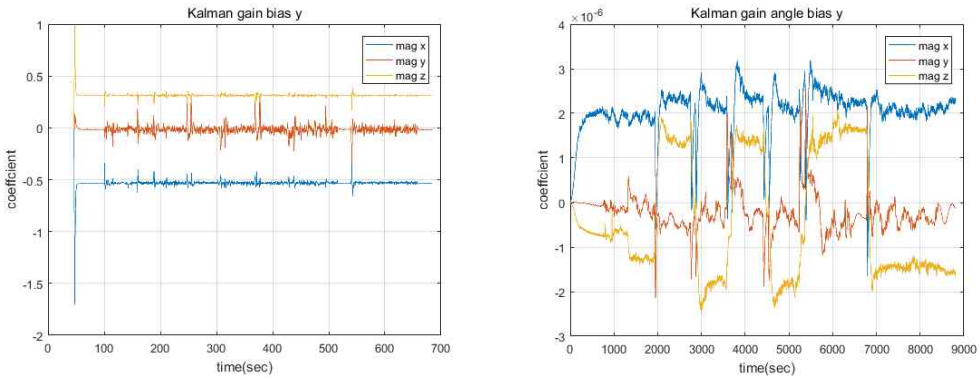
용한다.



(a) **(b)**

그림 4.13 IEKF방법과 ecl EKF에서 사용된 칼만이득 속도 z와 지자기의 관계

그림 4.13 (a)은 IEKF방법에서 사용된 칼만이득의 결과이다. 속도 z와 지자기의 관계를 보여준다. x, y, z 요소 모두 0에 근사한 값을 사용한다. 그림 4.13 (b)은 ecl EKF방법에서 사용된 칼만이득의 결과이다. 속도 z와 지자기의 관계를 보여준다. ecl EKF는 IEKF방법과 다르게 변화가 심한 칼만이득을 사용하지만 이러한 변화는 IEKF방법보다 상대적으로 적은 량을 사용한다.



(a) **(b)**

그림 4.14 IEKF방법과 ecl EKF에서 사용된 칼만이득 각속도 y의 편차와 지자기의 관계

그림 4.14 (a)은 IEKF방법에서 사용된 칼만이득의 결과이다. 각속도 y축의 편차와 지자기의 관계를 보여준다. 초기 값이 굉장히 크지만 시간이 지남에 따라 지자기 x는 −0.5에 근사한 값이 출력되며, 지자기 y는 0에 근사한 값이 출력, 마지막으로 지자기 z는 0.3에 근사한 값을 사용한다. 그림 4.14 (b)은 ecl EKF방법에서 사용

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

된 칼만이득의 결과이다. 각속도 y축의 편차와 지자기의 관계를 보여준다. ecl EKF는 IEKF방법과 다르게 변화가 심한 칼만이득을 사용하지만 이러한 변화는 IEKF방법보다 상대적으로 적은 량을 사용한다.

표 4.7 칼만이득에 대한 평균, 절대값의 평균, 표준편차, 표준편차 대 평균의 비율, peak to peak

		mean (μ)	mean of absolute ($\lvert\mu\rvert$)	standard deviation (σ)	standard deviation to mean ratio $\left(\frac{\sigma}{\lvert\mu\rvert}\right)$	peak to peak ($p-p$)
ecl EKF quarter X-magnet	x	$8.8141*10^{-4}$	$9.0718*10^{-4}$	$7.9180*10^{-4}$	0.8983	0.0026
	y	$1.7863*10^{-4}$	$9.4440*10^{-4}$	0.001	5.6959	0.0035
	z	$6.3377*10^{-4}$	$6.5110*10^{-4}$	$5.4550*10^{-4}$	0.8607	0.0024
IEKF quarter X-magnet	x	-0.0232	0.0240	0.0127	0.5488	0.2355
	y	-0.5474	0.5474	0.0850	0.1553	7.4028
	z	0.0911	0.0911	0.0118	0.1296	1.0570
ecl EKF velocity Z-magnet	x	$4.5189*10^{-4}$	0.0013	0.002	4.4642	0.0177
	y	$-4.3975*10^{-4}$	0.0021	0.0029	6.5964	0.0221
	z	$-2.6585*10^{-4}$	$8.9374*10^{-4}$	0.0014	5.2806	0.0128
IEKF velocity Z-magnet	x	-0.0892	0.1233	0.0157	1.6892	5.8663
	y	-0.0207	0.0689	0.1250	6.0382	5.5123
	z	0.0550	0.0760	0.0931	1.6920	3.4112
ecl EKF angular bias Y-magnet	x	$2.0447*10^{-6}$	$2.0544*10^{-6}$	$5.3013*10^{-7}$	0.2593	$4.8589*10^{-6}$
	y	$-2.2956*10^{-7}$	$3.6491*10^{-7}$	$4.2771*10^{-7}$	1.8632	$4.6748*10^{-6}$
	z	$-3.4652*10^{-7}$	$1.3171*10^{-6}$	$1.3560*10^{-6}$	3.9131	$4.5374*10^{-6}$
IEKF angular bias Y-magnet	x	-0.5344	0.5344	0.0508	0.0950	1.7001
	y	-0.0157	0.0283	0.0413	2.6255	0.6306
	z	0.3143	0.3143	0.0290	0.0923	0.9817

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

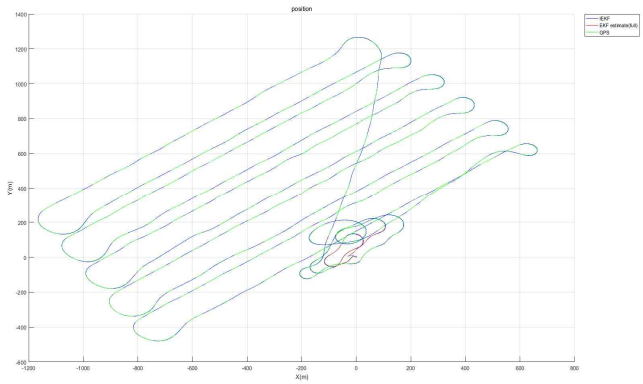
표 4.7은 IEKF방법과 ecl EKF에서 사용된 칼만이득을 평균, 절대값의 평균, 표준편차, 표준편차 대 평균의 비율, peak to peak이다. 평균과 절대값의 평균, 표준편차, peak to peak 모두 ecl EKF값이 IEKF방법보다 적게 나온다. 하지만, ecl EKF의 값 전체가 상대적으로 적은 값이므로 상대적으로 큰 IEKF방법의 값이 커진다. 이러한 부분은 해결하기 위해 절대적으로 값을 비교하는 방법으로 표준편차 대 평균의 비율을 사용한다. 표준편차 대 평균의 비율은 ecl EKF가 IEKF방법보다 큰 값을 가진다. 이러한 결과를 통해 칼만이득은 IEKF방법이 ecl EKF보다 변화율이 적다.

Collection @ chosun

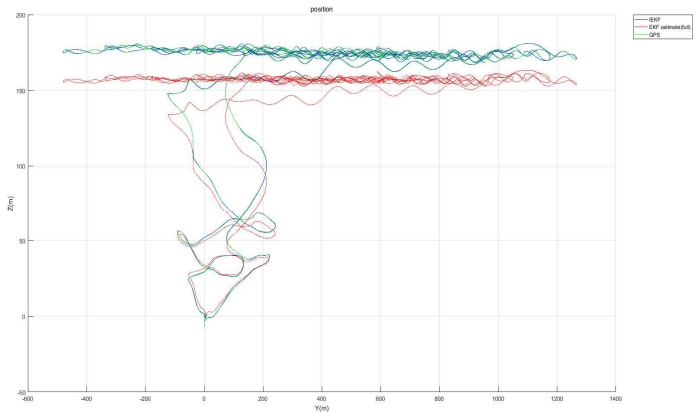
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제4절 IEKF방법을 이용한 자세, 위치, 속도추정

추정되는 상태값으로는 위치, 자세, 속도, 각속도의 편차, scale factor, 고도의 편차이다. 측정값으로는 속도, 위치, 지자기, 고도를 사용한다. 결과는 오픈소스 ecl EKF에서 EKF방법과 비교한다.



(a)



(b)

그림 4.15 IEKF방법과 ecl EKF를 통해 추정된 위치 비교 (a. x-y좌표, b. x-z좌표)

그림 4.15는 IEKF방법을 통해 추정된 위치와 오픈소스인 ecl EKF, 실험에서 측정된 GPS를 x-y좌표로 그래프화한 결과이다. 파랑색 그래프는 IEKF방법의 결과이

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

며, 빨강색 그래프는 ecl EKF결과, 초록색은 측정된 GPS센서이다. 고도(z좌표)에서 IEKF방법이 ecl EKF보다 GPS에 근접한 추정된 결과를 확인 할 수 있다. 여기서 추정의 차이는 ecl EKF는 measurement로 GPS센서x, y만을 사용하며 height센서를 사용하여 추정하여 z를 추정한다. IEKF방법에서 measurement로는 GPS센서 x, y, z와 height센서를 사용하여 추정한다. 또한, IEKF방법에서는 추정되는 state에서 height bias를 추정하여 고도를 보정해준다. IEKF방법만이 고도에 대해서 GPS센서를 이용하여 예측하며, 고도에 대한 보정단계에 편차를 사용한다.

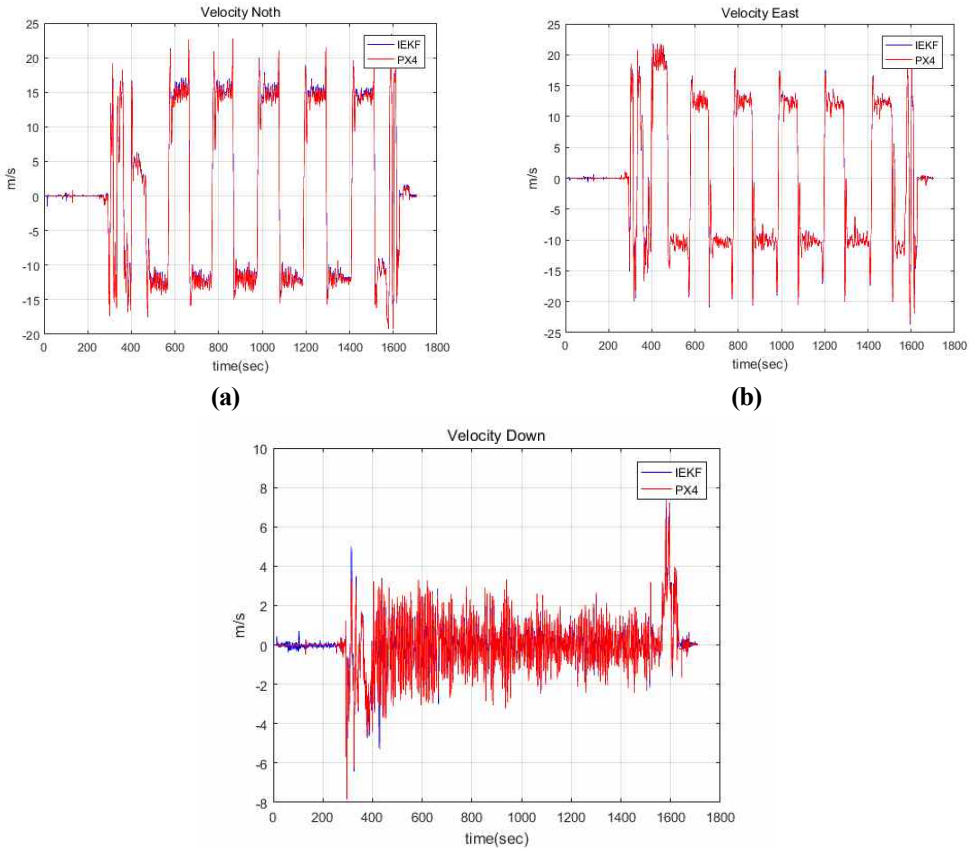


그림 4.16 IEKF방법과 ecl EKF를 통해 추정된 속도 (a. Noth, b. East, c. Down)

그림 4.16는 추정된 속도에 대한 결과이다. 빨강색 그래프는 ecl EKF추정 결과이며, 파랑색 그래프는 IEKF방법 추정 결과이다. Noth, East에서는 미소한 차이만 존재한다. Down에서는 무인기가 이륙하기 전까지 큰 차이를 보이지만 이륙 후에는 차이가 거의 없음을 확인된다. 나머지 추정결과는 ecl EKF와 IEKF방법에서 일정한 변화량을 가진 결과를 확인할 수 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

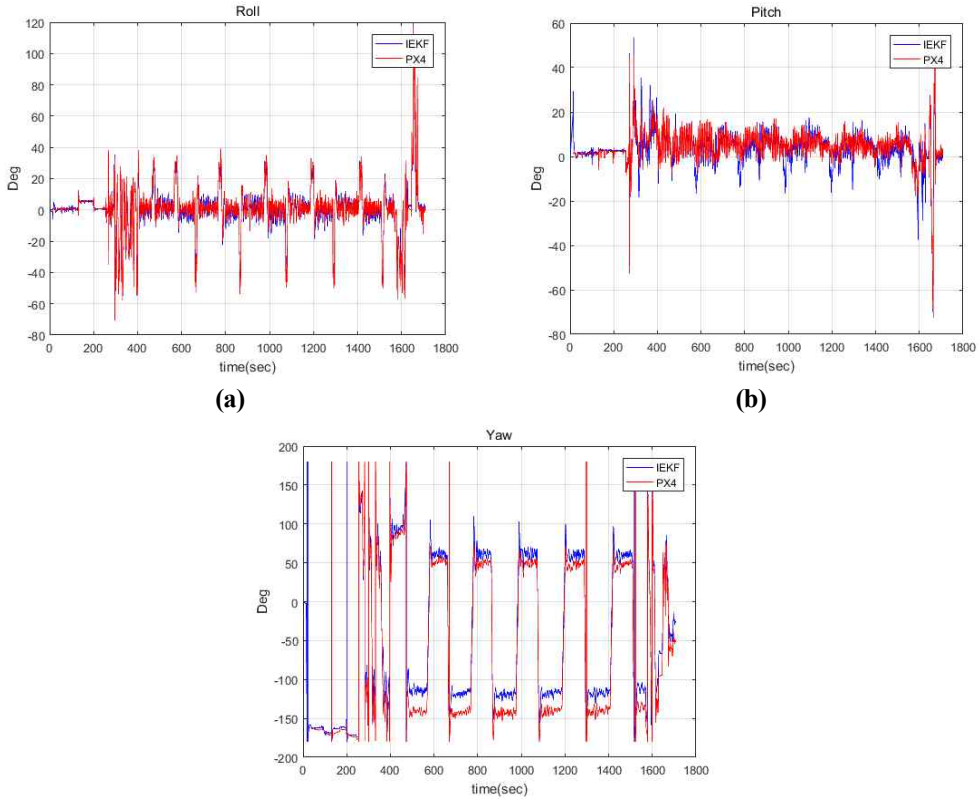


그림 4.17 IEKF방법과 ecl EKF를 통해 추정된 자세 (a. Roll, b. Pitch, c. Yaw)

그림 4.17는 IEKF방법을 사용하여 추정한 자세의 결과이다. Roll, Pitch, Yaw그래프를 통해 IEKF방법과 ecl EKF의 추정결과가 차이가 존재하지만, 결과의 단위가 Deg로 그려진 그래프이다. 죽, 상대적인 차이이기 때문에 소량의 차이를 가진다. 추정된 Yaw는 무인기의 heading를 의미하며, 일정한 규칙을 가진 그래프가 그려짐으로써 정해진 경로에 따라 달라지는 Yaw를 IEKF방법과 ecl EKF가 추정을 성공한 사실을 알 수 있다. 또한, Yaw는 ecl EKF와 IEKF방법과 무인기가 이륙한 후 400초 이후 30도 정도의 차이가 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

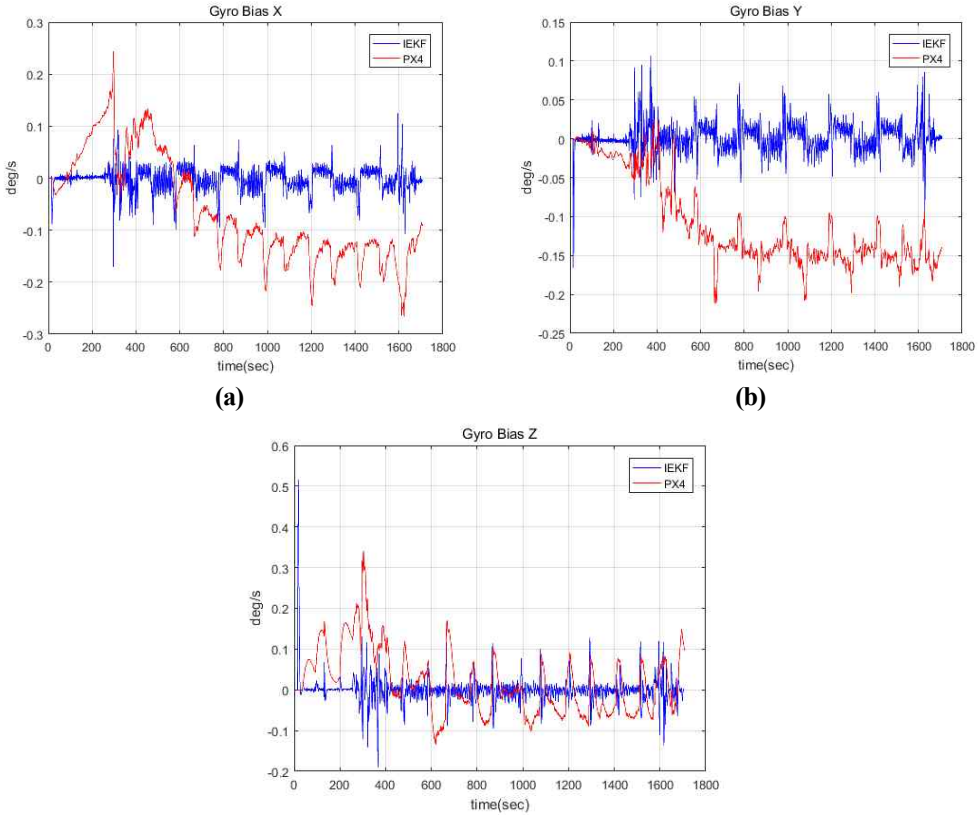
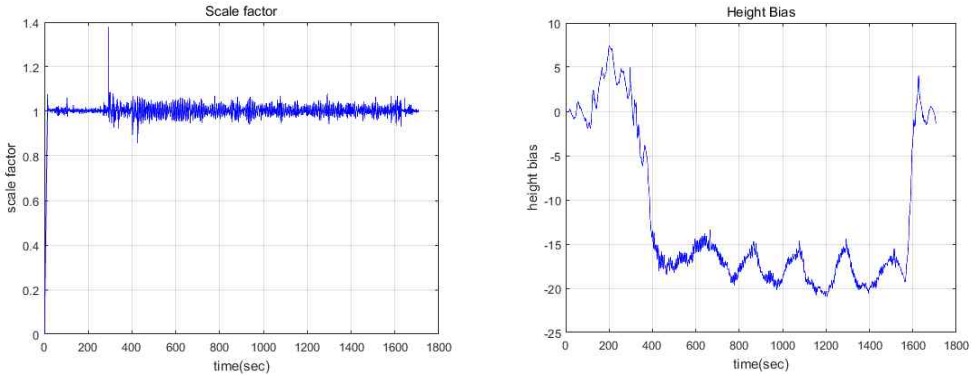


그림 4.18 IEKF방법과 ecl EKF를 통해 추정된 가속도 편차 (a. x, b. y, c. z)

그림 4.18는 IEKF방법을 통해 추정된 Gyro bias이다. Gyro bias는 angular이 측정할 때 일정한 에러를 가지고 측정될 때이다. 이러한 측정에서 발생하는 에러를 보정해줌으로써 무인기 추정에 정확성을 올려준다. IEKF방법은 일정한 값을 출력되는 반면에 ecl EKF는 큰 변화를 가진 그래프를 보여준다. 하지만, 이러한 변화는 y축의 단위가 Deg이므로 상대적으로 차이가 존재한 것이다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) **(b)**

그림 4.19 IEKF방법을 통해 추정된 Scale factor, 고도의 편차 (a. Scale factor, b. 고도의 편차)

그림 4.19는 IEKF방법을 사용하여 추정된 scale factor와 height bias이다. scale factor 는 측정된 accelerate에서 일정한 량의 오류를 의미한다. height bias도 동일하다. Scale factor는 1에 근접한 그래프가 출려된다. 그에 비해 height bias는 시간이 지난 후 -17에 근접한 그래프를 확인할 수 있다. 0~400초까지는 무인기의 이륙에 때문에 불규칙한 편차를 보이며, 이착륙 이후부터는 일정한 변화를 가진 값이 출력된다.

measurement innovation은 측정값에 측정값과 관련 있는 상태값의 차이를 구함으로써 상태값을 보정해주는 값이 정해진다. measurement innovation의 값이 크다는 것은 측정값과 추정된 상태값이 관계가 줄어들게 된다. 즉, 추정된 상태값의 신뢰성이 떨어지며 칼만 이득은 그만큼 커지는 결과를 확인할 수 있다. 다음은 measurement에 대한 innovation의 결과를 그래프화한 결과이다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

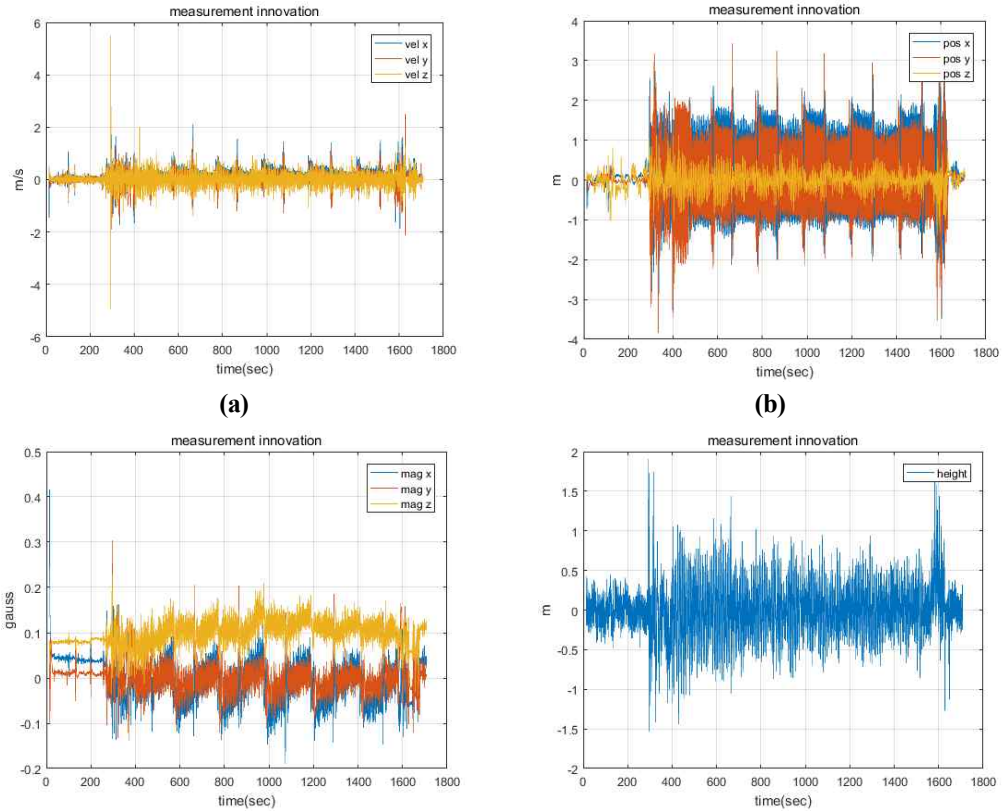


그림 4.20 IEKF방법에서 사용된 measurement innovation

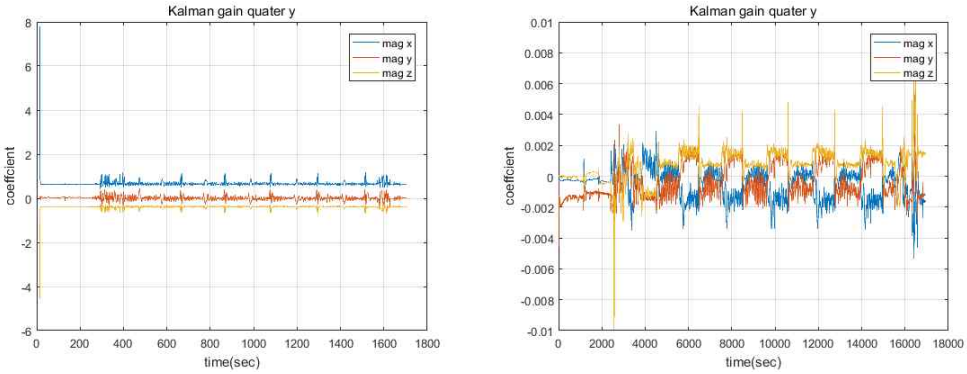
그림 4.20 (a)은 측정한 속도와 추정된 속도의 차이 값을 그래프화한 결과이다. 속도의 x, y, z좌표 모두가 1 ~ -1 사이의 값이다. 그림 4.20 (b)은 측정한 위치와 추정된 위치의 차이 값을 그래프화한 결과이다. 위치 x좌표는 1.8 ~ -1.8 사이의 값이며, 위치 y좌표는 1.5 ~ -1.5 사이의 값이다. 마지막으로 위치 z좌표는 0.5 ~ -0.5 사이의 값이다. 그림 4.20 (c)은 측정한 지자기와 추정된 자세를 사용하여 WMM를 월드좌표계에서 로봇좌표계로 변경한 값의 차이를 그래프화한 결과이다. 지자기 x좌표는 0.1 ~ -0.1 사이의 값이며, 지자기 y좌표는 0.08 ~ -0.08 사이의 값이다. 마지막으로 지자기 z좌표는 0.16 ~ -0.06 사이의 값이다. 그림 4.20 (d)은 측정된 고도와 추정된 위치 z와 고도에 대한 편차를 보정한 값의 차이를 그래프화한 결과이다. 무인기가 이륙하기 시작한 시각 400초 이후부터는 0.7 ~ -0.7 사이 값이다.

다음으로 칼만이득의 결과이다. IEKF의 장점으로 시간이 지남에 따라 칼만이득의 결과는 일정한 값에 수렴되는 결과를 확인 할 수 있다. 칼만이득은 추정된 상태

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

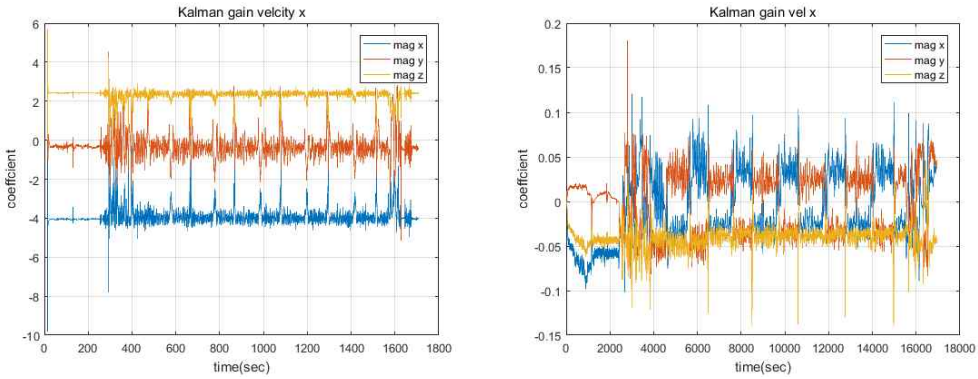
값을 일정한 값으로 보정한다. ecl EKF에서 EKF방법과 비교함으로써 동일한 실험에서도 서로 다른 칼만이득을 사용되는지 확인이 가능하다.



(a) **(b)**

그림 4.21 IEKF방법과 ecl EKF에서 사용되는 쿼터니언 y와 지자기의 칼만이득(a. IEKF b. ecl EKF)

그림 4.21는 IEKF방법과 ecl EKF에서 사용된 quarternion y와 지자기의 칼만이득이다. 그림 4.21 (a)는 IEKF방법은 쿼터니언 y와 지자기 x의 관계는 0.3정도의 값과 지자기 y는 0정도의 값, 지자기 z는 0.2정도의 값에 수렴한다. 그림 4.21 (b)는 ecl EKF의 쿼터니언 y와 지자기 x의 관계는 0.001 ~ -0.002사이의 값과 지자기 y는 0 ~ -0.002사이의 값, 지자기 z는 0.001 ~ -0.002사이의 값으로 불규칙한 차이를 보인다.



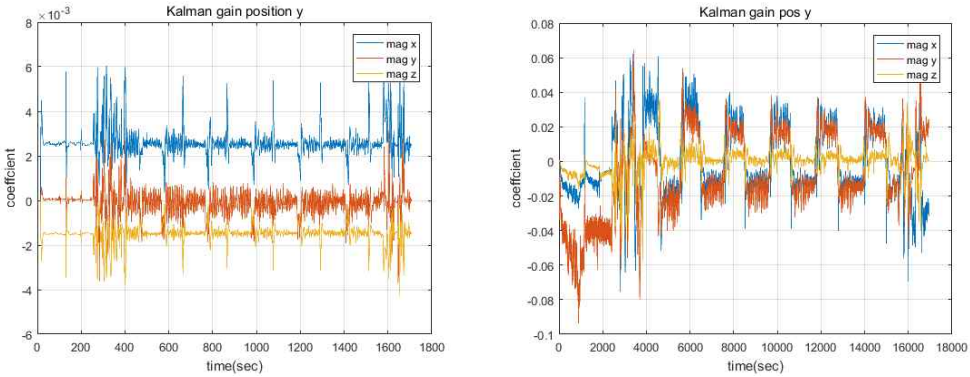
(a) **(b)**

그림 4.22 IEKF방법과 ecl EKF에서 사용되는 속도 x와 지자기의 칼만이득(a. IEKF b. ecl EKF)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

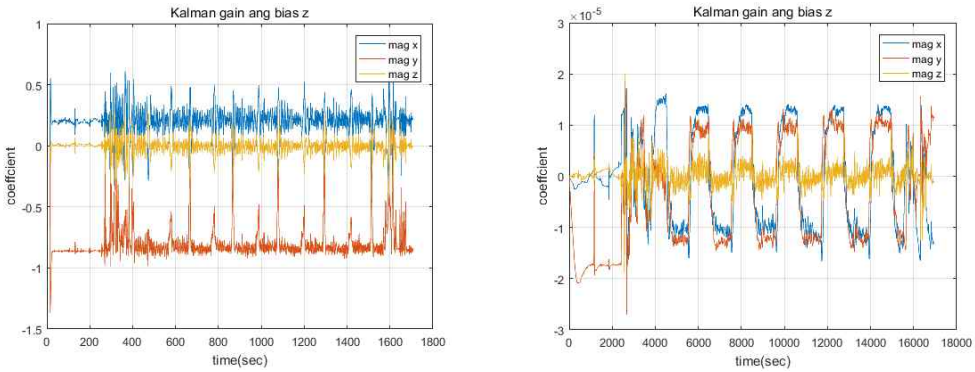
그림 4.22는 IEKF방법과 ecl EKF에서 사용된 속도 x와 지자기의 칼만이득이다. 그림 4.22 (a)는 IEKF방법의 속도 x와 지자기 x의 관계는 -4정도의 값과 지자기 y는 −0.3정도의 값, 지자기 z는 2.2정도의 값에 수렴한다. 그림 4.22 (b)는 ecl EKF의 속도 x와 지자기 x의 관계는 0.005 ~ -0.005사이의 값과 지자기 y는 0.005 ~ -0.003사이의 값, 지자기 z는 −0.003 ~ -0.005사이의 값으로 불규칙한 차이를 보인다.



(a) **(b)**

그림 4.23 IEKF방법과 ecl EKF에서 사용되는 위치 y와 지자기의 칼만이득(a. IEKF b. ecl EKF)

그림 4.23는 IEKF방법과 ecl EKF에서 사용된 위치 y와 지자기의 칼만이득이다. 그림 4.23 (a)는 IEKF방법의 위치 y와 지자기 x의 관계는 0.003정도의 값과 지자기 y는 0정도의 값, 지자기 z는 -1.8정도의 값에 수렴한다. 그림 4.23 (b)은 ecl EKF의 위치 y와 지자기 x의 관계는 0.03 ~ -0.01사이의 값과 지자기 y는 0.02 ~ -0.02사이의 값, 지자기 z는 0.005 ~ -0.005사이의 값으로 불규칙한 차이를 보인다.



(a) **(b)**

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

그림 4.24 IEKF방법과 ecl EKF에서 사용되는 각속도 x의 편차와 지자기의 칼만이득(a. IEKF. b. ecl EKF)

그림 4.24는 IEKF방법과 ecl EKF에서 사용된 angular bias x와 지자기의 칼만이득이다. 그림 4.24 (a)는 IEKF방법의 angular bias X와 지자기 x의 관계는 0.3정도의 값과 지자기 y는 0정도의 값, 지자기 z는 -0.8정도의 값에 수렴한다. 그림 4.24 (b)는 ecl EKF의 angular bias X와 지자기 x의 관계는 0.000015 ~ -0.00001사이의 값과 지자기 y는 0.00001 ~ -0.000013사이의 값, 지자기 z는 0.000005 ~ -0.000005사이의 값으로 불규칙한 차이를 보인다.

표 4.8 칼만이득에 대한 평균, 절대값의 평균, 표준편차, 표준편차 대 평균의 비율, peak to peak

		mean (μ)	mean of absolute ($\lvert\mu\rvert$)	standard deviation (σ)	standard deviation to mean ratio $\left(\frac{\sigma}{\lvert\mu\rvert}\right)$	peak to peak ($p-p$)
ecl EKF quarter Y-magnet	x	-5.4978* 10^{-5}	8.3724*10^{-4}	0.0010	1.8199	0.0083
	y	-3.4738* 10^{-4}	0.0010	0.0011	3.2052	0.0107
	z	7.2672*10^{-4}	0.0010	0.0010	1.4262	0.0184
IEKF quarter Y-magnet	x	0.6665	0.6665	0.0970	0.1455	7.3885
	y	0.0100	0.0671	0.0974	9.7085	0.8043
	z	-0.3907	0.3907	0.0562	0.1438	4.2754
ecl EKF velocity X-magnet	x	-0.0019	0.0259	0.0311	16.5717	0.2320
	y	-0.0092	0.0297	0.0331	3.6085	0.2152
	z	-8.3181* 10^{-4}	0.0073	0.0117	14.0127	0.1551
IEKF velocity X-magnet	x	-3.8793	3.8793	0.4596	0.1185	9.7735
	y	-0.3273	0.5304	0.6017	1.8383	9.6768
	z	2.3121	2.3122	0.2638	0.1141	5.7707
ecl EKF position Y-magnet	x	-8.0811* 10^{-4}	0.0176	0.0204	25.2135	0.1375
	y	-0.0079	0.0215	0.0243	3.0778	0.1581

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

	z	-3.4259*10^{-4}	0.0049	0.0075	22.0134	0.0943
IEKF position Y-magnet	x	0.0026	0.0026	6.1468*10^{-4}	0.2370	0.0072
	y	-1.0957*10^{-4}	3.8350*10^{-4}	5.6941*10^{-5}	5.1970	0.0068
	z	-0.0015	0.0015	3.919*10^{-5}	0.2614	0.0043
ecl EKF angular bias Z-magnet	x	-4.0414*10^{-7}	8.6534*10^{-6}	9.7555*10^{-6}	24.1387	3.5368*10^{-5}
	y	-3.5232*10^{-6}	1.0167*10^{-5}	1.0595*10^{-5}	3.0072	4.5474*10^{-5}
	z	9.9754*10^{-8}	1.5708*10^{-6}	2.2242*10^{-6}	22.2967	3.8774*10^{-5}
IEKF angular bias Z-magnet	x	0.2008	0.2115	0.1078	0.5367	1.1368
	y	-0.7967	0.7971	0.1332	0.1672	1.5328
	z	-0.0044	0.0422	0.0658	15.1046	0.7179

표 4.8은 IEKF방법과 ecl EKF에서 사용된 칼만이득을 평균, 절대값의 평균, 표준편차, 표준편차 대 평균의 비율, peak to peak이다. 평균과 절대값의 평균, 표준편차, peak to peak 모두 ecl EKF값이 IEKF방법보다 적게 나온다. 하지만, ecl EKF의 값 전체가 상대적으로 적은 값이므로 상대적으로 큰 IEKF방법의 값이 커진다. 이러한 부분은 해결하기 위해 절대적으로 값을 비교하는 방법으로 표준편차 대 평균의 비율을 사용한다. 표준편차 대 평균의 비율은 ecl EKF가 IEKF방법보다 큰 값을 가진다. 이러한 결과를 통해 칼만이득은 IEKF방법이 ecl EKF[17]보다 변화율이 적다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제5장 결론 및 향후 계획

AHRS의 지자기 측정값은 hard iron 효과와 soft iron 효과로 인한 왜곡에 취약하다는 문제를 가지고 있다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해소하기 위해 hard iron 효과로 인한 편차를 추정하는 방법을 제안하고, 추정된 편차 보정에 따라 항법성능이 향상됨을 보였다. 무향 칼만 필터를 사용하여 지자기 편차를 추정하였다. 편차 추정성능을 확인하기 위해서 편차가 보정된 지자기의 벡터를 사용한 자세추정과 편차가 보정되지 않는 지자기 벡터를 사용한 자세추정을 비교하였다. 편차를 보정한 지자기를 사용할 경우, 편차를 보정하지 않는 지자기를 사용할 경우보다 자세추정 성능이 향상됨을 실험을 통하여 확인했다.

지자기 측정 오차는 hard iron 효과뿐 아니라 soft iron 효과, 환산계수오차, 측정축 정렬오차 등에 의해서 발생한다. 따라서 향후 연구에서는 hard iron 효과 이외의 요소들을 추정하는 방법을 연구할 예정이다.

IEKF방법을 이용하여 무인항공기의 자세, 위치, 속도를 추정하였으며, IEKF방법의 장점인 칼만이득과 measurement innovation의 수렴이 보장되는지 확인 가능하다. 추가적으로 칼만이득을 구할 시, 위치의 x, y좌표에 대한 칼만이득이 동일하게 출력된다. 이러한 이유로는 식에서 위치의 x, y가 동일하게 연산되는 것을 확인된다. 추후 계획으로는 이러한 점을 고려하여 알고리즘 연산을 새로운 시점으로 볼 필요성이 존재한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

참고문헌

[1] Hashmall, J., Deutschmann, J., 1996. An Evaluation of Attitude-Independent Magnetometer-Bias Determination Methods - Flight Mechanics/Estimation Theory Symposium, 169-178.

[2] Ko, N.Y., Kuc, T.Y., Apr. 2015. Fusing Range Measurements from Ultrasonic Beacons and a Laser Range Finder for Localization of a Mobile Robot. Sensors, 15(5), 11050-11075.

[3] Ko, N.Y., Kim, T.G., and Choi, H.T., 2015. Synchronous and Asynchronous Application of a Filtering Method for Underwater Robot Localization, International Journal of Humanoid Robotics, 13(2).

[4] Ko, N.Y., Choi, H.T., and Lee, C.M., 2016a. Navigation of Unmanned Surface Vehicle and Detection of GPS Abnormality by Fusing Multiple Sensor Measurements - OCEANS'16 MTS/IEEE Monterey, California USA, 19-23.

[5] Ko, N.Y., Jeong, S., 2016, Fused Navigation of Unmanned Surface Vehicle and Detection of GPS Abnormality, Institute of Control, Robotics and Systems, 22(9), 723-732.

[6] Ko, N.Y., Choi, H.T., Lee, C.M., and Moon, Y.S., Apr, 2016b. Attitude Estimation Using Depth Measurement and AHRS for Underwater Vehicle Navigation - OCEANS '16 MTS/IEEE Shanghai, China, 10-13.

[7] Ko, N.Y., Jeong, S., and Bae, Y., 2016c. Sine Rotation Vector Method for Attitude Estimation of an Underwater Robot, Sensors, 16(8).

[8] J. Lee, J. Lee, "Attitude and position estimation system for practical outdoor mobile robots," The Korean Society of Mechanical Engineers, pp. 1644-1645, Dec 2016.

[9] S. Jeong, T. Kim and N. Ko, "Programming Toolkit for Localization and Simulation of a Mobile Robot," Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, vol. 23, no. 4, pp. 332-340, Aug 2013.

[10] Kim, E., Bang, H., Yong, K.L., and Lee, S.H., 2006. Three-axis Magnetometer Bias Estimation - The Korean Society For Aeronautical And Space Sciences, 818-821.

[11] Rhudy, M.T., Gu, Y., 2013. Interactive Robotics Letters(IRL) WVU Online. Understanding Nonlinear Kalman Filters, Part Ⅱ: An Implementation Guide. [Online] Available at: <http://www2.statler.wvu.edu/~irl/IRL_WVU_Online_UKF_Implementation_V1.0_06_28_2013.pdf> [Accessed 2016].

[12] Troni, G.C., Whitcomb, L., 2013. Adaptive Estimation of Measurement Bias in Three-Dimensional Field Sensors with Angular-Rate Sensors: Theory and Comparative

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Experimental Evaluation. Robotics: Science and Systems.

[13] F. Markley, “Attitude error representations for Kalman filtering,” Journal of Guidance, Control and Dynamics, vol. 26, no. 2, pp. 311−317, 2003.

[14] S. Bonnabel, P. Martin and E. Salaun “Invariant Extended Kalman Filter : theory and application to a velocity-aided attitude estimation problem,” Joint 48th IEEE Conference on Decision and Control and 28th Chinese Control Conference Shanghai, P.R China, pp. 1297-1304, Dec 2009.

[15] S. Bonnabel, “Left-invariant extended Kalman filter and attitude estimation,” in Proc. of the IEEE Conf. on Decision and Control, 2007, pp. 1027−1032.

[16] National Oceeanic and Atmospheric Administration(NOAA), 2017. Magnetic Field Calculators. [Online] Available at: <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag-web/#igrfwmm> [Accessed 2017].

[17] “https://github.com/ecl EKF/ecl/tree/master/matlab/EKF_replay”

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

감사의 글

2016년 학, 석사 연계를 마치고 2017년 대학원에 입학하였습니다. 벌써 1년 반이라는 시간이 지나 졸업을 앞두고 있습니다. 2년 동안 많은 일과 경험들을 해보며 자신 스스로가 성장하였다고 느낀 기간이었습니다. 본 논문은 학사 때는 배워보지 못한 자율주행이란 다소 생소한 학문을 다루었습니다. 처음에는 힘들고 어려웠으며 포기하고 싶은 생각도 했습니다. 그럴 때마다 저의 방향성을 제시해주시며 저와 같이 고민해주신 지도교수님이신 고낙용 교수님께 진심으로 감사드립니다. 하지만 교수님이 도와주시는 열정에 비해 언제나 제가 부족했으며, 이러한 점은 언제나 죄송한 마음뿐입니다. 교수님의 지지와 열정이 지금까지 저를 만들어주셨습니다. 그리고 지도교수님 만큼 많은 조언을 해주신 최한수 교수님, 이진이 교수님, 반성범 교수님, 곽근창 교수님께 정말로 감사드립니다.

학사때부터 지금까지 부족한 저 때문에 신경써주신 석기형한테 항상 고마운 마음을 갖고 있습니다. 처음 연구실에 들어와서 석기형에게 의지하고 가르침 받으면서 석사까지 무사히 졸업할 수 있었습니다. 또한, 석사기간동안 같이 지내온 정준혁한테도 고맙다고 전하고 싶습니다. 언제나 같이 일하며 연구할 때는 서로 궁금한 것을 공유하고 모든 사건사고를 같이 극복한 친구였습니다. 지금까지도 수시로 연구실 후배라는 이유 때문에 시간 내주신 태균이형과 효섭이형에게 감사드립니다. 자신들의 시간을 소비하면서 언제나 제가 힘들고 어려울 때 응원에 말씀을 해주셨으며, 사회에 나갈 때 어떻게 생활할지에 대한 유용한 팁 역시 저에게 있어서 중요한 지식이 되었습니다. 마지막으로 연구실 후배인 장영수, 안태용, 강이천, 정다빈한테도 고맙다고 전합니다. 언제나 부족한 선배의 모습만을 보여주었지만 항상 긍정적이고 좋은 분위기를 조성해준 애들이었습니다.

1년반동안 맨날 불평만 했는데 그러한 불평을 받아주신 저의 부모님한테도 감사드립니다. 언제나 밤늦게 집에 도착하면 주무시다가도 아들 들어오는 문소리에 일어나시는 모습에 아들은 언제나 죄송하게 생각하고 있습니다.

Collection @ chosun