

Zero-Scan-Back 기준 고도 생성 필터

Zero-Scan-Back Reference Height Generation Filter

황 익 호*, 나 원 상**

(Whang, Ick-Ho and Ra, Won-Sang)

Abstract - In many applications of UAVs flying in low altitude, the steady supply of accurate height measurements is very important for the UAVs to complete their mission successfully. In order to do this, a barometer or GPS height measurements are widely used. However, because these two sensors have their limitations in the application environment, a method for fusing these two measurements to produce reference heights are required. In this paper, a reference height generation filter is designed for UAV(Unmanned Air Vehicle) applications. The barometer errors originated by the change of the atmospheric environment are modeled using random walk models, and then the errors are identified and compensated through the ZSB(zero-scan-back) filter algorithm using the GPS height measurements. The performance of the proposed filter is demonstrated by realistic simulations.

Key Words :Height Measurement, Estimation, Fusion, Barometer Error Compensation, Zero-Scan-Back filter

1. 개요

무인비행체의 고도제어를 위해서는 지속적이고 안정적인 고도를 제공하는 것이 매우 중요하며, 이를 위해서 기압고도계를 이용한 고도 측정치가 많이 이용되어왔다. 그러나 비록 초기에 정확하게 기압고도계를 조정하였다고 하더라도, 시간 경과 및 비행체의 이동 등에 따라 현재 비행중인 대기의 기압 및 온도분포가 변화하므로, 기압고도계 측정오차는 지속적으로 증가하게 된다. 이에 반하여 GPS 등의 보조 고도센서들은 기압고도계에 비하여 측정 오차 증가폭은 적으나, 불규칙 오차의 크기가 크고 비행체의 자세나 주변 환경에 따라 센서를 이용하지 못하는 구간이 발생할 수 있다. 따라서 안정적인 무인비행체의 비행을 위해서는 이러한 두 종류의 센서들의 단점을 극복하고 정확한 고도 정보를 지속적으로 제공할 수 있는 기준고도 생성필터의 설계가 요구된다. 이러한 기준고도 생성필터는 참고문헌 [1]에서 제시한 기법을 응용하여 보조고도센서 측정치로 기압고도계의 오차를 추정/보상함으로써 구현될 수 있으나, 이 경우 필터의 주된 설계 변수인 전이확률 설정시 실제 대기변화특성을 효과적으로 반영하기 어려운 문제점이 있다. 본 논문에서는 기압고도계의 특성을 확률적으로 모델링하고 이 모델에 입각하여 필터를 유도함으로써 이러한 문제점을 해결하였다.

일반적으로 대기조건의 변화에 따른 기압고도계의 오차 특성은 대략 편향오차(bias error)와 환산계수오차(scale factor

error)로 나타남이 알려져 있다[1,2]. 이러한 편향오차와 환산계수오차는 최초로 설정된 기압고도계의 계수의 초기치와 현재 기압고도계를 운용중인 대기에 해당하는 계수들과의 차이에 의하여 발생한다. 이 경우, 대기의 온도, 압력 등의 특성 변화는 시간 및 위치 변화에 따라 점진적으로 진행되므로, 본 논문에서는 이러한 변화에 의하여 야기되는 기압고도계 오차 성분들을 Random Walk로 모델링하였다. 한편, 기압고도계의 고도오차는 GPS 등에 의하여 측정되는 보조고도측정치와의 차이에 의하여 측정될 수 있으나, 그 관계는 일반적인 선형 측정방정식으로 표현할 수 있는 한도를 넘어서므로 본 논문에서는 다중가설검증기법(Multiple Hypothesis Test)의 개념에서 ZSB(Zero-Scan-Back) 필터를 구성하는 방법을 취하였다[3]. 2장과 3장에서는 기압고도계 오차 모델 및 ZSB 필터를 유도하였으며, 4장에서는 시뮬레이션을 통하여 GPS를 보조고도센서로 가정한 경우의 성능을 검토하였다.

2. 기압고도계 오차모델

일반적으로 지표면에 가까운 대기에서 고도와 대기특성과의 관계는 대체로 다음과 같은 식으로 표현됨이 널리 알려져 있다[2].

$$H_p = H_0 + \frac{T_0}{\Gamma} \left[\left(\frac{P}{P_0} \right)^{-\frac{\Gamma}{g}} - 1 \right] \quad (1)$$

여기서, H_p 는 현재 비행중인 고도(기압고도), Γ 는 기온감율, R 은 기체상수, H_0 , T_0 , P_0 는 기압고도계를 초기화한 지점에서의 고도, 온도, 압력이다. 이제 비행체가 비행중인 대기의 상태가 기압고도계를 초기화한 지점에 비하여 온도는 $T_0 + \Delta T$, 압력은 $P_0 + \Delta P$ 로 변화하였다고 상정하고, 식(1)을 테일러시리즈로 전개하여 고차항을 무시하면 다음과 같은

저자 소개

* 황익호 : 國防科學研究所 責任研究員 · 工博

** 나원상 : 國防科學研究所 先任研究員

결과를 얻을 수 있다[1].

$$H_p + \Delta H \approx H_p + \frac{\Delta T}{T}(H_p - H_0) + \frac{RT_0}{g} \left(\frac{\Delta P}{P_0} \right) \quad (2)$$

따라서 기압고도계 오차 ΔH 는 대략 다음과 같은 편향오차 b 와 환산계수오차 a 에 의하여 야기되는 고도오차로 이루어진다고 할 수 있다.

$$a = \frac{\Delta T}{T}, \quad b = \frac{RT_0}{g} \left(\frac{\Delta P}{P_0} \right) \quad (3)$$

식(3)에서 볼 수 있듯이, 기준고도 H_0 에서의 온도변화는 환산계수오차를 발생시키며, 압력변화는 편향오차를 발생시킨다고 할 수 있다. 그런데 온도 및 압력의 변화는 기준점과의 시간적 공간적 거리가 증가함에 따라 더 크게 나타난다고 할 수 있으므로, 다음과 같이 Random Walk을 이용하여 기압고도오차를 확률적으로 모델링할 수 있다.

$$a_{k+1} = a_k + w_k^a \quad (4)$$

$$b_{k+1} = b_k + w_k^b \quad (5)$$

여기서 a_k 와 b_k 는 각각 시간 k 에서의 환산계수오차와 편향오차의 크기이며, w_k^a 와 w_k^b 는 공분산이 각각 Q_k^a 와 Q_k^b 인 영평균 백색잡음이다. 또한 Q_k^a 와 Q_k^b 는 다음과 같이 이동거리 Δl_k 및 경과시간 Δt_k 에 비례하는 값을 가진다고 모델링한다.

$$Q_k^a = Q_l^a \Delta l_k + Q_t^a \Delta t_k \quad (6)$$

$$Q_k^b = Q_l^b \Delta l_k + Q_t^b \Delta t_k \quad (7)$$

3. 기압고도계 오차 식별을 통한 기준고도생성필터

기압고도계의 환산계수오차가 다음과 같이 미리 정해진 환산계수오차후보 $\{a^{(i)}, i=1, \dots, m\}$ 들의 Bayesian 합으로 표현된다고 가정하자.

$$a_k = \sum_{i=1}^m a^{(i)} \alpha_k^{(i)} \quad (8)$$

여기서 $\alpha_k^{(i)} = \Pr\{a_k = a^{(i)}\}$ 이다. 따라서 환산계수오차 추정문제는 현재 시각에서의 환산계수오차후보들의 사후 확률(a posteriori probability)을 계산하는 문제로 생각할 수 있다. 이 확률은 베이즈의 법칙으로부터 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \alpha_{kk}^{(i)} &= \Pr\{a_k = a^{(i)} | Z^k\} \\ &= \frac{1}{c_1} Pr\{z_k | a_k = a^{(i)}, Z^{k-1}\} \\ &\quad \times \sum_j Pr\{a_k = a^{(i)} | a_{k-1} = a^{(j)}, Z^{k-1}\} \alpha_{k-1, k-1}^{(j)} \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 c_1 은 $\sum_i \alpha_{kk}^{(i)} = 1$ 을 만들기 위한 정규화 상수(normalizing constant)이다. 식(9)로부터 $\alpha_{kk}^{(i)}$ 를 계산하기 위해서는 이전 시간의 $\{\alpha_{k-1, k-1}^{(i)}, i=1, \dots, m\}$ 들을 알아야 하며, 각각의 $\alpha_{k-1, k-1}^{(i)}$ 들은 또다시 $\{\alpha_{k-2, k-2}^{(i)}, i=1, \dots, m\}$ 의 확률치를 요구하므로, 시간이 지남에 따라 알아야 할 $\alpha^{(i)}$ 의 사후확률의 개수는 지수적으로 증가한다. 이러한 특성으로 인하여 식(9)를 직접적으로 이용하여 필터를 구성하는 것은 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 ZSB 개념에서 식(9)를 근사화하여 실제로 구현이 가능한 준최적 필터를 유도하였다.

ZSB 필터란 매시간 단 하나의 환산계수오차를 선정하고

나머지 가능성은 모두 버리는 형태의 필터를 의미하며, 이러한 관점에서 식(9)를 재정리하면 다음과 같다.

$$\alpha_{kk}^{(i)} = \frac{1}{c_2} Pr\{z_k | a_k = a^{(i)}, Z^{k-1}\} Pr\{a_k = a^{(i)} | a_{k-1} = a_{k-1}^{ZSB}, Z^{k-1}\} \quad (10)$$

여기서 a_{k-1}^{ZSB} 은 시각 $k-1$ 에서 환산계수오차의 ZSB 추정치이며, c_2 는 정규화상수이다.

2장에서 환산계수오차의 시간에 대한 확률적 전파모델을 식(4)와 같은 Random Walk로 설정하였으므로, 식(10) 우변의 둘째 항은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$Pr\{a_k = a^{(i)} | a_{k-1} = a_{k-1}^{ZSB}, Z^{k-1}\} = \mathfrak{N}(a^{(i)} - a_{k-1}^{ZSB}, Q_{k-1}^a) \quad (11)$$

여기서 $\mathfrak{N}(x; P)$ 은 $\mathfrak{N}(x; P) = \frac{1}{2\pi\sqrt{P}} e^{-\frac{1}{2}x^T P^{-1}x}$ 의 정규분포 확률밀도함수를 나타낸다.

표 1. $\{a_{k+1} = a^{(i)}\}$ 의 조건하에서의 ZSB 칼만필터

System Propagation:

$$P_{k+1|k} = P_{kk}^{ZSB} + Q_k^b$$

$$\hat{b}_{k+1|k} = \hat{b}_{kk}^{ZSB}$$

Measurement Update:

$$P_{k+1|k+1}^{(i)} = (1 - K_{k+1}^{(i)}) P_{k+1|k}$$

$$\hat{b}_{k+1|k+1}^{(i)} = \hat{b}_{k+1|k}^{(i)} + K_{k+1}^{(i)} r_{k+1}^{(i)}$$

여기서 $K_{k+1}^{(i)} = P_{k+1|k} [S_{k+1}^{(i)}]^{-1}$, $S_{k+1}^{(i)} = P_{k+1|k} + R_k^{(i)}$,

$$R_k^{(i)} = R_k^o + (1 + a^{(i)})^2 R_k^{ref},$$

$$r_{k+1}^{(i)} = z_{k+1}^{(i)} - \hat{b}_{k+1|k},$$

$$z_{k+1}^{(i)} = z_{k+1}^{Baro} - (1 + a^{(i)}) z_{k+1}^{ref}$$

식(10) 우변의 첫 번째 항은 현재 가정된 환산계수오차가 $a^{(i)}$ 일 때 인가된 측정치의 공산함수(likelihood)를 나타낸 것으로서 표 1과 같이 $\{a_k = a^{(i)}\}$ 의 조건하에서의 칼만필터를 구동하여 그 잔류오차(residual)를 구하고 식(12)와 같이 그 확률을 계산함으로써 얻어진다.

$$Pr\{z_k | a_k = a^{(i)}, Z^{k-1}\} = \mathfrak{N}(r_k^{(i)}; S_k^{(i)}) \quad (12)$$

식에서 이용된 변수들은 표 1에서 정의한 값을 이용한다. 표 1의 부 칼만필터에서 입력 측정치는 기압고도계고도 z_{k+1}^{Baro} 와 GPS 등으로 측정된 보조 고도 측정치 z_{k+1}^{ref} 의 차와 가정된 환산계수오차로부터 계산된 $z_{k+1}^{(i)}$ 임에 유의하자.

최종 ZSB 추정치는 환산계수오차의 변화가능성을 모두 종합하여 다음과 같이 구한다.

$$\hat{a}_{k+1|k+1}^{ZSB} = \sum_{i=1}^m a^{(i)} \alpha_{k+1|k+1}^{(i)} \quad (13)$$

$$\hat{b}_{k+1|k+1}^{ZSB} = \sum_{i=1}^m \hat{b}_{k+1|k+1}^{(i)} \alpha_{k+1|k+1}^{(i)} \quad (14)$$

$$P_{k+1|k+1}^{ZSB} = \sum_{i=1}^m P_{k+1|k+1}^{(i)} \alpha_{k+1|k+1}^{(i)} \quad (15)$$

$$+ \sum_{i=1}^m \left[\hat{\delta}_{k+1|k+1}^{(i)} - \hat{\delta}_{k+1|k+1}^{ZSB} \right]^2 \alpha_{k+1|k+1}^{(i)}$$

이상의 결과를 종합하여 정리하면 다음과 같은 필터 알고리즘을 얻는다.

[Step 1] 시각 k 에서 환산계수오차의 변화 가설 $\{a_k = a^{(i)}, i=1, \dots, m\}$ 을 작성하고, 각각의 가설에 대하여 $\{a_k = a^{(i)}\}$ 의 조건하에서의 ZSB 칼만필터를 구동한다. 이때 수식은 표 1 수식에 시각 $k-1$ 에서의 환산계수오차 추정치 a_{k-1}^{ZSB} 와 편향오차 추정치 $\hat{b}_{k-1|k-1}^{ZSB}$ 및 그 오차공분산 $P_{k-1|k-1}^{ZSB}$ 를 적용한 것을 사용한다.

[Step 2] 시각 k 에서 환산계수오차의 변화 가설 각각에 대한 신뢰확률을 다음의 식을 이용하여 계산한다.

$$\alpha_{kk}^{(i)} = \frac{1}{c_2} \mathfrak{N}(r_k^{(i)}; S_k^{(i)}) \mathfrak{N}(a^{(i)} - a_{k-1}^{ZSB}; Q_{k-1}^a) \quad (16)$$

여기서 c_2 는 $\sum_i \alpha_{kk}^{(i)} = 1$ 을 만들기 위한 정규화 상수이다.

[Step 3] 식(13),(14),(15)를 이용하여 현재 시각 k 에서의 환산계수오차 및 편향오차의 ZSB 추정치를 구한다.

[Step 4] [Step 1]부터 반복한다.

이상과 같이 추정된 기압고도계의 편향오차와 환산계수오차를 이용하여 매 시간 기압고도계 측정치를 보상함으로써 최종적인 기준고도를 얻는다. 기준고도 생성필터의 운용방식은 GPS 등의 보조 고도 센서의 측정치가 발생할 때에는 기압고도계의 오차를 추정하고, 보조 고도 측정치가 존재하지 않는 구간에서는 가장 최근에 추정된 기압고도계 편향오차와 환산계수오차를 이용하여 기압고도를 보상하는 방식으로서, 보조센서가 동작하지 않는 구간에서도 정확한 보정기압고도를 안정적으로 제공하는 장점이 있다.

4. 시뮬레이션 및 결론

본 장에서는 표준편차 70m의 GPS를 보조 고도센서로 설정하고, 3장에서 제안한 필터를 이용하여 기압고도계의 오차를 보상하는 기준고도생성필터를 설계하고 그 성능을 검토하였다. 시뮬레이션에 이용한 필터운용 조건은 기압고도계의 초기오차를 0으로 가정한 것을 제외하면 참고문헌 [1]의 시뮬레이션 조건과 같다.

그림 1-3은 시뮬레이션 결과 나타난 필터의 편향오차 및 환산계수오차 추정성능과 필터에서 최종적으로 제공하는 기준고도의 RMS 오차를 도시한 것이다. 그림을 살펴보면 제안된 필터는 기존의 방식[1]을 이용한 것과 거의 유사한 성능을 보임을 알 수 있다. 그러나 물리적인 의미 없이 필터의 전이 확률을 선정하여야 하는 기존의 방식에 비하여 제안된 필터는 대기 변화에 관련된 특성을 감안하여 Q_k^a 와 Q_k^b 를 선정할 수 있으므로 대기 변화 측정자료를 이용하여 보다 실용적으로 쉽게 필터 파라미터를 선정할 수 있는 장점이 있다.

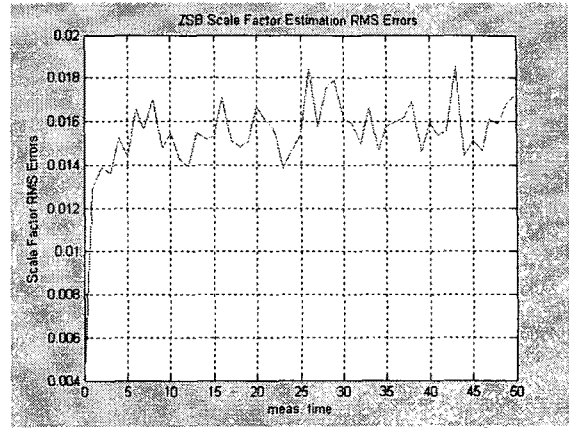


그림 1. ZSB 환산계수추정 RMS오차

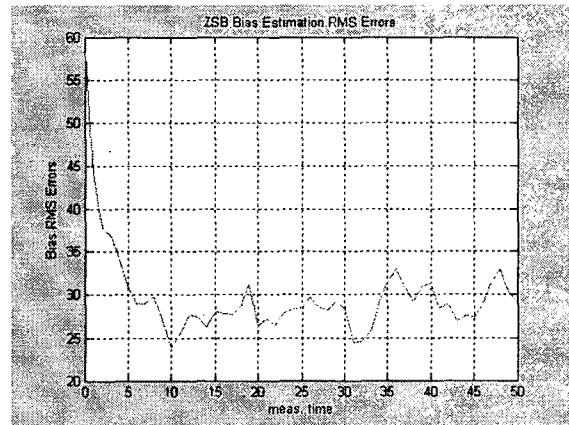


그림 2. ZSB 편향오차추정 RMS오차

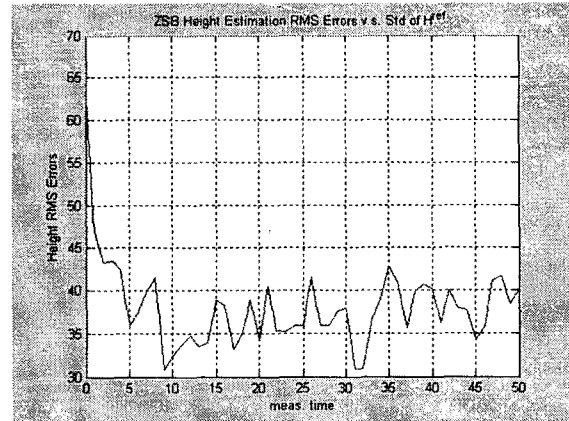


그림 3. ZSB 기준고도 RMS오차

참 고 문 헌

- [1] 황익호, 김승환, "모델전이 기법을 이용한 기압고도계의 오차추정", 대한 전기학회 논문지, 3호, 제 46권, 1997. 3.
- [2] Siouris, G.M., *Aerospace Avionics Systems*, Academic Press, 1993.
- [3] Blackman, S.S., *Multiple Target Tracking with Radar Applications*, Artech House, 1986