

GPS/INS/기압고도계의 웨이블릿 센서융합 기법

Sensor Fusion of GPS/INS/Baroaltimeter Using Wavelet Analysis

김 성 필*, 김 응 태, 성 기 정

(Seong Pil Kim, Eung Tai Kim, and Kie Jeong Seong)

Abstract : This paper introduces an application of wavelet analysis to the sensor fusion of GPS/INS/baroaltimeter. Using wavelet analysis the baro-inertial altitude is decomposed into the low frequency content and the high frequency content. The high frequency components, 'details', represent the perturbed altitude change from the long time trend. GPS altitude is also broken down by a wavelet decomposition. The low frequency components, 'approximations', of the decomposed signal address the long-term trend of altitude. It is proposed that the final altitude be determined as the sum of both the details of the baro-inertial altitude and the approximations of GPS altitude. Then the final altitude exclude long-term baro-inertial errors and short-term GPS errors. Finally, it is shown from the test results that the proposed method produces continuous and sensitive altitude successfully.

Keywords : baroaltimeter, GPS, INS, sensor fusion, wavelet analysis

I. 서론

항공기에서 고도 측정은 기압고도계와 관성항법센서(INS)를 사용하는 것이 일반적이다. 기압-관성센서 융합 시스템은 관성항법시스템의 수직 채널(고도)이 중력 모델의 오차로 인해 발산하는 것을 방지하기 위해, 두 센서의 오차를 되먹임 하는 구조로 되어 있다. 관성항법센서와 기압고도계의 고도 차이로 수직 방향 시스템의 감쇠비를 증가시켜 안정성을 높이는 것이다[1,2]. 기압-관성항법 융합 시스템은 초기에는 2차 구조가 사용되었으나, 현재는 대부분 3차 구조 시스템을 사용하는 것으로 알려져 있다[1].

위성항법기술이 급속히 발전함에 따라 GPS를 이용해 위치와 속도뿐만 아니라 고도 정보까지 획득하는 추세에 있다. GPS 고도를 비행제어시스템에 적용하기 위하여, 기존의 관성항법시스템이나 기압고도계와 융합하려는 연구가 활발히 수행되고 있다. 참고문헌 [3]에서는 GPS와 기압고도계를 결합한 고도 항법 알고리즘을 소개하고 있다. 그런데 GPS와 기압고도계는 관성항법시스템에 비해 측정 속도가 느려, 이착륙과 같은 기민한 비행 상황에서는 적용하기 어려운 단점이 있다. 한편 GPS를 이용해 INS 수직 채널의 불안정성을 보정하려는 연구도 수행된 바 있다[4]. El-Sheimy 등은 웨이블릿 해석을 이용한 GPS/INS 융합 기법을 소개하였다[5]. 이들은 GPS와 INS 신호에 대해 각각 웨이블릿 다해상도(multiresolution) 해석을 적용한 다음, 각 details를 결합하여 INS 오차 보정 신호를 추출해냈다.

한편 GPS 고도를 되먹임하지 않고 GPS와 기압-관성항법센서를 융합하는 기법에 대한 연구가 수행된 바 있다[6]. 이 논문에서는 기존의 기압-관성항법 결합 시스템이 기압고도와 관성센서의 수직 가속도를 입력으로 받는 상보(相

補) 필터(complementary filter) 구조인 점에 주목하여, 이를 GPS 융합에까지 확장하였다. 일반적으로 GPS 고도는 오랜 시간이 지나도 발산하지 않고 일정한 범위 안에서 유지되는 장점이 있다. 반면 INS의 가속도를 적분해서 구한 고도는 오차가 누적되어 발산할 수 있다. 기압고도계는 점진적인 대기 환경의 변화에 영향을 받는다. 즉 INS 센서는 단기간 측정에 적합하고, 기압고도계와 GPS는 각각 중기와 장기간 측정에 적합한 특성을 갖고 있다. 이처럼 상호보완적인 세 센서를 효과적으로 융합하여, 장기간 발산하지 않으면서 기민한 기동에는 민감하게 반응하는 고도 측정 기법을 제시하였다. 그런데 제안된 기법은 GPS와 기압-관성항법센서의 융합을 위해 칼만필터를 이용하고 있다. 일반적으로 칼만필터는 좋은 성능을 보이지만, 모델이 부정확한 경우에는 발산할 수 있고 측정 신호에 백색 잡음(white noise)이 섞여 있는 경우에만 사용할 수 있는 단점이 있다.

본 논문에서는 웨이블릿 해석(wavelet analysis) 기법을 적용하여 GPS/INS/기압고도계를 결합하는 새로운 센서융합 알고리즘을 소개한다. 이산 웨이블릿 변환(discrete wavelet transform)을 사용하여 측정값을 장기 경향과 단기 변화로 분리한 다음, GPS와 기압-관성센서의 특성에 따라 융합하여 최종 고도를 생성한다. 이렇게 함으로써 GPS 고도를 되먹임하지 않는 등 기존의 기법이 갖는 장점은 그대로 유지하면서 칼만필터의 한계로 인한 단점을 극복할 수 있다.

논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서는 일반적으로 많이 사용되는 2차와 3차 기압-관성항법 결합 시스템을 살펴보고, 이들이 기압고도계의 고도와 관성센서의 수직 가속도를 입력으로 하는 상보 필터(complementary filter)임을 소개한다. III 장에서는 웨이블릿 해석의 기본 이론을 소개하고, 센서 융합 알고리즘에 사용되는 이산 웨이블릿 변환(discrete wavelet transform)에 대해 살펴본다. IV 장에서는 웨이블릿 해석을 이용한 새로운 GPS/INS/기압고도계 센서 융합 기법을 제안한다. 기존의 칼만필터 대신 이산 웨이블

*책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2008. 9. 30, 채택확정 : 2008. 10. 30.

김성필, 김응태, 성기정 : 한국항공우주연구원

(spkim@kari.re.kr/eungkim@kari.re.kr/kjseong@kari.re.kr)

릿 변환을 적용하여 얻을 수 있는 특징점도 살펴본다. V 장은 새로 제안된 기법의 성능과 적용 가능성을 확인하기 위해 수행한 실험 결과를 소개한다. 마지막으로 VI 장에서는 연구 결과를 요약하고 앞으로 추가 연구가 필요한 내용을 제시한다.

II. INS/기압고도계 융합 고도 항법

관성항법센서가 측정한 수직방향 가속도로 고도를 계산하기 위해서는 중력 가속도를 보상한 다음 적분을 수행해야 한다. 그런데 중력 가속도를 보상할 때 사용되는 중력모델의 오차는 수직방향 항법시스템에 양(positive)의 되먹임 효과로 작용하여 고도 오차는 차츰 증폭되어 결국 발산하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 다른 종류의 고도 센서가 필요한데 보통 기압고도계가 쓰인다[5].

기압고도계는 반응시간은 느리지만 측정값은 비교적 정확하고 안정적이다. 반면에 관성센서는 고도의 변화에는 민감하지만 오차가 누적되어 결국에는 발산한다는 단점이 있다. 이러한 두 센서의 서로 대조되는 특성을 적절히 조화시켜 각각의 장점만을 모아 더 정확한 고도를 얻고자 하는 것이 INS/기압고도계 융합 시스템의 목적이다. 기압고도계를 이용한 고도 오차 보정에는 2차나 3차 구조가 대표적인데, 정확성과 측정 속도 등에서 뛰어난 3차 구조가 많이 사용되는 것으로 알려져 있다[1].

1. 2차 되먹임 구조

일반적으로 2차 되먹임 구조는 그림 1과 같이 관성항법센서의 수직 방향 가속도 값(\ddot{h}_a)로 계산한 고도와 기압고도계(h_B)의 오차를 각각 가속도와 속도 성분에 되먹임하는 방식으로 되어 있다[6].

두 센서의 측정값이 최종 고도값(h_e)에 어떻게 반영되는지는 되먹임 이득(C_1, C_2)에 의해서 결정되는데, 이 두 값의 물리적인 의미는 2차 되먹임 구조를 상보 필터로 바꾸어 보면 명확해진다[8]. 그림 1에서 h_e 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} h_e &= \frac{1}{s} \left[\frac{1}{s} \ddot{h}_a - C_2(h_e - h_B) - C_1(\dot{h}_e - \dot{h}_B) \right] \\ &= \frac{1}{s^2} \ddot{h}_a - C_2 \dot{h}_e - \frac{1}{s} C_1(h_e - h_B) \\ &= \frac{1}{s^2} \ddot{h}_a - \frac{C_1 s + C_2}{s^2} (h_e - h_B) \\ &= [1 - G] \left(\frac{1}{s^2} \ddot{h}_a \right) + G h_B \end{aligned} \tag{1}$$

식 (1)을 h_e 에 대해 정리하면 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} h_e &= \frac{s^2}{s^2 + C_1 s + C_2} \left(\frac{1}{s^2} \ddot{h}_a \right) \\ &\quad + \frac{C_1 s + C_2}{s^2 + C_1 s + C_2} h_B \\ &= [1 - G] \left(\frac{1}{s^2} \ddot{h}_a \right) + G h_B \end{aligned} \tag{2}$$

여기서, $G = \frac{C_1 s + C_2}{s^2 + C_1 s + C_2}$ 이다. 식 (2)로부터 그림 1의 융합시스템은 상보 필터임을 알 수 있다. 즉 가속계의 고도는 고주파 영역에, 기압고도는 저주파 영역에 반영되는 구조이다. 이때 되먹임 이득(C_1, C_2)은 저주파 필터의 특성을 결정하는 인자가 된다. 이러한 2차 되먹임 구조의 되먹임 이득을 최적화하는 방법에 대한 연구도 수행된 바 있다[9].

2. 3차 되먹임 구조

2차 되먹임 구조는 3차 되먹임 구조에 비해 계산이 간단하다는 장점이 있으나 가속도계의 바이어스 오차가 그대로 속도의 바이어스 오차에 반영되는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 그림 2와 같은 3차 되먹임 구조가 개발되었다. 그림에서 보듯이 관성센서와 기압고도계 고도의 오차를 적분하여 되먹임하는 과정이 새로 추가되었다. 이 적분기가 가속도계의 바이어스 오차를 보상하는 역할을 하게 된다[7].

식 (1~2)와 비슷한 과정을 거쳐 h_e 에 대해 정리하면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$h_e = [1 - G] \left(\frac{1}{s^2} \ddot{h}_a \right) + G h_B \tag{3}$$

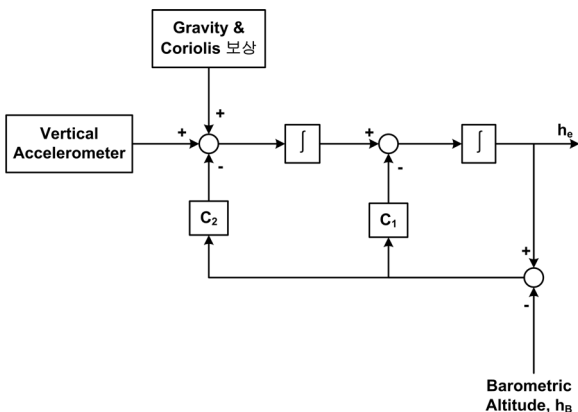


그림 1. 기압/관성센서 결합(2차 구조).

Fig. 1. Second-order vertical-channel damping.

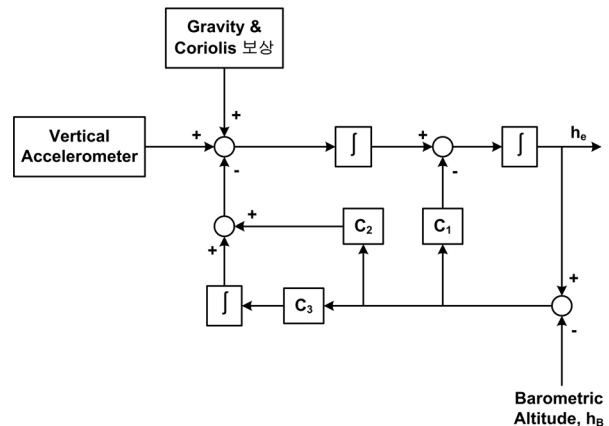


그림 2. 기압/관성센서 결합(3차 구조).

Fig. 2. Third-order vertical-channel damping.

여기서 $G \equiv \frac{C_1s^2 + C_2s + C_3}{s^3 + C_1s^2 + C_2s + C_3}$ 이다. 식 (3)으로부터 3차

되먹임 구조 역시 상보 필터의 형태를 가지고 있음을 확인할 수 있다. 즉 저주파 영역에서는 기압고도계의 측정값을, 고주파 영역에서는 가속도계의 측정 고도를 더 많이 반영하는 특성을 가지고 있다.

III. 웨이블릿 해석

웨이블릿 해석은 Morlet과 Grossman이 수학적 이론을 정립한 1980년대 중반이후 신호처리 분야에서 폭넓게 사용되고 있다[10]. 푸리에 변환이 신호의 주파수 정보만을 제공하는 것과 달리, 웨이블릿 해석은 시간영역에 담겨진 정보도 함께 제공해주기 때문이다. 이처럼 웨이블릿 기법은 부분적인 시간영역 해석이 가능해 비정상(nonstationary) 신호나 빠른 과도(transient) 신호 분석에 효과적이다. 웨이블릿 변환에는 연속 웨이블릿 변환(continuous wavelet transform)과 이산(discrete) 웨이블릿 변환이 있는데, 이산 웨이블릿 변환은 빠른 계산을 위해 척도(scale)와 이동(shifting) 인자를 2의 배수로 하는 것 외에는 같은 개념이므로 본 논문에서는 연속 웨이블릿 변환만 소개한다. 실수값을 갖는 신호 $f(t)$ 에 대한 연속 웨이블릿 변환은 다음과 같이 정의된다.

$$W_f(s, \tau) \equiv \frac{1}{\sqrt{s}} \int f(t) h\left(\frac{t-\tau}{s}\right) dt \quad (4)$$

여기서 s 는 척도 인자(scale factor)이고, τ 는 이동 인자(shifting factor)를 의미한다. $h(t)$ 는 웨이블릿을 나타낸다. 식 (4)를 살펴보면 미리 정의된 웨이블릿 함수의 척도를 바꾸고, 시간축 위치를 바꿔가면서 입력신호의 곱을 계산하는데, 입력신호와 웨이블릿의 신호가 일치할 때 가장 큰 변환값이 나오게 된다. 국소 푸리에 변환(short time fourier transform)도 시간 정보가 있는 창문함수를 통해 시간영역의 정보를 제공하지만, 창문함수의 해상도가 고정되어 있어 신호에 따른 유연한 대처를 할 수 없다. 이에 반해 웨이블릿 변환은 웨이블릿 함수를 확장 또는 축소시킬 수 있어 신호의 특성에 맞게 유연한 대처를 할 수 있다는 장점이 있다.

그림 3에 이산 웨이블릿 변환의 개념을 보였다. 입력 신호는 이산 웨이블릿 변환을 거치면 ‘approximations’와 ‘details’로 분리된다. Approximations는 입력신호의 고척도 즉 저주파 성분을 추출한 신호이고, details는 저척도 즉 고주파 성분에 해당되는 신호이다. 그림 4와 같이 이러한 변환과정을 반복 적용하면 다해상도 분석도 수행할 수 있다 [10].

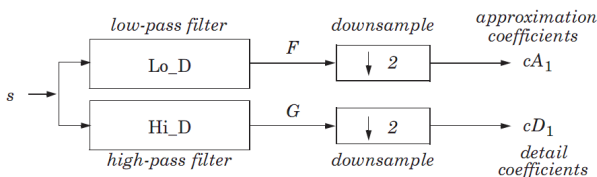


그림 3. 이산 웨이블릿 변환.
Fig. 3. Discrete wavelet transform.

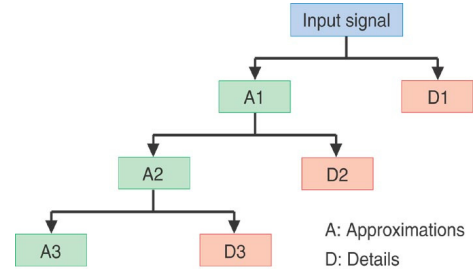


그림 4. 웨이블릿 다해상도 분해[5].
Fig. 4. Multiresolution wavelet decomposition[5].

IV. GPS/INS/기압고도계 융합 알고리즘

II 장에서 살펴보았듯이 일반적인 INS/기압고도계 융합 방법은 두 센서의 고도 측정값 차이를 되먹임 하는 폐회로 구조를 취하고 있다. 그러나 실제로는 INS의 측정값과 기압고도계의 측정값을 주파수 영역에 따라 적절히 조합하여 고도를 계산하는 개회로 방식의 상보 필터이다. 이 때문에 기압고도계의 시간에 따른 오차를 보상하지 못하고, 점차 기압고도계의 오차 특성을 따라 고도 값에 오차가 발생하게 된다. 최근 들어 이를 보완하기 위해 오차가 누적되지 않는 GPS를 함께 융합한 GPS/INS/기압고도계 융합 방법 알고리즘이 개발되었다[6].

그림 5를 보면 기압고도계와 관성항법센서의 융합에는 일반적인 2차 구조가 사용되고 있다. 그리고 GPS 고도는 기압-관성센서 고도 보상에 직접 사용되지 않는다. 이 방법에서는 우선 저대역 필터의 역할을 하는 칼만필터를 이용해 기압-관성센서 고도의 장기 추세 값을 구한 다음, 기압-관성센서의 고도(h_e)와 이 고도의 장기 추세의 차이를 계산한다. 이 값은 물리적으로 장기 추세 고도에 대한 현재 고도의 상대적인 섭동값(perturbation)에 해당한다. 이 섭동값에는 관성센서의 누적 오차나 기압고도계의 환경변화에 따른 오차가 포함되지 않는다. 고도의 장기적인 추세에 영향을 주는 이들 오차는 칼만필터를 통과하므로 측정고도와 빠른 과정에서 소거되기 때문이다.

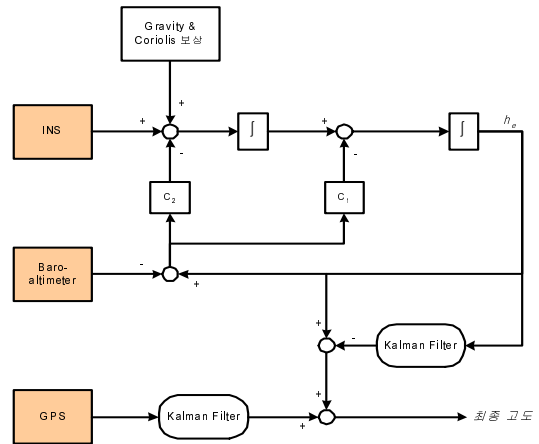


그림 5. GPS/INS/기압고도계 융합알고리즘.
Fig. 5. GPS/INS/Baroaltimeter fusion algorithm.

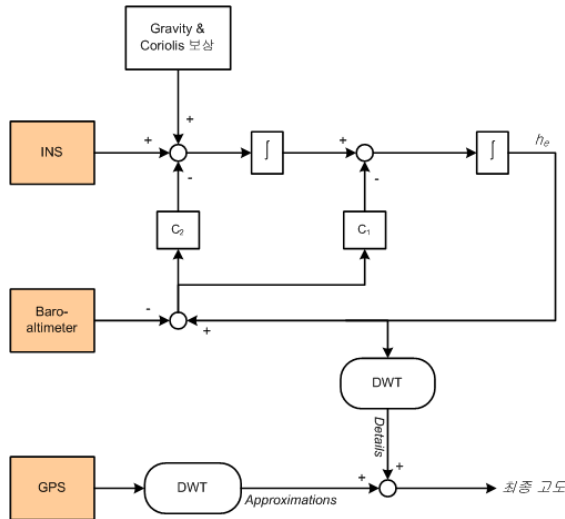


그림 6. 웨이블릿을 이용한 GPS/INS/기압고도계 융합.
Fig. 6. GPS/INS/Baroaltimeter wavelet sensor fusion.

한편 GPS 고도 측정값은 저대역 필터 역할을 하는 칼만 필터를 통과하도록 되어 있다. 위성 신호의 단절과 같은 일시적인 요인에 의한 GPS 고도 오차를 제거하기 위함이다. 이렇게 얻은 두 고도 정보를 더하여 최종 고도를 얻어내게 된다. 즉 장기적인 고도 변화는 GPS 고도값을 반영하고, 중·단기에 걸친 고도 변화는 기압-관성센서의 측정값을 사용하는 것이 이 기법의 핵심 개념이다. 그런데 일반적으로 칼만필터는 좋은 성능을 보이지만 모델이 부정확한 경우에는 발산할 수 있다. 그리고 측정 신호에 백색 잡음(white noise)이 섞여 있는 경우에만 사용할 수 있다는 단점이 있다.

본 논문에서는 이러한 문제를 보완하기 위해 웨이블릿 해석(wavelet analysis) 기법을 적용하여 GPS/INS/기압고도계를 결합하는 새로운 센서융합 알고리즘을 소개한다. 이산 웨이블릿 변환(discrete wavelet transform)을 사용하여 고도를 장기 추세와 단기 변화로 분리한 다음, GPS와 기압-관성센서의 특성에 따라 융합하여 최종 고도를 생성한다. 이렇게 함으로써 기존 기법의 장점은 그대로 유지하면서 칼만필터의 단점을 보완할 수 있도록 하였다. 그림 6에 새로 제안하는 GPS/INS/기압고도계 센서 융합 알고리즘을 보였다. 기압-관성센서의 고도에서는 장기 추세에 대한 섭동값이 필요하므로 이산 웨이블릿 변환 출력 중 고주파 성분(details)만 취한다. GPS는 고도의 장기 추세 변화 측정에 사용하므로 이산 웨이블릿 변환 출력 중 저주파 성분(approximations)만 사용한다. 이렇게 구한 두 값을 더해 최종 고도를 결정하게 된다. 각 웨이블릿 변환은 신호의 특성에 따라 다해상도 변환을 수행할 수도 있다.

V. 시험 및 분석

이 장에서는 IV 장에서 제안한 고도 항법 알고리즘의 검증을 위해 수행한 시험 결과 분석을 통해 그 성능과 타당성을 살펴본다. 시험에는 러시아 TeKnoi사의 GPS/INS 센서와 자체 제작한 기압고도계를 사용하였다. 시험은 차량을 이용해 도심 구간을 1시간 정도 주행하면서 실시하였으며,

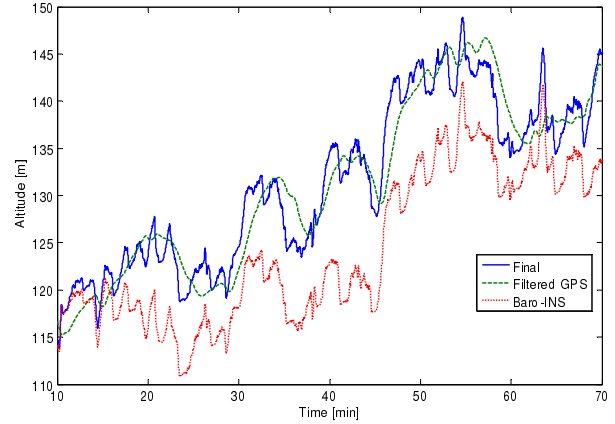


그림 7. GPS/INS/기압고도계 융합 결과(칼만필터).
Fig. 7. GPS/INS/Baroaltimeter fused altitude (Kalman filter).

기압고도계의 값은 10Hz로, GPS 고도값은 1Hz의 간격으로 측정하였다.

참고문헌 [6]의 고도 융합 알고리즘의 수행 결과를 그림 7에 보였다. 그림에서 실선은 융합된 최종 고도이고, 점선은 2차 구조의 기압-관성센서 결합 고도를 나타낸다. 그리고 쇄선은 칼만필터를 통과한 GPS 고도를 의미한다. 그림에서 최종 고도의 장기 추세는 필터링된 GPS 고도를 따라가지만, 단기적인 움직임은 기압-관성센서의 출력을 반영하고 있다. GPS 고도 정보가 단기간의 고도 변화를 민감하게 반영하지 못하는 단점을 기압-관성센서의 측정값을 이용하여 성공적으로 보완하고 있음을 알 수 있다. 그 결과 대기 환경 변화에서 비롯되는 기압고도계의 오차도 효과적으로 억제되고 있음을 볼 수 있다.

본 논문에서 제안한 웨이블릿 변환을 이용한 고도 융합을 위하여 GPS와 기압-관성센서 모두 ‘Daubechies 4’ 웨이블릿을 사용하였다[5,10]. 그리고 각 웨이블릿 변환은 10단계까지 수행하였다. 이 때 입력신호(s)와 approximations (a₁₀) 및 details(d_i)의 관계는 다음과 같이 주어진다.

$$s = a_{10} + d_{10} + d_9 + \dots + d_1 \tag{5}$$

식 (5)에서 GPS 고도의 장기 추세는 웨이블릿 변환의 출력으로 나오는 approximations에서 바로 구할 수 있음을 알 수 있다. 그리고 기압-관성센서의 경우에는 각 단계마다 나오는 details만을 재구성하면 장기 추세에 상대적인 섭동값을 얻을 수 있다. 그림 8은 최종 고도 결과를 보여준다. 두 알고리즘 모두 장기적인 추세는 GPS 고도를 추종하고 세 부적인 고도 변화는 기압-관성센서의 값을 반영하고 있음을 볼 수 있다.

그림 9와 10에 최종 고도 계산에 사용된 기압-관성센서의 섭동값과 GPS 고도 장기 추세를 보였다. 웨이블릿 변환의 경우 기압-관성센서 고도의 섭동값은 더 작게 반영되었고, GPS 고도의 장기추세는 실제 측정값에 더 예민하게 반영된 것을 알 수 있다. 이들 값을 사용하는 웨이블릿의 종류와 웨이블릿 변환의 단계에 따라 달라지므로 운영 환경과 신호 특성을 고려하여 설계자가 선택하여야 한다. 그리

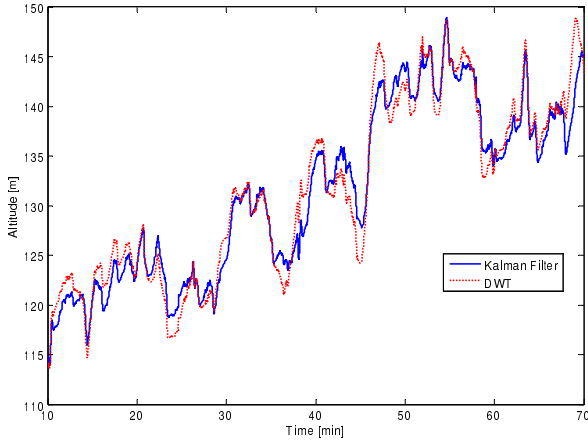


그림 8. 최종 융합 고도 비교.

Fig. 8. Comparisons of fused altitudes.

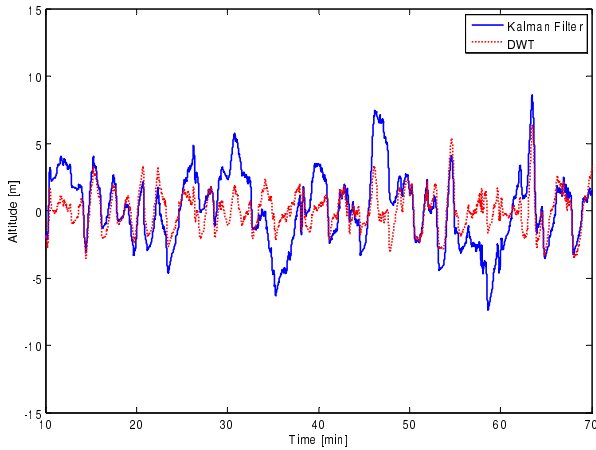


그림 9. 기압-관성센서 고도의 섭동값 비교.

Fig. 9. Deviated altitudes of baroaltimeter and INS.

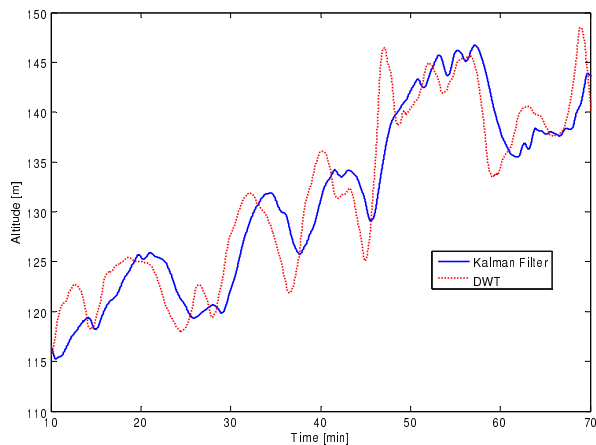


그림 10. GPS 고도 장기추세 비교.

Fig. 10. Comparisons of GPS altitude trajectories.

고 그림 10을 보면 칼만필터의 출력이 웨이블릿 변환에 비해 전반적으로 위상이 지연되고 있음을 볼 수 있다. 이는 칼만필터가 저대역 필터로 작용하기 때문이다.

VI. 결론

본 논문에서는 웨이블릿 해석을 이용한 GPS/INS/기압고도계 융합 항법 알고리즘을 제안하였다. 관성센서와 기압고도계의 융합에는 일반적인 2차 구조의 수직채널 댐핑 기법을 사용하고, 웨이블릿 해석을 이용하여 기압-관성 고도와 GPS 고도를 융합하였다. 이를 위해 이산 웨이블릿 변환으로 기압-관성센서 고도의 고주파 성분(details)과 GPS 고도의 저주파 성분(approximations)을 추출하고 그 합을 최종고도로 사용하였다. 그 결과 기존의 기압-관성센서 고도 항법에서는 기압고도 오차를 보상할 수 없는 문제를 성공적으로 해결할 수 있음을 보였다. 그리고 실제 시험을 통해 연속적이며 변화에 민감한 고도 정보를 얻을 수 있음을 확인하였다. 특히 칼만 필터를 사용함으로써 수반되었던 기존 기법의 모델링 오차로 인한 불안정성 문제와 백색잡음 신호에만 적용할 수 있는 제한 등을 효과적으로 극복할 수 있는 방안을 제시하였다. 끝으로 향후 다양한 웨이블릿 중에서 최적의 웨이블릿을 선정하는 문제와 다해상도 분석의 최적 단계 등에 대한 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] G. M. Siouris, *Aerospace Avionics Systems : A Modern Synthesis*, Academic Press, San Diego, pp. 209-223, 1993.
- [2] R. L. Blanchard, "A New Algorithm for Computing Inertial Altitude and Vertical Velocity," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, AES-7(6), pp. 1143-1146, November 1971.
- [3] 박경하, *GPS 수직축 안정화를 위한 GPS와 고도계의 결합*, 서울대학교 대학원, 2003.
- [4] 서재원, 이장규, 박찬국, *GPS를 이용한 INS 수직채널 감쇠루프의 오차 보정*, 제10차 GNSS Workshop, pp. 209-212, 2003.
- [5] N. El-Sheimy, A. Noureldin, S. Nassar, and A. Osman, "A New Way to Integrate GPS and INS," *GPS World*, Oct. 2005.
- [6] 김성필, 유창선, O. Salychev, 김웅태, "GPS/INS/기압고도계를 결합한 고도 결정 시스템 개발," *한국항공우주학회지*, 제33권, 제6호, pp. 51-56, 2006.
- [7] M. Kayton and W. R. Fried, *Avionics Navigation Systems*, John Wiley & Sons, New York, 1969.
- [8] R. G. Brown and P. Y. Hwang, *Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering*, John Wiley & Sons, pp. 178-181, 1997.
- [9] W. S. Widnall and P. K. Sinha, "Optimizing the Gains of the Baro-Inertial Vertical Channel," *AIAA Guidance and Control Conference*, 1978.
- [10] A. D. Poularikas, *The Transforms and Application Handbook*, CRC Press, Florida, 1996.



김 성 필

1994년 서울대학교 항공우주공학과 졸업. 1996년 동 대학원 석사. 2002년 동 대학 박사.
2002년~현재 한국항공우주연구원 선임 연구원. 관심분야는 항공기 유도제어, 탑재소프트웨어.



김 응 태

1981년 서울대학교 항공공학과 졸업. 1983년 한국과학기술원 석사. 1991년 Purdue 대학 박사.
1992년~현재 한국항공우주연구원 책임 연구원. 관심분야는 비행제어, 비행동역학, 항공기 시스템 식별, 항공기 설계.



성 기 정

1985년 한국항공대학교 항공기계공학과 졸업. 1987년 KAIST 석사. 2006년 한국항공대학 박사.
1987~1993년 대우중공업 우주항공연구소
1993년~현재 한국항공우주연구원 첨단 비행제어 팀장. 관심분야는 비행시험,

유인항공기 설계/개발.