

드리프트 오차 최소화를 위한 관성-기압센서 기반의 수직속도 추정 알고리즘

IMU-Barometric Sensor-based Vertical Velocity Estimation Algorithm for Drift-Error Minimization

지성인, 이정근*
(Sung-In Ji¹ and Jung Keun Lee^{1,2,*})

¹Dept. of Mechanical Engineering, Hankyong National University

²Institute of Machine Convergence Technology, Hankyong National University

Abstract: Vertical velocity is critical in many areas, such as the control of unmanned aerial vehicles, fall detection, and virtual reality. Conventionally, the integration of GPS (Global Positioning System) with an IMU (Inertial Measurement Unit) was popular for the estimation of vertical components. However, GPS cannot work well indoors and, more importantly, has low accuracy in the vertical direction. In order to overcome these issues, IMU-barometer integration has been suggested instead of IMU-GPS integration. This paper proposes a new complementary filter for the estimation of vertical velocity based on IMU-barometer integration. The proposed complementary filter is designed to minimize drift error in the estimated velocity by adding PID control in addition to a zero velocity update technique.

Keywords: vertical velocity, IMU (Inertial Measurement Unit), barometer, Kalman filter, complementary filter, PID control

I. 서론

수직속도의 추정은 운동체의 상승, 하강시 매우 중요한 문제이며, 현재 대표적인 활용분야는 항공분야로 항공기의 비행항법장치는 조종사에게 자세, 속도, 위치 등의 정보를 제공하여야 한다[1]. 항공기의 이착륙시 상승 및 하강 속도는 탑승자의 안전과 직결되며, 특히 착륙시에 하강속도를 정확히 인지할 수 없다면 사고가 발생할 수 있다. 또한 유인항공기 이외에도 무인항공기(UAV: Unmanned Aerial Vehicle)가 최근 군사목적 이외에 그 사용범위가 점차 넓어지고 있으며 다양한 연구가 진행되고 있는데[2,3], 무인항공기의 제어에 활용할 수 있으며, 항공분야 이외에도 일상생활 중 추락, 전도와 같은 낙상사고를 미리 감지하고 대응하는 시스템의 개발에 활용될 수 있다[4]. 또한 최근 멀티미디어 산업의 급속적 형태로 제시되고 있는 VR (Virtual Reality)에도 활용이 가능하다. VR은 사용자의 자세(orientation), 위치, 이동속도 등과 연동하여 사용자에게 정보를 전달하므로 보다 정확한 동작 추정이 요구된다. 이와 같이 수직속도의 추정은 현재뿐만 아니라 미래에도 그 활용방법이 다양하므로 알고리즘 개발에 큰 가치가 있다고 할 수 있다.

수직성분을 추정함에 있어 GPS (Global Positioning System), 초음파센서, 기압센서(barometer) 등 다양한 계측장치가 제시되었는데[5], GPS는 실내사용이 제한되며 초음파 센서는 측정거리 제한이 있는 문제점이 있다. 반면에 기압센서는 지

구 대기권 내에 있다면 앞서 언급한 센서의 문제점인 사용장소의 제한, 측정거리의 제한이 없어 수직성분 연구에 폭넓게 사용되고 있다[1,5-9]. 기압센서를 단독으로 사용하는 연구도 진행되며 있으나[4], 기압센서는 주변의 기압을 측정하는 계측장비로 측정잡음(measurement noise)이 매우 심하고, 기상조건에 매우 민감하여 바람, 실내의 에어컨 등 갑작스런 기압변화의 영향을 받아 정지상태임에도 수직이동이 있는 것으로 계측하는 문제가 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 기압센서와 MEMS (Micro Electro-Mechanical System) 관성센서를 결합하여 수직속도를 추정하는 알고리즘이 여러 연구를 통해 제안되었다. 관성센서의 측정값과 기울기 추정용 알고리즘으로부터 수직가속도를 계산해 첫 번째 입력신호로 사용하고, 기압센서로부터 고도를 계산하여 두 번째 입력신호로 사용해 수직속도 추정용 알고리즘을 통해 수직속도를 추정하게 된다. 이 방법은 수직속도와 고도를 추정하기 위해 [7]과 [8]에서 제안된 바 있다.

기존의 알고리즘은 관성센서로부터 계산한 수직가속도를 적분하여 속도를 계산하게 되면 드리프트(drift)가 발생하게 되고, 기압센서를 사용하여 드리프트를 보정하도록 되어있지만 기압센서의 잡음이 굉장히 심하여 그 비중이 수직가속도에 비해 크게 떨어져 드리프트 보정을 수행하는데 있어 느리게 작용하는 문제가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 [8]에서는 기압센서를 보정하기 위해 영속도 업데이트(ZUPT: Zero Velocity Update)가 추가되었는데, 이는 관성센서의 신호가 설정된 문턱값(threshold)에 의해 정지상태로 판별되면 속도를 0으로 강제하게 된다[13].

영속도 업데이트는 운동시간이 짧고 정지상태가 반복적으로 발생하는 상황에서 매우 효과적이다. 하지만 정지구간 없이 장시간 동작하는 경우라면 영속도 업데이트가 작동하지 않

* Corresponding Author

Manuscript received July 5, 2016 / revised August 22, 2016 / accepted October 6, 2016

지성인, 이정근: 한경대학교 기계공학과

(kde3045@hknu.ac.kr/jklee@hknu.ac.kr)

* 본 논문은 미래창조과학부 재원의 한국연구재단 기초연구사업(NRF-2015R1C1A1A02036373)의 지원을 받아 수행하였음.

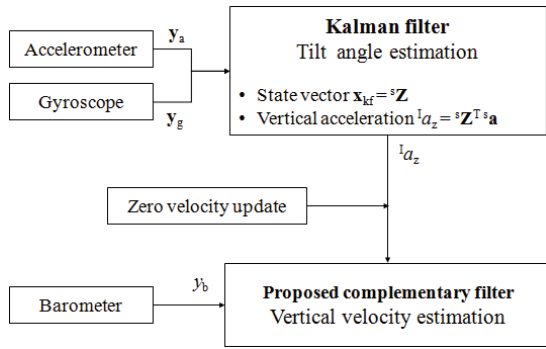


그림 1. 제안방법 블록 다이어그램.
Fig. 1. Block diagram of the proposed algorithm.

으므로 기압센서만으로 드리프트 보정을 수행하게 되고 이 때 드리프트가 정상적으로 보정되지 않는 문제가 발생한다.

본 논문은 관성센서와 기압센서를 결합하여 운동체의 수직속도를 추정하는 2단계 필터 알고리즘을 제안한다(그림 1 참조). 영속도 업데이트만으로 충분한 드리프트 보정을 기대하기 어려운 장시간의 동작조건에서도 높은 정확도를 갖도록 PID제어(proportional, integral, derivative control)와 상보필터(CF: Complementary Filter)의 유사성을 이용해 상보필터를 개선하여 드리프트 보정능력을 강화한 새로운 형태의 센서 융합 알고리즘이다.

이전의 자세추정에 대한 연구에서도 PID제어와 상보필터 간의 혼합은 사용된 바 있지만[9,11], 그 관계에 대한 명확한 설명이 부족한 실정이다.

II. 기울기 추정용 칼만 필터를 통한 수직가속도 계산

수직 속도를 추정하기 위한 첫 번째 입력신호인 수직 가속도는 가속도계를 통하여 쉽게 측정할 수 있을 것처럼 생각되지만, 가속도계 신호를 통해 얻는 계측 값을 그대로 수직 가속도로 사용할 수는 없다. 고정된 관성좌표계(inertial frame)는 중력의 방향을 Z, 지구자기장의 방향을 X로 하여 결정하였으며, 센서좌표계(sensor frame)는 센서에 부착된 좌표계로 센서의 자세변화에 따라 함께 변화하는 좌표계이다.

가속도계는 센서좌표계를 기준으로 사용자에게 신호를 전달하는데 수직속도를 추정하는데 필요한 것은 관성좌표계의 Z방향의 가속도이므로 센서좌표계에서 관성좌표계로의 좌표 변환 과정이 필요하다. 또한 지구중력 하에서 가속도계의 신호에는 중력가속도 외에 외부가속도(external acceleration)가 포함되어 있으므로 외부가속도 보상과정을 필요로 한다.

좌표 변환 및 중력가속도 제거를 수행할 1단계 필터인 기울기 추정용 칼만 필터는 [10]에서 제안된 것으로 구현하였으며, 이 칼만 필터(KF: Kalman Filter)는 가속도 모델에 기반한 가속도 보상알고리즘이 포함되어 있어 동적 환경에서도 높은 자세 추정 정확도를 갖는다.

기울기 추정용 칼만 필터의 상태벡터는 $\mathbf{x}_{kf} = {}^s \mathbf{Z}$ 로, 여기서 ${}^s \mathbf{Z}$ 는 관성좌표계 I에서 센서좌표계 S를 관측한 회전행렬(rotation matrix) ${}^l \mathbf{R}$ 의 일부분으로 다음과 같은 관계를 갖는다.

$${}^l \mathbf{R} = [{}^s \mathbf{X}, {}^s \mathbf{Y}, {}^s \mathbf{Z}]^T \tag{1}$$

따라서 ${}^s \mathbf{Z}$ 는 센서좌표계에서 관측한 관성좌표계의 Z축 단위방향벡터이다. 칼만 필터의 가속도계와 자이로스코프의 신호모델은 각각 다음과 같다.

$$\mathbf{y}_a = {}^s \mathbf{g} + {}^s \mathbf{a} + \mathbf{n}_a \tag{2}$$

$$\mathbf{y}_g = {}^s \boldsymbol{\omega} + \mathbf{n}_g \tag{3}$$

\mathbf{g} 는 중력가속도, \mathbf{a} 는 외부가속도, $\boldsymbol{\omega}$ 는 각속도, \mathbf{n}_a 는 가속도계의 측정잡음, \mathbf{n}_g 는 자이로스코프의 측정잡음이다. 가속도 ${}^s \mathbf{a}$ 는 식 (2)와 ${}^s \mathbf{Z}$ 를 이용하여 중력가속도를 제거하여 구할 수 있다. 즉,

$${}^s \mathbf{a} = \mathbf{y}_a - \mathbf{g} {}^s \mathbf{Z} \tag{4}$$

식 (4)의 가속도 ${}^s \mathbf{a}$ 와 상태벡터 ${}^s \mathbf{Z}$ 를 이용하여 관성좌표계에서의 수직가속도를 계산하면 다음과 같다.

$${}^l a_z = {}^s \mathbf{Z}^T {}^s \mathbf{a} \tag{5}$$

III. 기압센서를 통한 고도계산

수직 속도를 추정하기 위한 두 번째 입력신호인 고도 h 는 기압센서의 신호로부터 다음의 수식을 통해 구한다.

$$h = -\frac{T_0}{L} \left(1 - \left(\frac{P}{P_0} \right)^{\frac{-R_{air} L}{g}} \right) \tag{6}$$

여기서 T_0 는 15°C, L 은 기온저하율(Lapse rate), P 는 현재기압, P_0 는 표준대기압(101325Pa), R_{air} 은 공기의 기체상수이다. 식 (6)에 국제표준대기(international standard atmosphere, ISA)값을 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$h = 44300 \left(1 - \left(\frac{P}{P_0} \right)^{0.19} \right) \tag{7}$$

수직고도 h 를 기준으로 한 기압센서의 센서신호 y_b 의 모델은 다음과 같다.

$$y_b = h_r + n_b \tag{8}$$

여기서 h_r 은 실제고도이며, n_b 는 기압센서의 측정잡음으로 백색 가우시안 잡음(white Gaussian noise)으로 가정한다.

IV. 상보필터와 PID제어

그림 2로부터 상보필터와 PID제어가 매우 유사한 것을 확인할 수 있다. 그림 2의 상보필터(A)는 두 가지의 계측값 y_{cf1} 과 y_{cf2} 를 이용하여 결과를 추정하고 있으며, 그림 2의 PID제어(B)는 목표값으로 y_{pid1} 즉, 참값을 입력하였지만 시스템의 특성과 계측값 y_{pid2} 의 잡음으로 인하여 목표 값과 다른 결과를 출력하고 있다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$x_{pid,k} = (K_p(y_{pid1,k-1} - x_{pid,k-1}) + y_{pid2,k-1})dt \tag{9}$$

$$x_{cf,k} = (K_c(y_{cf1,k-1} - x_{cf,k-1}) + y_{cf2,k-1})dt \tag{10}$$

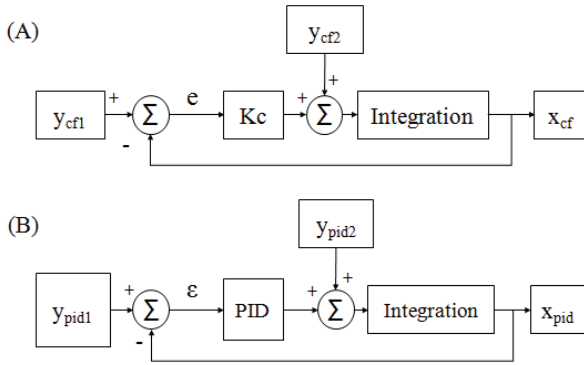


그림 2. 상보필터(A)와 PID제어(B)의 블록다이아그램.

Fig. 2. Block diagram of the complementary filter and PID control.

여기서 k 는 이산시간으로 k 와 $k-1$ 의 간격은 샘플링간격 (sampling time) dt 이며, K_p 는 비례제어이득, K_c 는 상보필터이득이다. 식 (9)는 PID제어에서 비례제어만 있을 때의 식이고, 식 (10)은 상보필터의 식이다.

K_p 와 K_c 는 사용자 설정 값이므로 y_{pid1} 와 y_{cf1} 의 관계를 정리할 필요가 있다. y_{pid1} 는 참값과 같고 y_{cf1} 은 참값에 측정잡음이 포함된 것으로 볼 수 있으므로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$y_{cf1,k} = y_{pid1,k} + n_{1,k} \quad (11)$$

$n_{1,k}$ 는 측정잡음으로 오프셋(offset)이 없는 잡음으로 가정하면, 비례제어의 저주파통과 특성을 고려하였을 때 잡음이 제거되므로 y_{pid1} 와 y_{cf1} 는 거의 동일한 입력으로 취급할 수 있다.

따라서 PID제어와 상보필터는 같은 작동방식을 갖고 있는 서로 다른 이름의 알고리즘으로 볼 수 있다. 그러므로 PID제어에서 기본형태인 비례제어를 적분제어와 미분제어의 추가로 보정하듯 상보필터에서도 K_c 만을 사용하는 기존의 상보필터에 적분제어와 미분제어를 추가하여 필터의 성능을 개선할 수 있다.

V. 수직속도 추정용 상보필터

제안하는 수직속도 추정용 상보필터(그림 3 참조)의 상태변수 \mathbf{x}_k 는 다음과 같다.

$$\mathbf{x}_k = \begin{bmatrix} h_k \\ v_k \end{bmatrix} \quad (12)$$

여기서 h_k 는 고도, v_k 는 수직속도이다. 상보필터이득 K_c 만을 이용하는 기존의 상보필터는 다음과 같다[12].

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{A}\mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{B}\mathbf{K}_c(y_{B,k-1} - h_{k-1})dt + \mathbf{C}'\mathbf{a}_{z,k-1}dt \quad (13)$$

여기서

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & dt \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & dt \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} dt \\ 1 \end{bmatrix}$$

이며, 상보필터이득 K_c 는 다음과 같다.

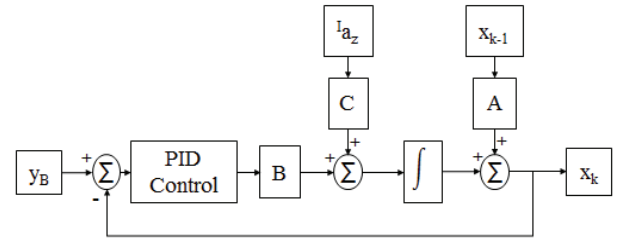


그림 3. 제안된 속도추정용 상보필터의 블록다이아그램.

Fig. 3. Block diagram of the proposed complementary filter.

$$\mathbf{K}_c = \begin{bmatrix} \sqrt{\sigma_{acc}/\sigma_b} \\ \sigma_{acc}/\sigma_b \end{bmatrix} \quad (14)$$

σ_{acc} 는 수직가속도 잡음의 표준편차, σ_b 는 기압센서 측정잡음의 표준편차이며, 식 (13)에서 상보필터 보정부분을 \mathbf{F} 라 하고 차이값을 ε 이라 하면 다음과 같다.

$$\varepsilon_{k-1} = y_{B,k-1} - h_{k-1} \quad (15)$$

$$\mathbf{F}_{k-1} = \mathbf{K}_c \varepsilon_{k-1} \quad (16)$$

식 (16)은 PID제어의 비례제어와 같은 형태이므로 여기에 적분제어와 미분제어를 추가하면 \mathbf{F} 는 다음과 같다.

$$\mathbf{F}_{k-1} = \mathbf{K}_c \varepsilon_{k-1} + K_i \sum_{i=1}^{k-1} \varepsilon_i + K_d \dot{\varepsilon}_{k-1} \quad (17)$$

여기서 K_i 는 적분제어이득, K_d 는 미분제어이득이며 시행착오(trial and error)를 통해 결정하였으며 고도와 속도 두 가지 상태변수 중 속도추정 결과에 중점을 두었다.

$$\begin{cases} \mathbf{K}_i = 0.05 \\ \mathbf{K}_d = 0 \end{cases} \quad (18)$$

미분제어는 추정결과에 잡음이 증폭되는 효과가 있어 미분제어는 작동하지 않도록 미분제어이득을 0으로하였다. 따라서 식 (17)과 식 (18)을 식 (13)에 적용하면 다음과 같다.

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{A}\mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{B} \left(\mathbf{K}_c \varepsilon_{k-1} + K_i \sum_{i=1}^{k-1} \varepsilon_i \right) dt + \mathbf{C}'\mathbf{a}_{z,k-1}dt \quad (19)$$

식 (15)를 실제 고도 h_r 과 잡음으로 분리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \varepsilon_{k-1} &= h_{r,k-1} + n_{b,k-1} - (h_{r,k-1} + n_{k-1}) \\ &= n_{b,k-1} - n_{k-1} \end{aligned} \quad (20)$$

n 은 고도추정 결과의 오차이며, n_b 는 백색 가우시안 잡음으로 가정하였으므로 누적오차 b 는 다음과 같다.

$$b_{k-1} = \sum_{i=1}^{k-1} n_i \quad (21)$$

b 의 값이 0이 아닌 값이 나온다면 적분제어의 추가로 드리프트 보정의 효과를 볼 수 있다.

본 논문에서 적분제어와 함께 드리프트 보정을 수행하고 있는 영속도 업데이트는 구현이 간단하므로 본 논문에서는 다루지 않는다.

VI. 알고리즘 검증 실험

1. 실험 구성

검증 실험에는 GY-87 10축 센서모듈이 사용되었으며, MPU6050 6축 관성센서, HMC5883L 3축 지자기센서, BMP180 기압센서로 구성되어있다(그림 4 및 표 1 참조).

Arduino UNO R3에 I2C 통신 및 센서 캘리브레이션(calibration)코드를 업로드하여 센서신호 수신 및 캘리브레이션을 수행하고 USB를 통해 PC로 전송하여 Matlab으로 구현된 필터 알고리즘에 실시간으로 입력된다. 알고리즘의 수직 속도 추정 성능검증에는 RMSE(root mean squared error)를 계산하기 위하여 Flex13 광학식 모션캡처 시스템을 참조값(reference)으로 이용하였다(그림 5 및 표 2 참조).

실험조건에 있어 충분한 속도변화를 주기 위하여 체육관에서 실험이 진행되었으며, 일상생활에서 접할 수 있는 다양한 동적 환경에서 실험하였고 실험별 동작은 다음과 같다.

- Test 1: 동적 상황을 가정하여 무작위 자세 및 위치변화
- Test 2: 심한 동적 상황을 가정하여 Test1보다 빠른 무작위 자세 및 위치변화
- Test 3: 계단 보행과 같은 단시간 운동 및 정지 상황을 가정하여 총 1.5m고도에 대하여 계단식 상승 및 하강

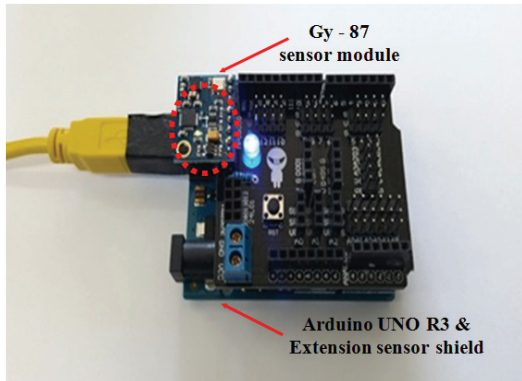


그림 4. GY-87 센서모듈과 아두이노 보드.
Fig. 4. GY-87 Sensor module and Arduino board.

표 1. 10축 센서모듈 사양.

Table 1. Specification of the 10-axis sensor module.

Accelerometer – MPU6050 (InvenSense)	
Range	±2~16g
Sensitivity	2048~16384 LSB/g
RMS noise	400 µg/√Hz
Gyroscope – MPU6050 (InvenSense)	
Range	±250~2000deg/s
Sensitivity	16.4~131 LSB/(deg/s)
RMS noise	0.05deg/sec
Magnetometer – HMC5883L (Honeywell)	
Range	±8 gauss
Sensitivity	230~1370 LSB/gauss
RMS noise	2 mgauss
Barometer – BMP180 (BOSCH)	
Absolute accuracy pressure	300~1100hPa
Resolution	Pressure = 0.01hPa
	Temperature = 0.1°C

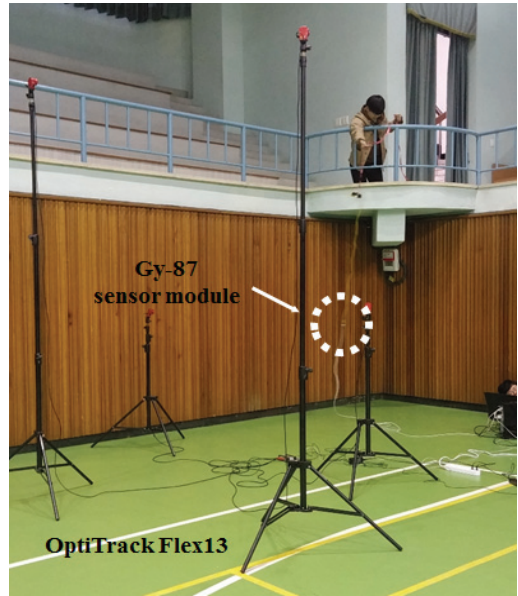


그림 5. 실험 전경.
Fig. 5. Test setup.

표 2. 광학식 모션캡처 시스템 사양.

Table 2. Specification of the optical motion tracking system.

OptiTrack Flex 13	
Pixel size	4.8×4.8µm
Resolution	1280×1024 (1.3MP)
Frame rate	30~120 FPS
Accuracy	Sub-millimeter
Shutter speed	7.5ms (at 120FPS)

- Test 4: Test 3과 같이 단시간 운동 및 정지 상황을 가정하였으며, 건물 한 층 높이에 해당하는 총 3m고도에 대하여 계단식 상승 및 하강
- Test 5: 장시간 운동상태를 가정한 3m 무정지 상승, 최고점 정지, 무정지 하강

성능 비교를 위하여 3가지 알고리즘을 비교하였으며 다음과 같다.

- Method 1: Two step Kalman with ZUPT [8]
[8]에서 제안된 알고리즘으로 2단계 칼만 필터로 구성된다. 기울기 칼만 필터는 [10]의 것을 이용하였으며, 영속도 업데이트가 적용되어있다.
- Method 2: Tilt KF + Conventional complementary with ZUPT
1단계 기울기 칼만 필터는 [10]의 것으로 동일하며, 2단계 필터는 기존의 상보필터[12]로 구현하였고 Method1에서 사용된 영속도 업데이트를 적용하였다.
- Method 3: Tilt KF + Proposed complementary with ZUPT
본 논문에서 제안하는 알고리즘으로 1단계 기울기 칼만 필터는 [10]의 것으로 동일하고 2단계 필터로 적분제어가 추가된 상보필터를 사용하며 영속도 업데이트와 적분제어가 모두 적용된 알고리즘이다.

2. 실험 결과

표 3은 각각의 실험에 대한 Method별 RMSE를 표시하고

표 3. 추정성능 결과 비교 (RMSE, m/s).

Table 3. Comparison of estimation performance (RMSE, m/s).

	Method 1	Method 2	Method 3
Test 1	0.2046	0.2033	0.1147
Test 2	0.2421	0.2417	0.1467
Test 3	0.1087	0.1094	0.0796
Test 4	0.0809	0.0810	0.0808
Test 5	0.2352	0.2352	0.1522

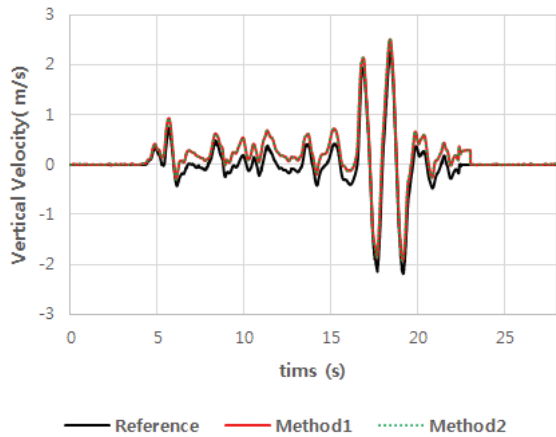


그림 6. 칼만필터와 상보필터의 비교 (Test 1).
Fig. 6. Comparison of the KF and conventional CF (Test 1).

있다. Method 1과 Method 2는 비슷한 수준의 성능을 보이고 있다(그림 6 및 표 3 참조). 하지만 상보필터는 칼만필터에 비하여 알고리즘 내에서 오차공분산행렬(error covariance matrix)과 이득을 계산할 필요가 없어짐에 따라 계산효율 면에서 유리하다[12].

Method 3는 Test 1,2와 Test 5에서 매우 우수한 성능을 보이고 있는데 특히 Test 1에서 Method 2에 비하여 약 44% 향상된 수직속도 추정 성능을 보이고 있다(그림 6 참조).

그림 7을 보면 Test 1과 Test 2에서 Method 2에 비하여 드리프트가 눈에 띄게 감소한 것을 확인할 수 있다.

Test 3과 Test 4에서는 이동-정지를 반복하여 운동체의 동작 시간이 짧고 정지상태에서는 영속도 업데이트가 작동하여 드리프트가 크게 나타나지 않았고 적분제어 추가로 인한 차이가 적거나 거의 효과가 없는 것을 볼 수 있는데, 영속도 업데이트의 기능으로 드리프트가 거의 발생하지 않고 있기 때문에 적분제어가 추가된다고 하여도 적분제어에 눈에 띄는 조작량이 확보되지 않기 때문이다.

추가적으로 Test 3은 적분제어의 제어특성과 관련이 있는데 적분제어의 조작량이 확보되어 추정 결과에 개입하기 위해서는 오차의 누적량이 필요하기 때문에 오차가 발생한다고 하여 즉시 눈에 띄는 동작을 기대할 수는 없다. 이를 확인할 수 있는 것이 Test 3으로 처음 오차가 발생한 약 8초 지점에서는 거의 작동을 하지 않고 이후 13초, 24초 지점에서는 적분제어의 효과가 나타났다.

Test 5는 적분제어와 영속도 업데이트가 함께 작동하는 것을 볼 수 있는데 장시간 동안 정지 없이 운동체가 움직이는 동안에는 적분제어가 작동하고 정지가 관별되면 영속도 업데이트로 드리프트가 바로 없어지는 것을 볼 수 있다.

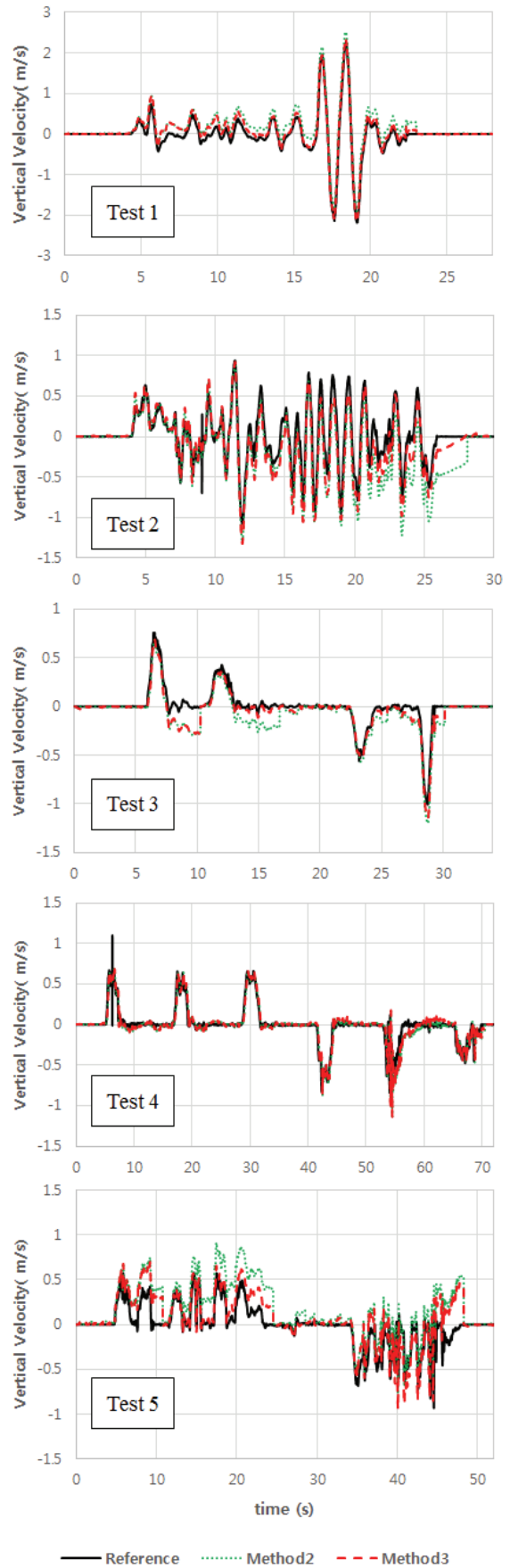


그림 7. 기존의 상보필터와 제안된 상보필터의 비교.
Fig. 7. Comparison of the conventional CF and the proposed CF.

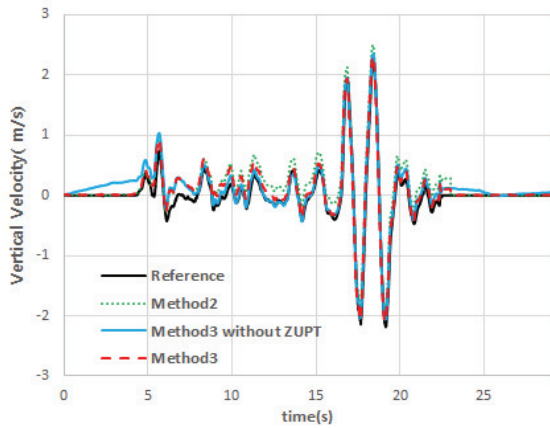


그림 8. 드리프트 보정기능의 비교(Test 1).
Fig. 8. Comparison of the drift compensation mechanism(Test 1).

본 논문에서 제안하는 알고리즘의 높은 드리프트 보정 성능은 영속도 업데이트와 적분제어의 연계가 중요한 부분으로 영속도 업데이트와 적분제어 중 어느 하나만으로는 부족한 성능을 보인다. 그림 8은 영속도 업데이트만 있는 Method2와 적분제어만 있는 경우(Method3 without ZUPT) 그리고 Method3를 비교한 것이다. 영속도 업데이트만 있는 Method2는 운동이 지속될수록 드리프트가 발생하고 있으며, 적분제어만 있는 Method3 without ZUPT는 적분제어가 개입하기까지 시간이 필요하며 운동이 종료되어 정지상태가 되었을 때 영속도 업데이트에 비하여 반응이 느리게 나타난다.

VII. 결론 및 고찰

본 논문에서 제안하는 수직속도 추정 알고리즘은 관성센서와 기압센서를 이용한 이단계 알고리즘으로 1단계 기류기 추정용 칼만필터와 2단계 수직속도 추정용 상보필터로 구성 되어있다. 두번째 단계인 상보필터는 PID제어, 특히 적분제어와 영속도 업데이트를 함께 사용하여 드리프트 보정기능을 강화하였다. 본 논문에서 제안된 알고리즘의 수직속도 추정 성능은 실험을 통하여 증명하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

첫째, 적분제어 없이도 드리프트가 거의 발생하지 않는 조건에서는 적분제어가 추가되어도 적분제어의 조작량이 확보되지 않으므로 적분제어로 인한 추정결과의 영향은 크지 않다. 둘째, 적분제어의 추가로 인한 드리프트 보정기능의 강화는 영속도 업데이트가 작동하지 못하는 장시간의 운동상태가 지속되는 조건에서 개선효과가 크게 나타났다.

영속도 업데이트는 정지상태를 판별하는데 있어 매우 반응이 빠르며 정지상태에서의 보정능력이 탁월하다. 하지만 이 방법은 장시간 동적 운동이 지속되는 경우 보정능력이 전혀 없는 문제점이 있다. 제안하는 알고리즘은 이와 같은 영속도 업데이트의 문제점을 해결하기 위한 방법으로 반응속도가 빠르진 않지만 운동상태에 무관하게 작동하는 적분제어를 활용하고 있다.

적분제어를 상보필터에 적용하면 적분제어의 특성 또한 그대로 적용되므로 실험조건과 적분제어이득이 적합하지 않은 경우 알고리즘이 정상기능을 하지 못할 수 있으므로 설정

에 주의를 요하며, PID제어에서 미분제어를 통해 시스템의 응답속도를 향상시킬 수 있지만, 본 논문에서는 입력신호의 잡음 증폭 문제가 심각하여 함께 사용하지 못하였다. 미분제어를 적절히 쓸 수 있도록 개선한다면 더욱 뛰어난 추정결과를 얻을 수 있을 것으로 기대한다.

REFERENCES

- [1] S. C. Lee, S. K. Hong, and S. R. Jung, "Estimation for the vertical speed of helicopter using MEMS inertial Sensor," *Proc. of Autumn Conference of The Korean Society For Aeronautical And Space Sciences (in Korean)*, pp. 1422-1425, Nov. 2014.
- [2] J. G. Lim and S. Jung, "Altitude control of a quad-rotor system by using a time-delayed control method," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 20, no. 7, pp. 724-729, 2014.
- [3] S. H. Kim, D. K. Lee, J. H. Cheon, S. J. Kim, and K. H. Yu, "Design and flight tests of a drone for delivery service," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 22, no. 3, pp. 204-209, 2016.
- [4] J. K. Lee, "Study on vertical velocity-based pre-impact fall detection," *Journal of Sensor Science and Technology*, vol. 23, no. 4, pp. 251-258, 2014.
- [5] J. H. Lee, "Altitude determination algorithm using ultra sonic ranger, GPS and barometric altimeter," Master's Thesis, Inha University (in Korean), Feb. 2008.
- [6] M. Husak and J. Jakovenko, "Use of barometric sensor for vertical velocity measurement," *Proc. of Advanced Semiconductor Devices & Microsystems*, pp. 223-226, Oct. 2010.
- [7] A. M. Sabatini and V. Genovese, "A sensor fusion method for tracking vertical velocity and height based on inertial and barometric altimeter measurements," *Sensors*, vol. 14, no. 8, pp. 13324-13347, 2014.
- [8] S. Zihajezadeh, T. J. Lee, J. K. Lee, R. Hoskinson, and E. J. Park, "Integration of MEMS inertial and pressure sensors for vertical trajectory determination," *IEEE Trans Instrum Meas*, vol. 64, no. 3, pp. 804-814, 2015.
- [9] M. Euston, P. Coote, R. Mahony, J. H. Kim, and T. Hamel, "A complementary filter for attitude estimation of a fixed-wing UAV," *Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Nice, France, pp. 22-26, Sep. 2008.
- [10] J. K. Lee, E. J. Park, and S. N. Robinovitch, "Estimation of attitude and external acceleration using inertial sensor measurement during various dynamic conditions," *IEEE Trans Instrum Meas*, vol. 61, no. 8, pp. 2262-2273, Aug. 2012.
- [11] R. Mahony, T. Hamel, and J. M. Pflimlin, "Nonlinear complementary filters on the special orthogonal group," *IEEE Trans Automat Contr*, vol. 53, no. 5, pp. 1203-1218, Jun. 2008.
- [12] W. T. Higgins, "A comparison of complementary and Kalman filtering," *IEEE Trans Aerosp Electron Syst*, vol. 11, no. 3, pp. 321-325, 1975.
- [13] F. Höflinger, J. Müller, R. Zhang, L. M. Reindl, and W. Burgard, "A wireless micro inertial measurement unit (IMU)," *IEEE Trans Instrum Meas*, vol. 62, no. 9, pp. 2583-2595, Sep. 2013.

**지성인**

2015년 환경대학교 기계공학과 학사.
2015년~현재 환경대학교 기계공학과 석사과정 재학 중. 관심분야는 관성모션캡처, 로봇시스템.

**이정근**

1997년 한양대학교 정밀기계공학과 학사. 1999년 한양대학교 정밀기계공학과 석사. 2002년~2006년 현대자동차 파워트레인연구소 연구원. 2010년 Simon Fraser University 메카트로닉 시스템 공학 박사. 2012년~현재 환경대학교 기계공학과 교수. 관심분야는 관성모션캡처, 바이오메카트로닉스.