

레이저 고도계와 초음파 거리계를 이용한 무인항공기 지면고도측정 알고리즘 설계

Ground Altitude Measurement Algorithm using Laser Altimeter and Ultrasonic Rangefinder for UAV

최경식*, 현정욱**, 장재원**, 안동만*, 홍교영*

Kyeung-Sik Choi*, Jung-Wook Hyun**, Jae-Won Jang**, Dong-Man Ahn* and Gyo-Young Hong*

요 약

본 논문은 레이저 고도계와 초음파 거리계를 이용한 무인항공기의 지면고도측정에 대한 알고리즘에 대하여 제시하였다. 무인항공기의 저고도 거리 측정시에 사용하는 레이저 고도계와 초음파 거리계를 이용하여 간단한 지상시험을 하였고, 각 센서들의 특징을 확인할 수 있었다. 특히, 레이저 고도계의 단점을 확인하여 초음파 거리계로 보완하는 알고리즘을 설계하였고, 실험을 진행하였다. 레이저 고도계와 초음파 거리계는 칼만필터를 이용하여 약결합 방식으로 융합하였으며, 실험결과 레이저 고도계의 단점을 초음파 거리계로 보완하여 안정적인 고도값이 측정될 수 있음을 확인하였다.

Abstract

This paper presents an algorithm concerning the ground altitude measurement using a laser altimeter and an ultrasonic rangefinder for UAV(Unmanned Aerial Vehicle). A simple ground test conducted using the laser altimeter and ultrasonic rangefinder that are used for conducting the low altitude measurement of UAV and identify the characteristics of each sensor. Especially, the disadvantages of the laser altimeter were checked through the ground test. After that who those are participated in this paper planned the algorithm which is complemented by the ultrasonic rangefinder and the experiment was conducted. The laser altimeter and the ultrasonic rangefinder were fused by a loosely coupled method by Kalman filter. The paper shows that stable value of altitude complemented by the ultrasonic rangefinder that covers the laser altimeter's drawbacks can be measured through the ground test.

Key words : Laser Altimeter, Ultrasonic Rangefinder, Altitude Measurement, Kalman Filter, UAV

I. 서 론

무인항공기는 정찰 및 감시, 최근에는 군수 분야의 공격용에 이르기까지 다양한 분야에서 많이 사용

되고 있으며, 효율성 역시 증대되고 있다. 효율성이 증대됨에 따라 무인항공기의 안정성과 신뢰성에 관심을 많이 가지게 되는데, 특히 자동이착륙을 위한 지면고도 측정에 대한 연구가 많이 진행되고 있

* 한서대학교 항공전자공학과(Department of Avionics, Hanseo University)

** 한국항공우주연구원 항공제어전자팀(Flight Control and Avionics Team, Korea Aerospace Research Institute)

· 제1저자 (First Author) : 최경식(Kyeung-Sik Choi, tel : +82-41-671-6239, email : chks3963@hanseo.ac.kr)

· 접수일자 : 2013년 9월 13일 · 심사(수정)일자 : 2013년 9월 14일 (수정일자 : 2013년 12월 11일) · 게재일자 : 2013년 12월 30일

<http://dx.doi.org/10.12673/jkoni.2013.17.6.749>

다.[1],[2],[3]

고도측정은 크게 외부 측위방식과 내부 측위방식으로 나뉘는데 외부 측위방식의 경우, 무인항공기에 외부장치를 설치하여 전파 또는 빛을 방사하고 되돌아오는 시간을 측정해 거리를 계산하는 방식이며, 내부 측위방식은 GPS와 같이 외부장치의 설치없이 전파의 수신을 받아 고도를 계산하는 방식이다.[4]

최근에는 내부 측위방식인 GPS와 외부 측위방식인 레이저 고도계를 이용한 고도 측정 연구가 진행되었으며, 레이저고도계의 단점을 GPS와 융합하여 정밀한 고도값을 획득하는 연구가 진행되었다.[4]

본 연구에서는 외부 측위방식인 레이저 고도계와 초음파 거리계를 약결합 방식으로 융합하여 안정적인 고도 측정값을 나타내었음을 확인하였다. 현재 무인항공기에 사용되는 레이저 고도계의 단점을 분석하고 이를 보완하기 위해 초음파 거리계를 사용하였으며, 실험결과 안정적인 고도값이 측정되었다.

II. 레이저 고도계와 초음파 거리계

2-1 레이저 고도계의 제원[5]

레이저 고도계는 레이저의 직진성을 이용하여 지상에 발사한 뒤 반사되어 되돌아오는 레이저를 검출하여 정확한 고도를 측정하는 장비이다.

실험에 사용된 레이저 고도계는 영국 MDL사의 ILM-150-R 제품으로 제품의 사양은 표 1과 같다.

표 1. ILM-150-R 사양표
Table 1. ILM-150-R Specification

Reflectorless Range (m)	0.5-150
Max Range (m)	650
Accuracy (cm)	5
Resolution (cm)	1
Rep. Rate (Hz)	9
Power (V)	9 to 24
Protocol	RS232
Operating Temp (°C)	-20 to +60
Dimensions (mm)	103*54*38
Weight (g)	260



그림 1. ILM-150-R 레이저 고도계
Fig. 1. ILM-150-R Laser Altimeter

ILM-150-R은 150 m의 측정거리를 가지며, 반사판을 사용할 경우 최대 650 m까지 측정이 가능하다. 정확도는 5 cm이고, 분해능은 1 cm로 데이터 갱신률은 9 Hz를 가지고 있다.

2-2 레이저 고도계의 특징

레이저 고도계는 지상에 한 지점을 기준으로 레이저를 발사하여 되돌아오는 시간을 계산하여 고도를 측정한다. 레이저 고도계는 좁은 지역의 고도를 비교적 정확하게 측정할 수 있으며, 절대고도 측정시에 많이 사용되고 있다. 한국항공학회 논문지 제 17 권 제 6 호 2013년 12월 (JKONI 17(6): 593-599, Dec. 2013)

하지만 지상에서 지형물로 인한 반사율에 따라 난반사가 되어 고도 계산을 할 수 없고, 어두운 반사체에 대해 거리측정을 할 경우에는 송출한 레이저를 수신할 수 없어 고도계산이 어렵다.[4]

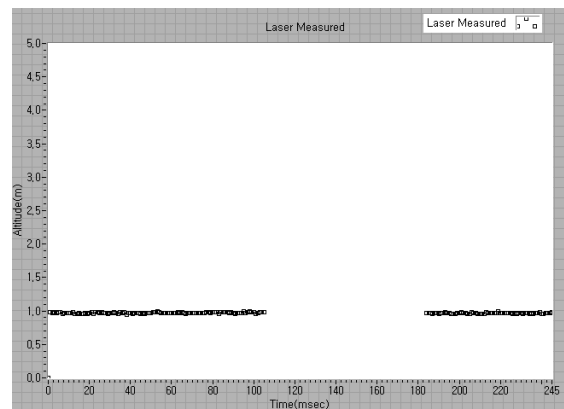


그림 2. 어두운 지표면에 대한 실험결과(레이저 고도계)
Fig. 2. Test Result on a Dark Surface (Laser Altimeter)

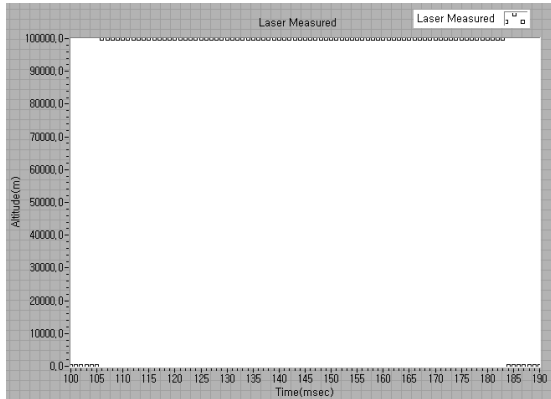


그림 3. 어두운 지표면의 확대
Fig. 3. Size Expansion about the Dark Surface

위의 그림 2는 어두운 지표면에 대한 레이저 고도계의 실험을 나타낸다. 1 m의 높이에서 계속 지면을 가리키던 레이저 고도계는 어두운 표면을 만나면서 발산하고 있다.

그림 3은 그림 2의 어두운 표면을 만났을 때의 표면을 확대한 그림이다. 실험 결과 105초부터 184초까지 지표면이 어두울 경우에 99999 m로 레이저 고도계가 발산을 한다.

2-3 초음파 거리계의 제원[6]

초음파 거리계는 음파를 송출하여 대상이나 지면에 부딪혀서 반사되어 돌아오는 반사 음파를 측정하여 거리를 얻는 장비이다.

실험에 사용된 초음파 거리계는 미국 MaxBotix사의 XL-MaxSonar-WRLA1 제품으로 송신과 수신이 하나로 되어 있는 일체형 제품이다. 제품의 사양은 표 2와 같다.

표 2. XL-MaxSonar-WRLA1 사양표
Table 2. XL-MaxSonar-WRLA1 Specification

Reflectorless Range (m)	0-10.68
Max Range (m)	10.68
Accuracy (cm)	2
Resolution (cm)	1
Rep. Rate (Hz)	10
Power (V)	3 to 5.5
Protocol	RS232
Operating Temp (°C)	-20 to +65
Dimensions (mm)	70.9*43.8dia.



그림 4. XL-MaxSonar-WRLA1 초음파 거리계
Fig. 4. XL-MaxSonar-WRLA1 Ultrasonic Rangefinder

XL-MaxSonar-WRLA1은 최대 10.68 m까지 측정이 가능하며, 정확도는 2 cm, 분해능은 1 cm, 데이터 갱신율은 10 Hz를 가지고 있다.

2-4 초음파 거리계의 특징[7]

초음파 거리계는 초음파를 발사한 후 대상물에 반사되어 수신되는 시간을 계산하여 거리를 측정하는 장치이다.

초음파 거리계의 장점은 열악한 환경에서 사용이 가능하고, 지표면의 매질에 영향을 적게 받으며, 대상체의 반사 특성이 좋다. 즉, 대상체의 표면과 반사율에 영향을 받지 않는다.

하지만 작동시 반응 소리를 발생시키며, 음파의 특성상 온도 및 공기밀도, 진동에 영향을 받는 단점이 있다.

특히, 온도의 경우 초음파 거리계의 음속은 아래의 식으로 계산된다.[8]

$$V_t = 331.5 + 0.60714t(m/s) \tag{1}$$

$t = \text{Temperature } (^\circ\text{C})$

식(1)은 0 °C에서 331.5 m/s의 속도로 측정이 되며, 20 °C에서는 약 343.64 m/s의 속도로 측정이 된다. 예를 들어, 2.5 m의 거리를 20 °C에서 0 °C의 속도를 이용하여 계산하면 약 2.389 m이며, 오차는 약 0.111 m가 발생한다. 즉, 온도에 따라 초음파 거리계의 오차가 발생하기 때문에 정확한 값을 알기 위해서는 온도 보정을 해주어야 한다.

하지만 사용자에게 따라 초음파의 속도가 일정한 것으로 간주하여 온도 보상을 하지 않는 경우도 있고, 센서를 추가하여 온도 변화에 상관없이 초음파 거리를 측정하는 방법도 연구된 바 있다.[9]

실험에 사용된 초음파 거리계의 경우는 Real-time Auto Calibration 기능이 있어 온도의 변화에 상관없이 정상적으로 작동하며[6], 실험 고도의 높이가 높지 않아 온도가 일정할 것으로 간주하여 실험을 진행하였다.

아래 그림 5는 지표면이 어두운 경우에 대한 거리 측정 실험이다. 그림 2와 같이 똑같은 실험 조건에서 초음파 거리계로 실험을 하였고, 실험 결과 그림 2와 달리 어두운 색깔을 105초부터 184초까지 지나 갔음에도 불구하고 비교적 정확한 고도값을 측정하였다. 또한 반사율에 상관없이 고도 측정이 가능하다.

그림 6은 1 m의 높이에서 지면으로부터 수직으로 약 30 도와 45 도까지 변화를 준 실험으로 반사각도에 따른 반사율에 대한 고도측정 실험을 나타낸 것이다.

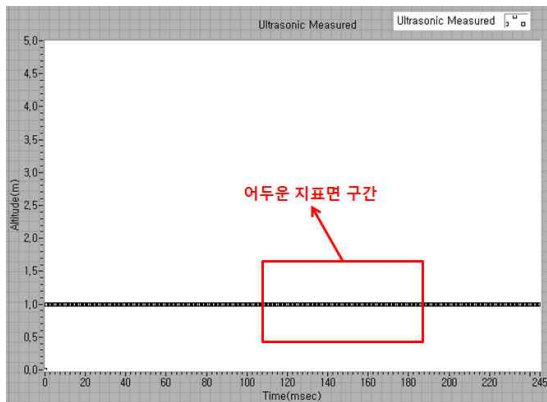


그림 5. 어두운 지표면에 대한 실험결과(초음파 거리계)
Fig. 5. Test Result on a Dark Surface (Ultrasonic Rangefinder)

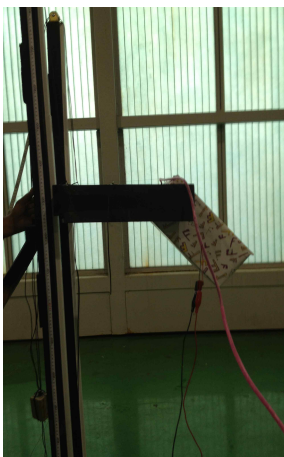


그림 6. 반사율 실험
Fig. 6. Reflectivity Test

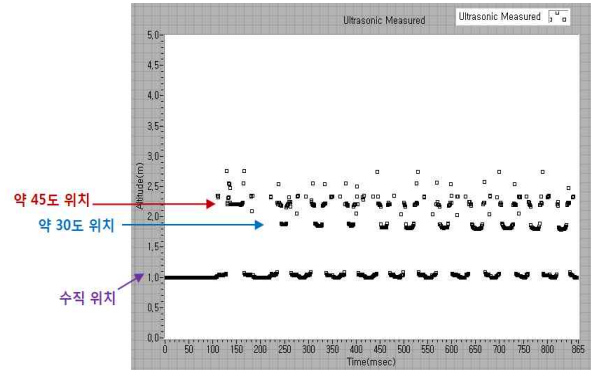


그림 7. 반사율에 대한 실험결과(초음파 거리계)
Fig. 7. Test Result on the Reflectivity (Ultrasonic Rangefinder)

실험 결과 그림 7과 같이 나타났으며, 레이저 고도계의 반사율에 따른 난반사로 고도측정이 불가능했던 것 [4]과는 달리 잡음이 섞여 있지만 측정이 되고 있음을 알 수 있다. 이를 칼만필터를 하게 되면 반사율과는 상관없이 잡음 제거와 함께 거리가 측정될 수 있다.

III. 필터 설계

3-1 선형칼만필터[10]

무인항공기의 자동이착륙을 위해서는 최대한 정밀한 고도값을 측정해야 한다. 고도오차가 생기게 되면 무인항공기의 안정성에 영향을 크게 받기 때문이다.

레이저 고도계는 레이저 고도계의 특성 때문에 단일장치로 사용하기에는 위험성이 따른다. 따라서, 초음파 거리계를 융합하여 보완할 수 있는 필터를 구현하였다. 어두운 표면에 대하여 발산하는 성질이 있는 레이저 고도계와 비교적 안정적이면서 정확한 거리값을 측정하는 초음파 거리계를 융합하여 정확한 고도값을 측정하는 알고리즘을 구성하였다.

두 장치의 융합은 선형칼만필터를 사용하였으며, 칼만필터 설계를 위하여 시스템 모델링을 하였다. 시스템 모델은 아래와 같다.

$$1. \begin{Bmatrix} x(1) \\ x(2) \end{Bmatrix}_{k+1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x(1) \\ x(2) \end{Bmatrix}_k + w_k \quad (2)$$

$$\begin{cases} x(1) = \text{Laser Altimeter Altitude (m)} \\ x(2) = \text{Ultrasonic Range finder Altitude (m)} \end{cases}$$

표 3. 장치의 공분산

Table 3. Covariance of the Devices

장치명	공분산	갱신률
레이저 고도계	10.19 m ²	50 Hz
초음파 거리계	-3.35 × 10 ⁻³ m ²	10 Hz

$$2. z_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x(1) \\ x(2) \end{Bmatrix} + v_k \quad (3)$$

식(2)과 식(3)에서 w_k 와 v_k 는 각각 백색잡음을 의미하며, w_k 는 시스템에 유입되어 상태변수에 영향을 주는 잡음이고, v_k 는 센서에서 측정되는 잡음이다. 이러한 잡음들은 공분산들과 연관이 있다.

표 3은 레이저 고도계와 초음파 거리계의 공분산을 나타낸 것이다. 레이저 고도계의 경우, 난반사의 영향으로 발산하는 값을 얻을 수 있기 때문에 기존 실험에서 비슷한 성능의 레이저 고도계의 공분산값을 이용하였으며[4], 초음파 거리계의 경우는 약 1 m의 높이에서 5분 동안 10회의 실험을 통해 얻어진 값이다.

다음은 칼만 필터의 과정이다.

0. 초기값 선정 :

$$\hat{x}_0, P_0 \quad (4)$$

1. 추정값과 오차 공분산 예측 :

$$\begin{aligned} \hat{x}_k^- &= A\hat{x}_{k-1} \\ P_k^- &= AP_{k-1}A^T + Q \end{aligned} \quad (5)$$

2. 칼만 이득 계산 :

$$K_k = P_k^- H^T (HP_k^- H^T + R)^{-1} \quad (6)$$

3. 추정값 계산 :

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k(z_k - H\hat{x}_k^-) \quad (7)$$

4. 오차 공분산 계산 :

$$P_k = P_k^- - K_kHP_k^- \quad (8)$$

칼만필터는 기본적으로 식(4)부터 (8)까지의 과정

으로 진행되어 진다. 초기값을 설정한 후, 식(5)에서 추정값(x_k)과 오차 공분산(P_k)을 예측을 하게 된다. 특히 위 첨자 ‘-’는 예측값을 의미하고, 오차 공분산 계산의 경우는 추정값에 대한 정확도 판단의 기준이 되므로 필터 설계시 칼만 이득과 더불어 중요하다.

식(6)의 칼만 이득(K_k)의 경우, 식(5)의 추정값과 오차 공분산을 토대로 예측하게 되며, 최종적으로 식(7)에서 추정값을 계산하게 된다.

식(8)에서는 식(5)에서 예측된 오차 공분산과 칼만 이득을 통하여 새로운 오차 공분산이 계산되며, 식(8)에서 식(8)까지 계속 순환하는 구조를 가진다.

IV. 지상실험

4-1 실험장치의 구성

아래 그림 8는 레이저 고도계와 초음파 거리계를 최대 높이 2 m까지 이동할 수 있도록 실험장치를 구성하였다. 특히, 박스 내부를 보면 그림 9와 같이 각 장치들을 나란히 설치하여 같은 거리값이 측정되도록 영점을 맞추었다.

실험장치는 무인항공기의 이착륙시에 GPS와 레이저 고도계의 고도를 비교하였을 때 레이저 고도계가 더 안정적이었기 때문에[4] 비교적 낮은 높이로 구성하였으며, 고도변화와 Roll의 변화를 줄 수 있도록 구성하였다.



그림 8. 실험 장치
Fig. 8. Test Equipment



그림 9. 박스의 내부
Fig. 9. Inside of the Box

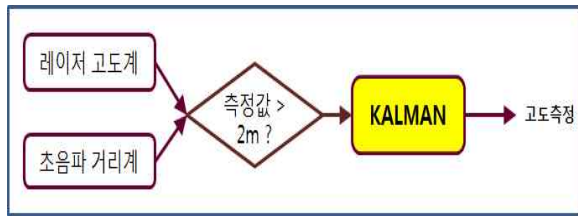


그림 10. 알고리즘의 구현
Fig. 10. Implementation of the Algorithm

4-2 알고리즘 설계

그림 10는 실험장치에 따른 알고리즘을 구현한 것이다. 기본적으로 레이저 고도계의 측정값이 칼만필터의 입력값으로 입력되지만, 레이저 고도계의 측정값이 2 m 이상이 될 경우는 초음파 거리계의 측정값으로 전환하여 칼만필터의 입력이 된다. 이 때 기준이 되는 2 m는 실험장치의 최대 높이이다.

4-3 LabView 구현

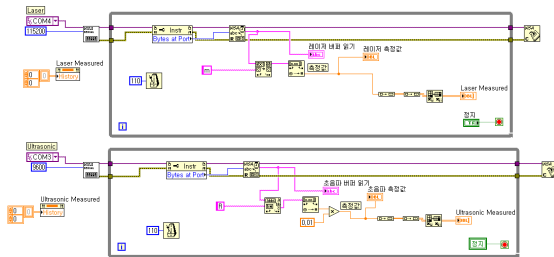


그림 11. 레이저 고도계와 초음파 거리계의 측정
Fig. 11. Measurement of Laser Altimeter & Ultrasonic Rangefinder

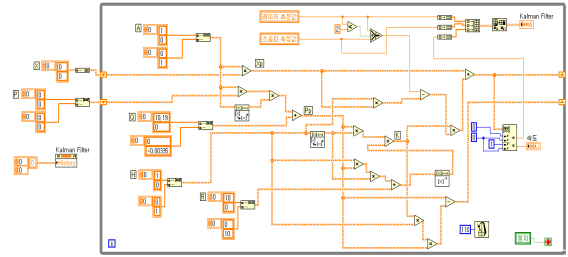


그림 12. 칼만필터의 구현
Fig. 12. Implementation of the Kalman Filter

그림 11과 그림 12은 실험 장치에 따른 그림 10의 알고리즘을 구현한 것이다. 그림 11에서 각각 장치들에 대하여 측정을 하였고, 그림 12의 칼만 필터에 측정된 거리값을 입력값으로 넣는다. 기본적으로 레이저 고도계의 고도값이 입력값으로 칼만필터에 입력되지만 2 m가 넘게 되면 초음파 거리계의 측정값이 입력값으로 변환이 되어 칼만필터에 입력이 된다.

4-4 실험 결과

1 m의 높이에서 레이저 고도계와 초음파 거리계의 칼만 필터를 통한 고도측정값은 그림 13과 같다. 레이저 고도계는 105초부터 184초까지 난반사로 인하여 고도측정이 불가하였지만 초음파 거리계의 측정값이 칼만필터의 입력값으로 사용되어 안정적인 고도값이 측정되고 있다. 또한 반사각도에 따른 반사율 실험결과도 레이저 고도계가 발산되면 초음파 거리계의 측정값을 칼만필터의 입력값으로 사용되어 고도가 측정된다.

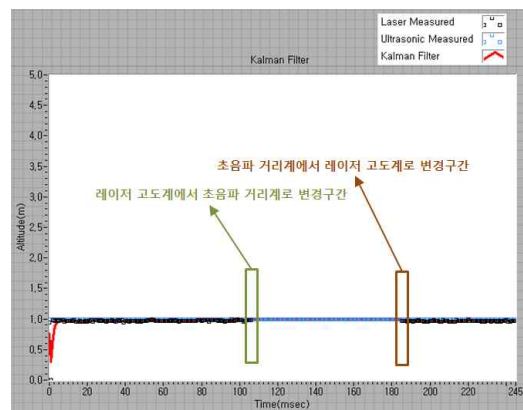


그림 13. 어두운 지표면에 대한 실험결과(칼만필터)
Fig. 13. Test Result on a Dark Surface (Kalman Filter)

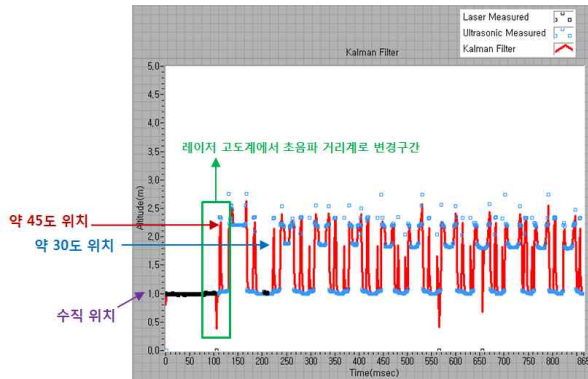


그림 14. 반사율에 대한 실험결과(칼만필터)
Fig. 14. Test Result on the Reflectivity (Kalman Filter)

그림 14는 반사율에 대한 실험결과를 나타낸 것으로 무인항공기의 Roll변화에 따른 지상시험의 결과값을 나타낸 것이다.

일반적으로 레이저 고도계가 고도측정을 하고 있지만 Roll의 변화를 주었을 때, 반사각도에 따른 반사율이 좋지 않을 경우가 생길 수 있다. 그림 14처럼 난반사가 되어 버리면 칼만필터는 100초를 지나면서 측정값을 초음파 거리계로 사용을 하여 난반사가 되지 않는 값을 나타내며, 잡음 또한 제거한 결과값을 확인할 수 있다.

V. 결 론

본 논문은 현재 무인기에서 사용되고 있는 레이저 고도계의 단점을 지상시험을 통해 확인하고, 이를 초음파 거리계로 보완하는 알고리즘을 설계하였다. 레이저 고도계는 어두운 반사면에 대해서는 고도 측정치가 발산을 하게 되며, 반사율에 따라 난반사가 되어 정확한 고도값을 측정할 수 없다. 이를 초음파 거리계로 보완하여 레이저 고도계의 측정값이 발산할 경우 초음파 거리계의 측정값이 칼만필터의 입력값으로 전환되어 안정적인 고도값이 출력될 수 있음을 확인하였다. 본 논문은 지상실험장치로 알고리즘을 검증하였으며, 실제 무인항공기에도 장착하여 지금의 알고리즘이 안정적인 고도값이 출력되는지를 확인할 예정이다.

감사의 글

본 논문은 2012년도 한서대학교 교비 학술연구 지원사업에 의하여 연구되었음.

Reference

- [1] Jae-Won Chang, Sang-Jong Lee and Sang-Soon Park, "Dynamic test of laser altimeter", *A Conference of the KSAS, Korea*, pp. 1517-1520, 2010.11.
- [2] Mohamad Farid bin Misnan, Norhashim Mohd Arshad and Noorfadzli Abd Razak, "Construction sonar sensor model of low altitude field Mapping sensors for application on a UAV", *IEEE 8th International Colloquium on Signal Processing and its Applications, Malaysia*, pp. 446-450, 2012.05.
- [3] Am Cho, Young-shin Kang, Bum-jin Park, Chang-sun Yoo and Sam-ok Koo, "Altitude integration of radar altimeter and GPS/INS for automatic takeoff and landing of a UAV", *ICCAS 8th International Conference on Control, Automation and Systems, Korea*, pp. 1429-1432, 2011.10.
- [4] Sangook Cho, Keeyoung Choi and Sung-su Kim, "Ground altitude computation algorithm using laser altimeter and GPS for UAV automatic take-off and landing", *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, vol. 41, no. 1, pp. 54-60, 2013.01.
- [5] MDL, "ILM-150" Leaflet
- [6] MaxBotix, "XL-MaxSonar-WRLA1(MB7076)", Datasheet
- [7] Jung-Wook Hyun, Jae-Won Chang, Hyung-Sik Choi and Hyeok Ryu, "Test of altitude measurement for auto landing of unmanned aerial vehicle", *A conference of the KSAA, Korea*, pp. 289, 2012.11.
- [8] Jung-Hoon Lee, "Altitude determination algorithm using ultrasonic ranger, GPS and barometric altimeter", *Requirement for the Degree of Master, Inha Univ.* 2008.02.
- [9] Young Cheol Lim, Eui Sun Kim, Tag Gon Kim, Chul Su Park and Young Min Kim, "Ultrasonic ranging system insensitive to atmospheric condition", *The*

Korean Sensors Society, vol. 2, no. 1, pp. 49-56, 1993.02.

- [10] Seong-Pil Kim, "Understanding of Kalman filter",
A-JIN, pp. 3-71. 2010.

최 경 식 (Kyeung-Sik Choi)



2010년 2월 : 한서대학교 항공전자
공학과(공학사)
2012년 3월 ~ 현재 : 한서대학교
항공전자공학과 석사과정
관심분야 : 비행시험, 항공기 시스템

현 정 욱 (Jung-Wook Hyun)



2010년 2월 : 한서대학교 항공전자
공학과(공학사)
2012년 2월 : 한서대학교 항공전자
공학과(공학석사)
2012년 2월~현재 : 한국항공우주
연구원(연구원)
관심분야 : 항공전자, 항공통신 시스템

장 재 원 (ae-Won Jang)



1999년 6월 : DeVry Univ. 전자
공학과(공학사)
2003년 2월 : 충남대학교 전자공학과
(공학석사)
2003년 4월 ~ 현재 : 한국항공우주
연구원(선임연구원)
2012년 3월 ~ 현재 : 충남대학교 전자공학과 박사과정
관심분야 : 항공전자, GPS, DSP

안 동 만 (Dong-Man Ahn)



2005년 ~ 2008년 5월 : 국방과학
연구소 소장
2008년 5월 ~ 현재 : 한서대학교
항공전자공학과 교수
관심분야 : 항공기 체계개발, 항공기
계측, 무인기 개발

홍 교 영 (Gyo-Young Hong)



1993년 3월 ~ 2001년 : 대한항공
한국항공기술연구소 선임연구원
2001년 9월 ~ 현재 : 한서대학교
항공전자공학과 교수
관심분야 : 비행시험, 항공통신,
항공기 시스템