

고도유지 제어를 포함한 자율이동체의 관성항법 알고리즘 수직채널 안정화루프 설계

심한준, 김영진, 이재홍, 나원상  
 한동대학교 기계제어공학부

Vertical Channel Damping Loop Design for Autonomous Vehicle with Altitude Controller

Han-Joon Shim, Young-Jin Kim, Jae-Hong Lee, Won-Sang Ra  
 School of Mechanical and Control Engineering, Handong Global University

**Abstract** - 본 논문에서는 고도유지 제어를 포함한 자율이동체의 수직 채널 안정화 루프를 제안한다. 제안된 방법은 일반적으로 널리 사용되고 있는 고전적인 수직채널 댐핑루프와 달리 고도정보와 함께 속도정보를 이용하여 궤적의 고도변화가 큰 이동체에 대하여 빠른 응답특성을 갖도록 한다. 루엔-버거(Luenberger) 관측기 구조를 이용함으로써 속도 정보를 활용한 수직채널 안정화루프의 체계적 설계가 가능함을 보인다. 제안된 설계 방법에 대하여 모의실험을 통해 제안한 기법의 성능 및 유용성을 확인한다.

1. 서 론

자율이동 시스템의 위치, 속도, 자세 추정을 목적으로 하는 항법 알고리즘 설계 문제는 항공우주, 자동차 및 다양한 군사산업의 기반이 되는 기술로 지금까지 이에 관한 많은 연구가 이루어져 왔다. 이를 위해 관성항법 센서 측정치를 적분함으로써 항법정보를 획득하는 순수항법 알고리즘이 활용될 수 있으나, 시간이 경과함에 따라 고도오차가 발생하는 특징을 가지므로 정확한 고도 정보 산출이 불가능한 것으로 알려져 있다 [1].

이러한 문제를 해결하기 위해서 기압고도계 등의 기준고도 정보를 이용하여 수직채널 안정화루프를 설계하는 방안이 고려되어 왔다. 기존 수직채널 댐핑루프는 수직가속도 측정치와 기압고도 측정치를 보완하여 신뢰성이 높은 고도 정보를 제공하지만, 자율이동 시스템의 고도의 급격한 변화시 응답속도가 매우 느리다는 단점이 있다 [1,2]. 기존 궤적의 고도변화가 큰 비행체의 경우 고도유지 제어의 성능을 향상시키기 위해 빠른 응답특성과 더불어 정확한 고도, 수직속도 추정 성능을 제공하는 우수한 수직채널 안정화 성능이 요구된다. 기존 수직채널 댐핑루프의 느린 응답속도는 관성항법 알고리즘의 성능저하를 야기하며, 결과적으로 자율이동체 시스템의 유도제어 성능을 저하시키는 요인이 된다.

본 논문에서는 전술한 문제를 해결하기 위해 수직채널 속도와 기압고도계의 고도 정보를 모두 사용함으로써 수직채널 안정화루프의 응답속도를 개선하는 방안을 제시한다. 지금까지 이에 대한 설계 기법으로 극 배치 기법(pole-assignment) 및 확률론적 최적 기법(stochastic optimization techniques) 등이 제안된 바 있으나, 기압고도계 이외의 다양한 보조 항법센서를 이용하여 수직채널 안정화루프를 설계하는 방법에 관한 연구는 충분히 이루어져 있지 않다. 그 대안으로 본 논문에서는 수직채널 안정화루프를 가상시스템과 루엔-버거(Luenberger) 관측기가 결합된 오차시스템으로 모델링하고 정상상태 칼만필터를 적용하여 수직채널 안정화루프를 설계한다. 모의실험을 통해 제안된 수직채널 안정화루프의 실효성을 검증한다.

2. 본 론

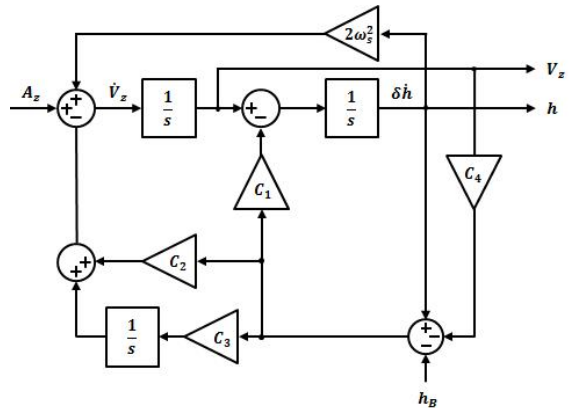
2.1. 기존 수직채널 안정화루프

3차 수직채널 댐핑루프 구조는 수직가속도 측정치와 기압고도 측정치를 보완하는 구조를 가지며 그림 1에 도시한 바와 같다. 여기서  $A_z$ 는 수직축 가속도이며  $h$ ,  $h_B$ 는 각각 고도와 기준고도를 의미한다. 수직채널 댐핑루프 시스템 특성 방정식  $(s+1/\tau)^3=0$  을 만족하는 극점을 배치하면 이득값  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ 은 다음과 같이 기술된다.

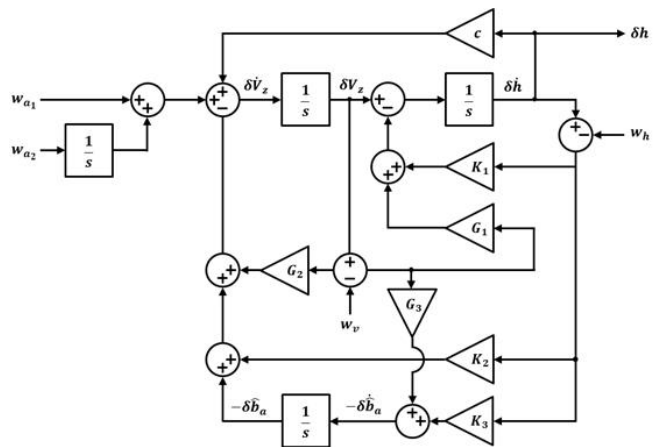
$$C_1 = \frac{2\omega_s^2 C_4 \tau^3 + 3\tau^2 + 3C_4 \tau + C_4^2}{(1-2\omega_s^2 C_4^2) \tau^3},$$

$$C_2 = \frac{2\omega_s^2 (\tau^3 + 3C_4 \tau^2) + 3\tau + C_4}{(1-2\omega_s^2 C_4^2) \tau^3},$$

$$C_3 = \frac{1}{\tau^3}$$



<그림 1> 3차 수직채널 댐핑루프



<그림 2> 개선된 수직채널 안정화루프

여기서,  $\tau$ ,  $2\omega_s^2$ 는 각각 시정수, 중력가속도 보상을 의미하며  $C_4$ 는 항법 센서 지연 시간을 보상하기 위한 이득이다. 만일  $C_4$ 가 0이라면 식 (1)은 식 (2)와 같이 정리 할 수 있다.

$$C_1 = \frac{3}{\tau^3}, C_2 = 2\omega_s^2 + \frac{3}{\tau^2}, C_3 = \frac{1}{\tau^3} \tag{2}$$

2.2 개선된 수직채널 안정화루프

본 논문에서 제안하는 수직채널 안정화루프는 그림 2에 도시한 바와 같다. 사용된 변수들의 정의는 다음과 같다.

- $\delta h$  고도 오차
- $\delta V_z$  수직 속도 오차
- $\delta \dot{b}_a$  수직 가속도 편향 오차
- $w_{a1}$  가속도 측정치 잡음

- $w_{a_2}$  가속도 랜덤워크 오차
- $w_h$  고도 센서 측정치 잡음
- $w_v$  수직 속도 센서 측정치 잡음

그림 2로부터 다음과 같은 오차방정식을 상태공간 방정식 형태로 기술할 수 있다.

$$\dot{x}_e(t) = A_e x_e(t) + B_e w(t) \quad (2)$$

여기서

$$x_e(t) = \begin{bmatrix} \delta h \\ \delta V_z \\ \delta \hat{b}_a \end{bmatrix}, w(t) = \begin{bmatrix} w_{a_1} \\ w_{a_2} \\ w_h \\ w_v \end{bmatrix}, A_e = \begin{bmatrix} -K_1 & 1 - G_1 & 0 \\ C - K_2 & -G_2 & 1 \\ -K_3 & -G_3 & 0 \end{bmatrix}, B_e = \begin{bmatrix} 0 & 0 & K_1 & G_1 \\ 1 & 0 & K_2 & G_2 \\ 0 & 1 & K_3 & G_3 \end{bmatrix}$$

위의 오차방정식은 무편향 필터(unbiased filter)의 오차 모델과 동일한 구조를 갖는다. 즉, 수직채널 안정화루프는 다음과 같은 확률론적 선형 시스템(stochastic linear system)에 대한 상태추정치 설계 문제로 재해석할 수 있다 [3]. 이러한 관찰결과에 기초하여 고도 및 수직 속도정보를 이용한 새로운 형태의 수직채널 안정화루프 그림 2의 이득을 체계적 설계 방법을 생각해보자.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) - v(t) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서  $x(t)$ 는 상태변수,  $y(t)$ 는 출력이며  $u(t)$ ,  $v(t)$ 는 각각 공정잡음, 측정잡음을 의미한다.

만일 가상 시스템 식 (3)의 오차시스템을 식 (2)라하면, 오차시스템을 접근 안정하게 하는 루엔-버거(Luenberger) 선형 필터는 다음 구조를 갖는다.

$$\dot{\hat{x}}(t) = H\hat{x}(t) + Ky(t) \quad (4)$$

추정 오차를  $x_e(t) = x(t) - \hat{x}(t)$ 로 정의하면 식 (3)와 (4)으로부터 다음 오차시스템을 유도할 수 있다.

$$\dot{x}_e = Hx_e(t) + [BK] \begin{bmatrix} u(t) \\ v(t) \end{bmatrix} \quad (5)$$

식 (5)에서  $u(t)$ ,  $v(t)$ 가 영평균 정규분포를 따르는 것으로 가정하면, 무편향 필터의 이득은 다음 조건을 만족하여야 한다.

$$H = A - KC \quad (6)$$

식 (6)를 식 (5)에 대입하여 정리하면, 다음 대응관계를 얻을 수 있다.

$$H \mapsto A_e, [BK] \mapsto B_e \quad (7)$$

여기서

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ c & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, K = \begin{bmatrix} K_1 & G_1 \\ K_2 & G_2 \\ K_3 & G_3 \end{bmatrix}$$

$$u = \begin{bmatrix} w_{a_1} \\ w_{a_2} \end{bmatrix}, v = \begin{bmatrix} w_h \\ w_v \end{bmatrix}, x = \begin{bmatrix} h \\ V_z \\ \hat{b}_a \end{bmatrix}$$

이제 칼만 필터를 적용하면 고도계와 속도 센서의 비정상성 오차에 대한 수직채널 안정화루프 이득을 설계할 수 있다.

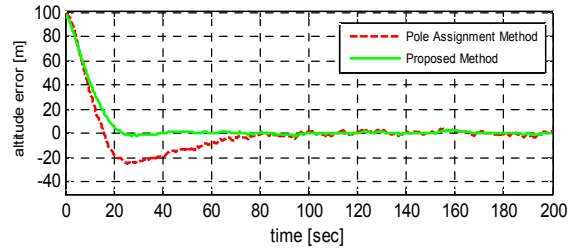
$$K = PC^T R^{-1} \quad (8)$$

여기서  $P$ 는 다음 대수 리카티 방정식의 해이다.

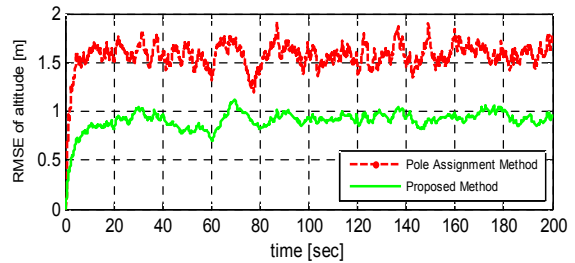
$$AP + PA^T + BQB^T - PC^T CP = 0 \quad (9)$$

### 2.3 모의 실험

제안된 수직채널 안정화루프의 실효성을 검증하기 위하여 모의실험을 수행하였다. 성능 비교를 위하여 기존 극배치 기법을 적용한 경우와 제안된 방법이 함께 고려된다. 그림 3의 결과로부터 기존 방법이 체계적 큰 고도변화에 느리게 수렴하는 반면, 제안된 방법은 초기 상태 오차의 수렴속도가 빠름을 확인할 수 있다. 100회 몬테칼로 모의실험 결과는 그림 4에 도시한 바와 같다. 그림을 살펴보면 제안된 기법은 추정오차의 표준편차 관점에서 뛰어난 성능을 제공함을 알 수 있다. 따라서 제안된 수직채널 안정화 루프를 고도변화가 큰 자율이동체에 적용하는 경우 기존의 방법에 비해 우수한 성능을 보장한다.



<그림 3> 고도 및 수직 속도 응답특성



<그림 4> 고도 및 수직 속도 상태추정치의 RMSE: 모의실험

### 3. 결 론

본 논문에서는 기존 수직채널 댐핑루프의 느린 응답속도 문제를 해결하기 위해 보조센서에서 제공하는 고도와 수직 속도 정보를 모두 이용한 형태의 항법장치 수직채널 안정화 루프구조를 제안하였다. 수직채널 안정화루프의 체계적 설계방법론을 정립하기 위해, 수직채널 안정화루프를 가상의 시스템과 루엔-버거(Luenberger) 관측기가 결합된 오차시스템으로 모델링하고, 정상상태 칼만필터를 이용하여 안정화루프의 이득을 결정할 수 있음을 확인하였다. 모의실험을 통해 제안된 방법을 적용할 경우, 고도변화가 비교적 큰 자율이동체의 수직채널을 안정화할 뿐만 아니라 빠른 수직채널 응답특성을 제공함을 확인하였다.

### [참 고 문 헌]

- [1] G.M. Siouris, *Aerospace Avionics Systems - A Modern Synthesis*, Academic Press, Inc., 1993
- [2] W.S. Widnall and P.K. Shinha, "Optimizing the gains of the baro-inertial vertical channel", *J. Guid. Control*, vol. 3, pp. 172-178, 1980
- [3] W.S. Ra, I. H. Whang and H.R. Park, "Robust damping loop design for GPS/INS vertical channel", *Electronics Letters*, vol. 42, no. 11, pp. 617-618, 2006