비선형 관측기를 이용한 스트랩다운 관성항법시스템 구성

Design of a SDINS using the nonlinear observer

°유 명 종*, 이 장 규**, 박 찬 국+, 심 덕 선++

* 서울대학교 전기공학부(E-mail: mjyu@asrignc3.snu.ac.kr)
** 서울대학교 전기공학부(E-mail: jgl@asri.snu.ac.kr)
+ 광운대학교 제어계측공학과(E-mail: cgpark@daisy.kwangwoon.ac.kr)
++ 중앙대학교 전자전기공학부(E-mail: dshim@jupiter.cie.cau.ac.kr)

Abstract : The nonlinear observers are proposed for a nonlinear system. To improve the characteristics such as a stability, a convergence, and an H_∞ filter performance criterion, we utilize an H_∞ filter Riccati equation or a modified H_∞ filter Riccati equation with a freedom parameter. Using the Lyapunov, the characteristics of the observer are analyzed. Then the in-flight alignment for a strapdown inertial navigation system(SDINS) is designed using the observer proposed. Simulation results show that the observer with the modified H_∞ filter Riccati equation effectively improve the performance of the in-flight alignment.

Keywords : nonlinear observer, stability, convergence, strapdown inertial navigation system

1. 서론

스트랩다운 관성항법시스템에서 오차를 추정하기 위하여 주로 사용되는 필터는 간접 되먹임 칼만필터이다. 간접되먹임 칼만필터는 일반적으로 확장형 칼만필터로 알려져 있다. 확장형 칼만필터는 시스템의 비선형 성이 작은 경우 그리고 초기의 오차가 작은 경우에만 사용이 가능하며 그렇지 않은 경우에는 쉽게 발산하는 특성을 가진다. 이러한 문제점을 개선하기 위하여 많은 연구가 있어 왔다.[1-3] 필터의 특성을 개선하기 위하여 중요한 것은 필터의 안정성, 수렴성 및 추정오차의 경향 등을 해석하는 것이다. 이러한 해석으로부터 필터의 성능을 개선할 수 있다.

스트랩다운 관성항법시스템에서 필터를 구성하기 위하여 시스템의 오차모델을 유도한다. 유도된 오차모델은 2차 이상의 고차 항은 생략하기 때문에 자세오차가 큰 경우 큰 모델 오차를 유발 할 수 있다. 이 경우 오차를 추정하기 위하여 사용된 필터의 성능은 저하된다.[4] 따라서 무시된 오차 항을 고려할 수 있는 필터가 요구되어 왔다.

본 논문에서는 필터의 중요한 특성을 개선하고, 오차 모델을 유도 할때 발생되는 2차 이상의 고차 오차 항을 고려하기 위하여 두 가지 비선형 관측기를 제시하였다. 하나는 H_∞필터 Riccati 방정식을 사용한 비선형 관측기이며, 다른 하나는 자유 매개변수를 가진 수정된 H_∞필터 Riccati 방정식을 사용한 비선형 관측기이다. Lyapunov 함수를 사용하여 구성된 비선형 관측기의 특성을 해석한다. 해석에서 고려된 중요한 특성은 관측기의 안정성, 수렴성, 추정오차의 허용 최대범위 및 선형 H_∞ 필터의 성능 지수 등이다. 이러한 해석으로부터 구성된 관측기의 특성을 비교하였으며, 관측기의 특성을 개선시키기 위하여 수정된 H_∞필터 Riccati 방정식에 사용된 자유 매개변수의 범위를 제시하였다. 또한 제시된 비선형 관측기를 이용하여 관성항법 시스템의 주행 중 정렬 방법인 속도 보정형 스트랩다운 관성항법 시스템을 구성하였으며 성능을 분석하였다.

2. 비선형 관측기

2.1 비선형 관측기 구성

비선형, 시변 시스템을 고려하자.

$$\dot{x}(t) = f(x(t)) + B(t)w(t) \tag{1}$$

$$y(t) = h(x(t)) + v(t) \tag{2}$$

여기서 $x(t)$는 상태변수, $y(t)$는 측정치, $w(t)$는 공정잡음 그리고 $v(t)$는 측정잡음이다. 잡음의 특성은 모른다고 가정한다. 비선형 관측기는 다음과 같이 구성된다.

$$\dot{\hat{x}}(t) = f(\hat{x}(t)) + K(t)[y(t) - h(\hat{x}(t))] \tag{3}$$

$$K(t) = P(t)C^T(t)R^{-1} \tag{4}$$

여기서 $P(t)$는 Riccati 방정식의 해이며, R는 측정 잡음과 관련된 양의 대칭 한정행렬이다. 비선형 관측기에서 사용된 Riccati 방정식은 다음절에서 제시한다.

$\hat{z}(t)$는 식 (5)와 같이 상태변수의 선형조합으로 구성된다.

$$\hat{z}(t) = L(t)\hat{x}(t) \tag{5}$$

추정오차를 식 (6)과 같이 정의하면, 추정오차의 미분방정식은 식 (7)과 같다.

$$\zeta(t) = x(t) - \hat{x}(t) \tag{6}$$

$$\begin{aligned} \dot{\zeta}(t) &= (A(t) - K(t)C(t))\zeta(t) + B(t)w(t) \\ &+ \varphi(x(t), \hat{x}(t)) - K(t)\chi(x(t), \hat{x}(t)) - K(t)v(t) \end{aligned} \tag{7}$$

여기서 $A(t) = \frac{\partial f}{\partial x}(\hat{x}(t))$, $C(t) = \frac{\partial h}{\partial x}(\hat{x}(t))$

$$f(x(t), u(t)) - f(\hat{x}(t), u(t)) = A(t)(x(t) - \hat{x}(t)) + \varphi(x(t), \hat{x}(t), u(t))$$

$$h(x(t)) - h(\hat{x}(t)) = C(t)(x(t) - \hat{x}(t)) + \chi(x(t), \hat{x}(t))$$

$\varphi(x(t), \hat{x}(t))$와 $\chi(x(t), \hat{x}(t))$ 추정오차의 2차 이상 고차 항들이다. 확장형 칼만필터는 이들 항들을 무시하여 사용한다. 그러나 본 논문에서는 이들을 불확실성(uncertainty)으로 고려한다.