

Backstepping 제어기법을 이용한 위성체 선회기동의 비선형 제어기법

Nonlinear Control Law for Spacecraft Slew Maneuver using Backstepping Control Law

°김기석*, 김유단**

* 서울대학교 항공우주공학과(Tel : 81-2-880-7392; Fax : 81-2-887-2662; E-mail: aerofog2@chollian.net)
** 서울대학교 항공우주공학과(Tel : 81-2-880-7398; Fax : 81-2-000-2662; E-mail: ydkim@snu.ac.kr)

Abstract : In this paper, the backstepping control method that is useful for cascade systems is applied to the slew maneuver of the spacecraft. The quaternion is used for representing the attitude of the spacecraft, because the reference trajectory of angular velocity has simple mathematical form. The conventional backstepping control has several problems such as slow convergence, trivial cancelling of nonlinear terms, and excessive control input. To overcome these problems, the modified backstepping control method which is redesign of Lyapunov function is proposed. To design a tracking function for angular velocity, it is necessary to estimate the process of maximum angular velocity, and therefore the estimation procedure using Bellman-Gronwall inequality is developed. To verify the effectiveness of the proposed control law, numerical simulation is performed and the results are compared with the exiting control scheme.

Keywords : backstepping, nonlinear control, Bellman-Gronwall inequality, Lyapunov redesign, slew maneuver

1. 서론

비선형 시스템의 제어기를 설계하기 위해서 개발된 backstepping 기법은 시스템의 외부루프 출력이 내부루프의 입력으로 구성되는 시스템의 제어에 효과적으로 사용되고 있다. 최근에는 이러한 backstepping 제어기법을 근간으로 하여 다른 제어기법을 결합한 연구 결과들이 많이 발표되고 있다. 그러한 연구의 예로 sliding mode method를 이용한 연구[1], 외란 제거를 위한 최적화 문제에 관한 연구[2], 적응제어기법을 적용한 연구[3,4], 시스템의 강건성을 고려한 연구[5,6] 등이 있다. 또한, backstepping 제어기에 대한 문제로 입력 크기 및 변화율에 제한이 있는 backstepping 제어기에 관한 연구도 수행되었다.[7]

한편, 최근에는 위성체의 선회기동에 대한 제어기 설계에 대해서는 많은 연구가 진행되어 왔으며,[8-9] backstepping 기법을 위성체의 선회기동에 적용한 연구가 발표된 바 있다.[10] 이 연구에서는 위성체의 자세 벡터로 Rodrigue 벡터를 사용하여 위성체의 선회 기동을 수행하는 backstepping 제어기를 설계하였다.

본 논문에서는 quaternion 벡터를 사용하여 위성체 선회기동에 backstepping 제어를 적용하였다. 그러나 일반적인 backstepping 제어를 위성체 선회기동에 적용할 때, 각속도 값의 범위를 예측하기 힘들고, 과도한 입력을 요구하며, 수렴성능이 좋지 않는 등의 문제가 있다. 이러한 문제점들을 해결하기 위하여 본 논문에서는 Gronwall-Bellman 부등식을 이용하여 제어기 설계시에 필요한 각속도의 최대 상한값을 예측할 수 있는 알고리즘을 제시하였다. 또한, 르야프노프 함수를 재설계하여 효율적으로 제어입력의 크기를 줄일 수 있는 backstepping 제어법칙을 제시하였다. 제안된 제어법칙은 일반적인 backstepping 제어기와 비슷한 구조를 갖지만, 제어이득을 체계적으로 설계함으로써 보다 좋은 성능을 보이고 있다. 제안된 제어기의 효율성을 뒷받침하기 위하여 수치 시뮬레이션 결과를 제시하였다.

2. 일반적인 backstepping 기법을 이용한 위성체 선회기동 제어

2.1 Backstepping 제어

일반적인 backstepping 제어기법을 정리하기 위해서 다음의 같은 비선형 시스템을 고려하자.

$$\dot{\eta} = f(\eta) + G(\eta)\xi \quad (1)$$

$$\dot{\xi} = f_a(\eta, \xi) + G_a(\eta, \xi)u \quad (2)$$

여기서 상태변수는 $\eta \in R^n$, $\xi \in R^m$ 이고, 제어입력은 $u \in R^m$ 이다. 또한, 함수 f 및 f_a 는 $f(0) = f_a(0) = 0$ 를 만족하는 연속함수이며, G_a 는 $m \times m$ 가역행렬이다. Backstepping 제어는 식(1), 식(2)와 같이 입력 u 는 식(2)의 ξ 에 대한 입력으로 표현되고, ξ 는 식(1)의 입력 형태로 표현되는 시스템에 대해서, 식(1)을 안정화시키는 제적 $\xi = -\phi(\eta)$ 를 설계하고, 설계된 $\xi = -\phi(\eta)$ 를 추종하도록 식(2)로부터 제어입력 u 를 설계하는 제어기법이다.[11]

2.2 선회기동에의 backstepping 제어 응용

본 절에서는 2.1절의 일반적인 backstepping 제어를 강제위성의 선회기동에 적용하였다. 강제위성의 동역학을 성분 별로 풀어 쓰면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_1 &= p_1 \omega_2 \omega_3 + u_1, & p_1 &= (I_2 - I_3) / I_1, & u_1 &= T_1 / I_1 \\ \dot{\omega}_2 &= p_2 \omega_3 \omega_1 + u_2, & p_2 &= (I_3 - I_1) / I_2, & u_2 &= T_2 / I_2 \\ \dot{\omega}_3 &= p_3 \omega_1 \omega_2 + u_3, & p_3 &= (I_1 - I_2) / I_3, & u_3 &= T_3 / I_3 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 $\vec{I} = \text{diag}\{I_1, I_2, I_3\}$ 는 관성모멘트로 주축을 기준으로