

가상 상태를 이용한 시간 지연 시스템의 슬라이딩 모드 제어

Sliding Mode Control for Time-delay System using Virtual State

송영삼*, 권성하**, 박승규**, 오도창***, 정은태**

* 창원대학교 전기전자제어공학과(Tel : 81-055-279-7559; E-mail:sys7855@hanmail.net)

** 창원대학교 메카트로닉스공학부

*** 건양대학교 정보전자통신공학부

Abstract: This paper presents a sliding mode control(SMC) design method for single input linear systems with uncertainties and time delay in the state. We define a sliding surface for the augmented system with a virtual state which is defined from the nominal system. We make a virtual state from optimal control input using LQR(Linear Quadratic Regulator) and the states of the nominal system. We construct a controller that combines SMC with optimal controller. The proposed sliding mode controller stabilizes on the overall closed-loop system.

Keywords : Sliding mode control, time delay, virtual state, LQR

1. 서론

일반적으로 제어기 설계에 있어서 시간지연(time-delay)과 불확실성(uncertainty)은 시스템의 성능저하나 불안정의 원인이 된다. 시간지연이 갖는 이러한 문제를 해결하기 위한 많은 연구가 이루어지고 있다. 시스템을 시간지연이 없는 시스템으로 변환하여 기존의 설계기법의 적용을 용이하게 하는 시간지연 보상기를 갖는 제어기법(predictor-based control)이 Furukawa 등[1], Kwon 등[6]에 의해 제안되었고, 시간지연 및 불확실성을 갖는 시스템에 대하여 비 메모리 상태 궤환 제어기법(Memoryless state feedback control)을 적용한 건실 제어 및 안정성 해석에 관한 연구가 Li 등[7], Shen 등[9]에 의해 제안되었다. 최근에는 슬라이딩 모드 제어기가 파라미터 변동이나 모델링 오차에 대해서 안정하고 정상 상태 특성이 좋은 장점 때문에 건실 제어기로서 많이 연구되어지고 있다[4][5][10]. 슬라이딩 모드 제어(Sliding Mode Control : SMC)는 상태공간 상에서 어떤 특정한 슬라이딩 평면을 정하고 이에 대한 상태벡터의 위치에 따라 상태벡터를 빠른 속도로 슬라이딩 평면을 따라 원점으로 수렴케 하는 슬라이딩 모드를 발생시키는 제어이론이다. 슬라이딩 모드 제어 기법은 시스템을 슬라이딩 모드 내에 머무르도록 제어입력을 발생 시켜줌으로써 슬라이딩 모드 위에서 파라미터 불확실성이나 외란에 대해 건실하다는 장점을 가진다. 그러나 SMC시스템의 동특성이 상태들의 선형결합 형태인 슬라이딩 평면에 의해서 좌우되기 때문에 슬라이딩 평면의 개수 즉 입력의 개수만큼 동특성의 차수가 줄어들게 되어 여러 가지 모델기반 제어이론과 결합되어 사용되는 것이 어려워며 근본적으로 도달 기간(Reaching Phase)문제와 입력 떨림(Input Chattering)현상 등의 단점을 가지고 있다[3][11]. 이에 박 등[8]은 단일 입력 시스템에 대해서 SMC의 이러한 보수성(conservation)을 없애고 도달기간 문제를 해결하기 위해 가상상태를 도입하여 슬라이딩 평면을 구성함으로써 슬라이딩 모드가 공칭 시스템의 동특성을 가지며 SMC와 결합이 가능한 제어기를 구성할 수 있도록 하였다. 또한 초기의 가상 상태를 초기 스위칭 함수를 0으로 만들 수 있도록 선택해서 도달기간(reaching phase)을 제거하였다.

본 논문에서는 상태에 시간 지연과 불확실성을 가지는 단일 입력 시스템에 대하여 최적제어기와 SMC가 결합된 형태의 제어기를 구성한다. LQR (Linear Quadratic Regulator)을 이용하여 구한 최적 제어 입력과 공칭 시스템의 상태로서 가상 상태를 정의하며 가상 상태를 포함하는 차수가 증가된 시스템에 대해 슬라이딩 평면을 결정한다. 본 논문에서는 시간지연과 불확실성이 존재하는 시스템에 대해서 전체 시스템이 안정하도록 하는 슬라이딩 모드 제어기를 설계한다. 그리고 간단한 예제를 통해 본 논문의 타당성을 보인다.

2. 문제 설정

상태에 불확실성과 시간지연이 있는 시스템

$$\dot{x}(t) = (A + \Delta A)x(t) + (A_d + \Delta A_d)x(t-d) + Bu(t) + Df(t) \quad (1)$$

을 고려한다. 여기서 $x \in R^n$ 는 상태, $u \in R^q$ 는 제어입력, $f \in R$ 는 외란, d 는 양의 상수인 지연시간이다. R^n 은 n 차원 실수 공간을 의미하며 모든 행렬은 적절한 차원을 가진다. 그리고 (1)의 시스템에서 행렬 (A, B) 는 가제어 표준형(Controllable Canonical Form)으로 가정한다. 즉, 행렬 A 와 B 는

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -a_1 & -a_2 & -a_3 & \dots & -a_n \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}$$

이다. 또한 노름유계(Norm Bounded)를 가지는 불확실한 행렬 ΔA , ΔA_d 와 외란 행렬 D 는

$$\text{rank}([B : \Delta A : \Delta A_d : D]) = \text{rank } B \quad (2)$$

의 정합조건(Matching Condition)을 만족한다고 가정한다. 정합조건을 만족하므로 (1)의 시스템에서 불확실성은