

하이브리드 시스템을 위한 모델 및 제어기 설계

박 홍 성
강원대학교 제어계측공학과

Modelling and Controller Design for Hybrid System

Hong Seong Park
Department of Control Instrumentation Engr.
Kangwon National University

ABSTRACT

A hybrid system contains both continuous variables and discrete event components. This paper presents the new control architecture for hybrid systems, which consists of a conventional controller for the continuous-time variable of the system, a supervisor for discrete event components of the system, and an interface for link between the controller and the plant.

The presented controller is suitable for the system operating at the different operating conditions or for system being changing the plant model by enabling and disabling discrete events. This paper shows that the presented controller is better than the conventional controller.

1. 서론

현재 사용되고 있는 많은 플랜트는 연속 변수와 이산 사건 변수들로 구성된 하이브리드(hybrid) 시스템이다. 따라서 이들을 제어하기 위한 제어기는 연속 변수를 제어할 뿐만 아니라 이산 사건 변수도 제어할 수 있도록 되어 있다. 그러나 실제 제어 알고리즘에서는 연속 변수만 사용되며 이산 사건 변수는 사용되지 않으며 사용되더라도 시스템 정지, 시작 등에 관련된 동작에만 사용된다. 하이브리드 제어 시스템의 좋은 예가 보일러 시스템이다. 노(furnace)와 공기조절기는 온도조절장치와 같은 이산 사건 시스템에 의해 제어되는 연속 시스템으로써 모델링될 수 있다. 연속 변수는 전류, 전압, 변위, 속도, 유량과 같은 수치를 가지며 이산 사건 변수는 밸브의 개폐, 통신 채널의 연결등과 같은 사건의 발생등으로 표시되며 언어 혹은 논리 형태를 가진다.

하이브리드 시스템의 제어는 기존의 연속 변수 제어와 이산 사건 제어로 이루어져 있다. 제어 목적과 방법은 기존의 제어와 이산 사건 제어와는 매우 다르다. 기존의 제어의 목적은 불확실성을 가진 시스템을 안정화시키거나 최적화시키는 것

이며, 이산 사건 제어 목적은 시스템의 결함 및 변하는 동작조건하에서도 시스템의 신뢰성을 보장하는 것이다.

기존의 제어는 전달함수와 상태 공간을 사용하여 연구되어 왔으며[1] 이산 사건의 제어는 약 10년 전부터 연구되어 왔으며 관리제어를 비롯한 여러 방법이 제안되었다[2-6]. 연속 변수 시스템의 제어에 있어서도, 서로 다른 동작 조건하에서도 제어할 수 있도록 하는 제어구조를 살펴보면 가변구조제어(variable structure control, VSC) 시스템[7], gain scheduling 구조[8] 등이 있다. VSC 시스템은 역시 연속 함수인 스위치 구조동 함수에 따라 플랜트의 입력을 바꾸는 구조이다[7].

관리제어는 제어대상이 되는 플랜트는 오토마톤으로 모델링되어야 한다. 일반적으로 시스템의 동작은 오토마톤에서 생성되는 언어에 의해 표현된다. 언어에 있어서 각 시퀀스는 시스템의 가능한 궤적을 표시하며 관리 제어기는 원하는 시퀀스를 따라가게끔 제어가능한 사건들을 enable/disable시킨다. 관리 제어에 있어서 제어목적은 언어로써 표시된다. 하이브리드 시스템 제어와 관련된 연구는 거의 없으며 최근에 시작되었다 [9-11].

본 논문에서는 이산 사건 변수와 연속 변수를 동시에 제어할 수 있는 하이브리드 제어기의 새로운 모델을 개발하고자 한다. 하이브리드 제어기 모델은 연속 변수 제어를 위한 기존의 제어기, 관리제어기(supervisor)와 연속 변수와 이산 사건 변수를 서로 변환시켜주는 접속장치로 구성되어 있다. 기존의 제어기는 하이브리드 시스템의 연속 변수를 제어하기 위하여 사용되며 관리제어기는 시스템의 이산 사건 변수를 제어하며 기존의 제어기에서 사용되는 제어 알고리즘과 매개변수들을 상태에 맞게 바꾸어 주기 위해 사용된다. 접속장치는 기존 제어기와 관리 제어기를 서로 연결하고 플랜트와 제어기 사이의 신호 교환을 위하여 사용된다. 본 논문에서 제안하는 방법은 서로 다른 동작 조건에서 운영되는 시스템 혹은 이산 사건에 의해 플랜트의 모델이 달라지는 시스템등에 적용될 수 있으며 기존의 제어기를 사용하여 제어하는 것 보다 훨씬 잘 제어될 수 있다.

2장에서는 하이브리드 시스템을 위한 수학적 모델을 검토하며, 3장에서는 하이브리드 시스템을 위한 새로운 제어기 구

조를 제시하고 4장에서 결론을 맺는다.

2. 하이브리드 시스템의 모델

하이브리드 시스템은 이산 사건 시스템과 연속 시스템이 결합된 시스템이며, 이를 살펴보면 이산 사건이 일어날 때마다 연속 시스템의 매개변수 혹은 모델이 변한다. 예로써, 그림 1과 같은 간단한 액체 높이 제어시스템[12]을 생각하자.

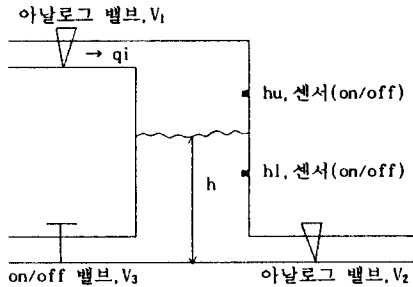


그림 1. 액체 높이 제어 시스템

그림 1의 동작은 다음과 같다. 센서 hu가 on이면 ($h \geq hu$ 인 경우 hu가 on) 밸브 V_2, V_3 가 열리고 V_1 이 닫히며 센서 hl이 on이면 ($h < hl$ 인 경우 on) V_2, V_3 가 닫히며 V_1 은 열린다. $hl \leq h < hu$ 인 경우는 기존의 제어를 사용한다. 여기서 기존의 제어기라 함은 그림 1과 같은 시스템을 이산사건과 무관하게 제어하는데 사용되는 제어기를 말한다. 이와 같은 시스템을 살펴보면 발생하는 이산사건의 종류에 따라, 즉 시스템의 상태에 따라 플랜트 모델이 바뀌어진다는 것을 알 수 있다. 따라서, 하이브리드 시스템의 연속 변수를 위한 모델은 식 (1), (2)와 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{x}(t) = f(q_u, t, x) + g(q_u, t, x)u(t) \quad (1)$$

$$y(t) = h(q_u, t, x) \quad (2)$$

식(1)과 식(2)는 비선형 시스템으로 모델링한 것이며 선형시스템만을 생각하면

$$\dot{x}(t) = A(q_u, t)x(t) + B(s_u, t) \cdot u(t) \quad (1)'$$

$$y(t) = C(q_u, t)x(t) \quad (2)'$$

여기서 q_u 는 시간 t 시의 이산 사건 시스템 상태이며 $u \in \mathbb{R}^m$, $y \in \mathbb{R}^k$, $x \in \mathbb{R}^n$ 이다. 시스템은 $t=t_0$ 에서 초기조건 $x(t_0)=x_0$ 상태에서 동작이 시작된다고 가정한다.

하이브리드 시스템의 연속 시스템 부분을 살펴보고 지금부터는 이산 사건 시스템을 살펴보자. 일반적으로 이산 사건 시스템 G 는 다음과 같이 표현된다.

$$G = (\Sigma, Q, \delta, q_0, Q_m) \quad (3)$$

여기서 Σ 는 알파벳(alphabet), Q 는 상태의 집합, δ 는 전이 관계(transition relation), q_0 는 초기 상태, Q_m 은 목적 상태(marked states)로 불리는 상태 집합이며 $Q_m \subset Q$ 이다. 알파벳 Σ 는 이산 사건의 집합이며 전이관계 δ 는 이산 사건의 발생으로 변하는 상태간의 관계를 나타내며, Q_m 은 어떤 일의 완료를 나타내는 상태로 해석될 수 있다.

Σ 의 원소들로 구성된 유한 스트링(string)의 집합을 Σ^* 로 표시하며, 스트링은 시스템에서 발생하는 이산 사건 혹은 알파벳들로 구성된 궤적을 말하며, Σ^* 의 부분집합을 언어(language)라 한다. 시스템 G 의 가능한 모든 궤적의 집합은 $L(G)$ 로 정의하며, 이는 제어되지 않은 이산 사건 시스템의 행동을 표시한다. DES의 동특성은 상태전이함수 δ 에 의해, 표시된다.

$$\delta : \Sigma \times Q \rightarrow Q \quad (4)$$

Σ 의 원소들은 알파벳 혹은 이산 사건이지만 하이브리드 시스템의 경우에는 어떤 연속 변수 경우는 이산 사건으로 변환시킬 수 있으며 변환된 이산 사건은 Σ 의 원소이어야 한다. 따라서 어떤 사건이 발생하더라도 (4)가 성립하게 된다.

3. 하이브리드 제어기

하이브리드 제어기는 기존의 제어기, 관리 제어기와 접속 장치로 구성되며 일반 구조는 그림 2에 있으며 그 구조의 변형된 구조는 그림 3에 있다.

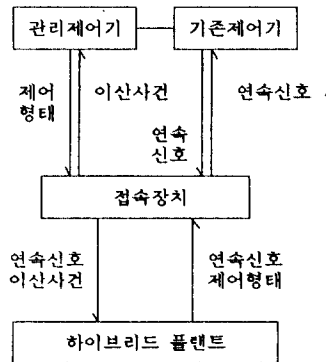


그림 2. 하이브리드 제어기의 일반 구조

기존의 제어기는 하이브리드 시스템의 연속 변수를 제어하기 위해 전통적인 방법에 의하여 설계되며 관리제어기는 시스템이 원하는 방향으로 동작되도록 이산 사건을 제어하도록 설계된다. 따라서 관리제어기는 항상 이산사건을 관찰하여 이산 사건들을 제어함으로써 시스템에 구조의 변화(예: 부품의 고장,

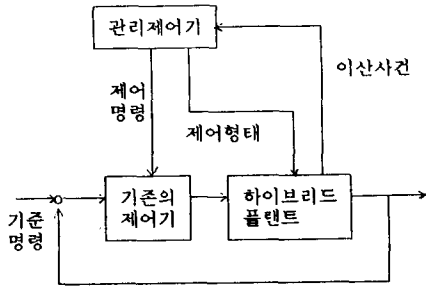


그림 3. 하이브리드 제어기의 응용 예

모델의 변화, 동작 조건의 급격한 변화 등)가 일어났는지를 검사하고 이를 토대로 기존의 제어기의 알고리즘을 바꾸거나 매개 변수 값을 변경시키도록 명령을 내린다.

접속장치는 플랜트의 연속 신호를 알맞은 이산 신호로 바꾸거나 관리제어기에서 나오는 제어형태를 플랜트의 연속신호로 바꾸며, 플랜트의 연속신호와 이산사건은 기존의 제어기의 입력 신호와 관리 제어기의 입력 사건으로 기존 제어기에서 출력되는 제어신호와 관리 제어에의 제어 형태는 플랜트의 제어 입력과 제어 형태로 바꾸어 주는 기능을 한다.

식 (1)에서 보다시피 하이브리드 시스템에서의 연속 신호 부분과 이산 사건 부분은 서로 밀접하게 관계를 맺고 있기 때문에 이들은 서로 분리하여 제어할 수 없다. 예로써, 이산 사건 시스템에서의 상태들은 연속 신호 부분에서의 여러 동작점 (operating point)으로 표시 될 수 있으며, 시스템의 상태 전이는 동작점의 변화로 볼 수 있다. 그림 1도 좋은 예의 하나이다.

제어기 설계 목적은 하이브리드 시스템의 안전성 (safety)과 안정성(stability)를 보장하며 가능한 최적성을 얻을 수 있도록 관리 제어기와 기존 제어기를 설계하는 것이다. 특히, 기존 제어기는 이미 알맞게 설계되어 사용하고 있다고 하면 별도로 제어기를 설계하지 않아도 될 수 있다. 따라서, 하이브리드 시스템이 안정성을 갖도록 이산사건에 의해 유도되는 각 상태의 연속 시스템 부분이 안정화되도록 제어시스템을 설계해야하며, 이를 위해서는 이산사건 부분과 연속 시스템 부분이 제어 가능해야 한다.

언어 K_1 은 연속 시스템이 제어가능한 시스템이 되도록 하게 하는 시퀀스이며 언어 K_2 는 연속 시스템이 안정한 시스템이 되도록 하게하는 시퀀스이다. K_3 는 하이브리드 시스템의 안전성과 같은 DES의 바람직한 동작을 보장하는 시퀀스이다.

$K_1 = \{s \in K_3 \mid X(t) = A(q_i, t)x(t) + B(q_i, t)U(t) \text{가 제어가능하며, } q_i \text{는 } s \text{에 의해 전이된 시간 } t \text{의 상태임}\}$

$K_2 = \{s \in K_3 \mid X(t) = A(q_i, t)x(t) + B(q_i, t)U(t) \text{가 안정하며, } q_i \text{는 } s \text{에 의해 전이된 시간 } t \text{의 상태임}\}$

따라서 관리 제어기의 제어목적은 제어대상 시스템이 다음과 같은 동작을 보장하는 것이다.

" $K_4 = K_1 \cap K_2$ 에서 지정된 동작을 하게 한다."

모든 이산사건이 제어가능하지 않기 때문에 이러한 목적을 얻기 위한 작업은 쉬운 일은 아니다. 이산사건 Σ 은 제어가능한 사건 Σ_c 와 제어불가능한 사건 Σ_u 로 나눌 수 있다. 즉

$$\Sigma = \Sigma_c \cup \Sigma_u, \quad \Sigma_c \cup \Sigma_u = \phi.$$

원하는 시퀀스 후에 일어나는 제어불가능한 사건이 바람직하지 않은 시퀀스로 가계하지 않으면, 그 언어 혹은 시퀀스를 제어가능하다고 한다. 즉,

$s \in \bar{K}$ 이고 $\sigma \in \Sigma_u$ 에 대해 $s\sigma \in L(G)$ 일때, $s\sigma \in \bar{K}$ 이면 $K \subset L(G)$ 는 제어가능하다. 여기서 \bar{K} 는 K 의 closure이다.

실제로, $K_4 \subset L(G)$ 가 닫혀 있고 제어가능하면,

$L(S/G) = K_4$ 인 관리제어기를 만들 수 있다.

그림 1과 같은 시스템의 모델을 사용하여 하이브리드 제어기를 설계하여 나타난 결과와 PID 방법만을 사용한 기존 제어기의 결과를 비교하여 보자.

평상시 시스템의 동특성방정식은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= ax + bu \\ y &= x \\ e &= r - y \\ u &= K_i \int edt + K_p e \end{aligned} \quad \text{---- (5)}$$

이런 경우에 있어서 계단 입력에 의한 응답은 그림 4와 같다. 그림 1의 하이브리드 제어기의 목적 언어 K_4 는 그림 5a에 있으며, 실제 시뮬레이션에 사용된 언어 K_4 는 그림 5b에 있다. 다음과 같은 그림 5b와 같은 단순한 하이브리드 제어기를 사용하여 계단 입력에 의한 응답을 보면 그림 6-7과 같다. 그림 5-7을 비교하면 하이브리드 제어가 좋다는 것을 알 수 있다.

5. 결론

연속 변수와 이산사건 변수로 구성된 하이브리드 시스템의 제어기 모델을 제시하였다. 이 제어기는 연속 변수 제어를 위해 사용하는 관리 제어기와 제어기와 제어대상 플랜트를 서로 연결해 주는 접속장치로 구성되었다.

이 제어기는 이산사건을 제어함으로써 복잡한 제어 대상 모델을 간단한 모델로 바꾸어 시스템을 제어하게 할 수 있을

뿐만 아니라 서로 다른 동작 조건하에서는 제어 알고리즘을 달리하여 동작하게 함으로써 원하는 성능을 얻게하며 시스템의 안전성과 안정성을 보장하여 준다. 예를 통하여 제안된 제어가 기존 제어기보다 좋음을 알 수 있다. 이에 대한 연구가 시작되는 단계이므로 많은 연구 주제가 남아 있다.

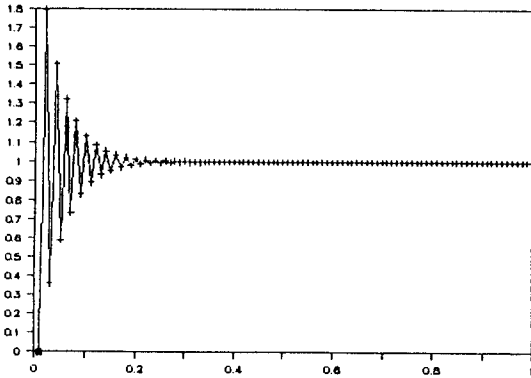


그림 4. 기존 제어기를 사용한 플랜트의 계단입력 응답의 예

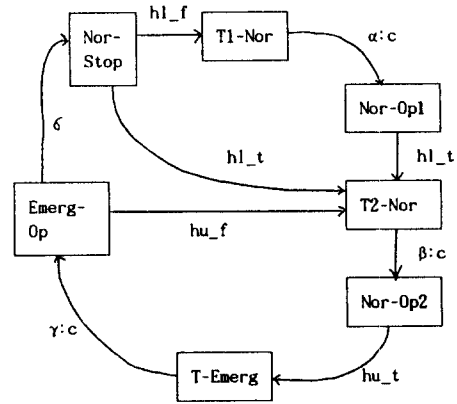
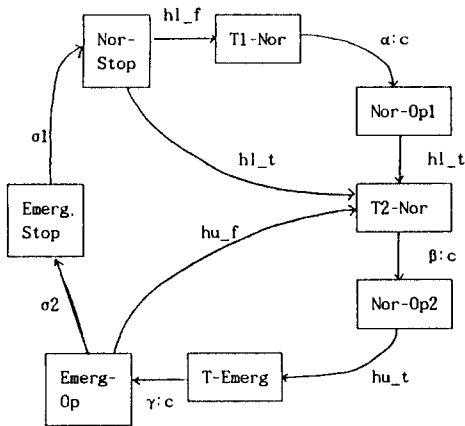


그림 5b. 그림 1의 간략화된 목적언어 K_4



$h1_t, h1_f$: 센서 $h1$ 의 on/off, ($\in \Sigma_u$)
 hu_t, hu_f : 센서 hu 의 on/off, ($\in \Sigma_u$)
 $\alpha:c$: V_1 은 op., V_2 는 off, V_3 는 off, ($\in \Sigma_c$)
 $\beta:c$: V_1 은 op., V_2 는 op., V_3 는 off, ($\in \Sigma_c$)
 $\gamma:c$: V_1 은 off., V_2 는 op., V_3 는 on, ($\in \Sigma_c$)
 σ_1, σ_2 : 해당하는 알맞은 동작, $\sigma_1 \in \Sigma_u, \sigma_2 \in \Sigma_c$

그림 5a. 그림 1의 목적언어 K_4

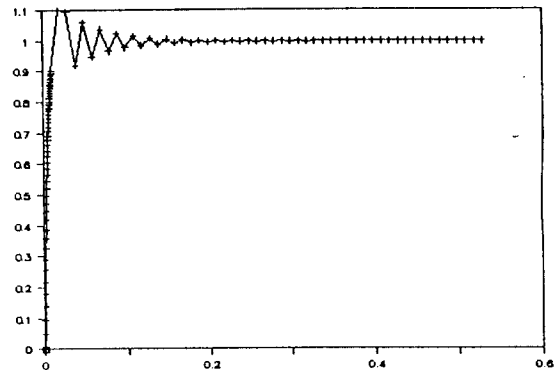


그림 6. 하이브리드제어기를 사용한 플랜트의 계단입력 응답의 예1

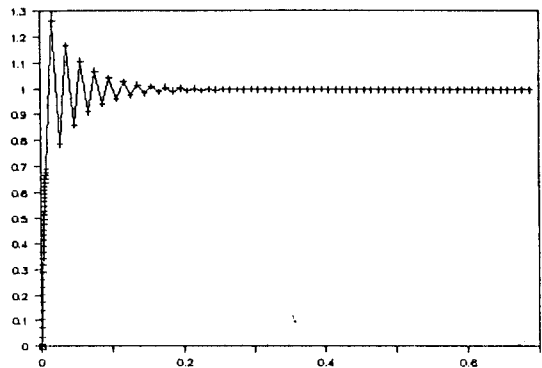


그림 7. 하이브리드제어기를 사용한 플랜트의 계단입력 응답의 예2

참고문헌

- [1] 강철구, 권육현, 박영필, 이교일, 현대제어공학, 최종당, 1993.
- [2] P.J. Ramadge and W.M. Wonham, "Supervisory Control of A Class of Discrete Event Process," *SIAM J. Control and Optimization*, vol. 25, No.1, pp.206-230, 1987.
- [3] W.M. Wonham and P.J. Ramadge, "On the Supremal controllable Sublanguage of A Given Language," *SIAM J. Control and Optimization*, vol. 25, No.3, pp. 637-659, 1987.
- [4] C.M. Ozveren and A.S. Willsky, "Output Stability of Discrete Event Dynamic Systems," *IEEE Tr. on AC.*, Vol.AC-36, No. 6, 1991.
- [5] Y.C. Ho, "A New Approach to Analysis of Discrete Event Dynamic System," *Automatica*, Vol.19, pp.149-167, 1983.
- [6] Y.C. Ho, X. Cao, and C. Caassandras, "Infinitesimal and Finite Perturbation Analysis for Queueing Network," *Automatica*, vol.19, pp.439-445, 1983.
- [7] J.Y. Hung, W. Gao, and J.C. Hung, "Variable Structure Control : A Survey," *IEEE Tr. on Industrial Electronics*, vol. 40, No.1, pp.2-22, 1993.
- [8] K.J. Astrom and B. Wittenmark, *Adaptive Control*, USA : Addison-Wesley Pub. Co., 1989.
- [9] J.A. Stiver and P.J. Antsaklis, "Modeling and Analysis of Hybrid Control Systems," *Proc. of 31th Conf. on Decision and Control*, pp.3748-3751, 1992.
- [10] F. Lin, J. Sun, and L.Y. Wang, "A Hybrid Control Architecture with Fuzzy Interface for Intelligent Control," *Proc. of 31th CDC*, pp.2539-2544, 1992.
- [11] P. Binns, M. Jackson, and Steve Vestal, "An Implementation for Hybrid Continuous Variable/Discrete Event Dynamic Systems," *Proc. of 31th CDC*, pp.2973-2979, 1992.
- [12] D.R. Coughanowr and L.B. Kpeel, *Process Systems Analysis and Control*, McGraw-Hill Kogakusha, Ltd, 1965.