

전기유압식 좌심실보조기에 사용된 직류서보모터의

슬라이딩모드 제어

°안 윤 호, 최 재 순, 정 찬 일, 민 병 구
서울대학교 의공학과

Sliding Mode Control of DC Servo Motor in Electrohydraulic Ventricular Assist Devices

Yun Ho An , Jae Soon Choi , Chan Il Chung, Byung Goo Min
Dept. of Biomedical Eng., Seoul Nat'l Univ., Korea

요약

본 연구에서는 슬라이딩 모드를 전기유압식 심실보조기의 직류서보모터제어의 속도와 위치제어에 적용하였다. 슬라이딩 모드 컨트롤은 가변구조시스템(variable structure system)의 일종으로 적절한 내부스위칭 논리를 갖는 연속적인 부시스템(subsystem)의 모임으로 구성된다. 이 점에서 고정된 제어구조를 갖는 일반적인 제어시스템과 다르다. 이 시스템은 불연속적인 동적시스템이나 시변적인 요소를 갖는 시스템등에서 사용되고 있다. 이 논문에서는 슬라이딩 모드 제어를 적용하여 좌심실보조기를 제어하는 경우에 넓은 작동범위에서도 시스템이 안정적이며 혈류역학적인 외란에 대해서도 기준입력에 대한 속도의 추종이 잘 이루어지는지의 여부를 실제의 구현에 앞서 컴퓨터모델을 통해 검증하고 문제점들을 조사하였다.

서론

좌심실보조기는 좌심실의 기능이 저하되어 약물등의 투여로는 치료효과를 기대할 수 없는 경우에 사용되는 보조기구이다. 심실보조기의 구동방식은 여러가지 방식이 있으나 서울대학교 의공학과에서는 직류서보모터의 회전을 유압으로 변환하여 혈액주머니를 구동하는 전기유압식 좌심실보조기를 개발하였다. 현재까지는 전기유압식 좌심실보조기의 직류모터의 속도 및 위치제어에서 비례적분제어기(PI controller)를 사용하여 왔다. 모델화가 적당하고 적절히 튜닝된 비례적분제어기는 추종성이나 안정성등의 문제가 적은 편이다. 이러한 보조기가 사용중인 상황에서 on-off제어방식의 슬라이딩모드를 적용시키고 검증은 시도한 이유는 좌심실 보조기를 실제로 적용하는 경우에 많은 종류의 외란이 발생하기 때문이다. 이러한 문제의 해결에는 많은 방법이 있으며 더 좋은 해결방법도 있겠으나 비교적 간단하게 구현이 가능한 점을 감안하여 이 방법을 채택하여 보았다.

좌심실보조기는 넓은범위의 작동조건이 요구되며 많은 외란을 가질 수 있다. 예를들어 좌심방의 혈액을 과다하게 흡입하는 경우에 좌심방함몰등의 문제가 발생하고 따라서 전부하(preload)가 증가할 수 있으며 동맥축의 혈관저항

이 신체의 중추신경계,내분비계 또는 자체조절기전으로 변화하는 경우에는 후부하(afterload)가 변한다. 또한 좌심실보조기의 동작자체가 심혈관계에 영향을 미치고 그 혈류역학적 변화에 따라 동작조건이 변할 수 있다. 이러한 변화의 범위가 넓고 변화하는 시점을 잘 알 수가 없기 때문에 보다 넓은 범위에서 작동되면서 일정수준의 안정성을 보장하는 제어가 필요한 경우가 있다.

본 연구에서 슬라이딩 모드를 적용하여 얻은 자료는 컴퓨터 모의실험에 의한 결과치이다. 슬라이딩모드를 속도와 위치제어에 적용하고 좌심실보조기를 생체에 적용하는 경우의 몇가지 조건을 주고 여러가지 조건에서 모의 실험하였다. 실제로 더 넓은 범위의 속도추종성을 보여주었다.

재료 및 방법

슬라이딩모드의 이론

S.V. Emelyanov 와 Utkin등은 가변적제어구조(Variable Structure System)의 이론에서 적절한 스위칭논리를 갖는 연속적인 부시스템들(subsystem)로 구성된 제어구조를 소개하였다. 이러한 시스템에서는 위상평면에서의 좌표와 외란에 의해 구성되는 불연속적인 함수로 제어조작(control action)이 행해진다. 따라서 제어장치가 간단해지는 장점이 있다.

슬라이딩모드의 제어 시스템에 대한 연구는 주로 위상공간(phase space)에서 이루어졌다. 이 평면상에서의 어떤 점의 위치는 상태궤적(state trajectory)이라고 불리며 동적인 계의 특성을 나타낸다. 제어시스템에서 어떠한 조작들을 취하면 상태궤적이 변하고 시스템이 바람직한 특성을 갖도록 변경할 수 있다.

이러한 시스템의 설계문제는 위상공간에서 불연속적인 제어조작을 나타내 줄 수 있는 적당한 면의 선택문제로 귀착된다. 슬라이딩모드란 위상평면에서 상태궤적이 불연속면으로 향하게 되는 특성이다. 불연속면 근처의 점들은 면으로 향하고 면을 따라 원점으로 이동한다. 이 사이의 시간은 유한하다. 점들이 면으로부터 이동(shift)이 일어나더라도 다시 불연속면으로 향하도록 하는 것이다.

불연속면의 계층을 명시하면 다음과 같이 일반화 될 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, t, u), x \in R^n, u \in r^n \\ u &= u_+(x, t), \text{ if } s(x) > 0, u_-(x, t), \text{ if } s(x) < 0 \\ s^T &= (s_1, \dots, s_m) \end{aligned}$$

여기서 설계의 절차는 다음의 두단계로 이루어진다. 우선 state space상의 평면 $s=0$ 를 결정하고, 제어함수 $u_+(x, t)$ 와 $u_-(x, t)$ 를 불연속면의 상태에 따라 선택한다. 불연속면의 존재영역과 필요조건에 대한 이론적인 자세한 내용은 참고문헌중 Utkin의 저서들에 수록되어 있다. Itkis등에 의하면 일반적으로 불연속면 근처에서의 슬라이딩 동작은 아래의 식처럼 지정된다.

$$\begin{aligned} \lim_{s \rightarrow 0^+} \frac{ds}{dt} &\leq 0 \\ \lim_{s \rightarrow 0^-} \frac{ds}{dt} &\geq 0 \end{aligned}$$

다른 표현방식으로는

$$\lim_{s \rightarrow 0} s \frac{ds}{dt} \leq 0 \quad \text{또는} \quad \lim_{s \rightarrow 0} \frac{d(s^2)}{dt} \leq 0$$

직류모터에서의 슬라이딩모드의 적용

여기에서는 기초적인 작업으로 직류모터에서 2차미분 방정식으로 상태모델을 설정하고 구현하였다. 불연속면은 S_0 이며 간단히 $s=0$ 으로 표기한다. 직류모터의 제어를 슬라이딩모드로 제어하려면 직류모터의 특성에 따른 상태 방정식이 구해져야 한다. 직류모터를 단순하게 단순하게 모델화하면 축의 각속도에 따른 다음과 같은 2차방정식이 얻어진다.

$$T_m T_e \ddot{n} + T_m \dot{n} + n = K_1 u - k_2 \dot{M}_l - k_0 M_l$$

u 는 모터에 공급하는 전압이고 T_m 과 T_e 는 각각 기계 및 전기적 시상수이다. M_l 은 부하의 토크이고 K_0, K_1, K_2 는 일정한 상수이다.

모터의 속도는 전압을 변경하여 이루어진다. 이전압은 u_0 와 $-u_0$ 의 값이 가능하다고 가정한다. $n_2(t)$ 가 원하는 속도프로파일이라면 다음과 같은 상태방정식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \frac{-1}{T_2} - \frac{1}{T_e T_m} x_1 - \frac{k_1}{T_e T_m} u + f(t), \end{aligned}$$

여기서 $f(t)$ 는

$$f(t) = \ddot{n}_2 + \frac{n_2}{T_e T_m} + \frac{k_2}{T_m T_e} \dot{M}_l + \frac{K_0}{T_e T_m} M_l$$

이다.

이러한 식을 정규형식(canonical form)으로 표현하면 슬라이딩모드의 움직임이 다음의 직선으로 주어진다.

$$s = c x_1 + x_2 = c x_1 + \dot{x}_1 = 0$$

여기서는 부하토크와 기준입력 그리고 모터의 다양한 매개변수들의 변동에 대해 불변이며 관성모멘트의 변화에 대해서도 둔감하다. 슬라이딩모드로 진입하면 에러축은 0 쪽으로 수렴한다. 다시 슬라이딩모드 방정식의 존재조건을 검증하기 위해 운동방정식(motion equation)을 구한다.

$$\dot{s} = c \dot{x}_1 - \frac{x_2}{T_e} - \frac{x_1}{(T_e T_m)} - \frac{-k_1}{(T_m T_e)} + f(t)$$

이때 $u = u_0 \text{sign}(s)$ 이고 다음의 부등식이 성립하여야 한다.

$$\frac{k_1}{(T_e T_m)} > \text{abs}(s)$$

s 와 \dot{s} 는 반대의 부호를 갖게 되며 상태벡터는 유한한 시간 이내에 $s=0$ 에 도달한다. 따라서 u_0 의 값으로 제어가 이루어지면서 슬라이딩모드에 도달하고 $M_l(t)$ 와 n_2 의 에러가 없어진다. 이때 각속도의 오차의 미분은 $x_2 = \dot{n}_2 - \ddot{n}$ 이다.

속도의 계측과 도함수를 계산하여 구하는 시간은 특정한 제어대상의 과도치나 지연에 대해 상대적으로 무시될 수 있는 값으로 정한다.

실험과정 및 재료

본 연구에서 사용된 컴퓨터 모의실험기는 3가지의 모델을 구현하고 있다.

- 마이크로프로세서를 이용하여 전동기를 구동하는 장치와 전동기에 관한 수학적 내용.
- 좌심방과 캐놀라 대동맥, 판막 그리고 혈액주머니와 혈액펌프
- 압력센서를 갖는 심혈관계의 모델

이 모의실험기에서 모터의 회전은 혈류역학적 변화로서 나타나고 모터에 가해지는 부하는 계속 변동하게 된다. 현재 사용중인 비례적분(PI)제어기는 80C196 마이크로프로세서를 이용하여 1ms마다 위치 및 속도를 제어하고 있다.

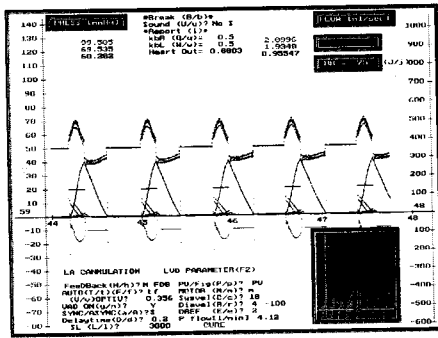


그림 2.b) 슬라이딩모드

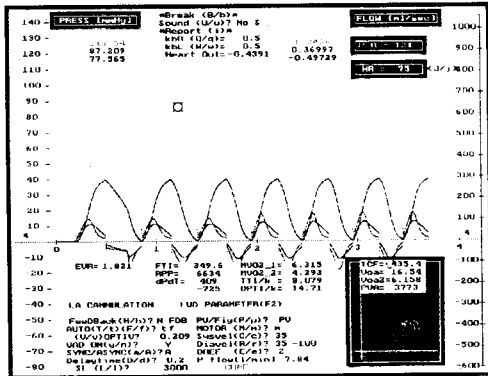


그림 2.c) 비례분제어기 고속

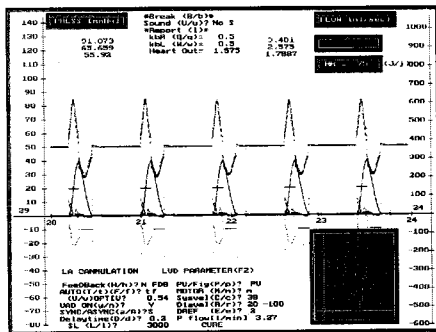


그림 2.d) 슬라이딩 모드

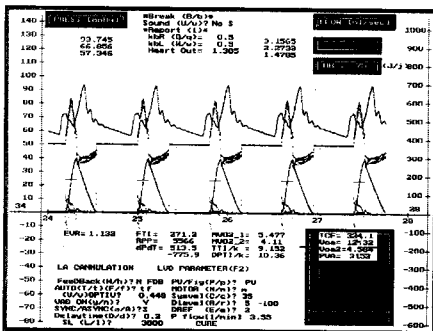


그림 2.e) 슬라이딩 모드

토의

슬라이딩모드 구동방식은 on-off제어방식으로 저속에서 비례적분제어기보다 추종되는 응답곡선의 형태가 매끄럽지 않은 경우와 저속에서의 전류소모가 과다한 경우가 있었다. 이러한 사실들은 이 제어방식을 채택하더라도 정상적인 동작조건시에는 적용에 대한 유리함이 상대적으로 적다는 점을 시사한다. 따라서 정상동작시에는 비례적분제어를 시행하고 좌심실혈물에 대처하는 비상모드 또는 비례적분기가 추종하기 어려운 경우에 대해 이 방법의 적용을 시도할 수 있다.

앞으로 구현될 실제의 프로그램에서는 성능개선을 위해 제어주기를 더 짧게 잡을 수 있도록 알고리즘을 개선해야 할 것이고 전류가 과다하게 흐르는 부분에 대한 개선도 필요하다고 생각되었다. 사용된 속도과형도 모의실험기의 구조상 포물선으로 한정되었다. 속도과형의 경우 다양한 형태에 대해 더 고려했고 검증해 보아야 할 것이다. 이와 함께 좌심방의 압력이나 유입혈액량의 양에 따라 속도의 기준입력을 변화시키는 알고리즘에 대한 연구를 병행하여야 할 필요가 있다.

또 이번 연구에서는 모의실험기에서 관측기(observer)를 따로 구성하지 않았고 슬라이딩모드의 불연속면이 다차원인 경우에 대해서는 고려하지 않았다. 앞으로 성능개선을 위해서는 이러한 부분에 대한 이론적 토대와 함께 실제적 접근이 더 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

1. Utkin,V.I., Sliding modes and their application in variable structure systems ,MIR publishers,Moscow, 1974.
2. Utkin ,V.I., Sliding Modes in Control and Optimization (English ed.), Springer-Verlag,Berlin,1992.
3. Itkis,U., Control Systems of Variable Structure,John Wiley & Sons,N.Y.,1976.
4. Kuo,B.C. Automatic Control Systems , 5ed., Prentice Hall , Engwood Cliffs, N.J.,1987.
5. Foster,C.C., Real Time Programming , Addison Wesley , Reading,Mass., 1981
6. 정찬일 , Computer Model of Left Ventricular Assist Device, 서울대학교 공과대학 석사학위논문 ,1994.
7. 김희찬 , 전동기구동형 인공심장의 제어기 개발에 대한 연구, 서울대학교 공과대학 박사학위논문 ,1989.

본 실험에서도 1ms마다 위상평면에서의 좌표위치를 계산하고 속도제어를 실시하였다. 속도와 위치에 따라 밀판(push plate)의 위치가 변하고 이에 따른 혈류역학적 변화와 이에 따른 모터의 회전수와 토크등이 모의 실험기에서 계산된다. 이번 연구에서는 속도와 위치가 잘 추종되는지를 관찰하였다.

직류모터는 Sanyo의 Super R 계열의 R406을 사용하였다. 이 모터에 부착된 엔코더는 1회전당 1000펄스를 발생시킨다.

(정격전압: 24Volt, 정격전류: 4.1A, 정격토크 1.9 kg-cm, 정격최대속도: 3000 rpm, Electrical time constant: 0.38msec, mechanical time constant: 4.7msec)

속도의 프로파일은 현재 비례적분제어기가 위치에 대한 속도의 포물선(parabola)형태로 같은 프로파일상에서 슬라이딩모드의 속도응답을 조사하였다. 이때 실제로 제어가 이루어지는 불연속면 $s = cx_1 + x_2 = cx_1 + \dot{x}_1 = 0$ 에서의 c 값을 몇가지 값으로 대체하여서 조사하였다.

결과 및 토의

결과

위의 내용을 컴퓨터로 모의실험하였다. 가장 잘 추종하는 경우는 c 의 값이 낮은값 (0근처)에서 얻어졌다. PI와 비교하여 고속에서의 추종성은 더 우수하였으며 저속에서의 추종성은 그다지 우수하지 않았다. 그러나 추종이 양호하게 이루어지는 범위가 더 넓었다. 전류소모는 저속에서 비례적분기보다 더 큰 값을 나타내었다.

아래의 그림1에서는 상평면에서 임의의 점들이 원점근처로 수렴하는 모습을 보여준다. 그림 a.는 s평면이 제대로 구성된 경우이고 그림b.는 수렴하는 범위가 넓고 추종이 잘 이루어지지 않은 경우이다. 그림c.는 추종이 이루어지지 않고 일정한 범위에서 진동하는 상태이다.

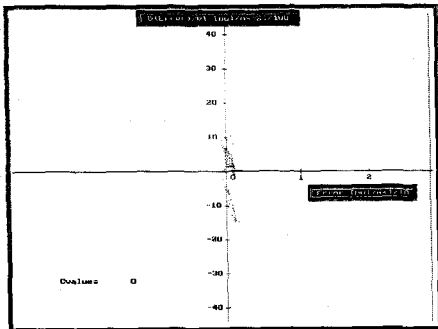


그림 (1.a) 수직축은 오차의 미분 \dot{e} 이고 수평축은 오차 e 이다.

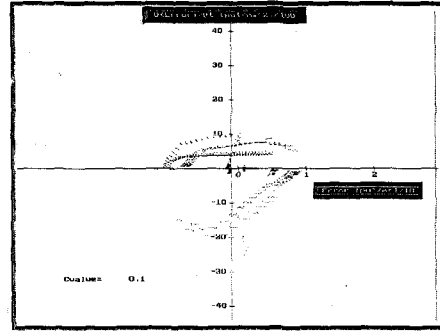


그림 (1.b)

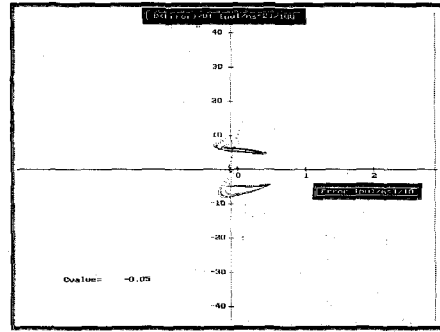


그림 (1.c)

그림 2의 a, b. 는 저속에서 실제로 발생할 수 있는 모의 실험에서의 속도추종곡선을 보여주고 있다. 그림 2의 c,d. 는 고속에서 실제로 발생할 수 있는 모의 실험에서의 속도추종곡선을 보여주고 있다.

(슬라이딩모드를 나타낸 그림들에서 위의 곡선들은 기준 입력과 응답을 나타낸다.이들이 하나의 파형처럼 보이는 이유는 속도의 추종이 잘 이루어지고 있다는 점을 나타낸다. 아래의 포물선처럼 보이는 부분은 절대위치의 변동을 보여주고 있다.) 그림 e에서는 동기모드(synchronized mode)에서 좌심실보조기가 R파에 동기하면서 작동하여 대동맥압의 파형에 변화를 일으키는 모습을 보여주고 있다.

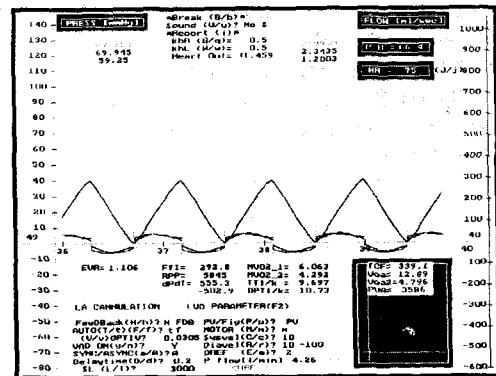


그림 2.a) 비례적분제어기 저속