지능알고리즘을 이용한 비선형 궤환제어에 관한 연구

고창민*, 박승규**, 윤태성**
창원대학교 전기공학과

Nonlinear feedback control by using intelligent algorithm

Chang-Min Ko, Seung-Kyu Park, Tae-Seong Yoon
Department of Electrical Engineering Changwon National University

Abstract - 본 연구는 지능알고리즘을 이용하여 비선형궤환을 구현하여 비선형시스템을 선형제어이론으로 제어할 수 있는 가능성을 제시한다. 기존의 비선형 궤환 선형화 이론은 비선형계통에 대한 정확한 모델링을 바탕으로 선형화기법을 적용하여 선형제어이론의 적용을 가능케 하는 것이었으나 본연구는 가상의 선형시스템과 SVM을 사용하여 동특성을 알려지지 않은 계통에 대해서도 적용시킬 수 있는 비선형 궤환선형화 기법의 가능성을 제공한다.

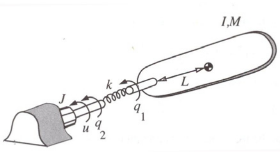
1. 서 론

로봇, 항공기, 우주위성과 같은 복잡한 비선형 시스템의 동작에는 정밀성, 안전성등의 엄격한 제한 요소가 요구되므로 고도의 제어 기법의 개발이 요구되고 있는 실정이다.[1] 비선형 시스템 이론의 대부분은 선형 시스템에 대한 결과를 비선형 시스템에 까지 확장시키는 것이다.[4] 근사선형화가 아닌 정확한 선형화 기법은 비선형 좌표변환과 비선형 궤환을 이용하는 것이다. 이 기법에 대한 연구는 이론적으로 상당히 활발히 진행되어 왔으나 근본적으로 비선형 계통에 대한 정확한 모델링이 요구되기 때문에 실제응용에 있어서는 제약을 받아왔다.[5] 그러므로 본 연구에서는 비선형계통에 대한 모델링을 필요로 하지 않으면서 선형화시킬 수 있는 새로운 방법을 제시한다. 이제까지의 연구중에서 모델링을 필요로 하지 않고 선형화시키는 방법은 입출력 데이터를 기반으로 지능알고리즘을 적용시켜 입출력 궤환 선형화를 시키는 것이었고 입출력 선형화된 후 가제어 표준형 형태의 상태방정식으로 표현하여 상태피이드백 형태의 제어기를 구성하였으나 사용되는 상태들이 실제상태의 정보를 반영하지 못하였다.[1] 이에 본연구에서는 입출력 선형화와 더불어 실제 상태를 반영하여 선형제어이론을 적용시킬 수 있는 새로운 방법을 제안한다. 선형화 상태에 실제 상태 정보를 반영하는 방법으로 지능알고리즘을 사용하게 되는데 본 연구에서는 Support Vector Machine(SVM)을 사용하기로 한다.[2]

2. 본 론

2.1 비선형 시스템의 선형화

본논문에서는 일단 비선형 좌표변환과 비선형 궤환에 의해 선형화시키는 기존의 기법에 대해서 살펴본다. 이해를 돕기 위하여 일반적인 이론대신 그림에 나오는 시스템의 예를 가지고 설명하기로 한다.[1]



<그림 1> 단축 유연한 로봇팔

<그림1>의 단축관절 로봇과 같은 비선형시스템의 상태방정식을 모델링하면 식(1.1),(1.2)로 나타낼수 있다.[1]

$$I\ddot{q}_1 + MgLsinq_1 + k(q_1 + q_2) = 0$$

$$\therefore\ \ddot{q}_1 = -(\frac{MgL}{I})\sin q_1 - (\frac{k}{I})q_1 + (\frac{k}{I})q_2 \qquad (1.1)$$

$$J\ddot{q}_2 - k(q_1 - q_2) = u$$

$$\therefore\ \ddot{q}_2 = \frac{u}{J} + (\frac{k}{J})q_1 - (\frac{k}{J})q_2 \qquad (1.2)$$

비선형 시스템을 표현할 때 좌표설정에 따라서 선형이 되거나 비선형이 된다. 여기서, J는 구동 전동기의 관성이며, L은 부하의 중력중심점까지의 거리이고, I,M은 부하질량이다.[1]

상태 벡터는 $x = [q_1\, \dot{q}_1\, q_2\, \dot{q}_2]^T$이다. 식(1.3)과 같다.

$$\rightarrow q_1 = x_1,\ \dot{q}_1 = x_2,\ q_2 = x_3,\ \dot{q}_2 = x_4 \qquad (1.3)$$

상태를 변환하면, 식(1-4)처럼 나타낼수 있다.[1]

$$z_1 = x_1$$

$$z_2 = x_2$$

$$z_3 = -\frac{MgL}{I}sinx_1 - \frac{k}{I}(x_1 - x_3)$$

$$z_4 = -\frac{MgL}{I}x_2\cos x_1 - \frac{k}{I}(x_2 - x_4) \qquad (1.4)$$

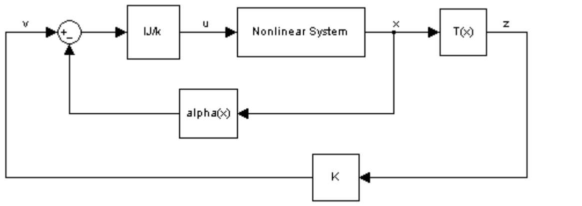
$\alpha(x)$는 식(1.5)처럼 정의 되고, 식(1.6)에 대입하여 정리한다.[1]

$$\alpha(x) = \frac{MgL}{I}sinx_1(x_2^2 + \frac{MgL}{I}cosx_1 + \frac{k}{I}) + \frac{k}{I}(x_1 - x_3)(\frac{k}{I} + \frac{k}{J} + \frac{MgL}{I}cosx_1) \qquad (1.5)$$

$$u = \frac{IJ}{k}(v - a(x)) \qquad (1.6)$$

여기서, $v = -kz$ 이므로,

$\therefore v = -k_1z_1 - k_2z_2 - k_3z_3 - k_4z_4$ 으로 표현이 된다.



<그림 2> 궤환선형화에 대한 개념도

본 연구에서는 비선형 궤환입력은 이미 인가된 상태에서 비선형 좌표변환에 대해서 살펴보기로 한다. 정확히 하면 비선형 좌표변환이라기 보다는 비선형 회귀관계를 정립하는 것이다. 지능 알고리즘을 사용하여 미지의 비선형동특성을 선형화시키는 연구는 이미 존재함으로 이러한 가정이 타당하다고 생각된다.

비선형 상태방정식은 비선형 좌표변환에 의해 다음과 같이 가제어 표준형 상태방정식으로 변환될 수 있다는 것은 알려진 사실이다.

가상의 상태는 다음과 같다.[1]

$\dot{z}_1 = z_2, \dot{z}_2 = z_3, \dot{z}_3 = z_4, \dot{z}_4 = v$

원래의 상태로부터 위의 상태값을 계산해 낼 수 있다면 위의 계통에 대해 선형제어기를 구성하면 기존의 상태궤환제어기가 설계되는 것이다. 위의 상태들과 실제 상태들간의 관계는 지능알고리즘을 사용하여 정렬이 가능하다. 본 연구에서는 SVR regression) 관계를 사용하기도 한다.

2.2 Support Vector Machine Regression

SVM(Support Vector Machine)은 Vapnik(1995)[2]에 의해서 제안되었으며, 분류판별(Support Vector Classification,SVC)를 해결하기 위해 개발되었지만 점차 회귀분석(Support Vector Regression)으로 점차 확대되었다.[2] 본 논문에서도 SVR(Support Vector Machine)를 이용하여 비선형 시스템을 선형화하는 종전의 복잡하고 수식 $T(x)$변환을 쉽게 좌표변환 하기위해 반복학습을 통하여 상태를 추정하고 비선형 시스템을 선형화 할수 있도록 regression Function을 사용하여 비선형계통 x와 선형계통 $\hat{z}$과의 관계를 알수 있다.

SVR regression형태는 다음과 같다.
함수 근사화 문제를 명확히 함수f로부터 얻어서 관측하면,
$(y_1,x_1),\ldots,(y_N,x_N)$와 $x\in R^m$, $y\in R$ 이다.
여기서 N은 학습데이터 수, x는 입력벡터, y는 출력데이터이다.[6]

$$f(x,w)=w^TK(x)+b \tag{2.1}$$

여기서 $K(\cdot)$는 R^m에 사상(Mapping)된 함수이며, 고차원 가상공간 F이다. $w\in F$는 가중벡터임을 확인할수 있고, b는 bias이다.[6]

$$\min\frac{1}{2}\parallel w\parallel^2+C\sum_{i=1}^{N}(\xi_i+\xi_i^*) \tag{2.2}$$

$$y_i-wx_i-b\le\epsilon+\xi_i \tag{2.3}$$
$$wx_i+b-y_i\le\epsilon+\xi_i^*$$
$$\xi_i\xi_i^*\ge0,\ C>0,\ i=1,\ldots,N$$

대표적인 커널에는 RBF커널, Linear커널, 다항커널(Polynomial kernel) 등으로 다음과 같이 정의된다.[7],[8]

Linear kernael : $k(x_i,x)=x^Tx_i$

RBF kernel : $k(x_i,x)=\exp(-\frac{\parallel x-x_i\parallel^2}{\sigma^2})$

본 논문에서는 Linear 커널 방법을 이용했으며, 선형분리가 불가능한 입력 공간에서의 최적 문제는 다음과 같이 변형된다.

$$\min\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{m}\alpha_i\alpha_jy_iy_jk(x_i,x_j)-\sum_{i=1}^{m}\alpha_i \tag{2.4}$$

$$s.t\ \sum_{i=1}^{m}\alpha_iy_i=0,\quad 0\le\alpha_i\le C,\quad i=1,\ldots,m$$

식(2.9)와 같이 변형되고, 이 식은 커널함수에 의해 특징 공간에서 선형분리가 가능한 식으로 바꿀수 있게 된다.[7],[8]

2.3 Simulation

그림 1의 계통에 대한 파라메터값은 다음 표와 같다.

<표 1> Parameter & Gain Value

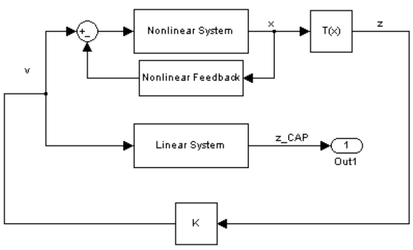
Parameter	Value	Gain	Value
I	0.031	MgL/I	25.8
J	0.004	k/I	230
MgL	0.8	k/J	1782.5
k	7.13	1/J	250
		IJ/k	0.000017391

선형화제어기를 상태궤환제어기로 하고 각각의 상태이득은 다음과 같이 결정한다.

$$k_1=7,\ k_2=17.75,\ k_3=19.25,\ k_4=7.5$$

비선형좌표변환과 비선형 궤환에 의해 선형화된 가상의 시스템은 다음과 같다.

$$\dot{z}_1=z_2,\ \dot{z}_2=z_3,\ \dot{z}_3=z_4,\ \dot{z}_4=v$$



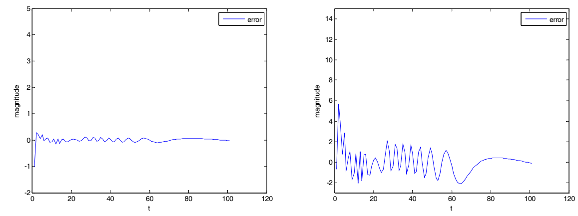
<그림 4> 비선형 궤환 시스템과 선형화된 가상시스템의 관계

학습데이타를 확보하여 학습하는 과정은 다음과 같다.
1) 한단계 이전의 실제계통의 상태 데이터를 입력 회귀벡터로 확보.
2) 가상시스템의 상태를 목표데이터로 확보
3) SVR알고리즘을 이용하여 학습
4) 학습된 결과의 확인

SVR를 통한 Linear관계식은 다음과 같이 결정된다.

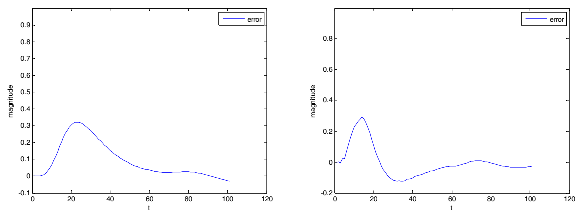
$$z_1=0.2495*x_1+0.1003*x_2+0.7549*x_3-0.0026*x_4-0.0288$$
$$z_2=-13.8208*x_1+1.0091*x_2+13.7796*x_3-0.0178*x_4-0.7011$$
$$z_3=-124.2582*x_1-0.2587*x_2+123.7634*x_3-0.0117*x_4-8.7775$$
$$z_4=298.1990*x_1-4.5904*x_2-297.9726*x_3+2.1159*x_4+18.8837$$

학습된 결과에 오차는 다음 그림과 같다.



<그림 5> Traget값과 추정SVM의 출력과의 오차

기존의 비선형 모델링식을 이용한 비선형 좌표변환의 결과와 비교해 보면 다음 그림과 같다.



a) b)

<그림 6> a)z_1의 오차 와 b)z_2의 오차

위의 결과로부터 비선형 좌표변환을 SVR을 이용하여 구현함으로써 미지의 비선형계통의 대한 선형화를 이루어낼 수 있음을 확인하였다.

3. 결 론

본 논문에서는 비선형계통에 대한 선형화방법에 대한 새로운 방법을 제시하였다. 기존의 지능알고리즘을 이용한 비선형 궤환선형화 알고리즘을 적용시킨 후 선형화된 상태방정식을 이용하여 가상의 상태와 비선형 계통의 실제상태간의 회귀관계를 SVR을 사용하여 추정한다. 결과적으로 선형계통의 상태와 비선형계통의 상태에 대한 비선형 변환관계를 확립할 수 있게 된다.

[참 고 문 헌]

[1] Jean-Jacques E. Slotine, Weiping Li, “Applied Nonlinear Control”, page242~245
[2] Steve R. Gunn, “Support Vector Machines for Classification and Regression”, Univ. of Southampton, Technical Report, 1998
[3] Steve R. Gunn and J.S. Kandola, “Structural Modelling with Sparse Kernels”, 2001
[4] 최성재, 배남석, “비선형 시스템의 선형화 기법, 중앙대 논문집, Vol.20, 1998
[5] 박영민, “비선형 시스템의 동특성피드백 선형화에 관한 연구”, 중앙대 논문집, 2003
[6] 한동창, 백운재, 김성락, 김한길, 심준홍, 박광원, 이석규, 박정일, ‘SVM Regression을 이용한 PMSM의 속도 추정’, 영남대, 2004,2005
[7] 조병선, “SVM을 이용한 유전자 알고리즘의 속도개선과 응용에 관한 연구”, 고려대 대학원 논문집, page.36~38, 고려대대학원, 2004
[8] 김영일, “서포트 벡터 학습을 이용한 함수 근사와 퍼지LQRQL 제어기 설계에 관한 연구”, 고려대 대학원 논문집, 2004
[9] 김기성, ‘Support Vector Machine을 이용한 분류분석’. 인하대 대학원 논문집, 2003

* 창원대학교 전기공학과 석사과정
** 창원대학교 전기공학과 정교수