

유연한 관절 로봇에 대한 비선형 관측기

김윤재, 임규만, 함철주, 함운철
전북대학교 공과대학 전자공학과

Nonlinear Observer for Flexible Joint Robots

Yun Jae Kim, Kyu Mann Im, Cheol Joo Ham, Woon Cheol Ham
Department of Electronic Engineering, Chonbuk National University

Abstract

This paper presents a nonlinear observer scheme for flexible joint robot manipulators. This nonlinear observer scheme is based on the sliding mode method. Sliding controllers have recently been shown to feature excellent robustness and performance properties for specific classes of nonlinear tracking problems. Dynamic equations of flexible joint robot manipulators are derived from the Euler-Lagrange equations by forming the corresponding Lagrangian. Simulation results are presented to show the validness of the proposed nonlinear observer scheme.

1. 서 론

최근에 모든 산업 분야에 있어서 로봇 매니퓰레이터의 필요성과 사용이 날로 증가하고 있다. 이러한 로봇의 발달 효과 장치에서 요구되어지는 위치의 정확성은 강성 링크를 사용함으로써 이루어질 수 있으나 무거운 하중을 다루기 위하여 상대적으로 로봇을 무겁게 제작할 수 밖에 없다. 따라서 현대의 로봇 매니퓰레이터는 이러한 비경계성과 불합리성을 해결하고 산업체 및 특수한 목적의 사용에 있어서 고도의 속도 성능을 갖는 경량의 로봇 구조가 절실히 필요하다.

최근 10 여년 동안 유연한 관절 로봇 매니퓰레이터를 제어하기 위하여 많은 제어 연구가 국내외로 활발히 진행 중에 있으며, Marino, Nicosia[1]와 Khorasani, Kokotovic[2]은 유연한 관절 로봇을 제어하는데 Singular perturbation 방식을 제안하였고, Luca, Isidori, Nicolo[3]는 동적 상태 궤환에 의한 선형화 기술을 활용하였으며, Spong은 동적 방정식에 적절한 가정과 상태 궤환에 의한 선형화 기술을 통하여 제어를 설계하였다. 특히 로봇 매니퓰레이터의 비선형 제어 이론에 있어서 비선형 관측기 구성하는 문제는 많은 경제적인 이점을 가지고 있다. 실제로 현재까지 비선형 관측기를 이용하여 로봇 매니퓰레이터를 제어하고자 하는 연구 분야에 대하여 간략히 살펴보면 Nicosia, Tornambe[4]는 이산 시간 시스템을 대상으로하여 설계된 관측기를 로봇 매니퓰레이터에 적용하였고, Slotine, Canudas[5]는 가

변구조 이론의 슬라이딩 모드 개념을 이용한 비선형 관측기를 설계하는등 많은 연구가 진행되어 왔지만 현재까지도 이 분야에 대한 연구는 상당히 미비한 상태이다.

최근 유연한 관절 로봇의 관측기에 대한 문제는 현대의 로봇 제어 이론에 있어서 가장 중요한 관심의 대상이다. 사실상 상태 궤환에 의한 이러한 로봇의 제어는 모든 관절에서, 4개의 상태 변수 즉, 전동기와 링크에서의 위치와 속도를 미리 알고 있어야 한다. 상태 궤환에 있어서 관측기를 사용하지 않을 경우의 로봇 제어는 모든 관절에서 상태 함수를 모두 알아야 하나 그러기 위해서는 많은 고가의 측정기의 필요와 복잡한 측정 계기가 요구된다. 따라서 본 논문에서는 이러한 비효율성을 해결하고 특별히, 매개변수 불확실성에 대하여 강인성을 갖는 가변구조 제어 이론[6][7]의 슬라이딩 모드 개념을 이용한 비선형 관측기를 설계한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 슬라이딩 모드 개념을 적용한 비선형 관측기 시스템 설계를 위하여 수학적인 사항에 대하여 고찰하고, 3장에서는 유연한 관절 로봇의 동력학적 방정식을 Euler-Lagrange Equation을 이용하여 유도한다. 4장에서는 2장에서 고찰한 비선형 관측기에 관한 수학적 사항과 3장에서 유도한 동력학에 근거하여 비선형 가변 구조 관측기를 설계하고, 5장에서는 앞장에서 고찰한 제어 이론과 제안한 알고리즘의 타당성을 시뮬레이션을 통하여 확인하며, 6장에서는 결론을 맺는다.

2. 비선형 관측기를 위한 슬라이딩 제어 이론

비선형 시스템의 일반식은 다음과 같이 표현되어질 수 있다.

$$\dot{x}(t) = f[t, x(t), u(t)], \quad \forall t \geq 0 \quad (1)$$

여기서 $x(t)$ 는 시간 t 에서 시스템의 상태이고 $u(t)$ 는 제어 입력 함수이다.

본 장에서는 식(1)과 같은 일반적인 비선형 시스템의 슬라이딩 모드에 대한 개념을 고찰하고 슬라이딩 모드를 활용한 변형된 비선형 시스템을 살펴봄으로써 후에 비선형 관측기를 설계하는데 이용한다.

2.1. 슬라이딩 모드 개념

로봇트 매니플레이터에 대한 제어 설계에 있어서 슬라이딩 모드 제어 이론은 다른 제어 이론보다 더욱 관심이 고조되고 있는 이론이다. 슬라이딩 모드에 대한 제어 법칙 구성은 다음과 같은 세 가지 단계로써 이루어 진다.

첫번째 단계로는 $s(\dot{x}, t) = 0$ 인 적절한 시간 변화 슬라이딩 평면을 선정하여야 하며 본 논문에서는 다음과 같이 선정하였다.

$$s(\dot{x}, t) = \left(-\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{n-1} \dot{x} \quad (2)$$

여기서 $\dot{x} = x - x_d$ 인 궤적 오차 벡터이며, λ 는 임의의 양의 상수이고, x_d 는 원하는 궤적함수이다.

두번째 단계로는 슬라이딩 곡면 부근에서의 상태 궤적이 슬라이딩 곡면을 향하여 움직이도록 다음과 같은 조건이 만족 되어지는 제어 법칙을 찾는 것이다.

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} s^2(x, t) \leq -\eta |s| \quad (\eta : 양수) \quad (3)$$

세번째 단계로는 스윙칭 곡면상에서의 시스템 방정식이 안정한가의 여부를 분석하는 것이다.

식(1)과 같은 비선형 시스템의 제어를 위해서는 상태변수 $x(t)$ 가 모두 측정 가능하여야 하나 실질적으로 이러한 경우는 거의 드물며 식(2)와 같이 표현되는 슬라이딩 곡면을 활용하기는 어렵다. 따라서 이를 위하여 비선형 관측기가 설계되어야 한다. 본 연구에서는 이러한 목적의 비선형 관측기 설계를 위하여 슬라이딩 모드를 활용하는 비선형 시스템을 수학적으로 모델링 하고 위상 평면(Phase Plane) 상에서 분석함으로써 이러한 문제점을 해결하고자 한다.

2.2. 비선형 관측기를 위한 수학적 모델링

본 절에서는 비선형 관측기 설계를 위해서 슬라이딩 모드를 활용한 다음과 같은 일반화된 비선형 시스템을 고려하고, 슬라이딩 모션 효과를 일으키는 sign function을 도입할 경우와 도입하지 않는 두 가지 경우에 대하여 수학적으로 살펴봄으로서 이러한 슬라이딩 모션 효과를 이후에 비선형 관측기 설계에 활용하고자 한다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= f_1(x_1, x_2) - k_1 \operatorname{sgn}(x_1) \\ \dot{x}_2 &= f_2(x_1, x_2) - k_2 \operatorname{sgn}(x_1) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 k_1, k_2 는 임의의 양의 상수이며, sgn 은 슬라이딩 효과를 부여하는 sign function을 나타낸다.

Case 1

식(4)에서 sign function을 도입하지 않는 경우에 대하여 살펴보면 다음과 같은 시스템으로 표현된다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= f_1(x_1, x_2) \\ \dot{x}_2 &= f_2(x_1, x_2) \end{aligned} \quad (5)$$

함수 $f_2(x_1, x_2)$, $f_1(x_1, x_2)$ 는 다음과 같은 조건이 만족되도록 설정한다.

$$\text{조건 1. } f_1(x_1, x_2) = -f_1(-x_1, -x_2)$$

$$f_1(x_1, x_2) > 0 \quad , \quad x_2 > 0 \quad (6.1)$$

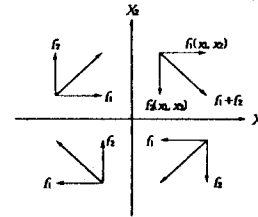
$$\text{조건 2. } f_2(x_1, x_2) = -f_2(-x_1, -x_2)$$

$$f_2(x_1, x_2) < 0 \quad , \quad x_1 > 0 \quad (6.2)$$

$$\text{조건 3. } f_2(x_1, x_2) \text{과 } f_1(x_1, x_2) \text{의 설정은 1상한과 3상}$$

한에서 궤적은 x_1 축을, 2상한과 4상한에서 궤적은 x_2 축을 통과 하도록 설정한다.

위와 같은 조건이 만족되는 경우 시스템 식(5)는 그림 1에서 보는 바와 같이 영점을 중심으로 $f_1(x_1, x_2)$, $f_2(x_1, x_2)$ 의 함수에 의하여 결정되는 형태를 갖고 진동(oscillation)이 일어남을 알 수 있다.

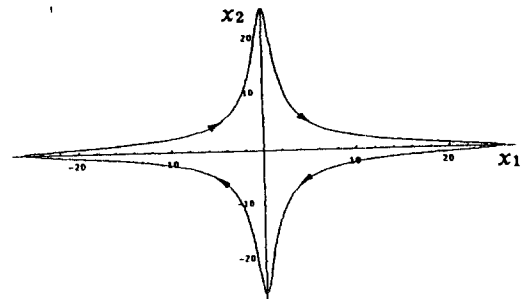


[그림 1] 진동 효과에 대한 개념

[예제 1] 앞 조건이 만족되는 다음과 같은 시스템을 관찰함으로써 그림 2에서 보는바와 같이 진동이 일어남을 확인할 수 있다.

$$\dot{x}_1 = x_1^2 x_2 + x_2$$

$$\dot{x}_2 = -x_1 x_2^2 - x_1 \quad (7)$$



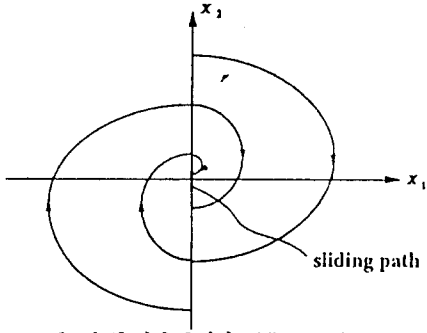
[그림 2] 진동 효과 현상

Case 2.

본 논문의 지면상 $f_1(x_1, x_2)$ 가 x_2 만의 함수이고 $f_2(x_1, x_2)$ 가 0인 경우에 대해서 고찰하고 특별히 $f_1(x_2)$ 가 x_2 인 경우에 대하여서만 간략히 고찰하여 본다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= f_1(x_2) - k_1 \operatorname{sgn}(x_1) \\ \dot{x}_2 &= -k_2 \operatorname{sgn}(x_1) \end{aligned} \quad (8)$$

식(8)은 일반적인 시스템 식(4)의 특별한 경우로써 sign function을 도입함으로써 아래의 식(9)로 표현되는 영역에서 슬라이딩 동작을 일으키는 전단 효과(shearing effect)를 나타낸다. 이러한 현상을 sliding patch로 정의하였으며 그림 3에서 보는바와 같다[8].



[그림 3] 전단 효과와 sliding patch

그림 3에서와 같이 궤적이 원점을 향하여 회전하고 있음을 알 수 있으며 다음과 같이 표현되는 영역에서는 sliding patch로 정의된 특이한 현상이 일어나게 되며 이는 마치 가변구조 제어 이론의 슬라이딩 모션과 동일한 현상으로 간주된다.

$$|x_2| \leq k_1, \quad x_1 = 0 \quad (9)$$

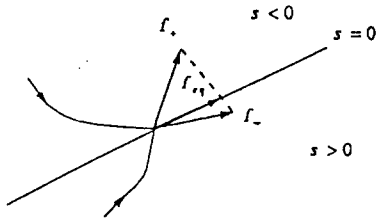
즉, 식(9)가 만족되는 영역에서는 다음과 같은 조건이 만족된다.

$$\begin{aligned} x_1 > 0 \text{ 일 경우} & \quad \dot{x}_1 < 0 \\ x_1 < 0 \text{ 일 경우} & \quad \dot{x}_1 > 0 \end{aligned} \quad (10)$$

이러한 sliding patch상에서의 위의 동적 방정식은 정확한 수학적 표현없이 임의적으로 분석하여 $x_1(t) = 0$, $x_2(t) = x_2(0)e^{-\frac{k_2}{k_1}t}$ 로 표현되어 원점으로 수렴함을 알 수 있다.

본 논문에서는 sliding patch상에서의 동적 방정식에 대한 정확한 수학적 분석을 위해서 Filippov's solution[9]을 이용한 분석 방법에 대하여 고찰한다.

Filippov's Solution



[그림 4] Convex combination

Sliding patch 상의 동적방정식은 다음과 같은 불연속면 동적방정식의 평균인 convex combination이 될 수 있으며 그림 4와 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \alpha(x_2 + k_1) + (1-\alpha)(x_2 - k_1) \\ \dot{x}_2 &= \alpha k_2 + (1-\alpha)(-k_2) \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 α 는 sliding patch 자체의 invariance에 의하여 결정되어지는 값이다.

$x_1(t) = 0$ 일 경우 α 는 다음과 같이 표현되어질 수 있다.

$$\alpha = \frac{k_1 - x_2}{2k_1} \quad (12)$$

식(12)을 식(11)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_2 &= \left(\frac{k_1 - x_2}{2k_1}\right)k_2 + \left(1 - \left(\frac{k_1 - x_2}{2k_1}\right)\right)(-k_2) \\ &= -\frac{k_2}{k_1}x_2 \end{aligned} \quad (13)$$

식(13)은 x_2 가 sliding patch상에 도달한 이후 sliding patch선상에서는 $e^{-\frac{k_2}{k_1}t}$ 로 감소하여 영점으로 가는 것을 보여준다. 앞에서는 k_1, k_2 를 임의의 양의 상수로써 고정시켰으나 k_1, k_2 를 다음과 같은 조건 범위에서 만족되도록 시간에 따른 변화 함수로써 설정하여도 x_1, x_2 의 궤적이 원점을 향하여 수렴됨을 알 수 있다.

$$|x_2(t)| < k_1 \quad \forall t \quad (14)$$

식(14)가 만족되도록 k_1 를 시간의 함수로 설정할 경우 모든 시간에 대해서 $x_2(t)$ 는 다음과 같이 표현되어질 수 있다.

$$x_2(t) = x_2(0)e^{-\frac{k_2}{k_1}t}$$

따라서 $k_1(t)$ 은 다음과 같은 식이 만족되도록 설정한다.

$$k_1(t) > x_2(0)e^{-\frac{k_2}{k_1}t}$$

일반적으로 윗식이 만족되도록 $k_1(t)$ 은 다음과 같이 두 가지 형태로 설정한다.

$$k_1(t) = (x_2(0) + \delta_1)e^{-\frac{k_2}{k_1}t}$$

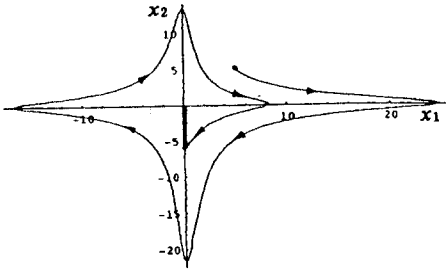
$$k_1(t) = (x_2(0) + \delta_1)e^{-\frac{k_2 + \delta_1}{k_1}t}$$

단 δ_1, δ_2 는 임의의 미소 양의 상수이다.

식(14)와 같은 조건이 만족되도록 k_1, k_2 를 시간에 따라 변화하여 초기값 $x_2(0)$ 가 처음부터 sliding patch상에 있도록 하면 모든 궤적이 $|x_2(t)| = 0 / (k_2 k_1)$ 보다 빠른 시간안에 sliding patch상에 도달됨을 알 수 있다.

[예제 2] 앞의 예제 1의 시스템 식에 k_1, k_2 와 sign function을 도입할 경우의 다음과 같은 시스템을 관찰함으로써 전단 효과가 일어남을 확인할 수 있으며 여기서 $k_1 > k_2$ 로써 k_1 은 4, k_2 는 0.5 이다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_1^2 x_2 + x_2 - k_1 \operatorname{sgn}(x_1) \\ \dot{x}_2 &= -x_1 x_2^2 - x_1 - k_2 \operatorname{sgn}(x_1) \end{aligned} \quad (15)$$

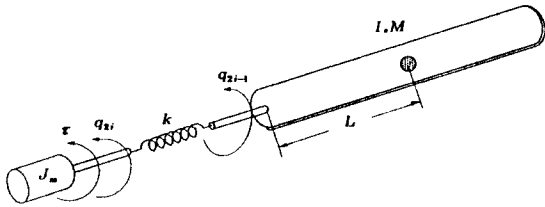


[그림 5] 전단 효과와 sliding patch

이상과 같이 sign function을 이용할 경우 가변구조 제어 이론의 스위칭 현상과 같은 sliding patch가 일어남을 알 수 있으며 후에 비선형 관측기 설계에 이용한다.

3. 유연한 관절 로봇의 동적 방정식

4장의 비선형 관측기 설계를 위하여 이를 적용하려는 유연한 관절 로봇의 동적 방정식을 고찰하여 본다.



[그림 6] 유연한 관절 로봇

매니퓰레이터의 일반적인 동력학적 방정식은 Lagrange-Euler 방정식의 직접적인 응용을 통하여 이루어질 수 있으며 Lagrange-Euler 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right] - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \tau_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (16)$$

여기서

L : Lagrangian 함수로써, 운동에너지 K -포텐셜에너지 P

K : 로봇 팔의 전체 운동에너지

P : 로봇 팔의 전체 포텐셜에너지

q_i : 로봇 팔의 일반 좌표계

\dot{q}_i : 일반 좌표계 q_i 의 시간 미분

τ_i : 관절에서 시스템 i 에 가해진 일반적인 토크

이다.

위의 Lagrange-Euler 방정식을 그림 6과 같은 유연한 관절 로봇의 동력학적 방정식을 유도하는데 이용한다[10].

단순한 시스템 동적 방정식을 위해서 관절은 DC-모터에 의해서 회전되고 i 번째 관절의 유연성은 스프링 상수

k_i , $i = 1, \dots, n$ 와 더불어 선형 비틀림 스프링으로써 모델 되어 진다고 가정한다. 이 경우 유연한 관절에서의 자유도는 강체 관절에서보다 2배이다.

그림 6에서 보는 바와 같이 n 개의 관절을 갖는 유연한 로봇의 경우 $q = (q_1, \dots, q_{2n})$ 는 시스템의 일반 좌표계로서 주어진다.

여기서

q_{2i-1} : 링크 i 에서의 회전 각도, $i = 1, \dots, n$

q_{2i} : 링크 i 에 연결된 DC-모터의 회전 각도

$$= -\frac{1}{r_i} \theta_i, \quad i = 1, \dots, n$$

θ_i : i 번째 관절의 모터의 회전 각도

r_i : i 번째 관절의 모터의 기어 비율

$q_{2i} - q_{2i-1}$: 관절 i 의 탄성 변위

벡터 q_1 와 q_2 를 다음과 같이 두 개의 n -차원 벡터로써 분리하여 정의한다.

$$q_1 = (q_1, q_3, \dots, q_{2n-1})^T$$

$$q_2 = (q_2, q_4, \dots, q_{2n})^T$$

모터의 운동에너지에 관한 링크 움직임의 영향을 무시하면 시스템의 운동에너지 및 포텐셜에너지는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\text{운동에너지 } K = \frac{1}{2} \dot{q}_1^T I(q_1) \dot{q}_1 + \frac{1}{2} \dot{q}_2^T J \dot{q}_2 \quad (17)$$

$$\text{포텐셜에너지 } P = V_1(q_1) + V_2(q_1 - q_2) \quad (18)$$

이며, 여기서 $I(q_1)$ 와 $V_1(q_1) = MgL \sin(q_1)$ 는 관제적으로 강체 매니퓰레이터의 관성행렬 및 포텐셜에너지이다. J 는 다음과 같은 관성행렬이다.

$$J = \text{diag} \left(\frac{1}{r_1^2} J_1, \dots, \frac{1}{r_n^2} J_n \right)$$

J_i 는 i 번째 모터의 관성이다.

V_2 는 관절들의 탄성 에너지로써 다음과 같다.

$$V_2 = \frac{1}{2} (q_1 - q_2)^T K (q_1 - q_2)$$

여기서 K 는 관절 스프링 상수 k_1, \dots, k_n 으로 구성되는 대각행렬이다.

앞에 식 (17)과(18)로 부터 구한 운동에너지와 포텐셜에너지를 통해서 식(16)와 같은 Lagrange-Euler 방정식을 활용하여 다음과 같은 유연한 관절 로봇의 동력학적 방정식을 구할 수 있다.

$$I \ddot{q}_1 + C(q_1, \dot{q}_1) \dot{q}_1 + MgL \sin(q_1) + k(q_1 - q_2) = 0$$

$$J \ddot{q}_2 + B \dot{q}_2 - k(q_1 - q_2) = u \quad (19)$$

여기서 $C(q_1, \dot{q}_1) \dot{q}_1$ 는 Coriolis 항이고 $B \dot{q}_2$ 는 마찰항이다.

4. 비선형 관측기 구성

본 장에서는 비선형 관측기를 설계하는데 있어 좀더 쉽게 문제를 해결하기 위해서 앞에 식(19)에서 마찰항을 무시하면 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} I\ddot{q}_1 + MgL\sin(q_1) + k(q_1 - q_2) &= 0 \\ J\ddot{q}_2 - k(q_1 - q_2) &= u \end{aligned} \quad (20)$$

위의 식(20)을 상태 공간에서 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x_1 &= q_1 & x_2 &= \dot{q}_1 \\ x_3 &= q_2 & x_4 &= \dot{q}_2 \end{aligned}$$

앞의 식(20)은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -\frac{MgL}{I}\sin(x_1) - \frac{k}{I}(x_1 - x_3) \\ \dot{x}_3 &= x_4 \\ \dot{x}_4 &= \frac{k}{J}(x_1 - x_3) + \frac{1}{J}u \end{aligned} \quad (21)$$

식(20)을 앞에 2장의 식(3)을 활용하여 다음과 같은 비선형 관측기 시스템을 구성한다.

$$\begin{aligned} \dot{\bar{x}}_1 &= -\alpha_{11}\bar{x}_1 + \bar{x}_2 - k_1\text{sgn}(\bar{x}_1) \\ \dot{\bar{x}}_2 &= -\alpha_{12}\bar{x}_1 + \left(-\frac{MgL}{I}\sin(\bar{x}_1) - \frac{k}{I}(\bar{x}_1 - \bar{x}_3)\right) \\ &\quad - k_2\text{sgn}(\bar{x}_1) \\ \dot{\bar{x}}_3 &= -\alpha_{21}\bar{x}_3 + \bar{x}_4 - k_3\text{sgn}(\bar{x}_3) \\ \dot{\bar{x}}_4 &= -\alpha_{22}\bar{x}_3 + \left(\frac{k}{J}(\bar{x}_1 - \bar{x}_3) + \frac{1}{J}u - k_4\text{sgn}(\bar{x}_3)\right) \end{aligned} \quad (22)$$

여기서 $\bar{x}_1 = \hat{x}_1 - x_1$ 이며 $\bar{x}_3 = \hat{x}_3 - x_3$ 이다. 상수 α_{ij} 는 영 벡터 부근에서 선형화된 시스템의 pole들이 s영역상에서 LHP상에 위치하도록 하기 위하여 Luenberger 관측기 ($k_1=0, k_2=0, k_3=0, k_4=0$ 에 상응하는)에서처럼 선택 되며, 이때의 결과 오차 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \dot{\bar{x}}_1 &= -\alpha_{11}\bar{x}_1 + \bar{x}_2 - k_1\text{sgn}(\bar{x}_1) \\ \dot{\bar{x}}_2 &= -\alpha_{12}\bar{x}_1 + \Delta f_1 - k_2\text{sgn}(\bar{x}_1) \\ \dot{\bar{x}}_3 &= -\alpha_{21}\bar{x}_3 + \bar{x}_4 - k_3\text{sgn}(\bar{x}_3) \\ \dot{\bar{x}}_4 &= -\alpha_{22}\bar{x}_3 + \Delta f_2 - k_4\text{sgn}(\bar{x}_3) \end{aligned} \quad (23)$$

여기서

$$\Delta f_1 = \hat{f}_1 - f_1, \quad \Delta f_2 = \hat{f}_2 - f_2$$

이며

$$f_1 = -\frac{MgL}{I}\sin(x_1) - \frac{k}{I}(x_1 - x_3)$$

$$\hat{f}_1 = \left(-\frac{MgL}{I}\sin(\hat{x}_1) - \frac{k}{I}(\hat{x}_1 - \hat{x}_3)\right)$$

$$f_2 = \frac{k}{J}(x_1 - x_3) + \frac{1}{J}u$$

$$\hat{f}_2 = \left(\frac{k}{J}(\hat{x}_1 - \hat{x}_3) + \frac{1}{J}u(t)\right)$$

이다.

5. 컴퓨터 시뮬레이션

본 장에서는 4장에서 다룬 슬라이딩 모드 이론을 이용하여 설계된 비선형 관측기의 동작 특성을 살펴보기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행한다. 앞의 식(22)와 비선형 관측기 시스템에 대하여 Runge-Kutta방식을 적용하여 시뮬레이션을 하였다. 유연한 관절 로봇의 각각의 물리 정수들은 [Table 1]과 같이 실험하였으며 이 때의 모의 실험 결과를 그림 7-10에 나타내었다.

[Table 1] 유연한 관절 로봇의 물리 상수

L = 3	[m]
g = 9.8	[m/sec ²]
M = 10	[kg]
J = 4	[N-m-sec ²]
I = 30	[N-m-sec ²]
K = 100	[N-m]

여기서 α_{ij} 는 모두 1로 설정하였으며 $k_1=0.1, k_2=1, k_3=0.1, k_4=1$ 로 설정하였다. 입력 $u(t)$ 의 설정에 있어서 본 논문에서는 제어기 설계보다 관측기 설계에 초점을 맞추었으므로 입력 상수를 0.5로써 임의로 설정하였다. 그림 7은 링크의 회전 각도에 대하여 비선형 관측기 시스템이 3초만에 sliding patch상에 도달됨을 보여주고 있고 이에 대한 오차 추정은 그림 8에서 나타내었다. 그림 9는 링크에 연결된 DC-모터의 회전 각도에 대하여 비선형 관측기 시스템이 4초만에 sliding patch상에 도달됨을 보여주고 있고 이에 대한 오차 추정은 그림 10에서 나타내었다.

따라서 위의 모의 실험을 통하여 매개변수의 불일치에도 불구하고 슬라이딩 모드를 이용한 비선형 관측기는 정확한 성능을 제공하고 있다는 것을 관찰할 수 있었다.

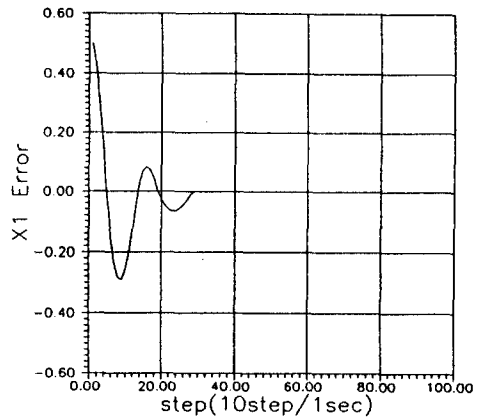
6. 결론

본 논문에서는 슬라이딩 모드 개념을 이용한 비선형 관측기를 유연한 관절 로봇에 대하여 적용시켰고 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 설계된 비선형 관측기가 안정하게 원점으로 수렴함을 입증하였다. 비선형 관측기 설계를 위해서 일반적인 비선형 시스템에 대한 슬라이딩 모드 개념을 고찰하고 슬라이딩 모드를 활용한 변형된 비선형 시스템에 있어서 슬라이딩 모션 효과를 일으키는 sign function을 도입 하는 경우와 도입하지 않는 두 가지 경우에 대해서 수학적으로 살펴보았다. 여기서 sign function을 도입하지

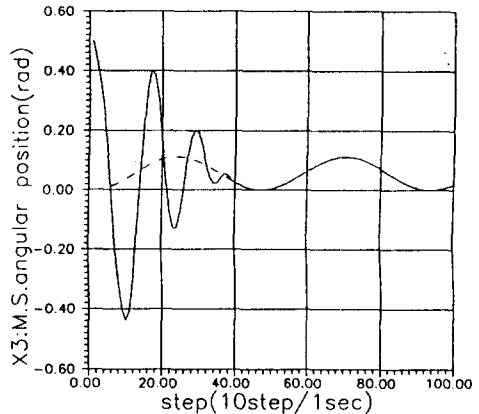
않는 비선형 시스템의 경우 비선형 함수가 세 가지 조건이 만족
 되어지면 영점을 중심으로 $f_1(x_1, x_2)$, $f_2(x_1, x_2)$ 의 함수에 의하
 여 결정되는 형태를 갖고 진동이 일어남을 알 수 있었으며 예제
 를 통하여 확인하였다. 앞으로의 연구 방향은 선형 시스템에 대
 한 가관측성 판별 여부는 잘 분석되어 있지만 비선형 시스템에
 대해서는 명확치 않으므로 비선형 시스템에 대한 가관측성 판별
 여부에 관한 연구가 계속될 예정이다.

참 고 문 헌

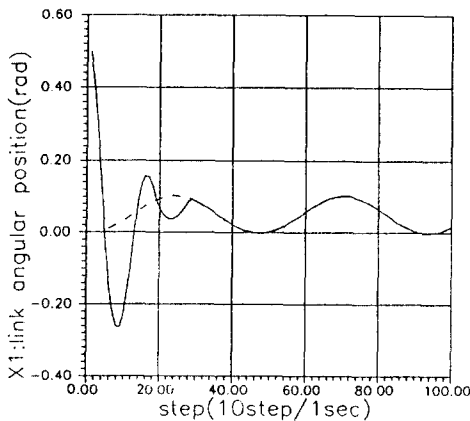
- [1] R.Marino and S.Nicosia, "Singular Perturbation Techniques in The Adaptive Control of Elastic Robots," *SYROCO 85*, Barcelona, 1985.
- [2] K.Khorasani and P.V.Kokotovic, "Feedback Linearization of a Flexible Manipulator Near Its Rigid Body Manifold," *System and Control Letters*, Vol.6, pp.187-192, 1985.
- [3] A.De Luca, A.Isidori and F.Nicolo, "An Application of Nonlinear Model Matching to The Dynamic Control of Robot Arms with Joint Elasticity," *SYROCO 85*, Barcelona, 1985.
- [4] S. Nicosia, P. Tomei, "State Observation of Elastic Joint Robots," *IFAC Robot Control*. NO.10. pp47-52, 1989.
- [5] J.J.Slotine Canudas de Wit, "Sliding Observers for Robot Manipulators" *IFAC*, No.5, pp.859-864, 1991.
- [6] V.I. Utkin, "Variable Structure Systems with Sliding Modes, a Survey," *IEEE Trans. Automatic Control*, Vol. AC-22, No.2, pp.212-222, 1977.
- [7] 함운철, 함철주, "불확실 비선형 다변수 시스템에 대한 MinMax-가변구조 제어기 설계," 대한전자공학회 논문지, Vol.29, No.12, pp.64-73, 1992,12.
- [8] J.J.Slotine, J.K.Hedrick and E.A.Misawa, "Sliding Observers for Nonlinear System," *ASME-J. of Dynamics Syst, Meas.Control*, Vol.109, pp.245-252, 1987.
- [9] A.F.Filippov, "Differential Equation with Discontinuous Right-Hand Sides," *Ann.Math Soc. Transl.*, Vol.42, pp.199-232, 1964.
- [10] M.W.Spong, "Modeling and Control of Elastic Joint Robots," *Trans. ASME, J. of Dynam. Syst. Measur.and Control*, Vol.109, pp.310-319, 1987.



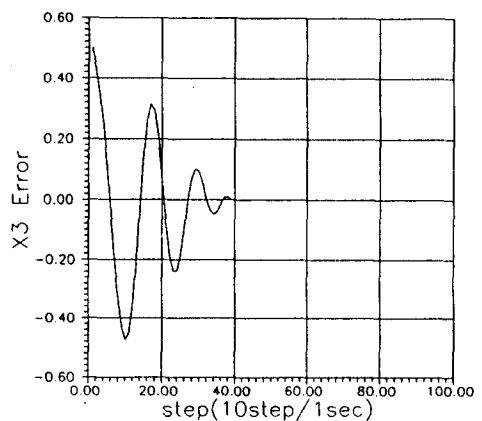
[그림 8] x_1 과 \dot{x}_1 의 오차



[그림 9] x_3 과 \dot{x}_3 의 비교



[그림 7] x_1 과 \dot{x}_1 의 비교



[그림 10] x_3 과 \dot{x}_3 의 오차