

3차원 도립진자 시스템의 구현 및 퍼지 제어

Fuzzy Control and Implementation of a 3-Dimensional Inverted Pendulum System

신호선^{*}, 추준욱^{**}, 이승하^{***}, 이연정^{***}

Ho-Sun Shin, Jun-Uk Chu, Seungha Lee, and Yun-Jung Lee

*삼성중공업 디지털사업팀, ** 재활공학연구소 인체공학팀,

***경북대학교 전자전기컴퓨터학부

요 약

새로운 3차원 도립진자 시스템의 구현 및 퍼지제어에 관하여 논한다. 기존의 1차원 또는 2차원 도립진자 시스템과 달리, 3차원 도립진자 시스템은 상하 운동을 포함하는 인간의 도립진자 제어행위를 적절히 모사할 수 있는 새로운 시스템이다. 3차원 도립진자 시스템의 특성 분석과 퍼지제어기 설계를 위하여 3축 직교로봇과 도립진자를 포함하는 기구부의 동력학식을 유도한다. 로봇의 여유자유도와 제한된 작업영역을 고려하면서 도립진자의 요오(yaw) 및 피치(pitch)각을 제어하기 위한 퍼지제어기 설계 방법을 제안한다. 개발된 PC 기반의 다축제어보드를 이용한 실험 결과를 통하여 제안된 시스템의 성능을 검증한다.

Abstract

The fuzzy control and implementation of a new three-dimensional(3-D) inverted pendulum system are addressed. In comparison with conventional 1-D and 2-D systems, the 3-D inverted pendulum system is a proper benchmark system to simulate human's control action which includes the up and down motion to stabilize an inverted pendulum. To investigate the characteristics of the 3-D inverted pendulum system and to design of a fuzzy controller, we derive dynamic equations of the mechanism including a 3-axis cartesian robot and an inverted pendulum. We propose a design method of a fuzzy controller of the yaw and pitch angles of an inverted pendulum. In the design, the redundant degree-of-freedom(DOF) of the robot and the constrained workspace are taken into account. The performance of the proposed system is proved by experimental results using a developed PC-based Multi-Motion Control(MMC) board.

Key Words : Fuzzy control, 3-D inverted pendulum, 3-axis cartesian robot, Redundancy.

1. 서 론

도립진자는 불안정한 제어 대상의 대표적인 예로서 설계된 제어 시스템의 안정도 해석을 위하여 많이 쓰이고 있으며, 전통적인 PID 제어기나 퍼지 제어기는 물론 현대의 다양한 제어 이론에 대한 성능검증에 이용되어왔다. 초기에는 일차원 도립진자에 대한 연구가 주를 이루었으나, 최근에는 회전형 도립진자, 2차원 도립진자 등 다양한 시스템이 연구되어지고 있다. 이에 관하여, 많은 연구 중 주요한 몇 가지를 살펴보면 다음과 같다.

Lin과 Saberi 등[1]은 일차원 도립진자에 선형 상태 제환 제어기를 적용하였고, Wei와 Dayawansa 등[2]은 비선형 제어기를 이용하여 cart-pole 형태의 도립진자 시스템을 제어하였다. 그러나 이러한 cart-pole 시스템은 도립진자의 각도 제어 뿐만 아니라 cart의 한정된 작업 영역에서의 위치 제어도 해야 하는 어려움이 있다. 이러한 이유로 회전형의 도립

진자 시스템이 제안되었고, Furuta 등[3]에 의해 연구되기도 하였다. 그런데 최근에는 2차원 평면상에서의 도립진자 시스템에 대한 연구가 진행되고 있는 중이다. Sprenger 등[4]은 2차원 도립진자의 제어에 스카라형 로봇을 이용하였으며, 도립진자의 각도 검출에는 hall-effect 센서를 사용하였다. 또한, Hoshino 등[5]은 [4]에서와 같이 스카라형 로봇을 사용하지만, 각도 검출에는 CCD 카메라를 이용한 비전 시스템을 사용하였고, Chung 등[6]은 여유 자유도를 가진 스카라형 로봇을 이용하여 2차원 도립진자를 제어하였다.

본 논문에서는 기존의 2차원 도립진자 시스템에 한 차원이 추가된 3차원 도립진자 시스템을 제안하고 이를 퍼지 제어 방법을 이용하여 제어하고자 한다. 3차원 도립진자 시스템은 다음과 같은 몇 가지 특징을 갖는다. 첫째, 3차원 도립진자의 제어는 실제로 인간의 도립진자 제어 행위와 유사한 경우로서, 전후·좌우운동 뿐만 아니라 상하운동을 포함하는 3차원 운동에 의한 제어이다. 둘째, 기존의 1, 2차원 도립진자 시스템의 경우, 진자의 각도 변화가 적을 때는 선형 근사화하여 다양한 선형제어 방법을 적용할 수 있으므로 해서 비선형 제어기로서의 퍼지 제어 방법과 비교하여 우수성을 보이기 부족할 실험 대상이었다. 그러나, 3차원 도립진자 시

접수일자 : 2002년 7월 30일

완료일자 : 2003년 1월 3일

시스템은 비대칭적인 상하 운동 제어가 포함되므로 퍼지 제어 등과 같은 비선형 제어 방법의 성능 검증에 위한 좋은 실험 대상 시스템인 것이다. 셋째로, 2차원 도립진자 시스템에 추가된 상하(z축) 운동 제어는 진자를 세우기 위한 전후·좌우 운동의 이동 범위를 줄여주는 보완적인 관계를 갖는다. 즉 z축의 자유도는 진자를 세우는데 있어 여유자유도로서 작업영역을 줄여줄 수 있는 특성을 갖는다.

구체적으로 본 논문에서는 3차원 도립진자를 제어하기 위해서 라그랑지(Lagrange) 방법을 이용하여 전체 시스템의 운동방정식을 모델링하고, 그 결과를 바탕으로 3차원 도립진자 시스템에 대한 퍼지 제어를 설계한다. 개발한 Multi-Motion Control(MMC) 보드, 3축 직교 로봇, 그리고 제작된 도립진자 기구부를 이용하여 퍼지 제어기와 3차원 도립진자 시스템을 실제 구현하여 실험하고, 성능을 검증한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 로봇의 제어에 필수적인 도립진자를 포함한 3축 직교 로봇에 대한 동역학 모델식을 유도하고, 이 운동방정식을 근사화시켜서 시스템의 특성을 살펴본다. 3장에서는 3차원 도립진자 제어를 위한 퍼지 제어기의 설계에 관하여 살펴보고, 4장에서는 3축 직교 로봇을 비롯하여 직접 제작한 MMC 보드, 기타 시스템 등의 하드웨어 구성에 관하여 기술한다. 5장에서는 실제 3축 직교 로봇을 이용하여 2차원 및 3차원 도립진자 시스템의 제어 실험 결과를 보이고 두 결과를 비교, 분석한다. 마지막으로 6장에서 결론을 맺는다.

2. 3차원 도립진자 시스템의 모델링

2.1 기하학적 구조

3축 직교 로봇에 의해 구동되는 3차원 도립진자 시스템의 전체 모습은 그림 1과 같다. 기본적으로 3차원 도립진자를 제어하기 위한 3축 직교 로봇과 로봇의 end-effector로서 도립진자가 결합되어 있는 형태이다. 도립진자는 그림 2에서 보듯이 두 개의 회전관절로 구성되어 있다. 각 회전관절의 회전각은 회전 가변저항에 의해 관측되며 공간상의 도립진자의 각도검출에 이용된다. α 는 x축 회전각을 나타내고, β 는 y축 회전각을 나타낸다. 그림 3은 도립진자 회전관절의 실제 제작된 기구부의 모습이다.

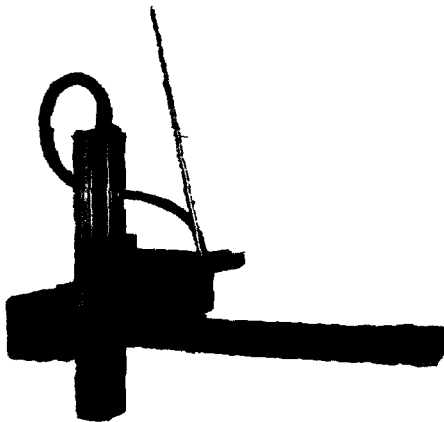


그림 1. 3차원 도립진자 시스템
Fig. 1. 3-dimensional inverted pendulum system.

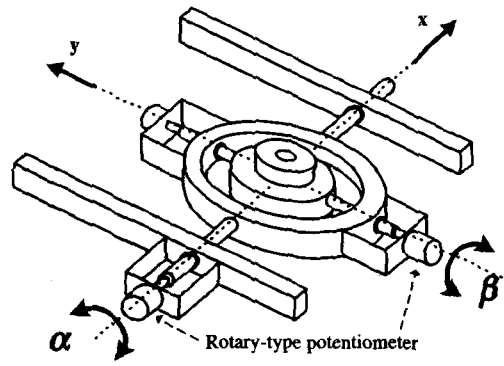


그림 2. 도립진자의 회전관절
Fig. 2. Revolute joints of inverted pendulum.



그림 3. 제작된 회전관절 프로토타입
Fig. 3. Manufactured prototype of revolute joints.

그림 4는 그림 1에 보인 3차원 도립진자 시스템의 모델링을 하기 위한 좌표계 시스템을 나타낸다. 전체 시스템의 좌표계는 C_0 를 베이스로 해서 $C_0 \sim C_2$ 의 3축 직교 로봇의 좌표계와 $C_3 \sim C_5$ 의 도립진자의 회전관절 좌표계로 구성된다.

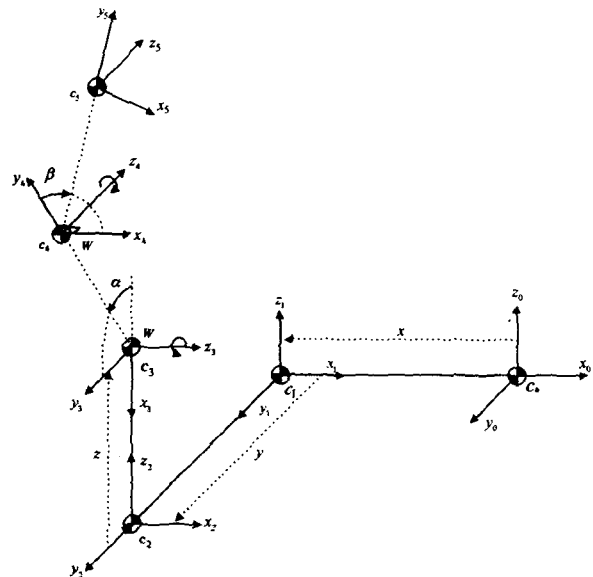


그림 4. 좌표계 시스템
Fig. 4. Coordinate system.

2.2 3차원 도립진자 시스템의 모델링

3차원 도립진자 시스템의 모델링은 설정된 그림 4의 좌표계를 갖는 시스템에 대하여 라그랑지안법[7]을 사용하여 구한다. 좌표계 시스템에 대하여 3축 직교 로봇의 위치 x, y, z 와 도립진자의 두 회전관절 α, β 를 포함하는 관절변수(q)는

$$q = [x, y, z, \alpha, \beta]^T \quad (1)$$

로 표시한다. 3차원 도립진자 시스템의 전체 운동 에너지와 위치에너지를 T 와 U 로 두면 라그랑지안 L 은

$$L(q, \dot{q}) = T - U \quad (2)$$

로 표현되고, 시스템의 운동방정식은 다음 식과 같다.

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i, \quad i=1, \dots, 5 \quad (3)$$

여기서, Q_i 는 관절 q_i 에 가해지는 일반화된 힘을 의미한다.

각 링크에 대한 운동 에너지를 정리하여 쓰면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} T_1 &= \frac{1}{2} m_1 \begin{bmatrix} \dot{x} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} m_1 \dot{x}^2, \\ T_2 &= \frac{1}{2} m_2 \begin{bmatrix} \dot{x} & \dot{y} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} m_2 (\dot{x}^2 + \dot{y}^2), \\ T_3 &= \frac{1}{2} m_3 \begin{bmatrix} \dot{x} & \dot{y} & \dot{z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} m_3 (\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2), \\ T_4 &= 0, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} T_5 &= \frac{1}{2} m_5 \begin{bmatrix} \dot{x} + \frac{1}{2} C_\beta C_\alpha \dot{\alpha} - \frac{1}{2} S_\beta S_\alpha \dot{\beta} \\ \dot{y} + \frac{1}{2} C_\beta \dot{\beta} \\ \dot{z} - \frac{1}{2} C_\beta S_\alpha \dot{\alpha} - \frac{1}{2} S_\beta C_\alpha \dot{\beta} \end{bmatrix}^T \\ &\quad \begin{bmatrix} \dot{x} + \frac{1}{2} C_\beta C_\alpha \dot{\alpha} - \frac{1}{2} S_\beta S_\alpha \dot{\beta} \\ \dot{y} + \frac{1}{2} C_\beta \dot{\beta} \\ \dot{z} - \frac{1}{2} C_\beta S_\alpha \dot{\alpha} - \frac{1}{2} S_\beta C_\alpha \dot{\beta} \end{bmatrix} \\ &\quad + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -C_\alpha \dot{\beta} \\ \dot{\alpha} \\ S_\alpha \dot{\beta} \end{bmatrix}^T I_5 \begin{bmatrix} -C_\alpha \dot{\beta} \\ \dot{\alpha} \\ S_\alpha \dot{\beta} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

여기서, m_1, m_2, m_3 는 각각 3축 직교로봇의 x 축, y 축, z 축 링크 질량이고, m_5 는 진자의 질량, l 은 진자의 길이를 나타낸다. $C_\alpha = \cos \alpha$, $C_\beta = \cos \beta$, $S_\alpha = \sin \alpha$, $S_\beta = \sin \beta$ 이며, I_5 는 진자의 관성행렬로서 다음 식과 같다.

$$I_5 = \frac{m_5 l^2}{12} \begin{bmatrix} S_\alpha^2 S_\beta^2 + C_\alpha^2 & -S_\alpha S_\beta C_\beta & S_\alpha S_\beta^2 C_\alpha - C_\alpha S_\alpha \\ -C_\beta S_\alpha S_\beta & C_\beta^2 & -C_\beta C_\alpha S_\beta \\ C_\alpha S_\alpha S_\beta^2 - S_\alpha C_\alpha & -C_\alpha S_\beta C_\beta & C_\alpha^2 S_\beta^2 + S_\alpha^2 \end{bmatrix}$$

그리고, $T_4=0$ 인 것은 도립진자 회전관절의 질량(m_4)가 직교로봇의 각 링크의 질량에 비해 매우 작으므로 무시한 것이다. 또한, 식 (4)의 결과로부터 전체 운동에너지 T 는

$$T = \sum_{i=1}^5 T_i \text{로 표현된다.}$$

다음으로 운동에너지와 함께 라그랑지안을 구성하는 위치 에너지를 구한다. 전체 시스템의 위치에너지는 다음과 같다.

$$U = \sum_{i=1}^5 U_i = 0 + 0 + m_3 \begin{bmatrix} 0 & 0 & g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + 0 + m_5 \begin{bmatrix} 0 & 0 & g \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} &\begin{bmatrix} x + \frac{1}{2} C_\beta S_\alpha \\ y + \frac{1}{2} S_\beta \\ z + \frac{1}{2} C_\beta C_\alpha \end{bmatrix} \\ &= m_3 g z + m_5 g \left(z + \frac{1}{2} C_\beta C_\alpha \right) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, g 는 중력가속도로서 $-9.8 \text{ m}^2/\text{sec}$ 이다. 또한, 링크 1, 2는 지면에 붙어 있고, 링크 4의 질량은 무시하여 이들 링크에 관한 위치에너지는 0으로 나타낸 것이다.

지금까지 유도한 운동에너지와 위치에너지를 이용하여 3차원 도립진자 시스템의 운동방정식을 구한다. 먼저 직교로봇의 각 링크 질량에 비하여 진자의 질량이 매우 작은 경우 즉, $m_1, m_2, m_3 \gg m_5$ 임을 가정하면,

$$\begin{aligned} L \approx L' &= \frac{1}{2} m_1 \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m_2 (\dot{x}^2 + \dot{y}^2) + \frac{1}{2} m_3 \\ &(\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2) - m_3 g z \end{aligned} \quad (6)$$

와 같이 쓸 수 있으므로, 3축 직교 로봇의 운동방정식은 식 (3)으로부터 다음과 같이 구하여진다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \frac{\partial L'}{\partial \dot{x}} - \frac{\partial L'}{\partial x} &= F_x \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial L'}{\partial \dot{y}} - \frac{\partial L'}{\partial y} &= F_y \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial L'}{\partial \dot{z}} - \frac{\partial L'}{\partial z} &= F_z \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, F_x, F_y , 그리고 F_z 는 각 축에 가해지는 힘을 의미한다. 식 (6)을 식 (7)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \ddot{x} (m_1 + m_2 + m_3) &= F_x \\ \ddot{y} (m_2 + m_3) &= F_y \\ \ddot{z} m_3 + g m_3 &= F_z. \end{aligned} \quad (8)$$

한편, 3축 직교 로봇에 의해 구동되는 도립진자의 운동방정식은 다음 식으로부터 구해진다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\alpha}} - \frac{\partial L}{\partial \alpha} &= 0 \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\beta}} - \frac{\partial L}{\partial \beta} &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

여기서, 링크 4, 5에 가해지는 힘은 존재하지 않으므로 $Q_4 = Q_5 = 0$ 임을 알 수 있으며 라그랑지안은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} L &= T - U \\ &= \frac{1}{2} m_1 \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m_2 (\dot{x}^2 + \dot{y}^2) + \frac{1}{2} m_3 (\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2) \\ &+ \frac{1}{2} m_5 (\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2) + \frac{l^2}{4} C_\beta^2 \dot{\alpha}^2 + \frac{l^2}{4} \dot{\beta}^2 + l C_\beta C_\alpha \dot{\alpha} \dot{x} \\ &- l S_\beta S_\alpha \dot{\beta} \dot{x} + l C_\beta \dot{\beta} \dot{y} - l C_\beta S_\alpha \dot{\alpha} \dot{z} \\ &- l S_\beta C_\alpha \dot{\beta} \dot{z} + \frac{1}{2} m_5 \dot{\beta}^2 \left(\frac{l^2}{12} \right) + \frac{1}{2} m_5 \dot{\alpha}^2 \left(\frac{l^2}{12} C_\beta^2 \right) \\ &- m_3 g z - m_5 g \left(z + \frac{l}{2} C_\beta C_\alpha \right). \end{aligned} \quad (10)$$

식 (10)을 식 (9)에 대입하여 정리하면 아래와 같이 운동 방정식이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\alpha} \\ \ddot{\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} H_{13} & H_{14} & H_{15} \\ H_{23} & H_{24} & H_{25} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} h_1 \dot{\alpha} \dot{\beta} \\ h_2 \dot{\alpha}^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (11)$$

여기서, 각각의 행렬의 요소들은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} H_{11} &= \frac{m_5 l^2 C_\beta^2}{3}, \quad H_{12} = 0, \quad H_{21} = 0, \quad H_{22} = \frac{m_5 l^2}{3} \\ H_{13} &= \frac{1}{2} m_5 l C_\beta C_\alpha, \quad H_{14} = 0, \quad H_{15} = -\frac{1}{2} m_5 l C_\beta S_\alpha, \\ H_{23} &= -\frac{1}{2} m_5 l S_\beta S_\alpha, \quad H_{24} = \frac{1}{2} m_5 l C_\beta, \\ H_{25} &= -\frac{1}{2} m_5 l S_\beta C_\alpha, \\ h_1 &= -\frac{2m_5 l^2 C_\beta S_\beta}{3}, \quad h_2 = \frac{m_5 l^2 C_\beta S_\beta}{3}, \\ G_1 &= -\frac{m_5 g l C_\beta S_\alpha}{2}, \quad G_2 = -\frac{m_5 g l S_\beta C_\alpha}{2}. \end{aligned}$$

식 (11)을 근사화 시켜서 시스템의 특성을 살펴보자. 식 (11)의 운동방정식을 평형점($\alpha = \beta = 0$) 부근에서 $C_\alpha = C_\beta = 1$, $S_\alpha = \alpha$, $S_\beta = \beta$ 로 근사화하고, $\alpha\beta$ 항과 같은 고차항과 원심력항($\dot{\alpha}^2$ 항), 코리올리력항($\dot{\alpha}\dot{\beta}$ 항)을 무시하여 근사화된 식을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{m_5 l^2}{3} \ddot{\alpha} - \left(\frac{m_5 l g}{2} + \frac{m_5 l \ddot{z}}{2} \right) \alpha + \frac{m_5 l}{2} \ddot{x} &= 0 \\ \frac{m_5 l^2}{3} \ddot{\beta} - \left(\frac{m_5 l g}{2} + \frac{m_5 l \ddot{z}}{2} \right) \beta + \frac{m_5 l}{2} \ddot{y} &= 0. \end{aligned} \quad (12)$$

식 (12)로부터 다음의 몇 가지 사실을 알 수 있다. 첫째, 로봇의 end-effector 가속도 \ddot{x} , \ddot{y} , \ddot{z} 가 도립진자 시스템의 입력으로 작용할 수 있음을 알 수 있다. 둘째, 가속도 입력 \ddot{x} , \ddot{y} 는 각각의 회전관절 변수 α , β 의 동특성에만

관계한다. 셋째, 가속도 입력 \ddot{z} 는 회전관절 변수 α , β 모두에 영향을 미치며 중력가속도에 의존적이다. \ddot{z} 가 시스템의 댐핑(damping) 성능에 영향을 줌으로 이 값의 크기에 따라 시스템 성능이 개선되며, 중력가속도보다 큰 값일 때에는 시스템을 안정화시킬 수도 있을 것이라는 점이다.

z 축의 제어를 위해서는 각 α , β 와는 별도로 관측변수를 설정해야한다. 변수 ϕ 는 그림 5에서 보듯이 중력방향에 대해서 수직축인 z 축과 도립진자가 이루는 각도를 나타낸다. 따라서, 이를 z 축 제어를 위한 각도 변수로 잡으면 각 α , β 와의 관계는 다음 식과 같다.

$$\phi = \cos^{-1}(\cos \alpha \cos \beta) \quad (13)$$

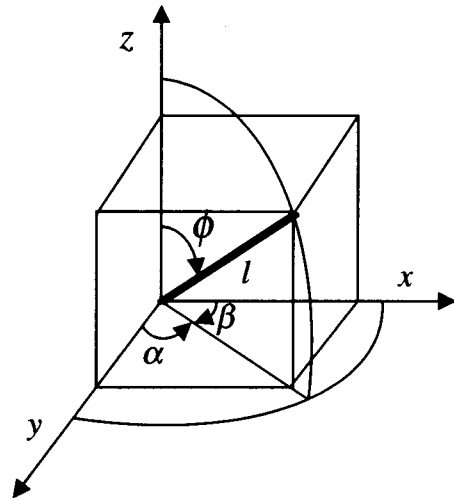


그림 5. z축 제어를 위한 각도변수
Fig. 5. Angle variable for z-axis control.

3. 퍼지 제어기 설계

전체 퍼지 제어시스템의 구성은 그림 6과 같다.

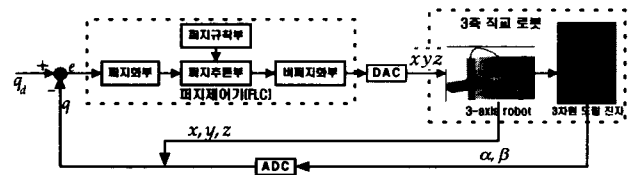


그림 6. 전체 퍼지 제어시스템의 구성도
Fig. 6. Block diagram of overall fuzzy control system.

그림 6의 구성을 살펴보면, 도립진자의 각도와 3축 직교로봇의 위치에 따른 퍼지 제어기의 출력은 3축 토크서보에 가해지고, 3축 직교 로봇이 운동을 일으킴으로써 3차원 도립진자를 제어하게 되는 구조이다. 3차원 도립진자 시스템을 제어하기 위하여 제안하는 퍼지 제어기에 대하여 좀더 자세히 살펴보면 그림 7과 같다.

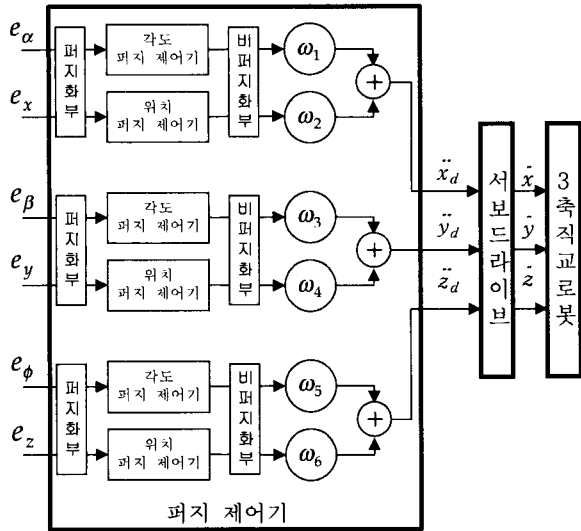


그림 7. 퍼지 제어기 구성도
Fig. 7. Block diagram of fuzzy controller.

각 축에 대한 퍼지 제어기는 독립적으로 적용되어 진다. 또한, 각 축은 각각 각도제어기와 위치제어기로 구성된다. 각각의 각도와 위치 제어기로부터의 출력에 적당한 가중치를 적용한 후 실제 로봇에 각각의 퍼지 제어기 출력의 합을 로봇에게 가하는 형태이다. x, y, z축 모두 동일한 방식으로 구성되며 제안되는 퍼지 제어기는 로봇의 위치보다는 독립진자를 세우는 것이 우선이므로 각도제어기에 대한 가중치를 위치제어기의 가중치보다 더 크게 지정해 준다. 반복 실험을 통하여 정한 각각의 가중치 값은

$w_1 : w_2 = 8 : 2$, $w_3 : w_4 = 8 : 2$, $w_5 : w_6 = 6 : 4$ 이다. 그림 7에서 e_ϕ 는 계측된 각 α , β 로부터 식 (13)을 이용하여 얻어진 각 ϕ 와 기준값과의 차이에 의해 계산된다. 그리고, 서보 드라이브에 가해지는 실제 물리량은 전압으로서 가속도 설정치 (\ddot{x}_d , \ddot{y}_d , \ddot{z}_d)로 표기된 것은 식 (12)에서 보았듯이 진자의 각도 제어가 각 축의 가속도 입력에 의해 이루어지는 것을 나타낸 것이다. 그러나, 각 축의 가속도와 힘과의 관계는 식 (8)에 나타난 바와 같이 단순 비례 관계를 가지므로 실제 토크 서보 드라이브를 사용한 경우 각각의 가속도에 비례하는 힘이 퍼지제어기로부터 출력되는 것으로도 볼 수 있다.

퍼지 제어기의 입력부분에 사용된 소속도 함수를 다음에 나타낸다. 정규화된 각 소속도 함수는 반복 실험을 통하여 구해진 것이다. 그림 8은 퍼지화부에 사용된 각도와 위치 오차에 대한 소속도 함수이다. 그림 9는 각도와 위치의 오차변화에 대한 소속도 함수

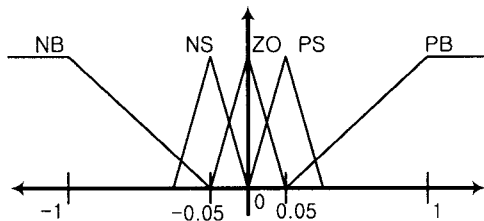


그림 8. 각도와 위치 오차에 대한 소속도 함수
Fig. 8. Membership functions of position and angle error.

화에 대한 소속도 함수를 나타낸다. 이 소속도 함수들은 원점 근처에서 정밀한 제어를 위하여 중앙 부분이 세분화된 특징을 갖는다.

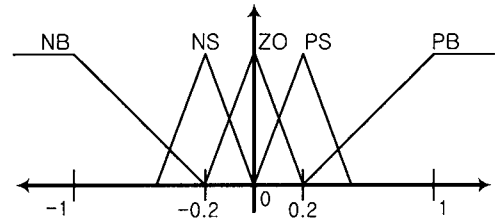


그림 9. 각도와 위치의 오차변화에 대한 소속도 함수
Fig. 9. Membership functions for change of position and angle error.

또한, 그림 10은 출력변수에 대한 소속도 함수를 나타내는데, 작은 오차 변화에도 큰 출력을 낼 수 있도록 ZO를 중심으로 바깥쪽에 몰려 있는 형태이다. 그리고 계산량을 줄이기 위하여 간단한 싱글톤 함수로 정하였다.

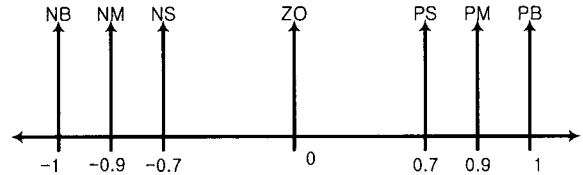


그림 10. 출력변수에 대한 소속도 함수
Fig. 10. Membership functions of output variable.

그리고, 설계된 퍼지 규칙은 그림 11과 같다. 그림 11의 (a)는 각 ϕ 의 경우를 제외한 각도와 위치제어기에 사용된 퍼지 규칙이며, 일반적으로 많이 사용되는 대각선에 대하여 대칭인 퍼지 규칙표의 형태이다. 그러나 각 ϕ 의 제어를 위한 퍼지 규칙은 다른 제어규칙과 다르게 그림 11의 (b)와 같이 왼쪽 위에서 오른쪽 아래로의 대각선 방향으로 감소하고 있는 비대칭적인 모양이다. 이는 그림 5에서 볼 수 있듯이 ϕ 각은 중력방향과 평행인 z축과 이루는 각이므로 진자가 전·후, 좌·우 어느 방향으로 기울어지든지 아래 방향으로 움직여서 각 ϕ 를 제어해야 하기 때문이다. 따라서 제어할 때는 오차가 양인 부분의 규칙들만 사용되나, 그림 11의 (a)와 같은 입력 Label들을 갖도록 하여 그림 11의 (b)와 같이 나타낸 것이다.

$e \backslash \acute{e}$	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	NB	NB	NS	NS	ZO
NS	NB	NS	NS	ZO	PS
ZO	NS	NS	ZO	PS	PS
PS	NS	ZO	PS	PS	PB
PB	ZO	PS	PS	PB	PB

$e \backslash \acute{e}$	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	ZO	NS	NM	NM	NB
NS	NS	NM	NM	NB	NB
ZO	NM	NM	NB	NB	NB
PS	NM	NB	NB	NB	NB
PB	NB	NB	NB	NB	NB

(a) 위치와 각도 제어 (b) ϕ 각 제어
(a) angle and position control. (b) ϕ angle control.
그림 11. 퍼지 규칙

그림 11. Fuzzy rules.

이 외에 퍼지제어기의 파라미터로서 퍼지 추론방법은 Mamdani의 max-min 방법을 사용하고, 비퍼지화는 무게 중심법을 사용한다.

4. 제어시스템의 하드웨어 구성

이 장에서는 3차원 독립진자 제어실험을 위한 하드웨어 구성에 대해서 설명한다. 그 구성은 크게 독립진자를 제어하게 되는 3축 직교 로봇과 개인용 컴퓨터에서 독립진자의 각도를 입력받고 퍼지 제어기의 출력을 로봇에게 줄 수 있도록 하는 ISA형 MMC 보드로 구분된다.

3축 직교 로봇은 삼성전자의 직교 로봇 시리즈인 RCM4-M을 사용하였고, 각 축의 파라메타 값은 다음 표 1과 같다.

표 1. 3축 직교 로봇의 파라메타 값
Table 1. Parameter value of 3-axis cartesian robot

	x축	y축	z축
길이	0.6m	0.5m	0.3m
모터용량	200W	100W	100W

각 축에 사용된 모터는 AC 서보 모터로 위치 및 속도 측정을 위한 인크리멘탈형 엔코더가 장착되어 있다. 퍼지제어기의 출력을 받아 실제 3축 직교 로봇에 제어입력을 가하기 위해 사용되는 서보 드라이브는 삼성전자의 CSDJ시리즈이며, 토크제어가 가능한 타입이다.

3축 직교 로봇을 제어하기 위한 ISA형 MMC 보드는 자체 개발·제작되었다. MMC 보드는 PC와의 통신을 위해 16비트 AT 확장 ISA 버스[9]를 이용하였으며, AD 컨버터, DA 컨버터, 엔코더 인터페이스, 기타 외부 I/O를 위한 부분 등으로 구성되어 있다.

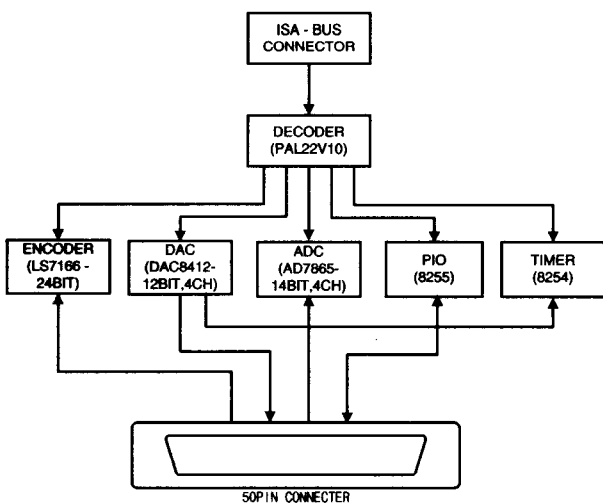


그림 12. ISA형 MMC 보드 구성도
Fig. 12. ISA type MMC board block diagram.

ISA형 MMC 보드의 전체 구성도는 그림 12와 같다. 엔코더 신호를 인터페이스하기 위한 LS7166은 24bit 분해능을 갖고 ISA 버스의 출력 신호나 마이크로 컨트롤러 등과 쉽게 인터페이스가 가능하다. 독립진자의 회전각을 검출하여

디지털 값으로 변환하는 AD 컨버터로는 14bit이며, 4개의 입력 채널을 갖는 AD7865를 사용하였다. 그리고 컴퓨터에서 계산된 퍼지 제어기의 출력값을 로봇에게 전달하기 위하여 아날로그 값으로 변환하기 위한 DA 컨버터는 12bit이며, 4개의 출력 채널을 갖는 DA8412가 사용되었다. 50PIN 커넥터 부분은 로봇의 서보 드라이브의 외부 제어 신호들과 엔코더 신호 등의 여러 가지 외부 신호들의 접속을 위한 부분이다. 타이머는 AD 컨버터의 EOC(end of conversion)신호를 이용하여 데이터를 읽어들이기 위해서 사용된다.

최근의 일반 컴퓨터에서는 여러 가지 종류의 외부카드의 사용에 따라 메모리의 사용영역이 일정치 않기 때문에 실제 실험에 사용될 메모리영역을 찾는 데 어려움이 있다. 그래서 확장이 용이하도록 PAL22V10을 사용하여 어드레스를 디코딩 할 때 사용되어지는 시스템에 따라 메모리 영역을 바꿀 수 있도록 하였다.

그림 13은 실제 제작되어진 ISA형태의 MMC 보드의 전체 모습을 나타낸다. 이 MMC 보드는 4축까지 제어가 가능하며, 24bit 엔코더 신호를 처리하므로 정밀한 위치제어가 가능하다. 그리고 외부 I/O 확장이 용이하도록 병렬 I/O 인터페이스가 포함되어 있다.

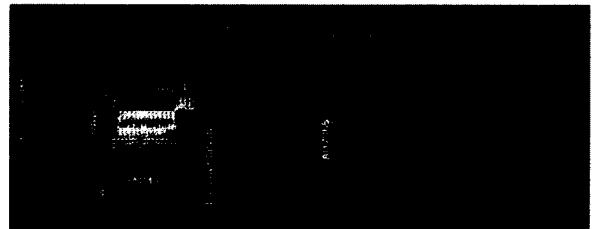


그림 13. ISA형 MMC 보드
Fig. 13. ISA type Multi-Motion Control board.

기타 제어시스템 구성 요소로는 독립진자의 α 와 β 각의 각도 검출을 위한 회전형 가변저항이 있다. 사용된 회전형 가변저항은 Midori사의 CP-2FK로서 마찰을 최소한 줄이기 위한 ball-screw형태이며 $\pm 1\%$ 의 선형성을 갖는 10k Ω 형이다. 그리고, 실험에 사용된 독립진자는 길이가 0.8m이고 질량이 0.3kg이다.

5. 독립진자 제어실험

이 장에서는 지금까지 유도한 운동방정식을 토대로 구현된 퍼지 제어기를 이용하여 독립진자를 제어하는 실험 및 그 결과에 대하여 설명한다. 먼저 2차원 시스템에 대한 제어실험

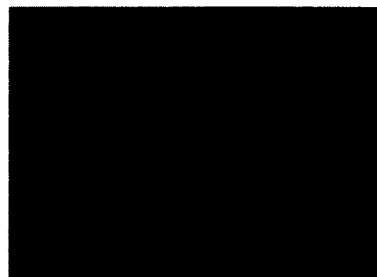
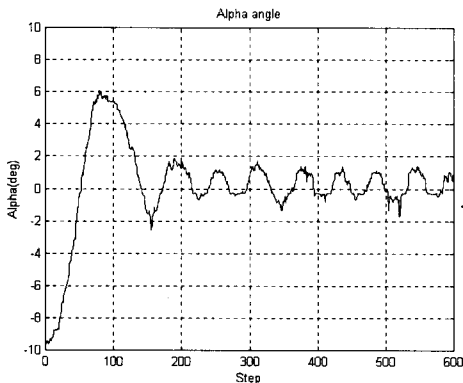


그림 14. 구현된 3차원 독립진자 시스템의 사진
Fig. 14. Picture of a implemented 3-dimensional inverted pendulum system.

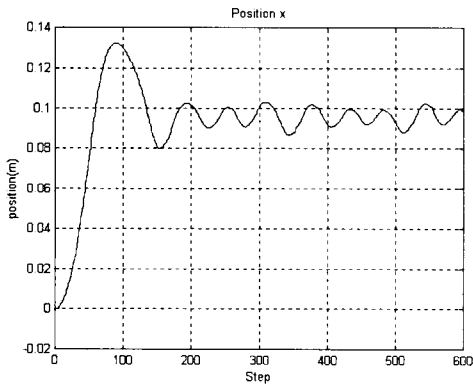
을 설명한 후에 3차원 시스템에 대한 제어실험을 설명한다. 그리고 2차원과 3차원 시스템의 제어 성능을 비교, 분석하여 z축을 이용한 3차원 시스템의 제어가 2차원 시스템에 비해서 우수한 성능을 보임을 설명한다. 구현된 3차원 도립진자 시스템의 전체 구성 모습은 그림 14와 같다.

5.1 2차원 도립진자 제어실험

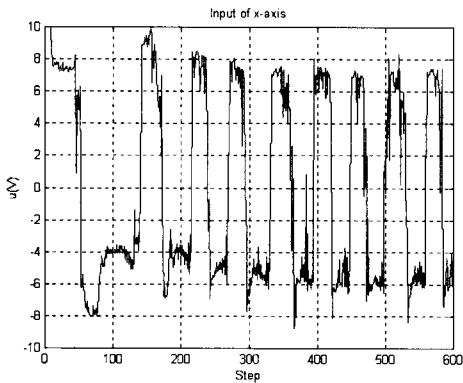
다음 그림들은 x축과 y축만을 이용한 2차원 도립진자의 제어 실험 결과를 나타낸다. 각 그래프에서 각 α , β 에 대한 기준입력은 0도이며, x축과 y축 위치의 기준입력은 각각 0.245 m와 0.245 m이며, 한 step은 3.5[msec]이다. 사용된 퍼지 제어기의 파라미터들은 3장에서 기술한 것들과 같다.



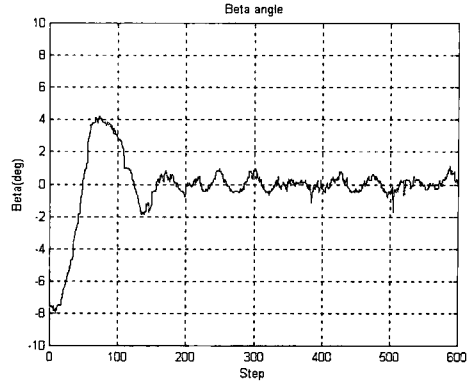
(a) Angle α



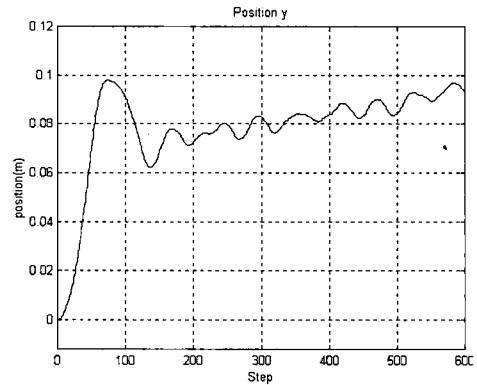
(b) Position x



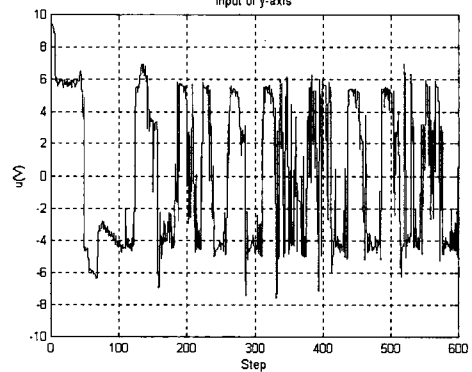
(c) x -axis control input



(d) Angle β



(e) Position y



(f) y -axis control input

그림 15. 2차원 도립진자 시스템의 제어 실험 결과: 각 α , β 와 위치 x , y 의 궤적

Fig. 15. Experimental results of control of a 2D inverted pendulum system: trajectories of angle α , β and position x , y .

다만, 2차원 도립진자의 경우이므로 z축과 ϕ 각 제어에 관한 제어기 부분은 제외된 경우이다. 그림 15의 (a)-(f)는 시간에 따른 α 각의 변화, 위치 x 의 변화, x축에 대한 입력의 변화 그리고, β 각의 변화, 위치 y 의 변화, y축에 대한 입력의 변화를 나타낸다. 그림 15의 (a), (d)에서 보듯이 α 각과 β 각이 잘 제어되고 있음을 알 수 있다. 반면, 위치는 원하는 기준값에 도달하지 못하고 있는데, 이는 설계된 제어기의 가중치가 위치보다 진자를 세우기 위한 각도 제어에 크게 설정되어 있기 때문이다. 실제 실험에서 위치에 대한 가중치를 증가시키면 로봇 기구부의 마찰 특성이나 모터 토크

의 제한으로 각도의 제어도 잘 되지 않는 현상을 보였다.
 그림 16은 로봇의 end-effector의 궤적을 x-y 평면상에 보인 것이다. 이 궤적으로부터 진자를 세우기 위해 움직이는 로봇의 작업영역을 살펴볼 수 있으며, 이에 관하여는 다음 절에서 3차원 도립진자 시스템의 경우와 비교하여 본다.

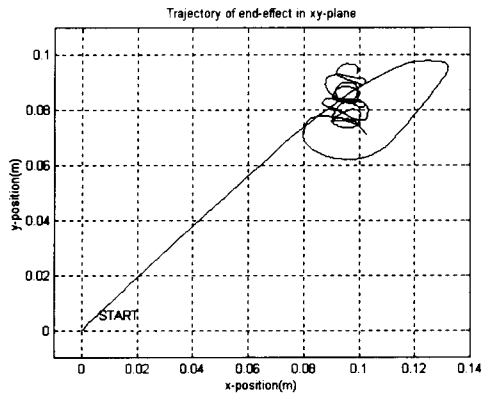
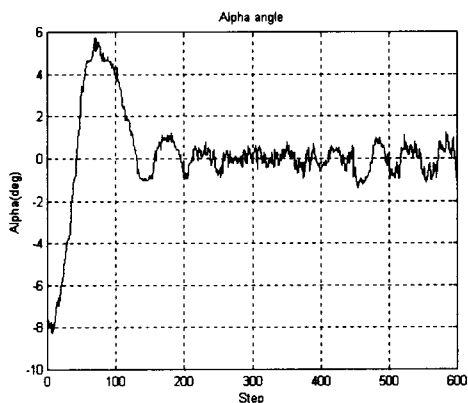


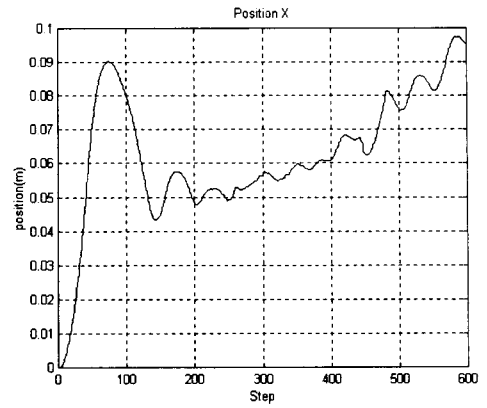
그림 16. xy 평면에서의 end-effector의 궤적
 Fig. 16. Trajectory of end-effector in xy-plane.

5.2 3차원 도립진자 제어실험

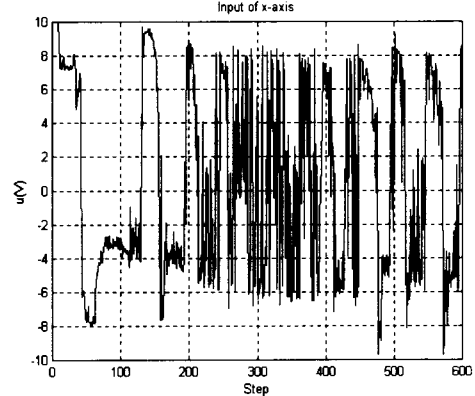
아래의 그림들은 x, y축 뿐만 아니라 z축을 모두 이용한 3차원에서 도립진자를 제어한 실험 결과를 나타낸다. 이들은 전 절의 퍼지 제어기와 동일한 파라미터들을 사용하고, 추가로 z축과 ϕ 각 제어에 관한 부분은 3장에서 기술한 파라미터를 그대로 적용한 경우의 결과이다. 적용한 z축 기준 위치는 초기 위치인 0.44 m이고, ϕ 각의 기준 각도는 0도이다. 그림 17의 (a)-(f)는 시간에 따른 α 각의 변화, 위치 x의 변화, x축에 대한 입력의 변화 그리고, β 각의 변화, 위치 y의 변화, y축에 대한 입력의 변화를 나타낸다. 그림 17의 (a)-(f)에서 보듯이 위치 제어는 가중치의 영향으로 2차원 시스템의 경우와 마찬가지로 기준치에 도달하지 못하나, α 각과 β 각의 제어 성능은 2차원 시스템의 경우에 비해 현저히 향상되었음을 알 수 있다.



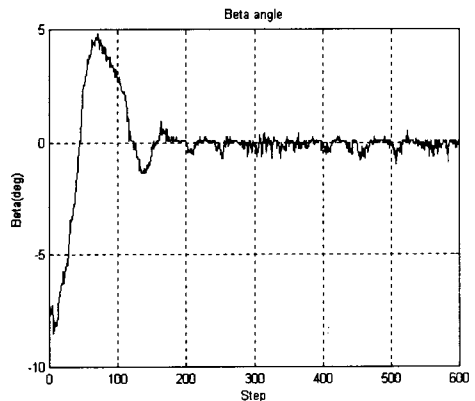
(a) Angle α



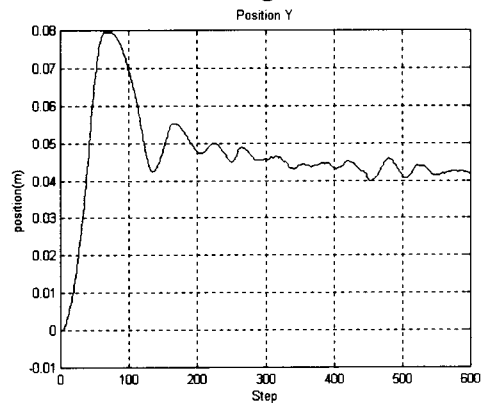
(b) Position x



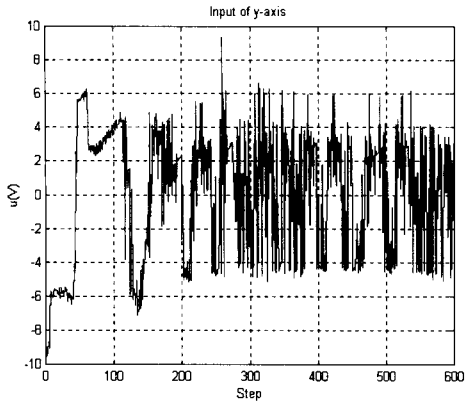
(c) x-axis control input



(d) Angle β



(e) Position y

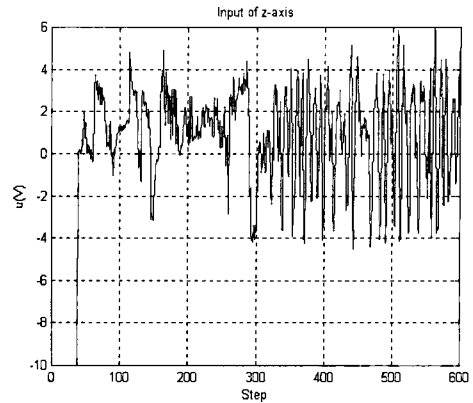


(f) y-axis control input

그림 17. 3차원 독립진자 시스템의 제어 실험 결과: 각 α , β 와 위치 x , y 의 궤적

Fig. 17. Experimental results of control of a 3D inverted pendulum system: trajectories of angle α , β and position x , y .

이와 같은 제어응답 특성의 개선은 추가된 z 축과 ϕ 각의 제어에 기인한다. 다음 그림 18은 시간에 따른 ϕ 각의 변화, 위치 z 의 변화, z 축에 대한 입력의 변화를 나타낸다. 각 ϕ 와 위치 z 의 제어가 잘 되고 있음을 알 수 있다. 초기에는 ϕ 각의 오차를 줄이기 위하여 z 축이 아래로 내려갔다가, 독립진자가 섰을 때 위치 오차를 줄이기 위하여 서서히 위로 올라가는 제어 동작을 나타내고 있다.



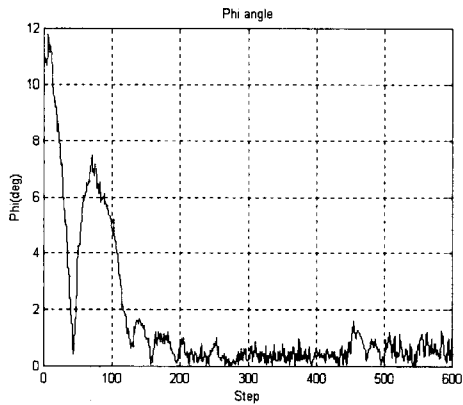
(c) z-axis control input

그림 18. 3차원 독립진자 시스템의 제어 실험 결과: 각 ϕ 과 위치 z 의 궤적

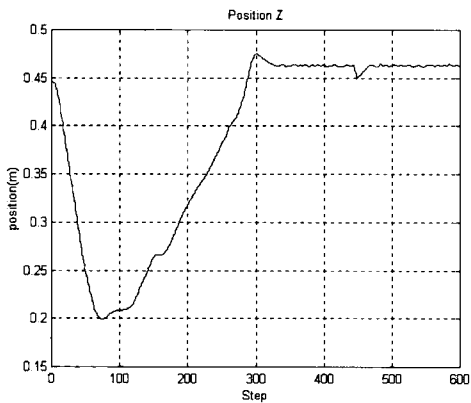
Fig. 18. Experimental results of control of a 3D inverted pendulum system: trajectories of angle ϕ and position z .

그림 19는 3축 직교 로봇의 end-effector의 궤적을 xyz 공간상에 나타낸 그림이다. 그림 19에서처럼 z 축의 제어는 앞에서 언급하였듯이 독립진자가 안정되면 지정된 위치로 올라가게 된다. 그리고 다시 독립진자가 불안정해지면 작동하여 독립진자가 안정화되도록 한다.

지금까지의 2차원과 3차원에서의 두 실험 결과를 통해서 α , β 각에 대한 각도 제어와 로봇에 가해지는 입력의 변화에 있어서 성능이 향상되었음을 알 수 있다. 특히 그림 20에 보인 실험 결과를 보면 2차원 독립진자 시스템에 비해서 3차원 독립진자 시스템의 성능이 작업 영역에 있어서 상당히 개선되었음을 볼 수 있다. 즉, 여유자유도인 z 축의 추가로 인하여 x , y 축의 작업영역이 2차원 경우에 비해 좁은 범위 안에서 독립진자를 세울 수 있음을 나타낸다.



(a) Angle ϕ



(b) Position z

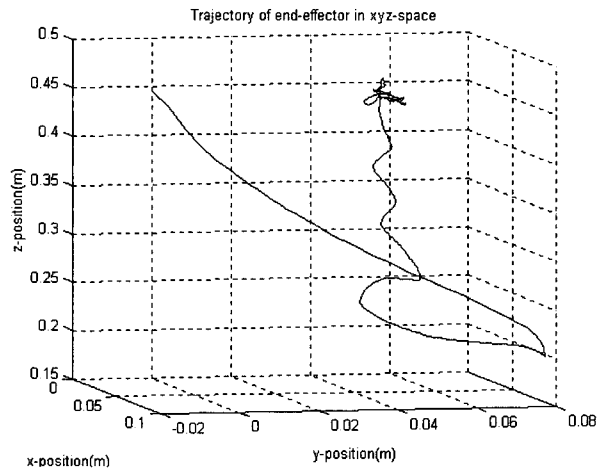


그림 19. xyz 공간에서의 end-effector의 궤적
Fig. 19. Trajectory of end-effector in xyz-space.

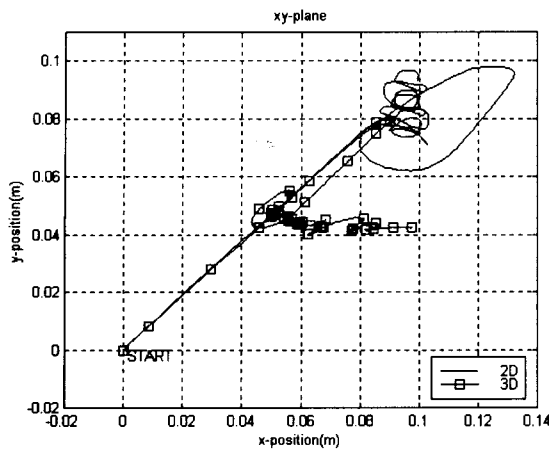


그림 20. 2차원과 3차원 시스템의 궤적 비교
 Fig. 20. Comparison of trajectory between 2D and 3D system.

6. 결론

인간이 도립진자를 제어하는 형태를 살펴보면 전후·좌우 운동뿐만 아니라 상하운동을 포함한 3차원 운동을 한다는 걸 알 수 있다. 그러나 기존의 연구사례는 대부분이 1차원 도립진자 제어에 치중되어 왔고, 최근에 들어서 2차원 도립진자에 대한 연구가 진행되고 있는 중이다.

이에 본 논문에서는 인간의 도립진자 제어형태와 유사한 3차원 도립진자 시스템을 분석하고 구현하였다. 첫째, 라그랑지안법을 이용하여 3축 직교 로봇과 도립진자를 포함한 3차원 도립진자 시스템을 모델링 하였다. 둘째, 3차원 도립진자 시스템의 제어를 위해서 ISA형태의 MMC 보드를 개발하였다. 이 보드는 도립진자의 검출된 회전각을 디지털 값으로 변환하는 DA컨버터, 디지털제어기로부터 제어출력을 아날로그 값으로 변환하는 AD컨버터, 그리고 로봇의 위치제어를 위해서 엔코더 신호를 처리하는 부분 등으로 구성되어 있다. 셋째, 3차원 도립진자 시스템의 모델링을 바탕으로 퍼지 제어기를 설계하였다. 마지막으로 설계된 퍼지 제어기를 이용해서 인간의 도립진자 제어 행위를 모사한 3차원 도립진자의 제어를 실험을 통하여 보였다.

실험 결과에서 볼 수 있듯이 여유자유도로서 사용된 z축의 도입은 한정된 작업 영역에서 도립진자 제어에 있어서 좋은 성능을 보였고, 도립진자의 정상상태 도달시간에 있어서도 좋은 성능을 나타내었다.

차후 해결과제로는 로봇의 정지마찰력이나 로봇 구동시 발생하는 진동 등의 비선형 특성을 보상해 줄 보상제어기를 첨가함으로써 좀더 정확한 위치제어가 가능하도록 해야 할 것이다.

참고문헌

[1] Z. Lin, A. Saberi, M. Gutmann, and Y. A. Shamash, "Linear Controller for an Inverted Pendulum Having Restricted Travel: A High-and-Low Gain Approach," Proc. American Control Conf., Seattle, WA, pp. 2980-2984, 1995.

[2] Q. Wei, W. P. Dayawansa, and W. S. Levine, "Nonlinear Controller for an Inverted Pendulum Having Restricted Travel," Automatica, vol. 31, no. 6, pp. 841-850, 1995.

[3] K. Furuta, M. Yamakita, and S. Kobayashi, "Swing up Control of Inverted Pendulum," Proc. IECON '91 Int. Conf., on Industrial Electronics, Control and Instrumentation, vol. 3, pp. 2193-2198, 1991.

[4] B. Sprenger, L. Kucera, and S. Mourad, "Balancing of an Inverted Pendulum with a SCARA Robot," IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, vol. 3, no. 2, pp. 91-97, 1998.

[5] T. Hoshino, and K. Furuta, "Stabilization of 2-D Inverted Pendulum via Partial Exact Linearization," Proc. 2nd Asian Control Conf., Seoul, pp. 495-498, 1997.

[6] C. Y. Chung, J. W. Sang, S. M. Lee, and B. H. Lee, "Balancing of an Inverted Pendulum with a Redundant Direct-Drive Robot," Proc. 2000 IEEE Int. Conf., on Robotics & Automation San Francisco, CA, pp. 3952-3957, 2000.

[7] C. C. Lee, "Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller-Part I and II," IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybern., vol. 20, no. 2, pp. 404-435, 1990.

[8] H. Asada, and J. -J. E. Slotine, Robot Analysis And Control, John Wiley & Sons, A Wiley-Interscience, 1986.

[9] T. Shanley, and D. Anderson, ISA System Architecture, Mindshare Inc., Addison-Wesley, 1995.

저 자 소 개



신호선(Hosun-Sun Shin)

2000년 : 금오공과대학교 전자제어공학과 (학사)

2002년 : 경북대학교 대학원 전자공학과 (석사)

2002년~현재 : 삼성중공업 디지털사업팀 연구원

관심분야 : 퍼지제어, 자동화시스템, 전력 선통신, 홈네트워크

E-mail: hosun.shin@samsung.com



추준욱(Jun-Uk Chu)

1998년 : 영남대학교 전기공학과 (학사)
2000년 : 경북대학교 전자공학과 (석사)
2002년 : 경북대학교 전자공학과 (박사수료)
2002년~현재 : 재활공학연구소 연구원
관심분야 : 학습제어, 퍼지제어, 신경회로망

Phone: 032-500-0597
Fax: 032-512-9794
E-mail: juchu@iris.korec.re.kr



이연정(Yun-Jung Lee)

1984년 : 한양대학교 전자공학과 (공학사)
1986년 : KAIST 전기및전자공학과 (공학석사)
1986년~1989년 : 한국기계연구원 연구원
1994년 : KAIST 전기및전자공학과 (공학박사)
1999년~2000년 : 일본 동경공업대 객원 연구원

1995년~현재 : 경북대학교 전자전기공학부 부교수
관심분야 : 지능로보틱스, 보행로봇, 퍼지제어, 학습제어
E-mail : yjlee@ee.knu.ac.kr



이승하(Seung-ha Lee)

1988년 : 경북대학교 전자공학과 (학사)
1990년 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (석사)
1995년 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (박사)
1996년~1999년 : 경북대학교 전자전기공학부 국책계약교수

2000년~현재 : 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 BK21 계약교수
관심분야 : 자동화시스템, 퍼지시스템, 지능제어, 로보틱스, 의공학
E-mail : shalee@ee.knu.ac.kr