論 文
48A - 9 - 13

상부 시변 부하를 갖는 2축 도립진자의 위치 제어

Position Control of the Two Links Inverted Pendulum with a Time Varying Load on the Top

李 健 寧*
(Keon Young Yi)

Abstract - The attitude control of a double inverted pendulum with a periodical disturbance at link top is dealt in this paper. The proposed system is consisted of the double inverted pendulum and a disturbing link; a triple inverted pendulum with two motors. The lower link is hinged on the plate to free for rotation in the vertical plane. The upper link is connected to the lower link through a DC motor. The DC motor is used to control the posture of the pendulum by adjusting the position of the upper link. The periodical disturbance can be generated by the additional link attached at the end of link 2 through another DC motor, which is the modeling of a posture for a biped supporting with one leg. The motor for the joint simulates the knee joint(or hip joint) and the disturbance for the legs moving in air. The algorithm for controlling the proposed inverted pendulum which is regarded as a virtual double inverted pendulum with a periodic disturbance, is consisted of a state feedback control and a fuzzy logic controller connected in parallel. The fuzzy controller keeps the center of gravity of the biped within the specified range through the nonlinear feedback compensator. The state feedback control takes over the role to maintain a desired posture regardless the disturbance at the link top. Simulations with a mathematical model and experiments are conducted to show the validity of the proposed controller.

Key Words : 2축 도립진자, 퍼지제어, 상태 피드백 제어, 비선형 피드백 보상기

1. 서 론

여러 분야의 산업현장에서 점차 로봇이 사람을 대신하여 다양한 작업을 해가고 있으며, 자율 이동이 가능한 로봇의 필요성 또한 날로 증가하고있다. 그러나, 대부분의 작업 환경이 인간위주로 설계되어있어 현장에 투여되는 로봇 또한 제약이 따르게 마련이다. 즉, 주행 로봇의 진입을 고려치 않은 계단, 협소하거나 턱이 있는 복도, 거친 바닥 면을 가진 구조에서는 바퀴를 장착한 로봇의 투입이 어려우며, 이 경우는 경사면이나 궤도를 설치하는 등 작업환경을 재구성하는 것 보다 보행 로봇을 이용하는 것이 효율적이다. 특히, 보행을 위한 바닥 면이 협소하거나 로봇 제작비용을 고려할 때 사람과 같이 두발로 보행할 수 있는 로봇은 그 설계 및 제어의 어려움에도 불구하고 개발의 필요성이 절실히 요구되며, 이는 미래 산업의 필수적인 기술로 자리 잡을 것이다.

본 연구의 목적은 두발 보행 로봇의 개발 및 보행 자세 제어를 위한 기초 연구로서, 모터 2개로 구성된 아크로바트 형식의 3축 도립진자를 제작하여 보행중인 두발 로봇이 한 발로 몸을 지탱하고 있는 자세를 모사하고[1], 이를 상부 외란을 갖는 가상 2축 도립진자로 해석하여 제어하는 것이다. 기존의 연구에서 볼 수 있듯이 Hemami와 Welmer[2]의 단순화된 보행 로봇 모델에 대한 안정성, 주기적 동작, 이동에 대한 알고리즘, Hemami 와 Katbab[3]의 일반적인 안정성을 고려하여 곧바로 서있는 자세의 사람 몸체의 움직임에 대하여 해석 등 도립진자 시스템은 보행 로봇 제어를 위한 로봇 모델로서 많이 사용되었다. 도립진자 시스템의 제어에 대한 연구 또한 많이 이루어졌다. Golliday, Hemami[4]는 2자유도의 보행 로봇 모델의 자세 안정성에 대하여 선형 피드백 제어를 제시하였으며, 바닥면 상의 이동에 제약을 갖는 도립진자 시스템에 대하여 Wei 등[5]이 비선형 제어기를 제안하였다. Berkemeier와 Fearing[6]는 하부 구동부를 갖는 2축 도립진자에 대하여 비선형 추적 제어기를 구현하였다. 실제 보행 로봇을 구현하는 측면에서, Hemami와 Wyman[7]은 억제된 동적 시스템 모델과 제어기를 제안하여 3축 보행 로봇에 적용하였으며, Kajita와 Tani[8]의 선형 도립진자 모드를 이용한 보행 로봇의 거친 바닥 면 보행, 안정 적응 퍼지 제어기[9], 혼합 제어[10], 최적 제어[11]등의 많은 연구가 진행되어 왔다.

사람의 발목 관절의 특성에 관한 연구[12],[13],[14]에서 알 수 있듯이 사람이 곧바로 서있는 자세는 순응성 하부관절을 갖는 2축/3축 도립진자로 모델링하여 해석할 수 있다. 본 연구는 Yi[1], Zheng[15]등은 구동기가 없는 발목 관절을 갖는 보행 로봇에 대하여 연구 에 대한 후속 연구로, 발목 관절에 구동 장치가 없는 보행 로봇의 한발로 지탱중인 자

* 正 會 員 : 光云大 電氣工學科 助教授 · 工博
接受日字 : 1999年 3月 31日
最終完了 : 1999年 7月 28日

세를 모사한 상부 외란을 갖는 2축 도립진자를 제어 대상으로 하였다. 즉, 바닥 면 연결부는 발목 관절을, DC 모터는 보행 로봇의 무릎 관절 또는 허리의 역할을 하며, 상부 외란은 몸체와 다른 쪽 다리의 움직임으로 모사한 것이다.

본문의 앞부분에서는 제시된 2축 도립진자 시스템의 수학적 모델링을 다루며, 이어서 이를 제어하기 위한 제어기인 상부 관절의 DC 모터를 구동하기 위한 피드백 선형화 제어기와, 모터가 없는 하단 연결부의 위치를 조절하기 위한 도립자세 교정용 퍼지 논리 제어기를 제시한다. 끝으로, 제시된 제어기의 효용성을 보여주기 위하여 수학적 모델에 대한 시뮬레이션 및 실험을 한다.

제 2 장. 도립진자 시스템의 수학적 모델링

본 연구에서 제시된 도립진자 시스템의 구성도는 그림 1과 같다. 하단 링크는 고정판 위에서 x-z 평면에 대하여 회전이 자유롭게 부착되어 있으며, 수직 축을 중심으로 ±10°의 제한 범위를 갖고 있다. 이는 기존의 연구에서 발표된 [15] 바와 같이 일정 구간에서는 유연성을 갖으며 이 범위를 벗어나지 못하도록 제약을 가하는 발목 관절의 성질을 적용한 것이다. 링크 1과 동일 규격의 균일한 매질로 구성되어 있는 링크 2는 DC 모터(M1)에 의해 링크 1의 상단에 부착되어 있다. 이 DC 모터는 실제적으로 도립진자를 움직이는 구동 장치로서의 역할을 하게 된다. 링크 3은 또 다른 DC 모터(M2)에 의해 링크 2의 상단에 부착되며, 모터 회전에 의한 왕복 운동을 함으로서 전체 도립진자의 무게 중심을 변화시켜 규칙적인 외란을 발생시키는 역할을 한다.

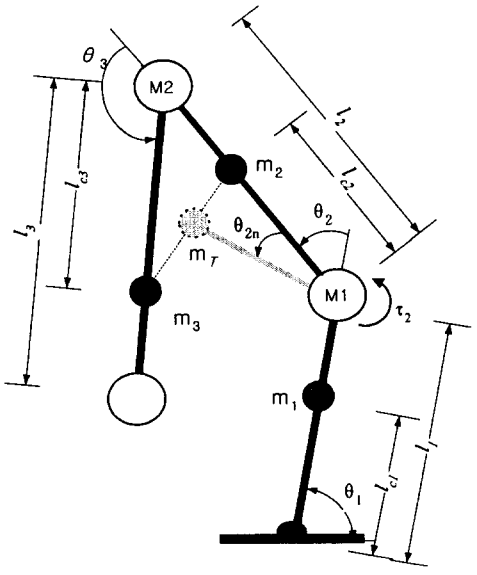

그림 1 도립진자 시스템의 구성도

Fig. 1 Schematic diagram of the double inverted pendulum system

표 1 제어 시스템의 매개 변수

Table 1 Parameters of the controlled system

	링크1	링크 2	링크 3
길이(m)	0.2	0.2	0.3
COG 거리(m)	0.145	0.145	0.1
무게(kg)	0.22	0.22	0.4
관성계수(kg · m²)	0.0056	0.0056	0.009

표 1은 도립진자 시스템의 매개 변수와 상수값으로, 실험에서 사용된 장치의 규격을 근거로 산출하였다. COG 거리는 각 링크의 관절에서 무게중심까지의 거리를 나타내며, 링크1, 2의 무게는 링크 자체의 무게에 모터의 무게를 포함한 것이며, 링크3은 링크 및 추의 무게를 나타낸다. 각 링크의 관성 계수는 모터를 점 질량으로 간주하고 링크는 균일한 매질의 막대로 간주하여 산출하였으며, 모터 회전자의 관성은 계산된 값에 비하여 상당히 작아(10-5) 무시하였다.

2.1 제어 대상 모델링 및 문제 설정

제어 대상을 모델링하기 위하여 라그랑지 방정식을 이용하였다[16].

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_i}\right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_i} = \tau_i , \quad i=1,2,3 \tag{1}$$

$$L = T - V \tag{2}$$

여기서 T 및 V는 각각 도립진자의 운동에너지 및 위치에너지를 나타내며, L은 랑그랑지안이다.

식 (1), (2)로부터 다음과 같은 동적 방정식을 얻는다.

$$\boldsymbol{D}(\theta)\ddot{\theta} + \boldsymbol{C}(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + \boldsymbol{g}(\theta) = \boldsymbol{\tau} \tag{3}$$

여기서 θ는 관절각 벡터, $D(\theta)$ 및 $C(\theta, \dot{\theta})$는 관성 행렬 및 구심력과 코리올리력의 항이고, $\boldsymbol{g}(\theta)$는 중력항이다.

제어대상인 3축 도립진자는 한발로 지지한 2족 보행로봇의 다른 발(상체 포함)이 이동하는 것을 모사한 것으로, 발목 및 무릎(도는 허리) 이외의 다른 부분의 움직임을 링크 3에 의하여 가해지는 주기적인 외란으로 간주한 것이다. 즉, 링크 3은 일반적인 3축 도립진자 제어와는 달리 자세제어에 활용할 수 없고, 일정한 주기를 갖는 운동을 하도록 (현 시점에서는 2족 보행로봇의 상체운동에 대한 구체적인 모델링이 유효하지 않아 정현 운동으로 대신하였음) 별도의 제어입력을 모터 2에 가하였다. 이 경우, 링크 2와 링크 3을 하나의 가상링크로 간주하여 해석이 가능하다. 즉, 링크 3의 위치에 따라 가상링크의 관절각 및 무게중심은 링크 2의 그것으로부터 변화가 발생하는데, 이 변화량을 외란으로 간주하면 식 (3)은 다음과 같은 가상 2축 도립진자의 동적 방정식으로 표현이 가능하다.

$$d_{11}\ddot{\theta}_1 + d_{12}\ddot{\theta}_2 + 2h\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + h\dot{\theta}_2^2 + f_1\dot{\theta}_1 + g_1 = 0 \tag{4}$$

$$d_{21}\ddot{\theta}_1 + d_{22}\ddot{\theta}_2 - h\dot{\theta}_1^2 + f_2\dot{\theta}_2 + g_2 = \tau_2 \tag{5}$$

여기서 f_1과 f_2는 관절의 마찰계수이며,

$$d_{11} = m_1 l_{c1}^2 + m_2(l_1^2 + l_{c2}^2 + 2l_1 l_{c2}\cos\theta_2) + I_1 + I_2$$
$$d_{12} = d_{21} = m_2(l_{c2}^2 + l_1 l_{c2}\cos\theta_2) + I_2$$
$$d_{22} = m_2 l_{c2}^2 + I_2$$

$$h = -m_2 l_1 l_{c2}\sin\theta_2$$
$$g_1 = (m_1 l_{c1} + m_2 l_1)g\cos\theta_1 + m_2 l_{c2} g\cos(\theta_1+\theta_2)$$
$$g_2 = m_2 l_{c2} g\cos(\theta_1+\theta_2)$$

이며, 각각의 계수는 표 1에서와 같다.

관절 3의 위치변화에 따른 상부 무게중심은 두 링크의 무게중심의 연장선 위에 위치하며(그림 1의 점선 끝에 위치함: m_T), 이는 다음으로 표시되는 θ_2및 l_{c2}에 대한 외란을 포함한 경우로 간주할 수 있다.

$$\theta_{2n} = \theta_2 + \tan^{-1}\left(\frac{C_1\sin\theta_3}{C_2 + C_1\cos\theta_3}\right) \tag{6}$$

$$l_{c2n} = \frac{\sqrt{C_3 + C_4\cos\theta_3}}{(m_2+m_3)} \tag{7}$$

여기서,

$$C_1 = m_3 l_{c3}$$
$$C_2 = m_2 l_{c2} + m_3 l_2$$
$$C_3 = m_2^2 l_{c2}^2 + m_2 m_3 l_2 l_{c2} + m_3^2(l_2^2 + l_{c3}^2)$$
$$C_4 = 2m_3^2 l_2 l_{c3} + m_2 m_3 l_{c2} l_{c3}$$

이 식에서 외란이 없는 경우, 즉, m3 = 0이면 (6)과 (7)은 각각 원래의 θ_2 와 l_{c2}로 환원됨을 알 수 있다. 보행로봇의 보행에 따른 상체의 운동은 정해진 궤적에 따라 규칙적으로 움직이므로, 위 식으로부터 가상 관절의 관절각 및 무게중심의 변화를 실시간으로 계산하여 보상하면 2축 도립진자 제어와 같은 방식으로 제어가 가능하다. (이후로는 일반적인 2관절 제어 문제로 간주하여 θ_1, θ_2 만으로 표현한다.)

앞서 유도된 모델에서 알 수 있듯이 관절 1에 제어 입력 τ_1이 없기 때문에 도립진자의 자세를 제어하기 위해서는 상부 관절의 자세를 조정하여 하부관절을 적절히 구동하여야 한다. 이를 위하여 관절 2에 대한 입력 τ_2에 대한 식으로 다시 표현하면 (4), (5)로부터 다음과 같이 표시된다.

$$(d_{11} - d_{21})\ddot{\theta}_1 + (d_{12} - d_{22})\ddot{\theta}_2 + N_1(\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, h) = -\tau_2 \tag{8}$$

여기서 N1은 다음의 관계식으로 표시되는 비선형 항이다.

$$N_1(\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, h) = 2h\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + h\dot{\theta}_1^2 + h\dot{\theta}_2^2 + f_1\dot{\theta}_1 - f_2\dot{\theta}_2 + g_1 - g_2 \tag{9}$$

각 관절의 위치 및 각속도를 상태변수 $\boldsymbol{X} = [\dot{\theta}_1 \ \theta_1 \ \dot{\theta}_2 \ \theta_2]^T$라 놓고 도립 자세 부근에서 근사화된 상태방정식은 $\theta_1 \cong 0$, $\theta_2 \cong 0$, $\dot{\theta}_1^2 \cong 0$, $\dot{\theta}_2^2 \cong 0$, 그리고 $\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 \cong 0$의 관계로부터 다음과 같이 표시된다.

$$\dot{\boldsymbol{X}} = \boldsymbol{AX} + \boldsymbol{B}\tau \tag{10}$$

여기서,

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & a_4 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ a_5 & a_6 & a_7 & a_8 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{B} = [b_1 \ 0 \ b_2 \ 0]^T$$

$$a_1 = -(m_2 l_{c2}^2 + I_2)f_1/t$$
$$a_2 = \{(m_2 l_{c2}^2 + I_2)\psi_1 - m_2 l_1 l_{c2}\psi_2\}/t$$
$$a_3 = (m_2 l_{c2}^2 + m_2 l_1 l_{c2} + I_2) f_2/t$$
$$a_4 = -m_2 l_1 l_{c2}\psi_1/t$$
$$a_5 = (m_2 l_{c2}^2 + m_2 l_1 l_{c2} + I_2) f_1/t,$$
$$a_6 = \{m_1 l_{c1}^2 + m_2(l_1^2 + l_1 l_{c2}) + I_1\}\psi_2/t - \{m_2(l_{c2}^2 + l_1 l_{c2}) + I_2\}\psi_1/t \tag{11}$$
$$a_7 = -\{m_1 l_{c1}^2 + m_2(l_1 + l_{c2})^2 + I_1 + I_2\} f_2/t$$
$$a_8 = \{m_1 l_{c1}^2 + m_2(l_1^2 + l_1 l_{c2}) + I_1\}\psi_2/t$$
$$b_1 = -(m_2 l_1 l_{c2} + m_2 l_{c2}^2 + I_2)/t$$
$$b_2 = \{m_1 l_{c1}^2 + m_2(l_1 + l_{c2})^2 + I_1 + I_2\}/t$$
$$\psi_1 = (m_1 l_{c1} + m_2 l_1)g$$
$$\psi_2 = m_2 l_{c2} g$$
$$t = m_1 m_2 l_{c1}^2 l_{c2}^2 + m_2 l_{c2}^2 I_1 + (m_1 l_{c1}^2 + m_2 l_1^2)I_2 + I_1 I_2$$

이때, A와 B 행렬 원소를 구하는데 사용된 계수는 앞서 사용된 계수와 동일하며, 각 관절의 마찰계수는 f1 = 0.0009 및 f2 = 0.0017로 하였다. 이 마찰계수는 도립진자를 도립시키지 않은 상태에서 자유 진자운동을 시킬 때의 실험 및 모의실험에 의한 운동특성을 비교하여 실험적으로 산정한 것이다. 위 계수 중에서 외란으로 인하여 상부관절의 무게중심까지의 거리 l_{c2}가 (7)의 형태로 변하므로 A와 B 행렬 원소는 시변 파라미터가 되나 온라인으로 산출이 가능하다.

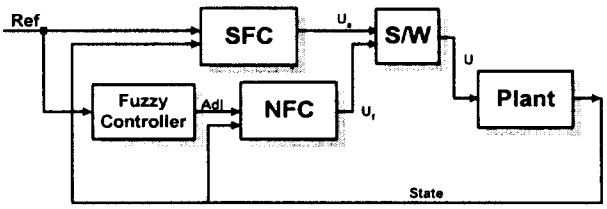

그림 2 제어기의 구성도

Fig. 2 The block diagram of the controller

2.2 제어 알고리즘

제시된 2링크 도립진자가 갖는 비선형성과 인위적으로 인가되는 외란에 무관하게 도립 자세를 유지하게 하기 위하여 비선형 피드백 보상기를 갖는 퍼지제어기와 상태 피드백 제어기를 합성한 제어기를 그림 2와 같이 구성하였다.

그림에서 상태 피드백 제어기(SFC)는 도립진자가 (10)으로 모델링되는 경우(선형 근사화 가능 구간)에 제어를 담당하며, 그 이외의 구간에서는 비선형 피드백 보상기을 갖는 퍼지제어기(NFC)에 의하여 도립진자가 선형 근사화 가능 구간으로 재 진입하도록 제어된다. 그림의 S/W는 제어기 선택 논리 스위치로 SFC로의 진입조건과 NFC로의 진출조건을 바탕으로 제어기를 선택하게된다. 진입조건으로는 두 관절 모두 작은 각일 경우로(1°: 작을수록 좋으나 너무 작을 경우 SFC의 동작 기회가 적어 도립자세 유지가 어렵다.) SFC의 출력이 제어입력이 되며, 진출조건으로는 SFC의 제어과정에서 관절각이 일정한 크기를 초과하는 경우로(10°: 선형화 근사화 가능 구간의 임의의 초기값을 주어 SFC로

제어하는 과정에서 가장 큰 관절각을 실험적으로 선정한다.) 퍼지제어기 출력이 제어입력이 되도록 동작한다.

2.2.1 상태 피드백 제어 및 비선형 피드백 보상기

식 (10)으로 표시되는 시스템은 두 개의 불안정한 극점을 갖는다. 그러나, 이는 이득 벡터 k를 갖는 상태 피드백을 사용하여 제어 대상의 특성 근을 임의의 안정한 위치로 이동시켜 제어할 수 있다.

$$\begin{aligned}\dot{\boldsymbol{X}} &= \boldsymbol{AX}-\boldsymbol{B}(\boldsymbol{kX}-\boldsymbol{r}) \\ &= [\boldsymbol{A}-\boldsymbol{Bk}]\boldsymbol{X}+\boldsymbol{Br}\end{aligned} \tag{12}$$

해석의 편의를 위해서, 목표 극점을 동일하게 하여 λ 라 놓으면 상태피드백을 가한 시스템의 특성방정식은 다음의 관계를 만족한다.

$$det(s\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A}+\boldsymbol{Bk})=(s+\lambda)^4 \tag{13}$$

이를 다시 쓰면

$$\boldsymbol{L}=\boldsymbol{A}_p\boldsymbol{k}+\boldsymbol{B}_p \tag{14}$$

여기서,

$$\boldsymbol{L}=[4\lambda \quad 6\lambda^2 \quad 4\lambda^3 \quad \lambda^4]^T$$

$$\boldsymbol{A}_p=\begin{bmatrix} b_1 & 0 & b_2 & 0 \\ a_3b_2-a_7b_1 & b_1 & a_5b_1-a_1b_2 & b_2 \\ a_4b_2-a_8b_1 & a_3b_2-a_7b_1 & a_6b_1-a_2b_2 & a_5b_1-a_1b_2 \\ 0 & a_4b_2-a_8b_1 & 0 & a_6b_1-a_2b_2 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{B}_p=\begin{bmatrix} -a_7-a_1 \\ a_1a_7-a_2+a_3a_5-a_8 \\ a_2a_7-a_3a_6+a_1a_8-a_4a_5 \\ a_2a_8-a_4a_6 \end{bmatrix}$$

위의 식에서, $\boldsymbol{L}$은 목표 특성 방정식의 계수 벡터이고, a_i, b_j는 행렬 $\boldsymbol{A}$, $\boldsymbol{B}$의 원소들이다. (14)를 $\boldsymbol{k}$에 대하여 재정리하면, 상태 피드백 이득은 다음과 같이 얻어진다.

$$\boldsymbol{k}=\boldsymbol{A}_p^{-1}(\boldsymbol{L}-\boldsymbol{B}_p) \tag{15}$$

그러나, 앞서 언급된 바와 같이 (12)의 상태 피드백 제어는 도립진자가 거의 도립 자세를 취할 때만 유효하다. 즉, 이 범위 밖에서는 (10)과 같은 근사화된 모델을 사용하지 못한다. 따라서 도립진자의 자세가 이 범위밖에 있는 경우에는 근사화되지 않은 (4), (5)식으로부터 θ_2 만으로 구성된 다음의 동적 방정식을 이용하여 θ_2 의 위치를 제어하여 간접적으로 θ_1 을 제어해야한다. 이를 위한 θ_2 만으로 구성된 동적 방정식은 다음과 같다.

$$(d_{22}-\frac{d_{12}^{\,2}}{d_{11}})\,\ddot{\theta}_2-N_2(\dot{\theta}_1,\dot{\theta}_2,\theta_1,\theta_2)=\tau_2 \tag{16}$$

여기서 N_2는 다음으로 표시되는 비선형 항을 나타낸다.

$$\begin{aligned}N_2(\dot{\theta}_1,\dot{\theta}_2,\theta_1,\theta_2)=&2h\frac{d_{12}}{d_{11}}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2+h\,\dot{\theta}_1^{\,2}+f_1\frac{d_{12}}{d_{11}}\dot{\theta}_1 \\ &+h\frac{d_{12}}{d_{11}}\dot{\theta}_2^{\,2}-f_2\dot{\theta}_2+\frac{d_{12}}{d_{11}}g_1-g_2\end{aligned} \tag{17}$$

상부관절의 자세를 제어하기 위하여, (17)의 비선형 항을 피드백 입력으로 하며 하부관절의 간접 구동을 위한 상부관절 θ_2 의 기준 궤적(θ_{2d}: 뒤에서 언급되는 퍼지제어기에서 결정됨)으로부터 다음과 같은 제어입력 U를 구성한다.

$$\tau_2=(d_{22}-\frac{d_{12}^{\,2}}{d_{11}})U-N_2(\dot{\theta}_1,\dot{\theta}_2,\theta_1,\theta_2) \tag{18}$$

$$U=\ddot{\theta}_{2d}+2\zeta\omega_n\dot{\tilde{\theta}}_2+\omega_n^{\,2}\tilde{\theta}_2 \tag{19}$$

여기서, $\tilde{\theta}_2$는 관절 2의 위치 오차로서, 기준 각도와 측정 각도의 오차, 즉, $\theta_2-\theta_{2d}$ 이다.

이 제어입력으로부터 링크 2의 위치는 다음과 같이 안정하게 임의의 목표위치로 제어됨을 알 수 있다.

$$\ddot{\tilde{\theta}}_2+2\zeta\omega_n\dot{\tilde{\theta}}_2+\omega_n^2\tilde{\theta}_2=0 \tag{20}$$

여기서, ζ 와 ω_n 는 설계자가 임의로 설정할 수 있는 제동비와 고유 주파수이다.

이제, 다시 도립진자의 자세에 역점을 두고 논의해 보자. 관절 1에 구동장치가 없음에도 불구하고, 상단 링크의 기준 위치를 조정함으로서 하단 링크를 제어할 수 있다[15]. 이 기준 위치는 다음 장에서 제시될 퍼지제어기에 의해 주어진다.

2.2.2 퍼지 논리 제어기

제시된 퍼지제어기는 두 링크의 위치(θ_1, θ_2)를 입력으로 하여, 하단 링크를 도립시키는 간접 토오크를 발생시키는 관절 2의 기준 위치를 설정하는 역할을 한다. 이 기준 위치는 (19)의 제어입력 산출에 이용된다.

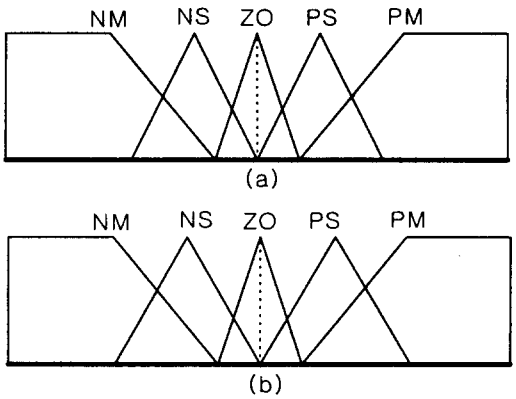

그림 3 (a) θ1의 소속함수 (b) θ2 의 소속함수
Fig. 3 (a) The input membership function of θ1
(b) The input membership function of θ2

각 링크의 측정 입력에 대한 소속함수들은 그림 3과 같이 이등변 삼각형법[17]을 사용하여 구성하였으며, 측면에 비하여 중앙에 밀집하게 배열하였다. 이 경우, 도립 자세 부근에서는 진동을 하게 되나 나머지 범위에서는 적절한 제어 특성(선형화 구간으로 진입 유도)을 얻을 수 있다. 또한, 진동을 하게 되는 도립 자세 구간에서는 앞장에서 제시한 상태 피드백 제어기에 의해 제어되므로, 진동에 대한 문제는 해결된다.

출력의 소속함수의 배열을 다른 형태로 구성되었다. 즉, 중앙부분이 양 측면보다 넓게 구성되어 있는데, 이는 수직

도립 자세 부근에서 퍼지제어기의 역할을 감소시킨다. 위와 같은 소속함수는 본 퍼지제어기 목적인 각 링크의 각도를 "0"에 가깝게 하며 이때의 각속도 또한 "0"에 가깝도록 조절되어 도립진자의 자세를 선형화 제어기의 제어 구간으로 유도하는 것이다.

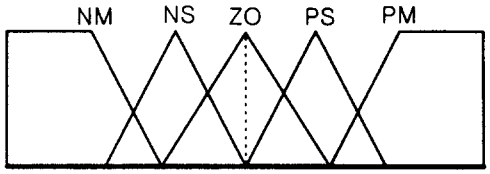

그림 4 출력 θ2d 의 소속함수
Fig 4 The output membership function for θ2d

퍼지제어기 규칙은 표 2와 같다. 이 추론 규칙은 퍼지화된 각 링크의 각도를 입력으로 하여 구성되었으며, 링크 2의 기준 위치를 출력으로 한다. 비퍼지화는 퍼지 추론의 네 개의 결과로부터 무게 중심 법에 의하여 계산되며, (19)의 제어입력 산출에 필요한 링크 2의 기준 위치를 정한다. 관절 2의 기준 각속도 및 기준 각가속도도 같은 방식으로 정할 수 있으나, 본 연구에서는 계산 시간을 고려하여 모두 "0"으로 하였다.

표 2 퍼지 제어 규칙
Table 2 The fuzzy control rules

θ_1 \ θ_2	NM	NS	ZO	PS	PM
NM	PM	PM	PM	PS	ZO
NS	PM	PM	PS	ZO	NS
ZO	PM	PS	ZO	NS	NM
PS	PS	ZO	NS	NM	NM
PM	ZO	NS	NM	NM	NM

제 3 장. 시뮬레이션 및 실험

2링크 도립진자의 자세 제어를 위하여 제시한 제어기의 타당성을 검증하기 위하여 제어 대상의 수학적 모델에 대한 시뮬레이션 및 실험을 수행하였다. 제어 대상 및 제어기 프로그램은 C-언어로 작성되었으며, 모델링에 사용된 상수값(표1)들은 추후 제작될 장치의 규격을 근거로 산출되었다.

3.1 시뮬레이션

그림 1의 링크3은 프로그램 작성의 편의를 위하여 링크 2 및 링크 3의 무게 중심만을 점으로 표시하였으며, 외란의 발생을 위한 관절각 3은 보행 로봇의 보행을 고려하여 다음으로 설정하였다. (실험에서는 PID 제어기를 이용하여 관절각을 구동하여야하나, 여기서는 다음 식을 직접 이용하였다.)

$$\theta_{3d} = \pi\ (1 + 0.25\sin(2\pi t)) \qquad (21)$$

먼저 퍼지제어기를 위한 비선형 피드백 보상기의 특성 고찰을 위한 시뮬레이션을 하였다. 링크의 초기위치는 $\theta_1 = 5^o$, $\theta_2 = -10^o$로 하였으며, 보상기 제어입력을 위한 $\zeta = 1$, $\omega_n = 25$로 하여 비선형 피드백 보상기만을 이용하여 제어하였다.

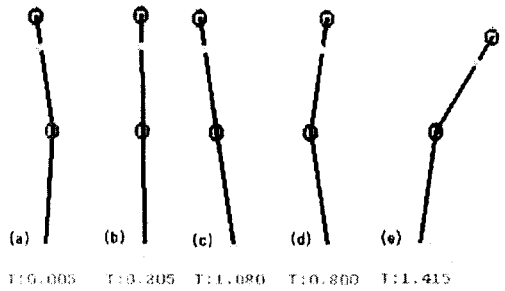

그림 5 비선형 피드백 보상기만을 적용한 제어
Fig. 5 Control with nonlinear feedback compensator only

그림 5의 결과에서 (a)는 초기상태를 나타내며, (b)는 상부관절이 우측으로 이동함에 따라 하부관절이 좌측으로 이동하며(그림자로 표시된 부분 참조) 도립한 상태를 보이는 중간과정을 나타낸다. (c), (d), (e)는 θ_2의 목표 값이 각각 $\theta_{2d} = 0^o$, 20^o, 25^o인 경우의 최종 자세이다. (c)의 경우는 목표 값이 작아 (b)에서 다시 좌측으로 넘어져 제약점에 머문 상태이며, (e)는 목표 값이 너무 커서 우측 제약점으로 이동하였다. 그러나, 두 경우 모두 (d)와는 달리 그림 하부에 표시된 무게중심이 안정한 위치를 벗어나고 있다. 그러나, 초기 위치를 달리하는 경우($\theta_2 = -5^o$ 또는 -15°) 목표 위치로 이동하기 위한 제어입력이 달라져서 (d)의 목표 값 또한 안정한 최종자세 유지가 불가능하다. 이상을 종합하면, 관절 위치에 따라 상부관절의 목표 값을 적절히 정해주면 위의 모든 경우에 대하여 안정된 최종 자세를 얻을 수 있는데, 그 결과는 다음 사례에서 보여준다.

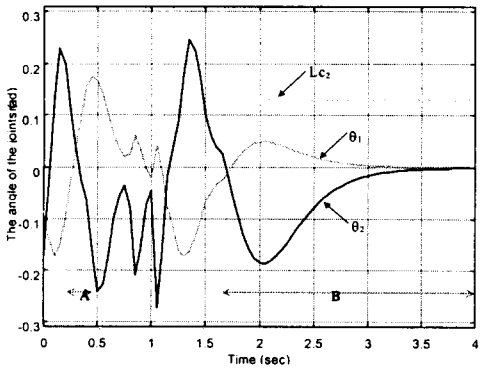

그림 6 도립진자의 재시도에 의한 도립
Fig. 6 The uprising retrials of the inverted pendulum

표2와 같이 구성된 퍼지 규칙에 따라 또 다른 초기조건 ($\theta_1 = -5^o$, $\theta_2 = -10^o$)과 외란이 없는 경우에 대하여 퍼지 및 상태 피드백 제어기를 이용한 제어를 실행하였다. 그림 6에서 알 수 있듯이 퍼지제어기는 도립진자를 선형화 구간에 진입시키나(하단에 표시된 A 구간), 진입시의 링크 각속

도가 상태 피드백 제어기에 의해 제어될 만큼 작지 못하기 때문에 상태 피드백 제어기는 이를 수직으로 도립시키지 못한다. 즉, 최초 진입 후의 자세에 대한 근사화된 모델은 이와 같이 큰 각속도에 대해서는 유효하지 못하다. 그러나, 퍼지제어기는 계속해서 선형화 구간에 재진입을 시도하게 되고(하단에 표시된 B구간), 두 번째 시도에 의해 도립진자는 수직 도립을 취하게 된다.

동일한 조건에서 외란을 가한 경우의 시뮬레이션 결과를 그림 7에 표시하였다. 외란을 발생시키는 관절 3의 규격은 표 1과 같으며, 관절각 변화는 (21)로 하였다. 외란 성분 중 (6)은 관절각 2의 기준 위치에 직접 수정하여 보상이 가능하여 여기서는 편의상 (7)의 외란만을 고려하였다.

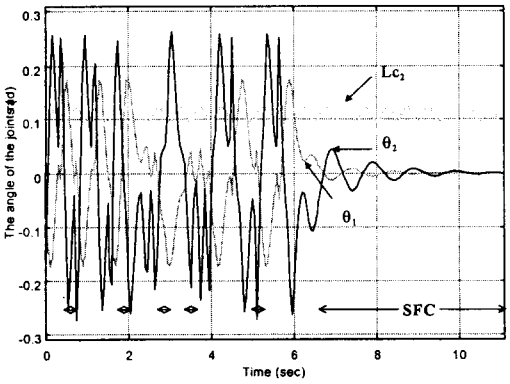

그림 7 상부 외란을 갖는 도립진자의 자세제어
Fig. 7 Attitude control of the inverted pendulum with a disturbance at link top

그림에 나타난 것과 같이 외란으로 인하여(그림에서 l_{c2}로 표시되었으며, 단위는 m 이다.) 선형화 제어구간이 좁아져 그림 6의 경우보다 느린 수렴 특성을 나타내나 (6번의 재시도 후 수렴하기 시작함: 그림 하단의 화살표 구간), 일단 적절한 조건으로 선형화 제어구간에서 진입한 후 외란에 관계없이 제어가 됨을 보여준다. 이 재시도 과정에서 하부관절은 좌측 또는 우측 제약점(0.17 rad)에 충돌하므로 이를 보행로봇에 적용할 때 문제가 될 것으로 생각된다. 그러나, 일부 초기조건에서는 충돌 없이 직접 도립이 되며(특정 초기값을 기준으로 퍼지규칙 및 소속함수를 조정하면 되나, 현 단계에서는 보행 로봇 관련 초기조건을 결정하지 못하여 논외로 하였음), 충격 완화장치를 갖는 유연성 관절(현재 연구중임)을 적용하여 어느 정도 문제해결이 가능할 것으로 사료된다.

3.2 실험

실험 장치의 구성은 그림 8과 같다. 제어 시스템은 Axiom사의 AX5411 A/D-D/A 변환기를 장착한 32-bit 386DX-33 컴퓨터, Advanced Motion Control 사의 모터 구동용 모듈(5A5)을 이용한 토오크 모드로 동작하도록 설계된 증폭기, 전원 공급장치 및 3축 도립진자로 구성되어 있다. 관절의 각도를 측정하기 위해서 두 개의 포텐셔미터가 사용되며, 상부 관절 구동장치는 33.2:1의 플래내터리 (Planetary) 기어를 갖는 Maxon사의 12V 10W DC 모터가 사용되었으며, 외란용 구동부는 동일 회사의 12V 4.5W, 기어비 84.3:1의 모터가 사용되었다. 입출력 데이터 엑세스를 포함 제어기의 모든 프로그램은 C언어로 구성되었으며, 샘플링 주기는 12ms이다. 위치 측정을 위한 센서의 잡음제거를 위하여 870Hz의 컷오프 주파수를 갖는 2차 버터워쓰 (Butterworth) 필터를 적용하였으며, 속도는 단위 샘플링 구간에서의 위치 변화로부터 산출하였다.

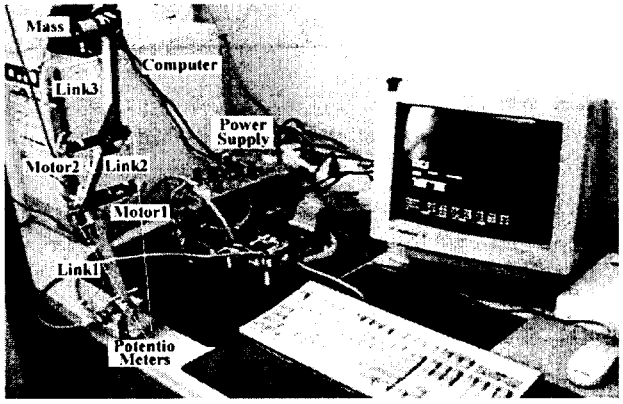

그림 8 3축 도립진자 시스템
Fig. 8 The triple inverted pendulum system

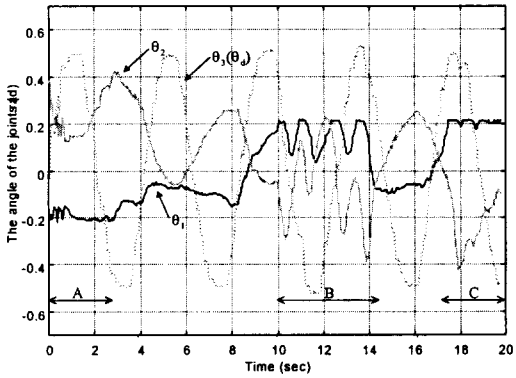

그림 9 상부 외란을 갖는 도립진자의 자세제어 실험
Fig. 9 Attitude control of the inverted pendulum with a disturbance at link top in experiment

외란은 $\theta_{3d}=0.15\pi\sin(1.5t)$로 하여 PID 제어기로 발생시켰으며(그림 9의 점선: 하부관절 운동의 영향으로 다소 왜곡되어있음.), 하부관절은 제약점에, 상부관절은 하부관절과 일직선인 초기조건에 대한 제어를 하였다. 시뮬레이션과는 달리 퍼지제어기에 의한 진입 시도 후 도립자세를 유지하지 못하고(모델링 오차 및 잡음에 기인함) 좌측(A 구간) 또는 우측 제약점(B, C 구간)으로 이동하고 있으나 관절 2의 움직임으로 외란을 적절히 보상하여(그림의 흐린 실선으로 표시된 관절각 2가 외란을 상쇄시키고 있음) 전체 무게중심은 지지면(발바닥) 내에 남아있었으며, 제약점 도달 시 충격도 크지 않았다. 다만 임의의 초기조건에 대하여는 과도한 진동현상을 보였으나, 본 제어기가 보행로봇 제어를 목표로 하고있어 로봇의 보행을 위한 특정 보행자세를 초기조건으로

하여 (현재는 로봇이 완성되지 않아 임의의 초기조건으로 하였음) 제어기를 재조정하면 보다 좋은 결과가 기대된다.

제 4 장. 결 론

본 연구에서 제시된 가상 2링크 도립진자는 무릎 관절 또는 허리의 역할을 하는 상부 관절과, 보행 시 몸체 또는 공중에서 이동중인 다른 쪽 다리로 간주되는 상부 외란을 통해서 두발 보행 로봇의 한발로 지탱중인 자세의 모델링을 하여 상부 관절에 측정 가능한 시변 부하가 있는 가상 2축 도립진자로 해석하였다. 또한, 이를 제어하기 위한 피드백 선형화-퍼지제어기를 제시하여 전체 무게중심이 안정한 위치에 유지되도록 제어하였다.

제시된 도립진자 시스템은 구동 장치가 없는 발목 관절을 갖는 보행 로봇의 다리로서 발전될 수 있으며, 제시된 제어기는 두발 보행 로봇의 보행자세 제어에 활용될 수 있다. 추후 과제로는 수렴특성 개선을 위한 퍼지 소속함수 조정 및 실제 장치로의 적용 연구가 요구된다.

감사의 글

본 연구는 1998년도 한국학술진흥재단 학술연구조성비 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

[1] K. Y. Yi and Yuan F. Zheng, "Biped Locomotion by Reduced Ankle Power," Proc. 1996 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 584-589, 1996.

[2] H, Hemami, F. C. Welmer, S. H. Koozekanani, "Some aspects of the inverted pendulum problem for modeling of locomotion systems," IEEE Trans. on Automatic Control, AC-18, pp.658-661, 1973.

[3] H. Hemami, A. Katbab, "Constrained inverted pendulum model for evaluating upright postural stability," J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol.104, pp.343-349, Dec. 1982.

[4] C. L. Gollliday, H. Hemami, "Postural stability of the two-degree-of-freedom biped by general linear feedback," IEEE Trans. on Automatic Control, pp.74-79, Feb. 1976.

[5] Q. Wei, W. P. Dayawansa, and W. S. Levine, "Nonlinear controller for an inverted pendulum having restricted travel,", Automatica, vol. 31. no.6, pp841-850, 1995.

[6] M. D. Berkemeier, R. S. Fearing, "Control Experiments on an underactuated robot with application to legged locomotion," Proc. 1994 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp149 - 154, 1994.

[7] H. Hemami, B. F. Wyman, "Modeling and control of constrained dynamic systems with application to biped locomotion in the frontal plane," IEEE Trans. on Automatic Control, vol. AC-24, no. 4, pp.526-535, August 1979.

[8] Shuuji Kajita and Kazuo Tani, "Experimental study of biped dynamic walking in the linear inverted pendulum mode," Proc. 1995 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 2885-2891, 1995.

[9] L. Wang, "Stable adaptive fuzzy controllers with application to inverted pendulum tracking," IEEE Trans. on System, Man, and Cybernetics, vol. 26, no. 5, Oct. 1996.

[10] C. E. Lin, Y. R. Sheu, "A Hybrid- Control Approach for Pendulum-Car Control," IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 39, No. 3,pp.208-214, 1992.

[11] K. Furuta, "Attitude control of a triple inverted pendulum," Int. J. Control, Vol. 39, No. 6, pp. 1351-1365, 1984.

[12] D. Kuo, F. Zajac, "A Biomechanical analysis of muscle strength as a limiting factor in standing posture," J. Biomechanics vol. 26, Suppl. 1, pp.137-150, 1993.

[13] Jie Chen, S. Siegler, C. D. Schneck, " The three-dimensional kinematics and flexibility characteristics of the human ankle and subtalar joint-Part I: Kinematics," ASME J. Biomechanical Eng., vol. 110, pp.364 - 383, Nov. 1988.

[14] Jie Chen, S. Siegler, C. D. Schneck, " The three-dimensional kinematics and flexibility characteristics of the human ankle and subtalar joint-Part II: Flexibility characteristics," ASME J. Biomechanical Eng., vol. 110, pp.374 - 384, Nov. 1988.

[15] K.Y. Yi, "Walking of a biped robot with compliant ankle joints," Proc. 1997, IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp245-250, 1997.

[16] M. Spong, M. Vidyasagar, *"Robot Dynamics and Control,"* Wie Wiley, 1989.

[17] C.C. Lee, "Fuzzy Logic in Control System: Fuzzy Logic Controller-Part I, II," IEEE Trans. Sys. Man Cybernetics, Vol. 20, No.2, pp. 404-435, 1990.

저 자 소 개

이 건 영(李 健 寧)

1959년 8월 2일 생. 1982년 한양대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1996년~현재 광운대 전기공학과 조교수

Tel : (02) 940-5142, Fax : (02) 942-0107

E-mail : keonyi@daisy.kwangwoon.ac.kr