

진자 흔들기 퍼지 제어기가 추가된 가상모델 제어 2족 곡예로봇 자세 균형 제어

Virtual Model Control of a Posture Balancing Biped Acrobatic Robot with Fuzzy Control for Pendulum Swing Motion Generation

이 병 수
(Byoungsoo Lee)

Abstract : A broomstick swinging biped acrobatic robot controller is designed and simulated to show the capability of the system of controllers: virtual model controller is employed for the robot's posture balancing control while a higher level fuzzy controller modulate the one of the virtual model controller's parameter for the pendulum swinging motion generation. The robot is of 7 degree-of-freedom, 8-link planar bipedal robot having two slim legs and a body. Each leg consists of a hip joint, a knee joint, an ankle joint and the body has a free joint at the top in the head at which a freely rotating broomstick is attached. We assume that the goal for the acrobat robot is to maintain a body balance in the sagittal plane while swinging up the freely rotating pendulum. We also assume that the actuators in the joints are all ideal torque generators. The proposed system of controllers satisfies the goal and the simulation results are presented.

Keywords : virtual model control, fuzzy control, bipedal robot, nonlinear control, pendulum

I. 서론

다관절 보행 로봇 등의 비선형 시스템의 제어계의 설계와 해석은 선형계의 그것보다 훨씬 난해하다. 이러한 시스템에서 제어기 설계 및 해석이 어려운 이유는 계가 매우 비선형이고, 계가 상태변수의 범위 전체에 걸쳐서 동작하여 근본적으로 불안정하며, 다입력 다출력 계이고, 지지하는 다리가 전환되면서 발생하는 불연속에 기인한 시변계이기 때문이며 이러한 이유로 강력한 해석 및 설계의 도구가 현재로는 풍부하지 못하다[1]. 다관절 보행 로봇의 해석 및 제어기 설계에 유용한 몇가지 기법들이 개발되었는데 대표적인 것으로는 하이브리드 위치/힘 제어[2], 강성 제어[3], 임피던스 제어[4] 등이 있으며 그 외에도 다수 개발되었다[5][6]. 이런 기법 중에서 가상 모델제어기법은 최근 주목을 받는 제어계 설계 기법으로 특히 지체가 많은 다관절의 보행 로봇의 자세제어에 매우 효과적이며 그 유용성이 증명되었다[7]-[9].

가상모델 제어기법은 가상기구 요소(virtual mechanical component)를 흉내내어서 관절 제어에 필요로 하는 실제 토크 혹은 힘을 산정하며 그로 인해서 마치 실제로 로봇에 이 흉내낸 가상기구요소가 결합되어 있는 것과 같은 착각을 불러 일으킨다[1]. 가상기구요소는 실제로 존재하지 않거나 존재할 수도 없는 가상의 요소일 수도 있으므로 이 제어기법은 범용이며 또한 기존의 제어기법이 동일한 정황에서 응용될 수 있다. 예를 들면 비례-미분 서보는 스프링계수가 비례이득, 점성계수가 미분이득, 그리고 설정위치가 관절의 설정각과 같은 가상회전스프링-댐퍼계로 실현될 수 있다. 더 나

아가 가상요소는 적응제어 혹은 학습요소를 포함할 수 있다 [8][9].

가상모델 제어의 이점은 매우 간결하고, 비교적 적은 양의 계산이 요구되며, 분산처리될 수 있다는 것이다. 이러한 이점들은 직렬 링크들의 행렬 또는 함수들의 역의 계산이 불필요하다는 특징 때문이다. 모든 계산식은 닫힌 형태로 최적화되어 미리 얻어지며, 다수의 가상요소가 독립적으로 계산되어 중첩될 수 있는데 출력과 관절의 토크가 서로 선형적으로 가함(linearly additive)이기 때문이다. 또한 가상기구요소들을 취사 선택하거나 파라미터를 변경하기 위해서 상위제어기를 채용할 수도 있다[8][9].

본 논문에서는 가상모델 제어기와 상위제어기인 퍼지 제어기가 결합된 계의 예로 두 개의 다리와 한 개의 몸통을 갖는 곡예 로봇의 진자 흔들기 제어기 계통을 선정하며 이 제어계를 설계하고 모의 실험한다. 곡예 로봇은 평면운동으로 제한된 두개의 다리를 갖는데 한 다리에 엉덩이, 무릎, 발목 3개의 관절을 갖고 두 다리는 몸통에 연결되어 있다. 로봇의 머리에 해당하는 부분에 진자가 자유로이 회전하는 조인트로 연결되어 있으며 초기에 연직 방향의 안정 위치에 있는 진자를 곡예로봇이 몸통을 좌우로 흔들며 에너지를 공급하여 진폭을 점차로 증가시켜가는 운동을 한다. 로봇의 다리 좌우 여섯개 관절 토크 제어에 가상모델 제어기를 사용하며 상위 제어기인 퍼지 제어기는 가상기구요소의 파라미터를 변경시켜 상체의 좌우 흔들기 운동을 발생시킨다.

II. 시스템 모델 및 목표

본 연구에서 사용된 곡예로봇은 7자유도, 8링크 평면 로봇이다. 발은 초기에 정해진 위치에 항상 고정되어 있으며 가는다란 왼쪽과 오른쪽 다리를 갖고 있다. 각 다리는 엉덩이(hip) 관절, 무릎(knee) 관절, 발목(ankle) 관절을 갖고, 머리

접수일자 : 2001. 1. 9., 수정완료 : 2001. 7. 13.

이병수 : 계명대학교 기계자동차공학부(blee@kmu.ac.kr)

※ 본 연구는 1994년 계명대학교 비사연구기금으로 이루어졌음.

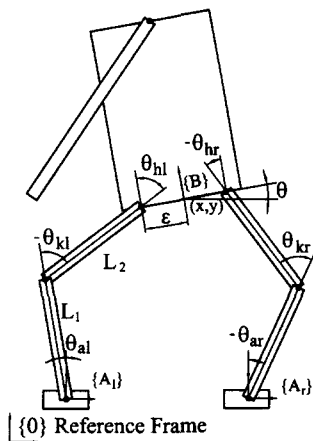


그림 1. 평면 8링크 2족 곡예 로봇 모델.
Fig. 1. Planar 8-link bipedal acrobat robot model.

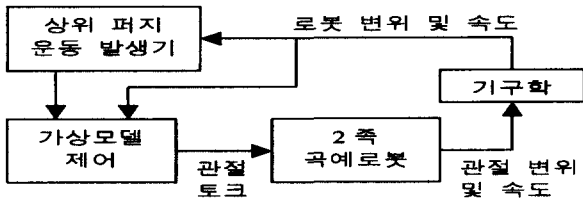


그림 2. 제어계 구조도.
Fig. 2. Control system architecture.

부분의 조인트에는 토크가 작용하지 않으며 자유로이 회전할 수 있는 가늘고 긴 진자가 연결되어 있다. 모든 관절은 회전하는 편 조인트이고 그 회전축은 운동평면에 대해서 수직이다. 그림 1에 두 다리 및 몸통의 좌표들과, 각 관절들 그리고 기호들이 표시되어 있으며 다음과 같은 조건을 수치 모의 실험시에 가정하였다:

- 1) 엉덩이, 무릎, 발목 관절에는 제어기가 지시한대로 정확한 토크가 발생된다.
- 2) 발은 바닥에서 미끄러지지거나 떨어지지 않는다.
- 3) 진자에 작용하는 공기 저항 및 핀조인트의 마찰은 무시한다.

연구의 목표는 곡예로봇이 몸통을 좌우로 흔들어 로봇의 머리부분에 핀조인트로 연결된 진자에 에너지를 공급하여 진폭을 점차 증가시키며 이와 동시에 곡예로봇의 관절 토크를 제어하여 몸통의 수직위치 및 피치각을 일정하게 유지하는 제어기를 설계하고 모의 실험하는 것이다. 몸통의 수직위치 및 피치각을 일정하게 유지하는 균형 및 자세제어에 가상모델 제어기를, 진자의 흔들기 운동을 발생하는 상위 제어기에 퍼지제어기를 채용한다(그림 2).

III. 자세 균형 유지 가상 모델 제어

가상 모델 제어기는 실제 액추에이터의 토크 혹은 힘을 산정하기 위해서 가상 기계-기구 요소를 사용한다. 산정된 토크는 가상 기계-기구 요소가 발생한 것과 같은 효과를 발생시켜 마치 로봇에 실제 기계-기구 요소가 연결되어 있는 것과 같은 착각을 일으키게 한다. 이러한 기계-기구 요소로는 간단한 스프링, 댐퍼, 질량 등이나 혹은 상상할 수 있는

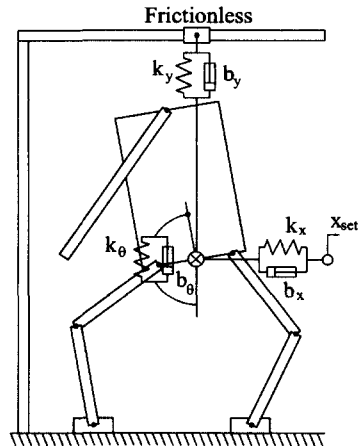


그림 3. 진자 흔들기 곡예 로봇에 사용된 가상 기구요소.
Fig. 3. Virtual components used for the broomstick swing acrobat robot.

모든 기계-기구 요소가 될 수 있다. 그림 3에 곡예 로봇과 사용된 가상 요소들이 그려져 있다. 몸통의 수직위치 제어용으로 일정한 높이에 고정되고 마찰이 없는 수평 슬라이드에 부착된 가상 스프링-댐퍼가 몸통에 연결되어 있고 이 가상 스프링-댐퍼는 몸통에 작용하는 가상힘 f_x 를, 수평위치 제어에는 로봇의 몸통과 셋포인트 x_{set} 사이에 연결된 가상 스프링-댐퍼가 사용되었고 이 가상 요소가 몸통에 작용하는 가상힘 f_x 를, 몸통의 피치각 제어용으로 회전 스프링-댐퍼가 몸통과 몸통에 고정된 좌표의 원점을 지나며 연직 방향인 가상의 기준 사이에 연결되어 토크 f_θ 를 발생시킨다. 수직 가상힘은 로봇의 수직위치를 일정한 높이에, 회전 토크는 몸통의 피치를 수직으로 유지시키며 수평 가상힘은 셋포인트 x_{set} 를 변경함으로써 몸통의 흔들기 운동을 발생시킨다.

가상 모델 제어의 주요한 매개변수는 수평 희망 위치인 x_{set} , 몸통의 희망 수직 위치인 y_d , 그리고 몸통의 희망 피치각 θ_d 이며 앞에서 설명한 선형 가상 요소를 가정하고 다음과 같은 가상 힘 혹은 토크를 계산한다:

$$f_x = k_x(x_{set} - x) + b_x(\dot{x}_{set} - \dot{x}) \quad (1)$$

$$f_y = k_y(y_d - y) + b_y(\dot{y}_d - \dot{y}) \quad (2)$$

$$f_\theta = k_\theta(\theta_d - \theta) + b_\theta(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) \quad (3)$$

여기서 x, y, θ 는 각각 몸통에 부착된 좌표 {B}의 원점의 수평좌표, 수직좌표 그리고 기준 좌표에 대한 각변위이며 x_{set}, y_d, θ_d 는 각각 좌표 {B}의 원점의 희망 수평좌표, 수직좌표, 그리고 기준 좌표에 대한 각변위인데 x_{set} 는 상위제어기가 좌우 흔들기 운동 발생에 사용할 제어변수이기도 하며 θ_d 는 곧바로 선 몸통에 해당하는 영의 값을 갖도록 한다. 또한 k_i, b_i 는 각각 좌표계 $i=x, y, \theta$ 에 대한 가상 기계-기구 요소들의 스프링상수 및 감쇠계수이다.

가상힘을 산출하기 위해서 기구학적 계산이 필요하며 좌표계 {A_i}과 {A_r}에서 좌표계 {B}의 원점까지의 좌표는

$${}^A_B \bar{X} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_1 \sin \theta_{al} - L_2 \sin(\theta_{al} + \theta_{kl}) \\ +\epsilon \cos(\theta_{al} + \theta_{kl} + \theta_{hl}) \\ L_1 \cos \theta_{al} + L_2 \cos(\theta_{al} + \theta_{kl}) \\ +\epsilon \sin(\theta_{al} + \theta_{kl} + \theta_{hl}) \\ \theta_{al} + \theta_{kl} + \theta_{hl} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$${}^A_B \bar{X} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_1 \sin \theta_{ar} - L_2 \sin(\theta_{ar} + \theta_{kr}) \\ -\epsilon \cos(\theta_{ar} + \theta_{kr} + \theta_{hr}) \\ L_1 \cos \theta_{ar} + L_2 \cos(\theta_{ar} + \theta_{kr}) \\ -\epsilon \sin(\theta_{ar} + \theta_{kr} + \theta_{hr}) \\ \theta_{ar} + \theta_{kr} + \theta_{hr} \end{bmatrix} \quad (5)$$

이며 그리고 관절의 각변위에 대해서 편미분을 행하면 다음과 같은 제코비언(Jacobian)을 얻는다[10].

$${}^A_B J = \begin{bmatrix} A & B & C \\ D & E & F \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^A_B J = \begin{bmatrix} P & Q & R \\ S & T & U \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서

$$\begin{aligned} A &= -L_1 \cos \theta_{al} - L_2 \cos(\theta_{al} + \theta_{kl}) \\ &\quad - \epsilon \sin(\theta_{al} + \theta_{kl} + \theta_{hl}) \\ B &= -L_2 \cos(\theta_{al} + \theta_{kl}) - \epsilon \sin(\theta_{al} + \theta_{kl} + \theta_{hl}) \\ C &= -\epsilon \sin(\theta_{al} + \theta_{kl} + \theta_{hl}) \\ D &= -L_1 \sin \theta_{al} - L_2 \sin(\theta_{al} + \theta_{kl}) \\ &\quad + \epsilon \cos(\theta_{al} + \theta_{kl} + \theta_{hl}) \\ E &= -L_2 \sin(\theta_{al} + \theta_{kl}) + \epsilon \cos(\theta_{al} + \theta_{kl} + \theta_{hl}) \\ F &= \epsilon \cos(\theta_{al} + \theta_{kl} + \theta_{hl}) \\ P &= -L_1 \cos \theta_{ar} - L_2 \cos(\theta_{ar} + \theta_{kr}) \\ &\quad + \epsilon \sin(\theta_{ar} + \theta_{kr} + \theta_{hr}) \\ Q &= -L_2 \cos(\theta_{ar} + \theta_{kr}) + \epsilon \sin(\theta_{ar} + \theta_{kr} + \theta_{hr}) \\ R &= \epsilon \sin(\theta_{ar} + \theta_{kr} + \theta_{hr}) \\ S &= -L_1 \sin \theta_{ar} - L_2 \sin(\theta_{ar} + \theta_{kr}) \\ &\quad - \epsilon \cos(\theta_{ar} + \theta_{kr} + \theta_{hr}) \\ T &= -L_2 \sin(\theta_{ar} + \theta_{kr}) - \epsilon \cos(\theta_{ar} + \theta_{kr} + \theta_{hr}) \\ U &= -\epsilon \cos(\theta_{ar} + \theta_{kr} + \theta_{hr}) \end{aligned} \quad (7)$$

이 제코비언을 이용하여 좌표계 {A_l}과 {A_r}에서 좌표계 {B} 사이의 가상힘과 관절토크의 관계를 다음과 같이 구할 수 있다[10]:

$$\begin{aligned} \bar{\tau}_l &= ({}^A_B J)^T \bar{F}_l \\ \bar{\tau}_r &= ({}^A_B J)^T \bar{F}_r \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \bar{\tau}_l &= \begin{bmatrix} \tau_{al} \\ \tau_{kl} \\ \tau_{hl} \end{bmatrix} & \bar{F}_l &= \begin{bmatrix} f_{xl} \\ f_{yl} \\ f_{\theta l} \end{bmatrix} \\ \bar{\tau}_r &= \begin{bmatrix} \tau_{ar} \\ \tau_{kr} \\ \tau_{hr} \end{bmatrix} & \bar{F}_r &= \begin{bmatrix} f_{xr} \\ f_{yr} \\ f_{\theta r} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

여기서 $\tau_{al} \tau_{kl} \tau_{hl}$ 은 왼쪽 다리의 발목, 무릎, 엉덩이 관절의

토크이며 $\tau_{ar} \tau_{kr} \tau_{hr}$ 은 오른쪽 다리의 발목, 무릎, 엉덩이 관절의 토크이다. 이제 두 다리 각각의 관계를 구했으니 두 식을 결합하여 다음의 식

$$\begin{bmatrix} \bar{\tau}_l \\ \bar{\tau}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ({}^A_B J)^T & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & ({}^A_B J)^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{F}_l \\ \bar{F}_r \end{bmatrix} \quad (9)$$

언으며 전개하면 다음과 같이 각 관절의 토크와 각 다리에 작용하는 가상힘과의 관계를 얻는다.

$$\begin{bmatrix} \tau_{al} \\ \tau_{kl} \\ \tau_{hl} \\ \tau_{ar} \\ \tau_{kr} \\ \tau_{hr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & D & 1 & 0 & 0 & 0 \\ B & E & 1 & 0 & 0 & 0 \\ C & F & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P & S & 1 \\ 0 & 0 & 0 & Q & T & 1 \\ 0 & 0 & 0 & R & U & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{xl} \\ f_{yl} \\ f_{\theta l} \\ f_{xr} \\ f_{yr} \\ f_{\theta r} \end{bmatrix} \quad (10)$$

식(10)은 각 다리의 가상 힘을 관절의 토크로 사상하지만 우리는 하나의 가상 힘을 지정하고 싶으며, 몇 개의 구속조건을 이용하여 각각의 가상 힘으로부터 결합된 힘을 얻고자 한다.

좌표 {B}는 왼쪽과 오른쪽 다리에 대해 일치하므로 결합된 힘은 각각의 다리에 작용하는 힘의 합과 같다는 적합조건으로부터 첫 번째 조건식

$$\text{구속조건 1: } \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{xl} \\ f_{yl} \\ f_{\theta l} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_{xr} \\ f_{yr} \\ f_{\theta r} \end{bmatrix} \quad (11-a)$$

을 얻을 수 있고, 왼쪽과 오른쪽 엉덩이 토크가 서로 같게 하여 동일한 토크를 분배한다는 구속조건을 선택하여 두 번째 조건식

$$\text{구속조건 2: } \tau_{hl} = \tau_{hr} \quad (11-b)$$

을 얻는다. 이 두개의 구속 조건을 결합하면 다음과 같은 벡터형의 구속 조건식이 된다:

$$\begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} = \mathbf{K} \begin{bmatrix} f_{xl} \\ f_{yl} \\ f_{\theta l} \\ f_{xr} \\ f_{yr} \\ f_{\theta r} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{K} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ C & F & 1 & -R & -U & -1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

이제 (12)의 4×6 행렬의 무어-펜로즈 의사역행렬(Moore-Penrose pseudo-inverse)

$$\mathbf{K}^+ = \mathbf{K}^T (\mathbf{K}\mathbf{K}^T)^{-1} \quad (13)$$

을 구한 후 영에 의해 곱해지는 마지막 열을 제거하고 (10)에 대입하여 가상 힘과 6개 관절에 작용하는 토크와의 관계를 얻는다. 세개의 가상 요소에 의해 발생한 힘은 (9), (10),

(12)에 의해 관절의 토크로 변환되며 유도된 제어 알고리즘은 복잡한 곡에 로봇의 동력학적 정보를 전혀 필요로 하지 않고 실시간에 로봇의 복잡한 역동력학적(inverse dynamics) 계산의 필요성을 사전에 배제하므로 제어기의 계산 부담이 줄어들게 되며 이로 인해서 실시간 제어가 가능해진다.

IV. 퍼지 제어를 이용한 상체 흔들기 운동

상위 제어기로서의 퍼지 제어기는 가상 모델 제어기의 매개변수 중 수평 가상 스프링-댐퍼의 변위인 x_{set} 을 제어 입력으로 하여 로봇 몸통의 좌우 흔들기 운동을 발생시키며 진자의 진폭을 증가시킨다. 제어 알고리즘은 실제로 막대를 들고 진폭을 증가시키려는 노력을 기울인 경험이 있는 설계자라면 찾아낼 수 있는 직관적인 것이며 진자의 제어 알고리즘을 서술하면 다음과 같다. 초기 상태에는 몸통이 중심에 위치해있고 진자는 연직방향에 있으며 초기에 좌우측 임의의 방향으로 운동을 시작하기 위하여 수평 가상 스프링-댐퍼의 변위를 좌측으로 변위시킨다. 그러면 몸통은 좌측으로 가속을 시작하는 반면 진자는 몸통의 가속방향의 반대방향인 우측으로 각변위를 더해간다. 하지만 어느 정도 시간이 흐르면 진자의 진폭이 어느 이상 커지지 않게 되며, 각속도가 더 이상 증가하지 않고 사점을 지나 감소하기 시작한다. 이 시점에 이르면 이번에는 수평 가상 스프링-댐퍼의 변위를 우측으로 변위시켜 몸통을 우측으로 가속한다. 시간이 흐르고 진자가 반대방향으로의 진폭 증가가 더 이상 없으면 다시 몸통을 좌측으로 가속한다. 이런 운동이 반복되어 결국 진자는 서서히 에너지를 공급받아 진폭을 한층 더 키운다.

다. 하지만 로봇의 안정성을 유지하기 위해서 수평변위를 무한정 크게 할 수 없으므로 가상 스프링-댐퍼의 변위를 정해진 최대값으로 제한한다. 이 규칙을 다음과 같이 요약할 수 있다:

규칙 1: if ϕ is Pos and ω is Inc then Δu is Zero

규칙 2: if ϕ is Neg and ω is Dec then Δu is Zero

규칙 3: if ϕ is Pos and ω is Dec then Δu is NegBig

규칙 4: if ϕ is Neg and ω is Inc then Δu is PosBig

규칙 5: if v_x is Pos and ϕ is Pos and ω is Inc then Δu is NegSmall

규칙 6: if v_x is Neg and ϕ is Neg and ω is Dec then Δu is PosSmall

여기서 ϕ 는 진자의 평형위치로부터 측정된 진자 각변위, ω 는 진자의 각속도, v_x 는 몸통에 부착된 좌표 원점의 수평방향 속도이며 이 세가지는 퍼지제어 입력 변수이고 Δu 는 제어증분값이며 임의의 시점 k 에서의 퍼지 제어 출력값은 다음과 같은 방식에 따라 결정된다.

$$u(k) \leftarrow u(k-1) + \Delta u \tag{14}$$

퍼지 제어기에 사용된 퍼지 멤버쉽 함수는 그림 4에 도표로 나타나 있으며, 입력 변수 v_x 에 대해서 Neg와 Pos 두개, 입력 변수 ϕ 에 대해서 Neg와 Pos 두개, ω 는 Dec와 Inc 두개, 그리고 Δu 는 NegBig, NegSmall, Zero, PosSmall, PosBig 5개의 멤버쉽 함수를 각각 갖는다. 주의할 것은 각 변수와 관련된 함수의 이름이 같더라도 서로 정의가 다르다는 것이다.

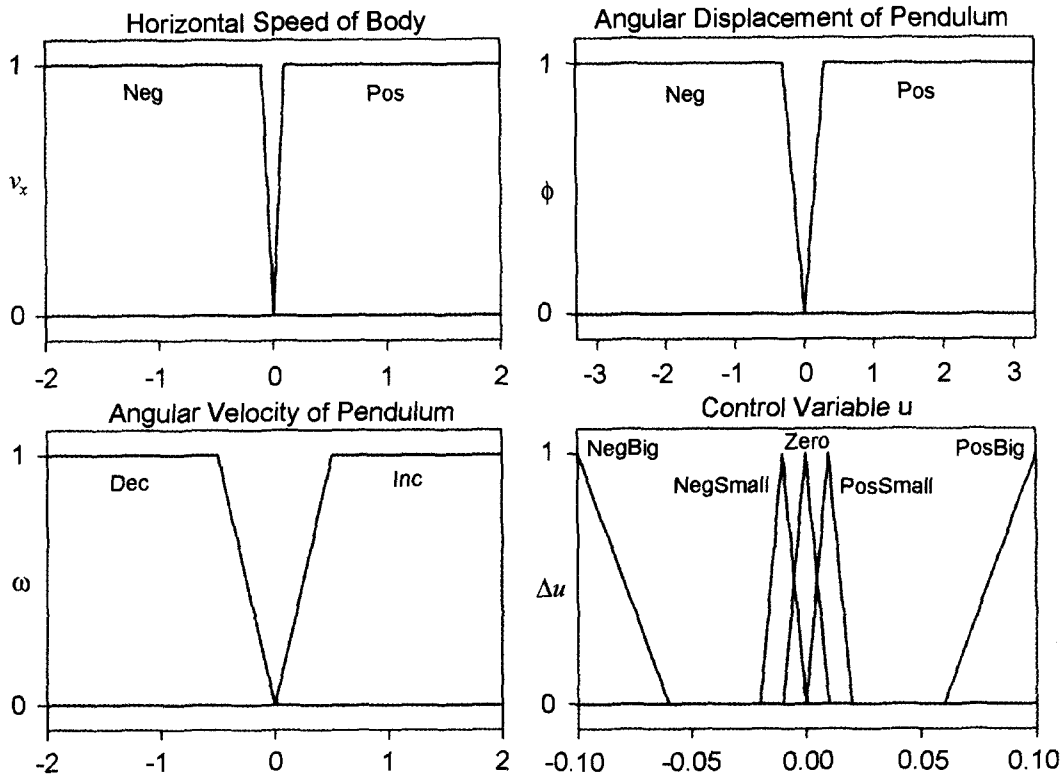


그림 4. 각 변수의 퍼지 멤버쉽 함수 정의.
Fig. 4. Definition of fuzzy membership functions for each variable.

V. 막대 흔들기 모의 실험 결과 및 토의

제어기의 성능을 알아보기 위해 모의 실험을 수행하였다. 로봇의 몸통은 폭이 0.44m, 높이가 0.8m, 질량이 3kg, 좌우측 다리는 가늘고 길이가 0.5m, 질량이 1kg인 두개의 링크로 연결되어 있으며 로봇이 관절을 펴고 직립하면 키가 1.8m가 된다. 6개의 관절 토크 액츄에이터가 엉덩이, 무릎 및 발목에 부착되었으며 가상 스프링-댐퍼의 수평변위의 최대값은 0.4m로 선정했다. 수평 가상 스프링-댐퍼의 탄성계수 및 감쇠계수는 각각 300N/m, 200N·s/m, 수직 가상 스프링-댐퍼의 탄성계수 및 감쇠계수는 각각 500N/m, 200N·s/m, 그리고 회전 가상 스프링-댐퍼의 탄성계수 및 감쇠계수는 각각 200N·m/rad, 200N·m·s/rad이다. 가상힘은 (1), (2), (3)에 의해 계산되며 (2)에 의해 계산된 수직 가상힘에 몸통의 중력을 상쇄시키기 위하여 몸통 중량과 동일한 힘을 반

대방향으로 더하였다.

동력학 시뮬레이션 상용 프로그램인 WorkingModel 2D 4.0을 곡예 로봇의 역학 및 애니메이션을 위해서 사용했고 가상모델 제어 및 퍼지 제어 알고리즘의 계산을 위해서 Matlab 4.2를 사용하였다. 두 프로그램과의 통신은 DDE를 통해서 이루어진다. 수치적분은 Kutta-Merson방법으로 매 초 700회 실행되었으며 실험의 결과로 퍼지 제어기에 의한 출력인 수평 가상 요소의 설치위치 값과 로봇의 응답 및 관절 토크의 그래프가 그림 5에 있으며 막대의 흔들기 애니메이션이 그림 6에 있다.

그림 5의 좌측상단의 가상스프링과 실제 몸통의 변위 그래프를 살펴보면 실제 몸통의 변위가 가상 스프링-댐퍼의 설정위치 제어값보다 진폭이 작으며 위상차가 있음을 알 수 있다. 이는 1자유도 질량-스프링-댐퍼의 진동 문제에서 가

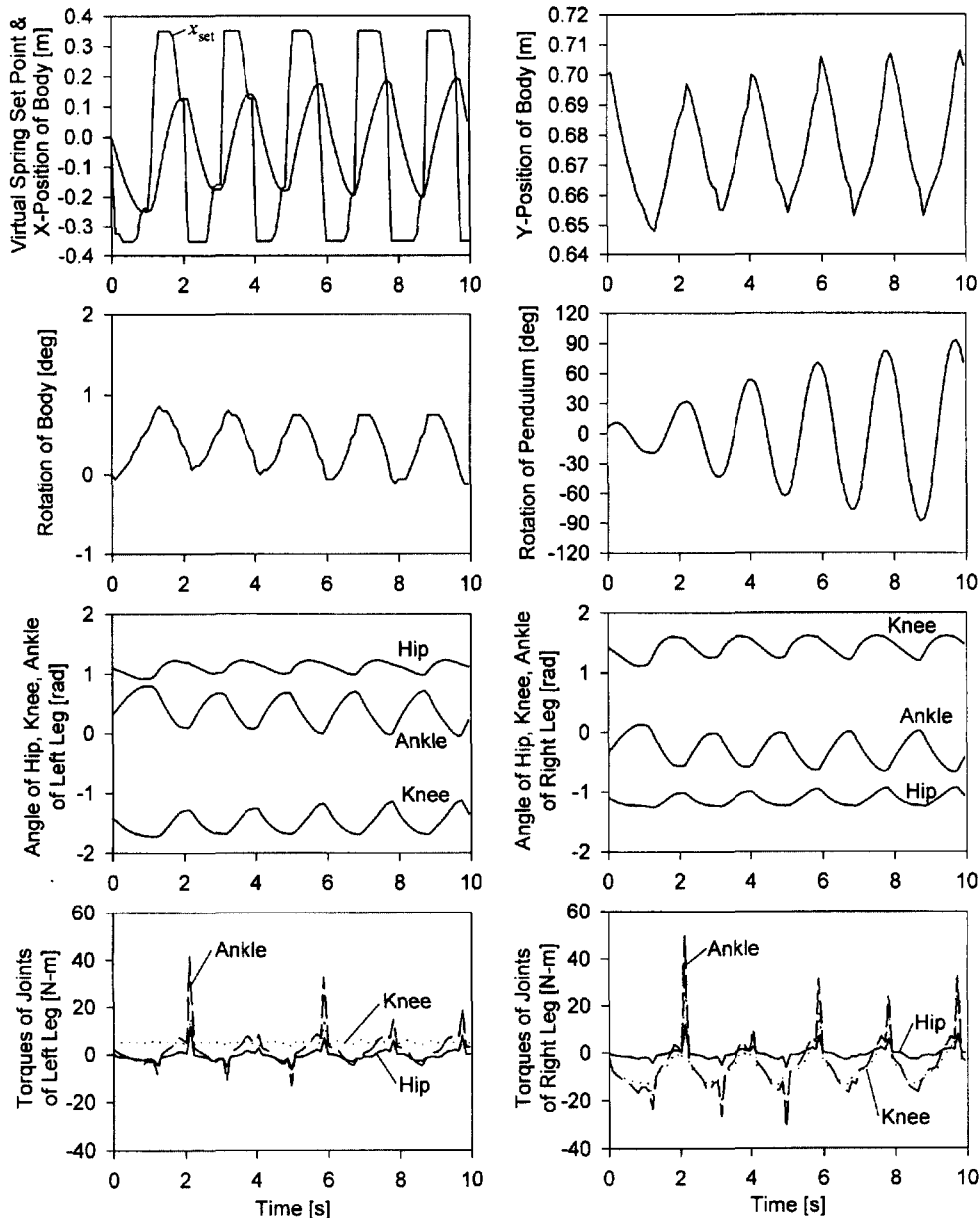


그림 5. 곡예로봇의 응답 시간 그래프.
Fig. 5. Time history of the response of the acrobat robot.

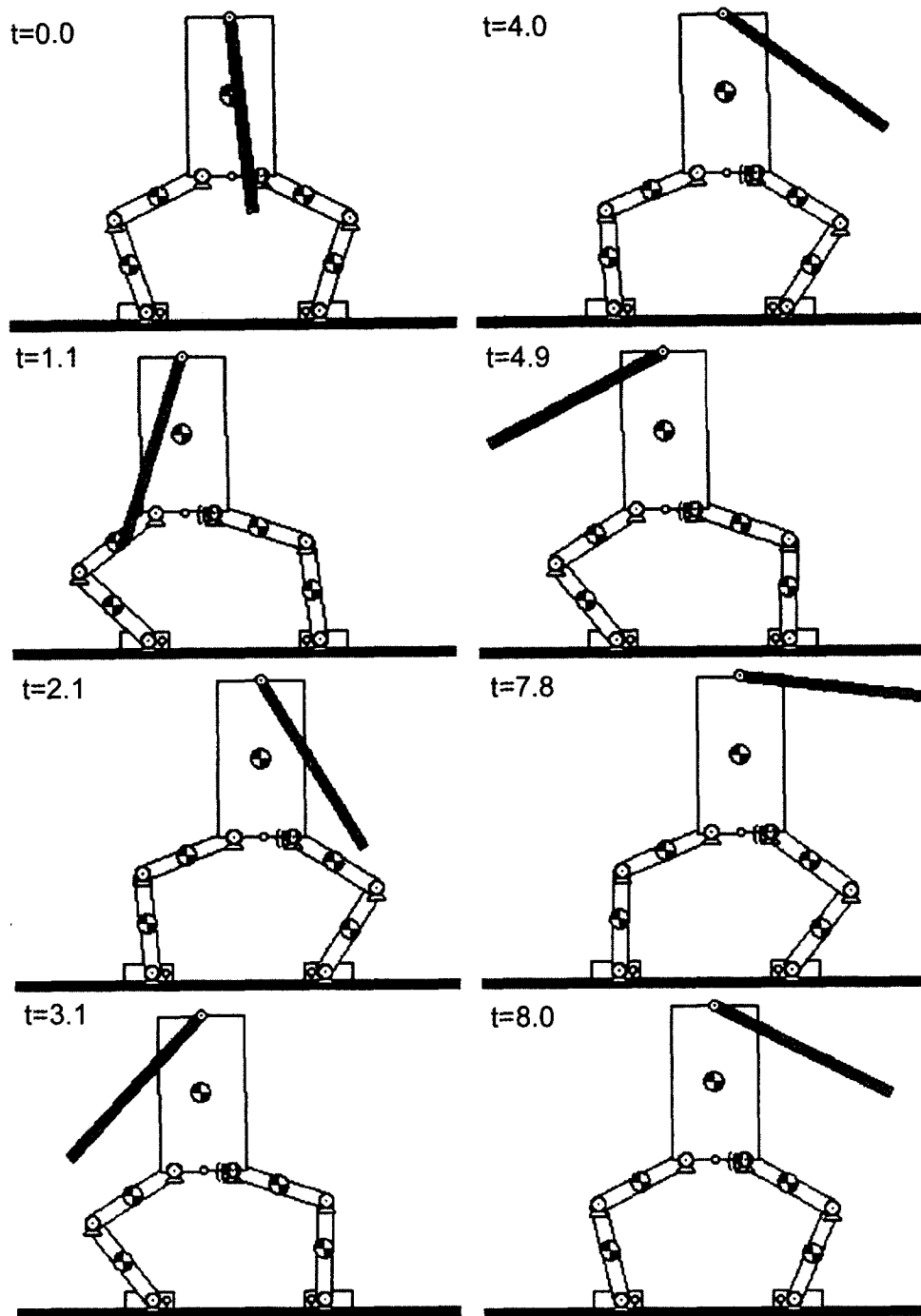


그림 6. 막대의 진폭을 증가시키는 곡예 로봇.
 Fig. 6. Frame views of the acrobat robot swinging the pendulum up.

진력과 응답과의 위상차가 있음을 상기하면 쉽게 이해될 수 있다. 우측 상단에는 몸통의 수직좌표의 변동 그래프가 있지만 수직 방향으로서는 아무런 제어가 없음에도 불구하고 약간의 편차가 발견되는데 본 연구에서 수직 방향의 약간의 운동은 제어의 목표와 상관이 없으며 진자 흔들기 운동에 지장이 없으므로 무시한다. 몸통의 피치각의 변동은 매우 안정적이어서 약 1도 이내의 변동에 그치고 있으며 또한 진자의 진폭이 점차 증가함을 알 수 있다.

또한 관절 토크 그래프 중 무릎 관절 토크를 살펴보면 몸

통이 그 운동 방향을 전환하는 시점에서 비교적 큰 토크가 필요한데 이는 낮은 안장 자세를 취하고 몸통을 좌우로 신속히 흔들기 실험을 해보면 즉시 느낄 수 있는 현상이다. 즉, 운동 방향이 바뀔 때 몸통의 운동량에 큰 변화를 주기 위해 무릎에 큰 토크가 걸리는걸 느낄 수 있으며 이는 로봇의 구조적인 특성이라 생각된다. 하지만 제어기의 실용성 측면에서 무릎 관절 토크의 최대치를 줄이는 것이 고려되어야 한다면 여러 가지 방법이 있겠지만 다음과 같은 세가지 방안을 제안할 수 있다. 첫째, 가상힘을 발생시키기 위해 가상 스

프링-댐퍼를 몸통에 부착시켰는데 이 가상 스프링-댐퍼의 강성과 감쇠계수를 낮추는 방안을 들 수 있다. 이렇게 하면 가상힘의 절대치가 줄어들 것이며 따라서 요구 토크의 최대값도 줄어들겠지만 민첩한 로봇의 운동과 타협해야 한다. 둘째, 퍼지 제어규칙을 약간 수정하여 제어 값의 변화가 필요할 때 그 변화의 폭을 작게 하는 방안인데 이렇게 하려면 멤버십 함수의 값을 조정하면 된다. 하지만 역시 로봇의 민첩함은 줄어들고 진자 흔들기 효율이 떨어져 흔들기 폭을 증가시키려면 많은 시간이 걸릴 것이다. 셋째, 로봇의 몸통의 높이를 높이기 위해 낮은 안장 자세에서 높은 안장 자세로 바꾸는 방안을 생각할 수 있다. 극단적으로는 무릎을 최대한 편 자세를 취하면 특이 상태가 되어 무릎 관절에는 토크가 전혀 걸리지 않게 된다. 이렇게 하려면 몸통에 수직방향으로 부착된 가상 스프링-댐퍼의 수직 위치를 더 높게 조정하면 된다.

또한 우측 다리에 더 큰 부하가 걸리는 것을 발견할 수 있는데 그 이유는 다음과 같다. 초기에 정지해 있는 진자를 흔들려면 일단 로봇의 몸통을 좌측이나 우측 한 방향으로 이동시켜야 하는데 본 논문에서는 우측을 택했고, 그래서 몸통의 운동이 우측으로 약간 더 편향되어 있으며 이로 인해 몸통의 운동 방향 변화가 필요할 때 우측 다리에 더 큰 부하가 걸리게 된다. 만약 처음에 좌측으로 운동을 시작했다면 좌측 다리에 더 큰 부하가 걸릴 것으로 예상할 수 있다.

그림 6은 운동 시작 시점에서 막대가 사점에 도달했을 시점에서의 로봇의 자세 및 막대의 위치를 그려본 것이다. $t=0$ 일 때 진자가 평형위치에서 미소량 변위되어 시작된다. 퍼지제어기가 제어 값을 발생시켜 몸통이 좌측으로 큰 가속을 갖고 움직이기 시작하면 막대는 반대방향으로 움직임을 시작하다가 어느 정도 시간이 흐르면 더이상 각변위가 증가하지 않고 퍼지 제어기는 이 움직임을 감지하고 다시 몸통의 움직임을 오른쪽으로 가속하기 시작한다. 이런 반복된 운동으로 진자는 에너지를 전달받고 그 진폭을 점차 증가시켜간다. 이 그림에서 알 수 있듯이 진자의 진동 주기는 약 2초 정도이며 매 주기마다 진폭이 증가됨을 알 수 있다. $t=7.8$ 초에서 진폭은 약 90도에 도달한다.

VI. 결론

본 논문에서는 곡예로봇의 자세 제어에 가상모델 제어기를, 진자 흔들기 운동 발생에 상위 제어기인 퍼지 제어기를 사용하였다. 하위 제어기인 가상모델 제어기알고리즘은 로봇의 기구학 및 구속조건을 사용하여 가상 기구 요소에 작용하는 힘을 관절에 작용하는 토크 혹은 힘으로 사상하는 계산 식을 얻게 하였으며 매우 직관적인 방법으로 로봇 제어기를 설계할 수 있게 하였다. 또한 제어값 계산을 행함에 있어서 해석학적으로 미리 얻은 식을 이용하여 구하므로 실시간에 로봇의 역동역학 계산을 할 필요가 없게 된다. 상위 제어기인 퍼지 제어기는 하위제어기의 파라미터를 제어 입력으로 하여 로봇의 몸통 흔들기 제어를 이루며 역시 직관적인 방법으로 설계되었다. 두 제어기 모두 직관적이며 동력학적 모델을 필요로 하지 않았으며 모의실험을 통해서 설계된 제어기가 매우 효과적임을 보였다.

참고문헌

- [1] Jerry E. Pratt, *Virtual Model Control of a Biped Walking Robot*, Master's Thesis, Department of Electrical Engineering and Computer Science, M.I.T., Aug., 1995.
- [2] M. H. Raibert and J. J. Craig, "Hybrid position/force control of manipulators," *Journal of Dynamics Systems, Measurement and Control*, vol. 102, 1981.
- [3] K. Salisbury, "Active stiffness control of a manipulator in cartesian coordinates," *19th IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 83-88, Dec., 1980.
- [4] N. Hogan, "Impedance control: An approach to manipulation: Part I - theory, Part II - implementation, Part III - applications," *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, vol. 107, pp. 1-24, 1985.
- [5] O. Khatib, "A unified approach for motion and force control of robot manipulators: the operational space formulation," *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol. 3, no.1, pp. 43-53, 1987.
- [6] C. Sunada, D. Argaez, S. Dubowsky, and C. Mavroidis, "A coordinated jacobian transpose control for mobile multi-limbed robotic systems," *IEEE Journal of Robotics and Automation*, pp. 1910-1994, 1994.
- [7] Chee-Meng Chew, Jerry Pratt, and Gill Pratt, "Blind Walking of a Planar Biped Robot on Sloped Terrain," *Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, Detroit, Michigan, pp. 381-386, May, 1999.
- [8] Jianjue Hu, Jerry Pratt and Gill Pratt, "Stable Adaptive Control of a Bipedal Walking Robot with CMAC Neural Networks," *Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, Detroit, Michigan, pp. 1050-1056, May, 1999.
- [9] Jianjue Hu and Gill Pratt, "Self-organizing CMAC Neural Networks and Adaptive Dynamic Control," *International Symposium on Intelligent Control/Intelligent Systems and Semiotics*, Cambridge, MA, pp. 259-265, September 15-17, 1999.
- [10] John J. Craig, *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*, Addison-Wesley, 1989.
- [11] Editors Jamshidi, M., Vadiie, N., and Ross, T. J., *Fuzzy Logic Control*, PTR Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1993.

기호 일람

위치와 관련된 첨자

f_x, f_y, f_θ = 가상 요소가 발생하는 힘의

수평, 수직, 회전성분

x_{set} = 몸통에 부착된 가상 스프링-댐퍼의

set point

x, y, θ = 몸통에 부착된 virtual model action frame

$x_d, y_d, \theta_d = x, y, \theta$ 의 희망 좌표

k_i = 좌표계 $i = x, y, \theta$ 에 대한 가상

스프링-댐퍼의 스프링상수

b_i = 좌표계 $i = x, y, \theta$ 에 대한

가상 스프링-댐퍼의 감쇠계수

$\{B\}$ = virtual model action frame
 $\{A_1\}, \{A_r\}$ = virtual model reaction frame
 $\{O\}$ = virtual model reference frame
 ${}^A_B \vec{X}$ = forward kinematic map from
frame $\{A\}$ to $\{B\}$
 ${}^A_B J$ = Jacobian matrix from frame $\{A\}$ to $\{B\}$
 $\vec{\tau}$ = 관절 토크 벡터
 \vec{F} = 가상 힘 벡터



이 병 수

1957년 4월 7일생. 1980년 한양대학교 정밀기계공학과 졸업. 1987년 Washington State University 석사. 1991년 동 대학원에서 박사. 1991년~현재 계명대학교 기계자동차공학부 부교수. 관심분야는 최적제어, 케이오스, 비선형 동역학, 비선형 제어, 인공 지능 제어.