

소형 휴머노이드 로봇의 그네 운동

Swing Motion of Miniaturized Humanoid Robot

박성훈*, 이수영, 정길도, 성영휘

(Seong-Hoon Park, Soo-Yeong Yi, Kil-To Chong, and Young-Whee Sung)

Abstract : In this paper, we present analysis on the dynamics of human swing and its realization by a miniaturized humanoid robot. Since the motion of legs is the most important in the swing, the swing system can be approximated as a double pendulum. Based on Lagrangian analysis, the leg motion is designed to make the swing motion as sustained oscillation. In order to detect the peak instant of the swing and to synchronize the leg motion with the swing, we use ADXL acceleration/inclination sensor. The miniaturized humanoid in this paper has total 20 DOFs including 6 DOFs in each leg, 34cm in height, and 2kg in weight. As a result of realization of the swing by the humanoid, the sustained oscillation is verified through experiments.

Keywords : swing motion, lagrangian analysis, ADXL acceleration/inclination sensor, miniaturized humanoid

I. 서론

근래의 로봇 기술 개발 분야는 단순 반복 작업을 단독적으로 수행하던 기존의 산업용 로봇에서 벗어나 개방적이고 인간 친화적이며 지능을 통해 스스로 상황을 판단하므로써 다양한 작업을 수행할 수 있는 새로운 지능형 로봇으로 발전하고 있다. 로봇에 지능을 부여하기 위해서는 주변 환경을 인식하거나 사건의 발생을 감지하기 위한 센서 사용이 필수적이며, 또한 유연하고 다양한 작업을 수행하는 데에는 팔이나 다리가 여러 개의 관절로 이루어지는 다관절형일 필요가 있다. 일반적으로 다관절형 휴머노이드 로봇이 산업용 로봇이나 바퀴구동형 이동 로봇에 비해 갖는 큰 장점 중의 하나는 사람/동물과 같이 다양한 동작을 할 수 있다는 것이다. 4족 로봇의 경우 개나 고양이와 같은 4족 동물이 천천히 움직일 때의 보행 동작을 묘사한 정적 물결 걸음새(wave gait)[1]를 구현할 수 있으며, 말이 빨리 뛸 때의 동작과 같은 동적 트롯 걸음새(trot gait)[2]와 갈롭 걸음새(gallop gait)에 대한 연구도 진행되고 있다. 또한 6족 로봇의 경우 개와 같이 천천히 걷는 것과 같은 crawl 걸음새를 구현할 수도 있다. 직렬로 연결된 관절 형태를 갖는 뱀 로봇은 부드러운 몸체 요동 운동을 통하여 전진하거나 장애물을 회피할 수 있다[3].

사람이나 동물의 운동을 로봇에 구현하려고 하는 것은 사람의 지능과정을 이해하므로써 기계지능을 실현하고자 하는 인공지능 공학과 같이 사람의 운동 특성을 이해하므로써 사람을 닮은 기계를 개발하고자 하는 로봇 공학 연구의 한 과정이라 할 수 있다. 이러한 이유로 지능형 로봇은 인공지능 연구나 인간 운동 특성 분석 연구의 테스트 베드로 개발되기도 한다. 일본의 JST에서는 사람의 운동 특성

연구를 위해 "morph"라고 하는 소형 휴머노이드 로봇을 개발한 바 있다[4]. 동경대에서도 유사한 목적으로 원격 두뇌형(Remote brain) 소형 휴머노이드를 개발하였으며, 이를 대상으로 그네 타는 운동과 두팔을 이용하여 물건을 잡는 작업 등 여러 가지 운동을 검증, 구현하기도 하였다[5,6,7]. 또한 동물의 학습 과정과 유사하게, Sony사의 보행 로봇을 대상으로 진화연산을 통해 보행 운동을 점진적으로 개선해 나가는 연구가 수행된 바도 있다[8]. 국내에서는 한국과학기술연구원에서 사람의 역기, 아령 운동을 동력학적으로 해석하고, 에너지를 최소화하는 움직임 생성하였으며, 이를 휴머노이드 로봇을 대상으로 구현한 바 있다[9]. 또한 총 18 자유도의 소형 휴머노이드를 개발하고, 이를 대상으로 계단 보행 알고리즘을 구현한 바도 있다[10,11]

본 논문에서는 사람 운동 특성 해석의 한 과정으로서 그네 타는 모습을 동력학적으로 분석하고, 이를 자체 개발한 새로운 소형 2족 휴머노이드를 대상으로 구현하였다. 특히 Lyapunov 함수를 통해 그네 운동의 에너지를 분석하였으며, 그네 진동을 지속할 수 있는 로봇의 운동을 생성하고, ADXL 가속도/기울기 센서를 이용하여 이를 구현하였다. 자체 개발한 소형 휴머노이드는 각 다리에 6 자유도, 각 팔에 3 자유도, 목에 2 자유도로 총 20 자유도와 무게 2kg, 키 34cm의 사양을 가지며, 다양한 보행 알고리즘과 인공지능 연구의 테스트 베드로서 제작된 것이다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2절에서 사람의 그네 운동을 동역학적으로 해석하고, 3절에서 본 휴머노이드 시스템에 대한 소개와 이에 대한 그네 운동 구현 실험 결과를 제시한 후, 4절에서 결론을 맺는다.

II. 그네 운동의 동역학 해석

진자 운동과 같은 형태의 그네 운동에 있어 힌지의 마찰력을 극복하고 진폭을 유지하는 것은 그네를 타고 있는 사람으로부터 다음과 같은 세 종류의 힘이 작용하고 있기 때문이라고 볼 수 있다[12].

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2003. 6. 9., 채택확정 : 2003. 11. 12.

박성훈 : 전북대학교 제어계측공학과(mate76@mail.chonbuk.ac.kr)

이수영, 정길도 : 전북대학교 전자정보공학부

(sulee@moak.chonbuk.ac.kr/kitchong@chonbuk.ac.kr)

성영휘 : 금오공과대학교 전자공학과(ywsung@knut.kumoh.ac.kr)

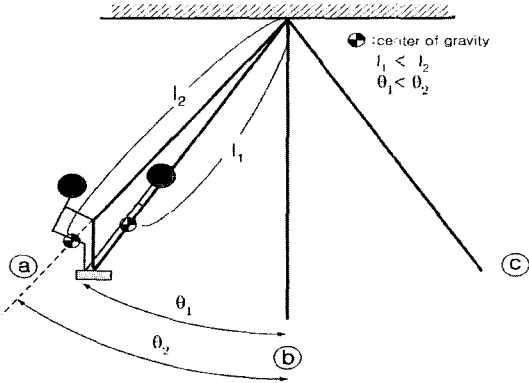


그림 1. 그네 운동.
Fig. 1. Swing motion.

(1) 그네에서 앉았다가 일어서는 운동을 반복하면서 그네의 무게 중심을 이동시키며, 등가적으로 줄 길이를 변화시킨다. 줄 길이가 길어지면 진자의 최대 속도가 증가하므로 운동에너지가 증가하게 되고, 이는 에너지 보존 원리에 의해서 위치에너지로 바뀌게 된다. 위치 에너지의 증가는 그네 높이가 높아짐을 의미한다. 그림 1에서 l_1 은 계속 서서 그네를 타는 경우 무게 중심까지의 줄 길이를 나타내며, l_2 는 앉았을 때의 등가적인 줄 길이를 나타낸다.

(2) 뒤쪽 정점 부근에서 몸을 뒤로 젖히므로써 진자의 복원력을 증가시킨다. 단순 진자의 경우, 정점에서 그네의 복원력은 $mg \sin \theta_1$ 이다. 반면에 그림 1처럼 몸을 뒤로 젖히는 경우 무게 중심이 단순 진자의 경우 보다 뒤쪽에 위치하게 되고, 이때 진자의 복원력은 $mg \sin \theta_2 > mg \sin \theta_1$ 가 된다. 이러한 작용은 앞쪽 정점 부근에서 몸을 앞으로 내미는 경우에도 해당된다.

(3) 양쪽 정점에서 사람이 팔로 그네 줄을 잡아당기거나 미는 힘이 다리를 통해 그네 발판에 복원력을 높이는 방향으로 작용한다.

사람이 앉아서 그네를 타는 경우는 앞의 두 작용과 더불어 다리의 운동으로 추진력을 얻게 된다. Inaba등은 로봇 그네 운동을 단진자로 모델링하고 다리 운동에 의한 영향을 등가적으로 진자 무게 중심까지의 길이를 변경시키는 과정으로 근사화하였다[5,13]. 본 논문에서는 보다 구체적으로 로봇 그네 운동을 그네 위의 몸체와 아래의 다리로 이루어진 2중 진자로 모델링하고, 전체 계의 에너지를 증가시키기 위한 다리의 움직임을 해석적인 방법을 통해 생성하고자 한다.

1. 그네 시스템 동력학 모델

위의 그림 2 (b)와 같은 이중 진자 시스템에서 각 점 질량 m_1, m_2 의 운동 에너지, K 및 위치 에너지, P 를 포함하는 Lagrangian은 다음과 같이 쓸 수 있다:

$$L = K(\theta, \dot{\theta}) - P(\theta) \tag{1}$$

$$= \frac{1}{2} \dot{\theta}^T M(\theta) \dot{\theta} - P(\theta)$$

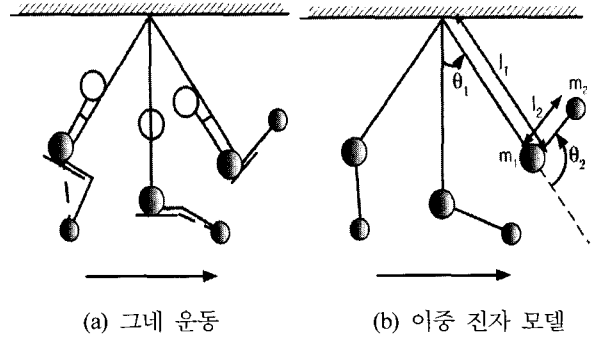


그림 2. 그네 운동 동력학 모델.
Fig. 2. Dynamic model of swing motion.

여기서 $\theta = [\theta_1, \theta_2]^t$ 이고, 관성 행렬, $M(\theta)$ 과 위치 에너지, $P(\theta)$ 는 다음과 같다:

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix},$$

$$m_{11} = (m_1 + m_2)l_1^2 + m_2l_2^2 + 2m_2l_1l_2 \cos \theta_2$$

$$m_{12} = m_2l_2^2 + m_2l_1l_2 \cos \theta_2$$

$$m_{21} = m_{12}$$

$$m_{22} = m_2l_2^2$$

$$P(\theta) = m_1g y_1 + m_2g y_2$$

$$= -(m_1 + m_2)l_1 \cos \theta_1 - l_2 m_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \tag{2}$$

위 시스템의 Lagrange-Euler방정식은 (3)으로 주어진다.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = M(\theta) \ddot{\theta} + \dot{M}(\theta) \dot{\theta}$$

$$= -\frac{1}{2} \frac{\partial (\dot{\theta}^T M(\theta) \dot{\theta})}{\partial \theta} + \frac{\partial P}{\partial \theta} \tag{3}$$

$$= M(\theta) \ddot{\theta} + V_m(\theta, \dot{\theta}) \dot{\theta} + \frac{\partial P}{\partial \theta}$$

$$= \tau$$

여기서 $\tau = [\tau_1, \tau_2]^t$ 는 그림 2 (b)의 이중 진자 모델에서 그네 줄 힌지 관절과 로봇 다리 관절에 가해지는 토크 입력 벡터이며, 코리올리(Coriolis)/원심력 벡터는 다음과 같이 쓸 수 있다[14].

$$V_m(\theta, \dot{\theta}) \dot{\theta} = \dot{M}(\theta) \dot{\theta} - \frac{1}{2} \frac{\partial (\dot{\theta}^T M(\theta) \dot{\theta})}{\partial \theta} \tag{4}$$

2. 시스템 에너지 해석

위 시스템에 관련된 총 에너지는 다음과 같다:

$$E = K + P \tag{5}$$

동력학식 (3)을 따르는 총 에너지의 시간 변화는 다음과 같이 구할 수 있다:

$$\begin{aligned}
 \frac{dE}{dt} &= \frac{dK}{dt} + \frac{dP}{dt} \\
 &= \frac{d\dot{\theta}^T}{dt} \frac{\partial K}{\partial \dot{\theta}} + \frac{d\theta^T}{dt} \frac{\partial K}{\partial \theta} + \frac{d\theta^T}{dt} \frac{\partial P}{\partial \theta} \\
 &= \dot{\theta}^T \mathbf{M}(\theta) \ddot{\theta} + \frac{1}{2} \dot{\theta}^T \frac{\partial}{\partial \theta} (\dot{\theta}^T \mathbf{M}(\theta) \dot{\theta}) + \dot{\theta}^T \frac{\partial P}{\partial \theta} \\
 &= \dot{\theta}^T \left\{ -\mathbf{V}_m(\theta, \dot{\theta}) \dot{\theta} - \frac{\partial P}{\partial \theta} + \tau \right\} \\
 &\quad + \frac{1}{2} \dot{\theta}^T \frac{\partial}{\partial \theta} (\dot{\theta}^T \mathbf{M}(\theta) \dot{\theta}) + \dot{\theta}^T \frac{\partial P}{\partial \theta} \quad (6) \\
 &= \dot{\theta}^T \{ \dot{\mathbf{M}}(\theta) - 2\mathbf{V}_m(\theta, \dot{\theta}) \} \dot{\theta} + \dot{\theta}^T \tau
 \end{aligned}$$

(6)에서 행렬, $\dot{\mathbf{M}}(\theta) - 2\mathbf{V}_m(\theta, \dot{\theta})$ 는 반대칭(skew-symmetric) 성질이 있으므로 (6)은 결국 다음과 같이 된다[11]:

$$\frac{dE}{dt} = \dot{\theta}^T \tau \quad (7)$$

(1) 첫 번째 관절에 마찰력만 있는 경우:

다리 운동은 하지 않고 첫 번째 힌지 관절에 마찰력만 작용하는 경우, 토크 입력은 다음과 같이 쓸 수 있다:

$$\tau = -\mathbf{C}\dot{\theta}, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서 힌지 관절의 마찰계수, c_1 은 양수이다. (8)을 (7)에 대입하면 다음의 결과를 얻을 수 있다:

$$\begin{aligned}
 \frac{dE}{dt} &= -\dot{\theta}^T \mathbf{C} \dot{\theta} \\
 &= -c_1 \dot{\theta}_1^2 \\
 &< 0
 \end{aligned} \quad (9)$$

이는 시스템의 에너지가 항상 감소함을 의미하며, 따라서 이중 진자의 진폭은 줄어들고 결국 움직임이 없는 평형 상태에 도달하게 된다.

(2) 다리 관절을 이용하여 운동하는 경우:

각 관절에서의 마찰력에 의한 에너지 감소를 극복하고 그네 운동을 지속하기 위해서는 다리 운동에 의한 토크 입력이 (7)을 양수로 만들 수 있어야 한다. 이를 위한 한가지 방법은 다음과 같다:

$$\begin{aligned}
 \tau &= -\mathbf{C}\dot{\theta} + \tau_i, \quad (10) \\
 \tau_i &= \begin{bmatrix} 0 \\ \alpha \frac{\dot{\theta}_1}{|\dot{\theta}_1|} \end{bmatrix}, \quad \alpha > 0
 \end{aligned}$$

(10)의 첫 번째 항은 마찰력에 의한 자연 감쇄력이며, 두 번째 항은 다리 관절 운동에 의한 토크 입력이다. 여기서 다리 관절 운동은 그림 2 (a)에서 보이는 바와 같이 사람이 그네를 타는 것처럼 화살표 방향으로 전진하는 상태에서는 다리를 앞으로 차고, 뒤로 향하는 경우는 다리를 뒤로 젖히는 것이다. (10)을 (7)에 대입하면 다음을 얻을 수 있다:

$$\frac{dE}{dt} = -c_1 \dot{\theta}_1^2 + \alpha |\dot{\theta}_1| \quad (11)$$

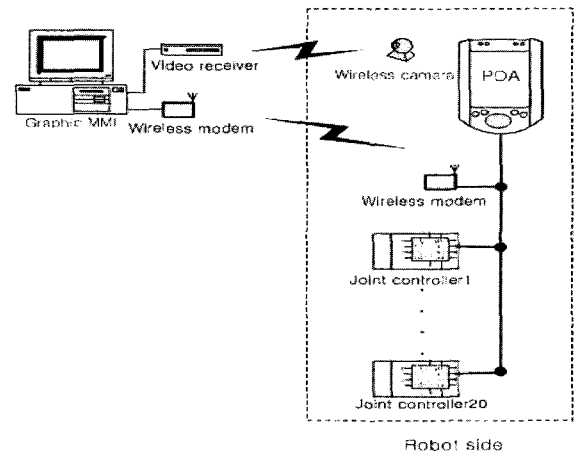


그림 3. 전체 휴머노이드 시스템 구성.

Fig. 3. Overall structure of humanoid system.

(11)은 $\alpha > c_1 \max\{|\dot{\theta}_1|\}$ 인 경우에 양수가 되며, 이는 다리 운동에 의한 토크의 크기가 일정 크기 이상인 경우 진자 운동의 진폭이 유지되거나 혹은 커질 수 있음을 의미한다.

III. 소형 휴머노이드에 대한 그네 운동 구현

1. 소형 휴머노이드 개발

본 논문에서 개발된 소형 휴머노이드 시스템은 로봇 기구와 탑재 주 제어기 및 관절 제어 시스템, 그리고 원격 그래픽 사용자 인터페이스 시스템으로 이루어져 있다. 또한 로봇의 머리 부분에 소형 무선 카메라를 장착하여 주변 환경 데이터를 획득할 수 있도록 하였으며, 획득한 영상 데이터를 무선 전송기를 통해 호스트 컴퓨터 시스템으로 전송하여 처리할 수 있도록 하였다. 전체 시스템 구성을 그림 3에 나타낸다.

본 로봇 시스템의 탑재형 주 제어기로는 국내 셀빅사의 CVOS 운영체제를 가지고 있는 Cellvic 1 PDA를 이용하였으며, 각 관절 제어를 위해서 Atmel 사의 AVR 마이크로프로세서를 이용하여 RS-485 직렬 네트워크 기반 관절 제어 시스템을 구성하였다. PDA 주 제어기로부터 네트워크 관절 제어 시스템으로 전달되는 각 관절 명령 데이터는 6 bit의 관절 고유번호와 10 bit 위치 데이터, 그리고 8 bit의 책심을 포함하여 3 바이트로 구성되며 직렬 통신 속도를 38400 bps로 설정하여 50Hz(20 ms)의 위치 데이터 전송 속도를 구현하였다.

개발된 로봇은 키가 34cm, 무게 2kg이며, 다리 당 6 자유도, 팔 당 3 자유도, 그리고 목 부분에 2 자유도로 총 20 자유도를 갖는다. 그림 4과 표 1에 본 휴머노이드 로봇의 각 관절에 설정한 관절 좌표계 및 기구학 변수들을 제시하였다. 몸체의 중심에 설정된 T_B 가 물체 기준 좌표계이고, T_{Ri} , T_{Li} $i=1,2,\dots,6$ 가 오른쪽, 왼쪽 각 다리의 관절에 설정된 좌표계다. 끝의 두 좌표계, T_{R6} 와 T_{L6} 는 발 끝에 설정된 좌표계로서 다리 역기구학의 기준이 되는 물체

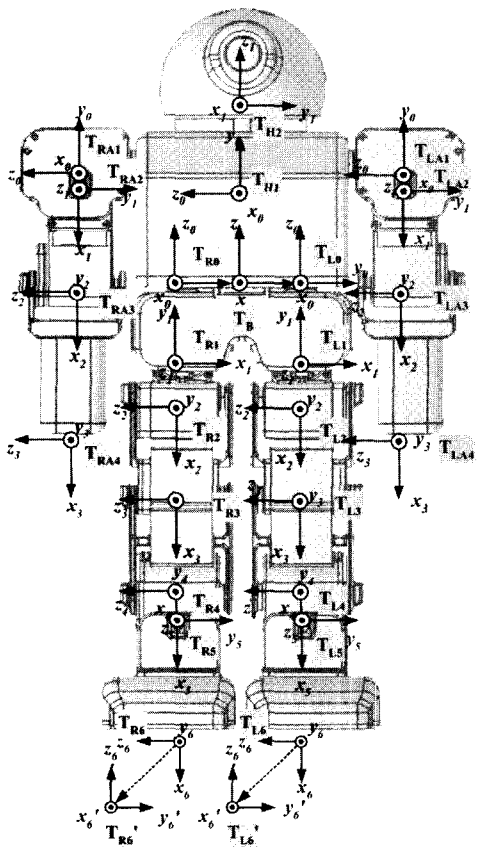


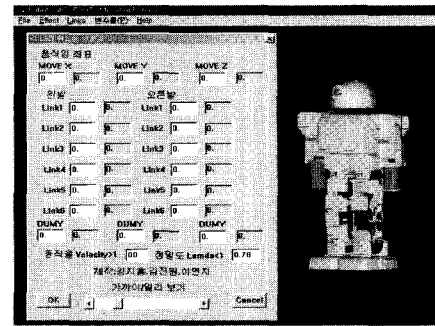
그림 4. 각 관절 좌표계.
Fig. 4. Coordinate frame of each joint.

표 1. 기구학 매개 변수들의 값.
Table 1. Kinematic parameter values.

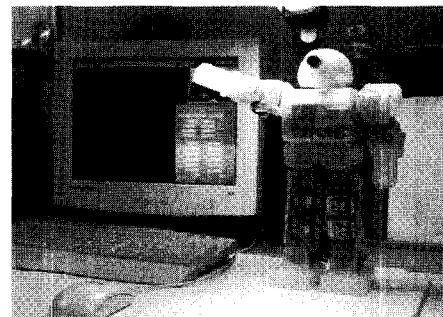
위 치	기호	길이(mm)
T_B 에서 T_{L0} 까지 y 방향	l_{L0}	21.1
T_{L0} 에서 T_{L1} 까지 $-z_0$ 방향	d_{L1}	48.4
T_{L1} 에서 T_{L2} 까지 $-y_1$ 방향	l_{L2}	14.2
T_{L2} 에서 T_{L3} 까지 x_2 방향	l_{L3}	48.6
T_{L3} 에서 T_{L4} 까지 x_3 방향	l_{L5}	46.2
T_{L4} 에서 T_{L5} 까지 x_4 방향	l_{L5}	14.3
T_{L5} 에서 T_{L6} 까지 x_5 방향	l_{L6}	47.3
T_{LA1} 에서 T_{LA2} 까지 z_0 방향	d_{LA}	8.0
T_{LA2} 에서 T_{LA3} 까지 x_1 방향	l_{LA2}	48.8
T_{LA3} 에서 T_{LA4} 까지 x_2 방향	l_{LA3}	69.0
T_{H1} 에서 T_{H2} 까지 y_0 방향	l_{H1}	60.5

기준 좌표계와 방향을 일치시키므로써 궤적 계획을 용이하게 하기 위한 것이다. 그리고 T_{RAi} , T_{LAi} , $i = 1, 2, 3$ 과 T_{Hi} , $i = 1, 2$ 는 각각 오른팔, 왼팔, 머리 부분에 설정된 좌표계들이다.

로봇의 동작 시뮬레이션과 사용자 인터페이스를 위해 OpenGL 그래픽 패키지를 이용하여 그래픽 사용자 인터페이



(a) 그래픽 사용자 인터페이스



(b) 전체 시스템

그림 5. 그래픽 사용자 인터페이스 및 전체 시스템.
Fig. 5. Graphic user interface and the overall system.

스 시스템을 제작하였다. 다음 그림 5는 그래픽 사용자 인터페이스 시스템과 전체 로봇 시스템을 보여준다.

2. 실험 결과

전술한 바와 같이 힌지에서의 마찰을 이기고 그네운동을 지속하기 위해서는 (10)과 같이 다리 관절 운동을 그네 운동과 동기가 맞도록 생성해야 한다. 이를 위해서는 그네 운동이 전, 후진 상태를 변경하는 시점, 즉 그네 운동의 정점을 감지해야 할 필요가 있다. Inaba등은 정점 감지를 위하여 로봇의 머리에 장착된 카메라 비전 센서를 이용하였다[5]. 그네 운동 중 얻어지는 카메라 영상에서 특징점들의 흐름 벡터를 감지하여 흐름 벡터가 변하는 시점을 그네 운동의 정점으로 인식하는 것이다. 본 논문에서는 정점 감지를 위하여 ADXL 가속도/경사각 센서를 이용하였다. ADXL 센서는 spring-suspension 형태의 구조물을 MEMS 기술을 이용하여 만든 것이며 2축의 가속도/경사각을 감지하여 아날로그, 또는 PWM 형태의 신호로 출력한다. 본 논문에서는 ADXL 센서의 출력을 처리하는 AVR 프로세서 보드를 제작하였으며, 이를 그림 3에서 보인 직렬 네트워크 제어 시스템에 하나의 노드로서 연결하였다. 주 제어기에서는 20ms 샘플링 속도로 센서 데이터를 폴링하여 다리 관절 모터를 구동하게 된다. 다음 그림 6은 진자 운동중 각 위치에 따른 ADXL 센서의 출력을 나타낸다.

그림 6에서 보듯이 x 축 신호를 기준으로 그네 운동의 전진 구간 ㉠→㉢, 혹은 후진 ㉢→㉠을 판별할 수 있다.

그림 7은 로봇의 다리 운동 없이 그네의 첫 번째 힌지 관절 마찰력만 작용하는 경우, ADXL 센서의 x 축 출력 신호

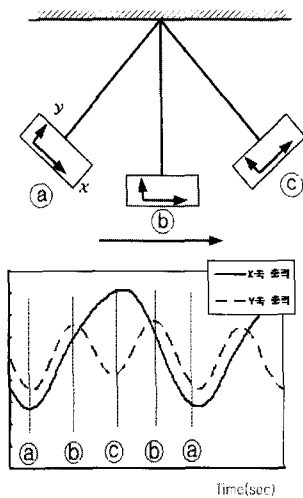


그림 6. ADXL 센서 출력.
Fig. 6. ADXL sensor output.

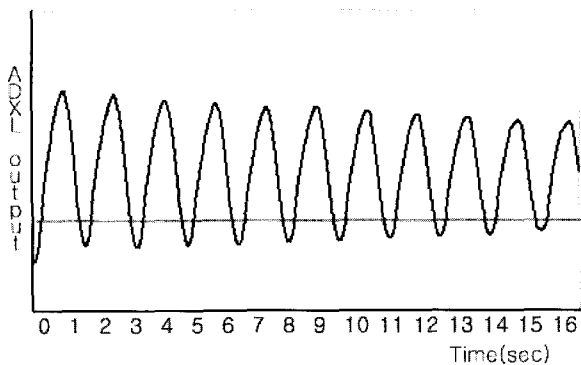


그림 7. 힌지 마찰만 있을 때의 진동.
Fig. 7. Oscillation with pure hinge damping.

를 보여준다. 신호의 진폭이 시간에 따라 감소하고 있음을 볼 수 있다. 진폭 감쇄 속도는 물론 힌지의 마찰 계수에 의존하게 된다.

다음 그림 8의 첫 번째 그림은 위와 같은 상황에서 식 (10)과 같은 형태의 다리 운동을 생성한 경우, ADXL 센서의 출력 신호이다. 신호의 진폭이 감쇄 없이 지속되고 있음을 볼 수 있다. 그림 8의 두 번째 그림은 다리 관절에 가해지는 신호를 보여주는데, ADXL 센서 신호의 정점과 동기가 맞춰져 있음을 알 수 있다. 그림 9에서는 각 정점에서의 로봇 다리 운동을 보여준다.

IV. 결론

본 논문에서는 사람의 운동 특성을 이해하고 이를 로봇에 구현하기 위한 노력의 하나로서 사람이 그네 타는 동작을 동력학적으로 모델링하고 에너지 관점에서 해석하였다. 이를 통해 그네가 지속적으로 진동할 수 있는 로봇의 운동을 생성하였으며, 소형 휴머노이드 로봇을 대상으로 이를 구현하였다. 그네 힌지 관절의 마찰력을 극복하고 진동을 지속하기 위해서는 로봇의 운동과 그네 운동을 동기화 시켜야 할 필요가 있다. 본 논문에서는 ADXL 가속도/경사각 센

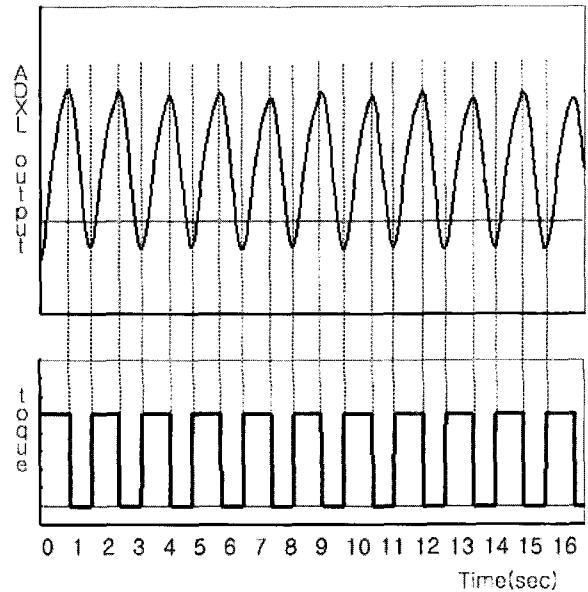


그림 8. 다리 운동에 의한 진동.
Fig. 8. Oscillation with leg motion.

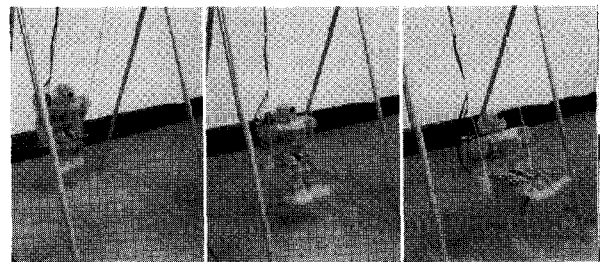


그림 9. 실험.
Fig. 9. Experiment.

서를 이용하여 그네 운동의 정점을 제측하고, 이를 통해 로봇의 운동을 그네 운동에 동기화 시킬 수 있었다.

사람의 그네 운동에 작용하는 힘은 본문에서 서술한 바와 같이 상체 움직임에 의한 힘과, 팔로 줄을 당기거나 미는 힘, 그리고 다리의 운동에 의한 힘이 있다. 본 논문에서는 문제를 단순화하기 위해 다리 운동에 의한 영향만을 고려하였으며, 이에 따라 그네 운동을 2중 진자로 모델링하였다. 상체와 팔에 의한 영향을 반영하기 위해서는 보다 복잡한 동역학 모델이 필요할 것이다.

참고문헌

[1] S. Song, K. Waldon, "An analytical approach for gait study and its applications on wave gaits", *The Int'l Jour. of Robotics*, vol. 6, no. 2, pp. 60-71, 1987.
[2] R. Kurazume, K. Yoneda, and S. Hirose, "Feedforward and feedback dynamic trot gait for quadruped walking vehicle", *Autonomous Robots*, vol. 12, pp. 157-172, 2002.
[3] M. Hashimoto, T. Yamada, and M. Yamakita, "Control of locomotion and head configuration for 3D snake robot", *Proc. of SICE*, Osaka, Japan, pp. 1648-1653, Aug., 2002.

[4] T. Furuta, Y. Okumura, T. Tawara, and H. Kitano, 'morph': A small-size humanoid platform for behavior coordination research", *Proc. of 2001 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, Tokyo, Japan, pp. 165-171, 2001.

[5] M. Inaba, K. Nagasaka, F. Kanehiro, S. Kagami, H. Inoue, "Real-time vision-based control of swing motion by a human-form robot using the remote-brained approach", *Proc. of IROS*, pp. 15-22, 1996.

[6] M. Inaba, T. Igarashi, S. Kagami, and H. Inoue, "A 35 DOF humanoid that can coordinate arms and legs in standing up, reaching and grasping an object", *Proc. of IROS*, pp. 29-36, 1996.

[7] F. Kanehiro, Y. Tamiya, M. Inaba, H. Inoue, "Developmental methodology for building whole body humanoid system", *Proc. of IROS*, pp. 1210-1215, 1999.

[8] G. S. Hornby, M. Fujita, S. Takamura, T. Yamamoto, and O. Hanagata, "Autonomous evolution of gaits with the sony quadruped robot," *Proc. of the Genetic and*

Computation Conf., vol. 2, Orlando, Florida, USA, pp. 1297-1304, Morgan Kaufmann, 13-17, 1999.

[9] 이종원 등, *휴먼로봇시스템 개발 보고서 I-V*, 한국과학기술원, 1994-1998.

[10] 성영휘, 이수영, "소형 휴머노이드 로봇 시스템 개발", *제어 · 자동화 · 시스템공학논문지*, 제7권, 제5호, pp. 420-426, 2001.

[11] Y. Sung and Y. Yi, "A miniature humanoid robot that can walk up and down stairs", *Proc. of 32nd ISR*, pp. 1463-1468, 2001.

[12] 김주환, 이승건, 주우진, "그네의 원리", *생명과학을 위한 물리학 탐구과제 보고서*, 서울대학교, 2002.

[13] M. A Pinsky, A. Zevin "Oscillations of a pendulum with a periodically varying length and a model of swing", *Int'l Journ. of Non-Linear mechanics*, vol. 34, pp. 105-109, 1999.

[14] F. L. Lewis, C. T. Abdallah *Control of robot manipulators*, Macmillan Publishing Company, 1993.



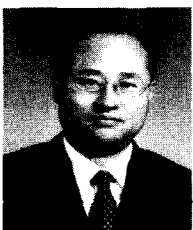
박 성 훈

1976년 7월 02일생, 2003년 2월 전북대학교 전자정보공학부 졸업(공학사), 2003년 3월-현재 동대학원 제어계측공학과 대학원 재학중, 관심분야는 시스템설계, 로봇공학.



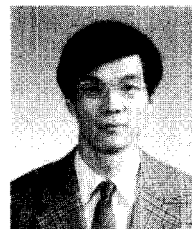
이 수 영

1964년 10월 2일생, 1988년 2월 연세대학교 전자공학과 졸업(공학사), 1990년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학석사), 1994년 8월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학박사), 1995년 3월-1999년 8월 한국과학기술연구원 휴먼로봇연구센터 선임연구원, 1997년 2월-1998년 2월 Univ. of Southern California, Dept. of CS, Post Doc. 1999년 9월-현재 국립전북대학교 전자정보공학부 조교수, 관심분야는 인간형 로봇, 이동 로봇, 지능 제어.



정 길 도

1960년 7월 24일생, 1984년 미국 오레곤 주립대학 기계공학과 졸업(공학사), 1986년 미국 조지아공대 기계공학과 졸업(공학석사), 1993년 미국 텍사스 A&M 대학 기계공학과 졸업(공학박사), 1993년-1995년 영남대학교 기계공학과 전임강사, 1995년-현재 전북대학교 전자정보공학부 부교수, 관심분야는 시스템 규명, 멀티미디어 전송, 시간지연 시스템 제어, 컴퓨터 네트워크 모델링.



성 영 휘

1962년 5월 20일생, 1988년 2월 고려대학교 전자공학과 졸업(공학사), 1991년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학석사), 1996년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학박사), 1995년-1996년 영국 옥스퍼드대학, Post Doc, 1996년-1998년 LG종합기술원 선임연구원, 1998년-현재 국립금오공과대학교 전자공학부 조교수, 관심분야는 인간형 로봇, 지능형 로봇, 여유자유도 머니플레이터.