

이중 병렬형 다리 구조를 가진 2족보행로봇의 보행제어

윤정한* · 박종현*†

* 한양대학교 기계공학부

Locomotion Control of Biped Robots with Serially-Linked Parallel Legs

Jung Han Yoon* and Jong Hyeon Park*†

* School of Mechanical Engineering, Hanyang Univ.

(Received April 22, 2009 ; Revised March 30, 2010 ; Accepted March 30, 2010)

Key Words: Asymmetric Platform(비대칭 구조), Biped Robot(2족 보행 로봇), Gravity-Compensated Inverted Pendulum Mode(중력 보상 역진자 모드), Parallel Mechanism(병렬형 구조), Serial Mechanism(직렬형 구조)

초록: 본 논문은 2족 보행로봇을 위한 새로운 병렬메카니즘을 제안하고 있다. 각 다리는 3자유도를 갖는 병렬 플랫폼 2개가 시리얼로 연결되어 있는데, 허벅지와 정강이 역할을 한다. 이 제안된 로봇을 위한 보행 궤적은 보행평면상에서는 중력보상역진자모드를 사용하여 구하였고, 횡방향으로는 역진자모드를 사용하여 구하였다. 지면으로부터의 반발력을 시뮬레이션하기 위해 발바닥 밑에 6자유도의 패드를 사용하였다. 제안된 메카니즘과 보행제어의 효율성은 SimMechanics를 이용한 12자유도 병렬 2족보행 로봇의 시뮬레이션을 통해 입증하였다.

Abstract: In this paper, we propose a new parallel mechanism for the legs of biped robots and the control of the robot's locomotion. A leg consists of two 3-DOF parallel platforms linked serially: one is an orientation platform for a thigh and the other is the 3-DOF asymmetric parallel platform for the shank. The desired locomotion trajectory is generated on the basis of the Gravity-Compensated Inverted Pendulum Mode (GCIPM) in the sagittal direction and the Linear Inverted Pendulum Mode (LIPM) in the lateral direction, respectively. In order to simulate the ground reaction force, a 6-DOF elastic pad model is used underneath each of the soles. The performance and effectiveness of the proposed parallel mechanism and locomotion control are shown by the results of computer simulations of a 12-DOF parallel biped robot using SimMechanics®.

1. 서론

2족 보행 로봇의 연구의 궁극적인 목표는 인간이 만들어 놓은 인공적인 환경 속에서 인간과 더불어 살아갈 수 있는 능력을 가진 로봇을 만드는 것이다. 인간의 노동력을 대체하고 인간에게 서비스와 편의를 제공하는 수단으로써의 2족 보행로봇에 대한 연구의 필요성이 제기된다.

기존의 2족보행 로봇은 시리얼 링크로 구성되는데 시리얼 형태의 링크는 그것을 움직이는 액추에이터에 걸리는 부하를 줄이기 위해 마그네슘 등의 가벼운 링크 재질의 재료가 사용되거나 특수가공으로 제작된

링크가 적용되는 등 여러 가지 복잡한 설계가 요구된다.⁽¹⁻⁴⁾ 이러한 시리얼 링크 구조의 특성으로 인해 요구되는 재료의 경량화나 모터 크기의 증가는 2족 보행 로봇의 생산 비용을 높이며, 동시에 2족 보행 로봇이 다룰 수 있는 부하에 많은 제약을 가져온다. 따라서 이러한 시리얼 링크 구조의 2족 보행 로봇의 단점을 보완하기 위하여 새로운 구조를 갖춘 2족 보행 로봇의 연구가 시작되었고 병렬형 메카니즘을 적용한 구조가 그 대표적인 예라고 할 수 있다.

병렬 메카니즘의 장점은 작은 액추에이터를 이용하여 큰 부하를 다룰 수 있는 다리를 만들 수 있다는 것이다. 이것은 시리얼 링크 구조의 로봇 매니플레이터와 병렬 링크 구조의 로봇 매니플레이터의 특징을 비교하여

† Corresponding Author, jongpark@hanyang.ac.kr

보아도 잘 알 수 있다. 한 개의 액추에이터가 그 다음 단계에 있는 액추에이터의 무게를 포함한 큰 부하를 다루어야 하는 시리얼 링크 구조는 최상단에 있는 액추에이터가 결국 모든 액추에이터의 무게를 지지해야 한다. 그러나, 병렬 링크 구조에서는 모든 액추에이터가 공동으로 모든 부하를 다룰 수 있어 각 액추에이터에 작용하는 부하는 현저하게 줄어들게 된다. 이러한 병렬형 근육의 장점으로 인해 현재 일본과 프랑스의 일부 연구자들도 병렬형 링크 구조의 2족 보행 로봇을 시도하고 있다.⁽⁵⁻⁹⁾ 그러나, 이러한 로봇은 다리의 형상이 자유자재로 움직일 수 있는 6 자유도가 아닌 5 자유도나 3 자유도의 다리를 갖고 있어 보행이 제한되었으며,^(6,7) 혹은 6 자유도의 다리를 갖는 하나의 스텐더트 플랫폼으로 구성되어 있어 무릎이 없는 다리의 형상을 갖게 되므로^(8,9) 보행 시 인간의 보행과 달리 무척 부자연스럽고 어색하게 보이게 된다.

본 논문에서는 인간의 보행 보조 기구나 운송 수단으로써의 역할을 수행할 수 있도록 강건한 2족 보행 로봇의 설계 및 제어 방법을 제안하고 있다. 즉 본 연구의 목적은 기존의 로봇이 가지고 있는 시리얼 링크 구조와 달리 각 다리의 관절과 링크를 병렬형 구조로 연결한 강건한 총 12자유도의 2족 보행 로봇들을 설계 및 제작하는 것이며, 이 로봇이 안정성을 유지하면서 보행할 수 있도록 하기 위해서 중력 보상 역진자 모드를 기반으로 만들어진 보행 궤적^(10,11)을 병렬형 구조의 무릎과 발에 맞춰 사용함을 제안하고 있다. 발의 충격 및 지면의 불확실성을 다루기 위해 임피던스제어⁽¹²⁻¹⁴⁾를 수행하지만, 본 논문에서는 비록 지면 불확실성을 다루는 데는 취약하지만, 원하는 궤적 추정을 위해 제어법칙의 계산량이 적은 일반적인 PID제어기를 사용하여 로봇을 제어하였다.

제 2장에서는 로봇의 다리 구조에 대한 설명과 더불어 설계 및 궤적생성에 필요한 기구학 분석을 하였으며, 3장에서는 중력보상 역진자모델을 이용한 궤적의 생성을 다루었다. 4장에서는 본 논문에서 제안된 다리를 가진 로봇이 전장에서 생성된 궤적을 따라 보행하는 컴퓨터 시뮬레이션 및 그 결과를 설명하였으며, 5장에서는 본 논문의 결론을 신고 있다.

2. 새로운 병렬형 다리 구조

2.1 이중 구조의 3자유도 병렬형 플랫폼

기존의 2족 보행 로봇의 각 다리는 일반적으로 여유 자유도가 없이 6자유도를 가진 시리얼 링크의 구조를 사용하였다. 이것은 Fig. 1에 나와

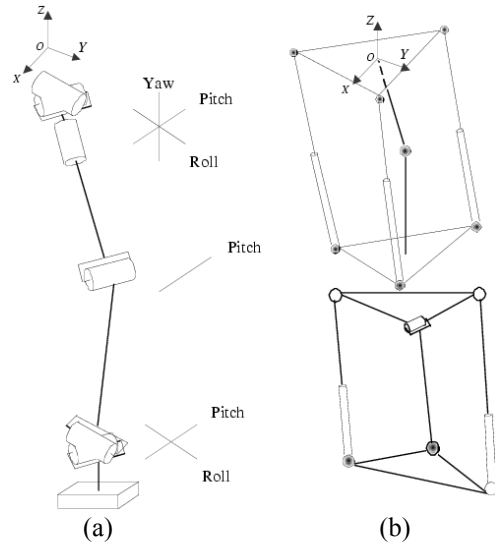


Fig. 1 Leg configurations: (a) a typical serial-link leg and (b) the proposed serially linked parallel leg that has its own knee as a human leg

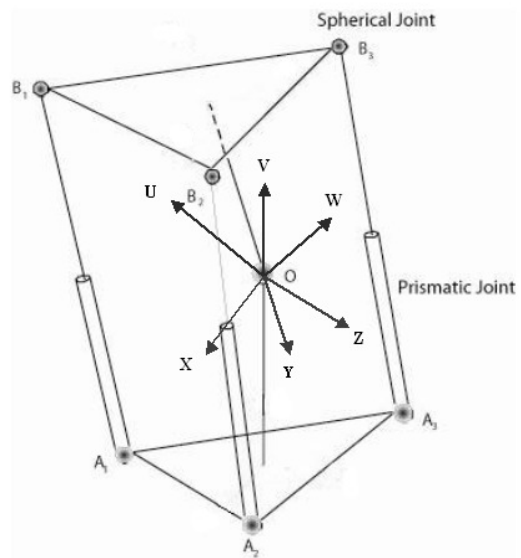


Fig. 2 A 3-DOF orientation platform for a thigh link

있듯이 요 방향으로 1축, 피치 방향으로 3축, 그리고 롤 방향으로 2축으로 구성된다.

본 논문에서는 이러한 시리얼 링크의 6자유도의 역할을 수행할 수 있도록 로봇의 허벅지 부위에 각각 피치, 요, 그리고 롤의 방향의 회전이 가능하도록 4개의 림(limb)을 병렬로 연결된 구조^(15,16)로 각각 SPS 림(limb)을 3개 사용하고 중앙에는 회전이 가능하도록 S 조인트로 연결된 림(limb)을 사용하는 구조로 택하였다. 로봇의 정강이 부위에는 피치 방향으로 2축과 롤 방향으로 1축의 회전이 가능하도록 UPS 조인트들로 이루어진 림(limb)을 2개, RPS 조인트들로 이루어진 림(limb)을 1개,

그리고 RS조인트들로 이루어진 림(limb)을 1개 사용하였다. 여기서, S, P, R 및 U는 각각 구면(spherical) 관절, 직선(prismatic) 관절, 회전(revolute) 관절 및 유니버설(universal) 관절을 의미한다.

2.1.1 로봇의 허벅지 부위용 병렬형 플랫폼

2족보행로봇의 보행에서 허벅지 부위의 3자유도를 구현하기 위해서 설계된 병렬형 플랫폼의 적합성을 확인하기 위해서 플랫폼의 자코비안을 구한다. 먼저 Fig. 2의 기구학적인 관계로 다음의 식이 구해진다.

$$\mathbf{b}_i = \mathbf{d}_i + \mathbf{a}_i \quad (1)$$

여기서, $\mathbf{a}_i = \overline{OA_i}$, $\mathbf{b}_i = \overline{OB_i}$ 이며 \mathbf{d}_i 는 림(limb) i 의 변위를 나타내는 벡터로 $\mathbf{d}_i = d_i \hat{\mathbf{s}}_i$ 로 표현되며 $\hat{\mathbf{s}}_i$ 는 기준 좌표계에 대한 $\overline{AB_i}$ 방향의 단위 벡터이다.

식 (1)로부터,

$$d_i = \sqrt{(\mathbf{a}_i - \mathbf{b}_i)^T (\mathbf{a}_i - \mathbf{b}_i)} = \sqrt{\mathbf{a}_i^T \mathbf{a}_i + \mathbf{b}_i^T \mathbf{b}_i - 2\mathbf{a}_i^T \mathbf{b}_i} \quad (2)$$

또한, 상판 B의 자코비안을 구하기 위해서 하판 A가 고정되어 있다고 가정하고 식 (1)을 시간에 대하여 미분하면,

$$\boldsymbol{\omega}_B \times \mathbf{b}_i = \dot{\mathbf{d}}_i \boldsymbol{\omega}_i \times \hat{\mathbf{s}}_i + \dot{\mathbf{d}}_i \hat{\mathbf{s}}_i \quad (3)$$

여기서 $\boldsymbol{\omega}_B$ 는 상판 B의 각속도이며, $\boldsymbol{\omega}_i$ 는 림(limb) i 의 각속도이다. 식 (3)으로부터 맨 마지막 항을 제거하기 위해 식 (3) 전체를 벡터 $\hat{\mathbf{s}}_i$ 와 내적하면

$$\dot{\mathbf{d}}_i = (\mathbf{b}_i \times \hat{\mathbf{s}}_i) \cdot \boldsymbol{\omega}_B \quad (4)$$

따라서 이 허벅지부 링크 시스템의 자코비안 \mathbf{J}_i 은 다음과 같다.

$$\dot{\mathbf{q}}_i = \mathbf{J}_i \boldsymbol{\omega}_B \quad (5)$$

여기서, 허벅지(thigh)의 조인트 변수 벡터는

$$\dot{\mathbf{q}}_i = [\dot{d}_1 \quad \dot{d}_2 \quad \dot{d}_3]^T$$

이며

$$\mathbf{J}_i = \begin{bmatrix} (\mathbf{b}_1 \times \hat{\mathbf{s}}_1)^T \\ (\mathbf{b}_2 \times \hat{\mathbf{s}}_2)^T \\ (\mathbf{b}_3 \times \hat{\mathbf{s}}_3)^T \end{bmatrix} \quad (6)$$

이다.

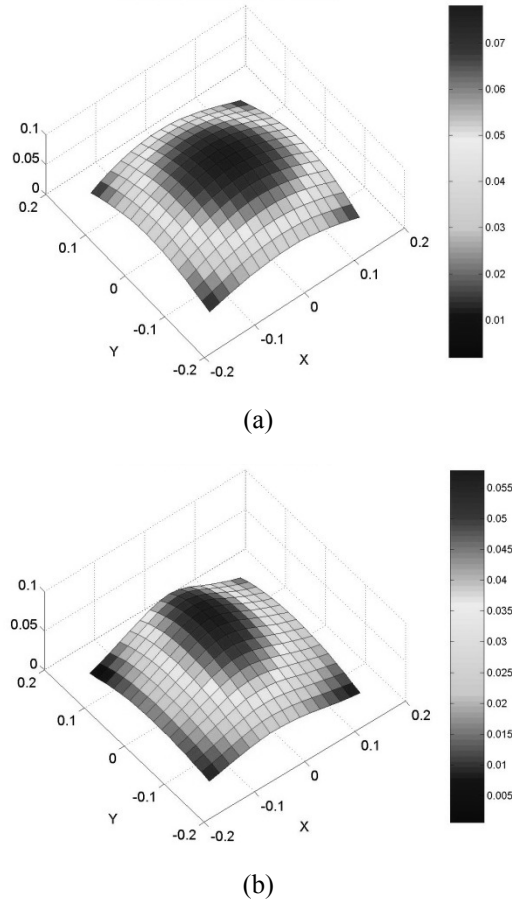


Fig. 3 Isotropic index with the end of each limb on the upper plate at a corner of (a) a equilateral triangle, and (b) an asymmetric triangle

로봇 끝단의 다방면으로의 이동 용이성을 통상적으로 등방성지수(isotropic index)를 이용하여 표현할 수 있다. 여러가지 형태의 등방성지수 중에서 본 연구에서는 다음과 같은 식을 이용하여 계산하였다.

$$\eta = \frac{\sigma_{\max}(\mathbf{J}_i)}{\sigma_{\min}(\mathbf{J}_i)} \quad (7)$$

여기서, $\sigma_{\max}(\cdot)$ 와 $\sigma_{\min}(\cdot)$ 는 각각 최대 및 최소 singular value 를 의미한다.

위의 분석결과를 이용하여 설계를 개선하기 위해 기구학에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 먼저 각 피치, 요, 그리고 롤의 축 방향으로 회전시켰을 때 Fig. 3(a)에 나와 있듯이 전후좌우 대칭으로 이동하였다. 이것은 림(limb)들을 연결하는 두 판상의 림(limb)의 위치가 중심에 대하여 일정한 각도와 일정한 거리에 있기 때문이다. 여기서 중심에 위치한 림(limb)의 구면(spherical) 조인트의 위치를 변경하여

인간의 허벅지 회전 반경과 비슷한 회전 반경을 갖도록 하였다.

또한, 2족보행 로봇에서는 로봇의 앞뒤 방향으로 큰 변위가 요구됨으로 림(limb)의 위치를 대칭이 아닌 비대칭적인 위치로 이동시킬 경우에 Fig. 3(b)에 나와있듯이 로봇의 진행방향으로 넓어지는 것을 볼 수 있다. 대략 롤 축의 각도를 45도로 고정할 경우에 등방성지수는 로봇 이동에 사용될 지역에서 거의 동일하면서 그 지역도 로봇의 이동에 적합하도록 넓어지는 것을 나타내고 있다. 따라서, 이 각도를 실제 로봇 설계에 사용하였다.

2.1.2 로봇의 정강이 부위용 비대칭 병렬형 플랫폼

로봇의 정강이 부위용 구조는 로봇의 보행에서 필요한 무릎에서의 피치 방향의 회전과 발목에서 피치와 롤 방향의 모션을 구현하기 위해서 기존의 대칭형 림(limb) 대신에 6-5-4 자유도를 가진 림(limb)이 두 판을 연결하는 비대칭형 플랫폼으로 구성되었다. 먼저 Fig. 4에서 좌표계가 무릎 뒷부분에 해당하는 점 O에 설정되어 있고, 그것의 X축은 무릎 관절의 회전방향($\overline{OA_2}$)으로, 그리고 이것에 직교하는 Y축은 보행의 진행방향($\overline{OA_1}$)으로 설정하였다. 그림으로부터 i 번째 림(limb)에 대한 loop-closure 방정식을 구할 수 있다.

$$\mathbf{p} + \mathbf{b}_i = \mathbf{a}_i + \mathbf{d}_i \tag{8}$$

여기서, $\mathbf{p} = \overline{OP}$, $\mathbf{a}_i = \overline{OA_i}$, $\mathbf{b}_i = \overline{PB_i}$, $\mathbf{d}_i = \overline{A_iB_i}$ ($i=1,2$)이다. 이 식 (8)로부터 역기구학을 구하면,

$$\begin{aligned} d_i &= \sqrt{(\mathbf{p} + \mathbf{b}_i - \mathbf{a}_i)^T (\mathbf{p} + \mathbf{b}_i - \mathbf{a}_i)} \\ &= \sqrt{\mathbf{p}^T \mathbf{p} + \mathbf{a}_i^T \mathbf{a}_i + \mathbf{b}_i^T \mathbf{b}_i - 2\mathbf{a}_i^T \mathbf{b}_i + 2\mathbf{p}^T \mathbf{b}_i - 2\mathbf{p}^T \mathbf{a}_i} \end{aligned} \tag{9}$$

이 된다. 역기구학 식을 이용해서 로봇의 정강이 부위용 구조로써의 타당성을 알아보기 위해서 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 5에서 윗 판을 고정하고 밀판을 지면에 나란하게 진행방향으로 움직였을 때 밀판이 지면에 대하여 수평을 유지하면서 이동한다는 것을 볼 수 있다. 기존의 3자유도의 병렬형 플랫폼으로는 구현하기 어려운 모션으로써 이 비대칭형 구조가 적합함을 알 수 있다.

식 (7)을 시간에 대해 미분을 하면 각 림(limb)에 관한 속도 벡터 루프 방정식을 얻을 수 있다. 단, 상판은 고정되어 있고, 2.1.1절에서와 같이 단위벡터를

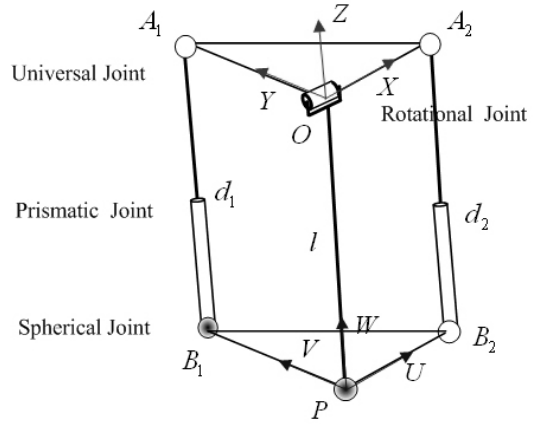


Fig. 4 A 3-DOF asymmetric platform for a shank link. The robot with this shank link walks in the Y-direction with P used as the heel

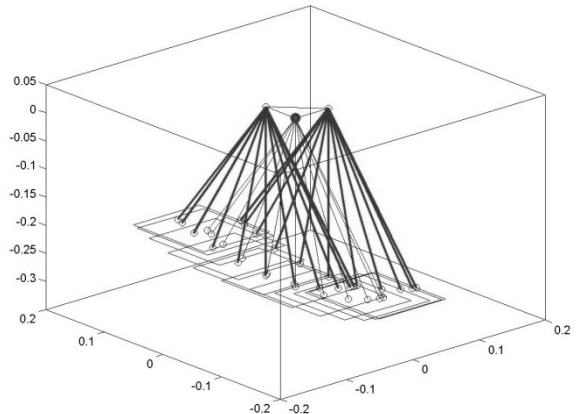


Fig. 5 A 3-D motion of the asymmetric platform in the sagittal plane

이용하여 $\mathbf{d}_i = d_i \hat{\mathbf{s}}_i$ 가 됨을 가정하면,

$$\mathbf{v}_p + \boldsymbol{\omega}_p \times \mathbf{b}_i = \dot{d}_i \hat{\mathbf{s}}_i + d_i \boldsymbol{\omega}_i \times \hat{\mathbf{s}}_i \quad (i=1,2) \tag{10}$$

여기서 \mathbf{v}_p 는 점 P의 속도이고, $\boldsymbol{\omega}_p$ 및 $\boldsymbol{\omega}_i$ 는 하판 및 림(limb) i 의 각속도이다. 이 식으로부터 림의 각속도 관련한 항을 제거하기 위해 식과 $\hat{\mathbf{s}}_i$ 를 내적시키면,

$$\hat{\mathbf{s}}_i \cdot \mathbf{v}_p + (\mathbf{b}_i \times \hat{\mathbf{s}}_i) \cdot \boldsymbol{\omega}_p = \dot{d}_i \quad (i=1,2) \tag{11}$$

이 시스템은 무릎에 대한 발의 속도 \mathbf{v}_p 는 무릎 뒤, 점 O에 있는 피치 조인트 각속도($\dot{\theta}$)에 의해서만 결정된다.

$$\mathbf{v}_p = \mathbf{u} \dot{\theta} \tag{12}$$

여기서

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} 0 \\ -l \cos(\theta) \\ l \sin(\theta) \end{bmatrix}$$

하관(ΔOB_1B_2)에 해당하는 로봇발의 피치 각도의 변화는 2개의 림(limb)의 길이가 고정 림(limb)의 길이와 동일할 때는 평행운동을 하도록 하지만, 그렇지 못할 때에는 로봇발의 피치 각도에도 변화를 준다. 또한, 로봇발의 피치 각도는 림(limb) 1의 길이변화, 즉 d_1 의 변화에 따라 달라질 수 있다. 로봇발의 롤링 각 변화는 항상 림(limb) 2의 길이 변화가 있을 때만 가능하다.

$$\boldsymbol{\omega}_p = \dot{\alpha} \hat{\mathbf{i}}_p + \dot{\beta} \hat{\mathbf{j}}_p \quad (13)$$

여기서 $\dot{\alpha}$ 및 $\dot{\beta}$ 는 로봇발의 피치속도 및 롤속도이며, $\hat{\mathbf{i}}_p$ 및 $\hat{\mathbf{j}}_p$ 는 하단의 X 및 Y방향의 단위벡터이며, 고정된 상판에 있는 점 O에 있는 좌표계를 이용하여 나타내면,

$$\hat{\mathbf{i}}_p = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \hat{\mathbf{j}}_p = \begin{bmatrix} 0 \\ \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{bmatrix}$$

이 되며, 피치각 α 는 상하관이 평행하게 되어 있을 때를 0으로 한다. 따라서, 이로부터

$$\boldsymbol{\omega}_p = \begin{bmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \cos \alpha \\ \dot{\beta} \sin \alpha \end{bmatrix} = \Sigma \begin{bmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \end{bmatrix}$$

여기서,

$$\Sigma = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \cos \alpha \\ 0 & \sin \alpha \end{bmatrix}$$

식 (11)을 하나의 식으로 표현하면,

$$\begin{bmatrix} (\mathbf{b}_1 \times \hat{\mathbf{s}}_1)^T \\ (\mathbf{b}_2 \times \hat{\mathbf{s}}_2)^T \end{bmatrix} \Sigma \begin{bmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{d}_1 \\ \dot{d}_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{s}}_1^T \gamma \\ \hat{\mathbf{s}}_2^T \gamma \end{bmatrix} \dot{\theta}$$

또는

$$\begin{bmatrix} (\mathbf{b}_1 \times \hat{\mathbf{s}}_1)^T \\ (\mathbf{b}_2 \times \hat{\mathbf{s}}_2)^T \end{bmatrix} \Sigma \begin{bmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\hat{\mathbf{s}}_1^T \gamma \\ 0 & 1 & -\hat{\mathbf{s}}_2^T \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{d}_1 \\ \dot{d}_2 \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}$$

여기에서, 정강이부(shank) 시스템 하관의 각속도를 피치속도와 요속도 외에 무릎에 대한 하관 P점의 각속도를 고려하면, 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} (\mathbf{b}_1 \times \hat{\mathbf{s}}_1)^T \\ (\mathbf{b}_2 \times \hat{\mathbf{s}}_2)^T \\ 0 \end{bmatrix} \Sigma \begin{bmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\hat{\mathbf{s}}_1^T \gamma \\ 0 & 1 & -\hat{\mathbf{s}}_2^T \gamma \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{d}_1 \\ \dot{d}_2 \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}$$

또는

$$\mathbf{J}_s \ddot{\boldsymbol{\omega}}_s = \mathbf{q}_s \quad (14)$$

여기서,

$$\ddot{\boldsymbol{\omega}}_s = \begin{bmatrix} \ddot{\alpha} & \ddot{\beta} & \ddot{\theta} \end{bmatrix}^T,$$

$$\mathbf{q}_s = \begin{bmatrix} \dot{d}_1 & \dot{d}_2 & \dot{\theta} \end{bmatrix}^T,$$

$$\mathbf{J}_s = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\hat{\mathbf{s}}_1^T \gamma \\ 0 & 1 & -\hat{\mathbf{s}}_2^T \gamma \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} (\mathbf{b}_1 \times \hat{\mathbf{s}}_1)^T \\ (\mathbf{b}_2 \times \hat{\mathbf{s}}_2)^T \\ 0 \end{bmatrix} \Sigma \begin{bmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}$$

이다.

2.2 6자유도 각 다리의 구조

로봇의 허벅지 부위용 플랫폼과 로봇의 정강이 부위용 병렬형 플랫폼을 시리얼로 연결하게 되면 무릎을 가지며 인간과 같은 자연스러운 보행 및 자세를 구현할 수 있는 구조를 갖는 6자유도의 플랫폼이 형성되게 된다. Fig. 3 플랫폼의 상단이 로봇의 엉덩이 링크 (pelvic link)에 고정되고 허벅지부의 기준좌표계가 있는 상판이 Fig. 3 플랫폼의 하단에 부착되게 된다. 따라서, 허벅지부 플랫폼의 하단에 있는 점 P는 로봇발의 뒤꿈치 또는 발목부분이 된다.

따라서, 엉덩이에 대한 무릎관의 각속도는 $-\boldsymbol{\omega}_B$ 이 되며 로봇발의 각속도 $\bar{\boldsymbol{\omega}}$ 는

$$\bar{\boldsymbol{\omega}} = -\boldsymbol{\omega}_B + \boldsymbol{\omega}_p = -\boldsymbol{\omega}_B + \Sigma \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \ddot{\boldsymbol{\omega}}_s \quad (15)$$

이 된다. 또한 로봇발에 있는 점 P의 엉덩이에 대한 상대적인 선형속도 $\bar{\mathbf{v}}$ 는

$$\bar{\mathbf{v}} = -\mathbf{v}_0 + \mathbf{v}_p = \mathbf{R}_k \boldsymbol{\omega}_i + \mathbf{u} \dot{\theta} = \mathbf{R}_k \boldsymbol{\omega}_i + \mathbf{u} [0 \ 0 \ 1] \ddot{\boldsymbol{\omega}}_s \quad (16)$$

이 된다. 여기서 \mathbf{v}_0 는 정강이부의 기준좌표계의 원점인 점 O이 위치하는 곳의 속도로서

허벅지부의 각속도와 무릎까지의 변이에 의존하는 행렬(R_k)의 곱으로 표현할 수 있다.

위의 2개의 식을 하나의 관계식으로 나타내면,

$$\begin{bmatrix} \bar{\mathbf{v}} \\ \bar{\boldsymbol{\omega}} \end{bmatrix} = \Omega \begin{bmatrix} \boldsymbol{\omega}_l \\ \bar{\boldsymbol{\omega}}_s \end{bmatrix} \quad (17)$$

여기서

$$\Omega = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{u} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ -\mathbf{I} & \Sigma \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \end{bmatrix}$$

이 된다.

행렬 Ω 이 singular하지 않는 조건에서는 원하고자 하는 발바닥의 선형속도 $\bar{\mathbf{v}}$ 와 각속도 $\bar{\boldsymbol{\omega}}$ 를 실현시킬 $\boldsymbol{\omega}_l$ 와 $\bar{\boldsymbol{\omega}}_s$ 를 윗식으로부터 구할 수 있다. 이로부터 식 (5)와 (14)를 이용하여 허벅지부와 정강이부의 관절 변수의 속도, \mathbf{q}_l 및 \mathbf{q}_s 를 각각 구할 수 있다.

3. 병렬형 보행 로봇의 궤적 생성

로봇의 궤적을 생성함에 있어서 진행 방향으로는 중력 보상 역진자 모드(GCIPM; Gravity-Compensated Inverted Pendulum Mode)⁽¹⁰⁾를 사용하였고 측면 방향으로는 기존의 시리얼 2축 보행 로봇의 궤적 생성 방법인 역진자 모델을 사용하였다. 중력 보상 역진자 모드는 한 개의 질량으로 로봇을 모델링하는 역진자 모드를 이용한 모델에서의 부정확성 및 이로 인한 안정성의 손상을 줄이면서도 비교적 단순하게 미분방정식을 이용하여 로봇의 궤적을 구할 수 있도록 로봇을 몸체와 스윙(swing)하는 다리 부분, 즉 두 개의 질량으로 모델링하는 방식이다. 물론, 몸체를 지지하는 발은 고정되어 있기 때문에 지지하는 발의 질량 효과는 무시할 수 있다는 가정을 사용한다. 이에 따라, 로봇의 엉덩이 부위와 스윙하는 다리/발을 각 하나의 질점으로 모델을 설정하였으며, 스윙하는 다리의 무게를 제외한 로봇의 전체 질량이 로봇의 엉덩이 링크에 집중되어 있는 것으로 가정하였다. Fig. 6은 로봇의 보행 궤적을 얻어 내기 위해 사용한 중력 보상 역진자 모드를 위한 단순화된 로봇의 기본 모델을 나타내고 있다. 여기서 M 은 로봇의 엉덩이부의 질량을 의미하며, m 은 스윙하는 다리의 질량을 의미한다.

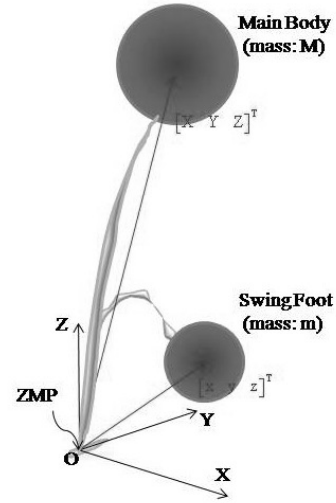


Fig. 6 A model of a biped robot for CGIPM (Gravity-Compensated Inverted Pendulum Mode) consists of two masses: one for the pelvic link and the other for a swing leg and foot. The origin of the XYZ-coordinate frame is the ZMP (zero-moment point)

이 모델로부터 임의적으로 주어진 진행방향의 발과 ZMP의 위치를 고려하여 엉덩이의 보행 궤적을 얻어낼 수 있다. 실제 진행되는 방향으로 스윙하는 발의 보행방향 및 수직방향의 궤적은 다음과 같다.

$$y(t) = S \sin \left\{ \frac{\pi}{T} \left(t - \frac{T}{2} \right) \right\} \quad (0 \leq t \leq T) \quad (18)$$

$$z(t) = \frac{h_f}{2} \left[1 + \sin \left\{ \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{T}{4} \right) \right\} \right] \quad (0 \leq t \leq T) \quad (19)$$

여기서 h_f 는 최대 스윙하는 발의 최대 높이를 말하며 S 는 한 발이 스윙하는 동안 이동하는 거리를 의미하고, T 는 발이 스윙하는 시간을 의미한다.

위의 식으로부터 ZMP의 위치가 발 가운데에 고정될 수 있도록 하는 엉덩이의 진행방향으로의 보행 궤적은 엉덩이 링크와 스윙하는 다리의 2개 질량으로 모델링된 시스템의 ZMP에 대한 회전모멘트 식을 이용한다.

$$\sum_i \mathbf{r}_i \times (m_i \ddot{\mathbf{r}}_i) = \sum_i \mathbf{r}_i \times (m_i \mathbf{g}) \quad (20)$$

여기서

$$\mathbf{r}_1(t) = [X(t) \ Y(t) \ Z(t)]^T,$$

$$\mathbf{r}_2(t) = [x(t) \ y(t) \ z(t)]^T,$$

$$m_1 = M, \ m_2 = m.$$

또한, 추가적인 운동구속 조건 $X(t)=0, Z(t)=H_z = \text{const.}$

을 이용하게 되는데, 여기서 H_z 는 보행중 유지해야 할 엉덩이부위의 높이를 의미한다. 보행평면만에서 운동만을 고려하면 식 (20)은

$$\ddot{Y}(t) + \frac{g}{H_z} Y(t) = \frac{m}{MH_z} [-z\ddot{y} + y\ddot{z} + mgy] \quad (21)$$

이 되는데, 식 (18)과 (19)를 사용하여 미분 방정식인 식 (21)에 대한 해를 구하면

$$Y(t) = C_1 e^{\omega t} + C_2 e^{-\omega t} + \mu \cos\left(\frac{\pi}{T} t\right) \quad (22)$$

이 된다. 여기서

$$C_1 = \frac{1}{2} \left[Y(0) + \frac{\dot{Y}(0)}{\omega} - \mu \right], \quad C_2 = \frac{1}{2} \left[Y(0) - \frac{\dot{Y}(0)}{\omega} - \mu \right],$$

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{H_z}}, \quad \mu = -\frac{1}{\omega^2 + \left(\frac{\pi}{T}\right)^2} \frac{m}{MH_z} \left(\frac{h_f}{2} \left(\frac{\pi}{T}\right)^2 + mg \right) S$$

이다.

한편, 측면 방향으로로는 스윙하는 다리의 효과가 진행방향 보다 미미하기 때문에 전체 질량을 엉덩이 링크에 하나의 집중질량으로 가정하여 스윙하는 동안 ZMP가 발 안에 머무를 수 있도록 유도하기 위해 역진자 모드를 사용하였다. 이는 보행방향의 중력 보상역진자 모드의 2질량 모델대신에 1개의 질량을 사용하여 다리의 움직임을 무시하고 보행축 좌우로 안정적으로 스윙하기 위해 ZMP에 회전스프링이 위치한다는 가정하에 궤적을 구한다. 좌우 방향의 움직임이 작기 때문에 단순하게 보행축에 있는 선형 스프링에 의해 질량이 좌우 진동하는 것으로 모델링 할 수도 있다.

4. 보행시뮬레이션

4.1 SimMechanics®를 이용한 로봇 모델링

본 논문에서는 시뮬레이션을 위한 로봇의 모델을 구현하기 위하여 동역학 모델링 프로그램으로 인 Matlab의 SimMechanics®를 사용하였다. 이 프로그램은 다양한 강체, 조인트, 액추에이터, 센서 등과 기구학적 구속조건을 표현하는 여러가지의 블록으로 이루어져 있어 해석하고자 하는 모델을 복잡한 수식의 전개 없이 빠르고 쉽게 구현할 수 있다. Fig. 7은 실제 SimMechanics®로 구현된 리니어 액추에이터의 모습과 시뮬레이션의 모습이다. 각 리니어 액추에이터의 양단에는 병렬형 구조의 양 판과 연결할 수 있는 다 자유도의 조인트가 부착되어 있다. PID 제어기는 원하는 궤적을 추종하도록 게인을 설정했으며 이 제어기에서 지령하는 토크 및 힘은 액추에이터 블록에서 발생시키도록 되어 있다. 또한, 피드백

Table 1 Parameters of the biped robot

Parameters	Length (m)	Mass (kg)
Hip	0.100	20.0
Thigh	0.350	3.5
Shank	0.300	3.2
Foot	0.150	0.8

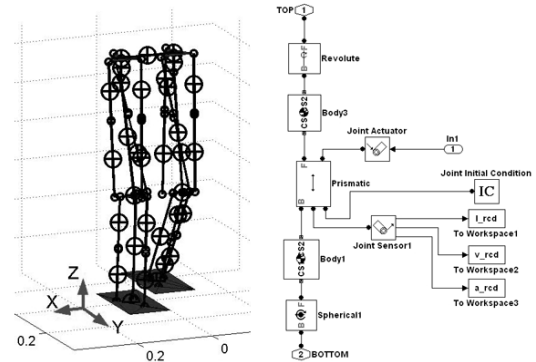


Fig. 7 Simulations with SimMechanics®: (a) a scene of biped robot simulation and (b) a model of a linear actuator

제어를 위해 시뮬레이션된 로봇의 거동에 대한 정보를 센서 블록을 통해 제어기가 피드백 받을 수 있도록 구성되어 있다. 여기에서 사용된 로봇의 파라미터는 Table 1에 나타내었다.

4.2 로봇의 환경 탄성 모델

로봇이 주어진 궤적을 추종하기 위해서는 전체의 몸을 지탱할 수 있는 환경 모델과 스윙하는 발이 지면에 착지하게 될 때에 큰 임팩트가 작용하게 되므로 이것을 흡수할 수 있는 장치가 필요하다. 단지 구속력을 모델링하는 방법으로는 이러한 상황을 시뮬레이션 할 수 없으므로 본 논문에서는 6 자유도의 탄성패드모델을 도입하여 실제와 가까운 외력을 시뮬레이션에 적용하였다. 여기서 탄성 패드 모델은 발 아래 사각형의 각 꼭지점에 비선형 스프링과 댐퍼 시스템을 사용한 충격 흡수 장치로 모델링하였다. 스윙하는 발이 지면에 접촉하게 될 때 패드에 의한 수직 반력은 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$f = \left(\frac{3}{2} \alpha \dot{\delta} + 1 \right) k \delta \quad (23)$$

여기서 δ 는 패드가 압축하게 되는 길이이고 α 는 충격 속도와 회복계수 사이의 관계를 정의하는 상수이다. 또한, k 는 비선형 강성인데 패드의 두께이상 변형되는 것을 방지하기 위해 다음의 비선형식을 사용하였다.

$$k = k_0 \left[1 + \frac{1}{10} \tan^3 \left(\frac{\pi}{2t_p} \delta \right) \right] \quad (24)$$

Table 2 Parameters of the pad underneath the soles

Parameters	Symbols	Values
Initial spring constant	k_0	9.0×10^4
Pad coefficient	α	0.5
Thickness of pads (with no load)	t_p	0.010 (m)

Table 3 Parameters of locomotion of the biped robot

Parameters	Symbols	Values
Step time	T	0.80 (s)
Stride	S	0.130 (m)
Maximum. elevation of swing foot	h	0.050 (m)

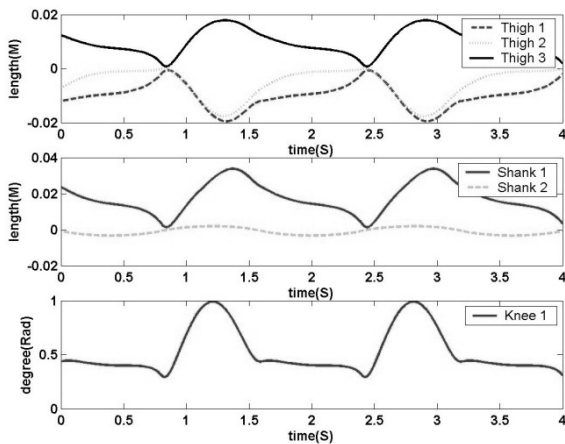


Fig. 8 Desired trajectory of the limbs

여기서 k_0 는 스프링 모델의 변형 초기의 강성 계수이고 t_p 는 패드의 두께이다. 이와 같은 비선형 패드가 발바닥의 전후좌우 모서리부분에 설치되었다고 가정하였으며, 따라서 지면으로부터 발바닥에 작용하는 GRF (ground reaction force)는 각 발바닥의 모서리의 패드에서 발생하는 힘의 합력으로 결정된다. 시뮬레이션에 사용된 패드 모델의 파라미터는 Table 2에 나타내었다.

4.3 보행 시뮬레이션

제한된 2족보행 로봇의 거동 및 동적 요구사항을 결정하고 생성된 궤적의 안정도를 확인하기 위하여 로봇을 컴퓨터상에 시뮬레이션 하였다. 발을 스윙하는 시간을 0.8초로 하여 시뮬레이션 했으며, 시뮬레이션에 사용된 보행궤적의 파라미터는 Table 3에 나타나 있다.

실제로 로봇의 보행 궤적을 로봇에 적용해서 3차원으로 보행을 수행 했을 경우에 각 액추에이터의 원하는 거동을 Fig. 8에 나타내었다. 각각 허벅지 부위

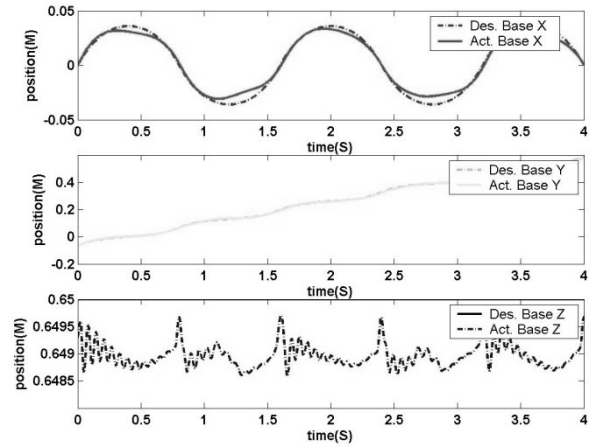


Fig. 9 Desired trajectory and actual trace of the base (or hip link)

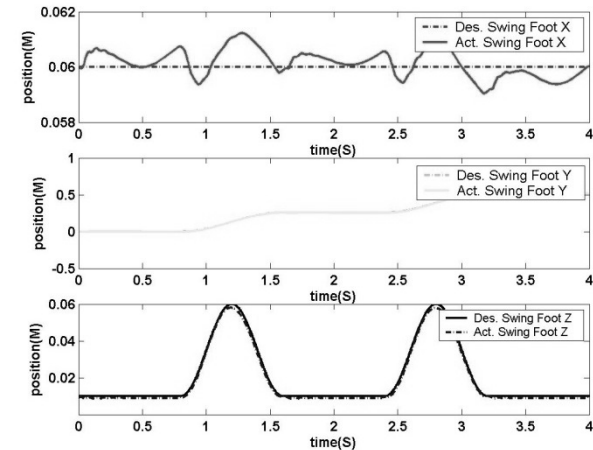


Fig. 10 Desired trajectory and actual trace of the right leg in swing

의 리니어 액추에이터 3개와 정강이 구조의 리니어 액추에이터 2개 및 무릎의 회전 액추에이터의 각도를 나누어 표시한 그림이다. 스윙하는 시간이 0.8초이고, 궤적은 특정한 다리를 기준하였기 때문에, 1.6초의 주기를 갖고 반복되고 있음을 알 수 있다. 이러한 원하는 궤적을 따라 가도록 각 액추에이터에서는 PID 제어를 사용되었다.

로봇은 안정적으로 원하는 궤적을 추종하였으며, Fig. 9 및 10에서는 엉덩이와 오른쪽 다리의 거동을 실제 주어진 궤적과 실제 궤적을 비교하여 나타내었다. 4초 동안 총 5 걸음을 걷게 되는 이 시뮬레이션에서 엉덩이 부위와 오른쪽 발의 거동이 주어진 궤적을 잘 따라가고 있음을 볼 수 있다. Fig. 10의 첫 그림에서 스윙하는 발이 로봇의 측면방향으로 0.06 m에 중심을 두고 약간씩 변하고 있는데, 이 수치는 지면에 고정된 발을 기준하여 보았을 때 발의 폭과 발사이의 간격으로 인해 스윙하는 발의 위치가

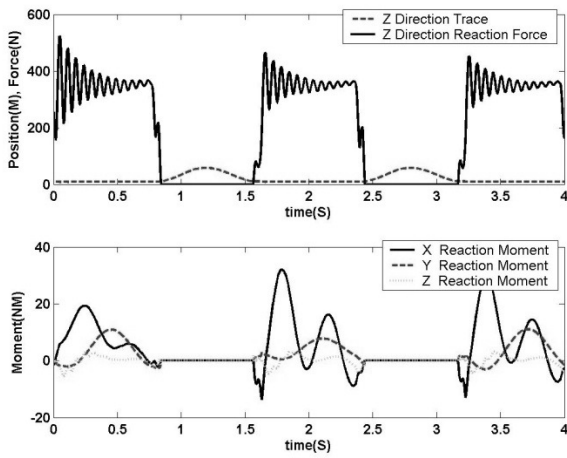


Fig. 11 Ground reaction force at the right foot

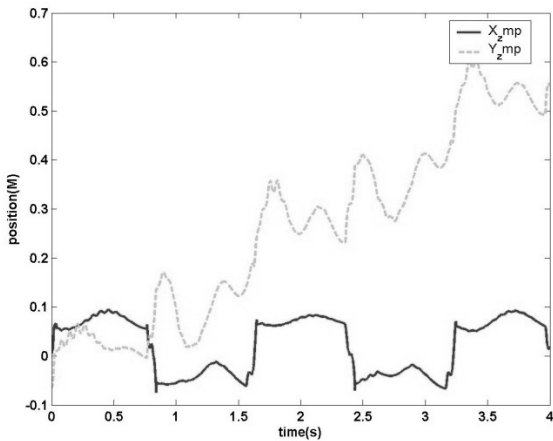


Fig. 12 Trajectory of the ZMP (Zero-Moment Point)

측면방향(여기서는 X축 방향으로 표시됨) 차이가 나는 것이다. 두 번째와 세 번째 그림에서 보듯 로봇의 진행방향으로 발의 궤적과 상하 궤적은 원하는 궤적을 잘 추종하였다.

지면으로부터 발이 받는 반발력 또는 임팩트의 크기를 제한하는 것은 보행의 안정성과 관절의 마모방지 면에서 매우 중요하다. 보행 시뮬레이션에서 로봇의 오른쪽 발이 지면으로부터 받는 수직 반발력을 Fig. 11에 나타내었다. 로봇의 스윙하던 발이 지면과 접촉하는 순간 임팩트가 발생하는 것과 곧 이어 이 다리가 몸무게를 지탱하기 시작 하는 과정에서의 몸무게에 해당하는 크기의 힘을 지면으로부터 받는 것을 알 수 있다. 반발력은 처음에는 진동현상이 보이고 다음에는 로봇의 몸체 무게에 해당하는 힘을 받는 것을 알 수 있다. 로봇 발의 착지는 발이 지면에서 튀거나 하는 현상이 없이 안정적으로 이루어졌음을 알 수 있다. 또한, 본 시뮬레이션에서 발과 지면과의 접촉을 위해 6 자유도

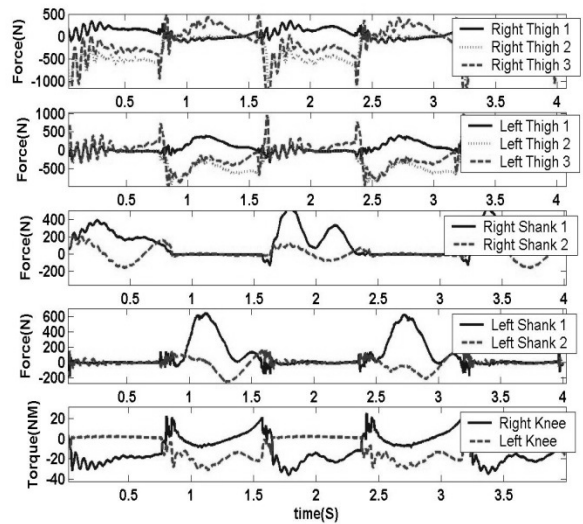


Fig. 13 Torque/force generated at the joint actuators

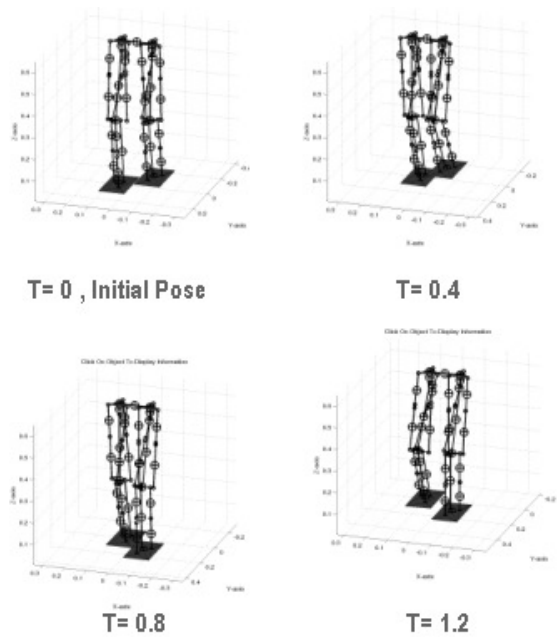


Fig. 14 Snapshots of walking simulations of the biped robot

의 환경모델을 사용하였기 때문에, 두번째 그림에서 볼 수 있듯이 발에 설정된 좌표계를 기준하였을 때 지면으로부터 발에 다양한 반력 모멘트가 작용함을 알 수 있다. 특히, 지지하는 발이 지면으로부터 받는 측면방향의 모멘트가 변하는 것은 로봇의 ZMP가 보행 중 (특히 발이 스윙하는 동안) 연속적으로 변하고 있음을 말해준다.

실제 로봇 보행 중의 ZMP의 거동을 살펴보면, Fig. 12에서 볼 수 있듯이, 전반적으로 보행방향으로 전진이동을 하면서 약간 앞뒤 방향으로 움직이고 있다. 이상적으로는 ZMP가 연속적으로 계속 전진하는 것이

바람직하나 매우 정교하게 최적화를 통해 생성된 궤적을 사용하지 않을 경우에 대부분 이와 같은 ZMP의 변화를 볼 수 있다. 또한, 이 그림은 측면 방향의 ZMP가 발바닥 내에서 변화하고 있음을 보여주고 있다.

로봇의 보행 중 각 액추에이터에서 발생하는 토크 및 힘은 Fig. 13에 나타나 있듯이 주기적으로 일정한 패턴을 보이고 있다. 이로부터 발의 피치 운동을 시키는 정강이부의 선형액추에이터가 발생시키는 힘이 롤 운동을 시키는 액추에이터보다 크다는 것 알 수 있다.

Fig. 14는 시뮬레이터 상에서 로봇이 보행을 하면서 왼발을 내딛고 난 뒤에 다시 오른 발을 올려드는 연결된 동작을 보여주고 있다. 기존의 시리얼 링크 구조의 다리를 갖는 2족 보행 로봇과 유사한 모습을 구현하면서도 무릎을 갖고 무릎각을 움직이는 자연스러운 모션을 하고 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 운반할 수 있는 하중에 제한이 있는 시리얼 구조형 보행 로봇의 단점을 보완하기 위해 3자유도 병렬형 플랫폼 2개를 직렬로 연결하여 이중으로 구성한 6자유도의 다리를 갖는 2족 보행 로봇을 제안하고 설계하였다. 이 로봇의 특징은 큰 하중의 물체를 지지하는 병렬형 구조에도 불구하고 2개의 병렬 구조의 연결부인 무릎을 갖는 구조를 갖고 있어, 보행하면서 발을 스윙할 때 자연스럽게 무릎을 굽힐 수 있기 때문에 인간의 보행처럼 자연스러운 보행 구현이 가능하다는 것이다. 이 로봇의 기구학적인 관절 변수는 로봇의 보행 동작이 쉽게 이루어 질 수 있도록 기구학적 분석을 통해 최적하게 결정하였다. 로봇의 기능을 검증하기 위해 중력 보상 역진자 모드에 근거하여 얻어진 보행 궤적을 사용하여 로봇의 동적 보행을 시뮬레이션 하였다. 로봇의 제어방식은 각 조인트별로 단순하게 독립적인 제어가 가능한 PID제어를 사용하였다. 이 로봇의 성공적인 동적 보행 시뮬레이션을 통해, 보행궤적의 생성, 제어 방식 및 제안된 로봇의 구조의 적합성을 입증하였다.

후 기

이 논문은 2004년도 한국학술진흥재단의 선도연구 과제 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2004-041-D00054)

참고문헌

(1) Hirai, K., 1997, "Current and Future Perspective of

- Honda Humanoid Robot," Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 500~508.
- (2) Kaneko, K., et al., 2002, "Design of Prototype Humanoid Robotics Platform for HRP," Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 2431~2436.
- (3) Kanehira, N., et al., 2002, "Design and Experiment of Advanced Leg Module (HRP-2L) for Humanoid Robot (HRP-2) Development," Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 2455~2460.
- (4) Kaneko, K., et al., 2004, "Humanoid Robot HRP-2," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1083~1090.
- (5) Morisawa, M., Yakoh, T., Murakami, T. and Ohnishi, K., 2000, "An Approach to Biped Robot with Parallel Mechanism," Proc. of Int. Workshop on Advance Motion Control, pp. 537~541.
- (6) Morisawa, M., Yakoh, T., Murakami, T. and Ohnishi, K., 2000, "A Comparison Study between Parallel and Serial Linked Structures in Biped Robot System," Proc. of Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 2614~2617.
- (7) Sellaouti, R., Konno, A. and Ouezdou, F. B., 2002, "Design of a 3 DOFs Parallel Actuated Mechanism for Biped Hip Joint," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1161~1166.
- (8) Sugahara, Y., Endo, T., Lim, H. O. and Takanishi, A., 2002, "Design of a Battery-powered Multi-purpose Bipedal Locomotor with Parallel Mechanism," Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 2658~2663.
- (9) Sugahara, Y., Endo, T., Lim, H. O. and Takanishi, A., 2003, "Realization of Stable Dynamic Walking by a Parallel Bipedal Locomotor on Uneven Terrain Using a Virtual Compliance Control," Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 595~600.
- (10) Park, J. H. and Kim, K. D., 1998, "Biped Robot Walking Using Gravity-Compensated inverted Pendulum Mode and Computed-Torque Control," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 3528~3533.
- (11) Kim, K. D. and Park, J. H., 1999, "Biped Robot Locomotion and Control Using Gravity-Compensated Inverted Pendulum Mode," *Trans. Of the KSME A*, Vol. 23, No. 2, pp. 209~216.
- (12) Hogan, N., 1985, Impedance control: an approach to manipulation: Part I-III, *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 107, pp. 1~24.
- (13) Park, J. H., 2001, "Impedance Control of Biped Locomotion," *IEEE Tr. On Robotics and Automation*, Vol. 17, No. 6, pp. 870~882.

- (14) Kwon, O. and Park, J. H., 2009, "Asymmetric Trajectory Generation and Impedance Control for Running of Biped Robots," *Autonomous Robots*, Vol. 26, No. 1, pp. 47~78.
- (15) Joshi, S. and Tsai, L.W., 2003, "A Comparison Study of Two 3-DOF Parallel Manipulators: One with Three and the Other with Four Supporting Legs," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 19, No. 2, pp. 200~209.
- (16) Tsai, L. W., 1999, *Robot Analysis: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators*, John Wiley & Sons.