

이족보행로봇의 설계와 동적보행을 위한 모의실험

박인규, 영영일
포항공과대학교 기계공학과

Design and Dynamic Walking Simulation of a Biped Robot

In-Gyu Park, Youngil Youm
Dept. of Mech. Engineering, POSTECH

Abstract - This paper presents a design of new type biped robot and dynamic walking simulation for this system. The robot is distinguished from other one by which has a parallel mechanism type trunk and lead-screw type actuators to drive the joints of the trunk, knee and ankle. The basic consideration on the design is that it is able to accommodate itself to human's daily environments without any other modification of around and also to operate its upper limbs more smoothly with a spine functional trunk. It is designed according to a human with about 130 cm height and about 30 kg weight. And it also is able to dynamically walk on an even ground. It has constructed with total 14 DOFs which have two legs, a hip, and a trunk. The joints of each leg and trunk are adopted with a parallel structure which has good kinematic characteristics and take light weight. To test of the capacity of joint actuators and to analysis of the dynamic properties of the biped robot, optimized trunk trajectory is determined by means of an approximated FFT method based on ZMP criteria, and dynamic simulation is performed using DADS with a 1.1 time/step velocity on the even ground during four steps.

1. 서 론

앞으로 다가올 고령화사회와 각종 안전사고 등의 위험으로부터 인간의 삶을 보조하기 위하여 인간 대부분의 생활공간 즉, 사무실, 병원, 공장, 심지어 가정에서 인간의 기능과 형태가 닮은 휴머노이드 로봇이 쉽게 이용될 것이고, 또한 이들의 활약이 크게 되리라 많은 연구자들이 예측하고 있다.

인간의 생활공간에서 활동을 자유롭게 할 수 있는 인간형 로봇은 인간의 형상정보와 유사함을 가지고 있어 인간의 생활공간에 어떠한 정리나 보수 없이 그대로 적용이 가능하여야 하며, 돌발적인 상황 예를 들어, 어린 아이들의 갑작스런 부딪힘, 주방기구 등의 흠어짐, 그리고 환자들을 급하게 이송해야 하는 등의 상황에 대처하기 위하여 구동기는 큰 힘과 강한 강성을 가지고 있어야 한다.

최근의 인간형로봇 개발분야의 특징을 살펴보면 자국의 구동기의 생산능력과 상당한 연관성이 있음을 알 수 있다. 일본에서는 자체 구동기의 원활한 설계 및 생산능력을 가지고 있어, 산업용로봇의 발전과 이것의 영향으로 직렬관절구조 이족보행로봇이 활발하게 개발되고 있다. 1985년 WL-10RD의 동적보행을 Kato에 의해 구

현된 이후, WABIAN-RII의 개발까지 꾸준히 진행되고 있다⁽¹⁾. 이와 아울러 Honda사에서 P2와 P3를, 그리고 ASIMO를 발표하면서 세계적으로 최고의 기술을 보유하게 되었다⁽²⁾. 최근에는 H6의 개발로, 보행의 실시간 자세보상뿐만 아니라, 많은 센서들을 이용하여 인간생활 공간에서의 인지작용(perception-action)에 까지 연구의 범위를 넓혀가고 있다^(3,4).

이와는 대조적으로 휴머노이드 개발의 역사가 비교적 짧은 미국, 유럽, 그리고 최근에는 중국 등에서는 구동기의 크기 변화에 비교적 적게 영향을 받는 screw 형태를 이용한 병렬구조(parallel structure)를 가지는 조인트 구동기를 적용하고 있다. MIT의 M2는 모든 조인트에 시리즈 elastic 구동기를 적용하여 제어와 조작의 편리성을 추구하였다⁽⁵⁾. 이 구동기는 힘 제어뿐만 아니라 충격완화의 기능을 가진다. 그리고 프랑스의 BIP-2000은 1995년부터 개발을 시작하여 2000년에 기초적인 걸음새구현을 성공하였다⁽⁶⁾. 힙 부분에는 회전관절을, 나머지 다리부의 구동에는 평행구조를 이용하였다. 인간의 부드러운 보행특성을 얻기 위하여 힙(pelvis)과 트렁크 사이에 관절을 추가한 것이 특징이다. 또한, 중국에서는 2003년까지 휴머노이드의 개발완성을 목표로 THBIP-I을 개발중이다⁽⁷⁾. 힙 부분에는 회전관절을, 다리부의 관절 구동을 위하여 평행구조를 역시 적용하였다. 지금까지 다리부의 제작이 끝났으며, 이 다리부를 위한 기초보행 모의실험을 마친 상태이다.

이 평행구조의 구동부는 직렬관절 구동부에 비하여, 모터의 구동효율이 크므로 구동기의 외관크기에 영향을 비교적 적게 받을 뿐만 아니라, 무게를 크게 줄일 수 있는 장점을 지니고 있다. 특히, 병렬기구가 가지는 강성특성(stiffness characteristics)를 가지고 있으므로 외란에 강한 특성을 지닌다. 또한 적은 감속비를 가지고 동력을 전달 할 수 있으므로 낮은 impedance특성을 지니므로 보다 자연스런 운동 특성을 얻을 수 있다⁽⁸⁾.

본 논문에서는 무게와 크기를 줄일 수 있을 뿐만 아니라, 구동기의 변화에 비교적 영향을 적게 받으며 운동학적인 특성이 우수한 병렬구조의 다리부 관절을 채택한다. 그리고, 상체의 운동특성 즉, 무거운 물건의 운반, 외부자극에 대한 빠른 응답특성을 강조하기 위하여, 상체부분인 트렁크 부분에 평행구조의 구동기를 적용한다. 기구학적으로 구성을 완료한 이족보행로봇의 동적 특성을 분석하기 위한 모의 실험을 직렬관절구조로 근사화된 이족보행로봇 모델을 이용하여 ZMP조건을 만족하는 균형추의 운동을 결정한 후, 상용 동역학 해석프로그램인 DADS를 이용하여 보행로봇의 보다 엄밀한 동적 보행을 구현한다.

2. 이족보행로봇의 설계 및 기구학적 구성

2.1 시스템의 설계

본 논문에서 제안된 시스템은 아직은 이족보행로봇이지

만, 앞으로 휴머노이드형태 로봇을 제작할 기초로서 인간의 보행형태 연구를 위하여 설계되었다. 이 이족보행 로봇은 인류의 생활공간에서 인류와 함께 생활이 가능한 휴머노이드를 구현하는 것을 목표로 한다. 실제의 표준으로 약 130cm 키의 인간을 기준으로 구성하였다⁽⁹⁾. 제작된 도면을 Fig. 1에 나타내었다. 여기서 M_i 는 i 번째 조인트를 위한 AC Servo Motor를 나타낸다.

본 설계의 특징은, 힙 부분에서 각 다리의 Yaw와 Roll 방향의 운동전달부분을 제외한 나머지 관절은, 구동부의 제작과 유지 및 보수성의 편리성과 관절의 강성을 고려하여 리이드 스크류로 동력을 전달하는 병렬기구를 일괄적으로 적용하였다. 그리고, 이 병렬기구를 적용함으로써 모터의 구동효율의 증대를 얻을 수 있으므로 무게를 가볍고 얇게 구성할 수 있었다. 여기서 주의할 부분은, 아직 완전한 운동을 묘사하지는 못하였지만, 원시적인 척추의 기능과 큰 힘과 빠른 외부 반응을 고려하여 설계된 트렁크 부분이다. 이것은 앞으로 다양해질 몸통의 운동을 고려하였다. 예를 들면, 두 팔의 장착을 통한 무게의 증가, 두 팔을 이용한 다양한 작업의 유연성, 그리고 몸통의 운동을 통한 부드러운 동적 보행의 수행 등이 있다.

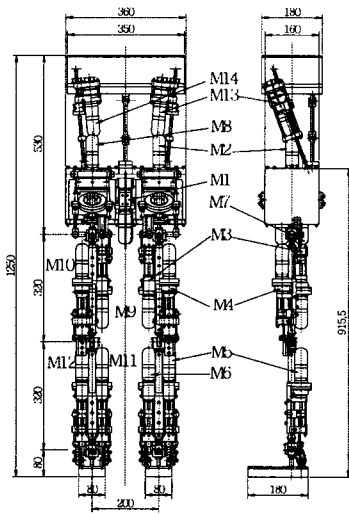


Fig. 1 Assembly drawing of a Biped Robot

설계된 시스템의 물성치를 Table 1에 나타내었다. 전체 시스템이 약 30 kg으로 사람의 경우와 유사함을 알 수 있다. 힙에는 세 개의 조인트가 함께 있으므로 대부분의 질량이 몰려있다. 그리고 아직은 트렁크를 이용하여 동적 균형을 유지하는 시스템이므로, 본 시스템의 경우 무게와 길이가 인간의 경우를 고려해야 하므로 제한이 되어있어 동적 보행에 어려움이 예상된다.

Table 1. Material properties of Biped system

Body name	Weight (Kg)	Principle and Product Inertia ($Kg \cdot m^2$)
Trunk	4.1365	0.085834, 0.007209, 0.118811 -0.000585, 0.001363, -0.004616
Hip	12.9055	0.151910, 0.059716, 0.147519 0.000076, -0.000056, 0.000001
Thigh	2.2343 × 2	0.013715, 0.013008, 0.003354 -0.000660, -0.001112, -0.001599
Calf	2.2394 × 2	0.013057, 0.011642, 0.002626 -0.000007, 0.000800, -0.000083
Foot	1.3544 × 2	0.001101, 0.004097, 0.004709 0.000000, 0.000017, 0.000000
Total	28.6983	

Table 2는 각 조인트의 운동범위를 인간이 보통의 보행을 할 때 생성하는 평균 관절 운동범위와 비교하여 나타내었다. 평범한 보행을 위한 충분한 운동범위를 가지고 있다. 그러나, 조그라 앉기를 할 경우의 무릎 관절 각도가 최대 120deg 정도까지 운동범위를 가지므로, 이 경우를 고려하여 도면을 수정해야 할 것으로 판단된다. 시스템의 모든 조인트에는 0.1 kw의 AC Servo Motor가 장착되어있다.

Table 2. Specification of joints

Joint name (Motor #)	Range of Rotation (deg)	Data for average human walking cycle(deg)
Hip Roll(M2,M8)	30, -30	8, -7
Hip Pitch(M3,M9)	-67.5, 65.5	30, -18
Hip Yaw(M1)	30, -30	5, -15
Knee Pitch(M4,M10)	0, 80	68, 8
Ankle Roll	20, -20	-
Ankle Pitch	-35, 45	10, -15

2.2 시스템의 기구학적 구성

기계시스템에서, 물체들을 연결하는 조인트에 생기는 기구학적 구속 조건식(kinematic constraint eq.s)

$\Phi^K(q)$ 는 조인트의 물리적인 특성을 대수적으로 표현한 방정식이다. 오일러 파라미터를 사용하여 공간상의 회전 운동을 나타낸 경우에는 오일러파라미터 구속 조건식 $\Phi^P(q)$ 를 함께 만족시켜야 한다. 그리고 시스템의 운동을 나타내는 구동 구속 조건식(driving constraint eq.s) $\Phi^D(q, t)$ 를 모두 포함하여 식(1)과 같은 시스템의 구속식을 구성한다⁽¹⁰⁾.

$$\Phi(q, t) = \begin{bmatrix} \Phi^K(q) \\ \Phi^D(q, t) \\ \Phi^P(q) \end{bmatrix} = 0 \quad (1)$$

그리고 식(1)의 시간에 대한 1차, 2차 편미분 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\Phi_q \dot{q} = -\Phi_t \quad (2)$$

$$\Phi_q \ddot{q} = -(\Phi_{qq} \dot{q} \dot{q} - 2\Phi_{qt} \dot{q} - \Phi_{tt}) = \gamma$$

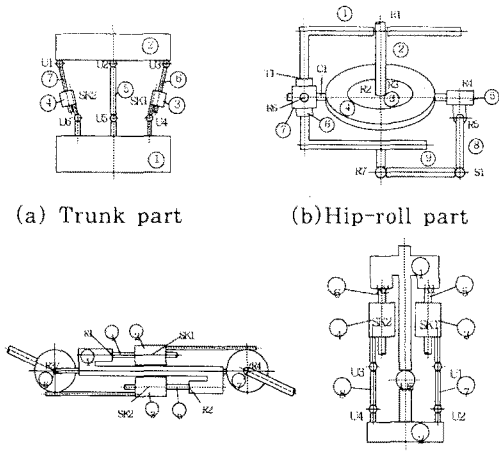
가 된다. 여기서 Φ_q 와 Φ_t 는 구속조건식의 좌표값 q 와 시간 t 에 대한 각각의 편미분을 나타낸다.

구속조건을 만족시키면서 운동방정식을 풀이하여야 하므로, 라그랑지승수(Lagrange multiplier)를 도입하여 시스템의 운동방정식을 다음과 같은 미분-대수방정식으로 구성한다.

$$\begin{bmatrix} M & \Phi_q^T \\ \Phi_q & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q^A \\ \gamma \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서, λ 는 라그랑지승수, Q^A 는 시스템에 작용하는 외력을 나타낸다. 그리고 $\Phi_q^T \lambda$ 의 항에서 구동구속에 해당하는 값들이 조인트 구동력에 해당한다. 위 식을 풀이하기 위하여, 기구학적 구속조건식을 구성하여야 한다. 이는 각 조인트들의 물리적 특성을 대수적으로 나타내는 식이다. 예를 들면, 회전조인트(revolute joint)는 두 물체사이에서 한 방향으로만 회전이 가능하도록 두 벡터가 직각을 이루도록 두 개의 Dot 1 구속조건을 부여하고 동시에 두 조인트가 한 점에 존재하도록 Spherical 구속을 동시에 주어 5개의 기구학적 구속을 가진다. 이와같은 방법으로 참고문헌(10)을 참조하여보면, 구형(Spherical) 조인트는 3개, 평행(Translation) 조인트는 5개, 스크류 조인트 5개, 유니버설 조인트 4개를 각각 가진다. Dist-Ang 구속은 스크류 조인트에 의한 거리가 래크-피니언운동으로 회전운동이 일어나도록 하는 구속식이다. 설계된 이족보행로봇의 조인트 구성은 Fig.

2에 나타내었다. 그리고 이렇게 설정한 조인트들의 타당성을 알아보기 위하여 Table 3에 구속조건들의 상호관계와 이에 의한 자유도를 알아보았다. 트렁크를 제외한 나머지 부분은 모두 짝을 이루므로, 본 시스템이 14 자유도를 가짐을 알 수 있다.



(a) Trunk part (b) Hip-roll part
(c) Thigh part (d) Calf and foot parts
Fig. 2 Schematic drawing for kinematic construction of each joint part

Table 3. Construction of kinematic constraints

	Trunk	Hip Yaw	Hip Roll	Thigh	Calf & foot
bodies	7	2	9	7	8
Constraints (nh)	49	14	63	49	56
Revolute(R)	-	1×5	7×5	4×5	2×5
Translate(T)	-	-	1×5	-	-
Screw(SK)	2×5	-	-	2×5	2×5
Universal(U)	6×4	-	-	-	5×4
Cylinder(C)	-	-	1×4	-	-
Spherical(S)	-	-	1×3	-	-
Dot 1	-	-	-	2×1	-
Dist-Ang	-	-	-	2×1	-
Euler Para	7×1	2×1	9×1	7×1	8×1
Ground	1×6	1×6	1×6	1×6	1×6
nc	47	13	62	47	54
DOF(=nh-nc)	2	1	1	2	2

3. 동적보행

앞 장에서 구성한 시스템의 운동특성을 알아보기 위하여 본 장에서는 복잡한 평행구조의 이족보행로봇을 비교적 간단한 직렬관절구조로 근사화 한다. 이 근사화된 시스템은 Fig. 3에 이동 좌표계와 함께 나타내었다. 그리고 이 근사화된 시스템을 질점들(particles)로 가정 한 후, 임의의 원하는 위치에 대한 D'Alembert의 원리를 이용하여 모멘트 평형 방정식을 구성한다. 이 임의의 원하는 위치가 지면일 경우, 그 위치를 $[X_{zmp}, Y_{zmp}, 0]^T$ 로 나타내고 ZMP점이라 정의한다. 이 점의 식으로 모멘트 평형방정식을 정리하면 다음과 같다.⁽¹¹⁾

$$X_{zmp} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g_z) x_i - \sum_{i=1}^n m_i \ddot{x}_i z_i}{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g_z)} \quad (4)$$

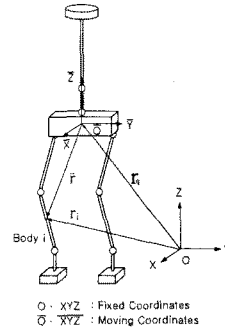


Fig. 3 Approximated biped model to serial joints and moving coordinate system

$$Y_{zmp} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g_z) y_i - \sum_{i=1}^n m_i \ddot{y}_i z_i}{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g_z)} \quad (5)$$

위 식(4)와 식(5)에서 트렁크의 항으로 정리한다. 그리고 나머지 항을 $\alpha(t)$ 와 $\beta(t)$ 로 묶은 후, 이 식을 다시 이동 좌표계 $[\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}]^T$ 의 항으로 나타낸다. 그리고 선형화를 수행하면 다음과 같은 두 개의 독립선형방정식을 얻을 수 있다.

$$(\bar{z}_T + z_q) \bar{x}_T - g_z \bar{x}_T = \alpha'(t) \quad (6)$$

$$(\bar{z}_T + z_q) \bar{y}_T - g_z \bar{y}_T = \beta'(t) \quad (7)$$

여기서,

$$\alpha'(t) = \alpha(t) - \bar{z}_T \dot{\alpha}(t) - \bar{z}_T g_x$$

$$\beta'(t) = \beta(t) - \bar{z}_T \dot{\beta}(t) - \bar{z}_T g_y$$

위의 식을 수정 FFT방법을 이용하여 ZMP의 구속을 만족하는 최적의 트렁크의 운동을 구한다.

그러나 이 트렁크의 운동방정식은 질점으로 모델이 되어 있어 실제 시스템과 많은 오차를 가진다. 그러므로 지면 접촉의 상황 즉, 발바닥의 임의의 위치가 지면에 접촉해 있어야 할 조건인 수직반력이 양의 값을 가져야 하는 조건과 지면에 작용하는 수평반력이 최대정지마찰력보다 작아야 하는 조건을 모두 만족하는 트렁크의 운동을 결정하여야 한다.

4. 모의실험

지금까지 이족보행로봇 설계 및 이 시스템의 기구학적 구성과 병렬링크로 이루어진 복잡한 시스템의 ZMP조건을 만족시키면서 동적보행을 수행하기 위한 트렁크의 운동을 결정하는 과정을 조사하였다.

설계한 시스템의 동적 특성을 분석하기 위하여 보행성인의 걸음속도의 근사치인 1.1sec/step, 0.3m/step에 대하여 네 보 진진보행하는 경우에 대하여 모의실험을 수행한다.⁽¹²⁾

Fig. 4는 모의실험에 사용된 DADS 3차원 모델을 보여준다. 선정된 ZMP의 궤적에 대한 트렁크의 운동을 결정하기 위해 식(6)과 식(7)의 최적해법과정에서 오차의 수렴성을 Fig. 5에서 도시하였다.

Fig. 6에서는 얻어진 최적의 균형추, 힙 궤적, 그리고 두 발의 궤적을 입력으로 역동역학 해석 범위에서 모의 실험을 한 결과를 나타내었다. 비교적 짧은 몸통의 길이로 인하여 큰 트렁크의 운동을 나타내지 못하므로 이를 보완하기 위하여 힙의 운동을 크게 주어서 보상하고자 하였다. Fig. 7에서 ZMP의 궤적에서 운동하는 대부분의 시간동안 한 점에 있도록 하였다. 그리고, DADS모

델과 근사화된 모델사이의 오차로 인하여 ZMP의 일부의 위치가 발바닥을 벗어나 있음을 알 수 있다.

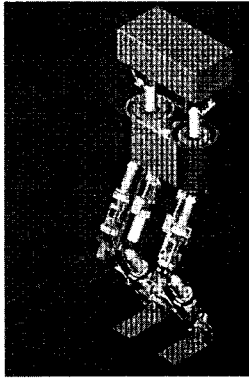


Fig. 4 3D DADS model of biped for simulation

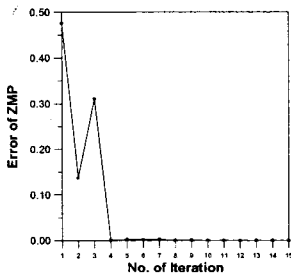


Fig. 5 Convergence of ZMP error to tolerance limit

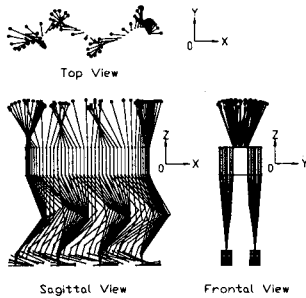


Fig. 6. Result of Inverse Dynamic simulation (4step; 0.3m/step, 1.1sec/step)

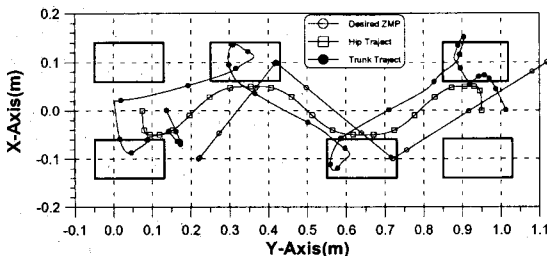


Fig. 7 Relationship between ZMP, Hip, and Trunk trajectories

역동역학 해석을 통하여, 전체 시스템의 조인트 운동을 얻은 후, DADS에서 실제 Forward dynamic 해석을 수행하는 과정에서 두 모델사이의 오차로 인하여 정확한 동적보행에 어려움이 있었다.

3. 결론 및 고찰

병렬구조를 갖는 구동기를 가진 이족보행로봇의 설계와 이 시스템의 동적 특성을 분석하기 위한 모의실험의 수행을 위한 과정을 살펴보았다. 본 연구를 통하여 다음의 사항을 정리할 수 있었다.

(1) 인간의 생활공간에서 주위환경 변화 없이 적용가능한 이족보행로봇을 개발하기 위한 인간의 운동범위와 크기를 분석하는 과정에서 병렬구조로 로봇을 설계하는 경우, 인간과 유사한 신체의 크기 및 무게를 얻는데 유리하다.

(2) 병렬구조를 이루는 경우, 시스템의 강성이나 기계적 운동특성이 많이 개선되지만, 시스템의 해석을 위한 운동방정식이나 DADS 모델에는 상당한 어려움과 노력이 필요하다.

(3) 보행에 영향을 주는 파라미터 분석의 미비와 잘못된 최적 트렁크의 운동특성을 얻는 방법의 미완성으로 동적보행의 구현에 많은 문제점이 있었다.

(4) 제한된 트렁크의 길이로 인하여 트렁크의 운동이 크게 움직여서 시스템의 모델링 오차를 증폭시키는 것으로 판단된다. 트렁크의 운동을 최소화하는 방안을 고려하여야 할 것으로 보인다.

앞으로, 다물체 동역학 기법을 이용하여 시스템의 운동방정식을 얻은 후 보다 엄밀한 트렁크의 운동을 결정을 해야 할 것이다. 그리고, 이족보행로봇은 많은 제어 변수들이 있는데 이들을 체계적으로 상호관계를 파악하기 위한 모의시험기를 개발하여야 할 것으로 판단된다.

(참 고 문 헌)

- [1] Hun-ok Lim and Atsuo Takanishi, "Waseda Biped Humanoid Robots Realizing Human-like Motion", Proc. of Advanced Motion Control, pp. 525-530, 2000
- [2] Hirai K, Hirose M, Haikawa Y, and Takenaka T, "The Development of Honda Humanoid Robot", IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1321-1326, 1998
- [3] Q. Huang, Y. Nakamura, and T. Inamura, "Humanoids Walk with Feedforward Dynamic Pattern and Feedback Sensory Reflection", IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 4220-4225, 2001
- [4] S. Kagami, K. Nishiwaki, and T. Sugihara, "Design and Implementation of Software Research Platform for Humanoid Robotics:H6", Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 2431-2436, 2001
- [5] D. Paluska, "Design of a Humanoid Biped for Walking Research", Thesis on MIT, 2000
- [6] B. Espiau and P. Sardain, "The Anthropomorphic Biped Robot BIP2000", IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 3996-4001, 2000
- [7] Li Liu, J. Wang, J. Zhao, and D. Yang, "The Biped Humanoid Robot THBIP-I", Int. Conf. on Bio-Robotics & Teleoperation, pp. 164-167, 2001
- [8] 이민기, 김태성, 이원철, "병렬기구형 로봇 및 공작기계에 관한 연구", 한국정밀공학회지, 제18권, 제7호, pp. 9-18, 2001
- [9] David A. Winter, "Biomechanics of human movement", John Wiley & Sons, 1979
- [10] E. J. Haug, "Computer-Aided Kinematics and Dynamics of Mechanical Systems, Vol. I, Basic Methods", Allyn and Bacon, 1989
- [11] 박인규, 김진걸, "이족로봇의 동적 보행계획과 역동역학 해석", 한국정밀공학회지, 제17권, 제9호, pp. 133-144, 2000
- [12] 김상훈, "통합보행분석시스템 구축과 단하지보조기 평가에의 적용", 포항공과대학교 산업공학과 석사학위논문, 2000