

인간의 보행 패턴 분석을 통한 최적의 보행 제어 인자 추출에 대한 연구 A Study to acquire optimal gait control parameter based by analysing human walking pattern

하승석, 한영준, 한헌수

서울시 동작구 숭실대학교 전자공학과
E-mail: {ssu1004, young, hahn}@ssu.ac.kr

요 약

본 논문은 인간의 보행에 대한 에너지 분석을 통해 biped robot의 설계 단계에서 최적의 보행제어인자를 추출하기 위한 연구이다. 에너지 효율이 높은 보행인자 값을 얻기 위해 인간의 보행영상을 획득하고, 획득된 영상을 5-link biped robot model로 근사화하여 dynamics와 energy를 분석한다. 또한 link의 길이 비율과 link의 무게, link의 관성의 변화를 통해 5-link로 근사화된 인간의 보행 효율과 기구적 요소 사이의 민감도를 판단할 수 있다. 인간과 자유도가 다른 biped robot이 인간과 같은 보행을 위하여 설계단계에서 고려되어야 할 중요한 기구적 요소가 이러한 민감도를 통해 구해진다.

Key Words : 5-Link biped robot, dynamics, energy analysis, sensitivity

1. 서 론

오래 전부터 인류는 보다 편리하고 윤택한 삶을 위하여 인간의 일을 돕는 도구를 개발하고 발전시켜 왔다. 1960년대에는 산업용 로봇이 출현하게 되었고, 이를 계기로 인간을 위한 도구의 발달은 더욱 가속화 되었다. 인간중심의 작업 환경에서 보다 능률적인 작업 활동을 위해 인간과 함께 생활 하며, 인간을 대신하는 능력을 갖춘 robot들이 개발되고 있다. 2000년대에는 인간과 비슷한 보행과 감각, 지능까지 갖춘 ASIMO와 같은 Humanoid robot이 개발되었다.

지난 20여 년간 많은 연구자들에 의하여 Humanoid robot 분야는 크게 2가지 영역으로 연구되고 발전시켜 왔다. 하나는 이족보행을 위한 mechanism에 관한 연구 분야이고, 다른 하나는 비전, 음성 인식 등 센서기반 인공지능에 관한 연구이다.

이족보행을 위한 mechanism에 관한 연구는 초기 정적 보행을 가능하게 만들고, 그 후 자연스러운 동적 보행을 위한 연구들이 진행 중에 있다. Biped robot은 초기 설계에 따라 한 정된 에너지 하에서 인간과 같은 안정적인 동적보행이 가능하다.

이를 위해 기존의 연구들은 Biped robot의

임의의 보행 패턴과 기구적 요소의 연관성에 관한 연구와 인간의 보행해석에 대한 연구를 수행하였다.

Silva 등은 biped robot의 hip ripple, hip offset, foot clearance에 대한 에너지를 측정하여 에너지를 최소화 시키는 hip의 높이와 step length값을 얻었다[1]. 또한 Liu는 인간의 보행과 비슷한 형태의 robot보행을 구현하고자 인간의 Zero Moment Point(ZMP)를 측정하고 또한 인간 관절의 각도, 각속도, 각가속도를 측정하였다. 이렇게 얻은 인간의 데이터를 biped robot에 적용하여 로봇의 보행을 구현하였다[2]. 이 논문에서는 인간의 보행 패턴을 robot에 적용하여 로봇의 보행을 수행했지만, 인간과 다른 자유도를 가진 robot에게 인간의 보행 패턴을 적용한다는 한계를 가지고 있다.

이러한 문제점을 극복하고 인간과 닮은 biped robot의 보행을 구현하기 위해, biped robot의 설계 단계에서 고려되어야 할 중요한 기구적 요소에 대한 연구가 선행되어야 한다. 따라서 본 논문에서는 인간의 보행 패턴을 분석하기 위하여 인간의 보행 영상을 촬영하여, 인간의 기구적 요소를 측정하였다. 측정된 데이터를 5-link biped robot model로 근사화하여 Double Support Phase(DSP)와 Single Support Phase(SSP)에 대한 dynamics 해석을

통해 인간의 보행패턴에 대한 energy를 분석하였다. 그리고 link의 길이 비율과 link의 무게의 변화가 5-link로 근 사화된 인간의 보행에 미치는 영향을 민감도를 측정하여 분석하였다.

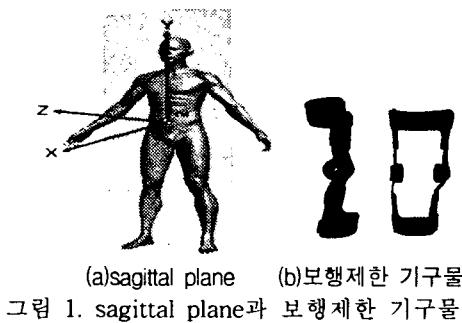
본문은 2장에서 인간의 보행에 대하여 기술하고, 3장에서는 5-link biped model을 기술하였으며 4장에서는 인간의 보행을 분석하는 방법을 기술한다.

2. 인간의 보행

Biped robot에 관한 연구는 안정적인 보행과 에너지 효율이 높은 보행을 구현하기 위하여 인간의 보행 특성에 대한 해석이 불가피 하다.

인간의 보행은 3D deformable model이며 많은 자유도를 가진 구조물이기 때문에 인간의 보행을 해석하기에는 많은 어려움이 따른다. 이러한 문제점을 극복 하고자 인간의 보행을 해석하기 위해 생리학자들에 의해 많은 연구가 진행되었다. 이들은 인간의 보행 중 거의 모든 dynamics요소들이 그림 1-(a)와 같이 인간의 몸을 반으로 나눈 x-y 평면상의 절단면(sagittal plane)에 존재하고 있음을 증명하였다 [3].

본 논문에서도 인간의 보행을 분석하기 위해 인간의 측면 보행 영상을 획득하여 5-link biped model로 근 사화하였다. 또한 인간의 보행을 최대한 sagittal 평면으로 제한하기 위하여 그림 1-(b)와 같은 허벅지와 종아리에 보행 제한 기구물을 착용하여 인간의 z축으로 보행을 제한하였다.



3. 5-link biped model

그림 2는 본 논문에서 인간의 보행을 해석하기 위한 5-Link biped model을 보여준다. 5개의 link로 이루어진 5-link biped model은 1개의 상체 link와 2개의 허벅지, 2개의 종아리 link를 가진 model이다. 이때 각 link를 잇는 모든 관절들은 회전 관절들이다.

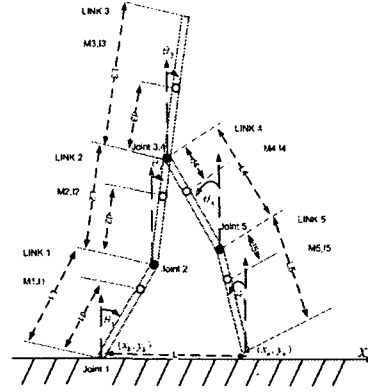


그림 2. 5-link biped model

그림 2에서 5-Link biped model의 보행에 영향을 주는 인자들은 다음과 같다.

- M_i : i번째 link의 무게
- L_i : i번째 link의 길이
- d_i : i번째 joint에서 COM까지의 거리
- I_i : i번째 link의 moment of inertia
- θ_i : i번째 link의 각도
- (x_e, y_e) : 지지하고 있는 다리의 좌표
- (x_b, y_b) : swing하고 있는 다리의 좌표
- τ_i : i번째 link의 control torque

4. 보행 분석

인간의 에너지를 측정하고 분석하기 위한 시스템의 구성도는 그림 3과 같다. 먼저, 인간의 보행 영상으로부터 5-link biped robot으로 간략화 하고 보행인자와 기구적 인자를 획득한다. 획득된 인자간의 dynamics를 통해 에너지를 측정하여 각 5-link biped robot의 보행 인자들을 변화시켜 민감도를 판단한다.

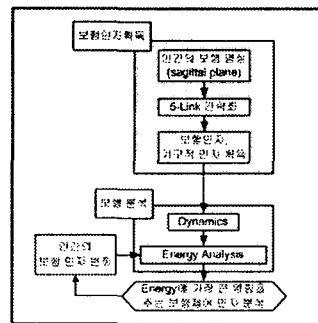


그림 3. 전체 시스템 구성도

4.1 Dynamics

본 논문에서는 Lagrangian 방정식을 사용하여 Single Support Phase 와 Double Support Phase의 dynamics를 해석하였다[4].

4.1.1 Single support phase(SSP)

인간의 보행 중 가장 많은 영역을 차지하는

SSP의 dynamics는 식 (1)에서와 같이 구할 수 있다.

$$D(\theta)\ddot{\theta} + H(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) = T \quad (1)$$

여기서 $D(\theta)$ 는 5×5 inertia matrix, $H(\theta, \dot{\theta})$ 는 5×5 Centrifugal and Coriolis matrix, $G(\theta)$ 는 5×1 Gravity matrix, $\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}, T$ 는 5×1 coordinate, velocities, accelerations, torque matrix이다.

4.1.2 Double support phase(DSP)

DSP 구간에서는 두 다리가 지면에 동시에 닿아 있어 식 (2)과같이 보행 중 땅에 닿은 두 발의 좌표 점으로 부터 두 가지의 구속 조건이 존재 하게 된다.

$$\Phi(\theta) = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_e - x_b - L \\ y_e - y_b \end{bmatrix} = 0 \quad (2)$$

$$\dot{\Phi}(\theta) = J(\theta)\dot{\theta} = 0 \quad (3)$$

$$\ddot{\Phi}(\theta) = J(\theta)\ddot{\theta} + \dot{J}(\theta)\dot{\theta} = 0 \quad (4)$$

$J(\theta)$ 는 식 (5)과 같은 Jacobian matrix이다.

$$J = \begin{bmatrix} l_1 \cos \theta_1 & l_2 \cos \theta_2 & 0 & l_4 \cos \theta_4 & l_5 \cos \theta_5 \\ -l_1 \sin \theta_1 & -l_2 \sin \theta_2 & 0 & -l_4 \sin \theta_4 & -l_5 \sin \theta_5 \end{bmatrix} \quad (5)$$

따라서 Double Support Phase의 dynamics는 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$D(\theta)\ddot{\theta} + H(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) = J^T(\theta)\lambda + T \quad (6)$$

여기서 λ 는 2×1 Lagrange multiplier matrix이다. Lagrange multiplier matrix는 식 (2)-(4)의 두 가지의 구속 조건으로 부터 구할 수 있다. 식 (6)에서 $J D^{-1}$ 을 양변에 곱함으로써 다음 식 (7)과 (8)을 구할 수 있다.

$$J\ddot{\theta} + J D^{-1}h = (J D^{-1} J^T)\lambda + J D^{-1}T \quad (7)$$

$$\ddot{\theta} = D^{-1}((T - h) + J^T \lambda) \quad (8)$$

또한 식 (4)를 식(7)에 대입하여 Lagrange multiplier matrix를 식 (9)와 같이 구할 수 있다.

$$\lambda = -(J D^{-1} J^T)^{-1}(J D^{-1}(T - h) + \dot{J}\dot{\theta}) \quad (9)$$

4.2 에너지 분석

식 (10)와 같이 각 Phase 마다 얻은 i 번째 link의 torque값과 각속도의 곱으로 인간의 보행의 power를 다음 식(10)으로 구할 수 있다.

$$P_i = \tau_i \cdot \omega_i \quad (10)$$

여기서 τ_i 는 i 번째 토크이고 ω_i 는 i 번째 각속도이다. 이때 i 번째 link의 energy는 식 (11)과 같이 한 주기 t_0 부터 t 까지 식 (10)의 power를 적분하여 얻을 수 있다.

$$E_i = \int_0^t P_i dt \quad (11)$$

5-link biped model의 전체 energy는 식 (11)으로부터 구할 수 있다.

$$E_{total} = \sum_{i=1}^5 E_i \quad (12)$$

4.3 민감도

기구적 요소의 변화가 보행 에너지에 미치는 영향을 알아보기 위하여 기구적 요소에 대한 에너지의 변화율을 계산한다.

식 (13)과 같이 민감도는 기구적 요소의 변화가 총 보행 에너지에 미치는 영향으로 정의할 수 있다.

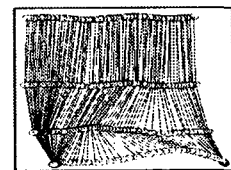
$$S_{E/P} = \lim_{\Delta p \rightarrow 0} \frac{\text{에너지 변화 비율, } E}{\text{기구적 요소 변화 비율, } P} = \frac{P \delta E}{E \delta P} \quad (13)$$

5. 실험 및 결과

그림 4-(a)처럼 인간의 보행을 측정하기 위해 피 실험자의 몸에 4개의 marker와 2개의 보행제한 기구물을 부착하여 초당 70frame의 CCD 고속 카메라를 통해서 인간의 보행 패턴을 얻었다. 자체 제작한 marker 추적 프로그램을 통해 그림 4-(b)와 같이 시간에 따른 link의 변위와 그림 5와 같이 시간에 따른 각도의 변화를 얻었다.



(a)보행 영상



(b)stick diagram

그림 4. 인간의 보행 영상과 stick diagram

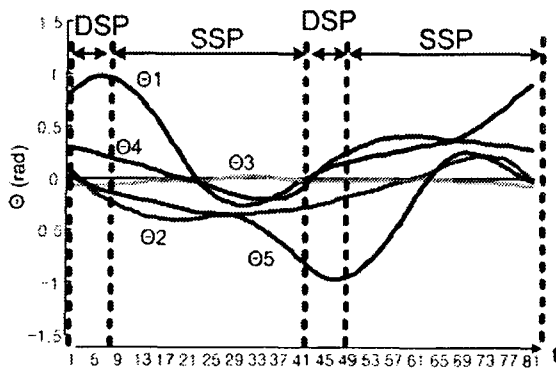


그림 5. 시간에 따른 link의 각도

시간의 따른 각도의 변화와 인간의 기구적 인자의 데이터를 사용하여 link1, link2, link3, link4, link5의 토크값을 그림 6과 같이 계산하였다.

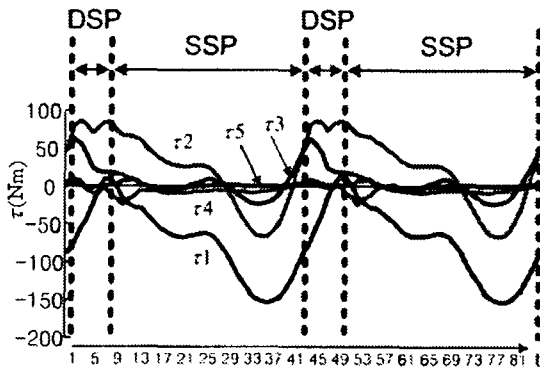


그림 6. 시간에 따른 인간의 보행 중 토크 변화

5-link biped model로 근 사화된 인간의 보행 에너지와 기구적 데이터 사이의 민감도를 확인하기 위하여 기구적 인자 정보를 표 1과 같이 변화 시키면서 민감도를 측정하여 인간의 보행에 영향을 주는 중요한 기구적 요소를 찾을 수 있다.

표 1. 기구적 요소의 변위와 민감도

기구적 요소	변위	민감도
link 1과 link2 길이의 비율	0.02	0.072054
상체와 하체의 길이의 비율	0.02	0.005169
link 1과 link2 무게의 비율	0.2	0.000146
상체와 하체의 무게의 비율	0.2	0.000188

link 1의 길이, 무게와 link 2의 길이, 무게의 비율, 또한 link 3과 link 1+link 2의 길이, 무게의 비율로써 민감도를 측정하였다. link 1과 link2의 비율이 다른 기구적 요소의 변화보다 민감도가 상대적으로 크게 나타났다. 민감도가

가장 높은 link 1과 link 2의 비율에 따른 토크의 변화는 그림 7과 같다.

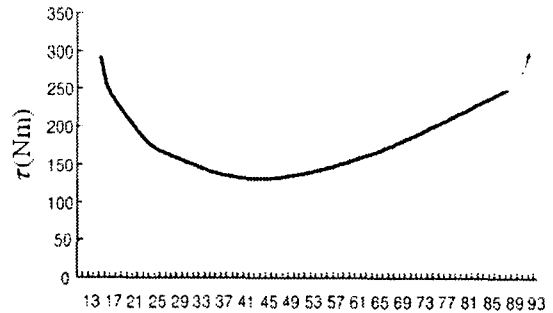


그림 7. link1과 link2의 비율에 따른 토크의 변화

그림 7은 link 1의 길이를 0.01m부터 다리의 총 길이 까지 늘려가며 측정한 토크의 변화이다. link 1과 link 2의 길이의 비율은 다리의 총길이에 link 2의 길이가 50%~60%의 길이를 가질 때 보행 에너지의 효율이 높게 나타났다.

6. 결론

biped robot이 인간과 같은 안정적이고 에너지 효율적인 보행을 이루기 위해서 인간의 보행 패턴을 biped robot에 적용하고자 하는 연구가 많이 이루어졌지만 인간과 다른 기구적 요소를 가진 biped robot에 인간의 보행 패턴을 직접적으로 적용하기 어렵다. 하지만, 인간의 보행 패턴을 따르면서 본 논문에서 제안한 중요한 인자들의 에너지 변환에 따른 민감도를 참조하여 biped robot을 설계하면 에너지 효율적인 로봇의 보행을 구현할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] Filipe M. Silva, "Energy Analysis During Biped Walking" Proceeding of the 1999 IEEE, Vol. 1, pp. 59-64, 1999
- [2] Li Liu, "Gait designing of biped robot according to human walking based on six-axis force sensors" Proceeding of the 2003 IEEE, Vol. 1, pp. 306-365, 2003
- [3] A. Borghese, "Kinematic determinants of human locomotion" J.Physiology, pp. 863-879, 1996
- [4] Xiuping Mu, "A Complete Dynamic Model of Five-Link Bipedal Walking" Proceeding of the 2003 IEEE, Vol. 1, pp. 4926-4931, 2003