

인간의 COG 궤적의 분석을 통한 5-link 이족 로봇의 보행 패턴 생성

(Gait Pattern Generation of 5-link Biped Robot Based on
Trajectory Images of Human's Center of Gravity)

김 병 현 [†] 한 영 준 ^{**} 한 현 수 ^{**}
(Byoungyun Kim) (Youngjoon Han) (Hernsoo Hahn)

요약 인간이 최소 에너지를 소비하면서 자연스럽게 안정된 상태로 보행한다는 것에 착안하여, 본 논문은 인간 보행의 COG 궤적을 분석함으로써 인간형 이족로봇의 자연스러운 보행에 관한 연구를 수행한다. 이를 위해서 본 논문은 sagittal plane과 frontal plane상의 보행 영상으로부터 계측된 COG 궤적을 고려함으로써 안정적이고 에너지를 최소화하는 자연스러운 이족로봇의 보행 패턴을 생성한다. 인간과 이족로봇은 기구학적인 형태는 유사하지만 자유도에 있어 많은 차이를 보이기 때문에 추출된 인간 관절의 회전력을 이족로봇에 바로 적용할 수 없다. 본 논문에서는 인간의 보행패턴으로부터 계측된 각 관절의 회전력과 인간의 COG 궤적으로부터 계산된 ZMP를 이용하는 적응적 보행 패턴 생성 GA 알고리즘을 통해 5-link 이족로봇 모델의 보행패턴을 생성한다. 제안된 알고리즘은 인간의 각 관절의 회전력과 ZMP 궤적을 고려하기 때문에 인간과 같이 유연하고 에너지를 최소화하는 인간형 이족로봇의 보행패턴을 생성한다. 본 논문은 역기구학을 이용한 일반적인 방법과 제안하는 방법에 의해 생성된 보행 패턴을 각각 5-link 이족로봇 모델에 적용하여 시각적인 측면과 에너지 효율측면에서 평가함으로써 제안하는 알고리즘의 우수성을 입증하였다.

키워드 : 5-link 이족 로봇, 보행 패턴, COG(Center Of Gravity), ZMP(Zero Moment Point)

Abstract Based on the fact that a human being walks naturally and stably with consuming a minimum energy, this paper proposes a new method of generating a natural gait of 5-link biped robot like human by analyzing a COG(Center Of Gravity) trajectory of human's gait. In order to generate a natural gait pattern for 5-link biped robot, it considers the COG trajectory measured from human's gait images on the sagittal and frontal plane. Although the human and 5-link biped robot are similar in the side of the kinematical structure, numbers of their DOFs(Degree Of Freedom) are different. Therefore, torques of the human's joints cannot be applied to robot's ones directly. In this paper, the proposed method generates the gait pattern of the 5-link biped robot from the GA algorithm which utilize human's ZMP trajectory and torques of all joints. Since the gait pattern of the 5-link biped robot model is generated from human's ones, the proposed method creates the natural gait pattern of the biped robot that minimizes an energy consumption like human. In the side of visibility and energy efficiency, the superiority of the proposed method have been improved by comparative experiments with a general method that uses an inverse kinematics.

Key words : 5-link biped robot, gait pattern, COG(Center Of Gravity), ZMP(Zero Moment Point)

· 본 연구는 숭실대학교 교내연구비 지원으로 이루어졌음

· 본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음(ITTA-2008-C1090-0803-0006)

[†] 학생회원 : 숭실대학교 전자공학과
forceral@naver.com

^{**} 정회원 : 숭실대학교 정보통신전자공학부 교수
young@ssu.ac.kr
hahn@ssu.ac.kr

논문접수 : 2008년 10월 13일

심사완료 : 2009년 1월 29일

Copyright©2009 한국정보과학회 : 개인 목적이나 교육 목적인 경우, 이 저작물의 전체 또는 일부에 대한 복사본 혹은 디지털 사본의 제작을 허가합니다. 이 때, 사본은 상업적 수단으로 사용할 수 없으며 첫 페이지에 본 문구와 출처를 반드시 명시해야 합니다. 이 외의 목적으로 복제, 배포, 출판, 전송 등 모든 유형의 사용행위를 하는 경우에 대하여는 사전에 허가를 얻고 비용을 지불해야 합니다.

정보과학회논문지: 소프트웨어 및 응용 제36권 제2호(2009.2)

1. 서론

인간은 자연스런 보행으로 에너지 소비를 최소화하는 방향으로 진화되어 왔다. 인간형 구조를 갖는 이족로봇이 인간의 보행 패턴을 추종할 때에 자연스럽게 에너지 효율이 높다. 하지만, 인간형 이족로봇은 사람과 달리 자유도의 제한으로 동적인 움직임에 많은 제약이 있다. 따라서 인간형 로봇이 과거에 안정적인 운동을 위해 주로 바퀴에 의존해왔지만 이족 로봇의 출현으로 보행의 동적 안정성에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

기존의 연구들을 보면 Magdalena[1]는 기준 보행 패턴 기반 퍼지 시스템의 학습을 통해 이족로봇의 보행 패턴을 생성 하였다. Huang[2]은 엉덩이와 발의 궤적을 생성하여 로봇에 적용함으로써 보행 패턴을 생성하였으며, Endof[3]는 형태론에 입각한 초기값의 설정과 GA (Genetic Algorithm)의 진화연산 및 평가를 통해 이족로봇의 보행패턴을 최적화 시키는 연구를 수행하였다. 기존 연구들은 이족로봇의 구조에 적합한 보행 패턴 생성에만 중점을 두었기 때문에 인간과 같은 자연스러운 보행이 불가능하다는 단점이 있다.

또한, 이족로봇의 안정적인 보행 패턴을 생성하기 위해서 Vukobratovic[4]은 동적 평형 상태임을 판단할 수 있는 Zero Moment Point(ZMP)를 제안하였다. ZMP를 얻기 위해 Kajita[5]는 인간의 외형을 1개의 관절과 1개의 링크로 단순화 시킨 역진자 모델 방법을 사용하였으며, Huang[6]은 보행 안정성을 만족하는 최적의 목적 ZMP를 설정한 후 발바닥으로 형성된 안정영역에 만족하는 발과 허리의 궤적을 생성하였다. Arbulu[7]는 인간의 ZMP를 얻기 위해서 발바닥에 압력 센서를 부착하여 압력의 변화를 통하여 전체적인 기울어진 정도를 얻음으로써 바닥 평면에서의 ZMP궤적을 얻었다. 많은 논문들이 COG의 2차원 평면상의 움직임을 통해 ZMP의 기반으로 안정한 보행패턴의 생성에 초점을 맞추고 있지만 Morisawa[8]는 3차원 상에 COG의 움직임을 고려한 ZMP 궤적을 고려하였다. 그리고 ZMP 궤적을 고려하여 Kwon[9]은 계단에서 보행할 수 있는 보행 패턴을 생성하는 방법을 제안하였고, Ching-Long[10]은 평평한 지면 이외에 다양한 지면의 상태에서도 자체적으로 충격을 완화시키며, 에너지를 적게 소비하는 균형 잡힌 보행 패턴 생성 방법을 제안하였다.

로봇 보행의 안정성이 확보되면서 이족 로봇의 보행 패턴에 관한 연구는 자연스런 인간의 보행의 분석하는 방향으로 진행되고 있다. Hasegawa[11]는 이족 로봇의 자연스러운 움직임이란 에너지를 최소화 하는 보행이라고 정의하고 계층 구조적 진화 알고리즘을 사용하여 자연스럽게 안정적인 이족 로봇의 보행을 유도하였다.

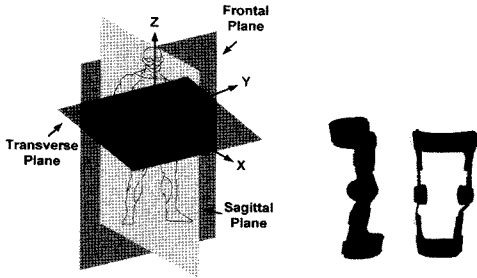
Arakawa[12]는 인간 생활환경과 유사한 장애물이 존재하는 작업공간에서 인간과 같이 자연스럽게 에너지를 최소화하는 보행 궤적을 생성하였다. 이를 위해 Arakawa는 유전 알고리즘을 적용시켜 에너지를 최적화 시키고 인간과 같은 자연스런 움직임을 생성하는 방법을 제안하였다.

인간이 최소 에너지를 소비하면서 자연스럽게 안정한 보행을 수행한다는 것에 착안하여, 본 논문은 인간 보행의 COG 궤적을 분석함으로써 인간형 이족로봇의 자연스러운 보행에 관한 연구를 수행한다. 이를 위해서 본 논문은 sagittal plane과 frontal plane상의 COG 궤적 영상으로부터 계측된 인간의 보행패턴을 분석함으로써 안정적이고 에너지를 최소화하는 자연스러운 이족로봇의 보행 패턴을 생성한다. 인간과 이족 로봇은 기구학적인 형태는 유사하지만 자유도가 다른 구조를 갖고 있기 때문에 추출된 인간 관절의 회전력을 이족로봇에 바로 적용할 수 없다. 이를 위해 인간의 보행 패턴으로부터 계측된 인간 각 관절의 회전력과 인간의 COG로부터 계산된 ZMP를 이용하는 적응적 보행 패턴 생성 GA 알고리즘을 통해 5-link 이족로봇의 보행 패턴을 생성한다. 제안된 알고리즘은 sagittal plane 상의 인간의 각 관절의 회전력과 frontal plane상의 인간의 ZMP 궤적을 고려하여 5-link 이족로봇의 보행패턴을 생성하기 때문에 인간과 같이 유연하고 에너지 소비를 최소화하는 이족로봇의 보행패턴을 생성한다.

본 논문의 2장에서는 인간과 로봇의 보행 운동의 모델링에 대해 설명하며, 3장에서는 인간 보행의 COG 궤적으로부터 계측되는 ZMP를 분석한다. 4장에서는 인간의 보행 패턴 영상 분석으로부터 각 관절의 회전력을 얻고 주파수 특성을 분석한다. 마지막으로 5장에서는 이족로봇의 보행패턴을 생성하는 제안하는 알고리즘을 설명하고, 6장에서 5-link 이족로봇 모델에 적용하여 기존 알고리즘의 보행 패턴과 비교 실험을 기술한다.

2. 인간과 로봇의 보행 운동의 모델링

이족로봇을 인간과 같이 움직이도록 하기 위해서는 로봇에 많은 관절을 부착해야하지만 이는 사실상 불가능하다. 반면에 인간은 3차원 변형가능(deformable)한 근육과 관절 구조를 가지고 있어서 이를 해석하기도 어려울 뿐 아니라 로봇으로는 흉내 내기 어려울 만큼 많은 자유도와 복잡한 기구적 요소를 가지고 있다. 일반적으로 동역학적 해석의 편의를 위해 인간형 이족로봇은 그림 1에서와 같이 5개의 링크로 구성된 형태(5-link biped model)로 근사한다. 이와 같이 복잡한 사람의 보행운동을 단순화된 로봇의 구조로 실현하기 위해서는 사람과 로봇의 보행운동의 동역학을 결부시키는 작업이



(a) plane들의 정의 (b) 보행 제한 기구

그림 1 sagittal, frontal, Transverse plane의 정의 및 인간 보행을 sagittal plane에 제한하기 위한 기구

필요하다.

사람의 보행운동에 대한 동역학적 모델링 작업은 많은 생체 학자들에 의해 연구가 진행되고 있다. 이들은 인간의 보행 중 모든 동력학 요소들이 그림 1에서와 같이 인간의 몸을 반으로 나눈 X-Z 평면상의 절단면(sagittal Plane)에 존재하고 있음을 증명하였다[13].

사람의 보행패턴을 sagittal plane으로 제한하여도 인간 보행패턴의 동역학적 특성을 잃지 않는다는 사실은 제한적인 구조를 가지는 5-link 이족로봇 모델에 인간의 보행 패턴을 적용해볼 수 있는 가능성을 제시한다. 본 논문에서는 인간의 보행패턴을 sagittal plane으로 제한하여 최대한 5-link biped model의 것과 유사하게 만들기 위해 그림 1(b)와 같은 허벅지와 종아리에 보행 제한 기구를 사람에게 착용시켜 보행시에 y축으로의 움직임을 제한하였다. 이러한 기구물을 착용하는 경우에도 사람의 보행은 불편하거나 크게 부자연스럽지 않다.

그림 2는 인간의 신체 구조를 근사화한 5-link 이족로봇 모델을 보여준다. 1개의 상체 link와 2개의 허벅지와 2개의 종아리 등 5개의 link로 이루어졌으며 각 link는 회전 관절로 결합되어 있다. 5-link 이족로봇 모델의

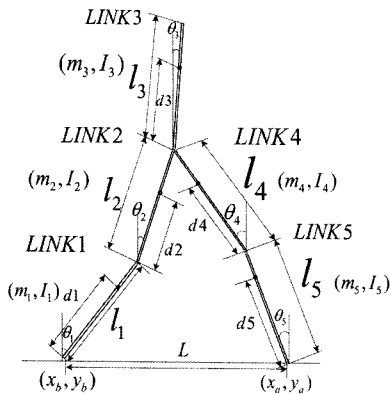


그림 2 5-link biped model의 인자 값

보행에 영향을 주는 인자들은 다음과 같다.

- m_i Mass of link i
- l_i Length of link i
- d_i Distance from joint i to the center of mass of link i
- I_i Moment of inertia of link i about the axis passing through the center of mass of Link i and perpendicular to the sagittal plane
- θ_i Angle of link i about the vertical
- (x_b, y_b) The coordinate of the supporting point
- (x_a, y_a) The coordinate of the tip of the swing limb
- τ_i Torque of joint i

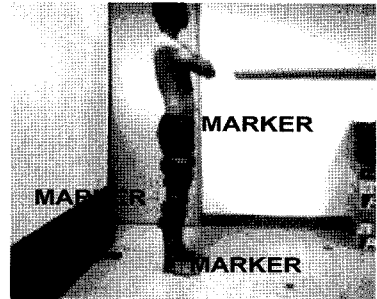
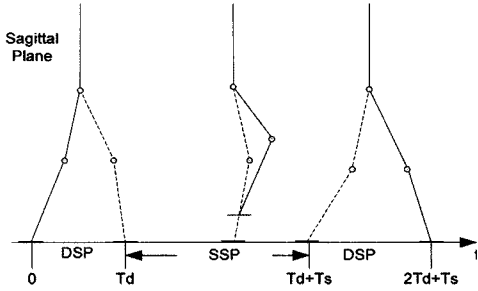


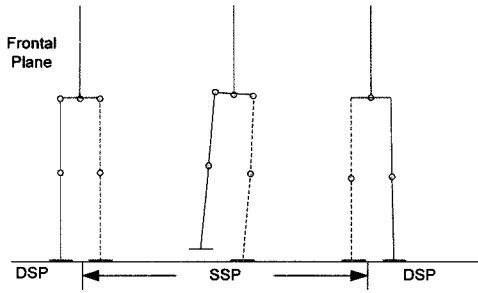
그림 3 Marker의 위치와 인간의 5-link biped model로의 근사화

이와 같은 5-link 이족로봇 모델과 인간의 운동을 결부시키기 위해, 즉 각 관절의 운동에 얼마만큼의 회전력을 가해야 사람의 것과 유사한 운동이 가능한지를 유추하기 위해 인간의 보행을 분석하여 보행 시 인간의 각 관절에 가해지는 회전력을 분석한다. 보행 중 변화하는 회전력은 관절의 각도, 속도, 각속도로부터 유도되기 때문에 이를 사람의 보행영상으로부터 추출하고 그 결과로 얻어지는 회전력을 제안하는 GA 알고리즘을 사용한다. 본 논문에서는 인간의 각 링크의 길이와 질량은 인간의 신체별 평균치를 준용하며 Lagrangian 방정식을 사용하여 인간의 보행 중 각 관절의 회전력과 로봇의 보행 중 회전력을 모델링한다[14,15].

인간의 보행은 그림 4와 같이 DSP(Double Support Phase)와 SSP(Single Support Phase)의 주기적인 반복으로 구성된다. DSP는 두 다리가 지면과 맞닿아 있는 상태를 의미하며, SSP는 로봇의 한쪽 발은 지면에 닿아 있고 다른 한 발은 앞으로 진행하며 회전하고 있는 상태를 말한다. 그림 4에서 T_4 와 T_5 는 각각 DSP와 SSP 구간의 시간을 나타낸다. 각 보행 구간에서 각 관절에서 발생하는 회전력은 다음과 같다.



(a) sagittal 평면에서 보행구간의 구분



(b) frontal plane에서 보행구간의 구분

그림 4 sagittal 및 frontal plane에서의 보행 구간

2.1 Single Support Phase(SSP)

인간의 보행 중 가장 많은 영역을 차지하는 SSP에서 5-link 이족로봇 모델의 각 관절의 회전력을 구하기 위해 각 링크의 질량 중심의 위치는 식 (1)으로부터 계산된다.

$$x_{ci} = \sum_{j=1}^{i-1} (a_j l_j \sin \theta_j) + d_i \sin \theta_i + x_b \quad (1)$$

$$y_{ci} = \sum_{j=1}^{i-1} (a_j l_j \cos \theta_j) + d_i \cos \theta_i + y_b$$

여기서 (x_{ci}, y_{ci}) 는 i 번째 link의 무게 중심 좌표를 나타내고, a_i 는 link3의 경우 0, link 1, 2, 4, 5의 경우는 1인 상수를 나타낸다. 따라서 5-link biped model의 위치 에너지와 운동에너지를 각각 식 (2)와 (3)으로 표현된다.

$$P = \sum_{i=1}^5 m_i g y_{ci} = \sum_{i=1}^5 \left[m_i g \left[\sum_{j=1}^{i-1} (a_j l_j \cos \theta_j) + d_i \cos \theta_i \right] \right] \quad (2)$$

$$K = \sum_{i=1}^5 \left[\frac{1}{2} m_i (\dot{x}_{ci}^2 + \dot{y}_{ci}^2) + \frac{1}{2} I_i \dot{\theta}_i^2 \right] \quad (3)$$

식 (2)와 (3)을 식 (4)의 Lagrangian 방정식에 적용하여 SSP구간에서의 5-link biped model의 각 관절의 회전력을 계산한다.

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_i} - \frac{\partial L}{\partial \theta_i} = \tau_i \quad (4)$$

$$D(\theta)\ddot{\theta} + H(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) = T \quad (5)$$

여기서 $D(\theta)$ 는 5X5 inertia matrix, $H(\theta, \dot{\theta})$ 는 5X5 centrifugal and corioli matrix, $G(\theta)$ 는 5X1 gravity matrix, $\theta = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5]$ 이고, $\dot{\theta}, \ddot{\theta}$ 는 각각 θ 의 속도와 가속도이며 $T = [\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4, \tau_5]$ 로 각 관절의 회전력 벡터이다. $D(\theta)\ddot{\theta}$ 는 inertial force를 나타내며, $H(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta}$ 는 원심력과 운동방향에 수직방향으로 생기는 전향력을 나타낸다. $G(\theta)$ 는 중력으로 생기는 힘이다.

2.2 Double Support Phase(DSP)

DSP구간에서는 두 다리가 지면에 동시에 닿아 있어 땅에 닿은 두발의 좌표 점으로부터 제약조건이 존재하게 된다. 따라서 각 관절의 각도에 대한 제약조건은 식 (6)으로 주어진다.

$$\Phi(\theta) = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_a - x_b - L \\ y_a - y_b \end{bmatrix} = 0 \quad (6)$$

$$\Phi(\theta) = \begin{bmatrix} l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin \theta_2 + l_4 \sin \theta_4 + l_5 \sin \theta_5 - L \\ l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos \theta_2 - l_4 \cos \theta_4 - l_5 \cos \theta_5 \end{bmatrix}$$

L 은 두 발 사이의 거리가 되며, 제약조건 Jacobian $J(\theta)$ 을 $\frac{\partial \Phi(\theta)}{\partial \theta}$ 로 정의할 때 식 (7), (8)과 같은 관계식이 성립한다.

$$\dot{\Phi} = J(\theta)\dot{\theta} = 0 \quad (7)$$

$$\ddot{\Phi} = \dot{J}(\theta)\dot{\theta} + J(\theta)\ddot{\theta} = 0 \quad (8)$$

DSP구간에 대한 회전력을 나타내는 식은 Lagrangian 방정식을 적용한 후 제약조건으로 생기는 힘 λ 에 $J^T(\theta)\lambda$ 을 추가하면 식 (9)로 주어진다.

$$D(\theta)\ddot{\theta} + H(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) = J^T(\theta)\lambda + T \quad (9)$$

그러나 Jacobian은 정방행렬이 아니기 때문에 직접적으로 λ 를 구할 수 없다. 이를 해결하기 위해 식 (9)에서 $J D^{-1}$ 을 양변에 곱하고, 제약 조건식을 사용하여 다음 λ 에 관한 식 (10)을 구할 수 있다.

$$\lambda = -(J D^{-1} J^T)^{-1} (J D^{-1} (T - h) + \ddot{\Phi}) \quad (10)$$

여기서, pseudo Jacobian 행렬이라 불리는 $J D^{-1} J^T$ 는 Jacobian이 역행렬이 가능하면, 역기구학을 쉽게 구할 수 있다.

3. 인간 보행의 ZMP 분석

임의의 물체에 작용하는 전체 외력(external force)은 물체의 질량과 질량중심의 가속도를 곱한 것과 같다는 Newton의 제2법칙에 따라 인간의 보행에 관한 동역학적 해석을 인간의 COG로 기술할 수 있다[16]. 따라서 인간 COG의 운동을 해석할 때, 인간의 신체적 구조를 그림 5와 같이 하나의 링크와 하나의 관절로 구성된 역진자 모델로 표현이 가능하다.

역진자 모델의 COG 자유도에 따라 COG 궤적을 그

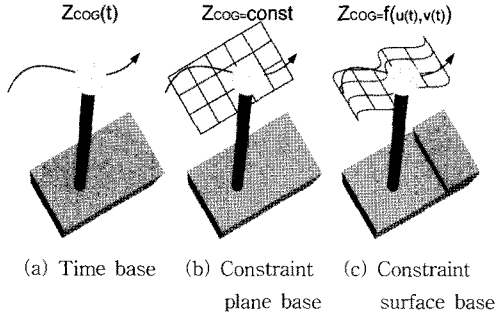


그림 5 역전자 COG 궤적에 따른 COG 운동 모델

림 5와 같이 세 분류로 구분할 수 있다. 그림 5(a)의 Time Base는 시간의 함수에 따른 1자유도의 COG 궤적을, 그림 5(b)는 Z축에 평행한 평면상에서 움직이는 2자유도의 COG 궤적을, 그림 5(c)는 3차원 공간상에 움직이는 3자유도의 COG 궤적을 보여준다.

그림 3과 그림 6과 같이 sagittal plane과 frontal plane상에 설치된 2대의 카메라로부터 획득된 보행 영상으로부터 COG 궤적을 계속한다. 그림 5에 제시된 COG 운동 모델에 따라 2대의 카메라로부터 계속된 COG 궤적의 정보를 이용하여 인간 보행의 안정영역의 판단지표인 ZMP 궤적을 얻는다.



그림 6 frontal plane에서의 무게중심의 마커 부착

3.1 Linear Inverted Pendulum Model

일반적으로 이족 로봇은 COG와 COG 주변의 각 모멘트로 표현되며 그림 7과 같다[8].

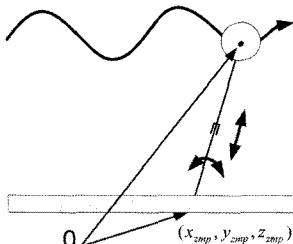


그림 7 역전자 모델

그림 7에서 ZMP 궤적과 상응하는 COG의 궤적은 $x_G = [x_G, y_G, z_G]^T$ 로 표현되며 로봇에 대한 COG의 각 모멘트는 $I_G = [I_{G_x}, I_{G_y}, I_{G_z}]^T$ 로 표현된다. 이때, 외부의 힘에 영향을 받지 않을 때 ZMP 위치 정보는 식 (11), (12)를 통하여 얻을 수 있다.

$$x_{zmp} = \frac{M(x_G(z_G + g) - (z_G - z_{zmp})\ddot{x}_G) - \dot{I}_{G_x}}{M(z_G + g)} \quad (11)$$

$$y_{zmp} = \frac{M(y_G(z_G + g) - (z_G - z_{zmp})\ddot{y}_G) - \dot{I}_{G_y}}{M(z_G + g)} \quad (12)$$

M 은 이족 로봇의 무게가 되며 g 는 중력 가속도가 된다. 여기서, 보행 중 각 모멘트의 영향을 적게 받는다고 한다면, 각 모멘트가 ZMP 방정식 식 (11), (12)에서 영향을 미치지 못한다고 가정할 수 있게 되고 식 (13), (14)로 다시 정의 된다.

$$x_{zmp} = x_G - \frac{(z_G - z_{zmp})\ddot{x}_G}{z_G + g} \quad (13)$$

$$y_{zmp} = y_G - \frac{(z_G - z_{zmp})\ddot{y}_G}{z_G + g} \quad (14)$$

식 (13), (14)를 보면, 두 ZMP 방정식에 3개의 상태 변수가 있음을 알 수 있다. 그러므로 COG 궤적 움직임을 임의로 생성할 수 없다. 본 논문에서는 COG 변화가 Parametric surface에 근거하였기 때문에 식 (15)와 같이 표현할 수 있다.

$$x_G = a(u(t), v(t)) \quad (15)$$

$$y_G = b(u(t), v(t))$$

$$z_G = c(u(t), v(t))$$

여기서, a, b, c 는 표면 상태의 특징 성분이 된다. 그리고 $u(t)$ 와 $v(t)$ 는 시간에 대한 constraint surface 파라미터가 된다. 따라서 식 (11), (12)는 다음과 같이 다시 표현된다.

$$x_{zmp} = a \quad (16)$$

$$- \frac{(c - z_{zmp})(a_u \ddot{u} + a_v \ddot{v} + a_{uu} \dot{u}^2 + 2a_{uv} \dot{u}\dot{v} + a_{vv} \dot{v}^2)}{c_u \ddot{u} + c_v \ddot{v} + c_{uu} \dot{u}^2 + 2c_{uv} \dot{u}\dot{v} + c_{vv} \dot{v}^2 + g}$$

$$y_{zmp} = b \quad (17)$$

$$- \frac{(c - z_{zmp})(b_u \ddot{u} + b_v \ddot{v} + b_{uu} \dot{u}^2 + 2b_{uv} \dot{u}\dot{v} + b_{vv} \dot{v}^2)}{c_u \ddot{u} + c_v \ddot{v} + c_{uu} \dot{u}^2 + 2c_{uv} \dot{u}\dot{v} + c_{vv} \dot{v}^2 + g}$$

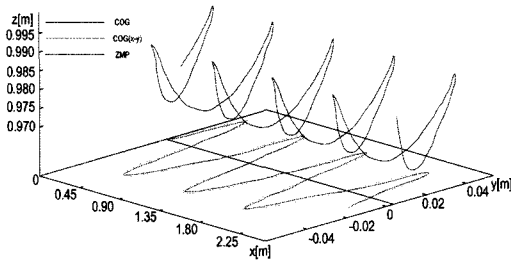
여기서, $(\cdot)_u = \frac{\partial(\cdot)}{\partial u}$, $(\cdot)_v = \frac{\partial(\cdot)}{\partial v}$, $(\cdot)_{uu} = \frac{\partial^2(\cdot)}{\partial u^2}$,

$(\cdot)_{uv} = \frac{\partial^2(\cdot)}{\partial u \partial v}$, $(\cdot)_{vv} = \frac{\partial^2(\cdot)}{\partial v^2}$ 을 의미한다. 위의 식

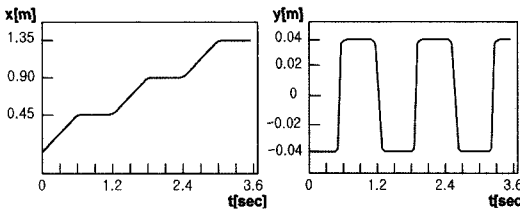
은 두개의 파라미터에 따른 COG 움직임은 실제 평면의 ZMP 위치에 의해 생성된다.

3.2 인간의 COG 영상 분석을 통한 ZMP 궤적 획득

인간 COG의 운동 궤적을 얻기 위해 그림 3과 6과 같이 인간의 sagittal plane와 frontal plane상에 COG에 마커를 부착하여 2 대의 카메라로부터 보행 영상을 획득한다. 카메라 캘리브레이션을 통하여 마커의 크기 및 이동 거리의 왜곡을 보정해주는 카메라 캘리브레이션(Camera calibration) 작업을 수행함으로써 그림 8(a)와 같이 인간 COG의 운동 궤적을 계속한다. 그림 8(a)의 COG 궤적을 식 (13), (14)에 대입함으로써 그림 8(b)와 (c)와 같이 인간의 ZMP 궤적을 얻을 수 있다.



(a) COG & ZMP trajectory



(b) ZMP trajectory in sagittal plane (c) ZMP trajectory in lateral plane

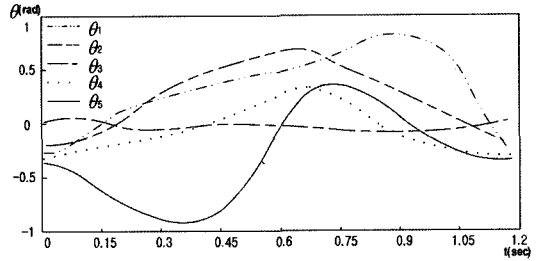
그림 8 인간의 COG 및 ZMP 궤적

그림 8(a)는 보행하는 동안의 무게중심의 궤적을 보여주고 있다. 그림 8(b)는 시간에 따른 X축에서 ZMP의 변화를 보여주며, 한주기 동안에 보폭의 변화가 계단형으로 진행된다. 즉, SSP 구간에서는 X축 방향으로 ZMP가 선형적으로 증가하지만, DSP 구간에서는 교차하는 지점으로 일시적으로 ZMP의 변화가 없다. 그림 8(c)는 시간에 따른 Y축에서 ZMP의 변화를 보여주며, SSP 구간과 DSP 구간에서 sine 파형과 같은 일정한 패턴을 보여준다.

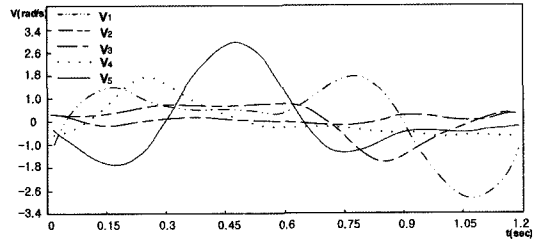
4. 인간의 보행 분석

4.1 인간 보행의 회전력(Torque)

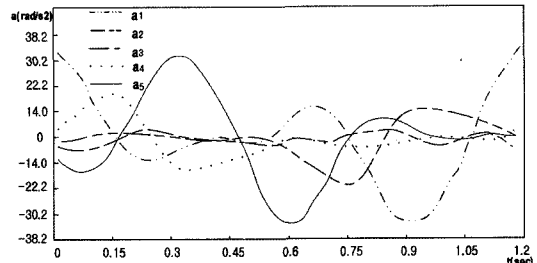
Sagittal plane 상에서 획득된 인간의 보행 영상을 분석으로부터 계속된 5-link 이족로봇 모델에 대응되는 각 관절의 각도, 각속도, 각가속도가 그림 9에 표현된다. 그



(a) 인간의 각 관절의 각도



(b) 인간의 각 관절의 속도



(c) 인간의 각 관절의 가속도

그림 9 보행시 인간 관절의 회전성분

표 1 실험자의 인자 값

Link	$M_i(Kg)$	$l_i(m)$	$d_i(m)$	$I_i(Kg \cdot m^2)$
1	3.355	0.48735	0.192	0.137
2	5.500	0.41895	0.237	0.101
3	37.290	0.80370	0.503	5.925
4	5.500	0.41895	0.181	0.101
5	3.355	0.48735	0.295	0.137

림 9(a)는 보행 영상으로 부터 얻은 각 관절의 위치 값을 이용하여 시간에 따른 각 관절의 각을 보여준다. 이를 1차 미분함으로써 그림 9(b)에서 보여주는 각속도를 구한다. 그림 9(c)는 구해진 각속도 값으로부터 각가속도를 보여준다.

본 논문에서는 5-link 이족로봇에 대응되는 인간의 각 링크의 길이, 질량, 그리고 관성모멘트를 표 1에 보여주며, 이는 인간의 신체별 평균치를 준용한다. 그림 9

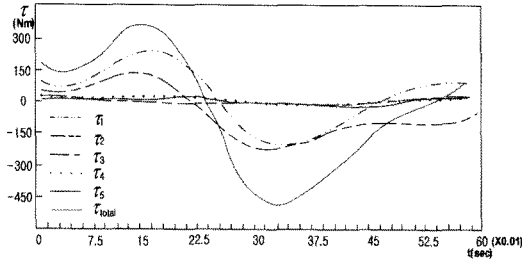


그림 10 인간의 보행 회전력

의 보행인자와 표 1에 주어진 실험자의 인자 값을 식 (5)의 Lagrangian 방정식에 대입하여 인간의 보행 중 각 관절의 회전력을 계산한다.

4.2 주파수 영역에서의 보행 특징 분석

근본적으로 인간은 이족로봇이 모방하기 어려운 만큼 많은 자유도와 복잡한 기구적 요소를 가지고 있어 각 관절의 회전력은 시간영역에서 복잡한 변화를 보인다. 그러나 시간영역에서 얻어진 각 관절의 회전력을 주파수 영역으로 변환시키면 저주파 영역에 주로 회전력 성분이 나타난다. 따라서 주파수 영역에서 회전력 정보에 대한 특징을 표현하거나 각 관절의 회전력을 분석하기 쉽다.

본 논문에서는 복잡한 데이터를 단순하게 처리할 수 있는 이산 코사인 변환을 사용하여 인간의 관절 회전력을 주파수 성분으로 변환한다. 실수부만을 사용하는 DCT(Discrete Cosine Transform)은 식 (18)과 같다.

$$X[k] = C(k) \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cos \left[\frac{\pi(2n+1)k}{2N} \right] \quad (18)$$

$$C(k) = \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{N}} & \text{for } k=0 \\ \sqrt{\frac{2}{N}} & \text{for } k=1,2,\dots,N-1 \end{cases}$$

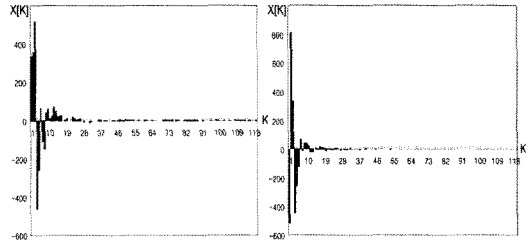
식 (18)을 통하여 시간 영역에서 정의된 회전력을 주파수 영역으로 변환하고, 역으로는 식 (19)를 이용하여 변환한다.

$$x(n) = \sum_{k=0}^{N-1} C(k) X[k] \cos \left[\frac{\pi(2n+1)k}{2N} \right] \quad (19)$$

여기서 $x(n)$ 은 시간 영역에서 샘플 시퀀스이며, N 은 샘플 시퀀스의 수, $X[k]$ 는 복소수 값의 주파수 영역 시퀀스이며 DCT에서는 실수 값만을 갖는다.

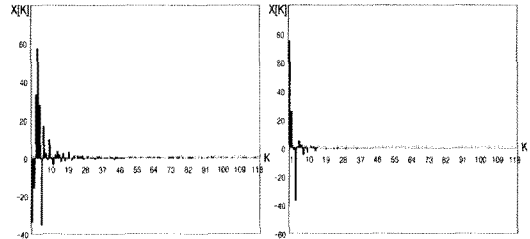
식 (19)를 이용하여 그림 10의 각 관절의 회전력을 주파수 영역으로 변환한 결과를 그림 11에서 보여준다.

그림 11에서 나타나듯 DCT를 이용하여 변환된 인간의 보행 회전력 중 가장 많은 정보를 담고 있는 값이 저주파영역이란 것을 알 수 있다. 저주파 영역만을 가지고 인간의 보행 회전력을 복원한 결과 그림 10과 같이 기존의 보행 패턴과 가까운 회전력을 가지게 된다. 따라



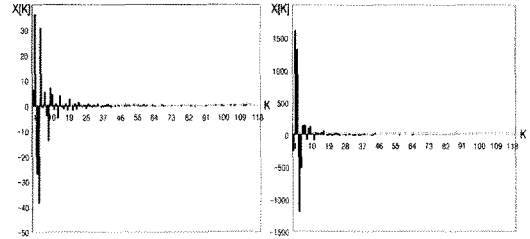
(a) Torque1

(b) Torque2



(c) Torque3

(d) Torque4



(e) Torque5

(f) Torque total

그림 11 인간의 각 관절각의 DCT 계수

서 본 논문에서는 이 저주파 영역의 값을 주파수 영역의 보행 인자라고 정의하고, 이를 이용하여 이족로봇의 sagittal plane 보행 패턴을 생성하게 된다.

5. 이족로봇의 보행패턴 생성

보행은 sagittal, frontal, transverse plane으로 구성되는 3차원 공간상의 움직임으로 해석할 수 있다. 그림 1에서와 같이 sagittal plane은 X-Z 평면으로 사람의 좌우를 가르는 평면이고, frontal plane은 Y-Z 평면이고 transverse plane은 X-Y평면이다. 이들은 서로 직교하므로 이들 중 2개의 평면에서의 움직임을 알면 3차원 운동의 복원이 가능하며, 이족로봇이 3차원 공간상에서 자연스럽게 보행하기 위해서는 역시 이들 중 2개 이상 평면에서의 보행 패턴을 아는 것으로 충분하다. 본 논문에서는 sagittal plane과 frontal plane의 보행 궤적을 생성함으로써 이족로봇의 자연스럽게 동적으로 안정적인 보행 패턴을 생성한다.

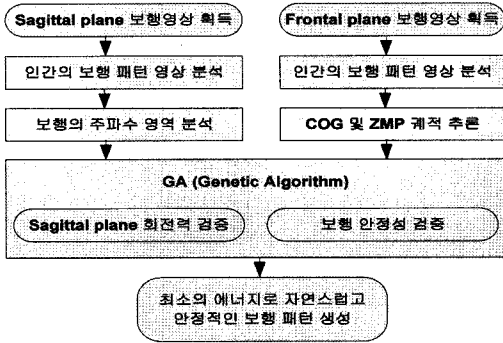


그림 12 제안하는 알고리즘의 흐름도

본 논문에서 제안하는 이족로봇의 보행패턴 생성 알고리즘은 그림 12에 보여주는 바와 같이 sagittal plane 과 frontal plane의 보행 패턴을 생성한다. sagittal plane에서의 보행패턴은 인간이 보행할 때 주파수 영역에서의 회전력을 분석을 통해 결정하며, frontal plane의 보행패턴은 인간 무게중심의 COG 및 ZMP 궤적을 생성한다. 인간의 관절은 다관절이기 때문에 인간의 ZMP 와 회전력을 5-link biped robot model에 바로 적용할 수 없어 이족로봇의 보행궤적을 적응적으로 최적화할 수 있는 유전 알고리즘(GA)을 이용한다[12,17,18].

5.1 적응적 이족로봇의 보행패턴 생성

인간의 보행 패턴을 이용하여 적응적으로 5-link 이족로봇의 보행 패턴을 구현하기 위한 알고리즘은 그림 13과 같다. 우선 인간의 보행 시 sagittal plane 상의 각 관절에서의 회전력의 특성을 표현하는 주파수 영역에서의 보행 인자와 frontal plane 상에서 COG의 궤적 영상으로부터 계속된 안정적인 보행을 보장하는 인간의 ZMP 궤적을 목표치로 설정하고, 임의의 특성을 갖는 이족로봇이 인간처럼 자연스럽게 에너지 효율이 높은 보행패턴을 갖도록 하기 위해 유전 알고리즘(GA)을 이용한다[19].

GA은 자연계의 진화현상을 구현하는 알고리즘으로, 집단 내 개체는 주위 환경에 적합한 형질을 가질수록 생존할 확률이 높으며 교배와 돌연변이를 통해 더 나은 방향으로 진화하고, 부적합한 형질을 가질수록 진화의 과정에서 점차 도태되어지는 적자생존과 자연도태의 원리를 이용한다. GA은 초기에 집단(population)으로부터 다음 세대를 만들게 되는데 선택(selection)과 교배(crossover), 돌연변이(mutation) 연산을 통해 진화하게 된다. 선택은 각 개체의 목적함수를 이용하여 다음 세대를 위한 집단을 새로이 생성하는 연산이다. 교배는 두 부모세대를 적절히 조합하여 새로운 자손을 생성한다. 돌연변이는 부모 세대의 값을 임의로 변화시키는 연산을 말한다.

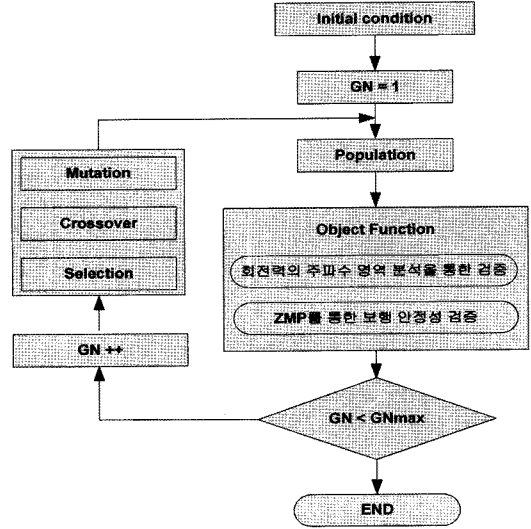


그림 13 적응적 보행 패턴 생성 알고리즘

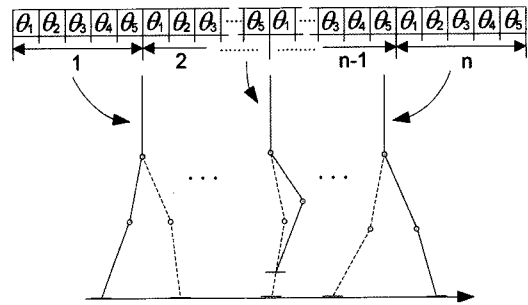


그림 14 유전 알고리즘의 유전형 표현

본 논문의 유전 알고리즘은 그림 14와 같이 개체의 표현형과 유전형을 일대일로 대응시켜 프로그래밍이 간편하며, 부호화 및 복호화 과정이 생략되어 탐색속도를 높일 수 있는 실수코딩 유전 알고리즘(real-coded genetic algorithm)을 이용하였다.

그림 14에서 θ_i 는 5-link 이족 로봇 모델의 i번째 관절의 회전각이다. 실수코딩 유전 알고리즘의 유전자는 로봇의 θ_1 부터 θ_5 까지 값을 갖는 이족로봇의 5개 관절의 회전각들로 표현된다. 여기서 n은 로봇의 각 관절의 궤적을 스플라인 곡선으로 보간하는 점들의 수이다.

본 논문에서는 사람보행의 특성을 표현하는 주파수 영역에서의 보행 인자와 이족보행로봇의 안정적인 보행을 보장하는 ZMP 궤적이 GA의 목적함수가 되며 다음의 식 (20), (21)과 같이 설정된다.

$$f_1 = \int_0^T E_{FDC} dt \tag{20}$$

$$f_2 = \int_0^{T_c} E_{ZMP} dt \quad (21)$$

여기서 T_c 는 보행 한주기 동안의 시간을 나타내며, E_{FDC} 는 인간의 저주파 영역값과 이족로봇의 저주파 영역값의 오차를 나타내며, E_{ZMP} 는 인간의 ZMP와 이족로봇의 ZMP사이의 오차로 식 (22), (23)으로 표현된다.

$$E_{FDC} = \|H_{FDC} - R_{FDC}\| \quad (22)$$

$$E_{ZMP} = \|p_{dZMP} - p_{zmp}\| \quad (23)$$

여기서, H_{FDC} 와 R_{FDC} 는 각각 한 주기 보행 동안의 인간 회전력과 이족로봇 회전력의 저주파 성분값을 나타내며, p_{dZMP} 와 p_{zmp} 는 각각 인간과 계산된 ZMP 궤적을 나타낸다. 따라서 식 (20), (21)의 목적함수에 최적으로 수렴하는 이족 로봇의 보행패턴을 생성할 수 있다.

6. 5-link biped robot model에 적용한 실험

이전의 영상 분석을 위한 인간의 보행 측정은 몸의 측면과 중앙에 마커를 부착하고, 2 대의 CCD 디지털 카메라(IPX-VGA 210)로부터 초당 120프레임으로 인간의 보행 영상을 획득하였다. 실험함에 있어서 실험자는 체형이 비슷한 다른 사람으로 구성하여 실험 하였다[표 2]. 제안한 알고리즘의 성능은 5-link Biped Robot Simulator(5-LBRS)을 Pentium PC에서 VC++로 구현하여 평가하였다. 성능평가는 frontal plane에서 계측한 인간의 ZMP 궤적과 sagittal plane에서 계측한 관절 회전력을 이용하였다. 일반적인 보행 패턴의 생성 기법과 본 논문에서 제안한 알고리즘에 의해 생성한 보행 패턴을 각각 5-link 이족로봇 모델에 적용하여 시각적인 측면과 에너지 효율적인 측면에서 비교 평가하였다.

표 2 피 측정인의 인자 값

Link	$M_i(Kg)$	$l_i(m)$	$d_i(m)$	$I_i(Kg \cdot m^2)$
1	5.159	0.47531	0.174	0.152
2	7.115	0.39341	0.209	0.121
3	38.452	0.80128	0.497	6.047
4	7.115	0.39341	0.169	0.152
5	5.159	0.47531	0.287	0.121

6.1 인간의 보행 인자의 추출 및 ZMP 계측

그림 8(a)와 같이 인간의 보행 인자를 추출하고 인간의 ZMP 궤적을 얻기 위해 5-LBRS를 사용하여 시간에 따른 인간의 각 관절의 변위와 시간에 따른 인간의 COG의 변화를 측정하였다. 5-link 이족로봇 모델에 대응되는 인간의 각 관절의 회전각 궤적을 그림 15에 보여주고 있다. 동역학 모델 식 (5)와 식 (9)에 각 관절의 회전력을 대입하고 표 2에 정리된 피 측정인의 각 link의 특성값을 대입하면 1주기 보행 중 각 관절의 회전력

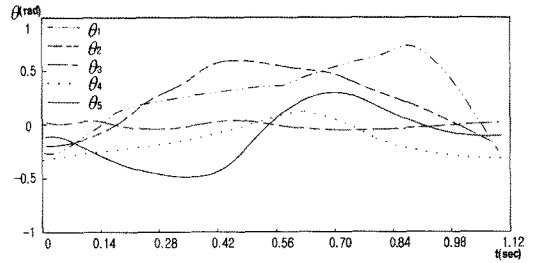


그림 15 보행시 인간의 각 관절의 회전각

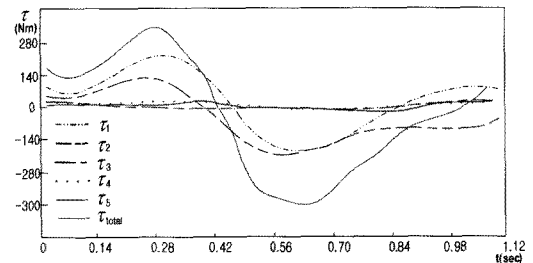


그림 16 동역학 모델 식으로부터 계산된 인간 각 관절의 회전력

이 그림 16에서 보여주는 바와 같이 계산된다.

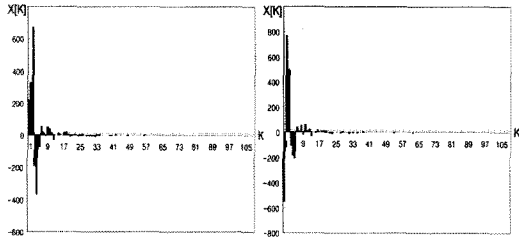
GA 알고리즘의 보행 인자값을 얻기 위해 DCT를 이용하여 인간의 회전력을 주파수 영역으로 변환하면 그림 17과 같다.

또한 5-LBRS를 사용하여 sagittal plane가 frontal plane에서 측정된 인간의 COG 궤적과 ZMP 궤적을 그림 18에 보여준다.

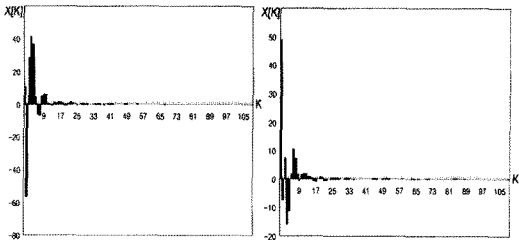
6.2 5-link 이족로봇 모델의 보행패턴 생성

인간의 보행시 인간의 각 관절의 회전력에 대한 DCT 주파수 회전력 성분과 인간의 ZMP를 사용하여 5-link 이족로봇 모델에 적합한 보행패턴을 유전 알고리즘을 통해 적응적으로 생성한다. 유전 알고리즘을 위한 초기 세대는 인간의 보행으로부터 얻어진 관절의 값을 이용하여 cubic spline곡선으로 생성하였다. 또한 실험에서 사용된 5-link 이족로봇 모델의 구조적인 특성값은 표 3과 같다.

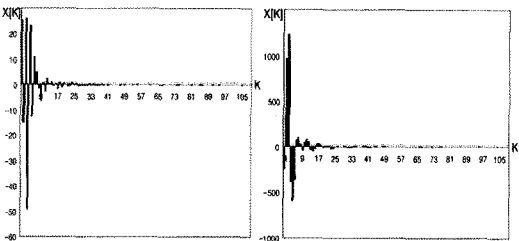
이족로봇의 보행패턴을 생성하기 위해 로봇의 보폭의 길이와 시간을 0.3m와 1.5초로 설정하였으며 이에 사용된 유전 알고리즘의 사양(specification)은 표 4와 같다. 최적의 보행패턴을 얻기 위해 유전 알고리즘 사양을 설계한 로봇의 인자에 따라 달리 적용한다. 본 논문에서는 Choi[20]가 적용한 유전 알고리즘을 포함한 다양한 유전 알고리즘의 사양에 따라 실험하여 표 4에 제시된 최적화된 유전 알고리즘 사양을 얻었다. 제안하는 유전 알고리즘은 다양한 조건에서 최대 250회 내의 반복 수행



(a) Torque1 (b) Torque2



(c) Torque3 (d) Torque4



(e) Torque5 (f) Torque total

그림 17 주파수 영역에서 인간 관절의 회전력

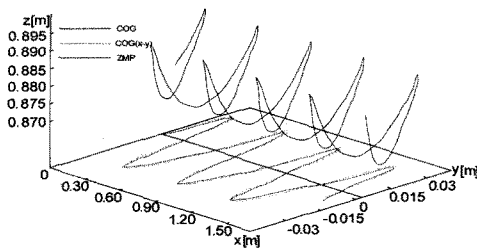


그림 18 보행 영상으로부터 계측된 인간의 COG 및 ZMP 궤적

으로 모두 최적화된 해를 갖는 개체를 얻었다. 또한 유전 알고리즘은 개체수가 45~70 사이의 범위 값을, 교차 확률은 0.95에 허용오차 ± 0.03 의 범위 값을, 변위 확률은 0.03에 허용오차 ± 0.02 의 범위 값을 가질 때에 최적이었다. 로봇의 각 관절의 회전 변위를 고려하여 유전형질을 구성하는 로봇의 회전각에 최소 비트 수를 할당함으로써 유전 알고리즘의 메모리 효율성을 높였다.

표 3 5-link 이족로봇 모델의 각 링크의 특성값

Link	$M_i(Kg)$	$l_i(m)$	$d_i(m)$	$I_i(Kg \cdot m^2)$
1	0.164	0.115	0.032	0.00082
2	0.144	0.085	0.053	0.00060
3	0.422	0.110	0.091	0.00350
4	0.144	0.085	0.032	0.00060
5	0.164	0.115	0.053	0.00082

표 4 유전 알고리즘 사양

Maximum generation(GN_{max})		300		
Population Size		50		
Crossover probability		0.98		
Mutation Probability		0.05		
Resolution of a joint angle				
θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5
2^{11} (11bits)	2^7 (7bits)	2^6 (6bits)	2^7 (7bits)	2^{11} (11bits)

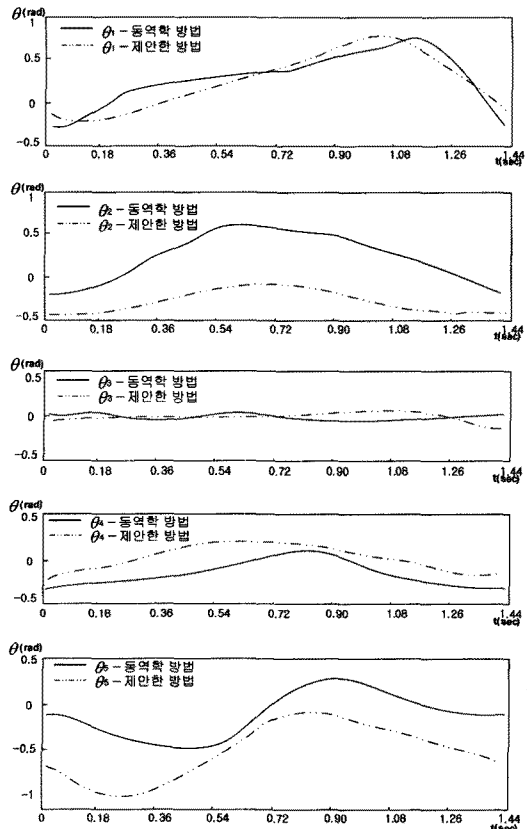


그림 19 보행시 인간의 회전각도와 로봇의 회전각도 유사도

그림 19는 적응적 보행 패턴 생성 알고리즘에 의해 생성된 5-link 이족로봇 모델의 회전각도와 인간의 보행

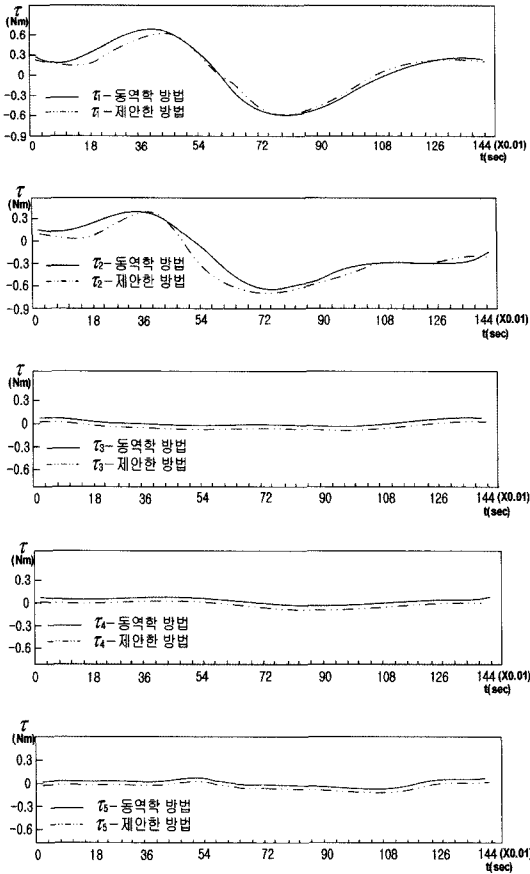
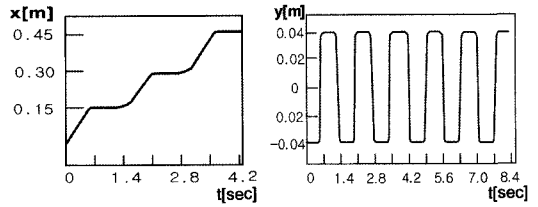


그림 20 보행시 인간의 회전력과 로봇의 회전력 유사도

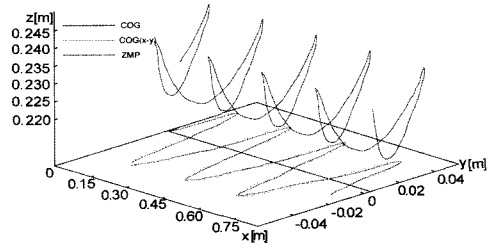
회전각도의 유사도를 보여준다. 인간의 회전 각도의 변화가 더 크게 변화를 가지는 패턴을 보이고 있는데 로봇의 회전 각도는 최적화된 값의 범위에서 회전각을 갖는 것을 알 수 있다. 그림 20은 5-link 이족로봇 모델의 회전력과 인간의 회전력의 유사도를 보여주고 있다. 제한한 알고리즘에 의해 생성된 관절의 회전각의 변화율에 따른 회전력은 그림 16에서 보여주는 인간의 회전력에 수렴하는 것을 그림 20의 유사도를 통하여 확인할 수 있다. 유사도를 비교함에 인간의 인자와 로봇의 인자 값이 다르므로 직접적인 유사도 비교는 힘들기 때문에 5-link 이족로봇 모델의 보행 패턴을 기준으로 인간의 보행 패턴의 회전 각도와 회전력을 정규화 시켜 비교 하였다.

5-link 이족로봇 모델의 보행 안정성을 확보하기 위해 제안하는 알고리즘에 의해 생성된 로봇의 ZMP 궤적과 그에 상응하는 로봇의 COG 궤적을 그림 21에 보여준다.

그림 21(a)는 보행 진행 방향인 X축에서의 5-link 이



(a) ZMP trajectory in sagittal plane (b) ZMP trajectory in lateral plane



(c) COG & ZMP trajectory

그림 21 이족 로봇의 COG 및 ZMP 궤적

족로봇 모델의 ZMP 궤적을 보인 그림이고, 그림 21(b)는 Y축에서의 5-link 이족로봇 모델의 ZMP 궤적을 보여준다. 그림 21(c)에서 5-link 이족로봇 모델의 ZMP가 X-Y 평면상에 투영된 COG 궤적의 안쪽에 놓임은 이족로봇의 안정적인 보행을 보장한다. 또한 그림 21로부터 5-link 이족로봇 모델의 COG와 ZMP가 그림 18에서 보여주는 인간의 것들과 매우 유사한 보행 패턴이 생성된 것을 확인할 수 있다.

본 논문에서 제안한 인간과 같은 유사한 5-link 이족로봇 모델의 보행에 관한 성능평가를 위해 인간의 보행 분석을 통해 적응적 보행 패턴 생성 알고리즘에 의해 생성된 로봇의 sagittal plane상의 보행 패턴과 ZMP 해석을 통해 얻어진 frontal plane상의 보행 패턴을 5-link 이족로봇 모델에 적용시킨 결과를 그림 22와 23에 각각 보여준다.

인간의 보행 영상을 기반으로 5-link 이족로봇 모델의 보행 패턴이 생성되었기 때문에 그림 23의 frontal plane상의 영상에서 5-link 이족로봇이 매우 안정적으로 보행하는 것을 확인할 수 있다. 또한 인간의 보행과 유사하게 세 번째 관절이 상하좌우로 주기적으로 움직이는 것을 확인할 수 있다.

마지막으로 제안한 알고리즘에 의해 생성된 5-link 이족로봇의 보행패턴에 관한 에너지 효율성을 평가하기 위해 일반적인 ZMP 궤적과 역기구학을 통해 얻어진 로봇의 보행패턴과 비교평가 하였다. 표 5는 제안하는 알고리즘에 의해 생성된 5-link 이족로봇의 보행패턴과 일

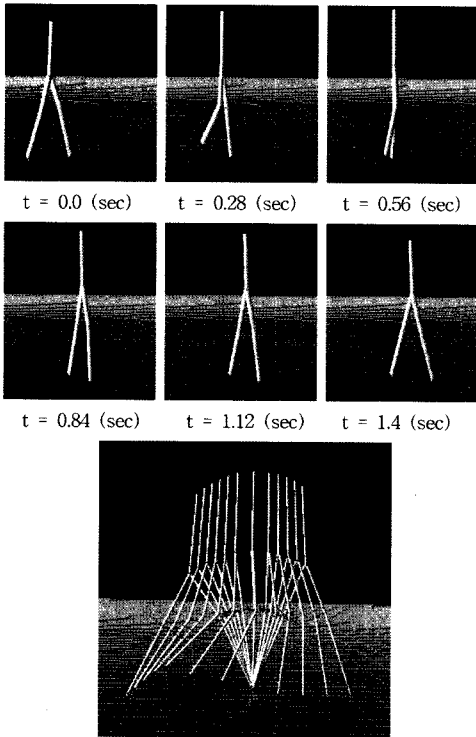


그림 22 sagittal plane상의 로봇 보행 시뮬레이션 영상

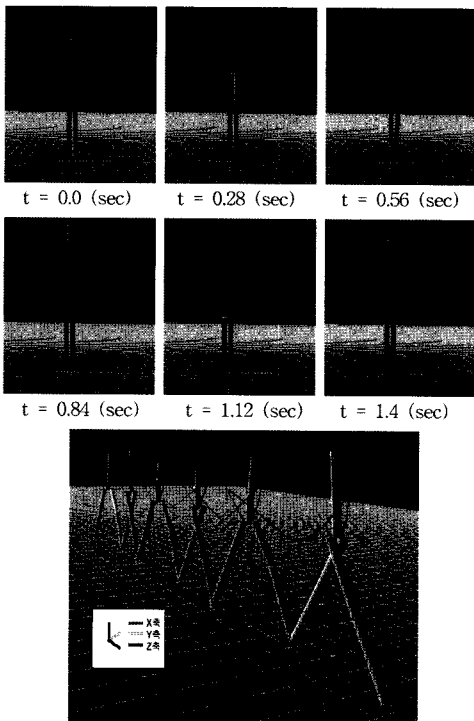


그림 23 frontal plane상의 로봇 보행 시뮬레이션 영상

표 5 제안하는 5 link 이족로봇의 보행패턴에 관한 에너지 효율성 평가

Joint	제안하는 방법	역기구학
1	0.015550J	0.018682J
2	0.009256J	0.011756J
3	0.002178J	0.005804J
4	0.001346J	0.003730J
5	0.000942J	0.001754J
Total	0.019232J	0.022148J

반적인 ZMP 궤적과 역기구학으로부터 얻어진 5-link 이족로봇의 각 관절마다 보행 1주기 동안 소요되는 에너지를 보여준다. 각 관절에서 소요되는 평균 에너지를 비교해보면 제안하는 알고리즘이 기존의 방법보다 0.002916J만큼 덜 소요되는 것을 알 수 있다. 그림 19를 살펴보면 제안하는 알고리즘에 의해 생성된 각 관절의 회전력이 인간의 보행 패턴과 유사하게 유연한 변화를 보이는 것을 알 수 있다.

6. 결론

본 논문은 인간과 같은 에너지 효율적이며 안정적인 이족로봇의 보행패턴을 생성하기 위해 인간의 sagittal plane과 frontal plane 상에서 획득된 보행영상으로부터 COG를 측정하였다. 역진자 모델을 사용하여 인간의 보행시에 COG로부터 ZMP를 계산하여 제안하는 적응적 보행 패턴 생성 알고리즘을 통해 에너지 효율적이며 안정적인 이족로봇의 보행패턴을 생성하였다. 제안하는 알고리즘에 의해서 생성된 보행 패턴을 5-LBRS 프로그램에 적용하여 역기구학을 이용하여 생성된 보행 패턴보다 자연스럽게 에너지 효율적임을 비교실험 하였다.

제안하는 알고리즘에 의해 생성된 보행패턴을 5-link 이족로봇 모델에 적용하여 인간과 같이 자연스럽게 에너지 효율적임을 보였다. 향후 연구에서는 5-link 이족로봇 모델에 유사한 이족로봇을 설계 및 제작하여 제안하는 보행패턴을 실험할 계획이다.

참고 문헌

- [1] L. Magdalena, "Learning Gait Patterns for the Fuzzy Synthesis of Biped Walk," IEEE IFCIS, pp. 248-250, 1994.
- [2] Q. Huang, "Planning Walking Patterns for a Biped Robot," IEEE ICRA Vol.17, pp. 280-289, 2001.
- [3] L. Endo, "Co-evolution of Morphology and Walking Pattern of Biped Humanoid Robot using Evolutionary Computation-Evolutionary Designing Method and its Evaluation," IEEE IROS, Vol.1, pp. 340-345, 2003.
- [4] M. Vukobratovic and D. Juricic, "Contribution to

- the Synthesis of Biped Gait," IEEE Trans. Bio-Med. Eng, Vol.1, pp. 1-6, 1996.
- [5] S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, k. Yokoi and H. Hirukawa, "The 3D Linear Inverted Pendulum Mode : A simple modeling for a biped walking pattern generation," Proc. of the 2001 IEEE/RSJ, Vol.1, pp. 239-246, 2001.
- [6] Q. Huang, K. Shuuiji, N. Koyachi, K. Kaneko, K. Yokoi, H. Arai, K. Komoriya and K. Tanie, "A High Stability, Smooth Walking pattern for a Biped Robot," IEEE ICRA, pp. 65-71, 1999.
- [7] Arbulu, "ZMP Human Measure System," IEEE Climbing-Walking Robots, pp. 433-440, 2006.
- [8] M. Morisawa, S. kajita, K. Kaneko and K. Harada, "Pattern Generation of Biped Walking Constrained on Parametric Surface," IEEE ICRA, pp. 2405-2410, 2005.
- [9] O. Kwon, J. Soo and P. Hyeon, "Optimal Trajectory Generation for Biped Robots Walking Up-and-Down Stairs," Journal of Mechanical Science and Technology, Vol.20, No.5, pp. 621-620, 2006.
- [10] S. Ching-Long, "Inverted Pendulum-like Walking Pattern of a 5-Link Biped Robot," ICAR, pp. 83-88, 1997.
- [11] Y. Hasegawa, "Trajectory Generation for Biped Locomotion Robot," Mechatronics, Vol.10, pp. 67-89, 2000.
- [12] Takemasa ARAKAWA and Toshio FUKUDA, "Natural Motion Trajectory Generation of Biped Locomotion Robot using Genetic Algorithm through Energy Optimization," IEEE Int. Conf. on System, Man and Cybernetics, pp. 1495-1500, 1996.
- [13] A. Borghese, L. Bianchi and F. Lacquaniti, "Kinematic determinants of Human Locomotion," Journal of Physiology, pp. 863-879, 1996.
- [14] Xiuping Mu and Qiong Wu, "A Complete dynamics model of five-link bipedal walking," Proceeding of american control Conference, pp. 4926-4931, 2003.
- [15] Xiuping Mu and Qiong Wu, "Development of a complete dynamic model of a planar five-link biped and sliding mode control of its locomotion during the double support phase," Int. Journal of control, Vol.77, No.8, pp. 789-799, 2004.
- [16] S. Kajita and K. Tani, "Study of Dynamic Biped Locomotion on Rugged Terrain," ICAR, Vol.1, pp. 741-746, 1991.
- [17] E. J. Solteiro Pires and J. A. Tenreiro Machado, "A TRAJECTORY PLANNER FOR MANIPULATORS USING GENETIC ALGORITHMS," IEEE Int. Sym. on Assembly and Task Planning, pp. 163-168, 1999.
- [18] M. Y Cheng and C.-S. Lin, "Genetic Algorithm for Control Design of Biped Locomotion," IEEE Int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics, Vol.2, pp. 1315-1320, 1995.
- [19] C. Chevallereau, A. Formal sky and B. Perrin, "Low energy cost reference trajectories for a biped robot," in Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 1398-1404, 1998.
- [20] Sangho Choi, Youngha Choi and Jingeol Kim "Optimal Walking Trajectory Generation for a Biped Robot Using Genetic Algorithm," IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 1456-1461, 1999.



김 병 현

2008년 숭실대학교 정보통신전자공학부 학사 졸업. 2008년~현재 숭실대학교 전자공학과 석사과정. 관심분야는 이족로봇, 영상처리



한 영 준

1996년 숭실대학교 전자공학과 학사 졸업. 1998년 숭실대학교 전자공학과 석사 졸업. 2003년 숭실대학교 전자공학과 박사 졸업. 2003년~현재 숭실대학교 정보통신전자공학부 조교수. 관심분야는 로봇비전, 영상처리, 비주얼서보잉



한 현 수

1991년 University of Southern California (공학박사). 1992년~현재 숭실대학교 정보통신전자공학부 교수. 1994년 일본기계기술 연구소 객원연구원. 1998년 숭실대학교 어학원장. 1999년 숭실대학교 정보통신전자공학부 학부장. 관심분야는 자동화 시스템, 자료융합, 물체인식