

# 인간의 보행 회전력의 주파수 특징 분석을 이용한 이족로봇의 적응적 보행 패턴 생성

## Biped robot gait pattern generation using frequency feature of human's gait torque analysis

하승석 · 한영준 · 한현수\*

Seung-Suk Ha, Young-Joon Han and Hernsoo Hahn

승실대학교 전자공학과

### 요 약

본 논문에서는 이족로봇의 자연스러운 보행 패턴을 생성하기 위해 인간의 보행 회전력(torque)을 주파수 영역에서 분석하고 분석된 데이터를 이용하여 적응적으로 이족로봇의 보행패턴을 생성하는 기법을 제안한다. 인간의 보행 회전력은 시간영역에서 복잡한 형태를 가지므로 DCT(Discrete Cosine Transform)를 이용하여 주파수영역으로 변환시켜 분석한다. 주파수 영역에서 얻어진 보행 회전력의 특징을 이용하여 이족로봇의 sagittal plane에서의 보행패턴을 생성한다. 또한 이족로봇의 안정적인 보행 패턴을 생성하기 위하여 동적 평형 상태임을 판단할 수 있는 Zero Moment Point(ZMP)해석을 통해 frontal plane상의 보행패턴을 생성하여 3차원 공간상의 안정적이고 인간과 같이 자연스러운 보행 패턴을 생성했다.

키워드 : 이족로봇, 인간의 보행 패턴 분석, 보행 패턴 생성, 유전자 알고리즘.

### Abstract

This paper proposes a method of adaptively generating a gait pattern of biped robot. The gait synthesis is based on human's gait pattern analysis. The proposed method can easily be applied to generate the natural and stable gait pattern of any biped robot. To analyze the human's gait pattern, sequential images of the human's gait on the sagittal plane are acquired from which the gait control values are extracted. The gait pattern of biped robot on the sagittal plane is adaptively generated by a genetic algorithm using the human's gait control values. However, gait trajectories of the biped robot on the sagittal plane are not enough to construct the complete gait pattern because the biped robot moves on 3-dimension space. Therefore, the gait pattern on the frontal plane, generated from Zero Moment Point (ZMP), is added to the gait one acquired on the sagittal plane. Consequently, the natural and stable walking pattern for the biped robot is obtained.

Key Words : biped robot, gait pattern frequency feature, human gait, Genetic Algorithm

### 1. 서 론

이족로봇은 안정된 자세를 유지하면서 다양한 이동 동작이 가능하도록 발전되고 있다. 두 다리로 몸을 지지해야만 하는 이족로봇은 보행 중 안정적인 자세를 가지기가 어렵기 때문에 동적 안정성을 고려하는 것이 무엇보다 중요하다. 이전의 연구들은 안정적인 이족로봇의 보행을 위해 Vukobratovic[1]에 의해 제안된 동적 평형 상태임을 판단할 수 있는 Zero Moment Point(ZMP)를 사용하여 이족로봇의 보행을 구현하였다. 그러나 로봇의 동적 평형 상태를 판단하는 일은 매우 복잡하여 이를 단순화 시켜서 로봇의 보행 패턴을 생성하고자 Kajita[2]는 간략한 모델로 역진자(inverted pendulum)모드 방법을 적용하였으며, Huang[3]은 보행 안정성을 만족하는 최적의 목적 ZMP를 세운 후 발바닥으로 형성된 안정영역에 만족하는 발과 허리의 궤적을 생성함으로써 보행패턴을 구현하였다. 이렇게 단순화된 모델을 사용하는 경우 이족로봇의 안정성을 확보하는 일이 가능하였지만 로봇의 기구 구조로 인해 매우 부자연스러운 보행 패턴을 가지게 되었다.

로봇 보행의 안정성이 확보되면서 이족로봇의 보행 패턴에 대한 연구는 좀 더 자연스러운 움직임 구현하는 방향으로 진행되고 있다. Hasegawa[4]는 이족로봇의 자연스러운 움직임이란 에너지를 최소화 하는 보행이라고 정의하고 계층 구조적 진화 알고리즘을 사용하여 자연스럽고 안정적인 이족로봇의 보행을 유도하였다. 복층구조를 가지는 진화 알고리즘 중 한 계층에서는 GA를 사용하여 에너지가 최소화되는 보행패턴을 생성하고 다른 계층에서는 이족로봇의 관절 인자 값들을 조합하는 역할을 한다. 계층구조를 가지는 알고리즘

를 생성하고자 Kajita[2]는 간략한 모델로 역진자(inverted pendulum)모드 방법을 적용하였으며, Huang[3]은 보행 안정성을 만족하는 최적의 목적 ZMP를 세운 후 발바닥으로 형성된 안정영역에 만족하는 발과 허리의 궤적을 생성함으로써 보행패턴을 구현하였다. 이렇게 단순화된 모델을 사용하는 경우 이족로봇의 안정성을 확보하는 일이 가능하였지만 로봇의 기구 구조로 인해 매우 부자연스러운 보행 패턴을 가지게 되었다.

접수일자 : 2007년 11월 20일  
완료일자 : 2007년 12월 10일  
감사의 글 : 본 연구는 승실대학교 교내연구비 지원으로 이루어졌음.  
\* 책임저자(Corresponding Author)

은 방대한 양의 조합을 가질 수 있는 관절 값들 중 최적의 해답을 얻을 수 있는 방법이 될 수 있다. Capi[5]는 최소에너지 소비와 최소토크변화를 목표로 에너지 소비량 검사와 다관절 로봇의 동적 평형 상태임을 판단할 수 있는 ZMP를 이용하여 로봇 보행의 안정성을 검사 하면서 학습을 통해 이족 보행로봇인 "Bonten-Maru I"의 보행 패턴을 생성해 냈다.

그러나 자연스러운 움직임이란 한정된 로봇의 구조물에서 최대한 인간과 닮은 움직임을 할 수 있을 때 이루어 질 수 있다. 이를 위해 본 연구에서는 인간의 보행 패턴 분석을 통해 한정된 자유도를 가진 로봇에 최대한 인간과 닮은 움직임을 유도하는 한편 ZMP를 이용한 안정적보행이 가능한 이족 로봇의 보행 패턴을 생성하는 기법을 제안한다. 우선 인간의 sagittal plane의 보행 영상을 획득하고, 획득된 영상을 통해 관절의 각도, 각속도, 각가속도를 추출한다. 인간과 이족 로봇은 기구적으로 다른 구조를 가지기 때문에 추출된 인간의 관절 값을 바로 적용하지 못한다. 이를 위해 관절의 인자 값들을 포함하고 있는 각 관절의 회전력을 Lagrangian 방정식을 사용하여 구한다. 시간 영역에서 변화하는 회전력은 매우 복잡한 데이터를 담고 있다. 따라서 이를 분석하기 위해 인간의 보행 한 주기 동안의 회전력의 변화를 신호로 간주하고 주기성을 가진 모든 신호는 단순한 사인 곡선의 조합으로 표현할 수 있다는 이론에 근거한 푸리에 변환(Fourier Transformation)을 사용하여 시간영역의 회전력 변화를 주파수 영역으로 변환한다. 시간영역에서 복잡한 변화를 보이는 회전력이 주파수 영역에서는 한정된 주파수대역을 가지며, 각 주파수대별 인간의 보행을 해석하고 가장 자연스러운 움직임에 대응되는 주파수 대역에서 인간의 보행 특징을 추출한다.

이러한 인간의 보행 특징요소를 이용하여 이족로봇의 sagittal plane의 보행 패턴은 인간의 보행 중 가장 자연스러운 움직임과 비슷한 움직임을 갖도록 GA(Genetic Algorithm)를 이용하여 보행 특징요소에 적응적으로 근접하게 만든다. 또한 이족로봇의 안정적인 보행 패턴을 위해 frontal plane의 보행패턴을 transverse plane의 목적 ZMP 궤적에 계산된 ZMP가 수렴 할 수 있도록 보행패턴을 생성해낸다. 결과적으로 동적으로 안정적이며 인간과 닮은 자연스러운 보행패턴을 생성할 수 있다.

본문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 인간과 로봇의 보행 운동을 모델링하는 기법을 설명하였고, 3장에서는 모델링된 인간의 보행 회전력의 주파수특성을 분석하는 방법을 설명한다. 4장에서는 3장에서 얻어진 인간의 보행 회전력을 이용한 sagittal plane의 보행 패턴 생성과 ZMP를 이용한 frontal plane의 보행 패턴 생성 방법을 설명한다. 5장에서는 제안한 알고리즘을 이족로봇에 구현하고 기존의 알고리즘이 생성하는 보행형태와의 비교를 통해 제안한 알고리즘의 우수성을 입증하였다.

## 2. 인간과 로봇의 보행 운동 모델링

이족로봇이 인간과 같이 움직이도록 하기 위해서는 로봇에 수많은 관절을 부착해야하지만 이는 불가능하다. 근본적으로 사람은 3차원 변형가능(deformable)한 근육과 관절 구조를 가지고 있어서 이를 해석하기도 어려울 뿐 아니라 로봇으로는 흉내 내기 어려울 만큼 많은 자유도와 복잡한 기구적 요소를 가진 모델이기 때문이다. 따라서 대부분의 이족보행 로봇은 그림 3에서와 같이 5개의 링크로 구성된 형태(5-link

biped model)로 단순화하여 구현하고 있다. 이와 같이 복잡한 사람의 보행운동을 단순화된 로봇의 구조로 실현하기 위해서는 사람과 로봇의 보행운동의 동역학을 결부시키는 작업을 필요로 한다.

사람의 보행운동에 대한 동역학적 모델링 작업은 많은 생체 학자들에 의해 많은 연구가 진행되었다. 이들은 인간의 보행 중 거의 모든 동역학 요소들이 그림 1에서와 같이 인간의 몸을 반으로 나눈 x-y 평면상의 절단면(sagittal plane)에 존재하고 있음을 증명하였다[6].

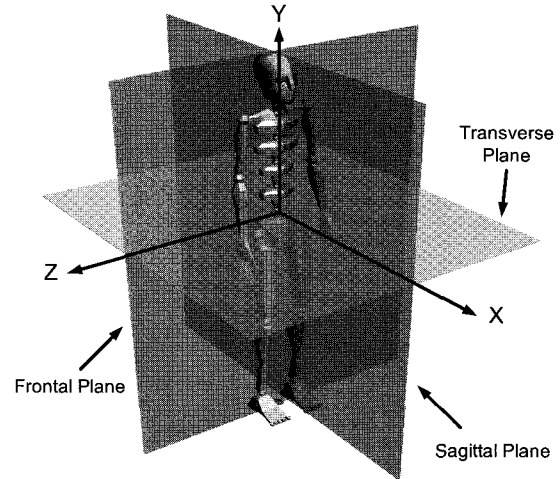


그림 1 Sagittal, Frontal, Transverse plane의 정의.  
Fig. 1 Definition of sagittal, frontal and transverse plane.

사람의 보행패턴을 sagittal 평면으로 제한하여도 인간 보행패턴의 동역학적 특징을 알 수 있다는 사실은 제한적인 구조를 가지는 5-link biped model에 인간보행패턴을 적용해 볼 수 있다는 가능성을 제시한다. 본 논문에서는 인간의 보행패턴을 sagittal 평면으로 제한하여 최대한 5-link biped model의 것과 유사하게 만들기 위해 그림 2와 같은 허벅지와 종아리에 보행제한 기구 물체를 사람에게 착용시켜 보행 시에 z축으로의 움직임을 제한하였다. 이러한 기구 물체를 착용하는 경우에도 사람의 보행은 불편하거나 크게 부자연스럽게 되지는 않는다.

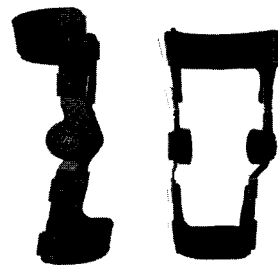


그림 2 인간보행을 sagittal plane에 제한하기 위한 기구물.  
Fig. 2 Mechanical parts constraining human walking to sagittal plane.

그림 3은 5-link biped model을 보여준다. 1개의 상체 link와 2개의 허벅지, 2개의 종아리 등 5개의 link로 이루어졌으며 각 link는 회전 관절로 결합되어있다.

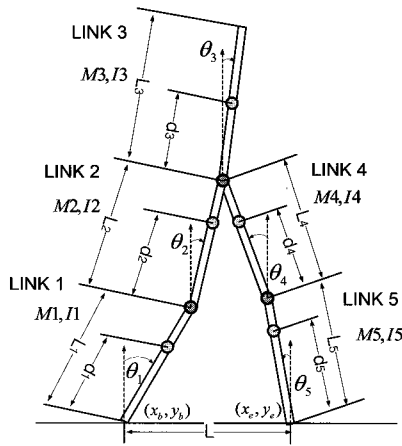


그림 3 5-link biped model의 부분별 명칭.  
Fig. 3 Structure of 5-link biped model.

5-Link biped model의 보행에 영향을 주는 인자들은 각 링크의 질량( $M_i$ )과 길이( $L_i$ )를 비롯하여 다음과 같은 것들이 사용된다.

- $d_i$  : i번째 joint에서 link의 COM까지 거리
- $I_i$  : i번째 link의 moment of inertia
- $\theta_i$  : i번째 link의 각도
- $(x_e, y_e)$  : 지지하고 있는 다리의 좌표
- $(x_b, y_b)$  : 움직이고 있는 다리의 좌표
- $\tau_i$  : i번째 joint의 torque

또한 이족 보행은 왼쪽 다리와 오른쪽 다리의  $\pi/2$ 만큼의 위상 변화로 구성되기 때문에 보행 중 한쪽 다리의 각도, 각속도, 각가속도 값으로 다른 쪽 다리의 각도, 각속도, 각가속도의 값을 유추해 낼 수 있다. 따라서 그림 4와 같이 인간의 보행을 측정하기 위해 피 실험자의 몸에 4개의 마커(marker)를 달고 인간의 보행을 5-Link biped model로 근사화 하였다. 이때 마커(marker)는 머리, 골반, 무릎, 발목에 위치한다.

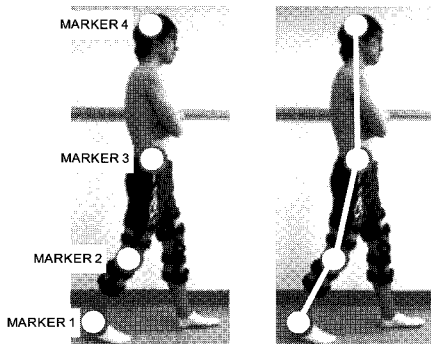


그림 4 인간을 5-link biped model로 근사화 하고 데이터 측정을 위해 부착한 Marker의 위치.  
Fig. 4 Markers attached for approximating human motion using a 5-link biped model.

이와 같은 5-link biped model의 운동과 사람의 보행운동을 연결시키기 위해, 즉 각 관절의 운동에 얼마만큼의 회전력을 가해야 사람의 것과 유사한 운동이 가능한지를 유추하기 위해 사람의 보행을 분석하여 보행 시 사람의 각 관절에 가해지는 회전력을 분석한다. 보행 중 변화하는 회전력은 관절의 각도, 속도, 각속도로부터 유도되기 때문에 이를 사람의

보행영상으로부터 추출하고 그 결과로 얻어지는 회전력을 로봇의 관절에 적용하는 방법을 시행하였다. 본 논문에서는 각 링크의 길이와 질량은 사람의 신체별 평균치를 준용하여 적용하였고 Lagrangian 방정식을 사용하여 인간의 보행 중 각 관절의 회전력과 로봇의 보행 중 회전력을 모델링한다.[7,8]

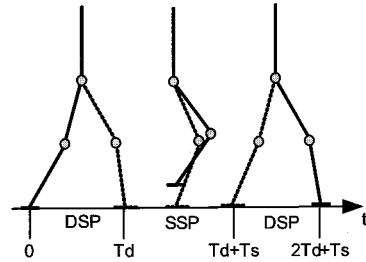


그림 5 Sagittal 평면에서 보행구간의 구분.  
Fig. 5 Walking phases on the sagittal plane.

이족로봇의 보행은 그림 5와 같이 Double Support Phase(DSP)와 Single Support Phase(SSP)의 주기적인 반복으로 구성된다. DSP는 두 다리가 지면과 맞닿아 있고, SSP에서는 한 다리만 지면과 맞닿고 다른 한 다리는 회전하고 있는 상태를 말한다. 그림 5에서  $T_d$ ,  $T_s$ 는 각각 DSP와 SSP구간의 시간을 나타낸다. 각 보행구간에서 각 관절에서 발생하는 회전력은 다음과 같이 표현된다.

### 2.1 Single Support Phase(SSP)

인간의 보행 중 가장 많은 영역을 차지하는 SSP에서의 각 관절의 회전력을 구하기 위해 먼저 각 링크의 질량 중심의 좌표를 그림 3에서 정의한 기호를 이용해서 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} x_{ci} &= \sum_{j=1}^{i-1} (a_j l_j \sin \theta_j) + d_i \sin \theta_i + x_b \\ y_{ci} &= \sum_{j=1}^{i-1} (a_j l_j \cos \theta_j) + d_i \cos \theta_i + y_b \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $(x_{ci}, y_{ci})$ 는 i번째 link의 무게 중심 좌표를 나타내고,  $a_i$ 는 link 3의 경우 0, link 1, 2, 4, 5의 경우는 1인 상수를 나타낸다. 따라서 5-link biped model의 위치에너지 P(potential energy)와 운동에너지 K(kinetic energy)는 각각 식 (2)와 (3)으로 표현할 수 있다.

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

$$\begin{aligned} K &= \sum_{i=1}^5 [\frac{1}{2} m_i (\dot{x}_{ci}^2 + \dot{y}_{ci}^2) + \frac{1}{2} I_i \dot{\theta}_i^2] \\ &= \sum_{i=1}^5 [\frac{1}{2} (I_i + m_i d_i^2) \dot{\theta}_i^2] \\ &\quad + \sum_{i=1}^5 [\frac{1}{2} m_i (\sum_{j=1}^{i-1} (a_j l_j \dot{\theta}_j \cos \theta_j))^2] \\ &\quad + \sum_{i=1}^5 [\frac{1}{2} m_i (\sum_{j=1}^{i-1} (a_j l_j \dot{\theta}_j \sin \theta_j))^2] \\ &\quad + \sum_{i=1}^5 [m_i d_i \dot{\theta}_i \sum_{j=1}^{i-1} [a_j l_j \dot{\theta}_j \cos (\theta_i - \theta_j)]] \end{aligned} \quad (3)$$

식 (2)와 (3)을 다음의 식 (4)와 (5)의 Lagrangian 방정식에 적용하면, SSP 구간에서 각 관절의 회전력을 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

$$L = K - P \quad (4)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_i} - \frac{\partial L}{\partial \theta_i} = \tau_i \quad (5)$$

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

여기서  $D(\theta)$ 는  $5 \times 5$  inertia matrix,  $H(\theta, \dot{\theta})$ 는  $5 \times 5$  Centrifugal and Coriolis matrix,  $G(\theta)$ 는  $5 \times 1$  Gravity matrix,  $\theta = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5]$ 이고  $\dot{\theta}, \ddot{\theta}$ 는 각각  $\theta$ 의 속도와 가속도이며  $T = [\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4, \tau_5]$ 로 관절에서의 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 force이다. 따라서 각각의 term들의 합이 biped model의 전체 force로 표현 될 수 있다.  $D(\theta)$ ,  $G(\theta)$ 는 식 (7)과 같이 구성된다.

$$\begin{aligned} D_{ij} &= p_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) \\ G_i &= g_i \sin(\theta_i) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서  $i, j = 1, \dots, 5$ 이며, inertia를 나타내는  $p_{ij}$ 와 중력을 나타내는  $g_i$ 는 식 (8), (9)와 같이 유도된다.

$$p_{ij} = \begin{cases} I_i + m_i d_i^2 + a_i \left( \sum_{j=i+1}^5 m_j \right) l_i^2 & j = i \\ a_i m_j d_j l_i + a_i a_j \left( \sum_{k=j+1}^5 m_k \right) l_i l_j & j > i \\ p_{ji} & j < i \end{cases} \quad (8)$$

$$g_i = m_i d_i g + a_i \left( \sum_{j=i+1}^5 m_j \right) l_i g \quad (9)$$

$H(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta}$ 는  $H(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} = [H_1(\theta, \dot{\theta}), \dots, H_5(\theta, \dot{\theta})]^T$ 로 나타냈을 때 식(10)과 (11)과 같이 inertia matrix를 통해서 유도된다.

$$H_i(\theta, \dot{\theta}) = \sum_{j=1}^5 \left( \sum_{k=1}^5 \Gamma_{jk}^i \dot{\theta}_j \dot{\theta}_k \right) \quad (10)$$

$$\Gamma_{jk}^i = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial D_{ij}}{\partial \theta_k} + \frac{\partial D_{ik}}{\partial \theta_j} - \frac{\partial D_{kj}}{\partial \theta_i} \right) \quad (11)$$

식 (10)에서  $j$ 와  $k$ 가 같을 때는 각 속도의 제곱으로 원심력을 나타내며,  $j$ 와  $k$ 가 다를 때는 전향력을 나타낸다.

### 2.1 Double Support Phase(DSP)

DSP 구간에서는 두 다리가 지면에 동시에 닿아 있어 땅에 닿은 두발의 좌표 점으로 부터 구속조건이 존재하게 된다. 따라서 각 관절의 각도에 대한 구속조건을 식 (12)와 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \Phi(\theta) &= 0 \\ \Phi(\theta) &= \begin{bmatrix} l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin \theta_2 + l_4 \sin \theta_4 + l_5 \sin \theta_5 - L \\ l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos \theta_2 - l_4 \cos \theta_4 - l_5 \cos \theta_5 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (12)$$

여기서  $\Phi$ 는 구속 조건을 나타내는 벡터이며,  $L$ 은 두발 사이의 거리가 된다. 또한 각 관절 각도에 대한 구속조건 Jacobian  $J(\theta)$ 을 식 (13)과 같이 정의 할 때 식 (14), (15)와 같은 관계가 성립한다.

$$J(\theta) = \frac{\partial \Phi(\theta)}{\partial \theta} \quad (13)$$

$$J(\theta)\dot{\theta} = 0 \quad (14)$$

$$J(\theta)\dot{\theta} + J(\theta)\ddot{\theta} = 0 \quad (15)$$

식 (15)로부터  $\ddot{\theta} = -\dot{J}\dot{\theta}$ 라는 관계식을 얻을 수 있다. 또한 구속조건으로 생기는 힘  $\lambda$ 에 의한 각 관절에서의 회전력  $J^T(\theta)\lambda$ 을 부가하면 DSP 구간에 대한 회전력을 나타내는 식 (6)은 다음의 식 (16)과 같이 바뀌게 된다.

$$D(\theta)\ddot{\theta} + H(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) = J^T(\theta)\lambda + T \quad (16)$$

그러나 식 (15)의 Jacobian은 정방행렬이 아니기 때문에 직접적으로  $\lambda$ 를 구할 수 없다. 이를 해결하기 위해 식 (16)에서  $J D^{-1}$ 을 양변에 곱하고, 구속 조건식을 사용하여 식 (17)과 (18)를 구할 수 있다. 여기서  $h = H(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta)$ 이다.

$$\ddot{\theta} + J D^{-1} h = (J D^{-1} J^T)\lambda + J D^{-1} T \quad (17)$$

$$\ddot{\theta} = D^{-1}((T - h) + J^T \lambda) \quad (18)$$

따라서  $\lambda$ 는 식 (19)와 같이 구할 수 있다.

$$\lambda = -(J D^{-1} J^T)^{-1} (J D^{-1} (T - h) + \ddot{\theta}) \quad (19)$$

### 3. 인간의 보행 분석

본문 2에서 구한 dynamics를 통해 해석된 무릎 관절의 보행 회전력은 그림 6과 같다. 이와 같이 시간영역의 보행 회전력은 많은 변화를 보이며, 이를 로봇에 적용하기 위해서는 많은 어려움이 따른다.

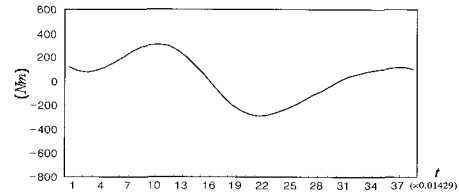


그림 6 무릎 관절에서의 보행 회전력.  
Fig. 6 Human's gait torque in the time domain.

따라서 이러한 점을 극복하고자 본 논문에서는 인간의 보행을 분석하고 이족로봇의 보행 패턴에 적용하기 위해 인간의 관절 회전력을 신호로 간주하고 임의의 주기적인 신호는 연속된 사인 곡선의 조합으로 표현할 수 있다는 이론에 근거한 이산 푸리에 변환(Discrete Fourier Transform)을 사용하여 인간의 관절회전력을 주파수 성분으로 변환하여 분석한다.

DFT는 입력 신호의 주파수 분포 분석을 행할 수 있는 기법으로, 특정 주파수 구간 내에서 균일한 간격으로 설정된 주파수에서의 값을 구할 수 있다. 이는 복소수의 형태로 표현되며 이를 절대 값으로 변환하면 해당 주파수에서의 크기를 알 수 있다. DFT는 식 (20)과 같이 표현된다.

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\frac{2\pi kn}{N}}, \quad 0 \leq k \leq N-1 \quad (20)$$

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

또한 주파수 영역에서 시간영역으로의 변환은 식 (21)과 같은 Inverse Discrete Fourier Transform(IDFT)을 사용하여 변환시킬 수 있다.

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X[k]e^{j\frac{2\pi kn}{N}}, \quad 0 \leq k \leq N-1 \quad (21)$$

그림 6와 같은 인간의 무릎 관절 회전력은 주파수 영역에서는 그림 7과 같이 표현된다.

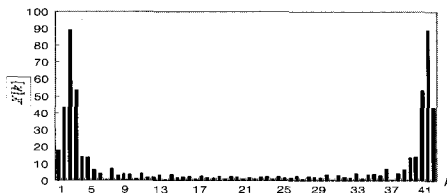


그림 7 주파수영역에서의 보행 회전력.

Fig. 7 Human's gait torque of frequency domain.

이와 같이 DFT를 이용하여 처리된 변환계수들은 복소수이므로, 이들의 저장 및 처리과정이 복잡하다. 따라서 본 논문에서는 DFT와는 달리 복소수를 이용하지 않고 실수만을 사용하는 DCT를 이용하여 분석한다. 또한 DCT는 주파수간의 상관관계를 쉽게 파악할 수 있다. DCT는 식 (22)와 같다.

$$X[k] = C(k) \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cos\left[\frac{\pi(2n+1)k}{2N}\right] \quad (22)$$

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

또한 DCT에서 시간영역으로의 변환은 식 (23)과 같은 Inverse DCT를 사용하여 변환시킬 수 있다.

$$x(n) = \sum_{k=0}^{N-1} C(k) X[k] \cos\left[\frac{\pi(2n+1)k}{2N}\right] \quad (23)$$

DCT를 사용하여 주파수영역으로 변환된 회전력은 그림 8과 같다.

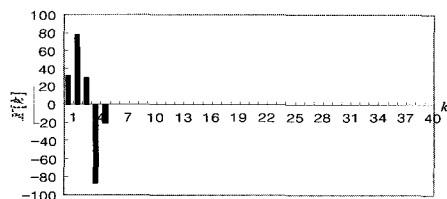


그림 8 인간의 보행 회전력의 DCT계수.

Fig. 8 Human's gait torque in the frequency domain.

그림 8에서 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 9와 같이 기존의 보행 패턴(그림 6)과 가까운 회전력을 가지게 된다. 따라서 본 논문에서는 이 저주파 영역의 값을 주파수 영역의 보행 인자라고 정의하고, 이를 이용하여 이족로봇의 sagittal plane 보행 패턴을 생성하게 된다.

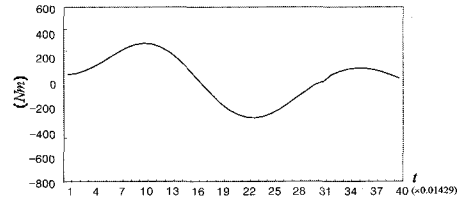


그림 9 저주파 영역 값만을 이용하여 복원한 인간의 보행 회전력.

Fig. 9 Human's gait torque recovered using the low frequency coefficients of DCT.

#### 4. 이족로봇의 보행 패턴 생성

보행은 sagittal, frontal, transverse plane으로 구성되는 3차원 공간상의 움직임으로 해석할 수 있다. 그림 1에서와 같이 sagittal plane은 (XY)평면으로 사람의 좌우를 가르는 평면이고, frontal plane은 (YZ)평면이고 transverse plane은 (XZ)평면이다. 이들은 서로 직교하므로 이들 중 2개의 평면에서의 움직임을 알면 3차원 동작의 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.

따라서 본 논문에서 제안하는 이족로봇의 보행패턴 생성 알고리즘은 그림 10에 보여주는 바와 같이 sagittal plane과 frontal plane의 보행 패턴을 생성한다. Sagittal plane에서의 보행패턴은 인간이 보행할 때 주파수 영역에서의 회전력을 분석을 통해 결정하며, frontal plane의 보행패턴은 transverse plane상의 목적 ZMP에 실제 ZMP가 수렴하도록 생성된다. 이때 보행에 필요한 많은 관절의 제어인자를 ZMP와 회전력만을 이용하여 생성하지 못하므로 적응적으로 최적화할 수 있는 유전자 알고리즘(GA)을 이용한다.

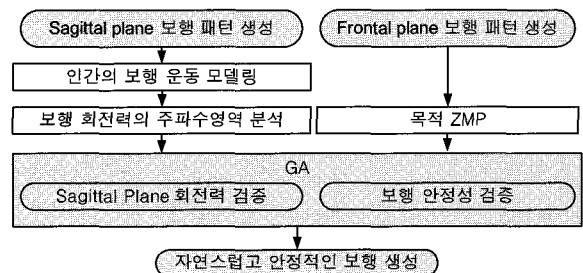


그림 10 제안하는 알고리즘의 구조.

Fig. 10 Flow of the proposed algorithm.

### 4.1 Zero Moment Point(ZMP)

Frontal plane상의 보행 궤적은 로봇이 중심이동을 위해 왼쪽 다리와 오른쪽 다리의 각도를 동일하게 움직인다고 가정하고 그림 11과 같이  $\theta_{frontal}$ 을 ZMP 궤적을 통해 구함으로서 frontal plane상의 궤적을 생성할 수 있다. 다관절 로봇의 동적평형 상태임을 판단 할 수 있는 Zero Moment Point(ZMP)[9]는 다관절 로봇의 모든 힘과 모멘트의 합이 0이 되는 점을 의미하며 기준좌표계 상에서의 위치는 식 (24)와 식 (25)로 표현할 수 있다. 또한 발바닥은 항상 지면과 평행을 이루고 있다고 가정한다.

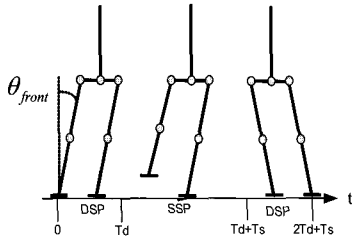


그림 11 Frontal plane에서의 보행 패턴.  
Fig. 11 Walking phases on the frontal plane.

$$x_{ZMP} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g) x_i - \sum_{i=1}^n m_i \ddot{x}_i z_i - \sum_{i=1}^n I_{iy} \ddot{\Omega}_{iy}}{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g)} \quad (24)$$

$$y_{ZMP} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g) y_i - \sum_{i=1}^n m_i \ddot{y}_i z_i - \sum_{i=1}^n I_{ix} \ddot{\Omega}_{ix}}{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g)} \quad (25)$$

여기서  $m_i$ 는  $i$ 번째 link의 무게이며,  $I_{ix}$ 와  $I_{iy}$ 는 inertia,  $\ddot{\Omega}_{ix}$ 와  $\ddot{\Omega}_{iy}$ 는 각속도를 나타낸다. 또한  $(x_i, y_i, z_i)$ 는  $i$ 번째 link의 질량 중심 좌표를 나타낸다.

본 논문에서는 로봇의 발바닥으로 형성되는 안정 영역의 중심에 ZMP가 존재 하고 있을 때 가장 안정적이라고 판단하고, 목적 ZMP궤적을 그림 12와 같이 설정하였다. 따라서 frontal plane상의  $\theta_{frontal}$ 값은 식 (24)와 식 (25)를 사용하여 구해진 계산된 ZMP궤적과 목적 ZMP궤적의 오차 값을 최소화하도록 그 값을 결정한다.

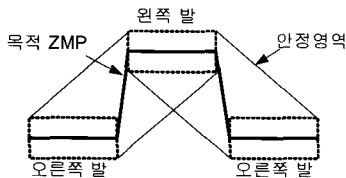


그림 12 목적 ZMP.  
Fig. 12 Desired ZMP.

### 4.2 적응적 보행 패턴 생성

인간의 보행 패턴을 이용하여 적응적으로 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 이족보행로

봇의 안정적인 보행을 보장하는 ZMP 궤적으로부터 구한 frontal plane 상에서의 기울림 각도를 목표치로 설정하고, 임의의 특성을 갖는 로봇이 사람과 같은 보행패턴을 갖도록 하기 위해 유전자알고리즘(GA)을 이용한다.

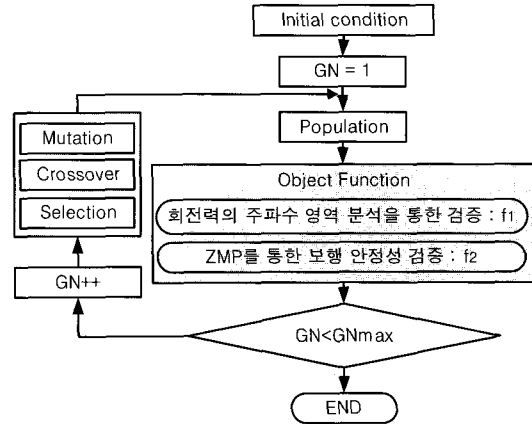


그림 13 적응적 보행 패턴 생성 알고리즘.  
Fig. 13 Flow of the generation gait pattern using GA.

GA는 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. GA는 초기해 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. 본 논문에서는 사람보행의 특성을 표현하는 주파수 영역에서의 보행 인자와 이족보행로봇의 안정적인 보행을 보장하는 ZMP 궤적이 GA의 목적함수가 되며 다음의 식 (26)~(27)과 같이 설정된다.

$$f_1 = \int_0^{T_c} E_{FDC} dt \quad (26)$$

$$f_2 = \int_0^{T_c} E_{ZMP} dt \quad (27)$$

여기서  $T_c$ 는 보행 한주기 동안의 시간을 나타내며,  $E_{FDC}$ 는 인간의 저주파 영역값과 로봇의 저주파 영역값의 오차를 나타내며,  $E_{ZMP}$ 는 목적 ZMP와 실제 ZMP사이의 오차로 다음의 식(28)~(29)와 같이 표현할 수 있다.

$$E_{FDC} = \| H_{FDC} - R_{FDC} \| \quad (28)$$

$$E_{zmp} = \| p_{zmp} - p_{dzmp} \| \quad (29)$$

여기서  $H_{FDC}$ 와  $R_{FDC}$ 는 각각 한 주기 보행 동안의 인간 회전력의 저주파 영역의 값과 로봇 회전력의 저주파 영역의 값을 나타내며,  $p_{zmp}$ 와  $p_{dzmp}$ 는 각각 계산된 ZMP궤적과 목적 ZMP궤적을 나타낸다.

따라서 식 (26)~(27)과 같은 목적함수에 최적으로 수렴하는 이족 로봇의 보행 패턴을 구할 수 있다.

### 5. 실험

제안한 알고리즘의 성능은 그림 14와 같이 직접 제작한 이족보행 로봇을 대상으로 실험을 통해 입증하였다. 제안된 알고리즘은 Pentium PC에서 VC++로 구현하였으며 로봇의 제어기에 전송하여 로봇을 구동하였다.

제안하는 알고리즘의 성능은 일반적으로 이족 로봇의 보행 패턴 생성에 사용되어지는 ZMP계적과 역기구학을 이용한 보행 패턴과 본 논문에서 제안한 알고리즘이 생성하는 보행패턴이 인간의 보행시 얻어지는 각 관절의 회전력에 얼마만큼 수렴되어 지는지를 비교하여 평가하였다.

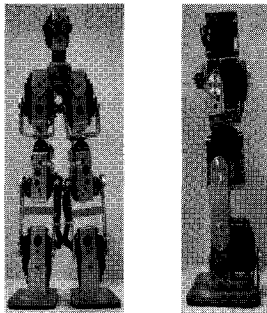


그림 14 실험에 사용한 이족로봇.

Fig. 14 Biped robot used in the experiments.

#### 5.1 인간의 보행 패턴 획득 및 분석

그림 15와 같이 인간의 보행을 측정하기 위해 피 실험자의 몸에 4개의 마커와 2개의 보행제한 기구 물을 부착하여 CCD 디지털 카메라(IPX-VGA 210)를 통해서 초당 100 frame의 인간의 보행패턴을 획득하였다. 보행인자 추출 프로그램(EHWP)은 시간에 따른 관절의 변위와 시간에 따른 각도의 변화를 측정한다.

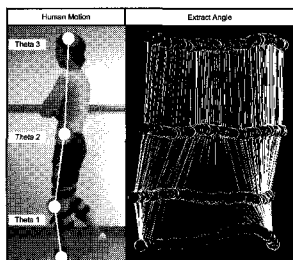


그림 15 인간보행의 인자를 추출하는 예.

Fig. 15 Extraction of human walking parameters.

EHWP를 통해 얻어진 관절의 각도와 각속도, 각가속도는 그림 16-18과 같이 측정할 수 있다.

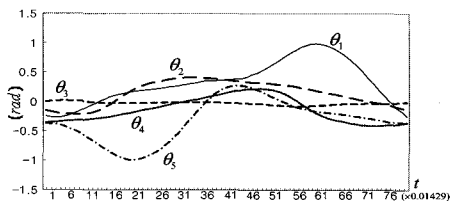


그림 16 인간의 각 관절의 각도.

Fig. 16 Rotational angles of individual human joints.

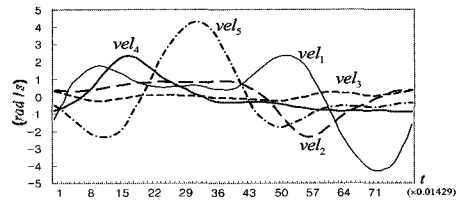


그림 17 인간의 각 관절의 속도.

Fig. 17 Velocities of individual human joints.

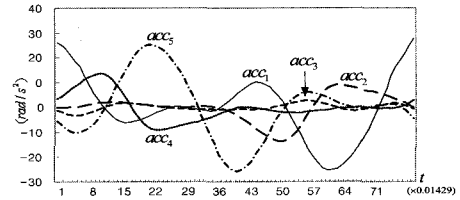


그림 18 인간의 각 관절의 가속도.

Fig. 18 Accelerations of individual human joints.

동적 모델 식(6)과 식(16)에 이들 각도, 속도, 가속도를 대입하고 표 1에 정리된 피 측정인의 각 link의 값을 대입하여 보행 중 각 관절의 회전력을 그림 19와 같이 구할 수 있다 [10].

표 1 피 측정인의 각 관절의 특성값.

Table 1 Feature values of the experimentee's links.

Link	$M_i$ (kg)	$L_i$ (m)	$d_i$ (m)	$I_i$ (kg·m <sup>2</sup> )
1	3.355	0.48735	0.192	0.137
2	5.5	0.41895	0.237	0.101
3	37.29	0.8037	0.503	5.925
4	5.5	0.41895	0.181	0.101
5	3.355	0.48735	0.295	0.137

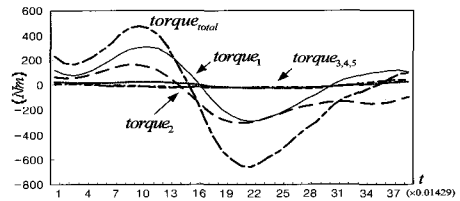


그림 19 인간의 각 관절의 회전력.

Fig. 19 Calculated torques of individual human joints.

그림 19와 같은 회전력의 분석을 위해 DCT를 이용하여 주파수 영역으로 변환하면 그림 20과 같다.

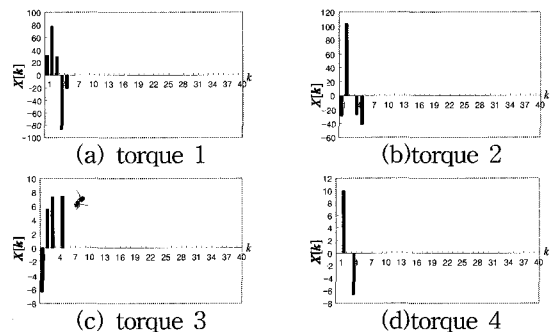


그림 20 주파수 영역에서의 인간의 회전력.

Fig. 20 Human's torque in the frequency domain.

5.2 이족로봇의 보행 패턴 생성

인간 보행 회전력의 DCT값을 사용하여 실제 이족로봇의 기구 물에 적응적으로 접근하는 보행패턴을 GA를 이용하여 생성한다. GA를 위한 초기 세대는 인간의 보행으로부터 얻어진 관절의 값을 이용하여 cubic spline곡선으로 생성하였다. 또한 실험에서 사용된 그림 14의 이족로봇의 구조적인 특성값은 표 2와 같으며 이에 적용될 GA의 parameter는 표 3과 같다.

표 2 이족로봇의 각 관절의 특성값.  
Table 2 Feature values of the robot links.

Link	$M_i (kg)$	$L_i (m)$	$d_i (m)$	$I_i (kg.m^2)$
1	0.164	0.115	0.034	0.00082
2	0.144	0.085	0.043	0.0006
3	0.422	0.11	0.091	0.0035
4	0.144	0.085	0.032	0.0006
5	0.164	0.115	0.053	0.00082

표 3 GA 변수.  
Table 3 GA parameters.

Maximum generation ( $GN_{max}$ )	300
Population size	11
Crossover probability	0.6
Mutation probability	0.1

그림 20에서의 인간의 주파수 영역 값과 GA를 이용하여 로봇의 회전력을 적응적으로 구하면 그림21과 같이 얻어지며 이와 같은 회전력은 인간의 회전력에 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 또한 GA를 통해 얻어진 이족로봇의 각 관절 값은 그림 22와 같다.

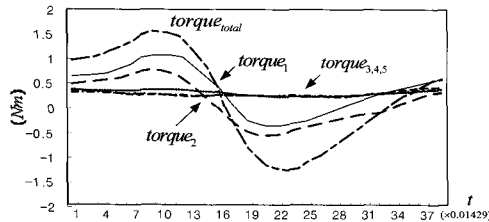


그림 21 GA를 이용하여 구한 이족보행로봇 각 관절에서의 회전력.

Fig. 21 Torques of individual robot's joints acquired using the GA.

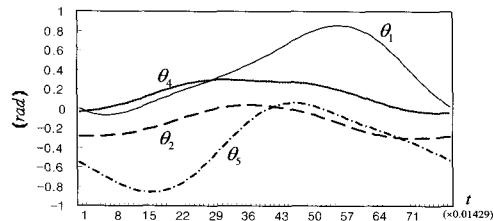


그림 22 GA를 적용하여 구한 이족보행로봇 각 관절에서의 각도변화.

Fig. 22 Rotation angles of individual robot's joints acquired using the GA.

로봇의 안정성을 위하여 ZMP를 사용하여 생성된 frontal

plane의 보행 패턴은 그림 23과 같다.

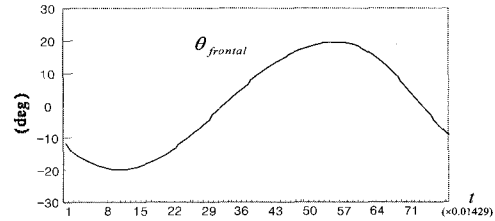
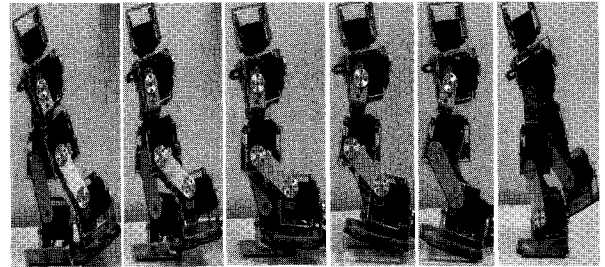


그림 23 최적화 후의 이족로봇의  $\theta_{frontal}$

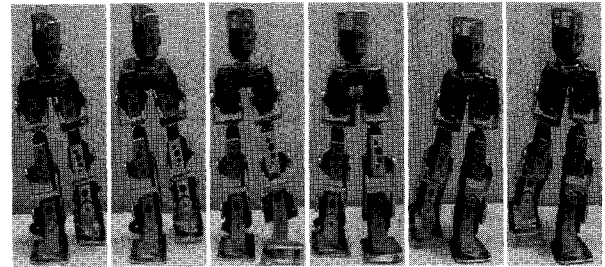
Fig. 23  $\theta_{frontal}$  of the biped robot after optimization process.

그림 25는 본 논문에서 제안한 이족로봇 보행의 성능평가를 위해 최종적으로 인간의 보행 분석을 통해 얻어진 로봇의 sagittal plane의 보행 패턴과 ZMP 해석을 통해 얻어진 frontal plane상의 보행 궤적을 보여준다.

본 논문에서 제안한 이족로봇 보행의 성능평가를 위해 ZMP궤적과 역기구학을 이용하여 얻어진 로봇의 보행 궤적은 그림 26과 같다. 또한 이를 이용하여 얻어진 이족로봇의 각 관절의 보행 중 회전력의 변화는 그림 27과 같다.



(a) sagittal상에서의 보행모습.



(b) frontal plane 상에서의 보행모습.

그림 25 이족로봇의 (a) sagittal, (b) frontal plane 상에서의 보행모습.

Fig. 25 Pictures of robot's walking in (a) sagittal and (b) frontal plane.

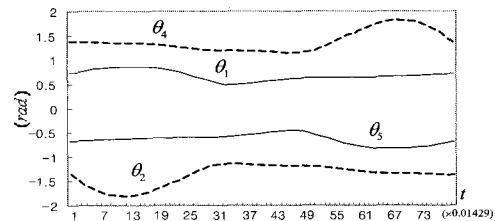


그림 26 ZMP궤적과 역기구학으로 얻은 로봇의 보행 궤적.  
Fig 26 Trajectories of robot's joint angles acquired from ZMP trajectory and inverse kinematics analysis.



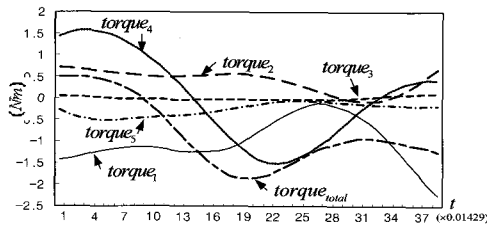


그림 27 ZMP 궤적과 역기구학으로 얻은 로봇 각 관절에서의 회전력.

Fig. 27 Torques of robot's joints acquired from ZMP trajectory and inverse kinematics analysis.

위의 결과에서 볼 수 있듯이 ZMP와 역기구학으로 얻어지는 이족로봇의 보행 패턴은 본 논문에서 제시한 방법보다 인간의 보행 중 회전력과 달라서 보행이 부자연스럽다는 것을 확인할 수 있다. 결론적으로, 본 논문에서 제시한 방법이 기존의 연구 방법보다 인간과 비슷한 자연스러운 보행 패턴을 생성하는 것을 알 수 있다.

### V. 결론

본 논문에서는 이족로봇의 인간과 닮은 자연스러운 보행 패턴 생성을 위해 우선 인간의 보행 패턴을 획득하고 보행 회전력을 계산하였다. 인간의 보행 회전력을 해석하기 위해 회전력을 주파수 영역으로 변환하고 변환된 주파수 영역에서 저주파 영역만을 취해 인간의 보행 인자로 정의 하였다. 인간의 보행 인자에 이족로봇의 보행 인자가 수렴하도록 이족로봇의 sagittal plane의 보행 패턴을 생성하였다. 또한 frontal plane의 보행 패턴은 이족로봇의 보행 중 안정성을 보장하기 위해 ZMP 궤적을 고려하여 이족로봇의 보행 패턴을 생성 하였다. 이러한 알고리즘을 통해 기존의 이족로봇 보행 연구 결과에 비해 인간의 보행에 더 가까운 이족로봇의 자연스러운 보행 패턴을 생성할 수 있음을 실험을 통해 입증 하였다.

### 참고 문헌

[1] M. Vukobratovic and D. Juricic, "Contribution to the Synthesis of Biped Gait," IEEE Trans. Bio-Med. Eng, Vol. 1, pp. 1-6, 1969.

[2] S. Kajita and K. Tani, "Study of Dynamic Biped Locomotion on Rugged Terrain : Derivation and Application of the Linear Inverted Pendulum Mode," IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, Vol. 6, pp. 86-96, 1990.

[3] Q. Huang, K. Shuuji, N. Koyachi, K. Kaneko, K. Yokoi, H. Arai, K. Komoriya and K. Tanie, "A High Stability, Smooth Walking pattern for a Biped Robot," IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 65-71, 1999.

[4] Yasuhisa Hasegawa, Takemasa Arakawa, and Toshio Fukuda, "Trajectory generation for biped locomotion robot," Mechatronics, Vol.10, No.1, pp. 67-89, 2000.

[5] Capi, Masao Yokota, "Optimal Multi-criteria hu-

manoid robot gait synthesis-an evolutionary approach", Int. Journal of Innovative Computing, Information and Control, Vol.2, pp. 1249-1258, December 2006.

[6] A. Borghese, L Bianchi, F Lacquaniti, "Kinematic determinants of human locomotion," Journal of Physiology, pp. 863-879, 1996.

[7] Xiuping Mu, Qiong Wu, "A Complete dynamics model of five-link bipedal walking," Proceeding of american control Conference, pp. 4926-4931 Denver, Colorado, America, 2003.

[8] Xiuping Mu, 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.

[9] Mimir Vokobratovic, Branislav Borovac, "Zero-moment point-thirty five years of its life" Int. Journal of Humanoid Robotics, vol 1, no. 1, pp. 157 - 173, 2004.

[10] David A. Winter, " Biomechanics and motor control, of human movement," WILEY, 1990.

### 저자 소개



하승석(Ha seung suk)  
2006년 숭실대 정보통신전자공학부 졸업  
2007년~현재 동 대학원 전자공학과 석사 과정

관심분야 : 이족로봇, 영상처리  
Phone : 010-2902-6143  
E-mail : ssu1004@ssu.ac.kr



한영준(Han young joon)  
제 14권 7호(2004년 12월호) 참조



한헌수 (Hahn hern soo)  
제 13권 4호(2003년 8월호) 참조