

인간 관절 에너지를 통한 이족로봇의 자연스러운 보행 제어

Control Gait Pattern of Biped Robot based on Human's Sagittal Plane Gait Energy

하 승 석, 한 영 준, 한 헌 수*
(Seung Suk Ha, Youngjoon Han, and Hernsoo Hahn)

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, as proved by the experiments.

Keywords : biped robot, human gait analysis, zero moment point, genetic algorithm

I. 서론

Humanoid robot은 인간 중심의 작업환경에서 인간과 함께 생활할 수준까지 발전하고 있다. 따라서 humanoid robot은 걸보습만 인간과 비슷할 뿐만 아니라 인간 중심의 작업 동선을 이동하기 위하여 인간이 이동하는 형태인 직립보행을 할 수 있어야 한다. 인간과 같이 로봇이 두 다리로 직립보행 할 수 있게 하기 위해 다양한 연구가 진행되고 있으며 특히 사람의 보행자세와 유사한 보행이 가능하도록 만들기 위해 인간의 보행 인자 값을 추출하고 로봇에 이를 적용하는 연구가 이루어지고 있다. 예를 들면 Caballero[1]는 인간의 보행 영상을 획득하여 kinematics와 dynamics 해석을 통해 이족로봇에 적용하고자 하는 연구가 이루어졌다. Sardain[2]는 동적으로 평형인 상태임을 판단할 수 있는 Zero Moment Point(ZMP)를 인간으로부터 추출하기 위해 압력센서가 달린 로봇 발을 인간이 착용하여 인간의 ZMP 궤적과 지면으로 부터의 반발력을 측정하였다. 이와 같은 압력분포는 많은 자유도와 복잡한 기구적 요소를 가진 인간의 3D deformable 구조에서 얻어지는 것으로써 한정적인 자유도를 갖는 이족보행로봇에 적용하기란 매우 어려운 일이다. 이러한 로봇과 인간과의 구조차이로 인해 발생하는 문제들을 극복하고자 인간의 보행은 가장 힘이 적게 드는 방향으로 학습되어 진다는 특성에 착안하여 이족로봇의 보행 또한 에너지가 최소화 되도록 보행 패턴을 생성하는 연구가 이루어 졌다[3].

그러나 이족로봇이 직립 보행을 하기 위해선 여러 가지 문제점이 존재 한다.

우선 이족로봇은 다수의 자유도를 가진 구조물이기 때문에 보행을 하기 위한 관절 인자 값들의 가능한 조합이 무수히 많다. 또한 이족로봇은 직립보행 형태로 이동할 수 있어야 하므로, 보행 시 동적 안정성을 고려하는 것이 무엇보다 중요하다. 따라서 이족로봇의 보행 패턴을 생성하기 위해 적응적으로 최적화하는 Genetic Algorithm(GA)을 이용하여 안정적이고 에너지 효율적인 보행 패턴을 생성하는 연구가 이루어 졌다. Hasegawa[4]는 이족로봇의 자연스러운 움직임이란 에너지를 최소화 하는 보행이라고 정의 하고 계층 구조적 진화 알고리즘을 사용하여 자연스럽게 안정적 인 이족로봇의 보행을 유도 하였다. 복층구조를 가지는 진화 알고리즘 중 한 계층에서는 GA를 사용하여 에너지가 최소화 되는 보행패턴을 생성하고 다른 계층에서는 이족로봇의 관절 인자 값들을 조합하는 역할을 한다. 계층구조를 가지는 알고리즘은 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 이족보행로봇인 "Bonten-Maru I"의 보행 패턴을 생성해 냈다. 이러한 연구들의 결과물로 이족로봇의 안정성과 에너지가 최소화 되는 보행은 이루어 졌지만, 인간과 닮아야 하는 이족로봇이 인간과 닮은 보행 패턴을 가지지는 못한다. 이와 같이 지금까지의 연구를 통해 얻어진 결론은 로봇을 인간과 같이 자연스러운 보행하도록 하는 것과 로봇의 안정성을 극대화하면서 에너지를 최소화 하도록 로봇을 움직이는 것은 상호 상충적인 관계인 것으

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2007. 9. 11., 채택확정 : 2007. 12. 18.

하승석, 한영준, 한헌수 : 숭실대학교 정보통신 전자공학부
(ssu1004@ssu.ac.kr/young@ssu.ac.kr/hahn@ssu.ac.kr)

※ 본 연구는 숭실대학교 교내연구비 지원으로 이루어졌음.

로 두개사이의 균형을 이루어야 로봇을 안정적이며 자연스럽게 보행하도록 할 수 있다는 것이다. 따라서 본 논문에서는 인간의 보행 패턴 분석을 통해 이족로봇을 인간이 보기에 자연스럽게 걷도록 만드는 한편 ZMP를 이용한 안정적 보행이 가능한 이족로봇의 보행 패턴을 생성하는 기법을 제안한다. 우선 인간의 보행 패턴을 이족로봇의 보행 패턴에 적용하기 위하여 sagittal plane의 보행 영상 분석을 통해 관절의 각도, 각속도, 각가속도, 회전력(torque)를 추출한다. 하지만 인간과 기구적으로 다른 이족로봇에 추출된 인간의 보행 패턴을 바로 적용하지 못한다. 따라서 각도, 속도, 가속도 정보를 담고 있는 회전력(torque)의 특징을 분석하게 된다. 이를 위해 통계학 분석에서 관절의 위치와 가변성의 특성을 파악할 수 있는 skewness와 kurtosis를 이용하여 보행 중 각 관절의 회전력의 변화를 파악할 수 있다.

Skewness와 kurtosis를 이용하여 이족로봇의 sagittal plane의 보행 패턴은 인간의 보행 중 발생하는 회전력(torque)과 비슷한 회전력을 갖도록 보행 패턴을 생성한다. 하지만 sagittal plane의 보행 패턴만으로는 3차원 공간상의 움직임을 완전히 표현하지 못한다. 따라서 본 논문에서는 frontal plane의 보행패턴을 transverse plane의 목적 ZMP 궤적에 계산된 ZMP가 수렴 할 수 있도록 frontal plane의 보행패턴을 생성해낸다. sagittal plane과 frontal plane의 보행은 3차원 공간상의 움직임에 동시에 영향을 주기 때문에 sagittal plane과 frontal plane의 보행 패턴을 따로 해석해서는 안 된다. 따라서 이족로봇의 보행 패턴을 다중 측면 최적화 문제를 위한 Pareto Optimal Solution과 GA를 이용하여 동적으로 안정적이며 인간과 닮은 자연스러운 보행 패턴을 생성한다.

본문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 인간의 보행 패턴에 대한 연구가 진행 되었고, 3장에서는 인간의 관절에서 보행 중 발생하는 회전력(torque)을 이용한 sagittal plane의 보행 패턴 생성과 ZMP를 이용한 frontal plane의 보행 패턴 생성 방법을 설명한다. 4장에서는 제안한 알고리즘을 이족로봇에 구현하고 기존의 알고리즘이 생성하는 보행과의 비교를 통해 제안한 알고리즘의 우수성을 입증하였다.

II. 사람과 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 2에서와 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 생체학자들에 의해 많은 연구가 진행되었다. 이들은 인간의 보행 중 거의 모든 동역학 요소들이 그림 1(a)와 같이 인간의 몸을 반으로 나눈 x-y 평면상의 절단면(sagittal plane)에

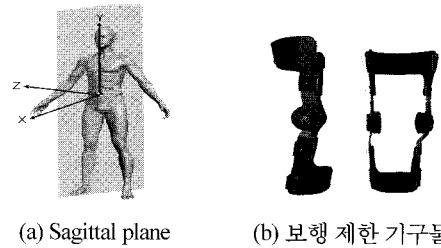


그림 1. Sagittal plane의 정의와 인간보행을 sagittal plane을 제한하기 위한 기구물.

Fig. 1. Definition of sagittal plane and mechanical parts constraining human walking to sagittal plane.

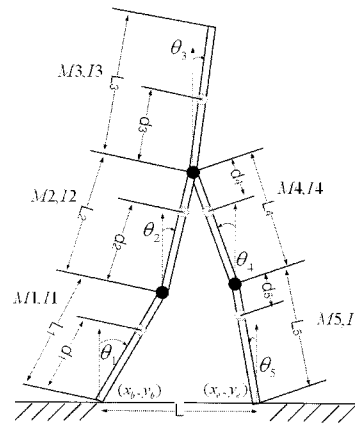


그림 2. 5-link biped model의 부분별 명칭.

Fig. 2. Structure of 5-link biped model.

존재하고 있음을 증명하였다[6].

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 1(b)와 같은 허벅지와 종아리에 보행제한 기구물을 사람에게 착용시켜 보행 시에 z축으로의 움직임을 제한하였다. 이러한 기구물을 착용하는 경우에도사람의 보행은 불편하거나 크게 부자연스럽게 되지는 않는다.

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

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
- θ_i : i번째 link의 각도
- (x_e, y_e) : 지지하고 있는 다리의 좌표
- (x_b, y_b) : 움직이고 있는 다리의 좌표
- τ_i : i번째 joint의 torque

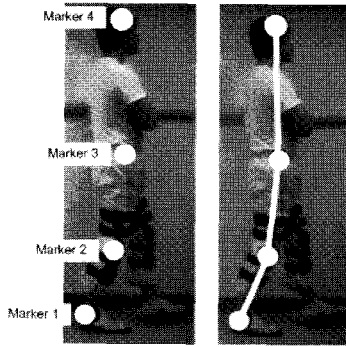


그림 3. Marker의 위치와 인간의 5-link biped model로의 근사화.
Fig. 3. Location of the markers and approximation of model using a 5-link biped model.

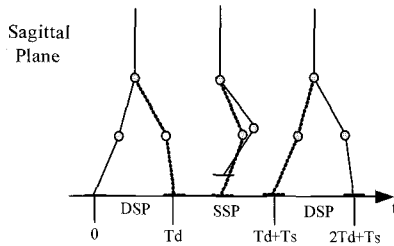


그림 4. Sagittal 평면에서 보행구간의 구분.
Fig. 4. Walking phases on the sagittal plane.

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 3과 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.

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 Lagrangian 방정식을 사용하여 인간의 보행 중 각 관절의 회전력과 로봇의 보행 중 회전력을 모델링한다 [7,8].

이족로봇의 보행은 그림 4와 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 4에서 T_d , T_s 는 각각 DSP와 SSP구간의 시간을 나타낸다. 각 보행구간에서 각 관절에서 발생하는 회전력은 다음과 같이 표현된다.

1. Single support phase(SSP)

인간의 보행 중 가장 많은 영역을 차지하는 SSP의 dynamics는 (1)에서와 같이 구할 수 있다.

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

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, $\theta = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5]$ 이고 $\dot{\theta}, \ddot{\theta}$ 는 각각 θ 의 속도와 가속도이며 $T = [\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4, \tau_5]$ 로 관절에서의 회전력 벡터이다.

2. Double support phase(DSP)

DSP 구간에서는 두 다리가 지면에 동시에 닿아 있어 땅에 닿은 두발의 좌표 점으로 부터 구속 조건이 존재하게 된다. 따라서 각 관절의 각도에 대한 구속조건을 (2)와 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \Phi(\theta) &= 0 \\ \Phi(\theta) &= \begin{bmatrix} l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin \theta_2 + l_4 \sin \theta_4 + l_5 \sin \theta_5 - L \\ l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos \theta_2 - l_4 \cos \theta_4 - l_5 \cos \theta_5 \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{2}$$

여기서 Φ 는 구속 조건을 나타내는 벡터이며, L 은 두발 사이의 거리가 된다. 또한 각 관절 각도에 대한 구속조건 Jacobian $J(\theta)$ 을 (3)과 같이 정의 할 때 (4), (5)와 같은 관계가 성립한다.

$$J(\theta) = \frac{\partial \Phi(\theta)}{\partial \theta} \tag{3}$$

$$J(\theta)\dot{\theta} = 0 \tag{4}$$

$$\dot{J}(\theta)\dot{\theta} + J(\theta)\ddot{\theta} = 0 \tag{5}$$

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

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

그러나 (5)의 Jacobian은 정방행렬이 아니기 때문에 직접적으로 λ 를 구할 수 없다. 이를 해결하기 위해 (6)에서 JD^{-1} 을 양변에 곱하고, 구속 조건식을 사용하여 (7)과 (8)를 구할 수 있다. 따라서 λ 는 (9)와 같이 구할 수 있다. 여기서 $h = H(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta)$ 이다.

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

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

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

III. 이족로봇 보행 패턴 생성

보행은 sagittal, frontal, transverse plane으로 구성되는 3차원 공간상의 움직임으로 해석할 수 있다. 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

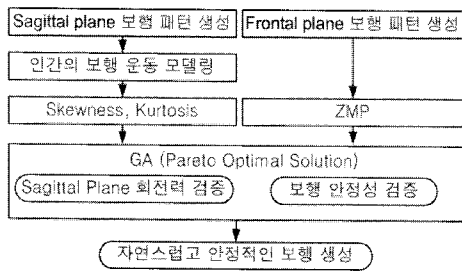


그림 5. 제안하는 알고리즘의 구조.

Fig. 5. Flow of the proposed algorithm.

sagittal plane과 frontal plane의 보행 궤적을 생성함으로써 이족로봇의 자연스럽게 동적으로 안정적인 보행 패턴을 생성한다.

따라서 본 논문에서 제안하는 이족로봇의 보행패턴 생성 알고리즘은 그림 5에 보여주는 바와 같이 sagittal plane과 frontal plane의 보행 패턴을 동시에 생성한다. Sagittal plane에서의 보행패턴은 인간이 보행할 때 각 관절의 회전력의 변화정도를 분석하여 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.

1. 보행 제어 인자

그림 5에서 정의되는 이족로봇의 sagittal plane의 자연스러운 보행패턴은 인간의 보행제어인자(각 관절의 회전력) 값을 분석하여 생성한다. 인간과 로봇의 보행 중 회전력의 특성을 파악하기 위하여 보행 한 주기 동안의 skewness와 kurtosis를 계산하여 보행 중 나타나는 회전력의 특성을 추출한다. 보행 중 사용하는 각 관절에서의 회전력은 그 부호와 양에 따라 관절의 방향과 움직이기 위한 힘의 크기를 알 수 있다[9]. 따라서 시간에 따라 변화하는 회전력의 위치와 분포를 알면 보행의 특징을 파악 할 수 있게 된다. 이러한 회전력의 특징을 파악하기 위해 회전력의 위치와 가변성의 특성을 결정지을 수 있는 skewness와 kurtosis의 값을 추출하여 이족로봇의 sagittal plane의 보행패턴을 생성한다. 그림 6에서 보면 sagittal plane상에서 skewness는 시간에 따라 변화하는 회전력의 분포에서 평균값에 관한 비대칭의 방향과 그 정도를 나타내며 다음의 (10)과 같이 정의된다.

$$Skewness = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^3}{(N-1)s^3} \quad (10)$$

또한 kurtosis는 시간에 따라 회전력이 얼마나 밀집되어 있는지 나타내는 척도로서 (11)과 같이 정의되며, 그 값이 3보다 작으면 peak가 낮고 완만한 분포를 이루고 3이면 정규분포, 3보다 크면 peak가 높고 급격한 분포를 이룬다.

$$Kurtosis = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^4}{(N-1)s^4} \quad (11)$$

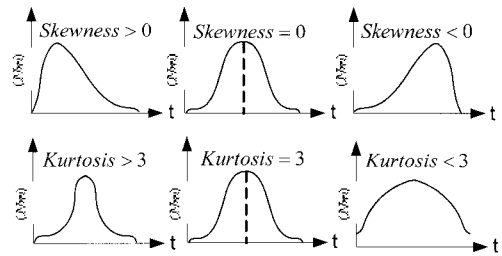


그림 6. Skewness와 Kurtosis의 값에 따른 위치분포.

Fig. 6. Skewness and Kurtosis.

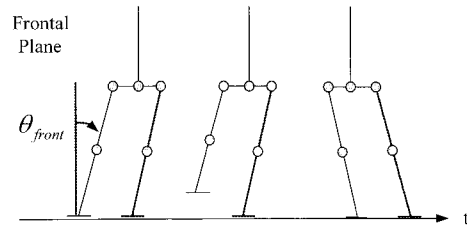


그림 7. Frontal plane에서의 보행 패턴.

Fig. 7. Walking phases on the frontal plane.

여기서 \bar{Y} 는 회전력의 평균, s 는 표준편차이고 N 은 로봇에서 취한 점들의 수이다.

Skewness와 kurtosis를 이용하여 보행에 있어서 인간관절의 회전력 변화에 상응하는 로봇관절의 회전력의 특성을 비교함으로써 적응적으로 sagittal plane의 보행 패턴을 생성하도록 한다. 그림 6은 skewness와 kurtosis의 값에 따른 회전력의 분포를 보여준다.

2. Zero Moment Point(ZMP)

Frontal plane상의 보행 궤적은 로봇이 중심이동을 위해 왼쪽 다리와 오른쪽 다리의 각도를 동일하게 움직인다고 가정하고 그림 7과 같이 $\theta_{frontal}$ 을 ZMP 궤적을 통해 구함으로써 frontal plane상의 궤적을 생성할 수 있다. 다관절 로봇의 동적평형 상태임을 판단 할 수 있는 Zero Moment Point(ZMP)[10]는 다관절 로봇의 모든 힘과 모멘트의 합이 0이 되는 점을 의미하며 기준좌표계 상에서의 위치는 (12)와 (13)으로 표현할 수 있다.

$$x_{ZMP} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g)x_i - \sum_{i=1}^n m_i \ddot{x}_i z_i - \sum_{i=1}^n I_{iy} \ddot{\Omega}_{iy}}{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g)} \quad (12)$$

$$y_{ZMP} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g)y_i - \sum_{i=1}^n m_i \ddot{y}_i z_i - \sum_{i=1}^n I_{ix} \ddot{\Omega}_{ix}}{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g)} \quad (13)$$

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

본 논문에서는 로봇의 발바닥으로 형성되는 안정 영역의

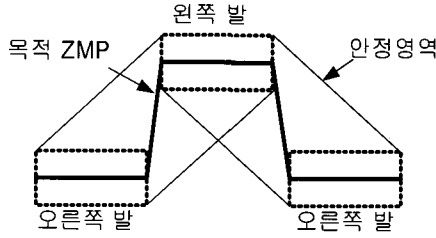


그림 8. 목적 ZMP.
Fig. 8. Desired ZMP.

중심에 ZMP가 존재 하고 있을 때 가장 안정적이라고 판단 하고, 목적 ZMP궤적을 그림 8과 같이 설정하였다. 따라서 frontal plane상의 $\theta_{frontal}$ 값은 (12)과 (13)을 사용하여 구해진 계산된 ZMP궤적과 목적 ZMP궤적의 오차 값을 최적화하도록 그 값을 결정한다.

3. 적응적 보행 패턴 생성

이와 같이 인간의 보행 시 sagittal plane 상의 각 관절에서의 회전력의 특성을 표현하는 skewness와 kurtosis, 그리고 이족보행로봇의 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. 본 논문에서는 사람보행의 특성을 표현하는 skewness와 kurtosis, 그리고 이족보행로봇의 안정적인 보행을 보장하는 ZMP 궤적이 GA의 목적함수가 되며 다음의 (14)-(16)과 같이 설정된다.

$$f_1 = \int_0^{T_c} E_{skewness} dt \tag{14}$$

$$f_2 = \int_0^{T_c} E_{kurtosis} dt \tag{15}$$

$$f_3 = \int_0^{T_c} E_{ZMP} dt \tag{16}$$

여기서 T_c 는 보행 한주기 동안의 시간을 나타내며, $E_{skewness}$, $E_{kurtosis}$, E_{ZMP} 는 각각 이족로봇과 인간의 skewness 오차, kurtosis 오차와 목적 ZMP와 실제 ZMP사이의 오차로 다음의 (17)-(19)와 같이 표현할 수 있다.

$$E_{skewness} = \| H_{skew} - R_{skew} \| \tag{17}$$

$$E_{kurtosis} = \| H_{kur} - R_{kur} \| \tag{18}$$

$$E_{zmp} = \| p_{zmp} - p_{dzmp} \| \tag{19}$$

여기서 H_{skew} 와 H_{kur} 는 한 주기 보행 동안 인간의 회전력 skewness와 kurtosis를 나타내고 R_{skew} 와 R_{kur} 는 로봇의 한 주기 보행 동안 회전력 skewness와 kurtosis를 나타낸다. 또한 p_{zmp} 와 p_{dzmp} 는 각각 계산된 ZMP궤적과 목적 ZMP궤적을 나타낸다.

3개의 목적함수를 동시에 최적화해야 하므로 본 논문에서는 여러 목적함수 $f = (f_1, \dots, f_m)$ 를 최적으로 만족하는 해법을 찾아야한다. GA를 다중측면 최적화에 적용하기 위

해서는 여러 목적함수들이 하나의 적합도함수로 결합되어야 한다. 하지만 이 경우 각 목적 함수들의 가중치 적용이 문제가 될 수 있다. Pareto Optimality는 동일한 크기의 두 벡터 a, b에 대한 최소화 문제에서 a dominate b는 (20)과 같이 정의된다[11]. 이때 dominate되지 않은 벡터들은 non-dominated set 또는 Pareto optimal set이라 부른다.

$$f_i(a) \leq f_i(b), \forall_i = 1, \dots, m, \wedge \tag{20}$$

$$f_i(a) < f_i(b), \exists_i = 1, \dots, m,$$

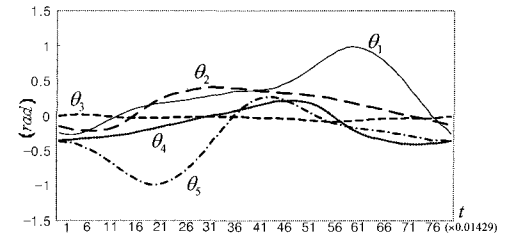
따라서 목적함수 f_1, f_2, f_3 를 최적으로 만족하는 non-dominated된 개체로 구성된 보행패턴을 찾을 수 있다.

IV. 실험

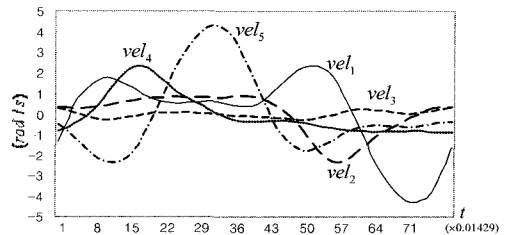
제안한 알고리즘의 성능은 그림 15에 주어진 이족보행 로봇을 대상으로 실험을 통해 입증하였다. 제안하는 알고리즘의 성능은 일반적으로 이족 로봇의 보행 패턴 생성에 사용되어지는 ZMP궤적과 역기구학을 이용한 보행 패턴과 본 논문에서 제안한 알고리즘이 생성하는 보행패턴이 인간의 보행시 얻어지는 각 관절의 회전력에 얼마만큼 수렴되어 지는지를 비교하여 평가하였다.

1. 인간의 보행 분석

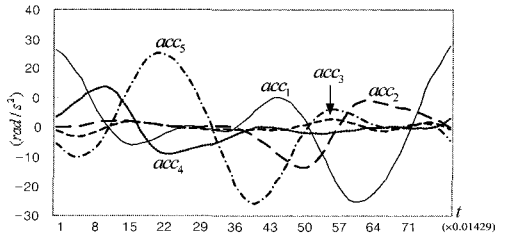
보행인자 추출 프로그램(EHWP)은 시간에 따른 관절의



(a)인간의 각 관절의 각도.



(b)인간의 각 관절의 속도.



(c)인간의 각 관절의 가속도.

그림 9. 인간의 각 관절의 각도, 속도, 가속도.

Fig. 9. Rotational angles, velocities and accelerations of individual human joints.

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 ²)
1	4.575	0.493	0.194	0.192
2	7.5	0.424	0.240	0.141
3	50.85	0.813	0.509	8.271
4	7.5	0.424	0.184	0.141
5	4.575	0.493	0.299	0.192

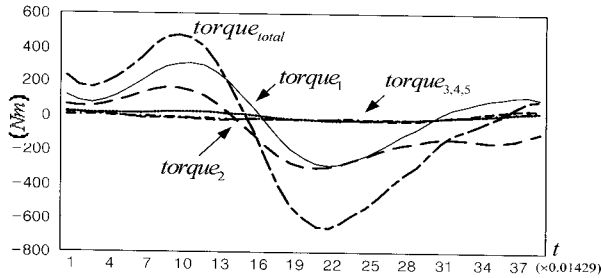


그림 10. 인간의 각 관절의 회전력.

Fig. 10. Calculated torques of individual human joints.

표 2. 표 1에 주어진 특징을 갖는 인간의 skewness와 kurtosis.

Table 2. Skewness and kurtosis of a human having the parameters given in Table 1.

Skewness	-0.199416
Kurtosis	1.814267

변위와 시간에 따른 각도의 변화를 측정한다. EHWP를 통해 얻어진 관절의 각도와 각속도, 각가속도는 그림 9와 같이 측정할 수 있다.

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

그림 10과 같은 회전력의 위치와 가변성의 특성을 결정짓기 위해 (10)과 (11)를 사용하여 추출한 skewness와 kurtosis의 값은 위의 표 2와 같다.

2. 이족로봇의 보행 궤적 생성

인간의 skewness와 kurtosis를 사용하여 실제 이족로봇의 기 구물에 적응적으로 접근하는 보행패턴을 GA를 이용하여 생성한다. GA를 위한 초기 세대는 인간의 보행으로부터 얻어진 관절의 값을 이용하여 cubic spline곡선으로 생성하였다. 또한 실험에서 사용된 그림 11의 이족로봇의 구조적인 특성값은 표 3과 같으며 이에 적용될 GA의 parameter는 표 4와 같다.

표 2와 같은 인간의 skewness와 kurtosis 값과 다목적 최적화 SPEA를 적용하면 로봇의 회전력과 각 관절의 각도 값은 각각 그림 12, 13과 같이 얻어지며 그림 13의 skewness와 kurtosis값은 표 5에서와 같이 인간의 skewness와 kurtosis 값에 수렴하는 것을 확인할 수 있다.

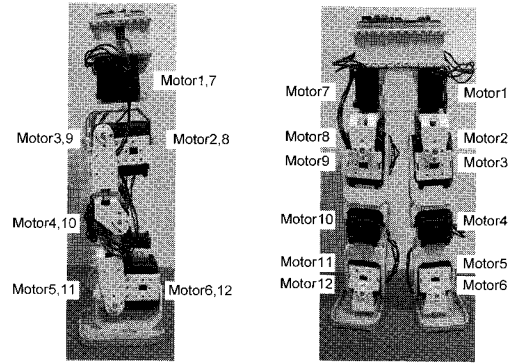


그림 11. 실험에 사용한 이족로봇.

Fig. 11. Biped robot used in the experiments.

표 3. 이족로봇의 각 관절의 특성값.

Table 3. Feature values of the robot links.

Link	M_i (kg)	L_i (m)	d_i (m)	I_i (kg.m ²)
1	0.14	0.1128	0.034	0.0605
2	0.08	0.0806	0.042	0.0442
3	0.53	0.1100	0.089	0.05
4	0.08	0.0806	0.039	0.0442
5	0.14	0.1128	0.079	0.0605

표 4. GA 변수.

Table 4. GA parameters.

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

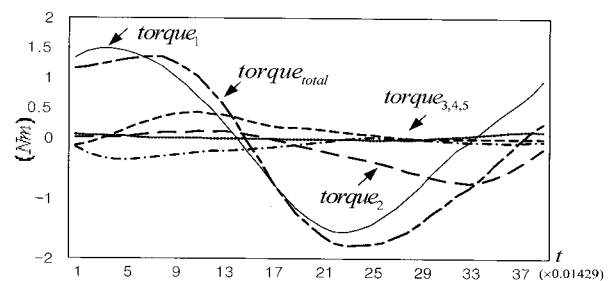


그림 12. SPEA를 적용하여 구한 이족보행로봇 각 관절에서의 회전력.

Fig. 12. Torques of individual robot's joints acquired using the SPEA.

또한 로봇의 안정성을 위하여 ZMP를 사용하여 생성된 frontal plane의 보행 패턴은 그림 14와 같다.

그림 15는 최종적으로 인간의 보행 분석을 통해 얻어진 로봇의 sagittal plane의 보행 패턴과 ZMP 해석을 통해 얻어진 frontal plane상의 보행 궤적을 보여준다.

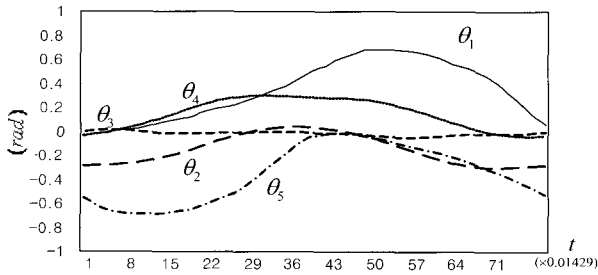


그림 13. SPEA를 적용하여 구한 이족보행로봇 각 관절에서의 각도변화.

Fig. 13. Rotation angles of individual robot's joints acquired using the SPEA.

표 5. 최적화 시행 전후의 로봇의 skewness와 kurtosis.

Table5. Skewness and kurtosis of the robot before and after applying the optimization process.

	Robot(before)	Robot(after)
Skewness	-0.293941	-0.198208
Kurtosis	2.041238	1.807961

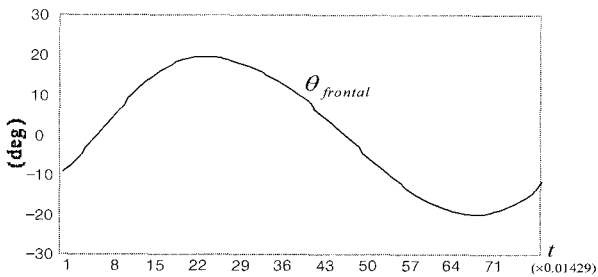
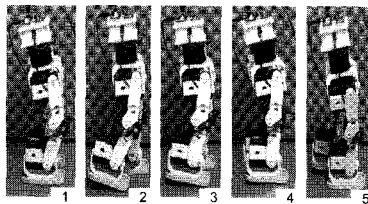
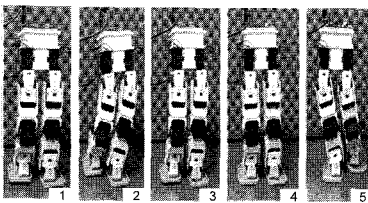


그림 14. 최적화 후의 이족로봇의 $\theta_{frontal}$.

Fig. 14. $\theta_{frontal}$ of the biped robot after optimization process.



(a) sagittal상에서의 보행모습.



(b) frontal plane 상에서의 보행모습.

그림 15. 이족로봇의 (a) sagittal, (b) frontal plane 상에서의 보행 모습.

Fig. 15. Pictures of robot's walking in (a) sagittal and (b) frontal plane.

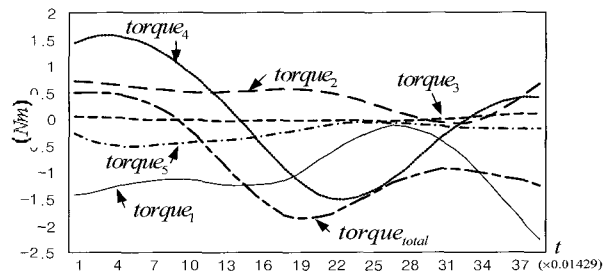


그림 16. ZMP궤적과 역기구학으로 얻은 로봇 각 관절에서의 회전력.

Fig. 16. Torques of robot's joints acquired from ZMP trajectory and Inverse kinematics analysis.

표 6. ZMP궤적과 역기구학으로 얻어진 skewness와 kurtosis.

Table6. Skewness and kurtosis of the robot joints acquired from ZMP trajectory and Inverse kinematics analysis.

Skewness	0.484065
Kurtosis	2.060038

본 논문에서 제안한 이족로봇 보행의 성능평가를 위해 ZMP궤적과 역기구학을 이용하여 얻어진 로봇의 보행 궤적을 이용하여 얻어진 이족로봇의 각 관절의 보행 중 회전력의 변화는 그림 16과 같다. 또한 그림 16과 같은 회전력에서 추출한 skewness와 kurtosis의 값은 표 6과 같다.

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 인간의 보행 패턴을 획득하고 인간의 보행 중 회전력의 변화에 이족로봇의 보행 중 회전력이 수렴하도록 sagittal plane의 보행 패턴을 생성하고, 또한 frontal plane의 보행 패턴은 이족로봇의 보행 중 안정성을 보장하기 위해 ZMP궤적을 고려하여 이족로봇의 보행 패턴을 생성하였다. 이와 같은 두 가지 평면상의 보행 패턴을 결합시키기 위해 다중 측면 최적화 문제를 해결하기 위한 SPEA를 사용하여 보행 패턴을 생성함으로써 기존의 이족로봇의 보행 연구 결과에 비해 인간의 보행에 더 가까운 이족로봇의 자연스러운 보행 패턴을 생성할 수 있음을 실험을 통해 검증 할 수 있었다. 향후 보행 중 인간의 ZMP궤적을 사용하여 이족로봇의 ZMP궤적을 생성함으로써 frontal plane상의 이족로봇의 궤적 또한 인간의 보행에 가까운 자연스러운 보행 패턴을 생성하는 연구가 필요하다.

참고문헌

[1] R. J. Caballero and E. Garcia, M. Armada, Pablo

- Gonzalez-de-Santos, "Biped gait observer and analyzer system," *ISRA'98, Saltillo, Coahuila, Mexico*, December 1998.
- [2] P. Sardain and G. Bessonnet, "Zero moment point-Measurements from a human walker wearing robot feet as shoes." *IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics*, vol. 34, no. 5, pp. 638-648, September 2004.
- [3] K. Y. Yi, Y. F. Zheng, "Biped locomotion by reduced ankle power," *Autonomous Robots*, vol. 4, no. 3, pp. 307-314, November 1997.
- [4] Y. Hasegawa, T. Arakawa, and T. Fukuda, "Trajectory generation for biped locomotion robot," *Mechatronics*, vol. 10, no. 1, pp. 67-89, October 2000.
- [5] Capi, M. Yokota, "Optimal multi-criteria humanoid 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] X. Mu and Q. Wu, "A complete dynamics model of five-link bipedal walking," *Proceeding of american control Conference*, pp. 4926-4931 Denver, Colorado, America, June 2003.
- [8] X. Mu and Q. 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, May 2004.
- [9] D. A. Winter, *Biomechanics and Motor Control, of Human Movement*, WILEY, 1990.
- [10] M. Vokobratovic and B. Borovac, "Zero-moment point-thirty five years of its life" *Int. Journal of Humanoid Robotics*, vol 1, no. 1, pp. 157-173, January 2004.
- [11] J. Horn, N. Nafpliotis, and D. E Goldberg, "A niched pareto genetic algorithm for multiobjective optimization," *Proc. of the First IEEE Conf. on Computational Intelligence*, pp. 82-87, 1994.



하 승 석

2006년 숭실대 정보통신전자공학부 졸업. 2007년~현재 동 대학원 전자공학과 석사과정. 관심분야는 이족로봇, 영상처리.

한 영 준

제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지 제 9 권 제 12 호 참조.

한 현 수

제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지 제 9 권 제 12 호 참조.