

# 유전자 알고리즘을 이용한 이족보행 로봇의 계단 보행

전권수\*, 권오홍\*, 박종현#

## Trajectory Optimization for Biped Robots Walking Up-and-Down Stairs based on Genetic Algorithms

Kweon Soo Jeon\*, Ohung Kwon\* and Jong Hyeon Park#

### ABSTRACT

In this paper, we propose an optimal trajectory for biped robots to move up-and-down stairs using a genetic algorithm and a computed-torque control for biped robots to be dynamically stable. First, a Real-Coded Genetic Algorithm (RCGA) which of operators are composed of reproduction, crossover and mutation is used to minimize the total energy. Constraints are divided into equalities and inequalities: Equality constraints consist of a position condition at the start and end of a step period and repeatability conditions related to each joint angle and angular velocity. Inequality constraints include collision avoidance conditions of a swing leg at the face and edge of a stair, knee joint conditions with respect to the avoidance of the kinematic singularity, and the zero moment point condition with respect to the stability into the going direction. In order to approximate a gait, each joint angle trajectory is defined as a 4-th order polynomial of which coefficients are chromosomes. The effectiveness of the proposed optimal trajectory is shown in computer simulations with a 6-dof biped robot that consists of seven links in the sagittal plane. The trajectory is more efficient than that generated by the modified GCIPM. And various trajectories generated by the proposed GA method are analyzed in a viewpoint of the consumption energy: walking on even ground, ascending stairs, and descending stairs.

**Key Words** : Biped Robot (이족보행로봇), Genetic Algorithm (유전자 알고리즘), Walking Up-and-Down Stairs (계단보행) Trajectory (보행 궤적), Optimization (최적화)

### 1. 서론

사람은 다양한 환경에서 안정하게 걷고, 에너지를 최소화 하기 위해 최적의 보행 궤적을 만들어 낸다. 그래서 많은 연구원들은 인간의 행동과 비슷한 이족보행로봇을 만들기 위해 연구해 왔다.

이족보행로봇의 안정적인 보행 궤적을 생성하

기 위해, Park<sup>1</sup> 은 중력 보상 역진자 모드(gravity-compensated inverted pendulum mode, GCIPM)를 제안 하였으나, 이 연구에서는 에너지 효율을 고려하지 않았다.

또한 에너지 소비를 줄이기 위한 많은 최적화 알고리즘이 제안되었다. Choi<sup>2</sup> 는 가속도와 속도의 편차에 대한 합을 최소화 시키기 위해 유전자 알

☞ 접수일: 2005년 8월 8일; 게재승인일: 2006년 2월 10일

\* 한양대학교 메카트로닉스.시스템 공학과

# 교신저자: 한양대학교 기계공학부

E-mail: jongpark@hanyang.ac.kr, Tel: (02) 2220-0435

고리즘을 이용하여 에너지를 최적화 시키는 방법을 제안하였다. Cheng<sup>3</sup>은 이족보행로봇의 제어기와 보행 궤적을 생성하기 위해 유전자 알고리즘을 이용하는 것을 제안하였다. Park<sup>4</sup>은 에너지 소비를 최소화하기 위해 각 링크의 무게 중심의 위치와 스윙하는 다리의 보행 궤적을 찾기 위한 방법을 제안하였다. Chevallereau<sup>5</sup>는 최적의 보행 궤적을 생성하기 위해 최적의 보폭과 보행 주기를 찾았다.

그리고 많은 연구원들은 이족보행로봇이 인간의 환경에 적응하기 위해 다양한 지면 조건에 대해 연구하였다. Shih<sup>6</sup>는 7 자유도의 이족보행로봇이 계단을 오를 때와 내려갈 때, 효율적으로 거동하는 방법을 제안하였다. Jeon<sup>7</sup>은 유전자 알고리즘을 이용하여 이족보행로봇이 계단을 오를 때 에너지를 최적화 시킬 수 있는 보행 궤적을 생성하는 방법을 제안하였다.

본 논문에서는 유전자 알고리즘을 이용하여 이족보행로봇이 계단을 오를 때와 내려갈 때 에너지를 최적화 시킬 수 있는 보행 궤적을 생성하고, 이족보행로봇의 안전한 거동을 위해 계산 토크 제어기(computed torque controller)를 적용하였다. 구체적으로 2 차원 평면에서 7 개의 링크로 구성된 6 자유도의 이족보행로봇 모델을 이용하였으며 총 에너지를 최소화를 위해서 RCGA(Real-Coded Genetic Algorithms)를 사용하였다. 그리고 이족보행로봇의 보행 궤적은 각 조인트의 각도를 시간  $t$ 에 대한 4 차 함수로 근사화하였다

본 논문은 다음과 같이 구성 되었다. 2 장에서는 이족보행로봇의 운동방정식을 서술하였고, 3 장에서는 이족보행로봇이 계단 보행을 하기 위한 조건들을 설명하였다. 4 장에서는 컴퓨터 시뮬레이션과 에너지 효율을 비교하였다. 마지막으로 5 장에서는 결론을 서술하였다.

## 2. 이족보행로봇 모델

인간의 보행 필요한 최소한의 자유도를 포함한 2 차원 평면에서 7 개의 링크로 구성된 6 자유도의 이족보행로봇 모델을 Fig. 1에 나타내었다.<sup>8,9</sup>

각 링크의 운동에너지와 위치에너지의 차를 계산하는 Lagrange 방정식을 이용하여 이족보행로봇의 운동방정식을 유도하였다. 이족보행로봇에 대한 운동방정식은 다음과 같다

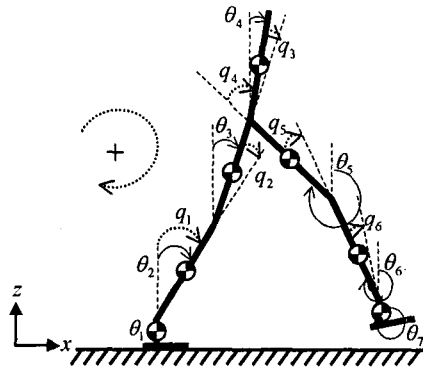


Fig. 1 6 DOF biped robot model

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) = \tau \quad (1)$$

여기서  $M(q)$ 는  $6 \times 6$  관성행렬,  $C(q, \dot{q})$ 는 원심력과 코리올리에 대한  $6 \times 1$  벡터,  $G(q)$ 는 중력에 대한  $6 \times 1$  벡터,  $\tau$ 는 각 조인트에 대한 토크를 나타내는  $6 \times 1$  벡터이다. 그리고 절대 각도(absolute angle)  $\theta$ 를 상대 각도(relative angle)  $q$ 로 바꿔 주는  $6 \times 7$  변환행렬인  $E$ 는 다음과 같다.

$$\theta = E^T q, \quad E = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Table 1 Parameters of the biped robot used

Link No.	Length (m)	Mass (kg)
Link 1	0.1	1.0
Link 2	0.4	5.0
Link 3	0.4	4.0
Link 4	0.5	6.0
Link 5	0.4	4.0
Link 6	0.4	5.0
Link 7	0.1	1.0

Table 2 Parameters used in the genetic algorithm

Parameter	Values
Maximum Generations	5,000
Population	30
Chromosome Length	14
Crossover Ratio	0.9
Mutation Ratio	0.02

Table 1 은 이족보행로봇 모델의 각 링크에 대한 파라미터들이다.

본 논문에서 사용된 가정은 각 링크의 무게 중심은 링크의 중심에 있다라고 가정하였다.

### 3. 유전자 알고리즘을 이용한 에너지 최적의 보행계획

#### 3.1 유전자 알고리즘

유전자 알고리즘 연산자는 재생산, 교배, 돌연변이로 구성된다. 재생산은 평균적인 적응값을 증가시키고, 교배는 유전자에 대한 정보를 교환시키고, 돌연변이는 국소적인 최대/최소에 대한 수렴을 막는다.<sup>10</sup> Table 2 는 유전자 알고리즘의 변수들이다.

많이 사용되고 있는 BCGA(Binary-Coded Genetic Algorithms)는 실질적인 적용에 많은 문제점을 가지고 있기 때문에 본 논문에서는 RCGA(Real-Coded Genetic Algorithms)를 사용하였다.<sup>11</sup>

#### 3.2 등호 제약 조건(Equality Constraints)

등호 제약 조건은 위치 조건과 반복 조건으로 구성된다.

첫째로, 이족보행로봇이 계단 보행을 하기 위한 한 보행 주기의 시작과 끝에서 스윙하는 다리의 발끝은 다음의 위치 조건을 만족 해야 된다.

$$t = 0; x_{iip}(0) = -S, z_{iip}(0) = -H \quad (3)$$

$$t = t_f; x_{iip}(t_f) = S, z_{iip}(t_f) = H \quad (4)$$

$$t = 0; x_{iip}(0) = -S, z_{iip}(0) = H \quad (5)$$

$$t = t_f; x_{iip}(t_f) = S, z_{iip}(t_f) = -H \quad (6)$$

여기서  $t_f$  는 한 보행 주기,  $S$  는 보폭이고,  $H$  는

계단의 높이이다. 식 (3)과 (4)는 계단을 오를 때 관련된 등호 제약 조건이고, 식 (5)와 (6)은 계단을 내려 갈 때 등호 제약 조건이다.

다음으로, 이족보행로봇의 보행은 주기적으로 반복되므로 다음의 반복 조건을 만족해야 한다.

$$\theta_i(0) = \theta_{8-i}(t_f) \quad (i = 1, \dots, 7) \quad (7)$$

$$\dot{\theta}_i(0) = \dot{\theta}_{8-i}(t_f) \quad (i = 1, \dots, 7) \quad (8)$$

여기서  $\theta_i$  는 Fig. 1 에서처럼 수직 축을 기준으로 절대좌표로 정의된다. 그리고 본 논문에서는 지면 접촉에 대한 충격은 고려되지 않는다.

#### 3.3 부등호 제약 조건(Equality Constraints)

부등호 제약 조건은 계단 조건, 무릎 조인트 조건, ZMP 조건으로 구성된다.

이족보행로봇이 한 보행 주기 동안 계단 보행을 하기 위해서는 Fig.2 에서 보여지는 것처럼 계단 조건을 만족해야 된다.

Fig. 2 (a)처럼 이족보행로봇이 계단을 오를 때 스윙하는 다리의 발끝이 계단 위에 있어야 하는 조건은 식 (9), (10), (11)이고, 계단과의 충돌을 피하기 위해 스윙하는 다리의 발끝에 대한 조건은 식 (12), (13), (14)이다.

$$-\frac{3S}{2} < x_{iip}(t) \leq -\frac{S}{2} \text{ 이면 } z_{iip}(t) > -H + \delta h \quad (9)$$

$$-\frac{S}{2} < x_{iip}(t) \leq \frac{S}{2} \text{ 이면 } z_{iip}(t) > \delta h \quad (10)$$

$$\frac{S}{2} < x_{iip}(t) \leq \frac{3S}{2} \text{ 이면 } z_{iip}(t) > H + \delta h \quad (11)$$

$$-H < z_{toe}(t) \leq 0 \text{ 이면 } x_{toe}(t) < -\frac{S}{2} - \delta s \quad (12)$$

$$0 < z_{toe}(t) \leq H \text{ 이면 } x_{toe}(t) < \frac{S}{2} - \delta s \quad (13)$$

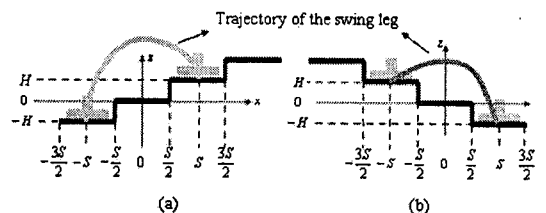


Fig. 2 (a) ascending stairs (b) descending stairs

$$H < z_{toe}(t) \leq 2H \text{ 이면 } x_{toe}(t) < \frac{3S}{2} - \delta s \quad (14)$$

그리고 Fig. 2 (b)처럼 이족보행로봇이 계단을 내려갈 때 스윙하는 발의 끝이 계단 위에 있어야 하는 조건은 식 (15), (16), (17)이고, 계단과의 충돌을 피하기 위해 스윙하는 발의 뒤꿈치에 대한 조건은 식 (18), (19), (20)이다.

$$-\frac{3S}{2} < x_{hip}(t) \leq -\frac{S}{2} \text{ 이면 } z_{hip}(t) > H + \delta h \quad (15)$$

$$-\frac{S}{2} < x_{hip}(t) \leq \frac{S}{2} \text{ 이면 } z_{hip}(t) > \delta h \quad (16)$$

$$\frac{S}{2} < x_{hip}(t) \leq \frac{3S}{2} \text{ 이면 } z_{hip}(t) > -H + \delta h \quad (17)$$

$$-H < z_{heel}(t) \leq 0 \text{ 이면 } x_{heel}(t) > \frac{S}{2} + \delta s \quad (18)$$

$$0 < z_{heel}(t) \leq H \text{ 이면 } x_{heel}(t) > -\frac{S}{2} + \delta s \quad (19)$$

$$H < z_{heel}(t) \leq 2H \text{ 이면 } x_{heel}(t) > -\frac{3S}{2} + \delta s \quad (20)$$

여기서  $\delta h$  와  $\delta s$  는 스윙하는 다리의 발이 계단과의 충돌을 피하기 위한 안전 경계 영역이다. 그리고 시간  $t$  는  $t=0$  과  $t=t_f$  를 포함하지 않는다.

식 (21)과 (22)는 부등호 제약 조건 중 무릎 조인트 조건이다. 무릎 조인트 조건은 인간과 비슷한 거동을 하기 위한 조건이다.

$$\theta_2 - \theta_3 > \delta \theta \quad (21)$$

$$\theta_6 - \theta_5 > \delta \theta \quad (22)$$

여기서  $\delta \theta$  는 안전 경계 영역이다.

마지막 부등호 제약 조건은 이족보행로봇의 안정성과 관련된 ZMP(Zero Moment Point)조건이다. ZMP 가 지지하는 다리의 발바닥 안에 있을 때, 이족보행로봇은 안정하다라고 할 수 있다.

$$\|x_{ZMP}\| < \frac{\Delta}{2} \quad (23)$$

여기서  $\Delta$  는 로봇의 발바닥 크기와 관련된 안전 경계 영역이다.

$$x_{ZMP} = \frac{\sum_{i=1}^6 m_i (\ddot{z}_i + g)x_i - \sum_{i=1}^6 m_i \ddot{x}_i z_i - \sum_{i=1}^6 I_i \ddot{\theta}_i}{\sum_{i=1}^6 m_i (\ddot{z}_i + g)} \quad (24)$$

여기서  $(x_i, z_i)$  는 링크  $i$  의 무게 중심의 위치이고  $I_i$  는 링크  $i$  의 관성 모멘트이다.

### 3.4 최적화 방법

이족보행로봇의 보행 궤적을 근사화시키기 위해 각 조인트 각도를 시간  $t$  에 관한 4 차 함수로 정의하였다.

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \\ q_5 \\ q_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} \\ a_{61} & a_{62} & a_{63} & a_{64} & a_{65} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ t \\ t^2 \\ t^3 \\ t^4 \end{bmatrix} \quad (25)$$

여기서 계수  $a_{i,j}$  ( $i=1, \dots, 6, j=1, \dots, 5$ ) 는 설계 변수이다. 식(25)에서 설계 변수의 총 개수는 30 개이지만 등호 제약 조건(식(3)에서 식(8)까지)으로부터 16 개를 제외하면 14 개가 에너지 최소화하기 위해 사용되어지는 설계변수이다.

최소화되어야 하는 성능지수(performance index) 는 다음과 같다.

$$J = \frac{1}{2} \int_0^t p^T Q p dt \quad (26)$$

여기서  $p = \dot{q}$  는 각 조인트에 적용되는 동력을 나타내고,  $Q = \text{diag}[\omega_1 \omega_2 \omega_3 \omega_4 \omega_5 \omega_6]$  는 양한정 행렬이다.  $Q$  의 요소인  $\omega_{1-6}$  는 상대적으로 작동하는 구동기의 토크에서 비중을 서로 다르게 주기 위해 필요하다.

식(9)에서 식(23)까지의 부등호 제약 조건은 다음의 부등호식으로 표현할 수 있다. 즉,

$$g_j(\alpha) \leq 0 \quad (j=1, \dots, n) \quad (27)$$

식(9)에서 식(23)까지 의해서 구속된 최적 문제

는 다음과 같이 변환 방법을 통하여 비구속 문제를 바꿀 수 있다.

$$F(\alpha, r) = J(\alpha) + P(g(\alpha), r) \quad (28)$$

여기서  $r$ 은 별점 파라미터의 벡터이고,  $P$ 는  $r$ 에 따라서 부과되는 별점이 다르게 되는 실변수 함수이다. 이 별점 함수의 형태는 변환 방법에 따라 다르다. 본 논문에서 사용한 변환 방법은 외부 별점 함수 방법이다.

$$P(g(\alpha), r) = \sum_{j=1}^n r_j [g_j^+(\alpha)]^2 \quad (29)$$

여기서  $g_j^+ = \max(0, g_j(x))$  이고,  $r_j$ 는 실수이다. 부등호 조건을 넘지 않으면,  $(g_j(\alpha) < 0)$ ,  $g_j^+(\alpha)$ 는 0 이고, 부등호 조건을 넘으면,  $(g_j(\alpha) > 0)$ ,  $g_j^+(\alpha)$ 는 양수이다.

이상의 내용을 정리하면, 에너지를 최적화 시킨 보행 궤적을 찾기 위해 4 차 함수의 계수를 설계 변수로 사용해서 각 조인트의 각도를 초기에 생성하고, 그 값들이 계단 조건, 무릎 조인트 조건, ZMP 조건을 만족하는지 못하는지를 판단하여 에너지를 최적화 시킨 보행 궤적을 찾으면 멈추고, 아니면 유전자 알고리즘 연산자는 새로운 조인트 각도를 생성하게 된다. Fig. 3 은 제안된 유전자 알고리즘을 사용한 보행 궤적 생성 방법의 순서도이다.

### 4. 시뮬레이션

본 논문에서는 이족보행로봇의 계단 보행을 시뮬레이션 하기 위해 상용프로그램인 MATLAB 을 사용하였다. 유전자 알고리즘의 파라미터는 Table 2 에 나타난 것과 같고, 유전자 알고리즘 연산자에서 사용된 방법은 재생산은 gradient-like selection

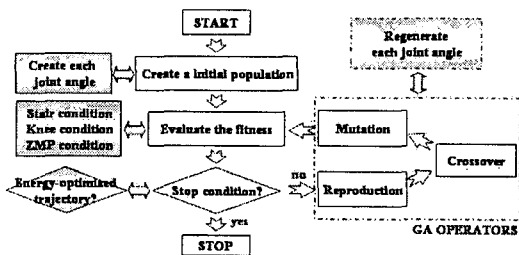


Fig.3 Flow chart of genetic algorithms

method, 교배는 modified simple crossover method, 돌연변이는 boundary mutation method 를 사용하였다. Table 3 은 컴퓨터 시뮬레이션을 하기 위한 모델 파라미터들이다.

### 4.1 계단을 오를 경우

계단을 오를 경우에 부등호 제한 조건의 비용 함수를 Fig. 4 에서 비교하였다. Fig. 4 (a)는 성능지수이고, (b)는 계단 조건, (c)는 무릎 조인트 조건, (d)는 ZMP 조건을 나타내는 부등호 제한 조건이다. 이 그림들 중 (b), (c), (d)는 부등호 제한 조건의 비용함수 값이 0 으로 수렴되는 것을 보여준다.

Fig. 5 는 유전자 알고리즘에 의해 생성된 각 조인트의 토크와 동력이다. 이 그림에서 (a)의 torque6 와 (b)의 power6 이 0 에 가까운 것을 볼 수 있다. 이것은 스윙하는 다리의 발목 조인트는 에너지를 거의 소비하지 않는다는 것을 의미한다.

Table 3 Parameters used in computer simulations

Parameters	Values
$S$	0.3 m
$H$	0.05 m
$\delta s$	0.001 m
$\delta h$	0001 m
$\delta \theta$	0.001 rad
$\Delta$	0.19 m
Stride Period	1.0 sec

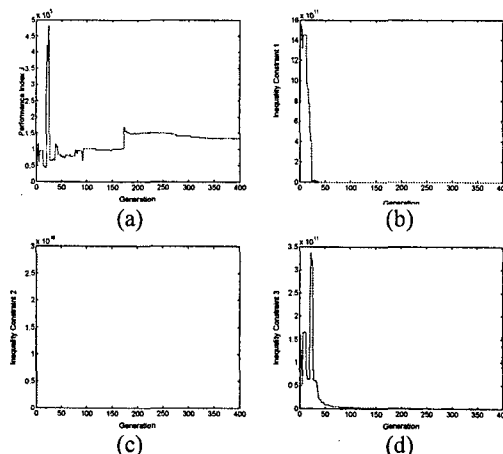


Fig. 4 Cost functions of inequality constraints when the biped robot ascends a stair

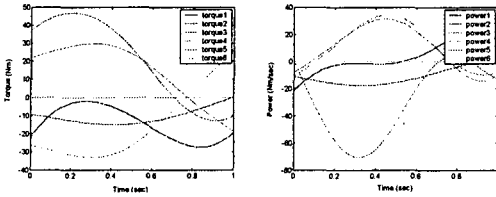


Fig. 5 Torque and power on each joint when the biped robot ascends a stair

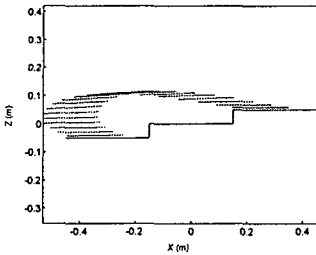


Fig. 6 Foot trajectory of the biped robot ascending stairs

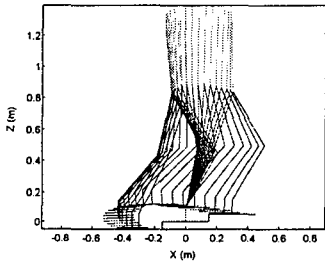


Fig. 7 Stick diagram of the biped robot ascending stairs

그리고 Fig. 6 과 Fig. 7 은 유전자 알고리즘을 이용하여 생성한 이족보행로봇의 거동을 나타낸다. 이것을 Fig. 15 에서의 인간의 발과 허프의 궤적들과 비교해 보면, 지면에 대해 발을 수평으로 유지하면서 계단과의 충돌을 방지함과 동시에 무릎이 굽혀져야 한다는 구속조건으로 인해서 스윙하는 발이 보행 주기 초기에 뒤로 약간 움직이지만 전체적으로 발의 궤적에서는 인간과의 유사성을 찾을 수 있다. 하지만, 허프의 궤적에서는 인간이 무릎을 펴고 걷기 때문에 많은 차이가 있다는 것을 알 수 있다. 여기서 Fig. 15 의 인간의 보행 궤적은 시뮬레이션과 동일한 계단조건과 비슷한 다리길이를 가진 사람의 보행을 Motion Analysis 사의 Hawk 를 이용해서 추출한 평균적인 보행 경로이다.

4.2 계단을 내려갈 경우

계단을 오를 때와 마찬가지로, 계단을 내려갈

때도 부등호 제한 조건의 비용함수 값은 Fig. 8 의 (b), (c), (d)에 나타나듯이 0 으로 수렴한다. 또한 Fig. 10 과 Fig. 11 에서는 올라갈 때와 반대의 거동하고 있음을 확인할 수 있다.

4.3 에너지 소비량의 비교

본 논문에서 제안된 방법을 이용하여 이족보행로봇이 평지를 걸을 때와 계단을 오를 때, 계단을 내려갈 때의 에너지 소비량을 계산하였다.

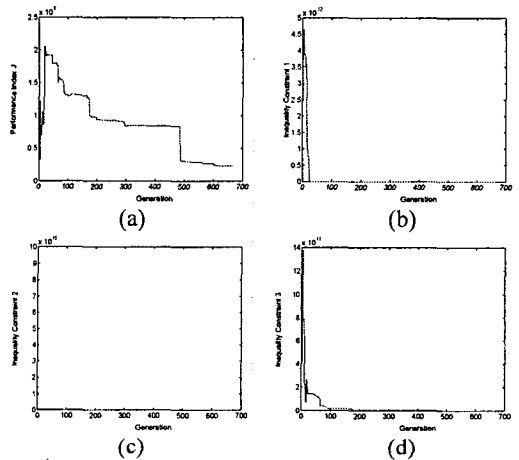


Fig. 8 Cost Function of inequality constraints when the biped robot descends a stair

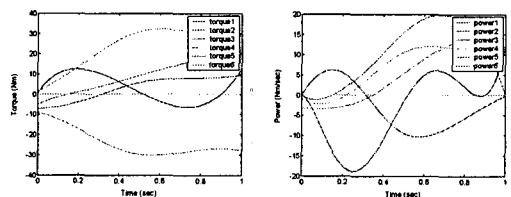


Fig. 9 Torque and power on each joint when the biped robot descends a stair

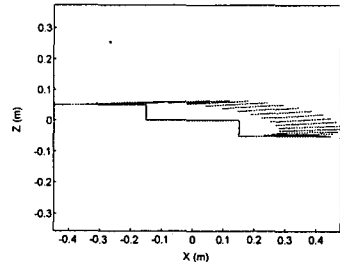


Fig. 10 Foot trajectory in locomotion when the biped robot descends a stair

Fig. 12 에서 수직 축의 경우는 각 조인트의 동력을 제공하여 더한 것이다. 점선은 평지를 걸을 때의 동력, 1 점 쇄선은 계단을 오를 때의 동력, 실선은 계단을 내려갈 때의 동력을 나타낸다. 이 그림에 나타난 것과 같이 평지를 걸을 때의 에너지 소비량이 가장 적다. 평지를 걸을 때는 계단을 오를 때보다 92%, 계단을 내려갈 때보다 54% 소비량이 더 적은 것으로 나타났다. 그리고 계단을 내려갈 때는 계단을 오를 때보다 82% 소비량이 더 적은 것으로 나타났다.

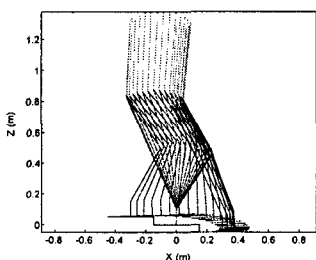


Fig. 11 Stick diagram of the biped robot descending a stair

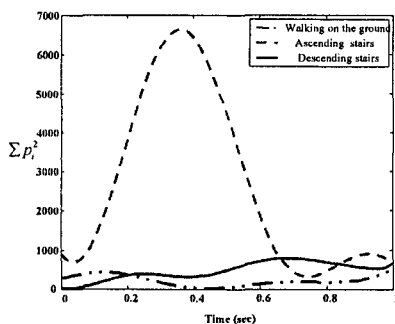


Fig. 12 Comparison of the energy consumption

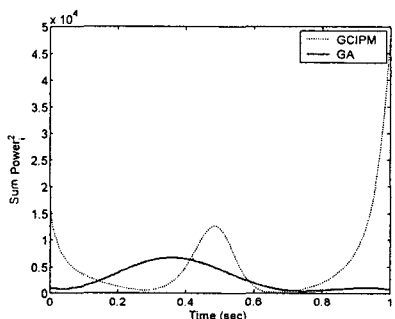


Fig. 13 Power comparison between the modified GCIPM method and the proposed GA method

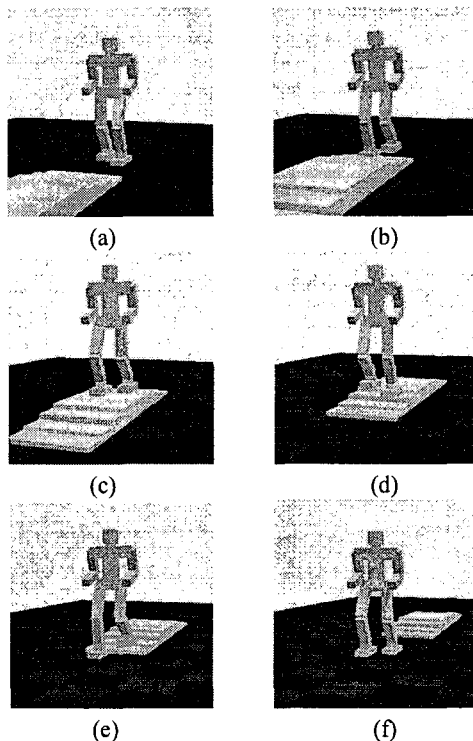


Fig. 14 Scenes of a biped robot during walking up and down stairs

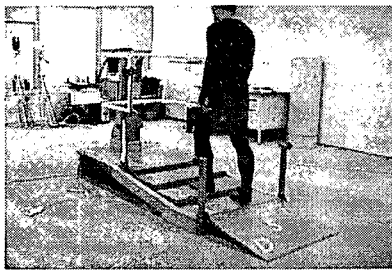
Fig. 13 에서는 기존의 역진자 모델 기반의 계단 보행 방법<sup>1</sup> 과 제안된 GA 기반의 보행 방법과의 에너지를 비교하였다. 보행의 시작과 끝에서 역진자 모델 기반의 보행 방법이 많은 에너지를 필요로 하며 제안된 보행 방법에 비해서 54% 정도 에너지를 더 많이 소모하는 것으로 나타났다.

Fig. 14 는 0.3m/s 로 계단 보행을 하는 이족보행로봇의 거동을 보여주고 있다. 여기서 이족보행로봇의 안정적인 거동을 위해 계산 토크 제어를 사용하였다. 유전자 알고리즘을 이용하여 찾은 각 조인트의 각도, 각속도, 각가속도를 추종치로 사용하였다.

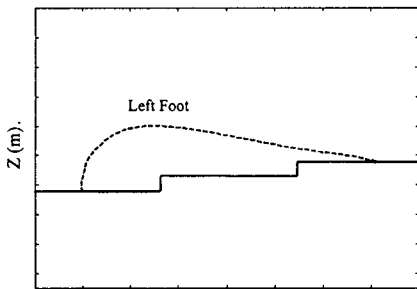
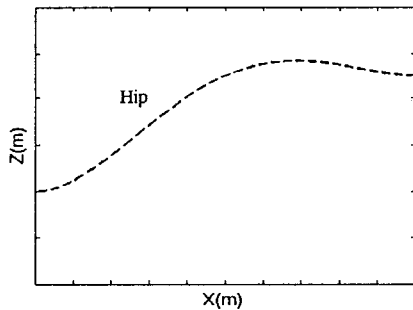
### 5. 결론

본 논문에서는 배터리의 소모를 줄이면서 동시에 액추에이터의 용량을 줄일 수 있는 보행 궤적을 생성하기 위해서 유전자 알고리즘을 이용하여 이족보행로봇이 계단을 오를 때와 내려 갈 때, 에너지를 최적화 시킬 수 있는 보행 궤적 생성 방

법을 제안하였다. 이 방법은 이족보행로봇과 같은 다자유도 시스템의 해를 빠르게 얻을 수 있으며 기존에 비해서 에너지 소비량을 현저하게 줄일 수 있는 방법이다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해서 역진자 모델 기반의 궤적 생성 방법에 비해 에너지 소비량을 줄이면서 넘어지지 않고 안정적인 거동을 할 수 있다는 확인하였다. 부가적으로 이족보행로봇이 평지를 걸을 때, 계단을 오를 때, 계단을 내려갈 때의 에너지 소비량의 비교에서 평지를 걸을 때 에너지 소비량이 가장 적은 것을 확인할 수 있었다.



(a)



(b)

Fig.15 Foot and hip trajectories of a normal subject during ascending stairs. (a) A normal subject attaching 32 markers to all over his body (b) Foot and hip trajectories

## 참고문헌

1. Park, J. H. and Kim, K. D., "Biped Robot Walking Using Gravity-Compensated Inverted Pendulum Mode and Computed Torque Control," Proc. Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 3528-3533, 1998.
2. Choi, S. H., Choi, Y. H. and Kim, J. G., "Optimal Walking Trajectory Generation for a Biped Robot Using Genetic Algorithm," Proc. Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 1456-1461, 1999
3. Cheng, M. Y. and Lin, C. S., "Genetic Algorithm for Control Design of Biped Locomotion," IEEE, pp. 1315-1320, 1995.
4. Park, J. H. and Choi, M. S., "Generation of An Optimal Gait Trajectory for Biped Robots Using A Genetic Algorithm," JSME International Journal, 2004.
5. Chevallereau, C., Formal'sky, A. and Perrin, B., "Low Energy Cost Reference Trajectories for a Biped Robot," Proc. Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1398-1404, 1998.
6. Shih, C. L., "Ascending and Descending Stairs for a Biped Robot," IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics-Part A: Systems and Humans, Vol. 29, No. 3, pp. 255-268, 1999.
7. Jeon, K. S. and Park, J. H., "Energy Optimization of a Biped Robot for Walking a Staircase Using Genetic Algorithms," Proc. Int. Conf. on Control, Automation and Systems, pp. 215-219, 2003.
8. Tzafestas, S., Raibert, M. and Tzafestas, C., "Robust Sliding-mode Control Applied to a 5-Link Biped Robot," Journal of Intelligent and Robotic Systems 15, pp. 67-133, 1996.
9. Furusho, J. and Sano, A., "Sensor-based control of a nine-link biped," Int. J. of Robotics Research, Vol. 9, No.2, pp. 83-98, 1990.
10. Goldberg, D. E., "Genetic Algorithm in Search, Optimization, and Machine Learning," Addison Wesley, 1989.
11. Jin, G. G., "Genetic Algorithms and Their Applications," Kyo Woo Sa, 2002.