

유전자 알고리즘을 이용한 이족 보행 로봇의 최적 설계 및 최적 보행 궤적 생성

Optimal Gait Trajectory Generation and Optimal Design for a Biped Robot Using Genetic Algorithm

최 무 성*, 권 오 흥, 강 민 성, 박 종 현

(Moosung Choi, Ohung Kwon, Minsung Kang, and Jong Hyeon Park)

Abstract : This paper proposes a method that minimizes the consumed energy by searching the optimal locations of the mass centers of links composing of a biped robot using Real-Coded Genetic Algorithm. Generally, in order to utilize optimization algorithms, the system model and design variables must be defined. Firstly, the proposed model is a 6-DOF biped robot composed of seven links, since many of the essential characteristics of the human walking motion can be captured with a seven-link planar biped walking in the saggital plane. Next, Fourth order polynomials are used for basis functions to approximate the walking gait. The coefficients of the fourth order polynomials are defined as design variables. In order to use the method generating the optimal gait trajectory by searching the locations of mass centers of links, three variables are added to the total number of design variables. Real-Coded GA is used for optimization algorithm by reason of many advantages. Simulations and the comparison of three methods to generate gait trajectories including the GCIPM were performed. They show that the proposed method can decrease the consumed energy remarkably and be applied during the design phase of a robot actually.

Keywords : biped robot, optimal design, genetic algorithm, gait trajectory

I. 서론

일반적으로 이동 로봇은 외부 전원을 사용하면 작동 공간에 제한이 있기 때문에 자신의 전원을 가지고 다닐 필요가 있다. 이러한 이유로 낮은 에너지 소비율은 로봇이 좀 더 오랫동안 움직일 수 있게 해준다. 로봇의 질량이 클수록 더 큰 전력의 모터를 필요로 한다. 고전력의 모터는 보통 더 무겁고 그에 따라 로봇은 무거워지기 때문에 모터 전력은 더욱 더 커져야 한다. 만약 에너지 효율이 고려된다면 우리는 이러한 악순환에 빠지지 않을 것이다. 특히 이족 로봇에 있어서 소비 에너지가 고려되어야 하는 이유는 자연스런 걸음걸이의 중요한 요소가 되기 때문이다[1]. 실제로 인간은 작은 에너지로 자연스럽게 걷는다[2]. 좋은 에너지 효율에 의한 걸음걸이는 이족 보행 로봇에 있어서 바람직 할 뿐 아니라 좀 더 자연스럽게 보이기도 한다.

이족 로봇에 있어서 소비 에너지의 크기는 보행 궤적에 따라 크게 달라질 수 있다. 지금까지 보행 궤적 생성에 대한 연구는 많이 이루어 졌는데, 우선 에너지 효율이 전혀 고려되지 않은 일반적인 궤적 생성에 대한 연구가 있다. 이와 같은 연구의 예로는 Kajita와 Tani의 기준 궤적 생성을 위한 선형 역진자 모드(linear inverted pendulum mode)가 있고[3], 이를 보완한 Park과 Kim의 중력 보상 역진자 모드(gravity-compensated inverted pendulum mode, GCIPM)가 있다[4]. 이들

연구에서는 에너지 효율이 고려되지 않았기 때문에 소비되는 에너지는 상대적으로 크다.

소비 에너지를 고려한 궤적을 생성하기 위한 연구들에서는 다양한 최적화 알고리즘이 사용되는데, 일반적으로 보행 궤적을 근사하기 위한 기저 함수의 변수가 설계 변수로 이용된다. Lee와 Chen은 최적 궤적을 생성하기 위해 기저 함수로 cubic B-spline을 사용했고, gradient-base 알고리즘을 이용했다[5]. Roussel 등은 보행 궤적을 근사화 하기 위해 piecewise constant method[7-8]를 사용하였다. Westervelt 와 Grizzle은 SQP 알고리즘과 cubic spline의 변수를 사용한 최적화 패키지인 DIRCOL을 사용하였다[9]. Capi 등은 로봇의 상태를 다항식으로 파라미터화 하고 유전자 알고리즘을 이용하여 최적화하였다[11].

설계 변수를 선택할 때 위와는 다른 방법으로 접근하는 연구들이 있다. Silva 등은 에너지 소비를 최소화하는 최적의 걸음 폭, 힐 높이, 링크 길이, 링크 질량 등을 찾아내었다[10]. Chevallereau 등은 최적 걸음 폭과 주기를 찾고 최적 경로를 생성하였다[6].

그러나 최적의 보행 변수들을 찾아낸 위와 같은 연구들에서 링크의 질량 중심을 다룬 연구는 없었다. 실제 로봇에 있어서 관절과 관절 사이의 링크 질량 중심의 위치는 중요하다. 일반적으로 로봇을 설계할 때 다른 부품보다 상대적으로 무거운 모터의 위치는 단지 정적인 설계 구속조건에 의해서만 결정된다. 만약 링크 질량 중심의 최적 위치를 알 수 있다면, 우리는 벨트나 풀리 등을 이용하여 그 최적의 위치에 모터를 위치시킬 수 있을 것이다. 그러므로 본 논문은 로봇 링크 질량 중심의 최적 위치를 찾음으로써 에너지 소비를 최소화하는 방법을 제안한다. 그리고 이 최적의 질량 중심은 보폭과

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2004. 6. 6., 채택확정 : 2004. 7. 18

최무성, 강민성 : 한국생산기술연구원

(moosung@kitech.re.kr/wowmecha@kitech.re.kr)

권오흥 : 한양대학교 정밀기계공학과(ohung210@ihanyang.ac.kr)

박종현 : 한양대학교 기계공학부(jongpark@hanyang.ac.kr)

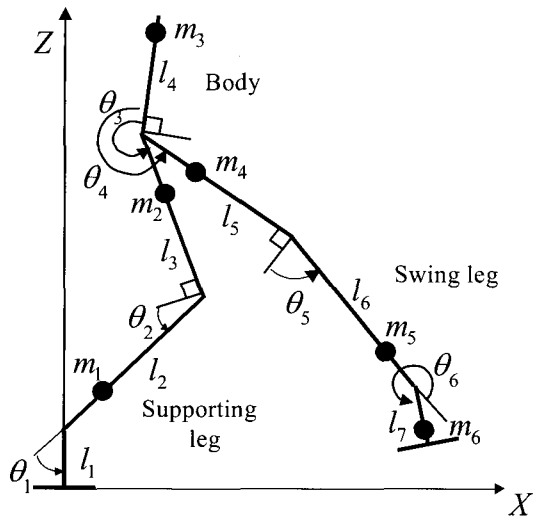


그림 1. 평면상의 6 자유도 2족 로봇 모델.
Fig. 1. 6-DOF biped robot in the saggital plane.

주기 등에 따라서 다소 변하기 때문에 가장 많이 사용되는 보행 조건에 대해서만 찾았다. 최적 알고리즘은 단순하고 빠르며 복잡한 구속 조건도 다루기 용이한 RCGA(Real-Coded Genetic Algorithm)를 사용하였다[11-13].

본 논문은 다음과 같이 구성되었다. II장에서는 6자유도 이족 모델이 소개되었다. 구속 조건과 최적 문제에 대한 수식들은 III장에 있으며, IV장에서는 유전자 알고리즘에 대해 간단한 설명이 되어 있다. 시뮬레이션과 GCIPM을 포함한 3가지 보행 궤적 생성 방법의 비교는 V장에서 볼 수 있다. 마지막으로 VI장에서는 본 논문의 결론을 보여 준다.

II. 이족 모델 정의

그림 1은 2차원 상의 이족 모델과 본 논문에서 사용된 기호들을 보여준다. 인간의 보행은 평면상의 7개의 링크로 나타낼 수 있기 때문에[14], 제한된 모델은 7개의 링크로 구성된 6 자유도 이족 로봇이다. 본 논문에서 사용된 모델의 물리적인 데이터는 표 1에 나타나 있다. 각 링크는 질점으로 가정하였다.

본 연구에서 하나의 보행 주기는 2가지의 상태로 나뉘어진다.

- 한쪽 다리는 지면에 닿아있고, 다른 한쪽 다리는 앞으로 위치한 한 발 지지 상태
- 양 다리의 역할을 순간적으로 바꾸는 상태

1. 6 자유도 이족 보행 로봇의 운동 방정식

한 발 지지 상태에서 6 자유도 이족 로봇에 대한 동적 방정식은 다음과 같다.

$$M(\theta)\ddot{\theta} + h(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) = Du \tag{1}$$

여기서 $M(\theta)$ 은 6x6 관성 행렬, $h(\theta, \dot{\theta})$ 는 원심력과 코리올리에 대한 6x1 벡터, $G(\theta)$ 는 중력에 대한 6x1 벡터, 그리고 u 는 모터의 토크를 나타내는 6x1 벡터이다.

표 1. 이족 로봇 모델의 물리적인 데이터.

Table 1. physical data of biped model.

	link1, link7	link2, link6	link3, link5	link4
Length (m)	0.15	0.35	0.4	0.5
Mass (kg)	1	5	2.5	6

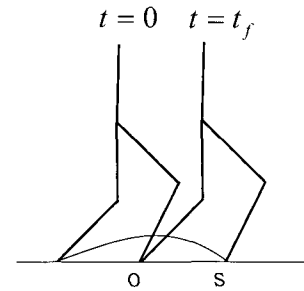


그림 2. 주기와 보폭.
Fig. 2. A stride and a period.

2. ZMP(Zero Moment Point) 조건

지면과 닿아있는 발에서 반력과 모멘트는 한 점에서의 반력으로 등가될 수 있다. 이 점이 ZMP인데, 다음과 같은 ZMP 식을 이용하여 안정성을 판단할 수 있다[4].

$$x_{ZMP} = \frac{\sum_{i=1}^6 m_i (\ddot{z}_i + g) x_i - \sum_{i=1}^6 m_i \ddot{x}_i z_i}{\sum_{i=1}^6 m_i (\ddot{z}_i + g)} \tag{2}$$

여기서 x_i, z_i 는 각 링크 질량 중심의 위치 좌표이다.

III. Formulation

1. 제약 조건

한 보행 주기의 끝에서 스윙하는 다리의 끝은 그림 2와 같이 목표 위치에 있어야 하므로 다음의 경계 조건이 필요하다.

$$\begin{aligned} x_{tip}(t_f) &= S \\ z_{tip}(t_f) &= 0 \end{aligned} \tag{3}$$

여기서 t_f 는 한 보행 주기이고, S 는 보폭이다.

보행 운동은 주기적이므로 다음과 같은 경계조건이 만족되어야 한다.

$$\begin{aligned} \theta_p(0) &= \theta_{7-p}(t_f) \\ \dot{\theta}_p(0) &= \dot{\theta}_{7-p}(t_f) \end{aligned} \tag{4}$$

($p=1,2,3,4,5,6$)

한 보행 주기동안 스윙하는 다리의 끝은 지면에 닿을 수 없으므로 다음의 부등호 제약 조건(inequality constraint)이 고려된다.

$$z_{ip}(t) \geq \delta h \quad (t \neq 0 \text{ and } t \neq t_f) \quad (5)$$

여기서 δh 는 떠있는 다리의 끝이 지면과 충돌하는 것을 방지하기 위한 안전 거리이다.

다음의 부등호 제약 조건은 무릎 관절 조건에 대한 것이다.

$$\begin{aligned} \theta_2 &\leq \frac{\pi}{2} - \theta_s \\ \theta_5 &\leq \frac{\pi}{2} - \theta_s \quad (\theta_s > 0) \end{aligned} \quad (6)$$

이 조건은 인간의 다리와 같은 형상을 위한 것이며, 특이 점을 피하기 위해서도 필요하다. θ_s 는 안전 범위이다.

ZMP가 지면과 접촉하는 면 안에 있다면 로봇은 안정하다고 판단할 수 있다.

$$|x_{ZMP}| < \frac{l_{ZMP\ b}}{2} \quad (7)$$

안전 경계 조건으로 $l_{ZMP\ b}$ 가 정의 되었다.

2. 최적화를 위한 설계 변수 정의

2.1. 보행 궤적을 근사화하는 기저 함수

시간에 따른 로봇의 궤적을 생성하기 위해서 각 관절의 각도를 4차 다항식으로 정의하였다. 다항식의 차수는 구속조건과 염색체의 개수를 고려하여 정하였다. 다항식의 계수는 설계 변수로 사용된다.

$$\begin{aligned} \theta(t) &= \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \\ \theta_5 \\ \theta_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{1,1} & \alpha_{1,2} & \alpha_{1,3} & \alpha_{1,4} & \alpha_{1,5} \\ \alpha_{2,1} & \alpha_{2,2} & \alpha_{2,3} & \alpha_{2,4} & \alpha_{2,5} \\ \alpha_{3,1} & \alpha_{3,2} & \alpha_{3,3} & \alpha_{3,4} & \alpha_{3,5} \\ \alpha_{4,1} & \alpha_{4,2} & \alpha_{4,3} & \alpha_{4,4} & \alpha_{4,5} \\ \alpha_{5,1} & \alpha_{5,2} & \alpha_{5,3} & \alpha_{5,4} & \alpha_{5,5} \\ \alpha_{6,1} & \alpha_{6,2} & \alpha_{6,3} & \alpha_{6,4} & \alpha_{6,5} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ t \\ t^2 \\ t^3 \\ t^4 \end{bmatrix} \\ &= A \cdot [1 \ t \ t^2 \ t^3 \ t^4]^T \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 A 는 설계 변수 행렬이다. 이 설계 변수들의 개수는 등호 제약 조건(equality constraint)들을 이용하여 줄일 수 있다. 등호 제약 조건 (4)를 이용하여 $\alpha_{1,1}, \alpha_{2,1}$ 와 $\alpha_{4,1}, \alpha_{5,1}$ 사이의 관계식을 얻을 수 있다. 나머지 등호 제약 조건들을 이용하면 설계 변수 행렬에서 2개의 열을 행렬의 나머지 인수로 나타낼 수 있다.

$$\theta(t) = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \\ \theta_5 \\ \theta_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boxed{\alpha_{1,1}} & \alpha_{1,2} & \boxed{\alpha_{1,3}} & \boxed{\alpha_{1,4}} & \alpha_{1,5} \\ \boxed{\alpha_{2,1}} & \alpha_{2,2} & \boxed{\alpha_{2,3}} & \boxed{\alpha_{2,4}} & \alpha_{2,5} \\ \alpha_{3,1} & \alpha_{3,2} & \boxed{\alpha_{3,3}} & \boxed{\alpha_{3,4}} & \alpha_{3,5} \\ \alpha_{4,1} & \alpha_{4,2} & \boxed{\alpha_{4,3}} & \boxed{\alpha_{4,4}} & \alpha_{4,5} \\ \alpha_{5,1} & \alpha_{5,2} & \boxed{\alpha_{5,3}} & \boxed{\alpha_{5,4}} & \alpha_{5,5} \\ \boxed{\alpha_{6,1}} & \alpha_{6,2} & \boxed{\alpha_{6,3}} & \boxed{\alpha_{6,4}} & \alpha_{6,5} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ t \\ t^2 \\ t^3 \\ t^4 \end{bmatrix} \quad (9)$$

그러므로 (9)에서 보듯이, 관절각 경로 생성에 사용되는 설

계 변수의 수는 15개이다.

2.2. 링크 질량 중심의 최적 위치

링크 질량 중심의 최적 위치를 찾기 위해 3개의 변수를 정의하였다.

$$C_1, C_2, C_3$$

여기서 C_1, C_2 그리고 C_3 는 각각 링크2-6, 링크3-5, 링크4에 대한 유전 인자이다. 이 유전 인자들은 정수화되어 질량 중심 지수로 이용된다. 즉,

$$\begin{aligned} \text{링크 질량 중심의 최적 위치} \\ = \{ \text{질량 중심 지수} / 10 \} \times \text{링크 길이} \end{aligned}$$

가 된다. 따라서 전체 설계 변수는 18이다. 즉,

$$\begin{aligned} \text{전체 설계 변수의 수} : 18 \\ = 30 - 15(\text{등호 제약 조건}) \\ + 3(\text{질량 중심에 대한 변수}) \end{aligned}$$

이 전체 설계 변수의 수는 본 논문 V장 3절에서의 염색체 길이와 같다.

3. 비용 함수

최소화되어야 할 성능 지수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} J(\alpha) &= \frac{1}{2} \int_0^{t_f} p^T Q p \ dt \\ \left(\begin{array}{l} p = u \dot{\theta} \\ Q = \text{diag}[q_1 \ q_2 \ q_3 \ q_4 \ q_5 \ q_6] \end{array} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 p 는 각 관절에서의 동력(power)이고, Q 는 양한정 행렬이다. Q 는 상대적으로 작동하는 구동기의 토크에서 비중을 서로 다르게 주기 위하여 필요하다. 조인트 토크 u 는 이족 모델의 역동역학으로부터 구해진다.

부등호 제약 조건은 다음과 같다.

$$g_j(\alpha) \leq 0 \quad (j = 1 \text{ to } n) \quad (11)$$

(5)에서 (7)까지는 본 연구에서의 부등호 제약 조건이다. 이 식들에 의해서 구속된 최적 문제는 다음과 같이 변환 방법을 통하여 비구속 문제로 바꿀 수 있다.

$$F(\alpha, r) = J(\alpha) + P(g(\alpha), r) \quad (12)$$

여기서 r 은 벌점 파라미터의 벡터이고, P 는 r 에 따라서 부과되는 벌점이 다르게 되는 실변수 함수이다. 이 벌점 함수의 형태는 변환 방법에 따라 다르다. 본 논문에서 사용한 변환 방법은 외부 벌점 함수 방법(exterior penalty function method)이다[13].

$$P(g(\alpha), r) = \sum_{j=1}^n r_j [g_j^+(\alpha)]^2 \quad (13)$$

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

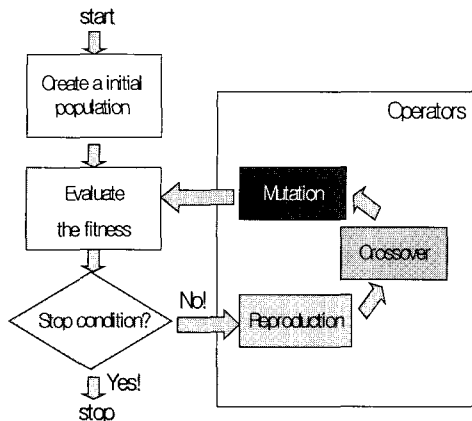


그림 3. 유전자 알고리즘의 흐름도.
Fig. 3. The flow chart of genetic algorithm.

IV. 유전자 알고리즘

1. 유전자 알고리즘

유전자 알고리즘은 강인하고, 전역적인 해를 구할 수 있기 때문에 많은 최적화 문제에 사용된다. 유전자 알고리즘은 그림 3과 같이 4단계의 과정으로 되어있다. 이러한 유전 과정을 통하여 생성된 자손은 평가 받기 위한 다음 개체군이 되고, 이런 과정은 만족스러운 개체가 발견되거나 다른 정지 조건이 있기 전까지 계속 반복된다.

2. Real-Coded GA(RCGA)

많이 사용되고 있는BCGA(Binary-Coded GA)는 적용에 많은 문제점을 가지고 있기 때문에 본 논문에서는 RCGA(Real-Coded GA)를 사용하였다. 일반적으로 풀어야 하는 문제는 고정밀한 해를 요구하고, 해에 대한 정보도 없고, 복잡한 구속 조건도 가지고 있다. 이런 경우에 BCGA에서 정밀도를 높이기 위하여 탐색 지역을 확장한다면, 해에 대한 정보가 없기 때문에 탐색체의 길이는 더 길어지게 되고 최적의 해를 찾기 위하여 더 긴 시간이 필요하며, 어떤 경우에는 해를 찾지 못할 수도 있다. 따라서 실수로 기호화하는 것을 사용하는데 다음과 같은 장점이 있다.

- 표현형과 유전형이 일대일 대응이 되기 때문에 부호화와 해독화하는 과정이 필요 없어서 프로그래밍이 간단하다. 그래서 탐색 속도도 빨라진다.
- 매우 큰 탐색 영역을 정의 하는 것이 가능하고, 복잡한 구속조건을 다루기가 쉽다.

3. RCGA의 연산자

RCGA에서는 BCGA에서 사용하는 연산자를 그대로 쓸 수 없다. RCGA의 연산자들 중에서 본 논문에서 사용한 연산자들을 소개하면 다음과 같다.

- 수정 단순 교배
이 연산자는 단순 교배의 단점을 보완한 것이다. 일단 교배점이 무작위로 선택되고, 선택된 점에서의 인자는 산술 교배의 원리에 의해 결합된다. 그리고 자손은 두 염색체의 그 다음 인자들을 교환함으로써 생산된다.
- 경계 돌연변이
이 연산자는 정의영역으로 같은 확률의 경계 값을 가진 균

등 돌연변이의 변형이며, 유전 인자의 다양성을 크게 할 수 있다.

V. 시뮬레이션

1. 중력 보상 역진자 모델에 기반한 경로 생성

(14)는 스윙하는 다리 끝의 경로를 나타낸다. 본 논문에서 시뮬레이션은 다음과 같은 조건에서 진행된다.

$$S = 0.3m, T_f = 1sec, Q = diag[1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1], \delta h = 0.001m, l_{ZMP_b} = 0.18m$$

$$x(t) = S \sin \left\{ \frac{\pi}{T} \left(t - \frac{T}{2} \right) \right\} \quad (0 \leq t \leq T) \quad (14)$$

$$z(t) = \frac{h_f}{2} \left[1 + \sin \left\{ \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{T}{4} \right) \right\} \right] \quad (0 \leq t \leq T)$$

여기서 h_f 는 스윙하는 발의 높이이다.

그림 4는 중력 보상 역진자 모델을 이용했을 때의 막대 도표와 각 관절의 토크와 동력을 나타낸다[4].

2. 질량 중심의 위치가 임의로 정해진 조건에서의 최적 경로 생성

GA의 파라미터들은 표 2와 같다. 교배 연산자로는 단순 교배의 단점을 보완한 수정 단순 교배 방법을 이용하였고, 돌연변이 방법으로는 유전 인자의 다양성을 크게 할 수 있는 경계 돌연변이 연산자를 이용하였다. 정해진 세대수가 되거나 50세대동안 비용 함수의 값이 일정한 경우 시뮬레이션은 끝나게 된다. 질량 중심의 위치가 임의로 정해진 조건에서의 최적 경로 생성에 대한 결과는 약 1870세대 만에 도출되었다. 그림 5은 질량 중심의 위치가 임의로 정해진 경우를 보여주고 있고, 그림 6은 스윙하는 발 끝의 궤적을 보여준다.

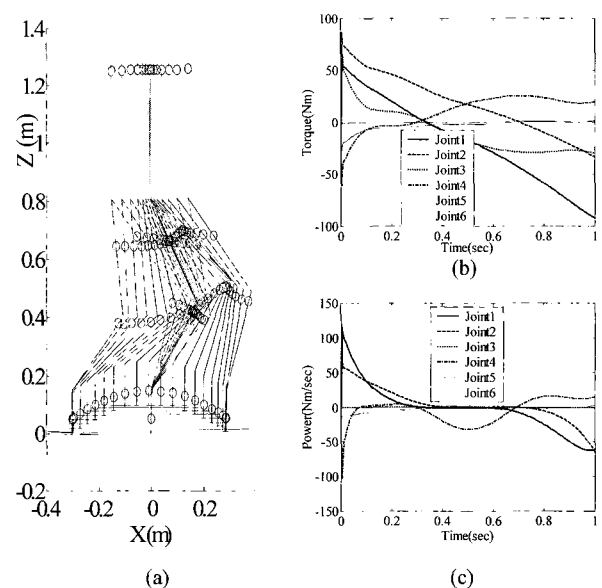


그림 4. 중력 보상 역진자 모델 ((a) 막대 도표, (b) 각 관절에서의 토크, (c) 각 관절에서의 동력).

Fig. 4. GCIPM ((a) Stick diagram, (b) Joint torque, (c) Joint power).

표 2. 유전자 알고리즘의 파라미터.

Table 2. GA parameters.

Maximum generation	3000
Population	30
Chromosome length	15
Crossover ratio	0.9
Mutation ratio	0.02

표 3. GA 파라미터.

Table 3. GA parameters.

Max. generation	3000
Population	30
Chromosome length	18
Crossover ratio	0.9
Mutation ratio	0.02

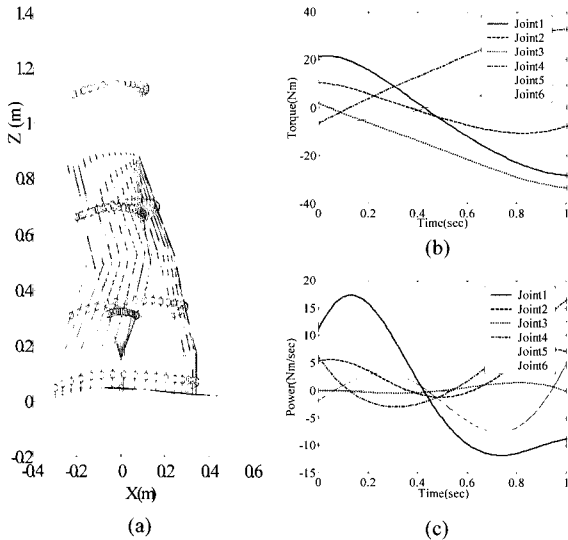


그림 5. 질량 중심의 위치가 임의로 정해진 경우의 시뮬레이션 ((a) 막대 도표, (b) 각 관절에서의 토크, (c) 각 관절에서의 동력).

Fig. 5. Predetermined locations of the mass centers ((a) Stick diagram, (b) Joint torque, (c) Joint power).

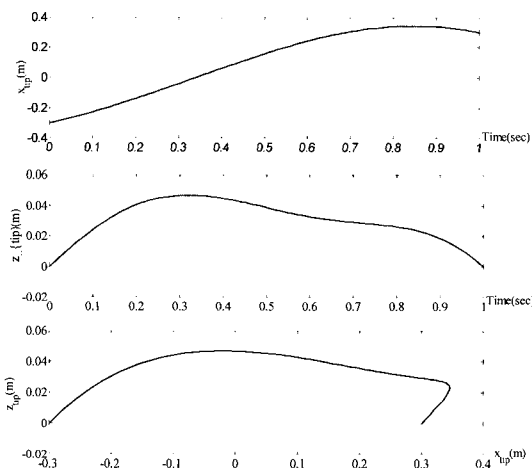


그림 6. 스윙하는 발 끝의 경로.
Fig. 6. Tip trajectory of the swing leg.

3. 제안된 방법을 이용한 최적 보행 궤적 생성

GA의 조건은 표 3과 같다. 이 시뮬레이션에서는 합리적인 결과를 도출하는데 1600세대가 걸렸다.

그림 7은 세대에 따른 비용 함수의 변화를 보여준다. 부등

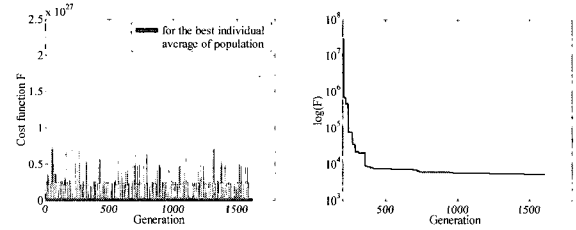


그림 7. 비용 함수 (우측은 로그 스케일).
Fig. 7. Cost function F (log scale).

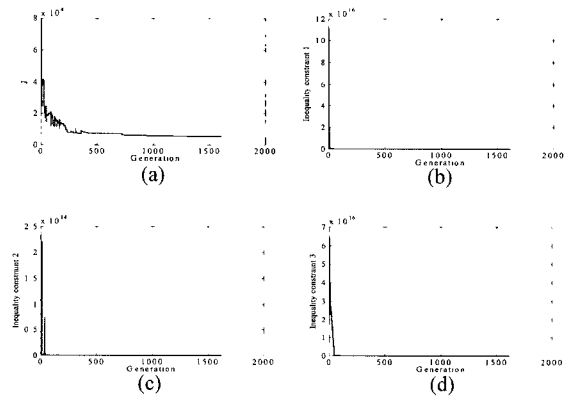


그림 8. 비용 함수 각 항의 세대에 따른 변화 ((a) Performance index J, (b) (c) (d) 부등호 제한 조건)

Fig. 8. Terms of the cost function ((a) performance index to be minimized : J, (b) Inequality constraint 1 : $z_{tip}(t) \ge \delta h$, (c) Inequality constraint 2 : knee joint condition, (d) Inequality constraint 3 : ZMP condition)

호 제약 조건에 관한 항은 그림 8의 (b), (c), (d)에서 0으로 수렴한다. 그림 9는 등호 제약 조건이 만족함을 보여준다. 그림 10과 11에서는 링크 질량 중심의 최적 위치를 제안된 방법으로 찾은 결과를 보여주고 있고 그림 12에서는 질량 중심 지수를 나타낸다. ZMP 위치는 그림 13에 나타나 있다.

이러한 시뮬레이션 결과는 제안된 방법이 소비 에너지를 최소화하면서 안정성을 확보된 보행 궤적을 찾고 있음을 보여준다.

4. 3가지 경로 생성 방법에 대한 에너지 비교

그림 14는 세가지 경로 생성 방법의 소비 에너지를 비교한 그래프이다. GCIPM[4]는 에너지 효율을 고려하지 않은 방법이기에 때문에 그래프에서도 알 수 있듯이 큰 에너지를 요구하고 있다. 그리고 에너지 효율을 고려한 두 방법에서도 그래프 모양은 유사하지만 최적의 질량 위치를 찾으려면서 에너지 최적화를 확보한 보행 궤적이 더 적은 에너지가 요구된다는

것을 확인할 수 있다. 즉, 제안된 방법을 사용하였을 때 소비 에너지는 GCIPM를 사용하였을 때보다 83.8%가 감소하였고, 질량 중심 위치가 임의로 정해져 있을 때보다 26.8% 감소하였다.

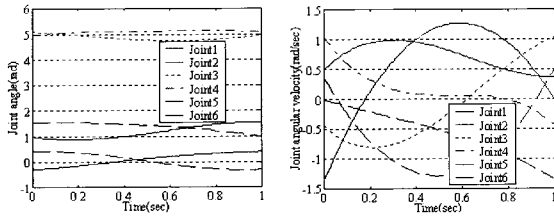


그림 9. 각 관절 각도, 각속도.
Fig. 9. Joint angles and angular velocities.

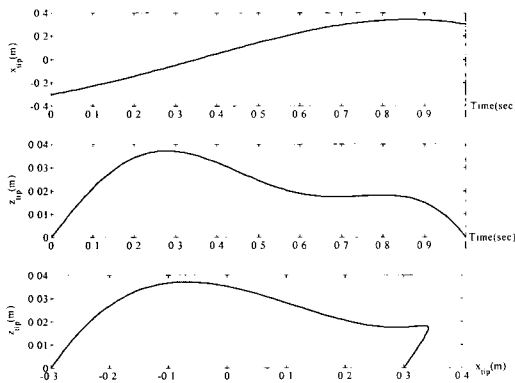


그림 10. 스윙하는 발 끝의 경로.
Fig. 10. Tip trajectory of the swing leg.

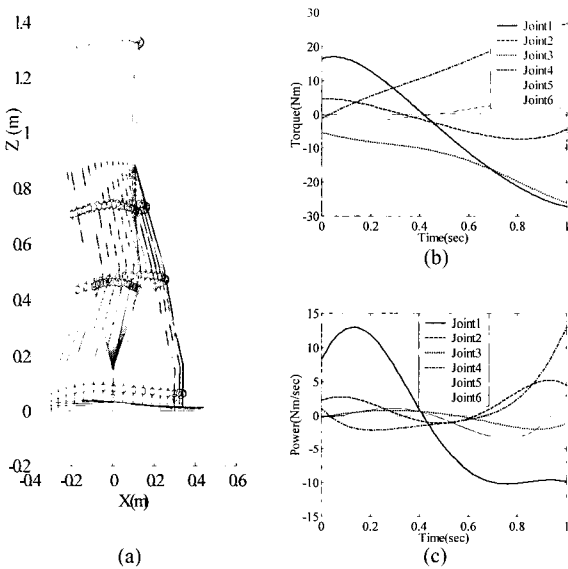


그림 11. 제안된 방법 ((a) 막대 도표, (b) 각 관절에서의 토크, (c) 각 관절에서의 동력).
Fig. 11. Proposed method ((a) Stick diagram, (b) Torque on the each joint, (c) Power on the each joint).

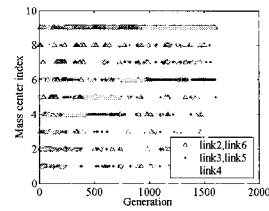


그림 12. 질량 중심 지수 (링크 질량 중심의 최적 위치={질량 중심 지수/10} 링크길이).
Fig. 12. Mass center index (optimal locations of the mass centers of links={mass center index/10} link length).

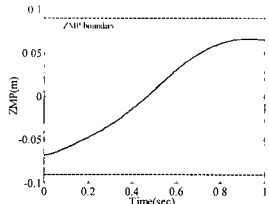


그림 13. ZMP 위치.
Fig. 13. ZMP position.

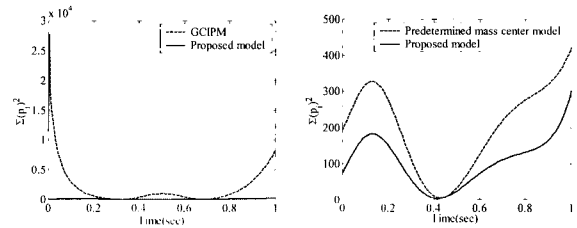


그림 14. 3가지 경로 생성 방법의 비교.
Fig. 14. Comparison of three different methods.

VI. 결론

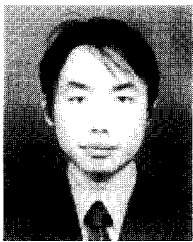
본 논문은 RCGA를 이용하여 링크 질량 중심의 최적 위치와 보행 궤적을 찾음으로써 소비되는 에너지를 최소화 하는 방법을 제안하였다. 최적의 궤적을 찾기 위하여 4차 다항식의 계수를 설계 변수로 사용하였다. GCIPM과 질량의 중심이 고정된 경우에 대한 비교 시뮬레이션을 통해서 링크 질량 중심의 위치 선정이 에너지 효율면에서 매우 중요하며, 유전자 알고리즘을 이용하여 찾아낸 질량 중심의 위치와 경로가 에너지 측면과 보행 측면에서 타당함을 확인하였다.

참고문헌

[1] Y. Hasegawa, T. Arakawa, and T. Fukuda, "Trajectory Generation for Biped Locomotion Robot", *Mechatronics*, vol. 10, pp. 67-89, 2000.
[2] A. Hreljac and P. E. Martin, "The Relationship between Smoothness and Economy during Walking", *Biological Cybernetics*, vol. 69, no. 3, pp. 213-218, 1993.
[3] S. Kajita and K. Tani, "Experimental Study of Biped Dynamic Walking in the Linear Inverted Pendulum Mode", *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and*

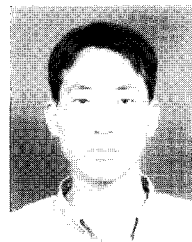
Automation, pp. 2885-2891, 1995.

- [4] J. H. Park and K. D. Kim, "Biped Robot Walking using Gravity-Compensated Inverted Pendulum Mode and Computed Torque Control", *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 3528-3533, 1998.
- [5] T. T. Lee and Y. C. Chen, "Minimum-Fuel Path Planning of a 5-link Biped Robot", *Proc. of the Twentieth Southeastern Sym. on System Theory*, pp. 459-463, 1988.
- [6] C. Chevallereau, A. Formal'sky, and B. Perrin, "Low Energy Cost Reference Trajectories for a Biped Robot", *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1398-1404, 1998.
- [7] L. Roussel, C. Canudas-de-Wit, and A. Goswami, "Generation of Energy Optimal Complete Gait Cycles for Biped Robots", *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2036-2041, 1998.
- [8] L. Roussel, C. Canudas-de-Wit, and A. Goswami, "Comparative Study of Method for Energy-Optimal Gait Generation for Biped Robots", *Int. Conf. on Informatics and Control*, pp. 1205-1212, 1997.
- [9] E. R. Westervelt and J. W. Grizzle, "Design of Asymptotically Stable Walking for a 5-Link Planar Biped Walker via Optimization", *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 3117-3122, 2002.
- [10] F. M. Silva and J. A. Tenreiro Machado, "Dynamic Performance of Biped Locomotion Systems", *Fifth Int. Workshop on Advanced Motion Control*, pp. 451-456, 1998.
- [11] M. Gen and R. Cheng, "Genetic Algorithms and Engineering Optimization", Wiley, 2000.
- [12] M. Srinivas and L. M. Patnaik, "Genetic Algorithms : A Survey", *Computer*, vol. 27, no. 6, pp. 17-26, 1994.
- [13] G. G. Jin, "Genetic Algorithms and Their Applications", Kyo Woo Sa, 2002.
- [14] J. Furusho and A. Sano, "Sensor-Based Control of a Nine-Link Biped", *The Int. Jr. of Robotics Research*, vol. 9, no. 2, pp. 83-98, 1990.



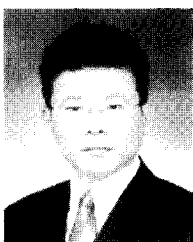
최 무 성

2001년 한양대학교 기계공학부(공학사).
2003년 한양대학교 정밀기계공학과(공학석사). 2003년~현재 한국생산기술연구원 근무. 관심분야는 이족 보행 로봇, 모바일 로봇.



권 오 흥

1999년 한양대학교 기계공학부(공학사).
2001년 한양대학교 정밀기계공학과(공학석사). 2001년~현재 한양대학교 정밀기계공학과 박사과정. 관심분야는 이족 보행 로봇, 스테레오 비전.



강 민 성

1997년 홍익대학교 기계공학과(공학사).
2002년 홍익대학교 기계공학과(공학석사). 2003년~현재 한국생산기술연구원 근무. 관심분야는 모바일 로봇, 호버링 로봇.



박 중 현

1981년 서울대학교 기계공학과(공학사).
1983년 MIT 기계공학과(S.M.). 1991년 MIT 기계공학과(Ph.D.). 1992년~현재 한양대학교 기계공학부 교수. 1999년 및 2003년 JSPS 지원 일본 와세다대학 방문연구. 2000년 CNR 지원 이탈리아의 Scuola Superiore Sant' Anna 방문연구. 2002-2003 MIT 방문 연구. 1991년~1992년 및 2001년~2003년 미국 Brooks Automation 근무. 관심분야는 로봇제어, 동역학 시스템 제어, 선형제어, 지능제어 등. IEEE, KSME, KSPE, KSAE 및 ICASE 회원.