

이족 로봇의 계단 보행에서 Real-Coded Genetic Algorithm 의 융합 기술의 사용

이정익

인하공업전문대학 기계설계과 교수

The usage of convergency technology for ROGA algorithm application on step walking of biped robot

Jeong-Ick Lee

Professor, Dept. of Mechanical Design, INHA Technical College

요약 계단 보행 시 로봇의 최적 궤도 계산은 유전자 알고리즘과 계산 토크 컨트롤러를 사용하여 수행되었다. 첫째, 생식, 교배, 돌연변이로 이루어진 실시간 유전 알고리즘 (RCGA)을 사용하여 총 에너지 효율이 최소화되었다. 보폭의 시작과 끝, 그리고 조인트, 각도, 각속도 위치 어셈블리 관련 재현성 조건은 선형 제약이다. 다음은 고려하지 못한 제약은 코너 스윙 다리와 계단의 외부와의 충돌을 막기 위한 조건, 운동학적 특이성을 막기 위한 무릎 관절의 조건 및 진행 방향의 안전은 보장되지 않음 이란 조건을 따른다. 마지막으로, 각 관절의 각도 궤도는 염색체를 근사 계수를 가지는 4차 다항식에 의해 정의된다. 이것은 보통 도보를 의미한다. 이 연구에서는 최적의 궤도의 에너지 효율을 7개의 링크로 구성된 7자유도의 2족 로봇을 통한 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 분석했다.

주제어 : 융합, 이족, 계단 보행, 실시간 유전 알고리즘, 각 조인트의 각 궤적, 역학적 유일해

Abstract The calculation of the optimal trajectory of the stepped top-down robot was made using a genetic algorithm and a computational torque controller. First, the total energy efficiency was minimized using the Red-Cold Generic Algorithm (RCGA) consisting of reproductive, cross, and mutation. The reproducibility condition related to the position assembly of the start and end of the stride and the joints, angles, and angular velocities are linear constraints. Next, the unequal constraint accompanies the condition for preventing the collision of the swing leg at the corner with the outer surface of the stairs, the condition of the knee joint for preventing kinematic peculiarity, and the condition of no moment in safety in the traveling direction. Finally, the angular trajectory of each joint is defined by fourth-order polynomial whose coefficient is to approximate chromosomes. This is to approximate walking. In this study, the energy efficiency of the optimal trajectory was analyzed by computer simulation through a biped robot with seven degrees of freedom composed of seven links.

Key Words : Convergence, Biped, Step Walking, RCGA(Real-Coded Genetic Algorithm), Each Joint Angle Trajectory, Kinematic Singularity

*Corresponding Author : Jeong-Ick Lee(jilee@inhac.ac.kr)

Received March 9, 2020

Accepted May 20, 2020

Revised April 10, 2020

Published May 28, 2020

1. 서론

지금까지 연구된 이족보행로봇은 인간들이 다양한 환경에서 걷고 에너지를 최소화하는 최적의 보행 궤적을 연구하기 위함이었다. 이족보행로봇의 안정적 보행궤적 연구를 위해 다음의 노력이 이루어졌다. 중력을 보상하여 역진자 거동을 관측하는 GCIPM은 Park[1]이 제안했으나 에너지 효율에 대한 고려가 되지 않았다. 그 이후 에너지 효율을 고려한 최적의 알고리즘들이 많이 연구되었다. 에너지를 최적화시킴에 있어 가속도와 속도 편차의 합을 최소화하기 위한 유전자 알고리즘 제안을 Choi[2]가 연구하였다. Cheng[3]은 유전자 알고리즘을 연구하여 이족보행로봇의 제어기와 보행 궤적을 생성시켰다. 각 링크의 무게, 중심위치와 스윙하는 다리 보행 궤적을 찾아서 에너지 소비를 최소화시킨 연구는 Park[4]이 수행하였다. 최적의 보폭과 보행주기를 통해 최적의 보행 궤적을 생성시킨 것은 Chevallereau[5]였다. 또한, Shih[6]와 Jen[7]은 이족보행로봇이 인간의 환경적응을 잘하게 하기 위해 지면조건들에 대해 다양하게 연구하였다. 먼저 7 유도의 이족보행로봇이 계단을 오르내릴 때 효율적 거동방법을 제안한 것은 Shih[6]였다. 그 반면, Jen[7]은 에너지 최적화의 보행 궤적생성에 계단을 이용하였다.

본 논문은 두 가지로 연구되었다. 첫째는 이족보행로봇이 계단을 오르내릴 때 최적의 보행궤적을 생성한 것은 유전자 알고리즘이었으며 이것을 위해 계단 토크제어기가 적용되었다. 둘째는 6자유도 이족보행로봇 모델로 2차원 평면의 7개 링크로 제작된 모델이 사용되었으며 에너지 최소화에는 RCGA가 사용되었다. 이족보행로봇의 보행 궤적을 근사화하는 4차원 함수로 정의되며 시간 t 를 통해 각 조인트 각도가 계산되었다. 이를 통한 연구 방법으로서도 아직은 이족보행로봇은 여전히 불안하며 가변성이 많다. 또한, 보행에서 떠나 중심이 그때마다 바뀌는 계단오르기, 고난이도 기술을 필요로 하는 고속도로 뛰고 착지하기 등의 기술은 향후 이족보행로봇이 뛰어넘어야 할 기술의 장벽이다.

2. 이족보행로봇 모델

Fig. 1은 6 자유도 이족보행로봇으로서 7개 링크로 구성되어 있다[8,9].

본 연구에서는 Lagrange 방정식을 이용해 이족보행로봇 운동방정식 유도했으며 이 식은 로봇 각 링크의 운

동에너지 및 위치에너지를 차를 이용한 것이다. 식 (1)은 이족보행로봇에 대한 운동방정식이다.

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

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

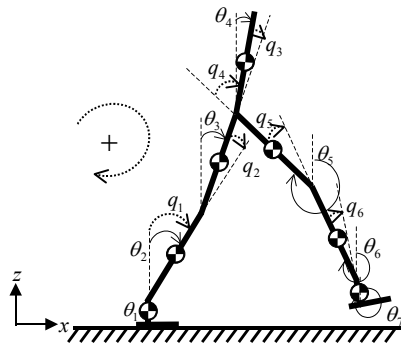


Fig. 1. Biped robot model with 6 DOF

$$\theta = E^T q$$

$$E = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

이족보행로봇 모델 각 링크의 파라미터들은 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Parameters of the biped robot per link number

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

각 링크의 무게중심은 링크마다 각 중심에 위치한다고 가정하였다.

3. 에너지 최적화 보행계획의 연구 (유전자 알고리즘 이용)

3.1 에너지 최적 보행계획을 찾기 위한 유전자 알고리즘

유전자 알고리즘 연산자는 3가지로 크게 나누어지며 그들은 재생산, 교배, 돌연변이이다. 재생산이란 평균적인 적응값을 증가시키는 것이고, 교배란 유전자에 대한 정보를 교환시키는 것이며, 돌연변이란 국소적인 최대 및 최소값에 대한 수렴을 방해한다[10]. Table 2는 유전자 알고리즘의 변수들을 보여준다.

Table 2. Parameters used in genetic algorithms

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

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[11].

3.2 등가 구속 조건(Equality Constraints)

등가 구속조건은 두 가지가 있는데 그들은 위치 조건 및 반복 조건이다.

첫째로, 이족보행로봇이 계단 보행을 위해 한 보행 주기의 시작과 끝에서 동작하는 다리의 끝은 다음 식들의 위치 조건을 만족함이 좋다.

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

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

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

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

여기서 t_f 는 한 보행 주기, S 는 보폭이고, H 는 계단의 높이이다. (3)과 (4)는 계단을 상향 할때 관련된 등가 구속조건이고, (5)와 (6)은 계단을 하향 할때 등가 구속조건이다. 이족보행로봇의 보행은 주기적 반복이 되풀이되므로 아래식을 만족해야 한다.

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

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

여기서 θ_i 는 Fig. 1에서처럼 수직축 기준 절대 좌표로 정의된다. 본 논문의 경우는 지면 접촉의 충격은 고려되지 않는다.

3.3 부등가 구속 조건(Equality Constraints)

부등가 구속 조건은 3가지 조건으로 구성되며 이들은 각각 계단 조건, 무릎 조인트 조건, ZMP 조건들이다.

이족보행로봇은 Fig. 2의 계단 형상을 통해 한 보행 주기 동안 계단 보행을 관측할 수 있다.

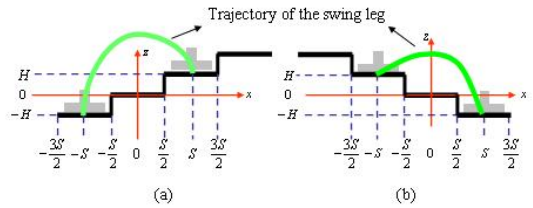


Fig. 2. (a) up stairs (b) down stairs

Fig. 2 (a)와 같이 이족보행로봇이 계단의 상향으로 움직일 때 움직이는 다리의 끝이 계단 위에 있어야 하는 조건은 (9), (10), (11)이고, 계단과의 부딪침을 피하기 위해 움직이는 다리의 발끝에 대한 조건은 (12), (13), (14)이다.

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

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

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

$$-H < Z \text{ 이면 } x \quad (12)$$

$$0 < z \text{ 이면 } x \quad (13)$$

$$H < Z \text{ 이면 } x \quad (14)$$

그리고 Fig. 2 (b)와 같이 이족보행로봇이 계단을 상향으로 움직일 시 움직이는 다리의 끝이 계단 윗쪽에 위치해야 하는 조건은 (15), (16), (17)이고, 계단과 부딪침을 피할 때는 움직이는 다리 동작의 뒤꿈치 조건은 (18), (19), (20)이다.

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

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

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

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

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

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

여기서 δh 와 δs 는 움직이는 다리가 계단과 부딪침을 피하기 위한 안전 경계 영역이다. 그리고 시간 t 는 $t = t_f$ 과 $t = 0$ 의 조건을 포함하지 않는다. (21)과 (22)는 부등가 구속조건 중 무릎 조인트 조건으로 무릎 조인트 조건의 경우는 인간과 비슷한 거동을 표현하기 위한 조건에 해당한다.

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

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

여기서 $\delta \theta$ 는 안전 경계 영역을 의미한다.

마지막 부등가 구속조건은 이족보행로봇의 안정성과 관련된 것으로서 ZMP(Zero Moment Point)조건인 식 (23)이다. ZMP가 지지하는 다리의 발바닥 범위 안에 있을 때, 이족보행로봇은 균형적으로 안정하다라고 할 수 있다.

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

여기서 Δ 는 로봇의 발바닥 사이즈와 관련된 안전 경계 영역을 의미한다.

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

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 보행궤적을 근사화된 식을 표현하기 위해 각 조인트별 각도를 시간 t 에 관한 아래와 같은 4차 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 $a_{i,j}$ ($i=1, \Lambda, 6, j=1, \Lambda, 5$)는 설계 변수이다. 그러므로 설계 변수의 총 개수는 등호 제약 조건, (3) ~ (8), 16개를 제외하면 14개이다.

성능지수(performance index)의 최소화 값에 대한 식은 다음과 같다.

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

여기서 $p = \pi \dot{q}$ 는 각 조인트에 적용되는 동력을 나타내고, $Q = \text{diag}[\omega_1 \ \omega_2 \ \omega_3 \ \omega_4 \ \omega_5 \ \omega_6]^T$ 는 양한정 행렬이다. Q 의 요소인 ω_{1-6} 는 상대적 작동 구동기를 시스템적으로 토크의 비중을 다르게 할 필요가 있다.

(9)에서부터 (23)까지의 부등가 구속조건은 다음과 같다.

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

(9)에서 (23)까지의 식들에 의해서 구축된 최적조건 문제는 식 (28) 같은 변환방법을 통해 비구속 조건 문제로 바꿀 수 있다.

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

여기서 r 은 별점 파라미터라고 하고 그 값은 벡터이고, P 는 실변수 함수로 r 에 따라 부과되는 별점이 다르다. 이 별점 함수의 형태는 변환 방법에 따라 조금씩 다르다. 본 논문에서 사용한 변환 방법이 외부 별점 함수로 인한 것이다.

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

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

그러므로, 유전자 알고리즘의 순서도는 Fig. 3에 나타난 바와 같다.

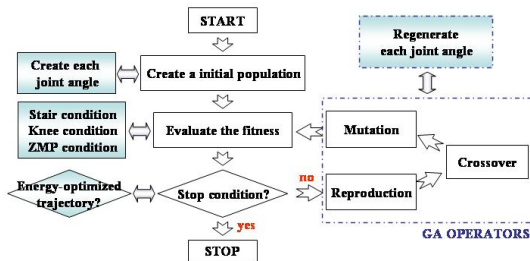


Fig. 3. Flow chart for genetic algorithms

4차 함수 계수를 설계 변수로 에너지 최적화된 보행 궤적을 찾아보았다. 조인트들의 각도를 초기로 발생시켰다. 또한, 그 값들이 각각 계단 조건과 무릎 조인트 조건 및 ZMP 조건의 3가지 조건 중 만족하는지의 가부를 판단하게 하였다. 그 결과 에너지를 최적화시킨 보행 궤적을 찾으면 멈추게 하고, 못찾을 경우 유전자 알고리즘 연산자가 다른 조인트 각도를 생성하도록 하였다.

4. 시뮬레이션

본 논문에서는 이족보행로봇의 계단 보행을 위한 거동을 시뮬레이션하기 위해 MATLAB 프로그램을 사용하였다. 유전자 알고리즘의 파라미터는 Table 2에 나타내었고, 유전자 알고리즘 연산자에서 사용된 방법에는 3가지가 있다. 이들은 재생산, 교배, 돌연변이 방법이며, 재생산의 경우 gradient-like selection method 방법을, 교배의 경우 modified simple crossover method 방법을 돌연변이의 경우는 boundary mutation method 방법을 사용하였다. Table 3은 컴퓨터 시뮬레이션을 위한 모델 파라미터들이다.

Table 3. Parameters used in simulations

Parameters	Values[m, rad, sec]
S	0.3 meter
H	0.05 meter
δs	0.001 meter
δh	0.001 meter
$\delta \theta$	0.001 radian
Δ	0.19 meter
Stride Period	1.0 sec

4.1 계단의 상향 경우

Fig. 4는 비등가 구속조건의 비용 함수를 비교한 경우이다. Fig. 4의 부등가 구속조건은 다음과 같다. (a)의 경우 성능지수, (b)의 경우 계단 조건(c)의 경우 무릎 조인트 조건, 마지막으로 (d)의 경우는 ZMP 조건이다. Fig. 4에서 부등가 구속제한 조건값이 0으로 수렴되는 것을 보여주는 것은 (b), (c), (d) 들이다.

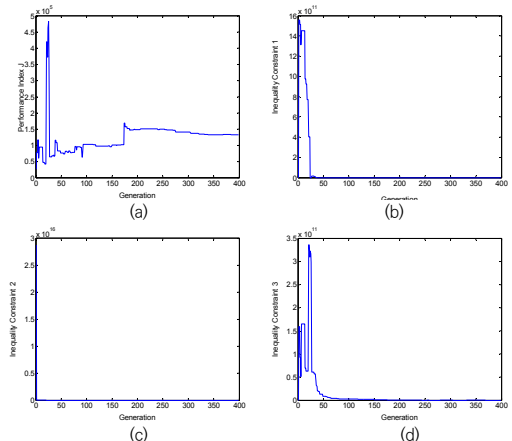


Fig. 4. Cost Function of inequality constraints at up stairs

유전자 알고리즘에 의해 생성된 각 조인트의 토크와 동력에 대한 선도를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에서 torque 6 및 power 6는 0에 수렴함을 볼 수 있다. 이것은 움직이는 다리의 발목 조인트 에너지가 거의 소비되지 않음을 의미한다. 그리고 Fig. 6과 Fig. 7은 유전자 알고리즘을 이용하여 생성된 이족보행로봇의 거동을 나타낸다. 특히, 계단과의 충돌 회피를 위한 움직이는 다리가 보행 주기 초기 약간 뒤로 움직이는 것을 관찰할 수 있다.

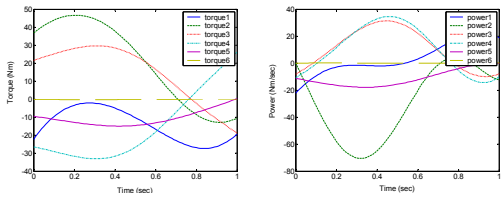


Fig. 5. Torque and power at up stairs per each joint

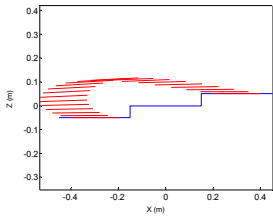


Fig. 6. Foot diagram in locomotion at up stairs

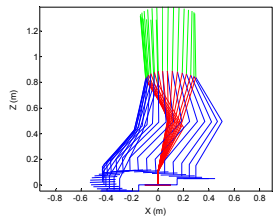


Fig. 7. Sticky motion diagram of the biped robot at up stairs

4.2 계단의 하향 경우

계단의 상향과 같이, 계단의 하향 시에도 비등가 구속 조건의 비용 함수인 (b), (c), (d)가 거의 0 들로 수렴함을 보여주며 이들은 Fig. 8에 나타나 있다. 역시 Fig. 10과 Fig. 11은 인간이 계단을 내려갈 때와 비슷한 거동을 보여준다.

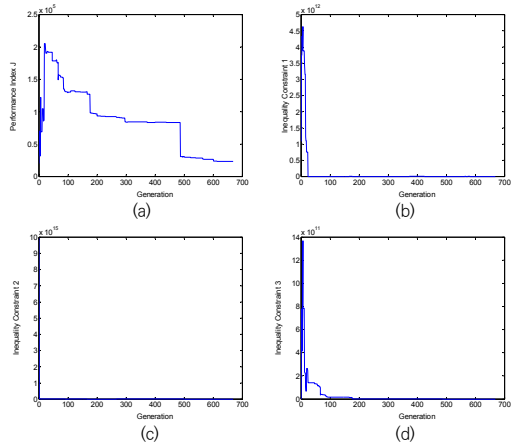


Fig. 8. Cost Function of inequality constraints at down stairs

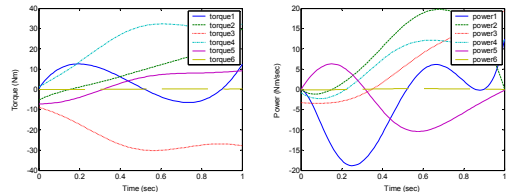


Fig. 9. Torque and power at down stairs per each joint

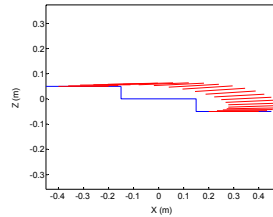


Fig. 10. Foot motion diagram in locomotion at down stairs

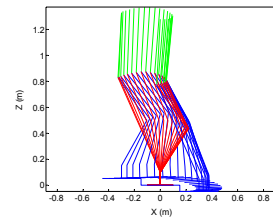


Fig. 11. Sticky motion diagram of the biped robot at down stairs

4.3 에너지 효율의 비교

이족보행로봇의 안정적 거동을 위해 계산이 가능한 토크 제어를 사용하였다. 각 조인트의 각도, 각속도, 각가속도는 추정값은 유전자 알고리즘을 이용하여 찾았다. Fig. 12는 0.3m/s로서 계단 보행의 이족보행로봇 거동을 보여준다.

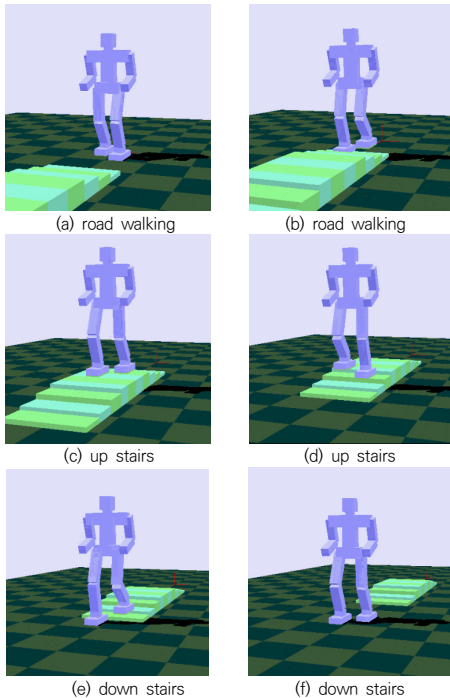


Fig. 12. 3 type locomotions of the biped robot (road walking, up and down stairs)

Fig. 12처럼 이족보행로봇이 평지를 걸을 때와 계단을 상향 및 하향 시 에너지 효율을 계산해 보았다. 수직축은 각 조인트의 동력을 제공하여 더한 것을 Fig. 13에 나타내었다. 점선은 평지를 걸을 때의 동력, 1점 쇄선은 계단을 상향 시 동력, 실선은 계단의 하향 시 동력을 나타낸다.

Fig. 13에 나타난 바처럼 평지 보행 시 에너지 효율이 가장 우수하다. 평지를 걸을 때는 계단의 상향보다 92%가, 계단의 하향보다 54%나 효율이 더 우수했다. 또한, 계단의 하향 시는 상향 때 보다 82% 효율이 더 우수하였다.

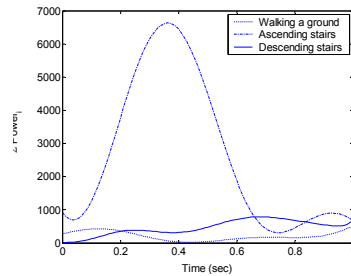


Fig. 13. Comparison of the energy efficiency at road walking, up and down stairs

5. 결론

본 논문에서는 이족보행로봇이 평지를 걸을 때, 계단을 올 때, 내려갈 때를 유전자 알고리즘을 적용하여 에너지를 최적화하는 보행궤적생성을 연구하였고, 이족보행로봇의 안정한 거동을 위해 계산가능한 토크 제어를 적용하였다. 계단 보행의 컴퓨터 시뮬레이션을 보면 평지 보행 시 에너지 효율이 가장 우수했다. 평지를 걸을 때는 계단의 상향 시 보다 92%가, 계단의 하향 시가 54%나 더 효율이 우수했다. 또한, 계단의 하향은 계단의 상향 보다 82% 효율이 더 우수하였다. 결과적으로 평지 보행 시 이족로봇은 가장 안정되며 에너지 효율이 높다는 것을 알게 되었다. 향후 연구로는 이족보행로봇의 달릴 때 거동을 연구하여 에너지 효율을 비교하는 것이 필요할 것으로 생각된다.

REFERENCES

- [1] J. H. Park & K. D. Kim. (1998). Biped Robot Walking Using Gravity-Compensated Inverted Pendulum Mode and Computed Torque Control. *Proc. Int. Conf. on Robotics and Automation*, 3528-3533.
- [2] S. H. Choi, Y. H. Choi & J. G. Kim. (1999). Optimal Walking Trajectory Generation for a Biped Robot Using Genetic Algorithm. *Proc. Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 1456-1461.
- [3] M. Y. Cheng & C. S. Lin. (1995). Genetic Algorithm for Control Design of Biped Locomotion. *IEEE*, 1315-1325.
- [4] J. H. Park & M. S. Choi. (2004). Generation of An Optimal Gait Trajectory for Biped Robots Using A Genetic Algorithm. *JSME International Journal*.
- [5] C. Chevallereau, A. Formal'sky & B. Perrin. (1998).

- Low Energy Cost Reference Trajectories for a Biped Robot. *Proc. Int. Conf. on Robotics and Automation*, 1398-1404.
- [6] C. L. Shih. (1999). Ascending and Descending Stairs for a Biped Robot. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A : Systems and Humans*, 29(3), 255-268.
- [7] K. S. Jeon & J. H. Park. (2003). Energy Optimization of a Biped Robot for Walking a Staircase Using Genetic Algorithms. *Proc. Int. Conf. on Control, Automation and Systems*, 215-219.
- [8] S. Tzafestas, M. Raibert & C. Tzafestas. (1996). Robust Sliding-mode Control Applied to a 5-Link Biped Robot. *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 15, 67-133.
- [9] J. Furusho & A. Sano. (1990). Sensor-based control of a nine-link biped, *Int. J. of Robotics Research*, 9(2), 83-98.
- [10] D. E. Goldberg. (1989). Genetic Algorithm in Search, Optimization, and Machine Learning, Addison Wesley.
- [11] G. G. Jin. (2002). *Genetic Algorithms and Their Applications*, Kyo Woo Sa.
- [12] K. M. Nam, B. S. Kim, D. K. Ko, G. R. Kim & S. G. Lee. (2009). Straight walking elevation of Biped Robot by using vision. *Proc. Conf. Society of Precision Engineering*, 153-154.
- [13] K. Hirai & M. Hirise. (1998). The Development of Honda Humanoid Robot, *Proc. of Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2, 1321-1326.
- [14] Ogura, Y. Shimomura, K Kondo, A. Morishima, A. Okubo, T. Momoki, H. O. Lim & A. Takanish. (2006). Human-like Walking with Knee Stretched, Heel-contrast and Toe-off Motion, by a Humanoid Robot, *Intelligent Robots and Systems, IEEE.RSJ Intelligent Robots and System*.
- [15] R. C. Luo & T. M. Chen. (2000). Autonomous Mobile Target tracking system based on grey-fuzzy control algorithm, *IEEE Trans. Industrial Electronics*, 47(4), 920-931.

이 정 익(Jeong-ick Lee)

[정회원]



- 1991년 2월 : 한양대학교 공과대학. 기계공학과 (공학사)
- 1993년 2월 : 한양대학교 공과대학. 정밀기계공학과 (공학석사)
- 1999년 8월 : 한양대학교 공과대학. 정밀기계공학과 (공학박사)
- 1993년 1월 ~ 1999년 12월 : (주)대우전자. 중앙연구소 (선임연구원)
- 2000년 3월 ~ 2007년 2월 : 용인송담대. 자동차기계설계전공 (교수)
- 2007년 3월 ~ 현재 : 인하공전. 기계공학부. 기계설계과 (교수)
- 관심분야 : CAD/CAM/CAE, 스마트팩토리, 생산자동화, 사출금형, 주조, 용접, 유비쿼터스 Eng., Nano, MEMS, BIOMECHANICS
- E-Mail : jilee@inhac.ac.kr