

# 유전 알고리즘을 이용한 4족 로봇의 계단 보행 방법

변재오\* · 최윤호\*\*

## Stair Locomotion Method of Quadruped Robot Using Genetic Algorithm

Jae-Oh Byun\* · Yoon-Ho Choi\*\*

### 요 약

본 논문에서는 곤충형 다리 구조를 갖는 4족 로봇의 효율적인 계단 보행을 위해 유전 알고리즘(Genetic Algorithm: GA)에 기반한 계단 보행 방법을 제안한다. 제안한 방법에서는 우선 계단 보행을 위한 요소와 도달 영역을 정의한다. 또한 GA 수행을 위한 유전자와 적합도 함수를 설정하고, GA를 이용하여 최소 이동 거리와 최적 에너지 안정도 여유(Energy Stability Margin: ESM)을 갖는 4족 로봇의 착지 지점을 탐색하여 걸음새 궤적을 생성한다. 마지막으로, 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 본 논문에서 제안한 계단 보행 방법의 효용성 및 우수성을 검증한다.

### ABSTRACT

In this paper, we propose an efficient stair locomotion method for a quadruped robot with mechanism of insectile legs using genetic algorithm(GA). In the proposed method, we first define the factors and the reachable region for the stair locomotion. In addition, we set the gene and the fitness function for GA and generate the gait trajectory by searching the landing position of a quadruped robot, which has the minimum distance of movement and the optimal energy stability margin(ESM). Finally, we verify the effectiveness and superiority of the proposed stair locomotion method through the computer simulations.

### 키워드

Quadruped Robot, Stair Locomotion, Gait Trajectory, Insectile Leg, Genetic Algorithm  
4족 로봇, 계단 보행, 걸음새 궤적, 곤충형 다리, 유전 알고리즘

## 1. 서 론

최근에 원전 사고 등과 같은 빈번한 재난 사고로 인해 사람이 접근하기 힘든 위험 환경에서 탐색 및 구조 작업 등을 위한 이동 로봇의 개발에 많은 관심을 가지고 연구를 수행하고 있으며, 이동 로봇이 이와 같은 환경에서 작업하기 위해서는 평탄 및 비평탄 지형뿐만 아니라 경사면과 계단과 같은 다양한 지형에서의 이동 및 보행이 필수적이다[1-5]. 특히 이동 로봇의 계단 지형에서의 이동 및 보행은 다른 지형들에

비해 매우 어렵고 도전적이다. 바퀴형(wheeled) 이동 로봇의 경우에는 이동에 많은 제약을 가지므로 다리형(legged) 이동 로봇 혹은 혼합형(hybrid) 이동 로봇의 계단 보행에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 혼합형 이동 로봇의 계단 보행에 관한 대표적인 연구로는 4족 로봇의 다리 옆에 바퀴를 추가로 장착한 HIT-HYBTOR[2]과 몸체에 큰 바퀴를 달아 계단 보행을 하는 로봇[3], 반원 형태의 특수한 다리를 사용한 RHex 로봇[4] 및 다리와 바퀴를 동시에 사용한 로봇[5] 등이 있다. 이러한 혼합형 구조의 경우 안정

\* 경기대학교 전자공학과(hydeeon@kgu.ac.kr)

\*\* 교신저자 (corresponding author) : 경기대학교 전자공학과 교수(yhchoi@kgu.ac.kr)

접수일자 : 2015. 08. 10

심사(수정)일자 : 2015. 09. 13

게재확정일자 : 2015. 09. 23

적인 계단 보행을 위해 바퀴 및 트랙등과 같은 특수한 이동 장치에 의존하기에 로봇 구조의 제한성을 가진다.

또한 다족 로봇의 계단 보행에 관한 연구는 다음과 같다. 2족 로봇의 경우, 영 모멘트 점(zero moment point)과 2족 로봇의 구조 등을 이용한 계단 보행 알고리즘 등이 제안되었으나[6], 일반적으로 2족 로봇은 계단 보행 시 다른 다족 로봇에 비해 안정도가 낮은 단점을 가진다. 4족 로봇의 경우, 마이크로소프트사의 키넥트(kinect) 센서를 이용한 계단 보행 알고리즘 [7], 스윙 궤적의 다리를 사용하여 계단을 보행하는 알고리즘[8] 및 곤충형 다리 구조를 이용한 계단 보행 알고리즘[9] 등이 제안되었으나, 센서 데이터의 처리 시간, 생성된 스윙궤적의 높은 전력 소비 및 착지 지점에 대한 제한성 등의 문제점을 가진다.

한편 다양한 지형에서 2족 로봇의 걸음새 생성을 위해 퍼지 논리, 신경망 회로 및 유전자 알고리즘 (Genetic Algorithm: GA) 등과 같은 지능 기법을 적용한 연구들이 많이 발표되고 있으나[10], 4족 로봇의 계단 보행 연구는 미비하다.

따라서 본 논문에서는 4족 로봇의 기존 계단 보행 방법의 문제점을 해결하기 위해 GA를 이용하여 착지 지점을 탐색하여 계단 보행 궤적 생성함으로써 곤충형 구조를 갖는 4족 로봇의 효율적인 계단 보행 방법을 제안한다. 제안한 방법에서는 우선 계단 보행을 위한 요소와 도달 영역을 정의한다. 또한 GA 수행을 위한 유전자와 적합도 함수를 설정하고, GA를 이용하여 최소 이동 거리와 최적 에너지 안정도 여유 (Energy Stability Margin: ESM)을 갖는 4족 로봇의 착지 지점을 탐색하여 걸음새 궤적을 생성한다. 마지막으로, 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 본 논문에서 제안한 계단 보행 방법의 효율성 및 우수성을 검증하고자 한다.

## II. 4족 로봇의 모델링, 유전 알고리즘 및 최적 에너지 안정도 여유

### 2.1 4족 로봇의 기구학 모델 유도

본 논문에서는 효율적인 계단 보행을 위해 그림 1과 같은 3 자유도의 곤충형 다리 구조를 갖는 4족 로봇을 선정하여 모델링한다.

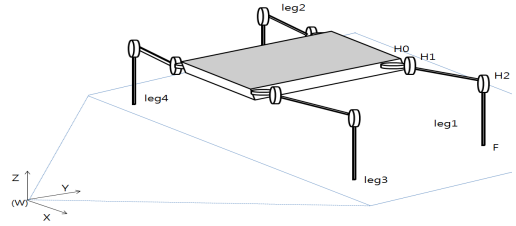


그림 1. 곤충형 다리 구조를 갖는 4족 보행 로봇의 구조  
Fig. 1 Structure of a quadruped robot with mechanism of insectile leg

4족 로봇의 모델링을 위해 다음과 같이 임의의 한 점을 좌표축으로 하는 세계 좌표계를 정의한다. 각 다리의 기구학은 구조상 같기에 다리 하나를 기준으로 한다. 우선, 그림 1의 기준 좌표계에서  $z$ 축으로  $\theta_1$ 만큼 회전,  $y$ 축으로  $l_1$ 만큼 평행 이동한다. 다음 관절에서는  $x$ 축으로  $-\theta_2$ 만큼 회전하고,  $y$ 축으로  $l_2$ 만큼 평행 이동하고 마지막으로  $x$ 축으로  $-\theta_3$ 만큼 회전하고,  $y$ 축으로  $l_3$ 만큼 평행 이동하여 구한 회전 행렬을 모두 곱하면 식 (1)과 같이 최종 변환 행렬을 구할 수 있다[9].

$$T_3 = A_1 A_2 A_3 = \begin{pmatrix} c_1 & s_1 s_2 s_3 - s_1 c_2 c_3 & -s_1 c_2 s_3 - s_1 s_2 c_3 & -l_1 s_1 - l_2 s_1 c_2 + l_3 (s_1 s_2 s_3 - s_1 c_2 c_3) \\ s_1 & c_1 c_2 c_3 - c_1 s_2 s_3 & c_1 c_2 s_3 + c_1 s_2 c_3 & l_1 c_1 + l_2 c_1 c_2 + l_3 (c_1 c_2 c_3 - c_1 s_2 s_3) \\ 0 & -c_2 s_3 - s_2 c_3 & c_2 c_3 - s_2 s_3 & -l_2 s_2 - l_3 (c_2 s_3 + s_2 c_3) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

여기서,  $c_i = \cos \theta_i$  이고,  $s_i = \sin \theta_i$  이며,  $l_i$ 는 관절 사이의 링크 길이를 나타낸다. 모든 관절에 대한 최종 변환 행렬은 다음과 같으며 변수  $n$ ,  $o$ ,  $a$ 는 각기 수직(normal), 회전(orientation), 접근(approach) 벡터로서 방향 정보를 나타내며, 변수  $p$ 를 위치로 나타내면 다음의 식 (2)와 식 (3)과 같다.

$$T = \begin{pmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = T_3 \quad (2)$$

$$\begin{aligned}
 p_x &= -l_1s_1 - l_2s_1c_2 - l_3s_1c_{(2+3)} \\
 p_y &= l_1c_1 + l_2c_1c_2 + l_3c_1c_{(2+3)} \\
 p_z &= -l_2s_2 - l_3s_{(2+3)}
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

한편 4족 로봇의 역기구학 모델은 대수학적 방법을 이용하여 식 (1)에서 역함수를 취해 각  $\theta_i$ 에 대하여 풀어 관절각을 구한다. 이를 계산하면 다음의 식 (4)와 식 (5)를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \theta_1 &= \tan^{-1}(-p_x/p_y) \\
 \theta_2 &= \tan^{-1}(\sin\theta_2/\cos\theta_2) \\
 \theta_3 &= \cos^{-1}\left(\frac{(p_y c_1 - l_1 - p_x s_1)^2 + p_z^2 - l_2^2 - l_3^2}{2l_2 l_3}\right)
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

여기서  $\sin\theta_2$ 와  $\cos\theta_2$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \sin\theta_2 &= \frac{c_2(p_y c_1 - l_1 - p_x s_1) - l_2 - l_3 c_3}{p_z} \\
 \cos\theta_2 &= \frac{\left(\frac{(p_y c_1 - l_1 - p_x s_1) \times (l_2 + l_3 c_3)}{p_z} - l_3 s_3\right)}{\left(p_z + \frac{(p_y c_1 - l_1 - p_x s_1)^2}{p_z}\right)}
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

### 2.2 유전 알고리즘

GA는 자연계의 진화원리를 컴퓨터 알고리즘과 결합한 탐색 방법으로서, 최적화 문제의 값을 구하는 알고리즘이다. 이와 같은 GA는 크게 초기화, 적합도 평가, 재생산, 교배, 돌연변이의 5가지 단계로 구분할 수 있다.

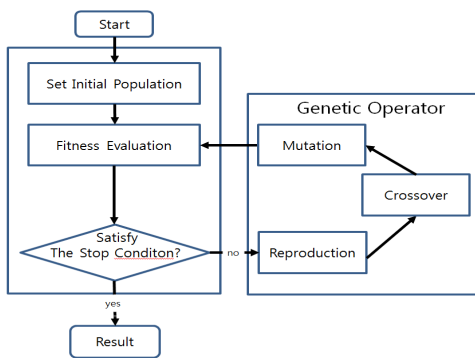


그림 2. 유전 알고리즘의 구조  
Fig. 2 Structure of genetic algorithm

그림 2를 보면 먼저 초기화가 시작되어 유전이 시작될 개체들의 집단을 구성한다. 이 때, 생성된 개체들은 구하려고 하는 문제의 답이 될 가능성을 가지고 있는 개체들이며 무작위 생성이나 경험적인 방법을 통해 구성된다. 이 생성된 개체들을 살펴보고 장점과 단점을 평가하는 적합도 항목이다. 상대적인 값으로서 조건을 충족하면 결과 값으로 산출되고 충족하지 못한다면 그 개체는 도태되어 소멸된다. 적합도 평가(fitness evaluation) 후 남은 개체들의 값이 정지 조건을 만족하고 있다면 결과 값이 되고, 그렇지 않으면 상대적으로 장점이 더 많은 값들을 모아서 개체를 다시 생성하는데 이를 재생산(reproduction)이라고 한다. 재생산된 개체들은 먼저 교배(crossover)를 통해 재결합하고 집단에 지금까지 없던 새로운 개체를 투입하여 변화를 시도한다. 마지막으로, 임의의 개체의 정보가 임의로 변경되어서 이전 집단에 없는 새로운 유전 정보를 만들어 내는 것을 돌연 변이(mutation)라 한다. 돌연 변이까지 끝나 새롭게 생성된 집단은 다시 적합도 평가를 실시하고 최적의 해를 구할 때까지 이와 같은 과정을 반복하게 된다. 따라서 적절한 적합도 함수(fitness function)와 GA 파라미터의 설정에 의해 GA의 성능이 결정되는데, 4족 로봇의 최적 착지 지점 탐색을 위한 이들의 설정은 3.2절에서 서술한다.

### 2.3 에너지 안정도 여유

로봇은 보행 도중 넘어지지 않기 위해서 안정한 동작을 유지하도록 제어해야 한다. 이러한 안정한 상태를 수치로 표현하기 위해 나타난 것이 안정 여유(Stability Margin: SM)이다. SM은 보행 로봇의 발을 기점으로 형성된 지지 다각형의 경계선과 로봇의 무게 중심을 평면에 투영한 점간의 최소거리로 정의하고 이 최소거리가 클수록 안정도가 높다. 이러한 안정도 판별에는 여러 가지 방법이 있으며, 이 중 에너지 안정도 여유는 로봇의 높이와 기울기가 고려되는 안정도이다. 보행 로봇의 발들이 이루고 있는 각각의 지지 경계선과 몸체의 무게 중심을 투영한 점과의 관계식을 에너지 안정도 레벨(Energy Stability Level: ESL)이라고 하며, 한 자세에서의 모든 지지 경계선의 관계에 대해 ESL을 구할 수 있고, 구해진 이 값들 중 최소값이 ESM이다[11].

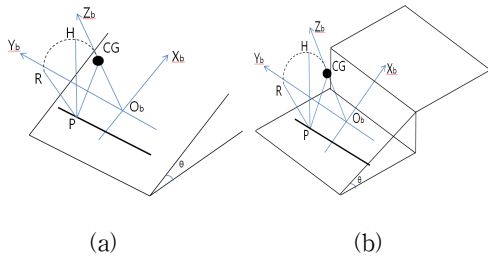


그림 3. ESM 정의를 위한 기하학적 모습  
(a) 경사면 (b) 계단

Fig. 3 Geometric shape for the definition of ESM  
(a) Incline (b) Stairs

그림 3에서 ESL을 구하기 위해서 경사면과 계단의 면을 각기 기하학적으로 나타냈다. 경사면에서의 경사 각  $\theta$ 는 계단에서의 계단 너비  $w$ 와 계단 높이  $h$ 에 대한 각  $\theta$ 로 치환될 수 있고 나머지 점과 값들은 기하학적 벡터 연산으로 구할 수 있다. 따라서 계단 면에서의 ESL 유도는 경사면에서의 경우와 동일하므로, 경사면에서의 ESL 계산식을 그대로 사용할 수 있다. 점 CG는 로봇의 무게 중심점(center of gravity)이며, 점 P가 속해 있는 선분은 지지 경계선이다. 무게 중심점 CG를 투영한 점을 점  $O_b$ 로 좌표계를 설정하고 축  $X_b, Y_b, Z_b$ 를 설정한다. 지지 경계선 중 하나를 선분  $q$ 라고 하고 점 CG로부터 선분  $q$ 와 가장 가까운 점을 점 P라고 가정하자. 선분  $q$ 를 가지는 단위 벡터  $\vec{PQ}$ 는  $\vec{OG}$ 와  $\vec{OP}$ 의 내적으로 구할 수 있다. 또 점 P를 중심으로 벡터  $\vec{PG}$ 를  $90^\circ$  회전하여  $\vec{PQ}$ 와  $\vec{PG}$ 의 내적으로 벡터  $\vec{PR}$ 을 구할 수 있고, 식 (6)을 사용하여 최대 고점인 점 H의 벡터  $\vec{PH}$ 를 구하면 다음의 식 (6)과 같다.

$$\vec{PH} = \cos\phi \vec{PG} + \sin\phi \vec{PR} \quad (6)$$

여기서  $\phi$ 는  $\vec{PH}$ 와  $\vec{PG}$ 의 사잇각으로 다음의 식 (7)과 같다.

$$\phi = \tan^{-1} \frac{\vec{PR}}{\vec{PG}} \quad (7)$$

한편 식 (6)과 (7)을 이용하여 ESL을 구하면 식 (8)과 같이 된다.

$$ESL = mg \left\{ \begin{aligned} &(-x_b \sin\theta + h \cos\theta) \cos\phi + \\ &\frac{1}{\sqrt{x_b^2 + y_b^2}} (hx_b \sin\theta + (x_b^2 + y_b^2) \cos\theta) \sin\phi \\ &+ x_b \sin\theta - h \cos\theta \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

### III. GA 기반 계단 보행 알고리즘

본 논문에서는 GA를 통해 최적의 ESM을 갖는 4족 로봇의 착지 지점을 탐색하여 계단 보행 궤적을 생성함으로써 4족 로봇의 효율적인 계단 보행 알고리즘을 제안한다.

#### 3.1 계단 보행을 위한 계단 요소 및 도달 영역의 정의

본 절에서는 계단이라는 고저차가 존재하는 지형에서의 보행을 위해 필요한 요소들을 설정한다. 계단은 경사면을 오르기 쉽게 한 지형물로서, 주기적으로 상승하는 평탄면으로 간주할 수 있다.

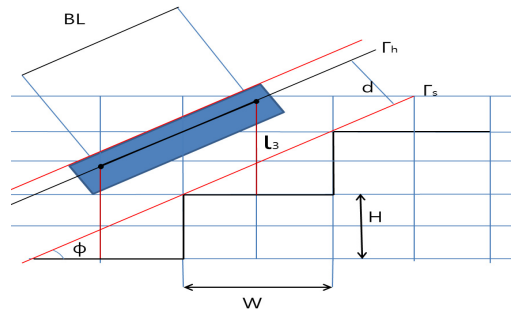


그림 4. 계단에서의 4족 로봇 측면도  
Fig. 4. Side view for a quadruped walking robot in the stairs

그림 4에서와 같이 계단은 각 층마다 존재하는 너비, 폭, 높이 등이 존재한다. 그림은 단면도로서 계단 너비는  $w$ , 계단 높이는  $h$ 이다. 계단 폭의 경우 계단 보행 궤적을 생성할 때 사용하지 않으므로 제외하였고, 그 외에도 계단의 가파름을 알 수 있는 계단 경사 각  $\phi$ 와 계단 빗면 궤적  $\Gamma_s$ 가 있다. 이 때, 경사각

$\phi = \tan^{-1}(\frac{H}{W})$ 이다. 로봇의 요소로는 다리 길이  $l_3$ , 몸체 길이  $BL$ , 보폭  $S$  및 몸 궤적  $\Gamma_h$ 가 있다.

다음으로, 보폭  $S$ 는 구조상 몸체 길이  $BL$  이상 움직일 수 없기에 도달 영역  $R$ 의 범위는  $S \leq BL$ 의 조건을 고려하여 설정한다.

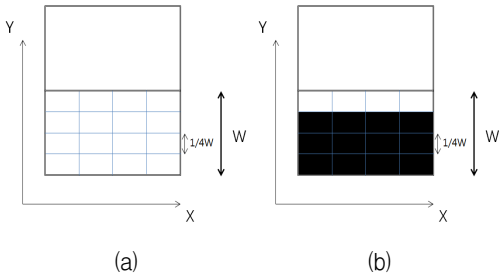


그림 5. 계단에서의 도달영역  
(a) 정의 전 (b) 정의 후  
Fig. 5 Reachable area in a stair  
(a) Before definition (b) After definition

그림 5는 계단의 평면도이다. 진행 방향이  $y$ 축 방향인 계단으로서 아래 계단의 구분된 칸은 계단 폭과 너비  $w$ 를 1/4로 나눈 것이다. 4족 로봇의 다리 길이와 계단 높이, 궤적의 모양새 등을 분석하면 계단 너비  $w$ 의 앞에서 1/4 지점부터 보행 시 계단에 충돌할 가능성이 높다. 계단은 앞서 서술한 바와 같이 주기적으로 상승하는 평탄면이므로 착지하는 발이 도달 영역을 벗어나면 충돌로 인해 다음 보행이 불가능해진다. 따라서 본 논문에서는 그림 (b)의 검은색 영역처럼 도달 영역을 주기적으로 설정한다.

다음으로, 4족 로봇의 계단 보행에서의 보행 궤적 생성 방법을 제안한다. 기본적으로 보행 궤적 생성에는 시작점, 끝점 그리고 속도가 중요한데 계단 보행의 경우에는 안정도가 가장 중요하기에 시작점과 끝점을 중심으로 서술한다. 계단은 고정차가 존재하는 지형이므로 일반적인 평지 보행 궤적은 계단과 충돌할 수 있어서 계단 보행 시의 계단과의 충돌 회피를 위해 보행의 시작점에서 다리를 임의의 크기만큼 수직 상승시켜 궤적의 시작점을 높여서 보행 궤적을 생성하면 식 (9)와 같다[9].

$$\frac{h}{2} + sw \times \sin\gamma \times \sin\alpha \times \sin\alpha \geq h \quad (9)$$

여기서  $\sin\gamma$  값은 현재 다리 위치에서의 사인 파형의 값이고, 각  $\alpha$ 는 다리가 평면과 이루는 각도를 나타내며  $sw$ 는 임의의 변수이다. 식을 간단히 하기 위해 각  $\alpha$ 를  $90^\circ$ 라 가정하면 식 (10)과 같이 된다.

$$sw \times \sin\gamma \geq \frac{h}{2} \quad (10)$$

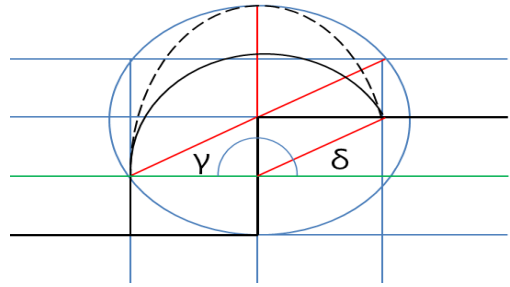


그림 6 계단 보행 궤적 측면도  
Fig. 6. Side view of stair walking trajectory

그림 6에서 각  $\gamma$ 는  $\gamma = 180 - \delta$ 와 같고, 각  $\delta$ 는  $\delta = \tan^{-1}(\frac{h/2}{w/2}) = \tan^{-1}(h/w)$ 이다. 식 (10)에서 부등식을 만족하기 위해 변수  $sw$ 는 높이  $h$ 로 바꾸고,  $\sin\gamma$ 는 이동하는 발끝 위치와 보행 시작 위치의 차이에 보행각의 최대 크기인 평각의 제한을 주고 정리하면 식 (11)과 같이 구할 수 있다.

$$h \times \sin(180 \times \frac{M_{P_y} - P_{1_y}}{\alpha}) = sw \times \sin\gamma \quad (11)$$

여기서  $M_{P_y}$ 는 움직이고 있는 발의 위치의  $y$ 축 좌표 값이고,  $P_{1_y}$ 는 보행 시작 위치의  $y$ 축 좌표 값이다. 또한  $\alpha$  값은 그림 4에서 각  $\gamma$ 를 이용하여 보행 종료 위치의 사인 값인  $\sin\gamma_{end}$ 이 필요하다. 식 (11)의 최소값은 각  $\gamma$ 와 같아야 하므로, 이를 풀면 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$180 * \frac{Mp_y - P1_y}{\alpha} = 180 - \delta$$

$$\alpha = \frac{180(Mp_y - P1_y)}{180 - \delta} \quad (12)$$

### 3.2 GA 기반 계단 보행 궤적 생성

#### 3.2.1 유전자 설정

이제 계단에서의 낮은 안정도를 GA를 통해 최적화하기 위해 GA의 유전자를 설정한다. 유전자의 염색체는 로봇 요소와 계단 요소들을 안정도와 로봇의 계단 보행 궤적, 3.1절에서 서술한 도달 영역 등을 고려하여 목적 함수에 영향을 주는 값으로 결정한다.

본 논문에서는 계단 보행에서 안정도의 최적화가 목적이므로 로봇 자세와 ESM에 동시에 영향을 미치는 요소로서는 발의 착지 지점을 나타내는  $x, y, z$  좌표 값이 존재한다. 이 때 계단은  $z$  좌표 값이 주기적으로 변하는 지형물이므로,  $z$  좌표 값은 고려 대상에서 제외한다. 따라서 GA의 유전자는 ESM 판별과 이동 거리를 계산하는데 필요한  $x, y$  좌표 값을 이용하여 구성한다.

#### 3.2.2 적합도 함수 설정

GA에서 적합도 함수는 GA의 방향성과 성능을 결정하는 중요한 요인이다. 본 논문에서는 적합도 함수는 안정도 판별법인 ESM을 사용하고 최소 이동거리를 고려하여 식 (13)과 같이 설정한다.

$$Fitness = \frac{1}{(\alpha \sqrt{(P1 - P2)^2}) + (\beta \times ESL)} \quad (13)$$

여기서  $\alpha, \beta$ 는 각 요소에 대한 가중치이다.  $\alpha$  값은 발끝 좌표의 이동 거리에 의한 차이를 나타내어 로봇이 안정도 때문에 너무 무리한 자세를 취하지 않도록 한다. 또한  $P1$  값은 GA를 통해 구해지는 착지 지점의 값이며,  $P2$  값은 이론적으로 이상적인 착지 지점의 값이다.  $\beta$  값으로는 ESL을 통해 판별한 안정도를 고려한다. ESL 값으로 얻어낸 값 중 최소값이 ESM이라는 점과 이동 거리의 차라는 최소화 형태의 목적 함수에서 최대화하는 방식으로 적합도 함수를 구성한다. 이러한 적합도 함수에서 ESL 계산만이 아

닌 이동 거리에 의한 차이를 포함하는 근거는 그림 7에서 확인할 수 있다.

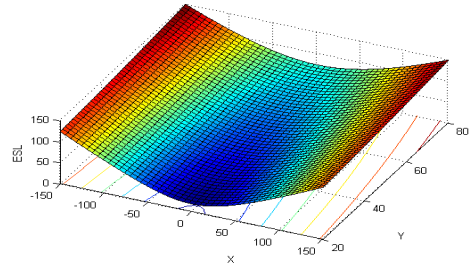


그림 7. 한 계단에 대한 ESL 값  
Fig. 7 ESL values for a stair

그림 7은 한 계단에서의 ESL 값을 나타낸 그림으로서,  $x$ 축과  $y$ 축은 계단의 좌표이고,  $z$ 축은 ESL 값을 나타낸다. 그림의 ESL 값은  $x$ 값의 절대값이 높거나  $y$ 값이 높을수록 높다. 이 이유로는 높이까지 나타낼 수 있는 3차원적인 안정도 방법인 ESM은 위치에너지와 운동 에너지를 이용하여 표현하는 방법이라고 할 수 있기에 높이뿐만이 아닌  $x, y$  좌표 값이 ESM에 영향을 미친다. 하지만 단순히  $x, y$  좌표 값 상승에 따라 ESM값이 높아진다는 것은 큰 문제이다. 따라서 이를 해결하기 위해 4족 로봇의 기본 자세의 발 좌표를 기준으로 로봇의 보폭과 계단의 높이만큼 이동하는 계단 보행의  $x, y$  좌표의 이론값을 설정하고 이 설정한 이론값의 ESL과 GA로 구한 좌표 값들의 ESL 값을 비교하여 높이에 대한 영향을 받으면서도  $x, y$  좌표에 의한 영향을 줄이고자 한다. 이 방식은 적합도 함수에 ESL만을 사용한 경우 나타나는 계단 가장 자리로의  $x, y$  좌표 생성에 의한 로봇 자세의 무너짐도 방지할 수 있다.

### 3.3 GA 기반 계단 보행

본 절에서는 3.1의 값들을 3.2절의 GA를 이용하여 적용시킨 계단 보행 궤적을 서술한다. 계단 보행 시의 다리 이동 순서는 다리 1→2→3→4이며, 이동 순서에 따라 다리를 움직이기 전 GA를 이용하여 ESM을 판별한다. 판별 값 중에서 가장 ESM 안정도가 높은 위치를 결정하여 다리를 이동하는데, 이 때 GA에 사용

하는 적합도 함수는 도달 영역 내에서 ESM 판별을 실시하고 동시에 이론적인 계단 보행 위치를 기준으로, 이동한 거리를 판별하여 높은 안정도 값을 위해 로봇의 보행 자세를 무너뜨릴 수 있는 위치를 배제한다. GA 연산이 진행되어 ESM이 판별되면 로봇은 찾아낸 좌표 값으로서, 3.1절에서 나타난 계단 보행 계획을 이용하여 계단 보행을 실시하여 로봇의 발이 보행을 종료해 착지하면 다음 발로 넘어간다. 위와 같은 보행 순서를 각 다리마다 반복하여 계단 보행을 수행하며 순서대로 모든 다리가 한 번 씩 이동하여 착지하는 것을 한 주기라 한다.

따라서 본 논문에서는 곤충형 다리 구조를 갖는 4족 로봇의 계단 보행에 있어서 GA 연산을 통하여 도달 영역 내에서 최적의 ESM을 탐색하고 그  $x, y$  좌표 값을 구함으로써 4족 로봇의 계단 보행에 있어서 최적의 발끝 위치와 그에 따른 최적의 안정도와 보폭을 자동으로 결정할 수 있게 된다.

#### IV. 모의 실험 및 결과 고찰

본 모의 실험에서는 제안한 곤충형 4족 로봇의 GA 기반 계단 보행 계획 생성의 효율성 및 우수성을 MATLAB을 이용한 모의 실험을 통해 검증하였다. 본 모의 실험에 사용한 4족 로봇의 다리 길이는  $l_1 = 20[mm]$ ,  $l_2 = 100[mm]$ ,  $l_3 = 100[mm]$  으로 계단의 크기는  $w = 40[mm]$ ,  $h = 40[mm]$  으로 계단 폭은  $150[mm]$  로 설정하였다. 또한 GA를 수행하기 위한 GA 파라미터들은 표 4-1과 같이 설정하였으며, 재생산은 룰렛-휠(roulette wheel) 방법을 사용하였다.

한편, GA의 세대 수와 집단 크기를 높임으로써 유전자의 시작 시의 유전자의 다양성을 확보하였다. 해의 범위는 계단의  $x, y$  축으로  $z$ 축의 경우는 계단 보행 특성상 고정 값을 가지므로 제외하였고, 계단 폭과 너비를 이용하여 3.1절을 참고하여 도달 영역  $R$ 의  $x$  축과  $y$  축으로  $R_x$ 와  $R_y$ 를 설정하였다.  $x, y$  축으로 설정된 각각의 유전자들은 15 비트(bit)의 이진수로 구성되어 총 30 비트의 염색체가 구성된다. GA 연산은 한 다리마다 수행하였으며 표 1에서의  $x_1$ 의 경우 4족 로봇의 좌측 다리인 다리 2와 4의 범위값으로

GA 연산에 사용되었으며  $x_2$ 의 경우 4족 로봇의 우측 다리인 다리 1과 3의 범위값으로 GA 연산에 사용되었다. 4족 로봇의 기본 자세에서 다리 1과 2가 위치하는 계단의  $y$  축 도달 영역  $R_y$ 를  $y_1$ , 그 윗 계단의  $R_y$ 를  $y_2$ 이라고 하여 기본 자세에서 첫 한 주기에 대한 모의 실험을 수행하였다.

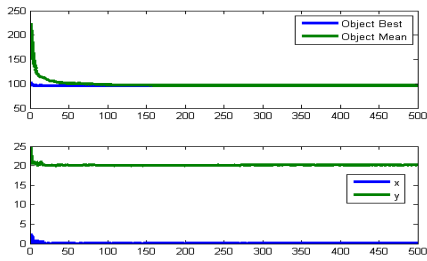
표 1. GA 파라미터  
Table 1. GA parameters

Population Size	500
Max Generation	500
Range	$x_1: -150 \sim 0 [mm]$ $x_2: 0 \sim 150 [mm]$ $y_1: -20 \sim 10 [mm]$ $y_2: 20 \sim 50 [mm]$
Reproduction	roulette wheel
Crossover Rate	0.7
Mutation Rate	0.00001

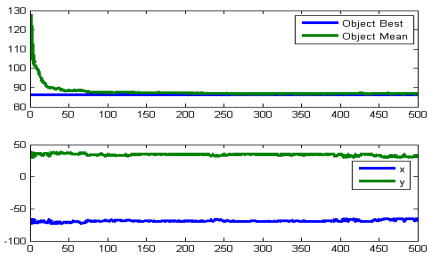
본 모의 실험에서는 GA를 사용한 4족 로봇의 걸음마다의  $x, y$  좌표와 이들 좌표로 구성되는 적합도 함수를 나타내었고 기존 방법에 의한 계단 보행의 ESM값과 제안한 방법에 의한 계단 보행의 ESM 값을 비교함으로써 본 논문에서 제안한 방법의 효율성 및 우수성을 검증하였다.

그림 8-(a), (b), (c), (d)는 각각 다리 이동 순서에 따른 로봇의 1 주기의 계단 보행에 대한 GA 연산의 결과이다. 그림 (a)는 다리 1의 이동을 그림 (b)는 다리 2의 이동을 그림 (c)는 다리 3의 이동을 그림 (d)는 다리 4의 이동을 각기 나타낸다. 각각의 그림들의 윗 부분은 최소화 시킨 적합도 함수의 평균값과 가장 좋은 값으로 낮을수록 좋은 결과를 나타낸다. 아랫 부분은 GA 연산에서 적합도 함수가 가장 좋을 때의  $x, y$  좌표 값들로 각각의 좌표 값들이 수렴함을 확인할 수 있었다. 본 모의 실험은 먼저 GA를 통하여 먼저 적합도 함수가 실시하여 가장 좋은 값에 해당하는  $x, y$  좌표 값을 찾고 적용하여 다음 다리의 계단 보행 시의 ESM 값을 더욱 좋게 하여 안정도를 향상하였다. 그림 8을 보면 적합도 함수의 결과 값 중 좋은 값은 늦어도 30세대 정도에서 수렴함을 하고 평균값은 150세대 정도에서 수렴함을 확인할 수 있다.

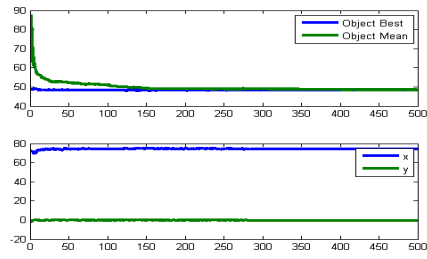




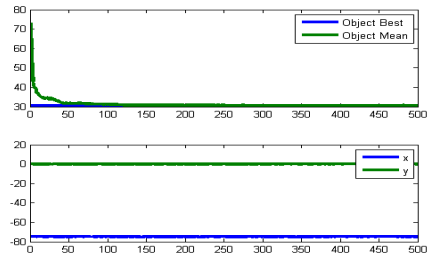
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 8. 제안한 방법을 사용한 모의실험 결과  
 (a) 다리 1 (b) 다리 2 (c) 다리 3 (d) 다리 4  
 Fig. 8 Simulation results for the proposed method.  
 (a) leg 1 (b) leg 2 (c) leg 3 (d) leg 4

그림 8-(a)에서  $x, y$  좌표는  $x=72.1, y=37.37$  로 그림 (b)에서는  $x=-65.58, y=30.43$  으로, 그림 (c)에서는  $x=74.17, y=-0.46$  으로, 그림 (d)에서는  $x=-74.92, y=-0.07$  로 수렴함을 확인할 수 있다. 이러한 모든 다리에 대한  $x, y$  좌표는 50세대 전에 수렴하였고 그림 (b)의 수렴 값의 오차는 돌연변이에 의한 유전자 개체의 변화로 일반적인 오차 범위 내에서 값이 수렴함을 확인할 수 있다.

한편, 그림 9은 본 논문에서 제안한 GA 연산을 통한 계단 보행과 기존 방법에 의한 이론적인 정적 계단 보행을 1주기 동안 비교한 ESM 결과이다[9].

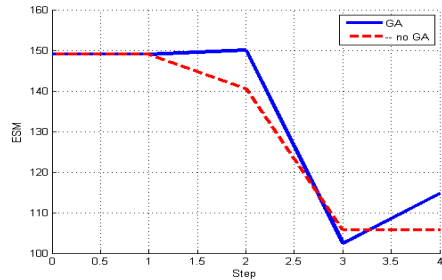


그림 9. 1주기 계단 보행의 ESM 결과값 비교  
 Fig. 9 Comparison of the ESM values for 1 periodic stair locomotion

그림에서 단계 0은 기본 자세를 의미하며, 단계 1, 2, 3, 4는 각각 다리 1, 2, 3, 4가 계단을 보행하는 시점을 나타낸다. 그림 9에서 단계 0과 1에서 GA를 사용한 ESM 값과 사용하지 않은 기존의 ESM 값은 동일하였으나 단계 2에서는 GA를 사용한 연산방법에서 ESM값이 더 높은 안정도를 보였고, 단계 3에서는 약간 떨어졌다. 단계 4에서는 다시 ESM값 기존 방법에 비해 높아져 안정도가 더 높다는 것을 확인할 수 있다.

## V. 결 론

본 논문에서는 GA 기반 계단 보행 궤적을 생성함으로써 곤충형 다리 구조를 갖는 4족 로봇의 효율적인 계단 보행을 제안하였다. 제안한 방법에서는 계단 보행을 위한 계단 보행 요소와 도달 영역을 정의하였



고, GA 수행을 통해 최소 이동 거리와 최적의 ESM을 갖는 4족 로봇의 착지 지점을 탐색하여 계단 보행 궤적을 생성하였다. 한편 제안한 방법의 효용성 및 우수성을 모의 실험을 통해 기존 방법과 비교함으로써 검증하였다.

**감사의 글**

본 연구는 2015학년도 경기대학교 대학원 연구원장 학생 장학금 지원에 의하여 수행되었음.

**References**

[1] Y. Choi, D. Kim, and K. Kim, "GA Based Locomotion Method for Quadruped Robot with Waist Joint to Walk on the Slop," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 8, no. 11, 2013, pp. 1665-1673.

[2] B. Huang, L. Sun, and Y. Luo, "Statically Balanced Stair Climbing Gait Research for A Hybrid Quadruped Robot," *Proc. of Int. Conf. on Mechatronics & Automation*, Zhengzhou, China, 2005, pp. 2067-2071.

[3] E. Nakano and S. Nagasaka, "Leg-Wheel Robot A Futuristic Mobile Platform for Forestry Industry," *Proc. of the 1993 IEEE Tsukuba Int. Workshop on Advanced Robotics*, Tsukuba, 1993, pp. 109-112.

[4] E. Z. Moore, D. Campbell, F. Grimmering, and M. Buehler, "Reliable Stair Climbing in the Simple Hexapod 'RHex'," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Washington, DC, 2002, pp. 2222-2227.

[5] K. Suwannasit and S. Laksanachawen, "A bio-inspired hybrid leg-wheel robot," *2004 IEEE Region 10 Conf.*, vol. 4, Tencon, 2004, pp. 495 - 497.

[6] J. Kim, I. Park, and J. Oh, "A Study on Control Algorithm for Stair Climbing of Biped Humanoid Robots," *Proc. of the 20th Korean Automatic Control Conf.*, Beijing, China, 10. 2005, pp 660-666.

[7] T. K. Brewer, "Development of a Quadruped robot and Parameterized Stair Climbing

Behavior," *University of Maryland, M. S. Thesis*, 2011.

[8] C. Ko, S. Chen, C. Li, and P. Lin, "Trajectory Planning and Four-leg Coordination for Stair Climbing in a Quadruped Robot," *Proc. of Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Taipei, Taiwan, 2010, pp. 5335-5340.

[9] J. Byun and Y. Choi, "An Efficient Stair Locomotion Method of Quadruped Robot with Mechanism of Insectile Leg," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 10, no. 3, 2015, pp. 395-402.

[10] E. Lee, "A Study on the intelligent walking algorithm of a biped walking robot," *University of Hankyong, M. S. Thesis*, 2004.

[11] Y. Choi, D. Kim, and K. Kim, "GA Based Locomotion Method for Quadruped Robot with Waist Joint to Walk on the Slop," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 8, no. 11, 2013, pp. 1665-1673.

**저자 소개**

**변재오(Jae-oh Byun)**



2014년 경기대학교 전자공학과 졸업 (공학사)  
 2015년 ~ 현재 경기대학교 대학원 전자공학과 석사과정  
 ※ 관심분야 : 로봇틱스, 지능제어

**최윤호(Yoon-ho Choi)**



1980년 연세대학교 전기공학과 졸업 (공학사)  
 1982년 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사)  
 1991년 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사)  
 1993년 ~ 현재 경기대학교 전자공학과 교수.  
 ※ 관심분야 : 비선형 적응제어, 지능제어, ADP 및 최적 제어, 다개체 협업제어, 로봇틱스, 웨이블릿 변환 및 응용

