

곤충형 다리 구조를 갖는 4족 로봇의 효율적인 계단 보행 방법

변재오* · 최윤호**

An Efficient Stair Locomotion Method of Quadruped Robot with Mechanism of Insectile Leg

Jae-Oh Byun* · Yoon-Ho Choi**

요약

본 논문에서는 곤충형 다리 구조를 갖는 4족 로봇의 정적 계단 보행 시 계단과의 충돌 제약이 없는 효율적인 걸음새 궤적 생성 방법을 제안한다. 우선 4족 로봇의 순기구학 및 역기구학 모델을 각기 대수학적 방법과 기하학적 방법으로 유도한다. 제안한 방법에서는 보행 시작 위치에서 수직 상승 후 사인 파형의 계단 보행 궤적을 생성하고, 계단과의 충돌을 피하기 위한 보행 궤적의 계수를 설정한다. 또한 안정적인 계단 보행을 위한 걸음새 순서를 결정한다. 마지막으로, 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제안한 계단 보행 방법의 효용성 및 실제 적용 가능성을 검증한다.

ABSTRACT

In this paper, we propose an efficient gait trajectory generation method for the static stair climbing of a quadruped robot with mechanism of insectile legs, which has no collision with stairs. First, we derive the kinematic and inverse models of a quadruped robot using the algebraic and geometrical methods, respectively. In the proposed method, we generate the stair locomotion trajectory of a sine wave after lifting a leg from the start position, and then determine the coefficient of the generated trajectory to avoid the collision with stairs. In addition, we make the gait sequence for the stable stair locomotion. Finally, we verify the effectiveness and applicability of the proposed stair locomotion method through computer simulations.

키워드

Quadruped Robot, Stair Climbing, Gait Trajectory, Insectile Leg, Wave Gait

4족 로봇, 계단 보행, 걸음새 궤적, 곤충형 다리, 물결 걸음새

1. 서론

최근에 원전 재난 사고 등으로 인해 사람의 접근이 힘든 혐지[1] 또는 위험한 환경[2]에서 작업이 가능한 이동 로봇에 관한 관심이 높아지고 있으며, 이를 위해

이동 로봇의 비평탄 지형의 보행을 위한 이동 로봇의 구조, 걸음새 생성 방법 및 제어에 관한 연구가 활발히 수행되고 있다. 또한 이와 같은 상황에서 이동 로봇이 작업을 수행하기 위해서는 계단과 같은 비평탄 지형에서의 보행이 필수적이므로 다양한 형태의 이동

* 경기대학교 전자공학과(hydeeon@kgu.ac.kr)

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

접수일자 : 2015. 02. 03

심사(수정)일자 : 2015. 03. 13

게재 확정일자 : 2015. 03. 23

로봇의 계단 보행이 발표되었다[3-9]. 대표적인 연구 사례로는 마이크로소프트의 키넥트(kinect)를 사용한 로봇[3], 다리와 바퀴를 동시에 사용한 혼합형 구조인 HIT-HYBTOR[5], 특수한 바퀴를 사용한 IMPASS[6]와 Loper[7], 2 자유도 다리를 갖는 Quattroped[10] 등이 있다. 이들 중에 4족 로봇인 Quattroped는 계단 보행을 위해 2 자유도 다리의 스윙(swing) 궤적을 사용하는데, 생성된 궤적은 특성상 계단과 충돌하지 않지만 전력 소비가 높으며 일반적인 4족 로봇[11]에는 적용할 수 없다. 한편 일반적인 곤충 형태의 구조를 갖는 4족 로봇은 다리 구조상 보행 궤적이 낮아 계단과 충돌할 가능성이 많으며 계단 보행 시 낮은 안정도를 갖는다.

따라서 본 논문에서는 곤충형 다리 구조를 갖는 4족 로봇의 정적 계단 보행 시 계단과의 충돌 제약이 없는 효율적인 걸음새 궤적 생성 방법을 제안한다. 우선 곤충형 다리 구조를 갖는 4족 로봇의 순기구학 및 역기구학 모델을 각기 대수학적 방법과 기하학적 방법을 사용하여 유도한다. 4족 로봇의 계단 보행에서 계단 및 로봇 요소들을 파라미터로 정하고, 이들과 보행 시작 및 종료 위치를 이용하여 계단과 충돌이 없는 걸음새 궤적 생성 방법을 제안하며, 4족 로봇의 안정적인 계단 보행을 위한 걸음새 순서를 결정한다. 마지막으로, 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제안한 계단 보행 방법의 효용성 및 실제 적용 가능성을 검증하고자 한다.

II. 곤충형 다리 구조를 갖는 4족 로봇의 모델링 및 계단 보행 요소 정의

본 논문에서는 3 자유도 곤충형 다리 구조를 갖는 4족 로봇을 고려한다. 우선 4족 로봇의 기구학 모델을 유도하고, 4족 보행 로봇의 보폭, 계단 파라미터, 계단 보행의 제한 조건 등에 대해 서술한다.

2.1 4족 로봇의 기구학 모델

먼저 4족 로봇의 임의의 한 점을 좌표축으로 하는 세계 좌표계를 기준으로 하여 4족 로봇을 모델링한다. 본 논문에서 고려하는 3 자유도 곤충형 다리 구조를 갖는 4족 로봇의 구조는 그림 1과 같다.

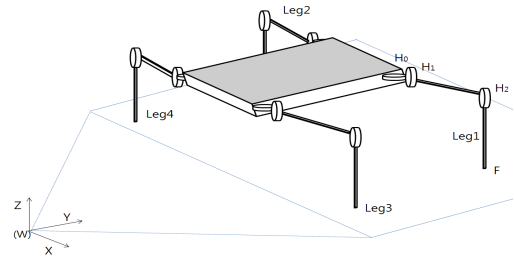


그림 1. 곤충형 다리 구조를 갖는 4족 보행 로봇의 구조

Fig. 1 Structure of a quadruped robot with mechanism of insectile leg

한편, 3 자유도 곤충형 다리 구조를 갖는 4족 로봇 모델을 한 개 다리에 대해 3차원적과 2차원적으로 도시하면 각기 그림 2(a)와 그림 2(b)와 같이 나타낼 수 있다.

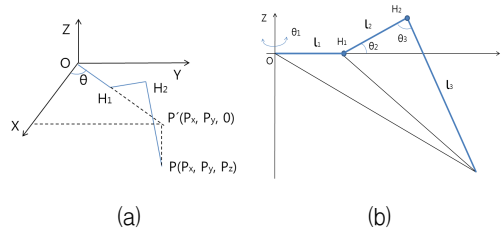


그림 2. 1개 다리의 기하학적 모습: (a) 3차원적 형상, (b) 2차원적 형상

Fig. 2 Geometric shape for one leg: (a) 3D shape (b) 2D shape

먼저 설정된 4족 보행 로봇의 기준 좌표계에서 z 축으로 θ_1 만큼 회전하고, y 축으로 l_1 만큼 평행 이동하면 회전 행렬은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_1 = T_1 = T_{z, \theta_1} T_{0, l_1, 0} = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & -l_1 s_1 \\ s_1 & c_1 & 0 & l_1 c_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서, $c_i = \cos \theta_i$ 이고, $s_i = \sin \theta_i$ 이다. 그리고 x 축으로 $-\theta_2$ 만큼 회전하고, y 축으로 l_2 만큼 평행 이동하면, 회전 행렬은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$A_2 = T_{x,-\theta_2} T_{0,l_2,0} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_2 & s_2 & l_2 c_2 \\ 0 & -s_2 & c_2 & -l_2 s_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

마지막으로, x 축으로 $-\theta_3$ 만큼 회전하고, y 축으로 l_3 만큼 평행 이동하면, 회전 행렬은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_3 = T_{x,-\theta_3} T_{0,l_3,0} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_3 & s_3 & l_3 c_3 \\ 0 & -s_3 & c_3 & -l_3 s_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

위에서 구한 회전 이동 및 평행 이동에 대한 행렬 A_1 , A_2 및 A_3 을 이용하면 변환 행렬은 식 (4), (5)와 같이 구할 수 있다.

$$T_2 = A_1 A_2 = \begin{bmatrix} c_1 - s_1 c_2 - s_1 s_2 & -l_1 s_1 - l_2 s_1 c_2 \\ s_1 & c_1 c_2 & c_1 s_2 & l_1 c_2 + l_2 c_1 c_2 \\ 0 & -s_2 & c_2 & -l_2 s_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$T_3 = A_1 A_2 A_3$$

$$= \begin{bmatrix} c_1 & s_1 s_2 s_3 - s_1 c_2 c_3 & -s_1 c_2 s_3 - s_1 s_2 c_3 & -l_1 s_1 - l_2 s_1 c_2 + l_3 (s_1 s_2 s_3 - s_1 c_2 c_3) \\ s_1 & c_1 c_2 c_3 - c_1 s_2 s_3 & c_1 c_2 s_3 + c_1 s_2 c_3 & l_1 c_1 + l_2 c_1 c_2 + l_3 (c_1 c_2 c_3 - c_1 s_2 s_3) \\ 0 & -c_2 s_3 - s_2 c_3 & c_2 c_3 - s_2 s_3 & -l_2 s_2 - l_3 (c_2 s_3 + s_2 c_3) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

최종적으로, 4족 로봇의 순기구학 모델은 식 (6), (7) 및 (8)과 같이 유도된다.

$$p_x = -l_1 s_1 - l_2 s_1 c_2 - l_3 s_1 c_{(2+3)} \quad (6)$$

$$p_y = l_1 c_1 + l_2 c_1 c_2 + l_3 c_1 c_{(2+3)} \quad (7)$$

$$p_z = -l_2 s_2 - l_3 s_{(2+3)} \quad (8)$$

한편, 역기구학 모델을 구하기 위해 행렬 T 를 다음과 같이 설정한다.

$$T = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = T_3 \quad (9)$$

여기서, 변수 n , o , a 는 각기 수직(normal), 회전(orientation), 접근(approach) 벡터로서 방향 정보를 나타낸다. 식 (4)와 (5)에 대해 역함수를 취하면 각각 다음과 같은 식들을 구할 수 있다.

$$T_1^{-1} T = A_2 A_3 \quad (10)$$

$$T_2^{-1} T = A_3 \quad (11)$$

이제 대수학적 방법을 사용하여 역기구학 모델을 유도한다. 식 (5)와 (9)는 서로 같기 때문에, 식 (1), (10) 및 (11)에서 p_x , p_y , p_z 를 이용하여 각 θ_i 에 대해 풀면, 관절각 θ_1 , θ_2 , θ_3 는 각기 다음과 같이 구해진다.

$$\theta_1 = \tan^{-1}(-p_x/p_y) \quad (13)$$

$$\theta_2 = \tan^{-1}(\sin\theta_2/\cos\theta_2) \quad (14)$$

$$\theta_3 = \cos^{-1}\left(\frac{(p_y c_1 - l_1 - p_x s_1)^2 + p_z^2 - l_2^2 - l_3^2}{2l_2 l_3}\right) \quad (15)$$

여기서 θ_2 를 구할 때 사용한 $\sin\theta_2$ 와 $\sin\theta_3$ 는 각기 식 (16)과 (17)과 같이 주어진다.

$$\sin\theta_2 = \frac{c_2(p_y c_1 - l_1 - p_x s_1) - l_2 - l_3 c_3}{p_z} \quad (16)$$

$$\cos\theta_2 = \frac{\left(\frac{(p_y c_1 - l_1 - p_x s_1) \times (l_2 + l_3 c_3)}{p_z} - l_3 s_3\right)}{\left(p_z + \frac{(p_y c_1 - l_1 - p_x s_1)^2}{p_z}\right)} \quad (17)$$

2.2 계단 보행을 위한 파라미터 설정

본 절에서는 곤충형 다리 구조를 갖는 4족 보행 로봇의 정적 계단 보행을 위한 계단 요소와 로봇 요소들을 설정한다. 우선 그림 3은 4족 로봇의 초기 자세, 로봇 요소 그리고 계단 요소를 나타낸다. 로봇 요소로는 다리 길이 l_3 , 몸체 길이 BL , 보폭 S 및 몸 체적 I_h 가 있으며, 계단 요소로는 계단 너비 W , 계단 높이 H , 계단 경사각 ϕ 및 계단 빗면 I_s 가 있다. 몸체 길이 BL 은 앞 고관절과 뒷 고관절 사이의 거리이며,

경사각 ϕ 는 계단 너비 W 와 계단 높이 H 로 이루어진 계단 빗면의 각도로 다음과 같다.

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{H}{W}\right) \quad (19)$$

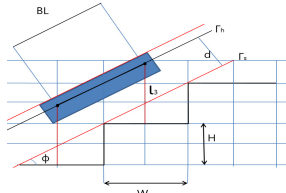


그림 3. 계단에서의 4족 로봇 측면도
Fig. 3 Side view for a quadruped walking robot in the stairs

몸 궤적 Γ_h 는 몸이 움직이는 궤적으로서, 계단 빗면 Γ_s 와 거리 d 만큼 떨어져 평행을 이루고 있는 궤적이라 가정한다. 보폭 S 는 안정된 계단 보행을 위한 중요한 요소로서, 앞다리와 뒷다리 사이에 간섭이 발생하지 않기 위해서 보폭 S 는 몸체 길이 BL 보다 작아야 한다. 또한, 연속적인 정적 보행을 고려하여 아래 계단과 윗 계단에서 발끝의 위치는 동일하게 한다. 따라서 계단 너비 W 와 보폭 S 가 동일해야 하며, 그림 3의 4족 로봇 다리 배열에서 좌우의 고관절 위치가 동일함을 확인할 수 있다. 또한 4족 로봇의 보행은 계단 보행을 고려하여 물결 걸음새(wave gait)가 아니며 계단 보행에서의 낮은 안정도를 증가시키기 위해 로봇의 다리 배치를 사다리꼴로 한다[5]. 로봇의 몸체는 별도의 피치(pitch)와 롤(roll) 운동이 없는 등속도 운동으로 가정한다. 이 때 몸체의 움직임은 계단 너비 W 와 계단 높이 H 로 구성된 계단 경사각 ϕ 에 의해 주어지는 궤도 Γ_s 와 d 만큼 떨어진 평행하는 궤도 Γ_h 를 따라 움직이고 몸체의 무게 중심도 궤도 Γ_H 로 이동한다고 가정한다.

III. 4족 로봇의 계단 보행 알고리즘

본 논문에서는 평지에서의 보행 구조, 정의된 로봇 요소 및 계단 요소를 이용한 곤충형 다리 구조를 갖는 4족 로봇이 계단과 충돌하지 않는 계단 보행 궤적

을 제안한다.

3.1 평지 보행 궤적의 생성

4족 로봇의 계단 보행 궤적 생성 방법을 제안하기 전, 일반적인 평지 보행 궤적을 계단 보행에 적용하기 위해서 평지 보행 궤적 생성 방법을 서술한다.

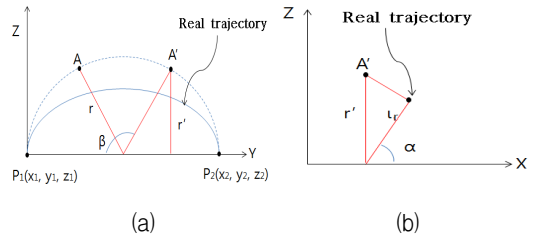


그림 4. 곤충형 다리 구조를 갖는 4족 로봇의 보행 궤적 : (a) 측면도 (b) 정면도
Fig. 4 Walking trajectory of a quadruped robot with mechanism of insectile leg: (a) Side view (b) Front view

그림 4(a)는 점 P_1 에서 점 P_2 까지의 로봇의 발 궤적을 진행 방향 기준으로 측면에서 바라본 그림이다. 이 반구형의 궤적은 $2r$ 만큼의 보폭을 표시한 반경 r 의 궤적이다. 또한 그림 4(b)는 궤적을 정면에서 나타낸 것으로 보행의 실제 궤적이 지면과 이루는 각 α 에 의하여 기울어진 것을 볼 수 있다. 그림 4(a)의 점선은 각 α 가 90° 를 이루는 궤적의 최고점을 나타낸다. 2.2절에서 보폭 S 가 계단 너비 W 와 동일하다고 가정하였으므로, 반경 r 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$r = \frac{S}{2} = \frac{W}{2} \quad (20)$$

그림 4의 요소들을 삼각 함수 공식을 이용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다[12].

$$\begin{aligned} r' &= r \sin \beta \\ l_r &= r' \sin \alpha \\ x_r &= l_r \cos \alpha \\ z_r &= l_r \sin \alpha \end{aligned} \quad (21)$$

여기서 x_r, z_r 는 각 β 의 변화에 대한 x 와 z 값의 변화량이다. 진행 방향 y 를 기준으로 하면 발의 궤적

은 다음과 같이 주어진다[12].

$$\begin{aligned} x &= x_1 + x_r \\ y &= y_1 + r(1 - \cos\beta) \\ z &= z_1 + z_r \end{aligned} \quad (22)$$

따라서 곤충형 다리 구조를 갖는 4족 로봇의 기본적인 평지에서의 걸음새 궤적은 식 (21)과 (22)로 주어진다.

3.2 4족 로봇의 계단 보행 궤적 생성 방법

기존의 관절형 로봇의 계단 보행에서 임의의 높이 $H/2$ 만큼 다리를 수직 상승시킨 후 사인 파형을 이용하여 계단 보행 궤적을 생성한다. 이는 계단 보행의 보행 시작 위치를 높임으로써 보행 시 궤적의 여유 공간을 확보하여 계단과의 충돌을 방지하기 위함이다.

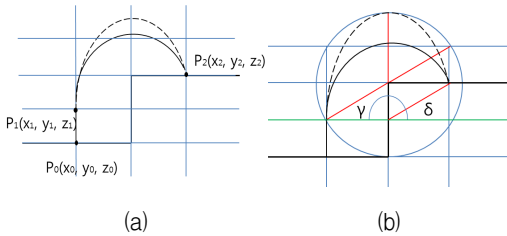


그림 5. 제안하는 계단 보행 궤적 :
(a) 측면도 1 (b) 측면도 2

Fig. 5 The proposed stair walking trajectory :
(a) Side view 1 (b) Side view 2

그림 5(a)는 제안하는 4족 로봇의 발 궤적의 단면도이며, 4족 로봇의 진행 방향은 y 축이고, 높이는 z 축이다. 그림에서 로봇의 발 궤적의 시작 위치는 계단 너비 W 의 중간 지점으로, 보행 종료 지점 P_2 는 계단의 보행 시작 위치 P_0 에서 계단 높이 H 와 보폭 S 를 이용하여 구한다. 점 P_1 은 시작 지점에서 $H/2$ 만큼 위에 위치하므로 점 $P_1(x_1, W/2, H/2)$ 과 점 $P_2(x_2, W+W/2, H)$ 를 구할 수 있다. 즉, 보행 시작 위치 P_0 에서 계단 높이 $1/2$ 만큼 수직 상승하면 P_1 이고, P_1 에서 사인 파형을 그리며 $W/2, H/2$ 만큼 움직이면 보행 종료 위치 P_2 가 된다. 본 논문의 고려 대상인 곤충형 다리 구조를 갖는 4족 로봇의 경

우, 구조상 발 궤적이 그림 5(a)에서 나타난 점선과 같이 기울어서 보행하기 때문에 실선으로 표기된 최대값의 궤적보다 높이가 낮아지므로 궤적 생성 시 주의하여야 한다. 이러한 곤충형 다리 구조를 갖는 4족 로봇의 보행 궤적과 지면과 평행을 이루고 있는 면의 각도를 α 라 하자.

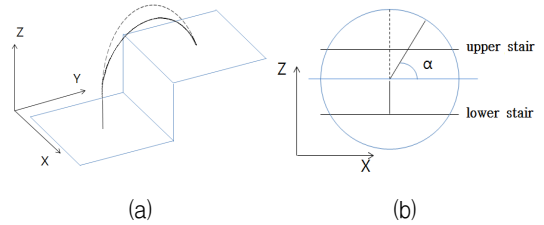


그림 6. 계단과 제안하는 궤적 :
(a) 대각선으로 바라본 그림, (b) 정면도
Fig. 6 The proposed trajectory and stairs :
(a) View seen diagonally, (b) Front view

그림 6(a)와 (b)는 그림 5를 각기 대각선 윗면과 정면에서 바라본 그림이다. 그림에서 점선은 기울어짐이 없는 궤적이고 실선은 기울어짐을 고려한 실제 궤적이다. 그림 6(b)에 나타난 바와 같이, 지면과 평행을 이루는 평면에서 각 α 의 기울기를 갖는 보행 궤적은 원 모양 안에서 움직인다. 그림 4(b)와 6(b)를 비교하면 계단 보행 궤적은 삼각 함수 공식을 통해 유도할 수 있고, 이것은 식 (21)과 (22)을 이용할 수 있음을 의미한다. 또한 계단과의 충돌을 회피하는 동시에 식 (21)과 (22)를 만족하기 위해 계단 보행 궤적은 사인 파형을 사용한다.

한편, 위 사실에 기반하여 제안한 4족 로봇의 계단 보행 궤적이 계단과 충돌 하지 않기 위해서 다음 2가지 조건을 만족해야 한다. 첫째는, 보행 중에 보행 궤적이 계단 높이 H 를 넘기는 것이고, 둘째는, 제안한 사인 파형에서 정해진 윗 계단의 착지 지점까지 파형을 임의의 각도 γ 로 제한하는 것이다. 먼저 계단 보행 궤적에 필요한 각도는 그림 5(b)에 나타내었다. 평각에서 각 δ 를 뺀 각도가 제한각 γ 이며 각 δ 는 계단 너비 W 와 계단 높이 H 를 이용하여 구할 수 있다. 구하고자 하는 각 γ 는 다음과 같다.

$$\gamma = 180 - \delta \quad (23)$$

여기서 $\delta = \tan^{-1}\left(\frac{H/2}{W/2}\right) = \tan^{-1}(H/W)$ 이다.

다음으로 변수 sw 를 결정한다. 변수 sw 는 사인 파형의 스케일링(scaling) 변수로서 보행 궤적의 크기와 밀접한 관계가 있다. 두 가지 조건을 만족하기 위해 변수 sw 를 변수 sw_1 과 변수 sw_2 로 나누고 동시에 조건을 충족하는 값을 변수 sw 로 설정한다.

이제 두 가지 조건을 만족하게끔 식을 변경한다. 먼저 계단 보행 궤적이 계단 높이 H 를 넘게 식을 구성한다. 만약 계단 높이 H 를 넘지 못하면, 계단 보행 중 계단과 부딪치게 된다. 식 (22)에서 z 축에 대한 궤적의 식을 계단 높이 H 로 변형시키면 다음을 얻을 수 있다.

$$\frac{H}{2} + sw_1 \times \sin\gamma_{1st} \times \sin\alpha \times \sin\alpha > H \quad (24)$$

여기서 $\sin\gamma_{1st}$ 는 첫 계단의 지점에서 사인 파형의 값이다. 계단 크기는 이미 결정되어 있으므로 식 (24)에서 조정할 수 있는 값은 각 α 와 변수 sw 이다. 각 α 의 경우 로봇의 구조에서 허용하는 보행하기 쉬운 임의의 값으로 설정한다. 식 (24)를 이용하여 계단과 충돌하지 않는 궤적의 변수 sw_1 를 구한다. 다음은 보행 궤적을 보행 종료 위치 P_2 에 도달시키기 위해 사인 파형의 각도를 각 γ 로 제한한다. 식 (24)를 구한 것과 비슷하게 식 (22)에서 보행 종료 위치 P_2 의 높이를 설정하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{H}{2} + sw_2 \times \sin\gamma_{end} \times \sin\alpha \times \sin\alpha = H \quad (25)$$

여기서 $\sin\gamma_{end}$ 값은 보행 종료 위치에서의 사인 파형의 값이다. 구한 변수 sw_1 과 변수 sw_2 를 비교하여 변수 sw 를 최종적으로 결정한다.

만약, 결정한 변수 sw 가 첫 번째 조건을 만족하지 못하면 그림 7(c)처럼 계단에 부딪치게 되고, 변수 sw 가 너무 높을 경우에는 그림 7(a)처럼 되어 효율적이지 않으며 발끝 좌표를 만족하지 못하기에 적절한 변수 sw 값을 결정해야 한다.

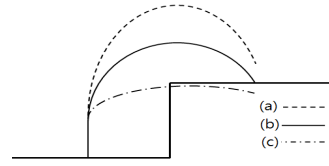


그림 7 변수 sw 에 의한 보행 궤적
Fig. 7. Walking trajectory for variable sw

마지막으로, 정적 보행은 안정도를 유지하기 위해 최소한 3개의 다리가 지면에 닿아 있어야 한다. 평지에서의 보행에 비해 안정도가 감소하는 계단 보행의 경우 더 크게 작용한다. 앞서 보폭 S 와 계단 너비 W 와 동일하다고 가정하였으므로, 계단 보행 시 앞다리와 뒷다리의 충돌을 피하기 위해 로봇의 걸음새는 좌우 앞다리가 한발씩 계단 보행한 후 좌우 뒷다리가 한발씩 움직이는 계단 보행 순서를 결정한다. 따라서 그림 1에서 표기된 다리 번호를 기준으로 1-2-3-4의 순서로 보행을 수행한다.

본 논문에서 제안한 계단 보행 방법을 요약하면, 평지에서의 보행 궤적을 이용하여 보행 시작 지점에서 임의의 높이 $H/2$ 만큼 수직 상승하고 계단 높이와 보행 종료 위치 P_2 를 이용하여 사인 파형의 스케일링 변수 sw 를 구해 계단과 충돌하지 않는 효율적인 계단 보행 궤적을 생성한다. 또한 다리 간의 충돌 회피와 안정도를 고려해 계단 보행 순서를 결정한다.

IV. 시뮬레이션

본 논문에서 제안한 방법의 효율성 검증을 위해 MATLAB을 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 우선, 다리 길이는 각각 $l_1 = 5[mm]$, $l_2 = 100[mm]$, $l_3 = 100[mm]$ 으로 설정하였고, 계단 너비 W 와 계단 높이 H 는 다리 길이 l_2, l_3 의 크기를 기준으로 임의로 각기 계단 너비 $W = 40[mm]$, 계단 높이 $H = 40[mm]$ 로 설정하였다. 또한 지면과 보행 시 4족 로봇의 다리가 이루는 각 α 는 임의로 60° 로 설정하였고, 변수 sw 는 식 (24), (25) 및 (26)에 의해 45° 로 설정하였다.

그림 8은 (a)부터 4족 로봇의 1주기 계단 보행 운동에 대한 시뮬레이션 결과를 순차적으로 보여준다.

시뮬레이션 결과로부터, 지정된 크기의 계단에서의 정적 계단 보행이 계단과의 충돌 없이 이루어짐을 확인할 수 있었다.

시 다리 길이에 관계없이 정적 계단 보행을 수행함을 확인할 수 있었다.

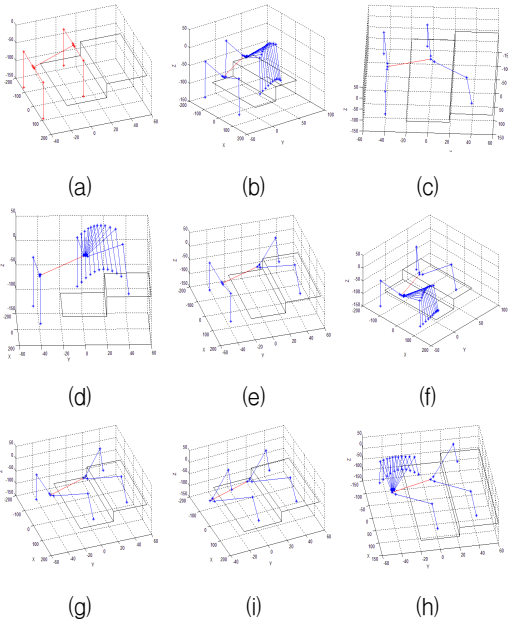


그림 8. 4족 로봇의 계단 1주기 보행 결과 : (a) 초기 상태, (b) 1번 다리 계단 보행 중, (c) 1번 다리 계단 보행 완료, (d) 2번 다리 계단 보행 중, (e) 2번 다리 계단 보행 완료, (f) 3번 다리 계단 보행 중, (g) 3번 다리 계단 보행 완료, (h) 4번 다리 계단 보행 중, (i) 4번 다리 계단 보행 완료

Fig. 8 Result of 1 periodic stair locomotion for a quadruped robot:

- (a) Initial state, (b) Stair locomotion of leg 1
- (c) Completed stair locomotion of leg 1,
- (d) Stair locomotion of leg 2 (e) Completed stair locomotion of leg 2 (f) Stair locomotion of leg 3 (g) Completed stair locomotion of leg 3,
- (h) Stair locomotion of leg 4, (i) Completed stair locomotion of leg 4

또한, 계단과 다리 길이 비율을 달리하여 제안한 계단 보행 궤적이 계단과 충돌 없이 정적 계단 보행이 이루어짐을 확인하기 위해 다리 길이 l_2 와 l_3 만 각각 25 [mm], 150 [mm]으로 변경하여 추가 시뮬레이션을 수행하였으며, 시뮬레이션 결과는 각기 그림 9와 10과 같다. 그림의 결과들로부터, 제안한 방법에 의해 생성된 계단 보행 궤적은 스윙 궤적처럼 계단 보행

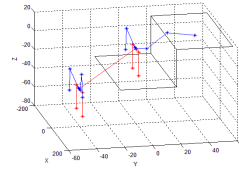


그림 9. 다리 길이 $l_2 = l_3 = 25$ [mm] 일 때의 계단 보행
Fig. 9 Stair locomotion for $l_2 = l_3 = 25$ [mm]

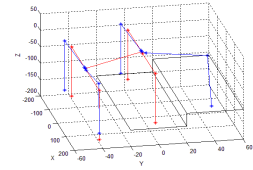


그림 10. 다리 길이 $l_2 = l_3 = 150$ [mm] 일 때의 계단 보행
Fig. 10 Stair locomotion for $l_2 = l_3 = 150$ [mm]

V. 결론

본 논문에서는 곤충형 다리 구조를 갖는 4족 보행 로봇의 계단 보행 걸음새 생성 방법을 제안하였다. 우선 4족 로봇의 기구학 모델을 유도하였고, 계단 보행을 위한 로봇 요소와 계단 요소를 정의하였으며, 계단 보행 궤적 생성을 위한 요소들을 가정하였다. 제안한 방법에서는 정의한 요소들을 이용하여 다리 길이, 다리와 지면과의 보행 각도, 계단 크기, 계단 보행에서의 보행 시작 및 종료 위치 등과 계단과의 상호 작용을 기하학적 방법을 사용하여 해석하였고, 이를 기반으로 4족 로봇의 계단 보행 걸음새 궤적을 생성하였다. 또한, 생성한 궤적이 계단과의 충돌을 회피하기 위한 변수를 구하였으며, 4족 로봇의 안정적인 계단 보행을 위한 걸음새 순서를 결정하였다. 마지막으로, 시뮬레이션을 통해 제안한 방법에 의해 생성된 계단 보행 궤적이 계단과의 충돌 없이 보행함을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 2015학년도 경기대학교 대학원 연구원장학생 장학금 지원에 의하여 수행되었음.

참고 문헌

- [1] Y. Bae and J. Park, "A Study on Obstacle Avoid Method and Synchronization of multi

- chaotic robot for Robot Formation Control based on Chaotic Theory," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 5, no. 5, 2010, pp. 534-540.
- [2] Y. Moon, Y. Seo, N. Ko, S. Roh, and J. Park, "Robot Design for Fire Detection and Data Processing," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 5, no. 1, 2010, pp. 31-36.
- [3] T. K. Brewer, "Development of a Quadruped robot and Parameterized Stair Climbing Behavior," Master's Thesis, *University of Maryland*, 2011.
- [4] M. Takahashi, K. Yoneda, and S. Hirose, "Rough Terrain Locomotion of a Leg-wheel Hybrid Quadruped Robot," *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Orlando, U.S.A., May 2006, pp. 1090-1095.
- [5] 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*, Niagara Falls, Canada, July 2005, pp. 2067-2071.
- [6] J. B. Jeans and D. Hong, "IMPASS: Intelligent Mobility Platform with Active Spoke System," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Kobe, Japan, May 2009, pp. 1605-1606.
- [7] S. D. Herbert, A Drenner and N Papanikolopoulos, "Loper: A Quadruped-Hybrid Stair Climbing Robot," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Pasadena, U.S.A., May 2008, pp. 799-804.
- [8] M. Takahashi, K. Yoneda, and S. Hirose, "Quasi-Static Analysis of a Leg-wheel Hybrid Vehicle for Enhancing Stair Climbing Ability," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Sanya, China, Dec 2007, pp. 1090-1095.
- [9] E. Z. Moore, D. Campbell, F. Grimminger, and M. Buehler, "Reliable Stair Climbing in the Simple Hexapod 'RHex'," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Washington, DC, U.S.A., May 2002, pp. 2222-2227.
- [10] 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, Oct 2010, pp. 5335-5340.
- [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.
- [12] Y. Ahn, "A Study on Quadruped Walking Robot with Mechanism of Insectile Leg," Ph.D's Thesis, *Chung-Ang University*, 2001.

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