

# 허리 관절을 갖는 4족 로봇의 경사면 보행을 위한 걸음새 생성 방법

## Gait Generation Method for a Quadruped Robot with a Waist Joint to Walk on the Slope

김국화\* · 최윤호\*\* · 박진배\*\*

Guk Hwa Kim, Yoon Ho Choi\* and Jin Bae Park

\*경기대학교 전자공학과

\*\*연세대학교 전기전자공학과

### 요 약

본 논문에서는 4족 로봇의 허리 관절을 이용하여 효율적인 경사면 보행을 위한 걸음새 생성 방법을 제안한다. 허리 관절을 갖는 4족 로봇의 기구학적 모델은 Denavit-Hartenberg 표현 방법과 대수적 방법을 이용하여 유도하고, 다리 이동 순서는 물결 걸음새(wave gait)를 사용한다. 한편 제안한 걸음새 생성 방법에서는 기구적 제한과 보폭의 감소를 완화하기 위해 경사면의 경사도에 따라 적절한 상체 및 하체의 허리 관절각을 결정하고, 에너지 안정도 여유(energy stability margin)를 증가시키기 위해 도달 영역(workspace)의 탐색을 통해 발끝 위치를 결정한다. 마지막으로, 컴퓨터 모의 실험을 통해 본 논문에서 제안한 알고리즘의 효율성 및 실제 적용 가능성을 검증한다.

**키워드 :** 4족 로봇, 경사면 보행, 허리 관절, 물결 걸음새, 에너지 안정도 여유

### Abstract

In this paper, we propose a gait generation method for a quadruped robot to walk efficiently on the slope, which uses the waist joint of a quadruped robot. We derive the kinematic model of a quadruped robot with waist joint using the Denavit-Hartenberg representation method and the algebraic method. In addition, the gaits are generated based on the wave gait. In the proposed gait generation method, first in order to alleviate the mechanical restriction and the reduction of the stride, we determine the appropriate waist joint angle according to the slope degree, and then decide the location of the tiptoe of a quadruped robot by exploring the workspace. Finally, through computer simulations, we verify the effectiveness and applicability of the proposed method.

**Key Words :** Quadruped robot, walking on the slope, waist joint, wave gait, energy stability margin

## 1. 서 론

로봇의 응용 분야는 산업용, 의료용, 탐사용, 군사용 등과 같은 많은 응용 분야가 있고 현재 다양한 형태의 로봇이 연구되고 있다. 특히 위험하고 사람이 접근하기 힘든 곳에서 일을 수행하는 로봇에 관한 연구가 활발히 수행되고 있으며 이러한 로봇은 다양한 환경에서 험난한 지형을 이동 및 탐사하기 때문에 지형에 따른 로봇 보행에 관한 연구가 필요하다. 지형에 따른 로봇의 보행 연구는 평탄 지면 보행과 비평탄 지면 보행으로 나

눌 수 있고, 평탄 지면 보행의 경우 지면에 대한 외란이 없기 때문에 비교적 쉽게 걸음새 생성이 가능하다 [1][2]. 이와 달리 비평탄 지면 보행의 경우 지면에 대한 외란이 발생하기 때문에 걸음새 생성을 위해 고려해야 할 부분이 많다. 비평탄 지면 보행에 관한 연구는 경사면, 계단, 장애물이 있는 지형 등이 있으며 비교적 외란이 적은 경사면에서의 보행에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

한편, 로봇의 경사면 보행을 위한 걸음새 생성에 관한 연구는 일반적으로 보행의 안정성이 보장되는 거미와 같은 구조를 가진 다족 로봇이 연구되어 왔다. 특히, 6족이나 8족과 같은 다족 로봇의 연구가 활발히 이루어져 왔고 보행을 하면서 몸체를 진후로 이동하는 걸음새가 주를 이루었다[3]-[5]. 6족 로봇의 경우, 안정도 관점에서 우수한 장점을 가지나 기구적 구조가 복잡하고 많은 관절의 제어를 필요로 하는 단점을 가진다. 한편, 4족 로봇은 6족 로봇에 비해 관절수가 적어 보다 간단한 구조를 갖는 장점을 가진다. 하지만 6족 로봇에 비해

접수일자: 2012년 6월 25일

심사(수정)일자: 2012년 9월 19일

게재확정일자: 2012년 9월 24일

† 교신 저자

본 연구는 2012학년도 경기대학교 대학원 연구장학생 장학금 지원에 의하여 수행 되었음.

안정도가 떨어지는 단점을 가지기 때문에 안정도를 증가시키는 걸음새 연구가 주로 수행되었다. 그 예로, 4족 로봇의 모든 다리가 지지하고 있는 상태에서 몸체를 좌우로 이동하여 무게중심의 이동가능 범위를 넓혀 안정 여유도를 증가시키는 간헐적 기는 걸음새(intermittent crawl gait)[6]가 있고, 또한 몸체를 좌우로 이동하면서 동시에 몸체를 기울여 이동하는 E-스웨이(sway), Y-스웨이 걸음새[7]등이 있다. 이러한 연구들의 경우 모두 단일 몸체를 가지기 때문에 몸체의 움직임이 유연하지 못하여 걸음새 생성에 제한성을 가진다. 이러한 단점을 보완하기 위해 허리 관절을 갖는 4족 로봇의 걸음새가 연구되었고, 기존의 허리 관절이 없는 4족 로봇 보다 보폭과 안정성 면에서 우수함을 증명하였다[8]. 하지만 허리 관절의 유연성이 떨어지고 뒷다리의 보폭이 감소하는 단점을 가지며, 보폭의 감소는 감소된 보폭만큼 속도에 비례하여 속도의 감소를 야기한다.

따라서 본 논문에서는 보폭의 감소를 줄이고 안정도도 증가시키기 위한 허리 관절을 이용한 4족 로봇의 효율적인 경사면 보행을 위한 걸음새 생성 방법을 제안한다. 허리 관절을 갖는 4족 로봇의 기구학적 모델은 Denavit-Hartenberg(D-H) 표현 방법과 대수적 방법을 이용하여 유도하며, 다리 이동 순서는 물결 걸음새(wave gait)를 사용한다. 한편, 제안한 걸음새 생성 방법에서는 기구적 제한과 보폭의 감소를 완화하기 위해 우선 경사면의 경사도에 따라 적절한 상체 및 하체의 허리 관절각을 결정하고, 에너지 안정 여유(Energy Stability Margin: ESM)를 증가시키기 위해 도달 영역(workspace)의 탐색을 통해 발끝 위치를 결정한다. 마지막으로, 컴퓨터 모의 실험을 통해 본 논문에서 제안한 알고리즘의 효용성 및 실제 적용 가능성을 검증한다.

## 2. 기구학 모델의 유도

본 절에서는 모의 실험을 위해 4족 로봇의 기구학 모델을 유도하며 4족 로봇의 1개 다리는 3 자유도(Degree of Freedom: DOF)를 갖는다. 어깨는 강아지나 고양이와 같이 2 DOF를 가지며 무릎은 1 DOF를 갖는다. 또한 허리에 1 DOF를 가지므로 4족 로봇의 전체 자유도는 총 13 DOF이며, 구조는 그림 1과 같다.

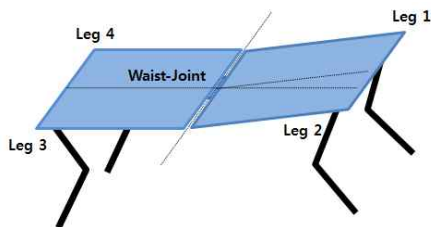


그림 1. 허리 관절을 갖는 4족 로봇의 구조

Fig. 1. Structure of a quadruped robot with a waist joint

### 2.1 순기구학 모델의 유도

순기구학 모델 유도는 임의의 한 점을 원점으로 하는 세계 좌표계를 기준으로 D-H 표현 방법을 이용하여

허리 관절을 포함하는 1개 다리의 모델을 유도한다. 한편, 4족 로봇의 모델링을 위한 변수와 D-H 표현 방법의 좌표축 설정은 그림 2와 같다.

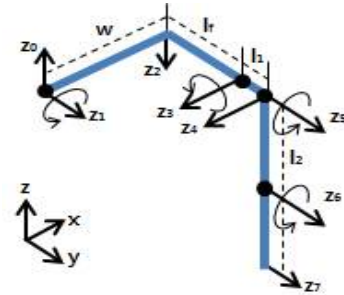


그림 2. D-H 표현 방법의 좌표축 정의

Fig. 2. Definition of coordinates for D-H representation

또한, D-H 표현 방법의 매개변수 설정은 표 1과 같으며, 표현 방법에서 사용되는 각 매개변수가 나타내는 값은 다음과 같다.

- 허리 길이:  $w$
- 허리 관절각:  $\theta_1$
- 어깨 고정 길이:  $l_f$
- 어깨, 허벅지, 정강이 길이:  $l_1, l_2, l_3$
- 어깨, 무릎의 관절각:  $\theta_2, \theta_3, \theta_4$

표 1. D-H 표현 방법의 매개변수

Table 1. Parameters for D-H representation

관절 $i$	$a$	$\alpha$	$d$	$\theta$
1	0	$90^\circ$	0	0
2	$w$	$90^\circ$	0	$\theta_1$
3	$l_f$	$-90^\circ$	0	$90^\circ$
4	$l_1$	$0^\circ$	0	$\theta_2$
5	0	$90^\circ$	0	$90^\circ$
6	$l_2$	$0^\circ$	0	$\theta_3$
7	$l_3$	$0^\circ$	0	$\theta_4$

$Z_2, Z_4$ 는 구조적으로 각각  $90^\circ$ 의 고정된 값을 가지며, 표 1의 변수들을 이용하여 변환 행렬을 얻을 수 있고 모든 변환 행렬을 곱하면 최종 변환 행렬  ${}^0T_7$ 을 구할 수 있다. 최종 변환 행렬  ${}^0T_7$ 는 식 (1)과 같다.

$$T_0^7 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = A_1 A_2 A_3 A_4 A_5 A_6 A_7 \quad (1)$$

여기서,  $A_n$ 은 각각의  $n$ 번째 관절에 대한 변환 행렬이며,  $p_x, p_y, p_z$ 는 위치를 나타내고 각기 식 (2)와 같은 값들을 가진다.

$$p_x = w c_1 + c_4 l_3 (c_1 s_3 + c_2 c_3 s_1) + l_3 s_3 (c_3 c_1 - c_2 s_3 s_1) + c_1 l_2 s_3 - l_1 s_2 s_1 + c_2 c_3 l_3 s_1$$

$$p_y = l_3 s_2 s_3 s_4 - c_2 l_1 - c_3 l_2 s_2 - c_3 c_4 l_3 s_3 - l_f \quad (2)$$

$$p_z = w s_1 + c_4 l_3 (s_3 s_1 - c_2 c_3 c_4) + l_3 s_4 (c_3 s_1 + c_2 c_1 s_3) + c_1 l_1 s_2 + l_2 s_3 s_1 - c_2 c_3 c_1 l_2$$

이 때,  $c_i = \cos \theta_i$ ,  $s_i = \sin \theta_i$  이다.

## 2.2 역기구학 모델의 유도

역기구학 모델을 유도하는 방법에는 대수적 방법과 기하학적 방법이 있고, 간단한 구조의 로봇은 기하학적 방법으로 쉽게 구할 수 있지만 구조가 복잡한 로봇은 기하학적 방법으로 역기구학 모델을 유도하기 어렵다. 본 논문에서 유도하고자 하는 허리 관절을 포함하는 1개의 다리는 4 DOF의 다소 복잡한 구조를 가지므로 대수적 방법으로 역기구학 모델을 유도한다. 대수적 방법은 순기구학의 결과로부터 관절각을 구하는 방법으로서, 2.1절에서 유도된 순기구학의 전체 변환 행렬  $T_0^7$ 을 식 (1)과 같이 나타내고, 각 관절의 변환 행렬의 역행렬을 이용하여 역기구학을 유도한다.

허리 관절각  $\theta_1$ 을 구하기 위해 역행렬을 곱하여  $A_2^{-1} A_1^{-1} T_0^7 = A_3 A_4 A_5 A_6 A_7$ 의 형태로 행렬을 변형하고 변형한 행렬의 (1, 3)의 요소로부터  $a_x c_1 + a_z s_1 = 0$ 의 수식을 얻을 수 있다. 이 수식으로부터 허리 관절각  $\theta_1$ 은 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left( -\frac{a_x}{a_z} \right) \quad (3)$$

또한, 어깨 관절각  $\theta_2$ 를 구하기 위해 역행렬을 곱해  $A_4^{-1} A_3^{-1} A_2^{-1} A_1^{-1} T_0^7 = A_5 A_6 A_7$ 의 형태로 행렬을 변형하고 변형한 행렬의 (1, 1)의 요소로부터 어깨 관절각  $\theta_2$ 는 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left( \frac{a_x s_1 - a_z c_1}{a_y} \right) \quad (4)$$

또한, 어깨 관절각  $\theta_3$ 와 무릎 관절각  $\theta_4$ 을 구하기 위해  $A_6^{-1} A_5^{-1} A_4^{-1} A_3^{-1} A_2^{-1} A_1^{-1} T_0^7 = A_7$ 의 형태로 행렬을 변형한다. 변형한 행렬의 (1, 3)의 요소로부터 다른 하나의 어깨 관절각  $\theta_3$ 를 식 (5)와 같이 구할 수 있다.

$$\theta_3 = \tan^{-1} \left( \frac{c_2 (a_z c_1 - a_z s_1) + a_y s_1}{a_z s_1 + a_x c_1} \right) \quad (5)$$

한편, 변형한 행렬의 (1, 1)과 (2, 1)의 요소로부터 얻은 수식을 정리하면 무릎 관절각  $\theta_4$ 을 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

$$\theta_4 = \tan^{-1} \left\{ \frac{c_3 (-n_x c_1 - n_z s_1) - s_3 (c_2 c_1 n_z - c_2 n_x s_1 + n_y s_2)}{c_3 (n_y s_2 + n_z c_2 c_1 - n_x c_2 s_1) - s_3 (n_z s_1 + n_x c_1)} \right\} \quad (6)$$

## 3. 4족 로봇의 경사면 보행 알고리즘

본 절에서는 경사각 증가에 따른 기구적 구속 조건과 보폭의 감소를 완화하면서 ESM을 증가시키는 경사면 보행 알고리즘을 제안한다. 경사면 보행 알고리즘은 두 개의 알고리즘 즉, 상체 및 하체의 허리 관절각 결정 알고리즘과 발끝 위치 선정 알고리즘으로 구성된다.

### 3.1 에너지 안정도 여유

보행 알고리즘의 생성은 여러 가지 고려해야 할 부분이 많다. 안정도 해석, 보행 자세, 변수 설정, 다리 움직임 순서 등 여러 가지 요소가 있고 그 중 안정도 해석 방법은 가장 중요한 요소 중 하나이다. 현재 안정도 해석 방법으로는 안정도 여유(Stability Margin: SM) 해석 방법[9], 세로 안정 여유도(Longitudinal Stability Margin: LSM) 해석 방법[10], ESM 해석 방법[11] 등이 있다. SM 해석 방법과 LSM 해석 방법은 무게 중심을 평면에 투영시켜 안정도를 판별하는 해석 방법이고, ESM 해석 방법은 위치 에너지를 고려하여 안정도를 해석하는 방법이다. 한편, 경사면 보행은 4족 로봇의 지지 다리 높이가 지지면에 따라 달라지고 이에 따른 위치 에너지도 달라지므로, 본 논문에서는 위치 에너지를 고려하는 ESM 해석 방법을 이용하여 보행 알고리즘을 생성한다.

ESM은 로봇이 지지 다각형의 한 변을 축으로 넘어지기 위해 필요한 위치 에너지의 최소값으로 정의되며, 식 (7)과 같다 [11].

$$ESM = mgh = mg(-x \sin \theta + h \cos \theta \cos \phi + \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2}} (hx \sin \theta + (x^2 + y^2) \cos \theta) \sin \phi + x \sin \theta - h \cos \theta) \quad (7)$$

여기서  $m$ 은 질량,  $g$ 는 중력 가속도,  $x$ 와  $y$ 는 지지 다리의 한 변을  $edge\ i$ 라 하고 무게 중심  $G$ 로부터  $edge\ i$ 까지 가장 가까운 점을  $P$ 라 할 때 점  $P$ 의 좌표이고,  $\phi$ 는 점  $P$ 에서 무게 중심  $G$ 까지의 벡터  $\overrightarrow{PG}$ 와 점  $P$ 에서 최대 고점  $H$ 까지의 벡터  $\overrightarrow{PH}$  사이의 사잇각이다. 윗 식으로부터 ESM은 지지 다리의 위치와 경사각  $\theta$ 와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

### 3.2 경사면 보행 알고리즘

현재까지 연구된 4족 로봇의 경사면 보행 알고리즘은 보행 자세에 따라 크게 3 가지로 나눌 수 있다. 경사면과 상관없이 4족 로봇의 몸체를 경사면과 평행하게 보행하는 자세[6], 수평면과 평행하게 보행하는 자세[7], 허리 관절을 가져 상체는 경사면과 평행하게 하고 하체는 수평면과 평행하게 보행하는 자세[12]가 있다. 수평면과 평행하게 보행하는 자세는 기구적 제한으로 경사각이 커지면 보행이 불가능하고, 4족 로봇의 몸체를 경사면과 평행하게 보행하는 자세는 안정성이 떨어지는 단점을 가진다. 한편 허리 관절을 가져 상체는 경사면

과 평행하게 하고 하체는 수평면과 평행하게 보행하는 자세는 경사면과 평행하게 보행하는 자세보다 더 높은 안정도를 가질 뿐 아니라 기구적 제약을 완화할 수 있었다. 그러나 이 보행 자세는 앞다리의 보폭은 보장되거나 뒷다리의 보폭은 감소하는 단점을 가진다.

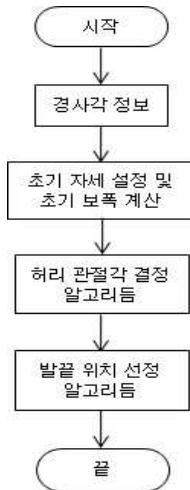


그림 3. 제안한 4족 로봇의 경사면 보행 알고리즘

Fig. 3. The proposed algorithm for a quadruped robot to walk on the slope

따라서 본 논문에서는 경사각 증가에 따른 기구적 구속조건을 완화하면서 보폭 감소를 줄이고 ESM을 증가시키는 경사면 보행 알고리즘을 제안하며, 제안한 4족 로봇의 경사면 보행 알고리즘은 그림 3과 같다. 본 논문에서 제안한 알고리즘은 경사각 정보를 받아 4족 로봇의 초기 자세에서 초기 보폭을 계산하고 원하는 목표 보폭에 의해 허리 관절각을 결정하여 보행 자세가 결정되면 4족 로봇의 도달 영역 내에서 ESM을 탐색을 통해 발끝 위치를 선정하여 걸음새를 생성한다.

3.2.1 상체 및 하체 허리 관절각 결정

본 절에서는 경사면의 증가에도 계속적 보행이 가능하고 보폭의 감소도 개선하는 허리 관절각 결정 알고리즘을 제안한다. 4족 로봇의 초기 자세는 그림 4의 파선과 같이 수평면과 평행한 값을 가지고 다리 이동 궤적은  $r$ 을 지름으로 하는 반원이다.

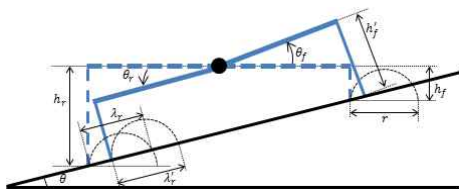


그림 4. 허리 관절각 결정을 위한 변수 정의  
Fig. 4. Definition of parameters for determining the waist joint's angle

그림 4에서  $\theta$ 는 지면의 경사각,  $r$ 은 다리 이동 궤적의 지름,  $h_r$ 와  $h_f$ 는 각기 초기 자세에서 뒷다리 높이와

앞다리 높이,  $\lambda_r$ 와  $\lambda_f$ 는 각기 뒷다리와 앞다리의 보폭을 나타낸다. 초기 자세의 뒷다리 높이  $h_r$ 은 4족 로봇의 최대 다리 길이  $h_{max}$ 와 동일하며, 앞다리 높이  $h_f$ 는 뒷다리 높이  $h_r$ 에 의해 결정된다. 또한 뒷다리 목표 보폭과 앞다리 목표 보폭은 각각  $\lambda'_r$ 와  $\lambda'_f$ 로 정의한다. 하체 허리 관절각과 상체 허리 관절각은 각각  $\theta_r$ 과  $\theta_f$ 로 정의하고 상체 및 하체 허리 관절각 결정 후 뒷다리 높이와 앞다리 높이는  $h'_r$ 와  $h'_f$ 로 정의한다. 이 때, 상체 및 하체 허리 관절각은 ESM의 감소를 고려하여  $0^\circ \sim \theta^\circ$  사이의 값으로 제한하며 허리 관절각 결정 알고리즘은 그림 5와 같다.

허리 관절각 결정 알고리즘은 경사각과 초기 자세의 정보로부터 기구적 제한을 받는지 여부를 확인한다. 한편, 기구적 제한은 식 (8)과 같다.

$$\theta = \tan^{-1} \frac{h_f - h_{min}}{l} \tag{8}$$

여기서  $h_{min}$ 은 다리의 최소 길이,  $l$ 은 몸체 전체의 길이이다. 기구적 제한을 받을 경우, 앞다리 목표 보폭  $\lambda'_f$ 을 초기 보폭  $\lambda_f$ 보다 큰 값으로 설정하고 기구적 제한을 받지 않을 경우, 원하는 목표 보폭으로 설정한다. 목표 보폭을 설정한 후, 식 (9)에 의해 상체 및 하체 허리 관절각을 결정한다.

$$\theta_f = \theta - \cos^{-1} \left( \frac{\lambda'_f}{r} \right), \theta_r = \theta - \cos^{-1} \left( \frac{\lambda'_r}{r} \right) \tag{9}$$

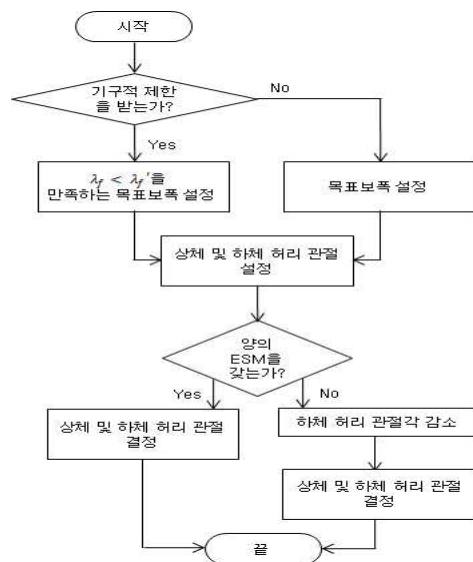


그림 5. 제안한 허리 관절각 결정 알고리즘  
Fig. 5. The proposed algorithm for determining the waist joint's angle

허리 관절각 설정 후, ESM을 확인하여 양(positive)의 ESM을 가질 경우 앞서 결정한 상체 및 하체 허리 관절각을 결정하고, ESM이 음(negative)의 값을 가질 경우 ESM을 증가시키기 위해 하체 허리 관절각을 감

소시킨 후 상체 및 하체 허리 관절각을 결정한다.

각 요소들의 관계는 식 (10)과 같다.

$$\lambda = \frac{R}{\beta} \tag{10}$$

**3.2.2 ESM을 고려한 발끝 위치 선정 및 이동**

기존의 경사면 걸음새 연구의 경우, 불연속 걸음새 (discontinuous gait)에 대한 연구가 주로 수행되었으며, 불연속 걸음새는 네 다리가 모두 지지하고 있는 상태에서 4족 로봇 몸체를 이동하는 걸음새 생성 방법이다. 이러한 경우, 한 주기의 걸음새를 생성하는데 많은 단계가 필요한 단점을 가진다. 이러한 단점에도 불구하고 불연속 걸음새를 적용하는 이유는 안정도 측면에서 큰 장점을 가지기 때문이다. 본 논문에서는 허리 관절을 사용하여 안정도를 증가시킬 수 있기 때문에 걸음새 생성 단계가 간단한 연속 걸음새를 적용하며 그림 6과 같이 한 주기를 기준으로 5 단계로 나누고, 4족 로봇의 다리 이동 순서는 정의된 다리 번호에 따라 3→2→4→1 순서로 이동하며 한 다리의 착지와 동시에 다음 이동 다리의 도달 영역에 대한 탐색이 동시에 이루어진다.

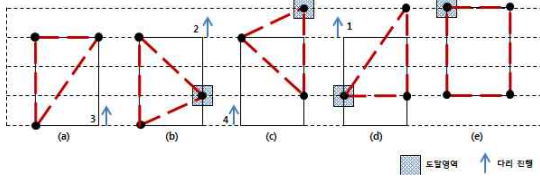


그림 6. 다리 이동 순서 및 도달 영역

Fig. 6. Moving sequence and workspace of legs

한편, 걸음새의 생성 단계별 과정은 다음과 같다.

- 단계 1: 다리 3의 도달 영역에 대한 ESM 탐색 및 이동
- 단계 2: 다리 3의 착지 및 다리 2의 도달 영역에 대한 ESM 탐색과 이동
- 단계 3: 다리 2의 착지 및 다리 4의 도달 영역에 대한 ESM 탐색과 이동, 몸체 이동
- 단계 4: 다리 4의 착지 및 다리 1의 도달 영역에 대한 ESM 탐색과 이동
- 단계 5: 다리 1의 착지

여기서, 도달 영역의 정의를 위한 기하학적 표현은 그림 7과 같고,

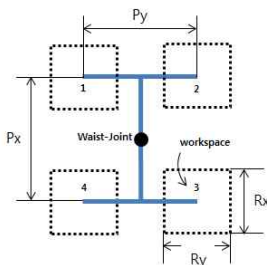
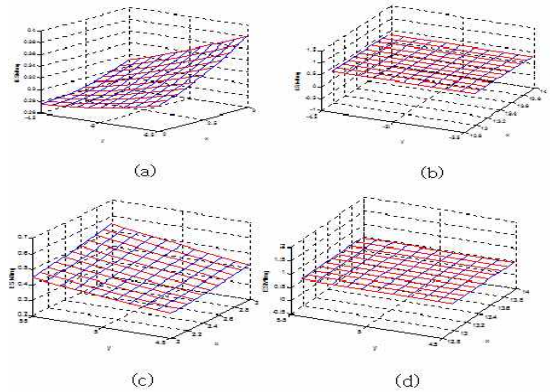


그림 7. 도달 영역 정의를 위한 기하학적 표현

Fig. 7. Geometric representation for the definition of workspace

여기서  $\lambda$ 는 보폭,  $\beta$ 는 디딤울,  $R$ 은 도달 영역을 나타낸다. 한편, 도달 영역은  $R \leq P$ 의 조건을 고려하여 설정한다[13]. 본 논문에서는  $\beta=3/4$ 로 정의하며 네 다리의 도달 영역의 범위는 동일하다. 한 다리의 도달 영역에 대한 ESM 계산 시 4족 로봇의 무게 중심은 변하지 않으며 도달 영역에 대한 위치 좌표를 1/10의 간격으로 입력받아 식 (7)에 의해 계산한다. 이에 대한 ESM 탐색 결과는 그림 8과 같고,  $x$ 축과  $y$ 축은 도달 영역에 대한 위치 좌표이며  $z$ 축은 ESM을 나타낸다.



(a) 다리 3, (b) 다리 2, (c) 다리 4, (d) 다리 1

그림 8. 각 다리의 도달 영역에 대한 ESM 탐색

Fig. 8. Exploration of ESM for workspace of each leg

단계 1은 다리 3의 도달 영역에 대한 ESM 탐색이 수행되고, 단계 2는 단계 1에서 탐색한 다리 3의 도달 영역에서 ESM이 높은 위치의 착지 및 다음 이동 다리인 다리 2의 도달 영역에 대한 ESM 탐색이 수행된다. 이 때, 그림 8(b)와 같이 다리 2의 이동에서 착지의 위치에 상관없이 ESM이 동일함을 알 수 있다. 이것은 4족 로봇의 ESM이 이동하는 다리가 이루는 지지선이 아닌 지지하고 있는 다리 1과 다리 3의 지지선을 결정하기 때문이다. 이 경우, 다음 단계 3의 몸체 이동에 유리한 위치로 다리 위치를 결정한다. 이러한 과정은 몸체를 좌우로 움직이지 않고 발끝의 디딤 위치 선택만으로 걸음새를 생성할 수 있어 몸체의 불필요한 움직임을 줄이는 장점을 가진다. 단계 3은 다리 2의 착지 및 다리 4의 도달 영역에 대한 ESM 탐색과 몸체의 이동이 수행된다. 단계 4는 다리 4의 착지 및 다리 1의 도달 영역에 대한 ESM 탐색이 수행되는데 이 단계 역시 그림 8(d)와 같이 도달 영역에 대한 ESM 변화가 없다. 따라서 다음 단계 5의 몸체이동에 유리한 위치로 다리 위치를 결정한다. 마지막으로, 단계 5는 다리 1의 착지를 수행하며, 계속적으로 보행할 경우 단계 5는 단계 1과 함께 수행된다.

**4. 모의 실험 및 결과 고찰**

본 절에서는 제안한 알고리즘의 효율성 및 실제 적용 가능성을 검증하기 위해 MathWorks 사의 MATLAB 을 이용하여 모의 실험을 수행하였다. 본 모의 실험에 사용한 4족 로봇의 제원은 표 2와 같다.

표 2. 모의 실험을 위한 4족 로봇의 제원  
Table 2. Dimension of a quadruped robot for simulation

	$w$	$l_f$	$l_1$	$l_2$	$l_3$
길이[mm]	100	50	20	100	100

우선, 허리 관절각 결정 알고리즘의 효율성을 검증하기 위해 경사각 증가에 따른 4족 로봇의 보행 자세에 대한 보폭과 일정한 경사각(15°)에서의 ESM을 비교하였다. 4족 로봇의 보행 자세는 수평면과 평행하게 보행하는 보행 자세(data 1), 경사면과 평행하게 보행하는 보행 자세(data 2), 본 논문에서 제안한 보행 자세를 비교하였으며 앞다리의 목표 보폭을 38[mm]로 설정하였고(data 3), 뒷다리는 양의 ESM을 갖는 범위 내에서 설정하였다(data 4). 경사각 증가에 따른 4족 로봇의 보행 자세에 대한 보폭의 결과는 그림 9와 같다.

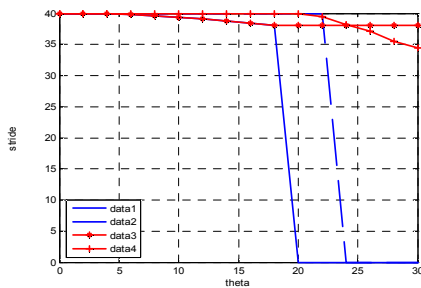


그림 9. 4족 로봇의 보행 자세에 대한 보폭  
Fig. 9. Stride for walking posture of a quadruped robot

그림 9에서 수평면과 평행하게 보행하는 보행 자세(data 1)는 경사각이 20°보다 커지면 기구적 구속 조건으로 인해 더 이상 보행이 불가능하다. 또한 경사면과 평행하게 보행하는 보행 자세(data 2)는 경사각이 24°보다 커질 경우 안정도 문제로 인해 더 이상 보행이 불가능하다. 한편, 본 논문에서 제안한 보행 자세(data 3, 4)는 경사각이 증가하더라도 계속적 보행이 가능함을 볼 수 있다.

여기서, 보행 자세들의 안정도를 비교하기 위해 모든 자세들이 보행 가능한 경사각 15°에서 각 자세에 대한 ESM을 비교하였으며 각 보행 자세에 따른 ESM의 결과는 표 3과 같다.

표 3. 경사각 15°에서의 EMS  
Table 3. ESM at the slope angle of 15°

보행자세	data 1	data 2	data 3,4
ESM	2.36	1.78	1.85

표 3의 결과로부터, 수평면과 평행하게 보행하는 보행

자세(data 1)의 ESM이 가장 높다. 하지만 앞서 서술한 바와 같이 이 자세는 기구적 구속조건으로 인해 보행이 불가능하다. 한편, 경사면과 평행하게 보행하는 보행 자세(data 2)와 본 논문에서 제안한 보행 자세(data 3, 4)의 ESM은 0.07 차이로 비슷한 값을 가지나, 본 논문에서 제안한 보행 방법은 초기 보행 자세 결정 후 발끝 위치 선정 알고리즘을 수행하여 ESM이 증가한다. 따라서 안정도 측면에서 본 논문에서 제안한 보행 방법이 더 높음을 알 수 있다. 이에 대한 결과는 그림 10과 같다.

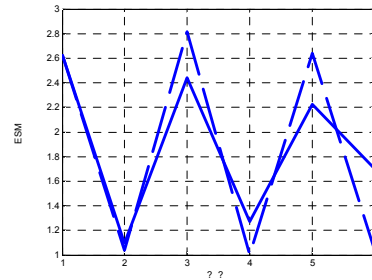


그림 10. 경사각 15°에서 걸음새 단계에 따른 ESM  
Fig. 10. ESM for gait step at the slope angle of 15°

그림 10에서 파선은 발끝 위치 선정 알고리즘을 적용하지 않은 걸음새 단계에 따른 ESM 결과이고, 실선은 발끝 위치 선정 알고리즘을 적용한 걸음새 단계에 따른 EMS 결과이다. 단계 1부터 5는 각각, 걸음새 생성 단계 1부터 5까지의 ESM 결과이며, 단계 6은 한 주기 걸음새 생성을 종료하고 계속적 보행을 위한 걸음새 단계 1을 나타낸다. 그림 10의 결과로부터 발끝 위치 선정 알고리즘을 적용하지 않은 걸음새의 ESM은 단계 2와 단계 4에서 0에 가까운 값을 가져 보행의 안정성이 다소 낮은 것을 볼 수 있으며, 이에 비해 본 논문에서 제안한 발끝 위치 선정 알고리즘을 적용한 걸음새의 ESM은 평이한 추이를 보이며 모든 걸음새 단계에서 안정한 것을 확인할 수 있다. 또한 걸음새의 ESM 평균 값을 비교해 보면, 발끝 위치 선정 알고리즘을 적용하지 않은 걸음새는 1.85, 발끝 위치 선정 알고리즘을 적용한 걸음새는 1.90로 발끝 위치 선정 알고리즘을 적용한 걸음새의 ESM이 더 높은 것을 확인할 수 있다.

한편, 기존 보행 자세들은 보행 불가능한 경사각에서의 발끝 위치 선정 알고리즘의 효율성을 알아보기 위해 경사각이 25°에서 모의 실험을 하였으며, 그 결과는 그림 11과 같다.

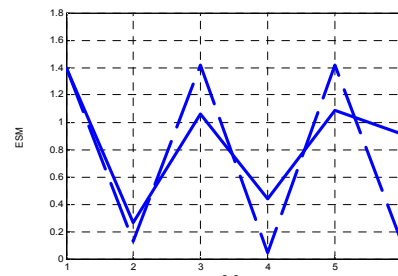


그림 11. 경사각 25°에서 각 걸음새 단계에 따른 ESM  
Fig. 11. ESM for each gait step at the slope angle of 25°

각 걸음새에 대한 ESM 평균값을 비교해 보면, 발끝 위치 선정 알고리즘을 적용하지 않은 걸음새는 0.75, 발끝 위치 선정 알고리즘을 적용한 걸음새는 0.86으로 발끝 위치 선정 알고리즘을 적용한 걸음새의 ESM이 더 높은 것을 확인할 수 있다. 본 논문에서 제안한 방법의 경우 경사각이 15°일 때는 ESM을 2.7% 향상하고 경사각이 25°일 때는 8.7% 향상함을 알 수 있다.

### 5. 결 론

본 논문에서는 ESM을 기반으로 허리 관절을 갖는 4족 로봇의 효율적인 경사면 걸음새 생성 방법을 제안하였다. 허리 관절을 갖는 4족 로봇의 기구학적 모델은 D-H 표현 방법과 대수적 방법을 이용하여 유도하였다. 제안한 걸음새 생성 방법은 허리 관절각 결정 알고리즘과 발끝 위치 선정 알고리즘으로 구성된다. 우선, 허리 관절각 결정 알고리즘을 통해 지면의 경사각이 증가하더라도 4족 로봇의 지속적인 보행이 가능하고 원하는 보폭을 보장할 수 있도록 하였고, 발끝 위치 선정 알고리즘을 통해 ESM을 증가시켰다. 또한, 본 논문에서 제안한 알고리즘의 효율성을 검증하기 위해 모의 실험을 수행하였으며 모의 실험은 경사면에 따라 기존의 보행 자세로 보행할 때의 보폭과 본 논문에서 제안한 보행 자세로 보행할 때의 보폭을 비교하여 본 논문에서 제안한 보행 자세로 보행할 때 보폭이 개선되는 것을 확인할 수 있었다. 또한 발끝 위치 선정 알고리즘을 적용하지 않은 4족 로봇 보행의 ESM과 발끝 위치 선정 알고리즘을 적용한 4족 로봇 보행의 ESM 비교에서 발끝 위치 선정 알고리즘을 적용하였을 때 ESM이 더 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

### References

[1] K. S. Seo, J. S. Choi and Y. W. Cho, "Automatic Gait Generation for Quadruped Robot Using GA with an Enhancement of Performance," *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, vol. 18, no. 4, pp. 555-561, 2008.

[2] H. S. Jung, G. H. Kim and Y. H. Choi "Gait Generation for Quadruped Robots Using Body Sways," *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, vol. 22, no. 3, pp. 305-311, 2012.

[3] P. C. Lin, H. Komsuoglu, and D. E. Koditschek, "A Leg Configuration Measurement System for Full-body Pose Estimates in Hexapod Robot," *IEEE Trans. on Robotics*, vol. 21, no. 3, pp. 411-422, 2005.

[4] P. V. Nagy and W. L. Whittaker, "Energy-based Stability Measures for Reliable Locomotion of Statically Stable Walkers: Theory and Application," *Journal of Robotics Research*, vol. 13, no. 3, pp. 272-287, 1994.

[5] S. Song and B. Choi, "The Optimally Stable Ranges of 2n-legged Wave Gaits," *IEEE Trans.*

*on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 20, Issue 4, pp. 888-902, 1990.

[6] H. Tsukagoshi, S. Hirots and K. Yoneda, "Maneuvering Operation of the Quadruped Walking Robot on the Slope," *Proc. of IROS*, pp. 863-869, 1996.

[7] F. T. Cheng, H. L. Lee and E. Orin, "Increasing the Locomotive Stability Margin of Multilegged Vehicles," *Proc. of ICRA*, pp. 1708-1714, 1999.

[8] S. H. Park and Y. J. Lee, "Discontinuous Zigzag Gait Planning of a Quadruped Walking Robot with a Waist-joint," *Journal of Advanced Robotics*, vol. 21, no. 1-2, pp. 1474-1479, 2007.

[9] D. Pongas, M. Mistry and S. Schaal, "A Robust Quadruped Walking Gait for Traversing Rough Terrain," *IEEE International Conf. on Robotics and Automation*, vol. 1, no. 3, pp. 132-141, 1985.

[10] P. G. Santos and M. A. Jimenez, "Generation of discontinuous gaits for quadruped walking vehicles," *Journal of Robotic Systems*, vol. 12, no. 9, pp. 599-611, 1995.

[11] D. Messuri and C. Klein, "Automatic Body Regulation for Maintaining Stability of a Legged Vehicle During Rough-terrain Locomotion," *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol. 1, no. 3, pp. 132-141, 1985.

[12] S. H. Pack and Y. J. Lee, "Discontinuous Zigzag Gait Control to Increase the Stability During Walking in Slope," *Journal of Institute of Control, Robotics and System*, vol. 15, no. 9, pp. 959-966, 2009.

[13] P. G. Santos, E. Garcia and J. Estremer, *Quadrupedal Locomotion*, Springer, 2006.

### 저 자 소 개



**김국화(Guk Hwa Kim)**

2011년 : 경기대학교 전자공학과(공학사)  
 2011년~현재 : 동 대학원 전자공학과 석사과정  
 관심분야 : 로봇틱스, 지능제어  
 E-mail : gh\_kim@kgu.ac.kr

**최윤호(Yoon Ho Choi)**

한국지능시스템학회 논문지, 제 22권 제 3호 참조

**박진배(Jin Bae Park)**

한국지능시스템학회 논문지, 제 22권 제 3호 참조