

# 허리 관절을 갖는 4족 로봇의 효율적인 걸음새 생성 방법

## An Efficient Gait Generation Method for Quadruped Robot with Waist Joints

김동섭\* · 최윤호\*

Dong Sub Kim and Yoon Ho Choi\*

\*경기대학교 전자공학과

† Department of Electronic Engineering, Kyonggi University

### 요 약

본 논문에서는 4족 로봇의 허리 관절을 이용하여 보행시 발생하는 몸체의 흔들림을 최소화하는 걸음새 방법을 제안한다. 제안한 방법에서는 4족 로봇의 기하학적 모델을 이용하여 몸체의 기울기에 따른 몸체의 힙(hip) 좌표를 계산하고, 이를 2 자유도(Degree of Freedom: DOF)를 갖는 허리 관절을 이용하여 4족 로봇의 무게중심(Center of Gravity: CoG)을 이동시킴으로써 몸체의 흔들림을 최소화한다. 이 때, 로봇의 걸음새는 물결 걸음새(wave gait)를 이용하여 보행한다. 마지막으로, 4족 보행 로봇의 모의 실험을 통해 기존 방법과 비교함으로써 본 논문에서 제안한 방법의 효율성을 검증한다.

**키워드** : CoG(Center of Gravity), 허리 관절(Waist joint), 4족 로봇(Quadruped robot), 보행(Locomotion), 스웨이(Sway)

### Abstract

In this paper, we propose a gait generation method for a quadruped robot using the waist joints which can minimize the body shake during the locomotion. In this proposed method, we first calculate the hip coordinate of tilted body using the geometrical model of a quadruped robot, and then move the CoG(Center of Gravity) of a quadruped robot using 2-DOF waist joints to minimize the body shake. In addition, the gait of a quadruped robot is generated based on the wave gait method. Finally, we verify the effectiveness of the proposed method by comparing with that of the previous method through the computer simulations.

**Key Words** : CoG, Waist joint, Quadruped robot, Locomotion, Sway

## 1. 서 론

다족 보행 로봇은 바퀴 로봇에 비해 비평탄 지형이나 계단 보행 등 험지 보행에서 이동이 용이하고 안정적인 보행이 가능하여 현재까지 많은 연구들이 수행되고 있다. 다족 보행 로봇의 경우 다리의 개수에 따라 2족, 4족, 6족 로봇 등으로 분류되며, 이 중 4족 로봇은 2족 로봇에 비해 안정적인 보행이 가능하고 보행 속도가 빠르므로 산업용, 군사용 등으로 활발한 연구가 수행되고 있다.

한편, 4족 로봇의 걸음새는 로봇의 보행 속도 및 안정도를 결정하는 중요한 요소 중 하나이며, 걸음새는 다리 이동

순서, 몸체 이동 궤적 및 몸체 자세 제어 등에 의해 결정된다. 현재까지 4족 로봇의 걸음새 연구는 상기의 파라미터를 최적으로 하는 효율적인 걸음새에 대해 연구되어 왔으며, 이중에서도 보행 안정도를 증가시키기 위한 연구가 활발히 진행되었다[1-7]. 또한, 몸체 움직임을 고려하여 안정도를 증진시키는 방법에 대한 연구들이 진행되었으며, 몸체를 움직여 무게중심(Center of Gravity: CoG) 범위를 증가시키는 간헐적 기는 걸음새(intermittent crawl gait)[8], 몸체를 좌우로 움직여 안정도를 증가시키는 E-스웨이(sway)[9] 등이 있다. 한편, 보행 시 발생하는 흔들림이 커질수록 4족 로봇은 불안정한 상태에 가까워지지는 단점을 가진다. 이를 보완하기 위해 다리 높이에 따른 흔들림에 대한 안정도 해석 방법을 정의하고 몸체의 스웨이를 이용하여 몸체 흔들림을 최소화하는 방법에 대해 연구되었다[10].

하지만, 기존 연구들은 단일 몸체를 이용하여 자세를 제어하기 때문에, 자세를 변경하려면 몸체 전체를 움직여야 하는 단점을 가진다. 이러한 단점을 개선하기 위해 허리 관절을 도입하여 걸음새를 생성하는 방법이 연구되었으며[11], 허리 관절을 이용하여 안정도를 증가시키는 연구들도 수행되었다[12][13]. 허리 관절을 갖는 4족 로봇은 기존 단일 로봇보다 보행 자세를 다양하게 변경하여 유연한 움직임이 가능하며, 보행 중 허리 관절을 움직임으로써 보폭을 증가시킬 수 있다. 또한 허리 관절을 이용하여 CoG를 이동시킬 수 있으므로 기

접수일자: 2013년 4월 5일

심사(수정)일자: 2013년 6월 28일

게재확정일자: 2013년 7월 8일

† Corresponding author

본 연구는 2013학년도 경기대학교 대학원 연구장학생활 학금 지원에 의하여 수행되었음.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

존 로봇보다 효율적인 자세 제어를 할 수 있는 장점을 가진다. 하지만, 기존 허리 관절에 관한 연구들 역시 기존의 안정도 판별법에 국한되어 있으며, 이는 4족 로봇의 보행시 몸체 흔들림에 따른 움직임을 고려하지 않았다.

따라서, 본 논문에서는 4족 로봇의 보행 시 발생하는 몸체 흔들림에 의해 발생하는 CoG의 변화량을 고려한 허리 관절각 결정 방법을 이용하여 몸체 흔들림을 최소화하는 걸음새 방법을 제안한다. 제안한 방법에서는 4족 로봇의 기하학적 모델을 이용하여 몸체의 기울기에 따른 몸체의 CoG 변화량을 계산하고, 이를 2 자유도(Degree of Freedom: DOF)의 허리 관절을 이용하여 4족 로봇의 CoG를 이동시킴으로써 몸체의 흔들림을 최소화한다. 한편, 4족 로봇의 걸음새는 물결 걸음새(wave gait)를 기반으로 생성한다. 마지막으로, 본 논문에서 제안한 방법의 효율성을 검증하기 위하여 모의 실험을 통해 기존 방법[10]에 의해 생성된 걸음새와 비교 및 분석한다.

## 2. 허리 관절을 갖는 4족 로봇의 모델링

4족 로봇의 몸체 모델을 설정하기 위해서 그림 1과 같이 몸체의 기준 좌표계를 세계 좌표계로 정의한다.

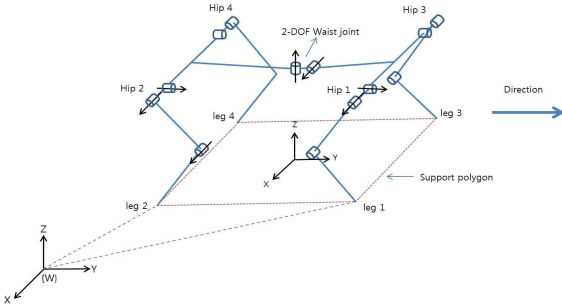


그림 1. 허리 관절을 갖는 4족 로봇의 좌표계  
Fig. 1. Coordinate frame of a quadruped robot with waist joints.

한편, 몸체의 평행 이동 및 회전 운동을 적용하여 4족 로봇의 기구학(kinematics) 모델을 유도하며, 본 논문에서 모델링 대상인 4족 로봇의 제원은 표 1과 같다.

표 1. 4족 로봇의 제원  
Table 1. Dimension of quadruped robot

	Body	Shoulder		Leg	
	$w_1$	$w_2$	$l_1$	$l_2$	$l_3$
Length (mm)	150	40	5	100	100

### 2.1 로봇의 순기구학 모델

본 논문에서는 3 자유도의 다리와 2 자유도의 허리 관절을 갖는 4족 로봇을 모델링한다. 우선, 기구학적 해석을 용이하게 하기 위하여 허리 관절을 중심으로 몸체의 모델을 상·하체로 나누어 정의한다. 이 때, 허리 관절을 중심으로  $x$  축과 평행한 축으로 회전하는 허리 관절과 1, 3번 다리를

포함하는 몸체를 상체로 정의하고,  $z$  축과 평행한 축으로 회전하는 허리 관절과 2, 4번 다리를 포함하는 몸체를 하체로 정의한다.

그림 2는 D-H(Denavit-Hartenberg) 표현 방법을 사용하기 위해 모델의 좌표축과 변수를 설정한 그림이다.

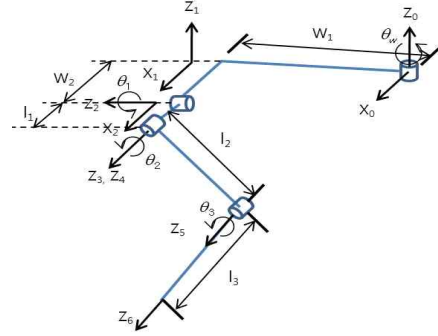


그림 2. D-H 표현 방법의 좌표축 정의  
Fig. 2. Definition of coordinates for D-H representation.

한편, 그림 2를 이용하여 D-H 매개변수를 설정할 수 있으며, 매개변수는 표 2와 같다.

표 2. D-H 표현 방법의 매개변수  
Table 2. Parameters for D-H representation

Joint $i$	$a_i$	$\alpha_i$	$d_i$	$\theta_i$
1	$w_1$	$0^\circ$	0	$\theta_w$
2	$w_2$	$90^\circ$	0	$90^\circ$
3	$l_1$	$0^\circ$	0	$\theta_1$
4	0	$90^\circ$	0	$90^\circ$
5	$l_2$	$0^\circ$	0	$\theta_2$
6	$l_3$	$0^\circ$	0	$\theta_3$

표의 변수들을 이용하여 관절  $i$ 에 대한 변환 행렬  $A_i$ 를 구할 수 있으며, 이를 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_i = \begin{bmatrix} c_i & -\alpha_i s_i & s \alpha_i s_i & a_i c_i \\ s_i & \alpha_i c_i & -s \alpha_i s_i & a_i s_i \\ 0 & s \alpha_i & \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서,  $c_i = \cos \theta_i, s_i = \sin \theta_i$  이며,  $\alpha_i = \cos \alpha_i, s \alpha_i = \sin \alpha_i$  이다. 한편, 모든 관절의 변환행렬을 곱하면 최종 변환 행렬을 구할 수 있다. 6개의 관절에 대한 최종 변환 행렬  $T_0^6$ 는 식 (2)와 같다.

$$T_0^6 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = A_1 A_2 A_3 A_4 A_5 A_6 \quad (2)$$

여기서,  $[p_x, p_y, p_z]$ 는 순기구학으로 유도된 최종 발끝 위치이

며,  $[n, o, a]$ 는 로봇의 회전(orientation) 벡터이다. 한편, 4족 로봇의 발끝 위치는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 p_x &= l_3 c_3 (c_w s_2 + c_2 s_1 s_w) - w_2 s_w - w_1 c_w + l_3 s_3 (c_2 c_w - s_1 s_2 s_w) \\
 &\quad - l_1 c_1 s_w + l_2 c_w s_2 + l_2 c_2 s_1 s_w \\
 p_y &= w_2 c_w - w_1 s_w + l_3 c_3 (s_2 s_w - c_2 c_w s_1) + l_3 s_3 (c_2 s_w + c_w s_1 s_2) \\
 &\quad + l_1 c_1 c_w + l_2 s_2 s_w - l_2 c_2 c_w s_1 \\
 p_z &= l_1 s_1 + l_2 c_1 c_2 + l_3 c_1 c_2 c_3 - l_3 c_1 s_2 s_3
 \end{aligned} \tag{3}$$

상기의 과정을 통해 구해진 상체의 변환 행렬과 하체의 변환 행렬을 이용하여 최종적으로 2 DOF의 허리 관절을 갖는 4족 로봇을 모델링한다.

**2.2 역기구학 모델의 유도**

본 논문에서는 변환 행렬의 역행렬을 이용하여 계산하는 대수적 방법으로 역기구학 모델을 유도한다. 식 (2)에서 유도된 순기구학의 전체 변환 행렬  $T_0^6$  에서 각 관절의 변환 행렬의 역행렬을 곱하여 관절각  $\theta_i$  를 유도한다.

우선,  $A_2^{-1} A_1^{-1} T_0^6 = A_3 A_4 A_5 A_6$ 의 형태로 행렬을 변형하고 변형한 행렬의 (1, 3)의 요소로부터  $a_x c_w + a_y s_w = 0$ 의 수식을 얻을 수 있다. 이 수식으로부터 허리 관절각  $\theta_w$ 는 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

$$\theta_w = \tan^{-1} \left( -\frac{a_x}{a_y} \right) \tag{4}$$

또한,  $A_3^{-1} A_2^{-1} A_1^{-1} T_0^6 = A_4 A_5 A_6$ 의 형태로 변형한 행렬의 (1, 1)의 요소로부터  $\theta_1$ 는 식 (5)와 같이 구할 수 있다.

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left( \frac{a_x s_w - a_y c_w}{a_z} \right) \tag{5}$$

다시  $A_6^{-1} A_5^{-1} A_4^{-1} A_3^{-1} A_2^{-1} A_1^{-1} T_0^6 = A_6$ 의 형태로 행렬을 변형한 후, (1, 3)의 요소로부터  $\theta_2$ 를 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left( -\frac{(a_x s_1 s_w - a_y s_1 c_w + a_z c_1)}{a_x c_w + a_y s_w} \right) \tag{6}$$

한편, 변형한 행렬의 (1, 1)과 (2, 1)의 요소로부터 얻은 수식을 정리하면  $\theta_3$ 을 식 (7)과 같이 구할 수 있다.

$$\theta_3 = \tan^{-1} \left( \frac{n_x (c_w c_2 - s_1 s_2 s_w) + n_y (c_2 s_w - c_w s_1 s_2) + n_z c_1 s_2}{n_x (c_w s_2 + c_2 s_1 s_w) + n_y (s_2 s_w - c_w s_1 c_2) + n_z c_1 c_2} \right) \tag{7}$$

식 (1)~(7)은 4족 로봇 하체의 한 개 다리 모델에 대한 관절각을 나타낸다. 하지만, 로봇 하체의 반대편 다리도 동일한 구조를 가지므로, 기구학 해석은 동일하게 나타낼 수 있다. 또한, 상체 다리에 대한 기구학 모델은 첫 번째 D-H 매개변수가 달라지며, 상기의 방법을 통해 4족 로봇의 상체에 대한 기구학 모델을 유도할 수 있다[13].

**3. 허리 관절을 이용한 걸음새 생성 방법**

본 논문에서는 허리 관절을 이용하여 보행시 몸체 흔들림을 최소화하는 걸음새 방법을 제안한다. 우선, 기울기 변화에 따른 CoG의 변화량  $\Delta CoG$ 를 계산한 후, 이를 허리 관절각과  $\Delta CoG$ 의 관계를 이용하여 흔들림에 의한  $\Delta CoG$  값을 허리 관절각으로 보상한다. 또한, 이와 같이 결정된 허리 관절각을 4족 로봇의 보행에 적용하여 최종적으로 허리 관절을 이용하여 보행하는 방법을 제안한다.

**3.1 물결 걸음새를 이용한 4족 로봇의 보행**

본 논문에서는 4족 로봇의 보행을 위해 물결 걸음새 방법[14]을 이용한다. 물결 걸음새는 다리 이동 순서가 최대 안정 여유도를 갖는 걸음새이며 정적 걸음새에서 가장 효율적인 걸음새이다.

그림 3은 4족 로봇의 다리 이동 순서를 나타내며, 다리 이동 순서는 (1→4→3→2)의 순서로 진행된다.

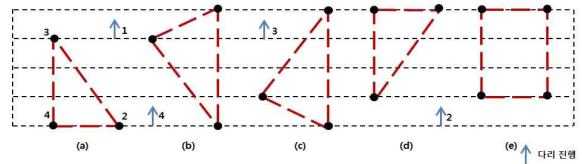


그림 3. 4족 로봇의 다리 이동 순서  
Fig. 3. Moving sequence of quadruped robot.

또한 본 논문에서의 걸음새는 4족 로봇이 한주기에 3/4의 디듀티(duty ratio)를 갖는 연속 걸음새(continuous gait)를 사용하며, 몸체의 중심 이동은 안정적인 걸음새를 위하여 다리 이동과 동시에 움직인다.

**3.2 기울기 변화에 따른 허리 관절각 결정 방법**

**3.2.1 기울기 변화에 따른 CoG 변화폭 결정**

4족 로봇이 보행할 때, 몸체는 발을 댄 방향으로 기울어지게 되며 몸체의 CoG 또한 기울어진 방향으로 이동한다. 몸체가 기울어짐에 따라 4족 로봇은 흔들림이 발생하며, 4족 로봇의 흔들림은 보행의 불안정함을 가져오는 단점을 가진다. 따라서 이를 개선하기 위해서는 먼저 4족 로봇의 흔들림에 대한 특성을 분석할 필요가 있다.

그림 4는 한 다리가 움직이면서 발생하는 흔들림에 대한 기하학적 모델이며, 그림에서 다리 이동 상태에서의 몸체는 다리를 댄 방향으로 떨어지면서 기울어지는 것을 알 수 있다.

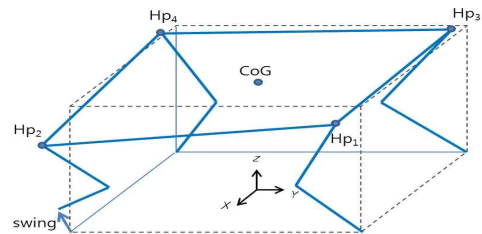


그림 4. 보행에 따른 4족 로봇의 기울어진 몸체  
Fig. 4. Tilted body of quadruped robot according to walking.

위 그림에 대한 기하학적 모델을 해석하기 위하여 각각의 파라미터를 설정하면 그림 5와 같이 나타낼 수 있으며, 몸체의 흔들림을 롤(roll), 피치(pitch) 기울기로 나타낸 파라미터를 적용한 그림이다.

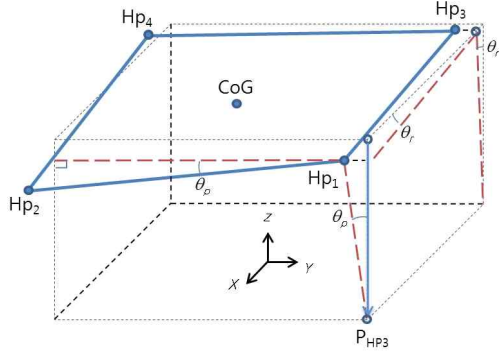


그림 5. 기울어진 몸체에 대한 파라미터 정의  
Fig. 5. Definition of parameters for tilted body.

그림에서  $\theta_r$ 와  $\theta_p$ 는 각기 롤, 피치의 각도를 나타내며, 점선으로 표시된 직육면체 평면은 로봇이 흔들리기 이전의 위치를 나타낸다.

그림 6은 육면체의 오른쪽  $xz$  평면에서 본 로봇의 기하학적 모델을 나타낸다.

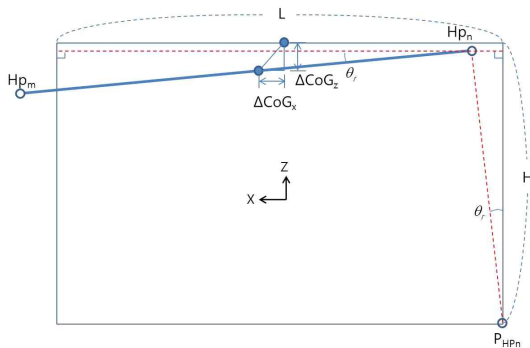


그림 6.  $xz$  평면에서 본 기울어진 몸체에 대한 파라미터 정의

Fig. 6. Definition of parameters for tilted body viewed from  $xz$  plane.

이 때, 흔들리기 이전의  $n$ 번째 힙(hip)에서 투영된 위치  $P_{Hp_n}$ 에서  $\theta_r$ 만큼  $y$  축으로 회전한 행렬을  $R_{\theta_r}^y$ ,  $\theta_p$ 만큼  $x$  축으로 회전한 행렬을  $R_{\theta_p}^x$ 로 정의하면, 기울어진 반대 방향의 힙 좌표 행렬  $Hp_n$ 은 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Hp_n = P_{Hp_n} R_{\theta_r}^y R_{\theta_p}^x T_H^z \quad (8)$$

여기서,  $Hp_n$ 은 해당 힙 좌표의  $x, y, z$  좌표로 구성된 행렬이며,  $Hp_n = [Hp_x \ Hp_y \ Hp_z \ 1]^T$ 로 나타낼 수 있다. 한편,  $P_{Hp_n}$ 은 투영된 위치 좌표의 행렬이며, 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{Hp_n} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & P_x \\ 0 & 1 & 0 & P_y \\ 0 & 0 & 1 & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

또한,  $T_H^z$ 는  $z$  축 평행 이동 행렬이며,  $T_H^z = [0 \ 0 \ H \ 1]^T$ 로 나타낼 수 있다. 여기서  $H$ 는 로봇의 초기 몸체 높이이다. 또한, 각 축의 회전 행렬  $R_{\theta_r}^x, R_{\theta_p}^y, R_{\theta_z}^z$ 은 식 (10)과 같이 정의한다.

$$R_{\theta_r}^x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{\theta} & -s_{\theta} & 0 \\ 0 & s_{\theta} & c_{\theta} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, R_{\theta_p}^y = \begin{bmatrix} c_{\theta} & 0 & s_{\theta} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -s_{\theta} & 0 & c_{\theta} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, R_{\theta_z}^z = \begin{bmatrix} c_{\theta} & -s_{\theta} & 0 & 0 \\ s_{\theta} & c_{\theta} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

한편,  $Hp_n$ 의 좌표를 이용하여 기울어진 방향의 힙 좌표 행렬  $Hp_m$ 을 식 (11)과 같이 구할 수 있다.

$$Hp_m = Hp_n R_{\theta_r}^y R_{\theta_p}^x T_L^z \quad (11)$$

여기서,  $Hp_m$ 은  $Hp_n$ 과 같은 행렬의 형태를 가진다. 위 과정을 통해 구한  $Hp_n$ 과  $Hp_m$ 의 중심 좌표를 이용하면 기울어진 몸체의 CoG를 구할 수 있다. 또한, 흔들리기 이전의 CoG와의 비교를 통해 기울어진 각도에 따른 CoG의 이동 폭  $\Delta CoG$ 을 계산할 수 있으며, 본 논문에서는 이를 허리 관절을 이용한 몸체 CoG 이동 방법에 적용하여 4족 로봇의 걸음새를 생성한다.

### 3.2.2 허리 관절을 이용한 몸체 CoG 이동 방법

본 논문에서는 효율적인 로봇의 몸체 움직임을 구현하기 위해 허리 관절을 이용한 CoG 이동 방법을 제안한다.

우선, 허리 관절을 기준으로 상체 허리 각도와 하체 허리 각도는 서로 동일한 각도로 움직인다고 가정한다. 그림 7은  $z$  축을 중심으로 회전하는 허리 관절에 의한 힙 좌표의 변화를 나타낸다.

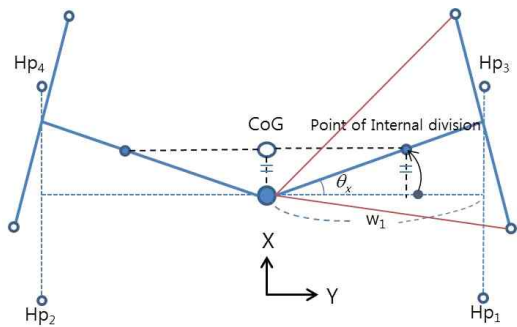


그림 7. 허리 관절에 의한 CoG의  $x$  좌표 변화  
Fig. 7. Variation of  $x$  axis coordination of CoG by waist joint.

그림에서  $Hp_1$ 과  $Hp_3$ , 그리고 허리 관절을 하나의 삼각형으로 가정하면, 삼각형의 특성을 이용하여 내분점을 구할 수 있다. 한편, 반대편 힙의 경우에도 같은 방법으로 구할 수 있으므로 결국 허리 관절에 의해 이동된 CoG는 상·하체의

내분점의 중점과 같다. 이를 수식으로 나타내면 식 (12)와 같이 된다.

$$\Delta CoG_x = \frac{2}{3} w_1 \sin \theta_x \quad (12)$$

여기서,  $\Delta CoG_x$ 는 4족 로봇에 허리 관절 움직임에 따른 CoG의  $x$  좌표 변화량이며,  $\theta_x$ 는  $z$  축 허리 관절에서의 회전각이다. 또한  $w_1$ 는 몸체의 전체 길이의 1/2에 해당하는 길이이다. 식 (12)를  $\theta_x$ 에 관한 식으로 다시 정리하면 식 (13)과 같이 된다.

$$\theta_x = -\sin^{-1}\left(\frac{3\Delta CoG_x}{2w_1}\right) \quad (13)$$

한편,  $x$  축을 중심으로  $\theta_z$ 만큼 회전하는 허리 관절의 움직임은 그림 8과 같이 나타낼 수 있다.

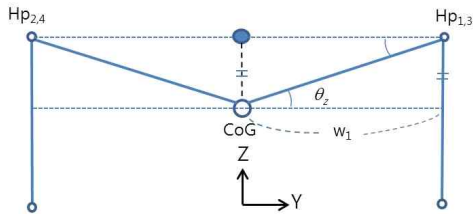


그림 8. 허리 관절에 의한 CoG의  $z$  좌표 변화  
Fig. 8. Variation of  $z$  axis coordination of CoG by waist joint.

위 그림에서 허리 관절에 의해 CoG가 상·하로 움직이며, 허리 관절각  $\theta_z$ 에 의한 CoG의 관계를 수식으로 나타내면 식 (14)와 나타낼 수 있다.

$$\Delta CoG_z = w_1 \sin \theta_z \quad (14)$$

여기서,  $\Delta CoG_z$ 는 4족 로봇에 허리 관절 움직임에 따른 CoG의  $z$  좌표 변화량이며,  $\theta_z$ 에 대하여 다시 나타내면 식 (15)와 같이 된다.

$$\theta_z = \sin^{-1}\left(\frac{\Delta CoG_z}{w_1}\right) \quad (15)$$

한편, 식 (13)과 (15)를 이용하여, CoG 변화량에 비례하여 CoG를 이동시키고 이를 허리 관절을 이용한 걸음새 생성 방법에 적용한다.

### 3.3 허리 관절을 이용한 걸음새 생성 방법

4족 로봇은 보행 중에 다리 궤적에 따른 기울기  $\theta_r$ ,  $\theta_p$ 가 발생하며, 로봇의 모델에 따라 기울어진 각도가 달라지게 된다. 4족 로봇의 기울어진 각도를 결정하는 방법은 몸체 흔들림에 대해 기존에 연구되었던 4족 로봇의 발 높이에 따른 안정 영역의 최대 기울기 정보를 이용하여 결정한다[10]. 이 때, 기울기 정보는 다리가 보행하면서 달라지는 다리 높이와 기울어진 각도의 관계를 이용하여 결정한다.

한편, 본 논문에서 제안하는 걸음새 과정은 다음과 같은 단계로 구성된다.

단계 1: 4족 로봇의 발 높이에 대한 기울기 정보 판별

단계 2: 기울기에 대한 힙 좌표 계산

단계 3: 기울어진 힙 좌표에 따른 CoG 변화량 계산

단계 4: CoG 변화량에 대한 허리 관절각 결정

우선, 단계 1에서는 기울기 정보를 식 (8)과 (11)에 적용하여 기울기에 따른 힙 좌표를 계산한다. 단계 2에서는 이동한 힙 좌표에 대한 CoG 변화량  $\Delta CoG$ 를 구하며, 단계 3에서는  $\Delta CoG$ 를 본 논문에서 제안한 허리 관절각 결정 방법에 따라  $\theta_x$ ,  $\theta_z$ 를 결정하고 이를 4족 로봇 걸음새에 적용하여 보행한다. 여기서, 단계 1부터 4까지의 과정은 한 다리가 이동할 때 수행하는 과정이며, 총 4개의 다리가 이동하므로, 위 과정이 4번 반복되는 주기를 가지며, 걸음새의 다리 순서는 물결 걸음새를 이용한다.

## 4. 모의 실험 및 결과 고찰

본 장에서는 제안한 방법을 모의 실험을 통해 기존의 방법[10]과 비교함으로써 제안한 방법의 효율성을 검증하였고, 모의 실험은 MATLAB을 이용하여 수행하였다.

### 4.1 기울기 변화에 대한 허리 관절각 생성

본 모의 실험에서의 한 주기에 대한 기울기 설정은 이전 연구[10]에서 제안한 다리 높이에 따른 롤, 피치 각도를 수치화 하여 모의 실험에 사용하였다. 한편, 본 모의 실험에서는 최대 다리 높이를 50[mm]로 설정하였고, 이에 대한 안정 영역 기울기 정보에 따른 롤, 피치 각을 적용하였다.

그림 9는 3.1절의 방법을 적용하여 몸체의 흔들림을 한 주기 동안 모의 실험한 결과이다. 그림의 결과로부터, 몸체의 기울기에 따라 몸체 CoG의 좌표도 함께 변하는 것을 확인할 수 있었다.

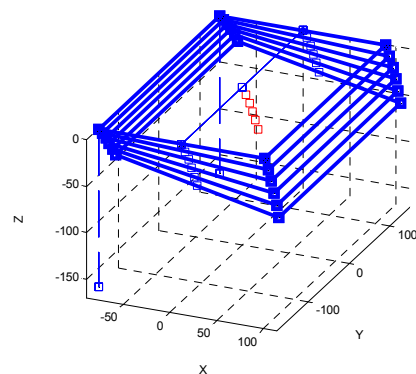


그림 9. 기울기 변화에 따른 힙 좌표 및 CoG 좌표의 변화

Fig. 9. Variation of hip coordination and CoG coordination by tilt variation.

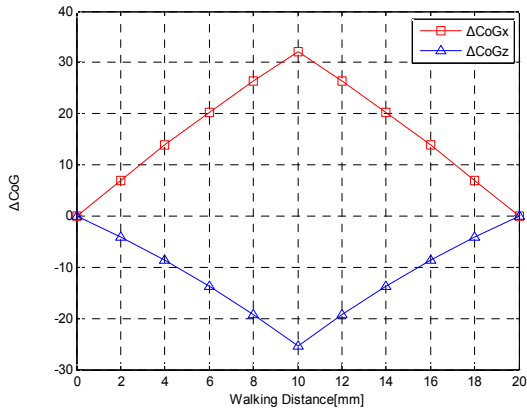


그림 10. 기울기 변화에 따른  $\Delta CoG$  변화량  
Fig. 10. Variation of  $\Delta CoG$  by tilt variation.

또한,  $\Delta CoG$ 의 좌표 변화를 그래프로 나타내면, 그림 10과 같다. 그림의 결과로부터, 몸체 CoG의  $x, y$  좌표는 다리가 이동함에 따라 증가되는 것을 확인할 수 있으며,  $z$  좌표는 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

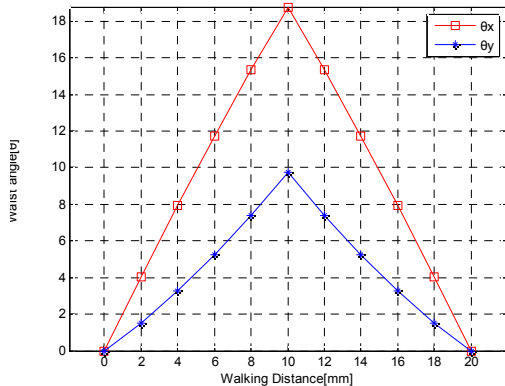


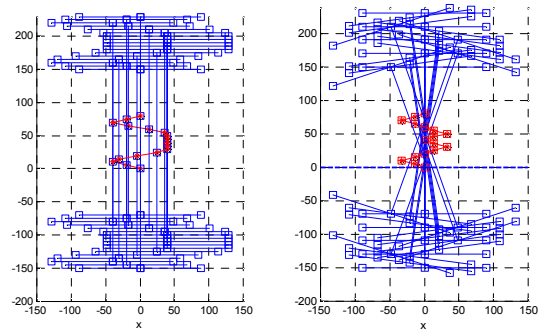
그림 11. 보행거리에 대한 허리 관절각  
Fig. 11. Waist angle for walking distance.

그림 11은 한 다리의 보행 거리에 따른 몸체 CoG의 이동 폭을 계산하고, 이를 허리 관절각 결정 방법을 적용하여 모의 실험을 수행한 결과이다. 위 그림에서  $\theta_x, \theta_y$ 는  $\Delta CoG$ 에 의하여 증가하는 것을 알 수 있으며, 최대 기울기를 갖는 10[mm]에서 최대 허리 관절각을 가짐을 알 수 있다.

#### 4.2 기존 연구 비교를 통한 효율성 검증

본 논문에서는 제안한 방법의 효율성을 검증하기 위해  $xz$  스웨이를 이용하여 몸체 흔들림을 최소화하는 기존의 걸음새 생성 방법[10]과 비교하였다.

그림 12는 각각 몸체가 80[mm]를 보행하는데 이동한 몸체의 궤적을 비교한 결과이다. 그림의 결과로부터,  $xz$  스웨이를 이용한 걸음새 생성 방법은 몸체의 CoG을 움직이기 위해 몸체 전체를 움직이는 반면에, 본 논문에서 제안한 방법을 이용한 걸음새 방법은 허리 관절의 이동만으로 몸체의 CoG을 이동시키는 것을 확인할 수 있었다.



(a)  $xz$  스웨이 몸체 궤적 (b) 허리 관절 몸체 궤적  
그림 12.  $xz$  스웨이 걸음새와 허리 관절을 이용한 걸음새의 몸체 궤적

Fig. 12. Body trajectories for  $xz$  sway based gait method and waist joint based gait method.

또한, 걸음새 과정에서  $xz$  스웨이를 이용한 걸음새 생성 방법과 본 논문에서 제안한 방법의 경우 힘의  $x$  좌표의 최대 움직임 폭은 각각  $\pm 129$ [mm],  $\pm 132$ [mm]로 유사하며, CoG의 이동 범위 또한 각각  $\pm 40$ [mm],  $\pm 32$ [mm]로 유사한 궤적과 폭을 갖는 것을 확인하였다. 한편, 기존 방법에서는 몸체 중심의 이동 폭이 CoG의 이동 폭과 동일한 반면에, 제안한 방법에서는 몸체 중심이 좌우 이동 없이 진행 방향을 그대로 추종하므로,  $xz$  스웨이를 이용한 기존 방법에 비해 몸체의 움직임이 줄어든 것을 확인할 수 있었다.

한편, 몸체의 상하 움직임을 알아보기 위해  $yz$  평면에서 바라본  $xz$  스웨이를 이용한 걸음새 생성 방법과 본 논문에서 제안한 걸음새 생성 방법의 이동 궤적은 각기 그림 13 및 14와 같다.

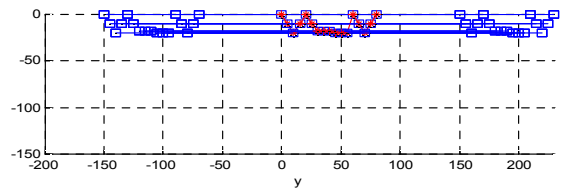


그림 13.  $xz$  스웨이 걸음새에서 몸체  $z$  좌표의 이동 궤적

Fig. 13. Moving trajectory of  $z$  axis coordination of body for  $xz$  sway based gait method.

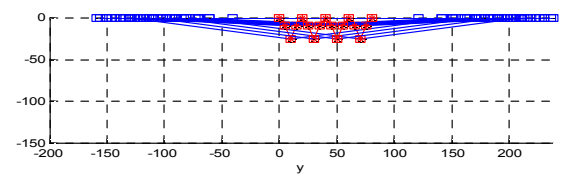


그림 14. 허리 관절 걸음새에서 몸체  $z$  좌표의 이동 궤적  
Fig. 14. Moving trajectory of  $z$  axis coordination of body for waist joint based gait method.

그림들의 결과로부터,  $xz$  스웨이를 이용한 걸음새 생성

방법은 상하로 움직여 흔들림을 줄이는 과정에서 몸체 전체를 상하로 움직이는 것을 확인 할 수 있었으나 본 논문에서 제안한 방법은 몸체의 중심 좌표만 상하로 움직이는 반면에 힙 좌표는 상하 움직임이 없음을 확인 할 수 있었다.

따라서 본 논문에서 제안하는 방법은  $xz$  스웨이를 이용한 기존 방법과 유사한 CoG 이동 궤적을 가지며, 보행 시 몸체의 움직임은 줄어드는 것을 확인할 수 있었다.

### 5. 결 론

본 논문에서는 4족 로봇의 보행 시 발생하는 몸체 흔들림에 의한 CoG의 변화량을 고려한 허리 관절각 결정 방법을 이용하여 몸체 흔들림을 최소화하는 걸음새 방법을 제안하였다. 이 때, 4족 로봇의 기하학적 모델을 이용하여 몸체의 기울기에 따른 몸체의 CoG 변화량을 계산하고, 이를 2 DOF의 허리 관절을 이용하여 4족 로봇의 CoG를 이동시킴으로써 몸체의 흔들림을 최소화하였다. 한편, 본 논문에서 제안한 방법의 효용성을 검증하기 위해 보행 모의 실험을 통해 몸체 흔들림을 최소화하는 방법[10]과 비교를 하였으며, 본 논문에서 제안한 방법이 기존의 방법과 CoG의 이동 궤적은 유사하면서, 몸체의 움직임은 줄어드는 효율적인 걸음새임을 확인할 수 있었다.

### References

[1] K. H. Choi, T. H. Kim, J. M. Yoo, and Y. T. Kim, "A Study for Semi-static Quadruped Walking Robot using Wave Gait," *Proc. of the Korean Society of Precision Engineering Conference*, pp. 551-554, 2001.

[2] D. Pongas, M. Mistry, and S. Schaal, "A Robust Quadruped Walking Gait for Traversing Rough Terrain," *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1474-1479, 2007.

[3] T. Lee and C. Shih, "Study of the Gait Control of a Quadruped Walking Vehicle," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 2, no. 2, pp. 61-69, 1986.

[4] S. Song and B. Choi, "The Optimally Stable Ranges of 2n-legged Wave Gaits," *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, vol.20, no. 2, pp. 61-69, 1986.

[5] J. M. Yang, "Designing Fault-Tolerant Gaits for Quadruped Robots Using Energy Stability Margins," *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, vol. 55, no. 7, pp. 319-326, 2006.

[6] B. H. Kim, "Analysis on Boundary Condition for Standing Balance of Four-Legged Robots," *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, vol. 21, no. 6, pp.673-678, 2011.

[7] J. Y. Jang, S. H. Hyun, and K. S. Seo, "Locomotion Control of 4 Legged Robot Using HyperNEAT," *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, vol. 21, no. 1, pp.132-137, 2011.

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

[9] F. T. Cheng, H. L. Lee, and E. Orin, "Increasing the Locomotive Stability Margin of Multilegged Vehicles," *Proc. of ICRA*, pp. 1708-1914, 1999.

[10] 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.

[11] I. Mizuuchi, T. Matsuki, M. Inaba, and H. Inoue, "GA-Based Motion Generation for Quadruped Robot Which Has Soft Spine Structure," *Proc. of the 17th Annual Conference of the Robotics Society of Japan*, pp. 199-200, 1999.

[12] S. H. Park, Y. J. Lee, and Y. H. Ha, "Discontinuous Zigzag Gait Planning of Quadruped Walking Robot with an Articulated Spine," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 10, no. 8, pp 703-710, 2004.

[13] G. H. Kim, Y. H. Choi, and J. B. Park, "Gait Generation Method for a Quadruped Robot with a Waist Joint to Walk on the Slope," *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, vol. 22, no. 5, pp.617-623, 2012.

[14] D. J. Pack and A. C. Kak, "A Simplified Forward Gait Control for a Quadruped Walking Robot," *Proc. of Intelligent Robots and Systems*, vol. 2, pp. 1011~1018, 1994.

### 저 자 소 개



**김 동 섭(Dong Sub Kim)**  
 2012년 : 경기대학교 전자공학과 공학사  
 2012년~현재 : 경기대학교 대학원  
 전자공학과 석사과정

관심분야 : 로보틱스, 지능제어  
 E-mail : dongsip@kgu.ac.kr

**최 윤 호(Yoon Ho Choi)**  
 한국지능시스템학회 논문지, 제 22권 제 3호 참조.