몸체 스웨이를 이용한 4족 로봇의 걸음새 생성

Gait Generation for Quadruped Robots Using Body Sways

정 학 상* · 김 국 화** · 최 윤 호**†

Hak Sang Jung, Guk Hwa Kim and Yoon Ho Choi*

*전자부품연구원 지능로봇스 연구센터

**경기대학교 전자공학과

요 약

본 논문에서는 4족 로봇 몸체의 xz-축 스웨이(sway)를 이용하여 4족 로봇의 몸체 흔들림을 최소화 하고 안정도 여유를 최대 로 하는 걸음새 생성 방법을 제안한다. 제안한 방법에서는 물결 걸음새(wave gait)를 기반으로 생성하고, 안정도 판별은 움직이는 다리의 높이 변화량과 4족 로봇의 몸체 기울기 정보를 이용한다. 이 때, 4족 로봇의 보행 시 z-축 스웨이로 인한 몸체의 충격을 줄이기 위해 푸리에 급수(Fourier series)를 이용하여 다리의 유연한 이동 궤적을 생성한다. 마지막으로, 본 논문에서 제안한 알고리즘의 실제 적용 가능성 및 효용성을 검증하기 위해 모의 실험 및 4족 로봇의 실제 보행 실험을 수행하여 제안한 방법의 보행 성능을 검증한다.

키워드 : 4족 로봇, 기울기, 안정도, 걸음새 생성, 스웨이

Abstract

In this paper, we propose a gait generation method for quadruped robots using the xz-axis sway of the quadruped robot, which minimizes the shake of the quadruped robot and maximizes the stability margin. In the proposed method, the gait is generated based on wave gaits and the stability analysis uses the body tilt information of the quadruped robot according to the leg's height of leg. In addition, to reduce the impact on the body caused by the z-axis sway while walking, the proposed method generates the smooth walking movement trajectory with less impact by using Fourier series. Finally, to verify the applicability and effectiveness of the proposed method, we carry out the computer simulations and the real walking experiments with the implemented quadruped robot.

Key Words : Quadruped Robot, Tilt, Stability, Gait Generation, Sway

1. 서 론

일반적으로 관절형 다족 로봇은 이족, 사족, 육족 그 이상의 다리를 갖는다. 이족 보행 로봇의 경우 비선형 모델의 다리 구조를 갖고 있으며 보행 중 몸체의 흔들림 제어나 안정화가 매우 어려운 단점을 갖고 있다. 한편 4족 로봇은 이족 로봇에 비해 보행 중 넓은 안정 영역을 가지며 보행 속도가 빠르다는 장점을 갖는다. 현재 4족 로봇은 다양한 분야에서 연구되고 있으며, 이러한 4족 로봇의 개발을 위해서 가장 기반이 되는 연구는 걸음새 생성에 관한 연구이다. 4족 로봇의 걸음새 생성에 대한 연구를 위해서는 안정도 해석, 발끝 궤적, 자세 제어, 다리 움직임 순서 등 여러 가지 요소를 고려해야 한다. 이러한 요소 중 안정도 해석은 가장 중요한 요소 중 하나이며, 기존의 안정도 해석 방법에 대한 연구는

무게 중심(Center of Mass: CoM)의 이동 방법을 이용한 걸음새 생성 방법 [1][2], 세로 안정 여유(Longitudinal Stability Margin: LSM)를 이용한 걸음새 생성 방법 [3], 에너지 안정 여유(Energy Stability Margin: ESM) [4][5] 등이 있다. 한편, 앞서 서술한 요소들을 이용하여 4족 로봇의 안정도 증가, 빠른 보행 속도, 저전력 보행, 몸체 흔들림의 감소 등을 연구하며 이러한 연구들 중에서도 안정도를 증가시키기 위한 연구가 많이 진행되어 왔다. 안정도를 증가시키기 위한 연구에는 디딤발에 압력 센서를 부착하여 몸체의 쓰러짐을 방지하는 보행 중 자세 제어 방법에 관한 연구 [6][7], 보행 중인 발의 착지점을 변경하는 방법에 대한 연구 [8], 스웨이(sway)를 이용한 연구 등이 있다 [9][10]. 한편, 4족 로봇의 저전력 보행이나 몸체의 흔들림을 적게 하는 방법 [11][12]에 대한 연구는 미비한 상태이며 앞서 서술한 기존의 안정도 해석 방법으로는 4족 로봇의 보행 중 흔들림에 대한 안정도를 판별할 수 없다. 실제 4족 로봇의 보행에서 4족 로봇이 다리를 지면에서 떼고 보행하는 과정은 4족 로봇의 안정도에 많은 영향을 주며, 4족 로봇의 다리 이동을 위해 다리를 들어 올리면 다리를 들어 올린 쪽으로 4족 로봇은 기울어지게 된다. 또한 들어 올리는 다리의 높이가 허용치 이상 높

접수일자: 2012년 1월 31일

심사(수정)일자: 2012년 5월 22일

게재확정일자 : 2012년 5월 23일

† 교신 저자

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

아지면 4족 로봇은 들어 올린 다리 쪽으로 쓰러지게 된다.

따라서 본 논문에서는 4족 로봇의 다리를 들어 올리는 높이와 4족 로봇의 기울어짐의 상관관계를 이용하여 새로운 안정도 해석 방법을 제안한다. 또한, 제안한 안정도 해석 방법을 이용하여 4족 로봇이 흔들리는 방향의 반대 방향으로 스웨이를 이용하여 4족 로봇의 이동 중 흔들림을 줄인다. 걸음새는 물결 걸음새(wave gait)를 기반으로 생성하고, 4족 로봇의 보행 시 z-축 스웨이로 인한 몸체의 충격을 줄이기 위해 푸리에 급수(Fourier series)를 이용하여 다리의 유연한 이동을 생성한다. 마지막으로, 본 논문에서 제안한 방법의 효용성 및 실제 적용 가능성을 검증하기 위해, 모의 실험과 실제 보행 실험을 통해 기존 방법들에 의해 생성된 걸음새들과 비교 및 분석하고자 한다.

2. 4족 로봇 모델링

본 논문에서 제작한 4족 로봇은 다리 하나 당 3 자유도를 가지며 총 12 자유도를 가진다. 제작한 4족 로봇의 실물은 그림 1과 같고, 4족 로봇의 제원은 표 1과 같다.

그림 1. 제작한 4족 로봇의 실물
Fig. 1. Implemented quadruped robot

표 1. 4족 로봇의 제원

Table 1. Dimension of the implemented quadruped robot

	몸체	어깨	허벅지	정강이
길이 [mm]	300	48	110	135

2.1 순기구학 모델

4족 로봇의 전체 기준 좌표계를 설정한 후, 하나의 다리에 대한 순기구학 모델을 유도한다. 유도된 한 다리의 순기구학 모델을 전체 기준 좌표계에 대한 회전 및 평행 이동을 이용하여 4족 로봇의 전체 순기구학 모델을 유도한다. 한편 한 다리에 대한 순기구학 모델은, 첫 번째 링크는 x-축, 두 번째와 세 번째 링크는 y-축에 대해 회전 운동을 한다. 이와 같은 방법에 의해 유도된 한 다리에 대한 순기구학 모델은 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} x &= l_1 \cos \theta_1 + \sin \theta_1 (l_3 \sin \theta_2 \cos \theta_3 + l_3 \cos \theta_2 \sin \theta_3 + l_2 \sin \theta_2) \\ y &= l_3 \cos \theta_2 \cos \theta_3 + l_2 \cos \theta_2 - l_3 \sin \theta_2 \sin \theta_3 \end{aligned} \quad (1)$$

$$z = l_3 \cos \theta_1 \sin \theta_2 \cos \theta_3 + l_3 \cos \theta_1 \cos \theta_2 \sin \theta_3 + l_2 \cos \theta_1 \sin \theta_2$$

여기서 l_1, l_2, l_3 는 각기 어깨, 허벅지, 정강이의 길이이며 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 는 각기 어깨 관절, 허벅지 관절, 정강이 관절의 회전 각도를 나타낸다.

2.2 역기구학 모델

4족 로봇이 실제로 동작하기 위해서는 앞서 구한 카테시안(Cartesian) 좌표를 가지고 관절각 θ_i 를 구해야 한다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 대수적 방법과 기하학 방법이 있으며, 본 논문에서는 기하학적 방법을 이용하여 그림 2와 같은 구조를 갖는 4족 로봇의 다리를 해석한다. 그림 2로부터 식 (2)~(12)를 구할 수 있으며, 구하는 과정은 다음과 같다.

기준 좌표계의 원점으로부터 xz-평면에서 투영된 점까지의 거리를 A라 하면 A는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$A = \sqrt{x^2 + z^2} \quad (2)$$

기준 좌표계의 원점에서 좌표까지의 거리를 B라 하면, B는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$B = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (3)$$

한편, 기준 좌표계의 원점에서 좌표까지 거리를 yz-평면에 투영시킨 거리를 C라 하면, C는 식 (4)와 같이 주어진다.

$$C = \sqrt{B^2 - l_1^2} \quad (4)$$

그림 2. 역기구학 모델 유도를 위한 좌표계
Fig. 2. Coordinates for deriving the inverse kinematic model

마지막으로, C를 xz-평면에 투영시킨 거리를 D라 하면, D는 식 (5)과 같이 주어진다.

$$D = \sqrt{C^2 - y^2} \quad (5)$$

앞서 구한 D 와 A 를 이용하여 θ_1 을 구할 수 있다. D 와 A 및 4족 로봇의 어깨 길이 l_1 으로 구성된 삼각형을 작도한 후 l_1 과 A 사이의 사잇각을 θ_{11} 라 정의하면, θ_{11} 는 식 (6)과 같이 계산될 수 있다.

$$\theta_{11} = \cos^{-1}\left(\frac{l_1^2 + A^2 - D^2}{2l_1A}\right) \quad (6)$$

그리고 x -축과 xz -평면에 투영된 좌표와 이루는 각을 θ_{12} 로 정의하면, θ_{12} 는 식 (7)과 같이 주어진다.

$$\theta_{12} = \tan^{-1}\left(\frac{z}{x}\right) \quad (7)$$

결과적으로, θ_1 은 식 (8)과 같이 구해진다.

$$\theta_1 = \theta_{12} - \theta_{11} \quad (8)$$

θ_2 값의 유도 역시 θ_1 을 구하는 방법과 유사한 방법으로 유도할 수 있으며, θ_2 의 경우에는 4족 로봇의 허벅지 길이 l_2 와 정강이 길이 l_3 , C 및 D 를 이용하여 구하게 된다. 4족 로봇의 허벅지 길이 l_2 와 C 사이의 사잇각을 θ_{21} , C 와 D 의 사잇각을 θ_{22} 라 하면, 사잇각 θ_{21} 과 θ_{22} 는 각기 식 (9)와 (10)과 같이 주어진다.

$$\theta_{21} = \cos^{-1}\left(\frac{l_2^2 + C^2 - l_3^2}{2l_2C}\right) \quad (9)$$

$$\theta_{22} = \tan^{-1}\left(\frac{y}{D}\right) \quad (10)$$

따라서 θ_2 값은 식 (11)과 같이 주어지게 된다.

$$\theta_2 = \theta_{21} + \theta_{22} \quad (11)$$

한편 4족 로봇의 허벅지 길이 l_2 와 정강이 길이 l_3 의 사잇각인 θ_3 는 식 (12)와 같이 유도된다.

$$\theta_3 = \cos^{-1}\frac{l_2^2 + l_3^2 - C^2}{2l_2l_3} \quad (12)$$

나머지 다리의 경우 모두 같은 구조를 갖고 있기 때문에 동일한 방법에 의해 모델링이 이루어진다.

3. 4족 로봇의 걸음새 생성

본 논문에서는 물결 걸음새를 이용한 걸음새 생성과 4족 로봇의 몸체 기울기 정보를 이용한 새로운 안정도 해석 방법을 제안한다.

3.1 물결 걸음새를 이용한 4족 로봇의 보행

물결 걸음새는 다리의 진행 순서가 몸체에 대해 전방

또는 후방으로 먼저 움직이기 때문에 걸음새가 물결 모양의 형태를 이루게 되므로 물결 걸음새라 부른다[13].

그림 3. 4족 로봇의 다리 정의
Fig. 3. Definition of quadruped robot's leg

그림 3은 4족 로봇의 다리를 정의한 것이며, 보행 순서는 (1→4→3→2)의 순서로 진행한다. 4족 로봇의 디듀티(duty ratio)은 3/4으로 4족 로봇의 다리가 움직일 때 4족 로봇의 중심 이동 및 안정한 걸음새를 위하여 몸체를 동시에 움직인다.

3.2 xz -축 안정도 판별

본 논문에서 제안한 걸음새 생성은 움직이는 다리의 최대 높이 H 를 결정함으로써 최종적인 걸음새를 생성하게 된다. 이 때 안정도 판별은 4족 로봇의 몸체에 대한 안정 영역의 기울기 정보를 이용한다. 롤(roll)의 최대 기울기 θ_{rmax} 와 피치(pitch)의 최대 기울기 θ_{pmax} 에 대한 기울기를 식 (13)과 같이 정의한다.

$$\theta_{rmax} = \tan^{-1}\left(\frac{2H}{l_x}\right) \quad (13)$$

$$\theta_{pmax} = \tan^{-1}\left(\frac{2H}{l_y}\right)$$

여기서 l_x 와 l_y 는 각기 4족 로봇의 x -축 및 y -축에 대한 길이이다. 위 식은 4족 로봇의 안정 영역의 최대 기울기 값으로서 4족 로봇의 보행 시 움직이는 다리가 지면에 닿지 않을 수 있는 최대 기울기를 의미한다. 한편 4족 로봇이 안정하게 보행하기 위한 안정 여유 조건은 식 (14)에 의해 주어진다.

$$\begin{cases} T_r \leq |\theta_{rmax}| \\ T_p \leq |\theta_{pmax}| \end{cases} \quad (14)$$

여기서 T_r 과 T_p 는 몸체의 x -축과 z -축에 대한 4족 로봇 몸체의 측정된 기울기 값이다. 한편, 움직이는 다리의 최대 높이 H 는 θ_{rmax} 와 θ_{pmax} 에 의해 변하게 되며, 이 값은 식 (13)을 이용하면 식 (15)와 같이 주어진다.

$$H = |(l_x/2) \times \tan(\theta_{rmax}) + (l_y/2) \times \tan(\theta_{pmax})| \quad (15)$$

윗 식의 관계를 그래프로 나타내면 그림 4와 같으며, 이때 롤(roll)과 피치(pitch)의 값은 각각 -10부터 10까지의 값을 가진다. 각각의 롤과 피치의 값을 식 (15)에 대입하면 최대높이 H 를 구할 수 있고 구해진 최대 높이 H 는 그래프의 명암으로 표기된다.

그림 4. 다리 높이에 따른 안정도 변화량
Fig. 4. Stability variation for the leg's height

따라서 z-축 스웨이를 결정하는 걸음새의 높이 H 는 기울기 정보를 이용한 식 (16)에 의해 결정된다.

$$H \geq |(l_x/2) \times \tan(T_r) + (l_y/2) \times \tan(T_p)| \quad (16)$$

3.3 xz-축 스웨이를 이용한 걸음새 생성

4족 로봇은 보행 시 안정 영역에 도달 하지 못하면 몸체가 흔들리거나 쓰러지는 경우가 발생하게 된다. 몸체의 흔들림을 줄이기 위해서는 다리가 지면에 닿는 순간의 반발력 등을 고려해야 하는데 반발력 등을 측정하기에는 다소 어려움이 따른다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 xz-축 스웨이를 가지며 쓰러지지 않고 보행할 수 있는 최대 기울기를 계산하여 안정도 판별에 사용한다.

한편, x-축 스웨이 x_{sway} 의 값은 식 (17)을 이용한다.

$$x_{sway} = \begin{cases} -\alpha & t \leq 10, t \geq 70 \\ \alpha & 30 \leq t \leq 50 \\ -\alpha \sin(0.1571t) & otherwise \end{cases} \quad (17)$$

여기서 α 는 x-축 스웨이의 폭, x_{sway} 는 4족 로봇의 CoM에 대한 x-축 좌표, t 는 구간에 대한 변수이다. 상수 0.1571은 사인함수의 2 주기를 기준으로 생성한 걸음새에 4족 로봇이 움직이는 전체 구간을 80 구간으로 나누어 얻는다. 또한 식 (17)의 구간에 대한 조건은 보행 중 쓰러지려 하는 방향과 반대 방향으로 각 축에 대해 스웨이를 주어 쓰러지지 않고 보행할 수 있도록 하기 위함이다. 또한 z-축 스웨이 z_{sway} 는 식 (18)에 의해 결정된다.

$$z_{sway} = \begin{cases} -H_{init} + H \times \sin(0.1571t) & 0 \leq t < 20 \\ -H_{init} + H \times \sin(0.1571t)/M & 20 \leq t < 40 \\ -H_{init} - H \times \sin(0.1571t)/M & 40 \leq t < 80 \end{cases} \quad (18)$$

여기서 M 은 상수로서 상하 스웨이의 폭을 결정하며, H_{init} 는 다리의 초기 위치를 나타낸다. 이 때 z-축 스웨이 값을 결정하는 변수 M 은 1보다 큰 값을 가지며

$H = aM$ 의 비례 관계를 가진다. 여기서 a 는 4족 로봇의 모델에 따라 달라진다. 또한 움직이는 다리의 최대 높이 H 의 값은 본 논문에서 제안하는 안정도 해석 방법을 통해 결정된다.

식 (18)에 $H = 50$, $M = 10$ 을 각기 대입하여 다리의 궤적을 구하면 그림 5와 같고 발을 디디는 순간에 궤적이 급격히 변하므로 4족 로봇의 보행 시 충격을 주게 됨을 알 수 있다. 이러한 충격을 줄이기 위해 푸리에 급수(Fourier series), 가우시안(Gaussian) 모델, 사인 함수의 합성을 고려한다.

그림 5. 유연한 다리 궤적의 생성
Fig. 5. Generation for smooth leg trajectory

그림 6. 생성된 다리 궤적의 변화량
Fig. 6. Variation of the generated leg trajectory

그림 6은 생성된 궤적의 변화량을 보여준다. 그림에서와 같이 세 개의 모델은 비슷한 성능을 보이나 25번째 구간 이후부터 푸리에 급수를 이용한 모델이 가장 작은 기울기 변화량을 가지는 것을 볼 수 있다. 따라서 본 논문에서는 푸리에 급수를 이용하여 4족 로봇의 유연한 걸음새를 생성한다.

결론적으로 본 논문에서 제안하는 걸음새 생성 방법을 요약하면, x-축 스웨이와 함께 기울기 정보를 이용한 안정도 해석 방법을 통해 결정된 z-축 스웨이를 동시에 인가함으로써 4족 로봇의 몸체 흔들림을 최소화 하는 걸음새를 생성한다. 또한 유연한 걸음새 생성을 위해 다리의 궤적은 푸리에 급수를 사용한다.

4. 실험 결과 및 고찰

본 실험에서는 제안한 알고리즘의 효용성 및 실제 적용 가능성을 검증하기 위해 MATLAB을 이용한 모의 실험과 실제 제작한 4족 로봇을 이용하여 보행 실험을 수행하였다.

4.1 모의 실험 결과 및 고찰

본 모의 실험에서 발을 들어 올리는 최대 높이 H 는 50mm이며, 한 걸음의 보폭은 80mm이다. 그림 7은 기존

방법인 CoM 방법과 LSM 방법을 이용한 걸음새 생성 결과이며, 그림 7은 본 논문에서 제안한 기울기를 이용한 xz-축 스웨이를 이용한 걸음새 생성 방법의 결과이다.

(a) CoM의 궤적 (b) LSM의 궤적
그림 7. CoM 및 LSM 방법을 이용한 걸음새 결과

Fig. 7. Gait generation result for CoM and LSM methods

(a) 윗면에서 본 결과 (b) 측면에서 본 결과
그림 8. 제안한 방법을 이용한 걸음새 결과

Fig. 8. Gait generation result for the proposed method

그림 7과 8의 결과를 비교해 보면, CoM 방법을 이용한 걸음새보다 LSM 방법을 이용한 걸음새의 움직임이 많이 감소한 것을 볼 수 있고, 본 논문에서 제안한 방법을 이용한 걸음새의 움직임이 LSM 방법을 이용한 걸음새보다 적은 것을 알 수 있다. 따라서 기존 방법들보다 본 논문에서 제안한 xz-축 스웨이를 이용한 걸음새가 몸체의 흔들림이 가장 적은 것을 알 수 있다.

기존 방법인 CoM 방법과 LSM 방법의 비교에서 몸체의 흔들림에 대한 관점에서 그 흔들림이 적어 LSM 방법의 성능이 더 우수하므로, 4.2절의 보행 실험은 LSM 방법과 본 논문에서 제안한 방법에 의해 생성된 걸음새 결과를 비교 및 분석하였다.

4.2 보행 실험 결과 및 고찰

실제 보행 실험에서는 보행 성능을 검증하기 위해 4족 로봇의 몸체 기울기 정보, 보행 시간 및 전류 소비량을 비교하였다. 한편 4족 로봇의 보행은 주기적으로

반복되므로 한 주기의 보행만을 실험하였으며, 모의 실험에서 얻은 관절 각도를 실제 보행 실험에 사용하였다.

그림 9는 LSM 방법을 이용한 실제 보행 실험 결과이며, 4족 로봇이 좌우로 움직이면서 보행함을 확인할 수 있었다. 본 실험에서 좌우 이동 거리는 60mm이다.

그림 9. LSM 방법을 이용한 보행 실험 결과
Fig. 9. Walking experiment result for LSM method

그림 10. 제안한 걸음새의 보행 실험 결과
Fig. 10. Walking experiment result for the proposed method

그림 10은 본 논문에서 제안한 방법을 4족 로봇에 적용한 결과이다. 본 실험에서는 좌우 40mm 상하 4mm의 스웨이 값을 갖는데, xz-축 스웨이를 이용함으로써 기존 방법들에 비해 몸체의 흔들림이 감소됨을 확인할 수 있었다.

한편, 그림 11은 LSM 방법 및 본 논문에서 제안한 방법에 의한 걸음새에 대한 몸체 기울기를 측정된 결과이다. 그림 11(a)의 기울기 측정 결과로부터, LSM 방법을 이용한 걸음새의 경우 몸체가 한쪽으로 쏠리는 것을

확인할 수 있었고, 그 이유는 x-축 스웨이 값이 크기 때문이다. 한편, 그림 11(b)는 본 논문에서 제안한 방법의 결과로서, x-축 좌우 40mm z-축 상하 4mm의 스웨이 값을 이용한 걸음새의 기울기 값이다.

(a) LSM 방법
(b) 제안한 방법
그림 11. LSM 방법 및 제안한 방법의 걸음새 기울기 값

Fig. 11. Tilt value of gaits for LSM method and the proposed method

그림의 결과로부터, 제안한 방법의 경우 4족 로봇 몸체의 기울기 값은 기존 방법들에 비해 변화가 적고 몸체가 흔들림이 적으며 쏠림 현상도 감소함을 확인할 수 있었다.

그림 12는 본 논문에서 제안한 방법의 에너지 효율성을 검증하기 위해 전류 소비량 및 소비 전력을 기존 방법들과 각기 비교한 결과이다.

그림 12. 각 걸음새에 대한 소비 전력
Fig. 12. Power consumption for each gait

그림의 결과로부터, 본 논문에서 제안한 방법이 몸체의 이동으로 인해 발생하는 관절 부하를 줄여 전체 소비전력이 감소됨을 알 수 있었고, 아울러 전체 소비전력이 감소됨을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 논문에서는, 몸체의 안정도 해석을 통해 안정한 걸음새를 유지하기 위해 움직이는 다리 높이 변화량에 따른 4족 로봇의 몸체 기울기 정보를 이용하여 새로운 안정도 해석 방법을 제안하였고, 제안한 안정도 해석 방법에 기반 하여 xz-축 스웨이를 이용함으로써 몸체의 흔들림을 줄이며 안정도 여유를 최대화 하는 효율적인 걸음새를 생성하였다. 또한 보행 도중 z-축 스웨이로 인한 몸체의 충격을 줄이기 위해 푸리에 급수를 이용하여 충격을 줄일 수 있는 유연한 걸음새를 생성하였다. 한편, 본 논문에서 제안한 알고리즘의 실제 적용 가능성 및 효율성을 검증하기 위해, 모의 실험 및 4족 로봇의 실제 보행 실험을 수행하였으며, 제안한 방법의 보행 성능을 기존 방법을 이용한 방법과 각기 비교 분석하여 기존의 방법 보다 제안한 방법이 몸체의 흔들림이 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 또한 보행 궤적의 간소화로 보행 시간을 줄일 수 있었으며, 효율적인 무게 중심의 이동으로 저전력 보행의 효과를 가짐을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] 최기훈, 김태형, 유재명, 김영탁, “물결걸음새를 이용한 준정적 4족 보행로봇에 관한 연구,” *한국정밀공학회 학술발표대회 논문집*, pp. 551-554, 2001.
- [2] S. Song and B. Choi, “The Optimally Stable Ranges of 2n-legged Wave Gaits,” *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 20, no. 4, pp. 888-902, 1990.
- [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] 양정민, “에너지 안정여유도를 이용한 사족 보행 로봇의 내고장성 걸음새,” *대한전기학회논문지*, vol. 55D, no. 7, pp. 319-326, 2006.
- [5] D. Messuri and C. Klein, “Automatic Body Regulation for Maintaining Stability of a Legged Vehicle During Rough-terrain Locomotion,” *IEEE Journal Robotics and Automation*, vol. 1, no. 3, pp. 132-141, 1985.
- [6] C. Maufroy, T. Nishikawa, and H. Kimura, “Stable Dynamic Walking of a Quadruped Robot “Kotetsu” using Phase Modulations Based on Leg Loading/Unloading,” *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation*, pp. 5225-5230, 2010.
- [7] I. M. Koo, T. D. Trong, T. H. Kang, G. L. Vo, Y. K. Song, C. M. Lee, and H. R. Choi, “Control of a Quadruped Walking Robot Based on Biologically Inspired Approach,” *Proc. of Intelligent Robots and Systems*, pp. 2694-2974 2007.
- [8] J. R. Rebula, P. D. Neuhaus, B. V. Bonnländer,

- M. J. Johnson, and J. E. Pratt, "A Controller for the LittleDog Quadruped Walking on Rough Terrain," *Proc. of IEEE Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1467-1473, 2007.
- [9] R. Kurazume, S. Hirose and Kan Yoneda, "Feedforward and feedback dynamic trot gait control for a quadruped walking vehicle maneuvering," *Proc. of International Conference on ICRA*, vol. 3, pp. 3172-3180, 2001.
- [10] M. H. Hung, F. T. Cheng, H. L. Lee and D. E. Orin, "Increasing the stability margin of multilegged vehicles through body sway," *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, vol. 28, no. 1, pp. 39-54, 2005.
- [11] H. Igarashi, T. Machida, F. Harashima, and M. Kakikura, "Free Gait for Quadruped Robots with Posture Control," *Proc. of IEEE Workshop on Advanced Motion Control*, pp. 433-438, 2006.
- [12] 정학상, 최윤희, 박진배, "자이로 센서를 이용한 4족 보행 로봇의 자세제어," *대한전기학회 하계학술대회 논문집*, pp. 1836-1837, 2010.
- [13] 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.

김국화(Guk Hwa Kim)

2011년 : 경기대학교 전자공학과(공학사)
2011년~현재 : 동 대학원 전자공학과 석사과정

관심분야 : 로봇틱스, 지능제어
E-mail : gh_kim@kgu.ac.kr

최윤희(Yoon Ho Choi)

1980년 : 연세대학교 전기공학과(공학사)
1982년 : 연세대학교 전기공학과 (공학석사)
1991년 : 연세대학교 전기공학과 (공학박사)
1993년~현재 : 경기대학교 전자공학과 교수

관심분야 : 비선형 적응제어, 지능제어, 네트워크 제어 시스템, 로봇틱스, 웨어블릿 변환 및 응용, ADP 및 최적 제어, 다개체 협업제어
Phone : 031-249-9801
E-mail : yhchoi@kgu.ac.kr

저 자 소 개

정학상(Hak Sang Jung)

2009년 : 경기대학교 전자공학과(공학사)
2011년 : 경기대학교 전자공학과 (공학석사)
2011년~현재 : 전자부품연구원 지능로봇
틱스 연구센터 연구원

관심분야 : 로봇틱스, 지능제어
E-mail : haha0000@keti.re.kr