

## 견형 4족 로봇의 위치 이동: 걷기 및 속보

임승철<sup>1†</sup> · 김광한<sup>1</sup>

### Locomotion of Dog-like Quadruped Robots: Walk and Trot

Seungchul Lim · Kwang Han Kim

#### ABSTRACT

This paper is concerned with locomotion of dog-like quadruped robots that can adapt to various terrains, mainly dealing with implementation methods and characteristics of static and dynamic gaits. To this end, a 12-DOF robot is built in house, motional trajectories of its body and feet are generated mimicking biological life, and the corresponding leg joint angles are analytically obtained by inverse kinematics. Such joint angle data are then applied to the robot's ADAMS model for computer simulations so that the planned walk and trot gaits are both confirmed dynamically stable. However, contrary to the simulation results, previous trot patterns showed unstable behavior during experiments. This problem led us to analyze the reason, and in the course we discovered the importance of maximally utilizing the concept of WSM rather than ZMP and therefore reducing the gait period to secure the stability of dynamic gaits such as trot.

**Key words** : Kinematics, Dynamic Stability, ZMP(Zero Moment Point), WSM(Wide Stability Margin)

#### 요약

본 논문은 다양한 지면에 적응 가능한 견형 4족 로봇의 위치 이동에 관한 정 보행과 동 보행의 구현 방법 및 특성을 주로 다루었다. 이를 위하여, 총 12 자유도의 로봇을 자체 제작하였으며, 몸통과 발의 운동궤적을 생체 모방 방식으로 생성한 후 역기구학에 의하여 그에 해당하는 각 다리의 관절각을 해석적으로 구하였다. 이러한 관절각 데이터를 상기 로봇의 ADAMS 모델에 적용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행한 결과, 계획된 걷기 및 속보 걸음새가 동역학적으로 안정함을 확인하였다. 그러나 그 이전의 속보 패턴의 경우에는 시뮬레이션 결과와는 달리 실험 중 불안정한 거동을 보였다. 그에 따라 원인 분석을 하는 과정 중, 속보와 같은 동 보행의 경우 ZMP보다는 WSM의 개념을 적극적으로 활용하고 보행 주기를 최대한 단축시키는 것이 안정성 확보에 매우 중요함을 발견하였다.

**주요어** : 기구학, 동적 안정성, 영 모멘트 점, 확장된 안정성 여유

## 1. 서 론

최근 들어 이동 로봇은 인간의 일상생활을 위한 서비스에서부터 국방에 이르기까지 그 역할과 비중이 점점 커지고 있다. 그 중 특히 4족 보행 로봇은 산악지형, 계단, 자갈밭 같은 다양한 종류의 지면에서 뛰어난 적응력을 발

휘할 수 있으면서도, 2족 보다는 가만 중량 크기와 보행 중 균형 유지 면에서 유리하고 다족에 비해서는 효율적인 보행 방식이 가능하다(Tood, 1985; Kato 등, 2001).

현재 잘 알려진 4족 보행 로봇들로는 일본의 TITAN 시리즈(Kato 등, 2001)와 AIBO 등이 있으며 이들은 정 보행을 기본으로 구사하면서 각각 지뢰 제거 작업을 하거나 개와 흡사한 여러 동작을 표현할 수 있도록 설계되었다. 또한 미국에서 최근에 국방용으로 개발된 Bigdog은 다양한 보행 능력, 큰 가만 중량, 탁월한 야지 적응 능력 등으로 유명하다(www.bostondynamics.com).

4족 보행 로봇은 지지하던 발을 지면에서 떼어 원하는 지점으로 옮겨가며 이동하기 때문에 복잡한 환경에도 적

\*본 연구는 명지대학교 산업기술연구소의 지원으로 수행되었습니다.

접수일(2010년 12월 14일), 심사일(1차 : 2011년 3월 10일), 게재 확정일(2011년 3월 21일)

<sup>1)</sup> 명지대학교 기계공학과

주 저 자 : 임승철

교신저자 : 임승철

E-mail; slim@mju.ac.kr

응 가능한 장점이 있지만, 반대로 그 때문에 몸의 균형이 흐트러지며 불안정해지는 단점도 있다. 따라서 로봇의 보행을 구현하려면 보행 중 안정성의 확보가 필수적이며, 이를 위하여 동물의 보행을 모방한 후 역학적 검토를 하는 방식이 도움이 될 수 있다.

이에 본 논문에서는 다음과 같은 일련의 과정을 통하여 자체 제작한 4족 보행 로봇의 걷기와 속보를 달성하였다. 1) 4족 동물의 보행 특성 분석, 2) 보행 안정성에 관한 이론 검토, 3) 기구학 해석, 4) 4족 보행 로봇의 정적, 동적 보행패턴 생성, 5) 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 보행 패턴 검증, 6) 실험 및 토의.

## 2. 4족 동물의 보행

4족 동물의 보행은 크게 정보행 과 동 보행으로 분류된다. 전자는 가속력을 거의 갖지 않고 느리게 진행되는 보행으로서 정속성이 요구되거나 매우 불규칙한 지형을 지나기 위한 보행 방식이며 대표적인 패턴은 걷기(walk)이다. 걷기 중에는 적어도 3개의 다리가 땅에 접촉하며, 보행 중 RR(후방 우측) → FR(전방 우측) → RL(후방 좌측) → FL(전방 좌측) 순서대로 발을 이동하고, 감속하거나 멈출 때에는 앞발에, 가속할 때에는 뒷발에 큰 힘이 작용한다(Nunamaker 등, 1985).

한편, 후자인 동 보행은 보행 중 어떤 가속력이 존재할 때의 상황으로 다시 속보(trot), 측대보(pace), 질주(gallop) 등으로 세분된다. 그 중 속보는 대각선에 위치한 두발이 하나의 발처럼 쌍을 이루어 움직이므로 마치 2족처럼 보행하는 패턴이며, 그 속도는 걷기와 질주 속도 사이에 존재하는 다양한 크기를 가질 수 있다.

이상의 두가지 보행에 대한 디딤울 즉, 한 주기 동안 각 발이 지면에 닿는 비율은 걷기와 속보의 경우 각각 0.75, 0.5이다.

## 3. 안정성

보행 로봇에서 안정성이란 ‘몸통이 쓰러지지 않고 이동할 수 있는 능력’이라고 말할 수 있으며, 이는 보행 패턴의 생성 시 반드시 확보되어야 할 필수 요소이다.

정보행 중 로봇의 넘어짐은 항상 지지영역 경계에서 일어난다. 즉, 로봇의 무게중심이 지지영역을 벗어나면 중력에 의한 회전 모멘트로 인하여 그 영역의 경계를 중심으로 원호를 그리며 넘어지게 된다. 이러한 안정성을 정량화하기 위하여, 무게 중심을 수평면에 투영시킨 위치와,

동일 평면상에 지지 다리가 형성하는 볼록 다각형 즉 안정 영역의 외곽선 사이의 최소거리를 SM(안정성 여유)이라고 한다(McGee 등, 1968).

한편, 동보행 시의 안정성 판단 기준으로는 ZMP 이론이 다용된다(Vukobratovic 등, 1990; Lim 등, 2006). 이는 관성력을 포함하여 로봇에 작용하는 모든 힘에 의한 회전 모멘트가 영이 되는 평면상의 점을 ZMP라 정의하고, 그 점이 상기 안정 영역내에 존재하는 지 여부를 점검한다. 예를 들어  $n$ 족 보행 로봇의 경우 그 위치는 지면 반력을 기준으로 표현할 때 식 (1)과 같다(Lim 등, 2005).

$$x_{ZMP} = \frac{\sum_{i=0}^n N_i x_{ei}}{\sum_{i=0}^n N_i}, \quad y_{ZMP} = \frac{\sum_{i=0}^n N_i y_{ei}}{\sum_{i=0}^n N_i} \quad (1)$$

여기서  $N_i, x_{ei}, y_{ei}$ 는 각각  $i$ 번째 발에 작용하는 수직 반력의 크기와  $x$  및  $y$ 축 위치 좌표를 나타낸다. 가속력이 없는 경우 위 식은 사실상 무게 중심의 좌표에 해당되므로 정보행의 SM 개념과 유사하게 동보행에서도 ZMP 여유를 정의할 수 있다.

위와 같은 ZMP 이론에 의하면 속도 시에는 대각선상에 존재하는 두 다리 만이 지면과 접촉하므로 ZMP가 이 대각선 안에 존재해야 로봇이 넘어지지 않고 보행할 수 있음을 의미한다. 그러나 이러한 조건은, 로봇의 무게 중심이 몸통의 중앙에 위치하고 지면이 이상적인 평면이라고 가정하더라도, 몸통을 부자연스럽게 좌우로 움직이면서 진행하거나 아니면 충분히 낮은 속도로 보행하여야만 만족될 수 있는 것이다.

이에 그 대안으로써 WSM(Kimura 등, 2007)의 개념을 적용한다면, 현재뿐만 아니라 다음 순간의 지지영역도 안정 영역에 포함되므로 그 영역의 크기가 충분히 커져 속보의 고속화 및 안정화에 매우 기여할 것이다. 단, 7.2절에 상술한 바와 같이, WSM의 유용성을 극대화하기 위하여는 보행 주기를 최대한 단축시키고 무게중심 대신 ZMP를 기준으로 설정하는 것이 바람직하다.

## 4. 기구학 해석

몸통과 발의 위치를 기준으로 계획된 보행 패턴을 정확히 구현하기 위하여는 역기구학에 의한 관절각 산출이 필요하다. 이를 위하여 먼저 제작된 로봇의 기계적 구조를 개략적으로 살펴보면 그림 1에서와 같다.

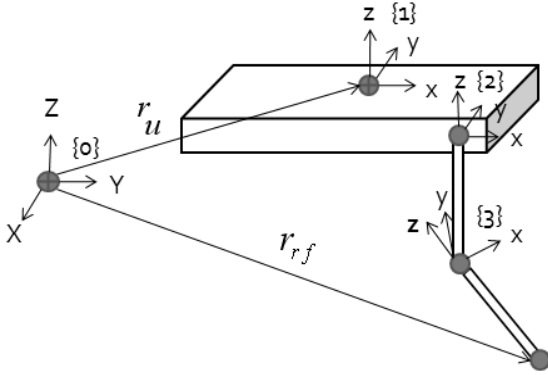


그림 1. Mechanical structure and coordinate frames

동 그림에는 대표적으로 전방 우측다리 하나만을 도시 하였으나, 모든 다리에는 공히 어깨나 힙에 김벌(gimbal) 구조를 채용한 피치와 롤 방향 2 자유도, 무릎에 피치 방향 1 자유도를 갖고 있어 로봇은 총 12개의 운동 자유도를 가진다.

이러한 로봇의 기구학 문제를 다루기 위하여 직교 관성 좌표계 {0}를 비롯하여 그와 초기에 평행한 링크 고정 좌표계 {1} 부터 {3}까지를 정의한다. 그 경우, 발의 몸통에 대한 상대 위치 벡터  ${}^1r_{rf/u}$  ( $=r_{rf} - r_u$ )는 {1}의 성분으로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$${}^1r_{rf/u} = {}^1x_u + \frac{1}{2}R {}^2x_{rt} + \frac{1}{3}R {}^3x_{rs} \quad (2)$$

여기서  ${}^1r_{rf/u} = [x \ y \ z]^T$ ,  ${}^1x_u = [l_{ux} \ l_{uy} \ l_{uz}]^T$ ,  ${}^2x_{rt} = [0 \ 0 \ l_{tz}]^T$ ,  ${}^3x_{rs} = [0 \ 0 \ l_{sz}]^T$ 이다.

한편 어깨의 피치와 롤, 무릎의 피치 각을 각각  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  그리고  $i = 1, 2, 3$ ,  $s_i = \sin \theta_i$ ,  $c_i = \cos \theta_i$ 라 할 때, 좌 표계간의 회전행렬(Craig, 2005)은

$$\frac{1}{2}R = \begin{bmatrix} c_1 & s_1s_2 & s_1c_2 \\ 0 & c_2 & -s_2 \\ -s_1 & c_1s_2 & c_1c_2 \end{bmatrix},$$

$$\frac{1}{3}R = \begin{bmatrix} c_1c_3 - s_1c_2s_3 & s_1s_2 & c_1s_3 + s_1c_2c_3 \\ s_2s_3 & c_2 & -s_2c_3 \\ -s_1c_3 - c_1s_2s_3 & c_1s_2 & -s_1s_3 + c_1c_2c_3 \end{bmatrix}$$

이 된다. 그러므로 식 (2)는 다시 쓰면

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{ux} + s_1c_2 + (c_1c_3 - s_1c_2s_3)l_{sz} \\ l_{uy} - s_2l_{tz} - s_2c_3l_{sz} \\ l_{uz} + c_1c_2l_{tz} + (-s_1c_3 + c_1c_2c_3)l_{sz} \end{bmatrix} \quad (3)$$

이 되고, 이를 관절각에 대하여 풀면 다음의 식 (4)와 같은 역기구학 해를 얻는다.

$$\begin{aligned} \theta_3 &= \text{Atan2}(s_3, c_3), \\ \theta_2 &= \text{Atan2}(s_2, c_2), \\ \theta_1 &= \text{Atan}(u) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서  $s_3 = \pm \sqrt{1 - c_3^2}$ ,

$$c_3 = (x - l_{ux})^2 + (y - l_{uy})^2 + (z - l_{uz})^2 - l_{tz}^2 - l_{sz}^2 / (2l_{tz}l_{sz}),$$

$$s_2 = (l_{uy} - y) / (l_{tz} + c_3l_{sz}), \quad c_2 = \pm \sqrt{1 - s_2^2},$$

$$u = \frac{c_2(l_{tz} + c_3l_{sz}) \pm \sqrt{c_2^2(l_{tz} + c_3l_{sz})^2 - (x - l_{ux})^2 - s_3^2l_{sz}^2}}{x - l_{ux} + s_3l_{sz}}$$

이다.

## 5. 보행 패턴의 생성

보행 패턴의 생성을 위하여 몸통과 발끝의 절대 운동을 생체 모방을 통하여 먼저 생성한 후, 다음 단계에서 그들의 차이로 상대운동을 구한다. 이때 변위와 속도가 시종 연속하도록 매끄러운 몸통과 발끝의 운동 궤적을 만들기 위하여 이산적 위치점들간의 보간 함수로서 3차 이상의 다항식을 사용하였다.

### 5.1 걷기

정상상태 걷기 패턴은 전술한 다리의 이동 방식과 순서를 따랐으며, 보폭=24mm, 주기=4초가 되도록 하였다. 다만 무릎이 완전히 펴진 기립 자세에서 정상상태 직전의 자세로 전환하기 위한 ‘웅크리기’와 FL과 RL의 연속 스윙 모드가 초기 1.5초 동안의 과도기에 추가되었다. 이상 걸음새의 진행을 시간대 별로 살펴보면 표 1과 같으며 3차원 공간내의 발끝의 시간 궤적은 그림 2와 같다. 동 그림에서 X, Y, Z는 각각 종, 횡, 상하 방향을 의미하며, 공히 각 발의 Y값은 일정하다.

한편, 그림 3은 몸통의 절대 운동을 도시한 것이다. 몸통은 초기에 웅크림으로 높이가 낮아지는 것 외에는 상하 및 횡 방향 움직임 없이 종 방향으로만 이동하도록 하였다. 따라서 몸통과 각 발끝의 상대 운동은 그림 2와 3의 동일 방향 궤적간의 차이가 된다. 이와 같이 구해진 상대

움직임을 식(4)의 역기구학 해에 대입하면 그림 4에서와 같이 보행에 필요한 총 12개 다리 관절의 각도 데이터를 산출할 수 있다. 이때, 로봇이 직선 보행을 하므로 모든 롤각( $\theta_2$ )=0이 됨은 자명하다.

5.2 속도

정상상태 속도 패턴을 2절에서 서술한 바와 같이 생성 하되, 보폭과 주기를 각각 30mm, 1초로 설정하였다. 이

표 1. Walk pattern timing

t [s]	0.0-0.5	0.5-1.5	1.5-2.5	2.5-3.5	3.5-4.5	4.5-5.5
motion	squat	FL & RL swing	RR swing	FR swing	RL swing	FL swing

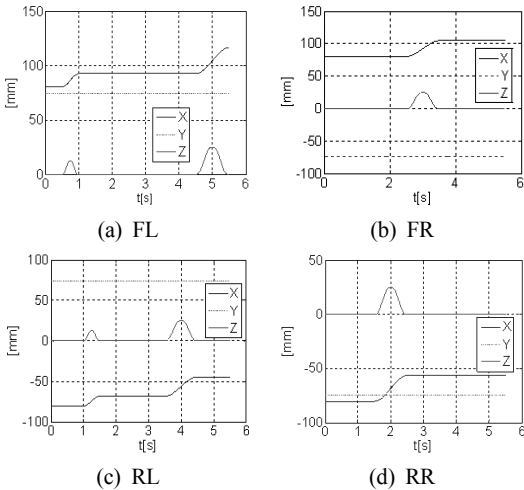


그림 2. Absolute foot motion during walk

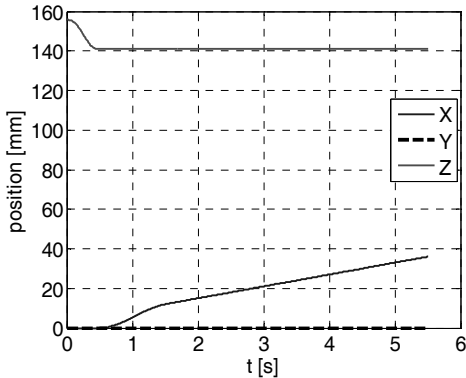


그림 3. Absolute body motion during walk

는 걷기보다 보폭은 1.25배 늘렸지만 주기는 2배나 단축 시킨 것이다. 또한 표 2에서와 같이 초기 1초까지 지속되는 과도기 동안 웅크리기에 이어 FR과 RL 다리 쌍이 반보폭, 15mm만큼 전진하도록 계획하였다.

보다 자세한 발끝과 몸통의 궤적은 각각 그림 5, 6과 같다. 걷기 때와는 달리 초기 자세를 잡은 후 몸통이 상하

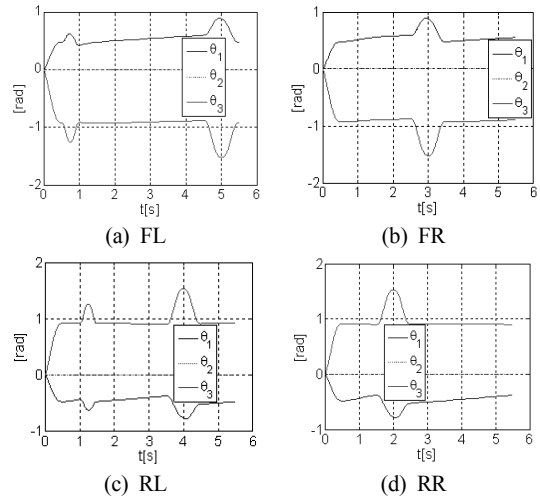


그림 4. Joint angles of each leg during walk

표 2. Trot pattern timing

t [s]	0.0-0.5	0.5-1.0	1.0-1.5	1.5-2.0
motion	squat	FL & RL half swing	FL & RR swing	FR & RL swing

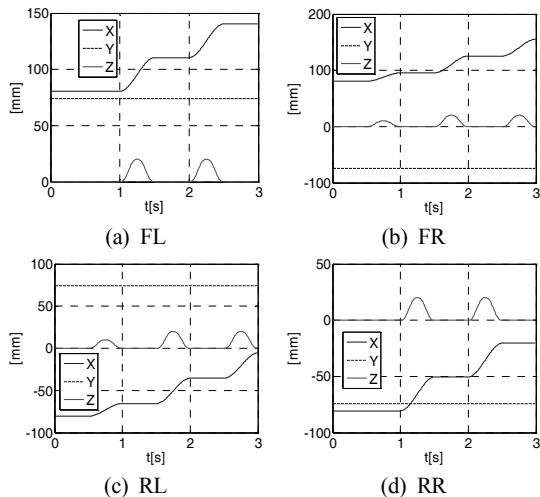


그림 5. Absolute foot motion during trot

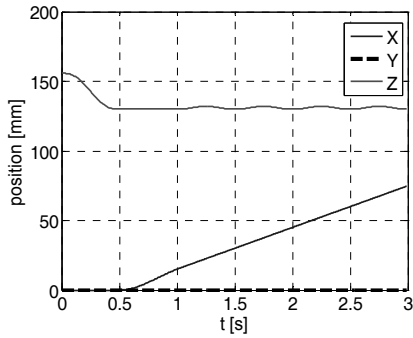


그림 6. Absolute body motion during trot

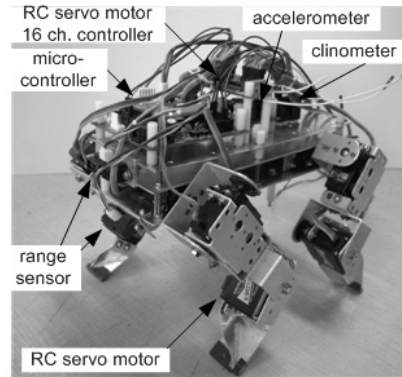


그림 8. Photo of the experimental robot

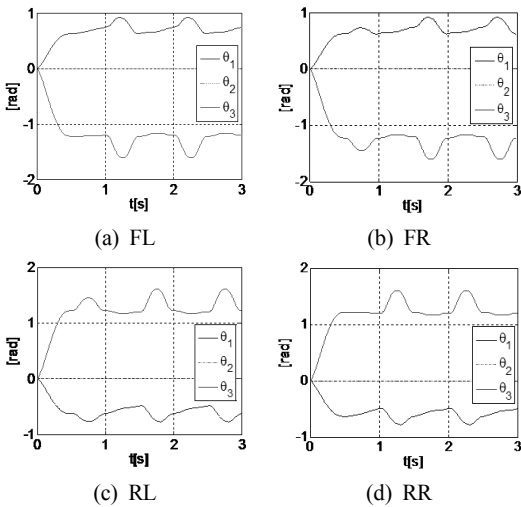


그림 7. Joint angles of each leg during trot

로 약간씩 요동치며 진행하게 하였다. 이들을 기준으로 몸통과 각 발끝 간의 상대적인 움직임을 구한 후, 그 결과를 식 (4)에 대입하면 각 관절이 움직여야 하는 각도의 궤적을 그림 7과 같이 산출할 수 있다. 이때, 걷기에서와 같이 모든 롤각( $\theta_2$ )=0, 그 외의 각은  $\pm \pi/2$  범위 내에서 변화함을 알 수 있다.

## 6. 컴퓨터 시뮬레이션

그림 8과 같이 실험용으로 제작된 로봇의 신장과 무게는 배터리 미부착 시 전기/전자 부품을 포함하여 각각 158mm, 1.49kg이다. 모든 다리는 동일한 구조와 질량을 가지며, 발끝은 보행 시 지면의 불규칙성에 적응하기 위하여 접촉면이 작으면서도 어느 정도 크기의 안정 영역을

확보하도록 칼날 모양으로 만들어 졌으며 그 하부에 얇은 고무 패드가 붙어 있다. 또한 모든 다리는 무릎이 안쪽으로 접히도록 조립되었다.

계획된 걸음새가, 로봇과 지면의 접촉 시 발생하는 충격, 마찰 그리고 보행 중 발생하는 관성력 등이 관여하는 복잡한 동력학적 현상에도 불구하고 안정하게 실현될 수 있을 지를 예측하는 능력은 패턴 개발의 효율성 면에서 매우 바람직하다. 이를 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행 하되 동력학 S/W인 ADAMS(www.mscsoftware.com)를 이용하였다. 이에 실험용 로봇의 기계적 제원을 최대한 충실히 반영하여 ADAMS용 모델을 구축하였으며, 모델이 지면과 접촉 시 발생하는 수직 반력은 비선형 강성 및 점성 감쇠력의 합으로, 또한 추력은 쿨롱 마찰력의 형태로 모델링 하되, 미끄럼 속도에 따라 정 및 동 마찰 계수를 각각 0.3과 0.1로 설정하였다.

### 6.1 걷기

걷기의 관절각 데이터를 ADAMS 모델에 입력하여 시뮬레이션한 결과 모델이 안정적으로 정보행함을 확인하였다. 그림 9는 해당 동영상 결과를 0.5초 간격으로 포착한 것이다. 또한 그림 10은 몸통의 무게중심과 각 발 끝점의 중방향 움직임을 나타낸 것으로서 이를 그림 3과 비교해 보면, 몸통이 계획했던 대로 거동하며 정상상태에서 6mm/s의 속도로 전진함을 알 수 있다.

한편, 그림 11과 12는 각각 앞다리 관절의 구동 토크와 동력을 나타낸다. 최대 토크는 지지 다리 중에서도 어깨 피치(FL\_1, FR\_1)와 롤(FL\_2, FR\_2) 보다는 무릎 관절(FL\_3, FR\_3)에서 요구되며, 반대로 동력은 스윙하는 다리의 어깨 피치 관절에서 가장 크게 요구됨을 알 수 있다.

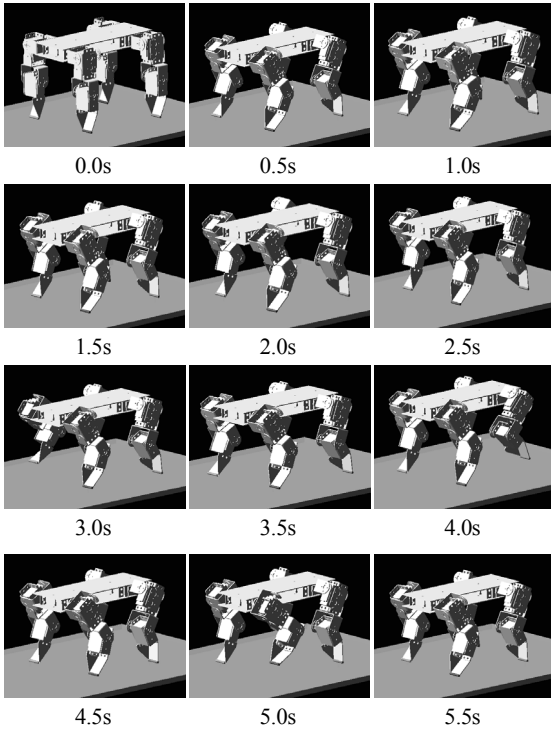


그림 9. Snapshots of the walking simulation model

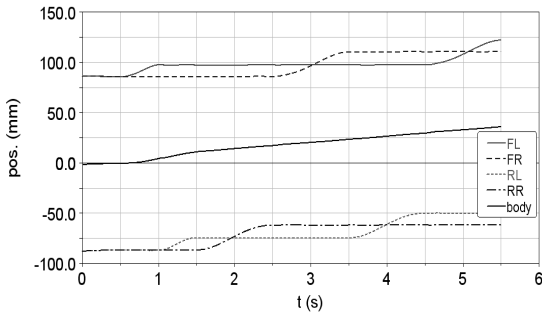


그림 10. Motion of the body and feet during walk

### 6.2 속도

그림 7의 속도용 관절각 데이터를 ADAMS 모델에 적용하여 시뮬레이션을 수행한 결과, 그림 13의 동영상 결과와 같이 모델이 안정적으로 보행함을 확인하였다. 그림 14는 그 때의 몸통의 무게중심과 각 발끝의 중방향 움직임을 나타낸 것으로서, 그림 6과 비교할 때 모델이 계획한 대로 잘 거동하고 있음을 알 수 있다. 또한 식 (1)에 근거하여 계산된  $x_{ZMP}$ 의 궤적 곡선으로부터 상당한 크기의 WSM이 존재함을 알 수 있다.

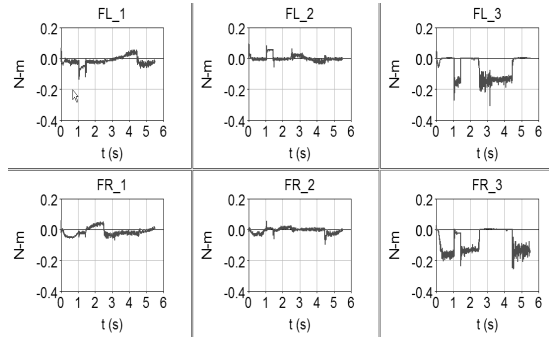


그림 11. Joint torques on forelegs during walk

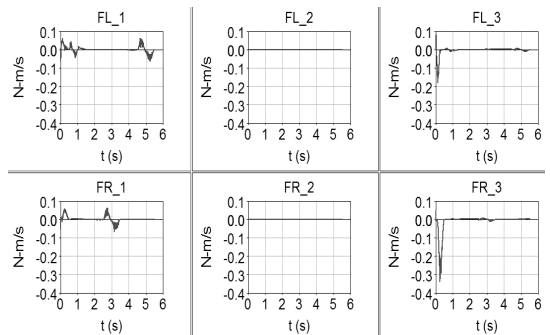


그림 12. Joint powers on forelegs during walk

한편, 그림 15는 앞 다리 관절의 구동 토크 추이를 나타낸 것으로서, 걷기에서와 같이 지지 다리의 무릎에 가장 큰 토크가 요구됨을 알 수 있다. 또한 현 속도 패턴의 경우 정상상태 속도=30mm/s로서 걷기보다 5배나 빠르지만 최대 구동 토크와 동력 측면에서는 각각 약 30%, 100% 정도만 커진다 (그림 16 참조). 이상의 관절 토크와 동력 및 회전각 범위에 관한 정보는, 다음 절에 소개될 실제 로봇용 모터의 용량이 충분한 것임을 입증한다.

## 7. 실험

### 7.1 로봇 시스템

제작된 로봇의 실시간 제어를 위하여 계층구조 방식을 채택하였으며, 상위에는 16MHz, 8-비트 사양의 마이크로 제어기인 ATmega128(Yoon, 2006), 하위에는 각 관절용 모터 제어를 배치하였다. 관절 구동 모터로는 사실상 하위 모터 제어를 내장한, 표 3과 같은 사양의 RC 서보 모터를 사용하였다. 한편 상위 제어기에 저장된 각 관절각 신호는 RS-232 직렬 통신 프로토콜에 의하여 하위 위치 제어기로 전달된다.

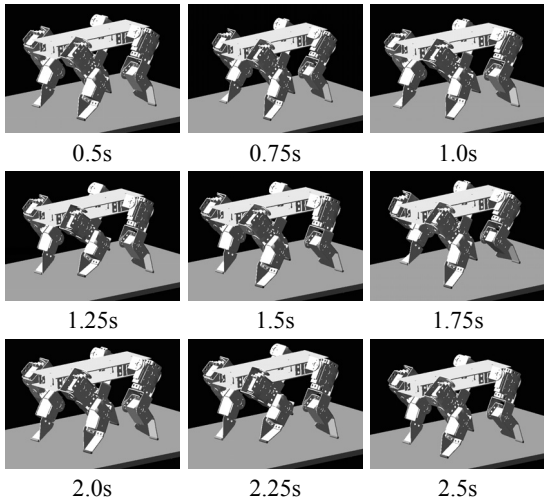


그림 13. Snapshots of the trotting simulation model

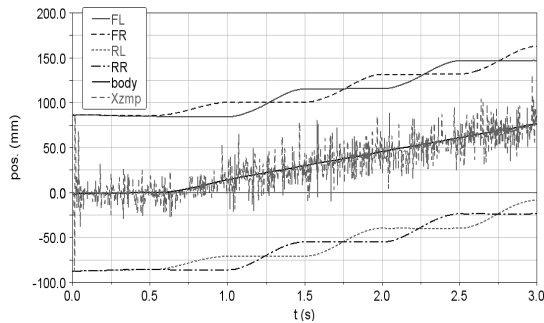


그림 14. Motion of the body and feet during trot

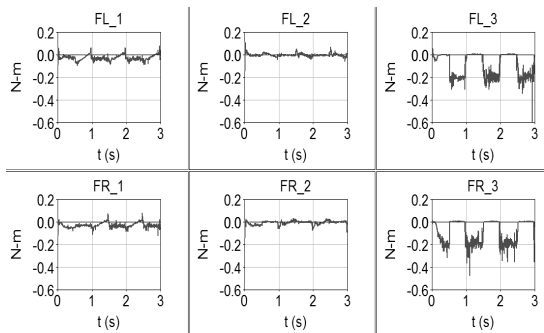


그림 15. Joint torques on forelegs during trot

### 7.2 보행 실험

실시간 보행 실험 결과, ADAMS 모델과 실제 로봇간의 질량 분포, 크기, 형상, 지면 특성 오차 등에도 불구하고 강건하게 로봇이 작동하였다. 그림 17, 18은 각각 실제 로봇의 걷기와 속도 과정을 시간 순으로 보여주는 것으로

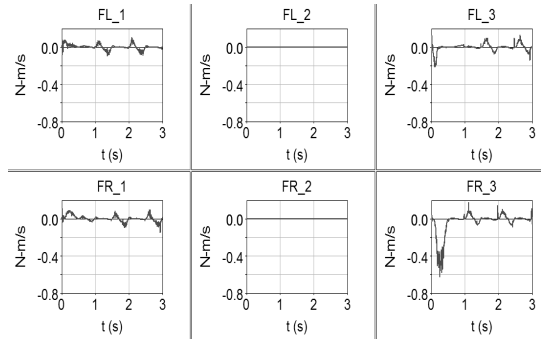


그림 16. Joint powers on forelegs during trot

표 3. Motor specifications

control method	digital PWM
control angle range	$\pm 90^\circ$
input voltage range	DC 4.8~7.2 V
speed @ 7.2V w/o load	8.1 rad/s
stall torque @ 7.2V	1.54Nm
response time	20 ms

서, 각각의 시뮬레이션 결과인 그림 9, 13과 비교할 때 잘 일치함을 알 수 있다.

참고로, 보폭=24mm 전후, 주기=2초로서 정상상태 속도가 약 12mm/s인 저속 속보의 경우에는 해당 시뮬레이션과 달리 실험에서는 몸통이 심하게 기우뎠거려며 세발이 지면에 닿는 불안정 현상이 나타났다. 이는 관성력의 영향보다는 앞에 열거한 여러 가지 현실적 오차 요인에 기인하며, 따라서 ZMP 개념에 의존하는 보행 방식의 한계성을 드러내는 것이다. 이에 현재 경우와 같이 보행 주기를 1초로 단축한 결과 보폭에 관계없이 로봇이 안정하게 보행하였고, 이는 곧 WSM의 유용성을 입증한다. 실제 강아지와 같은 생체뿐만 아니라, Bigdog의 경우를 유심히 관찰해보면 속도 시 보폭에 관계없이 상당히 짧은 보행 주기를 유지함으로써 WSM의 개념을 적극 활용하고 있음을 알 수 있다.

## 8. 결론

본 논문에서는 자체 제작한 건형 4족 보행 로봇을 이용하여, 생체를 모방한 두 가지 즉, 걷기와 속도 보행 패턴을 생성하고 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 통하여 그 실효성을 검증하였다.

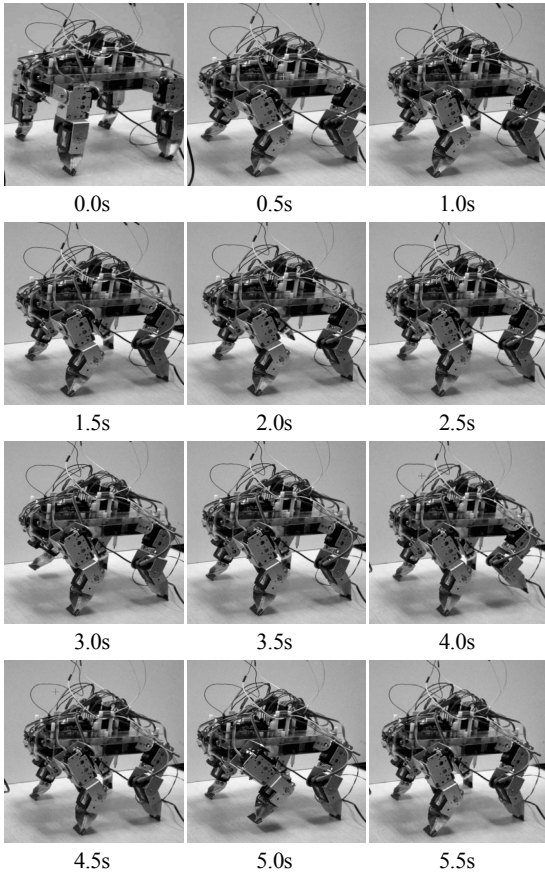


그림 17. Snapshots of the walking robot

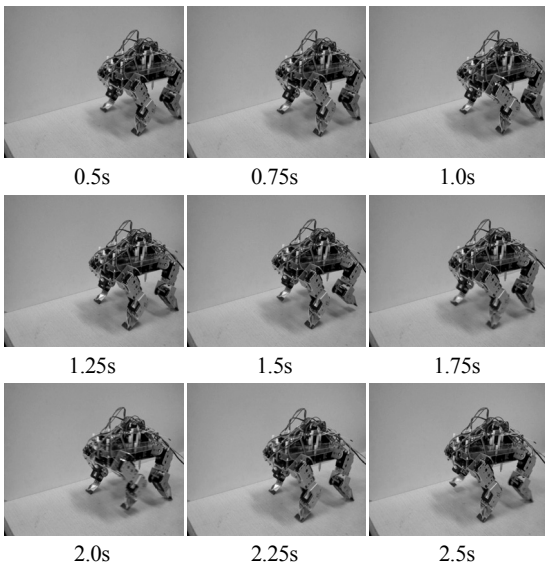


그림 18. Snapshots of the trotting robot

통상적으로 보행 패턴은, 생체 관찰 또는 상대적으로 단순한 정역학 기반의 안정성 예측 등을 통하여 생성된 후 실제 로봇에 적용된다. 그러나 로봇이 지면과 접촉하며 보행할 때의 복잡한 동역학적 현상에 대한 사전 검증이 패턴 개발의 효율성 관점에서 볼 때 더욱 바람직하다. 본 연구에서는 동 작업을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 수행하였으며 그 결과를 실험으로 재확인함으로써 패턴 개발에 상당한 도움이 되었다.

또한 실험을 통하여, ZMP 보다는 WSM의 개념이 동 보행의 고속 및 안정화에 크게 기여할 수 있으며 이를 위하여 보행 주기를 최대한 단축시키는 것이 유리하다는 사실을 발견하였다.

## 참고문헌

1. D.J. Tood, Walking machines: an introduction to legged robots, Kogan Page Ltd., 1985.
2. K. Kato and S. Hirose, "Development of quadruped walking robot, TITAN-IX - mechanical design concept and application for the humanitarian demining robot," Advanced Robotics, vol. 15, no. 2, pp. 191-204, 2001.
3. Bigdog, <http://www.bostondynamics.com>
4. D.M. Nunamaker and P.D. Blauner, "Normal and abnormal gait," Proceedings of Int. Veterinary Information Service, 1985.
5. R.B. McGhee and A.A. Frank, "On the stability properties of quadruped creeping gaits," J. Mathematical Biosciences, vol. 3, pp. 331-351, 1968.
6. S. Lim and I. Ko, "Development and application of a ZMP sensor system," Proceedings of KSME Spring Conf., pp. 1376-1381, 2005.
7. M. Vukobratovic, B. Borovac, D. Surla, and D. Stokic, Scientific fundamentals of robotics 7: biped locomotion, Springer-Verlag. 1990.
8. S. Lim and I. Ko, "Locomotions of a biped robot: static vs. dynamic gaits," Trans. of KSME(A), vol. 30, no. 6. 2006.
9. H. Kimura, Y. Fukuoka, and A.H. Cohen, "Adaptive dynamic walking of a quadruped robot on natural ground based on biological concepts," Int. J. of Robotics Research, vol. 26, no. 5, pp. 475-490, 2007.
10. J.J. Craig, Introduction to robotics - mechanics and control, 3rd Ed., Prentice Hall, 2005.
11. ADAMS, <http://www.mscsoftware.com>
12. D. Yoon, AVR ATmega 128, Ohm, 2006.





**임 승 철** (slim@mju.ac.kr)

1981 서울대학교 기계설계학과 학사

1983 KAIST 기계공학과 석사

1992 미) Virginia Tech, 박사

현재 명지대학교 기계공학과 교수

관심분야 : 모델링 & 시뮬레이션, 동역학 및 제어, 로봇 공학



**김 광 한** (tdream@nate.com)

2008 명지대학교 기계공학과 학사

2010 명지대학교 기계공학과 석사

관심분야 : 로봇 공학