

---

# 4족 보행로봇의 Trot 보행에 관한 연구

배철오\* · 안병원\* · 김현수\*

## A Study on Trot Walking for Quadruped Walking Robot

Cherl-O Bae\* · Byeong-Won Ahn\* · Hyun-Soo Kim\*

### 요 약

관절형 로봇은 바퀴구동로봇에 비해 인간과 비슷한 형태를 갖추고 있어 친화성이 높고 관절로 인하여 자유도가 높으며 접지점을 임의로 설정할 수 있다. 또한 접지위치와 본체와의 상대위치를 자유로이 설정할 수 있으며 관절을 매니플레이터로서 사용할 수도 있는 장점을 가지고 있다. 이에 반해 많은 자유도를 가지고 있어 기구가 복잡하고 이동속도가 바퀴구동로봇에 비해 늦으며 이동시 진동이 일어나기 쉽고 로봇이 넘어지지 않도록 하는 특별한 제어가 필요하게 된다. 많은 생물들의 기본다리인 4족형 구조는 동적안정을 유지하면서 이동을 계속할 수 있고, 또 보행중에도 기구적으로 쓰러짐을 회피할 수 있는 완전보행을 실현하는 최소한의 관절수로 구성되어 있는 보행형태이다. 이러한 보행실험을 위해 4족 보행로봇인 TITAN-VIII을 이용하여 Trot 보행 알고리즘을 연구하여 보행 실험을 행하였다.

### ABSTRACT

A legged robot is friendly to human because it is resemble to human. And the robot can obtain support points freely because it has high degree of freedom for several joint as compared with a wheeled robot. Also the robot can create the relative position at desired position between support position and robot. The joint of robot can used as manipulator. On the contrary the mechanism of robot is complicated to have many joint and moving speed is lower than wheeled robot. Also the legged robot is needed a special control not to fall on the ground because the robot is easy to vibrate when it is moving. The 4 leg structure is the minimum leg numbers not to fall and to realize safety gait continuously. A trot gait is investigated through experiments using a quadruped walking robot named TITAN-VIII.

### 키워드

Legged robot, wheeled robot, Quadruped walking robot, Trot gait

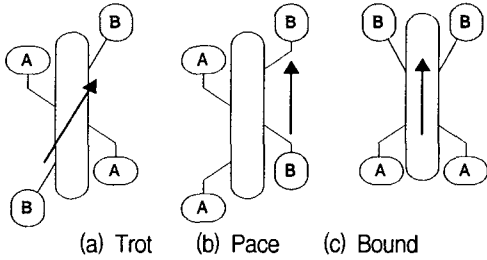
### 1. 서 론

서론부터는 2단으로 편집하세요. 관절이동형 로봇의 보행방법으로는 크게 정보행과 동보행 두 가지로 나누어 볼 수 있다[1]. 정보행은 항상 정적안정을 유지하는 보행으로 대표적인 것으로 기는

crawl 보행이 여기에 해당이 된다. 정보행은 동적안정을 유지하는 기간을 포함하는 보행으로 4족동보행에 있어서 기본적인 보행으로써 2다리를 쌍으로 움직이는 보행이 동물에 서 관측되고 있고, 각각 다음의 보행으로 불려지고 있다[2].

(a) Trot : 대각의 다리가 동시에 움직임

- (b) Pace : 좌우에 있어서 같은 쪽의 다리가 동시에 움직임
  - (c) Bound : 전후에 있어서 같은 쪽의 다리가 동시에 움직임
- 이들 보행에 대한 모습을 그림 1에 나타내고 있다.



(a) Trot (b) Pace (c) Bound  
 그림 1. 4족 동보행의 종류  
 Fig. 1 The type of dynamically stable gait

이들 보행방법 중 Bound 보행의 경우 보행을 위해서 상당히 큰 액추에이터가 필요하고 되고 따라서 소비에너지도 크게 되므로 실제 보행에는 그다지 사용되고 있지 않고 있다. Pace 보행의 경우에는 좌우측의 다리를 쌍으로 들어야 하므로 두 개의 다리를 들었을 경우 지지면을 지탱하는 한쪽의 두 다리만으로 중심을 잡기가 어렵게 된다. 따라서 정적인 안정을 유지하면서 이동을 계속할 수 있고 보행중에도 기구적으로 쓰러짐을 회피할 수 있는 Trot 보행방법이 4족보행 로봇에 주로 활용되고 있다[3][4]. 따라서 본 논문에도 이 Trot 보행을 위한 4족보행로봇인 TAITAN-VIII[5]을 이용하여 보행 실험을 행하였다.

Trot 보행에 있어서 보행중에 동체중심궤도를 진행방향에 대하여 좌우로 움직여 ZMP(Zero Moment Point)를 부드럽게 지지각 대각선상을 이동시키는 좌우요동보행[6]을 하도록 하였다.

ZMP는 로봇 본체에서 작용하는 힘이 지면에 투영된 것으로 이 지점에서는 모멘트가 존재하지 않게 된다. 그림 2에 ZMP를 나타내고 있다. 지면에 지지하는 다리의 대각선 위로 이 점을 유지하여 보행을 하게 되면 로봇은 안정한 보행을 유지할 수 있다.

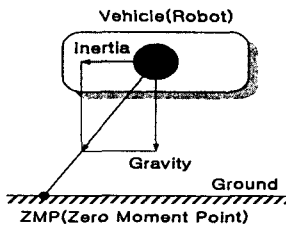


그림 2. ZMP  
 Fig 2. ZMP(Zero moment point)

그림 2에는 두 개의 지지하는 다리 사이의 대각선상의 ZMP를 따라가면서 y축 방향으로 좌우로 움직이며 x축방향으로 로봇이 이동하는 모습을 나타내고 있다. 로봇은 사인파 모양의 ZMP궤도를 따라 좌우로 부드럽게 움직여 넘어지지 않는 안전한 보행을 하게 된다.

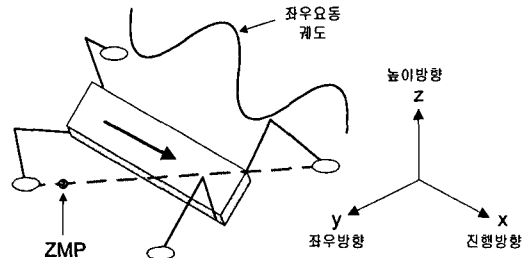


그림 3. 좌우요동보행  
 Fig 3. sway compensation trajectory

## II. 4족보행로봇의 좌우요동보행

로봇의 질점을 고려하여, 그 위치를  $(x_g, y_g, z_g)$ 로 한다. 바닥면이 수평이라고 가정하고, 바닥면으로부터의 높이  $z_g$ 가 일정하다고 하면, 바닥면에서의 ZMP의 위치  $(x_{zmp}, y_{zmp}, 0)$ 은

$$\begin{pmatrix} x_{zmp} \\ y_{zmp} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_g \\ y_g \end{pmatrix} - A \begin{pmatrix} \ddot{x}_g \\ \ddot{y}_g \end{pmatrix} \quad (1)$$

로 된다. 단  $A = \frac{z_g}{g}$ 이다. 또, 지지관절 대각선상을

$$\cos \theta x + \sin \theta y = d \quad (2)$$

로 하면, 그 위에 ZMP가 존재하기 위해서는

$$\cos \theta (x_g - A \ddot{x}_g) + \sin \theta (y_g - A \ddot{y}_g) = d \quad (3)$$

을 만족해야만 한다.

여기서 진행방향을 x축으로 하고, 진행방향으로의 중심 이동가속도는 일정하다고 가정한다. 즉,

$$x_g = x_0 + vt + \frac{1}{2} at^2 \quad (4)$$

로 하여, 이것을 식 (3)에 대입하면

$$\cos\theta\left(x_0 - Aa + vt + \frac{1}{2}at^2\right) + \sin\theta(y_g - A\ddot{y}_g) = d \quad (5)$$

로 되고, 이 비제차미분방정식의 해  $y_g$ 는

$$y_g - A\ddot{y}_g = 0 \quad (6)$$

의 해, 즉,

$$y_g = C_1^y e^{\sqrt{A}t} + C_2^y e^{-\sqrt{A}t} \quad (7)$$

로, 식 (5)를 만족하는 특수해의 합으로 된다. 여기서 특수해의 일반형을 시간  $t$ 의 다항식으로 하고, 해의 궤도가 아래의 식으로 주어진다고 가정한다.

$$y_g = C_1^y e^{\sqrt{A}t} + C_2^y e^{-\sqrt{A}t} + a_2^y t^2 + a_1^y t + a_0^y \quad (8)$$

궤도의 연속성

$$\left( \dot{y}_{g,t=0} = \dot{y}_{g,t=\frac{T}{2}}, y_{g,t=0} = -y_{g,t=\frac{T}{2}} \right)$$

경계조건으로 하고, 식 (5)에 대입하여 정리하면,

$$C_1^y = \sqrt{A} \cot\theta \frac{T\frac{a}{2} + (1 - e^{-\frac{T}{2\sqrt{A}}})v}{(e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}} - e^{-\frac{T}{2\sqrt{A}}})} \quad (9)$$

$$C_2^y = \sqrt{A} \cot\theta \frac{T\frac{a}{2} + (1 - e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}})v}{(e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}} - e^{-\frac{T}{2\sqrt{A}}})} \quad (10)$$

$$a_2^y = -a \cot\theta \quad (11)$$

$$a_1^y = -v \cot\theta \quad (12)$$

$$a_0^y = -x_0 \cot\theta + d \csc\theta \quad (13)$$

$$a_0 = \frac{d}{\cos\theta} + \frac{1}{4} \left( \frac{\sqrt{A} T (e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}} - e^{-\frac{T}{2\sqrt{A}}} + 2)}{(e^{\frac{T}{2\sqrt{A}}} - e^{-\frac{T}{2\sqrt{A}}})} - \frac{T^2}{4} \right) a - \frac{T}{4} a \quad (14)$$

가 얻어진다. 여기서,  $T$ 는 보행주기를 나타낸다. 이것은 로봇 본체를 좌우방향으로 요동시켜 ZMP를 항상 지지관절 대각선상에 유지하는 중심궤도이

고, 이 궤도를 실현하는 보행을 좌우요동보행이라 부른다.

### III. 4족 보행로봇의 하드웨어 구성

#### 3.1 4족 보행로봇 TITAN-VIII

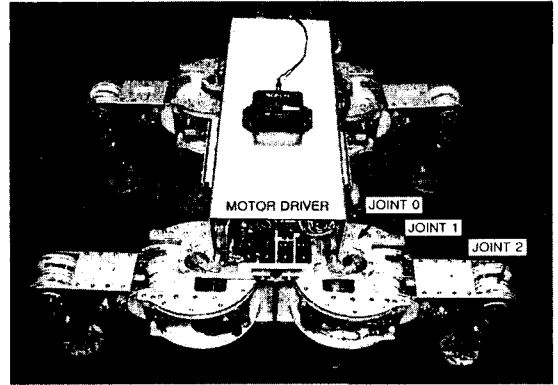
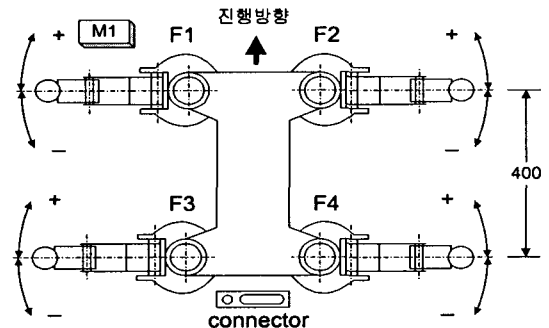


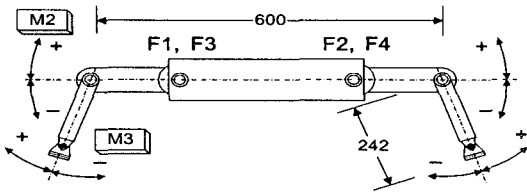
그림 4. TITAN-VIII 사진  
Fig 4. The picture of TITAN-VIII

그림 4에 4족 보행로봇인 TITAN-VIII의 사진을 나타내고 있다. TITAN-VIII 각각의 다리는 3자유도를 가지고 있고 모두 12자유도를 가지고 있다.

그림 5에서는 보행로봇의 전압의 극성에 따른 관절의 회전방향을 나타내고 있다. (a)그림의 경우 위에서 내려다본 로봇의 모습으로 M1(Motor 1) 모터에 가한 +, - 전압에 따른 회전방향을 나타내고 있으며 (b)그림의 경우 정면에서 본 모습으로 M2, M3 모터의 회전에 따른 관절의 움직이는 모습을 나타내고 있다. 앞다리와 뒷다리 사이의 간격은 400mm 정도이고, 정면에서 본 폭이 600mm, M3에 의해서 동작하는 관절의 높이가 약 242mm이다.



(a) 위에서 내려다본 모습



(b) 정면에서 본 모습

그림 5. TITAN-VIII의 관절 회전방향

Fig 5. The rotation direction of TITAN-VIII joint

그림 6은 로봇 관절이 동작할 수 있는 범위를 나타내고 있다. 각 축의 각도는 위치지시값과 potentiometer의 위치정보신호와의 편차가 0인 위치에서 정해진다.

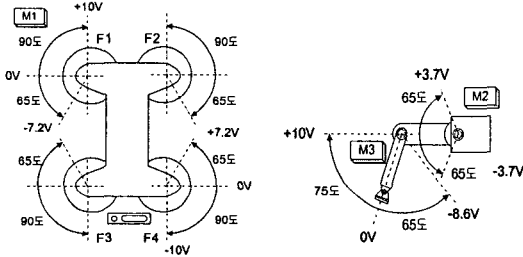
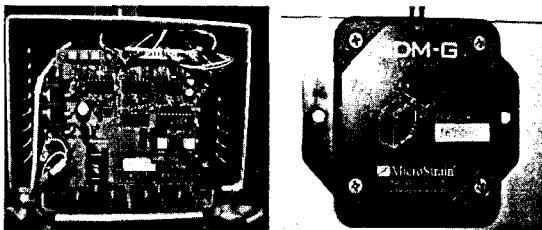


그림 6. 로봇 관절의 동작범위

Fig 6. The moving circle of robot joint

### 3.2 로봇의 제어부분

그림 7의 (a)는 로봇을 구동하기 위한 모터 드라이버로 각 모터당 하나씩 12개가 설치되어 있고 power MOS-FET에 의해 구동이 되며 별도의 냉각 장치 없이 로봇 본체를 방열판으로써 사용하고 있다. D/A 보드를 통해 구동지령을 모터 드라이버에 내리면 해당 모터는 구동하게 되고 이와 연동이 되는 potentiometer에 의해 위치값을 알아내게 되며 로봇이 보행을 하지 않는 중에도 전기브레이크가 들어가 있어 로봇은 정자세를 유지하게 된다.



(a)

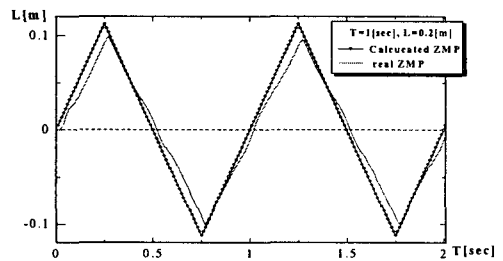
(b)

그림 7. DC 모터 드라이버 및 3D 모션센서  
Fig 7. DC motor driver and 3D motion sensor

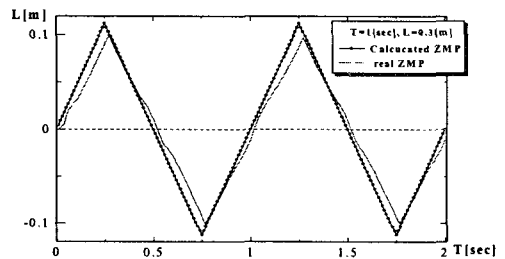
그림 7의 (b)는 로봇의 위치와 각속도를 피드백 받기 위해 3D 모션센서로 시리얼포트를 통해 x,y,z의 각 위치와 각속도 6개의 값을 불러오게 된다. 그밖에 12개의 모터출력을 위한 16Ch의 D/A 보드와 12개의 potentiometer로부터 각 위치값을 읽어오기 위한 16Ch의 A/D 보드가 설치되어 있다.

### IV. 보행실험

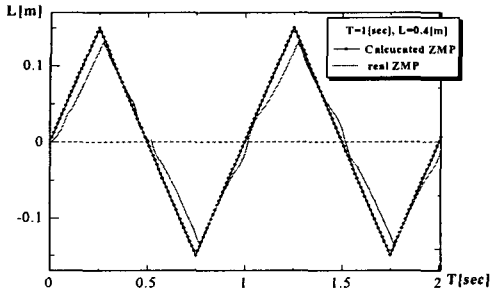
4족보행로봇인 TITAN-VIII의 좌우요동보행실험을 위해 사전에 보행을 위한 각 관절의 각도를 계산하고 10[msec]마다 계산된 값을 지령치로써 가하게 된다. 보행주기 T를 1[sec]로 하여 보행 1주기당 이동거리 L=0.2[m], 0.3[m], 0.4[m]로 보행실험을 한 결과를 그림 8에 나타내고 있다. x축은 시간축을 나타내고 있고, y축을 로봇관절의 이동거리를 나타내고 있다. 깨끗이 그려진 삼각형 모양의 파형이 계산에 의해서 연산된 이론적인 ZMP를 나타내고 있고, 이와 비슷하게 중첩된 그래프가 실제로 로봇이 ZMP의 위치를 따라 이동한 궤적을 나타내고 있다. 로봇이 좌우로 본체를 이동하면서 부드럽게 이동함을 알 수 있다. 3가지의 이동거리 변화에 따른 보행이 모두 잘 이루어짐을 확인할 수 있다.



(a) T=1[sec], L=0.2[m]



(b) T=1[sec], L=0.3[m]



(c)  $T=1[sec]$ ,  $L=0.4[m]$   
 그림 8. ZMP의 추종보행실험  
 Fig 8. Walking experiment of ZMP

### V. 결 론

4족보행이 가능한 TITAN-VIII를 이용하여 지면은 평평하고, 로봇의 바닥과 지면과는 미끄러짐이 없다는 가정하에 trot 보행실험을 한 결과 보행이 잘 이루어지는 것을 확인할 수 있었다.

보행은 단순히 전진과 후진의 동일한 보행을 하고 있으며, 장애물, 경사면등과 같이 외부조건에 따른 보행실험은 이루어지지 않았다. 향후 이러한 다양한 외부환경에 노출된 상태에서 완전한 보행을 할 수 있도록 여러 알고리즘을 개발하고 센서를 설치하는 등의 많은 연구가 필요할 것으로 사료된다.

### 참고문헌

[1] M.H. Raibert, et al., "Experiments in Balance with 3D One-Legged Hopping Machine", Robotics Research, MIT Press, Vol.3, No.2, pp.75-92, 1984

[2] M.H. Raibert, "Running with Symmetry", The International Journal of Robotics Research, Vol.5, No.4, pp3-19, 1987

[3] S. Hirose, K. Yoneda, R. Furuya, and T. Takagi. Dynamic and static fusion gait of a quadruped walking vehicle. In Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots

and Systems '89, pages 199-204

[4] K. Yoneda, H. Iiyama, and S. Hirose. Intermittent trot gait of a quadruped walking machine dynamic stability control of an omnidirectional walk. In Proc. Int. Conf. on Robotics and Automation, pages 3002-3007, 1996

[5] 廣瀬, 有川, "研究用プラットフォームしての普及型歩行ロボットTITAN-VIIIの開発", 日本ロボット學會誌, vol.17, No.8, pp.1191-1197, 1999

[6] K. Yoneda and S. Hirose. Dynamic and static fusion gait of quadruped walking vehicle on a winding path. Advanced Robotics, page 125-136

### 저자소개

#### 배철오(Cherl-O Bae)



1993년 2월 : 한국해양대학교 기관공학과 학사  
 1997년 8월 : 한국해양대학교 기관공학과 석사  
 2001년 8월 : 한국해양대학교 기관공학과 박사

2002년 3월~현재 : 목포해양대학교 전임강사, 조교수

※관심분야 : FA 및 용접자동화, 영상처리, 로봇 제어

#### 안병원(Byong-Won Ahn)



1986년 2월 : 한국해양대학교 기관공학과 학사  
 1991년 2월 : 한국해양대학교 기관공학과 석사  
 1996년 2월 : 한국해양대학교 기관공학과 박사

1996년 3월~현재 : 목포해양대학교 기관시스템공학부 전임강사, 조교수, 부교수

2002년 1월~2003년 1월 : 일본 큐슈대학 Post Doc.

※관심분야 : 로봇제어, FA 및 용접주변자동화



김현수(Hyun-Soo Kim)

1993년 2월 : 한국해양대학교 기  
관공학과 학사

1999년 2월 : 목포해양대학교 기  
관공학과 석사

2002년 2월 : 한국해양대학교 기  
관공학과 박사

2002년 3월~현재 : 목포해양대학교 전임강사, 조  
교수

※관심분야 : 마이크로프로세서, 영상처리, 로봇  
제어