

# 균형추를 장착한 4 족 로봇의 보행 안정성에 관한 연구

최기훈\*, 유재명#, 김영탁\*\*

## A Study on the Walking Stability of the Quadruped Robot with WBO

Gi Hun Choi\*, Jae Myung Yoo# and Young Tark Kim\*\*

### ABSTRACT

There are many types of walking robots in the world. For dynamic walking of the robots it is necessary to keep its dynamic stability. The dynamic stability is influenced by the position of ZMP (zero moment point).

In this paper we study the control of the ZMP position of walking robot. For experiment we developed a quadruped robot and analyzed the dynamic stability of the robot. Developed robot has 2 joints at each leg and WBO (weight balancing oscillator) on the body of the robot. The WBO is designed to move linearly from side to side when the robot walks dynamically.

Walking test was performed to verify the validity of the proposed methods. Especially we showed that the dynamic stability of the robot can be improved without sacrifice of the walking speed by control the WBO.

**Key Words** : Quadruped robot(4 족 로봇), ZMP(Zero moment point, 제로모멘트 점), Walking stability(보행 안정성), WBO(Weight balance oscillator, 균형추)

### 기호설명

$m_i$  = i 번째 강체의 질량  
 $\vec{r}_i = (x_i, y_i, z_i)$  = i 번째 강체 질량중심의 위치 벡터  
 $\vec{P} = (x_p, y_p, z_p)$  = XY 평면 위의 균형점 P 의 위치 벡터  
 $\vec{G} = (G_x, G_y, G_z)$  = 중력 가속도  
 $\vec{T}_M = (T_{Mx}, T_{My}, T_{Mz})$  = 점 P 에 작용하는 전체 모멘트

$m_b$  = 로봇 몸체의 질량  
 $m_{wb}$  = 균형추의 질량  
 $y_{wb}$  = 균형추의 y 축 좌표  
 $g$  = 중력 가속도  
 $h$  = 균형추의 높이

### 1. 서론

최근에 로봇의 응용분야가 다양해져, 인간에게는 위험하거나 악조건인 환경에서의 작업뿐만 아

\*\* 접수일: 2004년 9월 20일; 게재승인일: 2005년 4월 15일

\* 중앙대학교 대학원

# 교신저자: 중앙대학교 기계공학부

E-mail jaeyoo@ms.cau.ac.kr Tel. (02) 820-5311

\*\* 중앙대학교

나라 홈 서비스, 엔터테인먼트, 복지, 재활 등 여러 분야로 확대되고 있다. 이러한 다양한 분야에서의 로봇 응용은 로봇의 빠르고 유연한 자율이동성을 요구하게 된다.

보행 로봇은 1 족, 2 족, 4 족 그리고 6 족 등 여러 형태가 있을 수 있고, 이들은 차륜 이동로봇에 비해 비평탄 지형에서도 우수한 이동 능력과 적응 능력을 가지고 있기 때문에 최근에 많은 관심의 대상이 되고 있다. 특히 4 족 보행 로봇은 우수한 이동 능력뿐만 아니라 안정성, 에너지효율, 가반중량, 이동속도 등에서 많은 장점을 가지고 있다.

보행로봇에 관해서는 1878 년 E.Muybridge<sup>1</sup>가 걸음새를 사진으로 연속 촬영하여 평보(walk), 측대보(amble or pace), 속보(trot), 구보(gallop)로 걸음새의 형태를 분류하고 1969 년 Vukobratovic<sup>2</sup>가 제안한 ZMP(zero moment point)의 개념이 소개된 후 동적 보행 중 안정성 향상을 위한 연구가 시작되었다. 1970 년 Frank 등은 ZMP 의 개념을 적용한 최초의 2 족 로봇을 개발하였다.<sup>3</sup> 1983 년 Kato 등은 2 족 로봇이 안정하게 보행하기 위해 무게중심을 빠르게 옮기는 준 정적 걸음새(quasi-dynamic gait)를 제안하였다.<sup>4</sup> 1990 년 Shih<sup>5</sup> 등은 ZMP 를 수식으로 모델링 하였으며, 1993 년 Lin 등은 수학적 모델링과 시뮬레이션을 통해 4 족 로봇의 동적 모델링, 안정성, 에너지 효율에 대해 정리하였다.<sup>6</sup> 1995 년 Nanua 등은 4 족 로봇에 속보(trot gait)와 구보(gallop gait) 걸음새를 각각 적용하여 에너지 효율을 비교하였다. 여기서 그는 저속보행에서는 속보가 고속보행에서는 구보가 효율적임을 증명하였다.<sup>7</sup>

4 족 보행로봇에서 구현 가능한 걸음새에 대한 연구가 활발히 이루어지면서 1990 년대 중반부터는 보행에 최적인 걸음새를 적용하면서 에너지 효율을 높이고, 속도, 주기, 안정성을 향상하는 연구가 본격화되었다. 1991 년 Emura 등은 몸체의 고도를 인식하기 위해 부착한 고도센서(attitude sensor)를 이용하여 4 족 로봇의 동적 보행을 수행하였으며, 이 때 2 각지지 상태에서 몸의 균형을 유지하기 위해서 몸을 좌우로 진동하는 알고리즘이 필요하다는 것을 보였다.<sup>8</sup>

1995 년에 A. Takanishi 등은 동체 위에 인간의 상체 형태를 갖춘 4 족 보행로봇 'CENTAUR'를 측대보(pace gait)로 보행하면서 몸의 상체를 좌우로 흔들어(trunk motion) 균형을 유지하는 방법을 연구하였다.<sup>9</sup> 1999 년에 S. G. Lee 등은 4 족 로봇의 물결

걸음새를 안정화하기 위해 몸을 좌우로 기울여(tilting) 균형을 유지하는 방법을 연구하였다.<sup>10</sup> Takeuchi 는 말의 형태를 한 'MEL HORSE'를 개발하여 몸의 상체를 흔드는 방법(counter balance)으로 ZMP 를 제어하는 연구를 하였다.<sup>11</sup> 2001 년에 R. Kurazume 등은 'TITAN VIII'을 이용하여 몸을 흔들어 몸체 무게중심의 궤적을 보상(3D sway compensation trajectory)하는 방법으로 ZMP 를 2 각 지지상태의 대각선에 놓이도록 하여 보행하는 연구를 하였다.<sup>12</sup>

그러나 많은 분야에서 다양하게 이루어진 연구에도 불구하고 아직 실용적인 보행 로봇의 개발에는 많은 어려움이 있다. 즉, 무게를 가볍게 하기 위한 기구부의 설계, 보행 중 안정성을 높이기 위한 무게중심의 이동(swapping) 메커니즘 및 제어 방법 등의 연구가 필요하다.

본 연구에서는 4 족 로봇의 속보 걸음새를 대상으로 하여 평지는 물론 불규칙한 지형에서도 안정성을 최대로 유지하면서 빠른 동적 보행이 가능한 로봇의 구조를 제안하고, 로봇의 보행 시 안정성을 높이기 위한 제어 방법에 대하여 연구한다. 로봇의 개략적인 구조는 각 다리가 2 자유도인 4 개의 다리를 가지며, 동적 보행 중 안정성을 높이기 위해 보행 방향에 수직인 1 자유도의 균형추(WBO, weight balancing oscillator)를 몸체(body)의 중앙에 장착한다. 그리고 개발된 로봇의 보행을 수학적 해석과 보행실험을 통하여 균형추의 성능을 평가하고 동적 안정성을 검토하여 제안된 로봇의 우수성을 입증한다.

## 2. ZMP 와 균형추

### 2.1 ZMP

ZMP(zero moment point)의 개념은 1969 년에 Vukobratovic 에 의해 정의되었다. 보행 중에 로봇에 작용하는 모든 힘은 지지하는 다리에 집중하여 표현할 수 있다. 이때 바닥면의 반발력을 하나의 합력으로 표현 할 때, 모멘트가 0 이 되는 점이 바닥면에 존재하며, 이점을 ZMP 라 한다.<sup>13</sup>

로봇의 각 물체들을 임의의 공간상에 존재하는 질점들을 가정하자. 이때 임의의  $i$  번째 질점에 대하여 기준 좌표계(O-XYZ)에 관하여 벡터량을 정의하면 Fig. 1 로 나타낼 수 있다.

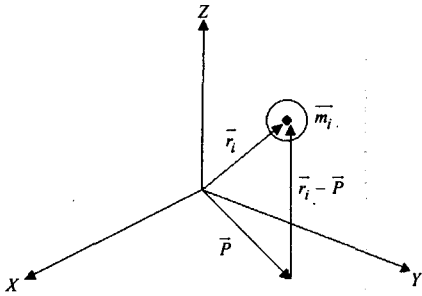


Fig. 1 Definition of vectors for a particle

링크의 하중은 각각의 무게중심에 집중되어 있으므로 Fig. 1 과 같이 임의의 기준 좌표계에 대하여 각 링크의 위치, 속도, 가속도 등의 벡터량을 표현할 수 있으며, D'Alembert Principle 에 의해 임의의 점 P 의 운동은 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\sum_i m_i (\bar{r}_i - \bar{p}_i) \times (\ddot{\bar{r}}_i + \bar{G}) + \bar{T}_M = 0 \quad (1)$$

만약 로봇의 관절이 n 개 있다면 식 (1)은

$$\begin{aligned} \sum_{i=0}^n m_i (\ddot{z}_i + g_z)(x_i - x_{zmp}) - \sum_{i=0}^n m_i (\ddot{x}_i + g_x)z_i &= 0 \\ \sum_{i=0}^n m_i (\ddot{z}_i + g_z)x_i - \sum_{i=0}^n m_i (\ddot{x}_i + g_x)z_i &= \sum_{i=0}^n m_i (\ddot{z}_i + g_z)x_{zmp} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=0}^n m_i (\ddot{z}_i + g_z)(y_i - y_{zmp}) - \sum_{i=0}^n m_i (\ddot{y}_i + g_y)z_i &= 0 \\ \sum_{i=0}^n m_i (\ddot{z}_i + g_z)y_i - \sum_{i=0}^n m_i (\ddot{y}_i + g_y)z_i &= \sum_{i=0}^n m_i (\ddot{z}_i + g_z)y_{zmp} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서

$x_i, y_i, z_i$  : i 번째 링크 무게중심의 지지각 기준 좌표계에 대한 위치

$\ddot{x}_i, \ddot{y}_i, \ddot{z}_i$  : i 번째 링크 무게중심의 지지각 기준 좌표계에 대한 가속도

으로 표현되고, 식 (2)와 식 (3)을  $x_{zmp}, y_{zmp}$  로

각각 정리하면

$$x_{zmp} = \frac{\sum_{i=0}^n m_i (\ddot{z}_i + g_z)x_i - \sum_{i=0}^n m_i (\ddot{x}_i + g_x)z_i}{\sum_{i=0}^n m_i (\ddot{z}_i + g_z)} \quad (4)$$

$$y_{zmp} = \frac{\sum_{i=0}^n m_i (\ddot{z}_i + g_z)y_i - \sum_{i=0}^n m_i (\ddot{y}_i + g_y)z_i}{\sum_{i=0}^n m_i (\ddot{z}_i + g_z)} \quad (5)$$

이다. 이 때 Z 축 방향 위치 성분은 바닥면에 존재하기 때문에 항상 0 이 된다.

## 2.2 균형추

균형추를 이용하여 ZMP 를 제어하면 관절 수를 줄일 수 있어 로봇구조가 간단해지고, 제어와 에너지 효율 측면에서도 상대적으로 우수하다.

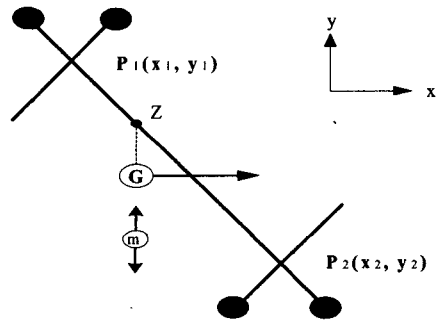


Fig. 2 Walking situation

Fig. 2 에 1 축의 균형추를 가진 로봇이 보행하는 중에 2 각 지지구간의 상태를 나타낸다. 이 때 로봇은 x 축 방향으로 등속운동을 하고  $p_1(x_1, y_1), p_2(x_2, y_2)$  는 지지축 선상에 있을 때, 지지축에 작용하는 중력에 의한 모멘트  $M_b$  는

$$M_b = \left\{ \left( \frac{y_1 + y_2}{2} - y(t) \right) m_b g + (y_{wb} - y(t)) m_{wb} g \right\} \sin \theta \quad (6)$$

이고, 균형추에 발생하는 모멘트  $M_{wb}$  는

$$M_{wb} = -m_{wb} h \ddot{y}_{wb} \sin \theta \quad (7)$$

이므로 전체 모멘트 다음과 같다.

$$M_t = M_b + M_{wb} \quad (8)$$

여기서

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{x_2 - x_1}{y_1 - y_2} \right) : \text{균형추의 이동축과 지}$$

지축의 사이각

$$y(t) = \frac{y_2 - y_1}{T} t + y_1 : \text{ZMP의 위치}$$

로봇의 안정한 보행을 위해서는 전체 모멘트가 항상 영이 되어야 하므로 식 (8)로부터 균형추의  $y$  축 좌표  $y_{wb}$ 를 구하면 다음과 같다.

$$y_{wb} = C_1 \exp(\sqrt{\frac{g}{h}}t) + C_2 \exp(-\sqrt{\frac{g}{h}}t) - \frac{a_1}{m_{wb}g} t - \frac{b_1}{m_{wb}g} \quad (9)$$

여기서

$$a_1 = -\frac{y_2 - y_1}{T} g(m_{wb} + m_b)$$

$$b_1 = \frac{m_b g (y_1 + y_2)}{2} - y_1 g(m_{wb} + m_b)$$

$$C_1 = \frac{a_1 \sqrt{h/g}}{m_{wb} g} \frac{1}{1 + \exp(\sqrt{g/h}T)}$$

$$C_2 = -\frac{a_1 \sqrt{h/g}}{m_{wb} g} \frac{1}{1 + \exp(-\sqrt{g/h}T)}$$

### 3.4 족 보행 로봇의 구조와 제어

#### 3.1 로봇의 구조

본 절에서는 보행 실험을 위해 제작된 4 족 로봇의 구조와 제어부동에 관하여 기술한다.

Fig. 3에 본 연구에서 보행 실험을 위해 제작한 4 족 보행 로봇의 간략한 구조와 센서의 위치를 나타낸다.

제작된 로봇의 전체 크기는 168\*244\*80mm 이고, 제어부는 몸체의 상단에 위치한다. 그리고 균형추는 몸체와 제어부 사이의 중앙에 놓여져 있다. 로봇은 전원을 탑재하고 있으며, Fig. 3에서 보는 바와 같이 3 종류의 위치 센서를 장착하여 전방과 후

방의 장애물 감지 및 지면의 상태를 감지할 수 있다. 세부적인 내용은 다음 항에 설명한다.

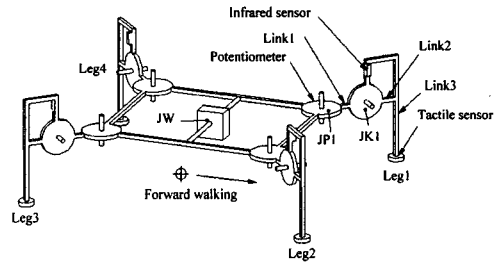


Fig. 3 Schematic of the quadruped robot

#### 3.1.1 로봇의 몸체와 다리

Fig. 4에 보여진 구조로 몸체를 구성하여 기하학적 중심에서 상하좌우로 대칭 위치에 4 개의 다리를 장착하고, 중앙에는 균형추가 장착되어 있다. 또한 동체의 휘어짐을 방지하는 상판은 제어부의 PCB 보드로 하였다.

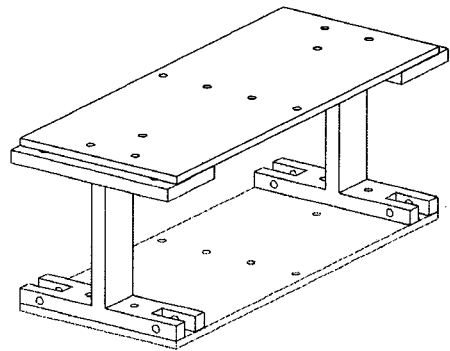


Fig. 4 Schematic of the body

몸체의 재질은 두랄루민으로, 이것은 무게가 가볍고 강성이 우수할 뿐 아니라 정전압용 회로 부품의 방열 기능을 포함하고 있어 불필요한 무게를 줄일 수 있다.

로봇의 각 다리 구조와 명칭은 Fig. 5에 보인다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 각 다리는 2 개의 관절과 3 개의 링크로 구성되어 있으며, 링크 2와 링크 3은 평행사변형 연동구조로 되어 발바닥의

위치는 링크 2 에 의해 결정된다.

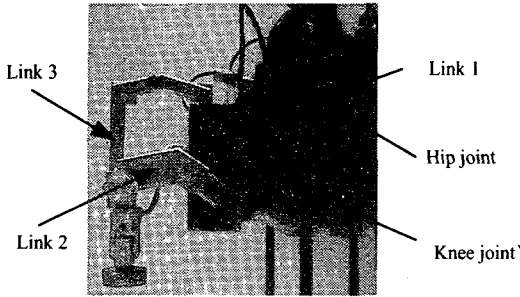


Fig. 5 Structure of the leg

또한 Fig. 5 에서는 로봇 다리의 관절 구동용 액추에이터를 볼 수 있다. 이 액추에이터는 5 단으로 감속되는 감속기어 모듈과 제어용 드라이버가 일체화되어 있는 Hitec 社의 서보 모터이다. 이 모터의 특징은 크기가 작지만 큰 토크를 가지는 것이다. Table 1 은 제작된 로봇의 관절 구동용 액추에이터 사양을 나타내고 있다.

Table 1 Specification of the leg's actuators

	Hip Joint	Knee Joint
Model	HS-422	HS-544BB
Torque[kg mm]	41	55
Speed[sec/60° ]	0.16	0.17
Size[mm]	40.6x19.8x36.6	39.8x19.8x35.8
Weight[g]	45.5	44.5

### 3.1.2 균형추

동적 걸음새에서는 ZMP 를 제어해야만 안정된 걸음새가 가능하다. 이를 위해 본 연구에서는 균형추를 설계 제작하였다. 이것은 로봇 전체무게의 34%에 해당하는 0.65kg 이며, 이동 행정은 145mm 의 범위이다. 또한 전원용 건전지를 균형추의 주 구성부품으로 사용하여 추가적인 무게의 증가를 줄였다. Fig. 6 은 제작된 균형추의 전경과 몸체에 부착된 모습이다.

균형추의 운동은 랙-피니언(rack-pinion) 방식으로 되어 있으며 동체의 바닥에 랙을 일체화하여 보행 방향과 수직한 좌우 방향으로 운동하며 최대

속도는 417mm/s 이다. 균형추의 운동으로 사용된 모터는 Hitec 社의 HS-925MG 로서 다리에 사용된 모터와 같은 구조이다. Table 2 에 HS-925MG 의 사양을 나타낸다.

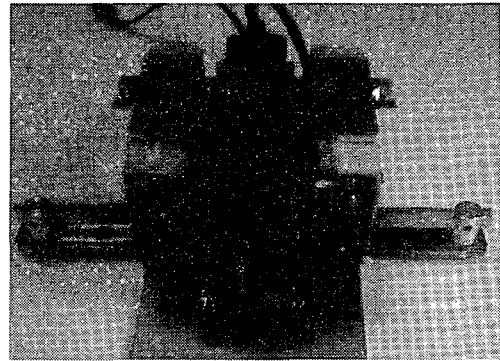


Fig. 6 Overview of the WBO

Table 2 Specification of the WBO's actuator

	WBO Joint
Model	HS-925MG
Torque[kg mm]	73
Speed[sec/60° ]	0.09
Size[mm]	39.2x20.0x37.8
Weight[g]	58

### 3.1.3 전원부

자율 이동을 위해 로봇은 전원용 전지를 탑재하고 있다. 사용된 전지는 Sanyo 社의 HF-A1U(1.2V, 1400mA)와 HF-4U(1.2V, 700mA)의 Ni-MH 형 이다. 이것은 재충전이 가능하고, 동급의 니카드(Ni-Cd) 충전지에 비해 부피는 20% 정도 축소되고, 무게는 30% 정도 가볍다.

Fig. 7 에 본 연구에서 사용된 전원과 모터의 구성을 나타낸다. 그림에서 보듯이 전원을 3 개의 절연된 전지팩으로 나누어 힙 관절, 무릎 관절 그리고 로직용으로 분리하여 구성하였다. 그 이유는 첫째, 보행 시 모터에 발생하는 순간 최대 소모 전력을 분산하여 보행 속도를 극대화 하기 위함이고, 둘째 모터 구동 시 발생하는 전압 강하로 인한 제어부의 오동작을 방지하기 위함이다.

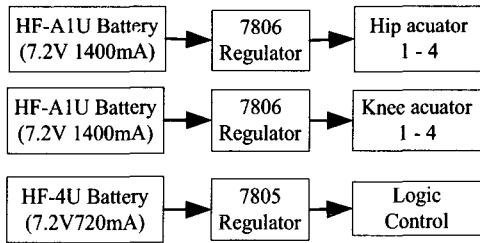


Fig. 7 Power systems

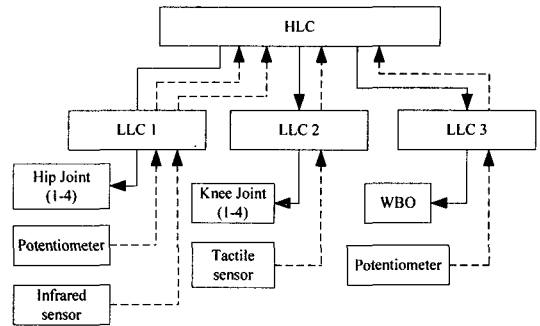


Fig. 9 Control system

### 3.2 로봇의 제어

#### 3.2.1 센서

로봇이 변화하는 환경에 대한 정보를 감지하여 자율적인 보행을 하기 위해 로봇에 장착된 센서는 3 가지 형태로서 총 16 개를 장착하였다. Fig. 8 에 3 종류의 센서와 부착된 위치를 나타낸다.



(a) Position sensor (b) Infrared sensor (c) Tactile sensor

Fig. 8 Type and position of the sensors

첫번째는 힙관절의 위치를 감지하기 위한 회전형 위치 센서로서 힙관절 모터에 1 개씩 총 4 개를 장착하였다(Fig. 8 (a)).

두번째는 장애물의 유무를 감지하기 위하여 반사형 적외선 센서를 다리의 진행 방향에 총 4 개를 부착하였다(Fig. 8 (b)).

그리고 마지막으로 발바닥이 지면에 닿는지의 여부와 경사면을 감지하기 위해 다리와 발바닥 연결부에 2 개씩 모두 8 개를 장착하였다(Fig. 8 (c)).

#### 3.2.2 제어부

로봇의 전체 제어 시스템은 보행 알고리즘의 계산 및 통합 제어를 위한 상층 제어기(HLC) 1 개와 각 다리와 균형추의 구동 및 센서로부터의 신호를 처리하기 위한 하층 제어기(LLC) 3 개로 구별된다. Fig. 9 에 전체 제어 시스템의 신호 흐름도를 보인다.

상층 제어기는 보행을 위한 다리의 이동 궤적과 착지점 선정 및 역학에 의한 착지점의 위치를 액추에이터의 제어값으로 좌표를 변환한다. 그리고 하층 제어기 1(LLC 1)은 힙관절의 각 모터와 링크 1 의 위치 및 장애물 감지를 처리하고, 하층 제어기 2(LLC 2)는 무릎 관절의 각 모터와 발바닥에 장착된 착지 감지 센서를 제어하고, 하층 제어기 3(LLC 3)에서는 균형추를 구동하는 모터와 그것의 위치를 제어한다.

본 연구에서 사용된 상· 하층 제어기는 ATMELE 사의 8 비트 마이크로 컨트롤러로서 AT90s8535, AT90s4434 을 사용하였다.

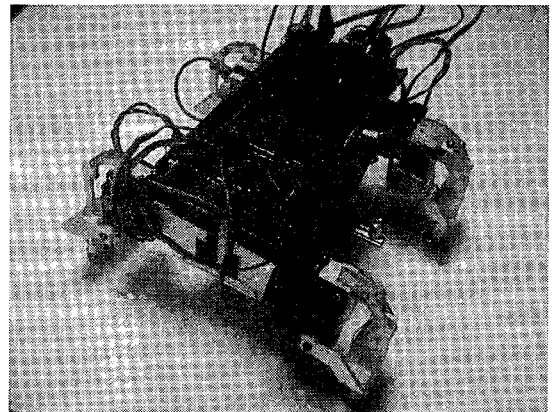


Fig. 10 Overview of the robot

Fig. 10 은 제작한 로봇의 전체 모습을 보인다. 제어부는 로봇의 상단에 위치하여 제어부의 구성과 함께 몸체의 일부 구조물의 역할을 하고 있다. Table 3 은 제작된 로봇의 주요 사양이다.

Table 3 Specification of the robot

Item		Unit	Specification
Body Size	Length	mm	168
	Width	mm	70
	Height	mm	66
Leg Size	Link 1	mm	48
	Link 2	mm	39
	Link 3	mm	41
Height of leg	Minimum	mm	10
	Maximum	mm	78
Mobility	No. of Legs	ea	4
	Active DOF	ea	8
	Passive DOF	ea	4
Capacity	Max speed	mm/s	178
	Gait period	sec	0.45
	Stride	mm	80
	WBO stroke	mm	145
	WBO Max. speed	mm/s	417
Weight	Total weight	kg	1.9
	WBO	kg	0.65
	Battery	kg	0.4
	Load Max.	kg	1.02
Energy	Power consumption	Watt	2.5

디딤돌이 0.58 로 매우 빠른 보행 속도를 가지는 것을 알 수 있다.

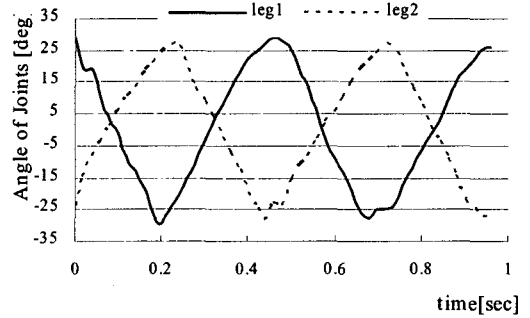


Fig. 11 The joint positions of the leg 1 and leg 2

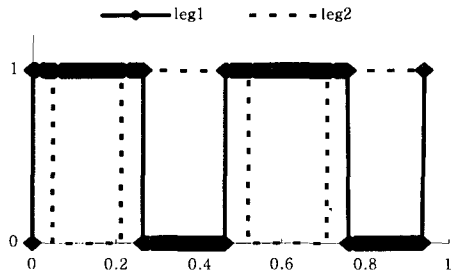


Fig. 12 Duty factor of the robot

본 연구에서 동적 보행 시 안정성을 향상시키기 위하여 설계한 균형추 궤적의 변화는 Fig. 13 에 나타낸다

#### 4. 보행실험

제작된 4 족 보행 로봇은 대각선에 위치한 다리를 쌍으로 보행 하는 속도 걸음새를 이용하여 보행 실험을 하였다.

Fig. 11 은 속도 걸음새를 수행하는 로봇의 링크 1 과 링크 2 의 회전각도로서 보행 방향에 수직 한 축에 대해 약  $\pm 28^\circ$  의 회전각을 보인다. 로봇의 일반적인 보행 중의 보폭은 80mm 이고, 보행 주기는 0.45[sec]이다.

다리 1 과 다리 2 가 지면에 닿아 있는 시간을 Fig. 12 에 보인다. Fig. 12 에서 '1'은 다리가 바닥에 닿은 상태이고, '0'은 그렇지 않은 상태로서 로봇의

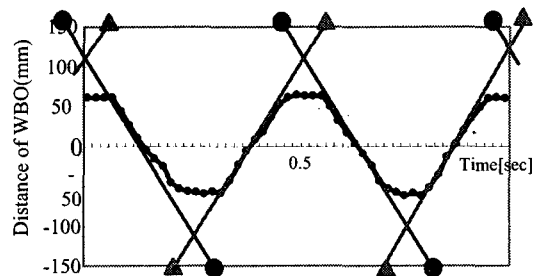


Fig. 13 Real trajectory of the WBO

Fig. 13 은 보행 중 지지하는 다리의 위치에 따

른 운동 궤적으로서, 두 다리로 지지하고 보행할 때 균형추의 위치는 지지대각선 주위에 있지만, 다리가 바뀌는 입각 전환기 중에는 균형추의 진행 방향을 순간적으로 바꾸는 것이 불가능하여 안정 영역을 벗어나지만, 지지대각이 바뀌면 균형추의 궤적은 다시 대각선상으로 복귀하여 안정을 회복함을 알 수 있다.

Fig. 14는 균형추를 장착한 경우와 그렇지 않은 경우에 발생하는 모멘트의 크기를 나타낸다. Fig. 14에서 ZMP를 제어하기 위해 균형추를 제어했을 경우가 그렇지 않은 경우에 비해 1/3.5 정도 모멘트가 감소하여 안정성이 향상됨을 알 수 있다.

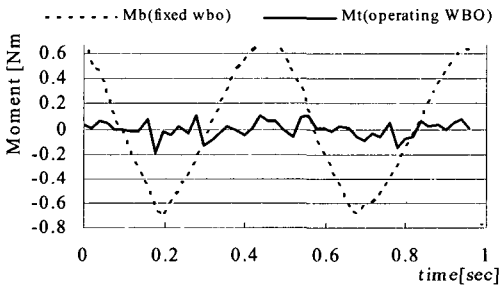


Fig. 14 Moments

균형추를 몸체의 중앙에 정지한 상태와 적절히 운동한 상태로 보행 시험을 하여 몸체의 평형도를 측정하였다. Fig. 15는 대각선에 쌍을 이루는 함께 움직이는 두 다리에 대해, 보행 중에 지면에 접촉하는 시간을 검출한 결과이다. 두 다리의 각각에 대해 디딤울을 계산하여 몸체의 평형도를 비교할 수 있고, 이를 이용하여 동적 안정성의 향상 여부를 판단하였다.

Fig. 16은 앞다리와 뒷다리의 착지시간을 구분하여 나타낸 것이다. (a)는 앞다리의 착지시간이고, (b)는 균형추를 정지시킨 경우의 뒷다리 착지시간 (c)는 균형추를 제어한 경우의 착지시간이다.

Fig. 16의 (b)와 (c)에서 균형추를 적절히 제어했을 경우 뒷다리의 디딤울이 앞다리와 이상적으로 일치하지는 않지만, (b)에 비해 상당히 규칙적이고 반복적인 형태를 나타내고 있다. 이것을 디딤울로 비교하면 균형추를 제어했을 경우가 그렇지 않은 경우에 비하여 약 24% 정도 평형성이 향상되었다.

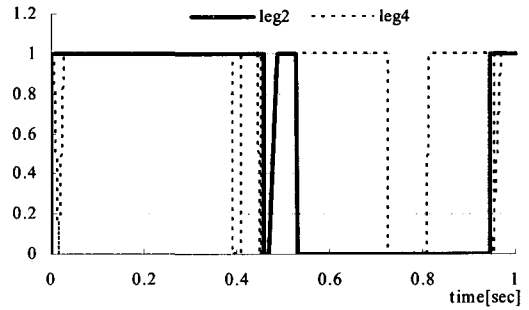


Fig. 15(a) Duty factor in fixed WBO

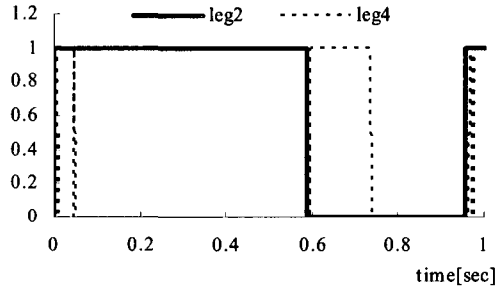


Fig. 15(b) Duty factor in operating WBO

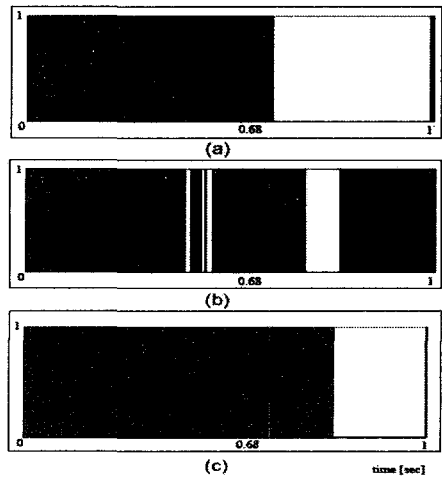


Fig. 16 Comparative graph of the duty factor in case of (fixed, operation) WBO



## 5. 결론

디딤돌이 0.75 이하인 동적 보행의 로봇은 보행 속도를 유지하면서 안정성을 높이기 위해서는 ZMP 를 제어해야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 전원용 전지를 균형추로 사용하여 ZMP 의 위치를 제어할 수 있는 4 족 보행 로봇을 제작하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 로봇의 동적 안정성을 향상시키기 위한 균형추의 운동 궤적과 모멘트에 대한 식을 유도하였다.
2. 균형추를 로봇 몸체의 내부에 장착하여 무게 중심점이 낮아 기구적으로 안정감을 높일 수 있었다.
3. 균형추의 중량은 로봇 전체의 약 34%로 이는 에너지 효율을 감소시키는 원인이 된다. 하지만 제작한 로봇에서는 균형추를 로봇 구조물의 일부로 구성하여 실체는 약 1/3 의 중량만이 추가되었다.
4. 상층과 하층 분산 제어기를 구성하여 처리 속도가 증가되었다. 따라서 다리의 이동 속도를 높일 수 있었으며 이는 디딤돌이 0.58 로 0.75 에 비하여 66%의 속도 향상을 가져왔다.
5. 4 족 로봇의 경우 2 각지지 대각선이 두 개 존재하기 때문에 2 축의 균형추 제어가 필요하지만, 1 축의 균형추만 제어한 경우에 대해 모멘트 변화량을 계산하고 보행실험을 하였다. 그 결과 1 축의 균형추 제어는 보행 속도를 감소하지 않으면서 모멘트의 크기가 약 35%로 감소하여 안정성이 향상되었다.
6. 보행 중 동체가 평형을 유지하는 정도를 본 연구에서는 앞·뒷다리의 디딤돌로 비교하였다. 그 결과 균형추를 이용하면 그렇지 않은 경우에 비하여 동체의 평형성이 24% 향상되었다.

## 후 기

본 연구는 중앙대학교 학술연구비 지원에 의한 것이다.

## 참고문헌

1. Muybridge, E., Lewis, S., "Animals in Motion," Dover Pubns, 1957
2. Vukobratovic, M., Juricic, D., "Contribution to the Synthesis of Biped Gait," Proc. IEEE Trans. On Biomedical Eng., Vol. BME-16, No. 1, 1969
3. Vukobratovic, M., Frank, A., and Juricic, D., "On the Stability of Biped Locomotion," Proc. of the IEEE Trans. on Biomedical Eng., Vol. BME-17 No. 1 pp. 25-36, 1970
4. Kato, T., Takanishi, A., Ishikawa, H., "The Realization of Quasi-Dynamic Walking by a biped Walking Machine," Proc. of the 4th CISM-IFTOMM Symposium, Theory and Practice of Robots and Manipulation, pp. 341-351, 1983
5. Shih, C., Churng, S., Lee, L., "Trajectory Synthesis and Physical Admissibility for a Biped Robot During the Single-Support Phase," IEEE, pp. 1646-1652, 1990
6. Lin, B., Song, S., "Dynamic Modeling, Stability and Energy Efficiency of A Quadrupedal Walking Machine," IEEE, pp. 367-373, 1993
7. Nanua, P., Waldron, K., "Energy Comparison Between Trot, Bound, and Gallop Using a Simple Model," Trans. of the ASME, Vol. 117, pp. 466-473, 1995
8. Emura, T., Arakawa, A., "Attitude Control of a Quadruped Robot during Two Legs Supporting," 91 ICAR., Fifth International Conference on Advanced Robotics, Vol. 1, pp. 711-716, 1991
9. Takanishi, A., Yamaguchi, J., Iwata, M., "Dynamic Quadruped Walking Stabilized with Trunk Motion," IEEE, pp. 165-172, 1995
10. Lee, S., Cho, C., "On-line control algorithm of a quadruped walking robot with quasi-static model," Proc. of the IEEE/RSJ Inter. Con. on Intelligent Robots and Systems, pp. 1645-1650, 1999
11. Takeuchi, H., "Development of MEL HORSE," Proc. of the IEEE Inter. Con. on Robotics & Automation, pp. 3165-3171, 2001
12. Kurazume, R., Hirose, S., Yoneda, K., "Feedforward and feedback dynamics trot dynamics control for Quadruped walking vehicle," Proc. of the IEEE Inter. Con. on Robotics & Automation, pp. 3172-3180, 2001
13. Park, I.G., Kim, J.G., "Dynamic walking planning and inverse Dynamic Analysis of biped robot," J. of the KSPE, Vol. 17, No. 9, pp. 133-144, 2000