

사각 보행 로봇의 제작 및 균형추를 이용한 안정성 향상에 관한 연구

강 신천* 오 준호** 정경민**

A Development of 4-legged Walking Machine and the Enhancement
of Static Stability Margin Using Balancing Weight

Sin Cheon Kang* Joon Ho Oh** Gyeong Min Cheong**

* 국방과학 연구소

** 한국과학 기술원

Abstract

As the application of robotic systems expand its scope, more research efforts are given in providing mobility to the robotic systems so that they can travel across various paths including those with formidable obstacles such as stairways or rough terrains. Legged locomotion is mainly concerned because the walking motion, like that of animal behavior, has many advantages over wheel type or track type locomotion especially in rough terrain.

Walking robots, in general, having a discrete number of legs, have inherently low static stability. Static stability can be increased to a certain degree, by improving walking method, but it has many limitations such as reduced travel speed. A very promising possibility lies in the use of balancing weight, nevertheless its actual implementation is very rare.

In this study, a 4-legged walking machine is developed and the static stability margin is increased with the balancing weight.

In the future, this robot will be used to make an experiment on the walking in rough terrain.

1. 서론

로봇 기술의 발전과 함께 로봇의 응용 분야가 점차 확장되어감에 따라 계단이나 험한 지형에서도 이동 및 작업이 가능한 로봇에 대한 관심이 높아지고 있는데 특히 험한 지형의 경우 바퀴식 이동 방식에 비해 동물처럼 다리를 이용한 보행 방식이 적합하므로 다리를 이용한 보행 로봇에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

보행 로봇은 다자유도의 복합적인 시스템이어서 이에 대한 연구를 위해서 많은 경비와 노력이 기울여져왔는데 소형으로 제작하는 경우 제작이 용이하고 제작 비용 및 시간의 절감, 실험이 간편하다는 장점이 있으며 걸음세에 관한 연구를 주목적으로 하는 경우에는 실제 문제점을 파악하는데 충분하다.

보행 로봇의 설계시 가장 고려되어야 할 점은 운동성 및 안정성의 확보이므로 이를 고려하여 다리 구조, 깃수등을 정하게 되는데 다리의 깃수가 많아질수록 운동성 및 안정성의 측면에서는 유리하지만 많은 수의 다리를 제어하기에 어려우므로

주로 4각 및 6각 보행 로봇에 대한 연구가 행해지고 있다. 특히 4각 보행 로봇에 대한 연구가 더욱 활발한데 4각 보행 로봇의 경우 제어해야 할 다리의 수가 작은 장점이 있는 반면 안정 여유가 작으며 특히 기구학적 오차가 큰 경우 및 비평탄면 보행의 경우 안정성의 증대가 절실하다.

보행방법의 개선으로 안정성을 증대시키는데에는 한계가 있으므로 균형추로 무게중심을 이동시키는 것과 같은 보조 수단을 이용하는 방법이 있을 수 있는데 균형추를 이용하여 안정성을 증대시키는 방법은 아직 구현되어 있지 않으며 실제 그 효과 및 한계를 알아볼 필요가 있다.

본 연구의 목적은

- 1) 비평탄면에서 보행이 가능한 구조의 소형 4각 보행 로봇을 설계, 제작하고
- 2) 균형추를 이용한 안정성의 증대 효과를 알아보는데 있다.

2. 설계 및 제작

보행 로봇의 다리는 링크기구로 구성되어 있는데 이 링크 기구를 소형으로 정교하게 제작하여야 하고 이를 구동하는 구동장치는 토오크가 크고 무게가 가벼워야 한다. 본 연구에서는 링크의 연결부에 추력베어링을 사용하여 링크기구를 간결하게 제작하고 구동장치로는 소형 서보를 사용하여 제작에 소요되는 경비 및 시간등을 절감하였다. 다리의 보행영역을 고려하여 다리기구를 설계하였고 추후 비평탄면에서의 보행 및 장애물 통과에 대한 연구가 가능하도록 근접 센서와 접지 센서를 부착하고 이에 적합한 발목부를 설계하였다. 안정 여유를 증대시키기 위한 보조수단으로서 좌우로 이동되는 균형추를 몸체에 부착하여 보행시 안정 여유를 증대시켰다.

보행 로봇이 정적 안정 상태를 유지하면서 원하는 위치로 이동하기 위해서는 각각의 다리가 적어도 3 자유도를 가져야 하므로 4각로봇의 경우 12개의 자유도가 필요하다. 본 연구에서는 뒷다리의 자유도를 각각 2자유도로 제한하고 균형추에 대한 1자유도를 포함하여 전체 11자유도를 갖는다. 평행사변형 형태의 다리구조를 그림 1에 나타내었고 로봇의 제원을 표 1에 나타내었다.

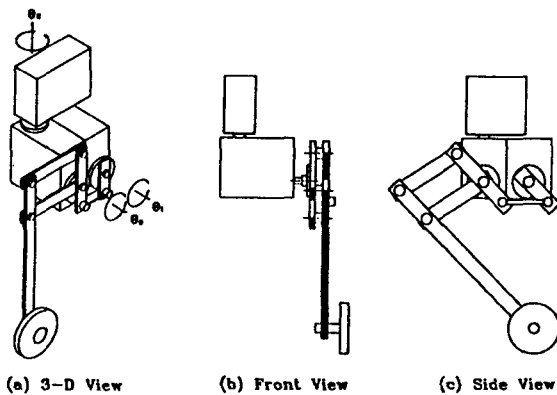


Fig.1 Leg Structure

몸체 길이	240 mm
중 량	1.42 kg
몸체 폭	156 mm
몸체 높이	160 mm
자유도	11
최대속도	1.2 m/min

<table 1> 보행 로봇의 제원

2.1 보행 영역

보행 로봇이 정지된 상태에서 다리끝이 도달할 수 있는 영역을 보행영역이라 하는데 이 보행영역의 크기에 따라 스트로크, 다리를 들어올릴 수 있는 높이, 몸체의 높이등이 결정된다.

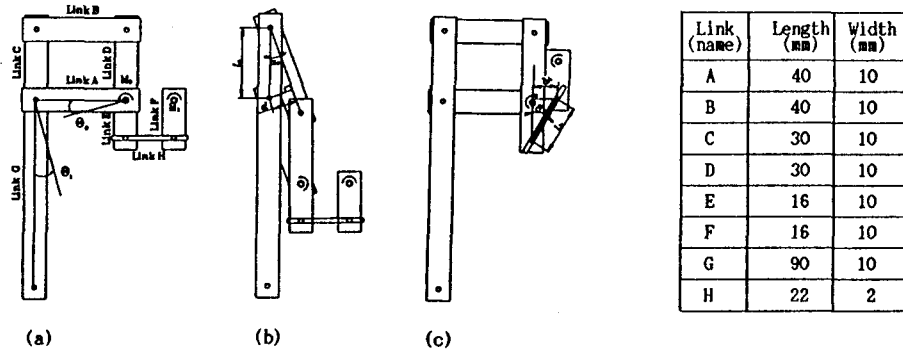


Fig.2 Link System

보행영역은 다리가 실제 회전할 수 있는 각 θ_0, θ_1 의 범위에 따라 정해진다. 다리의 구조 및 치수는 그림 2-a 와 같으며 θ_0, θ_1 의 범위는 사용된 서보 시스템의 회전 범위, 링크간의 간섭등에 의해 다음과 같이 제한된다.

본 연구에서 사용한 서보 시스템의 회전범위가 $-\pi/2 \sim \pi/2$ 이므로

$$-\pi/2 < \theta_0 < \pi/2 \quad (1)$$

$$-\pi/2 < \theta_1 < \pi/2 \quad (2)$$

링크A와 링크B 또는 링크 C와 링크D 사이에서 간섭이 발생할 수 있는데 그림 2-b 에서와 같이 두 쌍의 링크중에서 링크의 길이가 긴쪽인 링크A와 링크B사이에서 간섭이 발생하므로 하단 링크G는 이에 의해 아래와 같이 그 회전 범위가 제한된다.

$$-\pi/2 + \theta_0 + \alpha_0 < \theta_1 < \pi/2 + \theta_0 - \alpha_0 \quad (3)$$

여기서

$$\alpha_0 = \sin^{-1}(d/l_0) \quad (4)$$

$$d : d_a/2 + d_b/2$$

d_a : 링크A의 폭

d_b : 링크B의 폭

l_0 : 링크C의 길이

또한 그림 2-c 와 같이 링크E와 링크F 사이에 간섭이 발생하여 θ_1 이 아래와 같이 제한된다.

$$-\pi/2 + \alpha_1 < \theta_1 < \pi/2 - \alpha_1 \quad (5)$$

여기서

$$\alpha_1 = \sin^{-1}(d_i/l_h) \quad (6)$$

$$d_i : d_e/2 + d_f/2$$

d_e : 링크E의 폭

d_f : 링크F의 폭

l_h : 링크H의 길이

결국 식(1), (2), (3), (5)를 모두 만족시키는 θ_0, θ_1 에 의해 보행영역은 그림 3 과 같다.

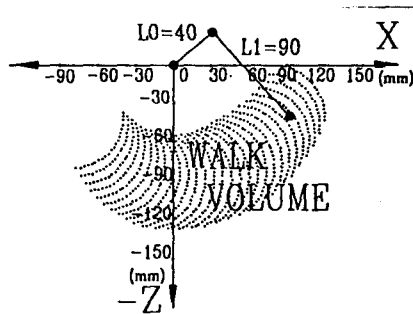


Fig.3 Walking Volume

그림 3으로부터 몸체의 높이가 높아질수록 최대 스트로크는 작아지게 되고 몸체의 높이를 낮출수록 크게 할 수 있음을 알 수 있다. 본 연구에서는 구해진 보행영역으로부터 몸체의 높이를 110 mm로 하여 스트로크를 100 mm, 다리를 들 수 있는 높이를 40 mm로 하였다.

2.2 균형추

보행 로봇의 작업 환경은 대개 비평탄지형이므로 비평탄 지형에서 로봇이 보행하기 위해서 가장 중요한 점은 안정성의 확보이다.

정적 안정 여유는 일반적으로 몸체의 무게중심과 다리들의 지지점을 꼭지점으로하는 지지다각형의 변과의 최소거리로 나타내는데 이때 해석의 복잡함을 피하기 위해 지지다각형의 앞쪽 경계와 뒷쪽 경계중 길잡과 가까운 쪽과의 거리인 세로안정 여유(Longitudinal Stability Margin, SL)를 사용한다.

걸음새의 안정여유에 대한 연구에 따르면 디딤을 β 를 크게함으로써 안정여유를 증가시킬 수 있는데 이 경우 이에따라 보행 속도가 작아지게되며 이동 상태의 다리를 다시 착지시키기위해서 되돌리는 시간이 짧아져서 다리를 되돌리는데 빠른 속도를 필요로하므로 β 를 증가시켜 안정여유를 크게 하는데에는 한계가 있다.

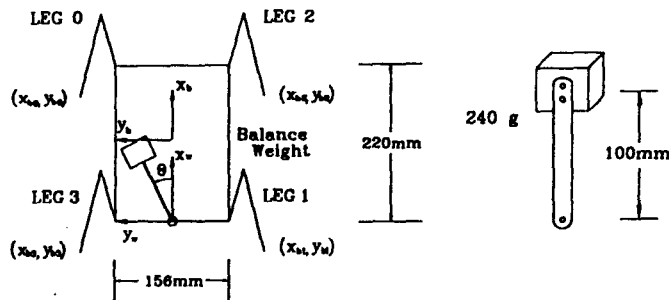


Fig.4 Balancing Weight

그러므로 본연구에서는 안정여유를 증가시키기 위한 보조수단으로서 균형추를 사용하여 몸체의 무게중심을 이동시킴으로써 보행속도를 줄이지않고 안정여유를 증가시키고자 한다.

균형추를 이동시키는 방법에는 여러가지가 있을 수 있는데 그림4 와 같이 균형추가 부착된 링크를 좌우로 회전시킴으로써 균형추를 이동시키는 간단한 방법을 사용하였다.

균형추를 부착하여 좌우로 이동시킴에 따른 질량 중심의 변화는 다음과 같이 계산된다.

균형추의 회전각을 θ_w 라 할 때 몸체 좌표계(X_b, Y_b, Z_b)에 대한 균형추의 위치 (x_{bw}, y_{bw})는 다음과 같다.

$$x_{bw} = d_w \cdot \cos(\theta_w) - L_w \quad (7)$$

$$y_{bw} = d_w \cdot \sin(\theta_w) \quad (8)$$

여기에서

L_w : $-X_b$ 방향으로 몸체좌표계의 원점으로부터 균형추의 회전중심까지의 거리

d_w : 균형추의 회전축 으로부터 균형추의 무게 중심 까지 거리

θ_w : 균형추의 회전각

균형추를 제외한 몸체의 질량 중심의 위치는 (0,0)이므로 균형추를 포함한 몸체의 무게 중심(x_{bc}, y_{bc})은 다음과 같다.

$$x_{bc} = \frac{M_w \cdot x_w}{(M_w + M_b)} \quad (9)$$

$$y_{bc} = \frac{M_w \cdot y_w}{(M_w + M_b)} \quad (10)$$

여기에서 M_b, M_w 는 균형추를 제외한 몸체의 질량과 균형추의 질량이다.

0번 다리를 들어올린 경우 몸체는 1번, 2번, 3번 다리에 의해 지지되고 안정 여유는 2번 다리와 3번 다리 사이의 직선(경계선)과 몸체 중심과의 거리로 결정된다. 이때 이 경계선의 방정식은 다음과 같이 된다.

$$x_b - x_{b2} = \frac{(x_{b3} - x_{b2})}{(y_{b3} - y_{b2})} \cdot (y_b - y_{b2}) \quad (11)$$

여기에서

X_{b2}, Y_{b2} : 몸체 좌표계에 대한 2번다리의 발의 위치

X_{b3}, Y_{b3} : 몸체 좌표계에 대한 3번다리의 발의 위치

무게중심과 지지다각형과의 최소거리인 실제 안정여유 S는 해석시 많이 사용되는 세로 안정 여유 S_L 보다 작으므로 실제 안정 여유 S를 구하면

$$S = \frac{|a \cdot y_o + b \cdot x_o + c|}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (12)$$

가 된다.

여기에서

$$a = \frac{(x_{b3} - x_{b2})}{(y_{b3} - y_{b2})}$$

$$b = -1$$

$$c = x_{b2} - \frac{(x_{b3} - x_{b2})}{(y_{b3} - y_{b2})} \cdot y_{b2}$$

균형추의 질량과 이동 위치를 결정하기 위해 어느 한다리를 들 경우 안정여유가 0이 되도록 무게 중심을 지지 다각형의 중심에 위치시키고 질량 M_w 의 균형추를 θ_w 회전시킨 후 앞다리를 헛다리를 들었을 때 안정여유를 계산하여 그림 5 에 나타

내었다.

질량 M_w 를 240g 로 하고 회전각 θ_w 를 변화 시킬 때 안정여유의 변화를 그림 5-a 에 나타내었다.

회전각 θ_w 를 30° 로 하고 균형추 질량 M_w 를 변화 시킬 때 안정여유의 변화를 그림 5-b 에 나타내었다.

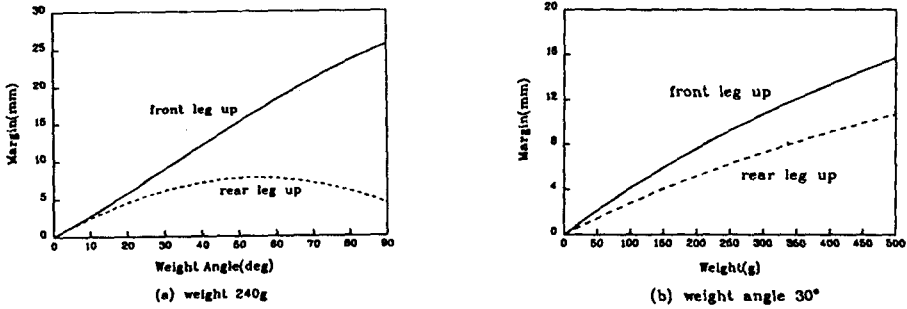


Fig.5 Stability Margin Vs Balancing Weight Mass and Angle

앞다리를 들 때의 안정 여유는 회전각이 약 57° 까지는 증가하고 그 이후에는 감소함을 알 수 있는데 이는 회전을 하면 전체적으로 몸체의 무게 중심이 뒷쪽으로 이동되기 때문이다.

본 연구에서는 균형추의 회전각을 30° 로하고 다리의 처짐을 막기 위해 균형추의 질량을 240 g 으로 하였으며 안정여유는 앞다리를 들었을때 약 9.0 mm 이고 뒷다리를 들었을때 약 6.0 mm 증가한다.

2.3 지면 반발력으로 부터 몸체중심 계산

안정 여유의 증가를 알아보기 위해서는 무게중심의 위치 변화를 알아야하는데 그 위치는 균형추의 이동에 따라 달라진다. 일반적으로 4다리로 지지할 때보다 3다리로 지지할 때 안정 여유가 작으므로 3다리로 지지하는 상태에서 무게 중심의 변화를 알아보고자한다. 3다리로 지지할 때에는 각다리의 수직 반력으로 부터 무게중심의 위치를 구할 수 있다.

세다리로 몸체를 지지하는 경우 각 다리에 걸리는 지면 반발력의 수직 성분을 F_0, F_1, F_2 라 할 때 로봇의 질량 중심의 위치 X_{bc}, Y_{bc} 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$X_{bc} = (X_{b0} * F_0 + X_{b1} * F_1 + X_{b2} * F_2) / W \quad (13)$$

$$Y_{bc} = (Y_{b0} * F_0 + Y_{b1} * F_1 + Y_{b2} * F_2) / W \quad (14)$$

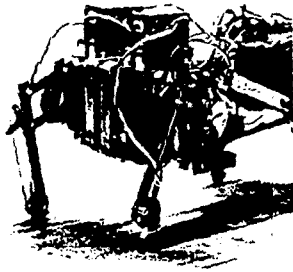
$$W = F_0 + F_1 + F_2 \quad (15)$$

여기서 W는 로봇전체의 무게가 된다.

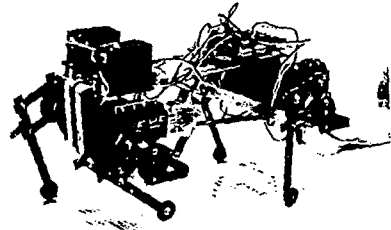
3. 실험 결과 및 토의

사진 1은 제작된 로봇의 외관이다. 왼쪽의 사진은 센서가 장치된 다리의 모습이다.

본 연구에서는 들어 올리는 다리의 순서를 일정하게 하고(0-1-2-3) 각다리를 들어올리기 전 주어진 정적 안정 여유를 확보할 수 있는 위치로 몸체의 무게중심을 이동시키도록 하는 보행방법을 사용하였는데 이경우 몸체의 이동과 다리의 이동이 동시에 일어나지 않는다.



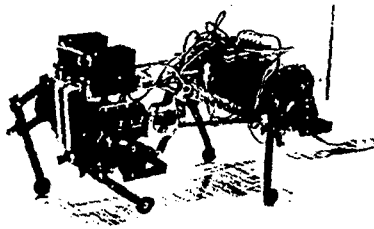
(a) 센서를 장착 했을 경우



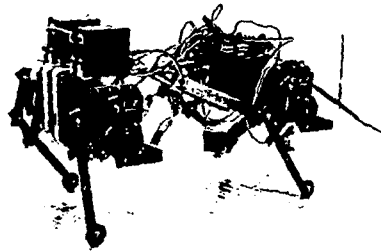
(b) 센서를 장착하지 않았을 경우

<Photo. 1> 보행 로봇의 모습

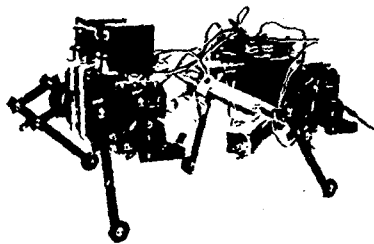
사진 2는, 로봇이 보행하는 모습으로서 각다리가 지면으로부터 들어올린 상태의 모습이다.



(a) 0 번 다리를 들었을 경우



(b) 1 번 다리를 들었을 경우



(c) 2 번 다리를 들었을 경우



(d) 3 번 다리를 들었을 경우

<Photo. 2> 보행 로봇의 이동 모습

균형추를 사용한 경우와 사용하지 않은 경우에 대해서 보행중 지지 상태의 각 다리에 걸리는 하중을 측정하여 그결과를 표 2 에 나타내었다.

	reaction force 0	reaction force 1	reaction force 2	reaction force 3
leg0 UP		126	575	710
leg1 UP	42		845	548
leg2 UP	450	774		185
leg3 UP	805	550	85	

Weight Rotation Angle : 0°

	reaction force 0	reaction force 1	reaction force 2	reaction force 3
leg0 UP		211	575	633
leg1 UP	102		735	593
leg2 UP	455	695		262
leg3 UP	735	578	113	

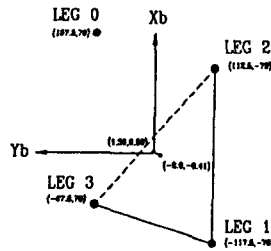
Weight Rotation Angle : 30°

<Table 2> 지지다리 반력 측정

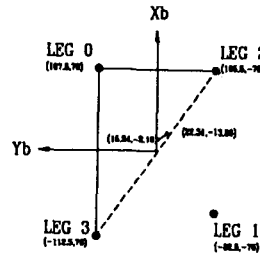
표 2 에서 3다리중 대각 위치에 있는 다리에 주도 힘이 작용함을 알 수 있다. 전자저울로 측정하는데 있어서 측정오차와 케이블의 무게가 반력에 미치는 변화등으로 인해 지지하는 반력들의 합력들이 실제 로봇무게인 1.420 Kg에서 약간씩 벗어남을 알 수 있다.

측정된 지면 반발력을 이용하여 식(13)과 식(14)로부터 균형추를 포함한 몸체의 무게중심의 위치를 구하고 식(12)로부터 정적 안정 여유를 계산하였다.

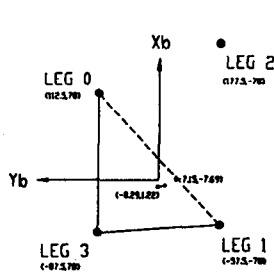
그림 6 에 각각의 다리를 들었을 경우에 대하여 균형추를 회전시키지 않았을때 로봇 몸체의 무게중심의 위치와 균형추를 30° 회전시켰을 때 무게중심의 위치를 나타내었다.



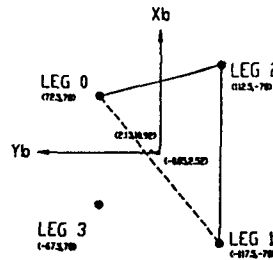
(a) Stability Margin Increments : 8.95 (mm)



(b) Stability Margin Increments : 5.38 (mm)



(c) Stability Margin Increments : 7.34 (mm)



(d) Stability Margin Increments : 4.89 (mm)

- : Transfer Leg
- : Supporting Leg
- : Mass Center (After Balance Weight Movement)
- : Mass Center (Before Balance Weight Movement)

Fig. 6 Mass Center Translation

경계선으로부터 안정한 방향으로 더 멀어짐을 알 수 있다. 앞다리를 들때가 뒷다리를 들때보다 안정 여유의 증가가 문것은 앞서 말한 것처럼 균형추가 회전을 하게 되면 몸체의 무게 중심이 뒷쪽으로 이동되기 때문이다.

그림 6 에 의하면 균형추의 이동에 의해 5~9 mm의 안정여유 증가가 생긴다.

4. 결 론

- 1) 제작하는데 많은 비용과 시간이 필요한 보행 로봇을 간단한 구조로 설계, 제작하고 평면상에서 직선보행을 실험을 수행하였다.
- 2) 기구학적 오차 및 변형이 클수록 더 큰 정적 안정 여유를 필요로 하며 균형추를 이용함으로써 정적 안정 여유를 더 확보할 수 있다.
- 3) 전체 구조의 변형 및 모터의 토크의 한계때문에 균형추의 무게를 증가시키는 데에는 한계가 있으므로 안정여유 증대 효과에는 한계가 있다.
- 4) 센서부를 부착하여 장애물을 감지할 수 있어 추후 보행 로봇의 비평탄면 보행에 대한 연구를 가능하게 하였다.

참 고 문 헌

- [1] Shigeo Hirose, "A Study of Design and Control of a Quadruped Walking Vehicle," International Journal of Robotics Research, Vol.3, No.2, 1984, pp.113-133.
- [2] Song S. M. and Waldron J. K., "An Analytical Approach for Gait Study and Its Application on Wave Gait," International Journal of Robotics Research, Vol.6, No.2, 1987, pp.60-71.
- [3] Chi Keng Tsai and David E. Orin, "Using Proximity Sensing in Robot Leg Control," IEEE, 1986, pp.1502-1507.
- [4] Shigeo Hirose and Kazuhito Yokoi, "The Standing Posture Transformation Gait of a Quadruped Walking Vehicle," Advanced Robotics, 1988, Vol.2, No.2, pp.345-359.
- [5] Shigeo Hirose and Kazuhito Yokoi and Kikuchi H., "The Gait Control System of a Quadruped Walking Vehicle," Advanced Robotics, 1986, Vol.1, No.4, pp.289-323.
- [6] Y.S. Yoon, H.J. Hong, "A Mechanical Design of a Quadruped Walking Machine for the Fastest Speed in Static Level Walking",
- [7] 홍형주, 윤용산, 손용희, "보행 로봇의 보행과 지면 반발력", 88 자동제어 학술회의 논문집, Vol. 1, pp 125-130, 1988
- [8] 1989년 로보틱스 및 자동화 연구회 Workshop : 이동 메카니즘과 자동화, 대한 전기학회 로보틱스 및 자동화 연구회
- [9] 梅地 正 의 저, 金 在 昇 역, "센서 인터페이스 NO. 4", 기전 연구사