

# 곤충형 다리구조의 4족 보행로봇의 개발

안영명\*·최기훈\*\*·김태형\*\*·김영탁\*\*\*

## Development of quadruped walking robot with insectile leg

Y.M. Ahn, G.H. Choi, T.H. Kim and Y.T. Kim

**Key Words:** insectile leg mechanism(곤충형다리구조), quadruped walking robot(4족보행로봇), stability margin(안정여유)

### Abstract

In this paper, we developed a quadruped walking robot, FRAMIX-T, with insectile leg mechanism and we inspected the efficiency of it in detail. In robotics, the legs of insect type are appropriate for the stability and the agile movement. So we first performed a gait analysis using duty factor, stride, phase *etc.*, and analyzed the stability margin to improve the stability of robot. On the basis of this research, we planned the wave gait suitable for FRAMIX-T and performed a walking experiment. From this result, we proved the high efficiency using insectile leg mechanism and the possibility of walking with improved stability and mobility.

### 1. 서 론

오늘날 산업현장에서는 제품생산에서부터 운반, 품질 관리 등을 위해 많은 로봇들이 이용되고 있다. 특히 물품의 운반이나 지형 탐사 등에 바퀴 또는 무한궤도 등을 부착한 로봇을 이용하고 있으나, 이동성의 제한으로 인한 작업 수행의 한계가 있다. 이러한 배경 하에서 불특정 지형에서 적응성이 높은 인간이나 동물, 곤충 등의 다리를 가진 보행 로봇에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다<sup>(1)(2)</sup>.

보행 로봇의 연구 분야는 크게 기구적 설계, 주변환경 인식, 제어 및 걸음새 분야로 나눌 수 있다. 이 중에서 걸음새는 로봇보행에 필수적인

분야로 평탄 지형에서 안정성을 갖는 걸음새에 관한 많은 연구 결과가 발표되었다. 최근에는 경사지형 또는 불규칙한 3차원 지형에서의 걸음새 제어와 로봇의 안정성 해석에 대한 연구들이 진행되고 있다. 하지만 로봇의 안정도와 불규칙한 지형에서의 걸음새 및 기구적 메커니즘에 대한 에너지 효율성, 자유도 등을 수학적으로 해석해야 하는 많은 과제들이 남아 있다.

따라서, 본 논문에서는 몸의 안정 유지 측면과 민첩한 동작에 적당한 곤충형 다리 구조<sup>(1)</sup>를 갖는 4족 보행 로봇에 대하여 연구한다. 먼저, 보행 로봇의 걸음새인자인 디딤올, 보폭, 위상 등의 적절한 선택을 통해 걸음새를 해석한다. 또, 다리의 이동순서와 지지경계선, 무게중심 등으로 나타나는 안정여유를 각 걸음새에 대하여 해석하고 비교한다. 이러한 연구를 바탕으로 4족 보행 로봇을 실물 제작하고, 제어기에 부하를 줄이는 분산 제어 구조를 적용하여 로봇을 제어한다. 또한, 최적 걸음새인 물결걸음새를 적용하여 보행 실험을 하며 곤충형 다리 구조를 가진 보행 로봇의 보행 가능성을 입증한다.

\* 서울대학 자동차과

\*\* 중앙대학교 대학원 기계공학부

\*\*\* 중앙대학교 기계공학부

## 2. 보행 로봇의 걸음새

### 2.1 걸음새의 정의

걸음새(gait)란 동물이나 보행 로봇이 몸체를 이동시키면서 각각의 다리를 올리고 내리는 반복적인 패턴을 의미하며, 다음과 같이 나타낸다.

$$T = \tau_s + \tau_f \quad (1)$$

여기서,  $T$ 는 주기,  $\tau_s$ 는 지면에 발이 닿아 있는 동안의 지지구간,  $\tau_f$ 는 지면에서 발이 떨어져 이동중에 있는 이동구간을 나타낸다. 디딤율(duty factor,  $\beta_i$ )은  $i$ 번째 다리가 한 주기동안 지면을 지지하는 시간을 주기로 나누어 무차원화한 것으로 식 (2)와 같으며  $0 < \beta < 1$ 인 값이다<sup>(3)</sup>.

$$\beta_i = \frac{\tau_s}{T} \quad (2)$$

$$\lambda_i = \frac{R}{\beta_i} \quad (3)$$

여기서,  $\lambda_i$ 는 한 주기동안 몸체가 움직이는 거리이며,  $R$ 은 한 발의 움직이는 거리이다. 정칙 걸음새는 모든 다리에 대하여 동일한 디딤율을 가지는 걸음새이며, 정적보행을 위한 디딤율과 전체 다리수의 관계를 Table 1에 나타낸다.

Table 1 Relation between leg and duty factor

Leg number	Range of duty factor
4	$0.75 \leq \beta < 1$
5	$0.6 \leq \beta < 1$
6	$0.5 \leq \beta < 1$

주기 걸음새에서, 주기위상변수  $\phi$ 는 한 운동 주기에서 다리 1의 마지막 위치에 대한 다리  $i$ 의 이동거리로 정의된다. 다리  $i$ 가 놓이고 들리는 시간위상변수  $\phi_{Li}$ 을 식 (4)로 정의하며<sup>(4)</sup>,  $0 < \phi_{Li} < \beta$ 이면 지지위상,  $\beta < \phi_{Li} < 1$ 이면 이동위상이 된다.

$$\phi_{Li} = [\phi - \phi_i]_{\text{mod}1} \quad (4)$$

### 2.2 보행로봇의 모델

#### 2.2.1 모델 선정

보행 로봇은 기존의 주행에 의한 이동이 아닌 걸음새를 적용한 것이다. 다리구조의 형태에 따른 관점에서 보면, 포유류는 빠르고 보행에 효과적이며, 파충류는 느린 반면에 안정적이다. 곤충류는 몸의 안정을 취하면서도 적은 힘으로 몸을 전후좌우로 기민하게 움직일 수 있는 특징을 가지고 있으므로, 몸의 안정 유지 측면과 민첩한 동작에 적당한 곤충의 다리구조 형태를 취하면서 4개의 다리로 보행을 하는 모델을 선정하였다.

#### 2.2.2 좌표계 설정

Fig. 1은 보행 로봇의 구조와 좌표계를 나타낸 것으로,  $\{W\}$ 는 기준 좌표계(world frame),  $\{B\}$ 는 몸통 좌표계(body frame)를 나타낸다. 각 다리의 경로 계획은 기준 좌표계에 대해서 정의하고 전체적인 로봇의 구조는 몸통 좌표계에 대해 정의한다. 벡터  $R$ 과  $T_i$ 는 각각 기준 좌표계에 대한 로봇 몸통 좌표계의 원점과  $i$ 번째 다리의 발끝 좌표를 표시한다. 몸통 좌표계에 대해  $i$ 번째 다리의 발끝의 위치는  $P_i$ 로 하고, 몸통의 각 모서리 위치는  $T_i$ 로 나타낸다. 이동하는 다리의 궤적은  $\{W\}$ 에서  $T_i$ 를 정의하고 이를 다시  $\{B\}$ 좌표계에서 정의하면 다음과 같다.

$$\vec{P}_i^B = \vec{T}_i - \vec{R} \quad (5)$$

$$\vec{P}_i^B = \vec{H}_i^B + \vec{F}_i^B \quad (6)$$

$$\vec{T}_i = \vec{R} + \vec{H}_i^B + \vec{F}_i^B \quad (7)$$

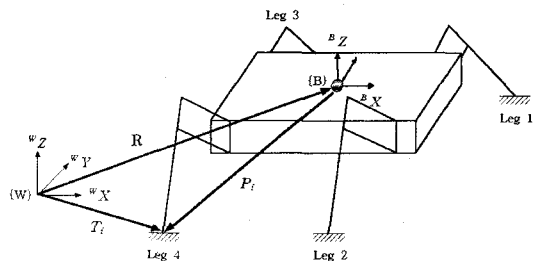


Fig. 1 Structure and coordinate system of robot

#### 2.2.3 걸음새 선정

보행 로봇의 걸음새는 디딤율, 상대위상, 다리이동순서에 의해 결정된다. 이들은 안정적인

걸음새를 유지하며 보행하기 위해 매우 중요한 인자들이다. 따라서, 본 논문에서는 디딤율을 7/8로 선정하고, 다리의 이동 순서는 +x 형태 중 4-2-3-1의 순서를 적용하도록 한다<sup>(5)</sup>. 걸음새의 형태는 물결걸음새, 기는걸음새, 동상걸음새를 적용하여 비교한다.

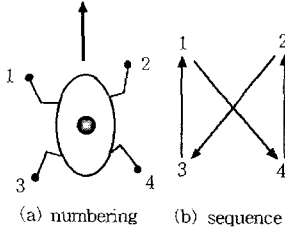


Fig. 2 Sequence of leg movement

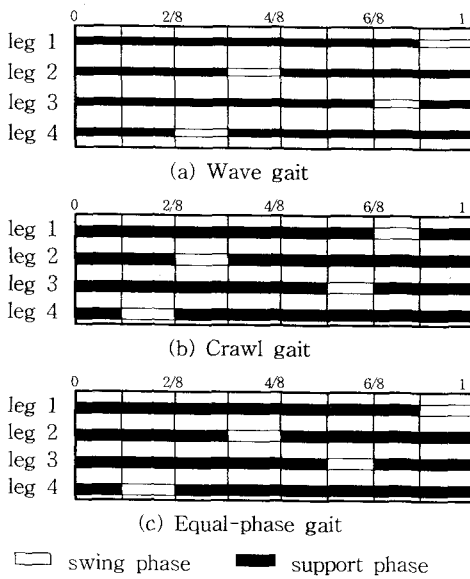


Fig. 3 Walking patterns of typical gaits

Table 2 Duty factor and phase of gaits

Gait	Duty factor range	Phase		
		$\phi_2$	$\phi_3$	$\phi_4$
Wave & crawl	$\beta \geq 0.75$	$\frac{1}{2}$	$\beta$	$\beta - \frac{1}{2}$
Equal-phase	$\beta \geq 0.75$	$\frac{1}{2}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{1}{4}$

Fig. 2에서 (a)는 보행 로봇의 각 다리 번호, (b)

는 +x 형태의 다리 이동순서를 나타낸 것이다. 또, Table 2는 디딤율과 상대위상에 의한 각 걸음새를 표현한 것이며, Fig. 3은 각 걸음새를 상대위상으로 표현한 걸음새 다이어그램이다.

### 3. 안정 여유

#### 3.1 안정 여유의 정의

보행 로봇의 제어는 몸체의 안정을 유지하도록 각 다리의 움직임을 제어하는 것으로 가장 근본적인 문제는 안정 여유이다. 안정 여유(stability margin,  $S_m$ )란 보행 로봇의 다리에 의해 형성된 지지다각형의 경계선과 몸체의 무게 중심을 평면에 투영한 점간의 최소거리로 정의하며, 특히 이동방향에 대한 안정 여유를 세로안정 여유(longitudinal stability margin,  $S_L$ )라고 한다<sup>(6)</sup>. 세로안정여유는 정적 걸음새인 직선보행의 경우에 해석의 용이성 때문에 주로 이용된다. Fig. 4에 의한 안정 여유를 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$S_M = \min \{ d_1, d_2, d_3, d_4 \} \quad (8)$$

$$S_L = \min \{ d_1, d_2 \} \quad (9)$$

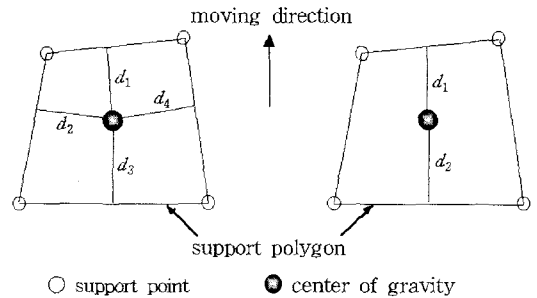


Fig. 4 Stability margin projected on plane surface

다리가  $2n$  인 보행 로봇의 주기적이고 정적인 걸음새의 안정 여유는 다음과 같이 나타낸다<sup>(7)</sup>.

$$S = \left( \frac{n}{2} - 1 \right) P + \left( 1 - \frac{3}{4\beta} \right) R \quad (10)$$

여기서,  $\beta$  는 디딤율,  $R$  은 다리의 보폭,  $P$  는 다리의 피치이다.

### 3.2 안정 여유의 해석

직선 보행 로봇에 대한 안정 여유 해석은 다리와 무게중심의 관계를 계산하고, 디딤올과 다리 이동순서에 따라 안정 여유 식을 적용한다.

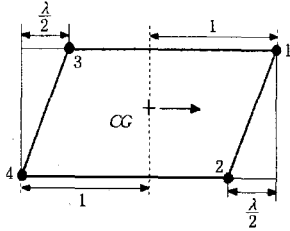


Fig. 5 Schematic diagram of leg position

Fig. 5는 각 다리의 위치와 보폭을 1로 정규화하여 나타낸 것이며, 진행방향에 대해서만 고려하므로 안정 여유는 다음과 같이 간단히 된다.

$$S_l = \left| \frac{x_a + x_b}{2} \right| \quad (11)$$

여기서,  $x_a$ ,  $x_b$ 는 무게중심에 대한 다리  $a$ 와  $b$ 의 진행방향의 위치이다. 이때, 각 걸음세의 최적 세로 안정 여유는 다음과 같다<sup>(8)</sup>.

$$S^* = \frac{S_l}{\lambda} \quad (12)$$

Table 3 Position of CG for gaits

Gait Time	Wave & crawl	Equal-phase
$t_0$	$\frac{\lambda}{T}(\phi_1)$	$\frac{\lambda}{T}(\phi_1)$
$t_1$	$\frac{\lambda}{T}(1-\beta)$	$\frac{\lambda}{T}(\phi_1-1+\beta)$
$t_2$	$\frac{\lambda}{T}(\phi_1-1+\beta)$	$\frac{\lambda}{T}(\phi_1)$
$t_3$	$\frac{\lambda}{T}(\phi_1)$	$\frac{\lambda}{T}(\phi_2-1+\beta)$
$t_4$	$\frac{\lambda}{T}(\phi_2)$	$\frac{\lambda}{T}(\phi_2)$
$t_5$	$\frac{\lambda}{T}(\phi_2-1+\beta)$	$\frac{\lambda}{T}(\phi_3-1+\beta)$
$t_6$	$\frac{\lambda}{T}(\phi_2-1+\beta)$	$\frac{\lambda}{T}(\phi_3)$
$t_7$	$\frac{\lambda}{T}(\phi_3)$	$\frac{\lambda}{T}(\beta)$
$t_8$	$\frac{\lambda}{T}(T)$	$\frac{\lambda}{T}(T)$

이 최적안정 여유의 값으로 보행하는 경우가 가장 이상적인 걸음새가 된다. 정칙이며 대칭인 주기 걸음새에 대하여 물결 걸음새, 기는 걸음새, 동상 걸음새를 한 주기에 대하여 Fig. 6에 나타내었다. 여기서, 무게중심의 이동, 지지다리 및 지지다각형의 형상 등을 살펴 볼 수 있다. 또, 각 걸음새에 대한 세로 안정 여유 곡선을 Fig. 7에 나타내며, 결과 수치를 Table 4에 보인다.

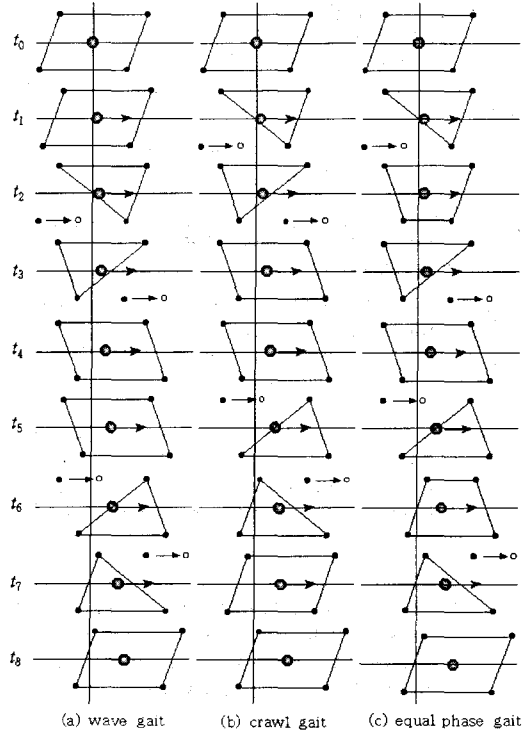
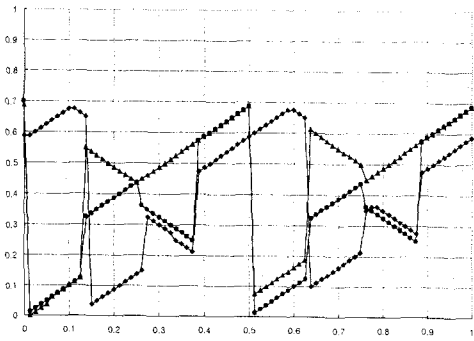


Fig. 6 Moving of center of gravity for a gaits

이상의 해석에 의해, 물결 걸음새가 안정 여유를 가장 많이 확보할 수 있으므로, 걸음새를 4족 보행 로봇에 적용하기에 적합한 최적의 걸음새임을 확인할 수 있었다.

Table 4 Stability margin of gaits

	Wave	Crawl	Equal-phase
Max.	0.6750	0.6785	0.6785
Min.	0.0375	0.0	0.0125
Ave.	0.3788	0.3150	0.2844
Opt.	0.125	0.125	0.0625



◆ Wave ▲ Crawl ● equal-phase  
Fig. 7 Longitudinal stability margin for gaits

#### 4. 로봇제작 및 보행실험

##### 4.1 보행 로봇의 구조

본 연구에서 개발한 보행 로봇 FRAMIX-T는 각 다리에 3개의 링크를 갖는 4족 형태이다. 각 다리는 곤충의 관절 구조에서 Link3의 기능이 Link2에 중속된 점을 감안하여, 크랭크 구조의 링크로 제작하였다. 그리고 Link1과 Link2를 제어하기 위해 2개의 회전관절에 F/V 변환기가 내장된 DC 서보모터를 사용하였다. 로봇 제어를 위한 센서부에는 각 회전관절의 회전각을 측정하기 위한 Potentiometer 및 다리 이동경로에 존재하는 장애물 감지를 위한 Infrared sensor가 사용되었다. 또한 로봇 다리의 지면 착지 여부를 감지하기 위한 Tact sensor를 로봇의 각 발에 장착하였다. Fig. 8과 Fig. 9는 곤충의 다리 형태를 응용하여 제작된 FRAMIX-T의 전체적인 구조와 실물사진이며, Table 5는 로봇의 주요 사양을 나타낸다.

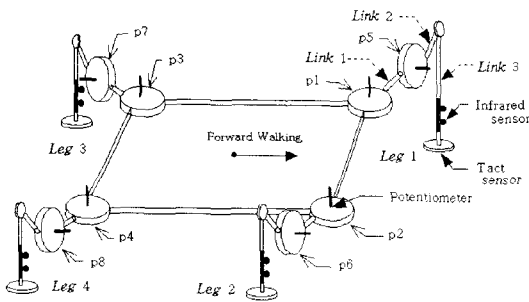


Fig. 8 The structure of a quadruped robot

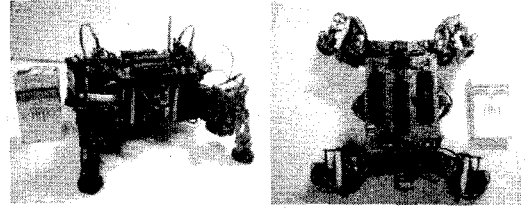


Fig. 9 Overview of the FRAMIX-T

Table 5 Specification of the FRAMIX-T

Item	Value	
Body dimension (mm)	Length	140
	Width	85
Leg dimension (mm)	Link 1	50
	Link 2	30
	Link 3	75
Body height (mm)	Minimum	20
	Maximum	50
Total weight (g)	350	
Gait period (sec)	4.2	
Stride (mm)	30	

##### 4.2 보행 로봇의 제어부

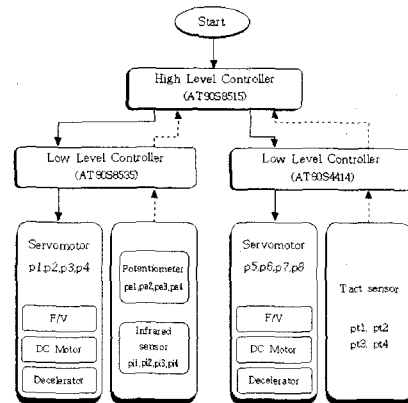


Fig.10 The overall control system of FRAMIX-T

본 연구에서 개발한 FRAMIX-T의 제어부는 1개의 상위 레벨 제어기(AT90S8515)와 2개의 하위 레벨 제어기(AT90S8535, AT90S414)로 구성된다. 상위 레벨 제어기는 각 발의 착지점 결정과 다리의 이동 경로 계획 및 역기구학 계산을 처리한다. AT90S8535는 Link1의 위치 제어용 서보모터와 Potentiometer, Infrared sensor의 제어를 담당하

고, AT90S4414는 Link2의 위치 제어용 서보모터와 Tact sensor의 제어를 한다. 또한 로봇의 제어부는 8개의 서보모터를 동기화하기 위한 기준 펄스를 생성하는 1개의 제어기를 포함한다. Fig. 10과 Fig. 11은 FRAMIX-T 제어부의 전체적인 계통도와 상위레벨 제어기의 계통도를 나타낸다.

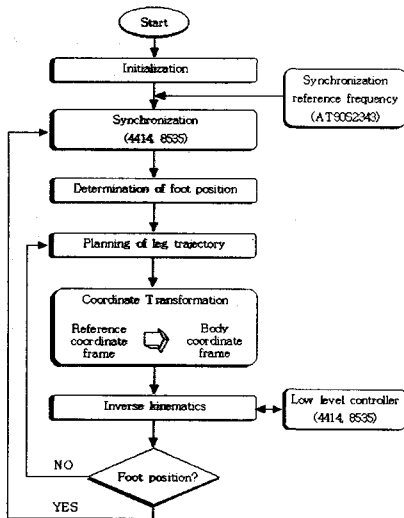


Fig. 11 The high level controller of FRAMIX-T

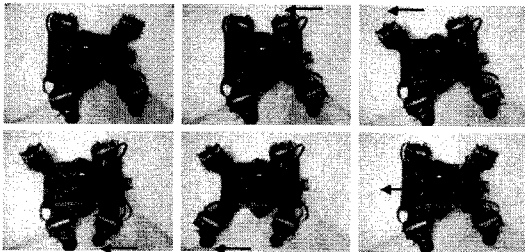


Fig. 12 The sequence of wave gait

이와 같이 4족 보행 로봇을 설계제작하고 제어 알고리즘을 적용하여 정적 최적 걸음새인 물결걸음새를 적용하여 보행을 수행하였다. Fig. 12는 물결걸음새의 다리이동순서에 따라 보행하는 모습을 나타낸다.

## 5. 결론

본 논문에서는 곤충형 다리 구조를 갖는 4족 보행 로봇에 대하여 세 걸음새를 적용하여 걸음

새인자를 선정하고 안정 여유를 해석하였다. 이것을 통해 물결 걸음새가 정적 최적 걸음새임을 확인할 수 있었다. 또, 상위레벨제어기와 하위레벨제어기로 구성된 분산제어기법을 적용한 제어 시스템을 이용한 로봇을 제작하여 물결걸음새를 수행하여 곤충형 다리 구조를 가진 로봇의 보행 가능성을 보였으며, 여러 방법의 직선 걸음새나 회전걸음새에 대해서도 적용할 수 있는 가능성을 보였다.

## 참고문헌

- (1) H. Cruse, 1980, "A quantitative model of walking incorporating central and peripheral influences: I. The control of the individual leg", *Biological Cybernetics*, Vol. 37, pp.131-136
- (2) 遠藤 玄, 廣瀬茂男, 2000, "ローフォーカーに関する研究 - システムの構成と基本的動作実験", *日本 ロボット學會誌*, Vol.18, No.2, pp.270-277
- (3) R. B. McGhee, A. A. Frank, 1968, "On the stability properties of quadruped Creeping Gaits", *Mathematical Biosciences*, Vol.3, pp.331-351
- (4) S. M. Dong, B. S. Choi, 1990, "The Optimally Stable Ranges of 2n-Legged Wave Gaits", *IEEE SMC*, Vol.20, No.4, pp.888-902
- (5) Robert B. McGhee, Geoffrey I. Iswandhi, 1979, "Adaptive locomotion of a Multilegged Robot over Rough Terrain", *IEEE Transactions on Systems, man, and cybernetics*, Vol. SMC-9, No. 4, April, p176-182
- (6) 구태완, 윤용산, 1999, "사각 보행 로봇의 걸음새 안정도에 관한 연구", *대한기계학회논문집*163-A, pp.669-677
- (7) Vijay R. Kumar, Kenneth J. Waldron, 1989, "Adaptive Gait Control for a Walking Robot", *Journal of Robotic Systems*, 6(1), p49-76
- (8) C. D. Zhang, S. M. Song, 1990, "Stability Analysis of Wave-Crab Gaits of a Quadruped", *J. of Robotics Systems*, Vol.7, No.2, pp.243-276