

# 다각 보행 로봇의 제어 방법에 관한 연구

박 성 혁                      황 승 구  
한국 전자 통신 연구소  
자동화 기술 개발부 제어 기기 개발실

A Study of the control method for  
multi-legged walking robots

Sung Hyuk Park            Seung Ku Hwang  
ETRI  
Automation Technologies Development Dept.  
Control Mechanism Sec.

## Abstract

In this paper the continuous static stable gait, kinematics and the basic control algorithm of the quadruped walking robot have been discussed. The control method described in this paper will be extended for the walking robot to walk on an uneven terrain.

제어 등을 들 수 있고 모든 경우에 안정도가 반드시 고려되어야 한다.

본 논문은 국내에서 진행되고 있는 4각 보행 로봇의 개발과제중, 제어 알고리즘의 구현을 위한 기초적 내용을 중심으로 pantograph 메카니즘을 갖는 4각 보행 로봇의 제어방식에 대해서 정적 안정을 고려한 걸음새(gait)와 kinematics 및 제어 알고리즘 순으로 서술한다.

## 1. 서론

연속적인 지지경로를 필요로 하는 바퀴나 궤도를 이용하는 로봇와는 달리, 보행 로봇은 최적화된 독립적인 착지점만을 필요로 하기 때문에 이동능력이 우수하여 달탐사 및 해저, 원자력발전소와 같은 비구조적인 환경에서 작업을 하는데 매우 유용하다.

보행 메카니즘의 연구는 McGhee에 의해 1960년대 후반 무렵 걸음새에 대한 수학적 해석의 기반이 구축된 이래 동적 안정도(dynamic stability)를 갖는 1각 및 2각 로봇과 정적 안정도(static stability)를 갖는 4각, 6각 로봇에 대해서 일본의 TIT(Tokyo Institute of Tech.), 동경대와 미국의 OSU(Ohio State Univ.), CMU(Carnegie Mellon Univ.)를 중심으로 활발히 수행되어 왔다.

보행 로봇의 제어 목표는 동체의 안정된 동작을 유지할 수 있도록 각 구동원의 힘집합을 찾는 것이므로 이를 위한 기본적인 제어 문제로는 몸체의 높이와 자세 제어, 각 다리(발)의 구동순서 및 발의 궤적 선정, 평균 이동속도

## 2. 걸음새

동물이나 보행 로봇의 발을 놓는 반복적인 패턴을 걸음새라고 하는데 이는 지면에 발이 놓여 있는 상태와 (support phase) 지면으로 부터 발이 떨어져 있는 상태(transfer phase) 두가지로 나뉘어지고 이를 수량적으로 표현하기 위해 표1과 같은 용어가 사용된다.

그림 1은 4각 걸음새의 8가지 종류를 relative phase로 나타낸 것인데 이중 trot와 pace를 gait diagram으로 표시하면 그림 2와 같다. 4각 로봇의 이론적으로 가능한 16가지의 걸음새중에서 한번에 한다리씩만 움직이는 걸음새가 6가지 있는데, 정적 안정도를 유지하는 걸음새는 그림 3에서 보듯이 오직 한가지 뿐이다. 한편, 걸음새 정의를 위해 표 1의 용어를 이용하면,  $\alpha$ 가 0인 경우가 게걸음(crab gait)이고 pace와 같이 같은  $\beta$ 를 갖는 다리 짝이 있는 경우가 정칙 걸음새(regular gait)로 좌우 대칭인 걸음새일 수 있고 안정 걸음새(stable gait)는  $i$ 번째 다리의  $\lambda$ 와  $i$ 번째 다리가 지지하고 있는 동안에 몸체가 움직인 거리가 같은 걸음새이다.

표 1. 걸음새 표현을 위한 용어 일람표

용어	정의	수식	비고
cycle time	한다리가 이동하기 시작하여 같은 다리가 다시 이동할때 까지의 시간	T	
duty factor	다리가 지면에 놓여 있는 시간의 T에 대한 비	$\beta$	
relative phase	기준다리가 지면에 놓여있는것을 0로 하고 T를 1로 했을때 각 다리가 지면에 닿는 시간의 T에 대한 비 (0~1)	P	
step	한다리가 지면에 닿은때부터 다음 다리가 지면에 닿을때 까지의 시간	st	$T = 4st$ 4각
stride length	한다리가 옮겨지는 거리	$\lambda$	
crab angle	새로방향 축과 진행 방향과의 사이각	$\alpha$	$\alpha = 0$ 계걸음
stability margin	정적 안정도를 유지 하면서 진행방향으로 움직일 수 있는 최대 거리 = 지지 다각형 (support polygon) 안에서 무게 중심이 진행 방향으로 움직일 수 있는 최대거리	S	

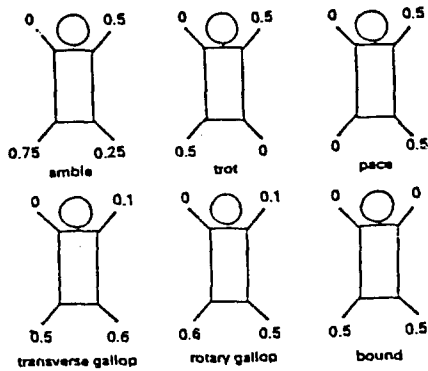
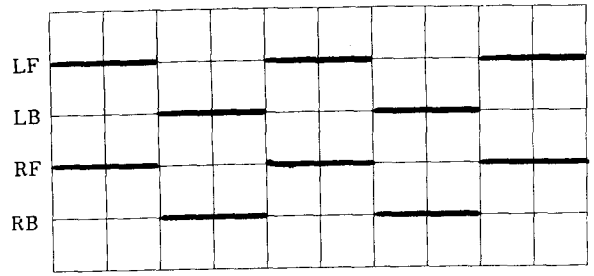
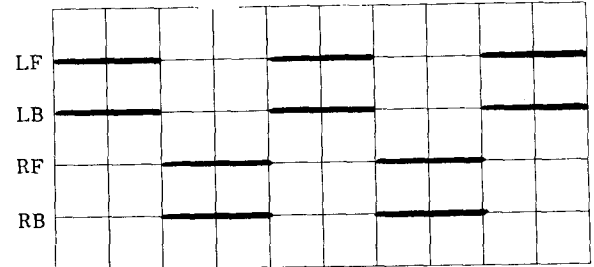


그림 1. Relative Phase로 나타낸 걸음새



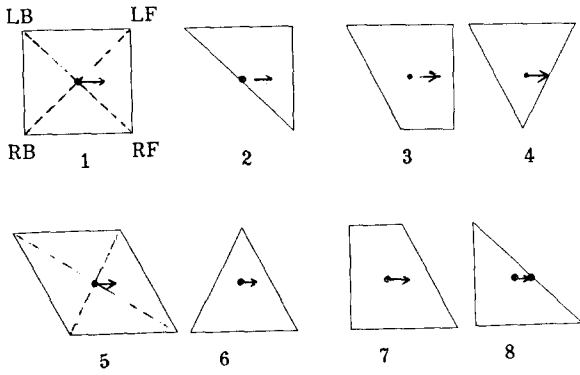
(a) Trot



(b) Pace

그림 2. Gait Diagram으로 나타낸 걸음새 ( $\beta=0.5$ )

RB-RF-LB-LF: stable



RB-LF-LB-RF: unstable

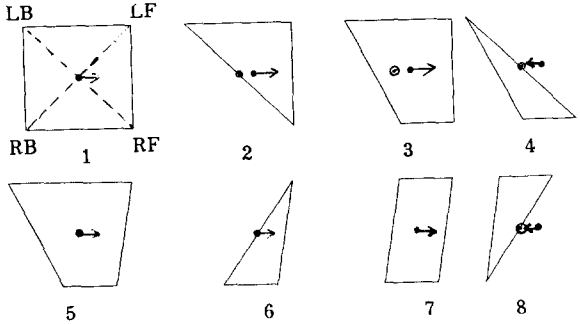


그림 3. 정적 안정 걸음새의 예

### 3. Kinematics

본 연구에서는 4각 로보트의 다리를 그림 4와 같은 pantograph 메카니즘으로 구성했는데 이는 구동부와 발끝사이의 관계가 두개의 선형 자유도를 갖고 구동부의 운동에 대해 발끝의 운동이 증폭되어 나타나는 특징이 있다.

pantograph는 그림 4에서 사각형 BCED가 평형사변형이고 점 A, D, F가 동일 직선상에 있는 기하학적 구조이다. 그림 5와 같이 좌표축을 설정하고 원점으로부터 구동부가 X축과 Z축으로 움직인 거리를 x, z로 할 때 발끝의 좌표(Fx, Fz)의 관계식은 식(1), (2)와 같다. 이때 K1은 확대비로 식(3)으로 정의된다. 한편 side walk를 위한 Y축 방향의 자유도를 pantograph에서 그림 6 처럼 3가지의 경우를 생각할 수 있는데 (a)의 경우는 Y축방향의 운동이 X축과 Z축 방향의 운동과 서로 독립적으로 움직이므로 Fy는 식(4) 처럼 y에 대해 선형이다.

그러나 (b)처럼 Y축 방향의 움직임을 Z축에 대해  $\theta$ 만큼 회전하여 구현할 때, Fy는 식(5)와 같이 표시되고 (c)의 경우는 XZ 평면 전체를  $\Omega$ 만큼 옆으로 돌려 Y축 방향의 움직임을 구현하므로 Fy는 식(6)처럼 표시된다. 이때 다리의 Z축 좌표가  $\Omega$ 의 영향을 받아 식(7)처럼 바뀌어 진다.

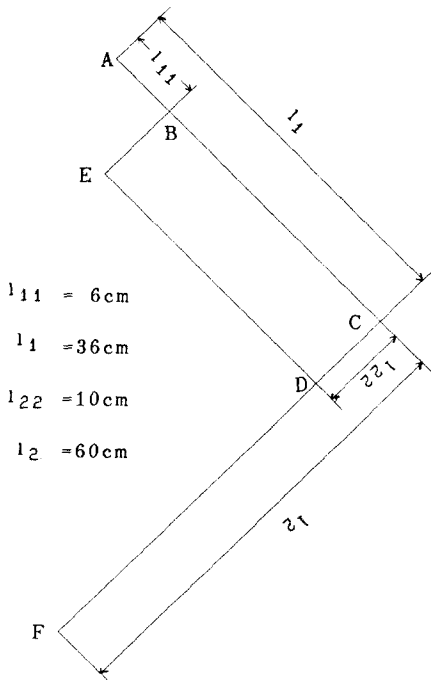


그림 4. Pantograph Mech.

$$F_x = (K_1 - 1) x \quad (1)$$

$$F_z = K_1 z \quad (2)$$

$$K_1 = \frac{l_1}{l_{11}} = \frac{l_2}{l_{22}} \quad (3)$$

$$F_y = y \quad (4)$$

$$Y = F_y = F_x \sin\theta = (K_1 - 1) x \sin\theta \quad (5)$$

$$Y = F_y = F_z \sin\Omega = K_1 z \sin\Omega \quad (6)$$

$$Z = F_z' = F_z \cos\Omega = K_1 z \cos\Omega \neq K_1 z \quad (7)$$

식(7)에서 보듯이 (c)의 경우와 같은 좌표 변환은 2개의 자유도 즉 Y, Z가 서로 독립적이 되지 못한다. 따라서 그림 6의 세가지 경우에 대한 inverse kinematics는 식(8), (9), (10)으로 표시된다.

$$x = \frac{X}{(K_1 - 1)}, \quad y = Y, \quad z = \frac{Z}{K_1} \quad (8)$$

$$x = \frac{X}{(K_1 - 1) \cos\theta}, \quad z = \frac{Z}{K_1}, \quad \theta = \tan^{-1} \frac{Y}{X} \quad (9)$$

$$x = \frac{X}{(K_1 - 1)}, \quad z = \frac{Z}{K_1 \cos\Omega}, \quad \Omega = \tan^{-1} \frac{Y}{Z} \quad (10)$$

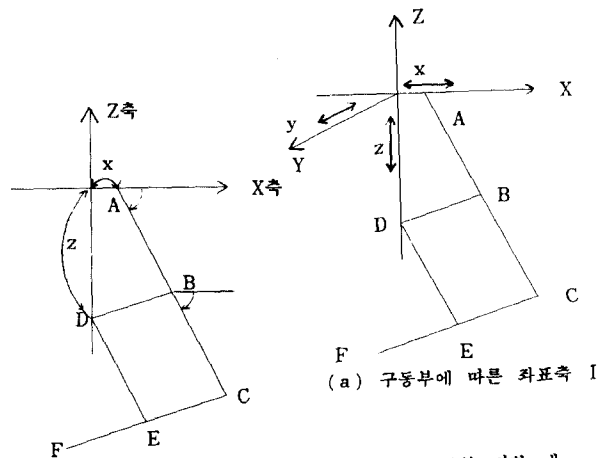
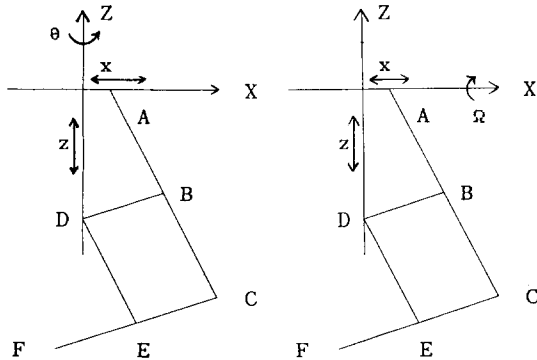


그림 5. Panto-Mech. 좌표축 그림 6. 구동부 변화 예



(b) 구동부에 따른 좌표축 II (c) 구동부에 따른 좌표축 III

그림 6 구동부 변화 예

#### 4. 제어 알고리즘

보행을 위한 제어구조가 그림 7과 같이 3단계로 나누어질 때, 기본 운동 제어에는 각 다리의 높이 정보를 이용해 동체의 높이를 유도하고 각 관절을 적절히 구동하여 몸체의 높이를 조절하는 것과 중력 방향에 대해 동체가 수직이 되도록 자세를 조절하는 것이 포함된다. 특히 후자는 비평탄면의 보행시 안정도에 상당한 영향을 미치기 때문에 중요하다. 그리고 이와 같은 몸체의 높이와 자세 제어는 이로부터 지지다리에 균등한 무게를 분배할 수 있기 때문에 잘 구현해야 한다. 이 외에도 주어진 기준속도에 맞추어 움직일 다리 및 지지다리의 평균 이동속도를 조절하는 것과 몸체 추진 운동이 있는데 후자의 경우는 9개 혹은 12개(각 다리당 3개의 구동원이 있다)의 구동원을 동기시켜 움직여야 한다. 그림 8은 연속적인 정적 안정을 유지하면서 정적 걸음새가 구현되기 위한 제어알고리즘의 흐름도인데 몸체가 수평을 유지하고 보행면이 평탄하다는 가정을 전제한다.

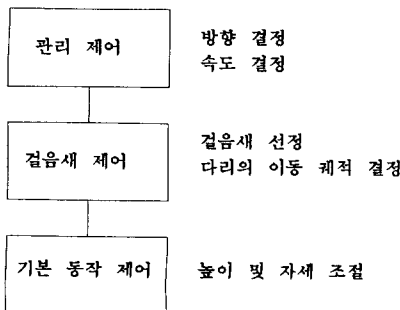


그림 7. 일반적인 보행 로봇의 제어 구조

먼저 움직일 다리의 선정은 자유 걸음새의 경우, 보행속도 및 방향 ( $\alpha$ )에 따라 dead lock이 생기지

않도록 정해야 하지만 정적 걸음새일 때는 그림 3에 나타낸 바와 같이 미리 정해진 순서에 따르면 된다. 이때 보행속도는 안정 여유(stability margin)내에서 다리를 이동하기 때문에 최고속도가 식(11)처럼 표시된다. 즉 한다리가 움직인 거리만큼 무게중심이 이동하는 경우이다.

$$v_{\max} = \frac{\lambda}{st} = \frac{4\lambda}{T} \quad (11)$$

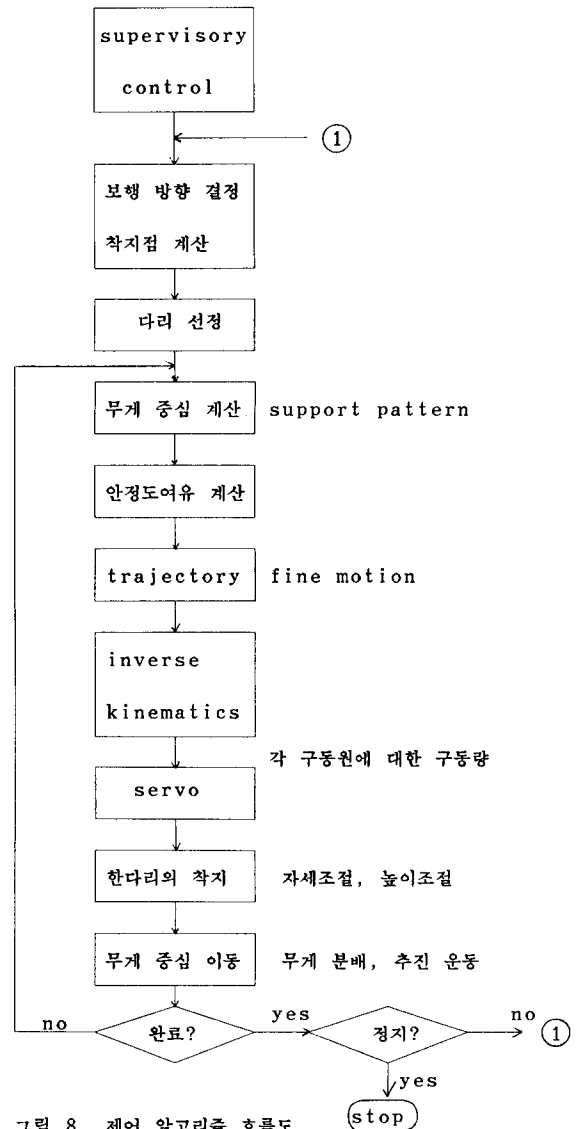


그림 8. 제어 알고리즘 흐름도

## 5. 결론

4각 이상의 보행 로봇은 주로 정적 안정도를 유지하는 걸음새를 갖는데 속도 향상을 위해 6각 로봇의 경우 follow-the-leader라는 걸음새가 발표된 바 있다.

본 연구에서는 pantograph mechanism을 갖는 4각 로봇의 제어방식중 정칙이며 안전한 걸음새의 경우에 대해서 알아보았다. 앞으로는 불규칙 험난 지형에 적응할 수 있는 자유 걸음새에 대한 효율적인 제어 알고리즘의 개발과 4각 보행 로봇이 갖는 구조적인 한계를 밝혀 보다 나은 보행 로봇의 구현에 이용하고자 한다.

## 참 고 문 헌

1. 김성동, 박성혁, 황승구, "다각 보행 로봇의 제어 알고리즘," 전기 학회지, vol. 36, no. 5, 1987 pp28 ~ 37
2. D.J. Todd, Walking Machines : An Introduction to Legged Robots, Anchor Press, 1985
3. A.P. Bessenov & N.V. Umnov, "The analysis of gaits in six legged vehicles according to their static stability," In First Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators 1973 pp1 ~ 10
4. R.B. McGhee & D.E. Drin, "An interactive computer - control system for a quadruped robot," In First Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators 1973 pp24 ~ 40
5. D.C.H. Yang & Y.Y. Lin, "Pantograph mechanism as a non-traditional manipulator structure," Mechanism & Machine Theory Vol.20, NO.2, 1985 pp115 ~ 122
6. R.M. Alexander, "The gaits of bipedal & a quadrupedal walking vehicle,"

Int. J. Robotics Research 3, 1984 pp49 ~ 59

7. S. Hirose, "A Study of design & control of a quadruped walking vehicle," Int. J. Robotics Research 3, 1984 pp112 ~ 133