

부정지형에서 4각 보행로봇의 걸음새 제어에 관한 연구

(A Study on Gait Control of a 4-Legged Walking Robot on Irregular Terrain)

成 鎰*, 文 永 鉉**

(Il Seong and Young Hyun Moon)

要 約

본 연구에서는 정적안정을 유지하면서 부정지형을 보행할 수 있는 4각 보행로봇을 구현하기 위해서, 동물의 걸음새를 관찰하여 4각 보행 로봇의 모델을 제시하고 그 모델에 대한 KINEMATIC을 기하학적인 방법으로 해석하였다. 그리고 이를 바탕으로 부정지형을 효과적으로 보행할 수 있는 걸음새 제어 알고리즘을 제시하였으며, 제시된 알고리즘의 지형 적응성을 고찰하기 위하여 지형을 4개로 분류하여 컴퓨터 시뮬레이션을 하였다.

Abstract

In this paper, A model of 4-legged walking robot is presented by investigating the gait of animals, which can walk with maintaining static stability on irregular terrain. Kinematics of the model robot was analyzed by geometric approach, and a gait control algorithm is proposed for the effective walking on irregular terrain. Terrains are classified into 4 types in order to study the terrain adaptability of the proposed algorithm and it is simulated for each type of terrain.

I. 서 론

지금까지의 로봇트는 대부분 인간의 기능 중에서 팔과 손의 기능을 모방한 것으로 몸체는 고정된 채 일정한 작업 영역 내의 작업을 수행하고 있는 것이 대부분이다. 이런 산업용 로봇트가 궁극적으로 사람

과 같은 기능을 가지는 로봇트로 구현되기 위해서는 이동 기능이 필수적이다. 로봇트의 이동은 대개 바퀴, 케도 혹은 다리 등으로 구현될 수 있는데 다리에 의한 이동은 비평탄면이나 장애물이 있는 지형에서 바퀴나 케도보다 우수한 지형 적응성을 가진다.¹⁾

다각 보행 로봇트에 대한 연구는 60년대에 미국과 소련에서 달과 다른 행성을 탐험하기 위한 준비과정에서 시작되었으나 제어의 복잡성으로 인해 큰 발전이 없었으나 70년대에 들어와서 디지털 컴퓨터의 등장으로 이 분야에 많은 발전이 있게 되었는데, 오하이오 주립대의 McGhee가 최초로 디지털 컴퓨터를 사용하여 6각 보행 로봇트를 만들었다.¹⁾ 그후 소련, 일본 등에서 여러가지 모델이 소개되었다.

*正會員, 三星電子 生産技術研究所

(Production Eng. Center, SAMSUNG Elec. Co.)

**正會員, 延世大學校 電氣工學科

(Dept. of Electrical Eng., Yonsei Univ.)

接受日字: 1988年 3月 19日

본 연구에서는 다각 보행 로봇의 세부 개발분야 중의 하나인 제어분야와 관련하여 동물의 걸음새를 관찰하고 그 중에서 정적 안정을 유지하면서 보행할 수 있으면서 가장 작은 다리 수를 가지는 4 각 보행 로봇의 모델을 제시하였다. 또한, 그 모델에 대한 KINEMATIC을 해석하고 부정지형에서 장애물을 효과적으로 극복할 수 있는 걸음새 제어 알고리즘(gait control algorithm)을 제시하고 컴퓨터 시뮬레이션으로 지형 적응성을 고찰하였다.

II. 동물의 걸음새 및 모델로봇의 구조

1. 동물의 걸음새

동물이나 보행 로봇의 발을 놓는 반복적인 패턴을 걸음새라고 하는데 이것은 지면에 발이 놓여있는 상태(supporting phase)와 지면으로부터 발이 떨어져 있는 상태(transferring phase) 두가지로 나뉘어진다.⁽¹⁾ 걸음새는 시간과 거리의 함수로 표현되어 질 수 있으며, 걸음새의 표시방법에는 그림에 의한 방법과 수량적 표현에 의한 방법이 있는데 수량적 표현을 위하여 보폭(stride length), duty factor, 상대 위상(relative phase), 안정 여유(stability margin) 등과 같은 용어가 사용된다.⁽¹¹⁾

포유류 중에서 고양이와 곤충류 중에서 진딧물의 걸음새를 gait diagram으로 나타내면 그림 1과 같다. 그림에서 흰 부분은 발이 지면으로부터 떨어진 상태이고, 검은 부분은 발이 지면에 놓여 있는 상태를 나타낸다.

고양이의 기본적인 걸음새는 평보(walk), 총총걸음(trot), 속보(pace), 구보(gallop) 등으로 나눌 수 있고, 진딧물의 걸음새는 빠른 걸음인 교호삼각모양(alternating tripod)과 느린걸음인 물결모양 걸음새

(wave gait)로 나눌 수 있다.⁽⁵⁾

다리의 배열은 그림 2와 같이 인간과 같은 포유류의 배열, 파충류의 배열 그리고 곤충류의 배열 3가지 형태로 나뉘어진다.

포유류의 배열은 빠르고 보행에 효과적이며, 파충류의 배열은 느린 반면 안정되며, 곤충류의 배열은 몸의 안정을 취하면서도 적은 힘으로 몸을 전후좌우로 기민하게 움직일 수 있는 특징이 있다.

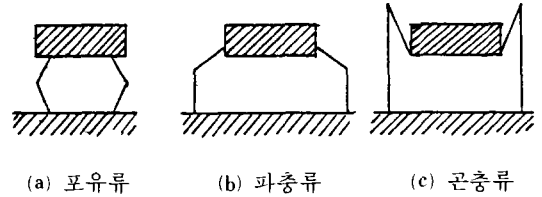


그림 2. 다리 배열의 형태

Fig. 2. Type of leg arrangement.

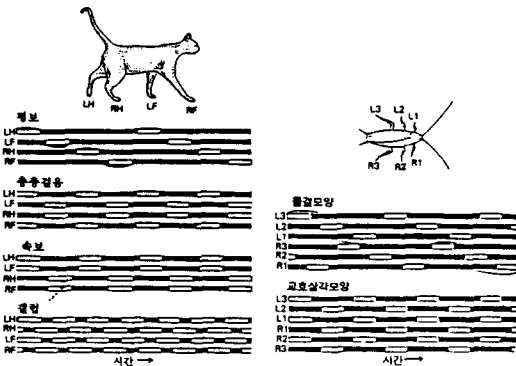
2. 모델 로봇의 구조

다각 보행 로봇은 매니퓰레이터와 마찬가지로 구동자(actuator)에 의해 구동되는 관절로 연결된 링크(link)들의 집합체로 볼 수 있다. 이러한 보행 로봇의 제어 목표는 동체의 안정된 동작을 유지할 수 있도록 하는 각 구동자 힘의 집합을 찾는 것이다. 따라서 보행로봇에 있어서 가장 근본적인 문제는 안정도라고 할 수 있다.

다각 보행로봇에 있어서 안정도는 크게 둘로 나뉘어지는데, 무게 중심이 항상 몸을 지지하는 다리로 이루어지는 지지평면 내에 있도록 하는 정적안정과 순간적으로 정적 안정은 유지되지 않지만 몸체의 속도와 가속도 등 몸전체의 이동사이클에 의해 안정된 동작을 취하는 동적 안정이 있다.⁽¹²⁾

정적 안정을 유지하기 위해서는 최소한 4 개의 다리가 필요하다. 왜냐하면, 지지평면을 구성하기 위해서는 최소한 3 개의 다리가 필요하고, 몸체의 이동을 위해서 최소한 1 개의 유각(swing leg)이 있어야 하기 때문이다. 따라서 4 다리 이상의 보행 로봇에서는 주로 정적 안정을 유지하기 위한 연구가 대부분이며 1 다리나 2 다리를 갖는 보행 로봇에서는 동적 안정을 유지하기 위한 제어가 주목적을 이루고 있다.

본 연구에서는 4 각 보행 로봇을 모델 로봇으로 선정하였으며, 다리의 배열은 동물의 걸음새 관찰에서 알아보았듯이 몸체가 안정되면서 적은 힘으로 쉽



(a) 고양이의 걸음새 (b) 진딧물의 걸음새

그림 1. 고양이와 진딧물의 걸음새
Fig. 1. Gaits of the cat and the cockroach.

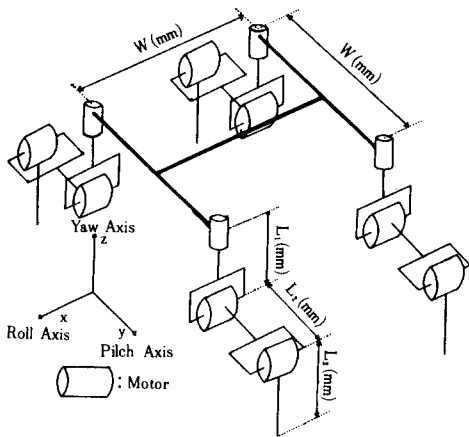


그림 3. 모델 4 각 보행로봇의 개략도
Fig. 3. Schematic diagram of 4-legged walking robot.

계 움직일 수 있는 특성을 가진 곤충류의 배열을 선택하였다. 그리고 각 다리는 3 개의 회전관절로 구성되어 있으며 3 개의 관절축 중에서 2 개는 몸체와 평행을 이루고 있고 1 개는 수직을 이루고 있다. 그리고 몸체는 가로 세로의 길이가 같은 정사각형이라 가정하였다. 이상에서 기술한 모델 로봇의 개략도는 그림 3 과 같다.

III. KINEMATIC 해석

고정된 장소에서 작업을 수행하기 때문에 기본 좌표계의 변화가 없는 매니퓰레이터와 달리 보행로봇은 다리의 기본 좌표계인 몸체의 좌표계가 계속 변하기 때문에 같은 방법으로 KINEMATIC을 해석할 수 없다. 따라서 여기에서는 움직이지 않는 임의의 기본 좌표계를 지표면에 설정하고 몸체의 좌표계를 준좌표계로 하여 KINEMATIC을 해석하기로 한다. 그리고 모든 좌표와 변환행렬(transformation matrix)은 3 차원 동차좌표계로 나타내었다.

1. 보행 로봇의 좌표계

지표상의 움직이지 않는 임의의 기본 좌표계는 O-XYZ로 표시되고 양의 Z축을 수직 방향으로 한 오른손 좌표계로 구성되며, 몸체 좌표계는 몸체의 무게중심과 원점이 일치한다고 가정하고 보행로봇의 진행 방향을 양의 x축, 양의 z축을 수직 방향으로 하는 오른손 좌표계로 구성되며, o-xyz로 나타내기로 한다.

기본 좌표계에 대한 몸체의 위치는 (X_0, Y_0, Z_0) 로 나타내고 몸체의 자세는 항공, 항해 등에서 많이 쓰

이는 Roll, Pitch, Yaw(RPY(ϕ, θ, φ))로 나타내기로 한다.^[8]

각 관절의 각도 α, β, γ 는 그림 4와 같이 각 링크의 원래 위치와 현재 위치 사이의 각도로 나타낸다.

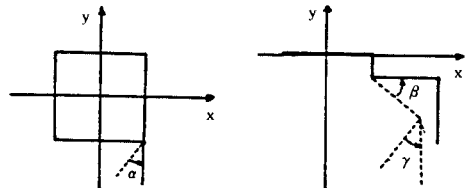


그림 4. 관절각 α, β, γ
Fig. 4. Joint angle α, β, γ .

보행 로봇의 KINEMATIC을 해석하기 위해서는 다음과 같은 4 개의 변수가 필요하다.

- (1) 기준 좌표계에서 몸체의 위치 : (X_0, Y_0, Z_0)
- (2) 몸체의 자세 : RPY(ϕ, θ, φ)
- (3) 다리 관절의 각도 : α, β, γ
- (4) 기준 좌표계에서 발끝의 위치 : (X_i, Y_i, Z_i)

위의 4 개의 변수를 완전히 알아야 보행 로봇의 KINEMATIC을 해석할 수 있다.

2. 기준 좌표계에서 몸체의 자세 및 위치

몸체 좌표계의 좌표를 기준 좌표계의 좌표로 변환하는 변환 행렬 T는 식(1)과 같다. 단, C = cos, S = sin이다.

$$T = [\text{Trans}(X_0, Y_0, Z_0)] [\text{RPY}(\phi, \theta, \varphi)] \\ = [\text{Trans}(X_0, Y_0, Z_0)] [\text{Rot}(X, \phi)] \\ [\text{Rot}(Y, \theta)] [\text{Rot}(Z, \varphi)] \quad (1)$$

각 다리의 관절각을 이용하여 몸체 좌표계에서 발끝의 좌표를 계산할 수 있다. 따라서 기준 좌표계와 몸체 좌표계에서 발끝의 좌표를 모두 알게되므로 여기서 다시 다음과 같은 변환 행렬 T를 구할 수 있다.

$$T = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} X_1 & X_2 & X_3 & X_4 \\ Y_1 & Y_2 & Y_3 & Y_4 \\ Z_1 & Z_2 & Z_3 & Z_4 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ y_1 & y_2 & y_3 & y_4 \\ z_1 & z_2 & z_3 & z_4 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \quad (2)$$

식(2)로부터 변환행렬 T를 계산하고 식(1)과 식(2)의 마지막 열을 비교함으로써 몸체의 위치(X_0, Y_0, Z_0)를 구할 수 있다.

몸체의 자세를 계산하기 위하여 변환 행렬 T에서 평행이동을 제외한 나머지 행렬을 T'이라 하면 T'은 식(3)과 같다.

$$T' = [\text{Rot}(X, \phi)] [\text{Rot}(Y, \theta)] [\text{Rot}(Z, \varphi)] \quad (3)$$

이 식(3)을 변형하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$[\text{Rot}(X, \phi)]^{-1} T' = [\text{Rot}(Y, \theta)] [\text{Rot}(Z, \varphi)] \quad (4)$$

“두 행렬이 같으면 두 행렬의 각 요소는 같다”는 행렬의 성질을 이용하여 식(4)의 양변을 비교함으로써 ϕ, θ, φ 를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \phi &= \text{atan } 2(-a'_y, a'_z) \\ \theta &= \text{atan } 2(\cos \phi n'_y + \sin \phi n'_z, \cos \phi o'_y + \sin \phi o'_z) \\ \varphi &= \text{atan } 2(a'_x, -\sin \phi a'_y + \cos \phi a'_z) \end{aligned}$$

여기서 atan 2는 변형된 역탄젠트로 0에서 ± 180 구간을 연속적으로 계산할 수 있다.

3. 다리의 관절각

각 다리의 관절각 $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ 를 구하기 위해 각 다리의 두번째 관절에서의 좌표계를 o_i 라 하고 (x_{oi}, y_{oi}, z_{oi})로 나타내면 다리의 관절각 α_i 는 그림 4로부터 다음과 같음을 알 수 있다.

$$\alpha_i = \text{atan } 2(x_i - x_{oi}, y_i - y_{oi})$$

관절각 β_i 와 γ_i 를 구하기 위하여 그림 5와 같이 다리를 2개의 링크가 이루는 평면에 투영한 좌표계를 구성할 수 있다.

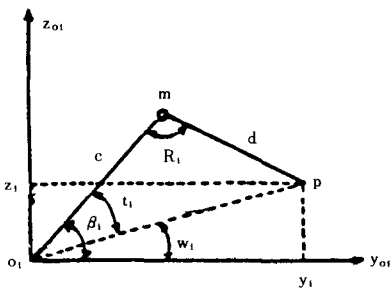


그림 5. 관절각 β_i 와 γ_i 를 계산하기 위한 좌표계
Fig. 5. Coordinate system for computation of joint angle β_i, γ_i .

그림 5의 삼각형 omp에서 t_1 와 R_1 를 계산하면 다음과 같다.

$$t_1 = \cos((c^2 + \overline{op}^2 - d^2) / 2c\overline{op}) \quad (5)$$

$$R_1 = \cos((c^2 + d^2 - \overline{op}^2) / 2cd) \quad (6)$$

그리고 삼각형 opy에서 w_1 를 계산 할 수 있다.

$$w_1 = \sin^{-1}((z_i - z_{oi}) / \overline{op}) \quad (7)$$

여기서 $\overline{op} = \sqrt{(x_i - x_{oi})^2 + (y_i - y_{oi})^2 + (z_i - z_{oi})^2}$ 이다.

식(5), (6), (7)과 다음의 관계식을 이용해 β_i 와 γ_i 를 구할 수 있다.

$$i=1,2 \quad \beta_i = t_i + w_i \quad \gamma_i = R_i - \pi/2$$

$$i=3,4 \quad \beta_i = -(t_i + w_i) \quad \gamma_i = -(R_i - \pi/2)$$

단, i는 X-Y 평면에서 사분면에 따른 다리의 번호

4. 기준 좌표계에서 발끝의 위치

먼저 몸체 좌표계에서 각 관절의 각도를 이용하여 발끝의 위치를 구한 다음 메니퓰레이터의 KINEMATIC 해석에서 많이 쓰이는 회전변환 행렬을 이용해 기준좌표계에서의 좌표값으로 바꾼다. 그림 6은 몸체와 한다리만을 나타내고 각 벡터의 값을 표시하였다. 벡터값을 계산하면 다음과 같다.

$$\bar{R} = \bar{R}_1 + T_1 \bar{R}_2 + T_1 T_2 \bar{R}_3 + T_1 T_2 T_3 \bar{R}_4$$

단,

$$T_1 = \begin{bmatrix} C\alpha & S\alpha & 0 & 0 \\ S\alpha & C\alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad T_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C\beta & -S\beta & 0 \\ 0 & S\beta & C\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C\gamma & -S\gamma & 0 \\ 0 & S\gamma & C\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

위에서 구한 몸체 좌표계에서의 발끝의 좌표값으로부터 기준 좌표계에서 좌표값을 구하면 다음과 같다.

$$[X_i Y_i Z_i 1]^t = [\text{Trans}(X_0, Y_0, Z_0)] [\text{RPY}(\phi, \theta, \varphi)] \bar{R}$$

IV. 걸음새 제어 알고리즘

보행 로봇 시스템은 크게 제어 시스템과 메카니즘으로 대별되고 제어 시스템은 관리자 (supervisory control), 보행제어 (motion planning) 그리고 서보제어 (motion execution)로 구성되어 있으며 그림 7과 같은 계층적 (hierarchical) 구조를 이루고 있다.¹¹⁾

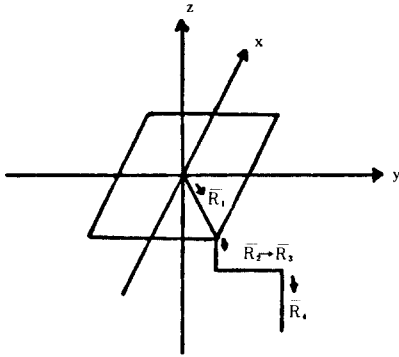


그림 6. 벡터 \bar{R}_1 의 위치
Fig. 6. Representation of \bar{R}_1 .

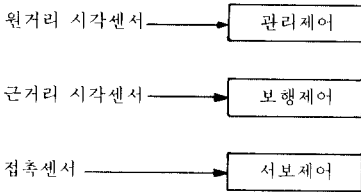


그림 7. 보행 로봇 제어 시스템의 구조
Fig. 7. Structure of walking robot control system.

관리제어에서는 외부에서 주어진 임무와 원거리 시각센서에서 받아 들인 정보로부터 경로를 계획하고 방향과 속도를 결정하여 보행 제어부로 넘긴다. 이것은 인간 조종자 또는 장래의 인공지능이 담당하게 된다. 보행 제어부에서는 관리 제어부에서 받은 정보와 근거리 시각센서에서 받아 들인 정보로부터 몸체의 부분적인 경로수정, 걸음새 결정 그리고 다리의 궤적과 속도등을 계산하여 서보제어부로 넘겨주게 되며 서보제어부에서는 넘겨받은 정보와 접촉센서의 정보로부터 서보 구동자의 제어신호를 발생하게 된다. 보행제어와 서보제어는 컴퓨터에 의해 이루어진다.

본 연구에서는 보행제어 중에서 걸음새 제어만을 다루기로 한다. 앞에서 제시한 모델 로봇은 3개의 회전 관절을 가지고 있으므로 구형의 도달지역을 가지지만 경계선 근방에서는 다리의 운동 여유가 거의 없고 또한 계산상의 복잡함을 피하기 위하여 구에 내접하는 육면체로 도달 지역을 제한 하였다.

4각 보행 로봇이 정적 안정을 유지하면서 보행

할 수 있는 이론적으로 가능한 걸음새는 다음 표와 같이 6가지 (= (다리의 수 - 1)!) 가 있는데 이 중에서 정적 안정을 유지하면서 교착상태가 발생하지 않고 보행할 수 있는 것은 앞장에서 고양이와 같은 네번째 걸음새 밖에 없다.¹¹⁾ 따라서 고양이의 평보(walk)를 보행로봇의 걸음새로 선정하였다. 이 걸음새를 상대위상(relative phase)으로 나타내면 그림 8과 같다.

표 1. 정적 걸음새의 종류
Table 1. Kind of static walk.

	유각의 순서			
1	LF	LR	RR	RF
2	LF	LR	RF	RR
3	LF	RR	LR	RF
4	LF	RR	RF	LR
5	LF	RF	LR	RR
6	LF	RF	RR	LR

* LF : 왼쪽 앞다리
LR : 왼쪽 뒷다리
RF : 오른쪽 앞다리
RR : 오른쪽 뒷다리

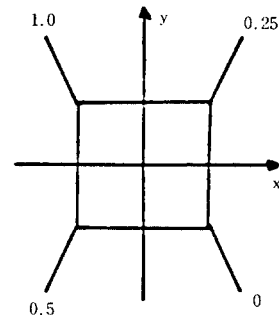


그림 8. 상대위상으로 표시한 평보
Fig. 8. Representation of walk by relative phase.

1. 걸음새의 수량적 분석

앞에서 고찰한 고양이의 평보에 대한 state diagram과 상대위상으로부터 지지상(supporting phase)을 그림 9와 표 2에 나타내었다. 그런데 여기에 나타난 고양이의 걸음새에서 안정 여유(stability margin)는 0이다.

표 2에서 보듯이 한 주기 동안에 각 다리가 지면에 닿아있는 동안에 나머지 3 다리는 각각 한번씩

표 2. 지지상(S=0 일 때)
Table 2. Supporting phase(S=0).

	LF	LR	RR	RF	유각
0-t1	SP	SP	TP	SP	RR
t1-t2	SP	SP	SP	TP	RF
t2-t3	SP	TP	SP	SP	LR
t3-T	TP	SP	SP	SP	LF

* SP : 지지상(support phase)
TP : 이동상(transfer phase)

표 3. 지지상(S≠0)
Table 3. Supporting phase(S≠0).

	LF	LR	RR	RF	비 고
0-t1	SP	SP	SP	SP	4 각지지
t1-t2	SP	SP	TP	SP	유각 : RR
t2-t3	SP	SP	SP	TP	유각 : RF
t3-t4	SP	SP	SP	SP	4 각지지
t4-t5	SP	TP	SP	SP	유각 : LR
t5-T	TP	SP	SP	SP	유각 : LF

* SP : 지지상(support phase)
TP : 이동상(transfer phase)

이동하며 그에 따라 몸체는 3번 이동한다. 몸체가 한 번에 움직이는 거리를 A(0), 진행 방향을 따라 측정 한 도달 지역의 길이가 E, 그리고 λ와 β를 각각 보폭, duty factor 라면 다음의 관계식이 성립한다.

$$E = 3A(0) \tag{8}$$

$$\lambda = 4A(0) \tag{9}$$

$$\beta = 3/4 \tag{10}$$

안정 여유가 0 일 경우에는 무게 중심이 지지평면의 경계선위에 있는 임계상태(critical state)가 존재하여 조그마한 외부 충격에도 쉽게 넘어지게 되므로 고양이의 평보를 좀더 일반화시켜 안정 여유가 0 이 아닐 경우를 생각하여 보자.

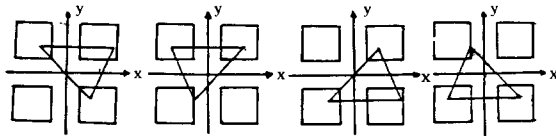


그림 9. 지지상의 변화 과정(S=0)
Fig. 9. Changing process of supporting phase.

그림 9에서 보면 한 주기 동안에 지지평면의 형태가 정삼각형에서 역삼각형으로 또 역삼각형에서 정삼각형으로 바뀌게 된다. 따라서 S ≠ 0 인 경우에는 불가피하게 4 각지지상이 존재하게 된다. 이 경우의 지지상을 도표로 나타내면 표 3과 같다. 이 경우에는 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$E = 3A(S) + 4S \tag{11}$$

$$\lambda = 4A(S) + 4S \tag{12}$$

$$\beta = 3/4(1+1/(1+A(S)/S)) \geq 3/4 \tag{13}$$

식 (11)로부터 A(S)=0 일 때 안정여유는 최대가 됨을 알 수 있고 이때의 안정여유 S_{MAX}=E/4 임을 알 수 있다.

2. 지지점 선정

앞에서 분석한 걸음새에 대한 제어 알고리즘을 구성하기 위하여 다음과 같은 가정을 하였다.

- 1) 보행 중에 몸체는 항상 수평을 유지한다.
- 2) 원거리 시각 센서와 근거리 시각센서로부터 지형에 대한 정보가 충분히 주어진다.
- 3) 보행 로봇의 초기 위치는 항상 평면이다.

걸음새 제어 알고리즘의 전체 흐름도는 그림 10과 같고, 이를 구체적으로 설명하면 다음과 같다.

보행을 시작하기 위해서는 먼저 각다리의 운동 여유를 계산하여 운동 여유가 가장 적은 다리를 유각(swing leg)으로 선정한다. 어느 한개의 다리가 유각으로 선정되면 그 다리를 들었을 경우 몸체가 넘어지지 않도록 무게 중심이 나머지 3개의 지지각이 구성하는 지지평면 내에 있어야 한다. 즉, 정적 안정을 유지해야 한다. 이것을 판정하는 방법은 다음과 같다.

3 개의 지지점 중에서 2 개를 선택하는 방법은 3 가지 경우가 있는데, 각각의 경우에서 두점을 지나는 직선의 방정식을 세우고 선택되지 않은 나머지 1 개의 지지점과 무게 중심이 같은 편에 있는가를 판정한다. 3 가지 경우 중에서 한번이라도 무게 중심과 나머지 지지점이 직선의 반대편에 있으면 무게 중심이 지지점 밖에 있다. 그렇지 않을 경우에는 지지평면 내에 무게 중심이 있다.

몸체가 안정되면 유각을 들어 몸체를 진행시키고 유각의 지지점을 선정한다. 지지점 선정에서는 먼저

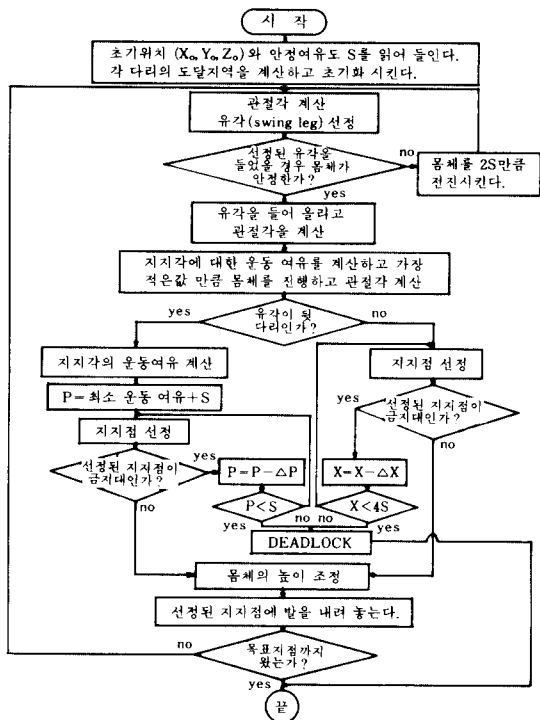


그림10. 걸음새 제어 흐름도
Fig. 10. Flow chart of gait control.

X-Y 평면에서 지지점을 선정하고, Z 축을 따라 몸체의 높이를 조정하여 최종 지지점을 얻는다. 지지점을 선정하는 방법은 다음과 같다.

4 각 보행 로봇에서는 대각선상에 있는 다리 끼리는 상관 관계를 가지기 때문에 앞의 2 다리 또는 뒷쪽 2 다리의 지지점만을 적절히 선정하면 교착상태가 발생하지 않게 된다. 여기서는 앞다리가 도달 지역 내에서 가능한 한 운동 여유가 크도록 그리고 최소한 4S 보다는 크도록 지지점을 선정한다. 뒷다리도 역시 운동 여유가 4S 보다는 커야하고, 대각선상에 있는 앞다리의 지지점과 지지각의 운동 여유 중에서 가장 작은 값에 S 만큼 더한 값을 P라고 할 때 점(P, 0)를 지나는 직선을 구하고 도달지역 내의 직선상에서 최대 운동 여유를 갖도록 지지점을 선정한다. 만약 선정된 지지점이 발을 내려놓을 수 없는 금지대라면 P를 ΔP 만큼 감소시켜서 위의 과정을 반복한다. 이때 P가 S 보다 작게 되면 로봇은 교착상태가 되어 멈추게 된다. 따라서 도달지역 내에서 지지점이 될 수 있는 지역은 그림11에서와 같이 빗금친 부분으로 제한된다. 교착상태가 발생하기 전에 지지점이 선정되면 몸체의 높이를 조정한 후 선정된 지지점에 발을 내려 놓는다.

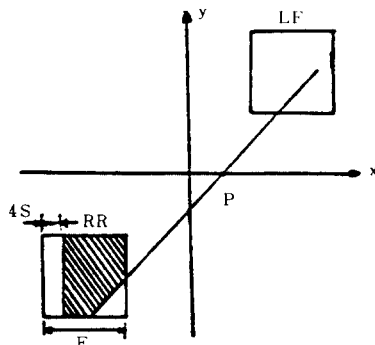


그림11. 뒷다리의 지지점 선정
Fig. 11. Selection of rear leg supporting point.

V. 컴퓨터 시뮬레이션 및 결과 고찰

앞에서 해석한 KINEMATIC 과 제시된 걸음새 제어 알고리즘으로 금지대, 경사지형, 계단, 요철지형에 대해서 보행과정을 시뮬레이션한 후 결과를 3차원 그래픽으로 나타내었다. 3 차원 좌표를 관측점에 따라서 2 차원 좌표로 변환하기 위한 방법으로는 투영법이 널리 쓰이는데, 여기서는 투영법 중에서 평행 투영법(parallel projection)을 이용하여 좌표를 변환 하였다.

1. 모의 지형 구성

보행 로봇이 실제로 걸어가야 할 지형은 아주 불규칙적이며 복잡하고 다양하다. 그러나 여기서는 일반적인 지형을 간략화하여 경사지형, 요철지형, 계단 그리고 깊은 도랑이나 웅덩이 같이 보행 로봇의 발을 놓을 수 없는 금지대로 분류하였다. 그리고 모든 지형은 표면이 딱딱하며 미끄러지지 않는다고 가정하였다.

(1) 금지대

지형에서 사각형으로 표시하였으며 모든 금지대가 로봇의 진행방향에 대하여 직각으로 놓여있다고 가정하였다.

(2) 경사지형

경사가 일정하다고 가정하고 함수 $Z = AX + B$ 로써 모의지형을 구성하였다.

(3) 요철지형

일반적인 요철지형은 요철의 높이와 간격이 불규칙하지만 여기서는 편의상 요철의 높이와 간격이 일정하다고 가정하고 함수 $Z = ABS(A \sin(X/B))$ 로써 지형을 시뮬레이션 하였다.

(4) 계단

계단의 높이와 폭이 일정하다고 가정하고 함수 $Z = Au(X-X1) + Au(X-X2) + Au(X-X3) + \dots$ 로써 모의지형을 구성하였다.

2. 결과 및 고찰

보행 로봇트 몸체의 길이와 넓이는 동일하게 100 cm로 하였고 각 다리의 링크길이 L1, L2, L3는 각각 10cm, 50cm, 50cm 그리고 안정 여유는 5 cm로 하여 시뮬레이션 하였으며, 시뮬레이션에 사용된 컴퓨터는 IBM-PC/AT 이고 그래픽은 Turbo Graphix Toolbox 를 이용하였다.

1) 금지대가 있는 곳에서의 보행

금지대를 네점 (261,0) (261,300) (300,0) (300,300) 이 이루는 사각형으로 설정하고 금지대가 있을 경우와 금지대가 없을 경우 발끝의 위치를 비교하여 표4에 나타내었다. 그리고 금지대가 있을 때와 없을 경우 다리의 이동회수 n에 대한 진행거리를 그림12에 나타내었다. 그림13에 연속적인 보행과정을 그래픽으로 나타내었다. 그래픽에서 관측점은 구 좌표계에서 (15000, 45°, 45°)로 하였다.

표 4에서 보면 금지대가 없을 경우 왼쪽 앞다리 LF의 위치가 206.9에서 294.5로 이동한데 반하여 X=261~300이 금지대로 설정된 경우에는 206.9에서 259.6으로 이동함으로써 금지대를 피하여 다리의

표 4. 발끝의 위치
Table 4. Position of foottip.

금지대가 없을 경우				금지대가 있을 경우			
RF	RR	LR	LF	RF	RR	LR	LF
250.7	63.1	19.2	206.9	250.7	63.1	19.2	206.9
250.7	63.1	106.9	206.9	250.7	63.1	106.9	206.9
250.7	63.1	106.9	294.5	250.7	63.1	106.9	259.5
250.7	150.7	106.9	294.5	250.7	149.5	106.9	259.5
338.3	150.7	106.9	294.5	320.3	149.5	106.9	259.5
338.3	150.7	194.5	294.5	320.3	149.5	159.5	259.5
338.3	150.7	194.5	382.1	320.3	149.5	159.5	347.2
338.3	238.3	194.5	382.1	320.3	203.3	159.5	347.2
425.9	238.3	194.5	382.1	390.9	203.3	159.5	347.2
425.9	238.3	282.2	382.1	390.9	203.3	247.1	347.2
425.9	238.3	282.2	469.7	390.9	203.3	247.1	434.7
425.9	325.9	282.1	469.7	390.9	255.9	247.1	434.7
513.6	325.9	282.1	469.7	477.4	255.9	247.1	434.7
513.6	325.9	369.7	469.7	477.4	255.9	306.7	434.7

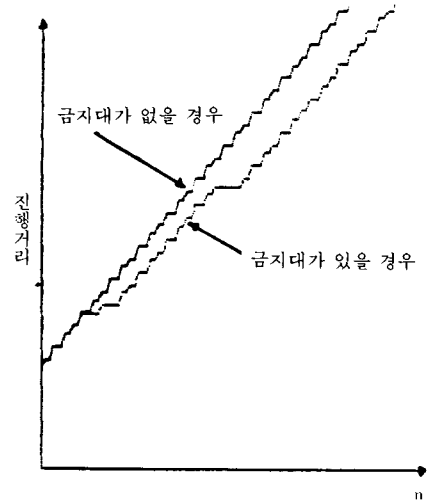


그림12. 금지대의 폭이 변할 때 n에 대한 진행거리
Fig. 12. Navigation distance to n with varying the width of forbidden area.

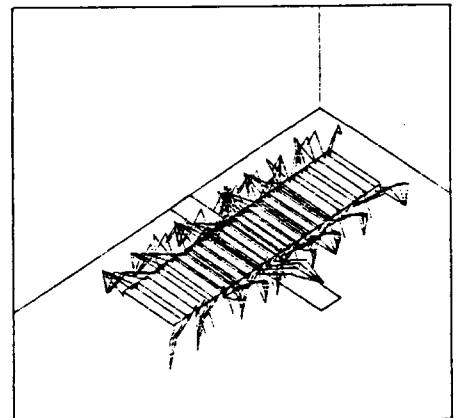
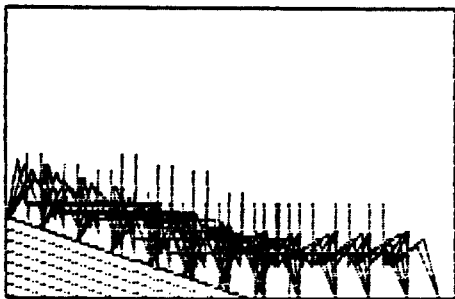


그림13. 금지대에서의 보행과정
Fig. 13. Walking process on forbidden area.

지지점을 선정한 것을 알 수 있다. 장애물로 인하여 운동 여유가 작은 지점을 지지점으로 선정하므로 인해 몸체를 진행시킬 수 있는 거리가 짧아져 몸체의 진행속도가 떨어짐을 그림12에서 볼 수 있다.

2) 경사지형에서의 보행

경사각을 14° (기울기 A=0.25)로 했을 때와 경사각이 없을 때 다리의 이동회수 n에 대한 진행거리를 그림15에 나타내었다. 경사지형을 오르는 연속적인 보행과정을 그림14에 그래픽으로 나타내었다. 그래



← 진행방향

그림 14. 경사지에서의 보행과정
Fig. 14. Walking process on slope.

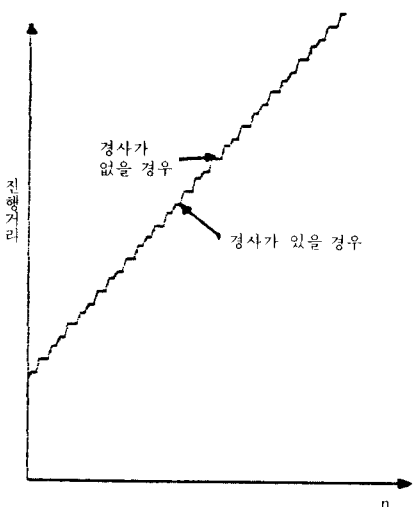


그림 15. 경사각을 바꾸었을 때 n에 대한 이동거리
Fig. 15. Navigation distance to n with changing the slope angle.

픽에서 관측점은 구좌표계에서 (15000, 90°, 90°)로 하였다.

그림 15에서 알 수 있듯이 경사지형에서는 경사각이 최대 경사각 이하인 경우에는 경사각이 로봇의 진행 속도에는 영향을 미치지 못함을 알 수 있다. 그러나 최대 경사각이 약 16° 정도로 아주 작고 경사지에서는 바퀴나 케도에 비해 상대적으로 비효과적임을 알 수 있다.

3) 요철지형에서의 보행

모의지형함수 $Z = ABS(A \sin(X/B))$ 에서 요철의 높이 A를 50cm, 주기 B를 50으로 했을 때 진행거리 에 따른 몸체의 높이 변화를 그림 16에 나타내었고,

연속적인 보행과정을 그림 17에 그래픽으로 표시 하였다. 관측점은 경사지형의 경우와 같다.

그림 17에서와 같은 요철지형의 경우 지형의 높이 변화가 심하더라도 요철지형의 차이가 몸체의 최대 높이가 보다 작으면 그림 16에서와 같이 보행로봇은 몸체 높이의 변화없이 안정하게 진행함을 알 수 있다.

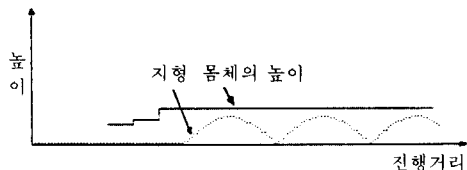


그림 16. 요철지형에서 몸체의 진행거리에 따른 높이의 변화
Fig. 16 Change of body's height to navigation distance on the rugged terrain.

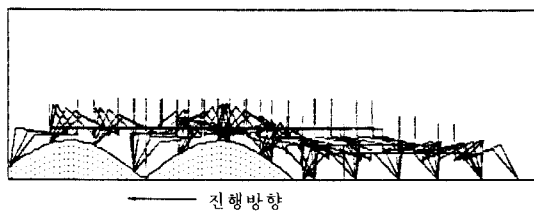


그림 17. 요철지에서의 보행과정
Fig. 17. Walking process on rugged terrain.

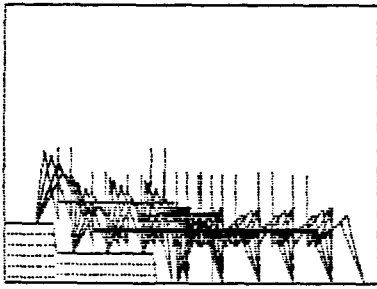
4) 계단오르기

계단의 높이 A를 25, 넓이를 125로 하였을 때 계단을 오르는 연속적인 보행 과정을 그림 18에 나타내었다.

계단을 올라가는 경우에는 발끝을 계단의 안쪽에 둬므로써 몸체가 진행하였을 경우 다리의 링크가 계단의 가장자리에 닿는 경우가 생기는데 여기서는 계단의 안쪽을 금지대로 설정함으로써 문제를 해결할 수 있었다.

VI. 결 론

본 연구에서는 동물의 걸음새를 관찰하여 4 각 보행로봇의 모델을 제시하고 그 모델에 대한 KINEMATIC을 기학적인 방법으로 해석하였으며, 정적인



← 진행방향

그림18. 계단을 오를때의 보행 과정
Fig. 18. Walking process on stair.

정을 유지하면서 장애물을 효과적으로 극복할 수 있는 알고리즘을 제시하고 이를 금지대가 있는 지형, 경사지형, 계단에 대해 시뮬레이션함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

사각보행 로봇의 보행속도는 단지 금지대에 의해서만 영향을 받으며 그 외의 지형에 대해서는 몸체 높이의 변화는 있으나 진행속도에는 영향을 미치지 못함을 알 수 있었다.

완전히 일반적인 지형은 아니지만 다양한 지형에 대해서 연속적인 지지점을 필요로 하는 바퀴나 케도보다 보행로봇은 우수한 지형 적응성을 가짐을 알 수 있었다.

요철지형이나 계단과 같이 지형의 높이가 급격히 변하는 곳에서는 그 부분을 금지대로 설정함으로써 다리의 링크가 지형에 부딪히는 문제를 해결하였으나 이를 서보 제어부에서 접촉 센서를 이용해 이 문제를 해결하는 것이 더 효과적이라 생각된다.

본 연구에서는 정적안정만을 고려하였으나, 앞으로 동적안정을 고려하고 운동방정식을 세워 보행로봇을 효과적으로 제어할 수 있는 제어법칙을 적용한다면 보다 나은 지형적응 특성을 가질 수 있으리라 기대된다.

參 考 文 獻

- [1] D.E. Orin, "Supervisory Control of a Multilegged Robot," *Int. J. Robotics Research*, pp. 79-91, 1982.
- [2] Hirose, S. et al, "Adaptive Gait Control of a quadruped Walking Vehicle," *Robotics Research*, edited by M. Brady and R. Paul, pp. 253-277, 1984.
- [3] I.E. Sutherland and M.K. Uliner, "Footprints in the Asphalt," *Int. J. of Robotics Research*, vol. 3, no. 2, 1984.
- [4] Ishino et al, "Walking Robot for Underwater construction," *ICAR*, pp. 107-114, 1983.
- [5] K. Pearson, "The Control of Walking," *Scientific America*, pp. 72-86, 1976.
- [6] M.H. Raibert and I.E. Sutherland, "Machines that Walk," *Scientific America* 248, pp. 44-53. 1983.
- [7] R.B. McGhee, and G.I. Iswandi, "Adaptive Locomotion of a Multilegged Robot over Rough Terrain," *IEEE Tr. SMC-9*, pp. 176-182, 1979.
- [8] Richard P. Paul, *Robot Manipulators: Mathematics Programing and Control*, MIT press, 1982.
- [9] Shi Zhimin, Gan Dongying, "Kinematics of Six-Legged Vehicle on Irregular Terrain," *ICAR*, pp. 389-396, 1985.
- [10] Song S.M. and Waldron K.J.: "Geometric Design of a Walking machine for Optimal Mobility," *Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design*, Tr. of the ASME, vol. 109, 21-28, March 1987.
- [11] 변증남외, "특집/보행로봇," *전기학회지* vol. 36, no. 4, 1987.
- [12] 황승구, 김성동, 박성혁, "보행로봇의 개괄적 소개," *전자통신동향분석*, vol. 2-2, 1987. *