

논문 2006-43IE-4-8

비평탄 지형에서 스트로크 제어법을 이용한 4족 로봇의 보행 알고리즘에 관한 연구

(A study on walking algorithm of quadruped robot used stroke control method in the irregular terrain)

안 영 명*

(Young Myung Ahn)

요 약

보행로봇은 평탄 지형에서나 비평탄 지형에서 이동할 수 있다. 지형에 따라 적절한 알고리즘으로 변화시켜 보행할 수 있다. 지금까지의 시각이 없는 로봇에 적합한 걸음새에 대한 논문들은 각 다리의 착지점을 선택하는 방법에 초점을 맞추고 있다. 그러나 본 논문에서는 스트로크와 주기를 변화시켜 비평탄 지형에서도 안정된 등속도 보행을 하는 알고리즘을 제시한다. 이 적응 알고리즘을 적용하여 로봇이 보행을 한다면, 고 기능의 센서를 이용한 복잡한 제어없이 발바닥에 장착된 힘 센서의 신호만으로도 비평탄 지형에서 안정된 등속도 보행이 가능하다. 본 논문에서는 각 다리에 2 자유도를 갖는 4족 로봇으로 평탄 지형과 비평탄 지형에서 물결 걸음새로 보행하는 실험을 하였다. 보행실험을 통하여 적응 알고리즘이 유용함을 증명하였다.

Abstract

Walking robot is able to move in regular or irregular terrain. It can walk that change adaptive algorithms according to the terrain. Existing papers about adaptive gaits of blind robot are based on intelligent foothold selection. However, this paper proposes a algorithm that is based on the variations of stroke and period to adapt the irregular terrain. If this adaptive algorithms is used, robot can maintain periodic gait walking and constant speed using only force sensor even in the irregular terrain without external sophisticated sensor. In this paper Quadruped robot with 2 DOF in each leg, is walk experiment with the wave gait in regular and irregular terrain. So the adaptive algorithm is proved useful through walk experiment.

Keywords : 보행로봇(Walking Robot), 스트로크 제어(Stroke Control), 보행알고리즘(Walking Algorithm)

I. 서 론

최근의 보행 로봇은 보행 할 수 있다는 장점으로 인해 인간과 유사한 모습으로 일상생활뿐만 아니라 산업 현장에서도 매우 유용하게 활용되어지고 있다. 그러나 지형의 변형이 심한 특수한 산업 현장에서는 보행 로봇의 활용이 매우 제한적이다. 따라서 평탄지형과 비평탄 지형 모두에서 보행이 자유로운 보행 로봇의 연구가 많이 이루어지고 있다.

비평탄 지형에서는 지형에 적절한 걸음새로 변화시켜 평지에서와 같은 속도로 안정된 보행을 하는 것이 중요하다. 이를 위해 1984년 Hirose에 의해 4족 보행 로봇의 지형 적응 알고리즘이 제안되어졌다^[1]. 또한 1989년 Kumar와 Waldron에 의해 물결걸음새(modified wave gait)를 형식화하였다^[2]. 이것은 넓은 범위의 속도를 가지고 선택된 지형에 적당한 걸음새를 자동으로 변화시키는 것이다.

제시된 두 개의 알고리즘은 모두 비평지에서 보행 로봇의 안정된 보행을 목적으로 하고 있다. 이를 위해 이동다리의 선정 및 다리의 착지 위치 결정에 초점을 맞추고 있다. 이 방법은 지형에 대해 미리 탐색할 수 없

* 정희원, 서일대학 자동차과

(Dept. of Automobile Engineering, Seoil College)

접수일자: 2006년8월23일, 수정완료일: 2006년12월4일

는 로봇 즉, 시각이 없는 로봇(blind robot)에게는 적합하지 않다. 또 다른 방법으로는 정밀하고 복잡한 센서를 부착해야만 한다. 그러나 지금까지 이 알고리즘들은 주로 컴퓨터 시뮬레이션에 의해서는 증명되었으나 유용한 실험결과는 많지가 않다.

따라서 본 연구에서는 비평탄 지형에서 보행하는 각 다리들의 스트로크(stroke)만을 제어하여 등속도 보행이 가능한 알고리즘을 제안한다. 이 알고리즘의 효용성을 입증하기 위해 각 다리의 자유도가 2인 4족 보행로봇으로 실험하였으며, 이를 통해 비평지에서 안정한 등속도 보행을 할 수 있음을 증명하고자 한다.

II. 보행 로봇의 걸음새

2.1 걸음새의 표현

걸음새(gait)는 이동 메커니즘의 설계 및 알고리즘의 설계에 영향을 미치는 중요한 인자가 된다. 걸음새 설계에 있어서는 다리 이동의 순서, 몸체 무게 중심의 궤적, 착지점의 위치를 결정해야 한다. 이것들은 실제 지형에서 보행할 때 매우 중요하다.

걸음새의 해석을 위해서는 McGhee와 Frank의 운동학적 걸음새 공식(kinematic formula)이 유용한 식으로 다음과 같다^[3].

$$K = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n, r_1, r_2, \dots, r_n, \delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n, \phi_2, \phi_3, \dots, \phi_n) \quad (1)$$

여기서 β 는 디딤을, r 은 각 다리의 위치, δ 는 r 에 대한 수직 방향의 각 다리의 위치, ϕ 는 상대위상(relative phase), n 은 다리의 개수를 나타낸다.

식 (1)은 정적 안정을 이용한 다족 보행 로봇의 걸음새를 표현할 수 있으며, $4n-1$ 개의 기구적 상수들로 보행 로봇에 대한 걸음새를 표현할 수 있다.

또한 걸음새는 McGhee의 물결걸음새와 Hirose의 계걸음새 등의 주기걸음새와 그래픽 탐색법, 착지영역 제한법 등의 비주기걸음새로 나눈다. 본 연구에서는 주기적인 걸음새를 가진 4족 보행로봇이 비평지에서 보행하도록 물결-계 걸음새(wave-crab gait)를 사용한다.

2.2 안정여유

안정여유(stability margin)란 보행 로봇의 다리에 의해 형성된 지지다각형의 경계선과 몸체의 무게 중심을 평면에 투영한 점간의 최소거리로 정의하며 그림 1에 나타낸다^[4-5].

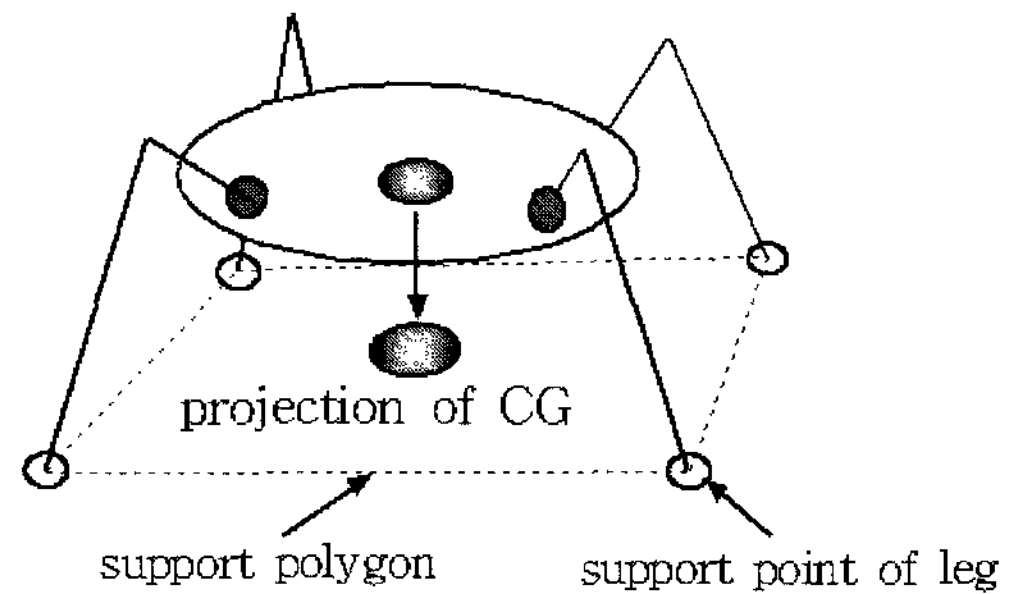
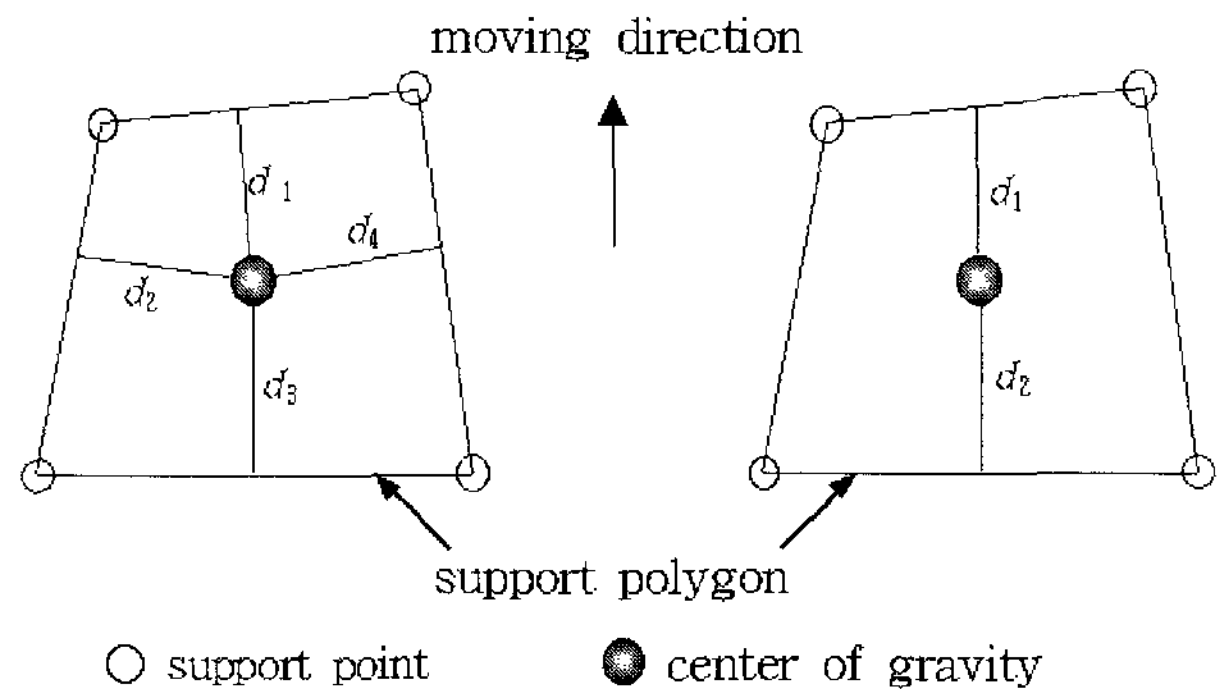


그림 1. 4족 보행로봇의 지지다각형
Fig. 1. Support polygon of a quadruped walking robot.



○ support point ● center of gravity
그림 2. 평면에 투영된 안정여유
Fig. 2. Stability margin projected on plane surface.

그림 2의 (a)는 2차원적인 표현방법을 일반적으로 나타내는 것으로 투영 무게중심과 지지하는 네 다리로부터 이루어지는 네 지지변 간의 거리 중 최소거리를 안정여유값으로 나타낸다. 이것을 안정여유(stability margin, S_M) 또는 절대 안정여유(absolute stability margin, S_a)라고 하며 식 (2)와 식 (3)으로 나타낼 수 있다^[6-8]. 이 식들에 의해 계산된 두 값 중 작은 값을 안정여유로 하여, 무게중심이 속하지 않은 반대영역에 있는 두 다리 중 안정여유가 작은 쪽의 다리를 움직이도록 한다.

$$S_M = \min\{d_1, d_2, d_3, d_4\} \quad (2)$$

$$S_L = \min\{d_1, d_2\} \quad (3)$$

그림 2의 (b)는 투영무게중심과 이동방향에 대하여 전방 또는 후방에 해당하는 지지변간의 최소거리 또는 이동방향에 대한 거리를 안정여유 값으로 나타내는 것이다. 이를 세로 안정여유(longitudinal stability margin, S_L or LSM)라 하며, 일반적으로 직선 보행의 경우에 해석의 용이성 때문에 주로 이 안정여유를 이용한다.

보행 로봇의 정적 보행은 정적 안정 상태를 유지하면서 보행하는 방법이다. 직선 보행 해석의 경우 해석의 용이성을 위해 그림 3과 같은 세로 안정여유를 안정성 척도로 사용하고, 본 논문에서는 3점 지지상태의 지지

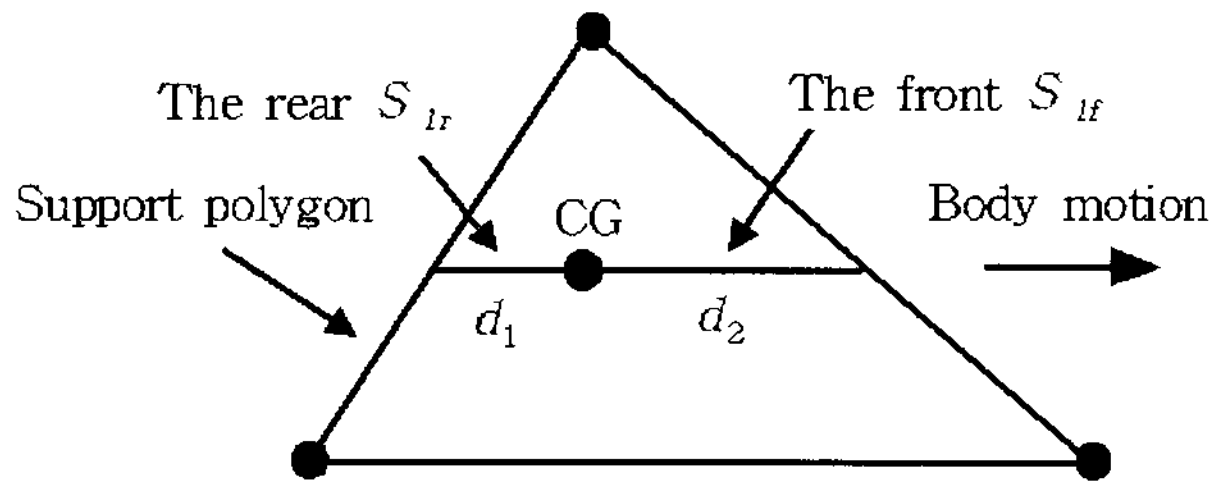


그림 3. 지지패턴에서의 안정여유와 세로 안정여유
Fig. 3. Stability margin and longitudinal stability margin of a support pattern.

다각형만을 고려한다. 왜냐하면 4점 지지 다각형은 3점 지지 다각형을 포함하고 있으므로 걸음새 안정여유에 영향을 미치지 않기 때문이다.

III. 비평탄지형의 물결-게 걸음새

3.1 다리의 지지위상

그림 4는 4족 로봇이 물결-게 걸음새로 보행할 때 위에서 본 모습이다. 본 논문에서는 로봇의 안정성을 위해 이동구간을 결정하는 4각 구역 안에 로봇의 다리가 항상 있어야 한다는 것을 기본으로 한다^[9].

그림 4에서 몸체 좌표계와 물결-게 보행 좌표계, 두 좌표계 모두 몸체의 무게중심점을 원점으로 하며, 축은 진행 방향과 일치한다. 주기걸음새로 정적보행을 할 때 지지다리의 위치는 위상변수를 이용하여 표현할 수 있는데 이는 다음과 같다^[10].

$$\begin{bmatrix} x'(t) \\ y'(t) \end{bmatrix} = [R_{z,\alpha}]^T \begin{bmatrix} x_{ci} \\ y_{ci} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{R}{2} - \phi_{Li}(t) \frac{R}{\beta} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서 t 는 다리 i 의 착지 후 주기 T 에 관한 시간

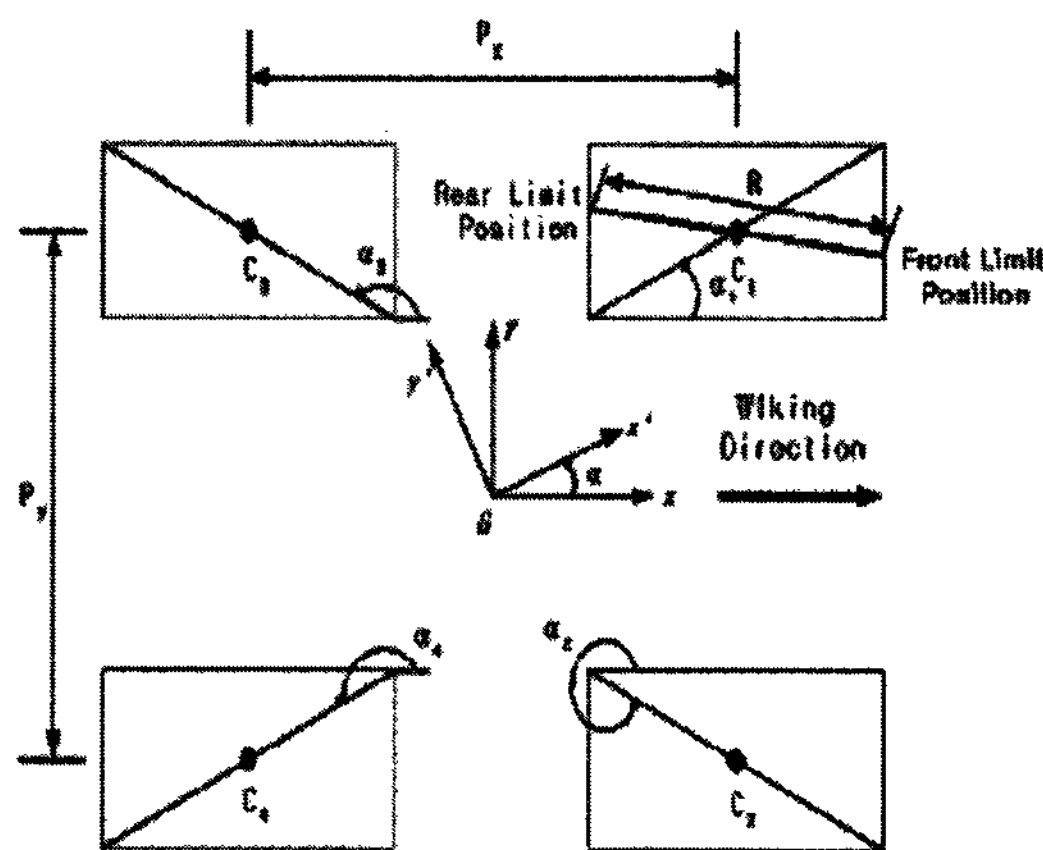


그림 4. 4족 다리의 작업영역
Fig. 4. Workspace of quadruped legs.

이며 z -축 주위로의 회전형렬 $[R_{z,\alpha}]$ 는 몸체좌표계와 물결-게 보행좌표계의 관계를 다음과 같이 나타낸다.

$$R_{z,\alpha} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha \\ \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \quad (5)$$

중심점 c_i 의 위치는 몸체좌표계를 기준으로 하면 다음과 같다.

$$[x_{ci}, y_{ci}]^T = \begin{cases} [(n-i)\frac{P_x}{2}, \frac{P_y}{2}]^T & \text{if } i \text{ is odd} \\ [(n-i+1)\frac{P_x}{2}, -\frac{P_y}{2}]^T & \text{if } i \text{ is even} \end{cases} \quad (6)$$

여기서 n 은 전체 다리수의 1/2이며 P_x 와 P_y 는 피치 스트로크이다. 다리의 최대 스트로크 R 은 보행각도 α 를 고려하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$R = \frac{R_x}{\cos\alpha} \quad \text{if } \alpha \leq \alpha_{p1} \text{ or } \alpha \geq \alpha_{p2} \quad (6a)$$

$$R = \frac{R_y}{\sin\alpha} \quad \text{if } \alpha_{p1} < \alpha \leq \alpha_{p3} \quad (6b)$$

$$R = -\frac{R_x}{\cos\alpha} \quad \text{if } \alpha_{p3} < \alpha \leq \alpha_{p4} \quad (6c)$$

$$R = -\frac{R_y}{\sin\alpha} \quad \text{if } \alpha_{p4} < \alpha < \alpha_{p2} \quad (6d)$$

여기서 α 는 보행방향과 몸체좌표계 x -축과의 각도이며 α_{π} 는 몸체좌표계 x -축과 다리 이동구간의 대각선과의 각도이다. 두 각도 모두 진행방향에 대해 반시계 방향으로 측정된다.

3.2 다리의 궤적과 이동시간

3.2.1 다리의 궤적

이동위상동안 다리는 이동구간 안에 있어야 하므로 스트로크는 기구적으로 한정되며 주기걸음새에서 스트로크를 R , 디딤울을 β 라고 하면 다리의 이동거리 λ 는 다음과 같다^[3].

$$\lambda = \frac{R}{\beta} \quad (7)$$

다리의 실제 이동거리가 스트로크보다 크기 때문에 고정 좌표계를 기준으로 한 4각 이동위상계적은 첫째, 이동위상동안 액추에이터 작동시간이 길어져서 전력소모가 더 많아지므로 효율이 낮아질 수 있고, 둘째 발의

궤적은 이동구간 안에 있어야 하므로 스트로크의 제한이 따른다는 단점을 가진다.

이것을 보완한 대안 궤적은 몸체 좌표계를 기준으로 한 4각 이동위상궤적으로, 더욱 간단한 4각 궤적생성과 이동위상동안 액추에이터 작동시간 단축으로 효율향상의 장점을 갖는다. 그러나 이 몸체 좌표계를 기준으로 한 4각 이동위상궤적은 다리를 들고 내릴 때 충돌의 가능성이 있지만 제어 알고리즘에 의해 극복할 수 있다.

3.2.2 다리의 이동시간

로봇이 몸체좌표계를 기준으로 한 4각 이동위상 궤적 계획대로 평지에서 보행할 때 다리의 이동시간 t_t 는 식 (8)로 계산되어진다(단, 다리의 가속은 제외되었으며 이동속도만 고려). 여기서, h 는 다리를 상승하고 하강할 때의 높이, R 은 스트로크, v_{xy} 는 xy -평면의 이동속도, v_z 는 z 축의 속도이다.

$$t_t = 2\frac{h}{v_z} + \frac{R}{v_{xy}} \quad (8)$$

높이 h 와 스트로크 R 에 있어 구동부의 최대속도로 인한 최소의 다리 이동시간은 다음과 같이 구해진다.

$$t_{t \min} = 2\frac{h}{v_{z \max}} + \frac{R}{v_{xy \max}} \quad (9)$$

또한 주기걸음새에 있어 다리 이동시간 t_t 와 주기 T 는 다음과 같다.

$$t_t = (1-\beta)T \quad (10)$$

$$T \geq \frac{t_{t \min}}{1-\beta} \quad (11)$$

블라인드 로봇의 경우 평지보행을 할 때 첫 주기는 식 (10)과 식 (11)을 통해 얻을 수 있지만 로봇이 비평탄 지형을 보행할 경우, 즉 주기가 변한다면 h 와 R 의 값이 변하게 된다. 따라서 비평탄 지형에서 다리 이동시간은 아래와 같다. 여기서, d_{z1} 는 다리 상승, d_x 는 이동, d_{z2} 는 하강 위상의 변위이다.

$$(1-\beta)T = \frac{d_{z1} + d_{z2}}{v_z} + \frac{d_x}{v_{xy}} \quad (12)$$

3.3 비평탄 지형에서의 주기적인 걸음새 제어법

걸음새 제어방법을 간단히 하기 위해 먼저 지형의 형태가 오목한지 볼록한지를 먼저 구분할 필요가 있다.

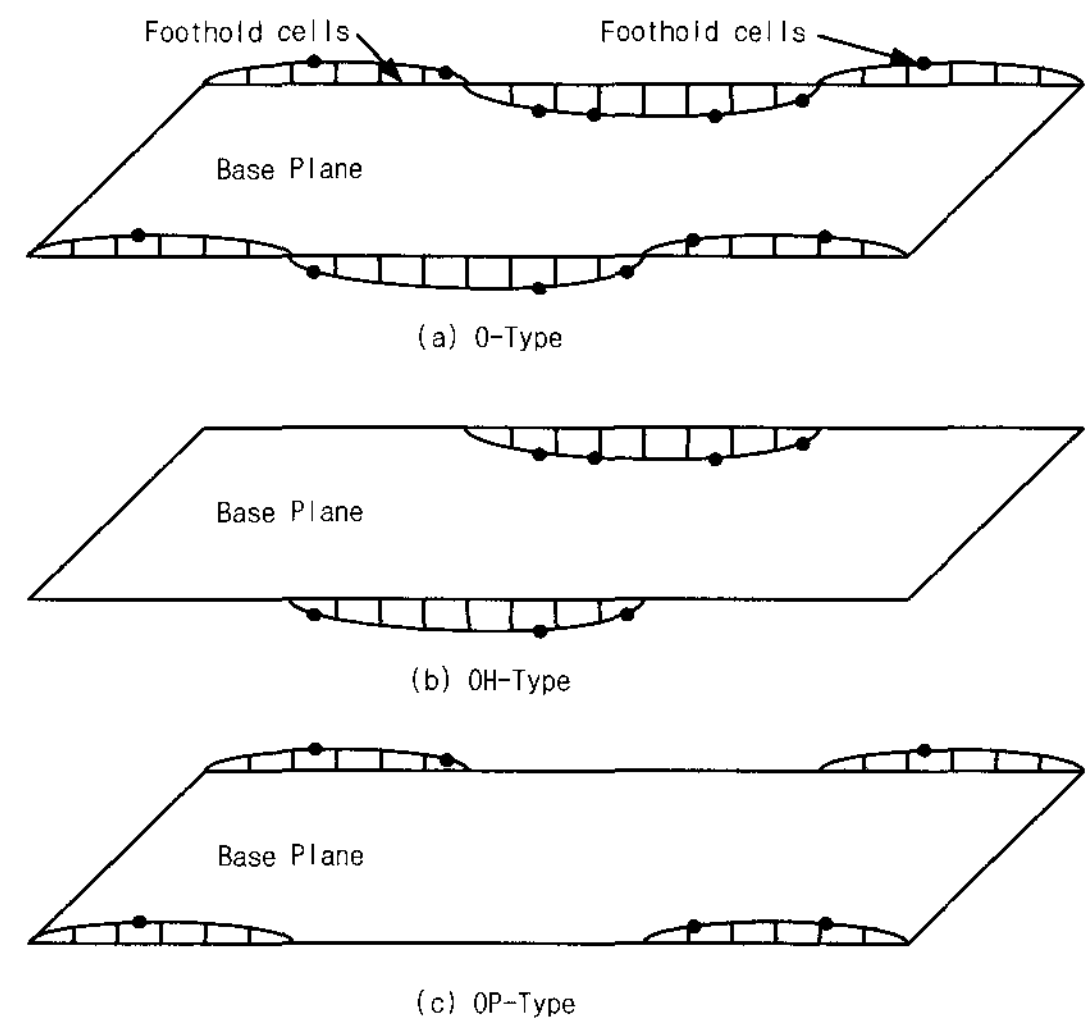


그림 5. 비평탄 지형의 형태
Fig. 5. Types of the irregular terrain.

블라인드 로봇의 경우, 지형의 형태는 지지하는 다리의 위치에 의해서 정의된다. 로봇의 발이 착지했던 곳을 작은 셀로 세분화된다. 이 셀은 기준 평지를 기준으로 위 또는 아래에 있으며 상층과 하층으로 정의되어진다. 기준 평지는 몸체좌표계가 존재하고 로봇 다리가 첫째로 지지한 위치이고, 이 평지는 이동위상에서 다리의 착지점으로 계산된다.

Hirose의 분류법에 따르면 보행로봇이 이동 가능한 지역의 형태를 O 형이라 할 수 있으며 그림 5에 비평탄 지형의 형태를 나타낸다. 그림 5의 (a)는 O 형으로 장애물이 없는 규칙적인 보행이 가능한 형태이며 기준 평지를 기준으로 불연속의 땅이다. (b)는 OH 형으로 하층 지면이 있는 기준평지이다. (c)는 OP 형으로 상층지면이 있는 기준평지이다. 따라서 O 형은 OP 형과 OH 형의 결합 형태이다.

비평탄 지형을 보행하는 로봇의 걸음새를 제어하는 첫번째 방법은 스트로크 제어법이다. 이 방법은 스트로크 R 과 주기 T 를 변화시킴으로써 디딤을 β 와 초기보행속도 v_0 를 유지시키는 것이다. 초기 스트로크 R_0 는 최대 스트로크 R_{\max} 보다 작아야만 한다. 또한 등속을 유지하기 위해 새로운 스트로크 R_1 과 새로운 주기 T_1 은 식 (13)에 의해 변해야 하며, 새로운 스트로크 R_1 은 식(14)를 만족해야 한다.

$$v_0 = \frac{R_0}{\beta T_0} = \frac{R_1}{\beta T_1} \quad (13)$$

$$\frac{R_0 t_{t \min}}{T_0(1-\beta)} \leq R_1 \leq R_{\max} \quad (14)$$

또 다른 제어 방법으로는 주기 T 를 증가시키는 반면 이동속도를 감소시키는 것으로 다리의 이동시간은 액추에이터의 동적 성능에 의해서 제한되며 이동위상동안 다리가 이동하는 거리를 결정한다. 따라서 이동위상을 끝내는데 초기의 주기가 부족하다면 최소 다리 이동시간이 증가하게 된다. 만약 주기 T 가 주어진다면 이동위상동안 다리의 속도는

$$v_{xy} \geq v_{xy \min} \quad (15)$$

이고, 새로운 T_1 은 T 보다 크며 다음과 같다.

$$T_1 = \mu T_0 \quad (16)$$

$$\text{where, } \mu = \frac{v_{xy}}{v_{xy \min}}$$

따라서 보행 속도 v_1 은 다음과 같다.

$$v_1 = \frac{v_0}{\mu} \quad (17)$$

3.3.1 OH 형 지형에서의 적응 걸음새(하층지면 보행 제어)

다리 i 가 지면에 착지하기 전에 전방한계점에 도달하여 이동위상을 끝내고 다음 다리 j 가 이동위상을 시작하게 되면 다리의 이동시간이 증가할 필요가 있다. 첫 스트로크 R_0 를 스트로크 제어법을 통해 R_1 으로 증가시키게 되는데, 다리 j 가 새로운 후방한계점으로 이동하는 동안 다리 i 는 몸체좌표계를 기준으로 하층지면 깊이만큼 더 내려간다. 이런 경우 다리는 하층지面的 깊이만큼 더 이동하게 되므로 추가-이동시간(extra-transfer time) t_{et}

$$t_{et} = \frac{h_e}{v_z} \quad (18)$$

이 추가-이동 시간은 보행속도가 v_0 일때, 다리 i 가 지면에 착지한 후 지지위상에 있던 다음 다리 j 에 의해 구할 수 있다. 스트로크 중심점 C_i 는 변하지 않는다고 할 때 지지위상에 있던 다리 j 에 의해 더 움직인 거리는 새로운 스트로크 R_n 과 바로 전 스트로크 R_{n-1} 의 차이의 1/2이 된다. 따라서 i 번째 다리의 추가-이동시간은 일반적으로

$$t_{et, i} = \frac{R_n - R_{n-1}}{2v_0} \quad (19)$$

으로 구할 수 있다. 따라서 z -축에 대한 최대속도를 고려

할 때 다리가 내려갈 수 있는 하층지面的 최대 깊이 h_e 는 다음과 같다.

$$h_e = \frac{(R_n - R_{n-1})v_z}{2v_0} \quad (20)$$

3.3.2 OP 형 지형에서의 적응 걸음새(상층지면 보행 제어)

다리 j 가 이동위상을 시작하여 최종 위치에 오기 전에 지면에 착지하게 되면 지지시간은 불안정성을 피하기 위해 증가해야 하므로 다리 j 의 스트로크는 R_1 으로 변하게 된다. 이 다리가 일단 지지위상을 끝내면 스트로크는 처음 스트로크 R_0 를 회복할 것이다. 주기 T_0 와 나머지 다리의 스트로크 R_0 는 그대로 남아 있다. 다리의 새로운 스트로크 R_1 은 스트로크 중심점 C_2 에 대해서 전방한계점과 후방한계점이 대칭이므로 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$R_1 = R_0 - 2t_e v_0 \quad (21)$$

여기서 t_e 는 지면에 일찍 착지하게 되는 시간이고 이 시간은

$$t_e = \frac{z_t - z_r}{v_z} \quad (22)$$

으로 구해진다. 여기서 x_t, y_t, z_t 는 이동위상의 마지막 상태에서 x -, y -, z -축의 이론상 위치이고, x_r, y_r, z_r 은 다리가 착지했을 때의 실제 위치이다.

보행좌표계를 기준으로 한 물결-계 걸음새의 다리의 위치는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} x'_i \\ y'_i \end{bmatrix}_{NRLP} = \begin{bmatrix} x'_i \\ y'_i \end{bmatrix}_{ORLP} - \begin{bmatrix} R_n - R_{n-1} \\ 2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

여기서 ORLP(Old Rear Limit Position)는 스트로크가 변하기 전 지지위상의 마지막 위치이고, $(R_n - R_{n-1})/2$ 는 다리 j 의 추가-이동위상동안 지지위상에 있던 다리에 의해 이동된 변위이다. 만일 R_n 이 다리 j 가 하층지면 보행제어 없이 착지할 때의 스트로크라면 다리는 초기 후방한계점까지 이동되며 지지위상에 있던 각각의 다리들은 다음과 같은 식에 의해 초기 전방한계점으로 이동될 것이다. 즉,

$$\begin{bmatrix} x'_j \\ y'_j \end{bmatrix}_{NRLP} = \begin{bmatrix} x'_j \\ y'_j \end{bmatrix}_{ORLP} + \begin{bmatrix} t_e v_0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (24)$$

그러나 지지위상에 있던 각 다리의 위치는 이동위상에 있던 다리에 하중지면 보행제어가 실행된다면 변하게 될 것이다. 즉, 보행좌표계를 기준으로 한 물결-계 걸음새의 새로운 후방한계점은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} x'_j \\ y'_j \end{bmatrix}_{NRLP} = \begin{bmatrix} x'_j \\ y'_j \end{bmatrix}_{ORLP} + \begin{bmatrix} t_c v_0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (25)$$

IV. 로봇의 구조 및 보행 실험

4. 1 로봇의 구조

실험 로봇의 각 다리는 2개의 관절과 3개의 링크로 구성되어 있다. 링크 2와 링크 3은 평행사변형 연동구조로 되어 발바닥의 위치는 링크 2에 의해 결정된다. 로봇의 전체적인 구조와 모터 그리고 센서의 위치를 그림 6에 간략하게 나타내었다.

다리 위치, 장애물, 비평탄 지형 등을 인식하여 원활한 보행을 하게 하기 위해 본 연구에서는 여러 장치들을 설치하였다. 먼저 각 회전관절의 회전각을 검출하여 각 링크의 위치를 정밀하게 제어하기 위하여 포텐서미

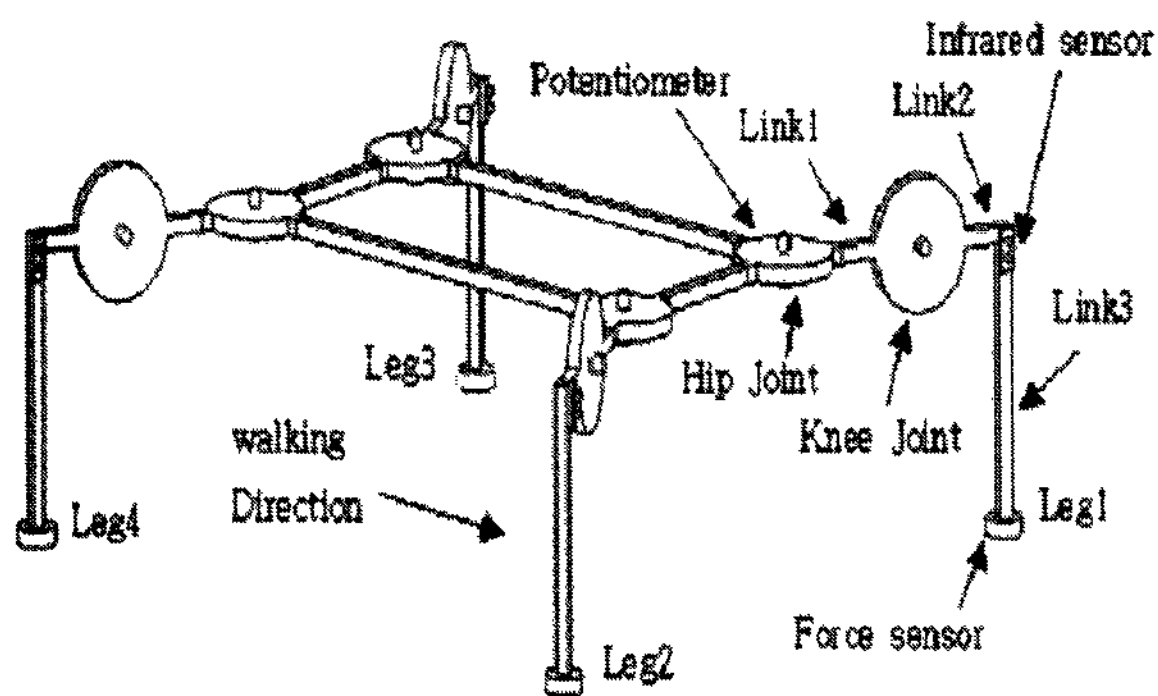


그림 6. 4족 로봇의 구조
Fig. 6. The structure of the quadruped robot.

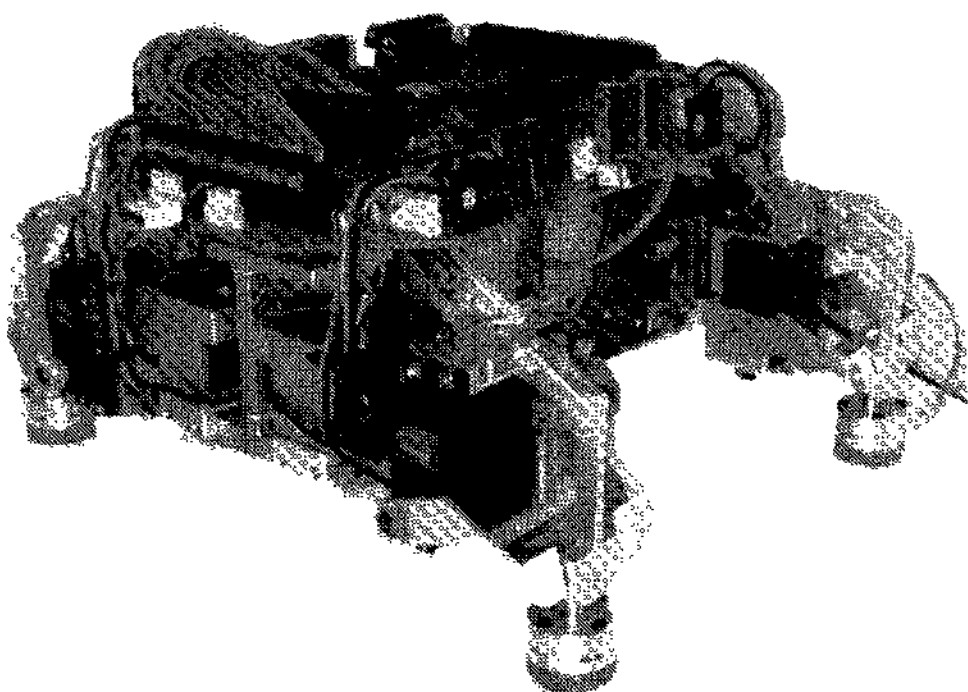


그림 7. 제작한 4족 로봇
Fig. 7. A manufactured quadruped robot.

터(potentiometer)를 장착하였으며, 장애물의 감지를 위해 비접촉식 적외선 센서(infrared sensor) 그리고 발끝이 지면에 닿는 것을 감지하여 보행의 안정성을 높이기 위해 각 Link 3에 힘센서(Force sensor)를 장착하여 비평탄 지형과 평탄지형을 구분하여 보행할 수 있게 하였다.

보행 속도와 주기 및 보폭은 평지에서 디딤율(β)이 0.75일 때 가지는 능력치를 가진다. 그림 7은 제작한 로봇의 실물사진이다.

4.2 보행실험 결과

스트로크 제어법을 이용하여 4족 로봇을 비평탄 지형에서 보행 실험을 수행한다. 로봇의 주 걸음새는 물결 걸음새이고, 디딤율 β 는 0.75인 직선보행을 원칙으로 한다. 단 가속은 없다고 가정한다.

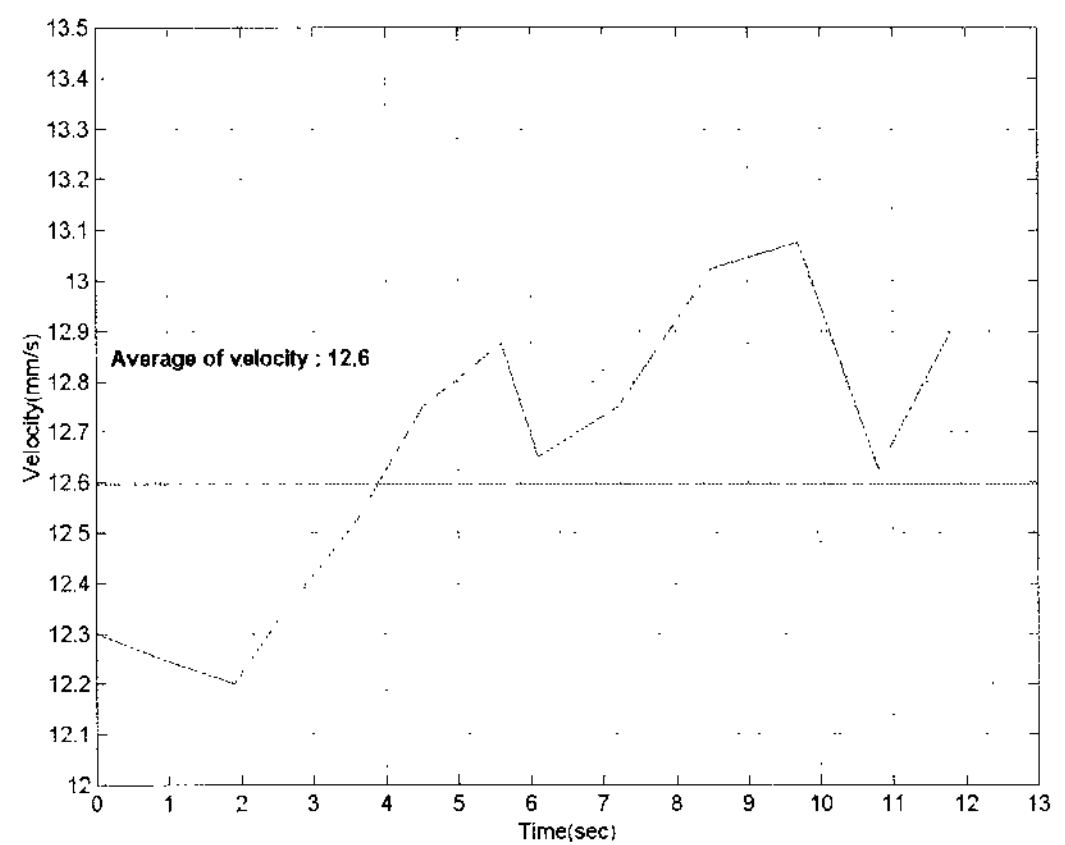


그림 8. 평지에서의 물결걸음새 속도변이
Fig. 8. Variation of velocity for a wave gait over the flat terrain.

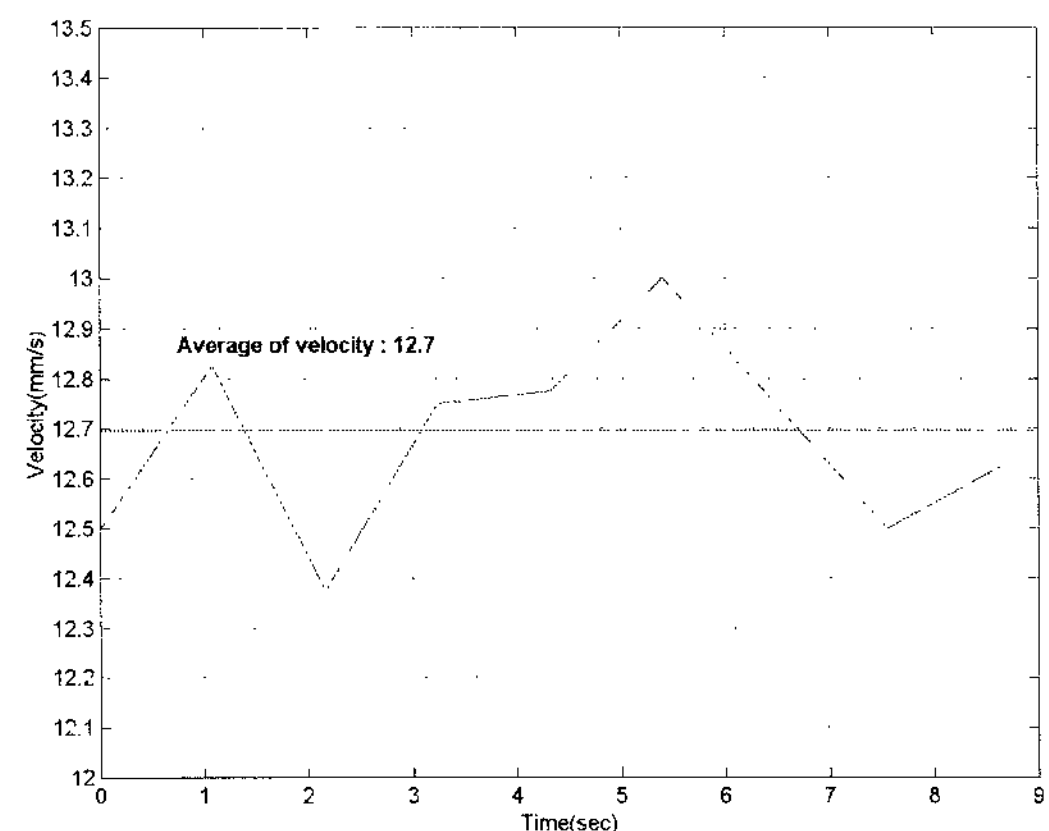


그림 9. 비평탄 지형에서의 물결걸음새 속도변이
Fig. 9. Variation of velocity for a wave gait over the irregular terrain.

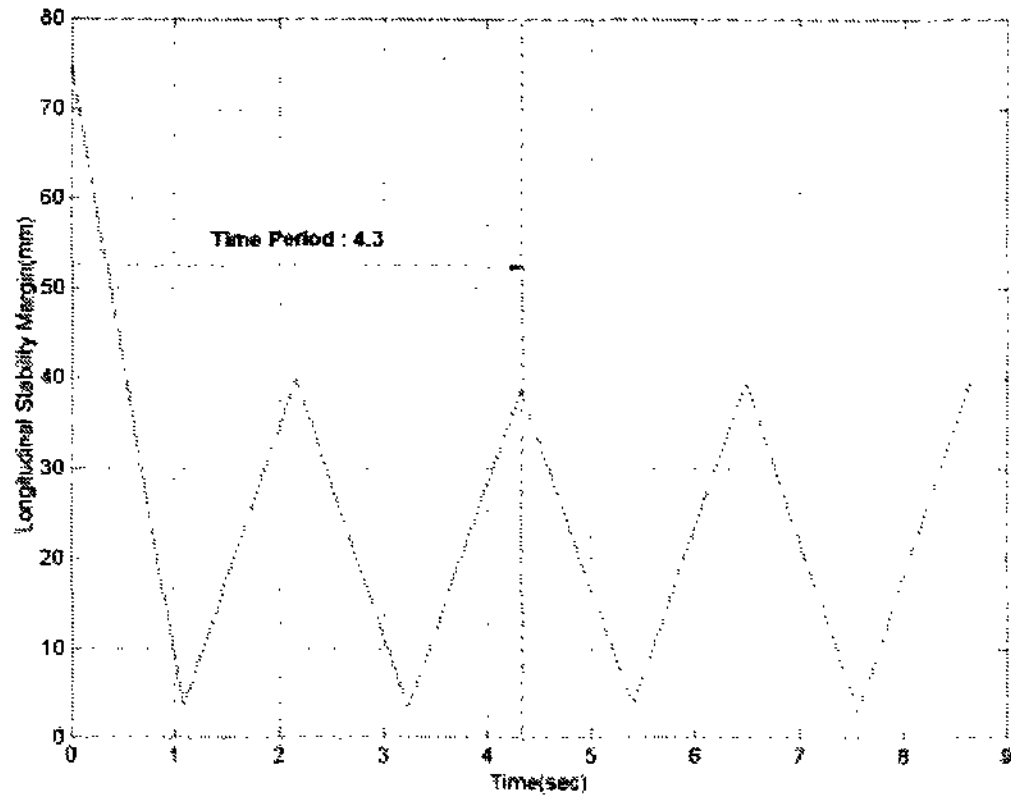


그림 10. 평지에서의 물결 걸음새 세로 안정여유
Fig. 10. Longitudinal stability margin for a wave gait over the flat terrain.

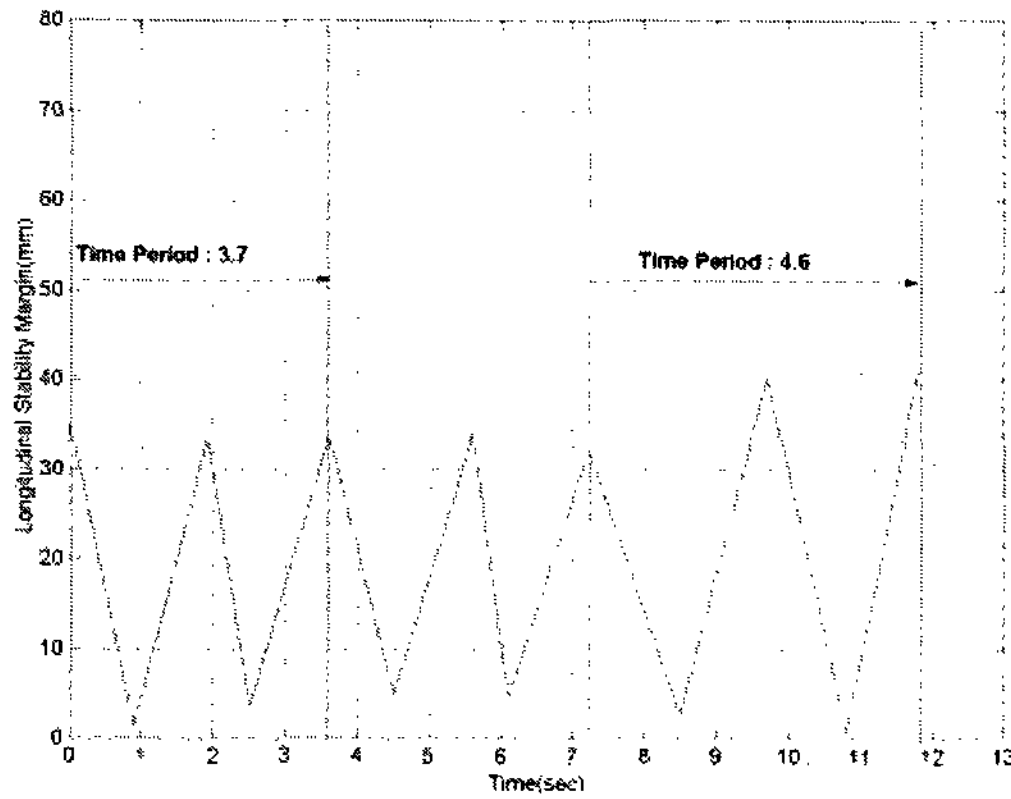


그림 11. 비평탄 지형에서의 물결 걸음새 세로 안정여유
그림 11. Longitudinal stability margin for a wave gait over the irregular terrain.

평지를 보행했을 경우와 가로×세로×높이가 300×220×13mm인 장애물이 있는 계단형태의 비평탄 지형을 보행할 경우의 속도를 측정하여 비교한다.

그림 8은 평지를 보행 시 로봇의 속도이며, 평균속도는 12.6mm/s이다. 비평지를 보행시 로봇의 속도는 그림 9에 나타낸다. 이 때의 평균속도는 12.7mm/s로서 평지를 보행할 때와 거의 같은 값을 알 수 있다.

그림 10은 로봇이 평지를 보행 할 때 측정된 세로 안정여유의 변화이다. 그림 11은 비평탄 지형에서 스트로크 제어법을 적용한 알고리즘에 의해 보행했을 때 세로 안정여유의 변화를 보인다. 시간의 7.2초까지는 계단형 장애물을 오르는 동안의 안정여유 값이고, 이후는 내려가는 동안의 값이다. 장애물을 오르는 동안에 세로 안정여유는 평지보행에 비해 0.6초 더 작아지지만, 장애물을 내려가는 동안에는 0.3초 더 커지는 현상을 볼 수

있다. 또한 위의 두 그림을 통해 평지와 비평탄 지형에서의 보행 모두 세로 안정여유의 최소값이 영보다 큰 값을 가지며, 이는 무게중심점이 항상 다리의 지지다각형 안에 존재하여 안정함을 의미한다.

V. 결 론

본 연구에서는 비평탄 지형에서 스트로크 제어법을 이용한 알고리즘을 로봇에 적용하여 안정된 등속도 보행이 가능함을 다음과 같이 입증하였다.

1. 로봇이 비평탄 지형을 보행할 때 발바닥에 장착된 힘센서의 감지 신호만으로도 평지와 비평지의 구분이 가능함을 보였다.
2. 로봇이 스트로크 제어법에 의해 스트로크와 주기를 변화시키는 알고리즘을 적용하여 비평탄 지형을 보행할 경우에도 세로 안정여유의 최소값이 항상 영 이상이 되어 무게 중심점이 지지다각형 안에 항상 존재하므로 정적 안정성을 검토하였다.
3. 스트로크 제어법을 적용하여 보행할 경우 착지점을 결정한 후 다리를 이동하는 알고리즘과는 달리 비평탄 지형에서도 주기 걸음새를 유지하며 등속도로 보행할 수 있음을 보였다.

이와 같은 결과를 바탕으로 비평탄 지형에서의 회전 걸음새에 대한 연구도 계속되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] Hirose, S., "A study of design and control of a quadruped walking vehicle", International Journal of Robotics Research. Vol.3, No.2, pp. 113-133, 1984.
- [2] Kumar, V. R. and Waldron, K. J., "Adaptive gait control for a walking robot", Journal of the Robotics Systems, Vol.8, No.1, pp. 49-76, 1989.
- [3] R. B. McGhee and A. A. Frank, "On the stability properties of quadruped Creeping Gaits", Mathematical Biosciences, Vol.3, pp. 331-351, 1968.8
- [4] H. Tsukagoshi, S. Hirose, K. Yoneda, "Maneuvering operations of the quadruped walking robot on the slope", Intelligent Robots and Systems '96, IROS 96, Proceedings of the 1996 IEEE/RSJ International Conference on Volume: 2, pp. 863-869, 1996.

- [5] C. D. Zhang and S. M. Song, "Turning Gait of a Quadruped Walking Machine", IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 2106-2112, 1991.
- [6] D. Zhou, K.H. Low and T. Zielinska, "A stability analysis of walking robots based on leg-end supporting moments", Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA '00. IEEE International Conference on Volume: 3, pp. 2834-2839, 2000.
- [7] Fan-Tien Cheng, Hao-Lun Lee and D.E. Orin, "Increasing the locomotive stability margin of multilegged vehicles", Robotics and Automation, 1999. Proceedings. 1999 IEEE International Conference on Volume:3, pp. 1708-1714, 1999.
- [8] Xuedong Chen, K. Watanabe and K. Izumi, "A new method on judgement of static stability for the quadruped robot", Systems, Man, and Cybernetics, 1999. IEEE SMC '99 Conference Proceedings. 1999 IEEE International Conference on Volume: 6, pp. 953-958, 1999.
- [9] Vargas, E., Jimenez, M. A. and armada, M. A. "A graphic simulator for the telepresence station of a legged locomotion robot", Proceedings of the 4th International Symposium on Offshore. Robotics and Artificial Intelligence, pp. 152-162, 1991.
- [10] Song, S. M. and Waldron, K. J. " An analytical approach for gait study and its applications on wave gaits", International Journal of Robotics Research. Vol.6, No.5, pp. 60-71, 1987.

저 자 소 개



안 영 명(정회원)

1994년 중앙대학교 기계공학과 학사 졸업.
 1997년 중앙대학교 기계공학과 석사 졸업.
 2001년 중앙대학교 기계공학과 박사 졸업.
 1998년~현재 서일대학 자동차과 교수
 2005년~현재 서일대학 산학협력단 기술지원센터장
 <주관심분야 : 신호처리, 시스템, 보행로봇>