

4족 보행기의 경로계획에 따른 걸음걸이 선택 Gait Selection According to Trajectory Planning for Quadrupedal Walking Machine

이 종 길
군산대학교 공과대학 기계공학부

ABSTRACT

In this paper, the continuous motion of a quadrupedal walking machine was studied. The motion planning which is able a walking machine body to precisely follow a three-dimensional curve was developed. A three-dimensional curve was designed based on Bezier curve and obstacle avoidance considerations. Due to the arbitrary motion direction during walking, special strategies of gaits were developed to ensure positive stability. The gait strategies were based on wave and wave-crab gait.

1. 서론

보행기에 대한 운동계획 알고리즘은 다음과 같은 두 가지 중요한 기능을 가지고 있다: 하나는 몸체의 경로를 제어하는 것이고 다른 하나는 발의 경로를 제어하는 것이다. 몸체의 운동계획은 몸체의 위치, 속도 그리고 가속도를 시간의 함수로 정의한 보행기의 몸체의 궤적을 생성한다. 이러한 몸체의 궤적 계획은 특히 보행기가 벽과 장애물로 둘러싸인 지역을 통과 할 때 특히 중요하다. 이때 몸체는 주위의 환경과의 충돌을 피하기 위하여 정확한 방식으로 움직여야만 한다.

발의 운동계획은 이동상태에 있는 다리에 대한 발의 궤적을 생성한다. 또한 발의 운동계획에서 발판은 보조 해석(gait analysis)에 기초하여 다음 단계의 위치로 발을 향하게 한다. 보행기가 이동하는 동안 보행기는 어떤 순간에도 안정되어야 한다. 다리를 이용한 보행기의 안정성은 발을 들고 내리는 순서를 나타내는 보조 형식과 매우 깊은 관련이 있다. 웨이브형 보조(wave gait)는 모든 주기적인 보조중에서 최적의 안정성을 가지므로 이 연구에서는 웨이브형 보조를 선택하려고 한다.

참고문헌⁽¹⁾에서 Orin은 평평한 지형에서 조이스틱과 같은 손 제어를 통하여 다수의 다리를 가진 보행기의 전방속도와 측면속도 그리고 몸체의 회전속도의 조합을 제어할 수 있는 운동계획 알고리즘을 제시하였다. 후에 이 알고리즘은 차량과 지형의 운동학적 관계에 기초한 평지가 아닌 지형에서 이동하는 경우에도 발전시켰다.⁽²⁾ 이러한 연구와 다른 유사한 연구⁽³⁾는 지형의 국부경사에 기초한 몸체의 조절 계획에 주로 초점을 두었다. 그들의 알고리즘은 경로의 구속이 없고 장애물이 없는 환경인 경우에 대하여만 유효하다. 만일 보행기가 주위환경과의 충돌을 피하기 위하여 규정된 경로를 따라 이동하기를 원한다면, 조이스틱 제어를 가지고 속도제어 알고리즘을 통하여 경로를 정확하게 따라 가기가 어렵다.

보행기가 제한된 영역의 공간을 통과할 때, 주위의 환경과의 충돌을 피하거나 또는 안정성을 증가시키기 위하여 몸체의 자세를 제어하는 것이 필요하다. 이러한 경우를 위하여 한 집의 위치와 몸체의 방위를 포함하는 몇개의 중간 위치를 통과하는 차량의 몸체의 운동을 지정하는 것이 필요하다. 이러한 몸체운동의 공간 구속과 더불어 운전자는 또한 몸체운동의 순간적인 속성들을 규정하기를 원할 수도 있다. 이 논문에서는 차량의 몸체가 지정된 곡선을 따라 이동하면서 확실한 안정성을 유지하기 위한 운동계획 알고리즘을 개발하였다. 보행기의 궤적계획을 위하여 다항식의 Bezier 곡선을 이용하였다.

2. 기본정의와 표기법

그림 1은 성능의 평가와 시뮬레이션을 위하여 사용할 4족 보행기의 모델을 나타낸다. 이 보행기 모델에서 전면에서 후면으로 다리의 번호를 왼쪽에 1과 3, 오른쪽에 2와 4를 정하였다.

정의 1: 듀티 인자, β_i 는 i 번째의 다리가 싸이클 시간 중에서 지지상태에 있는 시간 비율.

정의 2: 다리 위상, θ_i 는 다리 1이 놓인 뒤에 다리 i 가 지면에 놓일 때까지의 한 싸이클 주기의 시간 비율.

정의 3: 게 걸음 방향각, $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ 는 각각 몸체 좌표계의 x, y, z 축과 운동방향 사이의 각.

정의 4: 안정성크기, SM은 지지위상에 있는 발의 위치를 수평면에 투영하여 연결한 다각형에서 투영된 중심으로부터 각 변까지의 거리중 가장 짧은 거리.

3. 웨이브형 보조와 웨이브-개형 보조

웨이브형 보조는 모든 주기적인 보조에서 최적의 세로방향 안정성크기를 가지므로⁽⁴⁾, 표준 보조로 웨이브 형태를 택하였다. 웨이브형 보조에서 몸체의 양 옆에 있는 다리가 놓이는 순

서는 뒤에서 부터 앞으로 진행하여 움직인다. 마치 파도가 보행기의 뒤로부터 앞으로 전달되는 것과 같다.

4족 보행기의 웨이브형 보조의 방정식은 다음과 같이 정의된다:

$$\phi_1 = 0, \quad \phi_3 = \beta \quad (1)$$

내칭적인 특징을 가지고 있으므로 같은 짝의 오른쪽과 왼쪽에 있는 다리들 사이의 위상차이는 1/2이다. 따라서 오른쪽에 있는 다리들의 위상은

$$\phi_2 = 1/2, \quad \phi_4 = F(\beta - 1/2) \quad (2)$$

개 걸음과 회전운동에 대한 연구에서 4족 보행기의 운동 방향을 그림 2와 같이 대각선에 있는 다리의 운동공간의 중심을 통과하는 두 대각선에 의하여 4개의 영역으로 나누었다.^(5,6) 만일 개 걸음 방향각 α 가 영역 I에 있다면 이러한 방향으로의 개 걸음은 항상 우수한 안정성을 제공한다. 그러나, 만일 방향각이 다른 영역에 있다면 불안정하다. 따라서 안정성을 보장하기 위하여 약간의 수정이 필요하다. 웨이브 형태의 개걸음을 방향각에 따라 네 개의 영역으로 나누어 다음과 같이 네 가지 형태로 정의하면

- (1) +X 형태: 방향각이 I 영역에 있는 경우
- (2) +Y 형태: 방향각이 II 영역에 있는 경우
- (3) -X 형태: 방향각이 III 영역에 있는 경우
- (4) -Y 형태: 방향각이 IV 영역에 있는 경우

+X 형태는 정규 웨이브형 보조이다. +Y 형태는 왼쪽에 있는 두 개의 다리(#1과 #3)를 전면의 두 다리로 그리고 오른쪽에 있는 두 개의 다리(#2와 #4)를 후면의 두 다리로 간주하고, -X 형태는 후면에 있는 두 개의 다리(#3과 #4)를 전방의 두 다리로 간주하고, -Y 형태는 오른쪽에 있는 두 개의 다리(#2와 #4)를 전면의 두 다리로 간주하여 정규 웨이브형 보조들로 취급할 수 있다. 따라서 네 형태의 보조에서 받을 내딛는 순서는

- (1) +X 형태: 1 - 4 - 2 - 3
- (2) +Y 형태: 1 - 4 - 3 - 2
- (3) -X 형태: 4 - 1 - 3 - 2
- (4) -Y 형태: 4 - 1 - 2 - 3

참고문헌^(5,6)에서는 2차원의 평평한 지평과 몸체의 방위가 일정한 경우에 대하여 연구하였다. 본 논문에서는 가장 일반적인 경우로 고려될 수 있는 임의의 3차원 곡선을 따라 몸체가 이동할 경우를 고려하려고 한다.

4. 지정된 궤적을 따라 이동하는 경우

4.1 몸체 궤적계획

매니퓰레이터의 궤적계획은 항상 경로를 따라 명시된 속도 분포를 이용하여 직각좌표계에서 경로의 생성으로 이루어진다. 따라서 공간곡선으로서의 로봇 경로와 경로를 따라 명시된 속도분포를 설계하는 것이 바람직하다. 이것을 하기 위하여 경로와 속도분포에서의 매개변수를 구분하는 것이 필요하다. 그러나, 궤적생성의 종래의 방식은 경로가 시간의 함수로 나타내어지고 궤적과 혼용되기 때문에 동시에 경로와 속도분포를 설계할 수는 없다.⁽⁷⁾ 이 논문에서는 몸체의 운동을 위한 경로와 궤적의 설계는 참고문헌⁽⁷⁾에서 개발된 개념을 기초로 한다.

보행기의 몸체가 따라서 이동할 공간곡선으로서의 경로를 정의하기 위하여, 몇 개의 장애물을 피하기 위하여 통과해야 할 중요한 위치들은 지점과 방위들에 의하여 정의되어야 한다. 일단 위치들이 지정되면 차례로 명시된 점들 $P_c^{(i)}(i=0 \sim n)$ 을 통-

과하는 부드러운 경로를 Bezier 곡선에 기초를 둔 방법에 의하여 생성한다. Bezier 기법에는 설계자는 단순히 입력 매개변수를 제어하므로 원하는 형상의 곡선을 생성할 수 있다. 어떤 곡선 부분의 차수를 증가시키기 위하여 필요한 모든 것은 또 다른 인접의 정점을 명시하는 것이다. 이것은 대단히 유연성을 증가시키며 3차 스플라인 적용과 포물선 블렌딩 기법의 많은 어려움을 극복할 수 있다. 다른 잇점들은 (i) 곡선은 결코 생성하는 다각형을 정의하는 점들로부터 멀리 변하지 않는다. (ii) 계산의 부담이 3차 스플라인 곡선에 비하여 적다. 왜냐하면 Bezier곡선은 각 변수에 대하여 한 개의 식을 요구하는 반면 스플라인 기법은 각 그룹의 점들에 대하여 별개의 식이 필요하다. 그러나, 이러한 우수성과 유연성에도 불구하고 Bezier 기법은 두 가지의 제한을 갖고 있다. 첫째로 명시된 다각형 모서리들의 수는 그 곡선을 정의하는 다항식의 차수를 결정한다. 둘째로, 전체 곡선에 영향을 미치지 않는 곡선에서의 국부적인 변화를 줄 수가 없다.

경로는 매개변수와 관계없는 형태의 공간곡선 $\vec{R}_p(i)(\lambda_k)$ ($i=1 \sim n$)의 선분들의 합성으로 나타낸다. 여기서 λ_k 는 무차원 표준화 매개변수이고 범위는 [0, 1]이다. Bezier곡선의 수학적 근거는 두 끝점들 사이를 보간(interpolate)하는 다항식 블렌딩 함수이다. Bezier 다항식은 Bernstine 다항식과 관련되며 3차 Bezier 곡선은 다음과 같이 나타낼 수 있다:

$$\vec{R}_p^{(i)}(\lambda_k) = \sum_{j=0}^3 \sum_{i=1}^n \vec{P}_i^{(j)} J_{3,j}(\lambda_k) \quad (3)$$

$$J_{3,j}(\lambda_k) = \frac{3!}{j!(3-j)!} \lambda_k^j (1-\lambda_k)^{3-j}$$

$\vec{P}_i^{(j)}$ ($j=0 \sim 3, i=1 \sim n$)은 두 끝점들이고 선분 i에 있는 두 제어점들이다. i는 3차 곡선 선분의 번호이다. $\vec{R}_p^{(i)}(\lambda_k)$ 는 곡선 점에 대한 3차원 위치벡터이다.

두 끝점에서 이웃하는 선분들과의 위치, 접선 그리고 곡률에 대한 연속 조건은 다음과 같이 주어진다.

$$\vec{R}_p^{(i)}(1) = \vec{P}_i, \quad 3 = \vec{P}_{i+1}, \quad 0 = \vec{R}_p^{(i+1)}(0) \quad (4)$$

$$\frac{d}{d\lambda_k} \vec{R}_p^{(i)}(1) = \frac{d}{d\lambda_k} \vec{R}_p^{(i+1)}(0) \quad (5)$$

$$\frac{d^2}{d\lambda_k^2} \vec{R}_p^{(i)}(1) = \frac{d^2}{d\lambda_k^2} \vec{R}_p^{(i+1)}(0) \quad (6)$$

위의 구속방정식을 고려하여 경로는 점들 \vec{P}_i, j ($j=0 \sim 3$)에 기초한 연속된 3차 Bezier곡선들로서 결정된다. 경로의 i번째 선분의 길이는 다음식에 의하여 계산 될 수 있다.

$$L_i(\lambda_k) = \quad (7)$$

$$\int_0^1 \sqrt{\left[\frac{d}{d\lambda_k} x_i(\lambda_k)\right]^2 + \left[\frac{d}{d\lambda_k} y_i(\lambda_k)\right]^2 + \left[\frac{d}{d\lambda_k} z_i(\lambda_k)\right]^2} d\lambda_k$$

여기서, $L_i(\lambda_k)$ 는 시작점 $\vec{R}_p^{(i)}(0)$ 으로부터 정의된다.

어떤 명시된 점 $\vec{P}_c^{(i)}$ 에서의 차량 몸체의 자세는 Euler 각 φ, θ, ψ 의 향으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} a_1 & o_1 & n_1 \\ a_2 & o_2 & n_2 \\ a_3 & o_3 & n_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\varphi c\theta & c\varphi s\theta s\psi - s\varphi c\psi & c\varphi s\theta c\psi + s\varphi s\psi \\ s\varphi c\theta & c\varphi s\theta s\psi + c\varphi c\psi & s\varphi s\theta c\psi - c\varphi c\psi \\ -s\theta & c\theta s\psi & c\theta c\psi \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서, 방위 벡터 $(a_1, a_2, a_3)^T$, $(o_1, o_2, o_3)^T$ 와 $(n_1, n_2, n_3)^T$ 는 지면

에 고정된 X-Y-Z 좌표계의 각 축에 대한 몸체에 고정된 x-y-z좌표계의 축들 사이의 방향 여현이다. Euler 각들의 해는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \varphi &= \text{Atan2}(a_2, a_1), \quad \psi = \text{Atan2}(o_3, n_3) \\ \theta &= \text{Atan2}[-a_3, (a_1^2 + a_2^2)^{1/2}] \end{aligned} \quad (9)$$

명시된 점 $P_c^{(i)}$ 에서의 Euler 각 φ, θ, ψ 는 3차 공간곡선 $\vec{R}_P^{(i)}(\lambda_k)$ 를 유도하는 방법과 같은 절차를 따라 보간된다. 그러나 호의 길이 L_i 는 표준화된 매개변수 λ_k 대신에 독립 매개변수로 이용된다. 왜냐하면 호의 길이 L_i 의 향으로 나타낸 몸체의 자세가 더 자연스럽게 때문이다.⁽⁷⁾ 요구되는 속도의 크기는 경로에 있는 각 설계점에서 지정되고 3차 공간곡선에서 이용한 같은 절차에 따라 보간된다. 보행기의 운동방향은 경로에 접선이다.

지금까지 경로와 범위가 운동의 공간 구축에 대하여 무차원 매개변수 λ_k 의 주어진 값에 대하여 계산하였다. 지금 우리는 경로, 방위 그리고 속도를 위한 3차 다항식을 시간에 따른 운동 특성을 명시하기 위하여 시간의 함수로 유도하려고 한다. 보행기가 일정한 속력으로 경로를 따라 움직인다고 가정하면 시작점으로부터 곡선 선분의 주어진 길이에 대하여 선분 i 의 시작이래 걸린 경과시간은 다음과 같이 계산된다.

$$t_i = \int_0^{L_i} \frac{dL_i}{v^{(i)}(L_i)} \quad (10)$$

주어진 길이 L_i 는 식 (10)에서 λ_k 의 함수로 정의된다. 만일 $\lambda_k=0, 1/3, 2/3, 1$ 에 대한 경과 시간 t_i 를 안다면 Lagrange 다항식 방법을 이용하여 3차 다항식을 유도할 수 있다.

$$\lambda_k(t) = a_3t^3 + a_2t^2 + a_1t + a_0 \quad (11)$$

병진운동의 속도와 가속도를 다음으로부터 구할 수 있다:

$$\vec{v}_i = \frac{d\vec{R}_P^{(i)}}{dt} = \frac{d\vec{R}_P^{(i)}}{d\lambda_k} \frac{d\lambda_k}{dt} \quad (12)$$

$$\vec{a}_i = \frac{d^2\vec{R}_P^{(i)}}{dt^2} = \frac{d^2\vec{R}_P^{(i)}}{d\lambda_k^2} \left(\frac{d\lambda_k}{dt}\right)^2 + \frac{d\vec{R}_P^{(i)}}{d\lambda_k} \frac{d^2\lambda_k}{dt^2} \quad (13)$$

회전운동의 각속도와 각가속도는 다음으로부터 구할 수 있다:

$$\frac{d\vec{R}_\delta^{(i)}}{dt^2} = \frac{d\vec{R}_\delta^{(i)}}{dL_i} \frac{dL_i}{dt} = \frac{d\vec{R}_\delta^{(i)}}{dL_i} v_P(L_i) \quad (14)$$

$$\frac{d^2\vec{R}_\delta^{(i)}}{dt^2} = \frac{d^2\vec{R}_\delta^{(i)}}{dL_i^2} \left(\frac{dL_i}{dt}\right)^2 + \frac{d\vec{R}_\delta^{(i)}}{dL_i} \frac{d^2L_i}{dt^2} \quad (15)$$

여기서 $\vec{R}_\delta^{(i)}$ 는 Euler 각 φ, θ, ψ 에 대한 다항식이다. Euler 각의 정의에 따라서 몸체 좌표계의 임의의 각속도 ω 는 Euler 각 φ, θ, ψ 의 시간도함수의 향으로 나타낼 수 있다.

$$\omega = \dot{\varphi} + \dot{\theta} + \dot{\psi} \quad (16)$$

여기서 $\dot{\varphi}, \dot{\theta}$ 그리고 $\dot{\psi}$ 는 Euler 각의 변화율과 관련된 각속도 벡터이다. 여기서 ω_x 와 ω_y 그리고 ω_z 는 몸체에 고정된 좌표계의 각축에 $\dot{\varphi}, \dot{\theta}$ 과 $\dot{\psi}$ 를 직교투영하고 이들을 합하여 구할 수 있다:

$$\begin{aligned} \omega_x &= -\dot{\varphi} s\theta + \dot{\psi} \\ \omega_y &= \dot{\varphi} c\theta s\psi + \dot{\theta} c\psi \\ \omega_z &= \dot{\varphi} c\theta c\psi - \dot{\theta} s\psi \end{aligned} \quad (17)$$

각가속도는 윗식을 미분하여 다음과 같이 얻을 수 있다:

$$\alpha_x = -\ddot{\varphi} s\theta - \dot{\varphi} \dot{\theta} c\theta + \ddot{\psi} \quad (18)$$

$$\alpha_y = \ddot{\varphi} c\theta s\psi - \dot{\varphi} \dot{\theta} s\theta s\psi + \dot{\varphi} \dot{\psi} c\theta c\psi + \ddot{\varphi} c\psi - \dot{\theta} \dot{\psi} s\psi$$

$$\alpha_z = \ddot{\varphi} c\theta c\psi - \dot{\varphi} \dot{\theta} s\theta c\psi - \dot{\varphi} \dot{\psi} c\theta c\psi - \ddot{\varphi} s\psi - \dot{\theta} \dot{\psi} c\psi$$

그림은 3은 Bezier곡선에 의하여 생성된 경로를 보여준다. 만일 보행기가 그림에서 나타낸바와 같이 명시된 중간점들 P_3 와 P_2 를 경유하여 시작점 P_1 으로부터 목표지점 P_4 까지 이동하려고 한다면 보다 짧은 경로와 장애물을 피할 수 있는 우수한 경로곡선을 쉽게 생성할 수 있다. •로 표시된 제어점들의 위치를 변경하여 쉽게 경로의 형상을 수정할 수 있다.

4.2 발판과 발의 새로운 위치 선택

이동하는 다리의 발판은 두 가지 중요한 기준에 따라 선택된다. 하나는 발판이 다리의 기구학적 한계안에 있어야 한다. 다른 하나는 보행기의 안정성이 다리의 지지 위상 동안에 유지되어야 한다. 경험으로 발의 궤적은 운동공간의 중심을 통과하고 행정의 중심은 운동공간의 중심과 일치하여야한다. 그림 4을 참고하면 몸체의 중심이 A점에 올때 다리1은 원하는 발판인 점 D에 놓인다. 이 발판은 다음과 같이 구할 수 있다. 다리 1이 지지위상의 중간에 D점에 놓이게 된 후 보행기의 몸체는 B점에 오게되고 지지하는 발은 운동공간의 중심인 C_1 에 있어야 한다.

지면에 고정된 좌표계는 A점에서 몸체에 고정된 좌표계와 일치한다고 가정한다. 지면에 고정된 좌표계 대한 지지하는 발의 위치는 불변하므로 B점에서 지면에 고정된 좌표계와 몸체에 고정된 좌표계 대한 원하는 발판 D는 다음과 같은 관계를 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} C_{1x} \\ C_{1y} \\ C_{1z} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & o_1 & n_1 & P_{bx} \\ a_2 & o_2 & n_2 & P_{by} \\ a_3 & o_3 & n_3 & P_{bz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_{1x} \\ D_{1y} \\ D_{1z} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

여기서 C_{1x}, C_{1y} 그리고 C_{1z} 는 몸체에 고정된 좌표계에 대한 다리의 운동공간 중심의 세 성분이며 이들은 알고 있는 값들이다. 변환행렬은 또한 B점에서의 몸체의 자세가 앞의 개회에 의하여 결정되었으므로 알고 있는 값이다. 따라서 윗식으로부터 A점에서의 발판의 위치를 구할 수 있다. 같은 방법으로 다른 세개의 다리의 발판들을 구할 수 있다.

지면에 고정된 좌표계에서 발의 위치는 지지 위상 동안에 고정되어 있으므로 이 지지점의 값들은 계속적인 새로운 4×4 동차 변환 행렬을 이용하여 몸체의 좌표계로 변환 될 수 있다.

그림 5는 일정한 몸체 방위를 유지하는 경우와 게걸음의 방향각이 영인 경우의 보행에서 나타난 안정성을 보여준다. 보는 바와 같이 일정한 몸체 방위에 대한 경우가 더 좋은 안정성을 갖는다. 또한 이 경우의 보행기의 제어는 더 간단한 변환 행렬로 인하여 효율적이다. 보행기가 몸체의 방위를 변경하지 않고 곡선을 따라 이동할 수 있다는 것이 재래식의 바퀴를 이용한 차량에 비하여 또다른 유리한 점이다.

4.3 보조 형태의 수정

게걸음 방향각이 α_{d1} 를 통과할때 웨이브-게 보조 형태는 확

실 안정성을 유지하기 위하여 수정하여야 한다. 걸음 방향각이 α_{02} 를 통과할 때 걸음걸이 형태는 +X형태에서 -Y형태로 수정되어야 한다. +X와 -Y형태의 정지된 보조 모형을 그림 6(a)와 6(b)에서 나타내었다. 까만 점들은 연속된 위치에서의 몸체 중심을 나타낸다. "x"는 현재의 몸체중심 위치를 나타내고 까만 삼각형은 현재 사이클에서의 발의 위치이고, 빈 삼각형은 발이 들리기 바로 전의 발의 위치를 나타낸다. 까만 사각형은 현재 사이클에서 나타낸 다음 단계에서의 발의 위치를 나타낸다. 보는 바와 같이 +X형태의 안정성은 다리1이 들릴때 시간 5후에 음의 값이 된다. 만일 보행기가 시간 0에서 +X형태로부터 -Y형태로 보조를 수정한다면 즉 발의 위치가 그 순간에 -Y형태에 따라 교체하기 위하여 다리2로 대체 할 경우, 정지된 보조 모형은 그림 6(b)에 있는것과 같다. -Y형태의 안정성은 전 사이클에서 양의 값을 가진다. 따라서 걸음걸이 형태의 수정은 시간 5에서 또는 이 시간전에서 행하여야 한다. 걸음걸이 형태의 수정이 시간 5 또는 그 전에 이루어 질 수 있지만 보행기가 불안정하기 직전에 행하는 것이 좋다.

발의 위치를 교환하는 방법은 다음과 같다. 보행기가 보조 형태를 수정할 때 몸체를 이동하든지 정지할 수 있다. 여기서는 간단히 하기 위하여 후자를 택하였다. 그림 7(a)와 7(b)는 보조 형태를 바꾸기 위하여 발이 놓이는 순서를 보여준다. 이 그림에서 까만 원은 보조 형태가 수정되기 전의 발의 위치를 나타내고 까만 사각형은 보조 형태를 수정한 후의 발의 위치를 나타낸다. 먼저 지지하는 발들의 위치를 연결하여 이루어진 두 개의 다각형의 대각선을 그린다.

각 다각형에 대하여 안정성을 잃지 않고 들어올릴 수 있는 다리는 항상 둘이다. 왜냐하면 나타낸 새로운 다각형을 볼 때 들어올릴 수 있는 두 다리는 마지막 순간에 옮겨야 한다. 그림을 참고하면 다리2와 4를 보행기의 안정을 잃지않고 들어 올릴 수 있다. 따라서 다리1과 3은 먼저 옮겨 놓아야 한다. 그림 7(a)를 참고하면 이전 다각형을 볼 때 다리3은 불안정시키지 않고 들어올릴 수 있다. 따라서 이 다리부터 먼저 교체한다(그림에서 1로 표시하였음). 다리 3이 새로운 위치로 옮긴 후 다리 1은 안정성 때문에 들어올릴 수 없다. 따라서 다리 2와 4는 다리1을 들어 올리기 전 가상점으로 옮겨야 한다. 두 번의 가상 옮김은 그림에서 2와 3으로 표시하였다. 그런후에 다리1은 새로운 위치로 옮긴다.(4로 표시됨) 마지막으로 다리 2와 4는 연속적으로 그들의 새로운 위치로 옮긴다. 지금 그림 7(b)를 참고 하면 이전 경우에는 두 번의 다리 2와 4의 가상 옮김은 필요하지 않다. 따라서 단지 4번의 이동만 요구된다.

따라서 비록 안정성이 두 경우에 대하여 가능할지라도 시간 4에서 걸음걸이 형태의 수정은 6번의 이동이 요구되는 반면 시간 5에서의 걸음걸이 형태의 수정은 단지 4번의 이동을 요한다. 따라서 보조 형태의 수정은 시간 5에서 수행되어야 한다.

5. 결론

이 논문에서는 4족 보행기가 3차원의 임의의 곡선을 따라 이동하는 경우를 연구하였다. 위치와 방향을 나타내는 곡선을 Bezier곡선에 기초하여 생성하였다. 몇 개의 원하는 위치를 통과하도록 제한하였다. 안정성과 다리의 운동공간에서의 운동 요구를 만족시킬 수 있는 발판의 선택 알고리즘을 개발하였다.

이 일반적인 경우의 운동학을 또한 해석하였다. 마지막으로 만일 걸음의 방향각의 크기가 α_{01} 를 증가할 경우의 안정성을 유지하기 위하여 보조 형태를 수정하는 방법을 제시하였다. 보조 형태의 수정 알고리즘을 예를 들어서 설명하였다.

참고문헌

1. Orin, D.E.: "Supervisory Control of a Multilegged Robot," The International Journal of Robotics Reserch 1(1): 79-91, 1982.
2. Lee, W. and Orin, D.E.: "The Kinematics of Motion Planning for Multi-Legged Vehicle Over Uneven Terrain," IEEE Journal of Robotics and Automation 4(2): 204-212, 1988.
3. Messuri, D.A. and Klein, C.A.: "Automatic Body Regulation for Maintaining Stability of a Legged Vehicle During Rough-Terrain Locomotion," IEEE Journal of Robotics Automation RA-1(3): 132-141, 1985.
4. McGhee, R.B. and Frank, A.A.: "On the Stability Properties of Quadruped Creeping Gaits," Mathematical Biosciences 3(1/2): 331-351, 1968.
5. Hirose, S., Kikuchi, H., and Umetani, Y.: "The Standard Circular Gait of a Quadruped Walking Vehicle," Robotics Society of Japan 1(2): 143-164, 1986.
6. Zhang, C.D. and Song, S.M.: "Design of a Walking Chair for Handicapped People," Proceedings of 10th Applide Mechanism Conference. New Orleans, 1987.
7. Mizugaki, Y., Kimura, F., Sata, T., and Suzuki, T.: "Generation of a Free Curve Trajectory with a Specified Velocity Distribution for an Articulated Rogot," International Symposium on Design and Synthesis. Tokoy, Japan, pp. 569-574, 1984.

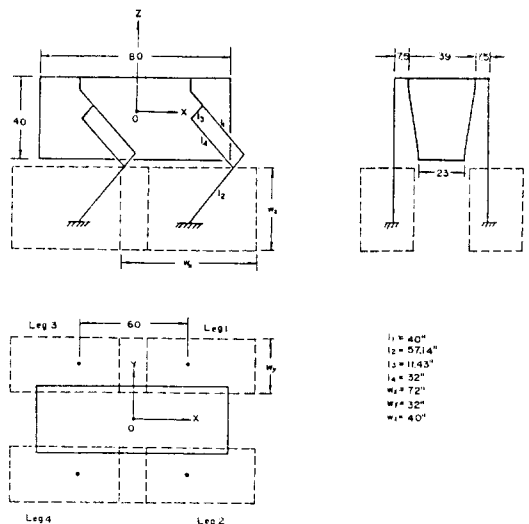


Figure 1. A quadrupedal walking machine with pantograph type leg.

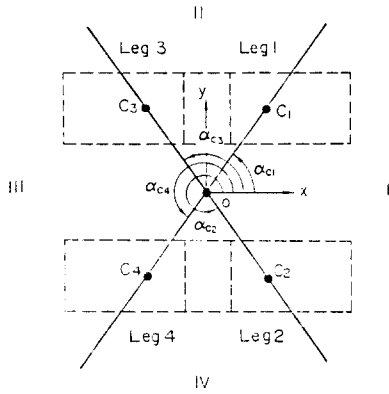


Figure 2. Four ranges of crab angle α

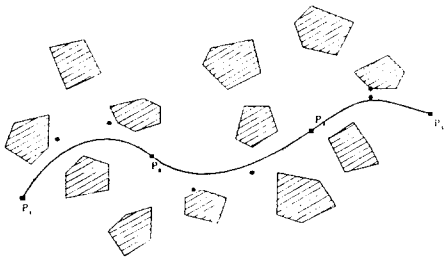


Figure 3. Path generation avoiding the obstacles by cubic Bezier curve.

Stability of Walking Machine following the Prescribed Trajectory
 Velocity of vehicle = 50.0 in/sec
 Duty factor = 5/6

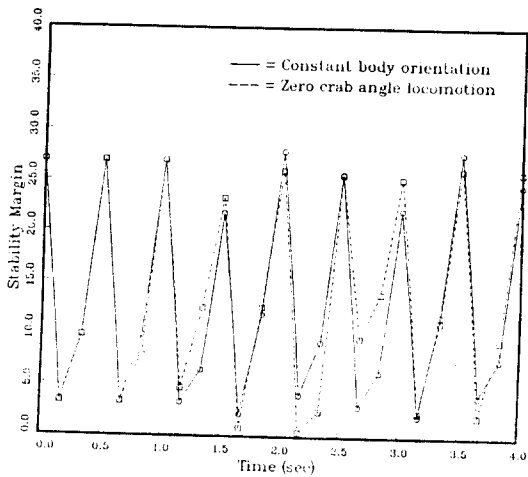


Figure 5. Stability of locomotion of a quadruped with two different modes.

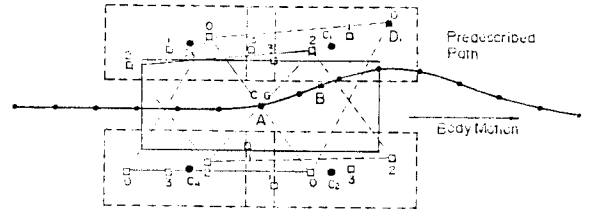
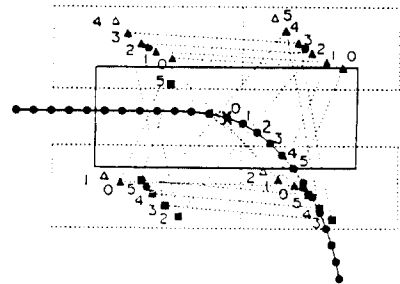
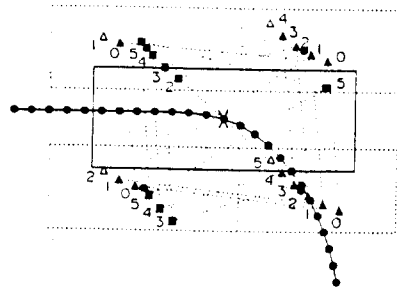


Figure 4. Foothold selection.



(a)



(b)

Figure 6. Stationary pattern for $\beta=5/6$ (a)-X type gait, (b)-Y type gait.

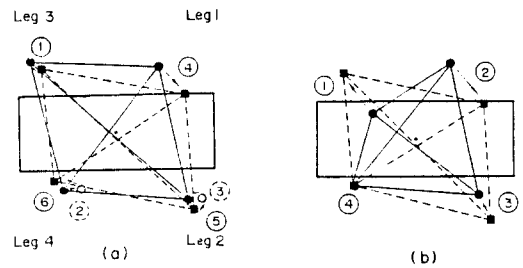


Figure 7. The sequence of foot replacement for gait transition (a)time 4, (b)time 5.