

4-족 보행 로봇의 정역학적 장애물 횡단 보행에 관한 연구

박 성 호*, 정 광 조**

Static Obstacle Crossing Locomotion of a Four-Legged Walking Machine

Sung Ho Park*, Gwang Jo Chung**

ABSTRACT

A four-legged Walking Machine can move on the plain terrain with mobility and stability, but if there exist any obstacles on the terrain of the motion direction, it takes extra time to cross those obstacles and the stability should be considered during motion. The main objective is the study a Quadruped which can cross obstacles with better mobility, stability and fuel economy than any other wheeled or tracked vehicles. Vertical step, isolated wall and ditch are the basic obstacles and by understanding those three cases perfectly, a Quadruped can move on any mixed rough terrain as 4-legged terrestrial vertebrates move. Each leg of a Quadruped has a limited walk space called a walking volume and this is very important to determine the crossing capability in a static analysis. A Quadruped can be simplified with links and joints. By applying the research method, a quadruped can determine the control procedures as soon as it receives the terrain information from scanner and finally can move with mobility and stability.

Key Words : Support Phase(지지상), Transfer Phase(이동상), Support Pattern(지지패턴), Duty Factor(의무인자), Periodic Gait(주기걸음꼴), Stability Margin(안정치)

1. 서 론

자동차나 기차가 살아 움직이는 생물체보다 우수한 장거리 주행 능력을 가지고 있다는 것은 주지의 사실이다. 하지만 이 사실은 시스템이 포장된 도로나 레일 위에서 운동할 때만 가능하다. 장애물이 존재하는 불규칙하거나 약한 지반 위에서는 위 장점들을 적용시킬 수 없다. 지구

표면의 50 % 이상을 차지하는 지표면은 기존의 구동 시스템으로는 접근할 수 없지만 대부분의 척추동물들의 생물체들에 의해서 쉽게 접근된다. 불규칙한 지반 위에서 척추동물들은 선천적으로 타고난 환경 적응 능력으로 민첩하게 움직일 수 있으므로 빠른 속도를 가지며, 운동 중 각각의 다리가 최소 시간에 선택된 최적점에 불연속적으로 착지하므로 우수한 에너지 효율을 나타낸다. 구동 시

* 동양대학교 제어계측과
 ** 한국기계연구원 자동화연구부

시스템은 불규칙한 표면 상태 그대로 바뀌기 지면과 계속 접촉하며 움직이지만, 척추동물은 각각의 다리가 선택된 점에 착지하므로 몸체는 최대한의 완만한 운동을 하게 되며 최대의 안락감을 보장한다. 그러므로 척추동물을 모방한 4-족 보행 로봇은 산악지역등 불규칙한 지면 위에서는 기존의 구동 시스템보다 우수한 주행능력을 가지고있다. 실험에 의하면, 어느 불규칙한 노면에서 구동 시스템은 4.8-8.0 Km/h 를 갔지만 척추동물은 아무런 어려움 없이 56.3 Km/h 를 갈 수 있었다.⁽¹⁾

최근의 주요 제작 사항을 보면, 1965 년에 스페이스 제너럴사가 탐험을 위한 6-족 보행 로봇에 관한 연구를 시작했고 지금까지 모델을 개발 중이다.⁽²⁾⁽³⁾ 1966 년과 1968 년에 Frank 와 McGhee 가 처음으로 컴퓨터 제어를 이용한 4-족 보행 로봇의 모델을 만들었다.⁽⁴⁾⁽⁵⁾ 1965 년에 제너럴 일렉트릭사가 대형 4-족 보행 로봇을 제작했지만 탑승한 운전자가 복잡한 4 개의 다리를 연속적으로 제어하기에 극히 어려웠다.⁽⁶⁾ 1977 년에 오하이오 대학의 McGhee 가 6-족 보행 로봇(OSU Hexapod) 와 ASV(Adaptive Suspension Vehicle) 를 제작했으며, 최근 까지 이에 대한 연구가 활발히 진행 중이다.⁽⁷⁾⁽⁸⁾ 1983 년에 서던랜드사에서 마이크로 컴퓨터가 장착된 6-족 보행 로봇을 제작했으며, 이 모델은 각 액츄에이터를 가솔린 엔진으로 작동했다.⁽⁹⁾ 1993 년에 카네기-멜론 대학에서 거미형태의 8-족 보행 로봇을 제작하여 인간이 도달하기 어려운 활화산 지역 탐사를 시켰다.⁽¹⁰⁾ 최근 극소형 보행 로봇을 의학, 유체 제어 등에 응용하려는 관심이 미국과 일본에서 증가하고 있지만 연구 수준은 기초 단계다.⁽¹¹⁾ 그동안 몇 건의 보행 로봇들이 실험적으로 제작되었지만, 위에서 언급한 보행 로봇이 가지는 장점들을 충분히 보여주질 못했다. 그 주요 이유는 기존 모델들이 몸체의 안정성을 유지하는데 어려움이 있었고, 전체 다리의 복잡한 상호 운동을 효율적으로 제어하는데 문제점이 있었기 때문이다. 평행 및 불규칙 표면에서 충분한 기능을 감당 할 수 있는 보행 로봇을 설계하기 위해서는 먼저 몸체 구조, 다리 운동과 걸음꼴에 관한 충분한 연구가 선행되어야 한다.

본 연구를 통해서 4-족 보행 로봇이 보행 중 장애물을 만났을 때 장애물 횡단 여부가 결정되며, 최소 시간에 장애물을 넘을 수 있는 연속 보행 과정을 미리 결정할 수 있다. 이 목적을 위하여 본 연구에서 몇개의 파라미터들이 제시될 것이며, 관련 계산 및 성능 비교를 위하여 6-족 보행 로봇인 "OSU ASV" 의 피치, 다리폭 및 몸체폭 길

이가 본 모델에 적용되었다.⁽¹²⁾

2. 본 론

본문에서 McGhee⁽¹²⁾ 에 의해 제안된 관련 용어들이 사용되며, 보행 로봇의 진행 방향의 우편 다리들은 전방에서 후방으로 차례로 1, 3, 5, ... 2n-1 등의 홀수로 지정되며, 좌편 다리들은 2, 4, 6, ... 2n 등의 짝수로 지정된다. 연구 목적상, 전족쌍과 후족쌍의 크기가 동일하다고 가정한다. 과거 생물학에서 동물들의 구조 및 걸음꼴에 관한 연구가 진행되었으며, 관련 사항들을 보행 로봇 설계에 적용할 수 있다. 본 연구에 사용되는 용어에 대한 정의는 후반부 Appendix 에 언급되었다.

보행 로봇은 정역학적 또는 동역학적 두 가지 방법으로 장애물을 넘을 수 있지만 정역학적 횡단의 경우만 고려한다. 이 경우에 다리를 현재면에서 목적면으로 이동시키기 위하여, 이동상 다리의 이동 공간이 현재면과 목적면을 동시에 연결해야 한다.

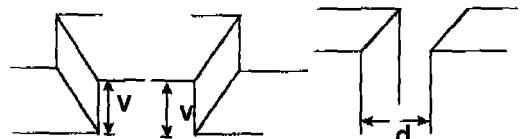


Fig. 1 Simplified Obstacle Pattern

장애물의 종류는 다양하지만, Fig. 1 의 세 가지로 형태로 압축할 수 있다. 도량은 폭을 나타내는 D, 수직벽은 상승벽과 하강벽이 존재하며 똑같이 벽 높이 V 로 정의된다. 장애물들은 수직 모서리를 가지고 있다고 가정하며 4-족 보행 로봇의 성능 계산 및 비교를 위하여 Fig. 2 모델의 수치들이 사용된다. Fig. 2 에서, 보행 로봇의 무게 중심 G 는 몸체 좌표계 X-Y-Z 의 원점과 일치하며, X 축은 보행 로봇의 진행 방향, Y 축은 오른쪽 방향, Z 축은 지면쪽 방향으로 정의한다. 각 다리의 끝점이 최대한 도달할 수 있는 축 이동 공간은 각각 R_x, R_y, R_z 으로 나타내며, 4-족 보행 로봇의 장애물 횡단 능력 및 보행시 안정치를 결정하는 중요한 요소들이다.

본 연구는 4-족 보행 로봇의 도랑 횡단, 수직벽 횡단, 독립벽 상승 및 하강에 관한 것이며, 각 경우에 보행 중인 4-족 보행 로봇이 장애물이 가진 수치들, 장애물과 보행 로봇의 상대거리, 기 입력된 보행 로봇 자체의 Data 를

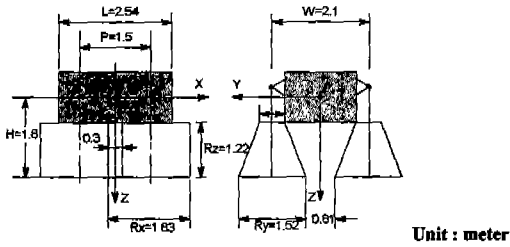


Fig. 2 Simplified Dimension of the Quadraped

사용하여 횡단여부를 결정하고, 횡단 가능 장애물에 대한 연속 보행 과정을 미리 결정하는 연구다. 최단 시간에 최적으로 제어하기에 필요한 파라미터들이 소개되고, 제시된 모델에 대해서 관련 수치를 계산하고 본 연구에서 제시한 방법을 적용한 연속 보행 과정이 소개 될 것이다. 따라서 본 연구의 최종 목적은 Fig. 3 에 나타난 불규칙한 표면을 빠른 속도로 횡단할수 있는 4-족 보행 로봇의 횡단 시퀀스(Sequence)결정에 있다.

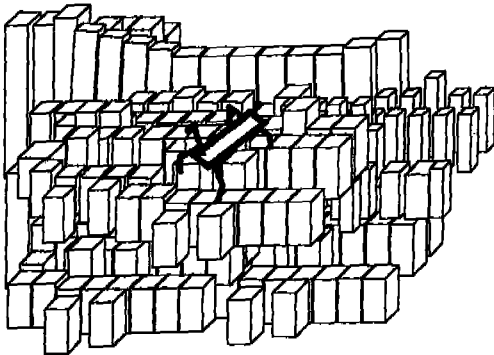


Fig. 3 Obstacle Crossing of a Four-Legged Walking Machine

2.1 도랑 횡단

2.1.1 비주기 걸음꼴에 의한 도랑 횡단

도랑 횡단력은 4-족 보행 로봇이 안정성을 유지하면서 건널수 있는 도랑의 최대 거리를 나타내며 다리폭 R 과 피치거리 P 의 함수로 나타낼 수 있다. 만약 도랑폭이 보행 로봇의 축이동공간, R_x 에 비하여 상대적으로 적을 경우는 주기 걸음꼴을 사용하여 횡단할 수 있지만, 일정 한계 이상의 경우엔 비주기 걸음꼴을 사용해야 하며 관련 사항이 2.1.2 장에 언급되어 있다.

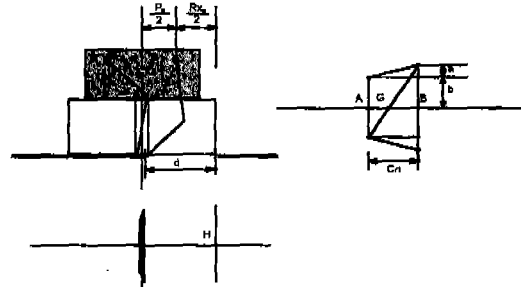


Fig. 4 Ditch Crossing of a Quadraped with a Non-Periodic Gait

4-족 보행 로봇은 Fig. 4 에서와 같이 몸체 무게중심을 현재면의 모서리에 위치시켜서 지지패턴이 일직선을 이룰 때에 최대 횡단력을 얻을 수 있으며, 피치 거리와 X-방향 다리폭 거리를 합한 값의 반이 된다. 하지만 이동 속도가 느린 정역학적 횡단의 경우, 일직선을 이루는 전족 중 하나를 목적면에 이동 시키는 순간과 마지막 후족을 목적면에 이동시키는 순간, 양의 안정치(Stability Margin)를 유지해야 하므로 Fig. 4 에 나타난 바와 같이 전족과 후족 사이에 최소 거리 AB 를 존재 시켜야 한다. 이 최소 거리 AB 는 4-족 보행 로봇의 제어 신뢰도와 요구되는 안정성에 의해 결정된다. Fig. 4 의 아래 그림은 최소 거리 AB 를 유지시키기 위한 최소 지지 패턴을 나타낸다. 전족이 이동상을 시작한 후 무게중심이 대각선상에 정확히 존재해야 하므로 최소 지지 패턴의 전방 경계로부터 GB 의 거리에 무게중심이 유지되어야 한다. 지지상에서 후족쌍과 몸체 중심선간의 거리를 b, 전족쌍의 외전거리를 a, 모서리 거리를 C_{r1} 이라하면 GA 는 아래와 같다.

$$GA = AB - GB = \frac{b}{a + 2b} C_{r1} \quad (1)$$

같은 원리로, 도랑을 건넌 후에도 최소 지지 패턴이 유지되어야 한다. 그러므로 두개의 전족과 한 개의 후족이 목적면에 도달한 후에, 무게중심은 후족의 GA앞에 위치해야 한다. 이유는 도랑의 현재면에서 마지막 후족이 이동상을 시작한 후에 무게중심이 정확히 지지 패턴의 대각선상에 존재해야 하기 때문이다. 따라서 4-족 보행 로봇이 최소한의 지지 패턴을 유지하면서 건널 수 있는 최대 도랑의 폭은 아래와 같다.

$$D_{\max} = \frac{1}{2} (P_o + R_{xo}) - \text{Max}(GA, GB) \quad (2)$$

외전(外轉)이 존재하지 않는 경우는, $GA = GB = C_{r,1,2} / 2 \cdot a = 0$ 와 이므로, 4-족 보행 로봇이 넘을수 있는 최대 도랑폭은 아래와 같다.

$$D_{max} = \frac{1}{2}(P_o + R_{xo} - C_{r,1,2}) \quad (3)$$

여기서 $C_{r,1,2}$ 는 전족쌍과 후족쌍을 목적면에 이동시키기 위하여 최소 지지 패턴을 유지하기 위한 모서리 거리를 나타낸다.

Fig. 5는 4-족 보행 로봇이 도랑을 건너는 연속 보행 과정을 나타낸다. 시퀀스-1에서 보행 로봇은 최대 횡단 폭을 확보하기 위하여 후족들을 모서리 거리 $C_{r,2}$ 에 위치시켰으며, 이때 최소 지지 패턴이 유지된다. L-1을 도랑을 넘어 목적면에 이동시키기 위하여 L-1이 이동상에 있으며 이때 보행 로봇의 무게중심이 지지 패턴 내부에 위치해야 하며 후방 안정치, S_{mr} 은 다음 조건을 만족해야 한다.

$$S_{mr} \geq 0 \quad (4)$$

시퀀스-2에서 L-1이 목적면 이동을 완료했으므로 이 순간 큰 S_{mr} 이 확보되며 다시 L-2는 목적면에 이동하기 위하여 이동상을 시작한다. 시퀀스-3에서 현재면 모서리에 이동한 후족과 목적면 모서리에 위치한 전족이 이루는 지지 패턴이 식 (4)를 만족시킬 때까지 보행 로봇의 몸체를 전방으로 이동시키고 L-3, L-4를 현재면 모서리에 이동시킨다. 연속되는 다음 시퀀스들의 목적은 후족 쌍을 목적면에 이동시키는 것이다. 따라서 시퀀스-4에서 L-1이 이동상인 경우 전방 안정치, S_{mf} 은 다음 식을 만족해야 한다.

$$S_{mf} \geq 0 \quad (5)$$

그러므로 전족 쌍이 목적면에서 최소 지지 패턴을 유지하기 위한 준비를 완료한 상태를 이룬다. 시퀀스-5에서 전족을 두번째 상(Second Phase)의 모서리 거리 $C_{r,2}$ 에 이동시킨다.

시퀀스-6에서 목적면에 만들어지는 최소 지지 패턴에서 식 (5)를 만족 시키도록 전체의 다리가 지지상을 이룬 상태에서 4-족 보행 로봇의 몸체를 운동 방향으로 이동시킨다. 그 이유는 후족쌍이 도랑을 건너는 동안의 이동상 동안 안정도(Stability) 확보에 그 목적이 있다. 시퀀스-7에서 L-3가 이동상을 시작해서 도랑을 건너후

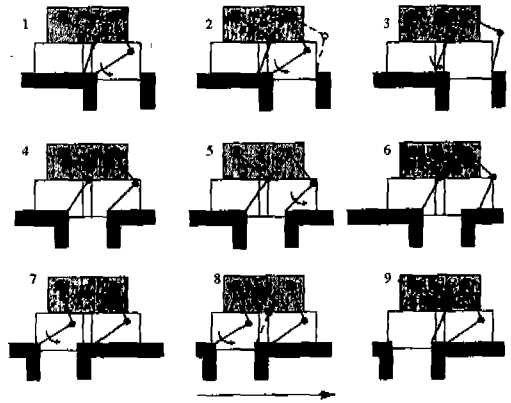


Fig. 5 Lateral Motion Sequence of Ditch Crossing

목적면의 도랑 모서리에 위치하며, 시퀀스-8에서 L-4도 같은 과정을 반복한다. 시퀀스-9는 도랑 횡단의 완결 상태를 나타낸다. 이 과정을 마친 후 4-족 보행 로봇은 주기 걸음꼴(Periodic Gait)을 사용하여 보행을 계속한다.

2.1.2 주기 걸음꼴에 의한 도랑 횡단

4-족 보행 로봇이 다리폭 거리와 피치 거리가 같은 파도 걸음꼴(Wave Gait)이나 연속 전족 모방 걸음꼴(Follow-the-Leader Gait)을 사용하여 보행할 경우 4-족 보행 로봇이 넘을 수 있는 최대 도랑 폭은 보행 로봇의 보폭, $\lambda/2$ 이며 Fig. 6에 나타난 족적(Footprint)으로 알 수 있다. 그러므로, 다음 식으로 표시된다.

$$D_{max} = \lambda/2 = R_x / (2\beta) \quad (6)$$

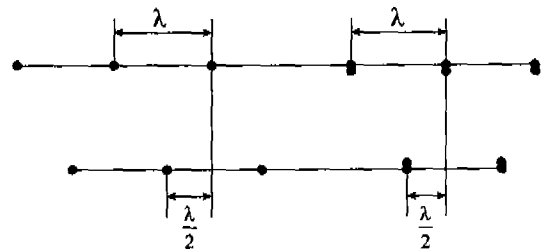


Fig. 6 Footprints of Follow-the-Leader Gait and Wave Gait

파도 걸음꼴로 보행하는 4-족 보행 로봇이 정역학적으로 안정을 유지하는 최소의 의무계수(Duty Factor), β 는 3/4 이므로⁽¹²⁾ 식 (6)에서 4-족 보행 로봇이 넘을 수 있는 최대 도랑 폭은 $2R_x/3$ 이 된다. 이 결과를 식 (3)과 비교하면, 그 차이가 무시하리만큼 작다. 연속 전족 모방

본 연구 모델은 $\gamma=33.69^\circ$ 와 $AF = 2.19$ m 의 값을 가진다. 높은 수직벽의 경우 족의 이동 공간을 확보하기 위하여 몸체각을 증가시켜야 한다. 하지만 4-족 보행 로봇의 몸체가 지면과 충돌하므로 몸체각은 아래의 조건을 만족시켜야 한다.

$$\theta \leq \tan^{-1} \frac{AN}{NC} = \tan^{-1} \frac{2R_{z0}}{L - (R_{x0} - P_o)} \quad (14)$$

L-2 를 수직벽의 목적면 모서리에 이동시키는 동안, L-1 을 현재면에 유지시키기 위해서 L-1 을 C 로 부터 모서리 거리 C_{β} 에 위치시켜야 하며 아래와 같이 계산된다.

$$C_{f1} = CF = AF \cos(\theta + \phi) \quad (15)$$

윗 식에서 아래 첨자 f1 은 L-1/2 의 처음상을 나타낸다. 만약 수직벽 높이가 몸체각 θ 에 해당하는 수직벽 거리 V_1 보다 적으면 L-1 은 $C_{f1} + \delta x_1$ 부터 $C_{f1} - \delta x_2$ 까지의 범위에 위치 할 수 있다. 만약 L-1/2 가 V_1 에 해당하는 C_{β} 내에 위치하면, L-1/2 는 아직도 목적면의 윗 모서리에 도달 할 수 있지만 몸체각이 주어진 V_1 에 해당하는 θ 보다 커지게 된다. 몸체각의 변화에 따른 V_1 , C_{β} 와 C_{β} 의 변화가 Table 1 에 나타나 있으며 2.2.2 장에 관련 사항의 특성이 설명되어 있다.

2.2.2 후족의 수직벽 범위

Fig. 8 은 L-3/4 의 수직벽 거리 조건을 나타낸다. 몸체의 앞부분을 낮춤으로써, 즉 몸체각을 감소시킴으로써 점진적으로 몸체가 평형을 유지 할 수 있도록 무게 중심점이 수직벽의 연장선상에 존재해야 한다. L-3/4 중 한 족이 현재면을 떠난 후에는 L-1/2 와 몸체 밑바닥으로 지지 된다. 악어와 같은 파충류들이 보행시 몸체의 무게 지지를 위해서 많이 사용하는 보행 방법이다. 척추동물들 처럼 보행 중 몸체 밑바닥의 접촉이 허용되지 않을 때에는 V_2 의 길이가 수정되어야 하며 이 경우는 나중에 언급 될 것이다.

전족의 수직 범위 계산과 동일한 방법으로 후족의 수직 벽 거리와 모서리 거리를 구할 수 있다. Fig. 8 에서

$$V_2 = AF \sin(\theta + \alpha) \quad (16)$$

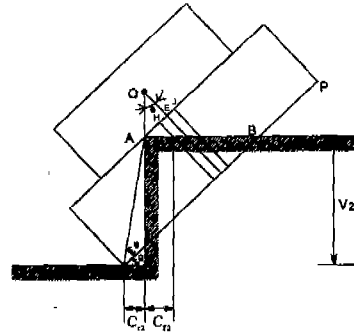


Fig. 8 Hindfoot Vertical Range

$$C_{r2} = AF \cos(\theta + \alpha) \quad (17)$$

여기서

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{2R_{z0}}{(R_{x0} + P_o) - 2(H_o - R_{z0})\tan\theta} \quad (18)$$

$$AF = \frac{R_{z0}}{\sin\alpha}$$

L-1/2 는 목적면의 모서리 거리 C_{f2} 의 바깥에 위치해야 하며 아래식으로 표시된다.

$$C_{f2} = \frac{2(H_o - R_{z0})\tan\theta - (R_{x0} - P_o)}{2\cos\theta} \quad (19)$$

Fig. 7 과 Fig. 8 을 비교하면, 후족의 수직벽 거리가 전족의 경우보다 $AJ \sin\theta$ 만큼 짧고 그 길이는 아래와 같이 계산된다.

$$\delta V = \frac{2(H_o - R_{z0})\tan\theta + (R_{x0} - P_o)}{2\sin\theta} \quad (20)$$

그러므로 후족의 수직벽 거리가 4-족 보행 로봇의 수직 벽 횡단력을 결정한다.

몸체 밑면이 몸체 무게를 지탱하는 것이 허용되지 않을 경우는 실제, 4-족 보행 로봇이 넘을 수 있는 수직벽 높이가 감소된다. Fig. 9 에서, 전족이 목적면부터 앞 방향 $C_{f2} + m/\cos\theta$ 으로 만큼 이동하기 위해서 후족을 모서리 거리 V_1 에 가깝게 이동시켜야 한다. 그후에, 무게중심을 경사면 윗 방향을 따라 m 만큼 이동시킨다. 모서리

거리 x_1 은 다음식으로 나타 낼 수 있다.

$$x_1 = \frac{b}{b+a} C_{f2} \quad (21)$$

무게중심이 m 만큼 이동한 후에 족 이동공간의 후방 경계면 역시 $\overline{p_1 p_2}$ 에서 $\overline{p_1^1 p_2^1}$ 로 이동된다. 후족들이 족 이동공간 내에 존재해야 하므로, $\overline{p_1^1 p_2^1}$ 선분과 x 축을 통과하는 수직선의 교차점부터 목적면 모서리까지의 수직 거리가 4-족 보행 로봇이 횡단 할 수 있는 최대 수직벽 거리가 된다. Fig. 9 에서 다음 관계가 성립된다.

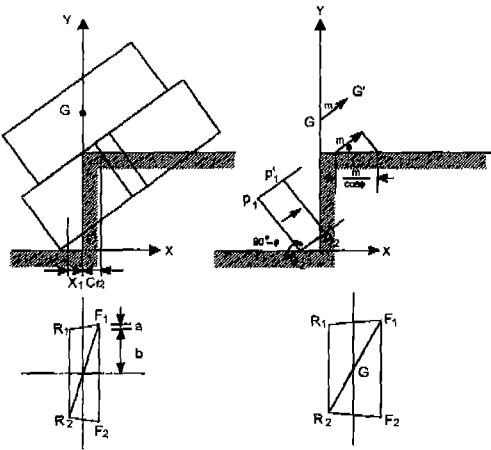


Fig. 9 Hindfoot Corner Distance and Hind Stroke Limit

$$m \cos \theta : C_{f2} + \frac{m}{\cos \theta} = b : 2b + a$$

그러므로,

$$m = \frac{b \cos \theta}{(a + 2b) \cos \theta - b} C_{f2} \quad (22)$$

$\overline{p_1^1 p_2^1}$ 를 통과하는 직선의 방정식은

$$y = \frac{1}{\tan \theta} \left(x - \frac{m}{\cos \theta} \right) + C_{r2} \quad (23)$$

따라서, 식 (23)의 직선과 모서리 거리 x_1 의 후족을 통과하는 선과의 교차점은 아래의 식으로 표시된다.

$$y_1 = \frac{1}{\tan \theta} \left(x_1 - \frac{m}{\cos \theta} \right) + C_{r2} \quad (24)$$

결국, 4-족 보행 로봇의 L-3/4 가 넘을 수 있는 최대

수직벽 거리는 아래와 같다.

$$V_2^1 = V_2 - y_1 \quad (25)$$

이때, 관련 모서리 거리는 아래와 같다.

$$C_{f2}^1 = C_{f2} + \frac{m}{\cos \theta} \quad (26)$$

$$C_{r2}^1 = x_1 = \frac{b}{b+a} C_{f2} \quad (27)$$

몸체각 θ 변화에 대한, V_2 , C_{r2} 와 C_{f2} 의 변화가 Table.1 에 나타나 있다. $\theta=32.5^\circ$ 에서 V_2 가 최대값 1.71 m 를 가지며, 횡단 중 몸체각이 적을수록 4-족 보행 로봇의 안정치를 기대 할 수 있으므로 32.5 도 이하의 값을 선택해야 한다. 주어진 수직벽 높이 V_2 에 대해서, 만약 L-3/4 를 후족을 C_{r2} 뒷쪽에 위치시키면 무게중심이 목적면 모서리를 통과 할 수 없고, 앞쪽에 위치시키면 주어진 V_2 에 해당하는 θ 보다 큰 몸체각으로 통과할 수 있다.

Table 1 Vertical Range and Corner Distance of Two Phases in the Vertical Step Crossing

θ	V_1	C_{r1}	V_2	C_{f2}	C_{r1}	C_{r2}
0	48.00	65.97	48.00	65.99	71.69	--
10	59.75	69.12	58.00	52.50	62.55	--
15	64.97	69.94	61.78	45.12	57.10	0.45
20	69.70	70.12	64.69	37.39	51.22	2.91
25	73.90	69.94	66.67	29.39	44.95	5.73
30	77.54	69.14	67.64	21.16	38.34	9.0
32.5	79.14	68.55	67.74	16.98	34.92	11.01
35	80.58	67.81	67.53	12.76	31.43	13.19
40	83.02	65.97	66.25	4.27	24.29	18.46
42.5	84.00	64.87	65.12	0.02	20.65	21.69
45	84.82	63.63	--	--	--	--
47.5	85.47	62.27	--	--	--	--

2.2.3 수직벽 상승 시퀀스

4-족 보행 로봇이 수직벽을 횡단할 경우 각각의 다리와 몸체의 연속 운동에 대하여 보자. Fig. 10 의 보행 로봇 모델이 몸체각 θ 를 유지하면서 수직벽을 횡단할 경우, 식 (9)와 (16)에 의해서 두 족의 수직벽 범위는 $V_1 = 1.604$ m 와 $V_2 = 1.579$ m 가 된다. 그러므로 모델이 이론적으로 넘을 수 있는 최대 수직벽 높이는 1.579 m 가 된다. 하지만 보행중 안정치 확보를 고려하여 이보다 적은 1.295 m 의 수직벽에 대한 연속 연속 보행 과정이 선택되었다. Fig. 11 은 몸체각 30° 로 1.295 m 의 수직벽을 넘어가는 4-족 보행 로봇의 연속 운동을 나타내며 운동의

전체 주기는 두개의 상(Phase)으로 나눌 수 있다. 각 상에서, 한 쌍의 다리가 현재면에서 목적면으로 이동하며 첫 상은 시퀀스 1 부터 4 까지를 나타내며 두번째 상은 시퀀스 4 부터 14 까지를 나타낸다. 시퀀스 14 에서 마지막 후족이 현재면에서 목적면으로 이동을 마치며 수직벽을 넘는 운동을 종료시킨다. 4-족 보행 로봇의 경우, 각 쌍의 족이 동시에 이동하면 안정성을 기대하기 어려워

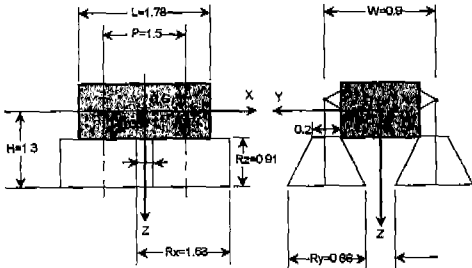


Fig. 10 Dimensions of a Quadruped for Walking Up Motion Sequence

므로 어느 한족이 이동을 완전한 후에, 동일 쌍의 다른 족을 한족의 측면 위치에 동일 길이로 이동시킨다. 시퀀스-1 은 수직벽 넘기를 시작할 처음 위치를 나타낸다. 네족은 다리폭의 중심위치에 있으며 몸체각 30°를 만든다. 몸체가 경사를 만든 후, 몸체의 전면과 수직벽 사이에 일정간극이 존재해야 한다. 시퀀스-2 에서 후족들이 모서리

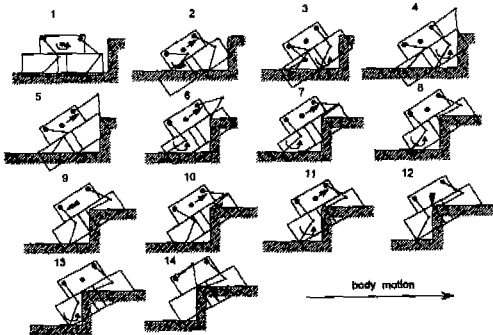


Fig. 11 Lateral Motion Sequence of a Quadruped Walking-Up

거리 뒤에 위치해야 한다. 그러므로 한 후족이 들리기 전에 무게중심이 현 지지패턴의 대각선 앞으로 이동되어야 한다. 전족의 족 이동공간이 목적면의 모서리를 커버할때 까지 이 과정이 반복된다. 시퀀스-3 에서 안정치를 유지

하면서 좌전족이 들릴 수 있도록 좌후족이 우후족의 앞에 위치시켰다. 시퀀스-4 에서 전족들이 들려져서 목적면의 상단 모서리에 위치시켰다. 이 시퀀스에서 첫 상이 완료되었다. 시퀀스-5 에서 후족들이 극한 위치에 도달할 때까지 4-족 보행 로봇의 몸체를 경사면을 따라 전방으로 이동시켰다. 수직벽 높이 (1.295 m) 가 선택된 몸체각의 수직벽 범위 (1.579 m) 보다 적으므로 몸체 밑바닥과 목적면 상단 모서리 사이에 일정 거리가 존재해야 한다. 시퀀스 6-8 에서 후족을 목적면 상단에 이동시키기 위하여 전족과 후족쌍의 Y-방향 폭거리가 서로 다른 사각 걸음꼴(Tetrapod Gait)을 적용했다. 몸체지지를 위하여 항상 두 전족과 한 후족을 반복적으로 이동시켰다. 시퀀스-9 에서 후족들이 모서리 거리 C_{12} 내에 위치시키기 전에, 전족들을 목적면 모서리 C_f 앞 에 위치시켜야 한다. 그러므로, 무게중심이 지지패턴 내부 대각선 뒤쪽에 위치할 수 있도록 몸체를 뒷 방향으로 이동시켜야 한다. 시퀀스-10 에서 전족들이 반복적으로 목적면 모서리부터 C_{12} 거리 만큼 이동했으며, 그 후 후족이 다리폭 한계에 도달할 때까지 몸체를 경사면을 따라 뒷 방향으로 이동시켰다. 시퀀스-11 에서 후족들을 모서리 거리 C_{12} (0.906 m) 에 이동시키고 몸체 무게중심이 수직벽 모서리를 통과할 때까지 몸체를 경사면을 따라 이동시켰다. 시퀀스-12 에서 몸체 밑바닥이 목적면 모서리를 접촉하여 안정성을 증가시킬때 까지 몸체를 낮춘다. 만약 몸체 밑바닥의 목적면 모서리 접촉이 허용되지않을 경우에는 족의 위치가 식

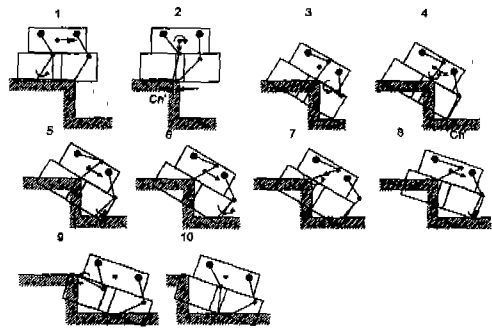


Fig. 12 Lateral Motion Sequence of a Quadruped Walking-Down

(26) 과 (27)을 만족시켜야 한다. 시퀀스-13 에서 후족들이 반복적으로 목적면으로 이동한다. 몸체 바닥이 4-족 보행 로봇의 전하중을 지지하고 있으므로 후족들은 안정치를 해치지 않고 이동할 수 있다. 시퀀스-14 는 두번째

상의 완결을 나타낸다. 이후에 보행 로봇은 몸체의 평형을 유지하고 다음 장애물을 넘을 준비를 하거나 장애물이 존재하지 않는 수평면일 경우에는 주기 걸음꼴을 써서 쉽게 이동 할 수 있다.

2.2.4 수직벽 하강운동

수직벽 하강운동은 상승운동의 역순을 적용하여 해결할 수 있으며, 상승운동의 모든 모서리 거리가 하강운동의 모서리 거리와 같다. 두 경우 모두, 모든 모서리 거리를 결정하는 주요 구속식들(Constraints) 은 하강 운동의 목적면, 즉 아래면에 의해 좌우된다. Fig. 12 는 4-족 보행 로봇이 30°의 몸체각으로 수직벽을 하강하는 측면 그림의 연속운동을 나타낸다. Table 1 에서 몸체각이 30° 일 경우, 최대 수직벽 높이 V_2 는 1.718 m 가 된다. 하강 운동 처음상의 후방 모서리 거리는 상승운동 두번째 상의 전방 모서리 거리와 같다. 그러므로 C_{r1} 을 식 (28) 로 부터 계산 할 수 있으며 0.230 m 가 된다. 1.718 m 의 수직벽을 30°의 몸체각으로 하강하는 4-족 보행 로봇의 이동 시퀀스가 Fig. 12 에 나타나 있으며 Fig. 13 에서는 각 시퀀스의 지지패턴이 나타나 있다. 하강운동 중 전족들이 다음 가능 착지점들을 확보하기 위하여, 각 시퀀스마다 계속 반복하여 몸체각을 감소시킨다. 만약 처음 몸체각 θ 가 주어진 수직벽 높이의 최대값에 가까우면, 하강운동중 많은 몸체각의 변화와 많은 족 이동운동이 요구된다. 이러한 예가 다음의 연속되는 그림에 잘 나타나 있다.

시퀀스-1 : 하강운동을 위한 시작 위치로 모든 족은 다리쪽의 중심에 위치하고 전족들이 수직벽의 모서리에 위치하여 있다. 몸체의 무게중심이 수직벽 모서리에 위치할

때까지 몸체를 전방으로 이동시킨다. 그후에, 후족들을 모서리거리 C_{r1}^1 만큼 이동시킨다. 이 C_{r1}^1 은 식 (18) 의 C_{f2} 와 같은 값을 가진다.

$$C_{r1}^1 = \frac{2(H_o - R_{zo})\tan\theta - (R_{zo} - P_o)}{2\cos\theta} \quad (28)$$

$C_{r1}^1 = 0.230$ m 이며 후족들은 이 모서리거리 내에 존재 할 수 없다. 시퀀스-2 에서 몸체를 낮추고 몸체각이 30°가 될 때 까지 무게중심에 대하여 몸체를 회전시킨다. 이 두 가지 동작으로 전족 이동공간의 전방 하단이 목적면을 연결하게 된다. 시퀀스-3 에서 전족들이 현재면에서 목적면으로 이동하며, 이동중 몸체가 몸체 밑바닥과 후족들에 의해서 지탱된다. 전족의 모서리거리는 Fig. 8 상승운동의 C_{f2} 와 동일하다. 이 시퀀스가 하강운동의 처음상을 완결한다. 시퀀스-4 에서 무게중심이 수직벽 모서리와 전족위치의 중심에 도달 할 때 까지 경사면을 따라 무게중심을 이동시킨다. 그 후에 후족을 수직벽 상단 모서리에 이동시킨다. 시퀀스-5 에서 전족들을 지지패턴내 최대 위치에 이동 시킨 후 무게중심이 새 지지패턴의 대각선에 도달할 때까지 경사면을 따라 무게중심을 이동시킨다. 이 시퀀스는 아래의 세가지 조건들이 만족 될 때 까지 반복된다.

- (1) 후족 이동공간의 전방하단 모서리가 목적면에 연결되어야 한다.
- (2) 무게중심이 전족과 목적면에 있는 후족 이동공간의 후방 경계 사이의 중심점 보다 앞에 위치해야 한다.
- (3) 몸체의 후방 모서리가 수직벽 모서리를 통과해야 한다.

시퀀스-6 에서 전족들을 전방 경계에 이동시킨 후에 무게중심이 새 지지패턴의 대각선에 도달할때 까지 무게중심을 전방으로 이동시킨다. 실제로 이 운동은 시퀀스-5 의 반복운동이다. 시퀀스-7 에서 전족들의 전방 이동거리를 증가시키기 위하여, 몸체를 시계 반대 방향으로 회전시켜야 한다. 시퀀스-8 에서 전족들을 전방 경계에 이동시킨 후 시퀀스-5 에서 언급한 세가지 조건을 만족할 때까지 몸체중심을 전방으로 이동시킨다. 시퀀스-9 에서 준비된 상태에서 후족들을 현재면에서 목적면으로 이동시킨다. 시퀀스-10 에서 하강운동의 완결을 나타낸다. 이후에 몸체가 점진적으로 지표면과 평행을 유지하며 전방으로 이동한다.

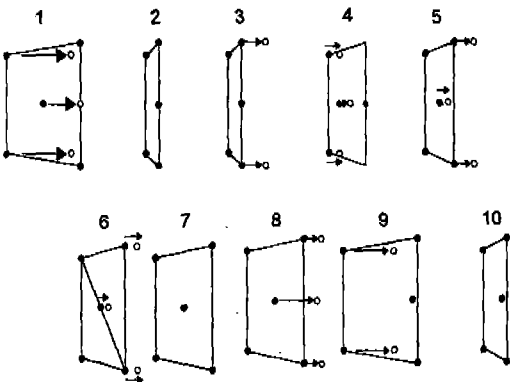


Fig. 13 Support Pattern Sequence of a Quadruped Walking-Down

3. 결론

척추동물의 형태를 가진 4-족 보행 로봇이 운동 중 장애물을 만났을 때, 4-족 보행 로봇이 가진 자체의 고유 치수들과, 장애물의 크기와 4-족 보행 로봇과 장애물 간에 존재하는 모서리 거리들에 의해서 장애물의 횡단 여부를 결정할 수 있으며 최소 시간에 최적 제어할 수 있는 연속 보행 과정을 미리 계획할 수 있다. 보행중 안정치 유지 문제 때문에 6-족 보행 로봇에 관한 연구에 비해서 4-족 보행 로봇 연구가 미진했던바, 본 연구에서 제시한 방법을 써서 4-족 보행 로봇의 보행 중 안정성 문제를 해결할 수 있고 최단 시간에 장애물에 횡단할 수 있는 연속운동을 계획할 수 있다.

참고 문헌

1. Bekker, M. G., Introduction to Terrain Vehicle System, University of Michigan Press, Ann Arbor, Michigan, 1969.
2. McKenney, J. D., "Investigation for a Walking Device for High Efficiency Lunar Locomotion," Paper 2016-61, American Rocket Society, Space Flight to the Nation, New York, 1961.
3. Baldwin, W. C., Miller, J. V., Multi-Legged Walker, Final Report, Space General Corp., El Monte, California, 1966.
4. MaGhee, R. B., "Finite State Control of Quadruped Locomotion," Proceedings of Second International Symposium on External Control of Human Extremities, Dubrovnik, Yugoslavia, 1966.
5. Frank, A. A., Automatic Control System for Legged Locomotion, USCEE Report No. 273, University of South California, Los Angeles, California, 1968.
6. Liston, R. A., "Test and Evaluation of a Versatile Walking Truck," Proceedings of Transportation Engineering Conference, ASME-NYAS, Washington, D.C., 1968.
7. Briggs, R. L., "Real-Time Digital Control of an Electrically Powered Vehicle Leg Using Vector Force Feedback", M.S. thesis, The Ohio

- State University, Columbus, Ohio, 1977.
8. Pugh, D. R., "An Autopilot for a Terrain Adaptive Hexapod Vehicle", M.S. thesis, The Ohio State University, Columbus, Ohio, 1982.
9. Raibert, M. H., and Sutherland, I. E., "Machine That Walk," Scientific American, Vol. No. 2, January, pp. 44-53, 1983.
10. Leary, W. E., "Robot named Dante to Explore Inferno of Antarctic Volcano," The New York Times, Dec. 8, 1992.
11. Fujita, H., "Present and Future Research Trend of Modern Micromachining Technology, 대한기계학회지 Vol.33, No.6, pp.495, 1993.
12. Song, S. M. S., "Kinematic Optimal Design of a Six-Legged Walking Machine", Ph.D. Dissertation, The Ohio State University, Columbus, Ohio, 1984.

Appendix (용어 정의)

1. 지지상 (Support Phase): 족이 지표면과 접촉하고 있는 상태를 말하며 몸체를 지지하며 정역학적 안정도 유지를 위해서는 3 개 이상의 다리가 지지상을 유지해야 한다.
2. 이동상 (Transfer Phase): 족이 지표면과 접촉하지 않고 공중에 떠있는 상태를 말하며 4-족 보행 로봇은 장애물을 내려오는 경우를 제외하고는 항상 한 개의 다리만 이동상을 유지해야 한다, 두개의 다리가 동시에 이동상을 유지할 수 없다.
3. 주기 (Cycle Time), T : 보행 로봇이 주기 걸음꼴로 보행할 경우 각각의 족이 한 사이클을 완성 하는데 걸리는 시간.
4. 의무 인자 (Duty Factor), β : 주기 시간을 1로 가정할 경우, 주기중 지지상이 차지하는 시간의 비율을 나타낸다.
5. 보폭 (Stride), λ : 보행 로봇이 보행하면서 한 주기를 마치는 동안 보행 로봇 몸체의 무게 중심이 이동한 거리
6. 지지패턴 (Support Pattern): 지지상에 있는 모든 발들을 수평면에 투영하여 연결한 다각형으로 2 차원 평면을 이룬다.
7. 주기 걸음꼴 (Periodic Gait): 한 다리의 걸음꼴을 일정시간 차이로, 시스템을 구성하는 다른 다리들이 반복하는 걸음꼴을 말하며, 그 외의 모든 경우는 비주기 걸음

걸(Non-Periodic Gait)이라 한다

8. 다리폭(Stroke), R: 지지상 동안 몸체 좌표에 대하여 발이 최대한 이동할 수 있는 거리. 몸체 좌표계의 X, Y, Z 3 방향으로 R_x , R_y , R_z 가 각각 존재한다.

9. 피치, P: 몸체 좌표계의 중심과 다리폭 중심과의 거리를 나타내며 몸체 좌표계의 X, Y, Z 3 방향으로 P_x ,

P_y , P_z 가 각각 존재한다.

10. 안정치(Stability Margin), S_m : 몸체 무게중심을 지지패턴에 수직으로 투영한 점에서 전방, 후방, 측면 경계선까지 각각 연결한 선분의 길이 중 최소의 길이를 나타낸다. 전방 경계선 과 후방 경계선 까지의 거리를 각각 S_{mf} , S_{mr} 로 나타낸다.