

4-족 이동로봇의 최소시간 최적제어를 위한 파라미터 연구

박성호*, 한문식*, 정광조**

Parameters for Min. Time and Optimal Control of Four-Legged Mobile Robot

Sung Ho Park* , Moon Sik Han* , Kwang Jo Jung**

Abstract

A four-legged mobile robot 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 times for a mobile robot to cross those obstacles and the stability should be considered during motion. The main objective is the study of 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 animal moves. 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 informations from scanner and finally can be moved as animals move with mobility and stability.

Key Words : Walking Volume, Present Plane, Destination Plane, Support and Transfer Phase, Quadruped Support Pattern, Stability, Vertical Step, Gait, Corner Distance.

기호설명

G	: 몸체 무게중심	λ	: 주기당 몸체 무게중심 이동거리
W	: 몸체의 폭	L	: 몸체길이
V_1	: 전족 수직벽 거리	R	: 몸체 좌표계에서 지지상족의
C_{1l}	: 전족 첫상 모서리거리 이동거리	C_{r1}	: 후족 첫상 모서리거리
R_x	: 로보트 진행방향 족이동거리	V_2	: 후족 수직벽 거리
R_z	: 지표면 방향 족이동거리	C_{2l}	: 전족 두번째상 모서리거리
R_y	: 운동방향의 오른쪽 족이동거리	C_{r2}	: 후족 두번째상 모서리거리
β_i	: 족지지상 시간비	θ	: 몸체각
α	: 족이동공간 모서리각	θ_m	: 최대몸체각
ϕ	: 족이동공간 대각선각	P	: 측면 인접족 R 간의 중심거리

* 동양공과대학교 제어계측공학과

** 한국기계연구원 로보트공학실

장애물이 존재하는 불규칙한 지반위에서는 기존의 구동시스템이 완전한 성능을 나타낼 수 없다. 지구표면의 50% 이상은 자동차나 기차 등으로 접근할 수 없지만 대부분의 척추동물들에 의해서 쉽게 접근된다. 불규칙한 지반위에서 척추동물들은 선천적으로 타고난 구조와 환경적응 능력으로 빠르게 움직일 수 있으며⁽¹⁾, 운동중 각각의 다리가 순간적으로 선택된 최적점에 착지하므로 우수한 에너지 효율을 나타낸다. 구동시스템은 불규칙한 표면상태 그대로 바퀴가 지면과 계속 접촉하며 움직이지만, 척추동물은 각각의 다리가 선택된 점에 착지하므로 몸체는 최대한의 완만한 운동을 하게되며 최대의 안락감을 보장한다. 이러한 불규칙한 표면상에서의 장점과 사람대신 위험지역에서의 작업가능성 때문에 생물체의 구조를 모방한 족이동로봇의 연구가 최근에 학술적으로 활발하게 진행되고있다.

주요 내용을 보면, 1965년에 스페이스 제너럴사가 달 탐험을 위한 4-족 및 6-족 이동로봇을 제작했지만 성능상 많은 제약이 있었다.⁽²⁾⁽³⁾ 1966년과 1968년에 Frank 와 McGhee 가 처음으로 컴퓨터 제어를 이용한 4-족 로봇을 만들었다.⁽⁴⁾⁽⁵⁾ 1965년에 제너럴 일렉트릭사가 4-족이동로봇을 제작했지만 탑승한 운전자가 복잡한 각다리를 제어하는데 어려움이 많았다.⁽⁶⁾ 1977년에 오하이오 주립대학의 McGhee 가 6-족이동로봇(OSU Hexapod)를 제작한바 최근 까지 이에 대한 연구가 활발히 진행중이다.⁽⁷⁾⁽⁸⁾ 1983년에 서던랜드사에서 마이크로 컴퓨터가 장착된 6-족이동로봇을 제작했다. 이 로봇은 각 액츄에이터를 작동키 위해서 가솔린 엔진을 장착했다.⁽⁹⁾ 1993년에 카네기-멜론대학에서 거미 형태의 8-족이동로봇을 제작하여 인간이 도달하기 어려운 활화산지역 탐사를 시켰다.⁽¹⁰⁾ 최근 극소형 족이동로봇을 의학, 유체제어 등에 응용하려는 관심이 미국과 일본에서 증가하고 있지만 초기단계다.⁽¹¹⁾ KIST 에서도 1994년부터 5개년 연구사업으로 4-족이동로봇에 관한 연구를 계획하고있다⁽¹²⁾.

그동안 주기걸음꼴(Periodic Gait)에 관한 많은 연구가 있었으며, 몇건의 족이동로봇이 실험적으로 제작되었지만, 위에서 언급한 세가지 장점들을 충분히 보여주질 못했다. 정역학적(Quasi-Static) 몸체 안정성(Stability) 유지를 위해 필요한 최소 다리수가 4개 인바, 운동중 안정성(Stability) 확보를 목적으로 6-족과 8-족이동로봇이 제작되었다. 카네기-멜론대학에서 제작된 8-족이동로봇 "Dante" 는 남극의 활화산 내부를 향하여 내려가다가

동로봇 들이 개발되었지만 이들은 평평한 실험실 바닥을 움직이거나, 이미 장애물에 관한 모든 데이터가 입력된 상태에서 장애물을 넘는 기초의 연구 단계이다.

척추동물들은 4개의 다리를 이용하여 안정성을 유지하며 민첩하게 장애물을 넘고 전체다리의 복잡한 상호운동을 효율적으로 제어한다. 따라서 본 연구의 모델은 정역학적 안정성 유지의 최소 다리수인 4개를 가지며, 운동중 인 족이동로봇가 장애물을 만났을때 최소시간에 장애물 횡단여부 및 횡단 시퀀스를 결정할 수 있는 파라미터들에 관하여 연구한다.

본 연구에서 4-족이동로봇은 운동중 항상 정역학적 안정성이 유지되며 모델의 성능 및 관련 계산을 위하여 Fig. 1 의 모델이 사용되며, 특히, 이 모델은 "OSU Hexapod" 와 동일한 다리폭과 피치를 가지고있다. 어떠한 형태의 불규칙 표면도 도랑(Ditch), 수직벽(Vertical Wall), 독립벽(Isolated Wall)의 세가지 형태중의 하나 또는 둘 이상의 복합형태를 가진다. 본 연구에서는 수직벽에 관한 사항만을 다룬다.

2. 본 론

족이동로봇의 운동을 연구하기 위하여 McGhee 와 그의 동료들⁽¹³⁾ 에 의해 제안된 아래의 용어들이 본 논문에서 사용된다. 다족이동로봇에서, 앞에서 뒷방향으로 한편의 족들은 1, 3, 5, ---2n-1 으로, 다른편족들은 2, 4, 6, ---2n 으로 지정된다.

- (1) 지지상 (Support Phase) : 발이 지표면과 접촉하고 있는상태.
- (2) 이동상 (Transfer Phase) : 발이 지표면과 접촉하지 않고 공중에 떠있는 상태.
- (3) 사이클시간(Cycle Time), T : 족이 한 사이클을 완성하는데 걸리는시간.
- (4) 의무인자(Duty Factor), β : 사이클시간중 지지상 시간이 차지하는 비.
- (5) 보폭(Stride), λ : 족이동로봇가 한사이클을 마치는 동안 족이동로봇의 무게중심이 이동한거리.
- (6) 지지패턴(Support Pattern) : 지지상에 있는 모든 발들을 수평면 상에 투영하여 연결한 다각형으로 2 차원 평면을 이룬다.
- (7) 주기걸음꼴(Periodic Gait) : 한다리의 걸음꼴을, 일정시간 차이로 시스템을 구성하는 다른 다리들이 반복하는 걸음꼴. 그외의 모든 경우는 비주기 걸음꼴(Non-Periodic Gait) 이라 한다.

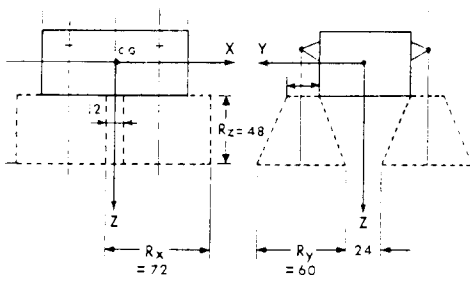


Fig. 1 Simplified Dimensions of the Quadruped

- (8) 다리폭(Stroke), R : 지지상동안 몸체좌표에 대하여 발이 최대한 이동할 수 있는 거리. 몸체좌표계의 XYZ 3 방향으로 R_x , R_y , R_z 가 각각 존재한다.
- (9) 피치, P : 몸체좌표계의 중심과 다리폭 중심과의 거리를 나타내며 몸체좌표계의 XYZ 3 방향으로 P_x , P_y , P_z 가 각각 존재한다.
- (10)안정치(Stability Margin), S_m : 몸체 무게중심을 지지패턴에 수직으로 투영한점에서 전방, 후방, 측면 경계선까지 각각 연결한 선분의 길이중 최소의 길이를 안정치라 부른다.

족이동로봇은 정역학적 또는 동역학적 두가지 방법으로 장애물을 넘을 수 있다. 첫째 경우, 현재면에서 목적면으로 다리를 이동시키기 위하여, 두면이 움직이는 다리의 족이동공간내에 존재해야된다. 두번째 경우에는, 동역학적 밸런싱 하에서 몸체의 운동이 이동다리의 도달거리를 증가시켜주므로, 위와같은 조건이 필요없다. 본 연구에서는 사족이동로봇의 정역학적 장애물 횡단에 관해서만 다루어질 것이다.

존재하는 장애물들의 종류는 다양하지만, 세가지로 압축 될 수 있고, 각 장애물들은 하나 또는 두개의 인자로 정의된다. 도랑은 도랑의 폭을 나타내는 인자 d 로, 수직벽은 벽높이를 나타내는 인자 V 로, 독립벽은 벽의 두께 U 와 높이 V 로 정의된다. 모든 장애물들은 수직 모서리를 가지고 있다고 가정하며 족이동로봇의 성능 계산 및 비교를 위하여 Fig. 1 의 수치들이 사용된다. Fig.1 에서, 몸체의 무게중심 G 는 몸체좌표계 X-Y-Z 의 원점과 일치하며, X 축은 운동진행방향, Y축은 오른쪽 병향, Z축은 지표면 방향을 향하고 있다. 점선은 각 다리의 끝점이 최대한 닿을 수 있는 족이동공간(Walking Volume)을 나타내고, R_x , R_y , R_z 은 다리폭 이동가능 공간의 각 방향 크기를 나타낸다. 이 세가지는 장애물 횡단 능력 및 안정도 계산에 있어서 중요한 요소들이다.

효율적으로 제어하기에 필요한 인자들을 제시하고, 4-족이동로봇이 가지는 최대 횡단력과 횡단력을 극대화시키는 방법들이 제시될 것이며 위 방법을 응용한 시뮬레이션이 소개 될 것이다.

2.1 수직벽 횡단

Fig. 2 처럼, 수직벽은 한개의 인자, 즉 수직벽의 높이 V 에 의해 정의된다. 족이동로봇이 넘을 수 있는 최대 수직벽 높이와 운동 시퀀스는 수직벽 범위와 관련 축의 모서리 거리에 의해 결정된다. 수직벽 범위는 로봇이 운동중, 정역학적 안정성을 유지하면서, 족이 최대한 도달할 수 있는 수직거리를 나타낸다. 족의 모서리 거리는 수직벽 모서리부터 지지발 위치까지의 거리를 나타낸다.

2.1.1 전족의 수직범위

운동중 안정성을 유지해야 하므로, 한편의 전족을 들어 올리기 위해서는 다른 전족과 두 후족은 지지상을 유지해야 한다. Fig. 2 에서, 사족이동로봇이 우전족을 최대 수직벽거리 V_1 에 이동시킨 상태를 나타낸다. 몸체의 무게중심점 G 와 전족 이동공간의 후하 모서리 연결선과 참조선 OG 사이의 각도를 γ 라고 하면,

$$\gamma = \tan^{-1}\left(\frac{R_{x0} - P_o}{2H_o}\right) \quad (1)$$

이며 Fig. 1 의 모델의 경우 $\gamma = 4.78^\circ$ 도가 된다. 수직벽 이동범위 V_1 는

$$V_1 = AF \sin(\theta + \phi) \quad (2)$$

여기서

$$\phi = \tan^{-1} \frac{R_{z0}}{R_{x0}} \quad (3)$$

$$AF = \frac{R_{z0}}{\sin \phi} \quad (4)$$

후족은 4-족이동로봇 무게중심의 수직 투영점 N 의 뒷부분 어느점에도 존재시킬 수 있다. 그러므로, $C_{r1} = CN$ 이며, r1 은 후족의 처음상(First Phase)을 나타낸다.

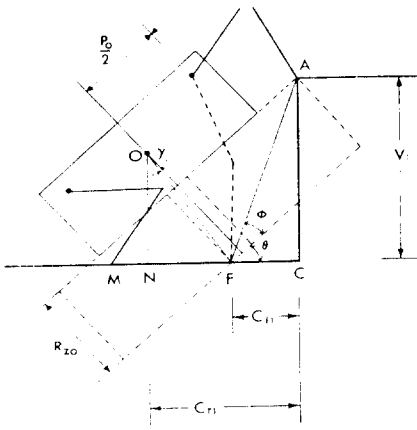


Fig. 2 Forefoot Vertical Range

$$C_{r1} = NF + FC \quad (5)$$

$$= H_0 \frac{\cos(90^\circ + \gamma + \theta)}{\cos \gamma} + AF \cos(\theta + \phi)$$

안정성 유지를 위해 후족들은 무게중심의 뒤에 위치해야 하므로 아래의 조건이 만족되어야 한다.

$$CM > C_{r1} \quad (6)$$

Fig. 1의 모델은 $\phi = 33.69^\circ$ 와 $AF = 2.19$ m의 값을 가진다. Fig. 3은 몸체의 하단 모서리가 지면에 닿았을 경우를 나타낸다. 이 위치에서 몸체각이 최대가 되며 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta_m = \tan^{-1} \frac{QF}{PQ} = \tan^{-1} \frac{2R_{z0}}{L - (R_{z0} - P_0)} \quad (7)$$

Fig. 1의 경우, θ_m 는 47.5° 를 이룬다. 전족이 수직벽의 목적면 모서리에 이동하는 동안 좌전족을 지면에 유지시키기 위해서는, 좌전족을 모서리점 C로부터 모서리 거리 C_{r2} 에 위치시켜야 하며 아래와 같이 계산된다.

$$C_{r2} = CF = AF \cos(\theta + \phi) \quad (8)$$

윗식에서 $f1$ 은 우족의 처음상을 나타낸다. 만약 수직벽 높이가 몸체각 θ 에 해당하는 수직벽 범위 V_1 보다 적으면, 좌전족은 $C_{r2} + \delta X_1$ 부터 $C_{r2} - \delta X_2$ 까지의 범위에 위치할 수 있다. 만약 전족들이 V_1 에 해당하는 C_{r2}

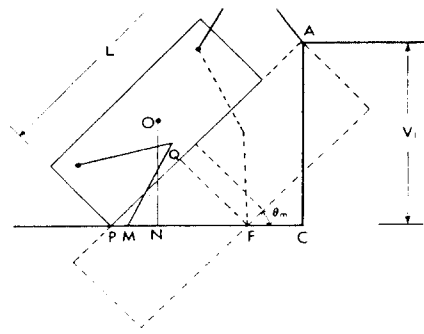


Fig. 3 Forefoot Vertical Range with Maximum Body Angle

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

θ	V_1	C_{r1}	V_2	C_{r2}	C_{rL}	C_{rR}
0	1.219	1.675	1.219	1.1676	1.820	-----
10	1.517	1.755	1.473	1.333	1.588	-----
15	1.650	1.776	1.569	1.146	1.450	0.011
20	1.770	1.781	1.643	0.949	1.300	0.073
25	1.877	1.776	1.693	0.746	1.141	0.145
30	1.969	1.756	1.718	0.537	0.973	0.230
32.5	2.010	1.741	1.720	0.431	0.886	0.279
35	2.046	1.722	1.715	0.324	0.798	0.335
40	2.108	1.675	1.682	0.108	0.616	0.468
42.5	2.133	1.647	1.655	0.050	0.524	0.550
45	2.154	1.616	-----	-----	-----	-----
47.5	2.170	1.581	-----	-----	-----	-----

내에 위치하면, 전족들은 아직도 목적면의 윗 모서리에 도달할 수 있지만 몸체각이 주어진 V_1 에 해당하는 θ 보다 커지게 된다. 몸체각의 변화에 따른 V_1 , C_{r1} , C_{rL} 의 변화가 Table 1에 나타나 있으며 여러가지 특징을 포함하고 있다.

2.1.2 후족의 수직벽 범위

Fig. 4은 후족의 수직벽 범위의 조건을 나타낸다. 몸체의 앞부분을 낮추므로써 점진적으로 몸체가 평형을 유지할 수 있도록 무게 중심점이 수직벽의 연장선상에 존재해야 한다. 후족이 현재면을 떠난후에는 두전족과 몸체 밀바닥으로 지지된다. 만약 몸체밀바닥의 접촉이 허용되지 않을 때에는 V_2 의 길이가 수정되어야 하며 이 경우는 나중에 토의 될 것이다. Fig. 4에서

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

$$C_{r2} = AF \cos(\theta + \alpha) \quad (9)$$

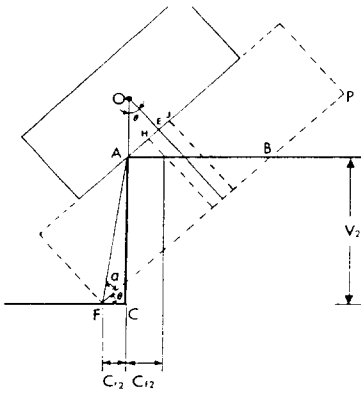


Fig. 4 Hindfoot Vertical Range

여기서

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{2R_{x0}}{(R_{x0} + P_o) - 2(H_o - R_{x0}) \tan \theta} \quad (10)$$

$$AF = \frac{R_{x0}}{\sin \alpha}$$

전족들은 목적면 상의 모서리거리 C_{r2} 의 바깥에 위치해야 하며 아래식으로 표시된다.

$$C_{r2} = \frac{2(H_o - R_{x0}) \tan \theta - (R_{x0} - P_o)}{2 \cos \theta} \quad (11)$$

Fig. 2 과 Fig. 4 를 비교하면, 후족의 수직벽 범위가 전족의 경우보다 $AJ \sin \theta$ 만큼 짧고 그 길이는,

$$\delta V = \frac{2(H_o - R_{x0}) \tan \theta + (R_{x0} - P_o)}{2 \sin \theta} \quad (12)$$

그러므로 후족의 수직벽 범위가 사족이동로봇의 수직벽 횡단 능력을 결정한다. 몸체각 θ 변수에 대한 V_2 , C_{r2} , C_{r2} 의 변화가 Table 1 에 나타나 있다. $\theta = 32.5^\circ$ 에서 V_2 가 최대값 1.71 m 를 가지며, 운동중 몸체각이 적을수록 안정성을 기대 할 수 있으므로 32.5° 이하의 값을 선택해야 한다.

주어진 수직벽 높이 V_2 에 대해서, 만약 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.

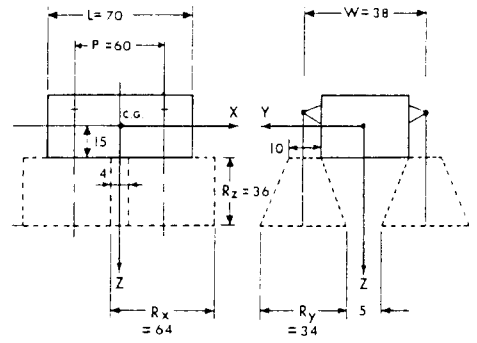


Fig. 5 Dimensions of Quadruped for Walking Up Motion Sequence

2.1.3 수직벽상승 시퀀스

사족이동로봇이 수직벽을 넘을때 네 다리와 몸체의 연속운동에 대해 고찰 될 것이다. Fig. 5 의 4-족이동로봇이 몸체각 30° 를 유지하면서 수직벽을 넘는다고 가정하면, 식 (2)과 (9)에 의해서 두족의 수직벽 범위는 $V_1 = 1.604$ m 와 $V_2 = 1.579$ m 이다. 그러므로 최대 수직벽 높이는 1.604 m 가 된다. 연속 운동의 케이스 스터디를 위해서 1.295 m 의 수직벽이 선택되었다.

Fig. 6 는 몸체각 30° 로 1.295 m 의 수직벽을 넘어가는 4-족이동로봇의 연속 운동을 나타내며 운동의 전체 주기는 두 상으로 나눌 수 있다. 각 상에서, 한쌍의 다리가 현재면에서 목적면으로 이동하며 그림에서 첫상은 시퀀스 1 부터 4 까지를 나타내며 두번째상은 시퀀스 4 부터 14 까지를 나타낸다. 시퀀스 14 에서 마지막 후족이 현재면에서 목적면으로 이동을 마치며 수직벽을 넘는 운동을 종료시킨다. 4-족이동로봇의 경우, 각쌍의 족이 동시에 이동하면 안정성을 기대하기 어려우므로 어느 한족이 이동을 완결한후에 동일쌍의 다른 족을 한족의 측면위치에 동일 길이로 이동시켜야한다.

시퀀스 1 은 수직벽 넘기를 시작할 처음 위치를 나타낸다. 네족은 다리쪽의 중심 위치에 있으며 몸체각 30° 를 만든다. 몸체가 경사를 만든후, 몸체의 전면과 수직벽 사이에 일정 간극이 존재해야 한다.

시퀀스 2 에서 후족들이 모서리 거리 C_{r1} 뒤에 위치해야한다. 그러므로 한후족이 들리기전에 무게중심이 현 지지패턴의 대각선 앞으로 이동되어야한다. 전족의 족이동공간이 목적면의 모서리를 커버할때까지 이과정은 반복 된다.

시퀀스 3 에서 안정성을 유지하면서 좌전족이 들릴 수

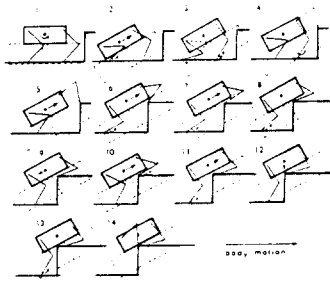


Fig. 6 Lateral Motion Sequence of a Quadruped Walking-Up

있도록 좌후측이 우후측의 앞에 위치시켰다.

시퀀스 4 에서 전족들이 들리이져서 목적면의 상단 모서리에 위치시켰다. 이 시퀀스에서 첫상이 완료되었다.

시퀀스 5 에서 후족들이 극한위치에 도달할때까지 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 테트라포드 걸음법을 적용했다. 몸체 지지를 위하여 항상 두 전족과 한 후족을 반복적으로 이동시켰다.

시퀀스 9 : 후족들이 모서리거리 C_{R2} 내에 위치시키기 전에, 전족들을 목적면 모서리앞 C_f 에 위치시켜야 한다. 그러므로, 무게중심이 지지패턴내 대각선 뒤쪽에 위치 할 수 있도록 몸체를 뒷 방향으로 이동시켜야 한다.

시퀀스 10 에서 전족들이 반복적으로 목적면 모서리부터 C_{R2} 거리만큼 이동했으며, 그후 후족이 다리쪽 한계에 도달할때까지 몸체를 경사면을 따라 뒷방향으로 이동시켰다.

시퀀스 11 에서 후족들을 모서리 거리 C_{R2} (0.906 m) 에 이동시키고 몸체 무게중심이 수직벽 모서리를 통과할때까지 몸체를 경사면을 따라 이동시켰다.

시퀀스 12 에서 몸체 밑바닥이 목적면 모서리를 접촉하여 안정성을 증가시킬때 까지 몸체를 낮춘다.

시퀀스 13 에서 후족들이 반복적으로 목적면으로 이동한다. 몸체바닥이 로봇의 전하중을 지지하고 있으므로 후족들은 안정성을 해치지 않고 이동할 수 있다.

시퀀스 14 는 두번째 상의 완결을 나타낸다. 두번째상이 완결된후, 평지에서 운동할때의 몸체 높이와 평형을 유지하고 정구 걸음꼴을 써서 쉽게 이동 하거나, 계단처럼 다음 장애물이 존재할 경우에는 Fig. 6 의 과정을 다시 반복한다.

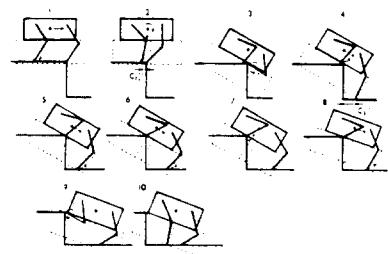


Fig. 7 Lateral Motion Sequence of Walking Down Quadruped

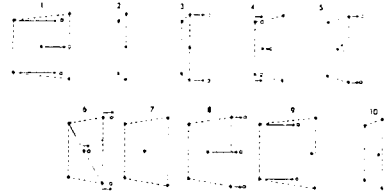


Fig. 8 Support Pattern of Lateral Motion Sequence

2.1.4 수직벽 하강운동

수직벽 하강운동은 상승운동의 역순을 적용하여 해결할 수 있으며, 상승운동의 모든 모서리 거리가 하강운동의 모서리 거리와 같다. 두경우 모두, 모든 모서리 거리의 주요 구속식들(Constraints) 은 아래면에 의해 좌우된다. Fig. 7 은 4-족이동로봇의 30° 의 몸체각으로 수직벽을 하강하는 측면 그림의 시퀀스를 나타낸다. Table 1 에서 몸체각이 30° 일 경우, 최대 수직벽 높이 V_2 는 1.718 m 가 된다. 하강운동 처음상의 후방 모서리 거리는 상승운동 두번째 상의 전방 모서리 거리와 같다. 그러므로 C_{R1} 을 식 (5) 로부터 계산 할 수 있으며 0.230 m 가 된다. 1.718 m 의 수직벽을 30° 의 몸체각으로 하강하는 4-족이동로봇의 이동 시퀀스가 Fig. 7 에 나타나 있으며 Fig. 8 에서는 각 시퀀스의 지지패턴이 나타나 있다.

하강운동중 전족들의 다음 가능 착지점들을 확보하기 위하여, 각 시퀀스마다 계속 반복하여 몸체각을 감소시킨다. 만약 처음 몸체각 θ 가 주어진 수직벽 높이의 최대치에 가까우면, 하강운동중 많은 몸체각의 변화와 많은 족이동운동이 요구된다. 이러한 예가 다음의 연속되는 그림에 잘 나타나 있다.

시퀀스 1 : 하강운동을 위한 시작 위치로 모든 족은 다리쪽의 중심에 위치하고 전족들이 수직벽의 모서리에

할 때까지 몸체를 전방으로 이동시킨다. 그후에, 후족들을 모서리거리 C_{r1}' 만큼 이동시킨다. 이 C_{r1}' 은 식 (11)의 C_{r2} 와 같은 값을 가진다.

$$C_{r1}' = \frac{2(H_0 - R_{x0}) \tan \theta - (R_{x0} - P_0)}{2 \cos \theta} \quad (13)$$

$C_{r1}' = 0.230$ m 이며 후족들은 이 모서리 거리 내에 존재할 수 없다.

시퀀스 5 : 전족들을 지지패턴내 최대 위치에 이동시킨 후 무게중심이 새 지지패턴의 대각선에 도달할때까지 경사면을 따라 무게중심을 이동시킨다. 이 시퀀스는 아래의 세가지 조건들이 만족될때 까지 반복된다.

1. 후족 이동 공간의 전방하단 모서리가 목적면에 연결.
2. 무게중심이 전족과 목적면에 있는 후족 이동 공간의 후방경계 사이의 중심점 보다 앞에 위치.
3. 몸체의 후방 모서리가 수직벽 모서리를 통과.

시퀀스 6 에서 전족들을 전방 경계에 이동시킨 후에 무게중심이 새 지지패턴의 대각선에 도달할때 까지 무게중심을 전방으로 이동시킨다. 실제로 이 운동은 시퀀스 5의 반복운동이다. 시퀀스 7 에서 몸체를 시계 반대 방향으로 회전시켜야 한다. 시퀀스 8 에서 전족들을 전방 경계에 이동시킨후 시퀀스 5 에서 언급한 세가지 조건을 만족할때 까지 몸체중심을 전방으로 이동시킨다. 시퀀스 9 에서 후족들을 현재면에서 목적면으로 이동시키며 시퀀스 10 은 하강운동의 완결을 나타낸다.

3. 결 론

네개의 매니플레이터를 가진 4-족이동로봇이 운동중 장애물을 만났을때, 4-족이동로봇 자체의 수치들과 로보트와 장애물 간에 존재하는 수직벽 거리와 모서리 거리를 측정, 비교해서 최소시간에 장애물의 횡단 가능성 여부 결정과, 가능 경우의 횡단 시이퀀스를 순간적으로 계획할 수 있다. 운동중 안정성 유지 문제 때문에 6-족과 8-족 이동로보트에 관한 연구에 비해서 4-족 이동로보트 연구가 미진했던바 본 연구 방법에 의해서 4-족이동 로보트의 운동중 안정성 문제 해결에 기여 할 수 있다. 장애물들을 빠르게 넘으며 전체다리의 복잡한 상호운동을 효율적으로 제어하는 척추동물들의 구조와 운동들을 4-족이동로보트 연구에 유용하게 응용할 수 있는바 추후 연구 과제로 남아있다.

1. Bekker, M. G., *Introduction to Terrain Vehicle System*, University of Michigan Press, Ann Arbor ,Michigan, 1969.
2. McKenney, J. D., "Investigation for 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. McGhee, 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 Conf. 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. 248, No. 2, January, pp. 44-53, 1982.
10. Leary, W. E., "Robot named Dante to Explore Inferno of Antarctic Volcano," *The New York York Times*, Dec. 8, 1992.
11. Fujita, H., "Present and Future Research Trend Trend of Modern Micromachining Technology," *대한기계학회지* Vol.33, No.6, pp.495, 1993.
12. 홍예선, "4족 휴먼 로봇의 지능형 보행제어 연구", *대한기계학회지*, Vol.34, No.10, pp.787-795, 1994.
13. McGhee, R. B., *"Vehicular Legged Locomotion,"* To appear in *Advances in Automation and Robotics*, Ed. by G. N. Saridis, Jai Press, 1983