



다각 보행 로봇의 제어 알고리즘

김성동 · 박성혁 · 황승구

한국전자통신연구소 연구원

I. 머리말

로봇의 이동 기능은 대개 바퀴, 궤도 혹은 다리로 구분되어 질 수 있다. 바퀴를 가진 로봇은 지형이 평탄하거나 견인력이 충분하면 좋은 성능을 나타내며, 궤도를 따라 움직이는 로봇은 지형의 경사가 급하지 않거나 장애물이 없는 경우에 잘 동작한다. 본고에서 서술하려는 다리를 가진 로봇(일명: 보행 로봇)은 바퀴나 궤도를 이용하는 로봇보다 비평탄면이나 장애물(계단, 구멍, 기둥 등)이 있는 지형에서 특히 우수한 이동 능력을 갖는다. 또 연속적인 지지경로를 필요로 하는 바퀴에 의한 로봇과는 달리, 보행 로봇은 지지를 하는데 최적화된 독립적인 착지점만 필요로 하기 때문에 방향전환이 용이하고 장애물을 쉽게 넘어가거나 우회할 수 있다."

이러한 보행 로봇의 응용 분야로서는 다음과 같은 것을 들 수 있다.

- (1) 원자력 발전소등 오염 가능 지역에서의 응급 처치, 감시, 경보 및 보수작업
- (2) 우주 혹성에서의 무인 작업
- (3) 산림 및 산업 화재 소화작업

(4) 극한 기후에서의 작업

(5) 의료계에서의 보조 수단

보행 로봇을 구현하기 위해서는, 각 관절의 움직임을 제어하는 시스템, 지형 지물을 인식하여 나아갈 경로를 결정하는 시스템, 로봇의 속도나 자세 등에 따라 다리의 시퀀스를 계산하는 시스템 등의 개발이 필수적이다.

다각 보행 로봇의 세부 개발 분야로는 아래와 같이 세가지로 나눌 수 있는데

- (1) 기계적 구조 분야...3축 자유도를 갖는 다리의 구조, 에너지 효율을 고려한 다리의 구조, 역학 및 운동학의 분석, 모델화등
- (2) 제어분야...다리의 시퀀스 결정, 각 다리의 서보 제어, 균형 및 안정도 유지, 속도제어
- (3) 지능 및 센서 분야...장애물 인식, 경로의 판단, 장애물 통과시 다리의 위치 결정

여기서는 제어분야와 관련하여 걸음새(gait)의 종류 및 표시 방법에 대해서 2장에서 언급하고, 3장에서 1각 및 2각 제어 알고리즘을 통해 역학(dynamics)이 고려된 다리의 시퀀스 제어에 관해서 알아보며, 4각 이상의 다각 로봇에 대한 제어문제 및 제어기법에 대하여 4장에서 서술하고자 한다.

II. 걸음새, 안정도 및 지형 적응

가. 걸음새

동물이나 보행 로봇의 발을 놓는 반복적인 패턴을 걸음새라고 한다. 걸음새는 지면에 발이 놓여 있거나, 지면으로부터 발이 떠있는 두가지 상태로 나누어 지는데, 지면에 놓여 있는 다리는 몸체를 지지하고 앞으로 추진시키며, 공중에 떠있는 다리는 이동시 다리와 지면과의 충돌을 피하기 위하여 다리의 길이가 짧게 조정되어 진다. 걸음새에 흥미를 가지고 연구하는 이유는 최소의 에너지로 더 나은 이동성을 가지는 보행 로봇을 개발하기 위한인데, 걸음새 연구의 세가지 접근 방법은 아래와 같다.

- (1) 직선 걸음새: 걸음새의 분류 및 안정도 분석
- (2) 커브길이나 비평탄면에서의 걸음새: 직선걸음새의 확장
- (3) 역학을 고려한 걸음새: 빠른 속도에서의 균형 유지 및 효율적 에너지소비

걸음새는 시간과 거리의 함수로 표현되어 질 수 있는데, 걸음새의 표시 방법에는 gait diagram 과 footfall formula 등의 그림에 의한 방법과 수량표현 (quantitative description)에 의한 방법등으로 나눌 수 있다.

Gait diagram (그림 2-1(a))은 연속적인 시간에 대하여 발이 지면에 놓여 있는 시간동안의 상태가 막대형태로 표시가 되며, footfall formula는 지면에 놓여 몸체를 지지하고 있는 상태를 점으로 표시하는 방법이다. 수량적인 표현에는 stride, stride length, duty factor, relative phase 등이 이용된다.

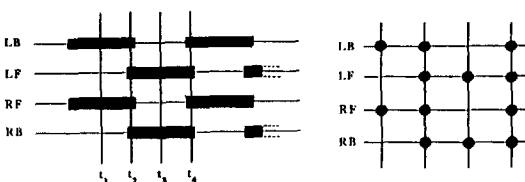


그림 2-1. (a) Gait Diagram, (a) Footfall Formula

한 다리의 이동으로부터 같은 다리의 다음 이동할 때까지의 완전한 한 주기를 stride라 하며, 한 stride 동안에 몸체가 이동한 거리를 stride length라 한다. 한 주기에 대한 특정한 다리가 지면에 놓여 있는 시간의 비를 duty factor (β)라고 하는데, 정적 균형을 유지하며 보행을 하기 위한 최적 duty factor는 4각인 경우가 0.75, 6각인 경우가 0.5 이며, 동물은 각 다리의 duty factor가 거의 같다. Relative phase는 선택된 기준 다리가 지면에 놓인 것을 0으로 하고 한 stride 주기를 1로 두었을 때, 한 stride 주기에 대한 각 다리가 지면에 닿는 시간비이다.²⁾

걸음새의 종류는 amble, trot, pace, gallop, bound 등이 있는데, 그림 2-2는 relative phase로 나타낸 걸음새들이다. 이 그림에서 amble일 경우, duty factor가 0.5인 gait diagram을 표시해 보면 그림 2-3과 같이 된다.⁴⁾ 이 결과를 보면 항상 두 다리는 지면에 놓여 있음을 알 수 있으며, 위의 방법

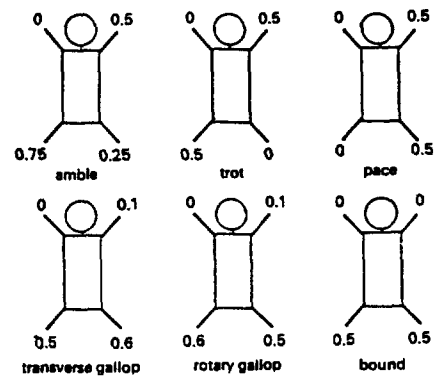


그림 2-2. Relative Phase로 나타낸 걸음새

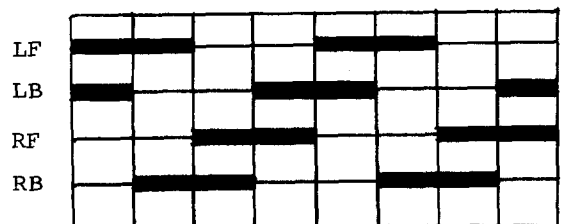


그림 2-3. Amble의 Gait Diagram ($\beta=0.5$)

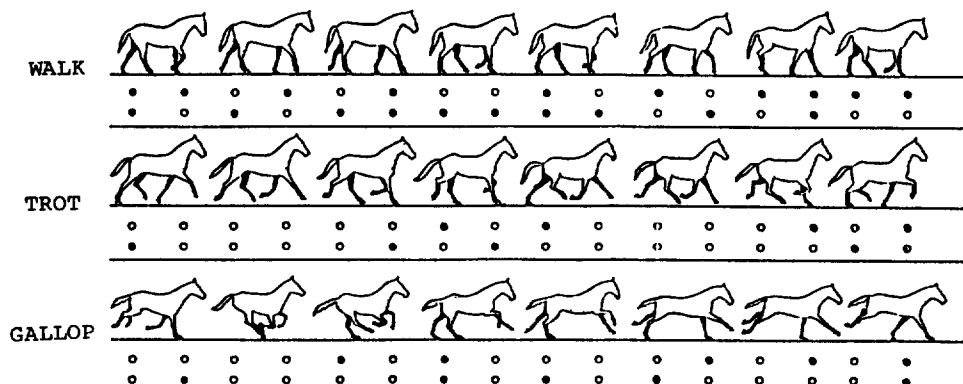


그림 2-4. 말의 걸음새

으로 걸음새들을 분석하여 보면 trot인 경우는 다리 앞과 뒤쪽의 대각선 방향으로 짝을 이루어 빨리 움직이며, pace인 경우는 오른쪽이나 왼쪽 한 쌍의 다리를 동시에 번갈아 움직이며, gallop인 경우($\beta < 0.5$)는 네발이 지면에 닿거나, 지면에서 떨어지는 시점이 각각 다름을 알 수 있다.

나. 동물의 걸음새

동물의 걸음새에 관한 과학적인 연구는 1878년 Muybridge가 trot로 가는 말이 동시에 4발을 모두 땅에서 떼느냐 안떼느냐 하는 문제를 밝히는데서부터 시작되었다. 발의 단계적 움직임을 찍은 Muybridge의 사진에 의하면 그림 2-4에서 보는 바와같이 말이 걸을 때는 두 발이 지면에 닿아 있으며, trot나 gallop으로 달릴 때는 주기적으로 네발이 지면으로부터 떨어질 때도 있음을 알 수 있다.⁵⁾

곤충은 여섯개의 다리를 가지고 있는데, 교호 삼각 모양(alternating tripod)과 물결모양(wave gait) 등의 두가지 걸음새로 나눌 수 있다.⁶⁾ 전자는 빠른 걸음이고, 후자는 느린 걸음일 때의 경우인데 그림 2-5에 나타나 있는 바와같이 적어도 항상 세다리가 이상이 지면에 닿아 있으므로 균형을 잘 유지할 수 있다. 이 때, 흰 부분은 발이 지면으로부터 떨어진 상태를 나타낸 것이고, 검은 부분은 발이 지면에 놓여 있음을 나타낸 것이다.

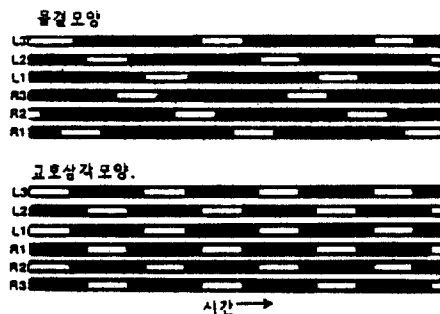
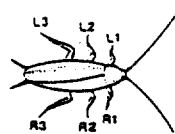


그림 2-5. 곤충의 Gait Diagram

그림 2-4, 2-5에서 보는 바와 같이 평탄한 지형에서의 동물 걸음새는 일정한 형태를 유지하지만, 비평탄 지형에서는 일정한 걸음새로 걷지 않는다는 것을 Pearson과 Franklin이 메뚜기 보행의 연구에서 영화 촬영 분석기법을 이용하여 알아 내었다. 그림 2-6은 메뚜기가 계단을 오를때 발목의 궤적(trajjectory)을 나타낸 것인데, 검은 원의 궤적은 발이 계단에 닿은 경우이며, 흰 원의 궤적은 계단의 수직면에 닿지 않고 다음 계단으로 넘어간 경우이다. 이와 같이 상황에 따라 발이 지면에 닿아 있

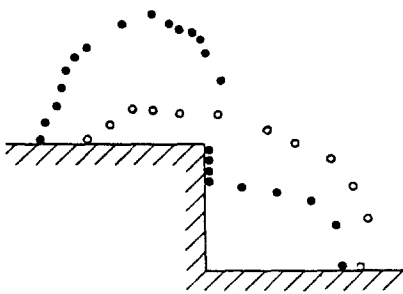


그림 2-6. 메뚜기의 발목 궤적(계단을 오를 때)

는 시간이 각각 다르므로 일정한 걸음새의 형태를 발견할 수 없다?

다. 안정도 및 지형적응도

보행 로봇에서 중요한 고려 대상중의 하나는 넘어지지 않으면서 안정도(stability)를 가지며 이동하는 것인데, 이동 메카니즘이 불안정하다는 것은 중력과 관성력 때문에 무게중심이 지지기반(몸체를 지지하고 있는 다리들을 연결한 다각형) 바깥에 있는 경우이다. 안정도는 정적인 경우와 동적인 경우가 있는데, 정적인 경우는 그림 2-7에 보는 바와 같이 안정된 상태에서 다음 안정된 상태로 천이 하는 것으로 속도가 느린 때가 대부분이다. 동적인 경우는 안정 상태에서 불안정 상태가 되면, 균형 유지를 하기 위한 제어를 거쳐 다시 안정 상태에 이르게 하는 것과 뿔운동 로봇과 같이 항상 불안정 상태이기 때문에 계속 뛰어 안정을 유지하는 것

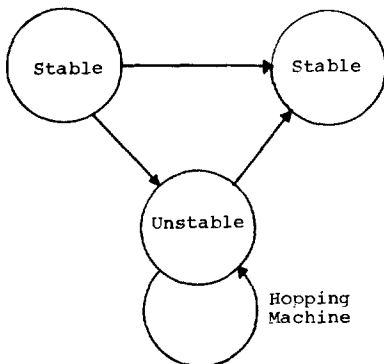
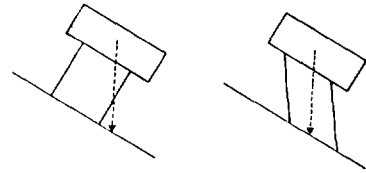


그림 2-7. 보행 로봇의 안정도



(a) 불안정한 상태 (b) 안정한 상태

그림 2-8. 지형 적응의 예

이 있는데, 빠른 속도로 이동하는 보행 로봇트가 여기에 속한다.

다각 보행 로봇에서 지형 적응도(terrain adaptability)는 발놓을 위치를 잘 선택하고 효율적으로 다리의 길이를 조절하는 것이다. 효율적으로 다리의 길이를 조절하는 목적은 에너지의 소비를 줄이고 부드럽게 움직이기 위하여 몸체가 예정된 진로를 벗어나는 것을 최소화하고, 지면의 경사에 관계 없이 몸체의 방향을 유지하며, 경사가 급한 지형(그림 2-8)에서도 안정되게 견도록 하는 것이다?

Ⅲ. 역학을 고려한 제어

역학은 균형을 능동적으로 시스템에 부여하는 중요한 역할을 하는데, 정적으로 몸의 균형을 유지하는 시스템은 지지하는 다리에 의해서 형성된 다각형안에 무게중심을 놓이게 함으로써 시스템의 불안정과 수평 가속도의 발생을 방지한다. 동물이 천천히 걸을 때는 정적 균형을 유지하나, 주행 또는 빠른 보행시는 역학을 이용하여 능동적 균형을 유지한다? 이러한 능동적 균형유지에 관한 최초의 기제는 1951년 Claude Shannon이 만든 자동으로 제어되는 전도추(inverted pendulum)인데 이는 작은 수레 위에 세워진 전도추를 수레를 움직여서 똑바로 세우는 것으로, 1965년 스탠포드 대학의 Cannon이 두개의 전도추를 동시에 균형잡는데 성공했다. Cannon은 이 실험에서 수레 모터의 힘과 전도추의 길이가 주어졌을 때 수레를 움직이는 한가지 힘으로 수레 위치는 물론 두개의 전도추각을 제어하였다.

이후, Shaffer와 Cannon은 탄력성이 있는 전도추의 균형을 잡는 연구를 공동으로 진행시켰으며, 이의 결과는 1각 및 2각 보행 로봇의 균형 문제를 다루는데 있어서 기본이 되었으나, 불행하게도 아직까지 Cannon의 분석 결과를 좀 더 복잡한 보행 로봇의 경우에 적용하여 발전시키지 못했다⁹⁾

가. 1각 로봇의 제어 알고리즘

1각 로봇(그림 3-1)은 카네기 멜론 대학의 Raibert가 전도추 모델을 이용하여 뛰운동 로봇(hopping machine)를 제작하였다. 이 뛰운동 로봇은 크게 몸체와 다리로 이루어져 있으며, 몸체의 관성능률은 다리의 그것보다 크고, 공진 반발 운동을 할 수 있도록 스프링을 다리 끝에 가지고 있다. 에너지 저장이나 소비는 엉덩이(몸체와 다리의 연결 부분)에 위치한 구동기(hydraulic actuator)에서 회전력을 발생시킴으로써 가능하며, 구동기는 전후 및 좌우 방향을 결정하기 위하여 2개가 장치되어 있다.

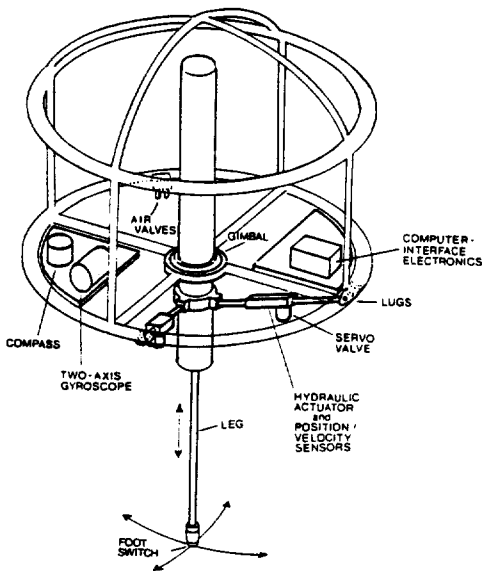


그림 3-1. 1각 로봇의 모델

그림 3-2는 뛰운동 로봇의 상태 천이도이다. 비행(flight) 하고 나서 지면에 착륙하게 되면 다리

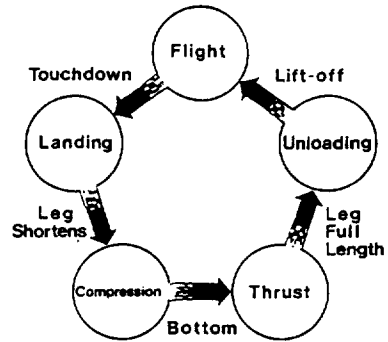


그림 3-2. 뛰운동 로봇의 상태 천이도

가 짧아지고 compression 상태가 되며, 여기서 thrust 상태로 천이 하면 다리가 길어지면서 지면을 박차고 이륙하여 비행 상태가 된다. 이러한 순서로 1각 로봇의 뛰운동은 반복적으로 수행 되어진다. 1각 로봇은 한 다리로 지지하기 때문에 항상 불안정 상태에 있게 되므로 동적 안정을 고려하여 계속적으로 제 자리를 뛰거나 여러 방향으로 달릴 수 있도록 하였는데, 이동 알고리즘은 뛰 높이(hopping height), 전진 속도(forward velocity) 및 몸체의 자세(body attitude) 제어로 나눌 수 있다. 뛰 높이는 지면에 다리가 놓여 있을 때 thrust된 양에 따라 제어 되며, 전진 속도는 다음 발 놓을 위치의 선택에 의해서 제어되어 지고, 몸체 자세의 제어는 다리가 지면에 있는 동안 엉덩이 부분의 구동기를 동작시킴으로써 몸의 자세를 유지한다³⁾.

나. 2각 로봇의 제어 알고리즘

인간과 같은 2각 형태의 걸음새에서 나타나는 생리학과 운동학에 대한 연구는 활발히 진행되어 왔으나, 2각 역학에 관계되는 광범위한 결과를 포함하는 논문은 지금까지 거의 없었다. 그 이유는 많은 자유도를 가진 연계 시스템의 동적 특성이 복잡하기 때문이다¹⁰⁾. 대부분의 2각 이동 시스템에 대한 연구는 운동학과 동력학을 기초로 한 간단한 관찰이나 수학적인 분석으로 이루어졌다. 이러한 기계는 인간보다 이동성이 부족하고 비안정성 문제가

야기된다¹¹⁾. 이에따라 최근에는 Lagrangian 역학, 상태 변수 기법 및 현대 제어이론을 2각 로봇 이동의 연구에 적용하여, 효과적인 안정화 제어 설계를 용이하게 하고 있는 추세이다.

1983년에 Kato와 그의 동료는 동적 걸음새를 유사하게 사용하는 2각 보행 로봇을 만들었는데, 전체적으로 10개의 자유도를 갖고 다리는 수압에 의해 구동되며, 전도추 모델이 기울어짐 동작의 구현에 사용되었다. 한편, 1984년에 Takamishi등은 Kato의 로봇과 유사한 걸음새를 갖고 1분에 0.5m의 긴 걸음을 12번 옮기는 2각 보행 로봇을 만들었는데, 특히 동적 변이기(dynamic transfer phase)라는 개념을 도입하여 복잡한 제어 시스템 없이도 동적 운동 특성을 충분히 만들어 낼 수 있다는 가능성을 제시하였다.

1980년과 1984년에 Miura와 Shimoyama가 능동적으로 균형을 잡는 조그마한 보행 로봇을 만들었는데, 이는 다리의 길이가 변하지 않기 때문에 엉덩이가 다리를 들어주는 메카니즘(사람이 대발을 타고 걷는 것을 닮았다 하여 stilt 2각 로봇이라함)으로 되어있고, 전도추 모델과 선형 케환 제어를 합하여 균형을 이루도록 하였다¹²⁾.

그림 3-3은 2각 보행 로봇의 간단한 모델을 나타낸 것인데, (a)는 자유도가 5인 일반적인 2각의 모델로 운동 방정식이 복잡하며, (b)는 무릎 관절이 없는 것으로 수학적 모델은 간단하나 다리를 전진방향으로 옮기는데 문제가 있다. 두다리로 걸을 때는 한다리가 지지를 하고 다른 한다리는 앞으로 나아가는데, 각 걸음새의 주기는 아래와 같은

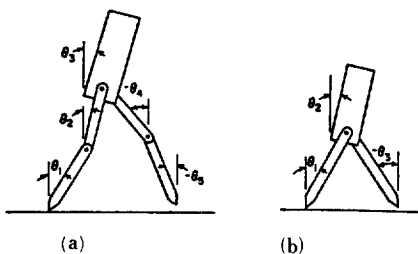


그림 3-3. 간단한 2각 보행 로봇의 모델

네단계로 나눌 수 있다.

- 오른다리 지지 단계
- 오른다리에서 왼다리로 지지 변환단계
- 왼다리 지지 단계
- 왼다리에서 오른다리로 지지 변환단계

이상의 각 단계별로 수학적인 모델을 세워 이 모델을 분석함으로써 시스템의 안정, 제어 및 측정을 용이하게 했다⁹⁾.

IV. 다각 로봇의 제어

보행 알고리즘의 설계 문제는 첫째로 운동 방정식을 각 관절에 있는 구동기 토오크에 관해 세우고, 둘째로 이 운동 방정식을 풀어 관절 토오크와 좌표 및 관절각을 알아 낸 후, 셋째로 출력을 선정하고 넷째로 바람직한 운동 특성을 갖는 좌표계를 얻기 위한 제어 법칙을 찾는 것으로 총괄 될 수 있다. 제어 목적상, 특정 운동 패턴을 만드는 각 관절각과 토오크를 만들어 내기 위하여 시스템의 특성과 상태의 함수로써 토오크를 산출하도록 제어 법칙이 선택되어야 한다.

다각 로봇의 걸음새 및 다리 서보 메카니즘을 제어하기 위한 알고리즘의 출력은 다음과 같은 4가지이다.

- (1) 시간함수로 미리 기술된 관절각 집합
- (2) 무게 중심이나 몸체각 같은 주요 매개변수의 미리 기술된 운동
- (3) 에너지나 가속도 같은 양을 최적화하는 경로
- (4) 외란에 대한 로봇의 안정도

이론적으로 시간 함수에 대한 토오크 집합이 입력으로 주어질 때, 관절각이나 다른 공간 매개변수의 운동을 찾아내는 것과 무게중심 같이 직접 측정될 수 없는 변수의 경우를 포함해서 기계적인 시스템의 운동을 관찰하고 모델화하는 것이 제어 목적의 또 다른 측면이라 할 수 있다. 이런 관점에서 다각 로봇의 제어 문제는 아래와 같이 분류된다.

- (1) 몸체의 이동경로를 정의함

- (2) 경로를 세분하여 각 세부 경로별로 관절각 궤적을 계산
- (3) 각 관절각 궤적을 만들어 내는 관절 궤적을 산출함
- (4) 관절 궤적에 해당하는 새로운 다리 이동점을 알아냄

한편 (2)항과 (3)항을 같이 연결하면 선택된 몸체 궤적에 해당하는 관절각과 토오크 패턴이 여러가지 있을 수 있어 제어 구조가 더 복잡해 질 수 있다. 이 밖에도 compliance문제, 각 다리에 부하를 고르게 할당하는 문제, 서로 다른 다리에서 생기는 반력을 피하는 문제와 파워 소비를 최적화하는 것들이 제어상 고려해야할 사항으로 들어간다.

걸음새는 속도나 안정도등과 같은 어떤 성질을 최적화하도록 미리 선택되어야 하는데, 다음에서 평탄하고 장애물이 없는 지형을 똑바로 직진하는 경우에 최적으로 알려진 물결 걸음새와 장애물이 있는 지형에 적용하여 보행할 수 있는 자유(free) 걸음새에 대하여 다각 보행 로봇의 경우에 비추어 살펴보자.

가. 물결 걸음새

평탄한 지형을 직진하는데 세로 안정도(longitudinal stability)를 유지하는 걸음새이다. 그림 4-1에서 보듯이 왼쪽 앞다리가 지면에 닿는 시점을 기준으로 각 다리에 대해서 상대적인 위상을 0과1사이로 정하면, 오른쪽 다리들의 위상은 대응되는 왼

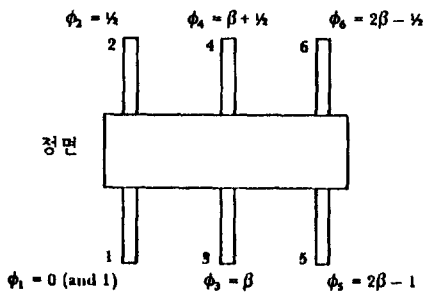


그림 4-1. 물결 걸음새를 하는 6각 로봇의 다리 번호 및 상대 위상

편 다리의 위상에 비해서 0.5 만큼 늦고 모든 다리의 β 가 일정하다. 이 걸음새는 Bessonov와 Umnov에 의해 β 가 0.5보다 크거나 같을 때, ϕ_3 가 β 이고 ϕ_6 가 $2\beta - 1$ 인 경우에 세로 안정도가 최적화됨이 증명되었다.

그림 4-2는 β 가 0.75일 때의 gait diagram인데 이를 살펴보면 왼쪽 앞발(1번)과 오른쪽 뒷발(6번)의 위상 변화와 오른쪽 앞발(2번)과 왼쪽 뒷발(5번)의 위상 변화가 서로 같음을 알 수 있고 한 순간에 지지하고 있는 다리의 수가 넷 혹은 다섯임을 볼 수 있다. 이런 다리의 수는 β 의 크기에 따라 변하는데, 4각 로봇의 경우 β 가 0.75일 때 에너지 효율 측면에서 가장 유효한 물결 걸음새를 이행한다고 알려져 있다.²⁾

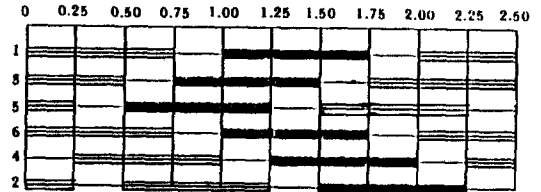


그림 4-2. 물결 걸음새를 하는 6각 로봇의 Gait Diagram

나. 자유 걸음새

지형이 불규칙하고 평탄하지 않을 때 로봇트는 평탄 지형에서처럼 정칙 보행(regular walking)을 할 수 없다. 이런 경우 다음에 놓여질 발은 어떤 특정한 최적화 기준에 의해 선택되어야 하는데, 그 모양과 제어시에 고려해야할 사항은 사람이 암벽 등반을 할 때 취하는 상황과 같다. 이런 종류의 걸음새를 자유 걸음새라 하며 이에 대한 연구는 Kugushev와 Jaroshevskij를 비롯해 McGhee와 Iswandhi에 의해 진행 되었는데, 후자는 정적 보행 안정도가 유지되면서 장애물이 있는 평탄 지형을 천천히 걷는 걸음새를 가지는 다각 보행 로봇에 대하여 연구하였다.³⁾

자유 걸음새를 구현하기 위해서는 각 다리가 안

정도를 유지하면서 몸체가 이동할 수 있는 최대 거리로 정의되는 운동 여유(kinetic margin)를 이용해야 한다. 즉, 각 다리에 대한 운동 여유를 비교하여 지지하고 있는 다리 중에서 먼저 들어야 할 다리(운동 여유가 가장 작은 다리)를 선택하고 이 다리가 다음의 새 다리로 대치되어 다음 동작으로 전환할 때는 운동 여유가 가장 큰 다리를 선택하는 것이다. 이동할 다리와 놓여질 위치를 결정하기 위해서 현재 들려진 모든 다리에 대해서 유효한 footholds를 시험해 볼 필요가 있다. 따라서, 이동할 지형을 이동 가능 지형과 불가능 지형으로 나누고 각 다리의 운동 여유를 고려한 이동 영역안에서 이를 계산하는데 일반적으로 다각 보행 로봇의 경우, 제어 알고리즘은 지면에 닿아 있는 다리의 수를 되도록이면 최소로 하도록(정적 안정도 때문에 3개 이상) 설계된다. 그림 4-3은 간단한 자유 걸음새 알고리

즘의 흐름도인데 특정 걸음 패턴에 대해 안정도가 상실 될 때 dead lock에 빠질 위험이 있다.

자유 걸음새의 문제점은 속도가 낮고 에너지 측면에서 비효율적인 것 외에도 위에서 언급했듯이 dead lock 상황의 발생을 들 수 있는데, Hirose는 4각 보행 로봇의 구현에서 이를 그림 4-4에서처럼 3단계로 나누어 레벨 B₂에서 이런 문제점을 해결하였다.¹⁴⁾ 이 알고리즘의 기본은 자유 걸음새를

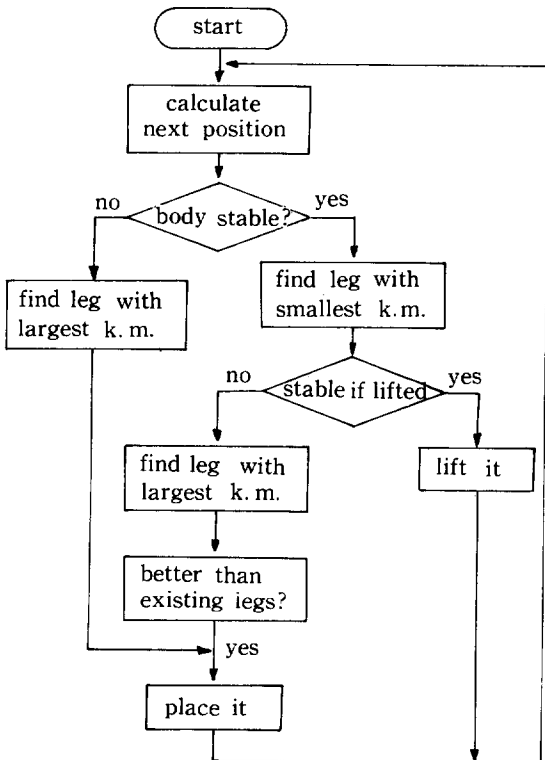


그림 4-3. 자유 걸음새 알고리즘

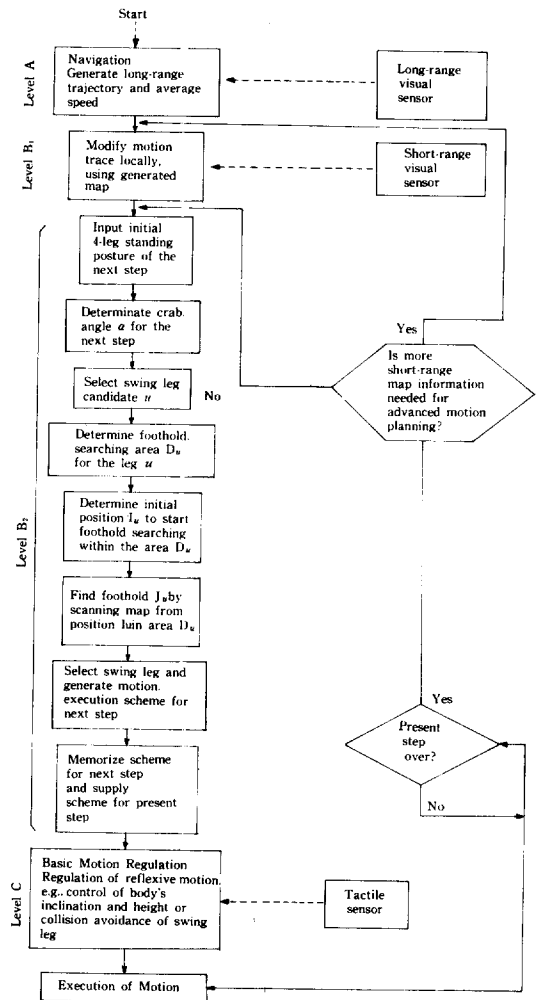


그림 4-4. 4각 보행 로봇의 제어 흐름도(Hirose)

정칙의 최적화된 걸음새(crawl gait)에 되도록 가깝게 하는 것이다. 즉, 한 다리를 앞으로 옮기는 경우에 정적 안정도가 유지되면서 다음에 움직일 다리에 대한 foothold search area를 줄이는 방향으로 다리의 위치를 선정한다.

그림 4-5는 오하이오 주립대에서 제작한 6각 보행 로봇의 제어 흐름도이다. 상위 부분의 제어는 사람이 연속 변수(continuous variable)를 입력하기 위해 이차원 조이스틱과 동작모드 선택 버튼을 사용하고, 속력과 회전 곡률이 조이스틱 입력이 된다. Motion Planner 프로그램은 조이스틱 명령을 몸체의 특정한 위치, 방향, 속도 및 각속도로 변화시켜준다. 다음 제어 단계인 Rate Command Generator는 최적 걸음새 패턴의 틀안에서 다리 끝의 속도를 결정한다. 다리끝의 속도가 관절의 속도율로 바꾸어 지고 나면, 서보 제어단계에서 이상적인 각 속도율을 만들기 위해 모터 전압을 생성한다. Force Command Generator는 로봇트가 평탄치 못한 지면을 걸을 때, 힘을 감지하여 에너지 비를 줄이고 안정성을 높이기 위하여 절단된 힘을 동적으로 변환시켜 주는 부분이다.¹⁵⁾

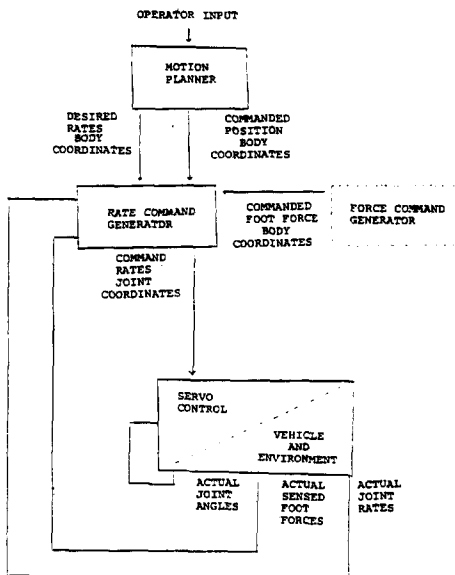


그림 4-5. 6각 보행 로봇의 제어 흐름도(OSU)

다. 방향 전환

방향 전환을 하기 위한 가장 간단한 방법으로는 걸음새 구현부와 독립된 조향장치(steering mechanism)를 갖는 것이다. Komatsu의 수중 작업용 octopod(이름: ReCUS)의 경우는 네다리를 가진 몸체 두개를 수직축에 대해 서로 회전 할수 있도록 함으로써, 그림 4-6과 같이 한 몸체의 네다리로서 있고 다른 몸체를 틀어 방향을 전환한다.¹⁶⁾ 교호 삼각 걸음새로 걷는 6각 로봇의 경우는 그림 4-7처럼 무릎에 대해서 그 아래 다리가 수직으로 스윙하면서 몸체를 돌려 방향을 전환하는데 스윙하는 두다리의 반대편 다리를 축으로 회전하는 구조가 된다. 그림에서 빗금친 부분이 지지하고 있는 다리이며 왼쪽으로 돌 경우를 나타내고 있다.

한편 다리가 3축 이상의 자유도를 갖고 진행할 궤적을 계산해 낼 수 있을때, 몸체에 대한 상대적인 각 발의 궤적을 계산하고 이를 다리 서보 메카니즘에 적용시킴으로써 보다 발전된 방식으로 방향 전환이 가능하다. Orin은 몸체의 속도, 전환율(rate of turing)과 현재 발의 좌표에 대한 함수로써

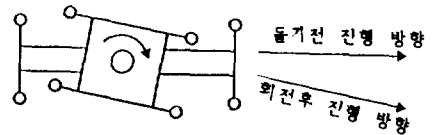


그림 4-6. ReCUS의 조향 메카니즘

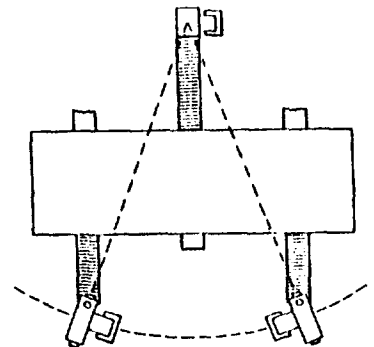


그림 4-7. 6각 로봇의 조향 메카니즘

몸체에 대한 상대적인 발의 속도를 계산한 바 있다.¹⁷⁾

5. 맺는말

지금까지 제어 기법을 다루기 전에 미리 선정되어야 할 걸음새에 대해서 정의 및 종류를 살펴 보았고 제어 대상이 되는 다각 보행 로봇의 제어 알고리즘에 대해서 역학을 고려한 1각, 2각의 경우와 자유 걸음새를 취하는 4 각 및 6 각 로봇에 대해서 알아 보았다.

그러나 보행 로봇이 실용적이 되기 위해서는 무거운 하중을 지탱할 수 있을 뿐만 아니라 속도 및 균형, 안정도를 높일 수 있도록 다리가 구조적으로 설계되어야 하며, 독립된 전원을 갖고 이동이 용이하도록 소형이고 경량이면서도 강력한 힘을 낼 수 있는 구동기가 필요하다. 또 작업을 하기 위해서는 팔(manipulator)을 가져야 하며, 멀리 있는 장애물은 물론 다리 근처에 있는 장애물을 독립적으로 판별해서 종합할 수 있는 시각 기능도 갖추어야 한다. 따라서 고성능의 보행 로봇을 구현하기 위해서는 제어 알고리즘뿐만 아니라 기계, 컴퓨터 및 센서 기술이 더욱 종합적으로 발전되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- 1) 황승구, 김성동, 박성혁, "보행 로봇의 개괄적 소개," 전자통신 동향분석, Vol. 2-2, 1987.
- 2) D. J. Todd, Walking Machines: An Introduction to Legged Robots, Anchor Press, 1985.
- 3) M. H. Raibert, Legged Robots that Balance, MIT Press, 1986.
- 4) R. M. Alexander, "The Gaits of Bipedal and Quadrupedal Animals," Int. J. Robotics Research 3,

- pp. 49~59, 1984.
- 5) M. H. Raibert, and I. E. Sutherland, "Machine that Walk," Scientific America 248, pp. 44~53, 1983.
- 6) K. Pearson, "The Control of Walking," Scientific America, pp72~86, 1986.
- 7) K. G. Pearson, and R. Franklin, "Characteristics of Leg movements and Patterns of Coordination in Locusts Walking on Rough Terrain," Int. J. Robotics Research 3, pp. 101~112, 1984.
- 8) M. Vukobratovic, Y. Stepaneko, "On the Stability of Anthropomorphic Systems," Mathematical Biosciences 14, pp. 1~38, 1972.
- 9) H. Hemami, and G. L. Golliday, "The Inverted Pendulum and Biped Stability," Mathematical Biosciences 34, pp. 95~105, 1977.
- 10) F. Gubina, H. Hemami, and R. McGhee, "On the Stability of Biped Locomotion," IEEE Tr. Biomedecal Engineering, Vol. BME-21, No. 2, pp. 102~108, 1974.
- 11) C. Golliday, Jr., and H. Hemami, "An Approach to Analyzing Biped Locomotion Dynamics and Designing Robot Locomotion Controls," IEEE Tr. AC-22, No. 6, pp. 963~972, 1977.
- 12) H. Miura, I. Shimoyama, "Dynamic Walk of a Biped," Int. J. Robotics Research 3, pp. 60~74, 1984.
- 13) R. B. McGhee, and G. I. Iswandi, "Adaptive Locomotion of a Multilegged Robot over Rough Terrain," IEEE Tr. SMC-9, pp. 176~182, 1979.
- 14) S. Hirose, "A Study of design and control of a Quadruped Walking Vehicle," Int. J. Robotics Research 3, pp. 113~133, 1984.
- 15) C. Klein and R. Briggs, "Use of Adaptive Compliance in the control of Legged Vehicles," IEEE Tr. SMC-10, No. 7, pp. 393~440, 1980.
- 16) Ishino et. al, "Walking Robot for Underwater Construction," ICAR, pp. 107~114, 1983.
- 17) D. E. Orin, "Supervisory Control of a Multilegged Robot," Int. J. Robotics. Research 1, pp. 79~91, 1982.