



보행로봇의 다리 및 동력전달 기구

윤 용 산* · 홍 형 주**

*한국과학 기술원 기계공학과 교수

**한국과학 기술원 기계공학과 박사과정

60년대와 70년대에 걸쳐 달과 다른 행성을 탐험하기 위한 준비과정으로 미국과 소련에서 험한 지형을 보행할 수 있는 보행로봇의 제작가능성이 연구되기 시작하였다. 이후에 지금까지 많은 연구팀에서 바퀴 대신 다리가 달린 보행로봇이 연구되어 왔다.

연구된 바에 의하면 동물들은 단단하지 않은 지면, 가파른 경사지, 바위가 많고 함정이 있는 지형에서 바퀴를 갖거나 무환케도로 구동되는 차량의 약 10%의 에너지로 움직인다고 한다. 또한 이런 지형에서 동물의 기동성은 바퀴차량보다 우월하며 이러한 사실로 미루어 보행로봇은 극한 지형에서 잠재적으로 매우 가치가 크다.

컴퓨터로 제어되는 최초의 보행로봇은 1966년 캘리포니아 대학의 "Phoney Pony"로서 이 로봇은 모터로 구동되는 4개의 다리를 갖고 각각의 다리는 엉덩이 관절과 무릎 관절에 한개씩, 모두 2개의 자유도를 갖는 단순한 구조로 만들어 졌다. 계속해서 많은 연구가 수행되면서 4절기구, 7절기구 그리고 축도기 기구(Pantograph Mechanism) 등의 기구들이 다리의 구조로 제안되기에 이르렀다.

국내에서는 아직 보행로봇에 대한 본격적인 연

구가 없었으나 미국, 일본과 같은 선진국에서는 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 지금까지 개발된 대표적인 보행로봇에 대한 예를 들면 다음과 같은 것들이 있다.

- | |
|--|
| 1 각 로봇 - Carnegie Mellon University |
| 2 각 로봇 - BIPER - 4 : Univ. of Tokyo |
| 4 각 로봇 - PV II : Tokyo Institute of Technology |
| 6 각 로봇 - ASV : OSU |
| 8 각 로봇 - Queen Mary College, London. |

지금까지 개발된 보행로봇은 보행 속도가 느리고 많은 동력이 소모되며 하중운반 능력이 미약하다는 사실이 취약점으로 지적되고 있다. 그러므로 현재 선진 외국에서의 연구 방향은 주로 다리의 기구학적 설계, 로봇 자체 중량의 최소화 그리고 효율적인 동력이용 등으로 진행되고 있다.

I. 다리의 기구학적 설계

다리의 구조에 의해 보행로봇의 에너지 효율은

보행로봇의 다리 및 동력전달 기구

크게 영향을 받는다. 또한 다리의 크기에 따라서 로봇이 이동할 수 있는 보폭과 통과할 수 있는 장애물의 크기가 정해지며, 안정성을 고려한 걸음 걸이도 결정된다.

보통 보행로봇의 다리를 설계하고자 할 때에는 다음과 같은 조건을 고려한다.

- i) 구조가 간단해야 한다.
- ii) 동력을 줄이기 위해 각 조인트에 걸리는 힘이 작아야 한다.
- iii) 운동성이 좋아야 한다.
- iv) actuator를 구동하지 않고도 정지상태를 유지할 수 있어야 한다.
- v) 안정성이 좋아야 한다.

하나의 다리에 대한 자유도는 보폭을 조절하기 위한 것과 발의 높이를 조정하는 것, 그리고 방향 전환을 위한 것 등 모두 3개의 자유도를 갖는 것이 적당하다고 인정되고 있으나 Makoto Kaneko 등의 6각 8자유도 보행로봇과 BIPER-4와 같은 2각 7자유도 로봇 등의 경우도 있다. 다리 기구의 종류를 크게 2차원 보행기구와 방향전환 기구의 경우로 나눌 수 있다.

1. 1. 2차원 보행기구

1) 직선 4절 기구

로봇이 보행하는 경우 로봇 몸체의 질량중심의 변동이 많을수록 위치 에너지의 변동때문에 전체적인 에너지 손실이 따른다. 그러므로 이동하는 동안 몸체의 높이 변화로 생기는 에너지 손실을 막기 위해서 다리는 몸체에 대하여 상대적으로 직선 수평 운동을 할 수 있어야 한다. 또한 평지 보행의 경우 1개의 actuator만이 구동되어서 다른 actuator가 그 운동에 대하여 불필요한 에너지를 소비하지 않도록 하기 위해서도 다리가 몸체에 대하여 직선 운동을 하도록 해야 한다. 4절 기구로써 이러한 요구를 만족하는 설계가 있는데, 이것은 기구상의 한점이 직선운동을 할 수 있도록 설계된 것들이다. 4절 기구를 몸체에 붙이는 방법도 여러

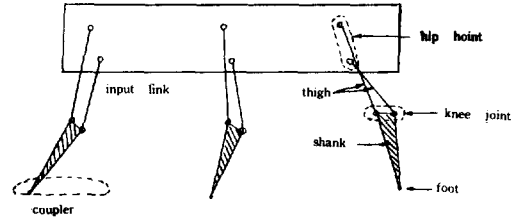


그림 1. 4절기구 다리

가지가 있으므로 OSU의 경우 (Prototype)의 예를 들어 설명하고자 한다.

그림 1에서 엉덩이관절 이하의 다리는 발끝이 몸체에 상대적으로 직선운동을 할 수 있도록 된 직선 4절 기구이다. 기능상 입력링크는 허벅지에 해당하고 커플러는 정강이의 역할을 한다. 입력링크를 회전시키면 발에 해당하는 커플러상의 한점은 지면과 평행하게 직선운동을 하게 된다.

이와 같은 설계에서 다리가 지면의 요철 부위를 만났을 때 지면과 닿지 않도록 하기 위해서는 높이에 대한 자유도가 다리에 추가되어야 한다. 4절 기구를 다리로 사용한 이 경우에 다리의 높이는 4절 기구를 구성하는 링크의 길이를 변화시켜서 조절할 수 있다. 즉 입력링크의 길이를 변화시키는 방법, 그리고 커플러상의 한점 즉 발의 위치를 변화시키는 방법 등이 있다. 그러나 입력링크의 길이를 변화시키면 발이 움직이는 궤적인 직선 경로를 벗어나게 되므로 커플러상의 위치를 변화시켜서 발의 높이를 조절할 수 있도록 하고 있다.

일반적으로 직선 4절 기구의 다리는 작동 면적과 운동성의 측면에서 비효율적이다. 또한 높이를 변화시키기 위하여 필요로 하는 커플러상의 actuator도 기계적 설계가 어렵다. 이와 같은 문제점으로 4절 기구의 다리는 실제 로봇의 다리에는 거의 사용되지 않았지만 보행로봇의 다리 설계에는 종종 이용되고 있다.

2) 7절 기구

직선 4절 기구의 높이 조절문제를 해결하기 위해서 직선 4절 기구를 또다른 4절 기구에 연결시켜서 만든 7절 기구가 설계되었다. 이러한 설계에

서는 링크사이에서 서로 간섭이 생기는 것을 피할 수 있고 발의 작동 범위도 만족할 만큼 얻을 수 있으며 또한 기구가 회전 조인트로만 구성되어 있기 때문에 기계적 설계가 용이하며 기구가 더욱 견고하다.

그러나 기구의 크기에 비해서 다리에 의해 만들어지는 작동범위가 작다. 기구학적으로도 복잡하므로 제어하기도 다소 어려운 점이 있다. 이 기구는 개념설계에 그치고 실제로 사용되지는 않았다.

3) Pantograph 기구(축도기 기구)

Pantograph 기구는 4개의 링크로 이루어진 기구로서 기구의 한쪽 끝에서의 운동이 다른 끝에서 확대되는 특징이 있다. 그림 2에서는 일반적인 Pantograph 기구가 표시되어 있다.

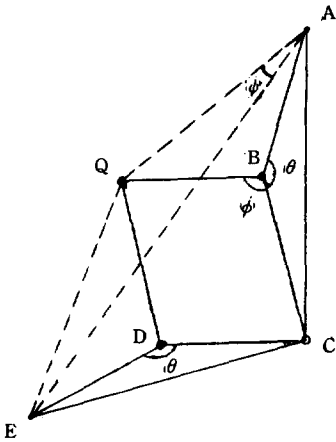


그림 2. Pantograph 기구

이 기구는 구조가 간단하고 수직과 수평 운동이 서로 독립되어 있으며 운동학적 방정식이 단순하여 제어하기에도 쉬운 장점이 있다. 또한 정확한 직선을 만들어낼 수 있어서 몸체 중심의 높이 변화가 적으므로 효율면에서도 유리하다. 그러나 A, Q 점을 수평, 수직 운동시키는 데 필요한 슬라이드를 만드는 데 기계적인 어려움이 있다.

이 모델은 현재까지 만들어진 다리 기구 중에서 가장 우수한 것으로 평가되고 있으며 OSU의 ASV, TIT의 PV II 등이 이 기구를 다리로 사용하여

제작되었다.

4) 조인트 구동

기구학적으로 그렇게 큰 의미는 없지만 지금까지 많은 보행로봇에 사용된 다리기구는 각각의 관절을 직접 구동하는 기구이다. OSU에서는 4절기구의 다리를 만들어서 Hexapod와 에너지 소비량을 조사하였다. OSU Hexapod의 다리들은 조인트로 두개의 링크가 연결되어 있으며 각 조인트에는 모터와 워엄기어 감속기로 되어 있다. 비교된 결과에 의하면 비저항(Specific Resistance)으로 표시되는 에너지 소비량은 Hexapod의 다리가 4절기구의 다리보다 약 20배 더 많다고 나타났다. 여기에서 비저항은 무차원 상수로 체중에 관계없이 서로 다른 생물학적 기계적 운동시스템의 효율을 비교하는데 사용되는 양이다. 직접 조인트에서 구동하는 다리는 보행로봇의 초기 연구단계와 2각 로봇의 다리 등에 주로 사용되었다.

1.2 방향전환 기구

보행로봇이 진행방향을 변경하기 위해서는 보폭과 다리의 높이를 변화시키는 자유도 이외에 옆 걸음을 할 수 있도록 자유도를 주어야 한다. 지금까지 개발된 보행로봇에서는 그렇게 큰 비중을 두지 않았지만 다음과 같은 3가지 경우를 예로 들 수 있다.

1) 내전과 외전(Adduction & Abduction)

이 모델은 2차원 보행기구를 한 개의 부재에 설치하고 몸체에 연결된 직선운동 actuator로 이 부재를 안쪽 혹은 바깥쪽으로 움직여서 옆 걸음을 걷는다. actuator와 그 고정축의 위치는 보행로봇의 구조에 의해서 결정된다. 이런 유형의 로봇으로는 OSU의 ASV가 있다.

2) 몸통 이동

MARK III(MAKOTO KANEKO)와 같은 로봇은 1개의 판에 3개의 다리가 달린 2개의 판으로 구성되어 있다. 이 로봇에서는 두개의 판이 수직축을 중심으로 최대 $\pm 18^\circ$ 회전해서 진행방

향을 수정할 수 있다. 제자리에서 회전하는 것도 가능한 이 로봇에서 회전하는데 걸리는 시간은 각각의 다리에 3개의 자유도를 갖는 로봇보다 적은 것으로 알려져 있다.

3) PANTOMECH

Hirose et al은 2차원 Pantograph 기구가 각각의 다리의 수직축을 중심으로 회전할 수 있게 하여 3차원의 운동성을 부여했다. 즉 바꾸고자 하는 방향으로 다리의 위치를 회전시켜서 보행을 계속하는 방법으로 간단히 방향을 수정한다. PANTOMECH 이라고 명명된 이 기구는 Pantograph의 2차원적 특징뿐만 아니라 3차원 운동까지도 쉽게 제어할 수 있도록 간단한 기계적, 기구학적구조를 갖고 있다.

1. 3 그밖의 다리 기구

1) Queen Mary College (London)

무환궤도에 많은 다리를 결합한 꼴의 보행기구가 Queen Mary College의 M. W. Thring에 의해 설계되었다. 20개씩의 다리가 달린 2개의 무환궤도가 몸체에 붙어있는 구조적 기동성 때문에 이 로봇은 연약지면을 움직일 수 있으며 상당한 하중을 싣고 계단을 오를 수 있다.

2) 뱀 운동을 하는 로봇(Univ. of Tokyo) 동경 대학의 Y. Umetani와 S. Hirose는 그들의 연구 도중에 뱀이 sine 함수와 가까운 고유한 운동을 하고 이 운동이 주어진 조건에서 가장 최적인 운동을 한다는 사실을 발견했다. 지면에 대한 뱀의 물결운동이 자체적으로 적응하는 성질은 마찰저항에 의해서 결정된다. 제작된 모델은 길이가 2m이며 서어보 기구로 추진되는 20개의 링크로 구성되어 있다.

3) 1각 로봇(CMU)

동적안정성을 연구하기 위하여 스프링에 달린 1각 로봇이 CMU에서 제작되었다. 대부분의 경우에서 정적 안정성만을 고려한 걸음걸이를 연구한 반면 이 경우에는 Inverted Pendulum 모델을 사용하여 안정성을 위한 제어 알고리즘이 개발되었다.

또 이 모델은 주행할 수 있는 4각 로봇을 확장되어 제작되었다. 유압실린더를 actuator로 사용하였으며 다리의 구조는 단순하고 기구학적으로 큰 의미는 없다.

2. 동력전달 장치

2. 1 직선운동의 구동

직선운동은 유압이나 공압 피스톤에 의해 직접 구동될 수도 있고 랙과 피니언, 리이드 스크류, 워엄기어 혹은 볼 스크류 등을 통해 회전운동을 직선 운동으로 바꾸어서 사용할 수 있다.

1) 랙과 피니언

랙은 긴 금속봉에 길이 방향으로 기어를 만든 것이고 피니언은 랙의 기어와 맞게 된 작고 둥근 기어이다. 피니언이 회전을 하면 피니언에 붙어 있는 이송체는 랙을 따라 직선운동을 하게 된다. 대개 랙은 고정되어 있다.

2) 리이드 스크류

리이드 스크류 구동은 스크류축을 회전시켜서 랙을 따라 너트를 직선운동 시킨다. 정밀도가 요구되는 장치에 사용되며 적절한 조건하에서 1/10000 in의 정밀도를 갖는 리이드 스크류를 사용하는 것이 보통이다. 긴 리이드 스크류는 강체로 취급되기에 충분하도록 커야하지만 상당한 마찰과 큰 관성 때문에 특별한 경우 이외에는 로봇에 사용되지 않는다.

3) 볼 스크류

볼 스크류는 마찰이 적고 빠른 응답을 낼 수 있기 때문에 로봇에 주로 이용된다. 원리상 볼 스크류는 리이드 스크류와 같지만 기어의 홈에 있는 많은 볼 베어링이 하중을 지지하고 마찰력을 줄인다. 구조상 볼 스크류는 스크류축과 너트 사이에 볼을 넣어서 볼이 스크류 홈을 구름운동하며 무한순환운동을 하기 때문에 종래의 리이드 스크류의 미끄럼 마찰을 구름마찰로 변환한 것이다.

에너지 전달효율은 약 90% 정도로 얻어지며 구동력도 줄어들어서 actuator의 크기를 줄일 수 있다. 또한 구름마찰은 구동을 시작할 때 큰 마찰력을 줄이고 펄림현상을 막을 수 있다. 적은 마찰력으로 기대되는 수명도 길다.

4) 유압실린더 구동

직선유압구동은 정밀가공된 실린더 안에 정확히 맞는 피스톤을 이용하여 한쪽 끝에서 기름에 압력을 가하여 다른 한쪽에서 피스톤을 구동한다. 피스톤의 운동은 기름의 양과 양쪽 끝의 피스톤에 걸리는 압력을 조정하여 제어한다. 초기단계의 많은 로봇가 직선운동을 만들기 위해 서어보 밸브로 제어되는 유압실린더를 사용하였다. 유압실린더는 강력하며 간단하고 값이 싸다. 고품질의 서어보 밸브는 가격이 비싸지는 하지만 회전운동을 직선운동으로 바꿀 필요가 없이 직접 직선운동으로 동력을 발생시키기 때문에 전체적으로는 경제적이다.

5) 공압실린더 구동

공압실린더는 공기가 사용되는 것을 제외하면 유압실린더와 같다. 공기의 유동은 솔레노이드 밸브에 의해 제어된다. 공기가 압축성이므로 공압실린더에 의해 얻어지는 힘은 제한되어 있다.

2.2 회전구동

대부분의 전기모터와 서어보 모터는 직접회전운동을 만들어내지만 대개 회전력은 작고 회전속도는 빠르다. 그러므로 큰 회전력과 낮은 속도의 동력으로 바꾸기 위해서는 기어, 벨트, 혹은 다른 장치들이 필요하다. 이러한 동력변환 과정은 원하는 시스템의 특성을 바꾸지 않고 또 높은 효율을 갖고 수행되어야 한다.

보행로봇 분야의 경험과 자료는 그렇게 풍부하지 않고 전반적으로 진행된 수준은 초기단계라 할 수 있다. 또한 이 분야는 기계공학과 전자 공학이 서로 결합되어야 결과를 내놓을 수 있는 성격을 띠

기 때문에 연구방법도 공동연구의 형태를 갖추게 되며 기술적인 정보교환도 서로 다른 용어, 기술의 성격 등의 이유로 자연스럽게 못하다.

기술수준이 모든 분야에서 초기단계라 각 분야마다 미진한 부분이 많다. 기계공학쪽에서 앞으로 연구 개발되어야 할 부분은 크게 간단하고 견고한 다리의 기구학적 설계, 가볍고 강력한 actuator의 개발, 효율적인 동력전달기구, 그리고 동적 안전성을 고려한 걸음걸이의 개발 등을 들 수 있다. 이러한 문제들이 해결되면 일반기계, 차량 및 인간이 접근하기 어려운 지형이나 환경 등에서 훌륭한 역할을 하며 유용하게 쓰일 것이다.

참 고 문 헌

- 1) McGhee, R. B., Ozguner, F., and Tsai, S. J.: Rough Terrain Locomotion by a Hexapod Robot Using a Binocular Ranging System, Robotics Research, edited by Brady, M. and Paul, R.: 227-25, The MIT Press, 1984.
- 2) Hirose, s., Nose, M., Kikuchi, H. and Umetami, Y.: Adaptive Gait Control of a quadruped Walking Vehicle, Robotics Research, edited by Brady, M. and Paul, R.: 253-277.
- 3) Raibert, M. H., Brown, Jr., H. B., and Murthy, S.S.: 3-D Balance Using 2-D Algorithms? Robotics research, edited by Brady, M. and Paul, R.: 279-301, The MIT Press, 1984.
- 4) Miura, H. and Shimoyama, I.: Dynamical Walk of Biped Locomotion, Robotics Research, Edited by Brady, M. and Paul, R.: 303-325, The MIT Press, 1984.
- 5) Song, S.M. Waldron, K.J. and Kinzel, G.L.: Computer-Aided Geometric Design of Legs for a Walking Vehicle, Mechanism and Machine Theory, Vol. 20, No. 6, 587-596, 1985.
- 6) Song, S.M. and Waldron, K.J.: Geometric Design of a Walking machine for Optimal Mobility, Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design, Transaction of the ASME, Vol. 109, 21-28, March 1987.