

보행 로봇의 발전과 응용

黃勝九* 徐一弘**

(正會員)

韓國電子通信研究所 制御器機 開發室 先任研究員*(工博)
漢陽大學校 工大 電子工學科 助教授**

I. 서론

“왜 보행로봇을 연구하는가?”라는 의문은 보행 로봇의 필요성, 응용 및 현재의 기술수준을 설명함으로써 어느정도 풀릴 수 있으리라 생각된다. 우선, 보행로봇의 필요성은 다음과 같은 두가지 측면에서 설명될 수 있다. 첫째로, 로봇이 이동할 수 있는 방법에는 케도, 바퀴, 다리등을 들 수 있는데, 케도는 그 이동 영역이나 작업 대상에 제한이 있게 되고, 바퀴는 이동성이 우수하나 장애물 지형에서는 많은 제약을 받게 된다. 다리로 이동하는 경우는 평탄면에서는 이동성이 바퀴보다는 떨어지나, 비평탄 면이나 장애물 지형에서는 우수한 성능을 나타낼 수 있다. 따라서, 원자력 발전소, 해저, 수중등의 비구조적인 환경에서는 다리로 이동이 가능한 로봇이 필요하게 된다.

두번째로, 보행로봇의 연구는 인간과 동물의 운동 구조를 이해하는데 크게 도움을 줄 수 있다. 인간과 동물의 보행 및 주행시 사용되는 다리 움직임의 패턴, 신경계통의 제어 구조 및 흐름, 균형 및 안정도 유지 메카니즘은 직접 다리를 가진 로봇을 제작하여 실험하여 봄으로써 쉽게 이해가 갈 수 있고, 이러한 실험을 통해 이미 세워진 가설이나 이론을 검증하여 볼 수 있다. 또한, 이러한 생물학적인 연구를 통해 새로운 구조를 가진 로봇의 제작이 가능하게 되는 것이다.¹⁾

보행로봇의 응용 분야로서는 비구조적인 환경에서의 작업, 즉, 원자력 발전소등 오염가능 지역에서의 응급처치, 감시, 경보 및 보수 작업, 우주에서의 작업, 산림 및 산업 화재 소화 작업, 수중 작업, 구조 작업에서의 보조 역할, 의료계에서의 보조 수단등을

들 수 있다. 현재까지 개발되어 있는 보행로봇은 대부분 현장 적용 능력이 부족하나, 미국의 Odetics사에서 개발된 원자력 발전소용 6각 로봇이나 일본 해운 항만청의 수중 작업용 6각 로봇등은 현장에 직접 투입되어 우수한 성능을 보이고 있다.¹⁾

보행 로봇의 전반적인 기술 수준은 아직 기초적 단계에 머물러 있으며, 위에서 언급한 것과 같은 응용분야에 일부 적용해 보는 정도이다. 그러나, 최근의 기술 개발 추이로 보아 보행 로봇은 앞으로 급격히 발전될 전망이며, 현장 응용 사례 또한 더욱 늘어날 전망이다.

본고에서는 이상에서 설명한 사항을 중심으로, 보행로봇의 발전, 요소 기술, 응용 및 문제점, 국내 기술 개발 현황등을 소개하여 여러분의 보행로봇에 대한 전반적인 이해를 돕고자 한다.

II. 보행 로봇의 발전¹⁾

다리로 이동하는 분야에 대한 과학적인 연구는 1987년 Muybridge가 말이 trot 걸음으로 갈때 네다리 모두가 땅으로부터 떨어지는가를 확인해 보이는 정지 동작 사진들을 Scientific American지에 실은 것으로부터 시작되었다.

그후, 1893년 Rygge에 의해 기계적으로 움직이는 말이 도안되는등, 1960년대에 이르기까지 많은 사람들이 동력학적 연계에 의해 걷는 동작을 만들어내는 기구적인 보행기계의 설계에 치중하여 보행로봇을 연구하였다. 그러나, 이런 기계적 구조에 의한 보행 메카니즘은 보행 패턴이 일정하여 지형의 변화에 대한 적응 능력이 없기 때문에 그 성능에 많은 제약이 있었다. 따라서, 1960년대 들어 제어 기술이 보행 로봇

에 도입되어야 한다는 필요성이 점차 인식되었다. 이와같은 접근 방식의 예로서 1968년 GE (General Electric)사의 Mosher가 만든 네다리로 걷는 보행 트럭을 들 수 있다. 이 기계의 특징은 장애물로부터 전달되는 힘이 운전자에게 페달과 핸들에 의해 피드백되도록 하였으며, 높이가 11피트, 무게가 300파운드 정도이며 유압을 동력원으로 사용한 것 등이다. 약 20시간의 연습끝에 Mosher는 이 트럭을 조작하여 여러가지의 장애물을 건널 수 있는 놀라운 기민성을 시범해 보였다. 이 기계는 잘 훈련된 운전자의 제어에 의존하지만, 보행로봇 분야에 처음으로 제어 기술을 도입하였다는데서 귀중한 지표가 되었다.

1970년대 들어 디지털 컴퓨터가 등장함에 따라 인간 대신에 컴퓨터가 제어를 담당하게 되었는데, OSU (Ohio State University)의 McGhee등이 최초로 이러한 보행 로봇을 제작하였다. 이 보행 로봇은 곤충과 같이 6개의 다리를 가지 몇가지의 표준 걸음새, 회전, 계걸음 및 간단한 장애물 처리등의 기능을 나타낼 수 있었다. 컴퓨터의 주요 작업은 각다리를 구동시키는 18개의 모터를 조정하는 운동 방정식을 푸는 것으로서, 조정 작업이란 로봇의 몸체 중심이 지지하고 있는 다리로 구성되는 다각형 안에 항상 위치하도록 유지 하면서 주기적으로 걷는 것을 말한다. 현재 이들은 ASV (Adaptive Suspension Vehicle)라는 대형의 6각 로봇을 제작중에 있는데, 길이가 5m, 높이가 3m, 무게가 약 2,600kg이며, 자체가 전원을 갖고, 운전자는 13개의 싱글보드 컴퓨터에 의해 처리되는 각종 정보 및 제어능력에 의해 이 로봇을 조종할 수 있게 되어 있다.¹⁾

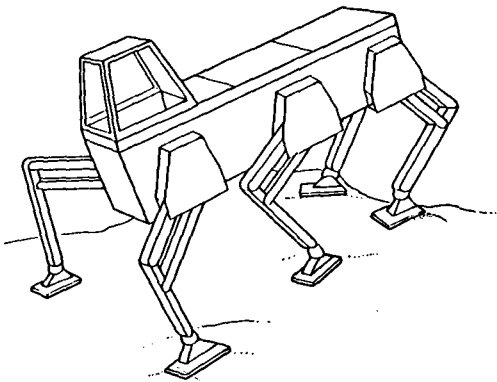


그림 1. ASV의 외관 구조도

1984년 TIT (Tokyo Institute of Technology)의 Hirose는 연계 기구의 설계와 컴퓨터 제어를 결합하여 인간의 중재없이 계단을 오르내리고 일부 장애물을 처리할 수 있는 4각 보행로봇을 만들었다. 이 로봇의 주요 특징으로서는 3차원 직각 좌표 pantograph 메카니즘을 사용한 것과 에너지 비효율성을 어느정도 해결한 데 있으며, 특히 다리의 구조를 간단히 하여 컴퓨터가 제어하기 쉽도록 하였다는데서 보행 로봇 연구에 새로운 방향을 제시하였다.¹⁾ 이와같은 접근 방식과 유사한 연구 결과는 최근 Adachi등이 개발한 Turtle-1을 들 수 있는데, 이 로봇은 ASTBALL-EM (approximately straight line three bar link mechanism for leg motion)이라는 특이한 구조의 다리를 사용하여 컴퓨터의 제어가 간편하도록 설계하였다.¹⁾

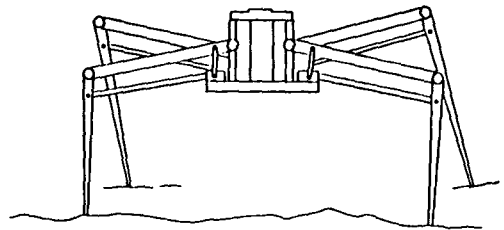


그림 2. Hirose의 PV-II의 보행 로봇

지금까지 설명한 보행 로봇들은 항상 세다리 이상은 지지하고 있어야 하고, 지지 다리가 이루는 다각형안에 로봇의 무게중심이 위치하여야 하며, 이상태를 유지하기 위해 천천히 걷는 등 정적인 보행을 위주로 하는 것들이었다. 이러한 로봇들의 개발과 병행하여 동적인 특성이 고려된, 즉 능동적인 균형을 유지하는 로봇들도 연구 개발되었다. 능동적인 균형이란 지지 다각형 밖에 무게중심이 위치하거나 지지하는 다리가 두개 이하일 경우가 발생하는 경우, 로봇이 이를 능동적으로 제어하여 균형을 유지하면서 걸거나 뛰는 것을 말한다. 이들 로봇의 대부분은 1951년 Cannon이 개발한 inverted pendulum 모델 및 이의 제어 방법을 응용하여 사용하고 있다.

능동적인 균형을 고려한 로봇에 대해 가장 활발하게 연구하고 있는 CMU (Carnegie Mellon University)의 Raibert는 평면상에서 움직이는 1각 및 2각 뿔 운동 로봇, 3차원 1각 뿔 운동 로봇, 4각 로봇

등을 개발하여 이러한 균형 제어가 가능하다는 것을 보이고 있다. 또한, 1980년대에 Kato, Miura, Shinoyama, Takanishi 등은 각각 inverted pendulum 모델을 이용하여 능동적 균형을 유지하는 2 각 로봇들을 개발하였으며, 이들의 결과는 복잡한 제어 시스템 없이도 동적운동의 특성을 충분히 만들어 낼 수 있다는 가능성을 제시하고 있다.

이상에서 우리는 보행 로봇의 전반적인 발전 상황을 정적 보행과 동적 보행등의 두가지 측면에서 살펴보았다. 이에 대한 요약은 표 1에 나타나 있다. 지금까지 기술한 이외의 보행 로봇들은 응용 측면을 설명하는 과정에서 소개하기로 한다.

III. 보행로봇의 요소기술

보행로봇의 구성은 그림 3 과 같이 관리 제어부, 동작 제어부, 동작 실행부, 이동체 및 센서 시스템 등으로 크게 나눌 수 있다. 관리 제어부에서는 보행 로봇 각 구성 요소들을 전체적으로 관장하고, 시각 센서시스템으로 부터 정보를 받아 나아가갈 경로를 계획하는 기능을 담당하며, 동작 제어부에서는 주어진 지형에서 안정되게 걸을 수 있도록 각다리의 제어시퀀스와 몸체의 이동을 제어하게 된다. 동작 실행부 즉 서보 제어부에서는 동작 제어부에서 계산된 값에 따라 액츄에이터를 구동시키는 기능을 담당하며, 로봇의 이동체는 실제 로봇의 기구부를 의미한다. 센

서시스템은 지능적인 걸음새를 구현하기 위한 시각, 촉각, 힘, 위치, 몸체자세 등에 관련된 각종 센서들로 구성된다. 다음 절에서는 이들 각 구성 요소들이 갖는 기술적 기능 및 특징에 관해 간략하게 기술하기로 한다.

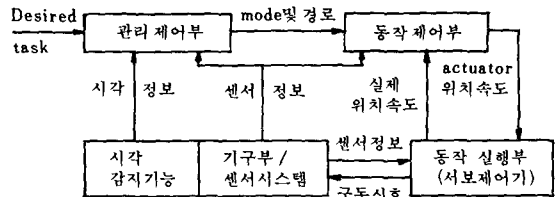


그림 3. 보행 로봇 시스템의 블록 다이어그램

1. 관리제어부¹⁴⁾

관리 제어 시스템의 주요 기능은 로봇 구성 요소의 총괄적인 관리와 시각 정보를 이용한 자율 경로 계획 기능으로 나눌 수 있다.

보행로봇의 관리제어시스템은 동작계획부터 각 다리를 구동하는 동작실행부까지의 관리와 여러 센서로부터의 계획을 처리해야 하므로 많은 계산량이 요구되어 다수의 마이크로 프로세서를 사용하여 일을 분담처리할 수 있도록 다중 CPU를 이용한 관리제어

표 1. 보행 로봇 주요 발전 내용

연재	누 가	무 엇 을
1850	Chebyshey	초기의 보행로봇에 사용되는 연계구조의 설계
1872	Muybridge	동물의 주행 모습을 관찰하는데 정지 동작 사진 사용
1893	Rygg	인간이 동력원이 되는 기계적인 말의 설계
1961	Space General	실의 지형에서 걷는 8 각 운동학적 로봇 개발
1963	Cannon 등	Inverted pendulum의 제어 시스템 개발
1968	Frank & McGhee	Phony pony의 걸음을 제어하는데 간단한 디지털 논리를 사용
1968	Mosher	GE 사각 트럭 개발
1977	McGhee	6 각 보행 로봇의 다리 동작을 조정하는데 디지털 컴퓨터를 이용
1977	Gurfinkel (소련)	6 각 로봇을 제어하는데 하이브리드 컴퓨터 이용
1980	Hirose & Umetani	계단을 오르내리는 4 각 로봇 개발. 기계적 구조가 제어를 간단히 하는 개념 도입
1980	Kato	quasi-dynamic 걸음새를 갖는 유압 2 각 로봇 개발
1980	Matsuoka	1 각 땀 운동 로봇 (2 차원적)
1981	Miura & Shimoyama	3 차원상에서 능동적인 균형을 유지하는 2 각 로봇 개발
1983	Sutherland	인간이 탈 수 있는 6 각 로봇 개발. 컴퓨터 및 인간이 조종하며 유압식
1983	Odetics	자체 동력원을 가지며 장애물 처리 기능을 갖는 6 각 로봇
1987	일본 해운항만성	수중작업이 가능한 6 각 로봇

시스템의 설계가 필연적이다. 이에 따라 채택하여야 하는 운영체제는 각각의 프로세서간의 작업조정과 통신을 용이하게 할 수 있어야 하며, 이러한 환경하에서 보행로봇의 제어 프로그램이 수행되도록 하여 관리제어시스템의 구조화 및 확장성을 꾀할 수 있도록 해야 한다.

다중프로세서의 특징은 다수의 마이크로프로세서가 단일 운영체제하에서 동작하는 단일 컴퓨터라는 것과, 문제해결을 위해서 프로세서간에 상호통신 및 협력을 요한다는 것, 그리고 신뢰도의 향상 및 병렬구조(parallelism)를 이용한 throughput의 증가를 기대할 수 있다는 것이다.

위와 같은 구조하에서 운영되는 보행로봇의 관리제어시스템에서 요구되어지는 주요 능력은 첫째, 시스템에서 요청되는 작업을 대기시간의 한계내에서 실시간에 처리할 수 있어야 한다는 점. 둘째, 로봇의 작업환경이 시간에 따라 변하며, 외부 여건의 발생 순서를 예측할 수 없으므로 외부 환경의 변화에 대해 시스템 제어의 흐름을 쉽게 바꿀 수 있어야 한다는 점, 셋째, 작업이 매우 복잡성을 띠기 때문에 여러개의 서로 독립된 비동기 동작을 소작업으로 분리하여 단순화시킬 수 있어야 한다는 점 등을 들 수 있다.

즉, 보행로봇의 관리제어시스템이 갖추어야 할 중요한 특성은 복잡한 보행의 수행과정을 독립적인 작은 단위의 프로세스로 나누어, 이들을 동시에 병렬 수행(concurrent processing) 시킴으로써 효율적인 시스템의 제어를 할 수 있는 능력이라 볼 수 있다.

2. 보행 메카니즘의 설계 및 제작¹¹⁾

불규칙 지형과 같은 보행로봇의 적용환경은 정돈된 환경에서 작업을 수행하는 산업용 로봇와는 달리 예측할 수 없는 많은 외란이 발생하게 되며, 이에 따라 메카니즘의 설계시 여러 사항이 고려되어야 한다.

기구 설계시 고려되고 있는 중요한 문제점들은 느린 보행속도, 낮은 하중 운반 능력, 낮은 에너지 효율, 높은 제작단가 등을 들 수 있다. 일반 산업용 로봇에서도 일어나는 문제점인 낮은 하중 운반 능력은 기계적인 문제와 액츄에이터 기술 등의 복합요소에 기인하며 이의 개선을 위한 노력은 꾸준히 진행되어 오고 있으나 괄목한 결과를 얻기까지는 상당한 시간이 소요될 것으로 예측된다.

보행체 제작은 개념설계(conceptual design) 방법을 도입하여 다리구조의 설계요구조건을 설정하고 여기서 제시된 기본 설계는 상세설계와 여러 각도의 해석

을 이용한 성능 개선을 위한 디자인 싸이클을 거쳐야 한다. 기구학적, 역동력학적 해석을 통해 다리의 링크 길이, 확대비와 소모동력과의 연관 관계 등을 밝혀 에너지 효율을 향상시켜 주어야 한다. 또한 구조물의 고유진동수는 제어신호의 주파수와 비슷한 값을 갖게 되면 심한 진동 현상이 발생하기 때문에 유한요소법을 이용한 진동해석이 필수적이다. 이와 함께 로봇의 실제 보행시 중요시되는 이동성(mobility) 및 안정도 등은 다리 및 몸체의 구조에 상당한 영향을 받는다. 실제로 로봇의 보행체적은 장애물 등이 존재하는 비평탄지형을 보행할 때 안정여유(stability margin)에 가장 큰 영향을 미치는 요소이기 때문에 기하학 및 기구학적 관계에 의해 최적의 보행체적을 설계해야 하지만 이렇게 설계된 치수는 동력 소모, 하중 지지 능력 등에 영향을 미치기 때문에 이의 결정은 여러 측면에서 설계 검토되어 진행되어야 한다.

3. 동작 제어부¹¹⁾

동작 제어부의 기능은 주어진 지형에서 최적의 걸음새를 구현하는 것이다. 걸음새(gait)란 동물이나 보행로봇이 발을 놓는 반복적 패턴을 말하며 이에 따르는 최적의 몸체자세를 유지하기 위한 일련의 제어 알고리즘을 여기에 포함시킬 수 있다. 걸음새에서 각 다리의 상태는 지면에 다리가 놓여 있는 지지구간(support phase)과 지면에서 떨어져 다음의 착지점을 향해 이동중인 이동구간(transfer phase)으로 나뉘어진다. 지지구간에 있는 다리는 몸체의 지지와 앞으로의 추진운동을 하게 되며, 이동구간에 있는 다리는 장애물 회피, 지면과의 충돌회피 등을 고려하여 궤적설계가 되어야 한다. 걸음새 연구의 기본 목적은 최적의 안정도를 유지하면서 최소의 에너지로 보다 나은 이동성을 갖는 보행로봇을 개발하는 데 있다.

걸음새 연구는 크게 사진, 그림 또는 도표를 이용한 그래픽적 기법과 수식적 방법을 이용한 해석학적 기법으로 구분된다. 어떤 방법으로 접근할 것인가는 각각의 경우에 따라 유리한 것을 택해야 하며 이에 따라 개발된 기본 걸음새는 공히 다음과 같은 절차에 의해 동작 실행부에 내려줄 명령을 발생시켜야 한다.

걸음새 제어 알고리즘을 수행하는 동작제어부는 관리 제어부로 부터 받은 지형정보와 이 지형정보에 따라 관리 제어부의 판단에 따라 발생된 기본 걸음새 모드에 따라 일련의 걸음새 상세설계를 하게 된다. 걸음새 제어 알고리즘의 주요 사항을 나열하면 크게 착지점 선정, 몸체무게중심의 궤적 설계, 걸음새 도표

(gait diagram) 설계, 서보 명령 발생 등으로 나눌 수 있다. 착지점은 다리의 보행체적, 지형정보, 안정도, 보행속도 등을 고려하여 선정되어야 하며, 몸체무게중심의 궤적은 방향과 위치 정보, 즉, 몸체 자세, 몸체 높이 및 무게중심의 궤적이 포함되어야 한다. 걸음새 도표는 안정도, 디듀움(duty factor). 몸체의 이동방향 등을 고려하여 각 다리의 착지 및 이륙의 순서를 결정하는 이벤트시퀀스 및 시간위상을 결정해주어야 한다. 이와 같은 일련의 정보를 바탕으로 동작 실행부에 보내 줄 신호를 만들기 위한 inverse kinematics의 해를 구하는 절차가 서보 명령 발생부에서 실행된다.

위에서 설명된 각각의 기능은 개발된 기본 걸음새인 평지에서의 직선보행, 계걸음, 회전, 함정통과(ditch Crossing), 계단, 경사면 등에서의 걸음새에 공통적으로 적용되며 걸음새 연구의 최종목표라 할 수 있는 자유걸음새(free gait)의 개발은 위의 기본 걸음새를 바탕으로 진행할 수 있다.

4. 동작 실행부¹³⁾.

동작실행부는 상위 레벨로부터의 액츄에이터 명령을 충실히 수행하기 위한 서보제어기라는 점에서는 일반 산업용 로봇의 그것과 동일하다. 그러나 보행로봇의 경우, 서보제어기는 몸체의 무게중심변화에 따르는 가변부하의 조작성 가능하여야 하고, 제어기 및 구동원의 몸체 탑재에 따르는 소형 경량화가 요구되며, 주어진 환경에 대해 유연한 적응/추진 동작 및 고속화가 요구된다.

위의 요구조건은 구동원, 전원 및 제어기 구성방식의 선정에 밀접한 연관성을 갖는다. 한다리의 구동원은 상황에 따라 크게 두가지의 부하가 작용한다. 첫째는 이동구간에서 나타나는 다리의 관성력과 중량이고, 둘째는 지지구간에서 나타나는 동체의 중량에 관한 부하이다. 구동원의 선정은 설계된 다리구조와 위의 사항을 고려하여 결정하여야 한다. 참고로 각각의 보행로봇의 특성에 맞추어 설정된 구동원의 예가 표 2에 나타나 있다.

한편 전원의 선택은 중량, 구동원의 종류 등을 고려하여 선택해야 하지만 실제적으로 시제품 제작 단계에서는 AC 상용전원이 유리하고 현장 적용 단계에서 AC 전원이 없는 경우를 고려한다면 battery의 사용은 불가피해진다.

제어기의 구성 방식은 고신뢰도를 위한 H/W의 간소화, S/W의 유연성 등의 기본적 측면과 보행로봇의 특성상 필요로 하는 가변 부하 조작 및 feed forward 제어 등에 대비하여 결정되어야 한다.

표 2. 각종 로봇의 구동원 선정 예

형 명	Type	Actuator 종류	갯수	Weight	비 고
TITAN III	4 legs	AC motor	12	80kg	GDA 20W (Y) 30W (X, Z)
MELWALK III	6 legs	DC motor	8	35kg	GDA, 30W, 50W
OSU Hexapod	6 legs	DC motor	13	140kg	Joint
OSU ASV	6 legs	Hydraulic motor	13	3ton	Joint
Sumitomo Electric Ltd	4 legs	DC motor	12	60kg	Joint SCARA Type leg
NCTU Quadruped-1	4 legs	DC motor	12	50kg	Joint

5. 센서 시스템

보행 로봇의 걸음새 구현을 위해 필요로 하는 센서의 종류는 시각 센서, 초음파 센서, 발 접촉 센서, 힘 센서, 몸체 자세 센서(gyroscope 등), 위치 감지 센서 등이 있다.

일반적으로 센서의 기능을 기술하면 감지기능(detection), 신호평가기능(signal evaluation)으로 대별되고, 부수적으로 pulse counting등의 신호변환기능(signal conversion)과 신호증폭기능 등이 추가된다. 시시각각으로 변하는 환경에 적응해야 하는 보행 로봇의 경우 다양한 센서의 사용은 필수적이며 관리제어부뿐만 아니라 동작계획부, 동작실행부의 알고리즘의 지능화는 위에 기술된 여러 센서 기능의 효율적인 운영에 기인한다.

위에 열거한 여러개의 센서 중 특히 시각 감지 기능은 장애물 감지 및 자율 경로 계획 등 보행로봇의 지능화를 실현하기 위한 필수 요소이다. 특히 최근에는 3차원 공간에서의 물체인식을 위해 스테레오비전 시스템에 관한 연구가 활발히 진행되어오고 있다.

한편, 시각 감지 기능을 포함한 여러 센서는 실시간 처리 능력, 경제성, interface의 용이성 등을 고려하여 신중히 선택되어야 한다.

IV. 보행 로봇의 응용 및 문제점

보행 로봇은 다리에 의한 독립된 착지점으로 몸체를 이동하기 때문에 별도의 이동로를 필요로 하는 바퀴나 캐도에 의한 이동체에 비해 이동능력이 우수하다. 특히 보행 로봇은 30도 이상되는 가파른 경사면

을 오르내리거나 계단이 있는 건물 내를 자유롭게 돌아다닐 수 있다. 또한 발바닥의 면적을 늘리고 각 다리에 몸체의 무게를 적절하게 분산시킴으로써 진흙이나 눈 위로 물체를 운반할 수 있는 능력도 갖출 수 있다. 따라서, 뺨이나 암반 따위가 산재한 해저작업, 지뢰 탐사 및 악지형에서의 조사 혹은 운반 기능을 필요로 하는 군사목적의 작업, 방사능 오염이 심한 원자력 발전소 내의 일부 시설의 운전 및 보수작업과 불타고 있는 건물내에서의 화재 진압이나 인명 구조작업등 인간이 직접 활동하기에 유해한 환경에서의 작업에 보행 로봇트는 시각장치를 이용하거나 혹은 사람이 직접 타고 운전하여 응용될 수 있다. 뿐만 아니라 하반신 마비나 사고로 다리가 절단되어 보행이 불가능한 사람에게 전자적인 제어장치를 환자의 다리에 부착하여 보행 가능하도록 하거나 인공 다리를 몸에 보철하여 정상인 처럼 걸을 수 있게 하는데 보행 메카니즘 및 전자 제어 장치에 관한 보행 로봇트의 연구가 한 몫을 차지하고 있다.

이 밖에도 행성 탐사와 같은 우주작업, 통나무를 벌목하여 산림지역으로부터 도로나 하천까지 운반하는 산림작업, 자라고 있는 곡물을 손상치 않으면서 진흙탕과 경계 구조물에 개회치 않고 경작할 필요가 있는 농경작업, 공기가 희박하고 유해한 가스가 있는 경사진 지하갱도에서 유용한 광석을 캐내야 하는 광산작업등에 보행 로봇트의 응용이 확대되고 있다.^[11]

그러면 다음에서 현재까지 실제로 제작된 보행 로봇트를 기준으로 그 사양과 응용 예를 살펴보자.

1. 보행 로봇트의 응용

미국의 오하이오 주립대학에서는 DARPA로부터 연구비를 지급받아 모래나 진흙 위를 걸을 수 있고 마른 땅에서 30도 이상의 경사를 오를 수 있으며, 2m 이내의 최소 회전반경으로 방향전환이 가능하고 깊은 하천을 잠수하여 건널 수 있도록 30도경사의 젓은 진흙벌로부터 물에 들어가거나 물으로 나올 수 있어야 한다는 군사목적의 요구사항을 토대로 ASV(Adaptive Suspension Vehicle)을 제작중에 있다. 최대 속도가 3.6m/sec로 70KW 모터 사이클엔진을 동력원으로 사용하고 있는 이 로봇트는 상술한 군사 목적의 요구사항을 모두 수용하지는 않지만 수직방향 자이로스코프, 비울 자이로스코프, 가속도계기를 사용해 몸체의 자세와 움직임을 감지하도록 하여 운전자가 쉽게 부정지형에서 ASV 조작할 수 있도록 설계하였다!^[1]

또한, 미국의 Odetics사가 개발한 ODEX I 은 계단

이 있는 건물에서 작업할 수 있도록 꾸민 보행 로봇트 로그 모양은 그림 6 과 같다. ASV와 마찬가지로 다리가 6 개이지만 몸체에 붙여진 모양새는 이동속도를 고려한 것이 아니고 정지작업시 안정된 지지능력을 갖도록 설계한 것이 특징이다. 몸체의 높이를 1.2m에서 3m 까지 조절할 수 있으며 한 다리를 매니플레이터로 사용하여 200kg까지 들어 올릴 수 있다. 구동은 전기장치에 의하며 구동원은 항공기용 배터리를 사용했는데 400kg 까지 물체 운반할 수 있는 능력이 있다.^[10]

한편, 일본의 Komatsu 회사가 제작한 ReCUS 라는 8 각로봇트는 다리의 교각을 세우기 위해 해저 암반을 조사하는 목적으로 1984년에 개발되었다. 그림 7에서 보듯이 빠른 조수에 견딜 수 있으며 고르지 못한 해저

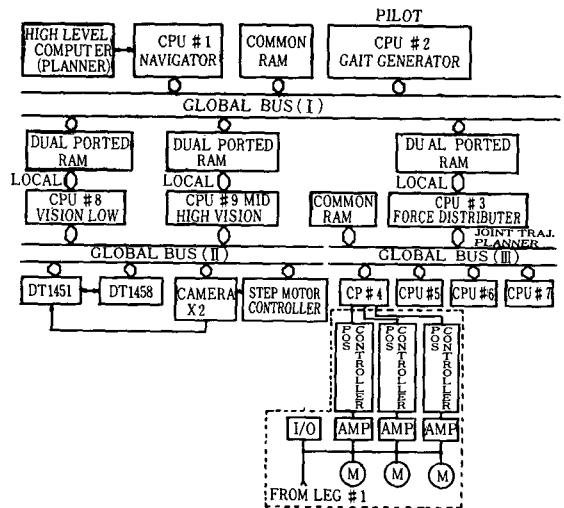


그림 4. 전체 시스템의 H/W 구조도

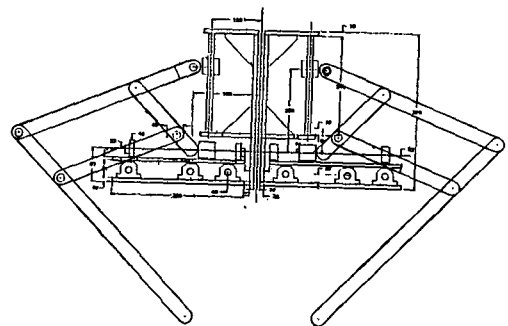


그림 5. 제작중에 있는 기계구조의 측면도

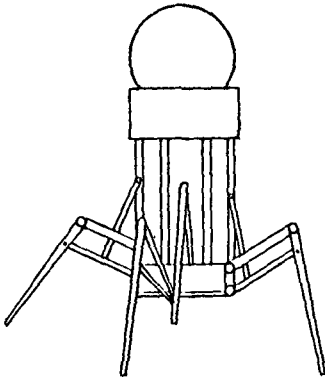


그림 6. Odetics 사의 ODEX I

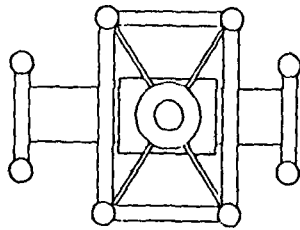
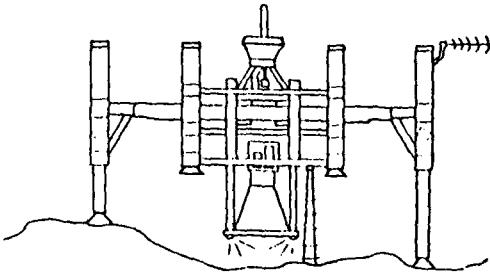


그림 7. 8 각 수중 작업 로봇 ReCUS

지형에서 안정되게 몸체를 지지하기 위하여 안팎에 각각 4 개의 다리를 가지고 이를 교대로 움직이는 교호 4 각 걸음새를 하는 특징이 있다. 길이 8 m, 높이 6m, 폭 4 m, 무게 29톤으로 보폭이 2.5m이고 보행속도는 분당 1.3m에서 4 m까지 구현 가능하다. 이 로봇은 구조적 특성때문에 무게 중심의 이동없이 안정되게 회전할 수 있으며 평균수심이 70m이고, 부정지형도가 1 m 내지 2 m 되는 해저 암반 지형과 경사도가 20도 되는 곳에서도 작업 가능하다.¹¹⁾

일본의 해운운수성은 1987년에 수중에서 검사 작업을 하는 6 각 로봇을 개발했다. 그림 8에 도시한 바와 같이 거미 모양의 이 로봇은 부식을 막기 위해 다리 재질을 알루미늄으로 하였고 몸체에 T. V. 카메라를 장착하여 수중상태를 외부에 보고할 수 있도록 하였다. 각 다리에는 3 개의 관절이 있고 길이는 1.5m이다. 총 중량이 680kg인 이 로봇은 발바닥에 이동 방향, 부정 지형도, 몸체의 기울어짐 정도 등에 관한 정보를 모으는 센서를 부착하고 있으며 보행 측면에서 세계 최초의 실제적인 수중 보행 로봇이다.¹²⁾

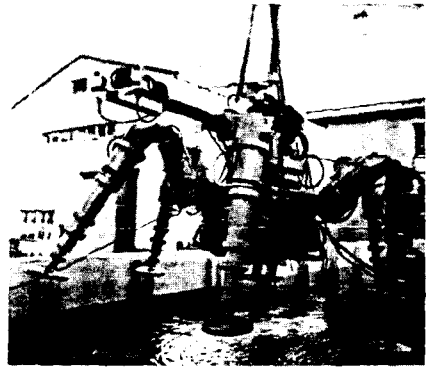


그림 8. 6 각 수중 검사용 로봇

또 한편 일본의 Mitsui사는 보행에 불편을 겪는 환자들에게 보행 연습을 시켜 보행 능력을 회복하는데 도움을 주는 의료기구로서의 로봇을 금년 10월에 개발하여 보행 로봇의 새로운 응용 측면을 부각시켰다. 이 로봇은 회전굴대, lifting arm, 환자의 지지 및 운반체, 공기압 동력부와 제어기로 이루어져 있고, 환자의 능력에 따라 환자의 다리에 인가되는 무게를 조정해 주는 센서를 부착하고 있다.¹³⁾

이상과 같이 응용분야가 다양한 보행로봇은 그 성능이 바퀴에 의한 이동체에 비해 우수한 면이 많음에도 불구하고 자동차와 전주어 볼 때, 그 발전 속도가 매우 더딘 것이 사실이다. 뿐만 아니라 개발된 모델이 특정 목적에 맞도록 잘 설계 구현되었을 지라도 성능면에서 한계가 있고 복잡한 제어 구조와 극한 환경에 의 노출로 인하여 신뢰성 및 경제성이 문제가 되고 있다. 그림 다음에서 보행 로봇이 갖는 문제점에 대해서 알아보자.

2. 문제점

보행로봇을 개발 구현하는 데에 수반되는 기술상의 어려움은 세가지로 대별될 수 있다. 첫째는 2개 이상의 자유도를 갖는 여러 개의 다리를 동시에 특정 목적으로 제어하는데 따르는 제어 구조 및 기법의 문제이고 둘째는 로봇이 이동함에 따라 동력원을 갖고 다니거나 이를 구동부에 전달해 주는 별도의 운송장치가 필요한데 이에 대한 부담을 어떻게 하면 최소화 할 것인가 하는 동력원의 문제이며, 셋째는 적절한 센서의 부착과 잘 알지 못하는 부정지형으로부터 이동에 유효한 정보를 추출하는데 필요한 센서의 응용문제이다.

먼저 제어상의 문제를 살펴보면, 다시 경로 계획과 동작제어의 문제로 나누어지는데 전자는 목적지에 안전하게 도달하기 위해서 알고 있는 지형 지물을 통과하는 경로를 찾는 문제이다. 이는, 보행 로봇의 시각 및 접촉, 초음파 센서등을 이용하여 원거리 혹은 근거리 경로 정보를 탐색하는 분야로 걸음새 제어분야와는 별도로 운영되며 계산량이 많기 때문에 따로 고속의 프로세서를 두어 처리해야 한다. 후자의 경우는, 보행로봇이 평균 속도를 이벤트 스텝스와 보폭에 따라 어떻게 구현할 것인가 하는 문제와 몸체의 높이 및 기울어짐 정도는 어떻게 유지하는 것이 안정도에 도움이 되는가를 함께 고려하여 다리를 구성하는 모든 구동부로 동시에 다축제어 신호를 줄 수 있는 효율적인 제어기의 설계 및 구성을 다룬다. 따라서 보행로봇 구성부분에 대해 복잡한 정, 동역학을 풀어야 하고 정확한 위치 및 속도제어가 실시간으로 가능해야 하기 때문에 고속의 연산프로세서와 실시간 운영체제 및 정교하고 신뢰성이 높은 제어기에 대한 연구가 선행되어야 한다. 그럼으로써 이들을 종합한 총체적인 기술의 집약체로서 보행 로봇의 제작이 가능하다.

한편, 동력원에 대한 연구 개발도 보행 로봇의 성능을 개선하는데 필수 불가결하다. 정교한 제어를 위해서는 전자장치 제어를 이용하는 것이 유리한데 이는 공유압 시스템에 비해 힘이 약해 해서 작업이나 우주탐사와 같이 큰 운반능력을 필요로 하는 분야에 적용하기 어렵다. 반면에 공유압을 이용한 제어 시스템은 큰 힘을 낼 수 있는 장점은 있지만 동력원을 제공하기 위한 케이블을 끌고 다녀야 하기 때문에 원거리 작업이 불편하고 공기나 유체가 갖는 압축성 때문에 정교한 제어가 어렵다. 따라서 자동차 엔진 같은 구동원을 사용하여 전기를 자체 발전하여 이를 동력원으로 전자 장치 제어를 구성하거나 압축기를 작동시

켜 큰 힘을 필요로 하는 공유압 액츄에이터 제어를 구성하는 방법으로 동력원의 문제를 해결하려는 시도가 있다. 다른 한편으로는 소형이면서 강력한 힘을 발휘할 수 있는 신종 액츄에이터로 direct drive motor의 개발에 대한 연구가 진행되고 있다.

끝으로 센서의 응용문제는 적절한 센서를 선택하여 제어기와 인터페이스 시키는 문제인데 그 과정에서 잡음과 오차를 최대한 줄이고 실제 상황에서 신뢰성 있는 센서정보를 지속적으로 제공할 수 있도록 메카니즘에 장착하는데 기술상의 어려움이 있다. 보행 로봇은 자체 상황과 외부 환경에 대한 상황을 감지하기 위하여 접촉 센서와 같은 binary 센서와 strain gauge를 사용한 힘 센서를 이용한다. 이들은 정적 안정도를 유지하는 걸음새 제어의 입력 혹은 이를 계산하기 위한 변환 신호로 이용되기 때문에 이들 종류의 선택 및 구조물에의 부착 기술이 전체 보행 로봇의 성능을 좌우한다. 따라서 보행 로봇의 성능 향상을 기대하고 이의 응용 분야를 넓히려면 이러한 센서의 개발과 그 응용 기술이 뒷받침되어야 하는데 현재로는 감지 신호의 오차 보정과 정밀성 유지에 어려움이 많다. 특히 발바닥에 부착되는 각종 센서는 지면과의 마찰로 잘 손상될 수 있기 때문에 이를 방지하기 위하여 센서의 선택에서부터 응용에 주의를 기울여야 한다. 예를들면, 근거리 정보에 주로 이용되는 초음파 센서와 같은 근접 센서의 응용이다. 초음파 센서는 대상물에 매우 가깝게 접근한 경우에 감도가 상대적으로 크게 떨어지고 온도는 물론 습도와 외부 잡음의 영향에 민감하기 때문에 예전에는 이의 사용이 많이 제한되어 왔으나 적용방법에 따라서는 1인치 이내로 물체의 근접 정도를 파악할 수 있는 성질을 이용하여 접촉 센서대신으로 응용 가능하다. 이와 같이 새로운 센서의 개발은 물론 기존 센서에 대한 적절한 응용을 바탕으로 보다 우수한 보행 로봇의 출현을 기대할 수 있기 때문에 센서 기술의 연구도 활발히 이루어져야 할 것이다.¹⁹⁾

V. 국내의 개발 현황 ^{11), 12), 13), 14), 15)}

국내에서는 1987년 6월부터 과기처 특種과제로써 4각 보행로봇의 개발이 진행되고 있다. 이 과제는 전장에서 기술한 보행로봇의 구성에 따라 팀이 구성되어 있으며 몇개의 독립된 기관이 참여하고 있다. 우선 관리제어 및 시각 시스템은 과학기술원 전기및전자공학과에서 담당하고 있으며, 몸체 및 다리의 설계 및 제작은 과학기술원 기계공학과, 그리고 걸음새 제어

알고리즘(동작제어부)은 한국전자통신연구소에서, 서보 제어기(동작실행부)의 개발은 한국기계연구소에서 각각 담당하고 있다.

이 과제에서 개발하려고 하는 4각 보행 로봇은 pantograph 구조의 다리, 모토롤라 68000VME 시스템에 의한 제어, 스테레오 시각 시스템, 실시간 처리가 가능하도록 변형된 XINU O/S, 12개의 DC 서보 모터 및 인공 장애물처리 등을 주요 특징으로 한다. 그림 4는 제어 시스템의 H/W 구조도이고 그림 5는 설계된 기구부의 측면도를 보여주고 있다.

현재 기구의 제작이 거의 완성단계에 있으며, 우선 평지에서 직선보행을 구현하는 실험을 하고, 이를 토대로 난이도가 높은 각종 걸음새를 구현할 예정으로 되어 있다.

Ⅶ. 결 론

보행 로봇 기술의 수준을 현장 응용 측면에서 볼때 아직은 많은 요소 기술들이 미 개발 상태에 있으며, 일부 응용 사례를 제외하고는 기초적인 수준에 머물러 있는 실정이다. 이렇듯 보행 로봇 기술 개발이 어느 정도의 수준에 올라와 있지 않은 것은 우선 이 기술이 기계뿐만 아니라 전기, 전자, 컴퓨터등의 관련 기술들이 종합적으로 융합되어야 하는 복합적 기술체이기 때문이며, 또한 곤충, 동물 혹은 인간의 걸음을 모방한다는 것 자체가 굉장히 어려운 일이기 때문이다. 이와 같은 모방의 어려움 때문에 일부에서는 다리대신 바퀴를 사용하면서 기구적으로 일부의 특정 장애물을 처리할 수 있도록 하는 방식을 사용하기도 한다.

본고에서는 이러한 보행 로봇의 전반적인 발전 역사, 요소 기술, 응용 및 문제점등을 살펴 보았으며 국내에서 처음으로 시도되고 있는 보행 로봇 개발 과제도 이번 기회에 간략히 소개하였다. 국내의 제반 여건으로 보아 보행 로봇을 개발하는 데는 많은 어려움이 따르지만, 이런 기술 개발을 시도해 봄으로써 그 과정에서 파생되는 요소 기술들, 예를들어, 분산 컴퓨터 제어, 다축 동시 제어, 실시간 로봇 O/S, 센서의 응용, 인공지능의 응용, neural network의 응용 등과 같은 기술들을 습득할 수 있으며, 경우에 따라서는 일반 산업 현장에도 이러한 기술들을 적용해 볼 수 있으리라 생각된다.


앞으로 보행 로봇은 원격 조종 기술등과 결합하여 인간을 대신하여 위험한 작업을 수행하는 등의 방향으로 발전할 것이며, 특히 neural network의 도입에 따

라 더욱더 지능화, 고 성능화 하리라 생각된다. 앞으로 국내에서도 보행 로봇 자체 기술뿐 아니라 그와 관련된 요소 기술, 응용 기술등에 더욱 많은 관심이 기울여 지기를 기대한다.

參 考 文 獻

- [1] D.J. Todd, "Walking Machines: An Introduction to Legged Robots," Kogan Page Ltd, 1985.
- [2] Special Issue: Legged Locomotion, Int. J. of Robotics Research, vol. 3, no. 2, Summer, 1984.
- [3] M.H. Raibert, "Legged Robots that Balance," MIT Press, 1986.
- [4] T.A. McMahon, "Muscles, Reflexes, and Locomotion," Princeton University Press, 1984.
- [5] H. Adachi, et. al., "Mechanism and Control of a Quadruped Walking Robot," *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 8, no. 5, pp. 14-19, Oct. 1988.
- [6] C.K. Tsai, H.C. Wong, and D.E. Orin, "Modified Hybrid Control for an Electrohydraulic Robot Leg," *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 8, no. 4, pp. 12-18, Aug. 1988.
- [7] Robotics and Automation, The Japan Robot News, vol. 6, no. 7, Sept. 1987.
- [8] Robotics and Automation, The Japan Robot News, vol. 7, no. 8, Aug. 1988.
- [9] J.U. Korein and J. Ish-Shalom, "Robotics," *IBM Systems Journal*, vol. 26, no. 1, pp. 55-95, 1987.
- [10] 황승구등, "보행 로봇의 개괄적 소개," 전자통신 동향분석, 제 2권, 제 2호, pp. 28-44, 1987.
- [11] 보행 로봇 특집, 전기 공학회지, vol. 36, no. 5, 1987.
- [12] 황승구등, "Advanced Control Method의 개발에 관한 연구," 과학기술처 최종연구 보고서, 1988.
- [13] 윤용산등, "다각 보행 로봇의 기구학적 설계 및 제작," 과학기술처 최종연구 보고서, 1988.

[14] 변중남등, “시각센서 및 보조센서를 이용한 Feedback Controller 및 인공지능을 갖는 관리 제어 시스템 개발,” 과학 기술처 최종 연구보고서, 1988.

[15] 박찬웅등, “다각 보행 로봇트를 위한 서보 제어 및 제어 알고리즘의 개발,” 과학 기술처 최종 연구 보고서, 1988. 

筆者紹介



黄 勝 九
 1957年 4月 9日生
 1979年 2月 서울대학교 전기
 공학과 학사
 1981年 2月 서울대학교 대학원
 전기공학과 석사
 1983年 8月~1986年 12月 미국
 Univ. of Florida 전기
 공학과 박사

1981年 10月 한국전자통신 연구소
 1988年 10月 현재 제어기기 개발실 선임연구원



徐 一 弘
 1955年 4月 16日生
 1977年 2月 서울대학교 학사
 1979年 2月 KAIST 석사
 1982年 2月 KAIST 박사

1982年 3月~1985年 2月 대우중공업 기술연구소
 근무
 1985年 3月~현재 한양대학교 전자과 조교수
 1987年 1月~1988年 1月 미국 미시간대학교
 전기과 객원연구원