

# 우주로봇 시스템의 개발동향

이 주 장\*

(\*한국과학기술원 전기 및 전자공학과)

## 1. 서론

로봇 기술은 미래의 우주 탐험에 있어서 유용하며 또한 시급한 상태이다. 그 첫째 이유는 우주극단적인 온도와 눈부심 또는 높은 수준의 방사선 등으로 인해서 인간에게 적당하지 못한 환경을 가지고 있는 것이다. 다른 이유는 로봇이 우주 비행사를 대신해서 사용됨으로서 우주선의 활동(EVA)에 대한 총체적인 시간을 줄일 뿐만 아니라 섬세한 동작이 필요한 인공제도의 건설과 우주 비행사가 수행할 수 없는 고도의 능력 등을 발휘할 수 있다. 우주 비행사의 필요한 수와 우주선의 활동 시간을 줄일 수 있는 것은 경제적인 면으로 보거나 우주 왕복선의 궤도에 있는 시간을 연장할 수 있는 것으로 보아 분명히 좋은 장점이다.

그럼에도 불구하고, 우주에서 로봇의 응용은 많은 문제점이 현존하고 있어서, 어떤 것은 독특하기도 해서 로봇 공학 분야와 우주 항해학에서는 활발한 연구 제목이 되고 있다. 우주 로봇과 관련된 제어 문제의 예를 들면 다양한 환경에 따라서 최적으로 조작되는 로봇에 대한 원격 로봇의 조정 등의 노력이 행해져 왔다. 또한, 가볍고 중력이 없고 큰 작업 공간을 고려한 유연성 로봇의 제어도 고려되어 왔다. 단지 최근에는 로봇과 베이스(우주 정거장, 우주 왕복선 또는 인공위성) 사이에 동역학적 상호작용을 고려한 우주 로봇의 제어, 동역학적 그리고 계획에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 로

봇 관성과 베이스 관성 사이의 비가 크거나 로봇의 운동 정밀도가 크게 요구될 때, 우주 로봇과 베이스 사이에 동역학적 상호작용은 특별히 중요하다. 로봇과 베이스의 운동을 조심스럽게 계획하고 제어하지 않으면, 우주 주위에 로봇이 있는 것이 불가능하고 동시에 베이스에 대해서도 알맞게 일을 할 수도 없다.

현재 많은 선구적 연구자들이 우주 로봇 기술을 이론적 분석이나 실험적 시스템을 통해서 개발하고 있다. 주로 동역학적 문제, 비균형적인 자연문제 및 제어문제의 세 부분으로 나눌 수 있다. 첫 번째 부분은 우주 로봇과 베이스 시스템의 동역학적 문제 조사로서, 베이스가 자세 제어에 의해 회전이 제어되고 반면에 병진이 자유스러울 때 자세한 운동학과 동역학이 토론된 선구적 일 중의 하나인 1985년의 논문을 수정한 것이 Lindberg, Longman과 Zedd는 문들이다. 이들 저자들은 회전과 위치가 둘 다 자유로울 경우까지 연장해서 생각 하였다. 이들 결과는 로봇 끝이 조인트 공간으로부터 관성 공간으로 운동학적 사상에 있어서 동역학적 종속 뿐만 아니라 사상의 독특함이 없다. 즉, 정과 역의 운동학적 문제가 존재한다. 이들 논문들은 일반적으로 고정 베이스 로봇에 상응되는 것보다 큰 우주 로봇의 작업 공간에서 분석되었다. Vafa와 Dubowsky는 우주 로봇 시스템의 동역학을 대표하는 가상의 매니플레이터의 개념을 제안하였다. 가상의 매니플레이터의 개념은 수정된 고정 베이스 로봇의 운동학과

의해서 우주 로봇의 운동학적 행동을 재생산하도록 하였다. 이들은 우주선의 거리를 최소화하는 로봇 운동에 적용하였다. Papadopoulos와 Dubowsky는 베이스가 자유롭게 날을 때 동역학과 궤도의 종속인 특이성에 대해서 기술했다.

Nakamura와 Mukherjee는 각 모멘트의 보전에 대한 선구적 일을 했고, Fernandes, Gurvits와 Li는 새로운 여기에 대해서 기술했다. 후자는 근사한 최적 계획에 대한 알고리즘을 개발하고 이전 시스템의 제어 능력에 대해서 서술하였다.

세번째 부분은 우주 로봇의 제어 문제이다. Yoshida와 Umetani는 우주 로봇의 일반적인 Jacobian행렬에 기초해서 Resolved Rate와 Resolved acceleration제어를 개발했다. 그리고나서 정지되어 있거나 움직이는 대상을 포획하기 위한 제어방법을 적용시켰다. Nasurani, Miyazaki와 Arimoto는 우주 로봇 시스템의 피이드백 제어 문제를 기술했다. Xu, Shum, Lee와 Kanade는 불확실성이 존재할 때의 우주 로봇 시스템의 적응제어 방법을 보여주고 있다. 첫째로, 관성 공간에서 우주 로봇의 동역학적 매개변수 항의 비선형 매개변수화를 논의하고 관성 공간에서 적응 제어 방법을 접근하였다. Ullman과 Cannon은 독립된 항해와 다중 자유로이 날으는 우주 로봇의 제어에 대해서 실험적 연구를 하였다.

다음의 두 장에서는 미국의 Carnegie-Mellon 대학의 Robotics Institute를 중심으로한 우주 로봇 시스템의 개발에 대해서 논의하고자한다. 첫째는 우주 정거장의 Cell과 Cell 사이를 걸어다니며 건축도 하고 여러가지 보수도 하는 유연성 로봇이고, 둘째는 화성의 고르지 못한 지형을 걸어다니는 여섯개의 발을 갖는 Ambler 로봇에 대해서 논의하고자한다.

## 2. 스스로 움직이는 우주 매니플레이터 (Self Mobile Space Manipulator)

우주 정거장에서의 우주 비행사의 차량 밖의 활동(EVA)은 비싸고, 위험하고, 그리고 광범한 준비를 필요로 한다. 계획에 없었던 수리와 같은 어떤 EVA 일들은 비행사의 다재다능함과 기술 그리고 판단력을 필요로 한다. 많은 다른 일들, 특히 일상적인 검사, 유지 등은 로봇에 의해 더 안전하고 싸게 할

수 있다.

우주 정거장에서의 EVA일을 위해 현재 설계되고 있는 로봇들은 유능하나, 값이 비싸고 매우 복잡하다. 나사(NASA)의 Flight Telerobotic Servicer (FTS) 그리고 캐나다의 Special Purpose Dexterous Manipulator (SPDM)은 그러한 EVA 로봇의 예이다. 이들 두 human-size 로봇은 다음과 같은 다른 장치들에 의존한다. 매니플레이터 시스템과 멀리 떨어진 큰 우주 정거장 그리고 거미 같이 움직이는 수송 시스템. 이러한 종속성은 그들의 유용성을 제한할 수 있다.

현재 비교적 간단하고 모듈적이고 가볍고 값이 싼 우주 정거장 EVA를 위한 로봇이 개발되고 있다. 이 로봇은 정거장 밖에서 독립적으로 움직이기에 충분한 크기를 가지고 있으나, 많은 중요한 일들을 하기에는 아직 충분하지않다. 우리의 설계는 독립적으로 움직이는 로봇에 대한 것이므로, 아직 재래의 매니플레이션 일들을 할 수는 없지만, 이것은 스스로 움직이는 우주 매니플레이터 또는 SM<sup>2</sup>라고 불리운다.

우리의 설계는 다음과 같은 능력을 갖는 전신 로봇 시스템에 대한 것이다.

- 인간의 감독 하에서의 충분한 자주적인 동작.
- 컴퓨터 중대를 갖는 오퍼레이터에 의해 명시된 일-수준 제어.

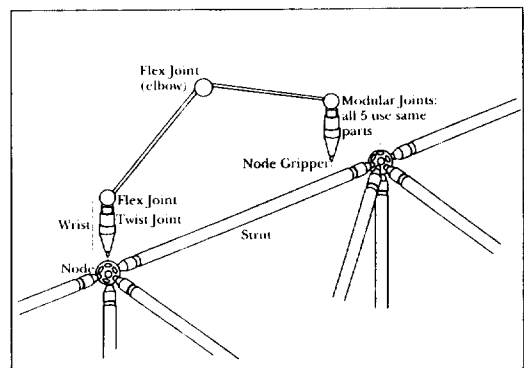


그림 2.1 The robot has five joints connected by two slender links. Grippers at each end attach to threaded holes in the truss nodes, enabling the robot to walk by stepping from node to node.

● 제어 콘솔(console)로 부터의 재래식의 joint-level 전신동작.

로봇은 시각 조사나 물건 운반 등의 유용한 일들을 수행할 수 있다. 로봇은 독립적으로 일할 수도 있고, 우주 비행사나 FTS같은 복잡한 로봇이나, 또는 그와 비슷한 간단한 다른 로봇과 같이 일할 수도 있다. 우주 비행사가 물건을 잡거나 놓거나 큰 부하를 놓는데 도움을 주거나 하기 위한 로봇 조수로서 SM<sup>2</sup>를 사용할 수 있도록 하기 위해서 EVA 우주 비행사가 목소리나 제스처를 사용하여 제어할 수 있기 위한 능력을 보이기를 원한다.

카네기 멜론 대학의 실험실에서 실제 로봇의 1/3크기의 형태로 개발하고 있다. 로봇은 적당한 스케일된 버팀대 구조의 마디 위를 걷는다. 마디 사이의 거리는 1.67m이고 로봇의 링크는 질량을 최소화하기 위해서 얇은 관 모양의 재료로 만들어진다. 이로인해 로봇은 재래의 지상의 로봇보다 더 잘 걷는다. 그래서 우리의 연구 분야 중의 하나는 이러한 유연성 로봇에 대한 제어 알고리즘의 개발이다. 이러한 로봇 설계로 인한 또 다른 결과는 원형 로봇의 성능을 실제적으로 테스트하기 위해서 모의 무중력 환경이 필요하다는 것이다. 그리고 비디오 추적과 혁신적인 반균형 매카니즘을 이용한 위치 정보 중력보상 시스템을 개발하여 다듬고 있다.

## 2.1 로봇 설계와 하드웨어

SM<sup>2</sup>는 우주 정거장 버팀대 위를 걷기에 필요한 최소한의 크기와 복잡성을 갖도록 구상되고 설계되었다. 기본적인 워커(walker)는 다섯 개의 회전하는 관절과 두 개의 가느다란 링크를 가지고 있다(그림 2.1) 로봇의 각 끝에 있는 글리퍼(gripper)는 그 자신이 버팀대나 다른 규칙적인 구조의 마디의 구멍에 갈 수 있도록 해준다. 걸음은 글리퍼에 의해 마디를 잡고 푸는 것을 교대로 하고, 발을 하나의 마디에서 다음 마디로 돌리는 것에 의해 이루어진다. 각 걷는 단계 마다, 로봇의 한쪽 끝을 마디로부터 풀고, 원하는 마디가 있는 곳까지 90도나 180도를 돌고, 다시 그 마디에 붙인다. SM<sup>2</sup>는 이러한 과정을 발을 바꾸어가며 수행하므로써 버팀대 위를 걷는다. 크기와 질량 그리고 구조적인 컴플라이언스(compliance)를 최소화하기 위해서, 로봇은 1/3크

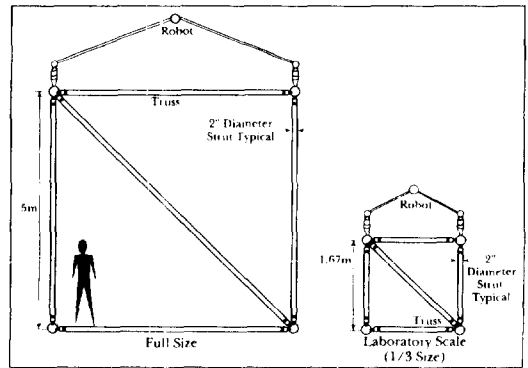


그림 2.2 Overall dimensions of the truss and robot are scaled to 1/3 to Permit experiments in the laboratory, while local dimensions (sizes of nodes, joints and grippers) are the same to keep local behavior similar, and mechanism size workable.

기의 버팀대상의 1.67m거리의 인접한 마디사이를 다다르기 위한 충분한 스펜(span)을 갖는다. 이론적으로, SM<sup>2</sup>는 버팀대 밖의 임의의 방해받지 않는 점을 가로지를 수 있다. 이것의 비교적 작은 크기(다른 우주 정거장과 로봇에 비해), 적은 질량, 그리고 저 소비 전력 때문에, SM<sup>2</sup>는 우주 정거장이나 다른 우주 공간 구조물에서의 건설, 조사, 검사, 그리고 유지에 있어서 잠재적인 유용성을 가지고있다.

로봇 개발의 시발점에서, 우주 정거장에서 사용될 가상의, 실 크기의, 독립식의 로봇을 설계하였다. 설계는 모터나, 드라이브, 링크, 매니플레이션 장치, 그리고 적당한 활동 범위에 필요한 보드 상의 파워 서플라이(batteries)와 같은 주요 부품들의 측정된 값을 이용하였다. 설계는 또한 링크나 관절의 컴플라이언스를 고려하였고, 그리고 결과적으로 나타나는 구조적인 진동 주파수도 고려하였다. 그리하여 작게 만들어진 로봇의 동적 매개변수들-질량, stiffness, 자연 주파수, 선형 속도-가 가상적인 로봇의 것과 비슷하게 유지되도록하는 축소 방법을 이용하여 설계하여 만들어졌다. 버팀대와 로봇의 전체 크기는 1/3로 줄었으나, 지엽적인 크기(버팀대 마디, 관절, 글리퍼)는 같다(그림 2.2) 이것은 매카니즘이 작동을 안 할 정도로 작지않으면서 보통의 실험실에서 사용할 수 있다.

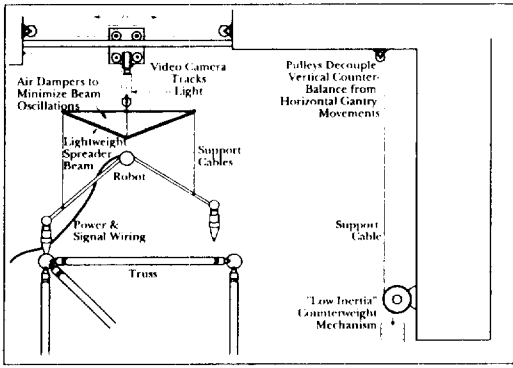


그림 2.3 Gravity compensation system simulates zero-gravity for realistic laboratory experiments. A passive system of counterweights, cables and pulleys provides a constant, vertical balance force. A powered, overhead carriage is servocontrolled to keep the support point directly above the robot.

## 2.2 중력 보상 시스템

궤도를 도는 우주 정거장에서의 무중력 상태는 로봇의 설계와 성능에 크게 영향을 끼친다. 무중력 상태에서는 긴 로봇트가 큰 질량을 움직일 때에도 작은 힘과 전력 소모를 요한다. 지구상에서 실제적인 실험을 수행하기 위해서, 중력 보상 시스템이 개발되었다. 중력 보상 시스템(그림 2.3)은 피동의 수직 반중력 시스템과 능동적으로 제어되어 평면 시스템으로 이루어져있다.

## 2.3 시각 그리고 감각 시스템

재래의 단단한 로봇트는 일반적으로 관절의 위치와 속도에 관한 정보만을 가지고 위치 제어를 하였다. 이러한 정보는 작동중에 심각한 구조적인 구부러짐을 갖는 로봇트를 제어하기에는 불충분하다. 그러한 구부러짐은 원하지 않는 구조적인 진동을 야기시킬 수 있고, 끝 점과 로봇트의 다른 점들의 위치가 불확실해질 수 있다. 이전의 관절 센서들에 더하여 SM<sup>2</sup> 이러한 문제점들을 다루기 위해 두 개의 센서를 더 사용한다. 첫째로, 단일 축 가속도 미터는 로봇트의 두 끝에서의 측면의 가속도를 측정하고,

나중에 서술할 신호 필터링에 의한 지연을 보상하기 위해 사용될 신호를 발생한다. 가속도 미터는 능동 감식에서 사용하게 될 구조적인 진동의 감지도 아울러 할 수 있다.

둘째로, 목표 대상에 대한 상대적인 끝 점의 위치 제어를 향상시키고 목표 마디 구멍에 클리퍼의 스크류를 인도하기 위해 자동 시각 시스템이 개발되었다. 이것은 가능한 관절 측정 값만을 사용했을 때보다 더 믿을 수 있는 클리퍼 스크류의 삽입을 제공한다. 시각 시스템의 사용은 끝 점의 위치 측정 에러를 약 2cm(전체 크기의 로봇트의 경우의 6cm에 해당함)에서 0.5cm미만으로 줄였다. 이것은 만족할만한 클리퍼 스크류의 삽입을 위해 충분하다.

## 2.4 로봇트 제어 방법

로봇트 동작의 제어는 세가지 요소에 의해 어려움을 나타낸다. 첫째, 로봇트는 링크와 관절의 compliance때문에 매우 유연하여 최대 관절 토크하에서 148mm(5.8in)의 끝 점의 빛나감을 나타낸다. 이것은 구조적인 진동에 대한 민감성과 끝 점의 위치의 많은 불확실성을 야기시킨다. 둘째, 로봇트의 긴 길이(전체 크기로는 5m가 넘는)는 센서의 부정확성이나 백 레쉬(backlash), 그리고 구조적인 변형에 의한 작은 각 에러를 증폭시킨다. 셋째, 관절 마찰이 비교적 큰 영향을 준다. 왜냐하면 구조 내의 긴장이나 진동을 최소화하기 위해 관절 토크가 작기 때문이다.

지난 10년 동안 유연한 팔의 제어에 큰 관심이 기울어져왔다. 이들의 대부분은 이론적인 것이었고, 단순한(종종, 과장된 유연성을 갖는) 팔의 엄격한 identification과 제어에 집중되어왔다[1, 2, 8]. 우리의 목표는 필수적인 가벼운 설계에 의한 관절과 링크의 유연성을 갖는 실제의, 5관절, 3차원 로봇트를 제어하는 것이다.

연구는 걸음 제어와 조작 및 운송의 확장 제어를 개선하기 위해 여러 분야에서 진행되고 있다.

- 구조적인 진동 제어.
- 적응 제어.
- 위치/힘 제어의 혼합.
- 로봇트의 경로와 동작 계획.

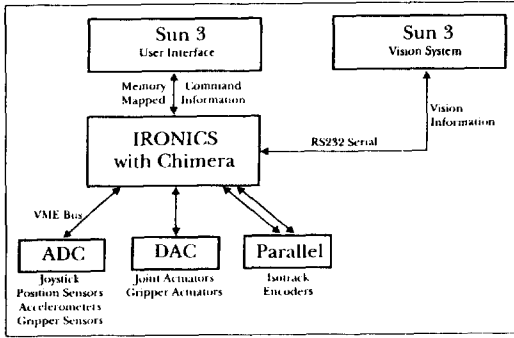


그림 2.4 The current control architecture is based on a single Ironics 68020 CPU communicating with the robot via ADC and DAC interfaces. Parallel and serial ports allow communication with vision systems and operator controls. A sun 3 Permits operator inputs and graphically displays data.

## 2.5 제어 구조

제어 구조는 제어 컴퓨터와 이에 연관된 하드웨어, 실시간 운영체제 그리고 제어 방법과는 독립적인 다른 소프트웨어(I/O 프로세싱 그리고 주변 프로세싱과의 통신)를 포함한다. 현재에는 실시간 제어는 CHIMERA II 실시간 운영체제가 돌아가는 Ironics 68020-based 단일 보드 컴퓨터에서 구현된다(10). 고성능 실시간 커널의 공급과는 따로, CHIMERA II는 멀티 프로세싱 특징과 다양한 하드웨어와 제어 소프트웨어간의 투명성의 층을 제공한다. Sun 3/260 호스트 워크스테이션은 코드 개발과 오퍼레이터 인터페이스를 위해 사용된다. 현재의 하드웨어 configuration은 그림2.4에 있다.

## 2.6 휴먼 인터페이스

사람의 인도와 자주적인 로봇의 컴퓨터 제어라는 두 가지 이점을 가질 수 있는 전신로봇 시스템(terorobotic system)이 되도록 설계된다. 우리는 낮은 수준으로부터의 부드러운 이동과 전신로봇 제어의 다양한 수준을 통한 로봇 제어 정거장에서의 오퍼레이터에 의한 관절의 전신 작동, 그리고 목표

가 결정된 반자동 오퍼레이션에 의한 모든 방법을 제공하기를 원한다. 여기에서 인간 오퍼레이터는 증가하는 복잡하고 높은 수준의 명령을 로봇에게 준다. 계층적인 video-display-based 제어구조는 인간 오퍼레이터가 주어진 일이나 로봇 동작에 따라 적절한 제어 수준을 선택할 수 있도록 해준다. 제어 시스템은 model-driven이다. 그래서 예측하는 display는 자동적으로 조절되는 작동 모드에 이용할 수 있다.

## 2.7 요약 및 결론

우리는 단순한, 5-DOF, 1/3크기의 실험실 버전의 로봇트를 개발하고 있다. 이 로봇트는 버팀대 위나 우주 정거장 밖의 다른 표면에서 걸을 수 있도록 설계된다. 이것은 삽입이나 운반 그리고 단순 유지 절차와 같은 일상적인 일을 할 수 있을 것이다. 우리는 로봇트와 모의 무중력 실험을 위한 중력 보상 시스템을 설계하고 만들었다. 우리는 우리의 매우 유연한 로봇트의 운동을 위한 서보제어를 개발하였고 원형적인 오퍼레이터 인터페이스를 개발하고 있다. 신경회로망을 이용한 시각 시스템이 버팀대마다 부착을 위해 요구되는 정확한 위치제어에 도움을 주기 위해서 만들어졌다. SM<sup>2</sup>는 버팀대의 가로 막히지 않은 바깥 영역에서 잘 걸을 수 있음을 데모하였다. 가까운 미래에 우리는 다음을 계획하고있다.

- 로봇트 하드웨어와 제어 그리고 중력 보상 시스템을 다듬는 것.
- 힘 피이드백을 포함한 더욱 더 진보된 인간 인터페이스를 갖는 실험.
- 움직이는 로봇트에의 조작 능력의 첨가.

운동과 조작하는 일에 적응 제어를 결합시키고 더 증가된 조작 능력을 위해 힘/위치 제어의 혼합을 사용할 것이다. 비록 우리의 현재 초점은 매우 특별한 우주 적용에 있지만, 우리의 로봇트의 연구는 더 넓은 충격 효과를 가질 것이다. 예를 들어, 우주에서의 유연성 로봇트의 제어는 현재 있는 것보다 덜 단단한 저가의 산업 또는 상업 로봇트에도 적용될 수 있다. 유사하게, 구조적인 진동이 문제가 되는 크레인이나 다른 큰 기계류의 제어에도 적용할 수 있다. 우주에서의 거친 조명을 위한 강인한 시각 시스템은 지상에서의 옥외 기계 시각 시스템에 적용할 수 있

다. 중력 보상을 위한 우리의 기술은 다른 우주와 연관된 프로젝트나 부력이 문제가 되는 해저 로봇의 실험실 연구에 적용할 수 있다. 우리는 우리의 기술로부터 다른 영역 및 혼자 일하는 것보다 사람과 컴퓨터가 증대된 기계 동작이 함께하여 더 생산적일 수 있는 영역에서 부가적인 산물이 나오기를 기대한다.

### 3. 앰블러 : 다리를 갖는 평면 이동차

#### 3.1 서론

카네기 멜론 대학 혹성 탐사 로봇 프로젝트의 최종 목표는 혹성 탐사를 위한 자주적으로 움직이는 로봇의 원형을 개발하는 것이다. 우리는 앰블러(Ambler)라고 불리는, 직교하는 다리와 포개어지는 걸음걸이로 특징지어지는 여섯 개의 다리를 갖는 로봇을 만들었다. 앰블러가 거친 지형을 걸을 수 있도록 하기 위해서 우리는 지각, 계획, 실시간 제어를 포괄적인 로봇 시스템과 조합하였다.

이전의 로봇의 기관 연구 조사 기사[6]는 달이나 화성에서의 로봇 임무에 대한 시나리오를 보였고, 그리고 자주적인 걸음에 대한 다른 연구 결과와

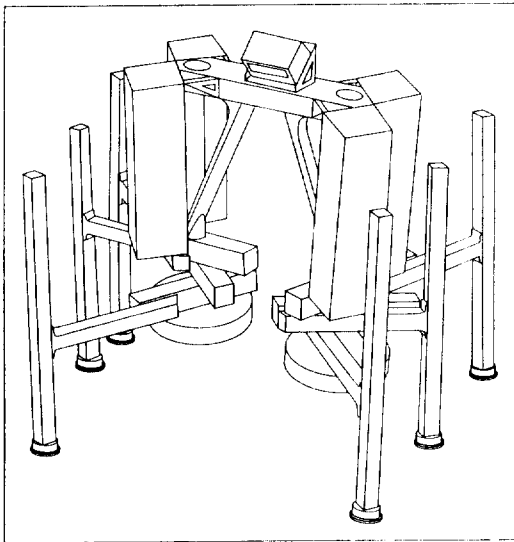


그림 3.1 Ambler configuration(top) and fully assembled.

비교하였다. 이 기사는 연구 프로그램들의 기술적 발전에 관심을 집중하고 있다.

#### 3.2 앰블러

앰블러(그림3.1)는 자주적이 탐사의 기본적인 필드에 상응하는 원형격(prototype) 로봇이다. 앰블러는 거친 표면에서의 탐사 임무에 의해 주어지는 특정한 강제 요건을 만족하도록 되어있다.

1. 거친 지형: 앰블러는 보통의 표면 조건(도랑이나 큰 돌 그리고 턱)에서는 30도에서 1미터까지를 오를 수 있어야만 한다.

2. 과학적인 부하: 앰블러는 집거나 파거나 몇 미터 깊이를 파거나 하기위한 과학적이고 표본적 장비들을 조절할 수 있어야만 한다.

3. 저소비 전력: 전력 소비는 1m/min을 위해 1kW를 넘지 말아야 한다.

앰블러의 요건에 대한 이점들은 다른 발행물에 나타나있다[3, 4, 5, 6].

#### 3.3 메카니즘과 일렉트로닉스

앰블러의 각 다리는 회전하는 링크와 평면상에서 이동하는 늘어나는 링크 그리고 이것과 직교하는 수직 링크로 구성되어있다. 앰블러의 여섯 개의 다리

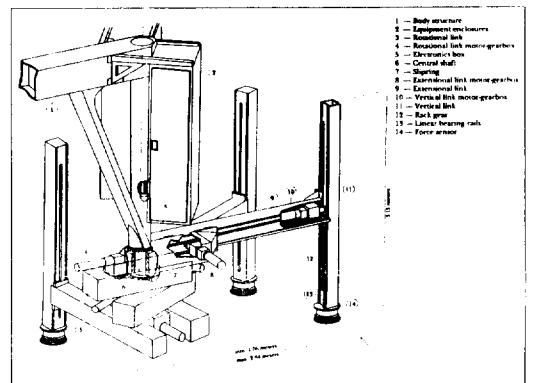


그림 3.2 Detail of three legs, the central shaft about which they rotate, and a section of the body. Components of the uppermost leg have been emphasized.

들은 하나의 기둥에 대해 세개의 다리로서 두개의 중앙 기둥 몸체(central body shafts)에 쌓아 올려지게 된다. 각각의 기둥(shafts)들은 네개의 봉입물 즉, 가정 동력 생성, 전자 장비, 컴퓨터 장비, 그리고 과학 장비들을 포함하는 활모양의 몸체 구조에 연결되어있다. 그 구조의 요소들은 주로 알루미늄(aluminum)재료로 되어 있다. 몸체 구조(body structure)의 꼭대기(top)에는 몸체의 방향을 측정하는 두개의 경사계(inclinometer) 뿐만 아니라, 패닝 테이블(panning table) 위에 스캐닝 레이저 파인더(scanning laser rangefinder)가 올려져 있다.

앰블러의 각 다리는 서로 같다(그림3.2) 회전하는 링크의 기어박스의 작은 톱니바퀴는 중앙 기둥에 붙여진 큰 박차 기어(spur gear)에 물려진다. 프리즈 매트릭 링크(광범위하고 수직적)들은 래크와 피니언(rack-and-pinion)으로 구동된다. 그리고 선형 베어 링위에 미끄러진다. 세개의 모터-기어박스 단위들의 각각은 영구 자석 DC 모터, 인크리멘탈 인코더, 고효율 박차 기어박스, 실패-안전(fail-safe) 부하 유지 제동장치, 그리고 절대 인코더(absolute incoeder)를 포함한다. 각 수직 링크의 기초위에 올려진 6축 힘/토크 센서는 발(feet) 위에 동작하는 힘들을 측정한다.

밧줄(tether) — 130 개의 보호된 꼬여진 쌍들, 30개의 동축 케이블, 그리고 동력 케이블을 포함하는 46m의 보호 직물 덮개 — 은 앰블러에 동력과 제어신호를 전달한다. 궁극적으로, 제어기, 동력 생성 장치, 그리고 원격 측정 재료들에 의해 밧줄(tether)에 대한 필요성은 제거되고, 몸체내에 적재되어 질 것이다.

다중링 슬립링(multiple-ring slipping)은 몸체의 각 다리로부터 동력과 신호를 통신한다. 커스텀 디지털과 아날로그 멀티플렉서는 슬립링에서 각 링의 수를 줄인다. 각각의 다리 위에서 회전하는 링크에 올려진 전자 박스는 다리를 움직이는 멀티플렉싱 하드웨어, 모토 증폭기, 그리고 제동 릴레이등을 가지고 있다. 안전한 회로(safety circuit)는 모든 보행물(walker)의 움직임을 감시하고, 감지된 다양한 불안정한 조건들에 응답해 로보트를 움직이지 못하게 한다.

다리 스택 밑의 두개의 표본 포트(sampling pod)들은 큰 표본 도구 또는 감지기를 포함할 수 있다.

앰블러는 그것들을 땅위에 가까이 또는 직접적으로 놓을 수 있다. 깊숙한 핵심 장비(deep coring equipment)는 보행물(walker)의 전체 높이를 포함하는 중앙 몸체 기둥내에 적재되어 질 수 있다.

### 3.4 보행 운영(Walking Operation)

앰블러의 수직 링크들은 각기 거친 지형에 적응하고 보행물의 레벨을 정한다(그림3.3) 모든 수직 링크들에 대한 각각의 변위는 기울기와 단계들을 올리거나 내리기 위하여 몸체를 들어 올리거나 더 내린다. 수준 몸체(level body)의 추진력은 회전하는 또, 늘어나는 링크들의 동격화된 움직임에 의해 성취되어 질 수 있다. 수동 발 회전은 수직 링크들을 추진 동안에 발에 대하여 선회하게 한다.

몸체가 나아감에 따라, 맨 후미의 다리가 앞으로 나아가야만 한다. 다리를 들어 올리는 동작, 그 다리를 앞으로 이동하는 동작, 그리고 그것을 땅위에 놓는 동작은 유일하다. 즉, 발이 올려진 후에, 늘어나는 링크(extensional link)는 후퇴하고 회전하는 링크(rotational link)는 그 발(들어 올려진 발)이 다른 지지 발들의 앞에 놓일 수 있도록 다리 스택(leg stack)들과 몸체를 통하는 것 사이에 수직 링크를 통과하도록 회전한다. 추진하는 동안에, 지지 다리들은 몸체에 비해 상대적으로 후미쪽으로 이동시킨다. 그러므로 모든 여섯개의 다리가 복귀한 후에, 각 다리는 그것의 제각기의 기둥 몸체(body shaft)에 대하여 전회전을 완성했다.그림3.4는 이 다리 움직임, 순환 등을 보여준다. 보행물(walker)이 앞으로 이동함에 따라, 굽게 그려진 다리는 왼편의 기둥 몸체에 대하여 전체 반시계 방향의 회전을 완전하게 한다. 같은 기간 동안에, 다른 모든 다리들은 그들의 원래 위치로 또한 순환했다. 순환(circulation)은

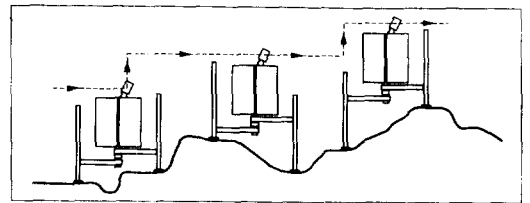


그림 3.3 Level body motion.

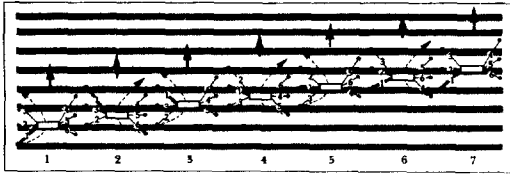


그림 3.4 Circulating gait. A sequence of six leg recoveries and body propel motions from left to right across the page. The dotted curve denotes the path of a recovering leg.

보행 메카니즘에서와 동물의 왕국에서 전례없다.

순환에 대한 많은 변동이 가능하다. 견고한 방향 전환(tight turn)들은 바깥쪽 다리들이 앞으로 순환하기를 계속하는 동안에, 앞에서 뒤까지 복귀하기 위해 방향전환의 안쪽에 있는 다리를 요구한다. 측면의 이동에 대하여, 앰블러는 다리가 복귀동안에 몸체를 통하여 통과하지 않는 전통적인 곤충 형태의 갈쭉 톱니 바퀴 걸음새를 이용한다.

우리는 전체 비선형 동적 표현에서 비보수적인 발-토양(foot-soil) 상호 작용을 결합하는 메카니즘 모델을 개발했다[7]. 우리는 발-토양(foot-soil) 상호 작용, 동력 소비, 톱오버(tipover)에 대한 퍼텐셜(potential), 그리고 푸트 슬립페이지(foot slippage)를 연구하기 위해서 이 모델을 적용했다[9]. 그 모델은 모의 실험된 시간의 과정(history)을 제공하고 너무 어렵거나 시간이 많이 소비되어 앰블러에는 직접적으로 시험하기 어려운 상황에서 보행물(walker)의 성능에 대하여 자세히 알게 해 준다.

### 3.5 요약 및 결론

이 글에서, 우리는 앰블러 메카니즘 그리고 집적 보행 시스템(integrated walking system)의 성분에 대해 집중적으로 논의 했고, 보행 실험을 문서화 했다.

거슬러 올라가서, 연구는 교통기관과 항해 문제점들에 초점을 맞추었다. 현재, 우리는 관범위한 시험들 — 점점 더 모험적인 지형위로의 보행 — 을 앰블러와 집적 보행 시스템의 능력을 실증하기 위해 수행하고 있다. 미래 보행 실험들은 앰블러의 이동성과 자율성에 보다 더 도전할 것이다. 집적 시스템

(integrated system)이 믿을 수 있는 설비로 성숙함에 따라, 우리는 머리위의 기증기를 제거할 것이다. 이것은 앰블러가 더 거친 실내 코스(더 큰 높이 변동)에 대처하게 할 것이며, 그리고 앰블러가 실외로 이동하도록 한다. 앰블러가 더 긴 범위의 코스(longer-range courses)을 횡단한다면, 밧줄(tether)은 그때 줄여지게 될 것이다. 1991년 12월에 대한 목적은, 밤에, 앰블러가 모래, 바위들, 철도 연결선, 자갈, 그리고 톱밥으로 구성되어 진 100m의 실외 코스를 횡단할 것 이라는 것이다(비기하학적인 모형).

동시에, 증가하고 있는 강조점들은 수행하고 있고, 발전하고 있는 임무의 배경에서, 조작(manipulation)문제들에 놓이게 될 것이다. 이 목적으로, 이동성(mobility)과 조작을 조합하는 것과 연관된 문제점들을 나타내기 위해 표본 획득 툴(sample acquisition tooling)과 감지기(sensors)들이 앰블러에 부착되어질 것이다. 1991년 12월의 또 다른 목적은 실내 표본 임무를 실증하는 것이다. 예를 들면, 동 떨어진 조작자(remote operator)에 의해 지시되어 지는 부분적으로 묻힌 바위를 수집하는 것이다.

### 참 고 문 헌

- [1] Alberts, T.E., W.J. Book and S.L. Dickerson. "Experiments in Augmenting Active Control of a Flexible Structure with Passive Damping." AIAA, Reno, Nevada, January 1986.
- [2] Cannon, R.H. and E. Schmitz. "Initial Experiments on the End-Point Control of a Flexible One-Link Robot." *International Journal of Robotics Research* 3, no. 3 (Fall 1984) : 62~75.
- [3] Bares, J. and Wm. Whittaker. "Walking Robot with a Circulating Gait." In *Proceedings, IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems*, Tsuchiura, Japan, July 1990, pp. 809~818.
- [4] Bares, J. "Orthogonal Walkers for Autonomous Exploration of Severe Terrain." Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, Carnegie Mellon University. (In preparation 1991).
- [5] Brooks, J. and Wm. Whittaker. Orthogonal Legged Walking Robot. United States Patent. (Awarded 1990, to be awarded 1991).



- [6] Krotkov, E., J. Bares, M. Hebert, T. Kanade, T. Mitchell, R. Simmons, and Wm. Whittaker. "Design of a Planetary Rover." 1988 *Annual Research Review*, The Robotics Institute, Carnegie Mellon University (1989) : 9~24.
- [7] Manko, D. "A General Model of Legged Locomotion on Natural Terrain." Ph. D. Thesis, Department of Civil Engineering, Carnegie Mellon University, April 1990.
- [8] Pfeiffer F. and B. Gebler. "A Multistage-Approach to the Dynamics and Control of Elastic Robots." In *Proceedings*, 1988 *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Philadelphia, Pennsylvania, April 1988, pp. 2~8.
- [9] Nagy, p., and Wm. Whittaker. "Experimental Program for the CMU Mars Rover Single Leg Testbed." In *Proceedings*, 20th *Pittsburgh Conference on Modeling and Simulation*, Pittsburgh, Pennsylvania, May 1989, pp. 1825~1829.
- [10] Stewart, David B., Donald E. Schmitz, and Pradeep K. Khosla. "Implementing Real-Time Robotics Systems using CHIMERA II." In *Proceedings, IEEE International Conference on Systems Engineering*, Pittsburgh, Pennsylvania, August 1990.



### 이주장(李柱張)

1948년 11월 14일생. 1973년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1977년 동 대학원 전기공학과 졸업. 1984년 Univ. of Wisconsin 졸업(공학). 1978~79년 미국 G.T.E. Automatic Electric Co. Project Engineer. 현재 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 부교수.