

# 最近의 宇宙이동로봇 매니퓰레이터의 개발

李 柱 張

한국과학기술원 전기 및 전자공학과 교수

우주 로봇 기술은 미래의 우주 탐험에 있어서 유용하며 또한 시급한 상태이다. 그 첫째 이유는 우주가 극단적인 온도와 눈부심 또는 많은 양의 방사선 등으로 인해서 인간에게 적당하지 못한 환경을 가지고 있는 것이다. 다른 이유는 로봇이 우주 비행사들을 대신해서 사용됨으로써 우주선의활동(EVA)에 대한 총체적인 시간을 줄일 뿐만아니라 섬세한 동작이 필요한 인공 궤도의 건설과 우주 비행사가 수행할 수 없는 고도의 능력 등을 발휘할 수 있다. 필요한 우주 비행사의 수와 우주선의 활동 시간을 줄일 수 있는 것은 경제적인 면으로 보거나 우주왕복선의 궤도에 있는 시간을 연장할 수 있는 것 등으로 보아 분명히 좋은 장점이다.

그럼에도 불구하고, 우주에서 로봇의 응용은 많은 문제점이 현존하고 있으며, 어떤 것은 독특하기도해서 로봇 공학 분야와 우주 항해학에서는 활발한 연구 제목이 되고 있다. 우주 로봇과 관련된 제어 문제의 예를 들면 다양한 환경에 따라서 최적으로 조작되는 로봇에 대한

원력 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)사이의 동역학적 상호작용을 고려한 우주 로봇의 제어, 동역학과 계획에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 로봇 관성과 베이스 관성사이의 비가 크거나 로봇의 운동정밀도가 크게 요구될 때 우주 로봇과 베이스 사이에 동역학적 상호작용은 특별히 중요하다. 로봇과 베이스운동을 조심스럽게 계획하고 제어하지 않으면, 우주 주위에 로봇이 있는 것이 불가능하고 동시에 베이스에 대해서도 알맞은 일을 할 수도 없다.

현재 많은 선구적 연구가들이 우주 로봇 기술을 이론적 분석이나 실험적 시스템을 통해서 개발하고 있다. 주로 동역학적 문제, 비균형적인 자연문제 및 제어문제의 세 부분으로 나눌 수 있다. 첫번째 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 Zedd 논문들이다. 이들 저자들은 회전과 위치가 둘 다 자유로울 경우까지 연장해서 생각하였다. 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 작업공간에서 분석되었다. Vafe와 Dubowsky는 우주 로봇 시스템의 동역학을 대표하는 가상의 매니플레이터의 개념을 제안하였다. 가상의 매니플레이터의 개념은 수정된 고정 베이스 로봇의 운동학에 의해서 우주 로봇의 운동학적 행동을 재생산 하도록 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 제어능력에 대해서 서술하였다.

세번째 부분은 우주 로봇의 제어문제이다. Yoshida와 Umetani는 우주 로봇의 일반적인 Jacobian행렬에 기초해서 Resolved Rate와 Resolved 'acceleration제어를 개발했다. 그런 후 정지되어 있거나 움직이는 대상을 포획하기 위한 제어 방법을 적용시켰다. Miyazaki, Masutani와 Arimoto는 우주 로봇 시스템의 피이드백 제어 문제를 기술했다. Xu, Shum, Lee와 Kanade는 불확실성이 존재할 때의 우주 로봇 시스템의 적응 제어 방법을 보여주고 있다. 첫째로, 관성 공간에서 우주 로봇의 동역학적 매개변수 항의 비선형 매개변수화

를 논의하고 관성 공간에서 적응제어 방법을 접근하였다. Ullman과 Cannon은 독립된 항해와 다중 자유로이 날으는 우주 로봇의 제어에 대해서 실험적 연구를 하였다.

### ■ 스스로 움직이는 우주 매니플레이터

우주 정거장에서의 우주 비행사의 차량 밖의 활동(EVA)은 비용이 많이 들고, 위험하고, 그리고 많은 준비를 필요로 한다. 계획에 없었던 수리와 같은 EVA일들은 비행사의 다재다능함과 기술적인 판단력을 필요로 한다. 많은 다른 일들, 특히 일상적인 검사, 유지 및 보수 등은 로봇에 의해 더 안전하고 싸게 할 수 있다.

우주 정거장에서의 EVA일을 위해 현재 사용되고 있는 로봇들은 유능하나, 값이 비싸고 매우 복잡하다. 나사(NASA)의 Fight Telerobotic Servicer(FTS) 그리고 캐나다의 Special Purpose Dexterous Manipulator (SPDM)는 이러한 종류의 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 모퉁이적이고 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 충분하지 않다. 현재의 Carnegie-Mellon 대학의 Robotics Institute의 설계는 독립적으로 움직이는 로봇에 대한 것이므로, 아직 재래의 매니플레이션 일들을 할 수는 없지만, 이것은 스스로 움직이는 우주 매니플레이터 또는 SM2라고 불리운다.

우리의 설계는 다음과 같은 능력을 갖는 원격 조정용 로봇 시스템에 대한 것이다.

- 인간의 감독 하에서의 충분한 자주적인 동작

● 컴퓨터 증대를 갖는 오퍼레이터에 의해 명시된 원격 조정.

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

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 실험실에서는 실제 로봇의 1/3크기의 형태로 개발하고 있다. 로봇은 적당히 스케일된 버팀대 구조의 마디 위를 걷는다. 마디 사이의 거리는 1.67m이고 로봇의 링크는 질량을 최소화하기 위해서 얇은 관 모양의 재료로 만들어진다. 이로 인해 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 견본 로봇의 성능을 실제적으로 테스트하기 위해서 모의 무중력 환경이 필요하다는 것이다. 그리고 비디오 추적과 혁신적인 반균형 메카니즘을 이용한 위치 서보 중력 보상 시스템을 개발하여 다듬었다.

■ 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(그림1). 로봇의 각 끝에 있는 클리퍼(gripper)는 그 자신이 버팀대나 다른 규칙적인 구조의 마디의 구멍에 갈 수 있도록 해준다. 걸음은 클리퍼에 의해 마디를 잡고

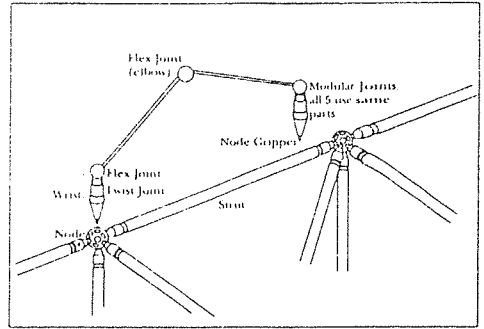


그림1. The robot has five joints connected by two slender links. Grippers at each end attach to threaded holes in the truss nodes, enabling the robot to walk by stepping form node to node.

푸는 것을 교대로 하고, 발을 하나의 마디에서 다음 마디로 돌리는 것에 의해 이루어진다. 각 걷는 단계마다, 로봇의 한 쪽 끝을 마디로부터 풀고, 원하는 마디가 있는 곳까지 90도나 180도를 돌고, 다시 그 마디에 붙인다. SM<sup>2</sup>는 이러한 과정을 발을 바꾸어가며 수행하므로써 버팀대를 위를 걷는다. 크기와 질량 그리고 구조적인 컴플라이언스(compliance)를 최소화하기 위해서, 로봇은 1/3 크기의 버팀대상의 1.67m거리의 인접한 마디 사이를 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 가지고 있다.

로봇 개발의 시발점에서, 우주 정거장에서 사용될 가상의, 실 크기의, 독립식의 로봇을 설계하였다. 설계는 모터나, 드라이브, 링크, 매니플레이션 장치, 그리고 적당한 활동 범위에 필요한 보드상의 파워 서플라이(batteries)와 같은 주요 부품들의 측정된 값을 이용하였

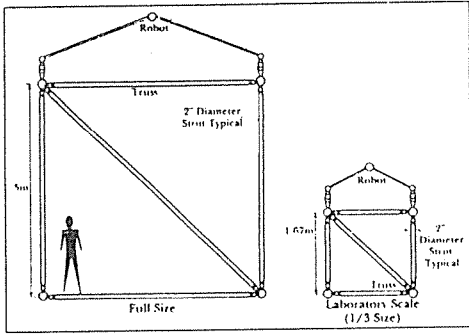


그림2. Overall dimensions of the truss and robot are scaled to  $\frac{1}{3}$  to permit experiments in the laboratory, while local dimensions (sizes of nodes, joints and grippers) are the same to keep local behavior similar, and mechanism size workable.

다. 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 유지되도록 하는 축소방법을 이용하여 설계하여 만들어졌다. 버팀대와 로봇의 전체 크기는 1/3로 줄었으나, 지엽적인 크기(버팀대 마디, 관절, 클리퍼)는 같다(그림2). 이것은 매카니즘이 작동을 안 할 정도로 작지 않으면서 보통의 실험실에서 사용할 수 있다.

■ 중력보상시스템

궤도를 도는 우주 정거장에서의 무중력 상태는 로봇의 설계와 성능에 크게 영향을 끼친다. 무중력 상태에서는 긴 로봇이 큰 질량을 움직일 때에도 작은 힘과 전력 소모를 요한다. 지구상에서 실제적인 실험을 수행하기 위해서, 중력 보상 시스템이 개발되었다. 중력 보상 시스템(그림3)은 피동의 수직 반 중력 시스템과 능동적으로 제어되는 평면 시스템으로 이루어졌다.

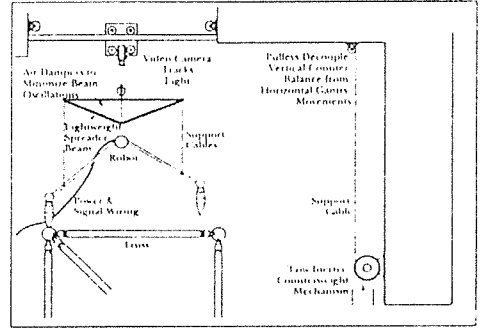


그림3. Gravity compensation system simulates zero-gravity for realistic laboratory experiments. A passive system of counterweights, cables and pulleys provides a constant, vertical balance force. A powered, overhead carriage is servocontrolled to keep the support point directly above the robot.

■ 시각 그리고 감각시스템

재래의 단단한 로봇은 일반적으로 관절의 위치와 속도에 관한 정보만을 가지고 위치 제어를 하였다. 이러한 정보는 작동 중에 심각한 구조적인 구부러짐을 갖는 로봇을 제어하기에는 불충분하다. 그러한 구부러짐은 원하지 않는 구조적인 진동을 야기시킬 수 있고, 끝 점과 로봇의 다른 점들의 위치가 불확실해질 수 있다. 이전의 관절 센서들에 더하여  $SM^2$ 는 이러한 문제점들을 다루기 위해 두개의 센서를 더 사용한다. 첫째로, 단일 축 가속도 미터(accelerometer)는 로봇의 두 끝에서의 측면의 가속도를 측정하고, 나중에 서술할 신호 필터링에 의한 지연을 보상하기 위해 사용될 신호를 발생한다. 가속도 미터는 능동 감쇠에서 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 측정값만을 사용했을 때보다 더 믿을 수 있는 글

리퍼 스크류의 삽입을 제공한다. 시각 시스템의 사용은 끝 점의 위치 측정 에러를 약 2cm (전체 크기의 로봇의 경우의 6cm에 해당함)에서 0.5cm미만으로 줄였다. 이것은 만족할만한 클리퍼 스크류의 삽입을 위해 충분하다.

■ 로봇 제어 방법

로봇 동작의 제어는 세가지 요소에 의해 어려움을 나타낸다. 첫째, 로봇은 링크와 관절의 compliance때문에 매우 유연하여 최대 관절 토크하에서 148mm(5.8in)의 끝 점의 빗나감을 나타낸다. 이것은 구조적인 진동에 대한 민감성과 끝 점의 위치의 많은 불확실성을 야기시킨다. 둘째, 로봇의 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 응력이나 진동을 최소화하기 위해 관절 토크가 작기 때문이다.

지난 10년 동안 유연한 팔의 제어에 큰 관심이 기울어져 왔다. 이들의 대부분은 이론적이었었고, 단순한(종종 과장된 유연성을 갖는) 팔의 엄격한 identification과 제어에 집중되어 왔다. 우리의 목표는 필수적인 가벼운 설계에 의한 관절과 링크의 유연성을 갖는 실제의, 5관절, 3차원 로봇을 제어하는 것이다.

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

- 구조적인 진동 제어, ● 적응 제어, ● 위치/힘 제어의 혼합 ● 로봇의 경로와 동작 계획

■ 제어구조

제어 구조는 제어 컴퓨터와 이에 연관된 하드웨어, 실 시간 운영체제 그리고 제어 방법과는 독립적인 다른 소프트웨어(I/O 프로세싱 그리고 주변 프로세스와의 통신)를 포함한다. 현

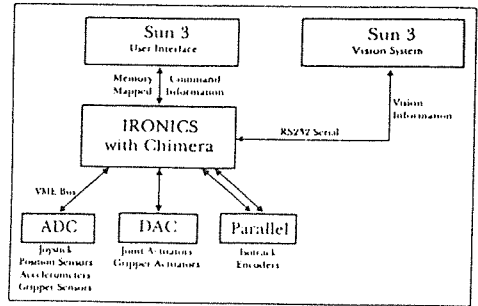


그림4. The current control architecture is based on a single Ironics 68020 CPU communicating with the robot via ADC and DAC interfaces. Parallel and serial ports allow communication with vision systems and operator controls. A SUN 3 permits operator inputs and graphically displays data.

재에는 실시간 제어는 CHIMERA II 실시간 운영체제가 돌아가는 Ironics 68020-based 단일 보드 컴퓨터에서 구현된다. 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 그림 4에 있다.

■ 휴먼 인터페이스

사람의 인도와 자주적인 로봇의 컴퓨터 제어라는 두가지 이점을 가질 수 있는 원격 로봇 시스템(telerobotic system)이 되도록 설계된다. 우리는 낮은 수준으로부터의 부드러운 이동과 원격 로봇 제어의 다양한 수준을 통한 로봇 제어 정거장에서의 오퍼레이터에 의한 관절의 전신 작동, 그리고 목표가 결정된 반자동 오퍼레이션에 의한 모든 방법을 제공하기를 원한다. 여기에서 인간 오퍼레이터는 증가하는 복잡하고 높은 수준의 명령을 로봇에 준다. 계층적인 video-display-based 제어 구조는 인간 오퍼레이터가 주어진 일이나 로봇 동작에

따라 적절한 제어 수준을 선택할 수 있도록 해 준다. 제어 시스템은 model-driven이다. 그래서 예측하는 display는 자동적으로 조절되는 작동 모드에 이용할 수 있다.

■ 최근의 개발동향

5축의 간단한 로봇에서 7축의 특별한 형태인 Slight Modified Self Mobile Space Manipulator (SM<sup>3</sup>)로 바꾸어서 연구를 진행 중이다(그림5). 기존의 5축의 walking로봇의 node gripper에 extra 2축의 손의 구실을 하는 part gripper를 부착하여 물건을 집어서 운반할 수 있도록 하였다. vision을 위해서 두 개의 작은 카메라가 part gripper(tip)와 base node gripper(고정됨)에 부착되어 있다. Tip 카메라는 part gripper의 세너 근처에서 대상물을 볼 수 있게 부착되어 있고, base 카메라는 로봇의 tip을 따라가거나 관심 있는 장소를 광범위하게 볼 수 있도록 회전하기도 한다.

중력 보상 시스템은 수동적인 수직 직교 좌표 시스템의 동작에서 능동적으로 움직이는 원통형 좌표 시스템으로 바꾸어 동작하는 Second Gravity Compensation System (GC II)이다. 이 시스템은 boom이 로봇의 고정된 끝점 위에 선회축이 되어 있으며, 부하의

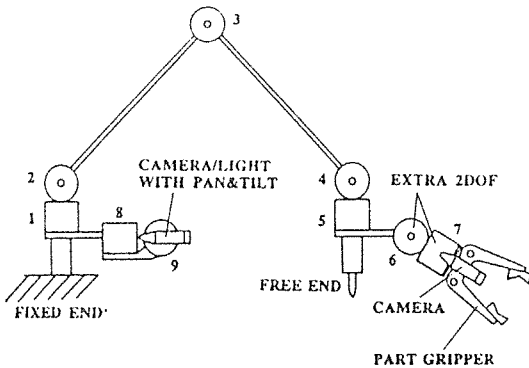


그림5. Seven-joint configuration for manipulation.

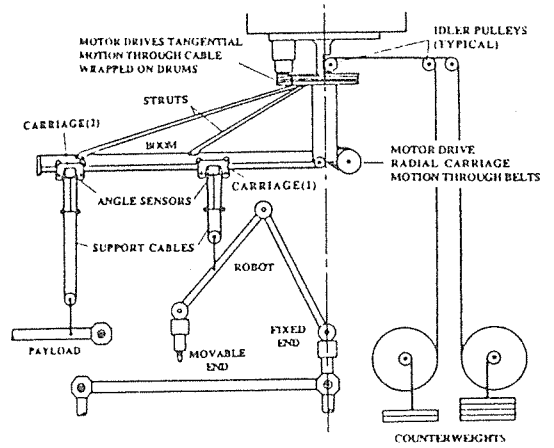


그림6. Schematic of the new gravity compensation system(GC II).

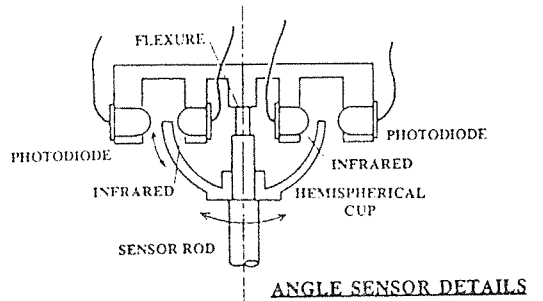
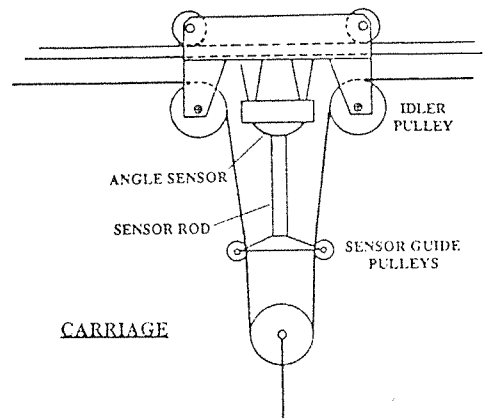


그림7. Carriage assembly and cross-sectional view of the angle sensor developed for GC II. The sensor provides precise angle measurements about two axes based on the amount of light received by the photodiodes.

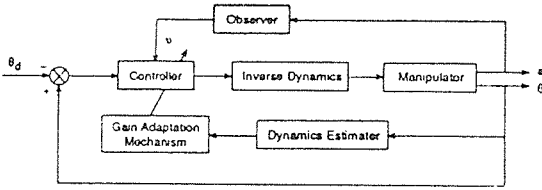


그림8. Block diagram of the configuration-independent control scheme based on the gain-schedule approach.

운반은 로봇의 방사형 움직임과 조화되는 boom을 따라서 움직이게 된다(그림6, 7).

로봇의 형태와 부하의 변화가 로봇의 동역학에 지대한 영향을 줌으로 종래의 PID 제어기에서 적응제어기로 바꾸었다. 특히 유연한 로봇 시스템에서 동역학적 구조(inertia와 stiffness matrices)가 로봇 형태에 따라 다르기 때문에, 조인트-각 측정에 의해서 평가된 동역학을 이용한 gain-schedule 방법을 구현하였다. model-reference 방법에 기초를 둔 적응제어 방법을 개발하고 위치, 질량 그리고 부하의 inertia 모우먼트에 있어서 불확실성을 자동적으로 보상하였다(그림8,9).

### ■ 요약 및 결론

우리는 단순한, 7-DOF, 1/3크기의 실험실 버전의 로봇을 개발하고 있다. 이 로봇은 버팀대 위나 우주 정거장 밖의 다른 표면에서 걸을 수 있도록 설계된다. 이것은 삼입이나 운반 그리고 단순 유지 절차와 같은 일상적인 일을 할 수 있을 것이다. 우리는 로봇과 모의 무중력 실험을 위한 중력 보상 시스템을 설계하고 만들었다. 우리는 우리의 매우 유연한 로봇의 운동을 위한 서보제어를 개발하였고 원형적인 오퍼레이터 인터페이스를 개발하고 있다. 신경회로망을 이용한 시각 시스템이 버팀대 마디 부착을 위해 요구되는 정확한 위치제어에 도움을 주기 위해서 만들어졌다. SM<sup>3</sup>는 버팀대의 가로 막히지 않은 바깥 영역에서 잘 걸을 수 있

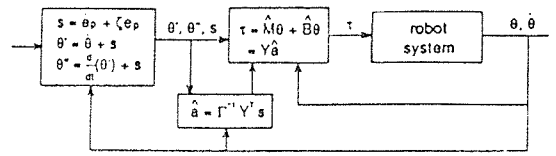


그림9. Block diagram the adaptive control scheme for unknown dynamic parameters.

음을 데모하였다. 가까운 미래에는 우리는 다음을 계획하고 있다.

- 로봇 하드웨어와 제어 그리고 중력 보상 시스템을 더 다듬는 것.
- 힘 피드백을 포함한 더욱 더 진보된 인간 인터페이스를 갖는 실험.
- 움직이는 로봇에의 고도의 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 로봇 연구는 더 넓은 충격효과를 가질 것이다.

예를 들어, 우주에서의 유연성 로봇의 제어는 현재 있는 것보다 덜 단단한 저가의 산업 또는 상업 로봇에도 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 있다. 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 함께 하여 더 생산적일 수 있는 영역에서 부가적인 산물이 나오기를 기대한다.