

우주로봇 원격제어 테스트 베드

The Test Bed for Teleoperated Space Robot

° 김동구*, 박종오**

*한국과학기술연구원 휴먼로봇센터(Tel:+82-2-958-5615;Fax:+82-2-958-5629;E-mail:dgkim@kistmail.kist.re.kr)

**한국과학기술연구원 휴먼로봇센터(Tel:+82-2-958-5621;Fax:+82-2-958-5629;E-mail:jop@kistmail.kist.re.kr)

Abstracts Using Telesensor programming method, We control the space robot which has two 2-DOF manipulators. To make this control system, we divide total works by elemental operation. And We make a simulation system that can simulate sensors and robot. In the simulation system, we make a sensor data and robot paths by "Teaching by showing" method. And Using these data, we control the real space robot. This off-line method can solve long time delay problem in teleoperation.

Keywords Telesensor programming, Elemental operation, Sensor model, Teach by showing

1. 서론

우주에서 작업하는 로봇의 가장 이상적인 형태는 인간의 판단이나 조정을 필요로 하지 않으면서 원하는 작업을 수행할 수 있는 완전한 자동 로봇이다. 그러나 현재의 기술 수준으로는 이런 완전한 자동 로봇의 구현이 불가능하다. 따라서 완전한 자동 로봇의 전 단계라 할 수 있는 인간의 판단 능력과 로봇의 자동 수행 능력을 조합한 원격 제어 방법이 제시되었다.

본 원격 제어 방법은 인간에 의하여 필요한 작업이 정의되고 우주 로봇의 자율 제어계에 의하여 작업이 수행되어 진다. 이 제어 방법을 Telesensor programming이라고 한다. 이 제어 방법은 자율 제어계를 갖지 않는 일반 적인 원격 제어에서 발생하는 신호전달의 지연 문제에 영향을 받지 않는다.

본 연구에서는 Predictive graphic을 이용한 teleoperation과 telesensor programming을 이용하여, 우주작업로봇이 장애물을 피하여 주어진 목표물에 접근하여 목표물을 포획하는 작업을 할 수 있는 시스템 개발을 목표로 하였다.

2. Tele-sensor programming

2.1. Tele-sensor programming의 정의

전체 작업을 센서를 기반으로 하여 제어하는 요소작업(Elemental operation)으로 나누고, 각 요소작업을 지상의 시뮬레이션 환경에서 조정자의 교시에 의하여 프로그래밍하고, 이를 원격지 우주작업 로봇에 전달하여 저장한 후, 로봇의 지역 자율성(Local Autonomy)에 의하여 실행하는 방식의 원격제어를 말한다. 즉 로봇의 제어에서 local autonomy를 수행하는데 센서들의 인지 값을 사용하는 것을 말한다. 이 프로그램 방식은 Off-line programming의 일종으로 로봇과 센서의 교시는 Teaching by showing 방법에 의하여 교시된다. 이 제어 방법은 인간과 로봇이 각각 특정한 작업을 맡아서 하는 shared-autonomy 방식의 접근 방법이다. 로봇 시스템에 지역 자율성을 부여함으로써 Time-delay가 존재하는 teleoperation에서 유용하게 사용될 수 있다.

일반 Graphic simulation을 이용하여 off-line으로 프로그램

을 생성할 경우, 생성된 명령은 joint나 cartesian level로 제한된다. 이 것은 프로그램 시스템에서의 기하학적 모델과 실제 시스템이 일치할 때만이 유용하다. 그러나 센서를 기저로 하여 제어를 하는 tele-sensor programming은 프로그램 환경과 실제 시스템의 불일치에 크게 영향을 받지 않는다.

2.2 Tele-Sensor Programming에 사용되는 개념

본 연구에서 시간 지연을 해결하기 위하여 제안된 tele-sensor programming에 나타나는 개념들을 정리하면 다음과 같다.

① Shared autonomy

전체 작업을 작은 요소작업으로 나누고, 인간은 이 요소작업을 규합하여 전체 작업을 계획하고, 로봇은 요소작업을 작업자가 지정한 순서대로 실행하는 개념을 말한다. 즉, 다음과 같이 정리 할 수 있다.

Human Operator	Low frequency	Planning	Task-directed
Robot System	High frequency	Execution	Sensor-based

인간은 전체 제어 시스템에서 hi-level에서 전체적인 작업을 정의하는 일을 하고, 로봇은 센서 값들을 정보로 받아들여 인간에게 의지하지 않고 요소 작업을 수행한다. 즉, 대략적인 명령이 인간 조정자에 의하여 하달되고 로봇은 이 명령을 지역 자율제어 시스템에 의하여 정밀하게 수행한다.

② Task-directed programming

조정자가 로봇을 프로그램 할 때, 조정자는 센서를 기저로 하는 요소작업에 의하여 프로그램을 한다. 조정자는 로봇이 각각의 요소작업을 어떻게 실행하는가에 대하여 고려를 할 필요가 없이, 요소작업들을 규합하여 원하는 작업을 프로그램 하면 된다. 즉, 조정자는 PLACE <PART> TO <PLACE> 와 같은 명령들에 의하여 전체 작업을 프로그램 하면 된다. 각 요소작업의 수행은 센서값들을 이용하는 지역 자율제어에 의하여 수행된다.

③ Elemental operation(요소작업)

복잡한 전체 작업을 요소작업들로 나눈다. 각 요소작업들은 조정자에 의하여 시뮬레이션 환경에서 정의되어 진다. 요소 작업

은 다음과 같이 3가지로 분류 할 수 있다.

1. Pose-controlled elemental operation

이 작업은 관절공간이나 출력공간(Cartesian space)에서의 목표 자세 값으로 정의되어진다. 목표 자세 값이 주어지면, 로봇은 목표 자세까지의 경로를 생성하고 이를 추종한다. 즉, Cartesian space의 모든 6자유도가 자세(위치와 회전각)값에 의하여 제어된다. 이 요소작업들은 시뮬레이션 환경에서 3차원 입력기를 통하여 로봇의 말단 점을 조정하여 목표 자세 값을 교시할 수 있다.

2. Sensor-controlled elemental operation

이 작업은 센서값들에 의하여 정의되어진다. 목표 센서값이 주어지면 로봇의 센서들에서 값을 입력받아 이를 제어에 사용한다. 이 작업은 Cartesian space의 모든 6자유도가 센서값들에 의하여 제어된다. 이 요소작업들은 시뮬레이션 환경에서 3차원 입력기를 통하여 로봇을 조정하여 교시하면서 센서값들을 저장한다. 이 요소작업에 의하여 정의된 작업은 유사한 환경에 처한 비슷한 작업을 처리 할 수 있다. 예를 들면, 거리 측정 센서를 사용하여 로봇의 그립퍼를 물체에 일정한 거리까지 접근시키는 접근의 요소작업은 다른 거리에 있는 물체에 대하여 같은 요소작업으로 접근시킬 수 있다. 즉, 그립퍼와 물체와의 관계를 고유 센서값으로 정의하였기 때문이다.

3. Shared-controlled elemental operation

이 작업은 위의 두 요소작업이 혼합되어 있는 작업이다. 즉, Cartesian space의 일부 자유도는 자세에 의하여 제어되고, 다른 자유도들은 센서에 의하여 제어되는 것이다. 예를 들면, contour 추적과 같은 작업은 자세 제어 자유도로 Ztrans, Xrot, Yrot, Zrot를 선택하고, 센서 제어 자유도로 Xtran, Ytran를 선택한다. 즉, Cartesian space의 자유도를 제어하는데 있어서 일부 자유도를 센서값들을 기준으로 제어하는 것이다.

⊙ Programming by demonstration(Teaching by showing)

위에서 정의된 각 요소작업을 교시하는 방법을 말한다. 즉, 조정자는 요소작업을 정의 내리고 그 것을 시뮬레이션 환경에서 로봇을 조정하여 보여 줌으로써 필요한 자세 값과 센서 값들을 정의하는 방법이다.

3.전체 작업 절차

우주 공간에 존재하는 목표물을 잡기 위하여 1단계로 Predictive graphic을 사용하는 teleoperation 방법에 의하여 우주로봇을 telesensor programming방법이 사용되기 전까지의 영역으로 이동한다. 이 제어 방법 동안 우주로봇과 지상 관계소 사이에는 제어 신호의 시간 지연이 발생한다. 그러므로 지상 관계소에서는 우주로봇의 모델을 이용한 predictive graphic을 보면서 우주로봇을 조정한다. 또한 우주로봇이 지시된 명령을 수행하는지 확인하기 위하여 실제 우주로봇의 상황을 모니터링 한다. 본 제어 방법은 제어 신호의 시간 지연 문제 때문에 복잡한 작업은 수행 할 수가 없다. 그러므로 목표물을 잡기 전 단계로써 우주로봇을 일정한 영역으로 이동 할 때에만 사용된다.

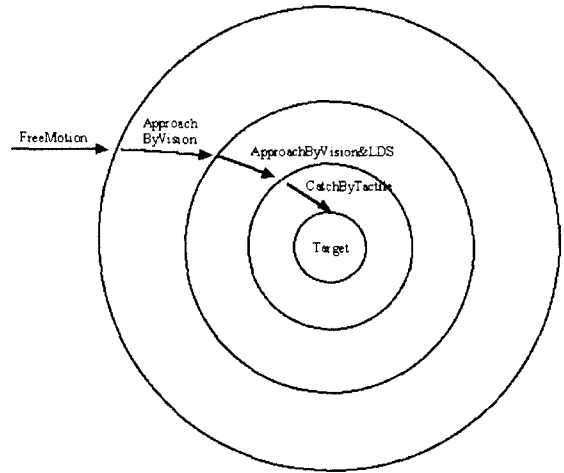
2단계로 telesensor programming 제어 방법에 의하여 목표물을 잡는다. Telesensor programming에 의하여 센서를 기준으로 전체 목표물 잡기 작업을 요소 작업들로 분할한다. 먼저, Vision 센서에 의하여 입력받은 우주로봇과 목표물과의 거리 정보를 이용하여 우주로봇을 목표물에 좀더 접근시킨다.

다음 단계로 Vision 센서와 Laser Distance Sensor(LDS)를 사용하여 우주로봇을 목표물을 잡을 수 있는 영역까지 이동한다. 이때, Vision 센서와 LDS의 센서 fusion에 의하여 목표물과 우주로봇 사이의 정확한 거리 정보를 구한다.

마지막으로, Tactile 센서를 사용하여 우주로봇에 의하여 잡히

는 목표물을 적당한 힘으로 잡는다.

우주로봇의 목표물 잡기 과정을 [그림 1]에 나타냈다.



[그림1] 우주로봇의 목표물 잡기 과정

여기서, Free Motion이란 predictive graphic을 사용하여 teleoperation을 사용하여 우주로봇을 조정하는 것을 말한다.

4. 지상 제어 시스템의 구성

우주로봇을 predictive 그래픽을 이용한 teleoperation과 telesensor programming에 의하여 제어하기 위하여 지상의 제어 시스템은 teleoperation기능, 요소 작업 정의 기능, 요소 작업을 이용한 프로그래밍 기능, 프로그램 실행 기능 등의 부가적 기능을 갖는 통합 제어 시스템이 필요하다.

4.1. TeleOperation 기능

Teleoperation 기능이란 지상의 관계소에서 우주로봇 모델을 이용하여 만들어 낸 predictive graphic화면을 보면서 우주로봇을 teleoperation으로 조정하는 것을 말한다.

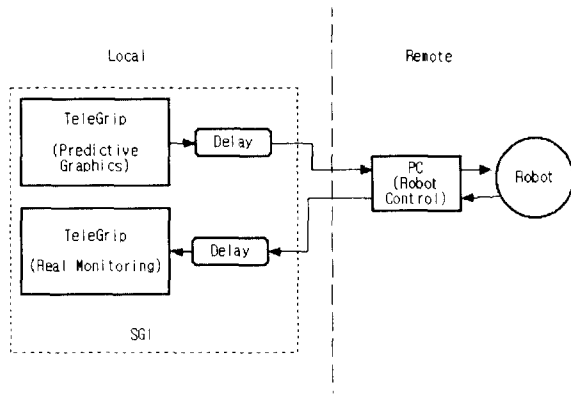
이 제어 방법에 의하여 우주로봇을 정밀하게 제어하기 전 단계로, 대략적으로 원하는 위치까지 이동시킬 수 있다. 이 제어 방법에서는 제어 신호의 전달에서 시간지연이 발생하기 때문에 정밀한 작업의 수행이 불가능하다. 그러나 장애물로부터 어느 정도의 거리를 유지하면서 우주로봇을 이동시키는 작업정도는 수행 할 수 있는 제어 방법이다. 그러므로 이 제어 방법을 사용하여 telesensor programming이 작동하기 위한 영역까지 우주로봇을 이동시킨다. 본 제어 방법을 구현하기 위하여 TeleGrip과 Magellan이 사용된다. TeleGrip은 3차원 시뮬레이터로써 우주로봇 모델과 연관되어 predictive graphic과 실제 우주로봇의 모니터링에 사용된다. Magellan은 3차원 입력기로써 predictive graphic상의 지상 우주로봇을 제어하는데 사용된다.

Teleoperation 제어 방법의 구성도는 [그림 2]와 같다.

지상의 조정자는 우주로봇의 모델에 의하여 만들어진 predictive graphic을 보면서 우주로봇을 magellan으로 조정한다. 이 때 발생된 제어 신호는 시간 지연을 거쳐서 원격지 우주로봇의 시스템에 전달된다. 전달된 제어 신호에 의하여 우주로봇이 작동하고 그 상태를 지상의 관계소에 전달한다.

우주로봇을 나타내기 위하여 Telegrip을 이용하여 모델링을 수행하고, 지상관계소와 우주로봇 사이의 통신을 나타내기 위하여 TCP/IP socket 통신을 사용한다.

실제 시스템에서 존재하는 원격지간의 신호 전달 시간 지연을 시뮬용 시스템에 구현하기 위하여 신호 지연 기능을 추가한다.



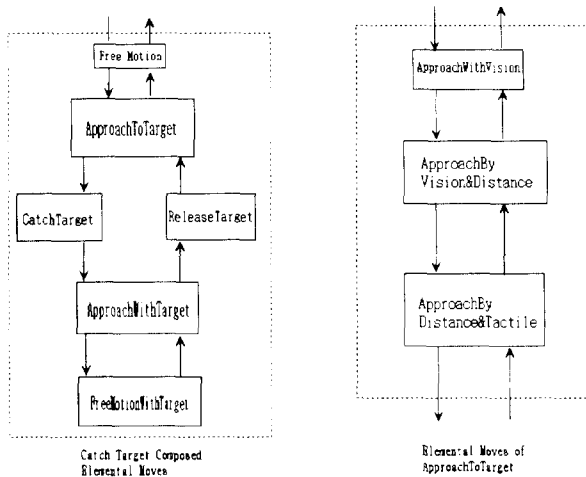
[그림 2] Teleoperation 제어 구성도

원격지 우주로봇의 제어기는 지상 관제소에서 만들어낸 제어 신호를 받아서 이를 사용하여 제어를 수행하고 현재의 상태를 지상의 관제소에서 모니터링 할 수 있게 전달한다.

4.2. 요소작업 정의(Define Elemental Operation)

Telesensor 프로그래밍을 구현하기 위하여 먼저 전체 작업을 센서를 기저로 하는 요소작업으로 분할하여야 한다. 분할된 요소작업은 이름이 정의되어 있고 Teaching By Showing에 의하여 교시되어 진다.

물체를 잡는 작업을 그룹 요소 작업과 기본 요소 작업으로 나누면 다음과 같다.



[그림 3] 물체 잡기 작업의 요소작업

다음은 분할 된 요소작업을 정의한다. 각 요소작업은 구조체의 형식을 취하며, 사용되는 센서와 센서 데이터, 그리고 사용되는 제어기로 구성된다. 즉 요소작업명 = {센서, 데이터, 제어기}의 형태이다. 일단 요소작업명이 정의되어지면 그 요소작업에 필요한 센서를 지정한다. 지정된 센서들에 대한 교시는 Teaching By Showing에 의하여 행하여진다. 제어기는 요소작업을 수행할 때 필요한 센서 공간에서 Cartesian 공간으로의 함수를 정의한다. 즉, 다음과 같다.

$$\Delta T = f(\Delta S)$$

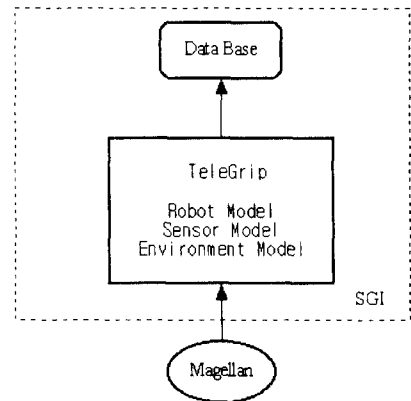
여기서 ΔT : Cartesian 공간, ΔS : Sensor 공간

정의된 센서의 교시는 Teaching by showing에 의하여 행한다. 즉, 우주로봇의 모델로부터 얻어진 그래픽 화면을 보면서 정의된 작업에 해당하는 동작을 취하면 이 때 우주로봇의 위치값과 회전각값뿐만 아니라 정의된 센서들의 값이 저장된다. 이 센서값들은 우주로봇과 목표물과의 상대적 값으로써 후에 실제 우

주로봇의 수행에 사용된다.

교시 작업에서의 구성은 [그림 4]와 같다.

정의된 요소작업들은 지상 관제소의 시뮬레이션 환경에 저장되고 또한 시간지연을 거쳐 우주로봇의 제어 컴퓨터에도 저장된다.



[그림 4] Teaching By showing 구성도

4.3 Off-line Programming

요소작업에 의하여 정의된 요소작업들을 이용하여 전체 작업을 구성한다. 전체 작업은 프로그램 명과 요소작업에 의하여 구성된다. 즉, 프로그램 명과 요소작업은 구조체의 형식을 취한다. 프로그램 명 - {요소작업}

만들어진 프로그램은 조정자에 의하여 우주로봇에 명령되어 진다. 우주로봇은 프로그램 명을 받아들여서 사용되는 요소작업들을 이용하여 지역 자율제 제어를 수행한다.

4.4 Off-line program 수행

프로그램된 전체 작업을 지상에서 시뮬레이션으로 미리 실행해 볼 수도 있고, 실제 로봇 시스템에 실행 명령을 내릴 수도 있다.

시뮬레이션의 경우, 실제 시스템에서 수행을 하기 전에 지상의 simulation 환경에서 수행을 미리 해본다. 프로그래밍과정에 의하여 정의된 프로그램을 Main Function이 인지하고 저장된 데이터 베이스에서 필요한 요소작업을 순서에 따라서 실행한다.

프로그램을 실제 우주로봇 시스템에서 수행하기 위하여 사용하는 프로그램 명을 명령한다. 프로그램 명은 시간지연을 거쳐 원격지 우주로봇 시스템에 전달된다. 전달된 명령은 원격지 우주로봇 시스템에 의하여 해석되고 수행된다.

4.5. Monitoring

우주작업 로봇의 작업 수행 결과를 확인하기 위하여 모니터링 기능이 필요하다. 모니터링은 Free motion에서의 것과 Tele-sensor programming의 수행에서의 것으로 나눌 수 있다.

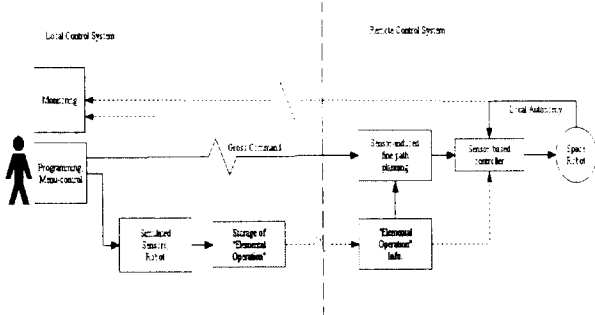
Free motion에서의 모니터링은 지상의 가상 우주로봇과 원격지의 실제 우주로봇의 동기에서 시작된다. 동기가 된 상황에서, 지상의 가상 우주로봇을 조정하면 시간 지연을 거쳐 원격지 로봇에 전달된 명령이 수행되고 센서들로부터 실제 로봇의 데이터가 시간지연을 거쳐 지상의 관제소에 전달된다. 전달된 센서값들을 이용하여 영상 중첩을 통하여 동작결과를 모니터링 한다.

Tele-sensor programming에 의하여 원격지의 로봇이 조정될 때는, 시간 지연을 거쳐 전달된 명령이 수행되는 과정을 모니터링 하게 된다. 이 때, 시뮬레이션에 의한 로봇의 움직임과 실제 수행되는 로봇의 움직임을 동시에 영상 중첩을 통하여 모니터링 하게 된다. 또한 각 요소작업에 사용되는 센서들의 값을 표시할

으로써 로봇의 작동 에러를 수치적으로 정확하게 파악할 수 있게 된다.

5. 우주작업 로봇의 실험 환경

우주작업 로봇을 원격 제어하는 시스템을 실험하기 위하여 그림과 같은 환경을 만들었다.



[그림 5] 전체 시스템 구성도

5.1. 지상관제소 시스템

5.1.1 센서 모델링

원격지 우주작업 로봇이 자율성을 가지고 정확한 작업을 수행하기 위해서는 지상의 시뮬레이션 시스템은 실제 시스템에 사용되는 모든 센서들의 기능을 에뮬레이션 하는 기능을 갖추어야 한다. 센서는 크게 두 종류로 나눌 수 있다. 첫 번째가 접촉 센서들이고 두 번째가 비접촉 센서들이다. 비접촉 센서들은 간단한 상관관계만을 에뮬레이션 하면 된다. 그러나 접촉 센서들은 센서 접촉점의 스티프니스, 접촉 방향들을 고려하여 에뮬레이션 하여야 한다. 본 연구에 사용된 센서는 레이저 거리 센서, 비전 센서, 그리고 택타일 센서이다. 레이저 거리 센서의 특성을 에뮬레이션 하기 위하여 센서 빔과 접촉하는 가장 가까운 물체의 교차점을 구한다. 실제 레이저 거리 센서는 3각 측정법을 사용하여 미리 정하여진 범위 내에서 매우 정확하게 거리를 구하여 준다. 본 연구에서는 물체 표면의 광학적 특성을 무시하였다. 그러므로 물체의 반사 특성은 고려하지 않고, 간단하게 센서와 물체와의 거리만을 계산하였다. 우주작업 로봇에서 카메라는 로봇의 위치와 회전각을 파악하는데 사용된다. 그러므로 필요한 카메라의 특성을 에뮬레이션 하는데 복잡한 카메라 모델은 필요하지 않다. 본 연구에서는 카메라의 물리적 특성 또는 정확한 픽셀의 값이 필요치 않고 그 정보로부터 로봇의 위치와 회전각을 알아내는 것이 중요하다. 본 시스템은 카메라의 출력 특성만을 에뮬레이션 하면 된다. 택타일 센서는 로봇 팔의 끝에 장착되어 로봇이 물체를 잡을 때, 기준값으로 사용된다. 택타일 센서는 접촉센서로서 본 연구에서는 택타일 센서와 물체와의 기하학적 관계로부터 그 값을 도출하는 방법을 사용하였다. 즉, 택타일 센서의 각 요소와 물체와의 거리로부터 택타일 센서의 출력값을 구한다.

5.1.2 Sensor-based Controller

Sensor based control을 위하여 다음의 제어기를 기본 제어기로 삼는다.

로봇의 nominal pose와 nominal sensor 값들의 관계는 일반적으로 비선형 함수관계이다.

$$y^* = f(x^*)$$

f : Nonlinear function

y^* : Nominal sensor values

x^* : Nominal pose

이 식의 1차 기구학적 관계식은 다음과 같다.

$$\dot{y}^* = J\dot{x}^*$$

여기서, J 는 다음과 같다.

$$\frac{\partial y_i}{\partial x_j} = J_{i,j}$$

위의 식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta y = J\Delta x$$

이 선형 관계식의 Least square solution은 다음과 같다.

$$\Delta x = (J^T J)^{-1} J^T \Delta y$$

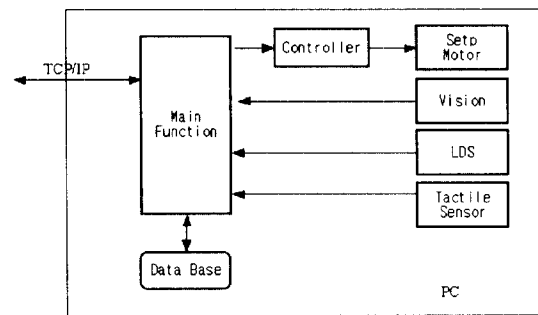
$$\Delta x_k = (J^T J)^{-1} J^T (y_k - y^*)$$

여기서 Jacobian을 해석적으로 구하기 힘들면 다음과 같이 구한다.

$$J_{i,j} \approx \frac{\Delta y_i}{\Delta x_j} \Big|_{x^*} = \frac{y_i(x^* + \Delta x_k) - y_i(x^* - \Delta x_k)}{2\Delta x_k}$$

5.2. 작업 수행 원격지 우주로봇

각종 명령을 수행하는 실제 로봇 시스템은 다음과 같이 구성된다.



[그림 6] 우주로봇 시스템의 구성

Main Function은 TCP/IP통신을 통하여 지상에서 오는 각종 명령을 해석하고 이에 상응하는 작동을 하는 역할을 한다. 또한, Vision센서, LDS, 촉각 센서에서 들어오는 신호를 처리한다. 우주로봇의 매니플레이터 구동은 스텝 모터를 이용하여 한다.

6. 결론

원격지 우주로봇을 지상에서 제어 할 때 신호 전달에서 오는 시간지연에 의하여 로봇을 제어하기가 어렵다. 본 연구에서 사용된 Off-line 프로그램 방법의 하나인 tele-sensor programming 방법을 사용하면 신호 전달의 지연에서 오는 문제를 해결 할 수 있다. 또한 본 제어 방법은 Off-line 프로그램에서 흔히 부딪히게 되는 calibration문제도 어느 정도 해결 할 수 있다. 앞으로의 연구 과제는 결정되지 않은 환경에서 tele-sensor programming을 하고 실제 측정 정보를 이용하여 모델을 갱신하는 기능을 추가하는 것이다.

참고문헌

- [1] Steve H. Murphy and John Ting-Yung Wen "Analysis of Active Manipulator Elements in Space Manipulation" in IEEE transactions on robotics and automation, vol 9, no. 5, October 1993
- [2] W.J. Book "Structural Flexibility of Motion Systems in the Space Environment" in IEEE transactions on robotics and automation, vol 9, no. 5, October 1993