

3차원 그래픽을 이용한 원격로봇 제어

Telerobot Control Based on 3-D Graphics

°김창희, 황석용, 이재경, 김승호

한국원자력연구소 원자력산업용 로봇기술개발팀

(Tel: 868-2930; Fax: 868-8833; E-mail: chkim3@nanum.kaeri.re.kr)

Abstract Telerobot system is being developed for the application to nuclear power plants by Korea Atomic Energy Research Institute. Human-machine interaction and interface are very important elements of telerobotic systems. The main purpose of this study is developing a control system based on 3-D graphic techniques for the easy user interface and realistic visual information supply. This system possesses the abilities for (1) virtual work environment modelling and simulation, (2) kinematic animation include redundant behavior (3) interfacing with a real robot system, (4) transformation between real and virtual mode within the same graphics system. This system is especially focused on enhancing the overall efficiency and reliability of nozzle dam installation task inside water chamber of steam generator in nuclear power plant.

Keywords Graphics, Telerobot, On-line Control, Nuclear Power Plant, Nozzle Dam Task,

1. 서론

한국원자력연구소에서는 가압경수로형 원자력발전소의 점검 및 보수 작업시 작업자의 방사선 피폭이 높은 증기발생기 수실에 노즐담 설치 및 회수작업을 원격으로 수행 가능한 원격로봇 시스템을 개발하고 있다. 증기발생기에 노즐담을 설치하는 이유는 수실 내 노즐에 위치한 노즐링에 댐을 위치시키고 댐을 노즐링에 적절한 방법으로 고정시켜 수실의 침수를 방지하기 위함이다. 내부 직경이 3194 mm 인 증기발생기 수실은 내부가 비어 있는 구의 1/4에 해당하는 구조로 되어 있으며, 전면 및 상부는 튜브 쉬트 및 플레이트로 막혀있다. 증기발생기 수실은 노즐을 통하여 원자로와 직결되어 있다. 이와 같이 협소하고 제한된 작업공간내에서 작업을 수행하여야 하는 원격로봇을 효율적으로 조작하기 위한 인간-기계 상호간의 인터페이스는 로봇의 작업 성능을 좌우하는 매우 중요한 분야이다.

그래픽을 이용한 사용자 인터페이스 및 컴퓨터 그래픽을 이용하여 로봇을 설계하거나 경로 계획, 시뮬레이션 및 오프-라인 프로그래밍을 생성하기 위한 연구는 1980년대 부터 활발히 수행되었다. 최근의 3차원 그래픽 기술과 이를 처리할 수 있는 프로세싱 기술의 발전으로 작업 현장에서 로봇이 수행하는 작업을 시각적으로 시뮬레이션하는 것뿐 아니라 원격에서 작동하는 로봇의 자세 및 작업 상황을 실시간으로 시각화하고 나아가 실시간으로 로봇을 제어하기 위한 연구가 활발히 추진되고 있다[1, 2]. 본 연구에서는 원거리에서 작업중인 로봇의 효율적인 제어를 위하여 3 차원 그래픽 기술을 활용한 제어시스템을 개발하였다. 개발된 시스템은 가상의 로봇 작업환경 구축 및 시뮬레이션이 가능함으로써 실제 작업을 수행하기 전에 운영자의 훈련을 위하여 사용될 수 있다. 또한 실제 작업을 수행중에 임의의 관측점에서의 시각정보를 실시간으로 운영자에게 제공이

가능하다. 개발된 시스템은 노즐담 설치 및 제거 작업을 위한 원격로봇에 적용하여 작업효율 및 신뢰성 향상을 검증하였다.

2. 시스템의 구성

시스템의 주컴퓨터는 실리콘 그래픽스사의 Indigo2 워크스테이션을 사용하였다. 이 컴퓨터는 64 bit 구조의 R4400 CPU를 탑재한 데스크 탑 그래픽 시스템으로 고속 그래픽 처리 능력을 갖추고 있으며 데스크 탑 형태이기 때문에 작업현장에서의 이동 및 설치가 용이한 장점을 갖고 있다. 또한 3 차원 그래픽 데이터를 고속으로 처리하기 위하여 24 비트 Z 버퍼를 갖추고 있으며 그래픽 터미널은 1248 x 1024의 해상도를 갖고 있다. 수동조작을 위한 입/출력 장치는 스페이스 볼과 다이얼 상자를 사용하였다. 그림 1은 시스템의 외관을 보여주며 그림 2는 기능별 블록도를 보여준다.

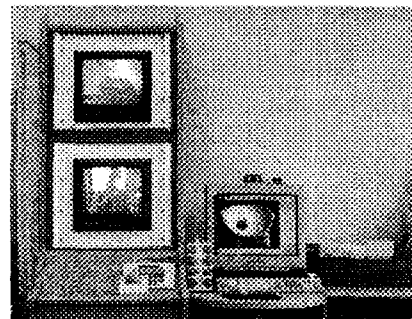


그림 1. 시스템의 구성
Fig. 1. System configuration

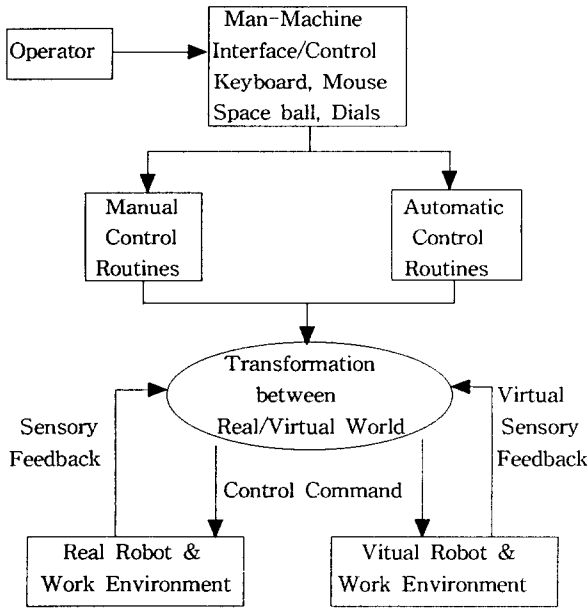


그림 2, 시스템의 기능별 블록도
Fig. 2. Functional block diagram of system

원격에서 작업중인 로봇의 작업내용을 시뮬레이션, 모니터링 및 제어하기 위한 관리자 프로그램은 기본 대상을 이용하여 복잡한 형상의 로봇이나 작업환경을 모델링하는 모델링 모듈, 모델링 모듈에서 구축된 대상을 이용하여 가상의 작업환경을 구축하고 로봇의 동작을 시뮬레이션하는 월드모델러, 로봇 제어부와 연결하여 작업상황 모니터링, 온-라인 제어하기 위한 온-라인 제어모듈로 구성된다. 개발된 시스템은 사용자가 시스템 운영체제에 깊은 지식이 없이도 쉽게 사용할 수 있으며 변경이 용이한 사용자 인터페이스의 제공이 가능하도록 X 윈도우 시스템의 Xlib 라이브러리를 사용하여 전체 프로그램의 메뉴를 구성하였으며 그래픽 기능은 3차원 그래픽 라이브러리인 OpenGL을 사용하였다.

3. 온-라인 제어

3.1 원격로봇과의 통신

원거리에 위치한 로봇의 효율적인 제어를 위한 통신프로토콜을 선택함에 있어 가장 중요한 것은 신뢰성있는 데이터의 전송이다. 데이터 전송시에 잘못된 데이터가 전송되어서는 안되며 데이터 전송상의 문제가 발생하면 이를 확인하고 가능하다면 복구할 수 있어야 한다. 이와 같은 사항을 고려하여 ethernet을 이용한 TCP/IP 프로토콜을 이용하여 로봇 시스템과의 데이터를 교환하도록 하였다. 원격에서 작업을 수행중인 로봇의 센서 데이터는 가상작업환경으로 귀환되어 그래픽 모델을 갱신하게 된다.

원격에 위치한 로봇을 제어하기 위한 샘플링 시간은 수 백 Hz 이상이다. Indigo 2의 최대 화면 처리 속도는 72 Hz 이고 가상 작업환경의 데이터 량에 따라 처리 속도는 달라진다. 따라서 원격로봇 제어부의 각 샘플링마다 로봇의 관절값을 전송하고 이를 처리할 필요는 없다. 또한 귀환된 데이터를 모두 처리하고자 할 경우에는 가상작업환경에서의 데이터 처리 속도가 로봇 샘플링 시간을 따르지 못하므로 실제 작업상황과 가상작업환

경과의 시간 지연이 발생하여 심각한 결과를 초래할 수 있다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 별도의 프로세스가 로봇 시스템과의 통신만을 담당하도록 하였으며 로봇 시스템으로부터 데이터가 전송될 경우 전송데이터를 공유메모리에 저장하도록 하였다. 따라서 가상작업환경의 로봇은 가장 늦게 전송되어 공유메모리에 저장된 데이터만을 처리하도록 하여 항상 실제 작업상황에 대한 정보를 그래픽 화면을 통하여 사용자에게 제공할 수 있도록 하였다.

원거리에 위치한 로봇과 메시지를 전송할 때 상위 4 바이트를 명령어 식별 코드로 할당하고 다음의 4 바이트에 전송 바이트 수를 명시하였다. 상위 4 바이트를 명령어 식별 코드로 설정함으로써 시스템의 확장 및 변경이 용이하도록 하였다. 표 2는 설정된 명령어 식별 코드를 보여준다.

표 1. 명령어 코드
Table 1. Command code

Command ID	내 용
MAIN_SOLENOID_ON	로봇 구동 스위치 ON
MAIN_SOLENOID_OFF	" OFF
TOOL_SOLENOID_ON	작업 공구 구동스위치 ON
TOOL_SOLENOID_OFF	작업 공구 구동스위치 OFF
OFFLINEDATALOADINIT	오프-라인데이터 다운로드 시작
OFFLINEDATALOADING	오프-라인 데이터 다운로드
OFFLINDCONTROLSTART	오프-라인 제어 실행
OFFLINDCONTROLPAUSE	오프-라인 제어 중지
OFFLINDCONTROLCANCEL	오프-라인 제어 취소
OFFLINDCONTROLEND	오프-라인 제어 수행 완료
HOMEMOVE	로봇 초기 위치
HOSTRETURN	현재 로봇 관절값 전송
HOMELOADER1	입퇴실장치 회전운동부 초기화
HOMELOADER2	입퇴실장치 선형운동부 초기화
ENTERROBOT	로봇 수실 내부로 입실
ATTACHGRIPTOOL	파지 툴 초기화
DETACHGRIPTOOL	파지 툴 탈착
DETACHDAM	노출 댄 탈착
BOLTING	볼팅
INSTALLROBOT	로봇 설치 및 초기화
SPACEBALLMOVE	스페이스 볼에 의한 로봇구동
JOINTABSMOVESTART	관절 절대 위치로 이동
JOINTABSMOVEPAUSE	관절 구동 정지
JOINTABSMOVECANCEL	관절 구동 명령 취소
JOINTINCMOVESTART	관절 상대 위치로 이동
JOINTINCMOVEPAUSE	관절 구동 정지
JOINTINCMOVECANCEL	관절 구동 명령 취소
SOCKCLOSE	통신 채널 닫음

3.2 여유자유도를 갖는 로봇 제어

작업현장과 유사하도록 작업환경을 구성하기 위해서는 크래인에 연결된 로봇 혹은 6축 이상의 자유도를 갖는 로봇을 가상작업환경에서 구현할 수 있어야 한다. 이와 같은 여유자유도를 갖는 로봇의 구성을 용이하도록 하기 위하여 각각 독립된 자유도를 갖는 구조물들을 결합하여 다축을 갖는 1 개의 로봇으로 정의할 수 있도록 하였다. 예를 들어 6자유도를 갖는 로봇 A와 2개의 회전축을 갖는 구조물 B 및 1 개의 회전축을 갖는 구조물 C로 workcell을 구성하고 구조물 B의 2번째 링크에 로봇이 부착되고 구조물 C가 로봇의 손(end effector)에 부착되어 작동할 경우 로봇 A는 2 개의 추가 외부축을 정의함으로써 2축의 여유자유도를 갖는 로봇과 같은 동작특성을 구현할

수 있도록 하였다. 외부축에 대한 자료구조는 외부축을 가진 구조물의 이름 및 외부축으로 할당된 회전축 번호 및 구조물의 자료구조 번호를 명시하도록 하였다. 외부축으로 할당된 구조물은 로봇의 움직임에 따라 부착된 외부축 구조물도 같이 움직여야 한다. 즉 로봇 손에 작업공구가 부착되면 실제 로봇에 작업공구가 부착된 것과 같이 가상 작업환경 내에서도 로봇과 작업공구는 단일 몸체로서 연결되어야 한다. 이와 같이 원하는 입의 위치에서 구조물을 부착/탈착 시키기 위하여 구조물의 자료구조에 부착 구조물의 고유번호를 명시하도록 하였다.

3.3 입출력 장치를 이용한 로봇 제어

3차원의 공간에 위치한 구조물을 취급하기 위해서는 각 구조물에 대하여 위치 및 방위 성분을 기술할 수 있어야 한다. 마우스의 경우는 2 차원의 좌표값만을 명시할 수 있어 마우스 만을 이용하여 3차원 구조물을 취급하기는 매우 불편하다. 스페이스 볼은 6 자유도의 힘/토크 값을 감지하여 출력시킴으로서 3 차원 공간상에서 사람이 물건을 손에 주고 움직이는 것처럼 조작자가 쉽게 구조물을 움직일 수 있다. X 윈도우 시스템에서 스페이스 볼 및 다이얼 상자의 출력값을 감지하기 위하여 표준 X 윈도우 시스템에서 제공하는 이벤트(event)가 아닌 확장 이벤트를 사용하였다.

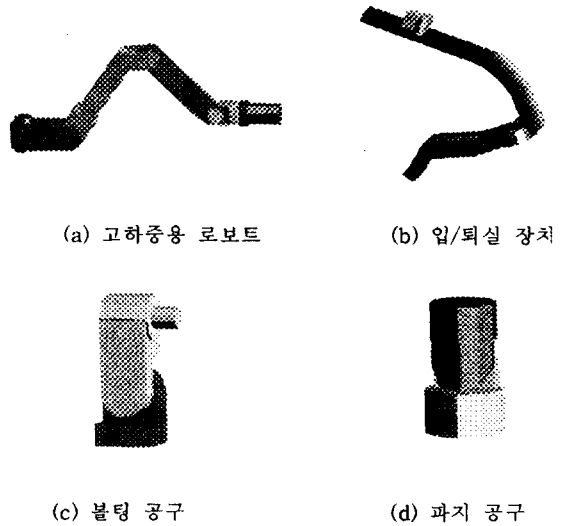
스페이스 볼을 이용하여 로봇을 구동시키기 위해서는 스페이스 볼의 출력값을 작업공간상의 어디를 기준으로 하여 할 달 할 것인가를 결정하여야 한다. 즉 사용자가 스페이스 볼 좌표계에서 x 축 방향으로 로봇 손을 이동시키고자 할 때 베이스 좌표계를 기준좌표계로 하였을 때와 손 좌표계를 기준좌표계로 하였을 경우와는 원하는 로봇의 자세가 달라지게 된다. 본 연구에서는 로봇의 자세가 바뀌더라도 스페이스 볼의 입력이 항상 사용자 측면에서는 동일한 좌표계에서 해석될 수 있도록 관측자 좌표계를 기준좌표계로 간주하여 스페이스 볼의 입력을 해석하였다. 관측자 좌표계에서의 입력값을 로봇 손 좌표계에서의 값으로 변환하기 위한 변환식은 $\vec{R} = {}^T_6 \cdot {}^6T_e \cdot \vec{r}$ 으로 표현되며, 여기에서 T_e 는 관측자 위치변환 행렬, T_6 은 로봇 손 변환 행렬, \vec{r} 은 스페이스 볼 입력 벡터를 나타낸다.

4. 실험

4.1 가상작업환경의 구축

노즐땀 장착 및 탈착 작업을 수행하기 위한 전체 시스템은 다음의 구조물로 구성된다.

- (a) 고하중용 로봇 : 수실 내부의 입/퇴실장치에 부착되어 노즐땀을 파지하여 맨웨이에서 노즐링으로 또는 노즐링으로부터 맨웨이로 운반하고 볼트를 체결하거나 푸는 작업을 수행하는 유압구동형 6자유도의 로봇
- (b) 로봇 입/퇴실 장치 : 회전운동부와 선형운동부의 2 자유도를 가지며 고하중용 로봇을 증기발생기 수실 내부로 입실하여 고하중용 로봇을 지지하고 작업후 수실 외부로 회수하는 장치
- (c) 파지공구 : 1 자유도의 회전축을 갖는 노즐땀 파지공구
- (d) 볼팅공구 : 1 자유도의 회전축을 갖고 노즐 땀을 노즐링에 부착 또는 탈착시키기 위한 공구



(a) 고하중용 로봇 (b) 입/퇴실 장치
(c) 볼팅 공구 (d) 파지 공구

그림 3. 작업환경 구성물의 모델링

Fig. 3 Modelling of work environment components

그림 4는 노즐땀 장/탈착 작업을 위하여 구축한 가상 작업환경을 보여준다. 입퇴실 장치는 맨웨이 프레임에 부착되어 있으며 로봇은 입퇴실 장치 선형구동부 상부에 설치된다.

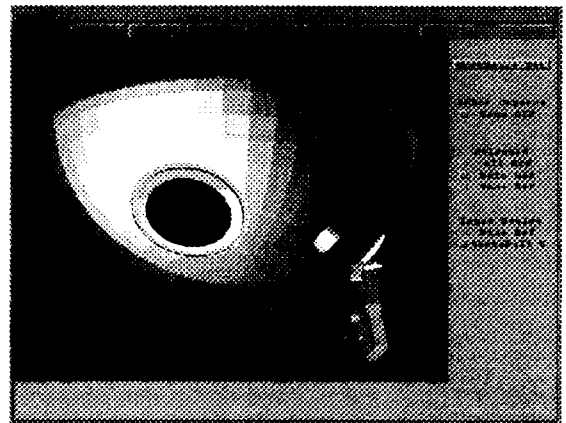


그림 4. 작업환경의 구축

Fig. 4. Construction of workcell

4.2 노즐땀 장착 및 볼트 체결

노즐땀 장/탈착 작업시 조작자가 시스템에 대한 깊은 지식이 없이도 손쉽게 작업을 수행할 수 있도록 노즐땀 장/탈착 작업과 직접적으로 관련된 기능들을 작업절차에 따라 체계적으로 정리하여 메뉴화하였다.

로봇의 설치 및 수실 내부로 입실시키기 위한 단계는 다음과 같다.

- (a) 로봇을 장착하기 쉽도록 입퇴실 장치의 자세를 (60°, 0 mm)으로 조절하고 로봇을 입퇴실 장치의 선형운동부에 부착한다.
- (b) 수실내부 입실을 위하여 로봇 관절값을 (-85.3°, -16°, -33.8°, -7.8°, 0°, 0°)으로 바꾼다.
- (c) 입퇴실 장치 회전운동부를 52°로 하여 맨웨이와 평행하도록

한 후 선형운동부를 -500mm 이송하여 로봇트 베이스부를 수실 내부로 입실시킨다..

(d) 회전운동부를 0° 될 때까지 회전시킨 후 파지공구를 부착한다.

그림 5는 각 단계별 자세를 부여준다.

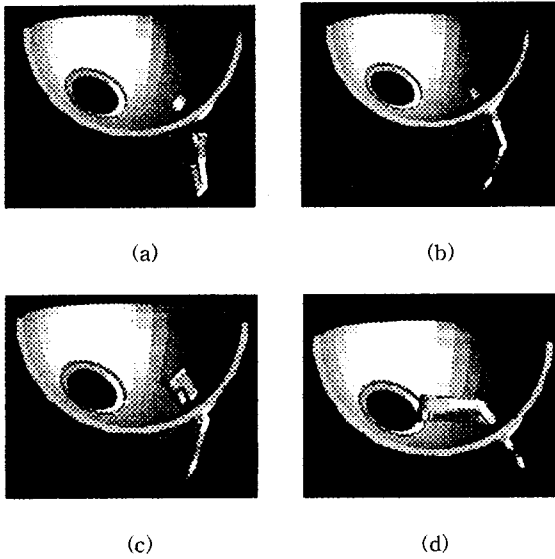


그림 5. 로봇트 설치
Fig. 5. Robot installation

반경 1.5 m 인 증기발생기 수실 내부에서 맨웨이에 위치한 직경 1 인 노즐땀을 파지하여 노즐링에 부착하기 위한 작업경로는 극히 제한되어 있다. 수실 내부에서 로봇트의 작업경로는 시뮬레이션을 통하여 구하였으며 3 조각의 노즐 땀을 가능하면 같은 경로를 따라 운반할 수 있도록 각 세부 단계 별로 메뉴화하였다. 노즐땀을 노즐링에 부착하기 위한 세부 단계는 다음과 같다.

- (a) 노즐땀의 파지 및 맨웨이를 통하여 수실 내부로 입실
- (b) 노즐링 부근으로 노즐땀 운반
- (c) 땀을 노즐링에 부착
- (d) 다음 땀 혹은 볼팅 공구의 부착을 위하여 end effector를 맨 웨이로 이동

노즐땀 설치 작업시 입퇴실 장치의 선형운동부와 파지공구는 로봇트의 여유자유도로 역할을 수행한다. 그림 6은 노즐땀 설치 시의 로봇트 자세를 보여주며 그림 7은 볼트를 체결 중인 로봇트의 자세를 보여준다.

5. 결론

본 연구에서는 원자력 시설과 같이 사람이 접근하기 어려운 작업환경에서 작업하는 로봇트의 효율적인 제어를 위하여 컴퓨터 그래픽에 기반한 로봇트 제어시스템을 개발하였다. 개발된 시스템은 실리콘 그래픽 워크스테이션에서 구현된 실제의 작업환경과 동일한 가상 작업환경과 원거리에서 작업중인 로봇트 시스템과 정보통신망을 통하여 연결함으로써 원격로봇트의 작업상황을 감시, 제어할 수 있도록 하였다. 원격의 로봇트를 구동하기 위한 입/출력 장치는 스페이스 볼과 다이얼 상자를 사용하였으

며 실시간으로 로봇트의 작업상황을 모니터링하기 위하여 공유 메모리를 사용하였다. 개발된 시스템의 성능을 평가하기 위하여 노즐땀 장/탈착용 로봇트에 적용하여 실험을 수행하였으며 그 결과 작업성능 및 신뢰성 향상을 확인하였다.

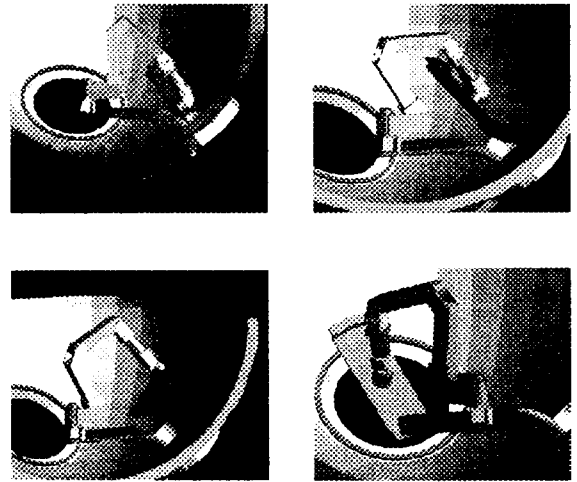
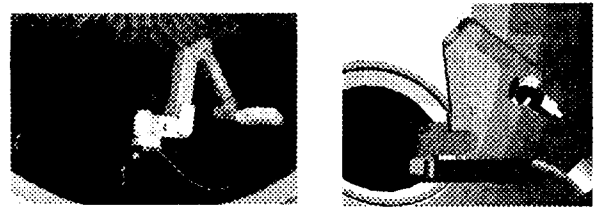


그림 6. 노즐땀 설치 작업 절차
Fig. 6. Nozzle dam installation procedure



(a) 실제 작업현장 (b) 가상작업환경

그림 7. 로봇트의 자세
Fig. 7 Robot posture

참고문헌

- [1] Chuxin Chen and Mohan M. Trevedi, "SAVIC: A Simulation, Visualization and Interactive Control Environment for Mobile Robots," International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, vol. 7, No. 1, pp. 123-144, 1993
- [2] Nadine E. Miner, "An Interactive Virtual Reality Simulation System for Robot Control and Operator Training," International Conference on Robotics and Automation," pp. 1428 - 1440, 1994
- [3] 김창희, 김승호, "그래픽을 이용한 원격작업용 로봇트 제어시스템 개발," 한국자동제어학술회의, vol 2, pp. 1166-1169, 1995
- [4] 한국원자력연구소 연구보고서, 원전용 로봇트 시스템 개발, KAERI/RR-1631/95, 1995