



원전 무인감시용 원격조종 이동로봇 시스템 개발사례

이범희, 구관모, 우희곤*

서울대학교 제어계측공학과, *한전 전력연구원

1. 머릿말

‘로봇’이라는 개념이 문학속에서나마 최초로 등장한 후 거의 한 세기가 경과하였으며, 이제는 이 단어가 일상생활에서의 보통명사화된지도 오래이다. 그러나 일반인들이 가지고 있는 막연한 개념의 주체로서의 ‘로봇’과 실제상황 사이에는 커다란 괴리가 존재한다. 즉 일반적으로 생각되어지는 ‘로봇’이 사람이 하고 있는 일 또는 사람이 하기 어려운 일들을 대신하는, 다양한 능력을 가진 기계인 반면에 현재 가동되고 있는 대부분의 로봇들은 공장자동화를 위한 산업용 로봇들로서 고정된 환경에서 미리 설정된 작업들만을 수행하도록 되어 있다.

산업용 로봇 이외의 로봇들은 상상가능한 모든 종류의 형태를 가질 수 있으므로 일반적으로 공인된 명칭은 없으나 이 글에서는 이를 ‘서비스 로봇’이라 통칭하기로 한다. 서비스 로봇에 대한 연구는 로봇연구의 초기단계부터 이루어져 왔으나 여러 가지 이유로 인하여 그리 활발하지는 못하였다. 그 가장 큰 이유는 아마도 경제성의 논리로 풀이될 수 있을 것이다. 즉, 막대한 개발비가 소요되는 데 비해 양산이 가능할 만큼의 시장이 존재하지 않았기 때문인 것이다. 또한 산업용 로봇에 비해 일반적으로 보다 복잡한 구조를 가지므로, 개발과정에서 더욱 많은 어려움이 존재하는 것 역시 중요한 이유로 작용해 왔다.

그러나 근래에 산업용 로봇의 제조기술이 발전되고 각 분야에서 로봇의 필요성이 구체적으로 대두되면서 다양한 방법으로 이러한 로봇의 개발이 시도되고 있다. 그 대표적인 분야를 들자면 방사능 지역과 같은 위험한 환경에서의 작업, 장애인의 기능을 보조해 주는 기구와 같이 인간을 보조해 주는 작업, 우주공간이나 심해에서의 작업로봇과 같이

인간이 할 수 없는 일을 대신하는 기계로서의 작업등이 된다. 이러한 다양한 분야 가운데 현재 가장 연구가 활발하고 실제 적용이 상당히 이루어지고 있는 분야가 원자력발전소에서의 작업로봇에 대한 연구이다.

원자력은 그 안정성과 오염에 대한 끝없는 시비에도 불구하고 석유를 대체할 미래의 에너지로 꾸준히 성장을 해 왔으며 근래에는 미래의 에너지가 아닌 현재의 에너지로서 이미 전체 에너지 생산량의 상당부분을 담당하고 있다. 국내에서도 원자력은 발전소의 계속적인 건설에 의해 석유 에너지의 대체효과와 함께 안정적인 전력 공급을 위해 지대한 공헌을 하고 있다. 그러나 이와 같은 긍정적인 효과에도 불구하고 안정성을 우려하는 회의적인 시선이 끊이지 않고 있으며 최근에는 3D 현상의 여파로 방사선구역내에서의 작업원들의 작업회피 경향까지 발생하고 있다.

이와 같은 추세를 배경으로 하여 원자력 선진국에서는 원자력발전소 운영의 자동화에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 대부분의 작업들에 요구되는 난이도와 복잡성에 기인하여 특히 로봇의 응용에 대한 연구에 많은 관심이 집중되고 있다. 현재 적은 숫자이지만 원자력 발전소 내에서 이동감시용, 사고처리용 및 폐기물 처리용 등의 목적을 가진 로봇들이 제작되어 시험운용 내지는 일부 실전배치되어 있는 것으로 알려지고 있다[1][2][3][6]. 보편적으로 인식되어 있는 로봇의 필요성에 비해 실제의 활용도가 낮은 것은 인간의 작업이 어려운 장소들이 방사선에 대한 노출, 고온, 장소의 협소함등으로 인하여 로봇의 작업환경으로도 어려움이 많기 때문이다.

한편 국내에서는 용접용, 도장용, 조립용 등의 공장자동화를 위한 로봇은 활발한 연구가 진행되고 있으나 이동로봇이나 기타 지능형로봇에 대한 연구는 아직 초보단계에 머무르

고 있다. 더욱이 국내에서는 전력회사의 환경에 대한 로봇 적용기술이나 경험이 축적되어 있지 못하므로 원자력발전소의 특수한 상황에 사용될 수 있는 기능을 가진 로봇에 대한 연구는 거의 전무하다고 할 수 있다. 현재 원자력발전소 내에는 증기발생기 세관(細管)검사용 로봇등 일부 특수작업용 로봇들이 수입, 배치되어 운영되고 있으며 이에 대한 국내 기업에 의한 연구도 수행된 바 있으나 이는 활용성이 극히 제한된 특정작업의 수행만을 위한 것이다.

이 글에서는 원자력발전소내의 작업을 위한 로봇연구의 동향과 서울대학교 로보틱스 및 지능시스템 연구실에서 한국전력 전력연구원과 공동으로 개발하고 있는 원전 이동감시 및 방사선측정용 원격조종 로봇의 개발사례를 소개하고자 한다.

2. 원전에서의 로봇활용을 위한 연구동향

현재 연구되고 있거나 가동되고 있는 서비스 로봇의 용도별 통계를 보면 거의 대부분이 발전소를 위해 제작되어 사용되어지고 있는 것으로 되어 있다[6]. 이러한 현상은 발전소내의 환경이 로봇의 응용을 가장 전실하게 요구하고 있는 사실의 결과로 해석될 수 있다. 구체적으로 원자력발전소의 예를 살펴보면 로봇의 이용이 요구되는 분야를 감시용, 사고처리용 및 폐기물 처리용등으로 분류할 수 있으며 이중 사고처리용 로봇의 경우 사고처리를 위한 다양한 별도장치들이 요구된다는 점에서 실용화가 어려운 기술이나, 다른 분야들에서는 이미 실용화단계에 도달하였다고 볼 수 있다.

이러한 배경하에 원전에서의 로봇의 활용에 대한 연구는 선진국들을 중심으로 다른 분야의 서비스 로봇들에 비해 오래전부터 다양하게 이루어져 왔고, 많은 결과들이 발표되었으므로 이 글에서 그 동향을 모두 소개하는 것은 불가능한 일이다. 이 글에서는 다양한 형태와 목표를 가지는 연구결과들중 대표적인 몇 가지를 소개함으로써 로봇활용의 방향과 그 수준에 대해 간략히 살펴보고자 한다.

원전에서의 사용을 전제로 한 로봇관련의 범용기술로는 주행성능에 관한 부분과 환경감지성능에 관한 부분, 자율성 확보를 위한 지능 구현에 관한 부분 등을 꼽을 수 있다. 원자력발전소에서의 로봇의 활용에 대한 가능성들이 최초로 대두되었을 때 가장 큰 장애가 되었던 것은 로봇을 작업장소까지 도달할 수 있게 하는 방법이었다. 원자력발전소의 건설시점부터 로봇의 작업을 고려한 설계가 이루어지기 시작한 것은 최근의 일로, 아직도 대부분의 발전소들은 좁은 복도와 계단, 손잡이를 돌려야 하는 출입문들로 구성되어 연결되어 있다. 따라서 주행능력에 있어서는 다양한 이동환경에 대처할 수 있도록 다기능을 가지는 기구적 설계가 중요한 문제가 되고, 주로 계단이나 장애물 등을 만났을 때 주행을 계속할 수 있도록 무한계도 방식에 보행기능을 응용한

구조를 복합시키는 것이 주요 관심사가 되고 있다. 환경감지성능에 관하여는 센서의 개별적인 성능에 대해서도 연구가 계속되고 있지만 새로운 센서의 활용이나 센서 융합(sensor fusion) 등을 이용하여 미지환경에 대한 파악능력을 향상시키는 것이 더욱 중요한 분야로 인식되고 있다. 또한 이러한 결과들을 바탕으로 작업로봇에 보다 높은 수준의 인공지능을 구현하기 위한 연구가 다방면으로 진행되고 있다[1],[4]. 작업로봇의 역학적 환경변수들도 산업용 로봇에 비해 불확실하므로 로봇, 특히 이동체에 탑재되는 매니플레이터에 대한 위치제어나 힘제어에 새로운 기법들을 적용하기 위한 연구 역시 활발히 진행되고 있다[1].

원전에서의 로봇의 용도중 감시용으로 사용되는 로봇의 경우는 가장 보편화된 로봇의 활용분야로서 PCV(Primary Containment Vessel)내부와 같은 고방사선 지역에 대한 감시 감시용 로봇[3]부터 폐기물 저장소와 같이 자유로운 주행성능이 요구되는 로봇[1][2]에 이르기까지 다양한 형태의 요구가 존재한다.

• 폐기물 저장소의 순회감시 로봇[2]

IMSS(Intelligent Mobile Sensing System)이라 명명된 이 시스템은 폐기물 저장소내의 고정경로를 따라 순회하며 이상유무를 감시하는 시스템으로 축전지(Battery)를 동력으로 하고 무선통신을 구현하여 케이블 없이 동작가능한 형태로 구성되어 있다. 주요 특징은 다음과 같다.

- 통신에 의존하지 않는 완전 자율주행 가능.
- 연결선 없이 동작가능.
- 카메라 시스템 및 영상녹화기 탑재.
- 영상정보 처리 및 분석 시스템 탑재.

그러나 카메라 시스템으로부터의 영상정보는 무선통신으로 구현되기에는 정보량이 너무 많으므로 녹화한 후 추후 검색하도록 되어 있고, 영상정보를 자체적으로 처리하고 이상을 검출하는 시스템을 사용하여 이상이 감지된 경우 이를 통신으로 보고하도록 되어 있다. 또한 카메라 이외의 센서가 탑재되어 있지 않아 시각적인 이상외에는 감지할 수 없게 되어 있다.

• PCV 내부 감시 로봇[3]

일본의 경우 원자력발전소의 비중도 높고 로봇응용기술에 있어서도 최선진국의 하나이므로 원자력발전소에서의 로봇 활용에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 이 로봇은 매우 방사선이 높은 지역인 PCV(Primary Containment Vessel)내에 장착된 레일을 따라 이동하며 내부이상을 감시하는 시스템이다.

- 음향과 시각 및 열감지 센서를 장착한 여러 대의 로봇이 함께 투입되어 운영됨.
- 카메라 자세의 광범위 제어를 통해 내부 전체의 감시 가능.
- 트롤리 와이어(trolley wire)를 통해 전원, 제어신호

및 데이터 교환.

이 시스템은 발전소의 설계단계부터 로봇의 활용을 고려한 경우의 대표적 사례로 볼 수 있으며 사람이 수행하던 작업을 분석하여 필요한 요구조건을 정리하고 처음부터 범용성을 고려하지 않은 설계에 의해 특정작업에 대한 로봇의 활용도를 극대화했다.

• 방사능 측정용 이동로봇[1]

방사선이 빛이나 전자파와 달리 직진만을 한다는 특성 때문에 인간이 직접 도달할 수 없는 지역에서 방사선량을 측정하는 작업은 긴 막대 끝에 방사선 센서를 장착하여 원하는 지점에 위치시키는 것만으로 대부분 해결하여 왔다. 그러나 이런 방식으로는 많은 한계가 존재해 왔으며 특히 오히려 넓은 장소에서의 측정이 불가능하였다. 여기에 소개하는 로봇은 PEDESCO RMI-3라 명명되었으며, 지하의 방사선 물질 저장창고 위의 지표면에서 누설 방사선량을 측정하기 위한 목적으로 개발되었다.

- 원격조종 이동로봇.
- 방사선량 데이터의 무선통신가능.
- 온도, 습기, 발화성가스 감지센서 탑재 가능.

평탄한 지표면에서의 측정을 목표로 한 만큼 주행성능이나 환경감지 능력보다는 조작성의 편의성에 더욱 중점을 둔 시스템이다.

• 방사능 제거 작업로봇[1]

방사능 누출이 발생했을 때나 혹은 누적방사선량이 높아진 지역의 방사능을 제거하는 작업은 로봇의 필요성이 가장 절실한 부분이다. 이러한 작업을 하는 기계들은 로봇이라 불리우기 어려운 간단한 형태부터 존재하여 왔으며 진공청소기와 같은 개념으로 주변물질을 흡입하는 것이 일반적이다. 이동로봇과 로봇 매니퓰레이터에 관련된 기술들이 발전하면서 이러한 일을 하는 로봇들의 효율이나 안전성에 큰 발전이 이루어졌다. 이 종류의 로봇중에는 지하 폐기물 저장소위의 토양을 수거하여 처리하는 초대형 원격조종형 차량도 있다.

• 방사능 물질 처리 작업로봇[1]

방사선 구역내의 작업후 발생하는 장갑이나 피복, 천조각 등은 일정기준에 의해 폐기되도록 규정되어 있다. 이 폐기 작업을 하는 작업원들이 작업중에 당하는 방사능 피폭은 인간에 대한 방사능 피폭의 가장 큰 비중을 차지하여 왔다. 따라서 이 분야에서도 많은 로봇들이 개발되어 활용되고 있으며, 종류도 매우 다양하다. 구체적인 예를 들자면, 매니퓰레이터를 이용한 폐기물의 수집, 수집된 폐기물들을 폐기용 드럼 내에 집적하는 작업, 폐기용 드럼을 이송수단에 싣고 내리는 작업 및 이송수단이 모두 대상이 되고 작업의 특성에 따라 각각 별도의 로봇이 사용된다.

이상의 예에서 살펴본 바와 같이 원자력발전소에서의 작업로봇은 요구되는 작업과 환경상의 조건이 서로 많은 차이

를 지니므로 형태나 기능상의 공통적인 요건이나 특징 등을 정리하는 것은 어려운 일이며, 주어진 상황에 따라 시스템이 갖추어야 할 조건들을 각론으로 연구할 수 밖에 없다. 일반적인 성능에 관한 요건들중 공통적으로 고려될 수 있는 것은 원자력발전소라는 전체 환경의 특수성에 기인하여 고장발생시 사후처리에 큰 어려움이 존재하므로 이에 대한 각별한 주의가 요구된다는 점이 가장 중요하다. 오동작이 발생할 경우 그 원인이 무엇인지 즉각 파악이 가능해야 하고 수리가 가능한 지역으로 이동시킬 방안이 마련되어야 한다. 또한 원격지와의 통신에 어려움이 예상되는 경우가 대부분이므로 최대한의 자율성을 확보하여야 할 것이다. 그러나 무엇보다도 중요한 것은 오동작이 발생할 소지를 최소화하는 것, 즉 높은 신뢰성을 확보하여야 한다는 것이다. 모든 분야에 고신뢰성이 요구되므로 실제 작업이 가능한 하나의 구체적인 시스템을 완성하는 데에는 많은 분야에 대한 연구 노력과 경험이 필수적인 요소가 된다.

3. 원격조종 이동로봇 시스템의 구성

현재 원전에서 사용되고 있는 로봇으로는 벽면이나 천정의 가이드 레일을 이용한 감시용 로봇들이 대부분이며 이 경우 발전소의 설계단계에서부터 로봇의 사용을 전제한 설계상의 배려가 필요하다. 이러한 설계상의 배려에 관계없이 방사선 지역을 자유롭게 주행할 수 있도록 로봇을 제작하려면 자율주행로봇(Autonomous Mobile Robot)의 형태를 가져야 한다. 자율주행로봇에 대한 연구는 산업용 로봇에 비해 집중적인 연구가 이루어지지 못하였으나 최근에는 설계와 제어등 여러 방면에 대해 연구가 활성화되어 가고 있다 [4]. 자율주행로봇의 형태를 가진 발전소 감시용 로봇에 대해서도 몇몇 연구성과가 발표된 바 있으며, 구체적으로 비전 시스템과 영상녹화기능을 이용한, 평면적인 방사선지역에 대한 고정경로 순회감시 로봇의 개발사례도 발표된 바 있다[2].

개발사례로서 소개하고자 하는 원격조종 이동로봇 시스템은 원자력발전소내의 방사선지역들을 주행하는 이동로봇의 각종 센서 정보를 이용하여 원격지에서 방사선지역의 이상유무와 방사선량을 관측하기 위한 시스템이다. 이러한 목적을 수행하기 위한 시스템으로서, 설계초기에는 고정된 경로를 가지는 자율주행로봇 시스템과 원격조종으로 동작되는 이동로봇 시스템을 함께 고려하였으나, 환경에 차이를 지니는 다수 지역을 감시할 수 있고, 운반 및 이동이 자유로운 원격조종 이동로봇 시스템으로 결정하였다.

다음은 현재 개발되고 있는 이동로봇 시스템의 설계목표이다. 일부는 환경의 제약에 의한 것이고 그 외의 사항들은 효율적인 시스템 운용을 위해 필수적인 요소들이다.

원격조종 이동로봇 시스템의 설계목표

- 시스템 전반
 - 운반 및 이동이 간편할 것.
 - 이상환경에서의 이상동작에 대한 시스템 자체 보호 능력이 있을 것.
- 이동로봇
 - 소형, 경량일 것.
 - 내방사선 성능이 우수한 소재를 사용할 것.
 - 제염처리가 가능할 것.
 - 고장 대책이 명확할 것.
 - 다양한 환경에서 주행이 가능할 것.
 - 신뢰성을 확보할 것.
- 모니터링 시스템
 - 방사선량 및 누적방사선량의 원격측정이 가능할 것.
 - 소형, 경량일 것.
 - 조작이 용이할 것.
 - 신뢰성을 확보할 것.

3.1 원격조종 이동로봇 시스템의 주요사양

개발되고 있는 이동로봇은 유선으로 공급되는 전원에 의해 동작하는 2 대의 모터로 구동되고 2대의 카메라, 각각의 카메라를 위한 조명들과 방사선 센서 본체 및 측정부(probe), 방사선 센서 전방확장기 등을 탑재한다. 이동로봇에서 측정되는 각종 센서 데이터와 영상신호는 통신 케이블과 별도의 영상신호전송 케이블을 통하여 원격제어 및 센서 데이터 모니터링을 담당하는 모니터링 시스템으로 전송된다. 모니터링 시스템에는 이동로봇으로부터 수신한 영상정보와 각종 센서 정보를 디스플레이하는 모니터와 이동로봇의 제어명령을 생성하기 위한 key pad, 이동로봇의 운동방향을 지시하는 조종간등이 장착되어 있다. 이동로봇과 모니터링 시스템에는 각각 80486 CPU를 탑재한 PC용의 주기판(CPU board)과 hard disk가 장착되고 두 시스템 사이의 통신은 RS-422을 이용한 직렬통신으로 구현하였다. 다음은 이동로봇 시스템의 주요사양을 정리한 것이다.

- 이동로봇
 - 조종방식 : 조작자가 조종간 형태의 조작기구를 이용하여 지정하는 방향으로 이동.
 - 구동방식 : 2 motor 전륜구동, Skid steering
 - 크기 : W 430 mm × L 680 mm × H 720 mm
 - 무게 : 약 67kg
 - 저조도 CCD TV camera 2 sets
(진진 방향 지면 감시용 고정 카메라 1 set, 환경 시각 감시용 회전이동 카메라 1 set)
 - 원격 zoom, focus 조정(Auto focus ON/OFF), 역광 보정 기능
 - 원격 카메라 자세 조종 : 좌우 120도, 상 40도, 하

20도

- 조명 2 sets
- 80486 탑재 PC 시스템
- 방열, 방수기능
- 모니터링 시스템
 - 카메라 신호와 센서정보를 디스플레이하는 14" 컬러 모니터
 - Key pad에 의한 이동로봇 전기능 제어
 - 이동 로봇 주행 제어용 조종간
 - 조작자를 위한 graphic user interface
 - 80486 탑재 PC 시스템
 - 데이터 저장을 위한 플로피 디스크 드라이브(FDD)
- 케이블
 - 별도의 전원, 영상, 통신용 케이블
 - 50m
 - 케이블 감는 장치

이동로봇과 모니터링 시스템의 설계시 외형상의 가장 큰 요구사항은 다양한 장소에 접근가능하도록 소형, 경량이어야 한다는 점이다. 재질의 선정에 있어서도 차체 중량을 최대한 작게 할 수 있도록 비중이 낮은 재질을 우선하여 검토하였다. 또한 탑재되는 부품들의 하중과 주행 및 운반시의 충격에 견딜 수 있도록 강한 재질이어야 하고 방수를 고려한 설계 및 가공이 용이해야 한다. 마지막으로 방사능지역에서의 동작이 요구되므로 내방사선 성능이 우수한 재질이 사용되어야만 한다.

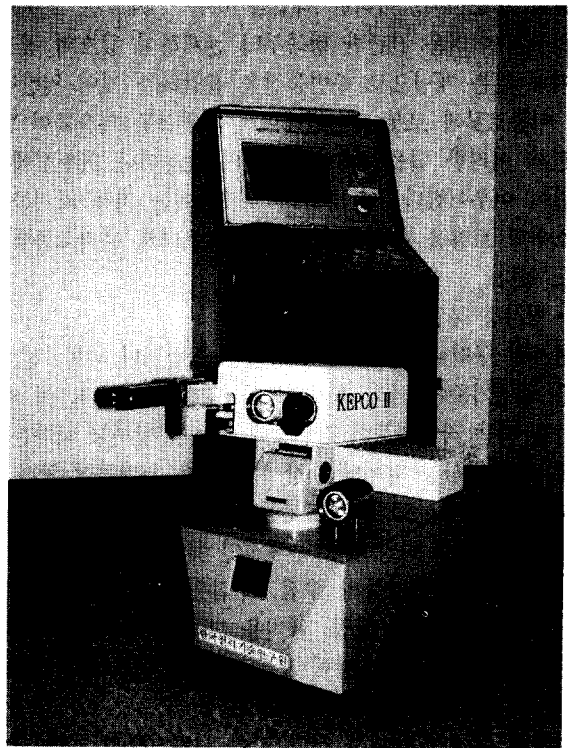


그림 1. 이동로봇과 모니터링 시스템.

이러한 고려사항하에 Polycarbonate 계열의 합성수지(비중 1.2)와 두랄루민(비중 2.7)을 사용하여 차체를 2대 제작하였다. 일단 합성수지를 사용하여 기능위주의 시제품 이동로봇을 제작하여 모든 기능시험을 완료한 후 두랄루민을 재료로 재제작을 하였다. 시제품에 사용한 합성수지는 강도와 중량면에서는 매우 우수한 특성을 가지고 있으나 복잡한 형상의 가공이 어려워 설계에 제약이 많았다. 알루미늄 합금은 가공성에서는 철계열의 합금에 비해 뒤지지만 그 외의 모든 항목에서 유리하며 별다른 처리없이도 부식에 강하며 내방사선성능도 우수하다. 차체를 제작하는 방식으로는 주물과 용접을 비교하여 용접방식으로 결정하였다. 용접방식을 선정한 이유는 가공공정에서 주물제작의 경우에 비해 용도외의 불필요한 중량이 발생하지 않기 때문이다. 그림 1은 이동로봇과 모니터링 시스템의 외관사진이다.

이동로봇의 구동동력원으로는 AC 서어보 모터 2대를 사용하였다. 모터의 용량은 자동차의 적정 엔진출력을 계산하는 방식을 사용하여 추정하였다[7],[9]. 이 방법은 차량의 구동 및 주행에 필요한 토크(torque)를 주행저항이라는 개념으로 계산하여 구동력을 산출하는 것이다. 차량이 주행 또는 기동할 때 작용하는 전주행저항 R 은 차량의 진행방향과 역방향으로 작용하는 힘의 합력으로 다음의 식에 의해 계산된다.

$$R = R_r + R_i + R_a + R_g$$

(R_r : 구름저항, R_i : 공기저항, R_a : 가속저항, R_g : 구배저항)

이 중 구름저항(rolling resistance)은 차량이 수평노면을 따라 구를 때 일어나는 저항으로 타이어의 탄성변형에 의한 저항, 노면의 탄성, 차륜 베어링부에서의 마찰저항, 노면의 요철에 의해 발생하는 충격저항등의 요소로 이루어지며, 차량속도가 낮은 경우는 다음과 같이 간단하게 근사가능하다.

$$R_r = \mu_r * m * g$$

(μ_r : 구름저항계수, 타이어의 내압 및 차체하중 노면상태등의 함수, m : 차체 질량, g : 중력가속도)

공기저항(air resistance)은 차량의 주행속도, 차체형상, 풍향각등에 의해 결정되며 차량의 전면과 후면사이의 압력차에 의해 발생하는 압력저항, 차체표면에 흐르는 공기와 차체와의 마찰저항, 공기의 출입에 의한 환기저항, 고속주행시 발생하는 양력에 의한 유도저항등의 요소로 구성되며, 일반적으로 본 이동로봇과 같이 저속으로만 주행하는 경우는 무시가능하다.

가속저항(acceleration resistance or inertia resistance)은 차량의 가속시 저항력으로 작용하는 관성저항이며 회전관성저항과 직진관성저항으로 구성된다. 일반적으로 차량의 가속저항은 회전관성저항을 질량으로 환산하여 다음 식으로

계산한다.

$$R_a = a * (m + \Delta m)$$

(a : 차량의 가속도, Δm : 회전부분의 가속저항의 환산질량)

구배저항(등판저항, grade resistance)은 차량이 경사진 노면을 상행주행할 때 발생하는 중력에 의한 저항력이며, 다음의 식에 의해 계산된다.

$$R_g = m * g * \sin(\theta)$$

(θ : 등판각)

본 이동로봇의 경우에는 속도가 저속이므로 공기저항은 무시하였고, 구름저항계수는 자동차의 일반적인 타이어상태와 양호한 노면을 가정한 실험근사치를 사용하였다[9]. 계산결과, 전주행저항은

$$R = 112.1 \text{ kgm/sec}^2$$

이 되고 다음 식에 의해 필요 토크를 산출하였다.

$$T_M = R * D / (\eta_t * N) = 0.97 \text{ kgm}^2/\text{sec}^2 = 0.97 \text{ Nm}$$

(T_M : 최소 필요 토크, R : 전주행저항, D : 타이어 직경, η_t : 동력전달장치의 기계효율, N : 전체감속비)

이에 따라 요구되는 모터의 출력은 다음과 같이 계산되었다.

$$P_{\text{total}} = T_M * W_M / 60 = 48.5 \text{ W}$$

(W_M : 모터축의 정격 기계출력속도, 2상일 경우)

계산결과에 따르면 50W급의 모터를 선정하면 필요한 토크를 낼 수 있다. 그러나 전술한 바와 같이 계산과정의 추정치 사용에 따라 실제상황과 다른 값이 사용된 부분이 있을 수 있어 토크가 부족한 상황에 대비한 여유도가 필요하므로 120W급의 모터를 사용하였다. 모터의 순시 최대 토크는 정격의 200%이므로 이러한 여유도의 적용에 의해 계산치의 4배이상의 순시 토크를 얻을 수 있게 된다.

이동로봇의 조향방식은 스키드 스티어링 방식으로 두 구동륜의 추진력의 차를 이용하여 속도가 느린 쪽을 축으로 피봇회전을 하는 조향방식이다. 이 방식은 조향특성이 차륜과 노면의 마찰특성에 크게 의존하므로 정확한 제어가 어려운 단점이 있으나 요구되는 회전반경이 다른 조향방식에 비해 매우 작아 상대적으로 좁은 환경에서의 운전이 유리하다.

한편 본 이동로봇은 방사선구역내의 사용이 전제된 것이므로 운신후 제염처리가 가능하여야 한다. 그러나 콘솔과 이동로봇을 연결하는 케이블의 처리와 방열에 유리한 구조를 갖추기 위해서는 차체의 완전한 방수는 불가능하다. 따라서 방수의 기본목표는 이동로봇의 차체 위에서 뿌리는 물

이 내부로 침투되지 않도록 하는 것으로 한정하였다. 우선 전, 후, 좌, 우의 옆판들과 바닥판의 결합은 내부용접으로 하되 옆판들의 높이가 낮게 하여 옆면의 틈새를 없앴으며, 상판의 결합은 조립순서에 기인하여 이러한 처리를 할 수 없으므로 방수용 실리콘으로 차폐하였다. 케이블이 연결되는 차체의 후면은 이중벽으로 하여 차체 위에 별도의 커버를 부착하고 케이블이 통과하는 높이에 차이를 두어 물의 침투가 일어나지 않도록 설계하였다. 자세조정기 위의 카메라, 조명 및 방사선 센서 전방확장기 등은 일체형의 케이스를 제작하여 장착하였다.

3.2 원격조종 이동로봇 시스템의 구성

이동로봇 시스템은 이동로봇 차체와 원격지에서의 제어 및 센서 모니터링을 담당하는 모니터링 시스템으로 구성된다. 모니터링 시스템은 카메라 신호 및 방사선 센서 데이터를 모니터링하는 부분과 제어명령을 입력받는 key들 및 이동방향을 입력하는 조종간등으로 구성되며 조종용 panel 상의 key pad에서의 입력을 key processing board에서 받아들여 해당하는 제어명령을 이동로봇에 전송하고 그 상태를 모니터에 표시한다. 이동로봇의 방사능 센서에서 읽어들인 값이나 카메라에 잡히는 영상은 모니터에 표시한다. 모니터로는 하나의 모니터를 화면분할하여 사용함으로써 방사선센서 데이터와 이동로봇 지령상황 및 카메라 신호를 동시에 디스플레이하도록 하였다. 그림 2는 전체 시스템의 구성도이다.

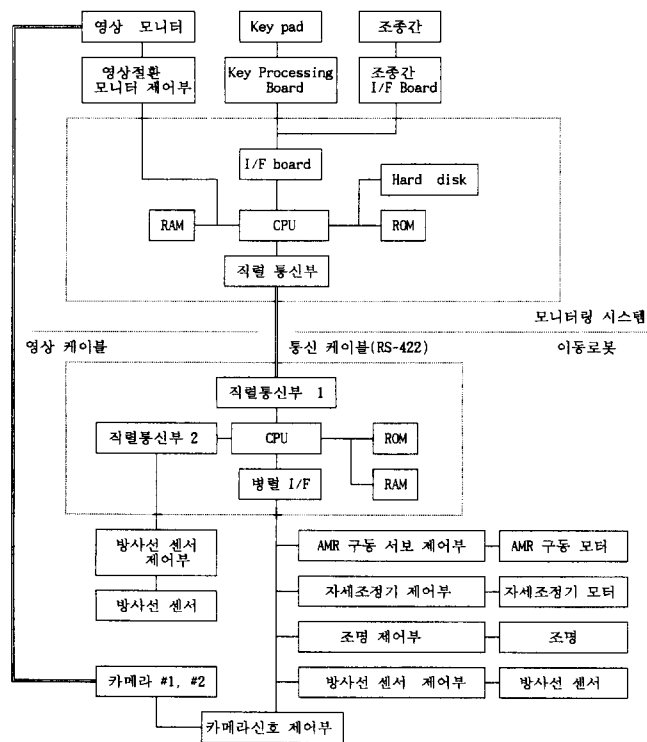


그림 2. 이동로봇 및 모니터링 시스템의 구성도.

이동로봇에는 80486 CPU를 탑재한 PC용의 주기판이 장착되었다. 이 주기판은 모니터링 시스템과의 통신, 이동로봇의 주행제어 및 각종 센서 시스템의 제어를 담당하며, 일반 개인용 컴퓨터와 마찬가지로 ROM BIOS와 hard disk에 프로그램된 내용에 따라 동작하고 일반 개인용 컴퓨터의 기본 입출력장치들을 모두 구비하고 있다.

이동로봇에 필요한 모든 기능들을 제어하기 위해 제작한 하드웨어들은 주 기관의 버스(bus)를 통해 CPU의 지령을 받고 센서 정보를 CPU로 전송한다. 제작된 하드웨어들을 기능별로 분류하면 모터 제어기(펄스 발생기), 카메라 #1 제어기, 카메라 #2 제어기, 조명 #1 제어기, 조명 #2 제어기, 자세조정기 제어기, 영상결합회로 제어기등이 된다. 각각의 제어기는 일반적인 AT-BUS 방식의 인터페이스[8]에 의해 CPU와 통신을 한다. 위에 분류한 각각의 제어기는 각기 독립적인 어드레스(address)를 가지도록 회로를 구성하였으나 실제 인터페이스용 보오드(board)는 모터 제어를 위해 하나, 그리고 나머지 모든 제어기들이 다른 하나를 공용하도록 하여 총 2 개만이 사용된다. 모터를 제외한 다른 장치들의 제어에는 릴레이등의 전력소자가 다수 사용되는데 이 소자들은 전기적 잡음(noise)의 원인이 되므로 역시 통합하여 하나의 별도 보오드상에 구현하였다. 그림 3은 이동로봇의 하드웨어 시스템 구성도이다.

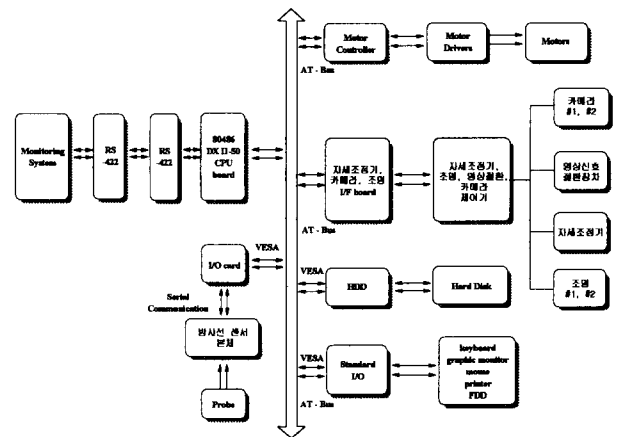


그림 3. 이동로봇의 하드웨어 구조

모니터링 시스템은 사용자가 조작하는 key pad와 조종간의 입력을 모니터를 통하여 디스플레이하고 이동로봇의 구동에 필요한 명령을 이동로봇에 전송하는 부분을 총괄하는 부분으로 조종간, key pad, key processing board, 80486 PC 주기판 및 모니터로 구성된다. 카메라 영상신호와 센서 데이터, 이동로봇 제어용 메뉴(menu)에 대한 PC 영상신호를 합성하여 모니터로 합성된 신호를 보내고 key processing board를 통해서 입력받은 명령을 해석하여 이동로봇으로 전달한다. 이 때의 이동로봇의 상태나 모니터링 시스템

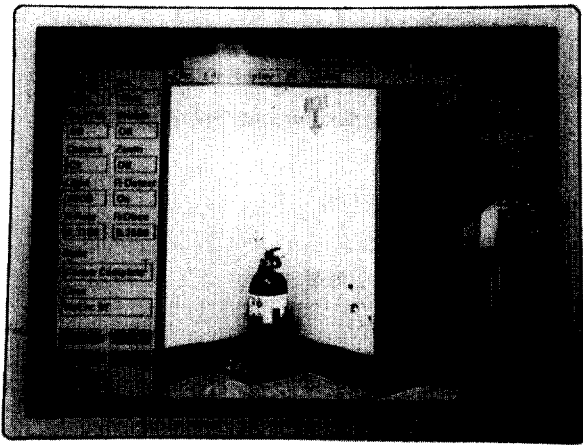


그림 4. 모니터링 시스템의 실행화면.

의 현재 상황 등은 모니터에 디스플레이함과 동시에 LED를 이용하여 표시한다. 그림 4는 모니터링 시스템의 실행화면이다.

이동 로봇 시스템과 모니터링 시스템의 통신은 가장 널리 사용되는 RS-232C에 비해 잡음에 강하고 먼 거리까지 통신이 가능한 RS-422에 의한 직렬통신 방식을 채택하였다. 본 시스템에 사용된 직렬 통신 인터페이스 카드는 일대일(point-to-point) 방식의 RS-422지원 통신 카드이며, 속도는 2-115,200bps 까지 지원한다.

4. 원격조종 이동로봇 시스템의 주요기능

원자력발전소에서 본 이동로봇 시스템이 사용될 경우 얻을 수 있는 정보는 방사선량 센서에서 측정된 방사선량 정보와 카메라로부터 얻어지는 시각정보의 두 가지이다. 원격지의 조작자는 시각기능을 이용하여 충돌을 회피하면서 방사선량 측정이 요구되는 위치까지 이동로봇을 조종하여 환경의 이상유무를 시각적으로 판단할 수 있고, 원하는 위치에서 방사선량 정보를 직접 취득할 수 있다.

4.1 방사선량 측정 시스템

이동로봇에 탑재한 방사선량 측정기는 미국 NRC사의 ADM-300X Extendable Survey Meter이다. ADM-300X은 GM 계수기형 측정기로서 측정부(probe) 확장기가 장착되어 있어 작업자가 접근하기 위험한 방사선 발생지역에 측정부를 근접시켜 감마선이나 베타선의 누적방사선량과 방사선량을 측정하고, 측정 데이터를 표시할 수 있다. 이 측정기는 크게 측정부(probe or survey meter), 표시부(display)와 제어부(control panel)의 주요 요소로 나눌 수 있다. 각 요소의 구성과 기능은 다음과 같다.

• 측정부

구성 : 센서(Sensors), 전자장치(electronics), 제어장치

(controls), 지시기(indicators), 전지(batteries) 등

기능 : 누적방사선량과 방사선량을 측정하고 결과를 표시부에 전송

• 표시부

구성 : 역광 기능이 있는 LCD 패널

기능 : 누적방사선량, 방사선량을, 전지 부족 상황, 정보 지정값등을 표시

• 제어부

구성 : 박막 제어 스위치 패널

기능 : 작업자의 제어 입력과 기기 시험 기능을 받아들인다

ADM-300X의 구조적, 기능적 특징은 다음과 같다.

• 전원(power) : 9VDC 건전지 3개(base 2개, probe 1개)

수명 : 60h (standard batteries)

125h (high capacity lithium)

• 작동중 자기 시험(self testing)

• 자동 측정범위 조정(Autoranging)

• 측정 범위

– 방사선량을

저준위 측정기(Low-range detector) $10\mu\text{R}/\text{h} \sim 800\text{mR}/\text{h}$

고준위 측정기(High-range detector) $600\mu\text{mR}/\text{h} \sim 10,000\text{R}/\text{h}$

– 누적방사선량

저준위 측정기(Low-range detector) $10\mu\text{R} \sim 10,000\text{R}$

고준위 측정기(High-range detector) $100\mu\text{R} \sim 10,000\text{R}$

• 방사선량을 및 누적방사선량의 청각/시각적 경보 체계 제공

• PC 등과의 RS-232 직렬 통신 기능 제공

• 반응 시간(Response time) : 2~5초

• 본체제원

중량(weight) : 3.17kg

높이(height) : 8.2cm

너비(width) : 10.5cm

이 측정기는 본래 사람이 휴대하여 이동하면서 낚싯대를 사용하듯이 조작함으로써 위치를 결정하도록 되어 있다. 그러나 본 이동로봇 시스템에서는 이와 같은 동작이 자동으로 이루어져야 하므로 별도의 기구부를 제작하여 원격조종이 가능하도록 하였다. 이 부분을 전방확장기라 호칭하였으며 최대 이송거리는 약 80cm이다. 그림 5는 전방확장기를 확장하여 측정기의 측정부(probe)를 최대한 원거리에 위치시킨 사진이다.

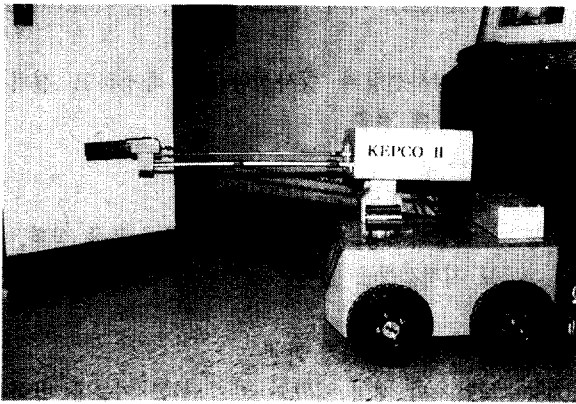


그림 5. 방사선 측정부가 최대 확장된 형태.

방사선량 측정 시스템의 전체구조는 그림 6과 같다. 측정부에서 측정된 방사선 관련 신호는 표시부/제어부에 보내져 해독된다. 해독된 데이터는 제어부로부터 RS-232 포트를 통해 이동로봇 제어부에 보내진다. 수집된 데이터는 다시 RS-422 직렬통신으로 모니터링 시스템에 보내진다. 반대로, 모니터링 시스템으로부터의 제어신호(측정 명령 등)는 반대 방향으로 측정 제어부에 보내진다.

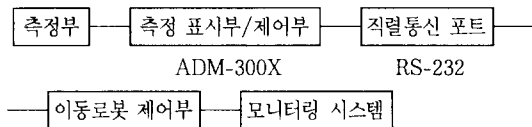


그림 6. 방사선량 측정 시스템의 구성.

4.2 환경감시 시스템

방사선량의 측정과 함께 작업환경의 상태를 운전자가 시각적으로 감시할 수 있도록 하는 것은 본 이동로봇에서 가장 중요한 기능이 된다. 이러한 기능을 위해 본 이동로봇 시스템에는 2대의 CCD 카메라와 각각의 카메라를 위한 조명 장치, 그리고 이 장치들을 원격제어할 수 있도록 하는 제어부가 장착된다. 이상의 장치들을 통칭하여 환경감시 시스템이라 명하였다. 다음은 환경감시 시스템의 구성요소들이다.

- 카메라 #1
- 조명 #1
- 카메라 #2
- 조명 #2
- 자세조정기

카메라 #1은 환경을 직접적으로 감시하기 위한 카메라로서 컬러 영상과 8배 주움(zoom), 자동초점조절 기능, 자동노출조절 기능, 역광보정 기능 등을 제공하며, 카메라 #2는 충돌회피를 위하여 지면을 감시하는 카메라이다. 조명

#1과 조명 #2는 각각의 카메라를 위해 독립적으로 장착하였으며 조도가 강하고 지향성이 우수한 상용의 할로겐 램프를 사용하였다. 다음은 카메라 #1, 카메라 #2, 조명 #1, 조명 #2의 개별사항들을 정리한 것이다.

- 카메라 #1의 주요사항
 - Color 카메라
 - 카메라와 렌즈 일체형
 - 최저조도 : 5 Lux
 - 초점거리 : 8-64mm (8배 zoom)
 - 자동초점조절(Auto Focus) 기능
 - 자동노출조절(Auto Iris) 기능
 - 역광보정(BackLight Compensation) 기능
- 카메라 #2의 주요사항
 - 흑백 CCD 카메라
 - 초점거리 : 16mm
- 조명 #1, #2의 주요사항
 - 전원 : AC 12V
 - 사용 램프 : Dichroic 할로겐 램프
 - 사용전력 : 50W

카메라 #1의 기능중에서 자동초점조절 기능, 자동노출조절 기능, 역광보정 기능과 주밍(Zooming) 기능등은 일반적인 카메라 시스템에는 없는 기능들로서 컬러 카메라로서의 장점과 함께 작업환경의 정확한 영상을 제공하는 데에 중요한 기능으로 작용한다. 조명 #1과 #2는 동일제품으로서 AC 220V 전원을 AC 12V로 전환하는 각각의 변압기에 의해 전원을 공급받으며 이 변압기는 이동로봇 차체 내부에 장착되어 있다.

카메라 #1과 조명 #1은 최대한 넓은 범위의 환경을 감시할 수 있도록 자세조정기와 결합되어 사용된다. 자세조정기에는 이 외에도 방사선 측정기 전방확장기가 함께 탑재되어 원하는 방향을 지향할 수 있도록 한다. 본 이동로봇은 자세조정기로서 카메라 장착을 전제로 한 상용의 Pan/Tilt 유닛을 사용하였다.

환경감시 시스템의 제어부는 자세조정기 제어부, 카메라 #1 제어부, 조명 #1, #2 제어부, 카메라 영상신호 절환 제어부등으로 구성된다. 이 모든 장치들은 하나의 board를 공유하여 동일한 방식으로 이동로봇상의 주기판과 인터페이스를 한다.

두 대의 카메라로부터 수신되는 영상신호를 모니터링 시스템으로 전송하는 방법으로는 화면분할방식과 신호절환방식을 모두 검토하였으나 화면의 질이나 장치의 안정성, 제작비용등 대부분의 측면에서 신호를 절환하는 방식이 유리한 것으로 판정되었다. 특히 모니터링 시스템의 디스플레이에서 영상신호와 센서 데이터들을 하나의 화면에 나타내도

록 하였으므로 두 대의 화면을 동시에 디스플레이하는 경우 화면을 효과적으로 관찰하기에 더욱 어려움이 있을 것으로 판단되었다. 카메라 영상신호의 질환을 제어하기 위한 회로는 상용의 VCR이나 TV 등에 사용되는 영상 절환 방식을 사용하였다. 이러한 시스템들에 사용되는 영상절환장치들은 영상절환 전용의 스위칭 IC를 사용하여 매우 간단한 회로로 영상절환을 구현하고 있다.

5. 맺음말

원자력발전의 비중과 중요성은 나날이 증대하고 있으며 그와 함께 안전성의 문제 역시 커다란 사회적 문제로 대두되고 있다. 이에 따라, 전술한 바와 같이 원자력 및 로봇연구의 선진국에서는 원자력발전소에서의 안전을 도모하고 사회적 신뢰를 확보하기 위한 방안으로 원전에서의 로봇사용이 적극적으로 연구되고 있으나 국내의 사정은 아직 시작단계라 할 수 있다.

이 글에서 소개하는 이동로봇은 원자력 발전소내의 방사선관리구역내를 이동하면서 설비를 감시하고 방사선량을 측정할 수 있는 능력을 갖춘 소형로봇으로서, 원자력 발전소 운영기술의 고도화를 추진하고자 하는 장기 연구의 첫 단계에 해당한다. 이동로봇의 차체를 소형으로 하고 방사선 측정기를 탑재함으로써 이상발생시 사람이 직접 접근하던 현장에서의 작업을 어느정도 대처할 것으로 기대되며 카메라를 이용하여 평상시의 감시활동 또한 수행할 수 있도록 제작되었다. 그러나, 현장에 실전배치되어 사용될 경우 충돌회피의 확실성과 고방사선 지역에서의 동작의 신뢰성 등에 있어서 많은 보완이 요구될 것으로 생각되며 기구적인 측면이나 하드웨어, 소프트웨어 등 모든 면에 대해 안정한 동작을 위한 노력이 지속되어야 하며, 현재까지 기울인 노력 이상의 것이 요구될 것으로 전망된다. 향후 지속적인 연구에 의

해 원자력 발전소 유지 및 보수 전반에 걸친 자동화기술을 습득함으로써 작업의 안전성을 도모하고, 작업원의 방사선 피폭을 저감하는 효과를 얻게 되기를 기대한다.

참 고 문 헌

- [1] M. Jamshidi & P. J. Eicker, "Robotics and Remote Systems for Hazardous Environments", Prentice Hall, 1993.
- [2] E. Byler, W. Chun, W. Hoff, D. Layne, "Autonomous Hazardous Waste Drum Inspection Vehicle", *IEEE Robotics and Automation Magazine*, March 1995.
- [3] Shinji Yamamoto, "Development of Inspection robot for Nuclear Power Plant", *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, May 1992.
- [4] A. Meystel, "Autonomous Mobile Robots: Vehicles with Cognitive Control", World Scientific, 1991.
- [5] R. D. Schraft, "Service Robots: Opportunities, Possibilities and Potentials for the Next Decade", Technical Survey, Fraunhofer-Institute for Manufacturing Engineering(IPA), 1994.
- [6] Shuji Asami, "Service Robots in Japan: Present and Future", Technical Survey, Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co. Ltd., 1994.
- [7] T. D. Gillespie, "Fundamentals of Vehicle Dynamics", SAE(Society of Automotive Engineers), 1992.
- [8] W. J. Tompkins & J. G. Webster, "Interfacing Sensors to the IBM PC", Prentice Hall, 1988.
- [9] 이 재순, "차륜공학", 동명사, 1981.

저 자 소 개



이 범 회

1955년 5월 29일생 1978년 서울대학교 전자공학과 졸업(학사)

1980년 서울대학교 공과대학원 전자공학과 졸업(석사)

1985년 Univ. of Michigan, Dep. of Computer, Information & Control Eng. 졸업(공학박사)

1985년~1987년 Purdue Univ. Electrical Eng. Assistant Professor

1987년~현재 서울대학교 전기공학부 교수

1995년 8월~현재 서울특별시 중소기업 창업보육센터 소장

주관심분야: 다중로봇의 힘 제어, 신경회로망 및 퍼지 응용 제어, 유연 자동화 시스템, 산업용 로봇

제어기 개발, 다중로봇의 충돌회피, 로봇 제어용 전문가 시스템 개발, 특수작업용 로봇 시스템

(151-742) 서울시 관악구 신림동 산 56-1 서울대학교 자동화 시스템 공동연구소

TEL. 02) 880-7311 / FAX. 02) 876-5414



구 관 모

1966년 2월 9일생

1988년 서울대학교 제어계측공학과(학사) 졸업

1990년 서울대학교 공과대학원 제어계측공학과(석사) 졸업

1993년~현재 서울대학교 공과대학원 제어계측공학과 박사과정

1990년~1993년 (주)LG전자 영상미디어 연구소 주임연구원

주관심분야 : 퍼지 제어, 이동로봇 시스템, 멀티미디어 영상기기 제어

(151-742) 서울시 관악구 신림동 산 56-1 서울대학교 자동화 시스템 공동연구소 로보틱스 및 지능 시스템 연구실 TEL. 02) 880-6485(교환 505) / FAX. 02) 885-6620



우 희 곤

1947년 9월 20일생

1974년 동아대학교 전자공학과(학사) 졸업

1983년 연세대학교 산업대학원 전자공학과(석사) 졸업

1995년 충남대학교 대학원 전자공학과(박사) 졸업

1983년~현재 한전 전력연구원 전력계통연구실 수석연구원

주관심분야 : 원격조종 로봇 시스템, 멀티미디어 자동화 시스템

(305-380) 대전시 유성구 문지동 103-16

TEL. 042) 865-5760 / FAX. 042) 865-5314