

로봇을 이용한 원격조작 임팩트렌치 작업의 자동수행 기능부 구현

° 박 영수, 박 병석, 이 재철

한국 원자력 연구소, 원격장치 기술실

Implementation of Automatic Mode for Remote Impact Wrench Task

Young-Soo Park, Byung-Suk Park, Jae-Sol Lee

Remote Technology Dept., Korea Atomic Energy Research Institute

ABSTRACT

After many years of proliferation, the nuclear industry is indebted for a formidable consequence, the safe management of spent fuel. Naturally, the high radioactivity involved with such process motivates the development of effective telerobotic systems. Nevertheless, the existing master-slave type of tele manipulators are limited in effectiveness by the human operator's limited sensory and manipulation capabilities. This paper presents the result of a research effort to resolve such problems by assigning the slave manipulator a certain degree of intelligence; sensing and actuation. In the presented system, a perception-action loop is achieved using ultrasonic range sensor and laser distance sensor interfaced with the PUMA 760 industrial robot system, and applied to automating impact wrenching task for unbolting the lid of nuclear spent fuel cask. The perception-action loop performs determination of the cask location, collision avoidance and centering of the impact wrench onto the bolt head. To aid the insertion task and to provide versatility a mounting module consisting of an RCC device and an automatic tool changer is designed and implemented. The performance of the developed system is tested on the model cask and the result is given.

1. 서론

지난 20년간 국내의 원자력산업은 크게 확장되어 왔으며, 현재 전국의 전력 수급의 60%를 담당하는 중요한 역할을 하고 있다. 그 결과 사용후핵연료의 취급문제가 최근 대두되고 있으며, 이의 안전하고 효율적인 취급기술의 개발이 시급하다. 사용후핵연료 취급기술은 고준위 방사능 환경하에서 이루어지므로 제반 작업이 원격조작으로 이루어져야하며, 현재 단순한 핵연료 이송작업만이 전경 크레인 시스템이나, 기계식 마스터슬레이브 매니플레이터로 이루어지고 있다. 하지만 현재 사용후핵연료의 취급의

중요성이 증대하고 있고, 따라서 보다 복잡하고 다양한 작업의 원격수행이 필요하고, 이에 서보화된 원격로봇의 도입이 필수적이다.

원격조작로봇의 조작은 현재 원거리의 조작자가 마스터 기구를 조작함으로써 작업현장의 슬레이브 로봇을 구동시키는 마스터-슬레이브 방식이 주로 사용되고 있으며, 이 경우 슬레이브 환경 정보를 원거리의 원격조작자에게 현실감있게 전달하는 것이 매우 중요하고도 어려운 문제이다. 따라서 매우 제한된 그리고 비효율적인 환경 정보의 전달에 기인한 원격조작은 매우 느린속도로 진행되고 작업의 신뢰성도 떨어지게 된다. 이는 인식, 판단, 조작의 모든 지능적인 기능을 인간조작자가 담당하게 됨에 따라서 인간의 제한된 정보수용기능 및 조작기능에 기인한 것이다. 특히 보다 정밀한 작업을 요구하는 일에는 원격조작이 매우 비효율적으로 진행될 수 밖에 없다. 따라서 근래의 원격조작로봇 시스템 개발의 추세는 작업현장의 로봇에 자체적인 환경인식 및 작업 수행 능력을 부여해서 원거리의 인간 조작자와 로봇 사이에서 작업분담을 시키는 방식을 추구하고 있다. 즉, 인간은 관리자의 입장에서 전체작업의 계획 및 판단을 담당하며, 구동에 있어서도 큰 정밀도를 요하지 않는 움직임(Gross Motion)을 담당하며, 정밀도를 요하는 세부작업은 원격로봇 자체의 지능으로 수행해 나가도록 한다는 개념이다. 이렇게 시스템을 구성함으로써 인간조작자의

육체적, 정신적 부담을 덜어 주게 되고, 작업의 정밀도 및 신뢰성을 향상시킬수 있게 된다. 이러한 방식은 현재까지 독립적으로 발달한 산업용 로봇시스템 응용의 여러가지 센싱 및 제어기술과 원격조작 기술을 접목시키는 작업을 필요로하며, 특히 센서의 개발 및 응용이 매우 중요하게 된다.

본 연구를 통해서 산업용 PUMA 760 로봇과 레이저 거리측정 센서 및 초음파센서를 이용하여 사용후핵연료 취급시설의 취급 및 유지보수작업에 가장 빈번히 야기되는 볼트 체결 및 분리를 위한 임팩트렌치 작업부의 자동수행모드를 구성하였다. 실험을 위해서 핵연료 이송용 캐스크의 뚜껑부위 고정용 볼트를 푸는 작업을 수행하였으며, 이를 위해서 캐스크의 위치인식 및 충돌회피동작, 임팩트렌치부와 볼트머리의 조심 및 볼트의 위치인식을 수행하였다. 또한 렌치부의 삽입을 용이하게 하기 위해서 RCC 장치를 도입하였고, 시스템의 범용성을 높이기 위해서 자동공구교환장치를 장착하였다. 본 논문에서 위 시스템의 구성 및 동작특성을 소개하고, 실제 실험결과 및 문제점을 소개한다.

2. 시스템 개발 사양

개발된 시스템은 원격조작 로봇시스템의 자동수행부로서 동작하며, 원거리 이송동작은 인간조작자에 의해서 마스터-슬레이브 방식의 구동으로 이루어진다. 따라서 자동수행부는 핵연료 이송용 캐스크에 임팩트렌치작업의 특수성을 고려해서 다음과 같은 기능을 담당한다.

- 인간 조작자의 원거리 이송동작중 장애물 회피기능을 수행한다.
- 작업물(핵연료 이송용 캐스크)의 위치를 인식하여, 로봇틀 작업위치로 옮긴다.
- 자동공구교환 기능을 갖추어서 다양한 종류의 공구에 호환되도록 한다.
- 캐스크 볼트의 위치를 인식한다.
- 임팩트렌치를 볼트에 맞추어 삽입한다.
- 임팩트렌치를 원격구동시키며, 캐스크볼트의 체결토크인 28.8kg-m을 인가할 수 있어야 한다.

기상의 작업을 연계시킴으로써 Impact Wrench 작업의 자동수행부가 구성된다.

3. 전체 시스템의 하드웨어 구성

개발된 원격로봇 시스템은 PUMA 760 로봇 시스템과 초음파 센서, 레이저 거리센서, 자동공구 교환장치, RCC 기구, 임팩트렌치와 장착부 그리고 인터페이스부로 구성되어 있다. 그림 1은 전체 시스템의 기능적인 개발도를 나타내며, 각 부분의 사양과 기능은 다음과 같다.

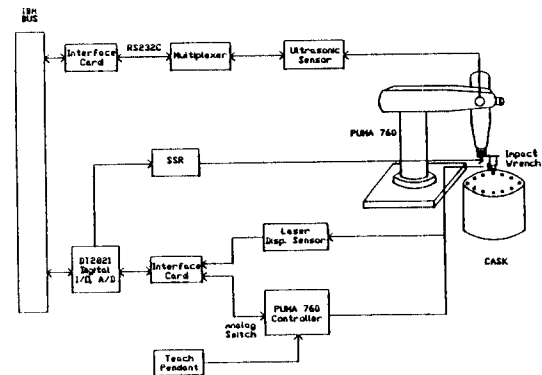


그림 1. 원격조작 시스템의 구성도

3.1. 로봇 시스템

시스템에 사용된 로봇은 Kawasaki사의 PUMA 760로봇로서, 6자유도의 움직임을 가지며, 별도의 로봇 콘트롤러부를 통해서 수동 조작 및 프로그램 제어가 가능하다. 프로그래밍 언어는 VAL의 변형인 KL언어로 구성되며, 외부 기기와의 통신포트로 16개의 아날로그 입력력 단자가 있으며, 이들은 프로그램 제어가 된다. IMB PC와 통신을 위해서 별도의 접속회로를 구성하였으며, Data Translation사의 DT2821 시스템의 Digital I/O 단자와 접속하였다. 그림 2는 PUMA 760 로봇과 주변기기들의 모습을 보여준다.

3.2. 초음파 센서

초음파센서는 인간조작자가 로봇의 원거리 이송동작을 수동조작할 때에 장애물 회피 동작을 담당하며, 작업물(핵연료 이송용 캐스크)의 근접 위치를 인간 조작자에게 전시해준다. 센서로는 CONTAQ사의 Model



그림 2. 원격조작 시스템의 외관

RMU-2000 초음파 센서를 사용 하였으며, 이는 0.5ft~60ft의 거리측정범위를 가진다. 거리측정정밀도는 0.007 inch 이며, multiplexer을 통해서 전후 좌우의 거리 측정용을 위한 4개의 센서를 RS 232 시리얼포트를 통해서 IBM PC 컴퓨터와 접속하였다.

3.3. 레이저 거리측정 센서

레이저 거리 측정센서는 작업물(해연료 이송용 캐스크)에서 임팩트렌치 작업을 하기 위해서 볼트 머리부 위치의 인식 및 자동 추종, 조심 작업을 수행하기 위한 목적으로 원격로봇의 자동 구동부의 인식기능을 담당한다. 센서로는 Keyence사의 모델 LB-01 레이저 센서를 사용하였으며, 60~140mm range의 거리측정이 가능하며 10 μ m의 측정 정밀도를 가진다. 센서의 출력신호로 $\pm 5V$ 의 출력전압은 A/D 변환기(Data Translation DT2821)에 입력되어 IBM AT 컴퓨터에 접속되었다.

3.4. 임팩트렌치 모듈

임팩트렌치부는 공압식 공구교환장치 (BL Autochange사, QC-20)를 통해서 로봇의 그리퍼에 장착되어, 향후 다른 종류의 공구와의 호환성을 부여하였다. 공구교환장치는 별도의 공압식 컴프레서로 구동되며, 로봇 컨트롤러의 컴퓨터에 의해서 제어된다. 또한 렌치의 볼트에의 삽입을 용이하게 하기 위하여 RCC(Remote Center Compliance) 장치 (BL Autochange사,

RCC-321-RS)를 도입하였다. 임팩트렌치는 Robot의 Payload Capacity를 고려해서 소형 DC 구동형을 사용하였으며, RCC 장치의 Compliance Center 거리 (16cm)에 맞추기 위하여 뒷부분을 절단하여 장착하였다. 별도의 DC power supply로 동력이 공급되며, 동작은 SSR(Solid State Relay)를 통해서 PC에 접속된 D/A 모듈로 동작시켰다. 그림 3에 임팩트렌치부가 로봇에 장착된 모습을 보여준다. 또한 풀어진 볼트를 제거하기 위해서 그리퍼를 사용하였으며 그림 4는 이의 공구교환장치에 장착된 모습을 보여준다.

3.5. 로봇 제어기와 컴퓨터 인터페이스부

제어용 컴퓨터는 IBM PC/AT로 구성되었으며, 그림 1에서 보여진 바와같이 이는 로봇 컨트롤 시스템의 컴퓨터와의 통신 및 각 센서들과의 접속을 담당하며, 임팩트렌치의 구동을 제어한다. 통신을 위해서 Data Translation사의 다목적 I/O 시스템 및 초음파 센서용 RS 232 보드와 멀티플렉서, 그리고 별도의 전자회로를

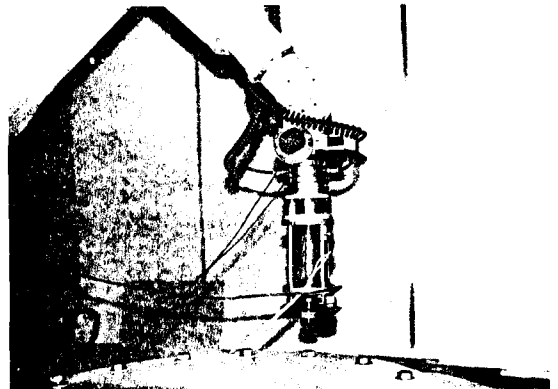


그림 3. 임팩트렌치 모듈



그림 4. 그리퍼 모듈

구성하였다. 그림 5은 컴퓨터 모듈의 개관을 보여준다.

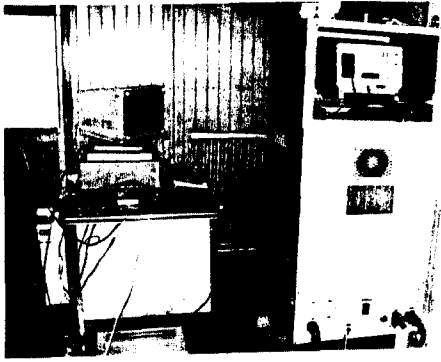


그림 5. 제어용 컴퓨터 시스템

4. 동작 방식 및 소프트웨어 구성

본 시스템의 제어는 수동조작과 자동조작으로 구성된다. 각 부분의 동작방식이 그림 6에 주어졌다.

4.1. 보강된 수동 조작부

수동부의 제어는 인간 조작자가 전시된 작업환경의 영상정보에 기인해서 수동조작기구를 사용해서 원거리의 슬레이브 로봇의 광역움직임을 제어하게 되는데, 본 연구에서는 마스터슬레이브 기구 구성 및 영상전달 부분은 중점을 두지 않았고, 수동조작기구로 PUMA 760 시스템의 수동조작 펜던트를 사용하여 조작하였다. 여기에 조작자의 한정된 인식기능을 보완하기 위해서 4개의 초음파 센서를 로봇의 손목부위에 장착하여 전후좌우의 거리정보를 조작자에게 전달하도록 하며, 근거리에 장애물이 있을 경우 경보음이 울리도록 한다. 또한 위의 정보를 이용하여 원하는 작업대상물까지의 거리 및 위치선정을 가능하게 하며, 일정한 거리내에 작업대상물이 있을경우에 조작자에게 이를 알려주어 특정 작업의 자동수행모드를 시작할 수 있도록 한다.

4.2. 임팩트렌치 작업의 자동수행부

캐스크 뚜껑의 볼트를 푸는 작업은 경질도를 요하며, 카메라정보의 원격전송을 통해서 인간조작자로 하여금 마스터슬레이브 방식의 구동으로 수행하기에는 어려운점이 많으므로, 이작업을 자동화하여 작업의 신뢰성과 효율을 높일수가 있을 것이다. 작업은 볼트의 위치를 찾는 작업과 임팩트렌치를 이용하여 볼트를 푸는 작업으로 구성되며,

볼트의 위치 및 작업 진행상황을 감지하기 위하여 레이저 거리센서를 최대한 활용하였고, 컴퓨터와 로봇제어기간의 통신을 적절히 이용하여 작업이 성공적으로 수행되도록 한다. 그림 6의 하단부에 자동모드의 동작이 플로우차트 형식으로 보이고 있다. 그림에서 보인바와같이 캐스크가 로봇의 작업범위내의 일정한 구간에 위치하게되면 초음파센서 정보로부터 인간 조작자에게 알려지고, 인간 조작자는 자동모드를 수행시켜서 작업을 자동수행 시킨다. 그리하면 레이저 거리센서가 동작을 시작하게되며 로봇은 손목부를 수직으로 위치시켜서 렌치 작업에 적합하도록 한다. 레이저 거리센서는 계속적으로 컴퓨터에 위치정보를 전달하여 볼트머리들이 위치한 원의 궤적을 찾아내는 작업을 수행한다. 이 작업부의 구체적인 수행 방법이 그림 7에 나타나 있다. 로봇제어의 제한된 통신능력과 KI 언어의 제한된 명령어로 위작업을 수행하기 위해서 그림에서 보인 바와같이 ①, ②, ③의 순으로 로봇으로 하여금 캐스크 위를 검사하게 하여 레이저센서 정보량이 크게 변하는 점을 인식, 캐스크의 위치를 지정할 수 있는 점들 P_1 , P_2 , P_3 를 찾아낸다. 다음에 P_3 로부터 P_1 으로 직선운동을 하며 캐스크 중앙에 있는 고리부분의 위치를 인식하여 원의 중심을 찾고, 이로부터 정해진 볼트까지의 거리를 반지름으로 하는 볼트들이 위치한 원의 궤적을 알아낸다. 볼트머리의 궤적을 얻어내면 그림 6에서와 같이 로봇은 이 궤적을 따라서 원운동을 하며 거리센서의 정보량의 변화분을 인식하여 볼트의 위치를 찾아낸다. 볼트머리가 발견되면 원운동을 일시 중지하고, 임팩트렌치 작업을 수행한다. 임팩트렌치의 삽입작업은 그림 7의 오른쪽에 주어진 바와같이 전후좌우와 회전운동을 겸한 미세한 동작을 수행하여 삽입 완료가 레이저 센서의 정보로부터 인식될 때까지 계속된다. 삽입이 되면, SSR(Solid State Relay)를 짧은 시간 구동시켜 볼트를 풀게된다. 볼트가 풀리면 렌치를 올리고 다시 원운동을 재개하여 위의 과정을 반복 모든 볼트가 풀릴때까지 계속한다. 위의 작업은 컴퓨터에서 각 센서 정보를 인식하고, 정해진 순서대로 로봇 제어기와 통신을 수행하므로써 이루어 진다. 초음파 센서 정보처리는 Quick Basic 프로그램 되었으며,

주 프로그램과 A/D 변환 및 로봇시스템과의 통신 및 SSR 동작을 담당하는 모듈은 C언어로 구성되었다. 로봇 컨트롤러로부터 PC로의 통신 및 로봇의 구동은 KI언어로 구성 되었다.

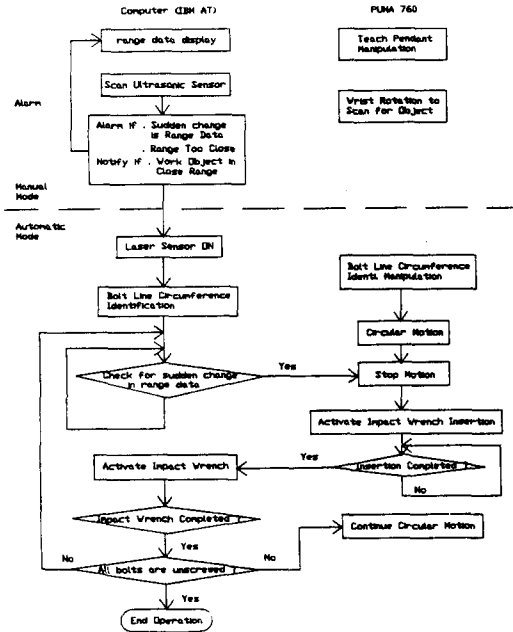


그림 6. 임팩트렌치 작업 수행 플로우차트

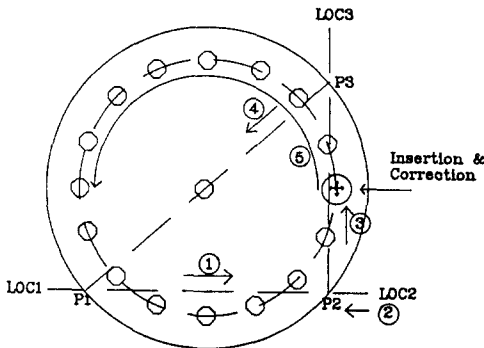


그림 7. 볼트라인 궤적의 인식 방법

5. 실험결과 및 제안

개발된 원격로봇 시스템을 이용하여 모형 핵연료 이송용 캐스크 뚜껑부의 볼트를 푸는 작업에 실험적으로 응용했다. 실험결과로 다음과 같은 특성을 얻었다.

- 초음파 센서를 이용한 장애물 인식은 센서의 방향과

일치되는 경우에 정확한 정보를 제공하였으며, 센서 방향과 45° 되는 방향의 장애물의 인식에서 거리측정 정확성이 떨어짐을 볼수 있다. 하지만 인간조작자의 조작을 돕는 역할은 효과적으로 수행한다고 평가된다.

- 원형 볼트궤적의 인식은 제한된 알고리즘으로 ±5mm 이내로 가능하였고, 이는 볼트 머리부의 크기에 비해 작은 오차로서 다음단계인 볼트위치 인식작업에 응용가능한 범위의 추정을 해 주었다.
- 볼트 머리부의 인식작업도 90% 이상의 성공율을 보였으나, 원형볼트 궤적의 인식이 오차가 큰 경우에 최대 6개의 볼트 머리부분 인식하지 못하였다.
- 볼트에 임팩트렌치를 삽입하는 작업은 성공적인 경우 삽입작업 하나에 평균 30초 이내에 이루어 졌으며, 성공율이 45%정도에 머물렀다.
- 작업가능한 조임토크가 임팩트렌치의 용량이 부족하여, 요구된 28.8kg-m에 못미쳤다. 또한 임팩트렌치의 구동축이 로봇의 마지막 축과 일치하는 관계로 로봇의 토크 용량을 초과한다.

이상에서 개발된 원격로봇 시스템의 임팩트렌치 작업에의 적용은 Cask가 놓인 위치 및 조임토크에 따라 작업성공율이 달라졌으며, 10kg-m 이내의 조임토크의 경우 45% 정도의 작업성공율을 보였다. 이와같은 단점은 로봇 제어기의 컴퓨터의 제한된 외부통신 기능 때문에 보다 효율적인 센서 정보의 응용을 이룰수 없기 때문이며, 기존 KI언어의 제한성 때문이다. 위의 문제점을 해결하기 위해서는 다음과 같은 작업들이 이루어져야 할 것이다.

- 로봇의 컨트롤러부에 프로그램 제어와 별도로 동작되는 매스터 조작기구를 설치하여 초음파센서부를 45° 방향으로 계속 회전 시키며 주위를 인식할 필요가 있다.
- 볼트 머리부 삽입을 위한 전후좌우 및 회전운동을 개선시킨다.
- 임팩트렌치의 용량을 키워야 한다. 현재 상용화된 제품에서는 구할수가 없으므로 모터부 및 플라이휠부분 제작해야 한다.
- 임팩트렌치에 인가되는 토크가 직접 6축에 전달되지

않도록 구동축 방향과 수직으로 오프셋 거리를 두어 장착한다. 현재 제작되어 실험이 수행될 것이다.

- 로봇제어기를 외부통신이 가능하고, 일반언어로 프로그래밍 할 수 있는 방식으로 재구성할 필요가 있다.
- 볼트의 체결을 원하는 조임토크까지 할 수 있도록 토크제어를 구성해야 한다.

일차적인 시스템 개발의 결과로 복잡한 작업의 완벽한 수행은 이루지 못했으나, 시스템을 보완함으로써 신뢰성있는 작업을 수행할 수 있을 것이다.

6. 결론

핵연료 이송용 캐스크의 볼트를 푸는 작업의 원격조작의 효과적인 수행을 이룩하기 위해서 로봇을 이용한 자동수행부의 개발한 결과를 소개했다. 로봇 제어기의 제한된 통신 및 프로그래밍 기능이 시스템의 성능에 큰 영향을 미쳐서 45%의 작업성공율을 가져왔으나, 원격조작의 향후 방향을 제시하고, 초음파센서 및 레이저 거리센서의 원격조작에의 응용가능성이 긍정적으로 평가되었다. 또한, 제안된 원격조작 로봇 시스템의 수동 및 자동조작 모드를 병행한 방법은 원격조작의 효율성 및 범용성을 증가시키는 좋은 방법으로 간주된다. 한편 임팩트렌치 작업에 있어서의 삽입작업에 많은 연구가 요구되며, 소형, 경량, 고출력의 임팩트렌치 개발이 요구된다.

참고문헌

- [1] 윤지섭외 "다기능 원격 임팩트렌치 개발", 1990, KACC, PP.298-301.
- [2] 이재설외 "사용후핵연료 원격 취급장치 개발", 한국원자력연구소 보고서 (KAERI/RR-778/88), PP46-62, 1988
- [3] G.Andre, R.Fourinier, "Status of the Advanced Telecooperation Project in the French A.R.A. Program", Proceedings of Remote Systems and Robotics in Hostile Environment Topical Meeting, PP.93-100, 1987.
- [4] John J.Kalk, "Fastener Tightening in A Radioactive (HOT) Cell", Proceedings of Remote Systems and Robotics in Hostile Environment Topical Meeting, PP.423-427, 1987
- [5] J.A.Constant and K.J.Hill, "Teleoperators in the Nuclear Industry", Proceeding of 6th International Symposium on Industrial Robots, PP.220-239, 1976.
- [6] I.B.Sheridan, "Telerebotics", Automatica, Vol25, No.4, PP.487-507, 1989