



제조용 양팔로봇에 관한 연구

박찬훈 | 한국기계연구원

[요약문]

최초의 산업용 로봇이 개발된 이래 산업 자동화의 중심에는 산업용 로봇이 있으며 현대의 풍요로운 산업화는 자동화 장비를 통한 대량생산에 힘입은 바 크다. 산업용 로봇은 현재까지도 제조 산업에서 매우 중요한 역할을 차지하고 있으며 그 중요도는 점점 커질 것으로 예상된다. 현재의 산업용 로봇은 과거에 비해서 정밀도, 강성, 내구성측면에서 많은 발전을 이루었다. 그러나 그 외형의 측면에서는 큰 변화가 없었으며, 아직도 대부분의 사업장에서는 하나의 팔을 가진 로봇이 이용되고 있다. 이러한 하나의 팔을 가진 전통적인 싱글 암 로봇은 작업자가 두 손을 가지고 작업하는 작업장에는 적용하기 곤란하며, 이는 산업용 로봇의 적용 범위를 제한하는 주된 이유 중의 하나임이 분명하다. 전자제품, 기계부품의 조립작업을 위해서는 인간과 같이 양팔을 가진 형태의 로봇시스템이 매우 효과적이며, 이러한 이유로 해외의 선진사를 중심으로 양팔을 가지는 제조용 로봇의 개발이 이루어지고 있다. 현재 시점에서는 상용화된 양팔로봇시스템은 소수에 불과하며, 기능적인 측면에서는 단순한 형태의 작업만이 가능하다. 그러나 기구학적 구성에 있어서 기존의 로봇과 달리 양팔구조를 가지고 있기 때문에 향후 매우 발달된 형태로 인간과 유사한 양팔 협조 작업을 수행하는 산업용 양팔로봇이 개발될 것으로 생각된다. 본 문헌에서는 현재의 제조용 양팔로봇 연구 동향을 간략히 설명하고, 한국기계연구원의 제조용 양팔로봇 시스템에 관련된 연구 내용을 소개하고자 한다.

1. 서론

산업용 로봇은 근대의 대량생산을 기반으로 한 풍요로운 산업화에 없어서는 안 될 중요한 역할을 하고 있다. 현재의 산업용 로봇은 과거에 비해서 그 정밀도, 강성, 내구성측면에서 많은 발전을 이루었으나, 외형의 측면에서는 큰 변화가 없었으며, 아직도 대부분의 사업장에서는 하나의 팔을 가진 로봇이 이용되고 있다. 이와 같이 대부분의 산업용 로봇은 하나의 팔을 가진 형태를 가지고 있으며, 이것은 산업용 로봇의 적용범위에 명백한 한계를 가지고 있음이 분명하다. 서비스 로봇 등의 분야에서는 이미 오래전부터 양팔을 사용한 로봇 시스템에 관한 연구가 진행되어 오고 있으나 아직은 실험실 수준에서의 연구범위를 벗어나고 있지 못하며, 특히 정밀도 및 강성의 측면에서는 제조용 로봇시스템과는 많은 차이를 보이고 있다. 현재 시점에서 몇몇 특수한 산업용 로봇들이 다중 팔을 가지고 있지만 일반적으로 각각의 팔이 개별 작업을 수행하는 수준에서 사용되고 있다.

과거에는 제조 로봇의 주요 시장은 용접, 이적재, 팔레타이징 작업 등과 같은 시장이었으며, 이러한 시장에서는 로봇이 작업물을 다루는데 있어 접촉력을 제어할 필요가 없으므로 로봇에 요구되는 기능은 높은 반복정밀도와 내구성이었다. 그러나 근래에 들어 제조로봇 시장은 과거와 달리 핸들링 및 조립 분야가 급속히 성장하고 있으며, 향후 단순



이송작업 뿐만 아니라 조립작업 (그림 1)에 적용될 수 있는 로봇에 대한 수요가 서서히 증가할 것으로 예상된다 [2] [3].

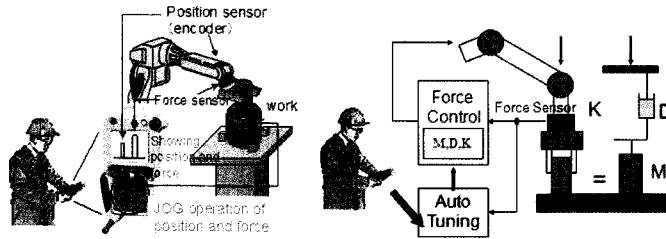


그림 1. 로봇을 이용한 조립작업 및 제어방법

그림 2에서 보듯이 특히 일본의 경우 핸들링 및 조립 분야의 시장이 제조로봇 시장의 거의 50%를 차지할 정도로 성장하였음을 알 수 있으며, 이러한 추세는 다른 나라들의 경우에도 비슷하다.

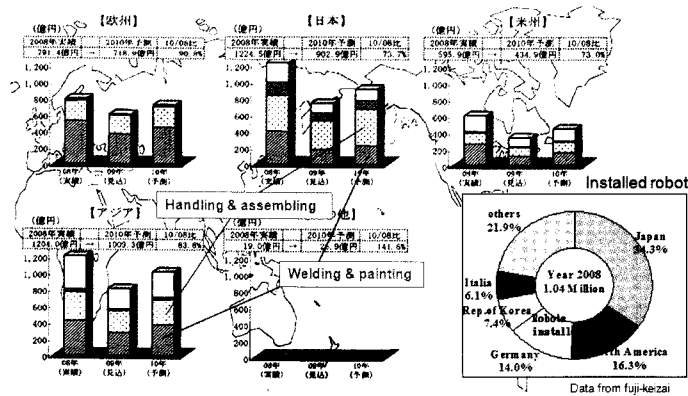


그림 2. 세계로봇시장의 로봇 수요 변화^[1]

이와 같은 이유로 그림 3에서 보듯이 제조로봇의 시장은 Spot welding이나 Painting등의 전통적인 시장에서 변화하여 IT 산업의 수요 상승과 더불어 Panel Handling 등의 시장이 성장하고 있다. 더 나아가 전자, 기계제품의 조립 공정에 대한 수요도 지속적으로 성장할 것으로 기대된다.

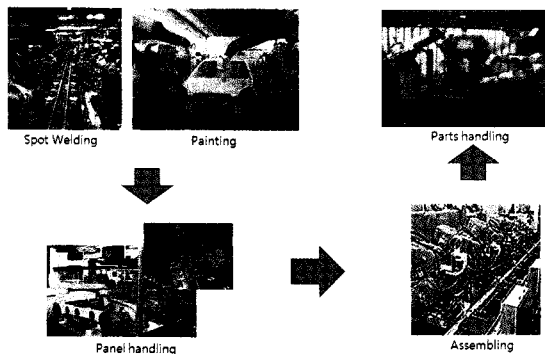


그림 3. 세계로봇시장의 로봇 수요 변화^[1]

이와 더불어 전 세계의 임금수준이 점차로 상승하고 있으며, 이로 인하여 많은 다국적 기업들이 중국으로 진출하고 있다. 그러나 중국도 임금 상승이 평균 12~14%에 이르고 있어서 향후 임금수준의 상승은 거의 모든 제조업체에 큰 압박요인이 될 것으로 생각된다. 또한 한국, 일본, 유럽 등의 경우에는 인구 증가율이 매우 낮은 상황이며, 이러한 추세가 계속되면서 제조인력의 극심한 부족 문제에 직면할 것이 분명하다.

상기에서 언급한 현실적인 요인들에 의해서, 기존의 단일 팔 로봇 시스템에서 탈피하여 인간작업자와 같이 양팔을 가진 제조용 로봇 시스템을 도입함으로써, 현재 자동화에 이르지 못하고 있는 정교한 조립을 요하는 작업에도 적용 가능한 로봇시스템을 개발하고자 하는 노력들이 활발히 이루어지고 있다. 본 문헌에서는 현재의 제조용 양팔로봇 연구 동향을 간략히 설명하고, 한국기계연구원의 제조용 양팔로봇 시스템에 관련된 연구 내용을 소개하고자 한다.

2. 제조용 양팔로봇 연구 동향

서비스 로봇 분야에서 양팔로봇은 오래된 연구 분야이다. 이 분야에서의 양팔로봇 연구는 냉장고 열기, 컵잡기, 쟁반 나르기, 물 따르기, 퍼즐 맞추기 등 매우 흥미롭고 미래 사회에서 로봇이 인간을 돕기 위해서 가져야할 기능들에 관한 연구가 이루어지고 있다. 특히 외국에 비해 국내에는 서비스 로봇분야의 연구에 대한 정부의 집중적인 지원이 이루어지고 있어서 선진국에 못지 않은 많은 결과들이 도출되고 있다. 그러나 이러한 분야의 연구는 연구의 목표가 되는 실생활에서의 적용까지 도달하기에는 어려움이 많다. 본 문헌에서는 이 분야의 연구동향에 관해서는 지면 관계상 언급하지 않는다.

이에 비하여 제조용 양팔로봇은 상대적으로 많은 연구가 이루어지고 있지 못하며, 이는 현재의 제조로봇 시장이 활성화 되어 있지 않은 것이 가장 큰 이유가 된다. 그러나 서론에서 언급했듯이 로봇 시장 가운데 핸들링과 어셈블리 시장이 성장하고 있으며 그 전망 또한 밝아서 소수의 기관들을 중심으로 제조용 양팔로봇에 관한 연구가 이루어지고 있다. 그 대표적인 예가 일본의 야스카와이다. 야스카와는 세계 최초의 상업화 모델을 출시하고 있으며, 상용 양팔로봇으로는 최고의 기술력을 자랑하고 있다. 가반하중 5kg(SDA5D), 10kg(SDA10D), 20kg(SDA20D)의 모델을 생산하고 있으며(그림 4), 각각의 모델에 사용되는 팔들은 7자유도를 가지는 한팔 로봇으로 시리즈화하여 양팔 로봇과 한팔 로봇 시장에서 모두 효과적인 시장전략을 구사하고 있다.

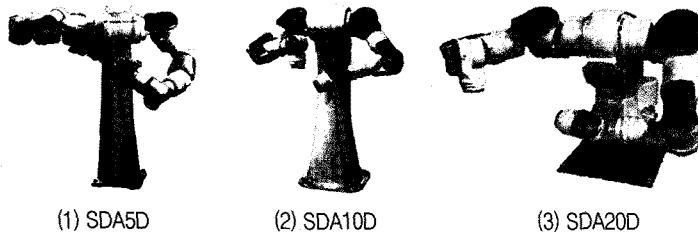


그림 4. 야스카와의 상용양팔로봇 모델¹⁾

야스카와에서는 이러한 양팔로봇의 상용화 모델을 개발하는데 그치지 않고 자사의 모델을 적용하여 조립공정에 적용하는 기술에 관한 연구도 진행하고 있다. 그림 5의 왼쪽 그림은 양팔로봇을 적용하여 과거 인간 작업자에 의해서 수행되던 Inverter V1000의 조립작업을 양팔로봇에 의하여 자동화한 예를 보여준다. 야스카와에서는 본 연구를 위하여 양팔에 카메라를 설치하여 비주얼 서보기능을 갖추었으며, 더 나아가 Inverter의 안전한 조립을 위하여 양팔의 말단에 6자유도의 힘/토크 센서를 장착하여 힘/모멘트제어를 수행하고 있다. 야스카와에서는 여기에서 더 나아가 향후 셀조립 생산공정을 로봇을 대체하겠다는 비전을 가지고 하나의 셀에서 한 대의 로봇이 인간작업자 대신 셀공



정을 수행하는 연구를 진행하고 있다.



그림 5. 야스카와에서 개발한 인버터 조립 데모 공정(좌)과 셀적용 실험장치(우)

위에서 언급한 야스카와의 SDAxxD 시리즈 외에는 아직 상용화 단계에 접어든 제조용 양팔로봇 시스템은 없다고 해도 과언이 아니다. 그러나 일본의 Kawada사 역시 상용 제조 로봇 시장을 염두에 두고 조립작업용 양팔로봇을 개발하고 있다. 상기에서 언급한 야스카와의 경우에는 세계 1위의 로봇 점유율을 가지고 있는 기업이다. 일본 Kawada사의 경우에는 이러한 메이저급 로봇회사가 아닌 작은 규모의 로봇 회사이지만 Nextage라는 조립용 양팔로봇을 개발하였다. 본 로봇은 단일팔의 가반하중이 1.5kg으로써 가전 부품의 조립공정에의 적용을 목적으로 하고 있으며, 머리부분에 자체 장착된 비전센서를 사용하여 자기위치 식별이 가능하다. 그러나 본 로봇은 아직 야스카와의 SDAxxD 시리즈와 같이 본격적인 상용화 단계에 들어서지는 못하고 있다.



그림 6. Kawada사에서 개발한 양팔작업로봇 Nextage

야스카와가 기존의 제조로봇의 컨셉을 유지하면서 양팔로봇을 개발한 것과 달리, DLR(독일항공우주연구소)은 인간과 로봇의 협조를 염두에 두고 양팔로봇 Justin을 개발하였다(그림 7). 본 로봇은 DLR에서 개발하고 KUKA에서 상용 모델로 판매하고 있는 7축 경량형 로봇팔을 사용하여 개발되었으나, 제조용이 아니라 서비스로봇을 염두에 두고 개발된 모델이다. 그럼에도 불구하고 본 문헌에서 소개하는 이유는 인간-로봇의 협조를 염두에 두고 개발된 최고수준의 양팔로봇 시스템이기 때문이다. 본 로봇 시스템에서는 각각의 조인트에 관절토크센서를 장착하고 있으

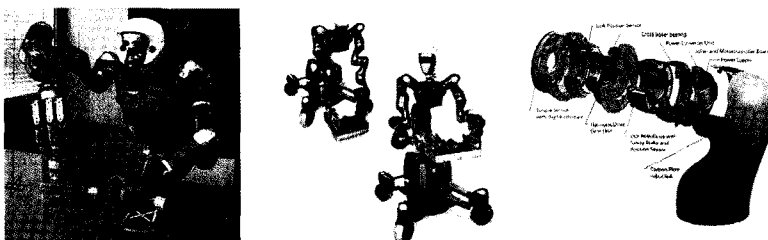


그림 7. DLR에서 개발된 Justin(좌) 과 상하체 연동작업(중), 컴팩트 구조의 안전관절 모듈(우)

며 이 때문에 인간과 로봇의 충돌이 발생할 경우 이를 신속히 감지하고 인간작업자에게 가해지는 충격이 최소화 되도록 제어된다. 그러나 이러한 목적을 달성하기 위해 장착된 관절 토크센서의 강성이 상대적으로 낮아서 로봇 전체의 강성이 낮아지는 문제가 있어서 제조로봇용으로 응용은 매우 제한적일 것으로 생각된다.

3. 한국기계연구원의 양팔로봇 연구

한국기계연구원에서는 (주)위아, (주)오토파워 등의 기업과 협력하여 국내에서는 최초로 제조용 양팔로봇 연구를 수행하였다. 본 절에서는 본 연구 내용을 간략히 소개하고자 한다.

3.1 양팔로봇의 설계

그림 8은 개발된 양팔로봇의 사진이다. 본 로봇은 기계부품의 조립 공정 자동화를 목적으로 개발되었다. 양팔은 각각 7자유도를 가지고 있으며 허리는 1자유도의 회전 자유도를 가지고 있다. 본 로봇의 구조적 특징은 기존의 제조로봇들과 달리 모든 조인트가 중공형 모터, 중공형 감속기, 중공형 엔코더, 중공형 브레이크를 사용하여 제작되었으며 이 때문에 관련 배선들이 부품의 중공을 통하여 로봇의 중앙부를 관통하도록 로봇 링크가 설계되어, 비교적 슬림한 형상을 가지게 되었다는 점이다. 그림에서 알 수 있듯이 관절의 배치가 인간과 유사한 배치를 가지고 있으며, 이 때문에 각각의 팔 움직임이 인간과 유사하게 구현될 수 있으며 동일한 이유로 작업테이블 및 주변에 비치된 장치들과의 간섭이 생기지 않도록 작업하는데 유리하다^{[4][5][6]}.



그림 8. (주)위아, (주)오토파워, 한국기계연구원이 공동으로 개발한 제조용 양팔로봇: 1차 프로토타입(좌)과 2차 프로토타입(우)

3.2 양팔의 협조작업을 위한 기구해석

양팔로봇에 있어서 가장 기본적인 작업은 양팔이 별도의 싱글암 로봇과 같이 서로 독립적인 작업을 수행하는 경우이다. 이때 허리가 없이 양팔만 가진 양팔로봇의 경우에는 싱글암 로봇이 2대 설치된 것과 동일하다. 그러나 양팔이 별도의 허리 위에 설치된 경우에는 반드시 허리의 움직임이 고려되어야 한다^{[3][4][5]}. 각각의 팔이 특정한 작업을 수행하기 위해서는 허리의 움직임이 동반되어야 하므로, 이 경우에는 반드시 허리 조인트의 움직임이 고려된 속도 역기구학이 사용되어야 한다. 이에 관해서는 문헌^{[3][4][5]}를 참조하기 바란다.

이러한 양팔 독립 운전과 달리, 양팔이 서로 협조하여 조립작업을 수행하여야 하는 경우에는 양팔의 궤적을 결정하는 것이 매우 까다롭다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 양팔의 협조모션을 정의하기 위하여 그림 9의 좌측에 보이는 바와 같이 첫 번째 팔의 말단에서 표현된 두 번째 팔 말단 좌표계의 위치를 기술하는 이른바 상대기구학적 표현 방법을 사용하였다. 이를 구현하기 위한 상세한 상대기구학의 표현에 관해서는 문헌^{[3][4][5]}를 참고하기 바란다.

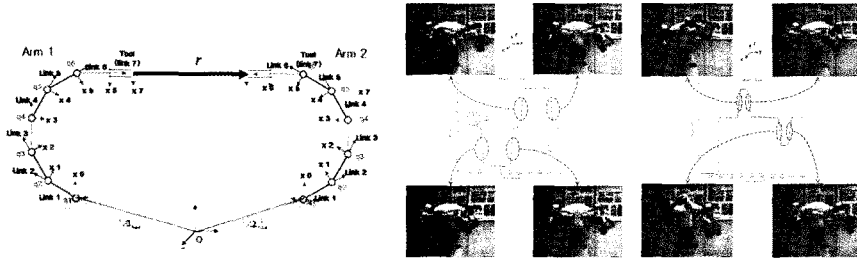


그림 9. 양팔 로봇의 상대기구학(좌)과 협조작업 움직임(우)

3.3 양팔을 이용한 조립 작업

제조용 양팔로봇의 개발 목적은 여러 가지가 있을 수 있지만, 궁극적으로는 양팔의 협조작업을 이용하여 조립작업을 구현하는 것이다. 본 연구에서는 단순형상물체의 경우 100um의 공차를 가지는 경우에 대해서 조립실험을 성공적으로 수행하였다. 이 경우 로봇의 위치 정밀도가 작업물의 공차보다 월등히 크기 때문에(특히 양팔로봇의 경우, 양팔 말단의 상대적인 위치오차가 매우 크다) 위치 수준의 협력제어 만으로는 이를 달성하지 못한다. 이 때문에 본 연구에서는 양팔의 말단에 6자유도의 힘/모멘트 센서를 장착하고, 이를 이용한 임피던스 제어를 구현하여 100um 공차의 두 부품의 조립을 수행하였다.

복잡형상 물체의 경우에는 이와 같은 임피던스 제어기법 만으로는 조립을 수행하는 것이 매우 어렵다. 이를 위하여 본 연구에서는 형상이 알려진 두 물체의 조립작업을 위한 조립모델을 개발하고^[7] 이를 적용하여 그림 10과 같은 조립을 수행하였다. 조립모델을 이용하여 복잡형상의 물체를 조립하기 위하여 양팔이 어떻게 움직여야 하는지를 결정하기 위하여 운동계획법을 개발하였다. 이것을 수학적으로 구현하기 위하여 우선 조립모델에서 정의된 기본 접촉으로 표현되는 조립 상태의 기하학적 정보를 로봇 운동의 구속조건으로 사용하고, 조립상태의 구속조건을 만족하면서 로봇의 성능지수를 최적화하도록 하였다^[7].

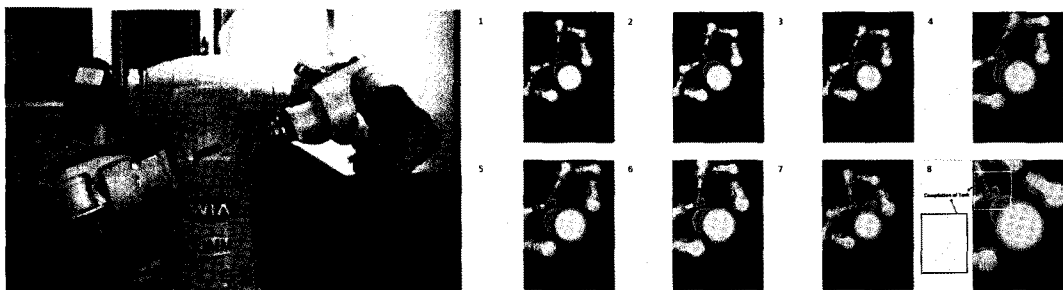


그림 10. 양팔 협조를 이용한 단순형상 물체의 조립(좌), 복잡형상 물체의 조립작업(우)

3.4 양팔로봇의 자기충돌 회피

양팔로봇은 단일암 로봇과 달리 하나의 로봇에 두 개의 팔을 가지고 있기 때문에 두팔의 충돌 위험이 상존한다. 비록 두 팔이 하나의 제어기에 의해서 제어된다고 할지라도 로봇의 티칭 과정 중에 사용자가 실수를 하는 등의 경우에는 양팔은 매우 위험한 상황에 놓이게 된다. 이러한 상황을 방지하기 위하여 본 연구에서는 제어기가 항상 양팔의 동작을 감시하여 두 팔의 물리적 간섭을 체크하도록 하였다. 그러나 이러한 물리적 간섭의 체크는 매우 복잡한 형상 정보를 고려하여야 하므로 매우 복잡한 연산을 필요로 하며, 따라서 제어기는 매우 큰 연산부담을 가지게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 실제 링크의 충돌을 감시하지 않고, 실제의 링크(그림 11 좌)보다 크고 형상이 단순한 가상링크(그림 11 중)를 가상하고 이들 간의 충돌을 감시하도록 하였다. 이러한 가상링크를 단순한 형상

으로 만드는 방법에는 다양한 방법이 있을 수 있으나, 본 연구에서는 가상의 구들을 연결하여 가상 링크를 만들도록 하였다. 즉 그림 11 (우)와 같이 각각의 링크상에 존재하는 임의의 반경의 구들을 만들고 이들을 서로 겹쳐서 원래의 링크를 완전히 감싸도록 함으로써 가상링크를 구현할 수 있다. 이와 같이 가상구를 사용하여 가상링크를 설정하게 되면 링크간 충돌의 감시는 반경 r 의 가상구들간의 충돌 감시의 문제로 단순화 되어 결과적으로 매우 빠른 연산이 가능하다.

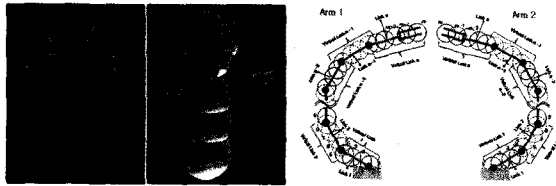


그림 11 로봇의 실제 형상(좌), 가상 링크로 표현된 로봇(중), 로봇의 가상링크를 구성하는 방법(우)

3.5 양팔로봇의 교시

그림 12의 좌측 그림과 같이 일반적으로 사용되는 제조로봇의 경우에는 경로 교시를 위하여 티칭팬던트를 사용한다. 비록 시간이 많이 걸리기는 하지만 제조로봇의 경우에는 티칭 팬던트를 사용하여 교시하는 것이 매우 일반화된 방법이다. 그러나 양팔로봇의 경우에는 하나의 로봇에 양팔이 있기 때문에 티칭팬던트를 사용하여 교시를 수행하는 것은 기존의 로봇과 비교해서 너무 불편하다. 물론 양팔이 각각 별도의 작업을 수행하도록 교시하는 경우에는 두 대의 단일암 로봇을 교시하는 것과 다르지 않다(그림 12의 중앙그림). 그러나 양팔로봇 개발의 목적이 양팔을 이용한 협조적인 모션의 수행임을 고려할 때 이는 바람직하지 않다. 따라서 양팔을 동시에 교시할 수 있도록 함으로써 양팔의 협조적인 모션을 비교적 쉽게 교시할 수 있는 방법이 필요하였다. 이를 위하여 본 연구에는 로봇 양팔을 인간 작업자가 직접잡고 움직일 수 있도록 하는 이른바 직접교시방법을 적용하여 양팔의 직관적인 교시가 가능하도록 하였다. 양팔의 말단에는 각각 6자유도 힘/모멘트 센서를 부착하였고 그리퍼는 힘모멘트 위에 설치 하였다. 제어기에서는 힘/모멘트 센서에 입력되는 외력에 대응하여 순응하여 제어될 수 있도록 임피던스 알고리즘을 탑재하였다. 이를 통해서 그림 12의 우측그림과 같이 작업자는 로봇의 양팔 말단을 동시에 양손으로 잡고 두팔을 동시에 밀거나 당김으로써 양팔의 궤적을 원하는 대로 교시할 수 있다.

이러한 교시 방법이 매우 직관적이고 편리하지만, 작업자의 교시의 정밀도에 한계가 있기 때문에 양팔의 정교한 상대운동이 필요한 경우에는 상기의 방법을 적용하기가 쉽지 않다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 정교한 양팔 상대움직임이 필요한 경우에는 이것을 Graphic User Interface를 통하여 양팔 상대움직임을 미리 규정할 수 있도록 하였다. 그러나 이 경우에도 협조작업을 위해 구축되는 자유도는 6자유도이지만, 양팔의 자유도의 총합은 14자유도 이므로 8자유도의 여유자유도를 가지게 된다. 따라서 로봇 제어기에서는 8개의 여유자유도를 결정함으로써 양팔 상대운동 중의 로봇의 자세를 결정해 주어야 하는데 이것은 간단한 일이 아니다. 따라서 본 연구에서는 양팔의 상대움직임이 GUI에 의해서 미리 규정되는 경우에는 작업자가 양팔 중 한팔의 움직임만 직접 교시하고

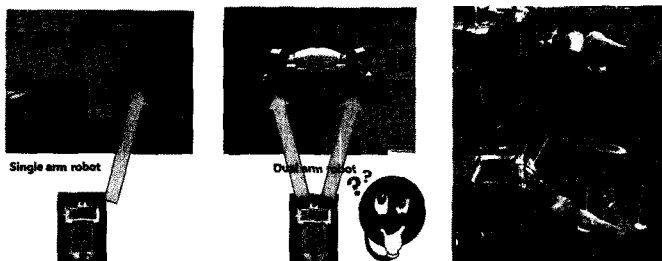


그림 12. 티칭팬던트를 사용한 단일암 로봇의 교시(좌), 양팔로봇의 교시(중), 양팔로봇의 직접교시



이때 로봇 제어기는 작업자의 교시에 따라 순응하여 움직이면서 동시에 미리 규정된 양팔의 상대적인 움직임은 계속 유지하도록 함으로써 양팔의 정교한 협조작업과 여유자유도의 직접교시를 동시에 달성하도록 하였다.

4. 결 론

과거와 달리 제조로봇 시장에서 핸들링분야와 조립분야의 규모가 점차로 커지고 있다. 이러한 시장의 변화에 대응하기 위한 해외 선진 로봇사들의 움직임이 빨라지고 있고, 이에 따라 제조용 양팔로봇의 상용모델들이 시장에 등장하기 시작하고 있으며 이것은 세계 제조로봇 개발의 큰 흐름이 되어가고 있다. 따라서 국내 로봇개발기업 및 연구기관들도 이러한 상황에 대응할 수 있는 노력이 필요한 시점이다. 이러한 이유로 본 문헌에서는 제조용 양팔로봇의 동향을 소개하고 한국기계연구원에서 개발된 제조용 양팔로봇의 기술에 관해 소개하였다.

❁ 참고 문헌

- [1] <http://www.yaskawa.com/site/Home.nsf/home/home.html>
- [2] IFR, WORLD ROBOTICS2006, 2006
- [3] 산업자원부, Statistical Research of Robot Industry, 2006
- [4] 박찬훈, 유정민, 박경택, 이영진, "산업용 듀얼 암 로봇의 기구해석 및 제어," 한국정밀공학회지, Vol. 26, No. 9, pp.14 ~ pp.22, 2009
- [5] 박찬훈, 박경택, 권대갑, "산업용 듀얼 암 로봇의 교시기술 개발," 한국정밀공학회지, Vol. 26, No. 9, pp.38 ~ pp.44, 2009
- [6] 박찬훈, 박경택, "산업용 양팔로봇의 설계 및 제어," 한국정밀공학회지, Vol. 25, No. 11, pp.58 ~ pp.65, 2008
- [7] 지식경제부, "정밀조립을 위한 듀얼암 로봇 협조작업 제어시스템 개발" 2단계 최종 보고서, 2008



박 찬 훈

· 한국기계연구원 나노융합생산시스템연구본부
 로봇지능기계연구실 선임연구원
 · 관심분야 : 양팔로봇, 협업로봇
 · E-mail : chpark@kimm.re.kr