

서비스 로봇용 안전팔

송재복 · 고려대학교 기계공학과, 교수

_e-mail : jbsong@korea.ac.kr

향후 우리 주변에 널리 보급될 서비스 로봇용 로봇팔이 인간이나 환경과 충돌하는 경우에 안전성을 구현하기 위하여, 능동 및 수동 컴플라이언스를 적용한 안전팔에 대하여 소개하고자 한다.

과거부터 인간은 로봇이 인간의 삶을 보다 풍요롭게 해 줄 수 있다는 믿음을 갖고 로봇과 공존하는 세상을 그려왔다. 인간과 로봇이 공존하는 성공적인 새로운 세계는 여러 환경에서 안전하고 사용하기 쉬우며, 인간을 대신해 다양한 작업을 수행할 수 있는 로봇의 개발에 달려 있다. 이를 위해 과거부터 다양한 제어 방법이 개발되었고, 산업 현장에서 실제 사용되어 왔다. 그러나 최근에는 이러한 산업용 로봇뿐만 아니라, 의료작업, 위험물 처리작업, 생활지원 등과 같은 다양한 목적을 갖는 새로운 분야의 로봇들이 출현하고 있다. 생활지원 로봇 분야 중의 한 분야인 서비스 로봇은 산업용 로봇처럼 로봇의 작업을 위한 고정된 환경

이 아닌, 인간이 거주하는 환경에서 인간을 돕는 다양한 작업이 요구된다. 로봇이 직접적으로 인간과 접촉하기 때문에 인간과 로봇간의 안전성이 중요한 문제로 부각되고 있다. 그러므로 로봇의 팔을 인간의 팔처럼 유연하게 설계하여 안전성을 해결하는 방법이 많이 연구되고 있다.

일반적으로 로봇팔에 유연성, 즉 컴플라이언스(compliance)를 부여하기 위해서는 능동적인 방법(active compliance method) 또는 수동적인 방법(passive compliance method) 등 두 가지를 이용한다. 능동적인 방법은 로봇에 장착된 힘/토크 센서 등 접촉을 감지할 수 있는 센서로부터의 피드백 신호를 제어기에서 감지하여 외부에서 작용된

힘이나 충격에 대해 적절하게 대처하는 것이다. 한편, 수동적인 방법은 스프링, 댐퍼 등의 기계요소에 기반한 기계적인 기구부를 사용하여 안전성을 구현하는 것이다.

능동 컴플라이언스 기반의 안전 팔

능동 컴플라이언스 방법은 센서 정보를 이용하여 충돌을 예측하고 회피하는 방법(collision detection and avoidance)과 작업에 따라 로봇팔의 관절 강성을 제어하여 충격을 흡수하는 방법(collision force suppression) 등이 주로 연구되고 있다.

센서정보 기반의 충돌회피 충돌을 예측하고 회피하는 방

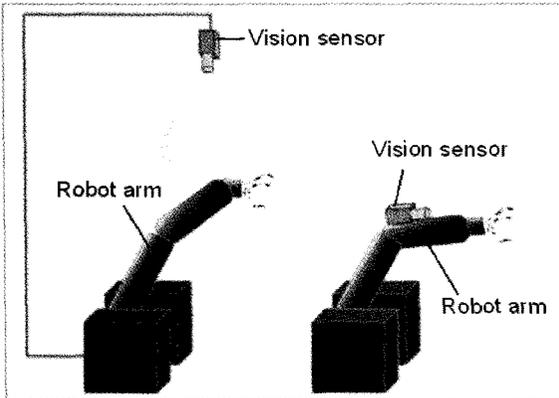


그림 1 비전센서 기반의 안전팔의 개략도

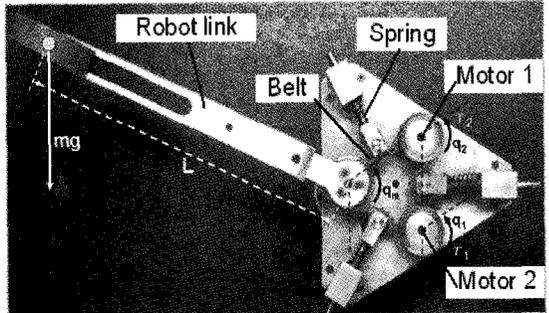


그림 3 Variable stiffness actuator의 내부 사진(이탈리아, Pisa 대학)

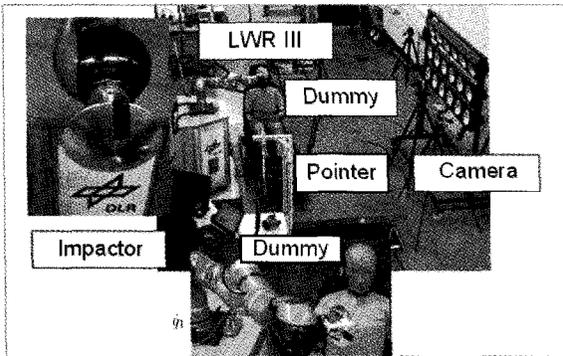


그림 2 힘/토크센서 기반의 LWRIII의 안전성 실험(독일, DLR)

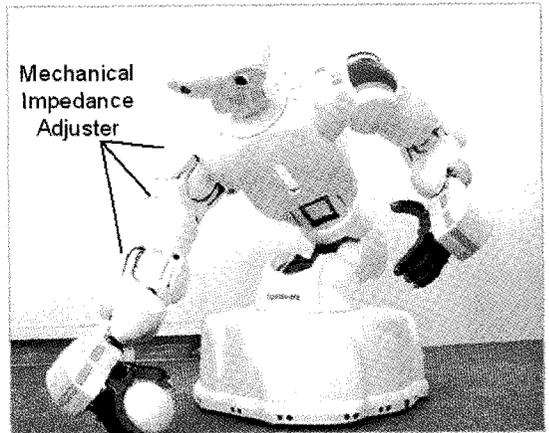


그림 4 Twendy 로봇의 variable impedance adjuster.(일본, Waseda 대학)

법은 접촉센서(tactile sensors)나 비접촉센서를 로봇이나 로봇 이외의 공간에 부착하여, 로봇과 인간 또는 사물과의 충돌을 방지하는 것이다. 충돌 회피 방법에 적외선센서, 초음파센서, 열감지센서, 근접센서, 힘/토크 센서 그리고 비전센서 등을 사용한 연구가 수행되어 왔다. 그러나 위와 같은 능동적인 방법은 센서를 사용하고 피드백 신호에 의한 제어를 하기 때문에 안전성을 구현하는 데 한계를 지니고 있다. 뿐만 아니라, 로봇 주위에 공존하는 인간의 행동 패턴을 정확하게 모델

링하기 어렵기 때문에, 충돌에 대한 예측이 부정확하다는 문제점이 있다. 예를 들어, 비전센서를 사용할 경우 분해능이 낮기 때문에 빠른 속도로 외부충격이 가해지면 이에 따른 즉각적인 대처가 어렵다. 또한, 이러한 센서들은 조도, 먼지, 습도 등 주위 환경의 영향을 많이 받기 때문에, 신호에 잡음이 섞이게 되면 오작동의 위험도 매우 높게 된다.

관절의 강성제어를 통한 충격 흡수
능동적으로 충격을 흡수하는

방법으로는 힘제어(force control)와 임피던스제어(impedance control)를 적용한 연구들이 많이 제시되었다. 임피던스 제어는 로봇손의 위치, 속도, 힘을 피드백함으로써 액추에이터를 구동하고, 결과적으로 바람직한 기계적 임피던스를 실현시키는 방법이다. 그러나 이러한 제어 방법들은 오랫동안의 연구에도 불구하고, 구현 알고리즘이 매우 복잡하고, 실제 로봇에 적용하기는 쉽지 않다. 최근에는 이러한 제어기의 불확실성을 줄이기 위하여 액추에이터에 수동적인 기

계 메커니즘을 결합하는 가변임피던스 방식(variable impedance approach)이나, 액추에이터를 분리하여 로봇팔의 질량관성모멘트를 줄이는 연구(distributed macro-mini actuation)들이 많이 수행되고 있다.

가변강성 방식은 기계적인 요소들로 로봇팔의 관절에 강성을 제공하고, 그 강성의 크기를 제어로서 조절하는 방법이다. 즉, 안전기준에 맞추어 강성의 크기를 능동적으로 제어하여, 안전성과 성능 간의 최적의 균형점을 찾는 것이 매우 중요하다. 피사대학에서는 수동요소인 벨트와 스프링을 조합하여 관절의 강성을 생성할 수 있도록 설계하였고, 벨트와 연결된 두 개 모터의 위상 차이로 관절의 강성을 조절할 수 있는 가변강성 액추에이터(variable stiffness actuator)를 개발하였다. 그리고 빠른 속도의 작업 조건에서는 로봇 관절의 강성을 낮추고, 높은 강성이 필요한 작업일 경우 로봇팔의 속도를 낮추는 제어기법을 통하여, 인간-로봇 상호 안전성과 로봇의 작업 성능 향상을 동시에 구현하였다. 와세다 대학의 서비스 로봇 Twendy에도 관절부에 판스프링과 얇기어 액추에이터로 구성된 강성조절장치(mechanical impedance adjuster)가 적용되었고, KIST에서는 MR브레이크와 회전형 스프링을 조합하여 수동 강성

능동 컴플라이언스 방법은 센서나 액추에이터의 제어로 인한 오작동의 위험이 있다. 수동 컴플라이언스 방법은 충돌에 대한 반응속도가 빠르고 오작동의 위험이 없으므로 안전성 구현에 적합하지만, 위치 정밀도를 유지할 수 있는 부가장치가 요구되는 단점이 있다.

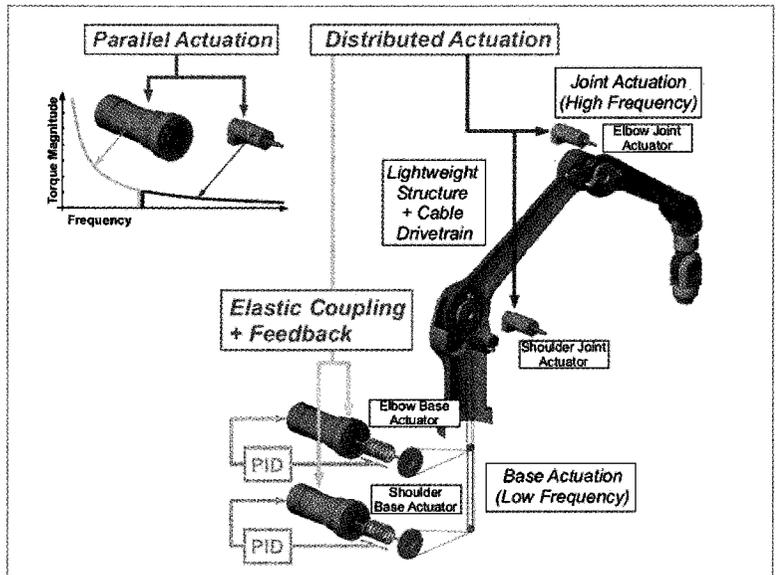


그림 5 Distributed Macro/Mini Actuation의 구성도(미국, Stanford 대학)

조인트(passive compliant joint)를 개발하였다.

충격을 흡수하는 또 다른 방법으로, 스탠포드 대학에서는 로봇팔의 관절에 부착된 액추에이터를 분할하여 로봇의 질량관성을 줄이는 방법(distributed macro-mini actuation)을 제시하였다. 하나의 관절에 작은 용량의 액추에이터와 큰 용량의 액추에이터 한 쌍으로 구성된다. 작은 용량의 액추에이터는 관절부의 직접 장착되고, 빠른 속도의 작은 토크제

어에 사용된다. 그리고 로봇팔의 베이스부에 위치한 높은 용량의 액추에이터는 와이어에 의하여 동력을 전송하고, 낮은 속도의 큰 토크제어에 사용된다. 결과적으로 충돌 위험성이 높은 빠른 속도의 제어 영역에서는 작은 용량의 액추에이터가 사용되므로 로봇팔의 유효 관성(effective inertia)이 줄어들어 외부에서 인가되는 충격력으로부터 안전성을 구현할 수 있다.

이와 같은 안전팔들은 수동요

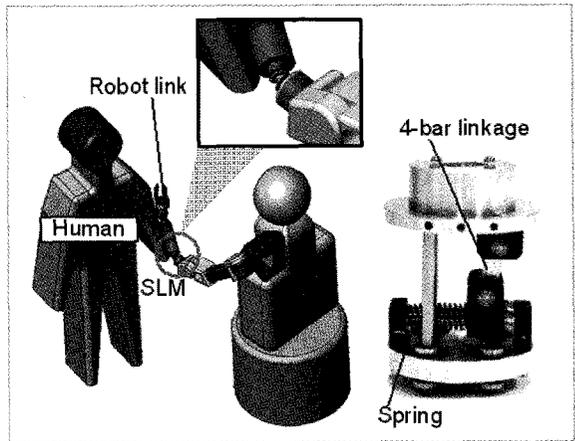
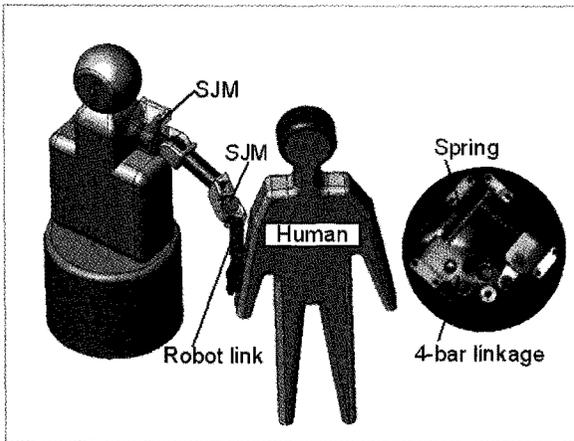


그림 6 안전 조인트 장치의 개념도와 구성도(한국, 고려대학교)

그림 7 안전 링크 장치의 개념도와 구성도(한국, 고려대학교)

소를 적용하였기 때문에 충격흡수에는 용이하지만, 근본적으로 능동적인 제어방법을 사용해야 하므로 오작동에 의한 위험요소는 제거할 수 없다. 뿐만 아니라, 가변강성장치의 경우 하나의 관절에 두 개의 액추에이터를 사용해야 하므로, 관절부가 비대해지고 무게 또한 증가하는 문제점이 있다. 따라서 제어기의 오작동에 의한 위험요소까지도 해결할 수 있는 안전팔에 대한 요구가 증대되고 있다.

수동 컴플라이언스 기반의 안전팔

수동 컴플라이언스 방법은 스프링, 댐퍼 또는 탄성링크 등과 같이 특별한 장치를 사용하여 로봇의 구조적인 컴플라이언스를 조절하는 방법이다. 수동적인 방법은 특별한 센서를 사용하지 않고, 기구부로 충격을 흡수하기 때문에 반응속도가 빠르고 오작동

의 위험이 작다. 그러나 이러한 탄성요소를 로봇팔에 장착하게 되면, 외력에 대한 충격 흡수에는 매우 용이하지만, 작업 시 로봇팔의 위치 정밀도가 매우 낮아진다. 예를 들어, 로봇팔의 골격을 부드러운 탄성소재로 만들면 매우 유연하게 충돌에 대응할 수 있지만, 로봇팔의 끝단에서 가벼운 물체를 드는 작업에도 팔의 처짐이 발생하게 된다.

고려대학교에서는 이러한 수동 컴플라이언스 방법의 문제점을 극복하기 위하여, 비선형강성 특성을 갖는 안전장치를 개발하여 국내외 특허를 출원 및 등록하였다. 비선형강성의 안전장치는 선형 압축 스프링과 4절링크로 구성되어 있다. 안전장치에 장착된 선형 압축 스프링은 외부에서 인가되는 충격을 흡수하는 역할을 하지만, 위에서 기술한 바와 같이 선형 스프링은 외력의 크기와는 무관하게 일정한 강성을 가지므

로, 작은 외력에도 변위가 발생하는 문제점이 있다. 이는 링크의 회전각도에 따라 동력전달률이 달라지는 4절링크를 결합하여 스프링에 비선형 강성 특성을 부여함으로써 이 문제를 해결하였다. 즉, 인간에게 상해를 줄 수 있는 외력 이하에서는 로봇팔의 강성이 매우 높게 유지되다가, 그 이상의 외력이 인가되면 로봇팔의 강성이 매우 급격히 감소하는 비선형강성 특성을 얻을 수 있다.

비선형강성 특성의 안전장치는 로봇팔의 조인트에 장착할 수 있는 안전조인트장치(SJM ; Safe Joint Mechanism)와 링크부 중간에 삽입할 수 있는 안전링크장치(SLM ; Safe Link Mechanism)의 두 가지 형태로 개발되었다. 모터와 감속기로 구성된 로봇의 조인트부에는, 감속기와 로봇 링크 사이에 SJM을 장착하여, 로봇 링크에 인가되는 충격을 감속기에 전달하지 않고 사이에

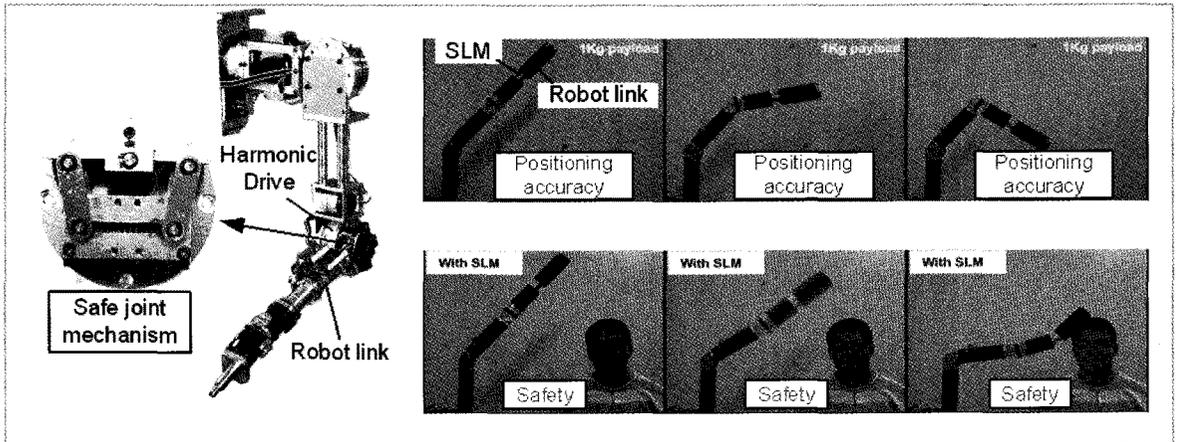


그림 8 안전 조인트 장치를 장착한 안전 로봇팔과 안전 링크 장치의 위치 정밀도 및 안전성 실험(한국, 고려대학교)

설치된 안전장치에 의하여 흡수하게 된다. SLM은 로봇의 링크와 링크 사이에 삽입되어, 임계충격력 이상의 외력이 인가될 때 링크가 꺾이는 것과 같은 역할을 하여, 충격을 흡수할 수 있다.

현재 개발된 SJM은 무게 100g, 크기 $\phi 65 \times 35\text{mm}$ 로서 매우 소형이며, 임계 동작 토크는 8.5Nm이다. 센서와 액추에이터를 추가로 장착하여야 하는 능동 시스템에 비하여 무게가 매우 작으므로, 로봇팔의 질량 관성모멘트의 증가로 인한 위험성을 낮출 수 있다. 뿐만 아니라, 감속기로 많이 사용되는 하모닉 드라이브보다 안전장치의 크기가 작으므로, 기존의 로봇팔의 설계를 크게 바꾸지 않아도 쉽게 장착할 수 있다.

SJM과 SLM은 기계적인 수동 요소만으로 구성되어 있기 때문에 빠른 속도의 충돌에 대해서도 안전성을 구현할 수 있다. 3m/s의 충돌에 대한 SJM과 SLM의 HIC는 50과 34이다. 참고로,

비선형강성 특성의 안전장치는 수동 기계요소만으로 안전성과 위치정확성을 동시에 구현할 수 있고, 무게와 크기가 작아서 기존 서비스용 로봇팔에 적용하기가 매우 용이하다.

3m/s 이상의 빠른 충돌속도로 인건과 로봇이 충돌할 경우, 약 30ms 이내에 모든 충격력이 전달되므로, 자동차의 안전기준으로 사용되는 HIC(Head Injury Criterion)나 AIS(Abbreviated Injury Scale)를 인간과 로봇 간의 안전 평가기준으로 주로 사용하고 있다. HIC의 경우 100 이하일 때 매우 안전하다고 평가한다.

서비스 로봇용 안전팔의 이상적 모델

서비스용 로봇팔의 안전성을 구현하기 위한 다양한 방법들을 살펴보았다. 하지만 실제 로봇과 인간이 공존하는 환경에서 한 가

지 방법만으로 완벽하게 안전을 유지하는 것은 매우 어려운 일이다. 복잡한 로봇 시스템이 다양한 환경변수들에 대응하기 위해서는 센서, 액추에이터 및 제어 시스템, 소프트웨어 설계의 능동적인 방법과 로봇의 형상설계, 충격 흡수장치와 같은 수동적인 방법이 적절히 조화를 이루어야 한다. 즉, 센서 기반의 액추에이터 제어를 통하여 충돌을 미연에 방지하고, 예상치 못한 환경변화로 인한 제어기의 오동작이나 센서에서 감지할 수 없는 빠른 속도의 충돌에 대해서는 수동 시스템으로 안전을 유지하는 것이 가장 바람직한 서비스 로봇용 안전팔의 모델이 될 것이다.