

인간-로봇 협업 기술에 대한 연구동향

박동일, 경진호, 정광조 | 한국기계연구원

[요약문]

로봇의 발전 동향을 살펴보면, 기존의 위치 기반제어를 통하여 단순반복 재생하는 로봇에서 인간과 로봇이 협력할 수 있는 로봇으로 그리고 궁극적으로는 독자적인 작업지능을 갖고서 독립적으로 운용되거나 인간과 공존할 수 있는 로봇으로 개발되어 나갈 것으로 예상된다. 다만 현재까지의 로봇 기술로는 로봇 독자적으로 완전한 작업지능을 구현하기가 힘들기 때문에 그 중간 단계로써 사람과의 협력 작업을 구현하고자 하는 것이다. 이처럼 인간-로봇 협업 기술은 인간의 지능과 로봇의 성능을 결합하여 고도의 작업을 구현할 수 있는 기술로써 로봇의 사용법을 모르는 현장 작업자도 로봇의 말단부를 잡고 손쉽게 로봇에 명령을 지시할 수 있다. 따라서 로봇의 응용 범위가 매우 다양해지고, 특히 로봇 전문인력이 없고 다품종 변량 생산을 주로 하는 중소기업에서의 로봇 활용을 촉진시켜 작업환경 개선과 생산성 향상이 가능해진다. 또한 제조업용 로봇 분야에서 뿐만 아니라 범용성이 강한 기술로 개인서비스 로봇에서부터 국방, 건설, 의료 등 전문서비스 로봇에 이르기까지 폭넓게 적용될 수 있다. 이러한 인간-로봇 협업을 위해 필요한 기술들로는 경량형 로봇팔 기술, 인간-로봇 협조 제어 기술, 인간-로봇 안전 기술, 작업자 편이를 위한 인터페이스 기술 등이 포함되며 향후 기술의 발전에 따라 그 파급효과가 극대화될 것으로 기대된다.

1. 서론

인간-로봇 협업 기술은 사람이 경험 및 직관, 창의적인 아이디어 등의 작업 지능을 담당하고 로봇이 강성, 지구력, 고속, 고정밀 성능 구현을 담당함으로써, 고도의 작업 구현이 가능한 기술이다. 기존의 산업용 로봇 기술로는 아직까지 로봇에 완전한 작업지능을 구현하기가 힘들기 때문에 그 중간 단계로써, 사람과의 협력 작업을 구현하는 것이다. 그 대표적인 예로 로봇의 말단 장치를 직접 손으로 잡고 로봇에 이동 경로를 지시하여 로봇의 반복 작업을 수행하게 해주는 직접교시의 중량물 조립시에 중량물의 무게감을 거의 느끼지 않고 로봇의 말단장치를 잡고 정밀 조립을 수행할 수 있도록 하는 협력 작업 등이 있다. 이 기술은 로봇 프로그래밍 등 사용법을 모르는 현장 작업자도 손쉽게 로봇을 활용할 수 있고, 다양한 작업으로 손쉽게 전환이 가능하여, 로봇 전문인력이 없고 다품종

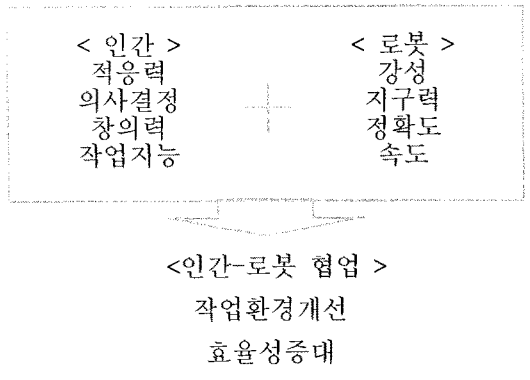


그림 1. 인간-로봇 협업 기술의 개념



변량 생산을 주로 하는 중소기업의 로봇 활용을 촉진시키고 작업환경 개선과 생산 효율성 증대에 일조할 것으로 기대하고 있다.

한편 로봇 진화의 틀에서 볼 때에도, 기존의 위치 기반제어를 통하여 단순반복 재생 하는 로봇에서 인간과 로봇이 협력할 수 있는 로봇으로 그리고 궁극적으로는 독자적인 작업지능을 갖고서 독립적으로 운용되거나 인간과 공존할 수 있는 로봇으로 개발되어 나아갈 것으로 예상된다.

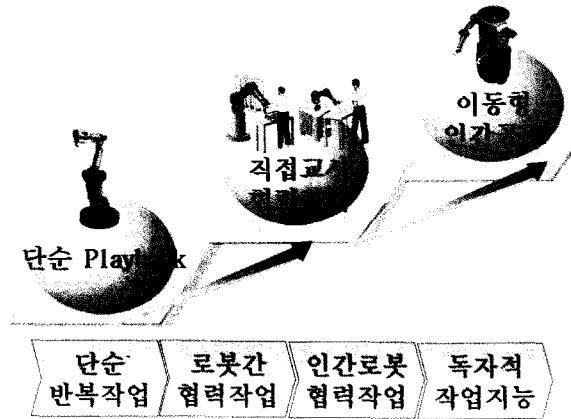


그림 2. 로봇 발전의 진화 단계

2. 인간-로봇 협업 기술 연구 동향

2.1 인간-로봇 협업 기술의 국외 연구 동향

최근들어 인간-로봇 협업 기술에 대해 가장 활발하게 이루어진 연구는 EU의 6th Framework Programme의 펀드를 지원받아 수행하였던 SME Project (IPA등 유럽 24개 기관이 참여)이다. 이는 독일의 대표 연구소인 IPA(프라운호퍼 생산기술연구소), DLR(독일 우주항공연구소)을 필두로 유럽의 주요 산업용 로봇 메이커인 KUKA, ABB, COMAU 등이 참여하여, 인간 공조형 로봇에 대한 개념을 정립하고 실적용을 위한 연구를 진행한 바 있다. 로봇에 미리 입력되지 않은 경로 계획, 작업계획을 사용자가 말단 장치를 잡고 직접 교시하여 입력시키는 기술을 비롯하여 사람과 협력하여 정밀 조립을 구현하는 기술, 사람과 공존하기 위해 필수적인 로봇 안전 기술 등이 포함되었으며 그 대표적인 사례로 IPA의 파워메이트, Rob@Work, DLR의 Light-wight arm을 활용한 연구 등이 있다.

독일 IPA의 인간과 협력작업을 수행하는 차세대 산업용 로봇 파워메이트는 로봇 매니플레이터가 수십 kg에 달하는 차량 기어박스를 자동차 조립라인의 기술자 앞으로 이동시키고, 기술자가 로봇을 잡고 천천히 자동차를 안에 기어박스를 정확히 끼워 맞추는 방식을 취한다. 사람의 안전을 위해 안전 버튼, 레이저 커튼, 비전 센싱 기술 등 다양한 기술이 함께 연구되었고, 실제 자동차 회사의 부품 조립 공정에 적용될 수 있을 것으로 기대되고 있다. IPA는 이외에도 로봇에 직접교시를 통해 용접 부위나 절단 부위를 입력해주면, 다음부터는 대상작업을 반복해서 수행할 수 있도록 하는 직접교시 로봇 Rob@Work를 개발하였다. 기존 산업용 로봇이 오프라인 프로그램과 티칭 팬던트 등을 사용하여 복잡한 방식으로 구동된 것에 비해, 직접교시 기술을 활용하면 작업자가 로봇의 말단을 직접 잡고 움직여 줌으로써 로봇의 이동 경로를 지시해 줄 수 있어 로봇 운영 방식에서 획기적인 변화를 실현할 수 있다. 그림과 같이 이 로봇을 사용하여 용접과 같은 열악한 작업을 간단한 교시 작업만으로 반복 수행할 수 있도록 구현한 바 있다.



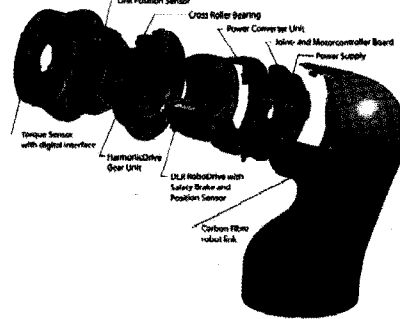
(a) (b)

그림 3. IPA의 인간-로봇 협업 기술 (a) 협력 작업 로봇 파워메이트 (b) 직접교시 용접로봇 Rob@Work

DLR의 Light-weight arm은 현재 개발된 세계 최고 수준의 로봇팔로 자중대비 기반하중의 비가 거의 1:1에 가까운 매우 가볍고 컴팩트한 로봇이다. 이 로봇의 특징은 중공형 서보모터, 중공형 하모닉 감속기, 중공형 엔코더, 중공형 토크 센서와 디지털 통신 기반의 서보 제어가 일체화된 중공 모듈을 활용하여 케이블 및 외부 링크가 차지하는 공간을 극도로 감소시킨데 있다. 링크 또한 복합소재를 활용하여 로봇 무게를 획기적으로 줄였으며, 이에 따라 하드웨어적으로도 사람과의 충돌시 충격력을 최소화할 수 있도록 개발되었다. 또한 각 축에 부착된 조인트 토크센서에서의 충돌 감지를 통하여 충격력을 조절할 수 있도록 안전을 위한 조인트 토크 제어 기술을 구현하였다.



(a)



(b)

그림 4. DLR의 Light-weight arm (a) LWA를 이용한 양팔로봇 (b) LWA의 중공형 구동모듈

이탈리아 PRISMA Lab.에서는 오래전부터 인간과 로봇의 공조 기술에 관한 연구를 중점적으로 진행해 왔다. 인간과의 접촉이나 외부에서의 명령 입력에 따른 컴플라이언스 제어, 임피던스 제어 기법에 관한 연구를 수행하였고, 로봇 관절의 모션제어를 통해 관절간의 충돌 회피 알고리즘도 함께 연구해 왔다. 최근에는 인간과 로봇의 협력 제어 및 안전 기술을 DLR의 양팔로봇에 적용한 연구를 진행하고 있다.

일본의 Tohoku 대학에서도 전통적으로 로봇 파트너라는 개념 하에 양팔을 지닌 이동형 로봇을 활용하여 연구를 수행해 왔다. 무겁거나 크기가 큰 물체를 운반하기 위해 로봇-로봇 간 협력 작업 기술부터 인간과 양팔형 이동 로봇 사이의 협력 작업에 이르기까지 인간과 로봇의 공존을 위한 다양한 로봇 기술을 연구해 왔다. 로봇-로봇 간, 인간-로봇 간의 충돌 회피 알고리즘에 대한 연구도 포함되어 있으며, 로봇과 인간의 상호보완을 위한 협력 작업을 위해 여유자유도 듀얼암을 지닌 로봇 시리즈를 개발하였다.

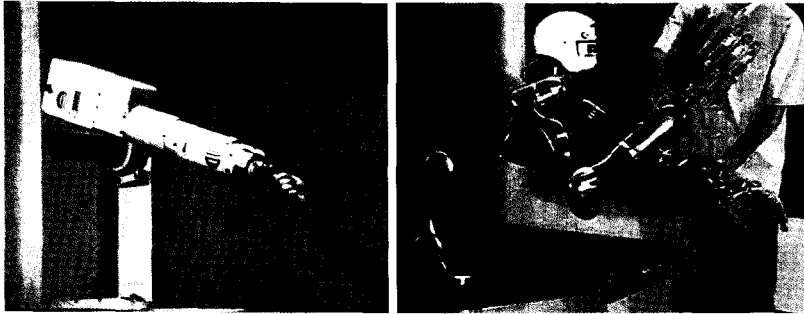
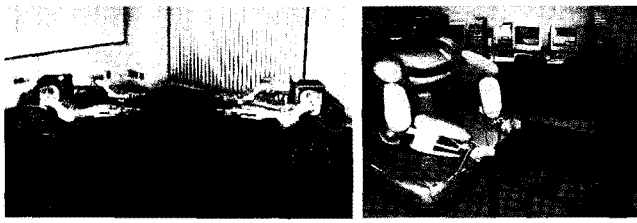


그림 5. 이탈리아 PRISMA Lab.의 인간 공조 제어 연구



(a) (b)

그림 6. Tohoku 대학의 협력작업 로봇 (a) 로봇-로봇 간 협력 작업 (b) 인간-로봇 간 협력 작업

KUKA의 안전 기술은 인간과 로봇의 협력 작업을 위해서 로봇 전체에 센서를 부착하고, 작업자와 로봇에 접촉할 경우 자동으로 안전모드로 전환하여, 인간과의 공존이 가능하도록 하였다. 이는 작업자의 손 또는 신체의 일부가 로봇에 접촉하면 고속 작업을 하던 중에도 바로 경로와 속도를 변경하여 사용자의 충격을 방지하거나 최소화하는 기능을 구현하였다. 인간과 로봇의 협력 작업을 위해서 반드시 필요한 기능으로 로봇이 사람에게 가할 수 있는 잠재적 위험을 피할 수 있을 것으로 보인다. 스탠포드대학에서 연구하는 안전기술은 응답성이 좋고 작은 토크를 내는 모터와 응답이 느리고 큰 토크를 내는 모터를 한 조인트에 함께 사용하는 방식을 사용하였다. 일반적인 안전 머니플레이터의 경우 안전을 위해 강성을 조절하게 되면 위치 정밀도가 나빠지고, 반대로 위치 정밀도 향상을 위해 조인트의 강성을 키우면 충돌시 안전 문제가 발생하게 된다. 이 연구에서는 응답성이 다른 두 개의 모터를 사용함으로써 이와 같은 단점을 극복하여 충돌안정성과 위치정밀도의 두가지 목적을 모두 만족시키는 연구를 수행하였다. 그러나 부피가 커지고 가격이 상승하는 단점이 존재한다.

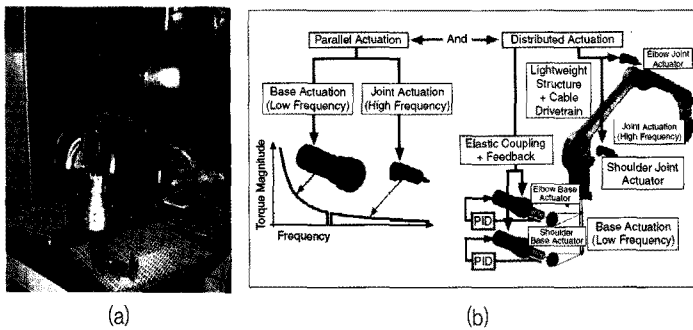


그림 7. 안전 기술에 관한 연구 (a) KUKA사의 KR3SI (b) 스탠포드대학의 DM2

2.2 인간-로봇 협업 기술의 국내 연구 동향

국내에서는 인간-로봇 협업 기술에 대한 일부 요소 기술들 중심으로 개발되어 왔다. 한양대의 고중량 커튼월 조립용 굴삭기 협조제어에 관한 연구는 굴삭기 끝부분에 3자유도의 머니플레이터(Wrist)를 설치하고, 굴삭기 작업자와는 별도로 커튼월에 가까이 있는 작업자가 추가 머니플레이터를 제어하는 방식의 연구를 수행하였다. 굴삭기에 부착된 Force/Torque 센서에 직접 힘을 가하여 이른바 직접 교시를 통해 인간과의 협조제어를 실현하고자 하는 목적을 가졌다. NT 리서치에서도 유사한 연구를 고층 빌딩의 중량 유리 조립에 활용한 바 있으며, 대형 금형을 위한 직접 교시 로봇 등의 위치제어를 통한 협업 기술 연구를 수행한 바 있다.

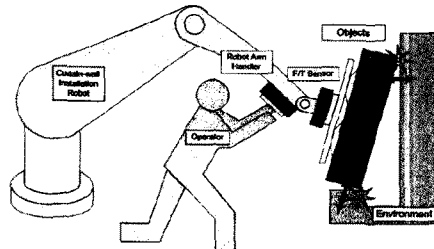


그림 8. 커튼월/유리 조립용 협조 제어

고려대와 KIST에서는 인간과 로봇의 충돌에 대비할 수 있는 안전 관절에 대한 연구를 수행해 왔다. 안전 기술은 비전센서, 초음파 센서 등의 외부 센서를 통해서도 해결 가능하지만, 고려대의 경우 임계충격력 이상의 충돌이 발생할 경우 링크나 조인트의 강성이 순간적으로 작아져 안전을 구현하였으나, 링크와 조인트에 작은 변형이 선형적으로 발생함으로써 정밀도가 하락하는 문제가 존재한다. 산업용 로봇 등 정밀도가 매우 중요한 적용 분야에서는 반드시 해결되어야 하는 과제이다. KIST의 연구도 MR 유체를 활용한 조인트가 전기적으로 그 강성을 조절할 수 있어 Flexible joint를 구현하였으나, 역시 강성과 정밀도 사이의 상반되는 구조를 지닌다.

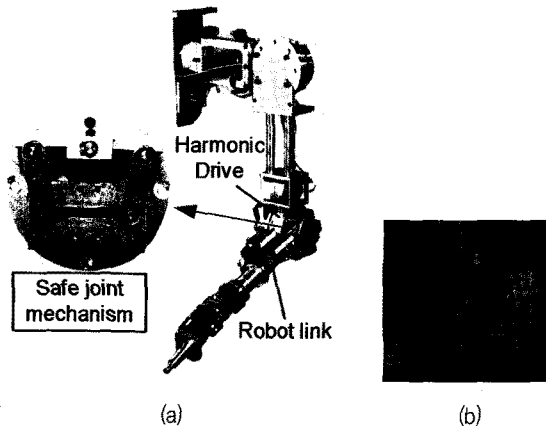


그림 9. 안전 조인트 (a) 수동 안전 관절 조인트 (b) MR 유체 안전 조인트



3. 한국기계연구원의 인간-로봇 협업 기술 연구

한국기계연구원에서는 ‘인간-로봇 협업 머니플레이션 기술 개발 과제’를 통하여 인간-로봇 협업을 위한 컴팩트 로봇 설계/제작 기술, 인간-로봇 협력을 위한 직접교시 및 재현 알고리즘, 통합안전기술 등을 개발하고 있다.

3.1 인간-로봇 협업용 플랫폼 기술

고강성 경량의 직접교시 로봇의 컴팩트한 설계를 위해 중공형 모터, 중공형 감속기, 중공형 브레이크, 중공형 엔코더가 일체화된 중공형 구동모듈을 설계, 제작하였고 4종의 중공형 구동 모듈을 활용하여 링크 형상을 설계하였다. 중공형 구동 모듈을 탑재하여 케이블이 로봇 내부의 중공을 통하여 연결되는 장점을 가지고 그림과 같이 매우 슬림한 형상을 갖고 있으며 조인트 토크 센서도 부착 가능한 형태로 제작되었다. 개발된 로봇은 가반하중이 10kg이며, 로봇 자중이 약 60kg을 지닌다. 협업 로봇의 경우 인간과 로봇이 동일한 공간을 공유하며 작업이 이루어지므로 경량화 로봇 설계 기술이 매우 중요한 부분이지만, 제조업 분야의 로봇 활용을 위해 로봇의 속도와 정밀도를 유지해야 하므로 최소한의 성능과 강성을 고려하여 개발되었다. 향후 협업 정밀도 향상을 위한 보조 장치로써 티칭 디바이스 등 사람과의 협력 작업에서 발생하는 오차를 감소시켜 줄 수 있는 하드웨어 기술이 추가로 필요할 수 있다.

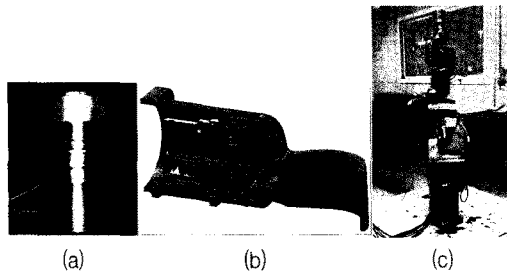


그림 10. 중공형 구동 모듈을 활용한 로봇 플랫폼 (a) 중공형 구동 모듈 (b) 중공형 구동 모듈 링크 (c) 협업 로봇 플랫폼

3.2 인간-로봇 협력 제어 알고리즘

인간-로봇 협력을 위한 힘/토크 센서 기반의 직접교시 알고리즘이 개발되었으며 교시 알고리즘부와 로봇 및 컨트롤러 구조로 구현되어 내부위치제어기를 가진 로봇에 적용하기 쉽게 구현되었다. 로봇의 끝단에 교시를 위한 교시력 힘/토크 센서와 외부 환경과 접촉하여 발생하는 외력을 측정하는 작업툴용 힘/토크 센서를 별도로 사용하고, 교시력 힘/토크 센서신호와 작업툴용 힘/토크 센서 신호가 서로 간섭되지 않도록 독립적으로 구성하였다. 교시력 신호 및 외력 신호를 상호 연산하여 로봇의 움직임을 결정하고, 로봇과 외부환경과의 접촉이 발생할 시에는 교시력을 변경하는 알고리즘을 적용하였다. 따라서 로봇의 진행이 불가능한 방향으로 로봇이 무리한 힘을 가하지 않고 로봇이 진행 가능한 방향으로만 로봇을 진행시키도록 하였다. 또한 로봇의 진행이 불가능한 방향이라 할지라도 작은 크기의 상호작용력을 지속적으로 발생시켜 작업물의 위치의 변경이 발생하더라도 로봇이 순간적으로 떨어지다 다시 밀착되는 현상을 방지할 수 있도록 하였다. 여기서 로봇의 움직임을 결정하는 단계에서 교시력에 의해 생성되는 이동변위는 로봇의 끝단을 기준점으로 이 기준점이 이동되는 가상의 스프링으로 모델링 하였다. 현재 로봇 위치를 기준으로 하는 가상 스프링을 사용하여 교시력의 크기를 제한해 줌으로써, 외부환경과의 접촉에 매우 안전하게 구현되었다.

임피던스 제어 계인에 대한 성능 변화 분석을 통하여 제어 계인을 최적화하였고, 다양한 시편에 대한 접촉교시 실험을 수행하여 제어 알고리즘에 대한 효과를 검증한 바 있다. 교시 및 협력 작업 정밀도 달성을 위해 작업 예상 경로 등을 활용하여 부정확한 교시 데이터를 보정하는 기술도 고려되고 있다. 교시된 데이터를 활용하여 최적화된 경로를 생성하고, 같은 작업을 반복할 수 있도록 재현하는 알고리즘도 함께 연구 되고 있다. 디버깅과 같이 균일한 접촉이

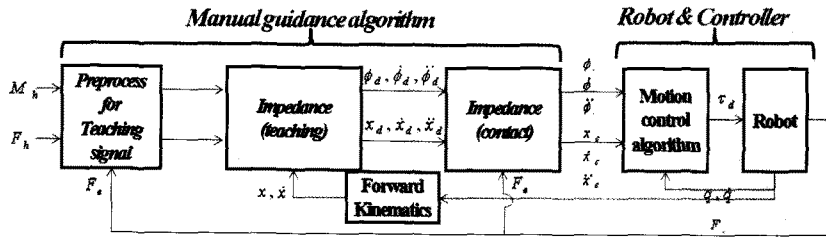


그림 11. 개발된 직접교시 알고리즘의 구성도

중요한 실제 공정에도 적용 가능하도록 하기 위해, 외부 환경의 반력 벡터와의 합성을 통한 작업 반력 처리 알고리즘이 구현되고 있다.

3.3 인간-로봇 협업을 위한 안전 기술 및 주변 기술

통합 안전 시스템을 위한 전략은 다음의 3단계로 수립되어 있다. 첫번째는 시각센서, 초음파센서 등 외부 센서를 활용하여 작업물, 작업상태, 작업자를 인식하여 정동적 장애물에 대한 접촉 위험도를 산정하고 실시간으로 충돌을 방지하는 단계이다. 다음단계로 사전에 충돌 감지가 실패하여 예기치 않은 충돌 발생시 충돌 발생 초기에 F/T 센서 또는 접촉 센서를 이용하여 충돌을 인지하여 대응하는 알고리즘을 채용하였다. 최종적인 단계로 충돌 감지 및 대응 알고리즘의 실패에 대비하여 수동형 안전 관절에 대한 전략까지 수립되었으며, 현재는 수동 안전 관절과 충돌 감지 및 대응알고리즘에 대한 연구가 수행되고 있다. 이외에 공동 연구기관들과 협업 로봇을 위한 힘기반 제어기, 협업 로봇 운용 시뮬레이터, 협업 로봇 운용을 위한 HRI 기반 지능형 단말기 등 관련 연구도 진행되고 있다.

4. 결 론

앞에서 언급된 바와 같이 인간-로봇 협업 기술은 인간의 지능과 로봇의 성능을 결합하여 고도의 작업을 구현할 수 있는 기술로 로봇의 사용법을 모르는 현장 작업자도 로봇의 말단부를 잡고 손쉽게 로봇을 활용할 수 있어 다양한 작업에 응용이 가능하다. 따라서 인간-로봇 협업 기술은 다품종 변량 생산 중심의 중소기업에서의 활용성이 높으며, 중소기업 현장에 실제 적용할 수 있는 기술 수준이 확보되면, 중소기업의 인력난과 생산 효율성 등을 해결하고, 산업의 경쟁력을 높이는 데 중요한 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 인간-로봇 협업 기술은 제조업용 로봇 분야에서 뿐만 아니라 범용성이 강한 기술로 개인서비스 로봇에서부터, 국방, 건설, 의료 등 전문 서비스 로봇에 이르기까지 폭넓게 적용될 수 있다. 따라서 인간-로봇 협업 기술에 대한 지속적인 연구 개발이 요구되며, 기술의 완성도가 높아짐에 따라 미래 인간 공조형 로봇 개발의 가속화를 가져올 것으로 기대된다.

✻ 참고 문헌

- [1] Gerhard Grunwald, Günter Schreiber, Alin Albu-Schäffer, and Gerd Hirzinger, "Programming by touch—the different way of human-robot interaction," IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 50, NO. 4, P659-666, AUGUST 2003
- [2] S. Haddadin, A. Albu-Schaeffer and G. Hirzinger, "Safe Physical Human-Robot Interaction: Measurements, Analysis and New Insights," In Proceedings of the 13th International Symposium of



Robotics Research (ISRR2007). Hiroshima, Japan, November 26–29, 2007.

- [3] Luigi Villani, Ciro Natale, Bruno Siciliano and Carlos Canudas de Wit, “An experimental study of adaptive force–position control algorithms for an industrial robot,” IEEE TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY, VOL. 8, NO. 5, p777–886, SEPTEMBER 2000
- [4] Fabrizio Caccavale, Ciro Natale, Bruno Siciliano and Luigi Villani, “Integration for the next generation – Embedding Force Control into Industrial Robots,” IEEE Robotics & Automation Magazine, P53–64, SEPTEMBER 2005
- [5] K. Nilsson, R. Johansson, A. Robertsson, R. Bischoff, T. Brogådh and M. Hägele, “Productive robots and the SMERobot™ project”, Third Swedish Workshop on Autonomous Robotics, Stockholm, September 1–2, 2005.
- [6] Rolf Dieter Schraft and Christian Meyer, “The Need for an Intuitive Teaching Method for Small and Medium Enterprises,” In: VDI–Wissensforum et al.: ISR 2006 – ROBOTIK 2006 : Proceedings of the Joint Conference on Robotics, May 15–17, 2006, Munich: Visions are Reality. Düsseldorf, 2006, 10 p
- [7] R. D. Schraft, E. Helms, M. Hans and S. Thiemermann, “Man–Machine–Interaction and Co–Operation for Mobile and Assisting Robots”, In: Proceedings of EIS 2004. Madeira, 2004
- [8] Md. Mozasser RAHMAN, Ryojun IKEURA and Kazuki MIZUTANI, “Investigation of the impedance characteristic of human arm for development of robots to cooperate with humans”, JSME International Journal, Series C, V.45, N.2, P.510–518, 2002
- [9] Kazuhiro Kosuge and Norihide Kazamura, “Control of a Robot Handling an Object in Cooperation with a Human,” IEEE International Workshop on Robot and Human Communication, P. 142–147, 1997
- [10] 지식경제부, 인간-로봇 협업 매니플레이션 기술 개발 (연구기획 최종보고서), 2008. 5
- [11] <http://www.smerobot.org>



박 동 일

· 한국기계연구원 나노융합·생산시스템연구본부
· 관심분야 : 로봇공학
· E-mail : parkstar@kimm.re.kr



경 진 호

· 한국기계연구원 나노융합·생산시스템연구본부
· 관심분야 : 로봇공학
· E-mail : jhkyung@kimm.re.kr



정 광 조

· 한국기계연구원 나노융합·생산시스템연구본부
· 관심분야 : 로봇공학
· E-mail : cko@kimm.re.kr