

협조 로봇의 작업 성능 향상을 위한 자율도 조절에 관한 연구

조혜경¹⁾

A Study on the Adjustable Autonomy for the Performance Improvement of Cooperating Robots

Hye-Kyung Cho

ABSTRACT

This paper provides a systematic way of integrating human intelligence and autonomous precision of robots to achieve the highest possible performance of a cooperating robot system. Adjustable autonomy, which deals with the combination of human and robotic skills, has the potential to bridge the gap which leaves many tasks suited to robotics beyond the reach of existing technology. Especially we will show that relevant human assistance or intervention will increase system performance by improving the exception handling capability, simplifying autonomous operation, and boosting speed and reliability. To support the usefulness of our scheme, a series of experiments were conducted with three cooperating robots which work together to dock both ends of a long suspended beam into stanchions.

Key words : adjustable autonomy, cooperating robot systems, control architecture, human-robot cooperation

요약

본 논문에서는 협조 작업하는 로봇 시스템의 제어에 이용되는 자율도를 조정하여 인간 작업자와 로봇 시스템이 효과적으로 역할을 분담하게 함으로써 전체 시스템의 작업 능력을 최대로 이끌어내는 방법을 제시한다. 인간 조작자와 로봇 시스템은 각기 다른 특성과 장점을 갖는데, 이 장점들을 체계적으로 결합하면 현재 기술로는 완전한 자동화가 어려운 작업의 영역에까지 로봇을 활용하여 효율을 극대화할 수 있다. 인간 조작자가 로봇이 처리하기 어려운 작업을 담당하거나 사전에 프로그래밍하기 어려운 돌발 상황에 대응하게 하면, 각종 센서나 자동화 프로그램을 단순화할 수 있으며, 작업의 속도와 안정성도 증가될 수 있다. 제시된 방법의 효율성을 정량적으로 검증하기 위한 시도로서, 세 개의 서로 다른 기능을 갖는 로봇이 공중에 매달린 긴 빔(beam)을 지지대에 결합하는 조립작업을 서로 다른 자율도 조건에서 반복적으로 수행하여 분석 결과를 도출한다.

주요어 : 자율도 조절, 협조 작업 로봇 시스템, 제어 구조, 인간과 로봇의 협조 작업

1. 서론

로봇을 이용하여 구현된 자동화 시스템에서 로봇의 제어 형태는 크게 두 가지로 구분된다. 하나는 로봇 시스템이 사전에 입력된 프로그램에 따라 완전히 자율적으로 동작(autonomous operation)하는 경우이며, 다른 하나는 숙

련된 인간 작업자에 의해 원격(tele-operated) 또는 수동으로 조작되는(remotely controlled) 경우이다. 원격조작은 인간 조작자의 상황 판단과 작업에 대한 지식, 숙련된 조작력을 이용할 수 있는 장점이 있으나 시간적 공간적 제약을 많이 받으며, 자동화된 프로그램과 센서 정보에 의존하는 자율 작동은 시스템 일부의 고장이나 예기치 않은 상황에 대한 대처 능력에 문제가 있다. 특히, 주위 환경과 상호작용이 많은 경우나 여러 로봇이 협력하여 작업하는 경우는 자동화된 시스템에서 돌발적으로 발생할 수 있는 다양한 오류 상황을 미리 예측하여 프로그래밍하는 것이 거의 불가능하다.

2006년 7월 20일 접수, 2006년 8월 2일 채택

¹⁾ 한성대학교 정보통신공학과

주 저자 : 조혜경

교신저자 : 조혜경

E-mail; hkcho@hansung.ac.kr

자율도조정시스템(adjustable autonomous systems, 이하 AAS라 칭함)은 인간 조작자와 자율적으로 동작하는 로봇의 바람직한 특성을 하나의 시스템 안에서 동적으로 결합할 수 있게 하여 가능한 최대의 성능을 끌어내고자 하는 시도이다(Goodrich 등, 2001). 즉, 로봇시스템의 작동을 인간 조작자가 전적으로 담당하는 원시적인 수동/원격 조작과, 이와 반대로 로봇들이 프로그램에 의해 완전히 자율적으로 동작하는 자동화된 형태뿐만 아니라, 이 두 가지 극단적인 제어 형태를 적절히 결합한 중간 단계로도 운용할 수 있으며, 이러한 제어 형태 사이의 전환이 필요에 따라 임의의 시점에서 매우 자연스러운 형태로 이루어질 수 있는 시스템을 말한다. 이와 같이 인간 조작자가 시스템의 동작에 개입할 수 있는 인터페이스를, 가장 원시적인 수동 조작의 형태에서부터, 매우 기본적인 동작 명령, 나아가 작업 중심의 함축적 명령에 이르기까지 다양한 단계로 제공하고 필요에 따라 선택할 수 있게 함으로써 전체 시스템의 기능, 신뢰성 및 유연성 향상을 이루어 낼 수 있다.

AAS와 관련된 연구는 아직 비교적 초기 단계에 머무르고 있으며, 분석적이기보다는 적용 사례를 통해 가능성을 제시하는 수준이 대부분이다. 현재까지 발표된 다양한 시도들을 간단히 살펴보면 다음과 같다. 간단한 작업에서 인간과 로봇의 협동작업으로 구현된 COBOT(Gillespie 등, 1999; Wannasuphprasit 등, 1998)은 인간 조작자가 세부적인 제어를 담당할 필요 없이 진행 방향으로 힘을 가하면 주어진 경로를 따라 가도록 시스템이 실제 제어를 담당하는 구조를 구현하였다. Goldberg 등(2001)은 수백 명의 인간이 주어진 궤적을 추적하기 위해 협력하는 실험이 수행하였다. 저자들은 참여한 인원과 이들의 능숙한 정도의 차이에 따른 성능변화를 제시하였다. Fong 등(2001)은 로봇과 인간 조작자 사이에 적절한 수준의 대화를 이용하는 시스템을 구현하였다. 로봇은 작업 공간 내에서 자신의 위치를 알아내기 위해서나 모호한 센서 정보를 활용하기 위해 사용자에게 질문할 수 있으며, 사용자가 이용 가능한 질문들도 제공된다. 또 다른 연구로는 한 명의 조작자에게 할당될 수 있는 적정 수의 자율이동 로봇의 수를 분석하기 위해 조작자가 로봇의 동작에 집중하지 않는 시간이 증가함에 따라 나타나는 시스템의 성능변화를 분석하였다(Goodrich 등 2003). 또한, 로봇에 대한 적용 사례는 아니지만 Scerri 등(2003)은 그룹 구성원 사이의 일정 조정에서 발생하는 불일치를 조정하여 스케줄링에 적용한 사례를 발표하였다.

이상에서 살펴 본 AAS에 관한 선행 연구들에서 흥미

로운 적용사례들은 제시되었지만, 일반 자동화 시스템과 AAS가 시스템 설계 측면에서 어떻게 차별화되며 어떠한 준비가 필요한지 체계적으로 제시된 바는 없다. 또한, 설계된 AAS의 적용 효과에 대한 정량적인 분석도 부족했다. 따라서 본 논문에서는 AAS에 관한 사전 연구를 확장하여 AAS를 구현하는 데에 있어 기본적으로 고려해야 할 사항과 이를 반영한 소프트웨어 제어 구조를 제안하고, 협력하는 다중 로봇 시스템에서 AAS의 도입이 작업 성능 향상에 미치는 영향(Brookshire 등, 2004)을 분석하기 위한 실험을 수행한다. 특히, 작업의 성공률이나 작업 시간 측면에서 AAS적용의 효과에 대한 정량적 분석을 시도한다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 자율도 조정 시스템의 정의와 함께 주요 이슈들을 살펴보고, 3장에서는 본 논문에서 다루는 로봇 시스템들과 실험 대상이 될 작업에 대하여 설명한다. 4장에서는 자율도 설정에 따른 성능 실험 결과를 보이고, 5장에서 결론을 맺는다.

2. 자율도 조정 시스템을 위한 제어 구조

이 장에서는 자율도 조정을 위하여 기존의 시스템이 어떻게 재구성되어야 하는가에 대하여 논한다. 자율화 정도의 설정이 바뀌어도 자연스럽게 대응하여 목표를 향해 작업하는 시스템을 구현하기 위해서는 고정된 자율도를 가정하여 설계된 기존의 시스템들과는 다른 준비가 필요하다. AAS를 구현하는 데에 있어 발생하는 가장 큰 문제점 중의 하나는 인간 조작자가 시스템을 직접 수동 조작하고 난 후 시스템의 모드(mode)가 다시 완전 자율 모드로 바뀌었을 때, 시스템이 인간 조작자가 수행한 작업에 대해 완전히 이해하고 있지 않다면 무슨 작업을 해야 할지를 알기 어렵다는 것이다. 이는 인간 조작자가 수동으로 시스템을 동작시키는 동안에도 시스템은 작업 진행과정에 대하여 안정적으로 모니터링(monitoring)할 필요가 있음을 의미한다.

우선, 특정 조건이 만족될 때까지 센서 정보에 기반하여 자동운전하는 작업 프로그램이 작업의 완료 여부를 검출하는 방법을 살펴본다. 그림1은 센서 정보에 기반하여 작업완료 조건이 만족될 때까지 반복적으로 출력을 계산하는 제어 루프의 전형적 흐름을 보여준다. 먼저 시스템은 센서 정보를 이용하여 작업의 종료 조건이 만족되었는지 확인하고, 아니면 작업 수행을 위한 적절한 제어 출력을 계산한다. 프로그램은 보통 성공적인 종료 조건이 만족될 때까지 위의 과정을 무한히 반복하도록 구성된다.

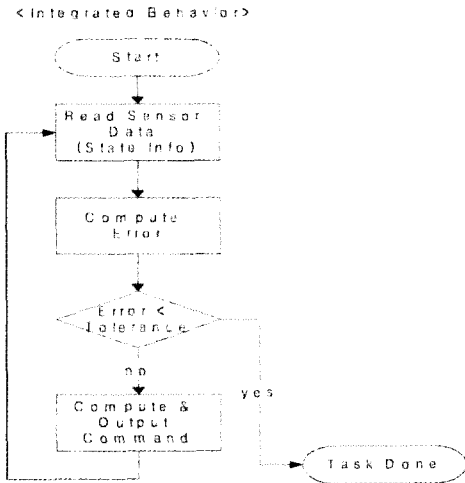


그림 1. 센서 기반 제어 시스템의 전형적 흐름

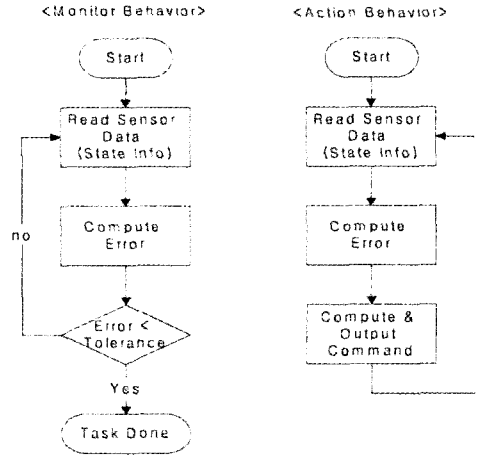


그림 2. 작업 종료조건 모니터링과 실행 부분이 분리된 자율도 조정 시스템의 제어구조

그런데, AAS에서는 때에 따라서는 인간 작업자가 직접 제어를 담당하기 때문에 위의 자동화된 프로그램이 실행되지 않을 수도 있다. 이는 소프트웨어 구조 측면에서 AAS 구현 경우에 한 가지 주목해야 할 사항을 암시한다. 즉, 완전 자동화된 시스템의 경우와 같이 모니터링과 제어 출력 계산을 하나의 프로그램이 담당하는 것이 아니라, 그림 2에 보인 바와 같이 작업의 실행(execution)부와 작업의 성공여부를 모니터링하는 부분이 분리되어 따로 구현되어야 한다는 것이다. 시스템의 설계 시에 그림 2와 같이 모니터링과 액츄에이터 모듈이 분리되어 처리되면 때로는 조작자가 두 가지 기능 중의 하나를 담당하고 나머지는 프로그램에 의해 실행하더라도 전체적인 구조가 그대로 유지되는 유연성을 확보할 수 있다. 즉, 센서가 부실할 때 인간 조작자가 작업의 종료 여부를 알려주고 구동은 로봇이 담당하게 한다면, 로봇의 조작은 수동으로 하지만 비전을 이용한 작업 종료 확인은 시스템에 맡기는 등의 협조가 가능하다.

AAS 하에서 인간 조작자가 자연스럽게 작업 수행에 참여하기 위해서는 시스템이 작업 진행상황을 정확히 인식하고 있어야 한다. 효율적인 구현을 위해 보통 분산 로봇 시스템은 그림 3과 같은 계층 구조를 가지도록 설계되는데, 프로그램에 의하여 동작할 때에는 작업 순서에 따라 적절한 단위 작업이 계획(planning) 또는 실행(executive) 단계에 의해 생성되고 이를 실제로 담당하는 행위 제어 모듈이 실행된다. 인간 조작자에 의해 운전될 때에도 적절한 행위 모듈이 실행되어 인간 조작자와 자연스런 인터페이스를 제공하기 위해서는 실제 로봇은 아니라도 각 로

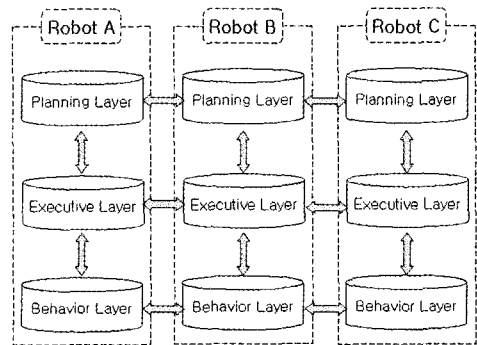


그림 3. 분산 로봇 소프트웨어의 계층 구조

봇에서 이루어지고 있는 전체 작업의 상태를 인식하여 일종의 조정 역할을 하는 가상의 에이전트를 계층 구조의 틀에 맞게 구성할 필요가 있다.

3. 다중 협조 로봇을 이용한 조립 작업 사례

3.1 빔 조립 시스템의 구성

본 논문에서 구현하고자 하는 작업은 서로 다른 세 가지 로봇을 이용하여 크레인에 매달린 약 2m 길이의 빔 (beam)을 좁은 두 개의 기둥(stanchion) 속에 결합하는 것으로, 하나의 로봇만으로는 실행할 수 없는 작업이다. 로봇 시스템은 NIST에서 제작된 대형 크레인의 형태의 스텔트 메카니즘 Robocrane과 스테레오 카메라를 이용하여 시각 정보를 제공하는 이동 로봇 Roving Eye, 이동 로봇 ATRV 위에 5 자유도 매니플레이터가 장착되어 주

로 빔을 잡고 조립하는 작업을 담당하는 이동 매니플레이터로 구성된다(Simmons 등, 1994; 2000). 그림 4는 작업에 참여하는 로봇들과 빔을 포함한 작업 공간의 모습을 보여준다. 그림 5는 빔이 결합될 지지대 부분을 확대한 모습인데, 빔의 폭과 지지대의 폭이 거의 같아 이를 결합하는 작업이 쉽지 않음을 보여준다.

3.2 이종 로봇을 이용한 빔 결합 작업

서로 다른 기능을 하는 세 로봇을 이용하여 약 2m 길이의 빔 양쪽 끝을 두 개의 지지대 위에 올려 결합하는 작업의 과정은 크게 다음 세 단계로 이루어진다.

- 1) 1단계 [1차 결합] : 크레인 로봇이 빔을 내려 주면, 이동 매니플레이터 로봇이 접근하여 팔 끝에 달린 전자석으로 빔의 한쪽 끝을 잡는다. Roving Eye가 전해 주는 시각정보를 이용한 비주얼 서보(visual servoing) 과정을 통해 빔의 한쪽 끝을 좁은 틈에 밀어 넣어 결합시키면 1단계가 완료된다.
- 2) 2단계 [자세 변경] : 1단계 성공 후 2차 결합을 시도

하기 위해서는 각 로봇이 위치 및 자세를 바꾸어야 한다. 이동 매니플레이터는 빔의 다른 쪽 끝을 잡기 위하여 180° 회전하여야 하는데, 내부 센서가 부정확하여 자신의 위치를 정확히 알지 못하므로 Roving Eye가 전해 주는 자세 정보에 의거하여 얼마나 더 회전할지, 얼마나 더 움직일지를 결정해야 한다. Roving Eye 역시 빔의 다른 쪽 끝을 관찰하기 좋은 위치로 이동해야 하는데, 두 로봇이 모두 충돌회피 기능이 없으므로 두 로봇이 동시에 이동하면서 충돌이 생기지 않도록 주의가 필요하다.

- 3) 3단계 [2차 결합] : 빔의 나머지 끝을 지지대에 결합하는 과정이다. 빔의 한쪽이 이미 좁은 틈에 결합되어 있어 빔이 수평방향으로 조금만 이동해도 다른 끝에 큰 힘이 가해지므로, 1차 결합 때와 같이 전자석을 이용하여 빔을 잡으면 놓치기 매우 쉽다. 따라서 2차 결합은 크레인이 빔의 수직 이동을 담당하고, 이동 매니플레이터는 빔을 수평으로 밀어 넣는 방법으로 진행한다.

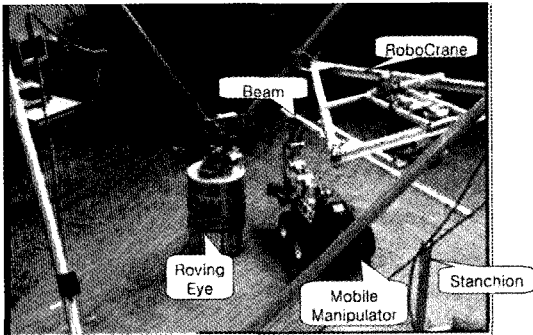


그림 4. 빔 결합을 위한 하드웨어 구성

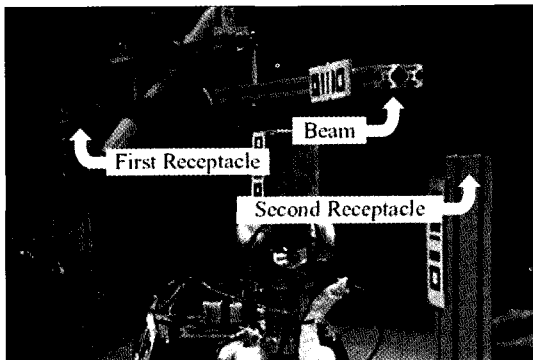


그림 5. 빔이 결합될 지지대: 빔의 폭과 지지대의 폭이 거의 같아 작업이 어려움을 보여줌

4. 자율도 설정에 따른 작업 성능 비교

이 장에서는 다른 자율도를 갖는 시스템 구성 하에서 동일한 작업에 대한 반복적인 실험을 수행하여 자율도 설정과 시스템 성능과의 관계를 분석해 본다.

4.1 순수 자동 운전

이 실험에서는 3장에서 설명한 전체 작업 절차를 각 로봇이 프로그램에 의해 자동적으로 실행하도록 하였다. 총 50회를 반복하여 실험한 결과, 오직 3회만 최후의 단계까지 진행하여 6%의 성공률을 보였다. 표 1의 두 번째 열은 초기 실험의 결과를 보여준다. 표에서는 작업이 성공하지 못한 경우 어느 단계에서 오류가 발생하여 작업이 중지되었는지도 함께 보여준다. 자동화된 프로그램으로 성공률을 어느 정도까지 올릴 수 있는지 확인하기 위하여 반복적으로 발생하는 오류에 대해서는 이를 처리하기 위한 부분을 추가하여 다시 실험하였다.

표 1에서 보듯이 초기 실험에서 가장 빈번하게 발생한 에러는 빔의 두 번째 끝단을 결합하는 2차 결합 과정에서 나타났는데, 이동 매니플레이터가 빔을 밀기 위해 팔을 뻗는 과정에서 특이점(singularity)에 매우 가까워지면서 발생하였다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 매니플레이터의 제어 방식을 RMRC (resolved motion rate control)로 교체하고, 매니플레이터 자세가 특이점에 가까

위지면 이동 로봇의 베이스가 자동으로 움직여서 특이점을 피하도록 하였다. 새로운 제어기로 역시 50회를 실험한 결과 표1의 세번째 열에 나타나 듯 성공률을 30%까지 증가시킬 수 있었다. 이 경우 대두된 가장 심각한 문제는 Roving Eye와 이동 매니플레이터가 자세를 바꾸면서 충돌하는 것이었는데, 이를 방지하기 위해 각 로봇의 중간 경유점을 잡아 주고 충돌이 예상될 때를 처리하는 별도의 예외 처리기(exception handler)를 추가하였다. 표 1의 네번째 열은 이러한 수정 후 실행된 실험 결과를 보여준다.

이와 같이 지속적이고 빈번하게 발생하는 오류에 대해서는 이를 처리하는 특별한 프로그램을 추가하는 과정을 통해 완전 자율 시스템의 성능은 지속적으로 향상될 수 있었고, 마지막 50회 실행에서는 성공률이 64%에 이르게 되었다. 하지만 나머지 실패의 원인은 매우 다양하며 일관성이 없으므로 알려진 오류에 대비하기 위해 사전에 프로그래밍하는 방식으로는 시스템의 성능을 향상시키는 데에 한계가 있음을 확인할 수 있었다.

4.2 수동(원격조종) 운전

이 실험에서는 인간 조작자가 3대의 로봇을 번갈아 원격으로 조정하면서 주어진 작업 과정을 진행하게 하였다. 유사한 실험 횟수를 유지하기 위해 4명의 사용자가 참여하여 총 50회를 진행하였다. 표 2는 원격조정 운전의 결과를 보여 준다. 작업의 성공률은 96%에 달하였으나 사용자의 숙련도에 따라 실행시간에 차이가 크게 나타났고, 프로그램에 의해 실행한 자율 운전의 경우보다 평균적으로 실행시간이 길어졌다.

실행시간이 길어진 주된 이유는 사람의 시각 시스템과 컴퓨터 비전(computer vision)의 근본적인 차이에 의하여, 인간 조작자가 두 개의 영상으로부터 거리 정보를 쉽게 추출하지 못한 것이 주요 원인으로 분석되었다. 원격조종 시스템의 성능을 향상시키기 위해서는 인간 조작자

관점에서 유용한 인터페이스 개발이 필수적임을 확인하였다. 또한 인간 조작자는 프로그램된 로봇에 의한 자동 실행의 경우에 비해 미세한 이동이 요구되는 빔의 결합 작업에서 큰 어려움을 겪는 것으로 나타났다.

4.3 자율도 조정 운전

자율도 조정 시스템의 경우 성능에 미치는 영향을 평가하기 위해서 전술한 제어구조를 채택한 시스템이 실행되었다. 인간 조작자는 로봇에 의한 자동화된 작업 과정을 지켜보다가 필요하다고 판단될 때 시스템에 개입할 수 있게 하였다. 인간 조작자가 개입하게 되면 현재의 작업 과정에 따라 적절한 인터페이스 화면이 나타나 조작자가 수동으로 각 로봇을 조작할 수 있게 된다. 수동 조작이 끝나면 조작자는 시스템을 다시 자동 운전 모드로 변경하고 시스템은 현재 상태에서 필요한 다음 작업을 찾아 자동으로 실행하게 된다.

인간 조작자가 개입하는 경우는 크게 두 가지로 볼 수 있는데, 첫째는 작업의 실행시간을 단축시키기 위해서 특별한 로봇을 수동 운전 한다든지 작업 완료를 나타내는 명령을 생성하는 것이며, 둘째는 자동화된 프로그램으로 처리되지 못하는 오류가 발생하였을 때, 로봇들이 자동 운전으로 처리할 수 있는 단계 직전까지의 작업을 수동

표 2. 원격조종운전 실험결과

작업 단계	횟수	비율(%)
작업 성공	48	96
1차결합 단계에서 실패	1	2
자세변경 단계에서 실패	1	2
2차결합 단계에서 실패	-	-
합 계	50	100

표 1. 자율운전에서 주요 실패요인 개선을 위한 프로그램 추가에 따른 작업 성공을 변화

작업 진행 단계	초기상태		매니플레이터 제어기 개선 후		자세 변경 시 충돌 처리부 보강 후	
	횟수	비율(%)	횟수	비율(%)	횟수	비율(%)
작업 성공	3	6	15	30	32	64
1차결합 단계에서 실패	16	32	11	22	7	14
자세변경 단계에서 실패	9	18	19	38	6	12
2차결합 단계에서 실패	22	44	5	10	5	10
합 계	28	56	45	90	45	90

운전으로 실행하는 것이다. 전자의 경우 조작자의 개입이 성공 여부와 관계없이 보조적인 것이라면, 후자의 경우는 조작자 없이는 실패하게 되는 경우이므로 조작자의 도움이 필수적이라 하겠다.

표 3은 자율도 조정 운전의 결과를 보여 준다. 자율도 조정 운전의 경우 조작자의 역할은 전술한 두 가지로 구분하여 집계하였다. 첫째는 조작자가 보조적 역할을 하는 경우인데, 자율 동작으로도 실행할 수 있는 작업이지만 인간이 더 능숙하게 처리할 수 있는 단계에서 조정권을 인계받아 작업을 수행한 후 자율동작으로 다시 전환하는 경우를 말한다. 하나의 예로, 빔 조립 작업의 경우 한쪽 빔을 고정 한 후 다른 쪽을 처리하기 위해 이동 매니플레이터가 자세를 바꾸는 과정에서 위치 검출을 담당하는 Roving Eye가 목표물을 놓치는 일이 많았다. 이 경우 한참 기다리면 탐색 알고리즘에 의해 목표물을 다시 찾게 되지만, 수동 모드로 전환하여 목표물을 카메라 앞에 위치시키도록 조작한 후 자동으로 전환하면 효과적으로 작업 시간을 줄일 수 있었다. 두 번째는 조작자가 결정적인 역할을 하는 경우인데, 조작자가 자율 동작을 관측하다가 시스템이 처리하기 어려운 돌발상황이 발생하거나 같은 작업을 반복적으로 실패할 경우 시스템 조정 권한을 인계받아 수동 운전하는 방식으로 구현하였다. 그 결과 완전자율 운전의 경우와 유사한 68% 정도가 조작자의 보조적 개입으로 성공하였고,

26%의 경우는 조작자의 결정적인 역할로 성공하게 된 결과를 얻었다.

표 4는 전술한 세 가지 운전방식의 결과를 총괄적으로 보여주는데, 자율도 조정 운전을 구현한 효과로 조작자가 보조적으로 개입한 경우 연계 된 작업시간 단축효과와, 필수적으로 개입하여 성공률을 26% 증가시킨 경우에서 볼 수 있는 작업 성능 향상의 효과를 분명하게 볼 수 있다. 물론, 후자의 경우 돌발상황 처리를 위해 작업시간이 증가하였으나 전체를 원격조종으로 실행하는 경우에 비하여 상대적으로 빨랐다. 이것은 작업 단계 중에 인간보다는 반복작업에 능숙한 로봇이 더 빨리 처리할 수 있는 단계가 많음을 의미한다. 작업의 내용에 따라 약간의 차이는 있겠지만 이상의 실험을 통해 자율도 조정 시스템의 구현과 적용에 대하여 다음과 같이 결론을 도출할 수 있다. 프로그램 된 절차에 의해 자동 운전으로 동작하는 시스템이 빈번히 발생하거나 구조적으로 알려진 문제점을 가지고 있을 때, 프로그램을 추가하는 방법 등의 자원을 투자하여 문제를 해결하면 그 성능을 개선할 수 있다. 이렇게 자원을 투자하여도 더 이상 성능이 개선되지 않는 포화상태가 되었을 때, 자율도 조정 구조의 도입은 인간 조작자로 하여금 구조화하기 어려운 문제를 담당하게 함으로써 적은 비용으로 성능에 있어 한 단계의 진전을 이루어 낼 수 있다.

표 3. 자율도 조종운전 실험결과

작업 단계		횟수	비율(%)
작업 성공	조작자 보조적 역할	34	68
	조작자 결정적 역할	13	26
1차결합 단계에서 실패		1	2
자세변경 단계에서 실패		1	2
2차결합 단계에서 실패		1	2
합 계		50	100

표 4. 시스템 운전 방법에 따른 성공률 및 작업시간 비교

운전 형태	성공률 (%)	작업완료시간(min)	
		평균	표준편차
자동운전	64	10	1.5
자율도 조정 운전	조작자 보조적 역할	68	9.5
	조작자 결정적 역할	26	11
	합계	94	10
원격조종	96	12.5	4

5. 결론 및 향후 연구 방향

본 논문에서는 협조 작업하는 로봇 시스템의 제어에 이용되는 자율도를 조정하여 인간 작업자와 로봇 시스템이 효과적으로 역할을 분담하게 함으로써 전체 시스템의 작업 능력을 최대로 이끌어내는 방법을 제안하였다. 또한, 작업의 성공률이나 작업 시간 측면에서 자율도 조정 시스템의 도입이 작업 성능 향상에 미치는 영향 분석하기 위하여 세 종류의 서로 다른 기능을 갖는 로봇이 공중에 매달린 빔을 지지대에 결합하는 조립작업을 반복적으로 수행하였다. 그 결과, 자동 운전에서 발생하는 구조적 문제점이 프로그램을 추가하는 방법으로는 더 이상 개선되기 어려울 때, 인간 조작자로 하여금 문제 해결을 담당하게 하는 자율도 조정 구조는 비교적 적은 비용으로 성능 향상을 이루어 낼 수 있음을 확인하였다. 앞으로의 연구에서는 조작자의 숙련도에 따른 분석을 추가하고, 조작자가 일방적으로 수동 조작의 필요성을 판단하고 요구하기보다 시스템도 상황에 따라 능동적으로 조작자의 개입을 요

청할 수 있도록 하기 위한 작업 모델을 구축하고자 한다.

참 고 문 헌

1. Goodrich, M. A., Olsen, D. R., Crandall, J. W., and Palmer, T. J. (2001), "Experiments in Adjustable Autonomy," In Proceedings of the IJCAI Workshop on Autonomy, Delegation and Control: Interacting with Intelligent Agents.
2. Gillespie, R. B., Colgate, J. E., Peshkin, M. (1999), "A General Framework for Cobot Control," International Conference on Robotics and Automation, Detroit MI.
3. Wannasuphprasit, W., Akella, P., Peshkin, M., Colgate, J. E. (1998), "Cobots: A Novel Material Handling Technology," International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Anaheim, ASME 98-WA/MH-2.
4. Goldberg, K., and Chen, B. (2001), "Collaborative Control of Robot Motion: Robustness to Error," In International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp.655-660.
5. Fong, T., Cabrol, N., Thorpe, C. and Baur, C (2001), "A Personal User Interface for Collaborative Human-Robot Exploration," In Proc. International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics, and Automation in Space, Montreal, Canada.
6. Goodrich, M. A., Crandall, J. W., and Stimpson, J. L. (2003), "Neglect Tolerant Teaming: Issues and Dilemmas," In proceedings of the AAAI Spring Symposium on Human Interaction with Autonomous Systems in Complex Environments.
7. Scerri, P., Pynadath, D., and Tambe, M. (2003), "Towards Adjustable Autonomy for the Real World," Journal of Artificial Intelligence Research, Vol.17.
8. Brookshire, J., Singh, S., and Simmons, R. (2004), "Preliminary Results in Sliding Autonomy for Assembly by Coordinated Teams," In Proceedings of IROS.
9. Simmons, R. (1994), "Structured Control for Autonomous Robots," IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.10, No.1, pp.34-43.
10. Simmons, R., Singh, S., Hershberger, D., Ramos, J. and Smith, T. (2000), "First Results in the Coordination of Heterogeneous Robots for Large-Scale Assembly," In Proceedings of International Symposium on Experimental Robotics, Hawaii.



조 혜 경 (hkcho@hansung.ac.kr)

1987 서울대학교 제어계측공학과 학사
 1989 서울대학교 대학원 제어계측공학과 석사
 1994 서울대학교 대학원 제어계측공학과 박사
 1995 고등기술연구원 선임연구원
 1996~현재 한성대학교 정보통신공학과 부교수

관심분야 : Control Architecture, Human-Robot Cooperation