

인간-로봇 팀의 조절가능 자율도 구현에서 무결절 전환

Seamless Switching in the Implementation of the Adjustable Autonomy of Human-Robot Teams

조혜경*
(Hye-Kyung Cho)

Abstract : Adjustable autonomy architecture provides various ways for a human operator to participate as a member of a human-robot team in improving the performance of the team by resolving issues that the robots cannot deal with or performing tasks that the robots alone would be unable to do. According to the level of involvement of the human operator, the robots have to adjust their level of autonomy and, in consequence, the operation mode of the overall system shifts. This paper deals with the implementation issues of seamless switching when the level of autonomy of the human-robot team shifts from one level to another. Especially, we focus on developing reliable methods for monitoring the task progress and maximizing the system flexibility by coping with the detailed differences between humans and robots in their characteristics of motions and their choices of positions, paths, and sequences of sub-goals to achieve a given task. To test and motivate the proposed methods, we have assembled three heterogeneous robots which work together to dock both ends of a suspended beam into stanchions.

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

I. 서론

기술의 발전으로 로봇이 자율적으로 처리할 수 있는 작업의 종류가 다양해지고 로봇이 수행하는 작업의 난이도 수준도 높아졌다 하더라도 높은 완성도를 기대할 수 있는 작업은 지극히 제한적이다. 특히, 주위 환경과 상호작용이 많은 경우나 여러 로봇이 협력 작업을 하는 경우는 시스템에 돌발적으로 발생할 수 있는 다양한 오류 상황을 모두 미리 예측하여 프로그래밍하는 것이 사실상 불가능하다. 이러한 자동화의 한계를 극복하여 로봇을 이용한 작업 영역을 확대하고 그 수준을 한 단계 끌어 올릴 수 있는 효과적인 시도로 조절가능 자율도(adjustable autonomy)[1] 구조를 들 수 있다.

조절가능 자율도는 인간 조작자와 로봇의 강점 즉, 로봇의 정교한 조작 성능과 인간 조작자의 판단력 및 지각력을 하나의 시스템 안에서 효과적으로 결합시켜 최대의 성능을 이끌어 내기 위한 방법이다. 기존의 자동화 시스템처럼 로봇 시스템이 프로그램에 의해 항상 완전히 '자율적'으로 자동 동작하는 것이 아니라 필요에 따라 인간 작업자의 직접적인 조작이나 통제 아래서 제한적인 자동화 수준으로 동작할 수 있으며, 이러한 제어 형태 사이의 전환이 임의의 시점에서 매우 자연스러운 형태로 이루어질 수 있는 시스템을 말한다. 이것을 인간 조작자가 로봇 시스템을 제어하는 관점으로 바꾸어 설명하면, 가장 원시적인 수동 조작(remote control)의 형태에서부터, 매우 기본적인 동작명령, 나아가 작업 중심의 함축적 명령에 이르기까지 다양한 단

계의 인터페이스가 제공되며 필요에 따라 자유로이 선택할 수 있게 함으로써 전체 시스템의 기능, 신뢰성 및 유연성 향상을 이루는 것이라 할 수 있다.

조절가능 자율도와 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[2,3]은 인간 조작자가 세부적인 제어를 담당할 필요 없이 진행 방향으로 힘을 가하면 주어진 경로를 따라 가도록 시스템이 실제 제어를 담당하는 구조를 구현하였다. Goldberg 등[4]은 수백명의 인간이 주어진 궤적을 추적하기 위해 협력하는 실험을 수행하였다. 저자들은 참여한 인원과 이들의 능숙한 정도의 차이에 따른 성능변화를 제시하였다. Fong 등[5]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 할당하기에 적절한 자율이동 로봇의 수를 분석하려는 목적으로 조작자가 로봇의 동작에 집중하지 않는 시간이 증가함에 따라 나타나는 시스템의 성능 변화를 분석하였다[6]. 또한, 로봇에 대한 적용 사례는 아니지만 Scerri 등[7]은 그룹 구성원 사이의 일정에서 발생하는 불일치를 조정하여 회의 시간을 결정하는 데에 적용한 사례를 발표하였다.

이상에서 살펴 본 조절가능 자율도에 관한 선행 연구들에서 흥미로운 적용사례들은 제시되었지만, 일반 자동화 시스템과 조절가능 자율도를 갖는 시스템이 설계 측면에서 어떻게 차별화되며 어떠한 준비가 필요한지 체계적으로 제

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2006. 10. 24., 채택확정 : 2006. 11. 23.

조혜경 : 한성대학교 정보통신공학과(hkcho@hansung.ac.kr)

※ 본 연구는 2006년도 한성대학교 교내 연구비 지원 과제임.

시된 바는 없다. 또한, 조정가능 자율도를 적용한 효과에 대한 정량적인 분석도 부족했다. 따라서 본 논문에서는 자율화 정도의 설정이 바뀌어도 자연스럽게 대응하여 최종 작업 목표로 진행되는 시스템을 구현하기 위해서는 고정된 자율도를 가정하여 설계된 기존의 시스템들과 무엇이 달라져야 하며 어떤 준비가 필요한지를 제어구조 측면에서 제시하고자 한다. 특히, 여러 대의 서로 다른 로봇이 공동으로 작업하며 이들 로봇의 연속한 위치이동이 포함된 작업들을 중심으로 하여, 인간 작업자가 선택한 위치정보, 경로 정보 및 세부 작업의 순서가 자동화된 프로그램에서 이용하는 것들과 다른 경우를 포괄하는 모니터링 방법을 제시함으로써 작업자가 불필요한 제약을 받지 않으면서 동작 모드(mode)에 적합한 작업을 일관되게 진행할 수 있게 한다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 조정가능 자율도 시스템의 정의와 함께 주요 이슈들을 살펴보고, 조정가능 자율도를 적용하며 문제점과 개선 효과를 분석할 수 있는 플랫폼 작업에 대하여 설명한다. 3장에서는 효율적인 제어 및 모니터링을 위한 위치 정보와 경로의 표현 방법, 세부 작업 순서의 변경에 대처하는 문제를 다루고, 4장에서는 조립 작업을 대상으로 구현한 결과를 제시하며, 5장에서 결론을 맺는다.

II. 조절가능 자율도의 이슈 및 적용 대상 작업

이 장에서는 조정가능 자율도 시스템의 특징과 무결절 전환의 필요성을 살펴보고, 이에 관한 연구 분석을 위해 본 논문에서 선정한 작업 환경에 대하여 설명한다.

1. 조정가능 자율도 시스템의 특징

조정가능 자율도는 완전한 자율 동작과 인간 작업자에 의한 원격/수동 조작 기능, 또한 이 두 가지 극단적인 형태의 제어 방법이 적절히 혼합된 여러 가지 동작방법 사이에서 안전하고 효율적인 방법으로 그 동작 모드를 변경할 수 있는 자동화된 제어 시스템으로 정의된다. 즉, 인간 조작자가 각종 센서(sensor) 및 액츄에이터(actuator)를 직접 조작할 수 있는 단계를 자율도 '0'이라 하고, 완전히 자동화된 프로그램에 의해 인간의 개입 없이 작업이 수행되는 것을 자율도 '1'이라 한다면, 조정가능 자율도는 0과 1사이에서 몇 개의 다른 자율도로 인간 조작자와 상호작용할 수 있고, 자율도 설정의 전환이 부드럽고 자유롭게 허락되며, 어떤 단계의 자율도에서는 일관되게 최종 작업 목표를 향해 작업을 진행하는 시스템이라 할 수 있다. 자동화 시스템의 한 요소로서 인간 작업자는, 센서를 대체한 인지력이나 조작능력으로 기여할 수 있을 뿐만 아니라, 또한 의사결정을 위한 지능을 제공할 수 있어 폭넓은 역할을 감당할 수 있고 이에 따라 인간과 결합된 전체 시스템의 성능을 크게 향상시킬 수 있다. 이와 같이, 조정가능 자율도 시스템에서는 자동화가 어려운 부분을 인간 조작자가 담당하게 함으로써 저가로 안전하고 신뢰할 수 있는 자동화 시스템을 구성할 수 있을 뿐 아니라, 인간 조작자가 다양한 형태로 시스템 운영에 개입할 수 있으므로 환경이 변화할 때마다 프로그램을 수정할 필요가 없으며, 불확실한 환경에서 실패하지 않고 주어진 작업을 수행하는 유연하고 안정한 시스템을

구현할 수 있는 장점이 있다.

이러한 유연성과 안정성은 여러 로봇이 협력작업하는 환경에서는 더욱 절실하다. 왜냐하면 여러 로봇이 협력 작업을 하는 경우는 더 많은 상호작용의 경우가 존재하므로 시스템에 돌발적으로 발생할 수 있는 다양한 오류 상황을 모두 미리 예측하여 대응하도록 프로그램하는 것이 사실상 불가능하기 때문이다. 이 경우 인간 조작자가 자동화 시스템의 구성요소로서 유기적으로 결합되어 있으면 다양한 돌발 상황에서 적절한 처리 방법을 선택하여 명령하거나 오류가 발생한 고난이도 작업을 직접 처리할 수 있어 매우 효과적이다.

조정가능 자율도를 구현하는 데에 있어 발생하는 가장 큰 문제점 중의 하나는 인간 조작자가 시스템을 직접 수동 조작하고 난 후 시스템의 모드가 다시 완전 자율 모드로 바뀌었을 때, 시스템이 인간 조작자가 수행한 작업에 대해 완전히 이해하고 있지 않다면 무슨 작업을 해야 할지를 알기 어렵다는 것이다. 따라서 끊임없는 동작이 이루어지기 위해서는 인간 조작자가 수동으로 작업하는 동안에도 시스템이 작업 진행과정을 안정적으로 모니터링(monitoring)할 필요가 있음을 의미한다.

조정가능 자율도를 구현하기 위해 해결해야 할 또 하나의 문제는 최종 작업목표를 이루기까지 세부적인 선택에 있어 인간 작업자와 로봇 시스템의 선호도나 특성의 차이를 어느 정도까지 보장할 것인가이다. 조정가능 자율도를 갖는 시스템에서는 최종 작업목표에 도달할 때까지 인간 작업자가 다양하게 기여할 수 있으므로 그 세부 과정에서의 선택은 매우 여러 가지 조합이 가능하며, 우리가 자동화 시스템을 프로그램할 때 선택한 작업 순서, 경로 및 위치 등은 이 중 하나에 불과하다. 인간 작업자가 프로그램된 것과는 다른 세부 경로를 따르던 중 자동 모드로 변환되었을 때, 만일 시스템이 처음 프로그램된 경로를 그대로 따르고자 한다면 시스템의 동작은 매우 부자연스러울 것이다. 따라서 조정가능 자율도를 갖는 시스템은 작업 순서, 경로 및 위치 등의 선택에 있어 인간 작업자와 끊임없는 인터페이스(seamless interface)를 보장하는 유연한 프로그램 구조를 취해야 한다. 본 논문에서는 협력 작업하는 다중 로봇의 조절가능 자율도를 구현하는 데에 있어 위의 두 가지 이슈를 집중적으로 다룬다.

2. 조정가능 자율도의 구현을 위한 플랫폼

조정가능 자율도의 구현에 동반되는 제어 구조와 여러 이슈를 연구하기 위한 플랫폼으로, 본 논문에서는 세 대의 서로 다른 로봇이 협력하여 작업하는 다음의 조립 시스템을 이용한다. 대상 작업은 크레인에 매달린 약 2m 길이의 빔(beam) 양쪽을 두 개의 지지대(stanchion) 속에 결합하는 것으로, 세 로봇 중 어느 하나만으로는 실행할 수 없는 작업이다. 로봇 시스템은 카네기 멜론 대학의 로봇 연구소에 위치한 장비들로서, 먼저 NIST에서 제작된 대형 크레인 형태의 역 스튜어트 메카니즘 Robocrane과 스테레오 카메라를 이용하여 시각 정보를 제공하는 이동 로봇 Roving Eye, 마지막으로 상용 이동로봇 ATRV 위에 5 자유도 매니플레이터가 장착되어 주로 빔을 잡고 조립하는 작업을 담당하

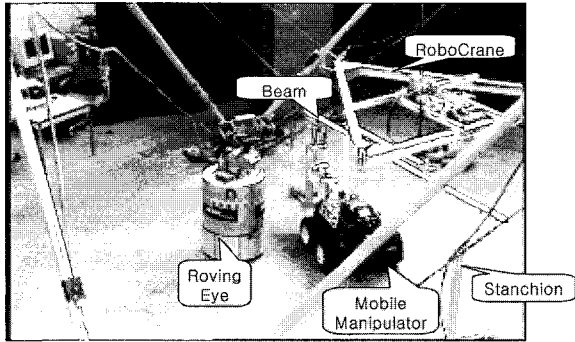


그림 1. 빔 조립 시스템의 로봇 구성.
Fig. 1. Robots in the beam assembly system.

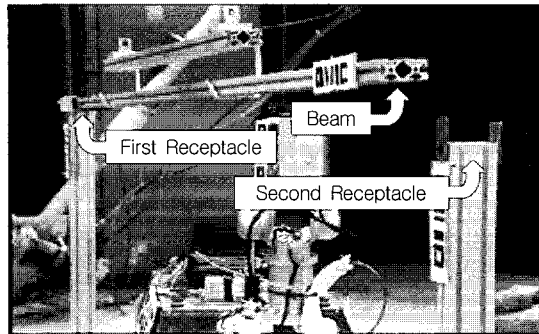


그림 2. 빔이 결합될 지지대와 비주얼 서보용 인공 표식.
Fig. 2. Stanchions to dock the beam and artificial landmarks for visual servoing.

는 이동 매니퓰레이터 Bullwinkle이다[8-10]. 그림 1은 작업에 참여하는 로봇들과 빔을 포함한 작업 공간의 모습을 보여준다. 그림 2는 그림 1의 빔 주변을 확대하여 찍은 것인데 빔의 폭과 지지대의 폭이 거의 같아 들을 결합하는 작업이 쉽지 않음을 보여준다.

이 시스템에 포함된 로봇들의 자동화 수준은 다음과 같은 한계를 지닌다. Robocrane은 빔의 큰 이동(gross motion), Bullwinkle은 미세 이동(fine motion)을 담당하는데 두 로봇 모두 충돌회피나 목적지까지의 경로계획 기능이 없기 때문에 충돌이 발생하지 않도록 적절한 경유점을 지정해 주어야 한다. 각 로봇 사이의 위치정보는 Roving Eye의 스테레오 카메라를 통해 구하는데, 각 로봇의 주요 부위에 바코드 형태로 부착된 인공 표식(artificial landmark)을 한 번에 모두 볼 수는 없으므로 작업의 진행단계에 따라 관측할 대상을 적절히 지정해 주어야 한다. 멀리 있는 여러 개의 표식을 동시에 지정하면, Roving Eye는 이들을 모두 화면에 잡기 위해 뒤로 이동하게 되는데, 이렇게 후퇴하는 중 해상도의 한계로 인공 표식을 인식하지 못하는 문제가 생기고, 한 번 목표 표식을 놓치면 이를 다시 찾기까지 상당한 시간의 탐색이 필요하다. 이와 같이 작업에 참여하는 각 로봇의 역할이 서로 차별화되어 있고 완전한 자동화를 구현하기에는 기술적인 수준이 높지 않은 환경이지만 인간 작업자의 참여를 통해 전체 시스템의 성능 향상이 가능함을 보이고자 한다.

III. 다중 로봇을 위한 조정가능 자율도 시스템의 구현

이 장에서는 2장에서 설명한 작업에 이용되는 각 로봇을 인간 조작자가 직접 조작하거나 프로그램에 의해 동작할 수 있도록 조정가능 자율도 시스템을 구현할 때의 핵심적인 설계 사항에 대하여 설명한다.

1. 다중 로봇의 조정가능 자율도를 위한 계층형 제어 구조

조정가능 자율도 시스템에서는 조작자와 시스템이 다양한 추상화 단계의 인터페이스를 사용하여 상호작용하게 되는데, 특히 조작자가 로봇들을 수동 조작하는 경우에는 진행 중인 작업의 결과가 무엇인가를 로봇 시스템이 미리 알기 어려우므로, 인간 조작자의 작업 내용에 대한 안정적인 모니터링(monitoring)과 이해가 주요 문제 중의 하나가 된다. 그림 3은 센서 정보에 기반을 둔 기존 자동화시스템들에서 작업의 완료 여부를 검출하는 프로세스의 전형적인 형태를 나타낸다. 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. 그런데, 조정가능 자율도 시스템에서 인간 작업자가 직접 제어하는 경우에는 위 프로세스가 동작하지 않게 되고, 이는 작업 완료를 모니터링 하는 것도 동시에 불가능해진다는 것을 의미한다. 이러한 특징은 조정가능 자율도를 구현할 때 소프트웨어 구조 측면에서 주목해야 할 주요사항을 암시한다. 즉, 완전 자동화된 시스템의 경우와 같이 모니터링과 제어 출력 계산이 하나의 프로세스에서 이루어지는 것이 아니라 작업의 실행(execution)부와 작업의 성공여부를 관측(monitor)하는 부분이 분리되어 별도의 프로세스로 구현되어야 한다는 것이다. 이러한 구조 하에서, 인간 작업자는 전체 작업을 수행하는데 기여하는 하나의 분산된 구성요소로서 특정 로봇의 실행부나 관측부를 직접 조작하면서 다른 로봇과 협력하여 작업을 완료할 수 있는 기반이 마련된다.

다중 로봇 시스템의 경우 각 에이전트에서 실행되는 작업은 때로는 동시에 실행되며 때로는 둘 이상의 에이전트가 매우 밀접한 협력 관계를 가지며 실행되는 경우가 있다.

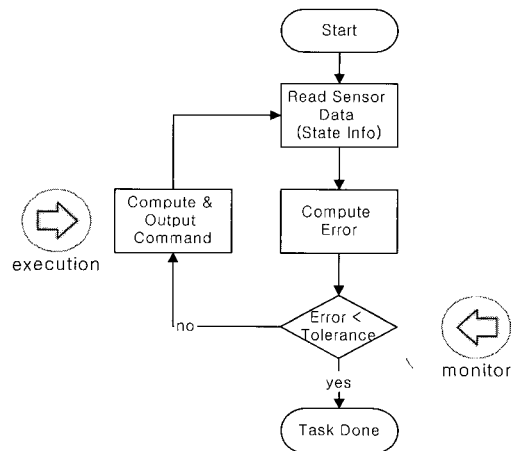


그림 3. 전형적인 자동화 시스템의 제어 흐름도.
Fig. 3. Typical control flow of autonomous systems.

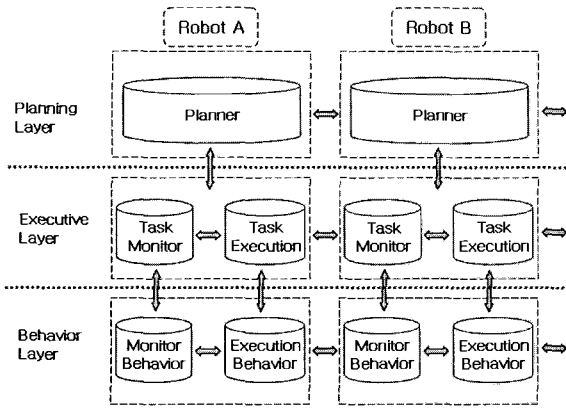


그림 4. 실행부와 모니터가 분리된 계층 구조
Fig. 4. A layered architecture with separated monitor and execution.

이러한 다중 로봇 시스템의 특성을 반영한 조정가능 자율도 구현을 위해, 본 논문에서는 그림 4와 같은 제어 구조를 제안하고 구현한다. 전술한 자동화 수준에서 알 수 있듯이 현재 계획 계층의 기능은 매우 단순하며, 각 로봇의 소프트웨어 구조는 기존의 계층 구조(layered architecture)를 유지하되, 각 계층의 모듈은 실행부와 모니터링부로 분리되어 별도의 프로세스로 구현된다. 또한 이들 실행부 및 모니터링부는 시스템의 자율도에 따라 작업자의 직접 조사를 위한 프로세스와 프로그램에 의한 자동동작 프로세스로 다시 분리된다.

2. 공간 분해를 이용한 위치 및 경로의 유연성 향상

이 절에서는 조정가능 자율도 시스템에서 인간 조작자에게 더 많은 유연성을 제공하고 결절 없는 모드 전환을 이루기 위한 위치 데이터 및 경로 데이터의 표현 방법을 제시한다. 흔히, 작업 진행에 대한 모니터링은 진행상황을 표현한 몇 가지 상태변수들을 이용하여 구현할 수 있다. 로봇이 관련된 작업에 있어 중요한 변수 중의 하나는 바로 위치 정보로, 위치 정보는 로봇에게 작업을 지시하기 위한 주요 요소이면서 동시에 작업의 진행상황을 표현하는 효과적인 지표를 제공한다. 그런데, 위치 정보의 처리에 있어 인간과 자동화 시스템은 그 특성이 다소 다르므로 로봇과 인간 작업자가 위치정보를 공유하기 위해서는 이들 둘 사이의 특성을 이해하고 반영해야 한다.

로봇의 프로그램에 이용되는 위치 데이터 중 일부는 작업 수행을 위해 정확한 제어가 불가피한 경우가 있으나, 부드러운 작업 진행을 위해 동반되는 경유점(waypoints)의 경우에는 굳이 그 위치를 정확히 지나야 할 필요는 없다. 연속한 위치 이동이 포함된 작업의 경우 로봇의 작업 진행을 판단하는 방법 중의 하나로 경유점 도달 여부를 이용하고자 할 때, 작업 진행에 필수적이지 않은 경유점에서 조차 인간 조작자가 자동화된 프로그램과 똑같은 위치를 이용해야 한다면 이는 조작자를 불필요하게 제약하는 결과를 초래한다. 따라서 작업에서 요구되는 위치 데이터의 정밀도에 따라 융통성 있게 위치 도달 여부를 판단할 수 있는 준비가 필요하다. 또한, 인간 조작자에게 좀 더 유연성을 허

락한다면, 허용 가능한 범위 내에서 작업에 이용되는 경로를 변경하거나, 작업 순서를 변경할 수 있도록 하는 제어 구조를 마련할 필요가 있다.

본 논문에서는 인간 조작자에 의한 수동 조작 및 자율동작사이에서 세부적인 위치나 경로의 차이를 수용하기 위하여, 다음의 4가지 항목으로 위치 데이터를 표현할 것을 제안한다.

- 1) 대표위치: 목표 위치에 대한 기하학적 정보(x,y,z,roll, pitch,yaw).
- 2) 정밀도: 목표 위치에 도달된 것으로 간주할 수 있는 오차범위. 대표 위치에 대한 상대 거리로 표현됨(dx, dy,dz,droll,dpitch,dyaw).
- 3) 자유공간: 목표 위치 근처에서 충돌 없이 목표위치로 이동할 수 있음이 보장된 빈 공간. 대표 위치에 대한 각 방향 상대 거리로 표현됨(dx,dy,dz,droll,dpitch,dyaw).
- 4) 좌표계: 위치정보 표현의 기준이 되는 좌표계.

위와 같은 구성 요소를 이용하여 위치 정보를 표현한 예를 그림 5에 표시한다. 요구 오차범위가 엄격하고 자유공간에 대한 보장이 적은 위치표현이 기존의 위치 표현에 대응된다 할 수 있다. 오차 범위가 크고, 자유 공간이 큰 위치는 보통 제약이 많지 않은 빈 공간에 설정된 경유점에 대응된다. 본 논문에서 조정가능 자율도로 구현하는 시스템은 대상물체들에 부착된 기점들의 위치만 분석할 뿐 로봇 팔과 물체들에 대한 자동 충돌 회피 기능은 제공되지 않는다. 그러므로 어떤 위치에서 목표위치를 향해 이동 명령을 출력하기 이전에 해당 명령이 성공적으로 수행될 수 있는지를 보장하기 위해서는 목표 위치 주변의 자유공간에 대해서도 명시적으로 지정할 필요가 있다.

위치 정보를 이와 같이 표현해서 얻는 더 중요한 성과는 모드 전환 시의 대응과 관련이 있다. 인간 작업자가 프로그램된 위치와 가까운 위치에서 작업을 멈춘 상태에서 모드가 전환된 경우, 현 위치와 목표위치 차이가 오차범위 안에

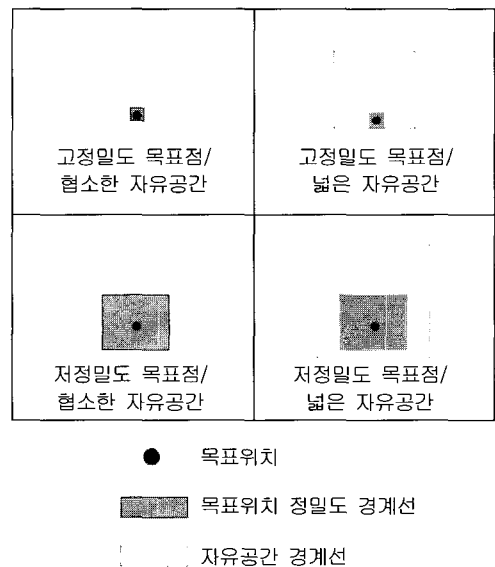


그림 5. 요구 정밀도를 이용하여 표현된 위치 정보.
Fig. 5. Representation for position information.

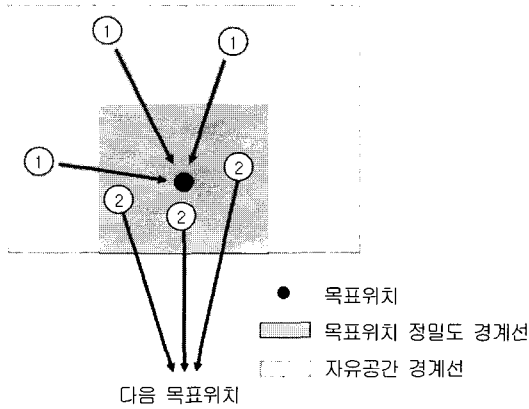


그림 6. 자유 공간 내 목표위치 주변에서 이동.
 Fig. 6. Motions around a target position within free space.

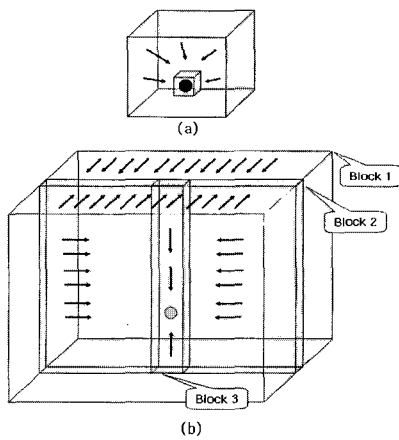


그림 7. 단일블록(a)과 중첩된 블록(b)을 이용한 이동 선호도 인코딩.
 Fig. 7. Motion preference encoding using a single block(a) and nested blocks(b).

든다면 굳이 목표위치까지 가지 않고 다음 위치로 진행하는 것이 보다 자연스럽다. 예를 들어 그림 6에 표시한 바와 같이 특정한 목표위치 주변에서 요구되는 정밀도가 낮아 굳이 정확하게 지날 필요가 없는 상황에서 인간 작업자가 ②로 표시한 위치들에서 작업을 마치고 시스템을 자동모드로 전환했을 때, 프로그램된 현재 목표위치까지 굳이 이동하고자 하는 시도는 매우 어색하거나 불필요한 이동이 된다. 반면, ①의 위치에 있어 목표점과 상당한 거리가 있거나 해당위치가 반드시 지나야 하는 중요한 위치라면 즉, 요구정밀도가 매우 높다면 목표위치로 이동하는 것이 타당하다. 전술한 위치표현방법은 자동화 프로그램에서 사용하는 위치정보와 인간 작업자 사이에서 상황에 적합하도록 유연성과 융통성을 확보할 수 있게 하므로 매우 효과적이다.

제시된 위치 표현방법은 자유 공간 내에서 로봇의 이동 형태를 인코딩하는 목적으로도 확장될 수 있다. 2장에서 설명한 작업의 경우, Robocrane이 빔을 옮길 때에는 직각 이동 방식이 가장 자연스러운데, 본 논문에서는 이러한 선호도를 반영하기 위하여 자유공간을 중첩하여 활용한다. 그림 7은 두 가지 형태의 블록에 대해 이동이 어떠한 방식으로

구현되는가를 보여준다. 단일 블록의 경우 자유 공간 내에 있으면 대표 위치가 목표점으로 설정되고 이 위치에 대한 차이로 서보가 이루어진다. 자유공간이 중첩되어 있는 경우는 대표위치가 아니라 가장 가까운 다음 자유공간의 내부로 목표위치가 온라인(on-line)으로 계산되므로, 가능한 좌표 축과 평행한 이동명령이 생성된다. 그림 7(b)는 자유공간이 3단계로 정의된 중첩된 블록이다. 자유 공간 안에서 가장 먼저 내부의 평면 위로 이동하는 움직임이 발생하고, 다음은 중앙의 직선 부분 영역으로 이동하며, 마지막으로 대표 위치를 향하여 이동하게 된다. 이러한 인코딩 방법을 이용하면 인간 작업자가 작업을 하다가 어느 위치에서 자동으로 전환이 이루어지든지 매우 자연스런 방식으로 이동할 목표위치가 생성될 수 있다.

이러한 위치 표현을 방향성 있는 링크로 연결하면 작업에 이용되는 경로를 표현할 수 있다. 이제 자동화된 프로그램이 이용하는 경로와 작업자가 수동 조작할 때 이용하는 경로가 다른 경우의 처리를 위해 전술한 위치 표현 방법을 확장한다. 그림 8에서 나타난 작업의 경우에는 두 개의 가능한 경로가 존재하고, 편의상 자동 프로그램은 아래쪽 경로를 이용하여 작업의 경유점을 설정하였다고 하자. 실제로 이용 가능한 경로가 위쪽에 또 있으므로 작업자는 위쪽 경로를 이용할 의도로 이동을 시작하였다. 만일 시스템이 인지하는 목표위치에 도달하기 전에 작업 모드가 수동에서 자동으로 바뀌었다면, 시스템은 거꾸로 돌아가 아래쪽 경로의 경유점으로 이동하는 부자연스런 이동을 하게 된다. 이러한 문제를 방지하기 위하여 하나의 작업에 대해 복수의 경로를 정의할 수 있는 체계를 만들고, 다음 이동할 목표 위치를 계산하기 위해 작업트리의 최종 작업에 대한 목표 위치에서부터 거꾸로 탐색해 나갈 때, 프로그램된 경로 상의 위치들뿐만 아니라 허용되는 다른 경로들도 함께 탐색하면, 사용자가 어떤 경로를 이용할 의도였는지를 알아내고 목표 위치를 향해 자연스럽게 이동할 수 있다.

이제까지 제시한 방법은 자동으로 동작하는 프로그램에서 필요로 하는 최소한의 정보보다 많은 것을 요구한다. 충돌회피 및 경로계획 기능이 없는 시스템의 한계를 극복하기 위한 방법이지만 자유공간이나 요구정밀도, 또한, 대체 가능한 추가적인 경로의 기하학적 정보를 입력한다는 것이 번거로울 수 있다. 그러나 여기에 활용되는 기하학적 정보

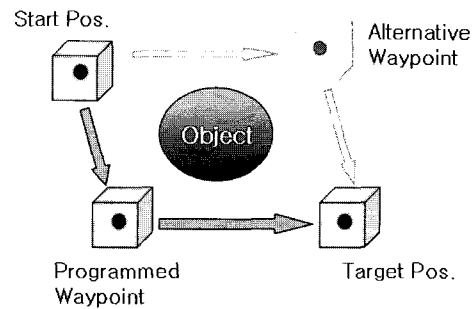


그림 8. 프로그램 된 경로(아래)와 대체가능 경로(위)의 표현.
 Fig. 8. Representation of a programmed path(below) and an alternative paths(above).

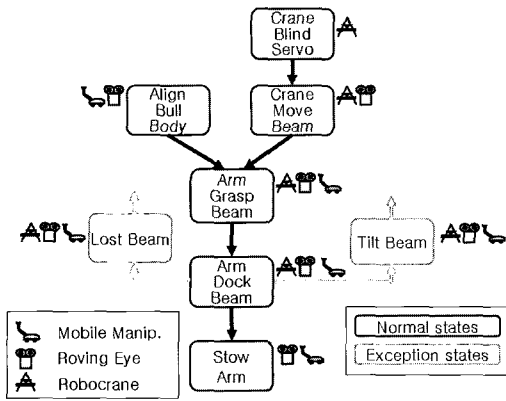


그림 9. 실행 가능한 작업 검색을 위한 빔 조립 작업 트리.
Fig. 9. Task tree for beam assembly task.

는 반드시 정확한 수치 값을 입력할 필요가 없고 자유 공간의 선언이 다른 목표위치의 정보와 겹치지 않도록 배타적으로 정의할 필요도 없다. 부가적인 정보가 적을수록 모드 전환 시 부자연스럽고 불필요한 이동이 동반될 가능성이 많으며 시스템의 주변의 정보를 더 정확히 입력할수록 더 융통성 있고 유연한 시스템을 구현하게 되는 것이다.

3. 작업 순서 변경의 유연성 향상

이 절에서는 인간 조작자가 자동 프로그램에서 이용하는 것과 다른 순서로 작업을 실행하고자 할 때, 허용 가능한 범위에서 순서의 변경에 대응하는 방법에 대하여 논한다. 완전 자동화된 프로그램에서는 미리 정한 순서에 따라 세부 작업을 실행하지만, 대부분의 경우 그 순서가 유일한 것은 아니다. 따라서 인간 조작자가 프로그램된 것과 다른 순서로 수동으로 작업을 하던 중 동작 모드가 자동으로 바뀌어도 시스템은 현재까지의 작업 내용을 반영하여 새로운 순서로 전체작업을 마칠 수 있어야 한다.

작업 순서의 변경은 시스템 내부에 전체 작업에 대한 작업 트리(task tree)를 표현하고, 모드가 자동으로 전환되거나 하나의 작업이 끝날 때마다 실행 가능한 작업을 탐색하여 실행시키는 구조를 이용한다. 실행 가능한 작업을 탐색하기 위하여 각 작업의 정의부에는 선결조건(precondition), 필요한 리소스, 작업 실행을 위한 세부 경유점 등의 정보가 포함된다. 또, 본 시스템이 분산 자율 시스템이므로 동시에 실행할 수 있는 여러 개의 세부 작업이 있다면 모두를 생성하여 실행할 수도 있다. 그림 9에는 빔의 첫째 끝을 조립하는 1단계 작업에 대한 작업 트리를 보인다. 각 작업 옆의 기호는 해당 작업이 필요로 하는 리소스, 즉, 로봇을 상징한다. 서로 다른 서브트리(sub-tree)에 존재하고 작업에 소요되는 로봇을 공유하지 않는 여러 개의 작업은 동시에 실행될 수 있다. 세 로봇의 상태를 이용하여 적절한 작업을 결정하는 상위 계층은 실제로 동작하는 세 대의 로봇 이외에 소프트웨어로만 존재하는 가상의 구성요소인 Leader Agent 상에서 구현하였다.

IV. 구현 결과

이 장에서는 설정된 목표 작업을 실행하기 위한 조정이

능 자율도 시스템을 구현하고 동작시킨 결과를 제시한다. 시스템에 포함된 여러 로봇들이 협력하기 위해서는 자신뿐만 아니라 다른 로봇의 계획계층 및 실행 계층에도 작업에 관련된 매개변수를 포함시켜 프로세스를 생성하거나 중지시킬 수 있어야 하는데, 이를 위해서는 Linux 상에서 계층 구조를 지원하는 Task Description Language[11]를 이용하였다. 계층 구조의 틀 안에서 그림 4에 표시한 것과 같이 모니터링과 실행을 위한 프로세스를 분리하였으며, 이들은 다시 수동으로 동작할 때와 자동으로 동작할 때로 분리되어 구현되었다.

조정기능 자율도 운전의 경우 자동에서 수동으로의 전환은 다음의 두 가지로 구분하여 구현하였다.

• 조작자가 주도한 모드 전환

자동 운전 중인 시스템을 조작자의 요청에 의하여 수동 모드로 전환한 경우인데, 로봇들이 자체적으로 회복하기 어려운 예러나 돌발상황이 발생했다고 판단하거나, 자율적으로도 실행할 수 있지만 수동으로 진행하면 시간이 단축된다고 판단한 경우 등을 포함한다. 시간 단축의 예를 하나 들면 다음과 같다. 빔 조립 작업의 경우 한쪽 빔을 고정 한 후 다른 쪽을 처리하기 위해 이동 매니플레이터가 자세를 바꾸는 과정에서 매니플레이터의 위치를 알려주는 역할을 하는 Roving Eye가 목표물을 놓치는 일이 많았다. 이 경우 상당한 시간이 지나면 탐색 알고리즘에 의해 목표물을 다시 찾게 되지만, 수동 모드로 전환하여 목표물을 카메라 앞에 위치시키도록 조작 한 후 자동으로 전환하면 효과적으로 작업 시간을 줄일 수 있었다.

• 시스템이 주도한 모드 전환

이 경우는 시스템이 조작자에게 직접 조작을 요청하는 경우인데, 같은 작업을 일정 회수 이상 반복적으로 실패할 경우 인간 작업자가 해당 작업을 성공시킬 수 있도록 조정 권한을 스스로 인계한다. 시스템이 모드 전환을 요청한 예는 다음과 같다. Bullwinkle이 전자석을 작동시켜 스틸 재질의 빔을 잡고 이를 지지대에 결합하기 위해 좁은 틈으로 빔을 유도하는 중 지지대의 돌출부에 걸리면 자력이 부족하여 빔을 놓치게 된다. 재시도 하여도 실패가 2회 반복되면 조작자에게 도움을 요청한다.

현재 수동에서 자동으로의 전환은 수동 조작하는 작업자의 판단에 의해서만 가능하도록 구현되었다. 이 경우, 다양한 상황에서 모드를 전환한 후 다음 작업이 자연스럽게 시작되는지 관측하였다. 그 결과 자동 프로그램이 사용하는 위치와 다른 위치에서 모드를 전환한 경우에도 제안된 위치 및 경로 표현 방법을 통해 부자연스럽게 프로그램된 위치로 되돌아가는 현상을 없앨 수 있음을 확인하였다. 그러나 유연성 확보를 위해 정의된 추가 영역을 벗어나 작업의 선형 조건이 만족되지 못할 정도로 멀어지면, 매치되는 작업이 없어 작업이 진행되지 못하는 경우가 있었다. 이때는 모드를 다시 수동으로 전환하여 저장된 위치 또는 경로에 가깝게 이동시켜 주면 무난히 진행하였다. 작업 순서 변경에 대응하는 것의 확인을 위해서는 그림 9 상단의 왼쪽 가지(branch)를 먼저 실행하도록 프로그램 한 후, 수동으로 오른쪽 가지를 먼저 실행하고 모드를 변경했을 때, 변경된 순

표 1. 완전 자동 운전과 조정가능 자율도 운전의 작업 성공률.
Table 1. Success rates of autonomous system vs. adjustable autonomy.

구분	완전 자동		조정가능 자율도	
	횟수	비율(%)	횟수	비율(%)
작업 성공	32	64	47	94
작업 실패	18	36	3	6
합계	50	100	50	100

서에 적용하여 왼쪽 가지가 실행됨을 확인하였다. 본 논문에서 제안한 방법들은 조정가능 자율도 시스템에서 모드 변경 시 결절없는 전환을 위한 것이기에 그 효과를 정량적으로 분석하기란 쉽지 않다. 다만, 능숙하지 않은 작업자들이 조작에 참여한 경우에도 자연스럽게 전환이 가능하였고, 더불어 자동화 수준의 한계를 극복하여 시스템의 성능을 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 표 1은 빔 조립작업을 완전한 자동방식으로 운전한 경우와 조정가능 자율도로 운전한 결과를 비교하여 보여 준다. 목표한 작업을 자동화 프로그램만을 이용하여 완전한 자동으로 50회 동작시킨 경우, 2장에서 설명한 자동화 수준의 한계로 인해 64%의 성공률을 보였다. 반면, 같은 작업을 서로 다른 숙련도를 갖는 4명의 작업자가 나누어 자율도 조정 운전으로 50회 실행한 결과, 인간 작업자가 적절한 순간에 참여함으로 인해 성공률이 94%까지 증가되었다. 작업 인원 및 횟수가 적어 작업자의 숙련도에 대한 영향은 분석하지 못했으나 작업자의 숙련도는 작업의 성패보다는 주로 실행시간에 영향을 주는 것으로 관측되었다.

V. 결론

본 논문에서는 자율도 조정이 가능한 자동화 시스템에서 자율도 설정이 바뀔 때 발생할 수 있는 오류나 부자연스런 동작을 최소화하는 문제를 다루었다. 우선 수동에서 자동으로 모드 전환 후 실행할 작업을 결정하기 위해서, 또, 좀더 유연한 조정 가능 자율도를 구현하기 위해서는 모니터링 프로세스와 실행 프로세스가 분리되어 구현되어야 함을 제시하고, 계층형 제어 구조를 기반으로 하여 두 기능이 분리된 제어 구조를 구현하였다. 또한, 인간 작업자와 자동화된 프로그램에서 선택한 위치정보, 경로정보 및 세부 작업의 순서가 다른 경우를 수용해야 하는 필요성과 그 방법을 제시하여 작업자가 불필요한 제약을 받지 않으면서 시스템의 구성 요소로 역할을 수행할 수 있게 하였다. 제안된 제어 구조를 크레인에 매달린 빔의 양쪽을 지지대에 조립하는 예제 시스템에 적용하여 각 로봇의 자동화 기술 수준이 높지 않더라도 인간의 참여를 통해 성능 향상을 이룰 수 있음을 검증하였다. 차후의 연구에서는 사용자 및 시스템의 동작성능에 대한 모델을 구축하여 최적의 동작 모드 및 모드 전환 시점을 결정하는 문제를 다루고자 한다.

참고문헌

[1] M. A. Goodrich, D. R. Olsen, J. W. Crandall, and T. J. Palmer, "Experiments in adjustable autonomy," *In*

Proceedings of the IJCAI Workshop on Autonomy, Delegation and Control: Interacting with Intelligent Agents, 2001.

[2] R. B. Gillespie, J. E. Colgate, and M. Peshkin, "A general framework for cobot control," *International Conference on Robotics and Automation*, 1999.

[3] W. Wannasuphprasit, P. Akella, M. Peshkin, and J. E. Colgate, "Cobots: A novel material handling technology," *International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, ASME 98-WA/MH-2, 1998.

[4] K. Goldberg and B. Chen, "Collaborative control of robot motion: Robustness to error," *In International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 655-660, 2001.

[5] T. Fong, N. Cabrol, C. Thorpe, and C. Baur, "A personal user interface for collaborative human-robot exploration," *In Proc. International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics, and Automation in Space*, June 2001.

[6] M. A. Goodrich, J. W. Crandall, and J. L. Stimpson, "Neglect tolerant teaming: Issues and dilemmas," *In proceedings of the AAAI Spring Symposium on Human Interaction with Autonomous Systems in Complex Environments*, 2003.

[7] P. Scerri, D. Pynadath, and M. Tambe, "Towards adjustable autonomy for the real world," *Journal of Artificial Intelligence Research*, vol. 17, 2003.

[8] J. Brookshire, S. Singh, and R. Simmons, "Preliminary results in sliding autonomy for assembly by coordinated teams," *In Proceedings of IROS*, 2004.

[9] R. Simmons, "Structured control for autonomous robots," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 10, no. 1, pp. 34-43, February 1994.

[10] R. Simmons, S. Singh, D. Hershberger, J. Ramos, and T. Smith, "First results in the coordination of heterogeneous robots for large-scale assembly," *In Proceedings of International Symposium on Experimental Robotics*, Hawaii, Dec. 2000.

[11] R. Simmons and D. Apfelbaum, "A task description language for robot control," *In Proc. Conference on Intelligent Robotics and Systems*, Vancouver Canada, October 1998.

조혜경

1987년 서울대학교 제어계측공학과 졸업. 1989년 동 대학원 석사. 1994년 동 대학원 박사. 1996년~현재 한성대학교 정보통신공학과 부교수. 관심분야는 Robot Control Architecture, Human-Robot Cooperation.

