

# 로봇 교시 기술의 연구 동향 및 주요 이슈

■이후만\*, 김중배, 김성훈  
(한국전자통신연구원(ETRI))

## I. 서론

최근 로봇 기술의 발전이 활발하게 이루어짐에 따라 로봇청소기와 같은 서비스 로봇이 개발되어 선풍적인 인기를 끌기 시작했다. 과거의 식기세척기나 세탁기 등이 사람이 해 오던 번거로운 작업을 대신함으로써 현재까지 우리 삶의 일부가 되어있는 것처럼 로봇 청소기 역시 진공 청소기를 대신하며 우리 삶의 일부가 될 수 있을 것으로 보인다. 그러나 이러한 기기들은 각각의 특별한 목적을 위해서 설계되었기 때문에 그에 맞는 작업만이 수행 가능하다는 한계에 머물러 있다.

기술이 발전할수록 미래의 소비자들은 하나의 지능화 된 기기를 통해 다양한 작업을 수행할 수 있기를 원할 것이다[1]. 따라서 앞으로 개발되는 로봇은 다양한 범주의 작업을 수행할 수 있는 능력이나 새로운 작업을 수행하기 위한 학습 능력을 지녀야 한다. 그리고 이러한 로봇을 효율적으로 활용하기 위해서는 사람이 로봇에게 명령을 전달하여 새로운 작업을 가르치거나 수행 가능한 기존의 작업을 활용할 수 있는 간단하고 직관적인 기술이 필요하다. 본 논문에서는 이러한 기술을 '로봇 교시' 기술이라고 통칭한다.

로봇 교시 시스템을 구축할 때에는 두 가지 관점에서 접근해야 한다. 첫째, 교시하는 사람의 입장에서 로봇에게 새로운 작업을 가르치거나 수행 가능한 기존의 작업을 활용하게 하는 방법은 무엇인지에 대한 문제가 있다. 둘째, 로봇의 입장에서 어

떻게 새로운 작업을 습득하거나 기존의 작업을 활용하는 법을 배우는가에 대한 문제이다. 본 논문에서는 다양한 로봇 교시 기술을 분석하고 해결해야 할 주요 이슈를 살펴봄으로써 두 관점의 문제를 함께 고찰한다.

본 논문은 최근의 로봇 교시 기술에 대한 연구를 포괄적으로 다루고 있다. 각각의 로봇 교시 기술에 대한 깊이 있는 연구가 진행된 적은 있지만[2,3], 다양한 로봇 교시 기술들에 대한 포괄적인 연구는 아직 이루어지지 않은 것으로 보인다. 지금까지 로봇 교시 영역의 연구가 어떻게 이루어져 왔는지 이해하고 이 분야를 연구하는 연구원들에게 통찰력을 제공하기 위해서는 로봇 교시 기술에 대한 포괄적인 동향 연구가 필요하다.

다음 II 장에서는 로봇 교시 시스템의 개략적인 개념과 로봇 교시 기술을 분석하기 위한 기준을 제시한다. III 장과 IV 장은 각 기준에 따라 분류된 교시 기술의 국내외 연구 동향 및 해결해야 할 주요 이슈를 소개한다. 마지막으로 결론에서는 이러한 국내외 로봇 교시 분야의 연구 동향을 고려하여 앞으로의 발전 방향에 대해 제안한다.

## II. 로봇 교시 기술의 개요

로봇 교시 시스템을 통해 다양한 작업의 수행을 교시하기 위해서는 로봇 프로그램을 유연성 있게 개발하는 것이 필연적이다. 이러한 로봇 프로그램의 유연성은 온라인/오프라인 프로그

래밍 방식에 관계 없이 이루어질 수 있다[4,5].

Pan 등은 로봇의 교시 기술을 온라인 프로그래밍과 오프라인 프로그래밍의 두 가지 범주로 나누어 분석하였다[6]. 과거에는 주로 산업용 로봇을 위한 교시 시스템을 생각했기 때문에 텍스트 기반의 오프라인 프로그래밍 교시 방법과 온라인의 유도(lead-through) 교시 방법이 교시 시스템의 주를 이루었다. 그러나 서비스 로봇의 발달과 함께 증강현실(AR, Augmented Reality)[7]과 같은 새로운 교시 기술이 등장하면서 온라인/오프라인 교시의 경계는 점점 모호해지고 있다. 로봇 교시 기술을 분류할 수 있는 새로운 기준이 필요한 시점이다.

로봇 교시 기술의 최근 연구 동향을 체계적으로 분석하기 위해 본 논문에서는 로봇 관점과 사용자 관점의 두 가지 기준을 통해 교시 기술을 분류한다. 로봇의 관점에서는 교시가 이루어지는 계층에 따라 교시 시스템의 적용 분야가 달라질 수 있고, 사용자의 관점에서는 교시 시스템의 사용을 위해 요구되는 전문성에 따라 사용 가능한 교시 시스템이 달라지기 때문이다. 여

기에서 전문성이란 로봇의 교시를 위한 프로그래밍 능력이나 로봇 자체에 대한 기반지식을 말한다.

그림 1은 교시가 이루어지는 계층에 준거하여 로봇 교시 기술을 분류하고 있다. 이 때, 로봇의 교시가 이루어지는 계층은 두 가지로 나누어 생각해 볼 수 있다. 하나는 교시 데이터를 “경로화(trjectory encoding)”하여 해석하는 경로 계층의 교시가 있고, 다른 하나는 교시 데이터를 “상징화(symbolic encoding)”하여 해석하는 태스크 계층의 교시가 있다. 전자는 주로 산업용 로봇에서 많이 쓰이는데 교시 내용을 교시 데이터와 모터 명령 간의 비선형적인 사상(mapping)으로 해석하는 것이고, 후자는 주로 서비스용 로봇의 연구에 많이 쓰이며 교시된 작업을 단위 행동-인자의 연속으로 나누어 해석하는 것을 말한다[8]. 기존의 산업용 로봇은 작업을 위한 정확한 위치, 즉 경로만을 교시하는 수준이었으나, 동적 환경에서 센서 정보에 대응하여 작업해야 하는 서비스 로봇과 같은 경우는 그보다 한 층 추상화된 태스크 계층에서의 명령을 통해 작업이 이루어지는 것이 보통이다. 그림 2는 이와 같은 교시 작업의 흐름을 개략적으로 보여주고 있다.

그림 3은 교시 시스템의 사용을 위해 요구되는 전문성에 따라 교시 기술을 재 분류 하여 사용자 입장과 로봇 입장에서의 2차원적 분류를 보여준다. 요구되는 전문성이 낮을수록 로봇 비전문가인 일반인도 사용하기 용이한 교시 기술인 반면, 요구되는

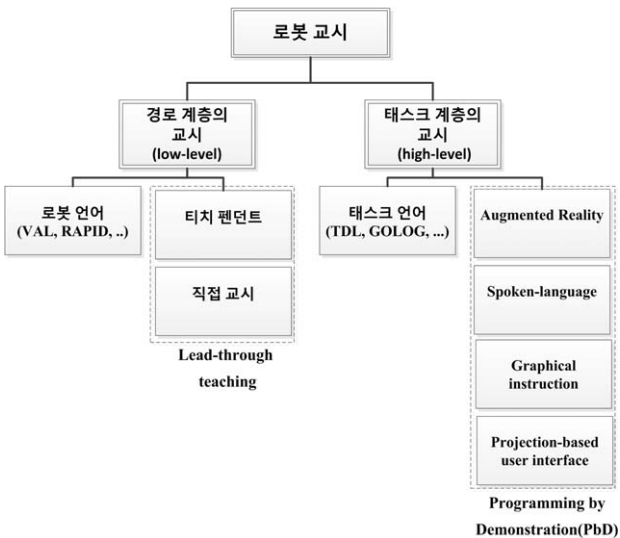


그림 1. 교시 계층에 따른 로봇 교시 기술의 분류.

경로 계층의 교시 (low-level)	로봇 언어 (VAL, RAPID, ..)	티치 펜던트	직접 교시
태스크 계층의 교시 (high-level)	태스크 언어 (TDL, GOLOG, ...)		PbD
사용자에게 요구되는 전문성 ← High                      Low →			

그림 3. 교시 계층 및 요구되는 전문성에 따른 로봇 교시 기술의 2차원적 분류.

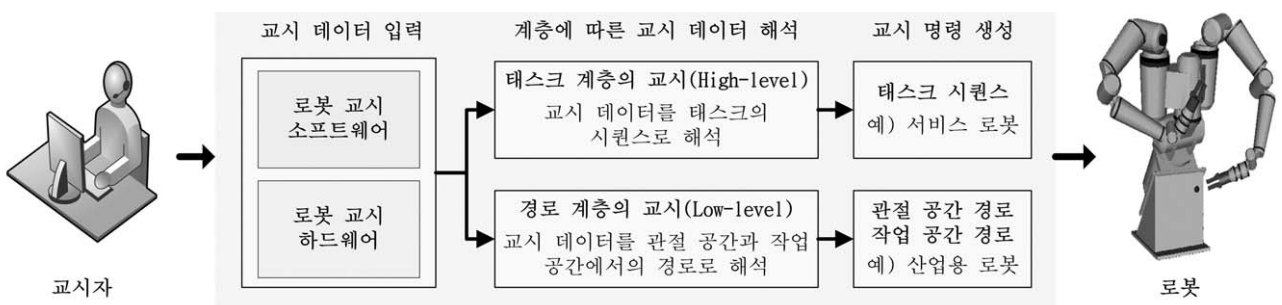


그림 2. 로봇 교시 작업의 흐름도.

전문성이 높다는 것은 보통의 일반인이 사용하기보다는 로봇 프로그래머와 같은 전문가에게 적합한 교시 기술이라는 것을 의미한다.

본 논문에서는 제안된 두 가지 기준을 바탕으로 교시 시스템을 체계적으로 분석한 후 해결해야 할 주요 이슈들에 대해 논의하여 교시 기술 분야의 연구가 앞으로 나아가야 할 방향성을 제시하고자 한다.

### Ⅲ. 전문성이 요구되는 교시 기술

로봇 비 전문가들이 로봇을 접할 기회가 많아지면서 로봇의 관리가 편리하고 쉬워지는 것은 필연적인 발전 방향이다. 그럼에도 불구하고, 현재 로봇 시장에서는 일일이 프로그래밍을 통해 로봇을 관리하는 것이 가장 확실하고 신뢰성이 보장되기 때문에 직접 프로그래밍하는 방법이 가장 널리 쓰이고 있다.

로봇 프로그래밍 시스템에 대한 깊이 있는 연구는 과거 Lozano-Perez에 의해 이루어진 적이 있다[9]. 그러나 Lozano-Perez의 연구 이후로 새로운 로봇 프로그래밍 언어가 개발되었고, 과거 산업용 로봇에만 국한되어 있던 로봇 프로그래밍의 적용 분야가 더 넓어짐에 따라 이를 위한 소프트웨어 플랫폼이 등장하기도 했다[10,11]. Lozano-Perez는 로봇 프로그래밍을 로봇의 제어가 이루어지는 계층에 따라 세 가지 범주로 나누었다.

이와는 다르게 본 논문에서는 로봇 프로그래밍을 통해 교시가 이루어지는 계층을 경로 계층과 태스크 계층의 두 가지로 나누어 분석하고자 한다.

#### 1. 경로 계층의 교시

##### 1.1 로봇 언어 프로그래밍을 통한 경로 계층의 교시

보통 로봇 프로그래밍 언어는 각 로봇 제어기의 기계언어에 맞도록 개발된다[12,13,14]. 이러한 로봇 언어는 로봇 프로그램의 프로시저를 제어하기 위한 간단한 신택스(syntax)와 명령어를 특징으로 한다. 로봇 언어를 사용하는 프로그래머는 기정의된 모션 제어 명령을 통해 로봇을 교시할 수 있다. 이러한 특징이 로봇 언어를 일반적인 C/C++ 등의 범용 언어와 구분 지을 수 있는 주요한 요소들이다.

로봇 언어를 통한 교시 프로그래밍은 교시 사용자에게 프로그래밍 능력뿐만 아니라 센서 기반의 로봇 모션 제어에 대한 전문성 또한 요구한다. 심지어 교시자가 두 방면에서 모두 뛰어나 해도 각각의 로봇 언어는 적용되는 로봇에 특화되어 있기 때문에 새로운 로봇의 교시 프로그래밍에는 적응을 위한 시간이 필요하게 된다. 로봇 언어는 일반적으로 특정 로봇과 적용 분야에 맞추어 개발되기 때문에 로봇의 수만큼이나 그 수가 많다고도 할 수 있다[15].

표준의 부재 속에서 URBI 언어가 로봇의 하위 계층을 제어하

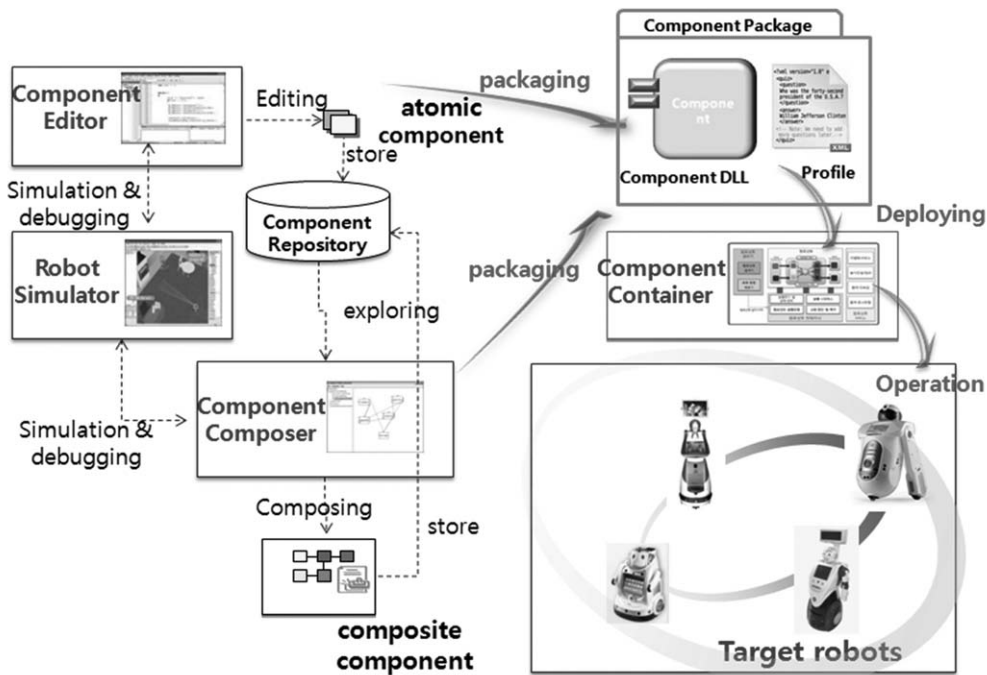


그림 4. 로봇 소프트웨어 플랫폼 OPRoS.

기 위한 표준으로서 제안되었다[10]. URBI는 클라이언트/서버 체계로 구성되었고, 적용되는 로봇이나 클라이언트 시스템에 독립적일 수 있도록 개발되었다. URBI는 모터나 센서의 값을 직접 읽거나 설정할 수 있는 하위 계층의 명령어를 제공한다. 명령 체계에 대한 직렬적/병렬적 처리가 모두 가능하기 때문에 복잡한 모터 교시 명령이 가능하다는 장점이 있다. 한편, URBI는 교시의 가용 범위를 높이기 위해 상태기계(state machine) 및 상위 계층의 기능들을 제공하기도 한다.

OPRoS[11]는 컴포넌트 기반의 소프트웨어 플랫폼으로서 역시 클라이언트/서버 체계를 지원한다. 로봇 컴포넌트는 재사용이 가능하고 치환이 가능한 소프트웨어 모듈로서 정해진 인터페이스를 통해 접근 가능하도록 개발되었다. OPRoS 플랫폼에서는 컴포넌트 모델, 컴포넌트 저작도구, 그리고 컴포넌트 실행 엔진을 제공한다[16].

그림 4는 제공되는 도구들을 활용하여 단위(atomic) 컴포넌트와 여러 개의 단위(atomic) 컴포넌트로 이루어진 컴포지트(composite) 컴포넌트를 개발하고 로봇 교시에 적용시키기까지의 개념도를 보여준다. OPRoS는 로봇 교시에 활용할 수 있는 시뮬레이터와 함께 기 정의된 80여가지의 센서 및 모터 디바이스 컴포넌트나 자율 주행, 매니퓰레이터 제어 등을 포함한 알고리즘 컴포넌트를 제공한다.

## 2. 태스크 계층의 교시

### 2.1 로봇 태스크 언어를 통한 교시

보통 태스크 계층에서의 프로그래밍은 어떤 작업을 수행하기 위해 구성되는 상위 명령어들의 연속으로 이루어진다. 이 교시 방식을 사용하는 교시자는 로봇의 기하학이나 운동학에 따른 위치나 경로 등을 구체적으로 교시할 필요가 없다.

태스크 계층의 프로그래밍에서 태스크들은 오로지 그들의 상태(state)나 행동(action)으로 정의(specification)된다. 따라서 태스크 계층에서의 교시는 교시 대상 로봇에 독립적으로 이루어진다. 이러한 태스크 계층의 구체화는 태스크 플래너[17,18]를 통해 모터 계층의 명령어로 변환시킬 수 있다. 단, 이를 위해서는 로봇이나 사물, 작업 공간, 초기 상태와 목표하는 최종 상태에 대한 정의(description)가 필요하다.

R. Simmons와 D. Apfelbaum은 태스크 계층의 로봇 제어를 위한 언어로서 TDL을 제안했다[19]. TDL은 태스크의 분리(decomposition) 및 동기화(synchronization), 실행 모니터링(execution monitoring)과 예외 처리(exception handling) 등의 기능을 지원한다. R Simmons 등은 제안된 언어의 성능을 검증하기

위해 모바일 로봇에 그 언어를 적용하였다[20]. 이를 통해 계층화 된 태스크 구조가 단순히 여러 컴포넌트를 결합하는 것 보다 신뢰성을 갖는다는 것이 입증되었다. 상위 계층의 태스크들을 통해 로봇을 예러가 발생할 만한 상황으로부터 멀어지도록 지속적으로 제어하고 하위 계층의 태스크들은 상위 계층에서 단순화된 문제들을 다룰 수 있도록 함으로써 효율적인 작업의 수행을 보였다.

G. De Giacomo 등은 주변 상황을 인지하고 작업 계획을 수행할 수 있는 언어로서 IndiGOLOG을 제안했다[21]. Indi-GOLOG은 온라인 플래닝(on-line planning)과 동적 환경에서의 계획수행(plan execution)을 지원한다. W. Burgard 등은 IndiGOLOG의 이전 버전인 GOLOG을 통해 박물관 안내 로봇을 시연했다[22]. 본래 GOLOG은 프로그래밍과 플래닝의 통합을 통해 상위 계층의 교시를 위한 프레임워크로서 제안되었었다. 그러나 GOLOG은 예측 불가능한 상황이나 동적인 환경에서 로봇을 제어하기 위한 방법을 갖추지 못했다는 단점을 지니고 있었다[23].

### 3. 프로그래밍을 통한 교시 방법에서의 주요 이슈

프로그래밍 능력이 요구되는 교시 방법에는 두 가지 해결 과제가 있다. 첫째, 로봇 프로그래밍 기술이 점차적으로 발달하고 있지만 다양한 로봇이나 적용분야에 독립적으로 적용할 수 있는 표준화 된 프로그래밍 시스템이 없다는 중요한 문제가 있다. 따라서 로봇과 프로그래밍 시스템의 이러한 부조화를 줄이기 위해서 표준화 된 인터페이스가 정의되고 개발되어야 할 것이다.

둘째, 교시 프로그래밍 시스템은 사용자의 프로그래밍 부담을 덜어줄 수 있는 방향으로 개발이 되어야 할 것이다. 직접 프로그래밍을 통해 교시하는 방법이 신뢰성이 보장되기는 하지만, 교시하는 사람이 전문 프로그래머가 아닐 경우 직접 프로그램을 짜는 일은 매우 어려운 작업이다. 게다가 보통 로봇을 활용하는 현장에서 교시를 하게 되는 사람은 수행하고자 하는 작업에 대해서는 대략적으로 알고 있을 뿐, 로봇을 다루기 위해 필요한 프로그래밍 능력은 갖추지 못한 일반인일 경우가 많다.

특히 경로 계층의 프로그래밍에는 많은 시간이 소모되기 때문에 로봇을 관리하는 비용이 로봇 자체의 비용에 견줄 수 있게 된다. 이러한 경향은 컴퓨터 하드웨어 자체의 가격에 대비하여 소프트웨어 개발 비용이 증가하는 최근의 경향에서도 살펴볼 수 있다.

태스크 계층에서의 교시는 모터 계층에서 명시적으로 프로그래밍하는 것에 비해 상대적으로 간단하고 직관적이지만, 로

봇 교시 시스템의 자동화가 이루어지기 위해서는 이러한 태스크 계층의 프로그램 역시 교시 시스템을 통해 자동으로 생성될 수 있어야 할 것이다.

#### Ⅳ. 로봇 비-전문가에게 적합한 교시 기술

로봇이 점점 우리 삶의 일부분이 되어갈수록, 프로그래밍 전문성이 부족한 일반 작업자도 로봇에게 작업 명령을 전달할 수 있는 쉽고도 직관적인 기술의 개발은 필연적이다. 직접 로봇 프로그램을 작성하지 않아도 되는 교시 방법은 전문가가 아닌 일반 작업자에게 로봇을 제어할 수 있는 직관적인 매개체를 제공한다는 면에서 최근 많은 관심을 끌고 있다.

##### 1. 경로 계층의 교시

프로그래밍 전문성을 요구하지 않는 교시 방법 중 모터 계층

에서의 교시는 보통 티치 펜던트 방식이나 직접 교시 방식을 통해 이루어진다. 본 논문에서는 이러한 교시 방법을 ‘유도(lead-through)’ 교시라고 칭한다.

이 교시 방법을 사용하는 교시자는 로봇을 직접 손으로 이끌거나 보조 장비를 활용하여 작업을 수행하기 위한 로봇의 움직임을 유도하는데, 이 과정에서 교시자는 로봇을 바라보며 로봇과 직접적인 연결을 통해 로봇을 움직일 수 있다. 이 때 로봇의 움직임에 따른 관절 값이 로봇의 제어기에 저장되고 로봇 프로그램을 통해 저장된 관절 값에 따라 로봇이 움직이도록 명령하는 것이다.

##### 1.1 티치 펜던트 (teach pendant)

티치 펜던트는 공장 자동화(Factory Automation) 산업의 발달로 산업용 로봇이 쓰이게 되면서 개발되었다. 과거에는 공장에서 사람이 직접적으로 로봇을 움직이기 위해 로봇 가까이에서



그림 5. 티치 펜던트의 개념도.

작업을 했기 때문에 위험에 노출될 수밖에 없었다. 이에 따라 작업자의 안전을 보장하기 위해서 티치 펜던트라는 로봇에 명령을 내리기 위한 휴대 단말기가 개발된 것이다.

그림 5는 티치 펜던트의 개념도를 보여준다. 티치 펜던트의 주요 기능은 로봇의 각 관절 축을 움직이거나 끝 단(end-effector)의 위치를 지정해 줌으로써 로봇을 움직이는 것이다. 교시자는 티치 펜던트를 사용하여 단계별로 각 작업에 필요한 로봇의 움직임을 로봇 제어기에 저장할 수 있고, 이 값은 실 작업을 위해 재사용된다.

티치 펜던트는 로봇 프로그램을 직접 작성하기 위한 인터페이스를 제공되기도 하지만 실제 작업 현장에는 전문 프로그래머가 상주하고 있지 않기 때문에 주로 로봇의 위치만을 교시하기 위해 사용된다. 이를 위해 대부분의 로봇 판매업체에서는 작업에 적합한 로봇 프로그램을 작성하여 로봇 제어기에 저장해 두고 현장 작업자로 하여금 티치 펜던트를 통해 각 변수에 알맞은 위치만을 교시할 수 있도록 돕는다.

Min-jae Oh 등은 PDA (Personal Data Assistant) 장비를 이용한 무선 티치 펜던트를 개발했다[24]. PDA와 로봇의 제어기는 무선랜(wireless LAN)을 통해 서로 메시지를 주고받도록 개발되었다. 무선 티치 펜던트를 사용했을 때의 가장 큰 장점은 교시자가 로봇의 작업 환경에서 멀리 떨어져 있음으로 안전을 보장받을 수 있다는 점이다.

H. Fukui 등은 다양한 응용에 적용할 수 있도록 표준화 된 티치 펜던트의 개발에 대해 연구했다[25]. 저자는 표준화 된 펜던트의 개발을 위해 다양한 티치 펜던트들을 조사하고 분류하였다. H. Fukui 등 역시 티치 펜던트가 무선으로 개발되었을 때 안전성이나 활용도 면에서 효율적이라는 것을 강조했다.

오프라인 프로그래밍 방식에 비해, 펜던트를 이용한 로봇의 교시는 PC를 따로 필요로 하지 않으며 따라서 비용적인 측면에서 절감효과를 가져올 수 있다. 그럼에도 불구하고 펜던트를 이용한 교시 방법은 작업 수행의 성공을 위해 수많은 시도와 오류(trial-and-errors)를 거쳐야 할 경우가 많기 때문에 교시하는 데 시간이 많이 소모되는 작업으로 평가할 수 있다.

### 1.2 직접 교시 (kinesthetic teaching)

직접 교시 방법은 로봇이나 프로그래밍에 대한 경험이 전혀 없는 사람도 로봇을 교시할 수 있는 인간-로봇 상호작용 기술이다. 직접교시가 진행되는 동안 교시자는 로봇을 직접 잡거나 부착형 교시 핸들을 잡고 작업을 수행하기 위한 로봇의 움직임을 교시할 수 있다. 교시자가 직접교시를 하는 동안 각 관절 각과

속도가 로봇의 제어기에 저장되고 작업을 수행할 때 사용된다. 직접교시 방법의 가장 큰 장점은 로봇 프로그래밍이 쉬워진다는 점인데 이 덕분에 로봇 비전문가인 현장 작업자도 쉽게 로봇을 교시할 수 있다.

직접교시는 주로 로봇의 끝 단(end-effector)을 붙잡고 이루어지기 때문에 교시 신호와 붙잡은 힘의 신호를 구분해 내는 것이 중요하다. 이를 위해 Park D.I. 등은 힘-토크 센서 신호를 적절한 교시 신호로 변환하는 신호처리 방법을 제안했다[26]. 저자는 이 기술을 바탕으로 직접교시를 위해 최적화 된 고강성 경량형 로봇을 설계하였다[27].

Qi.L 등은 로봇을 교시하기 위한 6 자유도의 장비를 제안하였다[28]. 제안된 장비는 물체의 움직임을 3자유도의 직교움직임과 3자유도의 회전움직임으로 측정할 수 있도록 설계되었다. 이 장비를 로봇의 끝 단에 부착함으로써 교시자가 의도하는 대로 로봇을 이끄는 것이 가능하다. 하지만 이 방법은 정확도가 높지 않기 때문에 높은 정확도를 요구하는 작업을 교시하기에는 적합하지 않다고 판단된다.

직접교시 방법을 이용하게 되면 로봇에게 단일 작업만을 교시할 수 있고 이 때 로봇의 제어기에는 분기 구문이나 조건문 등의 연산이 포함되지 않는다. 직접교시 방법은 센서 정보를 활용함에 있어 중대한 한계를 가지고 있기 때문에 이 방법은 간단한 반복 작업에 적합하다고 할 수 있다. 그보다 높은 수준의 작업을 수행하기 위해서는 교시자가 센서 정보나 연산에 직접 대응하여 로봇을 조작해야 할 것이다.

### 2. 유도(lead-through) 교시 방법에서의 주요 이슈

유도 교시 방법이 간단하면서도 이미 상용화된 기술임에도 불구하고 이 방법에는 몇 가지 해결해야 할 부분들이 있다. 첫째, 로봇을 직접 움직이기 때문에 원하는 대로 정확하게 유도하는 것은 대체로 번거롭고 시간을 많이 소모하는 일이라는 점이다. 이러한 문제점은 교시하고자 하는 작업의 내용이 복잡할수록 더욱 강조된다.

둘째, 유도(Lead-through) 방식을 통해 생성된 로봇 제어 프로그램은 유연성이 떨어진다는 점이다. 센서 정보에 대응하여 변화하도록 개발되지 않았기 때문에 교시하고자 하는 작업에 아주 조금의 차이만 발생하더라도 번거로운 교시 작업을 반복해야 한다.

셋째, 유도 교시 방법은 온라인으로 이루어지기 때문에 교시가 진행되는 동안 로봇이 작업에 투입되지 못한다는 단점이 있다.

넷째, 로봇을 생산하는 여러 업체마다 제작하는 로봇과 적용하고자 하는 응용에 따라 각각의 티치 펜던트를 제작하기 때문에 수많은 티치 펜던트가 존재한다. 이러한 표준의 부재는 앞서 소개된 직접 프로그래밍 교시뿐만 아니라 유도(lead through) 교시에서도 해결해야 할 중요한 이슈 중에 하나일 것이다.

### 3. 태스크 계층의 교시

#### 3.1 시범을 통한 교시(Programming by demonstration, PbD)

이 방법을 사용해 교시하는 사람은 직접 프로그램을 작성하는 대신에 로봇에게 작업에 대한 시범을 보임으로써 작업을 교시한다. 그림 6은 시범을 통한 교시 작업의 흐름을 개략적으로 보여주고 있다. 교시자는 로봇 교시용 하드웨어를 통해 교시 데이터를 입력하고 그 결과물로서 연속적인 교시 데이터가 생성된다. 이 교시 데이터는 불연속적인 태스크의 추출을 통해 태스크 계층에서 해석되고, 로봇 제어기에 기 정의되어 있는 API와

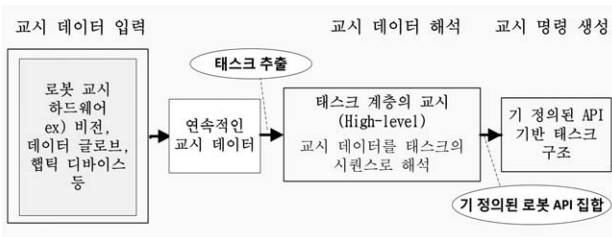


그림 6. 시범을 통한 교시의 흐름도.

의 사상(mapping)을 기반으로 태스크 계층의 교시 명령을 생성한다.

과거에는 시범을 통한 교시 역시 단순히 위치나 방위, 그리퍼와 같은 작업 툴의 상태 등을 저장했다가 되풀이 하는 방식으로 이루어졌다. 그러나 최근의 연구 동향은 이러한 PbD 시스템에 지능을 부여하면서 로봇이 단순한 반복 보다는 다양한 경우에 대해 유연하게 대처할 수 있도록 교시하는 방법에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

PbD를 통한 교시 방법은 교시자의 시범에 대해 ‘무엇을 모방할 것인가’ 와 ‘어떻게 모방할 것인가’ 의 두 가지 문제로 나누어 생각할 수 있다. 본 논문에서는 ‘무엇을 모방할 것인가’ 의 문제는 교시하는 사람의 관점에서, ‘어떻게 모방할 것인가’ 의 문제는 로봇의 관점에서 접근하고 있다.

첫째, 교시자의 관점에서는 교시 데이터를 전달하기 위한 인터페이스가 중요해진다. 티치 펜던트와 같은 전통적인 교시 인터페이스는 점차 비전[29,30,31], 데이터 글로브[32,33], 햅틱 디바이스[34,35], 증강현실[36], 음성인식[37], 도식화[38], 프로젝터[39] 등의 사용자 친화적인 교시 인터페이스로 대체되고 있는 추세다.

둘째, 로봇의 관점에서 로봇은 교시 내용을 충분히 이해하고 모방할 수 있을 정도로 지능을 가지고 있어야 한다. 이에 관한 연구는 기계 학습(machine learning) 알고리즘이 발달함에 따라 더욱 관심을 받고 있는 영역이다.

S. Liu와 H. Asada는 디버링(deburring) 로봇을 교시하기 위해

표 1. 여러 교시 기술의 교시 방법과 개발 예 및 주요 해결 과제.

분류	교시 계층	교시 방법	개발 예	주요 해결 과제
티치 펜던트	경로 계층	조그 다이얼을 통해 각 관절 축을 움직이거나 끝단의 위치를 지정	 Minjae Oh [23] H. Fukui [24]	로봇을 원하는 대로 정확하게 유도하는 데 시간이 많이 걸림
직접 교시	경로 계층	로봇을 직접 잡거나 부착형 교시 핸들을 잡고 로봇을 움직임	 Park D.I. [25,26] Qi. L [27]	적용 작업의 유연성이 떨어짐
로봇 레벨 언어	경로 계층	경로 계층의 로봇 제어 프로그램을 작성	 KUKA [9] VAL [10] ABB [11]	표준 언어의 부재
태스크 레벨 언어	태스크 계층	태스크 계층의 로봇 제어 프로그램을 작성	 TDL [18] IndiGOLOG [20]	표준 언어의 부재
PbD	태스크 계층	교시 데이터를 입력 받는 센서를 통해 로봇에게 작업에 대한 시범을 보임	 Vision-based [28-30] Data glove [31,32] Haptics [33,34] AR [35]	교시 시스템 자체의 개발이 어려우며 교시 데이터 입력 받는 센서에 성능 의존도가 높음

신경망(neural network) 이론을 적용하여 적응 제어가 가능하다는 것을 실험적으로 검증했다[40]. Kyoto 등은 물체의 파지를 교시하는 데 신경망 이론을 활용하여 파지 위치를 계산하였다[41]. 저자는 데이터 글러브를 통해 수집된 센서 값에 신경망 이론을 적용하여 교시자의 손 모양 역시 계산할 수 있었다.

Rainer Palm과 Boyko Iliev 등은 시간에 따른 퍼지 클러스터링(fuzzy time clustering) 기법을 기반으로 시범을 통한 교시를 수행하였다[42]. 제안된 방법은 시간에 연속적인 작업과 불연속적인 작업 모두에서 훌륭한 정확도를 보였다.

Sylvain Calinon 등은 로봇의 행동을 선형 시스템의 조합으로 표현하기 위해 가중치 메커니즘을 갖는 학습 알고리즘에 대해 연구했다[43]. 다양한 가중치의 적용에 대해 포괄적으로 적용할 수 있도록 공식화하기 위해 히든 마코프 모델이 사용되었다.

교시 시스템의 구성에 있어 교시하는 사람의 능동적인 참여가 강조되어야 한다는 견해도 있다. PbD를 연구하는 분야에서는 이를 “스캐폴딩 문제(scaffolding issue)” 라고 부른다.

Breazeal 등은 교시자와 로봇이 사회적인 관계를 형성함으로써 계층적인 구조로 이루어진 태스크 레벨에서의 교시의 성능을 한 층 향상시킬 수 있다는 것을 보였다[44]. Calinon과 Billard는 이처럼 로봇에게 사회적 가이드를 제공하는 교시 방식을 모터 계층에서의 교시에 적용함으로써 스캐폴딩의 개념을 모터 계층에까지 확장시켰다. 이들은 교시하는 사람의 능동적인 참여가 로봇의 학습 시스템 자체만큼이나 중요하다는 것을 강조했다[45].

#### 4. 시범을 통한 교시 방법에서의 주요 이슈

시범을 통한 교시 시스템의 개발에도 몇 가지 이슈가 있다. 첫째, 시범을 통한 교시 시스템의 교시자는 직접 로봇의 프로그램을 작성하지 않아도 되는데 반해 교시 시스템의 개발자는 프로그래밍과 로보틱스 이론에 모두 전문성을 갖추고 있어야 한다. 교시 시스템의 개발자는 로봇을 제어하기 위한 하위 계층의 제어 API를 개발해야 하고 교시자의 교시 데이터와 제어 API 사이의 사상(mapping) 알고리즘 또한 개발해야 한다. 이러한 알고리즘은 단순히 모터 값을 저장했다가 반복하여 실행하는 것과는 달리 훨씬 복잡하다. 따라서 이러한 교시 시스템의 성능은 시스템 개발자의 능력에 의존한다고 볼 수 있다.

둘째, 시범을 통한 교시 시스템의 성능은 교시 데이터를 입력받기 위해 사용되는 센서의 성능에 의존한다. 센서 데이터의 신뢰성은 결국 교시 데이터의 신뢰성을 결정하고 이는 곧 전체 교시 시스템의 신뢰성을 의미하기 때문이다. 그러나 센서의 성능

은 그 가격과 밀접한 연관이 있기 때문에 무조건 고성능의 센서를 사용할 수는 없으므로 저비용 고효율의 센서를 개발하는 것이 요구된다.

## V. 결론

본 논문에서는 다양한 로봇 교시 기술에 대해 교시자의 관점에서 요구되는 전문성과 로봇의 관점에서 교시가 이루어지는 계층을 기준으로 2차원으로 분류하여 분석하였다. 분류가 이루어진 각 교시 기술에 대한 특징 및 개발 사례를 분석하고 해결해야 할 주요 이슈를 제안함으로써 교시 시스템을 구성하기 위한 두 가지 관점에서의 문제를 함께 고찰하고 있다.

로봇 교시 기술을 개발하는 연구원들은 적절한 교시 시스템을 선택하기 위해 참고할 수 있는 가이드라인이 없다는 사실에 어려움을 겪어왔다. 본 논문에서는 다양한 로봇 교시 기술에 대한 최근의 연구 동향을 살피고 이를 분석함으로써 그러한 가이드를 제공하는데 일조하고자 한다. 표 1은 본 논문에서 분석된 로봇 교시 기술의 교시 계층 및 교시 방법 및 개발 예, 그리고 각 교시 기술이 가지고 있는 해결문제 등을 나타낸다.

로봇 교시 시스템은 텍스트 기반(text-based) 프로그래밍 시스템으로부터 터치 펜던트를 이용한 교시로 발전해왔고, 최근에는 시범을 통한 교시 혹은 더욱 지능적인 시스템에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 본 연구를 통해 확인된 로봇 교시 기술의 발전 방향은 크게 두 가지로 볼 수 있다. 첫째, 교시 시스템의 발전 방향이 교시자의 부담을 덜어주면서 더욱 직관적인 교시 시스템을 제공하고자 하는데 있다. 둘째, 교시를 받아들이는 로봇뿐만 아니라 교시하는 교시자의 역할이 점차 강조되고 있다는 점이다.

로봇 기술의 발전으로 로봇이 인간 삶의 일부가 되는 과정에서 인간과 로봇이 소통할 수 있는 수단인 교시 시스템의 중요성이 강조되고 있다. 다가올 로봇 사회를 위해 선도적인 교시 시

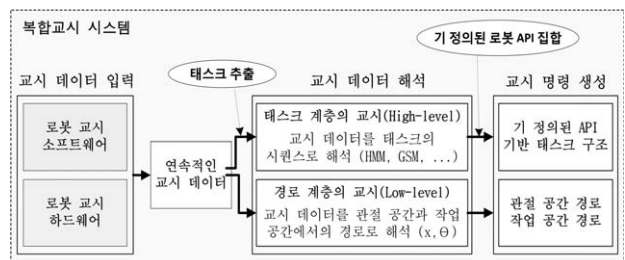


그림 7. 복합 교시의 흐름도.



시스템의 개발에 요구되는 사항은 다음과 같다.

- 로봇 비 전문가도 쉽게 교시할 수 있도록 교시자의 프로그래밍 부담을 덜어줄 수 있어야 한다.
- 교시하고자 하는 작업의 성격에 적합한 교시 계층(경로/태스크)을 제공해야 한다.
- 교시자의 능동적 참여를 통해 로봇의 학습 효율이 높아질 수 있는 교시 시스템을 개발해야 한다.

끝으로 본 논문에서는 기존의 다양한 로봇 교시 시스템에 대한 분석을 바탕으로 복합 교시(composite teaching) 시스템을 제안하고자 한다. 복합 교시 시스템이란 경로 계층의 교시와 태스크 계층의 교시가 모두 가능한 교시 시스템을 말한다. 경로 계층의 교시는 모터의 경로를 직접 교시하며 정확도를 요구하는 산업용 로봇에서 가장 많이 쓰이는 방식이지만 한번 교시한 작업에 대해서는 조금의 차이에도 대응할 수 없다는 단점이 있다. 반면 태스크 계층의 교시는 센서 값에 대응하며 적응 제어가 가능하다는 장점이 있지만 높은 정확도를 요구하는 작업에는 적합하지 않다는 단점이 있다. 복합 교시 시스템은 두 계층의 교시를 모두 가능하도록 함으로써 각각이 갖는 단점을 보완하고 로봇의 사용 목적에 적합한 교시 방법을 선택할 수 있도록 하는 교시 시스템이다. 그림 7은 본 논문에서 제안하는 복합 교시 시스템의 개념을 나타낸다.

로봇이 우리 삶의 일부가 되어갈수록 과거 산업용 로봇에 국한되어 있던 로봇 교시 기술의 적용 분야는 이제 서비스 로봇으로 그 영역을 넓혀갈 것이다. 산업용 로봇은 정해진 작업을 반복 수행하기 때문에 티치 펜던트를 이용한 경로 계층의 교시만으로 충분히 작업을 수행할 수 있었다. 그러나 서비스 로봇은 동적 환경에서 센서에 대응하며 작업을 수행할 필요가 있기 때문에 태스크 계층에서의 교시가 불가피하다. 따라서 향후 개발될 교시 시스템이 다양한 목적의 로봇에 적용 가능하기 위해서는 경로 및 태스크 계층의 교시가 모두 가능한 복합교시의 형태를 갖도록 개발되어야 할 것이다.

### 참고문헌

- [1] 한상철, "스마트서비스를 위한 지능형 서비스 로봇의 이해와 발전 방향," 한국컴퓨터정보학회지, 제18권 제2호, pp.1-14, 2010.
- [2] A. Billard, B. D. Argall, S. Chernova, M. Veloso, B. Browning, "A survey of robot learning from demonstration," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 57, Sissue 5, pp.469-483, 2009.
- [3] B. D. Argall and A. G. Billard, "A survey of Tactile Human-Robot Interactions," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 58, no.10, pp.1159-1176, 2010.
- [4] M. P. Deisenroth, and K. K. Krishnan, "On-line programming," *Handbook of Industrial Robotics*, 2nd Ed, chapter 18, Wiley, United States, 1999.
- [5] Y. F. Yong and M. C. Bonney, "Off-line programming," *Handbook of Industrial Robotics*, 2nd Ed, chapter 19, Wiley, United States, 1999.
- [6] Z. Pan, J. Polden, N. Larkin, S. Van Duin, J. Norrish, "Recent progress on programming methods for industrial robots," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 28, no. 2, pp. 87-94, 2012.
- [7] C. L. Ng, T. C. Ng, T. A. N. Nguyen, G. Yang, W. Chen, "Intuitive robot tool path teaching using laser and camera in augmented reality environment," *Proc. of the 11th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision*, Singapore, pp. 114-119, Dec. 2010.
- [8] A. Billard, S. Calinon, "Robot programming by demonstration," *Handbook of Robotics*, chapter 59, Springer, United States, 2008.
- [9] T. Lozano-Perez, "Robot programming," *Proc. of the IEEE*, vol. 71, ISSUE 7, pp. 821-841, 1983.
- [10] J.C. Baillie, "URBI: Towards a universal robotic body interface," *Proc. of the 4th International Conference on Humanoids Robotics*, pp.33-51, Nov. 2004
- [11] B.Y. Song, S.W. Jung, C.S. Jang, and S.H. Kim, "An introduction to robot component model for OPRoS," *Proc. of the International Conference on Simulation, Modeling and Programming for Autonomous Robots*, Venice, Italy, pp. 592-603, Nov. 2008.
- [12] KUKA Roboter GmbH, "SOFTWARE KR C2 / KR C3 Expert Programming," *KUKA System Software(KSS)*, Release 5.2, Issued 26, Sep. 2003.
- [13] J. R. McGRAW, "The VAL Language: Description and Analysis," *ACM Transactions on Programming Languages and Systems*, vol. 4, issue. 1, pp.44-82, Jan. 1982.
- [14] ABB Flexible Automation, "RAPID User's Guide," Vasteras, Sweden, Art. No. 3HAB 0002-24, 1995.
- [15] S. Bonner and K. G. Shin, "A comparative study of robot languages," *Computer*, vol. 15, no. 12, pp. 82-96, 1982.
- [16] C.S. Jang, S.I. Lee, S.W. Jung, B.Y. Song, R.W. Kim, S.H. Kim, and C.H. Lee, "OPRoS: A New Component-Based Robot

- Software Platform," *ETRI Journal*, vol. 32, no. 5, Oct. 2010.
- [17] T. Lozano-Perez, *Handey: A Robot Task Planner*, MIT Press, USA, 1992.
- [18] S. Cambin, F. Gravot, and R. Alami, "A robot task planner that merges symbolic and geometric reasoning," *Proc. of the European Conference on Artificial Intelligence*, 2004.
- [19] R. Simmons and D. Apfelbaum, "A task description language for robot control," *Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1931-1937, Oct. 1998.
- [20] R. Simmons, R. Goodwin, K. Zita Haigh, S. Koenig and J. O' Sullivan, "A layered architecture for office delivery robots," *Proc. of the Autonomous Agents*, pp. 245-252, Marina del Rey, CA, Feb. 1997.
- [21] G. De Giacomo, Y. Lesperance, H. J. Levesque and S. Sardina, "IndiGolog: A high-level programming language for embedded reasoning agents," *Multi-Agent Programming*, chapter 2, A. El Fallah Seghrouchni, J. Dix, M. Dastani and R. H. Bordini, Springer. 2009.
- [22] W. Burgard, A. B. Cremers, D. Fox, D. Hahnel, G. Lakemeyer, D. Schulz, W. Steiner, and S. Thrun, "Experiences with an interactive museum tour-guide robot," *Artificial Intelligence*, vol. 114, no. 1-2 : pp. 3-55, 1999.
- [23] H. J. Levesque, R. Reiter, Y. Lesperance, F. Lin, R. Scherl, "GOLOG: A logic programming language for dynamic domains," *Journal of Logic Programming*, vol. 31, no. 1-3, pp. 59-83, 1997.
- [24] Deisenroth, Oh, M. j., S. M. Lee, et al. "Design of a teaching pendant program for a mobile shipbuilding welding robot using a PDA," *CAD Computer Aided Design*, vol. 42, no. 3, pp. 173-182, 2010.
- [25] H. Fukui, S. Yonejima, M. Yamano, M. Dohi, M. Yamada, T. Nishiki, "Development of teaching pendant optimized for robot application," *2009 IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts*, pp. 72-77, 2009.
- [26] Park, D. I., C. Park, et al. "Signal processing of direct teaching data for human-robot cooperation," *Proc. of the 2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, pp. 1956-1960, 2010.
- [27] Park, D. I., C. Park, et al. "Design and analysis of direct teaching robot for human-robot cooperation," *Proc. of the 2009 IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing*, pp. 220-224, 2009.
- [28] L. Qi, D. Zhang, et al. "A lead-through robot programming approach using a 6-DOF wire-based motion tracking device," *Proc. of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, pp. 1773-1777, 2009.
- [29] P. Malheiros, P. Costa, A. P. Moreira, and M. Ferreira, "Robust and realtime teaching of industrial robots for mass customisation manufacturing using stereoscopic vision," *Proc. of the Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 2336-2341, 2009.
- [30] B. Solvang, G. Sziebig, and P. Korondi, "Vision based robot programming," *Proc. of the IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control*, pp. 949-954, April 2008.
- [31] K. Yoshida, F. Hibino, Y. Takahashi, and Y. Maeda, "Evaluation of pointing navigation interface for mobile robot with spherical vision system," *Proc. of the IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, pp. 721-726, June 2011.
- [32] J. Maycock, J. Steffen, R. Haschke, and H. Ritter, "Robust tracking of human hand postures for robot teaching," *Proc. of the International Conference on Intelligent Robots and Systems: Celebrating 50 Years of Robotics*, pp. 2947-2952, Sept. 2011.
- [33] D. Zhou and Y. Aiyama, "Intuitive and direct teaching system of multi-fingered hand-arm robot for grasping task," *Proc. of the International Symposium on System Integration*, pp.305-310, Dec. 2010.
- [34] L. Rozo, P. Jimenez, and C. Torras, "Learning force-based robot skills from haptic demonstration" *Proc. of the 13th International Conference of the Catalan Association for Artificial Intelligence*, 2010, Intelligence Research and Development, Vol 220 of Frontiers in Artificial Intelligence and Applications, pp. 331-340, 2010.
- [35] H. Kawasaki, S. Nanmo, T. Mouri, and S. Ueki, "Virtual robot teaching for humanoid hand robot using multi-fingered haptic interface," *Proc. of the International Conference on Communications, Computing and Control Applications*, pp. 1-6, March 2011.
- [36] R. Fung, S. Hashimoto, M. Inami, and T. Igarashi, "An augmented reality system for teaching sequential tasks to a household robot," *Proc. of the 20th IEEE International*

*Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, pp. 282-287, Aug. 2011.

[37] C. Jayawardena, K. Watanabe, and K. Izumi, "Teaching a tele-robot using natural language commands," *Proc. of the International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science*, pp. 59-64, Nov. 2005.

[38] Y. Sugiura, T. Igarashi, H. Takahashi, T. A. Gowon, C. L. Fernando, M. Sugimoto, and M. Inami, "Graphical instruction for a garment folding robot," *Proc. of the ACM SIGGRAPH 2009 Emerging Technologies*, no. 12, Aug. 2009.

[39] G. Reinhart, W. Vogl, and I. Kresse, "A projection-based user interface for industrial robots," *Proc. of the IEEE International Conference on Virtual Environments, Human-Computer Interfaces, and Measurement Systems*, pp. 67-71, June 2007.

[40] S. Liu, and H. Asada, "Teaching and learning of deburring robots using neural networks," *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 339-345, May 1993.

[41] F. Kyota, T. Watabe, S. Saito, and M. Nakajima, "Detection and evaluation of grasping positions for autonomous agents," *Proc. of the International Conference on Cyberworlds*, pp. 453-460, Nov. 2005.

[42] R. Palm and B. Iliev, "Programming-by-Demonstration and Adaptation of Robot Skills by Fuzzy-Time-Modeling," *Proc. of the IEEE Workshop on Robotic Intelligence In Informationally Structured Space*, pp. 18-25, April 2011.

[43] S. Calinon, A. Pistillo, and D.G. Caldwell. "Encoding the time and space constraints of a task in explicit-duration hidden Markov model," *Proc. of the International Conference on Intelligent Robots and Systems: Celebrating 50 Years of Robotics*, pp. 3413-3418, Sep. 2011.

[44] C. Breazeal, G. Hoffman, and A. Lockerd, "Teaching and working with robots as a collaboration," *Proc. of the Third International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, pp. 1030-1037, July 2004.

[45] S. Calinon and A. G. Billard, "What is the teacher's role in robot programming by demonstration? Toward benchmarks for improved learning," *Journal of Interaction Studies*, vol. 8, no. 3, pp. 441-464, 2007.

저자약력



**이 후 만**

- 2009년 서울대학교 바이오시스템공학과 (공학사)
- 2011년 서울대학교 지능형융합시스템학과 (공학 석사)
- 2011~현재 한국전자통신연구원(ETRI) 로봇/인지 융합 연구부 지능로봇제어연구팀.
- 관심분야 : 다관절 매니퓰레이터 제어 알고리즘, 로봇 교시 시스템



**김 중 배**

- 1986년 고려대학교 산업공학과 (공학사)
- 1988년 KAIST 산업공학과 (공학석사)
- 1991년~현재 한국전자통신연구원(ETRI)
- 로봇/인지 융합연구부 지능로봇제어연구팀.
- 관심분야는 : Networked Robot S/W Architecture, 로봇 교시 시스템



**김 성 훈**

- 1995년 광운대학교 전자공학과 (공학사)
- 1997년 광운대학교 전자공학과 (공학석사)
- 1997년~현재 한국전자통신연구원(ETRI) 로봇/인지 융합연구부 지능로봇제어연구팀.
- 관심분야 : 로봇제어, 로봇지능, 로봇 소프트웨어