

펙인홀 작업을 위한 임피던스 제어 기반의 직접교시 및 재현 알고리즘

Direct Teaching and Playback Algorithm for Peg-in-Hole Task using Impedance Control

김 현 중, 백 주 훈, 송 재 복*
(Hyunjoong Kim, Juhoon Back, and Jae-Bok Song)

Abstract: Industrial manipulators have been mostly used in large companies such as automakers and electronics companies. In recent years, however, demands for industrial manipulators from small and medium-sized enterprises are on the increase because of shortage of manpower and high wages. Since these companies cannot hire robot engineers for operation and programming of a robot, intuitive teaching and playback techniques of a robot manipulator should replace the robot programming which requires substantial knowledge of a robot. This paper proposes an intuitive teaching and playback algorithm used in assembly tasks. An operator can directly teach the robot by grasping the end-effector and moving it to the desired point in the teaching phase. The 6 axis force/torque sensor attached to the manipulator end-effector is used to sense the human intention in teaching the robot. After this teaching phase, a robot can track the target position or trajectory accurately in the playback phase. When the robot contacts the environment during the teaching and playback phases, impedance control is conducted to make the contact task stable. Peg-in-hole experiments are selected to validate the proposed algorithm since this task can describe the important features of various assembly tasks which require both accurate position and force control. It is shown that the proposed teaching and playback algorithm provides high positioning accuracy and stable contact tasks.

Keywords: direct teaching and playback, impedance control, peg-in-hole task

I. 서론

현재까지 산업용 로봇은 주로 자동차, 전자 관련 대기업 중심으로만 활용되어 왔다. 실제로 인력난을 겪고 있는 중소기업의 경우에는 여러 이유로 로봇 사용이 저조하였지만, 향후 이들 업체의 인력난 및 자동화 요구에 부응할 수 있는 신개념의 로봇 개발에 대한 요구가 대두되고 있다. 이러한 중소기업형 로봇에서 가장 고려되어야 될 부분은 프로그래밍에 익숙하지 않은 기존 근로자들이다. 로봇 운영을 위한 프로그래머 등을 따로 고용하기 힘든 중소기업의 사정상 기존의 작업자들만으로 산업용 로봇을 제어하고 유지 보수하는 것은 매우 어려운 일이다. 만약, 이들을 위한 손쉽고 직관적인 로봇의 프로그래밍 기술, 즉 직관적인 교시 방법이 제시된다면 기존의 작업자가 거부감 없이 로봇을 이용하고 다양한 작업을 용이하게 수행할 수 있을 것이다.

이와 관련된 연구가 전 세계적으로 이루어지고 있다. 먼저 유럽의 SME (Small and Medium Enterprise) Robot은 독일의 프라운호프 IPA를 중심으로 유럽 전역에서 진행 중인 중소기업용 산업용 로봇 개발 프로젝트이다. 여기에서는 음성인식, 영상인식, 힘제어 등의 다양한 방식을 통해 사용자에게 직관적인 교시방법을 제시한다[1,2]. 특히, BMW의 자동차 생산공정에 투입된 것으로 유명한 파워메이트 로봇(powermate robot)의 경우, 로봇을 이용하여 사용자가 손쉽게 무거운 작업물을

다룰 수 있게 하는 인간-로봇 협업 시스템을 제공한다. 하지만 사용자가 작업의 모든 과정에 걸쳐 로봇을 직접 구동해야 하므로 자동화 측면에서 단점이 있다[3]. 독일의 DLR연구소에서는 자체적으로 7자유도 로봇팔 LWR을 개발하였으며, 이것을 이용해 직접교시 및 재현 기술을 구현하였다. 이 로봇은 DLR이 보유한 세계 최고수준의 힘제어 기술을 통해 부드럽고 안전한 접촉작업이 가능하다. 하지만 로봇의 모든 축에 부착된 힘/토크센서가 매우 고가이므로 현재의 중소기업의 사정에는 적합하지 않다[4]. 미국의 Texas Austin 대학 RRG에서는 HAT (Human Augmentation Technology)를 통해 사람이 로봇의 엔드이펙터를 잡고 직접 교시할 수 있는 기술을 개발하였다. 하지만 작업물과 로봇 엔드이펙터가 접촉한 이후에 대해서는 힘제어를 수행하지 않아 불안정한 움직임을 초래하였다[5].

앞서 살펴본 바와 같이 다양한 방법으로 사용자에게 직관성을 제시해 주는 몇몇 연구가 수행되었지만, 대부분의 경우 자동화, 비용, 접촉작업의 수행능력 측면에서 쉽게 실제 현장에서 이용되기 힘든 면이 있었다. 본 연구에서는 하나의 힘/토크 센서를 이용하여 접촉작업을 직접 교시하고, 자동 재현할 수 있는 방법을 제시하였다. 직접 교시방법은 교시자가 로봇을 직접 잡고 원하는 작업경로를 교시하는 방법으로, 복잡한 프로그래밍 지식을 필요로 하지 않고 기존 작업자의 작업숙련도를 유지할 수 있다는 장점이 있다. 또한, 교시와 재현의 전 과정에 걸쳐 하나의 센서만을 이용하므로 비용 측면에서도 유리하다. 교시된 작업을 재현할 때는 로봇이 자동적으로 실시간으로 환경과의 충돌을 인지하여 경로를 보정하며 작업을 수행하므로 자동화 측면에서도 또한 장점을 갖는다.

본 논문의 구성은 II 장에서 센서와 로봇의 통합시스템의

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2008. 7. 25., 채택확정: 2009. 1. 28.

김현중, 송재복: 고려대학교 기계공학부

(jazzbop@korea.ac.kr/jbsong@korea.ac.kr)

백주훈: 광운대학교 정보제어공학과(backhoon@kw.ac.kr)

※ 본 연구는 교육과학기술부의 재원으로 한국과학재단의 지원(No. R11-2007-028-01002-0)과 지식경제부의 인간-로봇 협업 매니플레이션 기술개발 사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

구성 및 직접교시 알고리즘에 대해 언급하고, III 장에서 껍인홀 작업을 위한 임피던스 제어 기반의 교시 및 재현 기술에 대해 알아본다. IV 장에서는 껍인홀 작업 실험을 통해 본 교시-재현 시스템을 검증한다.

II. 직접교시 시스템

1. 통합 시스템 구성

힘/토크 정보를 기반으로 로봇을 직접 구동하기 위해서는 로봇과 힘/토크 센서의 통합된 시스템이 필요하다. 본 연구에서는 SCHUNK사의 LWR 및 NITTA사의 JR3 힘/토크 센서로 시스템을 구성하였다. 통합시스템의 구현에 앞서 LWR의 제어기를 설계하였는데, 여기에는 로봇의 기구학 및 동역학 연산을 수행하는 ROBOOP, 행렬계산을 수행하는 NETMAT 클래스가 사용되었다. 구현된 LWR의 제어기를 통해 관절공간 및 직교공간(cartesian space)에서 위치제어, 속도제어, 전류제어 등의 로봇 제어가 가능하다. 그림 1과 같이 힘/토크 센서의 좌표와 로봇 엔드이펙터의 좌표가 일치하는 방향으로 갖도록 하였다. 힘/토크 센서의 출력은 저역통과필터를 사용하여 잡음을 감소 시켰다.

2. 속도제어 기반의 직접교시 알고리즘

본 교시시스템은 교시과정에서 목표점의 위치, 교시속도, 각 모터에 인가된 전류 등의 정보를 저장하고, 재현과정에서 이들 정보를 이용해 목표점을 추종한다. 이때 교시과정에서 로봇의 거동을 아래와 같이 질량-댐퍼 시스템으로 동작하도록 제어하였다. 즉 교시자는 로봇의 엔드이펙터를 잡고 가상의 질량을 움직이는 것처럼 로봇을 구동할 수 있다.

$$M \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} + B \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F \\ \tau \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 v 및 ω 는 엔드이펙터의 선속도 및 각속도 벡터, F 는 힘/토크 센서에서 검출한 외부의 힘 및 토크 벡터이다. 그리고 M, B 는 각각 질량 및 감쇠를 나타내는 대각행렬로 아래와 같은 값을 가지며, 실험을 통해 적합한 값을 선정하였다.

$$M = \begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10 \end{bmatrix} \quad (2)$$

엔드이펙터 속도와 관절속도 간의 관계는 다음과 같다.

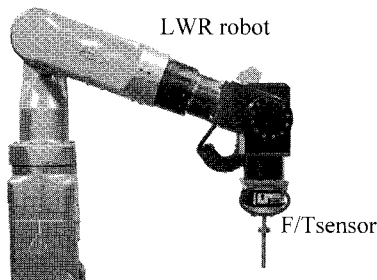


그림 1. LWR 로봇과 F/T센서.
Fig. 1. LWR robot and F/T sensor.

$$\begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = J(q) \dot{q} \quad (3)$$

여기서 \dot{q} 는 관절속도 벡터이며, J 는 자코비언 행렬이다. 위 식을 미분하면 아래와 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \dot{J}(q)\dot{q} + J(q)\ddot{q} \quad (4)$$

식 (1)에 위의 식 (3) 및 (4)를 대입하면 각 관절속도를 구할 수 있고, 이를 통해 로봇을 속도제어할 수 있다.

III. 껍인홀 작업을 위한 교시 및 재현

1. 껍인홀 작업의 정의 및 작업환경

껍인홀(peg-in-hole) 작업은 실제 산업현장의 조립작업을 묘사하는데, 위치제어뿐만 아니라 삽입 시 껍과 홀의 접촉에 의한 반발력이 생성되기 때문에 힘제어가 동시에 수행되어야 한다. 따라서 로봇을 직접 구동하고 접촉작업을 수행하는 본 교시/재현시스템을 검증하는 데 있어 적합하다. 여기서 껍인홀 작업은 엔드이펙터에 부착된 껍을 그림 2와 같이 홀 안에 삽입하는 것을 목적으로 한다. 이때 껍의 크기는 30.5mm, 홀의 크기는 31mm로 0.5mm의 공차를 가지며, 모두 높은 경도를 갖는 두랄루민으로 제작되었다.

만약, 껍인홀 작업에 교시과정이 없다고 가정하면 껍과 홀의 모따기 유무 또는 홀의 경사각의 유무에 따라 작업의 난이도가 결정이 된다. 하지만 본 실험에서는 작업자가 교시를 통해 홀의 위치를 교시하는 것이 가능하므로 껍과 홀에 모따기 없는 구조 및 경사진 홀에 대해 모두 안정적으로 작업이 수행될 수 있다는 장점이 있다.

2. 껍인홀 작업의 교시 알고리즘

껍인홀 작업을 통해 교시하고자 하는 위치정보에 대한 내용은 껍과 홀의 접촉 발생 유무에 따라 다음과 같이 두 단계로 나누어 생각해 볼 수 있다.

단계 1: 홀의 입구까지 껍의 위치정보 교시

단계 2: 홀의 최종 삽입지점까지 껍의 이동경로 교시

먼저 단계 1은 접촉작업이 없는 상황에서 껍을 홀의 입구까지 교시하는 과정이다. 이 단계에서 교시작업은 빠르고 부드럽게 교시자의 의도에 따라 교시되는 것이 중요하므로 식 (1)과 같이 질량-댐퍼 시스템을 사용하였다. 특히, 본 단계의 교시과정에서는 목표로 하는 홀의 입구 위치까지 원하는 만

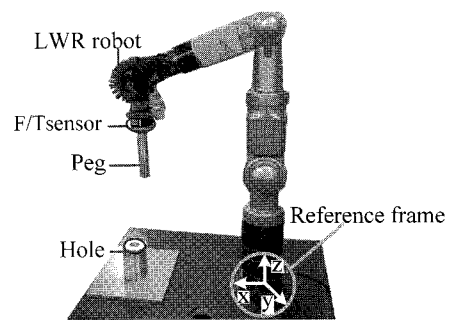


그림 2. 껍인홀 작업의 실험장치.
Fig. 2. Experimental setup for peg-in-hole task.

킴의 경유점(waypoint)을 통해 교시하는 것이 가능하다. 즉, 궤의 위치와 홀의 위치 사이에 경유점을 지정하여 재현과정에서 작업경로를 최소의 거리로 재구성할 수 있다

단계 2에서는 궤의 최종적인 삽입위치, 즉 홀의 끝단의 위치를 교시하는 것을 목표로 한다. 단계 1과 같은 높은 질량-댐핑계수 및 힘/토크 센서 이득을 사용할 경우 외력에 민감하게 움직이는 궤이 홀에 의해 구속되면서 로봇에 큰 충격을 가할 수 있다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해 다음과 같은 파라미터 및 힘/토크 센서 이득값을 사용하였다.

$$M = \begin{bmatrix} 15 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 15 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 15 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 15 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 15 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 15 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 25 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 25 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 25 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 25 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 25 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 25 \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서 M 은 엔드이펙터를 직접 구동할 때 움직이는 가상의 질량을 나타내는 대각행렬이고, B 는 이 질량에 작용하는 가상의 감쇠계수를 나타내는 행렬이다.

한편, 교시과정이 없는 일반적인 궤인홀 작업에서 경사진 홀을 대상으로 교시할 경우 작업의 난이도가 커진다. 궤의 위치각이 변화하면서 홀과 상대적으로 수직인 삽입 방향을 알기가 어렵기 때문이다. 그러나 본 시스템에서는 1단계 교시를 통해 경사진 홀에 궤를 접근시켜 위치 및 방위에 대한 정보를 줄 수 있다. 이렇게 단계 1의 교시가 완료되면 2단계 접촉작업에서는 기울어진 궤의 위치를 기준으로 하여 수직 방향으로 삽입이 수행될 수 있어야 한다. 따라서 1단계에서 교시된 위치를 좌표계의 원점으로 변환하여 줄 수 있도록 그림 3과 같이 좌표변환 작업을 하여 2단계 교시 작업을 수행하였다.

3. 임피던스 제어를 이용한 재현 알고리즘

재현과정은 교시과정과 마찬가지로 궤이 주변환경과 접촉되지 않은 자유구동 상태와 환경과 접촉하여 작업을 수행하는 접촉구동 상태 두 가지로 구분된다. 먼저 궤의 자유구동 시에는 외력과 상관 없이 교시된 목표위치를 추종하며 위치 제어가 수행된다. 이렇게 궤이 홀의 입구에 도달할 때까지 각 경유점의 위치를 교시하게 되면, 단계 1 재현과정에서는 각 경유점을 바로 잇는 최단경로를 재구성하여 전체 이동경로를 단축한다. 또한, 궤의 이동속도를 임의로 조정하여 교시된 이동속도보다 빠른 재현작업이 가능하다.

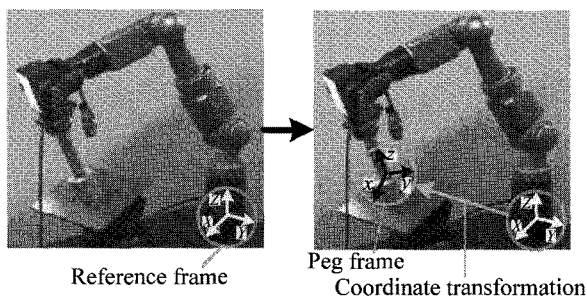


그림 3. 교시단계 2의 좌표변환.
Fig. 3. Coordinate transformation in teaching phase 2.

한편, 궤와 홀의 접촉이 발생한 이후에는 다음과 같이 실시간으로 검출된 외부의 힘과 현재위치 및 목표위치 사이에서 임피던스 제어를 수행하여 삽입작업에 특화된 기능을 수행한다[6].

$$M'(\ddot{x}_d - \ddot{x}) + B'(\dot{x}_d - \dot{x}) + K'(x_d - x) = F' \quad (6)$$

여기서 x_d 는 교시과정의 단계 2를 통해 저장된 경로벡터이며, x 는 엔코더에서 검출된 현재 로봇의 위치벡터로 두 벡터 모두 직교공간 상에서 표현된다. 또한, F' 은 힘/토크 센서에 검출된 외력정보이다. 위 식을 물리적으로 해석하면 그림 4와 같이 실제 궤의 경로(x)가 가상의 궤의 경로(x_d)를 추종하되, 둘 사이에 가상 스프링-댐퍼로 연결된 것을 볼 수 있다.

재현과정의 삽입작업 시 가상의 스프링 계수를 설정하는데 있어서 로봇의 x, y, z 병진방향의 강성은 비교적 높은 값으로 설정하였고, 회전방향의 강성은 낮은 값으로 설정하였다. 이를 통하여 로봇이 재현과정 중 병진방향으로는 높은 강성으로 정밀한 위치를 추종하고, 회전방향으로는 낮은 강성으로 궤의 삽입 시 생기는 위치오차를 수동적으로 보상해 줄 수 있게 된다.

$$K' = [K'_1 \dots K'_6]^T = [2.0 \ 2.0 \ 2.0 \ \dots \ 0.5 \ 0.5 \ 0.5]^T \quad (7)$$

여기서 K'_i 및 K'_r 은 각각 로봇의 직교좌표계에서 병진강성(translational stiffness) 및 회전강성을 나타내는 벡터이다.

본 시스템은 교시 및 재현 전 과정이 관절속도 \dot{q} 를 통해 제어된다. 그런데 식 (6)에서 계산되는 로봇의 속도벡터 \dot{x} 은 직교공간상의 값이므로 다음과 같은 해석 자코비안(analytical jacobian) 관계를 통해 관절속도로 변환해야 한다.

$$\dot{q} = J_A^{-1}(q)\dot{x} \quad (8)$$

여기서 J_A 는 해석 자코비안으로, 일반적인 자코비안 계산에서는 직교공간의 엔드이펙터 각속도를 이용하나, (8)의 \dot{x} 은 롤, 피치, 요(roll, pitch, yaw) 각의 미분항을 사용하기 때문에 \dot{q} 을 구하기 위해서는 위와 같이 해석 자코비안을 사용해야 한다[7]. 한편, 아래 관계를 통해 J_A 를 구할 수 있다.

$$J = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & T \end{bmatrix} J_A \quad (9)$$

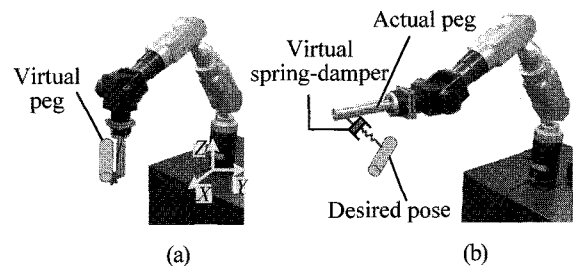


그림 4. 가상 궤를 이용한 재현시스템; (a) 초기위치, (b) 로봇 구동 중 가상 궤와 실제 궤 사이의 임피던스.
Fig. 4. Playback system using virtual peg; (a) initial position, and (b) impedance between real and virtual pegs during robot motion.

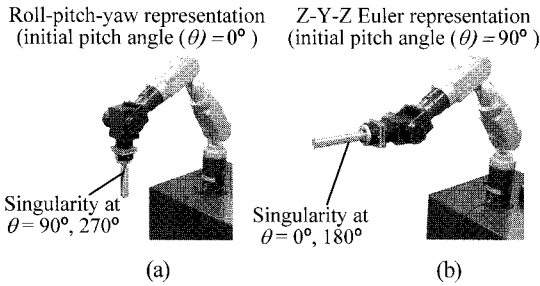


그림 5. 방위각에 따른 특이점 변화; (a) 롤-피치-요, (b) Z-Y-Z 오일러각.

Fig. 5. Singularity points at different angle representations; (a) roll-pitch-yaw representation, and (b) Z-Y-Z Euler representation.

여기서 T 는 3x3의 단위 행렬이며, T 는 오일러각의 미분항과 엔드이펙터의 각속도 사이의 관계를 나타내는 벡터로 아래와 같은 구성요소를 갖는다.

$$T = \begin{bmatrix} \cos\phi \cos\theta & -\sin\phi & 0 \\ \sin\phi \cos\theta & \cos\phi & 0 \\ -\sin\theta & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

여기서 ϕ 는 롤각, θ 는 피치각을 나타낸다. 주의할 점은 위에서 롤-피치-요각을 사용하였는데, T 의 성분을 고려할 때 로봇의 피치각 $\theta = 90^\circ, 270^\circ$ 에서 수학적 특이점(mathematical singularity)을 갖는다는 점이다. 한편, 행렬 x 의 방위각으로 Z-Y-Z 오일러각을 사용할 경우 $0^\circ, 180^\circ$ 가 수학적 특이점에 해당한다. 따라서 아래와 같이 사용하고자 하는 작업영역을 고려하여 적합한 방위각을 선정해야 한다.

IV. 펙인홀 실험 및 결과

1. 펙인홀 실험의 구성과 목표

본 실험의 구성은 LWR 로봇 및 힘/토크 센서, 로봇 엔드이펙터에 부착된 펙과 앵글바이스에 고정된 홀로 구성되어 있다. 본 실험에서는 홀의 경사각 유무를 각각 0° 및 30° 인 경우로 설정하여 실험을 수행하였다. 이 실험을 통하여 다음과 같은 사실을 검증하고자 한다.

가. 교시된 목표경로 및 목표위치를 빠르고 정밀하게 추종할 수 있는 위치정밀도.

나. 교시 및 재현 과정의 삽입과정 중 임피던스 제어를 통한 펙의 안정적 삽입 검증.

2. 실험결과 및 고찰

2.1 펙인홀 작업의 재현 위치 정밀도

본 시스템의 위치정밀도를 검증하기 위해 다음과 같이 직교공간상에서 각 단계의 엔드이펙터 위치를 통해 교시정보와 재현정보를 비교해 보았다. 그림 6은 1단계 자유공간 상에서의 교시 및 재현 위치를 나타내며, 그림 7은 2단계 접촉작업, 즉 펙이 홀에 삽입된 이후의 교시-재현 위치를 말한다.

실험을 통해 각 단계에서 교시된 목표점을 정밀하게 추종하고 있음을 확인할 수 있다. 특히, 그림 6에서 실제 교시경로를 추종하지 않고 경유점을 통해 단축된 거리를 이동함으로써, 교시시간에 비해 약 절반 가량 재현시간이 단축된 것을 알 수 있다. 또한, 그림 7(c)를 통해 펙이 홀의 끝까지 완전히 삽입된 것을 확인할 수 있다.

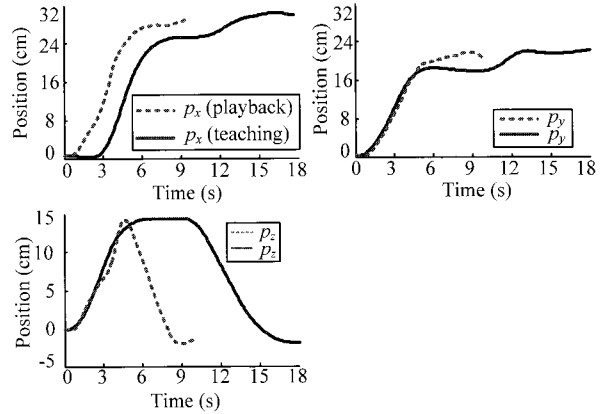


그림 6. 펙인홀 재현단계 1에서의 직교좌표 상의 경로.

Fig. 6. Cartesian positions during step 1 of peg-in-hole task.

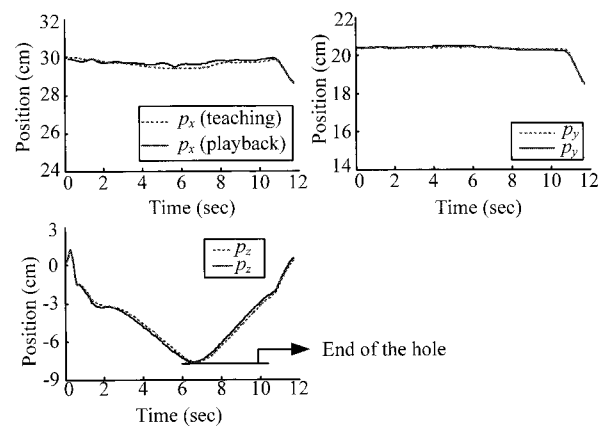


그림 7. 펙인홀 재현단계 2에서의 직교좌표 상의 경로.

Fig. 7. Cartesian positions during step 2 of peg-in-hole task.

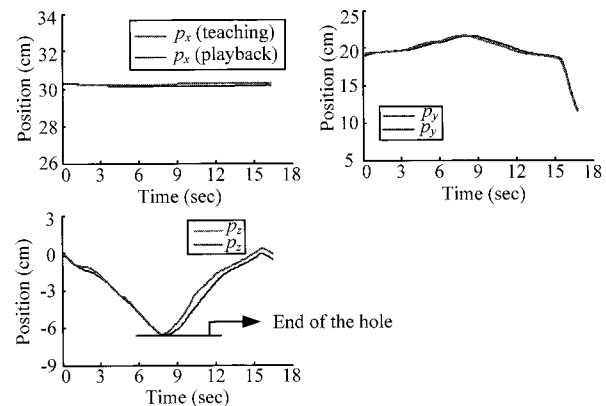


그림 8. 경사진 홀에서 펙인홀 작업시의 직교좌표 상의 경로.

Fig. 8. Cartesian positions during peg-in-hole task for tilted hole.

그림 8에서는 홀이 지면과 30° 기울어진 상황에서 2단계의 위치 추종성을 확인해 볼 수 있다. 그래프를 통해 위치 오차가 다소 발생하는 것을 볼 수 있는데, 이는 펙과 홀이 접촉한 이후 실시간으로 주변환경에 대응하여 삽입경로를 수정하기 때문이다. 그러나 (c)를 통해 홀의 최하단 위치까지 펙이 완전히 삽입되며, 목표위치를 정밀하게 추종하고 있음을 확인할 수 있다.

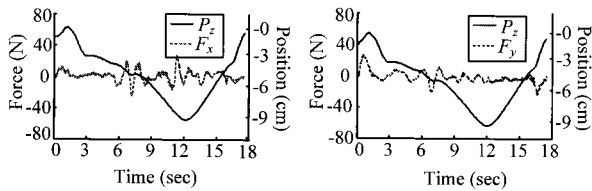


그림 9. 경사각이 없는 홀에서 썩 삽입 시 발생하는 힘.

Fig. 9. Force applied during peg insertion for flat hole.

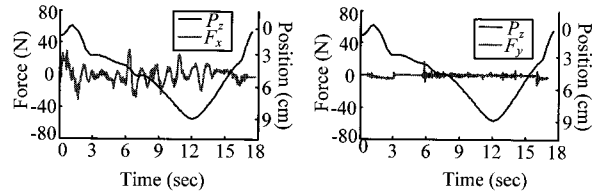


그림 10. 경사진 홀에서 썩 삽입 시 발생하는 힘.

Fig. 10. Force applied during peg insertion for tilted hole.

2.2 썩인홀 작업의 삽입 안정성

교시단계 2에서 썩이 홀에 삽입되기 시작하면 위치정밀도 및 작업속도 향상 이외에 썩이 안정적으로 삽입될 수 있는지 여부를 판별하는 것이 중요하다. 안정성을 검증하기 위해 다음과 같이 썩이 삽입되는 동안 발생하는 외력을 힘/토크 센서로 측정하였다.

그림 9를 보면 썩이 z 방향으로 삽입될 때 x, y 방향으로 발생하는 힘이 최대 40N 미만으로 발생하는 것을 알 수 있다. DLR에서 시행된 썩 삽입 실험에서 최대 약 45N의 반발력이 생성되었는데[8], 이와 비교해 볼 때 보다 안정적인 삽입이 이루어졌음을 확인할 수 있다.

앵글 바이스를 이용하여 30° 경사진 홀을 이용해 썩인홀 작업을 수행한 결과는 아래와 같다. 실험 결과를 보면 경사진 환경에서도 그림 10과 같이 썩의 z 방향 삽입에 대해 발생하는 반발력이 최대 40N을 넘지 않으며 안정적으로 삽입되는 것을 알 수 있다.

V. 결론

본 연구에서는 직관적인 로봇의 교시 및 정밀한 제현 기술

개발 방법을 제안하였다. 이 연구를 통하여 다음과 같은 결론이 도출되었다.

1. 제안된 시스템은 힘/토크 정보를 이용하여 주변환경과 비접촉 시에는 고속으로, 접촉 시에는 저속의 안정적인 교시가 가능하였다.
2. 제현 알고리즘은 유저 인터페이스를 통해 간단히 구현되며, 접촉/비접촉 작업으로 구분된 교시정보에 따라 비접촉 시에는 빠르게 각 경유점을 추종하고, 접촉 시에는 임피던스 제어를 수행하여 부드럽고 정밀하게 목표경로를 추종한다.

추후 연구활동으로는 다양한 접촉작업에 적용 가능한 알고리즘을 개발하여 시스템의 적용분야를 확장하는 것이다.

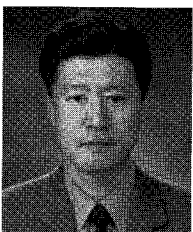
참고문헌

- [1] C. Meyer, "Intuitive programming of industrial robots," *International Symposium on Robotics*, pp. 69-74, Biel, Switzerland, 2006.
- [2] P. J. Norberto, "Robot-by-voice: Experiments on commanding an industrial robot using human voice," *Industrial Robot, An International Journal, Emerald Group Publishing Limited*, vol. 32, no. 6, pp. 505-511, 2005.
- [3] R. D. Schraft, "Powermate - A safe and intuitive robot assistant for handling and assembly tasks," *Proc. of IEEE Int. Conf. in Robotics and Automation*, Barcelona, Spain, pp. 4074-4079, 2005.
- [4] G. Hirzinger, "Cartesian impedance control techniques for torque controlled light-weight robots," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation*, Washington, DC., USA, pp. 657-663, 2002.
- [5] C. Pholsiri, "Extended generalized impedance control for redundant manipulators," *Proc. of 42nd IEEE Conf. on Decision and Control*, Maui, Hawaii USA, pp. 1255-1260, 2003.
- [6] M. W. Spong, S. Hutchinson, and M. Vidyasagar, *Robot Modeling and Control*, New York Wiley, 1989.
- [7] L. Sciacivco and B. Siciliano, *Modeling and Control of Robot Manipulators*, 2nd edition, Springer, 2000.
- [8] G. Hirzinger, "Flexible robot-assembly using a multi-sensory approach," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation*, San Francisco, CA, pp. 3687-3694, 2000.



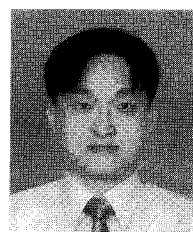
김 현 중

2006년 고려대학교 기계공학부 졸업. 2006년~현재 고려대학교 대학원 기계공학과 석사과정 재학중. 관심분야는 로봇교시 및 제현, 임피던스 제어.



송 제 복

1983년 서울대학교 기계공학과(공학사). 1986년 서울대학교 기계공설계학과(공학석사). 1992년 MIT 기계공학과(공학박사). 1993년~현재 고려대학교 기계공학부 교수. 관심분야는 이동로봇의 주행, 햅틱스, 지능로봇 시스템의 설계 및 제어.



백 주 훈

1997년 서울대학교 기계설계학과(공학사). 1999년 서울대학교 기계설계학과(공학석사). 2004년 서울대학교 전기공학부(공학박사). 2007년~2008년 고려대학교 기계공학부 연구교수. 현재 광운대학교 정보제어공학과 조교수. 관심분야는 비선형 제어.