

# Peg-in-hole 작업을 위한 힘/토크 정보 기반의 직접교시 알고리즘 Direct Teaching Algorithm for Peg-in-hole Task using Force/ Torque Data

\*김현중<sup>1</sup>, 백주훈<sup>2</sup>, 송재복<sup>3</sup>

\*H.-J. Kim (jazzbop@korea.ac.kr)<sup>1</sup>, J.-H. Back(Backhoon@korea.ac.kr), #J.-B. Song(jbsong@korea.ac.kr)  
고려대학교 기계공학부<sup>1, 2, 3</sup>

Key words : Direct teaching, Peg-in-hole task, Virtual peg

## 1. 서론

최근 대기업 중심의 산업용 로봇 편중 현상을 완화하며 중소기업체의 자동화 공정을 도울 수 있는 신개념의 로봇 개발에 대한 요구가 대두되고 있다. 이러한 중소기업형 로봇에서 가장 고려되어야 될 부분은 프로그래밍에 익숙하지 않은 기존 노동자들이다. 프로그래머를 따로 고용하기 힘든 중소기업의 사정상 기존의 노동자들만으로 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. 유럽의 SME(Small and Medium Enterprise) Robot<sup>[1]</sup>, 독일의 DLR연구소<sup>[2]</sup>, 미국의 Texas Austin 대학 RRG<sup>[3]</sup> 등 세계 유명연구기관에서는 음성인식, 영상인식, 힘제어 등의 다양한 방식을 통해 사용자에게 직관적인 교시방법을 제시한다.

본 연구에서 제안하는 직접교시는 힘/토크 센서를 통해 사용자가 로봇을 원하는 위치로 손쉽게 움직이고, 이를 통해 교시경로를 생성하는 방법이다. 특히 찍인홀(peg-in-hole) 작업에 특화된 교시시스템을 개발하였다. 본 논문의 2장에서는 로봇의 직접교시 시스템을 이용한 찍인홀 작업, 3장에서는 찍인홀 실험을 다룬다.

## 2. 로봇 직접교시 시스템을 이용한 찍인홀 작업

본 연구에서 제안된 로봇의 직접교시 시스템은 로봇 엔드이펙터(end-effector)에 부착된 6축 힘/토크 센서로 외부에서 인가된 힘/토크를 감지하여, 이에 비례하는 속도로 움직이는 원리를 갖는다. Fig. 1은 실험에 사용된 개발 환경으로, SHUNK사의 LWR(Light Weight Robot)로봇과 NITTA사의 JR3 힘/토크 센서로 구성되어 있다.

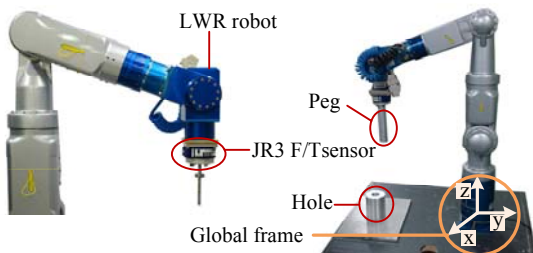


Fig. 1 (a) JR3 F/T sensor installed on LWR, (b) peg and hole.

로봇교시는 사용자가 목표점의 위치 및 힘 정보 등을 로봇에 알려주고 이를 저장하는 작업이며, 재현은 저장된 교시 정보를 이용해 목표점을 추종하는 과정을 말한다. 위 교시시스템에서는 특히 목표점의 위치정보를 저장하여 교시작업을 수행하며, 이후 재현 과정에서는 교시된 위치정보를 로봇이 추종하는 원리를 갖는다. 본 시스템의 목표작업을 찍인홀로 정했는데, 이는 실제 산업현장의 조립작업을 묘사한 것이며, 위치 및 힘이 모두 정밀하게 제어되어야 하는 특징이 있기 때문이다. 따라서 직접교시 시스템의 적용 실험으로 적합하다. 여기서 홀은 Fig. 1과 같이 z 방향으로 위치하며, 교시하고자 하는 위치정보에 대한 내

용을 다음과 같이 두 단계로 나누어 생각해 볼 수 있다.

- 단계 1) 초기위치에서 홀의 입구까지 찍의 위치정보 교시
- 단계 2) 찍이 홀의 입구에 도달한 이후 삽입위치 교시

우선 단계 1은 접촉작업이 없는 상황에서 찍을 정확히 홀의 입구까지 교시하는 과정이다. 이 단계에서 교시작업은 로봇의 속도제어를 통해 수행된다. 이를 위하여 로봇의 엔드이펙터에 인가된 힘(토크 포함)과 이로 인한 속도가 다음과 같은 질량-댐퍼 시스템과 같이 동작하도록 제어한다.

$$\mathbf{M} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{v}} \\ \dot{\boldsymbol{\omega}} \end{bmatrix} + \mathbf{B} \begin{bmatrix} \mathbf{v} \\ \boldsymbol{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F} \\ \boldsymbol{\tau} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

여기서  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{B}$ 는 각각 질량 및 감쇠를 나타내는 대각행렬로 실험을 통해 최적화하였다. 그리고  $\mathbf{v}$ ,  $\boldsymbol{\omega}$ 는 엔드이펙터의 선 속도 및 각속도 벡터,  $\mathbf{F}$ ,  $\boldsymbol{\tau}$ 는 힘/토크 센서에서 검출한 외부의 힘 및 토크 벡터이다. 교시자가 로봇의 엔드이펙터를 움직이면, 교시자가 인가한 힘/토크를 입력으로 하여 식 (1)로부터 엔드이펙터의 속도가 계산되며, 로봇은 이 속도를 추종하기 위하여 속도제어를 수행하게 된다. 이때 엔드이펙터의 움직임을 외력에 직접 비례하게 생성하면, 부드러운 움직임을 생성하기 어렵다. 그러나 식 (1)의 1차 시스템을 사용하면 저역 통과 필터링의 효과를 갖게 되어 보다 부드러운 엔드이펙터의 움직임을 생성할 수 있다. 위의 제어 방식으로 교시자는 찍을 홀의 입구까지 정확하고 빠르게 교시할 수 있다.

단계 2에서는 찍의 최종적인 삽입위치를 교시한다. 이를 위해서는 삽입위치의 x, y, z 성분을 교시하여야 하는데, 본 연구에서는 홀의 방향이 z축에 평행하므로 목표하는 삽입 위치는 단계 1의 마지막 위치에서 z축 방향으로 수평이동한 점이다. 즉, 단계 1의 마지막 위치의 x, y 성분을 목표 위치의 x, y 성분으로 정한다. 한편, 삽입작업의 교시를 위해서는 다음과 같은 상황을 고려하여야 한다. 만약 (1)을 통해 찍을 홀 안으로 삽입하면 x, y 방향으로 찍과 홀 사이 접촉으로 인한 반발력이 생성된다. 작은 공차를 갖는 홀과 찍 사이를 교시자가 접촉 없이 교시하는 것이 매우 어렵기 때문이다. 생성된 반발력은 찍의 불안정한 움직임을 야기하고 때로는 로봇에 큰 충격을 입히게 된다. 따라서 단계 2의 교시작업은 아래와 같이 임피던스 제어<sup>[4]</sup>를 통해 반발력 문제를 해결한다.

$$\mathbf{M}'(\ddot{\mathbf{x}} - \ddot{\mathbf{x}}_R) + \mathbf{B}'(\dot{\mathbf{x}} - \dot{\mathbf{x}}_R) + \mathbf{K}'(\mathbf{x} - \mathbf{x}_R) = \mathbf{F}' \quad (2.2)$$

여기서  $\mathbf{M}'$ ,  $\mathbf{B}'$ ,  $\mathbf{K}'$ 는 질량, 감쇠 및 강성을 나타내는 대각행렬이며,  $\mathbf{x}$  및  $\mathbf{x}_R$ 은 로봇 엔드이펙터의 현재 및 기준위치 벡터,  $\mathbf{F}'$ 는 힘/토크 벡터이다. 기준 위치벡터  $\mathbf{x}_R$ 은 찍의 실제 위치벡터  $\mathbf{x}$ 와 질량-스프링-댐퍼 시스템으로 연결되어 있는 가상의 기준점이다. 이에 대한 이해를 돕기 위해 아래 Fig. 2와 같이 고정되어 있는 가상의 찍을 생성하였고, 그 위치를  $\mathbf{x}_R$ 로 정하였다. 결국 Fig. 2(b)와 같이  $\mathbf{x}$ 와  $\mathbf{x}_R$ 은 식 (2)와 같은 관계를 가지며 거동한다.

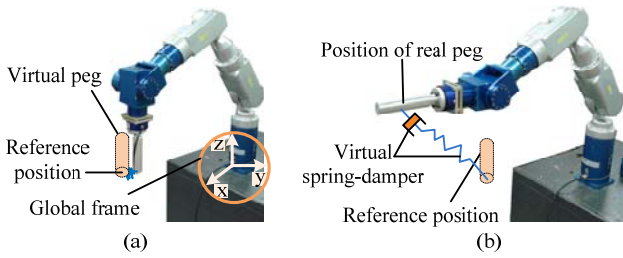


Fig. 2 Direct teaching system using virtual peg; (a) initial position, and (b) impedance between real and virtual pegs after robot motion.

한편, 단계 2를 수행할 때 기준 위치벡터  $\mathbf{x}_R$ 의  $x, y$  성분은 단계 1을 통해 교시된 목표 위치벡터 값으로 고정하였다. 그 이유는 삽입작업 시 껍이 홀과 부딪혀 반발력이 생겨도 고정된 가상의 스프링 원점이 항상 홀의 중심에 있으므로, 실제 껍이 중심 위치를 유지하며 삽입될 수 있기 때문이다. 또한 기준위치의  $x, y$  성분이 고정되어 있으면, 이 위치가 실제 홀과 일치하지 않아도 가상의 스프링을 통해 실제 껍과 기준위치 사이에서 힘의 평형이 유지된다.

기준 위치벡터의  $z$  성분은 초기에 홀의 입구에 위치해 있다. 만약 기준위치 벡터의  $z$  성분이 고정되어 있다면 교시자가 껍을 홀 방향으로 내릴수록 가상의 스프링에 의한 복원력을 강하게 받아 교시를 수행하는 데 어려움이 발생한다. 그러므로 기준벡터의  $z$  성분이 교시자의 교시 위치, 즉 현재위치 벡터의  $z$  성분에 따라 부드럽게 추종하는 것이 유리하다. 이를 위해 기준위치 벡터의  $z$  성분을 식 (1)과 같이 제어하여 교시자가 인가하는 힘/토크를 추종하는 형태로 설계하였다. 그 결과 껍이 홀을 따라 교시되면서 가상의 껍 역시 홀을 따라 내려오게 된다. 껍이 삽입 목표 위치까지 도달한 후 외력이 모두 제거되면 식 (2)를 통해 점근적으로  $\mathbf{x}$ 와  $\mathbf{x}_R$ 의  $z$  성분이 같아지고 껍이 정지하게 된다. 이때 현재위치 벡터  $\mathbf{x}$ 의  $z$  성분을 목표위치 벡터의  $z$  성분으로 결정한다.

한 가지 주의할 점은 식 (1)의 속도벡터가 선속도와 각속도의 벡터 항을 갖는데 비해서, 식 (2)의  $\mathbf{x}$  및  $\dot{\mathbf{x}}$  벡터는 아래와 같이 속도 및 오일러각의 미분항으로 표현된다는 점이다.

$$\mathbf{x}_R = \begin{bmatrix} \mathbf{p} \\ \phi \end{bmatrix}, \dot{\mathbf{x}}_R = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{p}} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

위 식에서  $\mathbf{p}$ 는 로봇 엔드이펙터의 기준위치,  $\phi$ 는 로봇의 기준 오일러각을 나타낸다. 기준위치  $\mathbf{x}_R$ 의  $z$  성분을 얻기 위해 다음의 관계를 사용한다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v} \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{T}_A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{p}} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

여기서  $\mathbf{T}_A$ 를 얻는 방법은 참고문헌<sup>[5]</sup>을 참고하도록 한다. 위 식을 통해 속도 값  $\dot{\mathbf{x}}_R$  벡터를 얻을 수 있으며 이 값을 (2)에 대입하여 껍인홀 작업의 접촉교시를 수행할 수 있다.

### 3. 껍인홀 실험

지금까지 개발된 힘/토크 정보 기반의 직접교시 알고리즘을 통해 껍인홀 작업을 수행하였다. 실험에 사용된 껍 및 홀은 두랄루민으로 제작되었으며, 껍은 직경이 30mm, 홀은 직경이 30.5mm로 제작되었다. 주목할 부분은 기존의 껍인홀 작업의 경우 홀의 입구를 찾는 것이 어려워 모따기를 통해 껍의 삽입작업을 용이하게 하였으나, 본 시스템의 경우 교시자가 직접 정확한 홀의 입구를 알려주는 것이 가능하므로 모따기 없는 껍과 홀을 제작하였다는 것이다.

Fig. 3은 껍인홀의 접촉작업과 관련된 실험 결과를 나타낸 것이다. 즉, 앞 절의 단계 2에서 목표위치의  $x, y$  방향 교시가 되어 있는 것을 가정하고 껍이 홀 안으로 삽입되면서 둘 사이 발생하는  $x, y$  방향의 힘정보를 측정하였다. 여기서  $F_x, F_y$ 는 힘/토크 센서에 의해 측정된  $x, y$  방향의 힘이다. 처음 껍은 (2.1)과 같이 고속으로 교시된 후 홀의 근처에 정지해 있다(Period I). 이후 껍을 홀 안으로 삽입하면 껍과 홀 사이의 접촉으로 인해 반발력이 발생한다(Period II). 삽입작업이 완료된 후 껍에 인가하던 교시자의 힘을 제거하면  $x, y$  방향의 힘이 다시 0으로 수렴하며 실제 껍의 움직임이 홀 안에서 안정적으로 정지하여 성공적으로 작업이 완료된 것을 확인할 수 있다(Period III).

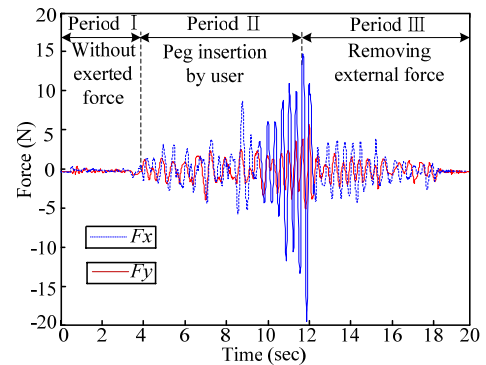


Fig. 3 Measured forces along  $x, y$  directions during peg insertion.

### 4. 결론

본 연구에서는 아래와 같은 직관적인 로봇 교시방법을 제시하였다.

1. 제안된 시스템은 힘/토크 정보를 이용하여 주변환경과 비접촉 시에는 고속으로, 접촉 시에는 저속의 안정적인 교시가 가능하다.
2. 껍의 삽입작업 시 가상의 껍을 생성하고, 이와 스프링-댐퍼로 연결된 실제 껍과 임피던스 제어를 하며 효과적인 접촉작업을 교시한다.

현재 연구된 직접교시 시스템은 특수한 홀 위치에 대해 껍인홀 작업을 수행한다. 추후에는 시스템이 다양한 홀 위치에 대해 작업 수행능력을 가질 수 있어야 한다. 또한, 교시된 내용을 바탕으로 로봇이 정밀한 재현작업을 할 수 있어야 하며, 현재 이에 대한 연구가 수행 중이다.

### 참고문헌

1. Pires, J., N., "Programming industrial robots using advanced input-output devices: test-case example using a CAD package and a digital pen based on the Anoto technology," Proc. of Int. Journal of Online Engineering, Vol. 3, No. 3, 2007.
2. Hirzinger, G., "Cartesian Impedance Control Techniques for Torque Controlled Light-Weight Robots," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation, pp. 657-663, 2002.
3. Pholsiri, C., "Extended Generalized Impedance Control for Redundant Manipulators," Proc. of 42nd IEEE Conf. on Decision and Control, pp. 1255-1260, 2003.
4. Spong, M., W., Hutchinson, S., and Vidyasagar, M., "Robot Modeling and Control," pp.329~337, New York Wiley, 1989.
5. Sciavicco, L., and Siciliano, B., "Modeling and Control of Robot Manipulators," pp.100~104, Springer, 2nd edition, 2000.