

로봇팔 직접 교시 시스템 개발

현웅근*

A Development of Robot Arm Direct Teaching System

Woong-Keun Hyun*

요약

본 논문에서는 로봇팔의 선단을 잡고 원하는 위치로 이동시켜서 작업을 직접 교시하는 직감적인 교시 및 제어를 시스템을 개발하였다. 개발된 시스템은 로봇팔 선단부의 위치 방향 및 자세 방향 힘을 측정하는 6축 힘 센서, 선단부에서 측정된 힘에 의한 로봇팔 관절 속도제어 명령어 생성 알고리즘, 자체 제작한 6축 로봇팔 및 제어 시스템으로 구성된다. 선단부 핸들러에 부착된 힘센서를 통해 로봇팔 조작자가 핸들러를 조종하는 위치 자세의 6차원의 힘/토크를 감지하고 이를 선단부 조종속도 명령으로 변환하여 6축 로봇팔을 제어한다. 연구 방법의 검증은 자체 제작된 6축 로봇으로 실행하였으며, 조종자의 핸들러 조정을 통한 작업교시에 의한 실험을 통해 제안한 힘 센서기반 로봇 선단 제어 방법이 성공적으로 동작함을 확인하였다.

ABSTRACT

In this paper, we developed an intuitive teaching and control system that directly teaches a task by holding the tip of a robotic arm and moving it to a desired position. The developed system consists of a 6-axis force sensor that measures position and attitude forces at the tip of the robot arm, an algorithm for generating robot arm joint speed control commands based on the measured forces at the tip, and a self-made 6-axis robot arm and control system. The six-dimensional force/torque of the position posture of the robot arm operator steering the handler is detected by the force sensor attached to the handler at the leading edge and converted into velocity commands at the leading edge to control the 7-axis robot arm. The verification of the research method was carried out with a self-made 7-axis robot, and it was confirmed that the proposed force sensor-based robot end-of-arm control method operates successfully through experiments by teaching the operator to adjust the handler.

키워드

Robot Teaching, Force Sensor, Velocity Command, Handler
로봇 교시, 힘 센서, 속도 명령, 핸들러

* 교신저자: 호남대학교 전자공학과 교수

• 접수일 : 2023. 12. 12
• 수정완료일 : 2024. 01. 12
• 게재확정일 : 2024. 02. 17

• Received : Dec. 12, 2023, Revised : Jan. 12, 2024, Accepted : Feb. 17, 2024

• Corresponding Author : Woong-Keun Hyun
Dept. of Electronics, Honam University,
E-mail : wkhyun@honam.ac.kr

1. 서 론

의료 시술을 보조하는 로봇으로는 다비치같은 외과 수술 로봇[1-3] 뿐만 아니라 치과 수술로봇[4] 및 그 보조 로봇에 대한 연구도 많이 되어져 왔다[5-7]. 치과 시술 보조 로봇은 치과 수술에서 치과 간호보조사의 역할 중 일부를 지원하는 로봇으로써, 치아교정, 임플란트, 브릿지 등 치과 진료 및 수술을 함에 있어서 치과의사를 지원하기 위해 간호보조사가 수행하는 작업인 환자의 입을 벌려서 원활한 치료 공간을 확보하는 행위를 수행한다. 이와 같이 치과의사와 협업하기 위한 치과 보조 로봇의 중요 기능중 하나는 치료 환자의 구강을 개구 상태로 유지하는 것이다. 치과의사는 로봇 전문가 혹은 엔지니어가 아니므로 치과 보조 로봇을 쉽게 다루어 작업 교시를 할 수 있어야 하는 바, 치과 치료 보조 로봇은 치과의사가 로봇의 자세 및 위치를 쉽게 만들 수 있는 교시 및 재현(teaching and playback)기능이 필요하다.

로봇을 활용하기 위해서는 사용자가 수행하고 싶은 작업의도를 로봇이 이해할 수 있는 형태로 구현 하는데 이를 로봇 교시라고 한다. 교시 기술은 직접 프로그래밍을 코딩하는 방법과 티칭 펜던트를 이용한 프로그래밍을 통해 교시점을 입력하는 방법이 있다[8]. 하지만 현재 현장에서 사용되고 있는 티칭 펜던트는 사용법과 실제 공정 방식과 사용법을 익혀야 하기 때문에 전문성을 갖춘 엔지니어만 사용이 가능한 경우가 대부분이다.

치과의사와의 협업 로봇은 로봇에 대한 전공 지식이 없는 치과의사가 직감적인 직접 교시로 보조 로봇의 작업을 교시할 수 있어야 한다. 이를 위해서 작업자가 특별히 로봇 프로그래밍에 대한 지식없이 로봇의 선단의 힘/토크 센서를 통해 사용자의 작업 의도를 전달하여 로봇을 제어하고 동작을 재현하는 제어 시스템이 필요하다[9,10]. 로봇팔의 힘을 측정하고 위치 및 속도를 제어하는 기술은 크게 임피던스 힘 제어와 하이브리드 힘 제어로 나뉜다. 임피던스 힘 제어 기술은 직접적으로 원하는 힘을 제어하지 않고 힘과 위치의 임피던스 변수의 관계를 이용하는 것으로 로봇과 대상체 간의 동적인 관계를 잘 처리하는 장점이 있다[11].

본 논문에서는 로봇팔 작업의 직감적인 교시 및 제

어를 위하여 선단부 6축힘 센서 기반 직접 교시 제어 시스템을 개발에 관하여 기술한다. 로봇팔 직감적 교시 제어시스템은 로봇팔 선단부(End effector)에 부착된 F/T(force torque) 센서로 작업자의 동작 의도를 파악하고 선단부에 가해진 힘을 로봇팔 속도 명령어로 환산하여 6축 로봇팔을 제어하는 시스템으로 구성된다.

II. 보조 로봇팔 교시 제어

2.1 보조 로봇 팔 기구학 해석 및 제어

시험용 치과보조 로봇은 위치 및 자세 제어를 위한 각각 3자유도 총 6자유도의 로봇팔로 구성한다.



그림 1. 직접 교시 시스템 시험용으로 제작된 로봇팔
Fig. 1 A robotic arm built to test a direct teaching system

그림 1에서와 같이 6축 로봇팔의 경우 베이스부터 3축은 로봇팔의 선단(End Effector)의 위치, 끝부분의 3축은 로봇 팔 선단의 자세를 제어한다. 인간이 직감적으로 교시하는 로봇팔의 제어는 3차원 직교 좌표 공간상에서 로봇의 선단부의 위치 또는 속도를 제어한다. 본 연구에서는 로봇 선단부의 F/T(force torque) 센서를 통해 인식한 조종자의 움직임을 3차원 속도제어 명령어로 환산한다. 그림1의 로봇팔에 대한 기구학을 분석하여 각 관절에 대한 기구학 변환 행렬(Homogeneous Transformation matrix)을 구하면 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned}
 A_1 &= \begin{bmatrix} c\theta_1 & s\theta_1 & 0 \\ s\theta_1 & -c\theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} L_0, & A_2 &= \begin{bmatrix} c\theta_2 & 0 & -s\theta_2 \\ s\theta_2 & 0 & c\theta_2 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \\
 A_3 &= \begin{bmatrix} c\theta_3 & s\theta_3 & 0 \\ s\theta_3 & -c\theta_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} L_2, & A_4 &= \begin{bmatrix} c\theta_4 & 0 & -s\theta_4 \\ s\theta_4 & 0 & c\theta_4 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \\
 A_5 &= \begin{bmatrix} c\theta_5 & s\theta_5 & 0 \\ s\theta_5 & -c\theta_5 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} L_4, & A_6 &= \begin{bmatrix} c\theta_6 & 0 & -s\theta_6 \\ s\theta_6 & 0 & c\theta_6 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \dots (1)
 \end{aligned}$$

수식(1)의 4x4 행렬 $A_1 \sim A_6$ 를 전부 곱하면 설계된 로봇의 4x4 정기구학 식 행렬이 된다.

$$A_{16} = A_1 * A_2 * A_3 * A_4 * A_5 * A_6 \dots (2)$$

조작자는 그림1와 그림 2의 6축 로봇팔 선단에 부착된 힘 센서를 조작하여(handling) 로봇 선단을 움직이는 바, 힘 센서에서 측정된 데이터는 3차원 직교 좌표계(Cartesian space)에서 로봇팔 선단의 속도 명령으로 변환해야 한다. 그리고 힘 센서로부터 산출된 직각 좌표계의 속도 명령을 식 (3)의 자코비언 식으로부터 관절 속도 각속도 명령으로 전환 시켜준다.

$$\dot{X} = J\dot{\theta} \dots (3)$$

여기서 자코비언 J 는 식(2)의 기구학 4x4행렬 A_{16} 에서 위치벡터를 각 관절각에 대하여 편미분한 행렬이며, \dot{X} 은 힘 센서 값을 직교좌표계 속도로 표현한 속도 벡터, $\dot{\theta}$ 은 각 관절 속도 벡터이다.

\dot{X} 으로부터 $\dot{\theta}$ 을 구하려면 식(3)의 역행렬을 구하면 되므로

$$\dot{\theta} = J^{-1}\dot{X} \dots (4)$$

이 되며, 입력 속도 벡터 $\{\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}\}$ 에 대한 관절속도 벡터 $\{\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3\}$ 를 구할 수가 있다. 여기서 J^{-1} 는 역 자코비언이다.

2.2 FT 센서 해석

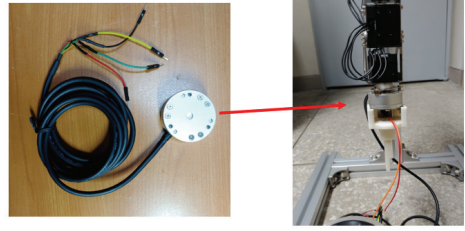


그림 2. F/T 센서와 센서가 부착된 로봇선단
Fig. 2 F/T sensors and a end effector of robots with sensors attached

로봇 선단에 적용된 센서는 RT40-SA-B로 F_x, F_y 축은 force는 100N(10kg중), F_z 는 150N, 회전 힘(torque)은 각축이 2.5Nm정도 감지한다. 이는 로봇선단에 도구를 부착하였다 하더라도 조작자의 손 조작 힘의 감지가 가능한 센서 측정 범위이다.

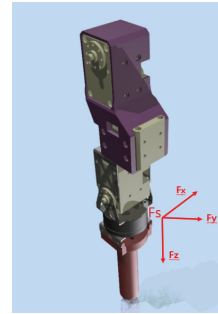


그림 3. 힘센서 로봇선단의 좌표계
Fig. 3 A Coordinate of the end effector with force sensor attached

선단에 부착된 F/T센서의 신호는 움직이고 있는 선단(end effector)의 x-y-z좌표계를 기준으로 힘 벡터이다. 이는 그림 3과같이 센서가 취해진 임의의 상대 좌표계에 대한 힘의 방향이어서 조작자가 움직이겠다고 생각하는 로봇의 기준 좌표계(base coordinate)의 방향과 다르다. 이는 DH 모델에서의 기구학식에서 자세부분의 3X3 행렬의 곱으로 기준 좌표계에서의 힘으로 환산할 수 있다.

$$F_{BS} = R_{13} R_{36} F_S \dots (5)$$

식(5)에서 F_{BS} 는 기준 좌표계(base coordinate)에서 본 센서 힘 벡터 F_S 이 힘 벡터이고, 그림 4의 R_{13} 과 R_{36} 은 각각 1축에서 본 3축의 자세 행렬, 3축에서 본 6축의 자세 행렬이다.

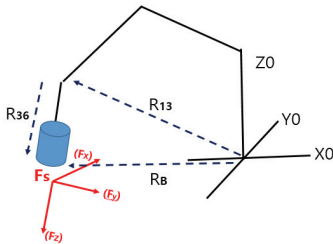


그림 4 기준좌표계와 손목부착 FT 센서의 힘 감지 좌표계
 Fig. 4 Reference coordinate and the coordinate of end effector with force sensor attached

손목 힘 센서 힘 순응 로봇 속도제어는 다음과 같다. 그림 5에서와 같이 손으로 로봇 선단을 잡아끌 때 센서의 힘 벡터는 선단의 상대 좌표계를 기준으로 형성된다. 이는 수식 (5)에 의해 기준 좌표계의 힘으로 환산되고 이 힘을

$$\dot{\theta}_{fd} = J^{-1} K F_{BS} \quad \dots (6)$$

의 수식을 이용하여 속도 명령으로 환산한다. 이러한 힘 환산 속도 명령을 모터 속도 제어 PI 제어기에 입력하여 속도제어를 수행한다.

2.3 힘센서 대응 로봇 제어

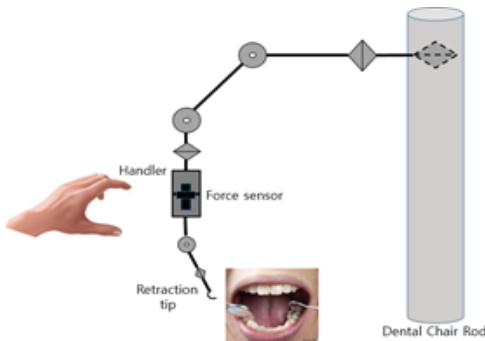


그림 5. 힘센서 핸들러가 장착된 치과 치료 보조로봇
 Fig. 5 Dental Care Assistive Robot with Force Sensor Handler

힘센서 교시 장치(핸들러)를 통하여 생성된 사용자의 의도는 로봇팔의 어드미턴스 제어기로 전달된다. 여기서 어드미턴스 제어기는 로봇과 외부 접촉환경과의 순응적인 동작을 생성을 위하여 개발된 제어기이고 산업분야에서 널리 활용되고 있다[6]. 외부 접촉력과 로봇 위치에 대한 기본적인 어드미턴스 관계식은 식 (7)과 같이 정의된다.

$$\frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1}{J_d s^2 + B_d s + K_d} \quad \dots (7)$$

여기서 J,B,K는 힘과 위치의 관계에서 로봇 끝단에 원하는 물리적 거동의 특성을 나타내며 각각 관성, 점성, 탄성값에 해당된다. 조작자는 힘 센서 핸들러를 급가속으로 당기거나 밀어서 조작하지 않으므로 관성과 탄성 계수를 0으로 하면 $F_d = B \dot{X}_d$ 로 되어 로봇 선단이 작동해야 할 속도는 핸들러에 가해지는 힘에 비례하게 되어 생성되는 관절각 속도 $\dot{\theta}_{fd}$ 은 수식 (8)로 결정해도 무방하게 되어 물리적으로 식 (4)와 같은 의미가 된다.

$$\dot{\theta}_{fd} = J^{-1} K \dot{X}_{fd} \quad \dots (8)$$

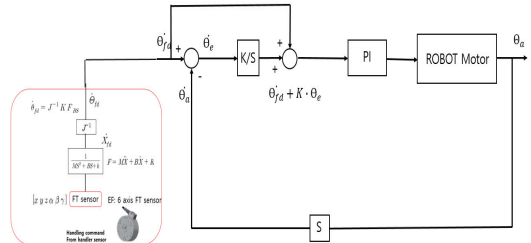


그림 6 힘센서에 의한 로봇교시장치의 제어기 블록도
 Fig. 6 Controller Block Diagram of Robot teaching System based on force sensor

그림 6의 제어 알고리즘 구조에서 $\dot{\theta}_{fd}$ 은 힘 센서에서 임피던스 제어기에서 환산된 관절 속도 명령이다. 이는 로봇이 실제로 구동되어 움직인 실제 관절 위치 θ_a 와 결합하여 이전 속도오차를 고려한 제어 명령식 $\dot{\theta}_d = \dot{\theta}_{fd} + K_p(\theta_d - \theta_a)$ 으로 보정된다. 이는 모

터에 입력되는 각속도 명령으로 모터는 이를 기준으로 PI 제어를 통해 로봇팔의 각 모터 속도를 제어한다. 로봇팔의 위치인 각도는 매 2msec 마다 읽히지며 이로써 각축의 측정 각속도 벡터 $\{\dot{\theta}_{a1}, \dot{\theta}_{a2}, \dot{\theta}_{a3}\}$ 와 각을 구하고 자코비언 역행렬 J^{-1} 를 곱하여 로봇팔 선단을 피드백 제어하는데 사용한다. 힘센서 기반 로봇팔 교시 장치의 제어흐름도는 그림 7과 같다.

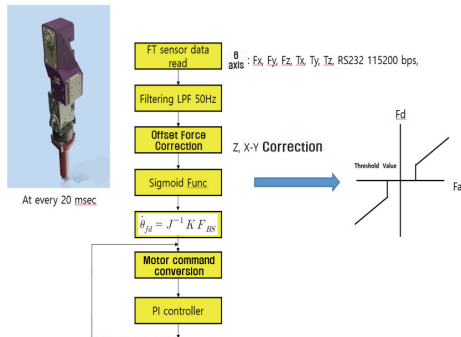


그림 7. 힘센서 기반 로봇팔 교시 장치의 제어흐름도
Fig. 7 Control flowchart of a force sensor-based robotic arm teaching system

힘센서는 매 20msec 마다 읽으며, 측정된 x-y-z축 3방향의 힘 벡터 $F_S = \{F_x, F_y, F_z\}$ 는 50Hz LPF를 거친후 다음과 같이 오프셋 힘(offset force)보정을 거친다.

$$F_{BS} = K F_S \quad \dots (9)$$

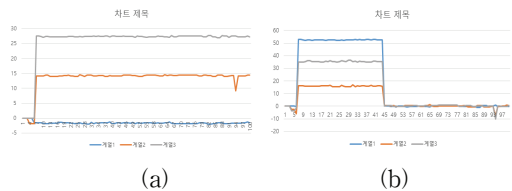
여기서 보정 계수 행렬 K는

$$K = \lambda * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.7 & 0 \\ 0 & 0 & 0.25 \end{bmatrix} \quad \dots (10)$$

힘 보정의 이유는 z축으로는 중력 방향의 힘이 작용 되므로 x-y축과 같은 힘을 작용하더라도 더 중력 방향(밀으므로)으로 가게 되므로 z축은 x-y축보다 작게 전달되도록 하기 위해서이다. 또 보정 힘은 작은 힘이 적용되며 미세한 힘도 전달되어 로봇 선단이 진동할 수 있으므로 시그모이드 함수(sigmoid function) 통해 일정 힘 이상이 가해져야 동작이 되도록 한다. 그리고 그러한 값으로 관절 속도 명령값을 구한후 이를 PI제어를 통해 제어하게 된다.

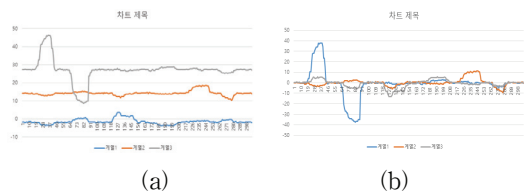
III. 제어 동작 실험 및 분석

그림 8.(a)는 로봇 선단에 F/T 센서를 부착한 후 로드가 가해지지 않은 모습이다. 그림에서 알 수 있듯이 x-y-z축의 값은 로드가 없는 경우라도 흔들러의 무게, 중력등에 의해 각각 다른 힘이 작용되고있는 듯한 모습을 보인다. 그림 8.(b)는 식(9)의 K로 중력 보상을 한 모습을 보인다. 그림 8.(b)의 45 sample time 후 부터는 중력 보상이 작동 되어 로드가 없을시(작업자가 힘 센서를 조작하지 않을 경우) 오프셋 힘이 보존되어 모든 방향의 힘은 0으로 표시됨을 보인다.



(a) 보정 되지 않은 힘(Fx,Fy,Fz)
(b) 오프셋(offset) 힘이 보정되고 50Hz LPF를 거친 힘
(a) uncalibrated forces (Fx, Fy, Fz)
(b) offset forces calibrated and filtered by 50 Hz LPF

그림 8. FT 센서에서 측정된 3축 방향 힘
Fig. 8 3-axis force measured by the FT sensor



(a) z축 방향으로 F/T 센서를 밀고 당길 때
(b) x축 방향으로 F/T 센서를 밀고 당길 때
그림 9. F/T 센서를 z, x 방향으로 밀고 당긴후의 3축 힘 파형
(1 계열: x 축힘, 2 계열: y 축힘, 3 계열: z 축힘)
(a) Pushing and pulling the F/T sensor in the z-axis direction
(b) Pushing and pulling the F/T sensor in the x-axis direction

Fig. 9 3-axis force waveforms after pushing and pulling FT in z and x directions

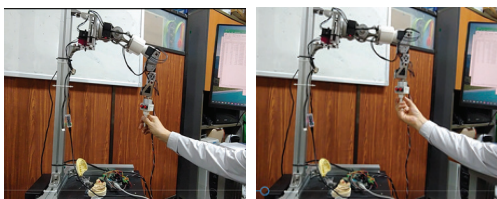
그림 9는 선단의 F/T 센서를 각각 z, x방향으로 밀고 당긴후의 3축 힘 파형 모습이다. 그림 9.(a)의 파형은 분석하면, z축 방향의 조작 힘에 크게 나타나고, x-y축 방향은 상대적으로 작은 반응 힘으로 나타난다. 조작자의 힘의 크기가 일정하지 않다 하더라도 크기의 비율은 상대적으로 너무 크게 차이가 난다. 그 이유는 z 축힘은 수직 상태라서 상하로 당기거나 밀 때 힘 감지가 예민하게 반응하며, x, y축 힘은 수평 상태에서 횡적인 힘이 반영되는 것이 아니라 선단 막대를 밀 때 센서 위부분의 축을 중심으로 회전 방향으로 힘이 적용되어 반영되므로 횡적힘의 방향인 X-Y축의 힘의 크기가 적게 나타난다. X축의 크기가 특히 적인 이유는 X축 방향으로 나사가 고정되어 있어 힘이 반영이 어려운 이유 때문이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 x-y-z축의 측정된 힘에 식(10)의 가중치를 곱하였다.



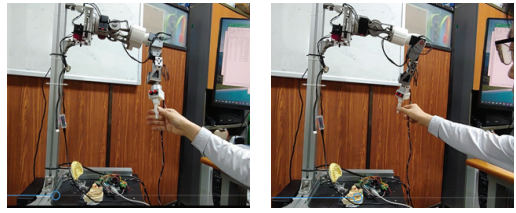
그림 10. F/T핸들러를 과하게 당기거나 밀 때 반발힘이 작용하는 모습
 Fig. 10 Repulsive force waveforms in action when pulling or pushing the F/T handler too hard

그림 10은 핸들러를 과한 힘으로 당기면 당긴 힘의 반발력이 작용하고 제어에 의해 순응 동작을 하면서 힘이 사라지면서 멈추게 되고 다시 그에 따른 반발힘이 작용하는 모습이 파형으로 나타남을 보인다. 이 문제는 정교한 제어로 풀어야 할 과제로 보인다.

그림 11(a)에서 11(d)는 제작된 로봇팔의 선단 힘 제어 동작 실험 결과 연속 사진을 볼 보인다.



(a) Z축을 당길 때의 동작 (b) Z축을 밀 때의 동작
 (a)when pulling the Z axis(b)when pushing the Z axis



(c) +X축으로 밀때 (d) -X축으로 당길 때
 (c) push in the +X axis (d) Pull in the -X axis 그림

그림 11. 로봇 교시 작업 실험
 Fig. 11 Experiment of robot teaching

그림 11에서 보듯이 작업자는 로봇의 선단의 핸들러를 움직여 F/T 센서에서 감지되는 힘을 통해 로봇을 수동 교시하게 된다. 로봇 작업의 교시는 일반적으로 조이스틱이나 제어판으로 동작시키는데 이는 매우 어렵고 복잡한 작업이다. 그림 11의 선단 교시 제어는 선단에 부착된 F/T 센서 핸들러를 조작하여 로봇을 직접 교시하는 모습을 보인다.

IV. 결 론

로봇에 작업을 교시하기 위해서 직접 프로그래밍을 코딩하거나 티칭 펜던트를 사용하여 로봇을 조작한다. 하지만 이러한 작업 교시는 실제 공정과 로봇 조작법등의 기초지식을 익혀야 하기 때문에 전문성을 갖춘 로봇 엔지니어만 사용이 가능하다. 이에 로봇에 대한 전문지식 없이 직감적인 직접 교시로 보조 로봇의 작업을 교시는 시스템이 필요하다. 본 논문에서는 이를 위해서 작업자가 로봇의 선단의 힘/토크 센서를 통해 사용자의 작업 의도를 전달하여 로봇을 제어하고 동작을 재현하는 제어시스템을 개발하였다. 로봇팔 선단부에 부착된 힘 센서를 통해 측정된 힘 벡터는 중력 보상 및 미세 힘 보정을 위한 알고리즘이 적용된 힘으로 교정되며, 어드미턴스 관계식 및 자코비언식에 의해 관절 속도 명령으로 변환된다. 이를 각 관절에 대한 PI 피드백 제어를 통해 6축 로봇팔을 제어하게 된다. 연구 방법의 검증은 자체 제작된 시험용 6축 치과 보조 로봇으로 실행하였으며, 조종자의 핸들러 조정을 통한 작업 교시에 의한 실험을 통해 제안한 힘 센서 기반 로봇 선단 제어시스템을 실험하였다. 조작자가 과하게 선단 핸들러를 조작할 경우 약간의

역작용의 힘이 발생하는 경우를 제외하고는 성공적으로 교시작업을 동작함을 확인하였다.

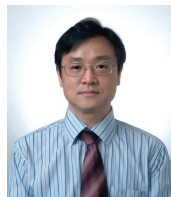
본 과제(결과물)는 2023년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과입니다. (과제관리번호: 2021RIS-002)

References

- [1] H. Su, A. Menciassi, and G. Ferrigno, "Toward teaching by demonstration for robot-assisted minimally invasive surgery," *IEEE Transact on Automation Science and Engineering*, vol. 14, no. 8, 2021, pp. 1-10.
- [2] H. Sadeghian, F. Zokaei, and S. Hadian Jazi, "Constrained kinematic control in minimally invasive robotic surgery subject to remote center of motion constraint," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 95, no. 3-4, 2019, pp. 901-913.
- [3] S. Lee and H. Yoon, "A Study on Development of Technology System for MIS(Minimally Invasive Surgery) robot of S. Korea analysed by the Application of Scenario Planning," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 8, no 1, 2013, pp. 13-26.
- [4] V. Riet, C. J. Sem, J.-P. R.Spijker, J. Kober, and J. de Lange, "Robot technology in dentistry, part two of a systematic review: an overview of initiatives," *Dental Materials*, vol 37, no. 8, 2021, pp. 1227-1236.
- [5] Y. Moon, Y. Bae, S. Roh, and K. Cho, "A Study on RT Component Implementation for Cooperation Robot of 7 Degree of Freedom Manipulator using RT Middleware," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 6, no. 1, 2011, pp. 142-147.
- [6] J. Moon and S. Kim, "Image Processing Processor Design for Artificial Intelligence Based Service Robot," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 17, no. 4, 2022, pp. 633-640.
- [7] S. Lee, D. Koh, N. Kim, E. Park, J. Bong and D. Jeon, "Mobile Robot for Indoor Air Quality Monitoring," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 17, no. 3, 2022, pp. 537-542.
- [8] S. Yoo, "Development of Block Coding Touch UX Design for User Centered Experience of Collaborative Robot Control," *Design Convergence Study*, vol. 17, no. 5, 2018, pp. 77-92.
- [9] K. Ahn and J. Song, "Cartesian Space Direct Teaching for Intuitive Teaching of a Sensorless Collaborative Robot," *Journal of Korea Robotics Society*, vol. 14, no. 4, 2019, pp. 311-317.
- [10] W. Hyun, "A remote control of 6 d.o.f. robot arm based on 2D vision sensor," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 17, no 5, 2022, pp. 933-940.
- [11] Z. Wang, L. Zou, X. Su, G. Luo, R. Li, and Y. Huang, "Hybrid force/position control in workspace of robotic manipulator in uncertain environments based on adaptive fuzzy control," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 145, 2021, pp .236-242.

저자 소개

현웅근(Woong-Keun Hyun)



1993년 한양대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사)
 1993년 ~ 현재 호남대학교 전자공학과/로봇드론 공학과 교수
 1996년 한국기계연구소 자동화그룹 객원 연구원
 1998년 일본 오사카 전기 통신대 객원교수

관심분야: 지능로봇, 지능 시스템

