

# 힘/토크 센서를 이용한 수술보조로봇의 원격중심운동 직접교시 알고리즘 연구

## Study on Direct Teaching Algorithm for Remote Center Motion of Surgical Assistant Robot using Force/Torque Sensor

김민효<sup>1</sup>·진상록<sup>†</sup>  
Minhyo Kim<sup>1</sup>, Sangrok Jin<sup>†</sup>

**Abstract:** This study shows a control strategy that acquires both precision and manipulation sensitivity of remote center motion with manual traction for a surgical assistant robot. Remote center motion is an essential function of a laparoscopic surgical robot. The robot has to keep the position of the insertion port in a three-dimensional space, and general laparoscopic surgery needs 4-DoF (degree-of-freedom) motions such as pan, tilt, spin, and forward/backward. The proposed robot consists of a 6-axis collaborative robot and a 2-DoF end-effector. A 6-axis collaborative robot performs the cone-shaped trajectory with pan and tilt motion of an end-effector maintaining the position of remote center. An end-effector deals with the remaining 2-DoF movement. The most intuitive way a surgeon manipulates a robot is through direct teaching. Since the accuracy of maintaining the remote center position is important, direct teaching is implemented based on position control in this study. A force/torque sensor which is attached to between robot and end-effector estimates the surgeon's intention and generates the command of motion. The predefined remote center position and the pan and tilt angles generated from direct teaching are input as a command for position control. The command generation algorithm determines the direct teaching sensitivity. Required torque for direct teaching and accuracy of remote center motion are analyzed by experiments of panning and tilting motion.

**Keywords:** Surgical Assistant Robot, Remote Center Motion, Direct Teaching, Force/Torque Sensor

### 1. 서 론

로봇 수술은 최소 침습 수술의 최신 트렌드이다. Da Vinci System (Intuitive Surgical Inc., 미국)은 세계에서 가장 성공적인 수술용 로봇으로 잘 알려져 있다. Da Vinci System은 원격제어 콘솔에서 수술자가 로봇을 조작하는 방식이기 때문에 수술자는 수술대에서 분리될 수밖에 없다. 그러나 많은 외과의들은 로봇 수술을 하는 도중 자유롭게 개입하고 예기치 않은 상황에 유연하게 대처할 수 있기를 원한다. 수술 로봇은 초고가 장비이기 때문에 소수의 3차 병원들만 보유하고 있고, 수술 시 로봇의 설

치 및 회수 등 전체 절차를 고려했을 때 종종 수술에 주로 사용되고 있다. 따라서 1차 병원을 포함한 전체 의료 현장을 감안하면 훨씬 수술 빈도가 높은 수술시간 2시간 이내의 복강경 수술에 활용할 수 있는 보급형 로봇이 필요하다. 더불어 최근 의료 보조 인력의 부족으로 의료인들이 수술에 대한 피로를 호소하고 있어 [Fig. 1]과 같이 수술자가 기존의 복강경 수술을 수행하면서 수술을 보조하는 수술보조로봇에 대한 요구가 증가하고 있다.

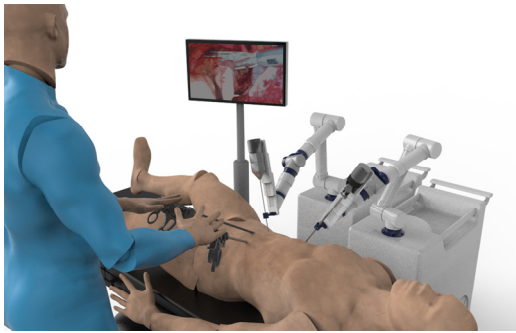
본 연구에서는 6관절 협동로봇에 2자유도 엔드이펙터를 장착한 보급형 수술보조로봇을 개발하였다. 수술보조로봇은 수술 중 원하는 영상을 얻을 수 있도록 복강경 카메라를 잡고 조종하거나 검자로 내부 조직을 견인하는 작업 등을 수행하여 수술자와 수술대에서 협업한다. 시작품에 대한 설계 타당성과 사용성 평가를 위해 [Fig. 2]와 같이 돼지를 이용한 동물실험을 수행했다. 복강경 수술보조로봇의 가장 기본적인 기능은 원격 중심운동이며, 수술자가 별도의 훈련없이 이를 가장 직관적으

Received : Aug. 31. 2020; Revised : Oct. 30. 2020; Accepted : Nov. 3. 2020

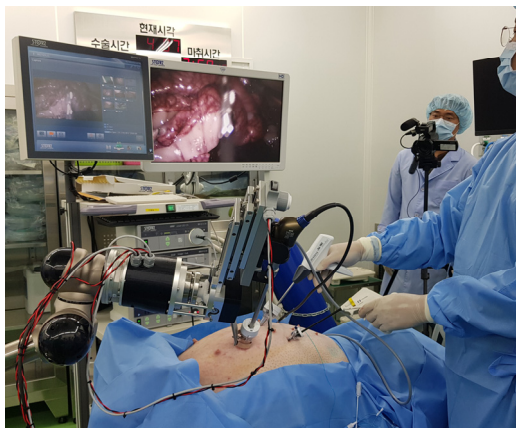
※ This work was supported by a 2-Year Research Grant of Pusan National University

1. Master's degree Student, School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan, Korea (mhkim1@pusan.ac.kr)

† Assistant Professor, Corresponding author: School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan, Korea (rokjin17@pusan.ac.kr)



[Fig. 1] Conceptual figure of surgical assistant robot



[Fig. 2] Animal experiment of surgical assistant robot

로 조작할 수 있는 방법이 직접교시이다. 수술자 입장에서 성능평가에 중요한 지표가 되는 것은 원격중심운동의 안정성과 직접교시의 민감도이다.

최근 협동로봇의 발전으로 다양한 직접교시 방법이 연구되고 있다. 저가형 협동로봇에 가장 널리 사용되고 있는 직접교시 방식은 센서없이 전류제어하는 방식이다<sup>12</sup>. 하지만 이는 기계적으로 감속기의 감속비와 마찰력 이상의 힘을 가해야 동작하기 때문에 민감한 동작을 원하는 수술현장의 요구조건에 맞지 않으며, 위치 기반 제어가 아니기 때문에 원격중심 유지 성능에 대해 신뢰할 수 없다. 로봇의 각 회전축에 토크센서를 장착하고 제어하여 민감하고 정밀한 동작이 가능한 방식이 있지만 고가의 협동로봇에 주로 사용되고 있다<sup>3,4</sup>. 협동로봇 끝단에 힘/토크 센서를 부착하여 이를 바탕으로 직접교시하는 방식도 있다<sup>5,6</sup>. 로봇의 끝단을 잡고 부드러운 교시가 가능하지만 중간의 다른 링크를 잡고 교시는 불가능하다는 단점이 있다.

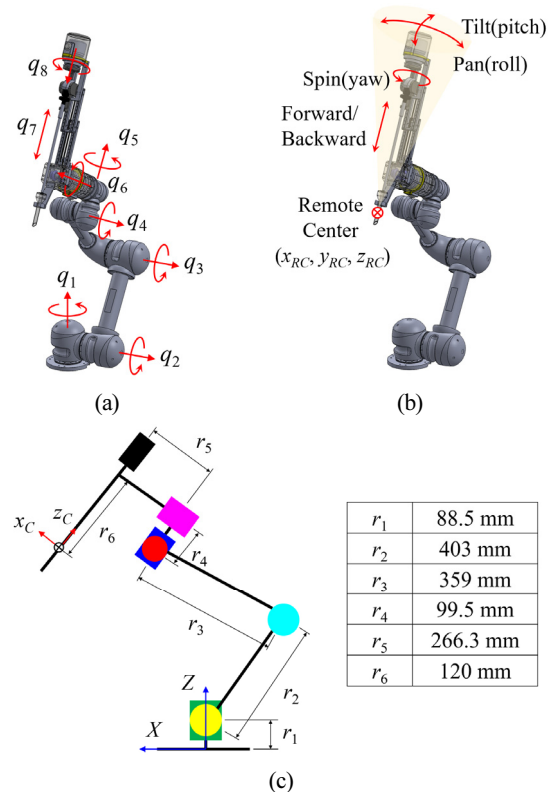
본 연구에서는 협동로봇의 끝단에 6자유도 힘/토크 센서를 장착하고 엔드이펙터를 연결하여 사용자가 엔드이펙터를 잡고 가하는 힘과 토크를 측정하고 직접교시에 활용하는 방식을 사용한다. 힘/토크 센서에서 발생하는 값은 제어 명령으로 변환되어 위치제어에 입력되기 때문에 원격중심을 견실하게 유지할 수 있지만 민감한 조작감을 만들기 위해서는 명령 변환 알고리즘의 설계에 주의가 필요하다. 사용자가 로봇의 엔드이

펙터를 잡고 직접교시하는 실험을 통해 목표 토크 내에서 민감하게 동작하며 명령을 잘 추종하는 성능과 원격중심위치를 유지하는 정도를 평가한다.

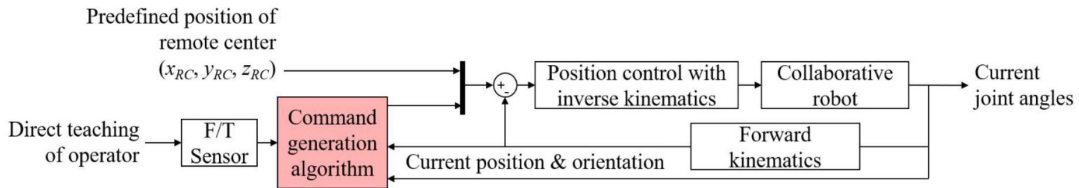
## 2. 원격중심운동

기구부 외부에 가상의 한 점을 원격중심으로 정의하고 원격중심에 기구의 관절이 있는 것처럼 움직이는 것을 원격중심운동이라고 한다. 원격중심운동은 수술보조로봇이 수술도구를 투관점(Trocar)을 통해 인체 내에 삽입하여 조작하는 동안 삽입 포트의 위치를 유지하기 위해 필수적인 기능이다. 원격중심을 기구적으로 제한하여 로봇의 어떤 움직임에도 항상 원격중심을 유지하는 방식이 높은 안전성으로 인해 널리 사용되고 있다<sup>7</sup>. 그러나 기구적으로 제한하는 방식은 병렬기구나 원호 형태의 기구로 구성되어 부피가 크고 수술대에 설치할 경우 수술자와 충돌할 가능성이 크기 때문에 수술자와 같은 공간에서 협업하는 수술보조로봇에는 적합하지 않다.

본 연구에서는 [Fig. 3(a)]와 같이 6자유도 협동로봇에 2자유도 엔드이펙터를 장착하고, 제어 알고리즘으로 가상 원격중심을 정의하여 원격중심운동을 구현한다. 이 방식의 경우 작은 기구 메커니즘으로 좁은 공간에서 사람이 수술도구를 잡



[Fig. 3] Kinematic model of surgical assistant robot: (a) 6-joint collaborative robot and 2-DoF end-effector, (b) remote center motion, (c) length of linkage and distance of remote center



[Fig. 4] Block diagram of remote center motion control

고 있는 것과 같은 효과를 낼 수 있어 수술자와 협업하는 수술 보조를 수행하며 충돌을 최소화할 수 있다. 단, 안전한 수술을 위해 제어기의 견실성이 매우 중요하다.

일반적인 복강경 수술에서 수술 도구들은 [Fig. 3(b)]와 같이 Pan (Roll), Tilt (Pitch), Spin (Yaw) 회전 운동과 전후진 (Forward/Backward) 직선 운동의 4자유도 운동이 필요하다. 수술보조로봇에서는 6자유도 협동로봇이 3차원 공간의 원격 중심을 유지하면서 4자유도 원격중심운동 중 Pan, Tilt 회전운동을 구현하여 원뿔과 같은 궤적을 만든다. 엔드이펙터가 나머지 2자유도 운동인 Spin과 전후진 운동을 제어한다. 엔드이펙터의 2자유도 운동은 독립적으로 제어 가능하므로 본 논문에서는 협동로봇의 Pan, Tilt 원격중심운동 제어에 연구를 한정한다. 수술보조로봇을 구성하는 협동로봇의 각 링크 길이와 끝단으로부터 원격중심까지의 거리는 [Fig. 3(c)]와 같다.

### 3. 원격중심운동의 직접교시 제어 전략

원격중심 위치를 유지하는 것이 가장 중요한 기능이기 때문에 협동로봇의 각 관절 엔코더 값에 기반한 위치제어를 통해 원격중심운동을 구현한다. 이때 협동로봇 끝단과 엔드이펙터 사이에 장착된 힘/토크 센서를 직접교시의 입력장치로 사용하여 사용자의 의도에 따라 원격중심 위치를 기준으로 Pan, Tilt 운동을 구현한다. 수술보조로봇의 엔드이펙터에 버튼이 있고 버튼을 누른 상태에서 엔드이펙터에 힘과 모멘트를 가하면 이에 따라 로봇이 직접교시되어 구동한다. 버튼을 놓는 시점에 6자유도 힘/토크 센서의 값을 전부 0으로 교정하여 중력 및 외란을 보상하면서 교시를 시작한다.

#### 3.1 위치제어 기반 원격중심운동 제어

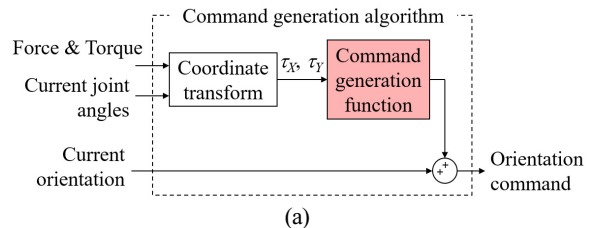
위치제어에 기반한 원격중심운동 제어를 [Fig. 4]와 같이 설계한다. 다관절 로봇의 일반적인 위치제어 알고리즘에 직접교시를 위한 명령 입력 부분만 수정한다. 먼저 정의된 원격중심 위치와 엔드이펙터의 자세를 6자유도 로봇에 제어 입력으로 가하고, 역기구학을 푸는 위치 제어에서 도출한 각 조인트 각도가 로봇에 인가되어 그 결과를 정기구학으로 풀어 되먹임하는 구조이다. 역기구학을 푸는 위치 제어는 미분 기구학에 PID 제어와

역계산법을 이용하여 설계하고 각 제어 이득은 최적화를 통해 조정한다<sup>[8]</sup>. 엔드이펙터의 자세는 직접교시로 인해 힘/토크 센서에 발생한 값을 명령 생성 알고리즘을 통해 계산하여 입력한다.

#### 3.2 직접교시 명령 생성 알고리즘

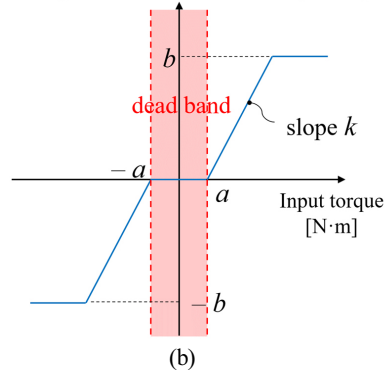
제안된 직접교시 제어 방법의 특징은 명령 생성 알고리즘이다. 명령 생성 알고리즘의 구조는 [Fig. 5(a)]와 같다. 로봇의 자세에 따라 좌표계가 변하기 때문에 6자유도 힘/토크 센서에서 측정된 값을 로봇의 형상 및 현재 각 관절 각도로부터 식 (1)과 같은 보조행렬(adjoint matrix)을 이용하여 좌표변환한다<sup>[9]</sup>. 변환된 값들 중 Pan, Tilt에 사용될 X축 토크와 Y축 토크만 추출하여 명령 생성 함수에 입력한다. Pan, Tilt 운동 중에 내시경 카메라의 화면 방향이 기울어지는 것을 방지하기 위해 Spin에 해당하는 명령은 초기 자세에서 변화하지 않도록 고정한다. Spin은 추후 엔드이펙터에서 따로 제어할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} f_B \\ \tau_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{BS} & 0 \\ \hat{p}_{BS} \mathbf{R}_{BS} & \mathbf{R}_{BS} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_S \\ \tau_S \end{bmatrix} \quad (1)$$



(a)

Change for orientation command [rad/ms]



(b)

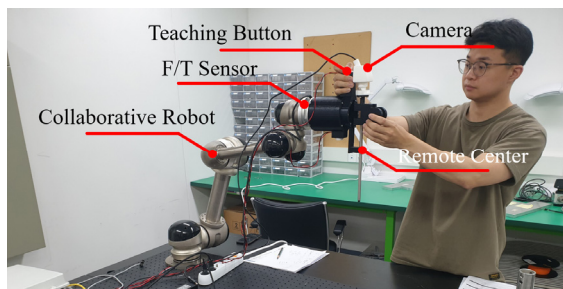
[Fig. 5] Command generation algorithm: (a) block diagram, (b) command generation function

$f$ 와  $\tau$ 는 힘과 토크이고, 아래 침자  $B$ 는 로봇 베이스 좌표계,  $S$ 는 센서 좌표계를 뜻하며,  $R_{BS}$ 는 베이스 좌표계 기준 센서 좌표계의 회전행렬,  $\hat{p}_{BS}$ 은 베이스 좌표계 기준 센서 좌표계의 위치 벡터로 만든 반대칭행렬(skew-symmetric matrix)이다.

명령 생성 함수는 [Fig. 5(b)]와 같이 입력값의 작은 변화에 로봇이 너무 민감하게 반응하지 않도록 적정영역의 불감대(Dead band)를 설정하고, 입력값에 비례상수를 곱하여 변환값을 생성한다. 큰 토크에 의해 급격하게 명령이 변하지 않도록 변환값의 크기 제한도 정의한다. 정기구학에 의해 계산되어 있는 현재 엔드이펙터의 자세에 변환값을 더하여 직접교시에 의한 자세의 변화를 실시간으로 입력한다. 제어주기(1 ms)마다 변환값을 더한다는 것은 변환값이 엔드이펙터의 운동 속도임을 의미한다. 감쇄 시스템(Damping system) 모델에 기반하여 명령 생성 함수의 입력은 토크이고 출력은 토크에 상수를 곱한 결과로 구동 속도가 도출된다. 불감대와 비례상수를 변경하여 조작 민감도를 조절할 수 있다. 비례상수를 구할 때는 직접교시에 필요한 목표 토크와 목표 속도 및 시스템의 구동속도 한계를 복합적으로 고려하여 결정해야 한다. 직접교시에서 조작 민감도를 정량화하기 어렵기 때문에 시스템의 특성 내에서 개략적으로 인자값들을 정하고 시행착오법으로 조정한다.

### 4. 원격중심운동 직접교시 성능 실험

협동로봇에 내시경 카메라를 잡는 엔드이펙터를 장착하고 원격중심운동의 직접교시 성능을 [Fig. 6]과 같이 실험했다. 협동로봇은 드라이버 일체형 모터(SMT-DA-series, LS메카피온, 한국)에 하모닉드라이브 감속기를 조립한 구동 모듈(MR-series, ㈜에스비비테크, 한국)을 이용하여 구성하였고, 로봇 끝단에는 6자유도 힘/토크 센서(RFT80-6A01, ㈜로보터스, 한국)를 부착하였다. 교시 버튼을 누른 채로 엔드이펙터에 힘과 토크를 가하



[Fig. 6] Experiment of remote center motion with direct teaching

[Table 1] Parameter value of command generation function

Motion	Parameters		
	Dead band $a$	Slope $k$	Bound $b$
Pan	0.2	$8 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-4}$
Tilt	0.2	$2 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-4}$

면 앞서 제시한 제어 방식에 따라 직접교시를 수행한다. Pan 운동, Tilt 운동 및 혼합운동을 교시하며 성능을 조사한다. 명령 생성 함수의 인자값은 [Table 1]과 같이 설정한 후 실험을 진행한다. 시작 자세는 1번부터 6번 관절각을 순서대로  $0^\circ, 20^\circ, 60^\circ, -80^\circ, 0^\circ, 0^\circ$ 로 놓고 시작하여 원격중심의 Roll, Pitch, Yaw 각도가  $0^\circ, 0^\circ, 0^\circ$ 인 자세에서부터 교시를 시작한다. 위치 및 자세 측정값은 관절들의 엔코더 값으로부터 정기구학을 풀어 도출한다.

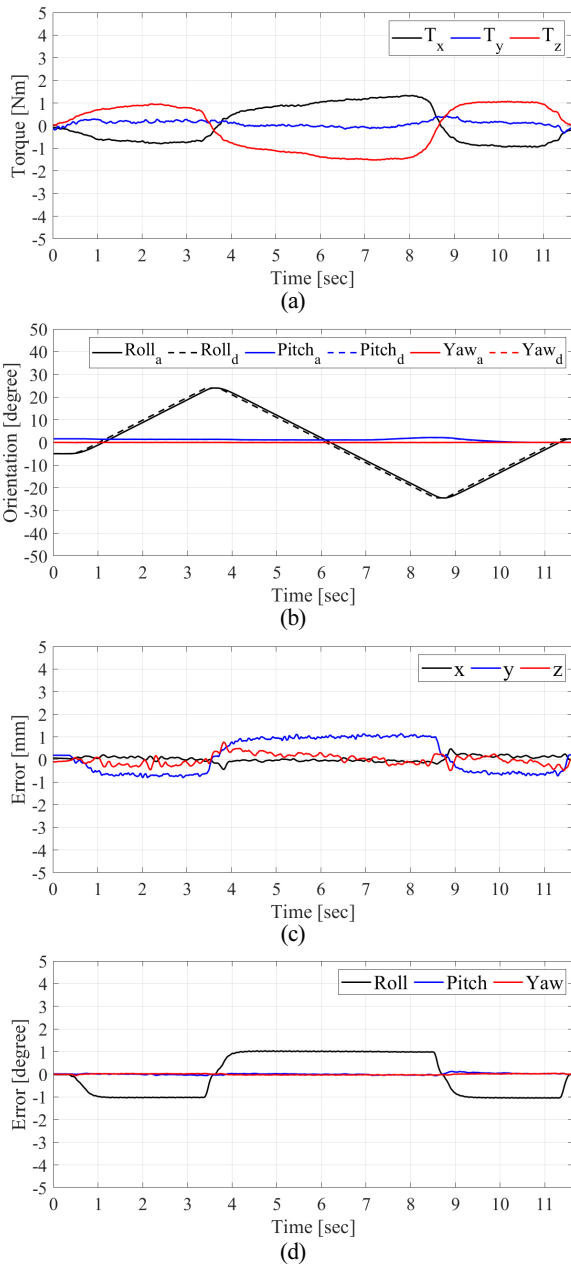
#### 4.1 Pan 운동 직접교시

엔드이펙터를 잡고 Pan (Roll) 운동을 교시할 때 [Fig. 7(a)]와 같이 힘/토크 센서에 토크가 발생하였고, 이에 따라 [Fig. 7(b)]의 점선과 같은 자세 명령이 생성되어 로봇에 인가되어 실선과 같이 추종했다. 센서 좌표계에서는 z-축 토크  $T_z$ 가 Pan 운동의 명령을 만드는데 사용되었고, x-축 토크  $T_x$ 는 Spin 운동과 관련된 요소이기 때문에 명령 생성 알고리즘에서 무시되었다. Pan 운동의 경우  $1.52 \text{ N}\cdot\text{m}$ 이내 토크로 교시가 가능함을 볼 수 있다. 직접교시를 진행하는 동안 원격중심의 위치 오차는 [Fig. 7(c)]와 같이  $1.15 \text{ mm}$  이내로 유지되었고, 생성된 명령에 대한 자세 오차는 [Fig. 7(d)]와 같이  $1.05^\circ$  이내로 추종하는 것을 확인할 수 있다.

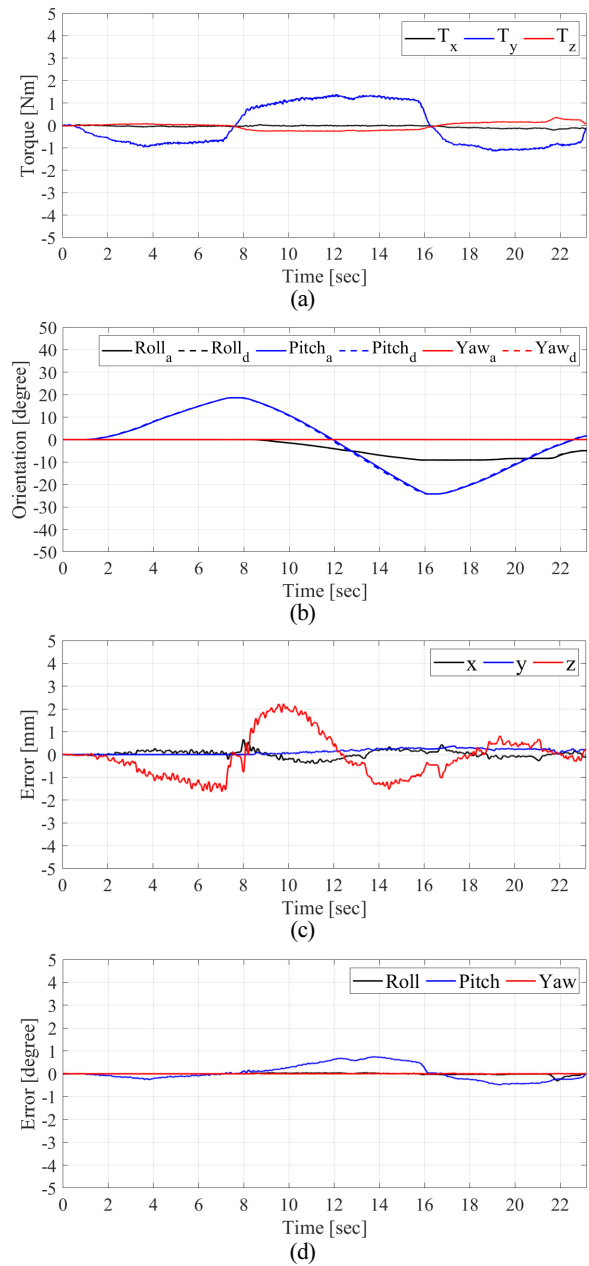
#### 4.2 Tilt 운동 직접교시

엔드이펙터를 잡고 Tilt (Pitch) 운동을 교시할 때 [Fig. 8(a)]와 같이 힘/토크 센서에 토크가 발생하였고, 이에 따라 [Fig. 8(b)]의 점선과 같은 자세 명령이 생성되어 직접교시를 수행했다. 센서 좌표계에서는 y-축 토크  $T_y$ 가 Tilt 운동의 명령을 만드는데 사용되었다.  $1.39 \text{ N}\cdot\text{m}$ 이내 토크로 교시가 가능하였고, 직접교시를 진행하는 동안 원격중심의 위치 오차는 [Fig. 8(c)]와 같이  $2.23 \text{ mm}$  이내로 유지되었다. 생성된 명령에 대한 자세 오차는 [Fig. 8(d)]와 같이  $0.75^\circ$  이내로 추종했다. Pan 운동에 비해 원격중심 오차가 큰 이유는 로봇의 기구적 특성 때문이다. 원격중심의 위치와 구동관절 축 사이의 거리에 비례하여 관절각 오차에 따른 위치 오차가 증폭된다. Pan 운동은 1, 5, 6번 관절이 연동하여 주된 움직임을 생성하고, 특히 6번 관절의 움직임이 지배적이어서 원격중심과 관절의 거리가 상대적으로 짧다. Tilt 운동은 2, 3, 4번 관절이 연동하여 주된 움직임을 관장하는데 기구의 링크 길이만큼 구동관절의 오차에 대한 끝단 위치 오차가 증가하기 때문에 Pan 운동에 비해 원격중심 위치 오차가 증가한다.

임상의의 관점에서 직경 5 mm 투관침 기준 약 2 mm의 위치 오차는 허용 가능하다는 소견을 받았다. 그러나 Da Vinci System의 경우 최대 오차  $0.441 \text{ mm}$ 의 정밀도<sup>[10]</sup>를 보이고 있어 본 로봇의 위치 오차에 개선이 필요하다.



[Fig. 7] Experimental results in pan motion: (a) torque profile of F/T sensor, (b) desired and actual orientation of end-effector, (c) position error of remote center, (d) orientation error

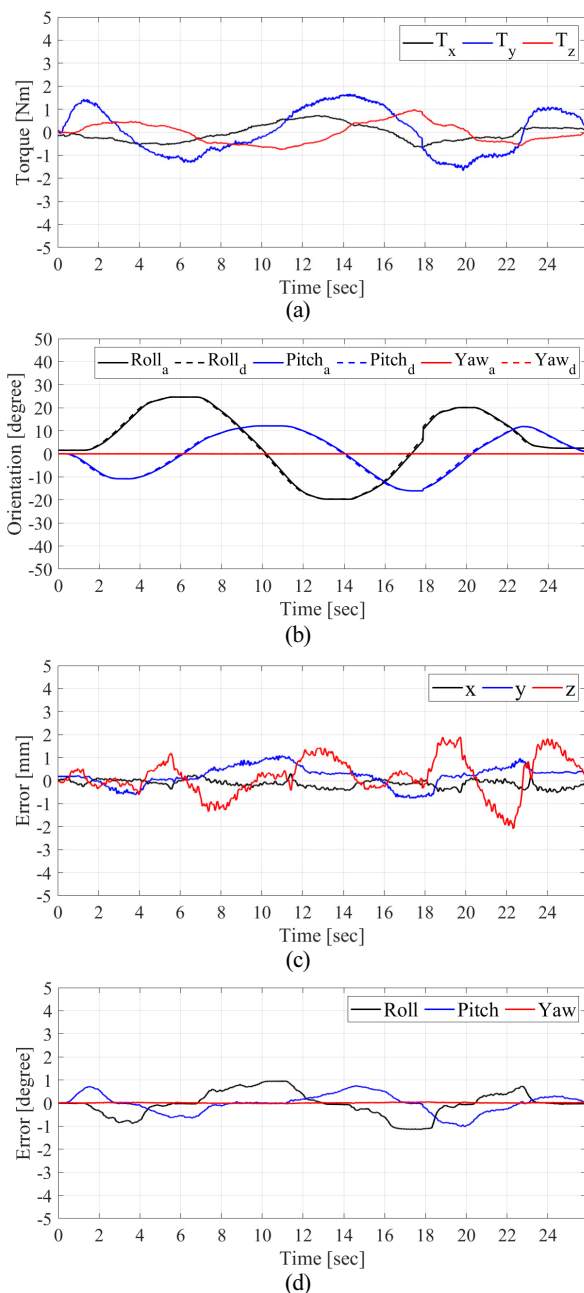


[Fig. 8] Experimental results in tilt motion: (a) torque profile of F/T sensor, (b) desired and actual orientation of end-effector, (c) position error of remote center, (d) orientation error

### 4.3 Pan-Tilt 혼합운동 직접교시

엔드이펙터를 잡고 Pan 운동과 Tilt 운동을 혼합하여 원격 중심을 기준으로 원뿔과 같은 궤적을 만들도록 직접교시했다. 교시하는 동안 [Fig. 9(a)]와 같이 힘/토크 센서에 토크가 발생하였고, 이에 따라 [Fig. 9(b)]와 같은 궤적으로 직접교시를 수행했다. 1.67 N·m 이내 토크로 교시가 가능하였고, 직접교시를 진행하는 동안 원격중심의 위치 오차는 [Fig. 9(c)]와 같이 2.10 mm 이내로 유지되었다. 생성된 명령에 대한 자세

오차는 [Fig. 9(d)]와 같이 1.14° 이내로 추종했다. 회전 방향에 따라 [Fig. 9(a)]와 같이 토크의 크기가 비대칭적으로 발생하는 것을 관찰할 수 있듯이 조작자가 교시하는 동안 자체에 따라 손에 느껴지는 토크가 균일하지 않아 불편함을 느꼈다. 그 결과, [Fig. 9(b)]의 18초 부근처럼 급격하게 변하는 움직임을 확인할 수 있다. 사용성 개선을 위해 로봇이 직접교시에 대한 등방성의 강성을 보일 수 있도록 제어 알고리즘의 수정이 필요하다.



[Fig. 9] Experimental results in pan-tilt combination motion: (a) torque profile of F/T sensor, (b) desired and actual orientation of end-effector, (c) position error of remote center, (d) orientation error

## 5. 결 론

수술보조로봇의 가장 필수적인 기능은 원격중심운동이고, 수술자가 가장 직관적으로 원격중심운동을 조작할 수 있는 방법은 직접교시이다. 본 연구에서는 협동로봇 끝단에 힘/토크 센서를 부착하고 측정값을 바탕으로 직접교시 명령을 생성하여 위치제어하는 제어 전략을 제시하였다. 위치제어로 원격중심 위치를 견실하게 유지하면서 힘/토크 센서로 민감한 직접

교시 성능을 이끌어냈다. 약 1.5 N·m의 토크로 약 2 mm 이내의 원격중심 위치 오차를 보이며 Pan, Tilt 운동을 직접교시 할 수 있었다. 기존의 수술로봇과 비교했을 때 원격중심 위치 오차를 줄일 필요가 있으며, 단순 감쇄 시스템 모델을 바탕으로 설계된 명령 생성 알고리즘만으로는 부드러운 직접교시 조작감에 한계가 있다. 추후 하드웨어 측면에서 위치오차 원인 분석 및 개선을 수행하고, 힘/토크 센서를 단순히 명령 입력 도구가 아닌 페루프 제어의 관측기로 포함하여 사용자가 느끼는 힘과 토크를 유연하게 보상하도록 고도화된 제어를 설계할 계획이다.

## 사 사

본 연구는 ㈜이룸(대구)의 장비를 활용하여 수행했다.

## References

- [1] S.-D. Lee, K.-H. Ahn, and J.-B. Song, "Torque control based sensorless hand guiding for direct robot teaching," *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Daejeon, South Korea, pp. 745-750, 2016, DOI: 10.1109/IROS.2016.7759135.
- [2] K.-H. Ahn and J.-B. Song, "Cartesian Space Direct Teaching for Intuitive Teaching of a Sensorless Collaborative Robot," *Journal of Korea Robotics Society*, vol. 14, no. 4, pp. 311-317, Dec., 2019, DOI: 10.7746/jkros.2019.14.4.311.
- [3] A. Albu-Schäffer, S. Haddadin, Ch. Ott, A. Stemmer, T. Wimböck, and G. Hirzinger, "The DLR lightweight robot: design and control concepts for robots in human environments," *Industrial Robot: the international journal of robotics research and application*, vol. 34, no. 5, pp. 376-385, 2007, DOI: 10.1108/01439910710774386.
- [4] C. Park, J. H. Kyung, H. M. Do, and T. Choi, "Development of direct teaching robot system," *2011 8th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI)*, Incheon, South Korea, pp. 730-732, 2011, DOI: 10.1109/URAI.2011.6145921.
- [5] J.-H. Ahn, S. Kang, C. Cho, J. Hwang, and M. Suh, "Design of Robot Direct-Teaching Tool and Its Application to Path Generation for Die Induction Hardening," *2002 International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, Jeonbuk, South Korea, pp. 2356-2360, 2002, [Online], <http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE02013830>.
- [6] H.-J. Kim, J.-H. Back, and J.-B. Song, "Direct Teaching and Playback Algorithm for Peg-in-Hole Task using Impedance Control," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 15, no. 5, pp. 538-542, 2009, DOI: 10.5302/j.icros.2009.15.5.538.
- [7] G. Zong, X. Pei, J. Yu, and S. Bi, "Classification and type synthesis of 1-DOF remote center of motion mechanisms," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 43, no. 12, pp. 1585-1595, 2008, DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2007.12.008.

- [8] S. Jin, S. Han, "Gain Optimization of Kinematic Control for Wire-driven Surgical Robot with Layered Joint Structure Considering Actuation Velocity Bound," *Journal of Korea Robotics Society*, vol. 15, no. 3, pp. 212-220, September, 2020, DOI: 10.7746/jkros.2020.15.3.212.
- [9] R. M. Murray, Z. Li, and S.S. Sastry, "Wrenches and Reciprocal Screw," *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation*, 1st ed., CRC Press, 1994, ch. 2, sec. 2.5, pp. 61-69, [online] <https://www.routledge.com/A-Mathematical-Introduction-to-Robotic-Manipulation/Murray/p/book/9780849379819>.
- [10] J. T. Wilson, T.-C. Tsao, J.-P. Hubschman, and S. Schwartz, "Evaluating Remote Centers of Motion for Minimally Invasive Surgical Robots by Computer Vision," *2010 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, Montreal, ON, Canada, pp.1413-1418, 2010, DOI: 10.1109/AIM.2010.5695924.



**김민효**

2019 인제대학교 전자IT기계자동차 공학부 (학사)

2019~현재 부산대학교 기계공학부 석사과정 학생

관심분야: 로봇 설계 및 제어



**진상록**

2008 서울대학교 기계항공공학부(학사)

2014 서울대학교 기계항공공학부(박사)

2014~2016 서울대학교 기계항공공학부 연수연구원

2016~2017 University of Texas Health Science Center Senior Research Associate

2017~현재 부산대학교 기계공학부 조교수

2019~현재 부산대학교병원 융합의학기술원 의료기기실장

관심분야: 의료 로봇 설계 및 제어