

초미세수술 로봇의 안정적인 원격조작을 위한 제어시스템 설계

Control System Design for Stable Teleoperation of Supermicrosurgical Robot

김 건 욱¹, 델가도 라이마리우스², 인 용 석[†]
Geonuk Kim¹, Raimarius Delgado², Yong Seok Ihn[†]

Abstract: In this study, we developed control system for stable teleoperation of supermicrosurgical robot platform. The supermicrosurgical robot platform is designed to perform precise anastomosis with micro vessels ranging from 0.3 mm to 0.7 mm. The robotic assistance could help more precise manipulation than manual surgery with the help of motion scaling and tremor filtering. However, since the robotic system could cause several vulnerabilities, control system for stable teleoperation should be preceded. Therefore, we first designed control system including inverse kinematics solver, clutch error interpolator and finite state machine. The inverse kinematics solver was designed to minimized inertial motion of the manipulator and tested by applying orientational motion. To make robot slowly converges to the leader's orientation when orientational error was occurred during clutch, the SLERP was used to interpolate the error. Since synchronized behavior of two manipulators and independent behavior of manipulator both exist, two layered finite state machines were designed. Finally, the control system was evaluated by experiment and showed intended behavior, while maintaining low pose error.

Keywords: Supermicrosurgical Robot, Control System, Teleoperation

1. 서 론

초미세수술은 0.3 mm 에서 0.7 mm 정도의 매우 미세한 혈관이나 신경을 문합하는 수술이다¹⁾. 미세한 혈관이 많이 분포하고 있는 수부이식 수술이나 피부와 근육 및 혈관을 동시에 이식하는 미세유리피판술 등을 수행할 때 주로 활용되는 수술 법이지만 매우 높은 난이도로 인해 숙련된 의사만이 수행할

수 있다. 이 때문에 모션 스케일링과 손떨림 제거 등의 기능을 통해 복강경 수술 분야에서 효과를 보여준 수술 로봇 시스템을 통해 그 어려움을 극복하고자 한 시도가 있었으며 이를 통해 그 가능성을 보여주었다²⁻⁴⁾.

하지만 미세수술을 목적으로 하여 개발된 시스템이 아니기 때문에 미세수술에서 요구하는 수준의 확대 비율을 갖추지 못한 점과 상대적으로 큰 수술용 말단부의 크기가 한계점으로 지적되었다⁵⁾. 이 때문에 (초)미세수술을 위해 고배율의 수술용 현미경과 함께 사용될 수 있고, 충분히 작은 수술용 말단부를 가진 수술 로봇 시스템들이 연구되고 있다⁶⁻⁸⁾.

[Fig. 1]은 기존 수술용 현미경과 같이 활용 할 수 있으며 두 명의 수술자가 동시에 로봇을 통한 원격조작으로 초미세수술을 진행할 수 있도록 개발된 로봇 시스템이다. 이러한 로봇 시스템을 통해 초미세수술을 수행하기 위해서는 로봇 시스템의 기구적인 특성과 동작 방법이 반영된 원격조작 제어 시스템의 설계가 필요하다.

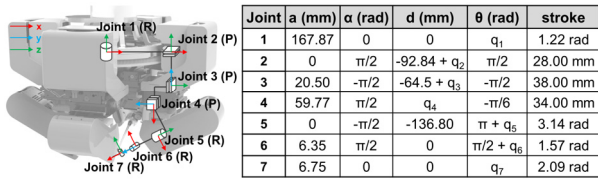
따라서 본 논문에서는 [Fig. 1]의 초미세수술 로봇을 안정적

Received : Dec. 11. 2023; Revised : Jan. 23. 2024; Accepted : Feb. 7. 2024

※ This work was supported in part by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (No. 2022M3C1A3081359); and in part by the Korea Institute of Science and Technology (KIST) Institutional Program (No. 2E32982).

1. MS Student, Mechanical engineering, Korea university and Center for Intelligent & Interactive Robotics, Korea Institute of Science and Technology (KIST), Seoul, Korea (kst33254@kist.re.kr)
2. Postdoctoral Researcher, Center for Intelligent & Interactive Robotics, Korea Institute of Science and Technology (KIST), Seoul, Korea (raim.delgado@kist.re.kr)

† Senior Research Scientist, Corresponding author: Center for Intelligent & Interactive Robotics, Korea Institute of Science and Technology (KIST), Seoul, Korea (yongseok.ihn@kist.re.kr)



[Fig. 1] Supermicrosurgical robot platform and DH parameter

으로 원격조작하기 위한 제어 시스템을 개발하고자 한다. 이를 위해 로봇의 구조를 고려하여 베이스에 전달되는 힘을 줄이기 위한 역기구학을 해석하였다. 또한, 교시장치와 로봇 사이의 연결을 끊은 후 교시장치를 재위치 시키는 클러치 기능 사용에서 발생할 수 있는 방향 자세 오차를 보간을 통해 부드럽게 이어주는 방법을 적용하였다. 마지막으로 각 매니플레이터의 행동을 관리하기 위한 유한 상태기계 모델을 설계하였으며, 이를 통해 실제 로봇 시스템에 적용하여 테스트함으로써 검증은 진행하였다.

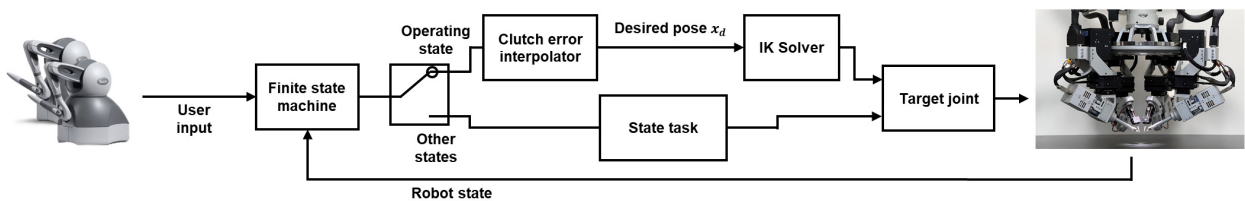
2. 초미세수술 로봇 시스템 구성

본 연구에서 사용된 초미세수술 로봇은 [Fig. 1]과 같이 총 네 개의 매니플레이터가 디스크형 베이스를 공유하고 있으며, 디스크형 베이스의 원주 형태의 경로로 구동되는 한 축의 관절을 가지고 있다. 그리고 삼차원 공간에서 정밀한 위치 이동을 위해 세 축의 병진 운동을 할 수 있는 관절을 가지고 있다. 마지막으로 좁은 공간에서 자유로운 방향 전환을 위해 말단부에 세 축의 회전 관절을 가지고 있다.

각 관절은 일반적인 전기 모터들로 구동되며, 이를 제어하기 위해 EPOS4 24/1.5 (maxon motor) 제어가 사용되었다. 각 관절은 이더넷(EtherCAT) 통신 방법을 통해 상위 마스터 제어기와 각 관절 제어 값을 주고받는다. 사용자의 움직임을 로봇에 전달하기 위한 교시장치로는 Touch (3D Systems)를 사용하고 있고 USB를 통해 통신한다.

3. 제어 시스템 설계

[Fig. 2]는 본 연구에서 제시하는 초미세수술 로봇의 원격조작 제어 시스템을 나타낸다. 교시장치를 통해 사용자의 움직



[Fig. 2] Control system for teleoperation of supermicrosurgical robot

임과 버튼 입력을 받아 로봇이 동작하며, 로봇이 안정적으로 동작하기 위해서 본 연구에서는 역기구학 해석과 클러치 에러 보간기, 그리고 유한 상태기계 모델을 설계하였다.

3.1 역기구학 해석

[Fig. 1]의 로봇은 좁은 수술 공간에서도 사용될 수 있도록 하기 위해 작은 크기를 가지도록 설계 되었으나, 공중에 떠 있는 베이스를 공유 함으로써 매니플레이터에서 발생하는 반작용 힘이 진동으로써 다른 매니플레이터에 전달될 수 있는 어려움이 있다.

케이블 생성을 통한 방식으로 진동을 감소시키는 연구들이 다수 존재하지만^{9,10}, 큰 관성모멘트를 가진 몸체의 원운동은 일정한 각속도를 가지고 움직이더라도 지속적으로 방향이 변하는 원심력을 만들어내게 된다. [Fig. 1]의 첫번째 관절이 이에 해당하는데, 말단부의 방향을 전환하는데 있어 첫 번째 관절을 동원함으로써 보다 자유로운 방향 변경이 가능하지만, 이로 인해 발생하는 힘이 베이스에 전달 됨으로써 정밀한 작업을 수행하는 데에 있어 악영향을 미칠 수 있다. 따라서 첫 번째 관절의 구동을 최소화하여 줄 필요가 있다.

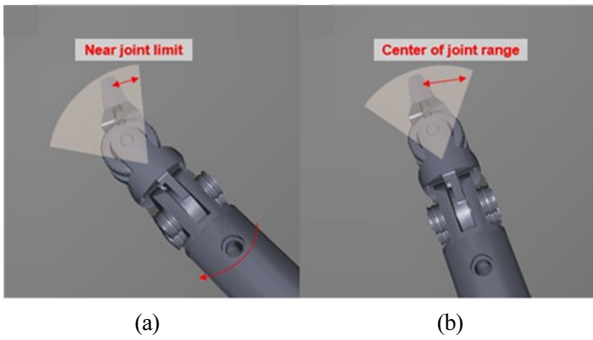
총 7자유도로 6자유도의 작업을 수행하는 데에 있어 여유 자유도를 가진 매니플레이터의 역기구학 해는 무수히 많이 존재하며, 속도 기구학을 통해 구할 수 있다. 자코비안 행렬 J 를 통해 목표 자세를 추종하기 위한 해를 구하는 식은 아래와 같다.

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}^+ \dot{\mathbf{x}} \quad (1)$$

식 (1)을 통해 역기구학 해를 구하게 될 경우 작업 오차인 $\|\dot{\mathbf{q}} - \mathbf{J}^+ \dot{\mathbf{x}}\|$ 를 최소화하기 위한 해로 관절들의 속도의 norm인 $\|\dot{\mathbf{q}}\|^2$ 를 최소화하는 해를 생성하게 된다. 따라서 해를 구하기 위해 자코비안에 각 관절의 가동률을 조절해 줄 수 있는 가중치 행렬이 들어간 가중치 유사 역행렬(weighted pseudo inverse)를 사용하였다.

$$\mathbf{J}_W^+ = \mathbf{W}^{-1} \mathbf{J}^T (\mathbf{J} \mathbf{W}^{-1} \mathbf{J}^T)^{-1} \quad (2)$$

$$\mathbf{W} = \text{diag}(w_1, w_2, w_3, w_4, w_5, w_6, w_7)$$



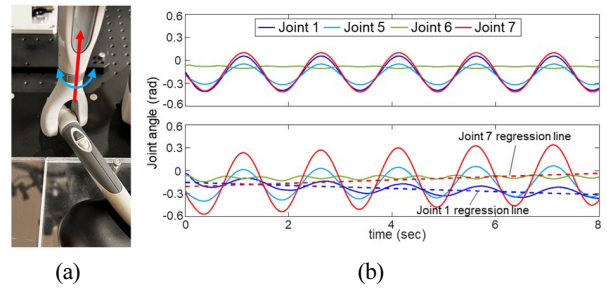
[Fig. 3] (a) First joint moves to ensure joint range of end-effector (b) Joint range ensured after some time

식 (2)를 통해 해를 구할 경우 $\|\dot{\mathbf{q}}\|_W^2 = \dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{W} \dot{\mathbf{q}}$ 를 최소화 하는 해를 얻게 되며, 이로 인해 큰 값의 w_i 를 설정할 수록 i 번째 관절의 가동률이 줄어들게 된다. 따라서 w_1 에 w_5, w_6, w_7 보다 큰 값을 설정함으로써 첫 번째 관절의 가동률이 줄어들게 하였다.

하지만 이 경우 첫 번째 관절의 가동을 최소화 한 상태로 방향을 표현할 수 있는 범위가 말단부의 관절 범위까지로 제한 되는데, 이를 넘어가게 되면 첫 번째 관절이 크게 움직이게 된다. 따라서 [Fig. 3]과 같이 여유자유도의 이점을 살려 첫 번째 관절이 말단부 세 개 관절이 관절 한계를 회피하도록 하는 위치로 서서히 수렴함으로써 첫 번째 관절의 큰 움직임 없이 말단부 관절들이 관절 한계로부터 멀어질 수 있도록 하였다. 이를 위해 관절 한계 회피를 위한 영공간 작업을 말단부 3개의 관절에만 적용되도록 설정하였으며, 이를 위한 역기구학 해석은 아래의 식 (3)과 같다. 이 때 첫 번째 관절이 충분히 천천히 움직이도록 하기 위하여 영공간 작업의 계수 k 를 작은 값으로 설정하였다.

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{q}} &= \mathbf{J}_W^{\dagger} \dot{\mathbf{x}} + (\mathbf{I} - \mathbf{J}_W^{\dagger} \mathbf{J}) \dot{\mathbf{q}}_N \quad (3) \\ \dot{\mathbf{q}}_N &= -\nabla_q \left(k \sum_{i=5}^7 \left(\frac{q_i - \bar{q}_i}{q_{max,i} - q_{min,i}} \right)^2 \right) \\ \bar{q}_i &= \frac{q_{max,i} + q_{min,i}}{2} \end{aligned}$$

위의 역기구학 해석을 검증하기 위해 각각 식 (1)과 식 (3)을 적용한 상태에서 [Fig. 4(a)]와 같이 교시장치의 관절 한 축에는 사인함수 형태의 값을 생성하고 나머지 관절 값은 고정된 상태로 목표 움직임을 생성하였다. 이렇게 생성된 교시장치의 움직임을 추종하기 위해 역기구학을 통해 생성된 로봇 관절 값은 [Fig. 4(b)]와 같다. 가중치 행렬을 적용함으로써 첫 번째 관절의 가동률이 약 40% 가량 감소하였으며, 시간이 지날수록 점선으로 표현된 첫 번째 관절 값의 회귀선이 이동함에 따

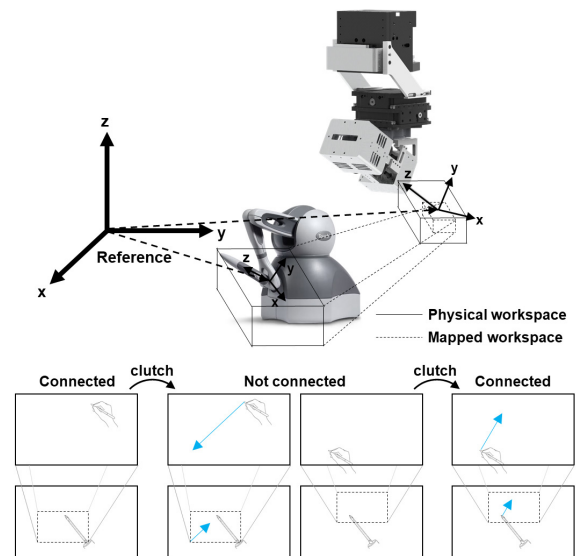


[Fig. 4] Test for inverse kinematics solver. (a) One of the joint values of leader device was generated by sine function and others are fixed. (b) Generated robot joint values to follow leader motion (upper: eqn (1), lower: eqn (3)). Dashed line represents linear regression line of joint 1 and joint 7

라 일곱 번째 관절 값의 회귀선이 0에 가까워지는 것으로 볼 때 영공간 작업이 의도한대로 동작하고 있음을 확인할 수 있다.

3.2 클러치 에러 보간기

원격조작을 통해 움직이는 수술 로봇의 경우 [Fig. 5]와 같이 교시장치의 작업영역이 로봇의 작업영역 상에 매핑 된다. 로봇은 매핑된 작업영역 상에서 교시장치의 움직임을 따라 움직이게 되는데, 사용자의 움직임을 축소시키는 모션 스케일링 기능으로 인해 해당 영역이 축소되게 된다. 이 때문에 로봇은 더 이동할 수 있지만 교시장치가 작업영역의 끝에 닿아 더 이상 움직일 수 없는 경우가 생기게 된다. 따라서 교시장치와 로봇 사이의 연결을 끊은 후 교시장치를 자유롭게 움직일 수 있는 위치로 이동시킨 후 다시 조작을 재개하는 클러치 기능이 사용된다.



[Fig. 5] Workspace mapping of surgical robot teleoperation. Robot mimics motion of leader device in mapped workspace and clutch is utilized to move beyond the mapped workspace

클러치 기능을 사용하여 교시장치를 이동시키는 과정에서 사람이 손의 방향을 전혀 변화시키지 않고 이동시키기는 어렵기 때문에 클러치 기능 사용 전후로 불 연속적인 방향 자세의 변화가 일어날 수 있다. 다빈치 수술 로봇의 경우 모터가 달려 있는 교시장치를 통해 클러치 과정 중 방향 자세의 변화가 생길 경우 스스로 로봇의 자세에 맞춰지도록 교시장치의 방향을 전환한다^[12]. 하지만 모터가 갖춰지지 않은 교시장치나 기구적 구조 없이 펜 형태로 된 핸드헬드 방식의 교시장치^[13,14]의 경우 이러한 방법으로 방향 자세를 복원하기 힘들다. 이 때문에 의도치 않은 방향 전환이 이루어질 수 있고, 이는 주변 조직에 손상을 입힐 수 있다.

이를 해결하기 위해 클러치 기능 사용 전의 방향 자세로부터 현재 교시장치의 방향 자세 사이를 보간 하여 자연스럽게 현재 교시장치의 자세로 수렴하도록 하였다. 이때 방향 자세의 부드러운 보간을 위하여 구면 선형 보간을 사용하였으며, 이를 통해 생성된 목표 방향 자세는 아래와 같다.

$$\mathbf{q}_t = \mathbf{q}_0 (\mathbf{q}_0^{-1} \mathbf{q}(k))^{u(k)} \quad (4)$$

식 (4)의 \mathbf{q}_0 는 클러치 기능 사용 직전의 방향을 나타내는 쿼터니언이며, $\mathbf{q}(k)$ 는 조작을 재개한 이후 현재 방향을 나타내는 쿼터니언이다. 보간 비율은 $u(k)$ 를 통해 결정되는데, $u(k)$ 가 1에 가까워질수록 목표 방향 자세 \mathbf{q}_t 는 $\mathbf{q}(k)$ 에 가까워진다. 이 때 사용자가 의도적으로 방향을 전환할 때에만 방향 자세의 변화가 이루어 지도록 하기 위해서 아래의 식과 같이 회전 각속도의 크기가 임계값 ϵ 를 초과할 때에만 보간 비율 $u(k)$ 가 제어 주기 T_c 를 수렴 시간 T_i 로 나눈 만큼 증가하도록 하였다.

$$u(k) = \begin{cases} u(k-1) + T_c/T_i & \|\mathbf{w}\| > \epsilon \text{ \& } u(k) < 1 \\ u(k-1) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

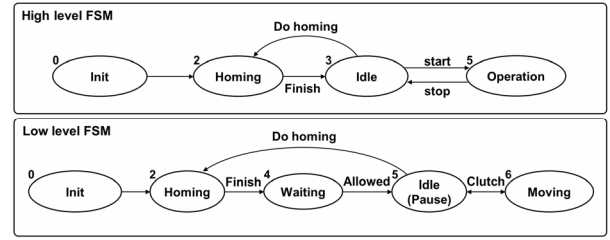
where

$$\mathbf{w} = \begin{cases} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ r_{11} + 1 \\ r_{22} + 1 \\ r_{33} + 1 \end{bmatrix} & R(k) = E \\ \frac{\pi}{2} & R(k) \text{ is diagonal} \\ \theta \frac{l}{\|\mathbf{l}\|} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\mathbf{R}(k) = \mathbf{R}_{k-1}^T \mathbf{R}_k = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{l} = \begin{bmatrix} r_{32} - r_{23} \\ r_{13} - r_{31} \\ r_{21} - r_{12} \end{bmatrix}$$

$$\theta = \arctan(\|\mathbf{l}\|, r_{11} + r_{22} + r_{33} - 1)$$



[Fig. 6] Finite state machine in two layers. High-level FSM manages synchronized behavior of two manipulators and low-level FSM manages operation of each manipulator. The states are represented by the number next to ellipse

\mathbf{w} 는 시간 $k-1$ 과 k 에서 교시장치의 방향 차이를 나타내는 회전행렬 $\mathbf{R}(k)$ 와 같은 회전을 나타내는 임의 축 회전 (axis-angle rotation) 벡터이며^[15], 이는 1 초 동안 $\mathbf{R}(k)$ 만큼 회전시킬 수 있는 각속도 벡터 와도 같다^[16].

3.3 유한 상태기계 디자인

수술 로봇의 각 매니플레이터는 각각의 교시장치를 통해 독립적으로 동작하지만, 사용자 입장에서는 양 손을 통해 두 개의 매니플레이터를 동시에 조작한다. 따라서 [Fig. 6]와 같이 교시장치를 통해 각 매니플레이터의 행동을 관리하는 하위의 유한 상태기계와 두 개의 매니플레이터의 동기적인 행동을 관리하기 위한 상위의 유한 상태기계를 구성하였다. 이 때 하위 유한 상태기계의 행동을 상위 유한 상태기계에서 관리해 주기 위하여 상위의 명령에 의해 진입하고 빠져나올 수 있는 대기 (waiting) 상태를 추가 해 주었다.

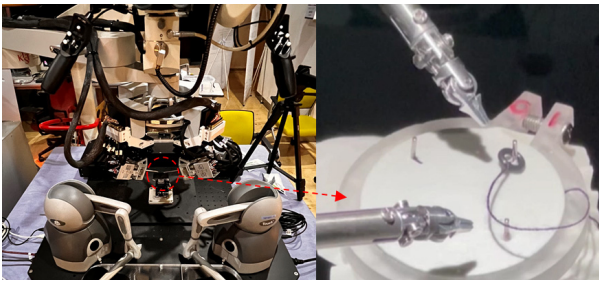
4. 실험

4.1 초미세수술 로봇 원격조작 실험

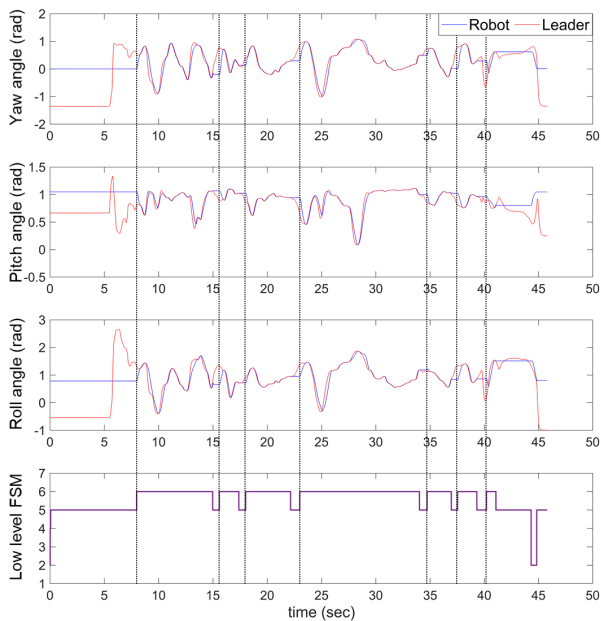
설계한 제어 시스템의 동작 성능을 평가하기 위하여 [Fig. 7]과 같이 초미세수술 로봇 시스템을 통해 peg-in-hole 셋업에서 고무링을 자유롭게 다루는 실험을 진행하였다. 클러치 에러 보간기의 동작을 확인하기 위하여 클러치 기능 사용 과정에서 일부러 교시장치의 방향을 전환하였으며, 교시장치와 로봇의 방향을 나타낸 오일러 각과 매니플레이터의 상태를 기록 하였다.

4.2 실험 결과 및 분석

[Fig. 8]은 클러치 에러 보간기가 적용되지 않았을 때의 교시장치 및 로봇의 방향 오일러 각과 유한 상태기계의 상태를



[Fig. 7] Test setup for control system performance test. Manipulate rubber ring on peg-in-hole setup without any rules

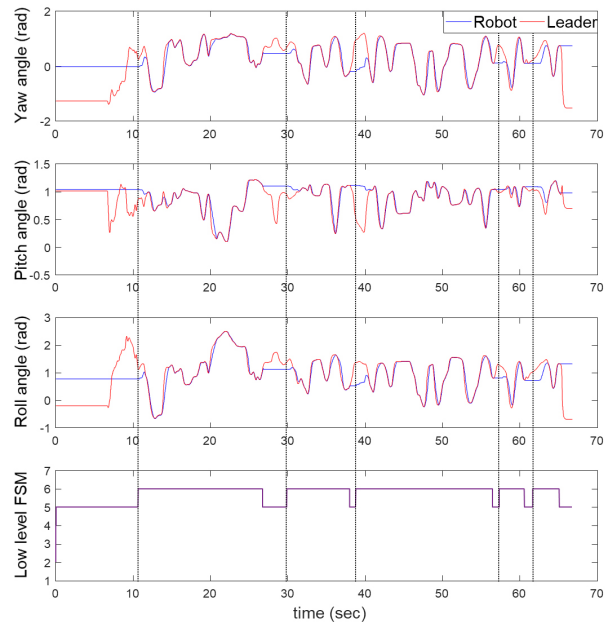


[Fig. 8] Euler angles representing orientation of the robot and leader device. When clutch was used and re-connected (dotted-line), robot immediately followed the leader device. For the states represented by each number, refer to [Fig. 6]

나타낸다. 점선으로 표시된 지점이 클러치 기능을 사용한 후 다시 교시장치를 통한 조작이 재개되는 시점이며, 이 때 로봇의 방향 오일러 각이 교시장치의 방향 오일러 각을 급격하게 추종하는 것을 확인할 수 있다.

[Fig. 9]는 클러치 에러 보간기가 적용 되었을 때의 결과이며, 조작이 재개된 시점에 로봇의 방향 오일러 각이 교시장치의 것을 바로 추종하지 않고, 어느 정도의 시간을 두고 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 조작 재개시 로봇의 방향 전환이 잠깐 지연되는 경우도 존재하였는데, 이는 교시장치의 방향 전환 속도가 일정 값 이하인 상황이었기 때문에, 사용자가 의도한 조작이 아니라 판단하여 움직이지 않은 경우이다.

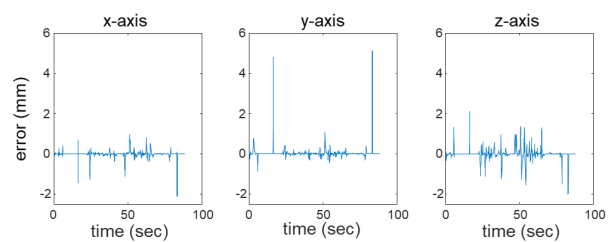
단순히 교시장치와 로봇 사이의 오차 관점에서 바라볼 경우 [Fig. 8]의 결과가 더 바람직 하지만, 실제로 클러치 기능 사용시 발생하는 방향 전환은 사용자가 의도하지 않은 것이 대



[Fig. 9] Euler angles representing orientation of the robot and leader device. When clutch was used and re-connected (dotted-line), robot slowly followed the leader device. For the states represented by each number, refer to [Fig. 6]

[Table 1] Position and orientation error

Axis	Left		Right	
	Position (rmse, mm)	Orientation (mean, rad)	Position (rmse, mm)	Orientation (mean, rad)
x	0.184	0.012	0.539	0.022
y	0.361	0.012	0.360	0.023
z	1.865	0.003	1.885	0.010



[Fig. 10] Position error for left manipulator. High peak occurred when large movement is ordered, since prismatic joint requires some time to reach

부분이다. 또한 직접 손을 보며 수술 작업을 진행하지 않기 때문에 클러치 기능 사용 후에 로봇의 방향 자세가 어떻게 변하게 될 지 예측하는 것은 어렵다. 따라서 [Fig. 9]와 같이 사용자가 의도치 않은 방향 전환을 바로 따라가기보단 천천히 수렴해 가는 것이 바람직 하다.

[Table 1]은 로봇의 목표 자세에 대한 추종 오차를 나타낸다. 양쪽 매니플레이터 모두에서 x, y축에 대해서는 0.5 mm 내

외의 오차를 보여주었으며, z축에서는 2 mm 아래의 오차를 보여주었다. 이는 [Fig. 10]과 같이 대부분의 오차가 병진 운동과 관련된 관절이 목표 위치까지 도달하는데 걸리는 시간으로 인해 발생한 오차였으며, 작은 모션이 발생했을 때에는 매우 낮은 오차가 발생하고 있음을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 초미세수술로봇을 안정적으로 원격조작하기 위한 제어 시스템을 제안하였다. 제안된 제어 시스템은 공중에 떠 있는 베이스를 공유하는 기구학적 구조로 인하여 큰 관성 움직임을 발생시키는 첫 번째 관절의 움직임을 최소화하도록 역기구학을 해석하였으며, 클러치 상황에서 발생할 수 있는 의도치 않은 방향 전환을 방지하기 위한 클러치 에러 보간기를 포함하고 있다. 또한, 두 계층의 유한 상태기계를 통해 두 매니퓰레이터의 동기화된 움직임과 독립적인 위치 추종 작업의 행동을 관리할 수 있도록 하였다.

가중치 유사 역행렬과 영공간 작업을 적용한 역기구학 해석을 통해 일반 자코비안 유사 역행렬(pseudo inverse)을 사용하였을 때 보다 첫 번째 관절의 가동률을 약 40% 감소시킬 수 있었으며, 이로 인해 베이스에 전달되는 힘을 줄임으로써 흔들림을 감소시킬 수 있었다. 클러치 에러 보간기를 통해 클러치시 발생할 수 있는 의도치 않은 방향 전환에 대해 천천히 수렴해 가는 것을 확인할 수 있었고, 이런 제어 시스템이 적용된 상태에서 1 mm 내외의 위치 추종 오차를 확보할 수 있는 것을 확인하였다.

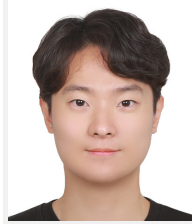
향후 연구에서는 현재 개발된 초미세수술로봇과 제어 시스템을 기반으로 적응형 모션 스케일링이나 모션 매핑 알고리즘을 적용하여 작업 시간의 증가에 대한 평가, 조작 직관성에 대한 사용자 테스트를 진행하여 미세혈관 문합과 같은 실제 초미세수술에서 로봇이 수행할 수 있는 역할에 대해 구체화할 수 있을 것으로 기대한다.

References

- [1] I. Badash, D. J. Gould, and K. M. Patel, "Supermicrosurgery: history, applications, training and the future," *Frontiers in Surgery*, vol. 5, pp. 23, 2018, DOI: 10.3389/fsurg.2018.00023.
- [2] C. G. Knight, A. Lorincz, A. Cao, K. Gidell, M. D. Klein, and S. E. Langenburg, "Computer-assisted, robot-enhanced open microsurgery in an animal model," *Journal of Laparoscopic & Advanced Surgical Techniques*, vol. 15, no. 2, pp. 182-185, May, 2005, DOI: 10.1089/lap.2005.15.182.
- [3] R. D. Katz, G. D. Rosson, J. A. Taylor, and N. K. Singh, "Robotics in microsurgery: use of a surgical robot to perform a free flap in a pig," *Microsurgery: Official Journal of the International Microsurgical Society and the European Federation of Societies for Microsurgery*, vol. 25, no. 7, pp. 566-569, Sept., 2005, DOI: 10.1002/micr.20160.
- [4] D. Saleh, M. Syed, D. Kulendren, V. Ramakrishnan, and P. Liverneaux, "Plastic and reconstructive robotic microsurgery—a review of current practices," in *Annales de Chirurgie Plastique Esthétique*, vol. 60, no. 4, Elsevier, pp. 305-312, Aug., 2015, DOI: 10.1016/j.anplas.2015.03.005.
- [5] Y. P. Tan, P. Liverneaux, and J. K. Wong, "Current limitations of surgical robotics in reconstructive plastic microsurgery," *Frontiers in Surgery*, vol. 5, pp. 22, Mar., 2018, DOI: 10.3389/fsurg.2018.00022.
- [6] M. M. Aitzetmüller, M.-L. Kliez, A. F. Dermietzel, T. Hirsch, and M. Kückelhaus, "Robotic-assisted microsurgery and its future in plastic surgery," *Journal of Clinical Medicine*, vol. 11, no. 12, pp. 3378, Jun., 2022, DOI: 10.3390/jcm11123378.
- [7] T. J. van Mulken, A. M. J. Scharmga, R. M. Schols, R. Cau, Y. Jonis, S. S. Qiu, and R. R. W. J. van der Hulst, "The journey of creating the first dedicated platform for robot-assisted (super) microsurgery in reconstructive surgery," *European Journal of Plastic Surgery*, vol. 43, pp. 1-6, 2020, DOI: 10.1007/s00238-019-01563-5.
- [8] A. Ballestin, G. Malzone, G. Menichini, E. Lucattelli, and M. Innocenti, "New robotic system with wristed microinstruments allows precise reconstructive microsurgery: preclinical study," *Annals of Surgical Oncology*, vol. 29, no. 12, pp. 7859-7867, Jun., 2022, DOI: 10.1245/s10434-022-12033-x.
- [9] Y. Fang, J. Qi, J. Hu, W. Wang, and Y. Peng, "An approach for jerk-continuous trajectory generation of robotic manipulators with kinematical constraints," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 153, pp. 103957, 2020, DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2020.103957.
- [10] G. Lee, J. Kim, and Y. Choi, "Convolution-based trajectory generation methods using physical system limits," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 135, no. 1, pp. 011001, Jan., 2013, DOI: 10.1115/1.4007551.
- [11] A. Liegeois, "Automatic supervisory control of the configuration and behavior of multibody mechanisms," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 7, no. 12, pp. 868-871, Dec., 1977, DOI: 10.1109/TSMC.1977.4309644.
- [12] C. Freschi, V. Ferrari, F. Melfi, M. Ferrari, F. Mosca, and A. Cuschieri, "Technical review of the da Vinci surgical telemanipulator," *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, vol. 9, no. 4, pp. 396-406, Dec., 2013, DOI: 10.1002/rcs.1468.
- [13] D. S. Kim, U.-J. Yang, B. Cheon, D. Baek, and D.-S. Kwon, "A novel encountered-type master device with precise manipulation for robot-assisted microsurgery," *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, vol. 17, no. 6, pp. e2314, Dec., 2021, DOI: 10.1002/rcs.2314.
- [14] D. Zhang, Y. Guo, J. Chen, J. Liu, and G.-Z. Yang, "A handheld master controller for robot-assisted microsurgery," in *2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*

(IROS), Macau, China, pp. 394-400, 2019, DOI: 10.1109/IROS40897.2019.8967774.

- [15] T. Sugihara, "Solvability-unconcerned inverse kinematics based on Levenberg-Marquardt method with robust damping," in *2009 9th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, Paris, France, pp. 555-560, 2009, DOI: 10.1109/ICHR.2009.5379515.
- [16] S. Kajita, H. Hirukawa, K. Harada, and K. Yokoi, "Kinematics", *Introduction to Humanoid Robotics*, vol. 101. Springer, 2014, ch. 2, sec. 2.2 pp. 29-36 [Online], Available: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-642-54536-8.pdf>.



김 건 욱

2022 성균관대학교 기계공학과(학사)
2022~현재 고려대학교 기계공학과 대학원 석사과정

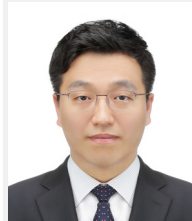
관심분야: 수술 로봇, 로봇 제어, 모션 매핑



Raimarius Delgado

2014 서울과학기술대학교 전기정보공학과(학사)
2016 서울과학기술대학교 전기정보공학과(석사)
2021 서울과학기술대학교 전기정보공학과(박사)
2021~2022 고영테크놀러지 제어그룹 의료 제어SW 파트 과장
2022~현재 한국과학기술연구원 지능로봇 연구단 박사후연구원

관심분야: Real-time systems, distributed control software, software architecture for intelligent robotics



인 용 석

2006 성균관대학교 기계공학과(학사)
2008 성균관대학교 기계공학과(석사)
2013 성균관대학교 기계공학과(박사)
2013~2014 LG전자 생산기술원 선임연구원
2014~2018 한국과학기술연구원 지능로봇 연구단 박사후연구원
2018~현재 한국과학기술연구원 지능로봇 연구단 선임연구원

관심분야: Robotic System Design and System Integration for Robotic Grasping and Manipulation