

# 와이어로 구동하는 적층형 다관절 구조를 지닌 수술 로봇의 구동 속도를 고려한 기구학적 제어기의 게인 최적화

## Gain Optimization of Kinematic Control for Wire-driven Surgical Robot with Layered Joint Structure Considering Actuation Velocity Bound

진 상 록<sup>†</sup>, 한 석 영<sup>1</sup>

Sangrok Jin<sup>†</sup>, Seokyoung Han<sup>1</sup>

**Abstract:** This paper deals with a strategy of gain optimization for the kinematic control algorithm of a wire-driven surgical robot. The proposed controller consists of the closed-loop inverse kinematics with the back-calculation method. The closed-loop inverse kinematics has 18 PID control gains, and the back-calculation method has 6 gains. An efficient strategy is designed to optimize 18 values first and then the remaining 6 values. The optimal gain sets are searched under the step input with performance indices. In this gain optimization, the objective function is defined as the minimum value of signal-to-noise ratio of the performance indices for 6 DoF (Degree-of-Freedom) motion that is based on the Taguchi method, and the constraints are applied to obtain stable responses for each motion evenly. The gain sets obtained are verified by simulations using the test trajectories. In comparative results, the optimal gain value based on the performance index combined with ISE (integral of square error) and settling time showed the best control performance.

**Keywords:** Gain Optimization, Closed-loop Inverse Kinematics, Back-calculation, Surgical Robot

### 1. 서 론

의료 분야에서 최소침습을 통한 수술 방법은 꾸준히 연구되고 있는 주제이다. 로봇을 이용한 수술 방법이 하나의 대안으로 떠올라 다양한 수술 로봇이 개발되고 있다<sup>1)</sup>. 뱀과 유사한 구조의 로봇은 작은 구멍으로 들어가 높은 자유도를 지닌 움직임을 구현할 수 있어 수술로봇의 구조로 널리 사용되고 있다<sup>2,3)</sup>. 관절을 이루는 요철이 있는 디스크를 여러 개 적층하고 이를 와이어로 관통시켜 와이어의 변위를 조절하여 전체 로봇 팔의 형상을 공간 상의 곡선의 형태로 제어할 수 있는 구

조이다. 와이어의 변위가 관절들의 회전각과 기구학적으로 구속되어 있어 로봇 팔 끝단의 위치 및 자세는 와이어의 변위에 대한 기구학 모델로 도출할 수 있다<sup>4,5)</sup>. 외부의 조종 장치로 로봇을 조종하는 수술자는 자신이 원하는 위치와 자세로 로봇의 끝단을 제어하기 원하기 때문에 위치 제어가 필요하다. 로봇 팔은 크기가 매우 작아 관성이 작고 급격한 움직임을 구현할 상황이 거의 없으며 와이어의 변위에 따라 로봇의 형상이 기구학적으로 강하게 구속되어 있기 때문에 일반적인 로봇 제어와 같은 동역학 모델보다는 기구학 모델에 기반하여 제어하는 것이 더 효과적이다.

본 연구에서는 [Fig. 1]과 같은 와이어로 구동하는 단일 경로 복강경 수술 로봇의 제어 게인 최적화를 다룬다. 하나의 와이어 구동 로봇 팔은 각각 2자유도의 근위부(proximal segment)와 말단부(distal segment)의 조인트 구조로 이루어져 있고 전체 로봇 팔은 전후진 운동과 축방향 회전 운동을 하여 전체 6 자유도 운동을 구현한다. 기구학적 제어 알고리즘으로 폐루프 역기구학(Closed-loop Inverse Kinematics)을 이용하였고,

Received : Feb. 17. 2020; Revised : May. 11. 2020; Accepted : Jun. 3. 2020

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

1. Research Engineer, College of Medicine, The Catholic University of Korea, Seoul, Korea (hansy628@gmail.com)

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



[Fig. 1] Wire-driven surgical robot for single port surgery

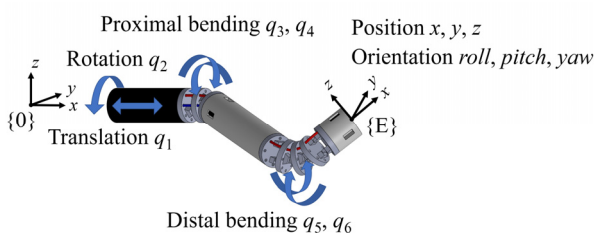
구동부의 구동속도 한계를 기구학적 제어기에 제한하기 위해 역계산법(Back-calculation)을 이용하였다<sup>6)</sup>.

폐루프 역기구학의 경우 PID 제어기와 같이 게인 조율(gain tuning)이 제어 성능에 큰 영향을 미친다. 역계산법 되먹임을 지닌 6자유도의 PID 제어기는 총 24개의 제어 게인을 지니고 있고, 이들 게인의 조율을 통해 최적의 제어 성능을 얻을 수 있다. 그러나 최적화해야 할 변수의 개수가 많아 기존의 최적화 알고리즘을 그대로 적용할 경우 발산하여 최적값을 찾지 못하거나 초기값 근처의 국소적인 최소값(local minimum)에 수렴하여 유의미한 값을 얻지 못하는 문제가 발생할 수 있다. 설계된 제어기의 게인 조율에 적합하도록 최적화 알고리즘을 적용하는 전략이 필요하고, 최적화에 사용될 목적함수와 제한조건을 적절하게 정의하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 6 자유도 PID 제어기의 게인을 먼저 최적화하고 역계산법의 최적 게인을 추후 찾는 전략으로 다양한 목적함수와 제한조건, 최적화 알고리즘의 최적화 결과를 몇 가지 기준 경로에 대해 성능 평가한다.

## 2. 수술로봇의 기구학 모델

단일경 수술을 위한 수술로봇 팔은 근위부와 말단부로 이루어져 있고, 각각의 근위부와 말단부는 수직방향으로 굽힘관절을 지니고 있으며, 전체 기구가 전후진 직선운동과 축방향 회전운동이 가능하여 [Fig. 2] 및 식 (1)과 같이 6 자유도 정기구학(forward kinematics) 모델을 수립할 수 있다<sup>6)</sup>.



[Fig. 2] Kinematic scheme of a surgical robot arm

$$T = T_{01}(q_1) \cdot T_{12}(q_2) \cdot T_{23}(q_3) \cdot T_{34}(q_4) \cdot T_{45}(q_5) \cdot T_{56}(q_6) \cdot T_{6E}$$

$$x = T_{1,4}, y = T_{2,4}, z = T_{3,4}$$

$$roll = \arctan\left(\frac{T_{3,2}}{T_{3,3}}\right),$$

$$pitch = \arctan\left(\frac{-T_{3,1}}{\sqrt{T_{3,2}^2 + T_{3,3}^2}}\right),$$

$$yaw = \arctan\left(\frac{T_{2,1}}{T_{1,1}}\right)$$

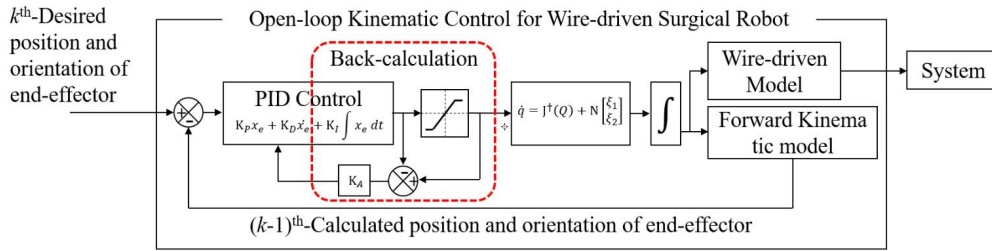
고정 좌표계인 {0}을 기준으로 각 관절에 이동 좌표계를 부착하고 각 이동좌표계 사이의 변환행렬(transformation matrix)을 순차적으로 곱하여 로봇 끝단의 이동 좌표계 {E}에 대한 변환행렬 T를 얻는다. 변환행렬로부터 로봇 끝단의 위치 및 자세를 계산할 수 있다. 아래 첨자는 변환행렬 원소의 위치를 나타내는 행과 열이다. 사슬 법칙(chain rule)을 통해 각 구동부에 부착된 이동 좌표계에 대한 자코비안(Jacobian) 행렬의 각 열을 순차적으로 얻을 수 있고, 이로부터 식 (2)와 같은 미분 역기구학(inverse kinematics)을 도출할 수 있다<sup>7)</sup>.

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \\ \dot{q}_4 \\ \dot{q}_5 \\ \dot{q}_6 \end{bmatrix} = [J_1 \ J_2 \ J_3 \ J_4 \ J_5 \ J_6]^\dagger \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ roll \\ pitch \\ yaw \end{bmatrix} \quad (2)$$

<sup>†</sup>는 행렬의 의사 역행렬(pseudo-inverse matrix)이다.

## 3. 수술로봇의 기구학적 제어기 설계

실시간으로 수술자의 조작 명령을 로봇에 전달하기 위해 기구학 모델로부터 자코비안을 지닌 미분 기구학 모델을 전개하고 이를 바탕으로 로봇 끝단의 위치 및 자세를 제어하는 PID 제어기를 설계한다. 적응형 다관절의 중속 및 관절각 분배 문제는 역기구학의 영공간해(null space solution)를 이용하여 구속할 수 있다. PID 제어기는 실제 시스템으로부터 되먹임을 받는 것이 아니라 각 조인트 각도와 로봇 팔 근위부의 직선운동 및 회전운동에 대한 정기구학 모델로부터 되먹임을 받아 역기구학 해를 도출한다. 이런 방식을 폐루프 역기구학이라고 한다<sup>8,9)</sup>. 그러나 기구학 모델에만 기반하여 설계된 제어기이기 때문에 감쇄와 같은 현이 고려되어 있지 않아 종종 자가진동 등의 원인으로 발산하는 제어 결과를 나타내기도 한다. 이를 극복하기 위하여 [Fig. 3]과 같이 폐루프 역기구학 제어기에



[Fig. 3] Block diagram of closed loop inverse kinematics with back-calculation

역계산법을 이용한 되먹임을 적분 제어기에 추가하면 제어 입력에 실제 시스템의 구동기가 지닌 한계만큼 제한을 둘 수 있어 안정적인 성능을 이끌어 낼 수 있다. 미분 역기구학에 PID 제어와 역계산법을 적용하면 식 (3)과 같은 페루프 역기구학식을 도출할 수 있다. 결과적으로, 역계산법을 적용한 페루프 역기구학의 해를 와이어 구동 모델에 대입하여 와이어를 당기고 풀어주는 스트로크를 도출하여 로봇 구동기에 개루프 제어로 입력하는 기구학적 제어기이다. 6 자유도 PID 제어기에 있는  $K_P, K_D, K_I$ 의 게인이 총 18개이고, 역계산법에 있는  $K_A$ 의 게인이 6개로 총 24개의 게인 인수의 조율이 필요하다.

$$\Delta \vec{q} = J^\dagger \left[ K_P \vec{e} + K_D \dot{\vec{e}} + \int \left\{ K_I \vec{e} + K_A bc(\vec{x}) \right\} d\tau \right], \quad (3)$$

$$bc(\vec{x}) = \begin{cases} \vec{x}_{upper} - \vec{x}, & \vec{x} \geq \vec{x}_{upper} \\ 0, & \vec{x}_{lower} < \vec{x} < \vec{x}_{upper} \\ \vec{x}_{lower} - \vec{x}, & \vec{x} \leq \vec{x}_{lower} \end{cases}$$

### 4. 게인 최적화

본 연구는 MATLAB과 SIMULINK (Mathworks Inc., USA)를 이용한 시뮬레이션을 통해 진행한다. 와이어로 구동하는 적응형 다관절 구조를 지닌 수술 로봇에 대한 기구학 모델을 바탕으로 제어기를 설계한다. 역계산법 되먹임에 필요한 구동 범위는 로봇의 하드웨어를 설계했을 때 선정된 모터의 사양과 기구적인 제한을 고려하여 선정한다. 설계한 제어기를 시스템 모델에 적용하여 그 제어 결과를 확인할 수 있다.

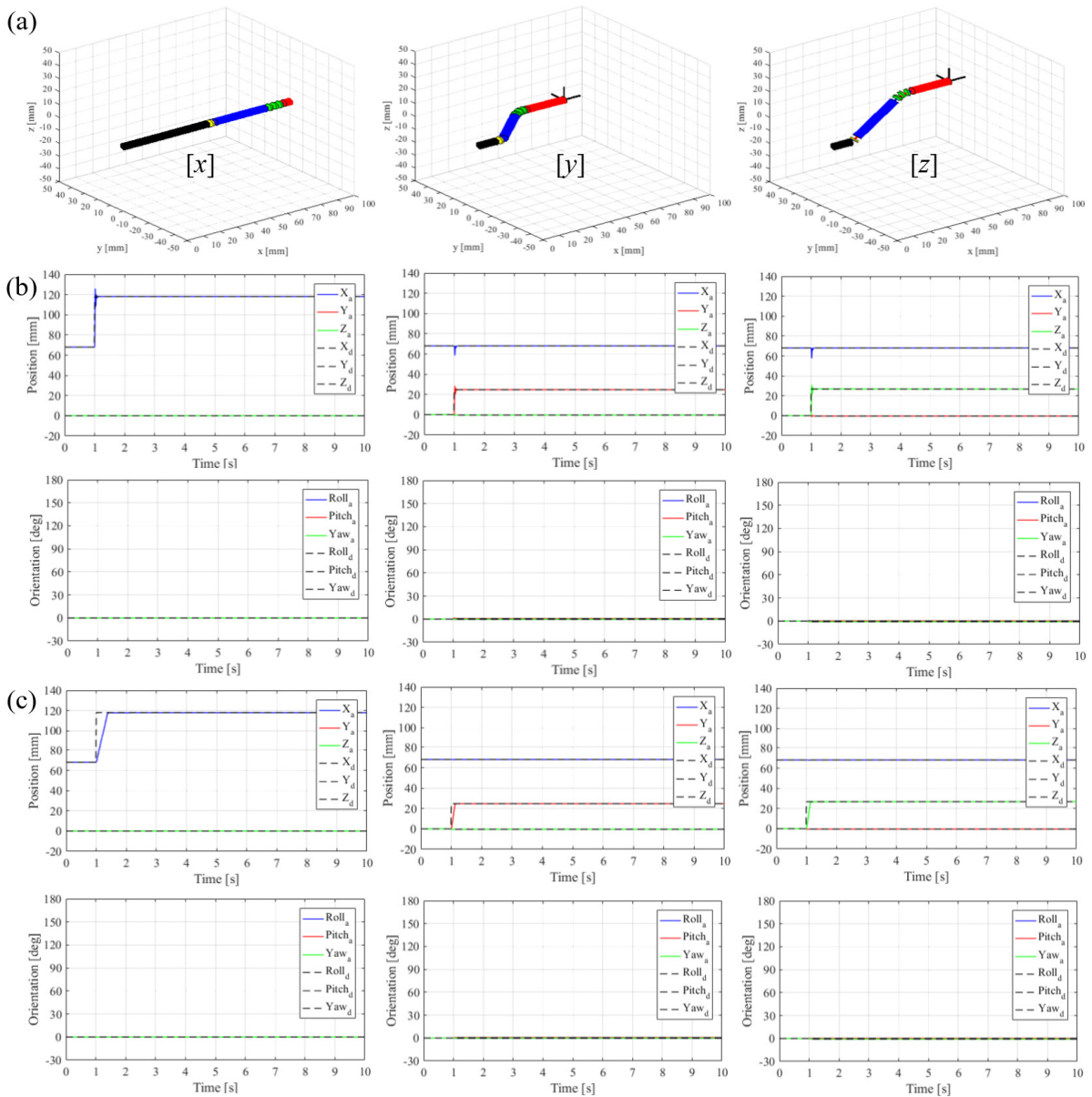
#### 4.1 최적화 전략

6 자유도 로봇의 제어 게인 조율을 위해 [Fig. 4(a)], [Fig. 5(a)]와 같이 6 자유도 각각의 계단 입력을 인가하고 그 결과로부터 최적화 알고리즘을 통해 게인의 최적값을 도출한다. 역계산법으로 구동속도를 제한할 경우 정착속도가 증가하기 때문에  $K_P, K_D, K_I$ 의 게인 튜닝과  $K_A$  게인 튜닝이 서로 상충한

다. 한 번에 총 24개의 게인을 조율할 경우 발산하거나  $K_A$ 가 0이 되는 무의미한 값으로 수렴하는 현상이 발생하기 때문에 먼저 PID 제어 게인 18개를 최적화하고 이어서 역계산법 게인 6개를 최적화한다<sup>10)</sup>. 18개의 PID 제어 게인을 최적화할 때는 구동속도 제한을 넣지 않아 역계산법을 적용하지 않고 이상적인 상태에서 게인을 최적화한다. 6 자유도 각각의 계단 입력에 대한 PID 제어 게인을 최적화하면 [Fig. 4(b)], [Fig. 5(b)]와 같은 결과를 얻을 수 있고, 이는 실제 시스템의 속도를 고려하지 않아 최대한 빠른 속도로 수렴하는 결과를 보인다. 최적의 PID 게인값을 지니는 모델에 역계산법 알고리즘을 추가한 제어기의 6개 게인을 추가로 최적화하면 [Fig. 4(c)], [Fig. 5(c)]와 같이 실제 시스템의 구동 속도 한계를 고려하여 완만하게 수렴하는 결과를 얻을 수 있다. 두 단계의 최적화를 진행할 때 목적함수는 동일하게 유지하고 제한조건의 범위만 수렴성을 고려하여 조정한다. MATLAB의 fmincon() 함수를 이용하여 최적화를 수행하였고, 보다 넓은 범위에서 최적값을 탐색하기 위해 Active-set 알고리즘을 적용하였다.

#### 4.2 목적함수 정의

일반적으로 제어기의 제어성능을 평가하기 위해서는 계단 함수(step function)를 목표값으로 가하고 이를 추종하는 제어 결과를 분석한다. 성능을 평가하기 위한 기준으로 다양한 형태의 성능지수(performance index)가 사용되고 있다. 보편적으로 많이 사용되는 것은 ISE (Integral of Square Error), IAE (Integral of Absolute Error), ITSE (Integral of Time Square Error), ITAE (Integral of Time Absolute Error), MSE (Mean Square Error) 등이 있다. ISE와 IAE는 목표값을 추종하는 제어 결과와 목표값의 오차를 제곱 혹은 절대값으로 계산하여 적분한 것이고 ITSE와 ITAE는 오차에 시간을 곱하여 적분하는 것으로 제어 결과 정상상태(steady state)의 오차에 보다 비중을 주어 성능을 평가한 지수이다<sup>11)</sup>. 각 성능지수에 따라 특성의 차이가 있어서 이를 비교하여 각 시스템에 맞는 성능지수를 찾는 연구가 필요하다. 원격 조종을 하는 수술 로봇의 특성상 조종자의 조작과 로봇 동작 사이의 시간 지연을 줄이는 것이 중요하기



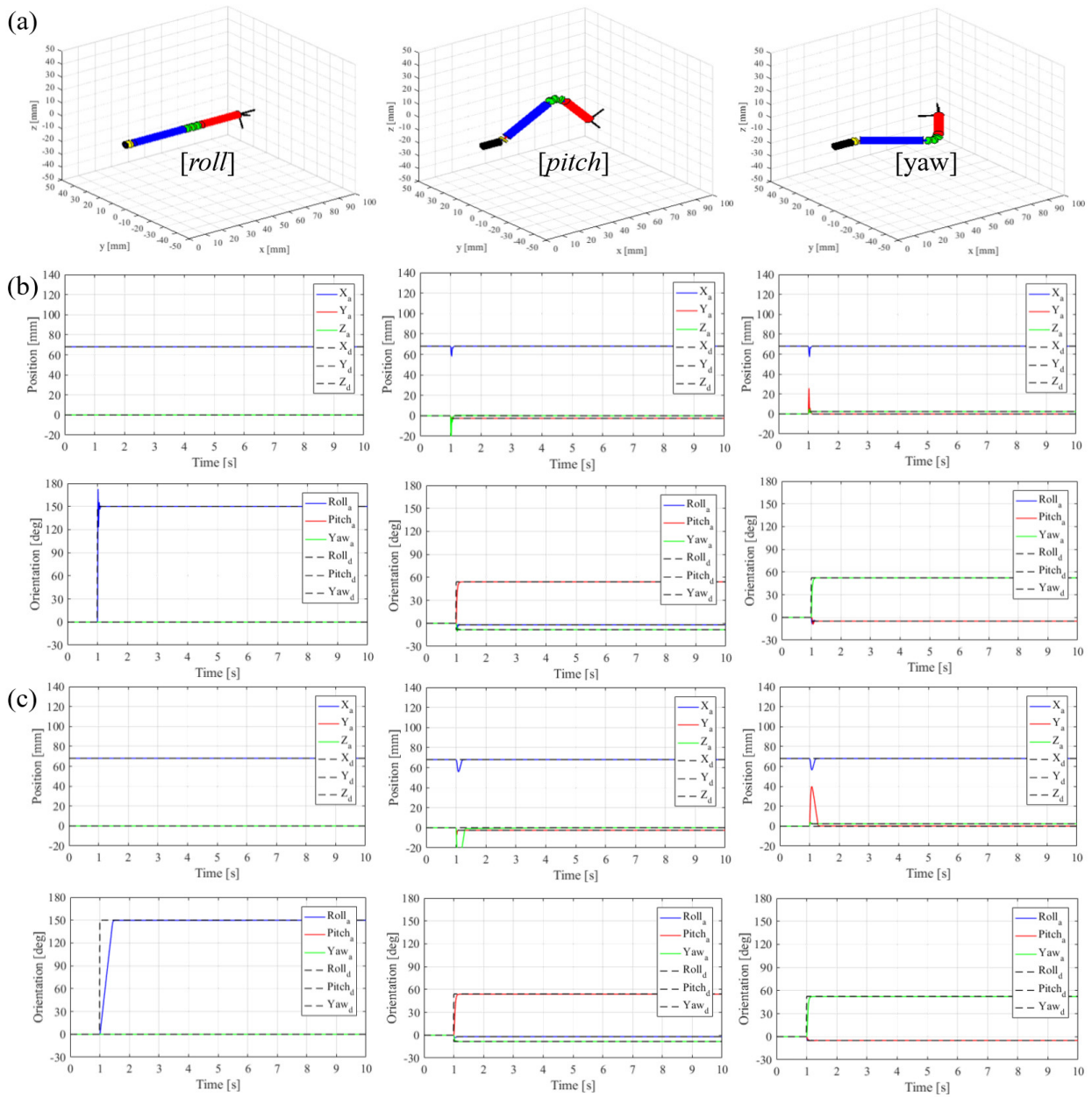
[Fig. 4] Position response: (a) 6 DoF step input, (b) example results of PID gain tuning, and (c) example results of back-calculation gain tuning

때문에 기존의 오차에 기반한 성능지수 뿐만 아닌 정착시간 (settling time) 등을 성능지수로 정의할 수도 있다. 본 연구에서 사용하여 비교한 성능지수는 정착시간, ISE, ITSE, 그리고 ISE와 정착시간의 합이다.

제어 계인이 로봇의 6 자유도 운동에 각각 독립적으로 작용하지 않고 상호작용하기 때문에 전체 6 자유도 운동의 오차를 동시에 고려할 수 있는 목적함수가 필요하다. 따라서 실험계획법의 일종인 다구치 방법론(Taguchi method)에서 사용하는 식 (4)와 같은 신호잡음비(signal to noise ratio)를 목적함수로 정의하여 6 자유도 각각의 성능지수가 고르게 최소화할 수 있도록 한다<sup>12)</sup>.

$$S/N \text{ ratio} = 10 \log_{10} \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{R_i}{R_0} \times 100 \right)^2}{n} \quad (4)$$

$R_i$ 는 앞서 정의한 성능지수이고,  $R_0$ 는 계인의 초기값에서의 성능지수이며, 이 문제는 6 자유도이므로  $n$ 은 6이다. 앞서 정의한 4가지 성능지수로 목적함수를 변경하며 결과를 비교한다. 또한, 계인 최적화에 적용된 각 자유도의 계단 입력의 크기를 기구의 구조 상 각 자유도마다 다른 민감도를 고려하여 설정한다. 본 연구에서는 각 조인트의 변위를 고려한 정기구학 해석을 토대로  $x$  방향 직선운동 거리 50 mm,  $y$  방향 직선



[Fig. 5] Orientation response: (a) 6 DoF step input, (b) example results of PID gain tuning, and (c) example results of back-calculation gain tuning

운동 거리 24.79 mm, z 방향 직선운동 거리 26.80 mm, roll 방향 회전각 150°, pitch 방향 회전각 54.03°, yaw 방향 회전각 52.32°로 계단 입력의 크기를 적용했다. 위치에 대한 오차와 자세에 대한 오차가 단위가 다르기 때문에 공평한 오차 비교를 위해 정규화(normalization)가 필요하다. 직경 6 mm의 실제 로봇으로 실험하여 조종자가 느끼는 위치 오차와 자세 오차의 상대적인 크기를 비교하여 기준값(reference)을 결정했다. 위치 오차는 기준값 1 mm로 나누고, 자세 오차는 라디안(radian)을 사용하지 않고 기준값 1°로 나누어 정규화했다.

### 4.3 제한조건 정의

제한조건은 최적화 결과에 큰 영향을 미치는 중요한 요소로 최적화 결과가 유의미한 값으로 수렴할 수 있도록 유도하는 역할을 한다. 계단 입력으로부터 제어 성능을 평가할 때 일반적으로 사용하는 오버슈트(overshoot)와 정상상태오차(steady state error)를 기본으로 적용한다. 또한, 계단 입력을 가한 해당 자유도의 운동 외에 나머지 자유도의 운동에도 변화의 제한을 두어 각 자유도의 계인 조율이 나머지 운동에 악영

향을 주지 않고 6 자유도 운동이 고르게 조율될 수 있도록 한다. 나머지 자유도의 운동의 변화를 제한하는 지표로는 앞서 성능지표로도 활용되었던 ISE와 최대 오차를 사용한다. 예를 들어, yaw방향 회전각에 계단 입력을 가하고 개인 조율을 하다 보면 [Fig. 3]의 여섯째열의 선도와 같이  $x$ 와  $y$ 방향 직선운동에 영향을 끼쳐 오차가 발생하게 된다. 이런 오차에 제한을 두어 최대한 다른 자유도에 악영향을 주지 않는 최적값을 탐색하려 한다. 본 연구에서는 계단 입력에 대해 오버슈트 15% 미만, 정상상태오차 2% 미만을 제한조건으로 부가했다. 나머지 자유도의 오차를 ISE를 기준으로 제한할 경우, PID 개인의 선형운동의 오차는 70 미만, 회전운동의 오차는 250 미만으로 적용했고, 역계산법 개인 최적화에서는 선형운동 8000 미만, 회전운동 60 미만으로 적용했다. 나머지 자유도의 오차를 최대값으로 제한할 경우, PID 개인에서 선형운동에서 10 mm 미만, 회전운동에서 10° 미만으로 적용했고, 역계산법 개인에서 선형운동 32 mm 미만, 회전운동 10° 미만으로 적용했다. 위 제한조건의 값들은 본 연구 케이스에 국한된 값으로, 시뮬레이션의 반복시행을 통해 결과의 수렴성과 도출값의 유의미함을 고려하여 결정한 값이다.

## 5. 최적화 결과 비교 평가

성능지수 4가지와 제한조건 2가지로 8가지 조합을 만들어 최적화를 수행하고 결과를 비교하여 최적 개인값을 도출한다. 비교 평가를 위해 시험 궤적을 만든다. 첫번째 시험 궤적은 수술로봇 팔의 모든 관절을 크기와 위상을 달리 고르게 구동했을 경우 나타나는 [Fig. 6(a)]와 같은 로봇 팔 끝단의 위치 및 자세로 표준 궤적(standard path)이라 명명했다. 수술 중 의사의 민감하고 빠른 움직임을 섬세하게 추종해야 하기 때문에 표준 궤적의 속도를 2배, 5배로 증가시켜 [Fig. 6(b)], [Fig. 6(c)]와 같은 시험 궤적을 생성한다. 의사가 실제로 햅틱 디바이스를 잡고 봉합 기술(suturing)을 수행할 때 로봇 팔 끝단의 위치 및 자세에 대한 명령을 저장하여 [Fig. 6(d)], [Fig. 6(e)], [Fig. 6(f)]와 같은 실습 궤적(practical path)을 생성했다. 총 6개의 시험 궤적을 바탕으로 8가지 최적 개인값 조합의 제어 성능을 시뮬레이션하여 비교 평가한다. 시간에 따라 임의로 변화하는 궤적에 대한 결과이므로 각 궤적에 대한 제어 오차의 2차 노움으로 비교했다.

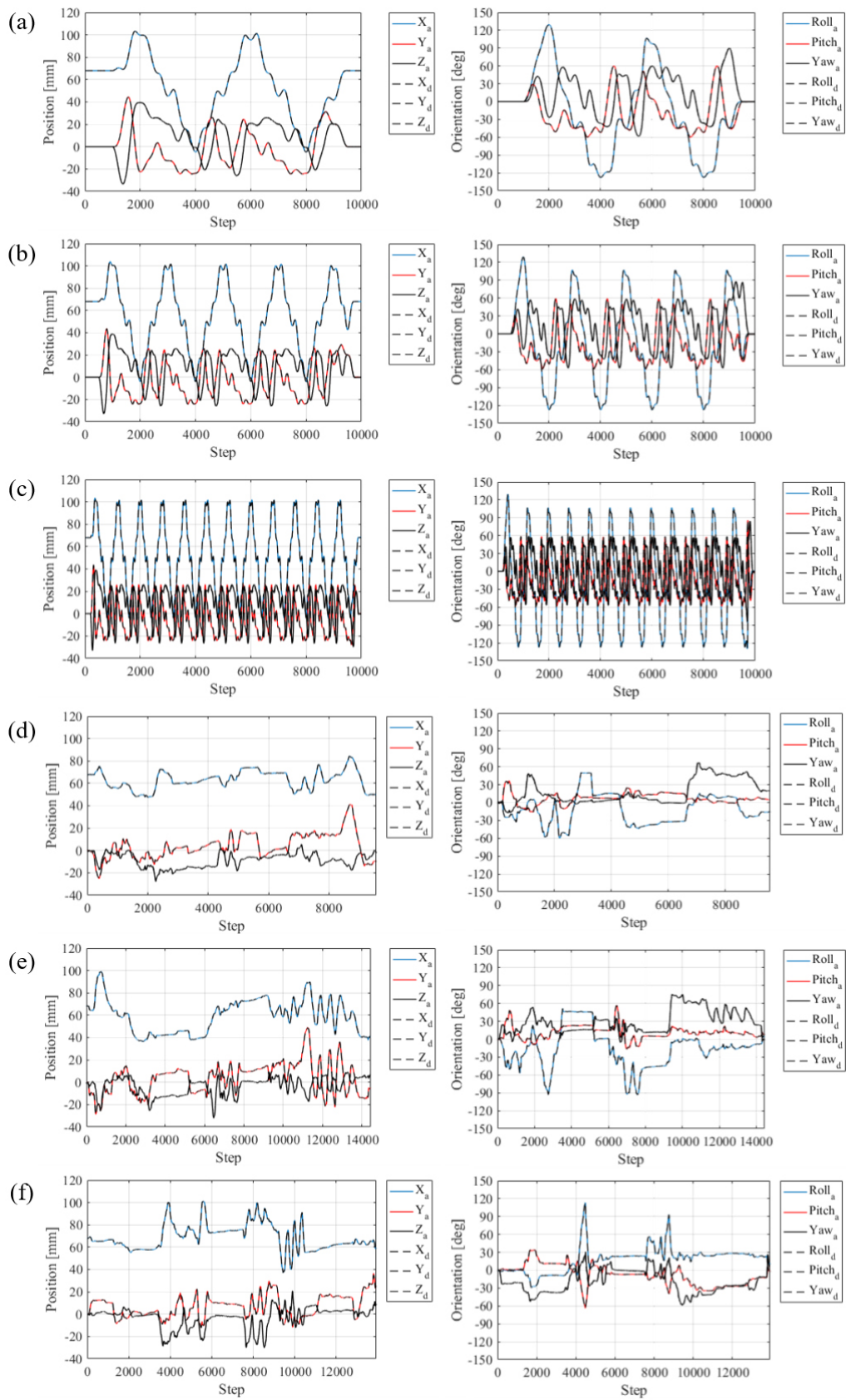
8가지 조합 중 3가지 조합이 대표적으로 좋은 결과를 보였다. 1번 케이스는 목적함수에 ISE와 정착시간의 합을 적용하고 제한조건을 다른 자유도의 ISE로 부가한 것이다. 2번 케이스는 목적함수에 ISE와 정착시간의 합을 적용하고 제한조건을 다른 자유도의 오차 최대값으로 부가한 것이다. 3번 케이스는 목적함수에 ITSE를 적용하고 제한조건을 다른 자유도의

오차 최대값으로 부가한 것이다. 각각의 개인값 조합으로 시험 궤적에 대한 제어 성능을 [Table 1]과 [Fig. 7]로 정리하여 비교한다. 표준 궤적에서는 2번 케이스가 가장 좋은 제어 성능을 보이지만 전체적으로 보면 1번 케이스가 가장 우수한 결과를 보인다. 특히 표준 궤적을 5배로 빠르게 입력한 시뮬레이션에서 압도적으로 좋은 결과를 보이고, 빠른 제어 성능을 바탕으로 임의의 궤적인 실습 궤적에서도 민감한 제어 성능을 보여줘서 가장 좋은 결과를 보인다. 계단 입력에 대한 제어 결과에서 시간에 대한 가중치를 고려한 ITSE보다 ISE에 정착시간을 더한 목적함수가 보다 효과적인 최적 개인값을 얻을 수 있었다는 것이 주목할 점이다. 최적화의 제한조건으로는 계단 입력을 인가하지 않은 다른 자유도의 안정도를 최대값만이 아닌 전체적인 ISE로 제한하여 수행한 것이 보다 우수한 제어 성능을 지닌 최적 개인값을 도출했다.

1번 케이스의 6 자유도 개인값은 [Table 2]와 같다. 6 자유도 운동 중  $y, z$  방향 직선 운동과 *pitch, yaw* 방향 회전운동은 와이어 구동을 통해 제어되고,  $x$  방향 직선 운동과 *roll* 방향 회전운동은 로봇 팔 전체를 움직이는 모터로 제어되어 구동 특성이 다르다. 도출된 최적 제어 개인값도 이에 따라 큰 차이를 보인다. 계단 입력의 크기 조절과 역계산법의 구동 한계 정의를 통해 기구학적 제어임에도 불구하고 해당 자유도의 제어 개인이 시스템의 동적 특성을 잘 반영하고 있음을 알 수 있다.

## 6. 결론

수술로봇 팔은 작은 크기 때문에 관절각을 측정할 센서를 부착하기 어렵고 관성이 작아 기구학적 제어기로 개루프 제어가 가능하다. 실시간으로 수술자의 명령을 전달하여 민감하게 제어하기 위해 페루프 역기구학을 이용하고 시스템 구동부의 동적 특성을 반영하게 위해 역계산법을 추가한 제어기를 설계했다. 설계한 제어기에는 6 자유도 PID 제어와 역계산법을 위해 총 24개의 개인을 조율해야 한다. 최적 개인값을 도출하기 위해 18개의 PID 개인과 6개의 역계산법 개인을 나눠 다양한 목적함수와 제한조건으로 최적화를 수행하였다. 총 8가지 전략으로 최적화된 개인값을 6개의 시험 궤적에서 제어 성능을 비교 평가하여 가장 최적의 개인값을 도출한다. 성능지수를 ISE와 정착시간의 합으로 정의하고 6 자유도 계단 입력에 대한 성능지수의 상호작용의 최소화를 목적함수로 설계하고, 각 계단 입력에 대한 제어 중 나머지 자유도에 대한 오차를 특정 ISE 미만으로 제한하는 제한조건으로 부가한 최적화 전략이 가장 우수한 제어 성능을 보였다. 본 연구에서 도출한 최적 제어 개인값은 실제 제작된 시스템의 제어 실험에 적용된다.



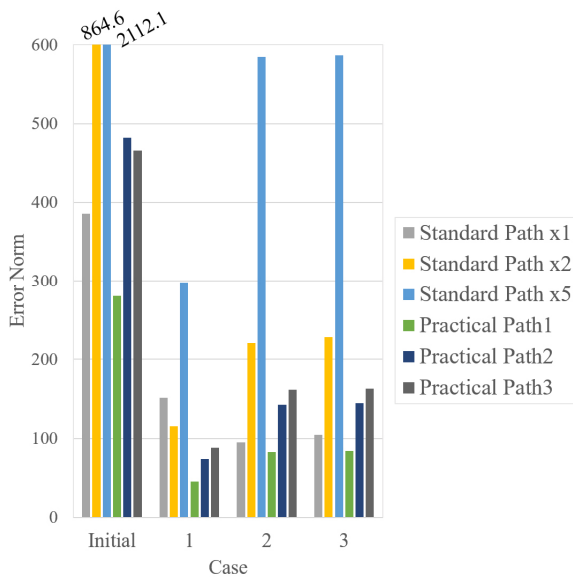
[Fig. 6] Test trajectories: (a) standard path, (b) standard path x1, (c) standard path x5, (d) practical path #1, (e) practical path #2, and (f) practical path #3

[Table 1] Comparison of control performance on test trajectories

Cases & conditions			Error norm					
			Standard path	Standard path x2	Standard path x5	Practical path #1	Practical path #2	Practical path #3
Initial value			385.4	864.6	2112.1	280.1	482.3	466.0
1	Objective function	ISE+Ts	151.4	115.2	298.2	45.1	73.7	87.9
	Constraint	ISE						
2	Objective function	ISE+Ts	94.8	220.4	584.5	82.6	142.6	161.5
	Constraint	Maximum						
3	Objective Function	ITSE	104.5	228.1	586.3	84.0	144.4	162.9
	Constraint	Maximum						

[Table 2] Optimal gain set of case #1

	$x$	$y$	$z$	$roll$	$pitch$	$yaw$
$K_P$	64.3169	82.7103	80.9997	65.1768	32.1512	33.2706
$K_I$	2.2790	3.2454	49.0947	1.8133	0.1888	0.2174
$K_D$	0.5472	0.3940	0.4298	0.5090	0.1147	0.1145
$K_A$	0.0495	0.0866	0.8254	0.0393	0.2031	0.2320



[Fig. 7] Comparison of control performance for each case of optimal gain

## References

- [1] C. Bergeles and G.-Z. Yang, "From passive tool holders to microsurgions: safer, smaller, smarter surgical robots," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 61, no. 5, pp. 1565-1576, May, 2014, DOI: 10.1109/TBME.2013.2293815.
- [2] H.-S. Yoon and B.-J. Yi, "Development of a 4-DOF Continuum Robot Using a Spring Backbone," *Journal of Korea Robotics Society*, vol. 3, no. 4, pp. 323-330, Dec., 2008, [Online], <http://www.jkros.org/journal/article.php?code=1986>.
- [3] F. Jelínek, E. A. Arkenbout, P. W. J. Henselmans, R. Pessers, and P. Breedveld, "Classification of joints used in steerable instruments for minimally invasive surgery-a review of the state of the art," *Journal of Medical Devices*, vol. 9, no. 1, 2015, DOI: 10.1115/1.4028649.
- [4] R. J. Webster and B. A. Jones, "Design and kinematic modeling of constant curvature continuum robots: a review," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 29, no. 13, pp. 1661-1683, 2010, DOI: 10.1177/0278364910368147.
- [5] P. Berthet-Rayne, K. Leibrandt, G. Gras, P. Fraitse, A. Crosnier, and G.-Z. Yang, "Inverse kinematics control methods for redundant snake-like robot teleoperation during minimally invasive surgery," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 3, no. 3, pp.2501-2508, July, 2018, DOI: 10.1109/LRA.2018.2812907.
- [6] S. Jin, S. K. Lee, J. Lee, and S. Han, "Kinematic Model and Real-Time Path Generator for a Wire-Driven Surgical Robot Arm with Articulated Joint Structure," *Applied Sciences*, vol. 9, no. 19, pp. 4114, 2019, DOI: 10.3390/app9194114.
- [7] M. W. Spong, S. Hutchinson, and M. Vidyasagar, "VELOCITY KINEMATICS-THE MANIPULATOR JACOBIAN," *Robot Modeling and Control*, 1st ed., John Wiley & Sons Inc., 2006, ch. 4, pp. 113-130, [Online], <https://www.wiley.com/en-us/Robot+Modeling+and+Control-p-9780471649908>.



- [8] P. Falco and C. Natale, "On the stability of closed-loop inverse kinematics algorithms for redundant robots," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 27, no. 4, pp. 780-784, 2011, DOI: 10.1109/TRO.2011.2135210.
- [9] A. Colomé and C. Torras, "Closed-loop inverse kinematics for redundant robots: comparative assessment and two enhancements," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 20, no. 2, pp. 944-955, 2015, DOI: 10.1109/TMECH.2014.2326304.
- [10] J. Bak, J. Kim, T. W. Seo, and S. Jin, "Gain Optimization of a Controller with Decomposition of Thrust Force and Actuation Limit Algorithm for a Tilted Thrusting Underwater Robot," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, vol. 36, no. 11, pp. 1025-1031, 2019, DOI: 10.7736/KSPE.2019.36.11.1025.
- [11] Stanley M. Shinnars, "Performance Criteria," *Modern Control System Theory and Design*, 2nd ed., John Wiley & Sons Inc., 1998, ch. 5, sec. 5.6, pp. 290-292, [Online], <https://www.wiley.com/en-us/Modern+Control+System+Theory+and+Design%2C+2nd+Edition-p-9780471249061>.
- [12] G. S. Peace, "ANALYSIS: SMALLER-THE-BETTER," *Taguchi Methods: A Hands-on Approach*, Addison-Wesley, 1993, ch.17, pp. 273-291, [Online], [https://books.google.co.kr/books/about/Taguchi\\_methods.html?id=ZeBTAAAAMAAJ&redir\\_esc=y](https://books.google.co.kr/books/about/Taguchi_methods.html?id=ZeBTAAAAMAAJ&redir_esc=y).

### 진 상 록



2008 서울대학교 기계항공공학부(학사)

2014 서울대학교 기계항공공학부(박사)

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

2017~현재 부산대학교 기계공학부 조교수

관심분야: 의료 로봇 설계 및 제어

### 한 석 영



2013 국민대학교 기계자동차공학부(학사)

2015 광주과학기술원 메카트로닉스(석사)

2016~2019 University of Texas Health  
Science Center Research Engineer

2020~현재 가톨릭대학교 의과대학 연구원

관심분야: 로봇 제어 및 의공학 장비 개발