

최소침습수술로봇을 위한 2-자유도 구형 메커니즘 설계 Design of 2-DOF Spherical Mechanism for Minimally Invasive Robot Surgery

*홍만복, #김광기

*M. B. Hong, #K. G. Kim(kimkg@ncc.re.kr)

국립암센터 의공학연구과

Key words : Laparoscopic surgical robot, Minimally invasive surgery, Spherical 4-bar mechanism, 2-DOF spherical mechanism

1. 서론

최소침습수술(Minimally Invasive Surgery, MIS)은 환자의 몸에 약 3-4 개의 10mm 정도의 절개를 하고, 이 구멍에 복강경 및 수술기구를 삽입하여 진행하는 수술을 의미한다. 이는 개복술에 비하여, 수술 후 환자의 회복이 빠르며 미용적인 측면에서 우수하고, 개복술만큼 효과적이라는 장점을 지닌다. 최근에는 Intuitive Surgical 사의 da Vinci 와 같은 수술 로봇이 사용됨에 따라, 3 차원 고화질 영상의 제공과 더불어 떨림 없는 정교한 시술 작업이 가능해졌으며, 고 자유도 수술 기구 도입으로 좀 더 다양한 수술들이 가능해 졌다 [1]. 이러한 장점에도 불구하고, 수술 시 힘 반향이 불가능하다는 점은 가장 큰 단점으로 지적되고 있다. 또한 아직 가격이 고가이고, 구현 가능한 작업영역 대비 각 암(arm)의 크기가 커서 수술 시 암 사이의 충돌이 발생하는 문제가 제기되고 있다.

복강경 홀더로 개발된 Computer Vision 사의 AESOP 은 처음 미국 FDA 의 승인을 받은 수술 보조용 로봇으로, SCARA 로봇 형태를 지니며 끝단 2 개의 조인트는 수동 회전 조인트로 구성된다 [2]. 일반적으로 최소침습수술에서의 수술기구는 트로카(trocar)를 중심으로 하는 구형 운동(spherical motion)을 하게 된다. 이를 구현하기 위해 3 자유도 구형 병렬형 메커니즘이 제안되었고 [3], 또한 2 자유도 구형 병렬 및 직렬 메커니즘에 대한 연구가 있었다 [4]. 구형 운동을 구현하기 위하여 기어열을 사용한 직렬형 메커니즘이 연구되었다 [5,6]. 이는 기구의 크기를 작게 할 수 있다는 장점이 있는 반면, 기어들의 백래시(backlash)에 의한 오차가 끝단에 누적되는 문제가 존재한다.

본 연구에서는 1 자유도 구형 4 절 메커니즘을 이용한 새로운 형태의 2 자유도 구형 메커니즘을 제안하고자 한다. 전체적인 형상은 그림 1 에 제시된 바와 같다. 다음 장에서는 제안된 메커니즘을 설계하기 위해 요구되는 설계 조건 및 메커니즘의 타입 합성 (type synthesis)에 관하여 논의한다.

2. 설계 요구조건 및 타입 합성

최소침습수술로봇을 위한 슬레이브 로봇은 일반적으로 2 개의 분리된 메커니즘으로 구성된다. 기저 메커니즘은 3 차원 공간 상 임의의 위치에 수술기구를 위치시키기 위한 3 자유도 위치 메커니즘으로 구성된다. 적절한 위치가 선정된 후 실제 수술 작업을 위하여, 4 자유도 운동 (3 개의 회전 운동 과 1 개의 수술기구 축 방향 병진 운동)을 구현할 수 있는 메커니즘이 위치 메커니즘의 끝단에 장착된다. 마스터 로봇 조종에 의한 수술 작업은 이러한 4 자유도 메커니즘에 의해 진행된다.

수술기구의 구형 운동을 위해 3 자유도 구형 메커니즘이 사용될 수 있다. 하지만, 구형 운동의 중심점, fulcrum point 는 환자의 복부 피부층과 근육층 사이에 위치하여야 하며 메커니즘은 환자 바깥쪽에 위치하여야 한다. 그러므로 원거리에 구형 중심 (Remote Center of Motion, RCM)이 위치하는 구형 메커니즘의 합성이 요구된다. 이와 더불어, 수술 시 로봇의 오작동으로부터 환자를 보호하기 위해서는 기구적으로 구속된 형태의 구형 메커니즘

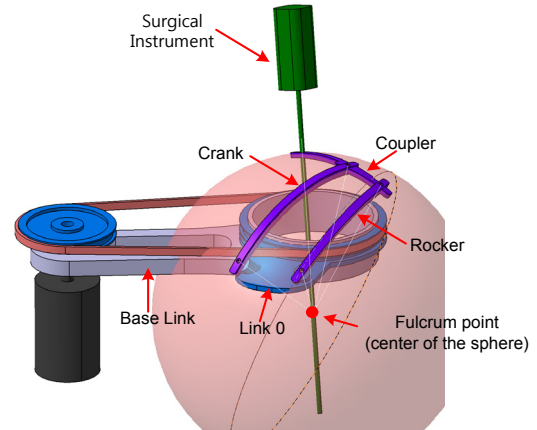


Fig. 1 Conceptual design of the proposed 2-DOF spherical mechanism for MIS

의 구성이 필요하다. 일반적인 6 자유도 로봇을 이용하여 슬레이브 로봇을 구현할 수도 있으나, 메커니즘의 복잡도에 의한 다양한 특이성으로 인해 충분한 작업 영역 확보에 어려움이 따르며, 실제 수술 작업을 위한 3 자유도 구형 운동이 기구적으로 구속되지 않는 단점을 지닌다.

수술기구 톨팁의 축 방향 회전을 제외하면, 2 개의 독립적인 회전이 가능한 메커니즘 합성이 필요하다. 각 회전에 대한 요구되는 회전 각도 범위는 일반적으로 70°~90° 정도로 추정된다. 본 연구에서는 두 회전축 모두 80°의 작업 영역을 갖도록 설계한다.

직렬형 구조는 작업영역이 크다는 장점이 있으나 강성 특성이 좋지 않고, 기어열을 활용한 직렬형 구조는 백래쉬에 의한 오차가 기구 끝단에 누적된다는 단점을 갖는다. 병렬형 구조의 메커니즘은 직렬형이 갖는 단점을 어느 정도 극복할 수 있고 소형화에 유리하지만, 충분한 작업 영역을 확보하기가 어렵다. Lum 등의 연구에서 제시된 바와 같이, 하나의 병렬 메커니즘으로 2 자유도 구형운동을 구현하면, MIS 를 위한 작업영역을 확보하기 위해 기구의 크기가 커지는 단점이 존재한다 [4]. 이를 보완하며 병렬형 구조의 장점을 활용하기 위해 먼저 1 자유도 구형 4 절 기구를 합성한다. 안정적인 기동 및 기구의 단순함을 위하여 회전 조인트만 이용하여 구현한다. 수술 기구가 장착될 커플러 링크 상의 한 점 P 는 그림 2 에 보여진 것과 같이 구의 북극(north pole)을 지나는 대원(great circle) 상의 호 P_1P_n 을 지나도록 설계된다. 설계된 4 절 기구의 그라운드 링크, Link 0 은 구의 원점과 북극점을 잇는 선에 대하여 회전 가능하도록 Base Link 와 회전 조인트로 연결된다 (그림 1 참조). 커플러 링크의 회전축과 Link 0 및 Base Link 사이의 회전 조인트에 의한 회전축은 구의 중심에서 만나도록 하여, 2 자유도 회전 운동을 구현할 수 있는 구형 메커니즘을 얻는다. 설계에 사용된 구의 중심은 fulcrum point 에 위치하도록 하며, 점 P 가 추종하는 호 P_1P_n 의 길이는 수술기구의 작업영역에 의해 결정되는 각도 ϕ (그림 2 참조)에 의해 정해진다.

다음 장에서는 이러한 4 절 구형 메커니즘을 합성하기 위한 최적 합성 방법을 제시한다.

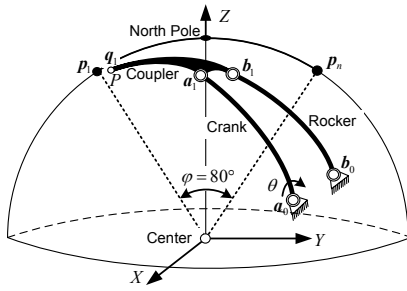


Fig. 2 Workspace and design parameters for the synthesis of the 4-bar spherical mechanism

3. 구형 4절 링크의 최적 합성

합성을 위해 요구되는 조건은, 그림 2에 제시된 바와 같이, 구형 4절 기구 커플러 상의 한 점 P가 대원(great circle) 상의 호를 추종하도록 기구를 합성하는 것이며, 이때 호의 길이는 사이각 $\varphi=80^\circ$ 에 해당하는 길이로 결정된다. 즉, 경로 생성(path generation) 합성 기법을 통해, 점 P가 p_1, p_n 의 경로를 추종하도록, 기구를 구성하는 각 링크들의 피벗점 a_0, a_1, b_0, b_1 의 좌표를 결정한다. p_1, p_n 의 호는 YZ 평면 상에 놓이며, Z축에 대하여 대칭적으로 구성한다. 구형 기구의 합성은 구의 반경에 무관하므로, 여기서는 단위 구를 고려한다. 단위 구 상의 임의의 점 r 의 좌표는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$r = [x, y, z]^T = [\cos \mu \cdot \cos \nu, \cos \mu \cdot \sin \nu, \sin \mu]^T, \quad (1)$$

여기서 ν 는 점 r 의 위치벡터를 XY 평면으로 투영한 벡터의 X축에 대한 각도로 정의되며, μ 는 XY 평면에 대한 위치벡터 r 의 각도를 의미한다. 단위 구 상에 놓여있는 4절 링크 피벗점들의 좌표는 그에 해당하는 ν 와 μ 에 의해 결정된다. p_1, \dots, p_n 을 점 P가 추종해야 하는 n 개의 점이라 하고, q_n 을 p_n 에 해당하는 실제 점 P의 좌표라 하자. 각 링크들을 강체가 가정하면 링크의 길이는 변하지 않으므로, 주어진 n 개의 점에 대하여 다음 식을 얻는다.

$$(a_1 - a_0)^T (a_1 - a_0) = (a_i - a_0)^T (a_i - a_0), \quad (2-1)$$

$$(b_1 - b_0)^T (b_1 - b_0) = (b_i - b_0)^T (b_i - b_0), (i = 2, 3, \dots, n). \quad (2-2)$$

점 q_j, a_j, b_j ($j = 1, 2, \dots, n$)는 같은 커플러 상에 존재하는 점들이므로, 이들 역시 다음과 같은 길이불변조건을 만족해야 한다.

$$(q_1 - a_1)^T (q_1 - a_1) = (q_i - a_1)^T (q_i - a_1), \quad (3-1)$$

$$(q_1 - b_1)^T (q_1 - b_1) = (q_i - b_1)^T (q_i - b_1), (i = 2, 3, \dots, n). \quad (3-2)$$

q_i 는 단위 구 상에 존재하므로,

$$q_i^T q_i = 1. \quad (4)$$

초기상태에서 a_0 에 연결된 구동기 입력에 의해 크랭크가 $\delta\theta$ 만큼 회전한다고 하자. 회전변환행렬 R 은 Rodrigues's formula로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다 [7].

$$R = I + \sin(\delta\theta)A + (1 - \cos(\delta\theta))A^2, \quad (5)$$

여기서 A 는 회전축 a_0 의 외대칭 행렬(skew symmetric matrix)을 의미한다. 이제 $\delta\theta$ 의 크랭크 회전에 의해 변화된 a_1 의 다음 위치 a_2 는 다음과 같이 결정된다.

$$a_2 = R a_1. \quad (6)$$

a_i, b_i 는 같은 커플러 링크에 존재하는 점이므로,

$$(a_1 - b_1)^T (a_1 - b_1) = (a_i - b_i)^T (a_i - b_i) \quad (i = 2, 3, \dots, n). \quad (7)$$

식 (7)과 (2-2), 그리고 단위 벡터 조건으로부터, b_2 를 구할 수 있다. 구해진 a_2 와 b_2 로부터, q_2 는 식 (3-1,2)와 (4)에

의해 구해진다. 이런 방식으로 매 순간에서의 커플러 상의 한 점 P의 위치 q_i 를 찾을 수 있다.

주어진 점의 위치 p_i 와 실제 위치 q_i 사이의 오차를 최소화하기 위한 최적설계 목적함수는 다음과 같다.

$$F(x) = \min \sum_{i=1}^n (p_i - q_i)^T (p_i - q_i), \quad (8)$$

여기서 $x = [v_{a0}, \mu_{a0}, v_{a1}, \mu_{a1}, v_{b0}, \mu_{b0}, v_{b1}, \mu_{b1}, v_{q1}, \mu_{q1}]$ 는 설계 변수 벡터를 의미한다. v_k, μ_k 는 식 (1)에서 설명한 바와 같이, 단위 구 상의 한 점 K를 나타내기 위한 두 개의 각도를 나타낸다.

커플러 링크의 회전각 θ 가 0° 부터 80° 까지 변화할 때 점 P는 p_1 부터 p_n 까지 이동하도록 최적설계를 수행한다.

Pattern search를 이용하여 최적화를 수행하며, search method로는 유전자 알고리즘을 사용한다. 합성된 메커니즘은 그림 1에 나온 바와 같고, 각 피벗점과 점 P의 초기위치 q_1 은 다음과 같다.

$$\begin{cases} a_0 = (-0.6606, -0.4374, 0.6100) & b_0 = (-0.3382, -0.6988, 0.6301) \\ a_1 = (-0.0246, 0.2508, 0.9677) & b_1 = (0.0260, 0.0076, 0.9996) \\ q_1 = (-0.0067, 0.6004, 0.7996) \end{cases}$$

4. 결론

본 연구에서는 직렬형 구조 내에 병렬형 구조가 구현된, MIRS를 위한 새로운 형태의 2자유도 구형 메커니즘을 제안하였다. 병렬형 구조는 구형 4절기구로 구현되었으며, 이는 구 상의 대원(great circle) 호를 따라 경로를 생성하도록 최적합성기법을 적용하여 설계되었다. 합성된 4절기구의 그라운드 링크는 회전축이 구의 중심과 북극점을 지나도록 구성된 회전 조인트에 의해 로봇 끝단과 연결된다. 따라서 전체 메커니즘은 RCM을 갖는 2자유도 구형운동을 구현한다. 제안된 메커니즘은 구조 특성 상, 기어열을 이용한 직렬형 구조보다 강성특성 및 정밀도가 좋을 것으로 예상된다. 또한, 순 병렬형 구조보다 같은 작업영역 대비 작은 크기로 구현 가능하므로, 전체 수술 로봇을 작고 경량화 하는데 유리할 것이라 기대된다.

후기

본 연구는 국립암센터의 기관고유사업 (0810122) 지원으로 수행되었음.

참고문헌

- Guthart, G. S. and Salisbury, J. K. Jr., "The Intuitive™ Telesurgery System: Overview and Application," Proc. Of Intern. Conf. on Robotics and Automation, **1**, 618-621, 2000.
- Sackier, J. M. and Wang, Y., "Robotically Assisted Laparoscopic Surgery," Surg. Endosc., **8**, 63-66, 1994.
- Li, T. and Payandeh, S., "Design of Spherical Parallel Mechanisms for Application to Laparoscopic Surgery," Robotica, **20**, 133-138, 2002.
- Lum, M. J. H. et al., "The RAVEN: Design and Validation of a Telesurgery System," Intern. J. Robotic Research, **28**(9), 2009.
- Berkelman, P. and Ma, J., "A Compact Modular Teleoperated Robotic System for Laparoscopic Surgery," Intern. J. Robotic Research, **28**(9), 2009.
- 박준우, 최재순, 이덕희, 임영빈, 조영호, "네트워크 기반 원격수술로봇 시스템," 제어·로봇·시스템학회 합동학술대회, 2008.
- McCarthy, J. M., "Geometric Design of Linkages," Springer-Verlag New York, Inc., 2000.