

수동 관절을 갖는 복강경 보조 로봇의 영상 정보 기반 행동 제어기 개발

Visual Servo based Motion Controller for a Laparoscopic Assist Robot with a Passive Joint

*#지상훈¹, 이상무¹, 남경태¹, 손윤희¹, 김광기², 조영호²

*#S. H. Ji(robot91@kitech.re.kr)¹, S. M. Lee¹, K. T. Nam¹, W. H. Shon¹, K. G. Kim², Y. H. Jo²

¹ 한국생산기술연구원 로봇기술연구부, ² 국립암센터 의공학연구과

Key words : Visual Servo, Passive Joint, Laparoscopic Assist Robot

1. 서론

의사에게 적절한 정보를 제공하거나 수술 보조를 하는 수술 보조 로봇(Surgical Assist Robot)에는 최소 침습 수술 로봇과 내시경 보조 로봇이 있다[1]. 최소 침습 수술 로봇의 경우에는 인간이 손으로 직접 도달할 수 없는 좁은 공간 내에서의 수술이나 손떨림 억제를 통한 미세 수술기능을 강점으로 비뇨기과, 산부인과, 흉부외과 및 외과에서 빠르게 적용되고 있다. 그러나 의사의 지시 또는 영상 정보에 의거하여 내시경의 위치를 결정하는 내시경 보조 로봇은 기능적 단순함에도 불구하고 조작자 의도 파악의 어려움, 행동 반경 문제 등과 같은 기술적 문제로 아직까지 상용화되지 못하였다.

상용화를 목적으로 한 내시경 보조 로봇으로 개발된 컴퓨터 모션사의 이속(AESOP)은 복강경 카메라의 상하좌우 및 원근을 시술자가 발판이나 손잡이를 이용하여 조절할 수 있게 하였다. 이 로봇의 경우 매니플레이터의 탈부착이 간단하도록 설계되었으며, 기구적으로 간단하게 구성된 장점이 있었다. 그러나 이 시스템은 스카라(Scara) 형태의 매니플레이터로 설계되었기에 행동 반경이 커지는 단점이 있었다. 이를 보완하고자 KaLar는 복강 내에서 이동 가능하며, 끝 단이 굽혀지는 매니플레이터를 채용함으로써 로봇의 움직임을 최소화 시켰다[2][3]. 그러나 이 시스템을 채용하기 위해서는 전용의 내시경을 사용해야 하기 때문에 가격이 상승되고 개발 기간이 길어져야 하는 단점이 있었다.

이를 보완하고자 지상훈등은 내시경 보조 로봇의 상용화 관점에서 기존 상용 내시경의 탈부착이 용이하고 복강경 보조 기능에 적합한 내시경 보조 로봇을 개발하였다[4]. 이 로봇은 영상 정보를 바탕으로 로봇의 행동을 제어하도록 설계되었으며, 환자 안전을 위하여 로봇 팔 끝 단에 수동 관절을 갖도록 하여, 매니플레이터 또는 내시경으로 인하여 환자의 피부 또는 장기기 손상되는 것을 방지하도록 개발되었다. 그러나 수동 관절의 부피 문제를 고려하여 엔코더가 없이 설계되었기에 완전한 영상 정보 기반 행동 제어가 이루어지지 못하였다. 이에 본 연구에서는 로봇의 자세와 Pivot 위치의 상관 관계를 이용한 수동 관절 값의 추정 및 이를 활용한 영상 정보 기반 행동 제어 알고리즘을 제안한다.

2 장에서는 본 연구에서 개발한 내시경 보조 로봇의 기구에 대해 설명하고 3 장에서는 수동 관절의 관절 값 추정 알고리즘과 영상 정보 기반 행동 제어 알고리즘에 대하여 설명한다.

2. 기구 설계

복강경 수술을 위한 내시경 보조 로봇에 대한 시스템 요구 사항을 분석하여 그림 1 과 같은 매니플레이터를 개발하였다. 개발된 매니플레이터는 4 개의 회전 관절, 1 개의 직선 이동 관절이 있으며, 내시경의 탈부착이 가능한 말단부에 2 개의 수동 회전 관절을 가지고 있다.



Fig. 1 Manipulator for Laparoscopic assist robot

제안된 매니플레이터의 링크 좌표계를 Denavit-Hartenberg (D-H) 파라미터를 Craig 가 제시한 방식으로 그림 2 와 표 1 과 같이 설정하였다[5].

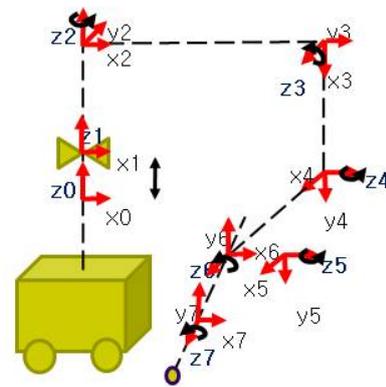


Fig. 2 Block diagram of our manipulator

Table 1 D-H Link Parameter

Link	α_i	a_i	d_i	θ_i
1	0	0	d_1	0
2	0	0	l_1	θ_2
3	90	l_2	0	θ_3
4	-90	l_3	0	θ_4
5	0	l_4	0	θ_5
6	90	l_5	0	θ_6

제안된 로봇은 연속된 3 개의 축이 한 점에서 교차되지 않기 때문에 일반적인 방법으로 역기구학을 풀 수 없다[5]. 따라서, 본 연구에서는 자코비안을 이용한 실시간 매니플레이터를 행동 계획 방법을 사용하였다.

매니플레이터에 대한 기구학 식은 식 (1)~(3)과 같으며, 이를 각 축에 대하여 편미분하여 도출된 자코비안은 3x4 행렬로 정의되었다.

$$x = (l_2 + l_3 \cos \theta_3) \cos \theta_2 + l_4 (\cos \theta_3 \cos \theta_2 \cos \theta_4 - \sin \theta_2 \sin \theta_4) \quad (1)$$

$$y = (l_2 + l_3 \cos \theta_3) \sin \theta_2 + l_4 (\cos \theta_3 \sin \theta_2 \cos \theta_4 + \cos \theta_2 \sin \theta_4) \quad (2)$$

$$z = d_1 + l_1 + (l_3 + l_4 \cos \theta_4) \sin \theta_3 \quad (3)$$

자코비안의 Pseudo-역행렬을 이용하여, 능동 축(1~4 축)의 끝단 부 속도 명령을 능동 축들에 대한 속도 명령으로 변경하였다.

3. 영상 정보 기반 행동 제어기 설계

그림 3 과 같이 수동 관절의 관절 각은 능동 관절 끝단 부의 위치와 Pivot 점의 위치를 이용하여 추정한다. 링크 i 에 대하여 정의된 Homogeneous Transform 을 T^{i-1}_i 로 정의하면, 매니플레이터의 능동 관절 끝단 부(P_a)와 Pivot 점(P_v), 그리고 수동 관절 끝단 부(P_p)의 관계는 식 4 와 같이 정의된다.

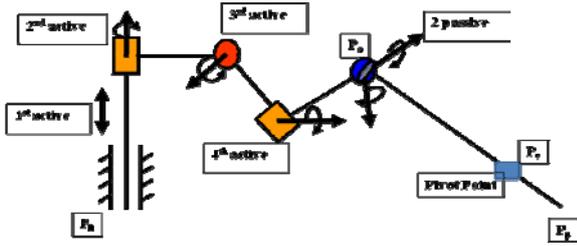


Fig. 3 Estimation of passive joints

$$P_v^w - P_a^w = T_6^0(P_v^6 - P_a^6) \quad (4)$$

여기서, P_v^w 와 P_a^w 는 월드 좌표계 상에서의 Pivot 점과 능동 관절의 끝단 부의 위치 값들이며, P_v^6 와 P_a^6 는 수동 관절(6 축) 정의 좌표계에 대한 위치 값들이다.

수동 관절 축의 회전 중심 축이 능동 축 끝단부에 부착되어 있으므로 P_a^6 는 원점이며, 수동 관절 축(6 축)의 축 좌표계 정의를 수동 링크의 진행 방향을 양의 x 축 방향(x^+)으로 설정하였기에, P_v^6 은 x 축 상의 점이 된다.

따라서, 식(4)는 식 (5)와 같이 정의되어 질 수 있다. 여기서, e_x 는 x 축에 대한 단위 벡터이며, k는 상수이다.

$$(T_4^0)^{-1}(P_v^w - P_a^w) = kT_6^4 e_x \quad (5)$$

식(5)의 좌우 항에서 회전과 관련된 부분을 활용하면, 식(6)과 같이 될 수 있다. 이 식에서 $\text{norm}(v)$ 는 v 방향의 단위 벡터를 정의하는 함수이다.

$$\text{norm}((T_4^0)^{-1}(P_v^w - P_a^w)) = \begin{bmatrix} \cos \theta_5 \cos \theta_6 \\ \sin \theta_5 \cos \theta_6 \\ \sin \theta_6 \end{bmatrix} \quad (6)$$

식(6)을 활용하여 수동 관절들의 값을 정의할 수 있다. 이 식에서 5 축 관절과 6 축 관절의 유효 범위는 각각 $[0, 180^\circ]$, $(-180^\circ, \sim 180^\circ)$ 이다.

영상 정보 기반의 행동 제어기는 영상 정보를 능동 관절 끝단 부의 속도 지령 명령으로 변경하고, 능동 관절들에 대한 pseudo-자코비안 역행렬을 이용하여 매니플레이터의 각 관절의 속도 명령을 정의한다.

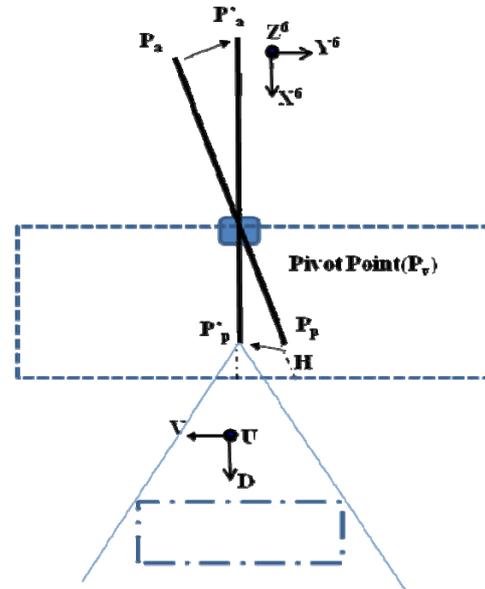


Fig. 4 Velocity command corresponding to visual command

영상 정보에 의한 행동 제어 과정에서 Zoom-In/Out 이 발생하지 않게 하기 위하여, 그림 4 에서와 같이 내시경과 피사체까지의 거리, 즉 매니플레이터가 가상의 수평면까지의 직선 거리(H)를 유지하도록 능동 관절의 끝단 부 위치(P_a)를 제어하도록 한다. 영상 정보 좌표계와 6 축 끝단 부 좌표계의 상관관계는 그림 4 와 같이 정의되면, 6 축 끝단 부의 좌표계의 원점은 능동 관절의 끝단 부의 위치이다.

4. 결론

본 논문에서는 수동 관절을 갖는 복강경 보조 로봇의 영상 정보 기반 행동 제어를 제시하였다. 이를 위하여 수동 관절의 관절 각 추정 알고리즘과 영상 정보 기반 행동 제어 알고리즘을 제시하였다. 추후 이 시스템은 작업자의 의도 파악 및 실시간 영상 처리 기술이 확보될 경우, 의료 보조용 로봇, 소규모 단위 공정에서의 인간 협조 로봇 등에 활용될 것으로 예상된다.

후기

본 연구는 지식경제부 협동연구사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

1. 박종오, “국내외 의료로봇 현황과 발전방향, 정보과학회지”, 제 26 권, 제 4 호, pp.49-54.
2. Won-Ho Shin, Seong-Young Ko, Jonathan Kim, and Dong-Soo Kwon, “Development of a 5-DOF Laparoscopic Assistant Robot”, International Journal of ARM, Vol. 7, No. 4, pp.21-28, Dec. 2006.
3. 나균호, “The Present and Future of Robotic Surgery”, 의학영상정보 분야 공동학술대회, pp.59-87, 2008.
4. 지상훈, “수술 팀 자동 추적 기반의 복강경 제어 로봇의 개발”, 제 1 회 대한의료로봇공학회 학술대회, 2008.
5. Craig, “Introduction to Robotics 3rd Ed.”, Prentice Hall.