

수술 도구의 위치 추적 및 힘 측정 Measurement of force and motion of a surgical tool

*나영진¹, 김영진¹, 안범모¹, #김정¹
*Y. J. Na¹, Y. J. Kim¹, B. M. Ahn¹, #J. Kim(jungkim@kaist.ac.kr)
¹ 한국과학기술원 기계공학과

Key words : NOTES, , tool motion measurement, tool interaction force measurement

1. 서론

자연 개구부 내시경 수술 (Natural orifice transluminal endoscopic surgery, NOTES)은 입, 항문 및 질과 같은 자연 개구부를 통해 내시경과 수술 도구를 삽입해 시술한다. 기존의 최소 침습 수술과 달리 피부 표면에 흉터가 남지 않아, 회복 기간이 짧은 장점이 있다. 2004년 Kalloo 등에 의해 돼지에 대한 Transcolonic NOTES가 수행된 후, 동물 실험 및 인체 시술이 계속해서 보고되고 있다 [1]. 초기의 NOTES는 내시경을 이용해서 이루어져 왔으며 하나의 overtube를 이용해서 시술해야 하는 특이점으로 인해 NOTES용 내시경 및 수술 도구를 개발하는 연구가 활발하게 이루어지고 있다 [2]. 그러나 수술 중 수술 도구에 작용하는 힘과 움직임을 수치적으로 제안해줄 수 있는 조직과 수술 도구 사이에서 발생하는 힘 및 내시경의 움직임의 분석에 대한 연구는 미흡하다 [3,4]. 수술 도구에서 발생하는 힘 분석을 통해서 조직에 발생하는 상처를 최소화 할 수 있고, 내시경의 위치 정보를 통해 정확한 작업공간 및 구동 범위를 제공할 수 있다 [5].

본 연구에서는 시술 시에 내시경 끝에서 발생하는 힘과 움직임을 동시에 측정할 수 있는 장비를 개발했다. 개발된 장비는 일반적인 내시경의 끝단에 탈부착이 가능하다. 힘 센서는 유한 요소 해석을 이용해서 응력 및 변형을 분포를 분석하여 제작했고, 위치 추적은 자력기반추적이 가능한 AURORA 센서(NDI, Waterloo, Canada)를 사용했다. 개발된 장비를 이용해 동물 실험을 진행했고, 이 때의 내시경에 작용되는 힘과 움직임을 측정했다.

2. 계측장비개발

내시경 끝단에서의 힘과 움직임을 측정하기 위해 그림 1과 같은 계측장비를 개발했다. 장비는 단축 방향의 힘 센서와, 도구 끝의 3축 위치 정보를 추적할 수 있는 위치 센서로 구성되어 있다.

힘 센서는 내시경의 공간적인 제약 (렌즈, 조명, 채널 등)을 고려해서 끝단을 감싸는 구조로 설계했다. 그림 2에서 S1, S2, S3는 스트레인 게이지가 부착된 면을 의미하고, 각각의 면에서 1축의 힘 측정이 가능하다. 힘 센서 감지부(S1, S2, S3)의 원통 내경은 10mm, 외경은 16mm, 두께는 1mm, 기둥은 120°마다 1개씩 위치하고, 두께는 3mm이다. 3개의 스트레인 게이지 (EA-06-031DE-350 model, Vishay, USA)가 감지부의 아랫면에 부착되었다. 힘 센서 성능을 검증하기 위해 힘과 출력값의 선형성을 측정했다 (그림 4). S1면에 0.1N에서부터 10N까지 힘을 가했을 때 S1

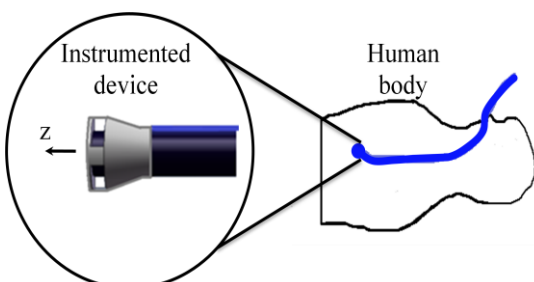


Fig.1 Transgastric NOTES using general endoscope

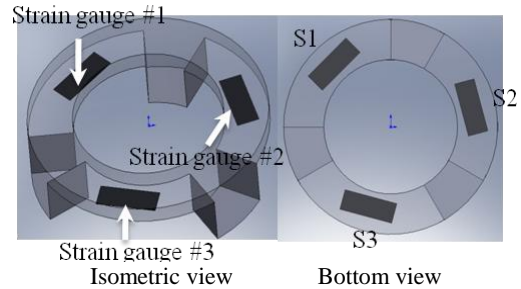


Fig.2 Force sensor configuration. S1, S2, and S3 indicates area which is attached on strain gauge #1, #2, and #3.

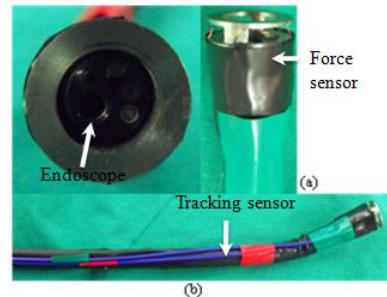


Fig.3 An instrumented device with the endoscope. (a) The designed force sensor (b) The attached Aurora electromagnetic tracking system sensors

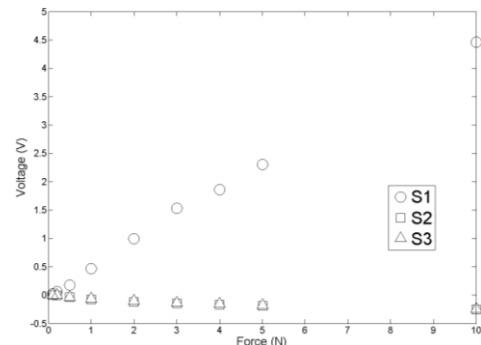


Fig.4 Force sensor calibration in S1

에서는 힘에 따른 출력값이 일정하게 선형성을 나타내며, S2, S3에서는 미세하게 감소한다. S2, S3에 각각 힘을 가했을 때 반복해서 실험을 수행했다. 3개의 스트레인 게이지 출력값과 힘 사이의 관계식을 행렬 A를 이용해서 나타내기 위해 다음과 같은 관계식을 이용했다. S1, S2, S3에서 얻은 출력값을 행렬 S, 가해준 힘 행렬을 F로 나타내었을 때 $F=AS$ 이다. 최소자승법을 이용해 계산된 행렬 A는

$$A = \begin{pmatrix} 2.2128 & 0.1584 & 0.1563 \\ 0.1598 & 2.1309 & 0.1574 \\ 0.1537 & 0.1732 & 2.1685 \end{pmatrix} \quad (1)$$

이다.

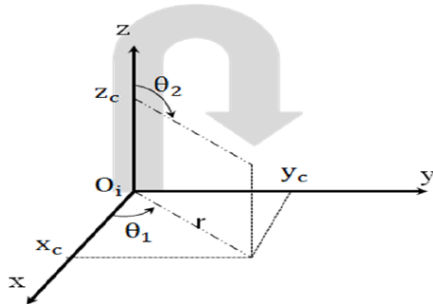


Fig.5 Endoscope angles model

내시경의 움직임을 설명하기 위한 자력 기반 위치 추적 센서 (Aurora, NDI, Waterloo, Canada)는 그림 3와 같이 사용되었다. 내시경은 유연하고 길지만 손잡이를 통해 구부릴 수 있는 구간은 끝 단에서부터 약 80mm 구간이다. 끝 단에서 80mm 를 기준(O_i)으로 하고 끝 단의 위치 좌표 (x_c, y_c, z_c)를 이용해서 끝 단이 뒤틀린 각도(twisted angle, θ_1)와 구부러진 각도 (deflected angle, θ_2)를 식 (2)와 같이 나타내었다 (그림 5).

$$\begin{aligned} \theta_1 &= A \tan 2(x_c, y_c) \\ \theta_2 &= A \tan 2(z_c, r) \end{aligned}, \quad r = \sqrt{x_c^2 + y_c^2} \quad (2)$$

3. 동물 실험

충남대학교 동물실험 윤리위원회 (Chungnam University Animal Care and Use Committee)에서 실험이 승인된 개 (Mongrel)를 대상으로 실험을 진행했다. 개발된 계측 장비가 부착된 위 내시경 (EG-300FP, Fuji Photo Optical Company, Japan)을 이용해서 입에서부터 위까지 삽입하는 시술을 수행하였으며, 계측 장비에서 힘과 위치 정보를 측정했다. 그림 6은 입을 기준으로 시간에 대한 내시경 끝 단의 삽입 길이를 나타낸다. 동시에 끝 단에 작용하는 1축 힘과 위치 정보를 측정하였다. 내시경의 움직임은 뒤틀린 각도 (twisted angle, θ_1)가 전체 과정에서 180도에서 회전한 후 반시계방향으로 계속해서 회전한다. 각도를 나타낼 때 0도에서 반시계방향으로 180도까지 positive 값을 갖고, 시계방향으로 -180도까지 negative 값을 갖는 Atan2를 사용했기 때문에 180도 부근에서는 변화량이 크게 나타나지만 절대적인 각도 변화로 이해해야 한다. 구부러진 각도 (deflected angle, θ_2)는 항상 positive 값을 가지며 삽입 위치에 따라 구부러지는 현상을 볼 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 위 내시경을 이용한 NOTES 수술에 있어 필요한 요구조건을 수치적으로 정립하기 위해 힘과 위치 측정이 가능한 계측 장비를 개발하고 동물실험을 수행하였다. 개발된 1축 힘센서는 3개의 부분으로 나누어서 각각 1축의 힘을 측정하도록 설계하였고, 동물 실험에서는 끝 단과 장기들 사이에 힘이 최대 1N 까지 측정되었다. 상용 위치 센서를 통해 얻은 위치 정보를 이용해서 실험 중에 내시경의 구부러짐, 뒤틀림을 조사했다. 입에서 위까지 삽입 과정 중 측정된 힘 정보와 내시경 움직임 정보는 새로운 NOTES 수술 도구 개발을 위해 필요하며, 수술용 로봇의 제어 및 개발에 활용할 수 있을 것이다.

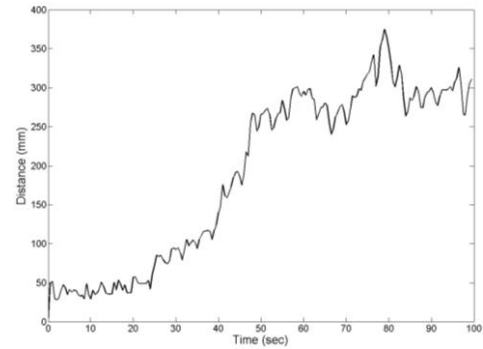


Fig.6 Distance of the end tip reference on the mouth

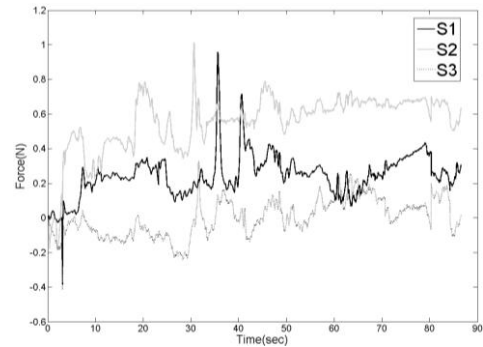


Fig.7 Force exerted on the front surface of the endoscope

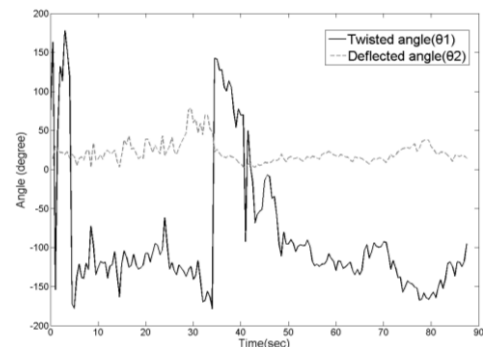


Fig.8 Twisted angle (θ_1) and deflected angle (θ_2) in response to the distance change during inserting

참고문헌

1. Kalloo A., Singh V., Jagannath S., et al. "Flexible transgastric peritoneoscopy: a novel approach to diagnostic and therapeutic interventions in the peritoneal cavity", *Gastrointestinal Endoscopy*, 60, 114-117, 2004.
2. Vahe K., Mikael S., James C., Guang-Zhong Y., et al. "Navigation Systems and Platforms in Natural Orifice Transluminal Endoscopic Surgery (NOTES)", *International Journal of Surgery*, 7, 4, 294 - 304, 2009.
3. Priya J., Charles M., Margherita C., et al. "Retraction Force Measurement During Transgastric and Transvaginal NOTES", *Gastrointestinal Endoscopy*, 67, 5, AB119, 2008.
4. Mark N. Appleyard, Charles A. Mosse, Timothy N. Mills, G. Duncan Bell, Fortunato D. Castillo, C. Paul Swain, "The Measurement of Forces Exerted During Colonoscopy", *Gastrointestinal Endoscopy*, 52, 2, 237-240, 2000.
5. Yusof G., Farrokh J., "Catheter Kinematics for Intracardiac Navigation", *IEEE Transaction on Biomedical Engineering*, 56, 3, 621-632, 2009.