

대장 소장 원형문합수술을 위한 지능형 로봇개발

권용민(고려대 대학원 제어계측공학과), 홍정화*(고려대 제어계측공학과)

Development of Intelligent Robot for Anastomosis of Intestine

Y.M.. Kwun (Control and Instrumentation. Eng., Korea University),
J. Hong*(Control and Instrumentation. Eng., Korea University)

ABSTRACT

As increasing gastrointestinal pathologies, general and thoracic surgeries using circular staplers have been dramatically increased. Because of convenience for surgical procedure, recently, various circular staplers for anastomosis have been used widely. Since the circular staplers conventional have used the displacement control method, however, the anastomosis could have various biomechanical conditions. To do that, biomechanical system of gastrointestinal soft tissue should be examined to control the anastomotic condition. In this study, a new intelligent robot used in cicular anastomosis. The intelligent robot driven by a stepper motor and controlled by a digital signal processor.

Key Words :Intestine(내장), Anastomosis(문합), Interface pressure(압착 압력), Circular stapler(원형 문합기), Biomechanics(생체역학), Robot(로봇), Fuzzy control(퍼지제어)

1. 서론

문합이란 인체의 대장암 등과 같은 대장 질환 시 대장 부분제거 수술 후 대장 재건 시, 직장에 생기는 병변 제거 수술 후 직장 재건 시술 중 수행되는 접합 수술이다. 최근 까지 고전적인 수 봉합에 의한 단순 문합술이 시행되어왔으며, 현재에는 미국에서 개발된 원형기계문합기가 전술된 문합 수술에 많이 적용되고 있다.

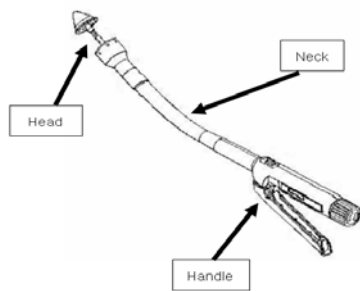


Fig. 1 Manual Circular Anastomosis Product

현재 사용되고 있는 원형기계문합기는 Fig. 1과 같이 일반적으로 크게 3부분으로 나눌 수 있다. 수술 시 창자의 문합이 이루어지는 Head부분과 곡선 및 직선의 형상을 갖고 있는 Neck부분, 문합 시 창자 연조직의 양쪽 절단부의 봉합 시 문합 간격을 조절해주는 조정나사 및 문합용 스테플을 발사하고, 불필요한 연조직을 절개하는 수동에 의한 기계적 동력을 발생 시키는 Handle부분으로 구성되어 있다.

기존 원형기계문합기의 3부분은 일체화 되어 있다. 수동식으로서 인체 창자의 해부학적 위치와 개체 및 성별, 나이 등 다양한 차이 등이 고려되지 않은 일정 범위의 문합 간격에서 사용되도록 설계되어 있다. 또한, 일체화 설계에 의한 수술 후 원형기계문합기 전체를 폐기 해야되는 문제점이 있다.

본 연구에서는 기존의 수동식 원형기계문합기와는 다르게 소형 스텝모터, 스트레인게이지, 마이크로컨트롤러에 의한 자동화된 로봇을 개발하였다. 또한, 본 연구에서 개발된 원형문합수술로봇은 스트레인게이지를 이용하여 문합시 압착압력을 측정하여

원초적인 창자의 물성치에 따른 최소한의 차이를 판별한다. 판별 후에 마이크로컨트롤러를 이용하여 퍼지연산을 수행하여 최적 압착 압력하에서의 문합이 가능하도록 하였다. 또한, 일체화되어 있던 원형기계 문합기를 문합이 이루어지는 Head-Neck부분과 자동화된 Handle부분으로 분리하여 사용할 수 있도록 설계하였다. 이는 압착압력을 제어하는 Handle 부분을 반영구적으로 사용할 수 있어서 시술을 수행하는 병원이나 환자에게 경제적 부담을 줄이게 된다.

2. 원형 문합수술 로봇의 구성

개발된 원형수술문합로봇은 다음 Fig. 2에 도시하였다. 원형문합수술시 스텝모터가 리드스크류를 구동하여 내장을 압착하게 된다. 이에 발생된 압력을 문합수술로봇 내부에 장착된 스트레인게이지가 측정하게 된다. 측정된 신호는 증폭기를 거쳐 마이크로컨트롤러(TMS320LF2407)에서 퍼지연산을 수행하여, 최적압력을 산출한다. 연산된 결과에 의거하여 모터구동회로에 신호를 출력하며, 이는 스텝모터에서 리드스크류를 구동하며 문합수술시 최적 압착을 구현한다.

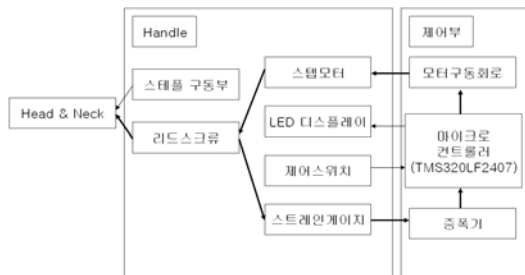


Fig. 2 Diagram of intestine circular anastomosis robot

2.1 기구부

개발된 원형자동문합로봇의 기구부는 다음 Fig. 2.1.1과 Fig. 2.1.2와 같다. Fig. 2.1.1은 Head와 Neck부분이다. Handle부분과 탈착이 가능하게 하기 위하여, Head 부분 결속부와 스텝 작동 부분 결속부가 분리되도록 구현되었다.



(a)



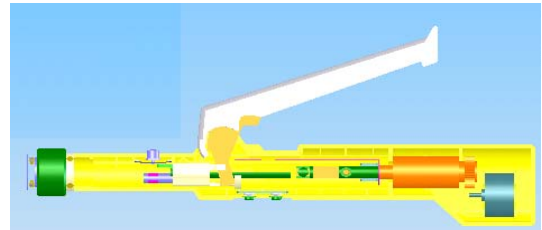
(b)

Fig 2.1.1 Intestine circular anastomosis robot part of Head & Neck(a), 3D-designed of Head & Neck(b).

다음 Fig 2.1.2는 원형문합수술로봇의 Handle 부분을 개발한 것이다. 내부에는 압력측정용 스트레인게이지와 압력 발생용 구동 리드스크류, 스텝모터가 내장되어있다. 압력 발생용 스텝모터는 소형인 PF-25-24를 사용하였다. 또한, 원형자동문합로봇 작동용 스위치 및 문합위치 표시용 LED 디스플레이가 내장되어 있다.



(a)



(b)

Fig. 2.1.2 Intestine circular anastomosis robot part of Handle(a), 3D-designed of Handle(b).

2.2 제어부

제어부는 디지털 신호 처리용 마이크로 프로세서인 TMS320LF2407을 이용하였다. 위의 마이크로 프로세서를 선택한 이유는 고속 연산 속도와 내부에 내장되어 있는 8 비트, 2.6MHz(최대) 샘플링 타임의 A/D 컨버터 때문이다. 퍼지 제어 알고리즘을 수행하기 위해서는 고속의 연산 속도가 보장되어야 하며, 설계의 간편성과 제어 프로그램 작성을 용이하게 하기 위하여 프로세서에 A/D컨버터를 내장된 제어 프로세서를 선택해야 한다. 또한 외부에 스텝모터 구동용 제어 드라이버인 SLA7024를 모터 구동 회로와 스트레인게이지 증폭용 증폭기를 구현하였다.



Fig 2.2.1 Intestine circular anastomosis robot control tool box.

2.3 제어 프로그램

원형문합수술로봇에 구현될 퍼지 제어 알고리즘은 다음과 같다. 먼저 내장의 압축 시스템을 다음과 같은 상태방정식으로 표현할 수 있다.

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (1)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{-c_1 x_2 - (k_1 + k_2)x_1 + u(t)}{m} \quad (2)$$

여기서 식(1)의 $x_1 \in (1 \times 10^{-3}, 2 \times 10^{-3})$ 은 창자의 압축변위이고, 식(2)의 x_2 는 압력을 가하면서 발생하는 속도이다. 그리고 $c_1 = \beta$ 는 Decay constant이고, $k_1 = G_0 - G_\infty$ 이며, $k_2 = G_\infty$ 이다. 또한 m 은 입력부 분에서 가정할 수 있는 질량에 대한 상수이고 $u(t)$ 는 창자에 가해지는 압력이다. 통상적인 샘플링 기법을 사용하면 위의 시스템은 다음과 같은 TS 퍼지 모델의 규칙들로 근사될 수 있다.

- 내장의 두께에 따른 퍼지 규칙

규칙1: IF x_1 is about I1, THEN $\dot{x} = A_1 x + B_1 u + a_1$

규칙2: IF x_1 is about I2, THEN $\dot{x} = A_2 x + B_2 u + a_2$

규칙3: IF x_1 is about I3, THEN $\dot{x} = A_3 x + B_3 u + a_3$

- 내장의 물성에 따른 퍼지 규칙

규칙4: IF x_1 is about I4, THEN $\dot{x} = A_4 x + B_4 u + a_4$

규칙5: IF x_1 is about I5, THEN $\dot{x} = A_5 x + B_5 u + a_5$

규칙6: IF x_1 is about I6, THEN $\dot{x} = A_6 x + B_6 u + a_6$

위의 TS 퍼지 모델에서 변수 l_n , A_n , b_n , a_n 등은 실험 결과에 의하여 결정된다. 각 IF-THEN 규칙에 사용된 퍼지 집합의 표준화된 멤버십 함수 μ_l 은 다음의 식(3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\mu_l(x(t)) > 0, l = 1, \dots, m \quad (3)$$

또한 멤버십 함수 μ_l 을 다음의 식(4)와 같이 정의할 수 있다.

$$\sum_{l=1}^m \mu_l(x(t)) = 1, \forall t \geq 0 \quad (4)$$

다음 과정으로 각 셀 S_l 위에서 정의되는 상한 행렬을 아래와 같은 식(5)와 식(6)으로 구성한다.

$$-\left(\sum_{l=1}^m \mu_l a_l\right) \left(\sum_{l=1}^m \mu_l a_l\right)^T \leq -E_{l_a} E_{l_a}^T \quad (5)$$

$$-\left(\sum_{l=1}^m \mu_l B_l\right) \left(\sum_{l=1}^m \mu_l B_l\right)^T \leq -E_{l_B} E_{l_B}^T \quad (6)$$

마지막으로, 원점이 속하지 않는 셀을 포함하는 영역을 표현하는 데 사용되는 행렬 Y_l 과 y_l 를 다음의 식(7)과 같이 결정한다.

$$S_l \subset x \in R^n \parallel Y_l x + y_l \parallel \leq 1 \quad (7)$$

위 결과를 바탕으로 선형행렬부등식 및 국소 상태케환 이득을 구하게 된다. 구하여진 국소 이득을 사용하는 TS 퍼지 제어기는 다음의 식(8)과 같다.

$$u = \sum_{l=1}^3 \mu_l K_l x \quad (8)$$

이러한 퍼지시스템은 IF-THEN 규칙에 대하여 최적 제어가 된다.

3. 원형문합실험 결과

원형문합수술로봇의 퍼지 제어 알고리즘을 확립하기 위해서는 내장 접촉면의 압력을 확인하여야 한다. 이를 통하여 내장의 두께와 내장의 물성을 파악할 수 있다. 즉, 압착 압력이 발생된 변위를 통하여 내장의 두께가 측정 가능하게 된다. 또한, 접촉면의 압력의 변화량을 통하여 내장의 물성에 대한 판단을 할 수 있게 된다. 내장의 두께와 물성에 대한 특성은 내장 문합시의 최적 문합 간격을 결정할 수 있는 측정치가 된다.

3.1 실험결과

실험은 제작된 원형문합수술로봇을 이용하여 내장을 문합시술 수행하였다. 사용된 내장은 수술후 추출된 내장을 이용하였으며 특성은 다음 Table 3.1.1과 같다.

실험순서	시편번호	두께(mm)	총두께(mm)
001	1	1.054	2.063
	2	1.009	
002	1	0.972	1.725
	2	0.753	
003	1	0.735	1.538
	2	0.803	
004	1	0.793	1.610
	2	0.817	
005	1	0.557	1.555
	2	0.598	

Table 3.1.1 Experiment data of intestine

실험순서	압축력 발생 변위(mm)
001	1.04
002	0.92
003	0.86
004	0.83
005	0.79

Table 3.1.2 Measured displacement data when input instant force to intestine.

내장을 문합하면서 Table 3.1.2의 변위간격에서 압축력이 발생하였으며, Fig 3.1.1은 발생된 압축력을 나타내며, Fig. 3.1.2는 문합된 내장이다.

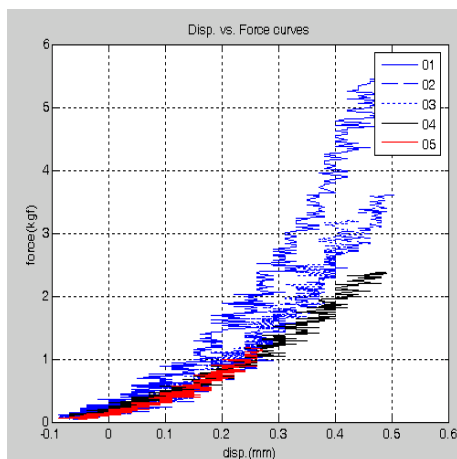


Fig. 3.1.1 Displacement vs. Force Curves.

Table 3.1.1, Table 3.1.2, Fig. 3.1.1을 통하여 내장의 두께와 물성치를 퍼지제어에 적용하게 될 수 있다. 내장의 압축력의 급격한 발생은 내장의 물성에 따른 반발력이 크다는 것을 의미하며, 압축력의 완만한 증가는 연한 특성을 가지는 것을 알 수 있다. 또한, 내장의 압축력이 발생하는 Head 간의 변위를 통하여 두께에 관한 특성을 규정지을 수 있다. 위 실험결과를 통하여 대장, 소장의 원형문합수술로봇을

구동하는 퍼지제어 규칙을 정할 수 있으며, 로봇 구동시에 적용시킬 수 있다.



Fig. 3.1.2 Surgical operated intestine using circular anastomosis.

4. 결론

진술한 구조와 제어 프로그램 및 실험을 통하여 대장, 소장 원형문합수술로봇을 구현할 수 있었다. 일회성인 Head-Neck 부분과 자동화된 Handle 부분의 분리를 통하여, Handle 부분을 지속적인 재사용이 가능할 것이다. 이는 기존제품의 일회 사용 후 폐기되는 단점을 감안할 때 환자 및 시술자는 비용을 절감하게 될 것이다. 또한, 기존 제품은 시술자의 주관적인 작동에 의한 수술 후 누출 및 협착 같은 질병을 가져올 수 있다. 본 연구에서 개발된 지능화된 원형문합수술로봇을 이용하여 최적 압착 간격하에서 시술함으로써 위의 기술된 질병을 감소시키는 결과를 가져올 것이다. 그러나 원형문합수술로봇을 사용후에 발생하는 문제점에 대해서는 심층적인 임상 연구가 필요할 것으로 보인다. 마지막으로 자동화된 로봇을 이용함으로써 시술의 간편함을 통한 시술자의 부담을 줄이게 될 것이다.

후기

본 연구는 2004년 산업자원부 신기술실용화기술개발사업(10008490)에 의해 지원되었다.

참고문헌

1. 권용민, 홍정화, “내장의 시간의존적 생체 역학 거동”, 제30회 대한의용생체공학회 춘계학술대회, pp. 43, 143, 2004
2. 권용민, 홍정화, 이인혁, “내장 문합시 활동성과 연조직 인터페이스 압력 해석”, 제31회 대한의용생체공학회 및 한국의학물리학회 추계학술대회, pp. 33, 2004
2. Kazuo Tanaka, Hua O. Wang , "Fuzzy Control Systems Design And Analysis", JOHN WILEY & SONS, INC., pp. 277-290, 2001.

3. V.I.Egorov, V.Schastlivtsev, R.A.Turusov, A.O.Baranov, "Participation of the Intestinal Layers in Supplying of the Mechanical Strength of the Intact and Sutured Gut", *Eur Surg Res*, 34(6):425-31, 2002.
4. Y.C. Fung, "Biomechanics Mechanical Properties of Living Tissue", Second Edition, Springer Verlag, pp. 466-499, 1993.
5. 韓甲洙, "人體解剖學", 改訂版, 高文仕, pp. 241-245, 1977.
6. Iman Brouwer, Jeffrey Ustin, Loren Bentley, Alana Sherman, Neel Dhruv, and F. Tendick, "Measuring In Vivo Animal Soft Tissue Properties for Haptic Modeling in Surgical Simulation", in J.D. Westwood et al., eds., *Medicine Meets Virtual Reality 2001*, IOS Press, pp. 69-74, 2001.