

케이블 컨듀잇 구조의 수술용 햅틱 마스터 장치의 개선과 smooth backlash inverse를 이용한 backlash 보정

Improvement of surgical haptic master device using cable-conduit and backlash compensation by smooth backlash inverse

최 우 혁¹, 윤 성 민², 이 민 철[†]

Choi Woo Hyeok¹, Yoon Sung Min², Lee Min Cheol[†]

Abstract In robotic surgery, a surgeon checks only a surgical site of patient in the progress of surgery by vision and sound information. In order to solve this limited information, the haptic function is necessary. And haptic surgical robot is also necessary to design a haptic master device. The master device for laparoscope operation with cable-conduit was developed in previous research to give haptic function. It suggested a possibility of developing a master device by using the cable-conduit. However, it is very inconvenient to use. Therefore, this paper suggests a new mechanism design structure to solve the problems of the previous work by new forming a new master device. And it has proved that it's usability is better than previous one. Furthermore it has also experimented and analyzed that a backlash of new master device is compensated by smooth backlash inverse algorithm.

Keywords: cable-conduit, tendon, backlash, compensation, haptic device

1. 서론

로봇 복강경 수술은 작은 절개부를 여러 개 내고 그 구멍을 통해 내시경과 여러 가지 도구를 환자의 환부에 집어 넣어 수술하는 복강경수술에 로봇공학이 접목된 형태이다. 이는 개복수술에 비해 빠른 회복과 낮은 감염율의 이점을 가지고 있다. 또한, 외과의사가 마스터 장치에 앉아서 수술을 집도하는 방식으로 외과의사와 환자간의 수술거리의 제약에 영향을 적게 받는 이점이 있고, 환자에게 정밀한 수술을 제공할 수 있다.

그러나 오직 시각과 음향의 정보만으로 수술상황을 파악해야 하는 문제점이 있다. 이는 외과의사들에게 로봇수술에 적응할 수 있도록 별도의 훈련과 높은 숙련도를 요구하게 되었다^{1,2}.

이런 문제점을 해결하기 위해서 조작자에게 촉각적인 정보를 추가로 제공하여 빠른 로봇수술의 적응과 숙련도를 쌓을 수 있도록 하는 방법이 제안되었다. 하지만 이를 구현하기 위해서는 여러 가지 감지기를 이용해야 하나 인체에 들어가 수술을 하는 수술용 로봇은 전기에 취약한 인체 내부의 안정성과 위생 등의 문제로 센서의 사용이 어렵다.

이러한 이유로 과거 의료 haptic장치는 수술용 로봇이 아닌 수술 훈련용 시뮬레이터 장치에 haptic기능을 부여하여 외과의사들이 전통적인 복강경 수술에 적응할 수 있는 훈련 장치를 개발하는 데 그쳤다³.

한편 이러한 연구경향에 발 맞춰 로봇 수술용 마스터 장치 또한 haptic 기능을 부여하려는 시도가 있었다. 이 중 cable-conduit구조를 이용하여 haptic마스터 장치를 개발한

Received : Dec. 5. 2013; Reviewed : Dec. 26. 2013; Accepted : Feb. 7 2014

※ This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education, Science and Technology(2011-0014915)

¹ Interdisciplinary Program in Robotics, Pusan National University (tinycracker23@gmail.com)

² Mechanical Engineering, Pusan National University (tactics1019@gmail.com)

[†] Corresponding author: Department of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan, Korea (mclee@pusan.ac.kr)

시도가 있었다. 이 연구는 본 연구의 선행연구로서 이 마스터 장치는 센서와 액추에이터를 조인트와 분리가 가능하며, 이에 따라 경량화와 haptic 정보를 전달 할 수 있는 구조이다. 또한, 움직임 전달과 힘 전달 등을 실험적으로 평가하여 haptic이 가능한 마스터장치의 개발 가능성을 제시하였다⁴⁾. 그러나 이 마스터 장치의 각 축(roll, yaw, pitch)의 구조적 위치가 조작자에게 불편함을 주었다. 또한 마스터 장치에서 발생하는 backlash 현상에 대하여 해결하지 않았다.

이에 본 연구는 먼저 선행연구의 문제점을 파악하여 손목 중심과 마스터 장치의 각 축의 교차점이 일치하도록 개선하고, backlash 현상에 의한 구동부와 종동부 간의 변위 오차를 보정하기 위한 알고리즘을 본 시스템에 적용하여 마스터 장치의 성능을 개선한다.

이를 위해 먼저 일반적인 사람의 손의 움직임에 대해 분석한다. 그 후 선행연구의 마스터 장치를 조작하기 위해 조작자의 손이 어떤 식으로 움직이는지를 확인하여 문제점을 파악한 후 손목 중심과 마스터 장치의 각 축의 교차점이 한 점에 일치하도록 새로운 설계 방안을 제시한다. 그 후 선행연구와 개선한 마스터 장치의 차이점을 비교 및 분석한다. 또한, 새로운 마스터 장치의 구동부와 종동부사이의 오차인 backlash 현상을 측정하고 이를 backlash보정 알고리즘인 Smooth backlash Inverse를 통해 보정하고 이 알고리즘에 대한 보정성능평가를 실시한다.

2. Cable-conduit 구조의 특성

Cable-conduit구조는 Fig. 1과 같이 케이블, 풀리, 컨듀잇, 컨듀잇 고정판의 4가지 구조의 단순한 구성으로 이루어져 있으며, 케이블을 통해 액추에이터와 조인트 사이의 거리를 늘려서 각각 종동부와 구동부로 나뉜다. 이러한 특징으로 인해 공간상의 제약이 적고 장치를 소형화 및 경량화를 할 수 있다.

일반적으로 케이블 한 개를 이용해서 구동하는 케이블

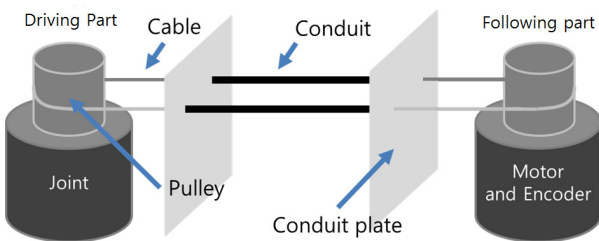


Fig. 1 Structure of cable-conduit

구조에 경우, 케이블이 풀리의 표면에 미끄러지거나 양쪽의 풀리가 헛도는 유격현상이 크게 발생하는 문제점이 있다⁵⁾. 위의 문제점들을 개선하기 위해서는 케이블 두 개를 교차하여 각 풀리에 연결되는 pull-pull형 구조를 사용하여 어느 정도 해결이 가능하다.

2.1 동작특성

케이블을 이용한 구조인 cable-conduit은 비선형적이기 때문에 그에 대한 이해가 필요하다. 그러므로 cable-conduit 구조의 동작 특성에 대하여 설명하고자 한다. 구조가 pull-pull형 일 때, 움직임 특성이 Fig. 2와 같이 4단계로 나뉜다⁶⁾. Fig. 2에서 보이는 각 4단계의 동작 특성은 다음과 같다.

- 1단계 (Fig. 2의 좌측 상부)
입력풀리(구동부)에 토크가 가해져도 두 케이블의 장력 변화가 없으면 출력풀리(종동부)는 움직이지 않는다.
- 2단계 (Fig. 2의 우측 상부)
하나의 케이블(a)에 장력증가가 일어나 케이블이 당겨지면 당겨진 케이블이 부분적으로 움직인다. 그리고 다른 케이블(b)가 conduit을 통해 구동부에서 종동부로 움직이게 된다.
- 3단계 (Fig. 2의 좌측 하부)
2단계가 지속되면 결국, 두 케이블(a, b)이 동시에 움직이게 되며, 이는 곧 두 케이블을 포함한 전체 시스템이 움직이는 것이다. 이는 입력된 토크가 구동부로부터 종동부에 전달되는 상태이다.
- 4단계 (Fig. 2의 우측 하부)
입력풀리가 정지해도 출력풀리가 움직인다. 이로 인해

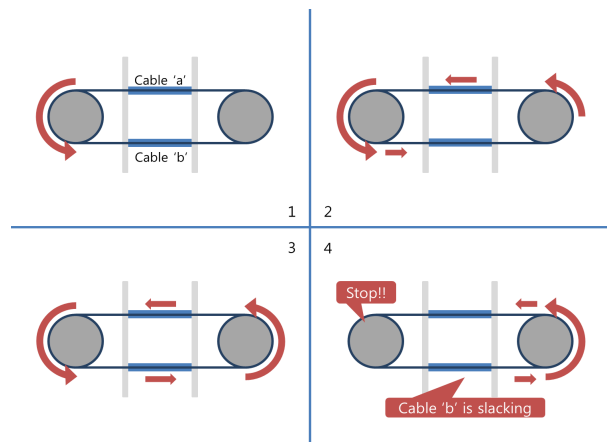


Fig. 2 Moving characteristic of cable-conduit

하나의 케이블(b)이 늘어나고, 나머지 케이블(a)는 구동부를 향해 계속 움직인다.

이 같은 특성으로 인해 pull-pull구조 또한 케이블의 늘어짐이나 미끄러짐 등이 발생한다는 것을 알 수 있다.

2.2 Backlash 현상

Backlash는 케이블이 늘어나거나 미끄러지는 현상으로 인해 발생하는 입력 값(x)과 출력 값(y) 사이의 비선형성 오차이다. 즉, 입력 값이 변화할 때 마다 출력 값이 입력 값만큼 추종 되지 않는 현상으로 연속시간의 backlash 모델을 아래의 식(1)과 같이 정의할 수 있으며 그래프로 표현했을 때 Fig. 3과 같다^[8,10,11]. 이는 cable-conduit구조에서 발생하는 backlash현상에도 적용할 수 있다^[6,7].

$$y(t) = B(x(t)) = \begin{cases} m(x(t) - c_l) & \text{if } \dot{x}(t) < 0 \text{ and } y(t-1) = m(x(t-1) - c_l) \\ m(x(t) - c_r) & \text{if } \dot{x}(t) > 0 \text{ and } y(t-1) = m(x(t-1) - c_r) \\ y(t-1) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

backlash 모델에서 m은 backlash의 기울기이고 C_l, C_r 은 각각 오른쪽과 왼쪽의 offset이다. 이러한 backlash의 보정은 각 방향의 offset을 줄여 출력 값이 입력 값에 근사하도록 하는 것을 의미한다.

3. 마스터 장치의 개선

본 장에서는 선행연구의 문제점을 분석하고 그에 대한 대안으로 개선된 마스터 장치를 제안한다.

3.1 선행연구 마스터 장치의 문제점 분석

선행연구 마스터 장치는 Fig. 4의 구조를 취하고 있으며, 각 축이 다빈치 인스트루먼트 팁의 자유도와 동일하게 설계되어 있다. 그리고 마스터의 경량화를 위해 프레임 두

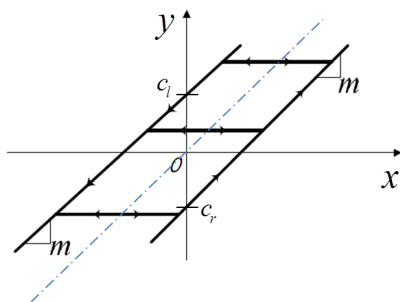


Fig. 3 backlash phenomenon

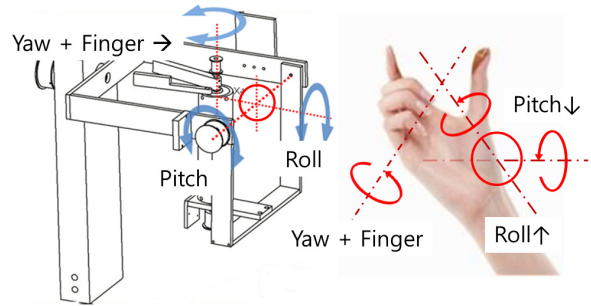


Fig. 4. Master device of previous research

께를 줄였고, 손잡이를 power grip형태를 취하고 있다. 또한 핸들의 각 축이 별도의 변환 없이 적용할 수 있도록 설계되었다^[4]. 선행연구의 마스터 장치의 분석에 앞서 사람이 특정 움직임을 취했을 때 손, 손목, 팔 등의 움직임 변화를 확인할 필요가 있었다. 사람의 움직임에 대해 정의하기 위해 손과 팔의 움직임^[12]을 Fig. 5^[9]의 (a), (b), (c)로 표기했다. 위의 각 움직임을 취하게 되면 (a)는 roll, (b)는 pitch, (c)는 yaw의 움직임이 된다. 이때, 각 움직임의 축이 손목의 중심을 교차하여 지나가는 것을 알 수 있다.

Fig. 4의 오른쪽의 손 그림은 선행연구의 마스터 장치를 손에 쥐었을 때 각 축이 손의 어느 위치에 있는지를 표시한 것이다. 여기서 Fig. 4의 손 그림의 각 축의 위치와 Fig. 5의 손 그림의 축 위치가 다르다는 것을 알 수 있다. 이러한 축 위치의 불일치가 어떤 영향을 주는지 알아보기 위해 선행연구의 마스터 장치를 사용해 Fig. 5의 세 가지 움직임을 실시해봤다. Fig. 6, Fig. 7은 선행연구의 마스터 장치를 파지하고 (c)와 (b)의 움직임을 행한 모습을 보여준다. Fig. 6에서 조작자가 좌우로 60도 움직였을 때 (Fig. 5의 c), 축을 중심으로 약 5.63cm의 변위차가 발생한다. 즉, 단순히 손목 관절만을 이용해서 구현할 수 있는 움직임을 변위차로 인해 팔 관절 등을 추가로 움직여야만 구현할 수

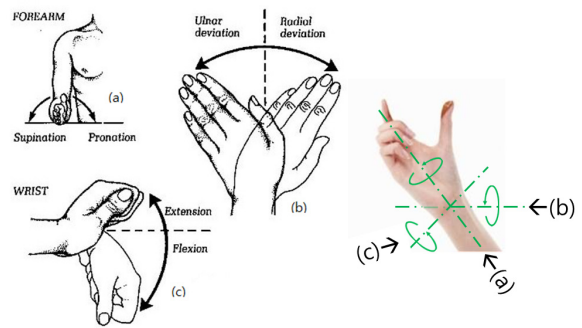


Fig. 5. Motion of human's hand and arm

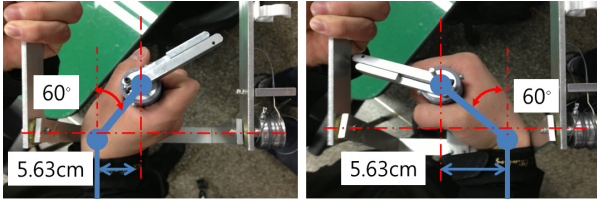


Fig. 6. Yaw axis motion of previous work

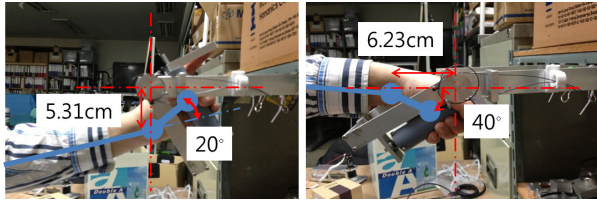


Fig. 7. Pitch axis motion of previous work

있다는 것을 의미한다. 또한 Fig. 7을 보면, 손목을 위로 20도 아래로 40도 움직였을 때 (Fig. 5의 b), 축 중심이 손목관절과 일치하지 않아 손목을 위로 움직일 때 팔을 추가로 약 10도를 추가로 움직여야하고 손목관절을 pitch축에서 약 5.31cm 내려가게 된다. 그리고 아래로 움직일 때는 팔을 약 6.23cm 정도 뒤로 당겨야한다. 이러한 자료를 통해, 마스터 장치를 사용하여 특정 움직임을 구현할 때 사람의 움직임보다 필요이상으로 과도한 움직임이 요구된다는 것을 알 수 있으며, 이는 조작자에게 불편함을 느끼게 한다.

3.2 개선된 마스터 장치

위의 선행연구의 문제점을 개선하기 위한 방법으로 각 축의 중심이 조작자의 손목에 올 수 있도록 맞추었다. Fig. 8은 새로 설계한 마스터 장치의 도면을 나타낸다. Fig. 4의 손 그림과 같이 조작자가 선행연구의 마스터장치를 쥐었을 때, 각 축의 위치가 조작자의 손에 어느 쪽에 위치하는지

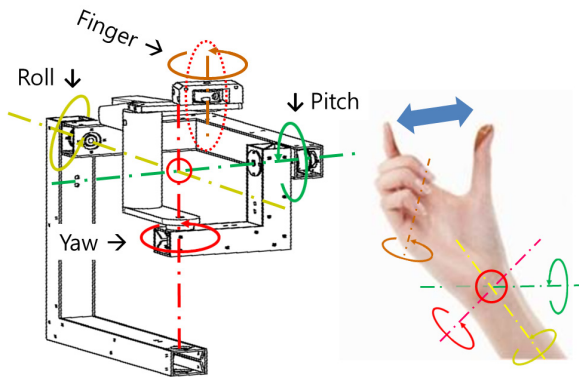


Fig. 8. Improved master device

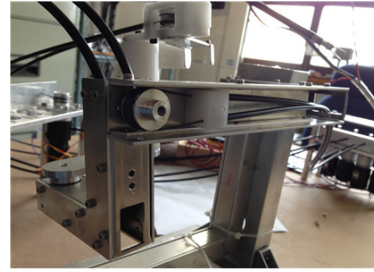


Fig. 9. The inner parts of the improved master device

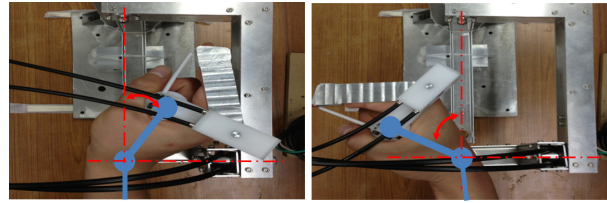


Fig. 10. Yaw axis motion of improved master device

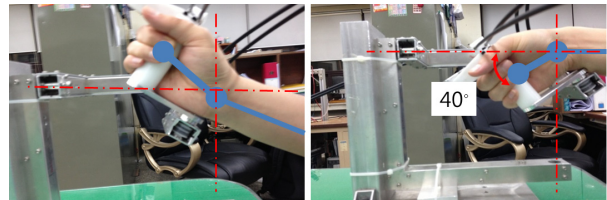


Fig. 11. Pitch axis motion of improved master device

표시하였다. 개선된 마스터 장치의 구성은 구동부인 마스터 핸들과 중동부인 컨트롤 박스로 구성되어 있다. 선행연구와 개선된 마스터 장치를 비교했을 때 roll, yaw, pitch축이 조작자의 손목의 중심을 교차하는 구조이며, 장치의 프레임은 ‘□’의 형태로 설계하고 내부에 케이블과 풀리가 들어갈 수 있도록 했다. Fig. 9는 장치 내부에 케이블과 풀리가 설치되어 있는 것을 보여준다. 또한 선행연구와 동일한 조건을 가지고 Fig. 6, 7과 같은 움직임을 실시했다. Fig. 10, 11은 Fig. 6, 7의 움직임을 개선된 마스터 장치에서 실시한 사진이다. Fig. 8과 같은 조작자의 손목과 각 축이 일치한 구조로 인해 Fig. 10, 11에서는 선행 마스터에서 발생하던 추가적인 움직임이 없음을 알 수 있다.

4. Backlash 보정 알고리즘

개선된 마스터 장치에도 backlash가 발생할 수 있기 때문에 backlash 보정 알고리즘이 필요하다. 이에 본 논문에서는 cable-conduit구조에 backlash 보정 알고리즘으로써 적용된 사례가 있는 smooth backlash inverse를 사용했다.

4.1 Smooth backlash inverse

4.1.1 Backlash inverse

Smooth backlash inverse를 설명하기에 앞서 backlash inverse에 대한 기본적인 설명을 하겠다. backlash inverse의 모델은 식 3과 같이 정의되며 Fig. 12와 같이 표현된다^[10,11]. 이는 보편적으로 backlash를 보정하는 데에 쓰이며, backlash를 구성하는 파라미터를 정확히 알고 있다면 backlash를 보정할 수 있다.

$$\hat{x}(t) = BI(y(t)) = \begin{cases} \frac{y(t)}{\hat{m}} + \hat{c}_l & \dot{y}(t) < 0 \\ \frac{y(t)}{\hat{m}} + \hat{c}_r & \dot{y}(t) > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

이때, $\hat{x}(t)$ 는 backlash가 없는 이상적인 제어입력 값이며, $y(t)$ 는 backlash 특성을 가지는 데이터, m 은 backlash의 기울기 그리고 c_r, c_l 은 각 방향의 오프셋 값이다^[10]. backlash특성이 비선형성이고 불연속적이기 때문에, backlash inverse 또한 비연속적이다^[7]. 게다가 정확한 파라미터 측정은 물리적으로 실현되기 어려운 문제가 있다.

4.1.2 Smooth backlash inverse

이 알고리즘은 backlash inverse에 smooth function을 적용하고 각 방향의 오프셋에 필터를 이용해 불연속적인 오프셋 데이터를 연속적으로 변형해준다. 이는 backlash inverse의 한계를 보완하기 위한 것이다^[7]. 아래의 식은 smooth backlash inverse의 모델식이다.

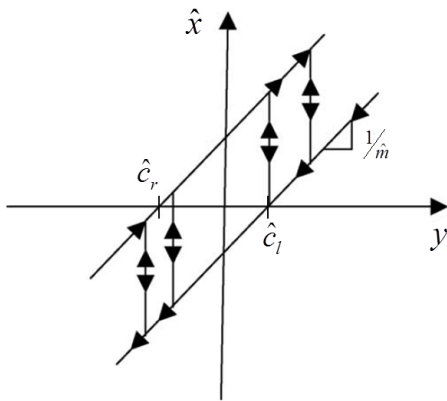


Fig. 12. backlash inverse

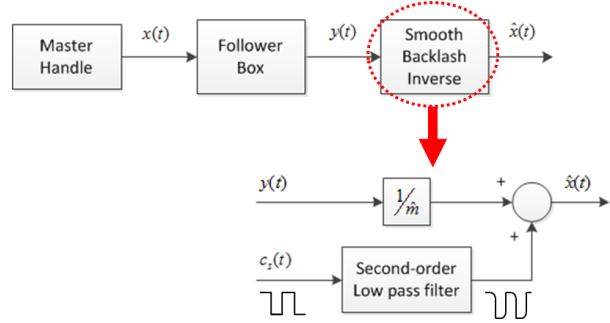


Fig. 13. smooth backlash inverse

$$\hat{x}(t) = \begin{cases} \frac{y(t)}{\hat{m}} + \hat{c}_l & \dot{y}(t) < 0 \\ \frac{y(t)}{\hat{m}} + \hat{c}_r & \dot{y}(t) > 0 \\ \hat{x}(t-1) & \dot{y}(t) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$= \frac{y(t)}{\hat{m}} + c_s(t)$$

이때, c_s 는 방향성에 따른 보정 값을 의미하며 식 (5)와 같이 정의 된다. \hat{c}_r 과 \hat{c}_l 은 미리 계산된 각 방향의 offset이다.

$$c_s(t) = \begin{cases} \hat{c}_l & \dot{y}(t) < 0 \\ \hat{c}_r & \dot{y}(t) > 0 \\ c_s(t-1) & \dot{y}(t) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

Smooth backlash inverse 알고리즘의 순서도는 Fig. 13과 같다. Fig. 13에서 오직 c_s 에만 2차계 필터가 사용되는 것을 알 수 있다. 이는 불연속적인 계단 함수형태의 c_s 의 데이터 값을 필터를 통해 연속적인 상태와 유사하게 만들어 준다. 필터의 사양은 각 시스템에 따라 조정하여 설계해야 한다.

5. 시스템의 backlash 보정 실험

5.1 마스터 장치 보정 실험 방법

제안된 마스터 장치는 기본적으로 구동부와 종동부가 분리되어 있는 구조를 취하고 있다. 그렇기 때문에 backlash가 발생할 수 있다. 먼저 개선된 마스터 장치의 backlash현상을 알아볼 필요가 있었다. 실험을 위해 마스터

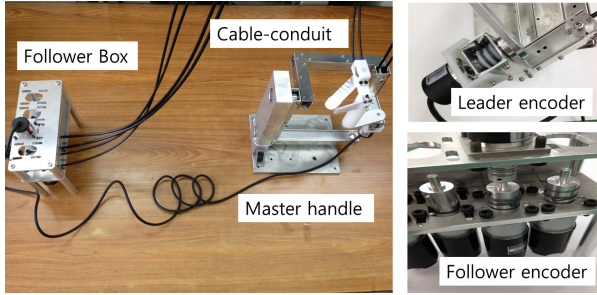


Fig. 14. The experiment system

Table 1. cable and conduit

	Cable	Conduit
Material	Nylon coated stainless steel	stainless steel (spring)
Thickness	0.87mm	5mm

장치와 케이블 그리고 컨트롤 박스로 구성된 시스템 (Fig. 14)을 구축했다. 이때 사용한 케이블과 컨듀잇은 Table 1과 같으며 엔코더는 Autonics사의 E30S4시리즈 (E30S4-1000-6-L-5)를 사용하였다. 장치의 특성상 마스터 핸들부에 엔코더를 부착하는 것은 시스템의 설계의도에 위반되나 구동부의 정확한 값을 측정하여 실험결과와 정확한 분석을 위해 엔코더를 부착했다. 그리고 구동부에 leader encoder, 종동부에는 follower encoder로 정의했다.

실험은 yaw, pitch, roll, finger의 세 축에 대하여 무작위 반복운동을 실시한다. 그 후 구동부와 종동부에 부착된 엔코더의 변위 값을 비교하여 backlash 구성 파라미터를 측정한다. 마지막으로 측정된 구성 파라미터를 보정알고리즘에 적용하여 보정된 값을 구동부와 종동부의 값과 비교한다. 이 때 알고리즘에 적용할 필터를 설계하기 위해 각 축에 대한 c_s 값을 FFT를 통해 확인해왔다. 설계한 필터의 cutoff frequency는 0.5Hz를 기준으로 설계했다. Fig. 15,

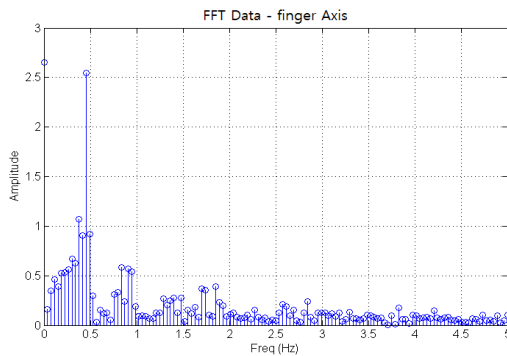


Fig. 15. The finger axis' s FFT data of c_s

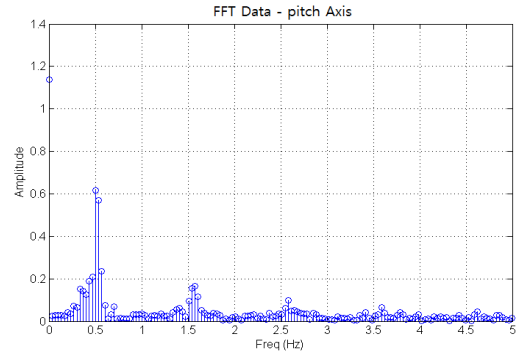


Fig. 16. The pitch axis's FFT data of c_s

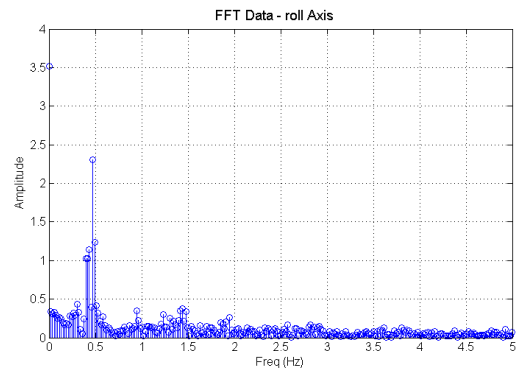


Fig. 17. The pitch axis's FFT data of c_s

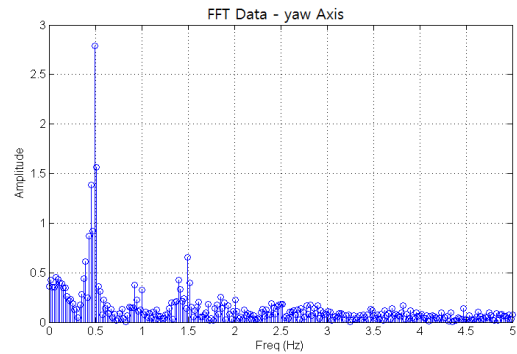


Fig. 18 The yaw axis' s FFT data of c_s

16, 17, 18은 각 축의 FFT값을 보여준다.

5.2 보정 실험 결과

위의 설명한 실험방법을 통해 각 축의 구동부와 종동부의 변위 값을 비교했고, 그를 통해 각 축에 backlash가 발생하는 것과 그의 구성 파라미터를 측정할 수 있었다. Table 2는 각 축의 backlash 구성 파라미터의 수치를 나타낸다. backlash 구성 파라미터 중 m 은 방향의 따른 기울기

Table 2. The backlash parameter of each axis

Axis	m_r	m_l	c_r	c_l
Finger	0.929770	0.962413	3.655689	-1.9290
Yaw	0.931682	0.913252	3.215000	-4.6401
Roll	0.945986	0.921484	4.384287	-1.1505
Pitch	0.928605	0.918171	0.189894	-1.3217

다르기 때문에 방향에 따라 m_r 과 m_l 으로 분류하였다. 그리고 Table 2의 파라미터를 smooth backlash inverse에 적용하고 그 보정 값과 보정 전의 값을 비교했다. Table 3은 각 축의 보정 전후의 값을 최소자승법으로 근사화한 후 backlash 값을 측정하고 비교한 것이다.

Table 3에서 보면 backlash가 보정 전 보다 보정 후가 최대 98.894% 줄어든 것을 확인 할 수 있었다. 실험결과에 대하여 Fig. 19, 20, 21, 22로 나타냈다. Fig. 19는 finger축에 대한 그래프이며, Fig. 20는 pitch축, Fig. 21는 yaw축, Fig. 22는 roll축에 대한 실험결과다. Fig. 19, 20, 21, 22에서 볼 수 있듯이 구동부의 변위 값인 leader encoder의 값(실선)과 smooth backlash inverse를 적용한 보정 값(점선)이 방향 전환 시의 최대 6.305°의 오차가 발생하지만 비교적 유사하게 나오는 것을 볼 수 있다. 위의 변위 값 그래프만으로 backlash의 보정 성능을 확인하기 쉽지 않기 때문에 각 축의 backlash의 변화를 Fig. 23, 24, 25, 26에 나타

Table 3. The backlash data of each axis before and after compensation (deg)

Axis	Before compensation	After compensation
Finger	5.2553	0.2306
Yaw	7.2328	0.1103
Roll	5.2075	0.0576
Pitch	1.3898	0.0049

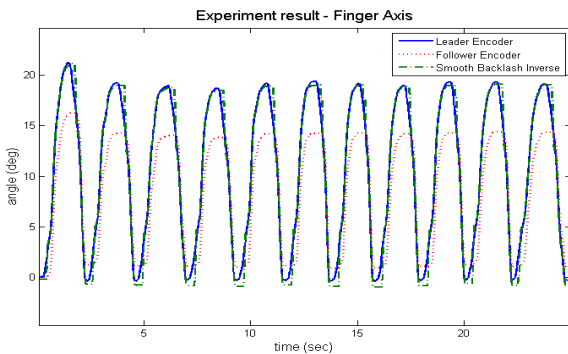


Fig. 19. The experiment result of finger axis

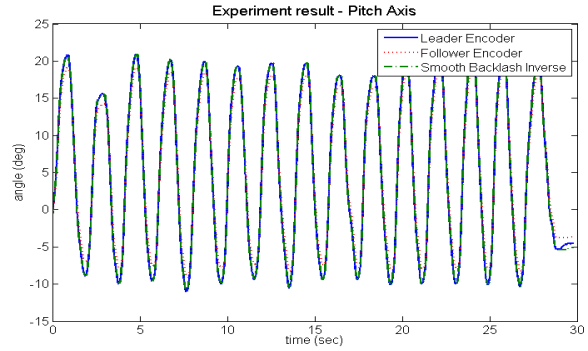


Fig. 20. The experiment result of pitch axis

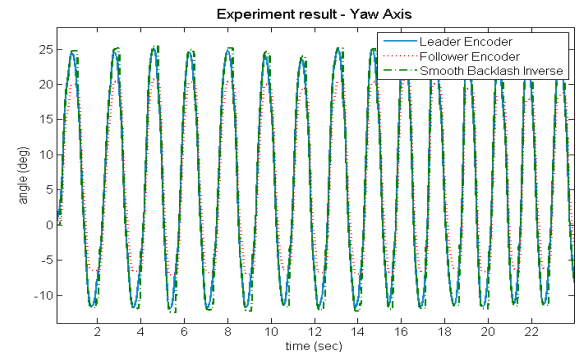


Fig. 21 The experiment result of yaw axis

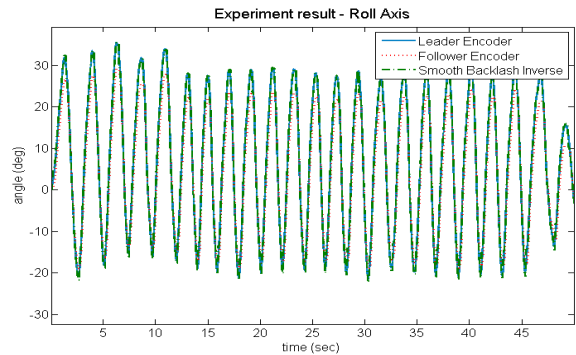


Fig. 22 The experiment result of roll axis

내었다. 실험결과에서 각 축의 보정 후 데이터는 대체적으로 영점을 지나는 선형직선 ($y=x$)의 형태를 띠고 있으나 방향 전환 구간은 발생하는 오차에 의해 선형직선의 형태가 아닌 것을 알 수 있다. 이는 비록 완벽한 backlash보정이란 할 수 없으나 방향전환 구간을 제외한 부분은 완벽히 backlash보정이 되었으며, 보정 후 잔여 backlash수치 또한 실험 전의 backlash수치에 비해 감소된 것을 알 수 있다. Table 4는 각 축의 보정 전후의 최대 및 최소 오차 값을

나타낸다.

Table 4. Error data of each axis before and after compensation (deg)

Axis	Before compensation		After compensation	
	MAX	MIN	MAX	MIN
Finger	5.220	-2.190	3.453	-3.742
Yaw	5.070	-5.580	6.305	-5.645
Roll	6.570	-2.730	3.407	-4.294
Pitch	1.950	-1.560	0.863	-0.925

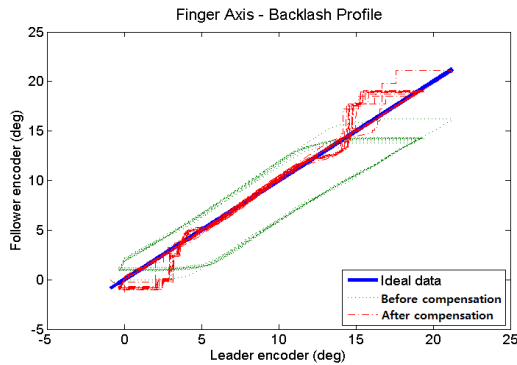


Fig. 23 The change of finger axis' s backlash

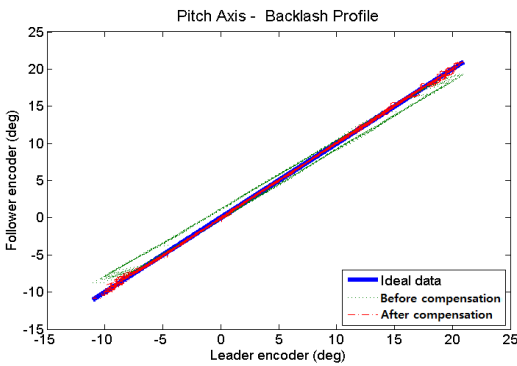


Fig. 24 The change of pitch axis' s backlash

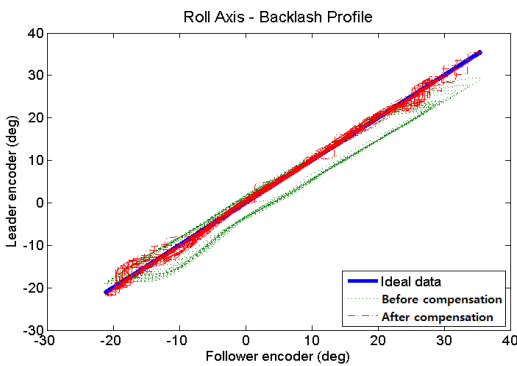


Fig. 25 The change of roll axis' s backlash

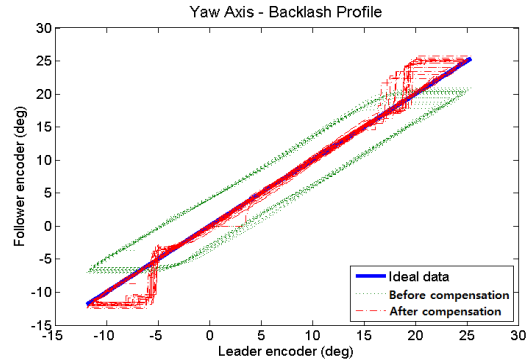


Fig. 26 The change of yaw axis' s backlash

6. 결론

본 논문에서는 먼저 선행연구의 마스터 장치가 가지는 구조적인 문제점을 지적했다. 선행연구의 마스터 장치의 문제점을 분석하기 위해 사람의 손의 움직임에 대하여 파악했으며, 파악한 움직임을 선행연구의 마스터 장치를 사용해 구현했을 때 마스터 장치의 각 축의 위치가 손의 움직임의 중점이 되는 손목을 교차하지 않는다는 것과 그것으로 인해 발생한 변위차로 인해 불필요한 움직임이 필요하게 된다는 것을 증명했다. 이러한 문제점을 yaw, pitch, roll 축의 교차점이 조작자의 손목 중심에 오도록 설계함으로써 해결했다. 그리고 마스터 장치의 프레임 내부의 공간을 만들고 그 안에 케이블과 폴리 그리고 컨듀잇 등이 지나가도록 하여 배선의 편의성을 제공했다.

또한, 개선된 마스터 장치를 이용하여 구동부와 중동부 간의 변위 차를 측정하고 각 축의 backlash 구성 파라미터를 측정했다. 그리고 보정 알고리즘인 smooth backlash inverse를 사용하여 보정했다. 이렇게 보정된 실험 데이터는 대체적으로 영점을 지나는 선형직선의 형태를 띠고 있으나 방향 전환 구간은 발생하는 오차가 여전히 발생하는 문제점이 있었다. 이는 차후에 보완이 필요하다.

References

- [1] F. Corcione, C. Esposito, D. Cuccurullo, A. Settembre, N. Miranda, F. Amato, F. Piorozzi, P. Caizzo, "Advantages and limits of robot-assisted laparoscopic surgery," *Surgical Endoscopy*, vol. 19, no. 1, pp.117-119, Apr. 2002.
- [2] P. Giulianotti, A. Coratti, M. Angelini, F. Sbrana,

S. Cecconi, T. Balestracci and G. Caravaglios, "Robotics in General Surgery-Personal Experience in a Large Community Hospital," Archives of Surgery, No. 138, pp.777-784, July 2003.

[3] Cagatay Basdogan, Chih-Hao Ho, and Mandayam A. Srinivasan, "Virtual Environments for Medical Training: Graphical and Haptic Simulation of Laparoscopic Common Bile Duct Exploration", IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS, vol. 6, no. 3, september 2001.

[4] Byeong-Ho Kang, Sung-Min Yoon, Min Cheol Lee, Chi-Yen Kim, "Development of Low-inertia Master device for Haptic system configuration of surgical robot", Journal of Korea Robotics Society, Vol.7, No.4, PP.267-275, 2012.

[5] Chi-Yen Kim, Min-Cheol Lee, Tae-Kyung Lee, Seung-Wook Choi, and Min-Kyu Park, "Study for the Indirect Measuring Method of Operational Force in Surgical Robot Instrument", Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, Vol.16, No.9, pp.840-845, 2010.

[6] Varun Agrawal, William J. Peine, Bin Yao, "Modeling of Following Characteristics Across a Cable-Conduit System", IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS, VOL. 26, NO. 5, OCTOBER 2010.

[7] Varun Agrawal, William J. Peine, Bin Yao and Seung Wook Choi, "Control of Cable Actuated Devices using Smooth Backlash Inverse," 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation Anchorage Convention District, May 3-8, 2010, Anchorage, Alaska, USA.

[8] Kwang-Ho Han, Gi-Ok Koh, Jae-Min Sung, and Byoung-Soo Kim, "Adaptive Control Approach for Improving Control systems with Unknown Backlash," 2011 11th International Conference on Control, Automation and Systems, Oct. 26-29, 2011, Gyeonggi-do, Korea.

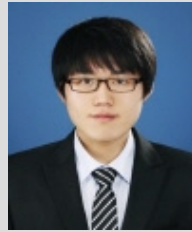
[9] ASSH(American Society for Surgery of the Hand)website, <http://www.assh.org>.

[10] S.Suraneni, I.N.Kar, O.V.Ramana Murthy, R.K.P. Bhatt, "Adaptive stick-slip friction and backlash compensation using dynamic fuzzy logic system",

Applied Soft Computing 6, pp26-37, 2005.

[11] G.Tao, P.V. Kokotovic, "Continuous-Time Adaptive Control of System with Unknown Backlash", IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATIC CONTROL, Vol. 40, NO. 6, JUNE 1995.

[12] Joseph J. Crisco, Wendell M.R. Heard, Ryand R. Rich, David J. Paller, Scott W. Wolfe, "The Mechanical Axes of the Wrist Are Oriented Obliquely to the Anatomical Axes", the journal of bone and joint surgery, Vol. 93, pp.169-177, Jan. 2011.



최우혁

2012 동명대학교 메카트로닉스공학과(공학사)
2012~현재 부산대학교 로봇 특성화대학원 로봇관련 협동과정 석사과정

관심분야 : 의료로봇, 로봇제어, tendon drive 등



윤성민

2010 부경대학교 기계공학부 (공학사)
2012 부산대학교 기계공학부 (공학석사)
2012~현재 부산대학교 기계공학부 박사과정

관심분야 : 로봇제어, 의료메카트로닉스, 의료로봇 등



이민철

1983 부산대학교 기계공학과 (공학사)
1988 일본 츠크바대학교 이공학연구과 (공학석사)
1991 일본 츠크바대학교 물리공학연구과 (공학박사)

2000~2001 노스캐롤라이나 주립대학교 방문교수

2009~2010 퍼듀대학교 방문교수

1991~현재 부산대학교 기계공학부 교수

관심분야 : 시스템 규명, 로봇제어, 의료로봇, 지능형 서비스로봇, 메카트로닉스 등