

줄 꼬임 기반 팔꿈치 외골격

Twisted Strings-based Elbow Exoskeleton

Dmitry Popov¹, 이 광 현², Igor Gaponov³, 유 지 환[†]

Dmitry Popov¹, Kwang-Hyun Lee², Igor Gaponov³, Jee-Hwan Ryu[†]

Abstract This paper presents a new concept of a 1-DOF elbow exoskeleton driven by a twisted strings-based actuator. A novel joint actuation mechanism is proposed and its kinematic model is presented along with its experimental evaluation, and guidelines on how to choose the strings suitable for such an exoskeleton are given. We also proposed and experimentally verified a human intention detection method which takes advantage of intrinsic compliance of the mechanism. The study showed that the developed twisted strings-driven elbow exoskeleton is light, compact and have a high payload-to-weight ratio, which suggests that the device can be effectively used in a variety of haptics, teleoperation, and rehabilitation applications.

Keywords: twisted strings, exoskeleton, rehabilitation, human intention

1. 개요

외골격 로봇 시스템은 사람에게 착용되어 사람이 느끼는 물리적인 힘을 직접적으로 가공하여 전달하는 물리적 인터페이스이다. 이런 외골격 로봇 시스템은 재활 및 물리 치료, 근력 보조 및 증폭, 가상환경과의 상호작용, 그리고 원격 조종 등에 응용되어 질 수 있다.

최근 몇 년간 외골격 로봇 분야는, 상지 (upper-limb) 보조^[3,4,6,7,11], 하지(lower-limb) 보조^[2,16] 그리고 손 보조^[1,5,9] 등과 같이 활용분야를 나누어 활발한 연구가 진행되고 있으며 최근 들어 팔목할 만한 진전이 이루어지고 있다. 하지만, 사용자의 피로를 야기하는 무거운 무게 와 큰 크기, 낮은 휴대성, 그리고 많은 센서들로 인한 기계적인 복잡함과 같은 여러 근본적인 문제점들 때문에 널리 사용되지 못하고 있다. 또 다른 문제점으로는 모터 및 기어의 연결로

이루어진 구동 메커니즘에서는 장애물과의 충돌 또는 갑작스러운 힘의 변화에 기구적인 안전성을 유지하기 어렵다는 점이다. 이를 해결하기 위해서는 외골격 기구는 일정수준의 기구적인 유연성을 가지고 있어야 한다. 그러므로 외골격 시스템을 구성하기 위해서는 높은 효율을 가지면서도 가볍고, 기구적인 유연성을 가지는 구동기가 필요하다.

본 연구의 목표는 자체적인 무게에 비해서 들 수 있는 하중의 비율이 높은, 그러면서도 가볍고 유연한 팔꿈치 외골격을 개발하는 것이다. 이러한 외골격 시스템을 개발하기 위해서는 새로운 종류의 구동 메커니즘이 적용되어야 한다. 최근 몇 년간 힘의 밀도와 외골격의 휴대성을 증가시키는 데 도움이 되는 몇 가지 유망한 기술들이 소개되었다. 이러한 기술 중의 하나로 줄 꼬임 기반 구동기가 로봇 손가락과 손, 팔^[10,12-15]에서 효율적인 구동기로 소개 되었다.

2. 제안된 팔꿈치 외골격 구조

2.1 선형 줄 꼬임 구동기

수 천 년 전부터 사람들은 일정거리 사이에서 동력을 전달하기 위해, 그리고 회전 운동을 선형 운동으로 변환하기 위해 각종 병기에 혹은 건축, 또는 기타 용도를 위해 줄을 사용하기 시작했다. 이러한 줄 꼬임 구동기(TSA: twisted string actuators)의 원리는 매우 간단하다. 상대적으로 낮은 토크에 의해 꼬임이 발생할 때 줄(또는 여러 가

Received : Jun. 5. 2013; Reviewed : Jun. 25. 2013; Accepted : Jul. 25. 2013

※ This research was supported by the MSIP(Ministry of Science, ICT&Future Planning), Korea, under the C-ITRC(Convergence Information Technology Research Center) support program (NIPA-2013-H0401-13-1006) supervised by the NIPA(National IT Industry Promotion Agency)

¹ School of Mechanical Engineering, KOREATECH(dmitry.sender@gmail.com)

² School of Mechanical Engineering, KOREATECH(kwanghyun@koreatech.ac.kr)

³ School of Mechanical Engineering, KOREATECH(igor@koreatech.ac.kr)

[†] Corresponding author: School of Mechanical Engineering, KOREATECH, Chungjeolno, Byeongchunmyun, Cheonan, Chungnam, Rep. of Korea (jhryu@koreatech.ac.kr)

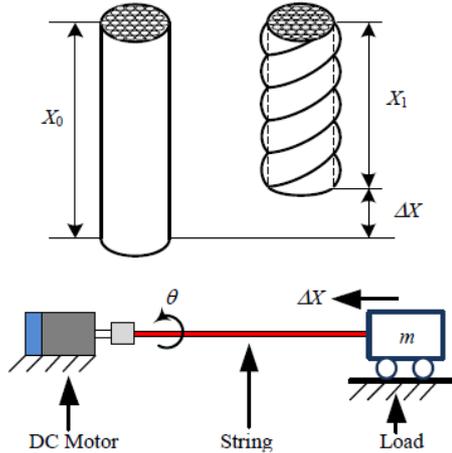


Fig. 1. Work principle of a twisting string actuator

닥의 줄로 이루어진 줄)은 높은 선형 힘을 발생시키면서 수축하게 된다(그림. 1). 따라서 줄은 비선형 기어비를 가지는 기어의 역할을 수행한다.

이러한 구동 메커니즘은 한 가닥 혹은 여러 가닥으로 이루어 질 수 있는데, 한 가닥으로 이루어진 TSA는 좀 더 정확하고, 여러 가닥으로 이루어진 TSA는 높은 강성을 가지기 때문에 더 빠르고 더 많이 수축한다. 이러한 원리를 적용한 구동 메커니즘은 상당히 가볍고 조용하면서도 유연하고 큰 힘을 발생시킬 수 있어서 외골격 시스템에 쓰이기 매우 적합하다. 한 가닥으로 이루어진 TSA나 여러 가닥으로 이루어진 TSA의 수학적 모델은 하나의 반지름을 가지는 원통형으로 나타낼 수 있다.

2.2 팔꿈치 외골격의 기본 개념

줄 꼬임 구동기를 사용하여 팔꿈치 외골격 시스템을 설계하는데 있어 몇 가지 가능한 기구학적 설계 방법이 있다. 이러한 방법들은 모두 다양한 크기의 팔에 적용하기 위해서 크기, 무게, 출력 등이 모두 달라져야 한다. 본 연구에서는 본체의 무게보다 몇 배는 무거운 무게를 감당할 수 있으면서도 운반하기 편한 작고 가벼운 기구 설계에 초점을 맞추었다. 그림 2에서 보는 것처럼 실제 사람의 팔 모양에 맞추고 어깨에 줄 꼬임 구동기가 위치하도록 한 간단한 디자인을 선정하였다.

팔꿈치 외골격 시스템의 초기 모델은 각각 상박과 하박에 해당하는 두 개의 링크로 구성된 구조이다. 링크는 회전형 조인트로 연결이 되어있는데, 이 조인트는 착용자의 팔꿈치와 같은 축을 가지고 회전하도록 설계되었다. 게다가 이 회전형 조인트와 같은 축 상에서 회전하도록 설계된 풀

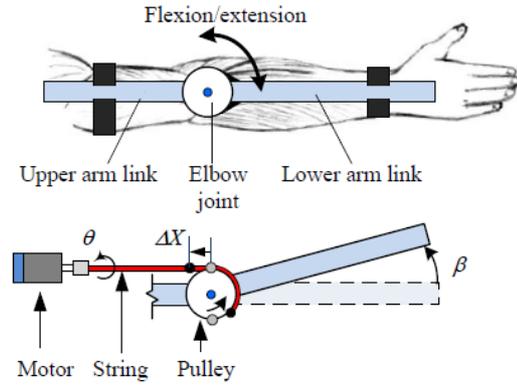


Fig. 2. Proposed exoskeleton configuration

리는 상박링크에 단단히 고정되어있다. 외골격의 수축 및 이완 동작은 이 풀리의 회전에 의해 판단된다. 때문에 TSA 시스템은 오직 하나의 회전 동작을 가지는 시스템으로 표현 가능하다. 그림 2의 아래 부분에 보이는 것처럼 줄의 끝을 풀리에 연결하는 것이 하나의 방법이다.

외골격 초기 모델에 쓰인 이러한 디자인에서, 줄의 한 쪽 끝은 모터 축에 연결되어있고, 다른 한 쪽 끝은 풀리에 연결되어 있어, 모터가 회전함으로 인해 줄의 수축이 발생된다. 이러한 수축이 발생함에 따라 풀리 부분에서는 자연스럽게 줄이 풀리게 된다(그림 3의 왼쪽 위 그림처럼 A지점의 위치가 B지점으로 이동한다.). 그러나 이러한 설계에는 한 가지 중대한 결함이 있다. 모터가 줄을 풀기위해 돌기 시작할 때, 풀리를 감싸고 있는 줄은 이미 꼬여져 있는 상태이기 때문에 그 길이가 줄어든 상태이다. 이 때문에 풀리는 초기 위치로 완벽히 되돌아가지 못한다.

이러한 현상을 극복하기 위해 분배기(separator)를 추가하였다. 분배기는 줄의 꼬임이 오직 모터와 분배기 사이에서만 발생하도록 만들어 준다. 따라서 풀리를 감싸고 있는 줄은 꼬임이 발생되지 않는 상태가 되고, 이는 풀리가 다시 초기 위치로 완벽히 돌아갈 수 있도록 해준다. 하지만 분배기는 줄이 한 가닥인 경우에는 의미가 없고, 줄이 여러 가닥일 경우에 그 효과가 나타나기 때문에 팔꿈치 외골격에 TSA를 적용하기 위해서는 여러 가닥으로 이루어진 줄을 사용하여야 한다.

지금까지 설명한 외골격은 오직 수축하는 힘만 가할 수 있다. 이완 동작은 중력에 의해 수행된다. 만약 양방향의 동작이 필요하다면 서로 대립되는 TSA가 필요하고 이는 외골격의 강성을 제어 할 수 있게 될 것이다.

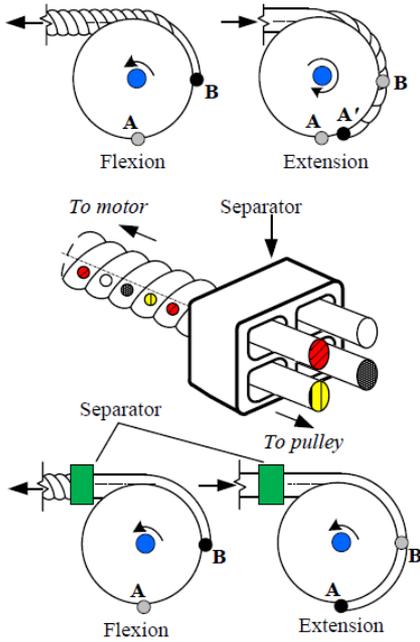


Fig. 3. Rotation of a pulley by means of a twisted string (top), a schematic representation of a separator (center), and behavior of a rotational twisted string actuator after the separator is introduced (bottom)

3. 기구학

본 절에서는 회전형(Rotational) TSA(이하 RTSA)에 대한 기구학적 설명을 다룬다. 정확한 기구학의 수학적 모델은 모터의 필요한 최대 토크를 구해 적절한 모터를 선정하기 위해 매우 중요하다. 줄 다발을 초기 반지름 r 과 초기 길이 $L + L_{pul}$, 그리고 스프링 상수 K 를 가지는 하나의 원통형 모델로 가정한다. 스프링 상수 K 는 다음과 같은 실험적 방법으로 구한다. 질량을 알고 있는 물체를 줄의 한 쪽 끝에 달고 반대편은 고정시킨다. 줄의 늘어난 정도를 측정하고 후크의 법칙을 이용하면, 걸린 힘과 늘어난 길이의 비율을 통해 스트링 상수를 구할 수 있다. 분배기와 풀리 사이의 길이는 줄의 꼬임 과정에 영향을 미치지 않고, 미케니즘의 크기를 최소화하기 위해 가능한 작게 유지되어야 한다.

줄이 꼬이는 길이 L 은 분배기에 의해 제한되고 꼬이는 과정동안 일정하게 유지된다. RTSA에 대한 수학적 모델은 그림 4에서 묘사하는 것과 같이 줄이 꼬이는 동안 단면의 기하학적 모델에 기초한다. 줄이 각도 θ 만큼 회전한 후에 수축하기 시작하고, 수축에 의해 줄어든 길이 L_{pul}^* 만큼 풀리는 풀리게 된다. 어떠한 하중도 가해지지 않는다고 하면, 모터의 회전각도와 줄의 길이 L_{pul}^* 사이의 관계는 다음과

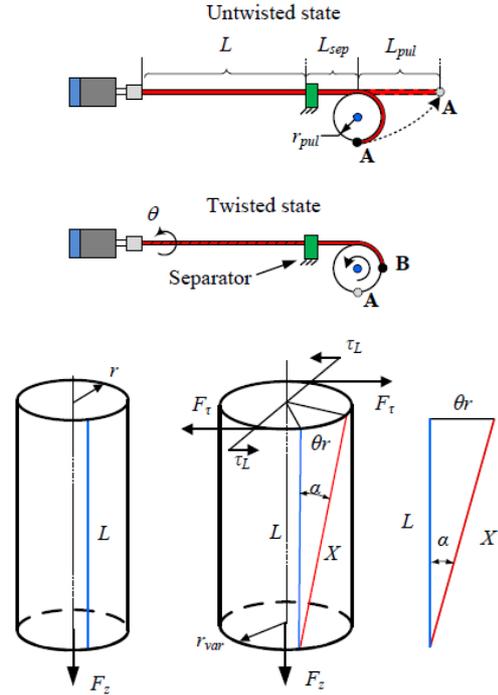


Fig. 4. Kinematics of a twisted string

같이 정의 될 수 있다:

$$L_{pul}^* = \sqrt{L^2 + \theta^2 r^2} - L \quad (1)$$

L_{pul}^* 의 길이 중 풀려진 줄은 풀리를 감싸고 있는 줄의 일부이고, 그것의 전체 길이 L_{pul} 은 그림 4와 같이 정의된다. 그러므로 나선형으로 생긴 부분의 줄의 길이 X 는 $L + L_{pul}^*$ 로 주어지고, 풀리에서 풀려나서 줄이 가질 수 있는 최대 길이는 $X = L + L_{pul}$ 이다.

TSA의 기존의 수학적 모델은 원통형으로 고려된 꼬인 줄의 반지름을 꼬임이 발생하는 동안 상수로 고려한다. 그러나 각각의 줄은 근접한 부분에 의해 무한히 압축될 수 없고 또한 충분한 회전이 일어난 후에는 내부의 공기 또한 없기 때문에 꼬임이 발생하는 동안 원통의 부피는 일정하다고 할 수 있다. 그러므로 원통의 길이가 줄어든다면 상대적으로 반지름은 점차 늘어난다고 할 수 있다. 알려진 것처럼 원통의 부피는 $V = \pi r^2 h$ 이므로, 수축이 일어난 뒤 원통의 반지름은 다음과 같이 구할 수 있다:

$$r_{var} = r \cdot \sqrt{\frac{L + L_{pul}^*}{L}} \quad (2)$$

여기서 r_{var} 과 r 은 꼬여진 상태와 정상 상태의 반지름이다. 제안된 모델과 기존 모델의 가장 큰 차이점은 제안된 모델의 경우 원통이 항상 일정한 부피를 유지한다는 가정이다. 본 논문의 뒷부분에서 언급하겠지만, 이 가정은 이론적 모델과 실험적 데이터의 연관성을 키우는데 상당히 중요한 역할을 한다.

꼬인 줄의 끝에 하중이 걸리게 되면 줄이 늘어나게 된다. 이 늘어남은 F_z 와 F_t 두 힘에 의해 발생된다. 전자는 인가된 하중에 의해 발생된 힘이고, 후자는 줄에서 발생하는 자연적인 풀림 힘이다 (그림 4. 가운데 아래). 길이 $L_{sep} + (L_{pul} - L_{pul}^*)$ 에 해당하는 줄의 부분은 줄의 나머지 부분 L 이 위의 두 힘에 의해 영향을 받는 동안, 꼬임이 발생하지 않기 때문에 오직 하중에 의한 힘 F_z 의 영향만 받는다. 분배기가 부분적으로 줄의 L 에 해당하는 꼬인 부분이 확장하는 것을 방지한다는 가정에 따라 여러 가닥으로 이루어진 줄의 스프링 계수는 자연적인 풀림 힘보다 몇 배는 크기 때문에 자연적인 풀림 힘을 무시함으로써 수학적 모델을 단순화시킬 수 있다. 결과적으로 줄은 하중에 의한 힘 F_z 에 의해서만 늘어난다고 가정할 수 있다. 부피는 일정하게 유지된다는 가정에 따라 식 (2)을 고려하고, 하중에 의한 힘을 적용하면 모터의 각도 θ 와 줄의 길이 L_{pul}^* 의 관계는 다음과 같이 표현할 수 있다:

$$L_{pul}^* = \sqrt{L^2 + \theta^2 r_{var}^2} - L - \frac{F_z}{K} \quad (3)$$

그림 5처럼 RTSA를 적용하여 외골격 시스템을 설계하

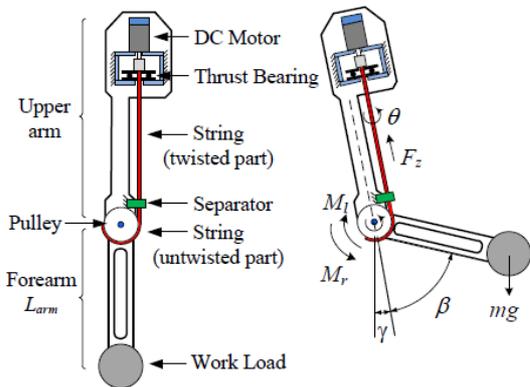


Fig. 5. A schematic view of the proposed twisted string-driven elbow exoskeleton in its extended (left) and flexed (right) states. A close-up view of the separator with four strings is shown in the right

는 것이 가능하다. 작동 메커니즘은 다음과 같다. 먼저 그림 5처럼 하중이 하박의 끝에서 작용한다고 가정하면, 이것은 모멘트 M_t 을 발생시킨다. 모터가 줄을 꼬기 시작함에 따라 줄은 수축이 되면서 선형 힘 F_z 를 발생시킨다. 회전축을 따라 작용하는 이 힘은 모멘트 풀리에서 작용하는 모멘트 M_r 을 발생시키고 이 모멘트가 하중에 의해 발생한 모멘트 M_t 보다 커지게 되면 하박은 팔꿈치 축을 기준으로 회전하기 시작하게 된다. 식 (3)을 통해 팔꿈치 각도 β 와 모터의 각도 θ 와의 관계를 다음과 같이 표현할 수 있다:

$$\beta_{i+1} = \frac{\sqrt{L^2 + \theta_i^2 r_{var}^2} - L}{r_{pul}} - \frac{mgL_{arm}\sin(\beta_i + \gamma)}{Kr_{pul}^2} \quad (4)$$

여기서 r_{pul} 은 풀리의 반지름이고 L_{arm} 은 하박 링크의 길이, γ 는 지면에서 수직인 방향으로부터 상박 링크 사이의 각도, m 은 인가된 하중의 질량, g 는 중력가속도이다. 아래 첨자 ‘ i ’, ‘ $i+1$ ’은 각각 현재 상태와 다음 단계의 상태를 뜻한다. 각도 β 는 하박 링크가 수직 아래 방향을 향하고 있을 때를 0으로 놓는다. 각도 β 에서 질량 m 에 대한 하중을 들어 올리는데 필요한 모터의 토크 τ_L 과 각도 θ 는 다음과 같이 정의 된다:

$$\tau_L = \frac{mg\sin(\beta + \gamma)}{\eta \cdot r_{pul} \cdot n} \cdot \frac{\theta r_{var}^2}{L} \cdot L_{arm} \quad (5)$$

$$\theta = \frac{1}{r_{var}} \sqrt{(L + \beta r_{pul} - \frac{mg\sin(\beta + \gamma)}{Kr_{pul}} L_{arm})^2 - L^2} \quad (6)$$

여기서 η 와 n 은 각각 메커니즘의 전체 효율과 전달률을 뜻한다.

효율적인 외골격 시스템을 설계하기 위해서는 적절한 모터가 선정되어야 한다. 그러므로 식 (5)는 요구되는 모터의 최대 토크를 구하기 위해 다음과 같이 수정될 수 있다:

$$\tau_L^{\max} = \frac{mg}{\eta \cdot r_{pul} \cdot n} \cdot \frac{\theta r_{var}^2}{L} \cdot L_{arm} \quad (7)$$

4. 실험적 증명

본 절에서는 줄 꼬임 기반 팔꿈치 외골격의 기구학적 모델을 제시하기 위한 실험적인 증명에 대해 설명한다. 이어지는 하위 절에서 실험 방법 및 다양한 하중이 가해지는

경우 외골격의 수학적 모델에 대한 실험적 연구에 대해 자세히 설명한다.

4.1 실험 준비

줄 꼬임 구동기 기반 외골격의 초기 모델은 이전 절과 그림 6에서 설명한 것과 같이 설계되었다. 초기 모델은 회전형 조인트로 연결된 두 개의 알루미늄 링크, 풀리, 플라스틱 분배기, DC모터 (Maxon RE-35 with a 2000-CPT encoder and a spur gearhead, gear ratio $n = 18$), 팔꿈치의 각도를 측정하기 위한 광학 인코더 1000-CPT encoder (Kwangwoo), 그리고 6개의 Vectran strings (Kuraray Co., Ltd.)으로 구성되어 있다. 모터의 축은 위쪽 팔의 링크에 맞추어져 있고, 줄의 한 쪽 끝은 기어의 축에, 다른 한 쪽 끝은 풀리에 연결이 되어 있다. 실험 시 하중(질량을 알고 있는 다양한 물체)은 그림 6에 보이는 것처럼 하박 링크의 끝단에 연결된다. 줄의 방향은 모터의 회전축과 같은 선상에 맞춘다.

센서를 포함한 시스템의 전체 무게는 2.2kg 이지만 더 가벼운 모터와 센서를 선정하고, 링크를 카본과 같은 더 가벼운 소재로 만들면 무게를 상당히 줄일 수 있다. 하박과 상박의 길이는 각각 0.41m, 0.39m 이다. 풀리의 반지름은 $r_{pul} = 0.04m$ 가 되도록 선정하였다. 초기 모델에 사용된 줄은 twisted 길이(모터와 분배기 사이의 길이) $L = 0.25m$ 이고 줄의 초기 반지름 $r = 0.36 \cdot 10^{-3}m$ 이다. 이러한 형태의 외골격은 최소 10kg의 하중을 들 수 있고 햅틱, 재활, 근력 증폭 등에 적용될 수 있다. 외골격은 설계 목적에 따라 더욱 다양하게 설계 될 수 있다. 예를 들어 재활 목적에 응용할 경우 최대 출력 및 중량이 적절하게 줄어들게 된다.

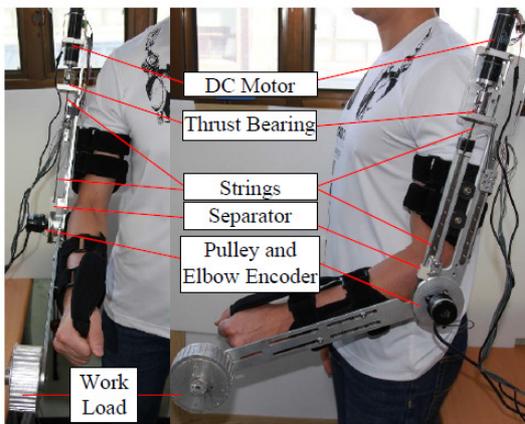


Fig. 6. A picture of the prototype exoskeleton

4.2 기구학적 증명

이 절에서는 모든 실험에 관해 설명한다. 외골격의 상박은 동작을 하는 동안 상정하지 못한 외란들로 부터의 영향을 받지 않기 위해 frame에 고정된다. 실험은 제안된 기구학적 모델을 증명하고 여러 다른 하중이 걸리는 경우에 대해 다룰 수 있도록 설계되었다.

실험 계획은 다음과 같다. 줄은 팔꿈치의 각도 β 가 90도가 될 때까지 꼬이게 된다. 그리고 줄은 초기 상태($\beta = 0^\circ$)까지 다시 풀리게 된다. 이 때 모터의 각도 θ 와 팔꿈치의 각도 β 가 저장되고, 모터의 전류 또한 측정된다. 이 전류는 이 후에 식 (5)를 증명하기 위해 토크 τ 로 변환된다. 다른 하중에 대해서도 이 과정을 반복한다.

그림 7은 모터 토크의 실험값과 이론값에 대한 비교 그래프이다. 이론값과 실험값에 약간의 차이는 있지만 필요한 최대 토크를 추정하는데 식 (7)을 이용할 수 있다. 이를 통해 팔꿈치 외골격 시스템에 필요한 적절한 사양의 모터를 선정할 수 있다. 그림 7의 그래프에서 보이는 진동은 초기 외골격 모델에서 줄이 모터의 축과 완벽히 일치하게 설치되지 않아 발생하였다. 이것은 모터의 토크가 계속 진동하게 만들고 매 회전마다 패턴이 반복된다. 따라서 그림 7로부터 실험을 하는 동안 모터가 18번을 회전했다는 사실을 추정할 수 있다.

그림 8은 두 가지 실험에서의 모터의 각도 θ 와 팔꿈치의 각도 β 사이의 실험적 관계를 줄이 일정 반지름을 가지는 경우와 상태에 따라 변하는 반지름을 가지는 경우에 대해 보여주고 있다. 이를 통해 변하는 반지름을 가지는 경우에 대한 수학적 모델이 기존의 모델보다 실험 결과와 잘 일치하는 것을 확인 할 수 있다. 또한 실험값에 대한 그래프는 두 경우에 대해서 거의 동일한 곡선을 보여주는데 이

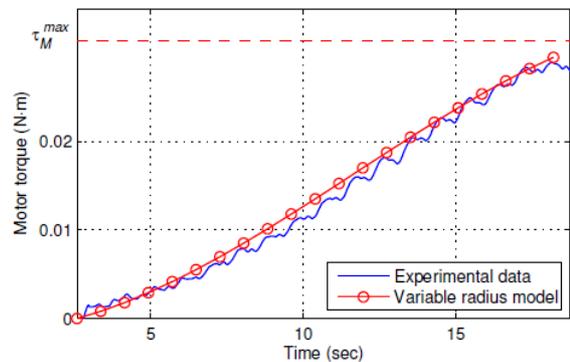


Fig. 7. Torque generated by the motor while lifting a 5 kg-payload from $\beta = 0^\circ$ to 70° with $\gamma = 20^\circ$

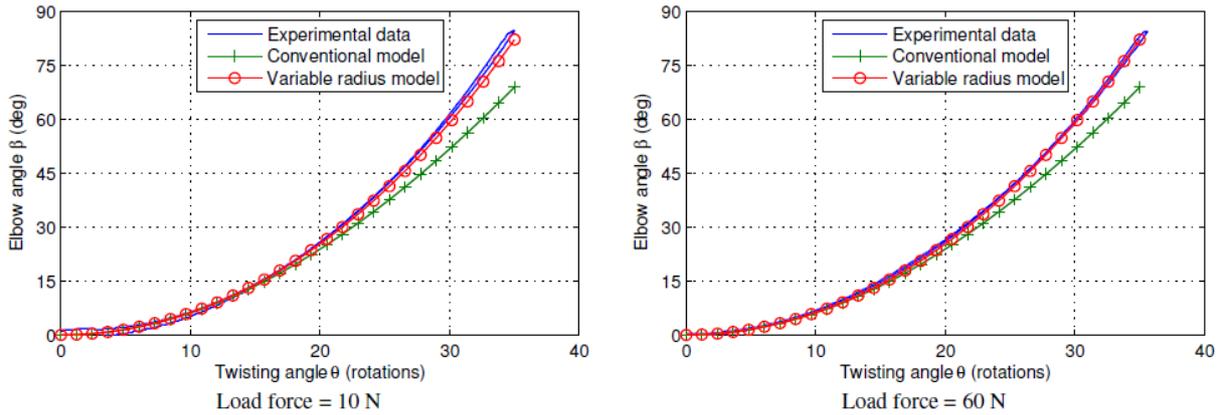


Fig. 8. Comparison of constant- and variable-radius mathematical models with different load forces

를 통해 스트링은 매우 높은 스프링 상수를 갖는다는 가정 또한 확인 할 수 있다.

4.3 사람 의지 감응 실험

위에서 언급한 것처럼, 외골격은 햅틱이나 원격조종 등이 적용되어 실제 사람에게 사용될 수 있어야 한다. 외골격을 사람의 의지대로 조작하기 위해서 사람의 의지를 측정하는 방법에 관해 개발하는 것은 매우 흥미로운 일이다. 제안된 줄 꼬임 기반 미케니즘의 도움을 통해 힘 센서를 사용하지 않고 사용자의 의지를 감지할 수 있다. 필요한 센서는 오직 팔꿈치 조인트에 설치된 회전형 엔코더가 전부이다.

선정된 줄이 매우 높은 강성을 가지고 이완이 거의 불가능할 지라도 일정한 각도 이상 꼬이게 된 이후에 줄은 스프링과 같은 역할을 하게 된다. 이러한 RTSA의 유연한 특징은 모터에 토크가 인가되는 경우에도 사용자가 팔꿈치를 약간 구부리거나 펼 수 있도록 해준다.

기존의 기어 타입의 구동기는 링크가 기어에 단단히 고정되어 있기 때문에 이러한 수축과 이완이 불가능 하다. 하지만 제안된 줄 꼬임 기반 구동기는 이를 가능하게 하며, 서로 대립하는 구동기를 가질 경우 이러한 수축과 이완을 제어 할 수 있다. 본 연구에서 개발한 팔꿈치 외골격의 초기 모델은 사용자의 의지를 다음과 같이 감지하였다:

- 사용자가 팔꿈치를 수축 또는 이완을 한 후에 이전 상태와 현재 상태의 팔꿈치의 각도 차이 β 를 측정한다.
- 이 팔꿈치의 각도 차이만큼 모터에 명령을 내리면 외골격은 요구된 방향으로 움직인다. 모터에 내리는 명령은 각도 차이에 비례 이득을 곱하는 것으로 간단히 계산된다.

- 하중은 식 (5)에 의해서 추정될 수 있고, 여기서 모터의 토크 τ_L 는 모터의 전류를 측정해서 구하고, 모터의 각도 θ 는 팔꿈치 조인트에 설치된 엔코더를 통해 측정한다.

이러한 접근은 사용자가 하중을 스스로의 힘만으로 들 수 있거나 하중이 전혀 걸리지 않는 경우에 사용이 가능하다. 제안된 알고리즘은 햅틱, 원격조종, 재활 등에 적용되어 질 수 있다. 두 개의 대립 RTSA를 사용할 경우 두 구동기가 스프링 역할을 하기 때문에 이 방법이 적용가능하다. 출력을 증폭해야 하는 경우에는 사람의 의지를 감지하기 위해 다른 방법이 개발되어야 한다.

그림 9는 사람의 의지에 따라 감응하는 실험에 대한 실험 결과를 보여주고 있다. 모터는 토크 제어 모드로 제어

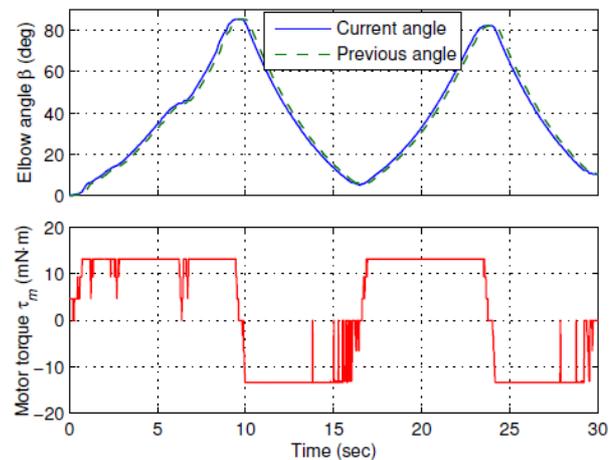


Fig. 9. Elbow angle (top) and motor command (bottom) time plots of the human interaction experiment

되었고, 모터의 토크는 제어 소프트웨어를 통해 제한되었다. 먼저 사용자가 하박을 위로 향하게 하기 위해 하박의 끝단에 정방향으로 약간의 힘을 가한다. 이로 인해 생기는 각도 오차 만큼에 해당하는 명령이 모터에 전해지고, 하박 링크가 위로 움직이게 된다. 이러한 경우 정방향으로 움직이기 때문에 오차는 양수이다. 만약 사용자가 반대 방향으로 움직이려고 시도를 한다면 반대 방향으로 힘을 가해줄 필요가 있다. 예를 들어 실험에서 설명한 것처럼 사용자가 대략 6초 동안 팔을 천천히 내리려고 시도를 하였고, 그 후 10초 동안 다시 반대 방향으로 링크를 움직이도록 시도하였다. 결과에 보이는 것처럼 어떠한 힘 센서도 사용하지 않고도 제안된 외골격은 즉시 사용자의 의지에 따라 제어가 되었다.

5. 논의

5.1 폴리의 크기 선정

모든 TSA는 줄의 수축이 제한되어 있기 때문에 너무 많이 줄이 꼬이게 되면 파단되게 된다. 줄이 꼬이는 동안 줄이 다시는 원래대로 되돌아 올 수 없을 만큼의 데미지를 입지 않을 만큼의 각도를 꼬임 허용 각도라 부른다^[12]. RTSA에 폴리를 추가함으로써 줄이 꼬임 가능한 길이를 증가시켰다. 그림 4에서 보는 것과 같이 증가된 L_{pul} 만큼의 길이가 폴리로부터 풀릴 수 있다. 이로 인해 줄의 꼬임 허용 각도를 증가시킬 수 있게 된다.

다양한 반지름의 폴리가 존재하지만 폴리가 클수록 같은 하중을 지지하기 위해 더 작은 모터 토크가 요구된다. 다르게 말해 이러한 경우 요구되는 수축량이 증가될수록 꼬임 길이가 더 긴 줄이 필요하다. 그러나 실제로 사람이 착용할 수 있는 외골격 시스템에서는 그 길이 L 이 사용자

의 팔의 크기에 따라 제한적일 수밖에 없다. 또한 이것은 결과적으로 모터가 더 많이 그리고 더 빨리 회전해야 함을 의미한다. 만약 폴리의 반지름이 작게 유지하려 한다면 줄은 조금만 수축해도 충분하다. 하지만 그만큼 더 큰 크기의 모터의 토크가 요구되게 된다. 더 출력이 높은 모터가 사용된다는 말은 결국 일반적으로 전체적인 크기 및 무게가 늘어남을 뜻하고 원하는 외골격을 설계하기 힘들어지게 된다.

5.2 줄 선정

제안된 줄 꼬임 구동기 기반 팔꿈치 외골격의 가장 중요한 이슈는 얼마나 많은, 그리고 어떠한 종류의 줄이 사용되어야 하는가이다. 일반적으로 팔꿈치 외골격은 큰 하중을 지탱하면서 동작이 가능해야 하므로 줄에는 높은 장력이 걸리게 된다. 때문에 줄 꼬임 구동기에 쓰이는 줄은 Vectran 또는 Kevlar^[8]와 같이 아주 높은 강성을 가지는 소재로 제작이 되어야 한다. 식 (5)에 따르면 원통형 모델의 반지름이 작을수록 더 작은 모터 토크가 요구된다. 그러므로 가능한 최소한의 반지름을 유지하면서 큰 하중을 견딜 수 있는 조건을 동시에 만족시킬 만한 줄을 선정해야 한다.

실험적인 관점에서 봤을 때, 많은 수의 줄을 동시에 사용하는 것은 설치하고 다루기에 불편함이 있다. 게다가 줄은 되도록 서로 고르게 꼬이게 하는 것이 좋다. 줄이 고르게 꼬임이 되지 않으면 바깥쪽에 존재하는 줄이 안쪽에 있는 줄을 감싸면서 꼬이게 된다. 이러한 경우 바깥쪽의 줄은 더 많은 장력을 받게 되고, 줄이 일찍 파단 될 수 있다. 또한 결과적으로 식 (4)에서 제시한 기구학적 모델을 따르지 않게 된다.

분배기는 줄들이 회전축을 중심으로 대칭적으로 분배가 되도록 설계되어야 한다. 이러한 경우 줄들은 서로 꼬이지 않게 되고 줄들을 하나의 원통으로 볼 수 있다.

6. 결론 및 향후 과제

본 논문에서는 줄 꼬임 기반 구동방식에 기반을 둔 새로운 팔꿈치 외골격 시스템에 대한 선행 연구에 대해 소개하였다. 본 연구를 위해 개발된 구동 메커니즘은 기본적으로 유연하고 관성(inertia)이 작으며 백래쉬(backlash)가 존재하지 않는다. 게다가 가볍고 저렴하고 기계적으로 간단하며, 기어나 힘 센서가 사용되지 않기 때문에 현재의 설계대로라면 자체 무게의 대략 4배까지의 하중을 들어 올릴 수 있다.

외골격의 구조를 개발하고 이에 대한 기구학적 내용과

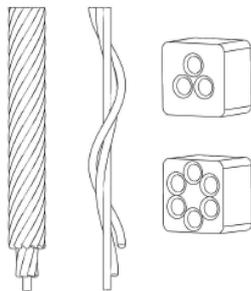


Fig. 10. Simplified structure of several twisted strings composing three layers (left) and three strings corresponding to each layer (middle). The picture on the right shows two possible designs of separator

모터의 토크 사이의 관계에 대해 실험적으로 증명하였고, 제안된 수학적 모델이 기존 모델보다 실제 실험 데이터와 더 잘 일치하는 것을 확인하였다. 본 연구에서 얻어진 기구학적 내용은 실제 외골격 시스템을 설계하는데 필요한 모터의 최대 토크를 계산하는데 사용될 수 있으며, 최종적으로 설계한 줄 꼬임 기반 구동기의 유연성을 활용한 제어 알고리즘으로 사람과 상호 작용하는 실험 까지 수행했다. 이는 외골격이 효과적으로 재활에 사용될 수 있고, 뿐만 아니라 햅틱이나 원격 조종에도 적용될 수 있음을 의미한다.

남은 연구 과제로는 사용자가 스스로 하중을 감당할 수 없을 때 힘을 증폭 시킬 수 있는 시스템을 위한 제어 알고리즘을 개발하는 것이다. 또한 수축과 이완 동작 모두를 인지하고 외골격의 강성을 제어하기 위해 본 논문에서 제안한 것과 유사한 양방향 구조의 줄 꼬임 기반 구동기를 개발할 계획이다.

References

- [1] M. Bouzit, G. Burdea, G. Popescu, and R. Boian. The rutgers master ii-new design force-feedback glove. *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, Vol. 7, No. 2. 256-263, Jun 2002.
- [2] A. Dollar and H. Herr. Lower extremity exoskeletons and active orthoses: Challenges and state-of-the-art. *Robotics, IEEE Transactions on*, Vol. 24, No. 1. 144 -158, Feb. 2008.
- [3] A. Frisoli, F. Rocchi, S. Marcheschi, A. Dettori, F. Salsedo, and M. Bergamasco. A new force-feedback arm exoskeleton for haptic interaction in virtual environments. In *Eurohaptics Conference, 2005 and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2005. World Haptics 2005. First Joint*, pages 195-201, March 2005.
- [4] R. Gopura and K. Kiguchi. Mechanical designs of active upper-limb exoskeleton robots: State-of-the-art and design difficulties. In *Rehabilitation Robotics, 2009. ICORR 2009. IEEE International Conference on*, pages 178-187, June 2009.
- [5] P. Heo, G. Gu, S.-j. Lee, K. Rhee, and J. Kim. Current hand exoskeleton technologies for rehabilitation and assistive engineering. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 13. 807-824, 2012.
- [6] G. Kwakkel, B. J. Kollen, and H. I. Krebs. Effects of robot-assisted therapy on upper limb recovery after stroke: A systematic review. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, Vol. 22, No. 2. 111-121, March/April 2008.
- [7] A. Montagner, A. Frisoli, L. Borelli, C. Procopio, M. Bergamasco, M. C. Carboncini, and B. Rossi. A pilot clinical study on robotic assisted rehabilitation in vr with an arm exoskeleton device. In *Virtual Rehabilitation, 2007*, pp.57-64, Sept. 2007.
- [8] T. Moyer, P. Tusting, and C. Harmston. Comparative testing of high strength cord. In *2000 International Technical Rescue Symposium*, pp.1-8, 2000.
- [9] F. M. Mozaffari, M. Troncossi, and C. V. Parenti. State-of-the-art of hand exoskeleton systems. In *Universit di Bologna. Internal document released under CC*, 2011.
- [10] G. Palli, C. Natale, C. May, C. Melchiorri, and T. Wurtz. Modeling and control of the twisted string actuation system. *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, pp.99. 1-10, 2012.
- [11] J. Perry, J. Rosen, and S. Burns. Upper-limb powered exoskeleton design. *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, Vol. 12, No. 4. 408-417, Aug. 2007.
- [12] D. Popov, I. Gaponov, and J.-H. Ryu. A study on twisted string actuation systems: Mathematical model and its experimental evaluation. In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2012 IEEE/RSJ International Conference on*, pages 1245-1250, Oct. 2012.
- [13] T. Sonoda and I. Godler. Position and force control of a robotic finger with twisted strings actuation. In *Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2011 IEEE/ASME International Conference on*, pages 611-616, July 2011.
- [14] M. Suzuki, T. Mayahara, and A. Ishizaka. Redundant muscle coordination of a multi-dof

robot joint by online optimization. In Advanced intelligent mechatronics, 2007 IEEE/ASME international conference on, pages 1-6, Sept. 2007.

- [15] M. Suzuki and T. Mayaliara. A method of real-time coordination of redundant muscles for multi-dof robot joints. In SICE, 2007 Annual Conference, pages 1064-1069, Sept. 2007.
- [16] A. Zoss, H. Kazerooni, and A. Chu. Biomechanical design of the berkeley lower extremity exoskeleton (bleex). Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on, Vol. 11, No. 2. 128-138, April 2006.



Igor Gaponov

2011 한국기술교육대학교 기계공학과(공학박사)
2012~현재 한국기술교육대학교 기계정보공학부 교수로 재직 중

관심분야 : Teleoperation, Biorobotics, Human-machine interaction



Dmitry Popov

2011 Moscow State Technical University 로봇공학 및 메카트로닉스(공학석사)
2011~현재 한국기술교육대학교 기계공학과 박사과정

관심분야 : Rehabilitation robotics, Human-machine interaction



유지환

2002 한국과학기술원 기계공학과(공학박사)
2005~현재 한국기술교육대학교 기계정보공학부 교수로 재직 중

관심분야 : Haptics, Teleoperation, Autonomous Vehicle



이광현

2012 한국기술교육대학교 기계정보공학부(공학사)
2012~현재 한국기술교육대학교 기계공학과 석사과정

관심분야 : Teleoperation, Autonomous Vehicle