종이접기 원리를 이용한 다자유도 로봇팔

Origami-inspired Multi DOF Robotic Arm

지도교수 : 조 규 진

이 논문을 공학사 학위 졸업논문으로 제출합니다.

2018 년 12 월 07 일

서울대학교 공과대학 기계항공공학부

2013-11801 윤 한 별

위 논문을 공학사 졸업논문으로서 S 로 인정한다.

2018 년 12 월 07 일

심사교수 조 규 진 (인)

2018년 12월

(제목 : 종이접기 원리를 이용한 다자유도 로봇팔)

(제목 : Origami-inspired Multi DOF Robotic Arm)

2013-11801 윤 한 별

지 도 교 수 : 조 규 진

2018. 12. 07.

서울대학교 공과대학 기계항공공학부

종이접기 원리를 이용한 다자유도 로봇팔

Origami-inspired Multi DOF Robotic Arm

기 계 항 공 공 학 부

2013-11801 윤 한 별

요 약

Self-locking robotic arm은 가볍고, 부피가 작으며, 변형이 가능하다. 또한, 종이접기 원리를 이용하여 로봇팔이 완전히 펴졌을 때 강한 강성을 가진다. 이와 같은 장점들로 Self-locking robotic arm은 UAV의 manipulator로써 효율적인 역할이 기대된다. 하지만 로봇팔을 펴는 과정에서 고무줄의 탄성 복원력과 중력에 의존하는 문제점이 있기에 upward extension을 요구하는 mobile robot에 적용이 어렵다. 또한, 로봇팔이 펴지는 중간과정, 즉 self-locking이 적용되기 이전의 강성은 여전히 약하다는 단점이 있다. 본 연구에서는 모터와 tendon을 이용하여 로봇팔을 펴는 mechanism을 구현하였다. 로봇팔을 펴는 tendon의 장력으로 self-locking system을 없앰으로써 발생할 수 있는 강성약화를 방지하였고, 더 나아가 로봇팔을 펴는 중간과정에서의 강성을 강화할 수 있었다. 여러 방향으로의 extension이 가능하기에 R-joint를 이용하여 길이 변형 가능한 origami-inspired link를 여러 개 연결하여 다자유도 로봇팔을 제작할 수 있다. 본 연구를 통해 제작한 종이접기 원리를 이용한 다 자유도 로봇팔은 mobile robot에 적용되어 효율적인 역할을 수행하게 된다. 로봇팔을 접은 상태로 이동하여 이동과정의 효율성을 증대되고, 목표지점에서 로봇팔을 원하는 길이로 펴져 manipulator로써 다자유도 업무를 수행할 수 있게 된다.

- 개요 -

1. 연구목적
2. 연구배경 및 내용
3. 연구과정 및 결과
 1) Single-unit Tendon-Driven Unfolding
  (1) Tendon-driven Unfolding Mechanism
  (2) Single-unit with Unfolding Mechanism
 2) Multi-unit Tendon-driven Unfolding
  (1) Mechanical Connection between Unit
  (2) Multi-unit Tendon-driven Unfolding
  (3) Result
 3) Multi-unit Tendon-driven Unfolding with Extra-unfold Locking System
  (1) Folding and Unfolding Tendon Length Trajectory
  (2) Extra-unfold Locking System
  (3) Result
5. 향후 연구 방향
 1) Rotation Angle Control
 2) Multi DOF Robotic Arm
6. 참고자료

1. 연구목적

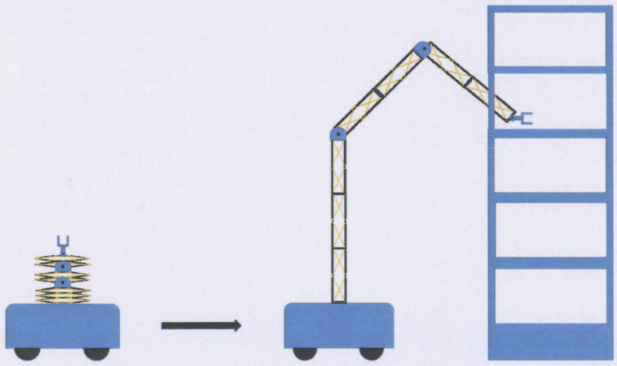
산업현장에서 물건을 운반하는 일의 효율성이 대두되고 있다. 세계적인 물류 업체 Amazon에서는 Kiva 로봇을 이용하여 물건의 운반에 필요한 시간을 단축하여 제품의 출고량을 극대화하였다. 산업현장뿐만 아니라 높은 위치에 있는 물건을 꺼내야 하는 도서관이나 대형 매장 등 일상생활에서도 이러한 로봇의 필요성은 존재한다. 하지만, 원하는 물건의 위치로 부피가 큰 manipulator를 달고 로봇이 이동하는 것은 비효율적이다. 산업현장에서도 로봇의 무거운 무게와 큰 부피로 인해 지정된 장소에서만 기능을 수행한다. 이러한 한계를 극복하기 위해 본 연구에서는 origami 원리를 이용한 로봇팔을 제작하여 wheeled mobile robot(ex. <그림1> Amazon Kiva)에 적용하고자 한다. <그림3>과 같이 제작된 로봇은 로봇팔을 folding 한 상태에서 이동하여 물건의 위치에 도달하는 과정의 효율성은 증가하고, 원하는 위치에 도달한 후에는 unfolding을 통해 range of motion을 증가시켜 물건을 정확히 집는 manipulator의 기능을 수행할 수 있을 것이다.



<그림 3> Amazon Kiva robots



<그림 4> a self-locking robotic arm



<그림 5> an origami inspired robotic arm for a wheeled robot

2. 연구배경 및 내용

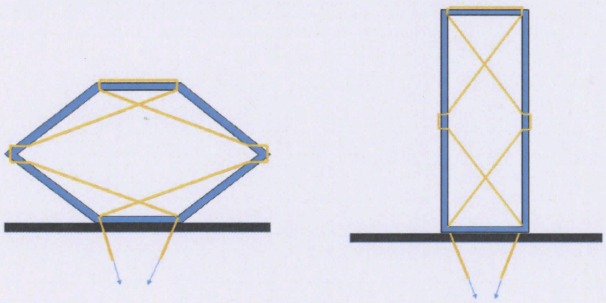
본 연구에서는 종이접기 원리를 이용하여 extendable robotic arm link를 제작하고자 한다. 종이접기 원리를 이용하여 설계된 시스템은 매우 가볍고, 초기부피가 작으며, 변형이 가능하다는 장점이 있고 강성이 약하다는 단점이 있다. 하지만, 최근 논문에 따르면, self-locking system을 이용해서 강성을 강화하는 방법이 고안되었다. "An origami-inspired, self-locking robotic arm"이 self-locking system을 이용하여 origami structure의 단점을 보완한 robotic arm이다. 이 robotic arm에서는 folding line이 perpendicular하면 singularity가 발생한다는 origami principle을 이용하여 self-locking을 구현하고 강성 강화를 실현하였고, tendon-driven actuation system을 이용하여 self-locking을 풀어 큰 힘을 들이지 않고 robotic arm을 접는다. 하지만, robotic arm을 펴는 과정을 고무줄의 탄성력에 의존하고 있어 본 연구에서 만들고자 하는 robotic arm으로써의 기능을 하는 데 어려움이 있다. drone에 적용하여 downward extension에만 사용한다면 중력의 힘을 받아 고무줄의 탄성력으로도 충분히 unfolding을 구현할 수 있다. 하지만, end effector에 무게가 있는 gripper를 장착하고 upward extension을 구현하기 위해서는, 제어가 불가능하고 부정확한 힘을 전달하는 고무줄의 탄성력보다는 tendon-driven actuation system을 통해 unfolding을 구현해야 한다. 이를 위해 tendon-driven unfolding mechanism을 구상하고자 한다. 이 과정에서 기존의 folding tendon path와 중첩되지 않도록 path를 설계할 것이고 하나의 모터로 구성된 tendon-driven actuation system을 통해 folding과 unfolding을 모두 구현해보고자 한다. 이렇게 제작한 tendon-driven extendable unit을 원하는 길이만큼 연결하여 robotic arm의 link를 구성하고자 한다. 또한, link를 R-joint로 연결하여 기존의 1자유도의 robotic arm을 다 자유도 extendable robotic arm으로 구현하도록 할 것이다.

3. 연구과정

1) Single-unit Tendon-Driven Unfolding

(1) Tendon-driven Unfolding Mechanism

origami robotic arm의 folding wall을 tendon을 이용하여 structure 내부로 당기는 힘을 작용해 준다면 unfolding을 구현할 수 있다. <그림4>와 같이 한 쪽 벽면의 folding line에 고리 및 구멍을 만들어서 tendon을 통과시킨다. 통과한 tendon은 그 반대편 벽면이 윗면과 아랫면에 닿는 변의 중심에 있는 구멍을 통과하게 된다. 양쪽을 대칭으로 tendon path를 설계하여 unfolding tendon path를 구성할 수 있다.



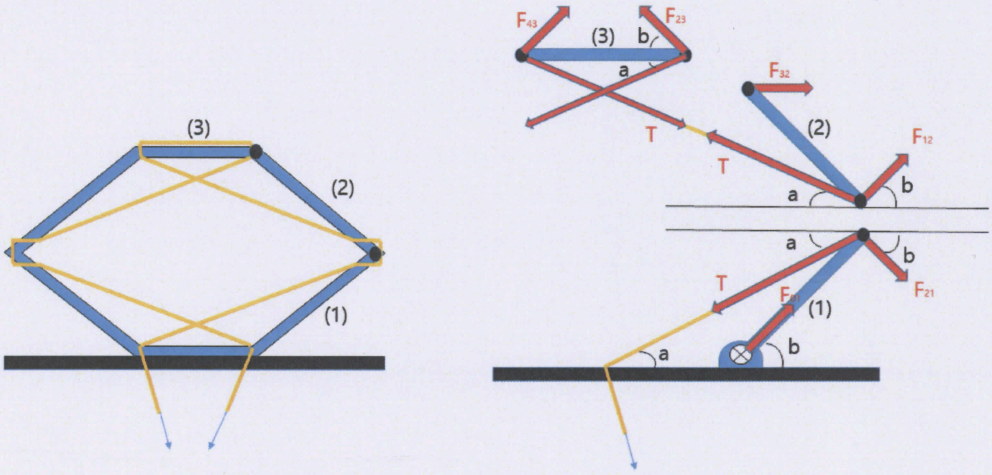
<그림 6> tendon-driven unfolding mechanism

<그림5>와 같이 unfolding mechanism을 2D 평면상에서 6-bar linkage로 단순화하여 modeling을 진행하였다. tendon을 당기는 장력을 T라 하고, element(i)가 element(j)에 가하는 힘을 F_{ij}라 하면, unfolding을 구현하기 위해 다음과 같은 조건을 만족하면 된다.

$$T\cos(a) > F_{21}\cos(b)$$

(a: tendon과 지면이 이루는 각, b: element(1)이 지면과 이루는 각)

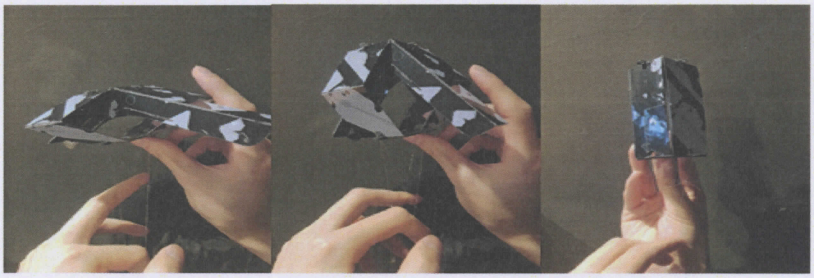
$\cos(a) > \cos(b)$를 항상 만족하므로, $T > F_{21}$이면 unfolding이 구현될 것이다. strain gauge나 힘 센서를 이용하여 F_{21}을 측정, 그보다 더 큰 힘으로 tendon을 당기면 unit unfolding을 구현할 수 있다.



<그림 7> unfolding mechanism modeling

(2) Single-unit with Unfolding Mechanism

구상한 tendon-driven unfolding mechanism을 바탕으로 직접 origami unit을 제작해 보고 새로 설계한 tendon path를 추가하여 <그림6>과 같이 실험을 진행하였다. unfolding driving tendon을 당겨 origami unit 양쪽 벽면에 장력 $T_H(=Tcos(a))$을 가하여 unfolding을 안정적으로 구현할 수 있었다.



<그림 8> tendon driven unfolding unit

unit unfolding과 folding을 구현할 때, 두 가지 tendon(기존의 folding tendon(FT)과 새로 설계한 unfolding tendon(UT))의 길이 증감의 비도 있다는 것을 확인할 수 있었다. 다시 말해서, unit이 folding할 때, FT는 증가하고 반대로 UT는 감소한다. 반대로 unit이 unfolding할 때, UT는 증가하고 FT는 감소한다. 이와 같이 증감의 비가 존재한다는 사실을 이용하여 single motor driven folding unfolding 구현하고자 한다. 실험을 통해 얻은 tendon 증감의 비는 <표 1>과 같으며 이에 따라 single actuator-driven을 위한 식(1)

pulley radius ratio을 산출하였다. 식(1)을 만족하는 pulley를 제작하여 a single actuator를 통해서 두 가지 tendon을 모두 제어해보고자 한다.

length(cm)	fully unfolded	fully folded	folding	unfolding
folding-driving tendon	12.8	18	+5.2	-5.2
unfolding-driving tendon	10.96	0.5	-10.46	+10.46

<표 2> tendon length for folding & unfolding

$$\Delta L = R\theta,\ \Delta l = r\theta$$

(ΔL: folding-driving tendon length change

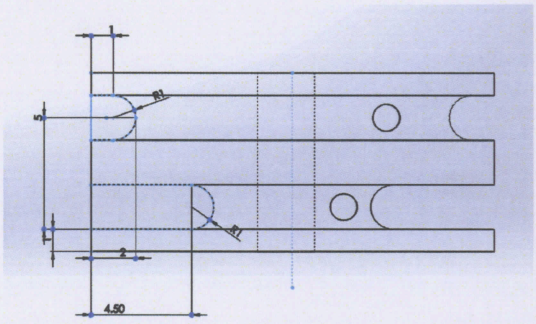
Δl: unfolding-driving tendon length change

R: pulley radius for rolling folding-driving tendon

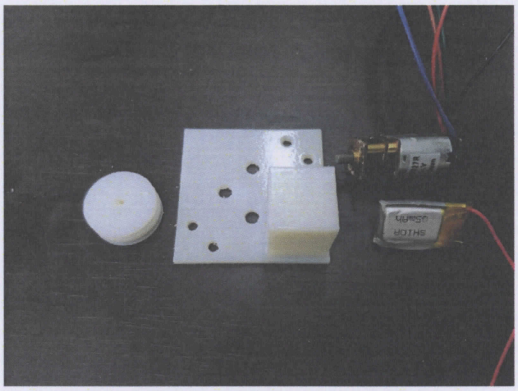
r: pulley radius for rolling unfolding-driving tendon)

$$\text{pulley radius ratio: } \frac{R}{r} = \frac{\Delta L}{\Delta l} = \frac{10.46}{5.2} \simeq 2 \cdots (1)$$

산출한 반경 비율을 바탕으로 pulley 설계도를 수정하여 3D printer를 이용하여 제작하였다.



<그림 9> pulley 3D model

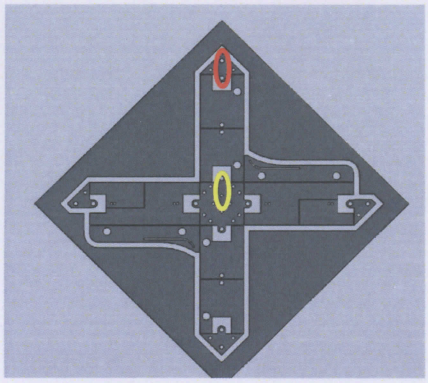


<그림 10> pulley + motor mount + motor

2) Multi-unit Tendon-driven Unfolding

(1) Mechanical Connection between Unit

링크를 구성하기 위해서 여러 unit을 연결해야 하며, 각 unit 간 연결 방법이 연결부의 강성과 전체 링크의 alignment에 영향을 미친다. 연결부의 강성약화는 링크 전체의 강성 약화를 초래하며, 링크의 정확한 alignment의 부재는 robotic arm의 정확한 수직 extension을 불가능하게 한다. 따라서 기존의 접착제를 이용한 unit 간 연결 방법 대신 mechanical connection을 통해 강성약화와 정확한 alignment를 얻어내고자 한다. tendon path의 마찰력을 줄이기 위한 eyelet은 마찰력을 줄이는 역할뿐만 아니라 두 origami plane을 고정해주는 역할도 할 수 있다. 따라서 eyelet을 이용하여 unit 간 연결을 구현하였다. <그림 9>와 같이 두 unit을 연결할 때 윗 unit의 빨간 원에 해당하는 구멍과 아래 unit의 노란 원에 해당하는 구멍을 align 해주면 전개도의 4개의 folding wall이 정확하게 배열될 뿐만 아니라 eyelet을 통한 mechanical connection을 통해서 강성약화를 막을 수 있다. <그림 10>은 eyelet으로 두 unit을 연결한 모습이다.



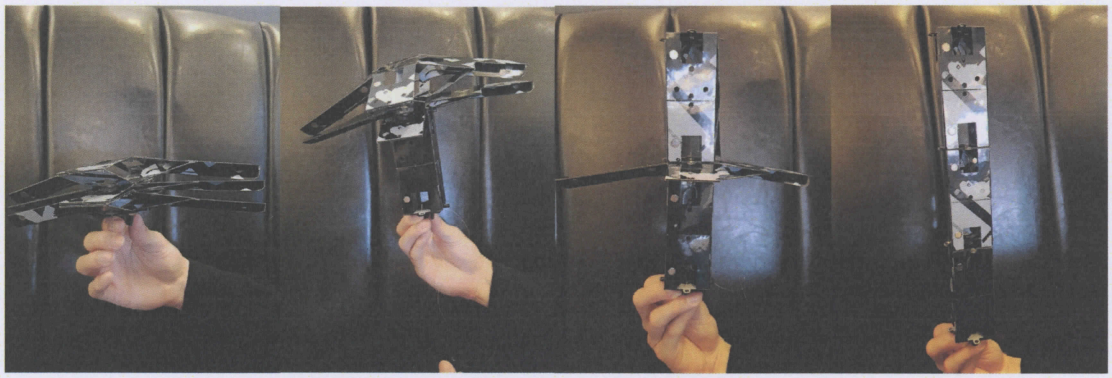
<그림 9> multi unit connection + alignment



<그림 10> eyelet connection

(2) Multi-unit Tendon-driven Unfolding

eyelet mechanical connection으로 unit들을 연결하여 <그림 11>과 같이 extendable robotic arm의 기본단위인 link를 구성하였다. single unit과 마찬가지로 tendon-driven unfolding mechanism이 구현되었고 여전히 증감의 비도 보였다.

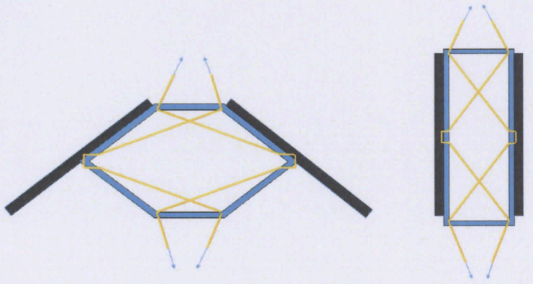


<그림 13> multi unit unfolding

unit이 fully unfold 되어서 self-locking이 구현된 이후에 unfolding에 필요한 tendon을 더 당겼을 때, <그림 12>와 같이 변형되는 것을 확인할 수 있었다. (extra-unfold) single unit 경우에는 self-locking이 구현되었을 때, motor를 정지시키는 명령을 통해 extra-unfold가 일어나지 않도록 할 수 있다. 하지만, multi unit link를 구성할 경우, 하나의 unit이 self-locking이 된 후에도 다른 unit들을 unfolding 하기 위해 tendon을 더 당겨주어야 한다. 이 과정에서 extra-unfold 현상이 발생할 수 있다. 하나의 unit이 fully unfold 된 상태에서 tendon을 더 당기더라도 unit의 중심부에 힘이 더 가해지지 않도록 개선이 필요했다. <그림 13>과 같이 folding wall 바깥 표면에 folding line이 없는 plate를 추가하여 unit이 fully unfolded 상태에서 tendon을 더 당겨도 outer plate가 내부로 꺾는 추가적인 T_H에 저항하도록 하였다.



<그림 14>
tendon pulled after self-locking

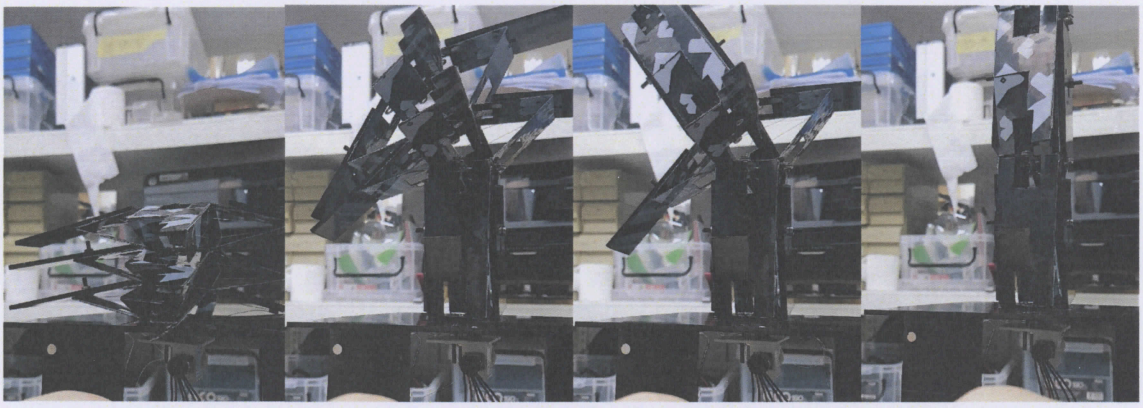


<그림 13> outer plate preventing from extra folding

아크릴 1t로 outer plate를 제작하여 실험한 결과 장력을 견디지 못하고 부러졌다. 추가적인 T_H가 outer plate에 전달되고 bending stress가 발생하기 때문에 bending stress에 강한 재료를 사용하거나 두꺼운 아크릴을 사용하여 outer plate를 제작해야 한다. 3t 아크릴 plate로 실험한 결과 부러지지 않고 bending stress를 잘 견디고 내부로 꺾이는 현상을 막을 수 있었다. 아크릴 plate의 두께 증가는 무게 증가를 가져오므로 unfolding 구현에 필요한 최소 T_H의 증가를 초래하는 문제점이 있다.

(3) Result

제작한 extendable robotic arm을 single actuation system을 이용하여 unfolding을 구현해 보았다. <그림 14>와 같이 tendon-actuation system을 이용하여 unfolding이 구현되었지만 정확한 수직 방향 extension이 구현되지는 않았다. 양쪽 folding wall에서 나오는 tendon을 모두 팽팽한 상태로 pulley에 감아 초기조건을 맞춰줘야 양쪽에 균일한 장력을 줄 수 있다. pulley에 tendon을 감아 초기조건으로 맞춰줄 때 수작업으로 수행하여 부정확성이 발생한 것으로 판단된다. 또한 <표1>은 unit folding과 unfolding 과정에서 초기(fully folded)와 나중(fully unfolded)조건의 tendon ratio만 산출한 것이다. 실험 결과, 펴지는 중간과정에서 항상 식(1)과 동일한 비율로 tendon 길이가 변화하는 것이 아니었다. 중간과정에서 tendon 길이 비율을 모두 산출하는 과정이 필요하다.

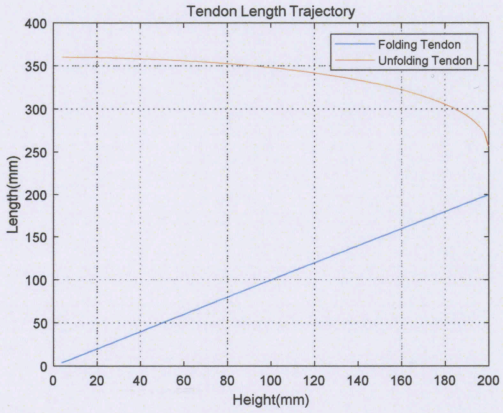


<그림 16> extendable robotic link unfolding

3) Multi-unit Tendon-driven Unfolding with Extra-unfold Locking System

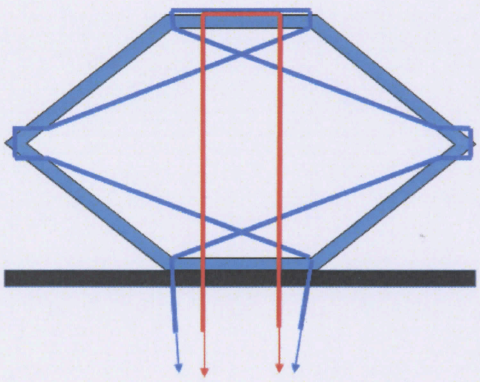
(1) Folding and Unfolding Tendon Length Trajectory

기존 self-locking system은 folding tendon이 locking을 풀고 folding 하기 때문에 tendon length를 정확하게 산출할 수 없다. 따라서, self-locking system을 제거하고 folding tendon path를 단순화하였다. 그로 인한 강성약화는 unfolding tendon의 장력으로 강화하고자 하였다. extendable robotic arm을 일정한 속도로 상승시켰을 때, arm의 높이에 따른 folding과 unfolding tendon length trajectory를 <그림 15>와 같이 plot하였다. 강성 강화를 위한 mechanism이 <표1>과 같이 최종적으로는 folding tendon의 길이가 200mm 증가할 때, unfolding tendon의 길이가 약 100mm 감소하였다. 하지만, 중간과정에서는 동일한 비율로 증감하지 않는 것을 확인할 수 있다.

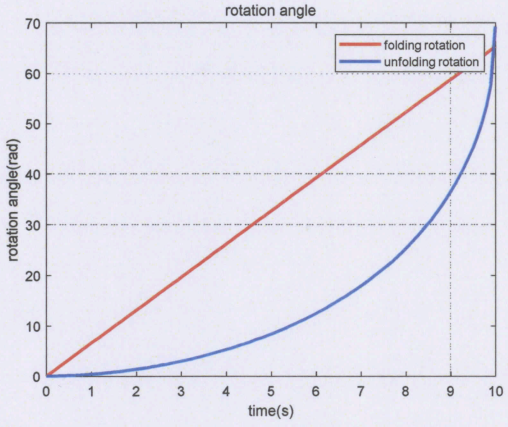


<그림 17> Tendon Length Trajectory

최종적으로 2배의 증감율을 보이므로, pulley의 반지름의 비율도 2배로 설계를 한다면, 최종적으로 같은 각도를 회전하면 unfolding이 구현된다. folding tendon의 pulley 반지름을 3mm, unfolding tendon의 pulley 반지름을 1.5mm라고 할 때, unfolding 중간과정에서 robotic arm 높이에 따른 desired rotation angle은 <그림 16>과 같다. 이를 시간에 따라 표현하면 <그림 17>과 같이 plot된다. 따라서, 하나의 actuator로 두 tendon을 모두 제어하여 unfolding을 구현하는 데에 한계가 있으므로, 두 개의 actuator를 사용하여 시간에 따른 rotation angle control을 통해 unfolding을 구현할 수 있다.



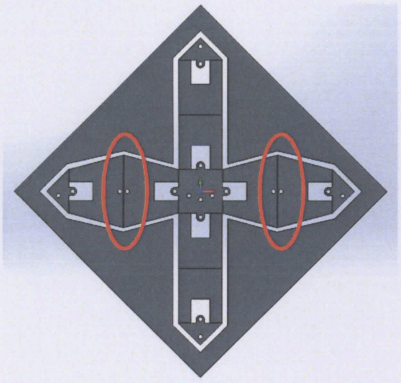
<그림 18> Tendon Configuration



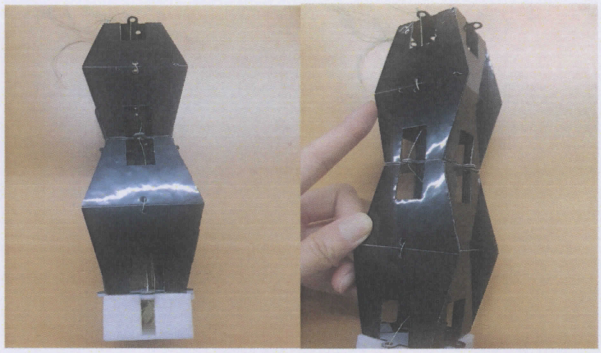
<그림 19> Rotation Angle Trajectory

(2) Extra-unfold Locking System

위에서 extra-unfold를 막기 위해 outer plate를 이용하는 방법에는 무게의 증가로 한계가 있었다. 따라서, <그림 18>과 같이 unfolding tendon에 의해 당겨지는 면의 너비를 늘리면, fully unfolding 되었을 때, perpendicular한 면에 의해 locking이 되어 extra-unfold 현상을 막을 수 있게 된다. <그림 19>는 실제 unit을 만들어서 실험을 진행한 모습이고, unit이 완전히 펴지고 tendon이 추가적으로 당겨졌을 때, extra-unfold 현상이 발생하지 않는 것을 확인할 수 있었다.



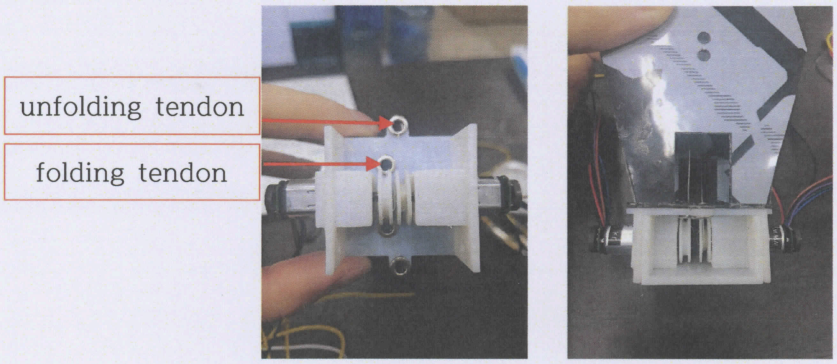
<그림 20> Extra-unfold Locking model



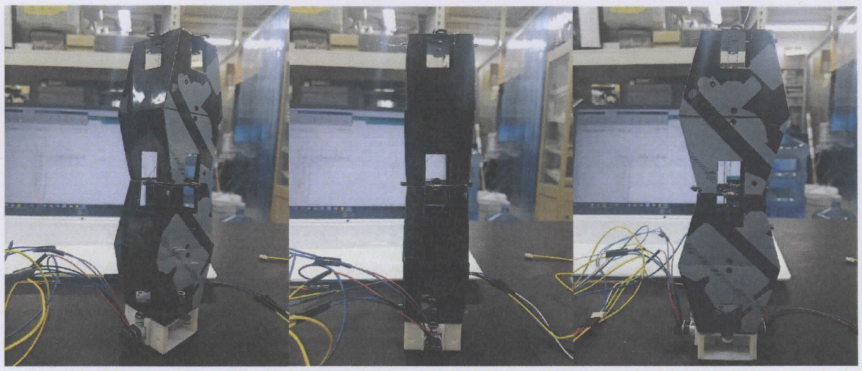
<그림 21> Extra-unfold Locking mechanism

(3) Result

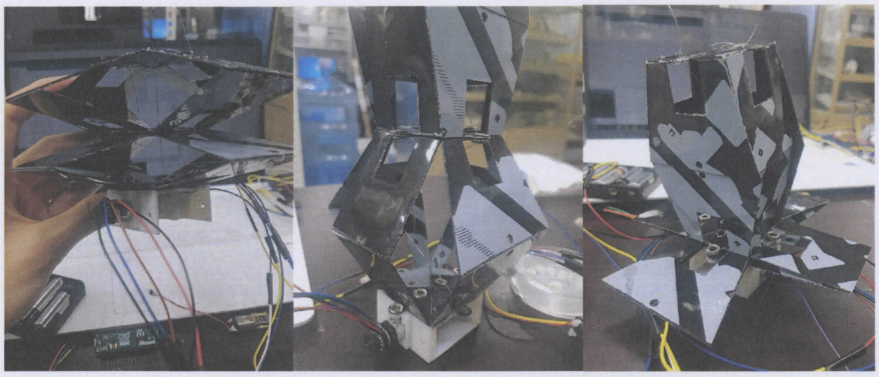
<그림 20>과 같이 두 개의 actuator에 각각 반경이 다른 pulley를 결합하여 folding과 unfolding tendon을 각각 제어하였다. <그림 21>은 robotic arm이 완전히 펴졌을 때의 방향별 모습이고, <그림 22>는 robotic arm의 folding과 unfolding의 중간과정의 모습이다. 실제로 아두이노를 이용하여 rotation angle control을 진행하고자 하였으나, 모터에 장착된 encoder의 noise로 인하여 rotation angle을 읽어 들일 수 없었고, 그에 따라 정확한 angle control을 할 수 없었다. <그림 17>과 같이 정확한 비율로 제어를 해줘야 folding과 unfolding이 구현되므로, 비율을 맞추지 못하여 unfolding 중간에 멈추는 현상이 발생하였다.



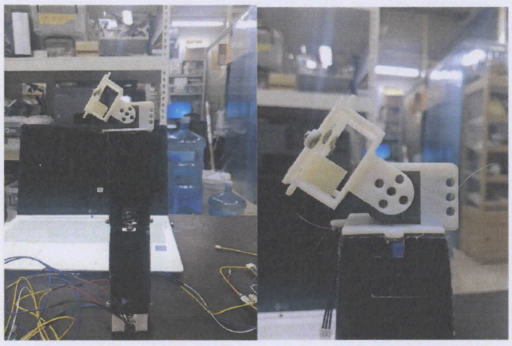
<그림 22> folding & unfolding actuator system



<그림 23> Extendable Robotic Arm Configuration



<그림 24> Folding & Unfolding Experiment



<그림 25> R joint connecting another link

5. 향후 연구 방향

1) Rotation Angle Control

Rotation Angle을 정확하게 읽을 수 있는 encoder를 추가하거나, 기존 encoder의 noise를 줄이는 방법을 고안해야 한다. 정확한 Rotation Angle을 제어할 수 있으면, folding과 unfolding이 가능한 extendable robotic arm을 구현할 수 있게 될 것이다.

2) Multi DOF Robotic Arm

<그림 23>과 같이 R joint를 multi unit으로 만든 link 위에 부착하고, 그 위에 새로운 multi unit link를 부착하면, 기존 수직 방향으로 상승과 하강만 가능했던 1 DOF robotic arm을 다자유도로 만들어 manipulator의 기능을 할 수 있도록 만들 수 있다. 이 경우, base에 위치한 unfolding driven actuator에 큰 힘이 필요하므로, 기어비가 더 큰 actuator 사용이 필요할 것이다.

6. 참고자료

1) Kim, S. J., Lee, D. Y., Jung, G. P., & Cho, K. J. (2018). An origami-inspired, self-locking robotic arm that can be folded flat. Science Robotics, 3(16), eaar2915.