

텐던 기반 직렬 기구의 외부 중력 보상 장치 설계

Design of an External Gravity Compensator for a Tendon-based Serial Mechanism

저자 (Authors)	이기현, 김진현 Gihyeon Lee, Jinhyun Kim
출처 (Source)	제어로봇시스템학회 논문지 26(5) , 2020.5, 385-391(7 pages) Journal of Institute of Control, Robotics and Systems 26(5) , 2020.5, 385-391(7 pages)
발행처 (Publisher)	제어로봇시스템학회 Institute of Control, Robotics and Systems
URL	http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE09331906
APA Style	이기현, 김진현 (2020). 텐던 기반 직렬 기구의 외부 중력 보상 장치 설계. 제어로봇시스템학회 논문지, 26(5), 385-391
이용정보 (Accessed)	서울과학기술대학교 1.241.15.*** 2020/12/23 21:43 (KST)

저작권 안내

DBpia에서 제공되는 모든 저작물의 저작권은 원저작자에게 있으며, 누리미디어는 각 저작물의 내용을 보증하거나 책임을 지지 않습니다. 그리고 DBpia에서 제공되는 저작물은 DBpia와 구독계약을 체결한 기관소속 이용자 혹은 해당 저작물의 개별 구매자가 비영리적으로만 이용할 수 있습니다. 그러므로 이에 위반하여 DBpia에서 제공되는 저작물을 복제, 전송 등의 방법으로 무단 이용하는 경우 관련 법령에 따라 민, 형사상의 책임을 질 수 있습니다.

Copyright Information

Copyright of all literary works provided by DBpia belongs to the copyright holder(s) and Nurimedia does not guarantee contents of the literary work or assume responsibility for the same. In addition, the literary works provided by DBpia may only be used by the users affiliated to the institutions which executed a subscription agreement with DBpia or the individual purchasers of the literary work(s) for non-commercial purposes. Therefore, any person who illegally uses the literary works provided by DBpia by means of reproduction or transmission shall assume civil and criminal responsibility according to applicable laws and regulations.

텐던 기반 직렬 기구의 외부 중력 보상 장치 설계

Design of an External Gravity Compensator for a Tendon-based Serial Mechanism

이 기 현¹, 김 진 현^{1,*}
(Gihyeon Lee¹ and Jinhyun Kim^{1,*})

¹Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science & Technology

Abstract: In this paper, the external gravitational compensation device of a tendon-based serial instrument was studied. Typically, a spring-based gravitational compensation device produces a compensation force that is in proportion to the angle of the link to which it wishes to perform the gravitational compensation. However, if several links are connected in a series, it is difficult to generate adequate compensation forces on all links because the orientation of gravity varies depending on the angle of the previous link, thereby rendering the necessary compensation forces variable. Therefore, in the case of a multi-axis serial mechanism, a gravitational compensation device using a parallelogram mechanism capable of transmitting a reference plane with respect to the direction of gravity has been widely used. A serial mechanism using a parallelogram mechanism for the gravitational compensation device is advantageous because gravitational compensation is possible by transmitting the reference plane to all links in the direction of gravity, regardless of the angle of each link. The only disadvantage is that it is difficult to manufacture due to its small size. To compensate for these drawbacks, we propose an external gravitational compensation device that is applicable to tendon-based series mechanisms. The proposed external gravitational compensation device can mediate reference plane transfer and gravitational compensation through tendons outside the serial mechanism, and it is advantageous in that the size and weight of the link can be reduced because it is installed outside the link. In this paper, we designed and verified the reference plane control mechanism that could transfer the reference plane similar to the parallelogram mechanism from the outside and the gravitational compensation mechanism that could mediate gravitational compensation according to the angle of each link. In addition, the prototype was assembled and experimentally verified.

Keywords: Gravity compensation, master-slave manipulator, tendon driven

1. 서론

매니퓰레이터와 같은 직렬 기구에서 링크의 중량에 의한 처짐은 무시할 수 없는 외란으로, 매니퓰레이터를 적절히 제어하기 위해서는 중력 보상이 필수적으로 고려되어야 한다. 일반적으로 사용되는 중력 보상 방법은 각 링크에 가해지는 중력에 의한 토크를 제어 입력에 더하여 상쇄하는 방법과 링크의 각도에 따라 가해지는 중력에 의한 토크를 특수한 기구부를 이용하여 상쇄시키는 방법이 있다. 추가적인 제어 입력으로 중력 보상을 수행할 경우 작업에 요구되는 토크보다 더 큰 액츄에이터 출력이 요구되고, 정지 시 액츄에이터가 단순히 정적 균형을 유지하기 위해 사용되어 에너지 효율이 떨어지는 단점이 있다[1].

일반적으로 사용하는 기구적인 중력 보상 방식으로는 링크의 무게를 보상하기 위해 평형추를 설치하는 방법과 스프링을 이용하는 방법이 있다. 평형추를 이용하는 방법은 그림 1의 (a)와 같이 링크의 질량 중심을 관절의 중심으로 고정하여 링크의 각도와 관계없이 중력 모멘트를 상쇄시킬

수 있다. 하지만 평형추의 중량으로 인해 관성 모멘트가 증가하여 가속도가 큰 조작이 필요할 경우 적합하지 않고, 가동범위가 제한되는 단점이 있다[1]. 스프링을 이용한 중력 보상 방식은 그림 1의 (b), (c)와 같이 스프링을 링크에 직접 설치하거나, 와이어를 이용하여 링크와 연결하여 링크 각도에 따라 중력 보상력을 생성하도록 설계하고, 평형추와 같은 관성 모멘트가 증가하는 단점이 없어 더 보편적으로 사용되고 있다.

하지만 2축 이상의 직렬 기구에서는 그림 2와 같이 이전 관절들의 각도가 다음 관절의 중력 토크에 영향을 주기 때문에 중력 방향에 대한 기준면을 전달할 수 있는 그림 3과 같은 평행사변형 기구나 유사 평행사변형 기구가 필요하다. 평행사변형 기구를 이용한 중력 보상 장치는 구조적으로 간단하고, 스프링을 사용한 중력 보상 기구와 조합되어 사용된다[2-5]. 의사 평행사변형 기구는 평행사변형 기구와 같은 동작을 하도록 고안되었고, 타이밍벨트, 웹기어 등을 이용한 의사 평행사변형 기구 등이 연구된 바 있다[2,6-8].

*Corresponding Author

Manuscript received January 13, 2020; revised March 9, 2020; accepted April 7, 2020

이기현: 서울과학기술대학교 기계자동차공학과 대학원생(leegihyeon@gmail.com, ORCID[®] 0000-0001-8023-9625)

김진현: 서울과학기술대학교 기계자동차공학과 교수(jinhyun@seoultech.ac.kr, ORCID[®] 0000-0003-1313-6938)

※ 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2019R1A4A1020715).

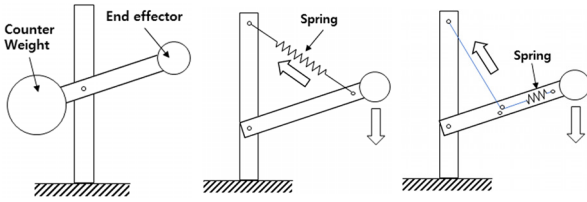


그림 1. 중력 보상 기구.

Fig. 1. Gravity compensation mechanism.

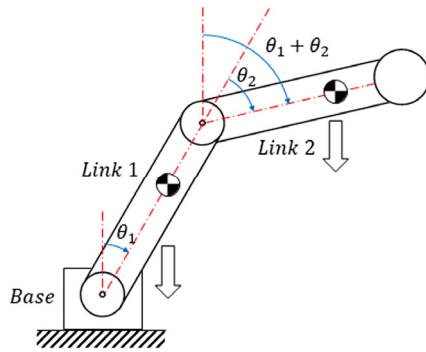


그림 2. 2-Link 매니퓰레이터 개략도.

Fig. 2. 2-Link manipulator schematic.

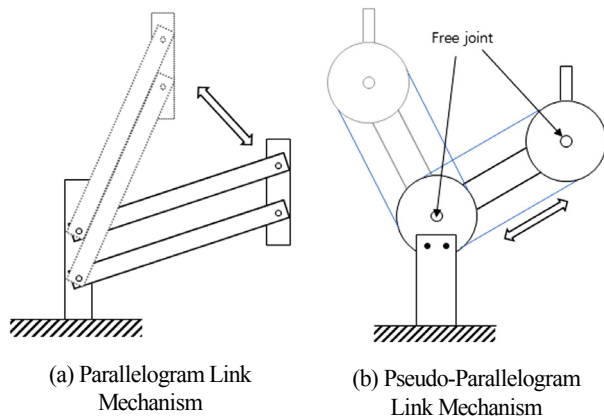


그림 3. 평행사변형 기구.

Fig. 3. Parallelogram Link Mechanisms.

의사 평행 사변형 기구는 평행사변형 기구에 비해 링크 내부에 삽입이 가능하여 공간 활용에 유리한 장점이 있다.

이러한 평행사변형 기구를 이용한 다축 직렬 기구의 중력 보상 장치는 이전 링크의 각도에 관계없이 모든 링크의 중력 보상을 기구적으로 적절히 수행할 수 있는 장점이 있다. 하지만 중력 보상 기구의 무게가 추가되어 가속, 감속을 위한 동적 토크가 상승하고, 링크 내부에 모든 구조물을 설치할 공간이 필요하기 때문에 소형으로 제작하기 힘든 단점이 있다[9-11].

본 논문에서는 이러한 단점을 보완하고자 텐던 기반 직렬 기구의 링크 외부에서 중력 보상을 수행할 수 있는 중력 보상기구를 설계하였다. 모든 링크의 중력 보상을 수행하기 위하여 평행사변형 기구와 같이 기준면을 다음 링크로 전달할 수 있는 기준면 제어 기구를 제안하였다. 또한 각 링크의 중력 보상을 위한 중력 보상 기구를 설계하고

수식적으로 검증하였으며, 전체 시스템 검증을 위한 3-Link 테스트 장치를 제작하여 제안한 중력 보상 기구의 성능을 실험적으로 검증하였다.

II. 텐던 기반 직렬 기구의 외부 중력 보상 설계

중력 보상 기구는 각 링크에 독립적으로 설치되는 경우가 일반적이지만 중력 보상 기구에 의해 기구부의 부피와 무게가 늘어나게 된다. 특히 다축 직렬 기구의 경우 평행사변형 기구가 필수적으로 포함되어야 하지만 소형으로 제작하는 것에는 한계가 있다[12]. 본 논문에서는 텐던 기반의 직렬 기구의 구조를 최대한 단순화하며 중력 보상이 가능하게 하기 위해 링크 외부에서 중력 보상이 가능한 기구를 설계하였다.

1. 제안된 기준면 제어 기구

링크의 외부에서 기준면을 제어하는 방법에 대하여 본 논문의 선행 연구가 수행된 바 있다[13,14]. 앞서 서술한 바와 같이 다자유도 기구는 각 관절의 움직임에 따라 변하는 중력 성분을 고려하기 위한 기준면 제어가 반영되어야 완전한 중력 보상이 가능하다.

그림 4와 같은 텐던 기반의 2축 직렬 기구에서 왼쪽의 텐던 구동 모듈의 선형 변위는 오른쪽 직렬 기구의 회전 변위로 변환된다. 한편, Link 2의 각도는 Link 2의 영점을 기준으로 β 이지만, 중력 방향(Link 0의 영점)을 기준으로 하면 Link 1의 각도 α 를 더한 $\alpha + \beta$ 가 된다. 따라서 Link 2의 관절에 가해지는 중력 토크 τ_2 는 $\alpha + \beta$ 에 비례하게 된다. 중력 보상 기구를 텐던 구동 모듈에 설치하고, 중력 보상 기구와 텐던 구동 모듈의 변위차 만큼 중력 보상을 수행한다고 가정하면, Link 2에 연결된 텐던 구동 모듈에서 Link 1의 변위인 x_α 만큼 더한 $x_\alpha + x_\beta$ 만큼의 변위에 대해 중력 보상을 수행해야 한다.

제안된 기준면 제어 기구는 그림 4와 같은 텐던 구동 방식 직렬 매니퓰레이터에서 그림 5와 같이 중력 보상의 기준이 되는 0° 의 위치를 다음 링크의 중력 보상 기구(gravity compensation mechanism block)로 전달하도록 설계되어 있다.

따라서 각 관절에 대응되는 중력 보상 기구가 각 링크의 기준면과 관절 사이의 변위에 따라 적절한 보상력을 생성하여 다축 직렬 기구에서 이전 링크의 각도와 관계없이 모든 링크에서 적절한 보상력이 생성된다.

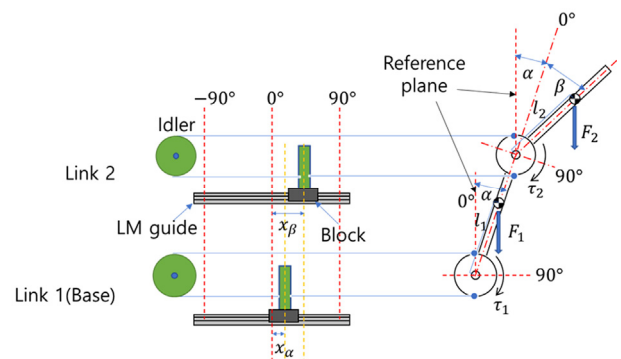


그림 4. 2-Link 기구 개략도.

Fig. 4. 2-Link Structure Schematic.

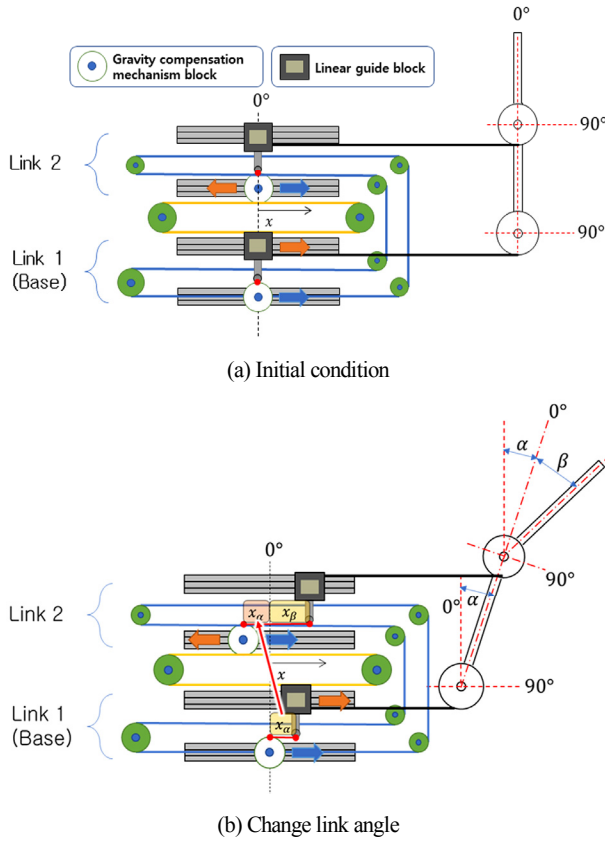


그림 5. 기준면 제어 기구 작동 원리.

Fig. 5. Principle of operation of reference plane control mechanism.

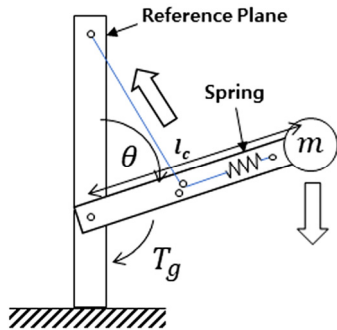


그림 6. 스프링을 이용한 중력 보상 방법.

Fig. 6. Gravity compensation method using spring.

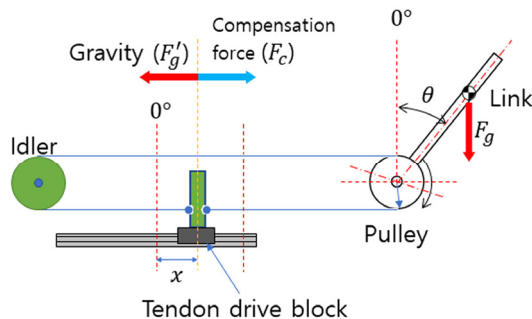


그림 7. 리니어 방식 텐던 구동 모듈의 중력 및 보상력.

Fig. 7. Gravity and Compensation Force in Linear Tendon Drive Blocks.

2. 제안된 중력 보상 기구

2.1 단일 링크 중력 보상

각 링크에서 보상력을 생성하기 위하여 그림 6과 같이 와이어와 스프링을 사용한 중력 보상 기구를 적용하였다. 이러한 중력 보상 방식은 일반적인 압축 스프링을 사용할 수 있고, 스프링의 위치를 자유롭게 선정할 수 있는 장점이 있다. 스프링의 탄성력에 의해 각도 θ 에 따라 중력에 의한 토크 T_g 와 같은 보상력이 생성되는 구조이다. 이러한 구조를 변형하여 그림 7과 같이 리니어 방식 텐던 구동 모듈에서 링크의 각도 θ 에 비례하는 변위 x 에 대하여 보상력을 생성할 수 있도록 중력 보상 기구를 설계하였다.

그림 7에서 매니플레이터의 기구부에서 자중에 의해 발생하는 토크는 식 (1)과 같이 링크의 무게중심까지의 거리 l_c , 링크의 자중 F , 각도 θ 의 관계식으로 나타낼 수 있다.

$$\tau = l_c \cdot F \cdot \sin(\theta) \quad (\theta = \frac{x}{r}) \quad (1)$$

토크 τ 에 의해 텐던 구동 기구와 연결된 와이어에 가해지는 장력은 링크에 연결된 폴리의 반경 r 과 관계되며 식 (2)와 같다.

$$F_g = \frac{\tau}{r} = \frac{l_c}{r} F \cdot \sin(\theta) \quad (2)$$

텐던 구동 기구에서 중력에 의한 자중을 상쇄하기 위해서는 F_g 와 같은 크기의 힘을 반대 방향으로 생성시키면 되므로 중력 보상 기구가 링크의 각도 θ 에 의해 발생하는 보상력 F_g 와 같다면 단일 링크에서 중력 보상이 가능하게 된다.

그림 8은 단일 링크에서 중력 보상을 수행하기 위해 설계한 중력 보상 기구의 개략도이다. 마스터 장치 기구부에 설치된 폴리는 텐던 구동 모듈에 연결되어 있고, 텐던 구동 모듈과 중력 보상 기구에 설치된 폴리는 와이어로 연결되어 있다. 마스터 장치의 링크의 각도가 변하여 0도 기준에서 x 의 변위가 발생하면 중력 보상 기구의 폴리 각도 α 가 변하고, α 와 폴리의 반경 d 의 관계에 의해 스프링의 압축 변위인 Δs 가 변하게 된다. $\Delta s = s' - (s - a)$ 로 나타낼 수 있고, 여기서 s 는 중력 보상 폴리의 중심에서 작용점까지의 거리, a 는 중력 보상 폴리의 중심에서 스프링에 연결된 와이어 고정지점까지의 거리, s' 은 작용점에서 고정지점까지의 거리이다. 따라서 스프링의 탄성력에 의해 중력 보상 폴리에 걸리는 장력 F_s 는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_s = k(s_0 + \Delta s) = ks_0 + s' - (s - a) \quad (3)$$

k : 스프링 상수

s_0 : 스프링 초기 압축 변위

제 2 코사인 법칙에 의해 $s' = \sqrt{s^2 + a^2 - 2sac\cos(\alpha)}$ 이므로, 중력 스프링의 탄성력에 의한 중력 보상 폴리에 걸리는 토크 τ_s 는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_s = F_s \cdot s \cdot \sin(\beta) \quad (4)$$

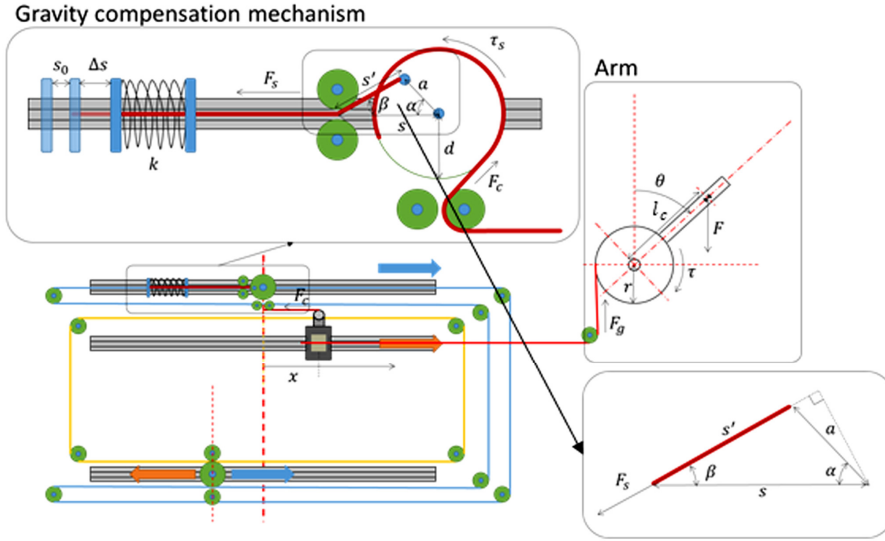


그림 8. 단축 중력 보상 기구 개념 설계.

Fig. 8. Single axis gravity compensation mechanism concept design.

사인 법칙에 의해 $\sin(\beta) = \frac{a}{s} \sin(\alpha)$ 의 관계가 성립되고, $s_0 = s - a$ 가 되도록 기구부에 제한조건을 두면 중력 보상 폴리에 걸리는 τ_s 는 식 (5)와 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned}\tau_s &= F_s s \frac{a}{s} \sin(\alpha) \\ &= k s_0 + s' - s(s-a) s \frac{a}{s} \sin(\alpha) \\ &\quad (i f s_0 = s - a) \\ &= k \cdot s \cdot a \cdot \sin(\alpha)\end{aligned}\quad (5)$$

따라서 중력 보상 기구가 텐던 구동 모듈에 작용하는 힘 F_c 는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_c = \frac{\tau_s}{d} = k \cdot \frac{a}{d} \cdot s \cdot \sin(\alpha) \quad (6)$$

여기서 $F_g = F_c$ 를 만족할 경우 중력 보상이 가능하다.

$$\frac{l_c}{r} \cdot F \cdot \sin(\theta) = k \cdot \frac{a}{d} \cdot s \cdot \sin(\alpha) \quad (7)$$

$\alpha = x/d = r\theta/d$ 이고, $r = d$ 로 제한조건을 주면 $\alpha = \theta$ 의 관계가 성립되고 중력 보상력 F_c 는 식 (8)과 같이 정리할 수 있다.

$$F_c = k \frac{a}{d} s \cdot \sin(\theta) \quad (8)$$

따라서 식 (8)의 양변을 정리하면 $l_c \cdot F = k \cdot a \cdot s$ 를 만족할 경우 $F_c = F_g$ 가 되어 중력 보상이 가능하게 된다.

2.2.2 다축 링크 중력 보상

링크가 2개일 경우 각각의 관절에 가해지는 자중에 의한 토크는 식 (9-10)과 같다.

$$T_{g2}(\theta_1, \theta_2) = F_2 \cdot l_{c2} \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (9)$$

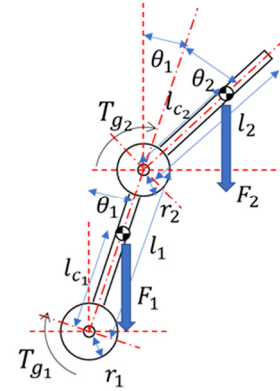


그림 9. 2-Link 매니퓰레이터 개략도.

Fig. 9. 2-Link Manipulator Schematic.

$$T_{g1}(\theta_1, \theta_2) = F_1 \cdot l_{c1} \cdot \sin(\theta_1) + F_2 \cdot l_1 \cdot \sin(\theta_1) + T_{g2} \quad (10)$$

중력 보상력과 중력에 의한 텐던 구동 모듈에 가해지는 장력은 식 (11-12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{g2} = \frac{l_{c2}}{r_2} F_2 \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (11)$$

$$F_{c2} = k_2 \cdot \frac{a_2}{d_2} \cdot s_2 \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (\text{if } r_2 = d_2) \quad (12)$$

따라서 2번 링크는 $l_{c2} F_2 = k_2 a_2 s_2$ 를 만족한다면 중력 보상이 가능하다. 2번 링크에서 중력 보상이 적절히 이루어졌다면 1번 링크에 가해지는 2번 링크의 토크에 의한 항이 상쇄되게 된다. 따라서 1번 링크에 가해지는 토크와 장력은 식 (13-15)와 같이 표현할 수 있다.

$$T_{g1}(\theta_1, \theta_2) = F_1 \cdot l_{c1} \cdot \sin(\theta_1) + F_2 \cdot l_1 \cdot \sin(\theta_1) + T \quad (13)$$

$$F_{g1} = \frac{l_{c1}}{r_1} F_1 \cdot \sin(\theta_1) + \frac{l_1}{r_1} F_2 \cdot \sin(\theta_1) \quad (14)$$

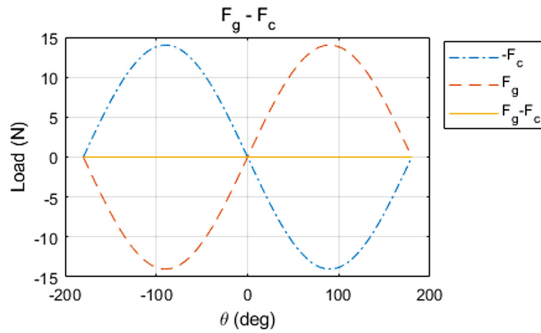


그림 10. 중력 보상 기구 시뮬레이션 결과.

Fig. 10. Simulation result of gravity compensation mechanism.

$$F_{cl} = k_1 \cdot \frac{a_1}{d_1} \cdot s_1 \cdot \sin(\theta_1) \quad (\text{if } r_1 = d_1) \quad (15)$$

마찬가지로 1번 링크에서는 $F_1 l_{c1} + F_2 l_1 = k_1 a_1 s_1$ 를 만족하면 중력 보상이 가능하다. 링크가 3개 이상인 경우에도 같은 방법으로 아래의 조건을 도출할 수 있다.

$$\text{링크 1(Base).} \quad (F_1 l_{c1} + (F_2 + F_3) l_1) = k_1 a_1 s_1$$

$$\text{링크 2.} \quad (F_2 l_{c2} + F_3 l_2) = k_2 a_2 s_2$$

$$\text{링크 3} \quad F_3 l_{c3} = k_3 a_3 s_3$$

위의 정역학적 기구 해석 결과를 검증하기 위해 각 각도에 따른 보상력 F_c 와 중력에 의해 텐던에 가해지는 장력 F_g 를 시뮬레이션하였고, 그림 10과 같이 상쇄되는 것을 확인하였다.

III. 실험 및 고찰

1. 3-Link 테스트 장치 제작

기준면 제어 기구와 중력 보상장치의 개념설계를 바탕으로 직렬 3-Link 중력 보상 테스트 장치를 제작하였다. 성능 검증을 위하여 리니어 액츄에이터, 스프링 탄성력을 측정할 수 있도록 각각 로드셀을 설치하였다.

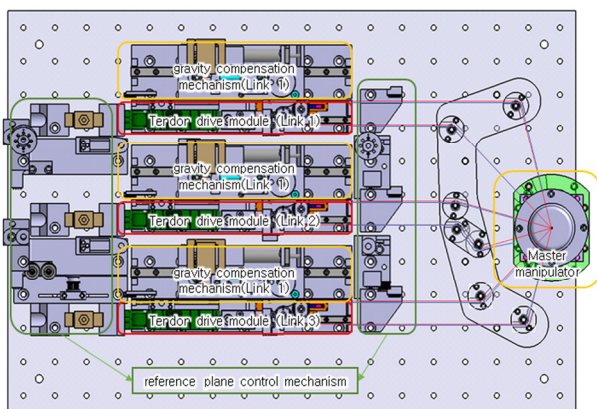


그림 11. 중력 보상 기구 및 기준면 제어 기구 배치.

Fig. 11. Gravity compensation mechanism and reference plane control mechanism arrangement.

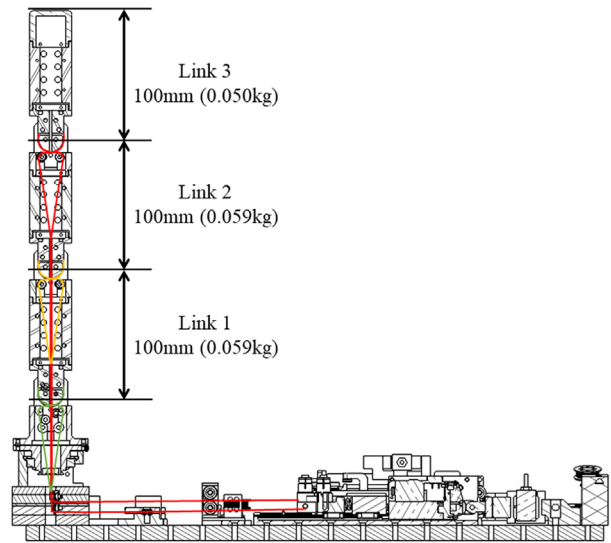


그림 12. 3-Link 중력 보상 테스트 장치 구성.

Fig. 12. Configure the 3-link gravity compensation test device.

2. 중력 보상 실험

2.1 무부하 실험

텐던 구동 모듈과 로드셀을 이용하여 테스트하기에 앞서 자유 상태에서 중력 보상 기구의 테스트를 수행하였다. 테스트 조건은 아래와 같다.

Case 1 : 중력 보상 기구 미사용

Case 2 : 중력 보상 기구 사용, 기준면 제어 기구 미사용

Case 3 : 중력 보상 수행

Case 1의 경우 중력 보상 기구를 적용하지 않은 경우로, 링크에 외력이 가해지지 않는 경우 그림 13의 4와 같이 중력에 의해 처지는 것을 확인할 수 있다.

Case 2의 경우 각 축의 0도를 기준으로 중력 보상 기구만 적용된 경우이며, 그림 14와 같이 모든 이전 관절들이 0°를 유지할 경우 마지막 링크인 Link 3에서 중력 보상이 되는 것을 확인할 수 있으나, 그림 15와 같이 이전 관절이

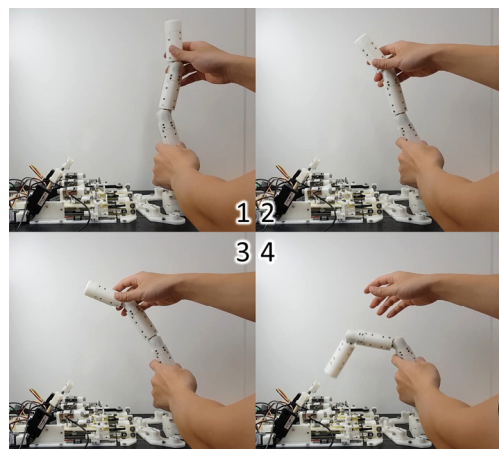


그림 13. 중력 보상기구 미적용 (Case 1).

Fig. 13. No gravity compensation mechanism.

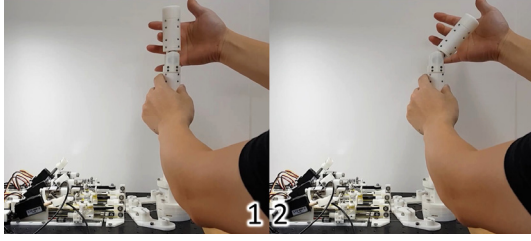


그림 14. 기준면 제어 기구 미적용(Link 3, Case 2).

Fig. 14. Reference plane control mechanism not used (link 3).

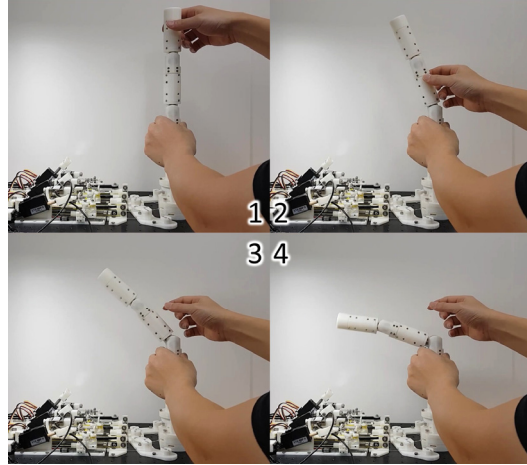


그림 15. 기준면 제어 기구 적용 (Case 2).

Fig. 15. No reference plane control mechanism used.

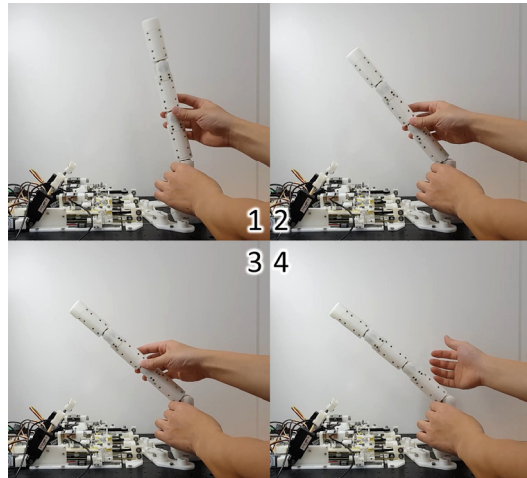


그림 16. 중력 보상 수행 (Case 3).

Fig. 16. Perform gravity compensation.

0°를 벗어날 경우 중력 보상이 수행되지 않는 것을 확인할 수 있다.

Case 3의 경우 기준면 제어 기구와 중력 보상기구를 모두 적용한 경우로, 이전 링크의 각도에 관계없이 모든 링크에서 중력 보상이 수행되는 것을 확인할 수 있다.

2.2 각도 추종 테스트

텐던 구동 모듈에 가해지는 힘을 측정하기 위하여 그림 17과 같이 리니어 액츄에이터 끝단에 로드셀을 설치하였고,

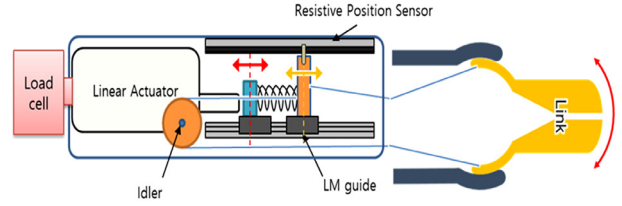


그림 17. 실험 장치 구성.

Fig. 17. Experimental Device Configuration.

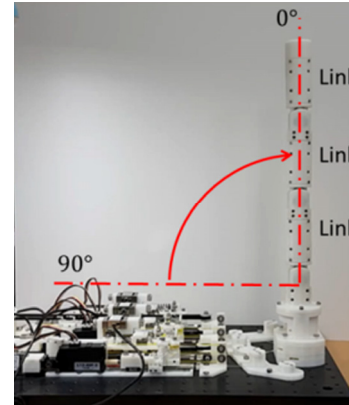


그림 18. 실험 방법.

Fig. 18. Experimental method.

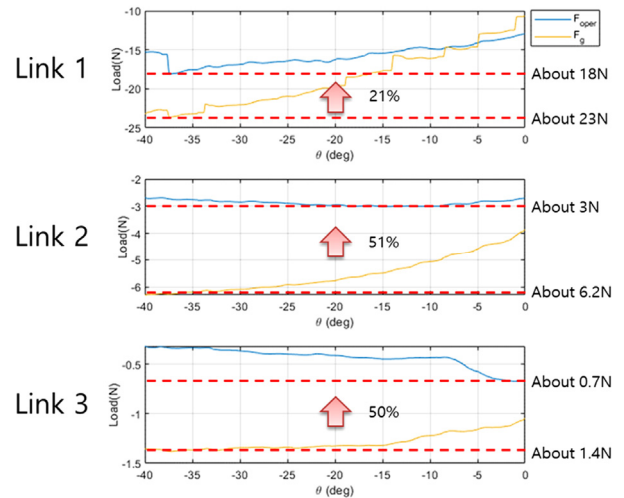


그림 19. 실험 결과.

Fig. 19. Experiment result.

그림 18과 같이 링크 1을 90°에서 0°로 가동하여 실험을 진행하였다.

실험은 중력 보상 장치를 적용한 상태와 중력 보상 장치를 적용하지 않은 상태로 각각 따로 진행하였으며, 전체 구동 각도 범위에 대한 실험 결과는 그림 19와 같다. F_{oper} 은 중력 보상을 수행한 상태에서 액츄에이터에 가해지는 힘이고, F_g 는 중력 보상을 수행하지 않은 상태에서 액츄에이터에 가해지는 힘이다. 전체 구동 각도 범위에 걸쳐서 링크 1에서 최대 21%, 링크 2에서 최대 51%, 링크 3에서 최대 50%의 가동 토크 감소 효과를 확인하였다.

IV. 결론

본 논문에서는 텐던 기반 직렬 기구에 적용 가능한 외부 중력 보상 기구를 설계하고, 3-Link 테스트 장치를 제작하여 성능을 검증하였다.

제안한 외부 중력 보상 기구는 평행사변형 기구와 같이 중력 방향의 기준면을 각 링크에 전달할 수 있는 기준면 제어 기구와 각 링크의 각도에서 기준면 제어 기구와의 각도차이에 비례하여 보상력을 생성할 수 있는 텐던 기반 와이어-스프링 방식의 중력 보상 기구를 적용하여 링크 외부에서 모든 링크의 중력 보상을 구현하였다. 제안한 외부 중력 보상 기구를 적용한 다축 직렬 기구는 텐던 구동 방식으로 외부에서 텐던을 통해 동력 전달과 중력 보상을 수행하기 때문에 링크의 내부 구조는 간단하여 작고 가볍게 만들 수 있는 장점이 있으며, 중력 보상을 위한 미세한 조정을 편리하게 외부에서 손쉽게 수행할 수 있다.

제작한 3-Link 테스트 장치에서 중력 보상 기구가 없는 경우 대비 20~50% 수준의 토크 감소 효과를 확인할 수 있었으며, 이는 의사 평행사변형 기구를 링크에 삽입하여 중력 보상을 수행한 기존 연구 결과인 57~87% 대비 낮은 수치이나 제작한 테스트 장치의 무게가 0.17 kg, 길이 300 mm로 링크의 무게와 부피를 큰 폭으로 줄이며 중력 보상 효과를 얻을 수 있었다.

REFERENCES

- [1] V. Arakelian, "Gravity compensation in robotics," *Advanced Robotics*, vol. 30, no. 2, pp. 79-96, 2016.
- [2] H. C. Park, K. H. Ahn, J. K. Min, and J. B. Song, "5 DOF Home Robot Arm based on Counterbalance Mechanism," *Journal of Korea Robotics Society* (in Korean), vol. 15, no. 1, pp. 48-54, Mar. 2020.
- [3] P. Y. Lin, W. B. Shieh, and D. Z. Chen, "Design of a gravity-balanced general spatial serial-type manipulator," *Journal of Mechanisms and Robotics*, vol. 2, no. 3, pp. 031003, 2010.
- [4] S. Hirose, T. Ishii, and A. Haishi, "Float arm V: hyper-redundant manipulator with wire-driven weight-compensation mechanism," *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 1, pp. 368-373, 2003.
- [5] B. Kim and A. D. Deshpande, "Design of nonlinear rotational stiffness using a noncircular pulley-spring mechanism," *Journal of Mechanisms and Robotics*, vol. 6, no. 4, pp. 041009, 2014.
- [6] D. Lee and T. Seo, "Lightweight multi-DOF manipulator with wire-driven gravity compensation mechanism," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 22, no. 3, pp. 1308-1314, 2017.
- [7] H. S. Kim and J. B. Song, "Multi-DOF counterbalance mechanism for a service robot arm," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 19, no. 6, pp. 1756-1763, 2014.
- [8] H. S. Kim, J. K. Min, and J. B. Song, "Multiple-degree-of-freedom counterbalance robot arm based on slid-

er-crank mechanism and bevel gear units," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 32, no. 1, pp. 230-235, 2016.

- [9] R. Barents, M. Schenk, W. D. van Dorsser, B. M. Wisse, and J. L. Herder, "Spring-to-spring balancing as energy-free adjustment method in gravity equilibrators," *Journal of Mechanical Design*, vol. 133, no. 6, pp. 061010, 2011.
- [10] S. Lee, "Development of a Cable Driven Haptic Cube," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems* (in Korean), vol. 25, no. 7, pp. 641-646, Jul. 2019.
- [11] H. Lee, C. S. and J. Son, "Hand-controller Mechanism and its Optimal Design Method for Manually Controlled Endoscopic Surgical Instrument," *Journal of Korea Robotics Society* (in Korean), vol. 14, no. 3, pp. 203-215, Sep. 2019.
- [12] G. Lee, and J. Kim, "Tendon-based Haptic Master Device Mechanism Design for Underwater Manipulation," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems* (in Korean), vol. 24, no. 5, pp. 346-353, May. 2018.
- [13] G. H. Lee and J. Kim, "Conceptual design of gravity compensation mechanism for tendon based haptic master device," *The 14th Korea Robotics Society Annual Conference (KRoC 2019)* (in Korean), pp. 689-690, 2019.
- [14] G. H. Lee and J. Kim, "Design of external gravity compensator for tendon based serial manipulators," *2019 16th International Conference on Ubiquitous Robots (UR)*, pp. 388-389, 2019.

이 기 현



2012년 서울과학기술대 기계공학과 학사. 2014년 동 대학원 석사. 2019년 동 대학 박사. 2019년~현재 서울과학기술대학교 박사후연구원. 관심분야는 매니퓰레이터 마스터 장치, 햅틱 장치, 수중 로봇.

김 진 현



1998년 포항공과대학교 기계공학과 학사. 2000년 포항공과대학교 기계공학과 석사. 2005년 포항공과대학교 기계공학과 공학박사. 2005년~2007년 한국생산기술연구원 선임연구원. 2007년~현재 서울과학기술대학교 기계자동차공학과 교수.

관심분야는 Redundant Manipulator, Underwater robots, Hovering robots, Neuro Robotics.