

형상기억합금 Underactuated 로봇 핸드의 설계에 관한 연구

김광호*, 신상호**, 정상화#

A Study on Design of Underactuated Robot Hand driven by Shape Memory Alloy

Gwang-Ho Kim*, Sang-Ho Shin**, Sang-Hwa Jeong#

(Received 5 March 2011; received in revised form 8 August 2011; accepted 6 October 2011)

ABSTRACT

The lightweight and compact actuator with high power is required to perform motion with multiple degrees of freedom. To reduce the size and inertia of a robot manipulator, the mechanical transmission system is used. The shape memory alloy(SMA) is similar to the muscle-tendon-bone network of a human hand. However, there are some drawback and nonlinearity, such as the hysteresis and the stress dependence. In this paper, the design of the underactuated robot hand is studied. The 3-finger dexterous hand is driven by the SMA actuator using segmental mechanism. This digital approach enables to overcome the nonlinearity of SMA wire. The translational displacement of SMA actuator required to bend a phalanx of the underactuated robot hand is estimated and the bending angle of the underactuated robot hand according to input displacement of SMA actuator is predicted by the multi-body dynamic analysis.

Key Words : Shape Memory Alloy(형상기억합금), Multi-body Dynamic Analysis(다물체 동역학 해석), Underactuated Robot Hand(부족구동 로봇 핸드), Differential Mechanism(차동 메커니즘)

1. 서 론

인간의 손과 같은 민첩성과 적응성을 갖는 로봇 핸드를 개발하기 위한 많은 연구가 이루어지고 있다. 인간형 로봇 핸드(anthropomorphic robot hand)는 절단

환자를 위한 인공 보철물이나 지능형 매니퓰레이터(dexterous manipulator)로 사용될 수 있다. 그러나, 다자유도 운동을 수행할 수 있는 가벼운 소형 액츄에이터가 부족하기 때문에 로봇 핸드를 개발하는데 많은 어려움이 있다^[1]. Tsai는 로봇 매니퓰레이터의 크기와 관성을 줄이기 위해 기계적 전달 시스템을 도입하였다^[2]. 텐던 구동 장치(tendon-driven manipulator)는 소형이면서 가벼운 시스템을 설계할 수 있고, 백래쉬가 적다. 단순히 물체를 움켜잡기 위한 목적으로 로봇 핸드를 개발할 경우에는 액츄에이터의 수를 감소시켜 제어

* (재)광주테크노파크 가전로봇센터

** 조선대학교 일반대학원 기계공학과

교신저자 : 조선대학교 기계공학과

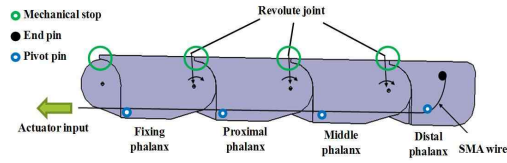
E-mail : shjeong@chosun.ac.kr

를 단순화할 수 있다. 자유도보다 적은 수의 액추에이터를 갖는 메커니즘을 부족구동(underactuation)이라 하고, 이러한 메커니즘에 의해 설계된 로봇 핸드는 자기-적응성(self-adaptability)을 갖는다^[3]. Hirose^[4]는 차동 메커니즘(differential mechanism)을 이용한 소프트 그리퍼(soft gripper)를 소개하였다. 소프트 그리퍼는 랜덤 형상의 물체를 균일한 힘으로 질 수 있고(force isotropy), 불안정한 힘 분배로 물체가 손상되는 것을 방지할 수 있다^[5].

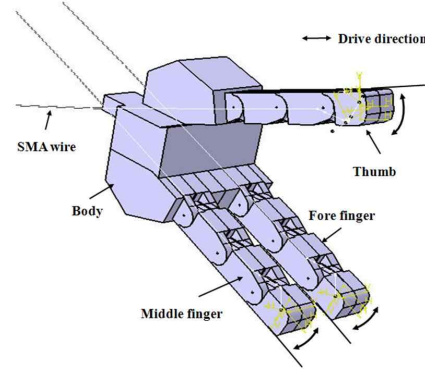
본 논문에서는 형상기억합금 액추에이터에 의해 구동되는 로봇 손을 개발하였다. 개발된 로봇 손은 3개의 손가락으로 구성되어 있고, 각각의 손가락은 한 개의 액추에이터로 3자유도를 구현하는 부족구동 메커니즘에 의해 설계하였다. 로봇 손을 구동하기 위한 액추에이터는 형상기억합금 와이어를 몇 개의 구간으로 나누고, 각각의 구간을 독립적으로 제어하였다. 다물체 동역학 해석을 통해 로봇 손의 손가락 마디를 구부리기 위해 필요한 형상기억합금 액추에이터의 직선 변위를 시뮬레이션하였고, 형상기억합금 액추에이터의 입력 변위에 따른 로봇 손의 움직임을 예측하였다.

2. SMA underactuated 로봇 핸드 설계

형상기억합금 액추에이터를 이용한 로봇 손을 Fig. 1에 나타내었다. 손가락은 고정마디(fixing phalanx), 첫마디(proximal phalanx), 중간마디(middle phalanx), 끝마디(distal phalanx)로 구성되어 있다. 각 마디 사이에는 1자유도를 갖는 회전 조인트로 연결되어 있고, 고정마디는 몸체(body)에 고정된다. 각 마디는 60° 회전이 가능하도록 설계하였고, 액추에이터의 입력이 없는 경우에는 스프링과 기계적인 스톱퍼에 의해 Fig. 1(a)와 같은 상태로 복원된다. 고정 핀(end pin)에 와이어를 고정하였고 풀리 대신 피벗 핀(pivot pin)을 이용하였다. 따라서, 개발된 로봇 손은 한 개의 SMA 액추에이터를 사용해 3개의 마디를 구부릴 수 있도록 설계되었다. 이러한 로봇 손은 자유도의 수보다 제어하고자 하는 텐던의 수가 적어 불충분 구동 장치(Insufficient actuated manipulator)이다.



(a) Initial position of finger



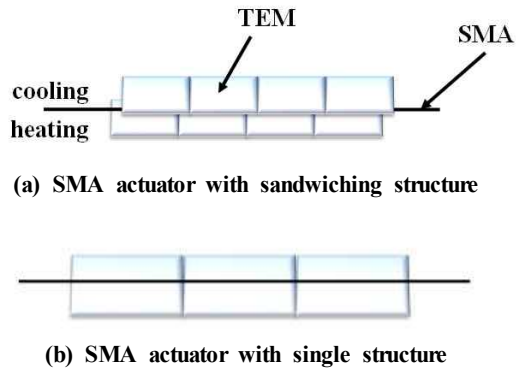
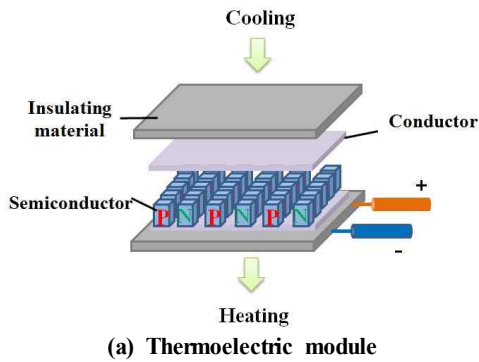
(b) Assembly of mechanical hand

Fig. 1 Design of underactuated robot hand

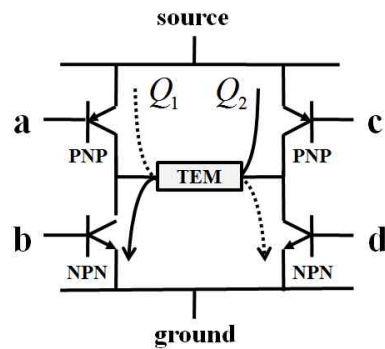
3. 구간분할 SMA 액추에이터

3.1 구간분할 메커니즘

형상기억합금 와이어는 Ni-Ti 합금으로 초탄성 효과를 이용하여 구동되며 높은 응력을 발생한다. 그러나 복잡한 형상의 복원이 불가능하고, 히스테리시스와 스트레스 의존성을 갖는다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 열전소자(TEM)를 이용하여 형상기억합금 와이어를 몇 개의 구간으로 나누고, 각 구간을 독립된 신호로 제어하는 구간분할 메커니즘을 이용하였다^[6,7]. 열전소자는 한쪽 면은 가열되고, 반대쪽 면은 냉각되는 성질을 갖는 열과 전기의 교환 시스템이다. 구간분할 메커니즘은 구간별 변위가 합산되어 최종 변위를 발생한다. Fig. 2와 같이 열전소자를 이용해 형상기억합금을 구간분할 하였다. 이러한 디지털 기법을 적용함으로써 제어를 단순화하고, 히스테리시스에 의해 발생하는 비선형성을 개선할 수 있다.



(b) SMA wire segmented by TEM
Fig. 2 Segmented SMA actuator



(c) H-bridge circuit

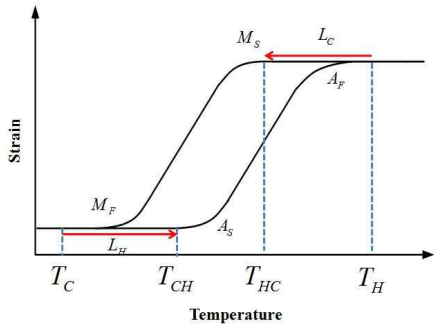
Fig. 3 SMA digital actuator using H-bridge circuit

3.2 히스테리시스 제어

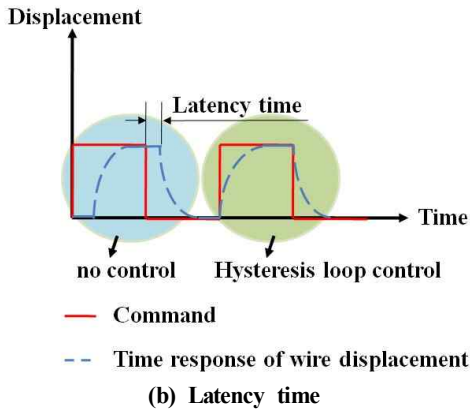
Fig. 3(a)에 샌드위치 구조의 형상기억합금 액추에이터를 나타내었다. 샌드위치 구조의 형상기억합금 액추에이터는 가열부와 냉각부가 따로 있어 액추에이터의 크기가 크고 제어 부담이 크다. 또한, 전원을 차단하였을 때 열평형에 의해 열전소자의 온도가 상승 또는 하강하여 원하지 않는 변위를 발생한다. 열전소자는 순방향 전원을 인가하면 한쪽 면이 가열되지만, 역방향 전원을 인가하면 가열되었던 면이 냉각되는 특징을 갖는다. 이러한 성질을 이용하면 샌드위치 구조의 액추에이터를 Fig. 3(b)와 같이 단일구조로 구성할 수 있다. 열전소자에 인가되는 전원의 극성을 바꾸기 위하여 Fig. 3(c)와 같은 H-bridge 회로를 이용하였다. a, b에 high 신호를 입력하고, c, d에 low 신호를 입력하면 a, d의 트랜지스터는 “ON” 상태가 되고, b, c의 트랜지스터는 “OFF” 상태가 되어 Q_1 방향으로 전원이 공급된다. 반대로 a, b에 low 신호를 입력하고, c, d에 high 신호를 입력하면 Q_2 방향을 따라 전원이 공급된다.

형상기억합금은 Fig. 4(a)와 같이 히스테리시스와 스트레스 의존성을 갖는다. 따라서 변위 제어가 어렵고 지연시간(latency time)이 발생한다. 열전소자의 온도를 상승시키면 형상기억합금 와이어는 온도가 T_{CH} 에 도달할 때부터 오스테나이트 상변화가 시작(A_S)되어 변위가 발생한다. 이때 T_C 에서 T_{CH} 까지의 시간을 가열시 지연시간(L_H)라고 한다. 이러한 지연시간에 의해 신호 입력 시간과 변위 발생 시간 사이에 차이가 발생하게 된다. 열전소자의 온도가 상승하여 형상기억합금 와이어의 상변화가 완료될 때를 A_F 라 한다. 반대로 열전소자의 온도를 낮추면 T_H 와 T_{HC} 사이의 차이로 인해 냉각시 지연시간(L_C)이 발생한다. 히스테리시스 루프 제어(hysteresis loop control)는 열전소자가 가열되도록 전원을 인가하여 온도가 T_H 에 도달하면 자동으로 전원이 차단하여 열전소자 표면의 온도를 T_{HC} 로 낮추고, 이 온도를 유지한다. 냉각을 위

한 신호가 입력되면, 냉각시 지연시간(L_c) 없이 곧바로 액추에이터의 변위를 제어할 수 있다^[8,9]. Fig. 4(b)와 같이 히스테리시스 루프 제어를 통해 지연시간을 줄일 수 있다.



(a) SMA Hysteresis curve



(b) Latency time

Fig. 4 Hysteresis loop control of SMA actuator

4. 다물체 동역학 해석

4.1 해석 조건

손가락을 구동하기 위해 필요한 액추에이터의 사양을 결정하고, 로봇 핸드를 설계하기 위해 다물체 동역학 해석 툴인 ADAMS를 이용하였다. 스프링/댐퍼 요소를 이용하여 텐던(tendon or spring)을 구현하였다. 스프링-댐퍼 요소의 설정 파라미터를 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Spring-damper connector in ADAMS

Parameter	Feature
Connector	Translational spring-damper
Coil count	1time
Diameter of spring	1mm

로봇 핸드의 움직임에 따른 텐던의 변화를 예측하기 위해 디자인 변수(design variable, DV)와 상태 변수(state variable, SV)를 이용하였다. 디자인 변수는 설계시 설정한 텐던의 총 길이를 나타내고, SV(n)은 조인트 사이의 n번째 텐던의 길이를 나타낸다. VARVAL(variable) 함수는 변수의 현재 값을 읽어 들인다. 식 (1)에 디자인 변수와 상태변수의 관계를 나타내었다. 로봇 핸드의 운동에 따라 n번째 텐던의 길이는 변화하지만, 텐던 길이의 총합, 즉 디자인 변수는 변화하지 않는다.

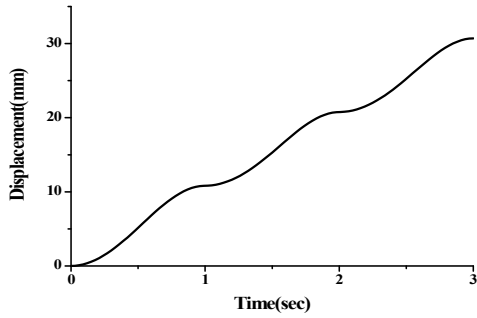
$$DV - \sum_{n=1}^3 VARVAL(SV(n)) = 0 \quad (1)$$

관절은 1자유도를 갖는 회전 조인트를 사용하였고, 60° 회전한다. 접촉조건은 충격력(impact force)을 사용하여 마디들 사이에 간섭(penetration)이 발생하지 않도록 하였다. 형상기억합금 액추에이터 입력 변위는 직선 조인트를 사용하였다.

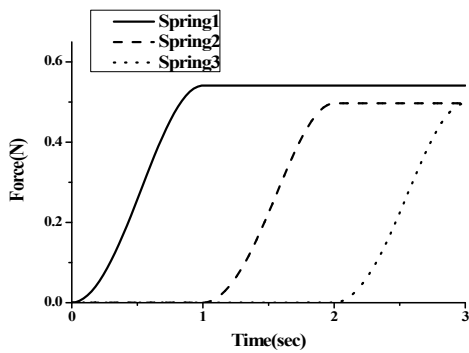
4.2 로봇 핸드 시뮬레이션

각 마디가 완전히 구부러지기 위해 필요한 액추에이터의 직선 변위를 예측하고, 이 값을 기준으로 형상기억합금 액추에이터의 길이와 열전소자의 개수를 선정하였다. 시뮬레이션을 위한 입력 조건으로 끝마디, 중간마디, 첫마디를 순서대로 각각 1초 동안 60° 회전시켰다. Fig. 5(a)에서와 같이 한 개의 손가락을 구부리기 위해서 필요한 액추에이터의 변위는 30.7mm로 예측되었다. 30×30mm 열전소자 한 개에서 발생하는 변위는 1.4mm이다^[10,11]. 따라서 개발한 로봇 핸드의 한 개의 손가락을 완전히 구부리기 위해서는 최소 22개의 열전소자가 필요하고, 각각의 열전소자는 독립된 신호를 통해 제어된다. 끝마디와 중간마디를 연결하는 텐던은 스프링 1, 중간마디와 첫마디를 연결하는 텐던은 스프링 2, 첫마디와 고정 마디를

연결하는 텐던은 스프링 3으로 설정하였다. 액츄에이터의 직선 변위 입력에 따른 해석 결과를 Fig. 5(b)에 나타내었다. 스프링 1에 작용하는 힘은 0.54N이고, 스프링 2와 스프링 3은 0.5N의 힘이 작용했다. 각 마디에 작용하는 힘이 대체로 균일함을 알 수 있다. 또한, 힘을 예측함으로써 형상기억합금 와이어의 선경을 결정하였다.



(a) Translational displacement of SMA actuator

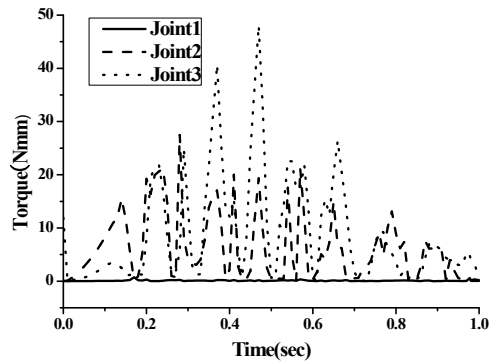


(b) Force acting on each tendons

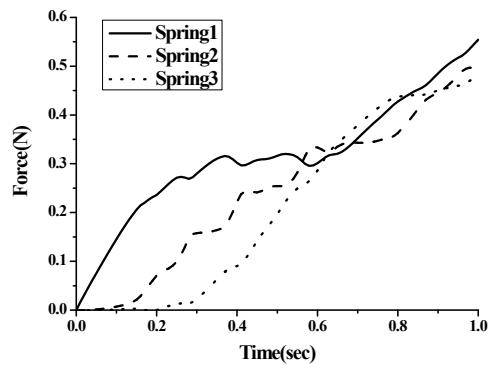
Fig. 5 Specifications of SMA actuator required for tending finger

형상기억합금 액츄에이터의 직선 변위 30.7mm를 입력하고, 각 조인트에 작용하는 토크를 예측하였다. 로봇 핸드의 움직임에 대한 손가락의 모멘트 분포는 빔에 작용하는 휨 모멘트와 같다. 따라서, 로봇 핸드의 말단으로 부터 각 조인트에 작용하는 토크는 $n(n+1)/2$ 만큼 증가한다^[12-15]. 시뮬레이션 결과, Fig. 6(a)와 같이 끝마디의 토크는 0이고, 첫마디의 토크가

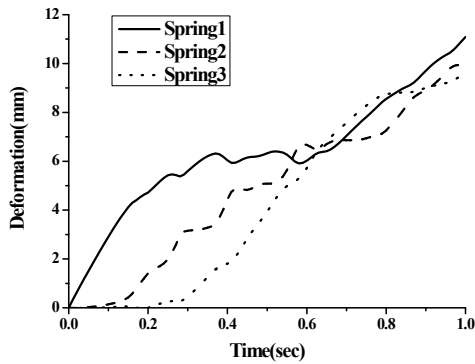
가장 크게 예측되었다. 바이어스 힘(bias force)에 의해 토크의 변동(fluctuation)이 발생한다. 대부분의 메커니즘은 주기적 운동을 하기 때문에, 바이어스 힘은 형상기억합금에 의해 작용된 힘의 반대방향으로 작용하여 기계적 장치를 복원시키기 위해 사용된다. 스프링에 작용하는 힘은 Fig. 6(b)와 같이 각 마디에 약 0.5N의 균일한 힘이 분포함을 알 수 있다. Fig. 6(c)에 시간에 따른 스프링의 변형을 나타내었다. 손가락은 끝마디, 중간마디, 첫마디 순으로 구부러졌고, 각각 약 10mm의 변형을 보였다. Fig. 7에 개발된 로봇 핸드를 나타내었다. ADAMS 시뮬레이션을 통해 중이 겹을 쥐기 위해 필요한 각 손가락의 입력값을 예측하였고, 이를 통해 개발한 로봇 핸드가 소프트 모션을 구현함을 확인하였다.



(a) Joint torque



(b) Spring force



(c) Spring deformation

Fig. 6 Dynamic characteristics of underactuated robot hand according to input of SMA actuator estimated by MBD analysis

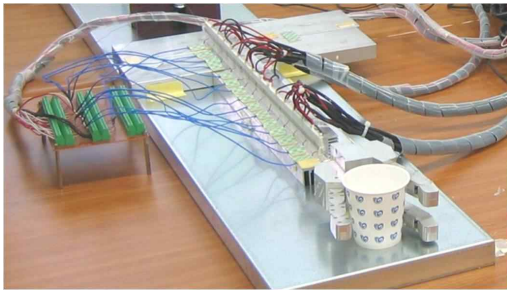


Fig. 7 SMA underactuated robot hand

5. 결론

형상기억합금 와이어의 비선형성을 개선하기 위해 구간분할 메커니즘을 이용한 액츄에이터를 개발하였다. 개발된 형상기억합금 디지털 액츄에이터를 인간형 로봇 핸드에 적용하였다. 다물체 동역학 해석을 통해 로봇 핸드의 액츄에이터 사양을 결정하였다. 로봇 핸드의 운동을 구현하기 위해 요구되는 액츄에이터의 변위를 예측하고, 액츄에이터의 입력에 따른 손가락의 운동을 해석하였다.

1. H-bridge 회로를 통해 샌드위치 구조의 액츄에이터를 단일 구조의 액츄에이터로 구성하였다. 이를 통해 액츄에이터의 크기를 줄이고, 열평형에 의해

발생하는 오차를 줄여 액츄에이터의 성능을 향상하였다.

2. 시뮬레이션 결과, 개발한 로봇 핸드의 그리핑 모션을 구현하기 위해 30.7mm의 액츄에이터 직선 변위가 필요하였고, 형상기억합금 액츄에이터의 사양을 결정하였다.
3. 다물체 동역학 해석을 통해 각 마디에 작용하는 힘과 모멘트를 예측하였고, 개발한 로봇 핸드가 소프트 그리퍼와 동일한 운동 특성을 보임을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2009년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

참고문헌

1. Krut, S., "A Force-Isotropic Underactuated Finger", IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 2325-2330, 2005.
2. Tsai, L. W., "Design of Tendon-Driven Manipulators", Trans. ASME Special 50th Anniversary Design Issue 117, pp. 80-86, 1995.
3. Laliberté, T., Birglen L. and Gosselin, C., "Underactuation in Robotic Grasping Hands", Japanese Journal of Machine Intelligence and Robotic Control, Special Issue on Underactuated Robots, 4(3), pp. 77-87, 2002.
4. Hirose, S., "Connected Differential Mechanism and its Applications", ICAR85, Tokyo, Japan, September 1985.
5. Krut S., "A Force-Isotropic Underactuated Finger", Proceedings of the 2005 IEEE - International Conference on Robotics and Automation, pp. 2325-2330, 2005.
6. Selden, B., Cho, K. J. and Asada, H. H., "Segmented Binary Control of Shape Memory Alloy Actuator Systems Using the Peltier Effect", Proceedings of the 2004 IEEE - International Conference on Robotics and Automation(ICRA), pp. 4931-4936, 2004.
7. Cho, K. J., Selden, B. and Asada, H., "Segmented

- Binary Control of Multi-Axis SMA Array Actuators", in Proc. of SPIE, 5757, pp. 314-322, 2005.
8. Selden, B., Cho, K. J. and Asada, H., "Multi-Segment State Coordination for Reducing Latency Time of Shape Memory Alloy Actuator Systems", Proceeding of the 2005 IEEE - International Conference on Robotics and Automation, pp. 1350-1355, 2005.
 9. Selden, B., Cho, K. J. and Asada, H., "Segmented shape memory alloy actuators using hysteresis loop control", Smart materials and structures, Vol. 15, pp. 642-652, 2006.
 10. Jeong, S. H., Kim, G. H., Kim, J. H., Lee, S. H. and Shin, S. M., "A study on operational characteristics of SMA wire segmented by thermoelectric module", Mater. Sci. Forum, Vol. 580-582, pp. 569-572, 2008.
 11. Jeong, S. H., Kim, G. H., Im, S. B., Jang, W. S. and Lee, K. T., "A study on control of shape memory alloy wire used in actuator of soft gripper", 39th Int. Symp. on Robotics 2008, pp. 672-675, 2008.
 12. Hirose, S. and Umetani, Y., "The development of soft gripper for the versatile robot hand", Mechanism and machine theory, Vol. 13, No. 3, pp. 351-359, 1978.
 13. Hirose, S. and Umetani, Y., "The kinematics and control of a soft gripper for the handling of living or fragile objects", Proceedings of the Fifth World Congress on Theory of Machines and Mechanisms, pp. 1175-1178, 1979.
 14. Tsai L. W. and Lee, J. J., "Kinematic analysis of tendon-driven robotic mechanisms using graph theory", ASME Transactions, Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design, Vol. 111, No. 1, pp. 59-65, 1989.
 15. Chang, S. L., Lee, J. J. and Yen, H. C., "Kinematic and compliance analysis for tendon-driven robotic mechanisms with flexible tendons", Mechanism and Machine Theory 40, pp. 728-739, 2005.