

가변강성 액추에이터의 원리에 대한 비교 실험 연구

Experimental Study on Different Principles of Variable Stiffness Actuators

백규열¹, 김현규¹, 서태원^{1,✉}

Kyu Yeol Baek¹, HyunGyu Kim¹, and TaeWon Seo^{1,✉}

¹ 영남대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Yeungnam University)
✉ Corresponding author: taewon_seo@yu.ac.kr, Tel: +82-53-810-2442

Manuscript received: 2015.1.5. / Revised: 2015.8.12. / Accepted: 2015.8.13.

Nowadays, there are many researches involving structural actuators, which have adjustable stiffness; they are also called variable stiffness actuators (VSA). The VSAs can adjust the characteristics of actuators for various functions and human-machine safety. This paper describes the design and analysis of two types of VSAs. To adjust stiffness, the actuators are controlled by a principle of lever ratio mechanism, by changing a pivot position or a spring position in the structure with springs. To make the principle workable, the designs are simplified by using a ball screw system with a motor. Each structure shows different static properties with variable rates of stiffness. We have also shown the experimental verification of the dynamic performance of the two types of VSAs. This research can be applied to various industrial fields, where humans work in conjunction with robots.

KEYWORDS: Variable stiffness actuator (가변강성 액추에이터), Experimental study (실험 연구), Dynamic model (동역학 모델), Ball-Screw (볼스크루)

1. 서론

로봇 및 각종 산업분야에서는 다양한 종류의 액추에이터가 사용되고 있다. 예를 들어 생산공정에서 인간이 하기 힘든 큰 힘을 이용한 작업이나 세밀하고 정밀한 작업 등의 특수한 반복 작업을 인간을 대신해 작업하고 있다. 하지만 인간이 개발한 로봇은 아직 인간의 민감한 오감과 유연한 판단 등을 대신하기엔 역부족이기 때문에 사람과 로봇이 서로를 단점을 도와 효과적으로 협업하는 분야가 늘어나는 추세다.¹

이러한 인간과 로봇의 상호작용에서 가장 중요

한 요인은 바로 안전(Safety) 과 안정(Stability)이다. 예를 들어 액추에이터 동력은 사람의 힘에 비해 절대적으로 크기 때문에 사람이 개입되었다가 자칫 큰 사고로 이어질 수 있고, 반대로 정교한 작업을 요구하는 로봇의 경우 사람의 힘이 외란으로 작용하여 오작동을 유발할 수 있다. 동력과 인력 사이의 힘이 서로 불균형하여 발생하므로 이는 액추에이터의 강성을 조절함으로써 사람과 로봇의 힘의 균형을 맞추어 화합을 이끌어 낼 수 있다.

이처럼 인간과 로봇의 효과적인 상호작용을 위해 액추에이터의 강성을 조절하는 다양한 연구가 진행되고 있다. 강성을 제어하는 Variable Stiffness

Actuator (VSA) 연구는 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 센서와 제어알고리즘으로 강성을 제어하는 소프트웨어적 방법과 기계 구조의 변형을 통하여 강성을 조절하는 하드웨어적 방법이 있다. 소프트웨어적으로 강성을 제어하는 연구로는 토크센서와 제어 알고리즘을 통해 수술시의 안정성을 구현한 Hippocrate²와 조인트에서 외력을 감지하여 제어하는 손을 모방한 HIT-Hand³이 있다. 하드웨어적 연구는 스프링과 피벗의 변위를 이용해 강성을 제어하는 Actuator with Adjustable Stiffness (AwAS)^{4,5}와 재활치료에 적용한 ARES,⁶ 그리고 이를 응용한 vsaUT⁷ 등이 있다.

현재까지 VSA 연구는 강성을 조절하기 위한 다양한 해결책을 제시하고 있지만 시스템을 사용하기 위해 고려되어야 할 구체적인 변수와 그에 따른 강성 변화폭 등의 정보가 부족하여 상용화에 큰 어려움이 있다. 또한 각 타입이 가지는 역학적 특성에 대한 비교 실험이 없어 각 분야의 요구사항에 적합한 메커니즘을 선정하기 어렵다.

그러므로 본 연구는 대표적인 두 가지 타입의 VSA 메커니즘에 대한 비교 연구를 진행하고자 한다. 특히 동일한 조건에서 가지는 각각의 정적 및 동적 특성을 분석하기 위해 기존의 메커니즘을 토대로 VSA 설계 및 제작하여 실험을 진행하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 VSA 메커니즘의 정적의 강성 변화를 해석하고 동적 모델링을 수식으로 나타낸다. 3장에서는 VSA 메커니즘의 상세설계 및 3D모델링을 통해 세부구조의 설명이 소개된다. 제작된 VSA 시제품으로 4장에서 정적 실험과 동적 실험을 통해 2장에서 나타낸 수식과 비교하여 결과를 도출한다. 5장에서는 본 논문의 결론이 제시된다.

2. 강성 해석 및 동적 모델링

2.1 가변강성 메커니즘

본 논문에서 다루는 VSA 메커니즘은 스프링이 포함된 구조물에서 각 변위를 바꾸어 구조적으로 강성을 조절한다.^{4,5} 상단의 Fig. 1에 도시된 메커니즘은 지렛대원리로 스프링 위치에 따라 강성이 변하는 타입과 피벗 위치에 따라 강성이 변하는 타입의 구조적 특징을 나타내고 있다.

2.2 강성 해석

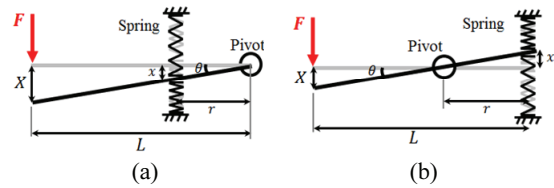


Fig. 1 (a) Spring position mechanism (b) Pivot position mechanism

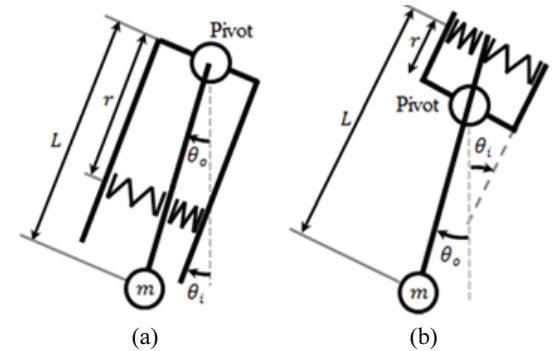


Fig. 2 Dynamic model; (a) Spring position mechanism (b) Pivot position mechanism

강성해석에 필요한 변수를 Fig. 2에 도시하였다. 스프링의 처짐 x 와 전체 처짐 X 는 거리 r 과 전체 길이 L 에 비례하므로 식(1)과 같이 나타낼 수 있으며, 스프링상수 k 에 의해 반력은 kx 로 모멘트 평형식에 의해 식(2)로 나타낼 수 있다.

두 식을 연립하여 구조적 강성 K 에 관한 식(3)으로 나타낼 수 있으며 강성은 변위 r 의 제곱에 비례한다는 것을 확인할 수 있다.

$$r : x = L : X \Rightarrow x = \frac{rX}{L} \tag{1}$$

$$FL = 2krx \tag{2}$$

$$F = KX = 2k \frac{r^2}{L^2} X \Rightarrow K = 2k \frac{r^2}{L^2} \tag{3}$$

피벗 변위타입 또한 위와 동일한 원리로 구해진 식(4)와 (5)를 연립하여 구조적 강성 K 에 관한 식(6)으로 나타낼 수 있으며 강성은 변위 r 의 제곱에 비례하며 동시에 $L - r$ 의 제곱에 반비례함을 확인할 수 있다.

$$r : x = L - r : X \Rightarrow x = \frac{rX}{L - r} \tag{4}$$

$$F(L - r) = 2krx \tag{5}$$

$$K = 2k \frac{r^2}{(L - r)^2} \tag{6}$$

2.3 동역학적 모델링

모델링에 고려되는 변수를 Fig. 3에 도시하였다. 고정된 링크에 외력을 가하는 정적 해석과 달리 동적 해석에서는 액추에이터의 구동에 따라 입력 링크와 출력링크의 변위 차와 스프링의 인장 압축을 통해 출력링크에 토크를 전달한다. 끝 단에 하중이 달린 출력링크는 외부 토크의 영향을 받는 단진자와 같이 나타낼 수 있다. 피벗에서 전달되는 토크 τ 와 그 반대방향으로 작용하는 중력에 의한 토크 $-mgL\sin\theta$ 을 합한 단진자 운동방정식은 다음 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau - mgL\sin\theta = I\ddot{\theta} \tag{7}$$

VSA-I의 경우, 입력링크의 변위 각 θ_i 에 의해 피벗으로부터 거리 r 만큼 떨어진 스프링의 인장 압축으로 출력링크에 가해지는 토크는 $2krx$ 이다. 이때 스프링의 인장압축 변위는 $r(\theta_i - \theta_o)$ 로 나타낼 수 있으므로 $2kr^2(\theta_i - \theta_o)$ 의 토크를 출력링크에 전달한다. 그러므로 외부 토크를 받는 출력링크의 단진자 운동방정식을 구하면 식(8)과 같다.

$$2kr^2(\theta_i - \theta_o) = mL^2\ddot{\theta}_o - mgL\sin\theta_o \tag{8}$$

VSA-II의 경우 마찬가지로 입력링크의 변위 각 θ_i 에 의해 피벗으로부터 거리 r 만큼 떨어진 스프링의 인장압축으로 $2kr^2(\theta_i - \theta_o)$ 의 토크를 출력링크에 전달한다. 그러므로 외부 토크를 받는 출력링크의 단진자 운동방정식을 구하면 식(9)와 같다.

$$2kr^2(\theta_i - \theta_o) = m(L - r)^2\ddot{\theta}_o - mg(L - r)\sin\theta_o \tag{9}$$

3. 설계 및 시제품 제작

3.1 VSA 설계

앞 장에서 소개한 두 가지 AwAS 메커니즘을 토대로 재설계를 진행하였다. 스프링의 위치와 피벗의 위치를 이동시키기 위해 행정거리 108mm의 Ball Screw가 사용되었다. 또한, 탄성계수 9.8N/mm 의 스프링을 선정하였다. VSA-I의 스프링을 평행하게 이동시키기 위해 Linear Motion Shaft와 Ball Bush를 선

Table 1 Specifications of VSA prototype

	Width (mm)	Length (mm)	Height (mm)	Weight (kg)
VSA-I	280	350	150	1.5
VSA-II	280	350	140	1.5

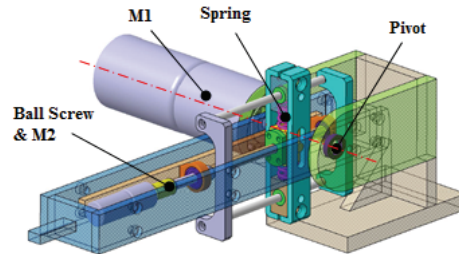


Fig. 3 Assembly drawing of VSA-I

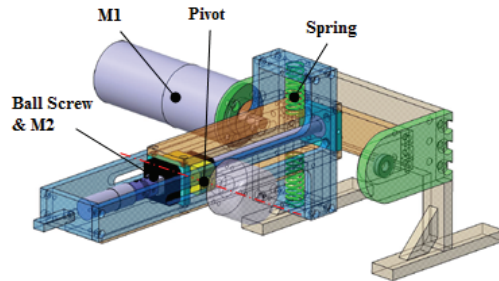


Fig. 4 Assembly drawing of VSA-II

정했고 VSA-II의 피벗을 이동하기 위해 마찰이 적은 MC Nylon 재질의 슬라이드 링크를 선정했다.

이 연구의 목적인 특성비교에 적합하도록 전체적으로 동일한 크기와 조건으로 설계를 진행하였다. 두 타입 모두 스프링과 피벗의 거리 r 이 0-108mm 범위에서 이동가능하며 모터에서 레버 끝 단 길이 L 은 240mm이다.

3.2 VSA-I 구조

Fig. 3에 VSA-I의 모델링을 도시하였다. 피벗 위치의 메인 모터(M1)는 구조 내부의 입력링크를 작동하고 출력링크와 베어링으로 나누어 두 링크가 따로 움직일 수 있다. 입력링크는 상하의 스프링을 통해 출력링크에 동력을 전달하므로 스프링 위치에 따라 강성을 변화시킨다.

3.3 VSA-II 구조

Fig. 4에 VSA-II의 모델링을 도시하였다. 메인 모터(M1)는 내부 입력링크를 작동시켜 같은 위치

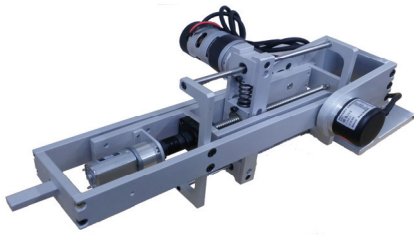


Fig. 5 Manufactured VSA-I prototype



Fig. 6 Manufactured VSA-II prototype

에 고정된 스프링을 통해 출력링크로 동력을 전달한다. Ball Screw의 이동 단에 피벗 축을 결합하고 피벗 축은 출력링크의 장공 내에서 슬라이드 링크를 통해 직선 이동함으로써 피벗의 위치를 변화시킬 수 있고 그로 인해 강성을 조절할 수 있다.

3.4 시제품 제작

앞 절에서 설계된 두 가지 VSA의 시제품을 제작하였다. 여러 가지 기계요소를 구매품과 가공품으로 구분하여 제작했고 조립의 용이성과 내구성을 위해 볼트체결로 조립하였다. 또한 경량화를 위해 대부분의 가공은 알루미늄 재질로 선정하였다. 완성된 VSA 시제품 사진을 Figs. 5과 6에 도시하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 정적 실험

본격적으로 이 논문의 목적인 두 가변 강성 모듈을 비교하기 위해 정적인 상태에서 각 타입의 강성을 측정하였다. 레버 끝 단에 2400g의 하중을 달고 변위 r 에 따른 처짐 X 을 측정하여 강성 K 를 도출하였다. 변위 r 은 각각 5mm 간격으로 실험하였다.

강성 변화 그래프를 Fig. 7에 도시하였다. 빨간색은 스프링 변위타입인 VSA-I을 나타내며 파란색은 피벗 변위타입인 VSA-II를 나타낸다. 실선은 2

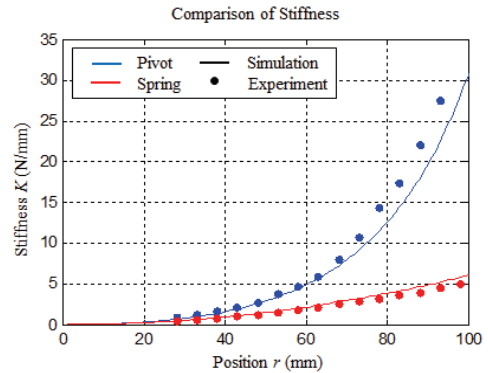


Fig. 7 Experimental results on the stiffness

장에서 해석된 정적 상태의 강성 이론 값이며 점선은 각 구간에서 처짐을 측정하여 강성을 도출한 실험 값이다.

그래프를 통해 두 타입의 특성을 쉽게 파악할 수 있다. VSA-I의 경우 비교적 낮은 변화율을 보이지만 전체적으로 강성이 작다. 반면 VSA-II의 경우 상대적으로 큰 강성 변화율과 큰 강성을 나타낸다. 이는 2장의 식(3)과 (6)에 분석한 바와 같이 두 타입 모두 강성은 변위 r 의 제곱에 비례하기 때문에 증가하며 VSA-II의 경우 $L - r$ 의 제곱에 반비례하기 때문에 Fig. 8과 같이 상대적으로 더 큰 변화 폭을 보인다.

4.2 동적 실험

동적 특성을 분석하기 위해 레버 끝 단에 8.5kg의 하중을 주고 액추에이터를 구동하였다. 모터에 사인파를 입력하여 특정 주파수의 진동을 발생시키고 모터의 각과 엔코더의 각을 측정했다. 실험 시 주파수는 0.6Hz에서 4Hz까지 0.2Hz 단위로 구동했으며 스프링과 피벗의 변위 r 은 0mm부터 100mm까지 10mm단위로 실험하였다.

2장에서의 동역학 모델은 댐핑이 없는 시스템이지만 시제품에 사용된 스프링은 외경 13mm의 면적을 지니며 압축/인장 외에도 약간의 굽힘이 발생하였다. 그리하여 시제품 제작에 의한 댐핑이 존재한다고 가정하고 도출된 VSA-I의 전달함수 식 (10), VSA-II의 전달함수 식(11)에 임의의 A 를 가정하여 실험 데이터를 통해 A 를 도출하였다.

$$G_{(s)} = \frac{2kr^2}{mL^2 \left(s^2 + As + \frac{2kr^2 - mgL}{mL} \right)} \quad (10)$$

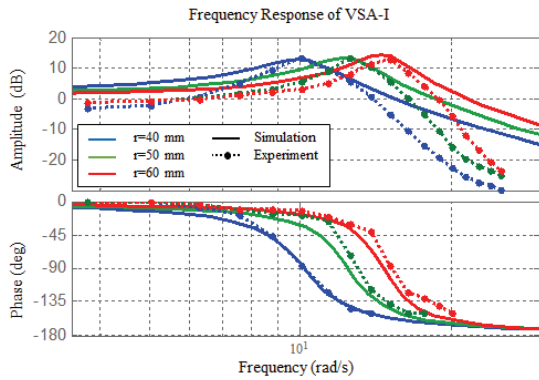


Fig. 8 Frequency response of VSA-I

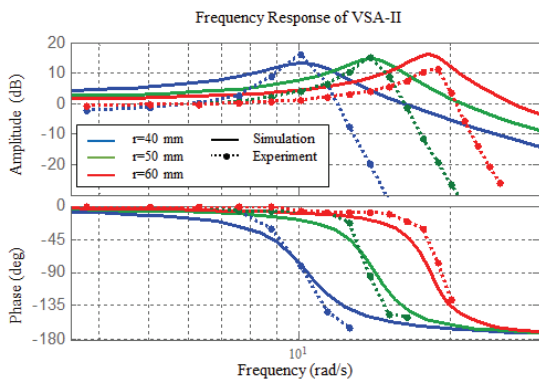


Fig. 9 Frequency response of VSA-II

$$G_{(s)} = \frac{2kr^2}{m(L-r)^2 \left(s^2 + As + \frac{2kr^2 - mg(L-r)}{m(L-r)^2} \right)} \quad (11)$$

우측 상단의 Figs. 8와 9에 시스템의 주파수 응답 그래프를 도시하였다. 실선은 전달함수 식(10)과 (11)의 주파수 응답 그래프이며 점선은 시제품 실험 측정 값이다. 변위는 40, 50, 60mm 일 때를 나타냈으며 임의의 댐핑을 가정한 A는 그래프에서 확인할 수 있듯이 두 가지 타입 모두 3.3 일 때 실험과 가장 근접한 결과를 도출하였다.

그래프에서 확인할 수 있듯이 이론과 실험 값 모두 진폭의 크기가 최대가 되는 주파수가 일치하며 그 주파수에서의 위상 차가 $\pi/2$ 에 가까움을 확인할 수 있다. 또한 전체적인 위상 차가 일치함으로써 제작된 시제품의 동역학적 모델이 식(10)과 (11)에 일치함을 확인할 수 있다.

두 타입의 최대 진폭의 주파수 변화 폭을 비교해 보면 VSA-I는 비교적 작은 변화폭과 낮은 주파

Table 2 Comparison of stiffness

Position r (mm)	VSA-I	VSA-II
	Stiffness K (N/mm)	
30	0.65	1.03
40	0.98	1.96
50	1.47	3.38
60	2.04	5.24
70	2.71	9.02
80	3.36	15.71
90	4.31	24.03
100	5.24	47.13

Table 3 Frequency response data

Position (mm)	VSA-I		VSA-II	
	Freq. (rad/s)	Amp. (dB)	Freq. (rad/s)	Amp. (dB)
30	12.6	13.395	13.86	15.586
40	15.12	13.092	16.38	14.805
50	16.38	11.401	18.9	11.496
60	17.64	10.639	20.16	8.967
70	18.9	9.928	21.42	6.533

수를 보이며 VSA-II는 상대적으로 큰 변화폭과 높은 주파수를 나타낸다. 강성과 밀접한 관련이 있는 이 주파수를 통해 외력만을 가한 정적 실험에서 확인한 두 타입의 강성 변화율이 동적 특성에서의 강성 변화 정도와 일치함을 확인할 수 있다.

4.3 고찰

두 타입의 비교를 위해 정적 실험과 동적 실험 데이터를 아래의 Tables 2와 3에 정리하였다.

정적 실험에서의 강성을 비교해 보면 VSA-II의 변화율이 VSA-I에 비해 월등히 큰 차이를 보이고 있다. 이는 2장에서 해석한 강성 식으로 알 수 있듯이 VSA-I의 경우 스프링의 강성을 변위 r에 따라 0-1의 비율만큼 조절 가능하기 때문에 비교적 작은 강성 폭을 보인다. VSA-II의 경우 변위 r이 커짐과 동시에 L-r의 크기에 반비례 하기 때문에 스프링 강성보다 5배 가까이 큰 강성을 구현할 수 있다.

동적 실험 데이터에서는 변위 r에 따른 최대 진폭의 주파수와 진폭의 크기를 확인할 수 있다. 강성과 밀접한 관련이 있는 고유 진동수의 변화도 정적 실험과의 비슷한 변화 폭을 보이고 있다. 강성이 작을수록 낮은 고유 진동수와 큰 진폭을 보이므로 낮은 강성일수록 고유진동수를 유념하여 제어해야 할 것이다.

VSA-I 은 유연성이 뛰어나므로 사람의 인체와 접하여 움직임을 보조하는 재활치료 목적 등의 로봇 분야에 사용될 수 있다. 반대로 VSA-II의 경우, 강성변화율과 그 크기가 뛰어나므로 수시로 강성을 변화시키는 인체모방로봇과 정밀도와 안전을 요구하는 산업분야의 다관절 로봇에서 효과적일 것이다.

5. 결론

본 연구에서는 두 가지 가변강성 메커니즘의 해석, 설계, 실험을 수행하여 비교, 분석하였다. 두 가지 VSA 메커니즘에 대해 강성 해석 및 동역학 모델을 수립하였고 메커니즘을 기반으로 VSA 시제품을 설계, 제작하였으며 이를 바탕으로 정적, 동적 실험을 수행하였다. 결과적으로 이론과 일치하는 실험 결과를 도출하였으며, 스프링변위 타입에 비해 피벗 변위 타입에서 급격한 강성 변화율과 높은 강성을 확인하였다. 결과적으로 스프링 변위 타입은 유연성이 중요한 분야, 피벗 변위 타입은 빠른 강성 변화와 정밀한 동작을 제어하는 분야에 적합하다. 본 연구의 결과는 추후 가변강성이 요구되는 분야에서 조건에 알맞은 메커니즘을 선정하기 위한 유용한 정보로 활용될 것이다.

후 기

이 연구는 영남대학교 LINC 사업단의 기업체공동연구과제 지원사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

REFERENCES

1. Jeong, J.-J. and Chang, S.-H., "Design of a Variable-Stiffness Type Safety Joint for Service Robots," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 26, No. 5, pp. 128-134, 2009.
2. Pierrot, F., Dombre, E., Dégoulange, E., Urbain, L., Caron, P., et al., "Hippocrate: A Safe Robot Arm for Medical Applications with Force Feedback," Medical Image Analysis, Vol. 3, No. 3, pp. 285-300, 1999.
3. Liu, H., Meusel, P., Seitz, N., Willberg, B., Hirzinger, G., et al., "The Modular Multisensory DLR-HIT-Hand," Mechanism and Machine Theory, Vol. 42, No. 5, pp. 612-625, 2007.
4. Jafari, A., Tsagarakis, N. G., Vanderborght, B., and Caldwell, D. G., "A Novel Actuator with Adjustable Stiffness (AWAS)," Proc. of the IEEE International

Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 4201-4206, 2010.

5. Jafari, A., Tsagarakis, N. G., Sardellitti, I., and Caldwell, D. G., "A New Actuator with Adjustable Stiffness Based on a Variable Ratio Lever Mechanism," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 19, No. 1, pp. 55-63, 2014.
6. Cestari, M., Sanz-Merodio, D., Arevalo, J. C., and Garcia, E., "An Adjustable Compliant Joint for Lower-Limb Exoskeletons," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 20, No. 2, pp. 889-898, 2015.
7. Groothuis, S. S., Rusticelli, G., Zucchelli, A., Stramigioli, S., and Carloni, R., "The Variable Stiffness Actuator Vsaut-II: Mechanical Design, Modeling, and Identification," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 19, No. 2, pp. 589-597, 2014.