

가변 모멘트 암 기반의 소형 가변 강성 액추에이터 모듈[§]

유 흥 선* · 송 재 복**†

* 고려대학교 메카트로닉스학과, ** 고려대학교 기계공학과

Small-Sized Variable Stiffness Actuator Module Based on Adjustable Moment Arm

Hong-Seon Yu* and Jae-Bok Song**†

* Dept. of Mechatronics, Korea Univ.,

** School of Mechanical Engineering, Korea Univ.

(Received December 28, 2012; Revised August 5, 2013; Accepted August 21, 2013)

Key Words: Variable Stiffness Actuator(가변 강성 액추에이터), Adjustable Moment Arm(가변 모멘트 암), Stiffness Control(강성 제어), Lever Arm Mechanism(레버 암 메커니즘)

초록: 최근에 들어 로봇과 환경 사이의 상호작용이 다양하게 발생하는 작업에서 가변 강성 액추에이터의 연구가 활발하다. 기존의 다양한 가변 강성 액추에이터가 개발되었지만 크기와 중량 때문에 응용분야를 찾기가 어렵다. 따라서 다양한 분야에 쉽게 이용되기 위해 소형의 가변 강성 액추에이터(miniVSA)를 개발하였다. miniVSA는 모멘트 암 기반의 강성제어 장치와 두 개의 모터로 구성된 구동 장치로 구성된다. 강성제어 장치는 두 캠의 상대 운동을 제어하여 위치와 강성을 동시에 제어할 수 있다. 이를 실험을 통하여 강성 변화를 검증하였다.

Abstract: In recent years, variable stiffness actuation has attracted much attention because interaction between a robot and the environment is increasingly required for various robot tasks. Several variable stiffness actuators (VSAs) have been developed; however, they find limited applications owing to their size and weight. For realizing their widespread use, we developed a compact and lightweight mini-VSA. The mini-VSA consists of a control module based on an adjustable moment arm mechanism and a drive module with two motors. By controlling the relative motion of cams in the control module, the position and stiffness can be simultaneously controlled. Experimental results are presented to show its ability to change stiffness.

1. 서 론

근래에 들어 인간과 로봇의 공존 및 협업의 중요성이 부각되면서, 로봇의 안정된 접촉작업을 위한 다양한 기술이 개발되고 있다. 강성제어는 사람의 안전과 안정된 접촉작업을 구현하는데 매우 중요한 요소로써, 최근에 성능 향상 등을 위한 다양한 연구가 활발히 진행 중이다.⁽¹⁻³⁾

강성을 조절하는 방법은 크게 센서 기반의 능동 강성제어와 기계시스템을 사용한 수동 강성제어 방법으로 나눌 수 있다. 기존의 로봇에 6축 힘/토크 센서를 장착함으로써 비교적 간단하게 로봇과 환경 사이에 발생하는 접촉력을 제어할 수 있다. 그러나 이 경우, 고가의 힘/토크 센서가 필수적으로 사용되고, 제어기의 성능, 센서의 응답속도 그리고 통신속도 등의 문제로 성능이 제한될 수 있다.⁽⁴⁾ 또한 낮은 강성을 구현하기 위해 힘/토크 센서의 감도를 증가시키는 경우에는 시스템의 불안정성이 증가하는 경우가 많기 때문에 구현할 수 있는 최소 강성이 제한된다는 단점이 있다.⁽⁵⁾

이러한 문제를 해결하기 위해서, 기계 시스템기

§ 이 논문은 대한기계학회 2012년도 추계학술대회(2012. 11. 7.-9., CECCO) 발표논문임

† Corresponding Author, jbsong@korea.ac.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

반의 수동형 강성 제어시스템에 대한 연구가 진행 중이다. 대표적인 수동형 강성 제어 시스템인 가변 강성 액추에이터(VSA, Variable stiffness actuator)는 강성 제공을 위한 스프링 등의 탄성요소와 강성 조절을 위한 메커니즘 등으로 구성되어 있다. 이와 같은 기계요소 기반의 수동형 강성 제어시스템의 경우, 비교적 넓은 강성영역을 갖고, 안정적으로 강성제어를 구현할 수 있는 장점이 있다. 또한 강성을 제어하기 위하여 토크제어 보다는 위치제어를 이용하므로 보다 쉽게 강성제어 구현할 수 있다.

현재까지 수동형 강성조절의 구현을 위한 다양한 형태의 VSA가 개발되었다. 두 개의 모터가 비선형성의 탄성요소로 연결되어 장력을 조절하는 방식을 채택한 MACCEPA,⁽⁶⁾ VSA-II⁽⁷⁾ 및 VSA-Joint,⁽²⁾ 판 스프링을 활용한 VSJ,⁽⁸⁾ 가변 모멘트 팔 기반의 HDAU,⁽⁹⁾ AwAS,⁽¹⁰⁾ AwAS-II⁽¹¹⁾ 및 vsaUT-II⁽¹²⁾ 등이 있다.

그러나 현재까지 개발된 VSA는 대부분 부피가 크고 무거우므로 로봇 팔 등의 다자유도 로봇에 적용이 힘들다. 그래서 본 연구에서는 가변 모멘트 암 기반의 강성조절 메커니즘을 갖는 소형 가변 강성 액추에이터 모듈(miniVSA)를 제안하고, 이를 적용한 miniVSA를 개발함으로써, VSA의 실제 다자유도 로봇에 대한 활용성을 향상하였다.

이 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 VSA의 기본원리에 대하여 설명한다. 3장에서는 본 연구에서 개발된 miniVSA의 위치 및 강성조절 메커니즘에 대한 원리를 설명하고, 4장에서는 실험을 통하여 개발된 miniVSA의 성능을 검증한다. 마지막으로 5장에서 결론을 도출한다.

2. 가변 강성 액추에이터의 원리

2.1 가변강성 액추에이터

일반적인 로봇 설계의 경우, 위치 정밀도 향상을 위해 모터 및 감속기와 링크를 직접 연결하는 관절 구조를 사용한다. 이와 같은 관절 구조는 일반적으로 강성이 매우 높게 설정되어 있으므로, 정밀한 위치제어는 이점을 갖는다. 하지만 능동 강성제어 등을 사용하여 인간과 같은 유연운동(compliant motion)을 구현하는 데에는 한계가 있다. 이를 해결하기 위하여 VSA설계 시에는 일반적으로 Fig. 1(b)와 같이 강성의 조절을 위해서 모터와 링크 사이에 탄성요소로 구성된 강성조절 장치를 삽입한다.

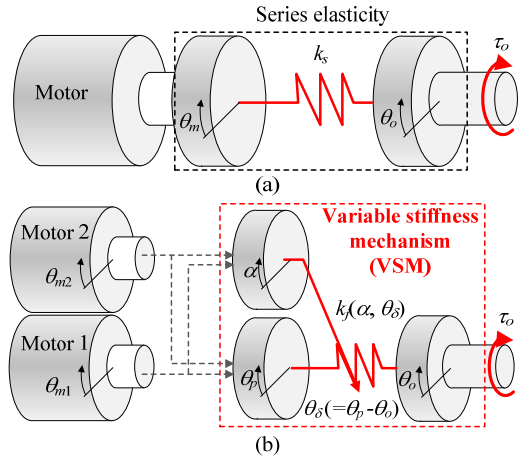


Fig. 1 Conceptual diagram (a) series elastic actuator, (b) variable stiffness actuator

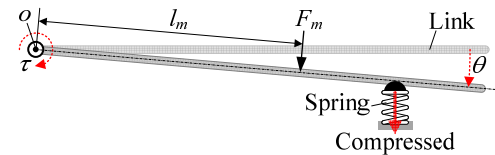


Fig. 2 Move the application point of the external force F_m

기존에도 Fig. 1(a)와 같이 모터와 링크 사이에 강성조절 요소를 삽입함으로써 Series elastic actuator (SEA)를 구성하여 힘 제어 등의 용도로 사용한 사례가 있다. 그러나 이 경우, 시스템의 강성은 스프링 강성에 의해 고정되므로 활용 분야가 제한된다는 단점이 있다. 반면에 Fig. 1(b)와 같은 가변강성 메커니즘(VSM, Variable stiffness mechanism)의 경우에는 모터 두 개로부터 받는 회전 입력의 차이 등을 이용하여 시스템의 강성과 위치를 동시에 제어할 수 있다. 따라서 기존 SEA에 비해 작업환경에 따른 유연한 강성 제공이 가능하다.⁽⁹⁾

2.2 가변강성 메커니즘

본 연구에서는 Fig. 2와 같이 1자유도 링크 및 스프링으로 구성된 가변 모멘트 암 기반의 VSM을 구현하였다. 그림에서 볼 수 있듯이, 스프링 및 링크의 회전 중심이 고정되었다고 가정할 때, l_m 의 거리에 외력 F_m 이 작용한다면, 회전중심 O 에는 회전토크 τ 가 인가된다. 또한 외력에 의해서 θ 의 회전변위가 발생한다. 즉, 링크를 θ 만큼 회전시키기 위하여 필요한 토크 τ 는 l_m 이 증가함에 따라 증가하며, 이는 시스템의 관절강성($k_j = \tau/\theta$)이 증가하는 것의 의미한다. 따라서, 힘의 작용점의 위치를 변화시킴으로써 회전강성을 조절할 수 있다.

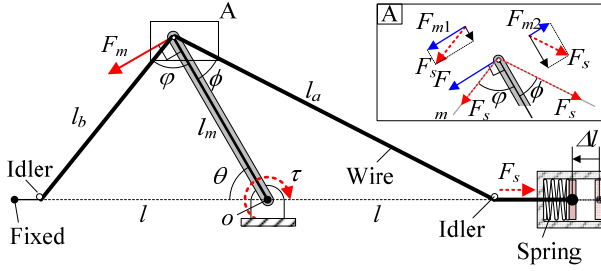


Fig. 3 Principle of stiffness variation

3. miniVSA의 개발

3.1 강성조절 장치의 구현

개발된 miniVSA의 단순화된 구조는 Fig. 3과 같다. 회전중심에 외력 τ 가 인가되어 링크에 θ 만큼의 회전변위가 발생할 때, 스프링은 와이어에 의해서 Δl 만큼 압축된다. 초기 상태의 와이어의 길이가 $2l$, 외력이 인가된 후에 변형된 와이어의 길이가 $l_a + l_b$ 일 때, Δl 은 식 (1)과 같다. 또한 이때 발생한 힘은 강성 k_s 인 스프링을 Δl 만큼 압축시키므로, 식 (2)와 같이 F_s 로 표현 가능하다.

$$\Delta l = (l_a + l_b) - 2l \quad (1)$$

$$F_s = k_s \Delta l \quad (2)$$

스프링 압축으로 인한 와이어 장력 F_s 가 링크에 수직인 방향으로 F_m 의 힘을 인가한다고 가정한다면, 이 힘은 Fig. 3에서 표현된 각도 ϕ 및 ϕ' 에 의해 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$F_m = F_{m1} - F_{m2} = F_s (\sin \phi - \sin \phi') \quad (3)$$

이때, $\sin \phi'$ 와 $\sin \phi$ 는 각각 $l \sin(180 - \theta) / l_a$ 및 $l \sin \theta / l_b$ 로 계산할 수 있다. 따라서 외력토크 τ 는 모멘트 암의 길이 l_m 및 힘 F_m 에 의해 다음과 같이 표현할 수 있다. 따라서, 회전 변위 θ 에 따른 관절강성 k_j 는 식 (5)와 같이 l_m 에 따라 조절이 가능하다.

$$\tau = l_m F_m \quad (4)$$

$$k_j = \frac{\partial \tau}{\partial \theta} = \frac{\partial (l_m F_m)}{\partial \theta} \quad (5)$$

3.2 miniVSA의 설계

본 연구에서는 Fig. 3의 강성조절 메커니즘을 바탕으로 초소형, 초경량 miniVSA를 구현하기 위하

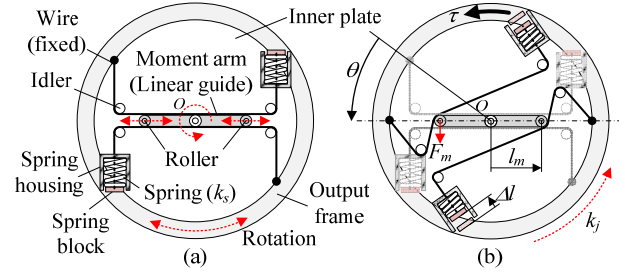


Fig. 4 Principle of miniVSA: (a) initial position, and (b) after rotation

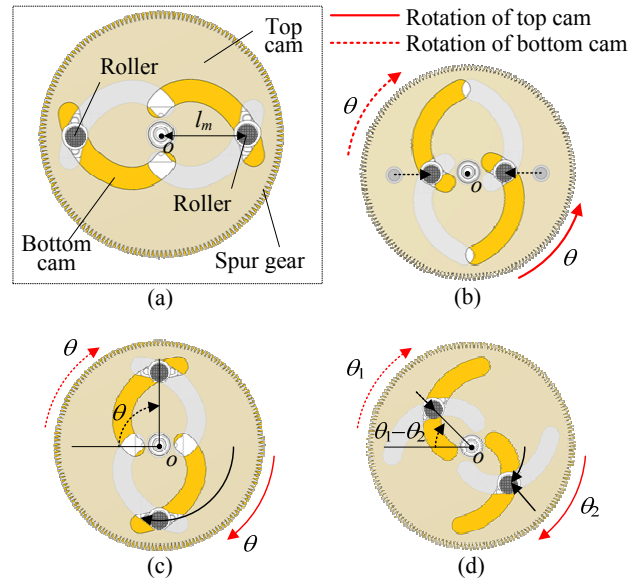


Fig. 5 Mechanism of relative movement of the cam (a) initial state, (b) stiffness control, (c) position control, (d) simultaneous control of position and stiffness

여 Fig. 4와 같이 압축 스프링, 롤러 및 와이어로 구성된 강성조절 장치를 제안한다. 제안된 강성조절 장치는 Fig. 4(b)와 같이, 스프링 하우징이 고정된 내부 판(Inner plate)과 출력 프레임(Output frame)의 상대 회전 변위를 조절하여, 모멘트 암에 설치된 롤러 및 와이어로 인하여 스프링을 압축시킴으로써, 시스템의 강성을 제어할 수 있다.

개발된 miniVSA에서는 슬릿이 있는 두 캠의 상대 회전운동을 이용하여 롤러의 위치를 조절함으로써, 시스템의 위치와 강성을 독립적으로 제어할 수 있다. 즉, 만약 두 캠이 회전 중심 O 를 중심으로 CW 및 CCW 방향으로 각각 θ 만큼 회전하였을 때, Fig. 5(b)와 같이 롤러가 O 방향으로 이동하게 되므로, 모멘트 암의 길이 l_m 가 변화된다. 그러므로, 식 (5)에 따라 출력 프레임의 강성을 조절할 수 있다. 또한 Fig. 5(c)와 같이 두 캠이 같은 방향

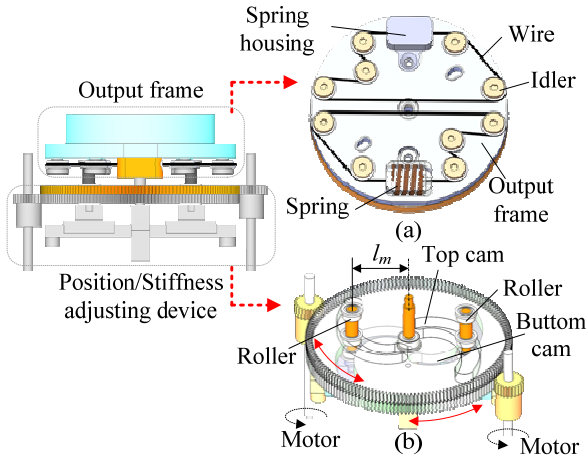


Fig. 6 Design of mini VSA: (a) Output frame, and (b) Position / Stiffness adjuster

으로 θ 만큼 회전하였다면, 롤러는 l_m 을 유지한 채로 θ 만큼 회전하게 되므로, 일정한 강성을 유지한 채로 출력 프레임의 위치만을 제어할 수 있다. 마지막으로, Fig. 5(d)와 같이 두 캠을 서로 다른 임의의 각도 θ_1, θ_2 로 회전시킬 경우, 롤러가 회전함과 동시에 l_m 이 변화하므로, 이를 조절하여 출력 프레임의 위치와 강성을 동시에 제어할 수 있다.

설계된 mini VSA는 Fig. 6과 같이 압축 스프링과 와이어로 구성된 출력 프레임과 두 개의 캠과 직선 가이드 및 평 기어로 구성된 위치/강성 조절 장치로 나눌 수 있다. 직선 가이드 상에 설치된 롤러는 두 캠의 상대운동에 의해 직선 및 회전 변위가 발생하게 되며, 이를 통해 출력 프레임의 위치를 제어하거나, 스프링을 압축시켜 원하는 강성을 제공할 수 있게 한다.

4. 시제품 개발 및 성능 실험

4.1 miniVSA 시제품 개발

개발된 miniVSA에는 강성 162 kN/m인 압축 스프링을 적용하였고, 모멘트 암은 최소 11 mm부터 최대 18.5 mm까지 변화할 수 있도록 설계하였다. 구동 장치는 Fig. 7(a)와 같이 두 개의 10 W BLDC 모터와 기어비 17:1인 유성기어를 사용하였으며, 협소한 공간 내에서 충분한 토크를 얻기 위하여 감속비가 10:1인 워م/워휠 기어를 적용하였다. 또한 6.5:1의 기어비의 평 기어를 사용하여 두 캠으로 동력을 전달함으로써 캠의 회전각 차이를 이용하여 출력 위치 및 강성을 제어할 수 있도록 하였다. 경량형 설계를 위하여 외부프레임은 두랄루민(6061-T6)을 사용하여 Fig. 7(b)와 같이 제작하였다. 이상에서 개발된 miniVSA의 사양은 Table 1과 같

Table 1 Specifications of miniVSA

Max. allowable torque	2.25 Nm
Size	72 mm x 72 mm x 60 mm
Weight	0.5 kg
Max. deflection	$\pm 30^\circ$
Stiffness range	0.19 ~ 1.22 Nm/°

Table 2 Comparison of size and performance of VSA

	miniVSA	HDAU	AwAS-II
Size (mm)	72 x 60	$\phi 100 \times 258$	$\phi 140 \times 180$
Weight (kg)	0.5	2.36	1.1
Stiffness (Nm/°)	0.12 ~ 1.42	0.07 ~ 2.2	0 ~ very large

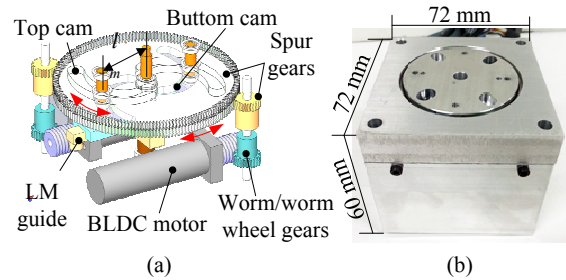


Fig. 7 miniVSA: (a) 3D model, and (b) prototype

다. 또한 Table 2에서 볼 수 있듯이, 본 연구에서 개발된 miniVSA는 기존의 VSA에 비하여 크기와 무게가 절반가량 줄어든 것을 알 수 있다.

4.2 miniVSA 성능 실험

miniVSA의 성능을 검증하기 위하여 Fig. 8과 같은 실험장치를 사용하였다. miniVSA를 수평 프레임에 고정하고, 길이 30 cm의 출력 링크를 연결하였다. 외력에 의해 출력 링크가 회전할 때, miniVSA의 가해지는 토크와 출력 링크의 변위를 동시에 측정하기 위하여 출력 프레임에 연결된 힘/토크 센서와 8.8×10^{-2} °/pulse의 분해능을 갖는 엔코더를 사용하였다. 또한 두 모터의 위치제어를 위해서 Maxon사의 BLDC 모터 드라이버(EPOS2-24-2)를 사용하였다.

3장에서 설명하였듯이 miniVSA의 강성은 모멘트 암의 길이를 제어함으로써 조절할 수 있다. 따라서 본 실험에서는 모멘트 암의 길이 l_m 를 1.5 mm 간격으로 조절함으로써 변화되는 강성 $k(l_m)$ 을 측정하였다. 실험 결과는 Fig. 9와 같다.

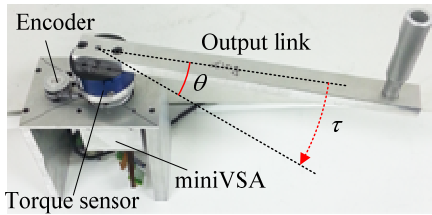


Fig. 8 Experimental setup using miniVSA

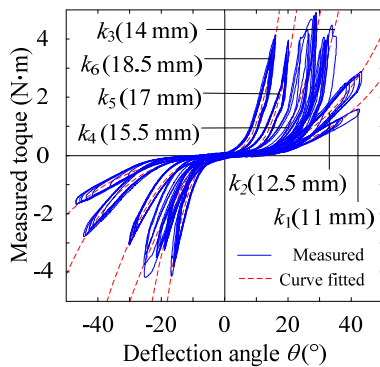


Fig. 9 Deflection angle-torque relationship

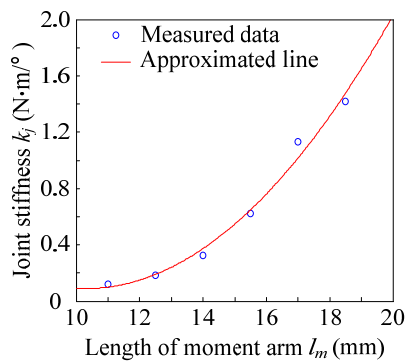


Fig. 10 variation of joint stiffness

실선은 측정된 데이터를 나타내며, 점선은 측정된 데이터를 바탕으로 3차 함수로 근사화한 결과이다. Fig. 9의 실험결과에서 알 수 있듯이, 외력토크 τ 는 변위 θ 에 대하여 비선형적인 특징을 갖는다. 또한 모멘트 암의 길이가 증가할수록, 동일한 변위에서 큰 토크 값을 갖는다는 것을 알 수 있다. 본 실험에서는 토크가 증가/감소할 때 히스테리시스가 관찰되었다. 이러한 문제는 miniVSA의 내부 부품 사이의 마찰과 관련이 있는 것으로 보인다. 따라서 출력 링크가 회전하는 방향에 따라 에너지를 최소화 하기 위한 적절한 보상이 필요하다.

Figure 9에서 각 모멘트 암에 해당하는 근사화된 그래프를 바탕으로, 식 (5)을 통해 계산된 강성은 Fig. 10과 같다. 이 결과로부터, 개발된 miniVSA의 최소 0.12 Nm° 에서 최대 1.42 Nm° 의 강성 조절

범위를 갖는 것을 알 수 있다. 또한 이 데이터들을 2차 함수로 근사화 함으로써, 모멘트 암의 변화에 따른 강성을 추정할 수 있다.

5. 결론

소형 가변 강성 액추에이터(miniVSA)는 같은 관절에서 위치와 강성을 동시에 제어할 수 있는 메커니즘을 제안하고 개발하였다. 그리고 miniVSA의 특성을 분석하고, 강성조절 및 강성범위를 실험을 통하여 검증하였으며, 이로부터 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) miniVSA는 두 캠의 상대운동을 이용한 강성 조절 장치를 이용하여 위치와 강성을 동시에 제어하였다.
- (2) 강성조절 장치에 와이어와 구동 장치에 웜/웜휠 기어를 이용하여 공간을 최소화 하여 가로, 세로 72 mm에 높이 60 mm에 무게가 0.5 kg의 가볍고 작은 형태로 개발하였다.
- (3) miniVSA는 $0.19 \sim 1.22 \text{ Nm}^\circ$ 의 강성영역 갖는 가변 강성 액추에이터를 개발하였다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부의 융복합형 로봇인력 양성 지원사업(NIPA-2012-H1502-12-1002) 및 “고밀도 혁신 제조공정용 로봇시스템 기술 개발”과제의 지원으로 수행되었음.

참고문헌

- (1) Tonietti, G., Schiavi, R. and Bicchi, A., 2006, “Optimal Mechanical/Control Design for Safe and Fast Robotics,” *Experimental Robotics IX: The 9th International Symposium on Experimental Robotics*, volume 21, pp. 311~320.
- (2) Wolf, S. and Hirzinger, G., 2008, “A New Variable Stiffness Design: Matching Requirements of the Next Robot Generation,” *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.1741~1746.
- (3) Pratt, G. A. and Williamson, M. M., 1995, “Series Elastic Actuators,” *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 399~406.
- (4) Zinn, M., Khatib, O., Roth, B. and Salisbury, J. K., 2004, “Playing It Safe - A New Actuation Concept for Human-Friendly Robot Design,” *IEEE Robotics and Automation Magazine*, Vol. 11, pp. 12~21.
- (5) Hogan, N. and Buerger, S. P., 2005, “Impedance and

- Interaction Control," *Robotics and Automation Handbook*, New York, NY: CRC Press.
- (6) Vanderborght, B., Tsagarakis, N., Semini, C., van Ham, R. and Caldwell, D., 2009, "MACCEPA 2.0: Adjustable Compliant Actuator with Stiffening Characteristic for Energy Efficient Hopping," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.544~549.
- (7) Schiavi, R., Grioli, G., Sen, S. and Bicchi, A., 2008 , "VSA-II: A Novel Prototype of Variable Stiffness Actuator for Safe and Performing Robots Interacting with Humans," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.2171~2176.
- (8) Choi, J., Hong, S., Lee, W., Kang, S. and Kim, M., 2011, "A Robot Joint with Variable Stiffness Using Leaf Springs," *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 27, No. 2, pp. 229~238.
- (9) Kim, B. S. and Song, J. B., 2012, "Design and Control of a Variable Stiffness Actuator Based on Adjustable Moment Arm," *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 99, pp. 1~7.
- (10) Jafari, A., Tsagarakis, N., Vanderborght, B. and Caldwell, D., 2010, "A Novel Actuator with Adjustable Stiffness (AwAS)," in *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.4201~4206.
- (11) Jafari, A., Tsagarakis, N., Vanderborght, B. and Caldwell, D., 2011, "AwAS-II: A New Actuator with Adjustable Stiffness Based on the Novel Principle of Adaptable Pivot Point and Variable Lever Ratio," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.4638~4643.
- (12) Groothuis, S. S., Rusticelli, G., Zucchelli, A., Stramigioli, S. and Carloni, R., 2012, "The vsaUT-II: a Novel Rotational Variable Stiffness Actuator," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.3355~3360.