

능동형 현가장치를 위한 가변 강성 직렬 탄성 액추에이터 설계

Variable Stiffness Series Elastic Actuator Design for Active Suspension

방진욱¹·최민식²·이동형²·박정호²·박은재²·이근일²·이장명[†]
Jinuk Bang¹, Minsik Choi², Donghyung Lee², Jungho Park², Eunjae Park²,
Geunil Lee², Jangmyung Lee[†]

Abstract: In this study, we developed an FSEA (Force-sensing Series Elastic Actuator) composed of a spring and an actuator has been developed to compensate for external disturbance forced. The FSEA has a simple structure in which the spring and the actuator are connected in series, and the external force can be easily measured through the displacement of the spring. And the characteristic of the spring absorbs the shock to the small disturbance and increases the sense of stability. It is designed and constructed to control the stiffness of such springs more flexibly according to the situation. The conventional FSEA uses a fixed stiffness spring and the actuator is not compensated properly when it receives large or small external force. Through this experiment, it is confirmed that FSEA compensates the external force through the proposed algorithm that the variable stiffness compensates well for large and small external forces.

Keywords: Series Elastic Actuator, Active Suspension, Variable Stiffness, Compliance Control

1. 서 론

최근 다양한 기술들이 발전하고 여러 종류의 로봇들이 개발되어 지고 있는 가운데 제어나 배터리 소재 기술들의 발달로 1인용 이동수단인 Personal Mobility가 개발되어지고 있다. 그리고 공장이나 일장에서 사용할 수 있는 운송용 서비스 로봇들도 대두되고 있다. 이러한 탑승 및 운송용 로봇들의 개발 요소 가운데 중요한 부분을 차지하는 것이 바로 안정성이다. 탑승 로봇에서 안정성은 탑승자의 승차감이나 안전에 직결되는 문제이며 서비스 로봇 중에서도 운송 관련 로봇들 역시 운송 물체의 안정감을 잡는 것이 매우 중요한 요소 중에 하

나이다. 특히 많은 상황 중에서도 고르지 못한 노면을 주행하거나 급격한 선회 운동을 할 때 안정성이 매우 취약하다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해서 차량에는 현가장치와 같은 장치를 설치하여 탑승자의 충격을 흡수하면서 차체의 흔들림을 최소화하여 안정감을 증진시킨다. 하지만 서비스로봇이나 퍼스널 모빌리티와 같은 1인용 탑승 로봇을 위한 현가장치와 같은 장치에 대한 연구가 아직 부족한 상황이다^[1-3]. 본 논문에서는 이러한 부분을 개선하기 위해 주행 로봇의 능동형 현가장치로 사용할 수 있는 시스템을 제안한다.

직렬 탄성 액추에이터(Series Elastic Actuator, SEA)는 미국 MIT에서 처음 제안한 구조이며 일반적으로는 액추에이터와 직렬로 연결된 부하 사이에 탄성 성분을 추가한 것이다. 이것은 기본적으로 힘 제어 또는 위치 제어를 통한 높은 임피던스 제어를 제공하기 때문에 로봇 팔의 관절 부분에 주로 사용된다^[4-6]. 직렬 탄성 액추에이터의 종류는 탄성 배치에 따라 크게 FSEA (Force-sensing Series Elastic Actuator), RFSEA (Reaction Force sensing Series Elastic Actuator)로 구분되어진다.

직렬 탄성 액추에이터는 외력을 측정하고 그에 상응하는 보상을 요구하는 시스템에 사용할 수 있다. 이와 같은 특성을

Received : Dec. 10. 2018; Revised : May. 12. 2019; Accepted : May. 14. 2019

※ This material is based upon work supported by the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE, Korea) under Industrial Technology Innovation Program. No.G01201605010048 '40 km/h of balancing robot with active suspension'

1. MS student, Pusan National University, Busan, Korea (jinuk1696@pusan.ac.kr)

2. Undergraduate student, Pusan National University, Busan, Korea (cms2578, dlehdgd62, qkrwjgdh0904, ppez24, mmsldfdk@gmail.com)

† Professor, Corresponding author: Dept of Electronics Engineering, Pusan National University, Busan, Korea (jmllee@pusan.ac.kr)

이용하여 직렬 탄성 액추에이터를 주행 로봇의 현가장치로 사용하며 다수의 직렬 탄성 액추에이터를 발판과 같은 탑승자와 직결되는 판에 연결하여 스프링의 탄성력을 이용하여 탑승자가 받는 충격을 흡수하고 받는 외력을 측정하여 그에 대응하는 보상을 할 수 있다. 하지만 고정적인 강성의 스프링을 사용하는 것으로는 견딜 수 있는 부하의 범위가 한정적이다. 만약 허용 범위를 초과하는 부하가 발생하면 스프링의 변위가 크게 변하여 모터가 외력에 의한 변위를 추종하기 어렵다. 반대로 스프링의 허용 범위보다 적은 부하가 발생하면 스프링의 변위는 발생하지 않고 스프링은 탄성체가 아닌 고정적인 막대와 같은 역할을 하게 된다. 이 경우에는 탄성체를 사용함으로써 얻는 이득을 가지지 못한다. 이러한 점을 개선하기 위해 스프링의 강성을 조절하는 가변 강성 시스템을 설계한다.

본 논문에서는 2장에서는 현가장치로 사용하기 위한 직렬 탄성 액추에이터의 모델링을 분석하며, 3장에서는 가변 강성 시스템을 설계 및 제작한다. 4장에서는 무게에 따른 현가장치로서의 성능을 실험을 통해 결과를 확인하고 고찰하며, 마지막 장에서 본 연구의 결론을 도출한다.

2. 직렬 탄성 액추에이터 모델링

2.1 직렬 탄성 액추에이터

직렬 탄성 액추에이터는 액추에이터 출력 부에 직렬로 탄성체가 연결되어 있는 것이다.

[Fig. 1]은 직렬 탄성 액추에이터의 대략적인 구조 나타낸 것이다. 구성은 기본적으로는 모터, 스프링, 부하 이렇게 구성되어 있으며 사용에 따라 모터와 스프링 사이에 gear를 추가하여 사용할 수 있다.

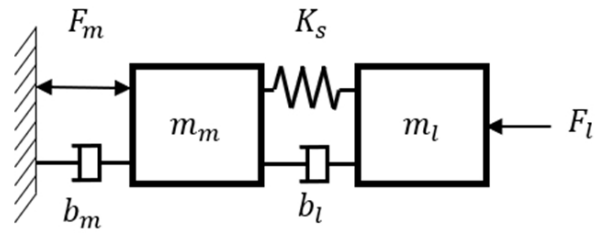


[Fig. 1] Structure of SEA

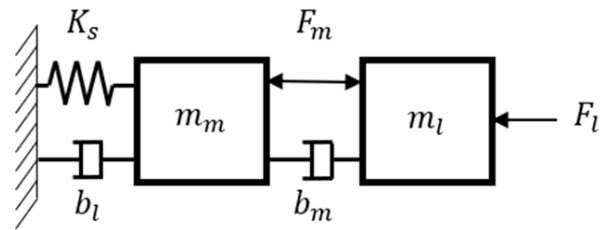
2.2 종류

직렬 탄성 액추에이터의 종류는 탄성 요소의 배치에 따라 두 가지의 유형으로 분류할 수 있습니다. 하나는 FSEA이고 다른 하나는 RFSEA이다.

두 타입의 차이점은 [Fig. 2]와 [Fig. 3]에서 구분되어 지는



[Fig. 2] Generalized dynamic model of the FSEA



[Fig. 3] Generalized dynamic model of the RFSEA

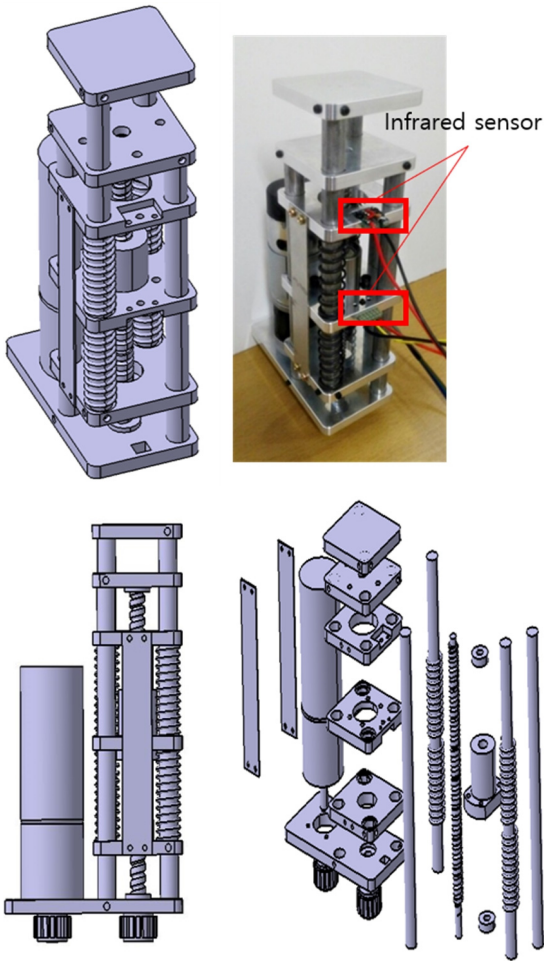
것처럼 스프링의 위치에서 차이가 난다⁷⁾. [Fig. 2]는 FSEA의 Model을 나타내고 [Fig. 3]는 RFSEA의 Model을 나타낸다. FSEA는 스프링의 질량을 모터 관성과 하나로 볼 수 있다. 그 이유는 스프링이 모터의 회전자와 동역학적으로 연결되어 있고, 모터의 동역학에 대한 스프링 질량의 영향이 같은 방식으로 작용하기 때문이다. RFSEA의 경우에는 동역학적 관계가 다르기 때문에 스프링의 질량은 모터 관성과 별도로 고려되어야 한다^{8,9)}.

위 모델에서 b_m 과 b_l 은 각각 모터 부와 부하부의 감쇠 계수이고, K_s 는 스프링 상수이다.

SEA에서 가장 중요한 요소는 외력을 측정하는 것으로 FSEA의 경우에는 모터는 지면에 직접 연결되고 하중에 가해지는 힘은 스프링을 통해 전달되므로 스프링의 변위를 이용하여 직접 힘을 측정할 수 있다. 또한 RFSEA는 모터와 지면 사이에 스프링이 위치하고 모터의 torque가 ball-screw를 통해 부하에 전달되면 스프링은 전달된 torque와 결합된 반력을 측정한다. 본 연구에서는 스프링은 외력을 측정하기 위한 도구로 사용되며 부하에서 받는 충격을 흡수하기 용이한 FSEA를 사용한다.

2.3 직렬 탄성 액추에이터 설계

[Fig. 4]는 CATIA 프로그램을 사용하여 직렬 탄성 액추에이터를 설계하고 제작한 모습이다. 기본 구성은 모터, Ball-Screw, 스프링, 적외선 센서, 부하로 구성되어 있다. 적외선 센서는 상단 스프링의 양 끝에 부착하여 외력에 의해 압축되는 길이를 측정할 때 사용된다. Ball-screw는 모터의 회전 운동을 직선

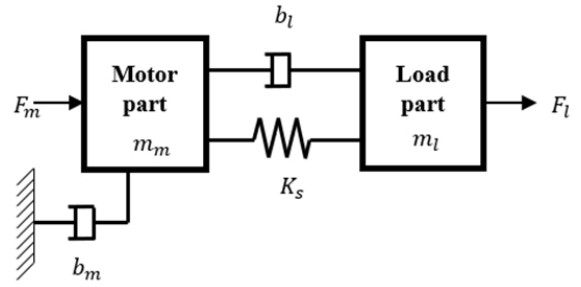


[Fig. 4] Designed and manufactured FSEA

운동으로 변환하기 위해 사용되며 너트와 함께 중심 판에 연결되어 액추에이터의 구동을 수행한다. 전체적인 구조는 주행 로봇이나 운송용 로봇에 사용할 것을 고려하여 높이를 최소화 하기위해서 모터와 모터를 제외한 부분을 병렬 구조로 설계하고 모터의 구동력을 Ball-screw에 전달하기 위해 pulley와 timing-belt를 사용한다.

2.4 모델링

FSEA에 대한 일반화된 동역학 모델링을 참고하여 시스템에 맞는 동역학 인자의 값을 도출한다. 직렬 탄성 액추에이터는 기본적으로 크게 두 부분으로 구성된 유연한 시스템이며 두 개의 질량 동역학 모델을 사용한다^[10]. FSEA에서는 스프링과 모터를 하나의 시스템으로 보고 부하 부와 모터 부로 구분한다. 본 논문에서 제안한 시스템은 회전 운동이 아닌 직선 운동이기 때문에 모터 및 부하의 회전 관성을 질량으로 각도를 길이로 대체한다.



[Fig. 5] Dynamic model of the FSEA

직렬 탄성 액추에이터의 동역학 모델은 [Fig. 5]와 같다. 모터 부는 기본적으로 모터의 구동과 직결된 모터와 ball-screw를 포함하고 두 부품을 연결해주는 pulley와 timing belt까지 포함한다. 부하 부는 부하에 외력을 가했을 때 움직이는 모든 부분을 포함한다^[11].

외력이나 모터의 구동에 의해 모터 부 및 부하부, 위치에 따른 스프링의 변위를 각각 x_m, x_l, x_s 라고 표현한다.

$$m_x \ddot{x}_m + b_m \dot{x}_m = F_m + N^{-1}F_l \tag{1}$$

$$K_s x_s = F_l \tag{2}$$

$$m_l \ddot{x}_l + b_l \dot{x}_l = F_l - F_{ext} \tag{3}$$

식 (1)~(3)은 각 질량 및 감쇠 계수 혹은 스프링 상수로 구성된 시스템에서 변위에 따른 힘을 구하는 식이다^[12]. 세 시스템의 동역학은 gear를 통한 기구학적 구속 조건 아래에 있으며, gear 비는 N으로 주어진다.

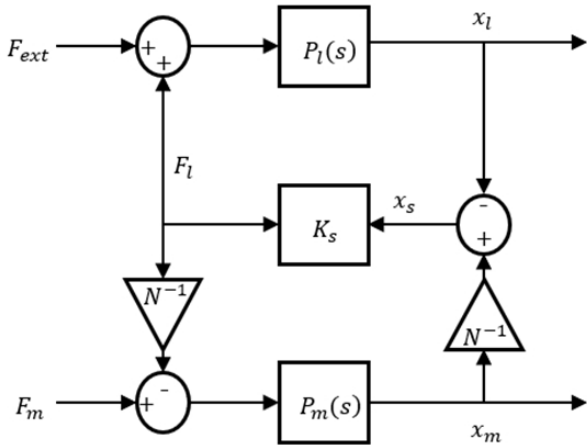
$$P_m(s) = \frac{1}{m_m s^2 + b_m s} \tag{4}$$

$$P_s(s) = 1/K_s \tag{5}$$

$$P_l(s) = \frac{1}{m_l s^2 + b_l s} \tag{6}$$

식 (1)~(3)을 기준으로 각 시스템을 라플라스 변환을 하면 식 (4)~(6)과 같이 표현이 가능하다.

라플라스 변환을 통해 구한 식을 바탕으로 최종적으로 FSEA의 블록 다이어그램은 [Fig. 6]와 같이 나타난다^[13,14]. 제안된 시스템에서의 gear 비는 1 : 1로 설계되었기 때문에 N은 1의 값을 가진다.

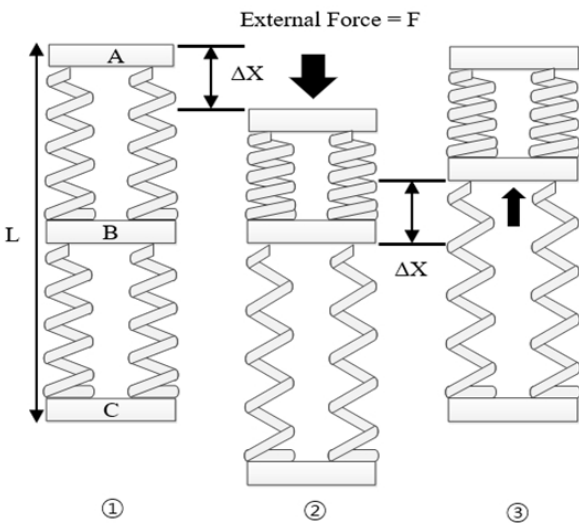


[Fig. 6] Block diagram of FSEA dynamics

3. 구조 설계 및 제어기 설계

3.1 직렬 탄성 액추에이터 구동

기본적인 직렬 탄성 액추에이터의 구조는 앞 절에서 설계 및 제작한 구조와 같으며, 기본 구동은 [Fig. 7]과 같이 A판에 외력 및 부하가 가해지게 되고 외력에 의해 상단부의 스프링은 압축되고 하단부의 스프링은 인장하게 된다. 이 때 A판과 B판에 적외선 센서를 부착하여 상단에 배치된 스프링의 길이 변화(Δx)를 측정하고 후의 법칙 $F=K \cdot \Delta x$ 를 이용하여 외력을 계산한다. 계산된 외력을 통해 그에 상응하는 힘만큼 모터를 구동시켜 ball-screw로 연결된 B판을 상승 또는 하강할 수 있다. 이와 같은 방법으로 최종적으로 A판은 항상 평형을 유지한다.



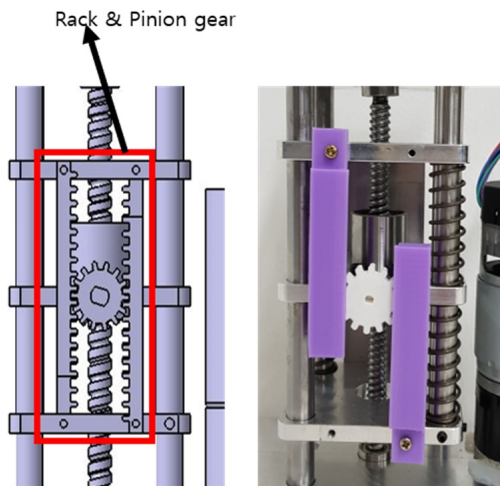
[Fig. 7] Operation of FSEA

3.2 가변 강성 구조 설계

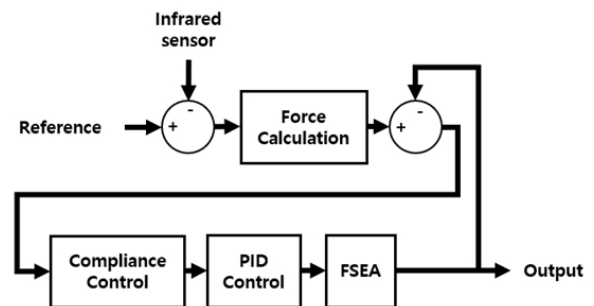
[Fig. 8]에서 스프링의 강성을 조절하기 위해 스프링의 길이를 고정해주는 판 대신 rack & pinion gear를 사용한다. 스프링을 고정하는 양 끝단에 rack gear를 부착하고, 가운데에는 pinion gear를 부착한다. Pinion gear 중심부에는 모터를 추가적으로 연결하고 연결된 모터를 회전시키는 것으로 양쪽의 rack gear를 제어한다. [Fig. 8]에서 pinion gear를 시계방향으로 회전시키면 스프링을 고정하고 있는 rack gear의 간격이 멀어지게 되고 스프링은 인장하게 된다. 반대로 반시계 방향으로 회전시키면 rack gear의 간격이 가까워지고 되고 스프링은 압축되게 된다. 이와 같은 방법으로 스프링의 강성을 제어한다.

3.3 제어기 설계

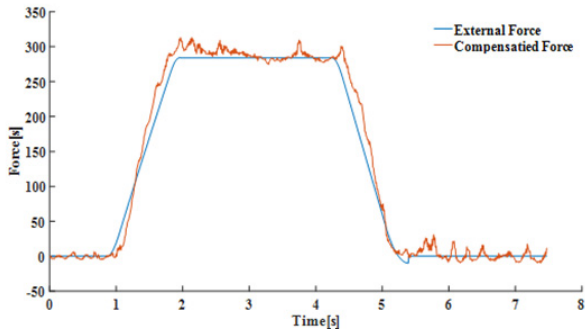
본 논문에서 사용된 직렬 탄성 액추에이터의 제어 알고리즘은 [Fig. 9]와 같다. MCU의 ADC로 측정된 적외선 센서 데이터를 기준 값과 비교하여 스프링의 변위(Δx)를 계산할 수 있다. 그리고 변위를 이용하여 외력을 계산하고 컴플라이언스 제어기 및 PID 제어기를 사용하여 액추에이터의 보상을 수행한다.



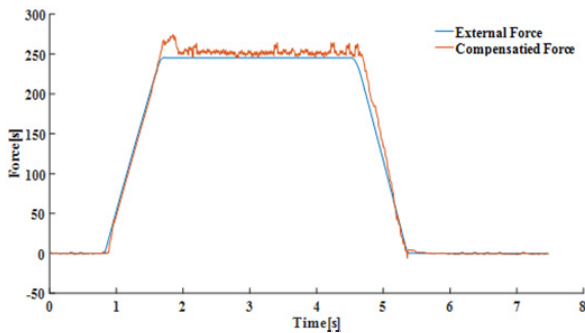
[Fig. 8] Designed and manufactured of variable stiffness FSEA



[Fig. 9] Control algorithm of FSEA



[Fig. 10] Compensation of SEA without controller



[Fig. 11] Compensation of SEA with controller

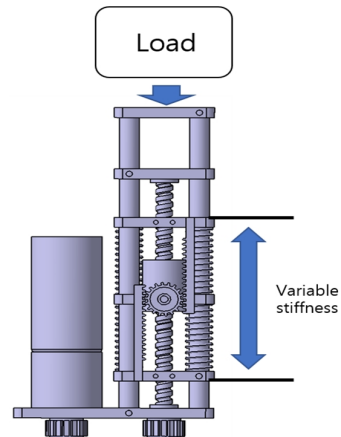
일반적으로 힘 제어만 할 경우에는 위치에 대한 오차가 발생할 가능성이 있고, 위치 제어만 할 경우에는 사용가능한 범위 이상의 힘을 사용하여 오류가 발생할 수가 있다. 따라서 컴플라이언스 제어를 통해 허용 범위 내에서의 힘과 위치를 제어함으로써 좀 더 유동적인 제어를 가능하게 된다. PID 제어기는 보다 정확한 액추에이터의 보상을 이루어 내고 응답 속도를 빠르게 만든다.

컴플라이언스는 변형이 되기 쉬운 정도를 표현하는 말이며, 컴플라이언스 제어기는 로봇이 주행 시에 노면의 상태에 따라 발생하는 발판의 흔들림을 힘과 위치 데이터를 이용하여 탑승자의 안정감을 향상시키기 위해 현가장치의 높이를 제어하는 것이 목표이다.

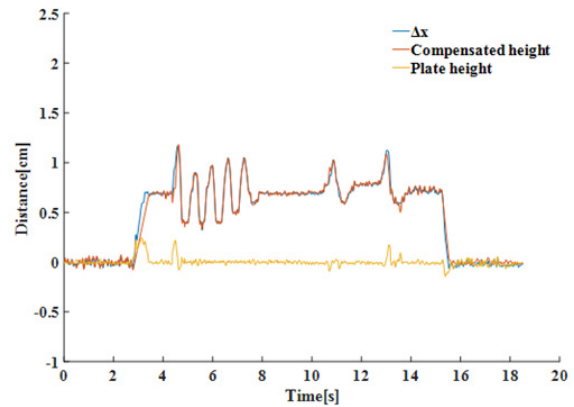
[Fig.10]과 [Fig.11]은 제어기를 적용하기 전과 후의 액추에이터 보상을 나타낸 것이다. [Fig.10]에서는 제어기가 없이 단순히 외력에 대한 액추에이터 보상만 이루어지는데 모터의 응답 속도 및 응답률이 매우 낮게 나타난다. 그에 비해 제어기를 적용한 [Fig.11]은 응답 속도 및 응답률이 높게 나타난 것을 보여준다.

4. 실험 및 결과

[Fig.12]에서 보이는 것과 같이 제안한 FSEA의 성능을 확인하기 위해서 다른 무게의 load를 가하여 무게에 따른 보상의



[Fig. 12] Compensation of SEA without controller

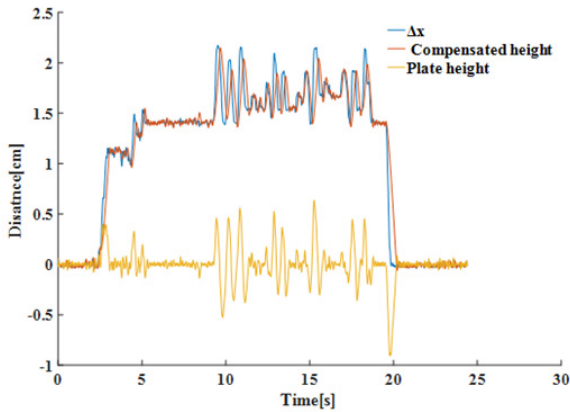


[Fig. 13] Experiment graph of spring ($K_s=50$ N/cm), Load (7 kg)

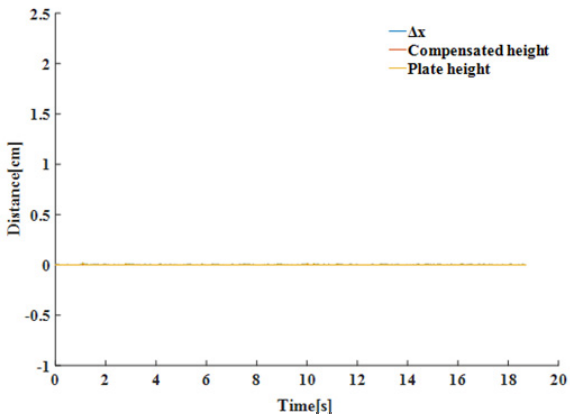
효율을 판단한다. 적외선 센서로 외력을 계산하고 모터를 이용하여 외력을 보상하는 실험을 진행한다. 그리고 추가적으로 rack gear를 조절하여 강성을 조절하고 변화한 강성을 동일한 load로 실험을 진행하여 강성이 변화한 상태에 따라 무게에 대한 보상 효율이 변화하는 것을 판단한다.

[Fig. 13]에서 파란 그래프는 외력에 의해 압축된 스프링의 길이를 표시하고 빨간 그래프는 외력에 상응하는 액추에이터의 보상을 나타낸다. 노란색 그래프는 직렬 탄성 액추에이터 상판인 일정 높이를 유지하고자 하는 판을 나타낸다. [Fig. 13]는 약 7kg의 질량을 가진 물체를 올린 후 스프링의 강성이 약한 상태에서 실험한 그래프이다. 스프링의 강성에 적합한 부하로 액추에이터의 보상을 통해 발판의 높이가 평균적으로 약 ± 0.1 cm 미만의 변위를 가지고 움직이는 것을 확인할 수 있다.

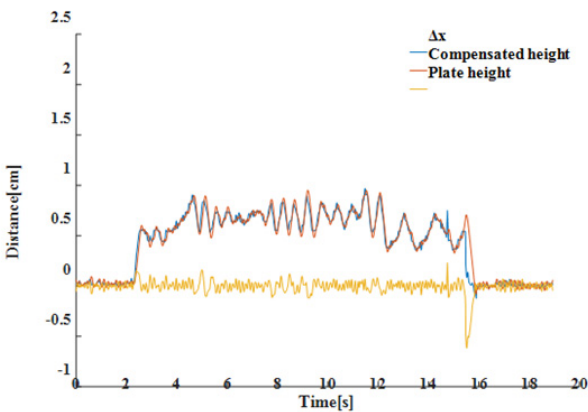
하지만 [Fig. 14]에서 보여지는 것처럼 스프링의 강성이 약한 상태에서 약 16kg의 질량을 가진 물체를 올린 후 실험을 진행하면 스프링의 가변 범위도 증가하고 액추에이터가 응답 속도를 따라가지 못하면서 발판의 높이가 약 ± 0.5 cm의 변위를 가지고 움직이는 것을 확인할 수 있다.



[Fig. 14] Experiment graph of spring ($K_s=50$ N/cm), Load (16 kg)



[Fig. 15] Experiment graph of spring ($K_s = 150$ N/cm), Load (7 kg)



[Fig. 16] Experiment graph of spring ($K_s = 150$ N/cm), Load (16 kg)

[Fig. 15]에서는 스프링의 강성을 강한 상태로 조절하고 다시 무게가 약 7 kg인 물체를 올린 후 실험한 그래프이다. 스프링의 강성에 비해서 가해지는 부하가 작아 스프링의 변위가 거의 발생하지 않게 되고 시스템에서 외력을 인지하지 못하게 된다. 이러한 상황에서의 문제점은 판의 높이는 일정하게 유지되지만 스프링의 변위가 발생하지 않아 주행 시 발생하

는 모든 충격은 물체가 그대로 받게 된다. 이런 경우에는 직렬 탄성 액추에이터를 사용하는 목적 중에 하나인 충격 완화에 효과적이지 못하다. [Fig. 16]는 위와 같은 스프링의 강성이 강한 상태에서 약 16 kg의 물체를 올린 후 실험한 그래프이다. [Fig. 15]와 비교했을 때 외력에 의한 변화가 크게 발생하지 않으면서 액추에이터의 보상도 비교적으로 잘 이루어져 발판의 높이가 약 ± 0.1 cm 미만의 변위를 가지고 움직이는 것을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 Personal Mobility의 안전성 증가를 위하여 외력에 대한 충격을 흡수하고 보상하는 능동형 현가장치로 사용할 수 있는 FSEA를 설계하였고 가변 강성 시스템을 적용하여 스프링이 견딜 수 있는 부하의 범위를 증가시켰고 컴플라이언스 제어기를 사용하여 외력에 대한 보상을 더욱 유연하게 제어하였다. 외력을 측정하기 위해 고가의 torque 센서가 아닌 스프링의 변위를 이용하여 저가의 적외선 센서로 외력을 측정하였고 FSEA의 모델링을 통하여 스프링 상수를 도출하였다. 그리고 FSEA를 제작하여 컴플라이언스 제어기 및 가변 강성 시스템을 적용하여 실험을 진행하였고 외력에 대한 보상이 잘 이루어지는 것을 확인하였다.

본 논문에서 제안한 직렬 탄성 액추에이터는 다수의 직렬 탄성 액추에이터를 사용하여 세그웨이와 같은 주행 로봇의 능동형 현가장치로 사용할 것이고, 가변 강성의 특성을 이용하여 실시간으로 현가장치에 가해지는 외력을 측정하고 외력의 크기에 따라 강성을 가변하여 발판을 제어하고 탑승자의 안정감을 증가시킬 것이다. 하지만 불안정한 노면에서의 주행과 같은 외력의 변화가 빠르게 진행되면 응답 속도 및 모터의 동작 속도의 한계로 보상이 지연되는 문제가 발생할 수 있다. 향후에는 추가적인 제어기 및 모터의 변경 등의 방법으로 보다 안정적이고 빠른 응답의 제어에 관한 연구를 진행할 예정이다.

References

- [1] Y. Chen, Z.-L. Wang, J. Qiu, and H.-Z. Huang, "Hybrid Fuzzy Skyhook Surface Control Using Multi-Objective Microgenetic Algorithm for Semi-Active Vehicle Suspension System Ride Comfort Stability Analysis," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 134, no. 4, pp. 1-14, 2012.
- [2] S.-H. Lee, "A Derivation of the Equilibrium Point for a Controller of a Wheeled Inverted Pendulum with Changing Its Center of Gravity," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol.18, no.5, pp. 496-501, 2012.

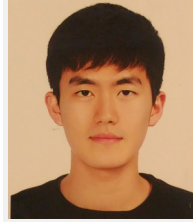
- [3] J. Yu, Y. Kim, and S. J. Kwon, "Nonlinear Model-Based Disturbance Compensation for a Two-Wheeled Balancing Mobile Robot," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 22, no. 10, pp. 826-832, 2016.
- [4] K. Isik, S. He, J. Ho, and L. Sentis, "Re-Engineering a High Performance Electrical Series Elastic Actuator for Low-Cost Industrial Applications," *Actuators*, vol. 6, no. 1, pp. 1-16, 2017.
- [5] G. Wang, *Recent Advances in Robotic Systems*, INTECH, 2016, p. 203.
- [6] A. G. L. Junior, R. M. de Andrade, and A. B. Filho, 2015, Nov., 13, "Series Elastic Actuator: Design, Analysis and Comparison," *Recent Advances in Robotic Systems*, [Online]. Available: <https://www.intechopen.com/books/recent-advances-in-robotic-systems/series-elastic-actuator-design-analysis-and-comparison>.
- [7] N. Paine, S. Oh, and L. Sentis, "Design and Control Considerations for High-Performance Series Elastic Actuators," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 19, no. 3, June 2014.
- [8] Y. Park, N. Paine, and S. Oh, "Development of Force Observer in Series Elastic Actuator for Dynamic Control," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no 3, March 2018.
- [9] C. Lee, S. Kwak, J. Kwak, and S. Oh, "Generalization of Series Elastic Actuator Configurations and Dynamic Behavior Comparison," *Actuators*, vol. 6, no. 3, pp. 1-26, 2017.
- [10] S. M. Mizanoor Rahman and R. Ikeura, "A Novel Variable Impedance Compact Compliant Ankle Robot for Overground Gait Rehabilitation and Assistance," *Procedia Engineering*, vol. 41, pp. 522-531, 2012.
- [11] H. Yu, S. Huang, G. Chen, and N. Thakor, "Control design of a novel compliant actuator for rehabilitation robots," *Mechatronics*, vol. 23, no. 8, pp.1072-1083, 2013.
- [12] E. Sariyildiz, G. Chen, and H. Yu, "Robust Position Control of a Novel Series Elastic Actuator via Disturbance Observer," *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Hamburg, Germany, 2015.
- [13] A. Calanca, L. Capiasani, and P. Fiorini, "Robust Force and Impedance Control of Series Elastic Actuators," *MDPI - Actuators*, vol. 3, no. 3, pp. 182-204, 2014.
- [14] H. Yu, M. STA Cruz, G. Chen, S. Huang, C. Zhu, E. Chew, Y. S. Ng, and N. V. Thakor, "Mechanical Design of a Portable Knee-Ankle-Foot Robot," *2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Karlsruhe, Germany, 2013.



방진욱

2017 신라대학교 전자공학과(학사)
2017~현재 부산대학교 전자공학과(석사)

관심분야: 모터 제어, 센서 제어, 주행 로봇



박은재

2013~현재 부산대학교 전자공학과 (학사)

관심분야: 기계 설계, 센서 제어



최민식

2013~현재 부산대학교 전자공학과(학사)

관심분야: 기계 설계, 센서 제어



이근일

2013~현재 부산대학교 전자공학과(학사)

관심분야: 기계 설계, 센서 제어



이동형

2013~현재 부산대학교 전자공학과(학사)

관심분야: 모터 제어



이장명

1980 서울대학교 전자공학과(학사)
1982 서울대학교 전자공학과(석사)
1990 미국 남기주대학교 전자공학과(박사)
1992~현재 부산대학교 전자공학과 교수

관심분야: 특수환경 Navigation and Localization, 지능로봇시스템 설계 및 제어, 마이크로프로세서 응용



박정호

2012~현재 부산대학교 전자공학과(학사)

관심분야: 모터 제어, 센서 제어