

소형로봇을 위한 원추형 스프링 기반의 도약 메커니즘의 개발

김병상[†] · 이장운* · 김현중* · Vu Quy Hung* · 송재복**

Development of Conical Spring-based Jumping Mechanism for a Portable Robot

Byeong-Sang Kim, Jang-Woon Lee, Hyun-Jung Kim, Quy-Hung Vu and Jae-Bok Song

Key Words : Jumping (도약), Conical spring(원추형 스프링), One-way clutch(단방향 클러치), Planetary gear(유성기어), Guard robot(안전 로봇)

Abstract

It is desirable that the guard robot should be small-sized and light-weighted to increase its portability. In addition, it should be able to overcome a relatively high obstacle to cope with different situations. The jumping robot can reach a higher place more rapidly than other locomotion methods. This research proposes the jumping mechanism based on the conical spring for a small robot. Both the clutch mechanism and conical spring are incorporated into the jumping mechanism. In the clutch mechanism, the spring can be immediately compressed and released by one actuator with the planetary gear train and one-way clutch. The robot equipped with the jumping mechanism can overcome the obstacles which are higher than its height. In this paper, the characteristic of the conical spring for the jumping robot is determined and the small-sized, light-weight jumping mechanism is developed. The validity of the jumping mechanism was verified by various experiments. It is shown that the robot using this mechanism can provide good mobility in the rough terrain.

1. 서 론

주어진 환경에서 임무를 수행하는 산업용/서비스용 로봇과는 다르게 경비로봇은 실내외에서 순찰 및 감시기능을 수행하여야 하므로, 로봇의 이동성(mobility)이 매우 중요하다. 그리고 경비로봇은 이동 공간에 제약을 받지 않아야 하므로 크기가 작고, 경비원들이 휴대할 수 있도록 가벼워야 한다. 그러나 로봇의 크기가 작으면 극복할 수 있는 장애물의 높이 또한 낮아지므로, 소형이면서 동시에 이동성을 향상시킬 수 있는 방법이 많이 연구되고 있다.

일반적으로 로봇의 이동성을 향상시키기 위해서는 바퀴를 이용하는 이동방법과 도약을 이용하는 이동방법으로 나누어 볼 수 있다. 주행 환경에 따라 바퀴의 직경이 변하거나, 계단과 같은 장애물을 극복할 수 있는 바퀴처럼 특화되어 있는 바퀴는 로봇의 이동성을 향상시킨다. 그리고 도약을 이용한 이동은 계단과 같이 높은 장애물을 극복할 경우 다른 이동방법에 비하여 빠르며, 효과적이다. 그러나 바퀴 구조는 극복할 수 있는 장애물의 높이가 바퀴의 크기에 영향을 받으므로, 높은 장애물을 극복하기에는 근본적인 한계가 있으며, 도약은 평지를 주행하는 데 있어서 매우 비효율적이다. 도약 기능을 갖는 로봇은 도약할 때 원하는 높이(jumping)와 방향(steering)으로 뛸 수 있어야 하며, 착지 시 발생하는 충격에 대하여 강인한 구조를 가지고 있어야 하고(shock-absorbing), 착지 후 자세를 유지할 수 있어야 한다(self-righting)^[1]. 지

† 고려대학교 기계공학과
E-mail : lovidia@korea.ac.kr
TEL : (02)923-3591 FAX : (02)923-3591

* 고려대학교 기계공학과

** 고려대학교 기계공학과

금까지 도약 기능을 구현하기 위하여 스프링의 탄성력, 공기의 압력, 화학 연료의 폭발력 등이 사용되었다. Papanikolopoulos는 얇은 판 스프링과 클러치를 이용한 도약 메커니즘을 개발하였으며, 도약으로 계단을 오를 수 있는 소형 원통로봇인 Scout를 개발하였다^[2]. Yi 또한 판 스프링과 캠을 이용하여 도약 기능을 구현한 SECUBOT을 개발하였다^[3]. Quinn은 4절 평행 링크와 압축스프링을 이용한 Mini-Whegs를 개발하였다. Mini-Whegs는 구조가 매우 단순하며, 크기가 작으면서도 높은 이동성을 가지고 있다^[4]. Tanaka는 실린더와 공압을 이용하여 도약할 수 있는 Leg-in-Rotor를 개발하였다. Leg-in-Rotor는 평지주행 성능이 우수할 뿐 아니라 벽돌, 나무 등이 많이 쌓여있는 환경에서도 우수한 주행성능을 보였다^[5]. 그리고 Fischer는 연소 에너지를 이용하여 매우 높이 도약할 수 있는 Hopper를 개발하였다^[6]. 그러나 Scout, SECUBOT, Mini-Whege은 도약을 하기 위해서 스프링을 최대한 압축해야 하기 때문에 도약 높이 조절이 자유롭지 못하다. 그리고 Leg-in-Rotor는 크기 문제로 휴대하기 어렵고, Hopper는 도약 기능만 가지고 있어서 평지에서 이동 효율이 좋지 않다.

본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 도약 시 높이와 거리를 조절할 수 있는 도약 메커니즘을 개발하였다. 도약 메커니즘은 원추형 스프링(conical spring)과 클러치 메커니즘으로 구성되며, 클러치 메커니즘은 다시 유성기어(planetary gear)와 단방향 클러치(one-way clutch)로 구성된다. 클러치 메커니즘은 액츄에이터의 회전방향에 따라 스프링에 동력을 전달하거나 또는 동력을 차단한다. 따라서 도약을 할 때, 압축되어 있는 스프링의 길이를 조절하여 도약 높이를 제어할 수 있다. 또한, 원추형 스프링은 설치 시 부가적인 가이드 구조를 필요로 하지 않기 때문에 내부구조가 단순하며, 스프링의 압축길이를 최대한 활용할 수 있다.

본 논문에서는 비선형 특성을 갖는 원추형 스프링을 이용하여 소형의 도약 메커니즘을 개발하였다. 그리고 도약 메커니즘을 적용한 소형로봇을 제작하고, 주행 실험과 계단을 오르는 실험을 통하여 도약메커니즘을 사용할 경우 높은 이동성을 확보할 수 있음을 검증하였다.

2. 도약 메커니즘

본 연구에서 제안하는 도약 메커니즘은 원추형 스프링을 이용하여 로봇의 도약을 구현한다. 2.1절에서는 도약 모델링을 통하여 도약 메커니즘에 사용하기에 적당한 스프링 특성을 설명한다. 2.2절에서는 도약 로봇에 적용하기에 적당한 원추형 스프링에 대해서 설명한다.

2.1 도약 모델링

도약 로봇은 그림 1과 같이 본체와 발(foot)로 나누어지며, 이 둘은 스프링으로 연결된다. 본체는 로봇의 몸통, 바퀴, 제어부 등 발과 스프링을 제외한 모든 부분이며, 발은 스프링 끝에 연결되어 도약 시 지면과 마찰력을 확보하는 부분이다. 초기 상태(a)에서 스프링을 압축하면 (b)와 같이 본체의 무게중심이 아래로 이동하고, 압축이 풀리면 본체는 (c)와 같이 지면과 반대 방향으로 힘을 받아 이동한다. 이 때, 스프링에 저장되어 있던 탄성에너지는 본체의 운동에너지로 전환되고, 본체는 이동속도 v_1 으로 움직인다. 본체가 관성에 의하여 초기 위치를 지나면서 발은 들어올리고(d), 이 때 본체와 발이 이루는 전체 시스템의 이동 속도는 v_2 가 된다.

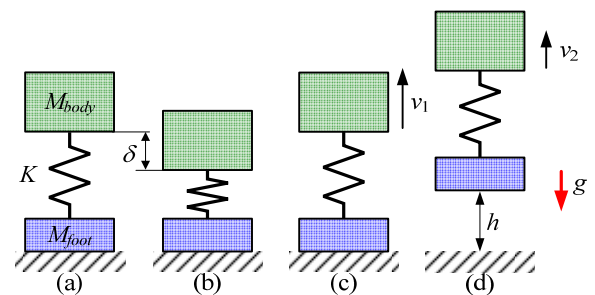


Fig. 1 Jumping model.

만약 스프링이 본체와 발에 고정되어 있고, 본체의 질량을 M_{body} , 발의 질량을 M_{foot} 라고 하면 다음과 같이 운동량 보존 법칙이 성립된다.

$$M_{body}v_1 = (M_{body} + M_{foot})v_2 \quad (1)$$

여기에 에너지 보존법칙을 적용하면 스프링 강성 K 와 변위 δ , 그리고 도약높이 h 사이의 관계를 얻을 수 있다.

$$h = \frac{1}{2g} \left(\frac{M_{body}}{M_{body} + M_{foot}} \right)^2 K \delta^2 \quad (2)$$

따라서 도약높이를 증가시키기 위해서는 발의 질량은 가벼워야 하고, 스프링은 강성과 변위가 커야 한다. 그러나 스프링 강성이 높으면 스프링을 압축하기 위하여 큰 토크를 낼 수 있는 모터가 필요하고, 또한 로봇의 크기가 제한되어 있으므로 변위를 증가시키는 것도 한계가 있다. 따라서 주어진 모터와 공간의 장점을 최대한 살릴 수 있는 스프링을 선택하여야 한다.

2.2 원추형 스프링

원추형 스프링은 특수 스프링 중 하나로서 강선을 나선형으로 감아서 제작하는 일반 나선형 스프링과 유사하다. 그러나 양단의 스프링 직경이 다르다. 그림 2와 같이 압축되었을 때 스프링의 길이가 작아서 축 방향의 공간이 제한적이고, 원주 방향의 공간에 여유가 있을 때 유용하며^[7], 크기가 작은 장점이 있다^[8].

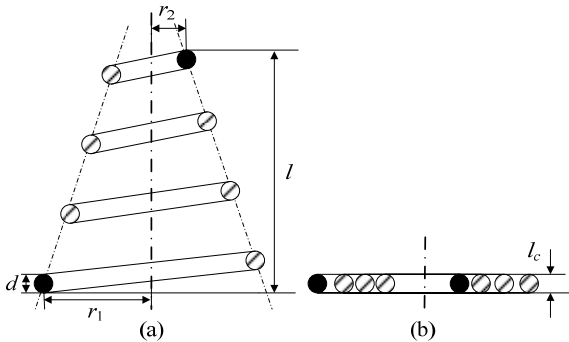


Fig. 2 Conical spring; (a) neutral, and (b) compressed.

원추형 스프링의 힘-변형 관계는 일반 나선형 스프링과 달리 그림 3과 같이 비선형 곡선으로 나타난다. P_1 에서 P_3 까지 하중을 증가시키면, δ_1 에서 δ_3 까지 변위가 증가하는데 변위가 증가하는 폭이 점차 줄어든다. 즉, 원추형 스프링은 초기 강성이 매우 작지만, 변형이 증가할수록 강성 또한 증가한다. 원추형 스프링 강성 $K_{conical}$ 은 다음과 같이 정의한다.

$$K_{Conical} = \frac{d^4 \cdot G}{16 \cdot n \cdot (r_1 + r_2) \cdot (r_1^2 + r_2^2)} \quad (3)$$

여기서, d 는 강선의 직경, G 는 전단탄성계수(shear modulus), r_1 은 스프링 큰 반경, r_2 는 스프링의 작은 반경, n 은 압축이 가능한 유효권선의 수다.

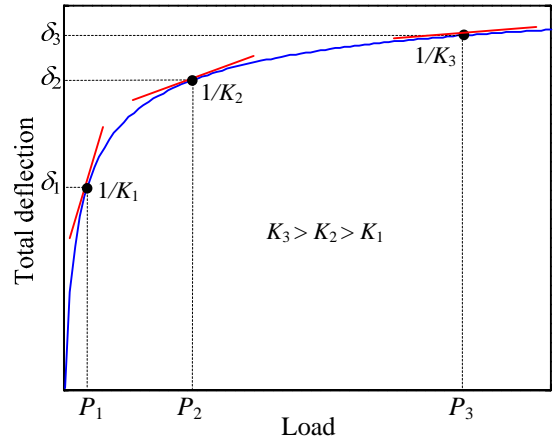


Fig. 3 Load-deflection curve of conical spring.

원추형 스프링은 그림 2(b)에서와 완전히 압축되었을 때 스프링 길이 l_c 가 강선의 두께 d 와 같으므로, 다른 스프링에 비하여 압축 길이가 길다. 또한, 일반 압축스프링은 좌굴(buckling)이 쉽게 발생하여 가이드 구조를 함께 사용하여야 한다. 그러나 원추형 스프링은 기하학적으로 좌굴에 강인하여 가이드를 없이 사용할 수 있다. 따라서 원추형 스프링은 도약기능을 갖는 소형 로봇에 적용하기에 적합하다.

3. 클러치 메커니즘

클러치 메커니즘은 모터의 회전 방향에 따라 스프링을 압축하거나, 압축되어 있는 스프링을 풀어준다. 본 장에서는 클러치 메커니즘의 구조와 작동 원리에 대해서 살펴본다.

3.1 클러치 메커니즘의 구조

그림 4(a)에서 볼 수 있듯이 클러치 메커니즘은 크게 유성기어와 단방향 클러치로 구성되어 있다. (b)는 유성기어의 모습을 나타낸 것이다. 일반적인 유성기어는 선기어(sun gear), 캐리어(carrier), 유성기어(planet gear), 링기어(ring gear)로 구성되는데, 본 메커니즘에서는 링기어를 줄을 감는 축에 고정되어 있는 와인더 기어(winder gear)로 대체하였다. (c)는 단방향 클러치를 보여주며, 클러치는 래칫휠(ratchet wheel)과 스톱퍼(stopper)로 구성되어 있다.

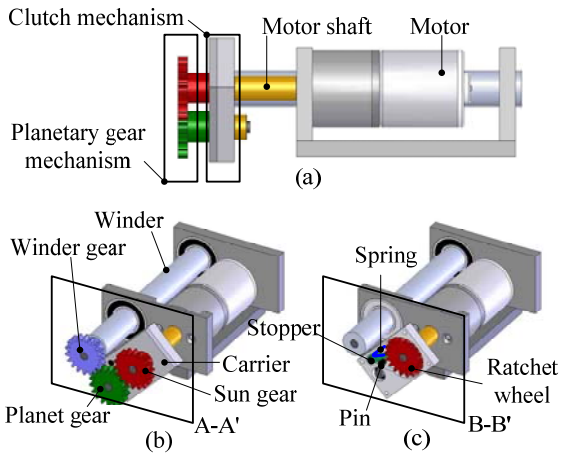


Fig. 4 Clutch mechanism; (a) front view, (b) planetary gear part, (c) clutch part.

3.2 클러치 메커니즘의 작동 원리

그림 5는 클러치 메커니즘의 동작 원리를 나타낸 것이다. 우선, 스프링을 압축하는 과정을 살펴보면 다음과 같다. 모터가 시계방향으로 회전하면, 모터에 고정되어 있는 선기어가 시계 방향으로 회전한다(I). 이 때, 선기어에 고정되어 있는 래칫휠 또한 시계 방향으로 회전하는데, 스톱퍼에 연결되어 있는 스프링이 래칫휠의 회전을 억제하여 캐리어가 회전하게 된다(II). 유성기어가 와인더기어를 만나 캐리어가 더 이상 회전하지 못하면, 스톱퍼는 래칫휠의 회전을 허용하며(III), 선기어의 동력은 유성기어를 거쳐(IV) 와인더기어로 전달된다(V). 따라서 와인더기어가 시계방향으로 회전하면 스프링에 연결되어 있는 줄을 감아서 스프링이 압축된다(VI).

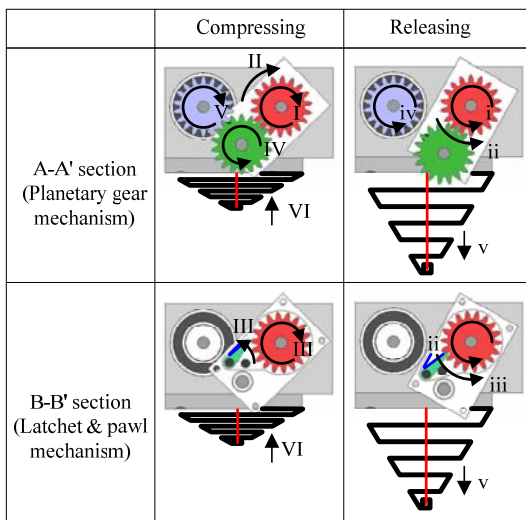


Fig. 5 Motions of clutch mechanism.

압축되어 있는 스프링을 풀어주기 위해서는 모터를 반시계 방향으로 회전시킨다(i). 이 때, 스톱퍼는 래칫휠이 반시계 방향으로 회전하는 것을 억제하고(ii), 이로 인해서 캐리어가 반시계 방향으로 회전하게 된다(iii). 캐리어가 반시계 방향으로 회전하면 와인더기어와 유성기어가 분리되어 와인더기어로 전달되던 힘이 사라져 와인더기어는 자유상태가 된다. 이 때, 압축되어 있던 스프링의 힘 때문에 와인더기어는 반시계 방향으로 회전하며(iv), 스프링은 빠르게 초기 위치로 복원된다(v).

이와 같이 클러치 메커니즘은 하나의 액츄에이터를 이용하여 두 가지 기능을 동시에 구현할 수 있도록 해 준다. 특히, 압축되어 있는 길이와 무관하게 스프링에 전달되는 동력을 차단할 수 있으므로, 도약 높이를 조절하는 데 매우 유용하다.

4. 제작 및 실험

4.1 원추형 스프링

그림 6(a)는 제작한 원추형 스프링을 보여준다. 스프링은 피아노 강선으로 제작되었으며, 직경은 3mm이고, 전단탄성계수가 $78 \times 10^3 \text{N/mm}^2$ 이다. 스프링의 큰 반경은 31mm, 작은 반경은 9mm, 그리고 코일을 감은 횟수는 7회, 초기 상태에서의 길이는 10cm이다. (b)는 힘과 변위 사이의 관계를 나타낸 것으로, 그래프의 기울기는 스프링 강성 K 의 역수이다. 원추형 스프링의 특성상, 변위가 증가할수록 스프링 강성 또한 증가하였다.

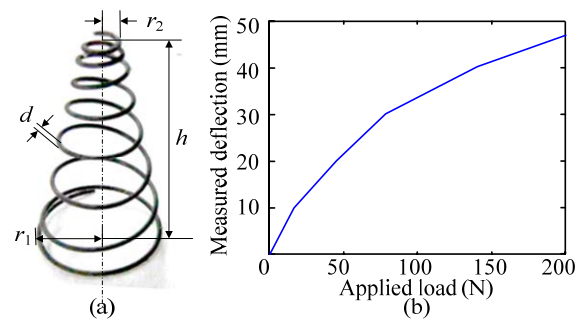


Fig. 6 Conical spring; (a) prototype, and (b) load-deflection curve.

4.2 도약 메커니즘

그림 7은 제작한 도약 메커니즘이다. 무게를 줄이기 위하여 일부 부품은 폴리아세탈(polyoxymethylene)을 사용하였고, 하중을 많이 받는 부품은 두랄루민을 사용하였다. 메커니즘의 최대 크기는 80x30x30mm이고, 질량은 약 120g이다. 도약용

모터의 감속기는 스프링을 완전히 압축할 수 있을 수 있도록 감속비를 높게 설계하였다. 또한, 스프링의 탄성력으로부터 기어가 파손되지 않도록 높은 허용하중을 갖는 유성기어 감속기를 사용하였다.

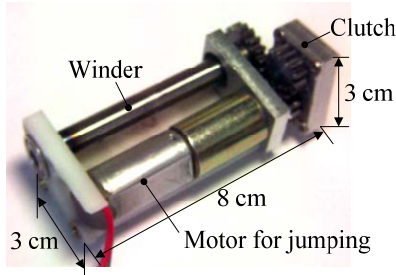


Fig. 7 Jumping mechanism using planetary gear and one-way clutch.

4.3 도약 로봇

그림 8은 원추형 스프링 기반 도약 로봇의 시제품이다. 바퀴는 착지할 때 발생하는 충격을 흡수할 수 있도록 스폰지를 사용하였다. 그리고 바퀴 구동용 모터의 감속기는 원하는 이동 속도를 얻을 수 있도록 감속비를 낮게 설계하였다.

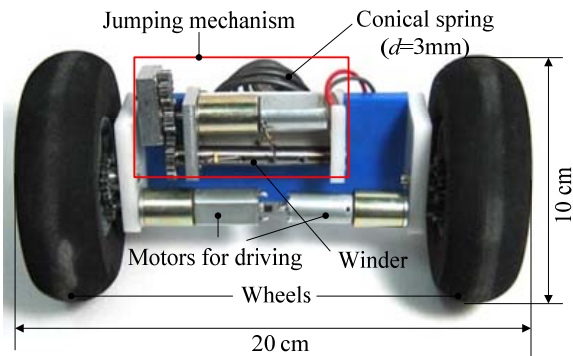


Fig. 8 Jumping robot based on jumping mechanism.

4.4 주행 및 도약 실험

제작한 소형 로봇을 이용하여 주행 및 도약 실험을 수행하였다. 주행 실험은 그림 9와 같이 타일이 붙어 있는 바닥과 흙/돌이 섞여 있는 바닥에 대하여 수행하였다. 그리고 그림 10과 같이 높이가 20cm로 일정한 대리석 계단과 높이가 다른 나무계단(15cm, 25cm)을 오르는 실험을 수행하였다.

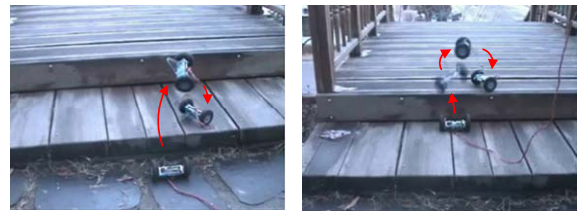
로봇의 주행 속도는 약 0.5m/s이며, 로봇이 도약할 수 있는 최대 높이는 50cm이다. 그리고 그림 10에서 볼 수 있듯이, 도약 기능을 갖는 소형로봇을 이용하여 계단을 오를 수 있음을 알 수 있다.



Fig. 9 Driving test.



(a)



(b)

Fig. 10 Jumping test; (a) marble stair (b) wooden stair.

5. 결론

본 연구에서는 소형로봇의 이동성을 향상시키기 위하여 도약 기능을 구현할 수 있는 원추형 스프링 기반의 도약 메커니즘을 개발하였다. 그리고 다양한 실험을 통하여 도약 메커니즘의 성능을 검증하였으며, 이로부터 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 도약 메커니즘은 원추형 스프링을 사용하여, 그 구조가 단순하며, 소형 로봇에 적용하기에 적합하다.
2. 유성기어와 단방향 클러치를 이용한 클러치 메커니즘은 하나의 액츄에이터를 이용하여 스프링을 압축하거나 풀어 줄 수 있다.
3. 도약 메커니즘은 스프링 압축 길이를 조절하여 도약 높이를 조절할 수 있다.

본 연구에서 개발한 도약메커니즘은 정찰, 경비 로봇 등의 소형 로봇에 적용할 수 있으며, 로봇의 이동성을 향상시킬 수 있다.

후 기

본 연구는 산업자원부 사회안전로봇 개발사업의 지원으로 수행되었음.

참고문헌

- (1) Paolo Fiorini, Joel Burdick, 2003, "The Development of Hopping Capabilities for Small Robots," *Autonomous Robots*, Vol. 14, 239~254.
- (2) Dean F. Hougen, Saifallah Benjaafar, Jordan C. Bonney, et al., 2000, "A Miniature Robotic System for Reconnaissance and Surveillance," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 501~507.
- (3) Eui-Jung Chung, Young-Sick Kwon, Jong-Tae Seo, Jung-Jae Jeon, Ho-Yeol Lee, Se-Jae Oh, Jae-Heon Chung, and Byung-Ju Yi, 2006, "Development of a Multiple Mobile Robotic System for Team Work," *SICE-ICASE International Joint Conference*, 4291~4296.
- (4) Jeremy M. Morrey, Bram Lambrecht, Andrew D. Horchler, Roy E. Ritzmann, Roger D. Quinn, 2003, "Highly Mobile and Robust Small Quadruped Robots", *IEEE International Conference on Intelligent Robots and System*, 82~87.
- (5) Hideyuki Tsukagoshi, Masashi Sasaki, Ato Kitagawa, Takahiro Tanaka, 2005, "Jumping Robot for Rescue Operation with Excellent Traverse Ability," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 841~848.
- (6) Gary J. Fischer, Barry Spletzer, 2003, "Long Range Hopping Mobility Platform," *Proceedings of the SPIE*, Vol.5083, pp. 83~92.
- (7) Nicholas P. Chironis, 1961, "Spring Design and Application," *McGraw-Hill*
- (8) John A. Roberts, 1954, "Spring Design and Calculation," *Technical Research Laboratory*, 7ed