

4절링크의 전달각에 기초한 충격흡수식 안전 메커니즘

박정준(고려대학교 기계공학과), 김병상(고려대학교), 송재복(고려대학교)

Shock Absorbing Safe Mechanism Based on Transmission Angle of a 4-bar Linkage

Jung-Jun Park, Byeong-Sang Kim, Jae-Bok Song (Dept. of Mechanical Eng., Korea Univ.)

ABSTRACT

Unlike industrial manipulators, the manipulators mounted on the service robots are interacting with humans in various aspects. Therefore, safety has been the important design issue. Many compliant robot arm designs have been introduced for safety. It is known that passive compliance method has faster response and higher reliability than active ones. In this paper, a new safe mechanism based on passive compliance has been proposed. Passive mechanical elements, specifically transmission angle of the 4-bar linkage, springs and shock absorbing modules are incorporated into this safe mechanism. This mechanism works only when the robot arm exerts contact force much more than the human pain tolerance. Validity of the safe mechanism is verified by simulations and experiments. In this research, it is shown that the manipulator using this mechanism provides higher performance and safety than those using other passive compliance mechanisms.

Key Words : safety(안전성), transmission angle(전달각), passive compliance(수동 컴플라이언스), manipulator(매니퓰레이터)

1. 서론

과거의 산업용 로봇과는 다르게 최근의 서비스 로봇은 인간과 공존하면서 작업을 수행하여야 한다. 로봇이 직접적으로 인간과 접촉하기 때문에 인간과 로봇간의 안전성이 중요한 문제로 부각되고 있다. 그러므로 로봇의 팔을 인간의 팔처럼 유연하게 설계하여 안전성을 해결하는 방법이 많이 연구되고 있다.

일반적으로 로봇 팔에 컴플라이언스(compliance)를 부여하기 위해서는 능동적인 방법과 수동적인 방법의 두 가지가 있다. 능동적인 방법은 로봇에 장착된 힘/토크 센서의 피드백 신호를 제어기에서 감지하여 외부에서 작용된 힘이나 충격에 대해 적합한 대처를 하는 것이다. 수동적인 방법은 스프링, 댐퍼 등의 요소를 이용하여, 기계적인 메커니즘으로 안전성을 구현하는 것이다.

능동적인 방법은 센서를 사용하고 피드백 신호에 의한 제어를 하기 때문에 안전성을 구현하는데 한계를 지니고 있다. 예를 들어, 비전센서를 사용할 경우 분해능이 낮기 때문에 빠른 속도로 외부충격

이 가해지면 이에 따른 즉각적인 대처가 어렵다. 또한, 센서의 신호에 노이즈가 섞이면 오작동의 위험도 있다. 그러나 수동적인 방법은 특별한 센서를 사용하지 않고 기계 메커니즘으로 충격을 흡수하기 때문에 반응속도가 빠르고 오작동의 위험이 작다.

이제까지 수동 컴플라이언스를 구현하는 메커니즘에 대한 연구가 많이 수행되어 왔다. Laurin Kovitz^[1]가 개발한 Programming passive impedance 메커니즘은 비선형 스프링과 바이너리 댐퍼를 사용하여 사람 근육의 작동 원리를 구현하였다. Morita and Sugano^[2]는 가변 스프링과 전기 브레이크를 이용하여 Mechanical impedance adjuster를 제안하였다. Okada^[3]는 Programmable passive compliance shoulder를 탄성 링크를 이용하여 개발하였다. 그리고 Kang^[4]이 회전형 스프링과 MR 댐퍼로 구성된 Passive compliance joint를 서비스 로봇의 팔 관절부에 적용하였다.

위에서 열거한 기존의 안전팔들은 관절부에 스프링과 댐퍼를 장착한 공통점이 있다. 스프링을 이용하면 충격을 흡수하는 데 매우 효과적이지만, 진동이 발생한다. 댐퍼를 이용하여 스프링의 진동을

감쇠시킬 수 있지만, 관절부가 비대해지고 복잡한 능동제어 기법이 적용되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 수동적인 방법만을 사용하여 인간과 로봇 상호간의 안전을 유지할 수 있는 메커니즘을 개발하였다.

본 연구에서 개발한 수동 안전 메커니즘은 스프링과 4절링크, 그리고 분할 모듈로 구성되어 있다. 안전 메커니즘에서 스프링과 분할 모듈은 외부에서 가해지는 충격에 유연하게 대처하여 안전성을 높이고, 4절링크는 전달각의 특성 때문에 안전 메커니즘이 작은 외력에 반응하지 않도록 하여 작업성을 향상시킨다. 지금까지 많은 연구들은 안전성의 이득을 얻기 위하여 작업성의 손해를 보거나 또는 그 반대였다. 그러나 본 메커니즘은 상황에 따라 안전성과 작업성의 기능을 최대화하였다. 따라서 작업의 효율을 높일 수는 동시에 충돌에 대한 안전성도 높일 수 있다.

본 논문에서는 스프링과 4절 링크, 그리고 분할 모듈로 구성된 안전 메커니즘을 설계하고, 시뮬레이션을 통하여 성능을 확인한 후 프로토타입을 제작하였다. 그리고 강제와 안전 메커니즘에 충돌 실험을 수행하여, 안전 메커니즘의 충격 흡수 성능을 비교하였다.

2. 안전 메커니즘의 설계

2.1 메커니즘의 구성

2.1.1 4절링크의 전달각과 스프링

일반적으로 로봇의 성능을 향상시키기 위해서는 강성을 크게 하여야 하지만, 충돌시의 안전성을 높이기 위해서는 강성을 작게 하여야 한다. 따라서 로봇의 성능과 안전성 측면에서 어느 정도의 외력까지는 강성이 커야 하고, 사람에게 상해를 줄 수 있는 외력 이상에서는 강성이 감소하는 것이 바람직하다. 이러한 기능을 구현하기 위하여 스프링과 4절링크를 이용하였다.

코일 스프링은 외력의 크기와는 무관하게 일정한 강성을 갖고, 후의 법칙에 따라 스프링의 변위에 비례하여 탄성력이 증가한다. 기존의 스프링에서 원하는 안전한 특성을 얻기 위하여 4절링크의 전달각(transmission angle)을 이용하였다.

전달각은 Fig. 1과 같이 floating 링크의 상대속도(V_{BA})와 output 링크의 절대속도(V_B) 사이의 각도 γ 로 정의된다. 4절링크에서는 floating 링크 중심선과 output 링크 중심선 사이의 각도로 간단히 정의되기도 한다. 평면 링크기구의 경우 가장 효율적으로 동력을 전달할 수 있는 전달각은 90° 이다. 전달각이 $40^\circ \sim 45^\circ$ 보다 작거나 $135^\circ \sim 140^\circ$ 보다 크다면 동력

전달에 어려움이 있다. 즉, 4절링크의 전달각이 135° 보다 큰 경우 링크를 작동시키기 위해서는 큰 힘이 필요하다. 그러나 전달각이 $45^\circ \sim 135^\circ$ 사이의 값이 되면 힘이 점점 효율적으로 전달되어 4절링크의 작동이 용이하게 된다.

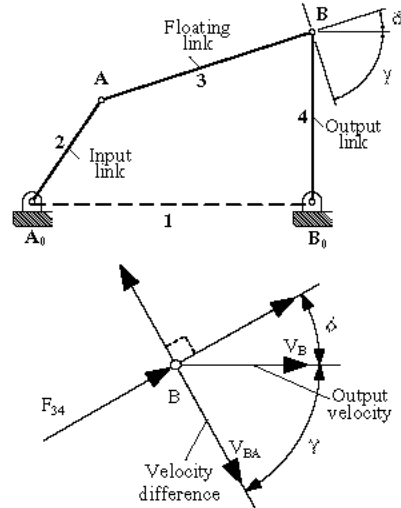


Fig. 1 Transmission angle of a 4-bar linkage.

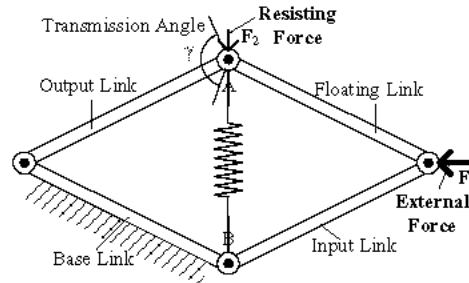


Fig. 2 4-bar mechanism combined with spring

Fig. 2는 4절링크에서의 힘 전달 관계를 나타낸다. 4절링크 input 링크 끝에 외력 F_1 을 가하였을 때, 동력전달을 막기 위해서는 F_2 의 힘이 필요하다. 외력 F_1 과 저항력 F_2 의 관계는 다음과 같다.

$$F_2 = \frac{F_1}{\tan(\gamma/2)} \quad (1)$$

이 식에서 전달각 γ 의 값이 180° 이면 외력 F_1 이 작용하여도 동력이 전달되지 않는다. 따라서 전달각이 180° 근방이 되도록 4절링크의 초기위치를 설정하면, 외부에서 가해지는 힘보다 훨씬 작은 힘만으로 초기상태를 유지할 수 있다.

여기서 Fig. 2의 점A, B 사이에 스프링을 장착하면 외력에 대한 저항력을 제공할 수 있다. 임계충

격력 이하의 외력에서는 전달각과 스프링의 힘에 의해서 4절링크가 초기 상태를 유지하게 된다. 그러나 임계충격력 이상의 외력이 가해지면 4절링크의 전달각이 작동가능 영역으로 변하여 스프링이 인장된다. 다시 외력이 제거되면 스프링의 힘에 의하여 4절링크가 초기상태로 복귀한다.

2.1.2 와이어와 충격흡수 모듈

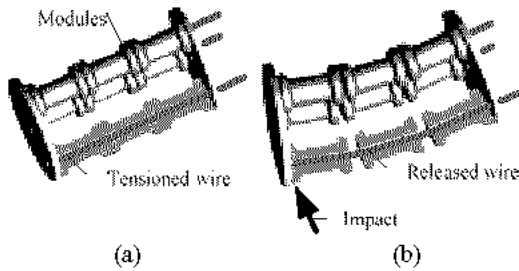


Fig. 3 Shock absorbing modules and wire; (a) before collision and (b) after collision.

Fig. 3(a)와 같이 원통 형상의 모듈들을 와이어로 연결하여 고정하였다. 평상시에는 와이어의 장력 때문에 모듈들이 단일 링크처럼 결합을 유지한다. 그러나 외부에서 충격이 가해지면, 충격력에 의해서 와이어 지지부분이 움직여 와이어가 느슨하게 되며, 이로 인하여 Fig. 3(b)와 같이 각 모듈들이 분리됨으로써 외부 충격을 흡수할 수 있게 된다. 충격시 와이어의 장력이 감소하는 원리는 다음 절의 Fig. 5에서 설명된다.

2.2 프로토타입의 설계

2.2.1 프로토타입 모델링

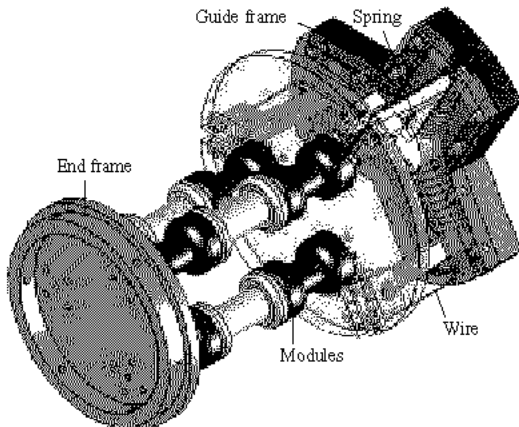


Fig. 4 Concept of proposed safe mechanism.

수동 컴플라이언스 안전 메커니즘을 개발하기

위하여 4절링크의 전달각과 스프링, 그리고 모듈-와이어 시스템을 조합한 프로토타입을 Fig. 4와 같이 설계하였다.

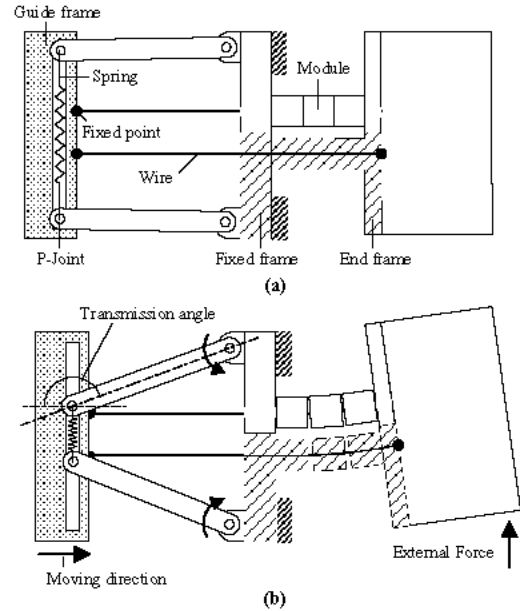


Fig. 5 Modified 4-bar mechanism; (a) before collision and (b) after collision.

충격흡수식 메커니즘은 로봇 팔의 안전성을 향상시키기 위하여 사용한다. 따라서 충격흡수식 메커니즘의 무게와 크기는 안전성에 영향을 미칠 수 있는 요소들이다. Fig. 5(a)와 같이 4절링크에서 대칭부분을 제거하여, 전달각의 특성은 그대로 유지하고 크기는 최소화할 수 있도록 설계하였다.

기존 모델의 floating 링크를 가이드 프레임으로 대체하였다. 한 개의 가이드 프레임에 3개의 링크가 연결됨으로, 기존 모델에서 필요했던 총 12개의 링크를 3개로 줄일 수 있었다. 그리고 가이드 프레임과 링크의 연결부를 Revolute joint (R-joint) 대신에 Prismatic joint (P-joint)를 사용하여, 외력이 가해졌을 때 링크가 내부로 이동하게 하였다. 스프링은 작동의 신뢰성과 설치 편의성을 위하여 가이드 프레임 내부에 삽입하였다.

수정된 메커니즘에서 전달각은 가이드 프레임의 운동방향과 링크의 중심선이 이루는 각도로 정의된다. 외력을 받으면 각각의 P-joint가 가이드를 따라 안쪽으로 움직이려 하고, 프레임 중심에 연결된 스프링을 압축하게 된다. 만약 외력이 가해지기 전 초기 전달각이 140° 이상이면, 임계충격력 이상에서만 작동하는 효과를 얻을 수 있다.

와이어는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 엔드 프레

임과 가이드 프레임 양 끝에 고정하였다. 외부 충격력이 가해졌을 때, 와이어의 장력에 의해서 가이드 프레임에 힘이 전달된다. 전달된 힘이 임계 충격력 이상이면 4절링크가 작동하여, 가이드 프레임이 이동하게 된다. 따라서 와이어가 느슨하게 되며, 이로 인하여 각 모듈들이 분리됨으로써 외부 충격을 흡수할 수 있게 된다.

모듈들 사이의 비틀림과 처짐을 방지하기 위해서 접촉면을 반구 형상으로 설계하였다. 와이어는 엔드 프레임과 가이드 프레임 끝에 고정하여 외력이 작용할 때 4절링크가 스프링에 압축력을 가할 수 있다.

2.2.2 시뮬레이션

시뮬레이션의 동적 해석 시간을 줄이기 위해서 모듈 부분을 제거하고 4절링크 메커니즘 부분만 고립시켜 모델링을 하였다. Solidworks로 구성요소들을 모델링하였고, MSC Visual Nastran 4D를 이용하여 동역학 해석을 수행하였다.

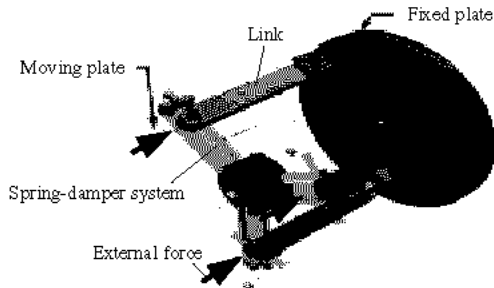


Fig. 6 Modeling of safety mechanism

힘을 전달 받는 4절링크 부분만 모델링을 하였기 때문에 Fig. 6과 같이 와이어가 고정되는 프레임에 와이어가 전달하는 힘과 같은 크기의 외력을 가해준다. 스프링 댐퍼 시스템을 4절링크 끝과 가이드 프레임 사이에 적용하였다.

외부에서 가해지는 충격은 순간적으로 가해졌을 때 가장 치명적이다. 그래서 와이어 고정단에 15N, 30N, 60N의 외부 충격력을 0.1~0.2초 동안 계단 입력으로 가하였다. 스프링 상수와 댐핑 계수를 0.97kN/m와 1kg/s로 각각 대입하여 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 7는 로봇의 무부하 작업 상태에서 충돌이 발생한 상황을 시뮬레이션한 결과이다. 15N, 30N의 외력에서는 가이드 프레임의 변위가 거의 없지만, 60N의 외력에서는 매우 신속하게 가이드 프레임의 변위가 발생하였다. 이러한 시뮬레이션을 통하여 제안한 메커니즘이 충격에 대하여 신속하게 응답함을 알 수 있다.

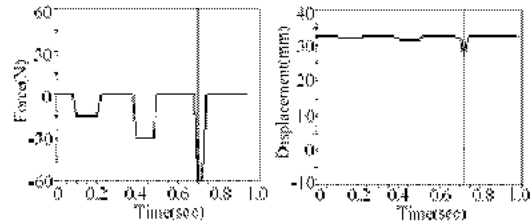


Fig. 7 Simulation results of safe mechanism.

3. 성능 실험

3.1 안전 기준

충돌 발생시 인간에게 안전하게 전달될 수 힘은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F \leq F_{\text{limit}} \quad [\text{N}] \quad (2)$$

여기서 F_{limit} 는 상해 기준으로, 여러 실험적인 연구에 의해서 그 값이 주어져 있다.^[5] 예를 들어, 정적 충격에 대하여 인간이 견딜 수 있는 한계 충격력은 50N정도이다.

한편, 동적 충돌의 경우는 매우 짧은 시간 사이에 큰 힘이 작용하므로 충격력 대신에 충격량을 안전 기준으로 한다. 로봇 팔이 안전하게 작동하기 위해서는 0.6m/s 이하의 속도를 유지해야 한다.^[5] 일반적인 서비스로봇의 팔의 무게를 2.5kg으로 가정하여, 한계 충격량을 1.5N·s로 설정하였다.

3.2 실험 장치의 구성

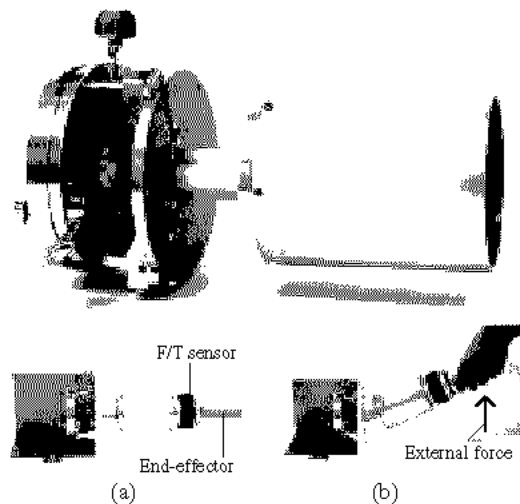


Fig. 8 Prototype of safe mechanism; (a) before collision and, (b) after collision.

제안된 안전 메커니즘을 적용한 로봇팔에 가해지는 외부 충격에 대한 성능을 실험하기 위하여 Fig. 8과 같은 프로토타입을 제작하였다. 시험의 편의를 위해서 안전 메커니즘의 엔드 프레임에 100mm 길이의 원통을 부착하였고, 원통 끝에는 힘/토크 센서를 설치하여 충격력을 측정하였다. 스프링 상수는 1.0kN/m으로 설정하였다.

3.3 실험 방법 및 결과

3.3.1 최대 한계 충격력에 대한 반응 실험

로봇팔에 1.5N·s 이상의 충격량이 가해질 때 안전 메커니즘이 작동하여 그 충격을 흡수해야 한다. 안전 메커니즘을 장착한 경우와 장착하지 않은 경우로 나누어 엔드 이펙터에 5.6N·s의 충격량을 가하였다.

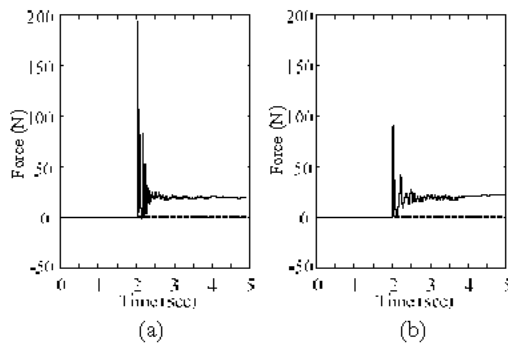


Fig. 9 Experimental results for collision without load; (a) rigid robot arm, and (b) robot arm with safe mechanism.

Fig. 9에서 보듯이 안전 메커니즘이 장착된 로봇팔은 외부에서 충격이 가해지는 순간 충격력을 흡수하여 충돌한 사물을 안전하게 보호할 수 있다.

3.3.2 정격 하중 실험

로봇 팔의 원활한 작업을 수행하기 위해서는 엔드 이펙터에서 로봇의 정격하중을 지탱하여야 한다. 따라서 2kg의 하중을 엔드이펙터에 부가하고 충격 실험을 하였다. 이번 실험도 안전 메커니즘을 장착한 경우와 장착하지 않은 경우로 나누어 엔드이펙터에 1.6N·s의 충격량을 가하였다.

로봇이 작업을 수행하는 동안에도 외부에서 충격이 가해지면 안전 메커니즘의 작동으로 충격력을 흡수하는 것을 Fig. 10으로부터 알 수 있다.

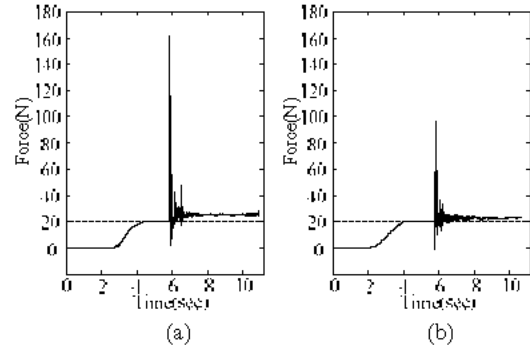


Fig. 9 Experimental results for collision without load; (a) rigid robot arm, and (b) robot arm with safe mechanism

4. 결론

기존에 수행되어온 안전 로봇팔에 관한 연구들은 대부분 조인트부의 메커니즘에만 집중하였었다. 그러나 본 연구에서 개발한 안전 메커니즘은 조인트와 링크 연결부의 Transmission으로 안전성을 구현하였다. 조인트부의 메커니즘에서 필요하였던 복잡한 제어 알고리즘이 없어도 되므로, 오작동의 위험도 줄어들게 된다.

성능 실험을 통하여 알 수 있듯이, 임계 충격력에 도달하였을 때 안전 메커니즘이 수동적으로 동작하기 때문에 반응 속도가 빠르고 안전의 신뢰도가 매우 높다. 임계 충격력 이하에서는 계속 작업을 수행할 수 있어서 높은 작업 효율을 유지할 수 있다. 따라서 본 메커니즘은 로봇 팔의 오작동으로 인한 위험에서 사람을 보호할 수 있는 수단으로서 사용될 수 있다.

후회 연구로는 본 연구에서 개발한 안전 메커니즘을 이용하여 로봇의 팔을 구성하고 다양한 형태의 충격 실험을 실시하여 성능을 평가하는 것이다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2003-000-10336-0) 지원으로 수행되었음.

참고문헌

1. K.F. Laurin-Kovitz, J. E. Colgate, "Design of components for programmable passive impedance," Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1476-1481, 1991.
2. T. Morita and S. Sugano, "Development of one-D.O.F. robot arm equipped with mechanical impedance adjuster," Proc. of the IEEE/RSJ International

- Conference on Intelligent Robots and System, pp. 407-412, 1995.
3. M. Okada, Y. Nakamura and S. Ban, "Design of programmable passive compliance shoulder mechanism," Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.348-353, 2001.
 4. S. Kang and M. Kim, "Safe Arm Design for Service Robot," Proc. of the International Conference on Control, Automation and System, pp.88-95, 2002.
 5. Y. Yamada, K. Suita, K. Imai, H. Ikeda and N. Sugimoto, "Human-robot contact in the safeguarding space," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 2, No. 4, pp. 230-236, 1997.
 6. H. Lim and K. Tanie, "Human safety mechanisms of human-friendly robots: Passive viscoelastic trunk and passively movable base," The International Journal of Robotics Research, Vol.19, No.4, pp. 307-335, 2000.
 7. K. Ikuta and M. Nakata, "General Evaluation Method of Safety for Human-Care Robots," Proc. of International Conference on Robotics and Automation, pp.2065-2072, 1999.
 8. A. Bicchi, S. Lodi Rizzini, and G. Tonietti, "Compliant design for intrinsic safety: General issue and preliminary design," Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System, pp.1864-1869, 2001.