

서비스 로봇용 가변강성 형 안전관절의 설계

Design of a Variable-Stiffness Type Safety Joint for Service Robots

정재진¹, 장승환^{1,✉}

Jae Jin Jeong¹ and Seung Hwan Chang^{1,✉}

¹ 중앙대학교 공과대학 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Chung-Ang Univ.)

✉ Corresponding author: phigs4@cau.ac.kr, Tel: 02-820-5354

Manuscript received: 2008.9.17 / Revised: 2008.12.31 / Accepted: 2009.2.11

This paper aims to design a variable-stiffness type economical safety joint for service robots. The safety joint was designed to have a passive shock absorbing mechanism for protecting human from a catastrophic collision under service condition of robots. A simple mechanism composed of two action disks for switching the load transfer, a spring and a screw for pre-load was proposed. In order to evaluate the performance of the safety joint a testing platform which can carry out the static and impact tests was also designed and fabricated. From the test results, the designed safety joint was proved to have a variable load-carrying capacity and about 42% impact absorption capacity with simple manipulation of the control screw.

Key Words: Safety Joint Mechanism (안전관절 메커니즘), Impact Test (충돌 실험), Variable-stiffness (가변강성), Kinematic Coupling (기구 커플링)

기호설명

F_1 = an external force

$F_2 = 3f_2$ = a rotating force

$F_3 = 3f_3$ = a lifting force

δ = an axial distance between two disks

δ_{max} = the maximum axial distance

ζ = a pre-compression displacement of a spring

θ = a rotating angle

1. 서론

로봇의 활용범위 확대 및 제반 기술이 발전함에 따라 서비스 로봇은 점차 우리의 일상생활과 매우 밀접한 관계를 맺게 되었다. 의료, 복지, 건설, 극한작업 등 비제조업에서 사용되는 로봇과 인간 공존형 대인지원 로봇인 개인용 로봇을 통칭

하여 서비스 로봇이라 부르며, 이러한 서비스 로봇은 앞으로 더욱 다양한 형태로 우리 앞에 등장할 것으로 예측된다. 이러한 추세에 따라 로봇은 인간과의 활동공간의 공유로 뜻하지 않은 충돌을 일으켜 안전사고를 발생시킬 수 있으므로 그 피해를 예방할 수 있는 장치를 마련하는 것이 중요한 문제로 부각되고 있다.¹ 그러나 이 문제를 해결하기 위해 높은 안전성을 갖춘 로봇을 설계하는 작업은 기구 설계뿐만 아니라 하드웨어와 소프트웨어를 설계하는 모든 엔지니어들 간에 긴밀한 협력을 요구하는 까다로운 문제로 인식되고 있다.^{2,3}

로봇의 안전성과 성능을 동시에 만족하기 위한 방법으로는 크게, 다양한 센서를 활용한 제어 알고리즘으로 능동적인 제어를 구현하는 전자적인 방법과 외부에서 가해지는 힘에 반응할 수 있는 물리적인 장치를 활용한 가변강성(Variable-stiffness) 형 혹은 수동형 컴플라이언스(Passive compliance)

타입의 기계적인 방식으로 나눌 수 있다.

프랑스의 수술용 로봇 히포크라테(Hippocrate)는 로봇 엔드 부위에 장착한 힘/토크 센서의 정보를 기초로 매니플레이터(Manipulator)를 제어함으로써 구조의 안전성을 구현하고 있으며,⁴ 독일 항공우주 연구소에서는 HIT-hand 를 개발함에 있어 로봇 핸드부의 각 조인트를 실시간으로 감지하여 외부에서 가해지는 힘에 대해 매니플레이터를 제어하는 기술을 개발하였다.⁵

이러한 능동적인 전자 제어방식은 고가의 센서 장비와 복잡한 제어 알고리즘이 필요하며 반응 속도가 센서와 액추에이터의 민감성에 전적으로 의존하는 단점을 가지고 있다. 또한, 센서의 오작동의 위험과 로봇의 제작 단가가 상대적으로 높은 문제가 지적되고 있다. 이에 따라 외부에서 가해지는 힘에 반응할 수 있는 물리적인 기계장치를 활용한 가변강성 메커니즘이나 수동형 컴플라이언스 방식이 더욱 즉각적인 반응성과 로봇의 생산단가 절감, 제작 및 제어의 용이성을 확보할 수 있는 장점을 가지고 있어 현재 많은 연구가 진행되고 있다. 국내의 관련 연구 동향을 살펴보면, 4 절링크의 전달각에 따른 힘 전달 특성 연구와 스프링과 전자식 댐퍼의 원형 배치로 구성된 조인트 등을 설계하여 수동형 컴플라이언스 메커니즘을 구현하는 연구가 수행된 바 있다.^{6,7} 그러나 기존의 연구 역시 실제 상용화된 로봇에 적용하기에는 크기 및 무게, 제어의 복잡성 등의 한계를 가지고 있어 경제성과 단순한 구조를 보장할 수 있는 새로운 가변 강성 장치의 개발이 요구되고 있다.

본 논문에서는 기구커플링(Kinematic coupling)과 볼 트랜스퍼(Ball transfer)를 이용하여 무게 450g 의 소형, 경량화된 가변 강성 형 안전관절을 설계하였고, 이를 제작하고 성능 평가를 수행하여 그 결과를 제시하였다.

2. 구조와 작동 메커니즘

일반적으로 매니플레이터를 가지는 로봇은 모터의 동력이 기어 장치를 포함한 구동부를 거쳐 관절을 움직이게 된다. 이 과정에서 동력 전달을 단순할 수 있는 장치를 삽입하여 상해가 발생할 수 있는 외력 이상에서 동력 전달을 신속히 차단하면 작동공간을 공유하는 인간과 기구 자체의 안전성을 높일 수 있다. 특히, 조인트 부분의 가변강성 혹은 컴플라이언스 부여는 충돌에서 인간의 안

전을 보장하는 매우 효과적인 방법으로 알려져 있다.⁸

본 논문에서 설계한 안전관절은 세 개의 원형 구멍이 120° 간격으로 가공된 입력디스크(Input disk)가 세 개의 볼이 반구 형태로 돌출된 출력 디스크(Output disk)와 맞물려 준-기구커플링 (Quasi-kinematic coupling)⁹ 과 같은 형태로 구동부의 회전을 피동부에 전달하며, 외부에서 임계치 이상의 정적하중이나 충격이 가해지면 두 디스크가 분리되면서 토크의 전달을 차단하는 역할을 하게 된다. 또한, 분리된 두 디스크는 120°까지만 회전한 후 다시 체결되기 때문에 안전관절의 작동 후 손쉬운 복구가 가능하며, 강성을 완전히 잃었을 때 발생할 수 있는 2 차 충돌의 피해를 예방할 수 있도록 설계 되었다.

입력/출력 디스크의 체결력은 축 방향으로 배치된 스프링의 압축 탄성력으로 제공되며, 스프링의 초기 압축변위(ζ)를 조정함으로써 체결력을 조절할 수 있다(Fig. 1 참조).

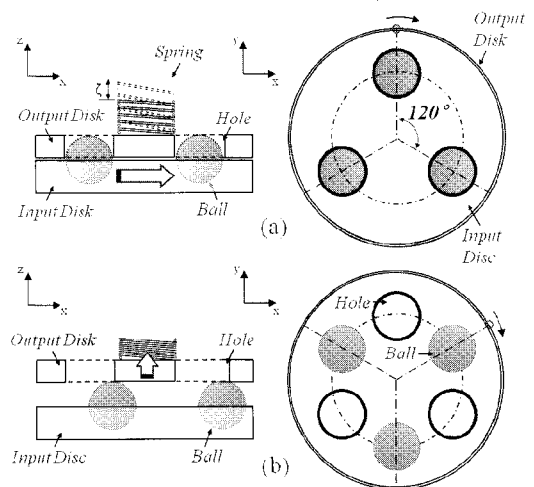


Fig. 1 Diagram of safety joint mechanism (a) matched state (b) free-rotation state

충격이나 정적하중 등 로봇암 외부에서 가해지는 외력(F_1)은 관절 부분에 토크를 발생시키며, 이로 인해 안전관절 내부의 입력 디스크에는 회전력($F_2=3 \cdot f_2$)이 발생한다(Fig. 2 참조).

외력(F_1)과 회전력($F_2=3 \cdot f_2$)의 상관 관계는 다음 식(1)과 같다.

$$F_1 \cdot a = F_2 \cdot b = 3 \cdot f_2 \cdot b \quad (1)$$

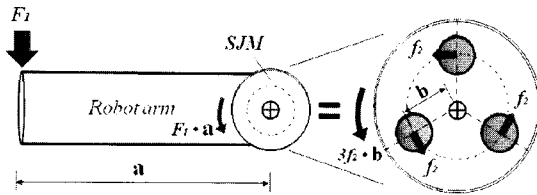


Fig. 2 Action diagram of safety joint with robot arm

안전관절 내부에서 회전력(f_1)은 볼과 원형 구멍의 접점에서 볼의 곡선을 따라 수직방향의 이격력(f_3)을 발생시킨다. 이격력(f_3)은 두 디스크를 분리시켜 이격거리 (δ)가 발생하게 된다(Fig. 3 참조).

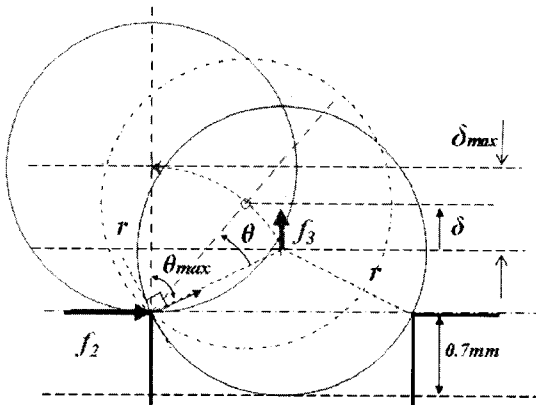


Fig. 3 Action diagram of the safety joint mechanism

회전력(f_2)과 이격력(f_3)은 회전각(θ)에 의해 식(2)의 관계를 가지며, 이격력(f_3)을 통해 스프링이 압축되므로 식(3)과 같은 관계가 성립한다.

$$f_3 = f_2 \times \cos(\theta_{\max} - \theta) \sin(\theta_{\max} - \theta) \quad (2)$$

$$F_3 = 3f_3 = k(\delta + \zeta) \quad (3)$$

여기서 압축변위는 볼의 이격거리(δ)와 스프링의 초기 압축변위(ζ)의 합으로, Fig. 3 에서 보인 기하학적 관계를 통해 볼의 이격거리(δ)로 회전각(θ)을 표시하면 식(4)와 같으며, 식(1)~(4)을 통해 볼의 이격거리(δ)를 발생시키기 위해 필요한 외력(F_1)을 유도하면 식(5)를 얻을 수 있다.

$$\theta = \theta_{\max} - \cos^{-1}\left(\frac{\delta - \delta_{\max} + r}{r}\right) \quad (4)$$

$$F_1 = \frac{b}{a} \times \frac{k(\delta + \zeta)}{\cos(\theta_{\max} - \theta) \sin(\theta_{\max} - \theta)} \quad (5)$$

설계된 로봇암의 길이(a)와 원형 구멍의 중심에서 디스크의 중심까지의 거리(b)는 각각 220mm, 14mm 이며, 원형 구멍의 직경과 볼의 반경(r)은 각각 4mm, 3.175mm 이다. 500kN/m의 탄성계수(k)를 가지는 스프링이 장착된 상태에서 초기 스프링의 압축변위 (ζ)를 각각 0.88mm, 1.17mm, 1.46mm, 1.90mm 로 부가하였을 때, 볼이 빠져나오며 완전히 이탈될 때까지의 변위(0.7mm)에 이르는데 필요한 외력(F_1)을 계산하여 Fig. 4 에 도시하였다.

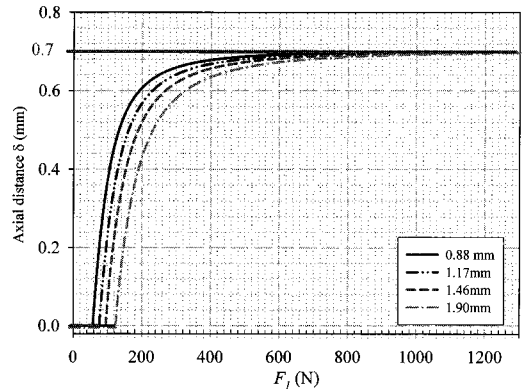


Fig. 4 Force versus axial distance curves w.r.t. the pre-compression displacement (ζ)

위 그래프에서 보이는 바와 같이 초기 압축 변위가 클수록 안전관절이 지탱할 수 있는 하중은 증가함을 확인할 수 있다. 또한, 일정한 외력 이하에서 안전관절은 변위가 발생하지 않으므로 강성을 잃지 않고 외력을 지탱할 수 있음을 확인하였다. 그러나 초기 압축변위가 크면 하중이 급격히 증가하는 구간의 기울기가 완만해지는 경향을 가져 안전관절의 작동 민감도가 떨어질 것으로 예상된다.

3. 안전관절의 제작

단순한 메커니즘으로 수동형 안전관절을 구현하기 위해 볼 트랜스퍼, 접시 스프링과 무두렌치 볼트 등을 적용하여 Fig. 5 에서 보이는 바와 같이 작동의 용이성과 정밀성을 확보한 1 자유도 안전관절을 설계하였다.

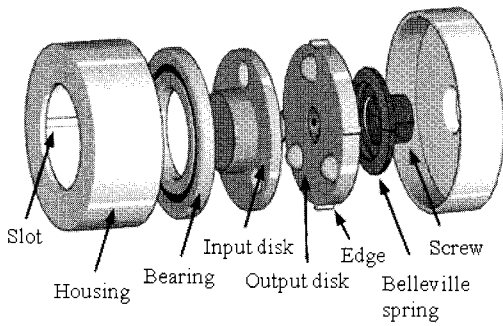


Fig. 5 Schematic diagram of safety joint mechanism

볼 트랜스퍼는 볼이 반구 형태로 돌출되어 있기 때문에 돌출부가 원형 구멍에 맞물려 동력을 전달하며, 원형 구멍에서 이탈한 후에는 입력디스크 위를 슬러스트 베어링과 같이 자유롭게 회전할 수 있게 한다. 볼 트랜스퍼의 주요 사양을 Table 1 에 제시하였다.

Table 1 Specifications of the ball transfer

Specification	Value
Ball diameter	6.35mm
Ball transfer diameter	12mm
Max. allowable load	20kg

접시 스프링은 작은 변위에서도 하중 수용력 (High energy storage capacity)이 우수하며 다른 스프링보다 공간 활용도가 높아 소형화 설계에 유용하다. 설계에 사용한 접시 스프링의 주요 사양을 Table 2 와 같다.

Table 2 Specifications of the belleville spring

Specification	Value
Outer (inner) diameter	27.7(14.45)mm
Thickness	1mm
Max. spring load	1300N

스프링의 초기 압축량을 조절할 수 있는 볼트를 삽입함으로써 안전관절의 작동 임계하중을 가변적으로 조절할 수 있도록 설계하였다.

최종적으로 설계된 안전관절은 주요 구성품의 강도를 높이기 위해 강철로 제작하였으며, 볼이

구르는 동안 입력디스크가 변형되는 것을 방지하기 위해 표면을 열처리 하였다. 제작된 안전관절의 모습과 주요사양을 Fig. 6 과 Table 3 에 제시하였다.

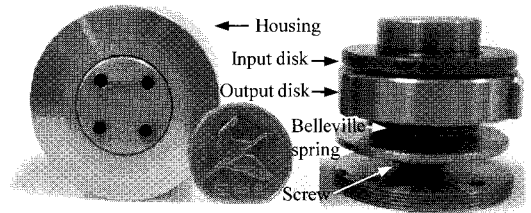


Fig. 6 Prototype of the safety joint

Table 3 Specifications of the safety joint

Dimensions	Value
Diameter	50mm
Length	42mm
Weight	450g
Spring constant	500kN/m
Payload	0~60N
Cut-off impulse	0.8 ~ 1.5Ns
Cut-off efficiency	max 42%

4. 안전관절의 성능평가

4.1 실험장치

본 연구를 통해 설계/제작된 안전관절의 성능을 평가하고자 실험용 플랫폼을 제작하여 로봇암에 가해지는 정적 및 충격 임계하중에 대한 안전관절의 거동을 실험적으로 평가하였다. 안전관절의 성능을 확인하기 위해 충격량, 에너지 흡수율 등을 종합적으로 측정할 수 있는 장치의 설계가 필요하다. 이를 위해 본 연구에서는 로드셀 (Bongshin, CBES-50) 및 고성능 인디케이터 (Bongshin, BS-G1000)를 활용하여 충격량을 측정하는 플랫폼을 구성하였으며 높은 충격력 재현 특성을 가지도록 설계하였다.¹⁰ 설계된 플랫폼은 질량을 가진 추의 자유 낙하 높이의 조절을 통해 일정한 충격량을 발생시키며, 진자와 로봇암, 안전관절이 체결된 지지부로 구성되어 있다(Fig. 7 참조).

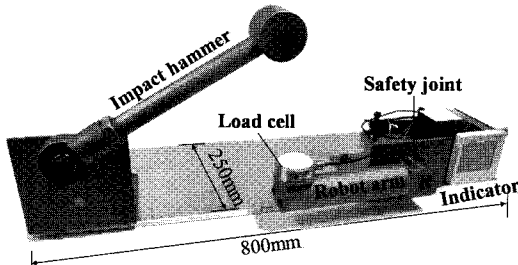


Fig. 7 Experimental platform for the safety joint

플랫폼의 간이 로봇암에는 최대 50kg 까지 50g 단위로 측정할 수 있는 고정밀 로드셀이 장착되었으며 이를 통해 측정된 하중 값(충격력)은 연결된 인디케이터를 통해 초당 2,000 회의 속도로 기록되어 PC 로 보내진다. 이 값을 적분하여 최종적으로 충격량을 계산하였다(Fig. 8 참조).

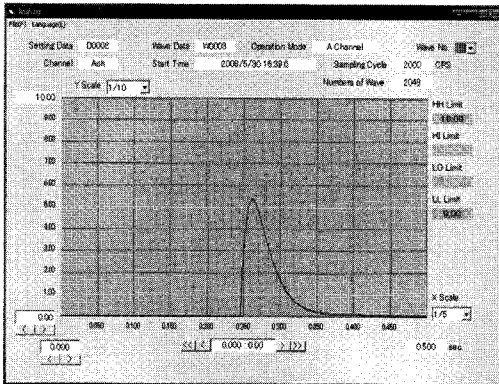


Fig. 8 Display window for measured impact signal

4.2 실험결과

안전관절에 삽입된 스프링의 압축량은 볼 트랜스퍼의 허용하중을 고려하여 $0 \leq \zeta \leq 2.3\text{mm}$ 범위로 제한하여 강성을 조절하였다. 제작된 안전관절의 정적 작동성능을 평가하기 위해 로봇암 말단에 일정한 정적하중을 가해 안전관절이 작동하는 임계하중과 토크를 스프링의 초기압축량에 따라 측정된 결과를 Table 4 에 나타내었다.

실험결과, 설계된 안전관절은 스프링의 초기 압축량에 의해 그 임계하중을 조절함으로써 5.72N 에서 최대 55.75N 해당하는 정적하중을 견딜 수 있는 것을 확인하였다. 이러한 정적 작동하중은 식(5)에서 계산된 하중 범위와 비교하면 약 30% 수준에 머무는 것을 알 수 있으며, 그 원인으로는

Table 4 Static critical load according to the pre-compression displacement

# of test	Pre-compression displacement [mm]	Spring force [N]	Critical Load [N]	Torque [Nm]
1	0.15	72.9	5.72	1.26
2	0.29	145.8	9.32	2.05
3	0.44	218.8	13.08	2.88
4	0.58	291.7	18.31	4.03
5	0.73	364.6	21.91	4.82
6	0.88	437.5	25.18	5.54
7	1.02	510.4	29.59	6.51
8	1.17	583.3	34.83	7.67
9	1.31	656.3	40.38	8.88
10	1.46	729.2	44.47	9.78
11	1.60	802.1	51.01	11.22
12	1.75	875.0	53.63	11.80
13	1.90	947.9	55.75	12.27

제작된 안전관절 입력/출력 디스크의 세 쌍의 볼-구멍이 완벽하게 가공되지 못해 실제로는 완벽히 체결된 한 쌍의 볼-구멍만이 안전관절 작동에 직접 영향을 미치는 것으로 판단된다. 또한, 구멍 가공 시 구멍 입구의 미세한 모따기(Chamfering) 가공이 안전관절 작동 시 접촉에 의한 회전력의 제어 불가능한 상황을 유발하여 임계하중을 저하시키는데 어느 정도 영향을 준 것으로 보인다. 이러한 가공 상의 문제와 회전력의 정량적 분석의 필요성은 차후 보완해야 할 주요 문제점으로 지적될 수 있다. 안전관절의 충격특성을 평가하기 위해 플랫폼의 추를 로봇암에 낙하시켜 충격하중을 가한 후 작동 충격량과 최대 충격력을 확인하였다(Fig. 9, Table 5 참조).

스프링의 강성을 초기 압축변위를 통해 변화시켜 안전관절이 각각 0.814Ns 에서 1.342Ns까지의 충격량 범위에서 작동함을 확인하였다. 이때 최대 충격력은 19N 에서 32N 사이였으며, 같은 조건에서 측정된 정적하중보다 낮은 값을 가졌다. 이를 통해 안전관절은 충격하중에 대해서 정적하중보다

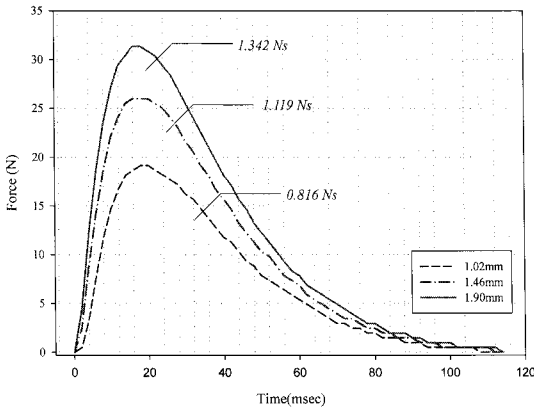


Fig. 9 Impulse response of the safety joint w.r.t. the pre-compression displacement of the spring

Table 5 Impact test result from the different pre-compression displacement

Pre-compression displacement [mm]	Max Force [N]	Impulse [Ns]
1 1.02	19	0.816
2 1.17	22	0.922
3 1.31	24	1.037
4 1.46	26	1.119
5 1.60	27	1.150
6 1.75	29	1.247
7 1.90	32	1.342

민감하게 반응함을 알 수 있다. 또한, 작동하중이 스프링의 강성과 선형 비례하여 정량적으로 작동성을 조절할 수 있음을 확인하였다.

안전관절이 장착된 로봇암과 장착되지 않은 로봇암에 같은 충격을 가하여 충격이 효율적으로 흡수됨을 확인해보고자 두 경우에 발생한 최대 충격력과 충격량을 측정하여 각각 비교하였다. 충격시험 플랫폼을 이용하여 1kg의 진자를 30° 들어올려 안전관절이 장착되지 않은 로봇암에 직접 충격을 가하는 경우, 최대 충격력은 48N이며, 그에 따른 충격량은 1.98Ns가 발생함을 알 수 있었다. 동일한 실험조건으로 안전관절을 장착한 로봇암에 충격을 가하면 Fig. 10에서 보이는 바와 같이 최대

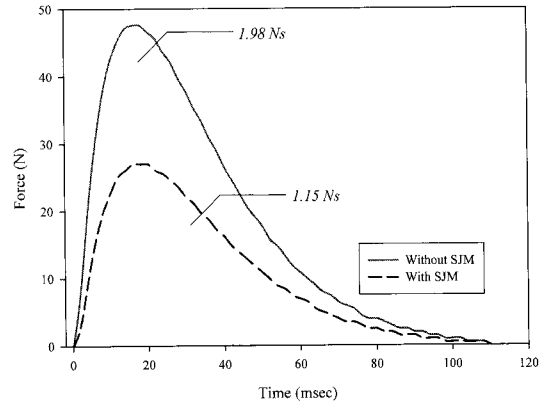


Fig. 10 Comparison of the impact test result

충격력은 28N으로 이전과 비교하여 20N 감소하였으며, 충격량은 1.15Ns으로 42%가량 감소함을 확인할 수 있었다.

이상의 실험결과를 통해 안전관절은 정적인 작동환경을 보장하면서도 충돌상황에서 최대 충격력과 충격량을 효율적으로 감소시켜 로봇과 인간의 안전을 일정수준 보장할 수 있음을 확인하였다.

5. 결론

안전관절은 로봇 매니플레이터의 갑작스러운 충격에 대해 조인트에 가해질 토크를 신속하게 차단하고 무강성을 가짐으로써 인체와의 충격에 대해 상해를 예방하고 조인트 자체의 파손을 방지한다. 본 논문은 기구 커플링과 볼 캐스터를 안전관절 설계에 적용하여 기존에 연구되었던 가변 강성 장치들의 문제를 해결함과 동시에 작동 메커니즘을 하나의 요소(하중조절 스크루)에 집중하고 강성변화의 핵심요소를 3차원으로 배치하여, 작동공간의 효율성이 높은 집적화된 설계를 수행하였다. 또한, 임의의 시스템에도 쉽게 적용할 수 있는 모듈화된 구조의 저가형 시제품을 완성하였으며, 설계된 안전관절의 성능평가를 위한 플랫폼을 설계하고 완성된 안전관절을 평가하였다. 이를 통해 42%의 충격 흡수능력을 확인하였다. 향후 볼 트랜스퍼를 대체할 수 있는 더욱 소형화되고 높은 허용 하중을 가진 메커니즘을 사용한다면 좀 더 경량화되고 성능이 우수한 안전관절을 구현할 수 있을 것으로 판단된다.

개발된 서비스 로봇용 안전관절은 향후 조인트부에 필요했던 복잡한 제어 알고리즘과 제반 장치

를 대체하고 로봇의 경량화와 제작의 편의성(제작비 절감)을 높일 수 있을 것으로 기대된다.

안전관절 작동하중에 대한 계산결과와 실험결과와의 차이를 유발시킨 가공문제는 향후 해결해야 할 주요 과제로 판단된다.

후 기

이 논문은 2008 년도 중앙대학교 우수연구자연구비 지원에 의한 것임.

참고문헌

1. Yamada, Y., Suita, K., Imai, K., Ikeda, H. and Sugimoto, N., "A failure-to-safety robot system for human-robot coexistence," *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 18, No. 1-2, pp. 283-291, 1996.
2. Santis, A. D., Siciliano, B., Luca, A. D. and Bicchi, A., "An atlas of physical human-robot interaction," *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 43, No. 3, pp. 253-270, 2008.
3. Zhijun, L., Aiguo, M., Ning, X., Jiangong, G. and Makoto, S., "Safe arm using compliant hybrid joints for mobile manipulators in human-symbiotic environments," *International Journal of Human-friendly Welfare Robotic Systems*, Vol. 6, No. 1, pp. 14-21, 2005.
4. Pierrot, F., Dombre, E., D'egoulange, E., Urbain, L., Caron, P., Boudet, S., Gari'epy, J. and M'egnien, J. L., "Hippocrate: a safe robot arm for medical applications with force feedback," *Medical Image Analysis*, Vol. 3, No. 3, pp. 285-300, 1999.
5. Liu, H., Meuse, P., Seitz, N., Willberg, B., Hirzinger, G., Jin, M. H., Liu, Y. W., Wei, R. and Xie, Z. W., "The modular multisensory DLR-HIT-Hand," *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 42, No. 5, pp. 612-625, 2007.
6. Park, J. J., Kim, B. S. and Song J. B., "Shock absorbing safe mechanism based on transmission angle of a 4-bar linkage," *Proc. of KSPE Autumn Conference*, pp. 94-99, 2004.
7. Yoon, S. S., Kang, S. C., Yun, S. K., Kim, S. J., Kim, Y. H. and Kim, M. S., "Safe arm design with MR-based passive compliant joints and visco-elastic covering for service robot applications," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 19, No. 10, pp. 1835-1845, 2005.
8. Ikuta, K. and Nokata, M., "General evaluation method of safety for human-care robots," *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 22, No. 5, pp. 281-297, 2003.
9. Hale, L. C. and Slocum, A. H., "Optimal design techniques for kinematic couplings," *Precision Engineering*, Vol. 25, No. 2, pp. 114-127, 2001.
10. Cho, C. K., Ryu, B. J., Lee, G. S. and Park, Y. P., "A study on the reconstruction of impact force produced by the collision between two elastic structures," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 20, No. 4, pp. 49-58, 2003.