

가변 톨림 토크 기반 컴플라이언스 스프링 클러치의 설계 및 토크 추정

Design of Variable Release Torque-based Compliance Spring-clutch and Torque Estimation

석 주 신¹, 이 우 섭², 강 성 철⁺

Ju-Shin Seok¹, Woo-Sub Lee², Sung-Chul Kang⁺

Abstract A variable release torque-based compliance spring-clutch (VCSC) is presented. VCSC is a safe joint to reduce the impact of collisions between humans and robots. It is composed of four functional plates, balls, springs to make some functions in compliant movement, release mechanism, gravity compensation during its work. Also, it can estimate torque applied to a joint by using distance sensor and parameters of cam profile. The measured variable torque of prototype is 4.3~7.6 Nm and release torque is 4.3 Nm. In our future studies, a calibration for torque estimation will be conducted.

Keywords Safe Joint, Joint Mechanism, Torque Estimation

1. 서 론

제조 및 서비스 분야의 로봇들이 개발되면서 사람과 로봇이 같은 공간에서 작업하는 것이 낫설지 않게 되었다. 좁게는 가정으로부터 넓게는 사회에 이르기까지 세계 곳곳에서 로봇은 사람과 함께 하고 있다. 로봇은 정확하고 신속한 움직임을 가지고 있으며 주변 환경의 영향을 받지 않아 여러모로 사람에게 이로움을 주고 있다. 그렇지만 아직까지 로봇은 사람처럼 생각하고 느끼고 판단할 수 없으며 이는 안전사고로 이어질 수 있다. 로봇의 오작동으로 인한 사고, 사람의 부주의로 인한 사고 등 해마다 여러 안전사고가 발생하고 있으며 심지어 사람

이 생명을 잃게 되는 경우도 있다.

안전사고의 크고 작고를 떠나 어떠한 경우라도 사람의 안전은 최우선시 되어야 한다. 안전사고는 미연에 방지해야 하며 혹시라도 사고로 이어질 경우 사고로 인한 피해를 최소화하여야 한다. 이를 위해 여러 곳에서 로봇과 관련된 안전 관절들을 개발하였다^[1].

안전 관절은 가변 강성 메커니즘을 이용한 관절과 톨림 메커니즘을 이용한 관절로 나누어 볼 수 있으며 가변 강성을 이용한 관절은 MIT의 SEA^[2]가 대표적이지만 SEA는 안전을 목적으로 개발된 관절이 아니다. 안전 관절의 개발은 Waseda Univ.의 MIA^[3]로부터 시작되었으며 이를 기점으로 Pisa Univ.의 VSA^[4], KIST의 VSJ^[5], Korea Univ.의 HDAU^[6] 등 다양한 안전 관절들이 개발되었다. 가변 강성 메커니즘을 이용한 안전 관절들은 공통적으로 관절의 강성 변화로 충격을 줄일 수 있다는 것을 실험적으로 검증하였다.

이와 달리 톨림 메커니즘을 이용하여 사람의 안전을 위해 개발된 안전 관절은 Korea Univ.의 SJM^[7], KIST의

Received : Oct. 21. 2015; Revised : Nov.18. 2015; Accepted : Jan. 4. 2016

⁺Corresponding author: Healthcare Robotics Research Group, Robotics and Media Institute, Korea Institute of Science and Technology, 5, Hwarang-ro 14-gil, Seongbuk, Seoul, Korea (kasch804@gmail.com)

¹Healthcare Robotics Research Group, Robotics and Media Institute, Korea Institute of Science and Technology(jushiri@msn.com)

²Healthcare Robotics Research Group, Robotics and Media Institute, Korea Institute of Science and Technology(robot@kist.re.kr)

SC^[8]가 있다. SJM은 Slider-crank 메커니즘과 스프링을 이용하여 풀림 메커니즘을 구현하였으며 SC는 롤러와 캠 프로파일, 스프링을 이용하여 풀림 메커니즘을 구현하였다. 그러나 SJM과 SC는 중력의 영향을 받게 되는 상태일 때 일정한 풀림 토크(풀림 동작에 필요한 토크)를 가지지 못하며 이를 해결하기 위해서는 중력보상기가 필요하다^[9].

본 논문에서는 안전 관절의 기능으로 컴플라이언스와 풀림 메커니즘을 가지며 중력의 영향에 무관하게 일정한 풀림 토크를 가지는 가변 풀림 토크 기반 컴플라이언스 스프링 클러치(VCSC)를 소개하고 거리센서를 이용하여 스프링의 압축량을 측정하고 이를 이용하여 외력을 추정하는 방법을 제시하고 검증하였다.

다음 2장에서 VCSC의 개념과 설계 방법 및 토크 추정 방법에 대해 설명하고 3장에서 제작된 VCSC의 프로토타입과 실험 환경을 나타내고 실험을 통해 검증한 토크 데이터를 제시한다. 마지막으로 4장은 결론을 나타낸다.

2. VCSC 설계

VCSC는 크게 4개의 플레이트 및 볼과 스프링으로 구성되어 있으며 다음의 Fig. 1에 나타낸다.

Fig. 1에서 (a)는 출력 플레이트, (b)는 컴플라이언스 플레이트, (c)는 중력 보상 플레이트, (d)는 고정 플레이트이다. (a)는 회전운동을 하며 볼을 통해 외력을 (b)로 전달한다. (b)는 외력의 크기와 캠 프로파일에 의해 상하운동을 하며 Spring의 압축량을 변화시킨다. (c)는 로봇

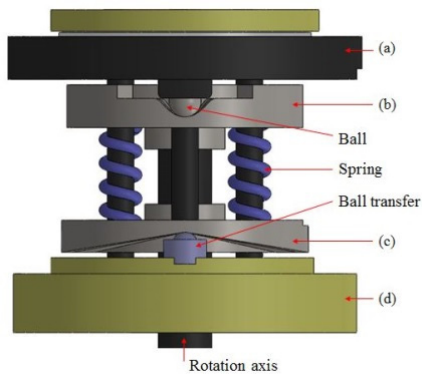


Fig. 1. Components of VCSC

팔(링크)이 회전할 때 작동하고 Ball transfer와 캠 프로파일에 의해 상하운동을 하여 Spring의 압축량을 변화시킴으로써 중력에 의해 관절에 걸리는 토크를 보상한다. (d)는 (a)-(c)를 연결하는 중심축을 고정하고 Ball transfer를 지지한다.

2.1 VCSC의 개념

VCSC의 회전축과 스프링의 압축방향이 같다는 것을 Fig. 1에서 확인할 수 있다. 이는 외력의 변화에 대한 볼의 움직임이 (b)의 압력각에 의해서만 결정된다는 것을 나타낸다. 압력각이 작을수록 볼이 이동하기 위해 필요한 토크는 작고 압력각이 클수록 필요한 토크는 크다. 이를 이용하여 VCSC는 초기 상태에서 풀리기 전까지 (캠 프로파일의 압력각이 최대인 지점) 컴플라이언스를 가진다. Fig. 2는 풀림 토크(압력각이 최대인 지점의 토크) 이상의 외력이 가해지면 볼이 초기상태로부터 컴플라이언스 구간과 풀림 구간을 지나 벽에서 멈추는 것을 나타낸다.

2.1.1 풀림 동작

Fig. 3은 풀림 동작을 나타낸다. 초기상태(a)에서 출력 플레이트에 풀림 토크 이하의 외력이 가해지면 볼이 컴플라이언스 플레이트를 밀어내며 이동한다(b). 풀림 토크

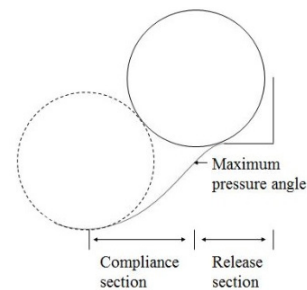


Fig. 2. Concept of VCSC

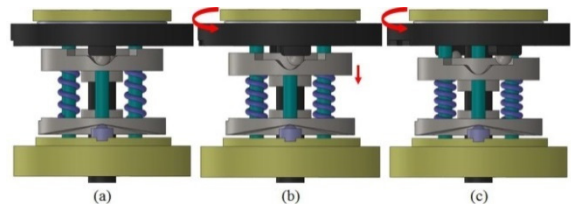


Fig. 3. Release motion of VCSC

크 이상의 외력이 가해지면 볼은 풀림턱을 넘어가 벽에서 멈추게 되며 VCSC는 풀림 상태가 된다(c).

2.1.2 중력 보상 동작

Fig. 4는 중력 보상 동작을 나타낸다. 초기상태(a)에서 Rotation axis가 회전하게 되면 보상 캠 프로파일에 의해 (b)와 같이 보상 플레이트가 스프링을 압축시키며 VCSC가 로봇 팔의 자세에 관계없이 풀림 토크가 일정하도록 해준다. 동작의 보상 범위는 ±90°이다(c).

2.2 컴플라이언스 캠 프로파일 설계

캠 프로파일이 일정하게 증가 및 감소하는 기울기를 갖게 하여 가속도가 상수가 되게 한다. 이는 VCSC가 풀리기까지 필요한 외력의 변화량을 일정하게 증가시키기 위함이다.

기존에 개발된 로봇 팔의 동토크와 정토크 및 크기를 고려하여 풀림 토크를 4.3 Nm로 결정하였으며 볼의 크기는 3 mm로 결정하였다. 또한, 풀림턱의 반경은 1 mm, 캠 프로파일의 수평 길이는 5.3 mm로 결정하고 볼의 크기와 풀림턱의 반경 및 캠 프로파일의 길이를 이용하여 이상적인 기울기를 Fig. 5의 점선과 같이 생성하였다. 이상적인 기울기는 볼의 초기 기울기만큼 일정하게

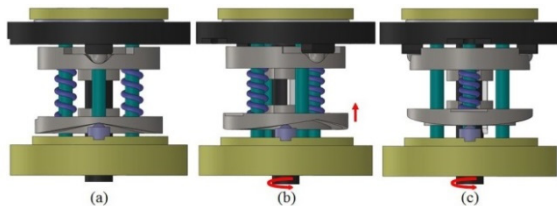


Fig. 4. Gravity compensate motion of VCSC

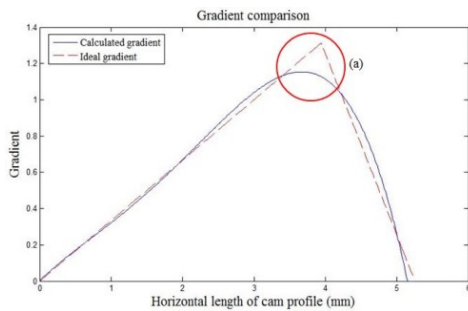


Fig. 5. Comparison of gradient

증가하다가 풀림턱의 최종 기울기만큼 일정하게 감소하며 (a)에서 저크(jerk)를 발생시킨다. 이 저크는 풀림 동작에 진동 및 충격을 유발하며 이를 해결하기 위해 다항식 최소자승법을 이용하였다.

$$f(x_i) = a_0 + a_1x_i + a_2x_i^2 + \dots + a_nx_i^n \tag{1}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & x_1 & \dots & x_1^n \\ 1 & x_2 & \dots & x_2^n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_i & \dots & x_i^n \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(x_1) \\ f(x_2) \\ \vdots \\ f(x_i) \end{bmatrix} \tag{2}$$

식 (1)은 일반적인 n차 다항식을 나타내며 (2)는 (1)을 행렬로 나타낸 것이다. x_i행렬은 캠 프로파일의 길이를 나타내며 f(x_i)행렬은 기울기의 크기를 나타낸다. 여러 차수의 다항식을 비교 후 4차 다항식(n=4)을 이용하였으며 Fig. 5의 실선은 다항식 최소자승법을 이용하여 계산한 기울기이다. 저크를 발생하는 부분이 부드러워진 것을 확인할 수 있다. Fig. 6은 계산된 기울기를 적분하여 생성한 캠 프로파일을 나타낸다.

2.3 풀림 토크

앞에서 선정된 4.3 Nm의 풀림 토크를 가지기 위해서는 캠 프로파일의 반력이 풀림 토크와 같아야 하며 Fig. 7은 이들의 관계를 나타낸다.

Fig. 7로부터 다음의 수식을 유도할 수 있다.

$$F_h = F_s \cdot \tan(\alpha) = kx \cdot \tan(\alpha) \tag{3}$$

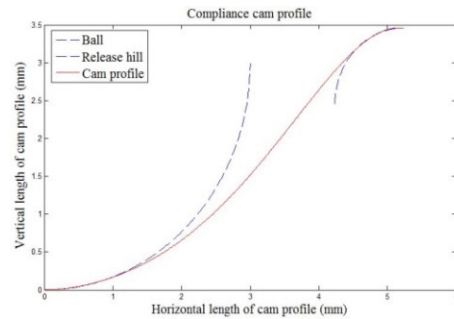


Fig. 6. Compliance cam profile

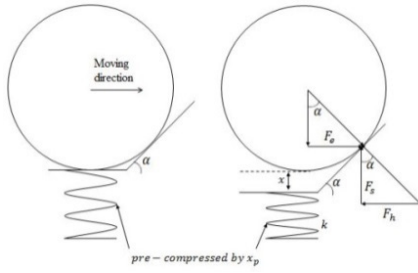


Fig. 7. Relations of external force and reaction force

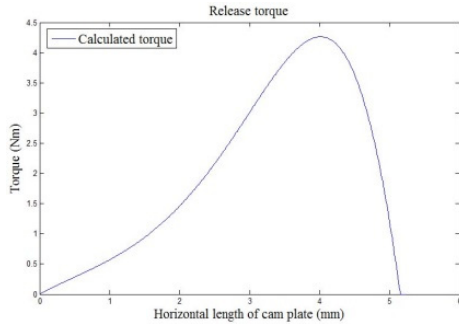


Fig. 8. Release torque of VCSC

$$F_e - F_h = kx_p \cdot \tan(\alpha) \quad (4)$$

위 식에서 F_h 는 캠 프로파일의 수평 반력, F_s 는 스프링력, k 는 스프링 강성, F_e 는 외력의 수평력, x 는 스프링의 압축량, x_p 는 스프링의 예압 길이, α 는 압력각이다.

식 (3)은 스프링력으로 인한 컴플라이언스 캠 프로파일의 수평 반력을 나타낸다. 볼이 움직이기 위해서는 F_e 가 F_h 보다 커야 하며 같거나 작다면 볼이 이동하지 않는다. 이를 고려하여 선정된 k 는 20.6 N/mm이다. 식 (4)는 (3)을 이용하여 x_p 를 계산하는 것을 나타낸다. 풀림 토크와 스프링의 강성, 캠 프로파일은 주어진 값이며 이로 인한 x_p 는 2 mm이다. 주어진 변수들로부터 VCSC가 초기상태에서 풀리기까지의 토크를 계산하면 다음과 같다.

$$T_r = l_c k(x + x_p) \cdot \tan(\alpha) \quad (5)$$

위 식에서 l_c 는 회전 중심과 볼 중심 사이의 거리이며 α 가 가장 클 때의 토크가 풀림 토크이다. 다음의 Fig. 8은 식 (5)를 나타내며 풀림 토크는 약 4.3 Nm이다.

2.4 중력 보상 캠 프로파일 설계

로봇 팔이 회전할 때 중력의 영향으로 로봇 팔의 무게만큼의 토크가 관절에 가해지는 것이 Fig. 9에 나타난다. 이는 VCSC의 풀림 토크를 변화시키며 외력이 일정하더라도 같은 동작을 할 수 없게 만든다.

이를 해결하기 위해 θ 에 대한 로봇 팔의 무게만큼 풀림 토크를 보상해주어야 하며 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$T_\theta = mgl \cdot \sin(\theta) \quad (6)$$

$$e_{\text{addition}} = \frac{T_\theta}{k \cdot \tan(\theta)} \quad (7)$$

위 식에서 m 은 로봇 팔의 질량, g 는 중력가속도, l 은 회전 중심과 무게중심 사이의 거리, θ 는 로봇 팔의 회전 각(0~90°), e_{addition} 은 스프링의 압축 길이, T_θ 는 중력에 의한 토크, k 는 스프링 상수이다.

식 (6)은 중력의 영향으로 관절에 걸리는 토크를 나타내고 식 (7)은 식 (3)으로부터 유도되었으며 중력 보상 캠 플레이트가 로봇 팔이 회전함에 따라 스프링을 e_{addition} 만큼 압축시키는 것을 나타낸다.

생성된 중력 보상 캠 프로파일은 Fig. 10과 같다.

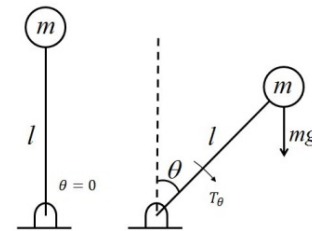


Fig. 9. Concept of gravity compensation

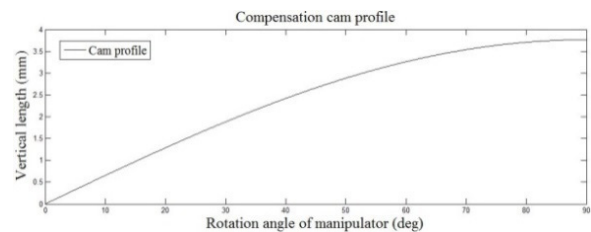


Fig. 10. Compensate cam profile

2.5 토크 추정

VCSC의 토크 추정은 거리센서를 이용하여 설계된 캠 프로파일의 데이터 테이블로부터 스프링의 압축량과 압력각을 찾아 토크 계산식에 대입하는 방식으로 이루어진다.

$$x = \min|H - d| \tag{8}$$

위 식에서 H 는 설계된 캠 프로파일의 높이 데이터, d 는 거리센서의 값이다.

H 와 d 의 차이의 최소값인 x 는 볼과 캠 프로파일의 접촉 지점의 높이를 의미한다. 이는 스프링의 압축량과 같고 x 가 결정되면 이에 해당하는 압력각도 설계 데이터로부터 찾을 수 있다.

$$T_e = lk(x + x_p) \cdot \tan(\alpha) + mgl \cdot \sin(\theta) \tag{9}$$

위 식은 식 (5)와 식 (6)을 더한 식이며 추정된 토크를 나타낸다. 식 (9)에서 x 와 α 를 제외하고 나머지 변수들

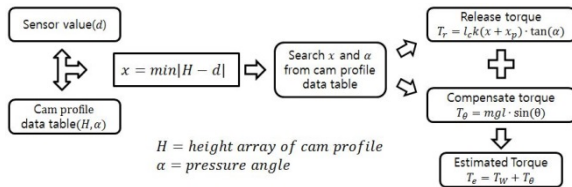


Fig. 11. Block diagram of torque estimation

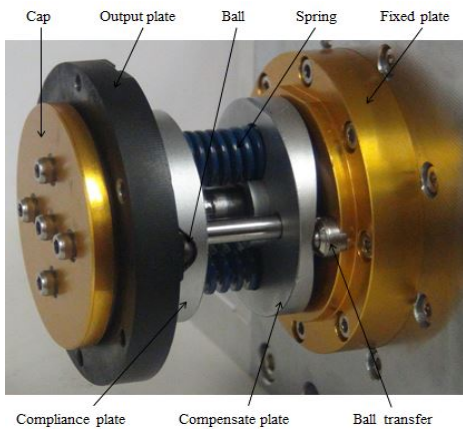


Fig. 12. Prototype of VCSC

은 주어진 값이며 x 와 α 는 앞에서 언급한 방법으로 찾아 토크를 추정한다. 아래의 Fig. 11은 토크 추정 방법을 블록 다이어그램으로 나타낸 것이다.

3. VCSC 제작

Fig. 12는 VCSC의 프로토타입을 나타내며 VCSC는 뚜껑, 출력 플레이트, 볼, 컴플라이언스 플레이트, 스프링, 보상 플레이트, 볼 트랜스퍼, 고정 플레이트로 구성되어 있다. 아래의 Table 1은 VCSC의 사양을 나타낸다.

3.1 실험 환경

Fig. 13은 VCSC의 실험 환경을 나타낸다. 실험 환경은 왼쪽부터 로봇 팔의 무게와 가반하중을 대체하기 위한 무게추, VCSC에 걸리는 토크를 측정하기 위한 토크 센서, VCSC, 스프링의 압축량을 파악하기 위한 레이저 센서, 링크를 회전하기 위한 모터와 하모닉 드라이브로 구성되어 있다.

Table 1. Specification of VCSC

Diameter	66 mm
Height	60.2 mm
Weight	525 g
Range of variable release torque	4.3~7.6 Nm
Range of gravity compensation torque	0~3.3 Nm
Release torque	4.3 Nm

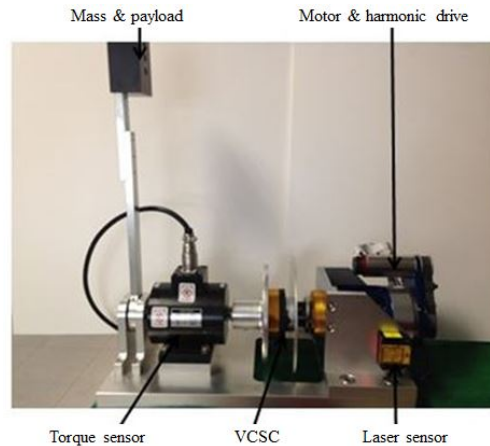


Fig. 13. Experimental environment

3.2 일정한 풀림 토크 검증

3.2.1 풀림 토크

Fig. 14는 링크가 0~90°까지 회전할 때 측정된 VCSC의 풀림 토크이다. 점선은 이론적으로 계산된 풀림 토크이며 4.3 Nm부터 7.6 Nm까지 증가한다. 에러바는 5°단위로 10회씩 측정된 토크의 평균값이며 약 4.4 Nm부터 약 8.1 Nm까지 증가한다. 측정된 토크는 계산된 풀림 토크와 비슷한 증가 양상을 보이며 평균 에러는 약 5.6111%이다. 토크 센서로 측정된 풀림 토크가 증가하는 이유는 링크가 회전하면서 중력 보상 플레이트로 인해 보상 토크가 추가되었기 때문이다.

3.2.2 일정한 풀림 토크

Fig. 15는 일정한 풀림 토크를 검증하기 위한 개념이다. 실선은 측정된 토크이며 점선은 계산된 토크이다. (a)는 풀림 토크, (b)는 보상 토크를 나타낸다. (a)에서 측정된 풀림 토크는 앞에서 언급한 것처럼 (b)를 포함하고 있기 때문에 실제 VCSC가 풀리기까지 가해야 하는 외력은 (a)와 (b)의 차이만큼이다.

Fig. 16은 Fig. 15로부터 얻어진 실제 VCSC가 풀리기

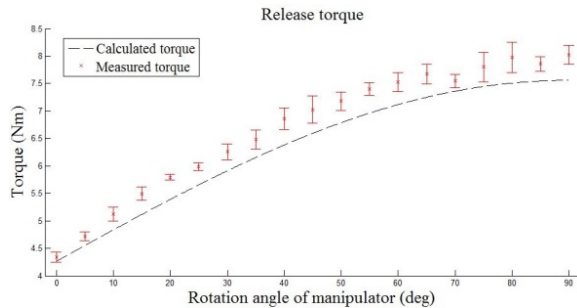


Fig. 14. Release torque

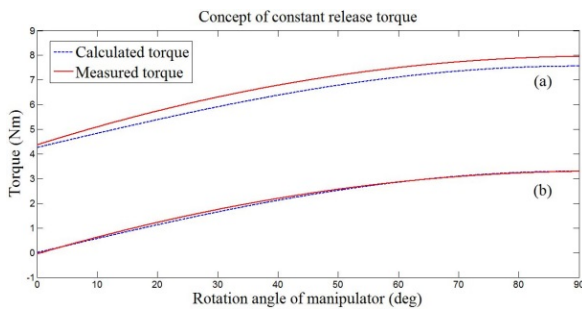


Fig. 15. Concept of constant release torque

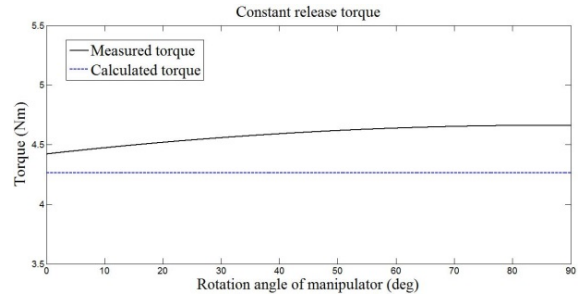


Fig. 16. Constant release torque

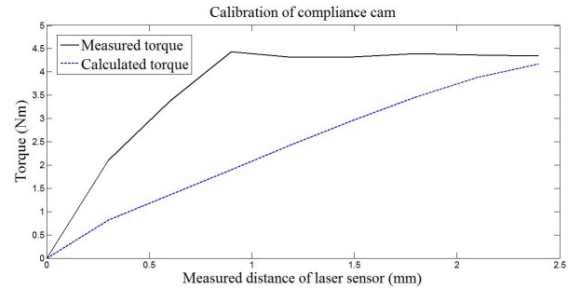


Fig. 17. Calibration of compliance cam profile

까지 가해지는 외력이며 일정한 풀림 토크를 나타낸다. 실선은 측정된 토크로부터 얻어진 값이며 점선은 계산된 토크로부터 얻어진 값이다. 계산된 풀림 토크는 4.3 Nm로 링크의 자세에 관계없이 항상 일정하지만 실제 측정된 풀림 토크는 점차 증가하며 최대값-최소값의 차이가 약 0.25 Nm이고 평균은 4.588 7Nm이다. 이는 계산된 풀림 토크와 비교했을 때 약 7%의 오차이다.

3.3 토크 추정

Fig. 17은 거리센서를 이용해 추정된 토크와 이론적으로 계산된 토크를 나타낸다. 실선은 추정된 토크이며 점선은 계산된 토크이다. 이론적으로는 거리 센서의 값이 2.5 mm일 때 VCSC가 풀림 동작이 일어나지만 실제 추정하였을 때는 거리 센서의 값이 약 0.8 mm일 때 VCSC의 풀림 동작이 일어난다. 이는 볼이 굴러가지 않을 때 볼과 컴플라이언스 캠 프로파일 사이의 마찰로 예상되며 추가적인 연구를 통해 개선해야 할 사항이다.

4. 결 론

본 논문에서는 VCSC의 기능과 설계, 토크 추정을 나

타내고 검증하였다. VCSC는 풀림이 발생하기 전 컴플라이언스를 가지며 로봇 팔의 자세에 무관하게 일정한 풀림 토크를 가지는 안전 관절이다. 거리 센서와 설계 데이터를 이용하여 관절에 걸리는 토크를 추정하였으며 향후 연구는 볼과 컴플라이언스 캠 프로파일 사이의 마찰을 줄여 토크 추정 값의 오차를 줄이고 보정하여 원활한 컴플라이언스 컨트롤을 하는 것이 목표이다.

사 사

이 논문은 산업통산자원부 산업기술혁신사업(10048920)의 지원을 받아 한국산업기술평가관리원의 관리하에 수행되었음.

References

- [1] Yeon-Taek OH, "Development of Humanoid Joint Module for Safe Human-Robot Interaction," J. Korea Robot. Soc, vol. 9, no.4, pp.264-271, December, 2014.
- [2] G. A. Pratt and M.M. Williamson, "Series elastic actuator," in IEEE/RSJ Conference on Intelligent Systems and Robots, Pittsburgh, PA, USA, 1995, pp. 399-406.
- [3] T. Morita and S. Sugano, "Design and development of a new robot joint using a mechanical impedance adjuster," IEEE International Conference on Robotics and Automation, Nagoya, Japan, 1995, pp. 2469-2475.
- [4] G. Tonietti, R. Schiavi, and A. Bicchi, "Design and control of a variable stiffness actuator for safe and fast physical human/robot interaction," IEEE International Conference on Robotics and Automation, Barcelona, Spain, 2005, pp. 526-531.
- [5] J. Choi, S. Hong, W. Lee, S. Kang, and M. Kim, "A robot joint with variable stiffness using leaf springs," IEEE Trans. Robotics, vol. 27, no. 2, pp. 229-238, April, 2011.
- [6] B. Kim and J. Song, "Hybrid dual actuator unit: A design of a variable stiffness actuator based on an adjustable moment arm mechanism," IEEE International Conference on Robotics and Automation, Anchorage, Alaska, USA, 2010, pp. 1655-1660.
- [7] J. Park, Y. Lee, J. Song, and H. Kim, "Safe joint mechanism base on nonlinear stiffness for safe human-robot collision," IEEE International Conference on Robotics and Automation, Pasadena, CA, USA, 2008, pp. 2177-2182.
- [8] W. Lee, J. Choi, and S. Kang, "Spring-clutch: A safe torque limiter based on a spring and CAM mechanism with the ability to reinitialize its position," IEEE/RSJ Conference on Intelligent Systems and Robots, 2009, pp. 5140-5145.
- [9] C. Cho, W. Lee, and S. Kang, "Static balancing of a manipulator with hemispherical space," IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Montr' eal, Canada, 2010, pp. 1269-1274.



석 주 신

2012 대구가톨릭대학교 메카트로닉스(학사)
2014 UST HCI&Robotics(석사)
2014 ~ 현재 KIST 로봇미디어연구소 인턴 연구원

관심분야: 메커니즘 설계 및 센서 개발



이 우 섭

1999 서강대학교 기계공학과(학사)
2004 연세대학교 전자공학과(석사)
2013 동경공업대학교 기계우주시스템(박사)
2013 ~ 현재 KIST 로봇미디어연구소 선임 연구원

관심분야: 미세 수술 로봇 메커니즘, 고신뢰성 실시간 제어기, 메커니즘 설계



강 성 철

1989 서울대학교 기계설계학과(학사)
1991 서울대학교 기계설계학과(석사)
1998 서울대학교 기계설계학과(박사)
1991 ~ 현재 KIST 로봇미디어연구소 책임 연구원

관심분야: 매니플레이션, 의료 및 헬스케어로봇, 우주로봇