https://doi.org/10.7735/ksmte.2020.29.3.195

J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.
ISSN 2508-5107(Online)

Special Issue : Engineering Design of ADBL

세 개의 공압 액추에이터로 구성된 유연 그리퍼의 개발

김종형[a*], 박인남[a]

Development of a Flexible Gripper with Three Pneumatic Actuators

Jong Hyeong Kim[a*], In Nam Park[a]

[a] *Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National university of Science & Technology*

ARTICLE INFO

Article history:
Received 7 April 2020
Revised 6 May 2020
Accepted 8 May 2020

Keywords:
Flexible gripper
Pneumatic actuators
Robot
Gripping
Look-up table

ABSTRACT

As the field of automation system expands widely with technological advances, the variety of highly adaptable end effectors and their mechanical freedom become significant. Rigid gripper, initially popular, now faces new challenges in various robotic applications because its movement is limited with an inflexible mechanical configuration of the link and joint. In this paper, a flexible gripper with three pneumatic actuators is developed for handling fragile or unshaped objects. The mapping between the pneumatic actuator and air pressure has nonlinear characteristics for motion control. Furthermore, it can change slightly by a small difference in manufacturing condition. The actuators, made from silicon, are driven pneumatically with a controller of the micro-processor. We demonstrated a classic robot task of turning a fragile light bulb into a socket by the flexible gripper, which has been regarded as an arduous job for the rigid gripper.

1. 서 론

산업 분야에서는 다양한 형태의 그리퍼들이 사용되고 있다. 특히, 다품종 소량생산으로 생산방식의 변화가 이루어지면서 산업현장에서 다양하게 사용이 가능한 그리퍼에 대한 중요성이 높아지고 있다. 또한 산업 분야뿐만 아니라 생물학적, 의학적 및 농업 분야와 같은 비산업 분야에서도 다양한 그리퍼에 대한 많은 수요가 있다. 이러한 예로 하네스 조립 등 현재 수작업에 의존도가 높은 조립 작업과 신체검사 또는 외과 수술을 위한 자유도가 높은 움직임이 필요한 의료용 로봇, 농업분야에서 형태가 일정하지 않고 손상받기 쉬운 농산물을 다루는 것 등이 있다[1-6].

강체 시스템에 기반을 둔 그리퍼는 기계 금속 부품과 같이 딱딱한 물체를 집어서 조립 등 다양한 작업을 하는데 폭넓게 사용되어 왔다. 이러한 전통적인 그리퍼는 정확성과 높은 작업 속도가 중요한 성능 지표였다. 서비스 로봇처럼 로봇을 사용할 수 있는 환경이 확장됨에 따라 다양한 물리적 대상의 작업물을 다루는 요구가 늘어나고 있다. 표면이 부드럽거나 악하고, 변형이 가능한 작업물을 다루거나, 인체와의 접촉이 필요한 로봇 작업의 경우 소프트 그리퍼는 필수적인 요소로 부상되고 있다[2-5,7-15]. 여러 형태의 그리퍼들이 개발되었는데, 이들은 기계적 링크 기구를 이용하거나, 공기압을 기반으로 케이블, 체인, 벨트를 이용한 기구물들을 사용하기도 하였다[1,6].

유연한 그리퍼는, 크게 세 가지 구동방식으로 분류할 수 있다. 공압 구동, 모터-와이어 구동, 지능 재료를 이용한 구동들이 있다. 유연한 그리퍼의 손가락 부분은 부드러운 폴리머와 구동부가 연결된 구조인데, 폴리머와 이루어진 손가락 구조와 조인트와 링크의 경계가 구분되지 않아 움직임을 생성 하는데 자유도가 무수히 많지만 이를 제어할 구동기의 수는 한정되어 있다.

* Corresponding author. Tel.: +82-2-970-6357
E-mail address: johnkim@seoultech.ac.kr (Jong Hyeong Kim).

공압형 유연 그리퍼들은 공기압으로 작동되는 고무 또는 실리콘 등 폴리머 소재로 된 소프트한 액추에이터를 손가락 형태로 조합하여 사용하는 것이 대표적이다. 이 손가락형의 소프트한 액추에이터의 내부는 압축 공기를 넣고 뺄 수 있는 챔버를 가지고 있으며, 그 형태는 대칭 단면을 갖거나 2개 이상의 내부 챔버로 구성되어 있다[3,8-12,14,15]. 더 발전된 형태로는 광섬유, 스프링이나, 와이어를 이용하여 보다 제어 정밀도나, 파지력을 높이는 연구가 진행되고 있다. 소형화 측면에서는 인공 근육에 의해 작동되는 인공손 형태까지 개발하고 있다[2].

이러한, 유연 그리퍼는 강체 그리퍼에 비해서 정확성이 떨어지고, 제어하기가 어려운 단점이 있다. 유연 그리퍼는 사용하는 소재들이 부드럽고, 동력을 전달하는 기구부가 강인하지 못하고, 또한 동력원 자체도 공기압 같이 압축성 특징을 가지 것이 많아서 그리퍼의 위치 및 속도에 있어서 정확성이 떨어진다. 이러한 부정확성은 제어계에 존재하는 비선형성 및 낮은 제어 응답 특성 등에 기인하는 경우가 많다.

유연 그리퍼에서 주로 사용하는 소프트한 공압 액추에이터는 비선형성이 많아서 주입되는 압력과 액추에이터의 구부러짐 정도를 정확히 예측하고 정밀하게 제어하기 위한 연구들이 진행이 되었다. 특히, 공기압의 정도와 그리퍼의 재질 및 형상 그리고 그 내부의 챔버의 형상에 따라 그리퍼의 구부러짐에 대한 형태와 정도를 유한요소법을 사용하여 예측하고자 하는 연구가 두각을 나타내었다[11,13,15]. 그러나, 실질적인 제작 문제에서 소프트 액추에이터의 수학적 모델과 실물과의 정합성이 높게 하고, 액추에이터들을 균일하게 많이 만드는 일은 쉽지 않았다. 액추에이터에 사용되는 재료의 유연성이 높아질수록 수학적 모델과 실제 제작된 제품과는 차이가 더 많이 발생하였다. 소프트 액추에이터에 1개 이상의 공기 챔버가 들어가는 경우는, 부정확성이 더 높아져서 공기압에 따른 손가락의 변형 정도를 예측하거나 제어하기는 쉽지 않았다.

본 연구에서는 각 3개의 공기 챔버를 가진 액추에이터 3개로 구성된 유연 그리퍼를 설계 제작하고 로봇에 부착하여 전구를 소켓에 돌려 끼우는 작업을 실현하고자 한다.

액추에이터는 3개 공기 챔버 내의 압력을 서로 다르게 줌으로서 다양한 각도와 형태로 구부릴 수 있다. 본 연구에서는 실제 만든 시작품 그리퍼와 수학적 모델 간의 일치성이 낮고 부정확한 점을 극복하고자 순람표(look-up table)를 이용하여 액추에이터의 그 변형을 제어하고, PWM 방식으로 그 변형의 속도를 제어해 보고자 한다.

전구를 소켓에 조립하는 과정은 그리퍼 관점에서 일정한 반복정밀도를 지니면서, 전구가 깨어지지 않도록 잡아야 하고, 돌리는 높은 자유도의 동작이 가능해야 한다. 동시에 높은 수준의 파지에 따른 힘 제어가 필요 없이 위치 정보만 가지고 쉽게 제어가 되어야

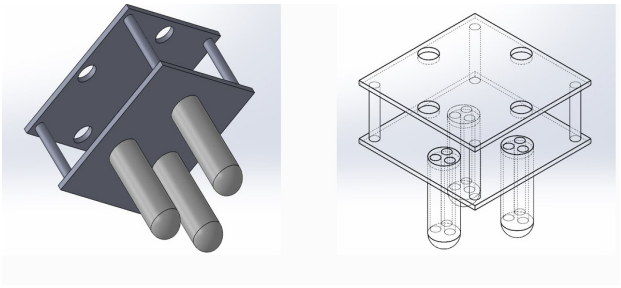


Fig. 1 Land marker on object

한다. 따라서 이 작업은 유연 그리퍼의 장점을 잘 보여 줄 수 있고, 향후 더 다양한 분야로 응용될 수 있음을 보여주는 좋은 사례가 될 것이다.

본 논문의 연구는 대학 4학년 졸업작품으로 수행되었으며, 자료 수입과 분석, 문제의 정의, 개념 설계, 실제와 제작 및 시험에 이르기까지 전 과정을 학생들이 실제 경험한 좋은 교육적 사례이다.

2. 그리퍼의 설계 및 제작

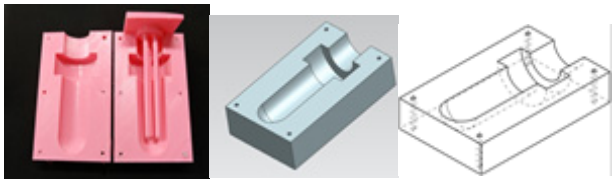
제안된 유연 그리퍼는, 3개의 공기압으로 구동되는 유연한 손가락 형태의 액추에이터로 구성되어 있다. 본 공기압 액추에이터의 내부는 실린더 형태의 3개 공기 챔버가 방사형으로 구성되어 있다.

액추에이터 내부에는 3개의 공기 통로가 있으며 각각의 내부 압력은 압력 제어 밸브를 통해 독립적으로 제어된다. 액추에이터의 한 통로의 압력이 증가하면 통로의 단면 특성에 따라 반경 방향의 변형에는 저항하는 한편, 축 방향으로 쉽게 변형된다. 따라서 3개의 통로의 압력을 각각 제어함으로써 액추에이터의 동작(pitch, yaw, stretch)을 제어할 수 있다.

유연 그리퍼의 구조 설계 및 제조는 기존의 강체 기반 그리퍼를 제작하는 데 사용 하는 절삭 가공과 주조 성형, 볼트와 너트를 통한 부품 조립 공정과는 다른 방식으로 진행된다. 유연 그리퍼에 사용되는 대표적인 소재인 실리콘을 이용하여 만드는 구조는 몰드 성형을 통해 제작된다. 과거에는 몰드 성형을 위한 주형틀을 금속으로 제작하기에 오래 걸리고 제조 단가가 높았지만 3D 프린터를 이용하면 복잡한 형상을 갖는 몰드의 생산 시간이 상대적으로 짧으면서 생산 단가가 낮은 장점이 있어 소프트 로보틱스에 자주 사용된다. 본 논문에서는 소프트 그리퍼의 핑거가 될 부분에 세 개의 공기 챔버를 3D 프린팅 몰드를 이용하여 제작하였다. Fig. 2는 본 논문에서 사용한 손가락 형태의 액추에이터 기구부 설계도와 이에 따라 제작된 몰드를 보여준다.

액추에이터는 Fig. 2에서 보는 것처럼 3개의 실린더 형 공기 챔버로 구성되어 있으며 각각의 내부 압력은 압력 제어 밸브를 통해 독립적으로 제어된다. 작동 원리를 살펴보면, Fig. 3과 같이 액추

(a) master shape of finger actuator



(b) mold for finger actuator

Fig. 2 A mold of finger actuator made by 3-D Printer

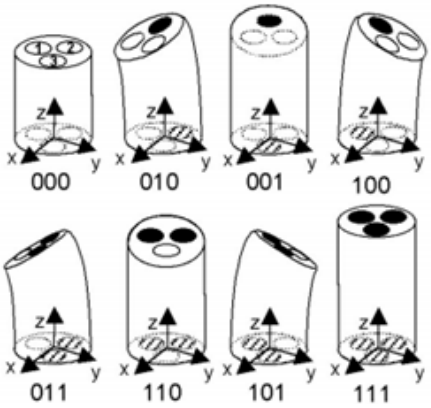
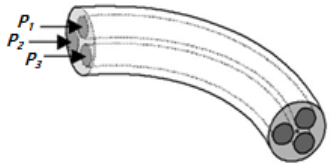


Fig. 3 Motion mode of finger actuator

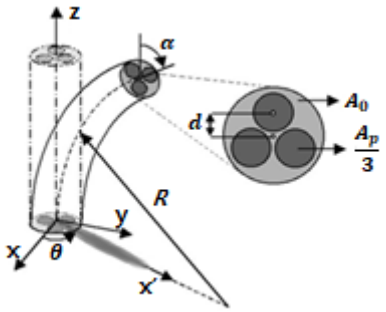
에이터의 한 챔버의 압력이 증가하면, 실린더 형 단면 특성에 따라 반경 방향의 변형에는 저항하는 한편, 축 방향으로 쉽게 변형된다. 따라서 3개의 통로의 압력을 각각 제어함으로써 액추에이터의 끝점의 동작(pitch, yaw, stretch)을 8개의 모드로 제어할 수 있다. 여기서 문제는 압력에 따라 액추에이터의 변형이 비선형적 특징이 있다는 점이다.

액추에이터의 동작은 Fig. 4에서처럼 수학적 모델링이 가능하며, 간단히 압력과 변수와의 관계를 살펴보면 다음 식(1)과 식(2)와 같다. 앞선 연구에서는 유한요소법을 사용하여 액추에이터의 변형을 정확히 해석하고, 압력을 제어하여 동작을 생성하고자 했다[11,12]. 그러나, 제작 상의 액추에이터 내의 밀도 불균형이나 재질의 불균일성, 압력과 변형 사이의 시간에 따른 변화 등의 문제로 정확한 동작을 제어하기가 어렵다. 한편으로는 소프트 액추에이터는 작업물 파지 때에 위치 오차에 따른 반력이 그리 크지 않으므로 실제 작업에서는 큰 문제가 되지 않을 수도 있다.

압력에 따른 액추에이터의 길이의 변화($\triangle L$)와 굽힘에 따른 곡률경(R)의 관계는 식 (1)과 같다.



(a) pressurizing a finger actuator with 3 ways



(b) the deformation of a finger actuator

Fig. 4 The deformation of a finger actuator by pressurizing

$$L = L_0 + \triangle L = L_0 + \frac{L_0 A_p (P_1 + P_2 + P_3)}{3 A_0 E}$$
$$R = \frac{3EI}{A_p d \sqrt{P_1^2 + P_1^2 + P_1^2 - P_1 P_2 - P_2 P_3 - P_1 P_3}} \quad (1)$$

여기서, L은 액추에이터의 늘어난 후 총길이, A_0는 액추에이터의 단면적, A_p는 챔버의 총 단면적, P_i는 i번째 챔버에 들어간 공기압력, d는 액추에이터 중심에서 한 챔버 중심까지의 거리, E는 액추이이터 재질의 탄성계수, 그리고, I는 액추에이터의 2차 관성모멘트를 의미한다.

액추에이터 끝점의 동작은 Fig. 4(b)에서처럼 두 개의 굽힘 각도 θ, α로 표현할 수 있다.

$$\alpha = \frac{L}{R}$$
$$\theta = acrctan\left\{\frac{2P_1 - P_2 - P_3}{(P_2 - P_3)\sqrt{3}}\right\} \quad (2)$$

이 식에서의 비선형성은 , 제작 과정에서 생기는 탄성계수, E의 불균일성과 액추에이터의 단면 면적, A의 값이 압력에 따라 변화하는데 있다. 비록 식 (1)과 식 (2)가 부정확한 측면은 있지만, 액추에이터가 움직이는 영역과 가해야 하는 압력의 범위를 정하는 데 의미가 있다고 할 것이다.

3. 실험 장치의 set-up

실험 장치는 백열전구를 집어서 소켓에 끼우고 돌려서 조립하는 과정을 구현하기 위하여, Fig. 5와 같이 구성되었다. 세부 구성을

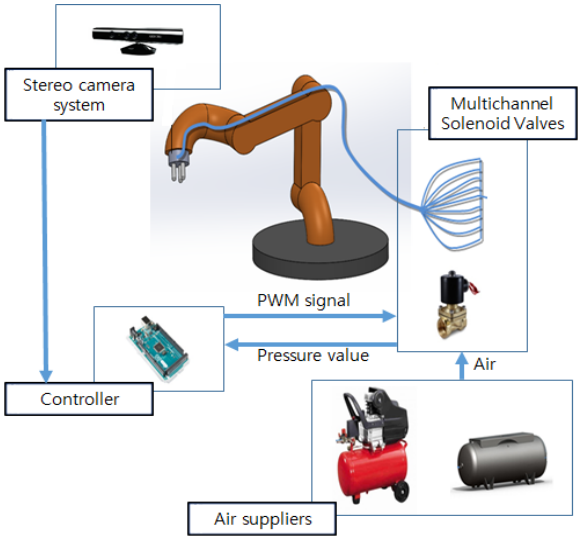


Fig. 5 Experimental set-up

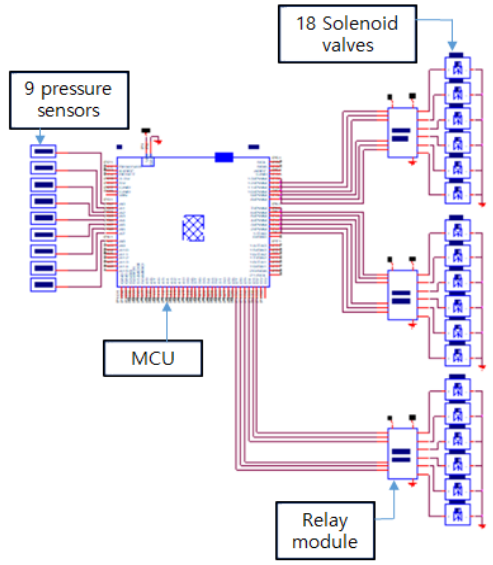


Fig. 6 Circuit of controlling 18 solenoid valves

살펴보면 다음과 같다. 6축 수직다관절 로봇에 3개의 손가락 형 공기압 액추에이터가 달린 소프트 그리퍼가 장착되어 있다.

공기압 공급 장치 부분은 각 액추에이터가 3개의 공기압 채널을 가지므로 총 9개의 채널로 구성되었으며, 각 채널별로 2 웨이 방식의 솔레노이드 밸브가 2개씩 연결되어 총 18개의 솔레노이드 벨브로 구성되어 있다. 또한, 각 채널마다는 챔버 내의 압력 측정을 위한 압력 센서가 부착되어 압력값은 제어기로 피드백해 준다.

제어기는 Fig. 6에서 보는 봐와 같이 마이크로 컨트롤러를 사용하였으며, 압력 센서로 부터 정보를 받아서, 챔버 내의 정해진 압력값이 나올 때까지 PWM 신호를 발생하여 솔레노이드 밸브를 on-off 제어하여 액추에이터로 들어가는 공기압을 조정한다.

스테레오 비젼 시스템은, 로봇을 안내하고 작업을 티칭하기 위한 목적으로 외부에 독립적으로 장착되어 있다. 별도의 그리퍼 위치 정보에 대한 실시간 피드백은 하지 않는다.

4. 실험 및 결과

첫 번째 실험은 한 개의 액추에이터에서 입력되는 3개의 압력값 변화에 따른 액추에이터의 변형 값의 관계를 찾는 것이다. 이를 위하여, Fig. 4의 $z-x$ 평면을 보는 카메라와 $z-y$ 평면을 보는 카메라 2대를 설치하여, 액추에이터의 변형을 측정하여, 곡률경(R), 그리고 두 개의 굽힘 각도 θ, α를 계산하였다. 액추에이터에는 미리 끝점과 중심선을 중심으로 그리드 패턴을 그려 넣어서 카메라가 쉽게 형상 및 변형을 알 수 있도록 하였다. 초기 공기압의 값은 식 (1), 식 (2)에서 계산하여 주어졌으나, 실제 굽힘 각도와는 맞지 않음을 알 수 있었다. Fig. 7은 카메라에서 측정한 액추에이

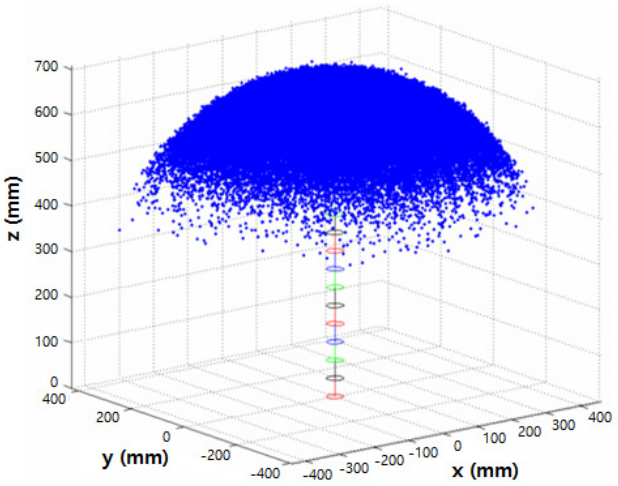


Fig. 7 Working area of actuator's end points

Table 1 Stereo accuracy result of 1st object

no.	P_1 (mbar)	P_2 (mbar)	P_3 (mbar)	R (mm)	θ (°)	α (°)
1	550	550	550	33.0	28	47
2	730	550	600	33.0	30	50
3	810	550	620	32.7	44	54
4	550	730	550	31.7	25	48
5	550	820	550	30.8	20	50
6	550	850	550	30.4	20	54
7	720	710	550	30.6	30	42
8	785	770	550	29.2	33	44
9	780	550	780	33.9	33	33
. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .

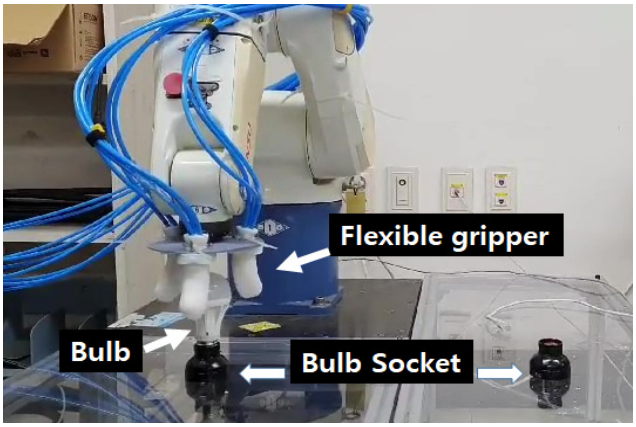


Fig. 8 Photograph for turing a bulb into a socket

터의 끝점들을 표현한 것이다.

Table 1은 실험을 통하여 액추에이터에 들어간 실제 압력과 곡률경(R), 그리고 두 개의 굽힘 각도 θ, α의 계산 결과이다. 이러한 실험을 통하여 얻어진 data를 가지고 아래의 행렬식으로 보간하여 사용하였다.

Fig. 7에서와 같이 실험에서 얻은 약 1,000개의 좌표에서 Table 1의 값을 계산하고, 식 (3)을 기반으로 linear programing 기법을 사용하여 $C_1 \sim C_9$의 값을 구하였다. 압력에 따른 액추에이터의 위치에 대한 절대정밀도는 별도의 측정 장비가 없어서 측정하지 못하였으나, 설치된 비젼 시스템으로 반복정밀도를 측정해 볼 때, 전체적으로 ± 2 mm 이내의 오차를 가진다.

$$\begin{bmatrix} C_1 & C_2 & C_3 \\ C_4 & C_5 & C_6 \\ C_7 & C_8 & C_9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R \\ \theta \\ \alpha \end{bmatrix} \tag{3}$$

두 번째 실험은 액추에이터의 속도 조절에 대한 작동을 확인하고자 하였다. 액추에이터의 정해진 압력까지 솔레노이드 밸브를 통하여 공기를 넣을 때, 마이크로 프로세서에서는 PWM 신호를 발생하여 on-off로 제어한다. 즉, 계속 on 상태로 공기를 주입하면 가장 빠른 속도로 액추에이터는 움직이게 되고, off 상태를 오래 가지고 가면, 액추에이터는 매우 천천히 움직이게 된다. 솔레노이드 밸브는 초당 5회~10회 on-off가 가능하므로 이를 조정하여 프로그램하도록 하였다. 최대 속도로 움직여도 소프트한 액추에이터이므로 진동이나, 오버슈트와 같은 현상은 없다.

세 번째 실험은 Fig. 8과 같이 로봇을 이용하여 실제 백열전구를 돌리는 실험을 통하여, 본 유연 그리퍼가 실제 작업을 수행할 수 있는지 여부를 확인하고자 하였다. 이 실험 장치에서는 아래 작업대 위에 두 개의 백열전구 소켓을 두고, 왼쪽에 조립되어 있는 백열전구를 풀어서 오른쪽 소켓에 다시 조립하고, 다시 오른쪽 소켓의 백열전구를 풀어서 왼쪽 소켓에 다시 조립하는 시험을 반복하여

(a) turning to left (b) open slightly (c) turing to right

Fig. 9 Gripping motion of the actuators for turning bulb

수행하였다. 이 실험에 앞서 백열전구의 유리 재질의 특성을 파악하여, 유리의 파괴가 일어나는 임계치를 먼저 계산하고, 본 액추에이터의 접촉면을 10 mm로 가정하여 백열전구에 미치는 힘이 임계치보다 낮도록 공기 압력을 설정하였다. 대상물의 손상을 줄이기 위해서는 더욱더 소프트한 재질을 사용하는 것이 좋으나, 실제의 경우 재료가 소프트해 질수록 제어를 위한 비선형성은 더욱 증가하여 제어하기가 쉽지 않다.

Fig. 9는 백열전구를 돌리는 대표적인 세부 동작을 보여준다. Fig. 9(a)는 백열전구를 소켓에서 풀기위해서 세 개의 액추에이터들을 왼쪽으로 돌리는 동작이고, Fig. 9(b)는 이들 액추에이터를 살짝 들어서 직선으로 원위치 시킨 동작이다. 왼쪽으로 돌리고, 원위치 시키는 동작을 반복하여 소켓에 있는 백열전구를 풀게 된다. Fig. 9(c)는 반대로 백열전구를 오른쪽으로 돌리는 동작으로, 오른쪽으로 돌리고 원위치 시키는 동작을 반복하여 백열전구를 소켓에 조립하게 된다.

본 실험에서는 성공적으로 백열전구를 10회 이상 돌려서 풀고, 로봇을 이용하여 이동하여 다른 소켓에 조립하는 과정을 성공하였다. 이는 단순한 유연 그리퍼의 동작을 시현하고 확인하는 과정을 넘어서, 다소 복잡할 수 있는 백열전구 조립 작업을 성공한 것은 향후 실용적 가능성을 보여준다.

추후 소프트 액추에이터 설계에 있어서 포도껍질이나, 과일 등 집는 대상에 따라서 접촉면에 미치는 힘을 미리 계산하여, 입력되는 공기의 압력을 제한하여야 한다. 또는, 필름 타입의 압력 센서를 소프트 액추에이터 앞에 붙여서 대상물의 손상이 가는 임계값을 초과 하지 않도록 조정해야만 한다.

5. 결 론

본 논문에서는 3개의 공기 챔버를 가진 소프트 액추에이터 3개를 결합한 손가락 형태의 그리퍼를 설계 제작하고, 이를 이용하여 실제 백열전구를 돌려서 성공적으로 소켓에 조립하는 과정을 실현하였다. 실제 동작에서 액추에이터의 위치 오차가 존재하였으나, 실리콘 소재의 특성으로 부드럽게 백열전구를 잘 감싸서 맞추어 들어가는 점을 확인 할 수 있었다.

공기압으로 작동되는 소프트 액추에이터 활용에 있어서, 주입하는 공기의 압력에 대해서 액추에이터가 얼마나 변형 또는 구부러지는 지를 모델링하고 예측하는 것은 매우 어려운 일이였다. 특히 소프트 액추에이터가 부드러울수록 제작하기가 힘들고 모델링하기도 어려운 일이였다. 본 논문에서는 학생들이 3D printer로 이용하여 틀을 만들고, 실리콘을 부어서 간단히 만들 수 있었다. 반대급부적으로 형상이나 재질의 밀도가 균일하지 못하여 실제 수학적 모델과 잘 맞지 않은 부분이 문제였으며, 이를 부분적 선형화로 해결하여 소프트 액추에이터의 반복정밀도 ±2 mm라는 비교적 좋은 결과를 얻었다.

본 논문에서는 소프트 액추에이터를 제어하는데 실험적 모델을 사용하여 순람표를 만들고 이를 이용하여 주입한 공기압과 액추에이터의 변형을 부분적으로 선형화화여 예측하였다. 이는 마치 강체 그리퍼에서 순방향 기구학과 역방향 기구학과 같은 역할을 해준다. 비록 정밀도는 떨어지지만, 강체가 아님에도 소프트 액추에이터를 비교적 편리하게 제어할 수 있었다.

본 논문에서의 속도 측면에서는 원하는 결과를 얻지 못하였다. 가장 큰 원인으로는 솔레노이드 밸브의 on-off 때의 비선형성이라고 간주된다. 2상의 솔레노이드 밸브에 PWM 신호를 주어 공기의 입출력을 제어하여 원하는 속도를 내는 것은 매우 어려운 일이였다. 밸브의 내의 오리피스 등 기구물의 설계 개선이 필요한 점이 있었다. 본 논문의 결과를 볼 때, 다른 연구 사례에서 사용한 PID 제어 기법들은 본 연구에서 사용한 on-off 제어에 비해서 별 성능성의 차이가 없을 것으로 예측이 된다.

비록 같은 틀에서 만든 소프트 액추에이터의 기구물 자체도 그 물리적 특성이 조금씩 차이가 나서, 3개의 소프트 액추에이터를 사용할 때 조금씩 보정이 필요하였다. 주입되는 공기 압력과 소프트 액추에이터의 변형과의 관계 함수를 피팅하는 과정에서 발생하는 비선형성에 대해서는 인공지능 뉴럴네트웍을 활용하여 개선하는 것이 필요할 것으로 예상된다.

본 연구에서는 위치 정밀도 및 속도 측면에서 원하는 결과를 얻지는 못하였지만, 더 정밀한 밸브의 사용과 소프트 액추에이터의 제작 소재의 개선이 이루어진다면, 유연한 그리퍼는 제조 산업 및 의료 분야, 개인 서비스 등 다양한 분야에서 활용성이 기대된다.

후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다.

References

[1] Jacobsen, S. C., Wood, J. E., Knutti, D. F., Biggers, K. B., 1984, The Utah/MIT Dexterous Hand: Work in Progress, Int. J. Robot. Res., 3:4 21-50, https://doi.org/10.1177/027836498400300402.

[2] Devi, M. A., Udupa, G., Sreedharan, P., 2018, A Novel Underactuated Multi-fingered Soft Robotic Hand for Prosthetic Application, Robotics and Autonomous Systems, 100 267-277, https://doi.org/10.1016/j.robot.2017.11.005.

[3] Elgeneidy, K., Lohse, N., Jackson, M., 2018, Bending Angle Prediction and Control of Soft Pneumatic Actuators with Embedded Flex Sensors, Mechatronics, 50 234-247, https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2017.10.005.

[4] Batsuren, K., Yun, D., 2019, Soft Robotic Gripper With Chambered Fingers for Performing In-Hand Manipulation, Applied Science, 9:2657 1-16, https://doi.org/10.3390/app9152967.

[5] Ham, K., Jeon, J., Park, Y., 2018, Development of Variable Stiffness Soft Robot Hand for Improving Gripping Performance, Korea Academy Industrial Cooperation Society, 19:12 47-53, http://doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.12.47.

[6] Thu, L. X., Han, S. H., 2008, Design of Three-Finger Hand System, Journal of the KSMTE, 17:6 71-76.

[7] Yu, Y. J., Lee, G. W., Jeong, S. H., Jung, W. K., Kim, H., Ahn, S. H., 2019, 3D Vision-based Soft Object Pick and Place System, Proceedings of KSMTE Autumn Conf., 167-167.

[8] Park, I. N., Oh, S. J., Kim, S. B., Kang, M. S., Kim, N. Y., Kim, J. H., Kang, B. S., Lee, J. H., 2019, The development of robotic three-finger gripper with flexible material, Proceedings of KSMTE Autumn Conf., 171.

[9] Suzumori, K., Kondo, F., Tanaka, H., 1993, Micro-Walking Robot Driven by Flexible Microactuator, Journal of Robotics and Mechatronics, 5:6 537-541, http://doi.org/10.20965/jrm.1993.p0537.

[10] Sai Dinesh, P., Raveendran, R., Aditya, K., Sreedharan, P., Udupa, G., 2017, viewed 10 June 2019, Innovative Micro-walking Robot Using Flexible Microactuator, <https://www.researchgate.net/publication/238519547>.

[11] Suzumori, K., Maeda, T., Watanabe, H., Hisada. T., 1997, Fiberless Flexible Microactuator Designed by Finite-Element Method, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2:4 281-286, http://doi.org/10.1109/3516.653052.

[12] Sun, Y., Song, Y. S., Paik, J., 2013, Characterization of Silicone Rubber Based Soft Pneumatic Actuators, International Conference on IROS Japan, 4446-4453.

[13] Fukuda, T., et al., 1989, Rubber Gas Actuator Driven by Hydrogen Storage Alloy for In-pipe Inspection Mobile Robot With Flexible Structure, Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, 1847-1852.

[14] Mohd, S. N. A., Mahmud, N. J., 2015, Modelling and Computation of Silicone Rubber Deformation Adapting Neo-Hookean Constitutive Equation, Fifth International Conference on Communication Systems and Network Technologies, 1323-1326.

[15] Gorissena, B., Donosea, R., Reynaertsa, D., Volder, M., 2011, Flexible Pneumatic Micro-actuators: Analysis and Production, Proc. Eurosensors XXV Greece, 682-684.

[16] Lee, K., Naa, S., Park, J., Ann, K., Lee, C., 2018, Development of a Dual-arm Service Robot Using Stereo Vision and 6-Axis Manipulators, Journal of the KSMTE, 27:3 271-277, http://doi.org/10.7735/ksmte.2018.27.3.271.

Jong Hyeong Kim
Professor in the Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science & Technology. His research interests include machine vision, artificial intelligence, robot application and factory automation.
E-mail: johnkim@seoultech.ac.kr

In Nam Park
Bachelor of Science in Mechanical Design and Automation Engineering at the Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science & Technology.
E-mail: pin4562@seoultech.ac.kr