

Soft-Tip을 가진 Dual Finger의 파지운동제어에 관한 연구

박경택*(울산대 대학원 자동차공학과), 양순용(울산대 기계·자동차공학부),
한현용(Ritsumeikan University Dept. Of Robotics)

Research of Controlled Motion of Dual Fingers with Soft-Tips Grasping

K. T. Park(Auto. Eng. Dept., USU), S. Y. Yang(Mech. & Auto. Eng. School, USU)
H. Y. Han(Robotics Dept., RMKU)

ABSTRACT

This paper attempt analysis and computer simulation of dynamics of a set of dual multi-joint fingers with soft-deformable tips which are grasping. Firstly, a set of differential equation describing dynamics of the fingers and object together with geometric constraint of tight area-contacts is formulated by Euler-Lagrange's formalism. Secondly, problems of controlling both the internal force and the rotation angle of the grasped object under the constraints of area-contacts of tight area-contacts are discussed. The effect of geometric constraints of area-contacts on motion of the overall system is analyzed and a method of computer simulation for overall system of differential-algebraic equations is presented. Finally, simulation results are shown and the effects of geometric constraints of area-contact is discussed.

Key Words : Soft Finger (소프트 핑거), Robot-Finger(로봇-핑거), Stable Grasping (안정 파지), Soft-Tips(소프트-팁), Multi-Finger, Robot Hands, Manipulating, Dual Finger.

1. 서론

사람의 손은 어떠한 특수한 조건에서도 물리적인 일을 할 수 있지만 로봇의 손은 그렇지 못하다. 사람의 이런 본능적인 기술을 수치적인 운동방정식으로 나타내기 어려운 것이 문제이다. 이런 사람의 기술을 효율적으로 접근해나가 로봇의 제어기를 찾아낸다면 로봇을 사람의 움직임처럼 유연하게 할 수 있을 것이다. 생물학 문헌에도 대부분의 지능적인 부분으로 구성된 사람의 손은 어떠한 조건에서도 유기적으로 움직임을 알 수 있다.^[1] 오늘날 로봇을 이용한 생산공정과 조립공정에서도 물체의 조건에 따라 사람의 손처럼 안정적으로 파지 할 수 있는 유연한 로봇 핑거의 파지동작이 요구되고 있다. 과거 거의 모든 논문의 문제는 로봇의 핑거 끝단을 딱딱하게 둔 접촉으로 가정하였고 접촉시 일어나는 접촉면의 위치 변화를 계산하지 않았거나 물체 표면에서 핑거 끝단의 롤링을 변화시켰다.^{[2][3]} 그러나 감성접촉은 건마찰과 비정상적인 못한 슬립을 발생시킨다. 그러

나 부드럽고 변형이 가능한 물질을 로봇-핑거의 끝단에 덮어씌워서 높은 마찰과 안정된 파지를 할 수 있다. 물체와 소프트-핑거의 접촉면에서 슬립 의한 롤링은 안정된 파지의 성능을 높일 수 있다.^[4] 이것은 물체의 최종 좌표계가 서로 다른 면에 접촉한 두 개의 핑거가 쉽게 물체와 수직으로 접촉면을 움직일 수 있는 것이다. 본 논문에서는 물체에 접촉을 할 때 안정된 파지를 위해 핑거가 움직여야 할 방향에 대해 알아보려고 한다.

처음에 물체와 로봇의 소프트-핑거 사이에 시스템을 Euler-Lagrange로서 운동방정식을 유도하고 다음에는 처음에 구한 운동방정식을 토대로 하여 피드백 컨트롤을 설계한다. 또 소프트-핑거로서 물체를 꼭 잡았을 때의 시스템에 대해서도 시뮬레이션을 하여 해석을 해보았다. 본 연구에서 제시된 파지 동작 계획은 부품 파지 시스템을 기존의 해석방법이 아닌 비선형성도 고려를 하여 해석을 하게 된다. 본 연구에서 설정한 모델은 수평방향으로만 움직일 수 있다고 가정하고 설계를 하였다.

2. 로봇 핑거의 운동방정식

2.1 로봇 핑거와 물체의 운동방정식 해석

2개의 소프트-핑거를 가지는 로봇의 운동방정식은 수평방향으로 제한하고 중력의 영향을 받지 않는다고 가정한다. 양쪽 핑거의 끝단에는 변형 가능한 실리콘과 같은 물질로 반원의 형태로 있다고 가정하고 Fig. 1에 대한 운동방정식을 도출한다. ($i=1$ 는 왼쪽손가락, $i=2$ 는 오른쪽손가락)

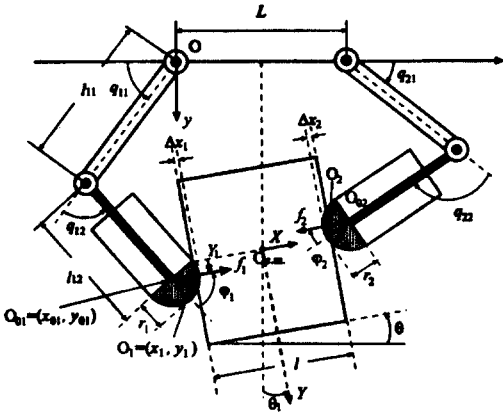


Fig. 1 A mechanical hand with dual fingers whose ends are covered with soft material

우선은 각각 소프트-팁 부분을 제외한 로봇-핑거의 끝점과 물체가 만나는 점을 좌표 $O_{01} = (x_{01}, y_{01})$, $O_{02} = (x_{02}, y_{02})$ 로하고 각각의 조인트가 이루는 각도를 $q_{11}, q_{12}, q_{21}, q_{22}$ 로서 표현한다.

$$x_{01} = -l_{11} \cos q_{11} - l_{12} \cos(q_{11} + q_{12}) \quad (1a)$$

$$y_{01} = l_{11} \sin q_{11} + l_{12} \sin(q_{11} + q_{12}) \quad (1b)$$

$$x_{02} = L + l_{21} \cos q_{21} + l_{22} \cos(q_{21} + q_{22}) \quad (1c)$$

$$y_{02} = l_{21} \sin q_{21} + l_{22} \sin(q_{21} + q_{22}) \quad (1d)$$

소프트-팁과 물체가 만나는 점 $O_i = (x_i, y_i)$ 를 기하학적 형상에 의해 계산하면 다음과 같이 표현된다.

$$x_1 = x_{01} - (r_1 - \Delta x_1) \cos(q_{11} + q_{12} + \varphi_1) \quad (2a)$$

$$y_1 = y_{01} - (r_1 - \Delta x_1) \sin(q_{11} + q_{12} + \varphi_1) \quad (2b)$$

$$x_2 = x_{02} - (r_2 - \Delta x_2) \cos(q_{21} + q_{22} + \varphi_2) \quad (2c)$$

$$y_2 = y_{02} - (r_2 - \Delta x_2) \sin(q_{21} + q_{22} + \varphi_2) \quad (2d)$$

물체의 중심을 x, y 라고 하면 윗식의 상관관계는 식(3a)(3b)와 같다.

$$\begin{aligned} x &= x_1 + \frac{1}{2} \cos \theta - Y_1 \sin \theta \\ &= x_2 - \frac{1}{2} \cos \theta - Y_2 \sin \theta \end{aligned} \quad (3a)$$

$$\begin{aligned} y &= y_1 - \frac{1}{2} \sin \theta - Y_1 \cos \theta \\ &= y_2 + \frac{1}{2} \sin \theta - Y_2 \cos \theta \end{aligned} \quad (3b)$$

2.2 물체와 소프트-팁의 접촉

Fig. 2는 소프트 팁이 직각으로 물체와 접촉했을 때와 각 φ 을 이루고 접촉했을 때 물체중심과의 거리가 변한다는 것을 보여준다. 물체를 딱 잡았을 때는 다음과 같은 상관관계를 가지고 있다.

$$\varphi_1 = Y_1 - c_1 + r_1 \varphi_1 = 0 \quad (4a)$$

$$\varphi_2 = Y_2 - c_2 + r_2 \varphi_2 = 0 \quad (4b)$$

여기서 c_1, c_2 는 상수이다.

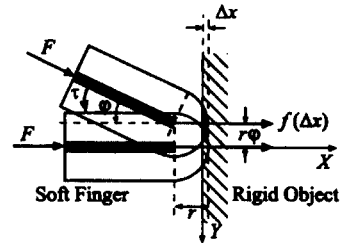


Fig. 2 The center of contact area moves

2.3 운동방정식

위에서 구한 기구학적인 방정식을 운동에너지 K 를 표현하면 식(5)처럼 표현된다.

$$\begin{aligned} K &= \frac{1}{2} \sum_{i=1,2} \dot{q}_i^T H(q_i) \dot{q}_i \\ &+ \frac{1}{2} (M \dot{x}^2 + M \dot{y}^2 + I \dot{\theta}^2) \end{aligned} \quad (5)$$

단, $M = \begin{pmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & I \end{pmatrix}$, m : 소프트핑거의 질량.

$q_i = (q_{i1}, q_{i2})^T$: Joint angle vector

포텐셜에너지 P 를 표현하면 식(6)와 같다.

$$P = \sum_{i=1,2} \int_0^{\Delta x_i} f_i(\xi) d\xi \quad (6)$$

로봇 소프트-핑거의 운동에너지와 포텐셜에너지를 에너지 함수 S 로 표현하기 위해 식(5)(6)에 의해 표현을 하면 식(7)와 같이 된다.

$$\begin{aligned} S &= \sum_{i=1,2} \left(\frac{1}{2} \varepsilon_i (\Delta x_i) \dot{\varphi}_i^T \right. \\ &\left. + \lambda_i (Y_i - c_i + r_i \varphi_i) \right) \end{aligned} \quad (7)$$

단, λ_i ($i=1,2$)

여기에 Hamilton의 원리를 적용하여 양쪽 로봇팔의 운동모형을 세우면 식(8)와 같이 되고 물체의 운동모형은 식(9)와 같이 된다.

$$H_i(q_i)\dot{q}_i + \left(\frac{1}{2}\dot{H}_i(q_i)\dot{q}_i + S_i(q_i, \dot{q}_i)\right)\dot{q}_i \quad (8)$$

$$+ \left(\frac{\partial \Delta x_i}{\partial q_1}\right)^T f_i(\Delta x_i) = u_i$$

$$M\ddot{z} + \left(\frac{\partial \Delta x_1}{\partial z}\right)^T f_1(\Delta x_1) \quad (9)$$

$$+ \left(\frac{\partial \Delta x_2}{\partial z}\right)^T f_2(\Delta x_2) = 0$$

단, $z = (x, y, \theta)^T$: 물체의 무게중심 및 각도

\dot{q}_1^T, \dot{q}_2^T 와 식(8), \dot{z}^T 와 식(9)사이의 관계를 수식으로 표현하면 식(10)와 같이 된다.

$$\dot{q}_1^T + \dot{q}_2^T = \frac{d}{dt}(K+P) \quad (10)$$

그러므로 입력(u_1, u_2)와 출력(\dot{q}_1, \dot{q}_2)에서 파지가 가능하다는 것을 알 수 있다.

3. 안정적 파지 제어

3.1 접촉면의 무시

팔의 파지를 위한 목표힘을 f_d 라 하고 목표각을 θ_d , q_1, q_2 는 실제에서 센서로서 측정을 하고 \dot{q}_1, \dot{q}_2 는 수치적으로 계산한다. Y_1, Y_2, x, y, θ 는 알고 있는 값이다. 제어입력값은 Arimoto에 의해 제안된 식(11)(12)를 쓴다.^[4]

$$u_1 = J_{01}^T \begin{pmatrix} \cos \theta \\ -\sin \theta \end{pmatrix} f_d \quad (11)$$

$$-k_{v1} \dot{q}_1 - \frac{r_1 f_d}{r_1 + r_2} (Y_1 - Y_2) \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$u_2 = J_{02}^T \begin{pmatrix} -\cos \theta \\ \sin \theta \end{pmatrix} f_d \quad (12)$$

$$-k_{v2} \dot{q}_2 - \frac{r_2 f_d}{r_1 + r_2} (Y_1 - Y_2) \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

물체와 로봇의 변수들은 Table 1.의 값을 사용하였다. 시뮬레이션은 짧은 시간 행하였으며, $f_1(\Delta x_1)$ 와 $f_2(\Delta x_2)$ 가 Fig.3에서 보는 것과 같이 목표값 $f_d=1$ 사이에서 진동하는 것을 알 수 있다.

3.2 접촉면의 고려

위의 시뮬레이션(Fig.3)은 물체의 회전각과 접촉면에서의 중심 이동무시하고 설계한 것이다. 접촉면과 물체의 회전값을 피드백하고 여기에 접촉면을 고

려하여 운동방정식을 구하면 식(13)(14)과 같이 된다.

$$\Phi_1 = Y_1 - c_1 + r_1(\pi + \theta - q_{11} - q_{12}) = 0 \quad (13)$$

$$\Phi_2 = Y_2 - c_2 + r_2(\pi + \theta - q_{21} - q_{22}) = 0 \quad (14)$$

여기에 Hamilton의 원리를 적용하여 양쪽 로봇팔의 운동모형을 세우면 식(15)와 같이 되고 물체의 운동모형은 식(16)와 같이 된다.

$$H_i(q_i)\dot{q}_i + \left(\frac{1}{2}\dot{H}_i(q_i)\dot{q}_i + S_i(q_i, \dot{q}_i)\right)\dot{q}_i \quad (15)$$

$$+ \left(\frac{\partial \Delta x_i}{\partial q_1}\right)^T f_i(\Delta x_i) - \lambda_1 \frac{\partial \Phi_i}{\partial Q_1} = u_i$$

$$M\ddot{z} + \left(\frac{\partial \Delta x_1}{\partial z}\right)^T f_1(\Delta x_1) + \left(\frac{\partial \Delta x_2}{\partial z}\right)^T f_2(\Delta x_2) \quad (16)$$

$$- \lambda_1 \frac{\partial \Phi_1}{\partial z} - \lambda_2 \frac{\partial \Phi_2}{\partial z} = 0$$

\dot{q}_1, \dot{q}_2 와 식(15), \dot{z} 와 식(16)사이의 관계를 수식으로 표현하면 식(17)와 같이 된다.

$$\dot{q}_1^T + \dot{q}_2^T = \frac{d}{dt}(K+P) \quad (17)$$

그러므로 입력(u_1, u_2)와 출력(\dot{q}_1, \dot{q}_2)에서 파지가 가능하다는 것을 알 수 있다.

제어 입력값에서 물체의 회전각을 고려하여 입력값을 구하면 아래식(18)과 같이 표현된다.

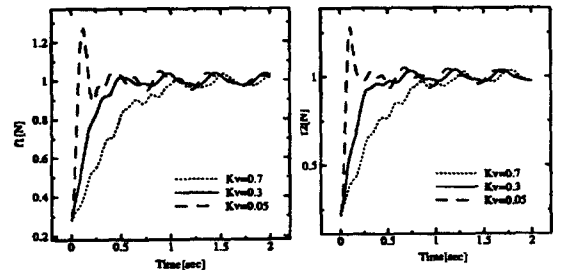
$$\bar{u}_i = u_i - \left\{ J_{0i}^T \begin{pmatrix} \sin \theta \\ \cos \theta \end{pmatrix} - r_i \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \right\} (\alpha \Delta \theta + \beta \Delta \theta) + \Delta u_i \quad (18)$$

식(18)을 이용하여 "Constraint Stabilization Method"(CSM)을 사용하여 2차 미분 방정식을 구하면 아래식(19)와 같이 표현된다.^[4]

$$\Phi'' + r_i \Phi' + \omega_i \Phi_i = 0 \quad (19)$$

단, ($i=1,2$)

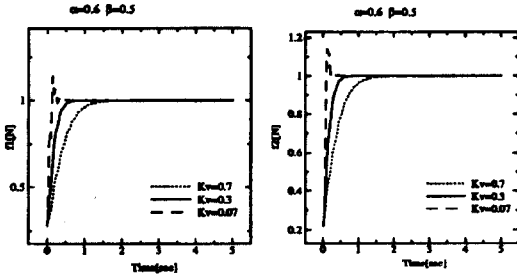
식(17)(18)(19)을 이용하여 Runge-kutta로 응답을 구하면 Fig.4, Fig.5, Fig.6, Fig.7과 같이 상당한 안정적인 파지동작을 볼 수 있다.



(a) Left Finger

(b) Right Finger

Fig. 3 Responses of force at finger of Kv



(a) Left Finger (b) Right Finger
 Fig. 4 Responses of force at finger of K_v

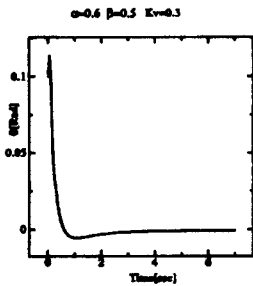


Fig. 5 Rotation angle the object

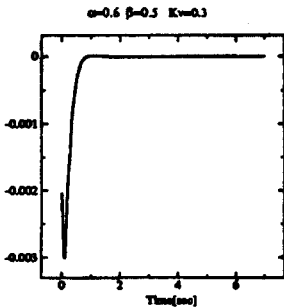


Fig.6 Discrepancy between Y_2 & $c_2 - r_2\phi_2$

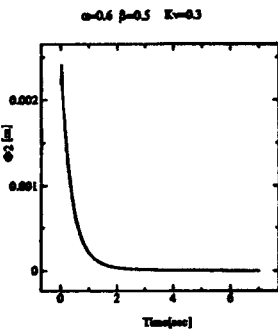


Fig. 7 Discrepancy between Y_2 & $c_2 - r_2\phi_2$

Table1. Parameters of the finger and the object

m_1 (kg)	m_2 (kg)	l_1 (m)	l_2 (m)	r_i (m)
0.3	0.28	0.08	0.07	0.01
L (m)	l (m)	m (kg)	I (kgm ²)	Ke
0.07	0.05	0.3	0.00025	1600

4. 결론

본 연구에서는 소프트-팁이 연결된 Dual-Finger가 물체를 안정적으로 파지할 수 있도록 운동방정식을 도출하고 시뮬레이션을 해보았다. 시뮬레이션 결과에서 보듯이 운동방정식이 틀리지 않았음을 알 수가 있다. 차후에 2 자유도의 실제 로봇을 만들어서 실제로 설계한 제어가 잘 맞는지 실험해보는 것이다..

후기

본 연구는 울산대학교 RRC와 일본의 Ritsumeikan University와의 연구교류에 의하여 이루어졌습니다.

참고문헌

1. Mason T., Salisbury J.K, "Robot hands and the mechanics of manipulation" The MIT Press, Cambridge USA, 1985.
2. Y. Yokokohji, M. Sakamoto, T. Yoshikawa "Vision-aided object manipulation by a multifingered hand with soft fingertips", proc. IEEE Int. Conf On Robotics and Automation, pp.3201~3207, 1999
3. P.Akella, M.Cutkosky, "Manipulating with soft fingers", proc. IEEE Int. Conf On Robotics and Automation, vol.2, pp.764~769, 1989
4. S.Arimoto, Pham T, Hyun-Yong H, Zoe.D "Dynamics and control of a set of dual fingers with soft tips" Robotica, vol.18, No.1, pp.71~80, 2000.
5. T. Naniwa, S.Arimoto, Louis L. Whitcomb "Learnig control for robot tasks under geometric constraints, IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol.11, no.3, pp.432~441, 1995
6. 이대길, 최상민, "로보틱스 입문", 홍릉과학출판사, 1991.
7. 강철구, 권인소, 외 "로봇 동역학과 제어", 회중당, 1994