

듀얼-핑거의 안정적 파지 운동 제어에 관한 연구

엄 혁*, 최종환⁺, 김승수⁺, 한현용⁺⁺, 양순용⁺⁺⁺, 이진걸⁺⁺⁺⁺

(논문접수일 2005. 4. 7, 심사완료일 2005. 6. 27)

A Study on Stable Grasping Motion Control of Dual-Finger

Hyuk Um*, Jong-Hwan Choi⁺, Seung-Soo Kim⁺, Hyun-Yong Han⁺⁺, Soon-Yong Yang⁺⁺⁺, Jin-Gul Lee⁺⁺⁺⁺

Abstract

This paper attempts to derive the dynamic model of handling tasks in finger robot which grasps stable and manipulates a rigid object with some dexterity. Firstly, a set of differential equation describing dynamics of the manipulators and object together with geometric constraint of tight area-contacts is formulated by Lagrange's equation. Secondly, the problems of controlling both the forces of pressing object and the rotation angle of the object under the geometric constraints are discussed. The effect of geometric constraints of area-contacts between the link's end-effector and the object is analyzed and the model based on the differential-algebraic equations is presented. In this paper, the control method for dynamic stable grasping and enhancing dexterity in manipulating things is proposed. It is illustrated by computer simulation and the experiment that the control system gives the performance improvement in the dynamic stable grasping and nimble manipulating of the dual fingers robot with soft tips.

Key Words : Dual-Finger Robot, Soft-Tip, Robot Hands, Stable Grasping, Manipulation, Area-Contact

1. 서 론

작업 현장에 따라서는 사람이 손가락을 사용하여 물체를 집는 동작을 핑거 로봇이 대신하여 수행하도록 한다. 그러

나 고정도의 작업을 위하여 높은 정밀도로 설계/제작된 핑거 로봇이라 할지라도 인간의 손가락이 수행할 수 있는 모든 동작을 완벽하게 실현하는 것은 불가능하며, 실제 작업 현장에서 사용되고 있는 핑거 로봇은 대부분 개루프 제어를 통한

* 부산대학교 대학원 지능기계공학과 (hum1111@hanmail.net)
주소: 609-735 부산광역시 금정구 장전동 산30 부산대학교 대학원 지능기계공학과 유압제어실험실
+ 울산대학교 산학협력단 연구원
++ 춘해대학 의료공학과
+++ 울산대학교 기계·자동차공학부
++++ 부산대학교 기계공학부

단순하고 반복적인 작업만을 수행하고 있다⁽¹⁾. 인간의 손가락이 수행하는 동작을 핑거 로봇이 대행할 수 없는 것은 기구학적인 문제뿐만 아니라 학습 능력, 감각 기관의 결여 등이다. 한편, 핑거 로봇의 성능제약은 파지 동작에 대한 모델 구축 그리고 이에 대한 기구학적 및 역학적 해석 등에 대한 연구가 충분하지 못했기 때문이다^(2,3).

핑거 로봇은 로봇 연구의 초기부터 주요한 관심분야로서 많은 연구가 있었지만, 대부분의 연구에서 핑거 로봇과 대상물은 강체, 접촉은 점접촉으로 가정하여 해석되고 있다^(3,4). 그러나 실제 인간의 손가락은 강체가 아니며 대상물과의 접촉은 점접촉이 아닌 면접촉으로 동작되며, 이러한 경우를 고려한 핑거 로봇에 대한 연구는 매우 드물다^(5,6). 또한 안정 파지와 물체의 조작에서 대부분이 개루프 제어로 이루어지며, 이는 사람의 파지 동작시 시각, 촉각 등의 감각기를 이용한 피드백 제어와는 본질적으로 다르다.

본 연구에서는 핑거 로봇이 대상물을 동적 안정 파지하도록 하는 제어 방법을 제안한다. 각 손가락이 1자유도인 2개 손가락의 간단한 핑거 로봇을 구성하여 제안한 제어 방법에 따라 실현하도록 하며, 손가락 끝단과 대상물간의 접촉은 면접촉과 회전 접촉으로 고려하도록 한다. 먼저 핑거 로봇이 대상물을 집을 때 면접촉에 의한 안정 파지 동작이 되기 위하여 각 손가락 끝단에 부드럽고 변형 가능한 소프트 재료의 팁을 부착하고, 핑거 로봇이 평면 작업공간에서 대상물을 파지할 때 팁의 변형에 의한 면접촉의 상태를 포함한 핑거 로봇의 운동방정식을 유도한다. 그리고 소프트 팁의 핑거 로봇에 의해 파지된 물체의 회전을 억제하는 동적 안정 파지를 실현하기 위하여 피드백 신호를 사용한 제어 입력을 제안한다. 마지막으로 핑거 로봇에서 대상물의 동적 안정 파지 동작에 대한 시뮬레이션 결과와 실험 결과의 고찰을 통하여 제안한 제어 방법의 유효성을 확인하도록 한다.

2. 핑거 로봇의 모델

Fig. 1에는 1자유도의 2개 독립 관절로 구성된 핑거 로봇의 물체 파지 동작에 대한 개략도를 나타내고 있다. 이때 물체는 마찰을 무시할 수 있는 평면상에 놓여 있다고 가정한다. 각 관절 끝단에는 변형 가능한 소프트 재료로서 반구 형태의 팁이 부착되어 있다. 점 O 는 기준좌표계의 원점이고 점 O 와 함께 각 관절의 회전 중심을 나타내며, 점 O_i 와 O_{0i} 는 소프트 팁과 물체의 접촉시 발생되는 접촉면적의 중심점과 관절 길이 방향선상의 관절 팁의 중심점을 각각 나타낸다. 점 $O_{c.m}$ 는 물체의 질량중심을 나타낸다. Y_i 는 점 $O_{c.m}$ 을

원점으로 하는 수직좌표계에서 접촉면적의 중심점과의 Y 방향의 거리를 나타낸다. 점 O 와 O 에서는 토크 τ_i 가 작용하여 각 관절을 구동시키도록 한다. 각 관절이 이루는 각도는 q_i 로서 표현되며, 물체의 회전 각도는 θ 로서 표현된다.

점 O_{0i} 및 O_i 의 좌표를 기하학적 형상에 의하여 표현하면 식 (1)~(4)와 같다.

$$\begin{aligned} x_{01} &= -l_1 \cos q_1 \\ y_{01} &= l_1 \sin q_1 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} x_{02} &= L + l_2 \cos q_2 \\ y_{02} &= l_2 \sin q_2 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} x_1 &= x_{01} + (r_1 - \Delta x_1) \cos \theta \\ y_1 &= y_{01} - (r_1 - \Delta x_1) \sin \theta \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} x_2 &= x_{02} - (r_2 - \Delta x_2) \cos \theta \\ y_2 &= y_{02} + (r_2 - \Delta x_2) \sin \theta \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 $r_i(i=1, 2)$ 는 각 관절 끝단에 부착된 소프트 팁의 반지름을 나타내며, $\Delta x_i(i=1, 2)$ 는 Fig. 1에서 검게 칠해져 있는 변형량 중에 면접촉의 중심점에서 일어나는 최대 변위를 나타낸다.

각 관절과 물체는 항상 접촉하고 있다는 가정하에 좌표간의 기하학적 구속관계에 의하여 물체의 질량중심 좌표를 나타내면 식 (5), (6)과 같다.

$$\begin{aligned} x &= x_1 + \frac{l}{2} \cos \theta - Y_1 \sin \theta \\ &= x_2 - \frac{l}{2} \cos \theta - Y_2 \sin \theta \end{aligned} \quad (5)$$

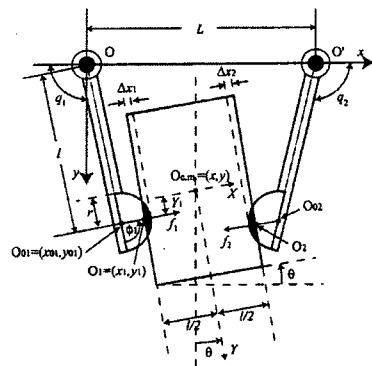


Fig. 1 Schematic diagram of dual fingers with soft-tip

$$\begin{aligned}
 y &= y_1 - \frac{l}{2} \sin\theta - Y_1 \cos\theta \\
 &= y_2 + \frac{l}{2} \sin\theta + Y_2 \cos\theta
 \end{aligned} \tag{6}$$

소프트 팁 끝단이 물체의 측면에 접촉하는 거리 Y_i 는 식 (1)~(6)의 관계로부터 식 (7), (8)과 같이 표현된다.

$$Y_1 = (x_{01} - x) \sin\theta + (y_{01} - y) \cos\theta \tag{7}$$

$$Y_2 = (x_{02} - x) \sin\theta + (y_{02} - y) \cos\theta \tag{8}$$

핑거 로봇이 물체에 작용하는 파지력은 소프트 팁이 구형이므로 물체에 작용하는 분포응력이 되며 물체 표면에서 면적분을 통하여 구해진다. 그러나 파지력을 물체 측면에 대한 수직방향의 집중응력으로 고려하고, 소프트 팁의 변형량 함수로 간주될 수 있다. 따라서 물체에 작용하는 파지력은 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다^(5,6).

$$f_i = k(\Delta x_i)^2 \tag{9}$$

여기서 k 는 소프트 팁의 탄성계수를 의미한다.

한편, Fig. 2는 소프트 팁 끝단과 물체와의 접촉점의 거동을 나타내고 있다. 각 관절이 회전 운동을 함에 따라 접촉점은 물체의 측면을 미끄러져 없이 구름 회전운동을 한다고 가정한다. 그러면 접촉 거리 Y_i' 는 기구학적 관계에 의하여 식 (10), (11)과 같이 표현된다^(5,7).

$$Y_1' = c_1 + r_1(q_1 - \theta - \frac{\pi}{2}) \tag{10}$$

$$Y_2' = c_2 + r_2(q_2 + \theta - \frac{\pi}{2}) \tag{11}$$

여기서 c_i 는 접촉 거리의 초기 상태를 의미한다.

한편, Lagrange 방정식을 이용하여 핑거 로봇의 운동방정식을 나타내면 식 (12)와 같다.

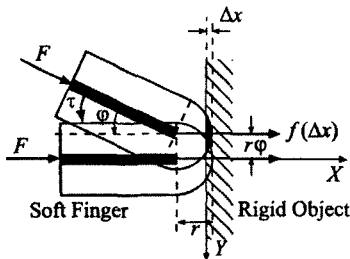


Fig. 2 Motion of the center of contact area on the object surface

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{z}_k} \right) - \frac{\partial L}{\partial z_k} &= Q_k' + \sum_{j=1} \lambda_j a_{kj} \\
 &\quad (k = 1, 2, \dots, 5, j = 1, 2)
 \end{aligned} \tag{12}$$

여기서, $L = K - P$ 를 의미하며, K 는 각 관절과 물체의 운동에너지, P 는 소프트 팁의 변형량에 의한 포텐셜에너지를 나타낸다. 또한 $z = [q_1, q_2, x, y, \theta]^T$ 는 일반화 좌표계, $Q = [u_1, u_2, 0, 0, 0]^T$ 는 비보존력, λ_j 는 라그랑지 승수, a_{kj} 는 구속 조건을 위한 계수 등을 각각 나타낸다. 첨자 k 는 일반화 좌표계의 개수, j 는 구속 조건의 개수를 의미한다. 운동에너지 및 포텐셜에너지를 나타내면 식 (13), (14)와 같다.

$$K = \frac{1}{2} \{ I_1 \dot{q}_1^2 + I_2 \dot{q}_2^2 + M \dot{x}^2 + M \dot{y}^2 + I \dot{\theta}^2 \} \tag{13}$$

$$P = - \sum_{i=1}^2 \int_0^{\Delta x_i} f_i(\zeta) d\zeta \tag{14}$$

여기서 I_i, I 는 관절의 회전 중심점에 대한 관절의 관성모멘트와 관절의 길이를 각각 나타내며, M, I 는 물체의 질량과 물체의 질량중심에 대한 물체의 관성모멘트를 각각 나타낸다. 또한 u_i 는 각 관절을 회전시키기 위한 토크 입력을 나타낸다.

또한 각 관절과 물체의 질량 중심과의 기하학적인 관계에 의한 소프트 팁과 물체와의 접촉점과 각 관절의 운동에 의한 접촉점의 거동이 동일해야 하므로 식 (7), (8)과 식 (10), (11)의 관계에서 구속 조건식을 나타내면 식 (15)와 같다.

$$\sum_{k=1} a_{kj} dz_k + a_{kj} dt = 0 \tag{15}$$

여기서, 계수 a_{kj} 는 다음과 같다.

$$a_{11} = l_1 \cos(q_1 - \theta) - r_1$$

$$a_{12} = a_{21} = 0$$

$$a_{22} = l_2 \sin(q_2 - \theta) - r_2$$

$$a_{31} = a_{32} = -\sin\theta$$

$$a_{41} = a_{42} = -\cos\theta$$

$$a_{51} = \Delta x_1 - \frac{l}{2}$$

$$a_{52} = -\Delta x_2 + \frac{l}{2}$$

따라서 소프트 팁이 장착된 2개의 핑거 로봇의 운동방정식은 식 (12)~(15)를 정리하여 나타내면 식 (16)~(20)과 같다.

$$I_1 \ddot{q}_1 - [l_1 \cos(q_1 - \theta) - r_1] \lambda_1 = u_1 - l_1 \sin(q_1 - \theta) f_1 \quad (16)$$

$$I_2 \ddot{q}_2 - [l_2 \cos(q_2 + \theta) - r_2] \lambda_2 = u_2 - l_2 \sin(q_2 + \theta) f_2 \quad (17)$$

$$M \ddot{x} + \sin \theta \lambda_1 + \sin \theta \lambda_2 = (f_1 - f_2) \cos \theta \quad (18)$$

$$M \ddot{y} + \cos \theta \lambda_1 + \cos \theta \lambda_2 = -(f_1 - f_2) \sin \theta \quad (19)$$

$$I \ddot{\theta} - (\Delta x_1 - \frac{1}{2}) \lambda_1 + (\Delta x_1 - \frac{1}{2}) \lambda_2 = f_1 Y_1 - f_2 Y_2 \quad (20)$$

3. 동적 안정 파지를 위한 피드백제어

끝단에 소프트 탭이 부착된 핑거 로봇이 임의의 물체에 대하여 동적 안정 파지를 위해서는 각 관절의 회전 운동이 정지되는 시점에서 물체의 운동이 정지되어야 하며 물체를 누르는 힘은 파지를 위해 설정된 힘으로 수렴하여야 한다. 또한 물체의 회전 모멘트와 관련하여 동적 안정의 척도가 되는 거리의 차 $(Y_1 - Y_2)$ 가 영으로 수렴하여야 한다. 거리의 차 $(Y_1 - Y_2)$ 는 식 (7), (8)에서 식 (21)과 같이 표현된다.

$$Y_1 - Y_2 = (x_{01} - x_{02}) \sin \theta + (y_{01} - y_{02}) \cos \theta \quad (21)$$

Y_i 의 관계식인 식 (7), (8)을 물체의 운동방정식의 식 (20)에 대입하고, 물체의 양쪽 측면을 누르는 힘과 각 소프트 탭의 반지름이 $f_1 = f_2 = f_d$, $r_1 = r_2 = r$ 이라고 가정하여 정리하면 식 (22)와 같다.

$$I \ddot{\theta} + 2r f_d \theta = f_d [(c_1 - c_2 + r(q_1 - q_2))] \quad (22)$$

식 (22)에서 물체의 회전 각도는 관절 각도에 의하여 간접적으로 제어될 수 있다는 것을 보여준다.

이제 관절의 운동방정식인 식 (16), (17)에서 물체를 안정하게 파지하기 위한 피드백제어 토크 입력 u_i 를 제안하면 식 (23), (24)와 같다^(5,6).

$$u_1 = l_1 \sin(q_1 - \theta) f_d - k_{v1} \dot{q}_1 - \frac{r_1}{r_1 + r_2} (Y_1 - Y_2) f_d \quad (23)$$

$$u_2 = l_2 \sin(q_2 + \theta) f_d - k_{v2} \dot{q}_2 + \frac{r_2}{r_1 + r_2} (Y_1 - Y_2) f_d \quad (24)$$

여기서 f_d 는 물체를 파지하기 위하여 설정된 최소한의 힘을 나타내며, k_w 는 설계 계인을 의미한다.

제안된 피드백제어 입력을 식 (16)~(20)에 대입하여 정

리하면 식 (25)~(29)와 같다.

$$I_1 \ddot{q}_1 + k_{v1} \dot{q}_1 + l_1 \sin(q_1 - \theta) \Delta f_1 + \frac{r_1}{r_1 + r_2} (Y_1 - Y_2) f_d = 0 \quad (25)$$

$$I_2 \ddot{q}_2 + k_{v2} \dot{q}_2 + l_2 \sin(q_2 + \theta) \Delta f_2 - \frac{r_2}{r_1 + r_2} (Y_1 - Y_2) f_d = 0 \quad (26)$$

$$M \ddot{x} - \cos \theta \Delta f_1 + \cos \theta \Delta f_2 = 0 \quad (27)$$

$$M \ddot{y} + \sin \theta \Delta f_1 - \sin \theta \Delta f_2 = 0 \quad (28)$$

$$I \ddot{\theta} - Y_1 \Delta f_1 + Y_2 \Delta f_2 - f_d (Y_1 - Y_2) = 0 \quad (29)$$

여기서 $\Delta f_i = f_i - f_d$ 이다.

식 (25)~(29)와 상태 변화율 벡터 $(\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dot{x}, \dot{y}, \dot{\theta})^2$ 와의 내적을 구하여 정리하면 식 (30)과 같다.

$$\frac{d}{dt} V = -k_{v1} \|\dot{q}_1\|^2 - k_{v2} \|\dot{q}_2\|^2 \quad (30)$$

여기서

$$V = (K + \Delta P) + \frac{f_d}{2(r_1 + r_2)} (Y_1 - Y_2)^2$$

$$K = \frac{1}{2} \{I_1 \dot{q}_1^2 + I_2 \dot{q}_2^2 + M \dot{x}^2 + M \dot{y}^2 + I \dot{\theta}^2\}$$

$$\Delta P = \sum_{i=1}^2 \int_0^{\Delta x_i} \{f_i(\xi) - f_d\} d\xi$$

함수 K 는 positive definite가 되고, $f_d > 0$ 이고 ξ 가 증가함에 따라 $f(\xi)$ 도 증가하므로 함수 ΔP 도 positive definite가 된다. 따라서 V 는 positive definite가 되고 식 (30)을 만족하므로 함수 V 는 Lyapunov 함수의 거동에 따르게 되어 $t \rightarrow \infty$ 에 대하여 \dot{q}_i 는 영(zero)으로 수렴한다^(5,6). 이때 식 (25), (26)에서 Δf_i 와 $(Y_1 - Y_2)$ 이 영으로 수렴하게 되어 물체를 누르는 실제적인 힘 f_i 는 설정된 힘 f_d 로 수렴하여 물체를 파지하게 되고, 식 (29)에서 물체의 회전 각도는 임의의 일정한 값으로 수렴하여 물체는 점근적 안정이 된다^(8~10).

4. 시뮬레이션 및 실험 결과 고찰

4.1 시뮬레이션

Fig. 1에 나타낸 바와 같은 시스템에 대하여 시뮬레이션을

수행하였다. 각 관절과 물체의 회전 각도를 피드백하여 제안된 방법에 의하여 각 관절을 작동시키기 위한 제어 입력을 산출하여 물체를 파지하도록 한다.

시물레이션을 위한 초기 조건은 다음과 같다.

- $(x, y) = (0.026, 0.056)$ [m]
- $\theta = -10$ [deg.]
- $q_1 = 97.6$ [deg.]
- $q_2 = 93.4$ [deg.]
- $(Y_1 - Y_2) = 0.0067$ [m]

시물레이션 시간은 0.7[s]로 하고 물체의 형상은 사각형으로 선정하였다. 각 관절의 구동부에서 발생하는 마찰과 물체와 수평면 사이에서 발생하는 마찰은 고려하지 않는다.

물체와 핑거 로봇에 대한 파라미터들은 Table 1에 나타낸다. 시물레이션은 MatLab과 Simulink를 사용하였다.

Fig. 4~Fig. 8은 시물레이션 결과들을 나타내고 있다. 물체를 파지하는데 설정된 최소한의 힘 f_{li} 는 1[N]으로 선정하였고, 설계 계인 k_{vi} 는 각 관절에 대하여 0.003으로 선정하였다. Fig. 4는 각 관절의 각도를 나타내고 있다. 왼쪽 관절(q_1)은 초기 순간에 반시계 방향으로 약간 회전한 후 약 0.2[s]까지 시계방향으로 회전하다가 정지하게 된다. 정지된 각도는 약 92[deg.]이다. 오른쪽 관절(q_2)은 약 0.2[s]까지 시계 방향으로 회전하다가 약 103[deg.]가 되면 정지하게 된다. 시물레이션 시간이 약 0.2[s]부터는 각 관절의 회전 운동이 정지되며 이는 관절이 물체 파지 동작의 종료로 의미한다. Fig. 5는 각 관절의 끝단에서 물체를 누르는 힘이 작용하는 거리

의 차($Y_1 - Y_2$)의 거동을 나타내고 있다. 초기 조건에서 각 관절의 끝단이 물체의 측면과 접촉하고 있는 위치는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 물체의 질량 중심을 원점으로 하는 수직 좌표계에서 -Y 방향에 위치한다. 작동이 시작되면 거리 차이는 감소하다가 약 0.2[s] 이후가 되면 영(zero)으로 수렴하게 된다. Fig. 6은 물체의 회전 각도를 나타내고 있다. 각 관

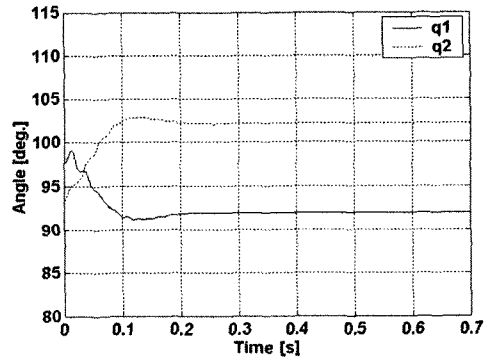


Fig. 4 Angles of two links(simulation)

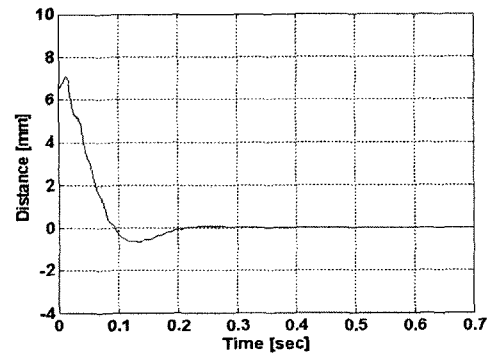


Fig. 5 Distance between two link-tips(simulation)

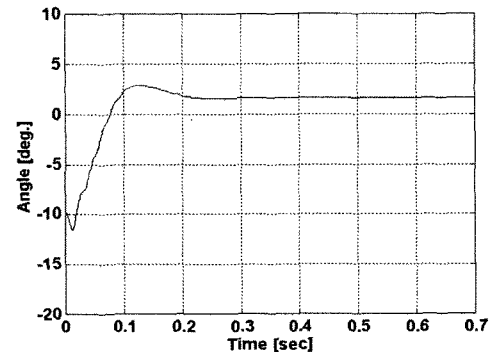


Fig. 6 Angle of object(simulation)

Table 1 Parameters used in the simulation

| | Para. | Value |
|--------|----------|--|
| Link | I_i | 1.04×10^{-5} [kg · m ²] |
| | l_i | 0.05 [m] |
| | r_i | 0.01 [m] |
| | L | 0.05 [m] |
| | c_1 | -0.0074 [m] |
| | c_2 | -0.013 [m] |
| | k | 50000 |
| Object | M | 0.04 [kg] |
| | I | 4.42×10^{-6} [kg · m ²] |
| | vertical | 0.03 [m] |
| | side | 0.021 [m] |

질의 끝단이 물체를 누르는 힘에 의하여 물체는 초기에 시계 방향으로 회전하였다가 이후 약 0.2[s]까지 반시계 방향으로 회전하여 각도가 약 2[deg.]가 되면 정지하게 된다. Fig. 7은 소프트 팁의 변형량에 의한 핑거 로봇이 물체를 파지하는 힘의 거동을 나타내고 있다. 초기에 변형량이 없으므로 각 관절의 파지력은 영(zero)이 되고 각 관절의 회전 운동에 의하여 변형량이 변함에 따라 파지력은 변하게 된다. 초기 시간에 파지력은 진동의 형태로 나타나다가 약 0.2[sec] 이후에는 물체를 파지하는데 설정된 힘 $f_{gr}=1[N]$ 으로 수렴하고 있다. Fig. 8은 핑거 로봇이 물체의 동적 안정 파지를 위한 제어 입력을 나타내고 있다. 각 관절에 대한 제어 입력은 초기 시간에 진동의 형태로 나타나다가 약 0.15[sec] 이후에는 약 0.05로 수렴하고 있다. 시뮬레이션 결과들에 의하면 약 0.2[s]부터는 각각의 상태들이 일정한 값으로 수렴하고 있는데, 이것은 핑거 로봇이 물체를 파지하여 동적 안정을 이룬 것으로 사료된다. Fig. 9는 설계 계인 k_v 의 변화에 따른 거리의 차 (Y_1-Y_2)와 물체의 경사각 거동을 나타내고 있다. k_v 를 감소시키면 과도 응답이 악화되어 물체를 안정적 파지하는

데 소요되는 시간이 증가하고, k_v 를 증가시키면 과도 응답은 양호하나 물체를 파지하는데 시간이 다소 길어진다. 따라서 설계 계인 k_v 는 과도 응답과 물체의 동적 안정 파지 시간을 고려하여 0.003으로 선정하였다.

4.2 실험

시스템의 구성을 나타내면 Fig. 10과 같다. 물체의 회전 각도는 레이저 변위 센서 2개를 사용하여 측정하였고, 각 관절을 구동시키기 위한 모터는 MAXON사의 S2332 DC모터 2개를 사용하였으며 PWM 신호에 의하여 동작된다. 컴퓨터와의 인터페이스는 DS1102 보드를 사용하였고, 보드에서 발생하는 PWM 신호에 의하여 모터의 입력 전류 및 전압을 생성시키기 위하여 LMD18200 Linear AMP 소자를 사용하였다. 레이저 변위 센서와 각 관절의 각변위 센서에 의하여 물체 및 각 관절의 회전 각도가 검출되면 물체의 동적 안정 파지를 위하여 제안된 제어 알고리즘에 의하여 제어 입력이 생성되고 PWM 신호로 변환하여 모터를 구동시키는 전압 및 전류가 변화되어 각 관절이 구동하게 된다.

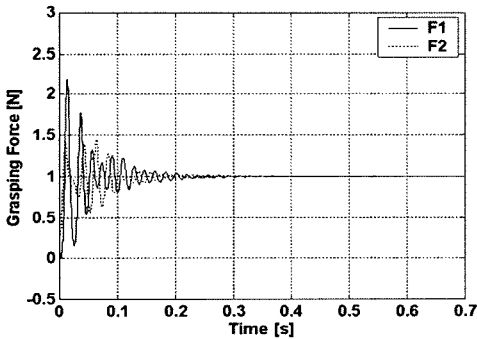


Fig. 7 Grasping Forces(simulation)

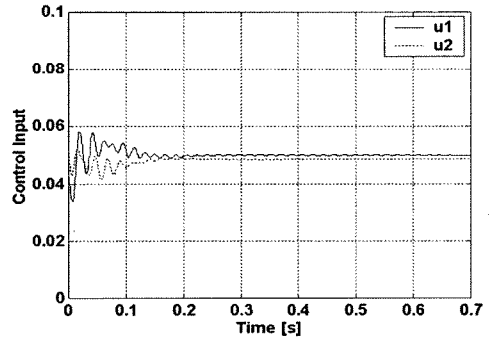
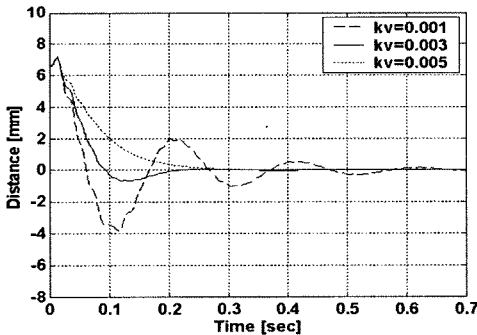
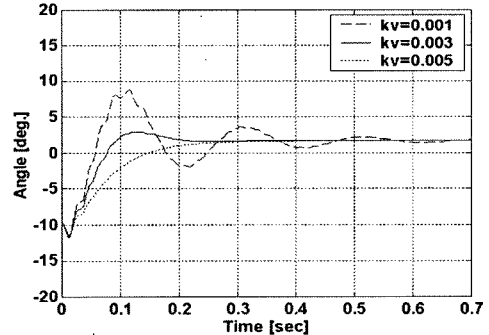


Fig. 8 Control inputs(simulation)



(a) Distances between Y_1 and Y_2



(b) Angles of object

Fig. 9 Control inputs(simulation)

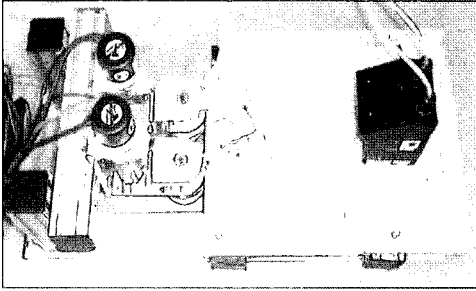


Fig. 10 Experimental setup

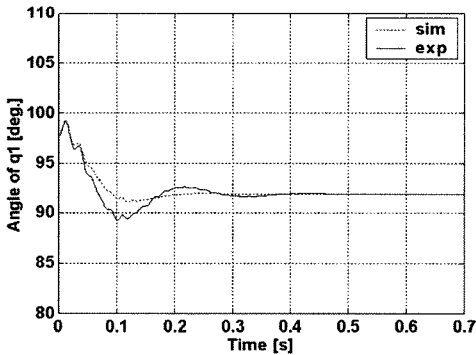
물체의 회전 각도 측정을 원활히 하기 위하여 물체의 하단부에 얇은 판을 부착하고, 각 관절 끝단에는 실리콘 고무로 만든 반구형의 팁을 부착하였다. 물체는 아크릴 판 위에 놓여져 중력과 마찰의 영향이 무시되도록 하였다.

Fig. 11 ~ Fig. 13에서는 실험 결과들을 시뮬레이션 결과와 함께 나타내고 있다. 물체를 파지하기 위한 힘 f_2 와 설계

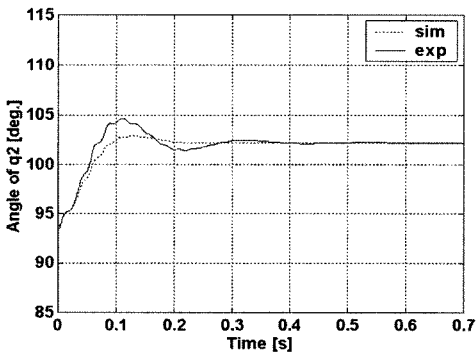
계인 k_w 는 시뮬레이션에서 설정된 값을 사용하였다. Fig. 11(a)와 (b)는 왼쪽 관절과 오른쪽 관절의 각도를 나타내고 있다. 실험에 의하면 왼쪽 관절의 회전 운동은 반시계 방향과 시계 방향으로 반복하다가 정지하며, 오른쪽 관절은 시계 방향과 반시계 방향으로 회전 운동하다가 정지한다. 정지 시간은 약 0.4[s]이다. 과도 응답에서 시뮬레이션 결과와 최대 약 2[deg.]의 차이가 발생되며, 정상 상태에서 각 관절 각도는 시뮬레이션 결과와 동일하게 왼쪽 관절의 각도는 약 92[deg.], 오른쪽 관절의 각도는 약 103[deg.]이다.

Fig. 12는 각 관절의 끝단에서 물체를 누르는 힘이 작용하는 거리의 차 ($Y_1 - Y_2$)의 거동을 나타내고 있다. 실험이 시작되면 거리의 차이 변화는 감소와 증가를 반복하다가 약 0.3[s] 이후가 되면 영(zero)으로 수렴하게 된다. 시뮬레이션 결과와 비교하여 과도 응답 중 약 2[mm] 정도의 차이가 발생되고 있으며 정상 상태에 도달하는 시간도 시뮬레이션 결과에 비하여 약 0.2[s] 증가된다.

Fig. 13은 물체의 회전 각도를 나타내고 있다. 각 관절의



(a) q_1



(b) q_2

Fig. 11 Angles of two links

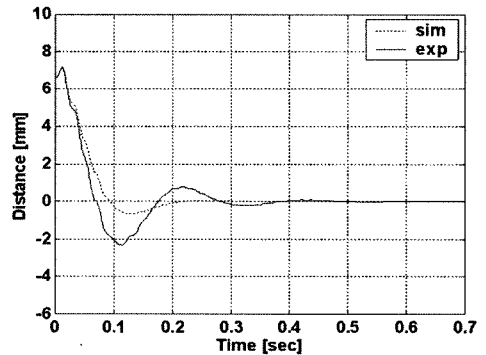


Fig. 12 Distances between two link-tips

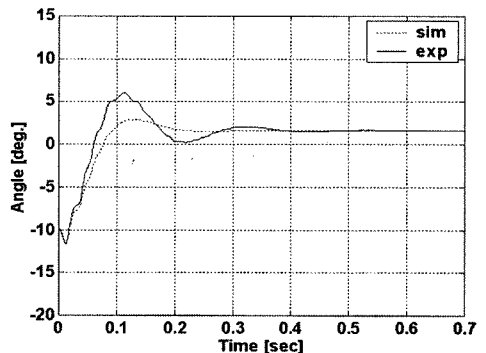


Fig. 13 Angle of object

운동에 의하여 물체는 초기에 시계 방향으로 회전하여 각도가 최대 약 6[deg.]까지 증가하다가 다시 감소하여 약 0.3[s] 이후가 되면 약 2[deg.]에서 정지하게 된다. 시뮬레이션 결과와 비교하여 과도 응답 중 약 3[deg.] 정도의 차이가 발생되고 있으며 정상 상태에 도달하는 시간도 시뮬레이션 결과에 비하여 약 0.2[s] 증가된다. 실험 결과들에 의하면 약 0.4[s]부터는 각각의 상태들이 일정한 값으로 수렴하며, 이것은 핑거 로봇이 물체를 파지하여 동적 안정 상태를 유지하고 있음을 의미한다. 각 상태들의 실험 결과들은 시뮬레이션 결과들과 비교하여 과도 응답에서 다소 약화되었으며 정상 상태 도달 시간에서도 약 0.2[s]의 차이가 존재한다. 이것은 시뮬레이션을 통한 설계 계인의 선형지 소프트 팁의 면접촉에 의한 마찰, 물체와 아크릴 판 사이에서 발생하는 마찰과 각 관절의 회전부에서 발생하는 동특성 등을 고려하지 않은 결과에 의한 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 논문에서는 핑거 끝단에 소프트 팁을 부착하여 물체와의 접촉을 면접촉이 되도록 하고 1자유도의 2개 관절을 이용한 핑거 로봇이 물체를 동적 안정 파지하도록 하는 피드백 제어시스템을 제안하였다. 먼저 핑거로봇과 물체와의 면접촉에 의한 구속조건을 포함시켜 비선형 운동방정식을 도출하고 이를 근거로 각 관절을 구동시키는 제어입력을 제안하여 핑거로봇에 의한 물체의 동적 안정파지를 달성하도록 하였다. 제안된 제어방법을 시뮬레이션을 통하여 그 결과로부터 유용성을 확인하였다. 또한 실험 장치를 구성하고 실제 물체의 안정 파지 실험 결과로부터 제안된 방법의 실효성을 검토하였다. 향후 핑거로봇의 자유도를 증가시켜 유사한 방법으로 모델 구축과 피드백 제어시스템을 구성하여 동적 안정 파지를 달성하도록 하는 연구가 계속 진행되어야 할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 울산대학교 RRC와 일본의 Ritsumeikan University와의 연구교류에 의하여 이루어졌습니다.

참고문헌

- (1) Mason, T., and Salisbury, J. K., 1985, "Robot hands and the mechanics of manipulation," *The MIT Press*, Cambridge USA.
- (2) Yokokohji, Y., Sakamoto, M., and Yoshikawa, T., 1999, "Vision aided object manipulation by a multi-fingered hand with soft fingertips," *Proc. IEEE Int. Conf. On Robotica and Automation*, pp. 3201~3207.
- (3) Sim, J. G., Han, H. Y., Yang, S. Y., Lee, B. R., Ahn, K. K., and Kim, S. S., 2002, "A Study on Stable Grasping Control of Dual-fingers with Soft-Tips," *Proceedings of the Korean Society of Machine Tool Engineers Conference*, pp. 219~224.
- (4) Akella, P., and Cutkosky, M., 1989, "Manipulating with soft fingers," *Proc. IEEE Int. Conf. On Robotica and Automation*, Vol. 2, pp. 764~769.
- (5) Arimoto, S., Nguyen, P. T. A., Han, H. Y., and Doulgeri, Z., 2000, "Dynamics and control of a set of dual fingers with soft tips," *Robotica*, Vol. 18, No. 1, pp. 71~80.
- (6) Arimoto, S., Tahara, K., Yamaguchi, M., Nguyen, P. T., and Han, H. Y., 2001, "Principle of Superposition for Controlling Pinch Motions by Means of Robot Finger with Soft Tips," *Robotica*, Vol. 19, pp. 39~47.
- (7) Naniwa, T., Arimoto, S., Whitcomb, L. L., 1995, "Learning control for robot tasks under geometric constraints," *IEEE Trans. on Robotica and Automation*, Vol. 11, No. 3, pp. 432~441.
- (8) Cheah, C. C., Kawamura, S., and Arimoto, S., 1998, "Feedback Control for Robotic Manipulator with Uncertain Kinematics and Dynamics," *IEEE International Conference on Robotics & Automation*, pp. 3607~3612.
- (9) Park, K. T., Kim, S. S., Yang, S. Y., Lee, B. R., and Ahn, K. K., 2001, "Research of Static Grasping for Handling Tasks in Field-Robot," *ICASE*, pp. 2895~2898.
- (10) Arimoto, S., 1992, *Dynamics And Control of Robot*, Asakura Shoten.