

다관절 핑거 로봇의 파지 운동 모델과 제어에 관한 연구

엄 혁(부산대 대학원 지능기계공학과), 최종환*(울산대 RRC)
김용석(울산대 대학원 기계·자동차공학과), 양순용(울산대 기계·자동차공학부)
이진걸(부산대 기계공학부)

A Study on Model and Control of Pinching Motion for Multi-Fingered Robot

H. Um(Mech. & Intell. Sys. Eng. Dept., PNU), J. H. Choi(RRC, UOU)
Y. S. Kim(Mech. & Auto. Eng. Dept., UOU), S. S. Yang(Mech. & Auto. Eng. Sch., UOU)
J. G. Lee(Mech. Eng. Sch., PNU)

ABSTRACT

This paper attempts to derive and analyze the dynamic system of pinching a rigid object by means of two multi-degrees-of-freedom robot fingers with soft and deformable tips. It is shown firstly that a set of differential equation describing dynamics system of the manipulators and object together with geometric constraint of tight area-contacts is formulated by Lagrange's equation. It is shown secondly that the problems of controlling both the forces of pressing object and the rotation angle of the object under the geometric constraints are discussed. In this paper, the control method for dynamic stable grasping and enhancing dexterity in manipulating things is proposed. It is illustrated by computer simulation that the control system gives the performance improvement in the dynamic stable grasping of the dual fingers robot with soft tips.

Key Words : Multi-Fingered Robot (다관절 핑거 로봇), Stable grasping (안정 파지), Soft-Tip (소프트 팁)
Area contact (면 접촉), Constraint stabilization method (구속 안정 방법)

1. 서론

작업 현장에 따라서는 사람이 손가락을 사용하여 물체를 잡는 동작을 핑거 로봇이 대신하여 수행하도록 한다. 그러나 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 단순하고 반복적인 작업만을 수행하고 있다. 인간의 손가락이 수행하는 동작을 핑거 로봇이 대행할 수 없는 것은 기구학적인 문제뿐만 아니라 학습 능력, 감각 기관의 결여 등이다.^{[1][2]} 한편, 핑거 로봇의 성능제약은 파지 동작에 대한 모델 구축 그리고 이에 대한 기구학적 및 역학적 해석 등에 대한 연구가 충분하지 못했기 때문이다. 핑거 로봇은 로봇 연구의 초기부터 주요한 관심분야로서 많은 연구가 있었지

만, 대부분의 연구에서 핑거 로봇과 대상물은 강체, 접촉은 점접촉으로 가정하여 해석되고 있다. 그러나 실제 인간의 손가락은 강체가 아니며 대상물과의 접촉은 점접촉이 아닌 면접촉으로 동작되며, 이러한 경우를 고려한 핑거 로봇에 대한 연구는 매우 드물다. 또한 안정 파지와 물체의 조작에서 대부분이 개루프 제어로 이루어지며, 이는 사람의 파지 동작시 시각, 촉각 등의 감각기를 이용한 피드백 제어와는 본질적으로 다르다.^{[3][4]}

본 연구에서는 다관절 핑거 로봇이 대상물간의 면접촉과 구름 회전운동을 고려하여 대상물을 동적 안정 파지하기 위한 제어 방법을 제안한다. 핑거 로봇이 대상물을 집을 때 면접촉에 의한 파지 동작이 되기 위하여 각 손가락 끝단에 부드럽고 변형 가능한 소프트 재질의 반구 형태의 팁을 부착하고, 물체를 잡는 파지력은 소프트 팁의 변형량의 함수로 표현한다. 또한 각 관절의 회전운동에 따른 소프트 팁

과 물체간의 접촉점의 거동은 미끄러짐이 없어 구름 회전운동을 한다고 가정한다. 이를 근거로 Lagrange 방정식을 적용하여 다관절 핑거 로봇의 파지 운동에 대한 모델을 구축한다. 그리고 핑거 로봇에 의해 물체의 회전운동을 억제하여 동적 안정 파지를 실현하기 위하여 피드백 신호를 사용한 제어 입력을 제안한다. 핑거 로봇에서 대상물의 동적 안정 파지 동작에 대한 시뮬레이션 결과를 통하여 모델 구축 및 제어 방법의 유효성을 확인하도록 한다.

2. 다관절 핑거 로봇의 모델

2.1 기하학적 좌표값

Fig. 1에는 다관절로 구성된 듀얼 핑거 로봇의 대상물 파지 동작에 대한 개략도를 나타내고 있다. 다관절 핑거는 수평면 운동을 통하여 대상물을 파지하며 대상물은 마찰을 무시할 수 있는 평면상에 놓여 있다고 가정한다. 각 핑거의 끝단에는 변형 가능한 소프트 재료로서 반구 형태의 팁을 부착하고 대상물 측면을 따라 팁의 구름 운동으로 대상물을 파지한다. 점 O 는 기준좌표계의 원점이고 점 O' 와 함께 각 핑거의 회전 중심을 나타내며, 점 O_1 과 O_2 는 소프트 팁과 물체의 접촉시 발생하는 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_1 및 O_2 의 좌표를 기하학적 형상에 의하여 표현하면 식(1)~(4)와 같다.

$$\begin{aligned} x_{01} = & -l_{11} \cos(q_{11}) - l_{12} \cos(q_{11} + q_{12}) \\ & - l_{13} \cos(q_{11} + q_{12} + q_{13}) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} y_{01} = & l_{11} \sin(q_{11}) + l_{12} \sin(q_{11} + q_{12}) \\ & + l_{13} \sin(q_{11} + q_{12} + q_{13}) \end{aligned}$$

$$x_{02} = L + l_{21} \cos(q_{21}) + l_{22} \cos(q_{21} + q_{22}) \quad (2)$$

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

$$x_1 = x_{01} + (r_1 - \Delta x_1) \cos(\theta) \quad (3)$$

$$y_1 = y_{01} - (r_1 - \Delta x_1) \sin(\theta)$$

$$x_2 = x_{02} - (r_2 - \Delta x_2) \cos(\theta) \quad (4)$$

$$y_2 = y_{02} + (r_2 - \Delta x_2) \sin(\theta)$$

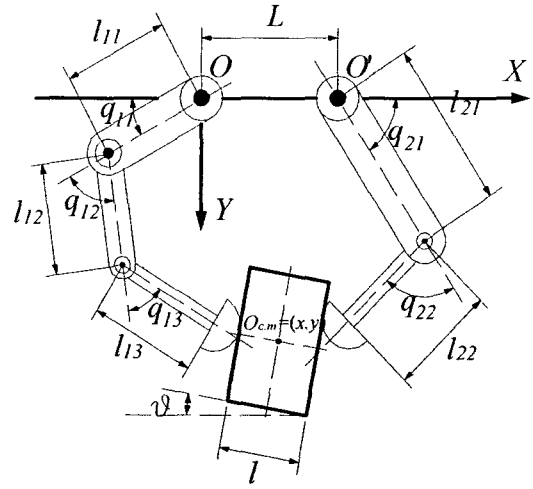


Fig. 1 Schematic diagram of dual fingers with soft-tip

여기서 L 은 각 핑거의 회전 중심까지의 거리, r_i ($i=1, 2$)는 각 핑거 끝단에 부착된 소프트 팁의 반지름을 나타내며, Δx_i ($i=1, 2$)는 핑거의 파지 운동에 의한 소프트 팁의 변형량 중에 면접촉의 중심점에서 일어나는 최대변위를 나타낸다.

각 핑거와 대상물은 항상 접촉하고 있다는 가정하에 좌표간의 기하학적 구속관계에 의하여 물체의 질량중심 좌표를 나타내면 식(5), (6)과 같다.^[5]

$$x = x_1 + \frac{l}{2} \cos(\theta) - Y_1 \sin(\theta) \quad (5)$$

$$= x_2 - \frac{l}{2} \cos(\theta) - Y_2 \sin(\theta)$$

$$y = y_1 - \frac{l}{2} \sin(\theta) - Y_1 \cos(\theta) \quad (6)$$

$$= y_2 + \frac{l}{2} \sin(\theta) - Y_2 \cos(\theta)$$

식 (1)~(6)의 관계로부터 소프트 팁 끝단의 대상물 측면의 접촉점과 대상물 질량 중심과의 수직 거리 Y_i 는 식(7), (8)과 같이 표현된다.

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

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

한편, Fig. 2는 소프트 팁의 구름 운동에 따른 대상물과의 접촉점 거동을 나타내고 있다. 각 핑거가 회전 운동을 함에 따라 접촉점은 대상물의 측면을 미끄러짐 없이 구름 회전운동을 한다고 가정한다.

그러면 접촉 거리 Y' 는 기구학적 관계에 의하여 식 (9), (10)과 같이 표현된다.^{[5]471}

$$Y'_1 = c_1 - r_1 \left(\frac{\pi}{2} + \theta - q_{11} - q_{12} - q_{13} \right) \quad (9)$$

$$Y'_2 = c_2 - r_2 \left(\frac{\pi}{2} - \theta - q_{21} - q_{22} \right) \quad (10)$$

여기서 c_i 는 접촉 거리의 초기 상태를 의미한다.

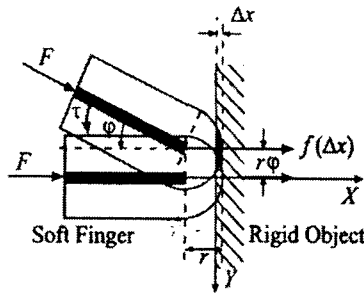


Fig. 2 Motion of the center of contact area on the object surface

2.2 파지에 대한 운동방정식

Lagrange 방정식을 이용하여 다관 핑거 로봇의 파지 운동방정식을 나타내면 식(11)과 같다.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}_k} \right) - \frac{\partial L}{\partial x_k} = Q'_k + \sum_{j=1}^m \lambda_j a_{kj} \quad (11)$$

$$(k = 1, 2, 3, j = 1, 2)$$

여기서 $L = K - P$ 를 의미하며, K 는 각 핑거와 대상물의 운동에너지, P 는 소프트 팁의 변형량에 의한 포텐셜에너지를 나타내며, $x = [q_1, q_2, z]^T$ 는 일반화 좌표계, $Q = [\tau_1, \tau_2, 0, 0, 0]^T$ 는 비보존력, λ_j 는 라그랑지 승수, a_{kj} 는 구속 조건을 위한 계수 등을 각각 나타낸다. 또한 $q_1 = [q_{11}, q_{12}, q_{13}]^T$ 와 $q_2 = [q_{21}, q_{22}]^T$ 는 좌우측 핑거의 관절 각도, $z = [x, y, \theta]^T$ 는 대상물의 좌표값 및 회전 각도, $\tau_1 = [\tau_{11}, \tau_{12}, \tau_{13}]^T$ 와 $\tau_2 = [\tau_{21}, \tau_{22}]^T$ 는 좌우측 핑거 각 관절의 구동 토크 등을 나타낸다. 첨자 k 는 일반화 좌표계의 개수, j 는 구속 조건의 개수를 의미한다.

운동에너지 및 포텐셜에너지를 나타내면 식(12), (13)과 같다.

$$K = \sum_{i=1}^2 \frac{1}{2} \dot{q}_i^T J_i(q_i) \dot{q}_i + \frac{1}{2} \dot{z}^T H \dot{z} \quad (12)$$

$$P = \sum_{i=1}^2 \int_0^{\Delta x_i} f_i(\zeta) d\zeta \quad (13)$$

여기서 $J_i(q_i) = \text{diag}(J_1(q_1), J_2(q_2))$ 와 $H = \text{diag}(M, M, J)$ 는 좌우측 핑거와 대상물의 관성 행렬, M 와 J 는 대상물의 질량과 대상물의 질량 중심에 대한 관성모멘트를 각각 나타낸다.

한편, 핑거의 파지력은 핑거 끝단에 구형의 소프트 팁이 부착되어 있으므로 분포응력으로 대상물에 작용하며 대상물의 표면에서 면적분을 통하여 구해진다. 그러나 파지력을 대상물 측면에 대한 수직방향의 집중응력으로 소프트 팁의 변형량 함수로 간주될 수 있다. 따라서 물체에 작용하는 파지력은 식(14)와 같이 나타낼 수 있다.^{[5]416}

$$f_i = k_i (\Delta x_i)^2 \quad (14)$$

여기서 k_i 는 소프트 팁의 탄성계수를 의미한다.

■ 좌측 핑거의 운동방정식

식(11)-(14)를 정리하여 좌측 핑거의 운동 방정식을 나타내면 식(15)와 같다.

$$J_1(q_1) \ddot{q}_1 + H_1(q_1, \dot{q}_1) + f_1 J_{01}^T \left[\frac{\partial \Delta x_1 / \partial x_{01}}{\partial \Delta x_1 / \partial y_{01}} \right] - \lambda_1 J_{\Phi_1}^T = \tau_1 \quad (15)$$

여기서 $J_1(q_1) \in R^{3 \times 3}$ 는 대칭인 양의 한정 행렬로서 각 관절의 관성행렬을 의미하며, $H_1(q_1, \dot{q}_1) \in R^{3 \times 1}$ 는 관절 운동에 의한 코리올리(coriolis)력과 원심력 행렬을 의미한다. 또한 J_{01} 은 각도 q_1 에 대한 좌표값 (x_{01}, y_{01}) 의 자코비안(jacobian) 행렬을 의미하며, J_{Φ_1} 는 각도 q_1 에 대한 구속 조건 Φ_1 의 자코비안(jacobian) 행렬을 의미한다. 각 행렬에 대한 요소들은 부록에서 언급한다.

■ 우측 핑거의 운동방정식

식(11)-(14)를 정리하여 우측 핑거의 운동 방정식을 나타내면 식(16)과 같다.

$$J_2(q_2) \ddot{q}_2 + H_2(q_2, \dot{q}_2) + f_2 J_{02}^T \left[\frac{\partial \Delta x_2 / \partial x_{02}}{\partial \Delta x_2 / \partial y_{02}} \right] - \lambda_2 J_{\Phi_2}^T = \tau_2 \quad (16)$$

여기서 $J_2(q_2) \in R^{2 \times 2}$ 는 대칭인 양의 한정 행렬로서 각 관절의 관성행렬을 의미하며, $H_2(q_2, \dot{q}_2) \in R^{2 \times 1}$ 는 관절 운동에 의한 코리올리 (Coriolis)력과 원심력 행렬을 의미한다. 또한 J_{02} 은 각도 q_2 에 대한 좌표값 (x_{02}, y_{02}) 의 자코비안 (jacobian) 행렬을 의미하며, J_{ϕ_2} 는 각도 q_2 에 대한 구속 조건 ϕ_2 의 자코비안(jacobian) 행렬을 의미한다. 각 행렬에 대한 요소들은 부록에서 언급한다.

■ 대상물의 운동방정식

식(11)-(14)를 정리하여 대상물의 운동 방정식을 나타내면 식(17)과 같다.

$$H\ddot{z} + f_1 J_{\Delta x_1}^T + f_2 J_{\Delta x_2}^T - \lambda_1 J_{z\phi_1}^T - \lambda_2 J_{z\phi_2}^T = 0 \quad (17)$$

여기서 $J_{\Delta x_i}$ 은 z 에 대한 Δx_i 의 자코비안 (jacobian) 행렬을 의미하며, $J_{z\phi_i}$ 는 z 에 대한 구속 조건 ϕ_i 의 자코비안(jacobian) 행렬을 의미한다. 각 행렬에 대한 요소들은 부록에서 언급한다.

■ 구속 운동방정식

각 핑거가 구동되더라도 항상 대상물과 접촉되어 있어야 하므로 좌표값에 의하여 정의되는 접촉 거리 Y_i 와 각도에 의하여 정의되는 접촉 거리 Y'_i 은 동일해야 한다. 따라서 식(18)과 같은 구속 조건을 만족해야 한다.

$$\phi_i = Y_i - Y'_i = 0 \quad (18)$$

식(18)의 구속 조건을 만족시키기 위해서 CSM (Constraint Stabilization Method)^{[7],[8]}을 적용하여 핑거와 대상물의 구속방정식을 나타내면 식(19)와 같다.

$$\ddot{\phi}_i + \gamma_i \dot{\phi}_i + w_i \phi_i = 0 \quad (19)$$

여기서 γ_i 와 w_i 는 설계 계인으로 핑거와 대상물 사이의 접성 감쇠계수와 탄성계수를 의미한다.

이상의 운동방정식으로부터 다관절 핑거 로봇의 파지에 대한 운동방정식을 정리하여 나타내면 식(20)과 같다.

$$A \ddot{X} = B \quad (20)$$

여기서

$$\ddot{X} = [\ddot{q}_1, \ddot{q}_2, \ddot{z}, \ddot{\lambda}_1, \ddot{\lambda}_2]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} J_1(q_1) & 0 & 0 & -J_{\phi_1}^T & 0 \\ 0 & J_2(q_2) & 0 & 0 & -J_{\phi_2}^T \\ 0 & 0 & H & -J_{z\phi_1}^T & -J_{z\phi_2}^T \\ J_{\phi_1} & 0 & J_{z\phi_1} & 0 & 0 \\ 0 & J_{\phi_2} & J_{z\phi_2} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \tau_1 - H_1 - f_1 J_{01}^T \\ \tau_2 - H_2 - f_2 J_{02}^T \\ -f_1 J_{\Delta x_1}^T - f_2 J_{\Delta x_2}^T \\ -\alpha_1 q_1 - \alpha_2 z - u_1 \phi_1 \\ -\beta_1 q_2 - \beta_2 z - u_2 \phi_2 \end{bmatrix}$$

3. 동적 안정 파지를 위한 피드백제어

끝단에 소프트 팁이 부착된 핑거 로봇이 대상물을 동적 안정 파지하기 위해서는 핑거의 파지 동작이 완료되면 대상물의 운동도 정지되어야 하며 대상물의 파지력은 설정된 파지력으로 수렴하여야 한다. 또한 물체의 회전 모멘트와 관련하여 동적 안정의 척도가 되는 접촉 거리의 차 $(Y_1 - Y_2)$ 가 영으로 수렴하여야 한다.

이제 다관절 핑거 로봇이 대상물을 안정적으로 파지하기 위한 각 관절의 구동 토크를 파지 운동방정식을 근거로 제안하면 식(21), (22)와 같다.^{[5],[8]}

$$u_1 = -k_{r1} \dot{q}_1 + f_d J_{01}^T \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta x_1 / \partial x_{01}}{\partial \Delta x_1 / \partial y_{01}} \end{bmatrix} - \frac{\tau_1}{r_1 + r_2} (Y_1 - Y_2) f_d \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$u_2 = -k_{r2} \dot{q}_2 + f_d J_{02}^T \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta x_2 / \partial x_{02}}{\partial \Delta x_2 / \partial y_{02}} \end{bmatrix} + \frac{\tau_2}{r_1 + r_2} (Y_1 - Y_2) f_d \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

여기서 f_d 는 대상물을 파지하기 위하여 설정된 최소한의 힘을 나타내며, k_{r_i} 는 설계 계인을 의미한다.

제안된 피드백제어 입력인 식(21), (22)를 식(20)에 대입하여 정리하면 식(23)-(27)과 같다.

$$\left(J_1(q_1) \frac{d}{dt} + \frac{1}{2} J_1(q_1) + H_1(q_1, \dot{q}_1) \right) \dot{q}_1 + k_{r1} \dot{q}_1 = -J_{01}^T \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta x_1 / \partial x_{01}}{\partial \Delta x_1 / \partial y_{01}} \end{bmatrix} \Delta f_1 - \frac{\tau_1 f_d}{r_1 + r_2} (Y_1 - Y_2) \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} & \left(J_2(q_2) \frac{d}{dt} + \frac{1}{2} \dot{J}_2(q_2) + H_2(q_2, \dot{q}_2) \right) \dot{q}_2 + k_{12} \dot{q}_2 \\ & = -J_{02}^T \left[\frac{\partial \Delta x_2 / \partial x_{02}}{\partial \Delta x_2 / \partial y_{02}} \right] \Delta f_2 + \frac{r_2 f_d}{r_1 + r_2} (Y_1 - Y_2) \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} M \ddot{x} - (\Delta f_1 - \Delta f_2) \cos(\theta) \\ + (\lambda_1 + \lambda_2) \sin(\theta) = 0 \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} M \ddot{y} - (\Delta f_1 + \Delta f_2) \sin(\theta) \\ + (\lambda_1 + \lambda_2) \cos(\theta) = 0 \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} I \ddot{\theta} - Y_1 \Delta f_1 + Y_2 \Delta f_2 - f_d (Y_1 - Y_2) \\ - \lambda_1 \Delta x_1 + \lambda_2 \Delta x_2 = -\frac{l}{2} (\lambda_1 - \lambda_2) \end{aligned} \quad (27)$$

여기서 $\Delta f_i = f_i - f_d$ 이다.

식(23)~(27)를 상태 변화율 벡터 $(\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dot{z})^T$ 와의 내적을 구하여 정리하면 식(28)과 같다.

$$\frac{d}{dt} V = -k_{11} \|\dot{q}_1\|^2 - k_{12} \|\dot{q}_2\|^2 \quad (28)$$

여기서

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

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

함수 K 는 positive definite가 되고, $f_d > 0$ 이고 ξ 가 증가함에 따라 $f_i(\xi)$ 도 증가하므로 함수 ΔP 도 positive definite가 된다. 따라서 V 는 positive definite가 되고 식(28)을 만족하므로 함수 V 는 Lyapunov 함수의 거동에 따르게 되어 $t \rightarrow \infty$ 에 대하여 \dot{q}_i 는

Table 1 Initial condition used in the simulation

	Para.	Value
Link	q_{11}	29 [deg.]
	q_{12}	69 [deg.]
	q_{13}	51 [deg.]
	q_{21}	57 [deg.]
	q_{22}	78 [deg.]
Object	θ	-10 [deg.]
	$Y_1 - Y_2$	9.585 [mm]
	x	0.029 [m]
	y	0.087 [m]

영(zero)으로 수렴한다.¹⁵⁾¹⁶⁾¹⁸⁾ 이때 식(23), (24)에서 Δf_i 와 $(Y_1 - Y_2)$ 이 영으로 수렴하게 되어 대상물의 파지력 f_i 는 설정된 파지력 f_d 로 수렴하여 대상물의 파지 동작이 완료되며, 식(27)에서 대상물의 회전 각도는 임의의 일정한 값으로 수렴하여 대상물은 점근적 안정이 된다.¹⁹⁾¹¹¹⁾

4. 시뮬레이션 결과 고찰

Fig. 1의 다관절 핑거 로봇에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 각 관절과 대상물의 각도를 피드백하고 제안된 제어 입력에 의하여 각 관절을 작동시켜 대상물을 파지하도록 한다. 대상물의 형상은 사각형으로 선정하고 각 관절 구동부에서의 마찰력, 대상물과 수평면 사이에서의 마찰 등은 고려하지 않는다. 핑거와 대상물의 초기 상태는 Table 1에 나타내고, 시뮬레이션을 위한 파라미터들은 Table 2에 나타낸다. 시뮬레이션은 MatLab과 Simulink를 사용하여 수행하고 시뮬레이션 시간은 1[sec]로 하였다.

물체를 파지하는데 설정된 최소한의 힘 $f_d = 1$ [N]으로 선정하고, 설계 계인 $k_{11} = 0.02$, $\gamma_i = 5000$, $w_i = 250000$ 으로 선정하였다. Fig. 3은 각 핑거의 관절 각도를 나타내고 있다. Fig. 3(a)에 나타난 것과 같이 좌측 핑거의 각 관절은 초기 조건

Table 2 Parameters used in the simulation

	Para.	Value
Link	m_{11}	0.03 [kg]
	m_{12}	0.03 [kg]
	m_{13}	0.04 [kg]
	m_{21}	0.04 [kg]
	m_{22}	0.03 [kg]
	l_{11}	0.04 [m]
	l_{12}	0.04 [m]
	l_{13}	0.04 [m]
	l_{21}	0.06 [m]
	l_{22}	0.04 [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	1.077 0^{-5} [kg·m ²]
	vertical	0.048 [m]
	side	0.03 [m]

에서 동작하여 시간 약 0.2[sec] 이후에 첫 번째 관절은 약 29[deg.], 두 번째 관절은 약 66[deg.], 세 번째 관절은 약 48[deg.]에서 정지하고 있다. Fig. 3(b)에 나타난 것과 같이 우측 핑거의 각 관절은 초기 조건에서 동작하여 시간 약 0.4[sec] 이후에 첫 번째 관절은 약 61[deg.], 두 번째 관절은 약 83[deg.]에서 정지하고 있다. Fig. 4는 각 핑거 끝단에서 대상물을 누르는 힘이 작용하는 접촉 거리의 차 ($Y_1 - Y_2$)의 거동을 나타내고 있다. 초기 상태의 접촉 거리의 차이는 각 핑거의 파지 동작이 진행함에 따라 지속적으로 감소하다가 시간 약 0.4[sec]에 영으로 수렴하고 있다. Fig. 5는 대상물의 회전 각도를 나타내고 있다. 핑거의 파지 동작에 의하여 대상물은 반시계 방향으로 회전하다가 각도가 약 10[deg.]가 되면 정지하게 된다. Fig. 3-5에 나타난 거동들을 근거로 시간 약 0.4[sec]가 되면 파지 동작이 완료된 것으로 사료된다. Fig. 6은 각 핑거가 대상물을 파지하는 힘의 거동을 나타내고 있다. 파지력은 소프트 팀의 변형량의 함수로 정의하므로 초기 파지력은 영이 되고 핑거의 파지 동작에 의하여 변형량이 변함에 따라 파지력은 변하고 진동의 형태로 나타나고 있다. 시간 약 0.15

[sec] 이후에는 설정된 파지력 $f_d = 1 [N]$ 으로 수렴하고 있다. Fig. 7은 대상물의 동적 안정 파지를 위한 제어 입력을 나타내고 있다. 각 관절에 대한 제어 입력은 초기 시간에 진동의 형태로 나타나다가 약 0.15[sec] 이후에는 적당한 값으로 수렴하고 있다.

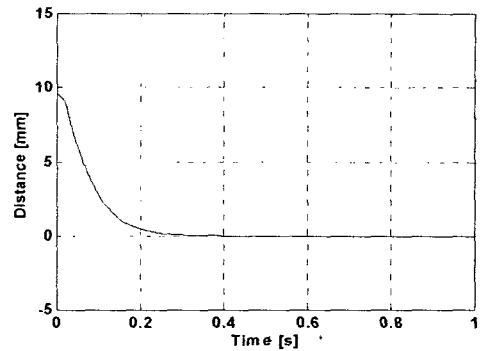
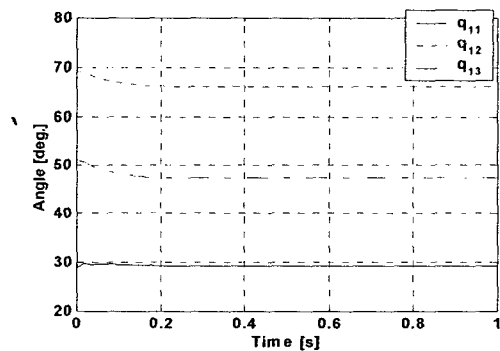


Fig. 4 Distance between two link-tips



(a) left

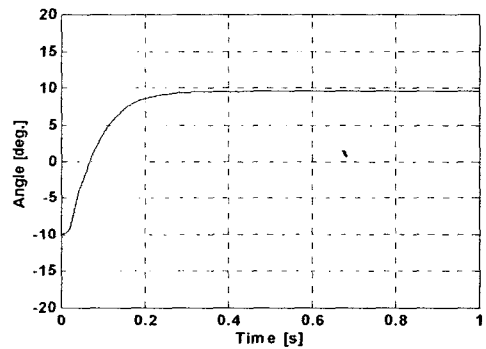
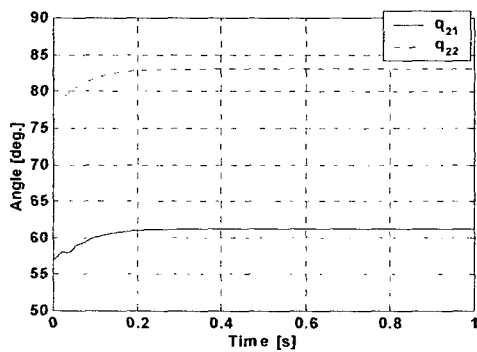


Fig. 5 Angle of object



(b) right

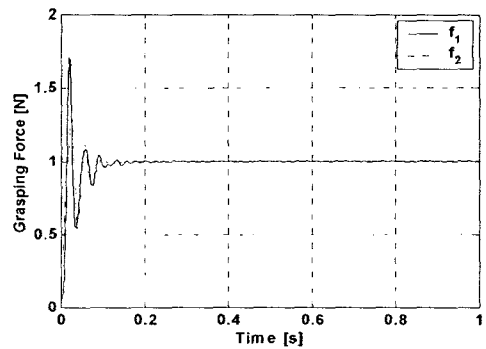
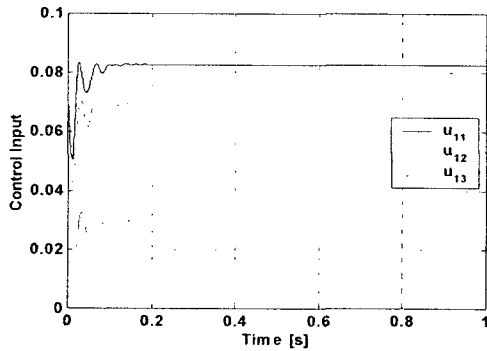
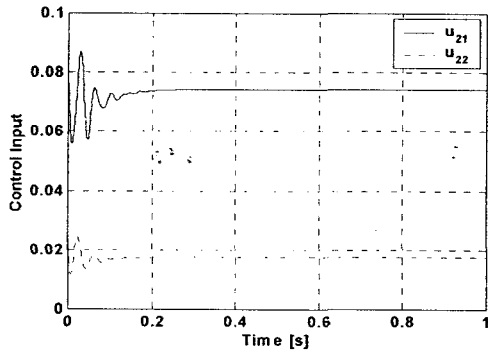


Fig. 6 Grasping forces

Fig. 3 Angles of links



(a) left



(b) right

Fig. 7 Control inputs

5. 결론

본 논문에서는 다관절 핑거 로봇이 대상물을 동적 안정 파지하기 위한 모델 구축과 이를 근거로 피드백 제어시스템을 제안하고 시뮬레이션을 통하여 빠른 시간 내에 주어진 대상물을 파지하는 것을 확인할 수 있었다. 인간 손가락의 접촉 특성을 고려하여 각 핑거의 끝단에는 변형이 가능한 소프트 팁을 부착하여 대상물과의 접촉을 면접촉이 되도록 하며 핑거와 대상물과의 구속 조건을 고려하여 파지 운동 방정식을 도출하였다. 또한 파지력을 소프트 팁의 변형량 함수로 고려함으로써 실제 시스템 구축시 힘 센서에 의하여 직접적으로 파지력을 피드백하는 부분을 축소시킬 수 있는 가능성을 확인하였다. 그러나 전체 시스템이 복잡하고 각 관절의 회전부에서의 마찰력과 대상물과 평면 사이에서의 마찰 등은 고려하지 않았다.

향후 제안된 제어 방법을 적용하여 다관절 핑거 로봇의 안정적 파지를 위한 피드백 제어시스템을 구현하도록 하며, 모델 불확실성에 대한 강인성에 관한 연구가 계속 진행되어야 할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 울산대학교 RRC와 일본의 Ritsumeikan University와의 연구교류에 의하여 이루어졌습니다.

참고문헌

- (1) Mason T., Salisbury J. K., 1985, "Robot hands and the mechanics of manipulation", The MIT Press, Cambridge USA.
- (2) Y. Yokokohji, M. Sakamoto, T. Yoshikawa, 1999, "Vision aided object manipulation by a multifingered hand with soft fingertips", Proc. IEEE Int. Conf On Robotica and Automation, pp.3201 ~ 207.
- (3) 심재균, 한현용, 양순용, 이병룡, 안경관, 김성수, 2002, "소프트-팁이 장착된 듀얼-핑거의 안정적 파지 제어에 관한 연구", 한국공작기계학회 추계학술대회 논문집, pp.219~224.
- (4) P. Akella, M. Cutkosky, 1989, "Manipulating with soft fingers", Proc. IEEE Int. Conf On Robotica and Automation, Vol.2, pp.764 ~ 59.
- (5) S. Arimoto, Pham T, Hyun-Yong H, Zoe. D, 2000, "Dynamics and control of a set of dual fingers with soft tips", Robotica, Vol.18, No.1, pp.71 ~ 80.
- (6) S. Arimoto, K. Tahara, M. Yamaguchi, P. T. Nguyen, H. Y. Han, 2001, "Principle of Superposition for Controlling Pinch Motions by Means of Robot Finger with Soft Tips", Robotica, Vol.19, pp.39~47.
- (7) T. Naniwa, S. Arimoto, Louis L. Whitcomb, 1995, "Learning control for robot tasks under geometric constraints", IEEE Trans. on Robotica and Automation, Vol.11, No.3, pp.432 ~ 441.
- (8) 박경택, 양순용, 2000, "부드러운 촉각을 가진 핑거의 운동과 제어에 관한 연구", 제어·시스템공학회 부산·울산 학술대회, pp.166 ~ 170.
- (9) C. C. Cheah, S. Kawamura, S. Arimoto, "Feedback Control for Robotic Manipulator with Uncertain Kinematics and Dynamics", IEEE International Conference on Robotics & Automation, pp.3607 ~ 3612.
- (10) Park, K. T, Kim, S. S, Yang, S. Y, Lee, B. R, Ahn, K. K, 2001, "Research of Static Grasping for Handling Tasks in Field-Robot," ICASE, pp.2895~2898.
- (11) 有本 卓, ロボットの 制御 朝倉書店

APPENDIX

1. 좌측 핑거의 운동방정식

$$\begin{aligned}
 J_{01}^T \begin{vmatrix} \frac{\partial \Delta x_1}{\partial x_{01}} \\ \frac{\partial \Delta x_1}{\partial y_{01}} \end{vmatrix} &= \begin{vmatrix} \frac{\partial x_{01}}{\partial q_{11}} & \frac{\partial y_{01}}{\partial q_{11}} \\ \frac{\partial x_{01}}{\partial q_{12}} & \frac{\partial y_{01}}{\partial q_{12}} \\ \frac{\partial x_{01}}{\partial q_{13}} & \frac{\partial y_{01}}{\partial q_{13}} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \frac{\partial \Delta x_1}{\partial x_{01}} \\ \frac{\partial \Delta x_1}{\partial y_{01}} \end{vmatrix} \\
 &= \begin{vmatrix} l_{11} \sin(q_{11} - \theta) + l_{12} \sin(q_{11} + q_{12} - \theta) \\ \quad + l_{13} \sin(q_{11} + q_{12} + q_{13} - \theta) \\ l_{12} \sin(q_{11} + q_{12} - \theta) + l_{13} \sin(q_{11} + q_{12} + q_{13} - \theta) \\ l_{13} \sin(q_{11} + q_{12} + q_{13} - \theta) \end{vmatrix} \\
 J_{\Phi_1}^T &= \begin{vmatrix} \frac{\partial \Phi_1}{\partial q_{11}} \\ \frac{\partial \Phi_1}{\partial q_{12}} \\ \frac{\partial \Phi_1}{\partial q_{13}} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{\partial}{\partial q_{11}} (Y_1 - Y_1') \\ \frac{\partial}{\partial q_{12}} (Y_1 - Y_1') \\ \frac{\partial}{\partial q_{13}} (Y_1 - Y_1') \end{vmatrix} \\
 &= \begin{vmatrix} l_{11} \cos(q_{11} - \theta) + l_{12} \cos(q_{11} + q_{12} - \theta) \\ \quad + l_{13} \cos(q_{11} + q_{12} + q_{13} - \theta) - r_1 \\ l_{12} \cos(q_{11} + q_{12} - \theta) + l_{13} \cos(q_{11} + q_{12} + q_{13} - \theta) - r_1 \\ l_{13} \cos(q_{11} + q_{12} + q_{13} - \theta) - r_1 \end{vmatrix}
 \end{aligned}$$

2. 우측 핑거의 운동방정식

$$\begin{aligned}
 J_{02}^T \begin{vmatrix} \frac{\partial \Delta x_2}{\partial x_{02}} \\ \frac{\partial \Delta x_2}{\partial y_{02}} \end{vmatrix} &= \begin{vmatrix} \frac{\partial x_{02}}{\partial q_{21}} & \frac{\partial y_{02}}{\partial q_{21}} \\ \frac{\partial x_{02}}{\partial q_{22}} & \frac{\partial y_{02}}{\partial q_{22}} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \frac{\partial \Delta x_2}{\partial x_{02}} \\ \frac{\partial \Delta x_2}{\partial y_{02}} \end{vmatrix} \\
 &= \begin{vmatrix} l_{21} \sin(q_{21} + \theta) + l_{22} \sin(q_{21} + q_{22} + \theta) \\ l_{22} \sin(q_{21} + q_{22} + \theta) \end{vmatrix} \\
 J_{\Phi_2}^T &= \begin{vmatrix} \frac{\partial \Phi_2}{\partial q_{21}} \\ \frac{\partial \Phi_2}{\partial q_{22}} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{\partial}{\partial q_{21}} (Y_2 - Y_2') \\ \frac{\partial}{\partial q_{22}} (Y_2 - Y_2') \end{vmatrix} \\
 &= \begin{vmatrix} l_{21} \cos(q_{21} + \theta) + l_{22} \cos(q_{21} + q_{22} + \theta) - r_2 \\ l_{22} \cos(q_{21} + q_{22} + \theta) - r_2 \end{vmatrix}
 \end{aligned}$$

3. 대상물의 운동방정식

$$\begin{aligned}
 J_{\Delta x_1}^T &= \begin{vmatrix} \frac{\partial \Delta x_1}{\partial x} \\ \frac{\partial \Delta x_1}{\partial y} \\ \frac{\partial \Delta x_1}{\partial \theta} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -\cos(\theta) \\ \sin(\theta) \\ -Y_1 \end{vmatrix} \\
 J_{\Delta x_2}^T &= \begin{vmatrix} \frac{\partial \Delta x_2}{\partial x} \\ \frac{\partial \Delta x_2}{\partial y} \\ \frac{\partial \Delta x_2}{\partial \theta} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos(\theta) \\ -\sin(\theta) \\ Y_2 \end{vmatrix} \\
 \therefore J_{z\Phi_1}^T &= \begin{vmatrix} \frac{\partial \Phi_1}{\partial x} \\ \frac{\partial \Phi_1}{\partial y} \\ \frac{\partial \Phi_1}{\partial \theta} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -\sin(\theta) \\ -\cos(\theta) \\ \Delta x_1 - \frac{l}{2} \end{vmatrix} \\
 J_{z\Phi_2}^T &= \begin{vmatrix} \frac{\partial \Phi_2}{\partial x} \\ \frac{\partial \Phi_2}{\partial y} \\ \frac{\partial \Phi_2}{\partial \theta} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -\sin(\theta) \\ -\cos(\theta) \\ -\Delta x_2 + \frac{l}{2} \end{vmatrix}
 \end{aligned}$$