

## 손가락 로봇의 안정 파지 운동 제어에 관한 연구

최 중 환†

(원고접수일 : 2006년 4월 2일, 심사완료일 : 2006년 5월 25일)

### A Study on Control of Stable Grasping Motion for Finger Robot

Jong-Hwan Choi†

**Abstract** : This paper attempts to derive and analyze the dynamic system of grasping 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** : Finger robot(손가락 로봇), Grasping motion(파지 운동), Constraint stabilization (구속 안정), Soft tip(소프트 팁)

### 1. 서 론

물체를 집기 위한 손가락 로봇은 로봇 연구의 초기부터 주요한 관심분야로서 많은 연구가 이루어졌고, 작업 현장에 따라서 사람이 손가락을 사용하여 물체를 집는 동작을 손가락 로봇이 대신하여 수행하도록 한다. 그러나 고정도의 작업을 위하여 높은 정밀도로 설계/제작된 손가락 로봇이라 할지라도 인간의 손가락이 수행할 수 있는 모든 동작을 완벽하게 실현하는 것은 불가능하며, 실제 작업 현장에서 사용되고 있는 손가락 로봇은 대부분 개루프 제

어를 통한 단순하고 반복적인 작업만을 수행하고 있다. 인간의 손가락이 수행하는 동작을 손가락 로봇이 대항할 수 없는 것은 기구학적인 문제뿐만 아니라 파지 동작에 대한 학습 능력의 부족, 감각 기관의 결여 등이다<sup>(1)-(3)</sup>. 또한 손가락 로봇의 성능 제약은 파지 동작에 대한 모델 구축과 이에 대한 기구학적 및 역학적 해석 등에 대한 연구가 충분하지 못했기 때문이다<sup>(4)</sup>. 손가락 로봇에 의한 파지 동작에 대하여 수행된 대부분의 연구에서는 손가락 로봇과 대상물을 강체로 가정하고 물체는 손가락 로봇과의 점접촉에 의하여 파지되는 것으로 해석되

† 책임저자(울산대학교 산학협력단), E-mail:jonghan@pusan.ac.kr, Tel: 016)452-0601

고 있다<sup>[5]</sup>. 그러나 실제 인간의 손가락 표면은 강체가 아닌 변형 물질이며 대상물의 파지 동작은 점 접촉이 아닌 면접촉으로 동작된다.

기존의 연구 내용에서는 손가락 로봇이 대상물을 파지할 때 로봇 끝단과 물체와의 동적 관계를 구름과 미끄럼 접촉으로 가정하여 운동 모델을 유도하고 이를 근거로 로봇에 피드-포워드 방법을 적용하고 있다<sup>[5],[6]</sup>. 이때 대상물의 운동은 고려하지 않아 물체의 정량적 파지 성능을 평가하기는 어렵다. 또한 손가락 로봇과 물체의 운동을 모두 고려한 모델을 구축하고 연산 토크 방법<sup>[7]</sup>이나 선형화 기법<sup>[8]</sup>을 적용하여 파지 동작을 제어한다. 또한 시스템에 존재하는 불확실한 매개변수를 선정하고 이를 추정하기 위하여 적응제어기법을 적용하기도 한다<sup>[9]</sup>. 그러나 제안된 대상물의 안정 파지를 위해서는 손가락 끝단에 대한 위치 및 힘 제어가 요구되며 이를 위하여 다수의 센서 부착이 필수적이다. 한편, 물체를 안정적으로 파지하기 위하여 소프트 핑거 로봇을 구성하고 로봇 시스템의 역동역학 해석으로 접근하지 않고 수동성(passivity) 이론을 제안하고 이를 적용한 연구도 있다<sup>[10]-[12]</sup>.

본 연구에서는 인간의 손가락 특성을 고려하여 다관절로 이루어진 두개의 손가락 로봇이 대상물을 안정적으로 파지하도록 하는 제어방법을 제안한다. 손가락 로봇이 대상물을 집을 때 면접촉에 의한 안정 파지 동작이 되기 위하여 각 손가락 끝단에 부드럽고 변형 가능한 소프트 재질의 팁을 부착한다<sup>[13]</sup>. 물체를 집을 파지력은 소프트 팁의 변형량 함수로 표현하여 파지력을 직접적으로 검출하여 피드백하지 않고 손가락 끝단의 위치 제어를 수행하여 소프트 팁의 변형량을 통하여 파지력을 제어하고자 한다. 이에 대하여 손가락 로봇이 평면 작업공간에서 대상물을 파지할 때 팁의 변형에 의한 면접촉의 상태를 포함한 손가락 로봇의 운동방정식을 유도한다. 그리고 손가락 로봇에 의해 대상물의 회전운동을 억제하여 동적 안정 파지를 실현하기 위하여 피드백 신호를 사용한 제어 입력을 제안하고 시뮬레이션 결과를 통하여 모델 구축 및 제안된 제어 방법의 유효성을 확인하도록 한다.

## 2. 손가락 로봇의 파지 운동 모델

### 2.1 기하학적 좌표값

Fig. 1에는 자유도가 각각 3과 2인 두개의 손가락 로봇이 대상물을 파지하는 개략도를 나타내고 있다. 손가락 로봇은 평면 작업공간에서 물체를 파지하며 물체는 마찰을 무시할 수 있는 평면상에 놓여 있다고 가정한다. 각 손가락 끝단에는 인간의 손가락 특성을 고려하여 변형 가능한 소프트 재료로서 반구 형태의 팁을 부착한다. 팁과 물체와의 초기 접촉점은 팁의 구름 운동으로 물체의 측면을 따라 이동되며 손가락 로봇의 파지 동작이 완료되면 그림에서 검게 표시된 것과 같이 소프트 팁은 변형되어 면접촉이 되며 소프트 팁의 변형량에 의한 탄성력이 물체에 작용하여 물체를 파지하게 된다. 점  $O$ 는 기준좌표계의 원점이고 점  $O'$ 와 함께 각 손가락의 회전 중심을 나타내며, 점  $O_{oi}$ 와  $O_i$ 는 관절 길이 방향선상의 관절 팁의 중심점과 소프트 팁과 물체의 접촉시 발생하는 접촉면적의 중심점을 각각 나타낸다. 점  $O_{c.m}$ 은 물체의 질량중심을 나타낸다.  $Y_i$ 는 점  $O_{c.m}$ 을 원점으로 하는 수직좌표계에서 접촉면적의 중심점과의  $Y$  방향의 거리를 나타낸다. 각 관절의 회전 중심에서는 토크  $\tau_i$ 가 작용하여 각 관절을 구동시키도록 한다. 각 관절의 각도  $q_{ij}$ 는 회전부에 설치된 엔코더에 의하여 검출되며 물체의 회전 각도  $\theta$ 는 물체의 아래쪽에 설치된 두개의 레

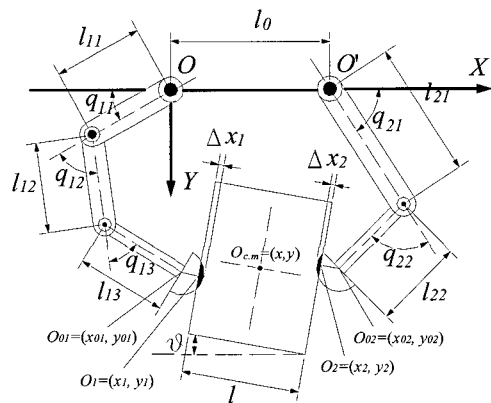


Fig. 1 Schematic diagram of finger robot with soft-tip

이저 변위 센서에 의하여 연산되어진다. 첨자  $i=1,2$ 에서 1은 좌측, 2는 우측을 의미하며,  $j=1,2,3$ 은 각 관절의 위치를 의미한다. 손가락 로봇에서 점  $O_{0i}$ 와  $O_{ji}$ 의 좌표를 기하학적 형상에 의하여 나타내면 식(1)~(4)와 같다.

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

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

$$x_1 = x_{01} + (r_1 - \Delta x_1) \cos(\theta) \quad (2)$$

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

$$x_{02} = l_0 + l_{21} \cos(q_{21}) + l_{22} \cos(q_{21} + q_{22}) \quad (3)$$

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

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

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

여기서  $l_0$ 는 양쪽 손가락의 거리,  $r_1$ 는 각 손가락 끝단에 부착된 소프트 팁의 반지름,  $\Delta x_i$ 는 소프트 팁의 변형량 중에 면접촉의 중심점에서 발생되는 최대변위를 나타낸다. 손가락과 물체는 항상 접촉하고 있다는 가정하에 좌표간의 기하학적 구속관계에 의하여 물체의 질량 중심 좌표를 나타내면 식(5), (6)과 같다<sup>(14),(15)</sup>.

$$x = x_1 + \frac{1}{2} \cos(\theta) - Y_1 \sin(\theta) = x_2 - \frac{1}{2} \cos(\theta) - Y_2 \sin(\theta) \quad (5)$$

$$y = y_1 - \frac{1}{2} \sin(\theta) - Y_1 \cos(\theta) = y_2 + \frac{1}{2} \sin(\theta) - Y_2 \cos(\theta) \quad (6)$$

식(1)~(6)의 관계로부터 소프트 팁과 물체와의 접촉면적의 중심점과 물체의 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 손가락이 회전 운동을 함에 따라 접촉점은 대상물의 측면을 미끄러짐 없이 구름 회전운동을 한다고 가정한다. 그러면 접촉 거리  $Y_i'$ 는 기구학적 관계에 의하여 식(9), (10)과 같이 표현된다<sup>(15),(16)</sup>.

$$Y_1' = c_1 - r_1 \left( \frac{\pi}{2} + \theta - q_{11} - q_{12} - q_{13} \right) \quad (9)$$

$$Y_2' = c_2 - r_2 \left( \frac{\pi}{2} - \theta - q_{21} - q_{22} \right) \quad (10)$$

여기서  $c_i$ 는 접촉 거리의 초기 상태를 의미한다.

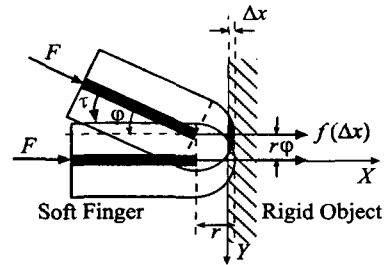


Fig. 2 Motion of the center of contact area on the object surface

### 2.2 파지 운동방정식

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

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_k} = Q_k' + \sum_{n=1}^3 \lambda_n a_{kn} \quad (11)$$

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

여기서  $L=K-P$ 를 의미하며,  $K$ 는 각 손가락과 물체의 운동에너지,  $P$ 는 소프트 팁의 변형량에 의한 포텐셜에너지를 나타내며,  $q=[q_1, q_2, z]^T$ 는 일반화 좌표계,  $Q=[u_1, u_2, 0, 0, 0]^T$ 는 비보존력,  $\lambda_n$ 는 라그랑지 승수,  $a_{kn}$ 은 구속 조건을 위한 계수 등을 나타낸다. 또한  $q_1=[q_{11}, q_{12}, q_{13}]^T$ 와  $q_2=[q_{21}, q_{22}]^T$ 는 좌·우측 손가락의 관절 각도,  $z=[x, y, \theta]^T$ 는 물체의 질량 중심 좌표 및 회전각도,  $u_1=[u_{11}, u_{12}, u_{13}]^T$ 와  $u_2=[u_{21}, u_{22}]^T$ 는 좌·우측 손가락의 각 관절을 구동시키는 토크 입력 등을 나타낸다. 첨자  $k$ 는 일반화 좌표계의 개

수,  $n$ 은 구속 조건의 개수를 의미한다. 운동에너지 및 포텐셜에너지를 나타내면 식(12), (13)과 같다.

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

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

여기서  $J_i(q_i) = \text{diag}[J_1(q_1), J_2(q_2)]$ 와  $H = \text{diag}[M, M, J]$ 는 손가락 로봇과 물체의 관성 행렬,  $M$ 과  $J$ 는 물체의 질량과 물체의 질량 중심에 대한 관성모멘트를 각각 나타낸다. 또한 손가락 로봇의 파지력은 소프트 팁이 변형하여 물체와 면접촉이 되어 분포응력의 형태로 물체에 작용하며 물체 측면에서 면적분을 통하여 구해진다. 그러나 파지력을 물체 측면에 대한 수직방향의 집중응력으로 소프트 팁의 변형량 함수로 간주될 수 있다. 따라서 물체에 작용하는 파지력은 식(14)와 같이 나타낼 수 있다<sup>(10), (11)</sup>.

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

여기서  $k_i$ 는 소프트 팁의 탄성계수를 의미한다.

■ 좌측 손가락의 운동방정식

식(11)~(14)를 정리하여 좌측 손가락의 운동방정식을 나타내면 식(15)와 같다<sup>(15)</sup>.

$$J_1(q_1) \ddot{q}_1 + f_1 J_{01}^T \begin{bmatrix} \partial \Delta x_1 / \partial x_{01} \\ \partial \Delta x_1 / \partial y_{01} \end{bmatrix} - \lambda_1 J_{\phi_1}^T = u_1 \quad (15)$$

여기서  $J_1(q_1) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 는 대칭인 양의 한정 행렬로서 각 관절의 관성행렬을 의미한다. 또한  $J_{01}$ 은 각도  $q_1$ 에 대한 좌표값  $(x_{01}, y_{01})$ 의 자코비안(jacobian) 행렬을 의미하며,  $J_{\phi_1}$ 는 각도  $q_1$ 에 대한 구속 조건  $\phi_1$ 의 자코비안 행렬을 의미한다. 각 행렬에 대한 요소들은 부록에서 언급한다.

■ 우측 손가락의 운동방정식

식(11)~(14)를 정리하여 우측 손가락의 운동방정식을 나타내면 식(16)과 같다<sup>(15)</sup>.

$$J_2(q_2) \ddot{q}_2 + f_2 J_{02}^T \begin{bmatrix} \partial \Delta x_2 / \partial x_{02} \\ \partial \Delta x_2 / \partial y_{02} \end{bmatrix} - \lambda_2 J_{\phi_2}^T = u_2 \quad (16)$$

여기서  $J_2(q_2) \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ 는 대칭인 양의 한정 행렬로서 각 관절의 관성행렬을 의미한다. 또한  $J_{02}$ 은 각도  $q_2$ 에 대한 좌표값  $(x_{02}, y_{02})$ 의 자코비안 행렬을 의미하며,  $J_{\phi_2}$ 는 각도  $q_2$ 에 대한 구속 조건  $\phi_2$ 의 자코비안 행렬을 의미한다. 각 행렬에 대한 요소들은 부록에서 언급한다.

■ 물체의 운동방정식

식(11)~(14)를 정리하여 대상물의 운동 방정식을 나타내면 식(17)과 같다<sup>(15)</sup>.

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

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

■ 구속 운동방정식

손가락 로봇이 동작되면 소프트 팁은 항상 물체와 접촉되어 있어야 하므로 좌표값에 의하여 정의되는 접촉 거리  $Y_i$ 인 식(7), (8)과 각도에 의하여 정의되는 접촉 거리  $Y_i'$ 인 식(9), (10)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)<sup>(10)-(12)</sup>을 적용하여 평거와 대상물의 구속방정식을 나타내면 식(19)와 같다.

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

여기서  $\gamma_i$ 와  $\omega_i$ 는 설계 계인으로 손가락과 물체 사이의 점성 감쇠계수와 탄성계수를 의미한다.

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

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

여기서

$$\ddot{X} = [\ddot{q}_1, \ddot{q}_2, \ddot{z}, \lambda_1, \lambda_2]^T$$

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

$$B = \begin{bmatrix} u_1 - H_1 - f_1 J_{01}^T \\ u_2 - H_2 - f_2 J_{02}^T \\ -f_1 J_{\Delta x_1}^T - f_2 J_{\Delta x_2}^T \\ -\alpha_1 \dot{q}_1 - \alpha_2 z - \omega_1 \dot{\phi}_1 \\ -\beta_1 \dot{q}_2 - \beta_2 z - \omega_2 \dot{\phi}_2 \end{bmatrix}$$

### 3. 안정적 파지를 위한 제어

손가락 로봇이 물체를 안정적으로 파지하기 위하여 파지 동작이 완료되면 물체에 가해지는 파지력은 일정한 값으로 수렴하여야 한다. 또한 물체의 거동이 정지되기 위해서는 회전 모멘트와 관련하여 접촉 거리의 차  $(Y_1 - Y_2)$ 가 영으로 수렴하여야 한다.

이제 손가락 운동방정식인 식(15), (16)을 근거리 다관절 손가락 로봇이 물체를 안정적으로 파지하기 위하여 각 관절 구동 토크의 피드백제어 입력을 제안하면 식(21), (22)와 같다<sup>[10], [16]</sup>.

$$u_1 = -k_{v1} \dot{q}_1 + f_d J_{01}^T \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta x_1}{\partial x_{01}} \\ \frac{\partial \Delta x_1}{\partial y_{01}} \end{bmatrix} - \frac{r_1}{r_1 + r_2} (Y_1 - Y_2) f_d \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$u_2 = -k_{v2} \dot{q}_2 + f_d J_{02}^T \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta x_2}{\partial x_{02}} \\ \frac{\partial \Delta x_2}{\partial y_{02}} \end{bmatrix} + \frac{r_2}{r_1 + r_2} (Y_1 - Y_2) f_d \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

여기서  $f_d$ 는 물체를 파지하기 위하여 설정된 최소한의 힘을 나타내며,  $k_{vi}$ 는 설계 계인을 의미한다. 제안된 피드백제어 입력인 식(21), (22)를 식(20)에 대입하여 정리하면 식(23)~(27)과 같다.

$$\left( J_1(q_1) \frac{d}{dt} + \frac{1}{2} J_1(q_1) + H_1(q_1, \dot{q}_1) \right) \dot{q}_1 + k_{v1} \dot{q}_1 \quad (23)$$

$$= -J_{01}^T \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta x_1}{\partial x_{01}} \\ \frac{\partial \Delta x_1}{\partial y_{01}} \end{bmatrix} \Delta f_1 - \frac{r_1 f_d}{r_1 + r_2} (Y_1 - Y_2) \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\left( J_2(q_2) \frac{d}{dt} + \frac{1}{2} J_2(q_2) + H_2(q_2, \dot{q}_2) \right) \dot{q}_2 + k_{v2} \dot{q}_2 \quad (24)$$

$$= -J_{02}^T \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta x_2}{\partial x_{02}} \\ \frac{\partial \Delta x_2}{\partial y_{02}} \end{bmatrix} \Delta f_2 + \frac{r_2 f_d}{r_1 + r_2} (Y_1 - Y_2) \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

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

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

$$I \ddot{\theta} - Y_1 \Delta f_1 + Y_2 \Delta f_2 - f_d (Y_1 - Y_2) - \lambda_1 \Delta x_1 + \lambda_2 \Delta x_1 = -\frac{1}{2} (\lambda_1 - \lambda_2) \quad (27)$$

여기서  $\Delta f_i = f_i - f_d$ 이다.

한편, 운동방정식인 식(15)~(17)을 사용하여 시스템의 출력과 입력 벡터인  $(\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dot{z})$ 와  $(u_1, u_2, 0)$ 의 내적을 구하면 식(28)과 같다.

$$\begin{aligned} q_1^T u_1 + q_2^T u_2 &= \frac{d}{dt} \left\{ \sum_{i=1}^2 \frac{1}{2} \dot{q}_i^T J_i(q) \dot{q}_i \right\} \\ &+ \{ (\dot{x}_{01}, \dot{y}_{01}) f_1 \} \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta x_1}{\partial x_{01}} \\ \frac{\partial \Delta x_1}{\partial y_{01}} \end{bmatrix} \\ &+ \{ (\dot{x}_{02}, \dot{y}_{02}) f_2 \} \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta x_2}{\partial x_{02}} \\ \frac{\partial \Delta x_2}{\partial y_{02}} \end{bmatrix} \\ &+ \frac{d}{dt} \left\{ \frac{1}{2} \dot{z}^T H z \right\} + (\dot{x}_1, \dot{y}_1) f_1 J_{\Delta x_1}^T \\ &+ (\dot{x}_2, \dot{y}_2) f_2 J_{\Delta x_2}^T \\ &= \frac{d}{dt} \left\{ \sum_{i=1}^2 \frac{1}{2} \dot{q}_i^T J_i(q) \dot{q}_i + \frac{1}{2} \dot{z}^T H z \right\} \\ &+ \{ (\dot{x}_{01}, \dot{y}_{01}) f_1 - (\dot{x}_{02}, \dot{y}_{02}) f_2 \} \begin{pmatrix} \cos \theta \\ -\sin \theta \end{pmatrix} \\ &- \{ (\dot{x}_1, \dot{y}_1) f_1 - (\dot{x}_2, \dot{y}_2) f_2 \} \begin{pmatrix} \cos \theta \\ -\sin \theta \end{pmatrix} \\ &= \frac{d}{dt} \left\{ \sum_{i=1}^2 \frac{1}{2} \dot{q}_i^T J_i(q) \dot{q}_i + \frac{1}{2} \dot{z}^T H z \right\} \\ &+ \Delta \dot{x}_1 f_1 + \Delta \dot{x}_2 f_2 \quad (28) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta \dot{x}_1 &= (\dot{x}_{01} - \dot{x}_1) \cos \theta - (\dot{y}_{01} - \dot{y}_1) \sin \theta \\ \Delta \dot{x}_2 &= -(\dot{x}_{02} - \dot{x}_2) \cos \theta + (\dot{y}_{02} - \dot{y}_2) \sin \theta \end{aligned}$$

파지력은  $f_i \geq 0$ 이며, 소프트 팁의 변형량  $\Delta x_i$ 와 선형이므로 식(29)로 표현이 가능하다.

$$\Delta \dot{x}_i f_i = \frac{d}{dt} \int_0^{\Delta x_i} f_i(\zeta) d\zeta \quad (29)$$

따라서 식(28)을 식(12), (13), (29)를 사용하여 다시 나타내면 식(30)과 같다.

$$q_1^\dagger u_1 + q_2^\dagger u_2 = \frac{d}{dt} \{K + P\} \quad (30)$$

이제 제안된 피드백제어 입력인 식(21), (22)를 식(30)의 좌변에 대입하여 정리하면 식(31)과 같다<sup>[10], [11]</sup>.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} V &= \frac{d}{dt} \left\{ (K + P) + \frac{f_d}{2(r_1 + r_2)} (Y_1 - Y_2)^2 \right\} \\ &= -k_{v1} \|\dot{q}\|^2 - k_{v2} \|\dot{q}\|^2 \end{aligned} \quad (31)$$

식(31)에서 운동에너지인 함수  $K$ 는 positive definite이며,  $f_d > 0$ 이고  $\xi$ 가 증가함에 따라  $f_i(\xi)$ 도 증가하므로 함수  $P$ 도 positive definite가 된다. 따라서 함수  $V$ 는 positive definite가 되고 식(31)을 만족하므로 함수  $V$ 는 Lyapunov 함수의 거동에 따르게 된다. 따라서  $\dot{q}$ 는  $t \rightarrow \infty$ 에 대하여 영(zero)으로 수렴한다<sup>[10]-[12]</sup>. 이때 식(23), (24)에서  $\dot{q}$ 가 영으로 수렴함에 따라 각 식의 우변에서  $\Delta f_i$ 와  $(Y_1 - Y_2)$ 도 영으로 수렴하므로 물체에 가해지는 파지력  $f_i$ 는 설정된 파지력  $f_{i0}$ 로 수렴하고 물체의 파지 동작이 완료되며, 식(27)에서 물체의 회전 각도는 임의의 일정한 값으로 수렴하여 물체는 점근적 안정이 된다<sup>[10]-[12]</sup>.

#### 4. 시뮬레이션 결과 고찰

Fig. 1의 다관절 핑거 로봇에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 각 관절과 대상물의 각도를 피드백하고 제안된 제어 입력에 의하여 각 관절을 작동시

켜 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[s]로 하였다.

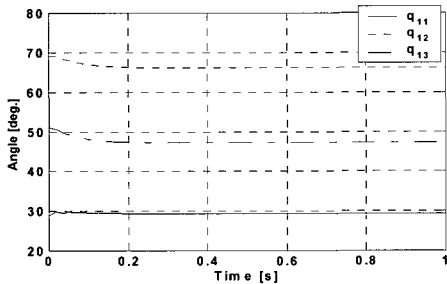
Table 1 Initial condition

	Para.	Value
Link	q11	29 [°]
	q12	69 [°]
	q13	51 [°]
	q21	57 [°]
	q22	78 [°]
Object	θ	-10 [°]
	Y1-Y2	9.585 [mm]
	x	0.029 [m]
	y	0.087 [m]

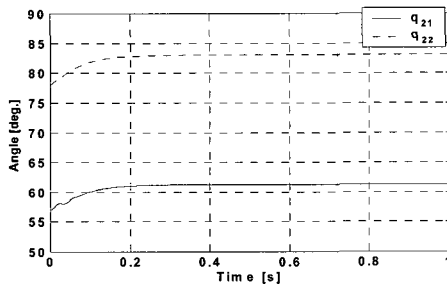
Table 2 Parameters used in the simulation

	Para.	Value
Link	m11	0.03 [kg]
	m12	0.03 [kg]
	m13	0.04 [kg]
	m21	0.04 [kg]
	m22	0.03 [kg]
	l11	0.04 [m]
	l12	0.04 [m]
	l13	0.04 [m]
	l21	0.06 [m]
	l22	0.04 [m]
	r <sub>i</sub>	0.01 [m]
	L	0.05 [m]
	c1	-0.0074 [m]
	c2	-0.013 [m]
	k	50000
Object	M	0.04 [kg]
	I	1.07 × 10 <sup>-5</sup> [kg · m <sup>2</sup> ]
	vertical	0.048 [m]
	side	0.03 [m]

물체를 파지하는데 설정된 최소한의 힘  $f_d=1(N)$ 으로 선정하고, 설계 게인  $k_{vi}=0.02$ ,  $\gamma_i=50$ ,  $\omega_i=250$ 으로 선정하였다. 설계 게인  $k_{vi}$ 는 제어 입력의 오버슈트를 억제하는데 게인을 증가시킬수록 오버슈트는 증가한다. 또한 게인  $\gamma_i$ 와  $\omega_i$ 는 물체의 회전 각도에 대한 과도응답성능에 관계한다. Fig. 3은 각 링크의 관절 각도를 나타내고 있다. Fig. 3(a)에 나타난 것과 같이 좌측 링크의 각 관절은 초기 조건에서 동작하여 시간 약 0.2[s] 이후에 첫 번째 관절은 약  $29^\circ$ , 두 번째 관절은 약  $66^\circ$ , 세 번째 관절은 약  $48^\circ$ 에서 정지하고 있다. Fig. 3(b)에 나타난 것과 같이 우측 링크의 각 관절은 초기 조건에서 동작하여 시간 약 0.4[s] 이후에 첫 번째 관절은 약  $61^\circ$ , 두 번째 관절은 약  $83^\circ$ 에서 정지하고 있다. Fig. 4는 각 링크 끝단에서 대상물을 누르는 힘이 작용하는 접촉 거리의 차 ( $Y_1-Y_2$ )의 거동을 나타내고 있다. 초기 상태의 접촉 거리의 차이는 각 링크의 파지 동작이 진행함에 따라 지속적으로 감소하다가 시간 약 0.4[s]에 영으로 수렴하고 있다. Fig. 5는 대상물의 회전 각도를 나타내고 있다. 링크의 파지 동작에 의하여 대상물은 반시



(a) left



(b) right

Fig. 3 Angles of links

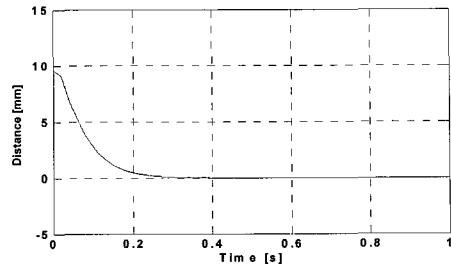


Fig. 4 Distance between two link-tips

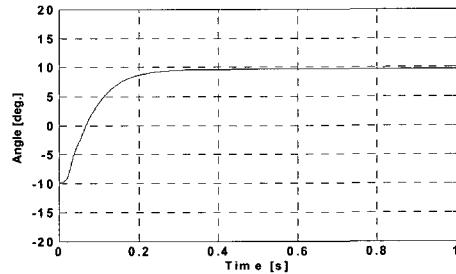


Fig. 5 Angle of object

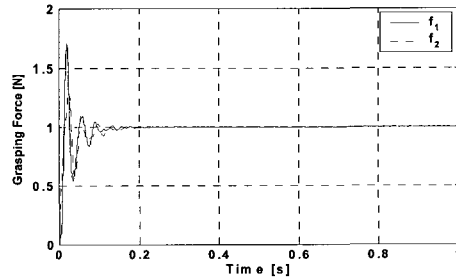
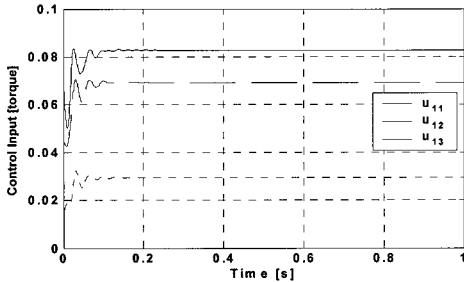


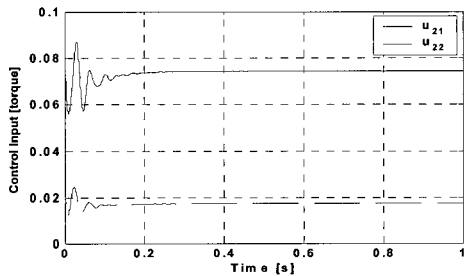
Fig. 6 Grasping forces

계 방향으로 회전하다가 각도가 약  $10^\circ$ 가 되면 정지하게 된다. Fig. 3~5에 나타난 거동들을 근거로 시간 약 0.4[s]가 되면 파지 동작이 완료된 것으로 사료된다. Fig. 6은 각 링크가 대상물을 파지하는 힘의 거동을 나타내고 있다. 파지력은 소프트 팁의 변형량의 함수로 정의하므로 초기 파지력은 영이 되고 링크의 파지 동작에 의하여 변형량이 변함에 따라 파지력은 변하고 진동의 형태로 나타나고 있다. 시간 약 0.15[s] 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 형

태로 나타나다가 약 0.15[s] 이후에는 적절한 값으로 수렴하고 있다.



(a) left



(b) right

Fig. 7 Control inputs

### 5. 결 론

본 논문에서는 다관절 손가락 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 손가락 로봇 끝단에는 변형 가능한 소프트 팁을 부착하여 물체와의 접촉을 면접촉이 되도록 하며 손가락 로봇과 물체와의 구속 조건을 고려하여 파지 운동방정식을 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 손가락

로봇의 안정적 파지를 위한 피드백 제어시스템을 구현하도록 하며, 모델 불확실성에 대한 강인성에 관한 연구가 계속 진행되어야 할 것으로 사료된다.

### 참고문헌

- [1] K. T. Park, S. S. Kim, S. Y. Yang, B. R. Lee and K. K. Ahn, "Research of Static Grasping for Handling Tasks in Field-Robot", ICASE, pp. 2895-2898, 2001.
- [2] R. S. Fearing, "Simplified grasping and manipulation with dexterous robot hand", IEEE Trans. Robot. Autom., pp. 188-195, 1986.
- [3] Y. Yokokohji, M. Sakamoto and T. Yoshikawa, "Vision aided object manipulation by a multifingered hand with soft fingertips", Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom., pp. 3201-3208, 1999.
- [4] T. Schlegl, M. Buss, T. Omata, G. Schmidt, "Fast dextrous re-grasping with optimal contact forces and contact sensor-based impedance control", Robot. Autom., Proceedings 2001 ICRA. IEEE Int. Conf. Vol. 1, pp. 103-108, 2001.
- [5] J. C. Trinkle, "A quasi-static analysis of dexterous manipulation sliding and rolling contact", Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom., Scotsdale, AZ, pp. 788-793, 1989.
- [6] N. Y. Chong, D. Choi and H. Suh, "A generalized motion/force planning strategy for multifingered hands using both rolling and sliding contacts", Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst., Yokohama, Japan, pp. 113-120, 1993.
- [7] A. B. A. Cole, J. E. Hauser and S.



S. Sastry, "Kinematics and control of multifingered hands with rolling contact", IEEE Trans. Autom. Control, Vol. 34, No. 4, pp. 398-404, 1989.

[8] E. Paljug, X. Yun and V. Kumar, "Control of rolling contacts in multi-arm manipulation", IEEE Trans. Robot. Autom., Vol. 10, No. 4, pp. 441-452, 1994.

[9] H. Kaswasaki, S. Ito and R. B. Ramli, "Adaptive decentralized coordinated control of multiple robot arms", Preprints IFAC Symp. Robot Control, pp. 461-466, 2003.

[10] 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.

[11] S. Arimoto, K. Tahara, M. Yamaguchi, P. T. Nguyen, H. Y. Han, "Principle of Superposition for Controlling Pinch Motions by Means of Robot Finger with Soft Tips", Robotica, Vol. 19, pp. 39-47, 2001.

[12] T. Naniwa, S. Arimoto, L. Whitcomb, "Learning control for robot tasks under geometric constraints", IEEE Trans. on Robot. Autom., Vol. 11, No. 3, pp. 432-441, 1995.

[13] P. Akella, M. Cutkosky, "Manipulating with soft fingers", Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom., Vol. 2, pp. 764-769, 1989.

[14] 심재군, 한현용, 양순용, 이병룡, 안경관, 김성수, "소프트-팁이 장착된 듀얼-핑거의 안정적인 파지 제어에 관한 연구", 한국공작기계학회 추계학술대회 논문집, pp. 219-224, 2002.

[15] C. C. Cheah, S. Kawamura, S.

Arimoto, "Feedback Control for Robotic Manipulator with Uncertain Kinematics and Dynamics", IEEE Int. Conf. Robot. Autom., pp. 3607- 3612, 1998.

[16] 엄혁, 최종환, 김승수, 한현용, 양순용, 이진걸, "듀얼-핑거의 안정적인 파지 운동 제어에 관한 연구", 한국공작기계학회논문집, Vol. 14, No. 4, pp. 81-88, 2005.

## 부 록

### 1. 좌측 핑거의 운동방정식

$$J_{01}^T \begin{bmatrix} \partial \Delta x_1 / \partial x_{01} \\ \partial \Delta x_1 / \partial y_{01} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_{01}}{\partial q_{11}} & \frac{\partial y_{01}}{\partial q_{11}} \\ \frac{\partial x_{01}}{\partial q_{12}} & \frac{\partial y_{01}}{\partial q_{12}} \\ \frac{\partial x_{01}}{\partial q_{13}} & \frac{\partial y_{01}}{\partial q_{13}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta x_1}{\partial x_{01}} \\ \frac{\partial \Delta x_1}{\partial y_{01}} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} l_{11} \sin(q_{11} - \theta) + l_{12} \sin(q_{11} + q_{12} - \theta) \\ \quad + l_{13} \sin(q_{11} + q_{12} + q_{13} - \theta) \\ l_{12} \sin(q_{11} + q_{12} - \theta) + l_{13} \sin(q_{11} + q_{12} + q_{13} - \theta) \\ \quad l_{13} \sin(q_{11} + q_{12} + q_{13} - \theta) \end{bmatrix}$$

$$J_{\phi_1}^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_1}{\partial q_{11}} \\ \frac{\partial \Phi_1}{\partial q_{12}} \\ \frac{\partial \Phi_1}{\partial q_{13}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial q_{11}} (Y_1 - Y_1') \\ \frac{\partial}{\partial q_{12}} (Y_1 - Y_1') \\ \frac{\partial}{\partial q_{13}} (Y_1 - Y_1') \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} l_{11} \cos(q_{11} - \theta) + l_{12} \cos(q_{11} + q_{12} - \theta) \\ \quad + l_{13} \cos(q_{11} + q_{12} + q_{13} - \theta) - r_1 \\ l_{12} \cos(q_{11} + q_{12} - \theta) + l_{13} \cos(q_{11} + q_{12} + q_{13} - \theta) - r_1 \\ \quad l_{13} \cos(q_{11} + q_{12} + q_{13} - \theta) - r_1 \end{bmatrix}$$

### 2. 우측 핑거의 운동방정식

$$J_{02}^T \begin{bmatrix} \partial \Delta x_2 / \partial x_{02} \\ \partial \Delta x_2 / \partial y_{02} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_{02}}{\partial q_{21}} & \frac{\partial y_{02}}{\partial q_{21}} \\ \frac{\partial x_{02}}{\partial q_{22}} & \frac{\partial y_{02}}{\partial q_{22}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta x_2}{\partial x_{02}} \\ \frac{\partial \Delta x_2}{\partial y_{02}} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} l_{21} \sin(q_{21} + \theta) + l_{22} \sin(q_{21} + q_{22} + \theta) \\ \quad l_{22} \sin(q_{21} + q_{22} + \theta) \end{bmatrix}$$

$$J_{\Phi_2}^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_2}{\partial q_{21}} \\ \frac{\partial \Phi_2}{\partial q_{22}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial q_{21}} (Y_2 - Y_2') \\ \frac{\partial}{\partial q_{22}} (Y_2 - Y_2') \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} l_{21} \cos(q_{21} + \theta) + l_{22} \cos(q_{21} + q_{22} + \theta) - r_2 \\ l_{22} \cos(q_{21} + q_{22} + \theta) - r_2 \end{bmatrix}$$

$$J_{z\Phi_1}^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_1}{\partial x} \\ \frac{\partial \Phi_1}{\partial y} \\ \frac{\partial \Phi_1}{\partial \theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin(\theta) \\ -\cos(\theta) \\ \Delta x_1 - \frac{l}{2} \end{bmatrix}$$

3. 대상물의 운동방정식

$$J_{\Delta x_1}^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta x_1}{\partial x} \\ \frac{\partial \Delta x_1}{\partial y} \\ \frac{\partial \Delta x_1}{\partial \theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos(\theta) \\ \sin(\theta) \\ -Y_1 \end{bmatrix}$$

$$J_{z\Phi_2}^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_2}{\partial x} \\ \frac{\partial \Phi_2}{\partial y} \\ \frac{\partial \Phi_2}{\partial \theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin(\theta) \\ -\cos(\theta) \\ -\Delta x_2 + \frac{l}{2} \end{bmatrix}$$

$$J_{\Delta x_2}^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta x_2}{\partial x} \\ \frac{\partial \Delta x_2}{\partial y} \\ \frac{\partial \Delta x_2}{\partial \theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ -\sin(\theta) \\ Y_2 \end{bmatrix}$$

저 자 소 개



**최종환 (崔鍾煥)**  
 1969년생, 1997년 부경대학교 정밀기계공학과 졸업, 1999년 부산대학교 대학원 지능기계공학과 졸업(공학석사), 2005년 부산대학교 대학원 지능기계공학과 졸업(공학박사), 현재 울산대학교 산학협력단 연구원