

## 소프트-팁이 장착된 듀얼-핑거의 안정적 파지 제어에 관한 연구 A Study on Stable Grasping Control of Dual-Fingers with Soft-Tips

심재균(울산대원), 한현용(춘해대 생체정보공학과), 양순용(울산대 기계·자동차공학부)  
이병룡(울산대 기계·자동차공학부), 안경관(울산대 기계·자동차공학부), 김성수(울산대 RRC)

### Abstract

This paper aims to derive a mathematical model of the dynamics of handling tasks in robot finger which stable grasping 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, 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. Thirdly, simulation results are shown and the effects of geometric constraints of area-contact is discussed. Finally, it is shown that even in the simplest case of dual single D.O.F manipulators there exists a sensory feedback from sensing data of the rotational angle of the object to command inputs to joint actuators and this feedback connection from sensing to action eventually realizes secure grasping of the object, provided that the object is of rectangular shape and motion is confined to a horizontal plane.

**Keywords** : Field-Robot, Stable Grasping, Robot-Finger, Soft Finger, Soft-Tips, Multi-Finger, Robot Hands, Manipulating, Contact Area, Dual Finger.

### 기호설명

- $z = (x, y, \theta)^T$ : position of the mass center of object
- $q_i = (q_{i1}, q_{i2})^T$ : joint angle of the finger
- $l_i = (l_{i1}, l_{i2})^T$ : lengths of the finger
- $I_i = (I_{i1}, I_{i2})^T$ : inertias of the finger
- $L$ : length of the connection origins of two finger
- $m$ : mass of the object
- $\Delta x_i$ : maximum length of displacement
- $r_i$ : radius of the finger-tip
- $\varphi_i$ : angle between the last link and X-axis of the object frame

### I. 서론

현재 생산 시스템의 자동화에 따라 로봇 작업의 적응성 및 유연성을 부여하기 위한 연구가 많이 진행되고 있다. 사람의 손은 어떠한 특수한 조건에서도 비교적 자유로운 일을 할 수 있지만 로봇의 손은 그렇지 못하다. 사람의 이런 본능적인 기술을 수치적인 운동방정식으로 나타내기 어려운 것이 문제이다. 이런 사람의 기술을 효율적으로 접근해나가 로봇의 제어를 찾아낸다면 로봇 핑거의 움직임을 사람의 손가락 움직임처럼 유연하게 할 수 있을 것이다.

생물학 문헌에도 대부분의 지능적인 부분으로 구성된 사람의 손은 어떠한 조건에서도 유기적으로 움직일 수 있다. 오늘날 로봇을 이용한 생산공정과 조립공정에서도 물체의 조건에 따라 사람의 손처럼 안정적으로 파지 할 수 있는 유연한 로봇 핑거의 파지동작이 요구되고 있다.

과거에는 로봇의 핑거(Finger) 끝단을 딱딱하게 둔 접촉으로 가정하였고 접촉을 할 때 일어나

는 접촉면의 위치 변화를 계산하지 않았거나 물체 표면에서 핑거 끝단의 롤링을 변화시켰다. 그러나 강성접촉은 건마찰과 슬립을 발생시킨다. 하지만 부드럽고 변형이 가능한 물질을 로봇-핑거의 끝단에 덮어씌워서 높은 마찰과 안정된 파지를 할 수 있다. 이것은 물체의 최종 좌표계가 서로 다른 면에 접촉한 두 개의 핑거가 유연하게 물체와 수직으로 접촉면을 움직일 수 있는 것이다. 본 논문에서는 물체의 양쪽 접촉면의 중심사이의 거리차이를 센서를 이용한 피드백을 통하여 조절함을 통해, 안정적으로 물체를 파지할 수 있는 변형 가능한 소프트-팁을 가진 1×1 관절의 듀얼-핑거를 제안하고자 한다.

## II. 본론

### 1. 핑거의 운동방정식

2개의 소프트-핑거를 가지는 로봇의 운동방정식은 수평방향으로 제한하고 중력의 영향을 받지 않는다고 가정한다. 양쪽 핑거의 끝단에는 변형 가능한 실리콘고무와 같은 재질로 반구의 형태로 있다고 가정하고 Fig.1에 대하여 기구학적인 해석과 운동방정식을 도출한다. ( $i=1$ 는 왼쪽손가락,  $i=2$ 는 오른쪽손가락)

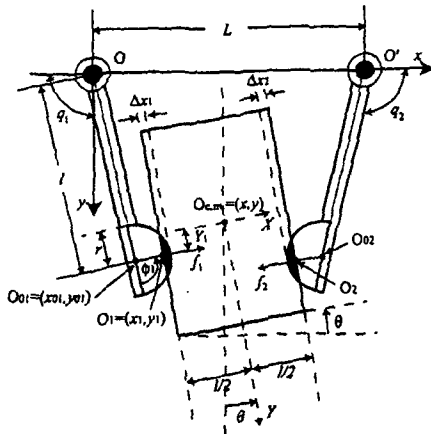


Fig.1 Dual single D.O.F fingers with soft-tips pinching a rigid object

Fig.1은 다음과 같은 상관관계를 만족한다.

$$q_1 + \varphi_1 = \pi + \theta \quad (1)$$

$$q_2 + \varphi_2 = \pi - \theta \quad (2)$$

우선은 각각 소프트-팁 부분을 제외한 로봇-핑

거의 끝점과 물체가 만나는 점을 좌표  $O_{01}=(x_{01}, y_{01}), O_{02}=(x_{02}, y_{02})$ 로 하고 각각의 조인트가 이루는 각도를  $q_1, q_2$ 로서 표현한다.

$$x_{01} = -l_1 \cos q_1 \quad (3)$$

$$y_{01} = l_1 \sin q_1 \quad (4)$$

$$x_{02} = L + l_2 \cos q_2 \quad (5)$$

$$y_{02} = l_2 \sin q_2 \quad (6)$$

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

$$x_1 = x_{01} - (r_1 - \Delta x_1) \cos(q_1 + \varphi_1) \quad (7)$$

$$y_1 = y_{01} - (r_1 - \Delta x_1) \sin(q_1 + \varphi_1) \quad (8)$$

$$x_2 = x_{02} - (r_2 - \Delta x_2) \cos(q_2 + \varphi_2) \quad (9)$$

$$y_2 = y_{02} - (r_2 - \Delta x_2) \sin(q_2 + \varphi_2) \quad (10)$$

물체의 중심을  $x, y$ 라고 하면 윗식의 상관관계는 식(11)(12)와 같다.

$$x = x_1 + \frac{l}{2} \cos \theta - Y_1 \sin \theta \quad (11)$$

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

$$y = y_1 - \frac{l}{2} \sin \theta - Y_1 \cos \theta \quad (12)$$

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

$Y_1, Y_2$ 는 다음의 상관관계를 이용해 계산할 수 있다.

$$Y_1 = (x_{01} - x) \sin \theta + (y_{01} - y) \cos \theta \quad (13)$$

$$Y_2 = (x_{02} - x) \sin \theta + (y_{02} - y) \cos \theta \quad (14)$$

실제 실험에서는 위의 상관관계에 의해  $Y_1, Y_2$ 를 실시간으로 계산이 가능하다.

Fig.2는 소프트-팁이 직각으로 물체와 접촉했을 때와 각  $\varphi$ 을 이루고 접촉했을 때 물체중심과의 거리가 변한다는 것을 보여준다. 물체를 꼭 잡았을 때는 다음과 같은 상관관계를 가지고 있다.

$$\phi_1 = Y_1 - c_1 + r_1 \varphi_1 = 0 \quad (15)$$

$$\phi_2 = Y_2 - c_2 + r_2 \varphi_2 = 0 \quad (16)$$

여기서  $c_1, c_2$ 는 상수이다.

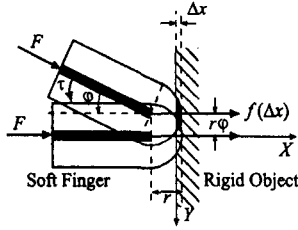


Fig. 2 The center of contact area moves on the object surface

시스템의 운동에너지를  $K$ 로 표현하면 식(17)처럼 표현된다.

$$K = \frac{1}{2} \{ I_1 \dot{q}_1^2 + I_2 \dot{q}_2^2 + M \dot{x}^2 + M \dot{y}^2 + I \dot{\theta}^2 \} \quad (17)$$

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

포텐셜에너지  $P$ 를 표현하면 식(18)와 같다.

$$P = \sum_{i=1,2} \int_0^{\Delta x_i} f_i(\xi) d\xi \quad (18)$$

여기에 Lagrange의 원리를 적용하여 양쪽 핑거의 운동모델을 세우면 식(19)와 같이 된다.

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i' + \sum_{j=1}^m \lambda_j a_{ij} \quad (19)$$

$$\sum_{i=1}^m a_{ij} dq_i + a_{tj} dt = 0 \quad (20)$$

여기서,  $L = K - P$

이상으로 식(19),(20)을 풀이하여 아래와 같은 운동방정식을 구하였다.

$$I_1 \ddot{q}_1 + f_1 l_1 (\sin q_1 \cos \theta - \cos q_1 \sin \theta) + \lambda_1 \quad (21)$$

$$\{ r_1 - l_1 (\sin q_1 \sin \theta + \cos q_1 \cos \theta) \} = u_1$$

$$I_2 \ddot{q}_2 + f_2 l_2 (\sin q_2 \cos \theta + \cos q_2 \sin \theta) + \lambda_2 \quad (22)$$

$$\{ r_2 + l_2 (\sin q_2 \sin \theta - \cos q_2 \cos \theta) \} = u_2$$

$$M \ddot{x} - (f_1 - f_2) \cos \theta + (\lambda_1 + \lambda_2) \sin \theta = 0 \quad (23)$$

$$M \ddot{y} + (f_1 - f_2) \sin \theta + (\lambda_1 + \lambda_2) \cos \theta = 0 \quad (24)$$

$$I \ddot{\theta} - f_1 Y_1 + f_2 Y_2 - \lambda_1 \Delta x_1 + \lambda_2 \Delta x_2 = -\frac{1}{2} (\lambda_1 - \lambda_2) \quad (25)$$

위의 식에서의 식(21),(22)은 핑거의 운동에 관

한 방정식이고 식(23),(24),(25)는 물체의 움직임에 대한 운동방정식을 표현한다.

## 2. 핑거 및 물체의 제어

핑거의 파지를 위한 목표힘을  $f_d$ 라 하고 목표각을  $\theta_d$ 라 한다.  $q_1, q_2$ 는 실제 실험에서는 센서로서 측정하지만 시뮬레이션을 위해  $q_1, q_2, \dot{q}_1, \dot{q}_2$ 는 수치적으로 계산한다.

$$Y_1 - Y_2 = (x_{01} - x_{02}) \sin \theta + (y_{01} - y_{02}) \cos \theta \quad (26)$$

$Y_1, Y_2, x, y, \theta$ 는 알면 다음의 식(27),(28)를 계산할 수 있다. 제어 입력값은 모터에 인가되는 토크값으로 하여 (27),(28)를 쓴다.

$$u_1 = -k_{v1} \dot{q}_1 + f_d \left\{ \frac{\partial \Delta x_1}{\partial q_1} + \frac{r_1}{r_1 + r_2} (Y_1 - Y_2) \right\} + \Delta u_1 \quad (27)$$

$$u_2 = -k_{v2} \dot{q}_2 - f_d \left\{ \frac{\partial \Delta x_2}{\partial q_2} + \frac{r_2}{r_1 + r_2} (Y_1 - Y_2) \right\} + \Delta u_2 \quad (28)$$

여기서,

$$\Delta u_1 = -\zeta \left\{ \frac{r_1}{r_1 + r_2} (\dot{Y}_1 - \dot{Y}_2) - \frac{\partial \Phi_1}{\partial q_1} \left( \frac{\dot{Y}_1 - \dot{Y}_2}{l - \Delta x_1 - \Delta x_2} \right) \right\}$$

$$\Delta u_2 = \zeta \left\{ \frac{r_1}{r_1 + r_2} (\dot{Y}_1 - \dot{Y}_2) - \frac{\partial \Phi_2}{\partial q_2} \left( \frac{\dot{Y}_1 - \dot{Y}_2}{l - \Delta x_1 - \Delta x_2} \right) \right\}$$

$k_{v1} \dot{q}_1$ 은 미분제어항으로 핑거의 회전각속도에 비례하는 제어입력항으로 오버슈트(overshoot)를 줄이고 빠르게 수렴하게 한다.

$f_d \left\{ \frac{\partial \Delta x_i}{\partial q_i} \right\}$ 항은 물체를 접촉력  $f_d$ 로 잡기 위해서 필요한 토크를 발생시키는 항으로써 접촉력  $f_d$ 에 자코비안을 곱한다. 이것은 물체를 접촉력  $f_d$ 로 잡기 위한 토크를 발생시킨다.

$f_d \left\{ \frac{r_1}{r_1 + r_2} (Y_1 - Y_2) \right\}$ 항은 모멘트 비례제어항으로 접촉력  $f_d$ 에 의하여 물체에 작용하는 모멘트에 비례하는 제어입력을 가함으로써 물체에 작용하는 모멘트가 0 (zero)으로 수렴하도록 한다.

$\Delta u_1, \Delta u_2$ 는  $Y_1$  과  $Y_2$  값에 대한 속도제어 입력값으로 미분에 대한 입력항으로 속도에 대한 계인값을 곱해서 표현한다.

물체의 움직임을 가상으로 나타내기 위하여 다음과 같이 물체의 움직임을 표현하였다.

$$\phi_i'' + \gamma_i \phi_i' + \omega_i \phi_i = 0 \quad (29)$$

여기서  $\gamma_i$ 와  $\omega_i$ 는 각각 상수로서 물체의 점성 감쇠항과 스프링상수항을 나타낸다.

$$J_{\phi_1} \ddot{q}_1 + J_{z\phi_1} \ddot{z} + (J_{\phi_1} + \gamma_1 J_{\phi_1}) \dot{q}_1 \quad (30)$$

$$+ (J_{z\phi_1} + \gamma_1 J_{z\phi_1}) \dot{z} + \omega_1 \phi_1 = 0$$

$$J_{\phi_2} \ddot{q}_2 + J_{z\phi_2} \ddot{z} + (J_{\phi_2} + \gamma_2 J_{\phi_2}) \dot{q}_2 \quad (31)$$

$$+ (J_{z\phi_2} + \gamma_2 J_{z\phi_2}) \dot{z} + \omega_2 \phi_2 = 0$$

식(30),(31)을 이용하여 물체의 움직임 즉,  $\dot{z}$ 를 계산하였다.

### 3. 시뮬레이션

물체와 로봇의 기본적인 변수들은 표1.의 값을 사용하였다. 시뮬레이션은 Matlab의 M파일과 Simulink를 사용하여 Runge-Kutta Method 로 4 초 동안 수행하였다.

Table 1. Simulation parameter

시간[sec]	Sampling time[ms]	$l_1(m)$	$l_2(m)$	$r_i(m)$
4	0.5	0.07	0.07	0.01
$L(m)$	Object[m]	$\gamma_i$	$\omega_i$	$f_d[N]$
0.078	0.05×0.03	5000	6250000	1.0
$\theta_{init}[deg]$	$q_1[deg]$	$q_2[deg]$	$Y_1[mm]$	$Y_2[mm]$
12.0	102.0	-100	7.99	19.096

로봇과 물체의 구동을 알아보기 위하여 물체의 중심과의 거리차이인  $Y_1 - Y_2$ 를 알아보았고 또한 물체의 각도 변화를 그래프로 표현해보았다.

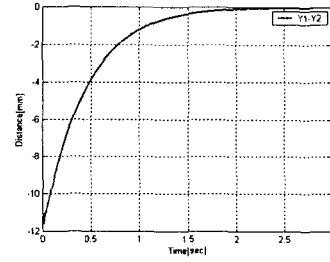


Fig. 3  $Y_1 - Y_2$  at  $\zeta=0.3$

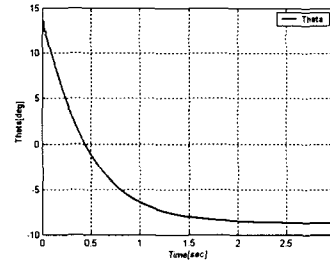


Fig. 4  $\theta$  at  $\zeta=0.3$

$\zeta=0.3$  에서 물체의 각  $\theta$ 가 안정화되는 시간은 느려지지만,  $Y_1 - Y_2$ 의 오버슈트가 사라졌지만 0으로 수렴되는 시간이 늘어나는 것을 알 수 있다.

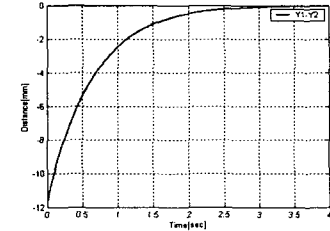


Fig. 5  $Y_1 - Y_2$  at  $\zeta=0.5$

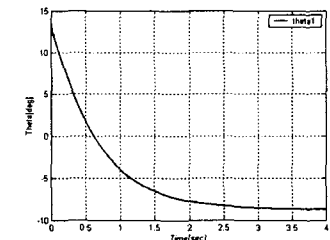


Fig. 6  $\theta$  at  $\zeta=0.5$

$\zeta=0.5$ 에서 물체의 각  $\theta$ 가 안정화되는 시간이 많이 느려졌으며,  $Y_1 - Y_2$ 가 0으로 수렴하는 시간도 길어졌다.

시뮬레이션 결과에서 알 수 있듯이 제어에 대한 입력값에서  $\zeta$ 값의 변화에 대하여 제어되는 시간의 변화만 나타날 뿐 안정적으로 제어가 되는 것에는 변화가 없었다.

하지만  $\zeta, Y_1 - Y_2$ 와 Force는 반비례 관계에 있는 것을 알 수 있다.  $\zeta, Y_1 - Y_2$ 가 빨리 수렴하면 Force는 초기에 불안정 하지만  $\zeta, Y_1 - Y_2$ 가 수렴하는 속도가 느려질수록 Force는 빠른 시간에 안정되는 것이다.

그러므로 실제의 실험에 있어서  $\zeta$ 의 값을 무시하고 앞의 제어 입력식으로도 만족할 수 있는 결과를 얻을 수 있음을 알았다.

### III. 실험 결과 및 고찰

#### 1. 실험장치의 구성

먼저 잡고자하는 대상의 물체의 각도의 변화를 알기 위해 레이저 변위센서 2개로 구성을 하였으며 모터는 MAXON사의 S2332 DC모터를 사용하였다.

모터를 구동하기 위한 인터페이스는 레이저 변위센서의 입력과 모터드라이버에 PWM 신호를 주기 위해 DSP 보드인 DS1102 보드를 사용하였다. 그리고 DS1102에서 나오는 PWM 제어신호를 받아 모터입력전류 및 전압을 주기 위해 LMD18200 Linear Amp 소자를 사용하여 시스템을 사용하였다. 실험 초기값 셋팅은  $q_1=90.5, q_2=110.2, \theta=0.255$ 이다.

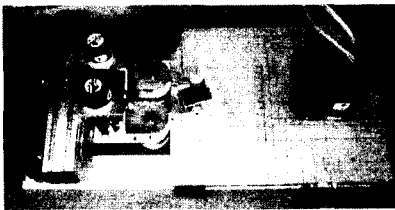


Fig. 7 Experimental setup

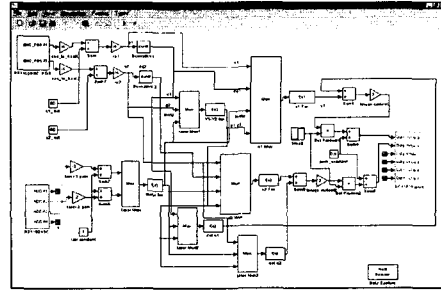


Fig. 8 Control program

#### 2. 실험결과

모든 실험에서 시작 시간이 틀린 것은 프로그램을 실행 후 시간은 시작되지만 측정모드로 변환하는 시간이 조금씩 틀리기 때문에 첫 움직임 시간은 무의미하다.

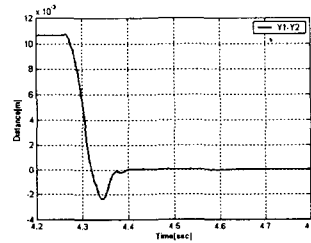


Fig. 9  $Y_1 - Y_2$  at  $q_1=90.5, q_2=110.2, \theta=0.255$

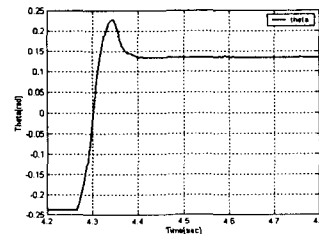


Fig. 10  $\theta$  at  $q_1=90.5, q_2=110.2, \theta=0.255$

Fig. 9,10은  $q_1=90.5, q_2=110.2, \theta=0.255$  일 때 평거의 접촉점과 중심과의 거리차와 물체의 각도 변화를 그래프로 나타낸 것이다. 최초의 거리차가 약 8mm에서 약 0.2초 이후에 1mm이하로 수렴되는 것을 알 수 있다.

## VI. 결론

본 논문에서는 처음에 물체와 일반화된  $1 \times 1$  자유도 로봇의 소프트-핑거 사이에 시스템을 Lagrange Equation으로서 운동방정식을 유도하였고, 다음에는 처음에 구한 운동방정식을 토대로 하여 피드백 컨트롤을 설계하여  $1 \times 1$  자유도 로봇물체를 잡았을 때의 시스템에 대하여 시뮬레이션을 하여 해석을 해보았고, 마지막으로  $1 \times 1$  자유도 로봇을 제작하여 실험을 통하여 이론의 타당성을 검증하였다.

시뮬레이션 결과는 Fig. 3~6에서 볼 수 있듯이 약 1초 후에 안정된 성능을 보였다. 제어의 입력값 ( $u_i$ )은 모터에 들어가는 전류값으로 환산을 하여 가상의 모터에 입력을 하여 계산을 한 결과가  $\zeta$ 의 값은 0에 가까울수록  $Y_1 - Y_2$ 는 빨리 수렴하지만 Force가 많이 진동하는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 실제 시스템을 구성한다면 모터에서 나오는 출력의 손실을 감안한다면  $\zeta=0$ 으로 값을 주어도 된다는 것을 알았다.

또한 시뮬레이션 결과에서 보듯이 운동방정식이 틀리지 않았음을 알 수가 있다. 그러나 모델링을 할 때 수평방향을 제한하였기 때문에 실제와는 차이를 보일 수 있다.

실험에서는  $1 \times 1$  자유도의 실질적인 듀얼 소프트-핑거를 제작함으로써 시뮬레이션 결과와 일치하는 것을 증명하였다. 하지만 물체의 바닥과의 마찰관계로 시뮬레이션에서는 약간의 진동을 하였지만 실제에는  $Y_1 - Y_2$ 가 거의 진동이 없이 0에 수렴하는 것을 알 수 있었다.

차후에는  $2 \times 2$  자유도 이상의 소프트-핑거를 제작하여 보다 다양한 파지 동작을 수행할 수 있도록 해야 될 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 Robotica and Automation,

pp.3201~3207, 1999

- [3] P.Akella, M.Cutkosky, "Manipulating with soft fingers", proc. IEEE Int. Conf On Robotica 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 contol for robot tasks under geometric comstriants IEEE Trans. on Robotica and Automation, vol.11, no.3, pp.432~441, 1995
- [6] C.C.Cheah, S.Kawamura, S.Arimoto "Feedback Control for Robotic Manipulator with Uncertain Kinematics and Dynamics" IEEE International Conference on Robotics & Automation, May, 360 7~3612
- [7] 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"
- [8] 박경택, 양순용, 부드러운 촉각을 가진 핑거의 운동과 제어에 관한 연구, 제어자동화시스템공학회학회, 부산경남울산지부, pp.166~170, 2000
- [9] Park,K.T, Kim,S.S, Yang,S.Y, Lee,B.R, Ahn,K.K, Research of Static Grasping for Handling Tasks in Field-Robot,"ICASE,2001.10.17~21, pp.2895-2898
- [10] 박경택,심재균,한현용,양순용,이병룡,안경관, "Field-Robot의 안정적 파지운동 제어에 관한 연구,"한국정밀공학회 추계학술대회, 2001.10. 26 ~27, pp.492-495
- [11] 有本 卓,ロボットの力學と制御,"朝倉書店,1992