

## 기계 부품의 조립분해 작업을 위한 로봇핸드 그리퍼 설계 및 견실제어에 관한 연구

### A Study on Robot Hand Gripper Design and Robust Control for Assembly and Disassembly Task of Machine Parts

정규현<sup>1\*</sup>, 신기수<sup>2</sup>, 노연국<sup>3</sup>, 문병갑<sup>4</sup>, 윤병석<sup>5</sup>, 배호영<sup>6</sup>, 김민성<sup>7</sup>, 한성현<sup>8</sup>

Gyu-Hyun Jeong<sup>1\*</sup>, Gi-Su Shin<sup>2</sup>, Yeon-Guk Noh<sup>3</sup>, Byeong-Gap Moon<sup>4</sup>,  
Byeong-Seok Yoon<sup>5</sup>, Ho-Young Bae<sup>6</sup>, Min-Seong Kim<sup>7</sup>, Sung-Hyun Han<sup>8</sup>

#### 〈Abstract〉

This study proposes a new technique to design and control of robot hand gripper for assembling and disassembling of a machine parts. The motion equation describing dynamics of the manipulators and object together with geometric constraint is formulated by Lagrange-Euler's equation. And the problems of controlling both the grasping force and the rotation angle of the grasped object under the constraints are analyzed. The effect of geometric constraints and a method of computer simulation for overall system is verified. Finally, it is illustrated that even in case of there exists a sensory feedback from sensing data of the rotational angle of the object to command inputs control of joint and this feedback connection from sensing data to control grasping of machinery parts.

*Keywords : Robot Hand, Robust Control, Gripper Design and Control, Assembly and Disassembly, Machine Parts*

---

1\* 정회원, 교신저자, (주)세영산업 대표  
E-mail: sysky25@naver.com

2 (주)에니토이 대표

3 에스에프엔티(주) 대표

4 (주)광진정밀 대표

5 (주)동명정기 대표

6 브이맥 대표

7 경남대학교 대학원 첨단공학과 석사과정

8 경남대학교 기계공학부 교수

1\* Corresponding Author, SE YOUNG INDUSTRY Co., Ltd.

2 ANYTOY Co., Ltd.

3 SFNT Co., Ltd.

4 KWANGJIN PRECISION Co., Ltd.

5 DONGMYONGJEONGGI Co., Ltd.

6 V-MAC

7 M.S. Course, Graduate School Kyungnam University.

8 Dept. of Mechanical Engineering, Kyungnam University.

## 1. 서론

현재 생산 시스템의 자동화에 따라 로봇작업의 적응성 및 유연성을 부여하기 위한 연구가 많이 진행되고 있다. 사람의 손은 어떠한 특수한 조건에서 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.[1]

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.[2]

과거에는 로봇의 핑거(Finger) 끝단을 딱딱하게 된 접촉으로 가정하였고 접촉을 할 때 일어나는 접촉면의 위치 변화를 계산하지 않았거나 물체 표면에서 핑거 끝단의 롤링을 면화시켰다.[3] 그러나 강성 접촉은 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.[4] 본 논문에서는 물체의 양쪽 접촉면의 중심사이의 거리를 조절함을 통해, 안정적으로 물체를 파지할 수 있는 변형 가능한 그리퍼 끝단을 가진 2x2 관절의 그리퍼의 설계 및 제어를 수행한다.

## 2. 본론

### 2.1 그리퍼의 운동방정식

2개의 그리퍼 끝단을 가지는 로봇의 운동방정식은 수평방향으로 제한하고 중력의 영향을 받지 않는다고 가정한다. 양쪽 그리퍼의 끝단에는 변형 가능한 유연한 재질로 가정하고 Fig. 1에 대하여 기구학적인 해석과 운동방정식을 도출한다. (i=1는 왼쪽손가락, i=2는 오른쪽 손가락)

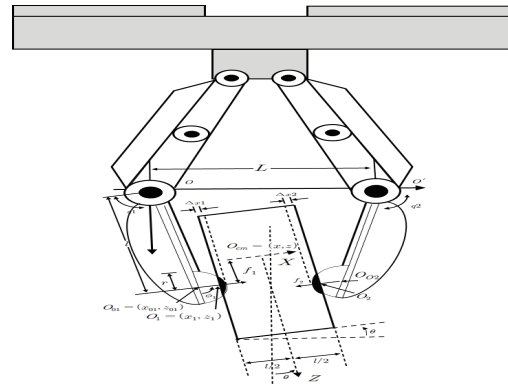


Fig. 1 Two-Jaw fingers with end-tip pinching a rigid object

Fig. 1은 다음과 같은 상관관계를 만족한다.

$$q_1 + \phi_1 = 180^\circ + \theta \quad (1)$$

$$q_2 + \phi_2 = 180^\circ - \theta \quad (2)$$

우선은 각각 그리퍼 끝단 부분을 제외한 로봇-그리퍼의 끝점과 물체가 만나는 점을 좌표  $O_{01} = (x_{01}, z_{01}), O_{02} = (x_{02}, z_{02})$ 로 하고 각각의 조인트가 이루는 각도를  $q_1, q_2$ 로서 표현한다.[5]

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

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

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

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

그리퍼 끝단과 물체가 만나는 점  $O_i = (x_i, z_i)$ 를 기하학적 형상에 의해 계산하면 다음과 같이 표현된다.[6]

$$x_1 = x_{01} - (\gamma_1 - \Delta x_1) \cos(q_1 + \phi_1) \quad (7)$$

$$z_1 = z_{01} - (\gamma_1 - \Delta x_1) \sin(q_1 + \phi_1) \quad (8)$$

$$x_2 = x_{02} - (r_2 - \Delta x_2) \cos(q_2 + \phi_2) \quad (9)$$

$$z_2 = z_{02} - (r_2 - \Delta x_2) \sin(q_2 + \phi_2) \quad (10)$$

물체의 중심을  $x, z$ 라고 하면 위 식의 상관관계는 식(11), (12)와 같다.

$$\begin{aligned} x &= x_1 + \frac{l}{2} \cos \theta - Y_1 \sin \theta \\ &= x_2 - \frac{l}{2} \cos \theta - Y_2 \sin \theta \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} z &= z_1 + \frac{l}{2} \sin \theta - Z_1 \cos \theta \\ &= z_2 - \frac{l}{2} \sin \theta - Z_2 \cos \theta \end{aligned} \quad (12)$$

$Z_1, Z_2$ 는 다음의 상관관계를 이용해 계산할 수 있다.

$$Z_1 = (x_{01} - x) \sin \theta + (z_{01} - z) \cos \theta \quad (13)$$

$$Z_2 = (x_{02} - x) \sin \theta + (z_{02} - z) \cos \theta \quad (14)$$

실제실험에서는 위의 상관관계에 의해  $Z_1, Z_2$ 를 실시간으로 계산이 가능하다.

Fig. 2는 그리퍼 끝단이 직각으로 물체와 접촉했을 때와 각  $\phi$ 을 이루고 접촉했을 때 물체중심과의 거리가 변한다는 것을 보여준다. 물체를 꼭 잡았을 때는 다음과 같은 상관관계를 가지고 있다.[7]

$$\phi_1 = Z_1 - c_1 + r_1 \phi_1 = 0 \quad (15)$$

$$\phi_2 = Z_2 - c_2 + r_2 \phi_2 = 0 \quad (16)$$

여기서  $c_1, c_2$ 는 상수이다.

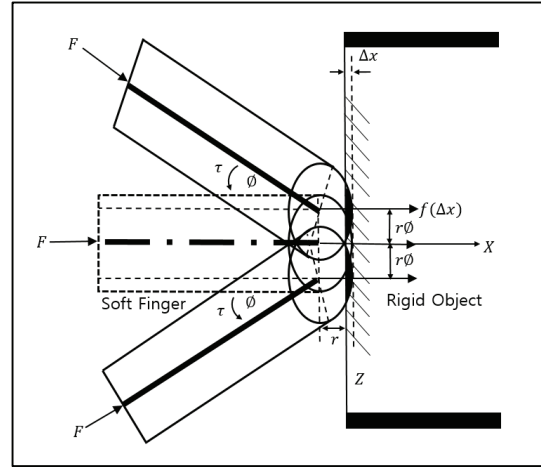


Fig. 2 The center of contact area moves on the object surface

시스템의 운동에너지를  $K$ 로 표현하면 식(17)~(25)같이 유도된다.[8]

$$K = \frac{1}{2} \{ I_1 \dot{q}_1^2 + I_2 \dot{q}_2^2 + M \dot{x}^2 + M \dot{z}^2 + \text{heta}^2 \} \quad (17)$$

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

포텐셜에너지  $P$ 를 표현하면 식(18)와 같다.

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

여기서 Lagrange-Euler의 원리를 적용하여 양쪽 그리퍼의 운동방정식을 유도하면 식(19)와 같이 된다.

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

$$\sum_{i=1}^n a_{ij} \dot{q}_i + a_{ij} dt = 0 \quad (20)$$

여기서, L=K-P  
 이상으로 식(19),(20)을 풀이하여 아래와 같은 운동방정식을 구하였다.

$$I_1 \ddot{q}_1 + f_1 l_1 (\sin q_1 \cos \theta - \cos q_1 \sin \theta) + \lambda_1 \{r_1 - l_1 (\sin q_1 \cos \theta + \cos q_2 \sin \theta)\} = T_1 \quad (21)$$

$$I_2 \ddot{q}_2 + f_2 l_2 (\sin q_2 \cos \theta - \cos q_2 \sin \theta) + \lambda_2 \{r_2 - l_2 (\sin q_2 \cos \theta + \cos q_2 \sin \theta)\} = T_2 \quad (22)$$

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

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

$$I \ddot{\theta} - f_1 Z_1 + f_2 Z_2 - \lambda_1 \Delta x_1 + \lambda_2 \Delta x_2 = -\frac{l}{2} (\lambda_1 - \lambda_2) \quad (25)$$

위의 식에서 식(21),(22)은 그리퍼의 운동에 관한 방정식이고 식(23),(24),(25)는 물체의 움직임에 대한 운동방정식을 표현한다.

## 2.2 핸드 그리퍼 및 제어

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

$$G_{12} = (x_{01} - x_{02}) \sin \theta + (z_{01} - z_{02}) \cos \theta \quad (26)$$

위의 식에서  $x, z, \theta$  및  $G_{12}(Z_1 - Z_2)$ 의 정보를 얻을 수 있으면 토크식을 계산할 수 있다. 제어 입력값은 모터에 인가되는 토크 값으로 식

(27),(28)과 같이 정의된다.

$$T_1 = -k_{v1} \dot{q}_1 + f_d \left\{ \frac{\partial \Delta x_1}{\partial q_1} + \frac{\gamma_1}{\gamma_1 + \gamma_2} (Z_1 - Z_2) \right\} + \Delta T_1 \quad (27)$$

$$T_2 = -k_{v2} \dot{q}_2 + f_d \left\{ \frac{\partial \Delta x_2}{\partial q_2} + \frac{\gamma_2}{\gamma_1 + \gamma_2} (Z_1 - Z_2) \right\} + \Delta T_2 \quad (28)$$

여기서,

$$\Delta T_1 = -\zeta \left\{ \frac{r_1}{r_1 + r_2} (\dot{Z}_1 - \dot{Z}_2) - \frac{\partial \phi_1}{\partial q_1} \left( \frac{\dot{Z}_1 - \dot{Z}_2}{l - \Delta x_1 - \Delta x_2} \right) \right\}$$

$$\Delta T_2 = -\zeta \left\{ \frac{r_2}{r_1 + r_2} (\dot{Z}_1 - \dot{Z}_2) - \frac{\partial \phi_2}{\partial q_2} \left( \frac{\dot{Z}_1 - \dot{Z}_2}{l - \Delta x_1 - \Delta x_2} \right) \right\}$$

$k_{v1} \dot{q}_1$ 은 미분제어항으로 그리퍼의 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 항을 나타낸다.

그리고  $f_d \left( \frac{r_1}{r_1 + r_2} (Z_1 - Z_2) \right)$ 항은 모멘트 비례제어의 항을 나타내고,  $\Delta T_1, \Delta T_2$ 는  $Z_1$ 과  $Z_2$ 값에 대한 속도제어 입력값으로 미분에 대한 입력항을 나타낸다.

## 2.3 모의실험

물체와 로봇의 기본적인 변수들은 표1.의 값을 사용하였다. 시뮬레이션은 Matlab을 사용하여 댐핑비(Damping ratio; DR)의 변화에 대하여 8초 동안 수행하였다.

DR=0.5에서 물체의 각  $\theta$ 가 안정화되는 시간은 느려지지만,  $G_{12}$ 의 오버슈트가 사라졌지만 0으로 수렴되는 시간이 늘어나는 것을 알 수 있다.

DR=0.6에서 물체의 각  $\theta$ 가 안정화되는 시간이 많이 느려졌으며,  $G_{12}$ 가 0으로 수렴하는 시간

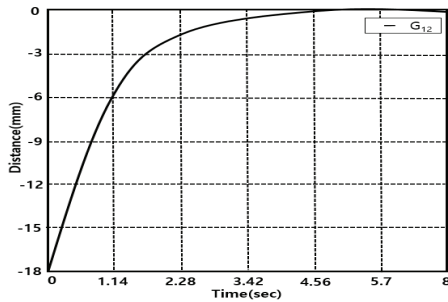


Fig. 3  $G_{12}$  at  $DR=0.5$

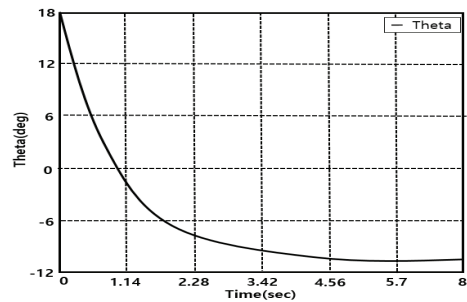


Fig. 4  $\theta$  at  $DR=0.5$

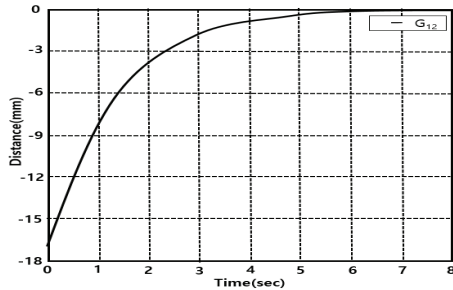


Fig. 5  $G_{12}$  at  $DR=0.6$

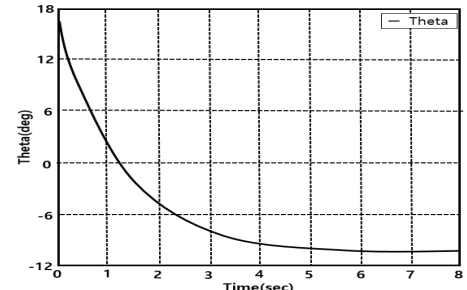


Fig. 6  $\theta$  at  $DR=0.6$

도 길어졌다.

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

하지만  $DR, G_{12}$ 와 Force는 반비례 관계에 있는 것을 알 수 있다.  $DR, G_{12}$ 가 빨리 수렴하면 Force는 초기에 불안정하지만  $DR, G_{12}$ 가 수렴하는 속도가 느려질수록 Force는 빠른 시간에 안정되는 것이다.

그러므로 실제의 실험에 있어서  $DR$ 의 값을 무시하고 앞의 제어 입력식으로도 만족할 수 있는

결과를 얻을 수 있음을 알았다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 실험장치의 구성

먼저 잡고자하는 대상의 물체의 각도의 변화를 알기 위해 변위센서 2개로 구성을 하였다.

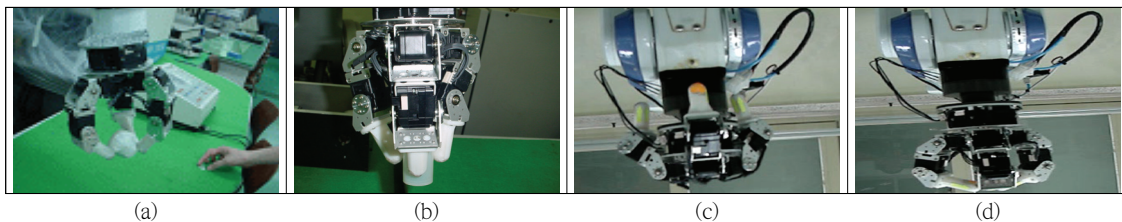


Fig. 7 Experimental setup

모터를 구동하기 위한 인터페이스는 레이저 변위센서의 입력과 모터드라이버에 PWM 신호를 주기위해 TMS230C32 보드를 사용하였다. 그리고 PWM 제어 신호를 받아 모터입력전류 및 전압을 주기위해 리니어 앰프 소자를 사용하여 시스템을 사용하였다. 실험 초기값 셋팅은  $q_1 = 85$ ,  $q_2 = 98.5$ ,  $\theta = 0.256$ 이다.

### 3.2 실험결과

아래의 그림은 핸드 그리퍼의 성능실험을 통한 실험결과를 나타내고 있다. Fig. 8, 9는  $q_1 = 85$ ,  $q_2 = 98.5$ ,  $\theta = 0.256$  일 때 그리퍼가 물

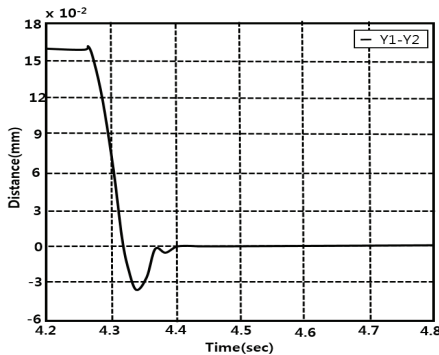


Fig. 8  $G_{12}$  at  $q_1 = 85$ ,  $q_2 = 98.5$ ,  $\theta = 0.256$

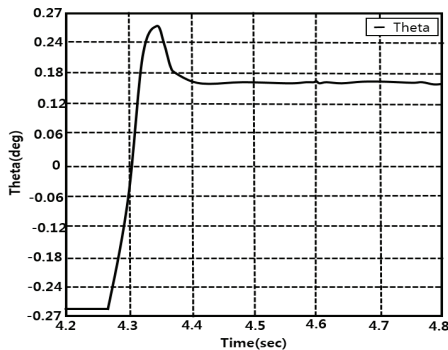


Fig. 9  $\theta$  at  $q_1 = 85$ ,  $q_2 = 98.5$ ,  $\theta = 0.256$

체를 잡는 위치 포인트 및 물체의 중심센터와의 거리와 물체의 방향 변화를 그래프로 나타낸 것이다. 최초의 거리차가 약 8mm에서 약 0.2초 이후에 1mm이하로 수렴되는 것을 알 수 있다.

### 4. 결론

본 논문에서는 처음에 물체와 일반화된 로봇의 핸드 그리퍼 끝단 사이에 시스템을 라그랑지-오일러 공식을 이용하여 동력방정식을 유도하였고, 다음에는 처음에 수한 운동방정식을 토대로 하여 피드백 컨트롤을 설계하여 2x2자유도 로봇물체를 잡았을 때의 시스템에 대하여 시뮬레이션을 수행하며 그 특성을 분석하였다. 그리고 2x2자유도 핸드 그리퍼를 제작하여 실험을 통하여 이론의 타당성을 검증하였다.

모의실험 결과 약 0.5초 후에 안정된 성능을 보였다. 제어의 입력값은 모터에 들어가는 전류값으로 환산을 하여 가상의 모터에 입력을 하여 제한을 한 결과가 댐핑비(Damping ratio)가 0에 가까울수록 빨리 수렴하지만 진동이 많아지는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 실제 시스템을 구성한다면 모터에서 나오는 출력의 손실을 감안한다면 감쇠비가 매우 적어도 된다는 것을 알았다.

또한 시뮬레이션 결과에서 보듯이 운동방정식이 틀리지 않았음을 알 수가 있다. 실험에서는 3x3자유도의 실질적인 듀얼 그리퍼를 제작하며 실험을 통하여 시뮬레이션 결과와 일치하는 것을 증명하였다.

차후에는 3x3자유도 이상의 이암 핸드를 제작하여 물건에 대한 핸들링작업이 가능할 수 있는 할 수 있도록 성능개선 위한 연구가 지속되어야 한다.

## 참고문헌

- [1] Mason T., Salisbury J.K, “Robot gands 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.Cutkoshky, “Manipulating with soft fingers”, proc. IEEE Int. Conf On Robotica and Automarion, 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.Naviwa, S.arimoto, Louis L.Whitcomb “Learning 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 Tobotic Manipulator with Uncertain Kinematics and Dynamics” IEEE International Conference on Robotica & Automation, May, 3607~3612.
- [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, 제어자동화시스템공학 회학술회의, 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, pp.2895-2898, (2001).
- [10] 박경택, 심재균, 한현용, 양순용, 이병룡, 안경관, “Field-Robot의 안정적 파지운동 제어에 관한 연구”, 한국정밀공학회 추계학술대회, pp.492-495, (2001).

(접수: 2017.07.31. 수정: 2017.08.15. 게재확정: 2017.09.01.)