

## Field-Robot 의 안정적 파지운동 제어에 관한 연구

박경택\*, 심재군(울산대 대학원 자동차공학과), 한현용(춘해대학 생체정보과), 양순용, 이병룡, 안경관(울산대 기계자동차공학부), 김승수(울산대학교 RRC)

### Research of Stable Grasping in Field Robot

K. T. Park, J.K.Sim(Automotive Eng. Dept. UOU), H. Y. Han(Biomedical Info. Dept. COC ), S.Y.Yang, B.R.Lee, K.K.Ahn(Mechanical & Automotive Dept. UOU), S.S.Kim(RRC.UOU)

#### ABSTRACT

This paper aims to derive a mathematical model of the dynamics of handling tasks in field robot 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 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 contact-area are 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

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

#### 1. 서론

현재 필드-로봇(Field-Robot) 및 생산 시스템의 자동화에 따라 로봇 작업의 적응성 및 유연성을 부여하기 위한 연구가 많이 진행되고 있다. 그러나 사람의 손은 어떠한 특수한 조건에서도 비교적 자유로운 일을 할 수 있지만 로봇의 손은 그렇지 못하다. 이런 사람의 기술을 효율적으로 접근해나가 로봇의 제어를 찾아낸다면 로봇을 사람의 움직임처럼 유연하게 할 수 있을 것이다.

생물학 문헌에도 대부분의 지능적인 부분으로 구성된 사람의 손은 어떠한 조건에서도 유기적으로 움직임을 할 수 있다.<sup>[1]</sup>

과거 거의 모든 논문의 문제는 로봇의 핑거(Finger) 끝단을 딱딱하게 둔 접촉으로 가정하였고 접촉시 일어나는 접촉면의 위치 변화를 계산하지

않았거나 물체 표면에서 핑거 끝단의 롤링을 변화시켰다.<sup>[2][3]</sup> 그러나 강성접촉은 건마찰과 비정상적인 못한 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 쉽게 물체와 수직으로 접촉면을 움직일 수 있는 것이다.

처음에 물체와 필드-로봇의 핑거 사이에 시스템을 Lagrange Equation 으로서 운동방정식을 유도하고 다음에는 처음에 구한 운동방정식을 토대로 하여 피드백 컨트롤을 설계한다. 또 소프트-핑거(Soft-Finger)로서 물체를 꼭 잡았을 때의 시스템에 대해서도 시뮬레이션을 하여 해석을 하였다. 본 연구에서 제시된 파지 동작 계획은 부품 파지 시스템을 기존의 해석방법이 아닌 비선형성도 함께 고려를

하여 해석을 하게 된다. 본 연구에서 설정한 모델은 수직방향으로만 움직일 수 있다고 가정하고 설계를 하였다.

## 2. 핑거의 운동방정식

### 2.1 핑거와 물체의 운동방정식

2 개의 소프트-핑거를 가지는 로봇의 운동방정식은 수평방향으로 제한하고 중력의 영향을 받지 않는다고 가정한다. 양쪽 핑거의 끝단에는 변형 가능한 실리콘과 같은 물질로 반원의 형태로 있다고 가정하고 그림 1.에 대하여 기구학적인 해석과 운동방정식을 도출한다.

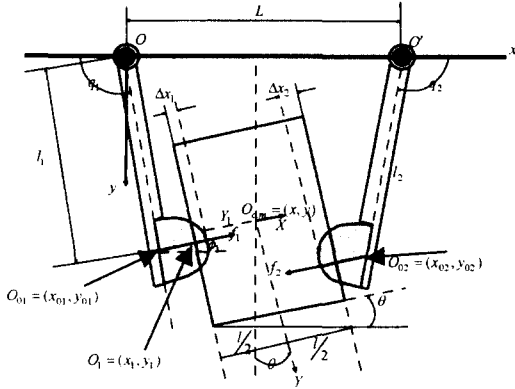


Fig. 1 A mechanical hand with dual fingers whose ends are covered with soft material

- $z = (x, y, \theta)^T$  : 물체의 무게 중심 및 각도
- $q_i = (q_1, q_2)^T$  : 소프트 핑거의 각도
- $l_i = (l_1, l_2)^T$  : 각 손가락의 길이
- $m_i = (m_1, m_2)^T$  : 각 손가락의 질량
- $I_i = (I_{11}, I_{22})^T$  : 각 손가락의 관성 모멘트
- $L$  : 두 핑거의 원점 사이의 거리
- $m$  : 물체의 질량
- $I$  : 물체의 관성모멘트
- $\Delta x_i$  : 소프트-팁이 줄어든 수직거리
- $u_i = (u_1, u_2)^T$  : 제어 입력값
- $\varphi_i$  : 물체의 X-축과 소프트-팁이 이루는 각도

그림 1.은 다음과 같은 상관관계를 만족한다.

$$q_{11} + q_{12} + \varphi_1 = \pi + \theta \quad (1a)$$

$$q_{21} + q_{22} + \varphi_2 = \pi - \theta \quad (1b)$$

우선은 각각 소프트-팁 부분을 제외한 로봇-핑거의 끝점과 물체가 만나는 점을 좌표  $O_{01} = (x_{01}, y_{01})$ ,  $O_{02} = (x_{02}, y_{02})$  로 하고 각각의 조인트가 이루는 각

도를  $q_{11}, q_{12}, q_{21}, q_{22}$  로서 표현한다.

$$x_{01} = -l_{11} \cos q_{11} - l_{12} \cos(q_{11} + q_{12}) \quad (2a)$$

$$y_{01} = l_{11} \sin q_{11} + l_{12} \sin(q_{11} + q_{12}) \quad (2b)$$

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

$$y_{02} = l_{21} \sin q_{21} + l_{22} \sin(q_{21} + q_{22}) \quad (2d)$$

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

$$x_1 = x_{01} - (r_1 - \Delta x_1) \cos(q_{11} + q_{12} + \varphi_1) \quad (3a)$$

$$y_1 = y_{01} - (r_1 - \Delta x_1) \sin(q_{11} + q_{12} + \varphi_1) \quad (3b)$$

$$x_2 = x_{02} - (r_2 - \Delta x_2) \cos(q_{21} + q_{22} + \varphi_2) \quad (3c)$$

$$y_2 = y_{02} - (r_2 - \Delta x_2) \sin(q_{21} + q_{22} + \varphi_2) \quad (3d)$$

물체의 중심을  $x, y$  라고 하면 윗식의 상관관계는 식 (4a), (4b)와 같다.

$$x = x_1 + \frac{1}{2} \cos \theta - Y_1 \sin \theta \quad (4a)$$

$$x_2 - \frac{1}{2} \cos \theta - Y_2 \sin \theta$$

$$y = y_1 - \frac{1}{2} \sin \theta - Y_1 \cos \theta \quad (4b)$$

$$y_2 + \frac{1}{2} \sin \theta - Y_2 \cos \theta$$

### 2.2 물체와 소프트-팁의 접촉

그림 2.는 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.

$$\varphi_1 = Y_1 - c_1 + r_1 \varphi_1 = 0 \quad (5a)$$

$$\varphi_2 = Y_2 - c_2 + r_2 \varphi_2 = 0 \quad (5b)$$

여기서  $c_1, c_2$  는 상수이다.

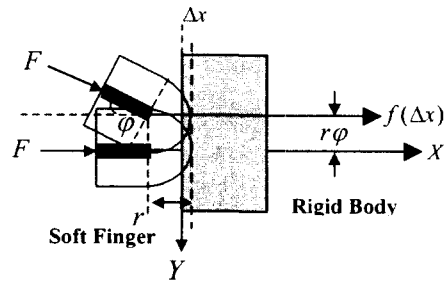


Fig. 2 The center of contact area moves

### 2.3 운동 방정식

위에서 구한 기구학적인 방정식을 운동에너지를  $K$  로 표현하면 식(6)처럼 표현된다.

$$K = \frac{1}{2} \sum_{i=1,2} \dot{q}_i^T H(q_i) \dot{q}_i + \frac{1}{2} (M \dot{x}^2 + M \dot{y}^2 + I \dot{\theta}^2) \quad (6)$$

$$\text{단, } M = \begin{pmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & I \end{pmatrix}, m: \text{소프트-핑거의 질량}$$

포텐셜에너지  $P$  를 표현하면 식(7)과 같다.

$$P = \sum_{i=1,2} \int_0^{\Delta x_i} f_i(\xi) d\xi \quad (7)$$

로봇 소프트-핑거의 운동에너지와 포텐셜에너지를 에너지 함수  $S$  로 표현하기 위해 식(6)(7)에 의해 표현을 하면 식(8)와 같이 된다.

$$S = \sum_{i=1,2} \left( \frac{1}{2} \varepsilon_i (\Delta x_i) \dot{\phi}_i^T + \lambda_i (Y_i - c_i + r_i \phi_i) \right) \quad (8)$$

단,  $\lambda_i$  ( $i=1,2$ )

여기에 Hamilton 의 원리를 적용하여 양쪽 핑거의 운동모델을 세우면 식(9)과 같이 되고 물체의 운동모델은 식(10)과 같이 된다.

$$H_i(q_i) \ddot{q}_i + \left( \frac{1}{2} \dot{H}_i(q_i) \dot{q}_i + S_i(q_i \cdot \dot{q}_i) \right) \dot{q}_i + \left( \frac{\partial \Delta x_2}{\partial z} \right)^T f_i(\Delta x_i) = u_i \quad (9)$$

$$M \ddot{z} + \left( \frac{\partial \Delta x_1}{\partial z} \right)^T f_1(\Delta x_1) + \left( \frac{\partial \Delta x_2}{\partial z} \right)^T f_2(\Delta x_2) = 0 \quad (10)$$

$\dot{q}_1^T$ ,  $\dot{q}_2^T$  와 식(9),  $\dot{z}^T$  와 식(10)사이의 관계를 수식으로 표현하면 식(11)과 같이 된다.

$$\dot{q}_1^T + \dot{q}_2^T = \frac{d}{dt} (K + P) \quad (11)$$

그러므로 입력 ( $u_1, u_2$ ) 와 출력 ( $\dot{q}_1, \dot{q}_2$ ) 에서 파지가 가능하다는 것을 알 수 있다.

### 3. 핑거 및 물체의 제어

#### 3.1 모터의 제어 입력값

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

$$Y_1 - Y_2 = (x_{01} - x_{02}) \sin \theta + (y_{01} - y_{02}) \cos \theta \quad (12)$$

$Y_1, Y_2, x, y, \theta$  는 알면 다음의 식(13),(14)을 계산할 수 있다.

$$u_1 = -k_{v1} \dot{q}_1 + \frac{\partial \Delta x_1}{\partial q_1} f_d - f_d \left\{ \frac{r_1}{r_1 + r_2} (Y_1 - Y_2) \right\} - \zeta \left\{ \frac{r_1}{r_1 + r_2} (\dot{Y}_1 - \dot{Y}_2) - \frac{\partial \Phi_1}{q_1} \left( \frac{\dot{Y}_1 - \dot{Y}_2}{l - \Delta x_1 - \Delta x_2} \right) \right\} \quad (13)$$

$$u_2 = -k_{v2} \dot{q}_2 + \frac{\partial \Delta x_2}{\partial q_2} f_d + f_d \left\{ \frac{r_1}{r_1 + r_2} (Y_1 - Y_2) \right\} + \zeta \left\{ \frac{r_1}{r_1 + r_2} (\dot{Y}_1 - \dot{Y}_2) - \frac{\partial \Phi_2}{q_2} \left( \frac{\dot{Y}_1 - \dot{Y}_2}{l - \Delta x_1 - \Delta x_2} \right) \right\} \quad (14)$$

#### 3.2 모터의 제어 실험

모터의 제어 시스템은 dSPACE 사의 DS1102 를 사용하여 구성하였다.

DS1102 는 One Chip DSP Control 보드로서 PWM 신호를 사용하여 모터를 제어하는 방식으로 PWM 의 신호는 Linear Amp 소자인 LMD18200 을 거쳐서 모터에 전압값으로 들어가게 된다.

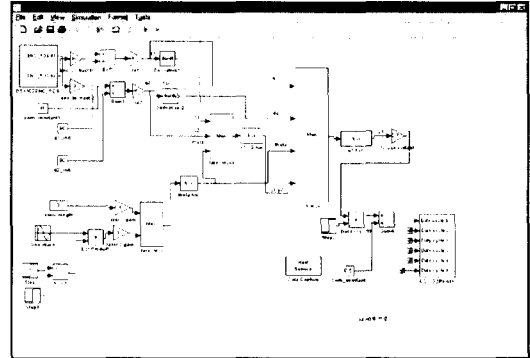


Fig. 3 Consist of simulink model

레이저 변위센서를 이용하여 물체의 변위를 측정하는 대신 가상의 신호를 모델 자체에 사용하였다.

그리고 모터의 움직인 위치를 알기 위해서 엔코

터를 장착하여 DS1102 보드에 입력을 받았다.

#### 4. 실험

##### 4.1 모터의 PID 실험

모터 자체의 정확한 위치 제어를 위해서 PID 제어를 사용하여 모터를 제어하였다.

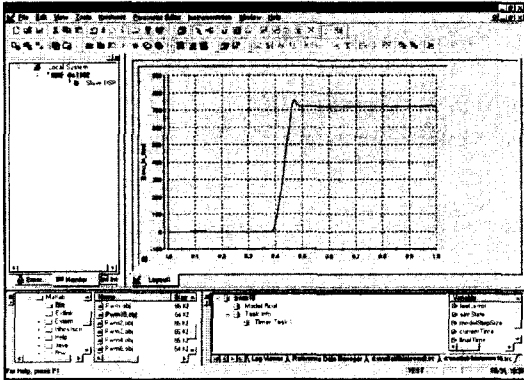


Fig. 4 PID control of motor

##### 4.2 변위에 대한 모터의 움직임

가상의 변위에 대한 모터의 움직임을 알아보기 위하여 모터의 제어를 수행한 결과 빠른 시간에서 도 수렴하는 것을 볼 수 있다.

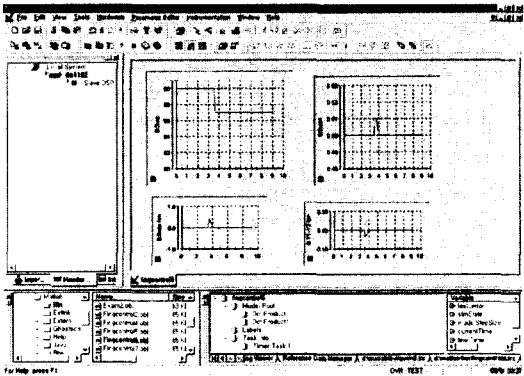


Fig. 5 Motion history at motor

#### 4. 결론

본 논문에서는 처음에 물체와 필드-로봇의 핑거 사이에 시스템을 Lagrange Equation 으로서 운동방정식을 유도하고 다음에는 처음에 구한 운동방정식을 토대로 하여 피드백 컨트롤을 설계하여 물체를 확

잡았을 때의 시스템에 대하여 해석을 해보았다.

이러한 해석을 토대로 하여 모터의 제어 실험을 수행하였으며 물체의 변위를 가상으로 신호로 입력하여 모터의 제어를 수행한 결과 만족할 만한 결과를 얻었다.

#### 후 기

본 연구는 울산대학교 RRC 와 일본의 Ritsumeikan University 와의 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 multi-fingered 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 "Learning control for robot tasks under geometric constraints" IEEE Trans. on Robotica and Automation, vol.11, no.3, pp.432~441, 1995
6. 이대길, 최상민, "로보틱스 입문", 홍릉과학출판사, 1991.
7. 강철구, 권인소, 외 "로봇 동역학과 제어", 희중당, 1994
8. 박경택, 양순용, 부드러운 촉각을 가진 핑거의 운동과 제어에 관한 연구", 제어자동화시스템 공학회학술회의 논문집, 부산경남울산지부, pp. 166~170, 2000