

다지 손을 이용한 문자 쓰기 : 파지 모델링 및 컴플라이언스 특성 해석

Character Writing Using Multi-Fingered Hands : Grasp Modeling and Compliance Analysis

김 병 호, 여 희 주

(Byoung-Ho Kim and Hee-Joo Yeo)

Abstract : When people write a character with a pen stably, proper compliance planning is necessary. In this paper, after investigating the property of character writing task, we propose a fundamental grasp model for character writing and also analyze compliance characteristics for effective character writing using multi-fingered hands. For this, the general stiffness relation of multi-fingered hand is firstly described. Next, we investigate the grasp configurations for grasping a pen and then, we analyze the conditions of the specified stiffness matrix in the operational space to successfully and more effectively achieve the given character writing task. Through the analysis, an effective grasp modeling for successful character writing is shown. And also, we conclude that the operational compliance characteristics should be properly planned for character writing, stably and precisely.

Keywords : multi-fingered hand, character writing task, grasp modeling and compliance analysis

I. 서론

다지 손을 이용한 물체의 조작에 있어서 파지 강성 및 컴플라이언스 제어 분야는 다양한 물체의 유연한 파지 및 정교한 조작을 위한 근본적인 분야로 여겨지고 있다. 따라서 많은 연구자들이 이 분야에 대한 이론적인 연구뿐만 아니라 다양한 응용 분야에 대한 새로운 연구를 시도하고 있다 [1]-[6]. Nguyen[1]은 로봇 손을 이용한 물체의 컴플라이언스 제어를 위하여 손가락 끝에서의 강성을 가상의 스프링으로 모델링 하였다. Yokoi[2] 등은 병렬-체인 메커니즘에서 각 관절의 토오크가 각 관절의 변위에 의해서 결정되도록 한 컴플라이언스 제어 방법을 사용하였다. Cutkosky[3] 등은 로봇 손을 이용한 물체의 유연한 조작을 위하여 컴플라이언스 제어의 유용성을 언급하였으며, 로봇 손과 물체간의 접촉 형태나 로봇 손가락의 기구적인 컴플라이언스 특성, 각 손가락의 서어보(servo) 이득, 그리고 파지 형태의 기하학적인 변화등이 다지 로봇 손의 컴플라이언스 특성을 결정하는 중요한 요인임을 해석하였다. 최근에 Ang[4] 등은 컴플라이언스 행렬의 상호간섭요소(coupling elements)가 로봇 손을 이용한 물체의 조립작업에서는 물체의 원활한 삽입을 방해하는 요소(jamming)를 보상하는데 적절히 이용될 수 있음을 제안하였다. 또한 Han[5] 등에 의하면, 다지 손을 이용한 물체의 조작에서 적절한 파지 안정성을 확보하기 위한 파지점 조건을 찾는 방법으로서 선형 행렬 부등식(linear matrix inequality)이 유용하게 이용될 수 있음을 확인할 수 있다. 그리고 컴플라이언스 해석을 기반으로 한 파지 모델링에 관한 연구도 중요하게 다루어지고 있다[6]. Kim[7] 등은 물체를

조작하는 다지 손을 위한 독립 손가락 및 독립 관절제어에 기반을 둔 컴플라이언스 제어 방법을 제안하였고, 컴플라이언스 제어 기법의 성공적인 구현을 위한 다지 손의 기하학적 조건에 관하여 언급하였다. 특히, 다지 손에 파지된 물체의 작업공간(operational space)에서 주어지는 컴플라이언스 특성을 생성하는데 있어서 여유 구동(redundant actuation)을 통하여 제안한 컴플라이언스 제어 방법을 이용하는 것이 효과적임을 보였다. 한편, Shimoga[8] 등은 로봇 손을 이용한 조립작업에서 컴플라이언스 기준점의 위치는 항상 물체의 접촉점에 두어야 한다고 언급하였다. 또한, 다지 손을 이용한 물체의 안정적인 조작을 위하여 컴플라이언스 기준점의 적절한 위치 선정이 필요하다는 사실이 확인되었다[9].

한편, 다지 손을 이용한 문자 쓰기 작업에 관한 연구는 인간형 로봇이 다지 로봇 손을 이용하여 다루게 될 다양한 작업을 실현하게 하는 중요한 연구로서 로봇이 사람처럼 펜으로 문자를 쓸 때, 어떠한 파지 형태를 취하면 보다 더 정밀한 문자를 쓸 수 있는지에 관한 연구이기 때문에 중요하게 여겨지고 있으나, 기존의 연구는 Hashimoto[10] 등이 로봇 손에 의한 문자 쓰기 작업의 기본적인 특성을 언급하는 정도이며, 아직까지 많은 연구가 이루어지지 않은 실정이다. 로봇 손을 이용하여 문자를 쓰기 위해서는 먼저 다지 손을 이용하여 펜을 안정적으로 잡아야 하는데, 이와 관련하여 근본적으로 펜의 작업공간에서의 컴플라이언스 특성에 대한 해석이 필요하다. 또한 문자 쓰기 작업을 위한 펜의 파지 형태에 대한 적절한 모델링이 필요하며, 임의의 문자를 안정되고 정밀하게 쓰기 위해서는 적절한 컴플라이언스 제어 방법이 요구된다.

이러한 관점에서 본 논문에서는 다지 손을 이용하여 안정된 문자를 쓰기 위한 기본적인 컴플라이언스 특성을 해석하고자 한다. 먼저 다지 손을 이용한 물체의 조작에 있어서

접수일자 : 2001. 5. 4., 수정완료 : 2001. 8. 21.

김병호 : 강원대학교 전기전자정보통신공학부(kimbh@cc.kangwon.ac.kr)

여희주 : 대전대학교 전자공학과(hjyeo@road.daejin.ac.kr)

물체에 설정된 작업공간과 각 손가락의 관절공간 간의 일반적인 강성 관계식을 정리한 후, 독립 손가락 기반 컴플라이언스 제어 기법[5]에 의한 독립 강성 관계식을 기술한다. 그리고 다지 손을 이용한 문자 쓰기 작업에 대한 특성을 세가지 단계로 분류하여 언급한 다음, 경험과 관찰을 통한 직관력(intuition)을 기반으로 한 문자 쓰기 작업의 유용한 파지 모델을 제시한다. 또한 이를 바탕으로 하여 펜의 작업공간에서의 컴플라이언스 특성을 해석하며, 제안한 파지 모델의 유용성을 해석적으로 보인다.

II. 다지 손 시스템의 강성 관계

다지 손을 이용한 물체의 파지 및 조작에 있어서 강성(stiffness) 또는 컴플라이언스(compliance) 특성은 물체의 미세한 선형 동작 구간에서 안정된 조작 특성을 결정하는 중요한 요소이다. 따라서 본 장에서는 다지 손을 이용한 물체의 조작에 있어서 먼저 다지 손에 의해 파지된 물체에 설정된 작업공간과 물체의 파지점에 설정된 각 손가락 끝 공간 간의 강성 관계를 정리한 후, 작업공간의 컴플라이언스 특성을 독립적인 각 손가락 끝의 컴플라이언스 특성으로 분배하도록 한 독립 손가락 기반 강성 관계를 기술한다.

그림 1은 n_f 개의 손가락을 지니는 로봇 손이 3차원에서 딱딱한 물체(rigid body)를 조작하는 경우를 나타낸다. 여기서 i 번째 손가락에 존재하는 관절의 수는 i_{n_f} 개이며, 첨자 j 는 관절공간을 의미한다. 그러면 물체의 작업 공간에서의 일반적인 힘 벡터와 손가락 끝 공간에서 힘 벡터 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_o = [G_o^T]^T T_f, \tag{1}$$

여기서 T_o 는 작업 공간에서 물체의 관성력과 외부의 힘을 포함한 일반적인 힘 벡터(6×1)이고, T_f 는 손가락의 끝 공간에서의 힘 벡터($m \times 1$, $m = \sum_{i=1}^{n_f} i_{n_{fp}}$, $i_{n_{fp}}$: i 번째 손가락 끝 공간의 자유도)를 나타내며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_f = [({}^1T_f)^T \quad ({}^2T_f)^T \quad \dots \quad ({}^{n_f}T_f)^T]^T$$

그리고 작업 공간과 손가락 끝 공간 사이의 자코비안 행렬(Jacobian matrix) $[G_o^T](m \times 6)$ 는 다음과 같다.

$$T_f = [({}^1T_f)^T \quad ({}^2T_f)^T \quad \dots \quad ({}^{n_f}T_f)^T]^T,$$

$$[{}^iG_o^T] = \begin{bmatrix} {}^iR_i & {}^i_p \times {}^iR_i \\ 0 & {}^iR_i \end{bmatrix},$$

여기서 ${}^iR_i(3 \times 3)$ 와 ${}^i_p(3 \times 1)$ 는 각각 작업 공간과 손가락 끝 공간간의 자세에 대한 회전 행렬 및 위치 벡터이며, $[G_o^T]^T$ 는 $[G_o^T]$ 의 전치 행렬(transpose matrix)을 나타낸다.

다지 손에 의해 파지된 물체의 작업 공간에서 강성 행렬은 (1)을 작업 공간의 위치벡터 u_o 에 관하여 편미분함으로써 구할 수 있으며, 작업 공간에서의 강성 행렬 $[K_o](n \times n)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[K_o] = [G_o^T]^T [K_f] [G_o^T], \tag{2}$$

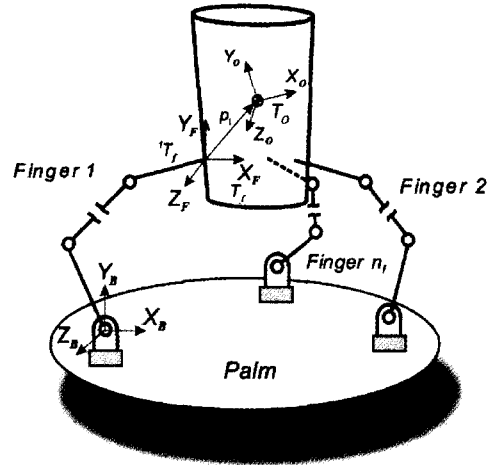


그림 1. 다지 로봇 손.
Fig. 1. A multi-fingered robot hand.

여기서 $[K_o]$ 는 작업 공간에서 순수하게 설정된 강성 특성과 물체의 기하학적 요인에 기인한 영향 $[T_f]^T d[H_\infty]$ 을 포함한 강성행렬이며, n 은 작업공간의 자유도를 나타낸다. 연산자 "O"와 $[H_\infty]$ 는 각각 일반화된 스칼라 도트연산(generalized scalar dot product)[11] 및 접촉점의 변화에 의해 생성되는 2차 기구학적 영향계수를 나타내는 $m \times n \times n$ 3차원 행렬이다[12]. 그리고 $[K_f](m \times m)$ 는 각 손가락 끝 공간에서의 강성 특성과 손가락간의 상호간섭을 포함한 강성 행렬을 나타내고, 다음과 같다.

$$[K_f] = \begin{bmatrix} {}^1K_f & {}^{12}K_f & \dots & {}^{1n_f}K_f \\ {}^{21}K_f & {}^2K_f & \dots & {}^{2n_f}K_f \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ {}^{n_f1}K_f & {}^{n_f2}K_f & \dots & {}^{n_f}K_f \end{bmatrix}$$

또한 $[{}^iK_j](i=j=1, L, n_f)$ 는 i 번째 손가락과 j 번째 손가락간의 상호간섭 강성 요소를 의미하며, $[{}^iK_j](i=1, L, n_f)$ 는 다음과 같다.

$$[{}^iK_j] = \begin{bmatrix} {}^iK_{fxx} & {}^iK_{fxy} & {}^iK_{fzx} \\ {}^iK_{fyx} & {}^iK_{fyy} & {}^iK_{fyz} \\ {}^iK_{fzx} & {}^iK_{fzy} & {}^iK_{fzz} \end{bmatrix}$$

일반적으로 3차원 공간에서의 6자유도 강성 관계를 나타내면, (2)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} K_{o11} & K_{o1j} & \dots & K_{o16} \\ K_{o21} & K_{o2j} & \dots & K_{o26} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{on1} & K_{onj} & \dots & K_{on6} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{1j} & \dots & g_{16} \\ g_{k1} & g_{kj} & \dots & g_{k6} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{m1} & g_{mj} & \dots & g_{m6} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} K_{f11} & K_{f1j} & \dots & K_{f1m} \\ K_{fj1} & K_{fjj} & \dots & K_{fjm} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{fm1} & K_{fmj} & \dots & K_{fmm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_{11} & g_{1j} & \dots & g_{16} \\ g_{k1} & g_{kj} & \dots & g_{k6} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{m1} & g_{mj} & \dots & g_{m6} \end{bmatrix}, \tag{3}$$

여기서, $i=j=2, L, 5$, $k=l=2, L, m-1$.

그러면 (3)으로부터, 작업공간의 컴플라이언스 특성을 독립적인 각 손가락 끝의 컴플라이언스 특성으로 분배하도록 한 독립 손가락 기반 강성 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_{oo} = \begin{bmatrix} g_{11}^2 & g_{11}^2 & \dots & g_{m1}^2 \\ g_{11}g_{1l} & g_{11}g_{1l} & \dots & g_{m1}g_{ml} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{11}g_{16} & g_{11}g_{16} & \dots & g_{m1}g_{m6} \\ g_{12}^2 & g_{12}^2 & \dots & g_{m2}^2 \\ g_{12}g_{1k} & g_{12}g_{1k} & \dots & g_{m2}g_{mk} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ g_{12}g_{16} & g_{12}g_{16} & \dots & g_{m2}g_{m6} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{15}^2 & g_{15}^2 & \dots & g_{m5}^2 \\ g_{15}g_{16} & g_{15}g_{16} & \dots & g_{m5}g_{m6} \\ g_{16}^2 & g_{16}^2 & \dots & g_{m6}^2 \end{bmatrix} K_{ff} \quad (4)$$

여기서

$$K_{oo} = [K_{o11} K_{o1j} \dots K_{o16} K_{o22} \dots K_{o26} \dots K_{o66}]^T,$$

$$K_{ff} = [K_{f11} K_{f1l} \dots K_{fmm}]^T,$$

이고, $i = j = 2, L, 5, k = 3, L, 5, l = 2, L, m - 1$ 이다.

(4)에서 다지 손 시스템에서 작업공간의 컴플라이언스 특성을 생성하기 위한 독립적인 각 손가락 끝 공간의 강성 요소는 선형 프로그래밍 기법을 이용하여 구할 수 있는데, 작업 공간과 각 손가락 끝 공간간의 자코비안 행렬이 파지 기하학(grasp geometry)에 의해 결정되므로, 컴플라이언스 기준점 및 각 손가락의 파지점 위치에 의존적임을 알 수 있다. 따라서 다지 손을 이용하여 어떤 물체를 효과적으로 조작하기 위해서는 적절한 파지점 설정이 중요함을 알 수 있다. 아울러 다지 손을 이용한 물체의 조작에 있어서 (4)와 같이 나타나는 강성 관계를 조사함으로써 주어진 파지 구조에 대한 특성을 해석적으로 파악하는 것이 가능해진다.

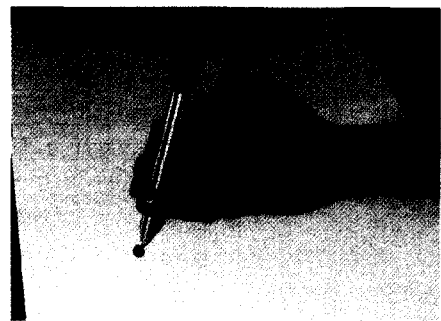
III. 다지 손에 의한 문자 쓰기 작업 특성

사람들이 다지 손에 의해 파지된 펜을 이용하여 어떤 문자를 쓸 때, 근본적으로 펜이 안정적으로 파지되어 있어야 할 뿐만 아니라, 정밀한 문자를 쓰기 위해서는 펜이 효과적으로 조작되어야 한다. 또한 팔과 손의 적절한 협조를 통하여 문자를 쓰게 되는데, 본 논문에서는 설명의 편의를 위하여 손가락의 운동만으로 가능한 작은 문자를 쓰는 경우에 대하여 고려한다.

일반적으로 문자 쓰기 작업은 크게 다음과 같은 3가지 제어 모드로 분류할 수 있다. 첫 번째 제어 모드는 펜을 가능한 쉽게 파지할 수 있도록 다지 손의 파지 구조를 형성하는 것인데, 이러한 제어 모드를 접근 모드(approaching mode)라 부른다. 접근 모드에서는 펜의 효과적인 파지 및 안정적인 파지를 위하여 팔과 손의 모든 관절에 대한 위치 제어가 중요하다. 두 번째 제어 모드는 펜의 파지 및 들어 올리기 동작 모드인데, 여기서는 안정된 파지를 위해 파지에 사용된 모든 손가락들에 대한 힘 제어가 필요하다. 세 번째는 자유 공간(free space) 및 구속 공간(constrained space)에서의 조작 모드이다. 이 모드는 실질적으로 문자를 쓰는 과정이 되는데,



(a)



(b)

그림 2. 다지 손을 이용한 펜의 파지 형태.

Fig. 2. Grasp styles of a pen using multi-fingered hands.

주어진 문자를 안정되고 정밀하게 쓰기 위해서는 유연하게 펜을 조작하여야 하므로 다지 손에 대한 컴플라이언스 제어가 필요하다.

다음은 사람들이 펜으로 어떤 문자를 쓸 때, 사용되는 파지 형태에 대하여 고려해 보자. 일반적으로 사람에 따라 펜을 잡는 형태는 다양하게 분류할 수 있는데, 여기서는 대부분의 사람들이 문자를 쓸 때 많이 이용하는 그림 2와 같은 파지 형태에 대하여 고찰한다. 그림 2에 나타난 파지 형태의 특징은 다음과 같이 나타낼 수 있다. 그림 2(a)의 파지 형태는 펜의 꼬리 부분이 엄지와 검지사이의 U자형 안장(knuckle)에 구속되고, 그림 2(b)는 펜의 꼬리 부분이 구속되지 않는 파지 형태를 나타낸다. 경험적으로 알 수 있듯이 그림 2(a)와 같은 파지 형태는 펜의 꼬리 부분이 구속됨으로써 펜의 조작에 있어서 흔들림 현상이 쉽게 안정화될 수 있음을 직관적으로 알 수 있다. 결국 그림 2(a)와 같은 파지 형태는 펜의 흔들림이 그림 2(b)에 비해 적기 때문에 보다 정밀한 문자를 쓰는데 적합하다고 볼 수 있다. 이러한 관점에서 본 논문에서는 그림 2(a)와 같은 파지 형태를 사용한 문자 쓰기 작업을 대상으로 한다. 또한 준 안정적인 동차 영역(quasi-static state)에서 문자 쓰기 작업의 근본적인 컴플라이언스 특성 해석을 통하여 보다 더 효과적인 파지 구조를 해석한다.

IV. 문자 쓰기를 위한 파지 모델링 및 컴플라이언스 특성 해석

본 장에서는 그림 2(a)와 같은 파지 형태를 사용한 문자 쓰기 작업에서의 컴플라이언스 특성을 해석하기 위하여 그림 3과 같이 관련 좌표계를 설정하고, 문자를 쓸 때 사용되는 파지 모델링을 수행한 후, 보다 효과적으로 문자를 쓰기

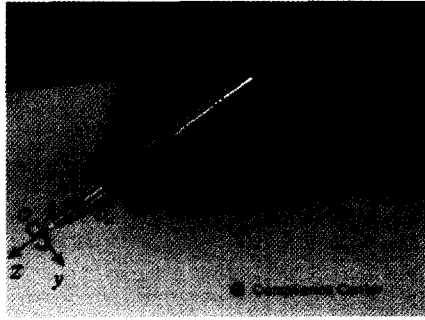


그림 3. 다지 손을 이용한 문자 쓰기.
Fig. 3. Writing a character with a pen grasped by multi-fingered hands.

위해 펜의 작업 공간에서의 컴플라이언스 특성 설정이 중요함을 보이고, 그림 2(a)에 나타낸 파지 형태가 그림 2(b)의 경우 보다 더 유용한 파지 형태임을 해석적으로 확인한다. 그림 3에서 펜의 작업 공간에서의 컴플라이언스 특성은 대칭(symmetric)이고, 각 파지점들에 대한 접촉점 형태는 마찰이 있는 점 접촉으로 가정한다.

대부분의 사람들이 다지 손을 이용하여 펜으로 문자를 쓸 때, 엄지와 검지는 각각 펜의 서로 인접하는 사분면을 파지하고, 중지는 펜을 받치면서 문자를 쓰고 있음을 관찰이나 경험적으로 알 수 있다. 따라서 그림 3의 단면 A-A'에서 보면, 각 손가락에 대한 파지점은 그림 4와 유사한 형태로 나타낼 수 있다.

또한 사람들이 문자 쓰기를 하는 동안 그림 3과 같이 펜

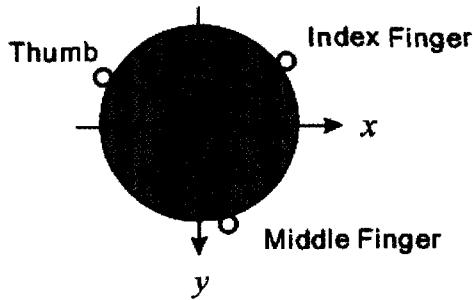


그림 4. 단면 에서 본 펜의 파지점 형성.
Fig. 4. Grasp posture of the grasped pen viewed in the section.

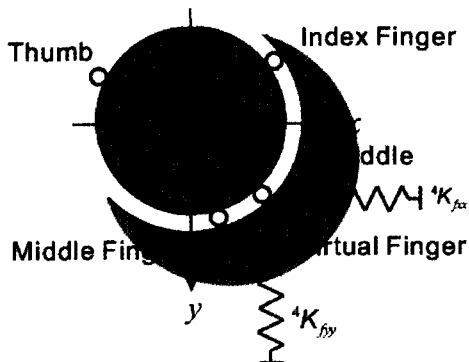


그림 5. 단면에서 본 펜의 파지점 형성.
Fig. 5. Grasp posture of the grasped pen viewed in the section.

의 꼬리 부분을 엄지와 검지 사이의 U자형 안장(knuckle)에 구속시키고 있음을 관찰할 수 있는데, 이러한 행위는 펜의 안정성을 확보하는데 있어서 매우 중요한 현상으로 받아들일 수 있다. 그림 3에서 펜의 꼬리 부분이 구속됨으로써 x방향과 y방향에 대한 펜의 직선 운동이 제한을 받게 된다. 이러한 관점에서 본 논문에서는 펜의 꼬리 부분이 구속되는 현상을 수동형 스프링에 의한 컴플라이언스 특성을 지니는 가상의 손가락에 의한 파지점으로서 그림 5와 같이 모델링하였다. 그림 5에 나타낸 파지점 모델은 그림 2(a)와 같이 펜의 꼬리 부분을 지지한 채 문자를 쓸 때, 보다 더 안정적이고 정밀한 문자를 쓰는 동작을 설명하는 데 중요한 역할을 하게 된다. 결과적으로 다지 손을 이용한 문자 쓰기 작업은 4개의 손가락에 의한 펜의 파지 및 조작 문제로 볼 수 있다.

사람들이 어떤 문자를 쓰기 위해서는 손가락으로 펜을 안정되게 잡은 다음, 잡은 펜을 직선 방향과 회전 방향으로 적절히 조합하여 이동시키는 과정이 필요하다. 결국 어떤 문자를 쓰는 과정은 임의의 방향으로 선을 그리는 연속적인 과정으로 볼 수 있다. 특히 그림 3에서 문자를 쓰기 위한 펜의 움직임을 살펴보면, 그림 3과 같은 파지 형태에서 펜의 꼬리 부분은 엄지와 검지사이의 U자형 안장(knuckle)에 접촉되어 있기 때문에 펜의 자세가 변경되지 않으면, 손가락의 운동에 의해 방향이나 방향으로 움직일 수 없다. 따라서 손가락의 운동에 의한 문자 쓰기는 불가능하다. 결국 방향으로 선을 긋는 작업은 펜을 방향으로 회전시키면서 방향으로 직선 운동을 시킴으로써 가능하고, 방향으로 선을 긋기 위해서는 방향으로의 회전 운동과 방향으로의 직선 운동의 적절한 조합이 요구된다. 한편, 방향으로의 회전 운동은 문자를 쓰는데 잘 사용되지 않음을 경험적으로 알 수 있다. 이러한 관점에서 볼 때, 방향과 방향의 회전 운동 및 방향으로의 직선 운동은 다지 손에 의한 문자 쓰기에 있어서 다른 방향에 비해 더 중요한 축 방향으로 볼 수 있으며, 이러한 방향을 제외하고 다른 방향의 움직임은 결과적으로 방향과 방향의 회전 운동 및 방향으로의 직선 운동에 의해 의존적으로 결정됨을 확인할 수 있다.

본 논문에서는 II장에서 언급한 독립 손가락 기반 컴플라이언스 제어 방법을 사용하여 그림 2(a)와 같은 파지 형태가 그림 2(b)에 비해 보다 더 정밀한 문자 쓰기에 적합함을 컴플라이언스 특성 해석을 통하여 보인다. 최근에 Kim[13]은 다지 손을 이용한 물체의 조작에 있어서 작업 공간과 각 손가락의 끝 공간간의 강성 관계를 기하학적으로 분석함으로써 컴플라이언스 기준점의 위치에 따른 작업 공간의 컴플라이언스 특성 설정이 달라질 수 있음을 제시하였다. 이러한 해석 방법을 적용하면, 컴플라이언스 기준점이 그림 3의 O_d 에 있는 경우, (4)로 표현된 펜의 작업 공간과 각 손가락 끝 공간간의 독립 강성 관계는 (5)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 x_i , y_i 및 z_i 는 각각 x, y 및 z방향에 대한 i번째 손가락의 파지점과 펜의 컴플라이언스 기준점간의 거리를 나타내는 변수들을 나타내고, 모두 양수이다.

그리고 (5)에 선형 프로그래밍 기법을 적용하면, 적절히 설정된 작업 공간의 강성값에 대한 각 손가락 끝의 강성값들을 구할 수 있다. 또한 다지 손을 이용한 문자 쓰기 동작에

을 바탕으로 파지 모델링을 수행하였다. 그리고 다지 손을 이용한 문자 쓰기 작업의 컴플라이언스 특성을 해석함으로써 문자를 보다 안정하고 정밀하게 쓰기 위한 파지 형태를 확인하였다. 결론적으로 다지 손을 이용한 문자 쓰기 작업을 성공적으로 수행하기 위해서는 펜의 파지 형태와 컴플라이언스 기준점 설정 및 작업 공간의 컴플라이언스 특성 설정이 중요함을 보였다. 이러한 연구 결과는 향후 인간형 로봇에서 다지 손을 이용한 다양한 응용 작업의 컴플라이언스 특성 설정 및 주어진 작업의 특성에 따라 다양하게 형성될 수 있는 파지 형태를 결정하는데 유용하게 이용될 수 있다.

참고문헌

- [1] V. Nguyen, "Constructing force-closure grasps in 3-D," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 240-245, March, 1987.
- [2] K. Yokoi, M. Kaneko, and K. Tanie, "A compliance control method suggested by muscle networks in human arms," *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 385-390, 1988.
- [3] M. R. Cutkosky and I. Kao, "Computing and controlling the compliance of a robotic hand," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 5, no. 2, pp. 151-165, 1989.
- [4] M. H. Ang, Jr. and G. B. Andeen, "Specifying and achieving passive compliance based on manipulator structure," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 11, no. 4, pp. 504-515, 1995.
- [5] L. Han, J. C. Trinkle, and Z. X. Li, "Grasp analysis as linear matrix inequality problems," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 16, no. 6, pp. 663-674, 2000.
- [6] Q. Lin, J. W. Burdick, and E. Rimon, "A stiffness-based quality measure for compliant grasps and fixtures," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 16, no. 6, pp. 675-688, 2000.
- [7] B. -H. Kim, B. -J. Yi, I. H. Suh, and S. -R. Oh, "A biomimetic compliance control of robot hand by considering structures of human finger," *Proc. Of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 3880-3887, 2000.
- [8] K. B. Shimoga and A. A. Goldenberg, "Grasp admittance center: choosing admittance center parameters," *Proc. of American Control Conference*, pp. 2527-2532, 1991.
- [9] B. -H. Kim, B. -J. Yi, I. H. Suh, and S. -R. Oh, "Stiffness analysis for effective peg-in/out-hole tasks using multi-fingered hands," *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Takamatsu, pp. 1229-1236, Nov. 2000.
- [10] H. Hashimoto, H. Ogawa, M. Obama, T. Umeda, K. Tatuno, and T. Furukawa, "Development of a multi-fingered robot hand with fingertip tactile sensors," *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 875-882, 1993.
- [11] R. A. Freeman and D. Tesar, "Dynamic modeling of serial and parallel mechanisms/robotics systems, Part I-methodology, Part II-applications," *Proc. 20th ASME Biennial Mechanisms Conf. Orlando, FL, Trends and Development in Mechanisms, Machines, and Robotics*, DE-vol. 15-2, pp. 7-21, 1988.
- [12] B. -J. Yi, I. D. Walker, D. Tesar, and R. A. Freeman, "Geometric stability in force control," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 281-286, 1991.
- [13] B. -H. Kim, *Biomimetic compliance control of multi-fingered hands with applications to dextrous robotic tasks*, Dissertation of Hanyang Univ., 2001.
- [14] J. D. Schutter and H. V. Brussel, "Compliant robot motion I. A formalism for specifying compliant motion tasks," *Int. Jour. of Robotics Research*, vol. 7, no. 4, pp. 3-17, 1988.
- [15] J. D. Schutter and H. V. Brussel, "Compliant robot motion II. A control approach based on external control loops," *Int. Jour. of Robotics Research*, vol. 7, no. 4, pp. 18-33, 1988.



김 병 호

1966년 2월 18일생. 1989년 금오공과대학교 전자공학과(공학사). 1994년 동 대학원(공학석사). 2001년 한양대학교 전자공학과(공학박사). 1995년~2001년 한국과학기술연구원 지능제어연구센터 박사과정 학생연구원. 2001년 3월~8월 대전대학교 강사. 2001년 8월~현재 강원대학교 BK21 계약교수. 관심분야: biomimetic compliance control, multi-fingered hand mechanisms with applications to dextrous robotic tasks, multiple arm control, macro/micro mechanisms, industrial applications of -processors, and intelligent control.

여 희 주

제어·자동화·시스템공학회 논문지, 제6권, 2호 참조.