

손가락/관절 간의 기구학적 독립을 고려한 로봇 손의 컴플라이언스 제어 방법

A Compliance Control Method for Robot Hands with Consideration of Decoupling among Fingers/Joints

김병호, 이병주, 서일홍, 오상록
(Byoung-Ho Kim, Byung-Ju Yi, Il Hong Suh, and Sang-Rok Oh)

Abstract : In this paper, for an object grasped by a robot hand to work in stiffness control domain, we first investigate the number of fingers for successful stiffness modulation in the object operational space. Next, we propose a new compliance control method for robot hands which consist of two steps. *RIFDS* (*Resolved Inter-Finger Decoupling Solver*) is to decompose the desired compliance characteristic specified in the operational space into the compliance characteristic in the fingertip space without inter-finger coupling, and *RIJDS* (*Resolved Inter-Joint Decoupling Solver*) is to decompose the compliance characteristic in the fingertip space into the compliance characteristic given in the joint space without inter-joint coupling. Based on the analysis results, the finger structure should be biomimetic in the sense that either kinematic redundancy or force redundancy are required to implement the proposed compliance control scheme. Five-bar fingered robot hands are used as an illustrative example to implement the proposed compliance control method. To show the effectiveness of the proposed compliance control method, simulations are performed for two-fingered and three-fingered robot hands.

Keywords : *RIFDS*, *RIJDS*, biomimetic, compliance control, robot hand

1. 서론

로봇 손을 이용하여 물체를 잡고 조작하는 경우에 있어서 물체를 안정하게 다루기 위해서는 각 손가락이 물체를 접촉하는 힘을 효과적으로 제어하여야 한다. 이와 관련하여 Yoshikawa[1] 등은 여러 개의 로봇 팔 또는 다지 로봇 손을 위한 동적 복합 위치/힘(hybrid position/force) 제어방법을 제안하였다. Yoshikawa[1] 등은 매니퓰레이터와 잡고 있는 물체의 동특성을 모델링하여 제어 알고리즘에 포함시켰고, 힘 센서를 사용하여 힘 신호를 측정하였다. Hasegawa[2] 등은 로봇 손을 이용하여 물체를 이동시킬 때, 각 손가락에 3축 힘 센서를 부착시키고, 외부에 스테레오 카메라를 배치하여 힘 신호와 시각 정보를 동시에 고려한 멀티센서기반 조작에 관하여 연구하였다. 이상의 연구에서는 실제로 손가락 구조에 힘 센서를 장착하기에 어려움이 따르고, 또한 힘 센서로부터 측정된 힘 신호에는 실질적으로 외란이 많이 포함되어 있기 때문에 매우 불안정하며, 로봇 매니퓰레이터에 비해 로봇 손가락의 운동 범위가 매우 작기 때문에 힘 신호를 이용하여 로봇 손가락의 정밀제어를 수행하는 것이 쉽지 않다.

로봇 손을 이용하여 물체를 조작하는 경우에 특히, 준정적인 상태에서 동작하는 경우, 힘 센서를 사용하여 측정된 힘 신호를 사용하는 방법 대신에 강성 또는 컴플

라이언스(stiffness or compliance) 제어 방법이 효과적으로 사용될 수 있다. 이와 관련하여 많은 연구자들이 파지 강성 또는 컴플라이언스 분야에 대하여 연구해 왔다. Nguyen[3]은 로봇 손에 의해 파지된 물체의 컴플라이언스 제어를 위하여 2차원 및 3차원에서 손가락 끝에서의 강성을 가상의 스프링으로 모델링하였다. Cutkosky[4] 등은 로봇 손가락의 컴플라이언스와 각 손가락의 서어보 이득(servo gain), 그리고 파지 형태의 기하학적인 변화(change of grasp geometry) 등에 의해 결정되는 다지 로봇 손의 컴플라이언스 모델에 관하여 해석하였다. Lee[5] 등은 로봇 손이 파지한 물체의 작업 공간에서 대각선 성분만을 갖는 강성 행렬을 정의하고, 이를 제어하기 위한 방법에 대하여 연구하였다. 그러나 아직까지 로봇 손의 컴플라이언스 제어를 성공적으로 수행하기 위한 필요 조건으로서, 손가락의 개수나 구조에 대해서는 언급되지 않았다. 최근에 Yi[6] 등은 여유구동을 갖는 5 관절 로봇 손가락을 사용하여 손가락의 각 관절을 독립적으로 제어함으로써 인하여 손가락 끝의 컴플라이언스 특성을 생성할 수 있도록 하는 컴플라이언스 제어 방법을 제안하였다. 또한, 여유구동 메커니즘을 갖는 폐쇄 체인(closed-chain)형의 손가락 형태가 직렬형의 손가락에 비해 컴플라이언스 제어를 위한 로봇 손가락의 설계측면에서 더 적합한 구조임을 제시하였다.

본 논문에서는 로봇 손이 물체를 잡고 조작할 때, 파지한 물체의 컴플라이언스를 성공적으로 제어하기 위해 요구되는 손가락의 개수를 조사하고, 보다 효과적으로 컴플라이언스 특성을 구현하기 위한 로봇 손가락의 구조에 대하여 고려하였으며, 독립적인 로봇 손가락 및 각

접수일자 : 2000. 1. 22., 수정완료 : 2000. 4. 25.

김병호 · 한양대학교 전자컴퓨터공학부, 한국과학기술연구원
지능제어연구센터

이병주, 서일홍 · 한양대학교 전자컴퓨터공학부
오상록 · 한국과학기술연구원 지능제어연구센터

손가락 관절의 제어를 기반으로 한 컴플라이언스 제어 방법을 제안하였다. 제안한 컴플라이언스 제어 방법은 RIFDS(Resolved Inter-Finger Decoupling Solver)와 RIJDS(Resolved Inter-Joint Decoupling Solver)로 구성되어 있다. 제안한 컴플라이언스 제어 방법의 효용성을 확인하기 위하여 두 개 그리고 세 개의 손가락을 갖는 로봇 손에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 다양한 시뮬레이션을 통하여 제안된 컴플라이언스 제어 알고리즘이 로봇 손을 이용하여 파지한 물체의 컴플라이언스 제어를 성공적으로 수행함을 확인하였다.

II. 로봇 손의 강성 해석

그림 1에서와 같이 n_f 개의 손가락을 갖는 로봇 손이 n 차원의 딱딱한 물체(rigid body)를 조작하는 경우에 대하여 고려해 보자. 여기서 각 손가락은 ' n_j ' 개의 관절을 갖는다. 물체의 작업 공간(operational space)에서의 힘/토크 벡터와 손가락 끝 공간에서 힘/토크 벡터 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서 T_o 는 작업 공간에서 물체의 관성력과 외부의 힘을 포함한 $n \times 1$ 힘/토크 벡터이고, T_f 는 손가락의 끝 공간에서의 $m \times 1$ ($m = \sum_{j=1}^{n_f} n_{j^*}$, ' n_{j^*} ' : i 번째 손가락 끝 공간의 자유도) 힘/토크 벡터를 나타낸다. 그리고 $[G_o^f]$ 는 작업 공간과 손가락 끝 공간 사이의 $m \times n$ 자코비안 행렬(Jacobian matrix)이며, $[G_o^f]^T$ 는 $[G_o^f]$ 의 전치 행렬(transpose matrix)을 나타낸다.

로봇 손이 파지한 물체의 조작 경로가 사전에 정해진 경우, 물체를 정해진 경로에 따라 조작하기 위해서는 각 손가락에 대한 힘 분배가 적절히 이루어져야 한다. 여기서 힘 분배는 물체를 안정하게 파지하고 원하는 경로를 잘 추종하도록 하기 위한 각 손가락의 힘/토크를 결정하는 것이다.

(1)에 대한 일반적인 해는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T_f = ([G_o^f]^T)^- T_o + (I - ([G_o^f]^T)^- [G_o^f]^T) \xi_f \tag{2}$$

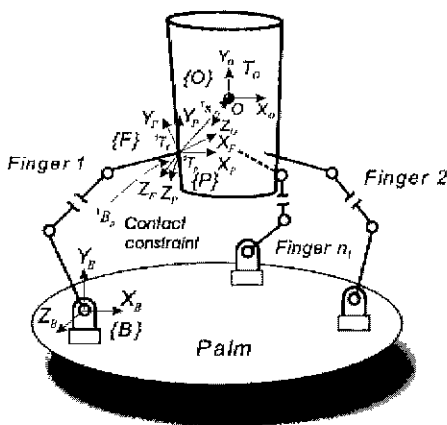


그림 1. 다지 로봇 손.
Fig. 1. A multi-fingered robot hand.

여기서 $([G_o^f]^T)^-$ 는 $[G_o^f]^T$ 의 의사 역 행렬(pseudo-inverse matrix)을 나타내고, I 는 $m \times m$ 단위 행렬이며, ξ_f 는 임의의 $m \times 1$ 벡터이다.

(2)를 이용하여 파지한 물체를 정해진 경로에 따라 조작하는데 요구되는 손가락의 힘을 구할 수 있다. 또한, 각 손가락에 힘 센서를 부착하여 힘 신호를 직접적으로 측정함으로써, 로봇 손가락의 힘 제어에 의한 물체의 조작행위를 수행할 수 있다. 그러나 실질적으로 손가락 구조에 힘 센서를 장착하는 데는 어려움이 따르고, 힘 센서의 신호에는 외란이 많이 포함되어 있기 때문에 매우 불안정하고, 작은 범위의 정밀한 제어가 요구되는 로봇 손의 경우, 고정도의 제어가 쉽지 않다. 한편, 인간의 손은 경험적으로 알 수 있듯이 정확한 힘 제어 보다는 컴플라이언스 제어를 이용하여 물체를 파지하고 조작하는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 논문에서는 독립적인 손가락 및 독립적인 손가락 관절 제어에 기반을 둔 컴플라이언스 제어 방법을 제안하고자 한다.

1 강성 관계

(1)을 작업 공간의 위치벡터 u_o 에 관하여 편미분 하면, 다음과 같이 작업 공간에서의 $n \times n$ 강성 행렬 $[K_o]$ 을 구할 수 있다.

$$[K_o] = [G_o^f]^T [K_f] [G_o^f] - ([T_f]^T \circ [H_{oo}^f]), \tag{3}$$

여기서 $[K_f]$ 는 각 손가락 끝 공간에서의 강성 특성과 손가락간의 상호간섭을 포함한 $m \times m$ 강성 행렬을 나타내고, 다음과 같다.

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

그리고 연산자 " \circ " 와 $[H_{oo}^f]$ 는 각각 일반화된 스칼라 도트연산(generalized scalar dot product) [7] 및 접촉점의 변화에 의해 생성되는 2차 기구학적 영향계수를 나타내는 $m \times n \times n$ 3차원 행렬이다 [8]. (3)에서 $[T_f]^T \circ [H_{oo}^f]$ 는 순수하게 물체의 기하학과 각 손가락의 힘에 의해 결정되는 요소이므로 이 항을 왼쪽으로 옮겨서 다시 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[K_o] = [G_o^f]^T [K_f] [G_o^f] \tag{4}$$

여기서

$$[K_o] = [K_o^+] + ([T_f]^T \circ [H_{oo}^f])$$

손가락 끝 공간과 각 손가락의 관절 공간사이의 강성 관계식을 구하려면, 먼저 로봇 손에 사용된 손가락의 구조를 파악하여야 한다. 여유 관절을 갖는 직렬형 손가락의 경우에는 전방향 자코비안 행렬이 유일하게 존재한다. 그러나 여유 구동을 지니는 폐쇄 체인(closed-loop)형 손가락의 경우에는 역방향 자코비안 행렬이 유일하게 존재한다 [8]. 본 논문에서는 폐쇄 체인형 5 관절

손가락을 갖는 로봇 손을 대상으로 한다.

i 번째 손가락 끝 공간의 $'n_{fp} \times 'n_{fp}$ 강성 행렬 $['K_f']$ 과 $'n_j \times 'n_j$ 관절 강성 행렬 $['K_g]$ 와의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다[8].

$$['K_f] = ['G_f^q]^T ['K_g] ['G_f^q] - (['T_g]^T \circ ['H_{ff}^q]) \quad (5)$$

여기서 $['G_f^q]$ 는 i 번째 손가락의 끝 공간과 관절 공간간의 $'n_j \times 'n_{fp}$ 자코비안 행렬을 나타내고, $['H_{ff}^q]$ 는 i 번째 손가락의 관절의 운동에 의해 생성되는 2차 기구학적 영향계수를 나타내는 $'n_j \times 'n_{fp} \times 'n_{fp}$ 3차원 행렬이다[8]. (5)에서 $['T_g]^T \circ ['H_{ff}^q]$ 는 각 손가락의 기하학과 각 손가락 관절의 토크에 의해 결정되는 요소이므로 이 항을 왼쪽으로 옮겨서 다시 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$['K_f] = ['G_f^q]^T ['K_g] ['G_f^q] \quad (6)$$

여기서

$$['K_f] = ['K_f'] + (['T_g]^T \circ ['H_{ff}^q])$$

2. 로봇 손의 컴플라이언스 제어를 위한 필요 조건

로봇 손을 이용하여 물체를 잡고 조작하는 경우, 손가락 끝과 물체의 사이에는 접촉이 이루어지고, 이 접촉점을 통하여 손가락 끝에 작용하는 힘 및 토크가 전달된다. 이때 전달되는 성분은 접촉의 형태에 따라 정해지는 접촉 구속조건에 의해 제한을 받는다. 또한, 물체의 작업 공간에서 원하는 컴플라이언스 특성을 얻기 위해서는 접촉의 형태에 따라 요구되는 손가락의 개수와 각 손가락의 구조를 파악해야 한다. 본 절에서는 마찰을 갖는 점 접촉형태의 경우, 로봇 손의 컴플라이언스 제어를 위하여 요구되는 손가락의 개수에 대하여 조사하고자 한다.

그림 1과 같이 로봇 손을 이용한 물체의 파지 시스템에는 일반적으로 손가락 사이의 상호간섭과 각 손가락을 구성하고 있는 관절 사이의 상호간섭이 존재한다. 만일 이러한 상호간섭을 제거할 수 있다면, 손가락들과 각 손가락의 관절들은 독립적으로 제어될 수 있기 때문에 로봇 손의 제어가 쉽게 이루어질 수 있다. 또한, 각 손가락 공간에서 물체에 접촉한 수직 방향과 접선 방향의 동작을 분리시키는 것은 복합 제어 방식(hybrid control method)등을 적용하는데 매우 유용하다. 이러한 관점에서, 손가락간의 상호간섭과 손가락 공간에서의 운동 방향들간의 상호간섭을 제거하는 조건을 포함하여 (4)를 벡터형태로 나타내면, 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} K_{oo} \\ \vec{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \end{bmatrix} K_f \quad (7)$$

여기서 K_{oo} 와 K_f 는 각각 작업 공간에서의 강성 행렬 $[K_o]$ 와 손가락 끝 공간에서의 강성 행렬 $[K_f]$ 의 독립 요소들로 재구성된 $\frac{n(n+1)}{2} \times 1, \frac{m(m+1)}{2} \times 1$ 벡터를 나타낸다. $[M_1]$ 은 $[K_o]$ 와 $[K_f]$ 의 독립 요소들간의 $\frac{n(n+1)}{2} \times \frac{m(m+1)}{2}$

관계 행렬을 나타내고, $[M_2]$ 는 모든 손가락의 상호 간섭 요소들을 선택해주는 $\frac{m(m-1)}{2} \times \frac{m(m+1)}{2}$ 행렬을 나타내며, $\vec{0}$ 은 $\frac{m(m-1)}{2} \times 1$ 영 벡터이다.

(7)에서 어떤 경우에는 관계 행렬의 랭크(rank)가 줄어드는 현상이 발생할 수 있는데, 여기서 이러한 현상은 고려하지 않았다. 결과적으로 2차원 및 3차원의 작업 공간에서 강성제어를 성공적으로 수행하기 위한 로봇 손가락 개수는 (7)로부터 표 1 및 표 2와 같이 구할 수 있다.

표 1. 강성 제어를 위한 필요조건(2차원).

Table 1. Necessary condition for stiffness control(2D).

손가락 개수	(a)	(b)	(c)	(d)	비고
2	6	6	10	-2	$[K_o]$ (3×3)
	3	6	10	1	$[K_o]$ (2×2)
3	6	15	21	0	$[K_o]$ (3×3)
4	6	28	36	2	$[K_o]$ (3×3)
5	6	45	55	4	$[K_o]$ (3×3)

표 2. 강성 제어를 위한 필요조건(3차원).

Table 2. Necessary condition for stiffness control(3D).

손가락 개수	(a)	(b)	(c)	(d)	비고
2	21	15	21	-15	$[K_o]$ (6×6)
3	21	36	45	-12	$[K_o]$ (6×6)
4	21	66	78	-9	$[K_o]$ (6×6)
5	21	105	120	-6	$[K_o]$ (6×6)
6	21	153	171	-3	$[K_o]$ (6×6)
7	21	210	231	0	$[K_o]$ (6×6)

표 1과 표 2에서 (a), (b), 그리고 (c)는 각각 $[K_o]$ 의 독립 요소의 개수, $[K_f]$ 에서 모든 손가락의 상호간섭 요소 및 손가락 공간의 운동 방향들간의 상호간섭 요소의 개수, 그리고 $[K_f]$ 의 독립 요소의 개수를 나타낸다. (d) (= (c) - (a) - (b))는 $[K_o]$ 를 생성하기 위해 필요한 $[K_f]$ 의 자유도를 제외한 여유 자유도를 나타낸다.

예를 들어, 두 개의 손가락을 갖는 로봇 손의 경우, 파지한 물체의 작업 공간에 주어진 3×3 강성 행렬은 6개의 독립요소로 구성된다. 그리고 각 손가락의 끝에 정해지는 강성 행렬 ($['K_i], i=1,2$)은 각각 2×2로서 전체 $[K_f]$ 는 4×4이며, 따라서 $[K_f]$ 에는 10개의 독립요소가 존재한다. 또한, 여기에는 6개의 상호간섭 요소가 포함되어 있다. 결과적으로 (7)에서 $[M_1]$ 과 $[M_2]$ 의 차원은 각각 6×10이 되고, $[M_1]$ 과 $[M_2]$ 를 결합하여 나타낸 행렬의 차원은 12×10이 되기 때문에 일반 해를 구하기 위한 입력 변수가 부족함을 확인할 수 있다. 그러므로 2차원에서 두 개의 손가락을 이용할 경우, 파지한 물체의 작업 공간에 주어진 3×3 강성 행렬을 구현할 수 없고, 표 1에서 보는 바와 같이 최소한 세 개의 손가락이 필요함을

알 수 있다.

3. RIFDS 강성 분배 알고리즘

본 절에서는 물체의 작업 공간에서 주어진 강성 특성을 생성하기 위해 요구되는 손가락 끝에서의 강성을 구하는 과정에 대하여 기술한다. 이 과정을 RIFDS (Resolved Inter-Finger Decoupling Solver)로 칭한다. 이 알고리즘을 이용하면, 각 손가락사이의 상호간섭 없이 각 손가락의 독립적인 제어에 의해 원하는 강성 특성을 생성할 수 있는 장점이 있다.

본 논문에서는 제안하는 알고리즘을 설명하기 위해 두 손가락을 갖는 로봇 손의 경우에 대하여 기술하고자 한다. 접촉의 형태는 마찰을 고려한 점 접촉을 가정하였고, 로봇 손의 동작 영역은 2차원이다.

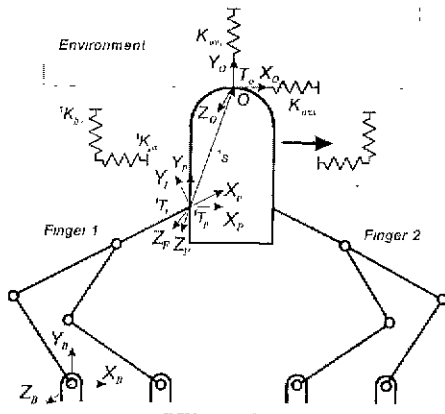


그림 2. 두 개의 손가락을 갖는 로봇 손의 컴플라이언스 제어.

Fig. 2. Compliance control by two-fingers.

예를 들어, 그림 2와 같이 두 손가락을 갖는 로봇 손을 이용하여 물체를 조작할 경우, 물체의 작업점 O 에서의 강성 행렬은 다음과 같이 주어진다.

$$[K_o] = \begin{bmatrix} K_{oa} & K_{oy} \\ K_{oy} & K_{oy} \end{bmatrix} \quad (8)$$

또한, 손가락 끝 공간에서의 강성 행렬은 일반적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[K_f] = \begin{bmatrix} {}^1K_{fx} & {}^1K_{fy} & {}^{12}K_{fx} & {}^{12}K_{fy} \\ {}^1K_{fy} & {}^1K_{fy} & {}^{12}K_{fx} & {}^{12}K_{fy} \\ {}^{21}K_{fx} & {}^{21}K_{fy} & {}^2K_{fx} & {}^2K_{fy} \\ {}^{21}K_{fy} & {}^{21}K_{fy} & {}^2K_{fx} & {}^2K_{fy} \end{bmatrix} \quad (9)$$

이 경우에 표 1로부터 강성 제어를 위한 조건이 만족함을 살펴볼 수 있다. 그림 2에서 물체의 작업 공간과 손가락 끝 공간 사이의 자코비안 행렬은 다음과 같으며

$$[G_o^f] = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \\ b_{31} & b_{32} \\ b_{41} & b_{42} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

각 손가락사이의 상호간섭을 제거하기 위하여 손가락 끝 공간에서의 비간섭이 보장된 강성 행렬을 다음과 같이 설계한다.

$$[K_f^d] = \begin{bmatrix} {}^1K_{fx}^d & 0 & 0 & 0 \\ 0 & {}^1K_{fy}^d & 0 & 0 \\ 0 & 0 & {}^2K_{fx}^d & 0 \\ 0 & 0 & 0 & {}^2K_{fy}^d \end{bmatrix} \quad (11)$$

독립적인 손가락 끝의 강성을 구하기 위한 관계식은 (4)를 전개하여 작업 공간과 손가락 끝 공간의 독립 요소에 의해 정리하면, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_{oo} = [B_f^o] K_{ff}, \quad (12)$$

여기서

$$K_{oo} = [K_{oa} \quad K_{oy} \quad K_{oy}]^T,$$

$$K_{ff} = [{}^1K_{fx}^d \quad {}^1K_{fy}^d \quad {}^2K_{fx}^d \quad {}^2K_{fy}^d]^T,$$

$$[B_f^o] = \begin{bmatrix} (b_{11})^2 & (b_{21})^2 & (b_{31})^2 & (b_{41})^2 \\ b_{11}b_{12} & b_{21}b_{22} & b_{31}b_{32} & b_{41}b_{42} \\ (b_{12})^2 & (b_{22})^2 & (b_{32})^2 & (b_{42})^2 \end{bmatrix}.$$

그러면 물체의 작업 공간에서 주어진 강성 특성을 생성하기 위한 각 손가락의 강성 특성을 구하는 문제는 다음식으로 표현된 행렬의 해를 구하는 문제로 바뀔 수 있다.

$$K_{oo} = [B_f^o] K_{ff}, \quad (13)$$

여기서

$$K_{ff} \geq 0.$$

본 논문에서는 선형 프로그래밍 기법을 이용하여 (13)의 해를 구하고자 한다. 이때 여러 개의 해가 존재할 수 있기 때문에 다음과 같은 목적 함수 Q 를 정의하고.

$$Q = \sum_{i=1}^{n_f} ({}^i w_{xx} {}^i K_{fx}^d + {}^i w_{yy} {}^i K_{fy}^d)$$

손가락 끝의 강성을 크게 하여 파지한 물체에 가해지는 외란에 강인하도록 하기 위하여 Q 를 최대화하는 해를 구한다. 여기서 ${}^i w_{xx}$ 와 ${}^i w_{yy}$ 는 각각 i 번째 손가락의 x 와 y 축에 대한 강성 최적화 가중치를 나타낸다.

결론적으로 파지한 물체의 작업 공간에서 주어진 강성 특성을 생성하기 위한 각 손가락의 강성 특성을 구하는 과정을 다음과 같은 알고리즘으로 요약하여 정리할 수 있다.

RIFDS 알고리즘 :

1) $[K_o]$ 를 설정한 다음, 주어진 $[K_o]$ 로부터 K_{oo} 를 구성한다.

2) 표 1 또는 표 2로부터 로봇 손에 관한 필요조건을

확인한다.

3) 자코비안 행렬 $[G_o^f]$ 를 구한다.

4) 선형 프로그래밍 기법을 이용하여 (13)의 해를 구한다.

5) 과정 4에서 구한 K_{ff} 를 재정리하여 $[K_f^d]$ 를 구한다.

4. RUDS 강성 분배 알고리즘

다음 단계는 RIFDS 알고리즘에서 구해진 각 손가락 끝의 강성 행렬에 대하여 각 손가락 관절에 대한 강성 행렬을 구하도록 한다. 이 과정을 RUDS(Resolved Inter-Joint Decoupling Solver)로 칭한다. 이 알고리즘을 이용하면, 각 손가락에서 관절들간의 상호간섭 없이 각 관절의 독립적인 제어에 의해 손가락 끝 공간에서 원하는 강성 특성을 생성할 수 있다.

한편, 로봇 손가락의 끝 공간에서 주어진 컴플라이언스 특성을 생성하기 위해서는 적어도 로봇 손가락은 손가락 끝 공간에서 주어진 컴플라이언스 행렬의 독립 요소들의 개수 이상의 능동 관절을 지녀야 하고, 이와 같은 조건을 만족시키는데 있어서 보다 효과적인 손가락의 구조는 인간의 손의 생체적인 동작 특성을 모방한 구조이어야 한다[6]. 즉, 로봇 손가락은 기구학적으로 여유 관절을 갖거나 여유 구동을 지녀야 하며, 특별히 여유 구동 메커니즘을 갖는 폐쇄 체인형의 로봇 손가락은 직렬형에 비해 설계의 관점에서 더 적합하다.

그림 3과 같은 5관절 로봇 손가락을 갖는 로봇 손을 고려해 보자.

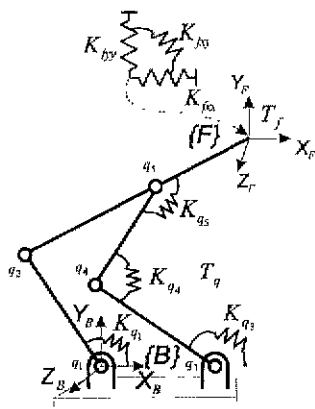


그림 3. 5관절 로봇 손가락.
Fig. 3. A finger with five-bar mechanism.

그림 3에서 i 번째 손가락 끝 공간과 관절 공간 사이의 역 방향 미소변위 관계식은 다음과 같으며

$$\delta^i q = [G_f^q] \delta^i u_f, \tag{14}$$

속도와 힘간의 이중성(duality)에 의하여, i 번째 손가락 끝 공간과 관절 공간사이의 힘 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_f = [G_f^q]^T T_q, \tag{15}$$

(14)와 (15)에서 $\delta^i q$ 와 T_q 는 각각 i 번째 손가락의 관절

에 대한 $'n_j \times 1$ 미소변위 및 토오크 벡터를 나타내고, $\delta^i u_f$ 와 T_f 는 각각 i 번째 손가락 끝에서의 $'n_{fp} \times 1$ 미소변위 및 힘/토오크 벡터를 나타낸다. $[G_f^q]$ 는 i 번째 손가락에 대한 $'n_j \times 'n_{fp}$ 역 방향 자코비안 행렬을 나타낸다.

그림 3에서 손가락 끝 점에서 정해진 강성 행렬은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[K_f] = \begin{bmatrix} 'K_{fxx} & 'K_{fxy} \\ 'K_{fya} & 'K_{fyy} \end{bmatrix} \tag{16}$$

그림 3에서 1, 3, 4, 5 관절이 능동 관절이면, i 번째 손가락에 대한 역 방향 자코비안 행렬은 다음과 같이 유일하게 정의할 수 있다[6].

$$[G_f^q] = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \\ a_{31} & a_{32} \\ a_{41} & a_{42} \end{bmatrix} \tag{17}$$

그리고 i 번째 손가락에 대한 각 관절간의 상호간섭을 제거하기 위하여 관절공간에서의 비간섭이 보장된 강성 행렬을 다음과 같이 설계한다.

$$[K_q^d] = \begin{bmatrix} 'K_{q1}^d & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 'K_{q3}^d & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 'K_{q4}^d & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 'K_{q5}^d \end{bmatrix} \tag{18}$$

그러면 각 관절에 대한 독립 강성을 구하기 위한 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$'K_{ff} = [A_q^f]' K_{qq}, \tag{19}$$

여기서

$$'K_{ff} = ['K_{fxx} \quad 'K_{fxy} \quad 'K_{fya} \quad 'K_{fyy}]^T,$$

$$'K_{qq} = ['K_{q1}^d \quad 'K_{q3}^d \quad 'K_{q4}^d \quad 'K_{q5}^d]^T,$$

$$[A_q^f] = \begin{bmatrix} (a_{11})^2 & (a_{21})^2 & (a_{31})^2 & (a_{41})^2 \\ a_{11}a_{12} & a_{21}a_{22} & a_{31}a_{32} & a_{41}a_{42} \\ (a_{12})^2 & (a_{22})^2 & (a_{32})^2 & (a_{42})^2 \end{bmatrix}.$$

(19)의 일반 해는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$'K_{qq} = [A_q^f]^{-1} 'K_{ff} + (I - [A_q^f]^{-1} [A_q^f]) \xi_q, \tag{20}$$

여기서 $[A_q^f]$ 는 $[A_q^f] ('n_{fp} \times 'n_j)$ 의 의사 역 행렬을 나타내고, I 는 $'n_j \times 'n_j$ 단위 행렬이며, ξ_q 는 임의의 $'n_j \times 1$ 벡터이다.

결론적으로 폐쇄 체인형 구조의 손가락을 갖는 로봇 손을 이용할 경우, 손가락 끝 공간에서 정해진 강성 특성을 생성하기 위한 각 관절의 강성 특성을 구하는 과정은 다음과 같이 알고리즘으로 요약하여 정리할 수 있다.

RUIDS 알고리즘 :

- 1) RIFDS 에 의해 정해진 $[K_f]$ 를 구현하기 위한 로봇 손가락의 형태를 결정한다.
- 2) 각 손가락에 대한 자코비안 행렬 $[G_f^q]$ 를 구한다.
- 3) (6)을 (19)와 같이 다시 정리한다.
- 4) (20)로부터 $'K_{qv}$ 를 구한다.
- 5) 과정 4에서 구한 $'K_{qv}$ 를 재정리하여 $[K_q^d]$ 를 구한다.

III. 로봇 손의 컴플라이언스 제어

본 장에서는 제안한 컴플라이언스 제어 방법의 효용성을 확인하기 위하여 두 손가락을 갖는 로봇 손의 경우와 세 손가락을 갖는 로봇 손의 경우에 대한 시뮬레이션을 수행한다. 여기서 접촉 형태는 마찰을 고려한 점 접촉이고, 미끄러짐 현상은 없다고 가정한다.

1. 두 손가락을 갖는 로봇 손의 경우

그림 2에 나타난 로봇 손을 고려해 보자. 이 로봇 손은 두 개의 동일한 5관절 메커니즘을 갖는 손가락으로 구성되어 있고, 손가락의 사양은 표 3과 같다. 이 로봇 손가락에 대한 기구학은 [9]에 기술되었다.

표 3. 5관절 로봇 손가락의 사양.

Table 3. Physical parameters for five-bar finger.

관절	길이(m)	질량(Kg)	관성 질량(Kgfm ²)
1	0.1	0.3	0.00025
2	0.2	0.6	0.0025
3	0.1	0.3	0.00025
4	0.1	0.3	0.00025
5	0.1	0.3	0.00025

그림 2에서 주어진 일은 y 축 방향에 대해 접촉력을 유지하면서 x 축 방향을 따라 주어진 경로를 추종하는 것이다. 주어진 일을 수행하기 위한 블록 다이어그램은 다음과 같다.

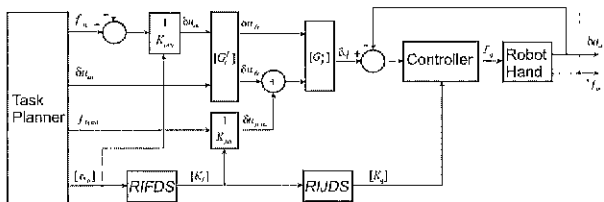


그림 4. 컴플라이언스 제어를 위한 블록도.
Fig. 4. Block diagram for compliance control.

그림 4에서 작업 계획기(task planner)는 초기에 파지된 물체의 작업 공간에서 x축 방향에 대한 경로와 y 축 방향에 대한 접촉력을 설정한다. 또한 강성 특성과 물체를 파지하는데 필요한 손가락의 내력(internal force)을 결정한다. 여기서 y축 방향에 대한 접촉력 제어는 y축

방향으로의 접촉력과 물체의 작업점 O에 설정한 강성 특성에 의해 결정되는 가상 경로를 추종하도록 함으로써 달성하도록 하였다. 로봇 손에 의해 파지된 물체의 작업 공간에서 설정된 강성 특성에 대한 각 손가락의 관절 강성 특성 $[K_q]$ 는 2장에서 기술한 RIFDS와 RUIDS 를 적용하여 구해진다. 그리고 외부환경에 접촉하고 있는 물체에 지속적으로 가해지는 실제의 힘은 다음과 같이 계산하며

$${}^s f_{oy}(t) = \begin{cases} K_{ovy} u_{oc}(t) : u_{oc}(t) > 0 \\ 0 : u_{oc}(t) \leq 0 \end{cases} \quad (21)$$

여기서

$$u_{oc}(t) = u_{od}(t) - u_{em}(t),$$

그리고 $u_{emv}(t)$ 는 외부환경의 위치를 나타낸다.

그러면, i 번째 손가락에 대한 경로와 i 번째 손가락의 관절에 대한 경로는 다음과 같이 구한다. 작업 공간에서 물체의 조작을 위한 동력학은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_o = [M_o] \ddot{u}_o(t) + [B_o] \dot{u}_o(t) + [K_o] \delta u_o(t), \quad (22)$$

여기서

$$\delta u_o(t) = u_{od}(t) - u_{oa}(t).$$

그리고 $u_{od}(t)$, $u_{oa}(t)$ 는 각각 파지된 물체에 설정된 작업점의 주어진 위치와 실제 위치를 나타내는 $n \times 1$ 벡터이고, $[M_o]$ 와 $[B_o]$ 는 각각 물체의 $n \times n$ 관성 행렬과 감쇠 행렬을 나타낸다. 그리고 \ddot{u}_o 은 물체의 가속도 벡터를 나타낸다.

각 손가락으로 분배되는 힘은 (2)를 이용하고, 손가락의 내력은 안정된 파지를 고려하여 결정하였다. 그리고 손가락 공간에서 유도되는 $m \times 1$ 미소 변위 벡터 δu_f 는 다음과 같이 구하였다.

$$\delta u_f = [K_f]^{-1} \delta T_f, \quad (23)$$

여기서

$$\delta u_f = [\delta^1 u_f \quad \delta^2 u_f \quad \dots \quad \delta^m u_f]^T.$$

i 번째 손가락 끝의 미소 변위 $\delta^i u_f$ 에 대한 i 번째 손가락 관절들의 미소 변위는 다음과 같으며

$$\delta^i q = [G_f^q]^{-1} \delta^i u_f. \quad (24)$$

i 번째 손가락의 관절에서의 경로는 다음과 같다.

$${}^i q(t+1) = {}^i q(t) + \delta^i q. \quad (25)$$

또한, 손가락 공간에서 정해진 강성 특성을 생성하기 위한 관절 토크 식은 다음과 같이 주어지며

$${}^i T_q(t) = {}^i K_q {}^i q_e(t) + {}^i K_{qv} \dot{{}^i q}_e(t), \quad (26)$$

여기서

$${}^i q_e(t) = {}^i q(t) - {}^i q_a(t)$$

이고, ${}^i q_a(t)$ 는 실제 관절의 위치를 나타내며, 보다 안정된 경로 추종을 위해 감쇄 이득 ${}^i K_{qd}$ 를 포함시켰다. (26)은 각 관절이 독립적으로 제어되는 독립 관절 기반 제어 방식을 나타낸다.

시뮬레이션에서 사용된 로봇 손의 동역학 모델은 다음과 같이 주어지는데

$${}^i T_q(t) = [{}^i I_{qq}] \dot{q}(t) + \dot{q}(t)^T [{}^i P_{qqq}] \dot{q}(t), \quad (27)$$

여기서 $[{}^i I_{qq}]$ 와 $[{}^i P_{qqq}]$ 는 각각 i 번째 손가락에 대한 $'n_i \times 'n_i$ 관성 행렬과 $'n_i \times 'n_i \times 'n_i$ 관성힘 배열을 나타낸다[7]. 본 시뮬레이션에서는 작업 공간의 강성 행렬을 다음과 같이 설정하였고,

$$[K_o] = \begin{bmatrix} 50 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix} \text{ [N/m]},$$

여기서 y 축 방향은 힘 제어 방향으로서 위치 제어 방향인 x 축의 강성 보다 작게 설정하였고, y 축 방향에 대하여 주어진 접촉력은 0.05 [N]로 설정하였으며, y 축 방향의 힘은 접촉환경의 안쪽에 y 축 방향으로 5 [mm]의 가상 경로를 설정하여 제어될 수 있도록 하였다. 또한, x 축 방향으로 이동 속도는 0.01 [m/sec]로 설정하였다. 내력은 각 손가락의 x 축 방향에 대하여 0.025 [N]으로 주었다. 그림 2에서와 같이 초기에 로봇 손이 물체를 파지한 기하학적 구조는 좌우 대칭이고, 첫 번째 손가락의 파지점 위치는 물체의 작업점 O 에 대하여 x 축 방향으로 -0.03 [m], y 축 방향으로 -0.06 [m]이며, 두 번째 손가락의 파지점 위치는 x 축 방향으로 0.03 [m], y 축 방향으로 -0.06 [m]이다. 그리고 선형 프로그램에서 x 와 y 축에 대한 i 번째 손가락의 강성 최적화 가중치 ${}^i w_{xx}$ 와 ${}^i w_{yy}$ 는 모두 1.0으로 설정하였다. 이러한 조건에서 시뮬레이션을 수행한 결과, x 축 방향 경로와 y 축 방향에 대한 접촉력 추이를 각각 그림 4와 그림 5에 나타내었다. 시뮬레이션 결과로부터 두 손가락간의 상호간섭을 배제한 형태의 제안한 컴플라이언스 제어 방법을 적용하여 작업 공간에서 원하는 방향의 운동과 접촉력을 제어할 수 있음을 확인할 수 있다.

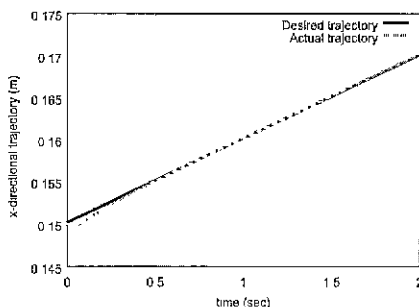


그림 5. x 축 방향 경로.
Fig. 5. Trajectory to the x -direction.

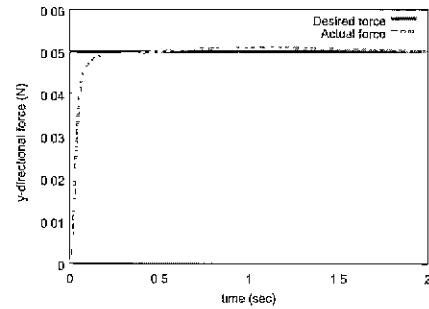


그림 6. y 축 방향 접촉력.
Fig. 6. Force trajectory to the y -direction.

2 세 손가락을 갖는 로봇 손의 경우

이 절에서는 그림 7과 같은 세 개의 손가락을 갖는 로봇 손을 이용하여 파지된 물체의 컴플라이언스 제어를 수행한다.

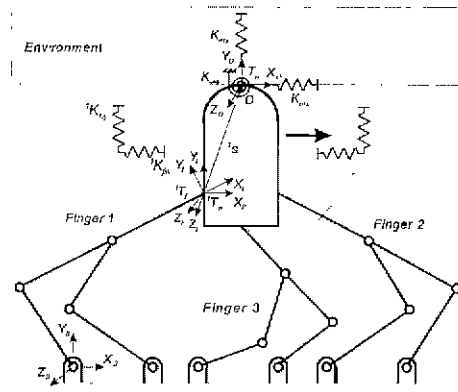


그림 7. 세 개의 손가락을 갖는 로봇 손의 컴플라이언스 제어.

Fig. 7. Compliance control by three-fingers.

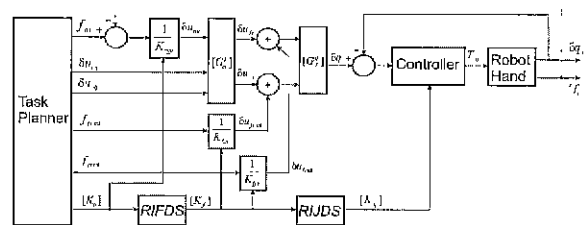


그림 8. 컴플라이언스 제어를 위한 블록도.
Fig. 8. Block diagram for compliance control.

각 손가락의 물리적인 파라미터는 두 손가락을 갖는 로봇 손의 경우와 동일하다. 그러나 이 시뮬레이션에서는 x, y, ϕ 방향에 대한 3자유도의 운동을 고려한다. 그림 7에서 y 축 방향에 대하여 주어진 접촉력은 0.05 [N] 이고, x 축 방향으로 이동 속도는 0.01 [m/sec]로 설정하였다. 이때 파지된 물체의 자체 작은 로봇 손 기준 좌표계의 x 축에서 본 작업 공간 좌표계의 x 축의 기울기를 나타내는데, 여기서는 0으로 설정하였다. 내력은 첫 번째 손가락과 두 번째 손가락은 각각 x 축 방향에 대하여 0.025 [N] 그리고 세 번째 손가락은 y 축 방향에

대하여 0.025 [N]를 주었다. 주어진 일을 수행하기 위한 블록 다이어그램은 그림 8과 같다. 시뮬레이션에서 초기에 작업 공간에서 설정한 강성 행렬은 다음과 같다.

$$[K_o] = \begin{bmatrix} K_{ox1} & K_{ox2} & K_{ox\phi} \\ K_{oy1} & K_{oy2} & K_{oy\phi} \\ K_{oz1} & K_{oz2} & K_{oz\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 50 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 0.3 \end{bmatrix} \text{ [N/m]} \quad (28)$$

여기서 y 축 방향은 힘 제어 방향으로서 위치 제어 방향인 x 축의 강성 보다 작게 설정하였고, ϕ 방향의 강성은 매우 작게 하여 물체의 자세 변화가 쉽게 일어날 수 있도록 하였다.

파지된 물체의 작업 공간에 설정한 3자유도의 컴플라이언스 특성을 성공적으로 생성하기 위해서는 표 1로부터 최소한 세 개의 손가락이 필요함을 알 수 있다. 로봇 손의 파지 형태는 첫번째 손가락과 두 번째 손가락은 서로 대칭이고, 세 번째 손가락은 물체의 아래 부분을 파지하고 있다.

2장에서 기술한 (13)을 그림 7에 나타낸 세 손가락 시스템에 대하여 나타내면, 다음과 같이 주어지는데

$$K_{ov} = \begin{bmatrix} 1.0 & 0.0 & 1.0 & 0.0 & 1.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ y_1 & 0.0 & y_2 & 0.0 & y_3 & 0.0 \\ 0.0 & 1.0 & 0.0 & 1.0 & 0.0 & 1.0 \\ 0.0 & -x_1 & 0.0 & x_2 & 0.0 & x_3 \\ y_1^2 & x_1^2 & y_2^2 & x_2^2 & y_3^2 & x_3^2 \end{bmatrix} K_{ff} \quad (29)$$

여기서

$$K_{ov} = [K_{ox1} \quad K_{ox2} \quad K_{ox\phi} \quad K_{oy1} \quad K_{oy2} \quad K_{oy\phi}]^T$$

$$K_{ff} = [{}^1K_{fx1} \quad {}^1K_{fy1} \quad {}^2K_{fx2} \quad {}^2K_{fy2} \quad {}^3K_{fx3} \quad {}^3K_{fy3}]^T$$

그리고 x_i 와 y_i 는 각각 물체의 작업점 O 로부터 i 번째 손가락의 접촉점까지의 거리 변수를 나타내고, 모두 양수로 정한다. (29)를 살펴보면, 관계 행렬의 두 번째 행의 모든 요소가 0으로 나타남을 확인할 수 있는데, 이것은 각 손가락 공간에서 상호간섭 요소 K_{fxy} 을 제거하였기 때문에 결과적으로 이들의 합인 K_{oxy} 가 항상 0이 됨을 의미한다. 이러한 현상은 관계 행렬의 랭크가 줄어든 경우로서 작업 공간에서의 강성 특성을 임의로 설정할 수 없음을 보여주는 것이다. 또한 세 번째 행은 물체의 x 축 방향과 회전 방향의 상호간섭 항 $K_{ox\phi}$ 와 관련이 있다. 여기서 K_{ff} 의 모든 요소는 양수이어야 하고, $y_i (i=1,2,3)$ 가 모두 양수이기 때문에 설정된 $K_{ox\phi} = 0$ 을 얻을 수 없다. 따라서 $K_{ox\phi}$ 와 관련된 항을 제외하고, 선형 프로그래밍 기법을 사용하여 K_{ff} 를 먼저 구한 다음, 구한 K_{ff} 를 (29)에 다시 대입하여 $K_{ox\phi}$ 를 구하는 과정을 선택하며, 결과적으로 초기에 설정한 작업 공간에서의 강성 행렬은 다음과 같이 변경된다.

$$[K_o] = \begin{bmatrix} 50 & 0 & 3.69 \\ 0 & 10 & 0 \\ 3.69 & 0 & 0.3 \end{bmatrix} \text{ [N/m]} \quad (30)$$

여기서 사용된 각 파라미터(단위: m) $x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3$ 는 각각 0.03, 0.06, 0.03, 0.06, 0, 0.1이다. 그리고 강성 최적화 가중치는 모두 1.0으로 설정하였다.

결과적으로 이러한 파지 형태에서는 x 축 방향과 회전 방향 사이의 상호간섭이 항상 존재함을 알 수 있다. 한편, 다른 상호간섭 성분들은 모두 0으로 설정될 수 있다.

그러면 파지 형태에 따른 현상을 분석하기 위해 그림 9를 살펴 보자. 그림 9는 그림 7과는 파지 형태가 다르다. 즉, 작업점 O 가 세 손가락으로 형성되는 파지 영역 내부에 존재하는 경우이다. 이러한 경우, (29)의 관련 행렬의 (3, 5)요소는 $-y_3$ 로 바뀌게 된다. 이렇게 되면 (28)에 주어진 강성 특성을 얻기 위한 손가락 공간에서의 해가 존재함을 살펴볼 수 있다. 따라서, 작업 공간에서 설정한 강성 특성을 생성하기 위해서는 로봇 손의 파지 형태를 신중하게 고려해야 함을 알 수 있다.

(30)으로 주어진 강성 특성을 생성하기 위한 시뮬레이션 결과는 그림 10과 그림 11에 주어진다. x 축 방향의 경로와 y 축 방향에 대한 접촉력이 만족할 만한 추이를 나타내고 있음을 살펴볼 수 있다. 파지된 물체의 자세각은 그림 12와 같으며, 초기 동작 단계에서 파지된 물체의 자세에 약간의 변동이 일어남을 확인할 수 있다.

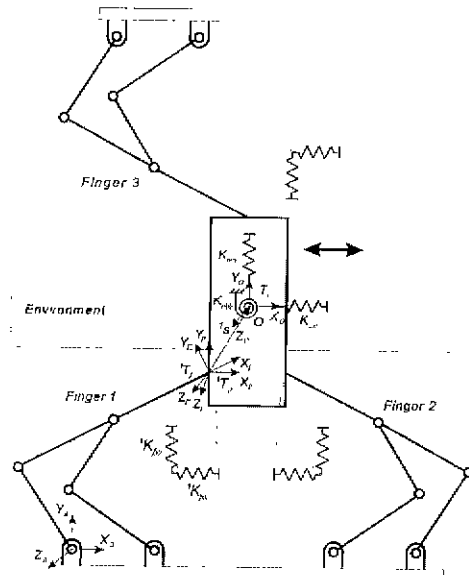


그림 9. 세 개의 손가락을 갖는 로봇 손의 컴플라이언스 제어(힘 집중 파지).

Fig. 9. Compliance control by three-fingers (force closure grasp).

그림 7과 같은 파지 형태는 세 개의 손가락으로 연필을 잡고 글씨를 쓰는 형태와 유사하다. 이러한 동작에서는 x 축 방향의 경로오차가 연필의 자세와 관련한 각도오

차를 초래할 수 있음을 경험할 수 있다. 그러므로 그림 7과 같이 물체를 파지하면, $K_{ox\phi}$ 의 존재는 자연스러운 것이다. 이러한 관점에서 (30)의 결과는 생체모방 (biomimetic)에 근거한 결과로 볼 수 있다. 한편, 그림 9의 경우는 힘 집중 파지 형태로서, 이러한 경우는 자세 변화를 허용하지 않는 것이 자연스러운 결과로 받아들여진다.

추가적으로 로봇 손을 이용한 물체의 조작 실험을 위해서는 안정된 물체의 파지가 이루어져야 하므로 각 손가락의 내력을 적절히 분배하기 위한 연구가 필요하다.

IV. 결론

본 논문에서는 로봇 손을 위한 새로운 컴플라이언스 제어 방법을 제안하였다. 제안한 컴플라이언스 제어 방법은 두 단계의 강성 분배 알고리즘 RIFDS와 RIIDS로 구성된다. 또한, 로봇 손에 의해 파지된 물체의 작업 공간에서 원하는 컴플라이언스 특성을 생성하기 위하여 로봇 손이 갖추어야 할 조건에 대하여 해석하였고, 다양한 시뮬레이션을 통하여 제안한 방법의 효용성을 확인하였다. 이러한 해석을 통하여 로봇 손을 이용하여 파지된 물체의 컴플라이언스 제어를 성공적으로 수행하기 위해서는 로봇 손을 구성하는 손가락의 개수와 각 손가락의 구조가 매우 중요함을 알 수 있었고, 원하는 컴플라이언스 특성을 생성하기 위하여 로봇 손이 취해야 할 파지 형태에 대한 신중한 고려가 필요함을 확인할 수 있었다.

추후의 과제로는 본 논문에서 제안한 방법을 컴플라이언스 제어가 요구되는 다양한 분야에 적용하는 것이다.

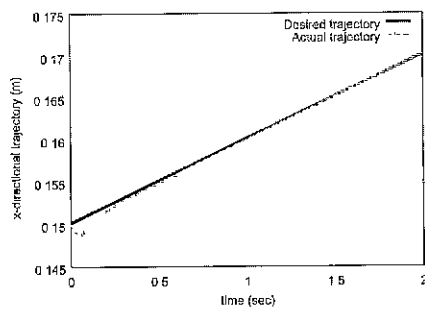


그림 10. x 축 방향 경로.
Fig. 10. Trajectory to the x-direction.

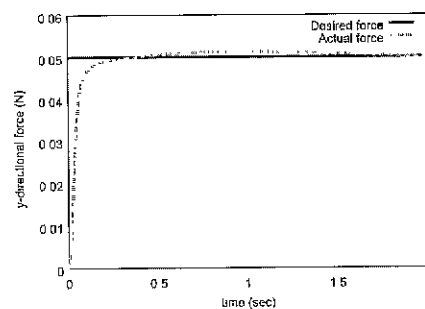


그림 11. y 축 방향 집속력.
Fig. 11. Force trajectory to the y-direction.

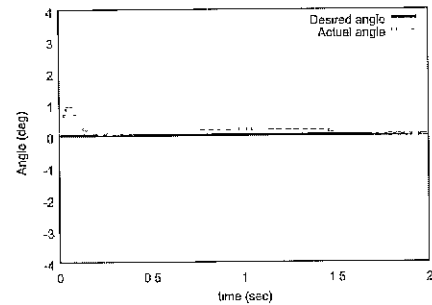


그림 12. 파지된 물체의 자세각.
Fig. 12. Orientation angle of the grasped object.

참고문헌

- [1] T. Yoshikawa, and X.-Z. Zheng, "Coordinated dynamic hybrid position/force control for multiple robot manipulators handling one constrained object," *Int Jour. of Robotics Research*, vol. 12, no. 3, pp. 219-230, 1993.
- [2] T. Hasegawa, T. Matsuoka, T. Kiriki, and K. Honda, "Manipulation of an object by a multi-fingered hand with multi-sensors," *Proc. of Int. Conf. on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation*, pp. 174-179, 1996.
- [3] V. Nguyen, "Constructing force-closure grasps in 3-D," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 240-245, March, 1987.
- [4] 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.
- [5] Y. T. Lee, H.-R Choi, W. K. Chung, and Y. Youm, "Stiffness control of a coupled tendon-driven robot hand," *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 14, no. 5, pp. 10-19, Oct., 1994.
- [6] B.-R. So, B.-J. Yi, S.-R. Oh, and I. H. Suh, "An independent joint-based compliance control method for a five-bar finger mechanism via redundant actuators," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2140-2146, 1999.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] B.-J. Yi, I. H. Suh, and S.-R. Oh, "Analysis of a five-bar finger mechanism having redundant actuators with applications to stiffness and frequency modulation," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 759-765, 1997.



김 병 호

1966년 2월 18일생. 1989년 금오공대 전자공학과(공학사). 1994년 동 대학원(공학석사), 1995년~현재 한양대 전자컴퓨터공학부(박사과정) / 한국과학기술연구원 지능제어연구센터 학생연구원. 관심분야는 biomimetic compliance control, multi-fingered robot/artificial hands and multiple arm control, macro/micro mechanism and intelligent control.

서 일 흥

제어·자동화·시스템공학 논문지 제6권, 제4호, 참조.



이 병 주

1960년 6월 7일생. 1984년 한양대 기계공학과(공학사). 1986년 텍사스주립대(오스틴) 기계공학과(공학석사). 1991년 동 대학원(공학박사). 1992년~1995년 한국기술교육대 제어기계공학과 조교수. 1995년~현재 한양대 전자컴퓨터공학부 부교수. 관심분야는 biomechanical system modeling and analysis, parallel/multiple arm and multi-fingered hands design and control, haptic interface, 여유자유도/여유구동 로봇 시스템, animation of dynamic systems.

오 삼 록

제어·자동화·시스템공학 논문지 제6권, 제4호, 참조.