로봇 손을 이용한 조립 작업의 컴플라이언스 특성 설정에 관한 연구 : 2차원 모델

A Study on Specifying Compliance Characteristics for Assembly Tasks Using Robot Hands: Two Dimensional Model

김 병 호, 오 상 록, 이 병 주, 서 일 홍
(Byoung-Ho Kim, Sang-Rok Oh, Byung-Ju Yi, and Il Hong Suh)

Abstract : This paper provides a guideline for specifying the operational compliance characteristics considering the location of compliance center and the grasp points in assembly tasks using robot hands. Through various assembly tasks, we analyze the conditions of the achievable operational stiffness matrix with respect to the location of compliance center and the grasp points. Also, we show that some of coupling stiffness elements in the operational space cannot be planned arbitrarily. As a result, it is concluded that the location of compliance center on the grasped object and the grasp points play important roles for successful assembly tasks and also the operational stiffness matrix should be carefully specified by considering those conditions.

Keywords : robot hand, compliance characteristics, location of compliance center, grasp points

I. 서론

본 논문에서는 로봇 손을 이용한 조립 작업에서 작업 공간의 컴플라이언스 특성 설정에 관하여 연구하고자 한다. 로봇 손을 이용하여 물체를 잡고 조작하는 경우에는 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 않음을 경험하여 왔다[1] - [3]. 로봇 손을 이용하여 물체를 조작하는 경우에 특히, 준 정적인 상태에서 동작하는 경우, 힘 센서를 사용하여 측정한 힘 신호를 사용하는 방법 대신에 컴플라이언스(compliance) 제어 방법이 효과적으로 사용될 수 있다.

이와 관련하여 많은 연구자들이 파지 강성 또는 컴플라이언스 분야에 대하여 연구해 왔다[4] - [7]. Nguyen[4]은 로봇 손에 의해 파지된 물체의 컴플라이언스 제어를 위하여 2차원 및 3차원에서 손가락 끝에서의 강성을 가상의 스프링으로 모델링 하였다. Yokoi[5]등은 직접 컴플라이언스 제어 방법을 제안하고, 병렬 팔 메커니즘에 적용하였다. Cutkosky[6]등은 로봇 손가락의 컴플라이언스와 각 손가락의 서어보(servo) 이득, 그리고 파지 형태의 기하학적인 변화등에 의해 결정되는 다지 로봇 손의 컴플라이언스 모델에 관하여 해석하였다. 또한 Lee[7]등은 로봇 손에 파지된 물체의 작업 공간에서 대각선 성분만을 갖는 강성 행렬을 정의하고, 이를 제어하기 위한 방법에 대하여 연구하였다. 최근에 Kim[8]등은 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 손가락의 제어를 기반으로 한 컴플라이언스 제어 방법을 제안하였다.

일반적으로 로봇 손을 이용한 물체의 조립 작업에서 작업 공간의 적절한 컴플라이언스 특성 설정은 팩인홀(peg - in - hole) 작업, 팩아웃홀(peg - out - hole) 작업 및 다양한 조립 작업에 있어서 매우 중요하다[9] - [12]. 또한 작업의 특성, 컴플라이언스 기준점 및 파지점의 위치에 따라 작업 공간의 컴플라이언스 특성 설정이 다르다. 최근에 작업의 특성을 고려한 컴플라이언스 특성 설정에 관한 연구[13][16]가 진행되었으나, 컴플라이언스 기준점 및 파지점의 위치에 따라 컴플라이언스 특성 설정이 달라지는 현상에 대해서는 고려하지 않았다.

본 논문에서는 독립적인 손가락의 제어를 기반으로 한 컴플라이언스 제어 방법을 조립 작업에 적용할 때 컴플라이언스 기준점이나 파지점의 위치에 따라 컴플라이언스 특성 설정이 다르게 됨을 다양한 조립 작업을 대상으로 해석하고, 적절한 컴플라이언스 특성 설정 방법을 제시하고자 한다.

접수일자 : 2000. 6. 23., 수정완료 : 2000. 9. 18.
김병호 : 한양대학교 전자컴퓨터공학부, 한국과학기술연구원 지능제어연구센터
오상록 : 한국과학기술연구원 지능제어연구센터
이병주, 서일홍 : 한양대학교 전자컴퓨터공학부

II. 로봇 손의 강성 특성

로봇 손을 이용한 물체의 파지 및 조작에 있어서 강성(또는 컴플라이언스) 특성은 유용하게 이용될 수 있다. 그림 1과 같이 로봇 손을 이용한 물체의 조립 작업(팩인홀 및 팩아웃홀 작업)에서 작업 공간의 적절한 컴플라이언스 특성 설정은 성공적인 작업을 수행하기 위하여 매우 중요하다[13][16]. 본 장에서는 로봇 손을 이용한 일반적인 물체의 파지 및 조작에 있어서 정해지는 작업 공간과 손가락 끝 공간간의 강성 관계와 각 손가락 끝 공간과 관절 공간간의 강성 관계를 기술한다.

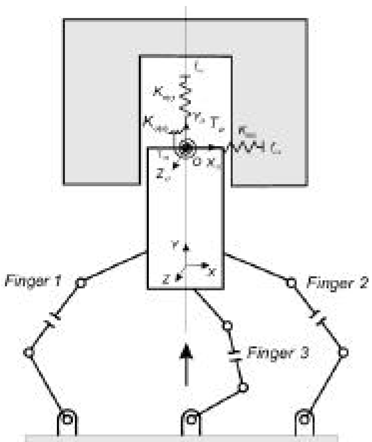

그림 1. 로봇 손을 이용한 물체의 조립 작업.
Fig. 1. Assembly task of an object by robot hands.

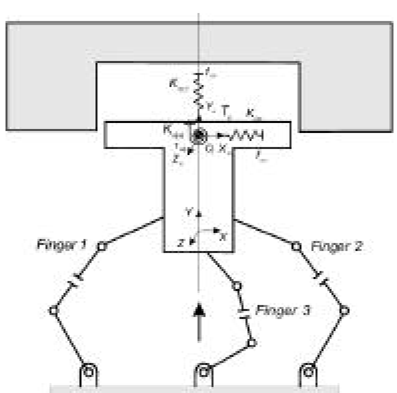

그림 2. 로봇 손을 이용한 T형 물체의 조립 작업.
Fig. 2. Assembly task of T - type object by robot hands.

그림 2는 2차원 공간에서 3개의 손가락(n_f ? 3)을 갖는 로봇 손이 딱딱한 T형 물체를 구멍에 조립하는 작업을 나타낸다. 여기서 각 손가락은 ${}^i n_j$ 개의 관절을 갖는다. 물체의 작업 공간(operational space)에서의 힘/토오크 벡터와 손가락 끝 공간에서 힘/토오크 벡터 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_o ? [G_o^f]^T T_f , \qquad (1)$$

여기서 T_o 는 작업 공간에서 물체의 관성력과 외부의 힘을 포함한 n?1 힘/토오크 벡터(n : 작업 공간의 자유도)이고, T_f 는 손가락의 끝 공간에서의 m?1 (m ? $\sum_{i=1}^{n_f} {}^i n_{fi}$, ${}^i n_{fi}$: i 번째 손가락 끝 공간의 자유도) 힘/토오크 벡터를 나타낸다. 그리고 $[G_o^f]$는 작업 공간과 손가락 끝 공간 사이의 m?n 자코비안 행렬(Jacobian matrix)이며, $[G_o^f]^T$ 는 $[G_o^f]$ 의 전치 행렬(transpose matrix)을 나타낸다.

그림 3은 그림 2에서 물체의 컴플라이언스 기준점 O_1 을 중심으로 한 작업 공간과 손가락 끝 공간 및 각 손가락의 관절 공간간의 강성 관계를 나타낸다. 여기서 주어진 작업을 성공적으로 수행하기 위해서는 작업의 특성에 따라 작업 공간의 강성 특성을 적절히 설정하여야 하고, 설정된 강성 특성을 성공적으로 구현하기 위해서는 적절한 손가락의 개수와 구조가 매우 중요하다.

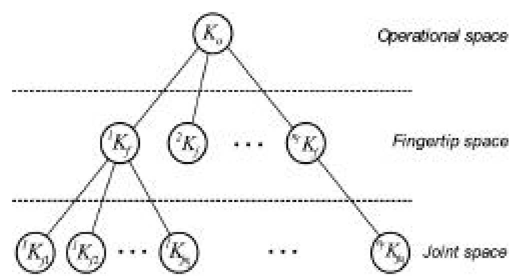

그림 3. 로봇 손을 이용한 물체의 조작을 위한 강성 관계.
Fig. 3. Stiffness relation for manipulating an object grasped by robot hands.

예를 들어, 2차원 공간에서 로봇 손을 이용한 물체의 3자유도 컴플라이언스 제어를 위한 로봇 손가락의 구조로는 5관절 구동형 로봇 손가락이 유용하게 이용될 수 있다[8][14]. 또한 작업 공간의 강성 특성을 설정함에 있어서 컴플라이언스 기준점이나 물체의 파지점의 위치가 중요하며, 작업 공간에서 설정된 강성 특성을 각 손가락의 관절 공간으로 적절히 분배해야 한다.

그림 2와 그림 3에서 작업 공간과 손가락 끝 공간간의 강성 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다[8].

$$[K_o] ? [G_o^f]^T [K_f][G_o^f] \qquad (2)$$

여기서 $[K_o]$는 작업 공간에서의 n?n 강성 행렬이고, $[K_f]$는 손가락 끝 공간에서의 m?m 강성 행렬을 나타낸다.

또한, 각 손가락 끝 공간과 각 손가락의 관절 공간

간의 강성 관계는 사용된 손가락의 구조에 따라 유일하게 정해지는 자코비안 행렬을 사용하여 유도할 수 있다. 본 논문에서는 5관절 구동형 로봇 손가락을 지니는 로봇 손을 사용할 경우에 대하여 기술하며, 유일하게 정해지는 역 방향 자코비안 행렬을 사용하면 각 손가락 끝 공간과 각 손가락의 관절 공간간의 강성 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[{}^i\boldsymbol{K}_f] = [{}^i\boldsymbol{G}_f^q]^T[{}^i\boldsymbol{K}_q][{}^i\boldsymbol{G}_f^q] \tag{3}$$

여기서 $[{}^i\boldsymbol{K}_f]$는 i번째 손가락 끝 공간의 ${}^in_{fp} \times {}^in_{fp}$ 강성 행렬이고, $[{}^i\boldsymbol{K}_q]$는 i번째 손가락의 i번째 관절의 ${}^in_j \times {}^in_j$ 관절 강성 행렬이며, $[{}^i\boldsymbol{G}_f^q]$는 i번째 손가락의 끝 공간과 관절 공간간의 ${}^in_j \times {}^in_{fp}$ 자코비안 행렬을 나타낸다.

III. 손가락의 기구적 독립을 고려한 컴플라이언스 제어 방법

본 장에서는 그림 2와 같이 2차원 공간에서 로봇 손을 이용한 조립 작업을 대상으로 손가락의 기구적인 독립을 고려한 컴플라이언스 제어 방법을 기술하고자 한다. 그림 2와 같은 조립 작업에서는 x축, y축 및 z축을 중심으로 한 회전축(θ축) 방향의 컴플라이언스 제어가 필요하며, 작업 공간에서 주어지는 3×3 강성 행렬 $[\boldsymbol{K}_o]$는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[\boldsymbol{K}_o] = \begin{bmatrix} \boldsymbol{K}_{oxx} & \boldsymbol{K}_{oxy} & \boldsymbol{K}_{ox\theta} \\ \boldsymbol{K}_{oyx} & \boldsymbol{K}_{oyy} & \boldsymbol{K}_{oy\theta} \\ \boldsymbol{K}_{o\theta x} & \boldsymbol{K}_{o\theta y} & \boldsymbol{K}_{o\theta\theta} \end{bmatrix} \tag{4}$$

Betti[15]의 정리를 이용하면, 선형특성을 갖는 물체의 강성 행렬은 항상 대칭(symmetric)이므로, (4)에서 독립 요소는 6개 이다. 따라서 (4)로 주어지는 작업 공간의 강성(또는 컴플라이언스) 특성을 생성하기 위하여 두 손가락을 이용할 경우, 손가락 끝 공간의 강성 행렬은 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$[\boldsymbol{K}_f] = \begin{bmatrix} {}^1\boldsymbol{K}_{fxx} & {}^1\boldsymbol{K}_{fxy} & {}^{12}\boldsymbol{K}_{fxx} & {}^{12}\boldsymbol{K}_{fxy} \\ {}^1\boldsymbol{K}_{fyx} & {}^1\boldsymbol{K}_{fyy} & {}^{12}\boldsymbol{K}_{fyx} & {}^{12}\boldsymbol{K}_{fyy} \\ {}^{21}\boldsymbol{K}_{fxx} & {}^{21}\boldsymbol{K}_{fxy} & {}^2\boldsymbol{K}_{fxx} & {}^2\boldsymbol{K}_{fxy} \\ {}^{21}\boldsymbol{K}_{fyx} & {}^{21}\boldsymbol{K}_{fyy} & {}^2\boldsymbol{K}_{fyx} & {}^2\boldsymbol{K}_{fyy} \end{bmatrix} \tag{5}$$

그런데, (5)와 같이 나타낸 손가락 끝 공간의 강성 특성에서 대칭성을 적용하면, 독립적인 강성 요소는 10개가 되며, 이러한 독립 요소를 제어하기 위해서 최소한 로봇 손가락은 10개의 능동 관절을 지녀야 한다. 더욱이 3차원에서 6×6 강성 행렬 $[\boldsymbol{K}_o]$를 생성하기 위해서는 21개의 능동 관절이 필요하게 된다. 따라서 각 손가락은 매우 많은 관절을 가지게 되므로 로봇 손가락의 설계적 측면에서 어려움이 따르고, 손가락의 제어를 위한 서어보 시스템의 구성이 매우 복잡해지며, 정밀한 제어 성능을 얻기가 쉽지 않다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 로봇 손가락의 기구적 독립을 고려하여 비간섭이 보장된 컴플라이언스 제어 방법[8]이 제안되었는데, 각 로봇 손가락의 강성 특성을 2개의 독립 강성으로 나타낼 경우, (4)로 주어진 6개의 독립 요소를 제어하기 위해서 로봇 손은 최소한 세 개의 손가락을 지녀야 함을 확인할 수 있다. 즉, 세 손가락을 지니는 로봇 손의 경우, 손가락 끝 공간의 독립 강성 행렬을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[\boldsymbol{K}_f] = \begin{bmatrix} {}^1\boldsymbol{K}_{fxx} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & {}^1\boldsymbol{K}_{fyy} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & {}^2\boldsymbol{K}_{fxx} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & {}^2\boldsymbol{K}_{fyy} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & {}^3\boldsymbol{K}_{fxx} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & {}^3\boldsymbol{K}_{fyy} \end{bmatrix} \tag{6}$$

그림 2에서 컴플라이언스 기준점 O_1에 대한 작업 공간과 손가락 끝 공간간의 자코비안 행렬 $[\boldsymbol{G}_o^f]$는 다음과 같이 나타낼 수 있으며, 컴플라이언스 기준점이 변경되면, x축과 y축 좌표계의 부호가 바뀌게 된다.

$$[\boldsymbol{G}_o^f] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & y_1 \\ 0 & 1 & -x_1 \\ 1 & 0 & y_2 \\ 0 & 1 & x_2 \\ 1 & 0 & y_3 \\ 0 & 1 & x_3 \end{bmatrix}$$

결과적으로 (4)로 주어지는 작업 공간의 강성 특성을 생성하기 위해서는 (6)과 같은 손가락 끝 공간의 강성 특성이 요구된다. (6)으로 표현된 손가락 끝 공간의 강성 특성은 손가락의 기구적인 독립을 고려하여 상호 비간섭이 보장되므로 각 손가락의 독립적인 제어에 의해 파지된 물체의 작업 공간에서 주어진 강성 특성을 구현할 수 있음을 의미한다. 이와 같이 손가락의 기구적 독립을 고려한 컴플라이언스 제어 방법은 비교적 손가락의 관절 개수를 줄일 수 있기 때문에 손가락의 제어를 위한 서어보 시스템을 간단하게 구성할 수 있으며, 손가락의 제어가 용이한 장점이 있다.

손가락의 기구적 독립을 고려한 강성 특성을 구하기 위하여 (2)를 벡터 형태로 재정리하면, 다음과 같이 나타낼 수 있고, 선형 프로그래밍 기법을 사용하여 각 손가락 끝 공간의 독립 강성 K_{ff}를 구할 수 있다.

$$K_{oo} = [\boldsymbol{B}_f^o]\ K_{ff} \tag{7}$$

여기서

$$K_{oo} = [\boldsymbol{K}_{oxx}\ \boldsymbol{K}_{oxy}\ \boldsymbol{K}_{ox\theta}\ \boldsymbol{K}_{oyy}\ \boldsymbol{K}_{oy\theta}\ \boldsymbol{K}_{o\theta\theta}]^T,$$

$$K_{ff} = [{}^1\boldsymbol{K}_{fxx}\ {}^1\boldsymbol{K}_{fyy}\ {}^2\boldsymbol{K}_{fxx}\ {}^2\boldsymbol{K}_{fyy}\ {}^3\boldsymbol{K}_{fxx}\ {}^3\boldsymbol{K}_{fyy}]^T,$$

이고, ${}^i\boldsymbol{K}_{fxx}, {}^i\boldsymbol{K}_{fyy}$는 각각 i번째 손가락의 x와 y축에 대한 강성값을 나타낸다. $[\boldsymbol{B}_f^o]$는 작업 공간과 손가락 끝 공간간의 강성 관계 행렬을 나타내는데, 작업 물체

에 설정된 컴플라이언스 기준점의 위치와 물체의 기하학적 조건에 따라 다르게 표현된다. 그림 2에서 컴플라이언스 기준점 O_1에 대한 $[B_f^o]$는 다음과 같다.

$$[B_f^o] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ y_1 & 0 & y_2 & 0 & y_3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & -x_1 & 0 & x_2 & 0 & x_3 \\ y_1^2 & x_1^2 & y_2^2 & x_2^2 & y_3^2 & x_3^2 \end{bmatrix},$$

x_i와 y_i는 각각 i번째 손가락의 파지점과 팩의 컴플라이언스 기준점간의 거리를 나타내는 변수들을 나타내고, 모두 양수이다.

(7)에서 $[B_f^o]$를 살펴보면, 두 번째 행의 모든 요소가 0으로 나타남을 확인할 수 있는데, 이것은 독립 손가락 기반 컴플라이언스 제어를 위해 각 손가락 공간에서 상호 간섭 강성 ${}^iK_{fxy}$ ($i = 1,2,3$)를 제거하였기 때문에 결과적으로 이들의 합인 K_{oxy}가 항상 0이 됨을 의미한다. 또한, 세 번째 행은 팩의 x_o축과 z_o축을 중심으로 한 회전축과의 상호 간섭 강성 $K_{ox\theta}$와 관련이 있다. 여기서 K_{ff}의 모든 요소는 양수이어야 하고, y_1, y_2, y_3는 모두 양수이기 때문에 $K_{ox\theta}$는 항상 존재하게 된다. 이러한 경우 $K_{ox\theta}$는 다음과 같은 과정에 의해 정해질 수 있다. (7)에서 $[B_f^o]$의 두 번째 행과 세 번째 행을 제외한 행렬을 $[D_f^o]$라 하고, 벡터 K_{oo}의 요소 중에서 K_{oxy}와 $K_{ox\theta}$를 제외한 벡터를 K_{oo}^*라 하면, 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있고,

$$K_{oo}^* = [D_f^o] K_{ff} \tag{8}$$

선형 프로그래밍 기법을 사용하여 K_{ff}를 구하면, $K_{ox\theta}$는 다음과 같이 결정된다.

$$K_{ox\theta} = [B_f^o]_3 K_{ff} \tag{9}$$

여기서 $[B_f^o]_3$는 $[B_f^o]$의 3행을 나타낸다.

한편 $K_{oy\theta}$는 $[B_f^o]$의 다섯 번째 행이 (+), (−)값을 공존하므로 작업의 특성에 따라 (+), 0, (−)값으로 적절히 설정할 수 있다.

이와 같은 과정을 통해서 작업 공간의 강성 특성은 작업의 특성과 작업 물체의 기하학적 조건으로 인한 파지점의 위치 및 컴플라이언스 기준점의 위치에 따라 신중히 설정해야 함을 알 수 있다.

IV. 작업 공간의 컴플라이언스 특성 설정

기존의 연구에서 의하면, 강성 행렬에서 대각선 성분은 작업의 특성에 따라 적절히 설정한다. 즉, 위치 제어를 하게 되는 축에 대해서는 큰 강성으로 설정하고, 상대적으로 힘 제어 축이면 작은 강성으로 설정하며, 위치 및 힘 제어를 동시에 필요로 하는 경우에는 중간 값으로 설정한다. 또한 중요하지 않는 축 방향에 대해서는 임의의 값으로 설정하는 방법이 제시되었다 [13][16]. 그러나 작업의 특성에 따른 컴플라이언스 기준점 및 파지점의 위치에 따라 컴플라이언스 특성 설정이 달라지는 현상에 대해서는 고려하지 않았다. 또한 작업 공간의 상호 간섭 강성은 일반적으로 서로 다른 축간의 동적 특성이 미치는 영향으로서 제어의 어려움을 초래할 수 있으며, 작업 물체의 컴플라이언스 기준점과 파지점의 위치에 따라 다르기 때문에 신중히 설정되어야 한다.

본 장에서는 주어진 작업의 특성 및 작업 물체의 모양에 따라 적절히 선정된 컴플라이언스 기준점의 위치를 고려하여 작업 공간과 손가락 끝 공간간의 강성 관계를 조사함으로써 작업 공간에서의 상호 간섭 강성을 임의로 설정할 수 없음을 보이고, 작업 공간의 강성 특성을 적절히 설정하는 방법을 제시하고자 한다.

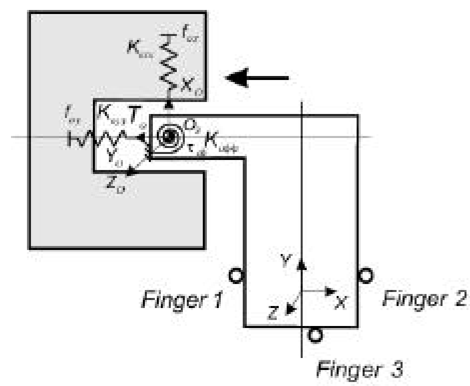

그림 4. 로봇 손을 이용한 ㄱ형 물체의 조립 작업.
Fig. 4. Assembly task of ㄱ - type object by robot hands.

1. ㄱ형 물체의 조립 작업

그림 4는 로봇 손을 이용하여 ㄱ자 모양의 물체를 조립하는 경우인데, 그림 2의 경우와는 작업 공간과 손가락 끝 공간간의 강성 관계가 다르며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_{oo} = [B_f^o]\ K_{ff}$$

$$\begin{bmatrix} K_{oxx} \\ K_{oxy} \\ K_{ox\theta} \\ K_{oyy} \\ K_{oy\theta} \\ K_{o\theta\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -x_1 & 0 & -x_2 & 0 & -x_3 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ -y_1 & 0 & -y_2 & 0 & -y_3 & 0 \\ y_1^2 & x_1^2 & y_2^2 & x_2^2 & y_3^2 & x_3^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^1K_{fxx} \\ {}^1K_{fyy} \\ {}^2K_{fxx} \\ {}^2K_{fyy} \\ {}^3K_{fxx} \\ {}^3K_{fyy} \end{bmatrix} \tag{10}$$

(10)에서 $[B_f^o]$의 3행과 5행의 부호가 모두 (−)임을 확인할 수 있다. 따라서 ㄱ형 물체의 조립 작업에서 컴플라이언스 기준점이 O_2에 있는 경우에는 $K_{ox\theta}$와 $K_{oy\theta}$가 항상 존재하게 됨을 알 수 있다. 여기서 $K_{oy\theta}$의 물리적인 의미는 y축 방향의 외부 힘(접촉력 또는 외란)에 의해 조립 물체의 자세 변화가 일어날

수 있음을 의미한다. 결국 $K_{ox?}$ 나 $K_{oy?}$ 를 0 또는 임의의 값으로 설정하게 될 경우, 그림 4와 같은 파지 구조에서 근본적으로 존재하는 조립 물체의 자세 변화를 제어할 수 없기 때문에 조립이 원활하게 이루어질 수 없다.

(10)에서 $K_{ox?}$ 와 $K_{oy?}$ 는 각각 다음과 같이 결정할 수 있다. 먼저 (7)을 다음과 같이 재정리한다.

$$K^*_{oo} ? [D^o_f] K_{ff} \tag{11}$$

여기서 $[D^o_f]$ 행렬과 K^*_{oo} 벡터는 각각 다음과 같다.

$$[D^o_f] ? \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ y_1^2 & x_1^2 & y_2^2 & x_2^2 & y_3^2 & x_3^2 \end{bmatrix},$$

$$K^*_{oo} ? [K_{oxx} \; K_{oyy} \; K_{o??}]^T$$

그리고 (11)에서 선형 프로그래밍 기법을 사용하여 K_{ff} 를 구하면, $K_{ox?}$ 와 $K_{oy?}$ 는 각각 다음과 같이 결정된다.

$$K_{ox?} ? [B^o_f]_3 K_{ff} \tag{12}$$

$$K_{oy?} ? [B^o_f]_5 K_{ff} \tag{13}$$

여기서 $[B^o_f]_i$ 는 $[B^o_f]$ 의 i 번째 행을 나타낸다.

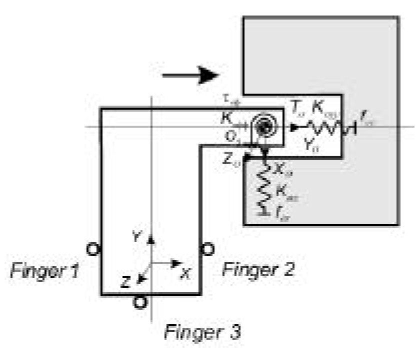

그림 5. 로봇 손을 이용한 ? 형 물체의 조립 작업.
Fig. 5. Assembly task of ? -type object by robot hands.

표 1. 조립 작업을 위한 강성 특성 설정.
Table 1. Specifying of operational stiffness characteristics.

컴플라이언스 기준점 및 파지점 위치	K_{oxx}	K_{oxy}	$K_{ox?}$	K_{oyy}	$K_{oy?}$	$K_{o??}$	비고
O_1	가,S	0	??	L	0, ??	S	그림 2
O_2	S	0	??	L	??	S	그림 4
O_3	S	0	??	L	??	S	그림 5
O_1, 왼쪽	S	0	??	L	??	S	그림 6
O_1, 오른쪽	S	0	??	L	??	S	
O_2, 왼쪽	S	0	??	L	0, ??	S	
O_2, 오른쪽	S	0	??	L	0, ??	S	
O_1, 왼쪽, 오른쪽 (두 손 사용)	S	0	??	L	0, ??	S	

2. ?형 물체의 조립 작업

그림 5는 로봇 손을 이용한 ?형 물체의 조립 작업을 나타낸다. 그림 5에서 컴플라이언스 기준점 O_3 에 대한 $[B^o_f]$ 는 그림 4와 비교하여 다음과 같이 변경된다.

$$[B^o_f] ? \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & ?x_1 & 0 & ?x_2 & 0 & ?x_3 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ y_1 & 0 & y_2 & 0 & y_3 & 0 \\ y_1^2 & x_1^2 & y_2^2 & x_2^2 & y_3^2 & x_3^2 \end{bmatrix} \tag{14}$$

즉, $[B^o_f]$ 의 5행의 부호가 (!)에서 (?)로 바뀐다. 이러한 경우, $K_{oy?}$ 값은 양수로 설정되어야 한다. (14)에서 $K_{ox?}$ 와 $K_{oy?}$ 는 각각 (11) (13)의 과정을 통하여 결정할 수 있다.

3. ? 형 물체의 조립 작업: 한 손의 경우

그림 6은 로봇 손을 이용한 ? 형 물체의 조립 작업을 나타낸다. 그림 6에서 컴플라이언스 기준점이 O_1 에 있고, 로봇 손이 물체의 왼쪽 세 지점을 파지하는 경우에는 그림 4와 동일한 해석이 가능하고, 로봇 손이 물체의 오른쪽 세 지점을 파지하는 경우에는 그림 5와 동일한 해석이 가능하다.

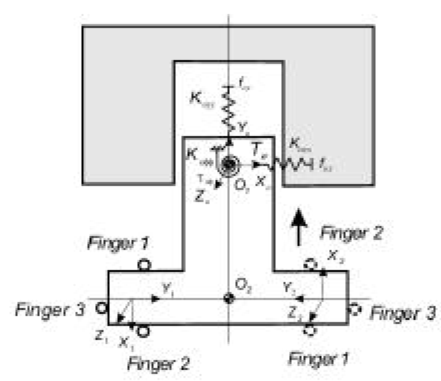

그림 6. 로봇 손을 이용한 ? 형 물체의 조립 작업.
Fig. 6. Assembly task of ? -type object by robot hands.

한편, 그림 6에서 컴플라이언스 기준점이 O_2 에 있는 경우에는 새로운 해석이 가능하다. 로봇 손이 물체의 왼쪽 세 지점을 파지하는 경우, $[B^o_f]$ 는 다음과 같

이 나타낼 수 있다.

$$[\boldsymbol{B}_f^o] ? \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & ?x_1 & 0 & ?x_2 & 0 & ?x_3 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ y_1 & 0 & ?y_2 & 0 & ?y_3 & 0 \\ ?y_1^2 & x_1^2 & y_2^2 & x_2^2 & y_3^2 & x_3^2 \end{bmatrix} \qquad (15)$$

이 경우에는 $\boldsymbol{K}_{oy?}$ 를 적절한 (?), 0, (?) 값으로 설정하는 것이 가능하므로 $\boldsymbol{K}_{oy?}$ 에 의한 영향은 제거할 수 있으나, $\boldsymbol{K}_{ox?}$ 성분은 항상 (?)값으로 존재하게 된다.

또한 로봇 손이 물체의 오른쪽 세 지점을 파지하는 경우에 $[\boldsymbol{B}_f^o]$ 는 다음과 같다.

$$[\boldsymbol{B}_f^o] ? \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & ?x_1 & 0 & ?x_2 & 0 & ?x_3 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ y_1 & 0 & ?y_2 & 0 & y_3 & 0 \\ ?y_1^2 & x_1^2 & y_2^2 & x_2^2 & y_3^2 & x_3^2 \end{bmatrix} \qquad (16)$$

이 경우에도 $\boldsymbol{K}_{ox?}$ 성분은 항상 (?)값으로 존재함을 확인할 수 있다.

4. ? 형 물체의 조립 작업: 두 손의 경우

그림 6과 같은 조립 작업에서 물체의 크기가 상대적으로 크거나 무거운 경우, 또는 정교한 작업이 요구될 경우에는 두 손을 사용하는 것이 효과적이다. 두 손을 사용하여 조립 작업을 수행할 경우, 컴플라이언스 기준점이 $\boldsymbol{O}_1$ 에 있는 경우에는 그림 4와 그림 5를 조합한 경우와 동일한 해석이 가능하다. 이때 작업 공간과 손가락 끝 공간간의 독립 강성 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_{oo} ? [\boldsymbol{B}_f^o] \; K_{ff} \qquad (17)$$

여기서

$$K_{oo} ? ?\boldsymbol{K}_{oxx}\; \boldsymbol{K}_{oxy}\; \boldsymbol{K}_{ox?}\; \boldsymbol{K}_{oyy}\; \boldsymbol{K}_{oy?}\; \boldsymbol{K}_{o??}\, ?^T,$$

$$K_{ff} ? ?{}_1^1\boldsymbol{K}_{fxx}\; {}_1^1\boldsymbol{K}_{fyy}\; {}_1^2\boldsymbol{K}_{fxx}\; {}_1^2\boldsymbol{K}_{fyy}\; {}_1^3\boldsymbol{K}_{fxx}\; {}_1^3\boldsymbol{K}_{fyy}$$
$$\quad {}_2^1\boldsymbol{K}_{fxx}\; {}_2^1\boldsymbol{K}_{fyy}\; {}_2^2\boldsymbol{K}_{fxx}\; {}_2^2\boldsymbol{K}_{fyy}\; {}_2^3\boldsymbol{K}_{fxx}\; {}_2^3\boldsymbol{K}_{fyy}\, ?^T,$$

이고, ${}_k^i\boldsymbol{K}_{fxx}, {}_k^i\boldsymbol{K}_{fyy}$ 는 각각 k 번째 로봇 손, i 번째 손가락의 x 와 y 축에 대한 강성값을 나타낸다. 또한 작업 공간과 손가락 끝 공간간의 강성 관계 행렬 $[\boldsymbol{B}_f^o]$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[\boldsymbol{B}_f^o] ? \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & ?{}_1x_1 & 0 & ?{}_1x_2 & 0 & ?{}_1x_3 & 0 & ?{}_2x_1 & 0 & ?{}_2x_2 & 0 & ?{}_2x_3 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ ?{}_1y_1 & 0 & ?{}_1y_2 & 0 & ?{}_1y_3 & 0 & {}_2y_1 & 0 & {}_2y_2 & 0 & {}_2y_3 & 0 \\ ?{}_1y_1^2 & {}_1x_1^2 & {}_1y_2^2 & {}_1x_2^2 & {}_1y_3^2 & {}_1x_3^2 & {}_2y_1^2 & {}_2x_1^2 & {}_2y_2^2 & {}_2x_2^2 & {}_2y_3^2 & {}_2x_3^2 \end{bmatrix}$$

여기서 ${}_kx_i$ 와 ${}_ky_i$ 는 각각 k 번째 로봇 손, i 번째 손가락의 파지점과 팩의 컴플라이언스 기준점간의 거리를 나타내는 변수들을 나타내고, 모두 양수이다.

또한 컴플라이언스 기준점이 $\boldsymbol{O}_2$ 에 있는 경우에는 그림 6에서 왼쪽 또는 오른쪽 만을 파지하는 경우를 조합한 경우와 동일한 해석이 가능하며, 작업 공간과 손가락 끝 공간의 독립 강성 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[\boldsymbol{B}_f^o] ? \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & ?{}_1x_1 & 0 & ?{}_1x_2 & 0 & ?{}_1x_3 & 0 & ?{}_2x_1 & 0 & ?{}_2x_2 & 0 & ?{}_2x_3 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ {}_1y_1 & 0 & ?{}_1y_2 & 0 & ?{}_1y_3 & 0 & {}_2y_1 & 0 & ?{}_2y_2 & 0 & {}_2y_3 & 0 \\ ?{}_1y_1^2 & {}_1x_1^2 & {}_1y_2^2 & {}_1x_2^2 & {}_1y_3^2 & {}_1x_3^2 & {}_2y_1^2 & {}_2x_1^2 & {}_2y_2^2 & {}_2x_2^2 & {}_2y_3^2 & {}_2x_3^2 \end{bmatrix} \qquad (18)$$

결과적으로 (17)과 (18)에서 $[\boldsymbol{B}_f^o]$ 의 3행은 ${}_kx_i$ 의 모든 부호가 (?)임을 확인할 수 있다. 따라서 물체의 회전 영향을 줄이기 위해서는 x 방향으로의 적절한 보상이 요구됨을 알 수 있다. 한편, 두 손을 사용하여 조립 작업을 수행하면, 적절히 여유 자유도를 활용할 수 있으므로 이러한 회전 영향을 보상할 수 있을 것으로 판단된다. 이러한 관찰은 사람의 경우에 있어서 두 손을 이용한 조립 작업을 수행할 때 쉽게 경험할 수 있는 일이다. 결론적으로 이러한 해석을 통하여 그림 2, 4, 5 및 6의 조립 작업을 수행하기 위한 작업 공간의 강성 특성 설정 기준은 표 1과 같이 정리할 수 있다. 표 1에서 S와 L은 각각 작은 값(Small)과 큰 값(Large)을 의미하고, ?, ? 는 양수이며, $\boldsymbol{K}_{oxx}, \boldsymbol{K}_{oyy}, \boldsymbol{K}_{o??}$ 에 의해 결정된다.

V. 결론

본 논문에서는 로봇 손을 이용한 조립 작업에서 물체의 작업 공간에서의 컴플라이언스 특성을 설정할 때 작업의 특성에 따른 컴플라이언스 기준점이나 파지점의 위치에 따라 컴플라이언스 특성 설정이 다르게 됨을 다양한 조립 작업을 대상으로 해석하고, 적절한 컴플라이언스 특성 설정 기준을 제시하였다. 결론적으로 로봇 손을 이용한 조립 작업에서 컴플라이언스 기준점이나 파지점의 위치가 성공적인 조립 작업을 위해 매우 중요하며, 이러한 조건을 고려한 컴플라이언스 특성 설정이 요구됨을 확인하였다. 이러한 연구 결과는 로봇 손을 이용한 다양한 조립 작업의 컴플라이언스 특성 설정에 유용하게 이용될 수 있다.

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] H. Maekawa, K. Tanie, and K. Komoria, "Dynamic grasping force control using tactile feedback for grasp of multifingered hand, " *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2462 - 2469, April, 1996.

[4] V. Nguyen, "Constructing force- closure grasps in 3- D, " *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 240 - 245, March, 1987.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 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.

[9] D. E. Whitney, "Quasi - static assembly of compliantly supported rigid parts," *Jour. of Dynamic systems, Measurement, and control*, vol. 104, pp. 65 - 77, March, 1982.

[10] H. Asada and Y. Kakumoto, "The dynamic analysis and design of a high - speed insertion hand using the generalized centroid and virtual mass," *Jour. of Dynamic systems, Measurement, and control*, vol. 112, pp. 646 - 652, 1990.

[11] T. Matsuoka, T. Hasegawa, T. Kiriki, and K, Honda, "Mechanical assembly based on motion primitives of multi - fingered hand," *Proc. of Advanced Intelligent Mechatronics*, 1997.

[12] P. Dario and M. Rucci, "An approach to disassembly problems in robotics," *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 460 - 467, 1993.

[13] 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.

[14] 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.

[15] H. Leipholz, *Theory of elasticity*, Leyden: Noordhoff, 1974.

[16] K. B. Shimoga and A. A. Goldenberg, "Grasp admittance center: choosing admittance center parameters," *Proc. of American Control Conference*, pp. 2527 - 2532, 1991.

김 병 호

1966년 2월 18일생. 1989년 금오공대 전자공학과(공학사). 1994년 동 대학원(공학석사), 1995년 현재 한양대 전자컴퓨터공학부 (박사과정) / 한국과학기술연구원 지능제어연구센터 학생연구원. 관심분야: biomimetic compliance control, multi - fingered hand mechanisms with applications to dexterous robotic tasks, multiple arm control, macro/micro mechanism, industrial applications of ? - processor, and intelligent control.

이 병 주

제어?자동화?시스템공학 논문지 제6권, 제7호, 참조.

오 상 록

제어?자동화?시스템공학 논문지 제6권, 제4호, 참조.

서 일 홍
제어?자동화?시스템공학 논문지 제 6 권, 제 4 호, 참조.