



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2016-0095928
(43) 공개일자 2016년08월12일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)

B25J 15/00 (2006.01) B25J 13/08 (2006.01)

B25J 15/02 (2006.01) B25J 15/08 (2006.01)

(52) CPC특허분류

B25J 15/0009 (2013.01)

B25J 13/081 (2013.01)

(21) 출원번호 10-2015-0017567

(22) 출원일자 2015년02월04일

심사청구일자 2015년02월04일

(71) 출원인

울산대학교 산학협력단

울산광역시 남구 대학로 93(무거동)

(72) 발명자

하철근

서울특별시 강남구 압구정로 113, 29동 1602호 (압구정동, 미성아파트)

하수안 빈

대한민국 680-749 울산광역시 남구 대학로 93 (무거동)

(74) 대리인

특허법인다래, 특허법인우인

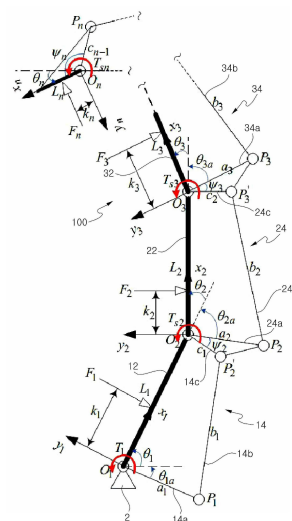
전체 청구항 수 : 총 14 항

(54) 발명의 명칭 불충분 구동형 로봇 핑거 장치 및 그 제어 방법

(57) 요약

본 발명의 실시예에 따른 불충분 구동형 로봇 핑거 장치는 물체와 직접 접촉하도록 된 로봇 핑거와; 상기 로봇 핑거를 제어하도록 된 로봇 핑거 제어부를 포함하는데, 상기 로봇 핑거는 복수의 지골을 포함하며, 상기 복수의 지골은 제1 관절 조인트에서 베이스에 회전 가능하게 연결된 제1 지골과, 제2 관절 조인트에서 제1 지골에 회전 가능하게 연결된 제2 지골과, 제3 관절 조인트에서 제2 지골에 회전 가능하게 연결된 제3 지골을 포함하고, 상기 로봇 핑거 제어부는 상기 복수의 지골 각각에서 상기 물체와의 접촉력을 산출한다.

대표도 - 도1



(52) CPC특허분류

B25J 15/022 (2013.01)

B25J 15/08 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 20140811

부처명 교육부

연구관리전문기관 한국연구재단

연구사업명 산학협력선도대학육성사업

연구과제명 자동차 조립라인 자동화를 위한 힘 제어 가능한 그리퍼 설계기술 개발

기 여 율 1/1

주관기관 울산대학교 산학협력단

연구기간 2014.08.01 ~ 2015.01.31

명세서

청구범위

청구항 1

물체와 직접 접촉하도록 된 로봇 핑거와;
 상기 로봇 핑거를 제어하도록 된 로봇 핑거 제어부
 를 포함하는 불충분 구동형 로봇 핑거 장치에 있어서,
 상기 로봇 핑거는 복수의 지골을 포함하며, 상기 복수의 지골은
 제1 관절 조인트에서 베이스에 회전 가능하게 연결된 제1 지골과,
 제2 관절 조인트에서 제1 지골에 회전 가능하게 연결된 제2 지골과,
 제3 관절 조인트에서 제2 지골에 회전 가능하게 연결된 제3 지골
 을 포함하고,
 상기 로봇 핑거 제어부는 상기 복수의 지골 각각에서 상기 물체와의 접촉력을 산출하는 것을 특징으로 하는 로
 봇 핑거 장치.

청구항 2

제1항에 있어서,
 상기 제1 관절 조인트에서 상기 베이스에 대하여 상기 제1 지골을 회전시키는 액추에이터와;
 상기 액추에이터에 의해 상기 제1 지골에 가해지는 회전 작동력의 일부를 제2 지골에 전달하여 상기 제2 관절
 조인트에서 상기 제1 지골에 대하여 상기 제2 지골을 회전시키는 제1 운동전달 요소와;
 상기 제1 운동전달 요소에 의해 상기 제2 지골에 가해지는 회전 작동력의 일부를 제3 지골에 전달하여 상기 제3
 관절 조인트에서 상기 제2 지골에 대하여 상기 제3 지골을 회전시키는 제2 운동전달 요소
 를 더 포함하는 로봇 핑거 장치.

청구항 3

제2항에 있어서,
 상기 제1 운동전달 요소는
 상기 제1 지골에 대한 상기 제2 지골의 위치를 기구학적으로 구속하는 제1 수동 요소와
 상기 제2 관절 조인트에서 상기 제2 지골에 상기 제2 회전 작동력으로서 제1 스프링 토크를 가하는 제1 스프링
 을 포함하며
 상기 제2 운동전달 요소는
 상기 제2 지골에 대한 상기 제3 지골의 위치를 기구학적으로 구속하는 제2 수동 요소와
 상기 제3 관절 조인트에서 상기 제3 지골에 상기 제3 회전 작동력으로서 제2 스프링 토크를 가하는 제2 스프링
 을 포함하는 것인 로봇 핑거 장치.

청구항 4

제3항에 있어서,

상기 제1 수동 요소는

일단이 상기 제1 관절 조인트에 회전가능하도록 연결된 제1 주구동바와,

상기 제1 일차 구동바에 대하여 회전가능하게 일단이 제1 주구동 조인트에 연결된 제1 불충분 구동바와,

상기 제1 불충분 구동바에 회전가능하게 일단이 제1 부구동 조인트에 연결되고 타단이 상기 제2 관절 조인트에 회전가능하게 연결된 제1 부구동바

를 포함하는 제1 4절 링크 구조를 포함하며,

상기 제2 수동 요소는

일단이 상기 제2 관절 조인트에 회전가능하도록 연결된 제2 주구동바와,

상기 제2 일차 구동바에 대하여 회전가능하게 일단이 제2 주구동 조인트에 연결된 제2 불충분 구동바와,

상기 제2 불충분 구동바에 회전가능하게 일단이 제2 부구동 조인트에 연결되고 타단이 상기 제3 관절 조인트에 회전가능하게 연결된 제2 부구동바

를 포함하는 제2 4절 링크 구조를 포함하는 것인 로봇 핑거 장치.

청구항 5

제4항에 있어서,

상기 로봇 핑거 제어부는 상기 복수의 지골 각각에서 상기 로봇 핑거의 기구학적 값, 상기 제1 수동 요소의 기구학적 값, 상기 제2 수동 요소의 기구학적 값, 상기 제1 회전 작동력, 상기 제1 스프링의 특성 및 상기 제2 스프링의 특성을 이용하여 접촉력을 산출하는 것인 로봇 핑거 장치.

청구항 6

제5항에 있어서,

상기 로봇 핑거의 기구학적 값은

상기 복수의 지골 각각의 길이,

상기 제1 관절 조인트로부터 상기 제1 지골이 상기 물체에 접촉하는 접촉점까지의 거리, 및

상기 제2 관절 조인트로부터 상기 제2 지골이 상기 물체에 접촉하는 접촉점까지의 거리

를 포함하며,

상기 제1 수동 요소의 기구학적 값은

상기 제1 주구동바의 길이,

상기 제1 불충분 구동바의 길이,

상기 제1 부구동바의 길이

를 포함하며,

상기 제2 수동 요소의 기구학적 값은

상기 제2 주구동바의 길이,

상기 제2 불충분 구동바의 길이,

상기 제2 부구동바의 길이

를 포함하는 것인 로봇 핑거 장치.

청구항 7

제6항에 있어서,

상기 로봇 핑거 제어부는 관계식:

$$\begin{bmatrix} k_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \alpha_{12} & k_2 & 0 & \dots & 0 \\ \alpha_{13} & \alpha_{23} & k_3 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \alpha_{1n} & \alpha_{2n} & \alpha_{3n} & \dots & k_n \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ \dots \\ F_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \dots \\ \tau_n \end{bmatrix}$$

을 이용하여 상기 접촉력을 산출하도록 구성되며,

상기 관계식에서

k_i 는 i 번째 관절 조인트로부터 i 번째 지골이 상기 물체와 접촉하는 접촉점까지의 거리이고;

F_i 는 i 번째 지골이 상기 물체에 접촉하는 접촉점에서의 접촉력이며;

$$\alpha_{ij} = k_j + \sum_{k=i}^{j-1} L_k \cos \left(\sum_{m=k+1}^j \theta_m \right), \quad i < j$$

이며;

단, L_k 는 k 번째 지골의 길이이고,

θ_m 는 베이스 또는 $m-1$ 번째 지골에 대한 m 번째 지골의 회전각인 것인 로봇 핑거 장치.

청구항 8

제7항에 있어서,

상기 로봇 핑거 제어부는 i 번째 지골이 상기 물체와 접촉하지 않을 경우 상기 관계식 좌변에서 매트릭스의 i 번째 행과 i 번째 열을 제거하고, F_i 를 제거하고, 우변에서 τ_i 를 제거한 후 상기 접촉력을 산출하는 것인 로봇 핑거 장치.

청구항 9

제2항에 있어서,

상기 로봇 핑거 제어부는 상기 복수의 지골 각각에서 상기 로봇 핑거의 기구학적 값, 상기 제1 운동전달 요소의 기구학적 값, 상기 제2 운동전달 요소의 기구학적 값을 이용하여 접촉력을 산출하는 것인 로봇 핑거 장치.

청구항 10

제9항에 있어서,

상기 로봇 핑거 제어부는 관계식:

$$J_T^T F = \tau$$

을 이용하여 상기 접촉력을 산출하도록 구성되며,

상기 관계식에서,

J_T 는 상기 로봇 핑거의 기구학적 값에 의해 정해지는 $n \times n$ 매트릭스인데, n 은 상기 복수의 지골의 개수이며,

$F = [F_1, F_2, \dots, F_n]^T$ 인데, F_i 는 i 번째 지골이 상기 물체에 접촉하는 접촉점에서의 접촉력이며,

$\tau = [\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n]^T$ 인데, τ_i 는 i 번째 지골에서의 토크인 것인 로봇 핑거 장치.

청구항 11

제10항에 있어서,

상기 로봇 핑거 제어부는 i 번째 지골이 상기 물체와 접촉하지 않을 경우 상기 관계식 좌변에서 J_T 매트릭스의 i 번째 행과 i 번째 열을 제거하고, F_i 를 제거하고, 우변에서 τ_i 를 제거한 후 상기 접촉력을 산출하는 것인 로봇 핑거 장치.

청구항 12

복수의 지골을 포함하는 로봇 핑거의 기구학적 값과, 로봇 핑거의 복수의 지골 사이의 운동전달 요소의 기구학적 값을 이용하여 접촉력을 산출하는 단계

를 포함하는 불충분 구동형 로봇 핑거 장치의 제어 방법.

청구항 13

제12항에 있어서,

상기 접촉력 산출 단계는 관계식:

$$J_T^T F = \tau$$

을 이용하여 상기 접촉력을 산출하며,

상기 관계식에서,

J_T 는 상기 로봇 핑거의 기구학적 값에 의해 정해지는 $n \times n$ 매트릭스인데, n 은 상기 복수의 지골의 개수이며,

$F = [F_1, F_2, \dots, F_n]^T$ 인데, F_i 는 i 번째 지골이 상기 물체에 접촉하는 접촉점에서의 접촉력이며,

$\tau = [\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n]^T$ 인데, τ_i 는 i 번째 지골에서의 토크인 것인 불충분 구동형 로봇 핑거 장치의 제어 방법.

청구항 14

제13항에 있어서,

상기 접촉력 산출 단계는 i 번째 지골이 상기 물체와 접촉하지 않을 경우 상기 관계식 좌변에서 J_T 매트릭스의 i 번째 행과 i 번째 열을 제거하고, F_i 를 제거하고, 우변에서 τ_i 를 제거한 후 상기 접촉력을 산출하는 것인 불충분 구동형 로봇 핑거 장치의 제어 방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 로봇 핑거에 관한 것으로, 보다 상세하게는 각 접촉점에서의 접촉력을 산술적으로 계산하여 복잡한 센서 및 제어 시스템을 필요로 하지 않는 불충분 구동형 로봇 핑거 장치에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 물체를 다루는 로봇 핑거 장치가 다양한 형태로 개발되어 다양한 분야에 활용되어 왔다. 균일한 접촉력을 제공하는 등방성 그리퍼(gripper)의 경우, 인간의 손가락과 유사한 그리핑 작동을 할 수 있는 장치를 제공하려면 일반적으로 십수개의 액추에이터와 센서가 필요하다. 이러한 유형의 로봇손으로 Utah/MIT Hand 등 다양한 것들이 개발되었다.

[0003] 한편, 로봇 핑거의 자유도보다 적은 액추에이터를 사용하는 불충분 구동형 로봇 핑거의 경우 각 관절마다 액추에이터를 설치하여 개별적인 제어를 하는 경우에 비해서 액추에이터 개수를 줄일 수 있어 여러 가지 장점을 제공한다. 이러한 불충분 구동형 로봇 핑거 장치의 경우에, 스프링이나 기구학적 제한 등을 이용하여, 장치가 다루는 물체의 형태에 스스로 적응할 수 있도록 설계하는 것이 중요하다.

[0004] 하지만, 종래의 불충분 구동형 로봇 핑거의 경우 각 지골(phalange)에서의 접촉점에서의 접촉력을 효율적으로 산출하여 효과적으로 로봇 핑거를 제어하는 방법에 대한 제시는 없었다.

[0005] (선행문헌)

[0006] 특허등록 제10-1340294호

발명의 내용

해결하려는 과제

[0007] 본 발명은 전술한 바와 같이 불충분 구동형 로봇 핑거에서 각 지골에서의 접촉점에서의 접촉력을 효율적으로 산출하여 이를 기초로 한 제어가 가능한 로봇 핑거 장치를 제공하고자 한다.

과제의 해결 수단

[0008] 전술한 목적을 이루기 위해 본 발명의 실시예에 따른 불충분 구동형 로봇 핑거 장치는 물체와 직접 접촉하도록 된 로봇 핑거와; 상기 로봇 핑거를 제어하도록 된 로봇 핑거 제어부를 포함하는데, 로봇 핑거는 복수의 지골을 포함하며,

[0009] 상기 복수의 지골은 제1 관절 조인트에서 베이스에 회전 가능하게 연결된 제1 지골과, 제2 관절 조인트에서 제1 지골에 회전 가능하게 연결된 제2 지골과, 제3 관절 조인트에서 제2 지골에 회전 가능하게 연결된 제3 지골을 포함하며,

[0010] 상기 로봇 핑거 제어부는 상기 복수의 지골 각각에서 상기 물체와의 접촉력을 산출한다.

- [0011] 이때, 로봇 핑거 장치는 상기 제1 관절 조인트에서 상기 베이스에 대하여 상기 제1 지골을 회전시키는 액추에이터를 더 포함할 수 있고,
- [0012] 상기 액추에이터에 의해 상기 제1 지골에 가해지는 회전 작동력의 일부를 제2 지골에 전달하여 상기 제2 관절 조인트에서 상기 제1 지골에 대하여 상기 제2 지골을 회전시키는 제1 운동전달 요소와; 상기 제1 운동전달 요소에 의해 상기 제2 지골에 가해지는 회전 작동력의 일부를 제3 지골에 전달하여 상기 제3 관절 조인트에서 상기 제2 지골에 대하여 상기 제3 지골을 회전시키는 제2 운동전달 요소를 더 포함할 수 있다.
- [0013] 또한, 상기 제1 운동전달 요소는 상기 제1 지골에 대한 상기 제2 지골의 위치를 기구학적으로 구속하는 제1 수동 요소와, 상기 제2 관절 조인트에서 상기 제2 지골에 상기 제2 회전 작동력으로서 제1 스프링 토크를 가하는 제1 스프링을 포함할 수 있고,
- [0014] 상기 제2 운동전달 요소는 상기 제2 지골에 대한 상기 제3 지골의 위치를 기구학적으로 구속하는 제2 수동 요소와 상기 제3 관절 조인트에서 상기 제3 지골에 상기 제3 회전 작동력으로서 제2 스프링 토크를 가하는 제2 스프링을 포함할 수 있다.
- [0015] 나아가, 상기 제1 수동 요소는 일단이 상기 제1 관절 조인트에 회전가능하도록 연결된 제1 주구동바와, 상기 제1 일차 구동바에 대하여 회전가능하게 일단이 제1 주구동 조인트에 연결된 제1 불충분 구동바와, 상기 제1 불충분 구동바에 회전가능하게 일단이 제1 부구동 조인트에 연결되고 타단이 상기 제2 관절 조인트에 회전가능하게 연결된 제1 부구동바를 포함하는 제1 4절 링크 구조를 포함할 수 있으며,
- [0016] 상기 제2 수동 요소는 일단이 상기 제2 관절 조인트에 회전가능하도록 연결된 제2 주구동바와, 상기 제2 일차 구동바에 대하여 회전가능하게 일단이 제2 주구동 조인트에 연결된 제2 불충분 구동바와, 상기 제2 불충분 구동바에 회전가능하게 일단이 제2 부구동 조인트에 연결되고 타단이 상기 제3 관절 조인트에 회전가능하게 연결된 제2 부구동바를 포함하는 제2 4절 링크 구조를 포함할 수 있다.
- [0017] 또한, 상기 로봇 핑거 제어부는 상기 복수의 지골 각각에서 상기 로봇 핑거의 기구학적 값, 상기 제1 수동 요소의 기구학적 값, 상기 제2 수동 요소의 기구학적 값, 상기 제1 회전 작동력, 상기 제1 스프링의 특성 및 상기 제2 스프링의 특성을 이용하여 접촉력을 산출할 수 있다.
- [0018] 이때, 상기 로봇 핑거의 기구학적 값은 상기 복수의 지골 각각의 길이, 상기 제1 관절 조인트로부터 상기 제1 지골이 상기 물체에 접촉하는 접촉점까지의 거리, 및 상기 제2 관절 조인트로부터 상기 제2 지골이 상기 물체에 접촉하는 접촉점까지의 거리를 포함할 수 있다.
- [0019] 또한, 상기 제1 수동 요소의 기구학적 값은 상기 제1 주구동바의 길이, 상기 제1 불충분 구동바의 길이, 상기 제1 부구동바의 길이를 포함할 수 있다.
- [0020] 또한, 상기 제2 수동 요소의 기구학적 값은 상기 제2 주구동바의 길이, 상기 제2 불충분 구동바의 길이, 상기 제2 부구동바의 길이를 포함할 수 있다.

[0021] 상기 로봇 핑거 제어부는 관계식:

$$\begin{bmatrix} k_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \alpha_{12} & k_2 & 0 & \dots & 0 \\ \alpha_{13} & \alpha_{23} & k_3 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \alpha_{1n} & \alpha_{2n} & \alpha_{3n} & \dots & k_n \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ \dots \\ F_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \dots \\ \tau_n \end{bmatrix}$$

[0022]

[0023] 을 이용하여 상기 접촉력을 산출하도록 구성되는 것일 수 있는데,
[0024] 여기에서

[0025] k_i 는 i 번째 관절 조인트로부터 i 번째 지골이 상기 물체와 접촉하는 접촉점까지의 거리이고; F_i 는 i 번째 지골이 상기 물체에 접촉하는 접촉점에서의 접촉력이며;

$$\alpha_{ij} = k_j + \sum_{k=i}^{j-1} L_k \cos \left(\sum_{m=k+1}^j \theta_m \right), \quad i < j$$

[0026] 이며;

[0027] 단, L_k 는 k 번째 지골의 길이이고,

[0028] θ_m 는 베이스 또는 $m-1$ 번째 지골에 대한 m 번째 지골의 회전각이다.

[0029] 나아가, 상기 로봇 핑거 제어부는 i 번째 지골이 상기 물체와 접촉하지 않을 경우 상기 관계식 좌변에서 매트릭스의 i 번째 행과 i 번째 열을 제거하고, F_i 를 제거하고, 우변에서 τ_i 를 제거한 후 상기 접촉력을 산출하는 것일 수 있다.

[0030] 상기 로봇 핑거 제어부는 상기 복수의 지골 각각에서 상기 로봇 핑거의 기구학적 값, 상기 제1 운동전달 요소의 기구학적 값, 상기 제2 운동전달 요소의 기구학적 값을 이용하여 접촉력을 산출하도록 구성될 수 있는데,

[0031] 이때 상기 로봇 핑거 제어부는 관계식:

$$J_T^T F = \tau$$

[0032] 을 이용하여 상기 접촉력을 산출하도록 구성될 수 있으며,

[0034] 여기에서,

[0035] J_T 는 상기 로봇 핑거의 기구학적 값에 의해 정해지는 $n \times n$ 매트릭스인데, n 은 상기 복수의 지골의 개수이며,

$$F = [F_1, F_2, \dots, F_n]^T$$

[0036] 인데, F_i 는 i 번째 지골이 상기 물체에 접촉하는 접촉점에서의 접촉력이며,

$$\tau = [\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n]^T$$

[0037] 인데, τ_i 는 i 번째 지골에서의 토크이다.

[0038] 마찬가지로, 상기 로봇 핑거 제어부는 i 번째 지골이 상기 물체와 접촉하지 않을 경우 상기 관계식 좌변에서 J_T 매트릭스의 i 번째 행과 i 번째 열을 제거하고, F_i 를 제거하고, 우변에서 τ_i 를 제거한 후 상기 접촉력을 산출하도록 구성될 수 있다.

[0039] 본 발명의 다른 실시 형태에 따른 불충분 구동형 로봇 핑거 장치의 제어 방법은 복수의 지골을 포함하는 로봇 핑거의 기구학적 값과, 로봇 핑거의 복수의 지골 사이의 운동전달 요소의 기구학적 값을 이용하여 접촉력을 산출하는 단계를 포함한다.

[0040] 이때 상기 접촉력 산출 단계는 관계식:

$$J_T^T F = \tau$$

[0041]

- [0042] 을 이용하여 상기 접촉력을 산출할 수 있으며,
 [0043] 여기에서,
 [0044] J_T 는 상기 로봇 핑거의 기구학적 값에 의해 정해지는 $n \times n$ 매트릭스인데, n 은 상기 복수의 지골의 개수이며,

[0045] $F = [F_1, F_2, \dots, F_n]^T$ 인데, F_i 는 i 번째 지골이 상기 물체에 접촉하는 접촉점에서의 접촉력이며,

[0046] $\tau = [\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n]^T$ 인데, τ_i 는 i 번째 지골에서의 토크이다.

[0047] 상기 접촉력 산출 단계는 i 번째 지골이 상기 물체와 접촉하지 않을 경우 상기 관계식 좌변에서 J_T 매트릭스의 i 번째 행과 i 번째 열을 제거하고, F_i 를 제거하고, 우변에서 τ_i 를 제거한 후 상기 접촉력을 산출할 수 있다.

발명의 효과

[0048] 본 발명의 실시예에 따른 불충분 구동형 로봇 핑거 장치는 각 지골에서의 접촉점에서의 접촉력을 효율적으로 산출하여 이를 기초로 한 제어가 가능하다는 효과를 제공한다.

도면의 간단한 설명

- [0049] 도 1은 본 발명의 제1 실시예에 따른 개념도이다.
 도 2는 본 발명의 제1 실시예의 3자유도 사례이다.
 도 3은 본 발명의 제1 실시예의 3자유도 사례의 물체를 다루는 경우의 수를 보여주는 도면이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0050] 이하, 본 발명의 바람직한 실시예를 첨부된 도면들을 참조하여 상세히 설명한다. 이하에서 본 발명의 바람직한 실시예를 설명할 것이나, 본 발명의 기술적 사상은 이에 한정하거나 제한되지 않고 당업자에 의해 변형되어 다양하게 실시될 수 있음은 물론이다.

[0051] 도 1은 본 발명에 따른 실시예에서 사용할 수 있는 n 개의 지골(phalange)을 가진 핑거 장치(100), 즉 n -지골(n -phalanx) 핑거 장치(100)를 도시한다. 제1 지골(12)은 제1 관절 조인트(O_1)에서 베이스(2)에 회전 가능하게 연결되어 있고, 제2 지골(22)은 제2 관절 조인트(O_2)에서 제1 지골(12)에 회전 가능하게 연결되어 있고, 제3 지골(32)은 제3 관절 조인트(O_3)에서 제2 지골(22)에 회전 가능하게 연결되어 있다. 이와 같이, i 번째 지골은 i 번째 관절 조인트에서 $i-1$ 번째 지골에 회전 가능하게 연결된다.

[0052] 액추에이터(도시 생략)에 의해 제1 지골(12)을 회전시키는 작동력(T_1)이 제1 지골(12)에 입력으로 가해지면, 이 작동력(T_1)의 일부는 제1 운동전달 요소(14)에 의해 제2 지골(22)에 전달되며, 이에 따라 제1 지골(12)에 대하여 제2 지골(22)을 회전시키는 힘(T_{s2})이 생성된다. 액추에이터는 회전력을 부여할 수 있는 임의의 장치, 예를 들어 회전모터 등이 사용될 수 있다. 여기에 스프링과 같은 탄성 수단이 추가되면 간단하면서도 적응성이 좋은 핑거 장치(100)가 얻어질 수 있다. 예를 들어, 제2 관절 조인트(O_2)에는 토크 스프링이 사용되어, 제2 지골(22)이 임의로 움직이지 못하도록 해준다. 제2 지골(22)로부터 제 n 지골까지 동일한 설명이 가능하며, 반복 설명 및 도시를 생략한다.

- [0053] 이와 같이 다루어지는 물체의 형상에 대한 적응성을 높이고 핑거를 기구학적으로 구속하기 위해 기구학적 수동(passive) 요소들이 사용될 수 있다. 도시된 수동 요소(14, 24, 34)는 4절 링크(four-bar linkage)인데, 각각은 주구동바, 불충분 구동바 및 부구동바를 포함한다. 즉, 제1 수동 요소(14)는 베이스(2)에 대하여 회전가능하도록 일단이 제1 관절 조인트(O_1)에 연결된 제1 주구동바(14a), 제1 주구동바(14a)에 대하여 회전가능하게 일단이 제1 주구동 조인트(P_1)에 연결된 제1 불충분 구동바(14b) 및 제1 불충분 구동바(14b)에 회전가능하게 일단이 제1 부구동 조인트(P'_2)에 연결되고 타단이 제2 관절 조인트(O_2)에 회전가능하게 연결된 제1 부구동바(14c)를 가진다. 제2 수동 요소(24) 이하 제 n 수동 요소까지 동일한 설명이 가능하며, 반복 설명 및 도시를 생략한다.
- [0054] 4절 링크는 수동 요소의 예일 뿐이며 기구학적 구속을 가하는 다른 다양한 수동 요소들이 적절히 사용될 수도 있다.
- [0055] 핑거 장치(100)가 물체를 다루는 상태는 로봇 핑거의 기구학적인 조건과 지골(12, 22, 32, ...)의 접촉지점 등에 의해 정의될 수 있다. 즉, 로봇 핑거의 기구학적 조건과 지골(12, 22, 32, ...)의 접촉지점을 알면 로봇 핑거의 작동을 분석할 수 있다.
- [0056] 도 1에서 핑거 장치(100)의 기구학적 조건을 나타내는 각 부호의 의미는 아래와 같다:
- [0057] L_i : i 번째 지골(즉, 제 i 지골)의 길이
- [0058] a_i : i 번째 4절 링크(즉, 제 i 수동 요소)의 주구동바의 길이
- [0059] b_i : i 번째 4절 링크(즉, 제 i 수동 요소)의 불충분 구동바의 길이
- [0060] c_i : i 번째 4절 링크(즉, 제 i 수동 요소)의 부구동바의 길이
- [0061] θ_i : 베이스(2) 또는 $i-1$ 지골에 대한 i 번째 지골(즉, 제 i 지골)의 회전각
- [0062] θ_{ia} : 베이스(2) 또는 $i-1$ 지골에 대한 1번째 4절 링크(즉, 제 i 수동 요소)의 주구동바의 회전각
- [0063] ψ_i : $O_iP'_i$ 와 O_iP_i 사이의 각도 (단, $i>1$)
- [0064] T_1 : 제1 관절 조인트(O_1)에서 액추에이터의 토크
- [0065] T_{si} : i 번째 관절 조인트(O_i)에서의 스프링 토크 (단, $i>1$)
- [0066] F_i : i 번째 지골에서 물체와의 접촉력
- [0067] k_i : i 번째 지골에서의 물체와의 접촉 위치 (O_i 로부터 접촉점까지의 거리)
- [0068] 접촉력의 분포는 접촉점의 위치와 스프링에 의해 가해지는 스프링 토크에 좌우된다. 아래에서는, 계산 및 설명의 단순화를 위해 핑거 장치(100)의 정적 상태를 가정하며, 즉 운동에 의한 가속도 등을 무시한다. 나아가, 마찰도 무시하도록 한다. 물론, 보다 정확한 산출을 위해 동적 상태와 마찰을 고려하는 것도 가능하다.
- [0069] 입력과 출력의 관계식은 아래와 같다.

수학식 1

[0070]
$$I^T \omega_a = F^T v$$

- [0071] 여기에서,
- [0072] T는 액추에이터와 스프링에 의해 각 지골에 가해지는 입력 토크 벡터;
- [0073] ω_a 는 대응하는 각속도(corresponding velocity) 벡터;
- [0074] F는 접촉력 벡터;
- [0075] v는 접촉점에서의 투영 속도(projected velocity) 벡터이다.

- [0076] 따라서, 아래와 같은 식이 얻어진다.

수학식 2

$$T = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_{s2} = -K_2 \Delta \theta_2 \\ T_{s3} = -K_3 \Delta \theta_3 \\ \dots \\ T_{sn} = -K_n \Delta \theta_n \end{bmatrix}, \omega_a = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{1a} \\ \dot{\theta}_{2a} \\ \dot{\theta}_{3a} \\ \dots \\ \dot{\theta}_n \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ \dots \\ F_n \end{bmatrix} \text{ and } v = \begin{bmatrix} v_{ye1} \\ v_{ye2} \\ v_{ye3} \\ \dots \\ v_{yen} \end{bmatrix}$$

[0077]

- [0078] 여기에서,
- [0079] K_i 는 i번째 관절 조인트(O_i)에 위치하는 토션 스프링의 강성;
- [0080] $\Delta \theta_i$ 는 i번째 관절 조인트(O_i)의 현재각과 최초각 사이의 차이(단, $i > 1$);
- [0081] v_{yei} 는 i번째 지골의 접촉점에서 y_i 축 방향의 투영 속도(projected velocity)이다.

- [0082] 따라서, 투영 속도(v)는 아래와 같이 자코비안 매트릭스 J_T 와 지골 조인트 좌표의 도함수 벡터인 $\dot{\theta} = [\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3, \dots, \dot{\theta}_n]^T$ 의 벡터곱으로 간단히 표현될 수 있다.

수학식 3

$$v = J_T \dot{\theta}$$

[0083]

- [0084] 여기에서 투영 속도(v)의 자코비안 매트릭스 J_T 는 아래와 같이 아래삼각(lower triangular) 형태로 얻어질 수 있다.

수학식 4

$$J_T = \begin{bmatrix} k_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \alpha_{12} & k_2 & 0 & \dots & 0 \\ \alpha_{13} & \alpha_{23} & k_3 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \alpha_{1n} & \alpha_{2n} & \alpha_{3n} & \dots & k_n \end{bmatrix}$$

여기에서,

$$\alpha_{ii} = k_i \text{ 이고,}$$

$$\alpha_{ij} = k_j + \sum_{k=i}^{j-1} L_k \cos \left(\sum_{m=k+1}^j \theta_m \right), \quad i < j$$

이다.

미적분을 통해, 구동 자코비안 매트릭스 J_a 를 이용하여 앞서 정의한 지골 조인트 좌표의 도함수 벡터와 관련시키면, 아래와 같은 식이 얻어진다.

수학식 5

$$\dot{\theta} = J_a \omega_a$$

불충분 구동 핑거 모델에서, 액추에이터 토크를 각 지골에 전달하는 데에 4절 링크를 사용하였고, 4절 링크의 각속도율은 i 번째 4절 링크, 즉 $O_i P_i P'_{i+1} O_{i+1}$ 에서 아래와 같은 식이 된다.

수학식 6

$$\begin{aligned} \frac{\dot{\theta}_i - \dot{\theta}_{ia}}{\dot{\psi}_{i+1} - \dot{\theta}_{i+1a}} &= \frac{\dot{\theta}_i - \dot{\theta}_{ia}}{-\dot{\theta}_{i+1a}} \\ &= \frac{c_i (L_i \sin(\psi_{i+1} - \theta_{i+1a}) + a_i \sin(\theta_i - \theta_{ia} + \theta_{i+1a} - \psi_{i+1}))}{a_i (L_i \sin(\theta_i - \theta_{ia}) + c_i \sin(\theta_i - \theta_{ia} + \theta_{i+1a} - \psi_{i+1}))} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_i &= \dot{\theta}_{ia} \\ &+ \dot{\theta}_{i+1a} \frac{c_i (L_i \sin(\theta_{i+1a} - \psi_{i+1}) - a_i \sin(\theta_i - \theta_{ia} + \theta_{i+1a} - \psi_{i+1}))}{a_i (L_i \sin(\theta_i - \theta_{ia}) + c_i \sin(\theta_i - \theta_{ia} + \theta_{i+1a} - \psi_{i+1}))} \end{aligned}$$

마지막 4-절 링크 $O_{n-1} P_{n-1} P_n O_n$ 에서는 아래와 같은 식이 된다.

수학식 7

$$\frac{\dot{\theta}_{n-1} - \dot{\theta}_{n-1a}}{\dot{\psi}_n - \dot{\theta}_n} = \frac{\dot{\theta}_{n-1} - \dot{\theta}_{n-1a}}{-\dot{\theta}_n}$$

$$= \frac{c_{n-1}(L_{n-1} \sin(\psi_n - \theta_n) + a_{n-1} \sin(\theta_{n-1} - \theta_{n-1a} + \theta_n - \psi_n))}{a_{n-1}(L_{n-1} \sin(\theta_{n-1} - \theta_{n-1a}) + c_{n-1} \sin(\theta_{n-1} - \theta_{n-1a} + \theta_n - \psi_n))}$$

$$\dot{\theta}_{n-1} = \dot{\theta}_{n-1a}$$

$$+ \dot{\theta}_n \frac{c_{n-1}(L_{n-1} \sin(\theta_n - \psi_n) - a_{n-1} \sin(\theta_{n-1} - \theta_{n-1a} + \theta_n - \psi_n))}{a_{n-1}(L_{n-1} \sin(\theta_{n-1} - \theta_{n-1a}) + c_{n-1} \sin(\theta_{n-1} - \theta_{n-1a} + \theta_n - \psi_n))}$$

[0095]

[0096] 따라서, 수학식 6과 수학식 7을 수학식 5에 대입하면 아래와 같은 식으로 표현될 수 있다.

수학식 8

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dots \\ \dot{\theta}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & X_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & X_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & X_{n-1} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{1a} \\ \dot{\theta}_{2a} \\ \dot{\theta}_{3a} \\ \dots \\ \dot{\theta}_n \end{bmatrix} \text{ or } \dot{\theta} = J_a \omega_a$$

[0097]

[0098] 여기에서,

$$J_a = \begin{bmatrix} 1 & X_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & X_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & X_{n-1} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \text{ 이고;}$$

[0099]

$$X_i = \frac{c_i(L_i \sin(\theta_{i+1a} - \psi_{i+1}) - a_i \sin(\theta_i - \theta_{ia} + \theta_{i+1a} - \psi_{i+1}))}{a_i(L_i \sin(\theta_i - \theta_{ia}) + c_i \sin(\theta_i - \theta_{ia} + \theta_{i+1a} - \psi_{i+1}))} \text{ 이며;}$$

[0100]

$$X_{n-1} = \frac{c_{n-1}(L_{n-1} \sin(\theta_n - \psi_n) - a_{n-1} \sin(\theta_{n-1} - \theta_{n-1a} + \theta_n - \psi_n))}{a_{n-1}(L_{n-1} \sin(\theta_{n-1} - \theta_{n-1a}) + c_{n-1} \sin(\theta_{n-1} - \theta_{n-1a} + \theta_n - \psi_n))} \text{ 이고;}$$

[0101]

[0102] X_i 는 i 번째 지점에 액추에이터 토크를 전달하는 데 사용되는 함수이다.

[0103] 수학식 1, 수학식 3, 수학식 5로부터 아래와 같은 식이 얻어진다.

수학식 9

[0104]
$$F = J_T^{-T} J_a^{-T} T$$

[0105] 수학식 9는 액추에이터 토크와 접촉력 사이의 실질적인 상관관계를 보여준다. 문제는 수학식 9는 $k_1 k_2 k_3 \dots k_n \neq 0$ 의 경우에만 유효하다는 것이다. J_a 는 특이성(singularity)을 가질 수 없다. 하지만, 핑거 장치(100)는 n보다 작은 수의 지골이 물체에 접촉하는 상태로 물체를 다룰 수도 있다.

[0106] n보다 작은 수의 지골에 의해 물체가 안정적으로 다루어지려면, 물체에 접촉하는 모든 지골에 능동적인 힘이 부여되어야 한다. 그리고, 물체에 접촉하지 않는 지골에서의 생성되는 힘은 0이어야 한다. 하지만, 수학식 9는 J_T 매트릭스가 특이성을 가지는 경우에 접촉력을 구하는 데 사용될 수 없다.

[0107] 수학식 9를 아래와 같이 표현할 수도 있다.

수학식 10

[0108]
$$J_T^T F = J_a^{-T} T$$

[0109] 수학식 10에서 우변의 $J_a^{-T} T$ 은 액추에이터, 스프링 토크, 액추에이터와 지골 사이의 토크 전달 함수와 관련되는 모든 관절 조인트에서의 토크 벡터 $\tau = [\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n]^T$ 로서, 아래와 같은 식으로 표시할 수 있다.

수학식 11

[0110]
$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \dots \\ \tau_n \end{bmatrix} = J_a^{-T} T = \begin{bmatrix} 1 & X_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & X_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & X_{n-1} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}^{-T} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_{s2} \\ T_{s3} \\ \dots \\ T_{sn} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} T_1 \\ T_{s2} - X_1 T_1 \\ T_{s3} - X_2 T_{s2} + X_1 X_2 T_1 \\ \dots \\ T_{sn} + \sum_{j=1}^{n-1} (-1)^{n-j} \prod_{i=j}^{n-1} X_i T_{si} \end{bmatrix}. \quad T_{s1} \equiv T_1$$

[0111] 수학식 10에서 좌변은 아래와 같은 식으로 나타낼 수 있다.

수학식 12

$$J_F^T F = \begin{bmatrix} k_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \alpha_{12} & k_2 & 0 & \dots & 0 \\ \alpha_{13} & \alpha_{23} & k_3 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \alpha_{1n} & \alpha_{2n} & \alpha_{3n} & \dots & k_n \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ \dots \\ F_n \end{bmatrix}$$

[0113] 따라서, 수학식 10은 아래와 같은 식이 된다.

수학식 13

$$\begin{bmatrix} k_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \alpha_{12} & k_2 & 0 & \dots & 0 \\ \alpha_{13} & \alpha_{23} & k_3 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \alpha_{1n} & \alpha_{2n} & \alpha_{3n} & \dots & k_n \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ \dots \\ F_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \dots \\ \tau_n \end{bmatrix}$$

[0115] 수학식 13은 i번째 관절 조인트에서 토크 τ_i 가 접촉력 벡터 F와 파라미터 α_{ij} 에 대하여 아래와 같은 식으로 계산됨을 보여준다.

수학식 14

$$\sum_{j=i}^n \alpha_{ij} F_j = \tau_i. \quad \alpha_{ii} = k_i$$

[0117] n보다 작은 수의 지골이 물체에 접촉하는 경우, 예를 들어 i번째 지골이 물체에 접촉하지 않는다고 하면, 파라미터 α_{ij} 는 상관없이 없으며, F_i 는 0이된다. 즉, 이러한 조건에서 수학식 14는 적합하지 않고, i번째 지골이 물체에 접촉하지 않는 경우에는 토크 τ_i 를 계산하는 데에는 수학식 14를 고려할 필요가 없다. 따라서, 수학식 13에서 F_i 를 제외하고 접촉력 벡터 F를 계산하기 위해서는 아래와 같은 프로세스를 따른다.

[0118] - 매트릭스 J_1 에서 i번째 열을 무시한다. 왜냐하면 모든 파라미터 $\alpha_{ij}, j=1 \dots n$ 는 존재하지 않기 때문이다.

[0119] - 매트릭스 J_1 에서 i번째 행을 무시한다. 왜냐하면 모든 파라미터 $\alpha_{ji}, j=1 \dots n$ 에 대하여 좌변에서 $F_i=0$ 이 되기 때문이다.

[0120] - 좌변에서 접촉력 벡터 F의 $F_i=0$ 요소를 제거한다.

[0121] - 우변에서 토크 벡터 $\vec{T}$ 의 i 번째 관절 조인트에서의 $\vec{T}_i$ 요소를 무시한다.

[0122] 이와 같이 i 번째 열과 i 번째 행을 무시하면, J_T 매트릭스는 차원이 $n-1 \times n-1$ 로 감소된다. 이제 J_T 는 특이성이 없다. 따라서, 수학적식 13은 F_i 를 제외하고 접촉력을 계산하는 데 사용될 수 있다. 둘 이상의 지골이 물체에 접촉하지 않을 경우에도 위 프로세스를 사용할 수 있다.

[0123] (3 자유도, 1-구동 핑거에서의 예)

[0124] 도 2는 $n=1$ 인 경우, 즉 3자유도 핑거 장치(100)의 예를 도시한다.

[0125] 불충분 구동 장치에서, 수학적식 9는 $k_1 k_2 k_3 \neq 0$ 인 경우에만 유효하다. 하지만, 도 3a 내지 도 3d에 예시된 바와 같이 핑거의 지골(12, 22, 32) 중 물체에 접촉하지 않는 것이 있을 경우(도 3b 내지 도 3d)가 가능하다.

[0126] 접촉력 F_1, F_2, F_3 를 구하기 위해서, 아래와 같이 4 가지 가능한 경우로 나누어 설명하기로 한다.

[0127] (1) 도 3a에 도시된 바와 같이 모든 지골(12, 22, 32)이 물체에 접촉하는 경우

[0128] (2) 도 3b에 도시된 바와 같이 기단측 지골, 즉 제1 지골(12) 및 말단측 지골, 즉 제3 지골(32)이 물체에 접촉하고 중앙 지골, 즉 제2 지골(22)은 물체에 접촉하지 않는 경우

[0129] (3) 도 3c에 도시된 바와 같이 중앙 지골, 즉 제2 지골(22) 및 말단측 지골, 즉 제3 지골(32)이 물체에 접촉하고 기단측 지골, 즉 제1 지골(12)은 물체에 접촉하지 않는 경우

[0130] (4) 도 3d에 도시된 바와 같이 말단측 지골, 즉 제3 지골(32)만이 물체에 접촉하는 경우

[0131] (제1 경우)

[0132] 모든 지골(12, 22, 32)이 물체에 접촉하는 경우 $k_1 k_2 k_3 \neq 0$ 이며, 수학적식 13은 아래와 같은 식이 된다.

수학적식 15

$$\begin{bmatrix} k_1 & k_2 + L_1 C_2 & k_3 + L_1 C_{23} + L_2 C_3 \\ 0 & k_2 & k_3 + L_2 C_3 \\ 0 & 0 & k_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_{s2} - X_1 T_1 \\ T_{s3} - X_2 T_{s2} + X_1 X_2 T_1 \end{bmatrix}$$

[0133]

[0134] 수학적식 15에서, 제1 지골의 접촉력(F_1)은 아래와 같은 식에 따라 산출된다.

수학식 16

$$F_1 = \frac{T_1}{k_1} - \frac{(k_2 + L_1 C_2)(T_{s2} - X_1 T_1)}{k_1 k_2} \\ - \frac{(k_3 + L_1 C_{23} + L_2 C_3)(T_{s3} - X_2 T_{s2} + X_1 X_2 T_1)}{k_1 k_3} \\ + \frac{(k_2 + L_1 C_2)(k_3 + L_2 C_3)(T_{s3} - X_2 T_{s2} + X_1 X_2 T_1)}{k_1 k_2 k_3}$$

[0135]

[0136] 여기에서,

$$C_i = \cos \theta_i \text{ 이고;}$$

[0137]

$$C_{ij} = \cos(\theta_i + \theta_j) \text{ 이다.}$$

[0138]

[0139] 수학식 15에서, 제2 지골의 접촉력(F_2)은 아래와 같은 식에 따라 산출된다.

수학식 17

$$F_2 = \frac{T_{s2} - X_1 T_1}{k_2} - \frac{(k_3 + L_2 C_3)(T_{s3} - X_2 T_{s2} + X_1 X_2 T_1)}{k_2 k_3}$$

[0140]

[0141] 수학식 15에서, 제3 지골의 접촉력(F_3)은 아래와 같은 식에 따라 산출된다.

수학식 18

$$F_3 = \frac{T_{s3} - X_2 T_{s2} + X_1 X_2 T_1}{k_3}$$

[0142]

[0143] (제2 경우)

[0144] 제1 지골(12) 및 제3 지골(32)만이 물체에 접촉하는 경우 k_2 는 존재하지 않으며, F_2 는 0이 된다. 수학식 15에서 J_T 매트릭스에서 제2 지골(22)에 관련된 제2열 및 제2행을 제거하고, F_2 및 $r_2 = T_{s2} - X_1 T_1$ 를 제거하면 아래와 같은 식이 된다.

수학식 19

$$[0145] \quad \begin{bmatrix} k_1 & k_3 + L_1 C_{23} + L_2 C_3 \\ 0 & k_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_{s3} - X_2 T_{s2} + X_1 X_2 T_1 \end{bmatrix}$$

[0146] 따라서, 제1 지골(12)에서의 접촉력(F_1)은 아래와 같은 식으로 산출된다.

수학식 20

$$[0147] \quad F_1 = \frac{T_1}{k_1} - \frac{(k_3 + L_1 C_{23} + L_2 C_3)(T_{s3} - X_2 T_{s2} + X_1 X_2 T_1)}{k_1 k_3}$$

[0148] 제3 지골(32)에서의 접촉력(F_3)은 수학식 18에서와 같다.

[0149] (제3 경우)

[0150] 제2 지골(22) 및 제3 지골(32)만이 물체에 접촉하는 경우 k_1 은 존재하지 않으며, F_1 은 0이 된다. 수학식 15에서 J_T 매트릭스에서 제1 지골(12)에 관련된 제1열 및 제1행을 제거하고, F_1 및 T_1 을 제거하면 아래와 같은 식이 된다.

수학식 21

$$[0151] \quad \begin{bmatrix} k_2 & k_3 + L_2 C_3 \\ 0 & k_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{s2} - X_1 T_1 \\ T_{s3} - X_2 T_{s2} + X_1 X_2 T_1 \end{bmatrix}$$

[0152] 제2 지골(22)에서의 접촉력(F_2)은 수학식 17에 의해 산출되고, 제3 지골(32)에서의 접촉력(F_3)은 수학식 18에 의해 산출된다.

[0153] (제4 경우)

[0154] 제3 지골(32)만이 물체에 접촉하는 경우 k_1 , k_2 는 존재하지 않으며, F_1 , F_2 는 0이 된다. 수학식 15에서 J_T 매트릭스에서 제1 지골(12)에 관련된 제1열 및 제1행을 제거하고, F_1 및 T_1 을 제거한 후, 제2 지골(22)에 관련된 제2열 및 제2행을 제거하고, F_2 및 T_2 를 제거하면 아래와 같은 식이 된다.

수학식 22

$$[0155] \quad k_3 F_3 = T_{s3} - X_2 T_{s2} + X_1 X_2 T_1$$

[0156] 제3 지골(32)에서의 접촉력(F_3)은 수학적 식 18에 의해 산출된다.

[0157] 이상의 설명은 본 발명의 기술 사상을 예시적으로 설명한 것에 불과한 것으로서, 본 발명이 속하는 기술 분야에
서 통상의 지식을 가진 자라면 본 발명의 본질적인 특성에서 벗어나지 않는 범위 내에서 다양한 수정, 변경 및
치환이 가능할 것이다. 따라서, 본 발명에 개시된 실시예 및 첨부된 도면들은 본 발명의 기술 사상을 한정하기
위한 것이 아니라 설명하기 위한 것이고, 이러한 실시예 및 첨부된 도면에 의하여 본 발명의 기술 사상의 범위가
한정되는 것은 아니다. 본 발명의 보호 범위는 아래의 청구범위에 의하여 해석되어야 하며, 그와 동등한 범
위 내에 있는 모든 기술 사상은 본 발명의 권리범위에 포함되는 것으로 해석되어야 할 것이다.

부호의 설명

[0158] 100: 핑거 장치

2: 베이스

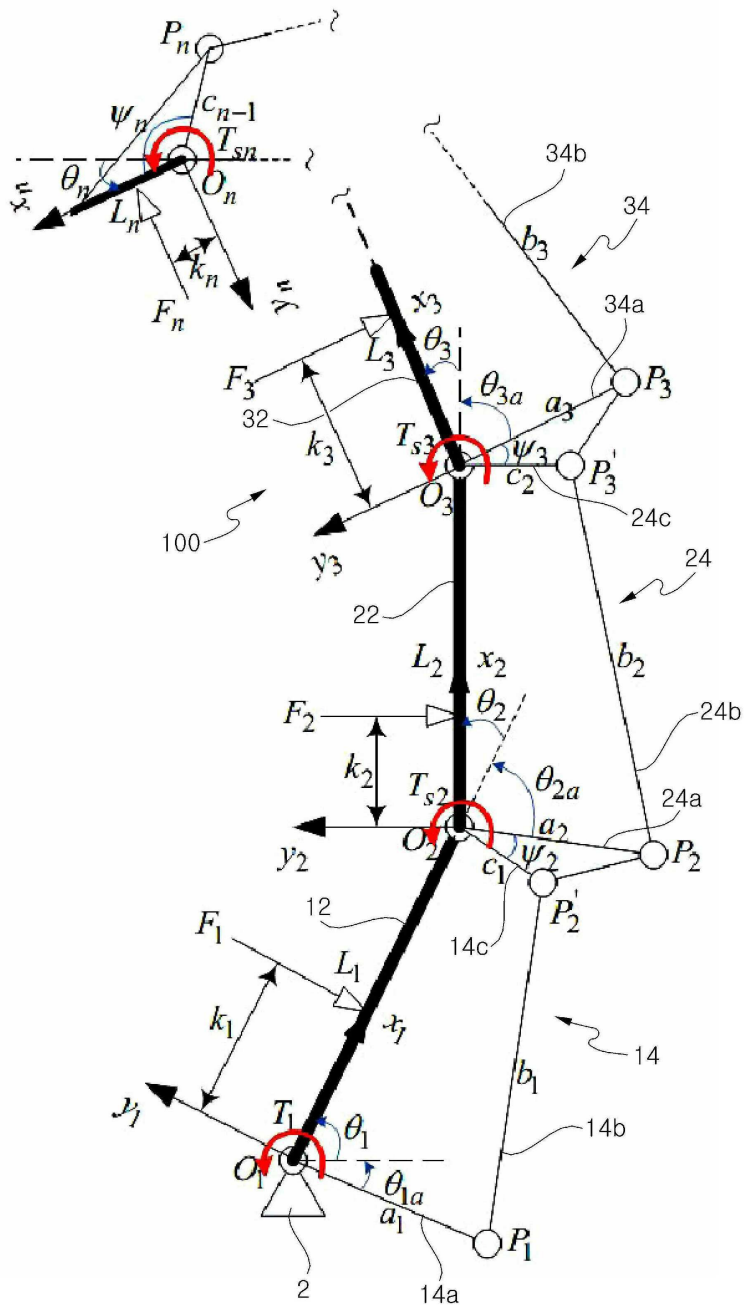
12: 제1 지골 14: 제1 수동 요소

22: 제2 지골 24: 제2 수동 요소

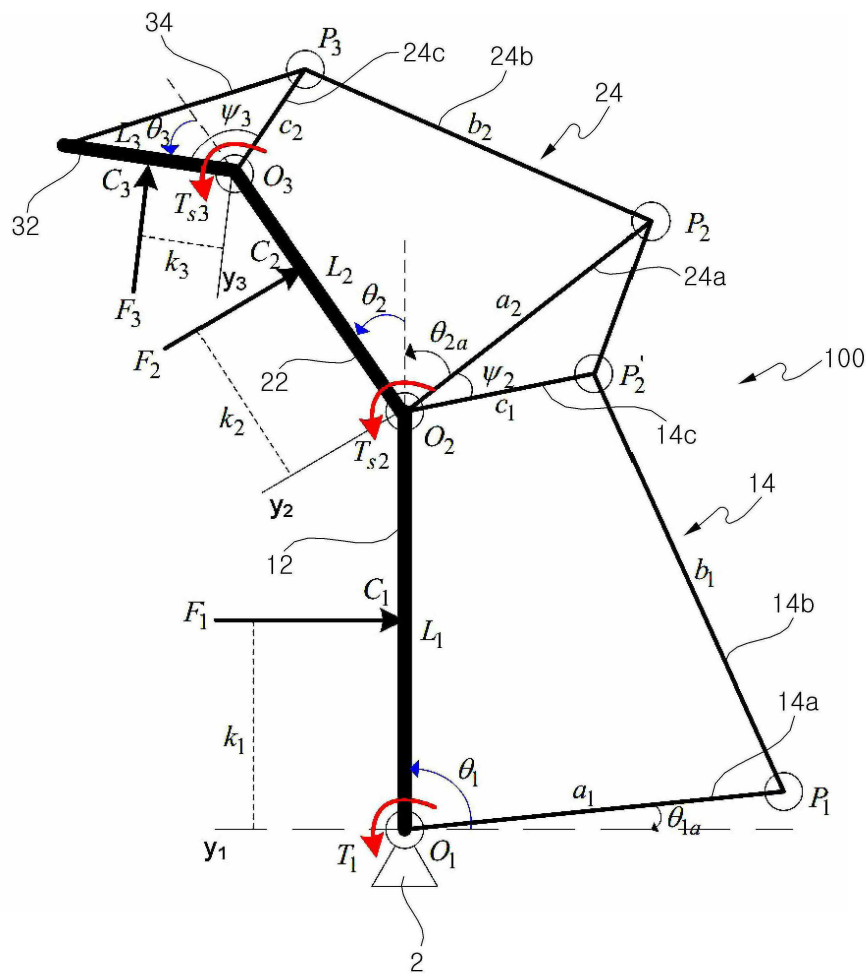
32: 제3 지골 34: 제3 수동 요소

도면

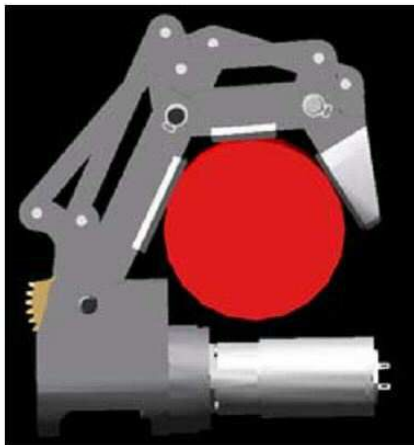
도면1



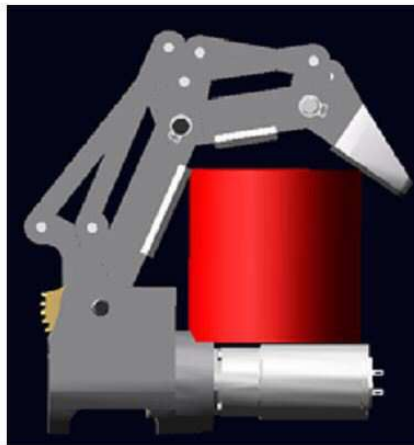
도면2



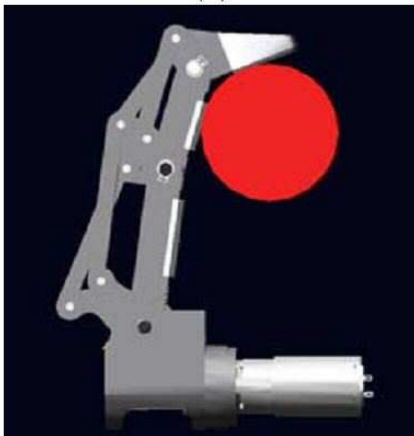
도면3



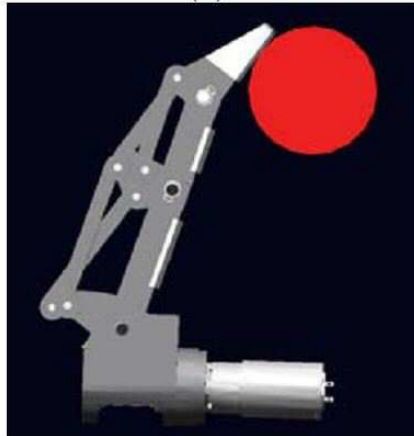
(a)



(b)



(c)



(d)