



(19) 대한민국특허청(KR)

(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2021년02월10일

(11) 등록번호 10-2214811

(24) 등록일자 2021년02월04일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
A61B 19/00 (2006.01) **B25J 18/00** (2006.01)
B25J 9/16 (2006.01) **G05B 19/40** (2006.01)

(52) CPC특허분류
A61B 34/30 (2016.02)
A61B 34/37 (2016.02)

(21) 출원번호 10-2015-7028827

(22) 출원일자(국제) 2014년03월18일

심사청구일자 2019년03월04일

(85) 번역문제출일자 2015년10월13일

(65) 공개번호 10-2015-0126951

(43) 공개일자 2015년11월13일

(86) 국제출원번호 PCT/US2014/031105

(87) 국제공개번호 WO 2014/146120

국제공개일자 2014년09월18일

(30) 우선권주장

61/800,924 2013년03월15일 미국(US)

(56) 선행기술조사문헌

EP02332484 A2

(뒷면에 계속)

전체 청구항 수 : 총 17 항

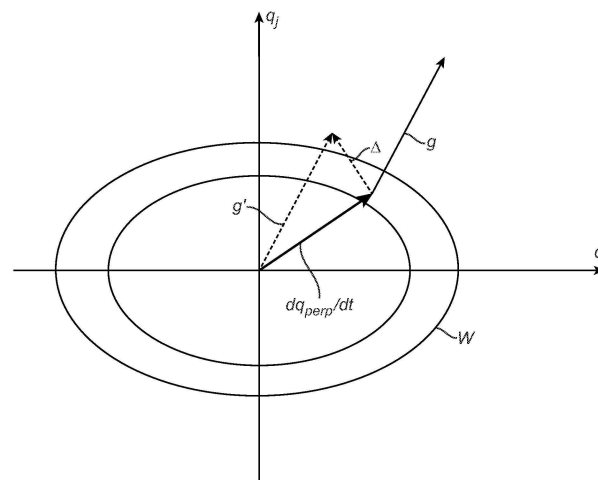
심사관 : 전창익

(54) 발명의 명칭 **매니플레이터 조인트 운동을 비등방적으로 증폭시키기 위해 영공간을 이용하는 시스템 및 방법**

(57) 요약

매니플레이터의 하나 이상의 조인트의 소정의 운동을 제공하면서 매니플레이터의 엔드 이펙터의 명령된 운동을 제공하기 위한 장치, 시스템 및 방법이 제공된다. 상기 방법은 제1 세트의 조인트들의 소정의 운동을 제공하기 위해 영공간 내에서의 조인트 운동을 비등방적으로 증폭시키도록 조인트 공간 내에서의 가중 행렬을 이용하여 가

(뒷면에 계속)

대표도

중치 부여 조인트 속도들을 연산하는 단계를 포함한다. 상기 방법은 의사역행렬 해를 이용하여 소정의 엔드 이펙터 운동을 성취하는 조인트 속도들을 연산하는 단계 및 제1 세트의 조인트들의 소정의 운동에 대응되는 조인트 공간 내에서의 포텐셜 함수 그래디언트를 이용하여 연산된 조인트 속도들을 조절하는 단계를 포함할 수 있다. 상기 방법은 가장 의사역행렬 해 및 증가된 자코비안 해를 사용하는 것을 포함할 수 있다. 하나 이상의 보조 운동도 의사역행렬 해로부터 연산된 조인트 속도들을 이용하여 제공될 수 있다. 그와 같은 방법들을 이용하는 시스템의 여러 가지 구성들이 여기에 제공된다.

(52) CPC특허분류

B25J 18/007 (2013.01)

B25J 9/1607 (2013.01)

G05B 19/40 (2013.01)

G05B 2219/40339 (2013.01)

G05B 2219/40359 (2013.01)

G05B 2219/40474 (2013.01)

(56) 선행기술조사문헌

KR1020080047318 A

JP2004094399 A

US5430643 A

US20120245736 A1

US20100331855 A1

명세서

청구범위

청구항 1

매니퓰레이터 암을 운동시키기 위한 로봇식 방법으로서, 상기 매니퓰레이터 암은 엔드 이펙터를 가진 기구를 지지하기 위한 이동가능한 원위 부분, 베이스에 연결되는 근위 부분, 및 원위 부분과 상기 베이스 사이의 복수의 조인트를 포함하고, 상기 복수의 조인트는 상기 엔드 이펙터의 엔드 이펙터 상태를 위한 일정 범위의 여러 가지 조인트 상태들을 가능하게 해주기에 충분한 자유도를 가지고, 상기 방법은:

소정의 엔드 이펙터 운동으로 상기 엔드 이펙터를 이동시키기 위한 조작 명령을 수취하는 단계;

상기 소정의 엔드 이펙터 운동을 실행시키기 위한 상기 복수의 조인트의 엔드 이펙터 변위 조인트 속도들을 연산하는 과정에 의해 상기 복수의 조인트의 엔드 이펙터 변위 운동을 결정하는 단계;

상기 매니퓰레이터 암의 자코비안의 영공간 내에서의 상기 복수의 조인트의 가중치 부여 조인트 속도들을 결정하는 단계로서, 상기 가중치 부여 속도들을 결정하는 단계는 상기 복수의 조인트의 조인트 공간 내에서의 가중치 부여를 상기 연산된 엔드 이펙터 변위 조인트 속도들에 적용하는 단계를 포함하고, 상기 가중치 부여는 상기 복수의 조인트의 운동의 비등방적 증폭에 대응되는, 가중치 부여 조인트 속도들을 결정하는 단계; 및

상기 소정의 엔드 이펙터 운동을 실행시키기 위해 상기 가중치 부여 조인트 속도들과 조합된 상기 엔드 이펙터 변위 운동에 따라 상기 복수의 조인트를 구동시키는 단계;를 포함하고 있는 것을 특징으로 하는 로봇식 방법.

청구항 2

제 1 항에 있어서, 상기 가중치 부여 조인트 속도들을 결정하는 단계는 그래디언트를 결정하기 위해 상기 가중치 부여를 나타내는 비등방성 표면을 적용하는 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 로봇식 방법.

청구항 3

제 2 항에 있어서, 상기 가중치 부여 조인트 속도들을 결정하는 단계는 상기 엔드 이펙터 변위 조인트 속도들과 상기 그래디언트 간의 차이를 결정하는 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 로봇식 방법.

청구항 4

제 3 항에 있어서, 상기 가중치 부여 조인트 속도들을 결정하는 단계는 상기 차이를 상기 영공간에 투영하는 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 로봇식 방법.

청구항 5

제 1 항 내지 제 4 항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 가중치 부여는 조인트 공간 내에서의 이차곡면과 포물면 중의 적어도 하나에 의해 나타내지는 것을 특징으로 하는 로봇식 방법.

청구항 6

제 1 항 내지 제 4 항 중 어느 한 항에 있어서,

상기 복수의 조인트의 보조 운동을 결정하는 단계; 및

상기 소정의 엔드 이펙터 운동을 실행시키기 위해 상기 엔드 이펙터 변위 운동 및 상기 가중치 부여 조인트 속도들에 따라 상기 복수의 조인트를 구동시키면서 상기 보조 운동에 따라 조인트들을 구동시키는 단계;를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 로봇식 방법.

청구항 7

로봇 시스템에 있어서, 상기 로봇 시스템은:

엔드 이펙터를 가진 기구를 지지하기 위한 원위 부분을 베이스에 대해 로봇식으로 이동시키도록 구성된 매니퓰레이터 암으로서, 상기 원위 부분과 상기 베이스에 연결되는 근위 부분 사이에 복수의 조인트를 가지고, 상기

복수의 조인트가 상기 엔드 이펙터의 엔드 이펙터 상태를 위한 일정 범위의 조인트 상태들을 가능하게 해주기에 충분한 자유도를 제공하도록 되어 있는 매니플레이터 암;

소정의 엔드 이펙터 운동으로 상기 엔드 이펙터를 이동시키기 위한 조작 명령을 수취하는 입력부; 및

상기 입력부를 상기 매니플레이터 암에 연결시키는 프로세서;를 포함하고 있고,

상기 프로세서는:

상기 소정의 엔드 이펙터 운동을 실행시키기 위한 상기 복수의 조인트의 엔드 이펙터 변위 조인트 속도들을 연산하는 과정에 의해 상기 복수의 조인트의 엔드 이펙터 변위 운동을 결정하는 단계;

상기 매니플레이터 암의 자코비안의 영공간 내에서의 상기 복수의 조인트의 가중치 부여 조인트 속도들을 결정하는 단계로서, 상기 가중치 부여 속도들을 결정하는 단계는 상기 복수의 조인트의 조인트 공간 내에서의 가중치 부여를 상기 연산된 엔드 이펙터 변위 조인트 속도들에 적용하는 단계를 포함하는, 가중치 부여 조인트 속도들을 결정하는 단계; 및

상기 소정의 엔드 이펙터 운동을 실행시키기 위해 상기 가중치 부여 조인트 속도들과 조합된 상기 엔드 이펙터 변위 운동으로 상기 복수의 조인트를 구동시키기 위한 명령을 상기 매니플레이터 암에 전송하는 단계;를 포함하는 방법을 수행하도록 구성되어 있는 것을 특징으로 하는 로봇 시스템.

청구항 8

제 7 항에 있어서, 상기 가중치 부여는 상기 복수의 조인트의 운동의 비등방적 증폭에 대응되는 것을 특징으로 하는 로봇 시스템.

청구항 9

제 8 항에 있어서, 상기 가중치 부여 조인트 속도들을 결정하는 단계는 그래디언트를 결정하기 위해 상기 가중치 부여를 나타내는 비등방성 표면을 적용하는 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 로봇 시스템.

청구항 10

제 9 항에 있어서, 상기 가중치 부여 조인트 속도들을 결정하는 단계는 상기 엔드 이펙터 변위 조인트 속도들과 상기 그래디언트 간의 차이를 결정하는 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 로봇 시스템.

청구항 11

제 10 항에 있어서, 상기 가중치 부여 조인트 속도들을 결정하는 단계는 상기 차이를 상기 영공간에 투영하는 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 로봇 시스템.

청구항 12

제 7 항 내지 제 11 항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 가중치 부여는 조인트 공간 내에서의 이차곡면에 의해 나타내지는 것을 특징으로 하는 로봇 시스템.

청구항 13

제 7 항 내지 제 11 항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 가중치 부여는 조인트 공간 내에서의 포물면에 의해 나타내지는 것을 특징으로 하는 로봇 시스템.

청구항 14

제 7 항 내지 제 11 항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 방법은:

상기 복수의 조인트의 보조 운동을 결정하는 단계를 더 포함하고, 상기 명령을 상기 매니플레이터 암에 전송하는 단계는 상기 소정의 엔드 이펙터 운동을 실행시키기 위해 상기 엔드 이펙터 변위 운동 및 상기 가중치 부여 조인트 속도들에 따라 상기 복수의 조인트를 구동시키면서 추가로 상기 보조 운동에 따라 상기 복수의 조인트를 구동시키도록 상기 매니플레이터 암에 지시하는 단계를 포함하고,

상기 엔드 이펙터 변위 조인트 속도들을 연산하는 과정은 상기 조작 명령에 응답하여 자코비안의 영직교공간 내

에서 조인트 속도들을 연산하는 과정을 포함하는 것을 특징으로 하는 로봇 시스템.

청구항 15

제 14 항에 있어서, 상기 보조 운동은 명령된 재구성 운동 및 충돌 회피 운동 중의 적어도 하나를 포함하는 것을 특징으로 하는 로봇 시스템.

청구항 16

제 7 항 내지 제 11 항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 매니퓰레이터 암의 원위 부분은 상기 기구를 해제가능하게 지지하도록 구성된 기구 홀더와 연결되고, 상기 기구는 원위측으로 상기 엔드 이펙트까지 연장된 기구 샤프트를 가진 수술 기구이고, 상기 엔드 이펙터 변위 운동은 상기 기구 샤프트를 원격 중심을 중심으로 피벗운동시키는 것을 특징으로 하는 로봇 시스템.

청구항 17

제 7 항 내지 제 11 항 중 어느 한 항에 있어서,

상기 복수의 조인트는 상기 근위 부분의 원위측이면서 상기 원위 부분의 근위측인 곳에 배치되는 원격 구형 중심 조인트를 포함하고, 상기 원격 구형 중심 조인트는, 상기 원격 구형 중심 조인트의 관절운동이 상기 매니퓰레이터 암의 원위 부분을 원격 중심과 교차하는 제1 원격 중심 축선, 제2 원격 중심 축선 및 제3 원격 중심 축선을 중심으로 피벗운동시키도록, 기계적으로 구속되거나; 또는

상기 복수의 조인트 중의 제1 조인트가 상기 근위 부분을 상기 베이스에 연결시키고, 상기 제1 조인트는 상기 매니퓰레이터 암의 원위 부분을 지지하는 레볼루트 조인트로 이루어져, 상기 레볼루트 조인트의 조인트 운동이 상기 매니퓰레이터 암의 원위 부분을 상기 레볼루트 조인트로부터 연장된 피벗 축선을 중심으로 피벗운동시키는 것을 특징으로 하는 로봇 시스템.

청구항 18

삭제

청구항 19

삭제

청구항 20

삭제

청구항 21

삭제

청구항 22

삭제

청구항 23

삭제

청구항 24

삭제

청구항 25

삭제

청구항 26

삭제

청구항 27

삭제

청구항 28

삭제

청구항 29

삭제

청구항 30

삭제

청구항 31

삭제

청구항 32

삭제

청구항 33

삭제

청구항 34

삭제

청구항 35

삭제

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명 대체로 개선된 수술 및/또는 로봇 장치, 시스템 및 방법을 제공한다.

배경 기술

[0002] 최소 침습 의료 기술은 진단 또는 수술 과정 중에 손상되는 조직의 양을 감소시킴으로써, 환자의 회복 시간, 불편함 및 유해한 부작용을 감소시키는 것을 목적으로 한다. 수 백만 건의 "개복" 수술 또는 통상적인 수술이 매년 미국에서 시행되고 있으며; 이러한 수술들 중의 다수는 잠재적으로 최소 침습식으로 시행될 수 있는 것들이다. 하지만, 수술 기구들, 기술 및 그것들을 완전히 익히는 데 필요한 추가적인 수술 훈련에 있어서의 한계로 인해, 비교적 작은 수의 수술들만이 현재 최소 침습 기술을 이용하고 있다.

[0003] 수술에 사용되는 최소 침습 원격 수술 시스템은 외과의의 조작성을 증대시키는 것과 함께 외과의가 원격지에서 환자를 수술하는 것을 가능하게 해주도록 개발되고 있다. 원격 수술은 외과의가 수술 기구 운동을 조작하기 위해 기구를 직접 손으로 파지하여 운동시키는 것이 아니라 예컨대 서보기구 등의 어떤 형태의 원격 제어를 이용하게 되는 수술 시스템을 나타내는 일반적인 용어이다. 이러한 원격 수술 시스템에 있어서, 외과의는 원격지에서 수술 부위의 영상을 제공받는다. 일반적으로 적당한 뷰어 또는 디스플레이 상의 수술 부위의 3차원 영상을 보면서, 외과의는 마스터 제어 입력 장치를 조작하고, 결과적으로 로봇 기구의 운동을 제어함으로써, 환자에 대한 수술 과정을 수행한다. 로봇 수술 기구들은 종종 개복 수술의 접근법에 관련되는 외상을 피하면서 환자 내

부의 수술 부위의 조직들을 치료하기 위해 작은 최소 침습 수술용 개구부를 통해 삽입될 수 있다. 이러한 로봇 시스템은 종종 최소 침습 개구부에서 기구의 샤프트를 피벗운동시키고, 개구부를 통해 기구의 샤프트를 축선방향으로 슬라이드시키고, 개구부 내에서 샤프트를 회전시키는 등에 의해, 매우 복잡한 수술 작업을 수행하기 위한 충분한 조작성을 가지고 수술 기구의 작업 단부들을 운동시킬 수 있다.

[0004] 원격 수술을 위해 사용되는 서보기구는 2개의 마스터 컨트롤러(외과의의 각각의 손마다 하나씩)로부터 입력을 수취하고, 2개 이상의 로봇 암 또는 매니퓰레이터를 구비할 수 있다. 손 운동을 촬영 장치에 의해 표시되는 로봇 기구의 영상에 매핑(mapping)시킴으로써, 외과의에게 각각의 손과 연계된 기구에 대한 정밀 제어를 제공하는 것을 도와줄 수 있다. 많은 수술 로봇 시스템에 있어서, 내시경이나 다른 촬영 장치, 추가적인 수술 기구 등을 운동시키기 위한 하나 이상의 추가적인 로봇 매니퓰레이터 암이 구비된다.

[0005] 다양한 구조 장치가 로봇 수술 중에 수술 부위에 위치한 수술 기구를 지지하는 데 사용될 수 있다. 피구동 링크리지(driven linkage) 또는 "슬레이브(slave)"는 흔히 로봇 수술 매니퓰레이터라 불려지고, 최소 침습 로봇 수술 중의 로봇 수술 매니퓰레이터로서의 예가 미국 특허 제6,758,843호; 제6,246,200호; 및 제5,800,423호에 개시되어 있으며; 이들의 전체 개시사항이 여기에 참조된다. 이들 링크지는 흔히 샤프트를 가진 기구를 유지하기 위한 평행사변형 배열구조를 이용한다. 그러한 매니퓰레이터 구조는 기구 샤프트가 공간 내에서 강성 샤프트의 길이를 따라 포지셔닝된 구형 회전(spherical rotation)의 원격 중심(remote center) 둘레로 피벗운동하도록 기구의 운동을 제한할 수 있다. 회전의 원격 중심을 내부 수술 부위로의 절개점과 얼라이닝(aligning)시킴으로써(예컨대, 복강경 수술 중에 복벽에 위치하는 트로카(trocar) 또는 캐놀라(cannula)에 의해), 수술 기구의 엔드 이펙터는 매니퓰레이터 링크지를 이용하여 샤프트의 근위 단부를 이동시키는 것에 의해 복벽에 잠재적으로 위험한 힘을 강제하는 일 없이 안전하게 포지셔닝될 수 있다. 대안적인 매니퓰레이터 구조가 예컨대 미국 특허 제6,702,805호; 제6,676,669호; 제5,855,583호; 제5,808,665호; 제5,445,166호; 및 제5,184,601호에 개시되어 있으며; 이들의 전체 개시사항이 여기에 참조된다.

[0006] 이 새로운 로봇 수술 시스템 및 장치들이 매우 효과적이고 유익한 것으로 판명되었지만, 여전히 추가적인 개선점들이 요망되고 있다. 예를 들어, 매니퓰레이터 암은 어떤 조건하에서 증가된 운동 또는 구성을 제공하기 위해 추가적인 여유 조인트(additional redundant joint)를 구비할 수 있다. 하지만, 최소 침습 수술 부위 내에서 수술 기구를 이동시킬 때, 이러한 조인트는 환자 외부에서의 상당히 큰 양의 운동을, 종종 필요하거나 기대되는 것보다 더 많은 운동을 나타낼 수 있으며, 이는 특히 최소 침습 개구부 둘레로 큰 각도 범위에 걸쳐 기구를 피벗운동시킬 때 그러할 수 있다. 환자 외부 등에서의 의도치 않은 매니퓰레이터/매니퓰레이터 접촉을 방지하면서 삽입 부위에서의 피벗운동을 구속하는 높은 구성가능성의 기구학적 매니퓰레이터의 조인트 세트들에 대한 소프트웨어 제어(software control)를 채용하는 대안적인 매니퓰레이터 구조들이 제안되어 왔다. 이러한 높은 구성가능성의 "소프트웨어 센터(software center)" 수술 매니퓰레이터 시스템들은 상당히 큰 장점들을 제공할 수 있지만, 또한 도전과제들을 제시할 수도 있다. 특히, 기계적으로 구속되는 원격 중심 링크지가 어떤 조건에서는 안전상의 장점을 가질 수 있다. 또한, 흔히 이러한 매니퓰레이터에 구비되는 다수의 조인트의 광범위한 구성도는 매니퓰레이터가 특정 과정에 바람직한 구성으로 수동식으로(manually) 셋업되는 것이 어렵게 되는 결과를 초래할 수 있다. 원격 수술 시스템을 이용하여 수행되는 수술의 범위가 계속 확대되고 있기 때문에, 환자 내의 기구의 가용한 구성 및 운동의 범위의 확대에 대한 요구가 증가하고 있다. 불행히도, 이러한 변화는 모두 신체 외부에서의 매니퓰레이터의 운동과 관련된 도전과제들을 증가시킬 수 있고, 또한 특정 작업에 대한 매니퓰레이터 암의 불필요한 운동을 회피하는 것의 중요성을 증가시킨다.

[0007] 이러한 이유들과 기타의 이유들로 인해, 수술, 로봇 수술 및 다른 로봇 응용을 위한 개선된 장치, 시스템 및 방법을 제공하는 것이 유익할 것이다. 이러한 개선된 기술들이 특정 작업 중에 매니퓰레이터 암의 운동의 양을 제한하는 능력을 제공한다면 특히 유익할 것이다. 또한, 적어도 몇 가지 작업들을 위한 기구의 운동의 범위를 증가시키면서, 이러한 시스템의 크기, 기계적 복잡성 또는 비용을 크게 증가시키는 일없이, 조작성을 유지시키거나 개선시키면서 그와 같은 개선점들을 제공하는 것이 바람직할 것이다.

발명의 내용

해결하려는 과제

과제의 해결 수단

- [0008] 본 발명은 대체로 개선된 로봇 및/또는 수술 장치, 시스템 및 방법을 제공한다. 많은 실시형태들에 있어서, 본 발명은 높은 구성가능성의 수술 로봇 매니퓰레이터를 채용하게 될 것이다. 이러한 매니퓰레이터는 예컨대 연계된 수술용 엔드 이펙터가 수술 작업 공간 내에서 가지게 되는 것보다 더 많은 운동 자유도를 가질 수 있다. 본 발명에 따른 로봇 수술 시스템은 일반적으로 로봇 수술 기구를 지지하는 매니퓰레이터 암 및 기구의 엔드 이펙터를 조작하기 위한 좌표화된 조인트 운동을 연산하는 프로세서를 포함하고 있다. 엔드 이펙터를 지지하는 로봇 매니퓰레이터의 조인트들은 매니퓰레이터가 주어진 엔드 이펙터 포지션 및/또는 주어진 피벗점 위치를 위한 일정 범위의 여러 가지 구성들 전체에 걸쳐 이동하는 것을 가능하게 해준다. 매니퓰레이터는 사용자 명령 또는 충돌 회피 운동(collision avoidance movement)과 같은 또 다른 종류의 운동에 응답하여, 재구성 운동과 같은 여러 가지 종류의 보조 운동을 가능하게 해주기 위해 추가적인 여유 조인트(additional redundant joint)를 구비할 수 있다.
- [0009] 하나의 양태에 있어서, 본 발명은 사용자 입력부 엔드 이펙터 조작 명령에 응답하여 소정의 엔드 이펙터 운동을 실행시키면서 신체 외부에서 매니퓰레이터의 하나 이상의 조인트의 소정의 운동을 제공하기 위해 영공간(null-space) 내에서의 매니퓰레이터의 하나 이상의 조인트의 운동을 비등방적으로 증폭(emphasis)시키는 것을 가능하게 해준다. 조인트 운동의 증폭은 그것이 조인트들의 방향에 의존하기 때문에 "비등방적(anisotropic)"인 것으로 간주될 수 있으며, 이 증폭은 소정의 엔드 이펙터 조작 운동을 실행시키는 조인트들의 운동에 수직으로 조인트들의 영공간 내에서 확장된다. 여기서 제1 세트의 조인트들이라고 불려지는 하나 이상의 조인트의 소정의 운동은 조인트 상태, 조인트 상태들의 조합, 상대적인 조인트 상태, 일정 범위의 조인트 상태들, 일정 프로파일의 조인트 상태들 또는 이들의 임의의 조합을 포함할 수 있다. 예를 들어, 소정의 운동은 제1 세트의 조인트들 중의 조인트들 간에 상대적으로 균일한 조인트 속도를 유지시키는 것 및/또는 매니퓰레이터의 소정의 자세나 충돌 방지 구성에 대응되는 일정 조합의 조인트 상태들을 유지시키는 것을 포함할 수 있다.
- [0010] 대체로, 원위 엔드 이펙터의 운동을 실행시키기 위한 매니퓰레이터 암의 명령된 운동은 매니퓰레이터 암의 모든 조인트들의 운동을 이용한다. 하지만, 일부 매니퓰레이터, 특히 여유 자유도를 가진 높은 구성가능성의 매니퓰레이터에 있어서는, 특정 조인트들의 속도들 또는 매니퓰레이터의 전체 운동 에너지가 바람직한 레벨을 초과할 수 있다. 소정의 엔드 이펙터 운동을 실행시키기 위한 영직교공간(null-perpendicular space) 내에서의 복수의 조인트의 연산된 운동에 의해 결정되는 것으로서 영공간 방향 내에서의 제1 세트의 조인트들의 운동을 증폭시키는 것에 의해, 본 발명은 본 명세서에 상세히 설명되는 바와 같이 소정의 엔드 이펙터 운동 중의 제1 세트의 조인트들의 소정의 운동을 제공한다. 또한, 매니퓰레이터 암의 명령된 재구성 운동 또는 충돌 회피 운동과 같은 특정의 다른 작업을 실행시키기 위한 추가적인 보조 운동(additional auxiliary movement)을 편입시키는 것이 유익할 수 있다.
- [0011] 일부 실시형태에 따라, 본 발명은 이동가능한 원위 수술 엔드 이펙터, 베이스에 연결되는 근위 부분, 및 원위 부분과 상기 베이스 사이의 복수의 조인트를 구비하고 있는 매니퓰레이터 암으로서, 상기 복수의 조인트가 주어진 엔드 이펙터 상태를 위한 일정 범위의 여러 가지 조인트 상태들을 가능하게 해주기에 충분한 자유도를 가지도록 되어 있는 매니퓰레이터 암을 제공하는 단계; 소정의 엔드 이펙터 운동으로 상기 엔드 이펙터를 이동시키기 위한 조작 명령을 수취하는 단계; 자코비안 행렬의 영직교공간 내에서의 조인트 속도들을 연산하고, 상기 복수의 조인트 중의 제1 세트의 조인트들의 소정의 운동에 대응되는, 상기 복수의 조인트의 조인트 공간 내에서의 가중치 부여(weighting)를 적용하는 것에 의해 자코비안의 영공간 내에서 상기 연산된 조인트 속도들을 조절함으로써, 가중치 부여 조인트 속도들(weighted joint velocities)을 결정하는 단계; 및 소정의 엔드 이펙터 운동과 상기 제1 세트의 조인트들의 소정의 운동을 실행시키도록 상기 가중치 부여 조인트 속도들에 따라 조인트들을 구동시키는 단계를 포함한다. 상기 제1 세트의 조인트들은 상기 복수의 조인트 중의 하나 이상의 조인트를 구비할 수 있다. 상기 제1 세트의 조인트들의 소정의 운동은 이들에 한정되는 것은 아니지만 조인트 상태, 조인트 상태들의 조합, 상대적인 조인트 상태, 일정 범위의 조인트 상태들, 일정 프로파일의 조인트 상태들 또는 이들의 임의의 조합을 포함할 수 있다. 일부 실시형태에 있어서, 상기 방법은 상기 가중치 부여 조인트 속도들이 연산되는 시작점이 되는 소정의 엔드 이펙터 운동을 성취하는 상기 복수의 조인트에 대한 자코비안 행렬의 영직교공간 내에서의 조인트 속도들을 연산함으로써 소정의 엔드 이펙터 운동을 실행시키기 위한 상기 복수의 조인트의 엔드 이펙터 변위 운동을 결정하는 단계를 더 포함할 수 있어, 가중치 비부여 조인트 속도들(unweighted calculated joint velocities)은 명령된 재구성 운동 또는 충돌 회피 운동과 같은 여러 가지 다른 보조 작업들(auxiliary tasks)에서의 사용을 유용한 것으로 남는다.
- [0012] 하나의 양태에 있어서, 상기 가중치 부여 조인트 속도들을 결정하는 단계는 자코비안의 가중 의사역행렬(weighted pseudo-inverse of the Jacobian)을 연산된 조인트 속도들에 적용한다. 상기 가중치 부여는 조인트

공간 내에서의 가중 행렬(weighting matrix)일 수 있다. 상기 가중치 부여는 포물면(paraboloid)과 같은 조인트 공간 내에서의 이차곡면(quadratic surface)을 포함할 수 있다. 일부 실시형태에 있어서, 상기 엔드 이펙터 운동을 결정하는 단계는 자코비안의 의사역행렬 해(pseudo-inverse solution)를 연산하는 단계 및 의사역행렬 해와 상기 의사역행렬 해의 포텐셜 함수 그래디언트(potential function gradient) 간의 차이를 연산하고, 상기 차이를 각각의 조인트의 영공간 벡터를 결정하기 위해 자코비안의 영공간에 투영시킴으로써 가중치 부여 조인트 속도들을 결정하는 단계를 포함한다.

[0013] 또 다른 양태에 있어서, 본 명세서에 설명되는 방법들 중의 어느 방법은 상기 연산된 조인트 속도들을 이용하여 복수의 조인트의 하나 이상의 보조 운동을 결정하는 단계, 및 상기 엔드 이펙터의 소정의 상태를 유지하면서 상기 연산된 보조 운동에 따라 조인트들을 구동시키는 단계를 포함할 수 있다. 상기 하나 이상의 보조 운동은 상기 복수의 조인트의 제2 세트의 조인트들의 소정의 운동을 포함할 수 있다. 상기 제2 세트의 조인트들은 상기 제1 세트의 조인트들 내의 하나 이상의 조인트를 포함할 수 있는 하나 이상의 조인트를 구비할 수 있다. 상기 하나 이상의 보조 운동은 명령된 재구성 운동, 충돌 회피 운동, 보조 작업 또는 이들의 임의의 조합을 포함할 수 있다.

[0014] 본 발명의 하나의 양태에 있어서, 조작 입력부를 갖는 여유 자유도(Redundant Degrees Of Freedom; RDOF) 수술 로봇 시스템이 제공된다. 이 RDOF 수술 로봇 시스템은 매니퓰레이터 어셈블리, 하나 이상의 사용자 입력 장치 및 컨트롤러를 구비한 프로세서를 포함하고 있다. 어셈블리의 매니퓰레이터 암은 주어진 엔드 이펙터 상태를 위한 일정 범위의 조인트 상태들을 가능하게 해주기에 충분한 자유도를 제공하는 복수의 조인트를 가진다. 일반적으로, 소정의 운동으로 엔드 이펙터를 이동시키기 위한 조작 명령을 수취하는 것에 응답하여, 시스템은 영공간과 직교하는 자코비안의 영직교공간(null-perpendicular-space) 내에서의 조인트 속도들을 연산함으로써 조인트의 엔드 이펙터 변위 운동을 연산하고, 소정의 엔드 이펙터 운동을 실행시키도록 연산된 운동에 따라 조인트들을 구동시킨다. 매니퓰레이터의 작업 공간을 확장시키기 위해 또는 여러 가지 보조 작업들을 가능하게 해주기 위해, 시스템은 매니퓰레이터 암의 최근위 레볼루트 조인트(proximal most revolute joint) 및/또는 기구를 매니퓰레이터 암의 근위 부분에 연결시키는 원위 레볼루트 조인트를 구비할 수 있다.

[0015] 또 다른 양태에 있어서, 매니퓰레이터는 기구 샤프트의 중간 부분이 원격 중심을 중심으로 피벗운동하도록 이동하게 구성된다. 매니퓰레이터와 기구 사이에, 기구 샤프트의 중간 부분이 액세스 부위를 통과되었을 때 엔드 이펙터 포지션을 위한 일정 범위의 조인트 상태들을 가능하게 해주기에 충분한 자유도를 제공하는 복수의 피구동 조인트가 존재한다. 컨트롤러를 가진 프로세서가 입력 장치를 매니퓰레이터에 연결시킨다. 소정의 엔드 이펙터 운동을 실행시키기 위한 조작 명령을 수취하는 것에 응답하여, 시스템은 영공간과 직교하는 자코비안의 영직교공간 내에서의 조인트 속도들을 연산하는 것을 포함하여 조인트들의 엔드 이펙터 변위 운동을 연산한다. 프로세서는 또한 복수의 조인트 중의 제1 세트의 조인트들의 소정의 운동을 실행시키기 위해 복수의 조인트의 조인트 공간 내에 가중치 부여를 적용함으로써 연산된 조인트 속도들을 조절하는 것에 의해 가중치 부여 조인트 속도들을 연산하고, 엔드 이펙터 변위 운동에 응답하여 소정의 엔드 이펙터 운동과 제1 세트의 조인트들의 소정의 운동을 실행시키도록 연산된 가중치 부여 조인트 속도들에 의해 매니퓰레이터 암을 구동시키기 위한 명령을 상기 매니퓰레이터 암에 전송하도록 구성되어 있다. 프로세서는 가중치 부여 조인트 속도들을 연산하는 과정이 조인트 공간 내에서 또는 더 구체적으로는 제1 세트의 조인트들의 소정의 운동에 대응되는, 포물면과 같은 이차곡면에 따라 적용되는 가중 행렬을 이용하도록 구성될 수 있어, 조인트들의 운동이 제1 세트의 조인트들의 소정의 운동을 제공하도록 영직교공간을 따라 증폭된다. 하나의 양태에 있어서, 상기 소정의 운동은 조인트 공간 내에서의 가중 행렬 또는 표면에 대응되는 운동에 접근하거나 근사하는 제1 세트의 조인트들의 운동이다.

[0016] 하나의 양태에 있어서, 매니퓰레이터 암의 근위 부분은 조인트들이 구동되는 동안 당해 근위 부분의 베이스에 대한 운동이 방지되도록 베이스에 부착된다. 또 다른 양태에 있어서, 매니퓰레이터 암의 근위 부분은 조인트들이 구동되는 동안 당해 근위 부분이 베이스에 대해 운동가능하도록 조인트에 의해 베이스에 연결된다. 하나의 예시의 실시형태에 있어서, 매니퓰레이터의 근위 부분을 베이스에 연결시키는 조인트는 레볼루트 조인트이고, 이 레볼루트 조인트는 당해 레볼루트 조인트의 조인트 운동이 매니퓰레이터 암의 하나 이상의 조인트를 당해 레볼루트 조인트의 피벗 축선을 중심으로 피벗운동시키도록 매니퓰레이터 암을 지지한다. 다수의 실시형태에 있어서, 레볼루트 조인트의 피벗 축선은 조인트로부터 엔드 이펙터의 기구 샤프트가 피벗운동하는 중심이 되는 원격 중심을 통과하여 연장된다. 하나의 양태에 있어서, 레볼루트 조인트의 운동은 매니퓰레이터 암의 하나 이상의 조인트를 원추적으로 경사져(distally tapered cone) 원위 엔드 이펙터, 일반적으로 원격 중심을 향해 배향(orientation)된 원추적 주위를 피벗운동시킨다. 이 양태에서 매니퓰레이터 암이 그 주위를 피벗운동하게 되는 이 원추적은 이하에 상세하게 설명되는 툴의 운동이 불가능하거나 손상될 수 있는 툴 팁의 운동의 범위 내의 원

추형 보이드(conical void)에 해당된다.

[0017] 또 다른 양태에 있어서, 매니퓰레이터의 근위 부분을 베이스에 연결시키는 조인트는 베이스에 대해 일반적으로 아치형 또는 대체로 원형 경로인 하나의 경로를 따라 운동가능하며, 이 경로를 따른 조인트의 운동이 기구 근방의 매니퓰레이터 암의 원위 부분을 통해, 바람직하게는 기구 샤프트가 피벗운동하는 중심이 되는 원적 중심을 통해 연장되는 축선을 중심으로 매니퓰레이터 암의 하나 이상의 조인트를 피벗운동시킨다. 일부 실시형태에 있어서, 매니퓰레이터는 매니퓰레이터의 근위 부분을 베이스에 연결시키는 레볼루트 조인트로서, 선형, 아치형 또는 대체로 원형일 수 있는 경로를 따라 베이스에 대해 운동가능한 레볼루트 조인트를 포함한다.

[0018] 본 발명의 또 다른 양태에 있어서, 근위 레볼루트 조인트 및 원위 평행사변형 링크지를 구비한 수술 로봇 매니퓰레이터가 제공되고, 레볼루트 조인트의 피벗 축선은 엔드 이펙터의 기구 샤프트의 축선과 실질적으로 교차하고, 바람직하게는 적용가능한 경우에 원적 중심에서 만난다. 시스템은 또한 입력부를 매니퓰레이터 암에 연결시키는 컨트롤러를 가지고, 소정의 엔드 이펙터 운동을 실행시키는 가중치 부여 조인트 속도들을 연산함으로써 사용자 입력부 명령에 응답하여 복수의 조인트의 운동을 연산하도록 구성된 프로세서를 포함하고, 조인트 속도들의 가중치 부여가 근위 베이스와 엔드 이펙터 사이의 하나 이상의 조인트의 소정의 운동에 대응된다. 일부 실시형태에 있어서, 프로세서는 또한 하나 이상의 보조 작업을 실행시키기 위해 가중치 비부여 조인트 속도들로부터 영공간 내에서의 조인트 속도들을 연산하도록 구성된다.

[0019] 본 발명의 특성 및 장점들의 보다 완전한 이해는 본 명세서의 나머지 부분 및 도면을 참조함으로써 명백해질 것이다.

도면의 간단한 설명

[0020] 도 1a는 본 발명의 실시형태들에 따른 로봇 수술 시스템의 평면도로서, 환자 내의 내부 수술 부위에서 수술용 엔드 이펙터들을 가진 수술 기구들을 로봇식으로 이동시키기 위한 복수의 로봇 매니퓰레이터를 구비한 수술 스테이션을 가지는 로봇 수술 시스템의 평면도이다.

도 1b는 도 1a의 로봇 수술 시스템을 다이어그램으로 도시하고 있다.

도 2는 도 1a의 로봇 수술 시스템 내에 수술 과정 명령들을 입력하기 위한 마스터 외과의 콘솔 즉 워크스테이션을 도시한 사시도로서, 입력 명령들에 응답하여 매니퓰레이터 명령 신호들을 발생시키기 위한 프로세서를 구비하는 마스터 외과의 콘솔의 사시도이다.

도 3은 도 1a의 전자장치 카트의 사시도이다.

도 4는 4개의 매니퓰레이터 암을 가진 환자측 카트의 사시도이다.

도 5a-5d는 하나의 예시의 매니퓰레이터 암을 도시하고 있다.

도 6a-6b는 각각 피치 포워드 구성(pitch forward configuration) 및 피치 백 구성(pitch back configuration)에서의 예시의 매니퓰레이터 암을 도시하고 있다.

도 6c는 피치 포워드 구성 및 피치 백 구성의 각각에서의 콘 오브 사일런스(cone of silence) 즉 원추형 툴 액세스 제한 구역을 포함하는, 예시의 매니퓰레이터 암의 수술 기구 툴 팁의 운동의 범위의 그래프도를 도시하고 있다.

도 7a는 매니퓰레이터 암을 근위 레볼루트 조인트(proximal revolute joint)의 축선을 중심으로 회전시키는 근위 레볼루트 조인트를 가진 예시의 매니퓰레이터 암을 도시하고 있다.

도 7b는 예시의 매니퓰레이터 암 및 그 운동의 범위 및 콘 오브 사일런스의 범위를 도시한 도면으로서, 그것의 운동이 도시된 콘 오브 사일런스를 감소시키는 데 사용될 수 있는 근위 레볼루트 조인트의 축선 둘레로 매니퓰레이터 암을 회전시키는 근위 레볼루트 조인트를 가진 예시의 매니퓰레이터의 암을 도시하고 있다.

도 8은 원위 기구 홀더 근방에 레볼루트 조인트를 가진 예시의 매니퓰레이터 암을 도시하고 있다.

도 9는 원위 기구 홀더 근방에 조인트 축선을 중심으로 기구 홀더를 회전시키거나 비틀림운동시키는 레볼루트 조인트를 가지는 예시의 매니퓰레이터 암을 도시하고 있다.

도 10a-10c는 원위 기구 홀더 근방에 레볼루트 조인트를 가진 예시의 매니퓰레이터 암의, 조인트가 조인트 운동의 범위 전체에 걸쳐 운동될 때의 순차도를 도시하고 있다.

도 11a-11b는 원위 레볼루트 조인트를 가진 예시의 매니플레이터 암의, 조인트의 각도 변위가 각각 0° 일 때와 90° 일 때의 회전 프로파일을 도시하고 있다.

도 12a-12c는 조인트의 경로 주위에서 매니플레이터 암을 지지하는 근위 조인트를 이동시키는 근위 조인트를 가진 예시의 매니플레이터 암을 도시하고 있다.

도 13a-13b는 예시의 매니플레이터 어셈블리의 자코비안의 영공간과 영직교공간(null-perpendicular-space) 사이의 관계를 그래프로 나타낸 도면이다.

도 14는 자코비안의 의사역행렬(pseudo-inverse of the Jacobian) 및 포텐셜 함수 그래디언트(potential function gradient)를 이용하여 조인트 공간 내에서의 가중치 부여 조인트 속도들(weighted joint velocities)을 연산하는 방법을 그래프로 도시하고 있다.

도 15는 하나의 예시의 매니플레이터 어셈블리에서 일반적인 알고리즘을 구현하는 데 사용되는 블록도를 도시하고 있다.

도 16-17은 본 발명의 양태들에 따른 예시적인 방법들의 블록도를 도시하고 있다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0021] 본 발명은 대체로 개선된 수술 및 로봇 장치, 시스템 및 방법을 제공한다. 본 발명은 수술 과정 중에 복수의 수술 툴 또는 기구가 연계된 복수의 로봇 매니플레이터 상에 장착되거나 그것들에 의해 이동될 수술 로봇 시스템과 함께 사용하는 데 특히 유익하다. 이 로봇 시스템들은 흔히 마스터-슬레이브 컨트롤러로서 구성되는 프로세서를 구비하는 원격 로봇, 원격 수술 및/또는 원격 현장감 시스템을 포함한다. 비교적 큰 수의 자유도를 갖는 관절형 링크지들을 구비한 매니플레이터 어셈블리를 이동시키도록 적절히 구성된 프로세서를 채용한 로봇 시스템을 제공하는 것에 의해, 링크지들의 운동이 최소 침습 액세스 부위를 통한 작업에 맞춤형될 수 있다. 본 발명의 양태들은 대체로 여유 자유도를 가지는 매니플레이터로 설명되지만, 어떤 양태들은 예를 들어 특이점(singularity)을 경험하거나 그것에 접근하게 되는 매니플레이터와 같은 비여유 매니플레이터에 적용될 수 있다는 것을 이해해야 한다.

[0022] 여기에 설명되는 로봇 매니플레이터 어셈블리는 흔히 로봇 매니플레이터 및 그것들에 장착되는 툴(툴은 종종 수술 형태들에서 수술 기구를 포함)을 포함하고 있지만, "로봇 어셈블리"란 용어는 툴이 그것에 장착되지 않는 매니플레이터도 포함할 것이다. "툴(tool)"이란 용어는 통상적인 즉 산업 로봇 툴과 특수화된 로봇 수술 기구의 모두를 포함하며, 후자의 구조는 종종 조직(tissue)의 조작, 조직의 치료, 조직의 촬영 등에 적합한 엔드 이펙터를 포함한다. 툴/매니플레이터 인터페이스는 종종 툴의 신속한 제거 및 대체 툴에 의한 교체를 가능하게 해주는 신속 분리 툴 홀더 또는 커플링이 될 것이다. 매니플레이터 어셈블리는 종종 로봇 수술 과정 중의 적어도 일부분 동안 공간 내에 고정되어 있게 되는 베이스를 가질 것이며, 매니플레이터 어셈블리는 베이스와 툴의 엔드 이펙터 간에 다수의 자유도를 구비할 것이다. 엔드 이펙터의 작동(그립 장치의 조(jaw)의 개방 또는 폐쇄, 전자 수술 패들(paddle)의 통전 등)은 종종 이러한 매니플레이터 어셈블리의 자유도로부터 독립적이고 추가적인 것일 것이다.

[0023] 엔드 이펙터는 일반적으로 2개 내지 6개의 자유도를 가지고 작업 공간 내에서 이동할 것이다. 여기에 사용되는 것으로서, "포지션(position)"이라는 용어는 위치(location)와 배향(orientation)을 모두 포함한다. 따라서, 엔드 이펙터(예를 들어)의 포지션의 변화는 제1 위치로부터 제2 위치로의 엔드 이펙터의 이동, 제1 배향으로부터 제2 배향으로의 엔드 이펙터의 회전 또는 양자의 조합을 포함할 수 있다. 최소 침습 로봇 수술을 위해 사용될 때, 매니플레이터 어셈블리의 운동은 샤프트나 툴 또는 기구의 중간 부분의 운동이 최소 침습 수술 액세스 부위나 다른 개구부를 통한 안전한 운동으로 제한되도록 시스템의 프로세서에 의해 제어될 수 있다. 그와 같은 운동에는 예컨대 개구부 부위를 통한 수술 작업 공간 내로의 샤프트의 축선방향 삽입, 샤프트 축선을 중심으로 하는 샤프트의 회전 및 액세스 부위에 인접한 피벗점을 중심으로 한 샤프트의 피벗운동이 포함될 수 있다.

[0024] 여기에 설명되는 예시의 매니플레이터 어셈블리들 중의 다수는 수술 부위 내에서 엔드 이펙터를 포지셔닝시키고 이동시키는 데 필요한 것보다 더 많은 자유도를 가진다. 예컨대, 최소 침습 개구부를 통해 내부 수술 부위에 6개의 자유도를 가지고 포지셔닝될 수 있는 수술용 엔드 이펙터가 몇몇의 실시형태에 있어서는 9개의 자유도(6개의 엔드 이펙터 자유도(위치를 위한 3개의 자유도, 배향을 위한 3개의 자유도) + 액세스 부위 제약에 순응하기 위한 3개의 자유도)를 가질 수 있으며, 종종 10개 이상의 자유도도 가질 것이다. 주어진 엔드 이펙터 포지션을 위해 필요한 것보다 더 많은 자유도를 갖는 높은 구성가능성의 매니플레이터 어셈블리는 작업 공간 내에서의 엔

드 이펙터 포지션을 위한 일정 범위의 조인트 상태들을 가능하게 해주기에 충분한 자유도를 가지거나 제공하는 것으로서 설명될 수 있다. 예컨대, 주어진 엔드 이펙터 포지션을 위해, 매니플레이터 어셈블리는 일정 범위의 선택적인 매니플레이터 링크지 포지션들 중의 어느 하나를 차지할 수 있다(그리고 일정 범위의 선택적인 매니플레이터 링크지 포지션들 사이에서 구동될 수 있다). 마찬가지로, 주어진 엔드 이펙터 속도 벡터를 위해, 매니플레이터 어셈블리는 자코비안(Jacobian)의 영공간(null-space) 내에서의 매니플레이터 어셈블리의 여러 가지 조인트를 위한 일정 범위의 여러 가지 조인트 운동 속력들을 가진다.

[0025] 본 발명은 광범위한 운동이 요망되고, 다른 로봇 링크지, 수술 요원 및 장비 등의 존재로 인해 제한된 전용 공간만이 가용한 수술(및 기타) 용례에 특히 적합화된 로봇 링크지 구조를 제공한다. 이러한 큰 범위의 운동과 각각의 로봇 링크지에 필요한 공간의 감소는 로봇 지지 구조물의 위치와 수술 또는 다른 작업 공간 사이에 더 큰 유연성도 제공할 수 있어, 셋업을 조장(facilitating)하고 셋업을 신속화한다.

[0026] 조인트 등의 "상태(state)"라는 용어는 여기에서 종종 조인트와 연계된 제어 변수와 관련되어 있다. 예컨대, 각도 조인트(angular joint)의 상태는 각도 조인트의 운동의 범위 내에서의 각도 조인트에 의해 한정되는 각도 및/또는 각도 조인트의 각속도와 관련될 수 있다. 마찬가지로, 축선방향 또는 프리즈메틱 조인트(prismatic joint)는 프리즈메틱 조인트의 축선방향 포지션 및/또는 축선방향 속도와 관련될 수 있다. 여기에 설명되는 다수의 컨트롤러는 속도 컨트롤러를 포함하며, 종종 일부 포지션 제어 양태를 가지기도 한다. 대안적인 실시형태는 주로 또는 전적으로 포지션 컨트롤러, 가속도 컨트롤러 등에 의존한다. 그와 같은 장치들에 사용될 수 있는 제어 시스템의 다수의 양태들이 미국 특허 제6,699,177호에 더 상세하게 설명되어 있으며, 그 전체 개시사항이 여기에 참조된다. 따라서, 설명되는 운동들이 연계된 연산들에 기초하고 있는 한, 여기에 설명되는 조인트들의 운동들의 연산들과 엔드 이펙터의 운동들은 포지션 제어 알고리즘, 속도 제어 알고리즘, 양자의 조합 등을 사용하여 수행될 수 있다.

[0027] 특정 실시형태에 있어서, 예시의 매니플레이터 암의 톨은 최소 침습 개구부에 인접한 피벗점을 중심으로 피벗운동한다. 일부 실시형태에 있어서, 시스템은 그 전체 개시내용이 여기에 참조되는 미국 특허 제6,786,896호에 개시된 원격 중심 기구학과 같은 하드웨어 원격 중심(hardware remote center)을 활용할 수 있을 것이다. 그와 같은 시스템은 매니플레이터에 의해 지지되는 기구의 샤프트가 원격 중심점을 중심으로 피벗운동하도록 링크지들의 운동을 구속하는 이중 평행사변형 링크지를 활용할 수 있을 것이다. 대안적인 기계적으로 구속되는 원격 중심 링크지 시스템들이 공지되어 있으며, 미래에 발전될 수 있을 것이다. 놀랍게도, 본 발명의 다양한 양태들과 관련한 작업은 원격 중심 링크지 시스템이 높은 구성가능성의 기구학적 구조로부터 이익을 얻을 수 있다는 것을 나타낸다. 특히, 수술 로봇 시스템이 최소 침습 수술 액세스 부위에서 또는 그 근방에서 교차하는 2개의 축선을 중심으로 한 피벗운동을 가능하게 해주는 링크지를 가질 때, 구형 피벗운동(spherical pivotal motion)이 환자 내에서의 소정의 운동 범위의 전체를 아우를 수 있지만, 여전히 피할 수 있는 결점들(불량하게 컨디션닝됨(poorly conditioned), 환자 외부에서의 암 대 암(arm-to-arm) 또는 암 대 환자(arm-to-patient)의 접촉 가능성이 높음 등)에 의해 어려움을 겪을 수 있다. 언뜻, 액세스 부위에서 또는 그 근방에서의 피벗운동에 역시 기계적으로 구속되는 하나 이상의 추가적인 자유도를 부가하는 것이 운동의 범위에 있어서 개선을 거의 제공하지 못하거나 경미한 개선만을 제공하는 것으로 보일 수 있다. 그렇지만, 놀랍게도, 이러한 조인트는 전체 시스템이 충돌 방지 자세로 구성되는 것 또는 충돌 방지 자세로 구동되는 것을 가능하게 해주는 것에 의한, 다른 수술 과정들을 위해 운동의 범위를 더 확장시키는 것 등에 의한 중대한 장점들을 제공할 수 있다. 몇몇의 실시형태에 있어서, 시스템은 그 전체 개시내용이 여기에 참조되는 미국 특허 8,004,229호에 설명되어 있는 바와 같이, 원격 중심을 성취하는 데 소프트웨어를 활용할 수 있을 것이다. 소프트웨어 원격 중심(software remote center)을 가진 시스템에 있어서, 프로세서는 기계적 제약에 반하여, 결정된 피벗점을 중심으로 기구 샤프트의 중간 부분을 피벗운동시키도록 조인트의 운동을 연산한다. 소프트웨어 피벗점을 연산하는 능력을 가짐으로써, 시스템의 순응성 또는 경직성으로 특징지어지는 여러 가지 모드가 선택적으로 구현될 수 있다. 더 구체적으로는, 일정 범위의 피벗점/중심(예컨대, 이동가능한 피벗점, 수동형 피벗점, 고정형/강성 피벗점, 연성 피벗점 등)에 걸친 여러 가지 모드가 원하는 대로 구현될 수 있다.

[0028] 다중의 높은 구성가능성의 매니플레이터들을 가진 로봇 수술 시스템의 많은 장점들에도 불구하고, 매니플레이터들이 여유 자유도를 가지고서 베이스와 기구 사이에 상대적으로 많은 개수의 조인트 및 링크를 구비하기 때문에, 원위 엔드 이펙터 및/또는 원격 중심의 소정의 운동을 성취하기 위한 복수의 조인트의 명령된 운동이 바람직하지 않은 조인트 속도, 하나 이상의 조인트와 연계된 과도한 운동 에너지를 발생시키거나, 소정의 운동 선택을 충족시키지 못하는 운동을 발생시킬 수 있다. 바람직하지 않은 조인트 속도의 예로는 바람직하지 않은 조인트 상태들의 조합, 하나 이상의 조인트의 과도한 조인트 속도 또는 불균형적인 조인트 상태들이 포함될 수

있다. 본 발명은 명령된 엔드 이펙터 운동 중에 하나 이상의 조인트를 위한 조인트 상태들의 조합과 같은 소정의 운동 또는 본 명세서에 설명되는 여타의 운동을 제공한다.

[0029] 하나의 양태에 있어서, 시스템은 툴 팁 및/또는 원격 중심의 명령된 운동을 성취하는 가중치 부여 조인트 속도들(weighted joint velocities)을 연산하도록 구성된다. 조인트 속도들은 영공간 방향 내에서 조인트들의 운동을 비등방적으로(anisotropically) 증폭(emphasis)시키기 위해 조인트 공간 내에서 가중치를 부여받고, 이 가중치 부여(weighting)는 제1 세트의 조인트들의 소정의 상태 또는 운동에 대응되어, 가중치 부여 조인트 속도들에 따라 조인트들을 구동시키는 것에 의해 제1 세트의 조인트들의 소정의 운동을 제공하면서 명령된 운동을 성취한다. 첫 번째 접근법에 있어서는, 가중치 부여 조인트 속도들은 조인트 공간 내에서의 가중 행렬(weighting matrix)을 적용함으로써 연산된다. 두 번째 접근법에 있어서는, 가중치 비부여 조인트 속도들(unweighted joint velocities)이 툴 팁 및/또는 원격 중심의 명령된 운동을 성취하고, 가중치 부여 조인트 속도들이 가중치 비부여 조인트 속도들을 이용하여 연산된다. 이 접근법은 특히 가중치 비부여 조인트 속도들이 명령된 재구성 작업 및 충돌 회피 작업과 같은 하나 이상의 여러 가지 다른 작업을 실행시키는 데 사용될 수 있을 때 유용하다. 특정 양태에 있어서는, 가중치 비부여 조인트 속도들과 가중치 부여 조인트 속도들이 포물면 또는 타원면과 같은 조인트 공간 내의 이차곡면(quadratic surface)을 포함하는 가중치 부여를 이용하는 동일한 커널(kernel) 내에서 연산된다. 가중치 부여 조인트 속도들은 예를 들어 이하의 상세한 설명에서 설명되어 있는 바와 같이 의사역행렬 해(pseudo-inverse solution)와 그 해의 포텐셜 함수 그래디언트(potential function gradient) 간의 차이를 이용하여 가중치 비부여 조인트 속도들로부터 연산될 수 있다.

[0030] 하나의 양태에 있어서, 수술 공간 내에서의 명령된 엔드 이펙터 운동은 기구학적 자코비안의 영직교공간 내에서 프로세서에 의해 연산된 조인트들의 좌표화된 엔드 이펙터 변위 운동에 따라 매니퓰레이터의 하나 이상의 조인트를 구동시킴으로써 실행된다. 재구성 운동 또는 충돌 회피 운동과 같은 여러 가지 다른 작업들이 자코비안의 영공간 내에서 연산된 조인트들의 좌표화된 운동에 따라 매니퓰레이터의 하나 이상의 조인트를 구동시킴으로써, 엔드 이펙터의 소정의 상태를 유지하면서 실행될 수 있으며, 이 작업들은 종종 엔드 이펙터 변위 운동과 동시적이다. 일부 실시형태에 있어서, 이러한 여러 가지 다른 작업들은 가중치 비부여 조인트 속도들을 이용할 수 있으며, 따라서 시스템은 가중치 비부여 조인트 속도들과 가중치 부여 조인트 속도들의 양자 모두를 동일한 이터레이션(iteration) 또는 커널(kernel) 내에서 연산하도록 구성될 수 있다. 이러한 실시형태들은 가중치 부여 조인트 속도들을 결정하는 데 필요한 연산을 감소시키기 위해 가중치 비부여 조인트 속도들을 이용하여 조인트 속도들에 가중치를 부여하는 대안적인 방법들을 이용할 수 있을 것이다.

[0031] 일부 실시형태에 있어서, 자율 제어 알고리즘(autonomous algorithm)에 기반한 회피 운동과 같은 여러 가지 다른 작업들과 관련하여 연산된 운동이 여러 가지 다른 작업들을 실행시키기 위해 연산된 조인트 속도들에 오버레이(overlay)될 수 있다. 그와 같은 회피 운동들의 예가 "영공간을 이용한 매니퓰레이터 암 대 환자 충돌 회피(Manipulator Arm-to-Patient Collision Avoidance Using a Null-Space)" 라는 명칭으로 2012년 6월 1일자로 제출된 미국 가특허출원 제61/654,755호; 및 "영공간을 이용하여 매니퓰레이터 암들 사이의 충돌을 회피시키기 위한 시스템 및 방법(System and Methods for Avoiding Collisions Between Manipulator Arms Using a Null-Space)" 라는 명칭으로 2012년 6월 1일자로 제출된 미국 가특허출원 제61/654,773호에 개시되어 있으며, 그 전체 개시내용이 여기에 참조된다. 하지만, 비등방적으로 증폭되는 조인트 운동에 오버레이되는 연산된 운동은 자율 제어 운동에 한정되지 않으며, 명령된 재구성 운동, 운동의 범위, 조작성 또는 컨디셔닝을 개선시키기 위한 운동과 같은 여러 가지 다른 운동을 포함할 수 있다. 그와 같은 명령된 재구성의 예가 "영공간을 이용한 수술 매니퓰레이터의 명령된 재구성(Commanded Reconfiguration of a Surgical Manipulator Using the Null-Space)" 이라는 명칭으로 2012년 6월 1일자로 제출된 미국 가특허출원 61/654,764호에 개시되어 있으며, 그 전체 개시내용이 여기에 참조된다.

[0032] 이하의 설명에서, 본 발명의 여러 가지 실시형태가 설명될 것이다. 설명을 목적으로 하여, 특정 구성들 및 세부사항들이 실시형태들의 완전한 이해를 제공하기 위해 기술된다. 하지만, 본 발명은 여러 세부사항들 없이 실시될 수 있다는 것도 당업자에게 명백할 것이다. 또한, 잘 알려진 세부사항들은 설명되는 실시형태를 불분명하게 만들지 않도록 하기 위해 생략되거나 단순화될 수 있을 것이다.

[0033] 이제 동일한 도면부호가 여러 도면에 걸쳐 동일한 부분을 나타내고 있는 도면을 참조하면, 도 1a는 수술대(14) 위에 누워 있는 환자(12)에 대해 최소 침습 진단 또는 수술 과정을 수행하기 위해 사용되는 다수의 실시형태에 따른 최소 침습 로봇 수술(MIRS) 시스템(10)의 평면도이다. 이 시스템은 수술 과정 중에 외과의(18)에 의해 사용되는 외과의 콘솔(16)을 포함할 수 있다. 한 명 이상의 보조원(20)도 이 수술 과정에 참여할 수 있다. MIRS 시스템(10)은 또한 환자측 카트(22)(수술 로봇) 및 전자장치 카트(24)를 포함할 수 있다. 환자측 카트(22)는,

외과의(18)가 콘솔(16)을 통해 수술 부위를 보고 있는 동안에, 환자(12)의 신체 내의 최소 침습 절개부를 통해 적어도 하나의 제거가능하게 결합된 툴 어셈블리(26)(이하 간단히 "툴"이라 함)를 조작할 수 있다. 수술 부위의 영상이 환자측 카트(22)에 의해 배향 조작될 수 있는 입체 내시경과 같은 내시경(28)에 의해 얻어질 수 있다. 전자장치 카트(24)가 외과의 콘솔(16)을 통한 외과의(18)에게 제공되는 후속적인 화면표시를 위해 수술 부위의 영상을 처리하는 데 사용될 수 있다. 한번에 사용되는 수술 툴(26)의 개수는 일반적으로 무엇보다 진단 또는 수술 과정 및 수술실 내의 공간 제약에 좌우된다. 수술 과정 중에 사용되는 하나 이상의 툴(26)을 교체하는 것이 필요한 경우에는, 보조원(20)이 환자측 카트(22)로부터 툴(26)을 제거하고, 수술실 내의 트레이(30)로부터 또 다른 툴(26)로 교체할 수 있다.

[0034] 도 1b는 로봇 수술 시스템(50)(도 1a의 MIRS 시스템(10)과 같은)을 다이어그램으로 도시하고 있다. 전술한 바와 같이, 외과의 콘솔(52)(도 1a의 외과의 콘솔(16)과 같은)은 최소 침습 수술 과정 중에 환자측 카트(수술 로봇)(54)(도 1a의 환자측 카트(22)와 같은)를 제어하도록 외과의에게 의해 사용될 수 있다. 환자측 카트(54)는 수술 부위의 영상을 촬영하고, 촬영된 영상을 전자장치 카트(56)(도 1a의 전자장치 카트(24)와 같은)로 출력하기 위해 입체 내시경과 같은 촬영 장치를 사용할 수 있다. 전술한 바와 같이, 전자장치 카트(56)는 임의의 후속적인 화면표시 전에 다양한 방법으로 촬영된 영상을 처리할 수 있다. 예컨대, 전자장치 카트(56)는 결합된 영상을 외과의 콘솔(52)을 통해 외과의에게 화면표시하기 전에 촬영된 영상들을 가상 제어 인터페이스로 오버레이할 수 있다. 환자측 카트(54)는 촬영된 영상들을 전자장치 카트(56) 외부에서 처리하기 위해 출력할 수 있다. 예컨대, 환자측 카트(54)는 프로세서(58)로 촬영된 영상을 출력할 수 있으며, 촬영된 영상을 처리하기 위해 사용될 수 있다. 영상들은 또한 전자장치 카트(56)와 프로세서(58)의 조합에 의해 처리될 수도 있으며, 촬영된 영상들을 공동적으로, 순차적으로 그리고/또는 공동과 순차의 조합으로 처리하도록 함께 결합될 수 있다. 하나 이상의 별개의 디스플레이(60)가 또한 수술 부위의 영상이나 다른 관련영상과 같은 영상의 현지 및/또는 원격 표시를 위해 프로세서(58) 및/또는 전자장치 카트(56)와 결합될 수도 있다.

[0035] 도 2는 외과의 콘솔(16)의 사시도이다. 외과의 콘솔(16)은 외과의(18)에게 깊이 지각을 가능하게 해주는 수술 부위의 통합 입체 뷰를 제공하는 좌안 디스플레이(32) 및 우안 디스플레이(34)를 구비하고 있다. 콘솔(16)은 또한 환자측 카트(22)(도 1a 도시)가 하나 이상의 툴을 조작하게 만드는 하나 이상의 입력 제어 장치(36)를 구비하고 있다. 입력 제어 장치(36)는 외과의에게 원격 현장감 또는 외과의가 툴(26)을 직접 제어한다는 강한 느낌을 가지도록 입력 제어 장치(36)가 툴(26)과 일체라는 지각을 제공하기 위해 연계된 툴(26)(도 1a 도시)과 동일한 자유도를 제공할 수 있다. 이를 위해, 포지션, 힘 및 촉각 피드백 센서들(도시 안됨)이 툴(26)로부터의 포지션, 힘 및 촉각 감각을 입력 제어 장치(36)를 통해 외과의의 손으로 다시 전달하기 위해 채용될 수 있다.

[0036] 외과의 콘솔(16)은 일반적으로 외과의가 수술 과정을 직접 모니터하고, 필요한 경우 직접 현장에 위치하고, 전하나 다른 통신 매체를 통하기보다 직접 보조원에게 이야기할 수 있도록 환자와 동일한 방에 배치된다. 하지만, 외과의는 원격 수술 과정을 허용하는 다른 방, 완전히 다른 건물 또는 환자로부터의 다른 원격지에 위치될 수도 있다.

[0037] 도 3은 전자장치 카트(24)의 사시도이다. 전자장치 카트(24)는 내시경(28)과 결합될 수 있고, 외과의 콘솔 위의 외과의에게 제공되는 후속적인 화면표시, 또는 근처 및/또는 원격지에 배치되는 또 다른 적합한 디스플레이상의 후속적인 화면표시 등을 위해 촬영된 영상을 처리하는 프로세서를 구비하고 있다. 예컨대, 입체 내시경이 사용되는 경우, 전자장치 카트(24)는 외과의에게 수술 부위의 통합 입체 영상(coordinated stereo image)을 제공하도록 촬영된 영상을 처리할 수 있다. 이러한 입체 영상의 통합(coordination)은 양쪽 영상들 간의 얼라인먼트(alignment)를 포함할 수 있고, 입체 내시경의 입체 작동 거리를 조절하는 것을 포함할 수 있다. 또 다른 예로서, 영상 처리는 광학 수차와 같은 촬영 장치의 촬영 오차를 보정하기 위한 선결정된 카메라 보정 파라미터의 이용을 포함할 수 있다.

[0038] 도 4는 각각이 원위 단부에서 수술 기구 또는 툴(26)을 지지하는 복수의 매니퓰레이터 암을 가진 환자측 카트(22)를 도시하고 있다. 도시된 환자측 카트(22)는 수술 툴(26)이나 수술 부위의 영상의 촬영을 위해 사용되는 입체 내시경과 같은 촬영 장치(28)를 지지하도록 사용될 수 있는 4개의 매니퓰레이터 암(100)을 포함하고 있다. 조작은 다수의 로봇 조인트를 갖는 로봇 매니퓰레이터 암(100)에 의해 제공된다. 촬영 장치(28) 및 수술 툴(26)은 절개부의 크기를 최소화하기 위해 운동학적 원격 중심이 절개부에 유지되도록 환자의 절개부를 통해 포지셔닝되고 조작될 수 있다. 수술 부위의 영상은 수술 툴(26)의 원위 단부가 촬영 장치(28)의 시계 내에 위치될 때는 수술 툴(26)의 원위 단부의 영상을 포함할 수 있다.

- [0039] 수술 툴(26)에 관해서는, 여러 가지 형태의 다양한 선택적인 로봇 수술 툴 또는 기구 및 여러 가지 엔드 이펙터가 사용될 수 있으며, 매니플레이터들 중의 적어도 몇몇의 기구는 수술 과정 중에 제거되어 교체된다. 드베키 포셉(DeBakey Forcep), 마이크로포셉(microforcep), 포츠 시저스(Potts scissors) 및 클립 어플라이어(clip applier)를 포함하는 이러한 엔드 이펙터들 중의 몇몇은 한쌍의 엔드 이펙터 조(jaw)를 형성하도록 서로에 대해 피벗운동하는 제1 및 제2 엔드 이펙터 요소를 구비한다. 스칼펠(scalpel) 및 전기소작 프로브를 포함하는 다른 엔드 이펙터는 단일의 엔드 이펙터 요소를 가진다. 엔드 이펙터 조를 가진 기구에 대해서는, 조는 흔히 핸들의 그립 부재들을 압착함으로써 작동될 것이다. 단일 요소형 엔드 이펙터 기구도 예컨대 전기소작 프로브를 통전시키는 등을 위해 그립 부재들을 파지함으로써 작동될 수 있다.
- [0040] 기구(26)의 기다란 샤프트는 엔드 이펙터 및 샤프트의 원위 단부가 최소 침습 개구부를 통해, 흔히 복벽 등을 통해 수술 작업 부위 내로 원위방향으로 삽입되는 것을 가능하게 해준다. 수술 작업 부위는 공기취입될 수 있고, 환자 내에서의 엔드 이펙터의 운동은 종종 적어도 부분적으로 샤프트가 최소 침습 개구부를 통과하는 위치를 중심으로 기구(26)를 피벗운동시키는 것에 의해 실행될 것이다. 다시 말해, 매니플레이터(100)는 샤프트가 엔드 이펙터의 소정의 운동을 제공하는 것을 도와주기 위해 최소 침습 개구부 위치를 통해 연장되도록 환자 외부에서 기구의 근위 하우징을 이동시킬 것이다. 따라서, 매니플레이터(100)는 종종 수술 과정 중에 환자 외부에서 상당히 큰 운동을 거치게 될 것이다.
- [0041] 본 발명의 다수의 실시형태에 따른 예시의 매니플레이터 암이 도 5a-12c를 참조하여 이해될 수 있다. 전술된 바와 같이, 매니플레이터 암은 대체로 원위 기구 또는 수술 툴을 지지하고, 베이스에 대해 상대적인 기구의 운동을 실행시킨다. 여러 가지 엔드 이펙터를 갖는 다수의 상이한 기구가 수술 과정 중에 각각의 매니플레이터 상에 순차적으로 장착되기 때문에(일반적으로 수술 보조원의 도움으로), 원위 기구 홀더는 장착된 기구 또는 툴의 신속한 제거 및 교체를 허용하는 것이 바람직할 것이다. 도 4를 참조하여 이해될 수 있는 바와 같이, 매니플레이터들은 환자측 카트의 베이스에 근위측에서 장착된다. 일반적으로, 매니플레이터 암은 복수의 링크지 및 베이스와 원위 기구 홀더 사이에 연장된 연계된 조인트들을 포함하고 있다. 하나의 양태에 있어서, 예시의 매니플레이터는 매니플레이터 암의 조인트들이 주어진 엔드 이펙터 포지션을 위한 일정 범위의 여러 가지 구성들로 구동될 수 있도록 여유 자유도를 갖는 복수의 조인트를 구비하고 있다. 이는 여기에 개시되는 매니플레이터 암의 실시형태들 중의 어느 것에도 해당될 수 있다.
- [0042] 어떤 실시형태들에 있어서, 예컨대 도 5a에 도시된 바와 같이, 예시의 매니플레이터 암은 근위 레볼루트 조인트(proximal revolute joint)(J1)를 구비하고 있고, 근위 레볼루트 조인트(J1)는 제1 조인트 축선을 중심으로 회전하여 그것의 원위측의 매니플레이터 암을 조인트 축선을 중심으로 회전시킨다. 몇몇의 실시형태에 있어서는, 레볼루트 조인트(J1)는 베이스에 직접 장착되는 한편, 다른 실시형태들에 있어서는, 조인트(J1)는 하나 이상의 이동가능한 링크지 또는 조인트에 장착될 수 있다. 매니플레이터의 조인트들은 조합하여 매니플레이터 암의 조인트들이 주어진 엔드 이펙터 포지션을 위한 일정 범위의 여러 가지 구성들로 구동될 수 있도록 하는 여유 자유도를 가진다. 예컨대, 도 5a-5d의 매니플레이터 암은, 기구 홀더(510) 내에 지지된 원위 부재(511)가 특정 상태를 유지하고 있는 동안에, 여러 가지 구성으로 기동될 수 있고, 엔드 이펙터의 주어진 포지션 또는 속도를 구비할 수 있다. 원위 부재(511)는 일반적으로 툴 샤프트(512)가 그것을 통해 연장되게 해주는 캐논라이며, 기구 홀더(510)는 일반적으로 기구가 캐논라(511)를 통해 최소 침습 개구부를 통과하여 환자의 신체 내로 연장되기 전에 기구가 부착되게 되는 캐리지(스파(spar) 상에서 이동하는 벽돌 모양 구조물)이다.
- [0043] 도 5a-5d의 매니플레이터 암(500)의 개개의 링크들을 도 5a-5d에 도시된 바와 같이 링크들을 연결하는 조인트들의 회전 축선들과 함께 설명하면, 제1 링크(504)는 그것의 조인트 축선을 중심으로 피벗운동하는 피벗 조인트(J2)로부터 원위방향으로 연장되어 있고, 그것의 조인트 축선을 중심으로 회전하는 레볼루트 조인트(J1)에 연결되어 있다. 다수의 나머지 조인트들은 도 5a에 도시된 바와 같이 그것들의 연계된 회전 축선들에 의해 식별될 수 있다. 예컨대, 도시된 바와 같이, 제1 링크(504)의 원위 단부는 그것의 피벗 축선을 중심으로 피벗운동하는 피벗 조인트(J3)에서 제2 링크(506)의 근위 단부에 연결되어 있고, 제3 링크(508)의 근위 단부는 그것의 축선을 중심으로 피벗운동하는 피벗 조인트(J4)에서 제2 링크(506)의 원위 단부에 연결되어 있다. 제3 링크(508)의 원위 단부는 피벗 조인트(J5)에서 기구 홀더(510)에 연결되어 있다. 일반적으로, 조인트들(J2, J3, J4, J5)의 각각의 피벗 축선들은 실질적으로 평행하고, 링크지들은 도 5d에 도시된 바와 같이 서로 나란히 포지셔닝되었을 때 "겹쳐 있는" 것처럼 보여져, 매니플레이터 암의 감소된 폭(W)을 제공하고, 매니플레이터의 기동 중의 환자 클리어런스(patient clearance)를 향상시킨다. 어떤 실시형태들에 있어서는, 기구 홀더도 최소 침습 개구부를 통한 기구(306)의 축선방향 운동을 조장(facilitating)하고, 그것을 통해 기구가 슬라이드 가능하게 삽입되는 캐논라에 대한 기구 홀더의 부착을 조장하는 프리즈메틱 조인트(J6)와 같은 추가적인 조인트를 구비한다.

- [0044] 그것을 통해 툴(512)이 연장되는 원위 부재 또는 캐놀라(511)는 기구 홀더(510)의 원위측에서 추가적인 자유도를 구비할 수 있다. 기구의 자유도 작동은 흔히 매니플레이터의 모터에 의해 구동될 것이며, 대안적인 실시형태들은 기구 상에 위치되는 것으로 여기에 개시된 하나 이상의 조인트가 그 대신에 신속 분리가능 기구 홀더/기구 인터페이스 상에 위치되도록 하거나, 반대로 하나 이상의 조인트가 신속 분리가능 기구 홀더/기구 인터페이스가 아닌 기구 상에 위치되도록 하여, 신속 분리가능 기구 홀더/기구 인터페이스에서 기구를 지지 매니플레이터 구조부로부터 분리할 수 있다. 몇몇의 실시형태에 있어서, 캐놀라(511)는 툴 팁의 삽입 지점 즉 대체로 최소 침습 개구부 부위에 배치되는 피벗점(PP) 근방 또는 근위측에 회전 조인트(J7)(도시 안됨)를 구비한다. 기구의 원위 리스트(wrist)가 기구 리스트에 위치한 하나 이상의 조인트의 기구 조인트 축선을 중심으로 한 수술 툴(512)의 엔드 이펙터의 피벗운동을 가능하게 해준다. 엔드 이펙터 조(jaw) 요소들 간의 각도가 엔드 이펙터 위치 및 배향에 대해 독립적으로 제어될 수 있다.
- [0045] 예시의 매니플레이터 어셈블리의 운동 범위는 도 6a-6c를 참조하는 것에 의해 이해될 수 있다. 수술 과정에서, 예시의 매니플레이터 암은 수술 작업 공간 내의 특정 환자 조직에 액세스하기 위해 필요한 대로 도 6a에 도시된 바와 같이 피치 포워드 구성(pitch forward configuration)으로 또는 도 6b에 도시된 바와 같이 피치 백 구성(pitch back configuration)으로 기동될 수 있다. 하나의 대표적인 매니플레이터 어셈블리는 축선을 중심으로 적어도 $\pm 60^\circ$, 바람직하게는 약 $\pm 75^\circ$ 만큼 피치 포워드 및 피치 백 운동할 수 있고, 또한 축선을 중심으로 $\pm 80^\circ$ 만큼 요운동할 수 있는 엔드 이펙터를 구비한다. 이러한 양태가 어셈블리에 엔드 이펙터의 증가된 기동성을 가능하게 해주지만, 특히 매니플레이터 암이 도 6a 및 6b에서와 같이 완전 피치 포워드 구성에 있거나 완전 피치 백 구성에 있을 때는 엔드 이펙터의 운동이 제한될 수 있는 구성들이 존재할 수 있다. 하나의 실시형태에 있어서, 매니플레이터 암은 각각 외부 피치 조인트에 대한 (+/-75도) 및 외부 요 조인트에 대한 (+/-300도)의 운동의 범위(ROM; Range of Motion)를 가진다. 몇몇의 실시형태에 있어서, ROM은 외부 피치가 (+/-90도)보다 더 큰 ROM을 제공하도록 증가될 수 있으며, 이 경우 대체로 삽입 한계와 관련된 내부 구형부(inner sphere)가 남겠지만, 조인트 운동이 제한되거나 불가능한 콘 오브 스페이스(cone of sapce)는 완전히 사라지게 될 수 있을 것이다. 여러 가지 실시형태가 증가되거나 감소된 ROM을 가지도록 구성될 수 있으며, 전술한 ROM은 설명을 목적으로 제공되는 것이며, 본 발명은 여기 개시되는 ROM에 한정되지 않는다는 것이 이해될 것이다.
- [0046] 도 6c는 도 5a-5b의 예시의 매니플레이터의 툴 팁의 전체 운동의 범위 및 작업 공간을 그래프로 나타낸 도면이다. 작업 공간이 반구체로서 도시되어 있지만, 조인트(J1)와 같은 매니플레이터의 하나 이상의 레볼루트 조인트의 운동의 범위 및 구성에 따라 구체로 나타내질 수도 있다. 도시된 바와 같이, 도 6c의 반구체는 중심의 작은 구형 보이드(spherical void)와 함께 2개의 원추형 보이드(conical void)를 포함하고 있다. 이들 보이드는 툴 팁의 운동이 기계적 제약으로 인해 불가능하거나 엔드 이펙터의 운동을 어렵게 또는 느리게 만드는 극도로 높은 조인트 속도로 인해 실행불가능할 수 있는 영역을 나타낸다. 이런 이유로, 원추형 보이드는 "콘 오브 사일런스(cone of silence)"라 불려진다. 몇몇의 실시형태에 있어서, 매니플레이터 암은 원추 내의 한 지점에서 특이점(singularity)에 도달할 수 있다. 콘 오브 사일런스 내 또는 그 근방에서의 매니플레이터의 운동은 손상될 수 있기 때문에, 매니플레이터의 링크지들과 조인트들을 재구성하기 위해서는 매니플레이터의 하나 이상의 링크를 수동식으로 이동시키지 않고서는 매니플레이터 암을 콘 오브 사일런스에서 벗어나도록 이동시키는 것이 어려울 수 있으며, 이는 대안의 작업 모드를 필요로 하여 수술 과정을 지연시킬 수 있다.
- [0047] 이러한 원추형 부분 내로의 또는 그 근방에서의 기구 샤프트의 운동은 일반적으로 매니플레이터 내의 원위 링크지들 사이의 각도가 상대적으로 작을 때 발생한다. 따라서, 그와 같은 구성들은 링크지들 사이의 각도를 증가시키도록(링크지들이 서로에 대해 더 직교에 가까운 포지션으로 이동되도록) 매니플레이터의 운동을 비등방적으로 증폭시키는 것에 의해 회피될 수 있다. 예컨대, 도 6a 및 6b에 도시된 구성들에 있어서, 최원위 링크와 기구 홀더 사이의 각도(a)가 상대적으로 작게 될 때, 매니플레이터의 운동은 더 어려워질 수 있다. 여러 실시형태들에 있어서의 나머지 조인트들에 있어서의 조인트 운동의 범위에 따라, 어떤 링크지들 사이의 각도가 감소할 때, 매니플레이터의 운동이 억제될 수 있으며, 경우에 따라서는 매니플레이터 암이 더 이상 운동의 여유가 없을 수도 있다. 기구 샤프트가 이러한 원추형 부분에 근접하고 있거나 링크지들 사이의 각도가 상대적으로 작게 되어 있는 매니플레이터 구성을 매니플레이터 암의 기동성 및 조작성이 제한되도록 "불량하게 컨디션닝되었다(poorly conditioned)"고 한다. 매니플레이터는 조작성 및 운동의 범위를 유지하도록 "양호하게 컨디션닝되는(well-conditioned)" 것이 바람직하다. 하나의 양태에 있어서, 본 발명은 수술 과정 중의 엔드 이펙터의 운동 중에도 매니플레이터를 원하는 대로 재구성하는 명령을 입력하는 것에 의해 사용자가 전술한 원추형 부분에서의 기구 샤프트의 운동을 회피하게 만드는 것을 가능하게 해준다. 이러한 양태는 매니플레이터가 어떤 이유에서든

지 "불량하게 컨디셔닝되는" 경우에 특히 유용하다.

[0048] 전술한 매니플레이터의 실시형태들이 본 발명에 사용될 수 있지만, 몇몇의 실시형태는 역시 매니플레이터 암의 조작성 및 컨디셔닝을 향상시키는 데 사용될 수 있는 추가적인 조인트를 구비할 수 있다. 예컨대, 예시의 매니플레이터는 도 5a의 매니플레이터 암 및 그것의 연계된 콘 오브 사일런스를 레볼루트 조인트의 축선을 중심으로 회전시켜 콘 오브 사일런스를 감소시키거나 제거하는 데 이용될 수 있는 레볼루트 조인트 및/또는 링크지를 조인트(J1)의 근위측에 구비할 수 있다. 또 다른 실시형태에 있어서, 예시의 매니플레이터는 또한 조인트(J5)에 대해 실질적으로 수직인 축선을 중심으로 기구 홀더를 피벗운동시킴으로써 툴 팁을 오프셋시켜 콘 오브 사일런스를 더 감소시키고 수술 툴의 운동의 범위를 향상시키는 원위 피벗 조인트를 구비할 수 있다. 또 다른 실시형태에 있어서, 조인트(J1)와 같은 매니플레이터 암의 근위 조인트는 베이스 상에 이동가능하게 장착되어, 필요에 따라 콘 오브 사일런스를 이동 또는 전이시키고 매니플레이터 툴 팁의 운동의 범위를 향상시킬 수 있다. 이러한 추가적인 조인트의 사용 및 장점은 여기에 설명되는 예시의 매니플레이터 암들 중의 어느 것에서 각각이 서로 독립적으로 사용되거나 조합적으로 사용될 수 있는 이러한 조인트의 예를 도시하고 있는 도 7a-12c를 참조함으로써 이해될 수 있다.

[0049] 도 7a-7b는 예시의 매니플레이터 암과 함께 사용하기 위한 추가적인 여유 조인트(여유 조인트)(매니플레이터 암의 근위 부분을 베이스에 연결시키는 제1 조인트)를 도시하고 있다. 제1 조인트는 근위 레볼루트 조인트(J1)이며, 이 근위 레볼루트 조인트(J1)는 조인트(J1)의 조인트 축선을 중심으로 매니플레이터 암을 회전시킨다. 근위 레볼루트 조인트(J1)는 조인트(J1')를 근위 레볼루트 조인트(J1')로부터 소정의 거리 또는 각도 만큼 오프셋시키는 링크(501)를 구비한다. 링크(501)는 도 7a에 도시된 바와 같은 만곡형 링크지 또는 도 7b에 도시된 바와 같은 선형 또는 각도진 링크0075지일 수 있다. 일반적으로, 조인트(J1')의 조인트 축선은 도 7a에 도시된 바와 같이 원격 중심(RC) 또는 툴 팁의 삽입 지점과 얼라이닝(aligning)된다. 하나의 예시의 실시형태에 있어서, 조인트(J1')의 조인트 축선은, 매니플레이터 암의 다른 레볼루트 조인트 축선과 마찬가지로, 체벽(신체바디 body wall)에서의 이동을 방지하도록 원격 중심을 통과하고, 그에 따라 수술 중에 운동될 수 있다. 조인트(J1')의 축선은 암의 후방부의 포지션 및 배향을 변화시키는 데 사용될 수 있도록 암의 근위 부분에 커플링된다. 대체로, 이와 같은 여유 축선들은 기구 팁이 외과의의 명령을 추종하는 동시에 다른 암 또는 환자 인체 구조부와 충돌을 회피하는 것을 가능하게 해준다. 하나의 양태에 있어서, 근위 레볼루트 조인트(J1')는 플로어에 대한 매니플레이터의 장착 각도를 변화시키기 위해 단독으로 사용된다. 이 각도는 1) 환자 인체 외부 구조부와 충돌을 방지하고, 2) 신체 내부의 인체 구조부에 도달하기 위해 중요하다. 일반적으로, 근위 레볼루트 조인트(J1')에 부착된 매니플레이터의 근위 링크와 근위 레볼루트 조인트의 축선 사이의 각도(a)는 약 15도이다.

[0050] 도 7b는 예시의 매니플레이터 암에 있어서의 근위 레볼루트 조인트(J1') 및 그것의 연계된 조인트 축선과 콘 오브 사일런스 사이의 관계를 도시하고 있다. 근위 레볼루트 조인트(J1')의 조인트 축선은 콘 오브 사일런스를 통과할 수 있거나 완전히 콘 오브 사일런스 외부에 있을 수 있다. 근위 레볼루트 조인트(J1')의 축선을 중심으로 매니플레이터 암을 회전시킴으로써, 콘 오브 사일런스는 감소될 수 있거나(조인트(J1') 축선이 콘 오브 사일런스를 통과하게 되는 실시형태에서), 효과적으로 제거될 수 있다(근위 레볼루트 조인트 축선이 완전히 콘 오브 사일런스 외부에서 연장되어 있는 실시형태에서). 링크(501)의 거리 및 각도가 콘 오브 사일런스에 대한 조인트(J1') 축선의 포지션을 결정한다.

[0051] 도 8은 예시의 매니플레이터 암과 함께 사용하기 위한 또 다른 형태의 여유 조인트인, 매니플레이터 암의 원위 링크(508)에 기구 홀더(510)를 연결시키는 원위 레볼루트 조인트(J7)를 도시하고 있다. 원위 레볼루트 조인트(J7)는 시스템이 일반적으로 원격 중심 또는 삽입 지점을 통과하는 조인트 축선을 중심으로 기구 홀더(510)를 비틀림운동시키는 것을 가능하게 해준다. 이상적으로는, 이 레볼루트 조인트는 암의 원위측에 위치되고, 그에 따라 삽입 축선의 배향을 이동시키는 데 특히 적합하다. 이 여유 축선의 추가는 매니플레이터가 임의의 단일의 기구 팁 포지션을 위해 다중의 포지션들을 취하는 것을 가능하게 해준다. 대체로, 이와 같은 여유 축선들은 기구 팁이 외과의의 명령을 추종하는 동시에 다른 암 또는 환자 인체 구조부와 충돌을 회피하는 것을 가능하게 해준다. 원위 레볼루트 조인트(J7)는 삽입 축선을 요 축선에 더 근접하게 이동시키는 능력을 가지고 있기 때문에, 운동의 암 피치 백 범위를 증가시키는 것이 가능하다. 원위 레볼루트 조인트(J7)의 축선, J1'의 요 축선 및 툴 팁의 삽입 축선 사이의 관계가 도 9에 도시되어 있다. 도 10a-10c는 조인트(J7)의 순차적인 운동과 그것이 어떻게 툴 팁의 삽입 축선을 좌우로 전이시키는 지를 도시하고 있다.

[0052] 원위 레볼루트 조인트(J7)의 또 다른 장점은 환자와 기구 홀더 또는 매니플레이터 암의 원위 링크지 사이의 충돌을 회피하기 위해 환자를 비켜 놓아야만 하는 삽입 지점 근위측의 매니플레이터 암의 원위 부분의 가동 공간

(swept volume; 휩쓸고 지나가게 되는 공간)인 환자 클리어런스 원추역(patient clearance cone)을 감소시킬 수 있다는 점이다. 도 11a는 원위 레볼루트 조인트가 0도로 유지되고 있는 동안에 매니플레이터 암의 근위 부분의 환자 클리어런스 원추역을 도시하고 있다. 도 11b는 원위 레볼루트 조인트가 축선을 중심으로 90도의 각도 변위를 가진 것으로 도시되어 있는 동안에 매니플레이터 암의 근위 부분의 감소된 환자 클리어런스 원추역을 도시하고 있다. 따라서, 삽입 지점 근방에 최소의 환자 클리어런스를 가지는 수술 과정에 있어서, 본 발명에 따른 조인트(J7)의 사용은 원격 중심 위치 또는 엔드 이펙터의 포지션을 원하는 대로 유지하면서 추가적인 클리어런스를 제공할 수 있다.

[0053] 도 12a-12c는 예시의 매니플레이터 암과 함께 사용하기 위한 또 다른 형태의 여유 조인트인, 매니플레이터 암을 이동시키거나 축선을 중심으로 회전시키는 근위 조인트를 도시하고 있다. 다수의 실시형태에 있어서, 이 근위 이동가능 조인트는 매니플레이터 암의 운동의 범위를 전이시키거나 회전시킴으로써 콘 오브 사일런스를 감소 또는 제거시켜, 매니플레이터 암의 더 양호한 컨디셔닝 및 개선된 기동성을 제공하도록 일정 경로를 따라, 조인트(J1 또는 J1')와 같이, 매니플레이터의 근위 조인트를 이동시킨다. 이 근위 이동가능 조인트는 도 12a-12c의 조인트(J1")에서 보여지는 바와 같은 원형 경로를 구비할 수 있거나, 반원형 또는 아치형 경로를 구비할 수 있다. 대체로, 이 조인트는 캐놀라(511)를 통해 연장된 톨(512)의 샤프트가 그것을 중심으로 피벗운동하게 되는 원격 중심(RC)과 교차하는 이동가능 조인트의 축선을 중심으로 매니플레이터 암을 회전시킨다. 여러 가지 다른 실시형태에서는 조인트(J1")의 축선이 경사지거나 수평방향일 수 있겠지만, 도시된 실시형태에서는 이 조인트(J1")의 축선은 수직방향 축선이다.

[0054] 몇몇의 실시형태에 있어서, 매니플레이터 암(500)은 근위 또는 원위 레볼루트 조인트, 근위 이동가능 조인트 및 평행사변형 형태의 원위 링크지 중의 어느 하나 또는 전부를 구비할 수 있다. 이러한 피쳐(feature)들 중의 어느 하나 또는 전부의 사용은 링크지들 사이의 각도를 증가시킴으로써 매니플레이터의 조작성 및 운동을 향상시키는 것에 의해 더 양호한 "컨디셔닝된" 매니플레이터 어셈블리를 제공하도록 추가적인 여유 자유도를 제공하고, 본 발명에 따른 재구성을 조장(facilitating)한다. 이러한 예시의 매니플레이터의 증가된 유연성은 또한 조인트 한계, 특이점 등을 회피하도록 매니플레이터 링크지의 기구학적 특성을 최적화하는 데 사용될 수 있다.

[0055] 하나의 예시의 실시형태에 있어서, 매니플레이터의 조인트 운동들은 시스템의 모터를 이용하여 컨트롤러에 의해 하나 이상의 조인트를 구동시킴으로써 제어되며, 조인트는 컨트롤러의 프로세서에 의해 연산된 좌표화된 조인트 운동에 따라 구동된다. 수학적으로, 컨트롤러는 그 중의 몇몇이 조인트의 구성 또는 속도에 대응하는 요소들을 가질 수 있는 벡터 및/또는 행렬을 이용하는 조인트 명령들의 적어도 몇 가지 연산을 수행할 수 있다. 프로세서에 유효한 선택적인 조인트 구성들의 범위는 조인트 공간으로서 개념화될 수 있다. 이 조인트 공간은 예컨대 매니플레이터가 가지는 자유도 만큼 많은 차원을 가질 수 있으며, 매니플레이터의 하나의 특정 구성은 조인트 공간 내에서의 하나의 특정 지점을 나타낼 수 있으며, 각각의 좌표가 매니플레이터의 연계된 조인트의 조인트 상태에 대응된다.

[0056] 하나의 예시의 실시형태에 있어서, 시스템은 여기에서 카테시안 공간(Cartesian space)으로서 나타내지는 작업 공간 내에서의 피쳐(feature)의 명령된 포지션 및 속도가 입력된 컨트롤러를 포함한다. 상기 피쳐는 제어 입력을 사용하여 관절운동될 제어 프레임으로서 사용될 수 있는 매니플레이터 상의 또는 매니플레이터 외부의 임의의 피쳐일 수 있다. 여기 설명되는 많은 예에서 사용되는 매니플레이터 상의 피쳐의 하나의 예는 툴 팁이 될 것이다. 매니플레이터 상의 피쳐의 또 다른 예는 핀 또는 채색 문양과 같이 툴 팁 상에 존재하지 않으면서 매니플레이터의 일부분인 물리적 피쳐가 될 것이다. 매니플레이터 외부의 피쳐의 한 예는 툴 팁으로부터 정확히 일정 거리 및 각도 만큼 떨어져 있는 빈 공간 내의 기준점이 될 것이다. 매니플레이터 외부의 피쳐의 또 다른 예는 매니플레이터에 대한 그것의 포지션이 설정될 수 있는 타겟 조직이 될 것이다. 이러한 모든 경우에 있어서, 엔드 이펙터는 제어 입력을 사용하여 관절운동될 가상의 제어 프레임과 연계된다. 하지만, 이하에서는, "엔드 이펙터(엔드 이펙터)"와 "툴 팁(tool tip)"은 같은 의미로 사용된다. 대체로, 소정의 카테시안 공간 엔드 이펙터 포지션을 등가의 조인트 공간 포지션에 매핑시키는 닫힌 형태 관계(closed form relationship)는 존재하지 않지만, 대체로 카테시안 공간 엔드 이펙터 속도와 조인트 공간 속도 사이에는 닫힌 형태 관계가 존재한다. 기구학적 자코비안은 조인트 공간 포지션 요소들에 대한 엔드 이펙터의 카테시안 공간 포지션 요소들의 편도함수들의 행렬이다. 이런 방식으로, 기구학적 자코비안은 엔드 이펙터와 조인트들 사이의 기구학적 관계성을 포착한다. 다시 말해, 기구학적 자코비안은 엔드 이펙터에 대한 조인트 운동의 효과를 포착한다. 기구학적 자코비안(J)은 아래의 관계를 이용하여 조인트 공간 속도(dq/dt)를 카테시안 공간 엔드 이펙터 속도(dx/dt)에 매핑시키는 데 사용될 수 있다.

- [0057] $dx/dt=Jdq/dt$
- [0058] 따라서, 입력 포지션과 출력 포지션 사이에 닫힌 형태 매핑이 존재하지 않을 때에도, 자코비안 기반 컨트롤러에서 명령된 사용자 입력으로부터 매니플레이터의 운동을 구현하는 것과 같이(다양한 다른 구현예가 사용될 수 있다), 속도들의 매핑이 반복적으로(iteratively) 이용될 수 있다. 많은 실시형태들이 자코비안 기반 컨트롤러를 구비하지만, 몇몇의 구현예들은 여기에 설명되는 피쳐들 중의 어느 하나를 제공하기 위해 매니플레이터 암의 자코비안에 액세스하도록 구성될 수 있는 다양한 컨트롤러를 사용할 수 있을 것이다.
- [0059] 그와 같은 하나의 구현예를 아래에 간략히 설명한다. 명령된 조인트 포지션이 자코비안(J)을 연산하는 데 사용된다. 매 시간 간격(Δt) 동안, 카테시안 공간 속도(dx/dt)가 소정의 이동(dx_{des}/dt)을 수행하고 소정의 카테시안 공간 포지션으로부터 형성된 편차(Δx)를 보정하기 위해 연산된다. 이 카테시안 공간 속도는 다음으로 자코비안의 의사역행렬($J^\#$)을 이용하여 조인트 공간 속도(dq/dt)로 변환된다. 그 결과로서 생긴 조인트 공간 명령 속도는 다음으로 조인트 공간 명령 포지션(q)을 생성하기 위해 적분된다. 이러한 관계들이 아래에 열거된다.
- [0060] $dx/dt=dx_{des}/dt+k\Delta x$ (1)
- [0061] $dq/dt=J^\# dx/dt$ (2)
- [0062] $q_i=q_{i-1}+dq/dt \Delta t$ (3)
- [0063] 자코비안(J)의 의사역행렬은 소정의 툴 팁 운동(및 경우에 따라서는 피벗 툴 운동의 원격 중심)을 조인트 속도 공간(joint velocity space)으로 직접적으로 매핑시킨다. 사용되는 매니플레이터가 툴 팁 자유도보다 더 많은 유효 조인트 축선들을 가질 경우(6개까지)(그리고, 툴 운동의 원격 중심이 사용되고 있을 때에는, 매니플레이터는 원격 중심의 위치와 관련한 3개의 자유도를 위한 추가적인 3개의 조인트 축선을 가져야 한다), 매니플레이터는 여유도가 있다고 한다. 여유도가 있는 매니플레이터의 자코비안은 적어도 하나의 차원을 가진 "영공간"을 포함한다. 본 명세서에서, 자코비안의 영공간($N(J)$)은 순간적으로(instantaneously) 어떠한 툴 팁 운동도(그리고 원격 중심이 사용될 때는 어떠한 피벗점 위치의 운동도) 취득하지 못하는 조인트 속도들의 공간이고; "영운동(null-motion)"은 어떠한 툴 팁 및/또는 원격 중심의 위치의 순간 운동도 발생시키지 못하는 조인트 포지션들의 콤비네이션(combination), 궤적 또는 경로이다. 매니플레이터의 소정의 재구성(여기에 설명되는 임의의 재구성을 포함)을 취득하기 위해 연산된 영공간 속도들을 매니플레이터의 제어 시스템 내에 편입 즉 도입하면, 상기 방정식 (2)는 다음과 같이 변한다.
- [0064] $dq/dt=dq_{perp}/dt+dq_{null}/dt$ (4)
- [0065] $dq_{perp}/dt=J^\# dx/dt$ (5)
- [0066] $dq_{null}/dt=(1-J^\# J)Z=V_n V_n^T Z=V_n a$ (6)
- [0067] 방정식 (4)에 따른 조인트 속도는 2개의 성분: 제1 성분인 영직교공간(null-perpendicular-space) 성분, 즉 소정의 툴 팁 운동(그리고 원격 중심이 사용될 때는, 소정의 원격 중심 운동)을 발생시키는 "퓨레스트(purest)" 조인트 속도(최단 벡터 길이); 및 제2 성분인 영공간 성분을 가진다. 방정식 (2) 및 (5)는 영공간 성분 없이 동일한 방정식이 얻어지는 것을 보여준다. 방정식 (6)은 좌변에 영공간 성분을 위한 통상적인 형식으로 시작하여, 가장 오른쪽 우변에 예시의 시스템에 사용되는 형식을 나타내고 있으며, 여기서 V_n 은 영공간을 위한 정규직교 기저 벡터(orthonormal basis vector)들의 집합이고, a 는 그러한 기저 벡터들을 혼합하기 위한 계수이다. 몇몇의 실시형태에 있어서, a 는 영공간 내에서의 운동을 원하는 대로 형성 또는 제어하기 위한, 노브(knob)나 다른 제어 수단의 사용 등에 의한, 제어 파라미터, 변수 또는 설정에 의해 결정된다.
- [0068] 도 13a-13b는 예시의 매니플레이터 암의 자코비안의 영공간과 자코비안의 영직교공간 사이의 관계를 그래프로 도시하고 있다. 도 13a는 수평방향 축선을 따르는 영공간과 수직방향 축선을 따르는 영직교공간을 도시하고 있으며, 2개의 축선은 서로 직교하고 있다. 대각선 벡터는 상기 방정식 (4)로 표현되는 영공간 내의 속도 벡터와 영직교공간 내의 속도 벡터의 합을 나타낸다.
- [0069] 도 13b는 영공간과 "영운동 다양체"로 도시된 4차원 조인트 공간 내에서의 영운동 다양체(null-motion

manifold) 사이의 관계를 그래프로 도시하고 있다. 각각의 화살표(q_1, q_2, q_3, q_4)는 주 조인트 축선(principal joint axis)을 나타낸다. 폐곡선은 동일한 엔드 이펙터 위치션을 순간적으로 취득하는 조인트 공간 위치션들의 집합인 영운동 다양체를 나타낸다. 곡선 상에 주어진 점(A)에 대해, 영공간은 엔드 이펙터의 어떠한 운동도 순간적으로 발생시키지 않는 조인트 속도들의 공간이기 때문에, 영공간은 점(A)에서의 영운동 다양체의 접선에 평행하다.

[0070] 앞서 언급한 첫 번째 접근법, 즉 조인트 공간 가중 의사역행렬 접근법(Joint-space weighted pseudo-inverse approach)에 있어서는, 시스템은 자코비안 행렬의 가중 의사역행렬을 연산한다. 예를 들어, 자코비안의 정의와 더불어 연쇄 법칙(chain rule)을 이용하면, 그 결과가 다음의 방정식들에 의해 얻어질 수 있으며, 여기서 W 는 조인트 속도들에 가중치를 부여하는 데 이용되는 가중 행렬이고, $()^{\#}$ 은 의사역행렬 해(pseudo-inverse solution)이다.

$$[0071] \quad dx/dt = J * dq/dt \quad (7)$$

$$[0072] \quad dx/dt = J * W * W^{(-1)} * dq/dt \quad (8)$$

$$[0073] \quad W^{(-1)} * dq/dt = (J * W)^{\#} * dx/dt \quad (9)$$

$$[0074] \quad dq/dt = W * (J * W)^{\#} * dx/dt \quad (10)$$

[0075] 또 다른 접근법, 즉 카테시안 공간 가중 의사역행렬 접근법(Cart-space weighted pseudo-inverse approach)에 있어서는, 다음의 방정식들이 사용될 수 있다.

$$[0076] \quad dx/dt = J * dq/dt$$

$$[0077] \quad W * dx/dt = W * J * dq/dt$$

$$[0078] \quad dq/dt = (W * J)^{\#} (W * dx/dt)$$

[0079] 예:

[0080] $W = \text{diagonal}([1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1])$ 로 설정한다. 이는 제3의 카테시안 공간 속도 요소 즉 Z 를 따른 이동이 dt/dq 에 0의 영향을 미치게 만들고, 따라서 그 결과적인 속도들은 엔드 이펙터 Z 를 따라 0 이동을 발생시킬 것이다.

[0081] 가중치 부여 조인트 속도들이 상기 방정식들의 사용에 의해 얻어질 수 있지만, 이 접근법과 관련하여 어떤 단점들이 존재할 수 있다. 예를 들어, 매니퓰레이터 운동과 연계된 여러 가지 다른 작업들이 여러 가지 다른 알고리즘들에 사용되는 영공간 기저 벡터들(null-space basis vectors)과 같은 특이값 분해 연산(singular value decomposition calculation)의 가중치 비부여 조인트 속도들을 이용한다면, 이 접근법은 이러한 여러 가지 다른 작업들에 대한 추가적인 특이값 분해 연산을 필요로 할 수 있다.

[0082] 필요한 연산의 수를 최소화하기 위한 앞서 언급한 두 번째 접근법에 있어서는, 시스템은 가중치 비부여 조인트 속도들에 기초한 조인트 속도들에 가중치 부여를 적용함으로써 각각의 커널 사이클(kernel cycle)에 대해 단일의 특이값 분해(singular value decomposition)만을 필요로 하도록 구성될 수 있다. 따라서, 여러 가지 다른 작업들 또는 운동은 가중치 비부여 조인트 속도들을 이용하는 한편, 가중치 부여는 명령된 운동 중의 제1 세트의 조인트들의 소정의 상태 또는 운동을 제공하기 위해 조인트 속도들에 적용될 수 있을 것이다. 이 접근법에 있어서는, 상기 방정식 (2) 또는 (5)로부터 얻어질 수 있는 바와 같은 자코비안의 의사역행렬로부터의 dq/dt 가 그라디언트(gradient)를 결정하기 위해 조인트 속도 공간 내에서의 가중치 부여를 나타내는 비등방성 표면(anisotropic surface)에 적용된다. 다음으로, 의사역행렬 해(pseudo-inverse solution)와 의사역행렬 해의 표면에서의 그라디언트 간의 차이가 가중치 부여 조인트 속도들을 결정하기 위해 영공간에 투영되는 가중치 부여 보정이 된다.

[0083] 도 14는 상기 제2 접근법의 하나의 예를 그래프로 도시하고 있다. 가중치 부여 W 는 조인트 공간 내의 비등방성 포물면(anisotropic paraboloid)으로 도시되어 있다. 벡터 표시된 dq/dt 는 톨 톱 및/또는 원점 중심의 명령된 운동에 응답하여 연산된 원래의 의사역행렬 해(pseudo-inverse solution)이다. 조인트 속도 가중치를 나타내는 비등방성 포물면의 그라디언트(g)는 dw/dt 벡터와 그라디언트 간의 차이 Δ 를 결정하기 위해 원점으로 이동되고(g' 로 도시됨), Δ 는 그 다음에 가중치 부여 조인트 속도들을 결정하기 위해 사용되는 dq_{null}/dt 를 결정하기 위해 조인트들의 영공간에 투영된다. 이상적인 조인트 속도 벡터가 언제나 성취될 수는 없으므로, 그 결과적인

벡터 $dq_{null}/dt + dq_{perp}/dt$ 는 가중치 부여에 의해 규정된 조인트 운동에 근접한다.

[0084] 이러한 근접은 다음의 방정식들의 사용에 의해 성취될 수 있으며, 여기서 C 는 포물면에 의해 정의되는 비용 함수(cost function)이고, g 는 그래디언트이며, V_n 은 영공간 기저 벡터들(null-space basis vectors)을 나타낸다.

$$C = \frac{1}{2} \| W * dq_{perp}/dt \|^2 = \frac{1}{2} (dq_{perp}/dt)^T * W^T * W * dq_{perp}/dt \quad (11)$$

[0085]
$$g(dq_{perp}/dt) C = W^T * W * dq_{perp}/dt \quad (12)$$

[0086] 일반적으로, 전술한 그래디언트에 있어서는, 소괄호 부분은 그래디언트가 $g(x)y = (dy/dx)^T$ 의 표현식으로 취해 지도록 밀표기되어야만 한다.

[0087] 방정식 (12)와 원래의 dq_{perp}/dt 간의 차이인 보정값은 다음과 같다.

[0088]
$$\Delta = W^T * W * dq_{perp}/dt - dq_{perp}/dt = (W^T * W - I) * dq_{perp}/dt \quad (13)$$

[0089] Δ 를 기저 벡터(V_n)을 가진 영공간에 투영하면:

[0090]
$$dq_{null}/dt = V_n * V_n^T * \Delta = V_n * V_n^T * (W^T * W - I) * dq_{perp}/dt \quad (14)$$

[0091] dq_{perp}/dt 가 의사역행렬 해이므로, 그것의 영공간에의 투영은 0이고, 따라서,

[0092]
$$V_n * V_n^T * dq_{perp}/dt = 0 \quad (15)$$

[0093]
$$dq_{null}/dt = V_n * V_n^T * W^T * W * dq_{perp}/dt \quad (16)$$

[0094] 상기 방정식들의 사용에 의해, 소정의 가중치 부여 조인트 속도들은 대각선을 따라 대각선 외에 0 성분들을 가지는 대각화 행렬(diagonalized matrix)일 수 있고, 가중치 비부여 특이값 분해(unweighted singular value decomposition)가 다중 사용자에게 의해 상기 알고리즘들 중의 어느 것에서의 사용을 포함하여 여러 가지 작업들에 대해 공유될 수 있다. 조인트들에 대한 가중치들을 설정함으로써, 방정식 (16)은 최소한의 연산으로 가중치 부여 조인트 속도들에 따라 조인트들의 속도 프로파일을 조절하기 위한 영공간 벡터를 생성하는 데 사용될 수 있다.

[0095] 선택적으로, 어떤 양태에 있어서, 포텐셜 함수 그래디언트(potential function gradient)를 편입하여, 카테시안 공간 엔드 이펙터 속도에 적용되는 증가된 자코비안(augmented Jacobian)이 이용될 수 있다. 자코비안의 증가(augmentation)는 원하는 바의 조인트 속도들을 연산한다. 자코비안을 이용하여 조인트 운동을 연산한다고 할 때, 그 연산은 증가된 자코비안 해석방법을 포함할 수 있다는 것으로 이해되어야 한다. 증가된 자코비안 해석방법에 따르면, 열 벡터가 이용될 수 있는 것으로 이해되지만, 다음의 방정식들이 이용될 수 있다.

[0096]
$$dx/dt = J * dq/dt$$

[0097]
$$y = h(q)$$

[0098]
$$dy/dt = \partial h / \partial q * dq/dt$$

[0099]
$$[dx/dt^T \ dy/dt^T]^T = [J^T \ \partial h / \partial q^T]^T * dq/dt$$

[0100]
$$d(x;y)/dt = [J; h'] * dq/dt$$

[0101]
$$dq/dt = [J; h']^\# d(x;y)/dt$$

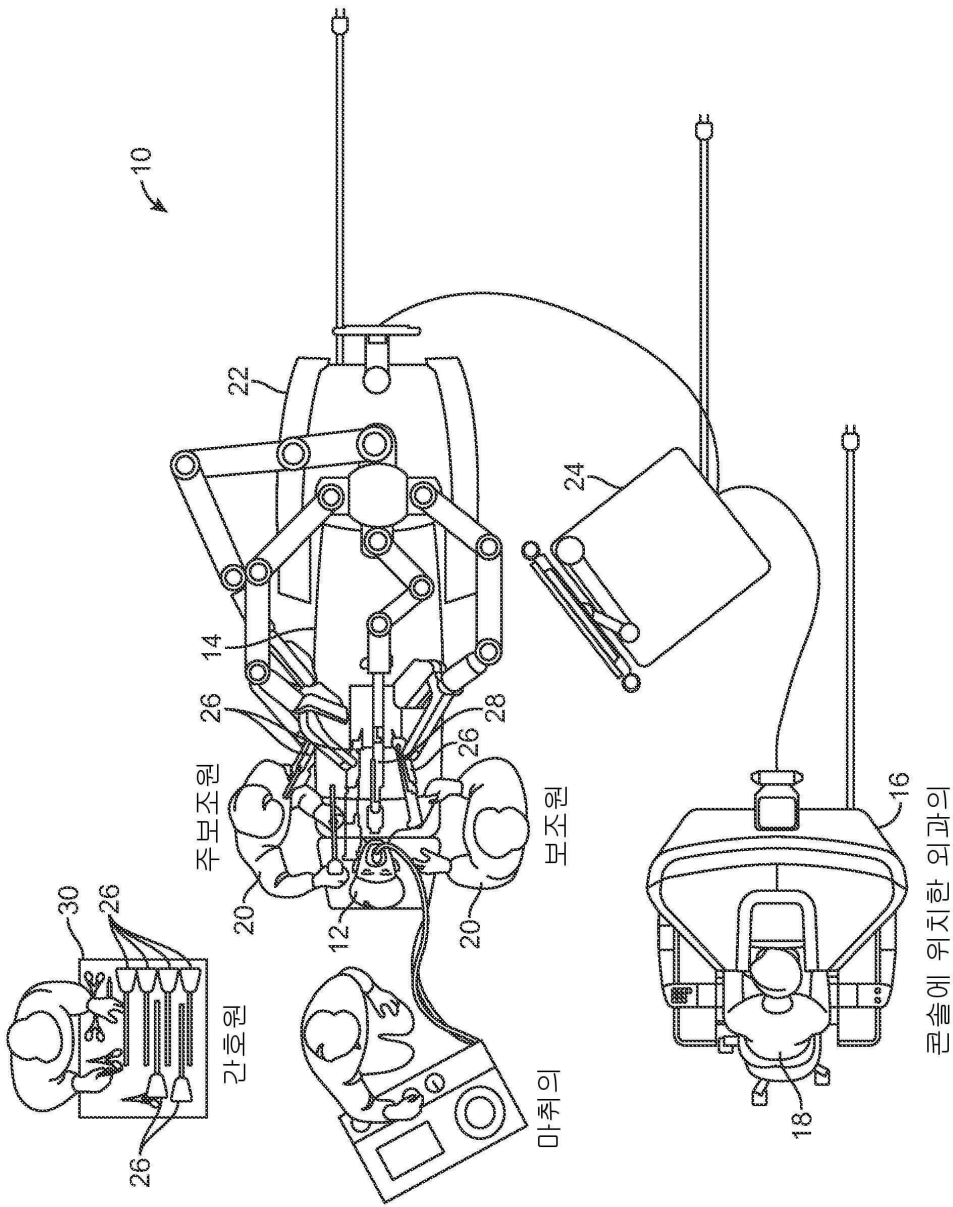
[0102] 첫 번째 예에서는, 조인트 3의 속도를 조인트 4의 속도의 2배와 같게 만들고자 $dy/dt=0$, $\partial h / \partial q = [0 \ 0 \ 1 \ -2 \ 0 \ 0]$ 으로 설정한다.

[0103] 두 번째 예에서는, 조인트 3의 속도를 0로 만들고자, $dy/dt=0$, $\partial h / \partial q = [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]$ 으로 설정한다.

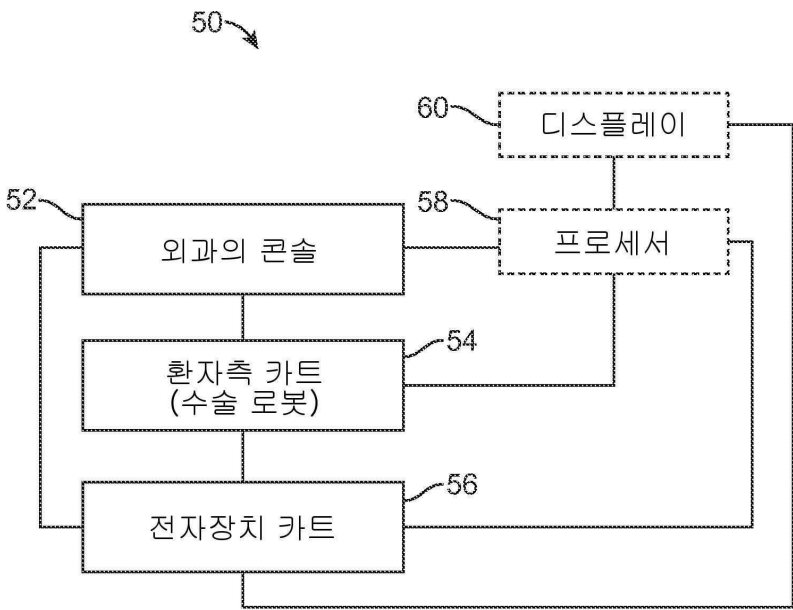
- [0104] 도 15는 전술한 방정식들과 관련하여 환자측 카트 조인트 상태를 제어하기 위한 일반적 알고리즘을 구현하기 위해 필요한 단순 블록도를 도시하고 있다. 도 15의 방법에 의하면, 시스템은: 매니플레이터 암의 정기구학(forward kinematics)을 연산하고; 다음으로 방정식 (1)을 이용하여 dx/dt 를 연산하고; 방정식 (5)를 이용하여 dq_{perp}/dt 를 연산하고; 다음으로 방정식 (6)을 이용하여 dq_{perp}/dt 및 자코비안에 의존할 수 있는 z 로부터 dq_{null}/dt 를 연산한다. 연산된 dq_{perp}/dt 및 dq_{null}/dt 로부터, 시스템은 다음으로 각각 방정식 (4) 및 방정식 (3)을 이용하여 dq/dt 및 q 를 연산함으로써, 컨트롤러가 소정의 엔드 이펙터의 상태 및/또는 원점 중심의 위치를 유지하면서 매니플레이터의 소정의 재구성을 실행시킬 수 있게 해주는 운동을 제공한다.
- [0105] 도 16-17은 본 발명에 따른 예시의 방법들의 플로우 차트들을 도시하고 있다. 도 16에 도시된 하나의 예시의 방법에 있어서, 시스템은 소정의 엔드 이펙터 운동에 따라 엔드 이펙터를 이동시키기 위해 사용자에게 의해 입력되는 조작 명령에 응답하는 제1 세트의 조인트들의 소정의 운동에 대응되는 가중 행렬을 이용하여 가중치 부여 조인트 속도들을 결정하는 과정을 포함한다. 그런 다음, 시스템은 소정의 엔드 이펙터 운동을 실행시키고 제1 세트의 조인트들의 소정의 운동을 제공하도록 가중치 부여 조인트 속도들에 따라 조인트들을 구동시킨다. 도 17에 도시된 바와 같이, 방법은 의사역행렬 해를 이용하여 명령된 엔드 이펙터 운동을 성취하는 조인트 속도들을 결정하는 단계를 포함한다. 가중치 부여 조인트 속도들이 상술한 바와 같은 의사역행렬 해의 그래디언트(예컨대, 포텐셜 함수 그래디언트)를 이용하고 또한 조인트 공간 내에서의 가중 행렬을 이용하여 조인트 속도들을 조절함으로써 연산될 수 있다. 시스템은 소정의 엔드 이펙터 운동을 실행시키고 제1 세트의 조인트들의 소정의 운동을 제공하도록 가중치 부여 조인트 속도들에 따라 조인트들을 구동시킨다. 선택적으로, 시스템은 명령된 재구성 또는 충돌 회피와 같은 하나 이상의 보조 작업과 연계된 조인트 속도들을 연산하도록 가중치 부여 표면에서의 의사역행렬 해를 이용할 수 있으며, 그에 따라 조인트들은 명령된 엔드 이펙터 운동 중에 여전히 제1 세트의 조인트들의 소정의 운동을 제공하면서 보조 작업들을 실행시키도록 구동될 수 있다.
- [0106] 예시의 실시형태들을 명확한 이해를 위해 어느 정도 상세하게 예시의 방법으로 설명하였지만, 여러 가지 개조, 수정 및 변경이 있을 수 있음은 당업자에게 명백할 것이다. 따라서, 본 발명의 범위는 첨부된 청구범위에 의해 서만 한정된다.

도면

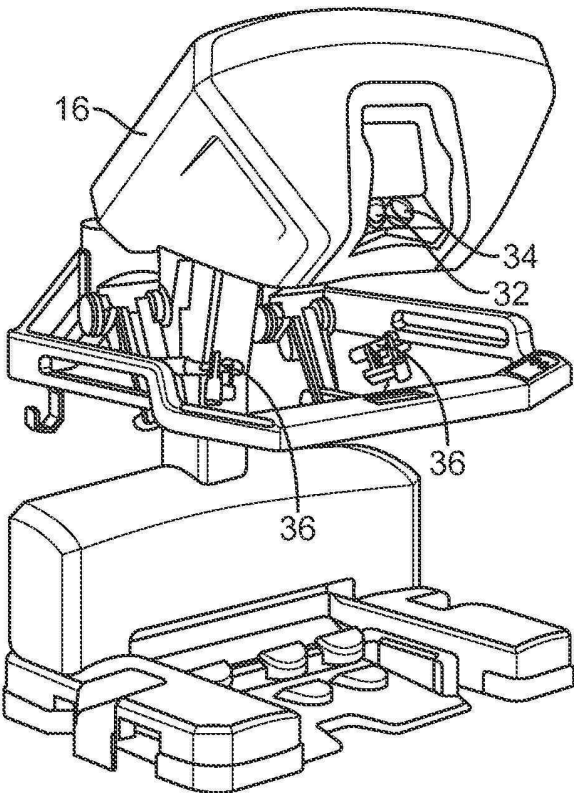
도면1a



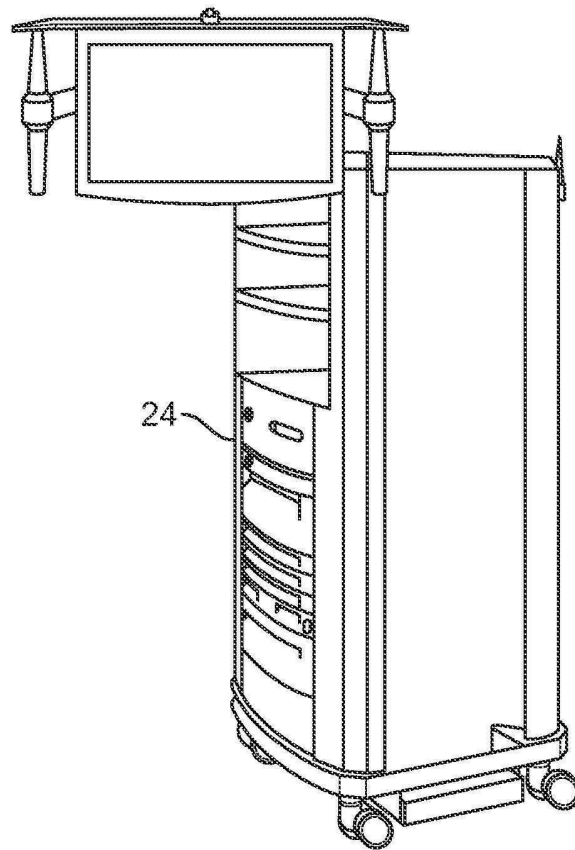
도면1b



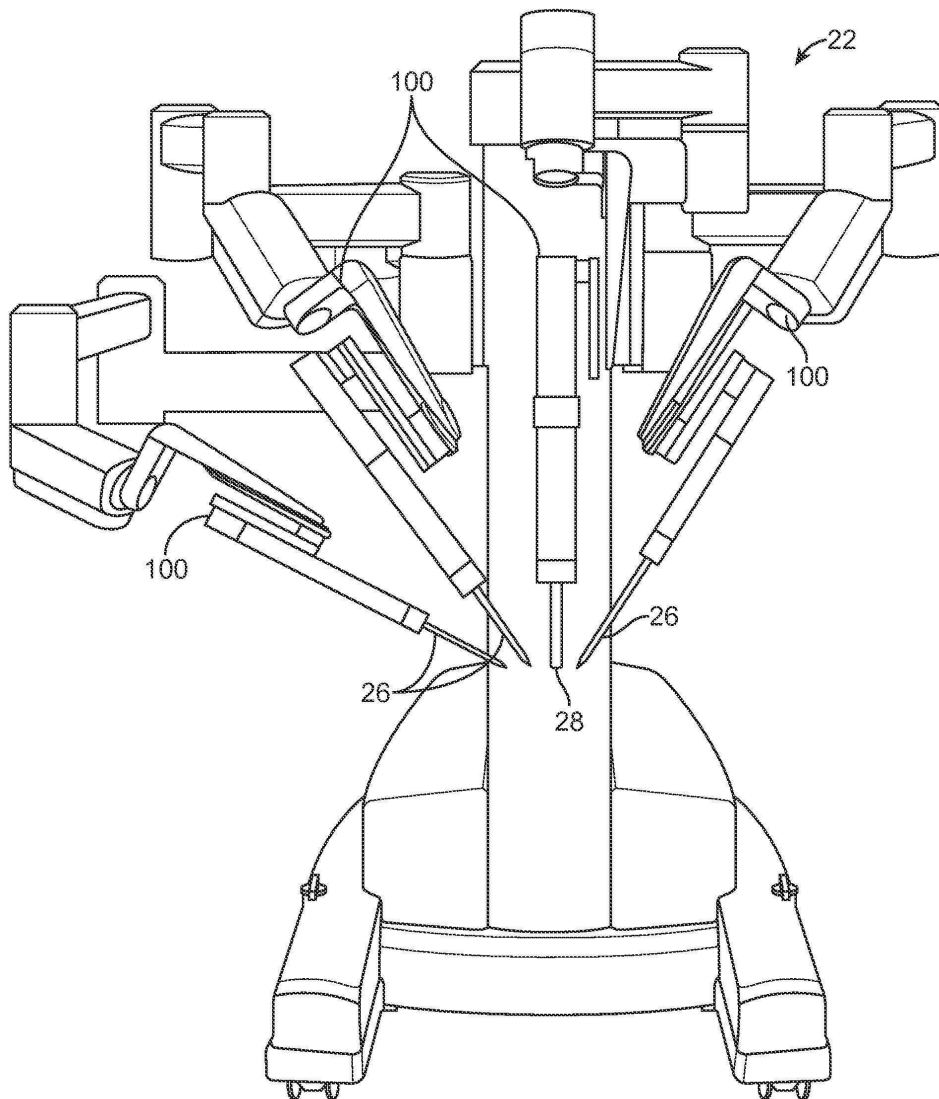
도면2



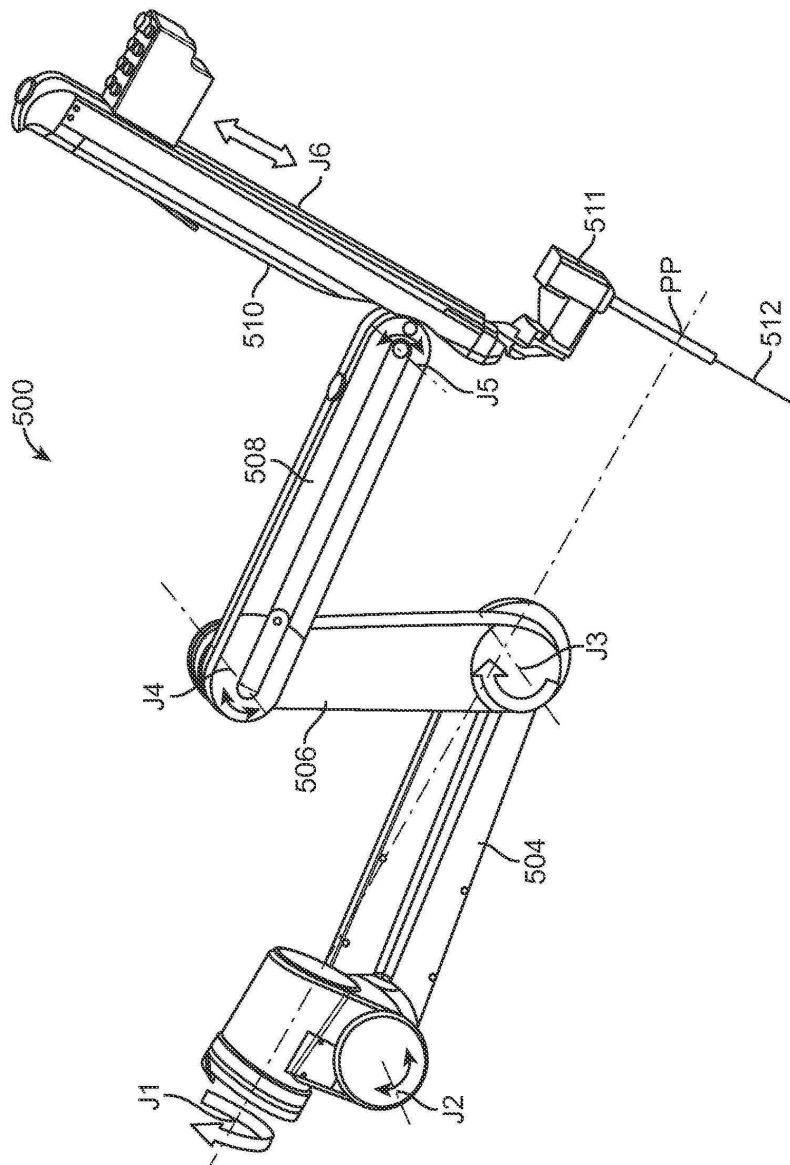
도면3



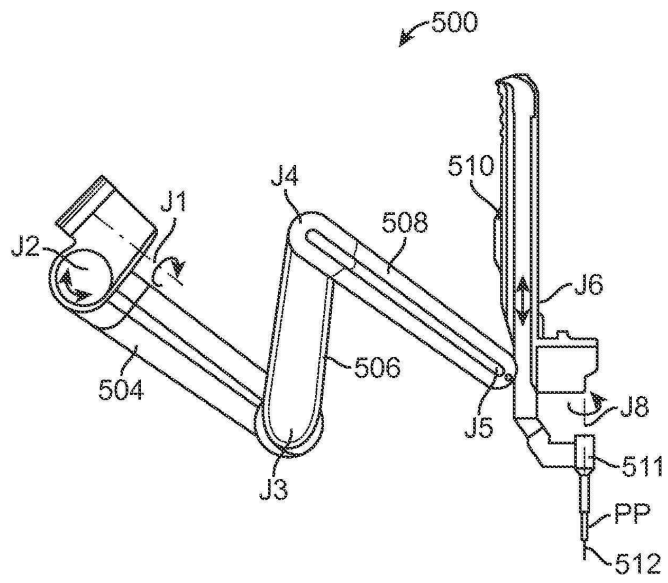
도면4



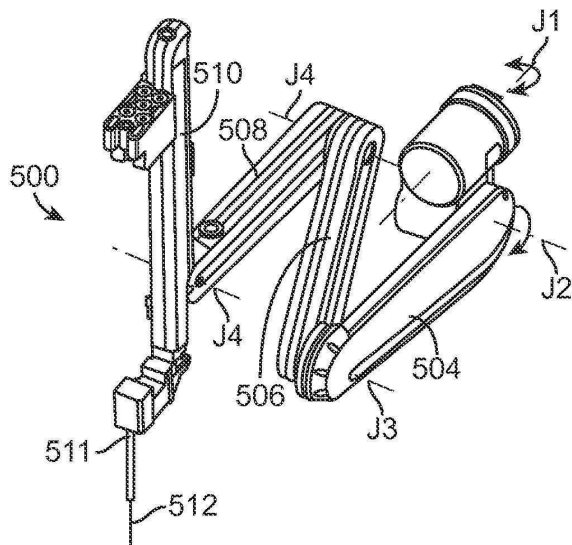
도면5a



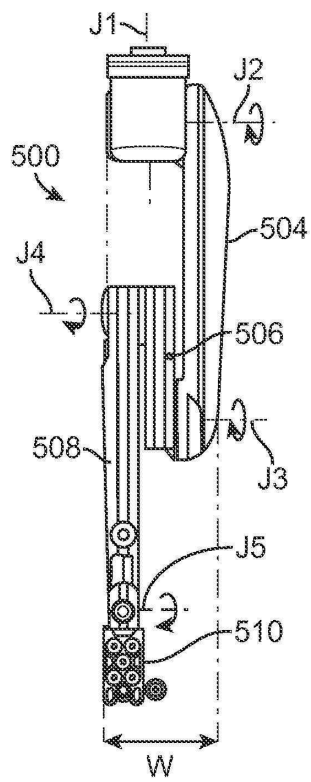
도면5b



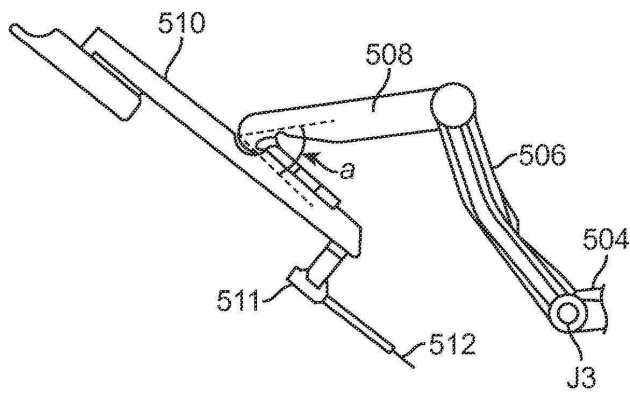
도면5c



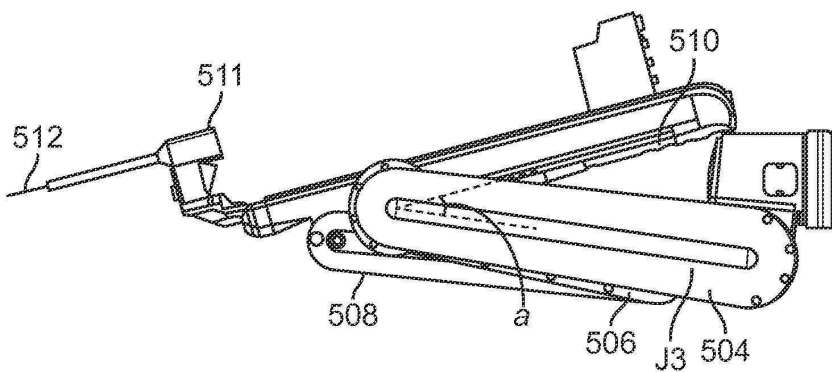
도면5d



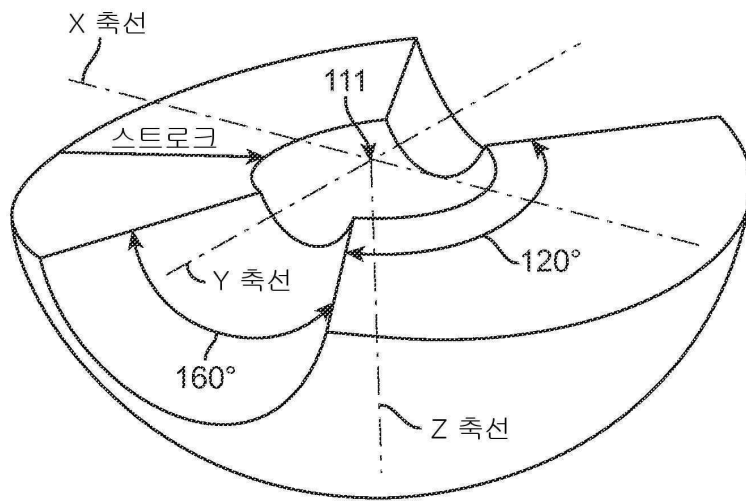
도면6a



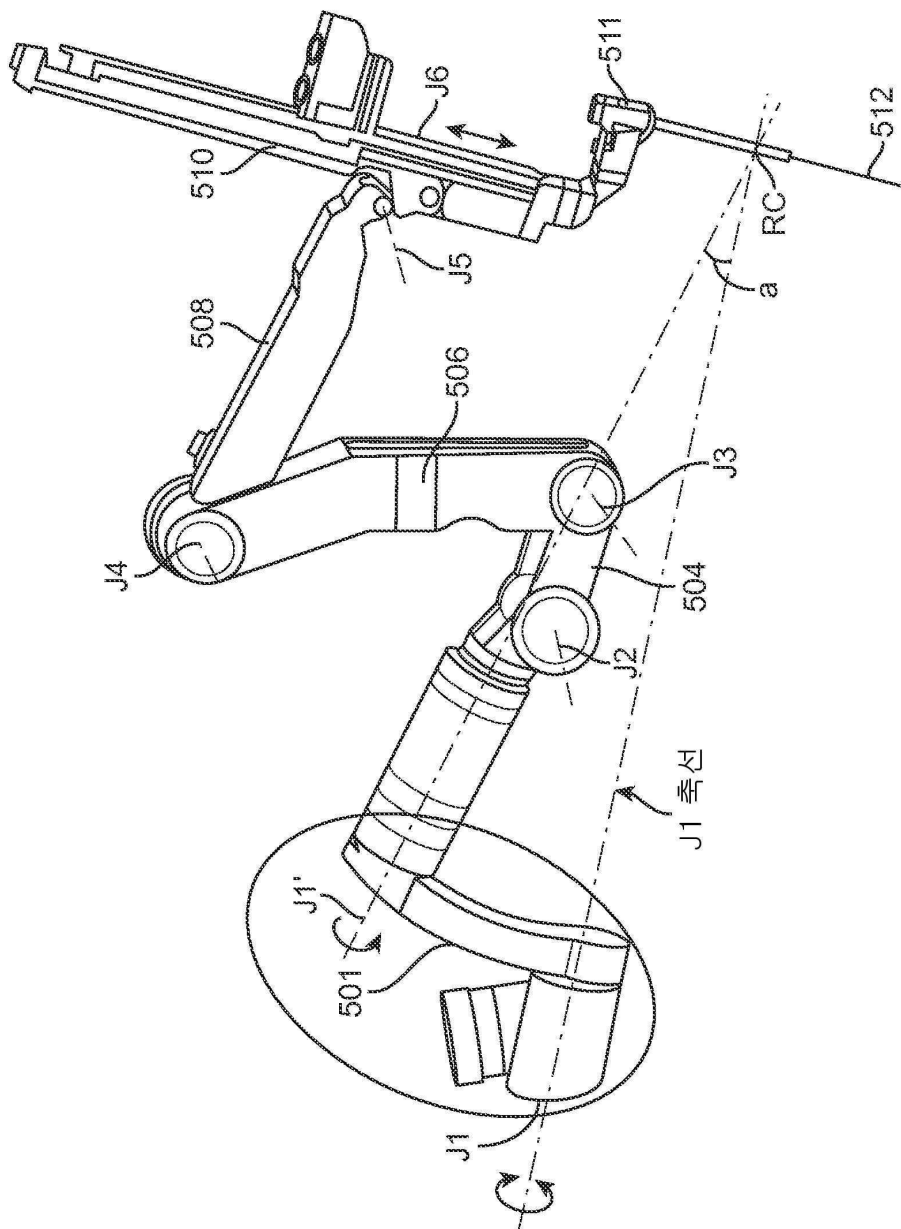
도면6b



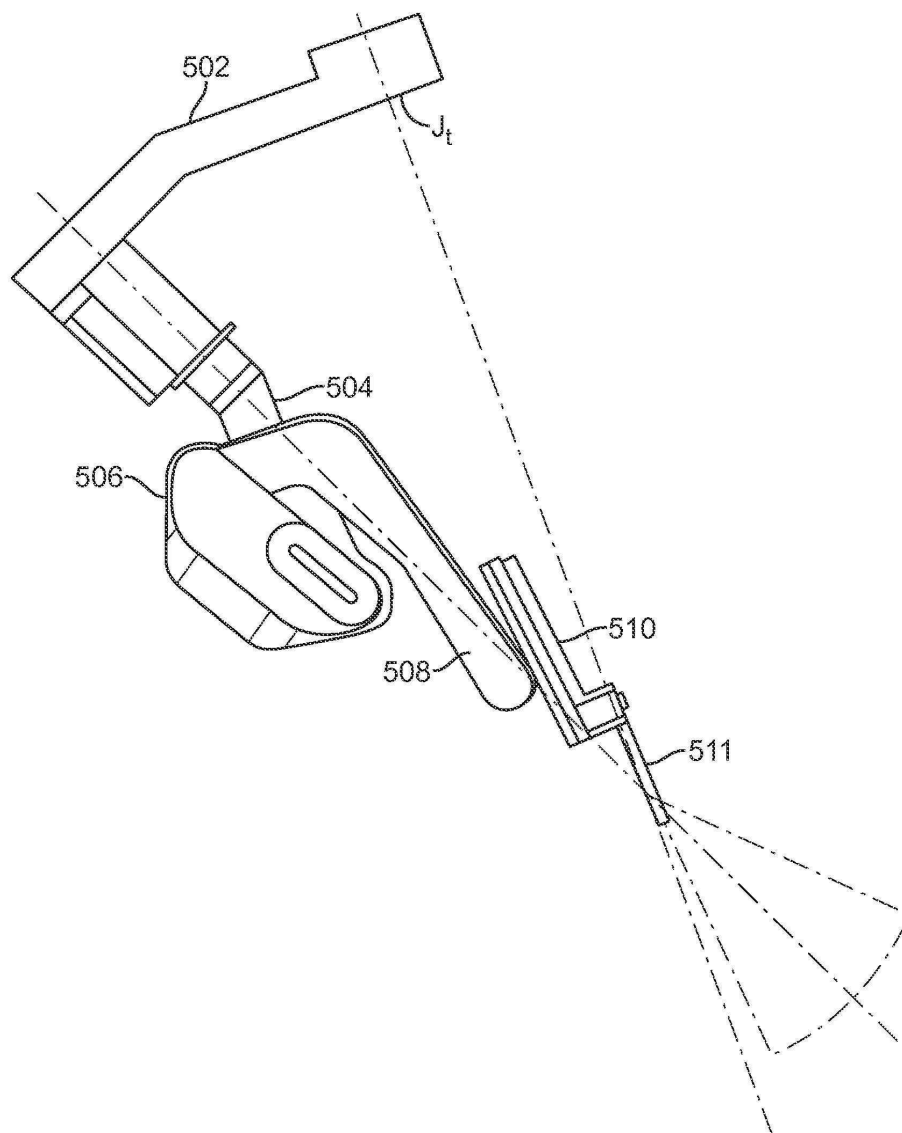
도면6c



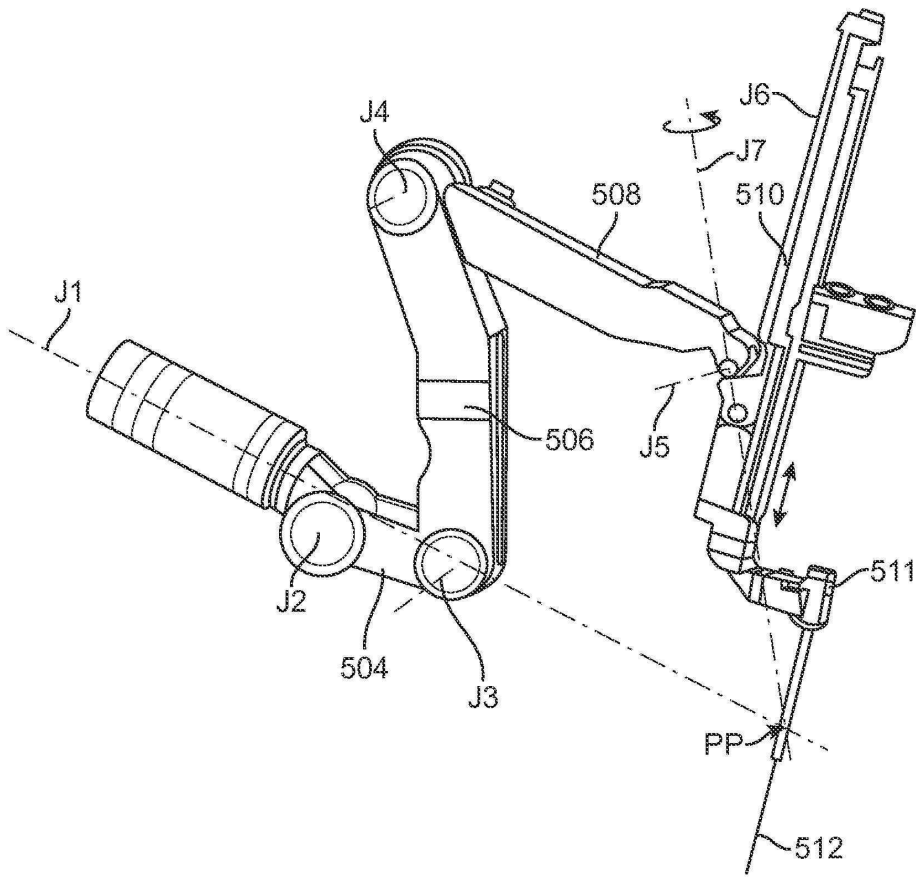
도면 7a



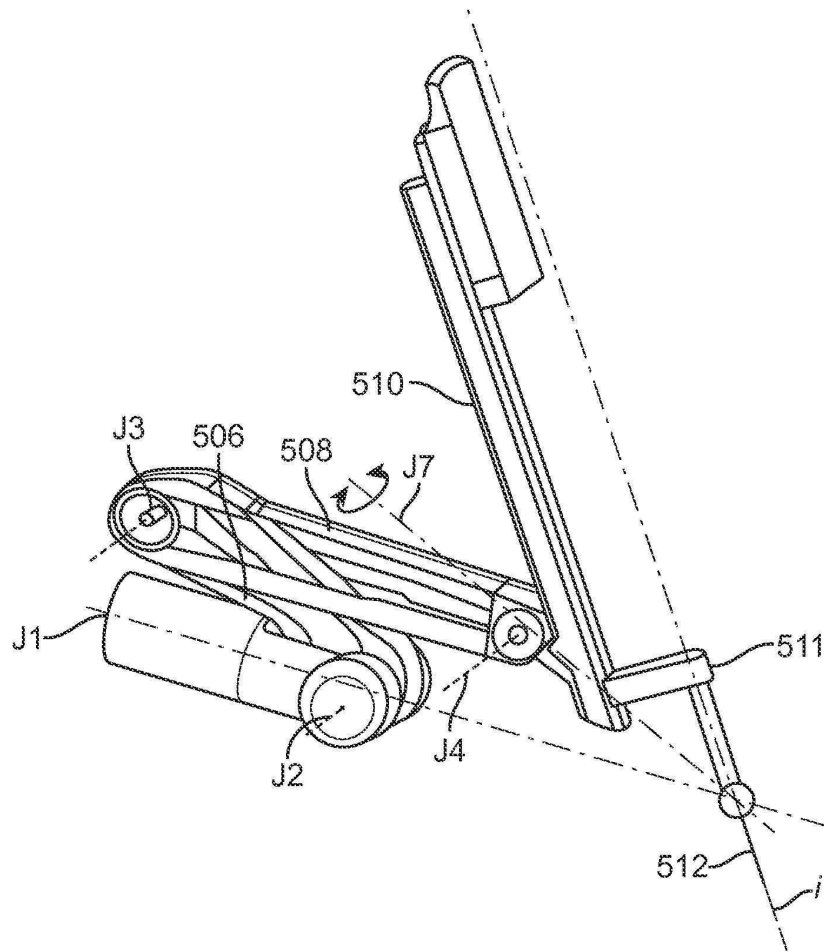
도면 7b



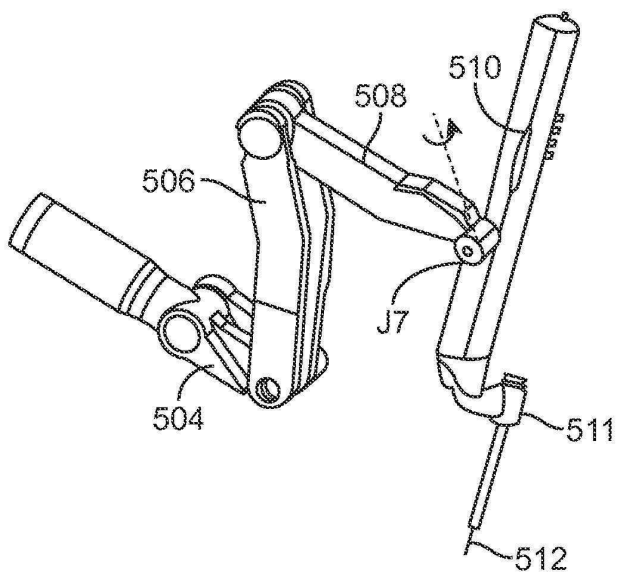
도면8



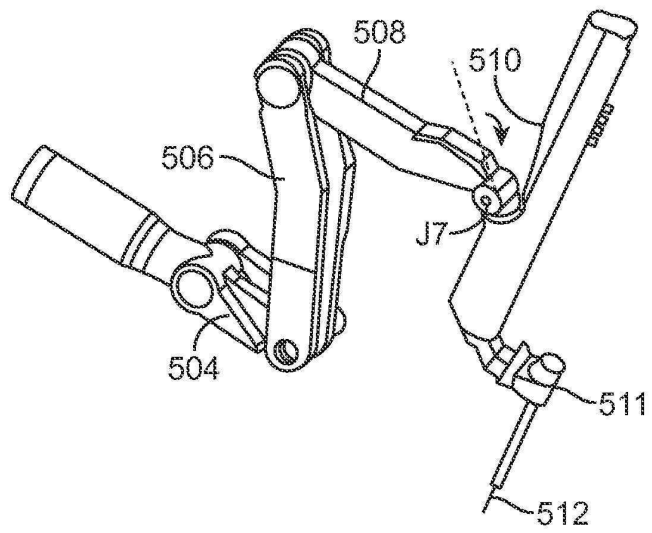
도면9



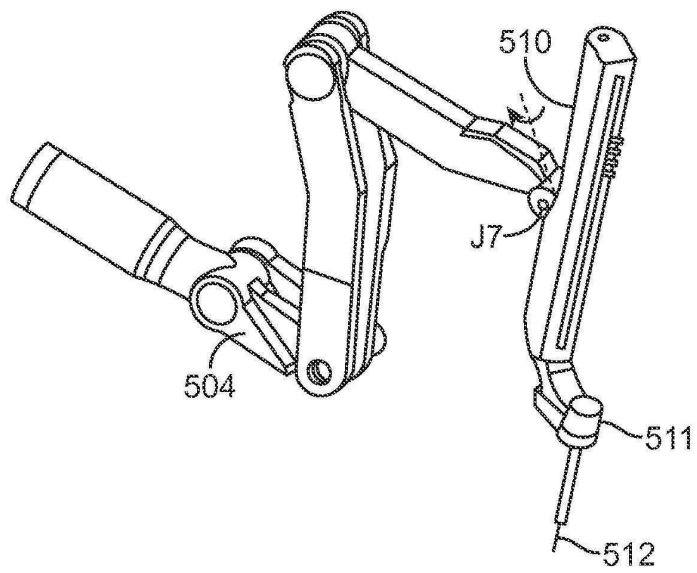
도면10a



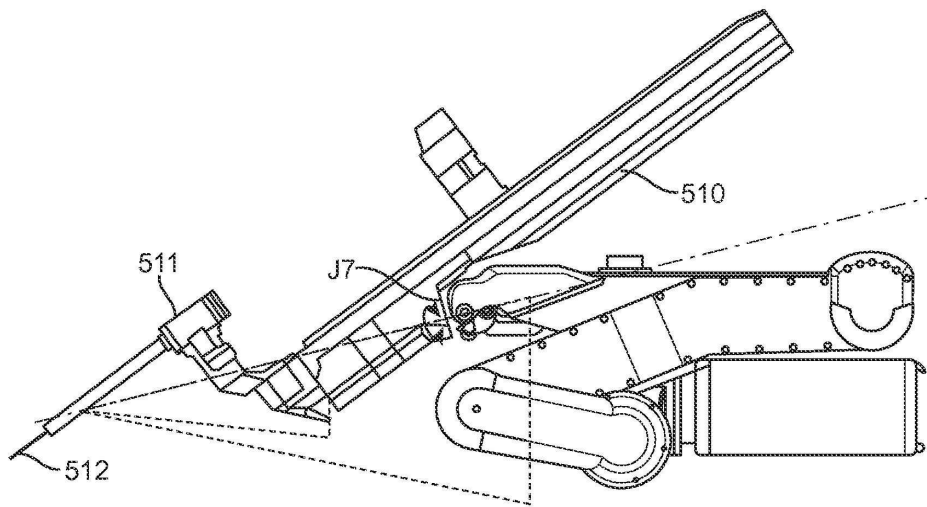
도면10b



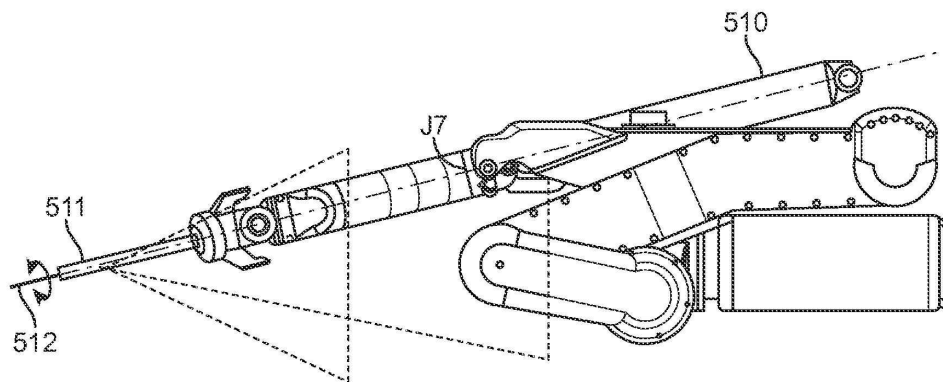
도면10c



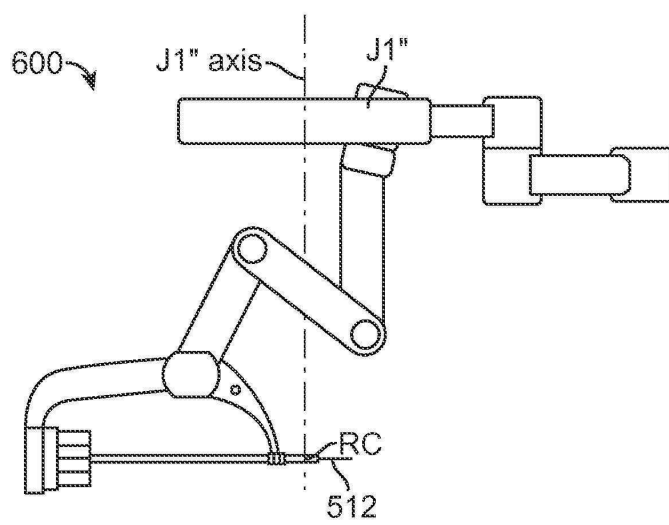
도면11a



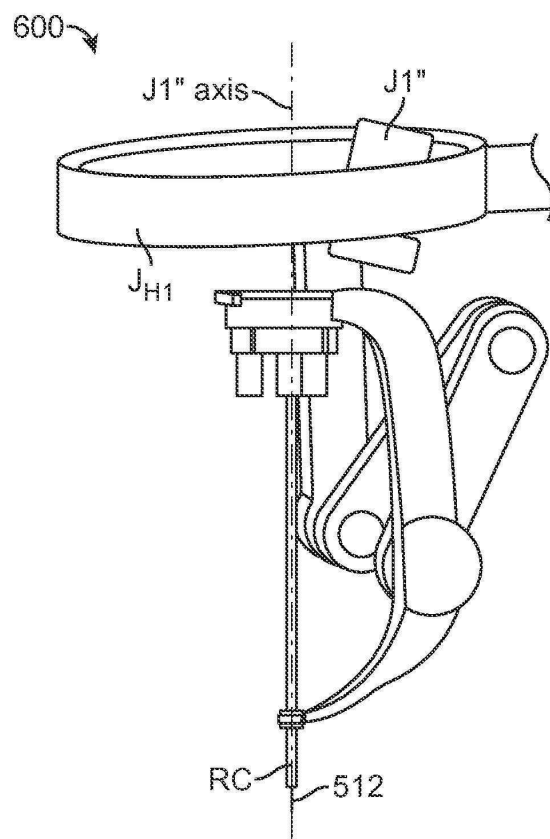
도면11b



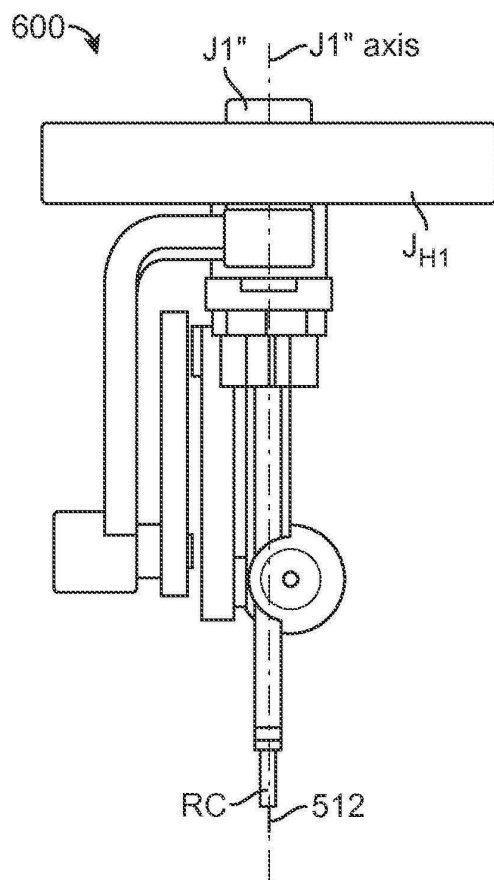
도면12a



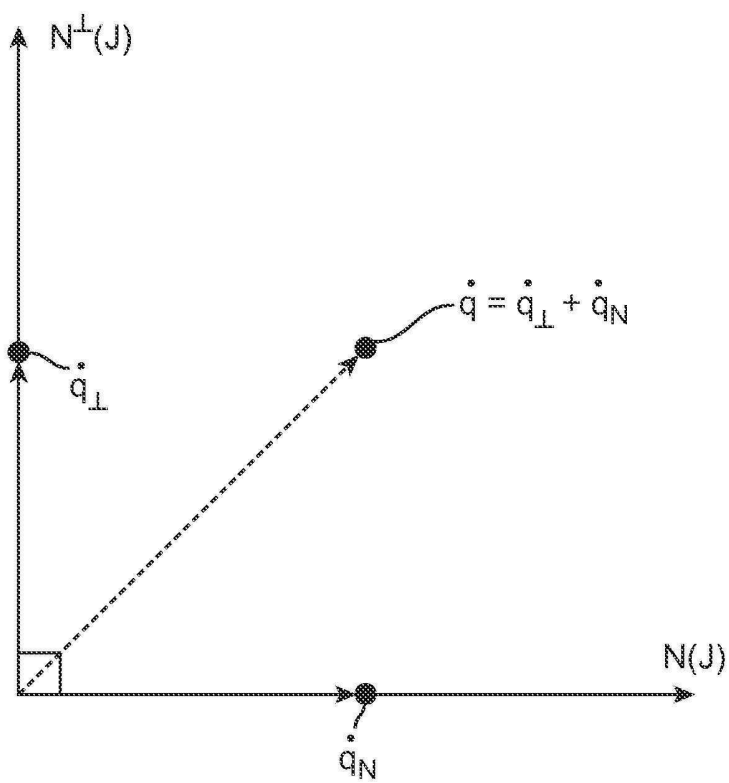
도면12b



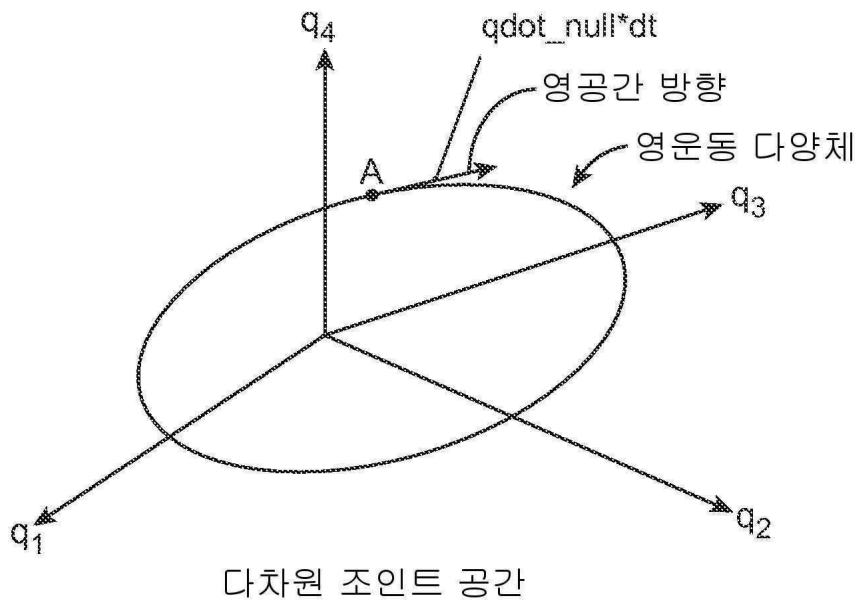
도면12c



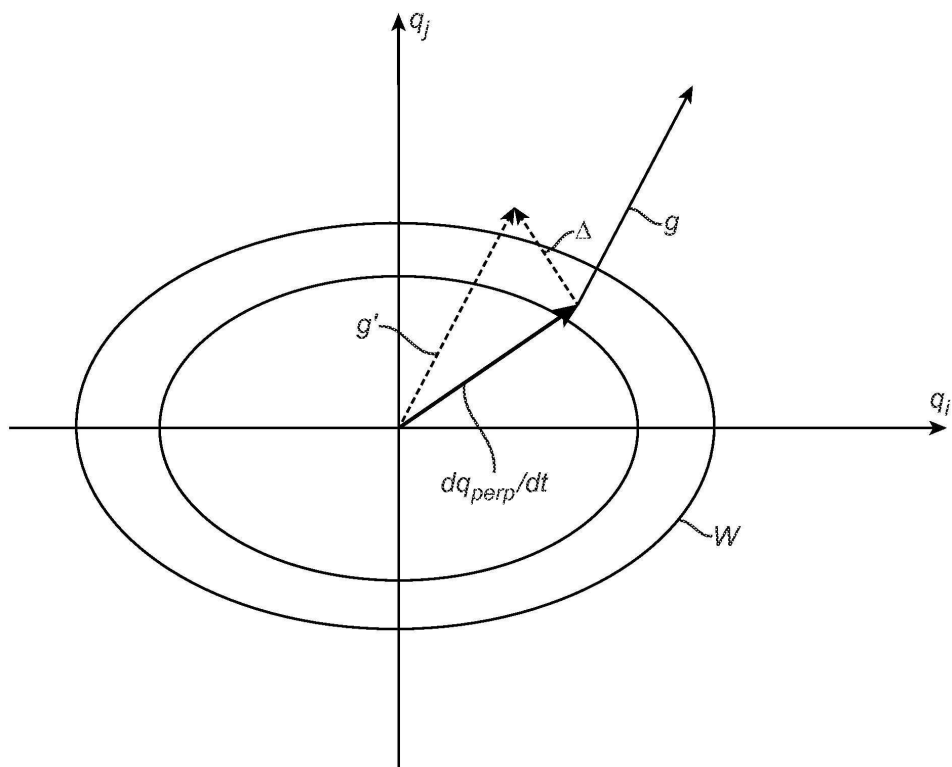
도면13a



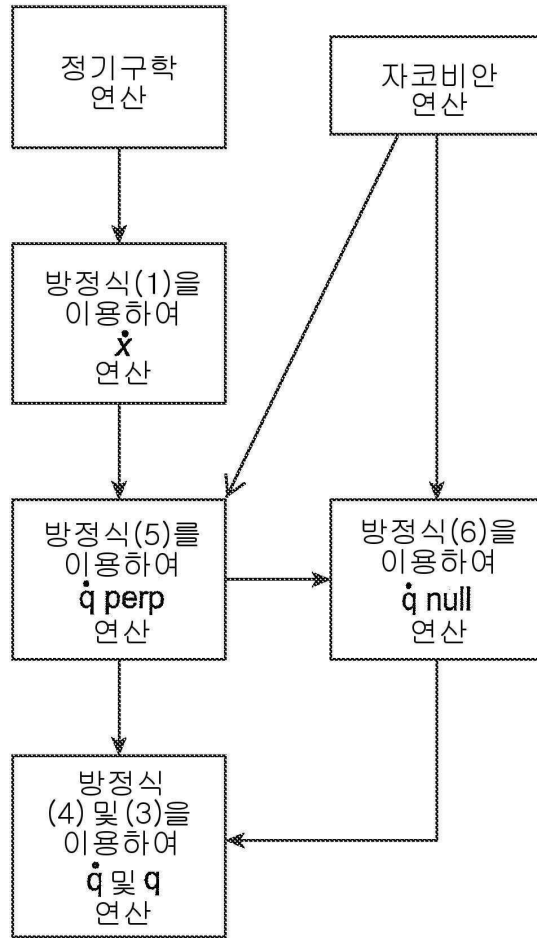
도면13b



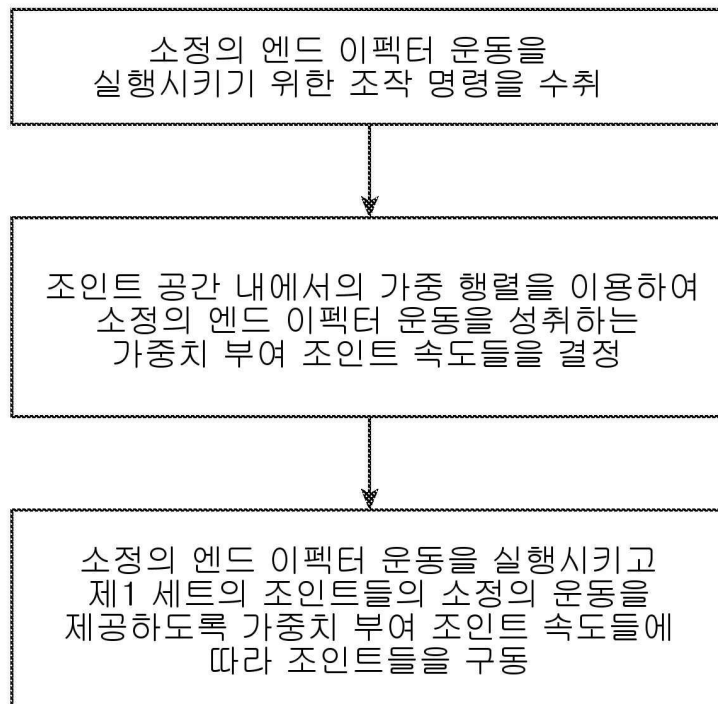
도면14



도면15



도면16



도면17

