(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2023-0124943
(43) 공개일자 2023년08월28일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
A61B 34/32 (2016.01) *A61B 34/00* (2016.01)
A61B 34/10 (2016.01) *A61B 34/20* (2016.01)
A61B 90/00 (2016.01) *B25J 9/16* (2006.01)
(52) CPC특허분류
A61B 34/32 (2016.02)
A61B 34/74 (2016.02)
(21) 출원번호 10-2023-7022433
(22) 출원일자(국제) 2021년12월28일
심사청구일자 없음
(85) 번역문제출일자 2023년07월03일
(86) 국제출원번호 PCT/US2021/065334
(87) 국제공개번호 WO 2022/147001
국제공개일자 2022년07월07일
(30) 우선권주장
63/132,821 2020년12월31일 미국(US)

(71) 출원인
마코 서지컬 코포레이션
미국 33331 플로리다주 웨스턴 엔터프라이즈 애비뉴 3365
(72) 발명자
쿠라나, 리샤브
미국, 플로리다주 33301, 포트 라우더데일, 아파트 207, 510사우스이스트 5번가
(74) 대리인
박경재

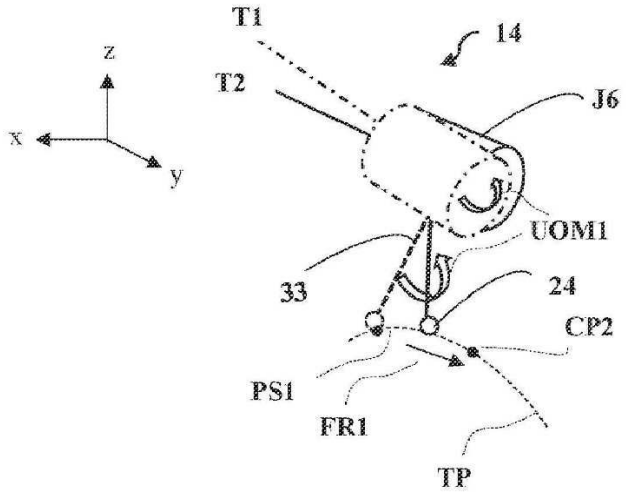
전체 청구항 수 : 총 39 항

(54) 발명의 명칭 **운동학적 구성요소의 원치 않은 배향 모션을 완화하기위한 로봇 시스템 및 방법**

(57) 요 약

로봇 수술 시스템은 매니퓰레이터의 구성요소들에 의해 정의된 운동학적 사슬, 및 에너지 어플리케이터를 포함하는 수술 도구를 포함한다. 적어도 하나의 제어기는 에너지 어플리케이터 이외의 운동학적 사슬의 하나 이상의 구성요소가 원치 않는 배향 모션을 경험하고 있거나 경험할 것임을 식별한다. 적어도 하나의 제어기는 현재의 또는 예상되는 원치 않은 배향 모션을 완화시키도록 매니퓰레이터의 동작을 변경한다.

대 표 도 - 도10



(52) CPC특허분류
B25J 9/1641 (2013.01)
A61B 2034/104 (2016.02)
A61B 2034/105 (2016.02)
A61B 2034/107 (2016.02)
A61B 2034/2059 (2016.02)
A61B 2090/067 (2016.02)

명 세 서

청구범위

청구항 1

수술 시스템으로서,

에너지 어플리케이터를 포함하는 수술 도구;

베이스 및 복수의 링크들 및 조인트들을 포함하는 매니퓰레이터 - 상기 매니퓰레이터는 상기 수술 도구를 지지하도록 구성되고, 운동학적 사슬(kinematic chain)이 상기 매니퓰레이터의 상기 베이스 및 복수의 링크들 및 조인트들을 포함하는 구성요소들에 의해 정의되고, 상기 수술 도구는 상기 에너지 어플리케이터를 포함함 -; 및

적어도 하나의 제어기를 포함하며, 상기 적어도 하나의 제어기는:

반자율 모드에서 도구 경로를 따라 상기 에너지 어플리케이터가 전진하는 속도로 정의되는 공급 레이트를 결정하도록;

상기 공급 레이트에 따라 상기 도구 경로를 따른 복수의 명령된 위치들로 상기 에너지 어플리케이터를 전진시키도록 상기 반자율 모드에서 상기 매니퓰레이터를 제어하도록;

상기 에너지 어플리케이터 이외의 상기 운동학적 사슬의 하나 이상의 구성요소가 상기 공급 레이트에 따라 상기 도구 경로를 따른 상기 에너지 어플리케이터의 전진 동안 일어나는 원치 않은 배향 모션을 경험하고 있거나 경험할 것임을 식별하도록; 그리고

상기 원치 않은 배향 모션을 고려하여 상기 공급 레이트를 변경하도록 구성된, 수술 시스템.

청구항 2

제1항에 있어서, 상기 적어도 하나의 제어기는 상기 에너지 어플리케이터 이외의 상기 운동학적 사슬의 상기 하나 이상의 구성요소에 의해 경험된 또는 경험될 상기 원치 않은 배향 모션의 크기에 상관되는 팩터만큼 상기 공급 레이트를 감소시키도록 또한 구성됨으로써 상기 원치 않은 배향 모션을 고려하여 상기 공급 레이트를 변경하고, 상기 변경된 공급 레이트는 상기 공급 레이트의 변경 전에 존재하는 상기 공급 레이트의 속도보다 작은 제로가 아닌 속도인 것인, 수술 시스템.

청구항 3

제1항 또는 제2항에 있어서, 상기 적어도 하나의 제어기는 상기 에너지 어플리케이터 이외의 상기 운동학적 사슬의 하나 이상의 구성요소가 상기 원치 않은 배향 모션을 경험하고 있거나 경험할 것임을, 또한:

상기 원치 않은 배향 모션을 임계치 또는 범위와 비교하는 것; 그리고

상기 원치 않은 배향 모션이 상기 임계치 또는 범위를 만족시키는 것에 응답하여 상기 원치 않은 배향 모션을 고려하여 상기 공급 레이트를 변경하는 것에 의해, 식별하는 것인, 수술 시스템.

청구항 4

제1항 내지 제3항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 적어도 하나의 제어기는:

상기 공급 레이트에 따라 상기 도구 경로를 따른 상기 복수의 명령된 위치들로의 상기 에너지 어플리케이터의 전진 동안 상기 운동학적 사슬의 전방 운동학적 측정치들을 획득하도록; 그리고

상기 전방 운동학적 측정치들을 평가하여, 상기 에너지 어플리케이터 이외의 상기 운동학적 사슬의 하나 이상의 구성요소가 원치 상기 않는 배향 모션을 경험하고 있거나 경험할 것임을 식별하도록 구성된 것인, 수술 시스템.

청구항 5

제1항 내지 제4항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 운동학적 사슬의 상기 하나 이상의 구성요소의 상기 원치 않은 배향 모션을 나타내는 시뮬레이션 데이터를 저장하고 있는 비일시적인 컴퓨터 판독가능 매체를 더 포함하며, 상

기 시뮬레이션 데이터는 상기 공급 레이트에 따라 상기 도구 경로를 따른 상기 복수의 명령된 위치들로 상기 에너지 어플리케이터를 전진시키도록 상기 반자율 모드에서 상기 매니퓰레이터의 제어를 시뮬레이션하도록 구성된 수술 전 시뮬레이션으로부터 획득되고, 상기 적어도 하나의 제어기는:

상기 비일시적인 컴퓨터 판독가능 매체로부터 상기 시뮬레이션 데이터를 검색하도록; 그리고

상기 시뮬레이션 데이터에 기초하여, 상기 에너지 어플리케이터 이외의 상기 운동학적 사슬의 하나 이상의 구성요소가 원치 상기 않는 배향 모션을 경험하고 있거나 경험할 것임을 식별하도록 구성된 것인, 수술 시스템.

청구항 6

제1항 내지 제5항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 운동학적 사슬의 임의의 하나 이상의 구성요소에 관련된 측정치들을 생성하도록 구성된 하나 이상의 센서를 더 포함하며; 그리고

상기 적어도 하나의 제어기는 상기 측정치들을 분석하여, 상기 에너지 어플리케이터 이외의 상기 운동학적 사슬의 하나 이상의 구성요소가 원치 상기 않는 배향 모션을 경험하고 있거나 경험할 것임을 식별하도록 구성된 것인, 수술 시스템.

청구항 7

제1항 내지 제6항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 적어도 하나의 제어기는:

상기 운동학적 사슬의 임의의 하나 이상의 구성요소에 대한 관성 값들을 비일시적인 컴퓨터 판독가능 매체에 저장하도록; 그리고

상기 저장된 관성 값들을 이용하여, 상기 에너지 어플리케이터 이외의 상기 운동학적 사슬의 하나 이상의 구성요소가 원치 상기 않는 배향 모션을 경험하고 있거나 경험할 것임을 식별하도록 구성된 것인, 수술 시스템.

청구항 8

제1항 내지 제7항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 반자율 모드에서 상기 도구 경로를 따른 상기 에너지 어플리케이터의 전진 동안, 상기 적어도 하나의 제어기는 또한:

상기 수술 도구의 재배향을 가능하게 하도록;

상기 에너지 어플리케이터 이외의 상기 운동학적 사슬의 상기 하나 이상의 구성요소가 상기 수술 도구의 재배향에 응답하여 또한 일어나는 상기 원치 않은 배향 모션을 경험하고 있거나 경험할 것임을 식별하도록; 그리고

상기 수술 도구의 재배향에 응답하여 또한 일어나는 상기 원치 않은 배향 모션을 고려하여 상기 공급 레이트를 변경하도록 구성된 것인, 수술 시스템.

청구항 9

제1항 내지 제8항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 적어도 하나의 제어기는:

상기 운동학적 사슬의 상기 하나 이상의 구성요소에 대해 하나 이상의 가상 촉각 객체를 연관시키도록;

가상 경계를 정의하도록;

상기 하나 이상의 가상 촉각 객체와 상기 가상 경계 사이의 충돌을 검출하도록;

상기 충돌의 검출에 응답하여 상기 가상 촉각 객체와 연관된 상기 운동학적 사슬의 상기 하나 이상의 구성요소가 상기 가상 경계를 초과하는 것을 제한하도록 상기 매니퓰레이터를 제어하도록;

상기 에너지 어플리케이터 이외의 상기 운동학적 사슬의 상기 하나 이상의 구성요소가 상기 충돌의 검출에 응답하여 상기 운동학적 사슬의 상기 하나 이상의 구성요소의 제한에 응답하여 또한 일어나는 상기 원치 않은 배향 모션을 경험하고 있거나 경험할 것임을 식별하도록; 그리고

상기 충돌의 검출에 응답하여 상기 운동학적 사슬의 상기 하나 이상의 구성요소를 제한하는 것에 응답하여 또한 일어나는 상기 원치 않은 배향 모션을 고려하여 상기 공급 레이트를 변경하도록 구성된 것인, 수술 시스템.

청구항 10

제9항에 있어서, 상기 수술 도구는 샤프트, 및 상기 샤프트의 원위 단부에 있는 상기 에너지 어플리케이터를 포함하고, 상기 적어도 하나의 제어기는:

상기 원위 단부 이외의 상기 샤프트 상의 위치들에서 상기 수술 도구의 상기 샤프트에 대해 상기 가상 촉각 객체들 중 상기 하나 이상을 연관시키도록;

상기 수술 도구가 상호작용하는 수술 부위에 대해 상기 가상 경계를 연관시키도록;

상기 수술 부위의 상기 가상 경계와 상기 샤프트의 하나 이상의 가상 촉각 객체 사이의 상기 충돌의 검출에 응답하여 상기 샤프트가 상기 가상 경계를 초과하는 것을 제한하도록 상기 매니퓰레이터를 제어하도록;

상기 샤프트가 상기 원치 않은 배향 모션을 경험하고 있거나 경험할 것임을 식별하도록; 그리고

상기 샤프트에 의해 경험된 또는 경험될 원치 않은 배향 모션을 고려하여 상기 공급 레이트를 변경하도록 구성된 것인, 수술 시스템.

청구항 11

제9항 또는 제10항에 있어서, 상기 적어도 하나의 제어기는:

상기 수술 부위의 가상 경계와 상기 하나 이상의 가상 촉각 객체 사이에서 일어나는 침투의 값을 평가하도록; 그리고

상기 침투의 값의 평가에 따라 상기 공급 레이트를 변경하도록 구성된 것인, 수술 시스템.

청구항 12

제1항 내지 제11항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 원치 않은 배향 모션을 고려한 상기 공급 레이트의 변경에 응답하여, 상기 적어도 하나의 제어기는:

상기 에너지 어플리케이터 이외의 상기 운동학적 사슬의 하나 이상의 구성요소가 더 이상 상기 원치 않은 배향 모션을 경험하고 있지 않거나 더 이상 경험하지 않을 것임을 식별하고, 이에 응답하여, 상기 공급 레이트의 변경 후 계획된 상기 공급 레이트를 재개하도록 구성된 것인, 수술 시스템.

청구항 13

제1항 내지 제12항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 원치 않은 배향 모션은 상기 에너지 어플리케이터 이외의 상기 운동학적 사슬의 임의의 하나 이상의 구성요소에 의해 경험된 또는 경험될 각속도, 각가속도, 또는 각가가속도(angular jerk) 중 원치 않은 하나 이상으로서 또한 정의되는 것인, 수술 시스템.

청구항 14

수술 시스템을 작동시키는 방법으로서, 상기 수술 시스템은 에너지 어플리케이터를 포함하는 수술 도구, 베이스 및 복수의 링크들 및 조인트들을 포함하는 매니퓰레이터 - 상기 매니퓰레이터는 상기 수술 도구를 지지하고, 운동학적 사슬이 상기 매니퓰레이터의 상기 베이스 및 복수의 링크들 및 조인트들을 포함하는 구성요소들에 의해 정의되고, 상기 수술 도구는 상기 에너지 어플리케이터를 포함함 -, 및 적어도 하나의 제어기를 포함하며, 상기 적어도 하나의 제어기는:

반자율 모드에서 도구 경로를 따라 상기 에너지 어플리케이터가 전진하는 속도로 정의되는 공급 레이트를 결정하는 단계;

상기 공급 레이트에 따라 상기 도구 경로를 따른 복수의 명령된 위치들로 상기 에너지 어플리케이터를 전진시키도록 상기 반자율 모드에서 상기 매니퓰레이터를 제어하는 단계;

상기 에너지 어플리케이터 이외의 상기 운동학적 사슬의 하나 이상의 구성요소가 상기 공급 레이트에 따라 상기 도구 경로를 따른 상기 에너지 어플리케이터의 전진 동안 일어나는 원치 않은 배향 모션을 경험하고 있거나 경험할 것임을 식별하는 단계; 및

상기 원치 않은 배향 모션을 고려하여 상기 공급 레이트를 변경하는 단계를 위한 것인, 방법.

청구항 15

제14항에 있어서, 상기 원치 않은 배향 모션을 고려하여 상기 공급 레이트를 변경하는 단계는 상기 적어도 하나의 제어기가 상기 에너지 어플리케이터 이외의 상기 운동학적 사슬의 상기 하나 이상의 구성요소에 의해 경험된 또는 경험될 상기 원치 않은 배향 모션의 크기에 상관되는 팩터만큼 상기 공급 레이트를 감소시키는 단계를 포함하고, 상기 변경된 공급 레이트는 상기 공급 레이트를 변경하기 전에 존재했던 상기 공급 레이트의 속도보다 작은 제로가 아닌 속도인 것인, 방법.

청구항 16

제14항 또는 제15항에 있어서, 상기 에너지 어플리케이터 이외의 상기 운동학적 사슬의 하나 이상의 구성요소가 원치 상기 않는 배향 모션을 경험하고 있거나 경험할 것임을 식별하는 단계는 상기 적어도 하나의 제어기가:

상기 원치 않은 배향 모션을 임계치 또는 범위와 비교하는 단계; 및

상기 원치 않은 배향 모션이 상기 임계치 또는 범위를 만족시키는 것에 응답하여 상기 원치 않은 배향 모션을 고려하여 상기 공급 레이트를 변경하는 단계를 포함하는 것인, 방법.

청구항 17

제14항 내지 제16항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 적어도 하나의 제어기가:

상기 공급 레이트에 따라 상기 도구 경로를 따른 상기 복수의 명령된 위치들로의 상기 에너지 어플리케이터의 전진 동안 상기 운동학적 사슬의 전방 운동학적 측정치들을 획득하는 단계; 및

상기 전방 운동학적 측정치들을 평가하여, 상기 에너지 어플리케이터 이외의 상기 운동학적 사슬의 하나 이상의 구성요소가 원치 상기 않는 배향 모션을 경험하고 있거나 경험할 것임을 식별하는 단계를 포함하는, 방법.

청구항 18

제14항 내지 제17항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 운동학적 사슬의 상기 하나 이상의 구성요소의 상기 원치 않은 배향 모션을 나타내는 시뮬레이션 데이터를 저장하고 있는 비일시적인 컴퓨터 판독가능 매체를 포함하며, 상기 시뮬레이션 데이터는 상기 공급 레이트에 따라 상기 도구 경로를 따른 상기 복수의 명령된 위치들로 상기 에너지 어플리케이터를 전진시키도록 상기 반자율 모드에서 상기 매니퓰레이터의 제어를 시뮬레이션하기 위한 수술 전 시뮬레이션으로부터 획득되고, 상기 적어도 하나의 제어기가:

상기 비일시적인 컴퓨터 판독가능 매체로부터 상기 시뮬레이션 데이터를 검색하는 단계; 및

상기 시뮬레이션 데이터에 기초하여, 상기 에너지 어플리케이터 이외의 상기 운동학적 사슬의 하나 이상의 구성요소가 원치 상기 않는 배향 모션을 경험하고 있거나 경험할 것임을 식별하는 단계를 포함하는, 방법.

청구항 19

제14항 내지 제18항 중 어느 한 항에 있어서, 하나 이상의 센서가 상기 운동학적 사슬의 임의의 하나 이상의 구성요소와 관련된 측정치들을 생성하는 단계를 더 포함하고, 상기 적어도 하나의 제어기가:

상기 측정치들을 분석하여, 상기 에너지 어플리케이터 이외의 상기 운동학적 사슬의 하나 이상의 구성요소가 원치 상기 않는 배향 모션을 경험하고 있거나 경험할 것임을 식별하는 단계를 더 포함하는, 방법.

청구항 20

제14항 내지 제19항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 적어도 하나의 제어기가:

상기 운동학적 사슬의 임의의 하나 이상의 구성요소에 대한 관성 값들을 비일시적인 컴퓨터 판독가능 매체에 저장하는 단계; 및

상기 저장된 관성 값들을 이용하여, 상기 에너지 어플리케이터 이외의 상기 운동학적 사슬의 하나 이상의 구성요소가 원치 상기 않는 배향 모션을 경험하고 있거나 경험할 것임을 식별하는 단계를 포함하는, 방법.

청구항 21

제14항 내지 제20항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 적어도 하나의 제어기가 상기 반자율 모드에서 상기 도구 경로를 따른 상기 에너지 어플리케이터의 전진 동안:

상기 수술 도구의 재배향을 가능하게 하는 단계;

상기 에너지 어플리케이터 이외의 상기 운동학적 사슬의 상기 하나 이상의 구성요소가 상기 수술 도구의 재배향에 응답하여 또한 일어나는 상기 원치 않은 배향 모션을 경험하고 있거나 경험할 것임을 식별하는 단계; 및

상기 수술 도구의 재배향에 응답하여 또한 일어나는 상기 원치 않은 배향 모션을 고려하여 상기 공급 레이트를 변경하는 단계를 포함하는, 방법.

청구항 22

제14항 내지 제21항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 적어도 하나의 제어기가:

상기 운동학적 사슬의 상기 하나 이상의 구성요소에 대해 하나 이상의 가상 촉각 객체를 연관시키는 단계;

가상 경계를 정의하는 단계;

상기 하나 이상의 가상 촉각 객체와 상기 가상 경계 사이의 충돌을 검출하는 단계;

상기 충돌을 검출하는 것에 응답하여 상기 가상 촉각 객체와 연관된 상기 운동학적 사슬의 상기 하나 이상의 구성요소가 상기 가상 경계를 초과하는 것을 제한하도록 상기 매니퓰레이터를 제어하는 단계;

상기 에너지 어플리케이터 이외의 상기 운동학적 사슬의 상기 하나 이상의 구성요소가 상기 충돌을 검출하는 것에 응답하여 상기 매니퓰레이터가 상기 운동학적 사슬의 상기 하나 이상의 구성요소를 제한하는 것에 응답하여 또한 일어나는 상기 원치 않은 배향 모션을 경험하고 있거나 경험할 것임을 식별하는 단계; 및

상기 충돌을 검출하는 것에 응답하여 상기 매니퓰레이터가 상기 운동학적 사슬의 상기 하나 이상의 구성요소를 제한하는 것에 응답하여 또한 일어나는 상기 원치 않은 배향 모션을 고려하여 상기 공급 레이트를 변경하는 단계를 포함하는, 방법.

청구항 23

제22항에 있어서, 상기 수술 도구는 샤프트, 및 상기 샤프트의 원위 단부에 있는 상기 에너지 어플리케이터를 포함하고, 상기 적어도 하나의 제어기가:

상기 원위 단부 이외의 상기 샤프트 상의 위치들에서 상기 수술 도구의 상기 샤프트에 대해 상기 가상 촉각 객체들 중 상기 하나 이상을 연관시키는 단계;

상기 수술 도구가 상호작용하는 수술 부위에 대해 상기 가상 경계를 연관시키는 단계;

상기 수술 부위의 상기 가상 경계와 상기 샤프트의 하나 이상의 가상 촉각 객체 사이의 상기 충돌을 검출하는 것에 응답하여 상기 샤프트가 상기 가상 경계를 초과하는 것을 제한하도록 상기 매니퓰레이터를 제어하는 단계;

상기 샤프트가 상기 원치 않은 배향 모션을 경험하고 있거나 경험할 것임을 식별하는 단계; 및

상기 샤프트에 의해 경험된 또는 경험될 원치 않은 배향 모션을 고려하여 상기 공급 레이트를 변경하는 단계를 포함하는, 방법.

청구항 24

제22항 또는 제23항에 있어서, 상기 적어도 하나의 제어기가:

상기 수술 부위의 가상 경계와 상기 하나 이상의 가상 촉각 객체 사이에서 일어나는 침투의 값을 평가하는 단계; 및

상기 침투의 값의 평가에 따라 상기 공급 레이트를 변경하는 단계를 포함하는, 방법.

청구항 25

제14항 내지 제24항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 적어도 하나의 제어기가 상기 원치 않은 배향 모션을 고려하여 상기 공급 레이트를 변경한 후에:

상기 에너지 어플리케이터 이외의 상기 운동학적 사슬의 하나 이상의 구성요소가 더 이상 상기 원치 않은 배향 모션을 경험하고 있지 않거나 더 이상 경험하지 않을 것임을 식별하고, 이에 응답하여, 상기 공급 레이트의 변

경 후 계획된 상기 공급 레이트를 재개하는 단계를 포함하는, 방법.

청구항 26

수술 시스템으로서,

에너지 어플리케이터를 포함하는 수술 도구;

베이스 및 복수의 링크들 및 조인트들을 포함하는 매니퓰레이터 - 상기 매니퓰레이터는 상기 수술 도구를 지지하도록 구성되고, 운동학적 사슬이 상기 매니퓰레이터의 구성요소들에 의해 정의되고, 상기 수술 도구는 상기 에너지 어플리케이터를 포함함 -; 및

적어도 하나의 제어기를 포함하며, 상기 적어도 하나의 제어기는:

상기 에너지 어플리케이터 이외의 상기 운동학적 사슬의 하나 이상의 구성요소가 원치 상기 않는 배향 모션을 경험하고 있거나 경험할 것임을 식별하도록; 그리고

상기 원치 않은 배향 모션을 고려하여 상기 에너지 어플리케이터의 공급 레이트를 변경하도록 구성된, 수술 시스템.

청구항 27

제26항에 있어서, 상기 적어도 하나의 제어기는:

상기 에너지 어플리케이터가 전진하는 속도로 정의되는 공급 레이트를 결정하도록;

상기 공급 레이트에 따라 하나 이상의 명령된 위치로 상기 에너지 어플리케이터를 전진시키도록 상기 매니퓰레이터를 제어하도록; 그리고

상기 에너지 어플리케이터 이외의 상기 운동학적 사슬의 하나 이상의 구성요소가 상기 공급 레이트에 따라 상기 에너지 어플리케이터의 전진 동안 일어나는 원치 않은 배향 모션을 경험하고 있거나 경험할 것임을 식별하도록 구성된 것인, 수술 시스템.

청구항 28

수술 시스템을 작동시키는 방법으로서, 상기 수술 시스템은 에너지 어플리케이터를 포함하는 수술 도구, 베이스 및 복수의 링크들 및 조인트들을 포함하는 매니퓰레이터 - 상기 매니퓰레이터는 상기 수술 도구를 지지함 -, 적어도 하나의 제어기를 포함하고, 운동학적 사슬이 상기 매니퓰레이터의 상기 베이스 및 복수의 링크들 및 조인트들을 포함하는 구성요소들에 의해 정의되고, 상기 수술 도구는 상기 에너지 어플리케이터를 포함하며, 상기 방법은 상기 적어도 하나의 제어기가:

상기 에너지 어플리케이터 이외의 상기 운동학적 사슬의 하나 이상의 구성요소가 원치 상기 않는 배향 모션을 경험하고 있거나 경험할 것임을 식별하는 단계; 및

상기 원치 않은 배향 모션을 고려하여 상기 에너지 어플리케이터의 공급 레이트를 변경하는 단계를 포함하는, 방법.

청구항 29

제28항에 있어서, 상기 적어도 하나의 제어기가:

상기 에너지 어플리케이터가 전진하는 속도로 정의되는 공급 레이트를 결정하는 단계;

상기 공급 레이트에 따라 하나 이상의 명령된 위치로 상기 에너지 어플리케이터를 전진시키도록 상기 매니퓰레이터를 제어하는 단계; 및

상기 에너지 어플리케이터 이외의 상기 운동학적 사슬의 하나 이상의 구성요소가 상기 공급 레이트에 따라 상기 에너지 어플리케이터의 전진 동안 일어나는 원치 않은 배향 모션을 경험하고 있거나 경험할 것임을 식별하는 단계를 포함하는, 방법.

청구항 30

수술 시스템으로서,

에너지 어플리케이터를 포함하는 수술 도구;

베이스 및 복수의 링크들 및 조인트들을 포함하는 매니퓰레이터 – 상기 매니퓰레이터는 상기 수술 도구를 지지하도록 구성되며, 운동학적 사슬이 상기 매니퓰레이터의 구성요소들에 의해 정의되고, 상기 수술 도구는 상기 에너지 어플리케이터를 포함함 –; 및

적어도 하나의 제어기를 포함하며, 상기 적어도 하나의 제어기는:

상기 에너지 어플리케이터 이외의 상기 운동학적 사슬의 하나 이상의 구성요소가 원치 상기 않는 배향 모션을 경험하고 있거나 경험할 것임을 식별하도록; 그리고

상기 원치 않은 배향 모션을 고려하여 상기 매니퓰레이터의 동작을 수정하도록 구성된, 수술 시스템.

청구항 31

제30항에 있어서, 상기 적어도 하나의 제어기는 상기 원치 않은 배향 모션을 고려하여 상기 운동학적 사슬의 임의의 하나 이상의 구성요소의 거동을 변경하도록 구성됨으로써 상기 매니퓰레이터의 동작을 수정하는 것인, 수술 시스템.

청구항 32

제30항에 있어서, 상기 적어도 하나의 제어기는 조인트 모션을 조작하는 것, 조인트 제한들을 조작하는 것, 조인트 자세들을 조작하는 것, 영공간(null-space) 내에서의 조인트 움직임을 조작하는 것; 상기 수술 도구의 궤적을 변경하는 것;상기 수술 도구가 전진하는 도구 경로를 수정하는 것;가상 경계들 또는 다른 제약들을 조정하는 것, 상기 운동학적 사슬의 임의의 하나 이상의 구성요소의 거동을 금지하는 것, 상기 매니퓰레이터 또는 수술용 도구의 재배향을 제한하는 것, 및 상기 매니퓰레이터의 역구동을 제한하는 것, 사용자에 의한 공급 레이트 조정을 제한하는 것, 그리고 상기 매니퓰레이터의 동작을 중단하는 것 중 임의의 하나 이상을 예측적으로 또는 동적으로 수행하도록 또한 구성됨으로써, 상기 원치 않은 배향 모션을 고려하여 상기 매니퓰레이터의 동작을 수정하는 것인, 수술 시스템.

청구항 33

수술 시스템을 작동시키는 방법으로서, 상기 수술 시스템은 에너지 어플리케이터를 포함하는 수술 도구, 베이스 및 복수의 링크들 및 조인트들을 포함하는 매니퓰레이터 – 상기 매니퓰레이터는 상기 수술 도구를 지지함 –, 적어도 하나의 제어기를 포함하며, 운동학적 사슬이 상기 매니퓰레이터의 상기 베이스 및 복수의 링크들 및 조인트들을 포함하는 구성요소들에 의해 정의되고, 상기 수술 도구는 상기 에너지 어플리케이터를 포함하며, 상기 방법은 상기 적어도 하나의 제어기가:

상기 에너지 어플리케이터 이외의 상기 운동학적 사슬의 하나 이상의 구성요소가 원치 상기 않는 배향 모션을 경험하고 있거나 경험할 것임을 식별하는 단계; 및

상기 원치 않은 배향 모션을 고려하여 상기 매니퓰레이터의 동작을 수정하는 단계를 포함하는, 방법.

청구항 34

제33항에 있어서, 상기 적어도 하나의 제어기가 상기 원치 않은 배향 모션을 고려하여 상기 운동학적 사슬의 임의의 하나 이상의 구성요소의 거동을 변경함으로써 상기 매니퓰레이터의 동작을 수정하는 단계를 포함하는, 방법.

청구항 35

제33항에 있어서, 상기 적어도 하나의 제어기는 조인트 모션을 조작하는 것, 조인트 제한들을 조작하는 것, 조인트 자세들을 조작하는 것, 영공간 내에서의 조인트 움직임을 조작하는 것; 상기 수술 도구의 궤적을 변경하는 것;상기 수술 도구가 전진하는 도구 경로를 수정하는 것;가상 경계들 또는 다른 제약들을 조정하는 것, 상기 운동학적 사슬의 임의의 하나 이상의 구성요소의 거동을 제한하는 것, 상기 매니퓰레이터 또는 수술용 도구의 재배향을 제한하는 것, 및 상기 매니퓰레이터의 역구동을 제한하는 것, 사용자에 의한 공급 레이트 조정을 제한하는 것, 그리고 상기 매니퓰레이터의 동작을 중단하는 것 중 임의의 하나 이상을 또한 예측적으로 또는 동적으로

수행함으로써, 상기 매니퓰레이터의 동작을 수정하는 단계를 포함하는, 방법.

청구항 36

수술 시스템으로서,

에너지 어플리케이터를 포함하는 수술 도구;

베이스 및 복수의 링크들 및 조인트들을 포함하는 매니퓰레이터 - 상기 매니퓰레이터는 상기 수술 도구를 지지하도록 구성되고, 운동학적 사슬이 상기 매니퓰레이터의 구성요소들에 의해 정의되고, 상기 수술 도구는 상기 에너지 어플리케이터를 포함함 -; 및

상기 운동학적 사슬의 하나 이상의 구성요소의 원치 않은 배향 모션을 나타내는 시뮬레이션 데이터를 저장하고 있는 비일시적인 컴퓨터 판독가능 매체를 포함하는 적어도 하나의 제어기 - 상기 시뮬레이션 데이터는 상기 에너지 어플리케이터를 복수의 명령된 위치들로 전진시키도록 상기 매니퓰레이터의 제어를 시뮬레이션하도록 구성된 시뮬레이션으로부터 획득됨 - 를 포함하고, 상기 적어도 하나의 제어기는:

상기 시뮬레이션 데이터에 기초하여, 상기 에너지 어플리케이터 이외의 상기 운동학적 사슬의 하나 이상의 구성요소가 원치 상기 않는 배향 모션을 경험하고 있거나 경험할 것임을 식별하도록; 그리고

상기 원치 않은 배향 모션을 고려하여 상기 매니퓰레이터의 동작을 수정하도록 구성된 것인, 수술 시스템.

청구항 37

수술 시스템을 작동시키는 방법으로서, 상기 수술 시스템은 에너지 어플리케이터를 포함하는 수술 도구, 베이스 및 복수의 링크들 및 조인트들을 포함하는 매니퓰레이터 - 상기 매니퓰레이터는 상기 수술 도구를 지지하도록 구성되며, 운동학적 사슬이 상기 매니퓰레이터의 구성요소들에 의해 정의되고, 상기 수술 도구는 상기 에너지 어플리케이터를 포함함 -, 및 상기 운동학적 사슬의 하나 이상의 구성요소의 원치 않은 배향 모션을 나타내는 시뮬레이션 데이터를 저장하고 있는 비일시적인 컴퓨터 판독가능 매체를 포함하는 적어도 하나의 제어기 - 상기 시뮬레이션 데이터는 상기 에너지 어플리케이터를 복수의 명령된 위치들로 전진시키도록 상기 매니퓰레이터의 제어를 시뮬레이션하도록 구성된 시뮬레이션으로부터 획득됨 - 를 포함하고, 상기 방법은 상기 적어도 하나의 제어기가:

상기 시뮬레이션 데이터에 기초하여, 상기 에너지 어플리케이터 이외의 상기 운동학적 사슬의 하나 이상의 구성요소가 원치 상기 않는 배향 모션을 경험하고 있거나 경험할 것임을 식별하는 단계; 및

상기 원치 않은 배향 모션을 고려하여 상기 매니퓰레이터의 동작을 수정하는 단계를 포함하는 것인, 방법.

청구항 38

수술 시스템으로서,

샤프트, 및 상기 샤프트의 원위 단부에 있는 에너지 어플리케이터를 포함하는 수술 도구;

베이스 및 복수의 링크들 및 조인트들을 포함하는 매니퓰레이터 - 상기 매니퓰레이터는 상기 수술 도구를 지지하도록 구성됨 -;

적어도 하나의 제어기를 포함하며, 상기 적어도 하나의 제어기는:

상기 샤프트 상의 위치들에서 상기 수술 도구의 상기 샤프트에 대해 하나 이상의 가상 촉각 객체를 연관시키도록;

상기 수술 도구가 상호작용하는 수술 부위에 대해 가상 경계를 연관시키도록;

상기 수술 부위와 연관된 상기 가상 경계와 상기 샤프트와 연관된 상기 하나 이상의 가상 촉각 객체 사이의 충돌을 검출하도록; 그리고

상기 충돌의 검출에 응답하여 상기 샤프트가 상기 가상 경계를 초과하는 것을 제한하도록 상기 매니퓰레이터를 제어하도록 구성된, 수술 시스템.

청구항 39

수술 시스템을 작동시키는 방법으로서, 상기 수술 시스템은 샤프트, 및 상기 샤프트의 원위 단부에 있는 에너지 어플리케이터를 포함하는 수술 도구, 베이스 및 복수의 링크들 및 조인트들을 포함하는 매니퓰레이터 - 상기 매니퓰레이터는 상기 수술 도구를 지지하도록 구성됨 -, 및 적어도 하나의 제어기를 포함하며, 상기 방법은 상기 적어도 하나의 제어기가:

상기 샤프트 상의 위치들에서 상기 수술 도구의 상기 샤프트에 대해 하나 이상의 가상 촉각 객체를 연관시키는 단계;

상기 수술 도구가 상호작용하는 수술 부위에 대해 가상 경계를 연관시키는 단계;

상기 수술 부위와 연관된 상기 가상 경계와 상기 샤프트와 연관된 상기 하나 이상의 가상 촉각 객체 사이의 충돌을 검출하는 단계; 및

상기 충돌의 검출에 응답하여 상기 샤프트가 상기 가상 경계를 초과하는 것을 제한하도록 상기 매니퓰레이터를 제어하는 단계를 포함하는, 방법.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 관련 출원 교차 참조

[0002] 본 국제 특허 출원은 2020년 12월 31일에 출원된 미국 가 특허출원 제63/132,821호의 우선권 및 이익을 주장하며, 이의 내용 전문이 이에 의해 원용된다.

[0003] 기술분야

[0004] 본 개시는 일반적으로 로봇의 운동학적 사슬(kinematic chain)에서의 구성요소들의 원치 않은 배향 움직임을 고려하여 제어하기 위한 로봇 시스템들 및 방법들에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0005] 수술 부위에 수술 절차를 수행하는 로봇 시스템은 보통 베이스, 복수의 링크들 및 조인트들을 갖는 매니퓰레이터, 및 매니퓰레이터에 결합되는 엔드 이펙터를 포함한다. 많은 경우, 엔드 이펙터는 수술 부위에서 조직을 제거하도록 설계된 에너지 어플리케이터를 갖는 수술 도구를 포함하거나 지지한다. 운동학적 사슬은 베이스, 링크들 및 조인트들, 및 에너지 어플리케이터를 포함하는 수술 도구에 의해 정의된다.

[0006] 출입 제어 로봇 시스템의 경우, 힘이 입력으로서 수신되고, 에너지 어플리케이터의 명령된 위치들이 출력된다. 출입 제어의 역 운동학적 특성으로 인해, 에너지 어플리케이터의 명령된 위치들은 작업 공간(x, y, z) 좌표들로서 출력되고, 운동학적 사슬 구성요소들의 각 자세(위치 및 배향)는 방정식들의 복잡한 시스템에 의해 정의된 제약들을 만족시키는 솔루션에 따라 출력된다.

[0007] 에너지 어플리케이터는 전형적으로 명령된 위치들에 따라 도구 경로를 따라 이동된다. 에너지 어플리케이터가 도구 경로를 따라 이동하는 속도는 통상적으로 에너지 어플리케이터의 "공급 레이트"로 알려져 있다. 선행 시스템은 공급 레이트의 수동 사용자 선택, 조직의 특성, 에너지 어플리케이터에 인가된 감지된 힘, 경로의 곡률 등과 같은 조건들 또는 입력들을 고려하여 공급 레이트를 조정하는 것을 고려하였다. 선행 출입 제어 로봇 시스템에서의 공급 레이트의 조정은 도구 경로를 따른 에너지 어플리케이터의 움직임에 직접적으로 영향을 주는 원하는(또는 의도된) 입력들 또는 조건들에만 응답한다. 그러나, 공급 레이트의 조정을 위한 선행 기술들은 매니퓰레이터의 도구 샤프트, 조인트들, 또는 링크들과 같은 에너지 어플리케이터 이외의 운동학적 사슬의 구성요소들(즉, 비-도구 경로 구성요소들)에 대해 일어나는 원치 않은 배향 모션(orientational motion)의 가능성을 고려하지 않는다. 이러한 비-도구 경로 구성요소들은 이러한 비-도구 경로 구성요소들이 복잡한 역 운동학적 솔루션에 따라 운동학적으로 조작될 때 일어나는 급격한 각속도, 각가속도 또는 각가가속도를 경험할 수 있다. 비-도구 경로 구성요소들의 이러한 원치 않은 배향 모션은 명령된 위치에의 부정확성을 야기할 수 있다. 예를 들어, 비-도구 경로 구성요소들의 관성은 모션 또는 방향에 대한 의도치 않은 변경을 야기하여 명령된 위치로부터의 편차를 야기할 수 있다. 또한, 이러한 원치 않은 배향 모션은 수술 작업 흐름 또는 사용자 경험을 방해할 수 있는데, 이는 조작자가 이러한 모션에 의해 경보를 받을 수 있고, 조작을 수동으로 감속시키거나 정지시키기를 원

할 수 있기 때문이다. 적어도 앞서 언급한 단점들을 해결할 것이 요구된다.

발명의 내용

[0008] 제5 양태에 따르면, 수술 시스템이 제공되며, 이 수술 시스템은 에너지 어플리케이터를 포함하는 수술 도구; 베이스 및 복수의 링크들 및 조인트들을 포함하는 매니퓰레이터 – 매니퓰레이터는 수술 도구를 지지하도록 구성되고, 운동학적 사슬이 매니퓰레이터의 구성요소들에 의해 정의되고, 수술 도구는 에너지 어플리케이터를 포함함 –; 및 에너지 어플리케이터 이외의 운동학적 사슬의 하나 이상의 구성요소가 원치 않는 배향 모션을 경험하고 있거나 경험할 것임을 식별하도록; 그리고 원치 않은 배향 모션을 고려하여 에너지 어플리케이터의 공급 레이트를 변경하도록 구성된 적어도 하나의 제어기를 포함한다.

[0009] 제2 양태에 따르면, 제1 양태에 따른 수술 시스템을 작동시키는 방법이 제공된다.

[0010] 제3 양태에 따르면, 수술 시스템이 제공되며, 이 수술 시스템은 에너지 어플리케이터를 포함하는 수술 도구; 베이스 및 복수의 링크들 및 조인트들을 포함하는 매니퓰레이터 – 매니퓰레이터는 수술 도구를 지지하도록 구성되고, 운동학적 사슬이 매니퓰레이터의 구성요소들에 의해 정의되고, 수술 도구는 에너지 어플리케이터를 포함함 –; 및 에너지 어플리케이터 이외의 운동학적 사슬의 하나 이상의 구성요소가 원치 않는 배향 모션을 경험하고 있거나 경험할 것임을 식별하도록; 그리고 원치 않은 배향 모션을 고려하여 매니퓰레이터의 동작을 수정하도록 구성된 적어도 하나의 제어기를 포함한다.

[0011] 제4 양태에 따르면, 제3 양태에 따른 수술 시스템을 작동시키는 방법이 제공된다.

[0012] 제1 양태에 따르면, 수술 시스템이 제공되며, 이 수술 시스템은 에너지 어플리케이터를 포함하는 수술 도구; 베이스 및 복수의 링크들 및 조인트들을 포함하는 매니퓰레이터 – 매니퓰레이터는 수술 도구를 지지하도록 구성되고, 운동학적 사슬이 매니퓰레이터의 구성요소들에 의해 정의되고, 수술 도구는 에너지 어플리케이터를 포함함 –; 및 에너지 어플리케이터가 전진하는 속도로 정의되는 공급 레이트를 결정하도록; 공급 레이트에 따라 복수의 명령된 위치들로 에너지 어플리케이터를 전진시키도록 매니퓰레이터를 제어하도록; 에너지 어플리케이터 이외의 운동학적 사슬의 하나 이상의 구성요소가 공급 레이트에 따라 에너지 어플리케이터의 전진 동안 일어나는 원치 않은 배향 모션을 경험하고 있거나 경험할 것임을 식별하도록; 그리고 원치 않은 배향 모션을 고려하여 공급 레이트를 변경하도록 구성된 적어도 하나의 제어기를 포함한다.

[0013] 제6 양태에 따르면, 제4 양태에 따른 수술 시스템을 작동시키는 방법이 제공된다.

[0014] 제7 양태에 따르면, 수술 시스템이 제공되며, 이 수술 시스템은: 에너지 어플리케이터를 포함하는 수술 도구; 베이스 및 복수의 링크들 및 조인트들을 포함하고, 수술 도구를 지지하도록 구성된 매니퓰레이터 – 운동학적 사슬이 매니퓰레이터의 베이스 및 복수의 링크들 및 조인트들을 포함하는 구성요소들에 의해 정의되고, 수술 도구는 에너지 어플리케이터를 포함함 –; 및 반자율 모드에서 도구 경로를 따라 에너지 어플리케이터가 전진하는 속도로 정의되는 공급 레이트를 결정하도록; 공급 레이트에 따라 도구 경로를 따른 복수의 명령된 위치들로 에너지 어플리케이터를 전진시키도록 반자율 모드에서 매니퓰레이터를 제어하도록; 에너지 어플리케이터 이외의 운동학적 사슬의 하나 이상의 구성요소가 공급 레이트에 따라 도구 경로를 따른 에너지 어플리케이터의 전진 동안 일어나는 원치 않은 배향 모션을 경험하고 있거나 경험할 것임을 식별하도록; 그리고 원치 않은 배향 모션을 고려하여 공급 레이트를 변경하도록 구성된 적어도 하나의 제어기를 포함한다.

[0015] 제8 양태에 따르면, 제7 양태에 따른 수술 시스템을 작동시키는 방법이 제공된다.

[0016] 제9 양태에 따르면, 적어도 하나의 제어기를 갖는 수술 시스템은 운동학적 사슬의 하나 이상의 구성요소의 원치 않은 배향 모션을 나타내는 시뮬레이션 데이터를 저장하고 있는 비일시적인 컴퓨터 판독가능 매체를 구비하며, 시뮬레이션 데이터는 에너지 어플리케이터를 복수의 명령된 위치들로 전진시키도록 매니퓰레이터의 제어를 시뮬레이션하도록 구성된 시뮬레이션으로부터 획득되고, 적어도 하나의 제어기는: 비일시적인 컴퓨터 판독가능 매체로부터 시뮬레이션 데이터를 검색하도록; 시뮬레이션 데이터에 기초하여, 에너지 어플리케이터 이외의 운동학적 사슬의 하나 이상의 구성요소가 원치 않는 배향 모션을 경험하고 있거나 경험할 것임을 식별하도록; 그리고 원치 않은 배향 모션을 고려하여 매니퓰레이터의 동작을 수정하도록 구성된다.

[0017] 제10 양태에 따르면, 제9 양태에 따른 수술 시스템을 작동시키는 방법이 제공된다.

[0018] 제11 양태에 따르면, 수술 시스템이 제공되며, 이 수술 시스템은 샤프트, 및 샤프트의 원위 단부에 있는 에너지 어플리케이터를 포함하는 수술 도구; 베이스 및 복수의 링크들 및 조인트들을 포함하는 매니퓰레이터 – 매

니퓰레이터는 수술 도구를 지지하도록 구성됨 -; 적어도 하나의 제어기를 포함하며, 적어도 하나의 제어기는: 샤프트 상의 위치들에서 수술 도구의 샤프트에 대해 하나 이상의 가상 촉각 객체를 연관시키도록; 수술 도구가 상호작용하는 수술 부위에 대해 가상 경계를 연관시키도록; 수술 부위와 연관된 가상 경계와 샤프트와 연관된 하나 이상의 가상 촉각 객체 사이의 충돌을 검출하도록; 충돌의 검출에 응답하여 샤프트가 가상 경계를 초과하는 것을 제한하도록 매니퓰레이터를 제어하도록 구성된다.

[0019] 제12 양태에 따르면, 제11 양태에 따른 수술 시스템을 작동시키는 방법이 제공된다.

[0020] 상기한 양태들 중 임의의 양태는 부분적으로 또는 전체적으로 조합될 수 있다.

[0021] 상기한 양태들 중 임의의 양태에 대해, 다음의 구현예들 중 임의의 하나 이상이 개별적으로 또는 조합하여 고려된다:

[0022] 일부 구현예들에서, 적어도 하나의 제어기는 에너지 어플리케이터가 전진하는 속도로서 정의되는 공급 레이트를 결정하도록 구성된다.

[0023] 일부 구현예들에서, 적어도 하나의 제어기는 공급 레이트에 따라 복수의 명령된 위치들로 에너지 어플리케이터를 전진시키도록 매니퓰레이터를 제어하도록 구성된다.

[0024] 일부 구현예들에서, 원치 않은 배향 모션은 공급 레이트에 따른 에너지 어플리케이터의 전진 동안 일어난다.

[0025] 일부 구현예들에서, 매니퓰레이터는 운동학적 사슬의 일부인 복수의 링크들 및 조인트들을 포함한다.

[0026] 일부 구현예들에서, 공급 레이트는 특히 도구 경로를 따라 명령된 위치들에 따라 에너지 어플리케이터를 전진시키기 위한 것이다.

[0027] 일부 구현예들에서, 공급 레이트는 특히 반자율 동작 모드에서 에너지 어플리케이터를 전진시키기 위한 것이다.

[0028] 일부 구현예들에서, 적어도 하나의 제어기는 에너지 어플리케이터 이외의 운동학적 사슬의 하나 이상의 구성요소에 의해 경험된 또는 경험될 원치 않은 배향 모션의 크기에 상관되는 팩터만큼 공급 레이트를 감소시키도록 또한 구성됨으로써 원치 않은 배향 모션을 고려하여 공급 레이트를 변경한다. 일부 구현예들에서, 변경된 공급 레이트는 공급 레이트의 변경 전에 존재하는 공급 레이트의 속도보다 작은 제로가 아닌 속도이다.

[0029] 일부 구현예들에서, 적어도 하나의 제어기는 에너지 어플리케이터 이외의 운동학적 사슬의 하나 이상의 구성요소가 원치 않은 배향 모션을 경험하고 있거나 경험할 것임을, 또한: 원치 않은 배향 모션을 임계치 또는 범위와 비교하는 것; 그리고 원치 않은 배향 모션이 임계치 또는 범위를 만족시키는 것에 응답하여 원치 않은 배향 모션을 고려하여 공급 레이트를 변경하는 것에 의해, 식별하도록 구성된다.

[0030] 일부 구현예들에서, 적어도 하나의 제어기는: 공급 레이트에 따라 도구 경로를 따른 복수의 명령된 위치들로의 에너지 어플리케이터의 전진 동안 운동학적 사슬의 전방 운동학적 측정치들을 획득하도록; 그리고 전방 운동학적 측정치들을 평가하여, 에너지 어플리케이터 이외의 운동학적 사슬의 하나 이상의 구성요소가 원치 않는 배향 모션을 경험하고 있거나 경험할 것임을 식별하도록 구성된다.

[0031] 일부 구현예들에서, 비일시적인 컴퓨터 판독가능 매체는 운동학적 사슬의 하나 이상의 구성요소의 원치 않은 배향 모션을 나타내는 시뮬레이션 데이터를 저장하며, 시뮬레이션 데이터는 공급 레이트에 따라 도구 경로를 따른 복수의 명령된 위치들로 에너지 어플리케이터를 전진시키도록 반자율 모드에서 매니퓰레이터의 제어를 시뮬레이션하도록 구성된 수술 전 시뮬레이션으로부터 획득된다. 일부 구현예들에서, 적어도 하나의 제어기는: 비일시적인 컴퓨터 판독가능 매체로부터 시뮬레이션 데이터를 검색하도록; 시뮬레이션 데이터에 기초하여, 에너지 어플리케이터 이외의 운동학적 사슬의 하나 이상의 구성요소가 원치 않는 배향 모션을 경험하고 있거나 경험할 것임을 식별하도록 구성된다.

[0032] 일부 구현예들에서, 하나 이상의 센서는 운동학적 사슬의 임의의 하나 이상의 구성요소에 관련된 측정치들을 생성하도록 구성된다. 일부 구현예들에서, 하나 이상의 센서는 다음 중 임의의 하나 이상을 포함한다: 조인트들 중 어느 하나 이상에 결합되고, 조인트 위치, 조인트 속도, 및 조인트 가속도 중 어느 하나 이상을 감지하도록 구성된 센서들; 조인트들 중 어느 하나 이상의 조인트의 액추에이터들에 의해 인출되는 전류를 감지하도록 구성되는 전류 센서들; 운동학적 사슬의 어느 하나 이상의 구성요소에 결합된 추적기의 상태를 검출하도록 구성된 네비게이션 시스템; 및 운동학적 사슬의 어느 하나 이상의 구성요소의 모션을 검출하도록 구성된 비전 시스템. 일부 구현예들에서, 적어도 하나의 제어기는 측정치들을 분석하여, 에너지 어플리케이터 이외의 운동학적 사슬의 하나 이상의 구성요소가 원치 않는 배향 모션을 경험하고 있거나 경험할 것임을 식별하도록 구성된다.

[0033] 일부 구현예들에서, 적어도 하나의 제어기는: 운동학적 사슬의 임의의 하나 이상의 구성요소에 대한 관성 값들을 비일시적인 컴퓨터 판독가능 매체에 저장하도록; 그리고 일부 구현예들에서, 저장된 관성 값들을 이용하여, 에너지 어플리케이터 이외의 운동학적 사슬의 하나 이상의 구성요소가 원치 않는 배향 모션을 경험하고 있거나 경험할 것임을 식별하도록 구성된다. 일 구현예에서, 관성 값들은 회전 관성 값들이다. 일 구현예에서, 관성 값들은 병진 또는 선형 관성 값들이다.

[0034] 일부 구현예들에서, 반자율 모드에서 도구 경로를 따른 에너지 어플리케이터의 전진 동안, 적어도 하나의 제어기는 또한: 수술 도구의 재배향을 가능하게 하도록; 에너지 어플리케이터 이외의 운동학적 사슬의 하나 이상의 구성요소가 수술 도구의 재배향에 응답하여 또한 일어나는 원치 않은 배향 모션을 경험하고 있거나 경험할 것임을 식별하도록; 그리고 수술 도구의 재배향에 응답하여 또한 일어나는 원치 않은 배향 모션을 고려하여 공급 레이트를 변경하도록 구성된다. 일부 구현예들에서, 재배향은 사용자에 의해 개시된다. 다른 구현예들에서, 재배향은 본 시스템에 의해 개시된다.

[0035] 일부 구현예들에서, 적어도 하나의 제어기는: 운동학적 사슬의 하나 이상의 구성요소에 대해 하나 이상의 가상 촉각 객체를 연관시키도록; 가상 경계를 정의하도록; 하나 이상의 가상 촉각 객체와 가상 경계 사이의 충돌을 검출하도록; 충돌의 검출에 응답하여 가상 촉각 객체와 연관된 운동학적 사슬의 하나 이상의 구성요소가 가상 경계를 초과하는 것을 제한하도록 매니퓰레이터를 제어하도록; 에너지 어플리케이터 이외의 운동학적 사슬의 하나 이상의 구성요소가 충돌의 검출에 응답하여 운동학적 사슬의 하나 이상의 구성요소의 제한에 응답하여 또한 일어나는 원치 않은 배향 모션을 경험하고 있거나 경험할 것임을 식별하도록; 그리고 충돌의 검출에 응답하여 운동학적 사슬의 하나 이상의 구성요소를 제한하는 것에 응답하여 또한 일어나는 원치 않은 배향 모션을 고려하여 공급 레이트를 변경하도록 구성된다.

[0036] 일부 구현예들에서, 수술 도구는 샤프트, 및 샤프트의 원위 단부에 있는 에너지 어플리케이터를 포함하고, 적어도 하나의 제어기는: 원위 단부 이외의 샤프트 상의 위치들에서 수술 도구의 샤프트에 대해 가상 촉각 객체들 중 하나 이상을 연관시키도록; 수술 도구가 상호작용하는 수술 부위에 대해 가상 경계를 연관시키도록; 수술 부위의 가상 경계와 샤프트의 하나 이상의 가상 촉각 객체 사이의 충돌의 검출에 응답하여 샤프트가 가상 경계를 초과하는 것을 제한하도록 매니퓰레이터를 제어하도록; 샤프트가 원치 않은 배향 모션을 경험하고 있거나 경험할 것임을 식별하도록; 그리고 샤프트에 의해 경험된 또는 경험될 원치 않은 배향 모션을 고려하여 공급 레이트를 변경하도록 구성된다.

[0037] 일부 구현예들에서, 적어도 하나의 제어기는 수술 부위의 가상 경계와 샤프트의 하나 이상의 가상 촉각 객체 사이에서 일어나는 침투를 평가하도록 또한 구성됨으로써 샤프트가 원치 않은 배향 모션을 경험하고 있거나 경험할 것임을 식별하도록 구성된다. 일부 구현예들에서, 가상 경계와 하나 이상의 가상 촉각 객체 사이에서 일어나는 침투의 값/크기가 평가될 수 있고, 이 평가에 응답하여 공급 레이트가 조정될 수 있다.

[0038] 일부 구현예들에서, 원치 않은 배향 모션을 고려한 공급 레이트의 변경에 응답하여, 적어도 하나의 제어기는: 에너지 어플리케이터 이외의 운동학적 사슬의 하나 이상의 구성요소가 더 이상 원치 않은 배향 모션을 경험하고 있지 않거나 더 이상 경험하지 않을 것임을 식별하고, 이에 응답하여, 공급 레이트의 변경 전 기존의 또는 변경 후 계획된 공급 레이트를 복구하거나 재개하도록 구성된다.

[0039] 일부 구현예들에서, 원치 않은 배향 모션은 에너지 어플리케이터 이외의 운동학적 사슬의 임의의 하나 이상의 구성요소에 의해 경험된 또는 경험될 각속도, 각가속도, 또는 각가가속도 중 원치 않은 하나 이상으로서 또한 정의된다.

[0040] 일부 구현예들에서, 수술 도구는 샤프트, 및 샤프트의 원위 단부에 있는 에너지 어플리케이터를 포함하며, 에너지 어플리케이터는 컷팅 버(cutting bur)로서 또한 정의되는 것이다.

[0041] 일부 구현예들에서, 적어도 하나의 제어기는: 수술 기구 및 에너지 어플리케이터를 가상 강체로서 모델링하도록; 그리고 가상 강체에 인가되는 가상 힘에 기초하여 원치 않은 배향 모션을 고려하여 기구 공급 레이트를 변경하도록 구성된다.

[0042] 일부 구현예들에서, 적어도 하나의 제어기는: 복수의 변수들 — 변수들은: 에너지 어플리케이터가 적용되는 공간의 형상; 에너지 어플리케이터의 유형; 환자 건강; 에너지 어플리케이터가 적용되는 조직의 성질; 및 도구 경로의 경로 세그먼트의 기하학적 구조 중 하나 이상을 포함함 — 에 기초하여 공급 레이트를 계산하도록 구성된다.

[0043] 일부 구현예들에서, 원치 않은 배향 모션을 고려하여 공급 레이트를 변경하는 것에 더하여, 적어도 하나의 제어기는 또한, 기구 공급 레이트의 사용자 조정; 에너지 어플리케이터가 노출되는 힘 및 토크; 도구 경로의 경로 세그먼트의 곡률; 기구 동력; 조직 온도; 및 환자 또는 해부학적 구조 추적기에 인가되는 외력 또는 이의 움직임 중 임의의 하나 이상에 기초하여 결정된 기구 공급 레이트를 조정하도록 구성된다.

[0044] 일부 구현예들에서, 공급 레이트의 변경 동안, 에너지 어플리케이터는 선형이고 만곡되지 않은 도구 경로의 세그먼트를 따라 전진하고 있다.

[0045] 일부 구현예들에서, 하나 이상의 제어기는 추가적으로, 또는 대안적으로 공급 레이트(feed rate, FR)를 변경하는 방식으로 매니퓰레이터의 거동을 변경함으로써 원치 않은 배향 모션을 완화시킨다. 일부 구현예들에서, 하나 이상의 제어기는 예측적으로 또는 동적으로: 예를 들어, 영공간(null-space) 내에서 조인트 모션, 조인트 한계들, 또는 조인트 자세들을 조작하고; 도구의 궤적을 변경하고; 도구 경로를 수정하고; 가상 경계들 또는 다른 제약들을 조정하고; 사용자에 의한 재배향, 역구동, 또는 공급 레이트 조정과 같은 로봇 기능들을 금지할 수 있는 등이다.

[0046] 상기한 구현예들 중 임의의 구현예는 상기한 양태들 중 임의의 양태의 임의의 부분과 조합하여 또는 개별적으로 이용될 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0047] 본 개시의 이점들은 첨부 도면들과 관련하여 고려될 때 다음의 상세한 설명을 참조하여 더 잘 이해되는 바와 같이 쉽게 인식될 것이다.

도 1은 로봇 수술 시스템의 일 구현예의 사시도이다.

도 2는 각 링크들, 조인트들 및 이에 결합된 엔드 이펙터 및 도구를 도시하는 로봇 수술 시스템의 매니퓰레이터의 일 구현예의 레이아웃이다.

도 3은 도구 및 그 에너지 어플리케이터를 포함하는 매니퓰레이터의 구성요소들에 의해 형성된 운동학적 사슬의 일 구현예의 개략도이다.

도 4는 일 구현예에 따른, 로봇 수술 시스템을 제어하기 위한, 구성요소들 및 제어기들을 포함하는, 제어 시스템의 블록도이다.

도 5는 일 구현예에 따른, 로봇 수술 시스템에 의해 이용되는 소프트웨어 프로그램의 기능 블록도이다.

도 6은 일 구현예에 따른, 소프트웨어 프로그램의 경계 생성기의 예시적인 출력을 도시한다.

도 7은 일 구현예에 따른, 소프트웨어 프로그램의 경로 생성기의 예시적인 출력을 도시한다.

도 8은 에너지 어플리케이터의 공급 레이트를 결정하기 위해 경로 생성기에 의해 이용될 수 있는 가변 입력들의 블록도이다.

도 9는 에너지 어플리케이터가 명령된 위치들 사이에서 도구 경로의 경로 세그먼트를 따라 전진되는 것의 일례를 도시하며, 여기서 에너지 어플리케이터에 대한 공급 레이트가 경로 세그먼트들에 대해 정의된다.

도 10은 운동학적 사슬의 특정 비-도구 경로 구성요소들이 예를 들어, 정의된 공급 레이트에 따른 에너지 어플리케이터의 전진에 기초하여 일어나는 원치 않은 배향 모션을 경험하는 것의 예를 개략적으로 도시한다.

도 11은 일 구현예에 따른, 특정 비-도구 경로 구성요소들의 원치 않은 배향 모션을 완화시키기 위한, 에너지 어플리케이터가 다음 명령된 위치에 도달하기 전, 도 10의 에너지 어플리케이터의 공급 레이트의 감소를 개략적으로 도시한다.

도 12는 운동학적 사슬의 특정 비-도구 경로 구성요소들이 예를 들어, 정의된 공급 레이트에 따른 에너지 어플리케이터의 전진에 기초하여 일어나는 원치 않은 배향 모션을 경험하는 것의 다른 예를 개략적으로 도시한다.

도 13은 일 구현예에 따른, 특정 비-도구 경로 구성요소들의 원치 않은 배향 모션을 완화시키기 위한, 에너지 어플리케이터가 다음 명령된 위치에 도달한 후, 도 12의 에너지 어플리케이터의 공급 레이트의 감소를 개략적으로 도시한다.

도 14는 운동학적 사슬의 비-도구 경로 구성요소들의 원치 않은 배향 모션의 존재 또는 예상되는 존재에 영향을

주는 팩터들의 블록도이다.

도 15는 샤프트와 연관된 가상 촉각 객체를 포함하는 도구의 샤프트의 예를 개략적으로 도시하며, 여기서 가상 촉각 객체와 가상 경계 사이의 충돌에 응답하여 반력이 생성된다.

도 16은 일 구현예에 따라, 원치 않은 배향 모션을 완화하기 위한 공급 레이트의 감소 및 경계 충돌로부터의 반력에 응답하여 도 15의 샤프트에 의해 경험되는 원치 않은 배향 모션을 개략적으로 도시한다.

도 17은 에너지 어플리케이터가 공급 레이트에 따라 도구 경로를 따라 전진할 때 매니퓰레이터의 재배향의 예를 개략적으로 도시한다.

도 18은 일 구현예에 따른, 원치 않은 배향 모션을 완화하기 위한 공급 레이트의 감소 및 재배향에 응답하여 도 17의 운동학적 사슬의 특정 비-도구 경로 구성요소들에 의해 경험되는 원치 않은 배향 모션을 개략적으로 도시한다.

도 19는 현재의 또는 예상되는 원치 않은 배향 모션을 고려하여 에너지 어플리케이터의 공급 레이트를 변경하기 위해 로봇 수술 시스템에 의해 이용되는 알고리즘의 일 구현예를 도시하는 흐름도이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0048] I. 시스템 개관

[0049] 도 1을 참조하면, 로봇 수술 시스템(10)이 도시되어 있다. 시스템(10)은 골 또는 연조직을 치료하는 것과 같은 환자(12)의 수술 부위 또는 해부학적 체적(A)을 치료하는 데 유용하다. 도 1에서, 환자(12)는 수술을 받고 있다. 도 1의 해부학적 구조는 환자(12)의 대퇴골(F) 및 경골(T)을 포함한다. 수술 절차는 조직 제거 또는 다른 형태의 치료를 수반할 수 있다. 치료는 절단, 응고, 조직의 병변, 다른 인 시튜 조직 치료 등을 포함할 수 있다. 일부 예들에서, 수술 절차는 부분 또는 전체 무릎 또는 엉덩 관절 치환 수술, 견관절 치환 수술, 척추 수술, 또는 발목 수술을 포함한다. 일부 예들에서, 시스템(10)은 단일구획, 이중구획, 다중구획, 또는 전체 무릎 임플란트를 포함하는 둔부 및 무릎 임플란트와 같은 수술 임플란트에 의해 교체될 물질을 잘라내도록 설계된다. 이러한 유형의 임플란트 중 일부는 본원에 원용되는 발명의 명칭이 "Prosthetic Implant and Method of Immplantation"인 미국 특허 출원 공개 제2012/0330429호에 나타나 있다. 본원에서 개시된 시스템(10) 및 기술은 다른 절차, 수술 또는 비-수술을 수행하기 위해 사용될 수 있거나, 또는 로봇 시스템이 이용되는 산업 애플리케이션 또는 다른 애플리케이션에서 사용될 수 있다.

[0050] 도 1 내지 도 3에 도시된 바와 같이, 시스템(10)은 매니퓰레이터(14)를 포함한다. 매니퓰레이터 카트(17)(도 1에 도시된 바와 같이)는 매니퓰레이터(14)를 지지할 수 있으며, 이에 따라, 매니퓰레이터(14)는 매니퓰레이터 카트(17)에 고정된다. 매니퓰레이터(14)는 베이스(16) 및 복수의 링크들(18a-18n)을 갖는다. 일례에서, 인접한 링크들(18)의 쌍들은 조인트들(J) 중 하나에 의해 연결된다. 링크(18)는 집합적으로 매니퓰레이터(14)의 하나 이상의 아암(들)(23)을 형성한다. 매니퓰레이터(14)는 직렬 아암 구성(도 1 내지 도 3에 도시된 바와 같은), 병렬 아암 구성, 또는 임의의 다른 적절한 매니퓰레이터 구성을 가질 수 있다. 다른 예에서, 하나 이상의 매니퓰레이터(14)가 다중 아암 구성에서 이용될 수 있다. 일례에 따른 매니퓰레이터(14)는 매니퓰레이터(14)에 대해 적어도 6 자유도(DOF)를 구현하는 6개의 조인트들(J1-J6)을 갖는다. 매니퓰레이터(14)는 임의의 수의 자유도를 가질 수 있고, 임의의 적절한 수의 조인트(J)를 가질 수 있으며, 여분의 조인트를 가질 수 있다.

[0051] 각 조인트(J)에서, 인접한 링크(18)들 사이에 배치된 조인트 모터(27)와 같은 액추에이터가 있을 수 있다(도 2 참조). 조인트 모터(27)는 링크(18)를 회전시키도록 구성된다. 이와 같이, 링크(18)의 위치는 조인트 모터(27)에 의해 설정된다. 각 조인트 모터(27)는 매니퓰레이터(14) 내부의 구조적 프레임에 부착될 수 있다. 일례에서, 조인트 모터(27)는 영구 자석 브러시리스 모터와 같은 서보 모터이다. 조인트 모터(27)는 동기 모터, 브러시형 DC 모터, 스테퍼 모터, 유도 모터 등과 같은 다른 구성을 가질 수 있다.

[0052] 조인트 모터(27)는 복수의 각도 위치(이하, 조인트 각도라고 함) 중 하나에 위치된다. 조인트 각도는 인접한 링크들(18) 사이의 조인트(J)의 각도이다. 각 조인트(J)는 조인트 토크를 받도록 구성될 수 있다. 조인트 토크는 조인트(J)의 선회 또는 비틀림 "힘"이며, 조인트(J)의 피벗 포인트로부터의 길이에 가해지는 힘의 함수이다. 조인트(J)의 조인트 토크를 측정하기 위해 하나 이상의 조인트 모터(27)에 토크 센서가 연결될 수 있다. 대안적으로, 조인트 토크를 측정하기 위해 조인트 모터(27)에 인가되는 전류를 나타내는 신호가 사용될 수 있다.

[0053] 하나 이상의 조인트 모터(27)는 위치 센서 또는 인코더(19)를 구비할 수 있다. 간략화를 위해, 하나의 조인트

인코더(19)가 도 1에 도시되어 있지만, 다른 조인트 인코더들(19)이 유사하게 도시되어 있을 수 있다. 대안적으로, 그 조인트 모터(27)에 의해 구동되는 하나 이상의 링크(18)는 위치 센서 또는 인코더(19)를 구비할 수 있다. 인코더(19)는 각 조인트(J)의 조인트 각도를 측정할 수 있다. 일부 실시예들에서, 두 개의 인코더들, 즉 이동되는 링크(18)에 대한 하나의 인코더 및 조인트 모터(27)에 대한 하나의 인코더는 이를테면 조인트 각도를 평균화함으로써 조인트 각도를 결정하도록 사용될 수 있고, 컴플라이언트 트랜스미션을 통한 조인트와 조인트 모터(27) 사이의 변위를 평균화한다. 매니퓰레이터(14)는 조인트 인코더(19)를 필요로 하지 않고, 대안적으로 또는 추가적으로 하나 이상의 조인트(J)에서 조인트 모터(27) 상에 존재하는 모터 인코더를 이용할 수 있다. 또한, 매니퓰레이터(14)는 회전 조인트를 필요로 하지 않고, 대안적으로 또는 추가적으로 하나 이상의 프리즘 조인트를 이용할 수 있다. 특정 조인트(J)는 수동적으로 이동가능하고 잠금가능할 수 있는 반면, 다른 조인트(J)는 능동적으로 구동될 수 있다. 조인트 유형의 임의의 적합한 조합이 고려된다.

[0054] 도 1을 참조하면, 매니퓰레이터(14)의 베이스(16)는 일반적으로 매니퓰레이터(14) 또는 시스템(10)의 다른 구성요소들을 위한 고정된 기준 좌표계를 제공하는 매니퓰레이터(14)의 일부분이다. 일반적으로, 매니퓰레이터 좌표계(MNPL)의 원점은 베이스(16)의 고정된 기준에서 정의된다. 베이스(16)는 하나 이상의 링크(18)와 같은 매니퓰레이터(14)의 임의의 적절한 부분에 대해 정의될 수 있다. 대안적으로, 또는 추가적으로, 베이스(16)는 매니퓰레이터(14)가 매니퓰레이터 카트(17)에 물리적으로 부착되는 경우와 같이, 매니퓰레이터 카트(17)에 대해 정의될 수 있다. 일례에서, 베이스(16)는 조인트(J1, J2)의 축의 교차점에 형성된다. 이에 따라, 조인트들(J1 및 J2)이 실제로 이동하는 구성요소들임에도 불구하고, 조인트들의 축들의 교차점은 그럼에도 불구하고 가상의 고정된 기준 자세이며, 이는 고정된 위치 및 방향 기준 둘 다를 제공하고 매니퓰레이터(14) 및/또는 매니퓰레이터 카트(17)에 대해 이동하지 않는다. 다른 예들에서, 매니퓰레이터(14)는 베이스(16)가 도구의 베이스 부분(예를 들어, 사용자에 의해 손으로 잡히거나 또는 셋업 링키지에 결합된 부분)이고 도구 팁이 베이스 부분에 대해(예를 들어, 반자율적으로)이동가능한 핸드헬드 매니퓰레이터일 수 있다. 베이스 부분은 추적되는 기준 좌표계를 갖고, 도구 팁은 기준 좌표계에 대해(예를 들어, 모터 및/또는 조인트 인코더들 및 전방 운동학적 계산들을 통해) 계산되는 도구 팁 좌표계를 갖는다. 도구 팁의 이동은 경로에 대한 자세가 결정될 수 있기 때문에 경로를 따르도록 제어될 수 있다. 이러한 핸드-헬드 구성은 "Surgical Instrument including Somes, Cutting Accessory that Extends from the Some and Actuators hetst the Position of the Cutrating Accessory relation to the Sheet"라는 명칭의 미국 특허 제9,707,043호에 기술된 것과 같을 수 있으며, 이의 전체 내용이 이에 의해 본원에 원용된다.

[0055] 도구(20)는 매니퓰레이터(14)에 결합되고, 특정 모드들에서 해부학적 구조와 상호작용하도록 베이스(16)에 대해 이동가능하다. 도구(20)는 물리적 및 수술 도구이고, 특정 실시예에서 매니퓰레이터(14)에 의해 지지되는 엔드 이펙터(22)이거나 엔드 이펙터(22)의 일부를 형성한다. 도구(20)는 사용자에 의해 파지될 수 있다. 매니퓰레이터(14) 및 도구(20)의 하나의 가능한 배치는 발명의 명칭이 "Surgical Manipulator Capable of Controlling a Surgeical Instrument in Multiple Modes"인 미국 특허 제9,119,655호에 기술되어 있으며, 이의 개시는 이에 의해 본원에 원용된다. 매니퓰레이터(14) 및 도구(20)는 대안적인 구성으로 배열될 수 있다. 도구(20)는 2014년 3월 15일에 출원된, "End Effector of a Surgical Robotic Manipulator"의 미국 특허 출원 공개 번호 2014/0276949에 도시된 것과 같을 수 있다.

[0056] 도구(20)는 수술 부위에서 환자(12)의 조직과 접촉하여 이를 제거하도록 설계된 에너지 어플리케이터(24)를 포함한다. 일례에서, 에너지 어플리케이터(24)는 버(25) 또는 수술용 커터이다. 도구(20)는 매니퓰레이터(14)에 결합된 근위 단부 및 에너지 어플리케이터(24)가 위치되는 원위 단부를 갖는 도구 샤프트(33)를 포함할 수 있다. 도구 샤프트(33)는 에너지 어플리케이터(24)가 조직을 조작할 수 있도록 절단 축을 중심으로 회전한다. 버(25)는 실질적으로 구형일 수 있고 구형 중심, 반경(r) 및 직경을 포함한다. 대안적으로, 에너지 어플리케이터(24)는 드릴 비트, 톱날, 초음파 진동 팁 등일 수 있다. 도구(20) 및/또는 에너지 어플리케이터(24)는 임의의 기하학적 특징, 예를 들어, 둘레, 원주, 반경, 직경, 폭, 길이, 체적, 면적, 표면/평면,(임의의 하나 이상의 축을 따른) 모션 엔벨로프의 범위 등을 포함할 수 있다. 기하학적 특징은 원하는 치료를 수행하기 위해 수술 부위에서 조직에 대해 도구(20)를 위치시키는 방법을 결정하기 위해 고려될 수 있다. 본원에서 설명된 일부 실시예들에서, 도구 중심점(TCP)을 갖는 구형 버는 설명의 편의 및 용이함을 위해 설명될 것이지만, 도구(20)를 임의의 특정 형태로 제한하려는 것은 아니다.

[0057] 매니퓰레이터(14)의 일례가 도 2에 도시되어 있다. 이 예에서, 매니퓰레이터(14)는 직렬 아암 구성을 갖는다. 보다 구체적으로, 매니퓰레이터(14)는 5개의 링크(18a, 18b, 18c, 18d, 18e)를 포함하고, 링크(18a)는 베이스(16)에 가장 근접하고 링크(16e)는 베이스(16)에 가장 말단이다. 도 2의 매니퓰레이터(14)는 또한 J1, J2, J3,

J4, J5, J6으로 식별되는 6개의 조인트를 포함한다. 조인트(J1)는 베이스(16)와 링크(18a) 사이에 배치된다. 조인트(J2)는 링크(18a)와 링크(18b) 사이에 배치된다. 조인트(J3)는 링크(18b)와 링크(18c) 사이에 배치된다. 조인트(J4)는 링크(18c)와 링크(18d) 사이에 배치된다. 조인트(J5)는 링크(18d)와 링크(18e) 사이에 배치된다. 조인트(J6)는 링크(18e)와 엔드 이펙터(22) 사이에 배치된다. 도 2의 매니퓰레이터(14)가 직렬 아암이기 때문에, 임의의 하나의 조인트(J1-J6)의 이동은 하류의 모든 링크들(즉, 이동된 조인트로부터 매니퓰레이터의 원위 단부까지의 모든 링크)로의 움직임을 야기한다.

[0058] 각 조인트(J1-J6)는 그 자신의 개별 축(A1, A2, A3, A4, A5, A6)을 중심으로 각각 회전하도록 구성된다. 6개의 조인트(J1-J6)를 가짐으로써, 매니퓰레이터(14)는 6 자유도(DOF)로 자유롭게 이동한다. 즉, 매니퓰레이터(14)는 세 수직 축들을 따라 전/후, 상/하, 그리고 좌/우로 병진하여 자유롭게 움직인다. 매니퓰레이터(14)는 또한 보통 피치(pitch), 요(yaw) 및 롤(roll)로 지칭되는 3개의 수직 축들에 대한 회전 움직임을 통해 배향을 자유롭게 변경한다. 당업자는 매니퓰레이터(14)가 도구(20)가 그 자신의 축을 중심으로 회전될 필요가 있는지 여부와 같은 팩터에 따라 5DOF의 이동을 구현할 수 있다는 것을 이해할 것이다. 예를 들어, 버링(burring)할 때, 매니퓰레이터(14)는 버가 별도로 회전하기 때문에 5DOF에서 작동할 수 있다. 이러한 경우에, 조인트의 수가 요구되는 자유도의 수보다 크기 때문에 중복성이 있다. 톱질할 때, 매니퓰레이터(14)는 6DOF에서 작동할 수 있다.

[0059] 베이스(16)에 위치된 조인트(J1)는 허리의 회전과 유사한 움직임을 일으킨다. 축 A1을 중심으로 회전함으로써, 조인트(J1)는 매니퓰레이터(14)를 좌에서 우로 회전할 수 있게 한다. 조인트(J2)는 어깨의 회전과 같은 움직임을 일으킨다. 축 A2를 중심으로 회전함으로써, 조인트(J2)는 매니퓰레이터(14)를 앞뒤로 연장할 수 있게 한다. 조인트(J3)는 팔꿈치의 굽힘과 같은 움직임을 일으킨다. 축 A3를 중심으로 회전함으로써, 조인트(J3)는 매니퓰레이터(14)가 상승 및 하강할 수 있게 한다. 조인트(J4)는 손목의 비틀림과 같은 움직임을 일으킨다. 축 A4를 중심으로 회전함으로써, 조인트(J4)는 매니퓰레이터(14)가 상부 링크(18d, 18e)를 원형 모션으로 회전시켜 도구(20)의 배향을 변경할 수 있게 한다. 조인트(J5)는 손목의 굽힘과 같은 움직임을 일으킨다. 축 A5를 중심으로 회전함으로써, 조인트(J5)는 링크(18e) 및 수술 도구(20)가 상하로 기울어질 수 있게 하고, 피치 및 요 모션을 담당한다. J4와 같이, 조인트(J6)는 손목의 비틀림과 유사한 움직임을 일으킨다. 조인트(J6)는 도구(20)의 더 정확한 제어를 허용하기 위해 축 A6를 중심으로 회전한다.

[0060] 도 3을 참조하면, 운동학적 사슬(KC)은 베이스(16), 복수의 링크들(18) 및 조인트(J)와 같은 임의의 견고하게 부착된 구성요소를 포함하는 매니퓰레이터(14), 샤프트(33)(적용가능한 경우) 및 에너지 어플리케이터(24)를 포함하는 도구(20)에 의해 형성된다. 엔드 이펙터(22)는 또한 운동학적 사슬(KC)의 일부일 수 있다. 또한, 매니퓰레이터(14)와 엔드 이펙터(22) 사이에 결합된 임의의 장착 시스템 또는 살균 인터페이스는 운동학적 사슬(KC)의 일부일 수 있다. 운동학적 사슬(KC)의 일부일 수 있는 장착 시스템 및/또는 살균 인터페이스 메커니즘의 일례는 “Mounting System With Sterile Barrier Assembly For Use In Coupling Surgical Components”라는 명칭의 미국 특허출원 공개 US 2020/0170724A1호에 설명되어 있으며, 이의 전체 내용은 본원에 원용된다. 본원에서 사용될 때, 용어 "운동학적 사슬"은 조인트에 의해 연결된 강체의 조립체이며, 여기서 강체의 강성은 강체의 운동학이 수학적 모델을 사용하여 사슬 내의 다른 강체에 대해 결정되고 관련될 수 있도록 제한된 모션을 가능하게 한다. 도 3의 예에서, 운동학적 사슬(KC)은 적어도 하나의 링크가 기계적으로 접지되기 때문에 "메커니즘"을 더 형성한다.

[0061] 도 2에 도시된 바와 같이, 힘-토크 센서와 같은 센서(S)는 원위 링크(18e)와 엔드 이펙터(22) 사이에 장착될 수 있다. 힘-토크 센서(S)는 엔드 이펙터(22) 및/또는 도구(20)가 노출되는 힘 및/또는 토크의 함수로서 가변 신호들을 출력하도록 구성된다. 그렇게 함으로써, 힘-토크 센서(S)는 사용자에 의해 엔드 이펙터(22) 및/또는 도구(20)에 인가되는 입력 힘의 감지를 허용한다. 입력 힘은 사용자의 인가된 힘/토크를 에뮬레이트하기 위해 매니퓰레이터(14)의 이동을 제어하는데 이용될 수 있다. 힘-토크 센서(S)는 또한 에너지 어플리케이터(24)에 인가되는 외력을 감지할 수 있다. 일 구현예에서, 힘-토크 센서(S)는 6DOF 센서이어서 힘- 토크 센서(S)는 3개의 상호 직교하는 힘 및 도구(20)에 인가되는 직교하는 힘의 축들에 대한 3개의 토크를 나타내는 신호들을 출력하도록 구성된다. 추가적으로 또는 대안적으로, 엔드 이펙터(22) 및/또는 도구(20)에 인가되는 입력 힘은 조인트 모터들(27) 상의 조인트 토크 또는 전류 센서들을 사용하여 결정될 수 있다.

[0062] 도 1을 참조하면, 매니퓰레이터(14) 및/또는 매니퓰레이터 카트(17)는 매니퓰레이터 제어기(26) 또는 다른 유형의 제어 유닛을 수용할 수 있다. 매니퓰레이터 제어기(26)는 하나 이상의 컴퓨터, 또는 매니퓰레이터(14)의 모션을 지시하는 임의의 다른 적절한 형태의 제어기를 포함할 수 있다. 매니퓰레이터 제어기(26)는 중앙 처리 유닛(CPU) 및/또는 다른 프로세서, 메모리(도시되지 않음), 및 저장소(도시되지 않음)를 가질 수 있다. 매니퓰레이터 제어기(26)에는 후술하는 바와 같이 소프트웨어가 로딩된다. 프로세서는 매니퓰레이터(14)의 동작을 제어

하기 위한 하나 이상의 프로세서를 포함할 수 있다. 프로세서들은 임의의 유형의 마이크로프로세서, 멀티-프로세서, 및/또는 멀티-코어 처리 시스템일 수 있다. 매니퓰레이터 제어기(26)는 추가적으로 또는 대안적으로, 하나 이상의 마이크로 제어기들, 필드 프로그래머블 게이트 어레이들, 시스템 온 칩, 이산 회로, 및/또는 본원에서 설명된 기능들을 수행할 수 있는 다른 적합한 하드웨어, 소프트웨어, 또는 펌웨어를 포함할 수 있다. 프로세서라는 용어는 임의의 구현을 단일 프로세서로 제한하도록 의도되지 않는다. 매니퓰레이터(14)는 또한 하나 이상의 디스플레이들 및/또는 입력 디바이스들(예를 들어, 푸시 버튼들, 키보드, 마우스, 마이크로폰(음성 활성화), 제스처 제어 디바이스들, 터치스크린들 등)을 갖는 사용자 인터페이스 UI를 포함할 수 있다.

[0063] 도구(20)는 도구에 대한(예를 들어, 도구(20)의 회전 모터에 대한) 전력을 제어하는 것, 도구(20)의 이동을 제어하는 것 및/또는 도구(20)의 세척/흡인을 제어하는 것과 같은 도구(20)의 동작을 제어하는 도구 제어기(21)를 포함할 수 있다. 도구 제어기(21)는 매니퓰레이터 제어기(26) 또는 다른 구성요소와 통신할 수 있다. 도구(20)는 또한 하나 이상의 디스플레이들 및/또는 입력 디바이스들(예를 들어, 푸시 버튼들, 키보드, 마우스, 마이크로폰(음성 활성화), 제스처 제어 디바이스들, 터치스크린들 등)을 갖는 사용자 인터페이스 UI를 포함할 수 있다. 매니퓰레이터 제어기(26)는 매니퓰레이터 좌표계(MNPL)와 같은 좌표계에 대해 도구(20)(예를 들어, TCP)의 상태(위치 또는 방향)를 제어한다. 매니퓰레이터 제어기(26)는 도구(20)의 모션의 (선형 또는 각) 속도, 가속도, 또는 다른 도함수를 제어할 수 있다.

[0064] 일례에서, 도구 중심점(TCP)은 에너지 어플리케이터(24)에서 정의된 미리 결정된 기준점이다. TCP는 다른 좌표계에 대해, 알려진, 또는 계산될 수 있는(즉, 반드시 정적인 것은 아님) 자세를 갖는다. 에너지 어플리케이터(24)의 기하학적 구조는 TCP 좌표계에 대해 알려지거나 정의된다. TCP는 하나의 포인트가 추적되도록 도구(20)의 버(25)의 구형 중심에 위치될 수 있다. TCP는 에너지 어플리케이터(24)의 구성에 따라 다양한 방식으로 정의될 수 있다. 매니퓰레이터(14)는 TCP의 자세가 결정될 수 있도록 조인트/모터 인코더 또는 임의의 다른 비-인코더 위치 감지 방법을 채용할 수 있다. 매니퓰레이터(14)는 TCP 자세를 결정하기 위해 조인트 측정을 사용할 수 있고, 및/또는 직접적으로 TCP 자세를 측정하는 기술을 이용할 수 있다. 도구(20)의 제어는 중심점에 제한되지 않는다. 예를 들어, 임의의 적절한 프리미티브, 메시 등이 도구(20)를 표현하기 위해 사용될 수 있다.

[0065] 도 1에 도시된 바와 같이, 시스템(10)은 네비게이션 시스템(32)을 더 포함할 수 있다. 네비게이션 시스템(32)의 일례는 2013년 9월 24일에 출원된 "Navigation System Including Optical and Non-Optical Sensors"이라는 명칭의 미국 특허 제9,008,757호에 기술되어 있으며, 이에 의해 본원에 원용된다. 네비게이션 시스템(32)은 다양한 객체들의 움직임을 추적한다. 이러한 객체들은 예를 들어, 매니퓰레이터(14), 도구(20) 및 해부학적 구조, 예를 들어, 대퇴골(F) 및 경골(T)을 포함한다. 네비게이션 시스템(32)은 (네비게이션) 로컬라이저 좌표계 LCLZ에 대한 객체들의 상태 정보를 수집하기 위해 이들 객체들을 추적한다. 로컬라이저 좌표계(LCLZ)에서의 좌표는 변환을 이용하여 매니퓰레이터 좌표계(MNPL)로 변환될 수 있고, 및/또는 그 반대로 변환될 수 있다.

[0066] 네비게이션 시스템(32)은 네비게이션 제어기(36) 및/또는 다른 유형의 제어 유닛을 수용하는 카트 조립체(34)를 포함한다. 네비게이션 사용자 인터페이스(UI)는 네비게이션 제어기(36)와 동작적으로 통신한다. 네비게이션 사용자 인터페이스는 하나 이상의 디스플레이(38)를 포함한다. 네비게이션 시스템(32)은 하나 이상의 디스플레이들(38)을 사용하여 추적된 객체들의 상대적 상태들의 그래픽 표현을 사용자에게 디스플레이할 수 있다. 네비게이션 사용자 인터페이스(UI)는 네비게이션 제어기(36)에 정보를 입력하거나 또는 그렇지 않으면 네비게이션 제어기(36)의 특정 양태들을 선택/제어하기 위한 하나 이상의 입력 디바이스들을 더 포함한다. 이러한 입력 디바이스들은 대화형 터치스크린 디스플레이들을 포함한다. 입력 디바이스들은 푸시 버튼들, 키보드, 마우스, 마이크로폰(음성 활성화), 제스처 제어 디바이스들 등 중 임의의 하나 이상을 포함할 수 있다.

[0067] 네비게이션 시스템(32)은 네비게이션 제어기(36)에 결합된 네비게이션 로컬라이저(44)를 또한 포함한다. 일례에서, 로컬라이저(44)는 광학 로컬라이저이고 카메라 유닛(46)을 포함한다. 카메라 유닛(46)은 하나 이상의 광학 센서(50)를 수용하는 외부 케이싱(48)을 갖는다. 로컬라이저(44)는 그 자신의 로컬라이저 제어기(49)를 포함할 수 있고, 비디오 카메라(VC)를 더 포함할 수 있다.

[0068] 네비게이션 시스템(32)은 하나 이상의 추적기를 포함한다. 일례에서, 추적기들은 포인터 추적기(PT), 하나 이상의 매니퓰레이터 추적기들(52A, 52B), 제1 환자 추적기(54), 및 제2 환자 추적기(56)를 포함한다. 도 1의 도시된 예에서, 매니퓰레이터 추적기는 도구(20)(즉, 추적기(52A))에 견고하게 부착되고, 제1 환자 추적기(54)는 환자(12)의 대퇴골(F)에 견고하게 부착되며, 제2 환자 추적기(56)는 환자(12)의 경골(T)에 견고하게 부착된다. 이 예에서, 환자 추적기(54, 56)는 골의 섹션에 견고하게 부착된다. 포인터 추적기(PT)는 해부학적 구조를 로컬라이저 좌표계(LCLZ)에 정합하기 위해 사용되는 포인터(P)에 견고하게 부착된다. 매니퓰레이터 추적기(52A, 52B)

는 베이스(16)(즉, 추적기(52)B), 또는 매니퓰레이터(14)의 임의의 하나 이상의 링크들(18)과 같은 도구(20)에 추가하여, 또는 그 외의, 매니퓰레이터(14)의 임의의 적절한 구성요소에 부착될 수 있다. 추적기들(52A, 52B, 54, 56, PT)은 임의의 적절한 방식으로 그들 각 구성요소들에 고정될 수 있다. 예를 들어, 추적기들은 그것이 연관되는 객체에 대한 그 각 추적기의 관계(측정치)를 결정하기 위한 적절한 (보충적인) 방식이 존재하는 한, 견고하게 고정되거나, 유연하게 연결되거나(광 섬유), 또는 전혀 물리적으로 연결되지 않을 수 있다(초음파).

[0069] 임의의 하나 이상의 추적기는 활성 마커(58)를 포함할 수 있다. 활성 마커(58)는 발광 다이오드(LED)를 포함할 수 있다. 대안적으로, 추적기들(52A, 52B, 54, 56, PT)은 카메라 유닛(46)으로부터 방출된 광을 반사하는 반사기들과 같은 수동 마커들을 가질 수 있다. 본원에서 구체적으로 기술되지 않은 다른 적합한 마커가 이용될 수 있다.

[0070] 로컬라이저(44)는 추적기들(52A, 52B, 54, 56, PT)를 추적하여 추적기들에 각각 부착된 객체의 상태에 각각 대응하는 추적기들(52A, 52B, 54, 56, PT)의 상태를 결정한다. 로컬라이저(44)는 추적기들(52, 54, 56, PT) 및 연관된 객체들의 상태들을 결정하기 위해 알려진 삼각측량 기술들을 수행할 수 있다. 로컬라이저(44)는 추적기들(52A, 52B, 54, 56, PT)의 상태를 네비게이션 제어기(36)에 제공한다. 일례에서, 네비게이션 제어기(36)는 추적기들(52A, 52B, 54, 56, PT)의 상태를 결정하여 매니퓰레이터 제어기(26)에 전달한다. 본원에서 사용될 때, 객체의 상태는 추적된 객체의 위치 및/또는 배향 또는 위치 및 또는 배향의 등가물/미분을 정의하는 데이터를 포함하지만, 이에 제한되지 않는다. 예를 들어, 상태는 객체의 자세일 수 있고, 선형 속도 데이터, 및/또는 각속도 데이터 등을 포함할 수 있다.

[0071] 네비게이션 제어기(36)는 하나 이상의 컴퓨터 또는 임의의 다른 적절한 형태의 제어기를 포함할 수 있다. 네비게이션 제어기(36)는 중앙 처리 유닛(CPU) 및/또는 다른 프로세서, 메모리(도시되지 않음), 및 저장소(도시되지 않음)를 갖는다. 프로세서들은 임의의 타입의 프로세서, 마이크로프로세서, 또는 멀티-프로세서 시스템일 수 있다. 네비게이션 제어기(36)는 소프트웨어로 로딩된다. 예를 들어, 소프트웨어는 로컬라이저(44)로부터 수신된 신호를 추적되는 객체의 위치 및 방향을 나타내는 데이터로 변환한다. 네비게이션 제어기(36)는 추가적으로 또는 대안적으로, 하나 이상의 마이크로 제어기들, 필드 프로그래머블 게이트 어레이들, 시스템 온 칩, 이산 회로, 및/또는 본원에서 설명된 기능들을 수행할 수 있는 다른 적합한 하드웨어, 소프트웨어, 또는 펌웨어를 포함할 수 있다. 프로세서라는 용어는 단일 프로세서로 제한하려는 것이 아니다.

[0072] 객체 상태들을 결정하기 위해 삼각측량 기술들을 이용하는 네비게이션 시스템(32)의 일례가 도시되어 있지만, 네비게이션 시스템들(32)은 매니퓰레이터(14), 도구(20), 및/또는 환자(12)의 추적을 위한 임의의 다른 적절한 구성을 가질 수 있다. 다른 예에서, 네비게이션 시스템(32) 및/또는 로컬라이저(44)는 초음파 기반이다. 예를 들어, 네비게이션 시스템(32)은 네비게이션 제어기(36)에 결합된 초음파 이미징 디바이스를 포함할 수 있다. 초음파 이미징 디바이스는 전술한 객체, 예를 들어, 매니퓰레이터(14), 도구(20), 및/또는 환자(12) 중 임의의 것을 이미징하고, 초음파 이미지에 기초하여 네비게이션 제어기(36)에 상태 신호를 생성한다. 초음파 이미지는 2D, 3D, 또는 이 둘의 조합일 수 있다. 네비게이션 제어기(36)는 객체들의 상태들을 결정하기 위해 거의 실시간으로 이미지들을 처리할 수 있다. 초음파 이미징 디바이스는 임의의 적합한 구성을 가질 수 있고, 도 1에 도시된 바와 같은 카메라 유닛(46)과 상이할 수 있다.

[0073] 다른 예에서, 네비게이션 시스템(32) 및/또는 로컬라이저(44)는 무선 주파수(RF) 기반이다. 예를 들어, 네비게이션 시스템(32)은 네비게이션 제어기(36)에 결합된 RF 송수신기를 포함할 수 있다. 매니퓰레이터(14), 도구(20) 및/또는 환자(12)는 그에 부착된 RF 이미터 또는 트랜스폰더를 포함할 수 있다. RF 이미터들 또는 트랜스폰더들은 수동적이거나 능동적으로 여자될 수 있다. RF 송수신기는 RF 추적 신호를 송신하고 RF 이미터들로부터 수신된 RF 신호들에 기초하여 네비게이션 제어기(36)에 상태 신호들을 생성한다. 네비게이션 제어기(36)는 수신된 RF 신호를 분석하여 상대적인 상태들을 연관시킬 수 있다. RF 신호들은 임의의 적절한 주파수일 수 있다. RF 송수신기는 RF 신호를 효과적으로 이용하여 객체를 추적하기 위해 임의의 적절한 위치에 배치될 수 있다. 또한, RF 이미터들 또는 트랜스폰더들은 도 1에 도시된 추적기들(52A, 52B, 54, 56, PT)과 훨씬 상이할 수 있는 임의의 적절한 구조적 구성을 가질 수 있다.

[0074] 또 다른 예에서, 네비게이션 시스템(32) 및/또는 로컬라이저(44)는 전자기 기반이다. 예를 들어, 네비게이션 시스템(32)은 네비게이션 제어기(36)에 결합된 EM 송수신기를 포함할 수 있다. 매니퓰레이터(14), 도구(20), 및/또는 환자(12)는 임의의 적절한 자기 추적기, 전자기 추적기, 유도성 추적기 등과 같은 그에 부착된 EM 구성요소들을 포함할 수 있다. 추적기들은 수동적이거나 능동적으로 여자될 수 있다. EM 송수신기는 EM 필드를 생성하고 추적기로부터 수신된 EM 신호에 기초하여 네비게이션 제어기(36)에 대한 상태 신호를 생성한다. 네비게이션

제어기(36)는 수신된 EM 신호를 분석하여 상대 상태를 그에 연관시킬 수 있다. 다시, 이러한 네비게이션 시스템(32)의 예들은 도 1에 도시된 네비게이션 시스템 구성(32)과 다른 구조적 구성을 가질 수 있다.

[0075] 네비게이션 시스템(32)은 본원에서 구체적으로 언급되지 않은 임의의 다른 적합한 구성요소들 또는 구조를 가질 수 있다. 또한, 도시된 네비게이션 시스템(32)과 관련하여 위에서 설명된 기술들, 방법들, 및/또는 구성요소들 중 임의의 것은 본원에서 설명된 네비게이션 시스템(32)의 다른 예들 중 임의의 것을 위해 구현되거나 제공될 수 있다. 예를 들어, 네비게이션 시스템(32)은 단지 관성 추적 또는 추적 기술들의 임의의 조합을 이용할 수 있고, 추가적으로 또는 대안적으로 광섬유 기반 추적, 머신 비전 추적 등을 포함할 수 있다.

[0076] 도 4를 참조하면, 시스템(10)은 다른 구성요소들 중에서, 매니퓰레이터 제어기(26), 네비게이션 제어기(36), 및 도구 제어기(21)를 포함하는 제어 시스템(60)을 포함한다. 제어 시스템(60)은 도 5에 도시된 하나 이상의 소프트웨어 프로그램 및 소프트웨어 모듈을 더 포함한다. 소프트웨어 모듈들은 시스템(10)의 제어를 돕기 위해 데이터를 처리하기 위해 매니퓰레이터 제어기(26), 네비게이션 제어기(36), 도구 제어기(21), 또는 이들의 임의의 조합 상에서 동작하는 프로그램 또는 프로그램들의 일부일 수 있다. 소프트웨어 프로그램들 및/또는 모듈들은 제어기들(21, 26, 36)의 하나 이상의 프로세서들(70)에 의해 실행될, 매니퓰레이터 제어기(26), 네비게이션 제어기(36), 도구 제어기(21), 또는 이들의 조합 상의 비일시적인 메모리(64)에 저장된 컴퓨터 판독가능 명령어들을 포함한다. 메모리(64)는 RAM, 비휘발성 메모리 등과 같은 임의의 적절한 구성의 메모리일 수 있고, 로컬로 또는 원격 데이터베이스로부터 구현될 수 있다. 또한, 사용자와 프롬프트 및/또는 통신하기 위한 소프트웨어 모듈은 프로그램 또는 프로그램들의 일부를 형성할 수 있고, 매니퓰레이터 제어기(26), 네비게이션 제어기(36), 도구 제어기(21) 또는 이들의 임의의 조합 상의 메모리(64)에 저장된 명령어들을 포함할 수 있다. 사용자는 네비게이션 사용자 인터페이스(UI) 또는 다른 사용자 인터페이스의 임의의 입력 디바이스들과 상호작용하여 소프트웨어 모듈들과 통신할 수 있다. 사용자 인터페이스 소프트웨어는 매니퓰레이터 제어기(26), 네비게이션 제어기(36), 및/또는 도구 제어기(21)로부터 별개의 디바이스 상에서 실행될 수 있다.

[0077] 제어 시스템(60)은 본원에서 기술된 기능 및 방법을 수행하기에 적합한 입력, 출력 및 처리 디바이스들의 임의의 적합한 구성을 포함할 수 있다. 제어 시스템(60)은 매니퓰레이터 제어기(26), 네비게이션 제어기(36), 또는 도구 제어기(21), 또는 이들의 임의의 조합을 포함할 수 있거나, 또는 이들 제어기들 중 하나를 포함할 수 있다. 이들 제어기는 도 4에 도시된 바와 같이 유선 버스 또는 통신 네트워크를 통해, 무선 통신을 통해, 또는 다른 방식으로 통신할 수 있다. 제어 시스템(60)은 또한 제어기로서 지칭될 수 있다. 제어 시스템(60)은 하나 이상의 마이크로 제어기들, 필드 프로그래머블 게이트 어레이들, 시스템 온 칩, 이산 회로, 센서들, 디스플레이들, 사용자 인터페이스들, 표시자들, 및/또는 본원에서 설명된 기능들을 수행할 수 있는 다른 적절한 하드웨어, 소프트웨어, 또는 펌웨어를 포함할 수 있다.

[0078] 도 5를 참조하면, 제어 시스템(60)에 의해 사용되는 소프트웨어는 경계 생성기(66)를 포함한다. 도 6에 도시된 바와 같이, 경계 생성기(66)는 도구(20)의 이동 및/또는 동작을 제한하기 위한 가상 경계(71)를 생성하는 소프트웨어 프로그램 또는 모듈이다. 가상 경계(71)는 1차원, 2차원, 3차원일 수 있고, 점, 선, 축, 궤적, 평면, 또는 복잡한 기하학적 형상을 포함하는 다른 형상을 포함할 수 있다. 일부 실시예들에서, 가상 경계(71)는 삼각형 메시에 의해 정의된 표면이다. 이러한 가상 경계들(71)은 또한 가상 객체들로서 지칭될 수 있다. 가상 경계(71)는 3D 골 모델과 같은 해부학적 모델(AM)에 대해 정의될 수 있다. 도 6의 예에서, 가상 경계들(71)은 전체 무릎 임플란트에 대한 5개의 평면들을 묘사하기 위한 평면 경계들이고, 대퇴골(F)의 헤드의 3D 모델과 연관된다. 해부학적 모듈(AM)은 가상 경계들(71)이 해부학적 모듈(AM)과 연관되게 되도록 하나 이상의 환자 추적기(54, 56)에 등록된다. 가상 경계들(71)은 임플란트 특정(예를 들어, 임플란트의 크기, 형상, 부피 등에 기초하여 정의됨)일 수 있고/거나 환자 특정(예를 들어, 환자의 해부학적 구조에 기초하여 정의됨)일 수 있다. 가상 경계(71)는 수술 전, 수술 중, 또는 이들의 조합으로 생성되는 경계일 수 있다. 다시 말해서, 가상 경계들(71)은 수술 절차가 시작되기 전에, 수술 절차 동안(조직 제거 동안 포함), 또는 이들의 조합들 동안 정의될 수 있다. 임의의 경우에, 제어 시스템(60)은 가상 경계들(71)을 메모리에/로부터 저장/검색함으로써, 가상 경계들(71)을 메모리로부터 획득함으로써, 수술 전에 가상 경계들(71)을 생성함으로써, 또는 수술 중에 가상 경계들(71)을 생성함으로써 등에 의해 가상 경계들(71)을 획득한다.

[0079] 매니퓰레이터 제어기(26) 및/또는 네비게이션 제어기(36)는 가상 경계(71)에 대한 도구(20)의 상태를 추적한다. 일례에서, TCP의 상태는 도구(20)가 가상 경계들(71)에 대해 원하는 위치 관계(예를 들어, 가상 경계들을 넘어 이동되지 않음)로 유지되도록 가상 시뮬레이션을 통해 가상 강체 모델에 인가될 촉각력을 결정하기 위해 가상 경계들(71)에 대해 측정된다. 가상 시뮬레이션의 결과는 매니퓰레이터(14)에 명령된다. 제어 시스템(60)은 물리적 핸드피스가 물리적 경계/장벽의 존재시 응답하는 방식을 모방하는 방식으로 매니퓰레이터(14)를 제어/위치시

킨다. 경계 생성기(66)는 매니퓰레이터 제어기(26) 상에 구현될 수 있다. 대안적으로, 경계 생성기(66)는 네비게이션 제어기(36)와 같은 다른 구성요소들 상에서 구현될 수 있다.

[0080] 도 5 및 도 7을 참조하면, 경로 생성기(68)는 제어 시스템(60)에 의해 실행되는 다른 소프트웨어 프로그램 또는 모듈이다. 일례에서, 경로 생성기(68)는 매니퓰레이터 제어기(26)에 의해 구동된다. 경로 생성기(68)는 임플란트를 수용하기 위해 해부학적 구조의 섹션을 제거하는 것과 같이, 도구(20)가 횡단하기 위한 도구 경로(TP)를 생성한다. 도구 경로(TP)는 복수의 경로 세그먼트(PS)를 포함할 수 있거나, 또는 단일 경로 세그먼트를 포함할 수 있다. 경로 세그먼트(PS)는 직선 세그먼트, 곡선 세그먼트, 이들의 조합 등일 수 있다. 도구 경로(TP)는 또한 해부학적 모델(AM)에 대해 정의될 수 있다. 도구 경로(TP)는 임플란트-특정, 예를 들어, 임플란트의 크기, 형상, 부피 등에 기초하여 정의될 수 있고 및/또는 환자-특정(예를 들어, 환자의 해부학적 구조에 기초하여 정의될 수 있다)일 수 있다.

[0081] 본원에서 설명된 하나의 버전에서, 도구 경로(TP)는 조직 제거 경로로서 정의되지만, 다른 버전들에서, 도구 경로는 조직 제거 이외의 치료를 위해 사용될 수 있다. 본원에서 설명된 조직 제거 경로의 일례는 밀링 경로(72)를 포함한다. 용어 "밀링 경로"는 일반적으로 해부학적 구조를 밀링하기 위한 타겟 부위의 부근에서의 도구(20)의 경로를 지칭하며, 도구(20)가 경로의 전체 기간에 걸쳐 해부학적 구조를 작동 가능하게 밀링할 것을 요구하도록 의도되지 않는다. 예를 들어, 아래에서 더 상세히 이해될 바와 같이, 밀링 경로(72)는 도구(20)가 밀링 없이 일 위치로부터 다른 위치로 전이하는 섹션들 또는 세그먼트들을 포함할 수 있다. 또한, 밀링 경로(72)를 따른 다른 형태의 조직 제거, 이를테면 조직 절제 등이 사용될 수 있다. 밀링 경로(72)는 수술 전, 수술 중, 또는 이들의 조합으로 생성되는 미리 정의된 경로일 수 있다. 다시 말해서, 밀링 경로(72)는 수술 절차가 시작되기 전에, 수술 절차 동안(조직 제거 동안 포함), 또는 이들의 조합으로 정의될 수 있다. 어느 경우든, 제어 시스템(60)은 메모리에/로부터 밀링 경로(72)를 저장/검색함으로써, 메모리로부터 밀링 경로(72)를 획득함으로써, 수술 전에 밀링 경로(72)를 생성함으로써, 수술 중에 밀링 경로(72)를 생성하는 등에 의해 밀링 경로(72)를 획득한다. 밀링 경로(72)는 원형, 나선형/코르크스크류, 선형, 곡선형, 이들의 조합 등과 같은 임의의 적합한 형상 또는 형상들의 조합을 가질 수 있다.

[0082] 가상 경계들(71) 및/또는 밀링 경로(72)를 생성하기 위한 시스템 및 방법의 일례는 발명의 명칭이 "Surgical Manipulator Capable of Controlling a Surgeical Instrument in Multiple Modes"인 미국 특허 제9,119,655호에 기술되어 있으며, 이 개시는 이에 의해 본원에 원용된다. 일부 예들에서, 가상 경계(71) 및/또는 밀링 경로(72)는 매니퓰레이터 제어기(26) 또는 네비게이션 제어기(36) 상에서보다는 오프라인으로 생성될 수 있다. 그 후, 가상 경계(71) 및/또는 밀링 경로(72)는 매니퓰레이터 제어기(26)에 의해 실행시간에 사용될 수 있다.

[0083] 도 5를 참조하면, 두 개의 추가적인 소프트웨어 프로그램들 또는 모듈들이 매니퓰레이터 제어기(26) 및/또는 네비게이션 제어기(36) 상에서 실행된다. 하나의 소프트웨어 모듈은 행동 제어(74)를 수행한다. 거동 제어(74)는 도구(20)에 대한 에너지 어플리케이터(24)의 다음 명령된 위치(CP) 및/또는 배향(예를 들어, 자세)을 나타내는 데이터를 계산하는 프로세스이다. 어떤 경우에는 TCP의 위치가 행동 제어(74)로부터 출력되고, 다른 경우에는 도구(20)의 위치 및 방향이 출력된다. 경계 생성기(66), 경로 생성기(68), 및 힘/토크 센서(S)로부터의 출력은 에너지 어플리케이터(24)에 대한 다음 명령된 위치(CP) 및/또는 도구(20)에 대한 배향을 결정하기 위해 거동 제어부(74)에 입력으로서 공급될 수 있다. 거동 제어(74)는 명령된 자세를 결정하기 위해, 아래에서 더 설명되는 하나 이상의 가상 제약들과 함께, 이들 입력들을 처리할 수 있다.

[0084] 제2 소프트웨어 모듈은 모션 제어(76)를 수행한다. 모션 제어의 일 양태는 매니퓰레이터(14)의 제어이다. 모션 제어(76)는 거동 제어(74)로부터 다음 명령된 자세를 정의하는 데이터를 수신한다. 이들 데이터에 기초하여, 동작 제어부(76)는(예를 들어, 역 운동학 및 야코비안 계산기를 통해) 매니퓰레이터(14)의 조인트(J)의 조인트 각도의 다음 위치를 결정하여, 예를 들어, 명령된 자세에서 매니퓰레이터(14)는 거동 제어부(74)에 의해 명령된 대로 도구(20)를 위치시킬 수 있다. 다시 말해서, 모션 제어부(76)는 데카르트 공간에서 정의될 수 있는 명령된 자세를 매니퓰레이터(14)의 조인트 각도들로 처리하여, 매니퓰레이터 제어기(26)는 이에 따라 조인트 모터들(27)에 명령하여, 매니퓰레이터(14)의 조인트들(J)을 도구(20)의 명령을 받은 자세에 대응하는 명령을 받은 조인트 각도로 이동시킬 수 있다. 하나의 버전에서, 모션 컨트롤(76)은 조인트(J)의 조인트 각도를 조절하고, 조인트 모터(27)가 명령된 조인트 각도로 연관된 조인트(j)를 구동하는 것을 보장하기 위해 가능한 한 가깝게 조인트 모터들(27)이 출력하는 토크를 조정한다.

[0085] 경계 생성기(66), 경로 생성기(68), 거동 제어(74), 및 모션 제어(76) 중 임의의 것은 소프트웨어 프로그램(78) 또는 이들의 임의의 조합으로 개별적으로 및/또는 독립적으로 동작하는 소프트웨어 프로그램들의 서브세트들일

수 있다. 용어 "소프트웨어 프로그램"은 본원에서 설명된 기술적 솔루션들의 다양한 능력들을 수행하도록 구성된 컴퓨터 실행가능 명령어들을 설명하기 위해 사용된다. 단순화를 위해, 용어 "소프트웨어 프로그램"은 적어도 경계 생성기(66), 경로 생성기(68), 거동 제어(74), 및/또는 모션 제어(76) 중 임의의 하나 이상을 포함하도록 의도된다. 소프트웨어 프로그램(78)은 매니퓰레이터 제어기(26), 네비게이션 제어기(36), 또는 이들의 임의의 조합에서 구현될 수 있거나, 또는 제어 시스템(60)에 의해 임의의 적절한 방식으로 구현될 수 있다.

[0086] 사용자 상호작용을 처리하기 위해 임상 애플리케이션(80)이 제공될 수 있다. 임상 애플리케이션(80)은 사용자 상호작용의 많은 양태를 취급하고 수술 전 계획, 임플란트 배치, 정합, 골 준비 시각화, 및 임플란트 맞춤의 수술 후 평가 등을 포함하는 수술 작업 흐름을 조정한다. 임상 애플리케이션(80)은 디스플레이(38)에 출력하도록 구성된다. 임상 애플리케이션(80)은 그 자신의 개별 프로세서 상에서 실행될 수 있거나 네비게이션 제어기(36)와 함께 실행될 수 있다. 일례에서, 임상 애플리케이션(80)은 임플란트 배치가 사용자에 의해 설정된 후에 경계 생성기(66) 및/또는 경로 생성기(68)와 인터페이스하고, 그 후 경계 생성기(66) 및/또는 경로 생성기(68)에 의해 리턴된 가상 경계(71) 및/또는 도구 경로(TP)를 실행을 위해 매니퓰레이터 제어기(26)에 전송한다. 매니퓰레이터 제어기(26)는 본원에서 설명된 바와 같이 도구 경로(TP)를 실행한다. 매니퓰레이터 제어기(26)는 생성된 도구 경로(TP)로 부드럽게 되돌아가기 위해 기계가공을 시작하거나 재개할 때 특정 세그먼트(예를 들어, 리드인 세그먼트)를 추가로 생성할 수 있다. 매니퓰레이터 제어기(26)는 또한 아래에서 더 설명되는 바와 같이 대응하는 가상 제약들을 생성하기 위해 가상 경계들(71)을 처리할 수 있다.

[0087] 시스템(10)은 본원에 원용되는 미국 특허 제9,119,655호에 기술된 바와 같은 수동 모드에서 동작할 수 있다. 여기서, 사용자는 수동으로 지시하고, 매니퓰레이터(14)는 수술 부위에서 도구(20) 및 그 에너지 어플리케이터(24)의 이동을 실행한다. 사용자는 수동 모드에서 도구(20)의 이동을 야기하기 위해 도구(20)와 물리적으로 접촉한다. 일 버전에서, 매니퓰레이터(14)는 도구(20)를 위치시키기 위해 사용자에 의해 도구(20)에 가해지는 힘 및 토크를 모니터링한다. 예를 들어, 매니퓰레이터(14)는 사용자에 의해 인가되는 힘 및 토크를 검출하고 제어 시스템(60)에 의해 사용되는 대응하는 입력(예를 들어, 하나 이상의 대응하는 입력/출력 신호들)을 생성하는 힘/토크 센서(S)를 포함할 수 있다.

[0088] 매니퓰레이터 제어기(26) 및/또는 네비게이션 제어기(36)는 힘/토크 센서(S)로부터 입력(예를 들어, 신호들)을 수신한다. 사용자가 인가하는 힘 및 토크에 응답하여, 매니퓰레이터(14)는 사용자에 의해 인가된 힘 및 토크에 기초하여 일어났을 수 있는 움직임을 에뮬레이트하는 방식으로 도구(20)를 움직인다. 수동 모드에서의 도구(20)의 움직임은 또한 경계 생성기(66)에 의해 생성된 가상 경계(71)에 대해 제한될 수 있다. 일부 버전들에서, 힘/토크 센서(S)에 의해 취해진 측정들은 힘/토크 센서(s)의 힘/토크 좌표계(FT)로부터, 가상 시뮬레이션이 도구(20)의 가상 강체 모델 상에서 수행되는 가상 질량 좌표계와 같은 다른 좌표계로 변환되어, 힘 및 토크가 가상 시뮬레이션에서 가상 강체에 가상으로 인가되어,(다른 입력들 중에서)이들 힘과 토크가 어떻게 가상 강체의 이동에 영향을 미칠 것인지를 궁극적으로 결정할 수 있다.

[0089] 시스템(10)은 또한, 매니퓰레이터(14)가 밀링 경로(72)를 따라 도구(20)를 이동시키는 반자율 모드에서 동작할 수 있다(예를 들어, 매니퓰레이터(14)의 능동 조인트들(J)은 사용자로부터 도구(20)에 대한 힘/토크를 필요로 하지 않고 도구(20)를 이동시키도록 동작한다). 반자율 모드에서의 동작의 예는 또한 본원에 원용되는 미국 특허 제9,119,655호에 설명되어 있다. 일부 실시예들에서, 매니퓰레이터(14)가 반자율 모드에서 동작할 때, 매니퓰레이터(14)는 사용자 보조 없이 도구(20)를 이동시킬 수 있다. 사용자 도움을 받지 않는다는 것은 사용자가 도구(20)를 이동시키기 위해 도구(20)와 물리적으로 접촉하지 않는다는 것을 의미할 수 있다. 대신, 사용자는 이동의 시작 및 정지를 제어하기 위해 어떤 형태의 원격 제어를 사용할 수 있다. 예를 들어, 사용자는 도구(20)의 이동을 시작하기 위해 원격 제어부의 버튼을 누르고 도구(20)의 이동을 정지시키기 위해 버튼을 해제할 수 있다.

[0090] 매니퓰레이터 제어기(26) 및 거동 제어기(74)를 포함하는 제어 시스템(60)은 가상 시뮬레이션에서 도구(20)의 동역학을 시뮬레이션하도록 구성된다. 가상 시뮬레이션은 에너지 어플리케이터(24)를 갖거나 갖지 않는 도구(20)에 기초할 수 있다. 일례에서, 가상 시뮬레이션은 강체 역학을 시뮬레이션하는 컴퓨터 소프트웨어인 물리 엔진을 사용하여 구현된다. 가상 시뮬레이션은 실행가능한 프로그램이 저장된 비일시적인 컴퓨터 판독가능 저장 매체(64)를 갖는 컴퓨팅 디바이스 상에서 구현될 수 있다. 가상 시뮬레이션은 도구(20)의 이러한 동역학이 매니퓰레이터(14)에 의해 물리적으로 수행되기 전에 도구(20)의 동역학을 시뮬레이션한다. 제어 시스템(60)은 동적 객체인 가상 강체로서 도구(20)를 모델링한다. 이에 따라, 제어 시스템(60)은 도구(20)의 강체 역학을 효과적으로 시뮬레이션한다. 가상 강체는 가상 시뮬레이션에 따라 데카르트 작업 공간에서 6DOF에 따라 자유롭게 이동한다. 가상 강체는 도구(20) 상에, 내부에, 또는 너머에 있을 수 있는 단일 포인트로서 모델링될 수 있다. 질량/

관성 매트릭스는 6DOF에서 가상 질량을 정의한다. 일례에서, 가상 강체는 도구(20)의 질량 중심에 대응한다. 여기서, "질량 중심"은 힘이 도구(20)의 다른 포인트에 가해졌다면, 그리고 그렇지 않고, 도구(20)가 제한되지 않았으면, 즉 매니퓰레이터(14)에 의해 제한되지 않았으면, 도구(20)가 회전하는 포인트인 것으로 이해된다. 가상 강체의 질량 중심은 도구(20)의 실제 질량 중심에 가까울 수 있지만 동일할 필요는 없다. 가상 강체의 질량 중심은 경험적으로 결정될 수 있다. 도구(20)가 매니퓰레이터(14)에 부착되면, 질량 중심의 위치는 개별 의사의 선호도를 수용하도록 재설정될 수 있다. 다른 실시예에서, 가상 강체는 무게 중심 등과 같은 도구(20)의 다른 특징부에 대응할 수 있다.

[0091] 이 가상 강체는 가상 질량을 갖는 것으로 생각된다. 가상 질량은 조인트들(J) 중 적어도 하나에 대한 관성을 갖는다. 일부 경우들에서, 가상 질량체는 조인트들(J1-J6)의 각 조인트에 대해 관성을 갖는다. 관성은 가상 질량이 속도의 변화에 응답하여 나타내는 저항의 측정치이다. 관성은 가상 질량의 특성인 것으로 이해될 수 있다. 이와 같이, 가상 질량은 가상 강체의 질량 및 관성 모두를 지칭할 수 있다. 가상 강체의 가상 질량은 통상적으로 도구(20)의 실제 질량과 동일한 자릿수 내에 있다. 가상 질량은 도구(20)의 실제 질량보다 크거나 작도록 설계될 수 있다.

[0092] 일례에서, 가상 강체는 가상 시뮬레이션의 각 반복의 시작에서 제1 자세에 있다. 제어 시스템(60)은 힘-토크 센서(S)로부터 사용자 적용 입력 힘 및/또는 다른 제약들로서 모델링된 다른 입력 힘을 수신할 수 있다. 가상 강체가 제1 자세에 있을 때 가상 시뮬레이션에서 입력 힘이 가상 강체에 인가된다. 입력 힘은 가상 강체가 데카르트 공간 내에서 상이한 위치 및 상이한 배향을 갖는 제2 자세로 가상 경로를 따라 전진하게 한다. 가상 시뮬레이션에 기초하여 가상 강체의 제2 자세를 알면, 제어 시스템(60)은 가상 시뮬레이션을 따라 조인트(J)의 동작을 명령한다. 즉, 제어 시스템(60)은 직교 공간에서 가상 강체의 동역학을 변환하여 매니퓰레이터(14)의 모션을 지시하고 조인트 공간에서 도구(20)의 배향을 제어한다. 제2 자세를 초래하는 힘은 조인트 공간 내의 움직임에 데카르트 공간 내의 움직임을 관련시키는 야코비안 매트릭스들을 계산하는 야코비안 계산기에 인가된다.

[0093] 가상 시뮬레이션은 가상 강체의 시각적 또는 그래픽 표현들 없이 계산적으로 실행될 수 있다. 가상 시뮬레이션이 가상 강체를 가상으로 동적으로 디스플레이할 필요는 없다. 즉, 가상 강체는 처리 유닛 상에서 실행되는 그래픽 애플리케이션 내에서 모델링될 필요가 없다. 일부 경우에, 실제 도구(20)로 추적되는 가상 도구의 이동이 수술 부위의 수술 동안 시각적 도움을 제공하기 위해 수술 부위에 디스플레이될 수 있다. 이러한 경우에, 디스플레이된 도구는 가상 시뮬레이션의 직접적인 결과가 아니다.

[0094] II. 공급 레이트의 결정

[0095] 에너지 어플리케이터(24)가 경로를 따라 진행하는 속도 또는 속도는 공급 레이트(FR)로 지칭된다. 일 구현예에서, 이러한 전진은 반자율 모드에서, 보다 구체적으로는 도구 경로(TP)를 따른 전진일 수 있다. 이 섹션은 공급 레이트(FR)가 절차 전 또는 절차 동안 결정되는 기술을 설명한다. 이 섹션에서 설명되는 바와 같이, 공급 레이트(FR)는 다양한 조건 및/또는 변수에 기초하여 설정되고 변경될 수 있다. 다음 섹션에서 설명되는 바와 같이, 공급 레이트(FR)는 운동학적 사슬(KC)의 비-도구 경로 구성요소들의 원치 않은 배향 모션을 고려하여 동적으로 변경될 수 있다. 공급 레이트(FR)는 발명의 명칭이 "Surgical Manipulator Capable of Controlling a Surgeical Instrument in Multiple Modes"인 미국 특허 제9,119,655호에 기재된 기술에 의해 계산될 수 있으며, 이의 개시는 본원에 원용된다.

[0096] 일 구현예에 따라 공급 레이트(FR)를 결정하기 위해, 경로 생성기(68)는 하나 이상의 변수를 계산한다. 이러한 변수들 중 하나는 가상 강체에 인가될 때 에너지 어플리케이터(24)의 전진을 초래하는 힘 및 토크이다. 다른 변수는 도구(20)의 배향을 배향의 허용가능한 범위 내에서 유지하기 위해 가상 강체에 인가되는 힘 및 토크이다.

[0097] 일례에서, 경로 생성기(68)는 도 5 및 도 8에 도시된 바와 같이, 공급 레이트 계산기(82) 인 서브 모듈을 포함한다. 공급 레이트 계산기(82)는 에너지 어플리케이터(24)가 도구 경로(TP)의 개별 경로 세그먼트(PS)를 따라 이동함에 따라 이동해야 하는 공급 레이트(FR)를 결정한다(도 9 참조). 공급 레이트 계산기(82)로의 입력은 정의된 공급 레이트(DEFINED F.R.)일 수 있다. 가장 기본적인 형태에서, 정의된 공급 레이트(FR)는 스칼라 값이다. 실제로, 매니퓰레이터 제어기(26)에는 복수의 정의된 공급 레이트(FR)가 제공될 수 있다. 이들 정의된 공급 레이트는 디폴트 공급 레이트를 설정하는 데 사용될 수 있고, 후술하는 바와 같이 다양한 변수에 따라 스케일링되거나 수정될 수 있다. 정의된 공급 레이트는 에너지 어플리케이터(24)가 전진되는 실제 공급 레이트(FR)에 항상 대응할 필요는 없다. 또한, 정의된 공급 레이트를 디폴트로 설정할 필요는 없다. 대신에, 시스템(10)은 정의된 공급 레이트에서 시작하지 않고, 다음의 변수들 중 임의의 하나 이상에 기초하여 실제 공급 레이트(FR)를 동적으로 결정할 수 있다. 다시 말해서, 실제 공급 레이트(FR)는 미리 결정되거나 미리 결정된 임의의

디폴트 또는 정의된 공급 레이트 없이 "온 더 플라이"로 결정될 수 있다.

[0098] 도 9를 참조하면, 일례에서, 특정 정의된 공급 레이트(FR1...FRN)가 각 경로 세그먼트(PS1...PSN)에 부여될 수 있다. 이러한 공급 레이트(FR) 부여는 수술 전에 또는 수술 중에 수행될 수 있다. 이어서, 공급 레이트(FR)는 절차의 시작시 또는 절차 동안 조정될 수 있다. 두 개 이상의 인접한 경로 세그먼트(PS)는 동일하거나 상이한 정의된 공급 레이트(FR)를 부여받을 수 있다. 이러한 공급 레이트(FR)는 공극 공간의 형상; 에너지 어플리케이터(24)의 유형; 환자의 건강; 에너지 어플리케이터(24)가 적용되는 조직의 성질; 및 경로 세그먼트(PS)의 기하학적 구조 등과 같은 변수들에 기초하여 생성될 수 있지만, 이에 제한되지 않는다. 실제로, 정의된 공급 레이트(FR)는 전형적으로 5 내지 400 mm/sec이다. 공급 레이트는 상황에 따라 이 범위보다 크거나 작을 수 있다. 일 실시예에 따르면, 공급 레이트(FR)는 수술 계획, 시스템 설정, 및/또는 외과 의사 선호도에 기초하여 미리 결정된다. 대안적으로 또는 추가적으로, 공급 레이트(FR)는 수술 중 조건에 기초하여 결정되고 수정될 수 있다. 공급 레이트들은 또한 에너지 어플리케이터(24)가 다음 경로 세그먼트(PS)에 도달하는 시간에, 또는 그 이전에 임의의 시간에 경로 세그먼트들(PS)에 부여될 수 있다.

[0099] 도 9에 도시된 바와 같이, 경로 생성기(68) 및 공급 레이트 계산기(82)를 포함하는 매니퓰레이터 제어기(26)를 포함하지만 이에 제한되지 않는 하나 이상의 제어기는 공급 레이트(FR)에 따라 에너지 어플리케이터(24)를 복수의 명령된 위치들(CP1-CPN)로 전진시키도록 매니퓰레이터(14)를 제어하도록 구성된다. 명령된 위치들(CP)은 보통 반자율 모드에서 도구 경로(TP)에 대해 정의되지만, 반드시 그런 것은 아니다. 일 구현예에서, 도구 경로(TP)의 세그먼트들(PS)은 후속 명령된 위치들(PS) 사이에서 정의된다. 대안적으로, 명령된 위치들(CP)은 수동 모드에서 시스템(10)에 의해 에뮬레이트되는 사용자 개시 및 비-도구 경로 움직임에 따라 결정될 수 있다.

[0100] 도 8을 참조하면, 공급 레이트 계산기(82)는 공급 레이트(FR)를 생성하기 위해 정의된 공급 레이트를 조정할 수 있다. 일 버전에서, 이러한 조정은 임의의 수의 계수들로 정의된 공급 레이트(FR)를 곱함으로써 수행된다. 각 계수는 0 내지 1.0일 수 있다. 계수는 1.0을 초과하는 값을 가질 수 있다. 이들 계수 각각은 공급 레이트 계산기(82)에도 적용되는 변수의 함수로서 변할 수 있다.

[0101] 이들 변수 중 제1 변수는 도 8에 도시된 바와 같이 공급 레이트(FR)의 사용자 조정(USER ADJUST)일 수 있다. 이는 시술이 진행됨에 따라 의사가 실시간으로 수행하는 공급 레이트(FR)의 조정이다. 의사는 도 1에 도시된 펜던트(88)와 같은 원격 제어에 의해 공급 레이트의 이러한 조정을 행할 수 있다. 펜던트의 예는 발명의 "Surgical Manipulator Capable of Controlling a Surgical Instrument in Multiple Modes"라는 명칭의 미국 특허 제9,119,655호에 설명된 것과 같을 수 있으며, 이의 개시가 이에 의해 본원에 원용된다. 공급 레이트 계산기(82)는 공급 레이트(FR)를 증가 또는 감소시키기 위해 의사 입력 명령의 함수로서 계수를 출력한다.

[0102] 규정된 공급 레이트(FR)를 선택적으로 스케일링하는 데 사용될 수 있는 제2 변수는 도 8에 도시된 바와 같이 에너지 어플리케이터(24)가 노출되는 힘 및 토크(SNSD F/T)이다. 에너지 어플리케이터(24)는 엔드 이펙터(22)에 견고하게 부착될 수 있는 도구(20)에 견고하게 부착된다. 이에 따라, 힘/토크 센서(S)에 의해 출력된 신호들은 에너지 어플리케이터(24)가 노출되는 힘 및 토크를 나타내는 신호들이다. 공급 레이트 계산기(82)는 매니퓰레이터(14)가 도구(20) 및 에너지 어플리케이터(24)에 인가하는 힘/토크의 양과 기구 전진 속도 사이에 관계가 있다는 원리에 기초하여 공급 레이트(FR)를 설정할 수 있다. 일반적으로, 제거되지 않는 조직의 가열을 최소화하는 것이 현대 의료 실무의 목표이다. 이러한 목표에 대한 하나의 이유는 이러한 불필요한 가열이 조직에 야기될 수 있는 부수적인 손상을 최소화하는 것이다. 이에 따라, 매니퓰레이터(14)는 상당한 양의 힘 및/또는 토크가 기구 또는 에너지 어플리케이터(24)에 인가되는 것으로 결정될 때, 경로 세그먼트(PS)에 대한 공급 레이트(FR)를 감속시키도록 구성된다.

[0103] 공급 레이트(FR)의 이러한 조정이 유용한 일례는 에너지 어플리케이터(24)가 피질골 및 해면골 모두를 통해 경로 세그먼트(PS)를 가로질러 이동할 때이다. 바깥쪽 골인 피질골은 상대적으로 단단하다. 안쪽 골인 해면골은 피질골보다 더 다공성이고 제거에 덜 저항성이다. 이에 따라, 에너지 어플리케이터(24)가 일정한 속도로 양 유형의 골을 가로질러 이동하면, 해면골보다 피질골을 가로질러 어플리케이터를 이동시키기 위해 더 많은 힘/토크가 인가될 필요가 있다. 이는 공급 레이트(FR)의 조정 없이, 피질골이 해면골의 인접한 섹션보다 더 잠재적으로 손상을 유발하여 가열을 받을 것임을 의미한다. 매니퓰레이터(14)의 이러한 특징은 에너지 어플리케이터(24)를 전진시키기 위해 요구되는 힘/토크의 양에 대한 증가를 나타내는 신호를 제공하는 힘/토크 센서(S)에 응답하여 공급 레이트(FR)를 느리게 함으로써 원치 않은 가열에 대한 이러한 가능성을 최소화한다.

[0104] 에너지 어플리케이터(24)가 피질골을 절삭하는 것으로부터 해면골로 이동하면, 기구를 전진시키는데 필요한 힘/토크는 감소된다. 이러한 상황에서, 공급 레이트(FR)는 에너지 어플리케이터(24)가 적용되는 골이 가열되는 정

도를 상당히 증가시키지 않고 증가될 수 있다. 이는 환자에 대한 시술을 수행하는데 걸리는 시간의 양을 감소시킨다. 이는 또한 환자에 대한 시술을 수행하는 데 걸리는 시간을 최소화하는 현대의 외과 수술의 목표이며, 이는 환자의 내부 조직이 감염에 노출되고 개방되는 시간의 양을 감소시키고 외과의 피로의 가능성 및 환자가 마취 하에 유지되어야 하는 시간의 양 모두를 감소시킨다.

[0105] 공급 레이트 계산기(82)는: (1) 개별 힘 및 토크 성분으로 구성된 6-성분 벡터의 크기,(2) 개별 힘 성분으로 구성된 3-성분 벡터의 크기와,(3) 개별 힘 성분 및/또는 토크 성분의 임의의 조합으로 구성된 벡터의 크기 중 하나, 둘 또는 셋에 기초하여 힘/토크 조정 계수를 결정한다. 대안적으로, 계수는 가장 큰 힘 또는 토크 성분들 중 하나 이상에 기초한다. 이러한 변수들 중 하나 이상에 기초하여, 공급 레이트 계산기(82)는 연관된 룩업 테이블(84) 내의 데이터를 참조하여 힘/토크 조정 계수를 결정할 수 있다.

[0106] 공급 레이트(FR)를 조정하는 것에 더하여, 에너지 어플리케이터(24)의 회전 절단 속도가 또한 변화될 수 있다. 보다 구체적으로, 에너지 어플리케이터(24)가 버인 경우, 버의 절단 치아의 속도는 조직 제거의 정확성을 향상시키고 조직에서의 열 발생을 최소화하도록 조정되고 최적화될 수 있다. 버 절삭 치형부의 최적 속도는 커터 회전 속도 및 커터 직경의 팩터이며, 이는 치형부 기하학적 형상 및 제거되는 물질의 유형에 기초하여 최적화된다.

[0107] 규정된 공급 레이트가 공급 레이트(FR)를 생성하도록 조정될 수 있는 제3 변수는 도 8에 도시된 바와 같이 경로 세그먼트의 곡률(PATH CRVTR)이다. 이러한 조정은 에너지 어플리케이터(24)가 곡선 경로 세그먼트(PS)를 따라 위치적으로 명령되고 변위될 때, 모멘텀이 에너지 어플리케이터(24)를 도구 경로(TP) 또는 경로 세그먼트(PS)로부터 멀리 이동시키는 높은 속도의 속도로 에너지 어플리케이터(24)가 변위되지 않는 것을 보장하도록 수행된다. 일부 예들에서, 경로 세그먼트(PS)가 선형이거나 비교적 작은 곡률을 가질 때, 공급 레이트(FR)는 곡률에 기초하여 조정되지 않는다. 공급 레이트 계산기(82)가 에너지 어플리케이터(24)가 비교적 큰 곡률 또는 작은 반경을 갖는 경로 세그먼트(PS)를 따라 이동하고 있다는 표시를 수신할 때, 공급 레이트 계산기(82)는 공급 레이트(FR)를 생성하기 위해 이 변수에 기초하여, 정의된 공급 레이트(FR)을 하향 조정할 수 있다.

[0108] 공급 레이트 계산기(82)는 경로 생성기(68)의 다른 서브모듈 구성요소일 수 있는 곡률 계산기로부터 에너지 어플리케이터(24)가 이동하는 경로의 곡률, PATH CRVTR 변수의 표시를 수신한다. 이 입력 변수에 기초하여, 공급 레이트 계산기(82)는 룩업 테이블(84) 중 하나를 참조하여 공급 레이트(FR)가 조정되어야 하는 정도를 반영하는 계수를 결정할 수 있다. 하나 이상의 경로 세그먼트(PS)가 선형이거나 0에 가까운 곡률을 가질 때, 정의된 공급 레이트(FR)는 곡률에 기초하여 조정되지 않을 수 있고, 계수는 1.0 또는 그 부근이다. 공급 레이트 계산기(82)가 에너지 어플리케이터(24)가 비교적 큰 곡률을 갖는 경로 세그먼트(PS)를 따라 이동하고 있다는 표시를 수신할 때, 계산기는 공급 레이트(FR)를 생성하기 위해 이 변수에 기초하여 정의된 공급 레이트를 하향 조정한다. 검색된 계수는 1에서 감소한다. 일부 버전들에서, 곡률이 0.05 mm^{-1} 이하이면, 공급 레이트 계산기(82)는 에너지 어플리케이터(24)가 전진하는 세그먼트(PD)의 곡률에 기초하여 공급 레이트(FR)를 감쇠시키지 않는다. 곡률 계산기는 다수의 이격된 필터링된 타겟 위치들을 정의하는 데이터에 기초하여, 현재 필터링된 경로의 곡률을 결정한다. 이러한 곡률을 나타내는 데이터는 PATH CRVTR 변수로서 공급 레이트 계산기(82)로 전달된다.

[0109] 경로 세그먼트(PS)의 곡률을 설명하기 위해 공급 레이트(FR)를 변경하는 것은 에너지 어플리케이터(24)의 배향 모션(예를 들어, 각속도, 각가속도, 각가가속도) 또는 운동학적 사슬(KC)의 임의의 다른 구성요소들에 관계없이, 도구 경로(TP)에 대한 에너지 어플리케이터(24)의 명령된 또는 예상된 위치(x, y, z)에 기초한다.

[0110] 도 8에 도시된 바와 같이, 공급 레이트(FR)를 생성하도록 정의된 공급 레이트가 조정될 수 있는 제4 변수는 기구 파워(INST POWER)이다. 이 변수는 도구(20) 및/또는 에너지 어플리케이터(24)가 환자에게 적용하는 전력의 양이다. 일반적으로, 기구가 조직에 인가하는 전력이 증가함에 따라, 조직이 이 전력에 의해 가열되는 정도도 증가하기 때문에, 기구 전력은 공급 레이트(FR)를 조정하기 위한 입력 변수로서 이용된다. 위에서 설명된 바와 같이, 조직이 잠재적으로 손상을 주는 가열을 받는 정도를 최소화하는 것이 바람직하다. 또한, 공급 레이트(FR)가 감소되지 않으면, 에너지 어플리케이터(24)의 성능이 저하될 상태에 매니퓰레이터(14)가 진입하고 있다는 것을 기구에 의한 전력의 큰 출력이 나타내는 상황이 있을 수 있다. 예를 들어, 많은 양의 전력이 버(25)에 인가될 필요가 있는 경우, 이러한 전력의 증가는 버(25)가 제거되어야 하는 물질을 제거하는 것이 곤란한 상태에 진입할 수 있음을 나타낼 수 있다. 버(25)가 예상된 바와 같이 수행하는 것을 보장하기 위해, 버(25)의 전진 속도를 감소시키는 것이 유리하다. 이는 물질이 제거되는 정확도를 개선하는 것을 도울 수 있다. 조직 제거의 정확성을 향상시키는 것은 버(25)의 도포 후에 남아 있는 조직의 표면 마무리 및 선명도를 향상시킨다. 이에 따라, 도구(20) 및/또는 에너지 어플리케이터(24)에 의해 인가된 전력이 증가한다는 표시가 있을 때, 공급 레이

트 계산기(82)는 공급 레이트(FR)를 감소시킨다.

[0111] 도구(20)가 전동 도구인 구성에서, 전력 변수는 도구 모터에 의해 출력되는 토크의 양일 수 있다. 일반적으로, 도구(20)에 인가된 전류와 도구(20)가 출력하는 토크 사이에는 정비례 관계가 있다. 이에 따라, 도구(20)에 의해 인출되는 전류의 측정치가 기구 전력 변수로서 이용된다. 이 변수를 나타내는 기구 전력 신호는 도구 제어기(21)에 의해 생성되고 매니퓰레이터 제어기(26)에 인가된다. 특히, 도구 제어기(21)의 회로는 도구(20)에 의해 인출된 전류를 모니터링하고 도구(20)에 의해 인입된 전류를 나타내는 신호를 출력할 수 있다. 이 신호는 공급 레이트 계산기(82)에 인가된 아날로그 또는 디지털 INST POWER 신호가 생성되는 루트 신호이다. 공급 레이트 계산기(82)는 INST POWER 신호에 기초하여 그리고 룩업 테이블(84) 중 하나를 참조하여, 공급 레이트(FR)를 결정하기 위해 정의된 공급 레이트가 기구 전력에 기초하여 스케일링되어야 하는 정도를 나타내는 계수를 결정한다.

[0112] 공급 레이트(FR)를 생성하기 위해 정의된 공급 레이트를 조정하기 위한 팩터로서 사용될 수 있는 제5 변수는 도 8에 도시된 바와 같은, 조직 온도(TISSUE TEMP)이다. 이는 환자의 절단되지 않은 조직이 가열되는 정도를 최소화하는 현대 수술 실무의 위에서 언급된 목표 때문이다. 온도 센서는 조직 온도(TISSUE TEMP)의 표시를 제공하기 위해 이용될 수 있다. 온도 센서는 도구(20)에 장착될 수 있다. 다시, 온도 센서에 의한 신호 출력은 조직의 온도 또는 에너지 어플리케이터(24)의 온도를 나타낼 수 있다. 온도 센서에 의해 출력된 신호는 도구 제어기(21)를 통해 매니퓰레이터 제어기(26)로 라우팅될 수 있다. 절단되지 않은 조직의 온도 외에, 정의된 공급 레이트를 조정하기 위한 다른 팩터는 에너지 어플리케이터(24)에 의해 제거된 칩의 온도를 포함할 수 있다. 제거된 칩 및 물질은 보통 "슬러리"로 지칭된다. 슬러리의 온도는 온도 센서를 포함하는 임의의 적합한 방식으로 측정될 수 있다. 공급 레이트 계산기(82)는 TISSUE TEMP 신호에 의해 표현된 온도에 기초하여 그리고 룩업 테이블(84) 중 하나를 참조하여 적절한 조직 온도 공급 레이트 조정 계수를 결정한다. TISSUE TEMP 신호가 조직 온도가 허용가능한 범위 내에 있음을 나타낸다면, 이 계수는 1.0 또는 그 근처일 수 있다. 대안적으로, TISSUE TEMP 신호가 조직 또는 에너지 어플리케이터(24) 온도가 조직에 상당한 손상이 있을 수 있는 레벨에 접근하거나 그 이상인 것을 나타내면, 검색된 계수는 1로부터 감소할 수 있다.

[0113] 공급 레이트(FR)를 생성하기 위해 정의된 공급 레이트를 조정하기 위해 공급 레이트 계산기(82)에 의해 사용될 수 있는 제6 변수는 도 8에 도시된 바와 같이 계산된 힘(CMPTD FORCE)이다. 후술하는 바와 같이, 이 계산된 힘은 가상 강체에 인가되는 힘이다. 이 힘에 응답하여, 모션 제어 프로세스는 도구 경로(TP)를 따라 에너지 어플리케이터(24)를 전진시킨다. 계산된 힘은 거동 제어 프로세스 소프트웨어 모듈들 중 다른 하나에 의해 계산된다. 토크 성분을 포함할 수 있는 이 계산된 힘은 에너지 어플리케이터(24)에 대한 명령된 위치가 결정되는 입력 변수로서 작용한다. 공급 레이트 계산기(82)는 공급 레이트(FR)를 생성하여, 계산된 힘과 공급 레이트(FR) 사이에 역 관계가 존재한다. 계산된 힘이 에너지 어플리케이터(24)의 전진을 구현하도록 증가되는 경우에, 공급 레이트 계산기(82)는 공급 레이트(FR)를 감소시킨다. 공급 레이트(FR)의 이러한 감소는 매니퓰레이터가 조직에 대한 에너지 어플리케이터(24)의 인가의 정확성이 악영향을 받을 속도 이상으로 에너지 어플리케이터(24)를 전진시킬 가능성을 감소시킨다. 일부 버전들에서, 공급 레이트 계산기(82)는 계산된 힘의 크기 및 룩업 테이블(84) 중 하나를 기준으로 계수를 결정한다. 이 계수는 정의된 공급 레이트가 계산된 힘의 크기의 함수로서 스케일링되어야 하는 정도를 나타낸다.

[0114] 공급 레이트(FR)를 생성하기 위해 정의된 공급 레이트를 조정하기 위해 공급 레이트 계산기(82)에 의해 사용될 수 있는 제7 변수는 도 8에 도시된 바와 같이 가상 경계(71) 충돌(VB COLLISION)에 기초할 수 있다. 에너지 어플리케이터(24) 또는 도구(20)가 가상 경계(71)를 관통하면, 정의된 공급 레이트(FR)가 조정될 수 있게 된다. 충돌은 다수의 팩터, 이벤트 또는 조건으로 인해 일어날 수 있다. 일례에서, 충돌은 (예를 들어, 반자율 또는 수동 모드 동안) 매니퓰레이터(14)의 명령된 모션으로 인해 일어난다. 예를 들어, 수동 모드에서, 사용자는 경계(71)를 관통하는 명령된 위치를 초래하는 엔드 이펙터에 입력 힘을 인가할 수 있다. 추가적으로 또는 대안적으로, 충돌은 매니퓰레이터(14) 외부의 소스들로 인해 일어날 수 있다. 이러한 소스는 환자 해부학적 구조, 환자 움직임, 환자 추적기(들)(54, 56) 움직임 등에 대한 변경일 수 있다. 예를 들어, 환자 추적기(들)(54, 56) 중 하나 이상은 그의 현재 위치로부터 상이한 위치로 이동할 수 있다. 환자 추적기(들)(54, 56)의 이동은 환자의 해부학적 구조의 이동에 기인할 수 있다. 환자의 움직임은 환자를 재위치시키는 스태프로 인한 것일 수 있거나, 또는 해부학적 구조체와의 충돌로 인한 것일 수 있다. 예를 들어, 로봇 매니퓰레이터 또는 에너지 어플리케이터(24)는 환자 해부학적 구조체와 충돌하여 이를 밀어낼 수 있다. 다른 예에서, 에너지 어플리케이터(24)는 해부학적 구조의 조작 동안 해부학적 구조를 물리적으로 밀 수 있다. 스태프에 의해 해부학적 구조에 부주의한 범프가 있을 수 있다. 환자 추적기(들)(54, 56)의 움직임은 환자 추적기(들)(54, 56)이 부착되는 골/해부학적 구조에 관련될 수 있다. 즉, 해부학적 구조에 대한 환자 추적기(들)(54, 56)의 강성 고정은 제거, 이동 또는 느

손해질 수 있다. 일례에서, 환자 추적기(들)(54, 56)의 이동은 환자 추적기의 대응하는 이동을 야기하고, 가상 경계(71)는 환자 추적기(들)(54, 56)가 부착되는 대응하는 해부학적 구조에 정합된다. 가상 경계(71)의 움직임은 매니퓰레이터(14) 또는 에너지 어플리케이터(24)와 충돌할 수 있다. 다른 예에서, 환자 추적기(들)(54, 56)의 이동은 도구 경로(TP) 또는 그 세그먼트들의 재생 또는 업데이트를 야기할 수 있다. 에너지 어플리케이터(24)가 켜져 있는 재생되거나 업데이트된 도구 경로(TP) 또는 세그먼트는 환자 추적기(들)(54, 56)의 이동 전에 존재했던 마지막 공급 레이트와 비교하여 상이한 정의된 공급 레이트를 가질 수 있다. 가상 경계(71)와의 충돌은 본원에서 설명된 상황들 중 임의의 상황에 대해 일어날 수 있고, 본원에서 구체적으로 기술되지 않은 다른 조건에 기초하여 일어날 수 있다.

[0115] 정의된 공급 레이트(FR)는 임의의 충돌 조건에 응답하여 조정될 수 있다. 조정은 선행적 또는 소급적일 수 있고, 공급 레이트(FR)는 증가 또는 감소될 수 있다. 조정은 (예를 들어, 에너지 어플리케이터 또는 도구를 감속시키기 위한) 예방 조치로서 또는 충돌의 현재/예상된 효과들을 완화하기 위해 일어날 수 있다. 충돌은 공급 레이트(FR)를 조정함으로써 저지되거나, 준수되거나, 회피될 수 있다. 공급 레이트(FR)는 에너지 어플리케이터(24)로부터 멀리 이동하는 해부학적 구조에 도달하기 위해 증가될 수 있거나, 또는 공급 레이트[FR]는 에너지 어플리케이터(24)를 향해 이동하는 해부학적 구조에 응답하여 감소될 수 있다. 에너지 어플리케이터(24)/도구(20)에 의한 가상 경계(71)의 충돌에 응답하여 공급 레이트(FR)를 조정하는 다른 방식이 고려된다.

[0116] 공급 레이트(FR)를 생성하기 위해 정의된 공급 레이트를 조정하기 위해 공급 레이트 계산기(82)에 의해 이용될 수 있는 두 개의 부가적인 입력 변수들은 도 8에 도시된 바와 같이, 실제 원치 않은 배향 모션(실제 UOM) 및 예상된 원치 않은 배향 모션(예상 UOM)이다. 이들 입력은 후속 섹션에서 상세히 설명되며, 운동학적 사슬(KC)의 하나 이상의 비-도구 경로 구성요소의 실제 또는 예상된 원치 않은 배향 모션을 결정, 식별 또는 모니터링할 수 있는 제어 알고리즘에 의해 제공된다. 이러한 변수들은 배향 모션의 원치 않은 효과들을 완화하기 위해 공급 레이트(FR)를 능동적으로 또는 사전에 변경하도록 입력될 수 있다. 원치 않은 배향 모션을 식별, 계산, 모니터링하기 위한 기술들이 다음 섹션에서 설명된다.

[0117] 공급 레이트 계산기(82)는 정의된 공급 레이트를 계수들과 곱할 수 있다. 이 공정의 생성물은 에너지 어플리케이터(24)가 전류 경로 세그먼트를 따라 전진되어야 하는 실제 속도인 공급 레이트(FR)이다.

[0118] 공급 레이트 계산기(82)로의 추가 입력은 힘 오버라이드(도 8) 모듈, 또한 경로 생성기(68)의 구성요소로부터 어서트된 신호일 수 있다. 에너지 어플리케이터(24)의 반자율 전진 동안, 외과의사가 도구(20)를 갑자기 재위치시키려고 시도하게 하는 조건이 일어날 수 있다. 이러한 조치를 취할 때, 의사는 부주의하게 펜던트(88) 트리거를 해제하지 않을 수 있다. 이러한 이벤트가 일어나면, 도구 경로(TP)로부터 멀리 도구(20)를 변위시키기 위한 의사의 노력에 응답하여, 힘/토크 센서(S)는 비교적 높은 힘 및 토크에 노출된다. 이들 힘 및 토크는 힘 오버라이드 모듈에 의해 유지되는 상한 힘/토크 한계를 초과한다. 힘 오버라이드 모듈은 매니퓰레이터(14)를 반자율 모드로부터 수동 모드로 천이시키기 위한 신호를 출력하도록 구성된다. 힘 오버라이드는 또한 힘-토크 센서(S)의 출력을 평가하여, 이들 힘/토크가 지정된 시간 기간보다 큰 시간 동안 그들의 더 높은 제한 값들을 초과하였는지를 결정한다. 평가 테스트가 참이면, 힘 오버라이드는 기구 전력 생성 유닛의 비활성화를 초래하는 명령을 어서트한다. 힘 오버라이드는 또한 에너지 어플리케이터(24)의 반자율 전진의 정지를 초래하는 명령들을 어서트할 수 있다. 힘 오버라이드로부터의 신호의 표명에 응답하여, 공급 레이트 계산기(82)는 제로 속도 공급 레이트(FR)를 출력한다. 보통 공급 레이트 계산기(82)는 기구를 제로 속도 공급 레이트로 램핑한다. 힘 오버라이드가 의사로부터의 다른 명령의 입력에 기초하여 공급 레이트 계산기(82)로의 신호의 표명을 중단하면, 공급 레이트 계산기(82)는 제로가 아닌 속도 공급 레이트(FR)를 출력하는 것으로 복귀한다.

[0119] 도 8에 도시된 바와 같이, 경로 보간기(PATH INTRPLTR)는 경로 생성기(68)의 다른 서브-모듈 구성요소다. 경로 보간기(86)는 에너지 어플리케이터(24)의 좌표계에 대한 타겟 위치를 결정한다. 에너지 어플리케이터(24)의 원위 단부의 자세는 에너지 어플리케이터(24)의 좌표계에 대해 고정되는 것으로 이해된다. 이들 타겟 위치들은 작업을 수행하기 위해 에너지 어플리케이터(24)의 말단부가 이동해야 하는 포인트이다. 경로 보간기(86)로의 입력은 경로 세그먼트(PS)의 원점 및 종단을 정의하는 데이터; 세그먼트(PS)가 직선인지 또는 곡선인지를 나타내는 데이터, 및 곡선이면 곡선의 특성을 포함하지만, 이에 제한되지 않는다. 경로 보간기(86)로의 다른 입력은 공급 레이트 계산기(82)로부터의 공급 레이트(FR)이다. 이는 공급 레이트 계산기(82)에 의해 결정된 바와 같이 기구가 경로 세그먼트를 따라 이동해야 하는 속도이다. 상기한 입력 변수들에 기초하여, 경로 보간기(86)는 일 구현예에서 다음의 단계들에 따라 에너지 어플리케이터(24)의 원위 단부의 타겟 위치를 결정한다: 1) 에너지 어플리케이터(24)의 좌표계의 원점이 초기 위치에 있는 것으로 가정된다. 초기 위치는 에너지 어플리케이터(24)가 이동해야 하는 경로 세그먼트(PS)를 따른 위치이다. 에너지 어플리케이터(24)가 세그먼트(PS)의 시작 포인트에 있

다면, 이 포인트는 에너지 어플리케이터(24)의 좌표계의 초기 위치이다. 초기 위치와 타겟 위치 둘 모두는 골 좌표계에서의 포인트들이다. 2) 공급 레이트(FR)에 기초하여, 에너지 어플리케이터(24)가 단일 시간 프레임에서 세그먼트(PS)를 따라 이동하는 거리가 계산된다. 일부 버전들에서, 시간 프레임의 기간은 0.1 내지 2 밀리초이다. 3) 초기 위치, 계산된 거리의 길이 및 세그먼트 말단의 위치에 기초하여, 경로 보간기(86)는 타겟 위치를 정의하는 데이터를 생성한다. 타겟 위치들을 결정하기 위해 사용되는 추가 변수는 경로 세그먼트의 특성, 즉 직선 또는 곡선; 및 곡선이라면 곡률 반경을 기술하는 도구 경로 생성기로부터의 데이터이다. 4) 단계 1 내지 3은 좌표계 EAPP가 경로 세그먼트의 말단에 도달하였다고 결정될 때까지 반복된다. 세그먼트 원점으로부터 이격된 제1 타겟 위치의 계산 후에, 각 프레임에서 계산된 타겟 위치는 다음 프레임의 타겟 위치의 계산을 기초로 하는 초기 위치로서 이용된다. 5) 타겟 위치가 경로 세그먼트(PS)에 대한 종단 위치와 동일하면, 경로 보간기(86)는 새로운 세그먼트를 따라 위치되는 타겟 위치들의 세트를 생성하기 위해 단계들 1 내지 4를 반복한다.

[0120] 단일 프레임의 시간 기간 동안, 에너지 어플리케이터(24)가 이동할 수 있는 거리는 현재 세그먼트에 대한 종단 위치까지의 거리보다 클 수 있다. 경로 보간기(86)가 에너지 어플리케이터(24)가 이 상태에 있다고 결정하면, 보간기는 에너지 어플리케이터(24)가 현재 경로 세그먼트의 종단에 있다고 결정될 때 에너지 어플리케이터(24)가 시작하는 시점에 대해, 그 프레임의 끝에서 다음 경로 세그먼트를 따라 어디에 위치되어야 하는지를 표시하는 데이터를 생성한다.

[0121] 의사가 도구(20)의 반자율 전진을 시작할 준비가 되면, 의사는 도 1에 도시된 바와 같이 원격 제어 또는 펜던트(88)를 이용한다. 의사는 펜던트(88)의 버튼(90a, 90b)을 누를 수 있다. 일부 버전들에서, 하나 이상의 제어기는 버튼(90)의 누름에 기초하여 공급 레이트(FR)의 사용자 조정을 나타내는 계수를 출력한다. 일부 버전들에서, 계수는 0.0, 0.25, 0.40, 0.70 또는 1.0이다. 이는 도 8에 도시된 바와 같이, USER ADJUST 입력으로서 공급 레이트 계산기(82)에 적용되는 계수이다. 펜던트 버튼(90a)의 각 누름은 공급 레이트 계수를 다음 더 높은 레벨까지 재조정하는 결과를 가져온다. 펜던트 버튼(90b)의 각 누름은 공급 레이트 계수를 레벨 아래로 재조정하는 결과를 가져온다. 하나 이상의 제어기는 버튼(90) 중 어느 하나가 눌려졌는지 여부를 판정하기 위해 펜던트(88)를 모니터링한다. 기구 전진을 시작하기 위한 명령은 USER ADJUST 계수를 0 이상으로 리셋하기 위한 명령일 수 있다.

[0122] 모든 버전에서 공급 레이트 계산기(82)가 변수의 순간 값에 기초하여 공급 레이트(FR)를 항상 계산할 필요는 없다. 일부 버전들에서, 이러한 입력 변수들은 필터링될 수 있다. 마찬가지로, 임의의 가변 효과 공급 레이트(FR)의 범위를 확립하기 위해 곱셈기로서 사용되는 계수를 변화시키는 이유가 있을 수 있다. 특정 변수의 적용은 지연될 수 있다. 계수의 변화는 계수의 크기 변경의 효과를 혼합하거나 혼합하도록 필터링되거나 램핑될 수 있다. 이러한 필터링 또는 블렌딩은 도구(20)의 전진을 매끄럽게 한다. 기구의 전진의 이러한 평활화는 기구의 위치 결정의 신속한 변경으로 인해, 매니퓰레이터가 불안정하게 되거나 타겟 위치를 오버슈트할 수 있는 가능성을 감소시킬 수 있다. 임의의 변수의 효과는 선택적으로 무시될 수 있다. 예를 들어, 가장 작은 또는 가장 큰 계수에 기초하여 공급 레이트(FR)를 생성하는 한편, 다른 계수들은 무시되는 것이 바람직할 수 있다.

[0123] 일부 버전들에서, 공급 레이트 계산기(82)로의 두 개 이상의 변수들이 결합될 수 있다. 이러한 결합은 합산, 승산, 평균화 또는 분할에 의해 이루어질 수 있다. 계산된 계수들은 마찬가지로 합산되거나, 곱해지거나, 평균되거나, 또는 나누어져, 정의된 공급 레이트에 기초하여, 공급 레이트(FR)를 확립하기 위해 사용되는 최종 계수를 제공할 수 있다. 마찬가지로, 계수가 단지 가변-계수 공급 레이트 테이블에 기초하여 결정될 수 있는 요건은 없다. 이들 계수를 결정하는 다른 수단은 입력 변수로서 변수들을 방정식에 사용하는 것에 기초하며, 그 결과는 공급 레이트(FR)를 확립하는데 사용되는 계수이다. 방정식은 다항식 또는 비선형 방정식일 수 있다.

[0124] 마찬가지로, 기구 전류 인출 이외의 데이터는 기구 전력의 표시로서 기능하는 공급 레이트 계산기(82)에 의해 데이터로서 사용될 수 있다. 이들 데이터는 일정한 출력을 유지하기 위해 기구에 인가되도록 요구되는 전압 또는 듀티 사이클을 포함한다. 이 출력은 속도 또는 온도일 수 있다. 페루프 에너지 출력 디바이스의 경우에, 출력의 측정은 기구 전력의 표시로서 기능할 수 있다. 보다 구체적으로, 출력의 강하는 기구 전력의 변경의 표시로서 기능할 수 있다. 예를 들어, 감지된 파라미터가 모터 속도이면, 속도 강하는 기구의 전력 수요의 증가가 있음을 나타낸다. 동력 수요가 변경되었다는 이러한 추론적 표시에 기초하여, 공급 레이트 계산기(82)에 적용되는 INST POWER 계수가 조정된다.

[0125] III. 운동학적 사슬의 비-도구 경로 구성요소들의 원치 않은 배향 움직임을 고려하여 공급 레이트를 변경하기 위한 기술들

[0126] 이전 섹션에서 설명된 바와 같이, 공급 레이트(FR)는 다양한 조건 및/또는 변수에 기초하여 설정되고 변경될 수

있다. 이 섹션에서 설명된 바와 같이, 공급 레이트(FR)는 운동학적 사슬(KC)의 비-도구 경로 구성요소들의 원치 않은 배향 모션을 고려하여 변경될 수 있다. 여기서, 비-도구 경로 구성요소들은 도구 경로(TP) 상에 위치되지 않는(오프로 위치되는), 매니퓰레이터(14), 베이스(16), 링크들(18), 조인트들(J), 엔드 이펙터(22), 도구 샤프트(33)(적용가능한 경우), 장착 시스템 및/또는 멸균 인터페이스 메커니즘과 같은 운동학적 사슬(KC)의 구성요소들을 설명하는 용어이다. 즉, 비-도구 경로 구성요소는 도구 경로(TP) 상에 위치된 에너지 어플리케이터(24)를 제외한 운동학적 사슬(KC)의 임의의 성분을 포함한다. 완화될 원치 않은 배향 모션은 운동학적 사슬(KC)의 비-도구 경로 구성요소들에 대한 것이기 때문에, 에너지 어플리케이터(24)가 전진하고 있는 도구 경로(TP)의 세그먼트(PS)가 선형일 때에도 원치 않은 배향 모션을 고려하기 위한 공급 레이트(FR)의 변경이 일어날 수 있다. 아래에서 설명되는 바와 같이, 원치 않은 배향 모션의 존재 또는 예상된 존재에 영향을 미치는 다양한 환경들이 존재하고, 그러한 환경들은 완화 시에 도구 경로(TP)가 선형인지 또는 곡선인지에 관계없이 존재할 수 있다.

[0127] 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)는 에너지 어플리케이터(24) 이외의 운동학적 사슬(KC)의 하나 이상의 구성요소(운동학적 사슬(KC)의 비-도구 경로 구성요소들)가 원치 않은 배향 모션을 경험하고 있거나 경험할 것임을 식별하도록 구성된다. 즉, 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)는 원치 않은 배향 모션이 능동적으로 그리고 현재 일어나고 있거나 일어날 것으로 예상된다고 결정할 수 있다. 어느 상황에서든, 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)는 이에 응답하여 에너지 어플리케이터(24)의 공급 레이트(FR)를 변경하여 원치 않은 배향 모션을 고려한다.

[0128] A. 원치 않은 배향 모션 및 효과

[0129] 배향 모션에 대한 용어 "원치 않은"은 의도적이든 아니든, 시스템(10)이 시스템 성능 또는 사용자 경험에 관련된 이유들로 인해 그러한 모션이 원해지지 않기 때문에 시스템(10)에 의해 제거되거나 완화되어야 하는 것으로서 결정 또는 식별하도록 구성된 비-도구 경로 운동학적 모션을 기술한다. 모션에 대한 용어 "배향"은 사실상 각도, 예를 들어, 비-도구 경로 구성요소의 회전 모션으로 이해될 수 있다. 배향 모션은 원형 경로를 따를 수 있지만 반드시 그럴 필요는 없다. 대신에, 원치 않은 배향 모션은 2차원 또는 3차원의 임의의 곡선 경로를 따른 모션일 수 있다. 여기서, "경로"는 운동학적 사슬(KC)의 임의의 비-도구 경로 구성요소에 의해 취해진 이동 경로를 단지 설명하고, 반드시 미리 정의된 이동 경로를 의미하지는 않는다(그러나 포함할 수 있다). 배향에 관한 용어 "모션"은 에너지 어플리케이터(24)이외의 운동학적 사슬(KC)의 임의의 하나 이상의 구성요소에 의해 경험된 또는 경험될 각속도, 각가속도, 또는 각 가가속도(jerk) 중 원치 않은 하나 이상으로 정의될 수 있다. 용어 "모션"은 비-도구 경로 구성요소의 정적 위치 또는 변위를 배제하지만, 대신에 시간에 따른 위치의 변화율, 또는 그 임의의 파생물을 포함한다.

[0130] 본원에서 설명된 비-도구 경로 구성요소는 에너지 어플리케이터(24)를 배제하기 때문에, 본원에서 설명되는 원치 않은 배향 모션은 절단 버(25)의 절단 축선을 중심으로 한 회전과 같은 에너지 어플리케이터(24)의 회전을 명시적으로 배제한다. 배향 모션은 운동학적 사슬(KC)의 비-도구 경로 구성요소의 선형 모션을 배제한다. 배향 모션은 또한, 적어도 일부 배향(예를 들어, x, y, z 축들에 대한 회전)에 의해 명령되는 모션과 비교하여, 위치(x ,y, z)에 의하여 엄격하게 명령된 모션을 배제한다. 이러한 배향 모션은 위치 명령된 모션에 부가되거나 배타적일 수 있다. 예를 들어, 명령된 포지션들(CP)은 도구 경로(TP)에 대한 TCP의(x, y, x) 포지션을 정의하고, 배향 자세들이 역 운동학적 솔루션에 의해 지시되기 때문에 비-도구 경로 구성요소들의 배향 자세들 또는 이동을 정의하지 않는다. 이로 인해, 도구 경로(TP)를 따른 에너지 어플리케이터(24)의 명령된 위치설정은 경로 세그먼트(PS)가 선형인지 또는 곡선인지에 관계없이, 원하는 위치 모션이고, 원치 않은 배향 모션이 아니다.

[0131] 원치 않은 배향 모션을 고려하는 것은 일부 구현예들에서, 배향 모션의 원치 않은 효과들을 완화시키기 위해 공급 레이트(FR)가 변경된다는 것을 의미한다. 예를 들어, 원치 않은 배향 모션은 에너지 어플리케이터(24)이외의 운동학적 사슬(KC)의 하나 이상의 성분이 갑작스런 회전 모션을 하게 할 수 있다. 일부 경우들에서, 갑작스런 터닝 모션은 비-도구 경로 구성요소들과 다른 객체 사이의 잠재적인 의도하지 않은 충돌의 가능성을 증가시킬 수 있다. 공급 레이트(FR)를 변경함으로써 원치 않은 배향 모션을 완화하는 것은 이러한 충돌의 가능성을 감소시킬 수 있다. 또한, 비-도구 경로 구성요소의 갑작스런 회전 모션은 매니퓰레이터(14)의 의도하지 않은 요동을 생성할 수 있고, 이는 차례로 도구 경로(TP) 또는 수술 부위에 대한 에너지 어플리케이터(24)의 명령된 위치에 부정확성을 야기할 수 있다. 공급 레이트(FR)를 변경함으로써 원치 않은 배향 모션을 완화하는 것은 이러한 부정확성의 가능성을 감소시킬 수 있다. 또한, 갑작스런 회전 모션은 의사에게 시각적으로 관련된 것으로 나타날 수 있다. 공급 레이트(FR)를 변경함으로써 원치 않은 배향 모션을 완화하는 것은 비-도구 경로 구성요소의 더 매끄럽고 더 일관된 모션을 제공함으로써 사용자 경험을 개선한다.

[0132] B. 원치 않은 배향 모션을 고려한 공급 레이트 변경

[0133] 원치 않은 배향 모션을 고려하여 공급 레이트(FR)를 변경하는 것은 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)가 이전 섹션에서 설명된, 실제 공급 레이트(FR) 또는 정의된 공급 레이트를 변경하는 것에 의해 일어날 수 있다. 도 8의 변수(실제 UOM) 및(예상 UOM)는 공급 레이트(FR)를 경로 보간기(86)에 출력하기 위해, 임의의 다른 변수와 함께 공급 레이트 계산기(82)에 직접 입력될 수 있다.

[0134] 다른 구현예에서, 변수(실제 UOM) 및 변수(예상 UOM)로부터의 입력은 공급 레이트 계산기(82)를 바이패스할 수 있고, 대신에 경로 보간기(86)에 입력되어, 도 8에서 점선으로 도시된 바와 같이, 공급 레이트 계산기(82)에 의해 출력된 공급 레이트를 오버라이드한다. 이러한 오버라이딩은 다른 공급 레이트 변수들이 달리 지시할 수 있는 상황들에서와 같이, 원치 않은 배향 모션이 완화되는 것을 보장하는데 유익할 수 있다. 원치 않은 배향 모션이 식별될 때, 이러한 공급 레이트 오버라이딩은 디폴트 설정 또는 특정 환경들에 대한 예외일 수 있다. 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)는 임의의 적절한 기준들 또는 조건, 이를테면, 비제한적인 배향 모션에 관련된 임계치(예를 들어, 크기, 방향, 지속기간)의 초과, 수술 절차의 스테이지, 원치 않은 배향 모션의 허용오차에 관련된 외과 의사 선호도들, 원치 않은 배향 모션을 야기할 수 있는 임의의 조건들의 식별된 존재(도 14에 도시됨), 도구 경로(TP) 또는 세그먼트에 관련된 임의의 팩터, 공급 레이트 계산기(82)에 의해 출력된 공급 레이트의 값, 또는 공급 레이트를 컴퓨팅하는 데 사용되는 위에서 설명된 변수들 중 임의의 변수의 입력 값들에 기초하여, 공급 레이트를 오버라이드하는 조건이 존재할 때를 결정할 수 있지만, 이에 제한되지 않는다.

[0135] 일부 구현예들에서, 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)는 가상 강체로서 도구(20) 및 에너지 어플리케이터(24)를 모델링하고 가상 강체에 인가된 가상 힘에 기초하여 원치 않은 배향 모션을 고려하여 공급 레이트(FR)를 변경하도록 구성된다. 이와 같이, 변수들(실제 UOM) 및(예상 UOM)로부터의 원치 않은 배향 모션 또는 입력에 관련된 파라미터들이 가상 힘에 포함될 수 있으며, 이는 위에서 설명된 계산된 힘(CMPTD FORCE) 변수일 수 있다.

[0136] 일부 구현예들에서, 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)는 공급 레이트(FR)를 감소시키도록 또한 구성됨으로써 원치 않은 배향 모션을 고려하도록 공급 레이트를 변경한다. 일례에서, 공급 레이트(FR)는 에너지 어플리케이터(24)이외의 운동학적 사슬(KC)의 하나 이상의 구성요소에 의해 경험된 또는 경험될 원치 않은 배향 모션의 크기 및/또는 방향에 상관된 팩터에 의해 감소된다. 일부 구현예들에서, 변경된 공급 레이트는 공급 레이트의 변경 전에 존재하는 공급 레이트의 속도보다 작은 제로가 아닌 속도이다. 즉, 기존의 공급 레이트(FR)는 원치 않은 배향 모션을 완화시키도록 감소될 수 있다. 변경 또는 감소는 점진적이거나 충격적일 수 있고, 원치 않은 배향 모션을 완화시키는 데 요구되는 것으로 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)에 의해 결정된 지속 기간과 같은 임의의 지속 기간에 걸쳐 또는 임의의 지속 기간 동안 일어날 수 있다.

[0137] 일부 경우에, 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)는 공급 레이트(FR)를 추가적으로 또는 대안적으로 증가시키거나 또는 그렇지 않으면 증가시키도록 계획된 기존의/미리 결정된 공급 레이트(FR)을 의도적으로 유지함으로써 원치 않은 배향 모션을 완화시킬 수 있다. 예를 들어, 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)는 공급 레이트(FR)를 신속하게 감소시킬 수 있고, 그 후 공급 레이트를 증가시켜 원치 않은 배향 모션을 완화시킬 수 있다.

[0138] 운동학적 사슬(KC)의 비-도구 경로 구성요소의 원치 않은 배향 모션의 일례가 도 10 및 도 11에 도시되어 있다. 이 예에서, 원치 않은 배향 모션을 경험하는 운동학적 사슬(KC)의 비-도구 경로 구성요소는 도구(20)의 샤프트(33) 및 매니퓰레이터(14)의 하나의 조인트(J)이다. 도 10에서, 에너지 어플리케이터(24)는 명령된 위치(CP1 및 CP2) 사이에서 곡선 경로 세그먼트(PS1)를 따라 전진된다. 이러한 모션 동안, 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)는 도구 샤프트(33) 및 조인트(J6)가 공급 레이트(FR1)에 따른 전진의 결과로서 원치 않은 배향 모션(UOM1)을 경험하거나 경험할 것임을 식별 또는 예측한다. 조인트(J6) 및 도구 샤프트(33)의 상태는 시간 단계(T1)에서 점선으로 표시되고, 후속 시간 단계(T2)에서 실선으로 표시된다. 원치 않은 배향 모션(UOM1)은 T1과 T2 사이의 도구 샤프트(33) 및 조인트(J6)의 급격한 회전(화살표로 도시됨)을 초래한다. 일례에서, 도구 샤프트(33) 및 조인트(J)의 원치 않은 배향 모션(UOM1)은 구성요소의 각 이전 위치에 대해 및/또는 매니퓰레이터(14)의 임의의 다른 구성요소에 대해 샤프트(33) 및 조인트를 각운동을 평가하는 것을 포함하여, 본원에서 설명되는 방법들 중 임의의 방법을 사용하여 결정될 수 있다. 원치 않은 배향 모션은 또한 에너지 어플리케이터(24), 도구 경로(TP) 및/또는 명령된 위치(PS)와 같은 원치 않은 배향 모션을 경험할 수 있거나 경험하지 않을 수 있는 기준 기준에 대해 식별될 수 있다.

[0139] 도 11에서, 원치 않은 배향 모션을 완화하기 위해, 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)는 공급 레이트(FR1)를 상이한 공급 레이트(FR2)로 변경한다. 도 11에서, 도구 샤프트(33)의 상태는 시간 단계(T2)에서 점선으로 표시되고, 후속 시간 단계(T3)에서 실선으로 표시된다. 공급 레이트(FR2)는 에너지 어플리케이터(24)가 동일한 경로 세그먼트(PS1)를 횡단하는 동안 변경된다. FR2로의 공급 레이트를 의도적으로 변경하는 것은 차례로 명령된 위치

(CP2)에 도달하기 전에 도구 샤프트(33) 및 조인트(J6) 모두의 원치 않은 배향 모션(UOM2)이 감소되거나 제거되게 한다.

[0140] 도 10 및 도 11의 이전 예에서, 공급 레이트(FR)는 하나의 경로 세그먼트(PS)를 횡단하는 에너지 어플리케이터(24)의 프로세스에서 원치 않은 배향 모션(UOM)을 고려하도록 변경되었다. 도 12 및 도 13에서, 에너지 어플리케이터가 경로 세그먼트(PS1)의 횡단을 완료하고 다음 명령된 위치(CP2)에 도달한 후에 공급 레이트(FR)를 변경함으로써 원치 않은 배향 모션(UOM)을 완화시키는 다른 예가 도시된다. 즉, 원치 않은 배향 모션은 CP1과 CP2 사이의 경로 세그먼트 PS1 상에서 일어나지만, FR1에서 FR2로의 공급 레이트의 변경으로 인해 CP2와 CP3 사이의 다음 경로 세그먼트 상에서 완화된다. 후속 명령된 위치(CPN)는 공급 레이트(FR)를 변경하기 전 또는 후에 결정될 수 있다.

[0141] 이러한 실시예들은 원치 않은 배향 모션이 일어난 후에 일어나는 공급 레이트(FR)의 반응적 조정을 예시한다. 원치 않은 배향 모션을 고려하기 위한 공급 레이트(FR) 수정은 대안적으로 예측적일 수 있어서, 운동학적 사슬(KC)의 비-도구 경로 구성요소는 시스템(10)이 이를 사전적으로 완화시킬 것이기 때문에 원치 않은 배향 모션을 경험(또는 완전히 경험)하지 않는다.

[0142] 원치 않은 배향 모션 – 영향을 미치는 팩터들 및 예들

[0143] 도 14를 참조하면, 원치 않은 배향 모션(UOM으로 도시됨)은 하나 이상의 현재 또는 예상된 외부 조건들, 상황들, 또는 동작들에 응답하여, 그 동안, 또는 그에 기초하여 일어나거나 일어날 것으로 예상된다. 이러한 팩터는 매니퓰레이터(14) 자체, 수술 환경 또는 사용자로 인해 일어날 수 있다. 개별적으로든 또는 조합하여서든, 이러한 조건들, 상황들, 또는 동작들은 원치 않은 배향 모션의 존재 또는 예상된 존재에 영향을 미치는 직접 또는 간접 팩터들일 수 있다.

[0144] 일 구현예에서, 임의의 현재 또는 예상된 외부 조건, 상황, 또는 동작에 대해, 도 14에서 100으로 도시된 바와 같이, 반자율 모드에서 에너지 어플리케이터(24)의 전진 동안 원치 않은 배향 모션이 일어나거나 일어날 것으로 예상된다. 이는 시스템(10)이 전형적으로 도구 경로(TP)를 따라 에너지 어플리케이터(24)를 이동시키기 위해 반자율 모드에서 제어된 공급 레이트를 구현한다는 이해에 기초한다. 원치 않은 배향 모션은 수동 모드와 같은 다른 동작 모드에서 일어날 수 있다. 예를 들어, 매니퓰레이터(14) 및/또는 엔드 이펙터(22)는 사용자가 예를 들어, 삽입 축을 따라 도구의 공급 레이트를 수동으로 제어할 수 있게 하는 공급 레이트 제어기 인터페이스 또는 펜던트를 구비할 수 있다. 이러한 상황에서, 원치 않은 배향 모션은 사용자가 예를 들어, 수동 모드에서 공급 레이트를 수동으로 제어할 때에도 일어날 수 있다. 수동 공급 레이트 제어의 일례는 "Robotic Surgical System and Methods Utilizing a Cutting Bur for Bone Penetration and Cannulation"이라는 명칭의 미국 특허 출원 공개 제2020/0289133A1호에 설명되며, 이의 내용 전문이 본원에 원용된다.

[0145] i. 결정된 공급 레이트 및 변수들

[0146] 원치 않은 배향 모션의 존재 또는 예상된 존재에 영향을 줄 수 있는 하나의 팩터는 도 14의 104에 도시된 공급 레이트(FR)의 계산에 이용되는 공급 레이트 또는 변수에 따른 에너지 어플리케이터(24)의 전진이며, 이전 섹션에서 설명된 바와 같다. 이 상황에서, 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)는 공급 레이트(FR)에 따라 도구 경로(TP)를 따라 명령된 위치(CP)로 에너지 어플리케이터(24)를 전진시킨다. 이러한 공급 레이트 전진으로 인해, 역운동학적 솔루션은 운동학적 사슬(KC)의 하나 이상의 비-도구 경로 구성요소가 원치 않은 배향 모션을 경험하게 할 수 있다는 것을 생각할 수 있다. 원치 않은 배향 모션의 존재 또는 예상된 존재는 이러한 공급 레이트 조정 팩터가 비-도구 경로 구성요소의 배향 모션에 영향을 미친다는 이해에 기초하여 다음 중 임의의 것에 의해 영향을 받을 수 있다: 예를 들어, 펜던트(88)를 사용함으로써 공급 레이트(FR)에 대한 사용자 조정(106)(USER ADJUST); 경로 곡률(108)(PATH CRVTR); 조직 온도(110)(TISSUE TEMP), 기구 전력(112)(INST. POWER), 및/또는 가상 경계(113)와의 충돌(VB COLLISION). 도 10 및 도 11 및 도 12 및 도 13에 각각 도시된 예는 공급 레이트(FR) 또는 공급 레이트의 계산에 이용되는 변수에 따른 에너지 어플리케이터(24)의 전진에 기초하여 일어나는 원치 않은 배향 모션을 도시하는 것으로 간주될 수 있다.

[0147] ii. 제약들

[0148] 원치 않은 배향 모션의 존재 또는 예상된 존재에 영향을 줄 수 있는 다른 팩터는 시스템(10) 상의 또는 시스템(10)의 제약들(114로 도시됨)이다. 이러한 제약은 운동학적 사슬(KC)의 임의의 구성요소와 관련된 기계적 제약 및/또는 가상 제약일 수 있다. 이들 제약들은 개별적으로 또는 조합하여, 원치 않은 배향 모션에 영향을 줄 수 있다.

[0149] 원치 않은 배향 모션의 존재 또는 예상된 존재에 영향을 줄 수 있는 하나의 제약은 도 14의 116에 도시된 워크스페이스 한계 제약이다. 매니퓰레이터 제어기(26)에 의해 수행되는 모션 제어 프로세스들의 일부로서, 워크스페이스 한계가 에너지 어플리케이터(24)가 정의된 워크스페이스의 경계에 도달하고 있는지를 결정하기 위해 평가된다. 이 워크스페이스의 한계는 좌표계(MNPL)의 원점으로부터 이격되고 이 좌표계를 참조하여 정의된다. 워크스페이스는 링크(18)가 그 모션 범위의 완전한 연장으로 이동할 수 있다면 에너지 어플리케이터(24)가 이동할 수 있는 체적 내에 있다. 때때로 "덱스트러트 워크스페이스(dexterous workspace)"로 지칭되는 이러한 워크스페이스 및 매니퓰레이터(14)는 에너지 어플리케이터(24)가 이 워크스페이스 밖으로 전진하는 것을 방지한다. 워크스페이스 한계는 임의의 기하학적 형상을 가질 수 있고, 예를 들어, 의사가 엔드 이펙터(22)를 재배향하는 적어도 일부 능력을 갖는 것을 보장하기 위해, 통상적으로 매니퓰레이터(14)의 전체 모션 범위 내의 공간의 체적보다 작다. 이러한 워크스페이스 한계를 고려하는 과정에서, 운동학적 사슬(KC)의 하나 이상의 비-도구 경로 구성요소가 교정 재배향에 의해 원치 않은 배향 모션을 경험할 것으로 생각된다.

[0150] 원치 않은 배향 모션의 존재 또는 예상된 존재에 영향을 줄 수 있는 다른 제약은 도 14의 118에 도시된 간섭 제한 제약이다. 여기서, 매니퓰레이터 제어기(26)는 링크(18) 또는 매니퓰레이터(14)의 임의의 구조 부재 사이의 충돌을 피하기 위해 매니퓰레이터(14)를 제어한다. 이러한 충돌을 방지하기 위한 한 가지 이유는 링크(18)들 사이에 핀치 포인트(pinch point)가 형성되는 결과를 초래할 수 있는 링크들(18)의 상대 이동을 방지하기 위한 것이다. 이러한 충돌을 방지하는 것은 또한 이러한 충돌에 의해 야기되는 손상을 방지한다. 실제 조인트 각도들의 표현들에 기초하여, 매니퓰레이터 제어기(26)는 잠재적으로 충돌하는 링크들(18)의 쌍들 사이의 최소 거리를 결정한다. 이러한 결정을 하기 위해, 매니퓰레이터 제어기(26)는 조인트들(J)의 자세, 및 잠재적으로 충돌하는 링크들(18)의 쌍들 사이의 공통 정상 거리들 및 최소 거리들을 결정하기 위해 전방 운동학 데이터를 사용할 수 있다. 매니퓰레이터 제어기(26)는 잠재적으로 충돌하는 링크들(18)의 쌍들에 대한 최소 거리와 링크들의 쌍(18)에 대한 경계 거리 사이의 차이를 계산한다. 이 경계 거리는 서로를 향한 링크(18)의 이동이 원치 않은 거리이다. 이러한 간섭 한계를 고려하는 과정에서, 운동학적 사슬(KC)의 하나 이상의 비-도구 경로 구성요소가 교정 재배향에 의해 원치 않은 배향 모션을 경험할 것으로 생각된다.

[0151] 원치 않은 배향 모션의 존재 또는 예상된 존재에 영향을 줄 수 있는 다른 제약은 도 14의 118에 또한 도시된 특이점(singularity) 회피와 관련된 제약이다. 특이점은 예측할 수 없는 로봇 모션 및 속도들을 초래하는 둘 이상의 로봇 링크들 또는 조인트들(J)의 동일 선상의 정렬에 의해 야기되는 조건이다. 축들 또는 조인트들(J)이 특이점에 배치될 때, TCP에 대해 동일한 위치를 달성하기 위해 역 운동학에 대한 무한한 수의 방식들이 존재할 수 있다. 이러한 상태를 피하기 위해, 매니퓰레이터 제어기(26)는 많은 제어 기술들 중 하나를 구현할 수 있다. 일례에서, 상술된 간섭 제한들이 구현될 수 있다. 다른 예에서, 특이점 분석은 로봇 조립 또는 교정 동안 수행될 수 있다. 분석은 매니퓰레이터 제어기(26)에 저장된 특이점 회피 데이터를 산출할 수 있다. 접근하는 특이점에 응답하여, 매니퓰레이터 제어기(26)는 매니퓰레이터(14)에게, 특이한 직선 자세로부터 특정 조인트들(J)에서 선행적으로 회전하는 것과 같은 교정 조치를 취하도록 명령할 수 있다. 교정 동작은 또한 조인트(J)가 TCP 위치를 변경하지 않고 이동될 수 있는 영공간 내에서 조인트(J) 위치를 변경함으로써 일어날 수 있다. 엔드 이펙터(22)의 궤적 또는 배향은 또한 특이점을 피하도록 변경될 수 있다. 특이점들을 회피하는 프로세스에서, 운동학적 사슬(KC)의 하나 이상의 비-도구 경로 구성요소들이 교정 동작에 의해 원치 않은 배향 모션을 경험할 것으로 생각될 수 있다.

[0152] 원치 않은 배향 모션의 존재 또는 예상된 존재에 영향을 줄 수 있는 다른 제약은 도 14의 120에 도시된 가상 제약이다. 예를 들어, 가상 제약은 예를 들어, 도구(20), 에너지 어플리케이터(24), 및/또는 매니퓰레이터(14)의 이동 또는 동작을 제약하기 위한 가상 객체 또는 경계(71)를 정의할 수 있는 경계 생성기(66)에 의해 구현되는 것일 수 있다. 이전 섹션에서 설명된 바와 같이, 이러한 가상 경계들(71)은 3D 골 모델과 같은 해부학적 모델(AM)에 대해 정의될 수 있다. 매니퓰레이터 제어기(26) 및/또는 네비게이션 제어기(36)는 가상 경계(71)에 대한 도구(20)의 상태를 추적한다. 일례에서, TCP의 상태는 가상 시뮬레이션을 통해 가상 강체 모델에 인가될 촉각력을 결정하기 위해 가상 경계들(71)에 대해 측정되어, 각 운동학적 구성요소는 가상 경계(71, 예를 들어, 가상 경계들을 넘어 이동되지 않음)에 대한 원하는 위치 관계로 유지된다. 가상 시뮬레이션의 결과는 매니퓰레이터(14)에 명령된다. 이러한 가상 경계(71)를 준수하는 과정에서, 운동학적 사슬(KC)의 하나 이상의 비-도구 경로 구성요소가 교정 촉각력 또는 반력에 의해 원치 않은 배향 모션을 경험할 것으로 생각된다.

[0153] 도 15 및 도 16은 제한 충돌로부터의 교정 촉각력 또는 반력에 의해 원치 않은 배향 모션을 경험하는 운동학적 사슬(KC)의 비-도구 경로 구성요소의 예를 도시한다. 보다 구체적으로, 이 예에서, 비-도구 경로 구성요소는 도구(20)의 샤프트(33)이고, 제약은 가상 경계(71)이다. 이 예에서 가상 경계(71)는 해부 모델(AM)과 연관될 수

있고, 예를 들어, 전체 엉덩이 수술을 위한 대퇴부 샤프트와 연관될 수 있다. 가상 경계(71)는 제거되지 않아야 하는 대퇴골의 영역으로부터 에너지 어플리케이터(24)로 밀링함으로써 제거될 대퇴골 샤프트의 체적을 묘사한다. 에너지 어플리케이터(24)는 가상 경계(71) 내의 도구 경로(TP)를 따른다. 구체적으로, 에너지 어플리케이터(24)는 제1 공급 레이트(FR1)에 따라 도구 경로(TP)를 따라 전진된다.

[0154] 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)는 운동학적 사슬(KC)의 하나 이상의 구성요소에 대해 하나 이상의 가상 촉각 객체(VO)를 연관시킬 수 있다. 이 예에서, 가상 촉각 객체(VO)는 샤프트(33)와 연관되지만, 운동학적 사슬(KC)의 임의의 다른 구성요소와 연관될 수 있다. 가상 촉각 객체(VO)는 샤프트(33) 상에 시각적으로 및 물리적으로 존재하지 않지만, 대신에 가상적, 즉 샤프트(33)의 기하학적 구조와 계산적으로 관련된다.

[0155] 일부 구현예들에서, 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)는 제1 가상 촉각 객체(VO)를 제1 구성요소 상의 제1 위치에서 운동학적 사슬(KC)의 제1 구성요소에 대해 연관시킬 수 있다. 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)는 또한 제1 위치로부터 이격된 제1 구성요소 상의 제2 위치에서 운동학적 사슬(KC)의 제1 구성요소에 대해 제2 가상 촉각 객체(VO)를 연관시킬 수 있다. 가상 촉각 객체(VO)는 하나 이상의 링크(18), 조인트(J), 베이스(16), 엔드 이펙터(22), 샤프트(33) 등에 대해 운동학적 사슬(KC)의 임의의 구성요소 상에 위치될 수 있다. 일례에서, 도 15에 도시된 바와 같이, 가상 촉각 객체(VO)는 샤프트(33)의 근위 단부 근처에 배치되는데, 이는 샤프트(33)의 원치 않은 배향 모션에 대한 가능성이 에너지 어플리케이터(24)가 위치되는 샤프트(33)의 원위 단부보다 샤프트(33)의 근위 단부 근처에서 더 크기 때문이다.

[0156] 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)는 도 15에 도시된 바와 같이 하나 이상의 가상 촉각 객체(VO)와 가상 경계(71) 사이의 충돌을 검출할 수 있다. 일 구현예에서, 충돌 검출은 전술한 바와 같이, 네비게이션 시스템에 의한 해부학적 구조 및 도구(20)의 추적에 기초할 수 있다. 충돌의 크기 및/또는 방향은 가상 촉각 객체(들)(VO)와 가상 경계(71)의 메시의 다각형 요소들 사이의 교차에 기초하여 가상 촉각 객체가 경계(71)와 침투하는 깊이와 같은 임의의 적절한 기술을 사용하여 검출 및 측정될 수 있다. 대안적으로, 충돌은 그 내용이 본원에 원용되는 "Robotic Surgical System and Method for Producing Reactive Forces to Implement Virtual Boundaries"이라는 명칭의 미국 특허 출원 공개 제2018/0353253A1호에 설명되어 있는 투영된 아크 또는 투영된 영역 방법을 사용하는 것과 같이, 메시 다각형 요소의 기하학적 구조에 대해 경계지어진 가상 체적의 기하학적 구조의 함수인 침투 팩터에 기초하여 계산될 수 있다. 충돌에 응답하여, 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)는 샤프트(33)가 가상 경계(71)를 초과하는 것을 제한하도록 매니퓰레이터(14)를 제어한다. 구체적으로, 계산된 충돌의 크기 및/또는 방향에 기초한 반력(RF)이 매니퓰레이터(14)에 명령된다. 반력(RF) 및 그 각 방향은 충돌 위치 근처의 화살표로도 15에 도시되어 있다.

[0157] 도 16에서, 예는 충돌을 피하고/완화하기 위해 반력(RF)에 따라 매니퓰레이터(14)의 명령된 모션이 샤프트(33)의 원치 않은 배향 모션(UOM)을 야기하는 것을 도시한다. 다시, 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)는 샤프트(33)가 현재 원치 않은 배향 모션(UOM)을 경험하고 있거나 경험할 것임을 식별할 수 있다. 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)는 충돌의 검출에 응답하여 샤프트(33)의 제한에 응답하여 일어나는 원치 않은 배향 모션(UOM)을 설명하기 위해 FR1에서 FR2로 공급 레이트를 변경한다.

[0158] 도 15 및 도 16에 도시된 예는 운동학적 사슬(KC)의 비-도구 경로 구성요소가 제약에 의해 원치 않은 배향 모션을 경험하는 방법이나 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)가 이러한 원치 않은 배향 모션을 고려할 수 있는 방법에 관한 설명의 범위를 제한하도록 의도되지 않는다. 예를 들어, 샤프트(33)이외의 비-도구 경로 구성요소는 전술한 것과 같은 임의의 유형의 제약을 받을 수 있다. 제약은 또한 가상 촉각 객체 VO와 같은 충돌을 반드시 요구할 필요는 없지만, 대신에 모션 제한의 계산 제어에 기초할 수 있다. 예를 들어, 샤프트(33)는 가상 촉각 객체들(VO)이 존재하지 않고 가상 경계(71)와 충돌할 수 있다. 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)는 샤프트(33)의 알려진 물리적 기하학적 형상의 모델에 기초하여 충돌을 검출할 수 있다.

[0159] iii. 도구 재배향

[0160] 원치 않은 배향 모션의 존재 또는 예상된 존재에 영향을 줄 수 있는 다른 팩터는 도 14에서 122로 도시된 수술 도구(20) 및/또는 엔드 이펙터(22)의 재배향이다. 이러한 재배향은 도구 경로(TP)를 따라 에너지 어플리케이터(24)가 전진하는 동안일 수 있거나 또는 에너지 어플리케이터(24)가 정지되어 있을 때 일어날 수 있다.

[0161] 일례에서, 수술 도구(20) 및/또는 엔드 이펙터(22)의 재배향은 시스템(10)에 의해 개시될 수 있다. 예를 들어, 124에 도시된 바와 같이, 재배향은 매니퓰레이터 제어기(26)에 의해 수행되는 자동화된 재배향일 수 있다. 일례에서 자동화된 재배향은 수술 절차의 주어진 상황, 조건, 또는 단계에 대해 최적이거나 바람직한 것으로 시스템

(10)에 의해 결정된 원하는 배향으로의 재배향일 수 있다. 에너지 어플리케이터(24)가 도구 경로(TP)를 따라 전진하는 경우에, 자동화된 재배향은 수술 부위에 접근하기 위한 시스템 선호도 및/또는 수술 부위 근처의 장애물에 의해 수술 도구(20) 및/또는 에너지 어플리케이터(24)에 적용되는 재배향 힘 및 토크에 응답하여 일어날 수 있다. 실제로, 경로 세그먼트(PS)를 따른 에너지 어플리케이터(24)의 전진을 차단하는 장애물이 있을 수 있다. 이러한 장애물은 돌출 조직 또는 수술 도구일 수 있다. 장애물이 에너지 어플리케이터(24)의 전진을 차단하는 것을 방지하기 위해, 도구(20)는 상이한 배향 또는 배향의 정상 범위 밖의 배향을 취할 필요가 있을 수 있다.

[0162] 일 구현예에서, 자동화된 재배향은 다음과 같이 구현될 수 있다. 도구(20)의 실제 자세를 알게 됨으로써, 매니퓰레이터 제어기(26)의 배향 조절기는 에너지 어플리케이터(24) 위에(예를 들어, 5- 20 cm 위에) 위치된 기준면(예를 들어, 평면)을 정의할 수 있고, 기준면은 도구(20)의 종축에 수직이다. 이어서, 배향 조절기는 도구(20)의 종축이 기준 표면과 교차하는 포인트 주위에 중심을 둔 기준 표면에 구멍(예를 들어, 원)을 형성한다. 개구는 도구(20)의 정상 배향의 한계를 정의할 수 있다. 배향 조절기는 도구(20) 배향이 이동하였음을 결정할 수 있거나, 개구 한계 내에서 또는 개구 한계를 넘어서 자세로 이동할 필요가 있을 수 있다. 이에 응답하여, 매니퓰레이터 제어기(26)는 매니퓰레이터(14)에 힘을 명령하여 도구가 개구 내에서 또는 개구 너머로 재배향되도록 할 수 있다. 자동화된 재배향을 구현하는 과정에서, 운동학적 사슬(KC)의 하나 이상의 비-도구 경로 구성요소가 원치 않은 배향 모션을 경험할 것으로 생각된다.

[0163] 다른 예에서, 수술 도구(20) 및/또는 엔드 이펙터(22)의 재배향은 도 14의 126에 도시된 바와 같이 사용자에 의해 개시될 수 있다. 일례에서, 시술자는 에너지 어플리케이터(24)가 도구 경로(TP)를 따라 전진되는 동안 도구(20)의 배향을 재설정하도록 결정할 수 있다. 도구 경로(TP) 부근에 있을 수 있는 조직 또는 다른 기구와의 접촉을 피하기 위해 도구(20)를 재배향하는 것이 바람직할 수 있다. 의사가 도구(20)를 그렇게 재배향하기를 원한다면, 그/그녀는 엔드 이펙터(22) 상의 입력을 작동시킨다. 대안적으로, 의사는 어떠한 명령도 입력하지 않고 힘에 의해 도구(20)의 재배향을 구현하려고 시도할 수 있다. 매니퓰레이터 제어기(26)는 예를 들어, 사용자 입력의 지속시간을 모니터링함으로써 또는 힘/토크 센서(S)에 의해 검출된 힘에 기초하여, 이 사용자 입력을 모니터링할 수 있다. 어느 경우든, 매니퓰레이터 제어기(26)는 대응하는 사용자 입력을 에뮬레이트하는 방식으로 도구(20)을 재배향시킬 것을 매니퓰레이터(14)에 명령할 수 있다. 수동 재배향을 구현하는 과정에서, 운동학적 사슬(KC)의 하나 이상의 비-도구 경로 구성요소가 원치 않은 배향 모션을 경험할 것으로 생각된다. 도구 재배향의 자동 또는 수동 로봇 제어의 예는 "Surgical Manipulator Capable of Controlling a Surgical Instrument in Multiple Modes"라는 명칭의 미국 특허 제9,119,655호, 및 "System and Method of Controlling a Surgical Tool During Autonomous Movement of the Surgical Tool"이라는 명칭의 미국 특허 제9,937,014호에서 설명된 것들과 같을 수 있으며, 이들 각 개시는 이에 의해 본원에 원용된다.

[0164] 도 17 및 도 18은 매니퓰레이터(14), 보다 구체적으로는 도구(20)의 재배향에 응답하여 원치 않은 배향 모션을 경험하는 운동학적 사슬(KC)의 비-도구 경로 구성요소의 예를 도시한다. 보다 구체적으로, 이 예에서 재배향은 (도시된 바와 같이) 원위 조인트(J)에 힘을 가하는 의사에 의해, 또는(도시되지 않은) 엔드 이펙터(22) 상의 사용자 입력을 작동시킴으로써 개시될 수 있다. 도 17에 도시된 재배향 동작 동안, 에너지 어플리케이터(24)는 제1 공급 레이트(FR1)에 따라 도구 경로(TP)를 따라 전진된다. 도 17에서, 예는 재배향 명령에 따른 매니퓰레이터(14)의 모션이 샤프트(33) 및 조인트(J)의 원치 않은 배향 모션(UOM)을 야기하는 것을 도시한다. 다시, 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)는 이들 구성요소들이 원치 않은 배향 모션(UOM)을 현재 경험하고 있거나 경험할 것임을 식별할 수 있다. 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)는 재배향에 응답하여 일어나는 원치 않은 배향 모션(UOM)을 설명하기 위해 FR1에서 FR2로 공급 레이트를 변경한다.

[0165] 도 16 및 도 17에 도시된 예는 운동학적 사슬(KC)의 비-도구 경로 구성요소들이 재배향에 의해 원치 않은 배향 모션을 경험하는 방법 또는 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)가 이러한 원치 않은 배향 모션을 고려할 수 있는 방법에 관한 설명의 범위를 제한하도록 의도되지 않는다.

[0166] iv. 외력

[0167] 원치 않은 배향 모션의 존재 또는 예상된 존재에 영향을 줄 수 있는 또 다른 팩터는 도 14의 122에 도시된 외력 또는 토크이다. 이러한 외력은 도구 경로(TP)를 따른 에너지 어플리케이터(24)의 전진 동안 일어날 수 있거나 또는 에너지 어플리케이터(24)가 정지되어 있을 때 일어날 수 있다. 이들 외력 및 토크는 도구(20) 전진에 대한 조직의 저항 및 예를 들어, 의사 또는 환경에 의해 운동학적 사슬(KC)의 임의의 하나 이상의 구성요소에 인가되는 외력 및 토크를 포함할 수 있다. 모션 제어 모듈들은 외력/토크가 매니퓰레이터(14) 또는 도구(20)에 가해지고 있는지 또는 객체들이 매니퓰레이터(14) 또는 도구(20)와 접촉하고 있는지를 검출하기 위해 매니퓰레이터

(14)의 상태를 모니터링할 수 있다.

[0168] 원치 않은 배향 모션의 존재 또는 예상된 존재에 영향을 줄 수 있는 외력/토크의 일례는 130으로 도시된 도구(20)에 적용되는 외력/토크이다. 일례에서, 이러한 외력/토크는 전술한 바와 같이 그리고 도 17 및 도 18에 도시된 바와 같이 힘 또는 사용자 입력에 의해 도구(20)를 수동으로 재배향하는 의사에 의해 도구(20)에 인가된다. 이러한 외력은 힘/토크 센서(S)에 의해 검출될 수 있다. 매니퓰레이터 제어기(26)는 또한 과도한 외력이 도구(20) 또는 에너지 어플리케이터(24)에 인가되고 있는지를 결정하기 위해 힘/토크 센서(S)에 의해 감지되는 힘 및 토크를 나타내는 신호들을 모니터링할 수 있다. 에너지 어플리케이터(24)가 적용되는 조직의 정상 저항의 결과로서, 도구(20)의 전진에 대한 약간의 저항이 있다. 도구(20)의 반자율 전진 동안, 힘/토크 센서(S)는 조직 저항의 인가에 응답하여, 센서가 상당한 한계를 초과하는 힘 및 토크의 레벨에 노출되는 것을 나타내는 신호를 출력할 수 있다. 도구(20) 상의 외력/토크를 고려하도록 매니퓰레이터(14)에 명령하는 프로세스에서, 운동학적 사슬(KC)의 하나 이상의 비-도구 경로 구성요소들은 원치 않은 배향 모션을 경험할 것으로 생각된다.

[0169] 외력/토크의 다른 예는 132로 도시된 매니퓰레이터(14)의 역구동이다. 역구동 토크는 매니퓰레이터(14), 도구(20) 및/또는 에너지 어플리케이터(24)에 가해지는 외력 및 토크에 응답하여 조인트 모터(27)에 의해 출력된다. 역구동 토크는 관성 및 중력을 극복하기 위해 필요한 토크를 초과하는 조인트 모터(27)에 의해 출력되는 토크이다. 매니퓰레이터(14), 도구(20) 및/또는 에너지 어플리케이터(24)가 외력 및 토크를 받을 때, 이들 힘 및 토크는 명령된 자세로의 도구(20)의 전진을 순간적으로 방해한다. 이는 차례로 하나 이상의 조인트(J)의 그들의 명령된 조인트 각도로의 전진을 순간적으로 방해한다. 외력 및 토크의 인가와 동시에 제어 루프는 조인트 모터(27)에 의해 출력되는 토크를 조정하여 이들 외력 및 토크를 보상한다. 역구동 토크를 계산하기 위해, 매니퓰레이터 제어기(26)는 외력 및 토크가 존재하지 않으면 조인트 모터(27)가 출력해야 하는 토크를 결정할 수 있다. 매니퓰레이터 제어기(26)는 인코더로부터 측정된 조인트 각도 및 전방 운동학 분석으로부터 계산된 조인트 각도를 이용할 수 있다. 역구동 토크가 결정될 수 있는 다른 변수는 조인트 모터(27)가 링크(18)에 적용하여 도구(20), 이에 따라 에너지 어플리케이터(24)를 명령된 자세를 향해 전진시키는 실제 토크이다. 실제 토크를 얻는 하나의 방법은 조인트 모터(27)에 의해 출력된 토크를 측정하는 것이고, 보다 정확하게는 감속 기어이다. 또 다른 방법은 토크 센서 또는 조인트 모터(27)의 전류 인출을 측정하는 센서에 의해 측정된 바와 같이 조인트 모터(27)의 토크를 모니터링하는 것이다. 역구동력을 고려하도록 매니퓰레이터(14)를 제어하는 과정에서, 운동학적 사슬(KC)의 하나 이상의 비-도구 경로 구성요소가 원치 않은 배향 모션을 경험할 것으로 생각된다. 로봇 매니퓰레이터의 역구동 제어의 예는 "Robotic System and Method for Backdriving the Same"이라는 명칭의 미국 특허 제10,327,849호에 설명된 것과 같을 수 있으며, 이들 각 개시는 이에 의해 본원에 원용된다.

[0170] 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)는 매니퓰레이터(14)의 역구동에 응답하여 운동학적 사슬(KC)의 비-도구 경로 구성요소들에 의해 경험되는 또는 경험될 원치 않은 배향 모션을 고려한다. (의도적으로 또는 충돌에 의해 일어나는) 역구동 동작 동안, 에너지 어플리케이터(24)는 제1 공급 레이트(FR1)에 따라 도구 경로(TP)를 따라 전진된다. 역구동 명령에 따른 매니퓰레이터(14)의 모션은 샤프트(33) 및 조인트(J)의 원치 않은 배향 모션(UOM)을 야기한다. 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)는 역구동에 응답하여 일어나는 원치 않은 배향 모션(UOM)을 고려하여 공급 레이트를 FR1에서 FR2로 변경한다.

[0171] 외력/토크의 다른 예는 134로 도시된 바와 같이, 환자 또는 환자 추적기(들)(54, 56)에 적용되는 것이다. 환자에게 적용될 때, 외력/토크는 환자를 재위치시키는 것으로 인해 일어날 수 있거나 또는 해부학적 구조와의 충돌로 인해 일어날 수 있다. 예를 들어, 로봇 매니퓰레이터 또는 에너지 어플리케이터(24)는 환자 해부학적 구조체와 충돌하여 이를 밀어낼 수 있다. 다른 예에서, 에너지 어플리케이터(24)는 해부학적 구조의 조작 동안 해부학적 구조를 물리적으로 밀 수 있다. 다른 예에서, 스태프 또는 다른 수술 도구에 의해 해부학적 구조에 부주의한 범프가 있을 수 있다. 환자 추적기(들)(54, 56)에 적용될 때, 외력/토크는 많은 동일한 이유들 때문에 일어날 수 있다. 여기서, 환자 추적기(들)(54, 56) 중 하나 이상은 외부/힘에 응답하여 그의 현재 위치로부터 상이한 위치로 이동한다. 환자 추적기(들)(54, 56)에 적용되는 외력/토크는 환자의 해부학적 구조의 움직임으로 인한 것일 수 있다. 외력/토크는 환자 추적기(들)(54, 56)가 부착되는 골/해부학적 구조에 대한 환자 추적기(들)(54, 56)의 이동을 야기할 수 있다. 즉, 해부학적 구조에 대한 환자 추적기(들)(54, 56)의 강성 고정은 제거, 이동 또는 느슨해질 수 있다. 이들 상황들 중 임의의 상황에서, 환자 추적기(들)(54, 56)는 이동할 가능성이 있고 이는 매니퓰레이터(14)의 동작에 영향을 미칠 수 있다. 일례에서, 환자 추적기(들)(54, 56)의 이동은 가상 경계(71)의 대응하는 이동을 야기하고, 가상 경계는 환자 추적기(들)(54, 56)가 부착되는 대응하는 해부학적 구조에 정합된다. 가상 경계(71)의 움직임은 매니퓰레이터(14) 또는 에너지 어플리케이터(24)와 충돌할 수 있다. 이러

한 상황은 환자 가상 경계(71)에 의해 제한된 매니퓰레이터(14)가 경계(71)에 의해 도구에 인가된 반력으로 인해 환자를 계속 압박하는 "런어웨이(runaway)" 에러 상태를 야기할 수 있다. 그러나, 이러한 압박에 응답하여, 동일한 경계(71)는 (현재) 이동하고 있는 해부학적 구조체와의 정합으로 인해 이동된다. 이러한 런어웨이 조건은 매니퓰레이터(14)의 작동(예를 들어, 방향, 공급 레이트, 명령된 위치 등)을 조정함으로써 저지되거나, 준수되거나, 또는 회피될 수 있다. 이러한 조건을 완화시키기 위해, 매니퓰레이터(14)가 제어되는 제약들이 조정될 수 있다. 런어웨이 조건들을 완화시키기 위해 본원에서 설명되는 기술들에 의해 사용될 수 있는 제어 시스템의 일례는 2020년 1월 10일에 출원되고 "Surgical Systems and Methods for Guiding Robotic Manipulators"이라는 명칭의 국제 특허 출원 제PCT/US2020/053803호에서 설명된 것과 같을 수 있으며, 이의 전체 개시가 원용된다. 다른 예에서, 외부/힘으로부터의 환자 추적기(들)(54, 56)의 움직임은 상이한 궤적, 도구 경로(TP) 또는 그 세그먼트들의 재생/업데이트를 야기할 수 있다. 매니퓰레이터(14)의 작동은 새로운 도구 경로(TP) 또는 궤적을 수용하도록 조정될 수 있다.

[0172] 환자 및/또는 환자 추적기(들)(54, 56)에 인가되는 외력을 고려하도록 매니퓰레이터(14)를 제어하는 과정에서, 또는 "런어웨이" 상태를 완화할 때, 운동학적 사슬(KC)의 하나 이상의 비-도구 경로 구성요소들이 원치 않은 배향 모션을 경험할 것으로 생각된다. 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)는 이들 외력/토크에 응답하여 운동학적 사슬(KC)의 비-도구 경로 구성요소들에 의해 경험되는 또는 경험될 원치 않은 배향 모션을 고려한다. (의도적으로 또는 충돌에 의해 일어나는) 교정 동작 동안, 에너지 어플리케이터(24)는 제1 공급 레이트(FR1)에 따라 도구 경로(TP)를 따라 전진된다. 교정 동작에 응답하는 매니퓰레이터(14)의 반응 모션은 비-도구 경로 구성요소들 중 어느 하나의 원치 않은 배향 모션(UOM)을 야기한다. 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)는 교정 동작에 응답하여 일어나는 원치 않은 배향 모션(UOM)을 고려하여 공급 레이트를 FR1에서 FR2로 변경한다.

[0173] D. 원치 않은 배향 모션을 고려하기 위한 예시적인 알고리즘

[0174] 도 19를 참조하여, 원치 않은 배향 모션을 고려하기 위한 방법(200)의 일 구현예가 설명된다. 방법(200)은 설명될 바와 같이, 하나 이상의 제어기(26, 68, 82) 및 로봇 수술 시스템의 임의의 보충 구성요소들에 의해 구현되는 알고리즘을 설명한다. 도 19에 도시된 방법(200)은 단계들이 추가되거나 생략될 수 있고, 존재하는 경우, 도시된 것과 상이한 순서로 실행될 수 있기 때문에 범위가 제한되지 않는다.

[0175] 일 구현예에서, 방법(200)은 공급 레이트(FR)가 결정되는 단계(202)에서 시작한다. 공급 레이트(FR)는 도 8에 도시된 바와 같이 이전 섹션에서 설명된 기술 및 변수에 따라 공급 레이트 계산기(82)에 의해 결정될 수 있다. 이 공급 레이트(FR)는 에너지 어플리케이터(24)가 이동하도록 명령될 속도이다. 이에 따라, 단계(204)에서, 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)는 공급 레이트(FR)에 따라 에너지 어플리케이터(24)를 전진시키도록 매니퓰레이터(14)에 명령한다. 이러한 전진은 예를 들어, 반자율 모드에서 도구 경로(TP)를 따르는 것과 같은 에너지 어플리케이터(24)의 위치 제어 전진이다. 운동학적 사슬(KC)의 다른 구성요소의 배향 및 위치 제어는 시스템의 다른 제약을 준수하면서 에너지 어플리케이터(24)가 명령된 위치로 이동할 수 있게 하기 위해서도 단계 204에서 일어날 수 있다.

[0176] 단계(206)에서, 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)는 운동학적 사슬(KC)의 비-도구 경로 운동학적 구성요소(들)의 원치 않은 배향 모션을 식별, 분석 및/또는 모니터링한다. 여기서, 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)는 능동적으로 일어나고 있거나(실제 UOM) 일어날 것으로 예상되는(예상 UOM) 원치 않은 배향 모션을 식별할 수 있다. 어느 경우에나, 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)는 실제 또는 예상된 원치 않은 배향 모션을 식별하기 위해 다음의 구성요소들, 기술들, 또는 알고리즘들 중 임의의 하나 이상을 이용할 수 있다. 다음 중 임의의 것이 개별적으로 또는 조합하여 이용될 수 있다. 실제 또는 예상된 원치 않은 배향 모션의 식별은 도 14에 도시되고 위에서 설명된, 실제 또는 예상되는 원치 않은 배향으로의 모션의 존재에 영향을 미치는 팩터들, 이벤트들, 또는 조건들 중 임의의 것에 대한 응답일 수 있다.

[0177] 단계(208)에서, 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)는 원치 않은 배향 모션을 식별, 분석 및/또는 모니터링하기 위해 매니퓰레이터(14)의 전방(FWD) 운동학적 측정을 선택적으로 채용할 수 있다. 여기서, 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)는 조인트(J) 각도의 함수로서 TCP의 데카르트 엔드포인트 위치를 계산하는 운동학적 프로세스를 구현한다. 전방 운동학적 프로세스는 매니퓰레이터(14)의 조인트(J) 내의 위치 센서(인코더)로부터 입력을 수신한다. 이 입력에 기초하여, 순배향 모션 프로세스는 베이스(16)에 대한 TCP의 위치를 계산한다. 도구(20)와 에너지 어플리케이터(24) 사이의 알려진 기하학적 관계에 기초하여, 베이스(16)에 대한 에너지 어플리케이터(24)의 위치가 계산될 수 있다. 위치 센서들이 조인트 위치를 모니터하기 때문에, 변환은 매니퓰레이터(14)의 모션을 반영하도록 주기적으로 업데이트될 수 있다. 전방 운동학적 계산은 역 운동학적 제어에 따라 수행된 에너지

어플리케이터(24)의 명령된 모션의 임의의 주어진 시간 단계 후에 업데이트될 수 있다. 전방 운동학적 계산의 프로세스에서, 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)는 에너지 어플리케이터(24)의 다양한 위치에 대한 전방 운동학적 파라미터 값을 비일시적인 메모리(64)에 저장할 수 있다. 에너지 어플리케이터(24)는 전진 운동학적 데이터가 포착될 때 공급 레이트(FR)에 따라 전진될 수 있다. 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)는 이후의 단계(216)에서 설명되는 바와 같이, 범위들, 임계치들, 또는 그렇지 않으면 원치 않은 배향 모션을 나타내는 조건들과 비교될 수 있는 조건들, 패턴들, 또는 추세들을 식별하기 위해 시간의 지속기간에 걸쳐 전방 운동학적 파라미터 값들을 분석할 수 있다. 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)는 또한 동적 구성요소들과 환경 객체들 또는 다른 동적 구성요소들 같은 다른 객체들 사이에서 일어나는 충돌들을 식별하기 위해 순방향 동적 데이터를 분석할 수 있다. 이러한 기술들로, 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)는 조인트 인코더들 이외의 센서들 또는 감지 시스템들의 사용 없이 원치 않은 배향 모션을 결정할 수 있다.

[0178] 단계(210)에서, 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)는 대안적으로 또는 추가적으로 임의의 주어진 수의 센서 또는 감지 시스템을 이용하여 실제 또는 예상된 원치 않은 배향 모션을 식별, 분석 및/또는 모니터링할 수 있다. 하나 이상의 센서는 에너지 어플리케이터(24)를 포함하는 운동학적 사슬(KC)의 임의의 하나 이상의 구성요소와 관련된 측정치를 생성하도록 구성된다. 일례에서, 하나 이상의 센서 또는 감지 시스템은 네비게이션 시스템(32) 또는 그의 임의의 구성, 예컨대 운동학적 구성요소들(KC)을 추적할 수 있는 광학, 전자기, 라디오 주파수, 관성, 초음파, 또는 머신-비전 기반 로컬화 시스템일 수 있다. 하나 이상의 센서는 조인트 또는 링크 위치, 조인트 또는 링크의 속도, 및 조인트 또는 링크에 대한 가속도 중 임의의 하나 이상을 감지하도록 구성된 조인트(J) 또는 링크(18) 중 어느 하나 이상에 결합된 센서를 포함할 수 있다. 이러한 센서들은 관성 센서들, 네비게이션 시스템(32)과 함께 이용되는 추적 요소들 등일 수 있다. 다른 예에서, 하나 이상의 센서는 조인트(J) 중 임의의 하나 이상의 조인트의 모터(27)에 의해 인출되는 전류를 감지하도록 구성된 전류 센서를 포함할 수 있다. 이러한 전류 감지는 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)가 원치 않은 배향 모션을 추론할 수 있는 조인트 토크를 나타낼 수 있다. 원치 않은 배향 모션을 식별하기 위해 위에서 구체적으로 설명된 것 이외의 센서 또는 감지 시스템을 사용하는 것이 고려된다. 하나 이상의 제어기(26, 68, 82) 및/또는 네비게이션 시스템(32)은 에너지 어플리케이터(24)이외의 운동학적 사슬(KC)의 하나 이상의 구성요소가 원치 않은 배향 모션을 경험하고 있거나 경험할 것임을 식별하기 위해, 주어진 시간 주기에서 또는 임의의 지속 시간에 걸쳐 측정치 중 임의의 것을 분석하도록 구성된다.

[0179] 단계(212)에서, 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)는 대안적으로 또는 추가적으로 관성 값들을 이용하여 실제 또는 예상된 원치 않은 배향 모션을 식별, 분석 및/또는 모니터링할 수 있다. 구체적으로, 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)는 에너지 어플리케이터(24)를 포함하는 운동학적 사슬(KC)의 임의의 하나 이상의 구성요소에 대한 관성 값을 비일시적인 컴퓨터 판독가능 매체(64)에 저장하도록 구성된다. 일례에서, 관성 값들은 회전 관성 값들이다. 회전 관성 값들은 관성 모멘트, 질량 관성 모멘트 및 각 질량 값들로도 알려져 있다. 이러한 값은 회전 축을 중심으로 특정 각운동에 필요한 토크를 결정하는 스칼라 양이다. 다른 구현예에서, 관성 값은 병진 또는 선형 관성 값일 수 있다. 이러한 값을 저장함으로써, 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)는 에너지 어플리케이터(24)이외의 운동학적 사슬(KC)의 하나 이상의 구성요소가 원치 않은 배향 모션을 경험하고 있는지 또는 경험할 것인지를 식별하도록 더 양호하게 구비된다.

[0180] 단계(214)에서, 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)는 대안적으로 또는 추가적으로 시뮬레이션을 이용하여 실제 또는 예상된 원치 않은 배향 모션을 식별, 분석 및/또는 모니터링할 수 있다. 여기서, 매니퓰레이터(14) 및 각 운동학적 구성요소들의 모션을 시뮬레이션하기 위해 수술 전 또는 수술 중 시뮬레이션이 수행될 수 있다. 이러한 시뮬레이션된 모션은 예를 들어, 도구 경로(TP)를 따른 에너지 어플리케이터(24)의 전진 또는 선택적으로 반자율 모드에 따른 전진의 시뮬레이션일 수 있다. 매니퓰레이터 제어기(26) 및 거동 제어기(74)를 포함하는 제어 시스템(60)은 베이스(16), 링크들(18), 조인트들(J), 엔드 이펙터(22), 도구(20) 및/또는 에너지 어플리케이터(24)의 강체 동역학을 시뮬레이션하기 위해 물리 엔진을 사용하여 위에서 설명된 가상 시뮬레이션 또는 다른 시뮬레이션 방식에서 매니퓰레이터(14)를 시뮬레이션할 수 있다. 시뮬레이션은 매니퓰레이터(14)를 런-타임으로 제어하기 위해 제어 시스템(60)에 의해 이용되는 것일 수 있거나 또는 그로부터 분리되어 구현될 수 있다. 시뮬레이션은 디스플레이 상에 시각적으로 또는 그래픽으로 표현되거나 또는 사용자에게 숨겨진 데이터에 의해 순수하게 구현될 수 있다. 일례에서, 시뮬레이션은 자동화된 수술 절차의 모든 부분에 대해 매니퓰레이터(14)의 이동을 수행할 수 있다.

[0181] 시뮬레이션은 셋업 또는 원하는 자세, 리드-인 또는 리드-아웃 경로 이동들, 사이트로부터 매니퓰레이터(14)의 후퇴, 매니퓰레이터(14)의 재배향, 공급 레이트 변경, 시스템에 대한 제약들 등을 포함하는 매니퓰레이터(14)의

제어와 관련된 임의의 또는 모든 팩터들을 고려할 수 있다. 또한, 시뮬레이션은 매니퓰레이터(14)와 관련된 다른 작업들, 이벤트들 또는 명령들과 관련된 데이터를 제공할 수 있다. 예를 들어, 시뮬레이션은 매니퓰레이터(14)의 임의의 구성요소의 운동학적 자세를 정의하는 로봇 데이터 또는 로그 또는 명령된 데이터(예를 들어, 에너지 어플리케이터(24)의 명령된 위치)를 포함할 수 있다. 시뮬레이션은 하나 이상의 가상 경계들(71)과의 임의의 매니퓰레이터(14) 구성요소들의 충돌들의 로그, 경계(71) 충돌의 침투의 크기/방향, 및/또는 제한 충돌을 교정하기 위해 적용된 각 반력의 파라미터들/값들을 포함할 수 있다. 시뮬레이션은 위에서 설명되고 도 14에 도시된 것들 중 임의의 것과 같은 원치 않은 배향 모션의 존재에 영향을 줄 수 있거나 영향을 주는 팩터들 중 임의의 것에 관련된 데이터를 획득할 수 있다. 추가적으로 또는 대안적으로, 시뮬레이션은 절차의 가상 트레일-런 동안 의사에 의해 부분적으로 수행될 수 있다. 여기서, 의사는 시뮬레이션에서 매니퓰레이터(14) 및 수술 부위를 볼 수 있다. 원치 않은 배향 모션의 존재에 영향을 미치는 상술된 팩터들 중 임의의 것이 이 시뮬레이션 동안 고려될 수 있다. 예를 들어, 외부 또는 의사 개시 팩터의 결과로서, 또는 자동화된 로봇 제어의 결과로서 일어나는 시뮬레이션된 외력, 제약, 충돌, 역구동, 재배향 등이 있을 수 있다.

[0182] 다른 구현예에서, 제어 시스템(60)은 수술 전에 또는 수술 중에 실행될 수 있는 기계 학습 알고리즘을 이용할 수 있다. 기계 학습 알고리즘은 원치 않은 배향 모션을 능동적으로 예측하기 위해 과거 로봇 및 네비게이션 시스템 데이터에 대한 현재의 로봇 모션을 분석할 수 있다. 이러한 예측들은 예를 들어, 예상된 원치 않은 배향 모션 이전에 수 초 또는 밀리초로 이루어질 수 있다. 신경 네트워크는 원치 않은 배향 모션을 예측하기 위해 종래의 로봇 수술 절차 또는 유사한 특성의 시뮬레이션에 대해 훈련될 수 있다. 훈련 데이터는 또한 환자 데이터, 임플란트 데이터, 시술 유형, 및/또는 외과 의사 선호도를 포함할 수 있다. 현재의 절차에 대해, 훈련된 신경망은 절차의 과정 전체에 걸쳐 예측된 원치 않은 배향 모션을 고려하여(공급 레이트의 조정을 포함하는) 매니퓰레이터(14)의 명령을 자동으로 수정하도록 적용될 수 있다. 외과의사는 시술 전에 기계 학습 예측의 영향 및 매니퓰레이터(14) 모션에 대한 각 수정을 시각적으로 검토하기 위해 입력 디바이스를 이용할 수 있다. 외과의사는 또한 매니퓰레이터(14) 모션에 대한 임의의 예측 수정들을 수용하거나 거부할 수 있다.

[0183] 시뮬레이션 또는 기계 학습 알고리즘의 결과는 다른 것들 중에서, 원치 않은 배향 모션을 나타내는 예측 런타임 이벤트들의 시간 로그를 포함하는 데이터를 포함할 수 있다. 이러한 데이터는 제어 시스템(60)에 저장되거나 전송될 수 있다. 절차 전에 또는 절차 동안에, 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)는 메모리로부터 시뮬레이션 또는 기계 학습 데이터를 검색하고, 시뮬레이션 데이터 및 로봇 시스템의 실제 런타임 데이터에 기초하여, 원치 않은 배향 모션이 일어날 것으로 예상되는 것을 식별하도록 구성된다. 그 후, 제어 시스템(60)은 다가오는 원치 않은 배향 모션의 예상된 효과를 감소시키거나 또는 존재를 제거하기 위해 매니퓰레이터(14)의 모션을 자동으로 수정할 수 있다. 본원에서 설명된 시뮬레이션 또는 기계 학습 기술은 전술한 바와 같이 임의의 다른 유형의 감지를 사용하여 구현될 수 있다. 또한, 이러한 시뮬레이션 또는 기계 학습은 본원에서 구체적으로 기술되지 않은 방식에 따라, 예를 들어, 인공 지능 및 계획 소프트웨어의 대안적인 형태를 사용함으로써 수행될 수 있는 것으로 고려된다. 채용될 수 있는 시뮬레이션 기술의 예는 "Patient-specific Preoperative Planning Simulation Techniques"라는 명칭의 미국 특허 출원 공개 제2019/0142520A1호에 설명되어 있으며, 이의 내용 전문이 이에 의해 본원에 원용된다.

[0184] 단계(216)에서, 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)는 선택적으로 실제 또는 예측의 원치 않은 배향 모션을 한계, 임계치 또는 범위와 비교한다. 이 기능은 원치 않은 방향 움직임으로부터 정상 또는 원하는 방향 움직임을 묘사하기 위해 수행될 수 있다. 한계, 임계치 또는 범위는 원치 않은 배향 모션의 시스템(10) 식별의 감도를 정의할 수 있다. 실제로, 이러한 감도의 균형은 절차 및 사용자 경험의 최적화에 유리하다. 과도한 수의 이벤트가 원치 않은 것으로 식별되면, 공급 레이트 감소로 인해 절차 시간이 연장될 수 있다. 너무 적은 이벤트들이 원치 않은 것으로 식별되면, 배향 모션의 원치 않은 효과들은 사용자 경험 또는 시스템 정확도를 포함할 수 있다. 의사는 적용 가능하다면, 절차 전에 또는 절차 동안 또는 시뮬레이션 스테이지 동안 이러한 감도를 조정할 수 있다. 임계치 또는 범위는 크기, 방향, 주파수, 지속시간 또는 운동학적 성분에 대한 각속도, 가속도 또는 가가속도의 과도한 값 중 임의의 하나 이상을 정의할 수 있다. 임계치들 또는 범위들과의 비교는 수술 전에, 수술 중에, 시뮬레이션 동안 또는 시뮬레이션에 응답하여, 또는 미래의 원치 않은 배향 모션을 나타내는 조건들을 식별하는 것에 응답하여 일어날 수 있다.

[0185] 하나의 비-제한적인 예에서, 단계(216)에서의 실제 또는 예측 배향 모션의 평가는 다음과 같이 수행될 수 있다: (예를 들어, 각속도에 관한) 하한을 특정 값(예를 들어, 0.2 rad/s) 미만으로 정의한다. 실제 또는 예측 배향 모션이 이러한 하한 미만인 경우, 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)는 무시해도 될 정도, 정상 및/또는 바람직한 것으로 간주할 수 있고, 공급 레이트(FR)를 변경하기 위한 조치를 취하지 않는다. 실제 또는 예측 배향 모션이

이러한 하한(예를 들어, 0.2 rad/s)이상이지만 제1 임계치(예를 들어, 0.4 rad/s)이하인 경우, 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)는 예컨대 원치 않은 것으로 간주할 수 있고, 본원에서 설명된 기술에 따라 공급 레이트(FR)를 변경하기 위한 조치를 취할 수 있다. 일례에서, 하한과 제1 임계치 사이의 범위 내에서, 공급 레이트(FR)는 배향 모션의 값에 대응하는 맵핑에 의해 변경될 수 있다. 배향 모션에 관련된 값들에 대한 맵핑 값들은 메모리의 룩업 테이블에 저장될 수 있다. 맵핑은 연속적이거나 불연속적일 수 있고, 선형 함수, 계단 함수, 지수 함수, 로그 함수, 맞춤형(평활) 함수, 또는 임의의 다른 유형의 함수에 따라 정의될 수 있다. 선형 맵핑에 대해, 예를 들어, 스케일링은 하한에서의 배향 모션 값들에 대해 1(기존의/원래의/최종 공급 레이트를 유지하기 위해 1만큼의 스케일링)일 수 있고, 제1 임계치에서의 배향 모션 값들에 대해 0(FR을 0으로 감소시키기 위해 0만큼의 스케일)일 수 있다. 하한과 제1 임계치에서 또는 이들 사이에서, 배향 모션 값들과 공급 레이트 사이에 선형 상관이 있을 수 있다(예를 들어, 기존의 FR을 절반만큼 감소시키기 위해 하한과 제1 임계치와의 중간에서 0.5만큼 스케일링). 제1 임계치를 초과하는 실제 또는 예측의 원치 않은 배향 모션 값들에 대해, 공급 레이트(FR)는 실제 또는 예상의 원치 않은 배향 모션의 값을 즉시 감소시키거나 제로-아웃하도록 변경될 수 있다. 즉, 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)는 예컨대 제로 허용 오차의 원치 않은 배향 모션을 고려할 수 있다.

[0186] 추가적으로 또는 대안적으로, 사용자는 예를 들어, 임상 적용을 사용하여 선호도 또는 수술 계획에 기초하여 이들 한계, 임계치, 범위, 또는 스케일링 값 중 임의의 것을 설정 또는 조정할 수 있다. 예를 들어, 스케일링(0 내지 1) 또는 제한은 디폴트 값의 50% 이상으로 감소되고 150% 이상으로 증가될 수 있다. 위에서 설명된 제한들 및 임계 예는 고려되는 많은 상이한 구성들 중 하나이다. 범위 및 값은 기재된 것 및 본 실시예와 상이할 수 있다.

[0187] 제한들, 임계치들 또는 범위들 및 스케일링/맵핑은 실제 또는 예측적인 원치 않은 배향 모션을 야기하는 조건 또는 이벤트에 특정될 수 있고, 다양한 조건들 또는 이벤트들(예를 들어, 도 14의 임의의 그러한 이벤트들/조건들)에 대해 개별적으로 정의될 수 있다. 제한들, 임계치들 및 범위들은 구체적으로 배향 모션(예를 들어, 각속도)의 값들에 대한 것일 필요는 없지만, 실제 또는 예측 배향 모션과 간접적으로/직접적으로 상관될 수 있는 다른 파라미터들/측정치들로부터의 값들일 수 있다. 예를 들어, 가상 경계(71)(120, 도 14)와의 충돌에 응답하여 일어나는 실제 또는 예측적인 원치 않은 배향 모션에 대해, 임계치 또는 범위 및 스케일링/맵핑은 침투 파라미터의 값에 의존할 수 있다. 예를 들어, 침투 값이 0.1㎜ 미만이면, 공급 레이트(FR)의 스케일링은 0일 수 있다. 침투 값이 0.1㎜ 이상 0.2㎜ 미만인 경우, 공급 레이트(FR)의 스케일링은 0 내지 1일 수 있다. 침투 값이 0.2㎜ 보다 크면, 공급 레이트(FR)의 스케일링은 0일 수 있다. 다시, 이들 임계치들 및 스케일링 값들은 예를 들어, 조건/이벤트 및 원하는 응답에 의존하여 설명된 것과 상이할 수 있다.

[0188] 단계(220)에서, 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)는 실제 또는 예상된 원치 않은 배향 모션의 존재를 만족시키는 조건이 일어나는지 여부를 결정한다. 조건의 만족은 단계(216)에서 임계치 또는 범위의 만족에 응답하여 일어난다. 조건의 만족은 언제라도 일어날 수 있다. 일례에서, 조건의 만족은 에너지 어플리케이터(24)의 명령된 위치의 시간에 식별될 수 있다. 이러한 경우에, 조건은 원시 운동학적 또는 로컬라이저(44) 값에 기초하여 그리고 임의의 필터링 없이 실시간으로 또는 거의 실시간으로 만족될 수 있다. 대안적으로, 조건의 만족은 데이터가 지속 시간(예를 들어, 50-150 ms)에 걸쳐 필터링될 수 있는 필터링된 로봇 또는 로컬라이저(44) 값에 기초하여 식별될 수 있다. 실제 또는 예상된 원치 않은 배향 모션은 이 필터링된 데이터에 기초하여 계산/측정될 수 있다. 조건의 만족이 일어나지 않으면, 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)는 단계(202)에서 공급 레이트(FR)를 유지 또는 재개할 수 있다.

[0189] 단계(218)에서, 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)는 실제 또는 예상된 원치 않은 배향 모션의 존재를 식별한다. 다시, 원치 않은 배향 모션의 식별은 언제라도 일어날 수 있다. 식별은 단계(220)에서의 임계치 또는 범위의 만족에 대한 응답일 수 있지만 반드시 그럴 필요는 없다. 대안적으로, 자동 식별은 외력, 제약, 재배향, 또는 공급 레이트 이벤트들(도 14에 도시됨)의 식별과 같은 상술된 팩터들 중 임의의 것의 분석에 기초하여 또는 단계(206)에서 센서들, 감지 시스템들, 관성 값들, 또는 시뮬레이션으로부터 비-도구 경로 운동학적 구성요소(들)의 실제/예상된 배향 모션을 식별하거나 모니터링하는 것으로부터의 분석에 기초하여 일어날 수 있다.

[0190] 단계(222)에서, 원치 않은 배향 모션을 식별하면, 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)는 실제 또는 예상된 원치 않은 배향 모션을 충분히 평가한 후, 적절한 교정 동작의 파라미터를 결정한다. 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)는 원치 않은 배향 모션을 고려하여 공급 레이트(FR)를 어떻게 변경할지를 결정한다. 이는 예를 들어, 단계 216에서 설명된 임의의 평가 방법에 따라 수행될 수 있다. 일 구현예에서,(도 14에 도시된) 영향을 미치는 팩터들 또는 조건들의 존재 또는 예상된 존재의 검출은 원치 않은 배향 모션을 고려하여 공급 레이트(FR)를 변경하는 방법을 정량화하는 데 사용될 수 있는 변수들 및 계수들에 의해 정의될 수 있다. 이는 도 8에 도시된 변수에 기

초하여 공급 레이트를 계산하기 위해 사용된 이전 섹션에서 설명된 기술과 유사한 방식으로 수행될 수 있다. 예를 들어, 원치 않은 배향 모션에 영향을 미치는 각 적용가능한 팩터에 관련된 각 계수는 0 내지 1.0 일 수 있다. 계수의 변화는 계수의 크기 변경의 효과를 혼합하거나 혼합하도록 필터링되거나 램핑될 수 있다. 이러한 필터링 또는 블렌딩은 원치 않은 배향 모션의 매끄러운 완화를 초래하도록 행해질 수 있다. 임의의 변수의 효과는 선택적으로 무시될 수 있다. 예를 들어, 가장 작은 또는 가장 큰 계수에 기초하여 공급 레이트(FR)에 대한 변경을 결정하는 한편, 다른 계수들은 무시되는 것이 바람직할 수 있다. 공급 레이트 계산기(82) 로의 2 이상의 변수들은 예를 들어, 합산, 승산, 평균화, 또는 분할에 의해 결합될 수 있다. 계산된 계수들은 마찬가지로 합산되거나, 곱해지거나, 평균되거나, 또는 나누어져, 공급 레이트(FR)를 어떻게 변경할지를 결정하는데 사용되는 최종 계수를 제공할 수 있다.

[0191] 단계(224)에서, 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)는 공급 레이트(FR)에 대한 변경을 수행한다. 이는 결정된 공급 레이트를 변경하거나 결정된 공급 레이트에 우선하여 수행될 수 있다. 실제로, 공급 레이트(FR)는 보통 원치 않은 배향 모션의 부정적인 영향을 완화시키기 위해 감소될 것이다. 공급 레이트(FR) 수정은 원치 않은 배향 모션이 일어나는 것에 반응할 수 있다. 대안적으로, 공급 레이트(FR) 수정은 운동학적 사슬(KC)의 비-도구 경로 구성요소가 기대되는 원치 않은 배향 모션을 경험하지 않도록(또는 완전히 경험하도록) 사전에 구현될 수 있는데, 이는 시스템(10)이 이를 사전에 완화시킬 것이기 때문이다. 일부 경우에, 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)는 추가로, 또는 대안적으로, 증가시키도록 계획된 기존의/미리 결정된 공급 레이트(FR)를 의도적으로 유지함으로써 원치 않은 배향 모션을 완화시킬 수 있다. 예를 들어, 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)는 원치 않은 배향 모션을 완화하기 위해 공급 레이트(FR)를 빠르게 감소시킨 후 증가시킬 수 있다. 공급 레이트(FR)는 경험된 또는 경험될 원치 않은 배향 모션의 크기 및/또는 방향에 상관된 팩터에 의해 감소될 수 있다. 공급 레이트의 변경 또는 감소는 점진적이거나 충격적일 수 있고, 원치 않은 배향 모션을 완화시키는데 필요한 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)에 의해 결정된 지속 기간과 같은 임의의 지속 기간에 걸쳐 또는 임의의 지속 기간 동안 일어날 수 있다. 이들 상황 중 임의의 상황에서, 공급 레이트 변경은 단계(204)로 되돌아가서 수행될 수 있으며, 여기서 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)는 원치 않은 배향 모션을 고려하여 계산된 공급 레이트(FR)에 따라 에너지 어플리케이터(24)를 전진시키도록 매니퓰레이터(14)에 명령한다.

[0192] 원치 않은 배향 모션을 고려하기 위한 공급 레이트(FR)의 변경에 응답하여, 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)는 에너지 어플리케이터(24)이외의 운동학적 사슬(KC)의 하나 이상의 구성요소가 더 이상 원치 않은 배향 모션을 경험하지 않거나 더 이상 경험하지 않을 것임을 식별하도록 구성될 수 있다. 이 식별은 단계 220 에서 조건이 만족되는지 여부의 재평가에 의해 또는 단계 206 에서 비-도구 경로 구성요소들의 재 평가에 의해 수행될 수 있다. 식별은 또한, 단계(216, 220)에서 설명된 바와 같이, 임계치/한계 또는 범위가 만족되는지 또는 만족되지 않는지의 여부에 기초하여 구현될 수 있다. 예를 들어, 원치 않은 배향 모션에 대해 비교된 값들이 하한 아래로 떨어지면, 공급 레이트(FR)는 최종/이전/디폴트/원래 값으로 복구되거나 재개될 수 있다. 다른 예들에서, 룩업 테이블들에 저장된 값들을 이용하는 대신에, 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)는 PID 제어 루프와 같은 제어 루프를 수행할 수 있다. 예를 들어, 설정점은 하한 이하의 수와 같은 배향 모션에 대한 허용가능한 값일 수 있다. 제어 루프는 상술된 기술들 중 임의의 것으로부터 실제 배향 모션의 감지된 값들의 입력을 수신할 수 있다. 제어 루프를 통해, 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)는 오리엔테이션 모션의 세트-포인트와 실제 값들 사이의 차이로서 에러를 계산할 수 있고, 그 후, 실제 배향 모션의 감지된 값이 셋-포인트를 만족할 때까지 에러를 최소화하기 위해 이득 항들(예를 들어, P, I, D)에 정정을 적용할 수 있다. 이는 하나 이상의 비-도구 경로 구성요소가 더 이상 원치 않은 배향 모션을 경험하지 않거나 더 이상 경험하지 않을 것임을 식별하기 위해 이용될 수 있는 제어 루프의 일례다. 다른 유형의 제어 루프가 고려된다. 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)는 또한 예측 분석 또는 시뮬레이션에 기초하여 원치 않은 배향 모션의 예상된 지속기간들을 알 수 있고, 원치 않은 배향 모션이 일어나는/일어났을 지속 기간이 경과되었음을 추론할 수 있다. 이들 상황 중 임의의 상황에 응답하여, 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)는 원치 않은 배향 모션으로 인해 공급 레이트의 변경 전에 존재하거나 후에 계획된 202에서 공급 레이트를 복구 또는 재개할 수 있다.

[0193] IV. 원치 않은 배향 모션을 고려하기 위한 다른 예들

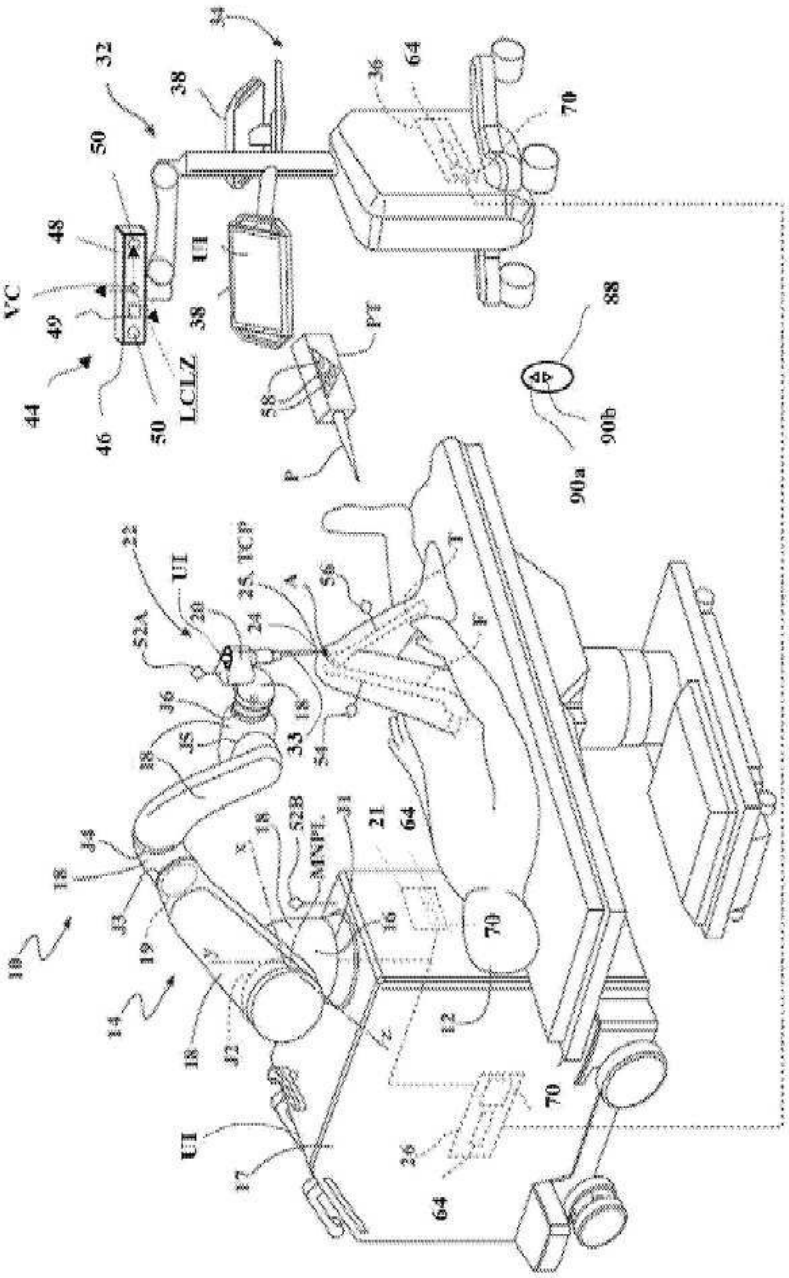
[0194] 전술한 기술들은 원치 않은 배향 모션을 고려하여 공급 레이트를 수정하는 것에 초점을 맞춘다. 전술한 임의의 기술은 공급 레이트(FR)를 변경하는 것 이외에 매니퓰레이터(14)의 거동을 변경함으로써 원치 않은 배향 모션을 완화시키기 위해 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)에 의해 이용될 수 있다. 예를 들어, 하나 이상의 제어기(26, 68, 82)는 예측적으로 또는 동적으로: 예를 들어, 영공간 내에서 조인트(J) 모션, 제한들, 또는 자세들을 조작하고; 도구(20)의 궤적을 변경하고; 도구 경로(TP)를 변경하고; 가상 경계들(71) 또는 다른 제약들을 조정하고;

도구 또는 아암 재배향, 아암 역구동, 또는 사용자에 의한 공급 레이트 조정 등과 같은 로봇 기능들을 금지할 수 있다.

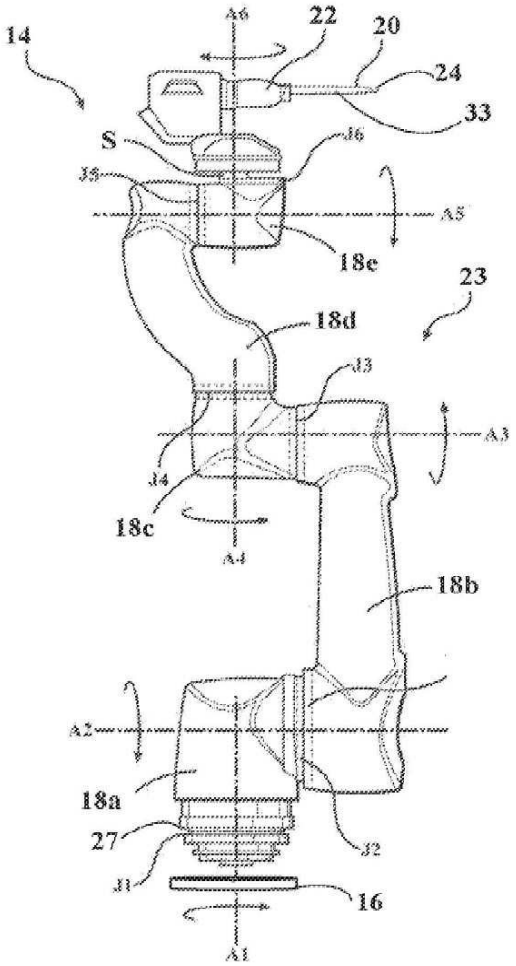
[0195] 몇몇 실시예가 전술한 설명에서 설명되었다. 본원에서 논의되는 실시예들은 총망라되거나 임의의 특정 형태로 제한되는 것으로 의도되지 않는다. 사용된 용어는 제한보다는 설명의 단어의 본질에 있는 것으로 의도된다. 상기한 교시에 비추어 많은 수정 및 변형이 가능하고 본 발명은 구체적으로 설명된 것과 달리 실시될 수도 있다. 또한, 본원에서 사용된 제목들은 단지 참조 및 가독성 목적을 위해 소개되며, 제목의 주제에 의해서만 섹션의 내용을 제한하는 것으로 이해되어서는 안 된다.

도면

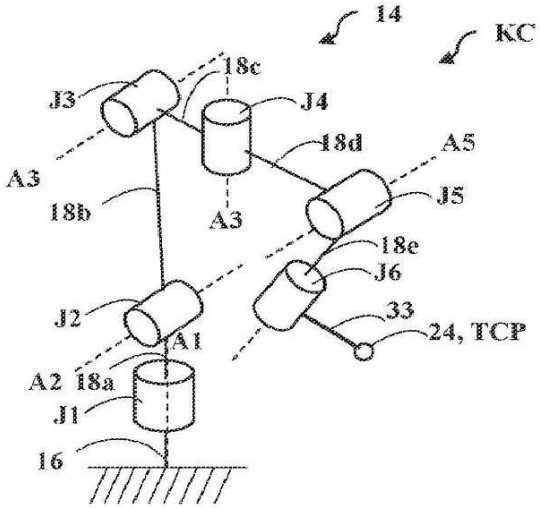
도면1



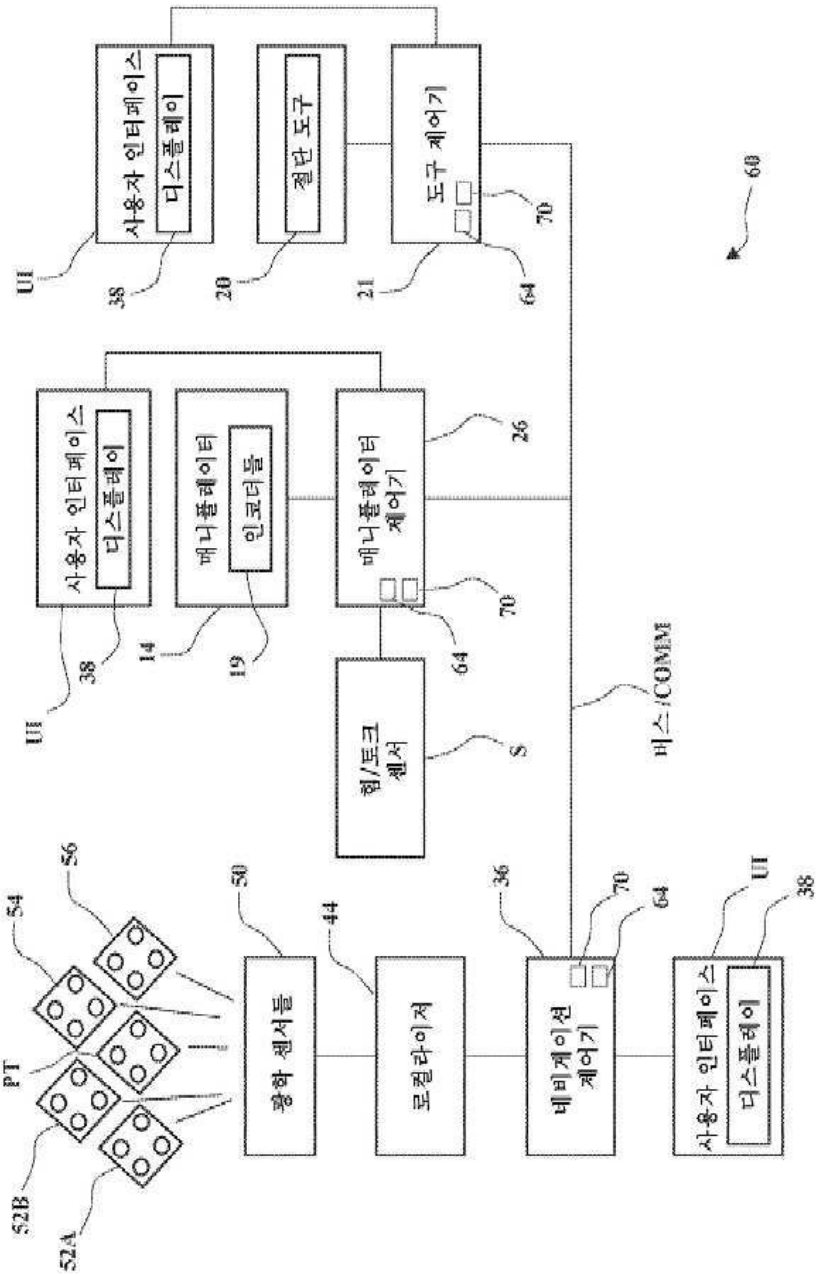
도면2


14
A6
22
20
24
33
S
J6
J5
A5
18e
23
18d
J3
A3
J4
18c
A4
18b
A2
18a
27
J2
J1
16
A1

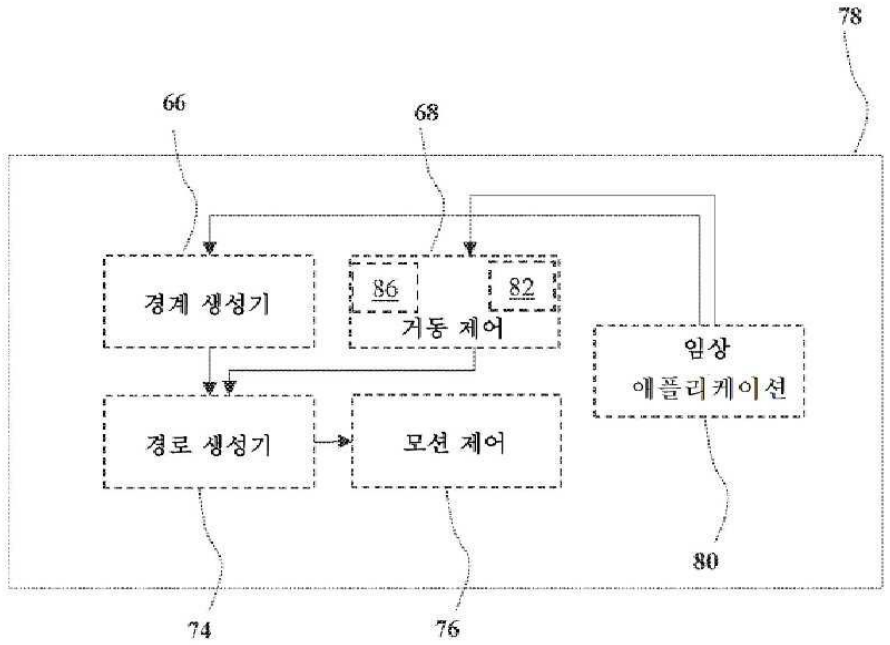
도면3


14
KC
18c
J3
J4
18d
A5
A3
J5
18b
A3
18e
J6
J2
33
A1
24, TCP
A2
18a
J1
16

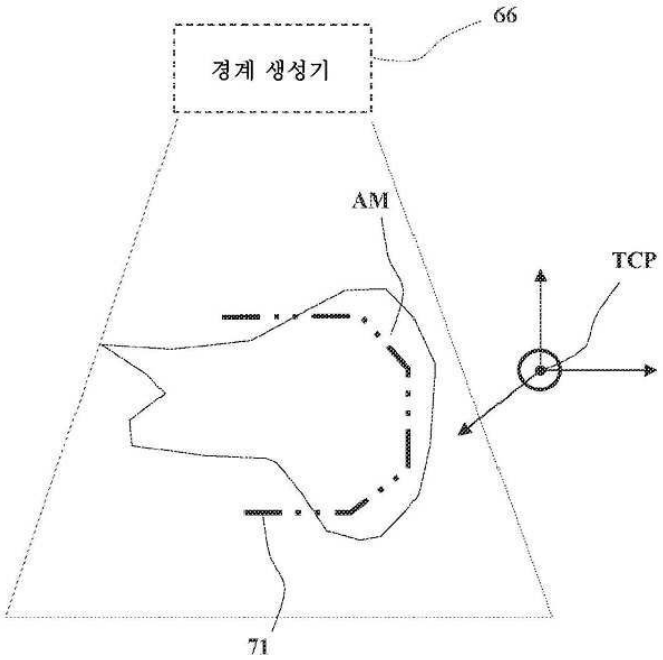
도면4


68
UI
38
사용자 인터페이스
디스플레이
20
절단 도구
21
64
70
도구 제어기
26
14
19
매니폴레이터
인코더들
매니폴레이터
제어기
S
힘/토크
센서
버스/COMM
52B
52A
PT
54
56
50
광학 센서들
44
로컬라이저
36
네비게이션
제어기

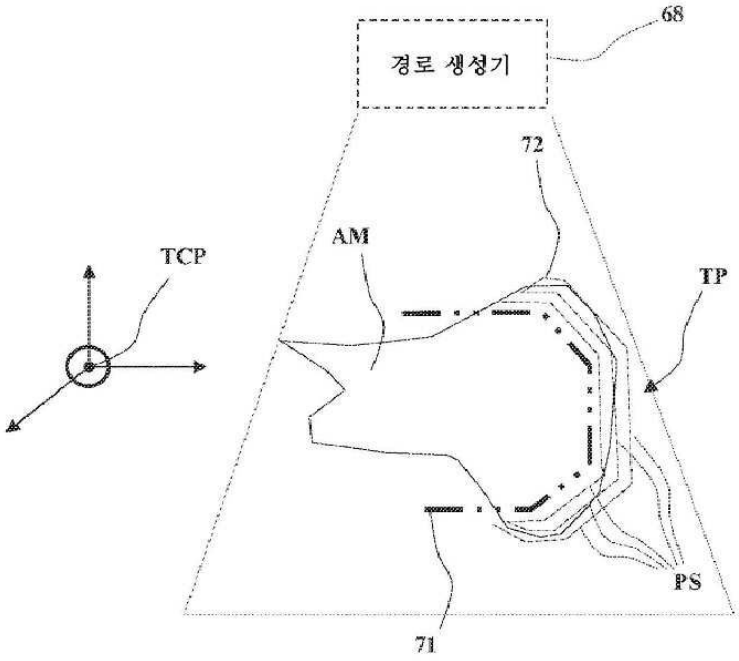
도면5


78
66
68
경계 생성기
86
82
거동 제어
임상
애플리케이션
경로 생성기
모션 제어
80
74
76

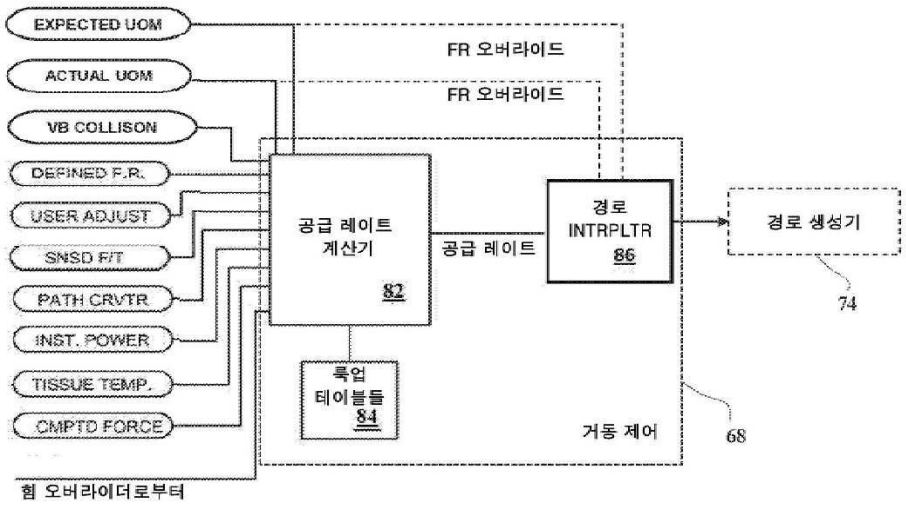
도면6


66
경계 생성기
AM
TCP
71

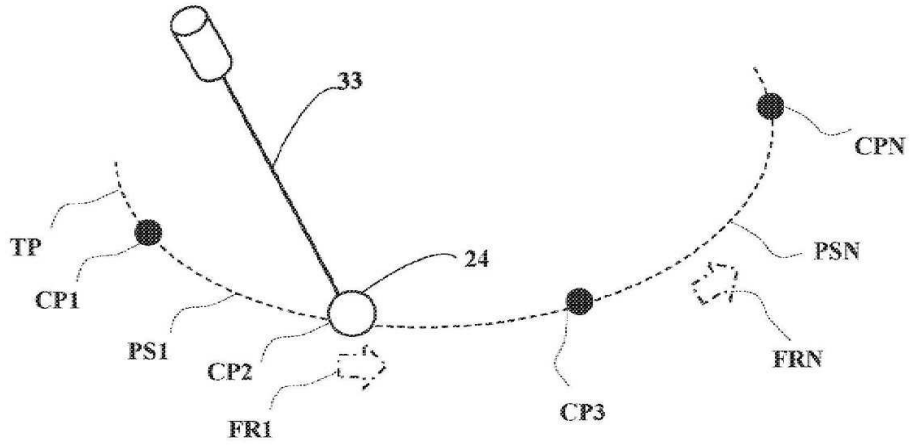
도면7


68
경로 생성기
72
AM
TCP
TP
PS
71

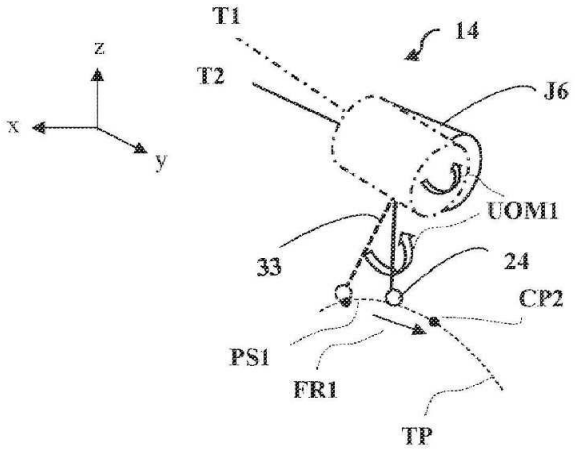
도면8


EXPECTED UOM
ACTUAL UOM
VB COLLISON
DEFINED F.R.
USER ADJUST
SNSD F/T
PATH CRVTR
INST. POWER
TISSUE TEMP.
CMPTD FORCE
FR 오버라이드
FR 오버라이드
공급 레이트 계산기
82
공급 레이트
경로 INTRPLTR
86
경로 생성기
74
룩업 테이블들
84
거동 제어
68
힘 오버라이더로부터

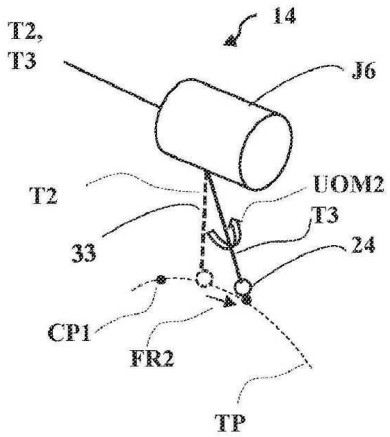
도면9



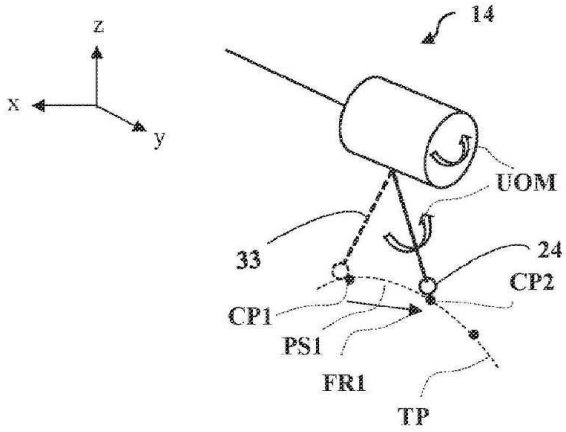
도면10



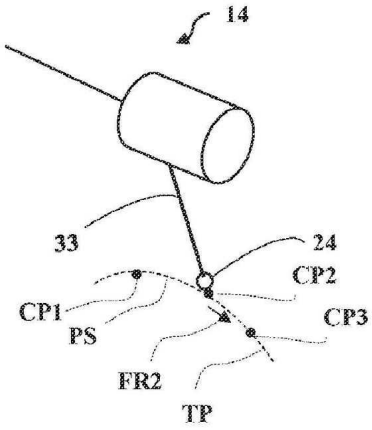
도면11



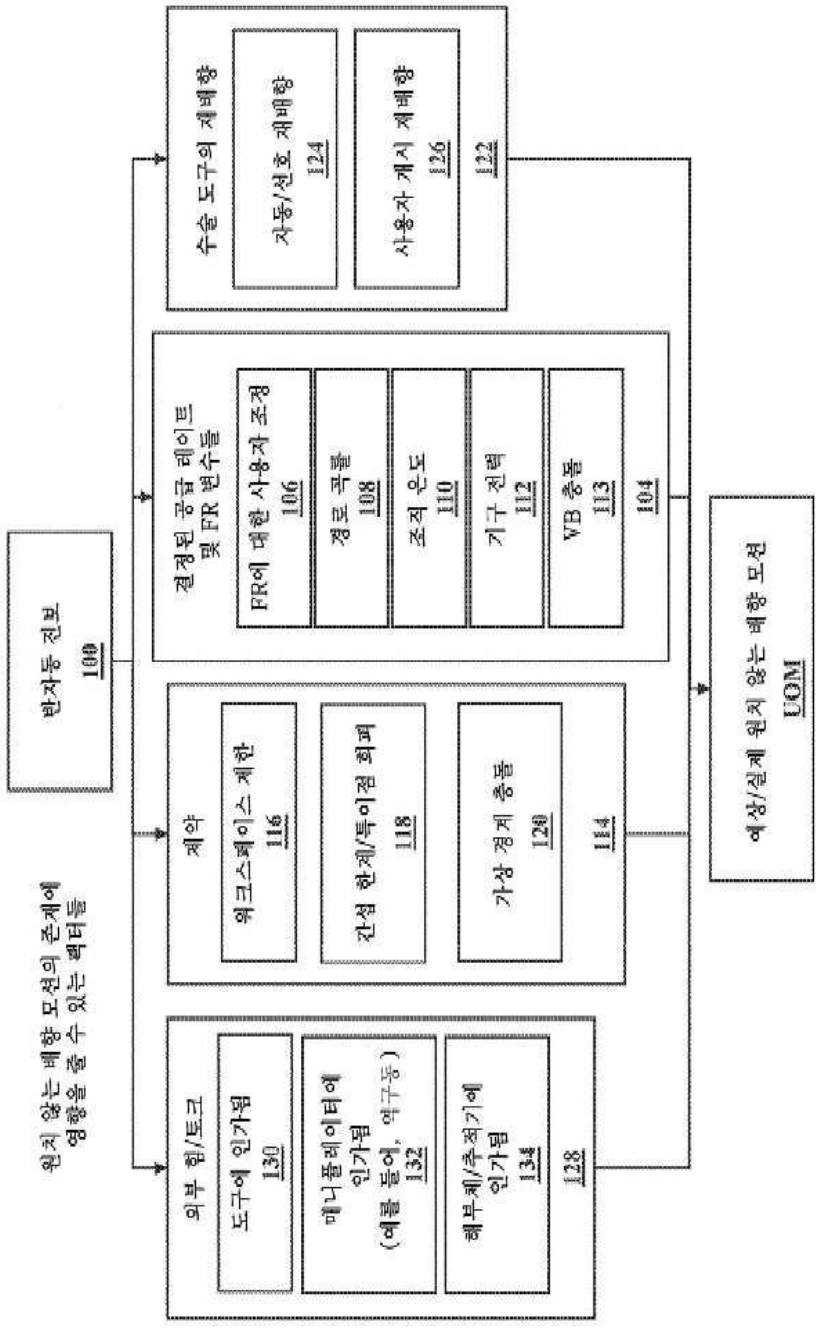
도면12



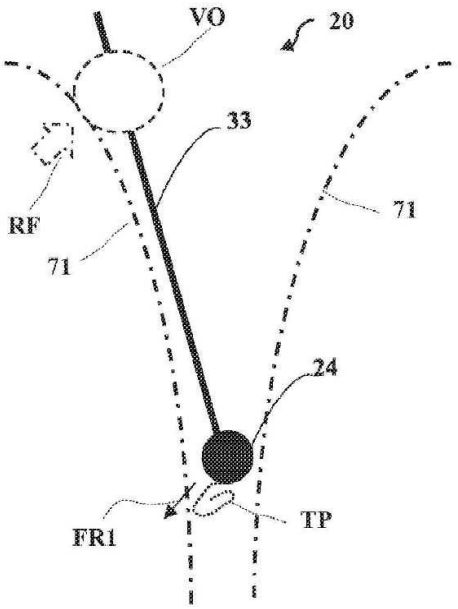
도면13



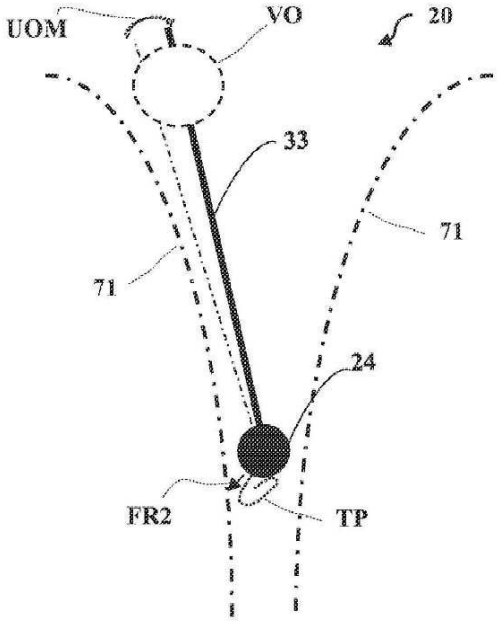
도면14


반자동 전보
100
원치 않는 배향 모션의 존재에
영향을 줄 수 있는 팩터들
결정된 공급 레이트
및 FR 변수들
FR에 대한 사용자 조정
106
정로 곡률
108
조직 온도
110
기구 전력
112
VB 충돌
113
104
수술 도구의 제배향
자동/선호 재배향
124
사용자 개시 재배향
126
122
제약
워크스페이스 제한
116
간섭 한계/특이점 회피
118
가상 경계 충돌
120
114
외부 힘/토크
도구에 인가됨
130
매니퓰레이터에
인가됨
(예를 들어, 약구동)
132
해부체/추적기에
인가됨
134
128
여상/실제 원치 않는 배향 모션
UOM

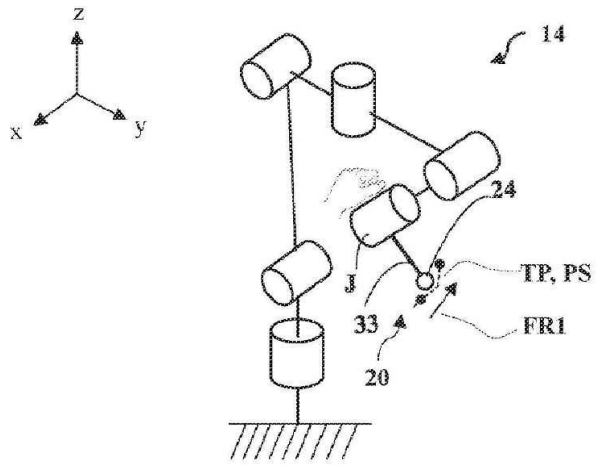
도면15



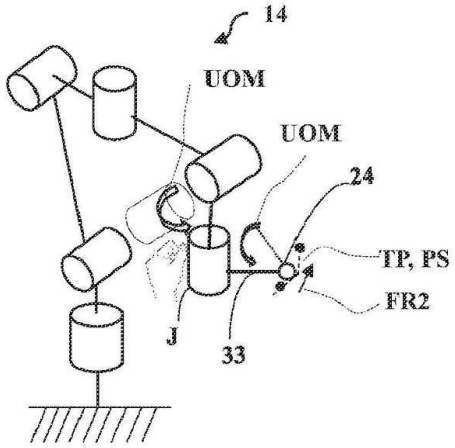
도면16



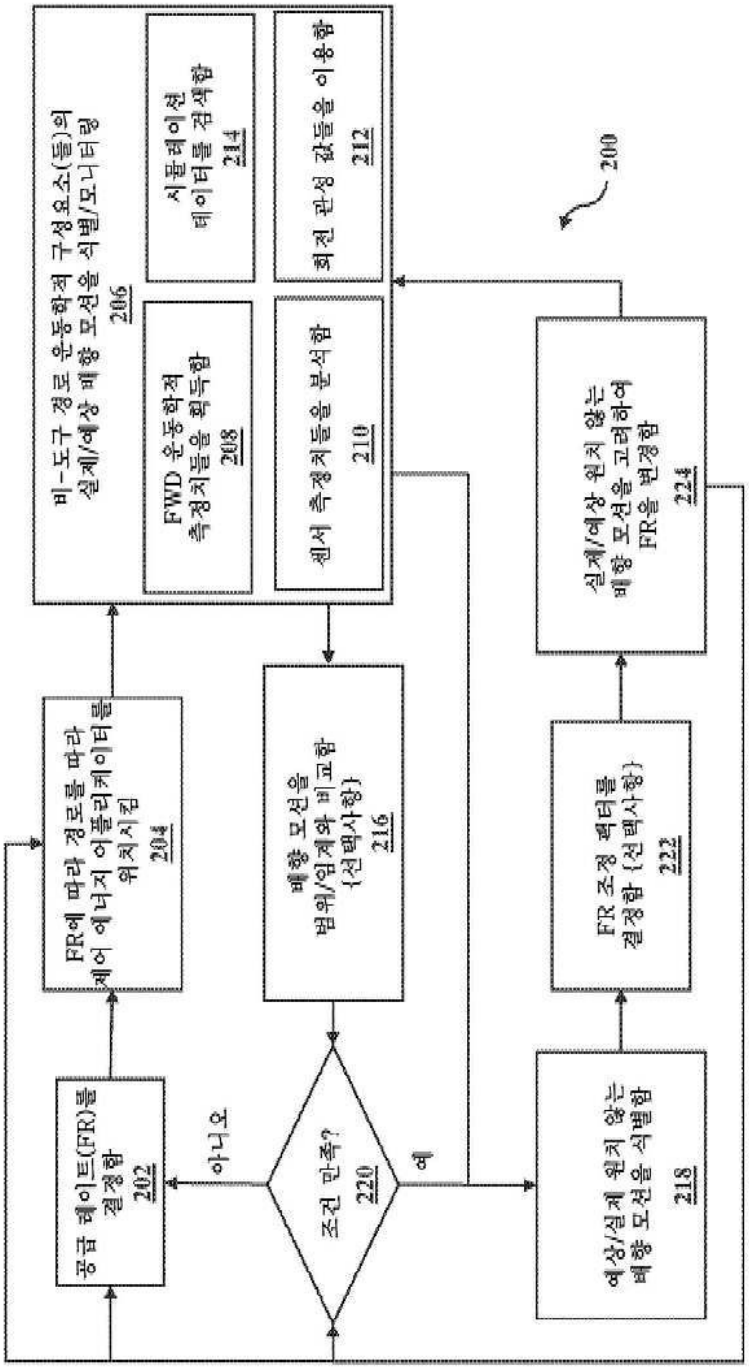
도면17



도면18



도면19


200
공급 레이트(FR)를 결정함 202
아니오
조건 만족? 220
예
FR에 따라 경로를 따라 제어 에너지 어플리케이터를 위치시킴 204
배향 모션을 범위/임계와 비교함 {선택사항} 216
비-도구 경로 운동학적 구성요소(들)의 실제/예상 배향 모션을 식별/모니터링 206
FWD 운동학적 측정치들을 획득함 208
시뮬레이션 데이터를 검색함 214
센서 측정치들을 분석함 210
회전 관성 값들을 이용함 212
여상/실제 원치 않는 배향 모션을 식별함 218
FR 조정 팩터를 결정함 {선택사항} 222
실제/예상 원치 않는 배향 모션을 고려하여 FR을 변경함 224