(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2022-0159392
(43) 공개일자 2022년12월02일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
A61B 34/00 (2016.01) *A61B 17/88* (2006.01)
A61B 34/10 (2016.01) *A61B 34/20* (2016.01)
A61B 34/30 (2016.01) *B25J 13/00* (2006.01)
(52) CPC특허분류
A61B 34/76 (2016.02)
A61B 17/8875 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2022-7034556
(22) 출원일자(국제) 2021년03월26일
심사청구일자 없음
(85) 번역문제출일자 2022년10월05일
(86) 국제출원번호 PCT/US2021/024438
(87) 국제공개번호 WO 2021/195542
국제공개일자 2021년09월30일
(30) 우선권주장
63/001,019 2020년03월27일 미국(US)

(71) 출원인
마코 서지컬 코포레이션
미국 33331 플로리다주 웨스턴 엔터프라이즈 애비뉴 3365
(72) 발명자
볼링, 데이비드, 진
미국, 뉴멕시코주 87122, 로스 랜초스 데 알버커키, 6712 엘우드 드라이브 노스웨스트
고스파빅, 보얀
미국, 플로리다주 33486, 보카 레이턴, 1520 사우스웨스트 15번가
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
박경재

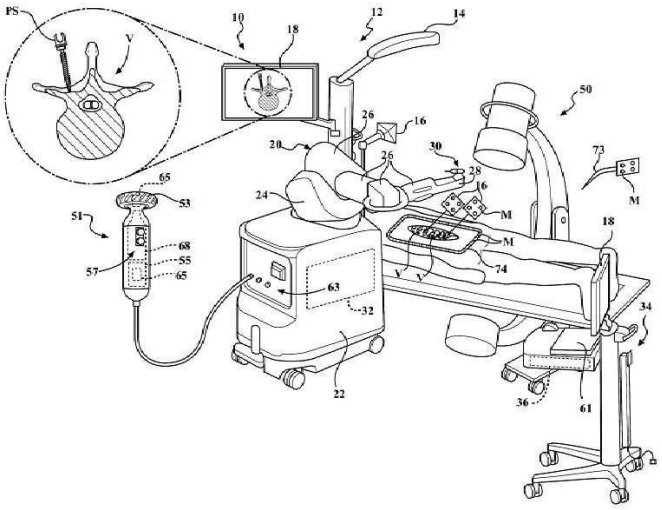
전체 청구항 수 : 총 46 항

(54) 발명의 명칭 **햅틱 인터페이스를 이용한 로봇 척추 수술 시스템 및 방법**

(57) 요 약

본원에는 나사와 인터페이싱하고 회전축을 중심으로 나사를 회전시키는 수술 툴을 포함하는 로봇 조작기를 포함하는 기술들이 개시되어 있다. 햅틱 장치는 액추에이터 및 액추에이터에 결합된 회전식 인터페이스를 포함하며, 회전식 인터페이스는 조작자의 손에 의해 수동으로 조작 가능하다. 하나 이상의 컨트롤러들은 계획된 궤적을 따라 수술 툴의 회전축을 유지하도록 로봇 조작기의 움직임을 제어하고; 회전축을 중심으로 한 회전 속도로 나사를 회전시키고 나사의 공지된 나사산 기하학적 형상에 따라 전진 속도로 나사를 선형으로 전진시키기 위해 수술 툴을 자율적으로 제어하고; 나사와 타겟 부위 사이의 현재 상호작용을 나타내는 측정을 획득하고; 회전식 인터페이스가 나사와 타겟 부위 사이의 현재 상호작용을 에뮬레이트하도록 하기 위해 햅틱 장치의 액추에이터를 제어한다.

대 표 도



(52) CPC특허분류
A61B 34/10 (2016.02)
A61B 34/20 (2016.02)
A61B 34/30 (2016.02)
A61B 34/74 (2016.02)
B25J 13/00 (2013.01)
A61B 2034/104 (2016.02)
A61B 2034/105 (2016.02)
A61B 2034/107 (2016.02)
A61B 2034/742 (2016.02)
(72) 발명자
존스, 크리스토퍼, 더블유.
미국, 인디애나주 46902, 코코모, 4502 롤랜드 드라이브
매큐언, 그렉
미국, 미시간주 49071, 마타완, 24510 렌 애비뉴
게셀만, 루카스
미국, 미시간주 49006, 칼라마주, 3710 오타와 애비뉴
니시무라, 카나
독일, 바덴바덴 76532, 프랑켄스트라쎄 29
딩, 웨이이
미국, 미시간주 48168, 노스빌, 16502 멀베리 웨이

명 세 서

청구범위

청구항 1

로봇 수술 시스템에 있어서,

로봇 조작기;

상기 로봇 조작기에 결합되고 나사와 인터페이싱하고 회전축을 중심으로 상기 나사를 회전시키도록 구성된 수술 툴;

액추에이터 및 상기 액추에이터에 결합된 회전식 인터페이스를 포함하는 햅틱 장치로서, 상기 회전식 인터페이스는 조작자의 손에 의해 수동으로 조작 가능하도록 구성되는, 상기 햅틱 장치;

타겟 부위의 위치를 추적하도록 구성된 내비게이션 시스템; 및

상기 로봇 조작기, 상기 햅틱 장치 및 상기 내비게이션 시스템에 결합된 하나 이상의 컨트롤러들로서, 상기 하나 이상의 컨트롤러들은,

상기 타겟 부위의 상기 추적된 위치에 기초하여 상기 타겟 부위에 대해 계획된 궤적을 따라 상기 수술 툴의 상기 회전축을 유지하도록 상기 로봇 조작기의 움직임을 제어하고;

상기 회전축을 중심으로 한 회전 속도로 상기 나사를 회전시키고 상기 계획된 궤적을 따라 전진 속도로 상기 나사를 선형으로 전진시키기 위해 상기 수술 툴을 자율적으로 제어하되, 상기 회전 속도 및 상기 전진 속도는 미리 결정되고 상기 나사의 공지된 나사산 기하학적 형상에 비례하고;

상기 나사와 상기 타겟 부위 사이의 현재 상호작용을 나타내는 측정을 획득하고;

상기 획득된 측정에 기초하여, 상기 회전식 인터페이스가 상기 나사와 상기 타겟 부위 사이의 상기 현재 상호작용을 에뮬레이트하도록 하기 위해 상기 햅틱 장치의 상기 액추에이터를 제어하도록 구성되는, 상기 하나 이상의 컨트롤러들을 포함하는, 로봇 수술 시스템.

청구항 2

제1항에 있어서, 상기 하나 이상의 컨트롤러들은 상기 조작자의 상기 손에 의해 상기 회전식 인터페이스를 회전시키는데 필요한 힘을 조절하기 위해 상기 조작자에게 저항력을 제공하도록 구성됨으로써 상기 나사와 상기 타겟 부위 사이의 상기 현재 상호작용을 더 에뮬레이트하며, 상기 회전식 인터페이스를 회전시키는데 필요한 상기 힘은 상기 타겟 부위에 대해 상기 나사를 회전시키는데 필요한 현재 힘을 반영하는, 로봇 수술 시스템.

청구항 3

제2항에 있어서, 상기 하나 이상의 컨트롤러들은 자율 검사 모드를 개시하도록 더 구성되며, 상기 회전식 인터페이스는,

상기 조작자에게 상기 타겟 부위에 대해 상기 나사를 회전시키는데 필요한 상기 현재 힘을 반영하는 햅틱 피드백을 제공하기 위한 상기 조절된 힘에 따라; 및

상기 나사를 회전시키기 위해 상기 수술 툴을 제어하는 능력 없이 수동으로 조작 가능한, 로봇 수술 시스템.

청구항 4

제3항에 있어서, 조건 또는 명령에 응답하여, 상기 하나 이상의 컨트롤러들은 상기 수술 툴을 자율적으로 제어하는 것과 동시에 상기 자율 검사 모드를 개시하도록 더 구성되는, 로봇 수술 시스템.

청구항 5

제3항 또는 제4항 중 어느 한 항에 있어서, 조건 또는 명령에 응답하여, 상기 하나 이상의 컨트롤러들은 상기 나사의 회전을 정지키시기 위해 상기 수술 툴을 자율적으로 제어하는 것을 정지 또는 일시 정지시킨 후 상기 자

율 검사 모드를 개시하도록 더 구성되는, 로봇 수술 시스템.

청구항 6

제3항 내지 제5항 중 어느 한 항에 있어서, 조건 또는 명령에 응답하여, 상기 하나 이상의 컨트롤러들은 상기 수술 툴의 자율 제어가 상기 나사의 회전을 정지시키도록 정지되거나 일시 정지된 후 상기 나사를 회전시키기 위해 상기 수술 툴을 자율적으로 제어하는 것을 재개하도록 더 구성되는, 로봇 수술 시스템.

청구항 7

제2항 내지 제6항 중 어느 한 항에 있어서,

상기 하나 이상의 컨트롤러들은 수동 제어 모드를 개시하도록 더 구성되며, 상기 회전식 인터페이스는 상기 조작자가 상기 회전식 인터페이스를 수동으로 조작하는 것에 기초하여 상기 나사의 회전 속도 또는 상기 나사의 상기 전진 속도 중 하나를 제어하는 능력으로 수동으로 조작 가능하며;

상기 하나 이상의 컨트롤러들은 상기 회전식 인터페이스가 상기 나사의 상기 회전 속도 또는 상기 나사의 상기 전진 속도 중 하나를 제어하도록 수동으로 조작되는 것에 응답하여, 상기 회전축을 중심으로 한 상기 회전 속도로 상기 나사를 회전시키고, 상기 계획된 궤적을 따라 상기 전진 속도로 상기 나사를 선형으로 전진시키도록 상기 수술 툴을 제어하도록 구성되며;

상기 회전식 인터페이스는 상기 조작자에게 상기 타겟 부위에 대해 상기 나사를 회전시키는데 필요한 상기 현재 힘을 반영하는 햅틱 피드백을 제공하기 위해 상기 조절된 힘에 따라 수동으로 조작 가능한, 로봇 수술 시스템.

청구항 8

제7항에 있어서, 조건 또는 명령에 응답하여, 상기 하나 이상의 컨트롤러들은 상기 나사의 회전을 정지시키기 위해 상기 수술 툴을 자율적으로 제어하는 것을 정지 또는 일시 정지시킨 후 상기 수동 제어 모드를 개시하도록 더 구성되는, 로봇 수술 시스템.

청구항 9

제8항에 있어서, 조건 또는 명령에 응답하여, 상기 하나 이상의 컨트롤러들은 상기 수동 제어 모드로부터 상기 나사를 회전시키기 위해 상기 수술 툴을 자율적으로 제어하는 것을 재개하는 것으로 전환하도록 더 구성되는, 로봇 수술 시스템.

청구항 10

제4항 내지 제9항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 햅틱 장치는 상기 조건 또는 상기 명령을 트리거하도록 구성되는, 로봇 수술 시스템.

청구항 11

제1항 내지 제10항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 나사와 상기 타겟 부위 사이의 상기 현재 상호작용을 나타내는 상기 측정을 획득하도록 구성되는 센서를 더 포함하며, 상기 하나 이상의 컨트롤러들은 상기 센서에 결합되는, 로봇 수술 시스템.

청구항 12

제7항 내지 제11항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 하나 이상의 컨트롤러들은,

상기 나사의 제어 동안 조건이 있다고 결정하고;

상기 조건이 있다고 결정하는 것에 응답하여, 상기 조작자에게 상기 회전식 인터페이스를 회전시키키는 능력을 방지하기 위해 상기 햅틱 장치의 상기 액추에이터를 제어함으로써 상기 조건에 대한 피드백을 제공하도록 구성되는, 로봇 수술 시스템.

청구항 13

제1항 내지 제12항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 내비게이션 시스템은,

상기 타겟 부위에 등록되는 상기 타겟 부위의 해부학적 모델에 대한 상기 나사의 위치를 결정하되, 상기 내비게이션 시스템은 상기 해부학적 모델에 대한 상기 나사의 복수의 위치들에서 상기 나사와 상기 해부학적 모델 사이의 예상된 상호작용을 나타내는 미리 결정된 데이터를 포함하고;

상기 해부학적 모델에 대한 상기 나사의 결정된 위치 및 상기 미리 결정된 데이터에 기초하여 상기 나사와 상기 타겟 부위 사이의 상기 현재 상호작용을 나타내는 상기 측정을 획득하도록 더 구성되는, 로봇 수술 시스템.

청구항 14

제1항 내지 제13항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 회전 속도 및 상기 전진 속도는 관계식 $\frac{\delta\theta}{\delta t}=\frac{\delta D}{\delta t}*\frac{\text{피치}}{2\pi}$에 따라 공지된 나사산 기하학적 형상에 비례하며, 여기서 $\frac{\delta\theta}{\delta t}$는 회전 속도이고, $\frac{\delta D}{\delta t}$는 전진 속도이고, 피치는 상기 나사의 단위 길이당 나사산 수인, 로봇 수술 시스템.

청구항 15

제1항 내지 제14항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 햅틱 장치는 핸드헬드 펜던트로서 더 정의되며 상기 회전식 인터페이스는 노브(knob)로서 더 정의되는, 로봇 수술 시스템.

청구항 16

제1항 내지 제15항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 햅틱 장치는 상기 로봇 조작기 및 상기 수술 툴로부터 원격으로 이격되는, 로봇 수술 시스템.

청구항 17

제1항 내지 제16항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 햅틱 장치는 상기 로봇 조작기 또는 상기 수술 툴에 직접 부착되는, 로봇 수술 시스템.

청구항 18

제1항 내지 제17항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 하나 이상의 컨트롤러들은 상기 조작자로부터 입력을 수신하여,

상기 액추에이터에 제공된 상기 저항력; 및

상기 나사를 회전시키기 위해 상기 수술 툴을 제어하는 상기 회전식 인터페이스의 능력의 민감도 중 하나 이상을 선택적으로 조절하도록 더 구성되는, 로봇 수술 시스템.

청구항 19

제1항 내지 제18항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 로봇 수술 시스템은 디스플레이를 더 포함하고, 상기 하나 이상의 컨트롤러들은 시뮬레이션된 자율 검사 모드를 개시하도록 더 구성되며, 상기 하나 이상의 컨트롤러들은,

상기 회전축을 중심으로 한 상기 회전 속도로 상기 나사를 회전시키고 상기 계획된 궤적을 따라 상기 전진 속도로 상기 나사를 선형으로 전진시킴으로써 상기 수술 툴을 자율적으로 제어하는 것을 시뮬레이션하고;

상기 수술 툴의 상기 시뮬레이션된 자율 제어를 상기 디스플레이 상에 디스플레이하고;

상기 나사와 상기 타겟 부위 사이의 시뮬레이션된 현재 상호작용을 획득하고;

상기 시뮬레이션된 현재 상호작용에 기초하여, 상기 회전식 인터페이스가 상기 나사와 상기 타겟 부위 사이의 상기 시뮬레이션된 현재 상호작용을 에뮬레이트하도록 하기 위해 상기 햅틱 장치의 상기 액추에이터를 제어하도록 구성되는, 로봇 수술 시스템.

청구항 20

제19항에 있어서, 상기 하나 이상의 컨트롤러들은 상기 수술 툴을 자율적으로 제어하기 전에 상기 시뮬레이션된 자율 검사 모드를 개시하도록 더 구성되는, 수술 로봇 시스템.

청구항 21

제1항 내지 제20항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 로봇 수술 시스템은 디스플레이를 더 포함하고, 상기 하나 이상의 컨트롤러들은 시뮬레이션된 수동 제어 모드를 개시하도록 더 구성되며, 상기 하나 이상의 컨트롤러들은,

상기 회전식 인터페이스가 상기 나사의 상기 회전 속도 또는 상기 나사의 상기 전진 속도 중 하나를 제어하도록 수동으로 조작되는 것에 응답하여 제어 입력을 수신하고;

상기 제어 입력에 응답하여 상기 회전축을 중심으로 한 상기 회전 속도로 상기 나사를 회전시키고 상기 계획된 궤적을 따라 상기 전진 속도로 상기 나사를 선형으로 전진시킴으로써 상기 수술 툴을 수동으로 제어하는 것을 시뮬레이션하고;

상기 수술 툴의 상기 시뮬레이션된 수동 제어를 상기 디스플레이 상에 디스플레이하고;

상기 나사와 상기 타겟 부위 사이의 시뮬레이션된 현재 상호작용을 획득하고;

상기 시뮬레이션된 현재 상호작용에 기초하여, 상기 회전식 인터페이스가 상기 나사와 상기 타겟 부위 사이의 상기 시뮬레이션된 현재 상호작용을 에뮬레이트하도록 하기 위해 상기 햅틱 장치의 상기 액추에이터를 제어하도록 구성되는, 로봇 수술 시스템.

청구항 22

제21항에 있어서, 조건 또는 명령에 응답하여, 상기 하나 이상의 컨트롤러들은 상기 나사의 회전을 정지시키기 위해 상기 수술 툴을 자율적으로 제어하는 것을 정지 또는 일시 정지시킨 후 상기 시뮬레이션된 수동 제어 모드를 개시하도록 더 구성되는, 로봇 수술 시스템.

청구항 23

로봇 수술 시스템을 제어하는 방법에 있어서, 상기 로봇 수술 시스템은 로봇 조작기, 상기 로봇 조작기에 결합되고 나사와 인터페이싱하고 회전축을 중심으로 상기 나사를 회전시키도록 구성된 수술 툴, 액추에이터 및 상기 액추에이터에 결합된 회전식 인터페이스를 포함하고 조작자의 손에 의해 수동으로 조작 가능하도록 구성된 햅틱 장치, 타겟 부위의 위치를 추적하도록 구성된 내비게이션 시스템, 및 상기 로봇 조작기, 상기 햅틱 장치 및 상기 내비게이션 시스템에 결합된 하나 이상의 컨트롤러들을 포함하며, 상기 방법은,

상기 하나 이상의 컨트롤러들을 사용하여, 상기 타겟 부위의 상기 추적된 위치에 기초하여 상기 타겟 부위에 대해 계획된 궤적을 따라 상기 수술 툴의 상기 회전축을 유지하도록 상기 로봇 조작기의 움직임을 제어하는 단계;

상기 하나 이상의 컨트롤러들을 사용하여, 상기 회전축을 중심으로 한 회전 속도로 상기 나사를 회전시키고 상기 계획된 궤적을 따라 전진 속도로 상기 나사를 선형으로 전진시키기 위해 상기 수술 툴을 자율적으로 제어하는 단계로서, 상기 회전 속도 및 상기 전진 속도는 미리 결정되고 상기 나사의 공지된 나사산 기하학적 형상에 비례하는, 상기 제어하는 단계;

상기 하나 이상의 컨트롤러들을 사용하여, 상기 나사와 상기 타겟 부위 사이의 현재 상호작용을 나타내는 측정을 획득하는 단계; 및

상기 하나 이상의 컨트롤러들을 사용하여 그리고 상기 획득된 측정에 기초하여, 상기 회전식 인터페이스가 상기 나사와 상기 타겟 부위 사이의 상기 현재 상호작용을 에뮬레이트하도록 하기 위해 상기 햅틱 장치의 상기 액추에이터를 제어하는 단계를 포함하는, 방법.

청구항 24

제23항에 있어서, 상기 회전식 인터페이스가 상기 획득된 측정에 기초하여 상기 나사와 상기 타겟 부위 사이의 상기 현재 상호작용을 에뮬레이트하도록 하기 위해 상기 햅틱 장치의 상기 액추에이터를 제어하는 단계는, 상기 하나 이상의 컨트롤러들을 사용하여, 상기 조작자의 상기 손에 의해 상기 회전식 인터페이스를 회전시키는데 필요한 힘을 조절하기 위해 상기 액추에이터에 저항력을 제공하는 단계를 포함하며, 상기 회전식 인터페이스를 회전시키는데 필요한 상기 힘은 상기 타겟 부위에 대해 상기 나사를 회전시키는데 필요한 현재 힘을 반영하는, 방법.

청구항 25

제24항에 있어서,

상기 하나 이상의 컨트롤러들을 사용하여, 자율 검사 모드를 개시하는 단계로서, 상기 회전식 인터페이스는,

상기 조작자에게 상기 타겟 부위에 대해 상기 나사를 회전시키는데 필요한 상기 현재 힘을 반영하는 햅틱 피드백을 제공하기 위한 상기 조절된 힘에 따라; 및

상기 나사를 회전시키기 위해 상기 수술 툴을 제어하는 능력 없이 수동으로 조작 가능한, 상기 개시하는 단계를 더 포함하는, 방법.

청구항 26

제25항에 있어서, 상기 하나 이상의 컨트롤러들을 사용하여, 조건 또는 명령에 응답하여 상기 수술 툴을 자율적으로 제어하는 것과 동시에 상기 자율 검사 모드를 개시하는 단계를 더 포함하는, 방법.

청구항 27

제25항 또는 제26항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 하나 이상의 컨트롤러들을 사용하여, 조건 또는 명령에 응답하여 상기 나사의 회전을 정지시키기 위해 상기 수술 툴을 자율적으로 제어하는 것을 정지 또는 일시 정지시킨 후 상기 자율 검사 모드를 개시하는 단계를 더 포함하는, 방법.

청구항 28

제25항 내지 제27항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 하나 이상의 컨트롤러들을 사용하여, 상기 수술 툴의 자율 제어가 상기 나사의 회전을 정지시키기 위해 정지 또는 일시 정지된 후 그리고 조건 또는 명령에 응답하여, 상기 나사를 회전시키기 위해 상기 수술 툴을 자율적으로 제어하는 것을 재개하는 단계를 더 포함하는, 방법.

청구항 29

제24항에 있어서,

상기 하나 이상의 컨트롤러들을 사용하여, 수동 제어 모드를 개시하는 단계로서, 상기 회전식 인터페이스는 상기 조작자가 상기 회전식 인터페이스를 수동으로 조작하는 것에 기초하여 상기 나사의 회전 속도 또는 상기 나사의 상기 전진 속도 중 하나를 제어하는 능력으로 수동으로 조작 가능한, 상기 개시하는 단계; 및

상기 하나 이상의 컨트롤러들을 사용하여, 상기 회전식 인터페이스가 상기 나사의 상기 회전 속도 또는 상기 나사의 상기 전진 속도 중 하나를 제어하도록 수동으로 조작되는 것에 응답하여, 상기 회전축을 중심으로 한 상기 회전 속도로 상기 나사를 회전시키고, 상기 계획된 궤적을 따라 상기 전진 속도로 상기 나사를 선형으로 전진시키도록 상기 수술 툴을 제어하는 단계를 더 포함하며;

상기 회전식 인터페이스는 상기 조작자에게 상기 타겟 부위에 대해 상기 나사를 회전시키는데 필요한 상기 현재 힘을 반영하는 햅틱 피드백을 제공하기 위해 상기 조절된 힘에 따라 수동으로 조작 가능한, 방법.

청구항 30

제29항에 있어서, 상기 하나 이상의 컨트롤러들을 사용하여, 조건 또는 명령에 응답하여 상기 나사의 회전을 정지시키기 위해 상기 수술 툴을 자율적으로 제어하는 것을 정지 또는 일시 정지시킨 후 상기 수동 제어 모드를 개시하는 단계를 더 포함하는, 방법.

청구항 31

제30항에 있어서, 상기 하나 이상의 컨트롤러들을 사용하여, 상기 수동 제어 모드로부터 조건 또는 명령에 응답하여 상기 나사를 회전시키기 위해 상기 수술 툴을 자율적으로 제어하는 것을 재개하는 것으로 전환하는 단계를 더 포함하는, 방법.

청구항 32

제26항 내지 제31항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 햅틱 장치를 사용하여, 상기 조건 또는 상기 명령을 트리거링하는 단계를 더 포함하는, 방법.

청구항 33

제23항 내지 제32항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 로봇 수술 시스템은 센서를 포함하며, 상기 방법은, 상기 센서를 사용하여, 상기 나사와 상기 타겟 부위 사이의 상기 현재 상호작용을 나타내는 상기 측정을 획득하는 단계를 더 포함하며, 상기 하나 이상의 컨트롤러들은 상기 센서에 결합되는, 방법.

청구항 34

제29항 내지 제33항 중 어느 한 항에 있어서,

상기 하나 이상의 컨트롤러들을 사용하여, 상기 나사의 제어 동안 조건이 있다고 결정하는 단계; 및

상기 하나 이상의 컨트롤러들을 사용하여, 상기 조건이 있다고 결정하는 것에 응답하여 상기 회전식 인터페이스를 회전시키는 능력을 방지하기 위해 상기 햅틱 장치의 상기 액추에이터를 제어함으로써 상기 조건에 대한 햅틱 피드백을 제공하는 단계를 더 포함하는, 방법.

청구항 35

제23항 내지 제34항 중 어느 한 항에 있어서,

상기 내비게이션 시스템을 사용하여, 상기 타겟 부위에 등록되는 상기 타겟 부위의 해부학적 모델에 대한 상기 나사의 위치를 결정하는 단계로서, 상기 내비게이션 시스템은 상기 해부학적 모델에 대한 상기 나사의 복수의 위치들에서 상기 나사와 상기 해부학적 모델 사이의 예상된 상호작용을 나타내는 미리 결정된 데이터를 포함하는, 상기 결정하는 단계; 및

상기 내비게이션 시스템을 사용하여, 상기 해부학적 모델에 대한 상기 나사의 결정된 위치 및 상기 미리 결정된 데이터에 기초하여 상기 나사와 상기 타겟 부위 사이의 상기 현재 상호작용을 나타내는 상기 측정을 획득하는 단계를 더 포함하는, 방법.

청구항 36

제23항 내지 제35항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 하나 이상의 컨트롤러들을 사용하여, 상기 조작자로부터 입력 수신하여,

상기 액추에이터에 제공된 상기 저항력; 및

상기 나사를 회전시키기 위해 상기 수술 툴을 제어하는 상기 회전식 인터페이스의 능력의 민감도 중 하나 이상을 선택적으로 조절하는 단계를 더 포함하는, 방법.

청구항 37

제23항 내지 제26항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 로봇 수술 시스템은 디스플레이를 더 포함하고, 상기 방법은, 상기 하나 이상의 컨트롤러들을 사용하여, 상기 하나 이상의 컨트롤러들을 포함하는 시뮬레이션된 자율 검사 모드를 개시하는 단계를 더 포함하며,

상기 회전축을 중심으로 한 상기 회전 속도로 상기 나사를 회전시키고 상기 계획된 궤적을 따라 상기 전진 속도로 상기 나사를 선형으로 전진시킴으로써 상기 수술 툴을 자율적으로 제어하는 것을 시뮬레이션하는 단계;

상기 수술 툴의 상기 시뮬레이션된 자율 제어를 상기 디스플레이 상에 디스플레이하는 단계;

상기 나사와 상기 타겟 부위 사이의 시뮬레이션된 현재 상호작용을 획득하는 단계; 및

상기 시뮬레이션된 현재 상호작용에 기초하여, 상기 회전식 인터페이스가 상기 나사와 상기 타겟 부위 사이의 상기 시뮬레이션된 현재 상호작용을 에뮬레이트하도록 하기 위해 상기 햅틱 장치의 상기 액추에이터를 제어하는 단계를 포함하는, 방법.

청구항 38

제37항에 있어서, 상기 하나 이상의 컨트롤러들을 사용하여, 상기 수술 툴을 자율적으로 제어하기 전에 상기 시뮬레이션된 자율 검사 모드를 개시하는 단계를 더 포함하는, 방법.

청구항 39

제23항 내지 제27항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 로봇 수술 시스템은 디스플레이를 더 포함하고, 상기 방법은, 상기 하나 이상의 컨트롤러들을 사용하여, 상기 하나 이상의 컨트롤러들을 포함하는 시뮬레이션된 수동 제어 모드를 개시하는 단계를 더 포함하며,

상기 회전식 인터페이스가 상기 나사의 상기 회전 속도 또는 상기 나사의 상기 전진 속도 중 하나를 제어하도록 수동으로 조작되는 것에 응답하여 제어 입력을 수신하는 단계;

상기 제어 입력에 응답하여 상기 회전축을 중심으로 한 상기 회전 속도로 상기 나사를 회전시키고 상기 계획된 궤적을 따라 상기 전진 속도로 상기 나사를 선형으로 전진시킴으로써 상기 수술 툴을 수동으로 제어하는 것을 시뮬레이션하는 단계;

상기 수술 툴의 상기 시뮬레이션된 수동 제어를 상기 디스플레이 상에 디스플레이하는 단계;

상기 나사와 상기 타겟 부위 사이의 시뮬레이션된 현재 상호작용을 획득하는 단계; 및

상기 시뮬레이션된 현재 상호작용에 기초하여, 상기 회전식 인터페이스가 상기 나사와 상기 타겟 부위 사이의 상기 시뮬레이션된 현재 상호작용을 에뮬레이트하도록 하기 위해 상기 햅틱 장치의 상기 액추에이터를 제어하는 단계를 포함하는, 방법.

청구항 40

제39항에 있어서, 상기 하나 이상의 컨트롤러들을 사용하여, 조건 또는 명령에 응답하여 상기 나사의 회전을 정지시키기 위해 상기 수술 툴을 자율적으로 제어하는 것을 정지 또는 일시 정지시킨 후 상기 시뮬레이션된 수동 제어 모드를 개시하는 단계를 더 포함하는, 방법.

청구항 41

로봇 수술 시스템에 있어서,

로봇 조작기;

상기 로봇 조작기에 결합되고 나사와 인터페이싱하고 회전축을 중심으로 상기 나사를 회전시키도록 구성된 수술 툴;

액추에이터 및 상기 액추에이터에 결합된 회전식 인터페이스를 포함하는 햅틱 장치로서, 상기 회전식 인터페이스는 조작자의 손에 의해 수동으로 조작 가능하도록 구성되는, 상기 햅틱 장치;

타겟 부위의 위치를 추적하도록 구성된 내비게이션 시스템; 및

상기 로봇 조작기, 상기 햅틱 장치 및 상기 내비게이션 시스템에 결합된 하나 이상의 컨트롤러들로서, 상기 하나 이상의 컨트롤러들은,

상기 타겟 부위의 상기 추적된 위치에 기초하여 상기 타겟 부위에 대해 계획된 궤적을 따라 상기 수술 툴의 상기 회전축을 유지하도록 상기 로봇 조작기의 움직임을 제어하고;

상기 햅틱 장치로부터 제어 입력을 수신하되, 상기 회전식 인터페이스는 상기 조작자가 상기 회전식 인터페이스를 수동으로 조작하는 것에 기초하여 상기 나사의 회전 속도 또는 상기 나사의 전진 속도 중 하나를 제어하는 능력으로 수동으로 조작 가능하고;

상기 햅틱 장치로부터의 제어 입력에 응답하여, 상기 회전축을 중심으로 한 회전 속도로 상기 나사를 회전시키고 상기 계획된 궤적을 따라 전진 속도로 상기 나사를 선형으로 전진시키기 위해 상기 수술 툴을 제어하되, 상기 회전 속도 및 상기 전진 속도는 미리 결정되고 상기 나사의 공지된 나사산 기하학적 형상에 비례하고;

상기 나사와 상기 타겟 부위 사이의 현재 상호작용을 나타내는 측정을 획득하고;

상기 획득된 측정에 기초하여, 상기 회전식 인터페이스가 상기 나사와 상기 타겟 부위 사이의 상기 현재 상호작용을 에뮬레이트하도록 하기 위해 상기 햅틱 장치를 제어하도록 구성되는, 상기 하나 이상의 컨트롤러들을 포함하는, 로봇 수술 시스템.

청구항 42

제41항의 상기 수술 시스템을 동작시키는 방법.

청구항 43

로봇 수술 시스템에 있어서,

로봇 조작기;

상기 로봇 조작기에 결합되고 회전축을 중심으로 회전시키도록 구성된 수술 툴;

액추에이터 및 상기 액추에이터에 결합된 회전식 인터페이스를 포함하는 햅틱 장치로서, 상기 회전식 인터페이스는 조작자의 손에 의해 수동으로 조작 가능하도록 구성되는, 상기 햅틱 장치;

타겟 부위의 위치를 추적하도록 구성된 내비게이션 시스템; 및

상기 로봇 조작기, 상기 햅틱 장치 및 상기 내비게이션 시스템에 결합된 하나 이상의 컨트롤러들로서, 상기 하나 이상의 컨트롤러들은,

상기 타겟 부위의 상기 추적된 위치에 기초하여 상기 타겟 부위에 대해 계획된 궤적을 따라 상기 수술 툴의 상기 회전축을 유지하도록 상기 로봇 조작기의 움직임을 제어하고;

상기 회전축을 중심으로 한 회전 속도로 상기 수술 툴을 회전시키고 상기 계획된 궤적을 따라 전진 속도로 상기 수술 툴을 선형으로 전진시키기 위해 상기 수술 툴을 자율적으로 제어하고;

상기 수술 툴과 상기 타겟 부위 사이의 현재 상호작용을 나타내는 측정을 획득하고;

상기 획득된 측정에 기초하여, 상기 회전식 인터페이스가 상기 수술 툴과 상기 타겟 부위 사이의 상기 현재 상호작용을 에뮬레이트하도록 하기 위해 상기 햅틱 장치를 제어하도록 구성되는, 상기 하나 이상의 컨트롤러들을 포함하는, 로봇 수술 시스템.

청구항 44

제42항의 상기 수술 시스템을 동작시키는 방법.

청구항 45

시뮬레이션 시스템에 있어서,

액추에이터 및 상기 액추에이터에 결합된 회전식 인터페이스를 포함하는 햅틱 장치로서, 상기 회전식 인터페이스는 조작자의 손에 의해 수동으로 조작 가능하도록 구성되는, 상기 햅틱 장치;

디스플레이 장치; 및

상기 햅틱 장치 및 상기 디스플레이 장치에 결합된 하나 이상의 컨트롤러들로서, 상기 하나 이상의 컨트롤러들은 상기 디스플레이 장치 상에 시뮬레이션을 제공하도록 구성되고, 상기 시뮬레이션은,

시뮬레이션된 수술 툴을 제공하되, 상기 시뮬레이션된 수술 툴은 시뮬레이션된 나사와 인터페이싱하고 시뮬레이션된 타겟 부위에 대해 시뮬레이션된 궤적에 따라 회전축을 중심으로 상기 시뮬레이션된 나사를 회전시키도록 구성되고;

상기 회전축을 중신으로 한 회전 속도로 상기 시뮬레이션된 나사를 회전시키고 상기 시뮬레이션된 궤적을 따라 전진 속도로 상기 시뮬레이션된 나사를 선형으로 전진시키기 위해 상기 시뮬레이션된 수술 툴을 시뮬레이션 제어하는 것을 제공하되, 상기 회전 속도 및 상기 전진 속도는 미리 결정되며 상기 시뮬레이션된 나사의 공지된 나사산 기하학적 형상에 비례하고;

상기 시뮬레이션된 나사와 상기 시뮬레이션된 타겟 부위 사이의 시뮬레이션된 현재 상호작용을 획득하고;

상기 시뮬레이션된 현재 상호작용에 기초하여, 상기 회전식 인터페이스가 상기 시뮬레이션된 나사와 상기 시뮬레이션된 타겟 부위 사이의 상기 시뮬레이션된 현재 상호작용을 에뮬레이트하도록 하기 위해 상기 햅틱 장치를 제어하도록 구성되는, 상기 하나 이상의 컨트롤러들을 포함하는, 시뮬레이션 시스템.

청구항 46

제45항의 상기 시뮬레이션 시스템을 동작시키는 방법.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 관련 출원에 대한 상호 참조

[0002] 본 출원은 2020년 3월 27일자로 출원된 미국 임시 특허 출원 번호 제63/001,019호에 대한 우선권 및 모든 이익을 주장하며, 이에 대한 전체 개시내용은 본원에 참조로서 통합된다.

배 경 기 술

[0003] 환자의 척추에서 수술 절차를 수행하기 위한 로봇 수술 시스템은 잘 알려져 있다. 예를 들어, 로봇 수술 시스템들은 환자의 척추에 척추경 나사(pedicle screw)를 배치하기 위해 현재 활용된다.

[0004] 환자가 척추경 나사를 배치하는 것을 수반하는 수술이 필요한 경우, 수술 전 이미징 및/또는 수술 중 이미징은 치료가 필요한 환자의 해부학적 구조 - 이 경우 환자의 척추 - 를 시각화하는 데 종종 사용된다. 그런 다음 의사는 이미지들에 대해 및/또는 이미지들로부터 생성된 3-D 모델에 대해 척추경 나사들을 배치할 곳을 계획한다. 계획은, 예를 들어, 이미지들 및/또는 3-D 모델에서 원하는 포즈를 식별함으로써, 이들이 배치되고 있는 특정 척추골에 대한 각각의 척추경 나사(pedicle screw)의 위치 및 배향(즉, 포즈)을 결정하는 것을 포함한다. 계획이 설정되면, 계획은 실행을 위해 로봇 수술 시스템으로 전달된다.

[0005] 전형적으로, 로봇 수술 시스템은 환자 위에 그리고 배치될 척추경 나사의 원하는 배향과 정렬되는 원하는 궤적을 따라 툴(tool) 가이드를 포지셔닝시키는 로봇 조작기를 포함한다. 로봇 수술 시스템은 또한 로봇 조작기가 의사의 계획에 따라 원하는 궤적을 따라 툴 가이드를 배치할 수 있도록 환자의 해부학적 구조에 대한 툴 가이드의 위치를 결정하는 내비게이션 시스템을 포함한다. 일부 경우에, 내비게이션 시스템은 조작기 및 환자에 부착된 추적 장치들을 포함하여, 로봇 수술 시스템이 원하는 궤적을 유지하기 위해 필요에 따라 툴 가이드를 이동시킴으로써 수술 절차 동안 환자의 움직임을 모니터링하고 이에 응답할 수 있다.

[0006] 툴 가이드가 원하는 궤적과 정렬되어 포지셔닝되면, 로봇 조작기는 정렬을 유지하도록 제어된다. 그 후, 의사는 툴 가이드를 통해 척추골에 인접하게 캐뉼라(cannula)를 포지셔닝시킨다. 의사는 척추경 나사를 위한 파일럿 홀(pilot hole)을 드릴링하기 위해 종래의 드릴링 툴을 캐뉼러 내로 삽입한다. 그런 다음, 의사는 드릴링 툴을 제거하고, 척추경 나사를 척추경 나사 드라이버로 파일럿 홀의 위치에 삽입한다. 이 방법론에서, 로봇 조작기는 파일럿 홀을 드릴링하거나 척추경 나사를 삽입하는 역할을 거의 내지 전혀 하지 않기 때문에 다소 덜 활용된다.

[0007] 한편, 2018년 11월 8일자로 출원된 "Robotic Spine Surgery System and Methods"이라는 명칭의 미국 제16/184,376호의 개시는 로봇 시스템이 수술 툴을 자율적으로 제어하여 회전축을 중심으로 한 회전율로 나사를 회전시키고 계획된 궤적을 따라 전진율로 나사를 선형으로 전진시키도록 이용될 수 있는 기술을 개시한다. 이러한 방법론에서 로봇 조작기의 이용에도 불구하고, 의사는 조직과 상호작용하는 동안 수반되는 힘, 에너지, 물질 및 정보 흐름과 직접 접촉하거나 제어하지 못하게 된다. 결국, 이는 의사가 수술 절차 동안 조직 상호작용 프로세스를 모니터링 및 평가하는 데 익숙한 촉각 및 감각 정보의 손실을 초래할 수 있다. 감각 입력(sensory input)의 결여로 인한 프로세스를 평가하는 의사의 무능은, 다른 것들 중에서도, 의사의 자신감의 상실, 정서적 스트레스, 낮은 시술 효과, 및 로봇 솔루션에 의해 포착되지 않지만 의사에게 인지가능한 예상치 못한 상황들에 반응할 수 없는 불능을 초래할 수 있다.

발명의 내용

해결하려는 과제

과제의 해결 수단

[0008] 본 개시의 제1 양태는 로봇 조작기; 로봇 조작기에 결합되고 나사와 인터페이싱하고 회전축을 중심으로 나사를

회전시키도록 구성된 수술 툴; 액추에이터 및 액추에이터에 결합된 회전식 인터페이스를 포함하는 햅틱 장치로서, 회전식 인터페이스는 조작자의 손에 의해 수동으로 조작 가능하도록 구성되는, 상기 햅틱 장치; 타겟 부위의 위치를 추적하도록 구성된 내비게이션 시스템; 및 로봇 조작기, 햅틱 장치 및 내비게이션 시스템에 결합된 하나 이상의 컨트롤러들로서, 하나 이상의 컨트롤러들은, 타겟 부위의 추적된 위치에 기초하여 타겟 부위에 대해 계획된 궤적을 따라 수술 툴의 회전축을 유지하도록 로봇 조작기의 움직임을 제어하고; 회전축을 중심으로 한 회전 속도로 나사를 회전시키고 계획된 궤적을 따라 전진 속도로 나사를 선형으로 전진시키기 위해 수술 툴을 자율적으로 제어하되, 회전 속도 및 전진 속도는 미리 결정되고 나사의 공지된 나사산 기하학적 형상에 비례하고; 나사와 타겟 부위 사이의 현재 상호작용을 나타내는 측정을 획득하고; 획득된 측정에 기초하여, 회전식 인터페이스가 나사와 타겟 부위 사이의 현재 상호작용을 에뮬레이트하도록 하기 위해 햅틱 장치를 제어하도록 구성되는, 상기 하나 이상의 컨트롤러들을 포함하는, 로봇 수술 시스템을 포함한다.

[0009] 일부 구현들에서, 회전식 인터페이스는, 이에 제한되는 것은 아니나, 노브(knob), 휠(wheel), 회전식 스위치 또는 다이털을 포함한다.

[0010] 일부 구현들에서, 햅틱 장치는 회전식 인터페이스 대신, 이에 제한되는 것은 아니나, 선형 푸시 버트, 선형 스위치, 선형 트리거 또는 선형 슬라이더와 같은 선형 인터페이스를 포함한다.

[0011] 일부 구현들에서, 하나 이상의 컨트롤러들은 햅틱 장치의 액추에이터를 제어하도록 구성됨으로써 나사와 타겟 부위 사이의 현재 상호작용을 에뮬레이트한다.

[0012] 일부 구현들에서, 하나 이상의 컨트롤러들은 조작자의 손에 의해 회전식 인터페이스를 회전시키는데 필요한 힘을 조절하기 위해 조작자에게 저항력을 제공하도록 구성됨으로써 나사와 타겟 부위 사이의 현재 상호작용을 더 에뮬레이트하며, 회전식 인터페이스를 회전시키는데 필요한 힘은 타겟 부위에 대해 나사를 회전시키는데 필요한 현재 힘을 반영한다.

[0013] 일부 구현들에서, 하나 이상의 컨트롤러들은 액추에이터 이외의 또는 그에 부가하여 수단을 이용하여 인터페이스의 기계적 모션을 저지하도록 구성된다. 예를 들어, 인터페이스의 움직임의 영향에 대해, 햅틱 장치는, 이에 제한되는 것은 아니나, 바이어싱 메커니즘들, 디텐트(detent)들, 래칫(ratchet)들, 및/또는 기어 시스템들 등을 포함하는 기계적 컴포넌트들; 이에 제한되는 것은 아니나, 유도성, 용량성, 및/또는 저항 소자들과 같은 전기 컴포넌트들; 자기 컴포넌트들; 전자기 컴포넌트들; 전기-기계 컴포넌트들; 유압 컴포넌트들; 및/또는 공압 컴포넌트들을 이용할 수 있다.

[0014] 일부 구현들에서, 하나 이상의 컨트롤러들은 인터페이스의 모션 범위를 제한하도록 구성됨으로써 나사와 타겟 부위 사이의 현재 상호작용을 더 에뮬레이트한다.

[0015] 일부 구현들에서, 하나 이상의 컨트롤러들은 자율 검사 모드를 개시하도록 더 구성되며, 회전식 인터페이스는 상기 조작자에게 상기 타겟 부위에 대해 상기 나사를 회전시키는데 필요한 상기 현재 힘을 반영하는 햅틱 피드백을 제공하기 위한 상기 조절된 힘에 따라; 그리고 나사를 회전시키기 위해 수술 툴을 제어하는 능력 없이 수동으로 조작 가능하다.

[0016] 일부 구현들에서, 조건 또는 명령에 응답하여, 하나 이상의 컨트롤러들은 수술 툴을 자율적으로 제어하는 것과 동시에 자율 검사 모드를 개시하도록 더 구성된다.

[0017] 일부 구현들에서, 조건 또는 명령에 응답하여, 하나 이상의 컨트롤러들은 나사의 회전을 정지시키기 위해 수술 툴을 자율적으로 제어하는 것을 정지 또는 일시 정지시킨 후 자율 검사 모드를 개시하도록 더 구성된다.

[0018] 일부 구현들에서, 조건 또는 명령에 응답하여, 하나 이상의 컨트롤러들은 수술 툴의 자율 제어가 나사의 회전을 정지시키도록 정지되거나 일시 정지된 후 나사를 회전시키기 위해 수술 툴을 자율적으로 제어하는 것을 재개하도록 더 구성된다.

[0019] 일부 구현들에서, 하나 이상의 컨트롤러들은 수동 제어 모드를 개시하도록 더 구성되며, 회전식 인터페이스는 조작자가 회전식 인터페이스를 수동으로 조작하는 것에 기초하여 나사의 회전 속도 또는 나사의 전진 속도 중 하나를 제어하는 능력으로 수동으로 조작 가능하다. 하나 이상의 컨트롤러들은 회전식 인터페이스가 나사의 회전 속도 또는 나사의 전진 속도 중 하나를 제어하도록 수동으로 조작되는 것에 응답하여, 회전축을 중심으로 한 회전 속도로 나사를 회전시키고, 계획된 궤적을 따라 전진 속도로 나사를 선형으로 전진시키도록 수술 툴을 제어하도록 구성되고; 회전식 인터페이스는 조작자에게 타겟 부위에 대해 나사를 회전시키는데 필요한 현재 힘을 반영하는 햅틱 피드백을 제공하기 위해 조절된 힘에 따라 수동으로 조작 가능하다.

[0020] 일부 구현들에서, 조건 또는 명령에 응답하여, 하나 이상의 컨트롤러들은 나사의 회전을 정지시키기 위해 수술 툴을 자율적으로 제어하는 것을 정지 또는 일시 정지시킨 후 수동 제어 모드를 개시하도록 더 구성된다.

[0021] 일부 구현들에서, 조건 또는 명령에 응답하여, 하나 이상의 컨트롤러들은 수동 제어 모드로부터 나사를 회전시키기 위해 수술 툴을 자율적으로 제어하는 것을 재개하는 것으로 전환하도록 더 구성된다.

[0022] 일부 구현들에서, 햅틱 장치는 조건 또는 명령을 트리거하도록 구성된다.

[0023] 일부 구현들에서, 로봇 수술 시스템은 나사와 타겟 부위 사이의 현재 상호작용을 나타내는 측정을 획득하도록 구성되는 센서를 더 포함하며, 하나 이상의 컨트롤러들은 센서에 결합된다.

[0024] 일부 구현들에서, 하나 이상의 컨트롤러들은, 나사의 제어 동안 조건이 존재한다고 결정하고; 조건이 존재한다고 결정하는 것에 응답하여, 회전식 인터페이스를 회전시키는 능력을 방지하도록 햅틱 장치의 액추에이터를 제어함으로써 조건에 관한 햅틱 피드백을 조작자에게 제공하도록 구성된다.

[0025] 일구 구현들에서, 내비게이션 시스템은, 타겟 부위에 등록되는 타겟 부위의 해부학적 모델에 대한 나사의 위치를 결정하되, 내비게이션 시스템은 해부학적 모델에 대한 나사의 복수의 위치들에서 나사와 해부학적 모델 사이의 예상된 상호작용을 나타내는 미리 결정된 데이터를 포함하고; 해부학적 구조에 대한 나사의 결정된 위치 및 미리 결정된 데이터에 기초하여 나사와 타겟 부위 사이의 현재 상호작용을 나타내는 측정을 획득하도록 더 구성된다.

[0026] 일부 구현들에서, 회전 속도 및 전진 속도는 관계식 $\frac{\delta\theta}{\delta t} = \frac{\delta D}{\delta t} * \frac{피치}{2\pi}$ 에 따라 공지된 나사산 기하학적 형상에 비례하고, 여기서 $\frac{\delta\theta}{\delta t}$는 회전 속도이다, $\frac{\delta D}{\delta t}$는 전진 속도이며, 피치(Pitch)는 나사의 단위 길이당 나사산(thread)의 수이다.

[0027] 일부 구현들에서, 햅틱 장치는 핸드헬드 펜던트(hand-held pendant)로서 더 정의된다.

[0028] 일부 구현들에서, 햅틱 장치는, 이에 제한되는 것은 아니나, 노브, 회전식 스위치 또는 다이얼과 같은 회전식 인터페이스이다.

[0029] 일부 구현들에서, 로드(rod), 앵커(anchor), 스페이서(spacer), 케이지(cage) 또는 플레이트(plate)와 같은 척추 임플란트와 같은 임의의 임플란트가 나사 대신에 이용될 수 있다.

[0030] 일부 구현들에서, 나사는 더 구체적으로는 자기-태핑 나사(self-tapping screw)이다.

[0031] 일부 구현들에서, 햅틱 장치는 로봇 조작기 및 수술 툴로부터 원격으로 이격된다.

[0032] 일부 구현들에서, 햅틱 장치는 로봇 조작기 또는 수술 툴에 직접 부착된다.

[0033] 일부 구현들에서, 하나 이상의 컨트롤러들은 액추에이터에 제공되는 저항력; 및 나사를 회전시키기 위해 수술 툴을 제어하는 회전식 인터페이스의 능력의 민감도 중 하나 이상을 선택적으로 조절하기 위해 조작자로부터 입력을 수신하도록 더 구성된다.

[0034] 일부 구현들에서, 로봇 수술 시스템은 디스플레이를 더 포함하고, 하나 이상의 컨트롤러들은 시뮬레이션된 자율 검사 모드를 개시하도록 더 구성되며, 하나 이상의 컨트롤러들은, 회전축을 중심으로 한 회전 속도로 나사를 회전시키고 계획된 궤적을 따라 전진 속도로 나사를 선형으로 전진시킴으로써 수술 툴을 자율적으로 제어하는 것을 시뮬레이션하고; 수술 툴의 시뮬레이션된 자율 제어를 디스플레이 상에 디스플레이하고; 나사와 타겟 부위 사이의 시뮬레이션된 현재 상호작용을 획득하고; 시뮬레이션된 현재 상호작용에 기초하여, 조작자의 손에 의해 회전식 인터페이스를 회전시키는데 필요한 힘을 조절하기 위해 조작자에게 저항력을 제공하도록 구성됨으로써 회전식 인터페이스가 나사와 타겟 부위 사이의 시뮬레이션된 현재 상호작용을 에뮬레이트하도록 하기 위해 햅틱 장치의 액추에이터를 제어하되, 회전식 인터페이스를 회전시키는데 필요한 힘은 타겟 부위에 대해 나사를 회전시키는데 필요한 시뮬레이션된 현재 힘을 반영하고, 회전식 인터페이스는 조작자에게 시뮬레이션된 현재 힘을 반영하는 햅틱 피드백을 제공하기 위해 조절된 힘에 따라; 그리고 나사를 회전시키기 위해 수술 툴을 제어하는 능력 없이 그리고 수술 툴의 시뮬레이션된 자율 제어를 제어하는 능력 없이 수동으로 제어 가능하도록 구성된다.

[0035] 일부 구현들에서, 하나 이상의 컨트롤러들은 수술 툴을 자율적으로 제어하기 전에 시뮬레이션된 자율 검사 모드

를 개시하도록 더 구성된다.

[0036] 일부 구현들에서, 로봇 수술 시스템은 디스플레이를 더 포함하고, 하나 이상의 컨트롤러들은 시뮬레이션된 수동 제어 모드를 개시하도록 더 구성되며, 회전식 인터페이스는 조작자가 회전식 인터페이스를 수동으로 조작하는 것에 기초하여 나사를 회전시키기 위해 수술 툴을 제어하는 증력 없이 그리고 수술 툴의 시뮬레이션된 수동 제어 동안 나사의 회전 속도 또는 나사의 전진 속도 중 하나를 제어하는 능력으로 수동으로 조작 가능하고, 하나 이상의 컨트롤러들은 회전식 인터페이스가 나사의 회전 속도 또는 나사의 전진 속도 중 하나를 제어하도록 수동으로 조작되는 것에 응답하여, 회전축을 중심으로 한 회전 속도로 나사를 회전시키고, 계획된 궤적을 따라 전진 속도로 나사를 선형으로 전진시킴으로써 수술 툴을 수동으로 제어하는 것을 시뮬레이션하도록 더 구성되고; 수술 툴의 시뮬레이션된 수동 제어를 디스플레이 상에 디스플레이하고; 나사와 타겟 부위 사이의 시뮬레이션된 현재 상호작용을 획득하고; 시뮬레이션된 현재 상호작용에 기초하여, 조작자의 손에 의해 회전식 인터페이스를 회전시키는데 필요한 힘을 조절하기 위해 조작자에게 저항력을 제공하도록 구성됨으로써 회전식 인터페이스가 나사와 타겟 부위 사이의 시뮬레이션된 현재 상호작용을 에뮬레이트하도록 하기 위해 햅틱 장치의 엑추에이터를 제어하되, 회전식 인터페이스를 회전시키는데 필요한 힘은 타겟 부위에 대해 나사를 회전시키는데 필요한 시뮬레이션된 현재 힘을 반영하고, 회전식 인터페이스는 조작자에게 시뮬레이션된 현재 힘을 반영하는 햅틱 피드백을 제공하기 위해 조절된 힘에 따라 수동으로 조작 가능하도록 구성된다.

[0037] 일부 구현들에서, 조건 또는 명령에 응답하여, 하나 이상의 컨트롤러들은 나사의 회전을 정지시키기 위해 수술 툴을 자율적으로 제어하는 것을 정지 또는 일시 정지시킨 후 시뮬레이션된 수동 제어 모드를 개시하도록 더 구성된다.

[0038] 본 개시의 제2 양태는 본 개시의 제1 양태에 따라, 그리고 선택적으로는, 이 섹션 내의 구현들 중 어느 하나에 따라 로봇 수술 시스템을 동작시키는 방법을 포함한다. 본 개시의 제1 및 제2 양태들은 이 섹션 내의 구현들 중 어느 하나에 따라 선택적으로 구현된다.

[0039] 본 개시의 제3 양태는, 로봇 조작기; 로봇 조작기에 결합되고 나사와 인터페이싱하고 회전축을 중심으로 나사를 회전시키도록 구성된 수술 툴; 액추에이터 및 상기 액추에이터에 결합된 회전식 인터페이스를 포함하는 햅틱 장치로서, 회전식 인터페이스는 조작자의 손에 의해 수동으로 조작 가능하도록 구성되는, 상기 햅틱 장치; 타겟 부위의 위치를 추적하도록 구성된 내비게이션 시스템; 및 로봇 조작기, 햅틱 장치 및 내비게이션 시스템에 결합된 하나 이상의 컨트롤러들로서, 하나 이상의 컨트롤러들은, 타겟 부위의 추적된 위치에 기초하여 타겟 부위에 대해 계획된 궤적을 따라 수술 툴의 회전축을 유지하도록 로봇 조작기의 움직임을 제어하고; 햅틱 장치로부터 제어 입력을 수신하되, 회전식 인터페이스는 조작자가 회전식 인터페이스를 수동으로 조작하는 것에 기초하여 나사의 회전 속도 또는 나사의 전진 속도 중 하나를 제어하는 능력으로 수동으로 조작 가능하고; 햅틱 장치로부터의 제어 입력에 응답하여, 회전축을 중심으로 한 회전 속도로 나사를 회전시키고 계획된 궤적을 따라 전진 속도로 나사를 선형으로 전진시키기 위해 수술 툴을 제어하되, 회전 속도 및 전진 속도는 미리 결정되고 나사의 공지된 나사산 기하학적 형상에 비례하고; 나사와 타겟 부위 사이의 현재 상호작용을 나타내는 측정을 획득하고; 획득된 측정에 기초하여, 회전식 인터페이스가 나사와 타겟 부위 사이의 현재 상호작용을 에뮬레이트하도록 하기 위해 햅틱 장치의 액추에이터를 제어하도록 구성되는, 상기 하나 이상의 컨트롤러들을 포함하는, 로봇 수술 시스템을 포함한다.

[0040] 본 개시의 제4 양태는 본 개시의 제3 양태에 따라, 그리고 선택적으로는, 이 섹션 내의 구현들 중 어느 하나에 따라 로봇 수술 시스템을 동작시키는 방법을 포함한다. 본 개시의 제3 및 제4 양태들은 이 섹션 내의 구현들 중 어느 하나에 따라 선택적으로 구현된다.

[0041] 본 개시의 제5 양태는, 로봇 조작기; 로봇 조작기에 결합되고 회전축을 중심으로 회전시키도록 구성된 수술 툴; 액추에이터 및 액추에이터에 결합된 회전식 인터페이스를 포함하는 햅틱 장치로서, 인터페이스는 조작자의 손에 의해 수동으로 조작 가능하도록 구성되는, 상기 햅틱 장치; 타겟 부위의 위치를 추적하도록 구성된 내비게이션 시스템; 및 로봇 조작기, 햅틱 장치 및 내비게이션 시스템에 결합된 하나 이상의 컨트롤러들로서, 하나 이상의 컨트롤러들은, 타겟 부위의 추적된 위치에 기초하여 타겟 부위에 대해 계획된 궤적을 따라 수술 툴의 회전축을 유지하도록 로봇 조작기의 움직임을 제어하고; 회전축을 중심으로 한 회전 속도로 수술 툴을 회전시키고 계획된 궤적을 따라 전진 속도로 수술 툴을 선형으로 전진시키기 위해 수술 툴을 자율적으로 제어하고; 수술 툴과 타겟 부위 사이의 현재 상호작용을 나타내는 측정을 획득하고; 획득된 측정에 기초하여, 회전식 인터페이스가 수술 툴과 타겟 부위 사이의 현재 상호작용을 에뮬레이트하도록 하기 위해 햅틱 장치의 액추에이터를 제어하도록 구성되는, 상기 하나 이상의 컨트롤러들을 포함하는, 로봇 수술 시스템을 포함한다.

[0042] 본 개시의 제6 양태는 본 개시의 제5 양태에 따라, 그리고 선택적으로는, 이 섹션 내의 구현들 중 어느 하나에 따라 로봇 수술 시스템을 동작시키는 방법을 포함한다. 본 개시의 제5 및 제6 양태들은 이 섹션 내의 구현들 중 어느 하나에 따라 선택적으로 구현된다.

[0043] 본 개시의 제7 양태는, 액추에이터 및 액추에이터에 결합된 회전식 인터페이스를 포함하는 햅틱 장치로서, 회전식 인터페이스는 조작자의 손에 의해 수동으로 조작 가능하도록 구성되는, 상기 햅틱 장치; 디스플레이 장치; 및 햅틱 장치 및 디스플레이 장치에 결합된 하나 이상의 컨트롤러들로서, 하나 이상의 컨트롤러들은 디스플레이 장치 상에 시뮬레이션을 제공하도록 구성되고, 시뮬레이션은, 시뮬레이션된 나사와 인터페이싱하고 시뮬레이션된 타겟 부위에 대해 시뮬레이션된 궤적에 따라 회전축을 중심으로 시뮬레이션된 나사를 회전시키도록 구성된 시뮬레이션된 수술 툴을 제공하고; 회전축을 중심으로 한 회전 속도로 시뮬레이션된 나사를 회전시키고 시뮬레이션된 궤적을 따라 전진 속도로 시뮬레이션된 나사를 선형으로 전진시키기 위해 시뮬레이션된 수술 툴에 시뮬레이션된 제어를 제공하되, 회전 속도 및 전진 속도가 미리 결정되고 시뮬레이션된 나사의 공지된 나사산 기하학적 형상에 비례하고; 시뮬레이션된 나사와 시뮬레이션된 타겟 부위 사이의 시뮬레이션된 현재 상호작용을 획득하고; 시뮬레이션된 현재 상호작용에 기초하여, 회전식 인터페이스가 시뮬레이션된 나사와 시뮬레이션된 타겟 부위 사이의 시뮬레이션된 현재 상호작용을 에뮬레이트하도록 하기 위해 햅틱 장치를 제어하도록 구성되는, 상기 하나 이상의 컨트롤러들을 포함하는, 시뮬레이션 시스템을 포함한다.

[0044] 본 개시의 제8 양태는 본 개시의 제7 양태에 따라, 그리고 선택적으로는, 이 섹션 내의 구현들 중 어느 하나에 따라 시뮬레이션 시스템을 동작시키는 방법을 포함한다. 본 개시의 제7 및 제8 양태들은 이 섹션 내의 구현들 중 어느 하나에 따라 선택적으로 구현된다.

도면의 간단한 설명

[0045] 도 1은 일 예에 따른 로봇 수술 시스템의 사시도이다.

도 2는 도 1의 로봇 수술 시스템이 사용된 수술 로봇 아암(arm)의 일 예의 사시도이다.

도 3은 척추 수술을 수행하기 위해 이미징 장치와 조합하여 사용되는 로봇 수술 시스템의 일 예의 사시도이다.

도 4는 로봇 아암에 결합된 수술 툴의 일 예의 부분 사시도이며, 수술 툴은 드릴에 결합된 하우징을 포함한다.

도 5는 드라이버 및 나사에 결합된 수술 툴에 결합된 로봇 아암의 부분 사시도이다.

도 6은 대안적인 수술 툴의 입면도이다.

도 7은 일 예에 따른 척추경에 파일럿 홀을 드릴링하는 도면이다.

도 8은 일 예에 따른 척추골(vertebra) 내로의 척추경 나사(pedicle screw)의 예시이다.

도 9는 라인 햅틱(line haptic)을 따라 배치된 척추경 나사의 예시이다.

도 10은 로봇 수술 시스템이 햅틱 장치를 포함하는 도 1의 로봇 수술 시스템의 인스턴스의 사시도이다.

도 11a는 자율 검사 모드, 수동 제어 모드, 시뮬레이션된 자율 검사 모드, 및 시뮬레이션된 수동 제어 모드를 포함하는 다양한 동작 모드들, 및 햅틱 장치에 대한 파라미터들을 예시하는 표이다.

도 11b는 수동 제어 모드 동안 햅틱 장치로부터의 입력에 기초하여 척추경 나사의 삽입을 제어하기 위한 다양한 기술들을 예시하는 표이다.

도 11c는 홈 위치로부터 홈이 아닌(non-home) 위치로 수동으로 조작되는 햅틱 장치의 회전식 인터페이스의 예시이다.

도 12a는 자율 검사 모드 동안 척추경 나사가 삽입되는 동안 햅틱 피드백을 조작자에게 제공하는 햅틱 장치의 예시이다.

도 12b는 수동 제어 모드 동안 척추경 나사가 삽입되는 동안 햅틱 피드백을 조작자에게 제공하는 햅틱 장치의 예시이다.

도 13a 및 13b는 드릴링 및 척추경 나사 삽입이 작업자의 계획에 따른 것임을 검증하는데 사용될 수 있는 전류 출력 대 깊이를 도시하는 예시들이다.

도 14a는 일 예에 따른, 햅틱 장치를 포함하고 삽입되는 척추경 나사의 시뮬레이션을 디스플레이하는 로봇 수술

시스템의 사시도이다.

도 14b는 시뮬레이션된 자율 검사 모드 동안 척추경 나사가 삽입되는 동안 햅틱 피드백을 조작자에게 제공하는 햅틱 장치의 예시이다.

도 14c는 시뮬레이션된 수동 제어 모드 동안 척추경 나사가 삽입되는 동안 햅틱 피드백을 조작자에게 제공하는 햅틱 장치의 예시이다.

도 15a는 햅틱 장치를 사용하여 로봇 수술 시스템을 동작시키는 방법의 흐름도이다.

도 15b는 자율 검사 모드를 실행하기 위한 샘플 단계들의 흐름도이다.

도 15c는 수동 제어 모드를 실행하기 위한 샘플 단계들의 흐름도이다.

도 15d는 시뮬레이션된 자율 검사 모드를 실행하기 위한 샘플 단계들의 흐름도이다.

도 15e는 시뮬레이션된 수동 제어 모드를 실행하기 위한 샘플 단계들의 흐름도이다.

도 15f는 척추경 나사(pedicle screw; PS)의 삽입을 자율적으로 제어하기 위해 수술 절차 동안 수행되는 샘플 단계들의 흐름도이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0046] I. 시스템 개요

[0047] 도 1 및 2를 참조하면, 이에 제한되는 것은 아니나, 척추경 나사, 다른 나사, 또는 다른 유형의 임플란트가 척추에 배치되는 척추 수술과 같은 척추 수술을 포함하는 다양한 수술 절차들에 사용될 수 있는 수술용 로봇 수술 시스템(10)이 도시되어 있다. 로봇 수술 시스템(10)은 로컬라이저(14) 및 추적 장치(16)를 포함하는 내비게이션 시스템(12), 하나 이상의 디스플레이들(18), 및 로봇 조작기(예를 들어, 베이스(22), 테이블 등에 장착된 로봇 아암(robotic arm)(20))를 포함한다. 로봇 아암(20)은 베이스(base)(22)에 회전 가능하게 결합된 베이스 링크(base link)(24) 및 베이스 링크(24)로부터 원위 단부(28)로 연장되는 복수의 아암 링크들(26)을 포함한다. 아암 링크들(26)은 로봇 아암(20) 내의 복수의 관절(joint)들을 중심으로 피봇(pivot)/회전된다. 척추 수술을 수행하는 데 사용하기 위한 수술 툴은, 예를 들어, 일반적으로 30으로 도시되어 있다. 수술 툴(30)은 로봇 아암(20)의 원위 단부(28)에 피봇 가능하게(pivotally) 연결될 수 있다. 아암 링크들(26)은 직렬로 장착될 수 있다. 대안적으로, 로봇 아암(20)은 평행 아암 링키지(arm linkage)들을 포함할 수 있다. 또한, 임의 개수의 로봇 아암(20)이 사용될 수 있다.

[0048] 로봇 컨트롤러(32)는 수술 툴(30)의 조작 동안 로봇 아암(20)의 제어 또는 의사(본원에서는 "조작자(the operator)"로 지칭됨)에게로의 가이던스(guidance)를 제공하도록 구성된다. 한 예에서, 로봇 컨트롤러(32)는 로봇 아암(20)을 제어하여(예를 들어, 그의 관절 모터들을 제어함으로써) 로봇 아암(20)을 통해 조작자에게 햅틱 피드백을 제공하도록 구성된다. 이러한 햅틱 피드백은 조작자가 수술 절차와 연관된 미리 정의된 가상 경계들을 넘어 수술 툴(30)를 수동으로 이동시키는 것을 제약하거나 억제하는 것을 돕는다. 이러한 햅틱 피드백 시스템 및 가상 경계들을 정의하는 관련 햅틱 객체들은, 예를 들어, Quaid 등에 의해 2006년 2월 21일자로 출원된 "Haptic Guidance System And Method"이라는 명칭의 미국 특허 번호 제8,010,180호 및/또는 Otto 등에 의해 2012년 12월 21자로 출원된 "Systems And Methods For Haptic Control Of A Surgical Tool"이라는 명칭의 미국 특허 출원 공개 번호 제2014/0180290호에 기술되어 있으며, 이들 각각은 그 전체가 본원에 참조로서 통합된다. 한 예에서, 로봇 수술 시스템(10)은 미국 플로리다주(FL), 포트 로더데일(Lauderdale) 소재의 MAKO Surgical Corp.에 의해 제조된 RIO™ 로봇 아암 상호작용 정형외과 시스템이다.

[0049] 일부 예에서, 로봇 아암(20)은 수술 절차를 수행하기 위해 미리 정의된 툴 경로들 및/또는 다른 미리 정의된 움직임들에 기초하여 자율적으로 작용한다. 이러한 움직임들은 수술 절차 동안 및/또는 수술 전에 정의될 수 있다. 추가적인 경우에, 수동 및 자율 제어의 조합이 활용된다. 예를 들어, 조작자가 로봇 아암(20)의 움직임을 유발하기 위해 수술 툴(30)에 힘을 인가하는 수동 모드 및 조작자가 펜던트(pendant)를 잡고서 로봇 아암(20)이 툴 경로를 자율적으로 따르도록 제어하는 반자율 모드 둘 모두를 사용하는 로봇 수술 시스템은 Bowling 등에 의해 2015년 6월 4일자로 출원된 "Robotic surgical system And Method For Transitioning Between Operating Modes"이라는 명칭의 미국 특허 번호 제9,566,122호에 기술되어 있으며, 이는 그 전체가 본원에 참조로서 통합된다.

[0050] 내비게이션 시스템(12)은 타겟 좌표계에 대한 수술실 내의 다양한 객체들의 움직임을 추적하도록 설정된다. 이러한 객체체들은, 예를 들어, 수술 툴(30), 관심 있는 환자의 해부학적 구조, 예를 들어, 하나 이상의 척추골, 및/또는 다른 객체들을 포함한다. 내비게이션 시스템(12)은 조작자에게 타겟 좌표계에서 이러한 객체들의 상대 위치들 및 배향들을 디스플레이할 목적으로, 그리고 일부 경우에는, 환자의 해부학적 구조와 연관되고 타겟 좌표계에 대해 정의된 가상 경계에 대한 수술 툴(30)의 움직임을 제어 또는 제약할 목적으로(예를 들어, 수술 내비게이션에 잘 알려진 좌표계 변환을 통해) 이러한 객체를 추적한다.

[0051] 수술 내비게이션 시스템(12)은 내비게이션 컨트롤러(36)를 수용하는 컴퓨터 카트 어셈블리(34)를 포함한다. 내비게이션 컨트롤러(36) 및 로봇 컨트롤러(32)는 로봇 수술 시스템(10)의 제어 시스템을 집합적으로 형성한다. 내비게이션 인터페이스는 내비게이션 컨트롤러(36)와 동작 가능하게 통신한다. 내비게이션 인터페이스는 컴퓨터 카트 어셈블리(34)에 조정 가능하게 장착되는 디스플레이(18)를 포함한다. 키보드 및 마우스와 같은 입력 장치들은 정보를 내비게이션 컨트롤러(36)에 입력하거나 아니면 내비게이션 컨트롤러(36)의 특정 양태들을 선택/제어하는 데 사용될 수 있다. 터치 스크린(도시되지 않음) 또는 음성 활성화를 포함하는 다른 입력 장치들이 고려된다.

[0052] 로컬라이저(localizer)(14)는 내비게이션 컨트롤러(36)와 통신한다. 도시된 예에서, 로컬라이저(14)는 광학 로컬라이저이고, 카메라 유닛(감지 장치의 일 예)을 포함한다. 카메라 유닛은 하나 이상의 광학 위치 센서들을 수용하는 외부 케이싱을 갖는다. 일부 예들에서, 적어도 2개의 광학 센서들은 때때로 3개 이상이 사용된다. 광학 센서들은 별도의 전하 결합 장치(Charge Coupled Device; CCD)일 수 있다. 카메라 유닛은, 이상적으로는 장애물이 없는, 아래에서 논의되는 추적 장치들(16)의 시야로 광학 센서들을 포지셔닝하기 위해 조정 가능한 아암 상에 장착된다. 일부 예들에서, 카메라 유닛은 회전식 관절을 중심으로 회전시킴으로써 적어도 하나의 자유도(degree of freedom)로 조정 가능하다. 다른 예들에서, 카메라 유닛은 2 이상의 자유도에 대해 조정 가능하다.

[0053] 로컬라이저(14)는 광학 센서들로부터 신호들을 수신하기 위해 광학 센서들과 통신하는 로컬라이저 컨트롤러(도시되지 않음)를 포함한다. 로컬라이저 컨트롤러는 유선 또는 무선 연결(도시되지 않음)을 통해 내비게이션 컨트롤러(36)와 통신한다. 하나의 이러한 연결은 고속 통신 및 등시성(isochronous) 실시간 데이터 전송을 위한 직렬 버스 인터페이스 표준인 IEEE 1394 인터페이스일 수 있다. 연결은 또한 회사 고유의 프로토콜을 사용할 수도 있다. 다른 예들에서, 광학 센서들은 내비게이션 컨트롤러(36)와 직접 통신한다.

[0054] 위치 및 배향 신호들 및/또는 데이터는 객체들을 추적하기 위해 내비게이션 컨트롤러(36)에 전송된다. 컴퓨터 카트 어셈블리(34), 디스플레이(18), 및 로컬라이저(14)는 2010년 5월 25일자로 발행된 Malackowski 등의 미국 특허 번호 제7,725,162호에 기술된 것과 유사할 수 있으며, 이는 본원에 참조로서 통합된다.

[0055] 로봇 컨트롤러(32) 및 내비게이션 컨트롤러(36)는 각각, 또는 집합적으로, 로컬 메모리, 외부 메모리, 클라우드 기반 메모리, 랜덤 액세스 메모리(random access memory; RAM), 비휘발성 RAM(non-volatile RAM; NVRAM), 플래시 메모리, 또는 임의의 다른 적절한 형태의 메모리와 같은, 데이터 및 컴퓨터 판독가능 명령어들의 저장에 적합한 메모리, 하나 이상의 개인용 컴퓨터들 또는 랩압 컴퓨터들을 포함할 수 있다. 로봇 컨트롤러(32) 및 내비게이션 컨트롤러(36)는 각각, 또는 집합적으로, 본원에 설명된 기능들을 수행하기 위해 메모리에 저장된 명령어들을 처리하거나 알고리즘들을 처리하기 위한 마이크로프로세서들과 같은 하나 이상의 프로세서들을 포함할 수 있다. 프로세서는 임의의 유형의 프로세서, 마이크로프로세서 또는 멀티-프로세서 시스템일 수 있다. 추가적으로 또는 대안적으로, 로봇 컨트롤러(32) 및 내비게이션 컨트롤러(36)는 각각 또는 집합적으로 하나 이상의 마이크로컨트롤러, 필드 프로그래머블 게이트 어레이, 칩 상의 시스템, 이산 회로, 및/또는 본원에 설명된 기능들을 수행할 수 있는 다른 적절한 하드웨어, 소프트웨어, 또는 펌웨어를 포함할 수 있다. 로봇 컨트롤러(32) 및 내비게이션 컨트롤러(36)는 로봇 조작기, 컴퓨터 카트 어셈블리(34)에 의해 운반될 수 있고/있거나 임의의 다른 적절한 위치에 장착될 수 있다. 로봇 컨트롤러(32) 및/또는 내비게이션 컨트롤러(36)는 아래에 설명된 바와 같은 소프트웨어가 로딩된다. 소프트웨어는 로컬라이저(14)로부터 수신된 신호들을 추적되는 객체들의 위치 및 배향을 나타내는 데이터로 변환한다.

[0056] 수술 로봇 시스템(10)은 로봇 컨트롤러(32) 외에 수술 로봇 시스템(10)의 컴포넌트들을 제어하기 위한 임의 개수의 컨트롤러들을 포함할 수 있다. 예를 들어, 수술 로봇 시스템(10)은 수술 툴(30)를 제어하도록 구성된 툴 컨트롤러를 포함할 수 있다. 다른 예로서, 수술 로봇 시스템(10)은 수술 로봇 시스템(10)의 햅틱 장치를 제어하도록 구성된 햅틱 장치 컨트롤러를 포함할 수 있다(아래에서 더 상세히 설명됨). 수술 로봇 시스템(10)의 컨트롤러들은 개별적으로 또는 조합하여 수술 절차의 기능들을 수행하도록 구성될 수 있다. 예를 들어, 로봇 컨트롤러(32), 내비게이션 컨트롤러(36), 로컬라이저 컨트롤러, 툴 컨트롤러, 및 햅틱 장치 컨트롤러는 수술용 로봇

시스템(10)의 햅틱 장치를 통해 조작자에게 햅틱 피드백을 제공하기 위해 조합하여 동작할 수 있다. 다른 예로서, 로봇 컨트롤러(32)는 로봇 아암(20)을 제어하기 위해 개별적으로 동작할 수 있다. 이와 같이, 이러한 다양한 구성들을 캡처하기 위해, 이하에서 이 설명은 또한 도 1에 표시된 바와 같이 "하나 이상의 컨트롤러들(33)"을 지칭할 수 있다. "하나 이상의 컨트롤러들(33)"은 참조된 기능을 수행하기에 적합한 임의의 개별 컨트롤러 또는 컨트롤러들의 임의의 조합을 포함하는 것으로 이해되어야 한다. 집합적인 하나 이상의 컨트롤러들은 또한 제어 시스템으로 간주될 수 있다.

[0057] 또한, 본원에 설명된 하나 이상의 컨트롤러들(33) 중 어느 하나에 의해 실행되는 본 명세서 내의 단계들 중 임의의 단계는 본원에 설명된 제어 알고리즘들에 따라 동작 가능하며, 이는 본원에 설명된 태스크들을 해결하기 위한 단계들의 유한 시퀀스에 따라 구현될 수 있다.

[0058] 도 3을 참조하면, 네비게이션 시스템(12)은 본원에서 추적기들로도 지칭되는 복수의 추적 장치들(16)을 포함한다. 예시된 예에서, 추적기들(16)은 환자의 별개의 척추골에 결합된다. 일부 경우에, 추적기들(16)은 골격 나사, 골격 핀(pin) 등을 통해 골격의 섹션들에 견고하게 부착된다. 다른 경우에, 극돌기(spinous process) 또는 척추의 다른 부분 상의 클램프(clamp)들이 추적기들(16)을 부착하는데 사용될 수 있다. 추가 예들에서, 추적기들(16)은 해부학적 구조의 다른 조직 유형들 또는 부분들에 장착될 수 있다. 추적기들이 부착되는 해부학적 구조에 대한 추적기들(16)의 위치는 디지타이징 프로브(73)(예를 들어, 자신의 마커들이 있는 내비게이션 포인터)가 표면-기반(surface-based) 등록을 위해 골격 상의 뼈의 랜드마크들 상에 터치 오프(touch off)하거나 골격 상의 여러 지점들을 터치 온(touch on)하는 데 사용되는 지점-기반(point-based) 등록과 같은 등록 기술들에 의해 결정될 수 있다. 종래의 등록 기술들은 추적기들(16)의 포즈를 환자의 해부학적 구조, 예를 들어 치료되는 척추골(V)에 상관시키기 위해 사용될 수 있다.

[0059] 척추골(V)의 극돌기에 부착되고 클램프가 부착되는 극돌기의 형상을 결정하기 위한 촉각 센서들(도시되지 않음)을 갖는 기계적 클램프들을 갖는 추적기들(16)을 사용하는 것과 같은 다른 유형의 등록이 또한 가능하다. 그런 다음 극돌기의 형상은 등록을 위해 극돌기의 3-D 모델에 매칭될 수 있다. 촉각 센서들과 추적 장치(16) 상의 3개 이상의 마커들 사이의 알려진 관계는 내비게이션 컨트롤러(36)에 미리 로딩된다. 이러한 알려진 관계에 기초하여, 환자의 해부학적 구조에 대한 마커들의 위치들이 결정될 수 있다.

[0060] 베이스 추적기(16)는 베이스(22)에 결합되어 수술 툴(30)의 포즈를 추적할 수 있다. 다른 예들에서, 개별 추적기(16)는 수술 툴(30)에 고정될 수 있는데, 예를 들어, 제조 동안 수술 툴(30)에 통합될 수 있거나, 수술 절차를 위한 준비 시 수술 툴(30)에 개별적으로 장착될 수 있다. 어느 경우든, 수술 툴(30)의 작업 단부는 베이스 추적기(16) 또는 다른 추적기에 의해 추적되고 있다. 작업 단부는 수술 툴(30)의 부속품(accessory)의 원위 단부일 수 있다. 이러한 부속품은 드릴, 버(bur), 톱, 전기 절제 장치, 나사 드라이버, 탭(tap), 수술용 칼, 잠쉬디(Jamshidi) 바늘 등을 포함할 수 있다.

[0061] 예시된 예에서, 추적기들(16)은 수동 추적기들이다. 이 예에서, 각각의 추적기(16)는 로컬라이저(14)로부터의 광을 광학 센서들로 다시 반사시키기 위한 적어도 3개의 수동 추적 소자들 또는 마커들(M)을 갖는다. 다른 예들에서, 추적기들(16)은 능동 추적기들이고, 적외선 광과 같은 광을 광학 센서들에 전달하는 발광 다이오드들 또는 LED들을 가질 수 있다. 수신된 광학 신호들에 기초하여, 내비게이션 컨트롤러(36)는 종래의 삼각측량 기술들을 사용하여 로컬라이저(14)에 대한 추적기들(16)의 상대적 위치들 및 배향들을 나타내는 데이터를 생성한다. 일부 경우에, 많거나 적은 마커들이 사용될 수 있다. 예를 들어, 추적되고 있는 객체가 라인을 중심으로 회전 가능한 경우, 2개의 마커들은 라인 주위의 다양한 위치들에서 마커들의 위치들을 측정함으로써 라인의 배향을 결정하는 데 사용될 수 있다. 로컬라이저(14) 및 추적기들(16)은 광학 추적 기술을 이용하는 것으로 상기에 설명되어 있지만, 대안적으로 또는 추가적으로, 전자기 추적, 초음파, 무선 주파수 추적, 관성 추적, 이들의 조합 등과 같은, 객체들을 추적하기 위한 다른 추적 모달리티들(modalities)을 이용할 수 있다는 것이 이해되어야 한다.

[0062] 또한, 수술 툴(30)이 임의의 원하는 절개 경계들 외부에서 환자의 피부에 부주의하게 접촉 또는 침투하지 않는 것을 보장하기 위해 환자의 피부 표면을 추적하는 것이 바람직할 수 있다. 이러한 목적을 위해, 접착 배킹(adhesive backing)을 갖는 능동 또는 수동 마커들과 같은 피부 부착 마커들(M)은 환자의 피부와 관련된 경계를 정의하도록 환자의 피부에 부착될 수 있다. 이러한 마커들(M)의 어레이는 주변 링(peripheral ring)(74)(원형, 직사각형 등)에 제공될 수 있어서, 수술 절차는 링(74)을 실질적으로 교란시키지 않고 링(74) 내부에서 계속된다(즉, 링은 관심 있는 절개 및 척추골 주위에서 환자의 피부 상에 배치됨). 하나의 적합한 피부 마커 어레이는 독일, 프라이부르크(Freiburg), D-79111 뵈칭거 스트라베(Botzinger Straße) 41에 소재한 Stryker Leibinger

GmbH & Co. KG에 의해 제조된 SpineMask® 추적기이다. 또한 본원에 그 전체가 참조로서 통합된, Schoepp 등에 의해 2015년 5월 13일자로 출원된 "Navigation System For And Method Of Tracking The Position Of A Work Target"이라는 명칭의 미국 특허 출원 공개 번호 제2015/0327948호를 참조한다. 다른 적합한 피부 추적기들이 또한 고려된다. 디지타이징 프로브(digitizing probe)는 또한 피부 표면 및/또는 절개부도 맵핑하는데 사용될 수 있다. 그러나, 일단 매핑되면, 피부의 임의의 움직임은 추가의 디지타이징 없이 검출되지 않을 것이며, 반면에 부착된 추적기 어레이는 환자의 피부의 움직임을 검출할 수 있다.

[0063] 수술 절차의 시작 이전에, 추가적인 데이터가 내비게이션 컨트롤러(36)에 로딩된다. 추적기들(16)의 위치 및 배향 및 이전에 로딩된 데이터에 기초하여, 내비게이션 컨트롤러(36)는 작업 단부가 적용되는 조직에 대한 수술 툴(30)의 작업 단부의 위치 및 수술 툴(30)의 배향을 결정한다. 추가 데이터는 추적기들(16) 또는 그의 마커들(M)의 위치들 및/또는 배향들을 수술 툴(30)의 작업 단부에 관련시키는 기하학적 데이터와 같은 교정 데이터(calibration data)를 포함할 수 있다. 이 교정 데이터는 또한 예를 들어 자신의 추적기에 대해 또는 베이스 추적기(16)에 대해 수술 툴(30)의 작업 단부의 위치를 결정하기 위해 공지된 기하학적 형상의 추적기(16) 상의 교정 프로브(calibration probe) 또는 교정 디봇(calibration divot)을 사용하는 것과 같이, 수술 전 또는 수술 중에 결정될 수 있다. 추가 데이터는 추적기들(16)을 환자의 해부학적 구조 또는 그의 3-D 모델들에 연관시키는 변환 데이터와 같은 등록 데이터를 포함할 수 있다. 일부 예들에서, 내비게이션 컨트롤러(36)는 이러한 데이터를 로봇 컨트롤러(32)에 포워딩한다. 그런 다음 로봇 컨트롤러(32)는 데이터를 사용하여 미국 특허 번호 제8,010,180호 또는 제9,566,122호에 설명된 바와 같은 로봇 아암(20)을 제어할 수 있으며, 이들 둘 모두는 본원에 참조로서 앞서 통합된다.

[0064] 내비게이션 컨트롤러(36)는 또한 관심 조직에 대한 수술 툴(30)의 작업 단부의 상대적 위치를 나타내는 이미지 신호들을 생성한다. 이러한 이미지 신호들은 디스플레이들(18)에 인가된다. 디스플레이들(18)은, 이러한 신호들에 기초하여, 조작자 및 직원이 수술 부위에 대한 수술 툴(30)의 상대적 위치를 볼 수 있게 하는 이미지들을 생성한다. 위에서 논의된 바와 같은 디스플레이들(18)은 명령들의 입력을 허용하는 터치 스크린 또는 다른 입/출력 장치를 포함할 수 있다.

[0065] 도시된 예에서, 내비게이션 시스템(12)을 사용하여, 베이스 추적기(16)를 통해 베이스(22)의 위치를 추적하고 로봇 아암(20)의 관절들로부터의 관절 인코더 데이터 및 수술 툴(30)과 로봇 아암(20) 사이의 알려진 기하학적 관계에 기초하여 수술 툴(30)의 포즈를 계산함으로써 수술 툴(30)의 포즈가 결정될 수 있다. 궁극적으로, 로컬라이저(14) 및 추적 장치들(16)은 수술 툴(30)의 포즈 및 환자의 해부학적 구조의 결정을 가능하게 하여 내비게이션 시스템(12)이 수술 툴(30)과 환자의 해부학적 구조 사이의 상대적 관계를 알게 된다. 이러한 한 네비게이션 시스템은, Wu에 의해 2013년 9월 24일자로 출원된 "Navigation System Including Optical And Non-Optical Sensors"이라는 명칭의 미국 특허 번호 제9,008,757호에 도시되어 있으며, 이는 본원에 참조로서 통합된다.

[0066] 동작 시, 특정 수술 태스크(task)들의 경우, 조작자는 드릴링, 절삭, 소잉(sawing), 리밍(reaming), 임플란트 설치 등과 같은, 환자에 대한 수술 절차를 수행하기 위해 수술 툴(30)을 조작하도록 로봇 아암(20)을 수동으로 조작(예를 들어, 이동 또는 그의 이동을 유발)한다. 조작자가 수술 툴(30)을 조작함에 따라, 내비게이션 시스템(12)은 수술 툴(30) 및/또는 로봇 아암(20)의 위치를 추적하고, 환자의 해부학적 구조에 등록된(또는 맵핑된) 하나 이상의 미리 정의된 가상 경계들을 넘어 수술 툴(30)를 이동시키는(또는 이의 움직임을 유발하는) 조작자의 능력을 제한하기 위해 조작자에 햅틱 피드백(예를 들어, 힘 피드백)을 제공하며, 이는 매우 정확하고 반복가능한 드릴링, 절삭, 소잉, 리밍, 및/또는 임플란트 배치를 초래한다.

[0067] 한 예에서, 로봇 아암(20)은 수동 방식으로 동작하고, 조작자가 가상 경계를 넘어 수술 툴(30)을 이동시키려고 시도할 때 햅틱 피드백을 제공한다. 햅틱 피드백은 로봇 아암(20) 내의 하나 이상의 액추에이터들(예를 들어, 관절 모터들)에 의해 생성되고, 케이블 구동 트랜스미션(cable drive transmission)과 같은 가요성 트랜스미션(flexible transmission)을 통해 조작자에게 전송된다. 로봇 아암(20)이 햅틱 피드백을 제공하지 않을 때, 로봇 아암(20)은 조작자에 의해 자유롭게 이동 가능하다. 다른 예들에서, 이전에 참조에 의해 본원에 통합된 미국 특허 번호 제9,566,122호에 도시된 것과 같이, 로봇 아암(20)은 유사한 방식으로 조작자에 의해 조작되지만, 로봇 아암(20)은 능동 방식으로 동작한다. 예를 들어, 조작자는 힘/토크 센서에 의해 측정되는 힘을 수술 툴(30)에 인가하고, 로봇 아암(20)은 힘/토크 센서로부터의 측정치들에 기초하여 조작자의 원하는 움직임을 에뮬레이트(emulate)한다. 다른 수술 태스크들의 경우, 로봇 아암(20)은 자율적으로 동작한다.

[0068] 도 4 및 5로 돌아가서, 수술 툴(30)의 일 예는 로봇 아암(20)의 원위 단부(28)에 결합되는 것으로 도시되어 있다. 보다 구체적으로, 축(A)을 중심으로 원위 단부(28)에 대한 수술 툴(30)의 회전을 허용하기 위해 수술 툴

(30)와 로봇 아암(20)의 원위 단부(28) 사이에 커플링(coupling)(40)이 제공된다. 도 4에서, 수술 툴(30)은 척추경 나사, 다른 나사, 또는 다른 유형의 임플란트를 위한 파일럿 홀을 드릴링하기 위한 드릴(42)을 포함한다. 드릴(42)은 회전축(R)을 중심으로 회전하도록 배열된다. 도 5에서, 수술 툴(30)은 척추경 나사(PS) 또는 다른 임플란트를 삽입하기 위해 회전축(R)을 중심으로 회전하도록 회전축(R)을 따라 배열된 드라이버(44)(예를 들어, 나사 드라이버)를 포함한다. 수술 툴(30)은 하우징(45)을 포함한다. 구동 시스템(예를 들어, 모터)은 드릴(42), 드라이버(44) 또는 다른 부속품을 구동하기 위해 하우징(45) 내에 위치된다. 구동 시스템은 가변 속도일 수 있다.

[0069] 하우징(45)은 드릴(42), 드라이버(44) 또는 다른 부속품을 구동 시스템에 해제 가능하게 부착하기 위한 콜릿(collet)(47) 또는 다른 유형의 커플러(coupler)를 더 포함한다. 일부 경우에, 감속기(speed reducer)(48)(도 5 참조)는 특정 부속품에 사용되도록 콜릿(47)에 해제 가능하게 부착될 수 있다. 감속기(48)는 구동 시스템에 직접 연결되는 것에 비해 부속품의 회전 속도가 감소되도록 하는 트랜스미션(transmission) 또는 기어 장치(gear arrangement)를 포함한다. 이는 더 느린 회전 속도가 요구되는 경우에 유용하다.

[0070] 도 6에 도시된 다른 예에서, 커플링(40)의 일 단부는 축(A)을 중심으로 회전하도록 수술 툴(30)을 지지한다. 커플링(40)의 다른 단부는 하우징(45)을 지지한다. 하우징(45)은 커플링(40)에 고정될 수 있거나 또는 회전축(R)을 중심으로 커플링(40) 내에서 회전하도록 지지될 수 있다. 다시 말하면, 하우징(45)은 커플링(40) 내에서 수동으로 회전할 수 있다. 그러나, 동시에 커플링(40)은 하우징(45)의 포지셔닝이 정밀하게 제어될 수 있도록 커플링(40)에 대한 회전축(R)을 따라 하우징(45)의 축방향 움직임을 제한한다. 추적기(도시되지 않음)는 하우징(45)의 위치 및/또는 배향을 추적하여 하우징(45)에 부착될 수 있으며 이로써 하우징(45)에 부착된 부속품의 회전축(R) 및/또는 원위 단부를 추적할 수 있다. 회전 샤프트(rotating shaft)(60)는 하우징(45) 내에 회전 가능하게 지지된다. 회전 샤프트(60)는 부속품(예를 들어, 도시된 바와 같은 드라이버(44))에 결합되는 원위 인터페이스/콜릿(62) 및 토크 공급원, 예를 들어 모터, 수동 회전을 위한 회전식 핸들 등과 같은 전원에 결합되는 근위 인터페이스/콜릿(64)을 갖는다. 예를 들어, 드라이버(44)는 원위 인터페이스(62)/회전 샤프트(60)에 결합된 것으로 도시되어 있다.

[0071] 로봇 수술 시스템(10)은 드릴(42) 및/또는 드라이버(44)를 제어하기 위한 다양한 컴포넌트들을 포함할 수 있다. 예를 들어, 도 4 및 5에서, 수술 툴(30)은 하우징(45)에 달려있는 핸들(46)을 포함한다. 핸들(46)은 수술 절차 동안 수술 툴(30) 및/또는 로봇 아암(20)을 조작하기 위해 조작자에 의해 파지되는 그립(grip)을 포함할 수 있다. 트리거(trigger)(49)는 또한 드릴(42) 및/또는 드라이버(44)의 속도를 제어하고, 로봇 아암(20)의 움직임을 개시하고, 회전축(R)을 원하는 궤적과 정렬시키는 등을 위해 존재할 수 있다. 트리거(49)는 로봇 아암(20) 및/또는 수술 툴(30)를 제어하기 위해 로봇 컨트롤러(32) 및/또는 툴 컨트롤러에 신호들을 전달할 수 있다.

[0072] 도 6의 예에서, 수술 툴(30)은 수술 툴(30) 및 드릴(42)을 제어하기 위한 내부 모터를 갖는 핸드피스(handpiece)(66)를 포함한다. 도시된 바와 같이, 핸드피스(66)는 조작자가 핸드피스(66)를 파지하고, 모터의 동작을 트리거하고, 모터가 회전 샤프트(60)를 통해 드라이버(44) 및 궁극적으로는 척추경 나사(PS)에 토크를 전달하게 할 수 있도록 근위 인터페이스(64)에 결합된다.

[0073] 수술 전 이미징 및/또는 수술 중 이미징은 환자의 척추와 같은 치료를 필요로 하는 환자의 해부학적 구조를 시각화하기 위해 사용될 수 있다. 조작자는 이미지들에 대해 및/또는 이미지들로부터 생성된 3-D 모델에 대해 척추경 나사(PS)를 배치할 곳을 계획할 수 있다. 계획은, 예를 들어, 이미지들 및/또는 3-D 모델에서 원하는 포즈를 식별함으로써, 이들이 배치되고 있는 특정 척추골(V)에 대한 각각의 척추경 나사(PS)의 포즈를 결정하는 것을 포함한다. 이는 환자 해부학적 구조의 3-D 모델에 대해 척추경 나사(PS)의 별개의 3-D 모델을 생성하거나 위치시키는 것을 포함할 수 있다. 일단 계획이 설정되면, 계획은 실행을 위해 로봇 수술 시스템(10)으로 전달된다.

[0074] 로봇 수술 시스템(10)은 임의의 수술 전 이미지들, 예를 들어, 수술 전에 촬영된 X-선, CT 스캔, 또는 MRI 이미지들 외에 또는 대안적으로 환자의 해부학적 구조의 수술 중 이미지들을 촬영하기 위한 이미징 장치(50)(예를 들어, 도 3에 도시된 바와 같은 C-아암)와 협력하여 사용될 수 있다. 이미징 장치(50)로부터의 수술 중 이미지들은 환자의 척추에 배치되는 척추경 나사(PS)의 원하는 배향에 대한 드릴(42) 또는 드라이버(44)의 실제 위치를 결정하는 것을 도울 수 있다. 척추경 나사(PS) 또는 다른 임플란트를 척추골(V) 내에 배치할 때 각각의 척추골(V) 및 별개의 척추골(V)에 대한 드릴(42) 및/또는 드라이버(44)의 대응되는 포즈를 개별적으로 추적하기 위해 별개의 추적 장치들(16)이 각각의 척추골(V) 상에 사용될 수 있다.

[0075] 로봇 수술 시스템(10)은 척추경 나사(PS)의 원하는 포즈를 평가하고, 수술 툴(30)의 드릴(42) 및 드라이버(44)

가 궁극적으로 조작자의 계획에 따라 척추경 나사(PS)를 배치하는 방식으로 제어되도록 로봇 아암(20)의 움직임을 제어하기 위해 척추경 나사(PS)의 원하는 포즈에 대응되는 가상 경계들(예를 들어, 햅틱 객체들), 미리 정의된 툴 경로들, 및/또는 다른 자율적인 움직임 명령어들을 생성한다. 이는, 예를 들어, 수술 절차 동안 수술 툴(30)의 궤적이 척추경 나사(PS)의 원하는 포즈와 정렬되는 것을 보장하는 것, 예를 들어 회전축(R)을 척추경 나사(PS)의 원하는 포즈와 정렬하는 것을 포함할 수 있다.

[0076] 다른 예들에서, 조작자는 원하는 궤적 및/또는 나사 배치를 수술 중에 계획할 수 있다. 예를 들어, 조작자는 관심 해부학적 구조, 예를 들어, 척추골(V)에 대해 원하는 진입 지점에 드릴(42)을 포지셔닝시키고, 디스플레이(18)가 회전축(R)의 궤적이 원하는 배향에 있음을 나타낼 때까지 드릴(42)을 배향시킬 수 있다. 일단 조작자가 궤적에 만족되면, 조작자는 이 궤적을 수술 동안 유지될 원하는 궤적으로서 설정하기 위해 제어 시스템에 입력(예를 들어, 터치스크린, 버튼, 풋 페달 등)을 제공할 수 있다. 회전축(R)이 원하는 궤적을 따라 머물도록 수술 툴(30)의 움직임을 제약하기 위해 생성된 햅틱 객체는 도 4에 도시된 것과 같은 라인 햅틱 객체(line haptic object; LH)일 수 있다. 라인 햅틱 객체(LH)는 이하에 더 설명되는 바와 같이 시작 지점(starting point; SP), 드릴(42), 척추경 나사(PS) 등의 원하는 깊이를 정의하는 타겟 지점(target point; TP), 및 출구 지점(exit point; EP)을 가질 수 있다. 다른 햅틱 객체 형상들, 크기들 등이 또한 고려된다.

[0077] 도 7 및 8을 참조하면, 척추골(V) 중 하나가 도시되어 있다. 척추 융합 수술과 같은 수술 절차 동안, 조작자는 척추경 영역을 통해 척추골(V)의 척추체(vertebral body)(100) 내로 하나 이상의 척추경 나사들(PS)을 삽입할 수 있다. 척추경 나사(PS)를 삽입하기 전에, 조작자는 척추체(100) 내의 파일럿 홀들(102)을 절삭하기 위해 드릴(42)을 사용할 수 있다. 대안적인 경우에, 자체-드릴링(self-drilling), 자체-태핑(self-tapping) 골격 나사가 사용되는 경우와 같이 파일럿 홀들이 배제될 수 있다. 예를 들어, 2009년 12월 29일자로 발행된, "Self-drilling bone screw"이라는 명칭의 Stefan Auth의 미국 특허 번호 제7,637,929호의 교시를 참조하며, 이는 그 전체가 본원에 참조로서 통합된다.

[0078] 한 예에서, 드릴링이 개시되기 전에, 로봇 수술 시스템(10)은 파일럿 홀들(102)의 원하는 배향과 일치하는, 원하는 궤적에 수술 툴(30)의 회전축(R)을 자율적으로 정렬시킴으로써 회전축(R)을 원하는 궤적에 따라 배치시키도록 수술 툴(30)의 움직임을 제어한다. 이 경우에, 로봇 아암(20)은 원하는 궤적을 따라 그러나 (도 4에 도시된 바와 같이) 척추체(100) 위로 이격되어 드릴(42)이 아직 척추체(100)와 접촉하지 않도록 드릴(42)을 자율적으로 포지셔닝시킬 수 있다. 이러한 자율적인 포지셔닝은 조작자가 수술 툴(30) 상에서 트리거를 당김으로써 개시될 수 있거나, 그렇지 않으면 움직임을 시작하기 위해 제어 시스템에 입력을 제공하는 것에 의해 개시될 수 있다. 일부 경우에, 수술 툴(30)의 툴 중심점(tool center point; TCP)은 먼저 원하는 궤적을 제공하는 라인 햅틱 객체(LH)의 시작 지점(SP)의 미리 정의된 거리 내에 (예를 들어, 미리 정의된 시작 구 내에) 있게 된다. 일단 TCP(예를 들어, 버 중심, 드릴 팁 중심 등)가 시작 지점(SP)의 미리 정의된 거리 내에 있으면, 트리거를 당기는 것(또는 대안적으로 풋 페달을 가압하거나 일부 다른 입력을 작동시키는 것)은 로봇 아암(20)이 수술 툴(30)을 원하는 궤적 상에 자율적으로 정렬 및 포지셔닝되도록 한다. 예를 들어, 2012년 12월 21일자로 출원된, "Systems And Methods For Haptic Control Of A Surgical Tool"이라는 명칭의 Otto 등의 미국 특허 출원 공개 번호 제2014/0180290호의 교시들을 참조하며, 이는 그 전체가 본원에 참조로서 통합된다. 로봇 아암(20)은 수술 전 계획에 기초하여 환자로부터 소정 거리로 수술 툴(30)를 이동시키도록 프로그래밍될 수 있거나, TCP를 궤적 상의 가장 가까운 지점으로 이동시킬 수 있다. 일단 수술 툴(30)이 원하는 포즈에 있으면, 로봇 수술 시스템(10)은 환자의 움직임을 추적하고 원하는 궤적 상에 회전축(R)을 유지하기 위해 필요에 따라 로봇 아암(20)을 자율적으로 조정함으로써 원하는 궤적 상에 수술 툴(30)의 회전축(R)을 효과적으로 유지할 수 있는데, 즉 라인 햅틱 객체(LH)와 정렬된다.

[0079] 그런 다음 로봇 수술 시스템(10)이 수술 툴(30)를 원하는 궤적 상에 유지시키는 동안, 조작자는 파일럿 홀들(102)을 드릴링하기 위해 척추체(100)를 향해 라인 햅틱 객체(LH)를 따라 드릴(42)을 이동(또는 이의 움직임을 유발)시키도록 수술 툴(30)을 수동으로 조작할 수 있다. 일부 경우에, 수동 로봇 아암(20)을 사용할 때와 같이, 로봇 수술 시스템(10)은 조작자가 라인 햅틱 객체(LH) 및 원하는 궤적에서 벗어나는 방식으로 수술 툴(30)을 이동시키려고 시도하는 경우 조작자에게 햅틱 피드백을 제공함으로써 원하는 궤적을 따라 머물기 위해 수술 툴(30)의 조작자의 움직임을 제약한다. 조작자가 로봇 아암(20)을 자유 모드로 복귀시키기를 원하는 경우, 수술 툴(30)의 구속되지 않은 움직임을 위해, 조작자는 출구 지점(EP)에 도달할 때까지 수술 툴(30)을 환자로부터 멀리 라인 햅틱 객체(LH)를 따라 뒤로 당길 수 있다.

[0080] 그런 다음 조작자는 원하는 깊이로 파일럿 홀들(102)을 드릴링한다. 드릴링 속도는 트리거(49)를 통해 조작자에 의해 제어될 수 있거나, 또는 환자의 해부학적 구조에 대한 드릴(42)의 위치에 기초하여 자동으로 제어될 수 있

다. 예를 들어, 드릴(42)의 회전 속도는 척추체(V) 내로의 초기 드릴링 동안 높게 설정될 수 있지만, 척추체(V) 내로의 추가 드릴링 동안 느려질 수 있고 최종 깊이로의 최종 드릴링 동안 훨씬 더 느리게 설정될 수 있다. 제어 시스템은 또한 로봇 컨트롤러(32)와 통신하는 하나 이상의 센서들(S)(예를 들어, 하나 이상의 힘 센서들, 힘/토크 센서들, 토크 센서들, 압력 센서들, 광학 센서들 등)을 통해 라인 햅틱 가이딩 동안 접촉/접촉력을 모니터링할 수 있다. 수술 툴(30)이 연조직을 통과하는 것을 의미하는 상당한 접촉/접촉력이 검출되지 않은 경우, 제어 시스템은 수술 툴(30)의 모터 또는 다른 전원(예를 들어, RF 에너지, 초음파 모터 등)을 활성화시키는 것을 방지한다. 골격과의 접촉이 검출될 경우(예를 들어, 광학적으로, 감지된 힘이 미리 정의된 임계치를 초과하는 등), 제어 시스템은 모터 또는 다른 전원을 활성화시킬 수 있다. 조작자들은 또한 접촉/접촉력을 수동적으로 느낄 수 있고 전원을 활성화시키기 위해 스위치를 트리거할 수 있다.

[0081] 원하는 궤적을 따른 조작자의 움직임을 제약하는 데 사용되는 가상 경계들(예를 들어, 햅틱 객체들)은 또한, 조작자가 파일럿 홀들(102)의 원하는 깊이에 도달했을 때, 예를 들어, 타겟 지점(TP)에 도달했을 때를, 햅틱 피드백을 통해, 표시할 수 있다. 별개의 가상 경계들이 또한 원하는 깊이들을 설정하는 데 사용될 수 있다. 다른 경우에, 로봇 수술 시스템(10)은 파일럿 홀들(102)을 원하는 깊이로 자율적으로 드릴링할 수 있다. 추가적인 경우에, 로봇 수술 시스템(10)은 초기에 자율적으로 드릴링할 수 있지만, 최종 드릴링은 수동으로 수행될 수 있거나, 또는 그 반대일 수 있다. 일단 파일럿 홀들(102)이 생성되면, 척추경 나사(PS)는 드라이버(44)를 사용하여 배치될 수 있다. 일부 예들에서, 파일럿 홀들(102)은 불필요할 수 있고, 척추경 나사(PS)는 로봇 수술 시스템(10)에 의해 배치된 가이드 와이어들 위에 또는 임의의 가이던스 없이 배치될 수 있다. 파일럿 홀들은 자체-드릴링, 자체-태핑 골격 나사가 사용되는 경우와 같이 불필요할 수 있다. 예를 들어, 2009년 12월 29일자로 발행된, "Self-drilling bone screw"이라는 명칭의 Stefan Auth의 미국 특허 번호 제7,637,929호의 교시를 참조하며, 이는 그 전체가 본원에 참조로서 통합된다.

[0082] 각각의 척추골(V)을 개별적으로 연속적으로 추적하고 드릴(42)의 움직임을 추적하기 위해 내비게이션 시스템(12)을 사용하는 하나의 이점은 척추경 나사(PS)가 척수(103)에 매우 근접하게 삽입될 수 있고, 따라서 척추경 나사(PS) 및 이들의 대응되는 파일럿 홀들(102)의 배치는 척수(103)와 상호작용하거나 손상시키는 것을 방지하도록 정밀하게 정렬되어야 한다는 것이다. 조작자가 부적절한 각도로 및/또는 너무 깊게 파일럿 홀들(102)을 드릴링하는 경우, 파일럿 홀들(102)을 드릴링하는 데 사용되는 척추경 나사(PS) 또는 드릴(42)은 척수(103)를 손상시킬 수 있다. 결과적으로, 환자의 해부학적 구조 및 구체적으로는 수술 전 이미지 및/또는 수술 중 이미지에 개략적으로 도시된 바와 같은 해부학적 구조에 대한 드릴(42) 및/또는 드라이버(44)의 포즈를 추적하기 위해 내비게이션 시스템(12)을 사용함으로써, 척수(103)는 피할 수 있다.

[0083] 드릴링이 완료되면, 드릴(42)이 척추체(100)로부터 제거되고 콜릿(47)을 통해 구동 시스템으로부터 분리된다. 그런 다음 드라이버(44)는 (감속기(48)와 함께 또는 없이) 구동 시스템에 결합된다.

[0084] 척추경 나사(PS)는 로봇 수술 시스템(10)의 도움으로 삽입될 수 있다. 한 예에서, 로봇 컨트롤러(32)는, 회전축(R)을 중심으로 한 회전 속도 및 계획된 궤적을 따른 전진 속도가 척추경 나사의 나사산 기하학적 형상(thread geometry)에 비례하도록 척추경 나사(PS)의 삽입을 자율적으로 제어한다. 로봇 컨트롤러(32)는 다양한 방법을 사용하여 척추경 나사(PS)의 삽입을 자율적으로 제어할 수 있다.

[0085] 예를 들어, 척추경 나사(PS)는 로봇 수술 시스템(10)의 메모리에 수술 전에 저장될 수 있는 일정한 회전 속도 또는 일정한 전진 속도로 삽입될 수 있다. 이러한 예에서, 전진 속도 및/또는 회전 속도는 수술 전에 로봇 수술 시스템(10)의 메모리에 저장될 수 있다. 전진 속도 및/또는 회전 속도는 또한 조작자에 의한 수술 동안 로봇 수술 시스템의 메모리에 입력 및 저장될 수 있다.

[0086] 다른 예에서, 로봇 컨트롤러(32)는 회전 속도 또는 전진 속도에 대한 미리 결정된 프로파일을 따를 수 있다. 회전 속도 또는 전진 속도에 대한 미리 결정된 프로파일은 척추경 나사(PS)의 시간 또는 위치와 같은 임의의 적합한 변수에 기초할 수 있다. 예를 들어, 도 9를 참조하면, 척추경 나사(PS)의 삽입은 환자의 해부학적 구조에 대한 드라이버(44) 및/또는 척추경 나사(PS)의 위치에 기초하여 자율적으로 제어될 수 있다. 이러한 예에서, 드라이버(44)의 회전 속도는 척추체(V) 내로의 초기 설치 동안 높게 설정될 수 있지만, 척추체(V) 내로의 추가 설치 동안 느려질 수 있고 최종 깊이로의 최종 이식 동안 훨씬 더 느리게 설정될 수 있다.

[0087] 도 9는 로봇 컨트롤러(32)가 수술 툴(30)을 자율적으로 제어하는 동안 척추경 나사(PS)의 홈 위치(home position)를 예시한다. 도시된 바와 같이, 척추경 나사(PS)는 라인 햅틱 객체(LH)에 의해 지정된 계획된 궤적이 있는, 이 경우, 척추골(V)로 도시된, 타겟 부위에 인접해 있다. 척추경 나사(PS)와 척추체(100) 사이의 나사산 계면은 척추경 나사(PS)가 잘못 삽입될 경우 골격, 나사(PS), 드라이버(44) 또는 수술 툴(30)이 손상될 위험이

있다. 골격은 가장 약한 물질일 가능성이 있고 따라서 나사가 잘못 삽입되면 손상을 입을 가능성이 가장 높다. 예를 들어, 척추경 나사(PS)가 회전축(R)을 중심으로 불충분한 회전으로 궤적(LH)을 따라 선형으로 전진할 때 부적절한 삽입이 발생할 수 있다. 이는 골격 물질이 나사산에 인접하여 전단(shear off)되어 골격 내로 강제로 밀려 들어가게 될 수 있다. 다른 예에서, 예를 들어, 척추경 나사(PS)가 궤적(LH)을 따라 불충분한 전진으로 회전축(R)을 중심으로 회전되어, 골격 물질이 나사산에 인접하여 전단되어 나사산을 따라 강제로 뒤로 밀려 들어가게 할 때, 사실상 홀을 드릴링하는 동안 부적절한 삽입이 발생할 수 있다. 어느 한 예에서, 부적절한 삽입의 결과는 골격 내에 척추경 나사(PS)를 고정하기 위해 골격 물질의 강도 및 양을 감소시키는 것이다.

[0088] 도 9는 또한 로봇 컨트롤러(32)가 수술 툴(30)을 자율적으로 제어하는 동안 척추경 나사(PS)를 삽입하기 위한 위치 제어의 사용을 예시한다. 나사를 삽입하기 위한 위치 제어는 적절한 깊이 위치 및 각도 또는 회전 위치가 동작 전체에 걸쳐 유지되는 것을 보장한다. 척추체(100)는 상기 예들에 도시된 바와 같이 파일럿 홀이 구비되거나, 또는 동작은 파일럿 홀이 요구되지 않도록 자체-드릴링 및 자체-태핑 나사를 이용할 수 있다. 척추경 나사(PS)의 시작 지점(Do)은 척추체(100)에 인접해 있다. 즉, 나사의 어느 부분이 척추체(100) 내부로 관통되기 전에 인접해 있다. 대안적으로, 시작 지점(Do)은 수술 전반에 걸쳐 적절한 위치 제어를 보장하기 위해 안전 여유(safety margin)로서 일정 거리만큼 척추체(100)로부터 이격될 수 있다. 삽입 깊이(D)는 척추체(100) 내에 척추경 나사(PS)의 설치를 완료하기 위해 계획된 깊이로서 최종 깊이(Df)로 궤적(LH)을 따라 전진한다.

[0089] 로봇 컨트롤러(32)는 궤적(LH)을 따른 회전 속도 및 전진 속도가 척추경 나사(PS)의 나사산 기하학적 형상에 비례하도록 척추경 나사(PS)의 삽입을 자율적으로 제어하도록 구성된다. 각각의 척추경 나사(PS)는 로봇 수술 시스템(10)의 메모리에 저장된 공지된 나사산 기하학적 형상을 갖는다. 예를 들어, 각각의 척추경 나사(PS)의 경우, 나사산 기하학적 형상은 척추경 나사(PS) 길이, 나사산 직경, 나사산 깊이, 헤드 크기, 및 단위 길이당 나사산의 수로서 정의되는 나사산 피치(thread pitch)(P) 중 임의의 하나 이상을 포함할 수 있다. 특정 예에서, 도 11a에 예시된 척추경 나사(PS)는 인치당 12개의 나사산의 나사산 피치를 가질 수 있다. 다른 예시적인 척추경 나사(PS)는 인치당 8개, 10개, 14개, 16개 또는 다른 수의 나사산들을 가질 수 있다. 로봇 아암(20)과 척추경 나사(PS) 사이의 정의된 관계, 및 로봇 수술 시스템(10)의 메모리에 저장된 척추경 나사(PS)의 알려진 기하학적 형상을 갖는 경우, 로봇 컨트롤러(32)는 특정 나사산 피치를 갖는 척추경 나사(PS)를 삽입하기 위한 적절한 회전 속도 및 전진 속도를 보장하도록 구성된다.

[0090] 척추경 나사(PS)의 나사산 기하학적 형상은 로봇 수술 시스템(10)의 메모리에 수술 전에 또는 수술 중에 저장될 수 있다. 일 예에서, 척추경 나사(PS)는 수술 계획의 일부로서 선택되고, 척추경 나사(PS)의 대응되는 나사산 기하학적 형상은 척추경 나사(PS)와 관련되어 계획 내로 입력된다. 일단 계획이 수술 중 수술을 위해 로딩되면, 로봇 수술 시스템(10)은 즉각적인 액세스를 위해 메모리에 저장된 알려진 나사산 기하학적 형상을 가질 것이다. 다른 예에서, 조작자는 상이한 척추경 나사(PS)를 수동으로 선택할 수 있거나, 로봇 수술 시스템(10)의 조작과 연계된 GUI를 사용하여 나사산 기하학적 형상을 수동으로 입력할 수 있다. 입력된 나사산 기하학적 형상은 메모리에 저장된 데이터베이스로부터 획득될 수 있거나, 또는 선택된 척추경 나사(PS)와 연관된 오프라인 사양으로부터 이러한 정보를 획득하는 조작자로부터 도출될 수 있다. 이러한 예들 중 어느 하나에서, 나사산 기하학적 형상은 GUI를 사용하여 조작자 입력 후에 메모리에 저장될 수 있어, 로봇 수술 시스템(10)은 후속적으로 입력된 나사산 기하학적 형상과 함께 본원에 설명된 제어 기술들을 수행할 수 있다. 또 다른 예에서, 로봇 수술 시스템(10)에 직접 또는 무선으로 연결된 측정 툴은 임의의 의도된 척추경 나사(PS)를 스캔 또는 측정하여 나사산 기하학적 형상을 추출하고 측정된 나사산 기하학적 형상을 로봇 수술 시스템(10) 메모리에 전송하는 데 이용될 수 있다. 일단 척추경 나사(PS)의 나사산 기하학적 형상이 로봇 수술 시스템(10)의 메모리에 저장되면, 척추경 나사(PS)는 사실상 내비게이션 시스템(12) 내에 제시될 수 있다.

[0091] 척추경 나사 나사산 피치, 각도, 또는 회전, 위치 및 삽입 깊이, 또는 궤적을 따른 전진 사이의 관계는 방정식 $\Theta = D*(\text{피치}/2\pi)$에 의해 관리되며, 여기서 Θ는 각위치이고, D는 단위 길이에서의 삽입 깊이이고, 피치는 척추경 나사(PS)의 단위 길이당 나사산(thread)이다. 로봇 컨트롤러(32)는 이 관계를 사용하여 척추경 나사(PS)의 설치를 제어한다. 예를 들어, 시간에 대한 요청에 대해 1차 도함수를 취하면, 각위치의 변화율, 또는 회전 속도($\delta\Theta/\delta t$)는, 2π로 나눈 피치에 의해 곱해진, 삽입 깊이의 변화율, 또는 전진 속도($\delta D/\delta t$)와 동일하다. 이는 다음과 같이 표현될 수 있다: $\delta\Theta/\delta t=\delta D/\delta t*\text{피치}/2\pi$ (식 1).

[0092] 로봇 수술 시스템(10)은 척추경 나사(PS)를 위한 해부학적 구조를 준비하기 위한 다양한 부속품을 포함할 수 있다. 예를 들어, 수술 툴(30)의 부속품 중 하나는 메스(scalpel), 전기수술용 나이프, 날카로운 팁을 갖는 다른 툴 등과 같은 피부 절개 툴을 포함할 수 있다. 피부 절개 툴은 드릴(42) 및/또는 드라이버(44)와 매우 유사하게 장착될 수 있거나, 또는 별개의 엔드 이펙터의 일부일 수 있고 커플링(40)에 부착되는 마운트(mount)에 연결될

수 있고, 피부 절개는 앞서 설명된 바와 유사한 방식으로 햅틱 가이드로 이루어질 수 있다. 즉, 가상 경계들(예를 들어, 햅틱 객체들)은 환자의 피부에서의 원하는 절개에 대한 조작자의 움직임을 제약하기 위해 절개를 생성할 때 사용될 수 있다. 일 예에서, 디지타이징 프로브는 원하는 절개 위치를 터치하고 연관된 경계/햅틱 객체를 생성하는 데 사용될 수 있다. 다른 예에서, 3-D 피부 모델은 피부 추적기의 포즈에 기초하여, 디지타이징을 통해, 및/또는 수술 전 방법을 통해 결정될 수 있고, 원하는 척추경 나사 배치의 계획은 제어 시스템에 의해 피부 모델에 기초하여 절개 위치를 결정하는 데 사용될 수 있다.

[0093] 디지타이징 프로브와 유사한 다른 유형의 포인터들도 절개의 위치를 나타내기 위해 환자의 피부에 가시광을 투사하도록 피부 절개 툴, 엔드 이펙터(end effector), 또는 다른 컴포넌트에 장착될 수 있는 레이저 포인터와 같은 원하는 절개의 위치를 식별하는데 사용될 수 있다. 이러한 레이저 포인터는 먼저 원하는 궤적에 피부 절개 툴의 회전축(R)을 정렬하고 이후 원하는 궤적을 따라 광을 투사하도록 레이저 포인터를 활성화시켜 사용될 수 있다. 피부 절개 툴의 대안적인 형태는 로봇 아암에 의해 제자리에 유지되는 툴 가이드를 통해 배치된다. 피부 추적기를 통해 달성된 환자의 피부의 추적으로 인해, 내비게이션 시스템(12)은 또한, 조작자가 햅틱 피드백에 의해 원하는 위치에서 환자의 피부의 원하는 절개를 절단할 수 있도록 피부 모델(예를 들어, 표면 모델, 포인트 클라우드 등) 및 원하는 궤적과 피부 모델의 교차에 기초하여 절개의 원하는 위치를 대략적으로 결정할 수 있다.

[0094] 햅틱 객체들은 절개의 생성을 가이드하기 위해 햅틱 피드백을 확립하기 위해 다양한 방식들로 정의될 수 있다. 햅틱 객체들은 피부 절개 툴의 폭, 피부 절개의 원하는 길이, 및/또는 절개의 원하는 깊이에 기초하여 정의될 수 있다. 원하는 절개 깊이는 또한 햅틱 객체의 일부로서 프로그래밍된 최대 절개 깊이에 의해 결정될 수 있는 최대 절개 깊이 내에서 조작자에 의해 제어될 수 있거나, 또는 기계적 정지부가 피부 절개 툴이 미리 결정된 지점을 넘어 엔드 이펙터의 툴 가이드(TG) 내의 가이드 개구(도시되지 않음)를 통해 슬라이딩되는 것을 방지하는 데 사용될 수 있다.

[0095] 수술 툴(30)의 부속품들 중 하나는 잠시디 바늘(Jamshidi needle), 탐침(stylet)을 갖는 다른 액세스 캐뉼러 등과 같은 와이어 삽입 툴을 포함할 수 있다. 와이어 삽입 툴은 피부 절개 툴과 매우 유사하게 장착될 수 있거나 또는 별개의 엔드 이펙터의 일부일 수 있고 커플링(40)에 부착되는 마운트에 고정적으로 연결될 수 있다. 와이어 삽입 툴과 마운트 사이에 상대 모션이 허용되지 않으면, 즉 이들이 서로 고정되면, 와이어 삽입 툴은 피부 절개로 진입하여 골격, 예를 들어, 척추골 상의 타겟 지점에 도달하도록 라인 햅틱 객체로 가이드될 수 있다. 와이어 삽입 툴과 마운트 사이의 상대적인 축방향 슬라이딩 모션이 허용되면, 예컨대 마운트가 개구를 갖는 툴 가이드를 포함할 때, 툴 가이드는 원하는 배향으로 포지셔닝될 수 있고, 와이어 삽입 툴은 툴 가이드 내의 개구를 따라 삽입될 수 있다. 타겟 지점까지의 상대 거리, 와이어 삽입 툴의 길이, 및 툴 가이드 위치에 따라, 와이어 삽입 툴은 드릴(42) 및/또는 드라이버(44)에 대해 앞서 설명된 것과 동일한 방식으로 라인 햅틱 객체를 통해 가이드될 수 있다.

[0096] 절개를 위한 피부 및 원하는 위치가 추적되기 때문에, 로봇 수술 시스템(10)은 절개를 위해 생성된 햅틱 객체에 대한 피부 절개 툴의 움직임을 제어할 수 있다. 햅틱 객체는 환자의 피부 내의 원하는 위치에서 절개가 이루어지도록 타겟 좌표계에서 정의된다. 일 예에서, 로봇 수술 시스템(10)은 피부 절개 툴의 수동 조작을 제어함으로써 햅틱 객체에 대한 피부 절개 툴의 움직임을 제어할 수 있다. 이는 조작자가 수동으로 이동하거나 수동으로 피부 절개 툴의 움직임을 야기하는 동안 피부 절개 툴이 원하는 위치에서 절를 행하도록 햅틱 객체에 의해 정의된 가상 경계에 대해 피부 절개 툴의 움직임을 제한함으로써 수행될 수 있다. 로봇 수술 시스템(10)은 피부 절개 툴이 절개의 원하는 깊이에 도달했거나 그렇지 않으면 절개에 대한 원하는 한계에 도달했음을 나타내기 위해 조작자에게 햅틱 피드백을 생성함으로써 햅틱 객체에 대한 피부 절개 툴의 움직임을 제약할 수 있다. 일단 원하는 위치에서 절개가 이루어지면, 피부 절개 툴은 해부학적 구조로부터 멀리 인출되고, 모든 절개가 이루어질 때까지 수술이 진행된다. 피부 절개 기술들은 2018년 11월 8일자로 출원된 "Robotic Spine Surgery System and Methods"이라는 명칭의 미국 특허 출원 제US 16/184,376호에 설명된 것과 유사할 수 있다.

[0097] II. 햅틱 피드백 기술

[0098] 전술한 바와 같이, 로봇 시스템(10)은 계획된 궤적을 따라 나사를 회전시키기 위해 수술 툴(30)을 제어하는데 이용될 수 있다. 본원에는 로봇 시스템(10)이 수술 툴(30)이 조직과 상호작용하도록 하는 동안 관련된 힘, 에너지, 물질 및 정보 흐름의 직접적인 햅틱 "느낌", 접촉 또는 제어를 의사에게 제공하기 위해 로봇 시스템(10)과 함께 이용되는 기술들이 설명되어 있다. 결국, 본원에 설명된 기술들은 의사가 수술 절차 동안 조직 상호작용 프로세스를 모니터링하고 평가하기 위해 (수동으로) 익숙한 햅틱 및 감각 정보를 에뮬레이트하기 위한 기술적

해결책을 제공한다. 본원에 기술된 햅틱 기술들은 로봇 제어 수술 동안 프로세스를 평가하는 의사의 능력을 복원한다. 해결책은, 예를 들어, 하나의 자유도(예를 들어, 회전) 및 하나의 수반되는 현상(예를 들어, 저항)을 사용하여 햅틱 피드백을 제공하기 위한 미려한 메커니즘(elegant mechanism)을 제공한다. 햅틱 장치는 로봇 아암(20) 및/또는 수술 툴(30)에 의해 조작되는 나사(또는 부속품)의 상호작용을 제어하거나 에뮬레이트하는 인터페이스(예를 들어, 노브(knob))를 포함할 수 있다. 일부 예들에서, 인터페이스의 저항이 변조되거나 증폭되며 나사와 나사가 삽입되는 주변 조직 간의 상호작용에 따라 동적으로 변할 수 있다. 일부 예들에서, 사용자가 인터페이스를 조작할 때, 로봇은 나사를 회전시키고 전진시킨다. 로봇 시스템은 적절한 센서들을 통해 나사 삽입 프로세스 파라미터들을 캡처한다. 그런 다음 센서 정보는 변환되고, 수술의가 나사가 삽입되는 조직의 일관성 및 나사와 조직 사이에 끼워지는 형태의 그립(grip)의 품질을 이해하는데 도움을 주는 향상된 감각 능력(sensory acuity)을 의사에게 제공하는 인터페이스에 대한 피드백을 변조하는데 사용된다. 결국, 본원에 설명된 햅틱 기술들은 의사 신뢰도를 증가시키고, 감정 스트레스를 감소시키고, 수술 효과를 증가시키고, 로봇 솔루션에 의해 달리 캡처되지 않은 예기치 않은 상황을 인지하고 반응하는 능력을 의사에게 제공한다.

[0099] 본원에 설명된 햅틱 기술들은 다양한 의료 애플리케이션들에서 사용될 수 있다. 예를 들어, 햅틱 기술들은 나사 삽입 프로세스에 관한 것이지만, 햅틱 기술들은 또한 다양한 다른 의료 애플리케이션들에서 사용될 수 있다. 일 예로서, 메스 또는 주사기를 포함하는 수술 동안, 햅틱 장치의 인터페이스는 메스 또는 주사기가 상이한 조직들을 통해 진행함에 따라 메스 또는 주사기에 의해 인가되는 힘을 에뮬레이트하기 위해 햅틱 피드백을 제공할 수 있다. 햅틱 기술들은 연조직에 대한 손상을 방지하기 위해 연조직을 수반하는 수술들에 사용될 수 있다. 예를 들어, 신연장치(distractor)가 연조직을 분리하는 수술 동안, 신연장치가 상처 부위에서, 수술 개구에서, 관절 공간 내의 골격들 사이에서, 또는 골격 성장 수술(예를 들어, 하악 신장) 동안 골격들 사이에서 연조직을 분리함에 따라, 햅틱 장치의 인터페이스는 신연장치에 의해 연조직에 가해지는 힘(또는 신연장치 상의 연조직에 의해 가해지는 장력)을 에뮬레이트하기 위해 햅틱 피드백을 제공할 수 있다. 다른 예로서, 지혈대(tourniquet)를 포함하는 수술 동안, 햅틱 장치의 인터페이스는 지혈대에 의해 연조직에 가해지는 압력을 에뮬레이트하기 위해 햅틱 피드백을 제공할 수 있다. 또 다른 예로서, 관절 공간을 개방하기 위한 잭(jack)을 포함하는 수술 동안, 햅틱 장치의 인터페이스는, 인대 밸런싱 프로세스를 돕기 위해 잭에 의해 인대들에 가해지는 힘(또는 잭 상의 인대들에 의한 장력)을 에뮬레이트하도로고 햅틱 피드백을 제공할 수 있다.

[0100] A. 햅틱 장치

[0101] 하나의 예를 참조하면, 도 10에 도시된 바와 같이, 로봇 수술 시스템(10)은 수술 툴(30)를 제어하기 위한 햅틱 장치(51)를 포함한다. 햅틱 장치(51)는 조작자의 손에 의해 수동으로 조작 가능할 수 있는 인터페이스(53)를 포함할 수 있다. 하나의 비제한적인 예에서, 햅틱 장치(51)는 핸드헬드 펜던트(hand-held pendant)일 수 있다. 대안적으로, 햅틱 장치(51)는 수동 수술 절차에서 이용되는 툴(예를 들어, 나사 드라이버)을 모방(mimicking)하는 물리적 디자인, 햅틱 글러브, 또는 표면 상에 안착될 수 있는 유닛을 포함할 수 있다. 햅틱 장치(51)는 본원에 설명된 능력을 의사에게 제공하도록 구성된 임의의 다른 장치일 수 있다.

[0102] 햅틱 장치에서의 "장치"라는 용어는 본원에 설명된 임의의 특정 실시예(들)로 제한되지는 않는다. 실제로, 햅틱 장치는 조작자에게 햅틱(느낌)을 제공하도록 구성된 임의의 장치를 포함할 수 있고, 여기서 햅틱 응답은 햅틱 장치로부터 떨어진 환경에서 발생하는 조건을 에뮬레이트한다. 이 장치는 적절한 햅틱을 제공하기 위해 다음의 컴포넌트들, 즉 기계적 컴포넌트, 전기적 컴포넌트, 전자-기계적 컴포넌트, 소프트웨어, 컨트롤러(들), 공압 컴포넌트, 유압 컴포넌트 중 임의의 하나 이상으로 구성될 수 있다.

[0103] 도 10에서, 햅틱 장치(51)는 베이스(22)를 통해 로봇 조작기 또는 수술 툴(30)에 직접 부착된다. 다른 예들에서, 햅틱 장치(51)는 컴퓨터 카트 어셈블리(34) 또는 내비게이션 시스템(12)과 같은 로봇 수술 시스템(10)의 임의의 다른 적합한 컴포넌트에 부착될 수 있다. 또 다른 예에서, 햅틱 장치(51)는 햅틱 장치(51)가 조작자가 잡을 필요가 없도록 로봇 아암(20) 또는 수술 툴(30)에 직접 결합될 수 있다. 햅틱 장치(51)는 또한 도 10에 도시된 바와 같이 로봇 조작기 및 수술 툴(30)로부터 원격으로 이격될 수 있다. 이러한 예에서, 햅틱 장치(51)는 로봇 수술 시스템(10)에 무선으로 결합될 수 있다. 대안적으로, 햅틱 장치(51)는 도 10에 도시된 바와 같이 시스템(10)에 연결된 코드로 전력을 공급받을 수 있다. 또 다른 예에서, 햅틱 장치(51)는 로봇 수술 시스템(10)에 반드시 부착될 필요는 없는 독립형 장치로서 사용될 수 있다. 예를 들어, 햅틱 장치(51)는 로봇 조작기 및/또는 내비게이션 시스템(12)을 포함하지 않는 수술 시스템이 사용될 수 있다.

[0104] 햅틱 장치(51)의 인터페이스(53)는 햅틱 장치(51)에 대해 자유도로 이동할 수 있다. 일 예에서, 인터페이스(53)는 햅틱 장치(51)에 대해 회전 자유도로 이동할 수 있다. 일부 예들에서, 회전식 인터페이스(53)는 도 10에

도시된 바와 같은 회전식 노브일 수 있다. 회전식 인터페이스(53)는 또한 회전 가능한 다이얼(dial), 볼(ball), 또는 휠(wheel)일 수 있다. 인터페이스(53)는 도면들에 구체적으로 도시되거나 본원에 기술된 것 이외의 구성들을 가질 수 있다.

[0105] 회전식 인터페이스(53)는 조작자가 회전식 인터페이스(53)의 회전 자유도를 나사 또는 툴이 회전하는 회전 자유도에 연관시킬 수 있게 하는 것이 바람직할 수 있다. 그러나, 회전식 인터페이스(53) 이외의 구성들을 이용하여 햅틱 장치(51)의 인터페이스(53)를 실현하는 것이 가능하다. 예를 들어, 햅틱 장치(51)는 조작자의 손에 의해 수동으로 조작 가능할 수 있는 선형 인터페이스(53)를 포함할 수 있다. 일부 예들에서, 선형 인터페이스(53)는 피봇팅 레버(pivoting lever), 푸시 버튼, 손바닥 또는 손가락 트리거, 스프링 스위치, 플런저(plunger), 컴플라이언트 패드(compliant pad) 또는 슬라이더일 수 있다. 또한, 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 선형 인터페이스(53)가 나사와 타겟 부위 사이의 현재 상호작용을 에뮬레이트하도록 하기 위해 햅틱 장치(51)의 액추에이터(55)를 제어할 수 있다. 예를 들어, 선형 인터페이스(53)가 푸시 버튼인 경우에, 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 조작자가 현재 상호작용에 따라 푸시 버튼을 누르기 위해 더 크거나 더 작은 힘을 인가하도록 액추에이터(55)를 제어할 수 있다. 다른 예에서, 선형 인터페이스(53)가 스위치 또는 플런저인 경우에, 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 조작자가 스위치 또는 플런저를 작동시키기 위해 더 크거나 더 작은 힘을 인가하도록 햅틱 장치(51)의 액추에이터(55)를 제어할 수 있다. 또 다른 예에서, 선형 인터페이스(53)는 경로를 따라 슬라이딩하도록 구성된 메커니즘을 포함하는 슬라이더(slider)이다. 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 조작자가 슬라이더를 작동시키기 위해 더 크거나 더 작은 힘을 인가하고/하거나 슬라이더의 선형 변위를 제한하기 위해 액추에이터(55)를 제어하도록 햅틱 장치(51)의 액추에이터(55)를 제어할 수 있다.

[0106] 로봇 수술 시스템(10)은 햅틱 장치(51)를 통해 조작자에게 햅틱 피드백을 제공한다. 도 10에 도시된 바와 같이, 햅틱 장치(51)는 하나 이상의 컨트롤러들(33)에 의해 제어될 수 있는 액추에이터(55)를 포함할 수 있다. 액추에이터(55)는 인터페이스(53)에 결합되고 인터페이스(53)에 힘을 인가하도록 구성된다. 액추에이터(55)는 액추에이터(55)와 인터페이스(53) 사이에 결합된 구동 출력 구동 샤프트(68)를 포함할 수 있다. 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 인터페이스(53)가 나사와 타겟 부위 사이의 현재 상호작용을 에뮬레이트하도록 하기 위해 액추에이터(55)를 제어할 수 있다. 일부 예들에서, 인터페이스(53)는 나사를 회전시키기 위해 수술 툴(30) 및/또는 드라이버(44)를 직접 제어하는데 이용된다. 햅틱 장치(51)를 통한 직접 제어는 또한 나사와 타겟 부위 사이의 현재 상호작용을 에뮬레이트하기 위해 햅틱 피드백과 조합될 수 있다. 이러한 예들에서, 조작자는 인식을 통해 인터페이스(53)의 자유도를 나사가 움직이는 자유도에 연관시킬 수 있다.

[0107] 액추에이터(55)는 브러시형(brushed) 또는 브러시리스(brushless) 모터, 직접 구동 모터, 능동 액추에이터, DC 모터, 전기 선형 모터, 선형 전류 제어 모터, 스테퍼(stepper) 모터, 전기 회전식 모터, 토커(torquer)(제한된 각도 범위를 갖는 모터), 스프링 기반 액추에이터, 자기 액추에이터, 유압 액추에이터, 공압 액추에이터, 수동 기계적 액추에이터, 자기 입자 브레이크들(brakes)을 포함하는 수동 액추에이터들, 마찰 브레이크들, 감쇠 저항 메커니즘, 또는 마찰 발생 메커니즘, 또는 이들의 임의의 조합과 같은 모터로서 구현될 수 있다.

[0108] 일부 예들에서, 햅틱 장치(51)는 로봇 시스템(10) 또는 햅틱 장치(51)의 의도하지 않은 사용을 방지하기 위한 안전 특징들을 포함할 수 있다. 예를 들어, 햅틱 장치(51)는 인터페이스(53)가 조작가능해지기 위해 눌러질 필요가 있는 사용자 인터페이스(57)(데드맨 스위치(dead man switch))를 포함할 수 있다. 유사하게, 사용자 인터페이스(57)는 로봇 수술 시스템(10)에 명령을 전송하기 위해 햅틱 장치(51)가 눌려질 필요가 있을 수 있다. 다른 예에서, 인터페이스(53)는 조작되기 전에 눌려지고 눌린 위치에서 에서 유지될 필요가 있을 수 있다. 또 다른 예에서, 햅틱 장치(51)는 하나 이상의 컨트롤러들(33)이 조작자의 손이 햅틱 장치(51)에 접촉하고 있는지 여부를 결정하도록 하는 힘 센서, 온도 센서, 근접 센서, 광학 센서, 및/또는 압력 센서와 같은 하나 이상의 센서들을 포함할 수 있다.

[0109] 햅틱 장치(51)는 다양한 동작 모드들에서 활용될 수 있으며, 이들 중 일부는 도 11a의 표에 설명된다(동작 모드들은 "햅틱 장치 동작 모드들"로 지칭됨). 도시된 바와 같이, 이러한 동작 모드들은, 이에 제한되는 것은 아니나, "자율 검사 모드", "수동 제어 모드", "시뮬레이션된 자율 검사 모드", 및 "시뮬레이션된 수동 제어 모드"를 포함한다. 이러한 모드들의 명칭들은 이해와 설명의 간략화를 위해 제공되며, 따라서 임의의 다른 적절한 규칙으로 명명될 수 있다. 이러한 모드들의 기능들은 아래에 제공된 설명에 기초하여 완전히 이해된다.

[0110] 도 11a의 표의 열 B를 참조하면, 햅틱 장치 동작 모드들 각각에서, 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 햅틱 피드백을 햅틱 장치(51)에 제공한다. 자율 검사 모드 및 수동 제어 모드에서, 햅틱 장치(51)는 척추경 나사(PS)와 타겟 부위 사이의 현재 상호작용을 에뮬레이트한다. 시뮬레이션된 자율 검사 모드 및 시뮬레이션된 수동 제어 모

드에서, 햅틱 장치(51)는 시뮬레이션된 척추경 나사와 시뮬레이션된 타겟 부위 사이의 현재 상호작용을 에뮬레이트한다. 이러한 모드들 중 어느 하나는 로봇 시스템(10)에 의해 자동으로 개시되거나, 조작자에 의해 수동으로 개시되거나, 임의의 다른 명령에 따라 개시될 수 있다.

[0111] 또한, 나사 위치 및 깊이는 본원에 설명된 임의의 제어 모드에 대해 디스플레이 장치 상에 디스플레이될 수 있다.

[0112] B. 상호작용 센서들

[0113] 본원에 설명된 동작 모드들 중 어느 하나의 경우, 로봇 수술 시스템(10)은 시스템의 이동 가능한 요소(예컨대, 임플란트, 나사, 및/또는 툴 자체)와 타겟 부위 사이의 현재 상호작용을 나타내는 측정을 획득하기 위해 하나 이상의 컨트롤러들(33)에 결합된 하나 이상의 센서들을 포함할 수 있다. 예를 들어, 로봇 수술 시스템(10)은 타겟 부위에 대한 척추경 나사(PS)의 위치를 감지하도록 구성된 위치 센서 및/또는 수술 툴(30)의 드라이버(44)의 회전 또는 척추경 나사(PS)의 회전을 감지하도록 구성된 회전식 인코더를 포함할 수 있다. 로봇 수술 시스템(10)은 타겟 부위에 의해 척추경 나사(PS)에 가해지는 힘을 감지하도록 구성된 힘 센서를 포함할 수 있다. 로봇 수술 시스템(10)은 타겟 부위에 의해 척추경 나사(PS)에 가해지는 토크를 감지하도록 구성된 토크 센서 및/또는 수술 툴(30)의 액추에이터에 의해 생성되는 전기 파라미터를 감지하도록 구성된 전기 파라미터 센서를 포함할 수 있으며, 여기서 전기 파라미터는 나사와 타겟 부위 사이의 현재 상호작용에 의해 수술 툴(30)에 가해지는 토크에 비례한다. 예를 들어, 이러한 예들에서, 토크의 증가는 척추경 나사(PS)가 피질 벽(cortical wall)에 접촉했거나 접촉할 것임을 나타낼 수 있고, 토크의 빠른 강하는 척추경 나사(PS)가 피질 벽을 뚫고 바닥에 이르렀음을 나타낼 수 있다. 로봇 수술 시스템(10)은 또한 타겟 부위의 특징에 대한 척추경 나사(PS)의 근접을 감지하도록 구성된 근접 센서, 타겟 부위 내의 척추경 나사(PS)의 깊이를 감지하도록 구성된 깊이 센서, 및 타겟 부위의 특징에 대한 척추경 나사(PS)의 변위를 감지하도록 구성된 변위 센서를 포함할 수 있다.

[0114] 일 구현에서, 내비게이션 시스템(12)은 추가적으로 또는 대안적으로 척추경 나사(PS)와 타겟 부위 사이의 현재 상호작용을 결정한다. 앞서 언급된 바와 같이, 수술 전 이미징 및/또는 수술 중 이미징은 환자의 해부학적 구조를 시각화하기 위해 사용될 수 있다. 예를 들어, 수술 전 이미지들, 예를 들어 X-레이, CT 스캔, 또는 MRI 이미지들은 환자의 해부학적 구조의 해부학적(가상) 모델, 및 구체적으로는 타겟 부위를 생성하는데 사용될 수 있다. 타겟 부위의 해부학적 모델은 임의의 적절한 등록 방법을 사용하여 타겟 부위에 등록될 수 있다. 내비게이션 시스템(12)은 로봇, 툴, 나사 및/또는 환자를 추적하고, 타겟 부위의 해부학적 모델에 대한 척추경 나사(PS)의 위치를 결정할 수 있다. 내비게이션 시스템(12)은 해부학적 모델에 대한 척추경 나사(PS)의 복수의 위치들에서 척추경 나사(PS)와 해부학적 모델 사이의 예상되는 상호작용을 나타내는 미리 결정된 데이터를 포함할 수 있다. 일 예에서, 데이터는 하나 이상의 컨트롤러들(33)에 의한 액세스를 위해 메모리의 룩업 테이블에 저장될 수 있다. 내비게이션 시스템(12)은 해부학적 모델에 대한 나사의 결정된 상태, 위치, 배향 및/또는 포즈 및 미리 결정된 데이터에 기초하여 척추경 나사(PS)와 타겟 부위 사이의 현재 상호작용을 나타내는 측정을 획득할 수 있다. 미리 결정된 데이터는 척추골(V)의 골밀도 데이터를 포함할 수 있다. 내비게이션 시스템(12)은 척추골(V)의 해부학적 모델에 대한 나사의 상태 및 골밀도 데이터를 사용하여, 예를 들어, 도 12a에 도시된 깊이(A)에서, 척추경 나사(PS)와 척추골(V) 사이의 현재 상호작용을 나타내는 측정을 획득할 수 있다. 미리 결정된 데이터는 또한 나사, 툴, 또는 상호작용을 정의하는 것과 관련된 임의의 다른 특징의 기하학적 형상에 관한 알려진 데이터를 포함할 수 있다.

[0115] 내비게이션 시스템(12)을 포함하는 상기 센서들의 임의의 조합은 이동 가능한 요소와 타겟 부위 사이의 감지를 구현하도록 결합될 수 있다.

[0116] C. 햅틱 사용작용 피드백

[0117] 컨트롤러(32)는 햅틱 장치(51)에 물리적 피드백을 제공하도록 구성됨으로써 척추경 나사(PS)와 타겟 부위 사이의 현재 상호작용을 에뮬레이트할 수 있다. 하기에 설명되는 바와 같이, 물리적 피드백은 다양한 형태를 취할 수 있다.

[0118] 본원에 설명된 제어 모드들, 즉 "자율 검사 모드", "수동 제어 모드", "시뮬레이션된 자율 검사 모드", 및 "시뮬레이션된 수동 제어 모드" 중 어느 하나는 본원에 설명된 햅틱 상호작용 피드백 기술들 중 어느 하나를 완전히 이용할 수 있다.

[0119] 이러한 기술들을 가능하게 하기 위해, 햅틱 장치(51)는 햅틱 장치(51)의 특징들을 감지하기 위해 도 10에 도시된 바와 같은 하나 이상의 센서들(65)을 구비할 수 있다. 예를 들어, 하나 이상의 센서들은 액추에이터(55), 인

터페이스(53), 이들의 임의의 조합, 또는 임의의 다른 특징들에 관련된 임의의 측정들을 검출할 수 있다. 이러한 센서들(65)은 위치 또는 변위 센서들, 증분/절대 인코더들, 각도 센서들, 전위차계들, 홀 효과 센서들, 유도성 센서들, 용량성 센서들, 가속도계들과 같은 관성 센서들, 속도/속력 센서들, 경사계들, 자이로스코프들, 힘 센서들, 토크 센서들, 스트레인 게이지(strain gage) 센서들, 또는 이들의 임의의 조합 또는 등가물들로서 구현될 수 있다.

[0120] 일부 구현들에서, 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 액추에이터(55) 이외의 또는 그에 부가하여 수단을 이용하여 인터페이스(53)의 기계적 모션을 수정 또는 제한하도록 구성된다. 예를 들어, 인터페이스(54)의 움직임의 영향에 대해, 햅틱 장치(51)는, 이에 제한되는 것은 아니나, 바이어싱 메커니즘들, 디텐트(detent)들, 래칫(ratchet)들, 및/또는 기어 시스템들 등을 포함하는 기계적 컴포넌트들; 이에 제한되는 것은 아니나, 유도성, 용량성, 및/또는 저항 소자들과 같은 전기 컴포넌트들; 자기 컴포넌트들; 전자기 컴포넌트들; 전기-기계 컴포넌트들; 유압 컴포넌트들; 및/또는 공압 컴포넌트들을 이용할 수 있다.

[0121] 일부 구현들에서, 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 인터페이스(53)를 수동으로 조작하는 능력을 방지하도록 구성된다. 예를 들어, 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 척추경 나사(PS)의 제어 동안 조건이 존재한다고 결정할 수 있고, 이에 응답하여, 회전식 인터페이스(53)를 회전시키는 능력을 방지하도록 햅틱 장치(51)의 액추에이터(55)를 제어함으로써 조건에 관한 햅틱 피드백을 조작자에게 제공할 수 있다. 예를 들어, 조건은 회전식 인터페이스(53)를 회전시키는 능력을 방지하는 오류 조건을 포함할 수 있다. 이러한 정지 조건들은 척추경 나사(PS)가 원하는 깊이에 도달하고, 척추경 나사(PS)가 미리 결정된 회전 수만큼 회전하고, 척추경 나사(PS)와 골격의 접촉 지점의 예측(2016년 6월 28일자로 출원된 "Robotic surgical systems And Methods For Controlling A Tool Removing Material From A Workpiece"이라는 명칭의 Moctezuma de la Barrera 등의 미국 특허 출원 공개 번호 제2017/0000572호에 기술되며, 이는 본원에 참조로서 통합됨) 및/또는 조작자의 주관적인 정지 지식(예를 들어, 조작자가 각 척추경 나사(PS)를 회전시키기 위한 시간의 양을 설정할 수 있음)을 포함한다. 추가로, 조건은 로봇 수술 시스템(10) 내에서 검출된 오류와 같은 오류 상태를 포함할 수 있다. 일부 예들에서, 회전식 인터페이스(53)의 회전을 방지하는 대신, 로봇 수술 시스템(10)은 진동 및/또는 펄스를 통해 조작자 햅틱 피드백을 제공할 수 있다. 예를 들어, 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 척추경 나사(PS)가 원하는 깊이에 도달한 때 햅틱 장치(51)를 진동시킬 수 있다.

[0122] 전술한 햅틱 기술들 중 어느 하나는 본원에 설명된 임의의 모드들 또는 예들, 또는 이들의 등가물들에 대해 개별적으로 또는 조합하여 이용될 수 있다. 또한, 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 상호작용 센서들, 햅틱 장치(51)의 센서들(65)로부터의 판독, 제어 모드의 변경 또는 개시, 또는 조작자에 의한 입력에 기초하는 것과 같은 임의의 조건에 응답하여 햅틱 기술들 중 어느 하나를 변경 또는 수정할 수 있다. 또한, 본원에 설명된 기술들 중 어느 하나는 햅틱 장치(51)의 회전식 인터페이스 또는 선형 인터페이스에 적응될 수 있다.

[0123] 1. 햅틱 피드백 - 저항력 또는 토크

[0124] 일 예에서, 물리적 피드백은 인터페이스(53)에 인가되는 저항력이다. 액추에이터(55)는 조작자의 손에 의해 인터페이스(53)를 조작하는데 필요한 힘 또는 토크를 조정할 수 있다. 회전식 인터페이스(53)를 조작하는데 필요한 힘은 타겟 부위에 대해 나사를 회전시키는데 필요한 현재 힘을 반영할 수 있다. 인터페이스(53)가 액추에이터(55)에 결합되기 때문에, 액추에이터(55)는 인터페이스(53)의 자유도로 모션에 저항하기 위한 저항력을 생성할 수 있다.

[0125] 예를 들어, 도 12a를 참조하면, 척추경 나사(PS)를 회전시키는데 필요한 현재의 힘은 F_{PS}로 예시되어 있고, 액추에이터(55)에 제공되는 저항력은 F_A로 예시되어 있으며, 회전식 인터페이스(53)를 회전시키는데 필요한 힘은 F_{RI}로 예시되어 있다. F_{RI}는, 조작자가 회전식 인터페이스(53)를 수동으로 조작할 때 F_{RI}가 경험되기 때문에 점선으로 도시되어 있다. 궤적(LH)을 따라 다양한 깊이에서, 현재의 힘(F_{PS})의 크기는 변화하고, 저항력(F_A) 및 힘(F_{RI})이 그에 따라 변화하게 한다.

[0126] 컨트롤러(32)는 저항력을 변조, 수정, 증폭 또는 아니면 동적으로 변화시키기 위해 액추에이터(55)를 제어할 수 있다. 그렇게 하기 위해, 컨트롤러(32)는 액추에이터(55)의 동작 전압, 주파수 또는 전류를 수정할 수 있다. 저항력은 스프링 힘, 댐퍼 힘, 임펄스 힘 등으로 모델링되거나 구현될 수 있다. 또한, 저항력은 위치, 속도, 및/또는 가속도 파라미터들에 기초할 수 있다.

[0127] 일부 예들에서, 로봇 수술 시스템(10)은 조작자로부터 입력을 수신하여 액추에이터(55)에 제공된 저항력(F_A)을

선택적으로 조정하도록 구성될 수 있다. 추가적으로, 로봇 수술 시스템(10)은 조작자로부터 입력을 수신하여 척추경 나사(PS)를 회전시키기 위해 수술 툴(30)를 제어하는 인터페이스(53)의 능력의 민감도를 선택적으로 조정하도록 구성될 수 있다. 일부 예들에서, 저항력(F_A)과 인터페이스(53)의 민감도는 관련된다. 예를 들어, 저항력(F_A)이 클수록 인터페이스(53)의 민감도가 높아지고, 저항력(F_A)이 작을수록 인터페이스(53)의 민감도가 낮아진다. 인터페이스(53)의 민감도를 수정하기 위해 조정될 수 있는 파라미터들은, 이에 제한되는 것은 아니나, 스프링 파라미터들, 감쇠 파라미터, 힘 파라미터들, 액추에이터(55)와 인터페이스(53)의 회전비 사이의 스케일링 인자, 액추에이터 파라미터들, 힘의 크기, 힘의 방향, 임의의 주어진 저항력에 대한 인터페이스(53)의 변위 한계 또는 범위, 저항력 곡선 또는 기울기 등을 포함한다. 예를 들어, 인터페이스(53)가 스프링을 포함하고 스프링 파라미터가 조정되는 경우에, 이러한 스프링 파라미터는 스프링 속도일 수 있으며, 더 큰 스프링 속도는 인터페이스(53)를 작동시키기 위해 더 큰 힘을 필요로 한다. 이러한 예에서, 스프링은 컴플라이언트 요소의 물질 특성을 변경함으로써 또는 컴플라이언트 요소의 기하학적 특성들을 변경함으로써 스프링 속도가 수정될 수 있도록 컴플라이언트 요소로 형성될 수 있다.

[0128] 일 예에서, 저항력은 인터페이스(53) 상에 또는 인터페이스(53)와 액추에이터(55) 사이에 정의된 홈 위치(home position)(제로 디텐트(zero detent))으로부터의 인터페이스(53)의 편차의 크기에 비례하는 크기를 갖는 복원력일 수 있다. 예를 들어, 홈 위치는 햅틱 모드가 시작되는 순간 컨트롤러에 의해 정의된 인터페이스(53)의 위치일 수 있다. 일 예에서, 홈 위치는 햅틱 장치(51)에 대한 정적 위치에서 정의된다. 다른 예에서, 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 상호작용 센서들, 햅틱 장치(51)의 센서들(65)로부터의 판독, 제어 모드의 변경 또는 개시, 태스크의 완료, 또는 조작자에 의한 입력에 기초하는 것과 같은 임의의 기존 조건에 기초하여 홈 위치의 위치를 동적으로 조정할 수 있다. 대안적으로, 홈 위치는 예를 들어 물리적 디텐트 등을 사용하여 기계적으로 미리 정의될 수 있다.

[0129] 일부 구현들에서, 저항력은 인터페이스(53)의 모션을 산출할 수 있다. 즉, 저항력은 인터페이스(53)의 위치를 임의의 홈 위치로 복원하려고 시도하지 않는다. 저항력은 초기에 크기가 낮을 수 있고, 인터페이스(53)가 홈 위치로부터 이동될수록 크기가 증가될 수 있다.

[0130] 일부 예들에서, 저항력은 나사(PS)가 타겟 부위에 대해 한계에 도달했다는 것을 사용자에게 전달하는데 필요한 크기로 증가된다. 예를 들어, 이는 나사가 척추체의 내부 피질 벽(interior cortical wall)에 접할 수 있는 상황에서 적절할 수 있으며, 이에 의해 피질 벽을 돌파하는 것을 방지하도록 한계가 제공된다. 일 예에서, 저항력은 높은 크기의 강성을 갖는, 차단력 효과(barrier force effect)로서 모델링될 수 있다. 대안적으로, 이러한 예들에서, 컨트롤러는 인터페이스(53)의 모션에 기계적 한계를 적용하도록 액추에이터(55)를 제어할 수 있다.

[0131] 많은 예들에서, 저항력은 회전 모션에 저항하도록 인가된다. 그러나, 저항력은 선형 모션에 저항하도록 인가될 수 있다. 예를 들어, 선형 모션은 인터페이스(53)의 선형 모션에 저항할 수 있다. 이러한 선형 모션은 슬라이더, 푸시 버튼 등과 같은 선형 인터페이스(53)에 대한 메커니즘의 모션일 수 있다. 대안적으로 또는 추가적으로, 선형 모션은 회전식 인터페이스(53)가 아래로 푸시될 수 있는(pushed down) 예일 수 있다. 이러한 예들에서 저항력은 회전식 인터페이스(53)의 푸싱 다운(pushing down)에 저항할 수 있다.

[0132] 저항력은 척추경 나사(PS)와 타겟 부위 사이의 현재 상호작용과 관련된 상이한 조건들에 응답하여 제공될 수 있다. 이러한 조건들 중 어느 하나는 전술한 상호작용 센서들 중 어느 하나에 의해 검출될 수 있다.

[0133] 일 예에서, 척추경 나사(PS)의 회전 위치에 응답하여 저항력이 인터페이스(53)에 인가된다. 기준점에 대한 나사(PS) 위치가 결정된다. 인터페이스(53)에 인가되는 저항력은 나사가 지정된 위치에 도달할 때까지 점진적으로 증가되거나 감소될 수 있다. 이 예에서, 인터페이스(53)의 홈 위치가 이용될 수 있다. 인터페이스(53)는 나사의 구동을 명령하기 위해 홈 위치로부터 멀리 회전될 수 있다. 홈이 아닌 위치에 있는 동안, 인터페이스(53)에 저항력이 인가된다. 그러나, 일단 특정 위치에 도달되면, 저항력은 제로화될 수 있고, 인터페이스(53)는 홈 위치로 스프링 백 될 수 있다. 대안적으로, 저항력은 나사가 위치에 도달하도록 점진적으로 근접함에 따라 (0까지) 점진적으로 감소될 수 있다.

[0134] 다른 예에서, 척추경 나사(PS)의 삽입 깊이에 응답하여 인터페이스(53)에 저항력이 인가된다. 이 예에서, 인터페이스(53)의 홈 위치가 이용될 수 있다. 인터페이스(53)는 나사의 구동을 명령하기 위해 홈 위치로부터 멀리 회전될 수 있다. 홈이 아닌 위치에 있는 동안, 인터페이스(53)에 저항력이 인가된다. 그러나, 일단 삽입 깊이에 도달되면, 저항력은 제로화될 수 있고, 인터페이스(53)는 홈 위치로 스프링 백 될 수 있다. 대안적으로, 저항력은 나사가 삽입 깊이에 도달하도록 점진적으로 근접함에 따라 (0까지) 점진적으로 감소될 수 있다.

[0135] 다른 예에서, 척추경 나사(PS)의 회전 속도에 응답하여 인터페이스(53)에 저항력이 인가된다. 이 예에서, 인터페이스(53)의 홈 위치가 이용될 수 있다. 인터페이스(53)는 나사의 구동을 명령하기 위해 홈 위치로부터 멀리 회전될 수 있다. 홈이 아닌 위치에 있는 동안, 저항력은 나사의 회전 속도에 따라 점진적으로 증가/감소될 수 있다.

[0136] 다른 예에서, 타겟 부위에 의해 척추경 나사(PS)에 인가된 토크에 응답하여 또는 툴에 의해 인가된 토크에 응답하여 저항력이 인터페이스(53)에 인가된다.

[0137] 다른 예에서, 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 또한 진동 및/또는 펄스를 통해 조작자 햅틱 피드백을 제공할 수 있다. 예를 들어, 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 타겟 부위에 대해 나사를 회전시키는데 필요한 현재 힘에 기초하여 햅틱 장치(51)의 진동의 주파수 및/또는 진폭을 조정할 수 있다. 보다 구체적인 예에서, 타겟 부위에 대해 나사를 회전시키는데 필요한 힘이 증가함에 따라 햅틱 장치(51)의 진동의 진폭은 증가할 수 있고 햅틱 장치(51)의 진동의 주파수는 감소할 수 있다. 유사하게, 타겟 부위에 대해 나사를 회전시키는데 필요한 힘이 감소함에 따라 햅틱 장치(51)의 진동의 진폭은 감소할 수 있고 햅틱 장치(51)의 진동의 주파수는 증가할 수 있다.

[0138] 저항력은 본원에 설명된 예들의 임의의 조합 또는 이들의 등가물들을 사용하여 구현될 수 있다.

[0139] 2. 햅틱 피드백 - 위치

[0140] 인터페이스(53)는 저항력 이외의 피드백 기술을 사용할 수 있다. 일 예에서, 인터페이스(53) 위치는 조작자에게 피드백을 제공하기 위해 나사(PS)와 타겟 부위 사이의 현재 상호작용에 응답하여 액추에이터(55)에 의해 능동적으로 제어(이동)된다. 이러한 조건들 중 어느 하나는 전술한 상호작용 센서들 중 어느 하나에 의해 검출될 수 있다.

[0141] 일 예에서, 척추경 나사(PS)의 회전 위치에 응답하여 인터페이스(53) 위치가 제어된다. 인터페이스(53)의 위치는 나사의 실시간 위치에 기초하여 액추에이터(55)에 의해 능동적으로 회전될 수 있다. 나사가 회전하면, 인터페이스(53)도 회전할 것이다. 또 다른 예에서, 인터페이스(53)의 위치는 최대 위치 또는 삽입 깊이와 같은 나사에 관한 임의의 위치 정보에 대해 작업자에게 알리기 위해 특정 고정 위치로 또는 그 사이로 이동될 수 있다. 인터페이스(53)는 인터페이스 위치를 나사 위치에 상관시키기 위한 그래픽 스케일 또는 표시(indicia)를 포함할 수 있다.

[0142] 다른 예에서, 타겟 부위에 의해 척추경 나사(PS)에 인가된 토크에 응답하여 또는 툴에 의해 인가된 토크에 응답하여 인터페이스(53) 위치가 제어된다. 인터페이스(53)의 위치는 나사에 의해 경험되는 다양한 토크 레벨들을 조작자에게 표시하기 위해 액추에이터(55)에 의해 능동적으로 이동될 수 있다. 인터페이스(53)는 인터페이스 위치를 나사 토크에 상관시키기 위한 그래픽 스케일 또는 표시를 포함할 수 있다.

[0143] 또 다른 예에서, 척추경 나사(PS)의 회전 속도에 응답하여 인터페이스(53) 위치가 제어된다. 인터페이스(53)의 위치는 나사에 의해 경험되는 다양한 속도 레벨들을 조작자에게 표시하기 위해 액추에이터(55)에 의해 능동적으로 이동될 수 있다. 인터페이스(53)는 인터페이스 위치를 툴 또는 나사 속도에 상관시키기 위한 그래픽 스케일 또는 표시를 포함할 수 있다.

[0144] 3. 햅틱 피드백 - 모션 범위

[0145] 다른 예에서, 인터페이스(53) 위치는 조작자에게 피드백을 제공하기 위해 나사(PS)와 타겟 부위 사이의 현재 상호작용에 응답하여 제한되도록 제어된다. 이러한 조건들 중 어느 하나는 전술한 상호작용 센서들 중 어느 하나에 의해 검출될 수 있다.

[0146] 일 예에서, 인터페이스(53)는 나사가 회전한 양과 관련된 양만을 회전시킬 수 있도록 제한된다. 다른 예에서, 인터페이스(53)는 나사가 삽입된 깊이와 관련된 양만을 회전시킬 수 있도록 제한된다. 다른 예에서, 인터페이스(53)는 나사가 물리적 또는 가상 경계에 도달한 곳을 식별하는 양만을 회전시킬 수 있도록 제한된다.

[0147] 다른 구현에서, 인터페이스(53)가 회전식일 때, 그 모션 범위는 연속적인 회전, 예를 들어, 임의 횟수의 완전한 360도 회전을 허용하도록 제어될 수 있다. 이는 사용자가 입력 제어를 위한 속도 또는 힘/토크에 도달하는 회전식 인터페이스(53)를 제어함으로써 나사 삽입을 수동으로 제어하도록 하기 위해 햅틱 장치(51)가 이용될 때와 같이, 후술되는 바와 같은 특정 제어 모드들에서 적절할 수 있다.

[0148] D. 자율 검사 모드

[0149] 햅틱 장치(51)의 한 모드는 자율 검사 모드(Autonomous Check Mode)이다. 자율 검사 모드 동안, 로봇 수술 시스

템(10)은 로봇 시스템(10)에 의한 나사(PS)의 자율 삽입에 따라 척추경 나사(PS)와 타겟 부위 사이의 현재 상호작용을 에뮬레이트하기 위해 조작자에게 햅틱 피드백을 제공한다. 자율 검사 모드 동안, 회전식 인터페이스(53)는 척추골(V)에 대해 척추경 나사(PS)를 회전시키는데 필요한 현재 힘(F_{PS})을 반영하는 햅틱 피드백을 조작자에게 제공하기 위해 힘(F_{RI})에 따라 수동으로 조작가능하다. 다시 말하면, 자율 검사 모드는 조작자가 자율 나사 삽입 전, 동안, 또는 후에 임의의 주어진 시간에 나사 상호작용을 "느낄" 수 있도록 한다.

[0150] 도 11a의 표의 열 B 및 D에 표시된 바와 같이, 햅틱 피드백은 검사를 위해 햅틱 장치(51)에 제공되지만, 햅틱 장치(51)는 자율 검사 모드 동안 수술 툴(30) 또는 드라이버(44)를 제어하여 척추경 나사(PS)를 삽입하지 않는데, 이는 나사가 로봇 시스템(10)에 의해 자율적으로 삽입되기 때문이다(도 11a의 열 D 참조).

[0151] 도 12a는 자율 검사 모드 동안 타겟 부위인 척추골(V)과 상호작용하는 척추경 나사(PS)의 일 예를 제공한다. 도 12a에서, 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 계획된 궤적(LH)을 따라 척추경 나사(PS)의 삽입을 자율적으로 제어한다. 이 경우, 나사는 자체-태핑이다. 한편, 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 척추경 나사(PS)와 척추골(V) 사이의 현재 상호작용을 에뮬레이트하도록 햅틱 장치(51)를 제어한다. 예를 들어, 척추경 나사(PS)가 계획된 궤적(LH)을 따라 깊이(A)로 삽입될 때, 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 깊이(A)에서 척추경 나사(PS)와 척추골(V) 사이의 현재 상호작용을 에뮬레이트하도록 햅틱 장치(51)를 제어한다. 따라서, 시스템(10)은 로봇 시스템에 의해 수행되는 나사(PS) 삽입을 경험하기 위한 햅틱 감각을 조작자에게 제공한다.

[0152] 일 예에서, 도 11a의 표의 열 F에 개략적으로 도시된 바와 같이, 자율 검사 모드는 로봇 시스템(10)에 의해 능동 및 자율 나사 삽입 동시에/동안 실행될 수 있다. 이러한 예에서, 자율 검사 모드를 개시함으로써, 회전식 인터페이스(53)는, 나사가 자율적으로 삽입됨에 따라 조작자가 회전식 인터페이스(53)를 통해 로봇 수술 시스템(10)으로부터 햅틱 피드백을 수신할 수 있도록 수동으로 조작가능하도록 제어된다. 이 예에서, 자율적인 나사 삽입은 햅틱 검사를 위해 중단되지 않는다. 나사(PS)가 계속해서 자율적으로 삽입됨에 따라, 삽입 깊이에 따라 척추경 나사(PS)와 척추골 사이의 현재 상호작용이 계속 변한다. 따라서, 이 예에서, 회전식 인터페이스(53)에 대한 저항성 피드백은 척추경 나사(PS)와 척추골 사이의 거의 실시간 현재 상호작용을 반영하도록 변경될 수 있다. 저항력에 대한 업데이트는 N초마다, 나사의 N도 회전마다, 나사 변위의 N ㎜마다 업데이트되는 등과 같은, 임의의 적절한 시간 단계에 따라 설정될 수 있다.

[0153] 대안적으로, 도 11a의 표의 열 F에 개술된 바와 같이, 자율 검사 모드는 하나 이상의 컨트롤러들(33)이 척추경 나사(PS)의 회전을 정지시키기 위해 수술 툴(30)를 자율적으로 제어하는 것을 정지 또는 일시 정지시킨 후에 개시될 수 있다. 일 예에서, 로봇 시스템(10)은 오퍼레이터가 자율 검사 모드를 트리거하는 것에 응답하여 자율 제어를 정지하거나 일시 정지한다. 대안적으로, 로봇 시스템(10)은 자율 모션의 사용자-개시 정지(user-initiated stopping)와 같은 임의의 다른 시스템 명령에 응답하여 자율 제어를 정지하거나 일시정지한다. 어느 경우든, 시스템(10)은 햅틱 장치(51)를 제어하여 시스템(10)이 정지되거나 일시 정지된 시간에 존재하는 척추경 나사(PS)와 척추골 사이의 상호 작용을 에뮬레이트한다. 자율 검사 모드가 수행된 후, 조작자는 나사 삽입을 계속하기 위해 로봇 시스템(10)의 자율 제어를 재개시할 수 있다.

[0154] 다른 예에서, 도 11a의 표의 열 F에 개술된 바와 같이, 로봇 수술 시스템(10)은 하나 이상의 컨트롤러들(33)이 척추경 나사(PS)를 삽입하도록 수술 툴(30)을 자율적으로 제어하기 전에 자율 검사 모드를 개시할 수 있다. 예를 들어, 조작자는 하나 이상의 컨트롤러들(33)이 척추경 나사(PS)를 삽입하도록 수술 툴(30)를 자율적으로 제어하기 전에 척추경 나사(PS)의 햅틱 피드백에 관심이 있을 수 있다. 이러한 예들에서, 나사(PS)는 의사에 의한 수동 삽입에 따라 부분적으로 이식될 수 있고, 이후에 자동 삽입이 뒤따를 수 있다. 부분적으로 이식된 나사(PS)와 타겟 부위 사이의 기존의 상호 작용은 의사가 자율 삽입을 개시하기 전에 검사하기 위해 햅틱 장치(51)에 반영될 수 있다.

[0155] 일부 예들에서, 자율 검사 모드의 개시는 하나 이상의 컨트롤러들(33)에 의한 수술 툴(30)의 자율 제어를 자동으로 개시한다. 유사하게, 자율 검사 모드가 비활성화될 때, 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 수술 툴(30)의 자율 제어를 중단할 수 있다. 자율 검사 모드의 대안적인 인스턴스, 및 그의 능력 및 사용이 고려된다.

[0156] E. 수동 제어 모드

[0157] 수동 제어 모드에서, 조작자는, 이에 제한되는 것은 아니나, 척추경 나사(PS)의 삽입과 같은 목적을 위해 수술 툴(30)을 제어하기 위해 햅틱 장치(51)를 이용한다. 수동 제어 모드 동안, 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 (도 11a의 열 D에 도시된 바와 같이) 척추경 나사(PS)의 삽입을 자율적으로 제어하지 않는다. 대신에, 햅틱 장치(51)의 인터페이스(53)는 척추경 나사(PS) 삽입을 제어하기 위해 하나 이상의 컨트롤러들(33)에 입력을 제공하

도록 조작된다. 햅틱 장치(51)로부터의 제어 입력에 응답하여, 하나 이상의 컨트롤러들(33)은, 회전축(R)을 중심으로 한 회전 속도로 나사를 회전시키고 계획된 궤적(LH)을 따라 전진 속도로 나사를 선형으로 전진시키도록 수술 툴을 제어한다.

[0158] 수동 제어 모드는 본원에 설명된 다른 햅틱 장치 모드들 중 어느 한 모든 전에 또는 후에 활용될 수 있다. 일 예에서, 로봇은 원하는 또는 미리 결정된 토크 피크, 삽입 깊이, 또는 나사 회전 수로 나사를 자율적으로 삽입할 수 있다. 이후, 수동 제어 모드는 태스크의 리마인더(reminder)를 완료하기 위해 활용될 수 있다.

[0159] 1. 수동 제어 입력

[0160] 수동 제어 모드에 대한 도 11a의 표의 열 G를 참조하면, 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 햅틱 장치(51)가 입력으로서 어떻게 이용될 수 있는지를 정의하는 입력 제어 기술을 결정하거나 수신하도록 구성될 수 있다.

[0161] 도 11b의 표를 참조하면, 이들 입력 제어 기술들의 예들은, 이에 제한되는 것은 아니나, 힘 또는 토크 입력, 회전 위치 입력, 또는 회전 속도 입력으로서 햅틱 장치(51)를 이용하는 것을 포함한다. 입력 제어 기술은 의사 선호도에 따라 설정되거나, 시스템에 의해 지정되거나, 또는 이들의 임의의 조합일 수 있다. 조작자는 햅틱 장치(51)의 사용자 인터페이스(57)(도 10에 도시됨)를 사용하여 또는 디스플레이 장치(18)로의 입력과 같은 임의의 다른 방법에 의해 입력 제어 기술을 선택할 수 있다.

[0162] 수동 제어 모드에서, 툴은 햅틱 장치(51)로부터의 입력에 응답하여 나사를 삽입하기 위해 제어된다. 아래에서 설명되는 바와 같이, 입력 제어를 위해 이용되는 기술과 동일하거나 상이할 수 있는 나사를 제어하기 위한 다양한 출력 기술들이 또한 존재한다.

[0163] a. 햅틱 장치로부터 입력되는 힘 또는 토크

[0164] 도 11b를 참조하면, 햅틱 장치(51)에 의해 제공되는 하나의 예시적인 입력은 조작자에 의해 인터페이스(53) 상에 가해지는 힘 또는 토크 입력이다. 12b에 도시된 바와 같이, 조작자는 인터페이스(53)를 수동으로 조작하기 위해 힘(F_{in})을 인가할 수 있다. 이 힘(F_{in})은 인가된 토크일 수도 있다. 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 척추경 나사(PS)를 삽입하기 위해 원하는 힘을 결정하고 원하는 힘에 기초하여 척추경 나사(PS)의 삽입을 제어하기 위해 인터페이스(53)에 인가되는 힘의 측정을 획득할 수 있다. 적용된 힘 또는 토크는 조작자가 나사(PS)와 타겟 부위 사이에 원하는 힘 또는 토크를 나타낼 수 있다.

[0165] 예를 들어, 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 도 11c에 도시된 바와 같이, 회전식 인터페이스(53)를 홈 위치(home position)(P_0)로부터 홈이 아닌 위치(non-home position)(P_1)로 수동으로 조작하는데 사용되는 힘(F_{in})에 기초하여 척추경 나사(PS)를 삽입하기 위한 원하는 힘을 결정할 수 있다. 이들 각각의 예에서, 위치(P_1)는 인터페이스(53)가 홈 위치에 대해 있을 수 있는 많은 위치들 중 하나의 가능한 예로서만 도시되어 있다. 일 예에서, 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 조작자가 힘(F_{in})을 인가할 때 회전식 인터페이스(53)에 인가되는 토크를 측정하거나 계산함으로써 힘(F_{in})의 측정을 획득하도록 구성될 수 있다. 다른 예에서, 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 조작자가 힘(F_{in})을 인가할 때 회전식 인터페이스(53)의 가속도를 결정함으로써 힘(F_{in})의 측정을 획득하도록 구성될 수 있다.

[0166] 로봇 수술 시스템(10)이 도 4 내지 6에 도시된 트리거(49)를 갖는 수술 툴(30)를 포함하는 경우에, 조작자는 햅틱 장치(51)의 회전식 인터페이스(53) 대신에 트리거(49)를 수동으로 조작함으로써 척추경 나사(PS)의 삽입을 제어할 수 있다. 이러한 예에서, 조작자는 힘(F_{in})으로 트리거(49)를 누를 수 있고, 트리거(49)는 조작자의 입력을 나타내는 하나 이상의 컨트롤러들(33)에 신호들을 통신할 수 있다.

[0167] 인터페이스(53)는 힘을 인가한 후에 조작자에 의해 해제될 때 인터페이스(53)가 홈 위치로 복귀하도록 제로 디텐트(zero detent)(홈 위치(P_0))를 포함할 수 있다. 이와 같이, 조작자는 이들의 손을 불필요하게 이동시키지 않고 회전식 인터페이스(53)에 일련의 힘(F_{in})을 인가할 수 있다. 다른 예에서, 인터페이스(53)는 원하는 힘을 달성하기 위해 인터페이스(53)의 충분한 회전을 허용하도록 방해받지 않는 자유도로 계속 회전할 수 있다. 이와 같이, 회전식 인터페이스(53)는 완전한 360도 모션 범위를 제공하여, 조작자가 그들의 손으로 나사를 회전시키는 것을 시뮬레이션할 수 있게 한다.

[0168] b. 햅틱 장치로부터의 위치 입력

[0169] 다른 예에서, 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 제어 입력을 제공하기 위해 인터페이스(53)의 위치(또는 위치의 변화)의 측정을 획득할 수 있다. 예를 들어, 조작자가 회전식 인터페이스(53)를 홈 위치(P_0)로부터 위치(P_1)로 수동으로 조작하는 경우에, 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 홈 위치(home position)(P_0)의 위치(location)에 대한 위치(position)(P_1)의 위치(location)에 기초하여 척추경 나사(PS)의 원하는 회전 위치를 결정할 수 있다. 일부 예들에서, 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 홈 위치(P_0)에 대한 위치(P_1)에서 회전식 인터페이스(53)의 회전 각도의 측정을 획득할 수 있다. 위치는 인터페이스(53) 및/또는 액추에이터(55)에 결합된 증분 또는 절대 인코더와 같은 임의의 적절한 센서를 사용하여 결정될 수 있다. 홈 위치(P_0)에 대한 인터페이스(53)의 변위는 또한 입력을 제공하는 데 이용될 수 있다. 대안적으로, 인터페이스(53)의 전체 모션 정도(예를 들어, 360도)에 대한 인터페이스(53)의 위치는 홈 위치에 관계없이 입력으로서 이용될 수 있다. 위치는 또한 전체 모션 정도(예를 들어, 1 및 ½ 회전 또는 540도)에 대한 인터페이스(53)의 누적 회전 카운트를 고려할 수 있다.

[0170] 일 예에서, 인터페이스(53)는 원하는 위치에서 조작자에 의해 해제될 때 인터페이스(53)가 홈 위치로 복귀하도록 제로 디텐트(zero detent)(홈 위치(P_0))를 포함할 수 있다. 다른 예에서, 인터페이스(53)는 원하는 위치를 달성하기 위해 인터페이스(53)의 충분한 회전을 허용하도록 방해받지 않는 자유도로 계속 회전할 수 있다.

[0171] c. 햅틱 장치로부터의 속도 입력

[0172] 또 다른 예에서, 햅틱 장치(51)에 의해 제공되는 입력은 조작자 조작에 응답하여 인터페이스(53)에 의해 경험되는 속도이다. 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 관성 센서들, 인코더들, 홀 효과 센서들 등과 같은 임의의 적합한 감지 장치들을 사용하여 인터페이스(53)의 속도의 측정을 획득할 수 있다. 예를 들어, 도 11b에 도시된 바와 같이, 인터페이스(53)가 시간 T_0에서 홈 위치(P_0)에 있고 조작자가 인터페이스를 시간 T_1에서 위치(P_1)로 이동한다고 가정한다. 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 인터페이스(53)의 속도를 결정하기 위해 시간 T_1-T_0의 변화에 대해 P_1과 P_0 사이의 거리 또는 변위를 결정할 수 있다. 이 거리 또는 변위는 선형이거나 각도일 수 있다. 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 적분기, 미분기, 룩업 테이블 등과 같은 감지된 판독치들에 기초하여 속도를 계산하기 위한 임의의 적절한 소프트웨어 또는 로직을 이용할 수 있다.

[0173] 일 예에서, 인터페이스(53)는 조작자에 의해 해제될 때 인터페이스(53)가 홈 위치로 복귀하도록 제로 디텐트(zero detent)(홈 위치(P_0))를 포함할 수 있다. 다른 예에서, 인터페이스(53)는 원하는 속도 입력을 달성하기 위해 인터페이스(53)의 충분한 회전을 허용하도록 방해받지 않는 자유도로 계속 회전할 수 있다.

[0174] 햅틱 장치(51)로부터의 입력 제어는 힘, 위치, 및/또는 속도의 임의의 조합일 수 있다.

[0175] 2. 수동 제어 출력

[0176] 전술한 입력 기술(힘, 위치, 속도) 중 어느 하나를 이용하는 햅틱 장치(51)로부터의 제어 입력에 응답하여, 시스템(10)은 나사의 삽입을 제어하도록 구성된다. 도 11b를 참조하면, 툴은 다양한 출력 제어 기술에 따라 나사를 구동하도록 제어될 수 있다. 이러한 출력 제어 기술은 힘, 회전 위치, 삽입 깊이 및 속도를 포함한다. 이러한 출력 제어 기술들은 아래에서 더 상세히 설명되며, 출력 제어 기술들은 임의의 입력 기술(힘, 위치, 속도)에 응답하여 이용될 수 있다.

[0177] 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 툴이 수동 제어 모드에서 어떻게 동작되어야 하는지를 정의하는 출력 제어 기술(즉, 힘, 회전 위치, 삽입 깊이 및 속도)을 결정하거나 수신하도록 구성될 수 있다. 출력 제어 기술은 의사 선호도에 따라 설정되거나, 시스템에 의해 지정되거나, 또는 이들의 임의의 조합일 수 있다. 조작자는 햅틱 장치(51)의 사용자 인터페이스(57)(도 10에 도시됨)를 사용하여 또는 디스플레이 장치(18)로의 입력과 같은 임의의 다른 방법에 의해 출력 제어 기술을 선택할 수 있다.

[0178] 수동 제어 모드 출력의 모든 경우에, 나사 회전 및 전진 속도는 본원에 설명된 기술들에 따라 나사산 피치에 의해 결부된다. 또한, 툴의 제어를 유발하기 위한 인터페이스(53)의 민감도는 본원에 설명된 예들 중 어느 하나에 대해 변경될 수 있다. 인터페이스(53)의 민감도는 골밀도를 고려하도록 수동으로 또는 자동으로 업데이트될 수 있다.

[0179] a. 툴의 힘 출력 제어

[0180] 임의의 입력 기술(힘, 위치, 속도)에 응답하여, 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 힘 제어에 기초하여 툴이 나사

(PS)를 구동시키도록 동작할 수 있다.

[0181] 일 예에서, 인터페이스(53)의 입력 위치는 툴(30)에 의해 나사에 출력되는 힘을 결정한다. 힘 출력은 토크일 수 있다. 일 예에서, 인터페이스(53)의 입력 위치는 툴이 나사에 인가해야 하는 특정 힘 또는 토크 레벨을 결정할 수 있고, 툴(30)은 특정 힘 또는 토크를 인가하도록 제어된다. 다른 예에서, 인터페이스(53)의 위치는 툴이 나사에 인가해야 하는 최대 힘 또는 토크 레벨을 결정할 수 있고, 로봇 및 툴(30)은 최대 힘 또는 토크가 달성될 때까지 나사를 계속 삽입한다. 이러한 예들에서, 인터페이스(53)는 조작자에 의해 해제될 때 인터페이스(53)가 홈 위치로 복귀하도록 제로 디텐트(홈 위치(P_0))를 포함할 수 있다.

[0182] 일 예에서, 인터페이스(53)의 입력 속도는 툴(30)에 의해 나사에 출력되는 힘을 결정한다. 예를 들어, 인터페이스(53)의 속도로의 증가/감소는 툴에 의해 나사에 인가되는 토크로 증가/감소될 수 있다. 이 예에서, 사용자는 완전한 나사 삽입을 달성하기 위해 인터페이스(53)를 점점 더 빠르게 회전시킬 필요가 있을 수 있다.

[0183] 또 다른 예에서, 인터페이스(53)에 인가된 입력 힘 또는 토크는 툴이 나사를 구동시키기 위해 힘 또는 토크 출력을 인가하도록 한다. 일 예에서, 인터페이스(53)의 입력 힘 또는 토크는 툴이 나사에 인가해야 하는 특정 힘 또는 토크 레벨을 결정할 수 있고, 툴(30)은 특정 힘 또는 토크를 인가하도록 제어된다. 인터페이스(53)의 입력 힘 또는 토크는 대안적으로 툴이 나사에 인가해야 하는 최대 힘 또는 토크 레벨을 결정할 수 있고, 로봇 및 툴(30)은 최대 힘 또는 토크가 달성될 때까지 나사를 계속 삽입한다.

[0184] b. 툴의 회전 위치 출력 제어

[0185] 임의의 입력 기술(힘, 위치, 속도)에 응답하여, 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 회전 위치 제어에 기초하여 툴이 나사(PS)를 구동시키도록 동작할 수 있다. 회전 위치는 기준 각도에 대한 나사의 회전 각도로서 정의될 수 있다.

[0186] 일 예에서, 인터페이스(53)의 입력 위치는 툴이 소정 위치로 나사(PS)를 회전시키도록 한다. 대안적으로, 인터페이스(53)의 변위는 툴이 소정 변위에 따라 나사(PS)를 회전시키도록 한다.

[0187] 다른 예에서, 인터페이스(53)의 속도 입력은 툴이 소정 위치로 나사(PS)를 회전시키도록 한다. 인터페이스(53)의 입력 속도의 증가/감소는 또한 출력 위치 제어의 변화를 유발할 수 있다. 이 예에서, 사용자는 완전한 나사 삽입을 달성하기 위해 인터페이스(53)를 점점 더 빠르게 회전시킬 필요가 있을 수 있다.

[0188] 다른 예에서, 인터페이스(53)의 힘 또는 토크 입력은 툴이 소정 위치로 나사(PS)를 회전시키도록 한다. 일 예에서, 인터페이스(53)의 입력 힘 또는 토크는 툴이 나사로 구동해야 하는 특정 위치를 결정할 수 있다. 인터페이스(53)의 입력 힘 또는 토크는 대안적으로 툴이 나사에 인가해야 하는 최대 위치를 결정할 수 있고, 로봇 및 툴(30)은 최대 위치가 달성될 때까지 나사를 계속 삽입한다.

[0189] c. 툴의 삽입 깊이 출력 제어

[0190] 임의의 출력 기술(힘, 위치, 속도)에 응답하여, 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 툴이 타겟 부위 내의 특정 삽입 깊이로 나사(PS)를 구동시키도록 동작할 수 있다.

[0191] 일 예에서, 인터페이스(53)의 입력 위치는 툴이 특정 삽입 깊이로 나사(PS)를 회전시키도록 한다. 대안적으로, 인터페이스(53)의 변위는 툴이 삽입 깊이에 따라 나사(PS)를 회전시키도록 한다.

[0192] 다른 예에서, 인터페이스(53)의 속도 입력은 툴이 특정 삽입 깊이로 나사(PS)를 회전시키도록 한다. 인터페이스(53)의 입력 속도의 증가/감소는 또한 삽입 깊이의 변화를 유발할 수 있다. 이 예에서, 사용자는 충분한 삽입 깊이를 달성하기 위해 인터페이스(53)를 점점 더 빠르게 회전시킬 필요가 있을 수 있다.

[0193] 다른 예에서, 인터페이스(53)의 힘 또는 토크 입력은 툴이 특정 삽입 깊이로 나사(PS)를 회전시키도록 한다. 일 예에서, 인터페이스(53)의 입력 힘 또는 토크는 툴이 나사로 구동해야 하는 특정 삽입 깊이를 결정할 수 있다. 인터페이스(53)의 입력 힘 또는 토크는 대안적으로 툴이 나사를 구동해야 하는 최대 특정 삽입 깊이를 결정할 수 있고, 로봇 및 툴(30)은 특정 삽입 깊이가 달성될 때까지 나사를 계속 삽입한다.

[0194] d. 툴의 속도 출력 제어

[0195] 임의의 입력 기술(힘, 위치, 속도)에 응답하여, 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 속도 제어에 기초하여 툴이 나사(PS)를 구동시키도록 동작할 수 있다. 속도는 나사의 회전 각도, 나사의 선형 삽입 속도, 툴의 회전 속도, 또는 이들의 임의의 조합의 시간에 대한 변화로 정의할 수 있다.

[0196] 일 예에서, 인터페이스(53)의 입력 속도는 툴이 관련 속도에 따라 나사(PS)를 회전시키도록 한다. 대안적으로, 인터페이스(53)의 변위는 툴이 관련 속도에 따라 나사(PS)를 회전시키도록 한다.

[0197] 다른 예에서, 인터페이스(53)의 속도 입력은 툴이 관련 속도에 따라 나사(PS)를 회전시키도록 한다. 인터페이스(53)의 입력 속도의 증가/감소는 또한 출력 속도 제어의 변화를 유발할 수 있다. 이 예에서, 사용자는 특정 속도를 달성하기 위해 인터페이스(53)를 점점 더 빠르게 회전시킬 필요가 있을 수 있다.

[0198] 다른 예에서, 인터페이스(53)의 힘 또는 토크 입력은 툴이 관련 속도에 따라 나사(PS)를 회전시키도록 한다. 일 예에서, 인터페이스(53)의 입력 힘 또는 토크는 툴이 나사로 구동해야 하는 특정 위치를 결정할 수 있다. 인터페이스(53)의 입력 힘 또는 토크는 대안적으로 툴이 나사를 구동시켜야 하는 최대 속도를 결정할 수 있고, 로봇 및 툴(30)은 최대 속도가 달성될 때까지 나사를 계속 삽입한다.

[0199] e. 입력과 출력 사이의 관계

[0200] 햅틱 장치(51)에 의해 제공되는 다양한 입력 제어 기술들뿐만 아니라 툴을 구동시키기 위한 다양한 출력 제어 기술들이 상기에 설명되어 있다. 햅틱 장치(51)의 입력과 툴로의 출력 사이의 관계는 아래에 설명되는 다양한 실시예들에 따라 정의될 수 있다. 햅틱 장치(51)의 입력과 툴로의 출력 사이의 관계는 아래에 설명되는 다양한 구성들의 임의의 조합에 따라 정의될 수 있다.

[0201] 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 햅틱 장치(51)의 입력을 툴에 대한 미리 결정된 출력에 매핑할 수 있으며, 이는 툴에 대한 디폴트 설정들에 대응할 수 있다. 예를 들어, 하나 이상의 컨트롤러들(33)의 메모리에는 룩업 테이블이 포함될 수 있고, 여기서 햅틱 장치(51)의 입력들은 툴에 대한 미리 결정된 디폴트 출력들에 대응한다. 하나의 이러한 예에서, 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 인터페이스(53)가 30도 회전된 측정치를 획득할 수 있다. 그런 다음 하나 이상의 컨트롤러들(33)은, 룩업 테이블에 기초하여, 척추경 나사(PS)가 1.5 회전/초의 회전 속도로 회전되어야 한다고 결정할 수 있다.

[0202] 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 햅틱 장치(51)의 입력을 다양한 변수에 기초할 수 있는 툴에 대한 미리 결정된 출력에 매핑할 수 있다. 예를 들어, 툴에 대한 미리 결정된 출력은 전술된 상호작용 센서들 또는 센서들(65) 중 어느 하나에 의해 검출될 수 있는 햅틱 장치(51)의 조건들에 기초할 수 있다. 예를 들어, 미리 결정된 출력은 척추경 나사(PS)의 삽입 깊이, 척추경 나사(PS)를 회전시키는데 필요한 현재 힘(F_{PS}), 및/또는 척추골(V)의 골밀도 데이터에 기초할 수 있다. 다른 예로서, 툴에 대한 미리 결정된 출력은 햅틱 장치(51)의 사용자 인터페이스(57)의 센서들(65)에 의해 감지된 판독치에 기초할 수 있다. 예를 들어, 사용자 인터페이스(57)는 "민감한" 제어를 위해 눌러질 수 있는 푸시 버튼 또는 원하는 제어 감도를 나타내도록 작동될 수 있는 슬라이더를 포함할 수 있다. 미리 결정된 출력은 센서들(65)에 의해 감지되는 원하는 제어 감도에 기초할 수 있다.

[0203] 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 단조(monotonic), 선형(예를 들어, 비례), 지수(exponential), 로그(logarithmic), 다항식(polynomial), 루트(root), 거듭제곱(power), 및 유리 함수(rational function)들과 같은 임의의 적절한 수학적 함수에 기초하여 입력과 출력 사이의 관계를 매핑할 수 있다. 일 예에서, 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 회전식 인터페이스(53)가 회전되는 정도의 양이 원하는 삽입 깊이에 비례하도록 선형 함수에 기초하여 측정된 위치를 원하는 삽입 깊이에 매핑할 수 있다. 예를 들어, 회전식 인터페이스(53)가 회전되는 각각의 정도에 대해, 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 원하는 삽입 깊이를 밀리미터의 1/90만큼 증가시킨다. 다른 예에서, 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 구간별 상수 함수(piecewise constant function)(즉, 플로어 함수(floor function))에 기초하여 측정된 위치를 회전 속도에 매핑할 수 있다. 이러한 예에서, 하나 이상의 컨트롤러들(33)은, 회전식 인터페이스(53)가 1도 내지 180도 사이에서 회전될 때(포괄적으로), 하나 이상의 컨트롤러들(33)이 원하는 회전 속도를 1 회전/초인 것으로 결정하고, 회전식 인터페이스(53)가 181도 내지 360도 사이에서 회전될 때(포괄적으로), 하나 이상의 컨트롤러들(33)이 원하는 회전 속도를 2 회전/초인 것으로 결정하도록, 측정된 위치를 원하는 회전 속도에 매핑할 수 있다.

[0204] 하나 이상의 컨트롤러들은 햅틱 장치(51)의 입력과 툴에 대한 출력 사이의 매핑 관계에 기초하여 임의의 입력 기술(힘, 위치, 속도)을 툴의 출력 제어(힘, 회전 위치, 삽입 깊이, 속도)에 매핑할 수 있다.

[0205] 도 11b의 도 D에 도시된 바와 같이, 힘 입력은 회전 위치 출력, 삽입 깊이 출력, 힘 출력 또는 속도 출력에 맵핑될 수 있다. 예를 들어, 힘 입력은, 힘 입력의 측정(F_{in}의 측정)이 비례적인 나사 회전 정도에 맵핑될 수 있도록 회전 위치 출력에 선형적으로 맵핑될 수 있다. 유사하게, 힘 입력은, 힘 입력이 비례적인 나사 삽입 깊이, 척추경 나사(PS)에 인가되는 비례적인 토크, 및 비례적인 나사 삽입 속도에 맵핑될 수 있도록, 삽입 깊이 출력,

힘 출력, 및 속도 출력에 선형적으로 맵핑될 수 있다.

[0206] 도 11b의 도 D에 도시된 바와 같이, 위치 입력은 회전 위치 출력, 삽입 깊이 출력, 힘 출력 또는 속도 출력에 맵핑될 수 있다. 예를 들어, 위치 입력은 위치 입력의 측정(위치(P_1)의 측정 또는 위치 P_1과 P_0 사이의 변위의 측정)은 비례적인 나사 회전 정도에 맵핑될 수 있도록 회전 위치 출력에 선형적으로 맵핑될 수 있다. 유사하게, 힘 입력은, 홈 위치(P_0)에 대한 위치(P_1)의 측정이 비례적인 나사 삽입 깊이, 척추경 나사(PS)에 인가되어야 하는 비례적인 최대 토크 레벨, 및 비례적인 나사 삽입 속도에 맵핑될 수 있도록 삽입 깊이 출력, 힘 출력, 및 속도 출력에 선형적으로 맵핑될 수 있다.

[0207] 도 11b의 도 D에 도시된 바와 같이, 속도 입력은 회전 위치 출력, 삽입 깊이 출력, 힘 출력 또는 속도 출력에 맵핑될 수 있다. 예를 들어, 속도 입력은 속도 입력의 측정(시간 T_1-T_0의 변화에 대한 P_1과 P_0 사이의 변위의 측정)은 비례적인 나사 회전 정도에 맵핑될 수 있도록 회전 위치 출력에 선형적으로 맵핑될 수 있다. 유사하게, 속도 입력은, 속도 입력이 비례적인 나사 삽입 깊이, 척추경 나사(PS)에 인가되는 비례적인 토크, 및 비례적인 나사 삽입 속도에 맵핑될 수 있도록 삽입 깊이 출력, 힘 출력, 및 속도 출력에 선형적으로 맵핑될 수 있다.

[0208] F. 시뮬레이션된 모드

[0209] 전술한 햅틱 장치(51)에 관한 기술들은 물리적 로봇 제어 및/또는 툴로의 구동을 이용하는 수술중 기술들에 관한 것이었다. 그러나, 실제 수술 절차를 실행하기 전에 로봇 시스템을 사용할 때 조작자에게 트레이닝 또는 더 큰 신뢰도를 제공하기 위해 햅틱 장치(51)를 이용하여 시뮬레이션을 수행하는 것이 고려된다. 도 11a 및 도 14a 내지 14c의 표를 참조하면, 햅틱 장치(51)와 함께 이용될 수 있는 다양한 시뮬레이션된 모드들이 있다. 이들 모드들은 시뮬레이션된 자율 검사 모드 및 시뮬레이션된 수동 제어 모드를 포함하고, 이들 모드들은 아래에서 상세히 설명된다.

[0210] 시뮬레이션 모드들은, 이에 제한되는 것은 아니나, 환자, 로봇 시스템, 로봇 조작기, 환자 테이블, 내비게이션 시스템, 툴, 나사를 포함하는, 수술중에 존재할 수 있는 전체 수술실 조건을 시뮬레이션할 수 있다. 시뮬레이션은 대안적으로 나사 및 타겟 부위; 툴, 나사 및 타겟 부위; 또는 로봇 조작기, 툴, 나사 및 타겟 부위를 시뮬레이션할 수 있다. 또한, 타겟 궤적 및 삽입 깊이를 포함하는 수술 계획은 참조를 위해 시뮬레이션에서 제공될 수 있다.

[0211] 시뮬레이션들은, 이에 제한되는 것은 아니나, 로봇 시스템(10)의 디스플레이들(18) 중 하나 이상, 또는 수술실 외부에 있는 디스플레이와 같은, 임의의 적합한 그래픽 디스플레이 장치 상에서 실행될 수 있다. 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 시뮬레이션들을 실행할 수 있다. 대안적으로, 햅틱 장치(51)는 로봇 시스템(10)으로부터 분리된 시뮬레이션 시스템에 연결될 수 있으며, 여기서 시뮬레이션 시스템은 그 자신의 제어 시스템을 갖는다.

[0212] 본원에 설명된 시뮬레이션된 모드들은 수술 전에 또는 수술 중에 실행될 수 있다. 예를 들어, 의사는 물리적 로봇 제어의 수행을 명령하기 직전에 수술실에서 시뮬레이션을 수행할 수 있다. 대안적으로, 시뮬레이션은 수술 전에 수행될 수 있다. 어느 경우든, 의사는 시뮬레이션 동안 경험되는 시스템(10)의 임의의 동작 파라미터들을 설정, 확인 또는 수정할 수 있다. 예를 들어, 의사는, 척추경 나사 크기, 삽입 깊이, 척추경 진입 지점 위치와 같은 수술 계획; 햅틱 장치 동작 또는 민감도; 햅틱 장치의 바람직한 제어 입력 기술(힘/토크, 위치, 속도); 툴 동작, 이송 속도, 선형 전진 속도, 회전 속도 또는 민감도; 툴을 위한 바람직한 제어 출력 기술(힘/토크, 위치, 속도); 포즈 또는 배향과 같은 로봇 파라미터들 등을 설정, 확인 또는 수정할 수 있다.

[0213] 앞서 언급된 바와 같이, 수술 전 이미징 및/또는 수술 중 이미징은 환자의 해부학적 구조를 시각화하기 위해 사용될 수 있다. 예를 들어, 수술 전 이미지들, 예를 들어 X-레이, CT 스캔, 또는 MRI 이미지들은 환자의 해부학적 구조의 해부학적 모델, 및 구체적으로는 타겟 부위를 생성하는데 사용될 수 있다. 이러한 가상 해부학적 모델은 시뮬레이션에서 활용될 수 있다. 추가적으로, 일단 척추경 나사(PS)의 나사산 기하학적 형상이 로봇 수술 시스템(10)의 메모리에 저장되면, 선택된 척추경 나사(PS)는 사실상 시뮬레이션 내에 제시될 수 있다.

[0214] 시뮬레이션된 모드들의 실행 동안, 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 햅틱 피드백을 햅틱 장치(51)에 제공한다. 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 회전식 인터페이스(53)가 척추경 나사(PS)와 타겟 부위 사이의 시뮬레이션된 현재 상호작용을 에뮬레이트하도록 하기 위해 햅틱 장치(51)의 액추에이터(55)를 제어하도록 구성된다. 도 14b 및 14c를 참조하면, 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 조작자의 손에 의해 회전식 인터페이스(53)를 회전시키는데 필요한 힘(F_{RI})을 조정하기 위해 액추에이터(55)에 저항력(F_A)을 제공하도록 구성됨으로써 시뮬레이션된 현재 상호작용을 에뮬레이트할 수 있으며, 여기서 회전식 인터페이스(53)를 회전시키는데 필요한 힘은 척추골(V)(타겟 부

위)에 대해 척추경 나사(PS)를 회전시키는데 필요한, 도 14c에 F_{SPS}로서 예시된, 시뮬레이션된 현재 힘을 반영한다. 물론, 햅틱 장치(51)는 전술한 힘, 위치 또는 모션 피드백 기술의 범위와 같은 저항성 피드백 이외의 임의의 기술을 사용하여 햅틱 피드백을 제공하도록 제어될 수 있다.

[0215] 시뮬레이션된 모드들의 실행 동안, 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 다양한 방법들을 사용하여 (시뮬레이션된) 척추경 나사(PS)와 (시뮬레이션된) 타겟 부위 사이의 시뮬레이션된 현재 상호작용을 획득하도록 구성될 수 있다. 예를 들어, 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 시뮬레이션의 좌표계에서 시뮬레이션된 현재 상호작용에 대응하는 가상 측정을 획득할 수 있다. 시뮬레이션 시스템은 시뮬레이션된 로봇, 툴, 나사 및/또는 환자를 추적하고, 타겟 부위의 해부학적 모델에 대한 시뮬레이션된 척추경 나사(PS)의 위치를 결정할 수 있다. 시뮬레이션 시스템은 해부학적 모델에 대한 시뮬레이션된 척추경 나사(PS)의 복수의 위치들에서 시뮬레이션된 척추경 나사(PS)와 해부학적 모델 사이의 예상되는 상호작용들을 나타내는 미리 결정된 데이터를 포함할 수 있다. 일 예에서, 데이터는 하나 이상의 컨트롤러들(33)에 의한 액세스를 위해 메모리의 룩업 테이블에 저장될 수 있다. 시뮬레이션 시스템은 해부학적 모델에 대한 나사의 결정된 상태, 위치, 배향 및/또는 포즈 및 미리 결정된 데이터에 기초하여 척추경 나사(PS)와 타겟 부위 사이의 시뮬레이션된 현재 상호작용을 나타내는 파라미터들을 계산할 수 있다. 미리 결정된 데이터는 척추골(V)의 골밀도 데이터를 포함할 수 있다. 시뮬레이션 시스템은 척추골(V)의 해부학적 모델에 대한 나사의 상태 및 골밀도 데이터를 사용하여 다양한 깊이에서 척추경 나사(PS)와 척추골(V) 사이의 시뮬레이션된 현재 상호작용을 나타내는 파라미터들을 계산 또는 획득할 수 있다. 미리 결정된 데이터는 또한 나사, 툴, 또는 상호작용을 정의하는 것과 관련된 임의의 다른 특징의 기하학적 형상에 관한 알려진 데이터를 포함할 수 있다.

[0216] 1. 시뮬레이션된 자율 검사 모드

[0217] 어떤 의미에서, 시뮬레이션된 자율 검사 모드는 자율 검사 모드의 시뮬레이션된 버전이다. 따라서, 시뮬레이션된 자율 검사 모드를 이해하기 위해 상기 자율 검사 모드에 대한 임의의 설명이 본원에 통합될 수 있다. 시뮬레이션된 자율 검사 모드 동안, 하나 이상의 컨트롤러들들(33)은 수술 툴(30)을 자율적으로 제어하는 것을 (그래픽적으로) 시뮬레이션하고, 조작자는 햅틱 장치(51)를 사용하여 시뮬레이션된 자율 삽입을 햅틱적으로 감지할 수 있다. 하나 이상의 컨트롤러들(33)은, 회전축(R)을 중심으로 한 회전 속도로 척추경 나사(PS)를 회전시키는 것을 시뮬레이션하고 계획된 궤적(LH)을 따라 전진 속도로 척추경 나사(PS)를 선형으로 전진시키는 것을 시뮬레이션하여 수술 툴(30)을 자율적으로 제어하는 것을 시뮬레이션한다. 그러나, 로봇 시스템은 툴의 동작을 물리적으로 제어하지 않는다. 대신에, 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 척추경 나사(PS)를 자율적으로 삽입하는 것을 시뮬레이트하기 위해 (도 11a의 열 E에 도시된 바와 같이) 수술 툴(30)의 자율 제어를 시뮬레이션한다. 시뮬레이트된 자율 검사 모드 동안, 회전식 인터페이스(53)는 조정된 힘(F_{RI})에 따라, 그러나 척추경 나사(PS)를 회전시키기 위해 시뮬레이트된 수술 툴(30)를 제어하는 능력 없이 그리고 수술 툴(30)의 시뮬레이트된 자율 제어를 제어하는 능력 없이 수동으로 조작될 수 있다. 자율 검사 모드와 마찬가지로, 자율 나사 삽입의 시뮬레이션을 중지/일시중지하기 전, 동안, 또는 후에 시뮬레이트된 자율 검사 모드가 수행될 수 있다.

[0218] 2. 시뮬레이션된 수동 제어 모드

[0219] 어떤 의미에서, 시뮬레이션된 수동 제어 모드는 수동 제어 모드의 시뮬레이션된 버전이다. 따라서, 시뮬레이션된 수동 제어 모드를 이해하기 위해 상기 수동 제어 모드에 대한 임의의 설명이 본원에 통합될 수 있다. 수동 제어 모드와 대조적으로, 시뮬레이션된 수동 제어 모드 동안, 인터페이스(53)는 (물리적) 수술 툴(30)을 제어하는 능력 없이 수동으로 조작가능하다. 대신에, 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 (도 11a의 열 E에 도시된 바와 같이) 조작자가 햅틱 장치(51)의 인터페이스(53)를 수동으로 조작하는 것에 응답하여 수술 툴(30)의 수동 제어를 시뮬레이션한다. 시뮬레이션된 수동 제어 모드 동안, 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 햅틱 장치(51)로부터의 입력에 응답하여 수술 툴(30)을 수동으로 제어하는 것을 시뮬레이션한다. 시뮬레이션된 수동 제어 모드 동안, 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 척추경 나사(PS)의 회전 속도 또는 전진 속도 중 하나를 제어하는 것을 시뮬레이션한다. 조작자는 햅틱 장치(51)를 수동으로 조작하고, 이에 응답하여, 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 (도 11a의 열 G에 도시된 바와 같이) 의 회전 속도 또는 전진 속도 중 하나의 제어를 시뮬레이션할 수 있다. 예를 들어, 조작자는 전술한 임의의 입력 기술을 사용하여 인터페이스(53)를 수동으로 조작할 수 있다. 제어 입력에 응답하여, 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 척추경 나사(PS)의 시뮬레이션된 삽입을 위한 힘, 위치 또는 속도와 같은 임의의 적합한 출력 기술에 기초하여 시뮬레이션된 툴의 출력을 제어한다. 도 14c에 도시된 예에서, 사용자는 디스플레이(18) 상의 나사 삽입의 시뮬레이션된 수동 제어를 수행하기 위해 인터페이스(53)에 입력 힘(F_{in})을 인가

한다. 입력 힘은 액추에이터(55)에 의해 출력된 (저항성) 힘(F_{RI})에 저항한다.

[0220] III. 로봇 수술 시스템을 제어하는 방법

[0221] 이제 도 15a를 참조하면, 흐름도는 로봇 수술 시스템(10)을 제어하는 방법의 일 예를 예시한다. 도시된 바와 같이, 흐름도는 수술 동안 다양한 햅틱 장치 동작 모드들의 동작을 예시한다.

[0222] 흐름도는 척추경 나사(PS)의 삽입을 삽입 또는 시뮬레이션하기 위해 로봇 수술 시스템(10)을 제어하는 방법을 예시한다. 방법은 단계(200)에서 시작하여 척추경 나사(PS)를 수용하기 위한 해부학적 구조를 준비하는 단계(202)로 바로 진행된다. 단계(202) 동안, 척추경 나사(PS)를 삽입하기 위한 해부학적 구조를 준비하기 위해 다양한 단계들이 실행될 수 있다. 이들 단계들은 환자 내에 절개를 형성하는 단계(1), 조직 견인기(tissue retractor)로 조직을 견인하는 단계(2); 캐뉼라를 견인된 조직 내에 배치하는 단계(3), 해부학적 구조 내에 파일럿 홀(102)을 드릴링하는 단계(4), 및 나사산을 해부학적 구조 내로 태핑하는 단계(5)를 포함할 수 있다. 단계(202)는 상기 단계들 (1) 내지 (5)를 포함할 필요가 없다는 것에 유의해야 한다. 예를 들어, 대안적인 예들에서, 단계 (4) 및 (5)는 파일럿 홀들(102)의 드릴링 및 해부학적 구조 내로의 나사산의 태핑이 배제될 수 있을 때 배제될 수 있다. 예를 들어, 이러한 예들은 자체-드릴링, 자체-태핑 골격 나사가 사용되는 경우의 예들을 포함한다.

[0223] 그런 다음 본 방법은 척추경 나사(PS)가 수술 툴(30)에 의해 상호작용하는 단계(204)로 진행한다. 일부 구현들에서, 툴(30)은 해부학적 구조와 상호작용하기 전에 나사(PS)에 결합된다. 대안적으로, 척추경 나사(PS)는 수동 또는 로봇 삽입을 포함하는 임의의 기술을 사용하여 타겟 부위에서 해부학적 구조 내로 부분적으로 안착될 수 있고, 이후 툴(30)은 부분적으로 안착된 나사(PS)와 상호작용한다. 보다 바람직하게는, 척추경 나사(PS)는 파일럿 홀들(102) 중 하나에 배치하기 위해 드라이버(44)의 원위 단부에 부착된다. 원래의 라인 햅틱 객체는 척추경 나사(PS)를 삽입하기 위해 사용될 수 있거나, 또는 새로운 시작 지점, 타겟 지점, 및 출구 지점을 갖는 새로운 라인 햅틱 객체가 드라이버(44) 및/또는 척추경 나사(PS)의 부착 시에 생성될 수 있다. 이 경우에, 드릴(42) 및/또는 드라이버(44)는 하나 이상의 컨트롤러들(33)이 하우징(45)에 연결된 부속품을 식별할 수 있도록 RFID 태그들 또는 다른 식별 장치들을 가질 수 있다. 하우징(45)은 태그를 판독하고 어떤 부속품이 부착되는지를 결정하기 위해 하나 이상의 컨트롤러들(33)과 통신하는 대응되는 RFID 판독기 등을 가질 수 있다. 그런 다음 이 정보에 기초하여, 컨트롤러는 새로운 라인 햅틱 객체를 생성, 액세스, 또는 그렇지 않으면 결정할 수 있다. 유사하게, 척추경 나사(PS)는 또한 RFID 태그들을 구비할 수 있고, 드라이버(44)는 유사한 판독기를 가질 수 있어서, 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 또한 어느 크기/유형의 척추경 나사(PS)가 부착되는지를 결정할 수 있다. 따라서, 라인 햅틱 객체는 드라이버(44) 및/또는 척추경 나사(PS)에 기초할 수 있어서, 로봇 아암(20)은 특정 척추경 나사(PS)를 원하는 위치, 예를 들어 환자의 해부학적 구조에 대해 원하는 배향 및 깊이로 배치하도록 정밀하게 제어된다.

[0224] 추가적으로, RFID 태그들, 또는 비전 카메라와 같은 다른 검출 장치들을 통한 부속품의 자동 검출로, 제어 시스템은 로봇 수술 시스템(10)과 함께 이용되는 임의의 수술 절차 소프트웨어를, 드라이버(44)가 연결되어 있는 현재 조작자에 대해 상이한 프롬프트, 명령어 등을 가질 수 있는 드라이버(44)와 연관된 다음 스크린으로 전진시킬 수 있다. 음성 인식, 제스처 감지, 또는 다른 입력 장치들은 소프트웨어를 전진시키고/시키거나 치료될 다음 척추골(100)로 변경하고/하거나 동작이 수행되는 척추체(100)의 일 면을 변경하는데 사용될 수 있다. 이는 또한 수술 툴(30)의 위치에 기초할 수 있다. 예를 들어, 부착된 부속품의 TCP가 다른 것보다 척추골(V)의 일 면에 더 가깝게 조작자에 의해 수동으로 배치되는 경우, 소프트웨어는 척추골(V)의 일 면에 대응하도록 자동으로 전진할 수 있다. 선택된 척추골(V) 및 동작의 일 면은 디스플레이들(18)로 또는 오디오 입력/출력을 통해 시각적으로 확인될 수 있다.

[0225] 일부 수술들에서, 모든 파일럿 홀들(102)이 먼저 드릴링되고, 그런 다음 추후에, 모든 척추경 나사들(PS)이 그들의 원하는 위치에 삽입될 때와 같이, 회전축(R)은 파일럿 홀들(102)을 드릴링하는 것과 척추경 나사들(PS)을 삽입하는 것 사이의 원하는 궤적으로부터 이동될 수 있다. 이러한 경우에, 척추경 나사들(PS) 각각을 배치하기 전에, 로봇 수술 시스템(10)은 앞서 설명된 방식으로 척추경 나사들(PS) 각각에 대해 원하는 궤적에 수술 툴(30)의 회전축(R)을 자율적으로 정렬시킴으로써 회전축(R)을 원하는 궤적에 따라 배치시키도록 수술 툴(30)의 움직임을 먼저 제어할 수 있다.

[0226] 조작자가 단계(206) 동안 수술의 동작을 종료하지 않으면, 방법은 하나 이상의 컨트롤러들(33)이 어느 햅틱 장치 동작 모드가 선택되는지를 결정하는 단계(208)로 진행한다(단계(206)는 아래에서 더 상세히 설명될 것임). 햅틱 장치 동작 모드는 임의의 조건 또는 명령에 응답하여 선택될 수 있다. 단계(210) 동안, 방법은 선택된 햅

틱 장치 동작 모드가 현재 하나 이상의 컨트롤러들(33)에 의해 실행되고 있는지 여부를 결정한다. 선택된 햅틱 장치 동작 모드가 하나 이상의 컨트롤러들(33)에 의해 실행되고 있지 않은 경우, 방법은 먼저 단계(212)로 진행하는데, 여기서 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 햅틱 장치 동작 모드가 실행되고 있는 경우 실행되고 있는 햅틱 장치 동작 모드를 종료한다. 이에 응답하여, 방법은 선택된 햅틱 장치 동작 모드에 기초하여 자율 검사 모드, 수동 제어 모드, 시뮬레이션된 자율 검사 모드, 또는 시뮬레이션된 수동 제어 모드 중 하나로 진행한다. 선택된 햅틱 장치 동작 모드가 이미 실행되고 있는 경우, 방법은 선택된 햅틱 장치 동작 모드를 계속 실행한다. 이와 같이, 단계들(208 및 210) 동안, 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 조건이 햅틱 장치 동작 모드의 개시를 프롬프트하는지 또는 조작자가 햅틱 장치 동작 모드의 개시를 명령하는지를 결정한다.

[0227] 이와 같이, 임의의 햅틱 장치 동작 모드는 조건 또는 명령에 응답하여 임의의 적합한 시간에 개시될 수 있다. 예를 들어, 조건 또는 명령에 응답하여, 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 척추경 나사(PS)의 회전을 정지시키기 위해 수술 툴(30)을 자율적으로 제어하는 것을 정지 또는 일시 정지시킨 후에 수동 제어 모드를 개시하도록 구성될 수 있다(또한 도 11a의 열 F에 표시됨). 다른 예로서, 조건 또는 명령에 응답하여, 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 수술 툴(30)을 자율적으로 제어하기 전에 수동 제어 모드를 개시하도록 구성될 수 있다(또한 도 11a의 열 F에 표시됨). 이러한 예들에서, 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 수술 툴(30)의 자율 제어가 정지되거나 일시 정지된 후에 나사를 회전시키기 위해 수동 제어 모드로부터 수술 툴을 자율 제어하는 것을 재개하는 것으로 전환할 수 있다. 또 다른 예로서, 조건 또는 명령에 응답하여, 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 수술 툴의 자율 제어를 정지 또는 일시정지하기 전에 또는 후에 시뮬레이션된 자율 검사 모드를 개시하도록 구성될 수 있다(또한 도 11a의 열 F에 표시됨). 또 다른 예로서, 조건 또는 명령에 응답하여, 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 수술 툴의 자율 제어를 정지 또는 일시정지하기 전에 또는 후에 시뮬레이션된 수동 제어 모드를 개시하도록 구성될 수 있다(또한 도 11a의 열 F에 표시됨).

[0228] 임의의 적합한 시간에 임의의 햅틱 장치 동작 모드를 개시하는 능력은 조작자에게 그들의 선호도에 기초하여 수술을 맞춤화(customize)하는 능력을 제공한다. 예를 들어, 하나 이상의 컨트롤러들(33)이 수술 툴(30)을 자율적으로 제어하는 것을 정지 또는 일시 정지시킨 후에 수동 제어 모드를 개시하는 일 구성에서, 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 초기에 조작자가 수동 제어 모드 동안 척추경 나사(PS)를 최종 깊이로 이식하기 전에 척추경 나사(PS)를 초기 깊이로 자율적으로 삽입할 수 있다(또는 그 반대도 가능함). 이러한 구성에서, 척추경 나사(PS)는 척추경 나사(PS)가 (내비게이션 시스템 12에 의해 결정된 바와 같이) 최종 깊이의 소정 거리 내에 있을 때까지 자율적으로 배치될 수 있다. 이 시점에서, 조작자는 조작자가 척추경 나사(PS)의 조임을 더 능동적으로 느낄 수 있도록 수술 툴(30)로 척추경 나사(PS)의 이식을 수동으로 완료할 수 있다. 조작자는 또한 자율 제어 동안 사용되는 수동 제어 모드 동안 척추경 나사(PS)의 배치를 완료하기 위해 별도의 툴(동력식 또는 수동식)을 사용하도록선택할 수 있다.

[0229] 다른 실시예들은 또한 그들의 선호도들에 기초하여 수술을 맞춤화하는 조작자의 능력을 예시한다. 예를 들어, 다른 구성에서, 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 수술 툴(30)을 자율적으로 제어하기 전에 시뮬레이션된 자율 검사 모드를 개시한다. 이러한 구성에서, 조작자는 하나 이상의 컨트롤러들(33)이 척추경 나사(PS)를 삽입하기 위한 자율 제어를 개시하기 전에 디스플레이(18) 상에 수술 툴(30)의 자율 제어의 시뮬레이션을 시각화할 수 있다. 다른 구성에서, 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 수술 툴(30)을 제어하기 위한 수동 제어 모드를 개시하기 전에 시뮬레이션된 수동 제어 모드를 개시한다. 이러한 구성에서, 조작자는 하나 이상의 컨트롤러들(33)이 척추경 나사(PS)를 삽입하기 위해 수동으로 제어하기 위한 수동 제어 모드를 개시하기 전에 디스플레이(18) 상에 수술 툴(30)의 수동 제어의 시뮬레이션을 시각화할 수 있다.

[0230] 또한, 조건 또는 명령에 응답하여 임의의 햅틱 장치 동작 모드를 개시하는 능력은 잠재적인 에러들(예를 들어, 척수(103)와의 충돌들)을 제거하고, 조작자에게 수술의 온-더-플라이(on-the-fly) 제어를 제공한다. 예를 들어, 조작자가 수동 제어 모드 동안 척추경 나사(PS)를 최종 깊이로 이식하기 전에 하나 이상의 컨트롤러들(33)이 초기에 척추경 나사(PS)를 초기 깊이로 자율적으로 삽입하는 전술한 구성에서, 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 조건 또는 명령에 응답하여 수동 제어 모드를 개시할 수 있다. 수동 제어 모드의 개시 및 자율 제어의 정지가 조건에 의해 프롬프트되는 경우에, 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 척추경 나사(PS)가 자율 제어 동안 최종 깊이의 미리 정의된 거리 내에 있음을 검출할 수 있고, 조건을 하나 이상의 컨트롤러들(33)에 전송할 수 있다. 그런 다음 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 수동 제어 모드를 개시하도록 프롬프트되고, 조작자가 척추경 나사(PS)의 배치를 수동으로 완료할 수 있도록 자율 제어를 정지한다. 최종 깊이의 미리 정의된 거리는 척추경 나사(PS)가 척수(103)와 접촉하지 않도록 미리 결정될 수 있다. 수동 제어 모드의 개시가 명령에 의해 명령되는 경우에, 조작자는 자율 제어의 상태의 내비게이션 시스템(12)에 의해 지시될 수 있다. 예를 들어, 디스플레이(18)는 척추경

나사(PS)가 전체 깊이에 도달하기 전에 얼마나 많은 회전이 남아 있는지를 나타낼 수 있고/있거나 디스플레이(18)는 척추경 나사(PS)의 얼마나 많은 추가 삽입이 필요한지를 작업자가 쉽게 시각화할 수 있도록 척추경 나사(PS), 해부학적 구조 및/또는 타겟 지점을 그래픽적으로 나타낼 수 있다. 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 또한 척추경 나사(PS)가 미리 결정된 깊이에 도달하였음을 조작자에게 통지하기 위해 햅틱 장치(51)를 통해 조작자에게 햅틱 피드백(예를 들어, 진동 또는 펄스)을 제공할 수 있다. 일단 조작자가 척추경 나사(PS)가 최종 깊이의 미리 정의된 거리 내에 있다고 결정하면, 조작자는 하나 이상의 컨트롤러들(33)에게 수동 제어 모드를 개시하고 조작자가 척추경 나사(PS)의 배치를 수동으로 완료할 수 있도록 자율 제어를 중지하도록 명령할 수 있다.

[0231] 햅틱 장치 동작 모드의 개시를 프롬프트할 수 있는 일부 예시적인 조건들은 척추경 나사(PS)가 원하는 깊이에 도달하는 것, 척추경 나사(PS)가 척수(103)와 잠재적으로 충돌하는 것, 및 척추경 나사(PS)가 미리 결정된 회전수로 회전되는 것을 포함할 수 있다. 이러한 예들에서, 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 자율 검사 모드, 수동 제어 모드, 시뮬레이션된 자율 검사 모드, 또는 시뮬레이션된 수동 제어 모드 중 하나를 자동으로 선택하도록 구성될 수 있다. 이러한 일 예에서, 하나 이상의 컨트롤러들(33)이 수술 툴(30)를 자율적으로 제어하여 척추경 나사(PS)를 미리 결정된 회전 수만큼 회전시킨 후에, 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 수동 제어 모드를 자동으로 선택하여 조작자가 척추경 나사(PS)의 삽입을 수동으로 완료하도록 구성될 수 있다.

[0232] 로봇 수술 시스템(10)은 햅틱 장치 동작 모드의 개시를 명령하기 위한 다양한 컴포넌트들을 포함할 수 있다. 예를 들어, 조작자는 햅틱 장치(51)를 사용하여 햅틱 장치 동작 모드의 개시를 명령할 수 있다. 도 10에 도시된 바와 같이, 햅틱 장치(51)는 사용자 인터페이스(57)를 포함할 수 있다. 조작자는 명령을 하나 이상의 컨트롤러들(33)에 송신하기 위해 사용자 인터페이스(57)를 작동시킴으로써 사용자 인터페이스(57)를 사용하여 햅틱 장치 동작 모드를 선택할 수 있다. 대안적으로, 일부 예들에서, 조작자는 햅틱 장치 동작 모드를 선택하기 위해 회전식 인터페이스(53)를 누를 수 있다. 로봇 수술 시스템(10)이 도 4 내지 도 6의 수술 툴들(30)을 포함하는 경우에, 조작자는 트리거(49) 또는 수술 툴(30)의 사용자 인터페이스(59)를 사용하여 햅틱 장치 동작 모드를 선택할 수 있다. 다른 예들에서, 조작자는 컴퓨터 카트 어셈블리(34)의 키보드(61)와 같은 컴퓨터 카트 어셈블리(34)의 사용자 인터페이스를 통해 햅틱 장치 동작 모드를 선택할 수 있다. 조작자는 또한 베이스(22)의 사용자 인터페이스(63)를 통해 햅틱 장치 동작 모드를 선택할 수 있다. 조작자 이외의 개인이 햅틱 장치 동작 모드의 개시를 명령할 수 있다는 것이 고려된다. 예를 들어, 햅틱 장치 동작 모드의 개시는 원격 사용자 인터페이스를 사용하여 원격 위치로부터 원격 사용자에 의해 명령될 수 있다.

[0233] 도 15b는 자율 검사 모드의 예시적인 단계들을 예시한다. 도시된 바와 같이, 자율 검사 모드는 척추경 나사(PS)와 타겟 부위 사이의 현재 상호작용을 나타내는 측정을 획득하는 단계(304); 햅틱 장치(51)의 회전식 인터페이스(53)가 척추경 나사(PS)와 타겟 부위 사이의 현재 상호작용을 에뮬레이트하도록 하기 위해 획득된 측정에 기초하여 햅틱 장치의 액추에이터를 제어하는 단계(306)로서, 이는 조작자의 손에 의해 회전식 인터페이스(53)를 회전시키는데 필요한 힘(F_{RI})을 조절하기 위해 햅틱 장치(51)의 액추에이터(55)에 저항력(F_A)을 제공하는 단계(308)를 포함하며, 회전식 인터페이스(53)를 회전시키는데 필요한 힘(F_{RI})은 타겟 부위에 대해 척추경 나사(PS)를 회전시키는데 필요한 현재 힘(F_{PS})을 반영하는, 상기 단계(306); 및 수술 툴(30)을 제어하는 능력 없이 타겟 부위에 대해 척추경 나사(PS)를 회전시키는데 필요한 현재 힘(F_{PS})을 반영하는 햅틱 피드백을 조작자에게 제공하기 위해 조절된 힘(F_{RI})에 따라 회전식 인터페이스(53)를 수동으로 조작하는 단계(310)를 포함한다.

[0234] 도 15c는 수동 제어 모드의 예시적인 단계들을 예시한다. 도시된 바와 같이, 수동 제어 모드는 회전식 인터페이스(53)를 수동으로 조작하는 조작자에 기초하여 척추경 나사(PS)의 회전 속도 또는 척추경 나사(PS)의 전진 속도 중 하나를 제어하는 능력으로 회전식 인터페이스(53)를 수동으로 조작하는 단계(300); 회전식 인터페이스가 척추경 나사(PS)의 회전 속도 또는 척추경 나사(PS)의 전진 속도 중 하나를 제어하도록 수동으로 조작되는 것에 응답하여, 회전축을 중심으로 한 회전 속도로 척추경 나사(PS)를 회전시키고, 계획된 궤적을 따라 전진 속도로 척추경 나사(PS)를 선형으로 전진시키도록 수술 툴(30)을 제어하는 단계(302); 앞서 설명된 단계들(304, 306, 및 308); 및 타겟 부위에 대해 척추경 나사(PS)를 회전시키는데 필요한 현재 힘(F_{PS})을 반영하는 햅틱 피드백을 조작자에게 제공하기 위해 조정된 힘(F_{RI})에 따라 회전식 인터페이스(53)를 수동으로 조작하는 단계(311)를 포함한다.

[0235] 도 15d는 시뮬레이션된 자율 검사 모드의 예시적인 단계들을 예시한다. 도시된 바와 같이, 시뮬레이션된 자율 검사 모드는 회전축(R)을 중심으로 한 회전 속도로 척추경 나사(PS)를 회전시키키고 계획된 궤적(LH)을 따라 전진 속도로 나사를 선형으로 전진시키는 것을 시뮬레이션하여 수술 툴(30)을 자율적으로 제어하는 것을 시뮬레이

션하는 단계(312); 수술 툴(30)의 시뮬레이션된 자율 제어를 디스플레이(18) 상에 디스플레이하는 단계(314); 척추경 나사(PS)와 타겟 부위 사이의 시뮬레이션된 현재 상호작용을 나타내는 측정을 획득하는 단계(304)(단계(304')로서 예시됨)의 인스턴스; 햅틱 장치(51)의 회전식 인터페이스(53)가 척추경 나사(PS)와 타겟 부위 사이의 시뮬레이션된 현재 상호작용을 에뮬레이트하도록 위해 획득된 측정에 기초하여 햅틱 장치의 액추에이터를 제어하는 단계(306)(단계(306')로 예시됨)의 인스턴스로서, 이는 조작자의 손에 의해 회전식 인터페이스(53)를 회전시키는데 필요한 힘(F_{RI})을 조정하기 위해 액추에이터(55)에 저항력(F_A)을 제공하는 단계(308)(단계(308')로 예시됨)를 포함하며, 회전식 인터페이스(53)를 회전시키는데 필요한 힘(F_{RI})은 타겟 부위에 대해 척추경 나사(PS)를 회전시키는데 필요한 시뮬레이션된 현재 힘(F_{SPS})을 반영하는, 상기 단계(306)의 인스턴스; 및 수술 툴(30)을 제어하여 척추경 나사(PS)를 회전시키는 능력 없이 그리고 수술 툴(30)의 시뮬레이션된 자율 제어를 제어하는 능력 없이 시뮬레이션된 현재 힘(F_{SPS})을 반영하는 햅틱 피드백을 조작자에게 제공하기 위해 조절된 힘(F_{RI})에 따라 회전식 인터페이스(53)를 수동으로 조작하는 단계(316)를 포함한다.

[0236] 도 15e는 시뮬레이션된 자율 검사 모드의 예시적인 단계들을 예시한다. 도시된 바와 같이, 시뮬레이션된 자율 검사 모드는 척추경 나사(PS)를 회전시키기 위해 수술 툴(30)을 제어하는 능력 없이 그리고 회전식 인터페이스(53)를 수동으로 조작하는 조작자에 기초하여 척추경 나사(PS)의 회전 속도 또는 척추경 나사(PS)의 전진 속도 중 하나를 제어하는 능력으로 회전식 인터페이스(53)를 수동으로 조작하는 단계(318); 회전식 인터페이스(53)가 척추경 나사(PS)의 회전 속도 또는 척추경 나사(PS)의 전진 속도 중 하나를 제어하도록 수동으로 조작되는 것에 응답하여, 회전축을 중심으로 한 회전 속도로 척추경 나사(PS)를 회전시키고, 계획된 궤적(LH)을 따라 전진 속도로 척추경 나사(PS)를 선형으로 전진시켜 수술 툴(30)을 수동으로 제어하는 것을 시뮬레이션하는 단계(320); 수술 툴(30)의 시뮬레이션된 수동 제어를 디스플레이(18) 상에 디스플레이하는 단계(322); 앞서 설명된 단계(304'); 앞서 설명된 단계(308')를 포함하는 앞서 설명된 단계(306'); 및 척추경 나사(PS)를 회전시키기 위해 수술 툴(30)을 제어하는 능력 없이 시뮬레이션된 현재 힘(F_{SPS})을 반영하는 햅틱 피드백을 조작자에게 제공하기 위해 조절된 힘(F_{RI})에 따라 회전식 인터페이스(53)를 수동으로 조작하는 단계(324)를 포함한다.

[0237] 도 15a를 참조하면, 점선 박스는 척추경 나사(PS)를 삽입하기 위해 수술 툴(30)을 자율적으로 제어하는 단계(214)를 예시한다. 해부학적 구조를 준비하는 단계(202) 및 척추경 나사(PS)를 수술 툴(30) 상에 배치하는 단계(204) 이후, 단계(214)는 단계들(206, 208, 210) 및 자율 검사 모드 중 어느 하나와 동시에 발생할 수 있다. 앞서 언급된 바와 같이, 수동 제어 모드, 시뮬레이션된 자율 검사 모드, 및 시뮬레이션된 수동 제어 모드 동안, 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 수술 툴(30)을 자율적으로 제어하고 있지 않는다. 이와 같이, 하나 이상의 컨트롤러들(33)이 수동 제어 모드, 시뮬레이션된 자율 검사 모드, 및 시뮬레이션된 수동 제어 모드 중 어느 하나를 개시하는 경우, 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 단계(214)의 실행을 중단하고 수술 툴(30)의 자율 제어를 중지한다(하나 이상의 컨트롤러들(33)이 수술 툴(30)를 자율적으로 제어하고 있는 경우). 그러나, 단계들(206, 208, 210) 중 어느 하나의 단계 동안 또는 자율 검사 모드 동안 임의의 시간에, 단계(214)가 실행될 수 있고, 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 수술 툴(30)의 자율 제어를 동시에 개시할 수 있다.

[0238] 수술 툴(30)을 자율적으로 제어하는 단계(214)가 도 15g에 추가로 예시된다. 도시된 바와 같이, 방법은 타겟 부위의 위치를 추적하는 단계(400); 원하는 궤적을 따라 회전축(R)을 배치하는 단계(402); 타겟 부위의 추적된 위치에 기초하여 타겟 부위에 대해 계획된 궤적(LH)을 따라 수술 툴(30)의 회전 축(R)을 유지하도록 로봇 조작기의 움직임을 제어하는 단계(404); 및 회전축(R)을 중심으로 한 회전 속도로 척추경 나사(PS)를 회전시키고 계획된 궤적(LH)을 따라 전진 속도로 척추경 나사(PS)를 선형으로 전진시키기 위해 수술 툴(30)을 자율적으로 제어하는 단계(406)로서, 회전 속도 및 전진 속도는 미리 결정되고 척추경 나사(PS)의 공지된 나사산 기하학적 형상에 비례하는, 상기 단계(406)를 포함한다.

[0239] 단계(400) 동안, 타겟 부위의 위치가 추적된다. 초음파 트랜스듀서(도시되지 않음)는 환자의 해부학적 구조 및 수술 절차의 진행의 실시간 이미지들을 생성하기 위해 환자의 피부의 배면에 장착될 수 있다. 수술 중 이미지들은 척추경 나사(PS)가 계획된 원하는 궤적을 따른다고 결정하거나, 드릴(42) 또는 척추경 나사(PS)가 신경 및 내측 또는 외측 피질 경계를 포함하는 임의의 임계 구조들에 가까워지고 있는지를 결정하는데 사용될 수 있다.

[0240] 단계(402) 동안, 회전축(R)은 계획된 궤적(LH)과 정렬된다. 수술 계획에 따라, 도 9에서와 같이, 회전축(R)이 계획된 궤적(LH)과 아직 정렬되지 않은 경우, 또는 회전축(R)이 다른 이유로 원하는 궤적으로부터 멀리 이동된 경우, 회전축(R)은 단계(402)에서 정렬된다. 구체적으로, 단계(402)에서, 로봇 수술 시스템(10)은 회전축(R)을 원하는 궤적을 따라 배치하기 위해 수술 툴(30)의 움직임을 제어한다. 이는 회전축(R)을 원하는 궤적을 따라 배

치하기 위해 수술 툴(30)의 자율 움직임을 유발하는 로봇 수술 시스템(10)을 포함할 수 있다. 대안적으로, 로봇 수술 시스템(10)은 회전축(R)이 계획된 궤적(LH)을 따라 배치될 때까지 수동 모드에서 힘/토크를 인가함으로써 조작자가 수술 툴(30)을 이동시키도록 할 수 있다. 로봇 수술 시스템(10)은 적절한 정렬을 나타내기 위해 수술자에게 피드백(시각적, 청각적, 및/또는 햅틱)을 생성할 수 있다. 일부 예들에서, 매력적인 햅틱들은, 툴의 위치가 매력적인 햅틱들에 의해 정의된 임계 거리만큼 계획된 궤적(LH) 근처에 있을 때 계획된 궤적(LH)을 향해 툴(30)을 당기기는 데 이용될 수 있다.

[0241] 단계(406) 동안, 로봇 수술 시스템(10)은 수술 툴(30)의 자율 움직임이 계획된 궤적(LH)을 따라 선형으로 툴의 자율 전진을 동시에 제어하면서, 또한 회전축(R)을 중심으로 한 수술 툴의 자율 회전을 제어하게 한다. 전진 및 회전의 자율 제어는 상기에 설명된 방정식(식 1)에 의해 정의된 나사산 피치와 관련된다. 나사산 피치에 의해 지시되는 자율 제어는 주변 골격 조직에 손상을 야기하는 것을 방지하기 위해 척추경 나사의 적절한 설치를 보장한다.

[0242] 단계(214)는 다수의 대안들에서 조작자에 의해 명령될 수 있다. 제1 예에서, 로봇 수술 시스템(10)은 완전한 자율성으로 실행되도록 구성될 수 있다. 즉, 일단 조작자가 수술 툴(30)의 자율 제어를 수행하도록 로봇 수술 시스템(10)에 명령하면, 로봇 수술 시스템(10)은 조작이 완료될 때까지 어떠한 추가의 조작자 입력도 없이 자율 제어를 수행한다. 대안적인 예에서, 조작자는 동작의 자율 실행을 개시한 다음, 버튼을 누르고 유지함으로써, 풋 스위치를 누르고 유지함으로써, 또는 입력이 중단되는 경우, 예를 들어 버튼 또는 풋 스위치가 해제되는 경우, 로봇 수술 시스템(10)이 동작의 실행을 일시정지하도록 하는 다른 연속 입력 제어와 같은 연속 입력을 제공할 수 있다. 자율 제어와 협력하여, 조작자는 동작이 실행되는 속도를 변조할 수 있다. 버튼 또는 풋스위치 외에, 조작자가 다수의 이산 속도들을 갖는 단계별(step-wise) 함수에서 로봇 속도의 증가 또는 감소를 명령할 수 있도록 추가적인 제어가 제공될 수 있다. 추가적인 속도 제어는 버튼들, 선택기들, 다이얼들, 또는 다른 적절한 제어의 세트를 포함할 수 있다.

[0243] 도 15a를 참조하면, 단계(206) 동안, 로봇 수술 시스템(10)은 동작이 종료되었는지 여부를 결정한다. 동작은 다양한 방법들을 이용하여 종료된 것으로 결정될 수 있다. 예를 들어, 조작자가 모든 척추경 나사(PS)가 원하는 깊이로 이식되었다고 결정하는 경우, 조작자는 동작의 종료를 명령할 수 있다. 다른 예로서, 조작자가 주관적으로 동작의 종료를 결정하면, 조작자는 동작의 종료를 명령할 수 있다. 또 다른 예에서, 하나 이상의 컨트롤러들(33)이 모든 척추경 나사(PS)가 원하는 깊이로 삽입된다고 결정하는 경우, 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 동작의 종료를 트리거할 수 있다. 그러나, 일부 예들에서, 척추경 나사(PS)가 원하는 깊이로 이식된 후, 동작은 종료되지 않았다. 이러한 예들에서, 방법은 다른 척추경 나사(PS)에 대해 도 15a의 방법의 단계들을 반복하고 모든 척추경 나사(PS)가 이식될 때까지 계속될 수 있다.

[0244] 로봇 수술 시스템(10)이 단계(206) 동안 동작이 종료되었다고 결정한 경우, 방법은 수술 툴(30)이 타겟 부위에 삽입되었는지 여부를 결정하는 단계(216)로 진행한다. 단계(216) 동안, 하나 이상의 컨트롤러들(33)은 수술 툴(30)의 위치 및 수술 툴(30)이 타겟 부위에 삽입되었는지 여부를 결정할 수 있다. 로봇 수술 시스템(10)이 수술 툴(30)이 삽입되지 않았다고 결정하는 경우, 방법은 단계(218), 즉 동작의 종료로 진행한다. 로봇 수술 시스템(10)이 수술 툴(30)가 삽입되었다고 결정하는 경우, 방법은 단계(218)의 종료로 진행하기 전에 툴을 회수하는 단계(220)로 진행한다.

[0245] 단계(220) 동안, 수술 툴(30)은 임플란트로부터 회수된다. 척추경 나사(PS)를 골격 내로 전진시키는 것과 같이, 조작자는 수술 툴(30)의 회수를 명령하기 위해 척추골(V)로부터 멀어지는 방향으로 수술 툴(30)에 힘을 입력할 수 있다. 대안적으로, 로봇 수술 시스템(10)은 일단 임플란트가 배치되면 조작자로부터 추가의 입력 없이 수술 툴(30)을 자율적으로 회수할 수 있다.

[0246] 척추경 나사(PS)의 헤드의 최종 수용을 위한 매끄러운 골격 표면을 제공하기 위해 수술 툴(30)에 의해 부분적인 관절면절제(partial facetectomy)가 수행될 수 있다. 절제(resection) 체적은 조작자의 계획에 기초하여, 즉 3-D 모델에서 머리의 위치를 결정함으로써 정의될 수 있다. 머리 형상에 대응하는 버(bur) 또는 미리-형성된 리머(reamer)(70)가 물질을 제거하는 데 사용될 수 있다. 일부 경우에, 드릴(42)은 드릴(42)이 파일럿 홀들을 생성하기 위해 더 작은 프로파일 드릴링 샤프트를 갖고, 척추경 나사(PS)의 헤드를 위한 시트(seat)(72)를 생성하기 위해 리머(70)가 더 근접하게 위치되도록 별도의 툴들을 피하기 위해 내부에 리머를 통합할 수 있다 - 따라서 파일럿 홀들(102) 및 시트(72)의 적어도 일부가 동시에 형성될 수 있다. 도시된 예에서, 드릴(42)은 근위 단부 및 원위 단부를 갖는 드릴링 샤프트 및 원위 단부에 드릴 팁(drill tip)을 갖는다. 리머(70)는 일단 드릴(42)이 타겟 척추체 내의 원하는 깊이로 삽입되면 리머(70)는 패싯(facet) 근처에 위치되도록 드릴 팁으로부터

근위방향으로 이격된다. 임의의 적합한 드릴 및/또는 리머 절삭 특징들은 홀을 형성하기 위해, 예를 들어 임플란트를 수용하기 위해 환자의 척추에 파일럿 홀 및 시트를 형성하기 위해 사용될 수 있다.

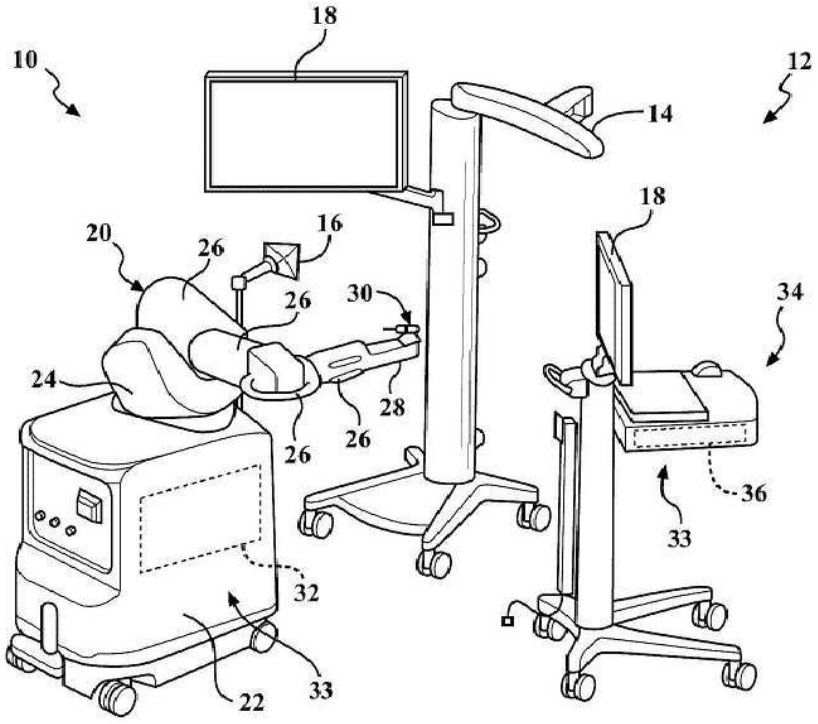
[0247] 본원에 설명된 시스템들 및 방법들은 척추경 나사(PS), 다른 나사, 패스너(fastener), 또는 다른 임플란트를 환자에게 배치하는 데 사용될 수 있다는 것이 이해되어야 한다. 따라서, 척추경 나사(PS)가 일례로서 전체적으로 참조되더라도, 본원에 설명된 동일한 시스템들 및 방법들은 환자의 임의의 해부학적 구조를 치료하기 위해 및/또는 환자 내로, 예를 들어, 엉덩이, 무릎, 대퇴골, 경골, 얼굴, 어깨, 척추 등에 임의의 임플란트들을 배치하기 위해 이용될 수 있다. 예를 들어, 로봇 팔(20)은 척추 임플란트를 위한 케이지(cage)를 배치하거나, 로드(rod)들을 배치하거나, 핀(pin)들을 구동시키거나, 나사형 컵을 이식하거나, 다른 컴포넌트들을 배치하는 데 사용될 수 있으며, 고관절 교체, 추간판 절제술(discectomy), 또는 기타 수술들에 사용될 수 있다. 상이한 엔드 이펙터들이 또한 다른 수술들을 위해 로봇 아암(20)에 부착될 수 있다. 일부 경우들에서, 엔드 이펙터는 또한 임플란트 삽입을 용이하게 하기 위해, 즉 원하는 포즈로 임플란트를 배치하기 위해 관절형 아암(articulating arm)을 가질 수 있다. 엔드 이펙터의 관절형 아암은 단순히 임플란트를 배치하기 위해 동일한 방식으로 제어되는 로봇 아암(20)의 소형 버전일 수 있거나, 임플란트를 포지셔닝하기 위해 제어되는 다른 메커니즘일 수 있다.

[0248] 내비게이션 시스템(12)은 광학 기반 추적기들을 갖는 광학 내비게이션 시스템을 포함할 수 있지만, 추가적으로 또는 대안적으로, 초음파를 통해 객체들을 추적하는 초음파 내비게이션 시스템들, RF 에너지를 통해 객체들을 추적하는 무선 주파수 내비게이션 시스템들, 및/또는 전자기 신호들을 통해 객체들을 추적하는 전자기 내비게이션 시스템들과 같은 다른 모달리티들을 이용할 수 있다. 다른 유형의 내비게이션 시스템들이 또한 고려된다. 또한, 본원에 설명된 모델들은 삼각측량 메쉬들, 복셀들을 사용하는 체적 모델들, 또는 일부 경우에 다른 유형들의 3-D 및/또는 2-D 모델들을 포함할 수 있다는 것이 이해되어야 한다.

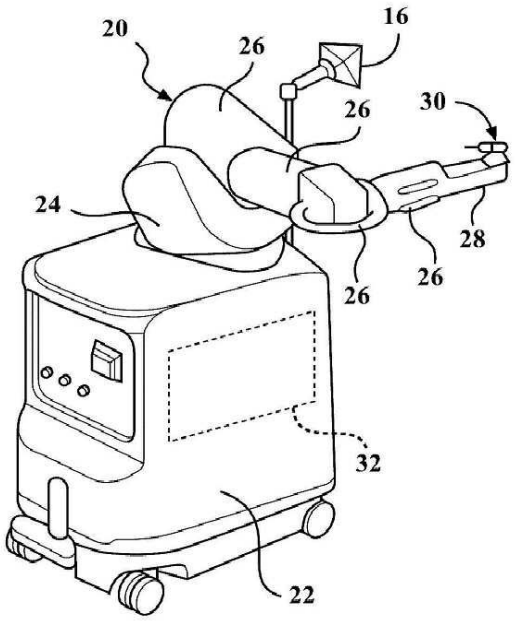
[0249] 몇몇 인스턴스들이 전술한 설명에서 논의되었다. 그러나, 본원에 논의된 인스턴스들은 본 개시를 임의의 특정 형태로 한정하거나 총망라하도록 의도되지 않는다. 사용된 용어는 제한이라기 보다는 설명의 단어에 속하기 위한 것이다. 많은 수정들 및 변형들이 상기 교시들에 비추어 가능하고 본 개시는 특별히 설명된 것과 달리 실시될 수 있다.

도면

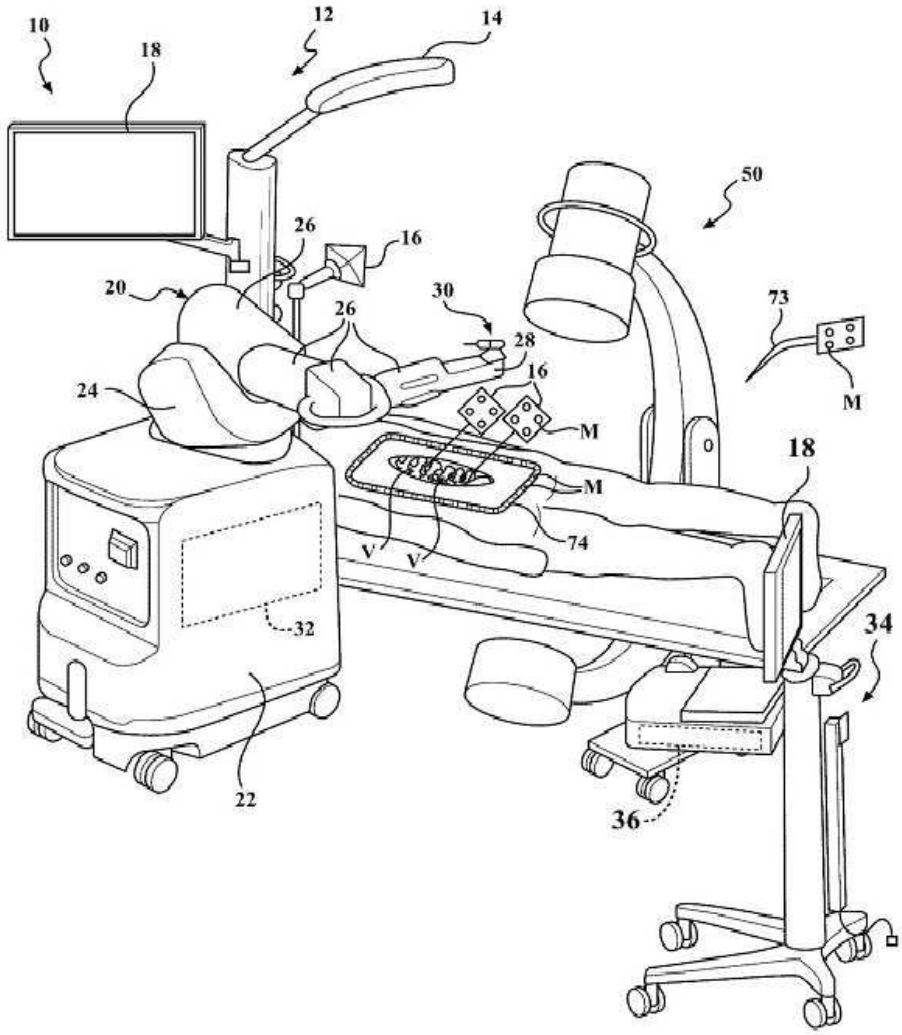
도면1



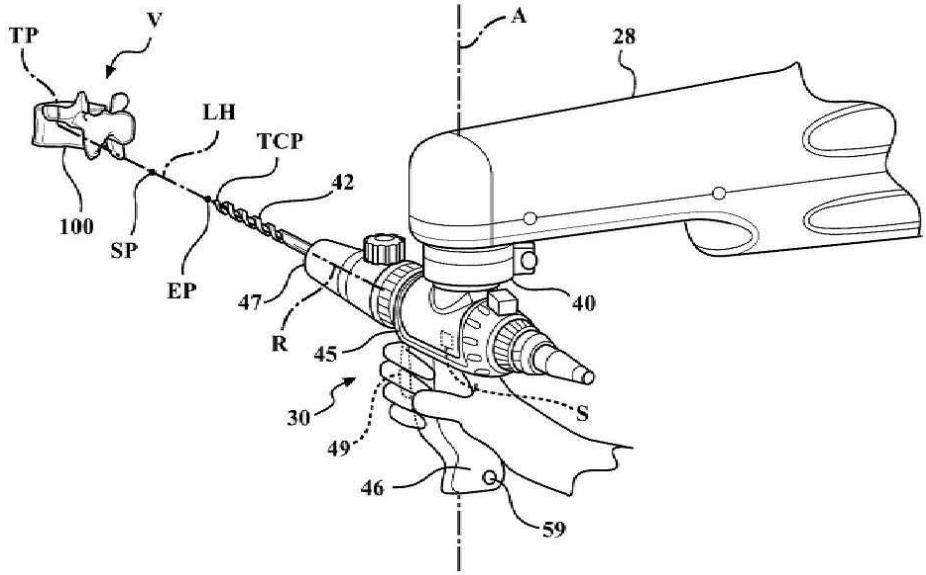
도면2


20
26
16
26
30
24
28
26
26
32
22

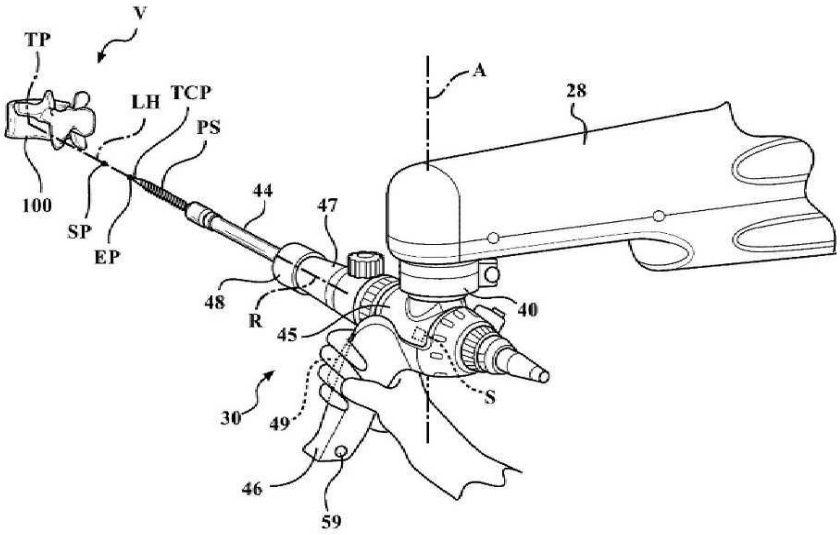
도면3


10
18
12
14
50
26
16
20
30
26
73
28
16
24
M
M
18
74
V
V
32
34
22
36

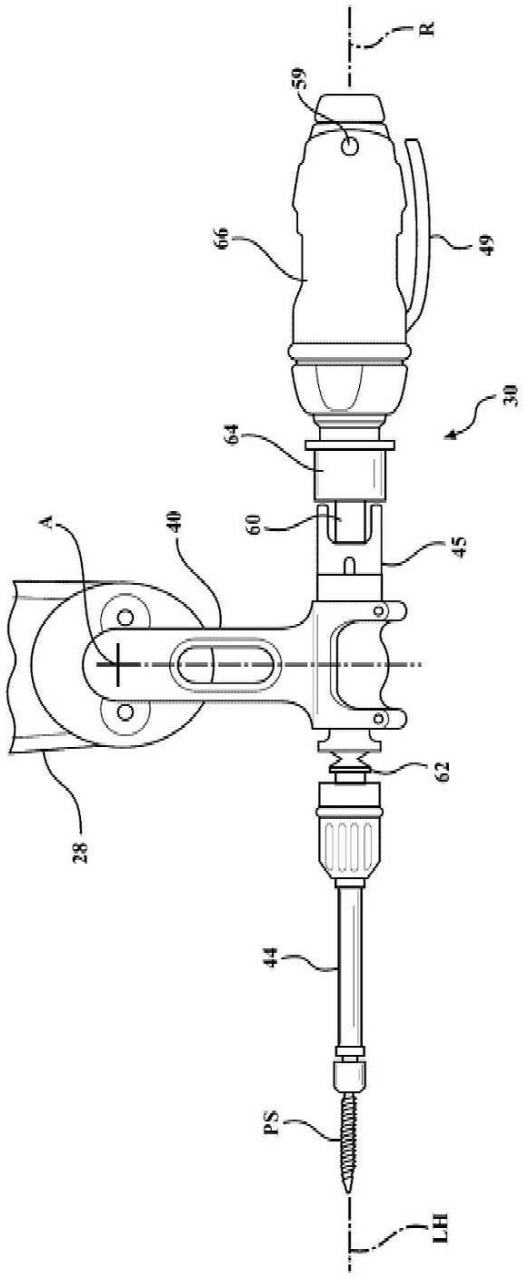
도면4


TP
V
A
28
LH
TCP
42
100
SP
EP
47
R
45
40
30
S
49
46
59

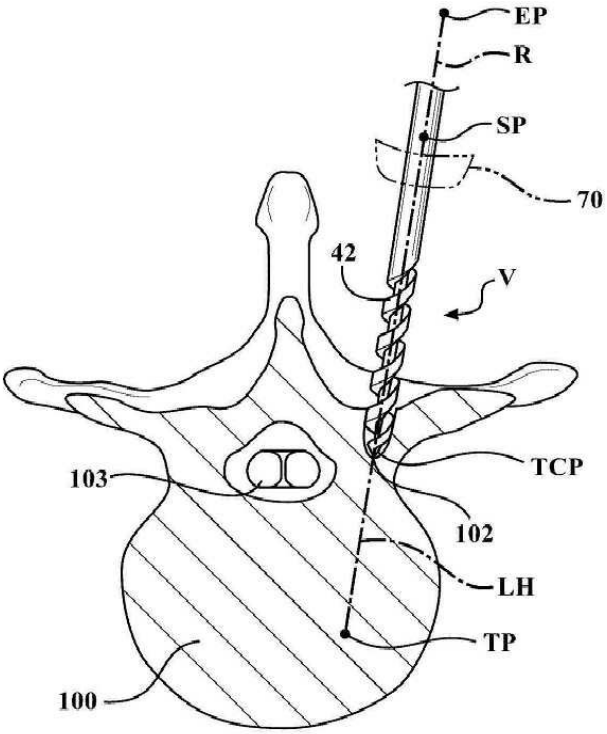
도면5


V
TP
A
28
LH
TCP
PS
44
47
100
SP
EP
48
R
45
40
30
S
49
46
59

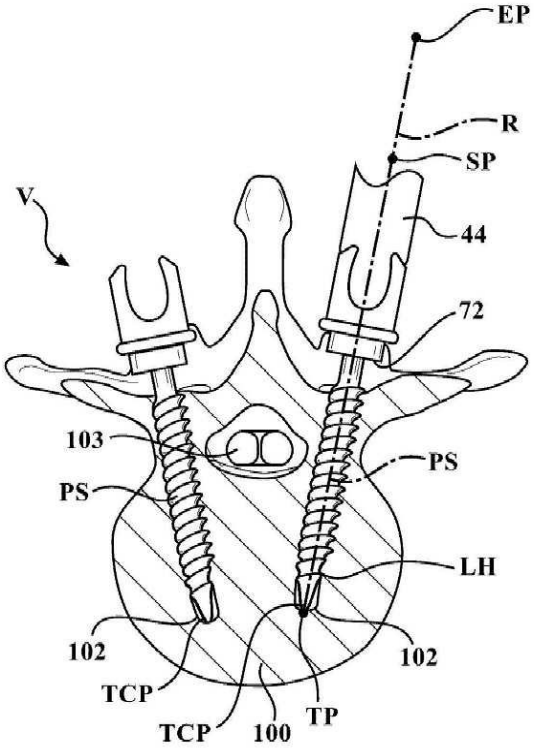
도면6



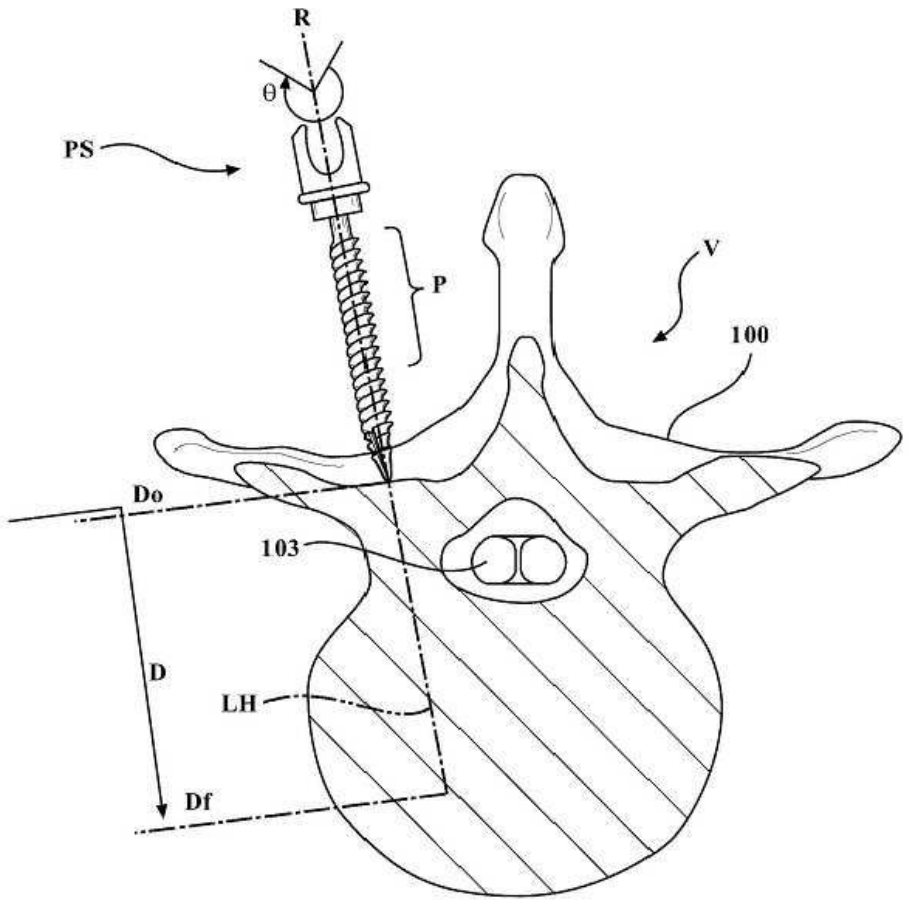
도면7


EP
R
SP
70
42
V
103
TCP
102
LH
TP
100

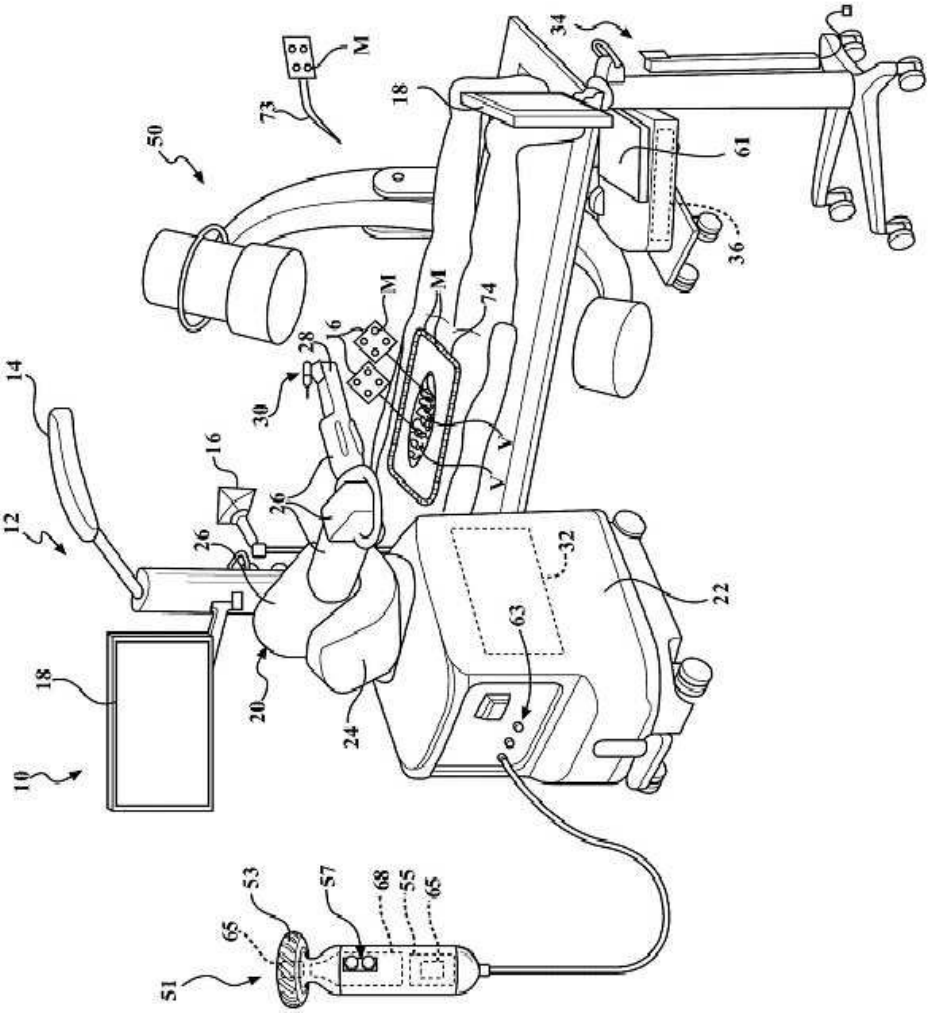
도면8


EP
R
SP
V
44
72
103
PS
PS
LH
102
102
TCP
TCP
100
TP

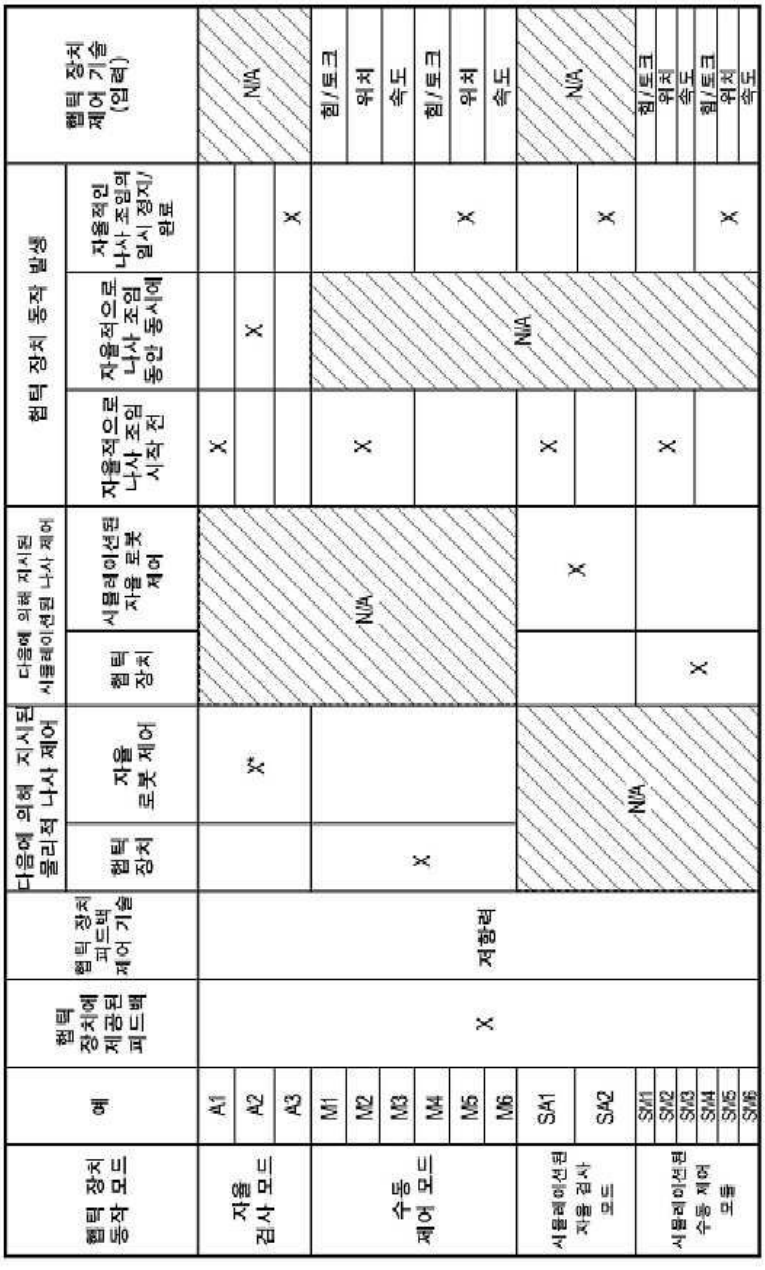
도면9



도면10


50
73
M
18
34
61
36
M
M
74
V
V
28
16
30
14
16
26
12
26
32
22
63
18
20
24
10
53
57
68
55
65
65
51

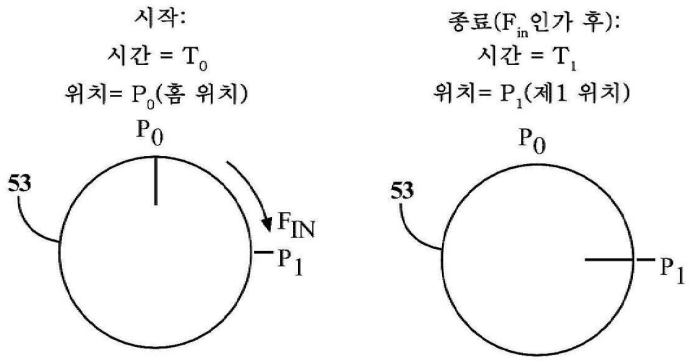
도면11a


A
B
C
D
E
F
G
햅틱 장치 동작 모드
예
햅틱 장치에 제공된 피드백
햅틱 장치 피드백 제어 기술
다음에 의해 지시된 물리적 나사 제어
다음에 의해 지시된 시뮬레이션된 나사 제어
햅틱 장치 동작 발생
햅틱 장치 제어 기술 (입력)
햅틱 장치
자율 로봇 제어
시뮬레이션된 자율 로봇 제어
자율적으로 나사 조임 시작 전
자율적으로 나사 조임 동안 동시에
자율적인 나사 조임의 일시 정지/완료
자율 검사 모드
수동 제어 모드
시뮬레이션된 자율 검사 모드
시뮬레이션된 수동 제어 모듈
A1
A2
A3
M1
M2
M3
M4
M5
M6
SA1
SA2
SM1
SM2
SM3
SM4
SM5
SM6
X
저항력
X*
N/A
힘/토크
위치
속도
* 선택적

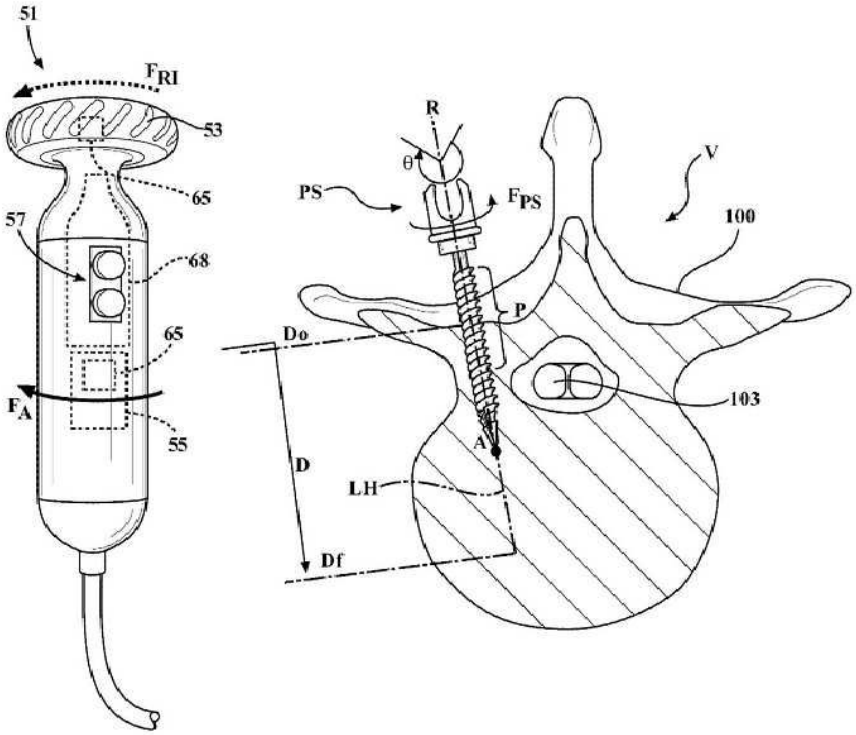
도면11b

A	B	C	D
햅틱 장치 (입력)	컨트롤러 측정		툴 제어(출력)
힘/토크	F_{in}	회전 위치	나사 회전 각도에 매핑된 입력 힘
		삽입 깊이	나사 삽입 깊이에 매핑된 입력 힘
		토크	나사에 인가된 토크에 매핑된 입력 힘
		속도	나사 삽입 속도에 매핑된 입력 힘
위치	P_1 변위 P_1-P_0	회전 위치	나사 회전 각도(들)에 매핑된 입력 위치 또는 변위
		삽입 깊이	나사 삽입 깊이에 매핑된 입력 위치 또는 변위
		토크	나사에 인가된 토크 레벨에 매핑된 입력 위치 또는 변위
		속도	나사 삽입의 속도에 매핑된 입력 위치 또는 변위
속도	$\frac{P_1-P_0}{T_1-T_0}$	회전 위치	나사의 위치에 매핑된 입력 속도
		삽입 깊이	나사 삽입 깊이에 매핑된 입력 속도
		토크	나사에 인가된 토크에 매핑된 입력 속도
		속도	나사 삽입 속도에 매칭된 입력 속도

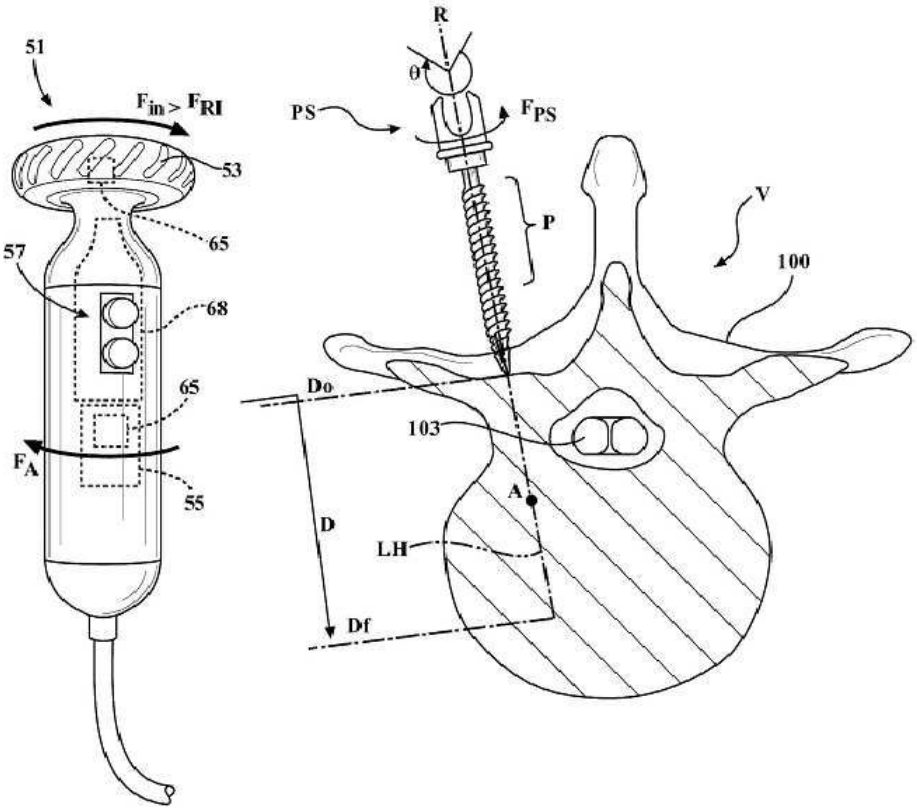
도면11c


시작:
시간 = T_0
위치= P_0(홈 위치)
P_0
53
F_{IN}
P_1
종료(F_{in}인가 후):
시간 = T_1
위치= P_1(제1 위치)
P_0
53
P_1

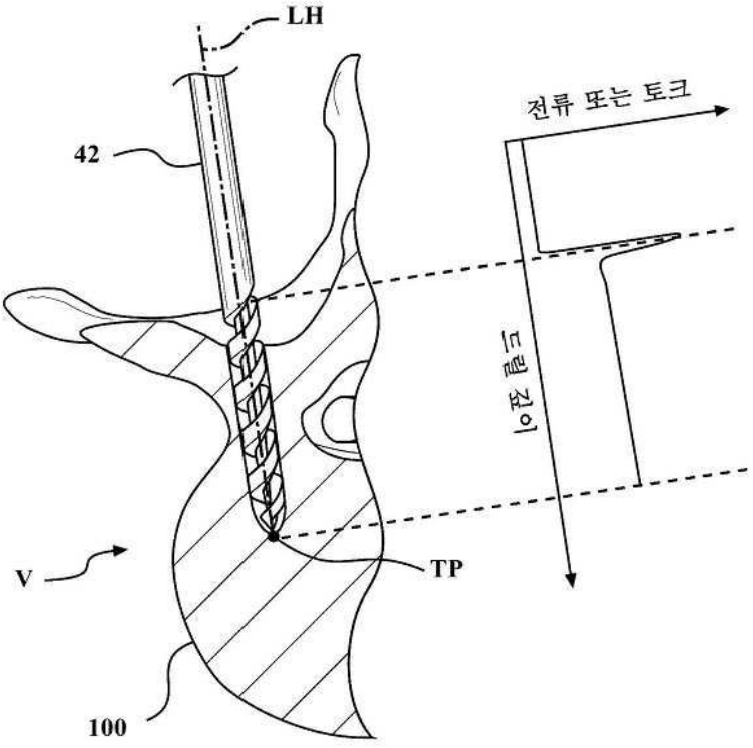
도면12a


51
F_{RI}
53
65
57
68
65
F_A
55
R
θ
PS
F_{PS}
V
100
P
Do
103
A
D
LH
Df

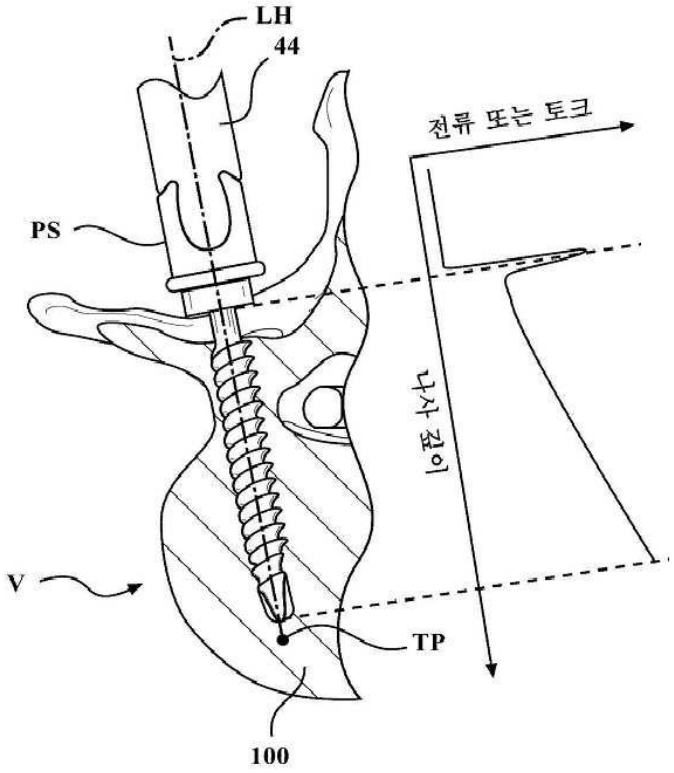
도면12b


51
$F_{in} > F_{RI}$
53
65
57
68
65
F_A
55
R
θ
PS
F_{PS}
P
V
100
Do
103
A
D
LH
Df

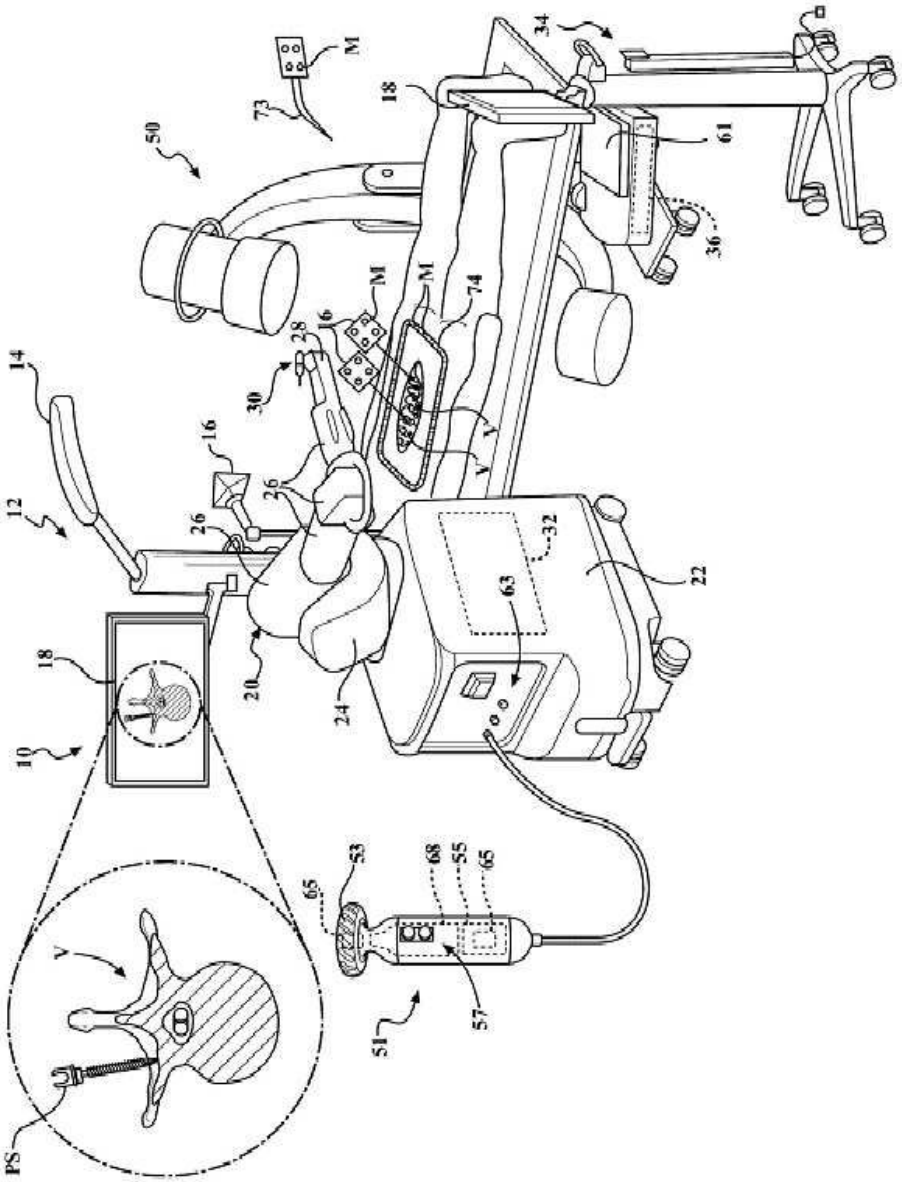
도면13a


LH
42
전류 또는 토크
트랙 전이
V
TP
100

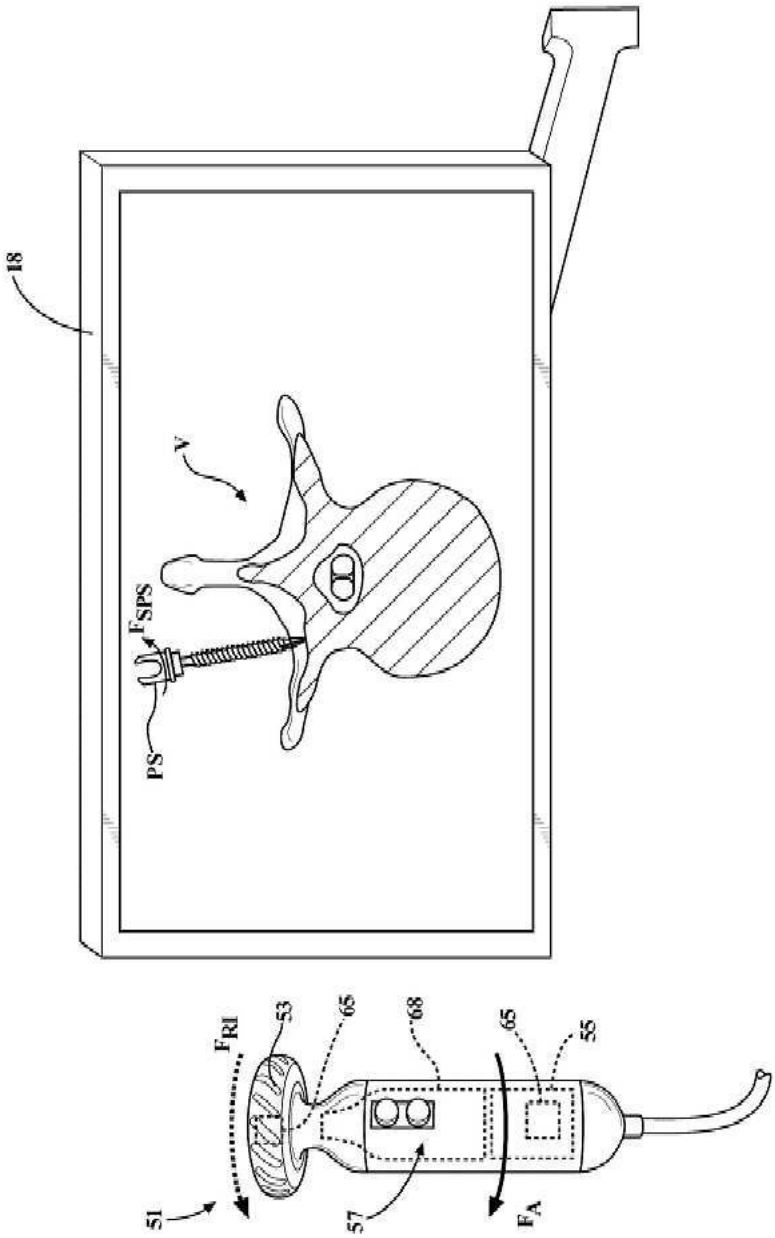
도면13b



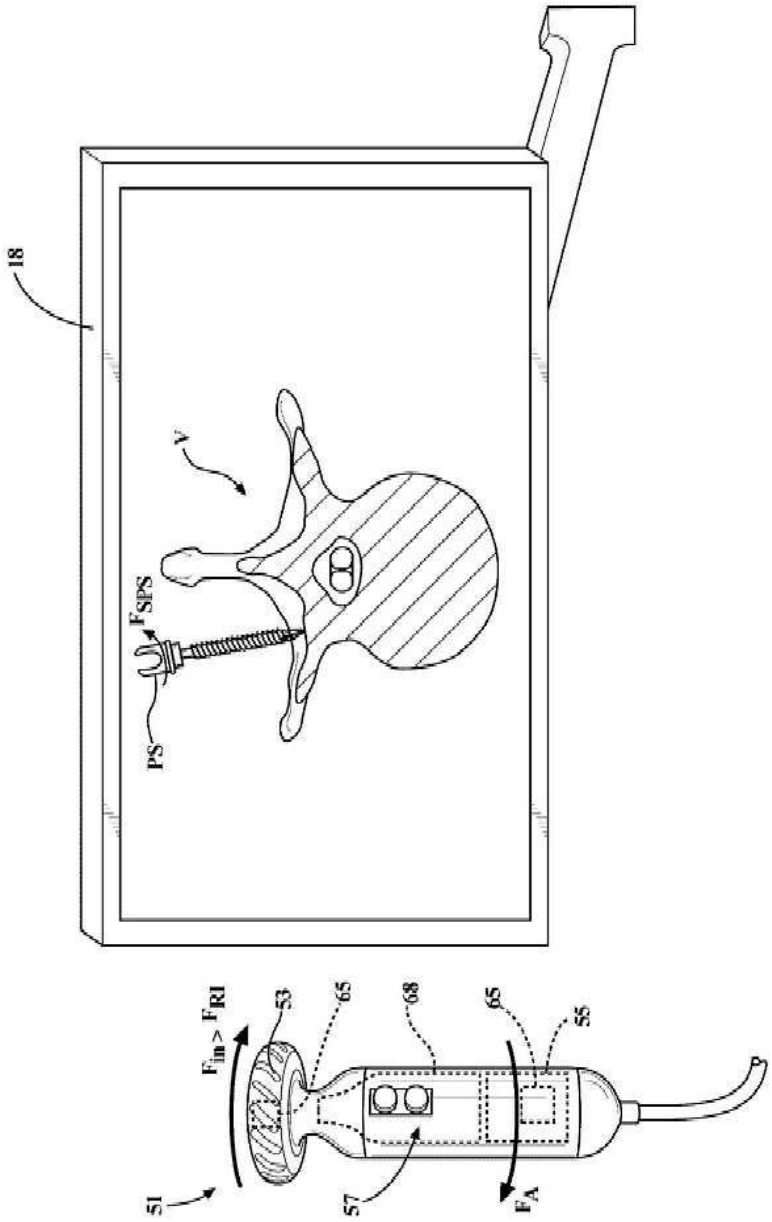
도면14a


50
73
M
18
34
61
36
74
28
16
30
14
12
26
32
22
63
20
24
10
53
68
55
65
57
51
V
PS

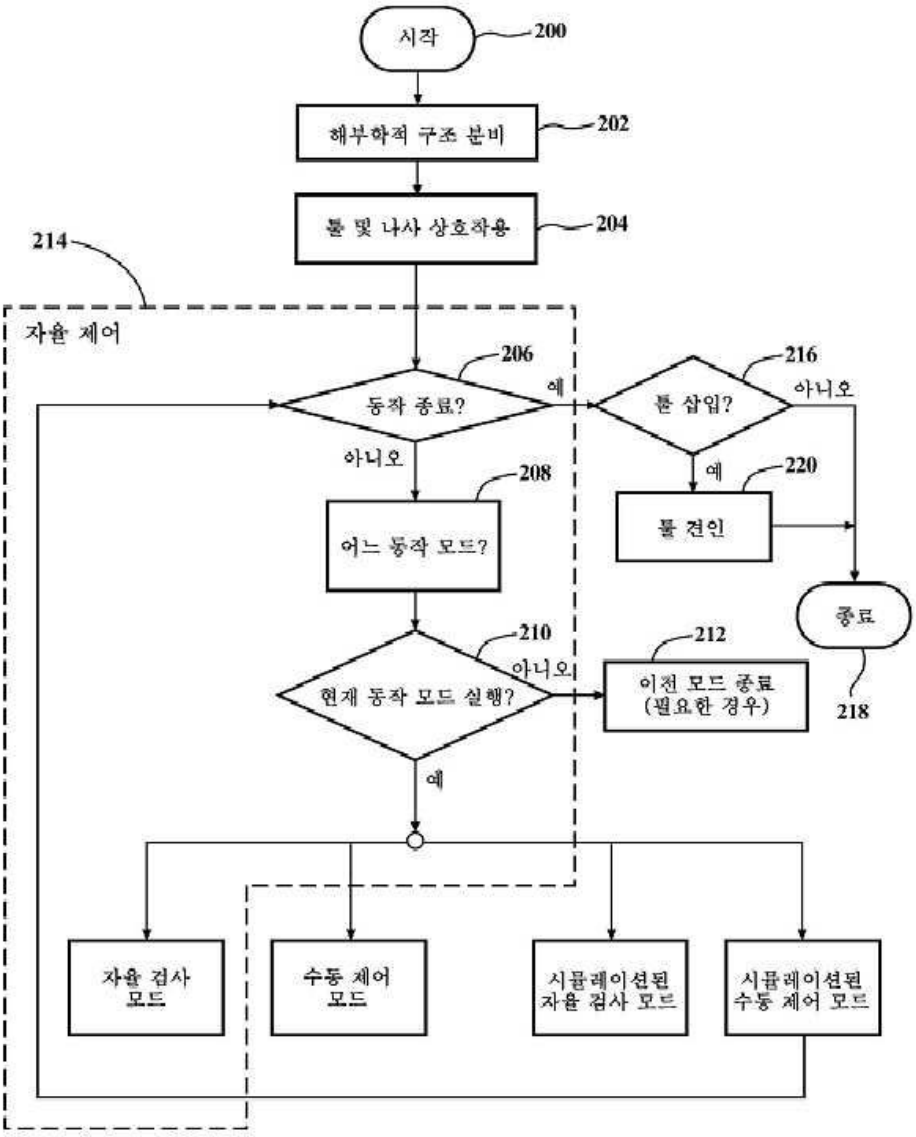
도면14b



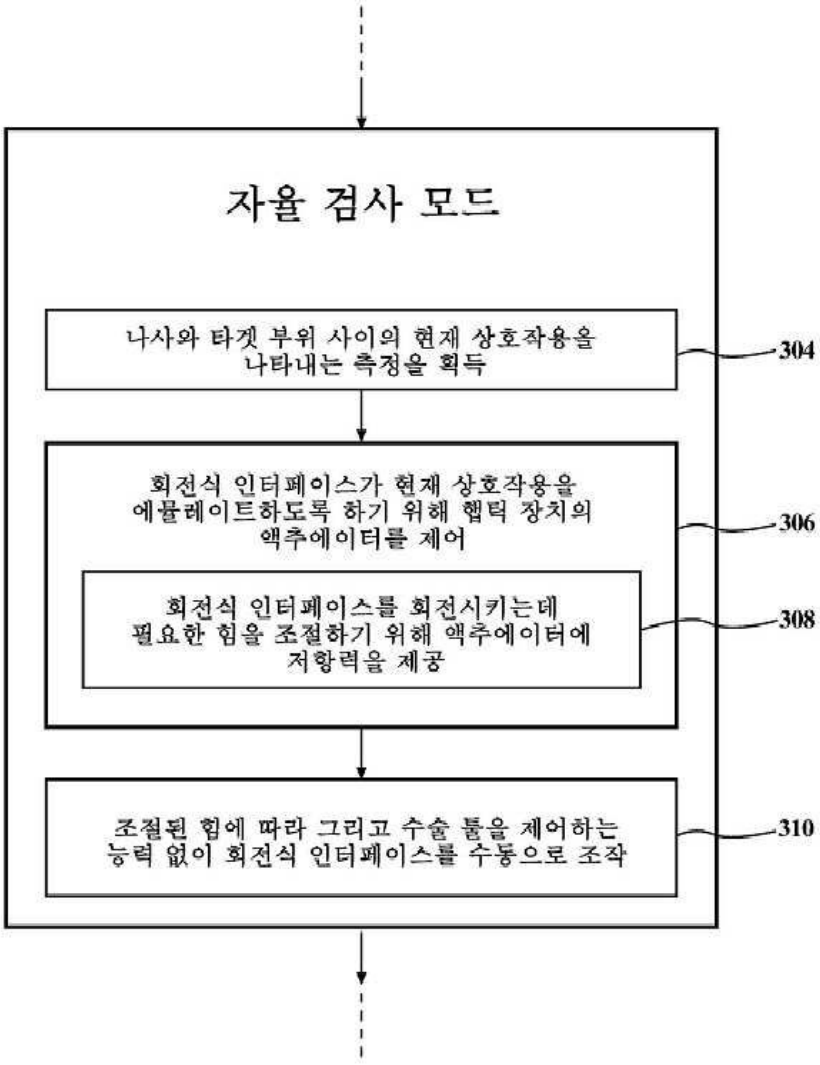
도면14c



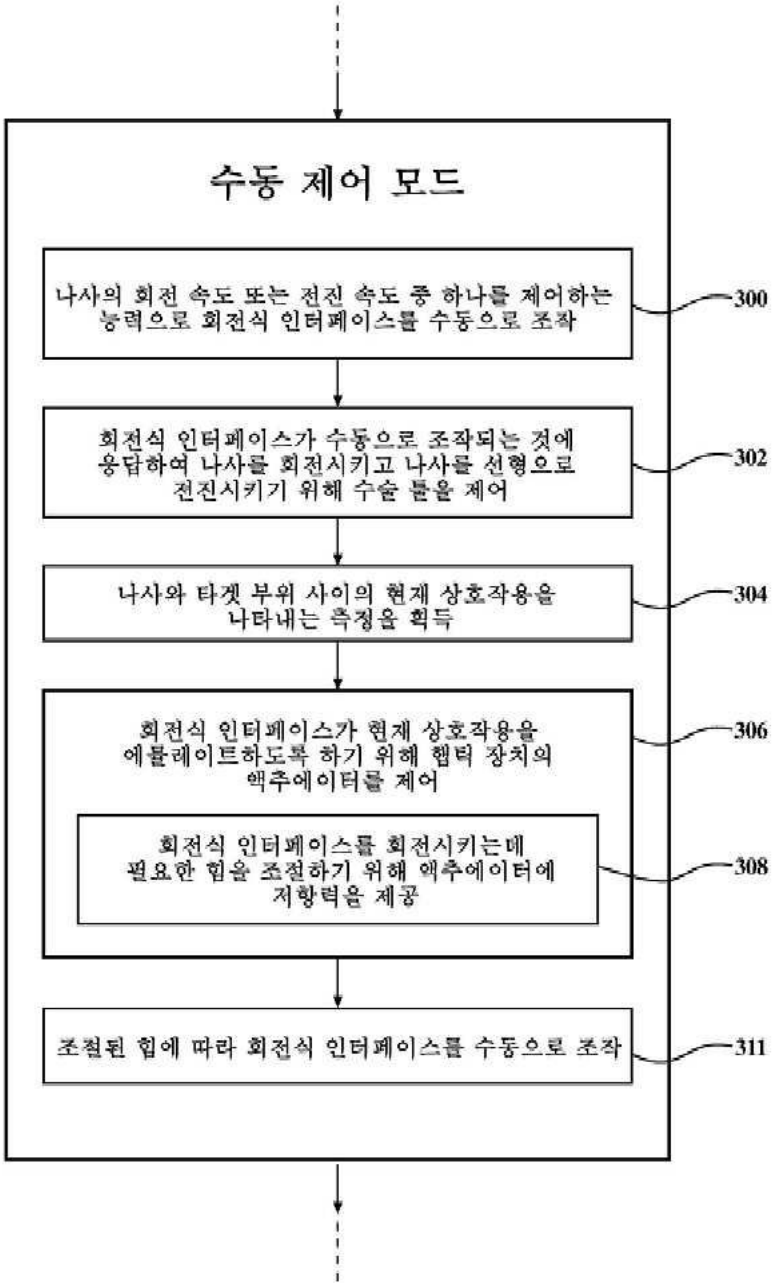
도면15a


시작
200
해부학적 구조 분비
202
툴 및 나사 상호작용
204
214
자율 제어
206
동작 종료?
예
아니오
216
툴 삽입?
아니오
예
208
어느 동작 모드?
220
툴 견인
종료
218
210
현재 동작 모드 실행?
아니오
212
이전 모드 종료
(필요한 경우)
예
자율 검사
모드
수동 제어
모드
시뮬레이션된
자율 검사 모드
시뮬레이션된
수동 제어 모드

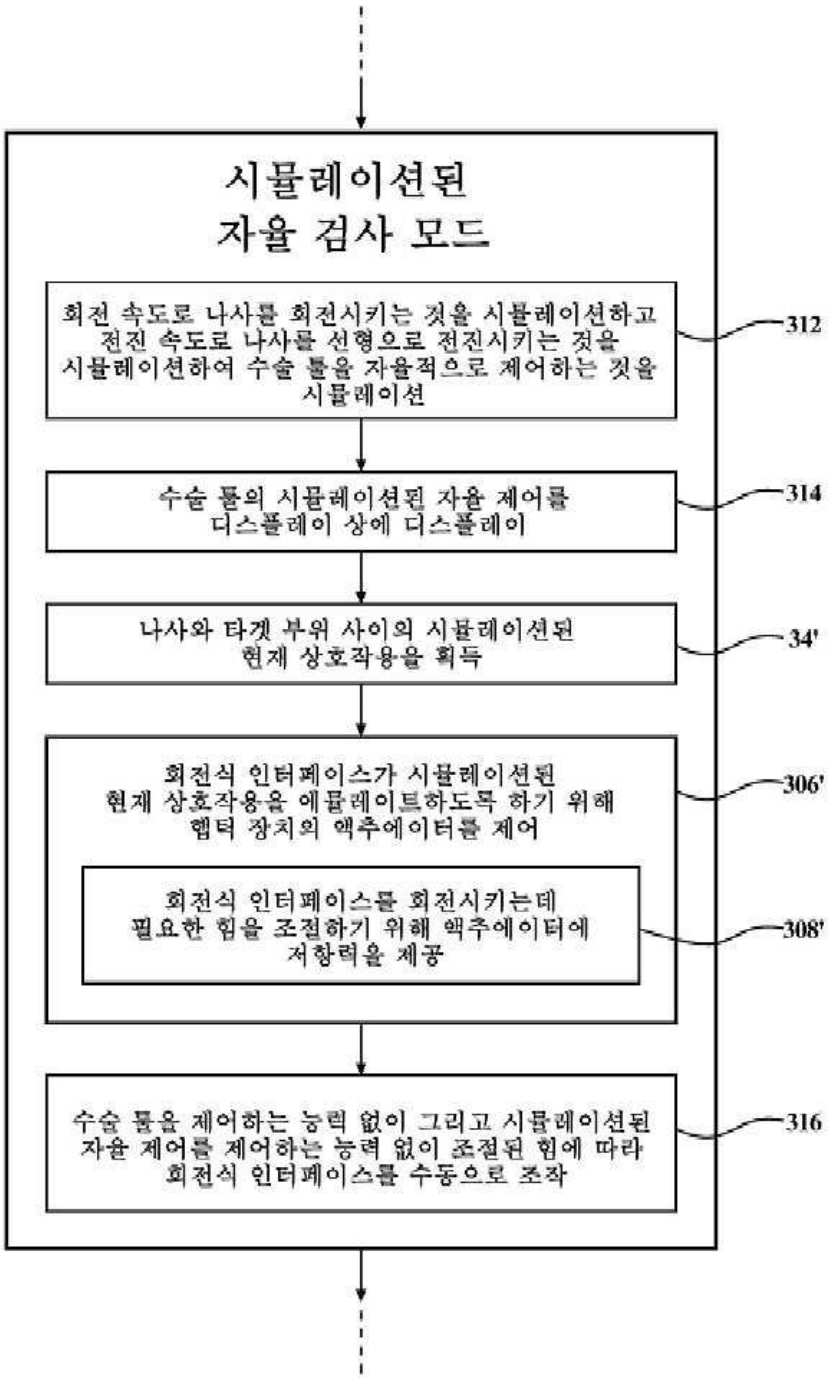
도면15b


자율 검사 모드
나사와 타겟 부위 사이의 현재 상호작용을 나타내는 측정을 획득
304
회전식 인터페이스가 현재 상호작용을 에뮬레이트하도록 하기 위해 햅틱 장치의 액추에이터를 제어
306
회전식 인터페이스를 회전시키는데 필요한 힘을 조절하기 위해 액추에이터에 저항력을 제공
308
조절된 힘에 따라 그리고 수술 툴을 제어하는 능력 없이 회전식 인터페이스를 수동으로 조작
310

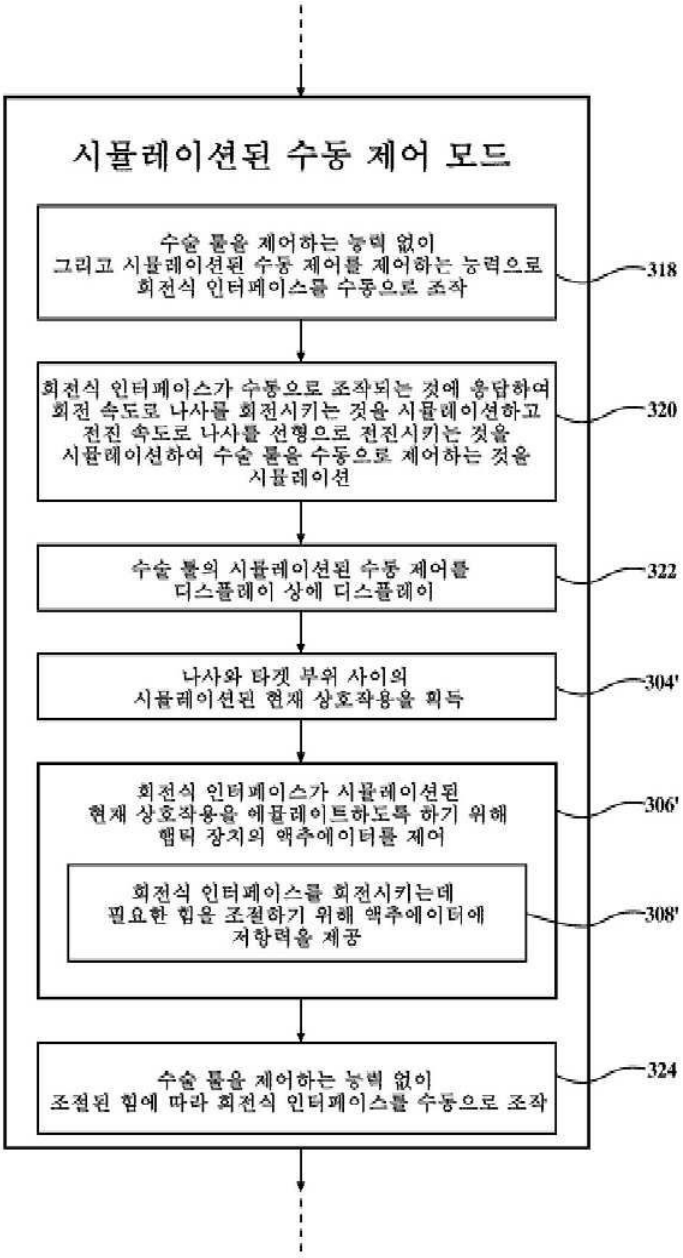
도면15c


수동 제어 모드
나사의 회전 속도 또는 전진 속도 중 하나를 제어하는 능력으로 회전식 인터페이스를 수동으로 조작
300
회전식 인터페이스가 수동으로 조작되는 것에 응답하여 나사를 회전시키고 나사를 선형으로 전진시키기 위해 수술 툴을 제어
302
나사와 타겟 부위 사이의 현재 상호작용을 나타내는 측정을 획득
304
회전식 인터페이스가 현재 상호작용을 에뮬레이트하도록 하기 위해 햅틱 장치의 액추에이터를 제어
306
회전식 인터페이스를 회전시키는데 필요한 힘을 조절하기 위해 액추에이터에 저항력을 제공
308
조절된 힘에 따라 회전식 인터페이스를 수동으로 조작
311

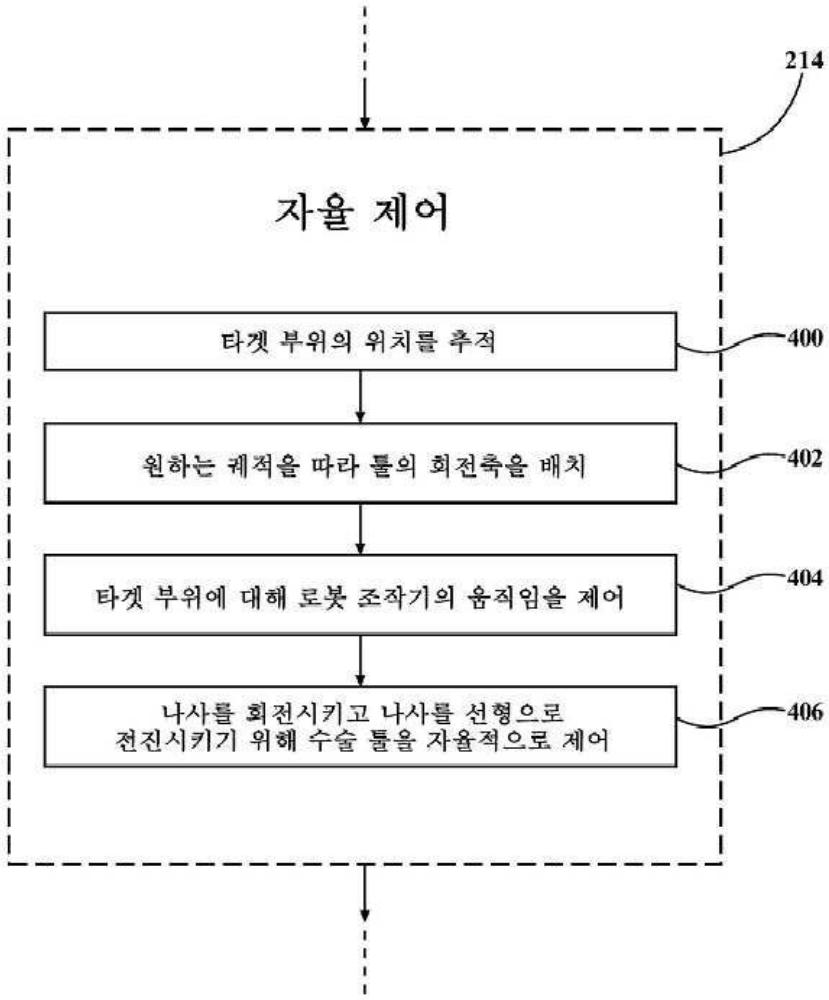
도면15d


시뮬레이션된
자율 검사 모드
회전 속도로 나사를 회전시키는 것을 시뮬레이션하고
전진 속도로 나사를 선형으로 전진시키는 것을
시뮬레이션하여 수술 툴을 자율적으로 제어하는 것을
시뮬레이션
312
수술 툴의 시뮬레이션된 자율 제어를
디스플레이 상에 디스플레이
314
나사와 타겟 부위 사이의 시뮬레이션된
현재 상호작용을 획득
34'
회전식 인터페이스가 시뮬레이션된
현재 상호작용을 에뮬레이트하도록 하기 위해
햅틱 장치의 액추에이터를 제어
306'
회전식 인터페이스를 회전시키는데
필요한 힘을 조절하기 위해 액추에이터에
저항력을 제공
308'
수술 툴을 제어하는 능력 없이 그리고 시뮬레이션된
자율 제어를 제어하는 능력 없이 조절된 힘에 따라
회전식 인터페이스를 수동으로 조작
316

도면15e


시뮬레이션된 수동 제어 모드
수술 툴을 제어하는 능력 없이
그리고 시뮬레이션된 수동 제어를 제어하는 능력으로
회전식 인터페이스를 수동으로 조작
318
회전식 인터페이스가 수동으로 조작되는 것에 응답하여
회전 속도로 나사를 회전시키는 것을 시뮬레이션하고
전진 속도로 나사를 선형으로 전진시키는 것을
시뮬레이션하여 수술 툴을 수동으로 제어하는 것을
시뮬레이션
320
수술 툴의 시뮬레이션된 수동 제어를
디스플레이 상에 디스플레이
322
나사와 타겟 부위 사이의
시뮬레이션된 현재 상호작용을 획득
304'
회전식 인터페이스가 시뮬레이션된
현재 상호작용을 에뮬레이트하도록 하기 위해
햅틱 장치의 액추에이터를 제어
306'
회전식 인터페이스를 회전시키는데
필요한 힘을 조절하기 위해 액추에이터에
저항력을 제공
308'
수술 툴을 제어하는 능력 없이
조절된 힘에 따라 회전식 인터페이스를 수동으로 조작
324

도면15f


214
자율 제어
타겟 부위의 위치를 추적
400
원하는 궤적을 따라 툴의 회전축을 배치
402
타겟 부위에 대해 로봇 조작기의 움직임을 제어
404
나사를 회전시키고 나사를 선형으로
전진시키기 위해 수술 툴을 자율적으로 제어
406