

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第6484226号  
(P6484226)

(45) 発行日 平成31年3月13日 (2019. 3. 13)

(24) 登録日 平成31年2月22日 (2019. 2. 22)

(51) Int. Cl.

F I

A 6 1 B 34/32 (2016. 01)  
B 2 5 J 13/08 (2006. 01)A 6 1 B 34/32  
B 2 5 J 13/08

A

請求項の数 15 (全 21 頁)

(21) 出願番号 特願2016-518078 (P2016-518078)  
 (86) (22) 出願日 平成26年9月30日 (2014. 9. 30)  
 (65) 公表番号 特表2016-538006 (P2016-538006A)  
 (43) 公表日 平成28年12月8日 (2016. 12. 8)  
 (86) 国際出願番号 PCT/US2014/058225  
 (87) 国際公開番号 W02015/048714  
 (87) 国際公開日 平成27年4月2日 (2015. 4. 2)  
 審査請求日 平成29年10月2日 (2017. 10. 2)  
 (31) 優先権主張番号 61/884, 500  
 (32) 優先日 平成25年9月30日 (2013. 9. 30)  
 (33) 優先権主張国 米国 (US)

(73) 特許権者 506410062  
 ストライカー・コーポレーション  
 アメリカ合衆国ミシガン州49002, カ  
 ラマズー, エアヴェー・ブルヴァード  
 2825  
 (74) 代理人 100099623  
 弁理士 奥山 尚一  
 (74) 代理人 100096769  
 弁理士 有原 幸一  
 (74) 代理人 100107319  
 弁理士 松島 鉄男  
 (74) 代理人 100114591  
 弁理士 河村 英文  
 (74) 代理人 100125380  
 弁理士 中村 綾子

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 外科手技の際に患者の解剖学的構造を操作するためのロボットシステムを制御するシステム及び方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

外科手技の際に患者 (P) の解剖学的構造を操作するためのロボットシステム (10) であって、前記解剖学的構造は、支持体 (14) により固定され、ある特性を有するものであり、

前記支持体 (14) に対して前記解剖学的構造が動く範囲に関係した前記解剖学的構造による反応を生じさせるために、前記支持体 (14) により固定された前記解剖学的構造に力を加える加力デバイスと、

前記解剖学的構造の反応を測定する反応測定デバイスと、

生じた反応に基づいて、前記支持体 (14) に対して前記解剖学的構造が動く範囲を表すデータを含む前記解剖学的構造の特性を計算するコントローラ (30) と、

前記解剖学的構造を操作する器具 (22) と

を備え、前記コントローラ (30) は、計算された前記特性に基づいて、前記解剖学的構造を操作する前記器具 (22) を自律制御するものである、ロボットシステム (10) 。

【請求項 2】

前記器具 (22) を自律制御する前記コントローラ (30) はさらに、計算された前記特性を利用して前記外科手技の際の前記解剖学的構造の動きを考慮するものである、請求項 1 に記載のシステム (10) 。

【請求項 3】

10

20

前記器具(22)を自律制御する前記コントローラ(30)はさらに、計算された前記特性に基づいて、前記器具の送り速度を調整するものである、請求項1又は2に記載のシステム(10)。

【請求項4】

前記器具(22)を自律制御する前記コントローラ(30)はさらに、前記外科手技の際に前記器具(22)が前記解剖学的構造に当てられたときに前記器具(22)の送り速度が、前記解剖学的構造が動く速度よりも速いものとなるように、計算された前記特性に基づいて前記器具(22)の送り速度を上げるものである、請求項3に記載のシステム(10)。

【請求項5】

前記器具(22)を自律制御する前記コントローラ(30)はさらに、計算された前記解剖学的構造の特性に基づいて前記器具(22)の最大送り速度を設定するものである、請求項1～4のいずれか一項に記載のシステム(10)。

【請求項6】

前記器具(22)を自律制御する前記コントローラ(30)はさらに、計算された前記特性を、前記解剖学的構造に対する前記器具(22)の動きをモデル化するシミュレーションプログラムに適用するものである、請求項1～5のいずれか一項に記載のシステム(10)。

【請求項7】

前記支持体(14)により固定された前記解剖学的構造に力を加える前記加力デバイスはさらに、前記器具(22)を利用して前記解剖学的構造に力を加えるか、又は前記器具(22)以外のデバイスを利用して前記解剖学的構造に力を加えるものである、請求項1～6のいずれか一項に記載のシステム(10)。

【請求項8】

前記加力デバイスは、校正処理の起動に応じて前記支持体(14)により固定された前記解剖学的構造に力を加えるものである、請求項1～7のいずれか一項に記載のシステム(10)。

【請求項9】

前記解剖学的構造の反応を測定する前記反応測定デバイスはさらに、前記解剖学的構造の変位を測定するものである、請求項1～8のいずれか一項に記載のシステム(10)。

【請求項10】

前記解剖学的構造の反応を測定する前記反応測定デバイスはさらに、前記解剖学的構造の変位を時間に応じて測定するものである、請求項9に記載のシステム(10)。

【請求項11】

前記解剖学的構造の特性を計算する前記コントローラ(30)はさらに、剛性特性と、減衰特性と、質量と、共振周波数と、減衰比と、周波数応答と、前記解剖学的構造に対する前記器具の実際の位置と前記解剖学的構造に対する前記器具の意図された位置との差とのうちの少なくとも1つを計算するものである、請求項1～10のいずれか一項に記載のシステム(10)。

【請求項12】

計算された前記特性に基づいて通知を行う請求項1～11のいずれか一項に記載のシステム(10)。

【請求項13】

さらに、計算された前記特性が最小しきい値よりも小さいこと又は最大しきい値よりも大きいことに応じて前記通知を行う請求項12に記載のシステム(10)。

【請求項14】

さらに、計算された前記特性が所定範囲外にあること又は所定範囲内にあることに応じて前記通知を行う請求項12又は13に記載のシステム(10)。

【請求項15】

さらに、計算された前記特性を評価して前記解剖学的構造を物理的に調整する方法に関

10

20

30

40

50

する示唆を導き出し、前記示唆を伴う前記通知を表示する請求項 12 ~ 14 のいずれか一項に記載のシステム（10）。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は包括的には、患者の解剖学的構造（anatomy）を処置するために外科手技の際に用いられるロボットシステムを制御するシステム及び方法に関する。より具体的には、本発明の一態様は、解剖学的構造に加えられた力に対する該解剖学的構造の反応に基づいたロボットシステムの制御に関する。

【0002】

10

〔関連出願の相互参照〕

本特許出願は、2013年9月30日に出願された米国仮特許出願第61/884,500号の優先権及び全ての利益を主張するものである。この仮特許出願は、引用することにより本明細書の一部をなすものとする。

【背景技術】

【0003】

施術者等の医療従事者が、最近になって、外科手技を行うためにロボットシステムを使用することに利益を見いだしている。このようなロボットシステムは通常、可動アームを備えている。可動アームは、非常に高い精度で位置決めすることができる自由な遠位端を有している。アームの自由端には手術器具が取り付けられる。手術器具は、手術部位に当

20

【0004】

初期のロボットシステムでは、医療従事者が患者を外科用ホルダ内に動かないように固定し、それにより、静的な患者座標系において手術部位を固定していた。しかしながら、最近のロボットシステムは、患者がわずかに動くことができるようにする外科用ホルダを利用する。したがって、最近の外科用ホルダは、静的な患者座標系において手術部位を動かないように固定するものではない。

【0005】

手術部位が動くことができるようにすることの1つの欠点は、ロボットシステムの自律動作中に手術部位が極めて緩く固定される可能性があるということである。この状況では、ロボットシステムの位置制御ループは、手術部位における対象に到達しようと絶えず試みるが、同時に、到達できないように（out of reach）該対象を絶えず押してしまう。結果として、手術器具は、手術部位において不正確に位置決めされ、それにより、外科手技に不要な遅滞をもたらす。

30

【0006】

このような状態を補うことができるか、又はそのような状態を完全に防ぐことができるロボットシステムの開発が求められている。

【発明の概要】

【0007】

一実施形態では、外科手技中に患者の解剖学的構造を操作するためのロボットシステムが提供される。加力デバイスは、解剖学的構造に力を加えて、解剖学的構造による反応を生じさせるように構成される。反応測定デバイスは、解剖学的構造の反応を測定するように構成される。解剖学的構造はある特性を有し、コントローラは、その反応に基づいて解剖学的構造の特性を計算するように構成される。器具は、解剖学的構造を操作するように構成される。コントローラは、計算された特性に基づいて、解剖学的構造に対して器具を自律制御する。

40

【0008】

一実施形態では、外科手技中に患者の解剖学的構造を操作するためのロボットシステムを制御する方法が提供される。解剖学的構造はある特性を有する。ロボットシステムは器具を備えており、器具を自律制御するように構成される。本方法は、解剖学的構造による

50

反応を生じさせるために解剖学的構造に力を加えることを含む。解剖学的構造の反応が測定され、その反応に基づいて解剖学的構造の特性が計算される。本方法は、計算された特性に基づいて解剖学的構造に対して器具を自律制御することを更に含む。

【 0 0 0 9 】

別の実施形態では、外科手技中に患者の解剖学的構造を操作するためのロボットシステムを制御する方法が提供される。解剖学的構造は支持体によって固定され、ロボットシステムは、器具を備えており、器具を自律制御するように構成される。ナビゲーションシステムは、解剖学的構造及び器具を追跡するように構成される。本方法は、ナビゲーションシステムを用いて、支持体に対して解剖学的構造が動く範囲を表すデータを求めることを含む。本方法は、データに基づいて、解剖学的構造に対して器具を自律制御することを更に含む。

10

【 0 0 1 0 】

本システム及び本方法は、器具が解剖学的構造に自律的に当てられることに応じて解剖学的構造が動く状況に対処するものである。反応を測定し、解剖学的構造の特性を計算することによって、本システム及び本方法は、そのような動きを考慮する。有利なことに、本システム及び本方法は、計算された特性に基づいて、解剖学的構造に対して器具を自律制御することができる。解剖学的構造の計算された特性に基づいて器具を自律制御することによって、本システム及び本方法は、医療従事者の介入を最小限に抑えるか、又は医療従事者が介入することなく、解剖学的構造の動きを考慮する。さらに、本システム及び本方法は、解剖学的構造の特性を有益に考慮し、それにより、手術部位における対象に到達しようと絶えず試みるが、同時に、到達できないように該対象を絶えず押してしまうという問題を回避する。代わりに、本システム及び本方法によれば、解剖学的構造の特性を考慮することによって、手術部位における対象に効率的に到達することができるようになる。したがって、本システム及び本方法は、手術部位における手術器具のより正確な位置決めを提供し、外科手技中の遅滞を少なくする。

20

【 0 0 1 1 】

本発明の利点は、添付図面とともに以下の詳細な説明を参照することで本発明がより良く理解されるにつれて、容易に理解される。

【図面の簡単な説明】

【 0 0 1 2 】

30

【図 1】ロボットシステムの斜視図である。

【図 2】ロボットシステムの説明図である。

【図 3】ロボットシステムを制御する方法のフローチャートである。

【図 4】一実施形態による、解剖学的構造の動きを示唆する通知を示すディスプレイの説明図である。

【図 5】別の実施形態による、解剖学的構造の動きを示唆する通知を示すディスプレイの説明図である。

【発明を実施するための形態】

【 0 0 1 3 】

外科手技を行うためにロボットシステムを制御するシステム及び方法が開示される。図 1 には、患者に対して外科手技を行うためのロボットシステム 10 を示している。

40

【 0 0 1 4 】

外科手技の前に、医療従事者は患者の術前データを収集することができる。術前データは、x 線、CT スキャン、MRI、又は術前データを収集することのできる任意の他のモダリティ (modality) によるものとすることができる。収集された術前データは、ロボットシステム 10 によって使用するためにセーブし、記憶することができる。

【 0 0 1 5 】

一実施形態では、患者は外科手技の際に支持ステーション 12 上に置かれる。支持ステーション 12 は、患者の解剖学的構造 (anatomy) を固定する支持体すなわち外科用ホルダ 14 を有している。患者の解剖学的構造を、図 1 の符号 A により示している。解剖学的

50

構造は、実施形態によっては、大腿骨 F 及び / 又は脛骨 T とすることができる。外科用ホルダ 14 は任意の方法で支持ステーション 12 につなぐことができることを理解されたい。

#### 【0016】

図 1 において、支持ステーション 12 は、トラック 18 を有する手術台 16 を備えている。外科用ホルダ 14 は、外科用ホルダ 14 が手術台 16 上でトラック 18 に沿って移動できるように、トラック 18 に接続されている。外科手技中に、医療従事者は、外科用ホルダ 14 をトラック 18 に沿って前後にスライドさせて、解剖学的構造を位置決めすることができる。外科用ホルダ 14 は、該外科用ホルダ 14 が定位置にあるものとなるように、トラック 18 に固定することができる。例えば、外科用ホルダ 14 は、解剖学的構造が最適な位置にあるときに、定位置に固定することができる。適切な外科用ホルダ 14 の一実施形態が、「Multi-Position Limb Holder」と題する 2012 年 7 月 20 日出願の米国特許出願第 13 / 554,010 号に示されている。この米国特許出願の内容は、引用することによりその全体が本明細書の一部をなすものとする。

10

#### 【0017】

外科用ホルダ 14 は定位置にあるものとして動くことができるが、解剖学的構造は、外科用ホルダ 14 に対して依然として動くことができるように外科用ホルダ 14 内に置かれる。例えば、解剖学的構造は、最大で 6 自由度を含む、1 以上の自由度において外科用ホルダ 14 に対して動くことができる。それにより、解剖学的構造は、実質的には、ロボットシステム 10 における動的な部分である。さらに、外科用ホルダ 14 は、解剖学的構造に力を加えるときに、該解剖学的構造の全体的な、又は大きな動きが制限されるように、該解剖学的構造をしっかりと保持するものであり、その結果、ロボットシステム 10 が該解剖学的構造を処置できる。

20

#### 【0018】

ロボットシステム 10 は、手術器具 22 を操作して解剖学的構造を処置するために用いることができるマニピュレータ 20 を有している。マニピュレータ 20 の一実施形態は、「Surgical Manipulator Capable of Controlling a Surgical Instrument in Multiple Modes」と題する 2013 年 3 月 15 日出願の米国仮特許出願第 61 / 792,251 号に記載されている。この米国仮特許出願の内容は、引用することによりその全体が本明細書の一部をなすものとする。

30

#### 【0019】

マニピュレータ 20 は、カート 24 と、カート 24 から遠位端 (distal end) まで延びている一対のアーム 26 とを有している。器具 22 は、一対のアーム 26 の遠位端に結合される。器具 22 は、任意のやり方でマニピュレータ 20 と一体化される場合があることを理解されたい。一実施形態では、器具 22 は、該器具 22 から延びるエネルギーアプリアケータ (energy applicator) 34 を有している。エネルギーアプリアケータ 34 は、超音波チップ、パー (bur) 又は外科手技を行うための任意の他の処置デバイスとすることができる。外科用ホルダ 14 は通常、マニピュレータ 20 に対して固定される。

#### 【0020】

マニピュレータ 20 及び器具 22 は、位置、力・トルク等を検知するための 1 以上のセンサ及び / 又はエンコーダも有することができる。センサ及びエンコーダは、マニピュレータ 20 及び器具 22 に関連する物理データ又は他のタイプのデータを提供するために本技術分野において知られている任意の形式のものとしてすることができる。1 つのタイプのセンサは力・トルクセンサ 28 であり、器具 22 に加えられた力及びトルクを検出することができる。適切な力・トルクセンサ 28 の一実施形態が、「Force/Torque Transducer」と題する 2013 年 3 月 12 日出願の米国仮特許出願第 61 / 777,596 号に示されている。この米国仮特許出願の内容は、引用することによりその全体が本明細書の一部をなすものとする。

40

#### 【0021】

また、マニピュレータ 20 は、マニピュレータコントローラ 30 も有している。マニピ

50

ュレータコントローラ 30 は、力・トルクセンサ 28 を含む、センサ及びエンコーダと通信する。マニピュレータコントローラ 30 は、力・トルクセンサ 28 により検知された力及びトルクがマニピュレータコントローラ 30 に返されるように、力・トルクセンサ 28 と通信することができる。マニピュレータコントローラ 30 は更に、ナビゲーションシステム 32 と通信する。

#### 【0022】

ロボットシステム 10、より詳細には、マニピュレータ 20 は、手動で、又は自律的に動作することができる。手動で動作するとき、ロボットシステム 10 は、手動モードにおいて動作している。手動モードでは、医療従事者が、ロボットシステム 10 にコマンドを適用することによって、器具 22 を手動で位置決めすることができる。コマンドを適用する一例は、医療従事者が器具 22 を握り、器具 22 に力・トルクを加えることを含む。医療従事者によって適用されたコマンドに基づいて、ロボットシステム 10 は、アーム 26 を作動させて、それに応じて、器具 22 が実質的に同時にリアルタイムに所望の位置に移動する。

#### 【0023】

ロボットシステム 10 は、器具 22 を自律制御するように構成されている。より詳細には、ロボットシステム 10 は、自律動作モード又は半自律動作モードにおいて器具 22 を自律制御する。自律モード又は半自律モードでは、マニピュレータコントローラ 30 は、プリロードされたデータ、ナビゲーションシステム 32 からのデータ、及びエンコーダからのデータを処理して、器具 22 が従うことになる経路を導き出す。経路はプリプログラミングするか、又はあらかじめ決定することができる。ロボットシステム 10 はアーム 26 を作動させ、その経路に沿って器具 22 を自律的に移動させて、解剖学的構造に処置を施す。ロボットシステム 10 は、医療従事者からの入力を実質的に用いることなく、手技を行う。

#### 【0024】

半自律モードでは、ロボットシステム 10 は、その経路に沿って器具 22 を自律的に移動させる。しかし、医療従事者が、コマンドをアサートして、ロボットシステム 10 の動作を制御することができる。例えば、ロボットシステム 10 は、器具を移動できるようにするために、医療従事者がロボットシステム 10 に関連付けられた制御ボタン又はスイッチを持続的に押下することを要求する場合がある。医療従事者がボタン又はスイッチを放すと、器具 22 の動きが一時的に停止する。自律モード又は半自律モードにおいて利用される 1 つの適切なナビゲーションシステムが、「Navigation System Including Optical and Non-Optical Sensors」と題する 2012 年 9 月 26 日出願の米国仮特許出願第 61 / 705,804 号に記載されている。この米国仮特許出願の内容は、引用することによりその全体が本明細書の一部をなすものとする。しかし、他のナビゲーションシステムも使用できることを理解されたい。

#### 【0025】

ナビゲーションシステム 32 は、ナビゲーションコンピュータ 38 を収容したコンピュータカートアセンブリ 36 を有するものとしてすることができる。ナビゲーションインターフェースは、ナビゲーションコンピュータ 38 と動作可能に通信する。ナビゲーションインターフェースによって、医療従事者は、ロボットシステム 10 と通信できるようになる。ナビゲーションインターフェースは、医療従事者がナビゲーションコンピュータ 38 と通信できるようにするために、少なくとも 1 つのディスプレイ 40、42 と、キーボード及びマウス等の入力デバイス 44、46 とを含む。

#### 【0026】

ナビゲーションコンピュータ 38 は、マニピュレータ 20 を制御するために、マニピュレータコントローラ 30 と協働する。ナビゲーションコンピュータ 38 は、マニピュレータコントローラ 30 がマニピュレータ 20 の動きを、それゆえ、器具 22 の動きを指示できるように、マニピュレータコントローラ 30 に器具 22 の姿勢データを与える。

#### 【0027】

10

20

30

40

50

ローカライザ４８は、ナビゲーションコンピュータ３８と通信する。図１に示している実施形態において、ローカライザ４８は光学ローカライザ４８であり、カメラユニット５０を有している。カメラユニット５０は、１以上の光センサ５２を収容する外部ケーシングを有している。幾つかの実施形態では、少なくとも２つの光センサ５２が利用される。他の実施形態では、３つ以上の光センサ５２が用いられる場合がある。

#### 【００２８】

ナビゲーションシステム３２は１以上のトラックを含む。トラックは、ポインタトラッカＰＴ、器具トラッカ５４、第１の患者トラッカ５８及び第２の患者トラッカ６０を含むことができる。トラックはアクティブ型マーカ５６を含む。アクティブ型マーカ５６は、発光ダイオードすなわちＬＥＤとすることができる。他の実施形態では、トラック５４、

10

#### 【００２９】

図１に示している実施形態では、第１の患者トラッカ５８は患者Ｐの大腿骨Ｆにしっかりと固定され、第２の患者トラッカ６０は患者Ｐの脛骨Ｔにしっかりと固定される。患者トラッカ５８、６０は、骨の複数の部分にしっかりと固定される。さらに、器具トラッカ５４は器具２２にしっかりと固定される。トラック５４、５８及び６０は、役に立つと思われる任意のやり方で個々の構成要素に固定することができる。

20

#### 【００３０】

図２に示すように、各ＬＥＤは、関連するトラックのハウジング（図示せず）内に位置し、ナビゲーションコンピュータ３８との間でデータを送受信するトラックコントローラ６２に接続される。また、トラック５４、５８、６０は、トラック５４、５８、６０の角速度を測定する３次元ジャイロスコープセンサ６４も含む。また、トラック５４、５８、６０は、 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 座標系において加速度を測定する加速度計６６も含む。

#### 【００３１】

トラック５４、５８、６０のアクティブ型マーカ５６から姿勢データを伝えるために、カメラユニット５０は、光センサ５２と通信するカメラコントローラ６８を有している。その際、カメラコントローラ６８は、ナビゲーションコンピュータ３８に姿勢データを伝える。その際、ナビゲーションコンピュータ３８は、更なる術前データとともに姿勢データを処理して、患者の解剖学的構造との関連において器具２２、それゆえ、エネルギーアプリータ３４の姿勢を伝える。一実施形態では、ナビゲーションインターフェースは、そのようなデータを医療従事者に伝える。医療従事者がロボットシステム１０とやりとりするために、当業者がこれまでの実施形態において説明されていない他の方法を見つけることができることを理解されたい。

30

#### 【００３２】

外科手技中に、ロボットシステム１０は、手動モードから半自律モード又は自律モードに切り替わることが望ましい。骨切断手技等の幾つかの手技では、器具２２が骨と関わっているときに解剖学的構造が器具２２と同じ速度で動かないように、解剖学的構造が外科用ホルダ１４内でしっかりと配置されることが望ましい。さもなければ、器具２２は骨を切断することができない。言い換えると、外科用ホルダ１４内に固定されるときに、解剖学的構造は、何らかの最小の剛性又は他の特性を有することが望ましい。さらに、外科手技中に器具２２が解剖学的構造に当てられるときに、解剖学的構造が器具２２より遅い速度で動くのを確実にするために、剛性等の幾つかの特性の値に基づいてロボットシステム１０を制御することが望ましい。

40

#### 【００３３】

器具２２が解剖学的構造に当てられるときの解剖学的構造の動きを考慮するために、ロボットシステム１０は、解剖学的構造の１以上の特性に基づいて較正される。１以上の特性は、剛性特性（ $k$ ）、減衰（damping）特性（ $b$ ）、質量（ $m$ ）、減衰比（ $\gamma$ ）、周波

50

数応答 (  $n$  ) 及び / 又は他の特性とすることができる。剛性特性 (  $k$  ) は、ばね定数として更に定めることができる。別の例では、特性は、解剖学的構造が外科用ホルダ 14 によって固定される範囲を表すデータを含む。より詳細には、特性は、外科用ホルダ 14 に対して解剖学的構造が動く範囲を表すデータを含む。

【 0034 】

図 3 は、外科手技中に患者 P の解剖学的構造を操作するためにロボットシステム 10 を制御する基本ステップを示している。ステップ 72 において、解剖学的構造に力を加えて解剖学的構造による反応を生成する。ステップ 74 において、解剖学的構造の反応が測定される。ステップ 76 において、その反応に基づいて解剖学的構造の特性が計算される。ステップ 78 において、計算された特性に基づいて、解剖学的構造に対して器具 22 が自

10

【 0035 】

ステップ 72 において、解剖学的構造に力を加えるために、一般的に、解剖学的構造に隣接するように、又は当たるように加力 ( force-applying ) デバイスが位置決めされる。一実施形態では、ロボットシステム 10、より詳細にはマニピュレータコントローラ 30 は、力を加えるために、加力デバイスを解剖学的構造に向かって能動的に動かす。あるいは、ロボットシステム 10 は静止していることができ、力を加えるために、加力デバイスがロボットシステム 10 から解剖学的構造に向かって伸長する。加力デバイスのそのような動きは、マニピュレータコントローラ 30 から独立して行うことができる。加力デバイスは任意の適切な構成を有することができる。例えば、解剖学的構造を操作する器具 22

20

【 0036 】

医療従事者は、ロボットシステム 10、より詳細にはマニピュレータコントローラ 30 が、器具 22 又は他の加力デバイスを解剖学的構造に当たるように位置決めできるように、手動モードにおいて入力を与えることができる。場合によっては、エネルギーアプリケータ 34 が解剖学的構造に当たるように位置決めされる場合がある。また、場合によっては、解剖学的構造に当接して位置決めするために、手術器具 22 には、その遠位端において非侵襲性で生体適合性のある構造を有する較正プローブ ( 図示せず ) が設けられる。

30

【 0037 】

代替的なバージョンでは、ロボットシステム 10 は、ステップ 72 において力を加える前に、器具 22 を解剖学的構造に当接して自律的に位置決めするために、半自律又は自律モードにおいて利用される場合がある。医療従事者は、自律動作中に介入し、解剖学的構造に当接する器具 22 の位置決めを指示するために、ナビゲーションインターフェースとやりとりすることができる。医療従事者は、当業者が器具 22 の位置を指示するのに役に立つと判断する任意のやり方において、マニピュレータ 20、ナビゲーションシステム 32 又はロボットシステム 10 の任意の他の構成要素とやりとりできることを理解されたい。さらに、医療従事者は、器具 22 を解剖学的構造に当接して位置決めするときに、手動

40

【 0038 】

ステップ 72 において、解剖学的構造に力が加えられる。ステップ 72 の一実施形態では、器具 22 が解剖学的構造に力を加える。別の実施形態では、器具 22 以外の加力デバイスが、解剖学的構造に力を加える。いずれの場合でも、手動モード、自律モード及び / 又は半自律モードにおいて、解剖学的構造に力を加えることができる。一実施形態では、力はあらかじめ決定される。さらに、力は 1 自由度において加えることができる。あるいは、力及びトルクは、6 自由度等の幾つかの自由度において加えられる場合がある。

【 0039 】

一実施形態では、力はステップ関数 ( step function ) に従って解剖学的構造に加えら

50



れる。その場合、力は第 1 の間隔において第 1 のレベルで加えられ、第 1 の間隔に続く第 2 の間隔において第 2 のレベルで加えられる。第 1 のレベルは第 2 のレベルより高いものとすることができるか、又はその逆の場合もある。したがって、ロボットシステム 10 は、解剖学的構造に種々のレベルの力を加えることができる。ステップ関数は、任意の適切な数のレベル及び間隔を含むことができる。

#### 【0040】

別の実施形態では、力は、インパルス関数  $F(t)$  に従って解剖学的構造に加えられる。この実施形態では、力が解剖学的構造に加えられ、解剖学的構造の反応を時間に応じて測定した信号が記録される。

#### 【0041】

更に別の実施形態では、ステップ 72 は較正処理を起動 (activate) することを含む。したがって、解剖学的構造に力を加えることは、較正処理の起動に応じて行われる。較正処理は、マニピュレータコントローラ 30 内に記憶された較正プログラムとすることができる。記憶される較正プログラムは、コンピュータプログラムを記憶することができ、ロボットシステム 10 の一部である任意の媒体に記憶することができる。ナビゲーションインターフェースは、較正処理を開始するようにユーザに促すことができる。あるいは、較正処理を自動的に開始することができる。

#### 【0042】

較正処理において、記憶された較正プログラムは、マニピュレータコントローラ 30 と協働して、解剖学的構造に力を加えるように器具 22 に指示することができる。一実施形態では、器具 22 が較正処理全体を通して解剖学的構造との接触を維持するものとなるように、解剖学的構造に力が加えられる。それに加えて、又はその代わりに、マニピュレータ 20 は、所定のしきい値の力に達するまで、解剖学的構造に加えられる力を増やし続けることができる。

#### 【0043】

解剖学的構造は、力が加えられた後に反応を生成する。後に詳細に説明されるように、解剖学的構造の生成された反応は、種々の形の任意の組み合わせをとることができる。一実施形態では、解剖学的構造の生成された反応は、機械的な反応とすることができる。例えば、生成された反応は、解剖学的構造の機械的な動き、より詳細には、解剖学的構造の変位又は回転運動とすることができる。解剖学的構造の生成された反応が機械的ではない形をとる場合もあることが、当業者には理解されよう。例えば、生成された反応は、電気的な反応とすることができる。

#### 【0044】

解剖学的構造による反応が生成された後に、ステップ 74 において、その反応が測定される。この反応は、種々の方法に従って測定することができる。反応測定デバイスが反応を測定する。ステップ 74 の一実施形態では、反応は、力・トルクセンサ 28 を用いて測定される。力・トルクセンサ 28 を器具 22 に関連付けることができる。器具 22 が解剖学的構造に力及び/又はトルクを加えたときに、力・トルクセンサ 28 は力及び/又はトルクを測定することができる。あるいは、力・トルク 28 は、器具 22 以外のデバイスに関連付けることができる。力及び/又はトルクは、時間に応じて測定することができる。さらに、力及び/又はトルクは、離散的又は連続的に測定することができる。

#### 【0045】

ステップ 74 の別の実施形態では、解剖学的構造の反応は、関節トルク (joint torque) を測定することによって測定される。関節トルクは、マニピュレータ 20 の関節のうちの 1 つに関連するトルクに対応する。任意の適切なセンサ及び/又はエンコーダが、関節トルクを検知することができる。さらに、2 つ以上の関節トルクを測定することができる。一実施形態では、関節トルクは、以下の式 (1) を用いて、計算され、ツール中心点 (tool center point, TCP) の力・トルクに変換される。式 (1) において、 $(J')$  は TCP から関節までのヤコビアン of 転置であり、 $(t)$  は関節トルクのベクトルである。関節トルクは、以下の式 (2) に示すように、器具 22 を操作するために用いられるモータ

10

20

30

40

50

コントローラによって引き込まれる電流から計算することができる。ただし、 $(k t)$  はモータトルク定数であり、 $(i)$  は電流である。さらに、関節トルクセンサを用いて、関節トルクの推定値を求めることができる。関節トルクは、種々の他の方法に従って測定することができる。

【数 1】

$$(1) F = J' * t$$

$$(2) \tau = kt * i$$

【0046】

10

ステップ 74 の更に別の実施形態では、解剖学的構造の反応は、解剖学的構造の変位を測定することによって測定される。変位は、力を加えられたことによって解剖学的構造が動く距離とすることができる。変位は、時間に応じて測定することができる。さらに、変位は離散的又は連続的に測定することができる。幾つかの実施形態では、所望の変位に達するまで、マニピュレータ 20 は、器具 22 を解剖学的構造に当て続けることができる。任意の適切なデバイス又は方法を利用して、解剖学的構造の変位を測定することができる。一例では、ナビゲーションシステム 32 が、トラッカ 58 及び 60 の位置の変化を測定することによって変位を計算する。例えば、ナビゲーションシステム 32 は、ステップ 72 において力を加える前に、解剖学的構造の初期位置を求めることができる。力が加えられた後に、ナビゲーションシステム 32 は、解剖学的構造の変位位置を求めることができる。ナビゲーションシステム 32 はその後、変位位置を初期位置と比較し、変位を求めることができる。

20

【0047】

ロボットシステム 10 は、変位を測定するとき、最終的な力及び変位測定値を記録することができる。ロボットシステム 10 が最終的な力及び変位測定値を記録する前に解剖学的構造及び器具 22 が平衡点 (equilibrium point) に達するものとなるように、ステップ 74 において、マニピュレータ 20 は、定められた整定時間 (settling time) だけ待つことができる。さらに、マニピュレータコントローラ 30 は、エンコード及び運動学的計算により、解剖学的構造の変位を計算することができる。解剖学的構造の変位を計算する代替的な方法を当業者が見つめることができることを理解されたい。

30

【0048】

解剖学的構造の反応を測定する際に、解剖学的構造の質量  $(m)$  を考慮することができる。一実施形態では、解剖学的構造の質量は術前データから推定される。さらに、解剖学的構造の質量は、外科用ホルダ 14 の質量に加えることができる。したがって、解剖学的構造の反応を測定する際に、解剖学的構造及びホルダ 14 の質量を考慮することができる。さらに、反応を測定するときに、質量及び変位の両方を考慮に入れることができる。

【0049】

解剖学的構造の反応は、上記の実施形態の任意の組み合わせに従って測定することができる。一実施形態では、その方法の幾つかのステップが異なる時刻に行われる。例えば、ステップ 72 及び 74 が異なる時刻に行われる。より詳細には、解剖学的構造の反応が測定される前に、解剖学的構造に力が加えられる。別の例では、ステップ 72 及び 78 が異なる時刻に行われる。詳細には、器具 22 の自律制御前に、解剖学的構造に力が加えられる。そのような場合には、解剖学的構造に力を加えるステップ 72 は、器具 22 を自律制御するステップ 78 から独立して別に行われる。

40

【0050】

あるいは、本方法の幾つかのステップを、同時に行うことができる。例えば、力が加えられるのと同時に解剖学的構造の反応が測定されるように、ステップ 72 及び 74 を同時に行うことができる。別の例では、ステップ 72 がステップ 78 と同時に行われる。詳細には、器具 22 が自律制御されるのに応じて、力が加えられる。そのような場合には、器具 22 を自律制御する前に、力を加えるステップ 72 が行われる必要はない。すなわち、

50

器具 2 2 の自律制御は、解剖学的構造にあらかじめ力を加えることなく開始することができる。むしろ、器具 2 2 の自律制御中に、解剖学的構造に力が絶えず加えられる。さらに、ステップ 7 4 及び 7 6 をステップ 7 8 と同時に行うことができる。すなわち、器具 2 2 が自律制御されるのに応じて、解剖学的構造の反応を測定することができ、解剖学的構造の特性を計算することができる。

#### 【 0 0 5 1 】

さらに、本方法の最も広い範囲から逸脱することなく、解剖学的構造の反応を測定する代替的な方法を当業者が見つめることができることを理解されたい。

#### 【 0 0 5 2 】

上記のように、ステップ 7 6 において、解剖学的構造の測定された反応に基づいて、解剖学的構造の特性が計算される。種々の実施形態に従って特性を計算することができる。一実施形態では、特性は静的手法を用いて測定される。この手法では、解剖学的構造の剛性特性 (  $k$  ) が特定される。解剖学的構造に加えられる力は既知であり、(  $F$  ) によって表される。解剖学的構造の計算された変位も既知であり、(  $x$  ) によって表される。マニピュレータコントローラ 3 0 は、ステップ 7 6 において剛性特性 (  $k$  ) について解くために、力 (  $F$  ) 及び変位 (  $x$  ) を以下の式 ( 3 ) に入力することによって、力 (  $F$  ) 及び計算された変位 (  $x$  ) を処理する。

#### 【 数 2 】

$$(3) F = k * x$$

#### 【 0 0 5 3 】

式 ( 3 ) において、解剖学的構造の静的な撓み ( deflection ) が測定される。剛性特性 (  $k$  ) はばね定数であり、定常状態条件下で推定することができる。解剖学的構造の特性を計算するための代替の静的手法を当業者が見つめることができることを理解されたい。

#### 【 0 0 5 4 】

別の実施形態では、動的手法を用いて、特性が測定される。この手法では、解剖学的構造のステップ応答又はインパルス応答が測定される。質量・ばね・ダンパのモデルに関する以下の特性方程式 ( 4 ) を用いて、パラメータが推定される。

#### 【 数 3 】

$$(4) m * x'' + b * x' + k * x = 0$$

#### 【 0 0 5 5 】

式 ( 4 ) において、(  $m$  ) はホルダ及び / 又は解剖学的構造の質量であり、(  $b$  ) は減衰 ( damping ) 係数等の減衰特性であり、(  $k$  ) はばね定数であり、(  $x''$  ) は、変位の時間に対する二次導関数 ( 例えば、加速度 ) であり、(  $x'$  ) は変位の時間に対する一次導関数 ( 例えば、速度 ) であり、(  $x$  ) は変位である。式 ( 4 ) において、パラメータ (  $m$ 、 $b$  又は  $k$  ) のうちの少なくとも 1 つを仮定するか、又は既知のものとして、その他のパラメータを容易に推定することができる。例えば、3 つのパラメータのうちの 2 つが既知である場合には、これにより、第 3 のパラメータの推定を向上させることができる。一例では、質量が既知であるか、又は入手可能な臨床データから推定することができる。別の例では、ばね定数 (  $k$  ) が静的試験により計算及び推定される。いずれの例でも、実験データから残りの 2 つの変数を計算することができる。あるいは、両方の例の手法を組み合わせ、(  $m$  ) 及び (  $k$  ) の両方に関する初期推定値を与えて、減衰特性 (  $b$  ) を実験データから計算することができる。

#### 【 0 0 5 6 】

ステップ 7 6 の別の実施形態では、特性の計算は、マニピュレータコントローラ 3 0 によって作成された経時的な変位のグラフから、解剖学的構造の反応の共振周波数 (  $\omega_n$  ) 及び減衰比 (  $\zeta$  ) を推定することを含む。推定された質量を用いて、以下の式 ( 5 ) 及び

式(6)を解くことで、剛性特性(k)及び減衰特性(b)を計算することができる。他の例では、質量、剛性特性(k)及び減衰特性(b)が推定される。

【数4】

$$(5) \omega_n = \sqrt{k/m}$$

$$(6) (2 * (\zeta) * \omega_n) = \frac{b}{m}$$

【0057】

更に別の実施形態では、ステップ76は、変位と時間との関係のデータから評価されるような、計算された反応 $x_c(t)$ と実験的な反応 $x(t)$ との平均二乗誤差を最小にするパラメータ値を探索する反復型最適化ルーチンの実行を含む。この実施形態では、式(7)において質量、ばね、ダンパモデル $H_s$ に関する完全な伝達関数を利用して、質量(m)、減衰特性(b)及び剛性特性(k)の値を計算する。

10

【数5】

$$(7) H(s) = \frac{X(s)}{F(s)} = 1/(m * s^2 + b * s + k)$$

【0058】

式(8)において、力の入力すなわち $f(t)$ は既知であり、 $f(t)$ のラプラス変換が計算されて、 $F(s)$ が求められる。したがって、式(7)における $F(s)$ は、力の入力のラプラス変換である。式(7)において、 $X(s)$ は並進出力(translation output)のラプラス変換であり、 $s$ はラプラス周波数変数である。式(7)において、 $X(s)$ は、 $F(s)$ の計算値と、(m)、(k)及び(b)の推定値とを用いて求められる。 $X(s)$ がわかると、以下の式(9)によって示されるような、逆ラプラス変換を用いて、 $X(s)$ を周波数領域から $x_c(t)$ である時間領域に変換する。その後、 $x_c(t)$ と $x(t)$ との平均二乗誤差が計算される。その後、本処理は、平均二乗誤差が許容可能な差以内に収束するまで、(m)、(k)及び(b)に関する更新された推定値を用いて繰り返される。

20

【数6】

$$(8) F(s) = \mathcal{L}\{f(t)\}(s)$$

$$(9) x_c(t) = \mathcal{L}^{-1}\{X(s)\}$$

30

【0059】

解剖学的構造の特性を計算するために上記で言及されていない代替の数学的方法を用いることを当業者が予想できることは理解されたい。

【0060】

上記のように、ステップ78において、ロボットシステム10は、計算された特性に基づいて、解剖学的構造に対して器具22を自律制御する。それにより、本方法は、器具22を自律制御するときに、解剖学的構造の特性を考慮する。マニピュレータコントローラ30は、計算された特性に基づいて、解剖学的構造に対する器具22、それゆえ、エネルギーアプリケータ34の先端部の位置を制御することができる。一実施形態によれば、器具22の自律制御は、計算された特性を利用して外科手技中の解剖学的構造の動きを考慮することを含む。

40

【0061】

別の実施形態では、計算された特性は、自律モード又は半自律モードにおいてマニピュレータの送り速度(feed rate)を制御する際に1つの要素として使用される。マニピュレータの送り速度は、「Surgical Manipulator Capable of Controlling a Surgical Instrument in Multiple Modes」と題する2013年3月15日出願の米国仮特許出願第6

50

1 / 7 1 6 , 2 5 1 号に記載されている。この米国仮特許出願の内容は、引用することによりその全体が本明細書の一部をなすものとする。

【 0 0 6 2 】

一例では、器具 2 2 の送り速度は、計算された特性に基づいて調整される。例えば、送り速度は、外科手技中に器具 2 2 が解剖学的構造に当てられたときに解剖学的構造が動く速度より速いものとなるように調整される。このようにして、器具 2 2 の送り速度が、外科用ホルダ 1 4 内で動く場合がある解剖学的構造と器具 2 2 が接触できるようにするのに十分であることを確実にするために、計算された特性が考慮される。

【 0 0 6 3 】

別の例では、送り速度は、解剖学的構造が外科用ホルダ 1 4 によって固定される範囲を表すデータに基づいて調整される。より詳細には、送り速度は、解剖学的構造が外科用ホルダ 1 4 に対して動く範囲を表すデータに基づいて調整される。そのようなデータは、器具 2 2 の実際の位置を、解剖学的構造に対する器具 2 2 の意図した位置と比較することによって導き出すことができる。ナビゲーションシステム 3 2 は、解剖学的構造及び器具 2 2 を追跡して、実際の位置を求める。実際の位置は、器具 2 2 の横断切断経路 ( traverse d cut path ) を含むことができる。意図した位置は、意図した横断切断経路を表す所定のプリロードされたデータとすることができる。器具 2 2 の切断経路は、複数の離散点において求めることができる。実際の経路と意図した経路とのプロファイル誤差を求めることができる。その後、プロファイル誤差を所定のしきい値と比較することができる。一例では、しきい値を超えるプロファイル誤差を有する横断切断経路点のパーセンテージが容認できないと見なされた場合は、送り速度が減速され、及び / 又は通知が表示される。場合によっては、プロファイル誤差目標値及び容認可能なパーセンテージは、調整することができるか、又は可変とすることができる。そのような調整は、例えば、その切断が荒切り ( rough cut ) か、仕上げ切り ( finish cut ) かに応じて行うことができる。さらに、そのような調整は、切断対象の解剖学的構造の重症度に基づいて行うことができる。アンダーカット ( undercut ) は、オーバーカット ( overcut ) とは異なるしきい値を有することもできる。別の例では、上記の方法を利用して、器具 2 2 による実際の骨除去と、機器 2 2 による意図した骨除去とを比較する。

【 0 0 6 4 】

別の実施形態では、器具の自動制御は、解剖学的構造の計算された特性に基づいて、器具 2 2 の最大送り速度を設定することを含む。場合によっては、ロボットシステム 1 0 は、外科手技を受ける詳細な解剖学的構造に応じて、器具 2 2 のデフォルト最大送り速度を指定することができる。言い換えると、デフォルト最大送り速度は、対象となる解剖学的構造に応じて異なる場合がある。その一方で、計算された特性に応じて、ロボットシステム 1 0 は、デフォルト最大送り速度以下となるように最大送り速度を設定することができる。例えば、計算された特性が、比較的硬い解剖学的構造を示す場合には、ロボットシステム 1 0 は、最大送り速度をデフォルト最大送り速度に設定することができる。解剖学的構造が比較的硬い場合、器具 2 2 を当てる際に不正確になる可能性は低いので、ロボットシステム 1 0 は最大送り速度を維持することができる。あるいは、例えば、計算された特性が、比較的緩く固定された解剖学的構造を示す場合には、ロボットシステム 1 0 は、器具 2 2 の最大送り速度を、デフォルト最大送り速度未満に、すなわちデフォルト最大送り速度未満である送り速度範囲内に設定することができる。ロボットシステム 1 0 は、解剖学的構造が緩く固定されることから生じる場合のある、器具 2 2 を当てる際の不正確さを解消するために、最大送り速度を制限することができる。他の実施形態では、最大送り速度は、上記のようなデフォルト最大送り速度にかかわらず、単に、計算された特性に応じて設定される。

【 0 0 6 5 】

さらに、計算された特性に基づく器具 2 2 の自律制御は、計算された特性をシミュレーションプログラムにおいて適用することを含むことができる。シミュレーションプログラムは、外科手技中に解剖学的構造に対する器具 2 2 の動きを、より詳細には、エネルギー

10

20

30

40

50

アプリケーション 34 の動きをモデル化することができる。一実施形態では、シミュレーションは、骨切削手技をモデル化する。

【0066】

本方法の範囲から逸脱することなく、上記の実施形態において説明される特性以外の計算された特性に基づく、器具 22 を自律制御するための使用法を当業者が見つけることができることは理解されたい。

【0067】

計算された特性に基づいて、ロボットシステム 10 は、図 4 及び図 5 に示すように、メッセージ又は通知 80 を与えることができる。通知 80 は、外科手技中に医療従事者を助けるものである。通知 80 は、ユーザインターフェース等の任意の適切な媒体上で与えることができる。図 4 及び図 5 において、通知 80 はナビゲーションシステム 32 のディスプレイ 42 上に与えられる。通知 80 は、画像、テキスト、又は画像及びテキストの組み合わせによって与えることができる。さらに、通知 80 は動画とすることができる。

10

【0068】

通知 80 は、計算された特性に基づいて与えられる。一実施形態では、通知 80 は、計算された特性の評価に基づいて与えられる。例えば、通知 80 は、計算された特性と、最適な動作に関連するしきい値との比較に基づいて与えることができる。しきい値は、最小しきい値又は最大しきい値とすることができる。計算された特性が最大しきい値より大きい、又は最小しきい値より小さい場合には、ロボットシステム 10 は通知 80 を与える。例えば、剛性  $k$  (又はパラメータ  $m$ 、 $b$  及び  $k$  の組み合わせ) に関する最小しきい値が決定される場合がある。計算された剛性が剛性  $k$  に関する最小しきい値より小さい場合には、ロボットシステム 10 は、医療従事者に、解剖学的構造がよりしっかり固定されるまで手技が継続できないという通知 80 を与える。

20

【0069】

その代わりに、又はそれに加えて、計算された特性に基づいて、自律モード又は半自律モードにおける送り速度を、機械加工精度を維持するために必要なレベルに調整することができる。一例では、送り速度は、解剖学的構造がよりしっかり固定されるまで、又は解剖学的構造がよりしっかり固定されない限り減速される。詳細には、解剖学的構造が、低い剛性を示す自由度においてよりしっかり固定されるまで、又はよりしっかり固定されない限り、送り速度を減速することができる。送り速度の調整は、医療従事者が送り速度を手動で調整する必要があるように、自動的及び受動的なものとするすることができる。むしろ、より迅速な機械加工が望ましい場合には、解剖学的構造の剛性が調整される。その後、ロボットシステム 10 は、解剖学的構造がよりしっかり固定された場合には、医療従事者に対して、送り速度を上げることができるという通知 80 を表示することができる。

30

【0070】

他の実施形態では、計算された特性が、最適動作に関する所定の特性範囲と比較される。計算された特性がその範囲外の場合には、ロボットシステム 10 は、通知 80 を送ることができる。例えば、ロボットシステム 10 が、剛性特性 ( $k$ ) 等の計算された特性が最適動作に関する範囲外にあると判断した場合は、ロボットシステム 10 は、通知 80 を送り、計算された特性が範囲外にあること、又は外科手技が中止されるべきであることを医療従事者に警告することができる。他方、剛性特性 ( $k$ ) が最適動作特性の範囲内にある場合には、ロボットシステム 10 は、外科手技が継続できることを医療従事者に通知することができる。さらに、上記の実施形態は、較正処理において行うことができる。例えば、較正処理は、計算された特性が最適動作特性の範囲内にあるときに終了することができる。

40

【0071】

多くの場合に、計算された特性に基づいて患者の解剖学的構造を調整する方法に関する指示を伴う通知 80 を与えることが有利である。通知 80 は、解剖学的構造がよりしっかり固定されるように、外科用ホルダ 14 内で解剖学的構造を位置決めし直すように医療従事者に警告することができる。解剖学的構造を位置決めし直すことは、外科用ホルダ 14

50

を操作することによって行われる。したがって、通知 80 は、外科用ホルダ 14 を操作する（例えば、動かす、調整する）方法に関する指示を示唆することができる。解剖学的構造の位置は、外科用ホルダ 14 を用いて、複数の自由度に沿って調整可能に設定することができる。解剖学的構造に加えられる力は、各自由度に対する解剖学的構造による反応を生む。自由度ごとに、解剖学的構造の反応が測定される。計算された特性は、自由度ごとに求められる。計算された特性に基づいて、自由度のうちのいずれかに対して解剖学的構造が調整されるべきであるか否かに関する判断を行うことができる。その判断は、計算された特性が所定のしきい値又は範囲を超えたか否かを含む、種々の方法に従って行うことができる。調整の大きさ又は範囲も判断することができる。

#### 【0072】

通知 80 は、解剖学的構造の自由度に基づく計算から導き出される示唆（suggestion）を与える。解剖学的構造のどの自由度が操作を必要とするか、及びそのような操作の範囲を判断することによって、通知 80 は、外科用ホルダ 14 の位置を変更するための示唆を与える。外科用ホルダ 14 の位置を変えることによって、解剖学的構造の位置が変化する。計算された特性は、解剖学的構造の位置の変化に応じて変化する。したがって、通知 80 は、計算された特性を変更するために、解剖学的構造を位置決めし直すように促す。

#### 【0073】

図 4 及び図 5 に示しているように、通知 80 は、外科用ホルダ 14 を調整する方法を視覚的に示す画像又は動画として表示される場合がある。通知 80 は、解剖学的構造を現在位置 90 から推奨位置 92 まで動かす方法を示している。解剖学的構造の現在位置 90 は、解剖学的構造のリアルタイムの位置である。推奨位置 92 は、上記のように、計算された特性から導き出される。図 4 及び図 5 において、現在位置 90 は破線によって示しており、推奨位置 92 は実線によって示している。

#### 【0074】

通知 80 によって提供される示唆は、外科用ホルダ 14 の構成によって決まる場合がある。例えば、図 4 及び図 5 において、外科用ホルダ 14 によって支持される解剖学的構造は、脚（leg）などの肢（limb）である。外科用ホルダ 14 は、解剖学的構造を伸ばすか、又は曲げるための機構を有するものとして行うことができる。外科用ホルダ 14 は、そり（sled）100 によって支持され、そり 100 は支持棒 102 に沿って移動する。通知 80 は、そり 100 を支持棒 102 から解放することと、そり 100 を支持棒 102 に沿って推奨位置 92 まで移動させることを示唆することができる。その後、外科用ホルダ 14 は推奨位置 92 に固定される。図 4 のそり 100 の推奨移動方向が、簡単にするために矢印によって示される。通知 80 は、伸長から屈曲、又はその逆の脚の動きを示唆することができる。通知 80 は、任意の所与の自由度（複数の場合もある）に沿った解剖学的構造の動きを示唆する。例えば、図 5 において、通知 80 は、外科用ホルダ 14 を内側に（患者の中心線に向かって）回転させることを示唆する。あるいは、通知 80 は、外科用ホルダ 14 を側方に（患者の中心線から離れるように）回転させることを示唆することができる。そのような場合に、通知 80 は、外科用ホルダ 14 を内側に、又は側方に動かすように示唆することができる。さらに、図 4 に示しているように、外科用ホルダ 14 は、解剖学的構造を固定するための少なくとも 1 つのストラップ 106 を有するものとして行うことができる。通知 80 は、ストラップ 106 をしっかりと締めることを示唆することができる。

#### 【0075】

当然、外科用ホルダ 14 は、種々の他の構成を有することができ、本明細書において列挙されない種々の他のやり方において操作することができる。さらに、通知 80 は、外科用ホルダ 14 の 2 つ以上の機構を位置決めし直すことを示唆することができる。また、通知 80 は、単一のステップ又は一連のステップを通して指示を与えることもできる。例えば、通知 80 は、最初に第 1 のステップとして図 4 に示した示唆を表示することができ、その後、第 2 のステップとして、図 5 に示した示唆を表示することができる。

#### 【0076】

場合によっては、通知 80 は受動的であり、単に、推奨位置 92 への動きを示唆する。

10

20

30

40

50

そのような場合、ロボットシステム 10 は一般的に、外科用ホルダ 14 が推奨位置 92 に動かされたか否かを判断しない。場合によっては、通知 80 は能動的であり、ロボットシステム 10 は、解剖学的構造及び／又は外科用ホルダ 14 が推奨位置 92 に達したか否かを判断する。ロボットシステム 10 は、解剖学的構造及び外科用ホルダ 14 の動きを間欠的又は連続的に監視することができる。ロボットシステム 10 は、解剖学的構造及び外科用ホルダ 14 が推奨位置 92 に達したか否かを判断するのに適した任意の方法及びシステムを利用することができる。例えば、ロボットシステム 10 は、解剖学的構造及び／又は外科用ホルダ 14 の現在位置及び推奨位置 92 を判断するために、ナビゲーションシステム 32 及び患者トラッカ 58、60 を利用することができる。

【0077】

10

さらに、ロボットシステム 10 は、推奨位置 92 に達したことを伝えるのに適した任意の通知方法を利用することができる。例えば、ナビゲーションシステム 32 は、解剖学的構造及び／又は外科用ホルダ 14 の推奨位置 92 に対する、解剖学的構造及び／又は外科用ホルダ 14 の現在位置 90 を表示することができる。解剖学的構造及び／又は外科用ホルダ 14 が動かされることに応じて、解剖学的構造及び／又は外科用ホルダ 14 の、表示されている現在位置 90 が、表示されている推奨位置 92 に接近する。表示されている現在位置 90 が表示されている推奨位置 92 に達するまで、調整が行われる。当然、触覚による方法又は聴覚による方法等の他の伝達方法を用いて、推奨位置 92 に達したことを伝えることができる。

【0078】

20

詳述された明細書から本発明の数多くの特徴及び利点が明らかであり、それゆえ、添付の特許請求の範囲は、本発明の真の趣旨及び範囲に属する本発明の全てのそのような特徴及び利点に及ぶことを意図している。さらに、当業者には数多くの変更及び変形が容易に思い浮かぶことになるので、本発明を図示及び説明されたのと全く同じ構成及び動作に限定することは意図されておらず、それゆえ、本発明の範囲に属する、全ての適切な変更形態及び均等物を採用することができる。

なお、特願 2016-518078 の出願当初の特許請求の範囲は以下の通りである。

【請求項 1】

外科手技の際に患者の解剖学的構造を操作するためのロボットシステムを制御する方法であって、前記解剖学的構造は支持体によって固定され、前記ロボットシステムは、ある器具を備え、前記器具を自律制御するものであり、ナビゲーションシステムは、前記解剖学的構造及び前記器具を追跡するものであり、

30

前記ナビゲーションシステムを用いて、前記解剖学的構造が前記支持体に対して動く範囲を表すデータを求めるステップと、

前記データに基づいて、前記解剖学的構造に対して前記器具を自律制御するステップとを含む方法。

【請求項 2】

前記求めるステップは、前記解剖学的構造の剛性を求めるステップを含むものである、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 3】

40

前記求めるステップは、前記解剖学的構造に対する、実際に追跡された前記器具の位置と、前記解剖学的構造に対する、意図された前記器具の位置とを比較するステップを含むものである、請求項 1 又は 2 に記載の方法。

【請求項 4】

外科手技の際に患者の解剖学的構造を操作するためのロボットシステムを制御する方法であって、前記解剖学的構造はある特性を有し、前記ロボットシステムは、ある器具を備え、前記器具を自律制御するものであり、

前記解剖学的構造による反応を生じさせるために、前記解剖学的構造に力を加えるステップと、

前記解剖学的構造の反応を測定するステップと、

50



前記反応に基づいて前記解剖学的構造の特性を計算するステップと、  
計算された特性に基づいて、前記解剖学的構造に対して前記器具を自律制御するステップと

を含む方法。

[請求項5]

前記器具を自律制御するステップは、計算された前記特性を利用して前記外科手技の際の前記解剖学的構造の動きを考慮するステップを含むものである、請求項4に記載の方法

。

[請求項6]

前記器具を自律制御するステップは、計算された前記特性に基づいて、前記器具の送り速度を調整するステップを含むものである、請求項4又は5に記載の方法。

[請求項7]

前記器具を自律制御するステップは、前記外科手技の際に前記器具が前記解剖学的構造に当てられたときに前記器具の送り速度が、前記解剖学的構造が動く速度よりも速いものとなるように、計算された前記特性に基づいて前記器具の送り速度を上げるステップを含むものである、請求項6に記載の方法。

[請求項8]

前記器具を自律制御するステップは、計算された前記解剖学的構造の特性に基づいて前記器具の最大送り速度を設定するステップを含むものである、請求項4～7のいずれか一項に記載の方法。

[請求項9]

前記器具を自律制御するステップは、プリロードされたデータと、ナビゲーションシステムからのデータと、エンコードからのデータを処理して前記器具を制御するステップを含むものである、請求項4～8のいずれか一項に記載の方法。

[請求項10]

前記器具を自律制御するステップは、自律動作モードにおいて前記器具を制御するステップを含むものである、請求項4～9のいずれか一項に記載の方法。

[請求項11]

前記器具を自律制御するステップは、半自律動作モードにおいて前記器具を制御するステップを含むものである、請求項4～9のいずれか一項に記載の方法。

[請求項12]

前記器具を自律制御するステップは、計算された前記特性を、前記解剖学的構造に対する前記器具の動きをモデル化するシミュレーションプログラムに適用するステップを含むものである、請求項4～11のいずれか一項に記載の方法。

[請求項13]

前記解剖学的構造に力を加えるステップは、前記器具を利用して前記解剖学的構造に力を加えるステップを含むものである、請求項4～12のいずれか一項に記載の方法。

[請求項14]

前記解剖学的構造に力を加えるステップは、前記器具以外のデバイスを利用して前記解剖学的構造に力を加えるステップを含むものである、請求項4～12のいずれか一項に記載の方法。

[請求項15]

前記解剖学的構造に力を加えるステップは自律的に行われるものである、請求項4～14のいずれか一項に記載の方法。

[請求項16]

前記解剖学的構造に力を加えるステップは手動で行われるものである、請求項4～14のいずれか一項に記載の方法。

[請求項17]

前記解剖学的構造に力を加えるステップは、ステップ関数又はインパルス関数に従って力を加えるステップを含むものである、請求項4～16のいずれか一項に記載の方法。

10

20

30

40

50

- [ 請求項 18 ]  
前記解剖学的構造に力を加えるステップは、較正処理の起動に応じて行われるものである、請求項 4 ~ 17 のいずれか一項に記載の方法。
- [ 請求項 19 ]  
前記力を加えるステップは、前記較正処理全体を通して前記解剖学的構造との接触を維持するステップを含むものである、請求項 18 に記載の方法。
- [ 請求項 20 ]  
前記反応を測定するステップは、前記解剖学的構造の変位を測定するステップを含むものである、請求項 4 ~ 19 のいずれか一項に記載の方法。
- [ 請求項 21 ]  
前記反応を測定するステップは、前記解剖学的構造の変位を時間に応じて測定するステップを含むものである、請求項 20 に記載の方法。
- [ 請求項 22 ]  
前記反応を測定するステップは、力・トルクセンサを利用するステップを含むものである、請求項 4 ~ 21 のいずれか一項に記載の方法。
- [ 請求項 23 ]  
前記反応を測定するステップは、関節トルクを測定するステップを含むものである、請求項 4 ~ 22 のいずれか一項に記載の方法。
- [ 請求項 24 ]  
前記力を加えるステップと前記反応を測定するステップとは同時に行われるものである、請求項 4 ~ 23 のいずれか一項に記載の方法。
- [ 請求項 25 ]  
前記力を加えるステップと前記器具を自律制御するステップとは同時に行われるものである、請求項 4 ~ 24 のいずれか一項に記載の方法。
- [ 請求項 26 ]  
前記特性を計算するステップは、剛性特性と、減衰特性と、質量と、共振周波数と、減衰比と、周波数応答と、前記解剖学的構造に対する前記器具の実際の位置と前記解剖学的構造に対する前記器具の意図された位置との差とのうちの少なくとも 1 つを計算するステップを含むものである、請求項 4 ~ 25 のいずれか一項に記載の方法。
- [ 請求項 27 ]  
計算された前記特性に基づいて通知を行うステップを更に含む請求項 4 ~ 26 のいずれか一項に記載の方法。
- [ 請求項 28 ]  
計算された前記特性が最小しきい値よりも小さいことに応じて前記通知を行うステップを更に含む請求項 27 に記載の方法。
- [ 請求項 29 ]  
計算された前記特性が最大しきい値よりも大きいことに応じて前記通知を行うステップを更に含む請求項 27 又は 28 に記載の方法。
- [ 請求項 30 ]  
計算された前記特性が所定範囲外にあることに応じて前記通知を行うステップを更に含む請求項 27 ~ 29 のいずれか一項に記載の方法。
- [ 請求項 31 ]  
計算された前記特性が所定範囲内にあることに応じて前記通知を行うステップを更に含む請求項 27 ~ 30 のいずれか一項に記載の方法。
- [ 請求項 32 ]  
計算された前記特性を評価して前記解剖学的構造を物理的に調整する方法に関する示唆を導き出すステップを更に含む請求項 27 ~ 31 のいずれか一項に記載の方法。
- [ 請求項 33 ]  
前記示唆を伴う前記通知を表示するステップを更に含む請求項 32 に記載の方法。
- [ 請求項 34 ]

10

20

30

40

50

外科手技の際に患者の解剖学的構造を操作するためのロボットシステムであって、前記解剖学的構造は、ある特性を有し、

前記解剖学的構造による反応を生じさせるために、前記解剖学的構造に力を加える加力デバイスと、

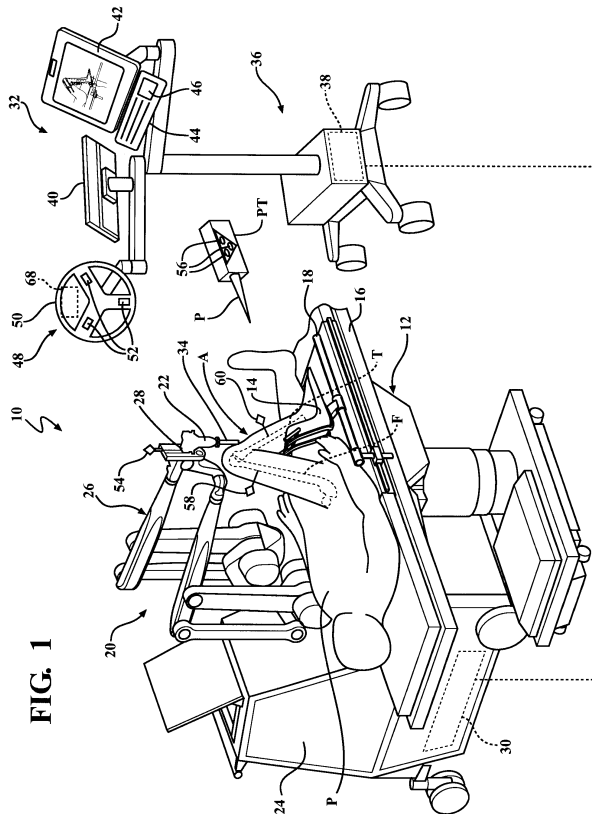
前記解剖学的構造の反応を測定する反応測定デバイスと、

生じた反応に基づいて前記解剖学的構造の特性を計算するコントローラと、

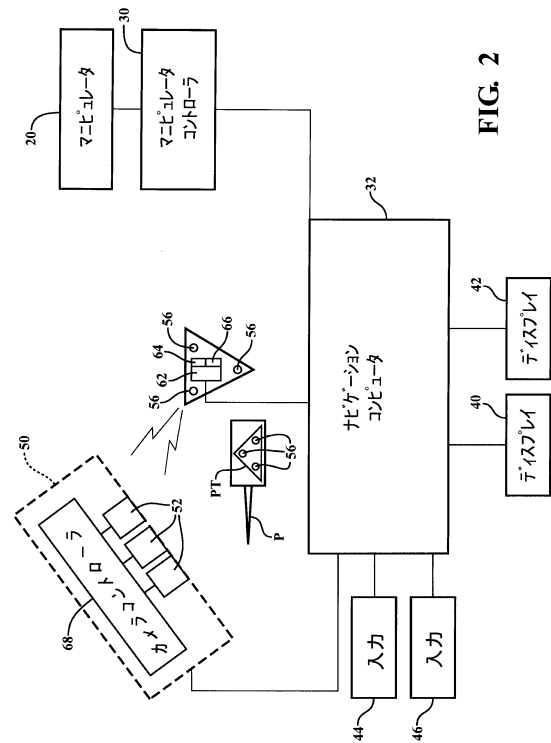
前記解剖学的構造を操作する器具と

を備え、前記コントローラは、計算された前記特性に基づいて、前記解剖学的構造に対して前記器具を自律制御するものである、ロボットシステム。

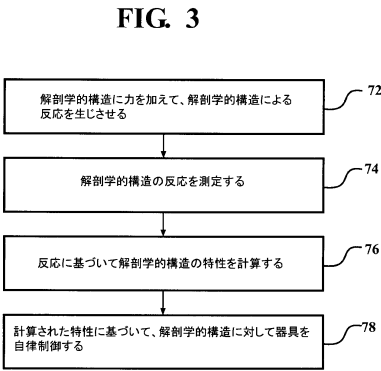
【図 1】



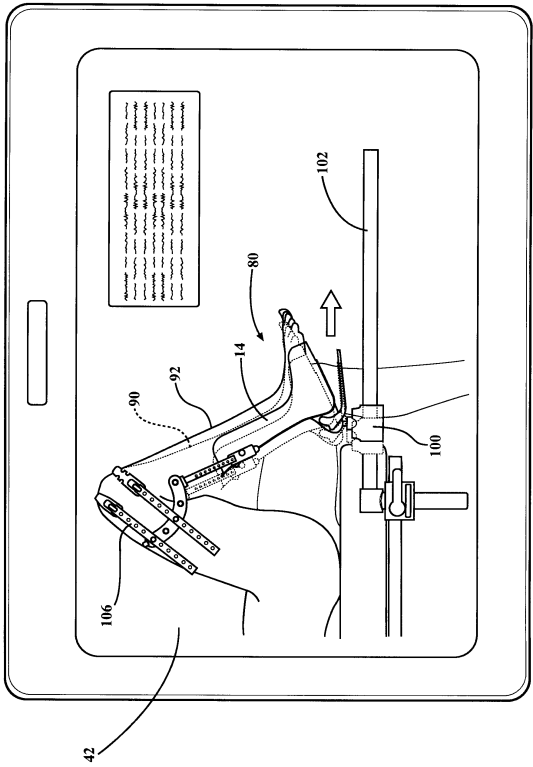
【図 2】



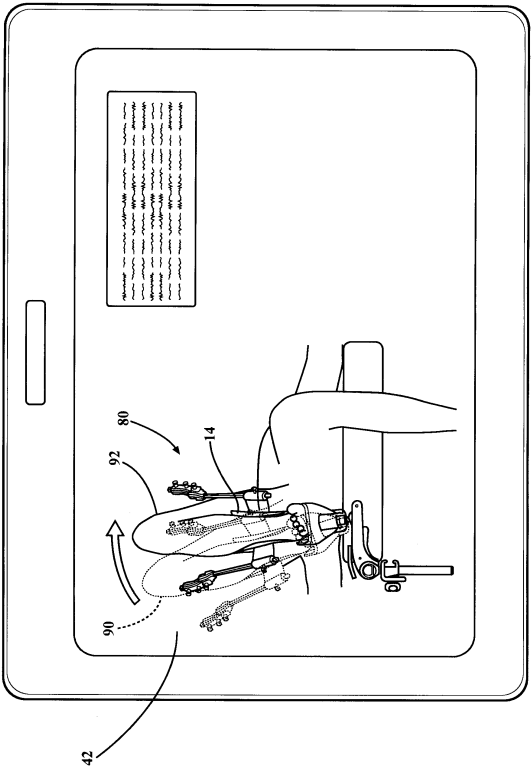
【 図 3 】



【 図 4 】



【 図 5 】



## フロントページの続き

(74)代理人 100142996

弁理士 森本 聡二

(74)代理人 100166268

弁理士 田中 祐

(74)代理人 100170379

弁理士 徳本 浩一

(74)代理人 100179154

弁理士 児玉 真衣

(74)代理人 100180231

弁理士 水島 亜希子

(72)発明者 マラコウスキー, ドナルド・ダブリュー

アメリカ合衆国ミシガン州49087, スクールクラフト, プレイリー・ロンド 16055

(72)発明者 ストーントン, ダグラス・エイ

アメリカ合衆国ミシガン州49009, カラマズー, グレン・ハーバー・ドライブ 5390

審査官 大屋 静男

(56)参考文献 特表2008-538184(JP, A)

特表2009-537230(JP, A)

特開2011-254975(JP, A)

特表2007-534351(JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

A61B 34/32

A61B 34/20

B25J 13/08