

(19)日本国特許庁(JP)

(12)公表特許公報(A)

(11)公表番号

特表2024-543877

(P2024-543877A)

(43)公表日 令和6年11月26日(2024.11.26)

(51)国際特許分類

A 6 1 F

9/007(2006.01)

F I

A 6 1 F

9/007

1 3 0

審査請求 未請求 予備審査請求 未請求 (全43頁)

(21)出願番号	特願2024-530436(P2024-530436)	(71)出願人	522497490
(86)(22)出願日	令和4年12月1日(2022.12.1)		フォーサイト ロボティクス リミテッド
(85)翻訳文提出日	令和6年7月22日(2024.7.22)		イスラエル国, ヨークニーム イリット
(86)国際出願番号	PCT/IB2022/061636		2 0 6 9 2 0 5 ハツミチャ ストリート
(87)国際公開番号	WO2023/100126		1
(87)国際公開日	令和5年6月8日(2023.6.8)	(74)代理人	100079108
(31)優先権主張番号	63/285,218		弁理士 稲葉 良幸
(32)優先日	令和3年12月2日(2021.12.2)	(74)代理人	100109346
(33)優先権主張国・地域又は機関	米国(US)		弁理士 大貫 敏史
(31)優先権主張番号	63/406,881	(74)代理人	100117189
(32)優先日	令和4年9月15日(2022.9.15)		弁理士 江口 昭彦
(33)優先権主張国・地域又は機関	米国(US)	(74)代理人	100134120
(81)指定国・地域	AP(BW,GH,GM,KE,LR,LS,MW,MZ,NA		弁理士 内藤 和彦
	最終頁に続く	(72)発明者	ゴラン, ヨアブ
			イスラエル国, テル アビブ 6 2 1 9 3
			最終頁に続く

(54)【発明の名称】 ロボットによるマイクロ手術処置のためのカフィードバック

(57)【要約】

【課題】 患者の眼に処置を行うための装置及び方法が記載される。

【解決手段】 ロボットユニットは、角膜の切開部を介して眼内に眼科ツール（21）を挿入して、眼科ツール（21）の先端部が眼内に配置されると共に眼科ツール（21）の遠隔運動中心位置が切開部内に配置されるようにする。1つ以上の位置センサ（92、94）から受信したデータに基づいて制御コンポーネントツール（32）の先端部の位置と向きを決定し、制御コンポーネントツール（32）の動きに一致するように眼科ツール（21）の先端部を眼内で動かす。切開部に対する眼科ツール（21）の遠隔運動中心位置の配置を示すフィードバックをオペレータに与える。他の適用例も記載されている。

【選択図】 図5

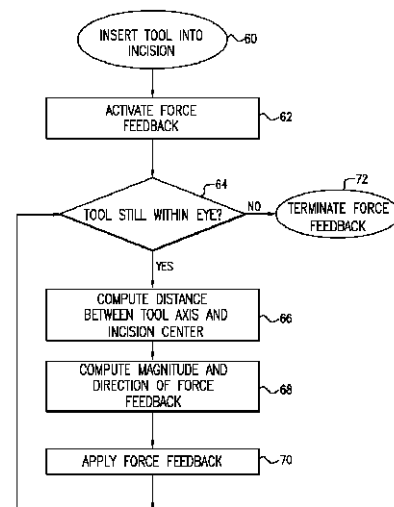


FIG. 5

【特許請求の範囲】

【請求項 1】

先端部を有する眼科ツールを用いて患者の眼に処置を行うための装置であって、
前記眼科ツールを動かすように構成されたロボットユニットと、
制御コンポーネントユニットであって、

オペレータによって動かすように構成され、先端部を規定する制御コンポーネントツールと、

前記制御コンポーネントツールに結合され、1つ以上の位置センサを備える少なくとも1つの制御コンポーネントアームと、
を備える制御コンポーネントユニットと、

10

コンピュータプロセッサであって、

前記ロボットユニットを駆動し、前記患者の眼の角膜の切開部を介して前記患者の眼内に前記眼科ツールを挿入して、前記眼科ツールの先端部が前記患者の眼内に配置されると共に前記眼科ツールの遠隔運動中心位置が前記切開部内に配置されるようにし、

前記1つ以上の位置センサから受信したデータに基づいて前記制御コンポーネントツールの前記先端部の位置及び向きを決定し、

前記制御コンポーネントツールの動きに一致するように前記患者の眼内で前記眼科ツールの前記先端部を動かし、

前記切開部に対する前記眼科ツールの前記遠隔運動中心位置の配置を示すフィードバックを前記オペレータに与える、
ように構成されているコンピュータプロセッサと、
を備える装置。

20

【請求項 2】

前記制御コンポーネントアームは、回転アーム関節を介して相互に結合された複数のリンクを備え、前記1つ以上の位置センサは、

3つの回転エンコーダであって、各々が、前記回転アーム関節のそれぞれ1つに結合され、前記各回転アーム関節の動きを検出すると共にそれに応じて前記制御コンポーネントツールの前記先端部のXYZ位置を示す回転エンコーダデータを発生させるように構成された、3つの回転エンコーダと、

3軸加速度計、3軸ジャイロスコープ、及び3軸磁力計から成る群から選択されたセンサの少なくとも1つを含む慣性測定ユニットであって、前記制御コンポーネントツールの前記先端部の向きを示す慣性測定ユニットデータを発生させるように構成された、慣性測定ユニットと、
を備える、請求項1に記載の装置。

30

【請求項 3】

前記制御コンポーネントアームは、回転アーム関節を介して相互に結合された複数のリンクを備え、前記制御コンポーネントツールは、3つの回転ツール関節を介して前記制御コンポーネントアームに結合され、前記1つ以上の位置センサは、

前記回転アーム関節のそれぞれ1つに結合され、前記回転アーム関節の動きを検出すると共にそれに応じて前記制御コンポーネントツールの前記先端部のXYZ位置を示す回転エンコーダデータを発生させるように構成された、2つの回転エンコーダと、

40

前記回転ツール関節のそれぞれ1つに結合され、前記回転ツール関節の動きを検出すると共にそれに応じて前記制御コンポーネントツールの前記先端部の向きを示す回転エンコーダデータを発生させるように構成された、1つの回転エンコーダと、

3軸加速度計、3軸ジャイロスコープ、及び3軸磁力計から成る群から選択されたセンサの少なくとも1つを含む慣性測定ユニットであって、前記制御コンポーネントツールの前記先端部の向きを示す慣性測定ユニットデータを発生させるように構成された、慣性測定ユニットと、

を備える、請求項1に記載の装置。

【請求項 4】

50

前記コンピュータプロセッサは、前記眼科ツールの前記遠隔運動中心位置が前記切開部の縁部から所与の距離内になるように前記眼科ツールが移動されると警報を発生することによって、前記切開部に対する前記眼科ツールの前記遠隔運動中心位置の前記配置を示すフィードバックを前記オペレータに与えるように構成されている、請求項 1 から 3 のいずれか一項に記載の装置。

【請求項 5】

前記コンピュータプロセッサは音声による警報を発生するように構成されている、請求項 4 に記載の装置。

【請求項 6】

前記コンピュータプロセッサは視覚による警報を発生するように構成されている、請求項 4 に記載の装置。

【請求項 7】

前記コンピュータプロセッサは、前記制御コンポーネントアームを介して力フィードバックを前記オペレータに与えることによって、前記切開部に対する前記眼科ツールの前記遠隔運動中心位置の前記配置を示すフィードバックを前記オペレータに与えるように構成されている、請求項 1 から 3 のいずれか一項に記載の装置。

【請求項 8】

前記コンピュータプロセッサは、
前記患者の眼内へ挿入された前記眼科ツールのアイデンティティを決定し、
前記眼科ツールの前記アイデンティティに基づいて、前記切開部に対する前記眼科ツールの前記遠隔運動中心位置の配置を計算する、
ように構成されている、請求項 7 に記載の装置。

【請求項 9】

前記コンピュータプロセッサは、
前記制御コンポーネントツールの速度測定を行い、
前記速度測定に基づいて前記オペレータに加えられる力を計算し、
前記制御コンポーネントを駆動して、前記計算した力を前記オペレータに加える
ことによって、前記制御コンポーネントを介して力フィードバックを前記オペレータに与えるように構成されている、請求項 7 に記載の装置。

【請求項 10】

前記コンピュータプロセッサは、
前記切開部に対する前記眼科ツールの位置の測定を行い、
前記位置測定に基づいて前記オペレータに加えられる力を計算し、
前記制御コンポーネントアームを駆動して、前記計算した力を前記オペレータに加える
ことによって、前記制御コンポーネントアームを介して力フィードバックを前記オペレータに与えるように構成されている、請求項 7 に記載の装置。

【請求項 11】

前記コンピュータプロセッサは、前記オペレータが前記制御コンポーネントツールに加えた力と等しく、かつ反対方向であるような力を計算することによって、前記オペレータに加えられる前記力を計算するように構成されている、請求項 7 に記載の装置。

【請求項 12】

前記コンピュータプロセッサは、前記切開部の中心から前記眼科ツールの外縁部までの距離に比例するような力を計算することによって、前記オペレータに加えられる前記力を計算するように構成されている、請求項 7 に記載の装置。

【請求項 13】

前記コンピュータプロセッサは、前記オペレータが受けた力フィードバックの剛性を示す入力を前記オペレータから受信し、少なくとも部分的に前記オペレータからの前記入力に基づいて前記オペレータに加えられる力を計算するように構成されている、請求項 7 に記載の装置。

【請求項 14】

10

20

30

40

50

前記コンピュータプロセッサは、前記切開部に対する前記眼科ツールの前記遠隔運動中心位置の動きをどのように制約するべきかに対応するように、前記制御コンポーネントツールの動きを制約するように構成されている、請求項 7 に記載の装置。

【請求項 15】

前記コンピュータプロセッサは、前記眼科ツールの前記遠隔運動中心位置が前記切開部よりも大きい切開ゾーン内に留まるよう制約するように、前記制御コンポーネントツールの動きを制約するように構成されている、請求項 14 に記載の装置。

【請求項 16】

前記コンピュータプロセッサは、前記眼科ツールの前記遠隔運動中心位置が前記切開部内に留まるよう制約するように、前記制御コンポーネントツールの動きを制約するように構成されている、請求項 14 に記載の装置。

【請求項 17】

前記コンピュータプロセッサは、前記切開部の中心からの 2 つの方向における前記眼科ツールの外縁部の距離に基づく力関数を計算することによって、前記オペレータに加えられる力を計算するように構成されている、請求項 7 に記載の装置。

【請求項 18】

前記 2 つの方向のうち第 1 のものは、前記切開部に平行であると共に前記切開部における前記患者の眼の前記角膜の接線であり、前記 2 つの方向のうち第 2 のものは、前記第 1 の方向に垂直であると共に前記切開部における前記患者の眼の前記角膜の接線である、請求項 17 に記載の装置。

【請求項 19】

前記制御コンポーネントアームは、回転アーム関節を介して相互に結合された複数のリンクと、各回転アーム関節に動作可能に結合された 1 つ以上のモータと、を備え、

前記コンピュータプロセッサは、前記複数のモータを用いて前記制御コンポーネントアームを駆動することによってカフィードバックを前記オペレータに与えるように構成されている、請求項 1 から 3 のいずれか一項に記載の装置。

【請求項 20】

前記制御コンポーネントアームは各関節に動作可能に結合された 3 つのモータを備える、請求項 19 に記載の装置。

【請求項 21】

前記制御コンポーネントアームはベルトを含み、前記モータのうち少なくとも 1 つは前記ベルトを介して前記回転アーム関節のうち対応する 1 つに動作可能に結合されて、前記モータのうち前記少なくとも 1 つが前記回転アーム関節のうち前記対応する 1 つを直接駆動する場合に比べて前記モータのうち前記少なくとも 1 つが前記制御コンポーネントユニットのベースの近くに配置されるようになっている、請求項 19 に記載の装置。

【請求項 22】

前記 1 つ以上のモータの過半数は、これらのモータが動作可能に結合されている前記回転アーム関節のうち対応する 1 つを直接駆動する、請求項 19 に記載の装置。

【請求項 23】

前記 1 つ以上の位置センサは、

3 つの回転エンコーダであって、各々が、前記回転アーム関節のそれぞれ 1 つに結合され、前記各回転アーム関節の動きを検出すると共にそれに応じて前記制御コンポーネントツールの前記先端部の X Y Z 位置を示す回転エンコーダデータを発生させるように構成された、3 つの回転エンコーダと、

3 軸加速度計、3 軸ジャイロスコープ、及び 3 軸磁力計から成る群から選択されたセンサの少なくとも 1 つを含む慣性測定ユニットであって、前記制御コンポーネントツールの前記先端部の向きを示す慣性測定ユニットデータを発生させるように構成された、慣性測定ユニットと、

を備える、請求項 19 に記載の装置。

【請求項 24】

前記制御コンポーネントツールは、3つの回転ツール関節を介して前記制御コンポーネントアームに結合され、前記1つ以上の位置センサは、

前記回転アーム関節のそれぞれ1つに結合され、前記回転アーム関節の動きを検出すると共にそれに応じて前記制御コンポーネントツールの前記先端部のX Y Z位置を示す回転エンコーダデータを発生させるように構成された、2つの回転エンコーダと、

前記回転ツール関節のそれぞれ1つに結合され、前記回転ツール関節の動きを検出すると共にそれに応じて前記制御コンポーネントツールの前記先端部の向きを示す回転エンコーダデータを発生させるように構成された、1つの回転エンコーダと、

3軸加速度計、3軸ジャイロスコープ、及び3軸磁力計から成る群から選択されたセンサの少なくとも1つを含む慣性測定ユニットであって、前記制御コンポーネントツールの前記先端部の向きを示す慣性測定ユニットデータを発生させるように構成された、慣性測定ユニットと、

を備える、請求項19に記載の装置。

【請求項25】

先端部を有する眼科ツールを用いて患者の眼に処置を行うための装置であって、

前記ツールを動かすように構成されたロボットユニットと、

制御コンポーネントユニットであって、

オペレータによって動かすように構成され、先端部を規定する制御コンポーネントツールと、

前記制御コンポーネントツールに結合された制御コンポーネントアームであって、

回転アーム関節を介して相互に結合された複数のリンクと、

1つ以上の位置センサと、

各回転アーム関節に動作可能に結合された1つ以上のモータと、

を備える制御コンポーネントアームと、

を備える制御コンポーネントユニットと、

コンピュータプロセッサであって、

前記ロボットユニットを駆動し、前記患者の眼の角膜の切開部を介して前記患者の眼内に前記眼科ツールを挿入して、前記眼科ツールの先端部が前記患者の眼内に配置されるようにし、

前記1つ以上の位置センサから受信したデータに基づいて前記制御コンポーネントツールの前記先端部の位置及び向きを決定し、

前記制御コンポーネントツールの動きに一致するように前記患者の眼内で前記選択された眼科ツールの前記先端部を動かし、

前記複数のモータを用いて前記制御コンポーネントアームを駆動することによってフィードバックを前記オペレータに与える、

ように構成されているコンピュータプロセッサと、

を備える装置。

【請求項26】

前記制御コンポーネントは各回転アーム関節に動作可能に結合された3つのモータを備える、請求項25に記載の装置。

【請求項27】

前記制御コンポーネントアームはベルトを含み、前記モータのうち少なくとも1つは前記ベルトを介して前記回転アーム関節のうち対応する1つに動作可能に結合されて、前記モータのうち前記少なくとも1つが前記回転アーム関節のうち前記対応する1つを直接駆動する場合に比べて前記モータのうち前記少なくとも1つが前記制御コンポーネントユニットのベースの近くに配置されるようになっている、請求項25に記載の装置。

【請求項28】

前記1つ以上のモータの過半数は、これらのモータが動作可能に結合されている前記回転アーム関節のうち対応する1つを直接駆動する、請求項25に記載の装置。

【請求項29】

10

20

30

40

50

前記 1 つ以上の位置センサは、

3 つの回転エンコーダであって、各々が、前記回転アーム関節のそれぞれ 1 つに結合され、前記各回転アーム関節の動きを検出すると共にそれに応じて前記制御コンポーネントツールの前記先端部の X Y Z 位置を示す回転エンコーダデータを発生させるように構成された、3 つの回転エンコーダと、

3 軸加速度計、3 軸ジャイロスコープ、及び 3 軸磁力計から成る群から選択されたセンサの少なくとも 1 つを含む慣性測定ユニットであって、前記制御コンポーネントツールの前記先端部の向きを示す慣性測定ユニットデータを発生させるように構成された、慣性測定ユニットと、

を備える、請求項 25 に記載の装置。

10

【請求項 30】

前記制御コンポーネントツールは、3 つの回転ツール関節を介して前記制御コンポーネントアームに結合され、前記 1 つ以上の位置センサは、

前記回転アーム関節のそれぞれ 1 つに結合され、前記回転アーム関節の動きを検出すると共にそれに応じて前記制御コンポーネントツールの前記先端部の X Y Z 位置を示す回転エンコーダデータを発生させるように構成された、2 つの回転エンコーダと、

前記回転ツール関節のそれぞれ 1 つに結合され、前記回転ツール関節の動きを検出すると共にそれに応じて前記制御コンポーネントツールの前記先端部の向きを示す回転エンコーダデータを発生させるように構成された、1 つの回転エンコーダと、

3 軸加速度計、3 軸ジャイロスコープ、及び 3 軸磁力計から成る群から選択されたセンサの少なくとも 1 つを含む慣性測定ユニットであって、前記制御コンポーネントツールの前記先端部の向きを示す慣性測定ユニットデータを発生させるように構成された、慣性測定ユニットと、

20

を備える、請求項 25 に記載の装置。

【請求項 31】

前記コンピュータプロセッサは、

前記ロボットユニットを駆動し、前記患者の眼の前記角膜の前記切開部を介して前記患者の眼内に前記眼科ツールを挿入して、前記眼科ツールの前記先端部が前記患者の眼内に配置されると共に前記眼科ツールの遠隔運動中心位置が前記切開部内に配置されるようにし、

30

前記切開部に対する前記眼科ツールの前記遠隔運動中心位置の配置を示すカフィードバックを前記オペレータに与える、
ように構成されている、請求項 25 から 30 のいずれか一項に記載の装置。

【請求項 32】

前記コンピュータプロセッサは、

前記患者の眼内へ挿入された前記眼科ツールのアイデンティティを決定し、

前記眼科ツールの前記アイデンティティに基づいて、前記切開部に対する前記眼科ツールの前記遠隔運動中心位置の配置を計算する、

ように構成されている、請求項 31 に記載の装置。

【請求項 33】

前記コンピュータプロセッサは、

前記制御コンポーネントツールの速度測定を行い、

前記速度測定に基づいて前記オペレータに加えられる力を計算し、

前記制御コンポーネントを駆動して、前記 1 つ以上のモータによって、前記計算した力を前記オペレータに加える

ことによって、前記制御コンポーネントを介してカフィードバックを前記オペレータに与えるように構成されている、請求項 31 に記載の装置。

40

【請求項 34】

前記コンピュータプロセッサは、

前記切開部に対する前記眼科ツールの位置の測定を行い、

50

前記位置測定に基づいて前記オペレータに加えられる力を計算し、

前記制御コンポーネントを駆動して、前記計算した力を前記オペレータに加えることによって、前記制御コンポーネントを介して力フィードバックを前記オペレータに与えるように構成されている、請求項 3 1 に記載の装置。

【請求項 3 5】

前記コンピュータプロセッサは、前記オペレータが前記制御コンポーネントツールに加えた力と等しく、かつ反対方向であるような力を計算することによって、前記オペレータに加えられる前記力を計算するように構成されている、請求項 3 1 に記載の装置。

【請求項 3 6】

前記コンピュータプロセッサは、前記切開部の中心から前記眼科ツールの外縁部までの距離に比例するような力を計算することによって、前記オペレータに加えられる前記力を計算するように構成されている、請求項 3 1 に記載の装置。

【請求項 3 7】

前記コンピュータプロセッサは、前記オペレータが受けたい力フィードバックの剛性を示す入力を前記オペレータから受信し、少なくとも部分的に前記オペレータからの前記入力に基づいて前記オペレータに加えられる力を計算するように構成されている、請求項 3 1 に記載の装置。

【請求項 3 8】

前記コンピュータプロセッサは、前記切開部に対する前記眼科ツールの前記遠隔運動中心位置の動きをどのように制約するべきかに対応するように、前記制御コンポーネントツールの動きを制約するように構成されている、請求項 3 1 に記載の装置。

【請求項 3 9】

前記コンピュータプロセッサは、前記眼科ツールの前記遠隔運動中心位置が前記切開部よりも大きい切開ゾーン内に留まるよう制約するように、前記制御コンポーネントツールの動きを制約するように構成されている、請求項 3 8 に記載の装置。

【請求項 4 0】

前記コンピュータプロセッサは、前記眼科ツールの前記遠隔運動中心位置が前記切開部内に留まるよう制約するように、前記制御コンポーネントツールの動きを制約するように構成されている、請求項 3 8 に記載の装置。

【請求項 4 1】

前記コンピュータプロセッサは、前記切開部の中心からの 2 つの方向における前記眼科ツールの外縁部の距離に基づく力関数を計算することによって、前記オペレータに加えられる力を計算するように構成されている、請求項 3 1 に記載の装置。

【請求項 4 2】

前記 2 つの方向のうち第 1 のものは、前記切開部に平行であると共に前記切開部における前記患者の眼の前記角膜の接線であり、前記 2 つの方向のうち第 2 のものは、前記第 1 の方向に垂直であると共に前記切開部における前記患者の眼の前記角膜の接線である、請求項 4 1 に記載の装置。

【請求項 4 3】

それぞれが先端部を有する複数の眼科ツールを用いて患者の眼に処置を行うための装置であって、

前記眼科ツールを動かすように構成されたロボットユニットと、

コンピュータプロセッサであって、

前記ロボットユニットを駆動し、前記患者の眼の角膜の切開部を介して前記患者の眼内に前記眼科ツールのうち選択されたものを挿入して、前記選択された眼科ツールの先端部が前記患者の眼内に配置されると共に前記眼科ツールの遠隔運動中心位置が前記切開部内に配置されるようにし、

前記患者の眼内へ挿入された前記眼科ツールのアイデンティティを決定し、

前記選択された眼科ツールの前記アイデンティティに基づいて、前記切開部に対する前記眼科ツールの前記遠隔運動中心位置の配置を計算し、

10

20

30

40

50

前記切開部に対する前記選択された眼科ツールの前記遠隔運動中心位置の配置を示すフィードバックを前記オペレータに与える、
ように構成されているコンピュータプロセッサと、
を備える装置。

【請求項 4 4】

先端部を有する眼科ツールを用いて患者の眼に処置を行うための方法であって、
ロボットユニットを駆動し、前記患者の眼の角膜の切開部を介して前記患者の眼内に前記眼科ツールを挿入して、前記眼科ツールの先端部が前記患者の眼内に配置されると共に前記眼科ツールの遠隔運動中心位置が前記切開部内に配置されるようにすることと、

オペレータによって移動されるように構成された制御コンポーネントツールに結合されている制御コンポーネントアーム上に配置された 1 つ以上の位置センサから受信したデータに基づいて、前記制御コンポーネントツールの前記先端部の位置及び向きを決定することと、

前記制御コンポーネントツールの動きに一致するように前記患者の眼内で前記眼科ツールの前記先端部を動かすことと、

前記切開部に対する前記眼科ツールの前記遠隔運動中心位置の配置を示すフィードバックを前記オペレータに与えることと、
を含む方法。

【請求項 4 5】

先端部を有する眼科ツールを用いて患者の眼に処置を行うための方法であって、

ロボットユニットを駆動し、前記患者の眼の角膜の切開部を介して前記患者の眼内に前記眼科ツールを挿入して、前記眼科ツールの先端部が前記患者の眼内に配置されると共に前記眼科ツールの遠隔運動中心位置が前記切開部内に配置されるようにすることと、

オペレータによって移動されるように構成された制御コンポーネントツールに結合されている制御コンポーネントアーム上に配置された 1 つ以上の位置センサから受信したデータに基づいて、前記制御コンポーネントツールの前記先端部の位置及び向きを決定することと、

前記制御コンポーネントツールの動きに一致するように前記患者の眼内で前記眼科ツールの前記先端部を動かすことと、

前記制御コンポーネントアームを介して力フィードバックを前記オペレータに与えることと、を含み、前記制御コンポーネントアームは、回転アーム関節を介して相互に結合された複数のリンクと、各回転アーム関節に動作可能に結合された 1 つ以上のモータと、を含み、前記力フィードバックは、前記複数のモータを用いて前記制御コンポーネントアームを駆動することによって前記オペレータに与えられる、方法。

【請求項 4 6】

それぞれが先端部を有する複数の眼科ツールを用いて患者の眼に処置を行うための方法であって、

ロボットユニットを駆動し、前記患者の眼の角膜の切開部を介して前記患者の眼内に前記眼科ツールを挿入して、前記眼科ツールの先端部が前記患者の眼内に配置されると共に前記眼科ツールの遠隔運動中心位置が前記切開部内に配置されるようにすることと、

前記患者の眼内へ挿入された前記眼科ツールのアイデンティティを決定することと、

前記選択された眼科ツールの前記アイデンティティに基づいて、前記切開部に対する前記眼科ツールの前記遠隔運動中心位置の配置を計算することと、

前記切開部に対する前記選択された眼科ツールの前記遠隔運動中心位置の配置を示すフィードバックを前記オペレータに与えることと、
を含む方法。

【請求項 4 7】

1 つ以上のツールを用いて患者の眼にロボットによるマイクロ手術を行うための装置であって、

エンドエフェクタと、

前記エンドエフェクタに結合され、前記 1 つ以上のツールをしっかりと保持するように構成されたツールマウントと、

前記エンドエフェクタに結合され、前記 1 つ以上のツールのヨー及びピッチ角回転を制御するように構成された 1 つ以上のロボットアームであって、前記ツールマウントで保持されたツールの先端部が前記患者の眼内で所望のように動くようになっており、前記患者の眼内への前記ツールの進入位置は切開ゾーン内に維持され、前記切開ゾーンは、前記切開ゾーンを貫通する前記ツールの最大断面の 150 パーセントよりも大きい、1 つ以上のロボットアームと、

前記ツールを前記所望のように動かすためオペレータによって移動されるよう構成された制御コンポーネントと、

前記切開ゾーン内での前記患者の眼内への前記ツールの前記進入位置の位置を示すフィードバックを前記オペレータに与えるように構成された出力ユニットと、
を備える装置。

【請求項 48】

前記出力ユニットは、前記切開ゾーン及び前記切開ゾーン内の前記ツールの前記進入位置を示すディスプレイを備える、請求項 47 に記載の装置。

【請求項 49】

前記出力ユニットは、前記患者の眼内への前記ツールの前記進入位置が前記切開ゾーンの縁部に近付くように前記ツールが移動されると警報を発生させるように構成された出力ユニットを含む、請求項 47 に記載の装置。

【請求項 50】

前記出力ユニットは、触覚フィードバックを前記オペレータに与えるように構成された前記制御コンポーネントの一部を含む、請求項 47 から 49 のいずれか一項に記載の装置。

【請求項 51】

前記制御コンポーネントは、前記患者の眼内への前記ツールの前記進入位置が前記切開ゾーンの縁部に近付くと、前記制御コンポーネントの移動に対する抵抗を増大させるように構成されている、請求項 50 に記載の装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

(関連出願の相互参照)

本出願は、2021 年 12 月 2 日に出願された Korman の「Robotic unit for microsurgical procedures」と題する米国仮特許出願第 63 / 285, 218 号、及び、2022 年 9 月 15 日に出願された Golan の「Force feedback for robotic microsurgical procedures」と題する米国仮特許出願第 63 / 406, 881 号の優先権を主張する。これらの米国仮特許出願は双方とも援用により本願に含まれる。

【0002】

本発明のいくつかの適用例は概ね医用装置及び方法に関する。具体的には、本発明のいくつかの適用例は、ロボットによりマイクロ手術処置を行うための装置及び方法に関する。

【背景技術】

【0003】

白内障手術は、混濁（白内障として知られている）を発症した眼の自然のレンズを除去すること、及びこれを眼内レンズと交換することからなる。かかる手術は通常、順次行われる複数の標準的なステップを伴う。

【0004】

最初のステップにおいて、患者の顔の眼の周りが（通常、ヨード溶液で）消毒され、顔が滅菌ドレープで覆われて眼だけが露出される。消毒及びドレーピングが完了すると、通

10

20

30

40

50

常は点眼液の形態で投与される局部麻酔薬を使用して眼に麻酔がかけられる。次いで眼球が上下の眼瞼を開いたままに保つ開瞼器を使用して露出される。眼の角膜に1回以上の切開（通常、2又は3回の切開）が行われる。切開は通常、ケラトーム刃と呼ばれる専用刃を使用して行われる。この段階において、眼に更に麻酔をかけるために、通常、眼の前眼房にリドカインが注入される。このステップに続いて、角膜切開によって粘弾性物質注入が施される。粘弾性物質注入を行うのは、前眼房を安定させるため、及び処置の残り時間の間眼圧を維持するのを助けるため、更に水晶体嚢を拡張するためである。

【0005】

嚢切開として知られている後段階において、前水晶体嚢の一部が除去される。レーザを利用した嚢切開、（精密ナノパルス技術を利用する）zeptoを使用した切開、及びマーカーを利用した嚢切開（嚢開放に望ましいサイズを示すために、角膜に規定のマーカーを使用して印が付けられる）などの様々な強化技術が、嚢切開を行うために開発されている。

10

【0006】

その後、ハイドロダイセクションとして知られているステップにおいて、白内障の外皮層を切り裂くために、角膜切開によって流体波を注入することが一般的である。ハイドロデリニエーションとして知られている後続のステップにおいて、水晶体の外側のより柔らかいエピ核は、流体波の注入によって内側のより硬いエンド核から分離される。次のステップでは、水晶体乳化吸引として知られているプロセスにおいて水晶体の超音波乳化が行われる。水晶体の核は初めにチョッパーを使用して破碎され、その後に通常は超音波水晶体乳化吸引プローブを使用して、水晶体の外側断片が破壊及び除去される。更に通常は、水晶体乳化吸引中に吸引を行うために別個のツールが使用される。水晶体乳化吸引が完了すると、残っている水晶体皮質（すなわち水晶体の外層）物質が水晶体嚢から吸引される。水晶体乳化吸引及び吸引の間、吸引された流体が通常、前眼房内の流体圧力を維持するために、平衡塩類溶液の灌流によって補われる。いくつかの例では、必要と見なされれば水晶体嚢は研磨される。その後、眼内レンズ（IOL）が水晶体嚢に挿入される。IOLは通常、折り畳み可能であり、折り畳まれた状態で挿入された後、水晶体嚢内部で展開される。この段階において、粘弾性物質は通常、以前に流体を水晶体嚢から吸引するのに使用された吸引デバイスを使用して除去される。必要であれば、眼球内の圧力を高めることによって切開部を塞ぎ、切開部の内部組織を外部組織に押し当てることによって強制的に切開部を閉じる。

20

30

【発明の概要】

【0007】

本発明のいくつかの適用例によれば、ロボットシステムは、眼内手術などのマイクロ手術処置で用いるために構成されている。通常、ロボットシステムは、撮像システム、1つ以上のディスプレイ、及び制御コンポーネントユニット（例えば、ジョイスティックなどの一對の制御コンポーネントを含む制御コンポーネントユニット）に加えて、1つ以上のロボットユニット（ツールを保持するように構成されている）を含み、制御コンポーネントユニットを介して、1人以上のオペレータ（例えば医師及び／又は看護師などの医療専門家）がロボットユニットを制御することができる。通常、ロボットシステムは1つ以上のコンピュータプロセッサを含み、これを介して、システムのコンポーネントと1人以上のオペレータは相互に動作可能に相互作用する。本出願の範囲は、相互に異なる様々な位置のいずれかに1つ以上のロボットユニットを搭載することを含む。

40

【0008】

通常、ロボットユニットの移動（及び／又はロボットシステムの他の態様の制御）は、少なくとも部分的に、1人以上のオペレータ（例えば医師及び／又は看護師などの医療専門家）によって制御される。例えばオペレータは、ディスプレイによって、患者の眼及びロボットユニット及び／又はそこに配置されたツールの画像を受信することができる。受信画像に基づいて、通常、オペレータは処置のステップを実行する。いくつかの適用例では、オペレータは制御コンポーネントユニットを介してロボットユニットにコマンドを与

50

える。通常、そのようなコマンドは、ロボットユニット内に配置されているツールの位置及び／又は向きを制御するコマンド、及び／又はツールによって実行される動作を制御するコマンドを含む。例えばコマンドは、刃、水晶体乳化吸引ツール（例えば水晶体乳化吸引ツールの動作モード及び／又は吸引力）、及び／又は注入器ツール（例えば、どの流体（例えば粘弾性流体、生理食塩水など）を注入すべきか、及び／又はどのくらいの流量で注入すべきか）を制御することができる。代替的に又は追加的に、オペレータは、撮像システム（例えば撮像システムのズーム、焦点、及び／又はx-y位置決め）を制御するコマンドを入力できる。いくつかの適用例では、コマンドは、例えば眼の中で眼内レンズを精密に位置決めするため眼の中の眼内レンズを操作するように眼内レンズマニピュレータツールを制御することを含む。

10

【0009】

通常、制御コンポーネントユニットは、ロボットシステムの各ロボットユニットに対応するよう構成された1つ以上の制御コンポーネントジョイスティックを含む。例えば、システムは第1及び第2のロボットユニットを含み、制御コンポーネントユニットは第1及び第2のジョイスティックを含むことができる。通常、各ジョイスティックは、関節を介して相互に結合された複数のリンクを含む制御コンポーネントアームである。（「ジョイスティック」及び「制御コンポーネントアーム」という用語は、本開示では相互に交換可能に用いられる。）いくつかの用途では、制御コンポーネントジョイスティックは、（ロボットユニットを再現するために）各制御コンポーネントツールを含む。通常、コンピュータプロセッサは、制御コンポーネントツールの先端部のXYZ位置及び向きを決定し、処置を実行するために使用されている実際のツールの先端部が制御コンポーネントツールの先端部の動きを追うようにロボットユニットを駆動する。場合によっては、処置を実行するために使用されている実際のツールは、本明細書及び特許請求の範囲において、「眼科ツール（ophthalmic tool）」と記載される。この用語は、処置を実行するために使用されている実際のツールと制御コンポーネントツールとを区別するために用いられ、いかなる点でも、使用され得るツールのタイプを限定するものとして解釈すべきではない。「眼科ツール」という用語は、本明細書に記載されているツールのいずれか1つ、又は、本開示を読んだ当業者が想到し得る他のいずれかのタイプのツールを含むものと解釈されるべきである。

20

【0010】

通常、白内障処置の際、眼の角膜に1回以上の切開（通常、2又は3回の切開）が行われる。切開は通常、ケラトーム刃と呼ばれる専用刃を使用して行われる。通常、ロボットユニットは、患者の眼内へ眼科ツールを挿入するよう構成されており、患者の眼内への眼科ツールの進入は角膜の切開部を介して行われると共にツールの先端部は患者の眼内に配置されるようになっている。更に通常は、ロボットシステムは、患者の眼内へのツールの進入口（entry）を切開部内に留まるよう制約するように、患者の眼内でツールの先端部を動かすよう構成されている。

30

【0011】

非ロボット前眼部手術を行うため、外科医は通常、患者の角膜に1回以上の切開を行い、その後これが様々な手術用ツールの進入ポイントとして用いられる。ツールは切開部を介して挿入され、手術目標を達成するため眼内で操作される。この操作が行われる間、ツールは、切開縁部に強く押し当てられないこと、過度に上方に持ち上げられたり下方に押し下げられたりしないことが医学的に好ましい。このような動きは切開縁部を引き裂き、これによって切開部が拡大して手術結果に悪影響を及ぼす可能性がある。理想的には、外科医は、切開部を介したツールの進入ポイントにおいて、ツールが切開部の中心を軸として回転するが横方向に動かないようにツールを操作する。本明細書において、切開部におけるツールのこのような動きは、運動中心（center of motion）を維持すると記載される。本明細書で記載されているようなロボット処置では、上記したツールの動きは、遠隔運動中心（remote center of motion）を維持すると記載される。これは、ツールが通常、遠くから制御される（例えば制御コンポーネン

40

50

トユニットによって）からである。非ロボット処置では、特に外科医が現在の外科的処置を行っているツール先端部に集中する必要がある場合、運動中心を手作業で維持することは難しい場合がある。本発明のいくつかの適用例によれば、本発明のいくつかの適用例によって、オペレータがロボット支援外科手術を行うのを支援するためにフィードバックが提供される。（以下で更に詳しく記載されるように）通常は制御コンポーネントユニットによって提供されるフィードバックは、通常、遠隔運動中心から逸脱する（*violation*）ジョイスティック及び／又は制御コンポーネントツールの動きをオペレータが試みた場合、この動きに対向する力を加えることによって、オペレータが眼科ツールの遠隔運動中心を維持するのを支援する。

【0012】

上述したように、いくつかの適用例では、オペレータは制御コンポーネントユニットを介してロボットユニットにコマンドを与える。通常、このようなコマンドは、ロボットユニット内に配置されているツールの位置及び／又は向きを制御するコマンド、及び／又はツールによって実行される動作を制御するコマンドを含む。いくつかの適用例では、ロボットユニットは、患者の眼内へのツールの進入口を切開部内で動かせるように構成され、コンピュータプロセッサは、出力ユニットを駆動して、切開部内での患者の眼内へのツールの進入位置を示すフィードバックをオペレータに与えるように構成されている。例えば、コンピュータプロセッサは、切開ゾーンと切開ゾーン内のツール進入位置とを示す出力をディスプレイ上に発生させることができる。いくつかの適用例では、患者の眼内へのツール進入位置が切開縁部から所与の距離内になるようにツールが移動されると、視覚又は音声による警報などの出力が発生される。

【0013】

いくつかの適用例では、コンピュータプロセッサは、制御コンポーネントユニットを駆動して、切開部内での患者の眼内へのツールの進入位置を示すフィードバックをオペレータに与えるように構成されている。例えば、患者の眼内へのツールの進入位置が切開縁部に近づくようにツールが移動されると、制御コンポーネントアームの移動に対する抵抗を増大させる、及び／又は制御コンポーネントアームを振動させる、及び／又は異なる出力を発生させることができる。なお、本発明のいくつかのそのような適用例によれば、眼科ツール自体の動きは遠隔運動中心を維持するように制約されず、ツールは自由に移動することができる。しかしながら、制御コンポーネントユニットは、眼科ツールが遠隔運動中心位置を切開部内又は切開ゾーン内に維持するように、オペレータによるジョイスティック及び制御コンポーネントツールの移動を支援するための力フィードバック（及び／又は他のフィードバック）をオペレータに与える。

【0014】

従って、本発明のいくつかの適用例によれば、先端部を有する眼科ツールを用いて患者の眼に処置を行うための装置が提供される。この装置は、

眼科ツールを動かすように構成されたロボットユニットと、

制御コンポーネントユニットであって、

オペレータによって動かすように構成され、先端部を規定する制御コンポーネントツールと、

制御コンポーネントツールに結合され、1つ以上の位置センサを含む少なくとも1つの制御コンポーネントアームと、

を含む制御コンポーネントユニットと、

コンピュータプロセッサであって、

ロボットユニットを駆動し、患者の眼の角膜の切開部を介して患者の眼内に眼科ツールを挿入して、眼科ツールの先端部が患者の眼内に配置されると共に眼科ツールの遠隔運動中心位置が切開部内に配置されるようにし、

1つ以上の位置センサから受信したデータに基づいて制御コンポーネントツールの先端部の位置及び向きを決定し、

制御コンポーネントツールの動きに一致するように患者の眼内で眼科ツールの先端部

10

20

30

40

50

を動かし、

切開部に対する眼科ツールの遠隔運動中心位置の配置を示すフィードバックをオペレータに与える、
ように構成されているコンピュータプロセッサと、
を含む。

【0015】

いくつかの適用例において、制御コンポーネントアームは、回転アーム関節を介して相互に結合された複数のリンクを含み、1つ以上の位置センサは、

3つの回転エンコーダであって、各々が、回転アーム関節のそれぞれ1つに結合され、各回転アーム関節の動きを検出すると共にそれに応じて制御コンポーネントツールの先端部のXYZ位置を示す回転エンコーダデータを発生させるように構成された、3つの回転エンコーダと、

10

3軸加速度計、3軸ジャイロ스코プ、及び3軸磁力計から成る群から選択されたセンサの少なくとも1つを含む慣性測定ユニットであって、制御コンポーネントツールの先端部の向きを示す慣性測定ユニットデータを発生させるように構成された、慣性測定ユニットと、
を含む。

【0016】

いくつかの適用例において、制御コンポーネントアームは、回転アーム関節を介して相互に結合された複数のリンクを含み、制御コンポーネントツールは、3つの回転ツール関節を介して制御コンポーネントアームに結合され、1つ以上の位置センサは、

20

回転アーム関節のそれぞれ1つに結合され、回転アーム関節の動きを検出すると共にそれに応じて制御コンポーネントツールの先端部のXYZ位置を示す回転エンコーダデータを発生させるように構成された、2つの回転エンコーダと、

回転ツール関節のそれぞれ1つに結合され、回転ツール関節の動きを検出すると共にそれに応じて制御コンポーネントツールの先端部の向きを示す回転エンコーダデータを発生させるように構成された、1つの回転エンコーダと、

3軸加速度計、3軸ジャイロ스코プ、及び3軸磁力計から成る群から選択されたセンサの少なくとも1つを含む慣性測定ユニットであって、制御コンポーネントツールの先端部の向きを示す慣性測定ユニットデータを発生させるように構成された、慣性測定ユニットと、
を含む。

30

【0017】

いくつかの適用例において、コンピュータプロセッサは、眼科ツールの遠隔運動中心位置が切開部の縁部から所与の距離内になるように眼科ツールが移動されると警報を発生することによって、切開部に対する眼科ツールの遠隔運動中心位置の配置を示すフィードバックをオペレータに与えるように構成されている。

【0018】

いくつかの適用例において、コンピュータプロセッサは音声による警報を発生するように構成されている。

40

【0019】

いくつかの適用例において、コンピュータプロセッサは視覚による警報を発生するように構成されている。

【0020】

いくつかの適用例において、コンピュータプロセッサは、制御コンポーネントアームを介してフィードバックをオペレータに与えることによって、切開部に対する眼科ツールの遠隔運動中心位置の配置を示すフィードバックをオペレータに与えるように構成されている。

【0021】

いくつかの適用例において、コンピュータプロセッサは、

50

患者の眼内へ挿入された眼科ツールのアイデンティティを決定し、
眼科ツールのアイデンティティに基づいて、切開部に対する眼科ツールの遠隔運動中心位置の配置を計算する、
ように構成されている。

【0022】

いくつかの適用例において、コンピュータプロセッサは、
制御コンポーネントツールの速度測定を行い、
速度測定に基づいてオペレータに加えられる力を計算し、
制御コンポーネントを駆動して、計算した力をオペレータに加える
ことによって、制御コンポーネントを介してカフィードバックをオペレータに与えるよう
に構成されている。 10

【0023】

いくつかの適用例において、コンピュータプロセッサは、
切開部に対する眼科ツールの位置の測定を行い、
位置測定に基づいてオペレータに加えられる力を計算し、
制御コンポーネントアームを駆動して、計算した力をオペレータに加える
ことによって、制御コンポーネントアームを介してカフィードバックをオペレータに与え
るよう構成されている。

【0024】

いくつかの適用例において、コンピュータプロセッサは、オペレータが制御コンポーネ
ントツールに加えた力と等しく、かつ反対方向であるような力を計算することによって、
オペレータに加えられる力を計算するように構成されている。 20

【0025】

いくつかの適用例において、コンピュータプロセッサは、切開部の中心から眼科ツールの
の外縁部までの距離に比例するような力を計算することによって、オペレータに加えられる
力を計算するように構成されている。

【0026】

いくつかの適用例において、コンピュータプロセッサは、オペレータが受けたいカフィ
ードバックの剛性を示す入力をオペレータから受信し、少なくとも部分的にオペレータか
らの入力に基づいてオペレータに加えられる力を計算するように構成されている。 30

【0027】

いくつかの適用例において、コンピュータプロセッサは、切開部に対する眼科ツールの
遠隔運動中心位置の動きをどのように制約するべきかに対応するように、制御コンポーネ
ントツールの動きを制約するように構成されている。

【0028】

いくつかの適用例において、コンピュータプロセッサは、眼科ツールの遠隔運動中心位
置が切開部よりも大きい切開ゾーン内に留まるよう制約するように、制御コンポーネント
ツールの動きを制約するように構成されている。

【0029】

いくつかの適用例において、コンピュータプロセッサは、眼科ツールの遠隔運動中心位
置が切開部内に留まるよう制約するように、制御コンポーネントツールの動きを制約する
ように構成されている。 40

【0030】

いくつかの適用例において、コンピュータプロセッサは、切開部の中心からの2つの方
向における眼科ツールの外縁部の距離に基づく力関数を計算することによって、オペレー
タに加えられる力を計算するように構成されている。

【0031】

いくつかの適用例において、2つの方向のうち第1のものは、切開部に平行であると共
に切開部における患者の眼の角膜の接線であり、2つの方向のうち第2のものは、第1の
方向に垂直であると共に切開部における患者の眼の角膜の接線である。 50

【0032】

いくつかの適用例において、

制御コンポーネントアームは、回転アーム関節を介して相互に結合された複数のリンクと、各回転アーム関節に動作可能に結合された1つ以上のモータと、を含み、

コンピュータプロセッサは、複数のモータを用いて制御コンポーネントアームを駆動することによってカフィードバックをオペレータに与えるように構成されている。

【0033】

いくつかの適用例において、制御コンポーネントアームは各関節に動作可能に結合された3つのモータを含む。

【0034】

いくつかの適用例において、制御コンポーネントアームはベルトを含み、モータのうち少なくとも1つはベルトを介して回転アーム関節のうち対応する1つに動作可能に結合されて、モータのうち少なくとも1つが回転アーム関節のうち対応する1つを直接駆動する場合に比べてモータのうち少なくとも1つが制御コンポーネントユニットのベースの近くに配置されるようになっている。

【0035】

いくつかの適用例において、1つ以上のモータの過半数は、これらのモータが動作可能に結合されている回転アーム関節のうち対応する1つを直接駆動する。

【0036】

いくつかの適用例において、1つ以上の位置センサは、

3つの回転エンコーダであって、各々が、回転アーム関節のそれぞれ1つに結合され、各回転アーム関節の動きを検出すると共にそれに応じて制御コンポーネントツールの先端部のXYZ位置を示す回転エンコーダデータを発生させるように構成された、3つの回転エンコーダと、

3軸加速度計、3軸ジャイロスコープ、及び3軸磁力計から成る群から選択されたセンサの少なくとも1つを含む慣性測定ユニットであって、制御コンポーネントツールの先端部の向きを示す慣性測定ユニットデータを発生させるように構成された、慣性測定ユニットと、を含む。

【0037】

いくつかの適用例において、制御コンポーネントツールは、3つの回転ツール関節を介して制御コンポーネントアームに結合され、1つ以上の位置センサは、

回転アーム関節のそれぞれ1つに結合され、回転アーム関節の動きを検出すると共にそれに応じて制御コンポーネントツールの先端部のXYZ位置を示す回転エンコーダデータを発生させるように構成された、2つの回転エンコーダと、

回転ツール関節のそれぞれ1つに結合され、回転ツール関節の動きを検出すると共にそれに応じて制御コンポーネントツールの先端部の向きを示す回転エンコーダデータを発生させるように構成された、1つの回転エンコーダと、

3軸加速度計、3軸ジャイロスコープ、及び3軸磁力計から成る群から選択されたセンサの少なくとも1つを含む慣性測定ユニットであって、制御コンポーネントツールの先端部の向きを示す慣性測定ユニットデータを発生させるように構成された、慣性測定ユニットと、を含む。

【0038】

更に、本発明のいくつかの適用例によれば、先端部を有する眼科ツールを用いて患者の眼に処置を行うための装置が提供される。この装置は、

ツールを動かすように構成されたロボットユニットと、

制御コンポーネントユニットであって、

オペレータによって動かすように構成され、先端部を規定する制御コンポーネントツールと、

10

20

30

40

50

制御コンポーネントツールに結合された制御コンポーネントアームであって、
回転アーム関節を介して相互に結合された複数のリンクと、
1つ以上の位置センサと、
各回転アーム関節に動作可能に結合された1つ以上のモータと、
を含む制御コンポーネントアームと、
を含む制御コンポーネントユニットと、
コンピュータプロセッサであって、
ロボットユニットを駆動し、患者の眼の角膜の切開部を介して患者の眼内に眼科ツールを挿入して、眼科ツールの先端部が患者の眼内に配置されるようにし、
1つ以上の位置センサから受信したデータに基づいて制御コンポーネントツールの先端部の位置及び向きを決定し、
制御コンポーネントツールの動きに一致するように患者の眼内で選択された眼科ツールの先端部を動かし、
複数のモータを用いて制御コンポーネントアームを駆動することによってカフィードバックをオペレータに与える、
ように構成されているコンピュータプロセッサと、
を含む。

10

【0039】

いくつかの適用例において、制御コンポーネントは各回転アーム関節に動作可能に結合された3つのモータを含む。

20

【0040】

いくつかの適用例において、制御コンポーネントアームはベルトを含み、モータのうち少なくとも1つはベルトを介して回転アーム関節のうち対応する1つに動作可能に結合されて、モータのうち少なくとも1つが回転アーム関節のうち対応する1つを直接駆動する場合に比べてモータのうち少なくとも1つが制御コンポーネントユニットのベースの近くに配置されるようになっている。

【0041】

いくつかの適用例において、1つ以上のモータの過半数は、これらのモータが動作可能に結合されている回転アーム関節のうち対応する1つを直接駆動する。

【0042】

いくつかの適用例において、1つ以上の位置センサは、

3つの回転エンコーダであって、各々が、回転アーム関節のそれぞれ1つに結合され、各回転アーム関節の動きを検出すると共にそれに応じて制御コンポーネントツールの先端部のXYZ位置を示す回転エンコーダデータを発生させるように構成された、3つの回転エンコーダと、

3軸加速度計、3軸ジャイロスコープ、及び3軸磁力計から成る群から選択されたセンサの少なくとも1つを含む慣性測定ユニットであって、制御コンポーネントツールの先端部の向きを示す慣性測定ユニットデータを発生させるように構成された、慣性測定ユニットと、
を含む。

40

【0043】

いくつかの適用例において、制御コンポーネントツールは、3つの回転ツール関節を介して制御コンポーネントアームに結合され、1つ以上の位置センサは、

回転アーム関節のそれぞれ1つに結合され、回転アーム関節の動きを検出すると共にそれに応じて制御コンポーネントツールの先端部のXYZ位置を示す回転エンコーダデータを発生させるように構成された、2つの回転エンコーダと、

回転ツール関節のそれぞれ1つに結合され、回転ツール関節の動きを検出すると共にそれに応じて制御コンポーネントツールの先端部の向きを示す回転エンコーダデータを発生させるように構成された、1つの回転エンコーダと、

3軸加速度計、3軸ジャイロスコープ、及び3軸磁力計から成る群から選択されたセン

50

サの少なくとも1つを含む慣性測定ユニットであって、制御コンポーネントツールの先端部の向きを示す慣性測定ユニットデータを発生させるように構成された、慣性測定ユニットと、
を含む。

【0044】

いくつかの適用例において、コンピュータプロセッサは、
ロボットユニットを駆動し、患者の眼の角膜の切開部を介して患者の眼内に眼科ツールを挿入して、眼科ツールの先端部が患者の眼内に配置されると共に眼科ツールの遠隔運動中心位置が切開部内に配置されるようにし、
切開部に対する眼科ツールの遠隔運動中心位置の配置を示す力フィードバックをオペレータに与える、
ように構成されている。

10

【0045】

いくつかの適用例において、コンピュータプロセッサは、
患者の眼内へ挿入された眼科ツールのアイデンティティを決定し、
眼科ツールのアイデンティティに基づいて、切開部に対する眼科ツールの遠隔運動中心位置の配置を計算する、
ように構成されている。

【0046】

いくつかの適用例において、コンピュータプロセッサは、
制御コンポーネントツールの速度測定を行い、
速度測定に基づいてオペレータに加えられる力を計算し、
制御コンポーネントを駆動して、1つ以上のモータによって、計算した力をオペレータに加える
ことによって、制御コンポーネントを介して力フィードバックをオペレータに与えるように構成されている。

20

【0047】

いくつかの適用例において、コンピュータプロセッサは、
切開部に対する眼科ツールの位置の測定を行い、
位置測定に基づいてオペレータに加えられる力を計算し、
制御コンポーネントを駆動して、計算した力をオペレータに加える
ことによって、制御コンポーネントを介して力フィードバックをオペレータに与えるように構成されている。

30

【0048】

いくつかの適用例において、コンピュータプロセッサは、オペレータが制御コンポーネントツールに加えた力と等しく、かつ反対方向であるような力を計算することによって、オペレータに加えられる力を計算するように構成されている。

【0049】

いくつかの適用例において、コンピュータプロセッサは、切開部の中心から眼科ツールの外縁部までの距離に比例するような力を計算することによって、オペレータに加えられる力を計算するように構成されている。

40

【0050】

いくつかの適用例において、コンピュータプロセッサは、オペレータが受けたい力フィードバックの剛性を示す入力をオペレータから受信し、少なくとも部分的にオペレータからの入力に基づいてオペレータに加えられる力を計算するように構成されている。

【0051】

いくつかの適用例において、コンピュータプロセッサは、切開部に対する眼科ツールの遠隔運動中心位置の動きをどのように制約するべきかに対応するように、制御コンポーネントツールの動きを制約するように構成されている。

【0052】

50

いくつかの適用例において、コンピュータプロセッサは、眼科ツールの遠隔運動中心位置が切開部よりも大きい切開ゾーン内に留まるよう制約するように、制御コンポーネントツールの動きを制約するように構成されている。

【0053】

いくつかの適用例において、コンピュータプロセッサは、眼科ツールの遠隔運動中心位置が切開部内に留まるよう制約するように、制御コンポーネントツールの動きを制約するように構成されている。

【0054】

いくつかの適用例において、コンピュータプロセッサは、切開部の中心からの2つの方向における眼科ツールの外縁部の距離に基づく力関数を計算することによって、オペレータに加えられる力を計算するように構成されている。

【0055】

いくつかの適用例において、2つの方向のうち第1のものは、切開部に平行であると共に切開部における患者の眼の角膜の接線であり、2つの方向のうち第2のものは、第1の方向に垂直であると共に切開部における患者の眼の角膜の接線である。

【0056】

更に、本発明のいくつかの適用例によれば、それぞれが先端部を有する複数の眼科ツールを用いて患者の眼に処置を行うための装置が提供される。この装置は、

眼科ツールを動かすように構成されたロボットユニットと、

コンピュータプロセッサであって、

ロボットユニットを駆動し、患者の眼の角膜の切開部を介して患者の眼内に眼科ツールのうち選択されたものを挿入して、選択された眼科ツールの先端部が患者の眼内に配置されると共に眼科ツールの遠隔運動中心位置が切開部内に配置されるようにし、

患者の眼内へ挿入された眼科ツールのアイデンティティを決定し、

選択された眼科ツールのアイデンティティに基づいて、切開部に対する眼科ツールの遠隔運動中心位置の配置を計算し、

切開部に対する選択された眼科ツールの遠隔運動中心位置の配置を示すフィードバックをオペレータに与える、

ように構成されているコンピュータプロセッサと、

を含む。

【0057】

いくつかの適用例において、先端部を有する眼科ツールを用いて患者の眼に処置を行うための方法が提供される。この方法は、

ロボットユニットを駆動し、患者の眼の角膜の切開部を介して患者の眼内に眼科ツールを挿入して、眼科ツールの先端部が患者の眼内に配置されると共に眼科ツールの遠隔運動中心位置が切開部内に配置されるようにすることと、

オペレータによって移動されるように構成された制御コンポーネントツールに結合されている制御コンポーネントアーム上に配置された1つ以上の位置センサから受信したデータに基づいて、制御コンポーネントツールの先端部の位置及び向きを決定することと、

制御コンポーネントツールの動きに一致するように患者の眼内で眼科ツールの先端部を動かすことと、

切開部に対する眼科ツールの遠隔運動中心位置の配置を示すフィードバックをオペレータに与えることと、

を含む。

【0058】

更に、先端部を有する眼科ツールを用いて患者の眼に処置を行うための方法が提供される。この方法は、

ロボットユニットを駆動し、患者の眼の角膜の切開部を介して患者の眼内に眼科ツールを挿入して、眼科ツールの先端部が患者の眼内に配置されると共に眼科ツールの遠隔運動中心位置が切開部内に配置されるようにすることと、

オペレータによって移動されるように構成されたコンポーネントツールに結合されている制御コンポーネントアーム上に配置された1つ以上の位置センサから受信したデータに基づいて、制御コンポーネントツールの先端部の位置及び向きを決定することと、

制御コンポーネントツールの動きに一致するように患者の眼内で眼科ツールの先端部を動かすことと、

制御コンポーネントアームを介してフィードバックをオペレータに与えることと、を含み、制御コンポーネントアームは、回転アーム関節を介して相互に結合された複数のリンクと、各回転アーム関節に動作可能に結合された1つ以上のモータと、を含み、フィードバックは、複数のモータを用いて制御コンポーネントアームを駆動することによってオペレータに与えられる。

10

【0059】

更に、本発明のいくつかの適用例によれば、それぞれが先端部を有する複数の眼科ツールを用いて患者の眼に処置を行うための方法が提供される。この方法は、

ロボットユニットを駆動し、患者の眼の角膜の切開部を介して患者の眼内に眼科ツールを挿入して、眼科ツールの先端部が患者の眼内に配置されると共に眼科ツールの遠隔運動中心位置が切開部内に配置されるようにすることと、

患者の眼内へ挿入された眼科ツールのアイデンティティを決定することと、

選択された眼科ツールのアイデンティティに基づいて、切開部に対する眼科ツールの遠隔運動中心位置の配置を計算することと、

切開部に対する選択された眼科ツールの遠隔運動中心位置の配置を示すフィードバックをオペレータに与えることと、を含む。

20

【0060】

更に、本発明のいくつかの適用例によれば、1つ以上のツールを用いて患者の眼にロボットによるマイクロ手術を行うための装置が提供される。この装置は、

エンドエフェクタと、

エンドエフェクタに結合され、1つ以上のツールをしっかりと保持するように構成されたツールマウントと、

エンドエフェクタに結合され、1つ以上のツールのヨー及びピッチ角回転を制御するように構成された1つ以上のロボットアームであって、ツールマウントで保持されたツールの先端部が患者の眼内で所望のように動くようになっていると共に、患者の眼内へのツールの進入位置は切開ゾーン内に維持され、切開ゾーンは、切開ゾーンを貫通するツールの最大断面の150パーセントよりも大きい、1つ以上のロボットアームと、

30

ツールを所望のように動かすためオペレータによって移動されるよう構成された制御コンポーネントと、

切開ゾーン内での患者の眼内へのツールの進入位置の位置を示すフィードバックをオペレータに与えるように構成された出力ユニットと、を含む。

【0061】

いくつかの適用例において、出力ユニットは、切開ゾーン及び切開ゾーン内のツールの進入位置を示すディスプレイを含む。

40

【0062】

いくつかの適用例において、出力ユニットは、患者の眼内へのツールの進入位置が切開ゾーンの縁部に近付くようにツールが移動されると警報を発生させるように構成された出力ユニットを含む。

【0063】

いくつかの適用例において、出力ユニットは、触覚フィードバックをオペレータに与えるように構成された制御コンポーネントの一部を含む。

【0064】

いくつかの適用例において、制御コンポーネントは、患者の眼内へのツールの進入位置

50

が切開ゾーンの縁部に近付くと、制御コンポーネントの移動に対する抵抗を増大させるように構成されている。

【0065】

本発明は、添付図面と共に以下の実施形態の詳細な説明を検討することによって、更に十分に理解されるであろう。

【図面の簡単な説明】

【0066】

【図1】本発明のいくつかの適用例に従った、眼内手術などのマイクロ手術処置で用いるために構成されたロボットシステムの概略図である。

【図2】本発明のいくつかの適用例に従った、患者の角膜の切開部の概略図である。

10

【図3A】本発明のいくつかの適用例に従った、患者の角膜を介して挿入されたツールの概略図であり、ツールの先端部は患者の眼内で所望のように動かされると共に、患者の眼内へのツール進入位置は切開ゾーン内に維持される。

【図3B】本発明のいくつかの適用例に従った、患者の角膜を介して挿入されたツールの概略図であり、ツールの先端部は患者の眼内で所望のように動かされると共に、患者の眼内へのツール進入位置は切開ゾーン内に維持される。

【図4A】本発明の適用例に従った、制御コンポーネントユニットがオペレータに与えるフィードバックの力を、被験者の角膜の切開部の中心からのツールの一部の距離の関数として、図表で示すグラフである。

【図4B】本発明の適用例に従った、制御コンポーネントユニットがオペレータに与えるフィードバックの力を、被験者の角膜の切開部の中心からのツールの一部の距離の関数として、図表で示すグラフである。

20

【図4C】本発明の適用例に従った、制御コンポーネントユニットがオペレータに与えるフィードバックの力を、被験者の角膜の切開部の中心からのツールの一部の距離の関数として、図表で示すグラフである。

【図4D】本発明の適用例に従った、制御コンポーネントユニットがオペレータに与えるフィードバックの力を、被験者の角膜の切開部の中心からのツールの一部の距離の関数として、図表で示すグラフである。

【図4E】本発明の適用例に従った、制御コンポーネントユニットがオペレータに与えるフィードバックの力を、被験者の角膜の切開部の中心からのツールの一部の距離の関数として、図表で示すグラフである。

30

【図4F】本発明の適用例に従った、制御コンポーネントユニットがオペレータに与えるフィードバックの力を、被験者の角膜の切開部の中心からのツールの一部の距離の関数として、図表で示すグラフである。

【図4G】本発明の適用例に従った、制御コンポーネントユニットがオペレータに与えるフィードバックの力を、被験者の角膜の切開部の中心からのツールの一部の距離の関数として、図表で示すグラフである。

【図4H】本発明の適用例に従った、制御コンポーネントユニットがオペレータに与えるフィードバックの力を、被験者の角膜の切開部の中心からのツールの一部の距離の関数として、図表で示すグラフである。

40

【図4I】本発明の適用例に従った、制御コンポーネントユニットがオペレータに与えるフィードバックの力を、被験者の角膜の切開部の中心からのツールの一部の距離の関数として、図表で示すグラフである。

【図5】本発明のいくつかの適用例に従った処置のステップを示すフローチャートである。

【図6A】本発明のいくつかの適用例に従ったジョイスティック及び制御コンポーネントツールの概略図である。

【図6B】本発明のいくつかの適用例に従ったジョイスティック及び制御コンポーネントツールの概略図である。

【図6C】本発明のいくつかの適用例に従ったジョイスティック及び制御コンポーネント

50

ツールの概略図である。

【図 7】本発明のいくつかの適用例に従った制御コンポーネントジョイスティックのいくつかの追加コンポーネントの概略図である。

【発明を実施するための形態】

【0067】

これより、本発明のいくつかの適用例に従った、眼内手術などのマイクロ手術処置で用いるために構成されたロボットシステム 10 の概略図である図 1 を参照する。通常、眼内手術に用いられる場合、ロボットシステム 10 は、撮像システム 22、1 つ以上のディスプレイ 24、及び制御コンポーネントユニット 26（例えば、図 1 の拡大部分に示されているジョイスティック 30 などの一対の制御コンポーネントを含む制御コンポーネントユニット）に加えて、1 つ以上のロボットユニット 20（ツール 21 を保持するように構成されている）を含み、制御コンポーネントユニットを介して、1 人以上のオペレータ 25（例えば医師及び／又は看護師などの医療専門家）がロボットユニット 20 を制御することができる。通常、ロボットシステム 10 は 1 つ以上のコンピュータプロセッサ 28 を含み、これを介して、システムのコンポーネントと 1 人以上のオペレータ 25 は相互に動作可能に相互作用する。本出願の範囲は、相互に異なる様々な位置のいずれかに 1 つ以上のロボットユニットを搭載することを含む。

【0068】

通常、ロボットユニットの移動（及び／又はロボットシステムの他の態様の制御）は、少なくとも部分的に、1 人以上のオペレータ 25（例えば医師及び／又は看護師などの医療専門家）によって制御される。例えばオペレータは、ディスプレイ 24 によって、患者の眼及びロボットユニット及び／又はそこに配置されたツールの画像を受信することができる。通常、そのような画像は撮像システム 22 によって捕捉される。いくつかの適用例では、撮像システム 22 は立体撮像デバイスであり、ディスプレイ 24 は立体画像ディスプレイである。受信画像に基づいて、通常、オペレータは処置のステップを実行する。いくつかの適用例では、オペレータは制御コンポーネントユニット 26 を介してロボットユニットにコマンドを与える。通常、そのようなコマンドは、ロボットユニット内に配置されているツールの位置及び／又は向きを制御するコマンド、及び／又はツールによって実行される動作を制御するコマンドを含む。例えばコマンドは、刃、水晶体乳化吸引ツール（例えば水晶体乳化吸引ツールの動作モード及び／又は吸引力）、及び／又は注入器ツール（例えば、どの流体（例えば粘弾性流体、生理食塩水など）を注入すべきか、及び／又はどのくらいの流量で注入すべきか）を制御することができる。代替的に又は追加的に、オペレータは、撮像システム（例えば撮像システムのズーム、焦点、及び／又は x-y 位置決め）を制御するコマンドを入力できる。いくつかの適用例では、コマンドは、例えば眼の中で眼内レンズを精密に位置決めするため眼の中の眼内レンズを操作するように眼内レンズマニピュレータツールを制御することを含む。

【0069】

通常、制御コンポーネントユニットは、ロボットシステムの各ロボットユニット 20 に対応するよう構成された 1 つ以上の制御コンポーネントジョイスティック 30 を含む。例えば、図示のように、システムは第 1 及び第 2 のロボットユニットを含み、図示のように、制御コンポーネントユニットは第 1 及び第 2 のジョイスティックを含むことができる。通常、各ジョイスティックは、関節によって相互に結合された複数のリンクを含む制御コンポーネントアームである。これについては、以下で図 6 A から図 7 を参照して更に詳しく記載する。いくつかの用途では、図 1 で示されているように、制御コンポーネントジョイスティックは、（ロボットユニットを再現するために）各制御コンポーネントツール 32 を含む。通常、コンピュータプロセッサは、制御コンポーネントツール 32 の先端部の XYZ 位置及び向きを決定し、処置を実行するために使用されている実際のツール 21 の先端部が制御コンポーネントツールの先端部の動きを追うようにロボットユニットを駆動する。場合によっては、ツール 21 は、本明細書及び特許請求の範囲において、「眼科ツール」と記載される。この用語は、ツール 21 と制御コンポーネントツール 32 とを区別

するために用いられ、いかなる点でも、ツール 21 として使用され得るツールのタイプを限定するものとして解釈するべきではない。「眼科ツール」という用語は、本明細書に記載されているツールのいずれか 1 つ、又は、本開示を読んだ当業者が想到し得る他のいずれかのタイプのツールを含むものと解釈されるべきである。

【0070】

これより、本発明のいくつかの適用例に従った、患者の角膜 42 の切開部 40 の概略図である図 2 を参照する。背景技術の節で上述したように、通常、白内障処置の際、眼の角膜に 1 回以上の切開（通常、2 又は 3 回の切開）が行われる。切開は通常、ケラトーム刃と呼ばれる専用刃を使用して行われる。通常、ロボットユニットは、患者の眼内へツール 21 を挿入するよう構成されており、患者の眼内へのツールの進入は切開部 40 を介して行われると共にツールの先端部は患者の眼内に配置されるようになっている。更に通常は、ロボットシステム 10 は、患者の眼内へのツールの進入口を切開部内に留まるよう制約するように、患者の眼内でツールの先端部を動かすよう構成されている。いくつかの適用例では、切開部の幅はケラトーム刃の幅に等しい。切開部中心点 43（図 2 でマーキングされている）は、これにより、切開部幅内の中心にある角膜表面上のポイントとして規定される。図 2 では軸が追加されており、x 軸は切開部に平行であると共に切開部における角膜の接線であり、y 軸は x 軸に垂直であると共に切開部における角膜の接線である。以下で x 軸及び y 軸を参照して本発明の例を記載する。

【0071】

非ロボット前眼部手術を行うため、外科医は通常、患者の角膜に 1 回以上の切開を行い、その後これが様々な手術用ツールの進入ポイントとして用いられる。ツールは切開部を介して挿入され、手術目標を達成するため眼内で操作される。この操作が行われる間、ツールは、切開縁部に強く押し当てられないこと、過度に上方に持ち上げられたり下方に押し下げられたりしないことが医学的に好ましい。このような動きは切開縁部を引き裂き、これによって切開部が拡大し手術結果に悪影響を及ぼす可能性がある。理想的には、外科医は、切開部を介したツールの進入ポイントにおいて、ツールが切開部の中心を軸として回転するが横方向に動かないようにツールを操作する。本明細書において、切開部におけるツールのこのような動きは、運動中心を維持すると記載される。本明細書で記載されているようなロボット処置では、上記したツール 21 の動きは、遠隔運動中心を維持すると記載される。これは、ツールが通常、遠くから制御される（例えば制御コンポーネントユニット 26 によって）からである。非ロボット処置では、特に外科医が現在の外科的処置を行っているツール先端部に集中する必要がある場合、運動中心を手作業で維持することは難しい場合がある。本発明のいくつかの適用例によれば、オペレータがロボット支援外科手術を行うのを支援するためにフィードバックが提供される。（以下で更に詳しく記載されるように）通常は制御コンポーネントユニット 26 によって提供されるフィードバックは、通常、遠隔運動中心から逸脱するジョイスティック 30 及び／又は制御コンポーネントツール 32 の動きをオペレータが試みた場合、この動きに対向する力を加えることによって、オペレータがツール 21 の遠隔運動中心を維持するのを支援する。

【0072】

上述したように、いくつかの適用例では、オペレータは制御コンポーネントユニット 26（図 1 に示されている）を介してロボットユニットにコマンドを与える。通常、このようなコマンドは、ロボットユニット内に配置されているツールの位置及び／又は向きを制御するコマンド、及び／又はツールによって実行される動作を制御するコマンドを含む。いくつかの適用例では、ロボットユニットは、患者の眼内へのツールの進入口を切開部内で動かせるように構成され、コンピュータプロセッサは、出力ユニットを駆動して、切開部内での患者の眼内へのツールの進入位置を示すフィードバックをオペレータに与えるように構成されている。例えば、コンピュータプロセッサは、切開ゾーンと切開ゾーン内のツール進入位置とを示す出力を 1 又は複数のディスプレイ 24 上に発生させることができる。いくつかの適用例では、患者の眼内へのツール進入位置が切開縁部から所与の距離内になるようにツールが移動されると、視覚又は音声による警報などの出力が発生される。

いくつかの適用例では、コンピュータプロセッサは、制御コンポーネントユニットを駆動して、切開部内での患者の眼内へのツール進入位置を示すフィードバックをオペレータに与えるように構成されている。例えば、患者の眼内へのツール進入位置が切開縁部に近付くようにツールが移動されると、制御コンポーネントアームの移動に対する抵抗を増大させる、及び／又は制御コンポーネントアームを振動させる、及び／又は異なる出力を発生させることができる。なお、本発明のいくつかのそのような適用例によれば、ツール 21 自体の動きは遠隔運動中心を維持するように制約されず、ツールは自由に移動することができる。しかしながら、制御コンポーネントは、ツール 21 が遠隔運動中心を切開部内又は切開ゾーン内に維持するように、オペレータによるジョイスティック 30 及び制御コンポーネントツール 32 の移動を支援するための力フィードバック（及び／又は他のフィードバック）をオペレータに与える。以下で、上述のフィードバックのいくつかの適用例について更に詳しく記載する。

10

【0073】

これより、本発明のいくつかの適用例に従った、患者の角膜 42 を介して挿入されたツール 21 の概略図である図 3 A 及び図 3 B を参照する。ツールの先端部 50 は患者の眼内で所望のように動かされると共に、患者の眼内へのツール進入位置は切開部に維持される。図 3 A は切開部 40 を介した灌流吸引ツール 46 の挿入を示し、図 3 B は注射器 48 が挿入されていることを示す。通常、ロボットシステム 10 は、患者の眼にツール 21 を挿入するよう構成されており、患者の眼内へのツールの進入口（すなわちツールの遠隔運動中心位置）は切開部 40 を介して行われると共にツールの先端部 50 は患者の眼内に配置されるようになっている。更に通常は、ロボットシステムは、患者の眼内へのツールの進入口（すなわちツールの遠隔運動中心位置）が切開内に留まるように、オペレータが患者の眼内でツールの先端部を動かすのを支援するように構成されている。いくつかの適用例では、ロボットシステムは、患者の眼内へのツール進入口が切開部外に移動するのを防止するため、眼科ツールの動きをどのように制約するべきかに対応して制御コンポーネントツールの動きを制約することによってオペレータを支援するように構成されている。いくつかの適用例では、コンピュータプロセッサは、現在、切開部内（すなわちツールの遠隔運動中心位置）にあるツール 21 の部分に対応する制御コンポーネントツールの部分の動きを制約するフィードバックをオペレータに与える一方で、制御コンポーネントツールの先端部（ツール 21 の先端部に対応する）が所望のように動くことを可能とする。通常、制御コンポーネントツールは、1 つ以上の制御コンポーネントモータを用いてフィードバックを与えるように構成されている。これについては、以下で図 6 A から図 6 C を参照して更に詳しく記載する。

20

30

【0074】

いくつかの適用例では、コンピュータプロセッサは、切開部内に現在配置されているツール（すなわち、どのタイプのツールが切開部内に現在配置されているか）を識別し、切開部内に現在配置されていると識別されたツールに基づいて、切開部に対する眼科ツールの遠隔運動中心位置の配置を計算する。例えば、コンピュータプロセッサは、撮像システム 22 を用いて（例えば機械視覚アルゴリズムを用いて）捕捉された画像を分析することにより、切開部内に現在配置されているツールを識別する。代替的に又は追加的に、各ツールはツール識別コンポーネント（例えばマーカー、バーコード、及び／又は QR コード）を有することができ、コンピュータプロセッサは、撮像システム 22 を用いて捕捉された画像内のツール識別コンポーネントを識別することにより、切開内に現在配置されているツールを識別する。いくつかの適用例では、コンピュータプロセッサは、どのツールが切開部内に現在配置されているかを識別する手動入力を受信するように構成されている。上述したように、コンピュータプロセッサは通常、制御コンポーネントユニットを駆動して、切開部に対する眼科ツールの遠隔運動中心位置の配置に基づく力フィードバックをオペレータに与える。図 3 B を参照すると、いくつかの適用例では、患者の眼内へのツール進入口を、切開部（通常、切開ポイントを貫通するツールの最大断面寸法よりもわずかに大きいだけである）内に留まるように制約するのではなく、患者の眼内へのツール進入口

40

50

は、切開部よりも大きい切開ゾーン 41 内に留まるように制約される。いくつかの適用例では、切開ゾーンの面積は、切開ゾーンを貫通するツールの最大断面寸法の 150 パーセント超又は 200 パーセント超である。例えば、患者の眼内へのツール進入口は、 $2\text{ mm}^2 \sim 10\text{ mm}^2$ の面積を有する切開ゾーン内に留まるように制約され得る。あるいは、ロボットシステムは、患者の眼内へのツール進入口を、切開部を貫通するツールの最大断面寸法よりも少しだけ大きい切開部内に留まるように、又は、切開部を貫通するツールの最大断面寸法以下である切開部内に留まるように制約するよう構成されている。

【0075】

上述したように、通常、ロボットシステムは、ツールの先端部が患者の眼内で所望のように動かされると共に患者の眼内へのツール進入口が切開ゾーン内に維持されるように、オペレータがツール 21 を動かすのを支援するよう構成されている。切開部内にあり、遠隔運動中心として機能するツールの長手方向部分は、本明細書において「ツールの遠隔運動中心位置」と呼ばれる。（なお、処置の間に、切開部内にあるツールに沿った位置は変化し得る。ツールの遠隔運動中心位置は、現在切開部内にあるツールに沿ったどのような位置も表す。）一般に、ツールの遠隔運動中心位置が切開部内に留まるようにオペレータがツールの先端部を患者の眼内で動かすのを支援するロボットシステムの全ての記載は、オペレータがツールの遠隔運動中心位置を切開部自体内に維持するか、又は（例えば前の段落で記載されているように）切開部よりも所定量だけ大きい切開ゾーン内に維持するのを支援することを意味すると理解するべきである。いくつかの適用例では、制御コンポーネントユニットを介してオペレータに力を加える。この力は、切開部の中心に対するツールの外縁部の距離の関数として変動する。

【0076】

いくつかの適用例では、制御コンポーネントユニットは、制御コンポーネントジョイスティック 30 及び／又は制御コンポーネントツール 32 の配置（すなわち位置と向き）及び動きに基づいて計算される方向性のある力（*directional force*）を加えるように構成されている。例えばコンピュータプロセッサは、制御コンポーネントツールの動きの速度測定を行い、この速度測定に基づいて、物理的相互作用をシミュレーションする、制御コンポーネントアームに加えられる力を計算することができる。代替的に又は追加的に、コンピュータプロセッサは、切開部に対する眼科ツールの位置の測定を行い、この位置測定に基づいて、物理的相互作用をシミュレーションする、制御コンポーネントアームに加えられる力を計算することができる。いくつかの適用例では、制御コンポーネントアームはユーザにトルクを加えるように構成されている。いくつかの適用例では、オペレータが制御コンポーネントツール 32 の一部を特定の面を越えて動かそうとした時はいつでもオペレータに力を加えることにより、フィードバックは壁をシミュレーションするように構成されている。いくつかのそのような適用例では、加えられる力は、オペレータが越えることのできない硬い壁の感覚を与えるため、オペレータが制御コンポーネントツール 32 に加えた力と等しく、かつ反対方向であるように構成されている。代替的に又は追加的に、加えられる力は、切開部の中心から眼科ツール 21 の外縁部までの距離に比例するように構成されている。通常これは、奥へ入るほど進入しにくくなる、ばねのような弾力のある障害物の感覚を生じる。

【0077】

再び図 3A を参照すると、単なる例として、灌流吸引ツール 46 は、 2.6 mm 幅の切開部 40 を介して挿入することができる。灌流吸引ツール 46 の端部は、断面を貫通する明確に定義された長手方向軸 52 を有する。通常、灌流吸引ツール 46 の長手方向軸は、できる限り切開部 40 の中心の近くに維持することが望ましい。灌流吸引ツール 46 の長手方向軸が切開部中心を貫通していると仮定すると、もしもオペレータが x 軸に沿って所与の量よりも大きくツールを動かしたら、切開部の拡張が発生する可能性がある。通常は、組織の柔軟性のため、角膜を引き裂くことなくツールの外縁部を切開部の縁部を越えて動かすことができる。従って、上述したように、いくつかの適用例では、患者の眼内へのツールの進入口は、切開部よりも大きい切開ゾーン 41 内に留まるように制約される。

【0078】

いくつかの適用例では、ツール及び患者の眼の画像、並びにツール寸法に関する所定のデータに基づいて、コンピュータプロセッサは、切開部に対するツールの遠隔運動中心位置と向きを決定するように構成されている。いくつかの適用例では、コンピュータプロセッサは、切開を行う場合のケラトーム刃の位置と向き（及び、ケラトーム刃の幅に関する所定のデータ）に基づいて、又はコンピュータビジョンを用いることによって、又はこれら2つの組み合わせを用いることによって、切開部の位置を決定する。いくつかの適用例では、コンピュータプロセッサは、切開部に対する（例えば、切開部の中心に対する、切開部の縁部に対する、及び／又は切開ゾーンの縁部に対する）ツールの長手方向軸の位置を決定する。いくつかのツールの場合、長手方向軸は直線であり、ツールの断面は軸に対して対称である。いくつかのツールの場合、ツールの長手方向軸は直線でなく、ツールの長さに沿った異なる位置で様々に異なり、長手方向軸はツールの断面の重心に追従する。いくつかの適用例では、コンピュータプロセッサは、切開部に対する（例えば、切開部の中心に対する、切開部の縁部に対する、及び／又は切開ゾーンの縁部に対する）ツールの遠隔運動中心位置の外縁部の距離を決定する。通常、コンピュータプロセッサは、上述の計算に基づいて、オペレータに提供されるフィードバック力の大きさ及び／又は方向を決定する。

10

【0079】

いくつかの適用例では、上述の計算に基づいて、コンピュータプロセッサは、制御コンポーネントアームがオペレータに提供する力ベクトルを戻す力関数を計算する。本開示の範囲は、任意のタイプの力関数を提供することを含む。それらのうちいくつかは、図4Aから図4Iを参照して詳しく記載される。いくつかの適用例では、力関数は、x軸に沿った動き、y軸に沿った動き、又はこれら双方の動きに基づく。2方向の力関数は、2つの独立関数として、又は2つの入力を有する1つの関数として計算される。いくつかの適用例では（例えば直線の長手方向軸と一定の断面を有するツールの場合）、力は、z軸に沿った動き（すなわち、切開部を介した後退及び前進。z軸はx軸とy軸に対して垂直である）に基づいて加えられることはない。その理由は、z軸に沿った動きは、切開部内又は切開ゾーン内に留まっているツールの遠隔運動中心位置からの逸脱を引き起こさないからである。しかしながら、ツールの断面が長さに沿って変動する場合は、z軸に沿った動きによってフィードバックが生じ得る。その理由は、z軸に沿った動きの結果として、ツール断面の外縁部の位置が切開部又は切開ゾーンに対して変化するからである。同様に、ツールの長手方向軸がz軸に対してある角度に配置されている場合、z軸に沿った動きによってフィードバックが生じ得る。その理由は、z軸に沿った動きの結果として、ツール断面の外縁部の位置が切開部又は切開ゾーンに対して変化するからである。

20

30

【0080】

これより、本発明の各適用例に従った、制御コンポーネントアームに加えられる力の変動を、被験者の角膜の切開部からのツールの外縁部の距離の関数として図表で示すグラフである図4A、図4B、図4C、図4D、図4E、図4F、図4G、図4H、及び図4Iを参照する。

【0081】

図4Aを参照すると、いくつかの適用例では、階段関数が適用される。図3Aを参照して上述したように、一例として、灌流吸引ツール46は、2.6mm幅の切開部40を介して挿入することができる。この例では、x方向に階段関数を適用することができ、切開部の幅は2.6mmである。

40

【0082】

【数1】

50

$$F = 0; |x| \leq 1.3mm$$

$$F = 10N; |x| > 1.3mm$$

[関数 1]

10

【0083】

本例では、ツールの遠隔運動中心位置における切開部の中心からのツールの長手方向軸の距離の関数として力関数が適用されるが、本開示の範囲は、他の変数の関数として、例えば、ツールの遠隔運動中心位置における切開部の外縁部からのツールの外縁部の距離の関数として、力関数を計算することを含む。更に、本開示の範囲は、上記又は下記の例に与えられている特定の距離及び力によって解釈するべきではない。これらの例は、提供され得る力関数のタイプを実証するために与えられる。本開示の範囲は、与えられているものとは異なる距離及び力を用いてこれらのタイプの力関数が適用されるように、これらの例を変更することを含む。

20

【0084】

関数 1 を用いると、ツールの軸が x 軸に沿ったいずれかの方向で切開部中心から 1.3 mm 未満であるようにオペレータがツールを動かした場合、力は加えられない。ツールの軸が x 軸に沿ったいずれかの方向で切開部中心から 1.3 mm よりも遠くなるようにオペレータがツールを動かした場合、10 N の力が加えられる。この例では、力の大きさだけが図示されている。力の方向は通常、逸脱の方向とは反対である、すなわち、距離の符号とは反対である。より完全な関数を以下に示す。

【0085】

【数 2】

30

$$F = 0; |x| \leq 1.3mm$$

$$F = -10N; x > 1.3mm$$

$$F = +10N; x < 1.3mm$$

[関数 2]

40

【0086】

簡略化のため、本明細書に記載されている他の関数の全てについて、力は大きさとして表示されている。しかしながら、力の方向は通常、動きの方向と反対であり、切開部中心の方へ向けられることは理解されよう。

【0087】

図 4 A に示されている階段関数は、切開部の縁部で 2 つの仮想的な壁の感覚を生成するように作用する。オペレータは、ツールが切開部内にある間は力が加えられていると感じ

50

ないが、切開部の中心から 1.3 mm よりも遠くにツールの軸を動かそうとした場合、オペレータの動きとは反対方向の（本例では）10 N の力を感じる。通常、力の大きさは、デバイスが許容する限り大きくすることで、堅い壁をシミュレーションする。このような力関数では、もしもオペレータが（本例では）10 N を越える力を加えた場合、ツールのツール縁部は切開部外へ移動し、オペレータは制御コンポーネントアームで一定の反対方向の力を感じる。

【0088】

力関数の他の選択肢を用いて、オペレータに異なる感覚を発生させることができる。一例は、図 4 B にグラフで示されている線形関数である。このような場合、オペレータが切開部中心からツール軸を（又は切開部縁部からツール縁部を）遠くに動かすほど、ツールを切開部中心へ引き戻そうとして大きい力が加えられる。このような関数は通常、オペレータに「弾力のある（springy）」感覚を与える。これは、切開部の縁部にツールが押し付けられている感じを、階段関数よりも正確に反映することができる。更に、これによって、切開部の縁部を越えてどの程度ツールが押されたかを示す手がかりをオペレータに与えながら、オペレータが切開部の縁部を越えてツールを押すことを可能とする。

【0089】

いくつかの適用例では、関数の組み合わせが提供される。例えば、図 4 C にグラフで示されているように、切開部中心から特定の距離内で線形関数を適用することができ、中心からの距離が特定の量（図示されている例では 1 mm）を超えると線形関数を適用する。この場合、オペレータは通常、切開部内では抵抗を感じないが、切開部縁部に近付くと、切開部中心からの距離に対して線形に変化する力が加えられる。これは通常、切開部縁部に到達しつつあること又は到達したことを示す何らかの指示をオペレータに与える。図 4 B にグラフで示されている関数と同様、この関数によって、切開部の縁部を越えてどの程度ツールが押されたかを示す触覚による手がかりをオペレータに与えながら、オペレータが切開部の縁部を越えてツールを押すことを可能とする。

【0090】

いくつかの適用例では、力関数のパラメータは、所与の感覚を生成するように構成されている。例えば線形力関数では、以下に示す関数 3 を用いて、剛性 k を変えることでフィードバックの感じを変化させることができる。

【0091】

【数 3】

$$F = k|x|$$

〔関数 3〕

【0092】

図 4 D は、異なる剛性値を用いた線形力関数がどのように見えるかをグラフで示す。各ラインは異なる剛性値を表す。剛性値が低くなると、切開部中心から所与の距離で加えられる力が小さくなり、その逆も同様である。いくつかの適用例では、ロボットシステムは、オペレータが（例えばコンピュータプロセッサに入力を与えることによって）適用したい力関数及び／又は適用したい剛性レベルを選択することを可能とし、また、少なくとも部分的にオペレータの選択に基づいてオペレータに加えられる力を計算することを可能とする。高い剛性の力関数を好むオペレータもいれば（切開部の縁部の方へ又は縁部を越えてツールを動かしたことの明確な指示を受信するため）、低い剛性の力関数を好むオペレータもいる可能性がある（カフィードバックに対して抵抗する程度が小さくなるように）。

10

20

30

40

50

【0093】

いくつかの適用例では、力関数の異なる組み合わせが用いられる。例えば、図4Eにグラフで示されているように、(a) ツールの長手方向軸が切開部中心から第1の所与の距離範囲（図示の例では0～0.5mm）内にある場合は力が加えられず、(b) ツールの軸が切開部中心から第2の所与の距離範囲（図示の例では0.5mm～1.3mm）内にある場合は線形力関数が適用され、(c) ツールの軸が切開部中心から第3の所与の距離範囲（図示の例では1.3mm以上）内にある場合は階段力関数が適用される。いくつかの適用例では、これによって各タイプの関数の利点が組み合わせられ、オペレータは、(a) 切開部中心に近い場合はカフィードバックに対して抵抗する必要がなく、(b) 切開部縁部に近付いていることを示す漸進的な手がかりが与えられ、(c) 切開部又は切開ゾーンの縁部を越えてツールを押すのを防ぐため、「硬い壁」の感覚が与えられる。

10

【0094】

いくつかの適用例では、他のタイプの力関数が適用される。これは例えば、図4Fにグラフで示されている指数力関数であり、以下のように指数的に変動する。

【0095】

【数4】

$$F = b \cdot e^{a|x|} + c$$

20

[関数4]

【0096】

ここで、a、b、及びcは設定可能なパラメータであり、eはオイラー数である。

【0097】

いくつかの適用例では、このような関数は、オペレータが中心から遠ざかるにつれて徐々に増大するカフィードバックをオペレータに与え、可変剛性の感覚を生成するように構成されている。多項式、対数、又は累乗を組み込んだ関数など、他の関数も使用され得る。

30

【0098】

いくつかの適用例では、関数の追加の組み合わせが用いられる。例えば、図4Gにグラフで示されているように、線形関数（切開部の中心の近く）を、指数関数（切開部の中心から遠く）と組み合わせることができる。

【0099】

図4Aから図4Gは、x軸に沿った変位に基づいて適用される関数をグラフで示す。いくつかの適用例では、y軸に沿った変位に対して同様の関数が適用される。いくつかの適用例では、y軸に沿った変位に基づいて加えられる力が別個に計算される。あるいは、x軸及びy軸の双方に沿った変位に基づいて2D力関数が用いられる。

40

【0100】

単に一例として、図4H及び図4Iは、本発明のいくつかの適用例に従って適用される2D指数力関数の一例の代替的な表現を図表で示す。

【0101】

例えば、以下に提案される関数5を2D力関数として用いることができる。

【0102】

【数5】

50

$$F = b_1 \cdot e^{a_1|x|} + b_2 \cdot e^{a_2|y|} + c$$

[関数 5]

【0103】

力出力は、ベクトルとして又は大きさとして解釈することができる。大きさとして扱われる場合、ベクトルの方向は通常、切開部中心に向かっている。

【0104】

これより、本発明のいくつかの適用例に従った処置のステップを示すフローチャートである図 5 を参照する。第 1 のステップ 60 では、ツール 21 を切開部 40 に挿入する（ツールと切開部は図 3 A から図 3 B に示されている）。第 2 のステップ 62 では、制御コンポーネントユニットの力フィードバック機能を活性化する。各適用例によれば、制御コンポーネントユニットの力フィードバック機能は、（ツールが切開部に挿入されたことの検出に応じて）自動的に活性化されるか、又はオペレータによって手動で活性化される。上述のように、いくつかの適用例では、オペレータは、フィードバックに用いられる力関数のタイプ及び／又は剛性を選択する。その後、コンピュータプロセッサは、ツールがまだ患者の眼内にあるか否かを検出する（ステップ 64）。ツールがまだ眼内にあると仮定すると、コンピュータプロセッサは、ツールに沿った遠隔運動中心位置において、ツールの軸と切開部の中心との距離を計算する（ステップ 66）。（上述のように、代替的に又は追加的に、コンピュータプロセッサは、ツールに沿った遠隔運動中心位置において、ツールの縁部と切開部の縁部又は切開ゾーンの縁部との距離を計算する。）ステップ 66 に基づいて、コンピュータプロセッサは、制御コンポーネントユニットによってオペレータに与えられる力の大きさと方向を計算する（ステップ 68）。ステップ 70 では、ステップ 68 で計算された力が加えられる。ステップ 64 において、ツールがもう眼内にないと検出されたと仮定すると、力フィードバックを終了する（ステップ 72）。各適用例によれば、制御コンポーネントユニットの力フィードバック機能は、（ツールが切開部から除去されたことの検出に応じて）自動的に終了するか、又はオペレータによって手動で終了する。

【0105】

これより、本発明のいくつかの適用例に従った制御コンポーネントユニット 26 のジョイスティック 30 及び制御コンポーネントツール 32 の概略図である図 6 A、図 6 B、及び図 6 C を参照する。図 6 A、図 6 B、及び図 6 C に示されているように、いくつかの適用例では、ジョイスティック 30 は、回転アーム関節 82 A、82 B、82 C によって接続された 2 つ以上のリンク 80 A、80 B、80 C を含む制御コンポーネントアームとして構成されている。「ジョイスティック」及び「制御コンポーネントアーム」という用語は、本開示では相互に交換可能に用いられる。いくつかの適用例では、各モータ 84 A、84 B、84 C は、オペレータにフィードバックを与えるため、回転アーム関節の各々の動きを制御するように構成されている。通常、フィードバックは、制御コンポーネントツール 32 上の位置 86 を制御コンポーネントツールの運動中心のように感じさせるのに効果的であり、この位置が所与の方向に動くとオペレータにフィードバック力が与えられるようになっている。通常、フィードバック力の強度と方向は、上述した例のうち 1 つに従ったものである。更に通常は、力の全体的なベクトルは、制御コンポーネントツールの x、y、及び z 方向の力から成る（図 6 A に示されている）。なお、制御コンポーネントツールの x、y、及び z 方向は、（上述した）眼科ツール 21 の x、y、及び z 方向に必ずしも直接対応しない。

【0106】

図6B及び図6Cを参照すると、通常、モータの過半数（例えば、モータのうち少なくとも2つ（モータ84B及び84C））は、力を伝達するため歯車やベルトを必要とすることなく回転アーム関節に対して直接トルクを与える、すなわちそれらは直接駆動モータであることに留意するべきである。いくつかの適用例では、モータのうち少なくとも1つ（84A）は、ベルト88を介して回転アーム関節のうち1つ（82A）にトルクを与える。通常、ベルトを用いることで、制御コンポーネントユニットのベース90（図7に示されているベース90）の近くにモータを位置決めすることを可能とする。その目的は、第3のモータが回転アーム関節82Aの近くに配置された場合に比べて、オペレータが感じる重量と慣性を軽減することである。

10

【0107】

なお、ジョイスティックによってオペレータに与えられるフィードバックが、切開部に対する眼科ツールの遠隔運動中心位置をいっそう十分に反映するために、より多くの制御コンポーネントモータを用いることが好ましい場合がある。例えば、いくつかの適用例では、制御コンポーネントが3D力ベクトル及び3Dトルクベクトルを与えるよう構成されるように、6つのモータが用いられる。本開示の範囲は、制御コンポーネントを介してオペレータにフィードバックを与えるため、1つから6つのモータを用いることを含む。しかしながら、4つ以上のモータを用いると、通常、ジョイスティックの設計に追加の重量と複雑さが加わる。更に本発明者らは、3つのモータを用いると、切開部に対する眼科ツールの遠隔運動中心位置を十分に反映する、オペレータに役立つフィードバックが与えられることを見出した。従って、図6A及び図6Bで示されているように、各ジョイスティックは通常3つのモータを含む。

20

【0108】

これより、本発明のいくつかの適用例に従った制御コンポーネントユニット26のいくつかの追加コンポーネントの概略図である図7を参照する。通常、上述のモータに加えて、各制御コンポーネントアームは、3つの回転アーム関節82A、82B、82Cの各々に結合された回転エンコーダ92を含む（例えば、援用により本願に含まれる、G l o z m a nのW O 2 2 - 0 2 3 9 6 2号の継続出願である米国特許出願17／818,477号に記載されている）。回転エンコーダは、各回転アーム関節の動きを検出し、それに応じて回転エンコーダデータを発生するように構成されている。いくつかの適用例では、制御コンポーネントアームは更に、3軸加速度計、3軸ジャイロスコープ、及び／又は3軸磁力計を含む慣性測定ユニット94を含む。回転エンコーダ及び慣性測定ユニットは、本明細書ではまとめて「位置センサ」と呼ばれる。慣性測定ユニットは通常、制御コンポーネントアームの動きに応じて、制御コンポーネントアームの3次元の向きに関する慣性測定ユニットデータを発生する。いくつかの適用例では、コンピュータプロセッサ28は、回転エンコーダデータ及び慣性測定ユニットデータを受信する。通常、コンピュータプロセッサは、回転エンコーダデータに基づいて制御コンポーネントツール32の先端部のXYZ位置を決定し、慣性測定ユニットデータに基づいて、又は回転エンコーダデータと慣性測定ユニットデータの組み合わせに基づいて、制御コンポーネントツール32の先端部の向き（例えば、向きの3つのオイラー角及び／又は向きの別の表現）を決定する。従って、回転エンコーダデータと慣性測定ユニットデータの組み合わせに基づいて、コンピュータプロセッサは、制御コンポーネントツールの先端部のXYZ位置と向きを決定するように構成されている。

30

40

【0109】

いくつかの適用例では、コンピュータプロセッサは、処置を行うために用いられている眼科ツールの先端部が制御コンポーネントツールの先端部の動きを追うようにロボットユニットを駆動する。いくつかの適用例では、コンピュータプロセッサは、処置を行うために用いられている眼科ツールの先端部が6自由度で制御コンポーネントツールの先端部の動きを追うようにロボットユニットを駆動する。通常、制御コンポーネントアームの3次元の向きを検出するため慣性測定ユニットを組み込むことにより、オペレータは、回転エ

50

ンコーダを用いて6自由度の全ての制御コンポーネントアームの動きを検出する場合に比べて少ない数のセンサを用いてロボットユニットの動きを制御できる。更に通常は、使用する回転エンコーダの数を減らすと、制御コンポーネントアームの全体的な複雑性が低減する傾向がある。その理由は、追加の回転エンコーダを導入すると、回転する関節に追加のワイヤを通す必要があるからである。

【0110】

追加の回転エンコーダに伴う複雑性にもかかわらず、いくつかの適用例では、制御コンポーネントアームは慣性測定ユニットに加えて4つ以上の回転エンコーダを含む。これは冗長性のためである、すなわち、位置センサのいくつかが故障した場合にシステムが追加の位置センサを使用できるようにするためである。いくつかのそのような適用例では、制御コンポーネントアームは、冗長性のため、各回転アーム関節に追加の回転エンコーダを含む。更に、いくつかの適用例では、制御コンポーネントは、冗長性のため、慣性測定ユニットに加えて、制御コンポーネントツールのツール32のロール、ピッチ、及びヨーを検出するため回転エンコーダを含む。いくつかのそのような適用例では、ツール32は、ツール32のロール、ピッチ、及びヨーに対応する3つの回転ツール関節を介して、制御コンポーネントアームに結合されている。通常、上述の回転エンコーダは、制御コンポーネントツールが制御コンポーネントアームに結合されている各回転ツール関節の動きを検出する。

【0111】

本発明のいくつかの適用例が白内障手術について記載されているが、本出願の範囲には、本明細書に記載の装置及び方法を他の医療処置に準用することが含まれる。具体的には、他の医療処置に対する本明細書に記載の装置及び方法は、マイクロ手術技術を用いて行われる一般外科、整形外科、婦人科、耳鼻咽喉科、神経外科、口腔顎顔面外科、形成外科、足病外科、血管外科、及び／又は小児外科などの他のマイクロ手術処置に適用されることがある。そのようないくつかの適用例では、撮像システムは1つ以上の顕微鏡撮像ユニットを含む。

【0112】

本出願の範囲には、本明細書に記載の装置及び方法を白内障手術以外の眼内処置に準用することが含まれることに留意されたい。かかる処置には、コラーゲン架橋結合、内皮角膜移植（例えばDSEK、DMEK、及び／又はPDEK）、DSO（移植なしのデスメ膜剥離）、レーザを利用した角膜移植、角膜移植、LASIK／PRK、SMILE、翼状片、眼表面癌治療、二次的IOL配置（縫合、経結膜など）、虹彩修復、IOL再配置、IOL交換、角膜表層切除、低侵襲緑内障手術（MIGS）、角膜輪部幹細胞移植、乱視角膜切除、角膜輪部減張切開（LRI）、羊膜移植（AMT）、緑内障手術（例えば、trABs、tuBes、低侵襲緑内障手術）、自動化層状角膜移植（ALK）、前部硝子体切除、及び／又は経扁平部前部硝子体切除が含まれることがある。

【0113】

本明細書に記載される本発明の適用例は、コンピュータプロセッサ28などの、コンピュータ又は任意の命令実行システムによる又は関連する使用のためのプログラムコードを提供するコンピュータ使用可能又はコンピュータ可読媒体（例えば、非一時的コンピュータ可読媒体）からアクセス可能なコンピュータプログラム製品の形態をとることができる。この説明の目的のために、コンピュータ使用可能又はコンピュータ可読媒体は、命令実行システム、装置、もしくはデバイスによる又は関連する使用のためのプログラムを含む、記憶する、伝達する、伝搬する、又は搬送することができる任意の装置である可能性がある。この媒体は、電子、磁気、光、電磁、赤外線、又は半導体システム（又は装置もしくはデバイス）又は伝搬媒体である可能性がある。通常、コンピュータ使用可能又はコンピュータ可読媒体は非一時的コンピュータ使用可能又はコンピュータ可読媒体である。

【0114】

コンピュータ可読媒体の例としては、半導体又はソリッドステートメモリ、磁気テープ、取り外し可能コンピュータディスク、ランダムアクセスメモリ（RAM）、読み取

り専用メモリ（ROM）、硬質磁気ディスク及び光学ディスクが挙げられる。現在の光学ディスクの例としては、コンパクトディスクー読み取り専用メモリ（CD-ROM）、コンパクトディスクーリード／ライト（CD-R/W）、DVD、及びUSBドライブなどが挙げられる。

【0115】

プログラムコードを記憶及び／又は実行するのに適したデータ処理システムが、システムバスを介してメモリ要素に直接的又は間接的に結合された少なくとも1つのプロセッサ（例えば、コンピュータプロセッサ28）を含むことになる。メモリ要素は、プログラムコードの実際の実行中に使用されるローカルメモリ、バルクストレージ、及び、実行中にバルクストレージからコードを取り出さなければならない回数を減らすために、少なくともいくつかのプログラムコードの一時的記憶を行うキャッシュメモリを含む可能性がある。システムは、プログラムストレージデバイス上の本発明に係る命令を読み出し、これらの命令に従って本発明の実施形態の方法を実行することができる。

10

【0116】

ネットワークアダプタをプロセッサに結合して、プロセッサを介在プライベートネットワーク又はパブリックネットワークを介して他のプロセッサ、リモートプリンタ、又はストレージデバイスに結合可能にすることがある。モデム、ケーブルモデム及びイーサネットカードは、現在利用可能なネットワークアダプタの種類のほんの一部である。

【0117】

本発明の動作を実行するためのコンピュータプログラムコードは、J A v A、S M A l l t A l k、C ++などのオブジェクト指向プログラミング言語、及びCプログラミング言語又は同様のプログラミング言語などの従来の手続き型プログラミング言語を含む、1つ以上のプログラミング言語の任意の組み合わせで書かれることがある。

20

【0118】

本明細書に記載されているアルゴリズムがコンピュータプログラム命令によって実施され得ることが理解されるであろう。これらのコンピュータプログラム命令は、汎用コンピュータ、専用コンピュータ、又は他のプログラマブルデータ処理装置のプロセッサに提供されてマシンを生成し、これによってコンピュータのプロセッサ（例えばコンピュータプロセッサ28）又は他のプログラマブルデータ処理装置によって実行される命令が、本出願に記載のアルゴリズムに規定された機能／作用を実施するための手段を生成することがある。また、これらのコンピュータプログラム命令はコンピュータ可読媒体（例えば非一時的コンピュータ可読媒体）に記憶されることがあり、コンピュータ又は他のプログラマブルデータ処理装置に特定の方法で機能するように指示できることによって、コンピュータ可読媒体に記憶されている命令は、アルゴリズムに規定された機能／作用を実施する命令手段を含む製造品を生成する。また、コンピュータプログラム命令を、コンピュータ又は他のプログラマブルデータ処理装置にロードして、そのコンピュータ又は他のプログラマブル装置上で一連の動作ステップを実行させてコンピュータ実施プロセスを生成することができ、これによってコンピュータ又は他のプログラマブル装置上で実行する命令は、本出願に記載のアルゴリズムに規定された機能／作用を実施するためのプロセスを提供する。

30

40

【0119】

コンピュータプロセッサ28は通常、専用コンピュータを生成するようにコンピュータプログラム命令を用いてプログラムされたハードウェアデバイスである。例えば、図を参照して説明したアルゴリズムを実行するようにプログラムされた場合、コンピュータプロセッサ28は通常、専用のロボットシステムコンピュータプロセッサとして機能する。通常、コンピュータプロセッサ28により実行される本明細書に記載された動作は、実際の物理的物体であるメモリの物理的状态を変化させて、使用されるメモリの技術に応じて異なる磁気極性や電荷などをもたらす。いくつかの適用例では、コンピュータプロセッサにより実行されると記載されている動作が、互いに組み合わせられる複数のコンピュータプロセッサによって実行される。

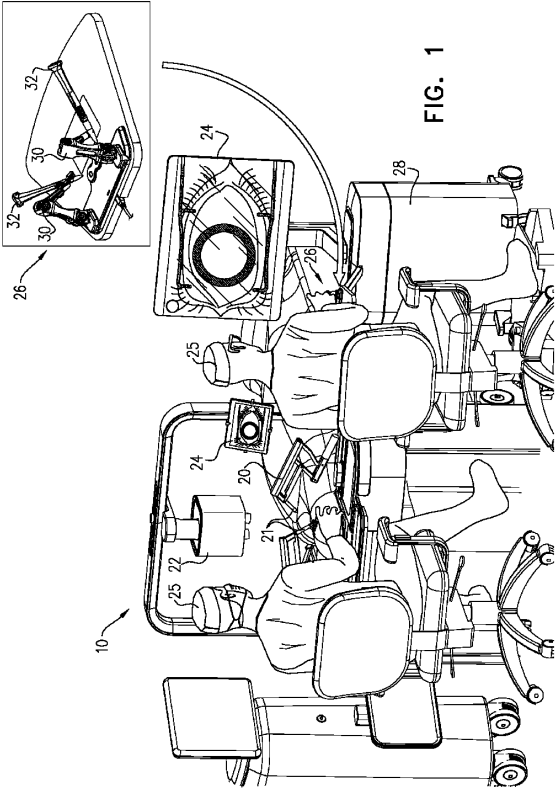
50

【 0 1 2 0 】

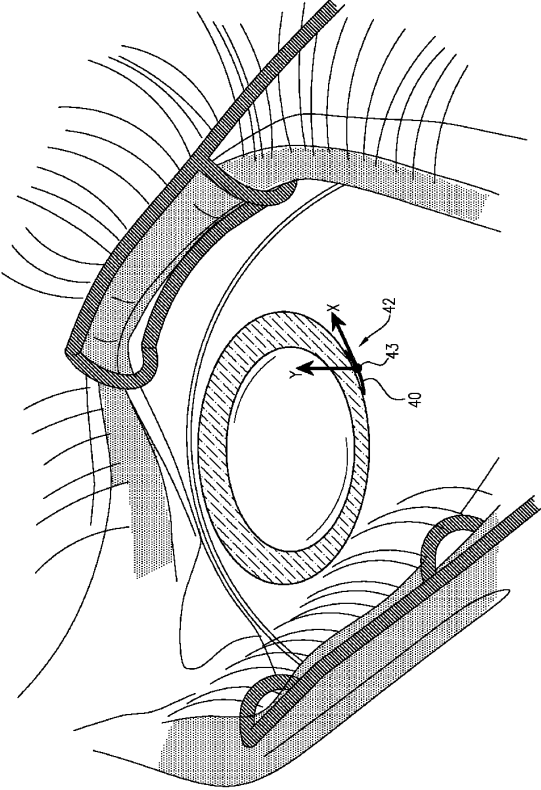
以上に具体的に示され説明されたものに本発明が限定されないことは当業者によって理解されるであろう。むしろ本発明の範囲は、上記の明細書で説明された様々な特徴の組み合わせ及びその部分的組み合わせの両方、並びに上述の説明を読むことで当業者に想到されるであろう、従来技術にはないそれらの変形例及び修正例を含む。

【 図 面 】

【 図 1 】



【 図 2 】



10

20

30

40

50

【図 3 A】

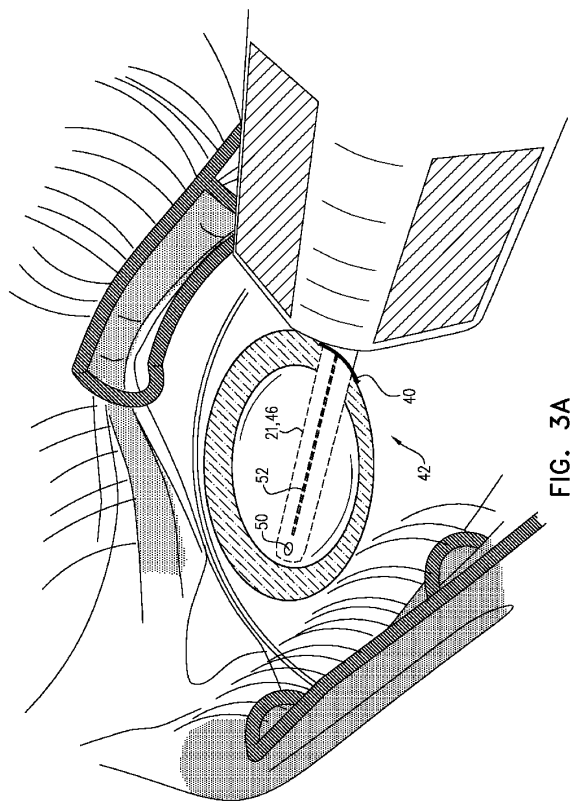


FIG. 3A

【図 3 B】

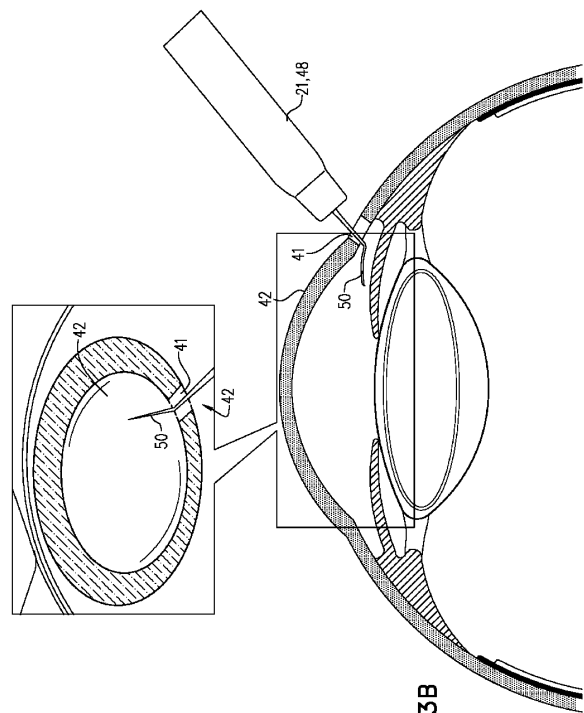
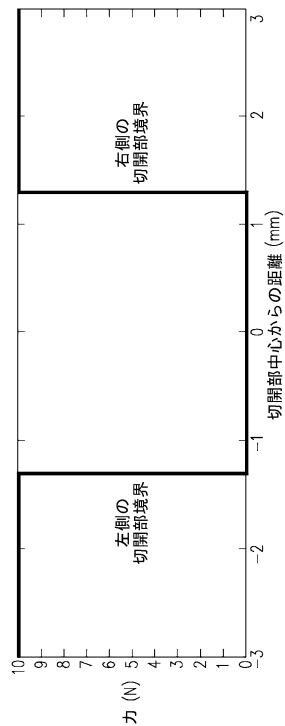
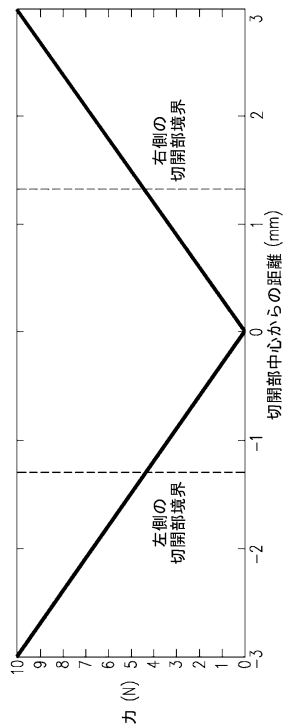


FIG. 3B

【図 4 A】



【図 4 B】



10

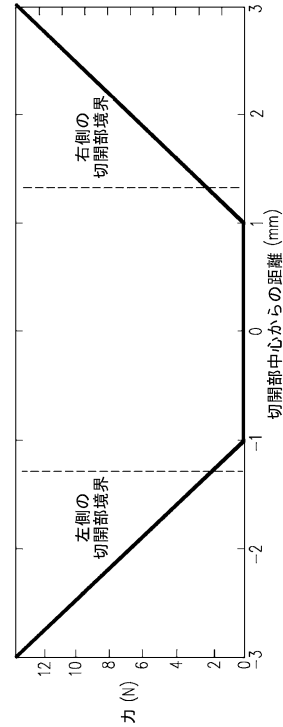
20

30

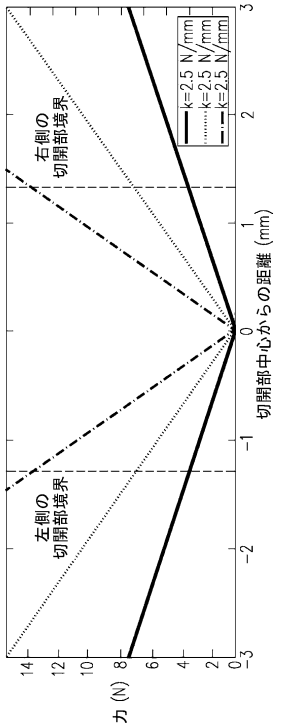
40

50

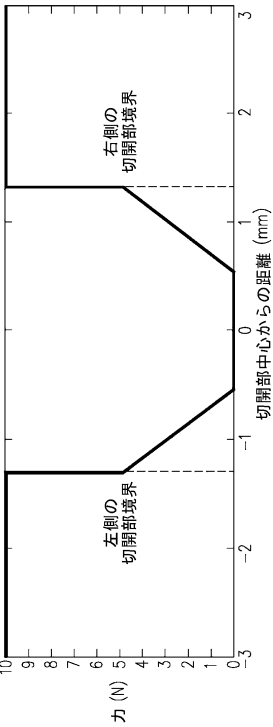
【図 4 C】



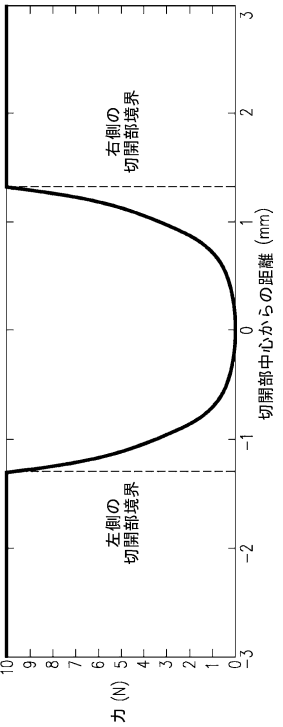
【図 4 D】



【図 4 E】



【図 4 F】



10

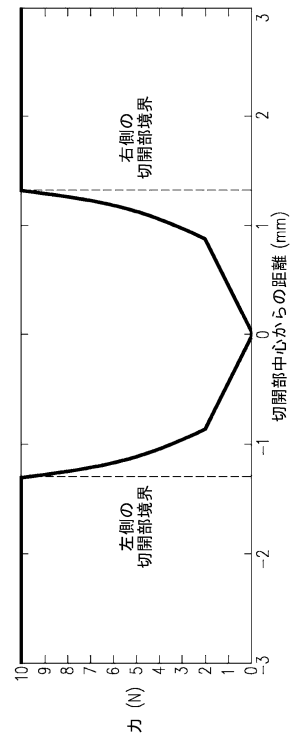
20

30

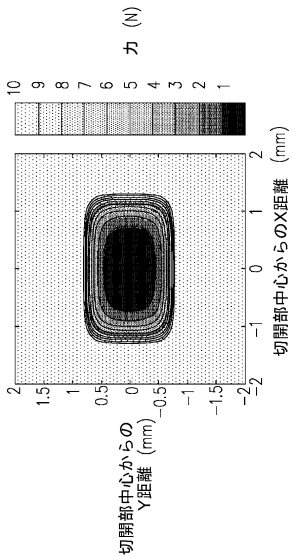
40

50

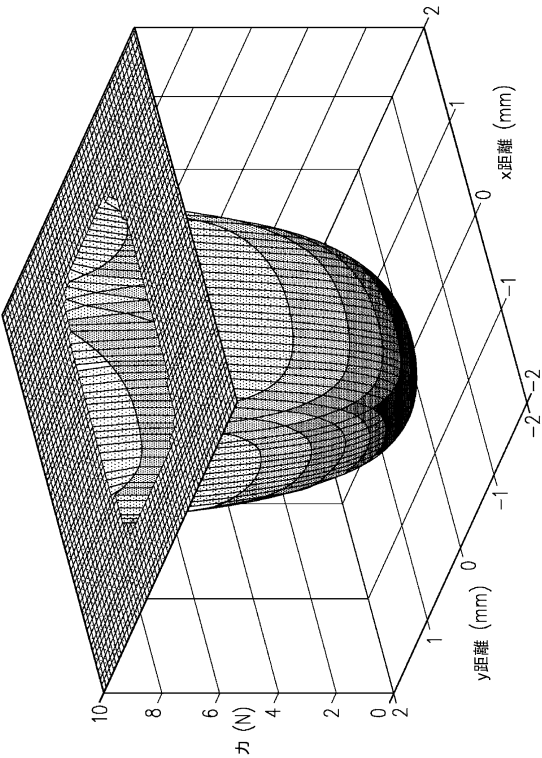
【図 4 G】



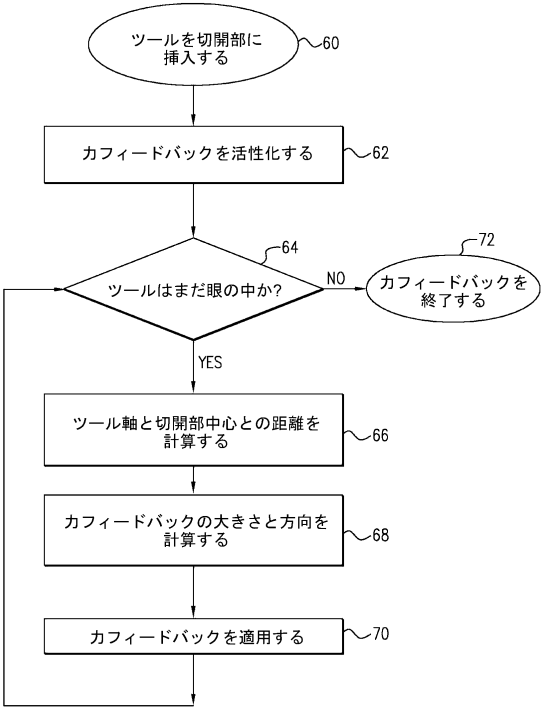
【図 4 H】



【図 4 I】



【図 5】



10

20

30

40

50

【図 6 A】

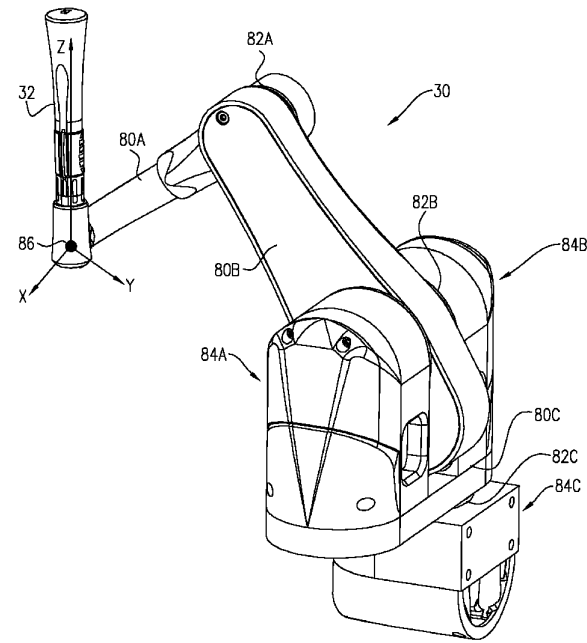


FIG. 6A

【図 6 B】

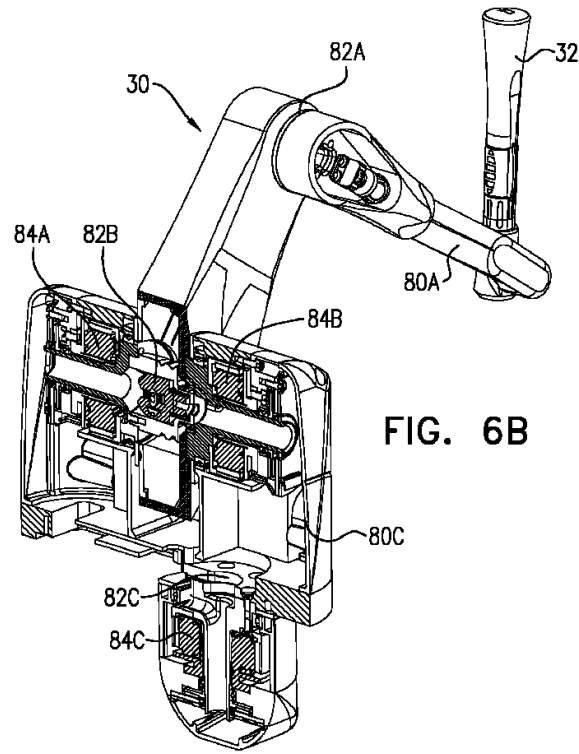


FIG. 6B

【図 6 C】

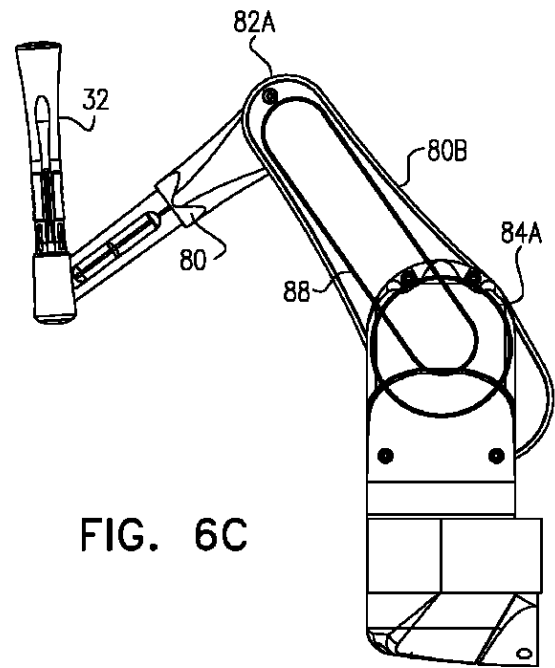


FIG. 6C

【図 7】

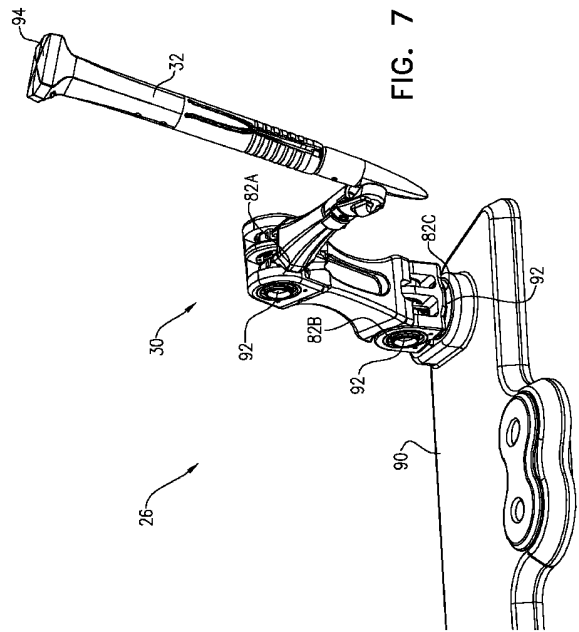


FIG. 7

10

20

30

40

50

【国際調査報告】

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/IB2022/061636

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

INV. **A61B34/37 A61B34/00 A61B90/90 A61B34/20 A61F9/007**
ADD.

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

A61B A61F

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

EPO-Internal

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	WO 2017/214243 A1 (INTUITIVE SURGICAL OPERATIONS [US]) 14 December 2017 (2017-12-14) paragraphs [0007], [0178], [0193] - [0196]; figures 1,2,16-19 -----	1
X	US 2020/261169 A1 (MILLER DANIEL N [US] ET AL) 20 August 2020 (2020-08-20) paragraph [0044]; figures 1A,3 -----	1
X	US 2014/194699 A1 (ROH SE-GON [KR] ET AL) 10 July 2014 (2014-07-10) paragraphs [0013], [0074] - [0077]; figures 1,2,9,10 -----	1
X	US 2001/020200 A1 (DAS HARI [US] ET AL) 6 September 2001 (2001-09-06) paragraphs [0056] - [0058]; figure 2 -----	1
	-/--	

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

16 February 2023

Date of mailing of the international search report

24/02/2023

Name and mailing address of the ISA/
European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040,
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Seon, Jean-Antoine

INTERNATIONAL SEARCH REPORT		International application No. PCT/IB2022/061636
Box No. II Observations where certain claims were found unsearchable (Continuation of item 2 of first sheet)		
This international search report has not been established in respect of certain claims under Article 17(2)(a) for the following reasons: 1. ☒ Claims Nos.: 44-46 because they relate to subject matter not required to be searched by this Authority, namely: see FURTHER INFORMATION sheet PCT/ISA/210 2. ☒ Claims Nos.: 2-43, 47-51 because they relate to parts of the international application that do not comply with the prescribed requirements to such an extent that no meaningful international search can be carried out, specifically: see FURTHER INFORMATION sheet PCT/ISA/210 3. ☐ Claims Nos.: because they are dependent claims and are not drafted in accordance with the second and third sentences of Rule 6.4(a).		
Box No. III Observations where unity of invention is lacking (Continuation of item 3 of first sheet)		
This International Searching Authority found multiple inventions in this international application, as follows: 1. ☐ As all required additional search fees were timely paid by the applicant, this international search report covers all searchable claims. 2. ☐ As all searchable claims could be searched without effort justifying an additional fees, this Authority did not invite payment of additional fees. 3. ☐ As only some of the required additional search fees were timely paid by the applicant, this international search report covers only those claims for which fees were paid, specifically claims Nos.: 4. ☐ No required additional search fees were timely paid by the applicant. Consequently, this international search report is restricted to the invention first mentioned in the claims;; it is covered by claims Nos.: Remark on Protest ☐ The additional search fees were accompanied by the applicant's protest and, where applicable, the payment of a protest fee. ☐ The additional search fees were accompanied by the applicant's protest but the applicable protest fee was not paid within the time limit specified in the invitation. ☐ No protest accompanied the payment of additional search fees.		

10

20

30

40

50

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/IB2022/061636

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	WO 2018/157078 A1 (UNIV CALIFORNIA [US]) 30 August 2018 (2018-08-30) paragraph [0023]; figures 1,4,5 -----	1
Y	US 9 658 605 B2 (SAMSUNG ELECTRONICS CO LTD [KR]) 23 May 2017 (2017-05-23) figures 1,2,3 -----	1
Y	US 2021/015574 A1 (ATAY STEFAN [US] ET AL) 21 January 2021 (2021-01-21) paragraphs [0020], [0021], [0035] - [0043] -----	1

International Application No. PCT/IB2022/061636

FURTHER INFORMATION CONTINUED FROM PCT/ISA/ 210

Continuation of Box II.1

Claims Nos.: 44-46

The subject matter of claims 44-46 relates to a surgical method. According to Rule 39.1 (iv) PCT the international search authority is not required to search subject matter falling under this category. The reasons are the following: The method of claims 44-46 relates to the motion control of a surgical tool which, according to the application, is to be inserted in the eye of a patient. Introducing and moving surgical tool in a body are considered as surgical steps and therefore the whole method is considered surgical.

Continuation of Box II.2

Claims Nos.: 2-43, 47-51

Master slave system with a force feedback on the master side to reflect where the position of the RCM is relative to the position of the incision.

The applicant's attention is drawn to the fact that claims relating to inventions in respect of which no international search report has been established need not be the subject of an international preliminary examination (Rule 66.1(e) PCT). The applicant is advised that the EPO policy when acting as an International Preliminary Examining Authority is normally not to carry out a preliminary examination on matter which has not been searched. This is the case irrespective of whether or not the claims are amended following receipt of the search report or during any Chapter II procedure. If the application proceeds into the regional phase before the EPO, the applicant is reminded that a search may be carried out during examination before the EPO (see EPO Guidelines C-IV, 7.2), should the problems which led to the Article 17(2) PCT declaration be overcome.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/IB2022/061636

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
WO 2017214243 A1	14-12-2017	CN 108882968 A	23-11-2018
		CN 114767266 A	22-07-2022
		EP 3468498 A1	17-04-2019
		KR 20190007505 A	22-01-2019
		KR 20220066432 A	24-05-2022
		US 2020315721 A1	08-10-2020
		WO 2017214243 A1	14-12-2017
US 2020261169 A1	20-08-2020	CN 111315309 A	19-06-2020
		EP 3684280 A2	29-07-2020
		EP 4140431 A1	01-03-2023
		JP 6880324 B2	02-06-2021
		JP 2021502173 A	28-01-2021
		KR 20200052980 A	15-05-2020
		KR 20210024229 A	04-03-2021
		US 2020261169 A1	20-08-2020
		US 2021177535 A1	17-06-2021
		WO 2019094794 A2	16-05-2019
US 2014194699 A1	10-07-2014	KR 20140090374 A	17-07-2014
		US 2014194699 A1	10-07-2014
US 2001020200 A1	06-09-2001	US 6233504 B1	15-05-2001
		US 2001020200 A1	06-09-2001
WO 2018157078 A1	30-08-2018	US 2019380795 A1	19-12-2019
		WO 2018157078 A1	30-08-2018
US 9658605 B2	23-05-2017	JP 6113493 B2	12-04-2017
		JP 2013132747 A	08-07-2013
		KR 20130073103 A	03-07-2013
		US 2013116706 A1	09-05-2013
US 2021015574 A1	21-01-2021	US 2021015574 A1	21-01-2021
		US 2022061942 A1	03-03-2022
		US 2022061943 A1	03-03-2022

フロントページの続き

,RW,SD,SL,ST,SZ,TZ,UG,ZM,ZW),EA(AM,AZ,BY,KG,KZ,RU,TJ,TM),EP(AL,AT,BE,BG,CH,CY,CZ,DE,D
K,EE,ES,FI,FR,GB,GR,HR,HU,IE,IS,IT,LT,LU,LV,MC,MK,MT,NL,NO,PL,PT,RO,RS,SE,SI,SK,SM,TR),O
A(BF,BJ,CF,CG,CI,CM,GA,GN,GQ,GW,KM,ML,MR,NE,SN,TD,TG),AE,AG,AL,AM,AO,AT,AU,AZ,BA,B
B,BG,BH,BN,BR,BW,BY,BZ,CA,CH,CL,CN,CO,CR,CU,CV,CV,CZ,DE,DJ,DK,DM,DO,DZ,EC,EE,EG,ES,FI
,GB,GD,GE,GH,GM,GT,HN,HR,HU,ID,IL,IN,IQ,IR,IS,IT,JM,JO,JP,KE,KG,KH,KN,KP,KR,KW,KZ,LA,LC,
LK,LR,LS,LU,LY,MA,MD,ME,MG,MK,MN,MW,MX,MY,MZ,NA,NG,NI,NO,NZ,OM,PA,PE,PG,PH,PL,
PT,QA,RO,RS,RU,RW,SA,SC,SD,SE,SG,SK,SL,ST,SV,SY,TH,TJ,TM,TN,TR,TT,TZ,UA,UG,US,UZ,VC,V
N,WS,ZA,ZM,ZW

(特許庁注：以下のものは登録商標)

1. QRコード

2. J A V A

1 1 コハンシュタム ストリート 1 1 アパートメント 5

- (72)発明者 ベン ゼエブ, オリ
 イスラエル国, ラマト ハシャロン 4 7 0 4 3 5 8 ハサドット ストリート 1 4
- (72)発明者 コーマン, タル
 イスラエル国, テル アビブ 6 9 3 6 0 5 9 ザリツキー ストリート 3
- (72)発明者 グロズマン, ダニエル
 イスラエル国, クファー ヨナ 4 0 3 4 7 2 3 オデム ストリート 3 7 エー