

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第5406893号
(P5406893)

(45) 発行日 平成26年2月5日(2014.2.5)

(24) 登録日 平成25年11月8日(2013.11.8)

(51) Int. Cl.		F I			
B 2 5 J	13/00	(2006.01)	B 2 5 J	13/00	Z
B 2 5 J	15/08	(2006.01)	B 2 5 J	15/08	K

請求項の数 10 外国語出願 (全 15 頁)

(21) 出願番号	特願2011-181660 (P2011-181660)
(22) 出願日	平成23年8月23日 (2011. 8. 23)
(65) 公開番号	特開2012-96349 (P2012-96349A)
(43) 公開日	平成24年5月24日 (2012. 5. 24)
審査請求日	平成23年12月7日 (2011. 12. 7)
(31) 優先権主張番号	12/916, 803
(32) 優先日	平成22年11月1日 (2010. 11. 1)
(33) 優先権主張国	米国 (US)

(73) 特許権者	511095986
	ジーエム・グローバル・テクノロジー・オペレーションズ・エルエルシー
	アメリカ合衆国ミシガン州48265-3000, デトロイト, ルネッサンス・センター 300

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 力および位置ベースの制御法則を用いたテンドン駆動ロボットフィンガのロバスト操作

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

ロボットシステムであって、

テンドンにより駆動されるロボットフィンガと、

前記ロボットフィンガにおいて前記テンドンの張力を測定する張力センサが利用可能かどうかを決定するように構成される制御システムと、を有し、前記制御システムは、選択的に、前記張力センサが前記テンドンの張力値を測定するために前記ロボットフィンガ内において利用可能であるとき、前記テンドンの測定された張力値を利用する力ベース制御法則を介して、また、張力センサが張力値を測定するために前記ロボットフィンガ内において利用可能でないとき、位置ベース制御法則のみを介して、前記ロボットフィンガを制御する、ロボットシステム。

【請求項 2】

請求項 1 に記載のロボットシステムであって、さらに、複数のテンドンを有し、各テンドンは各テンドンの張力値を測定する対応する張力センサを有し、前記制御システムは、前記張力センサの全てが利用可能であるときに力ベース制御法則を介して、また、前記張力センサの全てが利用可能でないときに位置ベース制御法則のみを介して、選択的に前記ロボットフィンガを制御するように構成される、ロボットシステム。

【請求項 3】

請求項 2 に記載のロボットシステムであって、前記制御システムはさらに、前記張力センサのいくつかだけが利用可能であるときに、選択的に前記位置ベース制御法則にコンブ

10

20

ライアンス値を導入するように構成される、ロボットシステム。

【請求項 4】

請求項 3 に記載のロボットシステムであって、前記コンプライアンス値は、前記テンドンの 1 つの望ましい張力と実際の張力との間の差分として定義される張力エラーの関数である、ロボットシステム。

【請求項 5】

請求項 1 に記載のロボットシステムであって、さらに、前記テンドンを移動させるためのアクチュエータを有し、前記制御システムは 2 階層構造または階級構造を使用し、前記 2 階層構造において、ジョイントコントローラが上位の制御ループを形成し、アクチュエータコントローラが下位の制御ループを形成し、

前記ジョイントコントローラは、カベース制御法則および位置ベース制御法則を実行し、前記ロボットフィンガのジョイントの力および位置をそれぞれ制御するように構成され、

前記アクチュエータコントローラは、位置ベース制御法則のみを実行し、前記アクチュエータの位置を制御するように構成される、ロボットシステム。

【請求項 6】

請求項 5 に記載のロボットシステムであって、前記アクチュエータコントローラに送られる、アクチュエータのための任意の命令されるアクチュエータ位置は、前記ロボットフィンガの範囲空間に制限される、ロボットシステム。

【請求項 7】

請求項 1 に記載のロボットシステムであって、さらに、複数のロボットフィンガを備えるハンドを有し、各ロボットフィンガは複数のテンドンを備え、各テンドンは各テンドンの張力値を測定する対応する張力センサを備え、各ロボットフィンガは、独立に制御されるロボットフィンガにおける利用可能な張力センサの数に依存して、他のロボットフィンガに対して独立に制御可能である、ロボットシステム。

【請求項 8】

請求項 1 に記載のロボットシステムであって、さらに、テンドンを移動させるためのアクチュエータを有し、前記制御システムは、下位および上位の制御ループを備える 2 階層構造を用い、前記下位の制御ループは、前記ロボットフィンガのアクチュエータ位置を動的にサーボし、前記ロボットフィンガが、前記ロボットフィンガのテンドンマップマトリックスの零空間内の運動に抵抗することを可能にし、一方で、前記テンドン上の初期の内部張力を名目的に維持する、ロボットシステム。

【請求項 9】

テンドンにより駆動されるロボットフィンガのための制御システムであって、前記制御システムは、

ホストマシンと、

非揮発性のコンピュータで読み取り可能な媒体と、を有し、前記媒体上に、前記ロボットフィンガを制御するための 2 階層制御構造を提供する制御プロセスが記憶され、

前記ホストマシンは、前記制御プロセスを実行し、前記テンドンの張力値を測定するのに好適な前記ロボットフィンガ内の張力センサの利用可能性を決定し、

前記張力センサが前記テンドンの張力値を測定するのに利用可能であるときは、前記テンドンの測定された張力値を利用するカベース制御法則を介して、

前記張力センサが前記テンドンの張力値を測定するのに利用可能でないときは位置ベース制御法則のみを介して前記ロボットフィンガを選択的に制御する、制御システム。

【請求項 10】

請求項 9 に記載の制御システムであって、前記ロボットフィンガは複数のテンドンを含み、各テンドンは各テンドンの張力を測定する対応する張力センサを備え、前記ホストマシンは、前記ロボットフィンガ内の複数の張力センサの全てが利用可能であるときに、測定されたテンドンの張力値を利用するカベース制御法則を介して、また、前記複数の張力センサの全てが利用可能でないときに位置ベース制御法則のみを介して、前記ロボットフ

10

20

30

40

50

ィンガを選択的に制御するように構成される、制御システム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

[0001]本発明は、NASA Space Act Agreement Number SAA-AT-07-003の下による政府の支援によりなされた。本明細書で説明される発明は、米国政府により、また米国政府の目的（すなわち非商業的）のためにロイヤリティの支払いなく製造および使用し得る。

【0002】

[0002]本発明は、ロボットシステムにおいてテンドン駆動ロボットフィンガのロバスト操作を提供するためのシステムおよび方法に関する。

10

【背景技術】

【0003】

[0003]ロボットは、一連のリンクを用いて物体を操作することができる自動化された装置である。リンクは、1つまたはそれ以上のアクチュエータ駆動のロボットジョイントにより相互接続される。典型的なロボットの各ジョイントは、少なくとも1の独立制御変数または自由度を持つ。エンドエフェクタは、ハンドで作業ツールの把持のような作業を実行するのに用いられる特定のマニピュレータである。それゆえ、様々なロボットマニピュレータの正確な運動制御は、必要とされる可動性、器用さ、および作業タスクに関連する機能性を達成するのを助ける。

【発明の概要】

20

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

[0004]器用なロボットは、装置またはシステム、特に人間の使用のために設計されたもの、すなわち適正な動作に人間のようなレベルの器用さが必要とされる装置、との直接的な相互作用が必要な場合に用いることができる。器用なロボットの使用は、人間のオペレータとの直接的な相互作用が必要とされる場合に望ましいことがあり、ロボットの動作は、人間の動作に類似するようにプログラムすることができる。そのようなロボットは、テンドン（腱）を用い遠隔的に駆動することができる複数のフィンガを含むことがあり、ロボットの総サイズおよび重量を減少させる。そのようなテンドンは、校正された張力レベルで常に張られている必要がある。

30

【課題を解決するための手段】

【0005】

[0005]したがって、器用なロボットのテンドン駆動フィンガを制御するための制御システムおよび方法が本稿に開示される。本制御システムは、本稿で開示される方法を実行することにより、フィンガが環境内において安全に物体に接触することができ、一方で、劣化したセンサ条件下でフィンガの動作を可能にするように、フィンガにおける動的なコンプライアンスを達成できる。これは、可撓性の2つの階層状の制御構造により達成され、ここで、上位の制御ループは、与えられたフィンガのために力ベースまたは位置ベースの制御法則を採用する。位置ベース制御法則は、制御する任意のテンドンのために動的なコンプライアンスを選択的に統合することができる。

40

【0006】

[0006]フィンガ内の多数の張力センサの全て、またはいくつか、あるいはいかなる依存して選択される制御法則が与えられた実行の間に利用可能である。典型的には、テンドン駆動フィンガの制御法則は、テンドンの内部張力を維持するために張力フィードバックを必要とする。ここで示される位置決め制御法則は、通常、本明細書で説明される範囲 - 空間強制を備える2つの階層状の制御構造を実行することにより、内部張力を維持する。

【0007】

[0007]ここで用いられる「力ベース制御法則」および「位置ベース制御法則」との用語は、当業界で理解されているように、それぞれ力または位置命令およびフィードバック信

50

号に基づくロボットの制御をいう。フレキシブルな制御スキームは、フィンガに特有であり、すなわち、与えられたロボットハンドの様々なテンドン駆動フィンガは、異なる制御法則を備えることができ、互いにフィンガに対して任意の瞬間にそのフィンガを動作させる。

【0008】

[0008]特に、ロボットシステムは、テンドンにより駆動されるロボットフィンガ、張力センサ、および制御システムを含む。テendonはアクチュエータにより制御される。制御システムは、張力値を測定するために張力センサが利用可能であるとき、力ベース制御法則を介して選択的にフィンガを制御し、また、張力センサが利用可能でないときに位置ベース制御法則を介して制御される。

10

【0009】

[0009]複数のテendonを使用することができ、それぞれは対応する張力センサを備える。制御システムは、いくつかの張力センサだけが利用可能であるときに、位置ベース制御法則にコンプライアンス値を選択的に導入することができる。コンプライアンス値は、張力誤差の関数とすることができ、誤差は1つのテendonの望ましい張力と実際の張力との間の差分として決定することができる。

【0010】

[0010]テendonにより駆動されるロボットフィンガの制御法則は、張力センサおよびホストマシンを含む。張力センサは、テendonの張力値を測定するように位置決めされ、ホストマシンは、張力値の測定のために張力センサが利用可能かを決定するように構成される。追加的に、ホストマシンは、張力値の測定のための張力センサが利用可能であるときに力ベース制御法則を介してフィンガを選択的に制御するように、また、張力値を測定するために張力センサが利用可能でないときに位置ベース制御法則を介してフィンガを選択的に制御するように構成される。

20

【0011】

[0011]また、ロボットシステム内のテendon駆動フィンガを制御するための方法が提供される。この方法は、テendonの張力値を測定するために張力センサが利用可能かどうかを決定することを含み、制御システムを介してフィンガを選択的に制御することを含み、制御システムは、張力値を測定するために張力センサが利用可能であるときに力ベース制御法則を使用し、また、張力値を測定するために張力センサが利用可能でないときに位置

30

【0012】

[0012]本発明の上述の特徴、利点、および他の特徴、利点は、添付図面とともに本発明を実行するための詳細な説明を参照することで容易に明らかとなる。

【図面の簡単な説明】

【0013】

【図1】本稿で説明されるように制御されるテendon駆動フィンガを備えるロボットを含むロボットシステムの概略図である。

【図2】図1に示されるロボットの、複数のテendon駆動ロボットフィンガを含む下アームアセンブリの概略斜視図である。

40

【図3】図2に示されるロボットフィンガを制御するために使用できるテendonおよびアクチュエータの概略斜視図である。

【図4】テendon駆動ロボットフィンガの概略斜視図である。

【図5】図2、4に示すテendon駆動ロボットフィンガを制御するための2階層制御構造の概略図である。

【図6】図2、4に示されるテendon駆動ロボットフィンガを制御するための方法を示すフローチャートである。

【発明を実施するための形態】

【0014】

[0019]図面を参照すると、いくつかの図面を通じて同様の符号は同一または同様の要素

50

を示す。図 1 を参照すると、ロボットシステム 10 が示されており、これは、器用なロボット 11 および制御システム 12 を含む。ロボット 11 は、様々なマニピュレータを含み、複数のテンドン駆動フィンガ 14 を含む。ロボット 11 の制御システム 12 は、2 階層制御序列または構造を介して動作する。ここで用いられる「2 階層 (two-tier)」との語は、ジョイントコントローラ 80 として図 1 に示される第 1 または上位の層の制御コントローラが、図 1 にアクチュエータコントローラ 90 として示される第 2 または下位の制御法則またはコントローラよりも高位の序列レベルで動作することを意味する。コントローラ 80、90 は、2 つの異なるプロセッサおよび関連するハードウェア装置として実装することができ、または代替的に、各々が単一のまたは分散型のハードウェア装置に内在する、ネストされたソフトウェアベースの制御ループとして実装することができ、1 つまたは複数のプロセッサにより自動的に実行される。

10

【 0 0 1 5 】

[0020] ジョイントコントローラ 80 は、様々なフィンガジョイント (図 4 参照) の位置を制御するために、高次のループにおいて力ベースまたは位置ベースの制御法則を使用し、これに依存して制御法則が選択される。制御システムによる具体的な制御法則の選択は、張力センサ 58 (図 3 参照) の利用可能性に基づき、張力センサ 58 は利用可能であり、すなわち与えられたフィンガ 14 においてオンラインおよび完全に機能的である。アクチュエータコントローラ 90 は、与えられたフィンガ 14 のテンドン 50 の位置を制御するために、下位のループにおいて位置ベース制御を使用する。

【 0 0 1 6 】

[0021] 図 1 の制御システムは、図 3 に示されるテンドン 50 上の十分な張力を自動的に維持する。典型的には、力ベース制御法則は、閉鎖ループ力フィードバックなどを介してテンドンの張力を規制するために用いられる。しかし、張力を測定するのに用いられる物理センサは、最適なロバスト性より劣ることがある。結果として、ロボット 11 のフィンガ 14 内にまたはそれに沿って位置決めされる張力センサのいくつかまたは全ては、特定の瞬間に使用することができるか、または使用できないことがある。それゆえ、制御システム 12 は、ジョイントおよびアクチュエータ 80、90 をそれぞれ使用して各フィンガ 14 を、以下で説明される選択的なコンプライアンスとともにまたはそれ無しに力または位置の制御法則により自動的にまた個別に制御する。ジョイントコントローラ 80 内で、適用される具体的な制御法則、すなわち力または位置の制御法則は、与えられたフィンガ 14 のために利用可能な張力センサの数に依存するように選択される。

20

30

【 0 0 1 7 】

[0022] 1 つの可能な実施形態において、図 1 に示されるロボット 11 は、人間のような外観となるように、また、与えられた作業課題を完成させるのに必要な程度に人間のようなレベルの器用さを備えるように構成することができる。人間型ロボットまたは他の器用なロボットは、人間の使用のために特別に設計された装置またはシステム、たとえば物体 30 を適切に操作するために人間のようなレベルの器用さが必要とされる任意の装置、と直接的な接触が必要とされる場面で使用することができる。ロボットの動作を人間の動作に近似するようにプログラムすることができるので、図 1 に示されるロボット 11 のような人間型ロボットの使用は、ロボットと人間のオペレータとの直接的な相互作用が必要とされる場面では好ましいことがある。ロボット 11 のフィンガ 14 は、ロボットが物体 30 に作用する任意の操作または作業課題の実行の間に制御信号 55 を介して、コントロールシステム 12 のハードウェアコンポーネントにより直接的に制御される。コントロールシステム 12 は、たとえば、ホストマシン、サーバ、またはそのような装置のネットワークである。

40

【 0 0 1 8 】

[0023] 図 1 に示されるロボット 11 は、複数の自由度 (DOF) で、自動化される課題を実行するようにプログラムすることができ、また、他の相互に作用する課題を実行するように、または、たとえばクランプ、照明、リレーなどの他の統合されるシステム部品を制御するようにプログラムすることができる。可能な一実施形態によれば、ロボット 11 は

50

、複数の、独立または相互依存した、移動可能なアクチュエータ駆動のロボットジョイントを備えることができ、これらのいくつかは運動範囲が重なる。フィンガ14の節を分離および移動させる様々なジョイント23に加えて、ロボット11のロボットジョイントは、肩ジョイントを含むことができ、この位置は図1において矢印3で全体的に示されており、また、肘ジョイント(矢印15)、手首ジョイント(矢印17)、首ジョイント(矢印19)、腰ジョイント(矢印21)を含むことができる。

【0019】

[0024]図1を参照すると、各ロボットジョイントは、1以上のDOFを備えることができる。たとえば、肩ジョイント(矢印13)および肘ジョイント(矢印15)のようなある従順なジョイントは、ピッチおよびロールの形態で少なくとも2の自由度を備えることができる。同様に、首ジョイント(矢印19)は、少なくとも3の自由度を備えることができ、腰ジョイント(矢印21)および手首ジョイント(矢印17)は、1以上の自由度を備えることができる。作業の複雑さに依存して、ロボット11は、42を超えるDOFで運動することができる。各ロボットジョイントは、1つ以上のアクチュエータを含み、また内部的にそれに駆動され、たとえば、ジョイントモータ、線形アクチュエータ、回転アクチュエータ等を含む。

【0020】

[0025]1つの可能な実施形態において、ロボット11は、図2に示される下腕アセンブリ75を含むことができる。他の実施形態において、ロボット11は、ヘッド16、トルソ18、ウェスト20、アーム22、ハンド24、フィンガ14、および対向する親指26のような追加的な人間のような要素を含むことができ、上述の様々なジョイントは、これらの要素の中または間に配置される。人間のように、アーム22、および他の要素は、ある程度運動の範囲が重なることができる。ロボット11は、作業に好適な固定部またはベース(図示せず)を含むことができ、たとえば、ロボットの用途または意図している使用に応じて脚部、トレッド、または他の移動可能なまたは固定のベースなどである。電力供給部28は、ロボット11に一体的に取り付けることができ、たとえば、充電可能なバッテリーパックまたは他の任意のエネルギー供給部を、トルソ18の背面に装着することができる、あるいは、テザリングケーブルを通して遠隔的に取り付けられ、様々なジョイントの運動のために十分な電気エネルギーを供給することができる。

【0021】

[0026]制御システム12およびその各コントローラ80、90は、上述したように、サーバまたはホストマシン、すなわち1つまたは複数のデジタルコンピュータまたはデータ処理装置、として実施化することができる、それぞれは1つ以上のマイクロプロセッサまたは中央処理装置(CPU)、読取専用メモリ(ROM)、ランダムアクセスメモリ(RAM)、電気的に消去可能なプログラム可能の読取専用メモリ(EEPROM)、高速クロック、アナログ-デジタル(A/D)回路、デジタル-アナログ(D/A)回路、および任意の必要な入力/出力(I/O)回路および装置、信号調整機器、バッファ機器を備えることができる。

【0022】

[0027]単純化および明確さのために図1に単一の装置として示されるが、制御システム12の様々な要素は、ロボット22を最適に制御するのに必要に応じて、多くの異なるハードウェアおよびソフトウェア要素として分散化することができる。制御システム12内のまたは容易にアクセス可能な個別の制御アルゴリズムは、ROM内に記憶でき、または、他の好適な実体的なメモリ位置および/またはメモリ装置内に記憶でき、制御システムの関連するハードウェア要素により自動的に実行され、それぞれの制御機能を提供する。

【0023】

[0028]図2を参照すると、下腕アセンブリ75は、図1に示されるロボット11の一部として使用することができる。各下アームアセンブリ75は、複数のテンドン駆動フィンガ14およびテンドン駆動親指26を備えるハンド24を含む。「テンドン駆動」との語は、以下で図3とともに説明する。下アームアセンブリ75は、複数のフィンガアクチュ

10

20

30

40

50

エータ40を含み、それぞれは、フィンガ14または親指26内の1つ以上のテンドン(図3参照)を選択的に引っ張るまたは解放するように構成される。下アームアセンブリ75はさらに、リストジョイント(矢印17)を運動させるための複数のリストアクチュエータ38を含む。フィンガアクチュエータ40および/またはリストアクチュエータ38のためのプリント回路板アセンブリ(PCBA)39は、図示のようにパッキングの効率のために、下アームアセンブリ75上およびその中に位置決めすることができる。下アームアセンブリ75は、ロードセル32に取り付けることができ、これは、下アームアセンブリを図1のロボット11のアーム22の残りに接続するために用いられる。

【0024】

[0029]複数のフィンガアクチュエータ40は、各フィンガ14および親指26に対応することができる。一般に、1つのフィンガアクチュエータ40は、各DOFプラス1つの追加的なフィンガアクチュエータを加えて利用可能である。それゆえ、3DOFを備える各フィンガは、4つのフィンガアクチュエータを必要とし、また、2DOFを備えるフィンガは、3つのフィンガアクチュエータが必要となる。

【0025】

[0030]図3を参照すると、フィンガアクチュエータ40の可能な実施形態の概略的な斜視図が提供される。フィンガアクチュエータ40は、モータ44、ギア駆動部46、アクチュエータハウジング48、テンドン50、およびテンドン終端部52を含むことができる。テンドン50は、アクチュエータハウジング48からフィンガ14の1つを通して延び、フィンガの端部で終端する。テンドン50は、フィンガ14内の中心から外れた位置に示されており、また、与えられたフィンガ内に1つ以上のテンドンが延びることができる。モータ44、ギア駆動部46、およびアクチュエータハウジング48は、フィンガ14および親指26内に必要とされるパッケージ空間を最小化するために、全て下アームアセンブリ75内に配置することができる。また、アクチュエータハウジング48のようなフィンガアクチュエータ40の大きな部品が、フィンガおよび親指に対して遠隔的にパッケージできるようにする。

【0026】

[0031]テンドン50は、保護外導管56内に位置決めされるシースまたは導管ライナ54により保護することができる。張力センサ58は、導管56上の圧縮力を測定し、テンドン50に付与される張力の大きさを決定する。テンドン50の張力は、図1に示される制御システム12に使用され、与えられたフィンガ14の様々なジョイントにおいて発生または受けるジョイントトルクを計算し、これは、与えられたハンド24のフィンガ14および親指26の制御のために制御システムに利用される。

【0027】

[0032]フィンガアクチュエータ40がテンドン50を運動させると、テendonは張力センサ58に対してスライドする。テendon50は、フィンガ14内に、テendon終端部52において終端する。テendon50の運動は、テendon終端部52の相対的な運動を生じさせ、それにより、フィンガ14を運動させる。内部的に、すなわちフィンガアクチュエータ40の運動により、または外部的に、すなわち図1の物体30からフィンガ14へ、力がテendon終端部52上に付与される。

【0028】

[0033]図4を参照すると、図1の制御システム12は、本明細書で説明されるように使用され、各フィンガ14を、与えられたハンド24の任意の他のフィンガに対して個別に制御する。テendon駆動フィンガのトルク制御において、望ましいジョイントトルクは、最初にテendon張力値に変換されなければならない。この問題は、張力分配(tension distribution)として言及され、また、各張力値は非負の値となることを保証しなければならない。フィンガ14は、複数のフィンガジョイント23を備え、このいくつかは、独立のジョイントであり、各フィンガジョイントのジョイント位置およびジョイントトルクが矢印1、2、3で示される。フィンガ14はnの独立のジョイント(nDOF)およびn+1のテendon50を備える。

10

20

30

40

50

【 0 0 2 9 】

[0034] 図 4 に示されるフィンガ 1 4 は、3 D O F を備え、それゆえ、この実施例においては 4 つのテンドン 5 0 がある。しかし、本発明の意図する範囲から逸脱することなく、より多くまたは少ないテンドンおよび/または D O F を使用することもできる。遠位のジョイントは、隣接するジョイント、すなわち中央のジョイントに機械的に連結されることに注意されたい。それゆえ、遠位のジョイントは独立する D O F ではない。また、フィンガ 1 4 の制御は、完全に決定され、この語は当業界に理解されるように、またそれゆえ、テンドン 5 0 の数は $n + 1$ 、あるいは図 4 に示される具体的な実施形態においては 4 である。独立する各ジョイント 2 3 は、ジョイントトルク およびジョイント位置 q により特徴付けられる。テンドン 5 0 の各々は、張力 f により特徴付けられ、図 4 においては f_1 、 f_2 、 f_3 、 f_4 として示され、あるいは全体として f_1 から f_{n+1} として示される。テンドン 5 0 の各々は、決定可能な位置 (x)、すなわち $x_1 - x_4$ を備える。

10

【 0 0 3 0 】

[0035] n ジョイントトルクと m テンドン張力との間の関係は、 $\tau = R f$ として示され、ここで $m > n$ である。変数

【 数 1 】

$$R \in \mathfrak{R}^{n \times m}$$

はテンドンマップとして知られ、これは、テンドン張力をジョイントトルクにマッピングするのに必要とされる様々なジョイント半径データを含む。テンドン制御可能とされるシステムのために、テンドンマップ R は、行フルランクでなければならない、また、 $R^T w = 0$ となる全て正の列マトリックス w が存在しなければならない。「内部張力」は、フィンガ 1 4 内の全ての張力の重み付き合計であり、それゆえ、より小さな内部張力は、様々なテンドン 5 0 の中のより小さい張力を示し、また、より小さな正味の力を示す。

20

【 0 0 3 1 】

[0036] 逆に、張力 f の解は以下であり、 R^+ が R の疑似逆行列であり、 I は単位行列であり、 τ は任意の値であり、

【 0 0 3 2 】

【 数 2 】

$$f = R^+ \tau + f_{\text{int}}$$

30

【 0 0 3 3 】

$$f_{\text{int}} \doteq (I - R^+ R) \lambda$$

【 0 0 3 4 】

ここで f_{int} は、 R の零空間に位置する内部張力を示し、ゼロの正味のトルクを生成する。行列 $[I - R^+ R]$ は、 R の零空間への射影演算子を提供する。疑似の静的条件が与えられると、ゼロの外力がフィンガ 1 4 に作用するときは $f = f_{\text{int}}$ である。

【 0 0 3 5 】

[0037] 同一の行列 R は、テンドン 5 0 とジョイント速度との間の関係を示す。仮想仕事の原理に基づいて、ジョイント運動のテンドン速度値は

40

【 0 0 3 6 】

【 数 3 】

$$R^T \dot{q}$$

【 0 0 3 7 】

に等しい。 R が定数であると仮定すると、テンドン 5 0 の正味の変位は、ジョイントの寄与とテンドンの長さ l (エル) の変化の合計、 $x = R^T q + l$ である。

[0038] 以下で、テンドン 5 0 のモデルを線形バネとして提供し、テendonは緊張したままであると仮定する。また、フィンガ 1 4 で使用されるテendon 5 0 は、テendonの長さ

50

の差は剛性に優位な差を与えないので同一の剛性値 k_t を備えると仮定する。以下の分析は、長さの変化 (Δl) をテンドンの張力およびジョイントトルクに関連させる。

【 0 0 3 8 】

【数 4】

$$\Delta f = k_t \Delta l$$

$$\Delta \tau = R \Delta f$$

$$= k_t R \Delta l$$

【 0 0 3 9 】

ゆえに

【 0 0 4 0 】

【数 5】

$$\Delta l = \frac{1}{k_t} R^+ \Delta \tau + \Delta l_{\text{int}}.$$

【 0 0 4 1 】

[0039]値 (Δl_{int}) は、R の零空間内での長さの変化を示し、すなわち、内部張力にだけ影響を与える長さの変化でありジョイントトルクに影響を与えず、値 (Δl_{int}) は、

【 0 0 4 2 】

【数 6】

$$\Delta l_{\text{int}} \doteq (I - R^+ R) \delta,$$

【 0 0 4 3 】

と書くことができ、ここで変数 δ の値は任意である。テンドンの変位の最終的な関係は、

【 0 0 4 4 】

【数 7】

$$\Delta x = R^T \Delta q + \frac{1}{k_t} R^+ \Delta \tau + \Delta l_{\text{int}}.$$

【 0 0 4 5 】

と書くことができる。

[0040]張力フィードバックがない場合、たとえば図 3 の張力センサのいくつかまたは全てが与えられたフィンガ 1 4 内での使用のために利用可能でないとき、図 1 の制御システム 1 2 により使用される位置法則は、早い位置ベースの制御性能を提供し、誤差が小さく、また、オーバーシュートが無く、また同時にフィンガ内の内部張力を維持する。内部張力を一定に維持するために、値 Δl_{int} は、すぐ上の数式から取り除かれる。

【 0 0 4 6 】

[0041]図 5 を参照すると、図 1 の制御システム 1 2 の概略図は、2 階層制御スキームを示している。制御システム 1 2 は、上位の制御ループおよび下位の制御ループを含み、すなわち、ジョイントコントローラ 8 0 およびアクチュエータコントローラ 9 0 をそれぞれ含む。ジョイントコントローラ 8 0 は、矢印 3 1 で示されるジョイント位置 (q) のベクトル、および、矢印 1 3 1 で示される望ましいまたは参照ジョイント位置 (q_d) を示す信号を処理ノード 6 0 を介して処理し、ジョイント位置エラー ($q - q_d$)、すなわち矢印 3 5 を計算する。同様に、テンドンの力 (f) は矢印 3 7 として示され、テンドンの位置 (x) は矢印 3 3 で示される。他の処理ノード 6 0 は、矢印 1 3 3 で示される命令されたテンドン位置 (x_d) を用いてテンドン位置エラー ($x - x_d$) を計算し、これをアクチュエータコントローラ 9 0 の下位のループに送る。

【 0 0 4 7 】

[0042]アクチュエータコントローラ 9 0 は、アクチュエータ位置上の単純な位置コント

10

20

30

40

50

ローラからなり、まず、オーバーシュートを回避するために第1命令応答動作の性能を最大化するように調整される。ジョイントコントローラ80は、当業界で理解されるようなフィンガジョイント上のカベースコントローラまたは位置ベースコントローラからなる。

【0048】

[0043]新しい位置コントローラが本稿で説明され、これは、速度コントローラの離散バージョンを実行し、アクチュエータの現在位置が連続的にフィードバックされ、ジョイントエラーに基づいてデルタベクトルと併合される。上述の運動学的な関係に基づいて、命令されたテンドン位置 (x_d)、すなわち矢印133は、以下のように記述できる。

【0049】

【数8】

$$x_d = x - k_p R^T \Delta q,$$

【0050】

ここで、 q は、ジョイント位置エラー ($q - q_d$)、すなわち図5に示される矢印35を表し、 k_p は、スカラー定数ゲインである。この制御法則は、上述の数式の零空間変位 (null-space displacement) をゼロ化する。

【0051】

[0044]この制御法則は迅速な応答を生成し、安定状態エラーを閉じ、過度に減衰した動作を維持する。しかし、これは、アクチュエータ位置を範囲空間 (range-space) に動的に制限しない。それゆえ、外乱はアクチュエータ位置に不相应な変化を生じさせ得る。これは、図3に示されるテンドン50が圧縮に抵抗できないという事実により悪化することがある。これを解決するために、出力は、フィンガ14の範囲空間内に投射され、これは、下位のループが範囲空間を動的にサーボすることを可能にする。これは、上位ループの最終的な制御法則 $x_d = R^+ R_x - k_p R^T q$ を提供する。この式の範囲空間拘束は、図5に示される2階層の階層制を必要とする。この範囲空間拘束は、システムが零空間内での運動に抵抗することを可能にし、また、テンドンに付与される最初の内部張力を名目的に維持することを可能にし得る。

【0052】

[0045]位置制御法則の代替スキームは、比例積分 (PI) 補償に基づく。この法則は、安定状態エラーを取り除くためにPI項で使用される各アクチュエータの最終位置のためのフィードフォワード項を実行する。このシステムが初期テンドン位置 x およびジョイント位置 q がゼロになるように初期化される場合、図3のテンドン50の長さを変化させずに矢印131の所望のジョイント位置 (q_d) にマッチングさせるアクチュエータ位置は、 $R^T q_d$ により与えられる。運動学的モデルは完全でないことがあるので、PI補償がエラーを除くために用いられる。

【0053】

[0046]したがって、フィードフォワード制御から命令される位置 (x_d)、すなわち矢印133は、以下ようになる。

【0054】

【数9】

$$x_d = -R^T (k_p \Delta q + k_i \int \Delta q dt).$$

【0055】

このフィードフォワード項は、早い立ち上がり時間を生じさせ、一方、PI項は定常誤差がゼロとなる結果を生じさせる。

[0047]フィンガ14の利用可能な張力センサの全数の全てではないがいくつかは利用可能である場合、制御システム12は、テンドンの選択的なコンプライアンスとともに、そのフィンガのために選択的に位置制御を適用することができ、制御システム12の位置制御能力を実行する。与えられたハンド24 (図2参照) の異なるフィンガ14は、同時に異なるコントローラまたは制御法則を用いて制御することができ、たとえば、あるフィン

10

20

30

40

50

がにはカベース制御であり他のフィンガには位置ベース制御を用いるなどである。

【0056】

[0048]選択的なコンプライアンス値(矢印57)は、 $k(f - f_d)s$ と定義することができ、 k はスカラー定数であり、 $(f - f_d)$ は張力エラーである。 s は、各テンドンのための要素の選択変数であり、たとえば、1はコンプライアンスがオンでありゼロはコンプライアンスがオフである。したがって、アクチュエータコントローラ90の下流で、選択的なコンプライアンス値57は、アクチュエータコントローラの出力51から減算され、 s は、選択的なコンプライアンスが望まれるか(すなわち1)あるいは望まれないか(すなわち0)に応じて制御システム12により選択される。制御信号(矢印55)は、図1に示されており、これは、最終的にロボット11にモータ命令として伝達され、これは、ジョイント位置(q)(矢印31)、テンドン位置(x)(矢印33)、およびテンドン張力(f)(矢印37)をフィードバックする。

10

【0057】

[0049]与えられたフィンガ14の全ての張力センサが利用可能である場合、図1の制御システム12は、その特定のフィンガを制御するのにカベース制御法則を使用する。以下の例示の制御法則は、フィンガ14のジョイント空間における運動を非干渉化(decouple)する。望ましいテンドン位置(x_d)のための式は、

【0058】

【数10】

$$\dot{x}_d = \dot{x} - k_d \dot{x} - P^T K_p (T - T_d),$$

20

【0059】

であり、ここで $T_{_}$ (上式では「 $_$ 」は T の下) = Pf であり、 P は R および w^T を互いを頂部で連結させる行列である。値 K_p および k_d は、それぞれ、ユーザー定義の比例ゲインおよび積分ゲインである。

【0060】

[0050]図6を参照し、また先の図に示される構造を参照すると、可能な一実施形態による本方法100は、ステップ102で開始し、ここで、制御システム12は、制御されるフィンガ14内の利用可能な張力センサの数を決定する。ステップ102は、与えられたフィンガ14内の各張力センサ58の状態を示す入力信号を受け取ることを含むことができ、たとえば、状態問い合わせコマンドまたは「ping」で張力センサに自動的に問い合わせ、問い合わせされた張力センサがpingの応答に成功した場合に、張力センサが利用可能であることを示す状態、すなわちオンラインであり適正に機能していることを記録することにより行う。

30

【0061】

[0051]代替的に、張力センサ58から校正された間隔で定期的に信号が伝達されるようにすることができ、そのような信号の伝達の中断または停止は、そのセンサが利用可能でないことを示すようにすることができる。追加的な実施形態は、校正された閾値に対する誤差値を測る張力センサ58を含むことができ、与えられたセンサの利用可能でない状態のプログラマーまたはユーザーによる手動入力を制御システム12内に記録し、センサのエラーコードまたはフラグ等処理する。

40

【0062】

[0052]ステップ104において、図1の制御システム12は、特定のフィンガ14の全ての張力センサ58が利用可能であるかどうかを決定し、たとえば、既知の張力センサの全数と、ステップ102で決定された利用可能なセンサの数とを比較することにより行う。フィンガ14の全ての張力センサ58が利用可能である場合、本方法100はステップ108に進む。そうでなければ、本方法はステップ106に進む。

【0063】

[0053]ステップ106において、制御システム12は、評価されるフィンガ14の張力センサ58の少なくともいくつかの利用可能かどうかを決定する。いくつかの利用可能で

50

ある場合、本方法 1 0 0 はステップ 1 1 0 に進む。他の場合は本方法 1 0 0 はステップ 1 1 2 に進む。

【 0 0 6 4 】

[0054]ステップ 1 0 8 において、ステップ 1 0 4 においてフィンガ 1 4 内の全ての張力センサがフィンガでの利用のために利用可能であることが決定された制御システム 1 2 では、図 1 の制御システムは、前述した力制御法則のみを使用してフィンガを制御する。本方法 1 0 0 は、利用可能な張力センサ 5 8 の数に変化があったことを決定するためにステップ 1 0 2 を繰り返す。

【 0 0 6 5 】

[0055]ステップ 1 1 0 において、ステップ 1 0 6 で与えられたフィンガ 1 4 内の張力センサ 5 8 のいくつかだけがフィンガでの使用のために利用可能であると決定された制御システム 1 2 では、図 1 の制御システムは、上述したように、選択されたコンプライアンスとともに位置ベース制御法則を使用してフィンガを制御する。本方法 1 0 0 は、利用可能な張力センサ 5 8 の数に変化があったかどうかを決定するために、ループ内でステップ 1 0 2 を繰り返す。

10

【 0 0 6 6 】

[0056]ステップ 1 1 2 において、制御されるフィンガ 1 4 の使用のために利用可能な張力センサ 5 8 がステップ 1 0 6 で無いと決定された図 1 の制御システムでは、図 1 の制御システムは、上述のように、フィンガを位置ベース制御法則のみを用いて制御する。本方法 1 0 0 は、利用可能な張力センサ 5 8 の数に変化があったかどうかを決定するために、ループ内でステップ 1 0 2 を繰り返す。

20

【 0 0 6 7 】

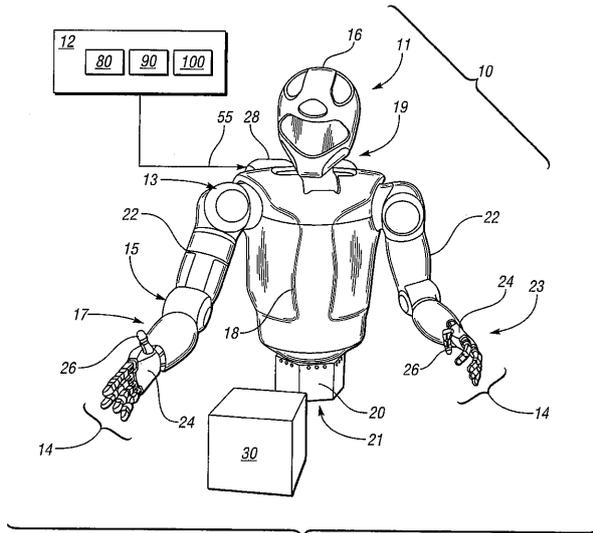
[0057]したがって、図 1 の制御システムは、張力センサの機能不全に対するロバスト性と組み合わせて、与えられたフィンガ 1 4 の腱を保護するために力制御を提供する。張力の検出なしに、有効な制御が各フィンガ 1 4 上に提供される。張力センサが利用可能でない場合、図 5 に関して上述した 2 階層制御構造を備える制御法則は、オーバーシュートなしで迅速な位置制御を提供し、一方で、フィンガ上に名目的な内部張力レベルを維持する。張力センサの全てが利用可能でない場合でさえ、腱を保護するために、位置制御に関してコンプライアンスが利用可能である。したがって、図 1 のロボット 1 1 は、ロバスト性の増加した高いレベルの性能で動作することができる。

30

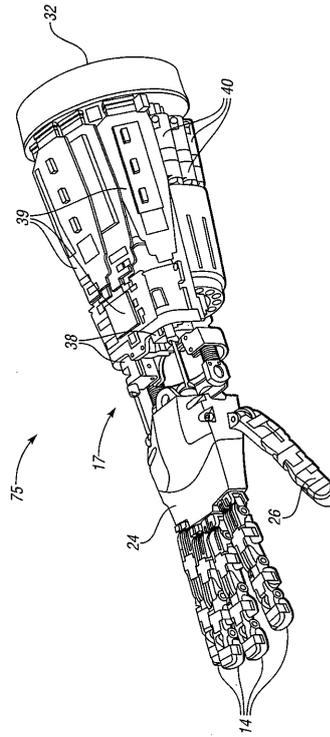
【 0 0 6 8 】

[0058]本発明の実施形態が詳細に説明されたが、本発明の分野における当業者は、添付の特許請求の範囲の範囲内で本発明を実施するための様々な代替設計および実施形態を認識するであろう。

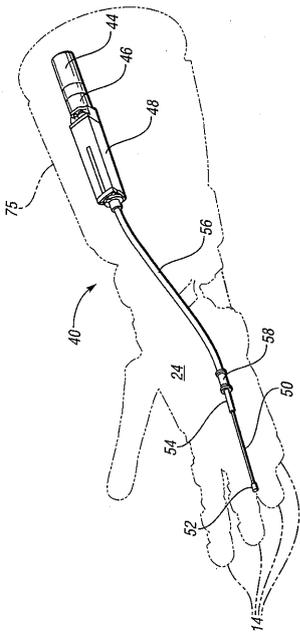
【 図 1 】



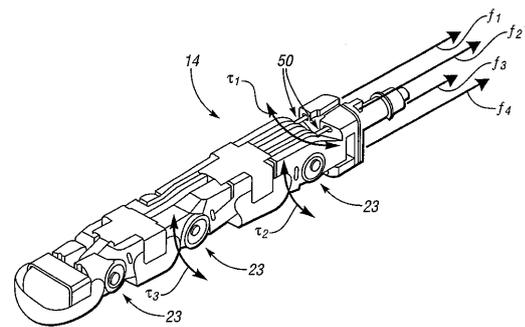
【 図 2 】



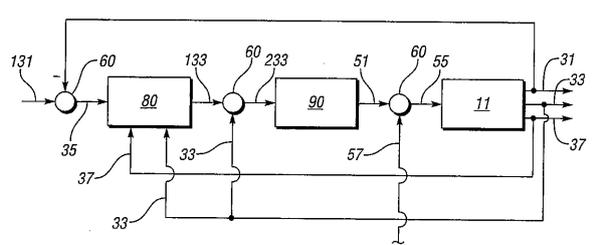
【 図 3 】



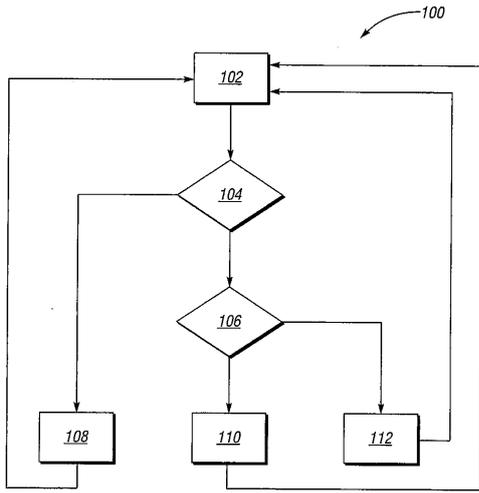
【 図 4 】



【 図 5 】



【 図 6 】



フロントページの続き

(73)特許権者 510149563

ザ・ユニテッド・ステイツ・オブ・アメリカ・アズ・リプレゼンテッド・バイ・ジ・アドミニ
 トレーター・オブ・ザ・ナショナル・エアロノーティクス・アンド・スペース・アドミニストレ
 ション

アメリカ合衆国ワシントン, ディストリクト・オブ・コロンビア 20546, サウスウエスト,
 イースト・ストリート 300

(74)代理人 100140109

弁理士 小野 新次郎

(74)代理人 100075270

弁理士 小林 泰

(74)代理人 100080137

弁理士 千葉 昭男

(74)代理人 100096013

弁理士 富田 博行

(74)代理人 100146710

弁理士 鐘ヶ江 幸男

(72)発明者 ムハマド・イー・アブダラー

アメリカ合衆国テキサス州77062, ヒューストン, ブライアムーア・コート 1702

(72)発明者 ロバート・ジェイ・プラット, ジュニア

アメリカ合衆国マサチューセッツ州02139, ケンブリッジ, フェインウッド・サークル 25
 , ナンバー 2

(72)発明者 マシュー・ジェイ・レイランド

アメリカ合衆国ミシガン州48371, オックスフォード, ウッドブライア・ドライブ 1067

(72)発明者 ブライアン・ハーグレイヴ

アメリカ合衆国テキサス州77539, ディキンソン, アーバー・ホロウ・レイン 6805

(72)発明者 マイロン・エイ・ディフトラー

アメリカ合衆国テキサス州77062, ヒューストン, ラドウェル・コート 15002

(72)発明者 フィリップ・エイ・ストローザー

アメリカ合衆国テキサス州77062, ヒューストン, コブル・ヴァリー・ドライブ 14818

(72)発明者 クリス・エイ・イールケ

アメリカ合衆国ミシガン州48353, ハートランド, サン・テラス・ドライブ 2670

審査官 松浦 陽

(56)参考文献 特開2010-149274(JP, A)

特開2010-117347(JP, A)

特開平03-196983(JP, A)

特開2007-045271(JP, A)

特開平11-247807(JP, A)

特開平07-028502(JP, A)

特開2005-092763(JP, A)

特開2006-127047(JP, A)

特開平09-185416(JP, A)

特開2011-143528(JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

B25J 1/00 - 21/02

G05B 19/18 - 19/46