

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第6497786号
(P6497786)

(45) 発行日 平成31年4月10日(2019.4.10)

(24) 登録日 平成31年3月22日(2019.3.22)

(51) Int.Cl.

F 1

B 25 J 19/00 (2006.01)
F 15 B 15/10 (2006.01)B 25 J 19/00
F 15 B 15/10A
H

請求項の数 21 (全 29 頁)

(21) 出願番号 特願2016-523917 (P2016-523917)
 (86) (22) 出願日 平成26年10月16日 (2014.10.16)
 (65) 公表番号 特表2017-504489 (P2017-504489A)
 (43) 公表日 平成29年2月9日 (2017.2.9)
 (86) 國際出願番号 PCT/US2014/060870
 (87) 國際公開番号 WO2015/102723
 (87) 國際公開日 平成27年7月9日 (2015.7.9)
 審査請求日 平成29年6月30日 (2017.6.30)
 (31) 優先権主張番号 61/893,093
 (32) 優先日 平成25年10月18日 (2013.10.18)
 (33) 優先権主張国 米国(US)

早期審査対象出願

(73) 特許権者 507044516
 プレジデント アンド フェローズ オブ
 ハーバード カレッジ
 アメリカ合衆国 マサチューセッツ 02
 138, ケンブリッジ, クインシー
 ストリート 17
 (74) 代理人 110001302
 特許業務法人北青山インターナショナル
 (72) 発明者 ギャロウェイ, ケヴィン
 アメリカ合衆国 マサチューセッツ州 0
 2138, ケンブリッジ, オックスフォード
 ストリート 60, ハーバードユニヴァ
 ーシティ, ルーム 403

審査官 貞光 大樹

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】ソフトアクチュエータ本体及び適合スリーブを備えた機械的にプログラムされたアクチュエータ並びに機械的作動方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

機械的にプログラムされたアクチュエータにおいて、
 制限なしに作動させたときに、屈曲し、直線状に延び、収縮し、捻れ、またはそれらの組み合わせとなるように構成された少なくとも1つのソフトアクチュエータ本体と、

前記ソフトアクチュエータ本体を作動させるように構成された作動機構と、

前記ソフトアクチュエータ本体の少なくとも一部分の周りに配置されるとともに、作動させたときにスリーブの内側で前記ソフトアクチュエータ本体を拘束しかつ前記ソフトアクチュエータ本体が前記スリーブで覆われていない場所で前記ソフトアクチュエータ本体が変形することを可能にするように構成された少なくとも1つのスリーブと
 を備えており、

前記スリーブが、前記ソフトアクチュエータ本体が覆われない少なくとも1つの開口を規定する單一片の材料を備えており、

前記單一片の材料が、前記開口と反対側を前記ソフトアクチュエータ本体に沿って連続的に延在することを特徴とする機械的にプログラムされたアクチュエータ。

【請求項 2】

請求項1に記載の機械的にプログラムされたアクチュエータにおいて、前記ソフトアクチュエータ本体が内部室を画定し、かつ前記作動機構が、前記ソフトアクチュエータ本体を変形させるために前記内部室内に流体を圧送するように構成されたポンプを含むことを特徴とする機械的にプログラムされたアクチュエータ。

【請求項 3】

請求項 2 に記載の機械的にプログラムされたアクチュエータにおいて、前記ソフトアクチュエータ本体が、可撓性およびエラストマー性の少なくともいずれかである少なくとも 1 つの材料であって、超弾性シリコーン、熱可塑性ウレタン、熱可塑性エラストマー、ゴム、ナイロン、織布材料、不織布材料、弾性ポリウレタン、およびポリエチレンから選択される前記少なくとも 1 つの材料を含むことを特徴とする機械的にプログラムされたアクチュエータ。

【請求項 4】

請求項 1 に記載の機械的にプログラムされたアクチュエータにおいて、前記ソフトアクチュエータ本体が、前記ソフトアクチュエータ本体の側部に沿った歪み抑制層を含み、かつ前記ソフトアクチュエータ本体が、前記ソフトアクチュエータ本体の側部の膨張を抑えることにより前記ソフトアクチュエータ本体の屈曲をもたらすように構成されることを特徴とする機械的にプログラムされたアクチュエータ。10

【請求項 5】

請求項 1 に記載の機械的にプログラムされたアクチュエータにおいて、複数のスリーブが前記ソフトアクチュエータ本体のそれぞれの部分の周りに配置され、前記スリーブの少なくとも 1 つが、(a) 前記スリーブの別のスリーブと異なる組成を有し、かつ(b) 前記スリーブが、前記スリーブの別のスリーブと異なる異方性機械的特性を有することを特徴とする機械的にプログラムされたアクチュエータ。20

【請求項 6】

請求項 5 に記載の機械的にプログラムされたアクチュエータにおいて、前記スリーブの少なくとも 2 つの間に間隙が設けられ、前記ソフトアクチュエータ本体を前記スリーブ間の前記間隙において変形させることを特徴とする機械的にプログラムされたアクチュエータ。20

【請求項 7】

請求項 1 に記載の機械的にプログラムされたアクチュエータにおいて、前記スリーブが開口を画定し、前記ソフトアクチュエータ本体を前記開口において変形させることを特徴とする機械的にプログラムされたアクチュエータ。

【請求項 8】

請求項 1 に記載の機械的にプログラムされたアクチュエータにおいて、前記スリーブが複数の開口を含み、前記ソフトアクチュエータ本体を前記開口において変形させることを特徴とする機械的にプログラムされたアクチュエータ。30

【請求項 9】

請求項 8 に記載の機械的にプログラムされたアクチュエータにおいて、前記開口が、前記スリーブにおける異なる長手方向位置および径方向位置に画定されることを特徴とする機械的にプログラムされたアクチュエータ。

【請求項 10】

請求項 1 に記載の機械的にプログラムされたアクチュエータにおいて、前記スリーブが、電子機器、センサ、磁石、配索機構、および連結機構から選択されるインターフェースを含むことを特徴とする機械的にプログラムされたアクチュエータ。40

【請求項 11】

請求項 1 に記載の機械的にプログラムされたアクチュエータにおいて、前記スリーブが、複数の前記ソフトアクチュエータ本体間の連結具としての役割を果たすことを特徴とする機械的にプログラムされたアクチュエータ。

【請求項 12】

請求項 1 に記載の機械的にプログラムされたアクチュエータにおいて、複数のスリーブが、互いに連結されるとともに、それぞれのソフトアクチュエータ本体の部分を収容することを特徴とする機械的にプログラムされたアクチュエータ。

【請求項 13】

請求項 1 に記載の機械的にプログラムされたアクチュエータにおいて、前記スリーブが50

、前記スリーブに収容される前記ソフトアクチュエータ本体の体積量を変化させるために調節可能な長さを有するように構成されることを特徴とする機械的にプログラムされたアクチュエータ。

【請求項 14】

請求項 1 に記載の機械的にプログラムされたアクチュエータにおいて、硬化材または硬化剤を用いて前記スリーブの少なくとも一部が剛性化されることを特徴とする機械的にプログラムされたアクチュエータ。

【請求項 15】

請求項 1 に記載の機械的にプログラムされたアクチュエータにおいて、前記スリーブが、剛性部分を前記ソフトアクチュエータ本体に固定することを特徴とする機械的にプログラムされたアクチュエータ。10

【請求項 16】

請求項 1 に記載の機械的にプログラムされたアクチュエータにおいて、前記スリーブを取り外し可能であることを特徴とする機械的にプログラムされたアクチュエータ。

【請求項 17】

請求項 1 に記載の機械的にプログラムされたアクチュエータにおいて、前記ソフトアクチュエータ本体よりも高い剛性を有する少なくとも 1 つの要素が、前記ソフトアクチュエータ本体の変形を更に制御するために前記スリーブ上または前記スリーブの内側に配置されることを特徴とする機械的にプログラムされたアクチュエータ。20

【請求項 18】

請求項 1 に記載の機械的にプログラムされたアクチュエータにおいて、前記アクチュエータが、前記ソフトアクチュエータ本体の周りに同心状に配置された内側スリーブと外側スリーブとを含み、間隙または開口が前記外側スリーブに設けられ、前記内側スリーブの一部を露出させることを特徴とする機械的にプログラムされたアクチュエータ。

【請求項 19】

機械的作動方法において、

室を画定する少なくとも 1 つのソフトアクチュエータ本体と、前記ソフトアクチュエータ本体の一部分の周りに配置された少なくとも 1 つのスリーブとを含む機械的にプログラムされたアクチュエータを使用するステップであって、前記スリーブが、前記ソフトアクチュエータ本体が覆われない少なくとも 1 つの開口を規定する單一片の材料を備えており、前記單一片の材料が、前記開口と反対側を前記ソフトアクチュエータ本体に沿って連続的に延在する、ステップと。30

前記ソフトアクチュエータ本体により画定された室内に流体を圧送し、前記ソフトアクチュエータ本体が前記スリーブで覆われていない場所で前記ソフトアクチュエータ本体を変形させ、その一方で、前記スリーブが前記ソフトアクチュエータ本体を覆っている場所で前記スリーブが前記ソフトアクチュエータ本体の変形を抑制するステップと

を含むことを特徴とする方法。

【請求項 20】

請求項 19 に記載の方法において、前記アクチュエータが、少なくとも 2 つのソフトアクチュエータ本体を含み、各ソフトアクチュエータ本体が、各ソフトアクチュエータ本体の一部分の周りに配置された少なくとも 1 つのスリーブを備えることを特徴とする方法。40

【請求項 21】

請求項 20 に記載の方法において、前記ソフトアクチュエータ本体間に物体を掴むように前記ソフトアクチュエータ本体を作動させるステップを更に含むことを特徴とする方法。50

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

政府支援

本発明は、国防高等研究計画局（Defense Advanced Research Projects Agency）

h Projects Agency)により与えられた助成番号W911NF-11-1-0094に基づく政府支援によりなされたものである。米国政府は、本発明において一定の権利を保有する。

【背景技術】

【0002】

ソフトアクチュエータは、複雑な動作を一体構造に組み込む能力と、エラストマー材料および加圧流体に起因した本来の柔軟性とを含む、剛性の機械システムに見られないいくつかの望ましい特徴を提供する。コンピュータ支援製図(CAD)プログラムおよび3次元(3D)プリンタは、アクチュエータ製造のための金型設計の(数日程度での)比較的迅速な繰り返しを可能にするが、これらの手法は、ソフトアクチュエータの出力動作、接続インターフェース、および表面特性の「オンザフライ」修正を可能にしない場合がある。この能力は、患者のニーズが変化する場所、ロボット操作またはリハビリテーションのための作業場などで、即時のカスタマイズが必要とされる場合に有利である。10

【発明の概要】

【0003】

機械的にプログラムされたソフトアクチュエータならびにその製造方法および使用方法が本明細書で説明される。装置および方法の種々の実施形態は、以下に説明する要素、特徴、およびステップの一部または全てを含み得る。

【0004】

機械的にプログラムされたソフトアクチュエータは、制限なしに作動させたときに、ソフトアクチュエータ本体の少なくとも一部が、屈曲し、直線状に延び、収縮し、捻れ、またはそれらの組み合わせとなるように構成される少なくとも1つのソフトアクチュエータ本体と、ソフトアクチュエータ本体を作動させるように構成された作動機構(例えば、流体ポンプ)と、ソフトアクチュエータ本体の一部分の周りに配置されるとともに、作動させたときにスリーブの内側でソフトアクチュエータ本体を拘束しかつスリーブで覆われていない場所でソフトアクチュエータ本体を屈曲させるように構成された少なくとも1つの適合スリーブとを含む。20

【0005】

機械的作動方法では、流体(例えば、空気または液体)がソフトアクチュエータ本体により画定された室内に圧送され、ソフトアクチュエータ本体がスリーブで覆われていない場所でソフトアクチュエータ本体を屈曲させ、その一方で、スリーブがソフトアクチュエータ本体を覆っている場所でスリーブがソフトアクチュエータ本体の屈曲を制限する。30

【0006】

これらのアクチュエータの実施形態は、快適性を向上させかつ使用者に対する負傷の危険性を低減するために軟組織(例えば、皮膚)が軟質でかつ柔軟性があるロボットアクチュエータと相互作用可能である、人間とロボットとの安全な相互作用をもたらすことができる。これらのソフトアクチュエータは、人間の動きを補助するためのロボットアクチュエータとしての使用、物体を取り扱うための形状適合性グリッパとしての使用、玩具での(例えば、ビデオゲーム用のインターフェースとしての)使用を含む様々な使用に適している。40

【図面の簡単な説明】

【0007】

【図1】図1は、スリーブのない湾曲するソフトアクチュエータ本体14の撮影画像である。

【図2】図2は、アクチュエータ本体14内の圧力変化後の図1の湾曲するソフトアクチュエータ本体14の撮影画像である。

【図3】図3は、ソフトアクチュエータ本体14の基部と遠位端部がそれぞれスリーブ16で取り囲まれた図1のソフトアクチュエータ本体14の撮影画像である。

【図4】図4は、アクチュエータ本体14内の圧力変化後の図3のアクチュエータ12の撮影画像である。50

【図5】図5は、歪み抑制層54がソフトアクチュエータ本体14の右側にあるソフトアクチュエータ本体14の図であり、アクチュエータ本体14の初期位置が左に示され、その一方で、アクチュエータ本体14内の圧力変化後の、歪み抑制層54によるアクチュエータ本体14の湾曲が右に示される。

【図6】図6は、ソフトアクチュエータ本体14の基部がそれぞれスリープ16で取り囲まれかつ歪み抑制層54がソフトアクチュエータ本体14の右側にあるソフトアクチュエータ本体14の図であり、アクチュエータ本体14の初期位置が左に示され、その一方で、アクチュエータ本体14内の圧力変化後の、スリープ16の上方の歪み抑制層54によるアクチュエータ本体14の湾曲が右に示される。

【図7】図7は、ソフトアクチュエータ本体14の基部と遠位端部がそれぞれスリープ16で取り囲まれかつ歪み抑制層54がソフトアクチュエータ本体14の右側にあるソフトアクチュエータ本体14の図であり、アクチュエータ本体14の初期位置が左に示され、その一方で、アクチュエータ本体14内の圧力変化後の、スリープ16間の歪み抑制層54によるアクチュエータ本体14の屈曲が右に示される。 10

【図8】図8は、加熱によりソフトアクチュエータ本体14に熱成形されるスリープ16を示す。

【図9】図9は、スリープ16が熱成形されたソフトアクチュエータ本体14を示す。

【図10】図10は、スリープ16の周囲に固定された締め付けクランプ24'によりソフトアクチュエータ本体14に取り付けられたスリープ16を示す。

【図11】図11は、スリープ16の周囲に固定されたジップタイ24'によりソフトアクチュエータ本体14に取り付けられたスリープ16を示す。 20

【図12】図12は、スリープ16の一端部の上側面とスリープ16の対向端部の底側面とにおけるフックとループ24'''のそれぞれの表面によりソフトアクチュエータ本体14に固定されたスリープ16を示す。

【図13】図13は、スリープ16の互いに対向する端部の各々に沿った開口に通されたレース24''''によりソフトアクチュエータ本体14に固定されたスリープ16を示す。

【図14】図14は、スリープ16とソフトアクチュエータ本体14との間に挿入された接着剤24'''''によりソフトアクチュエータ本体14に固定されたスリープ16を示す。 30

【図15】図15は、3つ以上のスリープ16間に形成された複数の関節部がアクチュエータ12の長さに沿って離間したアクチュエータ12を示す。

【図16】図16は、ソフトアクチュエータ本体14がスリープ16間で屈曲している、ソフトアクチュエータ本体14内の圧力変化後の図15のアクチュエータ12を示す。

【図17】図17は、ソフトアクチュエータ本体14が1つ、2つまたは3つのスリープセクション16で覆われ、かつスリープ16がソフトアクチュエータ本体14にわたって異なる距離だけ延びているアクチュエータの様々な実施形態を示す。

【図18】図18は、電子機器用の実装基板（例えば、接触センサ26および回路基板28）として機能できるスリープ16を示す。

【図19】図19は、（例えば、フックとループにより接続する、縫合される、接着されるなど）歪みゲージ30などのソフトセンサ用の固定点として機能できるスリープ16を示す。 40

【図20】図20は、（例えば、フックとループにより接続する、縫合される、接着されるなど）歪みゲージ30などのソフトセンサ用の固定点として機能できるスリープ16を示す。

【図21】図21は、剛性装置を軟質コネクタに接続するためのインターフェース（例えば、スクープ、レバー、ばね、または作動させる任意の機構）として機能できるスリープ16を示す。本実施形態において、スリープ16は、インターフェースとしての役割を果たすねじ付き支柱32を含む。

【図22】図22は、剛性装置を軟質コネクタに接続するためのインターフェース（例え 50

ば、スクープ、レバー、ばね、または作動させる任意の機構)として機能できるスリーブ16を示す。本実施形態において、スリーブ16は、インターフェースとしての役割を果たすねじ付き支柱32を含む。

【図23】図23は、剛性装置を軟質コネクタに接続するためのインターフェース(例えば、スクープ、レバー、ばね、または作動させる任意の機構)として機能できるスリーブ16を示す。本実施形態において、スリーブ16は、インターフェースとしての役割を果たすねじ付き支柱32を含む。

【図24】図24は、剛性装置を軟質コネクタに接続するためのインターフェース(例えば、スクープ、レバー、ばね、または作動させる任意の機構)として機能できるスリーブ16を示す。本実施形態において、スリーブ16は、インターフェースとしての役割を果たすねじ付き支柱32を含む。
10

【図25】図25は、(例えば、掴むときに位置合わせを容易にするための、工具を取り付けるための、または鉄系金属物体の迅速な収集に使用するための)磁石38の一体化または埋設を示す。

【図26】図26は、(例えば、掴むときに位置合わせを容易にするための、工具を取り付けるための、または鉄系金属物体の迅速な収集に使用するための)磁石38の一体化または埋設を示す。

【図27】図27は、(例えば、掴むときに位置合わせを容易にするための、工具を取り付けるための、または鉄系金属物体の迅速な収集に使用するための)磁石38の一体化または埋設を示す。
20

【図28】図28は、アクチュエータ本体14を直列に接続するための連結具としてのスリーブ16の使用を示す。

【図29】図29は、アクチュエータ本体14を直列に接続するための連結具としてのスリーブ16の使用を示す。

【図30】図30は、ソフトアクチュエータ本体14を互いに並列に連結するために並列に接続されたスリーブ16の使用を示す。

【図31】図31は、ソフトアクチュエータ本体14を互いに並列に連結するために並列に接続されたスリーブ16の使用を示す。

【図32】図32は、4つのソフトアクチュエータ本体14を接合して「X形関節」を形成するスリーブ16の使用を示す。
30

【図33】図33は、3つのソフトアクチュエータ本体14を接合して「T形関節」を形成するスリーブ16の使用を示す。

【図34】図34は、2つのソフトアクチュエータ本体14の端部同士を接合するスリーブ16の使用を示す。

【図35】図35は、スリーブ16の表面から延びるブラシ44を示す。

【図36】図36は、スリーブ16の表面上に突出する突起46を示す。

【図37】図37は、スリーブ16の表面上のループ48(代替的または追加的に、フックが設けられる)を示す。

【図38】図38は、引っ掛かりや絡まりを最小限に抑えるように管およびワイヤを配索するための周辺チャネル50を備えたスリーブ16を示す。
40

【図39】図39は、周辺チャネル50に通された管およびワイヤ52と、ソフトアクチュエータ本体14上に装着されたスリーブ16とを備えた図38のスリーブ16を示す。

【図40】図40は、下層のソフトアクチュエータ本体14に多数の屈曲位置を設けるために幅が狭くかつ剛性の接続ストリップに沿って間隔を置いて配置されるスリーブリング16を示す。

【図41】図41は、下層のソフトアクチュエータ本体14に多数の屈曲位置を設けるために幅が狭くかつ剛性の接続ストリップに沿って間隔を置いて配置されるスリーブリング16を示す。

【図42】図42は、0mmのスリーブ間隔でのソフトアクチュエータ本体14の屈曲を示し、影画像は、異なる圧力で屈曲するアクチュエータを示す。
50

【図43】図43は、15mmのスリープ間隔でのソフトアクチュエータ本体14の屈曲を示し、影画像は、異なる圧力で屈曲するアクチュエータを示す。

【図44】図44は、30mmのスリープ間隔でのソフトアクチュエータ本体14の屈曲を示し、影画像は、異なる圧力で屈曲するアクチュエータを示す。

【図45】図45は、開口22において下層のソフトアクチュエータ本体の屈曲を可能にするための開口22を備えたスリープ16を示す。

【図46】図46は、異なる箇所にかつ異なる向きに沿った異なる軸線の周囲で屈曲をもたらすために、スリープ16上の異なる長手位置および方位角位置に位置決めされた複数の開口22を備えたスリープ16を示す。

【図47】図47は、異なる箇所にかつ異なる向きに沿った異なる軸線の周囲で屈曲をもたらすために、スリープ16上の異なる長手位置および方位角位置に位置決めされた複数の開口22を備えたスリープ16を示す。

【図48】図48は、異なる箇所にかつ異なる向きに沿った異なる軸線の周囲で屈曲をもたらすために、スリープ16上の異なる長手位置および方位角位置に位置決めされた複数の開口22を備えたスリープ16を示す。

【図49】図49は、埋設された電気回路および配線62を備えたスリープ16を示す。

【図50】図50は、ソフトアクチュエータ12を身体部分63（ここでは、指）に接続できるスリープ16を示す。

【図51】図51は、スリープのない湾曲するソフトアクチュエータ12を含むマニピュレータを用いて正方形の物体66を掴む様子を示す。

【図52】図52は、掴むべき物体66の側面の長さに一致する長さを有するスリープ16で覆われた湾曲するソフトアクチュエータ12を備えたマニピュレータを示す。

【図53】図53は、物体66を掴む、図52のマニピュレータのスリープ付きソフトアクチュエータ12を示す。

【図54】図54は、荷重がかかった状態で物体66を支持する、スリープのないソフトアクチュエータ本体14を示す。

【図55】図55は、より大きな荷重がかかった状態で物体66を支持する、スリープ16を備えたソフトアクチュエータを示す。

【図56】図56は、更に大きな荷重がかかった状態で物体66を支持する、繊維強化積層構造を有するスリープ16を備えたソフトアクチュエータを示す。

【図57】図57は、物体66を掴む、スリープ16のないソフトアクチュエータ本体14の追加の実施形態を示す。

【図58】図58は、物体66を掴む、スリープ16を備えたソフトアクチュエータ本体14の追加の実施形態を示す。

【図59】図59は、湾曲するソフトアクチュエータ本体14上のスリープ16とスリープのない湾曲する第2のアクチュエータとを備えた形状適合マニピュレータを示す。

【図60】図60は、湾曲するソフトアクチュエータ本体14上のスリープ16とスリープのない湾曲する第2のアクチュエータとを備えた形状適合マニピュレータを示す。

【図61】図61は、下層のソフトアクチュエータ本体14上に調節可能な長さでの屈曲制限をもたらすために巻き広げることができるスリープ16を示す。

【図62】図62は、下層のソフトアクチュエータ本体14上に調節可能な長さでの屈曲制限をもたらすために巻き広げることができるスリープ16を示す。

【図63】図63は、下層のソフトアクチュエータ本体14上に調節可能な長さでの屈曲制限をもたらすために巻き広げることができるスリープ16を示す。

【図64】図64は、下層のソフトアクチュエータ本体14上に調節可能な長さでの屈曲制限をもたらすために巻き広げができるスリープ16を示す。

【図65】図65は、下層のソフトアクチュエータ本体14上に調節可能な長さでの屈曲制限をもたらすために延出させることができるセグメントを含むスリープ16を示す。

【図66】図66は、下層のソフトアクチュエータ本体14上に調節可能な長さでの屈曲制限をもたらすために延出させることができるセグメントを含むスリープ16を示す。

10

20

30

40

50

【図67】図67は、下層のソフトアクチュエータ本体14上に調節可能な長さでの屈曲制限をもたらすために延出させることができるセグメントを含むスリーブ16を示す。

【図68】図68は、ソフトアクチュエータ本体14の両端部に図61および図64の長さ調整可能なスリーブ16を備えたソフトアクチュエータ本体14を示し、スリーブ16が更なる巻き広げにより長くなるにつれてソフトアクチュエータ本体14の屈曲半径が減少することを示す。

【図69】図69は、ソフトアクチュエータ本体14の両端部に図61および図64の長さ調整可能なスリーブ16を備えたソフトアクチュエータ本体14を示し、スリーブ16が更なる巻き広げにより長くなるにつれてソフトアクチュエータ本体14の屈曲半径が減少することを示す。

【図70】図70は、非弾性(歪み抑制)繊維強化積層構造54を備えた(cとd)および非弾性(歪み抑制)繊維強化積層構造54のない(aとb)、繊維強化アクチュエータ本体14の断面比較を示し、図70(a)は、未加圧の繊維強化アクチュエータ本体14の図示の断面図および実際の側面図を示し、図70(b)は、流体加圧に起因したアクチュエータ本体14の壁の膨張を示し、図70(c)は、繊維強化アクチュエータ本体14上の非弾性繊維強化積層体54の配置を示し、かつ図70(d)は、スリーブ16が追加されたときのアクチュエータの図示の断面図を示す。

【図71a】図71aは、0mmのスリーブ16間隔を有する、ソフトアクチュエータの平坦表面上に非弾性繊維強化積層体を備えた屈曲するソフトアクチュエータの動作の範囲を示す。

【図71b】図71bは、15mmのスリーブ16間隔を有する、ソフトアクチュエータの平坦表面上に非弾性繊維強化積層体を備えた屈曲するソフトアクチュエータの動作の範囲を示す。

【図71c】図71cは、30mmのスリーブ16間隔を有する、ソフトアクチュエータの平坦表面上に非弾性繊維強化積層体を備えた屈曲するソフトアクチュエータの動作の範囲を示す。

【図72】図72は、屈曲関節としての役割を果たす両方のスリーブ16を貫通する開口22と、内側スリーブ16'が長手方向に延びることができる延在セグメント70としての役割を果たす外側スリーブ16''における間隙とを備えた、内側スリーブ16'と外側スリーブ16''を備えた未作動の直線状に延びるソフトアクチュエータ12を示す。スリーブは多セグメント動作を可能にする。

【図73】図73は、作動状態にある図72のソフトアクチュエータ12を示す。

【図74】図74は、アクチュエータの屈曲を生じさせるためのスリットの形態の開口を備えたスリーブ16内に収容された直線状に延びるソフトアクチュエータ本体14の撮影画像である。

【図75】図75は、ソフトアクチュエータ本体14内に圧送された流体により作動させたときの図74の直線状に延びるソフトアクチュエータの撮影画像である。

【図76】図76は、開口の向きにより各開口におけるアクチュエータの屈曲を互いに逆方向に生じさせる2つの開口を備えたスリーブ16内に収容された直線状に延びるソフトアクチュエータ本体14の撮影画像である。

【図77】図77は、スリーブ16の複数の開口および非切断部69が異なる向きの複数の軸線の周囲でアクチュエータの屈曲を生じさせるように構成された、スリーブ16内に収容された直線状に延びるソフトアクチュエータの撮影画像である。

【図78】図78は、共通の向きと一定の間隔とを共有する複数の開口と非切断部69とを備えたスリーブ16により屈曲するアクチュエータに変換された直線状に延びるソフトアクチュエータの撮像画像である。

【図79】図79は、各アクチュエータが、ソフトアクチュエータの直線作動を屈曲/湾曲動作に変換するための複数の開口を有するスリーブ16内に収容された直線状に延びるソフトアクチュエータを含む、湾曲するソフトアクチュエータを各指に含むパワーグリップグローブの撮像画像である。

【図80】図80は、各アクチュエータが、ソフトアクチュエータの直線作動を屈曲／湾曲動作に変換するための複数の開口を有するスリーブ16内に収容された直線状に延びるソフトアクチュエータを含む、湾曲するソフトアクチュエータを各指に含むパワーグリップグローブの撮像画像である。

【図81】図81は、リールから繰り出されかつ所望の長さをもたらすために切断可能なソフトアクチュエータ本体14を示す。

【図82】図82は、各端部に挿入されるキャップ68と、ソフトアクチュエータ本体14内への流体の導入を可能にするための、端部キャップの一方における空気圧または油圧接続部60とを備えた、図81のソフトアクチュエータ本体14の切断されたセグメントを示す。
10

【図83】図83は、把持特徴部49を含むスリーブ16を先端部に備えたソフトアクチュエータ本体14の斜視図を提示する。

【図84】図84は、把持特徴部49を含むスリーブ16を先端部に備えたソフトアクチュエータ本体14の斜視図を提示する。

【図85】図85は、把持特徴部49を含むスリーブ16を先端部に備えたソフトアクチュエータ本体14の斜視図を提示する。

【図86】図86は、スリーブ16上に装着された真空ジャミングポーチ80の作動により強固となり得る（それゆえ、これにより変形を制御できる）セグメントを備えたアクチュエータ12の実施形態を図示する。

【図87】図87は、スリーブ16上に装着された真空ジャミングポーチ80の作動により強固となり得る（それゆえ、これにより変形を制御できる）セグメントを備えたアクチュエータ12の実施形態を図示する。
20

【図88】図88は、スリーブ16上に装着された真空ジャミングポーチ80の作動により強固となり得る（それゆえ、これにより変形を制御できる）セグメントを備えたアクチュエータ12の実施形態を図示する。

【図89】図89は、スリーブ16上に装着された真空ジャミンググリッパ82を含むアクチュエータ12を図示する。

【発明を実施するための形態】

【0008】

添付図面において、類似の参照記号は異なる図を通じて同じまたは同様の部分を指し、また、アポストロフィは、同じ参照番号を共用する同じまたは同様の物品の複数の例を区別するために使用される。図面は、必ずしも原寸に比例したものではなく、むしろ、以下に述べる特定の原理を例示することに重点が置かれている。
30

【0009】

本発明の種々の態様の前述および他の特徴ならびに利点が、以下の、種々の概念のより詳細な説明と、本発明のより広い範囲内の特定の実施形態とから明らかになるであろう。上で紹介しあつ以下により詳細に述べる主題の種々の態様は、その主題がいかなる特定の実施態様にも限定されないので、多数の方法のいずれかで実施してもよい。特定の実施態様および用途の例は、主として例示の目的で提供される。

【0010】

本明細書において別段の定義、使用、または特徴付けがない限り、本明細書で使用される用語（技術的および科学的用語を含む）は、関連技術の文脈において許容されるそれらの意味と一致する意味を有するものとして解釈されるべきであり、本明細書において明示的に定義されない限り、理想化された意味または過度に形式的な意味に解釈されるべきではない。例えば、特定の組成について言及する場合には、現実に実用的だが不完全なものが適用される場合があるので、組成は、完全にではないが実質的に純粋なものであってもよく、例えば、少なくとも微量（例えば、1または2%未満）の不純物が存在し得ることも本説明の範囲内にあると理解することができ、同様に、特定の形状について言及する場合には、その形状は、例えば、製造公差による、理想的な形状でない不完全な変形を含むように意図される。本明細書に示される百分率または濃度は、重量または体積のいずれか
40

で表すことができる。

【0011】

本明細書では、種々の要素を説明するために、第1の、第2の、第3などの用語が使用されることがあるが、これらの要素は、これらの用語によって限定されるものではない。これらの用語は、単に1つの要素を別の要素と区別するために使用される。したがって、例示的な実施形態の教示から逸脱することなく、以下に述べる第1の要素を第2の要素と呼ぶことができる。

【0012】

「上方(above)」「下方(below)」「左側(left)」「右側(right)」「前方(in front)」および「後方(behind)」などの空間的な相対用語は、本明細書では、図に示すように、1つの要素と別の要素との関係を説明するのに説明し易くするために使用され得る。当然のことながら、空間的な相対用語および図示の構成は、本明細書で説明されかつ図に描かれた向きに加えて、使用時または動作時の装置の異なる向きを包含するように意図されている。例えば、図中の装置を反転させた場合には、他の要素または特徴の「下方」または「真下」にあると説明された要素が他の要素または特徴の「上方」に位置することになる。したがって、「上方」という例示的な用語は、上方と下方の両方の向きを包含する場合がある。装置を別の方向に向け(例えば、90度または他の向きに回転させ)てもよく、本明細書で使用される空間的な相対的記述用語は、それに応じて解釈される。

【0013】

更にまた、本開示では、ある要素が、別の要素「の上にある(on)」、「に接続される.connected to)」、「に連結される(coupled to)」、「に接触する(in contact with)」などと称される場合、別段の規定がない限り、要素は、他の要素の直ぐ上にあるか、他の要素に直接接続されるか、直接連結されるか、直接接触してもよく、または、介在要素が存在してもよい。

【0014】

本明細書で使用する専門用語は、特定の実施形態を説明するためのものであり、例示的な実施形態を限定するものとは意図されていない。本明細書で使用する場合、「a」および「an」などの単数形は、文脈からそうでないと分かる場合を除き、複数形も含むものと意図されている。加えて、「含む(includes)」、「含んでいる(including)」、「備える(comprises)」、および「備えている(comprising)」という用語は、言及された要素またはステップの存在を規定するが、1つもしくは複数の他の要素またはステップの存在または追加を排除するものではない。

【0015】

本明細書では、開示する方法およびアクチュエータ設計は、ソフトアクチュエータの力とマイクロの権限を使用者の手に委ねることができ、かつ特定の用途に適合するよう新たにソフトアクチュエータを成形する必要をなくすことができる。本明細書で説明するように、スリーブ16を使用してソフトアクチュエータ12を機械的にプログラムすることができ、このことは、ソフトアクチュエータの動作および性能の(例えば、数分程度での)迅速な修正を可能にする。例として、図1および図2は、作動機構18により作動させたとき(例えば、ポンプがソフトアクチュエータ本体14に流体を充填したとき)の湾曲するソフトアクチュエータ12の動作を示している。湾曲動作を生じさせる1つの手段は、(ソフトアクチュエータ本体14の非拘束部に対して)歪み抑制層54の長さに沿って弾性変形または塑性変形に抗する歪み抑制層54を接着し、それにより、応力を受けた(例えば、内圧が上昇した)ときに、図5に示すように、アクチュエータ12の湾曲を生じさせることである。この動作は、図3および図4に示すように、スリーブ16(収縮管など)をソフトアクチュエータ本体14に適用し、屈曲動作が望ましい場所に完全または部分的な開口を残すことにより、調節することができる。このようなスリーブ16でソフトアクチュエータ本体14を包むことにより、湾曲するソフトアクチュエータ本体14をより鋭角に屈曲するアクチュエータに変換することができ、(または、以下に述べるように

10

20

30

40

50

また図72～図80に示すように、直線状のアクチュエータを屈曲するアクチュエータに変換することができ、)かつ明らかに異なる動作(例えば、関節のような屈曲)をもたらすことができる。スリープ16の使用はまた、センサ26、電子機器、機械工具、および他のソフトアクチュエータとのインターフェース接続、および実装されるプリント回路基板28を含めることなどの、様々な特徴および性能をソフトアクチュエータ本体14に追加する新たな機会を可能にする(図18～図24、図35～図39、および図49を参照)。図21および図22に示すように、スリープはまた、他の物体33をスリープ16に装着するためまたはスリープ16を他の構造に装着するための(本実施形態ではねじ付き支柱の形態の)取付具32を含むことができる。図23および図24に示すように、アクチュエータ12を剛性リンク34に装着することができ、この剛性リンク34は、作動する枢動構造を形成するために枢動軸36において接合される。10

【0016】

本開示のソフトアクチュエータ本体14は、例えば、超弾性シリコーン、熱可塑性エラストマー、熱可塑性ウレタン、ゴム、弾性ポリウレタン、またはポリエチレンで形成することができる、室20を画定する壁を含む。よって、ソフトアクチュエータ本体14は、破損するまでに、例えば、その元の寸法の200%まで寸法を膨張させるように設計でき、その一方で、ソフトアクチュエータ本体14を内側で拘束するスリープ16を(例えば、ソフトアクチュエータ本体14の、例えば、10分の1以下の弾性を有する非膨張性布帛の形態の)可撓性材料、剛性材料、および/またはエラストマー材料で形成でき、その結果、スリープ16がソフトアクチュエータ本体14を拘束し、かつソフトアクチュエータ本体14が(例えば、内圧の上昇により)膨張したときにソフトアクチュエータ本体14がスリープ16を押圧する。20

【0017】

ソフトアクチュエータ本体14と拘束スリープ16の組み合わせは、以下の特徴のいずれかまたは全てを含むことができる。まず、スリープ16は、ソフトアクチュエータ本体14の動作を変化させることができる。図6に示すように、スリープ16に取り囲まれるソフトアクチュエータ本体14の任意の部分の変形を抑制することと、スリープ16における(図45に示すような、例えば、スリット状または切り欠き状の)開口22において変形を促進することにより、ソフトアクチュエータ本体14の長さに沿った任意の場所に屈曲位置を移動させるために、単一のスリープ16を使用することができる。追加の実施形態では、図3、図4、および図7に示すように、屈曲位置を移動させ、アクチュエータの曲率半径を変化させて、関節のような屈曲を生じさせるために、2つのスリープを離間して位置決めし配置することができる。加えて、図8～図14に示すように、スリープ16は、熱成形することができ、または締め付けクランプ24'、(例えば、ケーブルタイを備えた)レース24''、ゴム帯24'''、ジップタイ24''''、相互係止するフックとループ構造24'''''(例えば、VELCRO接着)、または縫製糸などの、固定機構24で固定することができ、またはソフトアクチュエータ本体14に巻き付け、熱溶着し、もしくは接着することができる。ソフトアクチュエータ12が医療用途に使用される特定の実施形態では、ソフトアクチュエータ本体14とスリープ16の両方を、シリコーンまたはパリレンポリマーなどの、生体適合性材料で形成または被覆することができる。追加の実施形態では、ソフトアクチュエータ12に作製される「関節」の箇所および屈曲半径を変更するために、スリープ16を異なる長さに切断することができる。加えて、スリープ16は、再使用のためにソフトアクチュエータ本体14を解放するためにはソフトアクチュエータ本体14から取り外し可能であるように設計することができる(例えば、スリープ16を、切り取り、滑落させ、解き、引き離し(詳細には、フックとループ構造を使用する場合)、加熱により除去することができる)。3040

【0018】

更に多くの実施形態では、図15～図17および図46～図48に示すように、単一のソフトアクチュエータ本体14における多数の軸線の周りに異なる曲率半径を有する多数の関節を作製するためにスリープ16を使用することができる。ソフトアクチュエータ本50

体 1 4 は、必ずしも歪み抑制層を含まなくてもよい。代替的に、ソフトアクチュエータ本体は、直線状の延びるソフトアクチュエータまたは任意のエラストマー性袋体とすることができます、かつ開口 2 2 の後のスリープ材料の非切断帯は、図 7 3 ~ 図 8 0 に示すように、歪み抑制層 5 4 の機能を果たすことができる。

【 0 0 1 9 】

スリープ 1 6 はまた、以下、すなわち、電子機器（例えば、慣性計測ユニットおよび機械式接点スイッチ）用の固定点として機能することと、ソフトセンサ 2 6 および 3 0（例えば、フックヒループ構造を相互係止させることにより固定され、互いに縫合され、互いに接着され得るなど）用の固定点として機能することと、剛性装置をソフトアクチュエータ本体 1 4 に接続する（例えば、取付具 3 2、スクープ、レバー、ばね、または作動させる必要がある任意の機構により、アクチュエータ 1 2 に連結する）ためのインターフェースとして機能することと、図 2 5 ~ 図 2 7 に示すように、（例えば、掴むときに位置合わせを容易にするために、工具 3 9 を取り付けるために、または鉄系金属物体 4 0 の迅速な収集に使用するために）磁石 3 8 を一体化させるかまたは埋設することと、3 D 構造を作製するためにスリープ 1 6 を使用できる、図 3 0 および図 3 1 に示すように、多数のソフトアクチュエータ本体 1 4 を並列に接続するかまたは直列に接続する（例えば、図 2 8、2 9、および図 3 2 ~ 図 3 4 に示すように、X 形関節、T 形関節、および L 形関節または端部同士の関節としての役割を果たす）ことと、（例えば、図 3 5 ~ 図 3 7 に示すように、ブラシ 4 4、粘着性表面、凸凹表面 4 6 により、ならびに、フックおよび／またはループ 4 8 などの取付機構により）物体を把持する、捻る、摺動させる、または転動させるための様々なテクスチャのいずれかを提供することと、図 3 8 および図 3 9 に示すように、管およびワイヤ 5 2 の引っ掛けりや絡まりを最小限に抑えるために周辺チャネル 5 0 を通して管および配線 5 2 を配索することと、を含む全ての一連の用途に対してインターフェース接続する媒体として機能することができる。

【 0 0 2 0 】

図 8 3 ~ 図 8 5 には、物体とインターフェース接続するための把持特徴部 4 9 を含むスリープ 1 6 が示されており、スリープ 1 6 はまた、ソフトアクチュエータ本体 1 4 を横切って更に延び、かつ他の実施形態に示すように、屈曲または他の形態の作動のための開口 2 2 または他の特徴部を含む。

【 0 0 2 1 】

他の実施形態において、図 4 0 および図 4 1 に示すように、幅が狭くかつ歪み抑制層 5 4 に沿って間隔を置いて配置される接続されたリング状のスリープ 1 6 セクションは、上で説明したように、アクチュエータ 1 2 の湾曲動作を大幅に変更することなく、多くのインターフェース用途を達成することができる。

【 0 0 2 2 】

スリープ 1 6 は、図 4 6 ~ 図 4 8、図 7 6 および図 7 7 に示すように、多数の軸線に沿った多数の屈曲位置を画定する、スリープ 1 6 に沿ってかつスリープ 1 6 の周囲に異なる長手方向位置および径方向位置に切り欠きまたはスリット 2 2 を備えた單一片の材料で形成することができ、かつ、図 3 2 ~ 図 3 4 に示すように、複数のソフトアクチュエータ本体 1 4 を接合するために使用できる（例えば、相互接続された多数のスリープ端部を備えた）單一片の材料で形成することができる。

【 0 0 2 3 】

図 4 2 ~ 図 4 4 に示すように、スリープ 1 6 の一端部には、ソフトアクチュエータ本体 1 4 に取り付けられかつ空気圧接続部 6 0 を含む固定具 5 8 が存在し、その空気圧接続部 6 0 は、ポンプ 1 8 と、ソフトアクチュエータ本体 1 4 の壁により画定された室 2 0 との間に流体連通をもたらす。（a）0 mm、（b）15 mm、および（c）30 mm のスリープ間隔における 28 A デュロメータ（28 A durometer）スリープ付きの屈曲するソフトアクチュエータ 1 2 の動作の範囲が、図 4 2 ~ 図 4 4 に比較のためにそれぞれ示されている。影画像 5 6 は、異なる圧力で屈曲するアクチュエータ 1 2 を示している。

10

20

30

40

50

【0024】

スリープ16は、ソフトアクチュエータ本体14の表面上の機械的特徴部（例えば、突起、ベローズ、ケブラー（Kevlar）リブ、他の幾何学的係止特徴部など）によりソフトアクチュエータ本体14の表面にしっかりと固定することができ、かつスリープ16は、繊維強化材を用いて形成することができる。スリープ16はまた、（図49に示すような）集積電気配線62、回路基板28、加熱要素、冷却要素、温度センサ、配索チャネル50、容量センサ、力センサ26、歪みセンサ30およびその他を有することができる。

【0025】

特定の用途において、スリープ16は、図50（ここでは、アクチュエータ12は、例えば0.5～2cmの厚みを有し、例えば長さが3～15cmであり得る）に示すように、ソフトアクチュエータ本体14を人間（または他の動物）の身体部分63、指など、または任意の他の関節のある身体部分に接続することができる。他の実施形態において、スリープ16は、ソフトアクチュエータ本体14を衣類に接続することができる。

10

【0026】

追加の実施形態では、図52、図53、図55、図55、および図58～図60に示すように、ソフトアクチュエータ12をマニピュレータ本体64に組み付けることができ、ここでは、掴むべき物体66の形状／寸法に（例えば、5%の範囲内で）一致するように、スリープ16を異なる長さに切断することができる。比較のために、スリープのない湾曲するソフトアクチュエータ本体14を備えたマニピュレータが図51、図54、および図57に示されており、ここでは、湾曲したソフトアクチュエータ12が、取り扱うべき物体66の表面に密着していないことが分かる。図54～図56の実施形態では、追加の下向きの力が、物体66から伸びるフック67を介して物体66に加えられる。提案されたスリープ16の使用は、角張った物体66に一致する改善された形状と、向上した保持強度とを可能にする。これらの実施形態において、スリープの長さは、図61～図69に示すように、取り扱うべき物体66の側面の長さに一致するように（例えば、転動、摺動、螺合／螺合解除などにより）調整／調節することができ、かつスリープ16は、剛性と可撓性とエラストマー性とを有する材料から構成するかまたはこれら材料と組み合わせることができる。例えば、スリープ16は、図70および図71に示すように、柔軟性のある関節部を作るために2つの剛性の構成要素54を接合することができる。

20

【0027】

図70は、繊維強化積層体を備えた繊維強化アクチュエータ12および繊維強化積層体のない繊維強化アクチュエータ12の断面比較を示し、図70（a）は、未加圧の繊維強化アクチュエータ12の図示の断面図および実際の側面図を示し、図70（b）は、流体加圧に起因したアクチュエータ壁の膨張を示し（平坦面15の外側への撓みに留意）、図70（c）は、繊維強化アクチュエータ12上の繊維強化積層体の配置を示し、かつ図70（d）は、スリープ16が追加されたときのアクチュエータ12の図示の断面図を示す。スリープ16と繊維強化積層体との組み合わせは、平坦面15を補強しつつ視覚的に表れる撓みを排除または低減する。

30

【0028】

図86は、図70の実施形態（c）の設計に対する代替案を提示しており、ここでは、アクチュエータの部分を補強するために剛性要素54をスリープ16と一体化させる代わりに、真空ジャミングポーチ80がスリープ16に一体化される。本実施形態において、流体ライン60は真空源に接続する。最初、大気圧においては遊離した粒子または積層層が真空ジャミングポーチ80内に収容されている。しかしながら、これらのセクションが真空にさらされると、ポーチ壁が、内容物を包囲して、内容物の移動を抑え、より剛性の状態へのポーチ80の相転移（すなわち、ジャミング）を生じさせる。この構成の有利な特徴は、真空圧力を調節することによりポーチ80の初期の可撓状態に戻すことができる可逆性とを含む。

40

【0029】

50

図87は、開口22におけるアクチュエータ12の変形を能動的に制御するために、真空ジャミングポーチ80が開口22と反対側に配置される、スリープ16の構成を提示している。図88は、ソフトアクチュエータ本体14が加圧されるその概念の図を提示しているが、真空ジャミングポーチ80'は真空中にあり、大気圧下にある外側ポーチ80よりも硬くなるので、1つの開口22（最も右側）におけるソフトアクチュエータ本体14の一部が拘束される。

【0030】

Cornell UniversityおよびEmpire Robotics, Inc.により実証されているように、真空ジャミングはまた物体を把持する有効な手段を提供することも判明している（例えば、米国特許出願公開第20130106127A1号明細書を参照）。図89に示すように、大気中において内圧で物体を拾い上げるために、真空ジャミンググリッパ（vacuum jamming gripper）82は、物体の上部に配置され、かつ物体に適合する。グリッパ82を硬化させるために真空が適用され、挟持による摩擦、取り込みおよび真空吸引により把持力を発生させる。更に、グリッパ82内に空気を注入して真空を解除することにより物体を解放することができる。図89は、目下の作業に応じて、この把持性能を任意にアクチュエータ12に追加するかまたはアクチュエータ12から除去することができるよう、真空ジャミンググリッパ82をスリープ16と一体化させることができる概念を提示している。

【0031】

図71は、ソフトアクチュエータ本体14の平坦表面15上に0.8mmの厚さの繊維強化積層体を備えかつスリープ16における開口22を横切る（a）0mm、（b）15mm、および（c）30mmの間隔を有する28Aデュロメータの屈曲するソフトアクチュエータ12の動作の範囲を図示している。局所的な延出を許容する延在セグメント70を備えたソフトアクチュエータ12が、図72および図73に示されている。本実施形態では、実質的に非弾性の外側スリープ16'のセクション間の間隙と、ソフトアクチュエータ本体14を覆う膨張可能な内側スリープ16'により延出を容易にする。外側スリープ16'が除去された（間隙をもたらす）場所では、露出した内側スリープ16'が径方向に膨張して、ソフトアクチュエータ12に対して流入および流出する流体流れに接触することができる。屈曲関節では、これらの箇所でのソフトアクチュエータ12の屈曲を容易にするために、スリープ16'および16''を完全に切断せずにスリープ16'と16''の両方に開口22を作ることができる。更に、（数例を挙げると、屈曲、延出、収縮、捻り延出、および捻り屈曲などの）2つ以上のタイプの動作をもたらすアクチュエータ12については、これらの動作をロックまたはアンロックする手段としてスリープ16を使用することができる。

【0032】

図74～図76に示すように、スリープ16は、屈曲／枢動箇所の各々に連続した長さのスリープ材料を提供するために開口22の後ろに非切断部69を含む。図77には、異なる向きの複数の軸線の周囲でアクチュエータの屈曲を生じさせるように構成された複数の開口（スリット）22を備えたスリープ16内に収容された直線状に延びるソフトアクチュエータ本体14が示されており、かつ図78には、共通の向きと一定の間隔とを共有する複数の開口22を備えたスリープ16により屈曲するアクチュエータに変換された直線状に延びるソフトアクチュエータ本体14が示されている。

【0033】

各アクチュエータ12が、ソフトアクチュエータ本体14の直線作動を屈曲／湾曲動作に変換するための複数の開口22を有するスリープ16内に収容された直線状に延びるソフトアクチュエータ本体14を含む、湾曲するソフトアクチュエータ12を各指に含むパワーグリップグローブ（power grip glove）72が、図79および図80に示されている。装着者の関節の箇所に一致するように開口22の位置をカスタマイズすることができる。ソフトアクチュエータ本体14の弾性は、例えば、アクチュエータ12が接触する屈曲する指との接触を（滑らすことなく）維持するために、アクチュエータ

10

20

30

40

50

12が関節において延びることを可能にする。他の実施形態では、アクチュエータ12を別のタイプの着用可能な衣服に組み込むことができ、ここでは、アクチュエータ12を、他の関節に沿って構成し、かつ必要に応じて、より大きな力またはより小さな力を生じさせるように設計することができる。また、ポンプ18を制御し、それによりアクチュエータ12の作動を制御するために、制御電子機器を衣服に組み込むことができる。

【0034】

いくつかの用途では、長期間の再使用のためにポンプ18が保持される一方で、アクチュエータ12を使い捨て可能として（例えば、1ヶ月間の使用後など、一定期間の使用後に廃棄して）取り替えることができる。

【0035】

他の実施形態において、ソフトアクチュエータ12は、人間または他の生物の身体部分にソフトアクチュエータ12を接続することなく（例えば、ロボットハンドを作製するために）単独で使用することができる。例えば、複数のアクチュエータ12は、人間が立ち入れない環境（例えば、海底200メートル以上の深さなどの、かなりの深度）において物体を拾い上げて取り扱うことができる掴み器を形成するために、ハブから延びることができる。

【0036】

特定の実施形態では、ソフトアクチュエータ本体14を、図81に示すようにリールで提供し、所望の長さに切断することができる。本実施形態を使用して、リールから所望の長さのソフトアクチュエータ本体14を切断し、次いで、図82に示すようにソフトアクチュエータ本体14の端部にキャップを被せることにより、ソフトアクチュエータ12を迅速に組み立てることができる。図82に図示する端部キャップ68の少なくとも一方は、アクチュエータ本体14の作動のための動力を供給するためにソフトアクチュエータ本体14内への流体の圧送を可能にするための、端部キャップ68を貫通する組み込み式の空気圧または油圧接続部であって（流体源に連結された空気圧または油圧ポンプ18が接続される）空気圧または油圧接続部を含み、かつ所望通りにアクチュエータ、12の屈曲または湾曲を可能にするための開口22を備えたスリーブ16をソフトアクチュエータ本体14に外嵌することができる。

【0037】

追加の実施形態において、スリーブ16は、異なる軸線に沿った異なる特性（例えば、異なる歪み特性）をアクチュエータ12に付与するために異方性材料で形成することができる。加えて、スリーブ16は、後にスリーブ16をエポキシまたはポリウレタンで被覆することにより剛性化できる織布材料で形成することができる。更にまた、スリーブ16は、複数の空気室を収容する一体型ソフトアクチュエータ本体14に適用することができる。更に多くの実施形態において、スリーブ16は、本開示のソフトアクチュエータ12により機械的に補助できる、動作を生じさせるために筋肉を動かす人間の活動に付随して生じる信号（例えば、電気信号、筋活動）を検出するように構成された電子センサ（例えば、筋電図（EMG））を含むことができる。

【0038】

本発明の実施形態を説明する際に、明確にするために特定の専門用語が使用される。説明の目的で、特定の用語は、同様の結果を実現するために同じように動作する技術的および機能的等価物を少なくとも含むように意図されている。加えて、本発明の特定の実施形態が複数のシステム要素または方法ステップを含むいくつかの例では、それらの要素またはステップを单一の要素またはステップに置き換えてもよく、同様に、单一の要素またはステップを同じ目的を果たす複数の要素またはステップに置き換えててもよい。更に、本発明の実施形態に関して種々の特性に関するパラメータまたは他の値が本明細書に規定されている場合、別段の規定がない限り、それらのパラメータまたは値を、100分の1、50分の1、20分の1、10分の1、5分の1、3分の1、2分の1、3分の2、4分の3、5分の4、10分の9、20分の19、50分の49、100分の99などだけ上方もしくは下方に（または1、2、3、4、5、6、8、10、20、50、100倍など

10

20

30

40

50

だけ上方に)、または四捨五入したそれらの近似値により調整することができる。その上、本発明についてその特定の実施形態を参照して示し説明してきたが、当業者であれば、本発明の範囲から逸脱することなく、形態と細部における種々の置換および変更を施してもよいことを理解するであろう。更にまた、他の様式、機能、および利点も本発明の範囲内にあり、かつ、本発明の全ての実施形態は、必ずしも上で説明した利点の全てを達成する必要はないし、上で説明した特徴の全てを有する必要もない。加えて、ステップ、要素および特徴を、他の実施形態との関連で同様に使用することができる。本文の全体を通じて引用された参考文献のテキスト、雑誌論文、特許、特許出願などを含む参考文献の内容は、その全体が参照により本明細書に組み込まれ、これらの参考文献からの適切な構成要素、ステップ、および特徴は、本発明の実施形態に含まれても、含まれなくてもよい。また更に、「背景技術」の項で特定された構成要素およびステップは、本開示に不可欠なものであり、本発明の範囲内における本開示の別の箇所で説明された構成要素およびステップとの関連でまたはそれらの代わりに使用することができる。方法請求項において、段階が特定の順序で列挙される場合には(参照を容易にするために加えられた順序付け先頭文字の有無にかかわらず)、それら段階は、用語および語句により別段の規定または暗示がない限り、列挙される順序に時間的に限定されるものと解釈されるべきではない。

10

【図1】

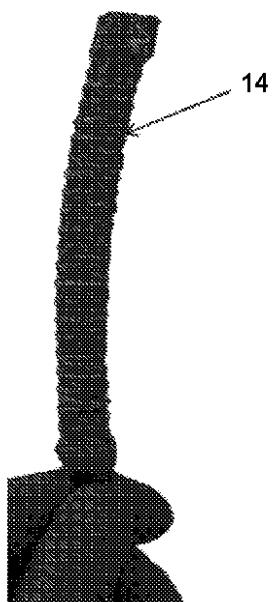


FIG. 1

【図2】

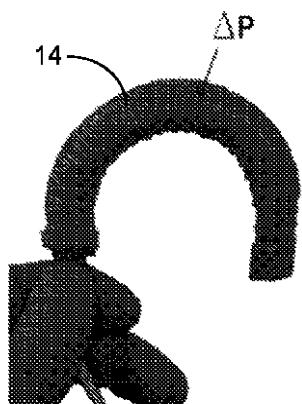


FIG. 2

【図3】

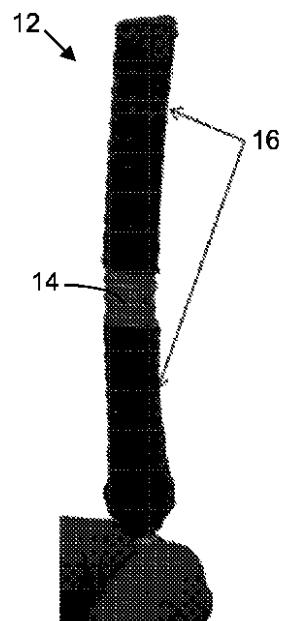


FIG. 3

【図4】

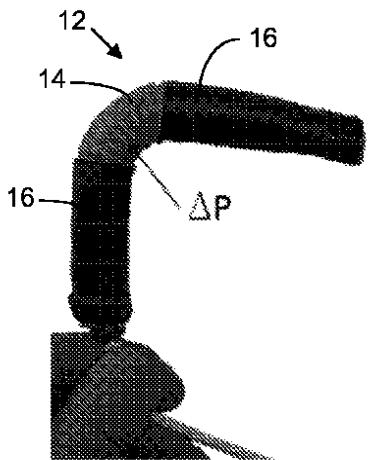


FIG. 4

【図5】

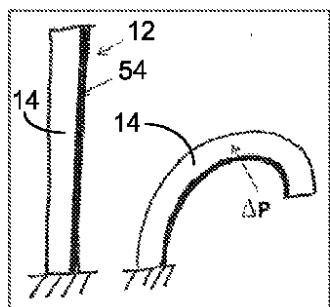


FIG. 5

【図7】

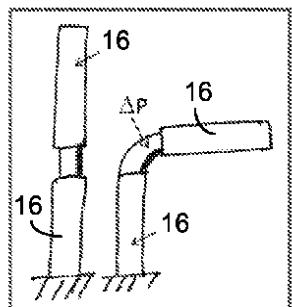


FIG. 7

【図6】

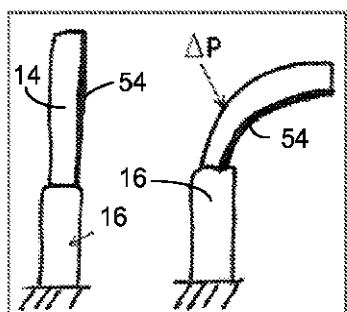
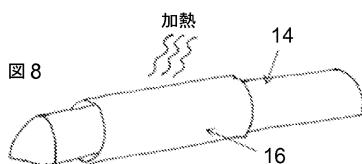
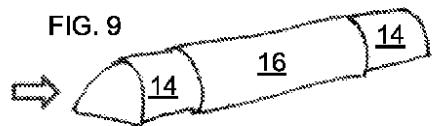


FIG. 6

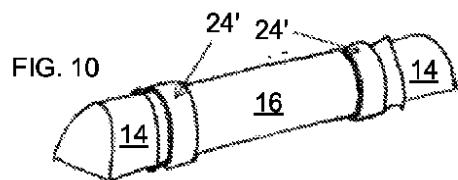
【図8】



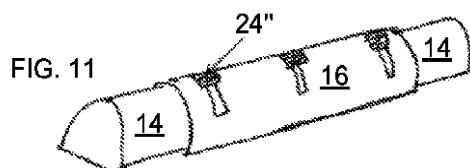
【図 9】



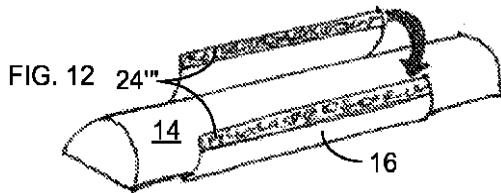
【図 10】



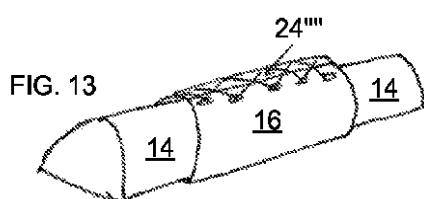
【図 11】



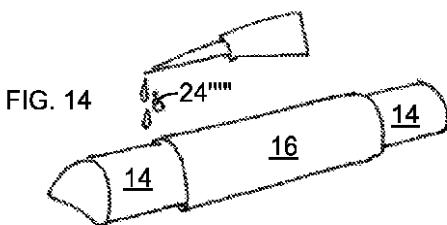
【図 12】



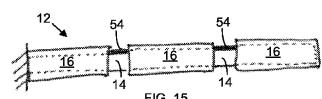
【図 13】



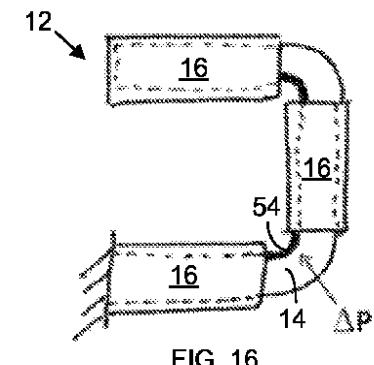
【図 14】



【図 15】



【図 16】



【図 17】

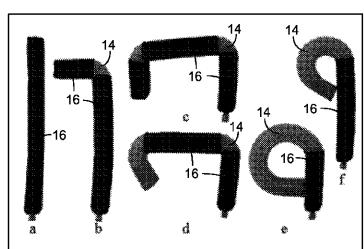


FIG. 17

【図 18】

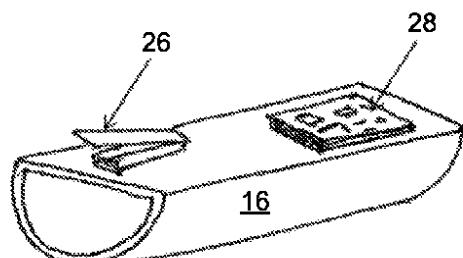


FIG. 18

【図 19】

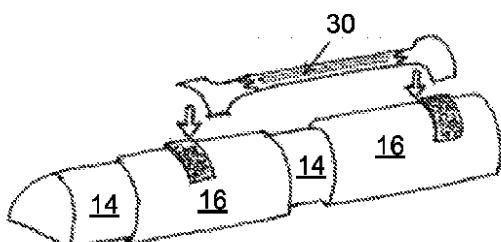


FIG. 19

【図 2 0】

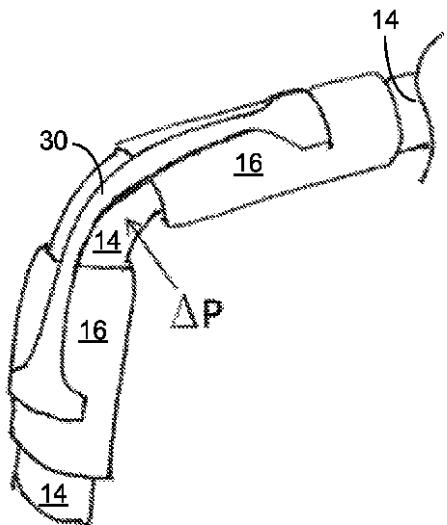


FIG. 20

【図 2 1】

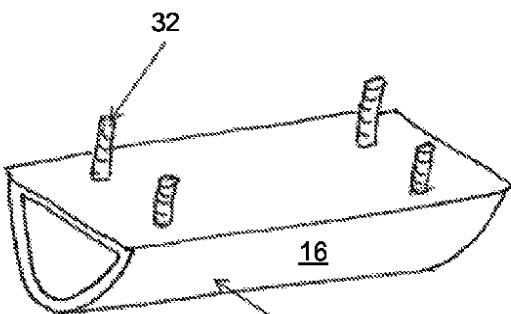


FIG. 21

【図 2 2】

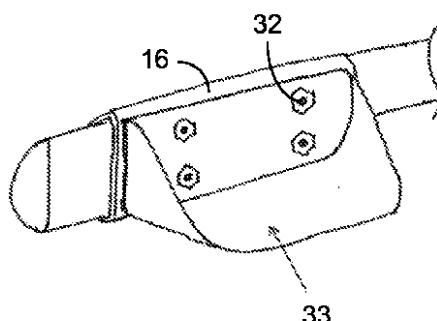


FIG. 22

【図 2 3】

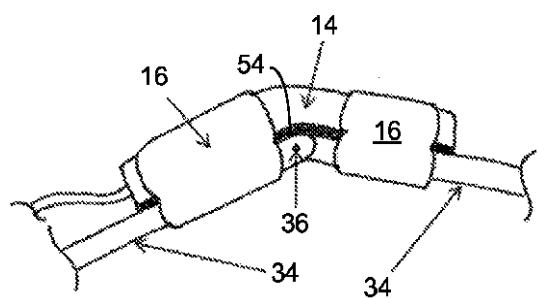


FIG. 23

【図 2 5】

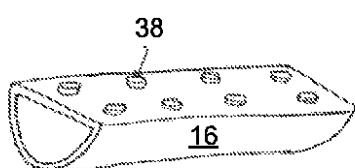


FIG. 25

【図 2 4】

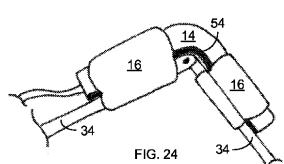


FIG. 24

【図 2 6】

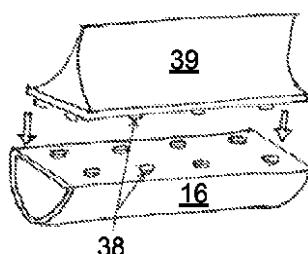
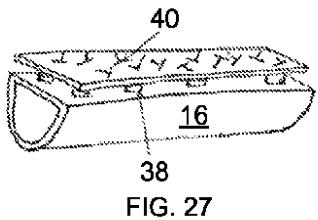
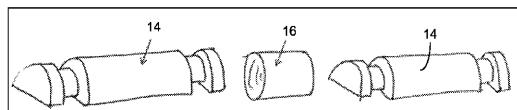


FIG. 26

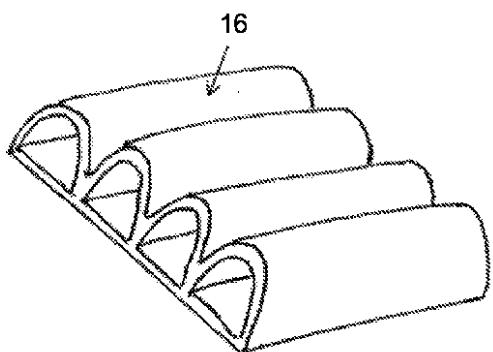
【図 27】



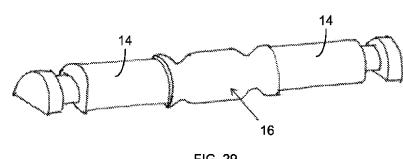
【図 28】



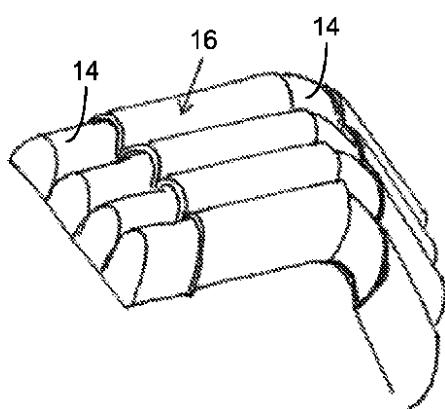
【図 30】



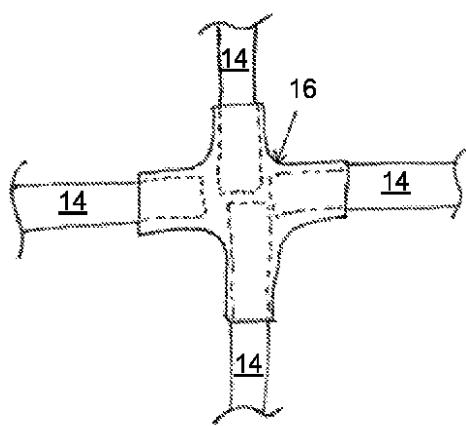
【図 29】



【図 31】



【図 32】



【図33】

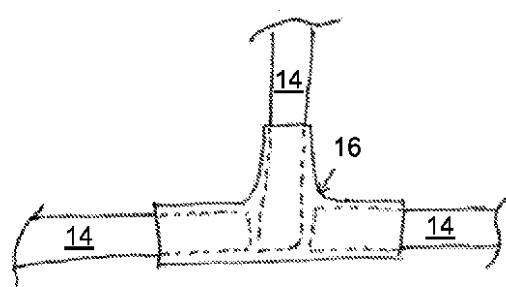


FIG. 33

【図34】

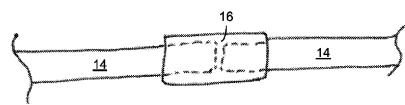


FIG. 34

【図35】

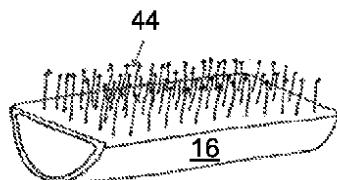


FIG. 35

【図36】

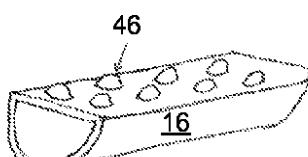


FIG. 36

【図37】

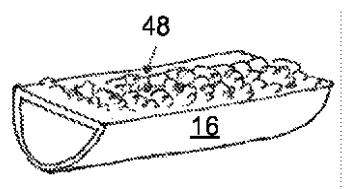


FIG. 37

【図41】

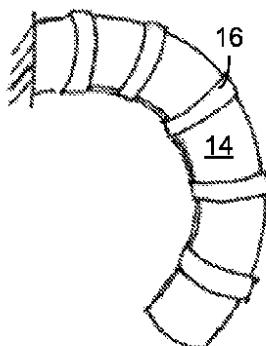


FIG. 41

【図38-39】

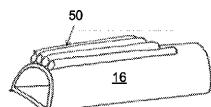


FIG. 38

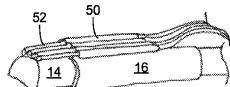


FIG. 39

【図40】

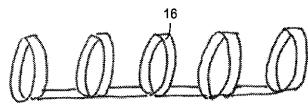
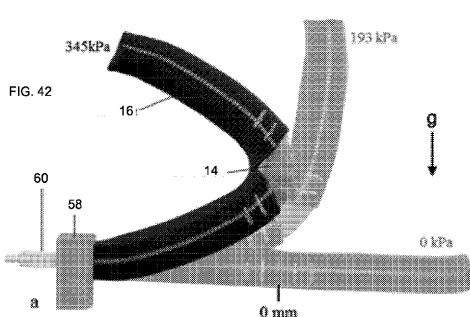
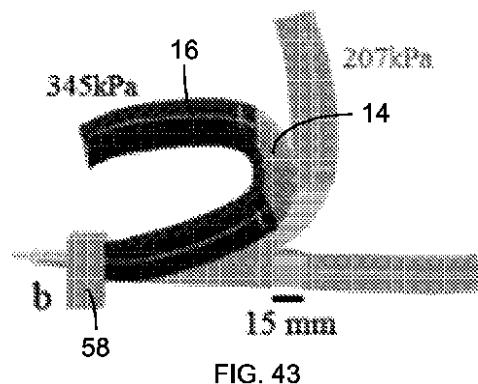


FIG. 40

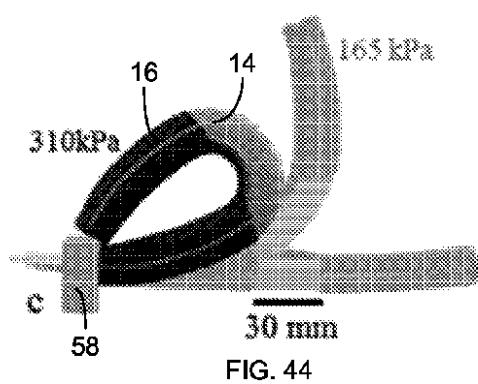
【図42】



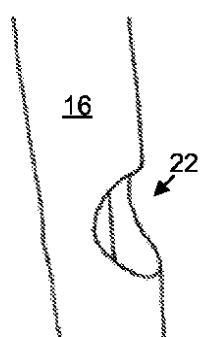
【図43】



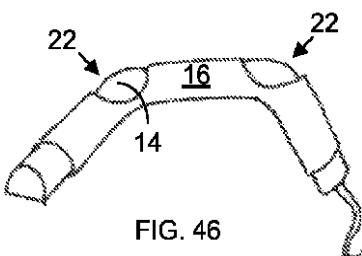
【図44】



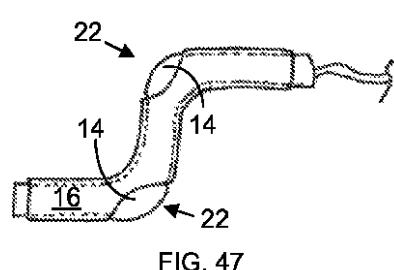
【図45】



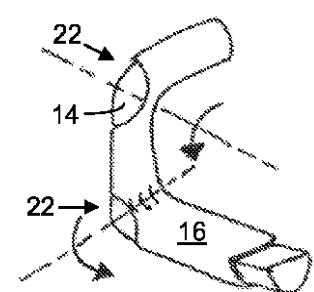
【図46】



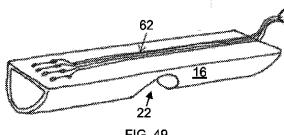
【図47】



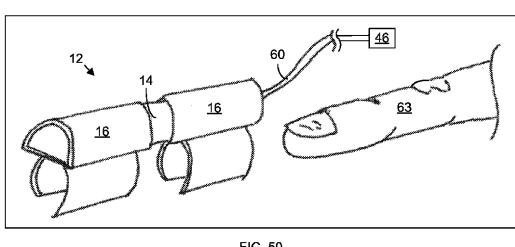
【図48】



【図49】



【図50】



【図 5 1】

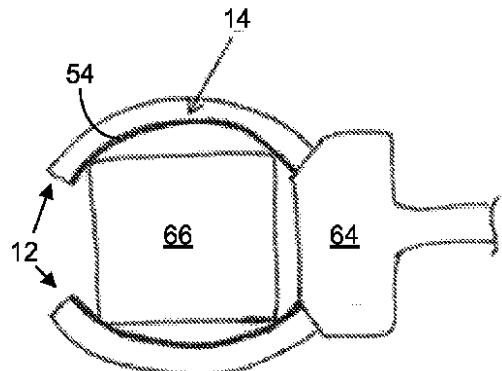


FIG. 51

【図 5 2】

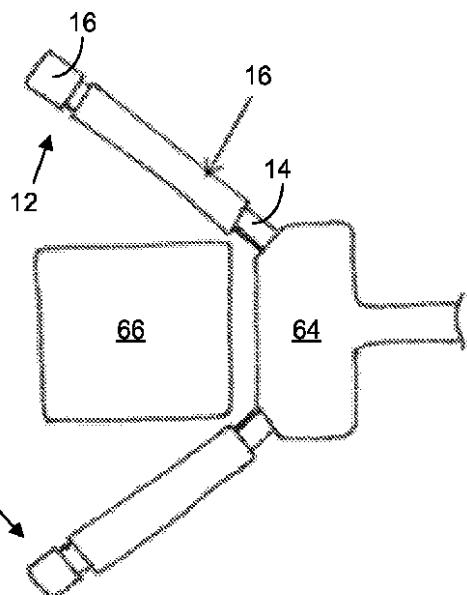


FIG. 52

【図 5 3】

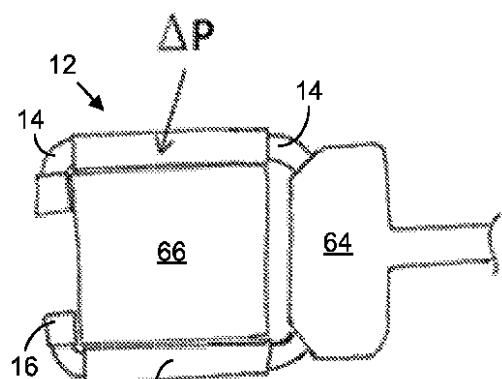


FIG. 53

【図 5 5】

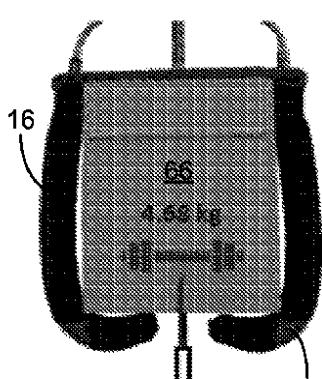


FIG. 55

【図 5 4】

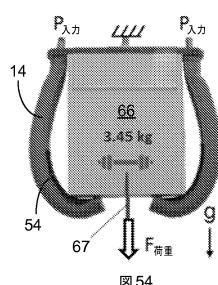


図 54

【図 5 6】

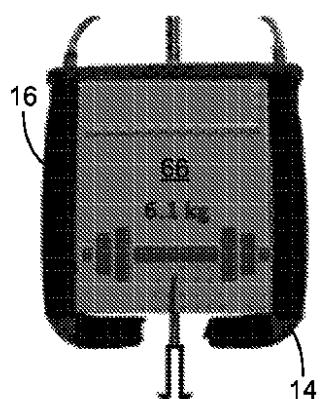


FIG. 56

【図 5 7】

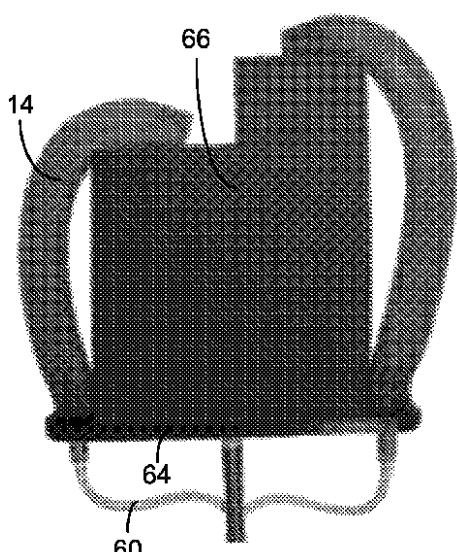


FIG. 57

【図 5 8】

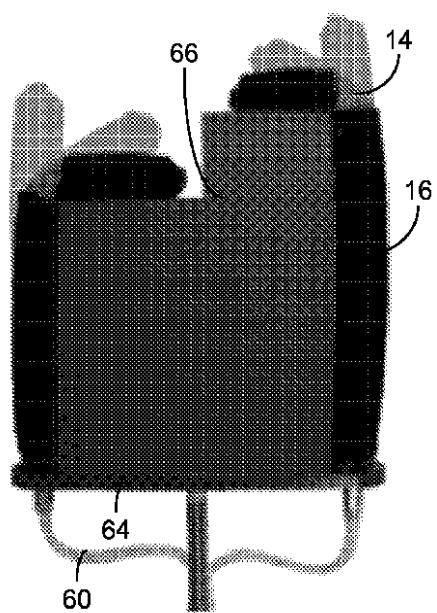


FIG. 58

【図 5 9】

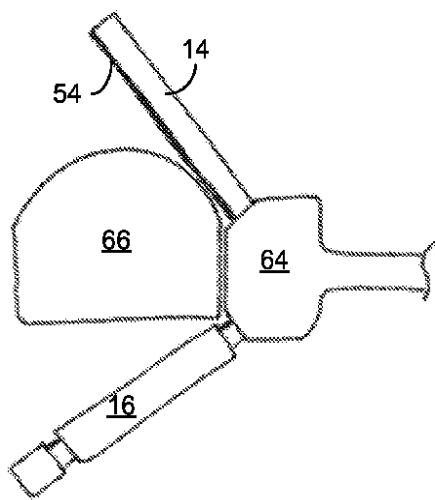


FIG. 59

【図 6 0】

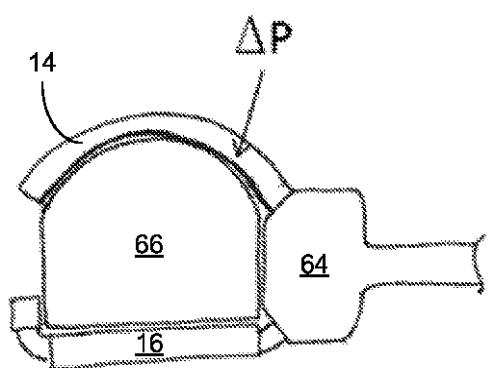
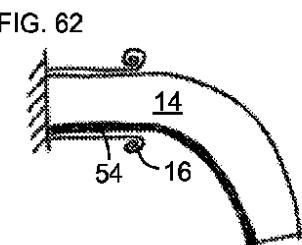
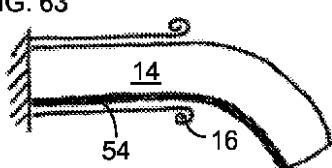


FIG. 60

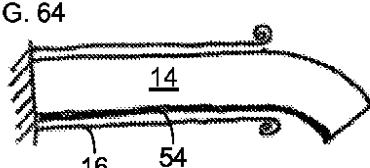
【図 6 2】



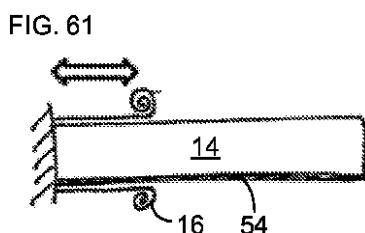
【図 6 3】



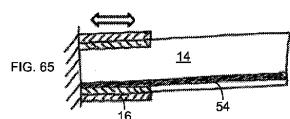
【図 6 4】



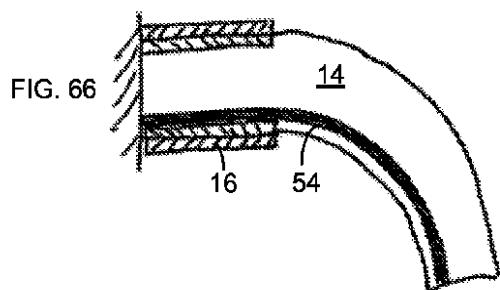
【図 6 1】



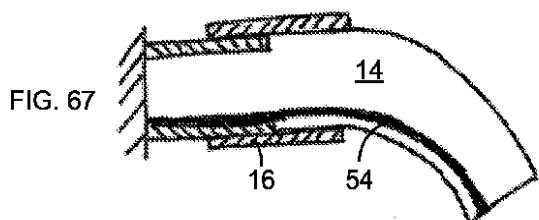
【図 6 5】



【図 6 6】



【図 6 7】



【図 6 8】

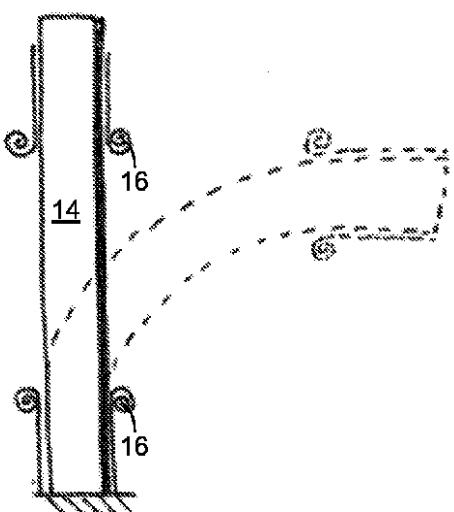


FIG. 68

【図 6 9】

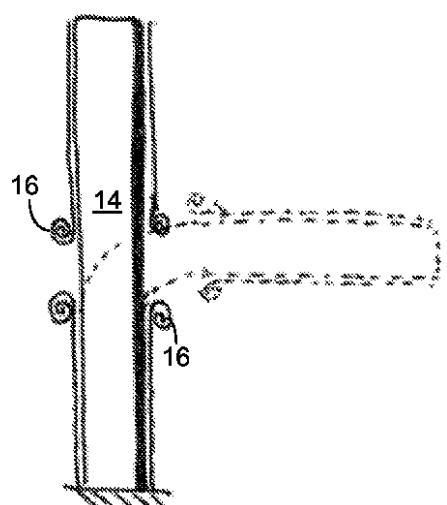


FIG. 69

【図 7 0】

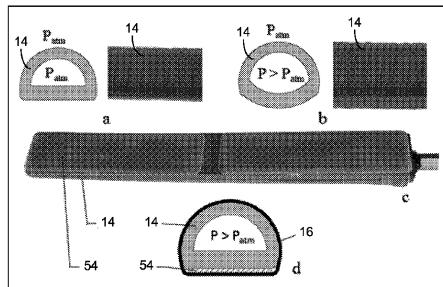


FIG. 70

【図 7 1】

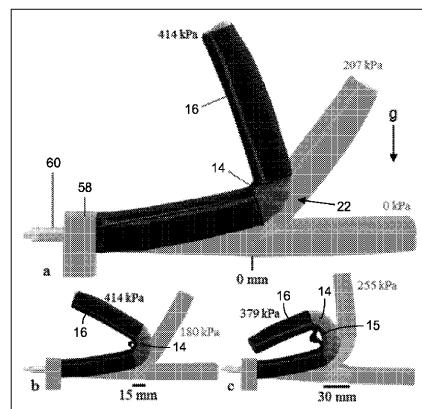


FIG. 71

【図 7 2】

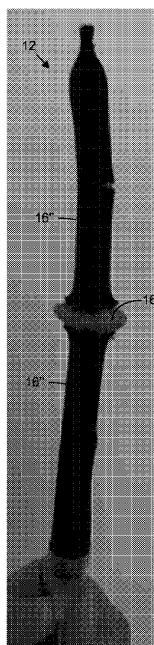


FIG. 72

【図 7 3】

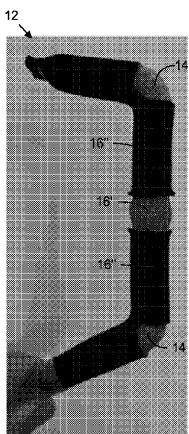


FIG. 73

【図 7 4】

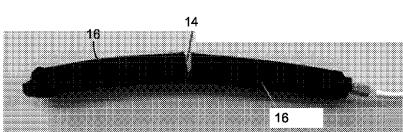


FIG. 74

【図 7 5】

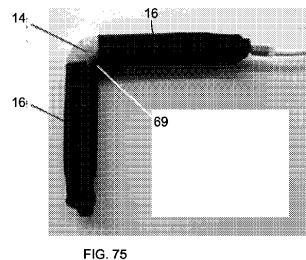


FIG. 75

【図 7 8】

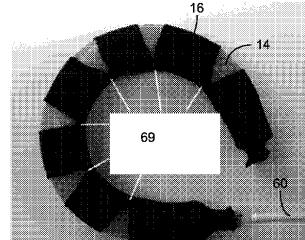


FIG. 78

【図 7 6】

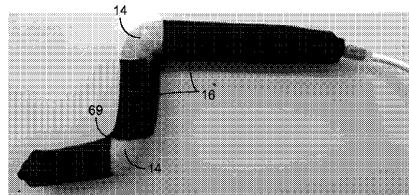


FIG. 76

【図 7 9】

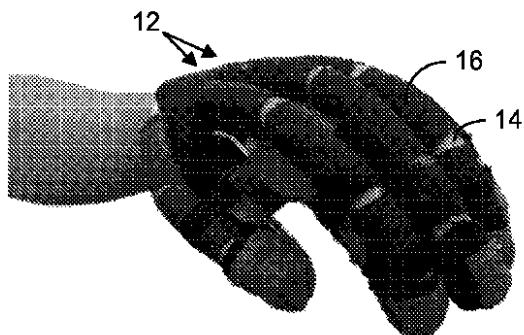


FIG. 79

【図 7 7】

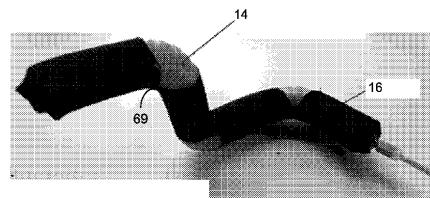


FIG. 77

【図 8 0】

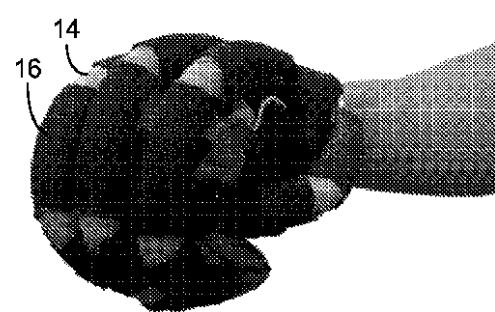


FIG. 80

【図 8 2】

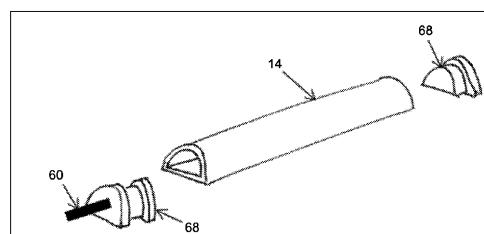


FIG. 82

【図 8 1】

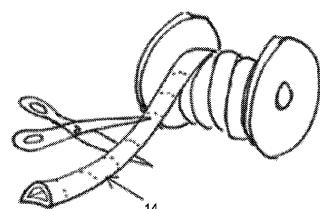


FIG. 81

【図 8 3】

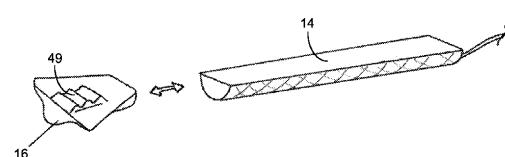


FIG. 83

【図 8 4】

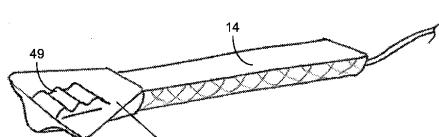


FIG. 84

【図 8 5】

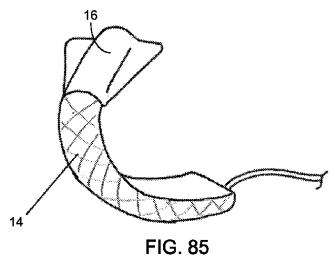


FIG. 85

【図 8 8】

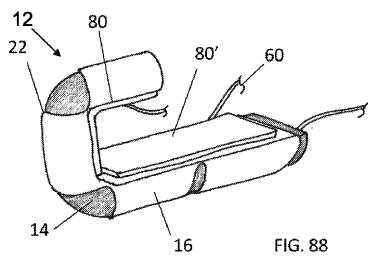


FIG. 88

【図 8 6】

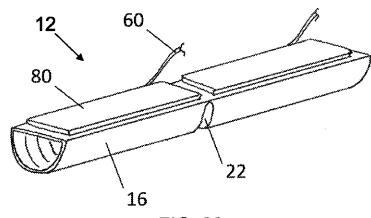


FIG. 86

【図 8 9】

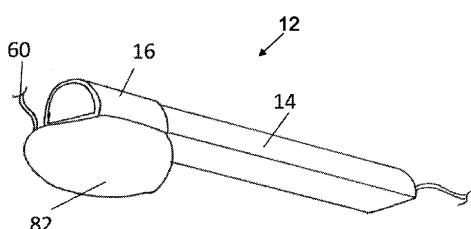


FIG. 89

【図 8 7】

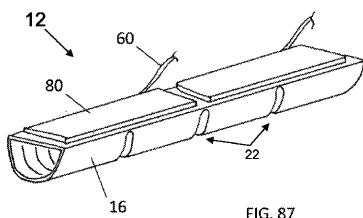


FIG. 87

フロントページの続き

(56)参考文献 特開平5 - 332325 (JP, A)
獨国特許出願公開第10316959 (DE, A1)
特開平4 - 111792 (JP, A)
国際公開第01/79707 (WO, A1)
国際公開第01/72479 (WO, A1)
特開2009-68531 (JP, A)
国際公開第2012/124546 (WO, A1)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

B25J 1/00 - 21/02
F15B 15/00 - 15/28