

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2019-209441

(P2019-209441A)

(43) 公開日 令和1年12月12日(2019.12.12)

(51) Int.Cl.  
B25J 15/00 (2006.01)

F I  
B25J 15/00

テーマコード(参考)  
3C707

審査請求 未請求 請求項の数 22 O L (全 52 頁)

(21) 出願番号 特願2018-108624 (P2018-108624)  
(22) 出願日 平成30年6月6日(2018.6.6)

(71) 出願人 304021417  
国立大学法人東京工業大学  
東京都目黒区大岡山2丁目12番1号  
(74) 代理人 100078776  
弁理士 安形 雄三  
(74) 代理人 100121887  
弁理士 菅野 好章  
(74) 代理人 100200333  
弁理士 古賀 真二  
(74) 代理人 100204205  
弁理士 田中 富雄  
(72) 発明者 岩附 信行  
東京都目黒区大岡山2-12-1

国立大学法人東京工業大学内  
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 把持方法及び装置

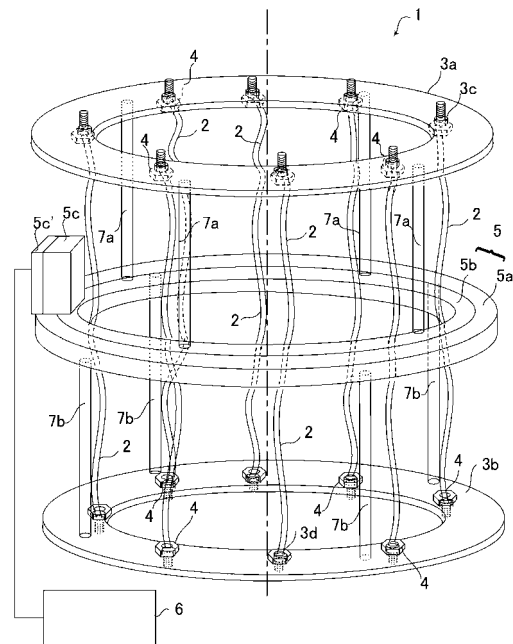
(57) 【要約】

【課題】多関節のような複雑な把持機構を用いずに、弾性索を多方向からオブジェクトに巻き付けて拘束することによって、オブジェクト(不定形のオブジェクトを含む)を損なうことなく、確実にかつ安定して把持(拘束)ができる把持方法及び装置を提供することにある。

【解決手段】

把持対象物を把持する把持方法であって、弾性索は3本以上であり、第1の支持部は、弾性索の一端を固定されたと、第2の支持部は、弾性索の他端を固定し、弾性索の集合体によって囲まれた空間の内側に、把持対象物を配置し、制御部は、第1の支持部と第2の支持部とを相対的に変位させることによって、空間の形状を制御し、形状が前記把持対象物の表面に沿って変形し、変形によって生じる把持力により把持対象物を把持する。

【選択図】 図1 2



**【特許請求の範囲】****【請求項 1】**

把持対象物を把持する把持方法であって、  
弾性索は 3 本以上であり、

第 1 の支持部は、前記弾性索の一端を固定し、

第 2 の支持部は、前記弾性索の他端を固定し、

前記弾性索の集合体によって囲まれた空間の内側に、前記把持対象物を配置し、

制御部は、前記第 1 の支持部と前記第 2 の支持部とを相対的に変位させることによって、  
前記空間の形状を制御し、

前記形状が前記把持対象物の表面に沿って変形し、該変形によって生じる把持力により前  
記把持対象物を把持することを特徴とする把持方法。

10

**【請求項 2】**

前記制御部によって、前記形状と前記把持対象物とが接触する接触点の位置を制御し、

前記空間が前記把持対象物を幾何学的に包み込むように、前記把持対象物を拘束する請求  
項 1 に記載の把持方法。

**【請求項 3】**

前記制御部によって、前記形状と前記把持対象物とが接触する接触点に加える力を制御し  
、前記弾性索の張力ベクトルの接平面に射影したベクトル成分と、前記把持対象物との間  
に作用する摩擦力とが釣り合うように、前記把持対象物を拘束する請求項 1 に記載の把持  
方法。

20

**【請求項 4】**

前記形状によって、前記把持対象物の位置及び / 又は方位を制御する請求項 1 乃至 3 のい  
ずれかに記載の把持方法。

**【請求項 5】**

前記第 1 の支持部及び前記第 2 の支持部が環状である請求項 1 乃至 4 のいずれかに記載の  
把持方法。

**【請求項 6】**

前記弾性索の個数を  $N$  とし、

前記第 1 の支持部が第 1 の半径を有する、第 1 の円を内包する円環状で、

前記第 2 の支持部が第 2 の半径を有する、第 2 の円を内包する円環状で、

前記各一端が、前記第 1 の円の円周を前記  $N$  等分するように、前記第 1 の支持部上に等間  
隔に配置され、

30

前記各他端が、前記第 2 の円の円周を前記  $N$  等分するように、前記第 2 の支持部上に等間  
隔に配置され、

前記制御部によって、

前記第 1 の支持部と前記第 2 の支持部とを相対的に回転させて、前記空間の形状を制御す  
る請求項 5 に記載の把持方法。

**【請求項 7】**

前記第 1 の半径と前記第 2 の半径とが略同一で、前記空間が略正多角柱状となる請求項 6  
に記載の把持方法。

40

**【請求項 8】**

前記  $N$  を 10 以上とし、

前記第 1 の半径と前記第 2 の半径とが略同一で、前記空間が略円筒状となる請求項 6 に記  
載の把持方法。

**【請求項 9】**

前記制御部によって、

前記一端における第 1 の張力及び前記他端における第 2 の張力に基づいて、算出した最大  
静止摩擦力に基づいて、前記変形の程度を決定する請求項 1 乃至 8 のいずれかに記載の把  
持方法。

**【請求項 10】**

50

前記第 1 の張力、前記第 2 の張力をそれぞれ  $T_s$ 、 $T_t$  とし、  
前記弾性索と前記把持対象物の表面との接触角を  $\theta$  とし、  
前記  $T_s$ 、前記  $T_t$  及び前記  $\theta$  に基づいて、前記最大静止摩擦力を推定する請求項 9 に記載の把持方法。

【請求項 11】

前記制御部によって、  
前記把持対象物を表すポリゴンの形状データを取得し、  
前記ポリゴンと前記弾性索とが接触する角部における、前記角部と前記弾性索との位置関係に基づいて、前記把持対象物と前記弾性索との間に作用する前記把持力を算出する請求項 1 乃至 10 のいずれかに記載の把持方法。

10

【請求項 12】

把持対象物を把持する把持装置であって、  
3 本以上の弾性索と、  
前記弾性索の一端が固定された第 1 の支持部と、  
前記弾性索の他端が固定された第 2 の支持部と、  
前記弾性索の集合体によって囲まれた空間の内側に、前記把持対象物を配置し、  
前記第 1 の支持部と前記第 2 の支持部とを相対的に変位させることによって、前記空間の形状を制御する制御部と、を備え、  
前記形状が前記把持対象物の表面に沿って変形し、該変形によって生じる把持力により前記把持対象物を把持することを特徴とする把持装置。

20

【請求項 13】

前記制御部は、前記形状と前記把持対象物とが接触する接触点の位置を制御し、  
前記空間が前記把持対象物を幾何学的に包み込むように、前記把持対象物を拘束する請求項 12 に記載の把持装置。

【請求項 14】

前記制御部は、前記形状と前記把持対象物とが接触する接触点に加える力を制御し、前記弾性索の張力ベクトルの接平面に射影したベクトル成分と、前記把持対象物との間に作用する摩擦力とが釣り合うように、前記把持対象物を拘束する請求項 12 に記載の把持装置。

【請求項 15】

前記形状によって、前記把持対象物の位置及び / 又は方位を制御する請求項 12 乃至 14 のいずれかに記載の把持装置。

30

【請求項 16】

前記第 1 の支持部及び前記第 2 の支持部が環状である請求項 12 乃至 15 のいずれかに記載の把持装置。

【請求項 17】

前記弾性索の個数を  $N$  とし、  
前記第 1 の支持部が第 1 の半径を有する、第 1 の円を内包する円環状で、  
前記第 2 の支持部が第 2 の半径を有する、第 2 の円を内包する円環状で、  
前記各一端が、前記第 1 の円の円周を前記  $N$  等分するように、前記第 1 の支持部上に等間隔に配置され、  
前記各他端が、前記第 2 の円の円周を前記  $N$  等分するように、前記第 2 の支持部上に等間隔に配置され、  
前記制御部は、  
前記第 1 の支持部と前記第 2 の支持部とを相対的に回転させることによって、前記空間の形状を制御する請求項 16 に記載の把持装置。

40

【請求項 18】

前記第 1 の半径と前記第 2 の半径とが略同一で、前記空間が略正多角柱状となっている請求項 17 に記載の把持装置。

【請求項 19】

50

前記 N を 10 以上とし、

前記第 1 の半径と前記第 2 の半径とが略同一で、前記空間が略円筒状となっている請求項 17 に記載の把持装置。

【請求項 20】

前記制御部は、

前記一端における第 1 の張力及び前記他端における第 2 の張力に基づいて、算出した最大静止摩擦力に基づいて、前記変形の程度を決定する請求項 12 乃至 19 のいずれかに記載の把持装置。

【請求項 21】

前記第 1 の張力、前記第 2 の張力をそれぞれ  $T_s$ 、 $T_t$  とし、

前記弾性索と前記把持対象物の表面との接触角を  $\theta$  とし、

前記  $T_s$ 、前記  $T_t$  及び前記  $\theta$  に基づいて、前記最大静止摩擦力を推定する請求項 20 に記載の把持装置。

【請求項 22】

前記制御部は、

前記把持対象物を表すポリゴンの形状データを取得し、

前記ポリゴンと前記弾性索とが接触する角部における、前記角部と前記弾性索との位置関係に基づいて、前記把持対象物と前記弾性索との間に作用する前記把持力を算出する請求項 12 乃至 21 のいずれかに記載の把持装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、弾性索を利用してオブジェクトを把持するための把持方法及び把持装置に関するものである。

【背景技術】

【0002】

近年、ビジョンセンサや双腕ロボット等の普及に伴って、多品種少量生産に関して、セル生産方式の自動化が試みられている。

【0003】

しかしながら、把持対象となる製品が、変形やばらつきの多い物の場合には、未だに人手による作業が必要とされる場合が多くある。また、ロボットハンドで把持する対象は、硬い機械部品等に限定されることが多いが、今日では、柔らかく傷つき易い把持対象（例えば、農作物、惣菜等）、或いは不定形（例えば、果物、海産物、揚げ物、廃棄物等）の把持対象物（以下、「オブジェクト」と称する）に拡大している。特に、食品分野等では扱う対象物のばらつきが大きく、様々な柔軟物体が含まれているため、同じ種類の物であっても、形状や内容、量等が異なる場合がある。

【0004】

そのため、ばらつきの大きいオブジェクトに対しては、従来のロボットハンドで対応することが困難であった。

【0005】

例えば、S. Hirose, Y. Umetani, "The development of soft gripper for the versatile robot hand", Mech. Mach. Theory, vol.13, pp. 351-359, 1978. (非特許文献 1) 及び N. Fukaya, S. Toyama, T. Asfour, R. Dillmann, "Design of the TUAT/Karlsruhe humanoid hand", Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst., vol.3pp. 1754-1759, Oct./Nov. 2000. (非特許文献 2) においては、剛体から構成される多関節の把持機構によって、形状適応性を実現することを開示している。

【0006】

また、K. Suzumori, S. Iokura and H. Tanaka, "Development of flexible

10

20

30

40

50

micro actuator and its applications to robotics mechanisms,” in Proc. IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation, pp. 2969-2974, 1991.

(非特許文献3)において、鈴森らは、内部に3つのチャンバを有する柔軟素材を用いた柔軟把持機構を開示している。さらに、非特許文献3では、各チャンバ内の圧力を制御することによって、その柔軟素材を変形させるフレキシブル・マイクロ・アクチュエータ(Flexible Micro Actuator (以下、FMAと称する))を開示している。そのFMAを指として構成した柔軟把持機構は、空圧又は油圧制御を要するものの、オブジェクトからの反力を受けて変形することによって、形状適応することができるものである。

【0007】

また、Eric Brown, and et. al., “Universal robotic gripper based on the jamming of granular material”, Proceeding of the National Academy of Sciences 107.44 pp.18809-18814,2000.(非特許文献4)及びJ. R. Amend, E. Brown, N. Rodenberg, H. M. Jaeger, H. Lipson, “A positive pressure universal gripper based on the jamming of granular material”, IEEE Trans. Robotics, vol.28, no 2, pp. 341-350, Apr. 2012.(非特許文献5)においては、柔軟素材の硬さを制御することによって形状適応性を実現するジャミングハンドを開示している。

10

【0008】

B. Donald, L. Gariepy, D. Rus, “Distributed manipulation of multiple objects using ropes”, Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, vol. 1, pp. 450-457, Apr. 2000.(非特許文献6)においては、ロープの両端位置を2台の移動ロボットで制御した輪を生成することによって、複数のオブジェクトを上記ロープで操作する手法を開示している。このような手法では、ロボットによって生成された輪が存在するため、ロボット自身がその輪を跨がなければならない。そのため、オブジェクトを拘束することが容易ではないという問題がある。

20

【0009】

また、T.-H. Kwok, and et. al., “Rope casing and grasping”, Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom., pp. 1980-1986, May 2016.(非特許文献7)においては、ロープの輪でオブジェクトを拘束する際、オブジェクトのくびれた位置を検出する方法を開示している。この方法では、オブジェクトの形状を位相幾何学的に解析する必要があり、また、その解析結果に基づいて、オブジェクトの表面に輪の軌跡を描くことによって、周長が最小である輪を発見しなければならない問題があるにもかかわらず、この方法を実施できる具体的な機構は、未だ開示されていない。

30

【0010】

B. Walker, and R. Vandersluis, “Design testing and evaluation of Latching end effector. ”, NASA. Lyndon B. Johnson Space Center, The 29<sup>th</sup> Aerospace Mechanism Symposium, pp1-16, 1995.(非特許文献8)においては、宇宙ステーションへ接近した宇宙船をロボットアームで捕捉する際、複数の索を用いて、宇宙船(オブジェクト)を拘束する手段を採用している。具体的には、B. Walkerらは、索を3方向から押し付けることによって、位置合わせを行なっている。

40

【0011】

H. Iwamasa, S. Hirai, “Binding of food materials with a tension-sensitive elastic thread”, Hirai, Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol.28, no. 2, pp. 4298-303, 2015(非特許文献9)においては、1本の弾性紐で構成された輪を4箇所のプーリで支持したバイディングハンドを開示している。そのバイディングハンドは、輪の大きさ(周長)を変化させることによって、把持の強度を制御することができる。

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0012】

50

【非特許文献1】S. Hirose, Y. Umetani, “The development of soft gripper for the versatile robot hand”, Mech. Mach. Theory, vol.13, pp. 351-359, 1978.

【非特許文献2】N. Fukaya, S. Toyama, T. Asfour, R. Dillmann, “Design of the TUAT/Karlsruhe humanoid hand”, Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Rpbots Syst., vol.3pp. 1754-1759, Oct./Nov. 2000.

【非特許文献3】K. Suzumori, S. Iokura and H. Tanaka, “Development of flexible micro actuator and its applications to robotics mechanisms, ” in Proc. IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation, pp. 2969-2974, 1991.

【非特許文献4】Eric Brown, and et. al., “Universal robotic gripper based on the jamming of granular material”, Proceeding of the National Academy of Sciences 107.44 pp.18809-18814, 2000.

【非特許文献5】J. R. Amend, E. Brown, N. Rodenberg, H. M. Jaeger, H. Lipson, “A positive pressure universal gripper based on the jamming of granular material”, IEEE Trans. Robotics, vol.28, no 2, pp. 341-350, Apr. 2012.

【非特許文献6】B. Donald, L. Gariepy, D. Rus, “Distributed manipulation of multiple objects using ropes”, Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, vol. 1, pp. 450-457, Apr. 2000.

【非特許文献7】T.-H. Kwok, and et. al., “Rope casing and grasping”, Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom., pp. 1980-1986, May 2016.

【非特許文献8】B. Walker, and R. Vandersluis, “Design testing and evaluation of Latching end effector.”, NASA. Lyndon B. Johnson Space Center, The 29th Aerospace Mechanism Symposium, pp1-16, 1995.

【非特許文献9】H. Iwamasa, S. Hirai, “Binding of food materials with a tension-sensitive elastic thread”, Hirai, Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol.28, no. 2, pp. 4298-303, 2015

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0013】

非特許文献1～3に開示された把持機構は、単純な構造を用いて形状適応性を実現しているものの、把持機構が柔軟であるため、把持状態が十分に保持されない可能性がある。

【0014】

また、非特許文献4～5に開示されたジャミングハンドの動作機構は、単純であるものの、柔軟材料の形状及び硬さを十分に制御して、袋がオブジェクトを拘束できるように変形するか否かが不確定である。

【0015】

次に、非特許文献6～9のような索を用いてオブジェクトを拘束する手法は、運動範囲を制限するまでに止まるものである。

【0016】

以上挙げたような従来手法では、種々のオブジェクトを3次元空間で完全に拘束することは困難である。

【0017】

本発明は上述のような事情に基づいてなされたものであり、本発明の目的は、多関節のような複雑な把持機構を用いずに、弾性索を多方向からオブジェクトに巻き付けて拘束することによって、種々のオブジェクト（不定形のオブジェクトを含む）を損ねることなく、確実にかつ安定して、把持（拘束）できる把持方法及び装置を提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【0018】

10

20

30

40

50

本発明に係る把持方法の上記目的は、把持対象物を把持する把持方法であって、弾性索は3本以上であり、第1の支持部は、前記弾性索の一端を固定し、第2の支持部は、前記弾性索の他端を固定し、前記弾性索の集合体によって囲まれた空間の内側に、前記把持対象物を配置し、制御部は、前記第1の支持部と前記第2の支持部とを相対的に変位させることによって、前記空間の形状を制御し、前記形状が前記把持対象物の表面に沿って変形し、該変形によって生じる把持力により前記把持対象物を把持することを特徴とすることにより達成される。

**【0019】**

また、本発明に係る把持方法の上記目的は、前記制御部によって、前記形状と前記把持対象物とが接触する接触点の位置を制御し、前記空間が前記把持対象物を幾何学的に包み込むように、前記把持対象物を拘束することにより、或いは前記制御部によって、前記形状と前記把持対象物とが接触する接触点に加える力を制御し、前記弾性索の張力ベクトルの接平面に射影したベクトル成分と、前記把持対象物との間に作用する摩擦力とが釣り合うように、前記把持対象物を拘束することにより、或いは前記形状によって、前記把持対象物の位置及び/又は方位を制御することにより、或いは前記第1の支持部及び前記第2の支持部が環状であることにより、或いは前記弾性索の個数を $N$ とし、前記第1の支持部が第1の半径を有する、第1の円を内包する円環状で、前記第2の支持部が第2の半径を有する、第2の円を内包する円環状で、前記各一端が、前記第1の円の円周を前記 $N$ 等分するように、前記第1の支持部上に等間隔に配置され、前記各他端が、前記第2の円の円周を前記 $N$ 等分するように、前記第2の支持部上に等間隔に配置され、前記制御部によって、前記第1の支持部と前記第2の支持部とを相対的に回転させて、前記空間の形状を制御することにより、或いは前記第1の半径と前記第2の半径とが略同一で、前記空間が略正多角柱状となることにより、或いは前記 $N$ を10以上とし、前記第1の半径と前記第2の半径とが略同一で、前記空間が略円筒状となることにより、或いは前記制御部によって、前記一端における第1の張力及び前記他端における第2の張力に基づいて、算出した最大静止摩擦力に基づいて、前記変形の程度を決定することにより、或いは前記第1の張力、前記第2の張力をそれぞれ $T_s$ 、 $T_t$ とし、前記弾性索と前記把持対象物の表面との接触角を $\theta$ とし、前記 $T_s$ 、前記 $T_t$ 及び前記 $\theta$ に基づいて、前記最大静止摩擦力を推定することにより、或いは前記制御部によって、前記把持対象物を表すポリゴンの形状データを取得し、前記ポリゴンと前記弾性索とが接触する角部における、前記角部と前記弾性索との位置関係に基づいて、前記把持対象物と前記弾性索との間に作用する前記把持力を算出することにより、より効果的に達成される。

**【0020】**

また、本発明に係る把持装置の上記目的は、把持対象物を把持する把持装置であって、3本以上の弾性索と、前記弾性索の一端が固定された第1の支持部と、前記弾性索の他端が固定された第2の支持部と、前記弾性索の集合体によって囲まれた空間の内側に、前記把持対象物を配置し、前記第1の支持部と前記第2の支持部とを相対的に変位させることによって、前記空間の形状を制御する制御部と、を備え、前記形状が前記把持対象物の表面に沿って変形し、該変形によって生じる把持力により前記把持対象物を把持することにより達成される。

**【0021】**

また、本発明に係る把持装置の上記目的は、前記制御部は、前記形状と前記把持対象物とが接触する接触点の位置を制御し、前記空間が前記把持対象物を幾何学的に包み込むように、前記把持対象物を拘束することにより、或いは前記制御部は、前記形状と前記把持対象物とが接触する接触点に加える力を制御し、前記弾性索の張力ベクトルの接平面に射影したベクトル成分と、前記把持対象物との間に作用する摩擦力とが釣り合うように、前記把持対象物を拘束することにより、或いは前記形状によって、前記把持対象物の位置及び/又は方位を制御することにより、或いは前記第1の支持部及び前記第2の支持部が環状であることにより、或いは前記弾性索の個数を $N$ とし、前記第1の支持部が第1の半径を有する、第1の円を内包する円環状で、前記第2の支持部が第2の半径を有する、第2

10

20

30

40

50

の円を内包する円環状で、前記各一端が、前記第 1 の円の円周を前記 N 等分するように、前記第 1 の支持部上に等間隔に配置され、前記各他端が、前記第 2 の円の円周を前記 N 等分するように、前記第 2 の支持部上に等間隔に配置され、前記制御部は、前記第 1 の支持部と前記第 2 の支持部とを相対的に回転させることによって、前記空間の形状を制御することにより、或いは前記第 1 の半径と前記第 2 の半径とが略同一で、前記空間が略正多角柱状となっていることにより、或いは前記 N を 10 以上とし、前記第 1 の半径と前記第 2 の半径とが略同一で、前記空間が略円筒状となっていることにより、或いは前記制御部は、前記一端における第 1 の張力及び前記他端における第 2 の張力に基づいて、算出した最大静止摩擦力に基づいて、前記変形の程度を決定することにより、或いは前記第 1 の張力、前記第 2 の張力をそれぞれ  $T_s$ 、 $T_t$  とし、前記弾性索と前記把持対象物の表面との接触角を  $\theta$  とし、前記  $T_s$ 、前記  $T_t$  及び前記  $\theta$  に基づいて、前記最大静止摩擦力を推定することにより、或いは前記制御部は、前記把持対象物を表すポリゴンの形状データを取得し、前記ポリゴンと前記弾性索とが接触する角部における、前記角部と前記弾性索との位置関係に基づいて、前記把持対象物と前記弾性索との間に作用する前記把持力を算出することにより、より効果的に達成される。

10

20

30

40

50

【発明の効果】

【0022】

本発明に係る把持方法及び装置によれば、弾性索を多方向からオブジェクトに巻き付けて拘束することによって、オブジェクトを損ねることなく、確実にかつ安定して把持（拘束）ができる。また、オブジェクトが不定形であっても、把持することができる。

【0023】

さらに、本発明に係る把持方法及び装置によれば、オブジェクトの硬さによる影響を考慮する必要がない。

【図面の簡単な説明】

【0024】

【図 1】変形した把持空間の平面図である。

【図 2】変形した把持空間の正面図である。

【図 3】変形した把持空間の斜視図である。

【図 4】支持部の間の角度を回転していない初期状態の把持空間の平面図である。

【図 5】支持部を相対的に回転した際の把持空間の平面図である。

【図 6】支持部を、図 5 に示す回転角度よりも更に回転して、変形した把持空間の平面図である。

【図 7】支持部の間の角度を、図 6 に示す回転角度よりも更に回転して、変形した把持空間の平面図である。

【図 8】上側の支持部の半径を下側の支持部の半径より小さくした場合、くびれ部の位置が、上側に移動する様子を示す図である。

【図 9】2つの円筒型の把持空間を重ね合わせることによって、2つのくびれ部を有する把持空間を形成することを示す図である。

【図 10】本発明の把持装置が、オブジェクトとしてボールを把持する様子を示す図である。

【図 11】本発明の把持装置が、オブジェクトとして紙コップを把持する様子を示す図である。

【図 12】第 1 の実施形態に係る把持装置の一例を示す斜視図である。

【図 13】回転部の一例を示す平面図である。

【図 14】図 13 における A - A' 線断面図の一例である。

【図 15】図 13 における A - A' 線断面図の別の例である。

【図 16】回転部の要部の一部省略の拡大図である。

【図 17】回転部の要部の一部省略の拡大図である。

【図 18】第 1 の実施形態に係る把持装置における支持部及び回転部の別の例を示す斜視図である。



- 【図 19】図 18 における回転部の減速電動部の構成を示す斜視図である。
- 【図 20】第 2 の実施形態に係る把持装置を示す斜視図である。
- 【図 21】センサの構成の一例を示す断面図である。
- 【図 22】張力センサの断面図である。
- 【図 23】第 2 の実施形態に係る把持装置の動作例を示すフローチャートである。
- 【図 24】第 3 の実施形態の把持装置の一例を示す斜視図である。
- 【図 25】第 3 の実施形態に係る把持装置の動作例を示すフローチャートである。
- 【図 26】第 4 の実施形態の把持装置のブロック図である。
- 【図 27】第 4 の実施形態に係る把持装置の動作の例を示すフローチャートである。
- 【図 28】オイラーの摩擦ベルト理論を説明するために、プーリに巻き付いたベルトの両端に作用する張力の関係を示す図である。 10
- 【図 29】プーリと、プーリに巻き付くベルトとが、微小角  $d$  内において、ベルトの両端に作用する張力が釣り合った状態を示す図である。
- 【図 30】拡張ベルト理論の基本であるポリゴン形状のオブジェクトの角部における力の微小要素を示す図である。
- 【図 31】ポリゴン形状のオブジェクトの接触角  $\theta$  を、 $n$  個の角部として、外角  $(\pi/n)$  ずつ屈曲するように分割した様子を示す図である。
- 【図 32】拡張ベルト理論における角部に奥行きをもたせた概念図である。
- 【図 33】ハーフエッジ構造と各要素のリンク関係を示す図である。
- 【図 34】オブジェクト辺上に設けられた各ノードの端から端に順に線分で結ぶことによって、弾性索の形状を表現する様子を示す図である。 20
- 【図 35】ノード  $i$  の仮想的な移動をベクトル  $\hat{u}_i$  (ハット)  $_i$  で表した図である。
- 【図 36】弾性索の伸縮(自然長方向に沿った伸張)に関する概念図である。
- 【図 37】弾性索の滑りを判定し、弾性索が辺上を移動する動きをシミュレートする動作例を示すフローチャートである。
- 【図 38】弾性索の集合が並列して形成された把持空間に、ポリゴン形状のオブジェクトは配置された初期状態の様子を示す図である。
- 【図 39】弾性索の集合が、下側の支持部が回転させることによって、オブジェクトを包み込む様子を示す図である。
- 【図 40】弾性索の集合が、下側の支持部が図 39 に示す回転角よりも回転させることによって、オブジェクトを包み込む様子を示す図である。 30
- 【図 41】弾性索の集合が、図 40 に示す状態から上方へ変位し、オブジェクトを持ち上げようとする図である。
- 【図 42】把持装置の把持部の外観を示す図である。
- 【図 43】2つの支持部が相対的に回転することによって、把持空間のくびれ部の内径は小さくなる様子を示す図である。
- 【図 44】2つの支持部が、図 43 における相対的な角度より多く回転することによって、把持空間のくびれ部の内径は、さらに小さくなる様子を示す図である。
- 【図 45】2つの支持部が、図 44 における相対的な角度より、さらに多く回転することによって、把持空間のくびれ部の内径は、さらに小さくなる様子を示す図である。 40
- 【図 46】シャープペンシルの芯のようなオブジェクトを容易に把持する様子を示す図である。
- 【図 47】支持軸を配してポリゴン化した球体のオブジェクトを示す図である。
- 【図 48】本発明の実施形態に係る把持装置を用いて、オブジェクトを把持する際の様子を示す図である。
- 【図 49】第 6 の実施形態に係る把持装置における支持部、パラレルマニピュレータ及び回転ステージの一例を示す斜視図である。
- 【発明を実施するための形態】
- 【0025】
- 以下、発明を実施するための形態について説明する。なお、使用可能文字の関係上、以 50

下に示す数式においてハット記号が付されているもの（英文字記号又はギリシャ文字で表された変数）については、本明細書の文章において、「（英文字記号又はギリシャ文字）<sup>^</sup>（ハット）」と記載する。また、変数がベクトルである場合、「ベクトル（英文字又はギリシャ文字）」と記載し、同様に、変数がマトリクス又は行列である場合、「マトリクス又は行列（英文字又はギリシャ文字）」と記載する。

**【0026】**

本発明の実施形態に係る把持方法及び装置は、共通の中心軸を有する2つの支持部（円環）の内側に、略平行に配置された複数の弾性索（弾性索集合）が形成し、2つの支持部（円環）の相対変位を制御し、且つ弾性索集合の把持空間に配置されたオブジェクトに、弾性索集合が巻き付かないし包み込むことによって、オブジェクトを把持（拘束）し、さら

10

**【0027】**

以下、本発明に係る把持方法及び装置において、弾性索の集合で形成された把持空間を変形させることによって、把持空間内に配置されたオブジェクトを損なうことなく、弾性索で包み込んで確実にかつ安定に拘束する原理について説明する。

**【0028】**

ここで先ず、オブジェクトを把持することができる把持索の集合の配置の一例として、円筒型を示す。円筒型の把持空間を形成するために、弾性索は、並列に（略等間隔に）円筒状に配置される。弾性索は、上下に配置された2つの円環状の支持部に接続される。

**【0029】**

本発明の実施形態に係る把持装置は、初期状態では、弾性索は略円筒面を形成している。すなわち、弾性索の集合は、円筒形の把持空間を形成する。そして、2つの支持部を相対的に回転させる又は変位させるに従って、円筒面の中央部分がくびれて変形していく。ここで、初期状態の円筒形から変形していく把持空間の様子を、図1～3に示す。図1は、変形した把持空間の平面図である。図2は、変形した把持空間の正面図である。図2に示すような、くびれた状態における曲面は、一葉双曲線と呼ばれる形状である。図3は、変形してくびれた状態の把持空間の斜視図である。

20

**【0030】**

さらに、支持部の間の相対的回転角度に応じて、くびれ部の内径が小さくなる様子を、図4～7に示す。図4～7には、初期状態では、把持空間は円筒型であり、中央部にくびれ部は生じていないが、支持部の間の相対的回転角度が大きくなるにつれて、くびれ部の直径は小さくなり、最終的には、略0となる様子が示されている。このような変形が起こるにつれて、把持空間に配置されたオブジェクトは、弾性索の集合によって、包み込まれるようにして把持される。

30

**【0031】**

また、弾性索の集合によって形成される把持空間の変形例に関して、図8に示すように、上側の支持部の半径を下側の支持部の半径より小さく設定した場合、くびれ部の位置を、上側に移動することができる。さらに、このようにくびれ部が一方の支持部側に移動した円筒型配置を、それぞれ上下反転したものを重ね合わせることによって、図9に示すような2つのくびれ部を有する把持空間を形成することができる。そして、2つのくびれ部の内径が0になった場合、弾性索線織面によって閉じた把持空間を形成することができる。なお、本発明において、上下の支持部を相対的に回転させる場合、上下支持部の間に配設されている複数本の弾性索同士が交差しないことは、実証されている。なお、弾性索線織面弾性索の集合で表現される離散的な曲面で構成されるものである。そして、弾性索線織面は、弾性索端点の配置を変えることによって、変形させることができる。つまり、弾性索の集合によって、「弾性があり、かつ形状を制御可能な曲線」を実現することができる。

40

**【0032】**

ここで、本発明に係る把持装置によって、オブジェクトを把持することができた例を図10及び図11に示す。図10は、本発明に係る把持装置が、オブジェクトとしてボール

50

を把持する様子を示す。図 1 1 は、本発明に係る把持装置が、オブジェクトとして紙コップを把持する様子を示す。

【 0 0 3 3 】

次に、本発明の実施形態に係る把持装置 1 について、図面を参照しつつ説明する。

【 0 0 3 4 】

( 第 1 の実施形態 )

第 1 の実施形態に係る把持装置の一例の斜視図を図 1 2 に示す。把持装置 1 は、例えば、食品等のレオロジー物体であるオブジェクト ( 把持対象物 ) に対しても、好適に把持することができるものであって、所定の位置に移動できるように口ポット ( 図示せず ) 等に取り付けられて用いられても良い。把持装置 1 は、図 1 2 に示すように、複数の弾性索 2 と、弾性索 2 によって形成された把持空間の形状を保持し、且つ変形動作させるための 2 つの円環状の支持部 3 a ( 上側 )、3 b ( 下側 ) と、各弾性索 2 を掛け渡すために支持部 3 a、3 b に設けられている固定部 4 と、支持部 3 a と支持部 3 b とを相対的に回転させるための回転部 5 と、回転部 5 の回転を制御するための制御部 ( 制御手段 ) 6 とを備えている。固定部 4 は、例えばボルトとして、弾性索 2 の両端をそれぞれ支持部 3 a 及び 3 b に固定しても良いし、ボルトやナットを用いて、弾性索 2 の両端をそれぞれ支持部 3 a 及び 3 b に固定しても良い。

10

【 0 0 3 5 】

なお、把持装置 1 が把持するオブジェクトは、特に食品等のレオロジー物体に限定されるものではなく、他の剛体からなるオブジェクト等に対しても当然に把持することができる。

20

【 0 0 3 6 】

また、オブジェクトの形状、大きさ、又は重さは常に一定しているとは限らない。本発明の実施形態ではオブジェクトの形状に関しては、不定形である場合も想定している。弾性索 2 は、図 1 2 に示すように、両端を支持部 3 a 及び 3 b に固定された弾性を有する紐である。弾性索 2 は、オブジェクトを包み込む ( 覆う ) ような把持空間を形成するため、少なくとも 3 本は必要である。

【 0 0 3 7 】

支持部 3 a と 3 b との間の相対的変位によって、初期状態では、弾性索 2 は、平行に配置されている。回転部 5 を駆動する前では、弾性索 2 は、互いに交差することなく、平行に配置されているため、円筒状空間を形成している。

30

【 0 0 3 8 】

弾性索 2 の両端は、固定部 4 によって支持部 3 a と 3 b とに跨って固定される代わりに、支持部 3 a 及び 3 b に設けられた開口部 ( 孔 ) 3 c 及び 3 d を通して結び目を形成して、固定しても良い。また、弾性索 2 の材料は、例えば天然ゴム製のラバーバンドで、いわゆる輪ゴムの大きなサイズのもの挙げられる。また、他の弾性索 2 の材料としては、天然ゴムを芯ゴムとして周囲をポリエステル繊維で編んだコールゴム ( 例えば、6 本の芯ゴムの有する「6 コール」が挙げられる ) なるものを挙げる事ができ、いわゆるアンダーウェアに使用されるゴム紐や、帽子のあご紐等が相当する。コールゴムは、ラバーバンドに対して、品質の経時変化が少なく、耐久性が高いものであるが、コールゴムは表面に編み模様があるため、摩擦係数に異方性があり、解析を複雑にする。一方、ラバーバンドは異方性が無いため、解析が容易である。

40

【 0 0 3 9 】

また、支持部 3 a 及び 3 b により形成される形状を円環状としているが、特に支持部 3 a と 3 b とが相対的な回転運動のみを与えられるような場合に、好適である。その際、支持部 3 a 及び 3 b の中心軸の位置及び方位がずれないように、回転方向のみに運動の自由度を有する回転部 5 が、支持部 3 a と 3 b との間に配置されることが好適である。回転部 5 の一例を図 1 3 に示す。

【 0 0 4 0 】

そして、図 1 3 に示すように、回転部 5 は、例えば、外側円環部 5 a、及び外側円環部

50

5 a の半径より小さい半径の内側円環部 5 b で構成されており、外側円環部 5 a に対して、内側円環部 5 b は回転自在である。内側円環部 5 b には、外側円環部 5 a に回転運動のみが許されるように、外側円環部 5 a と嵌合した構造を有する。

【0041】

そして、支持部 3 a と支持部 3 b を相対的に回転させるため、複数の各連結部 7 a の一方は、外側円環部 5 a に固定され、それぞれ各連結部 7 a の他方は、支持部 3 a に固定される。同様に、複数の各連結部 7 b の一方は、外側円環部 5 b に固定され、それぞれ各連結部 7 b の他方は、支持部 3 b に固定される。

【0042】

このような構造のため、外側円環部 5 a の回転運動、及び内側円環部 5 b の回転運動は、それぞれ結合部 7 a 及び 7 b を介して、それぞれ支持部 3 a 及び支持部 3 b に伝達される。更に、回転部 5 は、回転駆動部 5 c からの駆動力によって、駆動される。

【0043】

図 1 2 に示すように、回転駆動部 5 c は、外側円環部 5 a 又は内側円環部 5 b のいずれか一方に設けられた回転駆動固定部 5 c' に取り付けられるようにしても良い。

【0044】

第 1 の実施形態に係る把持装置において、把持索の集合で囲まれた把持空間を変形して、オブジェクトを把持する動作について説明する。

【0045】

まず、制御部 6 から出力された制御信号が、回転駆動部 5 c に入力される。次に、制御信号の指示に従って、電源（図示せず）等から電力が回転駆動部 5 c に供給される。さらに、回転駆動部 5 c が駆動されて、回転部 5 の外側円環部 5 a と内側円環部 5 b とが互いに逆向きに回転する。

【0046】

その結果、支持部 3 a と 3 b とが、互いに逆向きに回転して、弾性索 2 の集合によって形成された把持空間は、変形する。そして、支持部 3 a と 3 b とが、互いに逆向きの回転するにつれて、円筒状の空間の中央付近が狭くなり、くびれた形状となる。

【0047】

その結果、空間内に配置されたオブジェクトの形状に沿って、オブジェクトを包み込むように把持空間が変形する。その変形によって、オブジェクトと各弾性索 2 との間に摩擦力が生成される。把持装置 1 は、このプロセスで生じた摩擦力の総量に応じた、把持力を生成することができる。

【0048】

ここで、回転部 5 の機械的構造の一例として、図 1 3 に回転部 5 の平面図を示す。また、図 1 3 における A - A' 線断面図の例を図 1 4 及び図 1 5 に示す。図 1 4 及び図 1 5 が示すように、外側円環部 5 a と内側円環部 5 b との間には、ベアリング 5 c が配置されている。そして、外側円環部 5 a と内側円環部 5 b とが、ベアリング 5 c を介して回転自在に支持されている。外側円環部 5 a と内側円環部 5 b とで囲まれ、ベアリング 5 c が配置される空間に関しては、図 1 4 に示すように、その空間の断面が、ベアリング形状に沿った曲面形状でも良いし、また、図 1 5 に示すように、その空間の断面が方形であっても良い。

【0049】

そして、回転部 5 の要部を拡大した正面図を図 1 6 に示す。また、外側円環部 5 a と内側円環部 5 b との隙間を拡大した構造を図 1 7 に示す。

【0050】

図 1 6 及び図 1 7 に示すように、外側円環部 5 a と内側円環部 5 b とが向き合った空間に歯車 5 d を配置し、外側円環部 5 a には、歯車 5 d と噛み合い円周状に形成された内歯 5 a' を形成し、内側円環部 5 b には、歯車 5 d と噛み合い円周状に形成された外歯 5 b' を形成し、歯車 5 d を回転駆動部 5 c（例えばモータ）の回転軸と接合するように構成する。

10

20

30

40

50

## 【0051】

このように構成された回転部5に配置された回転駆動部5cを駆動することによって、外側円環部5aと内側円環部5bを相対的に回転することができる。

## 【0052】

本発明の実施形態に係る把持装置における支持部及び回転部について、回転部5とは別の構造のラック付き回転部51を有する例を、図18に示す。

## 【0053】

図18が示すように、ラック付き回転部51は、二重のリングで構成されており、内側円環部51a（内側のリング）で固定した場合、外側円環部51b（外側のリング）が回転するように動く。また、天地を逆にすると内側円環部51a（内側のリング）が回転する。

10

## 【0054】

まず、第1の実施形態に係る把持装置における回転部5と異なり、回転部51の外側円環部51b（回転リング）の外側には、ラック51b'が形成されている。そして、減速電動部51cの構造について、外側円環部51bを回転させるため、回転駆動部5cとは構造が異なる減速電動部51cを用いる。

## 【0055】

また、ラック付き回転部51を回転させるため、制御部16（図示しない）の指令に基づいて、回転駆動モータ51dは回転するよう制御される。

## 【0056】

続いて、減速電動部51cの構成及び動作について、図19を用いて説明する。まず、減速部51eが、回転駆動モータ51dの回転を、例えば1/50倍に減速する。

20

## 【0057】

そして、減速電動部51cの駆動軸51fにピニオンギア（歯車）51gが係合している。ここで、ラック51b'とピニオンギア51gとは噛み合っているため、減速電動部51cから駆動トルクが、ラック51b'を介して、外側円環部51bに伝達される。

## 【0058】

この駆動トルクにより、減速電動部51cは、ピニオンギア51gを介して、外側円環部51bを駆動する。

## 【0059】

この結果、回転駆動モータ51dの回転が、さらに略1/500倍の速度に減速して、ラック付き回転部51に伝達される。

30

## 【0060】

そして、エンコーダ51hは、エンコーダ51h自身の分解能に基づいて、外側円環部51bと内側円環部51aとの回転角度を計測することができる。エンコーダ51hによって計測された回転角度は、制御部16に出力される。

## 【0061】

なお、外側円環部51bの外周面にラック51b'を形成している例を示したが、外側円環部51bにラック51b'を形成することに代えて、例えば、回転リング状に形成した外側円環部51bの外周面に、成形フレキラック51b''を、円周方向に貼り付けることによって簡単に形成することができる。

40

## 【0062】

また、フレキラック51b'は、樹脂製で、直線状に延びた状態ではその軸線方向の力に対しては撓まず（曲がらず）、かつ軸線方向に直交する力が加えられると容易に曲がるものである。

## 【0063】

（第2の実施形態）

次に、第2の実施形態に係る把持装置20を図20に示して説明する。第2の実施形態に係る把持装置20は、第1の実施形態に係る把持装置1に対して、センサ8及び80（張力検出手段）を備えている点が異なっているが、その他の構成は略同じである。よって

50

、第 1 の実施形態と共通する構成要素については、同一の符号を付し、その説明を省略する。

【 0 0 6 4 】

第 2 の実施形態に係る把持装置 2 0 は、第 1 の実施形態に係る把持装置 1 と同様に、複数の弾性索 2 ( 弾性索 2 の集合 ) と、一对の支持部 3 a 及び 3 b と、各弾性索 2 と、支持部 3 a 及び 3 b とを固定する固定部 4 と、支持部 3 a と 3 b とを回転運動させる回転部 5 と、回転部の駆動制御を行なう制御部 2 6 と、回転部 5 及び支持部 3 a と 3 b とをそれぞれ結合する結合部 7 a 及び 7 b とを備えている。

【 0 0 6 5 】

したがって、把持装置 2 0 では、把持装置 1 と同様の効果が得られる。

10

【 0 0 6 6 】

また、第 2 の実施形態に係る把持装置 2 0 は、図 2 0 に示すように、把持装置 2 0 の把持力によりオブジェクトに作用する張力を、外圧として検出するセンサ 8 及び 8 0 を備えている。なお、センサ 8 は支持部 3 a の側に、センサ 8 0 は支持部 3 b の側に設けられている。

【 0 0 6 7 】

そして、制御部 2 6 は、センサ 8 及び 8 0 の検出結果に基づいて、オブジェクトを把持できるように、支持部 3 a と 3 b とを相対的に回転させるための制御信号を生成する。この制御信号に基づいて、回転駆動部 5 c を駆動することによって、外側円環部 5 a と内側円環部 5 b を適切な相対角度まで回転することができる。

20

【 0 0 6 8 】

センサ 8 及び 8 0 の取付位置について説明する。例えば、センサ 8 は支持部 3 a に開けられた開口部 3 c の上に設けられても良く、同様に、センサ 8 0 も支持部 3 b に開けられた開口部 3 d の上に設けられても良い。そして、弾性索 2 の端部とセンサ 8 の可動部 8 b とが機械的に接続され、同様に弾性索 2 の反対側 ( もう一方 ) の端部とセンサ 8 0 が機械的に接続されている。このため、弾性索 2 の張力に応じた、センサ 8 及び 8 0 のそれぞれの可動部 8 b の相対的移動距離 ( 量 ) が、制御部 2 6 に出力される。相対的移動距離に基づいて、制御部 2 6 は、弾性索 2 の張力を算出する。

【 0 0 6 9 】

センサ 8 又は 8 0 の構成の一例を図 2 1 に示す。図 2 1 に示すように、センサ 8 のハウジング 8 a に可動部 8 b が設けられており、ハウジング 8 a と可動部 8 b との間には弾性体 8 c が設けられている。可動部 8 b に張力が作用していないとき、弾性体 8 c が可動部 8 b をハウジング 8 a に押し付けている。可動部 8 b の端部に設けられた磁石 8 d とホール素子 8 e の相対的位置関係は、初期状態を維持している。

30

【 0 0 7 0 】

そして、弾性索 2 の伸張に応じた張力  $T$  が可動部 8 b に作用し、可動部 8 b が引っ張られると、張力  $T$  に応じて弾性部 8 c が縮む。すると、可動部 8 b の端部に設けられた磁石 8 d とホール素子 8 e の相対的位置関係は変化する。

【 0 0 7 1 】

その変化に伴って磁束密度が変化し、ホール素子 8 e からの出力電圧が変化する。制御部 2 6 は、その出力電圧の変化に基づいて、ハウジング 8 a と可動部 8 b との相対移動量  $s$  を算出し、相対移動量  $s$  及び弾性部 8 c の弾性定数に基づいて、弾性索 2 の張力を算出する。

40

【 0 0 7 2 】

また、本発明の第 2 の実施形態に係る把持装置 2 0 は、センサ 8 を使用するものに限定されるものではなく、センサ 8 と動作原理及び構成の異なる張力センサ 9 を採用しても良い。ここで、張力センサ 9 の構成例を図 2 2 に示す。

【 0 0 7 3 】

まず、張力センサ 9 の構造及び材質を説明する。図 2 2 に示すように、張力センサ 9 は、中心に配される弾性紐 9 a の周囲に感圧導電性紐 9 b 及び 9 c が 2 重に巻かれて ( ダブ

50

ルカバリングされて)構成される。例えば、感圧導電性カバリング紐(繊維)を好適に用いることができる。なお、ハウジング9dに弾性紐9aは固定され、ハウジング9dは支持部3aに固定される。

【0074】

弾性紐9aとしては、例えばポリウレタン製のものを好適に用いることができる。感圧導電性紐9b及び9cは、例えばポリエステル等の非導電性繊維にステンレス等の導電性繊維を混紡して撚り合わせるにより形成されていても良い。

【0075】

次に、張力センサ9の動作原理を説明する。感圧導電性紐9b及び9cは、それぞれに印加される張力(圧力)が大きくなると、感圧導電性紐9b及び9cの接触点数(接触面積)が増加(変化)することによって、電気抵抗値が変化するという特性を有している。そして、感圧導電性紐9b及び9cの伸びと抵抗値との間には、線形近似可能な関係が存在する。

10

【0076】

上述のような構造を有する張力センサ9は、感圧導電性紐9b及び9cの間の抵抗値変化の特性を安定にしている。特に、張力センサ9は、張力と抵抗との関係のヒステリシス特性を有効に軽減することができる。

【0077】

また、張力センサ9は、弾性及び伸縮性に優れた特性を有しているので、大きな変形にも対応することができる。さらに、張力センサ9は、自身に張力が作用すると、感圧導電性紐9b及び9cの間の抵抗値が低くなるという特性を有している。

20

【0078】

尚、張力センサ9は、上述のような感圧導電性カバリング紐(繊維)に限定されるものではない。オブジェクトを締め付ける(巻き付ける)弾性索2と結合することができるような部材であれば良く、弾性を有する他の紐状部材や若干の幅を有する布状の部材であっても良い。また、その場合には、弾性索2に作用する張力を検出するために、感圧導電性紐9bと9cとの間の抵抗を測定することができるように、信号線を張力センサ9に設ける。そして、制御部26は、張力センサ9から入力される信号に基づいて、弾性索2の張力を測定するように構成すれば良い。

【0079】

<把持装置の動作フロー>

30

制御部26は、把持装置20に所定の動作をさせる際に、センサ8の検出結果(出力)に基づいて、回転駆動部5dを制御する。

【0080】

図23は、第2の実施形態に係る把持装置20の動作の概略を説明するフローチャートである。

【0081】

まず、制御部26は、把持装置20の制御パラメータ等を初期化する(ステップS1)。具体的には、支持部3aと支持部3bとのなす角度が、所定の初期角度となるように、回転駆動部5dに指令を出すこと、オブジェクトに関するデータ、及び把持装置20の回転駆動部5dを制御する制御パラメータを読み出すことである。制御パラメータとしては、回転部5を駆動する際の外側円環部5aと内側円環部5bとの相対的角速度(角度ステップ、駆動角度の幅)、回転角度の上限値、回転角度の下限値、回転駆動部5dに与えられる回転トルクが挙げられる。オブジェクトに関するデータとしては、把持動作の対象物となるオブジェクトを特定するデータ、該オブジェクトの標準的な重量、サイズ(不定形な場合であっても、寸法の最大値~最小値、横幅、縦幅、奥行き)が挙げられる。

40

【0082】

次に、オブジェクトを弾性索2の集合で形成された把持空間内に設置する(ステップS2)。続いて、オブジェクトが把持空間内に適切に設置されたか否か判断を行なう(ステップS3)。ステップS3の判断がNoであるならば、ステップS2に戻り、オブジェク

50

トを設置し直す。ステップ S 3 の判断が Yes であるならば、制御部 2 6 は、制御パラメータ（角度ステップ、駆動角度の幅）に基づいて、回転駆動部 5 d に指令を出力して、回転部 5 を駆動する（ステップ S 4）。

【 0 0 8 3 】

制御部 2 6 は、センサ 8 及び / 又は 8 0 の出力に基づいて各センサの各張力を推定する（ステップ S 5）。具体的には、測定されたセンサ 8、8 0 の可動部 8 b の変位量と弾性体 8 c の弾性定数に基づいて、弾性索 2 の一端及び他端の各張力を推定する。

【 0 0 8 4 】

次に、把持装置 2 0 が、オブジェクトを把持できているか判断する（ステップ S 6）。例えば、各センサの各張力に基づいてオブジェクトを把持できるか否かを判断（比較）する。そして、その判断が No であるならば、ステップ S 4 に戻る。また、その判断が Yes であるならば、オブジェクトを把持することができると判断して、後述する把持後の処理を行う（ステップ S 7）。具体的な把持後の処理の例としては、把持装置 2 0 が、図示しないロボットアームの一部として機能させ、オブジェクトを把持したまま、オブジェクトを移動させるようなことが挙げられる。

【 0 0 8 5 】

（第 3 の実施形態）

次に、第 3 の実施形態に係る把持装置 3 0 を図 2 4 に示して説明する。第 2 の実施形態に係る把持装置 2 0 がセンサ（張力検出手段）を備えているのに対し、第 3 の実施形態に係る把持装置 3 0 は、撮像部 3 1（例えば、ビデオカメラ、CCD カメラ）を備えている点が異なっているが、その他の構成は第 1 の実施形態と略同じである。よって、第 1 の実施形態に係る把持装置と共通する構成要素については同一の符号を付し、その説明を省略する。

【 0 0 8 6 】

第 3 の実施形態に係る把持装置 3 0 では、撮像部 3 1 を用いて、オブジェクトの画像を撮影する。制御部 3 6 は、撮像部 3 1 から送信されたオブジェクトの画像の特徴（データ）を抽出する。そして、その特徴（データ）の変化に基づいて、回転部 5 の駆動制御を行うことによって、オブジェクトを把持する制御を行うことができる。

【 0 0 8 7 】

第 2 の実施形態に係る把持装置 2 0 では、オブジェクトとの接触点から加える力（把持力）を制御することによって、オブジェクトと弾性索との間に作用する力を均衡させる（釣り合わせる）ことで力学的に拘束するものである。これに対して、第 3 の実施形態に係る把持装置 3 0 では、オブジェクトと弾性索 2 との接触点の位置を制御することによって、オブジェクトを幾何学的に拘束する（固定する又は包み込む）ものである。

【 0 0 8 8 】

< 把持装置の動作フロー >

図 2 5 は、第 3 の実施形態に係る把持装置 3 0 の動作例を示すフローチャートである。

【 0 0 8 9 】

まず、第 3 の実施形態に係る把持装置 3 0 の動作であるステップ S 3 1 ~ S 3 4 及びステップ S 3 8 に関して、第 2 の実施形態に係る把持装置 3 0 の動作であるステップ S 1 ~ S 4 及び S 7 と同様であるので説明を省略し、本例ではステップ S 3 5 から説明する。

【 0 0 9 0 】

回転部 5 を回転させた後（ステップ 3 4）、制御部 3 6 は、撮像部 3 1 を用いてオブジェクトを撮影する（ステップ S 3 5）。

【 0 0 9 1 】

次に、制御部 3 6 は、撮像部 3 1 から送信されたオブジェクトの画像（データ）に基づいて、画像の特徴を抽出する（ステップ S 3 6）。その特徴に基づいて、オブジェクトを幾何学的に拘束できたか否かを判断する。例を挙げると、オブジェクトの画像の現在の中心位置の変化を推定することが挙げられる。

【 0 0 9 2 】

10

20

30

40

50



次に、把持装置 30 が、オブジェクトを把持できているか判断する（ステップ S 37）。例を挙げると、過去の中心位置との差分が所定の距離以下であるか否か判断するのが好適である。そして、ステップ S 37 の判断が No であるならば、ステップ S 34 に戻る。また、ステップ S 37 の判断が Yes であるならば、オブジェクトを把持することができると判断して、後述する把持後の処理を行う（ステップ S 38）。

#### 【0093】

（第 4 の実施形態）

次に、第 4 の実施形態に係る把持装置 40 を説明する。第 4 の実施形態に係る把持装置 40 は、第 1 の実施形態に係る把持装置 10 に対して、回転角度決定部 49 を備えている点が異なっているが、その他の構成は略同じである。

10

#### 【0094】

第 4 の実施形態の把持装置 40 のブロック構成図を図 26 に示す。図 26 に示すように、把持装置 40 は、弾性索 42 の集合で形成された把持空間を变形することによって、オブジェクトを拘束する把持部 48 と、オブジェクトを把持するように、回転部 45 の回転角を決定する回転角度決定部 49 と、回転角に基づいて、回転部 45 を駆動する制御部 46 とを有している。

#### 【0095】

また、オブジェクトを拘束する把持部 48 については、第 1 の実施形態に係る把持装置と同様に弾性索 42、支持部 43a 及び 43b、固定部 44、回転部 45 及び連結部 47 を有している。なお、図 26 においては、弾性索 42 及び固定部 44 は図示していない。

20

#### 【0096】

次に、回転角度決定部 49 の構成及び機能（動作）を説明する。まず、回転角度決定部 49 は、オブジェクトを選択する信号を入力する入力部 49a と、選択されたオブジェクトの形状のデータ（以下、単に「ポリゴンデータ」又は「PD」と称する）を記憶し、後述する算出部 49c に出力するオブジェクト形状記憶部 49b と、回転部 45 の回転角及びポリゴンデータの角部における外角に基づいて、オブジェクトと弾性索 42 との間に作用する把持力  $F^{\wedge}$ （ハット）及び摩擦力  $\mu$  を算出する算出部 49c と、算出部 49c が算出したデータ（各回転角毎の把持力  $F^{\wedge}$ （ハット）及び摩擦力  $\mu$ ）を記憶する算出データ記憶部 49d と、選択されたオブジェクトを画面表示する表示部 49e と、を備えている。なお、把持部 48 の構成は、第 1 の実施形態の把持装置 1 と同様であるので、その詳細は省略する。

30

#### 【0097】

また、オブジェクト形状記憶部 49b には、予め、オブジェクトの外形形状を表すポリゴンデータが記憶されている。さらに、算出データ記憶部 49c は、各オブジェクトに対応した回転角毎の摩擦力  $F^{\wedge}$ （ハット）、最大静止摩擦力（ $\mu | N^{\wedge}$ （ハット）|）を記憶する。そして、それらの中から所定の基準に基づいて、オブジェクトを把持するに適した回転角を提供する。所定の基準は、摩擦係数を  $\mu$ 、垂直抗力ベクトルを  $N^{\wedge}$ （ハット）とし、 $F^{\wedge}$ （ハット） $< \mu | N^{\wedge}$ （ハット）| のように設定しても良い。

#### 【0098】

以下、回転角度決定部 49 における処理を具体的に説明する。

40

#### 【0099】

< 把持装置の動作フロー >

制御部 46 は、把持装置 40 に所定の動作をさせる際に、回転角度決定部 49 で指定されたオブジェクトのポリゴンデータに基づいて、回転部 45 を制御する。

#### 【0100】

図 27 は、第 4 の実施形態に係る把持装置 40 の動作例を示すフローチャートである。

#### 【0101】

まず、回転角度決定部 49 に対して、オブジェクトのポリゴンの形状データを指定（選択）し（ステップ S 40）、回転角度決定部 49 は、オブジェクト形状記憶部 49b に記憶されているポリゴンデータを読み出し、ポリゴンデータからポリゴンを再現する（ステッ

50

プ S 4 1 )。

【 0 1 0 2 】

そして、オブジェクトのサイズ等に基づいて、入力部 4 9 a からポリゴンのサイズを指定し、弾性索 4 2 とオブジェクトとの摩擦係数  $\mu$ 、オブジェクトの質量  $M$ 、密度  $\rho$  を入力又は取得する (ステップ S 4 2)。

【 0 1 0 3 】

続いて、回転部 4 5 の回転角度  $\theta$  のデータ (以下、回転角度  $\theta$  と称する) 等を初期化し (ステップ S 4 3)、回転角度  $\theta$  に対して所定の角度ステップ  $\Delta\theta$  (以下、単に「 $\Delta\theta$ 」 と称する) を加算する (ステップ S 4 4)。

【 0 1 0 4 】

そして、回転部 4 5 を回転角度  $\theta$  分回転した状態をシミュレーションした場合において、ポリゴンに弾性索 4 2 の集合が巻き付いた状態 (包み込んだ状態) であるか否かを判断する (ステップ S 4 5)。ステップ S 4 5 の判断が No であるならば、ステップ S 4 4 に戻る。

【 0 1 0 5 】

ステップ S 4 5 の判断が Yes であるならば、ポリゴンの回転角度決定部 4 9 内 (における仮想空間) において、ポリゴンの各角部における各弾性索 4 2 の巻き付いた状態、すなわちポリゴンと弾性索の接触角度  $\alpha$  を算出する (ステップ S 4 6)。

【 0 1 0 6 】

また、各弾性索 4 2 の伸張  $L$  (変位) の推定に基づいて、張力  $T$  (ハット) を算出する (ステップ S 4 7)。

【 0 1 0 7 】

そして、各角部における外角  $\beta$  に基づいて、垂直抗力  $N$  (ハット)、把持力  $F$  (ハット) を見積もる (ステップ S 4 8)。

【 0 1 0 8 】

また、釣り合い (平衡) 方程式に基づいて、各角部において滑りが起きるか否かを判断する (ステップ S 4 9)。その判断が Yes であるならば、ステップ S 4 4 に戻る。ステップ S 4 9 の判断が No であるならば、各角部において、弾性索 4 2 の滑りが起きないのみなし、このときの回転角  $\theta$  を把持に適した回転角  $\theta_h$  (以下、把持回転角  $\theta_h$  と称する) として保存し、制御部 4 6 に出力する (ステップ S 5 0)。

【 0 1 0 9 】

続いて、制御部 4 6 は、把持回転角  $\theta_h$  に基づいて、把持部 4 8 の回転部 4 5 を回転させる指令を出力する (ステップ S 5 1)。そして、回転部 4 5 は、把持回転角  $\theta_h$  まで回転した結果、弾性索 4 2 がオブジェクトを巻き付けて (或いは拘束して) 把持状態とすることができる。

【 0 1 1 0 】

(第 5 の実施形態)

次に、第 5 の実施形態に係る把持装置 5 0 を説明する。第 5 の実施形態に係る把持装置 5 0 は、第 4 の実施形態に係る把持装置 4 0 に対して、オイラーのベルト理論及びポリゴンデータに基づいて、角部における張力を算出することによって、各角部における弾性索の滑り判定を行なう点が異なっているが、その他の構成はほぼ同じである。

【 0 1 1 1 】

まず、図 2 8 を用いて、滑り判定の基礎となるオイラーのベルト理論 (以下、ベルト理論と称する) を簡単に説明する。

【 0 1 1 2 】

図 2 8 に示すように、プーリ (滑車) 1 0 0 a にベルト 1 0 0 b が、接触角  $\phi$  に亘って、巻き付いている。そして、ベルト 1 0 0 b の両端 (一端及び他端) に、それぞれ張力  $T_t$  及び  $T_s$  ( $T_t > T_s$ ) が作用している。プーリ 1 0 0 a とベルト 1 0 0 b とが、微小角  $d$  内において定常状態 (釣り合った状態) を図 2 9 に示す。

【 0 1 1 3 】

10

20

30

40

50

そして、プーリ（滑車）の微小角  $d$  内において、張力  $T$ 、 $(T + dT)$ 、垂直抗力  $N$  及び摩擦力  $F$  が、定常状態となるような関係を、数 1 及び数 2 として表すことができる。

【 0 1 1 4 】

【 数 1 】

$$N = T \sin \frac{d\theta}{2} + (T + dT) \sin \frac{d\theta}{2}$$

【 0 1 1 5 】

【 数 2 】

$$F = -T \cos \frac{d\theta}{2} + (T + dT) \cos \frac{d\theta}{2}$$

10

数 1 は、微小角  $d$  の法線方向の釣り合いの方程式であり、数 2 は、微小角  $d$  の接線方向の釣り合いの方程式である。ここで、 $d$  及び  $dT$  が微小と仮定したとき、数 1 及び数 2 は、それぞれ数 3 及び数 4 のように近似することができる。

【 0 1 1 6 】

【 数 3 】

$$N \cong T d\theta \left( \sin \frac{d\theta}{2} \cong \frac{d\theta}{2}, dT \frac{d\theta}{2} \cong 0 \text{ と近似} \right)$$

20

【 0 1 1 7 】

【 数 4 】

$$F \cong dT \left( \cos \frac{d\theta}{2} \cong 1 \text{ と近似} \right)$$

摩擦力  $F$  と最大摩擦力  $\mu N$  とが同じ大きさになると、滑りが起きる。そのような場合、以下に示す数 5 が成り立つ。

【 0 1 1 8 】

【 数 5 】

$$d\theta = \frac{1}{\mu} \frac{dT}{T}$$

30

数 5 は、微小角  $d$  にあるベルト 1 0 0 b が、プーリ 1 0 0 a 表面上で滑る場合、張力の増加分  $dT$  と微小角  $d$  との関係を示している。ここで、数 5 を接触角 全体に亘って積分を行なうことによって、数 6 に示すようなベルト理論の式を得られる。

【 0 1 1 9 】

【 数 6 】

$$T_t = T_s e^{\mu\theta}$$

数 6 から、プーリ（滑車）上におけるベルトの滑りに関して、以下のような重要な特徴 (1) ~ (5) を読み取ることができる。

40

【 0 1 2 0 】

(1) 両端の張力  $T_t$  及び  $T_s$  とは、比例関係である。

【 0 1 2 1 】

(2) ベルト理論の式 (数 6) は、プーリ（滑車）の半径を含んでいないので、張力は半径に依存しない。(後述するポリゴンの角部は、曲率半径 = 0 の円柱 (の一部) みなすことができる根拠である。)

(3) 張力の比 ( $T_t / T_s$ ) は、接触角 と指数関数の関係である。

【 0 1 2 2 】

(4) 平面領域では、接触角 = 0 となるので、摩擦力は平面で作用しない。

50

## 【 0 1 2 3 】

( 5 ) ベルトの両端における張力  $T_t$ 、 $T_s$ 、及び接触角  $\theta$  を含むオイラーのベルト理論 ( 数 6 ) を用いれば、摩擦係数  $\mu$  を算出することができる。

## 【 0 1 2 4 】

特に、特徴 ( 5 ) を用いることによって、オブジェクトと弾性索との摩擦係数  $\mu$  を算出することができる。

## 【 0 1 2 5 】

次に、ポリゴン形状のオブジェクトに対して、ベルト理論を適用できるように、拡張されたベルト理論 ( 以下、拡張ベルト理論と称する。 ) を説明する。

## 【 0 1 2 6 】

拡張ベルト理論に拠れば、弾性索がポリゴン形状のオブジェクトに巻き付いた状態を解析することができる。すなわち、弾性索がオブジェクトの角部を滑るか否かを判定することができる。また、特徴 ( 4 ) が示すように、ポリゴンの角部を曲率半径 = 0 の円柱 ( 円柱の一部 ) として扱うことができる。

## 【 0 1 2 7 】

この特徴を利用すると、ポリゴン形状のオブジェクトにおける把持力が十分に発生しているか否かは、2つの平面で構成されている角部に巻き付いている箇所を拡張ベルト理論を適用して解析することによって、判断することができる。

## 【 0 1 2 8 】

まず、拡張ベルト理論の基本となるポリゴン形状のオブジェクトの角部における微小要素を、図 30 を用いて、簡単に説明する。

## 【 0 1 2 9 】

図 30 に示すように、ポリゴンのオブジェクト 100 d にベルト 100 c が、外角  $\theta$  に亘って、巻き付いている。ベルト 100 c の両端 ( 一端及び他端 ) に、それぞれ張力  $T$ 、 $T + \Delta T$  が作用している。また、図 30 に示すように、ポリゴンのオブジェクト 100 d とベルト 100 c とが、外角  $\theta$  内において定常状態 ( 釣り合った状態 ) である。

## 【 0 1 3 0 】

そして、ポリゴンのオブジェクト 40 c の外角  $\theta$  内における、張力  $T$ 、 $( T + \Delta T )$ 、垂直抗力  $N$ 、摩擦力  $F$  を用いて表した定常状態は、数 7 及び数 8 のように示すことができる。

## 【 0 1 3 1 】

## 【 数 7 】

$$N = T \sin \frac{\Delta \theta}{2} + (T + \Delta T) \sin \frac{\Delta \theta}{2} \cong T \Delta \theta$$

## 【 0 1 3 2 】

## 【 数 8 】

$$F = -T \cos \frac{\Delta \theta}{2} + (T + \Delta T) \cos \frac{\Delta \theta}{2} \cong \Delta T$$

数 7 は、外角  $\theta$  の法線方向の釣り合い方程式であり、数 8 は、外角  $\theta$  の接線方向の釣り合いの方程式である。

## 【 0 1 3 3 】

ここで、オイラーのベルト理論で用いた数 3 ~ 数 5 を参考にして、数 7 及び数 8 を整理する。この結果、角部で滑りが発生している時の角部前後の張力の比は  $( T + \Delta T ) / T$  は、数 9 のように表すことができる。

## 【 0 1 3 4 】

10

20

30

40

【数 9】

$$\frac{T+\Delta T}{T}=1+\frac{\mu T\Delta\theta}{T}=1+\mu\Delta\theta$$

ポリゴンの角部の外角 が微小の場合、数 7 ~ 数 9 を用いて、垂直抗力 N、摩擦力 F、滑り時における張力の比を、算出することができる。

【0 1 3 5】

ここで、ポリゴンの角部が微小でない場合、拡張ベルト理論に基づく張力の比に、外角が与える影響について検討する。

【0 1 3 6】

外角 が大きくなるにしたがって、数 9 に示された張力の比と、拡張ベルト理論との差が大きくなるという問題が生じる。しかし、このような差は、ポリゴンのメッシュ（網）をより細かく区分することによって解消する。例えば、図 3 1 に示すように、ポリゴンデータのオブジェクトの接触角 を、n 個の角部として、外角（ / n ）ずつ屈曲するように分割することができる。この分割数 n を増やすことによって、弾性索の両端の張力の比は、ベルト理論に近づけることができる。

【0 1 3 7】

次に、ポリゴンデータの角部が奥行き方向の成分を有し、また拡張ベルト理論における奥行き方向の力の様子を図 3 2 に示す。

【0 1 3 8】

そして、角部の摩擦係数  $\mu$  を用いて算出された最大静止摩擦力を用いることによって、角部において弾性索が滑るか否かを判定する手法について説明する。なお、その判定の手法において、角部における摩擦係数  $\mu$  は異方性を持たないと仮定する。すなわち、辺方向を示すベクトルとなす角度 によって変化する摩擦係数を  $\mu$  ( ) とするが、本発明の実施形態では、 $\mu$  ( ) =  $\mu$  (一定) として扱う。

【0 1 3 9】

ベルト理論によれば、張力ベクトル  $T^{\wedge}$  (ハット) を法線に射影したベクトルが、垂直抗力  $N^{\wedge}$  (ハット) と釣り合い、且つ張力ベクトル  $T^{\wedge}$  (ハット) を接線に射影したベクトルが摩擦力  $\mu |N^{\wedge}$  (ハット)| と釣り合うと、解釈することができる。

【0 1 4 0】

上述の解釈を図 3 2 に則して換言すると、張力ベクトル  $T^{\wedge}$  (ハット) を法線に射影したベクトルが垂直抗力  $N^{\wedge}$  (ハット) と釣り合い、且つ張力ベクトル  $T^{\wedge}$  (ハット) を接平面に射影したベクトルが摩擦力  $\mu |N^{\wedge}$  (ハット)| と釣り合うと、解釈することができる。

【0 1 4 1】

この解釈に基づいて、ベクトル方程式を立てると、数 1 0 及び数 1 1 のように表すことができる。なお、 $e^{\wedge}$  (ハット)<sub>1</sub>、 $e^{\wedge}$  (ハット)<sub>2</sub> 及び  $e^{\wedge}$  (ハット)<sub>3</sub> について説明する。ここで、図 3 2 の角部における接平面を張る単位ベクトルを  $e^{\wedge}$  (ハット)<sub>1</sub>、 $e^{\wedge}$  (ハット)<sub>2</sub>、単位法ベクトルを  $e^{\wedge}$  (ハット)<sub>3</sub> とする。また、 $e^{\wedge}$  (ハット)<sub>1</sub> は、ポリゴンの辺方向に一致させた単位ベクトルである。

【0 1 4 2】

【数 1 0】

$$\hat{N} + (\hat{T}_1 \cdot \hat{e}_3) \hat{e}_3 + (\hat{T}_2 \cdot \hat{e}_3) \hat{e}_3 = \hat{0}$$

【0 1 4 3】

【数 1 1】

$$\hat{F} + (\hat{T}_1 \cdot \hat{e}_1) \hat{e}_1 + (\hat{T}_1 \cdot \hat{e}_2) \hat{e}_2 + (\hat{T}_2 \cdot \hat{e}_1) \hat{e}_1 + (\hat{T}_2 \cdot \hat{e}_2) \hat{e}_2 = \hat{0}$$

ここで、摩擦係数を用いて最大静止摩擦係数を算出することによって、ポリゴンの辺の

10

20

30

40

50

角部において、ベルトが滑るか否かが判定することができる。

【0144】

まず、ポリゴンデータの角部とベルトとが接する平面（以下、接平面と称する）を仮に設定する。張力ベクトル  $T^{\wedge}$ （ハット）をその接平面内に射影したベクトル  $F^{\wedge}$ （ハット）と、最大静止摩擦力（摩擦係数  $\mu \times$  垂直抗力  $N^{\wedge}$ （ハット））が、後述する数12のような条件式を満たさないような場合、その角部において滑りが生じるとみなす。

【0145】

そのような釣り合い条件は、数12のように示すことができる。数12を満たすとき、その角部では、滑りは起きない。

【0146】

【数12】

$$|\hat{F}| \leq \mu(\psi) |\hat{N}|$$

以上説明したように、ベルト理論に基づいて、ポリゴンデータのオブジェクトをベルト（弾性索）で把持することができるか否かを判断する手法（拡張ベルト理論）を示した。

【0147】

第5の実施形態に係る把持装置50では、弾性索がオブジェクトに巻き付く時の形状を、静力学を用いて解析する。弾性索はオブジェクトとの接触以降、弾性索の両端からの張力により、オブジェクトの表面を滑りながら巻き付いていくものとする。そして、上述の特徴(1)~(5)に基づいて、弾性索に作用する張力、垂直抗力及び摩擦力を算出する。このような計算（シミュレーション）を繰り返しながら、各弾性索の位置を算出する。各弾性索の位置に基づいて、各弾性索の移動を解析（シミュレーション）して、弾性索の集合がオブジェクトを包み込み、静力学的釣り合い状態を算出する。

【0148】

そこで、第5の実施形態に係る把持装置50では、オブジェクト及び弾性索のモデル化を行なう。具体的には、オブジェクト形状をポリゴンモデルを用いて表現する。

【0149】

まず、拡張ベルト理論に用いるポリゴンデータのオブジェクトのデータ構造の決定法について説明する。

【0150】

拡張ベルト理論では、オブジェクトの形状を、ポリゴンデータで表現する。そして、ポリゴンモデルは、頂点（Vertex）、稜線（Edge）、面（Face）を構成要素として持つ。

【0151】

そして、その第1のメリットは、不定形なオブジェクトに対して、ポリゴン形状で近似することができることである。また、第2のメリットは、オブジェクトと弾性索の挙動の静力学的解析を、比較的簡素化することができることである。

【0152】

特徴(4)が示すように、オブジェクトをポリゴン形状で表現した場合、弾性索が屈曲する部分は、オブジェクトを構成する辺に限定されるからである。なお、本発明の実施形態に係る把持装置では、オブジェクトを凸面体とした例を示す。

【0153】

また、ポリゴン形状を構成する面は、三角形に限定する。このような限定条件を採用することによって、弾性索とオブジェクトとが接触するか否かの判定を一層簡素化することができる。

【0154】

第5の実施形態に係る把持装置では、ポリゴンデータのデータ構造は、ハーフエッジと呼ばれるデータ構造を用いる。ハーフエッジの概念は、図33に示すように辺に2つの方向を付与し1つの辺を2つに分割するものである。

【0155】

そして、ハーフエッジの概念を適用したポリゴンデータのデータ構造を表1~表3に示

10

20

30

40

50

す。表 1 は、オブジェクトのポリゴンについて、ハーフエッジ構造の頂点リストに含まれる情報の行列を示す。表 2 は、ハーフエッジ構造に含まれるハーフエッジリストに含まれる情報の行列を示す。表 3 は、オブジェクトのポリゴンのハーフエッジ構造の面リストに含まれる情報の行列を示す。

【 0 1 5 6 】

【表 1】

n列目	頂点番号nについての情報
1行目	頂点のx座標
2行目	頂点のy座標
3行目	頂点のz座標
4行目	この頂点を始点とするハーフエッジの番号

10

【 0 1 5 7 】

【表 2】

n列目	ハーフエッジ番号nについての情報
1行目	始点の頂点番号
2行目	所属する面番号
3行目	対ハーフエッジの番号
4行目	次ハーフエッジの番号
5行目	前ハーフエッジの番号

20

【 0 1 5 8 】

【表 3】

n列目	面番号nについての情報
1行目	所属しているハーフエッジの番号

また、ハーフエッジのモデルにおける隣接要素は、頂点、面、及びハーフエッジである。特に、隣接要素の情報を取得するために検索は必要ないことが、特長である。

【 0 1 5 9 】

図 3 3 に示される隣接要素（頂点、面、ハーフエッジ）の関係に基づいた位相情報が、ハーフエッジには含まれる。このため、隣接要素の情報を容易に取得することができる。

30

【 0 1 6 0 】

例えば、ハーフエッジ a の前ハーフエッジ番号 b は、ハーフエッジ行列 H の 5 行 a 列目に格納されており、 $b = H(5, a)$  と表記する。また、ハーフエッジ行列 H の 1 行 b 列目に格納されており、 $c = H(1, b)$  と表記する。さらに、頂点行列 V の 1 ~ 3 行 c 列目に格納されており、 $\hat{d} = V(1:3, c)$  と表記する。そして、頂点 c の位置ベクトル  $\hat{d}$  は、 $\hat{d} = V(1:3, c)$  と位置情報を辿って近接情報を取得することができる。

【 0 1 6 1 】

また、これらの情報を合成することによって、「ハーフエッジ a の前ハーフエッジの始点の位置ベクトル  $\hat{d}$ 」を、

40

$$\hat{d} = \hat{V}(1:3, \hat{H}(1, \hat{H}(5, a)))$$

のような形式で表記することができる。

【 0 1 6 2 】

第 5 の実施形態に係る把持装置において、弾性索は、ポリゴンデータのオブジェクトの表面を、隣の面から隣の面へ滑ることによって、移動する。このため、隣接する要素の情報を頻繁に取得する。そのため、ポリゴン形状のデータ構造として、ハーフエッジ構造を採用するメリットは大きい。なお、表 1 ~ 表 3 で示したハーフエッジのデータ構造は、一般的なものである。

50

## 【 0 1 6 3 】

本発明の第 5 の実施形態では、表 1 ~ 表 3 で示した一般的なハーフエッジのデータ構造に、一層の情報を付加したデータ構造を採用する。

## 【 0 1 6 4 】

まず、ハーフエッジ構造の頂点リストに含まれる情報は、変更はない。しかし、ハーフエッジ構造のハーフエッジリストに含まれる情報に関して、本発明の実施形態では、2 列目に終点の頂点番号及びこのハーフエッジの長さなる情報を追加する。そして、ハーフエッジ構造の面リストに含まれる情報に関して、本発明の実施形態に係る把持装置では、単位法ベクトルの x 座標、y 座標及び z 座標なる情報を、それぞれ 2 列目、3 列目及び 4 列目に追加する。

10

## 【 0 1 6 5 】

ここで、第 5 の実施形態に係る把持装置 5 0 で用いるハーフエッジのデータ構造を表 4 ~ 6 に示す。

## 【 0 1 6 6 】

表 4 は、オブジェクトのポリゴンについて、ハーフエッジ構造の頂点リストに含まれる情報の行列を示す。表 5 は、ハーフエッジ構造に含まれるハーフエッジリストに含まれる情報の行列を示す。表 6 は、オブジェクトのポリゴンのハーフエッジ構造の面リストに含まれる情報の行列を示す。

## 【 0 1 6 7 】

## 【表 4】

20

n列目	頂点番号nについての情報
1行目	頂点のx座標
2行目	頂点のy座標
3行目	頂点のz座標
4行目	この頂点を始点とするハーフエッジの番号

## 【 0 1 6 8 】

## 【表 5】

30

n列目	ハーフエッジ番号nについての情報
1行目	始点の頂点番号
2行目	終点の頂点番号
3行目	所属する面番号
4行目	対ハーフエッジの番号
5行目	次ハーフエッジの番号
6行目	前ハーフエッジの番号
7行目	このハーフエッジの長さ

## 【 0 1 6 9 】

## 【表 6】

40

n列目	面番号nについての情報
1行目	所属しているハーフエッジの番号
2行目	単位法ベクトルのx座標
3行目	単位法ベクトルのy座標
4行目	単位法ベクトルのz座標

まず、ハーフエッジの概念をなすハーフエッジ構造と各要素のリンク関係を図 3 3 に示す。そして、ハーフエッジは、面の外周をポリゴンの外部から見て反時計回りに 1 周するように配置されている。図 3 3 に示すように互いに次 (next)、及び前 (prev) という変数を用いて、前後のハーフエッジへのリンクを保持する。また、稜線を表すペアを対 (pair) という変数で互いにリンクする。さらに、ハーフエッジを含む面及びハーフエッジの起点となる頂点へのリンクも保持する。頂点には、その頂点を起点とするハーフエッジへ

50



のリンクを1つだけ持たせる。よって、どれか一つのハーフエッジがわかれば、そこから巡回して、周囲の面や頂点を取得できる。

【0170】

そして、第5の実施形態に係る把持装置では、ポリゴン表面上を、隣接する面上から隣接する面へと滑って、弾性索が移動することが想定される。したがって、本発明の実施形態に係る把持装置におけるポリゴン上の弾性索の挙動を解析する際は、オブジェクトのデータ構造には、ハーフエッジを用いて記述する。

【0171】

なお、第5の実施形態に係る把持装置では、専用ソフトを用いて、ハーフエッジのデータ構造を有するポリゴンデータが生成される。そして、生成されたポリゴンデータは、専用ソフトを用いて解析できるように保存される。

10

【0172】

次に、弾性索のモデル化について説明する。

【0173】

前述のように、オブジェクトの表面の曲がっている部分（角部）が、垂直抗力と摩擦力が作用する部分である。つまり、垂直抗力と摩擦力が作用する部分は、オブジェクトのポリゴンの辺（エッジ）に限定される。

【0174】

したがって、図34に示すように、オブジェクト辺上に設けられた各ノードを端から端に順に線分で結ぶことによって、弾性索の形状を表現することができる。図34において、黒点部は各ノードを、実線は弾性索がオブジェクトの表面に接している接触部を、破線は弾性索がオブジェクトの表面から浮いている（離れている）浮遊部を、それぞれ示している。

20

【0175】

また、ノードが乗っているハーフエッジの番号と、そのハーフエッジ上での位置座標とを用いて、ノードの位置を表現することができる。

【0176】

しかし、ハーフエッジの番号と、ハーフエッジ上の位置座標だけでは、弾性索（内部）の伸縮を表現することができない。そこで、弾性索のデータ構造には、新たな変数を追加する必要がある。表7に、弾性索のデータ構造を示す。

30

【0177】

【表7】

	1	2	3	...	N <sub>n</sub>
m	—	m <sub>2</sub>	m <sub>3</sub>	...	—
u	—	u <sub>2</sub>	u <sub>3</sub>	...	—
v	v <sub>1</sub> (=0)	v <sub>2</sub>	v <sub>3</sub>	...	v <sub>N<sub>n</sub></sub> (=1)

まず、弾性索のデータ構造においては、i番目のノードを「ノードi」と表記する。そして、ノードiとノードi+1に挟まれた弾性索区間を、「弾性索i」と表記する。弾性索のノードiは、変数m<sub>i</sub>、変数u<sub>i</sub>及び変数v<sub>i</sub>なる3つの変数で表される。ここで、変数m<sub>i</sub>、変数u<sub>i</sub>及び変数v<sub>i</sub>に関して、説明する。

40

【0178】

まず、変数m<sub>i</sub>は、ノードiが乗るハーフエッジの番号を示す。そして前述のように、1本の辺には、2本のハーフエッジが重なって存在するところ、弾性索iが接している側の面に所属するハーフエッジを選択する。

【0179】

また、変数u<sub>i</sub>に関しては、ハーフエッジの始点を変数u<sub>i</sub>=0、終点を変数u<sub>i</sub>=1と設定し、ノードiがハーフエッジ上に存在する位置座標を示す。

【0180】

さらに、変数v<sub>i</sub>に関しては、弾性索全体の方の端点を変数v<sub>1</sub>=0、もう一方の端点

50

を変数  $v_{N_n} = 1$  と設定し、弾性索全体を自然長に戻した状態における各ノード位置座標（弾性索の自然長を基準とした位置座標）を示す変数である。ここで、変数  $v_i$  の変化に関して解説すると、変数  $v_i$  が増加する場合は、弾性索  $i$  がノード  $i$  を通って、弾性索  $i-1$  へ流入することを意味する。

【 0 1 8 1 】

なお、弾性索の両端（ $i = 1, N_n$ ）は、オブジェクトに接触しないノードである。このため、弾性索の両端（ $i = 1, N_n$ ）における変数  $m_i$  及び変数  $u_i$  は、定義することができないので、それらは空白として処理される。

【 0 1 8 2 】

次に、3変数  $m_i$ （ハーフエッジの番号）、 $u_i$ （ハーフエッジ上のノード  $i$  の位置座標）、 $v_i$ （弾性索の自然長を基準としたノード  $i$  の位置座標）と、ポリゴンデータである  $V^{\wedge}$ （ハット）（Vertex（頂点））、 $H^{\wedge}$ （ハット）（Halfedge（ハーフエッジ））、 $F^{\wedge}$ （ハット）（Face（面））とを用いることによって、弾性索のノードの位置ベクトルとノードとの間に作用する張力を算出することができることを、例を挙げて説明する。

【 0 1 8 3 】

例えば、ノード  $i$  が乗るハーフエッジの始点及び終点の位置座標を、表 4 ~ 6 に示した位相関係を用いて、それぞれ数 1 3 及び数 1 4 のように表すことができる。

【 0 1 8 4 】

【 数 1 3 】

$$\text{始点} : \hat{p}_{hs} = \hat{V}(1:3, \hat{H}(1, m_i)) \quad 20$$

【 0 1 8 5 】

【 数 1 4 】

$$\text{終点} : \hat{p}_{he} = \hat{V}(1:3, \hat{H}(2, m_i))$$

なお、補足すると、 $H(1, m_i)$  は、ハーフエッジの始点  $p^{\wedge}_{hs}$  の頂点番号、 $H(2, m_i)$  は、ハーフエッジの終点  $p^{\wedge}_{he}$  の頂点番号のを意味する。また、 $V^{\wedge}(1:3, i)$  は、頂点番号  $i$  の頂点の位置ベクトル（ $x_i, y_i, z_i$ ）座標を意味する。

【 0 1 8 6 】

また、ノード  $i$  は、ハーフエッジの始点と終点を  $u_i : (1 - u_i)$  に内分する点に相当する。このため、ノード  $i$  の位置ベクトル  $p^{\wedge}_i = [x_i, y_i, z_i]^T$  を、位置ベクトル  $p^{\wedge}_{hs}$ 、位置ベクトル  $p^{\wedge}_{he}$ 、及び変数  $u_i$  を用いて、数 1 5 のように、算出することができる。

【 0 1 8 7 】

【 数 1 5 】

$$\hat{p}_i = (1 - u_i) \hat{p}_{hs} + u_i \hat{p}_{he} \quad 40$$

次に、ノード  $i$  とノード  $i + 1$  との間に作用する張力を算出する。

【 0 1 8 8 】

まず、弾性索  $i$  の長さ  $l_i$  を、ベクトル  $p^{\wedge}_i$  及び  $p^{\wedge}_{i+1}$  を用いて、数 1 6 のように表すことができる。

【 0 1 8 9 】

【 数 1 6 】

$$l_i = |\hat{p}_{i+1} - \hat{p}_i|$$

弾性索全体の自然長を  $L_0$  とし、弾性索  $i$  の自然長  $L_i$  を、数 1 7 のように表すことができる。

【 0 1 9 0 】

【 数 1 7 】

$$L_i = L_0 (v_{i+1} - v_i)$$

数 1 6 及び数 1 7 より、弾性索  $i$  の縦歪み  $\varepsilon_i$  を、数 1 8 のように表すことができる。

【 0 1 9 1 】

【 数 1 8 】

$$\varepsilon_i = \frac{l_i - L_i}{L_i}$$

10

ここで、縦歪みと張力の関係を示す近似式を以下に示すような数 1 9 ~ 数 2 1 とする。

【 0 1 9 2 】

【 数 1 9 】

$$F(\varepsilon) = 0 \cdots (\varepsilon < 0)$$

【 0 1 9 3 】

【 数 2 0 】

$$F(\varepsilon) = \sum_{i=1}^5 (a_i \varepsilon^i) \cdots (0 \leq \varepsilon \leq 1)$$

20

【 0 1 9 4 】

【 数 2 1 】

$$F(\varepsilon) = \sum_{i=1}^5 (i \cdot a_i) \varepsilon - \sum_{i=1}^5 (i \cdot a_i) + \sum_{i=1}^5 a_i \cdots (1 < \varepsilon)$$

そして、数 1 9 ~ 数 2 1 に、数 1 8 のように表された縦歪みを代入することによって、張力を算出することができる。弾性索  $i$  が、ノード  $i$  に印加する張力  $t_{i,i}$  の大きさ  $t_{i,i}$  は、数 2 2 ~ 2 4 のように表すことができる。なお、数 2 0 及び数 2 1 における係数  $a_i$  については、引張試験機等を用いて、各弾性索の張力と歪みとの関係を計測することによって計測する。

30

【 0 1 9 5 】

【 数 2 2 】

$$t_{i,i} = 0 \cdots (\varepsilon_i < 0)$$

【 0 1 9 6 】

【 数 2 3 】

$$t_{i,i} = \sum_{k=1}^5 (a_k \varepsilon_i^k) \cdots (0 \leq \varepsilon_i \leq 1)$$

【 0 1 9 7 】

【 数 2 4 】

$$t_{i,i} = \sum_{k=1}^5 (ka_k) \varepsilon_i - \sum_{k=1}^5 (ka_k) + \sum_{k=1}^5 a_k \cdots (1 < \varepsilon_i)$$

40

また、張力の方向は、弾性索の方向と一致しているため、張力ベクトル  $t_{i,i}$  は、ベクトル  $p_{i,i}$ 、 $p_{i,i+1}$  及び張力ベクトル  $t_{i,i}$  を用いて、数 2 5 のように表すことができる。

【 0 1 9 8 】

【数 2 5】

$$\hat{t}_{i,j} = t_{i,j} \frac{\hat{p}_{i+1} - \hat{p}_i}{|\hat{p}_{i+1} - \hat{p}_i|}$$

さらに、弾性索  $i$  は、ノード  $i + 1$  にも逆向きの力  $t \wedge (\text{ハット})_{i, i+1}$  を加えているため、数 2 6 のような関係が成り立つ。

【0 1 9 9】

【数 2 6】

$$\hat{t}_{i,i+1} = -\hat{t}_{i,i}$$

以後、 $t \wedge (\text{ハット})_{i, i}$  は  $t \wedge (\text{ハット})_i$  と表記する。

【0 2 0 0】

以上の数式を用いて、各ノード  $i$  に作用する摩擦力、3 変数  $m_i$  (ハーフエッジの番号)、 $u_i$  (ハーフエッジ上のノード  $i$  の位置座標)、 $v_i$  (弾性索の自然長を基準としたノード  $i$  の位置座標) を算出することによって、弾性索の状態を表現することができる。

【0 2 0 1】

次に、第 5 の実施形態に用いられる弾性索の移動を解析 (シミュレーション) について説明する。

【0 2 0 2】

前述のように、行列  $V \wedge (\text{ハット})$ 、行列  $H \wedge (\text{ハット})$ 、及び行列  $F \wedge (\text{ハット})$  は、オブジェクトのポリゴンデータの情報を示す。行列  $V \wedge (\text{ハット})$  の  $m$  行  $n$  列目の要素については、例えば、スカラー量である  $V(m, n)$  のように表記する。行列  $H \wedge (\text{ハット})$ 、行列  $F \wedge (\text{ハット})$  の  $m$  行  $n$  列目の要素についても、同様に表記する。なお、 $(1 \sim m)$  行  $n$  列目のように複数の要素からなる行列を表現する場合には、 $V \wedge (\text{ハット})(1 : m, n)$  のように表記する。

【0 2 0 3】

なお、最終行と最終列の番号は「end」と表記する。

【0 2 0 4】

以下、弾性索の移動を解析 (シミュレーション) に使用する変数を定義する。

【0 2 0 5】

$j$  : 弾性索の端点配置番号

$i$  : ノード番号

$L_0$  : 弾性索全体の自然長 (張力がかからない弾性索全長)

$\mu$  : 弾性索とオブジェクトとの間の摩擦係数

$m_i$  : ノード  $i$  が乗るハーフエッジ番号

$u_i$  : ハーフエッジ上におけるノード  $i$  の位置座標

$v_i$  : 自然長の弾性索上におけるノード  $i$  位置座標

$\gamma_i$  : ノード  $i$  の滑り判定指数 ( $\gamma_i = |f \wedge (\text{ハット})_i| - \mu |N \wedge (\text{ハット})_i|$  ( $\gamma_i > 0 \dots$  滑る、 $\gamma_i \leq 0 \dots$  滑らない))

$\hat{p}_i$  : ノード  $i$  の位置ベクトル  $\dots$  位置ベクトル  $\hat{p}_i = [x_i, y_i, z_i]^T$

$\hat{p}_{1-plan}$  : 弾性索の端点  $\hat{p}_1$  の移動計画

$$\hat{p}_{1-plan} = [\hat{p}_{1-1}, \hat{p}_{1-2}, \dots, \hat{p}_{1-j}, \dots]$$

$j = 1, 2, 3, \dots$  と移動させることによって、各配置における弾性索形状を決定する」

10

20

30

40

「 $\hat{p}_{end-plan}$  : 弾性索の端点 $\hat{p}_{end}$ の移動計画

$$\hat{p}_{end-plan} = [\hat{p}_{end-1}, \hat{p}_{end-2}, \dots, \hat{p}_{end-j}, \dots]$$

j = 1, 2, 3, ... と移動させることによって、各配置における弾性索形状を決定する」

$E \wedge (\text{ハット})_i$  : ノード i における局所座標系

$$\hat{E}_i = [\hat{e}_{i,1}, \hat{e}_{i,2}, \hat{e}_{i,3}]$$

$t \wedge (\text{ハット})_i$  : 弾性索 i がノード i に加える張力

$T \wedge (\text{ハット})_i$  : ノード i に加わる張力の合力

10

$$\hat{T}_i = \hat{t}_i + (-\hat{t}_{i-1})$$

$N \wedge (\text{ハット})_i$  : ノード i に加わる垂直抗力

$f \wedge (\text{ハット})_i$  :  $T \wedge (\text{ハット})_i$  をノード i における接平面へ投影したベクトル

$|f \wedge (\text{ハット})_i|$  が最大静止摩擦係数  $\mu |N \wedge (\text{ハット})_i|$  を超えれば、ノード i は滑る

次に、弾性索の端点配置 j における、弾性索の形状を解析（決定）する手順（1）～（10）を以下に示す。

20

【0206】

（1）ノードの生成及び削除に関して、弾性索の端点を前の配置 j - 1 から、配置 j へ移動した結果、弾性索がオブジェクトの辺に、新しく接触する場合は、ノードを追加する。また、弾性索がオブジェクトの辺から離れる場合は、ノードを削除する。

【0207】

（2）弾性索データである  $m_i$ （ハーフエッジの番号）、 $u_i$ （ハーフエッジ上のノード i の位置座標）、 $v_i$ （弾性索の自然長を基準とした位置座標）に基づいて、ノード位置  $p \wedge (\text{ハット})_i$  及び弾性索の張力  $t \wedge (\text{ハット})_i$  を算出する。

【0208】

（3）各ノードに作用する張力の合力  $T \wedge (\text{ハット})_i$ 、垂直抗力  $N \wedge (\text{ハット})_i$ 、最大静止摩擦係数  $\mu |N \wedge (\text{ハット})_i|$  を算出する。

30

【0209】

（4）判定指数  $\gamma_i$  の符号に基づいて、ノードが滑るか否かを判定する。

【0210】

（5）滑るノードに関しては、ノードは判定指数  $\gamma_i$  に比例した距離に応じて、張力のベクトル  $T \wedge (\text{ハット})_i$  の方向へ移動すると仮定する。

【0211】

（6）ノードの移動量を変換することによって、弾性索の変数  $u_i$ （ハーフエッジ上のノード i の位置座標）、 $v_i$ （弾性索の自然長を基準としたノード i の位置座標）の変化量を算出する。

40

【0212】

（7）更新された  $u_i$ 、及び  $v_i$  に基づいて、ノードがハーフエッジの端点に到達する場合は、その頂点を越えた別のハーフエッジにノードが移動する。

【0213】

（8）更新された  $u_i$ 、及び  $v_i$  に基づいて、ノードを移動し、手順（1）に戻る。

【0214】

（9）手順（1）～（7）を繰り返す。全ノードが滑らなくなったならば、端点配置 j における弾性索形状の計算を終了し、計算結果を保存する。

【0215】

（10）端点を次の配置 j + 1 に移動される。手順（1）に戻る。

50

## 【 0 2 1 6 】

手順 ( 2 ) ~ ( 6 ) までのメインプログラムは、ノードがオブジェクトの辺上を移動する「辺上移動」のアルゴリズムである。

## 【 0 2 1 7 】

なお、辺上移動のフローから外れる特殊現象を処理する場合は、それぞれサブプログラム ( サブルーチン ) で処理される。具体的には、移動する弾性索が、新しくオブジェクトの辺に接触することを「着辺」と呼び、オブジェクトの辺から離れることを「離辺」と呼ぶ。着辺及び離辺は、手順 ( 1 ) が対応する。ノードがハーフエッジの端に到達した後、頂点を越えて次のハーフエッジに移動する「頂点越え」は、手順 ( 7 ) として示した。

## 【 0 2 1 8 】

まず、メインプログラムである「辺上移動」のアルゴリズムについて、説明する。ここで、滑り判定指数  $\mu_i$  を算出する方法を、順番に説明する。

## 【 0 2 1 9 】

まず、数 1 5 に基づいて、ノードの位置  $p^{\wedge}(ハット)_i$  と数 2 2 ~ 2 4 に基づいて、弾性索  $i$  の張力  $T^{\wedge}(ハット)_i$  を算出する。ノードには、弾性索  $i$  と弾性索  $i - 1$  から張力が作用する。張力の合力ベクトル  $T^{\wedge}(ハット)_i$  は、以下に示すような数 2 7 ~ 2 9 を用いて、垂直抗力方向と摩擦力方向に分解することができる。最初のノード、すなわちノード番号が 1 の場合は、数 2 7 のように張力ベクトル  $T^{\wedge}(ハット)_i$  を表すことができる。ノード番号が 2 ~ ( end - 1 ) の場合は、数 2 8 のように張力ベクトル  $T^{\wedge}(ハット)_i$  を表すことができる。最後のノード、すなわちノード番号が end の場合は、数 2 9 のように張力ベクトル  $T^{\wedge}(ハット)_i$  を表すことができる。

## 【 0 2 2 0 】

## 【 数 2 7 】

$$\hat{T}_i = \hat{t}_i \cdot \cdot \cdot (i=1)$$

## 【 0 2 2 1 】

## 【 数 2 8 】

$$\hat{T}_i = \hat{t}_i + (-\hat{t}_{i-1}) \cdot \cdot \cdot (i=2 \sim end-1)$$

## 【 0 2 2 2 】

## 【 数 2 9 】

$$\hat{T}_i = -\hat{t}_{i-1} \cdot \cdot \cdot (i=end)$$

張力ベクトル  $T^{\wedge}(ハット)_i$  を分解する方向を示す局所座標系

$$\hat{E}_i = [\hat{e}_{i,1}, \hat{e}_{i,2}, \hat{e}_{i,3}]$$

は、 $e^{\wedge}(ハット)_{i,1}$ ,  $e^{\wedge}(ハット)_{i,2}$ ,  $e^{\wedge}(ハット)_{i,3}$  の順に以下のように決定する。

## 【 0 2 2 3 】

まず、 $e^{\wedge}(ハット)_{i,1}$  は、ノード  $i$  が乗っているハーフエッジの方向とする。そして、数 1 3 及び数 1 4 で表したハーフエッジの始点と終点の位置ベクトル  $p^{\wedge}(ハット)_{hs}$  及び  $p^{\wedge}(ハット)_{he}$  を用いて、数 3 0 のように表すことができる。

## 【 0 2 2 4 】

## 【 数 3 0 】

$$\hat{e}_{i,1} = \frac{\hat{p}_{he} - \hat{p}_{hs}}{|\hat{p}_{he} - \hat{p}_{hs}|}$$

また、 $e^{\wedge}(ハット)_{i,3}$  に関しては、 $e^{\wedge}(ハット)_{i,1}$  と弾性索  $i - 1$  で張られた面と、 $e^{\wedge}(ハット)_{i,1}$  と弾性索  $i$  で張られた面との 2 面を想定する。それぞれの単位法

10

20

30

40

50

ベクトル  $\hat{n}_{i,i-1}$  及び  $\hat{n}_{i,i}$  は、それぞれ以下の数 3 1 及び数 3 2 のように表すことができる。

【 0 2 2 5 】

【 数 3 1 】

$$\hat{n}_{i,i-1} = \frac{\hat{e}_{i,1} \times (\hat{p}_i - \hat{p}_{i-1})}{|\hat{e}_{i,1} \times (\hat{p}_i - \hat{p}_{i-1})|}$$

【 0 2 2 6 】

【 数 3 2 】

$$\hat{n}_{i,i} = \frac{\hat{e}_{i,1} \times (\hat{p}_{i+1} - \hat{p}_i)}{|\hat{e}_{i,1} \times (\hat{p}_{i+1} - \hat{p}_i)|}$$

10

この 2 面の間に対応する面を、ノード  $i$  におけるオブジェクトの接平面  $S_n$  とする。接平面  $S_n$  の法ベクトルを  $\hat{e}_{i,3}$  とする。

【 0 2 2 7 】

したがって、数 3 3 が示すようにベクトル  $\hat{n}_{i,i-1}$  及び  $\hat{n}_{i,i}$  の合成ベクトル方向が、 $\hat{e}_{i,3}$  の方向である。

【 0 2 2 8 】

【 数 3 3 】

20

$$\hat{e}_{i,3} = \frac{\hat{n}_{i,i-1} + \hat{n}_{i,i}}{|\hat{n}_{i,i-1} + \hat{n}_{i,i}|}$$

また、 $\hat{e}_{i,2}$  については、数 3 4 に示すように、 $\hat{e}_{i,1}$  及び  $\hat{e}_{i,3}$  に直交する方向として表すことができる。

【 0 2 2 9 】

【 数 3 4 】

$$\hat{e}_{i,2} = \hat{e}_{i,3} \times \hat{e}_{i,1}$$

30

次に、張力ベクトル  $\hat{T}_i$  の  $\hat{e}_{i,3}$  方向成分の力が、垂直抗力と釣り合うため、垂直抗力は数 3 5 として表すことができる。

【 0 2 3 0 】

【 数 3 5 】

$$\hat{N}_i = -(\hat{T}_i \cdot \hat{e}_{i,3}) \hat{e}_{i,3}$$

そして、分解された  $\hat{T}_i$  のもう一方の成分  $\hat{f}_i$  は、 $\hat{e}_{i,1}$  及び  $\hat{e}_{i,2}$  で表される接平面内に存在しているため、以下に示す数 3 6 で表される。

【 0 2 3 1 】

【 数 3 6 】

40

$$\hat{f}_i = (\hat{T}_i \cdot \hat{e}_{i,1}) \hat{e}_{i,1} + (\hat{T}_i \cdot \hat{e}_{i,2}) \hat{e}_{i,2}$$

以上のように計算した結果、滑り判定指数  $\eta_i$  は、以下の数 3 7 のように表すことができる。

【 0 2 3 2 】

【 数 3 7 】

$$\eta_i = |\hat{f}_i| - \mu |\hat{N}_i|$$

滑り判定指数  $\eta_i$  が、0 以下 ( $\eta_i < 0$ ) であるならば、注目するノード  $i$  を滑らせよう

50

とする力の大きさ  $|\hat{f}_i|$  が、最大静止摩擦力の大きさ  $\mu |N^{\wedge}(\text{ハット})_i|$  以下であるため、ノード  $i$  は滑らないと判断することができる。そして、この判断によって、滑り移動の処理は行われぬ。

【0233】

一方、滑り判定指数  $\delta_i$  が、0 を越える ( $\delta_i > 0$ ) ならば、注目するノード  $i$  を滑らせようとする力の大きさ  $|\hat{f}_i|$  が、最大静止摩擦力の大きさ  $\mu |N^{\wedge}(\text{ハット})_i|$  を越えるため、ノード  $i$  は滑ると判断することができる。そして、この判断によって、滑り移動の処理は行う。

【0234】

次に、滑り移動の処理について説明する。滑り移動の処理は、注目するノード  $i$  を接平面内で仮想的に移動するものとする。

10

【0235】

そこで、注目するノード  $i$  の仮想的な移動ベクトル  $\hat{\delta}_i$  を算出し、 $\hat{\delta}_i$  に基づいて、変数  $v_i$  (弾性索の自然長を基準とした位置座標) の変化量  $\Delta v_i$  を算出する。

【0236】

ノード  $i$  の仮想的な移動を示すベクトル  $\hat{\delta}_i$  を図35に示す。ベクトル  $\hat{\delta}_i$  は、 $\hat{f}_i$  と平行な大きさ  $\delta_i$  のベクトルで、以下に示す数38のように表すことができる。なお、 $\delta_i$  は、繰り返し計算におけるステップ幅である。

20

【0237】

【数38】

$$\Delta \hat{\delta}_i = \alpha \eta_i \frac{\hat{f}_i}{|\hat{f}_i|}$$

ベクトル  $\hat{\delta}_i$  については、 $e^{\wedge}(\text{ハット})_{i,1}$  方向の大きさを  $\delta_{i,1}$ 、 $e^{\wedge}(\text{ハット})_{i,2}$  方向の大きさを  $\delta_{i,2}$  とし、それぞれ数39及び数40のように表すことができる。

【0238】

【数39】

$$\Delta \delta_{i,1} = \Delta \hat{\delta}_i \cdot \hat{e}_{i,1}$$

30

【0239】

【数40】

$$\Delta \delta_{i,2} = \Delta \hat{\delta}_i \cdot \hat{e}_{i,2}$$

$\delta_{i,1}$  は、ノード  $i$  が乗るハーフエッジに沿った方向に移動した量である。ノード  $i$  がハーフエッジ上を  $\delta_{i,1}$  分移動した場合、変数  $u_i$  (ハーフエッジ上のノード  $i$  の位置座標) の変化量  $\Delta u_i$  との間に、以下の数41のような関係が成立する。

【0240】

【数41】

$$\Delta \delta_{i,1} = H(7, m_i) \Delta u_i$$

40

数41における  $H(7, m_i)$  は、前述のように、ノード  $i$  が乗るハーフエッジの長さを示す。数41を変形することによって、変化量  $\Delta u_i$  は、数42のように表すことができる。

【0241】



【数 4 2】

$$\Delta u_i = \frac{\Delta \delta_{i,1}}{H(7, m_i)}$$

続いて、 $\hat{p}_{i,2}$ に基づいて、変数  $v_i$ （弾性索の自然長を基準としたノード  $i$  の位置座標）の変化量  $\Delta v_i$  を算出する。

【0 2 4 2】

ここで、図 3 6 に、弾性索の伸縮（伸張）に関する概念図を示す。図 3 6 によれば、 $\hat{p}_{i,2} = 0$  且つ  $\hat{p}_{i+1,2} = 0$  の場合、弾性索  $i$  は引き伸ばされる。引き伸ばされた弾性索  $i$  の長さは、数 4 3 のように表される。

【0 2 4 3】

【数 4 3】

$$|\hat{p}_i - \hat{p}_{i+1}| = |\Delta \delta_{i,2}| + |\hat{p}_i - \hat{p}_{i+1}| + |\Delta \delta_{i+1,2}|$$

なお、弾性索  $i$  と弾性索  $i'$  とでは、両端の変数  $v$  は、変化しない。このため、 $\hat{p}^{\wedge}$ （ハット） $'_i$  においては  $v_i$ 、また  $\hat{p}^{\wedge}$ （ハット） $'_{i+1}$  においては  $v_{i+1}$  である。

【0 2 4 4】

したがって、 $v_i \sim v_{i+1}$  を

$$|\Delta \delta_{i,2}| : (|\hat{p}_i - \hat{p}_{i+1}| + |\Delta \delta_{i+1,2}|)$$

の比で内分した値が、ノード移動後の新しい  $v'_i$  である。その  $v'_i$  は、数 4 4 のように表すことができる。

【0 2 4 5】

【数 4 4】

$$v'_i = v_i + \frac{|\Delta \delta_{i,2}|}{|\Delta \delta_{i,2}| + |\hat{p}_i - \hat{p}_{i+1}| + |\Delta \delta_{i+1,2}|} (v_{i+1} - v_i)$$

また、 $v_i \sim v_{i+1}$  を

$$(|\Delta \delta_{i,2}| + |\hat{p}_i - \hat{p}_{i+1}|) : |\Delta \delta_{i+1,2}|$$

の比で内分した値が、移動後の新しい  $v'_{i+1}$  である。その  $v'_{i+1}$  は、数 4 5 のように表すことができる。

【0 2 4 6】

【数 4 5】

$$v'_{i+1} = v_{i+1} + \frac{|\Delta \delta_{i+1,2}|}{|\Delta \delta_{i,2}| + |\hat{p}_i - \hat{p}_{i+1}| + |\Delta \delta_{i+1,2}|} (v_{i+1} - v_i)$$

そして、 $v'_i$ 、及び  $v'_{i+1}$  は、

$$v'_i, v'_{i+1}, \Delta \delta_{i,2}, \Delta \delta_{i+1,2}, \hat{p}_i, \text{ 及び } \hat{p}_{i+1}$$

を用いて、それぞれ数 4 6 及び数 4 7 のように表すことができる。

【0 2 4 7】

【数 4 6】

$$\Delta v_i = \frac{|\Delta \delta_{i+1,2}|}{|\Delta \delta_{i,2}| + |\hat{p}_i - \hat{p}_{i+1}| + |\Delta \delta_{i+1,2}|} (v_{i+1} - v_i)$$

【0 2 4 8】

10

20

30

40

【数 4 7】

$$\Delta v_{i+1} = -\frac{|\Delta\delta_{i+1,2}|}{|\Delta\delta_{i,2}| + |\hat{p}_i - \hat{p}_{i+1}| + |\Delta\delta_{i+1,2}|} (v_{i+1} - v_i)$$

ここで、数 4 7 - 数 4 6 を演算することによって、 $v'_{i+1} - v'_i$  を解くと、数 4 8 のように表すことができる。さらに、 $v'_{i+1} - v'_i$  は、数 4 8 を整理することによって、数 4 9 のように表すことができる。

【0 2 4 9】

【数 4 8】

$$v_{i+1}' - v_i' = (v_{i+1} - v_i) - \frac{|\Delta\delta_{i,2}| + |\Delta\delta_{i+1,2}|}{|\Delta\delta_{i,2}| + |\hat{p}_i - \hat{p}_{i+1}| + |\Delta\delta_{i+1,2}|} (v_{i+1} - v_i)$$

10

【0 2 5 0】

【数 4 9】

$$v_{i+1}' - v_i' = \frac{|\hat{p}_i - \hat{p}_{i+1}|}{|\Delta\delta_{i,2}| + |\hat{p}_i - \hat{p}_{i+1}| + |\Delta\delta_{i+1,2}|} (v_{i+1} - v_i)$$

さらに、 $v'_{i+1} - v'_i$  を

$$\Delta\delta_{i,2}, \Delta\delta_{i+1,2}, \hat{p}_i, \text{ 及び } \hat{p}_{i+1}$$

20

を用いて、表すことができるが、変数  $v$  が昇順であることを考慮すると、 $v_{i+1} - v_i$  は、0 未満の値を取ることは許されない。すなわち、 $v'_{i+1} - v'_i$  は、0 以上であり、「変数  $v$  が昇順である」という条件を保障できる。

【0 2 5 1】

一方、 $0 < \delta_{i,2}$  又は  $\delta_{i,2} < 0$  である場合、外分を用いて  $v'_{i+1} - v'_i$  を解くと、数 5 0 のようになる。そして、数 5 0 を整理することによって、 $v'_{i+1} - v'_i$  を、数 5 1 のように表すことができる。

【0 2 5 2】

【数 5 0】

$$v_{i+1}' - v_i' = \frac{|\hat{p}_i - \hat{p}_{i+1}|}{-\Delta\delta_{i,2} + |\hat{p}_i - \hat{p}_{i+1}| + |\Delta\delta_{i+1,2}|} (v_{i+1} - v_i)$$

30

【0 2 5 3】

【数 5 1】

$$v_{i+1}' - v_i' = \frac{1}{1 - \frac{\Delta\delta_{i,2} - \Delta\delta_{i+1,2}}{|\hat{p}_i - \hat{p}_{i+1}|}} (v_{i+1} - v_i)$$

そして、数 5 1 において、

$$(\Delta\delta_{i,2} - \Delta\delta_{i+1,2}) / |\hat{p}_i - \hat{p}_{i+1}|$$

40

は、1 より大きくなり得る。このため、 $v'_{i+1} - v'_i$  は、0 未満になり得る。よって、「変数  $v$  が昇順である」という条件を保証できない。そのため、 $0 < \delta_{i,2}$  又は  $\delta_{i,2} < 0$  である場合、このような手法は適切ではない。

【0 2 5 4】

しかし、「 $\delta_{i,2} \geq 0$  且つ  $\delta_{i+1,2} \geq 0$ 」を満たす場合、数 4 4 ~ 4 7 を用いて、すべての  $v_i$  を解くことができる。

【0 2 5 5】

以上の事項から、弾性索  $i$  が、計算可能条件である「 $\delta_{i,2} \geq 0$  且つ  $\delta_{i+1,2} \geq 0$ 」を満たす弾性索  $i$  は必ず存在する。その弾性索  $i$  において、数 4 4 ~ 4 5 によって更新さ

50

れたノードは、 $v_{i,2} = 0$  とみなすことができる。  
したがって、すべての  $v_i$  を解くことができる。

【0256】

以上の説明を踏まえて、弾性索の滑りを判定し、弾性索が辺上を移動する動きをシミュレートするためのフローチャートを図37に示す。

【0257】

まず、制御部6は、弾性索データ ( $m_i, u_i, v_i$ ) に基づいて、ノード位置  $p^{\wedge}(\text{ハット})_i$  を算出する(ステップS60)。

【0258】

次に、変数  $m_i$  及びノード  $i$  の位置ベクトル  $p^{\wedge}(\text{ハット})_i$  に基づいて、局所座標系  $E^{\wedge}(\text{ハット})_i$  を決定し、弾性索の張力ベクトル  $t^{\wedge}(\text{ハット})_i$  を算出する(ステップS61)。

10

【0259】

さらに、制御部56は、ノード  $i$  に加わる垂直抗力ベクトル  $N^{\wedge}(\text{ハット})_i$ 、張力ベクトルの合力  $T^{\wedge}(\text{ハット})_i$  をノード  $i$  における接平面へ投影したベクトル  $f^{\wedge}(\text{ハット})_i$  を算出する(ステップS62)。すなわち、各ノード  $i$  に対して作用する張力の合力  $T^{\wedge}(\text{ハット})_i$ 、垂直抗力ベクトル  $N^{\wedge}(\text{ハット})_i$ 、及び張力の合力ベクトル  $T^{\wedge}(\text{ハット})_i$  を接平面へ投影したベクトルを算出する。

【0260】

そして、ノード  $i$  に関して、張力ベクトル  $N^{\wedge}(\text{ハット})_i$ 、ベクトル  $f^{\wedge}(\text{ハット})_i$ 、及び摩擦係数  $\mu$  に基づいて、判定指数  $\alpha_i$  を算出する(ステップS63)。

20

【0261】

ここで、ノード  $i$  の判定指数  $\alpha_i > 0$  であるか否かを判断する(ステップS64)。すなわち、判定指数  $\alpha_i$  に基づいて、ノード  $i$  がオブジェクトの辺を滑るか否かを判断する。

【0262】

ステップS64の判断がNoであるならば、判定指数  $\alpha_i > 0$  のノード  $i$  に対応する変数  $u_i$  及び  $v_i$  の変化量  $\Delta u_i$  及び  $\Delta v_i$  をそれぞれ算出し、変数  $u_i$  及び  $v_i$  を更新する(ステップS65)。すなわち、ノード  $i$  は滑ると判断することによって、滑り移動の処理を行う。具体的には、滑ると判断されたノード  $i$  に関して、判定指数  $\alpha_i$  に比例した量に応じて、張力の合力  $T^{\wedge}(\text{ハット})_i$  の方向へ移動する。そして、後述する「頂点越え」の処理を行う(ステップS66)。ステップS66の処理後、ステップS60に戻る。変数  $u_i$  及び変数  $v_i$  を更新することにより、ノードがハーフエッジの端点に到達した場合には、その頂点を越えた別の(隣接する次の)ハーフエッジに、そのノードをハーフエッジに移動し、移し替える。

30

【0263】

また、ステップS64の判断がYesであるならば、各ノード  $i$  の弾性索データ ( $m_i, u_i, v_i$ ) を記録する(ステップS67)。すなわち、全ノードが滑らない状態となるまで、ステップS60～ステップS66までの処理を繰り返し、端点配置  $j$  における弾性索の形状計算を終了し、形状を記録する。

【0264】

このようにして、ステップS67の後、制御部56は、弾性索の端点配置  $j$  が最後であるか否かを判断する(ステップS68)。

40

【0265】

ステップS68の判断がYesであるならば、辺上移動の処理を終了する。

【0266】

ステップS68の判断がNoであるならば、端点配置  $j+1$  を移動する(ステップS69)。弾性索の端点を次の端点配置  $j+1$  の位置に移動(変更)する。具体的には、弾性索の端点を前の配置  $j-1$  から配置  $j$  へ移動させる。移動後、オブジェクトに弾性索が接触して生成された新規のノードが追加される。逆に、弾性索がオブジェクトの辺から離れたノードは削除される。

50

## 【0267】

続いて、着辺又は離辺する処理を行う（ステップS70）。ステップS70の処理後、ステップS60に戻る。なお、辺上移動の基本的なフローから逸脱する現象は、特殊現象として扱われる。それらは、それぞれサブプログラム（サブルーチン）として処理される。移動する弾性索が新規にオブジェクトの辺に接触する現象が「着辺」である。逆に、弾性索がオブジェクトの辺から離れる現象が「離辺」である。また、オブジェクトの頂点を越えた別のハーフエッジへ乗り移る現象が「頂点越え」である。

## 【0268】

凹部を有さないオブジェクトにおける弾性索の着辺及び離辺が発生する箇所を説明する。弾性索の一方の端点、他方の端点を、それぞれノード1、ノードendと設定する。結果的に、オブジェクトが凹部を有さない凸多面体である場合、弾性索の着辺及び離辺が発生する範囲は、弾性索 $i$  ( $i = 2 \sim \text{end} - 2$ )に限られる。モデル化した弾性索は、一方の端点からもう一方（他方）の端点まで、オブジェクトの辺に配置されたノードは、すべてオブジェクト表面上の点（オブジェクトの辺）に存在する点である。また、凸多面体の性質として、「凸多面体の表面の任意の2点を結んだ線分は、すべてこの凸多面体の内部に存在する」ことは、明らかであるからである。したがって、弾性索 $i$  ( $i = 2 \sim \text{end} - 2$ )は、すべてオブジェクトの表面に存在し、弾性索 $i$ の浮遊部は存在しない。そして、浮遊部になる弾性索は、オブジェクトの外に存在するノード、すなわちノード1及びノードend（ノード $i$  ( $i=1, \text{end}$ ))である弾性索 $i$  ( $i=1, \text{end}-1$ )に限られる。

## 【0269】

次に、12本の弾性索の集合によるポリゴンデータのオブジェクトを拘束し、把持するシミュレーションを説明する。シミュレーションの条件は、表8に示すとおりである。

## 【0270】

## 【表8】

自然長	200mm	
弾性索本数	12本	
上側支持部	$z=60[\text{mm}]$	半径=105mm
下側支持部	$z=-60[\text{mm}]$	半径=105mm
動作	① 下側支持部を180度回転 ②弾性索の集合を+z方向へ変位	

続いて、オブジェクトを把持する様子を図38～39に示す。

## 【0271】

また、把持装置50の弾性索52の集合が並列して上下の支持部（円環）52a及び52bを繋いで形成された把持空間Hに、ポリゴン形状のオブジェクトが配置された初期状態を図38に示す。

## 【0272】

そして、支持部12本の弾性索52の集合で形成された把持空間Hが、下側の支持部52bが回転させることによって、くびれ部を徐々に狭くしていく様子を図38～図41に示す。図38～図41には、弾性索52の集合がオブジェクトを包み込み、また巻き付いていく様子が示されている。図40では、下側の支持部52bが上側の支持部52aに対して、180度回転した状態で把持動作を終えていることが示されている。また、図40では、巻き付きが完了した様子を示している。さらに、図41では、図40の状態から装置を上方へ変位させ、オブジェクトを持ち上げようとする様子を示している。

## 【0273】

次に、本発明の第5の実施形態に係る把持装置50がポリゴン形状のオブジェクトを把持する実例を示す。まず、把持装置50の把持部58の外観を図42に示す。図42に示すように、支持部53a及び53bは、アクリル円環で作製されている。アクリル円環に10°毎に孔が開けられている。

## 【0274】

また、各孔の位置に各弾性索 5 2 の端部を固定することができるように構成されている。この構成によって、弾性索 5 2 の端部を半径 1 0 5 m m の円の上に配置することができる。図 4 2 が示すように、上側及び下側の支持部 5 3 a 及び 5 3 b は、回転する回転部 5 5 に固定されている。

【 0 2 7 5 】

そして、回転部 5 5 が回転することによって、2つの円環状の支持部 5 3 a 及び 5 3 b は、相対的な角度で限定された回転運動をすることができる。図 4 3 ~ 図 4 5 に示すように、2つの支持部 5 3 a 及び 5 3 b が相対的な角度で回転することによって、把持空間のくびれ部の内径を小さくするように制御することができる。なお、くびれ部は、白点線の円で表す。

10

【 0 2 7 6 】

そして、図 4 6 は、シャープペンシルの芯のようなオブジェクトを容易に把持する様子を示す図である。

【 0 2 7 7 】

次に、支持軸を配してポリゴン化した球体のオブジェクトを図 4 7 に示す。

【 0 2 7 8 】

また、図 4 8 は、本実施形態に係る把持装置 5 0 を用いて、オブジェクトとして、支持軸を配してポリゴン化した球体を把持する様子を示している。

【 0 2 7 9 】

把持装置 5 0 は、図 4 8 に示すように、弾性索 5 2 を、オブジェクトを安定して把持できる回転角度まで回転させる。そして、制御部 5 6 が、把持を確保できる相対的な回転角度まで回転させる役割を果たしている。

20

【 0 2 8 0 】

このため、オブジェクトが、把持空間の中央に配置されている必要はない。そして、オブジェクトが、くびれ部が締まってくれば、適切に把持を行うことができる。

【 0 2 8 1 】

また、把持装置 5 0 では、把持空間がオブジェクトを包み込むことによって、オブジェクトの姿勢（位置又は方向）を制御することができる。このため、図 4 8 に示すように、オブジェクトを把持した状態で、把持装置 5 0 の姿勢を制御する場合にも、オブジェクトが動くことによって、オブジェクトを変形又は破損することを防止することができる。それに加えて、オブジェクトをプレスする際の姿勢や位置の精度を一層向上させることができる。

30

【 0 2 8 2 】

また、把持装置 5 0 では、把持空間がオブジェクトを包み込むことによって、オブジェクトを拘束するため、オブジェクトと弾性索 5 2 の集合とが接触する面積を大きくすることができる。これにより、把持装置 5 0 は、オブジェクトに掛かる把持力（摩擦力）を分散させることができる。

【 0 2 8 3 】

そのため、図 4 8 に示すように、変形し易いオブジェクトであっても、拘束によって、オブジェクトが変形するような、局所的な力がオブジェクトにかかることを防止することができると考えられる。

40

【 0 2 8 4 】

（第 6 の実施形態）

次に、第 6 の実施形態に係る把持装置 6 0 を説明する。

【 0 2 8 5 】

上下の支持部 6 3 a と 6 3 b との間において、より高い自由度の相対運動が出来るために、第 6 の実施形態に係る把持装置 6 0 は、第 1 の実施形態に係る把持装置 1 0 に対して、回転部 5、連結部 7 a 及び 7 b に代えて、パラレルマニピュレータ 6 5 及び回転ステージ 6 9 を備えている点が異なっているが、その他の構成は略同じである。第 1 の実施形態と共通する構成要素については、同一の符号を付し、その説明を省略する。

50

## 【0286】

図49は、第6の実施形態に係る把持装置60の概略構成を示す図である。図49に示すように、第6の実施形態に係る把持装置60は、第1の実施形態に係る把持装置1と同様に、複数の弾性索62（弾性索62の集合）と、一对の支持部63a及び63bと、パラレルマニピュレータ65及び回転ステージ69の駆動制御を行なう制御部66と、を備えているが、支持部3a及び3bを回転運動させる回転部5と、回転部5と支持部3a及び3bとを結合する結合部7a及び7bを、備えていない。

## 【0287】

第6の実施形態に係る把持装置60においては、3組のマニピュレータは、それぞれ支持部63a及び63bの略中心に円周上120度等配するように配置される。各マニピュレータ65は、回転アクチュエータ65a、リンク65b、回転対偶65c、リンク65d、及び球対偶65eから構成されている。

10

## 【0288】

図49に示すように、リンク65bの一方の基端は、回転アクチュエータ65aに接続される。リンク65bの他方の基端は、回転対偶65cに接続される。リンク65dの一方の基端は、球対偶65eに接続される。制御部66は、支持部3a及び3bの上に配置された3組の回転アクチュエータ65aのそれぞれに、動作指令値を与える。

## 【0289】

それによって、各リンク65bを回転アクチュエータ65aの回転軸まわりに揺動させることができる。

20

## 【0290】

また、3組のリンク65bの揺動状態を組み合わせることにより、3組のリンク65dと3組の球対偶65eで連結された支持部63aを3次的に位置制御することができる。このとき、3組の回転対偶65c及び球対偶65eの拘束によって、支持部63aと63bとの相対的変位を制御することができる。

## 【0291】

さらに、第6の実施形態に係る把持装置60においては、支持部63aの上に、回転ステージ部69を搭載することにより、支持部63aと支持部63bとの相対的角度を0～360°まで回転させることができる。

## 【0292】

また、回転ステージ部69は、支え部69a、及びステージ部69cで構成されている。そして、支え部69aは、モータ回転部69bと支持部63aとの位置関係を固定するように配設されている。モータ回転部69bから突出したモータ回転軸69b'の軸方向と、ステージ部69cの面に垂直となるように、ステージ部69cは、モータ回転軸69b'に配設され固定される。

30

## 【0293】

制御部66は、モータ回転部69bのステージ部69cが所定の回転角度まで回転するように、モータ回転部69bに動作指令値を出力する。

## 【0294】

したがって、回転ステージ部69を用いた支持部63a及び63bの回転に加え、マニピュレータ65を用いた支持部63a及び63bの相対的変位を制御することによって、弾性索62の集合によって形成された空間は、変形することができる。

40

## 【0295】

その結果、把持装置60では、把持装置1以上に、把持空間を自由に変形することができるという格別の効果が得られる。

## 【0296】

以上、実施例を用いて本発明の実施形態について説明したが、本発明は上記実施例に何ら限定されるものではなく、本発明の要旨を逸脱しない範囲内において、様々な変更をなし得ることはいうまでもない。

## 【0297】

50

例えば、本発明の実施形態に係る把持方法及び装置において、弾性索とオブジェクトとの接触点の位置を制御し、オブジェクトを幾何学的に拘束する把持方式（フォームクロージャ）、弾性索とオブジェクトとの接触点から加えられる力を制御して、オブジェクトに作用する力をつり合わせることによって拘束する把持方式（フォースクロージャ）のいずれを用いて、オブジェクトを把持するようにしても良い。

【0298】

また、第1の実施形態に係る把持装置1において、弾性索2の材料として、天然ゴム及びラバーバンドを例に挙げたが、これに限られることはない。弾性索2の材料は、弾性を有する紐状物体（弾性体の紐又はバンド）であれば良く、金属製、樹脂製等でも良く、材料は限定されない。例えば、弾性索2として、金属性のバネ等を採用しても良い。さらに、弾性索2に代えて、弾性を有する網（ネット）又は膜を用いても良い。

10

【0299】

さらに、第1の実施形態に係る把持装置1において、支持部3a、3bが、互いに逆向きに回転して、弾性索2の集合によって形成された把持空間は、変形する例を挙げたが、支持部3a、3bの一方を固定し、他方を回転させて弾性索2の集合によって形成された把持空間は、変形させても良い。

【0300】

また、第2の実施形態に係る把持装置20において、センサ8として、磁石とホール素子の相対的位置関係に基づいて、弾性索2の張力を算出するもの、及び感圧導電性紐9b、9cの接触点数（接触面積）の増加（変化）に応じた電気抵抗値の変化を用いて、弾性索2の張力を算出するものを挙げたが、これに限られるものではない。

20

【0301】

さらに、第2の実施形態に係る把持装置20において、2本の弾性索2に対して、一方の端にセンサ8を配置し、他方の端にセンサ80を配置している例を挙げたが、これに限られるものではない。例えば、任意の弾性索2に対して、一方の端にセンサ8を配置し、他方の端にセンサ80を配置して、検出した各弾性索2の張力に基づいて、弾性索2の集合で形成された把持空間Hを変形させるように制御をしても良い。また、センサ8の個数とセンサ80の個数とを異なるように、それぞれ支持部3a及び3bに配置しても良い。例えば、把持空間Hを変形させて、オブジェクトを拘束することに支障がなえれば、支持部3aのみにセンサ8を配置しても良い。同様に、支持部3bのみにセンサ80を配置しても良い。

30

【0302】

また、第3の実施形態に係る把持装置30において、オブジェクトを幾何学的に拘束できたか否かを判断する手法として、オブジェクトの画像の現在の中心位置の変化を推定するものが挙げたが、これに限られることはない。例えば、撮像部31から送信された画像データから、弾性索2の画像を抽出し、オブジェクトの表面に巻き付いた弾性索2の特徴（例えば、面積、長さ、曲率、又は屈曲点の位置且つ/又は個数等）に基づいて、把持索2がオブジェクトを包み込むように拘束したか否かを判定しても良い。

【0303】

さらに、第4の実施形態に係る把持装置40、及び第5の実施形態に係る把持装置50では、ポリゴンのデータ構造として、ハーフエッジを採用することを説明したが、これに限られることはなく、例えば、ポリゴンセット、インデックスフェースセットなる構造を採用しても良い。また、オブジェクトをポリゴン分割する際、ポリゴン形状を構成する面は、三角形に限定して説明したが、これに限られることはない。例えば、ポリゴン形状を構成する面を四角形、五角形又は六角形としても良く、六角形以上の多角形を用いても良い。さらに、ポリゴン形状の構成する面を、複数の多角形で構成しても良く、例えば、三角形と四角形、又は五角形と四角形混在して構成するようにしても良い。

40

【0304】

さらに、第6の実施形態に係る把持装置60では、3本のパラレルリンクマニピュレータ65を使用する例を説明したが、これに限られることはなく、3本以上のパラレルリン

50

クマニピュレータを有するように構成しても良い。また、第6の実施形態に係る把持装置60では、3組のマニピュレータは、それぞれ支持部63a及び63bの略中心に円周上120度等配するように配置される例を説明したが、支持部63a及び63bの略中心の円周上に等しい角度で配する必要はなく、異なる角度で配するようにしても良い。また、各マニピュレータ65は、回転アクチュエータ65a、リンク65b、回転対偶65c、リンク65d、及び球対偶65eの順に接続される必要はなく、回転アクチュエータ65a、リンク65b、回転対偶65c、リンク65d、及び球対偶65eの接続の順は、目的に応じて自由に構成することができる。例えば、球対偶65eと回転対偶65cとの位置を入れ替え、回転アクチュエータ65a、リンク65b、球対偶65e、リンク65d、及び回転対偶65cの接続の順に構成しても良い。さらに、球対偶65e又は回転対偶65cの個数を2以上に構成して、把持空間が一層自由に変形することが出来るように構成しても良い。さらに、リンク65b及びリンク65dの長さは、自由に設計しても良い。

10

## 【符号の説明】

## 【0305】

1、10、20、30、40、50、60	把持装置	
2、42、52、62	弾性索	
3a、43a、53a、63a	支持部	
3b、43b、53b、63b	支持部	
3c、3d	開口部（孔）	20
4、44	固定部	
5、45、55	回転部	
5a、51a	外側円環部	
5a'	内歯	
5b、51b	内側円環部	
5b'	外歯	
5c、45c	回転駆動部	
5c'、45c'	回転駆動固定部	
5d	歯車	
6、16、26、36、46、56、66	制御部	30
7a、7b、47a、47b	連結部	
8、80	センサ	
8a、9d	ハウジング	
8b	可動部	
8c	弾性体	
8d	磁石	
8e	ホール素子	
9	張力センサ	
9a	弾性紐	
9b、9c	感圧導電性紐	40
31	撮像部	
48、58	把持部	
49	回転角度決定部	
49a	入力部	
49b	オブジェクト形状記憶部	
49c	算出部	
49d	算出データ記憶部	
49e	表示部	
51	ラック付き回転部	
51b'	ラック	50



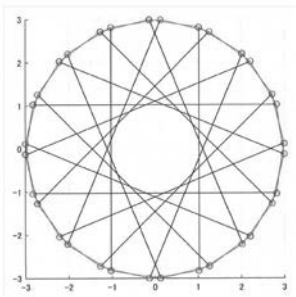
5 1 b ' ,  
 5 1 c  
 5 1 d  
 5 1 e  
 5 1 f  
 5 1 g  
 5 1 h  
 6 5  
 6 5 a  
 6 5 c  
 6 5 e  
 6 5 b、6 5 d  
 6 9  
 6 9 a  
 6 9 b  
 6 9 b '  
 6 9 c  
 1 0 0 a  
 1 0 0 b、1 0 0 c  
 1 0 0 d  
 H

フレキラック  
 減速電動部  
 回転駆動モータ  
 減速部  
 駆動軸  
 ピニオンギア  
 エンコーダ  
 パラレルマニピュレータ  
 回転アクチュエータ  
 回転対偶  
 球対偶  
 リンク  
 回転ステージ部  
 支え部  
 モータ回転部  
 モータ回転軸  
 ステージ部  
 プーリ  
 ベルト  
 オブジェクト  
 把持空間

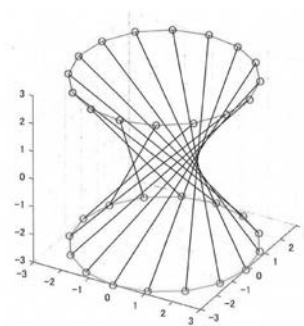
10

20

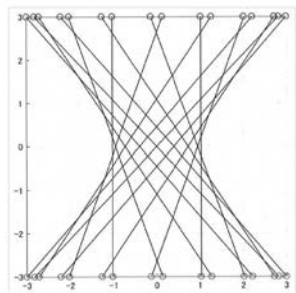
【 図 1 】



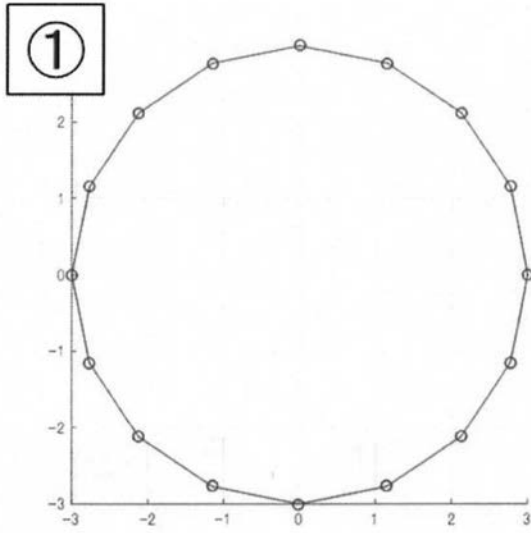
【 図 3 】



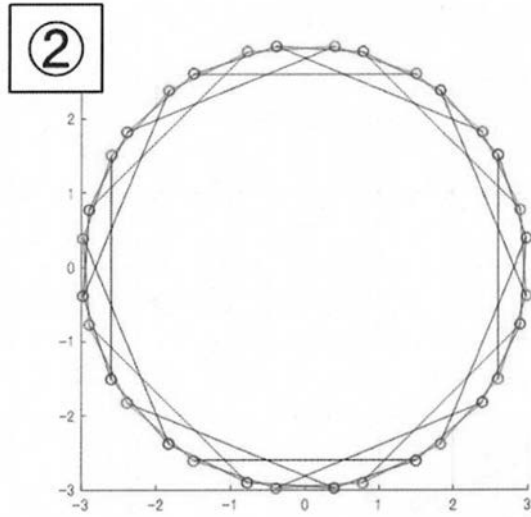
【 図 2 】



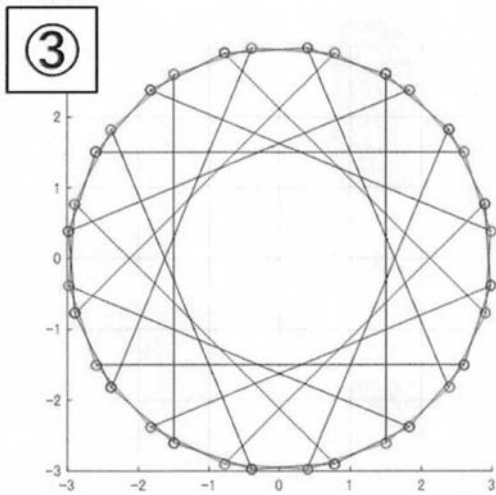
【 図 4 】



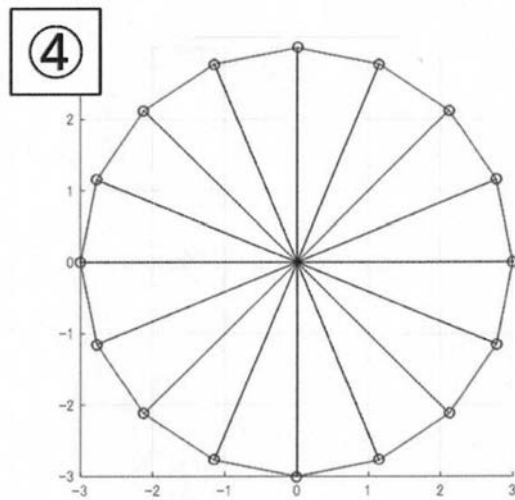
【 図 5 】



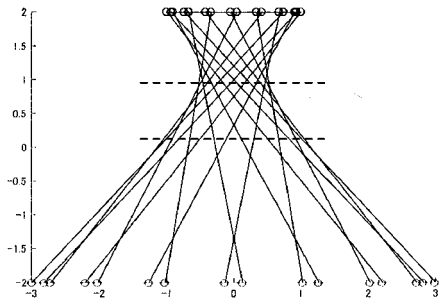
【 図 6 】



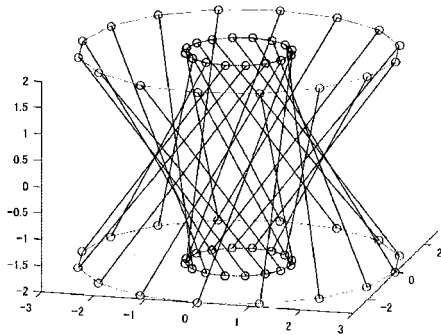
【 図 7 】



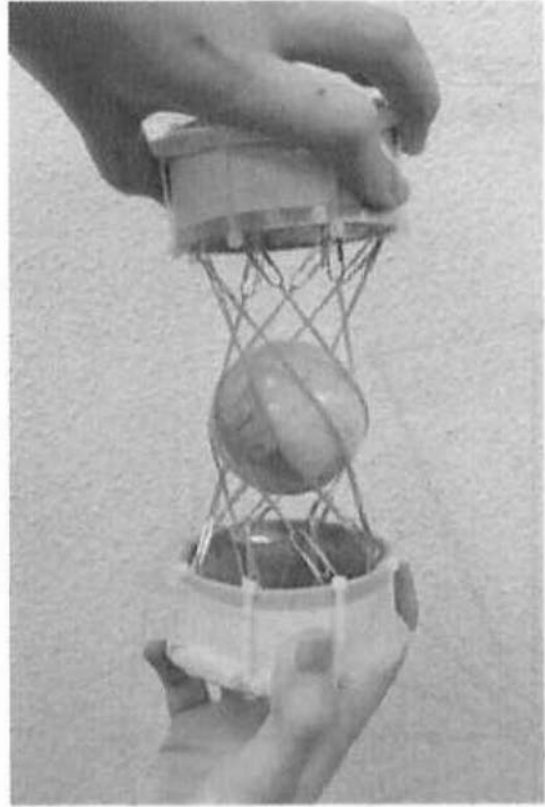
【 図 8 】



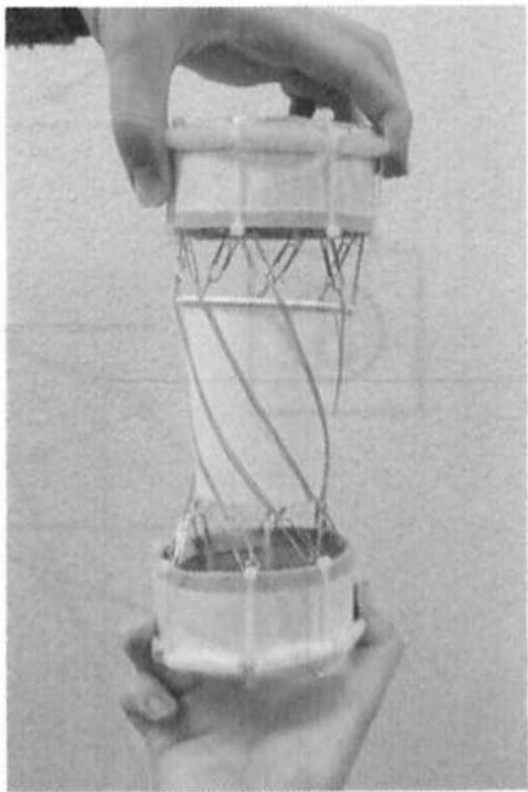
【 図 9 】



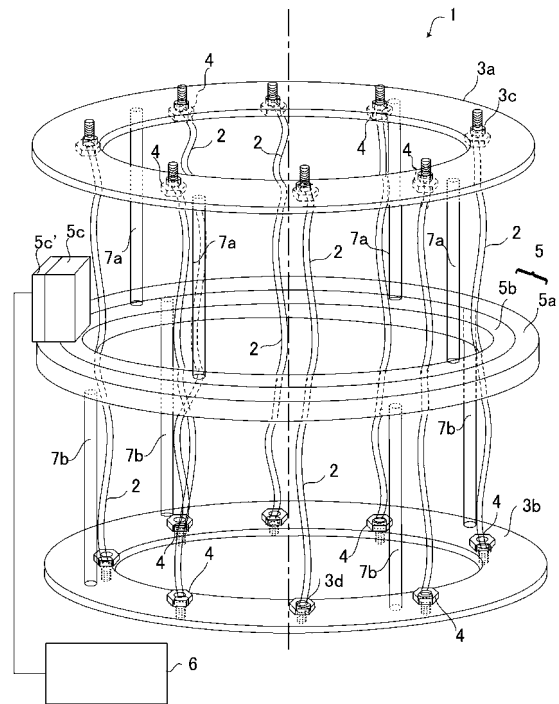
【 図 10 】



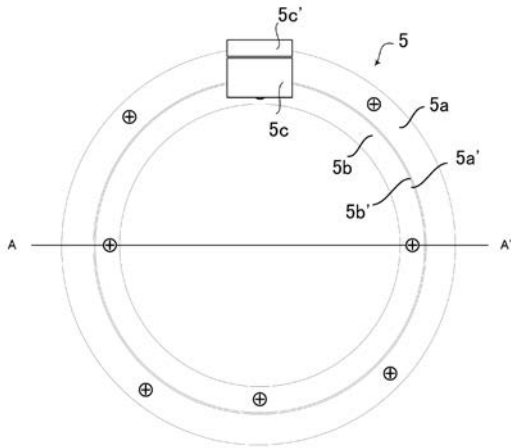
【 図 11 】



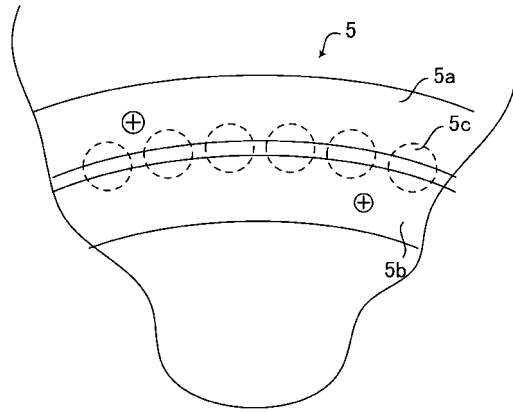
【 図 12 】



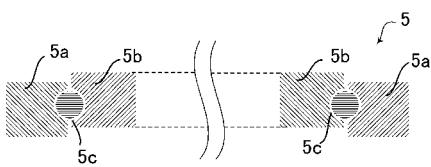
【 図 1 3 】



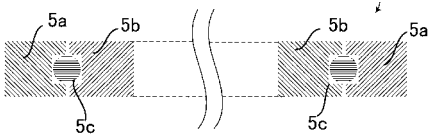
【 図 1 6 】



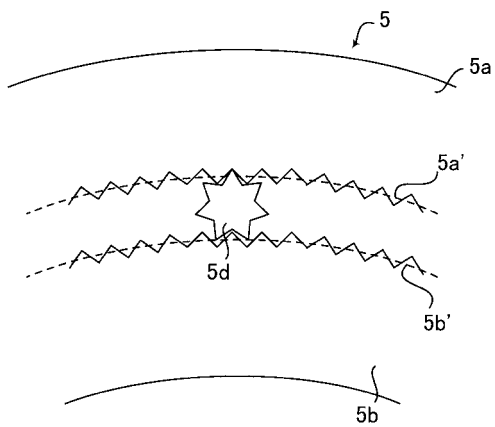
【 図 1 4 】



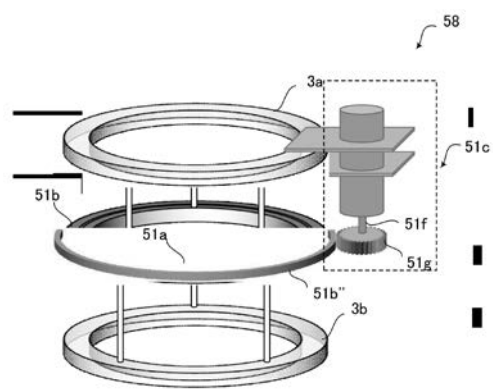
【 図 1 5 】



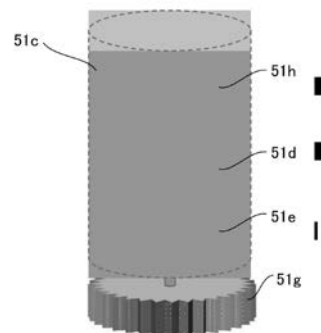
【 図 1 7 】



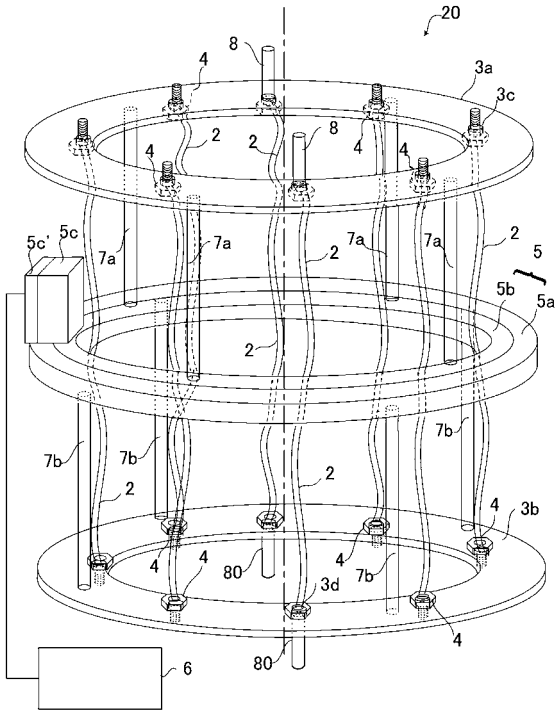
【 図 1 8 】



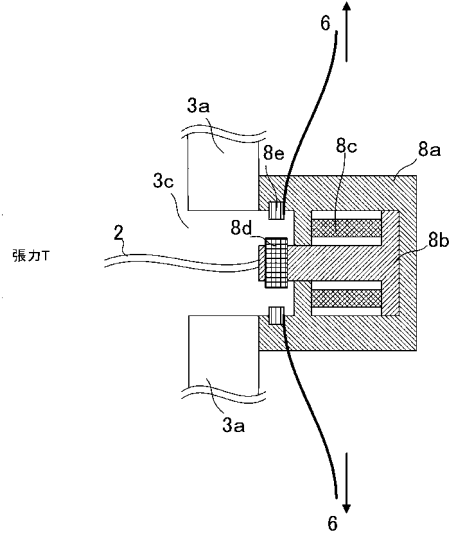
【 図 1 9 】



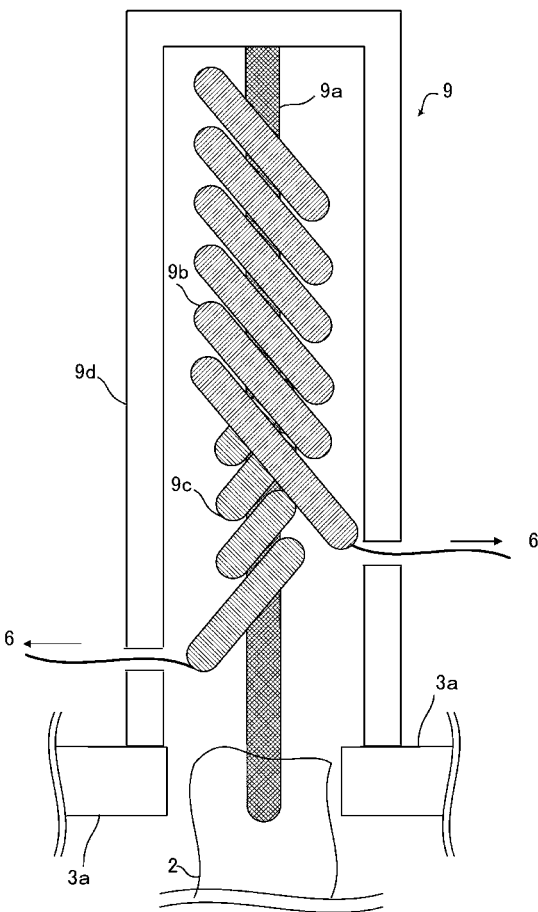
【図20】



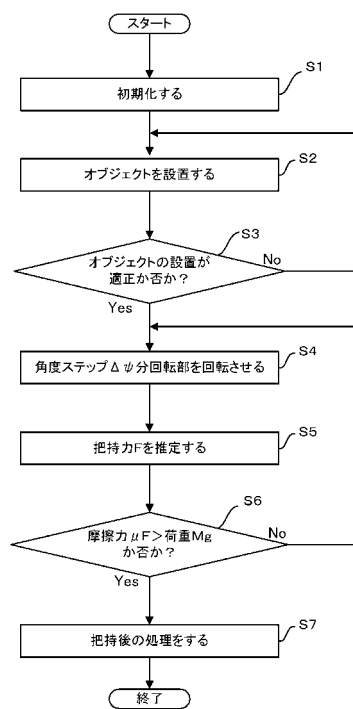
【図21】



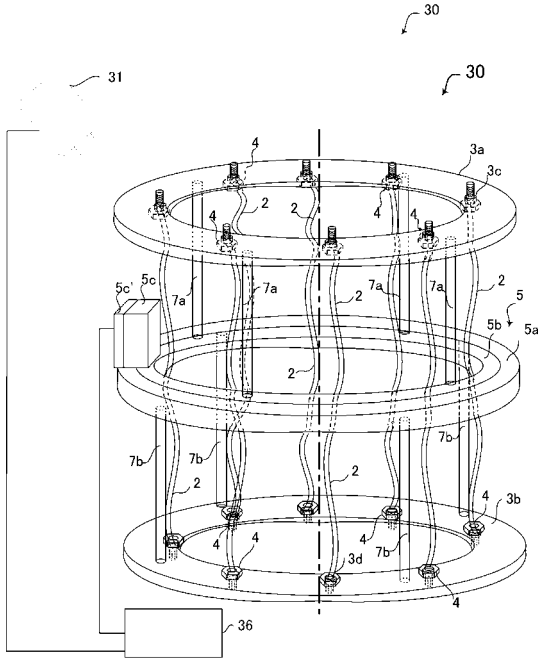
【図22】



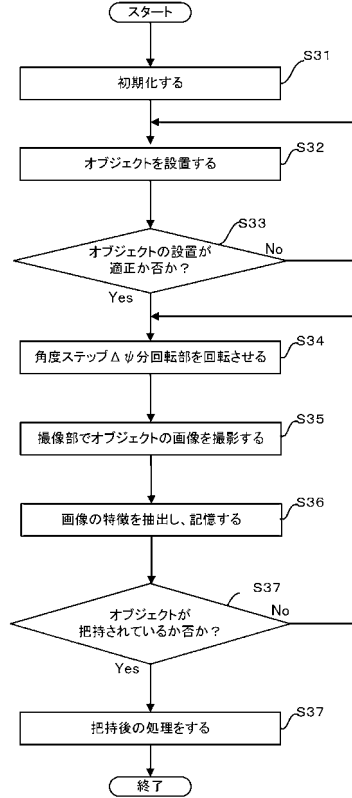
【図23】



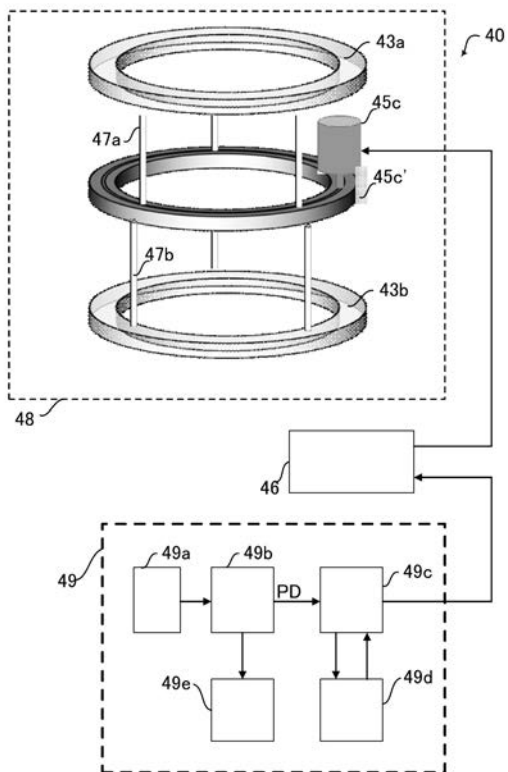
【図24】



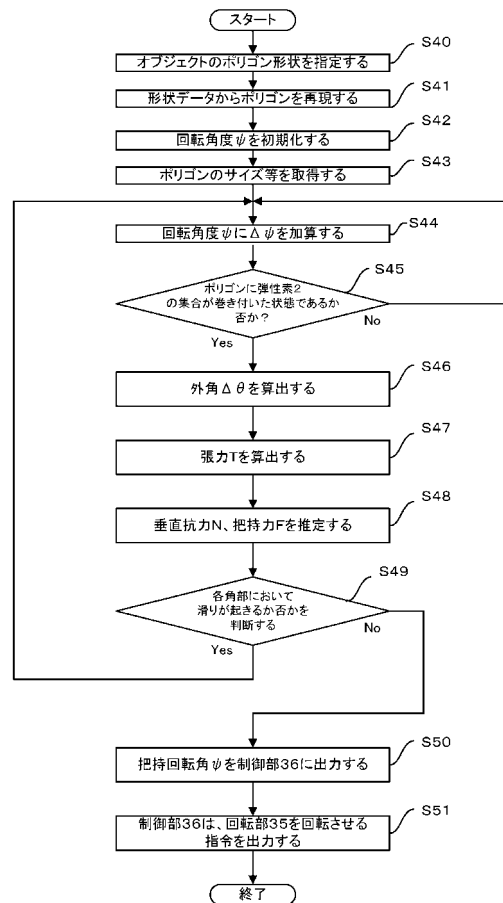
【図25】



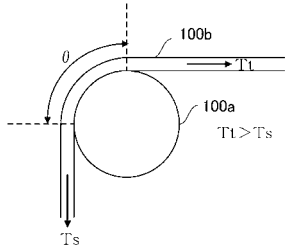
【図26】



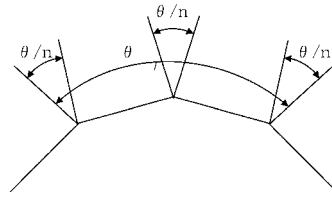
【図27】



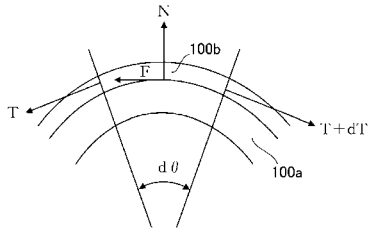
【 図 2 8 】



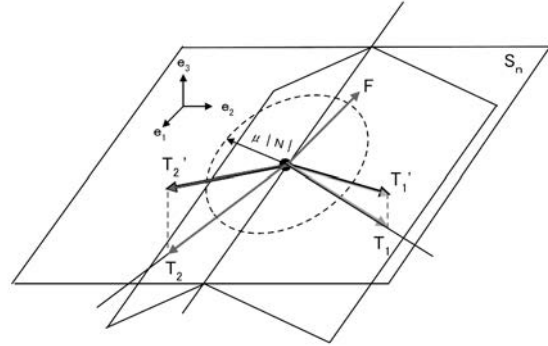
【 図 3 1 】



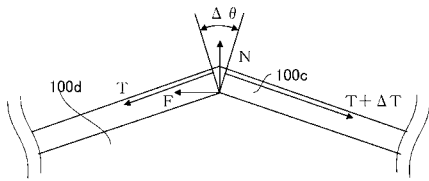
【 図 2 9 】



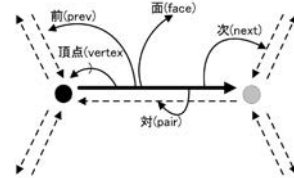
【 図 3 2 】



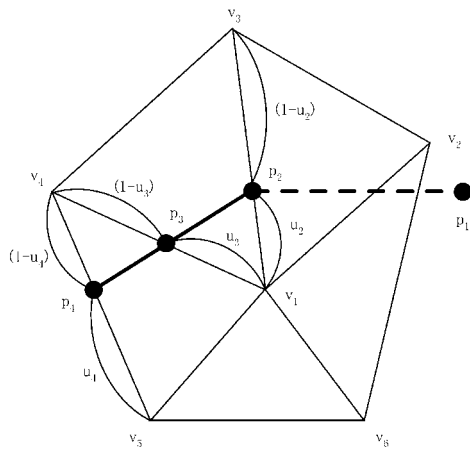
【 図 3 0 】



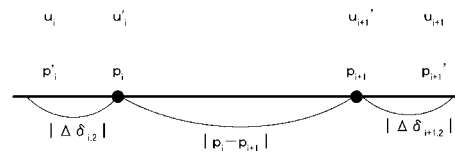
【 図 3 3 】



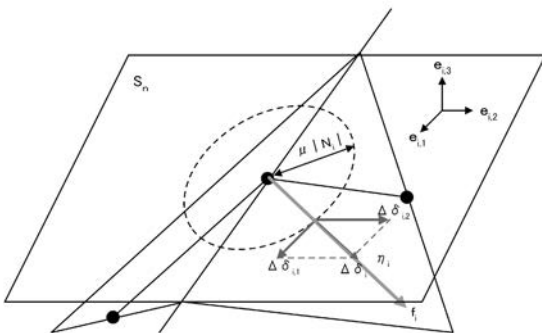
【 図 3 4 】



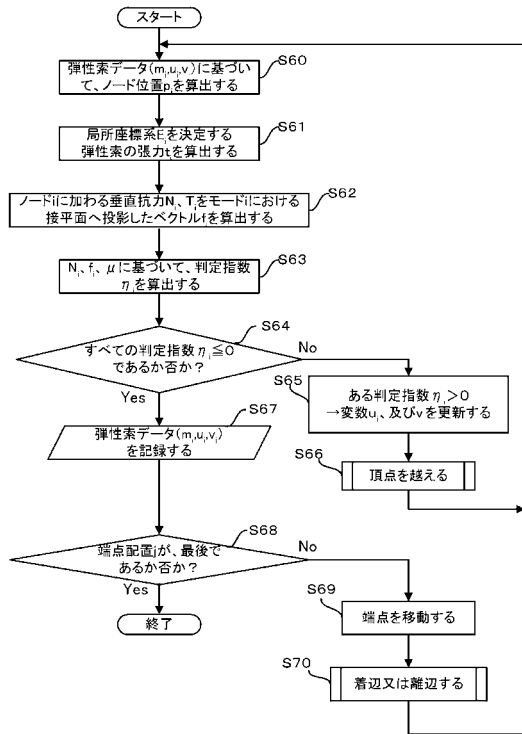
【 図 3 6 】



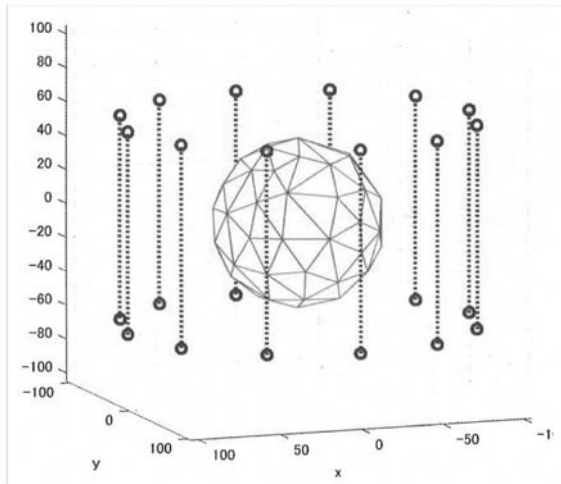
【 図 3 5 】



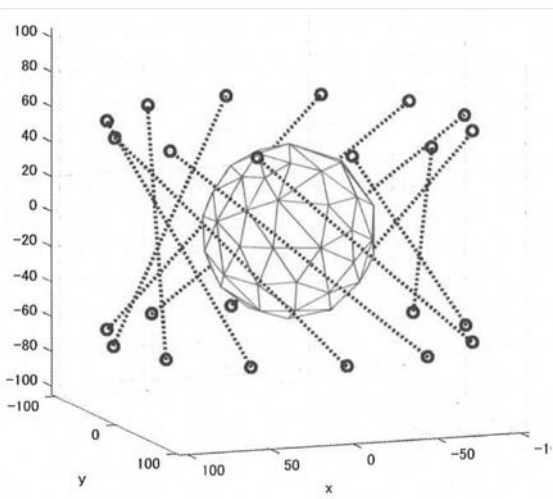
【図37】



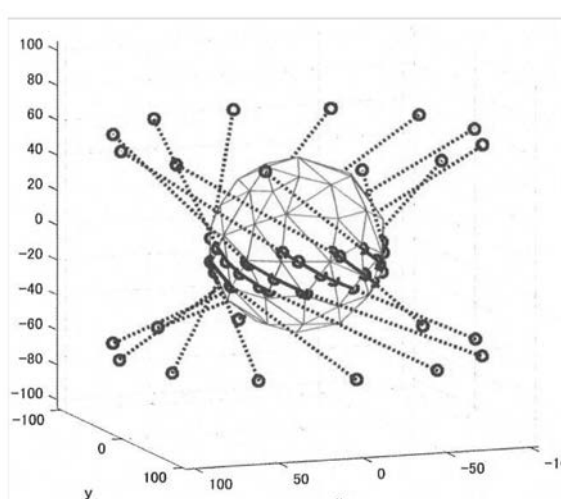
【図38】



【図39】

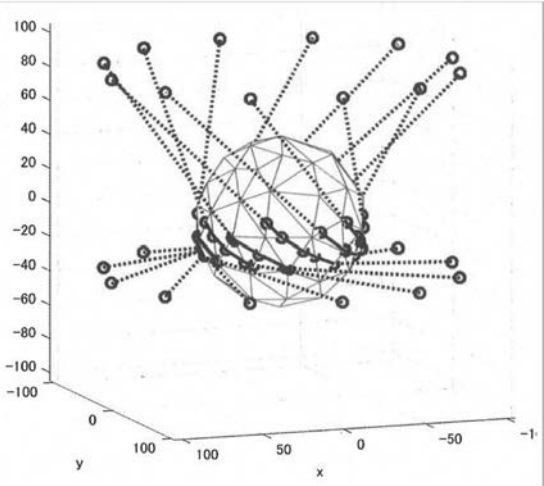


【図40】

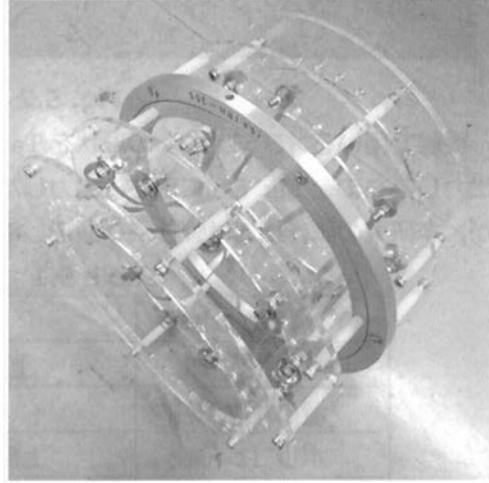




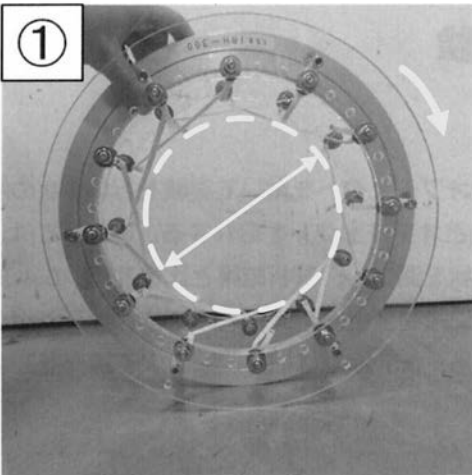
【 図 4 1 】



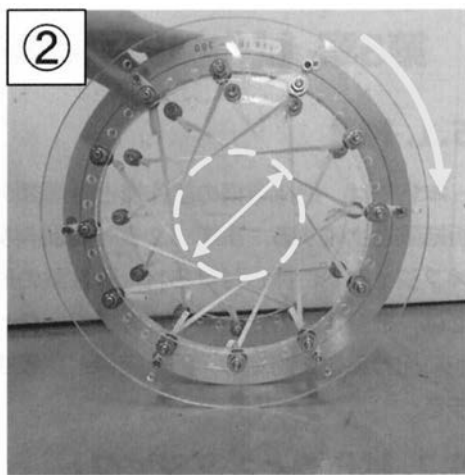
【 図 4 2 】



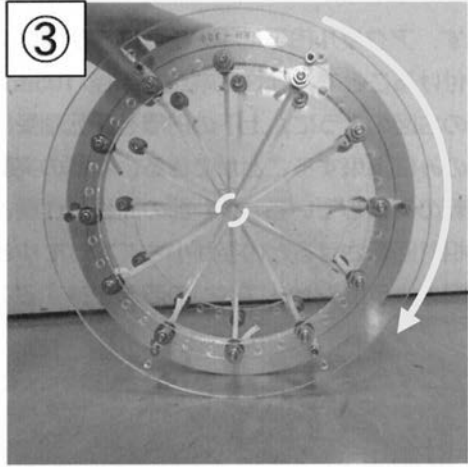
【 図 4 3 】



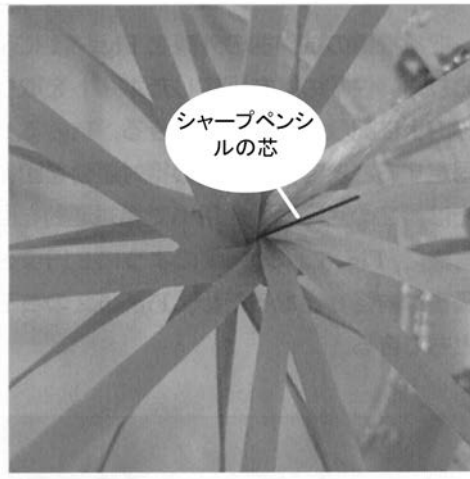
【 図 4 4 】



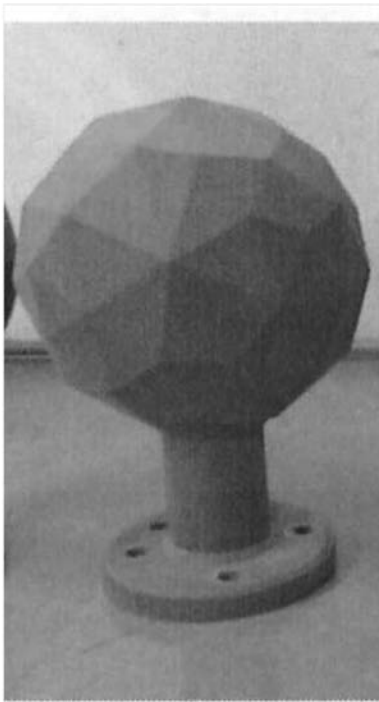
【 図 4 5 】



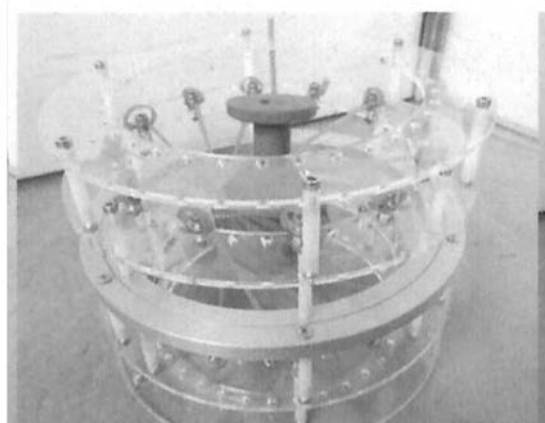
【 図 4 6 】



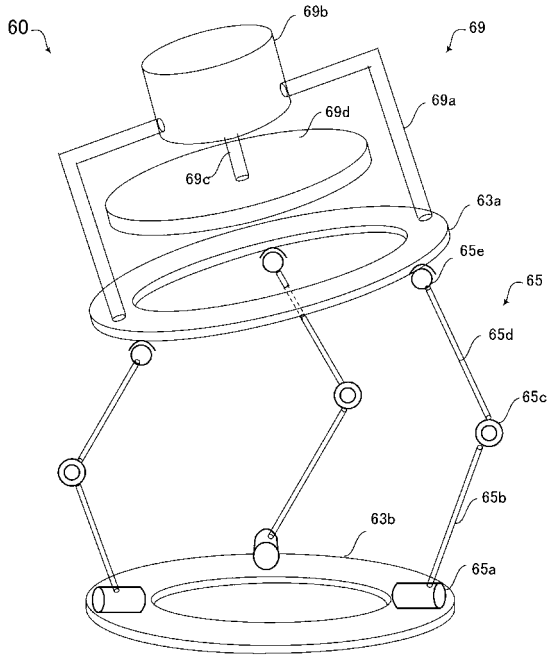
【 図 4 7 】



【 図 4 8 】



【 図 4 9 】



フロントページの続き

(72)発明者 近藤 尚登

東京都目黒区大岡山 2 - 1 2 - 1

人東京工業大学内

国立大学法

Fターム(参考) 3C707 DS01 EU04 EW01 KS33 MT04 MT10