

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第6417578号
(P6417578)

(45) 発行日 平成30年11月7日 (2018. 11. 7)

(24) 登録日 平成30年10月19日 (2018. 10. 19)

(51) Int. Cl.	F 1
F 1 6 S 1/06 (2006. 01)	F 1 6 S 1/06
E 0 4 B 1/343 (2006. 01)	E 0 4 B 1/343 U

請求項の数 13 (全 25 頁)

(21) 出願番号 特願2017-535529 (P2017-535529)
 (86) (22) 出願日 平成28年8月12日 (2016. 8. 12)
 (86) 国際出願番号 PCT/JP2016/073806
 (87) 国際公開番号 W02017/030103
 (87) 国際公開日 平成29年2月23日 (2017. 2. 23)
 審査請求日 平成29年12月25日 (2017. 12. 25)
 (31) 優先権主張番号 特願2015-160229 (P2015-160229)
 (32) 優先日 平成27年8月14日 (2015. 8. 14)
 (33) 優先権主張国 日本国 (JP)

(73) 特許権者 503360115
 国立研究開発法人科学技術振興機構
 埼玉県川口市本町四丁目1番8号
 (73) 特許権者 506175840
 ザ ボード オブ トラスティーズ オブ
 ザ ユニヴァーシティー オブ イリノ
 イ
 アメリカ合衆国, イリノイ州, アーバナ,
 サウス ライト ストリート 506, ヘ
 ンリー アドミニストレーション ビルデ
 イング 352
 (74) 代理人 100105924
 弁理士 森下 賢樹

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 可折構造物、ならびに、可折構造物製造方法、可折構造物製造装置、および、プログラム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

少なくとも二つの筒型構造を含む可折構造物であって、
 前記二つの筒型構造は、互いに共有する共有面の連続である共有面列を有し、
 一方の前記筒型構造の前記共有面列における捩れ特性は、他方の前記筒型構造の当該共有面列における捩れ特性とは逆方向であることを特徴とする、可折構造物。

【請求項 2】

請求項 1 に記載の可折構造物において、
 前記筒型構造は、展開状態と折り畳み状態とを移行する場合に、前記共有面まわりの折り角の伝播量が一方の前記筒型構造を介した場合と他方の前記筒型構造を介した場合とで
 等しいことを特徴とする、可折構造物。

【請求項 3】

請求項 2 に記載の可折構造物において、
 前記共有面列は、平行な稜線で前記各共有面が繋がった柱面であり、
 一方の前記筒型構造の壁面列が前記柱面列を貫通して他方側に延長した場合に、他方の前記筒形構造の壁面列と、柱面に直交する平面に対して鏡映対称であることを特徴とする、可折構造物。

【請求項 4】

請求項 2 に記載の可折構造物において、
 前記共有面列は、任意の単曲面であり、

前記共有面列と隣接する壁面列を有する前記筒型構造の壁面列がなす四価頂点における内角について、対角の和がそれぞれ180度であるか対角がそれぞれ等しく、かつ、一方の前記壁面列を介した折り角の伝播量と、他方の前記壁面列を介した折り角の伝播量とが、相等しくなるような前記内角をもつことを特徴とする、可折構造物。

【請求項5】

請求項1または2に記載の可折構造物において、

前記二つの筒型構造は、ミウラ折り筒型構造であって、

一方の前記筒型構造と他方の前記筒型構造とは、前記共有面列において折り線部分が互い違いに噛み合うジッパー型配置で接合されたことを特徴とする、可折構造物。

【請求項6】

請求項1乃至5のいずれか一つに記載の可折構造物において、

折り畳み状態から展開状態へと移行した場合に、それまで隣接していなかった前記筒形構造同士が隣接して接合可能となることにより、前記折り畳み状態への再移行を抑止することができることを特徴とする、可折構造物。

【請求項7】

請求項1乃至6のいずれか一つに記載の可折構造物において、

前記共有面列の面とは、

複数の折り線で構成される概念上の面であることを特徴とする、可折構造物。

【請求項8】

請求項1乃至7のいずれか一つに記載の可折構造物において、

前記可折構造物は、

折り畳み構造物または平坦可折構造物であることを特徴とする、可折構造物。

【請求項9】

生成面列から、二つの壁面列を有する、等価な可折構造を生成する可折構造生成ステップと、

前記生成面列および前記二つの壁面列に基づいて、前記生成面の両側に筒型構造を形成させる筒型構造形成ステップと、

を含むことを特徴とする、可折構造物製造方法。

【請求項10】

請求項9に記載の可折構造物製造方法において、

前記可折構造生成ステップは、

平行な稜線で繋がった柱面として前記生成面列を生成し、前記柱面に直交する平面に対して、任意の壁面列と鏡映対称となる壁面列を生成し、一方の前記壁面列を、前記生成面列を貫通して延長することにより、前記等価な可折構造を生成し、

前記筒型構造形成ステップは、

前記生成面列の両側に平行にオフセットさせた面列と、前記各壁面列から平行にオフセットさせた面列とにより、前記筒型構造を形成させること

を特徴とする、可折構造物製造方法。

【請求項11】

請求項9に記載の可折構造物製造方法において、

前記可折構造生成ステップは、

前記生成面列と前記二つの壁面列を有する前記可折構造の展開図において、各内部頂点における内角について、対角の和を180度とし、一方の前記壁面列を介した折り角の伝播量と、他方の前記壁面列を介した折り角の伝播量とが、相等しくなるように前記内角を決定していくことにより、前記等価な可折構造を生成し、

前記筒型構造形成ステップは、

前記生成面列の両側に平行にオフセットさせた面列と、前記各壁面列から平行にオフセットさせた面列とにより、前記筒型構造を形成させること

を特徴とする、可折構造物製造方法。

【請求項12】

生成面列から、二つの壁面列を有する、等価な可折構造を生成する可折構造生成手段と、

前記生成面列および前記二つの壁面列に基づいて、前記生成面の両側に筒型構造を形成させる筒型構造形成手段と、

を備えたことを特徴とする、可折構造物製造装置。

【請求項 13】

可折構造の生成方法をコンピュータに実行させるためのプログラムであって、生成面列から、二つの壁面列を有する、等価な可折構造を生成する可折構造生成ステップと、

前記生成面列および前記二つの壁面列に基づいて、前記生成面の両側に筒型構造を形成させる筒型構造形成ステップと、

をコンピュータに実行させるためのプログラム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、可折構造物、ならびに、可折構造物製造方法、可折構造物製造装置、および、プログラムに関する。

【背景技術】

【0002】

従来、折り畳み状態と展開状態との間で変形可能な可折構造物が知られている。

【0003】

例えば、特許文献 1 では、ミウラ折りと呼ばれる展開構造物を基本要素とした折り畳み容易な筒型の折り畳みボックス構造が開示されている。

【0004】

また、非特許文献 1 では、1 自由度の剛体折り可能で平坦可折性を有するアーチ状構造物が開示されている。

【0005】

また、非特許文献 2 では、2 方向に平坦可折性を有し、平坦な四辺形のメッシュで構成された 1 自由度の剛体折り可能な構造物が開示されている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0006】

【特許文献 1】特開 2012 - 116566 号公報

【非特許文献】

【0007】

【非特許文献 1】Tomohiro Tachi, "Composite Rigid-Foldable Curved Origami Structure", Proceedings of the First Conference Transformables 2013. In the Honor of Emilio Perez Pinerio, 18th-20th September, 2013, School of Architecture, Seville, Spain EDITORIAL STARBOOKS.

【非特許文献 2】Tomohiro Tachi, "Freeform Rigid-Foldable Structure using Bidirectionally Flat-Foldable Planar Quadrilateral Mesh", Advances in Architectural Geometry 2010, pp87-102

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0008】

10

20

30

40

50

しかしながら、従来の可折構造物は、各面が撓まない剛体であるときに１自由度の機構となつて剛体折り可能となるものの、各面に紙やプラスチック板、薄い金属板などの可撓性の素材を用いた場合には、各面が曲がることで、一様でない伸縮が発生してしまい、剛体折り変形モードを維持できなくなる、という問題があった。

【０００９】

本発明は上記の問題点に鑑みてなされたものであり、可撓性の素材であっても、一様でない伸縮が抑制されるように剛性が付与される可折構造物、ならびに、可折構造物製造方法、可折構造物製造装置、および、プログラムを提供するものである。

【課題を解決するための手段】

【００１０】

10

このような目的を達成するため、本発明の可折構造物は、少なくとも二つの筒型構造を含む可折構造物であつて、前記二つの筒型構造は、互いに共有する共有面の連続である共有面列を有し、一方の前記筒型構造の前記共有面列における捩れ特性は、他方の前記筒型構造の当該共有面列における捩れ特性とは逆方向であることを特徴とする。

【００１１】

また、本発明の可折構造物は、上記の可折構造物において、前記筒型構造は、展開状態と折り畳み状態とを移行する際に、前記共有面まわりの折り角の伝播量が一方の前記筒型構造を介した場合と他方の前記筒型構造を介した場合とで等しいことを特徴とする。

【００１２】

また、本発明の可折構造物は、上記の可折構造物において、前記共有面列は、平行な稜線で前記各共有面が繋がった柱面であり、一方の前記筒型構造の壁面列が前記柱面列を貫通して他方側に延長した場合に、他方の前記筒形構造の壁面列と、柱面に直交する平面に対して鏡映対称であることを特徴とする。

20

【００１３】

また、本発明の可折構造物は、上記の可折構造物において、前記共有面列は、任意の単曲面であり、前記共有面列と隣接する前記筒型構造の壁面列がなす四価頂点における内角について、対角の和がそれぞれ１８０度であるか対角がそれぞれ等しく、かつ、一方の前記壁面列を介した折り角の伝播量と、他方の前記壁面列を介した折り角の伝播量とが、相等しくなるような前記内角をもつことを特徴とする。

【００１４】

30

また、本発明の可折構造物は、上記の可折構造物において、前記二つの筒型構造は、ミウラ折り筒型構造であつて、一方の前記筒型構造と他方の前記筒型構造とは、前記共有面列において折り線部分が互い違いに噛み合うジッパー型配置で接合されたことを特徴とする。

【００１５】

また、本発明の可折構造物は、上記の可折構造物において、折り畳み状態から展開状態へと移行した場合に、それまで隣接していなかった前記筒形構造同士が隣接して接合可能となることにより、前記折り畳み状態への再移行を抑止することができることを特徴とする。

【００１６】

40

また、本発明の可折構造物は、上記の可折構造物において、前記共有面列の面とは、複数の折り線で構成される概念上の面であることを特徴とする。

【００１７】

また、本発明の可折構造物は、上記の可折構造物において、前記可折構造物は、折り畳み構造物または平坦可折構造物であることを特徴とする。

【００１８】

また、本発明の可折構造物の製造方法は、生成面列から、二つの壁面列を有する、等価な可折構造を生成する可折構造生成ステップと、前記生成面列および前記二つの壁面列に基づいて、前記生成面の両側に筒型構造を形成させる筒型構造形成ステップと、を含むことを特徴とする。

50

【 0 0 1 9 】

また、本発明の可折構造物の製造方法は、上記の可折構造物の製造方法において、前記可折構造生成ステップは、平行な稜線で繋がった柱面として前記生成面列を生成し、前記柱面に直交する平面に対して、任意の壁面列と鏡映対称となる壁面列を生成し、一方の前記壁面列を、前記生成面列を貫通して延長することにより、前記等価な可折構造を生成し、前記筒型構造形成ステップは、前記生成面列の両側に平行にオフセットさせた面列と、前記各壁面列から平行にオフセットさせた面列とにより、前記筒型構造を形成させることを特徴とする。

【 0 0 2 0 】

また、本発明の可折構造物の製造方法は、上記の可折構造物の製造方法において、前記可折構造生成ステップは、前記生成面列と前記二つの壁面列を有する前記可折構造の展開図において、各内部頂点における内角について、対角の和を180度とし、一方の前記壁面列を介した折り角の伝播量と、他方の前記壁面列を介した折り角の伝播量とが、相等しくなるように前記内角を決定していくことにより、前記等価な可折構造を生成し、前記筒型構造形成ステップは、前記生成面列の両側に平行にオフセットさせた面列と、前記各壁面列から平行にオフセットさせた面列とにより、前記筒型構造を形成させることを特徴とする。

10

【 0 0 2 1 】

また、本発明の可折構造物の製造装置は、生成面列から、二つの壁面列を有する、等価な可折構造を生成する可折構造生成手段と、前記生成面列および前記二つの壁面列に基づいて、前記生成面の両側に筒型構造を形成させる筒型構造形成手段と、を備えたことを特徴とする。

20

【 0 0 2 2 】

また、本発明のプログラムは、可折構造の生成方法をコンピュータに実行させるためのプログラムであって、生成面列から、二つの壁面列を有する、等価な可折構造を生成する可折構造生成ステップと、前記生成面列および前記二つの壁面列に基づいて、前記生成面の両側に筒型構造を形成させる筒型構造形成ステップと、をコンピュータに実行させることを特徴とする。

【 発明の効果 】

【 0 0 2 3 】

本発明によれば、可撓性の素材で各面を構成しても、一様でない伸縮が抑制されるように剛性が付与される可折構造物、ならびに、可折構造物製造方法、可折構造物製造装置、および、プログラムを提供することができる、という効果を奏する。

30

【 図面の簡単な説明 】

【 0 0 2 4 】

【 図 1 】 図 1 は、(A) 一つのミウラ折り筒型構造と、(B) 平行に配置した二つのミウラ折り筒型構造と、(C) ジッパー型に配置した二つのミウラ折り筒型構造の斜視図である。

【 図 2 】 図 2 は、図 1 の上面図(上段)および正面図(下段)を表す正投影図である。

【 図 3 】 図 3 は、展開時に一様でない変形が発生しない剛体折り変形モード(上段の(a), (b))と、展開時に一様でない変形が発生した捩れモード(下段の(c), (d))を示す図である。

40

【 図 4 】 図 4 は、(B) 平行配置の共有面列における捩れ方向を示す図である。

【 図 5 】 図 5 は、(C) ジッパー型配置の共有面列における捩れ方向を示す図である。

【 図 6 】 図 6 は、(C) ジッパー配置の筒型構造を多数配置した、2方向平坦可折性の波型のサンドイッチ構造を示す図である。

【 図 7 】 図 7 は、剛性が付与された剛体折り可能な可折構造物の展開状態と折り畳み状態を示す図である。

【 図 8 】 図 8 は、任意の単曲面の生成曲面(共有面列)から得られた、サンドイッチ構造を示す図である。

50

【図 9】図 9 は、本実施の形態が適用される製造装置 100 の構成の一例を示すブロック図である。

【図 10】図 10 は、図 6 の折り畳み構造から等価な折紙構造を抽出した 3 面列のアレイ構造を示す図である。

【図 11】図 11 は、平行面群による基本アレイ構造と筒型構造を示す図である。

【図 12】図 12 は、鏡映対称面群による基本アレイ構造と筒型構造を示す図である。

【図 13】図 13 は、二方向平坦折り可能条件による基本アレイ構造と筒型構造を示す図である。

【図 14】図 14 は、変形機構の適合性条件 1, 2, 3 を満たすときの各面の内角の関係を示す図である。

10

【図 15】図 15 は、本実施の形態の製造装置 100 における適合性条件 2 の可折構造物を製造するための処理の一例を示すフローチャートである。

【図 16】図 16 は、対角の和が 180° となる 4 価頂点を示す図である。

【図 17】図 17 は、生成面から片側ずつ両側へ面群が生成された構造の例を示す図である。

【図 18】図 18 は、本実施の形態の製造装置 100 における適合性条件 3 の可折構造物を製造するための処理の一例を示すフローチャートである。

【図 19】図 19 は、ジッパー型配置構造 (zipper)、平行配置構造 (aligned) の片持ち梁構造を示す図である。

【図 20】図 20 は、横軸を筒の伸縮率として、縦軸を剛性として、伸縮率に対する剛性の変化を示すグラフ図である。

20

【図 21】図 21 は、筒の伸縮率がそれぞれ 40%、70%、95% において、YZ 平面上の力の方向に対する剛性を表したグラフ図である。

【図 22】図 22 は、他の構造物の実施の形態を得るための単位構造と筒型構造を示す図である。

【図 23】図 23 は、可折構造物 A, B, C の折り畳み状態から展開状態への移行を示す図である。

【図 24】図 24 は、可折構造物 A, B, C の折り畳み状態から展開状態への移行を示す図である。

【図 25】図 25 は、壁面の鏡映反転を用いたアーチ構造の一例を示す図である。

30

【図 26】図 26 は、図 25 の壁面の鏡映反転を用いたアーチ構造の折り過程を示す図である。

【図 27】図 27 は、壁面の鏡映反転を用いたアーチ構造の他の例を示す図である。

【図 28】図 28 は、図 27 の壁面の鏡映反転を用いたアーチ構造の折り過程を示す図である。

【図 29】図 29 は、曲面状サンドイッチコア (curved sandwich core) として鏡映反転を用いた構造の一例を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0025】

以下に、本発明の本実施の形態にかかる可折構造物、ならびに、当該可折構造物の製造方法、製造装置、プログラム、および、記録媒体の実施の形態を図面に基づいて詳細に説明する。なお、この実施の形態により、この発明が限定されるものではない。

40

【0026】

[1. 可折構造物]

まず、以下に、本発明にかかる可折構造物の実施の形態について説明し、つづいて、本実施の形態にかかる可折構造物を製造するための製造装置の構成および製造方法の処理等について詳細に説明する。なお、可折構造物 (foldable structure) とは、折り変形可能な構造物であって、例えば、折り畳み構造物や平坦可折構造物 (flat-foldable structure) や剛体可折構造物 (rigid-foldable structure) である。ここで、図 1 は、(A) 一つのみウラ折り筒

50

型構造と、(B) 平行に配置した二つのミウラ折り筒型構造と、(C) ジッパー型に配置した二つのミウラ折り筒型構造の斜視図である。図2は、図1の上面図(上段)および正面図(下段)を表す正投影図である。

【0027】

(A) ミウラ折り筒型構造単体、および、(B) これを平行配置した構造は、平坦に折り畳める平坦可折性があり、1自由度の剛体折りが可能であることが知られている。ここで、剛体折りが可能な構造である「剛体可折構造」とは、複数の面が折り線で接続して構成された構造のうち、各面を撓まない剛体としたときに、連続変形できる機構となるものをいう。

【0028】

しかしながら、展開時に剛体折り変形モードを維持するためには、各面が捩れないこと、すなわち、各面の素材に比較的大きな剛性を有した素材を用いることが必要であった。換言すれば、(A) 筒型構造単体あるいは(B) 平行配置構造を、薄い材料で作った場合は、各面が曲がることで、一様でない伸縮がおきる、という問題があった。ここで、図3は、展開時に一様でない変形が発生しない剛体折り変形モード(上段の図3(a), (b))と、展開時に一様でない変形が発生した捩れモード(下段の図3(c), (d))を示す図である。

【0029】

上段の図3(a), (b)に示すように、理想的には、展開時に一様でない変形が発生せず、剛体折り変形モードを維持できることが望ましい。剛体パネルの構造であれば、この動きが一自由度の機構として連動するため、断面の変形が一様であり断面は伸縮率に応じて剪断変形する。(図3(b)参照)。しかしながら、現実には、単体の筒型構造は、実質的に平行四辺形断面であるものの、その断面の剪断変形の量が伸縮量の変化に応じて変化してしまうことで面の捩れが発生する(図3(c)参照)。伸縮方向の伸縮率の変化に応じてこの断面の剪断変形の量が変化することで捩れが発生する(図3(d)参照)。ここで、図3(c)の矢印は、捩れ方向を示しており、隣り合う各面列において交互に正負の回転方向に捩れが発生している。このように、パネルが薄い場合や、曲げが許されている場合など可撓性がある場合に、この断面の変形が筒型の両端で一致しない変形モードの変形が起きる。このような非一様な変形があると、筒型を端部から駆動するあるいは端部を固定して剛性を持たせることができないなど様々な問題が生じる。

【0030】

本願の発明者らは、これらの問題に鑑み、鋭意検討を行った結果、本発明を考案するに至った。すなわち、本発明の一実施の形態は、図1(C)および図2(C)に示すように、一方の筒型構造と他方の筒型構造とを、平行配置ではなく、折り線部分が互い違いに噛み合うジッパー型配置にて接合したことを特徴とする可折構造物である。このようなジッパー型配置の可折構造物は、一様でない伸縮を幾何的構造の組み合わせによって防ぐことができ、剛体折り変形モードを維持することができる。ここで、図4は、(B) 平行配置の共有面列における捩れ方向を示す図であり、図5は、(C) ジッパー型配置の共有面列における捩れ方向を示す図である。

【0031】

二つの筒型構造が面を共有するとき、伸縮率および伸縮率の勾配は二つの管において共有される。そのため、二つの筒型構造が非一様な変形モードを起こすとき、共有面の捩れモードを確認することができる。図4に示すように、(B) 平行配置で筒型構造を組み合わせた場合、伸縮率の勾配に対する捩れ方向が等しくなる。したがって、(B) 平行配置では、伸縮率の勾配に対する捩れ符号が等しく、非一様な変形モードを許し、(A) 単体の筒型構造と同等の一様でない変形を起こしてしまう。

【0032】

一方、図5に示すように、(C) ジッパー型配置にて筒型構造を組み合わせた場合は、伸縮率の勾配に対する捩れ方向が正負反転する。このように、本願発明者らが考案した(C) ジッパー型配置の可折構造物では、伸縮率の勾配による捩れが共有面列で反転する結

10

20

30

40

50

果、捩れを打ち消し合うことによって、一様でない変形モードが抑止され、構造的な固さ（剛性）を生むことができる。

【 0 0 3 3 】

本願発明者らは、更なる鋭意検討を行い、このジッパー型配置の筒型構造を基本構造として、共有面列における捩れ方向の反転の性質を維持した一般化形状を製造する原理を見出した。すなわち、ミウラ折り筒型構造の組み合わせに限らず、この捩れ方向の正負反転の原理を広く一般化して、様々な形状を製造できることを発見した。ある断面位置における平行四辺形の剪断変形が、その位置における伸縮率に対応し、伸縮率の勾配が共有面列の捩れを生む原理は、一般化した形状についても成立する。そのため、一般化形状においても、共有面列における捩れ反転の性質に着目して、同等の機能性、すなわち展開時における非一様な変形を防ぐような剛性を発揮できる。

10

【 0 0 3 4 】

なお、単体の筒型形状は、一例として、次のように一般化できる。すなわち、2対の平行面からなる四平面で構成された筒を単位構造とし、この単位構造が断面で連結することで作られた多面体筒型構造としてもよく、それを無限に細分化してなめらかにした曲面筒型構造としてもよい。なめらかな曲面筒型構造は、2対の平行面が空間中を動いてできる包絡面として定義できる構造である（非特許文献1参照）。本発明にかかる一般化形状の実施形態は、このような筒型構造が別の筒型構造と、多面体の場合は四角形面列、曲面筒型構造では単曲面を共有したもののうち、二種の筒型構造の伸縮による共有面列の変形機構が一致するものである。ここで、図6は、（C）ジッパー配置の筒型構造を多数配置した、2方向平坦可折性の波型のサンドイッチ構造を示す図である。なお、共有面は灰色で表している（以下の図においても同様）。

20

【 0 0 3 5 】

ここで、上述のように伸縮率の勾配に対して、断面の剪断変形が非一様になることによって構造中の面が特有の方向に捩れる性質を捩れ特性と呼ぶ。図6に示すように、このサンドイッチ構造は、波形の共有面列の上側の筒型構造の捩れ特性と、波形の共有面列の下側の筒型構造の捩れ特性が、正負反転するように組み合わせられている。そのため、組み合わせによって構造特性上、剛性が付与されることとなる。なお、組み合わせを決める前は共有面が存在しないため、可折構造物の生成過程において、共有面（共有面列）を「生成面（生成面列）」と呼ぶことがある。ここで、本実施形態において、「面」とは、必ずしも物理的な板状の面である必要はなく、複数の折り線で構成される概念上の面であればよく、例えば、トラス構造やラーメン構造で形成された構造上の面であってもよい。

30

【 0 0 3 6 】

重要なことは、生成面列（共有面列）から、上下側に壁面列を突出させるとき、上側と下側で壁面列が凹凸反転するように突出させ、かつ、上側の筒型構造と下側の筒型構造を変形機構において適合させる必要があることである。ここで、図7は、剛性が付与された剛体折り可能な可折構造物の展開状態と折り畳み状態を示す図である。

【 0 0 3 7 】

サンドイッチ構造の上側の筒型構造と下側の筒型構造で、変形機構を適合させなければ、図7に示すように折り畳むことができない。一方、上側と下側で同方向に壁面列を突出させれば、上側の筒型構造と下側の筒型構造で、変形機構を適合させることができるものの、それは単一構造を平行に配置したに過ぎず構造的性質は変わらないので、捩れ方向の反転による剛性が付与されることがない。この問題を解き、幾何学的パラメータを得る方法については、後に詳述する。なお、図7は、任意の柱面を生成面列として作成された折り畳み構造の例を示している。ここで、図8は、任意の単曲面の生成曲面（共有面列）から得られた、サンドイッチ構造を示す図である。図8は、任意の可展面を生成面列として作成された可折構造物の一例を示している。

40

【 0 0 3 8 】

本発明にかかる一般化形状の実施の形態によれば、図8に示すように展開状態と折り畳み状態とを移行する場合に、共有面まわりの折り角の伝播量が右回り（一方の壁面列を伝

50

わる場合)と左回り(他方の壁面列を伝わる場合)で等しいため、折り畳まれる構造に矛盾を生じることなく可折性を発揮することができる。また、共有面列の上側と下側では、擦れ方向が正負反転することにより、擦れを打ち消し合い、構造の組み合わせとして剛性が付与され、非一様な伸縮を抑制することができる。

【0039】

以上で、本実施の形態にかかる可折構造物の一例の説明を終える。このような展開時に剛性が付与される可折構造物の条件や構成、製造方法については以下にも説明する。なお、以下の説明において、自動で行うものと記載された構成や処理を手動にて行ってもよく、手動で行うものと記載された構成や処理を自動にて行ってもよいものである。また、以下の実施の形態においては、可折構造の一例として折紙構造や折り畳み構造を例示することがあるが、可折構造は、折紙構造や折り畳み構造に限られず、平坦可折構造や、剛体可折構造のほか、平坦に折り畳むことができないが折り変形可能な可折構造であってもよいものである。したがって、本実施の形態の説明において、「折紙構造」との記載を「平坦可折構造」、「剛体可折構造」あるいは「可折構造」と読み替えて実施してもよいものである。また、本実施の形態の説明において、「折り畳み」との記載を「折り変形」、「折り畳み状態」を「折り変形後の状態」と読み替えてもよいものである。

【0040】

[2. 製造装置100の構成]

つづいて、本実施の形態にかかる可折構造物の製造装置100の構成について説明する。図9は、本実施の形態が適用される製造装置100の構成の一例を示すブロック図であり、該構成のうち本実施の形態に関係する部分のみを概念的に示している。なお、製造装置100は、公知のコンピュータ支援設計(Computer Aided Design)の手段を備えていてもよい。

【0041】

図9において製造装置100は、概略的に、製造装置100の全体を統括的に制御するCPU等の制御部102、通信回線等に接続されるルータ等の通信装置(図示せず)に接続される通信制御インターフェース部104、入力部112や出力部114に接続される入出力制御インターフェース部108、および、各種のデータベースやテーブルなどを格納する記憶部106を備えて構成されており、これら各部は任意の通信路を介して通信可能に接続されている。

【0042】

記憶部106に格納される各種のデータベースやテーブル(幾何パラメータ記憶部106a等)は、固定ディスク装置等のストレージ手段であり、各種処理に用いる各種のプログラムやテーブルやファイルやデータベースやウェブページ等を格納する。

【0043】

このうち、幾何パラメータ記憶部106aは、可折構造物の設計条件や、幾何学的パラメータを記憶する幾何パラメータ記憶手段である。一例として、幾何パラメータ記憶部106aは、可折構造物の展開図データ(例えば平面図に山折線や谷折線等が記入された図面)を記憶してもよい。

【0044】

また、図9において、入出力制御インターフェース部108は、入力部112や出力部114の制御を行う。入力部112としては、キーボードやマウス、タッチパネル等を用いることができる。また、可折構造物の出力手段として、出力部114は、印刷機や3Dプリンター、レーザーカッター等であってもよい。表示手段としての出力部114としては、モニタ(家庭用テレビやタッチスクリーンモニタ等を含む)等を用いることができる。

【0045】

また、図9において、制御部102は、OS(Operating System)等の制御プログラム、各種の処理手順等を規定したプログラム、および所要データを格納するための内部メモリを有し、これらのプログラム等により、種々の処理を実行するための

情報処理を行う。制御部 102 は、機能概念的に、折紙構造生成部 102 a、筒型構造形成部 102 b、および、構造出力部 102 c を備えて構成されている。

【0046】

このうち、折紙構造生成部 102 a は、のちの共有面列となる生成面列から、二つの壁面列を有する等価な折紙構造を可折構造の一例として生成する可折構造生成手段である。なお、折紙構造生成部 102 a は、等価な折紙構造を生成することに限られず、平坦可折構造や剛体可折構造等の可折構造を生成してもよいものである。ここで、折紙構造生成部 102 a によって生成された折紙構造や平坦可折構造、剛体可折構造等の可折構造の幾何学的パラメータは、幾何パラメータ記憶部 106 a に格納される。ここで、本実施の形態において、生成面列から二つの壁面列を有する等価な折紙構造を生成するための 2 種類の適合性条件を例示する。ここで、図 10 は、図 6 の折り畳み構造から等価な折紙構造を抽出した 3 面列のアレイ構造を示す図である。

10

【0047】

(変形機構の適合性条件)

具体的な変形機構の適合性条件を扱うために、複雑な折り畳み構造を単純化して単位構造のみを考える。図 10 の下段 (SA-3) は、図 3 のサンドイッチ構造のうち、共有面列と、上側の一つの筒型構造と、下側の一つの筒型構造を抽出したものである。

【0048】

図 6 に示したサンドイッチ構造の共有面列の上側の筒型構造と下側の筒型構造は、共有面列に接する面の列である壁面列の法線方向で規定することができる。そのため、さらに単純化して図 10 の中段 (SA-2) のように、片側の壁面列と、共有面列と、もう一方の壁面列の 3 列を連結したアレイ構造を考えればよいことになる。壁面列は、法線方向のみが重要であるため、図 10 の上段 (SA-1) のように、共有面の反対側に延長しても、変形機構の性質は保たれるため、一方の壁面のみ延長したものを以下の適合性条件検討のための基本アレイ構造とする。また、両側の壁面列が自己交差する場合、法線方向を変えずにそれぞれの面を適切に平行移動することで自己交差のないアレイ構造としても、変形機構の性質は保たれる。このようにモデル化したアレイ構造において、3 列の四辺形列の変形機構を適合させることができる適合性条件は、以下の 3 つである。

20

【0049】

(変形機構の適合性条件 1)

図 11 は、平行面群による基本アレイ構造と筒型構造を示す図である。図 11 に示すように、左右の壁面列が平行となっている場合、共有面列となす折り線も平行となり、二つの筒型構造の変形機構は適合する。ただし、3 種類の面群の法線方向は、左右の壁面列が平行であることから、実質上 2 種類となるため、単体の筒型構造と構造的に同等である。すなわち、二つの筒型構造の変形機構は適合するものの、共有面における捩れ特性も同方向となってしまうために、展開時に剛性が付与されず、非一様な変形が抑制されない。したがって、この適合性条件 1 は、本実施の形態から却下される。

30

【0050】

(変形機構の適合性条件 2)

図 12 は、鏡映対称面群による基本アレイ構造と筒型構造を示す図である。図 12 の SA-1 に示すように、共有面列が柱面であり (面を繋ぐ稜線が平行であり)、柱面に直交する平面に関して、両側の壁面列が鏡映対称の関係にある場合、二つの筒型構造の変形機構は適合する。このとき鏡映対称性から捩れ特性は反転し、非一様な変形が抑制される剛性が付与される。なお、このとき、共有面列と壁面列がなす折り線も鏡映対称となり、折り線の凹凸が反転する。

40

【0051】

(変形機構の適合性条件 3)

図 13 は、二方向平坦折り可能条件による基本アレイ構造と筒型構造を示す図である。共有面列が自由な単曲面であり、 $3 \times n$ のアレイ構造の各内部頂点における内角について、二方向平坦折り可能条件を満たすためには、対角の和が 180° となるか対角が等しく

50

なり、かつ稜線における二面角が 0° あるいは 180° とはならないものである必要がある。なお、壁面と共有面の境界の頂点において対角が等しくなる場合、機構の適合性を保ったまま壁面を延長した場合には対角の和が 180° となる。なめらかな曲面の場合は、壁面と共有面の境の曲線状の折り線において可展となり、かつ母線と折り線の接線のなす角が折り線を境にして左右で等しいもの（展開図上で母線が曲線に対して鏡映の位置にあるもの）あるいはその壁面を共有面の反対側に延長したものである必要がある。本実施の形態において、なめらかな曲面筒構造は、2対の平行面が空間中を動いてできる包絡面として定義できる構造であり（非特許文献1参照）、その平行面によって曲面ができるときの各々の位置における共有面列上の線を母線という。なお、この適合性条件3にて生成された可折構造物の構造全体に対称性はなくてもよい。ここで、一方の壁面列と共有面列の10
 接続する折り線の凹凸と他方の壁面列のなす凹凸の正負が等しくなる場合と反転する場合がある。ここで、正負が等しい場合は捩れ特性の関係が平行配置と実質的に等しく、展開時に剛性が付与されないため本実施の形態から却下される。折り線の凹凸の正負が反転するとき、捩れ特性の関係が鏡映対称配置と実質的に等しくなり、剛性が付与される。ここで、図14は、左からそれぞれ、変形機構の適合性条件1, 2, 3を満たすときの各面の内角の関係を示す図である。

【0052】

図14(b)に示すように、変形機構の適合性条件2では、共有面の稜線が平行であり、共有面列と左右の壁面列の折り線および内角が、左右で一致しており、展開図において線対称の図形となっている。折紙構造生成部102aは、一例として、この変形機構の20
 適合性条件2を満たすようにアレイ構造を生成して、等価な折紙構造を生成してもよい。

【0053】

また、図14(c)に示すように、変形機構の適合性条件3では、展開図において、各内部頂点における内角について、対角の和が 180° となっている。すなわち、図14(c)に図示のごとく、内角 A_1 の対角は、 $\pi - A_1$ となっており、内角 B_1 の対角は、 $\pi - B_1$ となっている。また、内角 A_2 の対角は、 $\pi - A_2$ となっており、内角 B_2 の対角は、 $\pi - B_2$ となっている。また、他方の側面列においても図示のごとく、内角 α_1 の対角は、 $\pi - \alpha_1$ となっており、内角 β_1 の対角は、 $\pi - \beta_1$ となっている。また、内角 α_2 の対角は、 $\pi - \alpha_2$ となっており、内角 β_2 の対角は、 $\pi - \beta_2$ となっている。なお、30
 反対に、図示の $\pi - A_1$, $\pi - B_1$, $\pi - A_2$, $\pi - B_2$, $\pi - \alpha_1$, $\pi - \beta_1$, $\pi - \beta_2$ を内角ととらえても、その対角は、それぞれ、 A_1 , B_1 , A_2 , B_2 , α_1 , β_1 , α_2 , β_2 であり、対角の和は 180° の性質がある。折紙構造生成部102aは、一例として、各内部頂点における内角について対角の和を 180° とし、一方の壁面列を介した折り角の伝播量と、他方の壁面列を介した折り角の伝播量とが等しくなるように内角を決定していくことにより、アレイ構造を生成してもよい。なお、伝播量の計算手法については、後ほど詳述する。

【0054】

一例として、以上のように、折紙構造生成部102aは、生成面列と二つの壁面列を有するアレイ構造を生成することにより、等価な折紙構造を生成してもよい。なお、折紙構造生成部は、SA-1のように、生成面列に対して同じ側に二つの壁面列を生成した場合40
 は、SA-2のように、一方の壁面列を、生成面列を貫通して延長することにより、生成面列の上下に壁面列を生成し、等価な折紙構造を生成することができる。

【0055】

具体的には、適合性条件2の構造の場合、一例として、折紙構造生成部102aは、柱面である生成面列（共有面列）に任意の台形列を接続させ片側の壁面列とする、柱面に垂直な任意の平面に対して鏡映対称に複製した構造を生成する（図12のSA-1参照）。その場合、折紙構造生成部102aは、複製した面列を、生成面（共有面）を境にして反対側に延長することでもう一方の壁面列を生成してもよい（図12のSA-2参照）。上述のような延長操作を行っても、構造体の性質は変わらないため、変形機構の適合性は維持される。50

【 0 0 5 6 】

再び図 9 に戻り、筒型構造形成部 1 0 2 b は、折紙構造生成部 1 0 2 a により生成された等価な折紙構造（生成面列および二つの壁面列の組合せ）に基づいて、共有面となる生成面の両側に筒型構造を形成させる筒型構造形成手段である。具体的には、筒型構造形成部 1 0 2 b は、生成面列の両側に平行にオフセットさせた面列と、それぞれの壁面列から平行にオフセットさせた面列とによって、筒型構造を形成させてもよい（上述した図 1 0 ~ 図 1 3 の S A - 2 から S A - 3 の操作を参照のこと）。

【 0 0 5 7 】

例えば、折紙構造生成部 1 0 2 a によって、適合性条件 2 を満たす等価な折紙構造が生成された場合（図 1 2 の S A - 1 ~ 2 参照）、筒型構造形成部 1 0 2 b は、図 1 2 の S A - 2 ~ 3 に示すように、壁面列を柱面の母線方向に沿って平行移動させてコピーさせ、上面を生成面に平行な面列で繋げば、片面に筒型構造ができる。折紙構造生成部 1 0 2 a は、同等の操作を反対側にも施して筒型構造を両側に取得してもよい。

【 0 0 5 8 】

また、例えば、折紙構造生成部 1 0 2 a によって、適合性条件 3 を満たす等価な折紙構造が生成された場合（図 1 3 の S A - 1 ~ 2 参照）、筒型構造形成部 1 0 2 b は、折紙構造生成部 1 0 2 a により生成された生成面列（共有面列）と壁面列から筒型構造を作る。具体的には、筒型構造形成部 1 0 2 b は、生成面列（共有面列）を一定の距離だけオフセットさせ（面からの等距離の面を作ってそれらを繋ぐ面列を再構成する操作）、また壁面列を一定の距離だけオフセットさせることで、二対の平行な面列を作成してもよい。そして、筒型構造形成部 1 0 2 b は、これらを連結させることで、筒型構造を形成させることができる。

【 0 0 5 9 】

なお、筒型構造形成部 1 0 2 b は、オフセット操作を繰り返し実行することにより、生成面（共有面）の片側に平行面列を複数形成させてセル状構造を形成させてもよい。共有面列の片側の筒型構造の接合は、公知の平行接合と同等の操作を行ってもよい。なお、以上のように筒型構造形成部 1 0 2 b によって形成された筒型構造の幾何学的パラメータは、幾何パラメータ記憶部 1 0 6 a に格納される。

【 0 0 6 0 】

ここで、筒型構造形成部 1 0 2 b は、製造する可折構造物の素材の厚みに応じて設計の調整を行ってもよい。すなわち、製造しようとする可折構造物の素材が、紙などのように薄い場合は、可折性が自明であるが、素材の厚みが所定値以上で大きい場合に、設計通りに折り曲げることができなくなる。そこで、筒型構造形成部 1 0 2 b は、折り変形させる部分で厚みが干渉しないように、設計調整を行ってもよい。厚みのある剛性素材の場合、可折性を担保するには、ヒンジシフト（Hinge Shift）法と、ボリウムトリム（Volume Trim）法があるが、筒型構造形成部 1 0 2 b は、公知のヒンジシフト法を用いて設計調整を行ってもよく（米国特許第 7 7 9 4 0 1 9 号公報、Yan Chen, Rui Peng, Zhong You, “Origami of thick panels” Science, 349 (6246), 2015 等参照）、公知のボリウムトリム法を用いて設計調整を行ってもよい（Tachi T. “Rigid-Foldable Thick Origami”, Origami 5. Fifth International Meeting of Origami Science, Mathematics, and Education, A K Peters / CRC Press 2011, Pages 253 ~ 263 等参照）。

【 0 0 6 1 】

また、構造出力部 1 0 2 c は、筒型構造形成部 1 0 2 b により形成された筒型構造の複合体データを出力部 1 1 4 に出力して、可折構造物を製造する構造出力手段である。例えば、構造出力部 1 0 2 c は、筒型構造形成部 1 0 2 b により形成され幾何パラメータ記憶部 1 0 6 a に記憶された展開図データを、印刷機の出力部 1 1 4 に印刷出力してもよい。

また、構造出力部 102c は、筒型構造形成部 102b により形成された可折構造物データを、3Dプリンターとしての出力部 114 に出力して、折り畳み可能な立体構造物を製造してもよい。また、構造出力部 102c は、筒型構造形成部 102b により形成された展開図データに基づいて、レーザーカッター等の出力部 114 にて金属板から展開図形状を切り出してもよい。なお、各面を接合させて可折構造物の製造は、手動で行ってもよく工業ロボット等により自動で行ってもよい。

【0062】

また、図9において、通信制御インターフェース部 104 は、製造装置 100 とネットワーク 300（またはルータ等の通信装置）との間における通信制御を行う装置である。すなわち、通信制御インターフェース部 104 は、他の外部装置 200 または局と、通信回線（有線、無線を問わない）を介してデータを通信する機能を有する。なお、ネットワーク 300 は、顧客端末 100 と外部装置 200 とを相互に接続する機能を有し、例えば、インターネット等である。

10

【0063】

なお、製造装置 100 は、生成曲面や幾何パラメータ等の各種データベースや、本発明にかかるプログラム等の外部プログラム等を提供する外部装置 200 と、ネットワーク 300 を介して通信可能に接続して構成されていてもよい。また、この製造装置 100 は、ルータ等の通信装置および専用線等の有線または無線の通信回線を介して、ネットワーク 300 に通信可能に接続されていてもよい。

【0064】

20

また、図9において、外部装置 200 は、ネットワーク 300 を介して、製造装置 100 と相互に接続され、利用者に対して幾何学的パラメータ等のデータに関する外部データベースやプログラム等の外部プログラム等を実行するウェブサイトを提供する機能を有してもよい。ここで、外部装置 200 は、WEBサーバやASPサーバ等として構成していてもよく、そのハードウェア構成は、一般に市販されるワークステーション、パーソナルコンピュータ等の情報処理装置およびその付属装置により構成していてもよい。また、外部装置 200 の各機能は、外部装置 200 のハードウェア構成中のCPU、ディスク装置、メモリ装置、入力装置、出力装置、通信制御装置等およびそれらを制御するプログラム等により実現される。

【0065】

30

以上で、本実施の形態にかかる可折構造物の製造装置 100 の構成の説明を終える。

【0066】

[3. 製造方法の処理]

次に、このように構成された本実施の形態における可折構造物の製造装置 100 の処理の例について、以下に図15～図18を参照して詳細に説明する。図15は、本実施の形態の製造装置 100 における適合性条件 2 の可折構造物を製造するための処理の一例を示すフローチャートである。

【0067】

図15に示すように、まず、製造装置 100 の折紙構造生成部 102a は、任意の柱面を生成面列として取得する（ステップSB-1）。ここで、折紙構造生成部 102a は、利用者に入力部 112 を介して、曲線や曲率を入力させるように制御してもよく、入力された曲率や曲線に近似する柱面を生成面列として取得してもよい。曲率や曲線に近似する柱面を取得するために公知の幾何近似手法を用いてもよい。

40

【0068】

そして、折紙構造生成部 102a は、柱面とした生成面列に、任意の台形列を接続させ、片側の壁面列とし、柱面に垂直な任意の平面に対して鏡映対称に複製した構造を、もう片側の壁面列として生成する（ステップSB-2）。なお、得られた二つの壁面列は共有面に対して同じ側にあるので、折紙構造生成部 102a は、複製した壁面列の一方を、共有面を境にして反対側に延長することで、もう一方の壁面列を生成する。

【0069】

50

そして、筒型構造形成部 102b は、折紙構造生成部 102a により生成された生成面と二つの壁面列に基づいて、壁面列を柱面の母線方向に沿って平行移動させて複製させ、上面を生成面に平行な面列で繋ぐことにより、片面の筒型構造を生成する（ステップ S B - 3）。なお、折紙構造生成部 102a は、同等の操作を反対側にも施して筒型構造を両側に取得する。

【0070】

そして、構造出力部 102c は、筒型構造形成部 102b により形成された可折構造物の展開図データを、印刷機や 3D プリンターやレーザーカッター等の出力部 114 に出力して、可折構造物を製造する（ステップ S B - 4）。

【0071】

以上が、適合性条件 2 を満たす可折構造物を製造する処理の一例である。

【0072】

[適合性条件 3 を満たすための処理例]

つぎに、適合性条件 3 の可折構造物を製造するための処理の一例を説明するために、まず、折れ角の伝播量の計算について説明する。ここで、図 16 は、対角の和が 180° となる 4 価頂点を示す図である。なお、以下の折れ角の伝播量の計算方法については、非特許文献 2 も参照可能である。

【0073】

求める全体の機構は、4 価の頂点（4 本の折り線が集まる）の機構が矛盾なく連動することである。4 価の頂点は、既に 1 自由度の機構である。つまり一つの折り線の角度が決まったとき、残りの折り線の角度も決定する。そのため、4 価頂点から 4 価頂点へと折り角が伝播して、全ての折り角が決定する。

【0074】

このとき、折り線 a, b, c, d で囲まれた面（パネル）の周りでは、折り線 a の角度を決めると、順番に b, c, d と決定し、d が a を決定するというループができる。この折り角の伝播が一周したときに元に戻るような条件が各内部パネル（全ての頂点が 4 価頂点であるようなパネル）について成立する必要がある。

【0075】

折り線の角度を折り角（二面角の補角）の半角のタンジェント $\tan(\rho/2)$ で表したとき、適合性条件 3 を満たす 4 価頂点まわりの四つの折り線の折り角は、以下となる（非特許文献 2 参照）。

【数 1】

$$\left(\tan\frac{\rho_0}{2}, \tan\frac{\rho_1}{2}, \tan\frac{\rho_2}{2}, \tan\frac{\rho_3}{2}\right) = \left(k(\alpha, \beta) \tan\frac{\rho_1}{2}, \tan\frac{\rho_1}{2}, -k(\alpha, \beta) \tan\frac{\rho_0}{2}, \tan\frac{\rho_0}{2}\right)$$

【0076】

なお、 $k(\alpha, \beta)$ は、隣り合う折り線の折り角の伝播の量を表す係数であり、適合性条件 3 を満たすときのみ、図 14 (c) の合流する 2 つの矢印のように伝達量が時計回りと反時計回りで等しくなることから、面の内角にのみに対して一意に決定し、折り畳み変形によって変化しない定数となる。

【数 2】

$$k(\alpha, \beta) = \frac{\tan\frac{\alpha}{2} - \tan\frac{\beta}{2}}{\tan\frac{\alpha}{2} + \tan\frac{\beta}{2}} \quad (2)$$

【0077】

変形機構の動きが整合する条件は、一つの四角形パネルについて、この四つの頂点で伝播するそれぞれの折り角が、これらの頂点においてこの関係を保ったまま変形できる恒等

10

20

30

40

50

式が成立することである。すなわち、上述の図 1 4 (c) の中心の四角形において、以下の式が成立する必要がある。

【数 3】

$$k(\alpha_1, \beta_1):k(\alpha_2, \beta_2) = k(A_1, B_1):k(A_2, B_2) \quad (3)$$

【0078】

ここで、全ての内部四角形において式(3)を満たせば、変形機構が成立し、モデル内の全ての折り線の折り角 ρ_i の半角のタンジェントは、互いの比を保存しながら変化する。この変化はパラメータ $t: 0 \rightarrow \infty$ を用いて、以下の式で表せる。

10

【数 4】

$$\left(\tan \frac{\rho_1(t)}{2}, \tan \frac{\rho_2(t)}{2}, \dots, \tan \frac{\rho_n(t)}{2} \right) = (K_1, K_2, \dots, K_n)t \quad (4)$$

ここで、 $K_1, K_2, \dots, K_n$ は定数。

【0079】

ここから、次の簡略化した条件を得ることができる。すなわち、対角の和が 180° となり、かつ折り角が 0 でない立体形状であることである。この立体形状を一つでも得ることができれば、その状態を $t = 1$ とおいて、折り角の半角のタンジェントを $K_1, K_2, \dots, K_n$ とすれば、変形機構が $(K_1, K_2, \dots, K_n)t$ として定まる。

20

【0080】

以上で、伝播量の計算方法の解説を終える。このように、一方の壁面列を介した折り角の伝播量と、他方の壁面列を介した折り角の伝播量とが、相等しくなるように内角を決定していくことで、等価な折紙構造を生成することが可能である。ここで、図 1 7 は、生成面から片側ずつ両側へ面群が生成された構造の例を示す図である。図 1 8 は、本実施の形態の製造装置 100 における適合性条件 3 の可折構造物を製造するための処理の一例を示すフローチャートである。

【0081】

30

図 1 8 に示すように、まず、製造装置 100 の折紙構造生成部 102 a は、任意の曲面を生成面列として取得する(ステップ SC-1)。ここで、折紙構造生成部 102 a は、利用者に入力部 112 を介して、曲線や曲率を入力させるように制御してもよく、入力された曲率や曲線に近似する平面の連続を生成面列として取得してもよい。曲率や曲線に近似する平面の連続を取得するために公知の幾何近似手法を用いてもよい。

【0082】

そして、折紙構造生成部 102 a は、平面の連続 $g_1, g_2, \dots, g_n$ とした生成面列に対して、一方の壁面列を介した折り角の伝播量と、他方の壁面列を介した折り角の伝播量とが等しくなるように、片側ずつ壁面列 $w_1, w_2, \dots, w_n$ を決定する(ステップ SC-2)。

40

【0083】

ここで、共有面列(生成面列)の隣接面の折り角を $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_{n-1}$ とすると、上述の式(1)から、壁面列の隣接面の折り角は $-\phi_1, -\phi_2, \dots, -\phi_{n-1}$ となる。一方、壁面列と共有面列に挟まれた折り線の折り角はすべて等しい。これを ρ とおき任意に設定すると、列方向と行方向の折り線の半角のタンジェントの比 $k_i = \tan \rho / \tan(\phi_i / 2)$ が定まる。上述の式(2)を変形すれば、内角の関係から以下の式が得られる。

【数 5】

$$\tan \frac{\beta_i}{2} = \frac{1-k}{1+k} \tan \frac{\alpha_i}{2} \quad (5)$$

【0084】

任意の初期パラメータ ρ および α_1 を定めることで、 β_1 を決定し、一つ目の頂点から放たれる折り線の角度を決定することができる。これが、 g_2 と g_3 の境の稜線に交わり、 α_2 が決定する。また、式(5)より β_2 が決定する。このように、折紙構造生成部 102a は、連鎖的に、全ての折り線の内角を決定させてもよい。なお、折紙構造生成部 102a は、反対側の壁面列に対しても同様の処理で壁面構造を決定する。

10

【0085】

再び図18に戻り、筒型構造形成部 102b は、折紙構造生成部 102a により生成された生成面と二つの壁面列に基づいて、壁面列を柱面の母線方向に沿って平行移動させて複製させ、上面を生成面に平行な面列で繋ぐことにより、片面の筒型構造を生成する(ステップSC-3)。なお、折紙構造生成部 102a は、同等の操作を反対側にも施して筒型構造を両側に取得する。

【0086】

そして、構造出力部 102c は、筒型構造形成部 102b により形成された可折構造物の展開図データを、印刷機や3Dプリンターやレーザーカッター等の出力部 114 に出力して、可折構造物を製造する(ステップSC-4)。

20

【0087】

以上が、適合性条件3を満たす可折構造物を製造する処理の一例である。

【0088】

[構造強度の実証データ]

つづいて、本実施の形態にかかるジッパー型配置の筒型構造が構造強度に優れることを、有限要素法を用いたシミュレーション結果を参照して説明する。ここで、図19は、(a)ジッパー型配置構造(zipper)、(b)平行配置構造(aligned)の片持ち梁構造を示す図である。有限要素法シミュレーションにはABAQUS Finite Element Analysisを用いた。

30

【0089】

図19に示すように、伸縮が最長の70%において、シミュレーション実験を行った。ここで、筒型構造をなす平行四辺形面の高さと幅を1、平行四辺形の内角を55度とし、また材料の厚みは高さの100分の一となる0.01とした。また材料のヤング率は100000とした。なお、左側の端部は全頂点を固定し、右側端部を図示の矢印のごとくX方向(伸縮方向)、Y方向、Z方向(上下方向)にそれぞれ1の荷重をかけた。図は変形前の形状と強調された変形後の形状を重ね表示している。なお、長さ荷重の単位は任意に取ることができ、例えば長さをcm、力をN、ヤング率をN/cm²としてもよい。どの単位系を用いてもジッパー型配置と平行配置構造の相対的關係は保たれる。

40

【0090】

ここで、図20は、横軸を筒の伸縮率として、縦軸を剛性として、伸縮率に対する剛性の変化を示すグラフ図である。図の左から、それぞれX方向、Y方向、Z方向の剛性を表す。剛性は、力の大きさを端部変位の絶対値で割った値を用いている。図20に示すように、伸縮のプロセスの広範囲において、特にX方向のジッパー配置構造(zipper)の剛性の高さが確認された。

【0091】

ここで、図21は、筒の伸縮率がそれぞれ40%、70%、95%において、YZ平面上の力の方向に対する剛性を表したグラフ図である。いずれの伸展状態においても、ジッパー型の組み合わせ構造は方向依存性が少なく、弱軸の剛性(剛性の最小値)が最大となる

50

ことが確認された。

【 0 0 9 2 】

[他の構造デザイン]

上述した可折構造物の実施の形態は一例であって、上記以外にも様々な構造物の実施の形態を得ることができる。ここで、図 2 2 は、他の構造物の実施の形態を得るための単位構造と筒型構造を示す図である。

【 0 0 9 3 】

図 2 2 に示すように、基本の筒型構造は図 2 2 a に示す単位構造からなる。図示のごとく単位構造は、 α , a , c の 3 変数からなる。これを N 回繰り返すことで、筒型構造とする。 c が一致していれば、 a , α が異なる筒型構造とも組み合わせることができる。なお、面が剛体のとき、一自由度機構であり、展開率は平たい状態での長さに対する長さの割合を % で表す。

【 0 0 9 4 】

ここで、図 2 3 は、可折構造物 A , B , C の折り畳み状態から展開状態への移行を示す図である。およその展開率が % で示されている。

【 0 0 9 5 】

図 2 3 A は、建築屋根の用途を想定しており、高い面外剛性と変形可能性を実現することができる。なお、32 個の筒型構造を交互に並べている。なお、 $\alpha = 58^\circ$ から 84° まで変化しており、 $a = c = 0.3$ [m] , $N = 16$ である。全体の断面が平面曲線に沿うように、一つずつ変化させている。97% 展開時においては 2.6 [m] のライズで 8.1 [m] $\times$ 9.3 [m] の領域を覆う。5% 折り畳み時には 5.1 [m] $\times$ 0.5 [m] $\times$ 1.3 [m] に畳まれる。

【 0 0 9 6 】

図 2 3 B は、異なる筒型構造を用いた橋梁の用途を想定しており、二方向に平坦に折り畳め、かつ高い面外剛性を持つ。両側の筒型構造は $\alpha = 55^\circ$ であり、中間部 6 個の筒型構造は $\alpha = 85^\circ$, $a = c = 25$ [mm] , $N = 5$ である。

【 0 0 9 7 】

図 2 3 C に示す折り畳み構造は、一方向に平坦に折り畳まれた状態から、96.3% 展開状態において端部が合わさり固定できる構造となっている。向かい合わせの面を順にジッパー接合する操作を 3 回連続で繰り返したところで、一つ隣の面に次の筒型をジッパー結合している。この操作を 4 回行うことで、展開したときに四つの側面が連続的に閉じる構造としている。すなわち、折り畳み状態から展開状態へと移行した場合に、それまで隣接していなかった筒型構造同士が隣接して接合可能となることにより、折り畳み状態への再移行を抑止することができる。 $\alpha = 75^\circ$, $a = c = 25$ [mm] , $N = 5$ の筒型構造 12 個からなる。

【 0 0 9 8 】

ここで、図 2 4 は、可折構造物 A , B , C の折り畳み状態から展開状態への移行を示す図である。図 2 4 A は、多角形断面を持った構造とのジッパー接合を示す図である。また、図 2 4 B は、厚みを持ったパネルで実現されたジッパー接合の例を示す図である。 $a = 80$ mm , $c = 40$ mm , $\alpha = 75^\circ$, $N = 4$ である。厚みは $t = 5$ mm と $t = 10$ mm の二種類の厚さを持つ。

【 0 0 9 9 】

また、図 2 4 C は、長さの異なる筒をジッパー接合することによるアクチュエータシステムの用途を想定している。長い筒型構造の内部に液体を入れるため、端部が固定されている。ただし、端部の非一様な変形モードによって端部固定の影響が消え、中間部は独立性を持って折り畳み可能である。一方、中間部全体はジッパー接合で、一自由度の様な変形モードを示す。

【 0 1 0 0 】

ここで、図 2 5 は、壁面の鏡映反転を用いたアーチ構造の一例を示す図であり、図 2 6 は、図 2 5 の壁面の鏡映反転を用いたアーチ構造の折り過程を示す図である。なお、この

アーチ構造は、平坦折りが可能（平坦可折性あり）である。

【 0 1 0 1 】

また、図 2 7 は、壁面の鏡映反転を用いたアーチ構造の他の例を示す図であり、図 2 8 は、図 2 7 の壁面の鏡映反転を用いたアーチ構造の折り過程を示す図である。図示の如く、この例の場合、アーチ構造は、幅を持った折り畳みとなっている。

【 0 1 0 2 】

また、図 2 9 は、曲面状サンドイッチコア（*curved sandwich core*）として鏡映反転を用いた構造の一例を示す図である。図示のように、この例の場合、平坦折りはできず平坦可折性はないものの、折り変形は可能（可折性あり）である。なお、この曲面状サンドイッチコアは、共有面列および壁面列を無限に細分化してなめらかな曲面筒構造とすることで、7 枚の面列をそれぞれなめらかな曲面で作成し、それぞれの面が曲げ変形をし、面と面の間の折り線に沿って折れることで変形する可折構造とすることができる。また、このコア構造を二枚の可撓シート材料に挿入することで、曲げ変形可能な曲面状サンドイッチ構造を構成できる。

【 0 1 0 3 】

以上で、本実施の形態の説明を終える。

【 0 1 0 4 】

[他の実施の形態]

さて、これまで本発明の実施の形態について説明したが、本発明は、上述した実施の形態以外にも、特許請求の範囲に記載した技術的思想の範囲内において種々の異なる実施の形態にて実施されてよいものである。

【 0 1 0 5 】

例えば、製造装置 1 0 0 がスタンドアロンの形態で処理を行うよう説明したが、製造装置 1 0 0 がクライアント端末（外部装置 2 0 0 など）からの要求に応じて処理を行い、その処理結果を当該クライアント端末に返却するよう構成してもよいものである。

【 0 1 0 6 】

また、実施の形態において説明した各処理のうち、自動的に行われるものとして説明した処理の全部または一部を手動的に行うこともでき、あるいは、手動的に行われるものとして説明した処理の全部または一部を公知の方法で自動的に行うこともできる。

【 0 1 0 7 】

このほか、上記文献中や図面中で示した処理手順、制御手順、具体的名称、各処理の登録データや検索条件等のパラメータを含む情報、画面例、データベース構成については、特記する場合を除いて任意に変更することができる。

【 0 1 0 8 】

また、製造装置 1 0 0 に関して、図示の各構成要素は機能概念的なものであり、必ずしも物理的に図示の如く構成されていることを要しない。

【 0 1 0 9 】

例えば、製造装置 1 0 0 の各装置が備える処理機能、特に制御部 1 0 2 にて行われる各処理機能については、その全部または任意の一部を、CPU（*Central Processing Unit*）および当該 CPU にて解釈実行されるプログラムにて実現してもよく、また、ワイヤードロジックによるハードウェアとして実現してもよい。尚、プログラムは、後述する、コンピュータに本発明に係る方法を実行させるためのプログラム化された命令を含む、一時的でないコンピュータ読み取り可能な記録媒体に記録されており、必要に応じて製造装置 1 0 0 に機械的に読み取られる。すなわち、ROM または HDD（*Hard Disk Drive*）などの記憶部 1 0 6 などには、OS（*Operating System*）と協働して CPU に命令を与え、各種処理を行うためのコンピュータプログラムが記録されている。このコンピュータプログラムは、RAM にロードされることによって実行され、CPU と協働して制御部を構成する。

【 0 1 1 0 】

また、このコンピュータプログラムは、製造装置 1 0 0 に対して任意のネットワーク 3

10

20

30

40

50

00を介して接続されたアプリケーションプログラムサーバに記憶されていてもよく、必要に応じてその全部または一部をダウンロードすることも可能である。

【0111】

また、本発明に係るプログラムを、コンピュータ読み取り可能な記録媒体に格納してもよく、また、プログラム製品として構成することもできる。ここで、この「記録媒体」とは、メモリーカード、USBメモリ、SDカード、フレキシブルディスク、光磁気ディスク、ROM、EPROM、EEPROM、CD-ROM、MO、DVD、および、Blu-ray（登録商標）Disc等の任意の「可搬用の物理媒体」を含むものとする。

【0112】

また、「プログラム」とは、任意の言語や記述方法にて記述されたデータ処理方法であり、ソースコードやバイナリコード等の形式を問わない。なお、「プログラム」は必ずしも単一的に構成されるものに限られず、複数のモジュールやライブラリとして分散構成されるものや、OS（Operating System）に代表される別個のプログラムと協働してその機能を達成するものをも含む。なお、実施の形態に示した各装置において記録媒体を読み取るための具体的な構成、読み取り手順、あるいは、読み取り後のインストール手順等については、周知の構成や手順を用いることができる。プログラムが、一時的でないコンピュータ読み取り可能な記録媒体に記録されたプログラム製品として本発明を構成してもよい。

10

【0113】

記憶部106に格納される各種のデータベース等（幾何パラメータ記憶部106a等）は、RAM、ROM等のメモリ装置、ハードディスク等の固定ディスク装置、フレキシブルディスク、および、光ディスク等のストレージ手段であり、各種処理やウェブサイト提供に用いる各種のプログラム、テーブル、データベース、および、ウェブページ用ファイル等を格納する。

20

【0114】

また、製造装置100や外部装置200は、既知のパーソナルコンピュータ、ワークステーション等の情報処理装置として構成してもよく、また、該情報処理装置に任意の周辺装置を接続して構成してもよい。また、製造装置100や外部装置200は、該情報処理装置に本発明の方法を実現させるソフトウェア（プログラム、データ等を含む）を実装することにより実現してもよい。

30

【0115】

更に、装置の分散・統合の具体的な形態は図示するものに限られず、その全部または一部を、各種の付加等に応じて、または、機能負荷に応じて、任意の単位で機能的または物理的に分散・統合して構成することができる。すなわち、上述した実施形態を任意に組み合わせて実施してもよく、実施形態を選択的に実施してもよい。

【産業上の利用可能性】

【0116】

以上詳述したように、本発明によれば、可撓性の素材で各面を構成しても、一様でない伸縮が抑制されるように剛性が付与される可折構造物、ならびに、可折構造物製造方法、可折構造物製造装置、および、プログラムを提供することができる。例えば、このような可折構造物は、蝶番を用いない扉や、屋根、仮設住宅などの建築物に利用することができる。また、コンパクトに輸送して必要な場所で展開できる、椅子などの家具や、アウトドア用品等としても有用である。また、可撓性がありながら力を伝達できるので、ソフトロボティクス工学の材料にも用いることができる。このほか、アクチュエータや、ヒンジなどを使わないで形状が変化するモーフィング翼、伸展マスト、ステント等の医療素材としても有用である。

40

【符号の説明】

【0117】

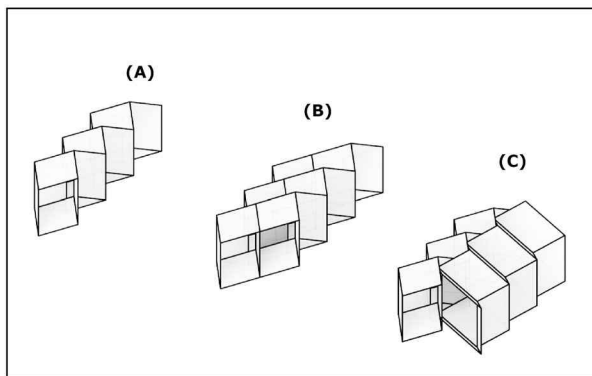
100 製造装置

102 制御部

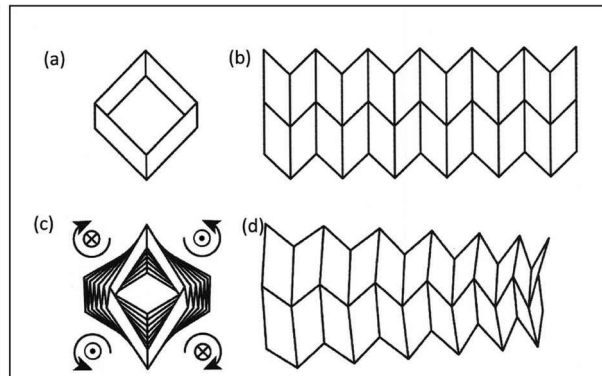
50

- 1 0 2 a 折紙構造生成部
- 1 0 2 b 筒型構造形成部
- 1 0 2 c 構造出力部
- 1 0 4 通信制御インターフェース部
- 1 0 6 記憶部
- 1 0 8 入出力制御インターフェース部
- 1 1 2 入力部
- 1 1 4 出力部
- 2 0 0 外部装置
- 3 0 0 ネットワーク

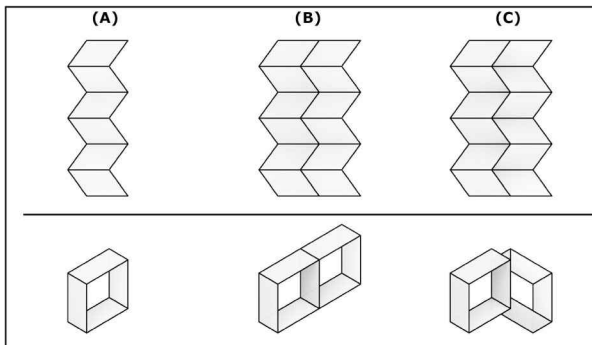
【図 1】



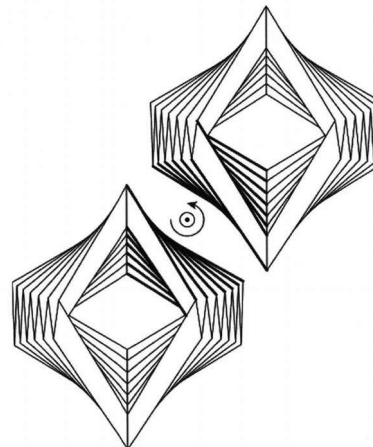
【図 3】



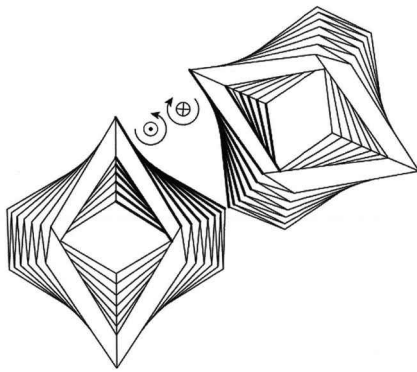
【図 2】



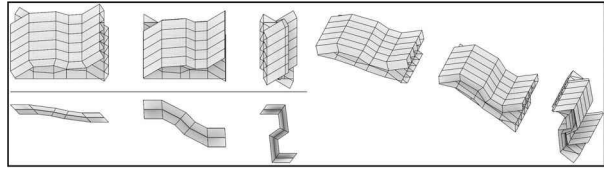
【図 4】



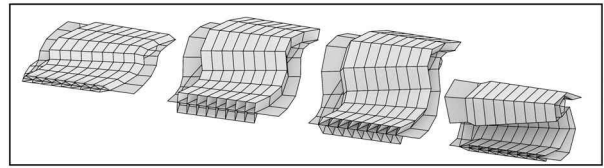
【図 5】



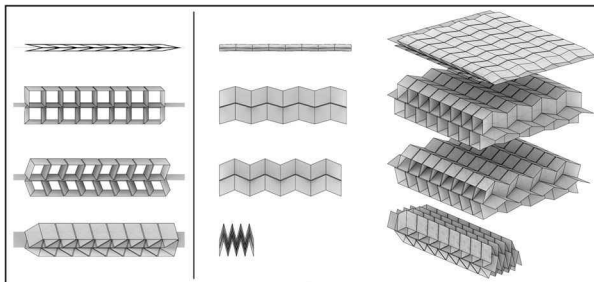
【図 7】



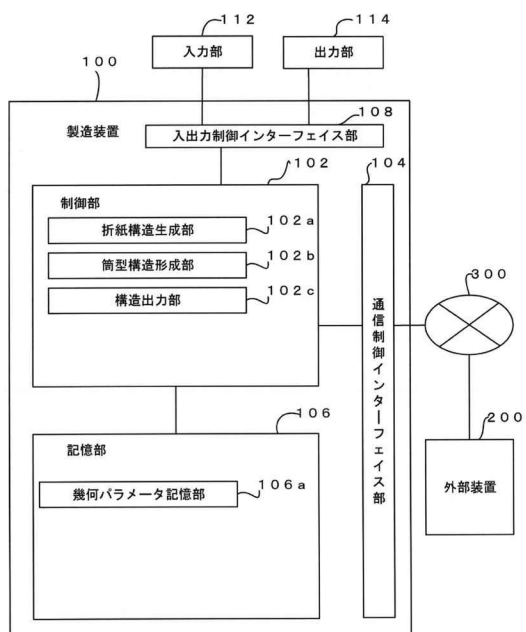
【図 8】



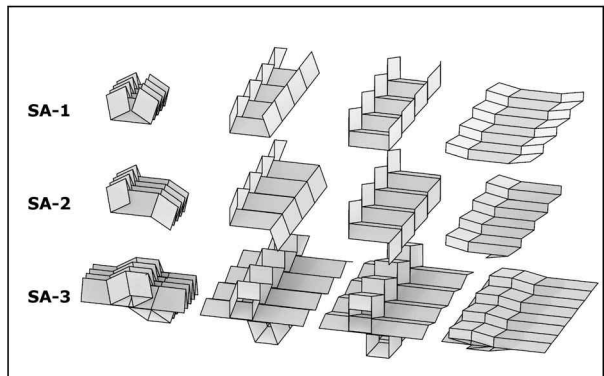
【図 6】



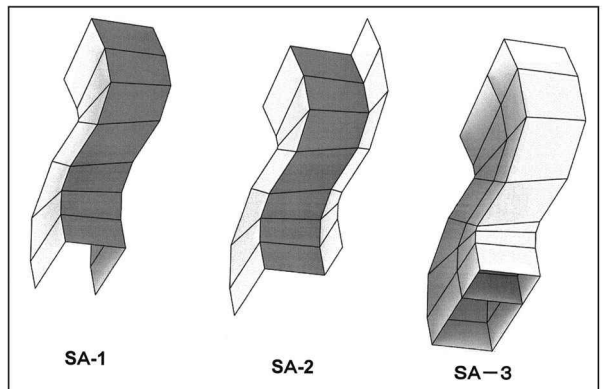
【図 9】



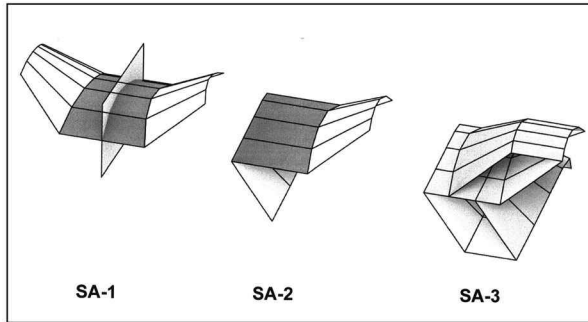
【図 10】



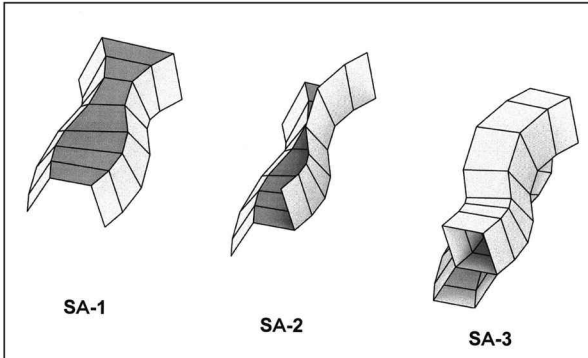
【図 11】



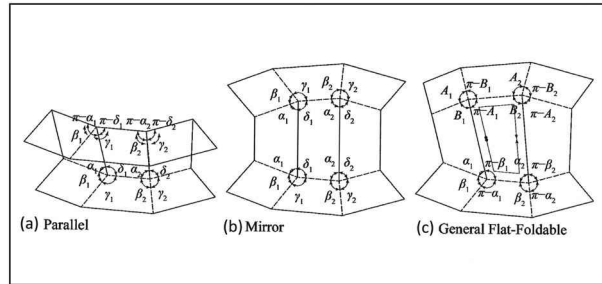
【図 12】



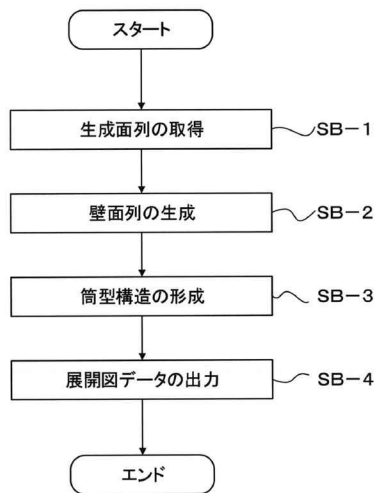
【図 13】



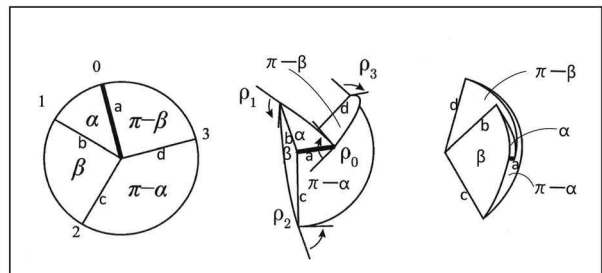
【図 14】



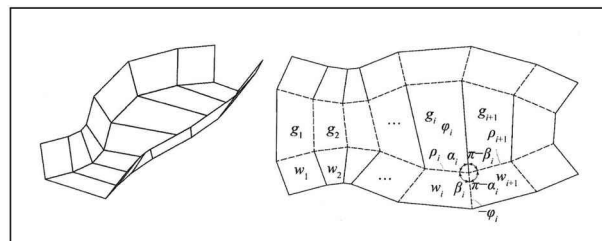
【図 15】



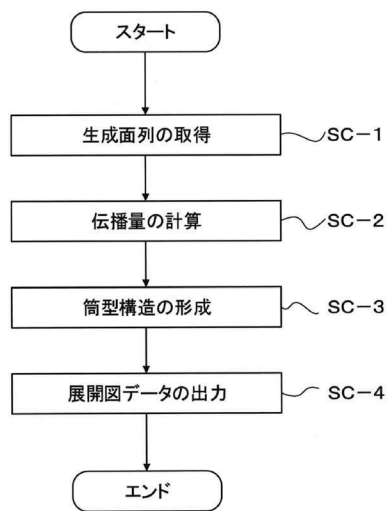
【図 16】



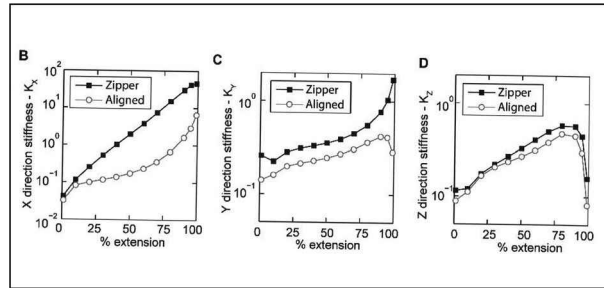
【図 17】



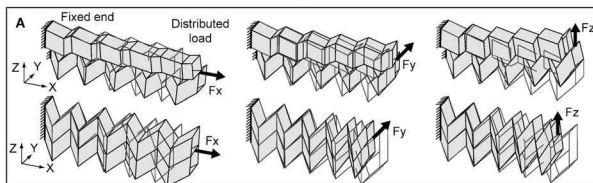
【図 18】



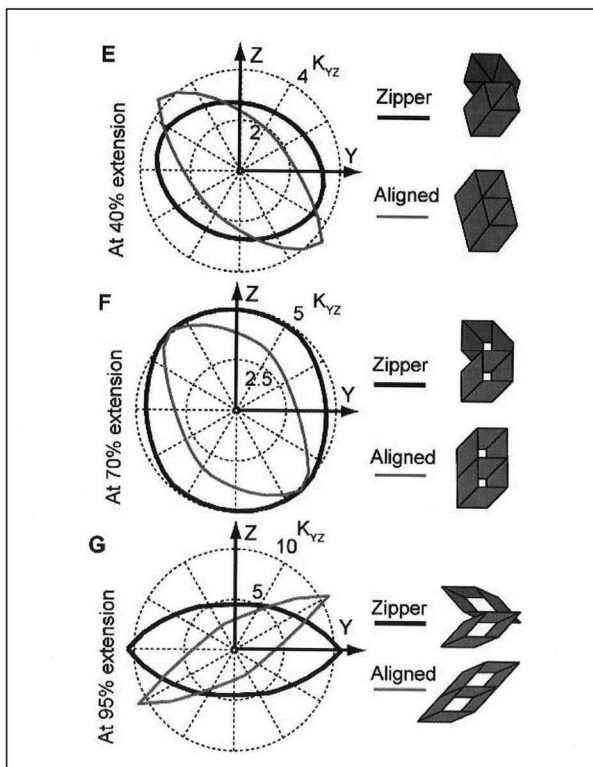
【図 20】



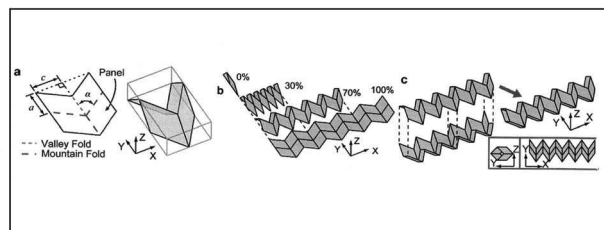
【図 19】



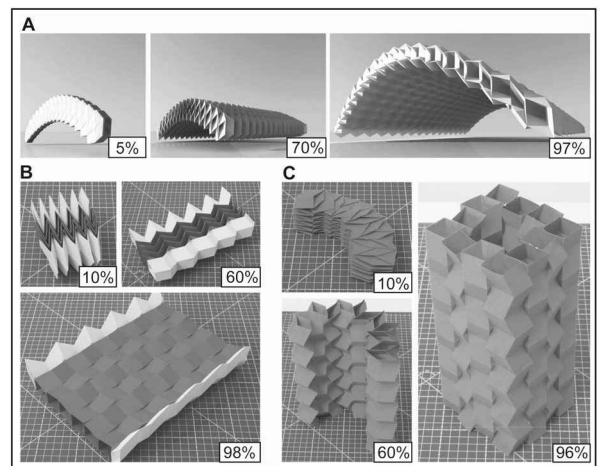
【図 21】



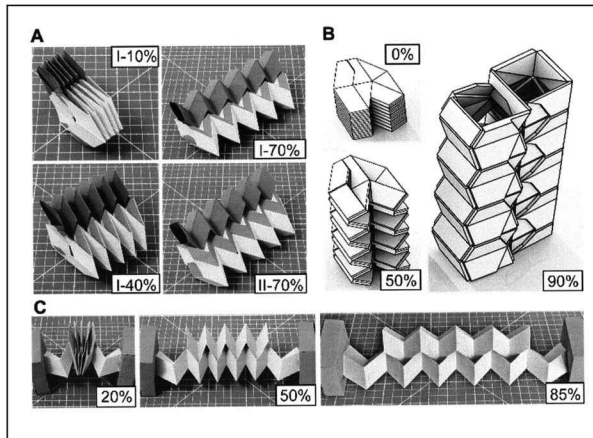
【図 22】



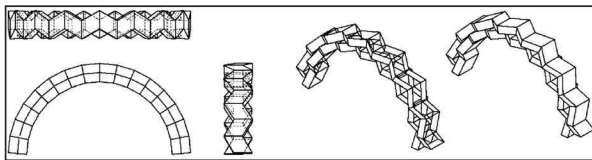
【図 23】



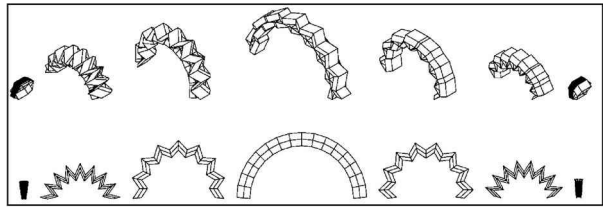
【図 24】



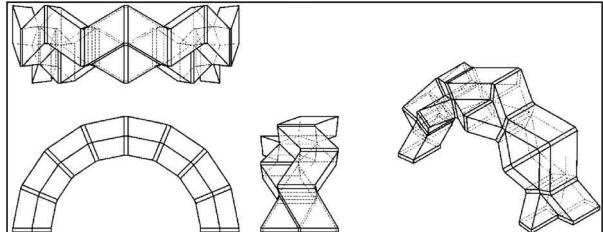
【図 25】



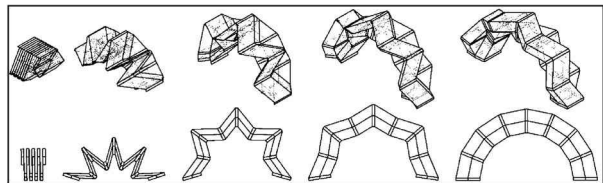
【図 26】



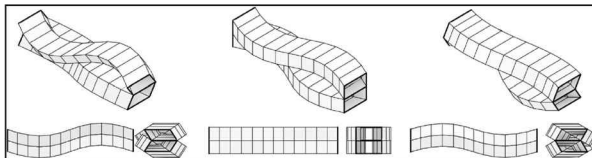
【図 27】



【図 28】



【図 29】



フロントページの続き

(72)発明者 舘 知宏

東京都目黒区駒場 3 - 8 - 1 国立大学法人東京大学内

(72)発明者 山口 泰

東京都目黒区駒場 3 - 8 - 1 国立大学法人東京大学内

(72)発明者 エフゲニ ティー フィリポフ

アメリカ合衆国 イリノイ州アーバナ MC - 250 マッシュズ アベニュー 205N.イリノイ大学内

(72)発明者 グラウシオ エイチ ポーリノ

アメリカ合衆国 ジョージア州アトランタ NW アトランティック ドライブ 790 ジョージア工科大学内

審査官 富士 春奈

(56)参考文献 特開2015 - 33772 (JP, A)

特開2012 - 42044 (JP, A)

特開2012 - 116566 (JP, A)

国際公開第2014 / 86132 (WO, A1)

三浦 公亮, 舘 知宏, 折畳める筒と、アクチュエータ、ペローズへの応用可能性, Dynamics & Design Conference 2011, 日本, 一般財団法人日本機械学会, 2011年 9月 5日, pp.3-8

石田 祥子, 野島 武敏, 萩原 一郎, 等角写像変換を利用した折り畳み可能な湾曲した筒型構造設計法, 日本応用数理学会論文誌, 日本応用数理学会論文誌, 2014年 3月25日, Vol.24, No.1, pp.43-58

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

F16S 1/00 - 5/00

B31D 5/04

B31B 50/00 - 70/99

E04B 1/343

JSTPlus / JMEDPlus / JST7580 (JDreamIII)