

(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2019-170458

(P2019-170458A)

(43) 公開日 令和1年10月10日(2019.10.10)

(51) Int.Cl.			F I			テーマコード (参考)		
<b>A63H</b>	<b>11/00</b>	<b>(2006.01)</b>	A63H	11/00	Z	2C150		
<b>A63H</b>	<b>33/10</b>	<b>(2006.01)</b>	A63H	33/10	D	3C707		
<b>B25J</b>	<b>9/08</b>	<b>(2006.01)</b>	B25J	9/08				

審査請求 未請求 請求項の数 7 O L (全 13 頁)

(21) 出願番号	特願2018-59705 (P2018-59705)	(71) 出願人	504180239 国立大学法人信州大学 長野県松本市旭三丁目1番1号
(22) 出願日	平成30年3月27日 (2018.3.27)	(72) 発明者	岩本 憲泰 長野県上田市常田三丁目15番1号 国立 大学法人信州大学繊維学部内
		(72) 発明者	西川 敦 長野県上田市常田三丁目15番1号 国立 大学法人信州大学繊維学部内
		(72) 発明者	新井 宏明 長野県上田市常田三丁目15番1号 国立 大学法人信州大学繊維学部内
		(72) 発明者	姜 洋 長野県上田市常田三丁目15番1号 国立 大学法人信州大学繊維学部内

最終頁に続く

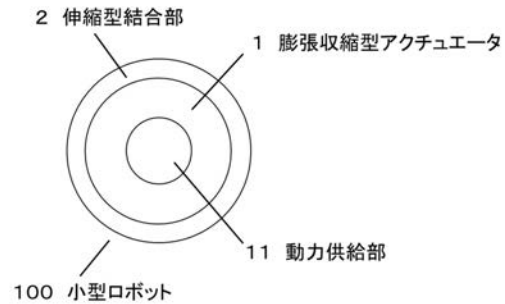
(54) 【発明の名称】 小型ロボットと小型ロボットより成るメッシュ型ロボット

(57) 【要約】 (修正有)

【課題】 シンプルな構成でしかも任意の曲面を形成できる小型ロボットと小型ロボットより成るメッシュ型ロボットを提供する。

【解決手段】 概円盤形状を有し、概円盤形状の径を変化させる膨張収縮型アクチュエータ1と、膨張収縮型アクチュエータ1の外周に設けられ、径の変化に応じて外周が変化し、しかも均等にまたは均一に結合部材が設けられた概円環状の伸縮型結合部2を含む。この小型ロボット100が複数集合してなるメッシュ型ロボットを形成する。各々の小型ロボット100は他の小型ロボット100と各々の伸縮型結合部2を介して結合している。

【選択図】 図1



**【特許請求の範囲】****【請求項 1】**

概円盤形状を有し、前記概円盤形状の径を変化させる膨張収縮型アクチュエータと、前記膨張収縮型アクチュエータの外周に設けられ、前記径の変化に応じて外周が変化し、しかも均等にまたは均一に結合部材が設けられた概円環状の伸縮型結合部を含む、小型ロボット。

**【請求項 2】**

前記概円盤形状は、軸対称形または 8 角以上の回転対称形であることを特徴とする請求項 1 に記載の小型ロボット。

**【請求項 3】**

前記膨張収縮型アクチュエータは空気圧により前記概円盤形状の径を変化させることを特徴とする請求項 1 または請求項 2 に記載の小型ロボット。

**【請求項 4】**

前記伸縮型結合部における前記結合部材は回転可能に設けられた永久磁石であることを特徴とする請求項 1 に記載の小型ロボット。

**【請求項 5】**

前記伸縮型結合部は前記複数の結合部材が弾性体により連結されてなることを特徴とする、請求項 1 に記載の小型ロボット。

**【請求項 6】**

それぞれ概円盤形状を有し、前記概円盤形状の径を変化させる膨張収縮型アクチュエータと、前記膨張収縮型アクチュエータの外周に設けられ、前記径の変化に応じて外周が変化し、しかも均等にまたは均一に結合部材が設けられた概円環状の伸縮型結合部を含む複数の小型ロボットユニットが、各々の中心部において固定されて成る小型ロボット。

**【請求項 7】**

請求項 1 または 6 に記載の小型ロボットが複数集合してなるメッシュ型ロボットであって、前記各小型ロボットは他の小型ロボットと各々の伸縮型結合部を介して結合して成る、メッシュ型ロボット。

**【発明の詳細な説明】****【技術分野】****【0001】**

本開示は、三次元形態、特に曲面を形成する、細胞の機能を有した小型ロボットおよびその集合体であるメッシュ型ロボットに関する。

**【背景技術】****【0002】**

複数の小型ロボットが移動する、または互いに接続・分離を行うことで集合体の形態が変化する、いわゆるモジュラーロボットが古くから提案されている。その一方で自然界での形態変化として生物の発生に伴う変化を研究し将来ロボットに応用する研究も進められている。例えば、多くの生物が球殻（胞胚）の状態から恣意的な外界の力を必要とせず複雑で多種多様な形態を形成する点について、興味を持っている研究者は少なくない。

**【0003】**

また、カプトムシの角のような一層の上皮シートの複雑な折り畳みからなる形態形成があり、この原理を明らかにするため実験およびシミュレーション両面から研究が行われている（非特許文献 1）。特に、近年の上皮シートの三次元モデルを用いた研究結果によって、細胞アピカル面の収縮、細胞の伸長と移動、基底面の弾性と粘性等が重要であることがわかっている（非特許文献 2）。

**【0004】**

また、数学分野の離散微分幾何では三角メッシュを基本とした円形メッシュの構成法と

10

20

30

40

50

してSchiftnerらの提案したCircle Packing Mesh (CPM)理論(非特許文献4)が知られている。

【0005】

一方、モジュラー型ロボットとしては、例えば、個々の小型ロボットが回転型のアクチュエータと連結機構を有し、複数の小型ロボットが互いに連結して任意の形状と動きを実現させた例がある(特許文献1、特許文献2)。また、正三角形の3辺すべてに回転型アクチュエータを設けた小型ロボットを折り紙のように繋いで任意の曲面形状を近似的に形成できるモジュラー型ロボットも提案されている(非特許文献3)。

【先行技術文献】

【特許文献】

10

【0006】

【特許文献1】特開2003-103063号公報

【特許文献2】米国特許US6568869

【非特許文献】

【0007】

【非特許文献1】M. Imai et al. "Three-dimensional morphogenesis of MDCK cells induced by cellular contractile forces on a viscous substrate", Scientific Reports, 2015.

【非特許文献2】S. Okuda et al., "Apical contractility in growing epithelium supports robust maintenance of smooth curvatures against cell-division-induced mechanical disturbance", J. Biomech., 2013.

20

【非特許文献3】C. H. Belke and J. Paik, "Mori: A Modular Origami Robot", Trans. Mechatronics, 2017.

【非特許文献4】A. Schiftner et al., "Packing circles and spheres on surfaces", Proc. of ACM SIGGRAPH, 2009.

30

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0008】

しかしながら、上記特許文献1、2の技術では、個々の小型ロボットのアクチュエータ動作が一軸回転に限られ、しかもアクチュエータを介して小型ロボットは一次元方向にしか拡張できないため、実現可能なモジュラー型ロボットとしては、いわゆる蛇型か、複数の蛇型の組み合わせにならざるを得なかった。

【0009】

また、非特許文献3の技術は、二次元的な拡張性はあっても、三角形の辺の長さがすべて固定されているため、実現可能な形状が制限される。もし、各辺が任意に変えられた場合、三角形はFEM解析に見られるように任意の曲面を構成することができる。しかし、このような三辺独立に長さを変えられる三角形ロボットは、実現出来たとしても、構造が非常に複雑になることは避けられない。

40

【0010】

さらに医療用、例えば手術時に内臓の形状に合わせて形状が変化するような圧排器具への応用を考えたとき、三角形メッシュでは頂点の角によって臓器を損傷させる可能性が高い、といった実用上の課題が生じる。そこで、本発明者らは、上記課題を解決するために鋭意検討を行い、新たな知見を見出すに至った。

【課題を解決するための手段】

【0011】

50

本発明に係る小型ロボットは、概円盤形状を有し、前記概円盤形状の径を変化させる膨張収縮型アクチュエータと、前記膨張収縮型アクチュエータの外周に設けられ、前記径の変化に応じて外周が変化し、しかも均等にまたは均一に結合部材が設けられた概円環状の伸縮型結合部を含む。

【0012】

前記概円盤形状は、軸対称形または8角以上の回転対称形であってもよい。

【0013】

前記膨張収縮型アクチュエータは空気圧により前記概円盤形状の径を変化させてもよい。

【0014】

前記伸縮型結合部における前記結合部材は回転可能に設けられた永久磁石であってもよい。

【0015】

前記伸縮型結合部は前記複数の結合部材が弾性体により連結されてなるものであってもよい。

【0016】

本発明に係る小型ロボットは、それぞれ概円盤形状を有し、前記概円盤形状の径を変化させる膨張収縮型アクチュエータと、前記膨張収縮型アクチュエータの外周に設けられ、前記径の変化に応じて外周が変化し、しかも均等にまたは均一に結合部材が設けられた概円環状の伸縮型結合部を含む、複数の小型ロボットユニットが、各々の中心部において固定されて成る。

【0017】

本発明に係るメッシュ型ロボットは、前記小型ロボットが複数集合してなるメッシュ型ロボットであって、前記各小型ロボットは他の小型ロボットと各々の伸縮型結合部を介して結合している。

【発明の効果】

【0018】

本発明によれば、極めてシンプルな構造で実現でき、さらに集合することで内部に空洞を保ちつつ曲面を構成するロボットを実現することができる。

【図面の簡単な説明】

【0019】

【図1】本発明の一実施形態に係る小型ロボットの構成図

【図2】図1の小型ロボットが集合したメッシュ型ロボットの動作説明図

【図3】図2の各小型ロボットの状態を表す概念図

【図4】メッシュ型ロボットの入出力を表す概念図

【図5】実施例1における膨張収縮型アクチュエータの構成図

【図6】実施例2における膨張収縮型アクチュエータの構成図

【図7】実施例3における伸縮型結合部の概念図

【図8】実施例4における伸縮型結合部の概念図

【図9】実施例5における小型ロボットの斜視図と上面図

【図10】実施例6における小型ロボットの断面図

【図11】実施例6におけるメッシュ型ロボットの外観図

【図12】実施例7におけるメッシュ型ロボットの設計方法を表す説明図

【図13】実施例7におけるメッシュ型ロボットの初期配置生成結果

【発明を実施するための形態】

【0020】

以下、本発明に係る実施の形態について図面を参照して詳細に説明する。図1に本発明に係る実施の形態（以下、本実施形態）における小型ロボットの概念図を示す。図1において、小型ロボット100は概円盤形状を有し、動力供給部11と、その外側に膨張収縮型アクチュエータ1と、さらにその膨張収縮型アクチュエータ1の外周に設けられた伸縮

10

20

30

40

50

型結合部 2 より構成される。

【 0 0 2 1 】

なお、本発明において、概円盤形状とは概円形の扁平形状、もしくは円柱形状を表し、概円形とは軸対称形または 8 角以上の回転対象形（例えば正八角柱形）を表すものとする。また、小型ロボット 1 0 0 の表面には微細な凹凸が含まれてもよいものとする。また、正多角柱形の場合、各辺の長さが 1 0 % 程度ばらついてよいものとする。

【 0 0 2 2 】

前記膨張収縮型アクチュエータ 1 は小型ロボット 1 0 0 の概円盤形状の径を変化させる。径を変化させる方法は特に限定されず、電磁的な方法、電気化学的な方法、油圧や空気圧等の物理的な方法を用いてもよい。また、形状記憶合金を用いてもよい。空気圧を利用する具体的な構成については後述の実施例で述べる。なお、空気圧の供給方法については特に限定されず、動力供給部 1 1 を介して外部から供給されるものであってもよく、動力供給部 1 1 がマイクロポンプを内蔵し、このポンプにより供給されるものであってもよい。また、化学反応により圧力を変えるものでもよい。

10

【 0 0 2 3 】

電気化学的な方法としては、例えば誘電性高分子材料に電場を作用させて屈曲変形やクリープ変形を生じさせる方法がある。誘電性高分子材料としてはポリ塩化ビニル（PVC）、ポリメタクリル酸メチル、ポリウレタン、ポリスチレン、ポリ酢酸ビニル、ナイロン 6、ポリビニルアルコール、ポリカーボネイト、ポリエチレンテレフタレート、ポリアクリロニトリル、シリコンゴム等を用いることができる。

20

【 0 0 2 4 】

伸縮型結合部 2 は、前記膨張収縮型アクチュエータ 1 の外周に設けられ、前記アクチュエータの径の変化に応じて全周が伸縮する円環形状を有する。また、伸縮型結合部 2 は円周方向のみならず、半径方向に弾性変形するものであってもよい。この機能は、複数の小型ロボットを用いて安定に曲面を近似するのに役立つ。

【 0 0 2 5 】

さらに、伸縮型結合部 2 には均等にまたは均一に結合部材 2 1 が設けられている。これらの前記結合部材は特に限定されず、磁気的方法、電気的方法、化学的方法、機械的方法、いずれの方法を採ってもよい。化学的方法としては、例えば弱粘再剥離（最貼付け可能）型粘着剤を外周面上に均一に塗布したものでよい。磁気的方法については、永久磁石を用いても電磁石を用いてもよいが、永久磁石を用いる方法については、伸縮性の実現方法も含め、後述の実施例で説明する。

30

【 0 0 2 6 】

動力供給部 1 1 は前記膨張収縮型アクチュエータ 1 に対して、膨張および収縮動作実行させるための動力源すなわちパワーを供給する。空気圧の場合は、前記のように内蔵ポンプを備えてもよいし、外部から供給される空気圧を制御するバルブを備えてもよい。電気エネルギーの場合は、内蔵電池であっても、有線または無線を用いた外部電源からの供給を中継するものであってもよい。また、動力供給部 1 1 は、ロボットの制御に必要なセンサ情報や目標値などの情報を他のロボットと、または複数のロボットを統括して制御するコンピューターと送受信する通信手段を備えていてもよい。外部からのパワーの供給や情報の送受信については後述する。

40

【 0 0 2 7 】

また、小型ロボット 1 0 0 のサイズは、特に限定はされないが、ニュートラル状態で 5 mm ~ 1 0 0 mm 程度であってもよい。また厚みは 1 mm ~ 1 0 0 mm 程度であってもよい。膨張収縮の範囲は大きいほどよいが、最大半径が最小半径に対して 2 倍程度まで変化するのが好ましい。

【 0 0 2 8 】

複数の小型ロボット 1 0 0 を集合させたときの様子を図 2 に示す。図 2 において、各小型ロボット（1 0 0）は他の小型ロボット（1 0 0'）と各々の伸縮型結合部 2 を介して結合している。特に永久磁石等で構成された結合部材 2 1 が結合に直接作用している。

50

## 【0029】

さらに、図2に示すように、各小型ロボット100は他の小型ロボット100'と接しながら、膨張または収縮動作を行う。このとき、互いの接点は適宜スライドする。その結果、CPM理論（非特許文献4）に基づき、任意の三次元曲面を近似形成することができる。さらに、一旦三次元曲面を形成した後、適当な部位にある一つまたは複数の小型ロボットを膨張/収縮動作させることにより、この三次元曲面を変化させることも可能である。

## 【0030】

なお、伸縮型結合部2に磁石等の結合部材21を均等配置して構成した場合、互いに接する小型ロボット間の接点は連続的にはスライドせず、離散的に変位する。例えば、後述の実施例の正12角形（縮小時）の小型ロボットでは、1辺当たり2個、計24個の結合部材21が最大半径時に均等間隔になるよう配置されており、15度（円周の1/24）の精度で接点が変わられる。1辺当たり1個の結合部材であっても、多角形になるほど（例えば36角形）精度は上がる（10度刻み）。

10

## 【0031】

もっとも、後述の実施例のように各結合部材21を弾性体（22）で繋いでおくと、隣接する小型ロボットと結合部材21の位置の間に多少の誤差があっても、互いに引き寄せ合う方向にそれぞれの弾性体に変形する。その結果、均等配置の状態から多少はずれるが、確実に結合部材21の永久磁石どうしを結合させることができる。

20

## 【0032】

集合体を形成する各小型ロボット100において、現在自身が置かれている状況は、図3に示されるように、自身の半径 $r$ と他のロボット100'との接点の角度（ $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\dots$ 、 $\theta_n$ ）よりなる極座標で決定される。言い換えれば、すべての小型ロボットの接点の極座標を集積することで、これらのロボットが形成する集合体の現在の全体像を特定することができる。この集合体の全体像と所望の全体像（参照曲面）との差を求め、その差が縮小するようにフィードバックをかければ、小型ロボットの集合体を所望の全体像に近づけることができる。

## 【0033】

図4に各小型ロボットに対する入出力の概念図を示す。図4において110は入力ラインを、111は出力ラインを、それぞれ表す。ここで各小型ロボットはidによって区別されているとする。膨張または収縮のための動力源（power）は、入力ライン110を通して、各小型ロボットに供給される。また、各小型ロボットがそれぞれ周囲の小型ロボットと接する位置の座標情報（ $r$ 、 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\dots$ 、 $\theta_n$ ）は、そのid情報とともに出力ライン111を通して返される。

30

## 【0034】

入力ライン110は有線でも無線でもよい。有線の場合、動力源（power）として電気を供給する導線であってもよいし、空気圧を供給するパイプであってもよい。供給される動力源が空気圧の場合、ロボットによって必要とされる供給量が異なるが、idで識別される各小型ロボット100の入り口にマイクロバルブ等を設けることで、個別に調整することができる。このとき、id情報と併せてマイクロバルブの開閉を指示する情報も入力ライン110を通じて伝送する必要がある。空気圧利用の場合は、パイプの中に導線を通してこれらの情報を伝送してもよい。

40

## 【0035】

出力ライン111は電気信号のみ伝送されるものであり、有線または無線のいずれであってもよい。有線の場合は導線を用いてもよく、さらに前記入力ライン110の導線と共有してもよい。この場合、各信号が混信するのを避けるため、周波数軸上または時間軸上で分離可能なように予めチャンネルを割り当てておいてもよい。また、前記の様に入力ライン110が導線のみで構成される場合、入力ライン110と出力ライン111とをさらにまとめて、1本の導線で実現してもよい。

## 【0036】

50

前記入力ライン 110 および出力ライン 111 と各小型ロボット 100 との接続であるが、入出力を 1 本の導線または導線内蔵の 1 本のパイプで実現する場合、当該導線またはパイプで各小型ロボット 100 を数珠状に一系列に繋いでもよい。あるいは当該導線またはパイプを格子状に組み、各交点に小型ロボット 100 を繋いでもよい。

【実施例】

【0037】

以下、本発明の実施例について説明する。

(実施例 1)

まず、本発明における小型ロボット 100 の具体例として、膨張収縮型アクチュエータ 1 が空気圧を利用するものについて、図 5 を用いて説明する。

10

【0038】

図 5 において、膨張収縮型アクチュエータ 1 は、円環状の弾性チューブ 12、13、14 と、それぞれと貫通し放射状に設けられた弾性チューブ 15、16 より構成される。動力供給部 11 は弾性チューブ 15、16 を介して、円環状の弾性チューブ 12、13、14 に空気（空気圧）を供給する。空気圧が供給された円環状の弾性チューブ 12、13、14 はその圧力に応じてその円周が伸縮し、それに伴い膨張収縮型アクチュエータ 1 の径も伸縮する。

【0039】

なお、空気圧を利用する場合、空気圧が径方向と円周方向の伸縮にのみ作用するのが好ましいが、弾性チューブでは圧力が等方に働くため、若干ではあるが厚み方向にも変化する。そこで、弾性チューブの代わりに次の実施例で示すようならせん状の折り目を有したシートを用いた膨張収縮型アクチュエータ 1 を用いてもよい。

20

【0040】

(実施例 2)

図 6 において、膨張収縮型アクチュエータ 1 におけるシート 17 には、らせん状に折り目が付けられている。図中、実線は山折りを、点線は谷折りを表す。このようなシート 17 を 2 枚、それぞれ外周部どうし、内周側どうしをシールして、中に空気圧を加えると、前記折り目を伸ばす方向に力が働き、らせんが直線に近くなるように形状変化し、その結果、（貼り合わせた）シート 17 の半径は拡大する。なお、動力供給部 11 は 2 枚のシート 17 に挟まれるように設けられても良い。このらせん状折り目シートは最大および最小半径のダイナミックレンジが非常に広く、しかも、厚み方向に広がらない、といった優れた特徴を有する。

30

【0041】

(実施例 3)

図 7 に、本発明に係る小型ロボット 100 における伸縮型結合部 2 の実施例を示す。図 7 において、伸縮型結合部 2（円環状構造の一部分のみを表示）は、複数の結合部材 21 とそれらを連結する弾性体 22 により構成される。さらに各結合部材 21 には永久磁石が回動可能に設けられている。

【0042】

図 7 において、2' は小型ロボット（100）と接する他の小型ロボット（100'）の一部を表す。一方の小型ロボット（100）と他方の小型ロボット（100'）の接点付近におけるそれぞれの結合部材中の永久磁石は、それぞれ逆極性になるように回動し、互いに吸引し、接合する。

40

【0043】

弾性体 22 は膨張収縮型アクチュエータ 1 の拡大縮小に応じて伸縮できるものであれば特に限定されず、シリコンゴムなどの樹脂系であっても、コイルバネ等の金属加工品であってもよい。より好ましくは、次の実施例で示されるような、折り畳み式フレームを用いたものであってもよい。

【0044】

(実施例 4)

50

図 8 に、本発明に係る小型ロボット 100 における伸縮型結合部 2 の他の実施例を示す。図 8 において、各結合部材 21 は折り畳み式フレーム形状の弾性体 23 によりほぼ均等に連結されている。連結方法としては結合部材 21 と同数の独立した弾性体 23 を、結合部材 21 交互に接続して、最終的に円環状の伸縮型結合部 2 を形成してもよいし、弾性体を、折り畳み部分以外を直線または平面で繋いで円環状に一体成型した後、折り畳み部分以外の部分に結合部材 21 を接着などの方法で固定して形成してもよい。後者について次の実施例で説明する。

【0045】

(実施例 5)

図 9 は、折り畳み式フレーム形状の弾性体 23 を一体成型したことを特徴とする、本発明に係る小型ロボット 100 の一実施例の斜視図 (左) および上面図 (右) である。本実施例において、小型ロボット (100) は正 12 角形 (縮小時) の扁平形状をなしており、特に外周の形状は伸縮型結合部 2 の形状により決定される。

10

【0046】

図 9 に示されるように、弾性体 23 は畳み式フレーム部とその間をつなぐ籠状のフレームが環状に一体成型されている。なお、弾性体 23 の材料は弾性変形する性質のものであれば特に限定されず、ゴム、樹脂、あるいは板バネであってもよい。本実施例では、結合部材 21 を構成する 1 対 (2 個) の永久磁石はこの籠状のフレームの両端に 1 つずつ固定される。このように弾性体 23 を一体成型すれば、よりローコストに伸縮型結合部 2 を製造することができる。

20

【0047】

なお、本実施例では籠状のフレームの両端に 1 対の磁石を配置したが、この構成により、膨張収縮型アクチュエータ 1 が最小半径に収縮したときには、隣のフレームの磁石と近接 (ほぼ一体化) するため、実質的に 1 周 12 個の磁石が配置されたのと等価になる。一方、膨張収縮型アクチュエータ 1 が最大半径に膨張したとき、弾性体 23 の畳み式フレーム部が伸びきるため、隣のフレームとの間隔が開き、1 周 24 個の間隔の磁石として機能する。

【0048】

(実施例 6)

図 10 に 2 枚の小型ロボットユニット 100 a、100 b をそれぞれの中心部で固定した小型ロボットの断面図を示す。それぞれのロボットユニットは膨張収縮型アクチュエータ 1 a、1 b および伸縮型結合部 2 a、2 b を有し、膨張収縮型アクチュエータ 1 a、1 b はそれぞれ独立に動作する。この構成により、複数の小型ロボットを集合させて曲面を形成することがさらに容易になる。なお、それぞれの小型ロボットにおける動力供給部 11 a、11 b は定形をなし、これらを貼り合わせてもよく、一体成型してもよい。さらに、2 枚の小型ロボットユニット全体を一体成型してもよい。また、2 枚に限らず複数の小型ロボットユニットを中心部で固定してもよい。

30

【0049】

例えば、図 11 に示すように、様々な曲率半径 (R) の曲面を形成するような場合、R が大きい場所に対しては小型ロボットユニット 100 a、100 b の半径差を小さく、R が小さい場所に対しては小型ロボットユニット 100 a、100 b の半径差を大きくすることで、より安定に目標とする曲面を形成することができる。

40

【0050】

(実施例 7)

本実施例では、具体的なメッシュ型ロボットの構築方法、特に任意の曲面を複数の小型ロボットで充填する場合の各ロボットの半径および接点の求め方について述べる。まず、目標とする参照曲面を設定する。次に任意の数の曲上の点を取得し、その点群を四角形の頂点群として四角形メッシュとする。次に、対角線を引いて三角形メッシュを生成する。このとき対角線が互い違いになるようにする。この後、各三角形 (図 12 の  $E_1 E_2 E_3$ ) に内接する円を配置して CPM (circle packing mesh) を得る。

50



この時点では互いに隣接する小型ロボットどうしは直接接触していない（図12の(100)および(100')）。

【0051】

このモデルに対し、レーベンバーグ・マーカート法による非線形最適化処理を行う。当最適化では、内接点同士を近づけるためのパラメータと、参照曲面とCPMを近づけるためのパラメータ、計2つのパラメータを用いる。これら2つのパラメータにそれぞれ重み付けの係数をかけて足した値が最小となるように三角形頂点群の座標を更新していく。この2つのパラメータにより、内接点を近づけつつも参照曲面から離れすぎないように最適化することができる。

【0052】

(シミュレーション)

上記の手順に従って、グラフィックライブラリOpenGLを用いてシミュレータを作製した。まず、目標値を図10のような双4次ベジエ曲面とし、横に14列、縦に18行の四角形メッシュを生成した。これに対角線を引いて計504個の内接円(小型ロボット)を配置し、これを初期状態として最適化を行った。

【0053】

前記最適化を行った結果を図13に示す。504個の小型ロボット群が、双4次ベジエ曲面形状に収束することが示された。以上のように、それぞれの目標値に対して各小型ロボット100の半径と隣接ロボットとの接触位置を最適化することより、任意の曲面を形成することができる。

【0054】

この曲面に対し力学的要素を加味する場合の考え方について、以下述べる。まず、各小型ロボットを剛体の円とした場合、運動方程式は以下の様に書ける。

【数1】

$$\begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{p} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F \\ N \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで、 $M \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  は質量  $m$  を単位行列にかけたものを、 $J \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  は慣性テンソルを、 $p \in \mathbb{R}^3$  は  $p$  を位置としたときの加速度を、 $\theta \in \mathbb{R}^3$  は  $\theta$  を各軸周りの角度としたときの角加速度を、 $F \in \mathbb{R}^3$  は外力のベクトルを、 $N \in \mathbb{R}^3$  は回転モーメントを、それぞれ表す。

【0055】

前記式(1)式を小型ロボット100の数だけ連立して各円の加速度、角加速度を求める。CPMを得るには隣接する内接点(円と三角形との接点)が直接円どうし接触するよう最適化を行っているが、内接点で完全に接触する解は無いと考えられる。つまり、2つの円(小型ロボット)が接触していなければ力は発生せず、得たCPMから外れた状態で初めて接触が発生する。

【0056】

そこで、一つの考え方として、小型ロボット100が拡大したときの半径増幅量  $r$  を設定し、拡大円同士のめり込み量で考える(図11)。 $r$  は半径の大きさに反比例する。すなわち、力のかかる位置は図12の三角形の辺  $E_1$ 、 $E_2$ 、 $E_3$  上で円が重なった距離の中間地点とする。ここに隣接円からの力  $f'_i$  ( $i=1 \sim 3$ ) と基準円からの力  $f''_i$  がかかる。よって基準円にかかる外力は  $f'_i$  と  $f''_i$  の反力の合力となり、さらに他辺においても同様に考えて、最大3方向から斥力が加わる。これは円同士がめり込んでいる場合であり、離れている場合は伸縮型結合部2として使用する性質に基づいた力が働く。特に、磁気的方法をとる場合には磁石による引力が働く。

【産業上の利用可能性】

【0057】

10

20

30

40

50

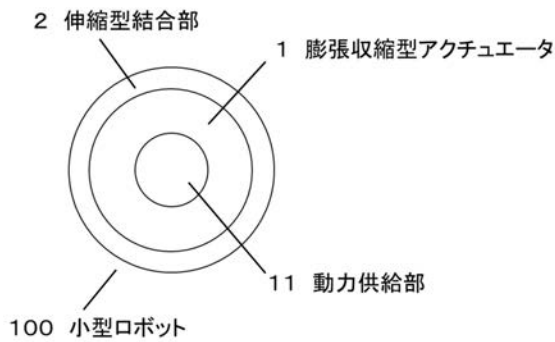
本発明は、細胞の機能を表現するシミュレータとして利用することが可能である。また、従来の3D形態形成学やメカノバイオロジーでの知見をロボットで観察可能となるとともに、新たな数理モデルの実証研究が可能となる。また、本発明は小型ロボットが狭い入口から侵入し内部空間で任意形状のメッシュ型を構成できることから低侵襲手術における圧排用の医療ロボットとしての発展が期待される。具体的には、内視鏡手術において鉗子の手先が作業可能な領域を確保するロボットとしての利用が考えられる。また、バーチャルリアリティ向けのロボットとしての利用が考えられる。

【符号の説明】

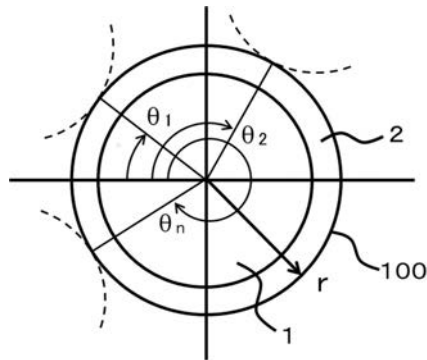
【0058】

- 1 膨張収縮型アクチュエータ
- 2 伸縮型結合部
- 11 動力供給部
- 12 ~ 14 弾性チューブ
- 17 シート
- 21 結合部材
- 22 弾性体
- 23 弾性体
- 100 小型ロボット

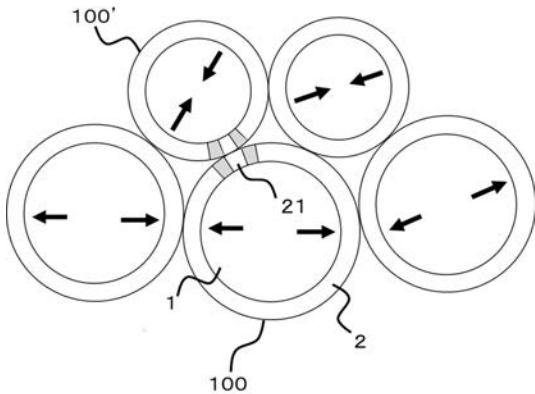
【図1】



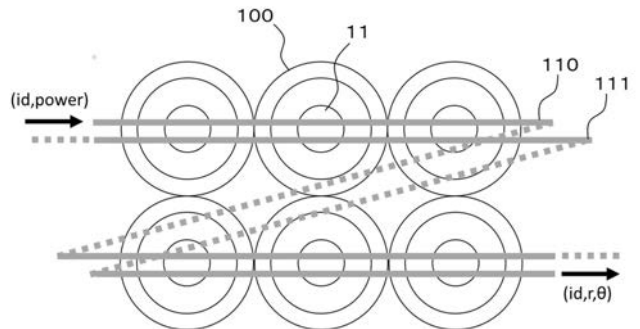
【図3】



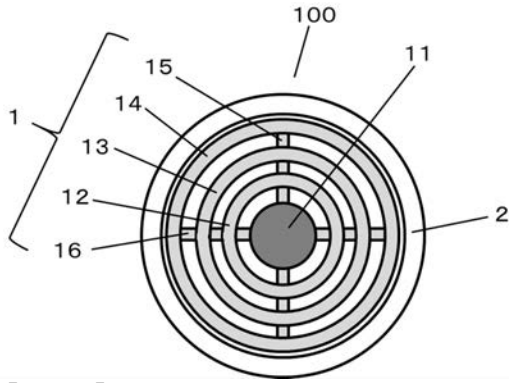
【図2】



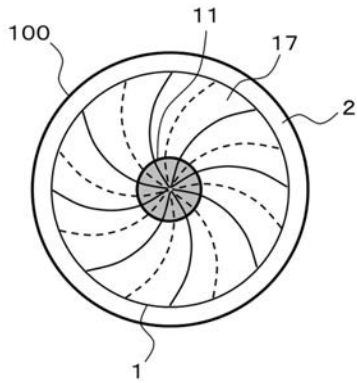
【図4】



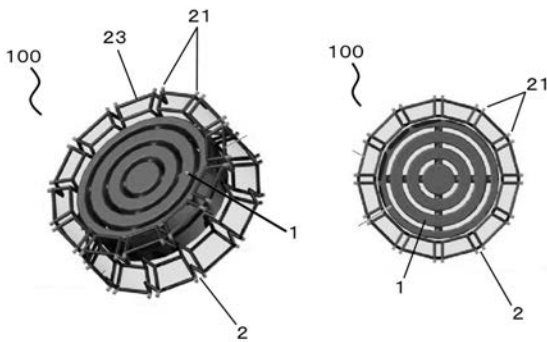
【図5】



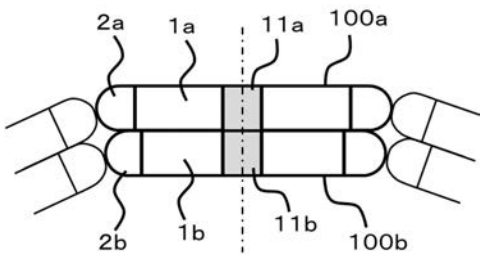
【図6】



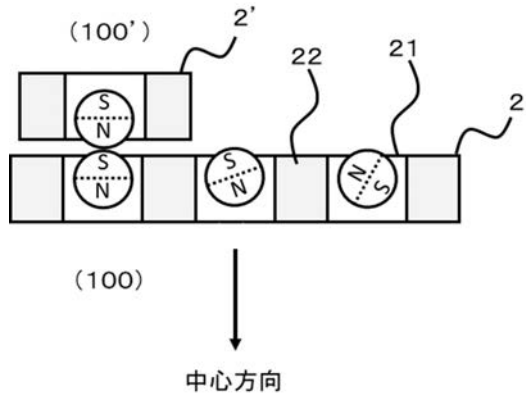
【図9】



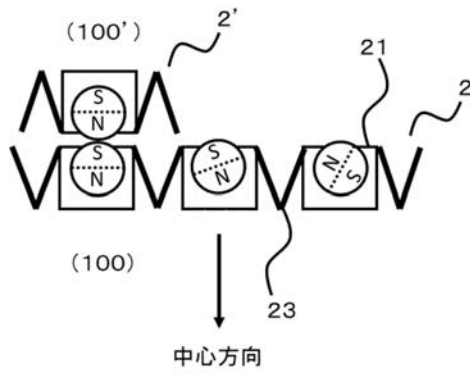
【図10】



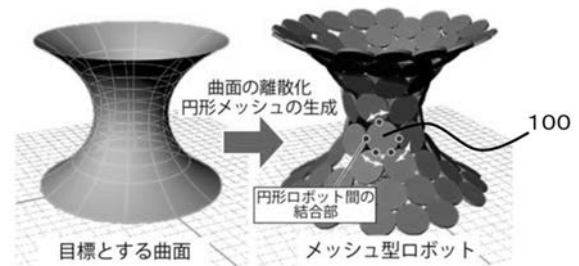
【図7】



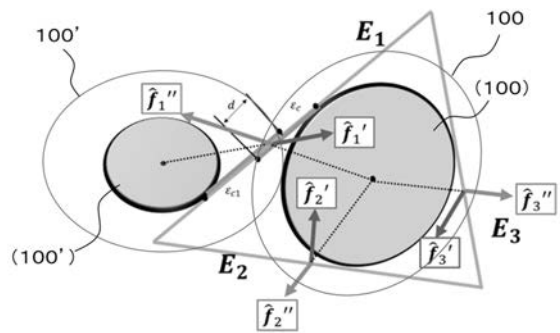
【図8】



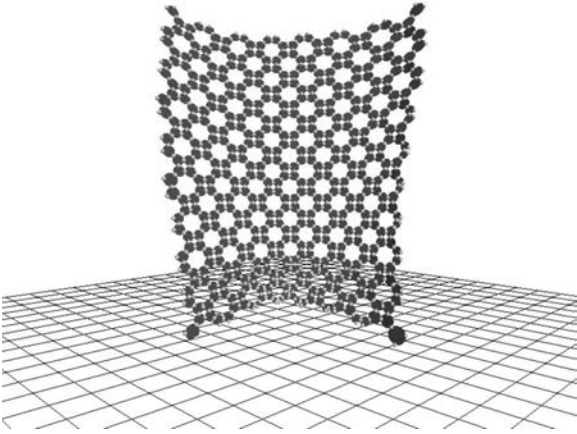
【図11】



【図12】



【 図 1 3 】



フロントページの続き

Fターム(参考) 2C150 AA05 BA23 BA26 BC01 DC03 DD04 EB11 EH09  
3C707 HS02 HS14