

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：13601

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2022

課題番号：21K14127

研究課題名（和文）曲面形状ロボットの運動学理論と形状フィードバック制御の離散微分幾何学的アプローチ

研究課題名（英文）Discrete Differential Geometry Approach to Kinematics and Shape Feedback Control for Surface Robots

研究代表者

岩本 憲泰 (Iwamoto, Noriyasu)

信州大学・学術研究院繊維学系・助教

研究者番号：30778816

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：曲面形状ロボットにおいて、形状推定と制御が容易なロボットの構造と運動学理論について研究を行った。微分幾何学から出発することでリアルタイム計算にも手が届く、形状の復元手法、曲面上の1点が与えられた位置に一致する曲面の算出手法を構築した。また、円錐台アクチュエータを25個有したS-isothermic曲面形状ロボットの具現化、平面内における等角変形の実現、3種のロボットに対する逆運動学アルゴリズムの構築を行った。特に、本研究で考案した区分的に平均曲率一定な曲面モデルは有用であると期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

曲面は家具、衣服、建築物や生物といった多くの物体の表層に位置し「かたち」の根幹をなしている。そのため、富んだ表現力を持つ曲面形状ロボットは工学分野での利用にとどまらず、様々な学問の個別の研究対象もしくは横断的な研究を促進する活性剤となると考えられる。しかし、形の制御を実現するうえで、形状推定にかかる計算量や制御・運動学理論の複雑さが問題であった。本研究では、この問題を双等温曲面や平均曲率一定曲面の活用により解決した。曲面形状ロボットに関する研究の重要な方向性を示すことができたと考えられる。

研究成果の概要（英文）：This study focuses on the structure and kinematics of robotic surfaces that facilitate shape estimation and control. Starting from differential geometry, we developed a method for shape reconstruction and finding a surface where a point on the surface coincides with a given position, which is feasible for real-time computation. We also realized a robotic S-isothermic surface with 25 truncated conical actuators, realized its conformal deformation in a plane, and constructed inverse kinematics algorithms for three types of robots. In particular, the surface model with piecewise constant mean curvature devised in this study is expected to be helpful.

研究分野：ロボット工学

キーワード：曲面形状ロボット

1. 研究開始当初の背景

曲面は家具、衣服、建築物や生物といった多くの物体の表層に位置し「かたち」の根幹をなしている。そのため、富んだ表現力を持つ曲面形状ロボットは工学分野での利用にとどまらず、様々な学問の個別の研究対象もしくは横断的な研究を促進する活性剤となると考えられる。能動的に動作する曲面の具現化例が増えてきているものの、制御理論の研究は限定されており、数学における連続な曲面の理論を一部適用したものや動力学モデルの提案に過ぎない。曲線マニピュレータの歴史を振り返ると、現在の曲面形状ロボットの研究は、各リンクが円弧で近似できるマニピュレータとその理論が構築される以前に類似した状況といえる。各リンクが円弧で近似できるマニピュレータと運動学理論は、その明快さとロボットの制御の容易さから、医療ロボットとして一気に研究が加速した経緯がある。曲面形状ロボットにおいても、これに対応するロボットと理論の組合せが有用であると予想される。

2. 研究の目的

微分幾何学の離散版である離散微分幾何学は、離散曲面とその変形を扱う Computer Graphics 分野と共に発展してきた。曲面形状のロボットの研究を考えた際、これらの成果はもっと活用されるべきだが、現状では単純な連続の曲面論にしか踏み込まれていない。研究代表者はこれまでに、離散微分幾何学に基づいた曲面形状ロボットと、ロボット上の局所座標系に直交座標系を導入できる運動学理論・フィードバック制御理論の組合せを提案してきた。本研究の目的はこれらを実現することにある。そのためにロボットの具現化、現在保有するシステムの拡張を行い、平面内また3次元空間内における運動学・フィードバック制御の実現を目指す。

3. 研究の方法

(1)本研究期間以前より構想していた S-isothermic 曲面形状ロボットを具現化する。S-isothermic 曲面形状ロボットは表と裏の半径を独立して制御可能な円錐台型のアクチュエータを連結することで実現される。等角写像により得られた円群の半径を各アクチュエータで実現することにより、S-isothermic 曲面を表現する。

(2)曲面形状ロボットの順運動学、逆運動学を剛体ロボットや連続マニピュレータの運動学と同様のアルゴリズムとして構築する。連続マニピュレータでは駆動空間、配位空間、作業空間の変換として運動学が構成される。これを参考とし、3種の曲面形状ロボットにおいて運動学を考える。

(3)曲面形状ロボットのフィードバック制御を曲率流に基づいて構築する。ロボットの推定曲率と目標曲率を用いてロボットが目標形状に収束することを目指す。

(4)連続マニピュレータの区分的に曲率一定モデルに対応する、曲面形状ロボットの区分的に平均曲率一定モデルとそれを適用したロボットを具現化する。本テーマは当初計画にはなかったものの、研究期間中に偶然考案できた。また、その拡張性の高さから本モデルについても研究を進めた。

4. 研究成果(1)

本研究期間以前には片面のみの半径を制御可能なアクチュエータを連結することでロボットを製作しており、そのデザインを拡張することで、両面の半径を制御可能なアクチュエータとそれを連結したロボットを実現した。アクチュエータは、ゴムライク樹脂を造形可能な光造形 3D プリンタ (M3DS-SA5) を用い、より柔らかいシリコンゴムで製作したパーツによりアクチュエータを連結した。初年度にはアクチュエータを 16 個使用したロボット、最終年度には 25 個使用したロボットを製作した。2つのロボットはそれぞれ空気室を 32 個、50 個搭載している。本研究期間以前から保有していた 25 自由度分制御可能な空気圧駆動装置では、後者のロボットを制御できないため、本研究で新たに 25 自由度分拡張した。

平面から平面へと一次分数変換 (メビウス変換) により等角写像された格子から円群の半径を求め、具現化したロボットのアクチュエータ半径に対応する円の半径となるよう制御することで、平面内の等角な変形を実現した。また、目標形状に至るまでの変形中の形状から、それに近い一次分数変換のパラメータを探索したところ、それらは存在し、目標のパラメータまで直線状に移動していることがわかった。

また、アクチュエータ数 16 個のロボットが表面と裏面の両方向に屈曲できること、つまり全体で平均曲率が正もしくは負となる形状を表現できることを確認した。アクチュエータ数 25 個のロボットでは、全体のうち特定の箇所平均曲率を正に、異なる箇所で負を同時に表現できることがわかった。

Isothermic 曲面では、曲面の第 1 基本形式と第 2 基本形式の非対角成分がゼロに、第 1 基本

形式の対角成分が等しくなる。この性質は曲面形状ロボットにおいて、運動学理論を議論しやすくする。さらに、ロボット上の座標系として直交座標系をとることができるため、剛体ロボットや連続マニピュレータの運動学を踏襲できる。この点で、剛体ロボットや連続マニピュレータ、3次元動作計測装置を組み合わせる手術支援ロボットにおいて、Isothermic 曲面やその離散曲面を表現できるロボットは有用と言える。本研究では、微分幾何学から出発した曲面形状ロボットの有用性を理論的に示した。

(2)

本研究では、ロボット全体の形状が与えられた曲面形状を実現する駆動変数を求める問題と、ロボット上の1点が与えられた位置に一致するような駆動変数を求める問題の2種の逆運動学を考えた。いずれの場合も配位変数から作業変数間の変換は幾何学的問題であるが、駆動変数から配位変数間の変換はロボットに依存する。

S-isothermic 曲面形状ロボットに対し、駆動変数から配位変数間の変換を求めるために、アクチュエータの半径と空気室内圧の関係を調査した。この関係が、ロボット内におけるアクチュエータの位置により異なること、連結するシリコンゴム部材の有無で異なることを調べ、各アクチュエータに対して変換則を実験的に求めた。

S-isothermic 曲面形状ロボットのロボット全体の形状が与えられた曲面形状を実現する駆動変数を求める逆運動学問題に対し、各アクチュエータの空気室内圧を求め、その圧力をロボットに与えた。配位変数から作業変数間の変換アルゴリズムは研究期間以前に構築したものを利用した。3次元的な屈曲を実現できたものの、それが等角な変形であるかは、より詳細な調査、評価方法が必要であるという結論に至った。

S-isothermic 曲面形状ロボットの平面内変形において、一次分数変換のパラメータで構成した空間を配位空間とすることで、順運動学と逆運動学を構築した。このアルゴリズムではロボット上の点が目標点に一致するようなアクチュエータ内圧を求める。これにより、ある軌道に沿ってロボット上の点位置を制御することが可能となった。

閉曲線状のゴム製駆動機構に石鹸膜を張った曲面形状ロボットに対しても逆運動学アルゴリズムを構築した。順運動学では、アクチュエータと受動関節で構成された離散曲線により境界形状を算出し、その後に石鹸膜の形状を求めた。各アクチュエータの空気室内圧に従って生じる角度を計算し、全体の弾性エネルギーが最小となるようアクチュエータの角度を修正、受動関節の角度を決定することで境界形状を得た。石鹸膜の形状は境界条件付き Laplace 方程式により求めた。逆運動学では、順運動学を複数回計算しながら石鹸膜上の点と指定した位置との誤差を最小とするアルゴリズムを構築した。

(3)

S-isothermic 曲面形状ロボットの曲率を推定するには、アクチュエータ数が少ないこと、ロボット上の全マーカを3次元動作計測装置で見失うことなく計測が難しいことから、本研究期間内では実現できなかった。そこで、導電性伸張センサをアクチュエータ上に貼り、アクチュエータ半径の推定する方針に切り替えた。新竹らが提案するカーボン粒子とシリコンゴムを混合した導電性伸張センサを参考に、直線状のセンサを製作した。伸張センサの抵抗値とアクチュエータ半径の値を同時に計測し、抵抗値から半径を推定可能であることを示した。本センサを各アクチュエータの空気室の外壁に貼ることで、伸張情報から半径を取得でき、それらの半径を用いてロボットの曲率を推定することが期待できる。

(4)

研究を進めるうちに、連続マニピュレータから発想を得て、区分的に平均曲率一定な曲面モデルを考案できた。本モデルは、平均曲率一定な回転面と極小曲面を市松模様状に張り合わせることで構成される。ロボットとして実現する場合、回転面がアクチュエータ、極小曲面が布やゴム膜のような受動要素を割り当てる。回転面として平面、カテナイド、球、円柱、アンデュロイド、ノドイドを適用でき、刃持表現公式を用いると球、円柱、アンデュロイド、ノドイド間にある変数で移り変えることが可能である。本研究では、刃持方程式をロボットに利用しやすくするために、伸び率を導入し、最終的に一つの回転面を3つの変数で表現した。区分的に平均曲率一定な曲面モデルでは、骨組みとなる回転面の形状を全て算出した後に、受動要素の形状を算出することで、全体の形状が得られ、これが順運動学に相当する。受動要素は \cotan -Laplacian を用いて境界条件付き Laplace 方程式を解くことで形状を計算した。区分的に平均曲率一定曲面モデルの形状計算は、事前に与えられた境界の内部に張る形を求める問題とは大きく異なり、動く曲面、ロボット独自のものがわかってきた。この順運動学を用いて、剛体ロボットアームの逆運動学に基づいて、逆運動学アルゴリズムを構築した。指定したロボット上の点が、目標位置に一致するような3つの変数を計算する。

区分的に平均曲率一定曲面の最も簡単な例は、円柱状の屈曲アクチュエータと受動要素を交互に接続することで製作できる。そこで、エイ型ロボットに着目し、その鱗に本モデルを適用した。円柱状の屈曲アクチュエータは、腱駆動システムで実現し、モータのエンコーダ値からアク

アクチュエータの曲率を推定した。このとき、先述の順運動学により、鱗の形状を推定することができ、この計算時間は約 10ms とリアルタイムでの計算が可能なほど短い。同様に、矩形状の円柱状の屈曲アクチュエータと受動要素を連結し、2x4 の市松模様状のロボットを製作した。本ロボットでは曲げセンサを搭載し、アクチュエータの曲率を推定し、順運動学でロボットの形状を推定した。また、これらのロボットを製作したことで、円柱状の屈曲アクチュエータでは、その曲率に基づいてフィードバック制御則を考えると、制御則は平均曲率流に一致することがわかった。

空気圧フィンガー3つをコの字状に配置した駆動部と面状のシリコン膜で構成した、回転面と近似可能な曲面形状ロボットを開発した。駆動部の土台には樹脂フレーム挿入口を設けており、挿入した樹脂フレームの形状に応じて、駆動部を屈曲状態で保持できる。無変形状態で球面、屈曲状態で円柱面、平面、アンデュロイドを表現できるよう設計・製作した。各空気圧フィンガーのチャンバーに空気圧を加えることで凸部が膨張し、屈曲状態から直線状態に変形する。ロボットをデブスカメラで撮影し、取得した 3 次元点群データに刃持方程式を改良した回転面モデルをフィッティングすることで、その曲率と近似幾何形状を得た。駆動部に圧力を 3 つの空気圧フィンガーに想定される組で与え、その形状を撮影した。本曲面形状ロボットは、無変形状態での球面の表現には至らなかったものの、平面、円柱、アンデュロイドの 3 種類の曲面で近似可能であることがわかった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Noriyasu Iwamoto, Daiki Kusakabe, Takuya Umedachi	4. 巻 7
2. 論文標題 Planar Conformal Deformation of Robotic S-Isothermic Surface	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 11531-11536
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/LRA.2022.3203238	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Noriyasu Iwamoto	4. 巻 35
2. 論文標題 Geometric Modeling and Estimation of Robotic Fin Shape with Bending Actuators and Passive Elements	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Sensors and Materials	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 岩本憲泰	4. 巻 41
2. 論文標題 幾何学から始める曲面形状ロボットの運動学理論	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本ロボット学会会誌	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計16件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 日下部大輝, 梅舘拓也, 岩本憲泰
2. 発表標題 両面の半径が可変な円錐台型アクチュエータを連結した曲面形状ロボットの具現化
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岩本憲泰
2. 発表標題 区分的に曲率一定な曲面形状ロボットの順運動学
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岩本憲泰
2. 発表標題 円柱型屈曲アクチュエータと布を市松模様状に貼り合わせた曲面形状ロボット
3. 学会等名 日本ロボット学会学術講演会 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 町田渉, 岩本憲泰
2. 発表標題 円錐台型アクチュエータを連結した曲面形状ロボットの平面内変形の逆運動学
3. 学会等名 第23回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 宮嶋優, 梅舘拓也, 岩本憲泰
2. 発表標題 円環状のソフトロボットとシャボン液で構成する曲面形状ロボットの開発
3. 学会等名 第23回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 坂本康介, 梅館拓也, 岩本憲泰
2. 発表標題 円錐台型アクチュエータを連結した曲面形状ロボットのアクチュエータ圧力と半径の変換則導出
3. 学会等名 第23回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Noriyasu Iwamoto
2. 発表標題 Kinematics of Nonzero Constant Mean Curvature Surface Models using a Kenmotsu-type Representation Formula
3. 学会等名 2023 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 町田渉, 坂本康介, 梅館拓也, 岩本憲泰
2. 発表標題 S-isothermic曲面形状ロボットの各アクチュエータの圧力と半径の関係
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岩本憲泰
2. 発表標題 区分的に平均曲率一定曲面モデルを適用したヒレを有するエイ型ロボット
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 宮嶋優, 梅舘拓也, 岩本憲泰
2. 発表標題 円環状ソフトロボットとシャボン液で構成する曲面形状ロボットの制御
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岩本憲泰
2. 発表標題 区分的に曲率一定な曲面形状ロボットの逆運動学
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 早川翔太, 秋山佳丈, 梅舘拓也, 岩本憲泰
2. 発表標題 カーボンブラックを用いた導電性伸長センサによる円錐台型アクチュエータの半径推定
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山田友樹, 梅舘拓也, 岩本憲泰
2. 発表標題 空気圧フィンガーをコの字状に配置した境界制御型曲面形状ロボット
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 日下部大輝, 梅舘拓也, 岩本憲泰
2. 発表標題 両面半径が可変な円錐台型アクチュエータの具現化
3. 学会等名 第22回 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渡辺慧光, 梅舘拓也, 秋山佳丈, 岩本憲泰
2. 発表標題 三角形メッシュ状に導電性伸張センサを配置した面状センサの曲率推定検討
3. 学会等名 第22回 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Noriyasu Iwamoto, Atsushi Nishikawa, Hiroaki Arai
2. 発表標題 Surface Robots based on S-Isothermic Surfaces
3. 学会等名 2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 区分的に平均曲率一定な曲面形状ロボット	発明者 岩本憲泰	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、PCT/JP2022/022043	出願年 2022年	国内・外国の別 外国

〔取得〕 計0件

〔その他〕

信州大学 繊維学部 作動可微分多様体研究室HP
<http://www.fiber.shinshu-u.ac.jp/iwamoto/index.html>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	梅舘 拓也 (Umedachi Takuya) (60582541)	信州大学・学術研究院繊維学系・准教授 (13601)	
連携研究者	秋山 佳丈 (Akiyama Yoshitake) (80585878)	信州大学・学術研究院繊維学系・教授 (13601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------