

New Folding and Gluing Robot for Automatic Assemble of 3D Shapes

メタデータ	言語: eng 出版者: 公開日: 2018-07-31 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: JULIAN, ANDRES ROMERO LLANO メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10291/19582

「博士学位請求論文」審査報告書

審査委員 (主査) 研究・知財戦略機構 特任教授

氏名 杉原 厚吉 ㊞

(副査) 研究・知財戦略機構 特任教授

氏名 萩原 一郎 ㊞

(副査) 総合数理学部 専任教授

氏名 荒川 薫 ㊞

(副査) 東京電機大学未来科学部 准教授

氏名 岩瀬 将美 ㊞

- 1 論文提出者 氏名 Julian Andres Romero Llano
(ロメロ ジャノ フリアン アンドレス)
- 2 論文題名
(欧文題) **New Folding and Gluing Robot for Automatic Assemble of 3D Shapes**
(邦文訳) 三次元形状の自動組立用新規折畳みロボット
- 3 論文の構成
本論文の構成は以下の通りである。
 - 1章 Introduction (緒論)
 - 2章 Kansei applied into Origami Engineering (折紙工学への感性の適用)
 - 3章 Origami-performing robot design (折り紙を折るロボットの設計)
 - 4章 Control scheme applied into the proposed robot
(提案するロボットに適用する制御スキーム)
 - 5章 Methodology for designing crease patterns for the proposed robot
(提案するロボットのための折れ線パターン設計方法)
 - 6章 Improved methodology for designing complex 3D shapes by the proposed robot
(提案するロボットで複雑な3次元形状を設計するための改良法)
 - 7章 Applications of the proposed methodologies and robot
(提案する方法とロボットの応用)
 - 8章 Conclusions and future works (結論と今後の研究)

4 論文の概要

折り紙は日本の伝統芸術で今まで遊びの側面が強かったが、近年、折り紙を自動的につくる折り紙ロボットは次世代産業の一つの候補としてその重要性が認識されつつある。たとえば折畳み帽子をオリンピック帽子などに使用するために大量に生産したい要望や、折り紙を利用した新しい三次元プリンターの可能性などがその例である。所謂折紙ロボットには実際に折り紙を折るロボットと、折り紙のように自ら展開収縮をする自己折りロボットがある。前者の主たる研究は、器用に折る人手の操作をロボットに模倣させることを目指したものであり、関連研究は、さながらロボットのセンサーとマニピュレータの複雑さの競演の様相を呈し袋小路に入っている感がある。そのため、現在の折紙ロボットの主流は自己折りロボットへと移行している。このような状況にあって折り紙を折るロボットに注目し、人間並みの器用さを追求するこれまでの研究とは真逆の観点に立ち、ロボットは極力簡易にし、代わりに折る対象となる2次元型紙を工夫するというコンセプトで検討を進めて、ロボットにとって折り易い折り紙、軸対称な折り紙、有限個の輪郭線からなる多面体で軸に垂直な断面が星型となる構造の折り紙のモデリングに成功したのが本論文である。特に後者の多面体モデルは、大量生産のための折り畳み帽子も含んでおり、所期の目的を達成している。本論文は8章からなり、各章の概要は次の通りである。

第1章「Introduction (緒論)」では、本学位論文に関連する、従来の折紙工学、折紙ロボット、制御法について述べている。紙のように大きく変形し、折畳まれた紙の層の数によりスプリングバック特性が異なるものを折る実用的なロボットは未だ世の中に見られないと述べている。本研究では、折り紙同様、ロボット自体が美しくその挙動も美しいことを目指し、そのための制御方法、ロボットの設計仕様、ロボットの折り易い展開図のあり方について検討し、紙を折るロボット実現のための課題と解決法について述べている。

第2章「Kansei applied into Origami Engineering (折紙工学への感性の適用)」では、本研究の目的が、上述のように、人間が折ることを前提にした折り畳み帽子の折紙ロボットによる大量生産方式を開発することにあるとまず述べている。人間が折ることを前提にした折紙展開図そのままではロボットで折ることは困難であり、折紙ロボットで生成するためには、展開図そのものも変える必要があるが、その時に問題になるのが、それによって得られる帽子が美しさを保持できているかである。まず、美しさを客観的に評価する感性システムを開発している。この種のシステムには、ニューラルネットワークの利用が有効であるが、大方は、多層型ニューラルネットワーク(BNN)で進められている。一方、ここでは、ホログラフィックニューラルネットワーク(HNN)を拡張し、ファジィ推論第2類を追加するなどで機能向上が得られたものが多層型より優れていることを見出している。本研究で扱う折紙ロボットに近いものに川人らのマニピュレータロボットがあるが、ここでもBNNを制御に使用していることから、HNNの使用により川人モデルに優る制御方式の可能性が期待されるとしている。

第3章 **Origami-performing robot design** (折り紙を折るロボットの設計)では、本研究で開発した折り紙を折る折紙ロボットの設計と開発の手順を示している。従来の研究では、折り紙を折る人間の手作業の模倣を目指し、多数のアクチュエータを備えた複雑なマニピュレータを使用した高価なものが開発されてはいるが、未だ実用化は得られていないと述べている。本研究では、方向を転換して、折り紙を折るための型紙に工夫を施し、折紙ロボットそのものは、単純折りと

糊付けだけを確実に可能とする簡易なものを目指し、レゴをベースに開発している。

第4章「Control scheme applied into the proposed robot (提案するロボットに適用する制御スキーム)」では、ロボットの動力学のフィードバック誤差解析に川人らが初めてニューラルネットワークを採り入れ、一定の成果が得られたことを報告している。所謂、川人モデルをベースに、川人らが使用した多層型ニューラルネットワークに比較し、第2章で検討したホログラフィックニューラルネットワークを利用する方が、スプリングバックの影響を排除し、精度よく折れること、そして制御速度の向上が得られたと述べている。

第5章「Methodology for designing crease patterns for the proposed robot (提案するロボットのための折れ線パターンの設計方法)」では、既に様々な軸対称の構造は多く求められ一枚の紙で折り紙を作るための展開図も得られているが、これらは人手で折ることを想定しており、これを第3章の蛇腹折りと糊付けの機能しかない折紙ロボットで折ることは困難であると述べている。そこで、展開図に対称な糊付け部を設け、糊付け後、展開して使用するためスリットを設けることでロボットで折る製品の实用性を高めている。2章で述べた美的な観点から、これまで人手で折る場合の軸対称構造物では対応できていない、非単調関数の輪郭線構造物もスリットを設けることにより折紙ロボットの対象としている。

第6章「Improved methodology for designing complex 3D shapes by the proposed robot (提案するロボットで複雑な3次元形状を設計するための改良法)」では、見る方向が異なっても常に輪郭線が同一の第5章の構造に比し、見る方向によって有限個の輪郭線を有する多面体で、しかも、中心軸に垂直な断面が星形となる構造に対しては、3章で得た折紙ロボットで折るための型紙を求めることができることを示している。折畳み帽子もこの種のものとなり、本研究の当初の目的を達成している。

第7章「Applications of the proposed methodologies and robot (提案する方法とロボットの応用)」では、提案された折紙ロボットで折り糊付けして生成できる例として、果物カバー、家のスケールモデル、ステント等双安定を利用する医療部品などを挙げている。

第8章「Conclusions and future works(結論と今後の研究)」では、本研究の成果と今後の課題について述べている。得られた成果として次を上げている。

●折り紙を折るこれまでのロボットは、人間の折る動作を再現するマニピュレーターの開発が中心であり、これでは袋小路に入った感のあることから、本研究では、ロボットは極力簡易なものとし、型紙に工夫をするという真逆の発想で研究に取り込み、オリンピック帽子などの大量生産への道を切り開いた。

●折紙工学の一つの目的は、誰もが簡単に折り紙が作れるよう、山線・谷線を記した型紙を作ることであり、その先駆的なソフトとしてロバートラングのTreeMakerなどがあるが、これらは全て人間が折ることを前提にしたものである。本論文では折紙ロボットで折ることを前提にした型紙の製法という、新しい研究分野を切り開いた。

●折紙ロボットで折るための型紙から得られるものは、人間が折ることを前提にした型紙から人手で作られるものとは異なる。ただし、折り紙特有の美しさは極力保持したい。そこで美しさを客観的に評価すべくニューラルネットワークを用いた感性システムを構築した。

●その感性システムで、大方で進められている多層型ニューラルネットワークと、自ら、ファジィ推論を組込んだホログラフィックニューラルネットワークを比較し、後者の方が優れること

を示した。

●川人のフィードバック誤差解析に、2章で得たニューラルネットワークを用いることにより、比較的簡易な構造のロボットで、折り紙を折り、糊付けする際に困難となるスプリングバックなどの制御が容易となることを示した。

●軸対称モデル、およびより一般的な上述の多面体構造で折紙ロボットで生成できる型紙のモデリング技術について検討し、実際に構築したロボットで折れることを確認した。

また、今後の課題として、より大きなそしてより複雑な製品を折ることの出来るロボットを目指すべく、レゴを用いない設計法の確立を上げている。

5 論文の特質

日本発の折紙工学ではあるが、日本の研究者数は未だ少ない。しかし、米国や中国では大きな予算がつけられたこともあり、世界的には俄かに研究者が多くなっている。紙を折るロボットの開発は、折紙工学に関する多様な研究テーマの中でも最もホットなテーマの一つであるが、未だ実用的なものは得られていない。この原因の一つは、人間の折り紙を折る操作を学習させ人間の様に器用なマニピュレータを求める研究が続いていることにある。本研究は、このことを反省し、人間の手より劣るロボットで折れる型紙を求める研究に舵を切った最初のものという意味で独創的な特質を有す。型紙もほぼ一般的構造と言っても差し支えない、有限個の輪郭線を有する多面体で、しかも、中心軸に垂直な断面が星形となる構造まで可能としている。この構造は当初の目的である折畳み帽子の構造も含むものである。現在、産業革命を起こしつつある3次元積層型プリンターに対し、以上の技術は、明治大学で独自に進めている折紙式3次元プリンターの中核技術になり得るという意味でも大変意義深い研究である。

6 論文の評価

本研究では、現在のところ紙を対象としたものであるが、世界的にもまれな、紙を折り、糊付けまで可能とする折紙ロボットの開発をしている。この種の制御で最も困難なスプリングバック現象に対し、そのフィードバック誤差解析のモデリングを行い、多層型とは異なる独自のニューラルネットワークを使用した制御シミュレーションでその妥当性を確認している。折り紙の展開図を工夫することにより、折る機能と糊付けだけ可能な簡易なロボットで折り、糊付けできることを、軸対称モデルから始まり、有限個の輪郭線を有する多面体で、しかも中心軸に垂直な断面が星形となる構造にまで広範囲に亘る構造の処理を可能としている。本研究で開発したロボットは強度を強くすることにより、樹脂や金属にまでそのまま拡張が可能である。以上のように、本研究は、新しいモデリング技術とシミュレーション技術を開発し折紙工学で最もホットなテーマの一つである折り紙を折るロボットに大きく貢献したものであり、現象数理学専攻の博士論文として相応しいものである。

7 論文の判定

本学位請求論文は、先端数理科学研究科において必要な研究指導を受けたうえ提出されたものであり、本学学位規程の手続きに従い、審査委員全員による所定の審査及び最終試験に合格したので、博士（数理科学）の学位を授与するに値するものと判定する。