

平成 30 年 6 月 8 日現在

機関番号：32682

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H02228

研究課題名(和文)「3D折紙式プリンターシステム」構築のための折り易い展開図とロボットの開発

研究課題名(英文) A study on simple origami designs for 3D origami printer system and its origami robot

研究代表者

萩原 一郎 (Hagiwara, Ichiro)

明治大学・研究・知財戦略機構・特任教授

研究者番号：50282843

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究で双腕ロボットを用い硬い材料で折る折紙ロボットの仕様をまとめた。レゴベースの折紙ロボットは2016年米国機械学会(ASME)デザイン部門ロボット学生コンテスト大学院の部で紙を型紙とする袋を作り3等賞を獲得した。折り紙ロボットの実現には、ロボットが折り易い型紙に変換する一般則を得ること、制御のロバスト性を得ること、の2つが課題となり、これらの達成により、折り紙を折るロボットを実現した。現在主流のバイオメティクスから得られた折り紙、一世代前の鶴などの折り紙をロボットで折るのは困難とされたが、2次元型紙の工夫や型紙に適切な切込みを入れ、次に糊付けする方式によりレゴタイプのロボットで実現した。

研究成果の概要(英文)：In this study, we showed a specification of origami robot with two arms which can fold stiff material. At ASME 2016 Student Mechanism & Robotics Design Competition, one of his students received the Third Place Award by achieving to fold a paper bag by his Lego-based robot. To make origami by origami robot, we needed to solve two problems: to obtain a general rule on robot friendly structures and to get robust control logic. We have overcome the problems and realized the origami robot. It been said that making origami such as current trend biomimetic origami or one-generation-ago origami like "crane" by robot was a big challenge. We developed the way to acquire robot friendly structures by arranging 2D plans and adding appropriate cuts on the plans, then glue on their margins. With this method, the Lego-based origami robot has achieved to make origami.

研究分野：折紙工学

キーワード：折紙工学 折紙ロボット 双腕ロボット レゴベースロボット 二次元型紙 制御ロジック 機械学習
画像処理

1. 研究開始当初の背景

オバマ前米国大統領も革命を起こすと称した3次元の積層型プリンターが得意なのは、圧造、鋳造、鍛造の3大製法のうち、鋳造、鍛造に相当するものであり、圧造に相当するオムツなどの衣服やパネル類への適用は必ずしも十分ではない。そこで、本研究代表者らは3次元プリンターと全く同じ3次元形状データから、山線・谷線・糊代付きの2次元の型紙を設けるシステムの開発に着眼した。研究代表者はすでに3次元構造データを基に、構造をいくつか分割しそれぞれの山線・谷線、糊代付きの2次元パターンを取得し、折紙のように3次元構造を組み立てる折紙式3次元プリンター(Ori-3D)を開発して新聞やテレビ等で既に取り上げられている^{[1]-[4]}。既存の積層型3次元プリンター(Lay-3D)は一体成型であるため、装置により製造できる大きさに制限があるが、Ori-3Dは、製造できる大きさに制限はない。また、これまで得られた折紙製品は、製造費が高いために工業化に至っていない背景があった。そこで本研究代表者らは3次元データの分割の仕方により様々な得られる2次元パターンを適切に修正したものを基に製造すれば折紙製品は安価に出来る可能性があり、その検証は有効と考えた。



図1 パンダ縫いぐるみの写真画像から得た折紙式・積層型3次元プリンター、実物比較(NHK2014)

2. 研究の目的

3次元構造の一続きの2次元展開図を作ると重なり部分が生じる。そこで重なりが生じないように、構造を複数に分けそれぞれの山線・谷線、糊代付きの2次元展開図を取得し、其々を3次元に組み、貼り合わせる折紙式3次元プリンターを開発した。複数に分けて得た2次元展開図同士に糊代部を適切に設けると、一続きの展開図に出来る可能性のあること、2次元展開図を木構造に変換して山折り谷折りの機能だけを有す簡易なロボットで折紙ロボットを開発できる可能性のあることを見出した。本研究の目的は、これらの知見を一般的な構造にも適用可能にする一般則を見出すこと、この2次元展開図を利用し、薄紙だけでなく厚紙、樹脂、天然繊維、金属などを折り曲げることを可能とする双腕ロボットを開発する事である。折紙式3次元プリンターは積層型プリンターでは困難なテキストチャーが自由という長所があり、積層型の上に貼付して外観品質を向上させる役割も有す。このため外観品質向上のための技術開発も目的とする。

3. 研究の方法

まずは山折り、谷折りが出来る片腕ロボットを開発する。人間やロボットが折り易い2次元展開図を自動的に得られるアルゴリズムを開発する。そしてOri3Dのテキストチャーが自由と言う特長を活かすため外観品質の向上を図る。そのため、曲面折りを実現する検討や色見本帳の通りの色合いを出せる検討などを行う。次に、片方の腕で持ち替えと糊づけを行い、もう一方の腕で山折り・谷折りをを行う双腕ロボットを開発する。薄紙だけでなく厚紙、樹脂、天然繊維、金属まで対応可能とすべく溝掘り等の前加工の検討も行う。ブランク材が紙以外の場合も、まず人間が、2次元展開図からロボットで可能な方法でまず紙で折り、これと同じ手順で指定のブランク材を対象に解析し所期の形状が得られるよう、ロボットの把持方法、荷重の掛け方等の教師データを取得ロボットに教師することを旨とする。解析と実験で折紙工法と従来の加工法で得られるものとの特性比較を行う。

4. 研究成果

折紙工学の領域で折紙ロボットは非常にホットな話題となっている。2016年度は、双腕ロボットで硬い材料まで目指したロボットの仕様についてまとめた。一方、対象を紙に特化した場合、レゴベースの折紙ロボットは非常に有力で、2016年の米国機械学会(ASME)デザイン部門のロボット学生コンテスト大学院の部で「世界初：糊付けまで可能な折り紙ロボット」のタイトルで紙を型紙とする袋を作る実演で臨み、3等賞を得た。トップを逃したのは糊をつける制御ロジックのロバスト性が及ばず、本大会で糊付けに失敗したからであるが、コンセプトについては高く評価された。更に、折紙帽子では、折紙作家によって作られた型紙は、ロボットで折るのは困難である理由も明確にした。すなわち、糊代と型紙本体の間の折り線を折るときにその折り線が他の本体部分に影響し、本体中の折り線を折るときにそれが糊代にまで影響するためロボットで折るのは困難となるわけである。一方、目標となる折り線の延長線上に事前に型紙の本体及び糊代が来ないようにした型紙に対しては、折紙ロボットでも実行可能となる。このように、折り紙を折るロボットの実現には、1)ロボットに折り易い型紙に変換する一般則を得ること、2)制御のロバスト性を得ること、が課題となり、これらの達成により、これまで困難とされてきた折り紙を折るロボットを実現した。折畳地図等で著名なミウラ折りは未だに大量生産ができずロボットにも困難であるが、例えば、複数に分割し糊代部を設け、ロボットに作らせることも可能であることをレゴベースのロボットで示すことができた。これまで現在主流のバイオミメティクスから得られた折り紙、一世代前の鶴とか亀などの折り紙

をロボットで折ることは非常に困難とされたが、2次元型紙の工夫や適切に切込みを入れ、次に糊付けする方式でレゴタイプのロボットで折れるようにできた。

参考文献

- [1]日刊工業新聞、明治大、紙で立体物を簡単に作れる折り紙式3D造形手法を開発、2014年5月23日
- [2]日刊工業新聞、明治大、折り紙3Dプリンターも「変形自在に紙で立体造形」、2014年5月23日
- [3]折り紙式3次元プリンター「ワールドビジネスサテライト」2014年6月10日
- [4]NHK WORLD (国際放送) 2014年10月2日(木)、NHK BS1 2014年10月12日(日)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計13件)

- (1)Kousuke Terada, Kota Kadoi, Sunao Tokura, Takamichi Sushida and Ichiro Hagiwara, The deformation mechanism on origami-based foldable structures, *Int. J. Vehicle Performance*, Vol. 3, No. 4, 2017, pp.334-346. [査読有]
- (2)Chenghai Kong, Xilu Zhao, Ichiro Hagiwara, Hydroforming process of manufacturing for reverse spiral origami structure, *Int. J. Vehicle Performance*, Vol. 3, No. 4, 2017, pp.347-364. [査読有]
- (3)Yang Yang, Sachiko Ishida, Xilu Zhao, Ichiro Hagiwara, Vehicle energy absorbers consisting of foldable cylinders using response surface methodology, *Int. J. Vehicle Performance*, Vol. 3, No. 4, 2017, pp.380-394. [査読有]
- (4) Sachiko Ishida, Hiroshi Uchida, Haruo Shimosaka and Ichiro Hagiwara, Design and Numerical Analysis of Vibration Isolators With Quasi-Zero-Stiffness Characteristics Using Bistable Foldable Structures, *J. Vib. Acoust* 139(3), 031015 (Apr 24, 2017) (8 pages) [査読有]
- (5) 阿部綾、楊陽、奈良知恵、安達悠子、萩原一郎、二枚貼り折りによるアルミ缶適用に関する検討、*日本応用数学会論文誌* 27(4)、305-332、2017. [査読有]
- (6) Chenghai Kong, Xilu Zhao and Ichiro Hagiwara, Progressive multistep press forming of a truss core panel for floor structure of electric vehicle, *Int. J. Vehicle Performance*, Vol. 4, No. 2, 2018, pp.200-217. [査読有]
- (7)Phuong Thao Thai, Maria Savchenko, Ichiro Hagiwara, Finite element simulation of robotic origami folding,

Simulation Modelling Practice and Theory 84 (2018) 251-267.組立式トラスコアパネル(ATCP)の実用化開発 Practical Development of ATCP (Assembly Truss Core Panel) [査読有]

- (8)寺田 耕輔、戸倉 直、高橋 徹、萩原 一郎、組立式トラスコアパネル(ATCP)の実用化開発、国立高等専門学校機構 福島工業高等専門学校 研究紀要第58号、pp.1-8.(2017年12月). [査読有]
- (9)萩原 一郎、折紙工学の現状と今後の動向—鍵を握る折紙式プリンタ&折紙工法—、*日本画像学会誌*、第56巻第2号：192-200(2017-4) [査読無]
- (10)萩原 一郎、「折紙工学」特集のねらい、*金属*、第87巻第10号：873(2017-10)、p.829. [査読無]
- (11)萩原 一郎、折紙工学の産業化の展望と今後の方向、*金属*、第87巻第10号：873(2017-10)、p.873-881. [査読無]
- (12)萩原 一郎、折紙工学の新展開(前編)、*機械の研究* 70(1)、35-42、2018-01. [査読無]
- (13)萩原 一郎、折紙工学の新展開(後編)、*機械の研究* 70(2)、115-122、2018-02. [査読無]

〔学会発表〕(計19件)

- (1)Aya Abe, Yang Yang, Chie Nara, Yuko Adachi and Ichiro Hagiwara, Application of pairing origami structure to aluminum cans Comparison of TMP and NP from the viewpoint of rigid folding and crushing force、シミュレーション学会、東京電機大学、2017年10月27日
- (2)Julian A. Romero, Luis A. Diago, and Ichiro Hagiwara, Norigami Crease Pattern Model Design Based on Surfaces of Revolution、ASME IDETC/CIE 2017、Cleveland, Ohio, USA, August 6-9 2017.
- (3) Yang Yang, Chie Nara, Xiaoshi Chen, Ichiro Hagiwara, Investigation of helmet based on origami structures, ASME 2017、Cleveland, Oh, 2017.8.6-9.
- (4)阿部綾、奈良知恵、萩原一郎、二枚貼り折りによるアルミ缶適用に関する検討、MIMS 共同利用共同研究拠点研究集会「折紙の幾何学的構造とモデリング」、明治大学中野キャンパス、2017年8月18日
- (5) 萩原一郎、自動車の現行エネルギー吸収材特性を凌ぐ折紙構造体及びその超安価な製造法開発、MIMS 共同利用共同研究拠点研究集会「折紙の幾何学的構造とモデリング」、明治大学中野キャンパス、2017年8月18日

(6) 萩原一郎、折紙工学の現状と課題 2017年イノベーションジャパンの展示部品を中心に一新たな工法による折紙工学の新展開、制振工学研究会、2017年8月24日

(7)阿部綾、楊陽、奈良知恵、安達悠子、萩原一郎、二枚貼り折りによるアルミ缶適用に関する検討、日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2017、愛知大学豊橋キャンパス、2017年8月30日

(8)Yang Yang、Chie Nara、Xiaoshi Chen、Ichiro Hagiwara、Investigation of helmet based on origami structures、D&D 2017、Aichi University、2017.8.29-9.1.

(9)ロメロ フリアン、ルイス・ディアゴ、萩原一郎、折紙ロボットのための2次元展開図の検討、D&D 2017、Aichi University、2017.8.29-9.1.

(10)阿部綾、楊陽、奈良知恵、安達悠子、萩原一郎、構造物の剛体折りに関する一考察、応用数学会 2017 年年会、武蔵野大学、2017年9月8日

(11)萩原一郎、趙希祿、自動車の現行エネルギー吸収材を凌ぐ反転折り型折紙構造、応用数学会 2017 年年会、武蔵野大学、2017年9月8日

(12)Julian A. Romero、Luis A. Diago、Chie Nara、Junichi Shinoda、and Ichiro Hagiwara、Considerations on Control Method for Folding and Gluing Machine、応用数学会 2017 年年会、武蔵野大学、2017年9月8日

(13)Julian ROMERO、Luis DIAGO、I. HAGIWARA、Origami Machine for Building 3D Origami based on Rotational Sweep、JSST2017 International Conference on Simulation Technology(2017.10/25-27)

(14) I. Hagiwara、Current State and Issues of Industrialization from Origami-engineering、The Second Workshop on Origami Engineering、2017.11.6-8 /Tianjin University、China.

(15)阿部綾、楊陽、奈良知恵、安達悠子、萩原一郎、二枚貼り折りによるアルミ缶適用に関する検討、第 23 回折り紙の科学・数学・

教育 研究集会、JOAS ホール、2017年12月16日

(16)阿部綾、奈良知恵、萩原一郎、二枚貼りポリヘドロンの圧潰特性、折紙式プリンターと数理の融合研究講演会、明治大学中野キャンパス、2018年1月31日

(17) 萩原一郎、折紙工学の現状と課題、折紙式プリンターと数理の融合研究講演会、明治大学中野キャンパス、2018年1月31日

(18)阿部綾、寺田耕輔、萩原一郎、折紙工法による組立式トラスコアパネル(ATCP:)の適用検討、日本応用数学会 2018 年研究部会連合発表会、大阪大学吹田キャンパス、2018年3月15日

(19) 萩原一郎、生活の 3 大要素「折り、畳み、広げ」の極意を折紙工学で紐解きます、明治大学研究ブランディング事業「数理科学する明治大学」第 1 回 公開シンポジウム対話が誘う現象数理の世界～ 数理でひも解く文学・芸術・社会 ～、明治大学駿河台キャンパス、2018年3月17日

〔産業財産権〕

出願状況(計 4 件)

名称：折り畳み構造物

発明者：萩原一郎、奈良知恵

権利者：明治大学

種類：特許

番号：特許願 2015-245594 号

出願日：2015年12月16日

公開番号：2017-110315

国内外の別：国内

名称：衝撃吸収体の製造装置および衝撃吸収体の製造方法

発明者：萩原一郎、趙希祿

権利者：萩原一郎

種類：特許

番号：特許願 2017-089216 号

出願日：2017年4月28日

国内外の別：国内

名称：コアパネル

発明者：萩原一郎、寺田耕輔

権利者：萩原一郎

種類：特許

番号：特許願 2017-166169 号

出願日：2017 年 8 月 30 日

国内外の別：国内

名称：容器

発明者：萩原一郎、奈良知恵、古原徹

権利者：明治大学

種類：特許

番号：特許願 2017 - 201993 号

出願日：2017 年 10 月 18 日

国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ

<http://www.isc.meiji.ac.jp/~hagilab/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

萩原一郎 (HAGIWARA、 Ichiro)

明治大学研究・知財戦略機構・特任教授

研究者番号：50282843

(2) 研究分担者

梶原逸朗 (KAJIWARA、 Itsuro)

北海道大学・工学研究院・教授

研究者番号：60224416

(3) 研究分担者

黄慶九 (HUANG、 Qingjiu)

工学院大学・工学部・准教授

研究者番号：20361785

(4) 研究分担者

篠田淳一 (SHINODA、 Junichi)

明治大学研究・知財戦略機構・研究推進員

研究者番号：60266880

(5) 研究分担者

ディアゴ ルイス・アリエル (DIAGO、 Luis
Ariel)

明治大学研究・知財戦略機構・研究推進員

研究者番号：20467020

(6) 研究分担者

石田祥子 (ISHIDA、 Sachiko)

明治大学理工学部・専任講師

研究者番号：40636502