

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K12115

研究課題名(和文) マルチスケール折り紙ロボットの自動設計アルゴリズムと自動製造に関する研究

研究課題名(英文) Automated Actuator Arrangement for Scalable Sheet-based Origami Robots

研究代表者

新山 龍馬(Niiyama, Ryuma)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・講師

研究者番号：00734592

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、安価なオンデマンドのロボット製造を可能にする技術として、折り紙構造を拡張したロボットの自動設計アルゴリズムと、デジタルファブリケーション技術の創出を目指した。アクチュエータには、折り紙構造と一体化できる空気圧アクチュエータを用いた。小型の構造として、生体規範型アプローチに基づいて、昆虫の翅の折りたたみ構造を取り上げた。また、大型の構造として、内圧で構造を支えるインフレータブル構造を利用した。提案システムは、ロボットの形状と望みの動きを入力すると、アクチュエータの拡大縮小と自動配置を行い、シート状の材料を使って製作できるデータを出力する。

研究成果の概要(英文)：We focused on an automatic robot design algorithm and digital fabrication technology for scalable origami robots. Pneumatic actuators are employed to embed actuators in robot structures. Developed small scale robots are based on insect wing that have an elastic origami structure based on bio-inspired approach. We also used inflatable structure for large scale robots. The proposed system accepts desired 3D shape and motion as input. Then, the system automatically scale and arrange actuators on origami structure.

研究分野：ロボティクス

キーワード：おりがみロボット ソフトアクチュエータ

1. 研究開始当初の背景

構造、センサ、アクチュエータを統合したロボット・システムは、従来、コンポーネントの組み立てによって製作されてきた。これに対して、締結部品を省き、センサやアクチュエータを構造に埋め込んだ形で自動製造しようとする試みがある。その中で、シート材料の形で加工を行なってから折り上げてロボットを構成する「折り紙ロボット」が提案されている。

折り紙 (Origami) は我が国でよく親しまれ、発展してきたものであり、学術面・工業面の両面で我が国発の技術として応用発展が望まれる。折り紙はシート状の素材から三次元構造を製作できるため、低コストで、運送に適したコンパクトなロボット・システムを製作する技術として有望である。

折り紙ロボットの自動設計・自動製造の技術が確立されれば、望みのタスクや形状からロボットを簡単に得ることができると期待される。これは、例えばプログラミング教育においてロボットハードウェアのコストがボトルネックになっているという問題を解決でき、ロボットの普及に貢献できる。また、運搬が容易で安価なシート素材を用いた「使い捨て」ロボットが実現できれば、ロボットの用途が広がる。大型の構造をコンパクトに製作し、使用する場所で展開するという利用方法も考えられる。これは、人工衛星の太陽パネル等に使われる特殊な技術であったが、本研究の成果を用いれば、例えば簡易住居の建設、地上での仮設アンテナや太陽パネルの展開、組み立ての必要がない家具の実現など、様々な応用が考えられる。

従来から MEMS 分野で Origami 構造が利用されてきたが、サービスロボットや建築スケールへの適用は難しい。また、望みの構造を得る設計アルゴリズムの開発は挑戦的な課題である。折り紙ロボットに関する技術の新たな進展が求められている。

2. 研究の目的

ロボットの多様化するアプリケーションの中で、特にさまざまなスケールのロボットの臨機応変な製造・供給に対応する基礎技術として、「折り紙」構造を拡張したロボットの自動設計アルゴリズムと、デジタルファブリケーション技術の創出を目指す。

構造、センサ、アクチュエータを統合したロボット・システムは、従来、複数の部品の組み立てによって製作される。これに対して、あらかじめセンサやアクチュエータを構造に一体化した形での自動製造を試みる。これまで用いられてきた形状記憶合金 (SMA) や形状記憶ポリマーは、小型ロボットに有効であったが、大型ロボットには適さない。より大型の可動構造も含むマルチスケール折り紙ロボットをめざし、自動設計に適した新型の流体アクチュエータによって折り紙構造を駆動することを提案する。これによって、

繰り返し動作とセンチメートルから数メートルまでの幅広いスケールに対応する。

3. 研究の方法

(1) 折り紙構造のための自動設計アルゴリズムの開発を行なう。ユーザーが望みの形状と動きを指定する場合、設計プロセスは、製作したい形状と動きを入力し、そこからシート状の展開図を計算するプロセス、およびアクチュエータの自動配置と、配線・流路の経路計算から構成される。ロボットの形状そのものを自動で生成する方法としては、ロボットシミュレーターの中で進化的に形状を探索し、タスクを遂行可能なロボット形状を得る。

(2) 多彩なスケールに対応でき、計算機による自動設計に適した折り紙構造を探索する。大型構造の候補として、内圧で構造を支えるインフレイタブル構造がある。小型構造の候補として、生体規範型アプローチに基づいて、昆虫の翅の折りたたみ構造がある。また、折り紙構造に統合でき、自動製造に適した自由形状シート状アクチュエータを、様々な大きさで設計・製作する技術を開発する。

4. 研究成果

(1) アクチュエータ配置の自動化と設計支援ソフトウェアを開発した。折り紙構造と薄型アクチュエータの統合が可能となる。ロボットの望みの形状と動きを入力し、シート状のソフトアクチュエータを自動配置することで、自動設計を実現した。入力データとして、3DCG ソフトウェア上で 3D モデルを製作し、アニメーションのためのキーフレームを定義した。次に、入力された時間的に変化する形状データから、回転部と並進部の幾何学情報を検出した。アクチュエータの拡大縮小と自動配置を行って、ロボットの展開図面を自動生成した。実際に、提案システムを用いて、多関節ロボットグリッパーの設計支援と製作を行なった。

(2) 折り紙構造は、紙のような薄いシート材料で作るのが一般的だが、立体造形のためのデジタルファブリケーションによって、折り目を含むシート材料そのものを 3D プリントすることもできる。そこで、3D プリント可能な折り目埋め込み型アクチュエータの開発と、可動部の自動検出を行った。次に、動物の 3D モデルを用意し、骨格モデルの当てはめによって可動関節の自動検出を行った。開発した折り目アクチュエータは、空気圧で駆動され、各部に合わせてスケーラブルなものとなっている (図 1)。

試作したロボットでは、制御回路をロボット胴体部に搭載し、自立システムとした。また、各関節角度を計算機上の 3D モデルの操作によって指令するインタフェースを提供した。

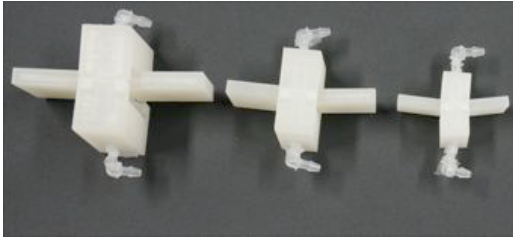


図1 大きさの異なるアクチュエータ。

(3) センチメートルスケールの折り紙構造の探索においては、昆虫の翅に注目した。折り紙構造をもった翅は、素早い収納・展開を可能にし、また一方で飛翔に十分な強度を保っている。翅の立体構造の解析から、折りたたみのための折り目パターンを解析し、実際に折り紙構造として実現可能であることを示した。また、デジタルファブリケーション技術を援用することで、翅のフレームである翅脈および膜構造を、樹脂材料を用いて人工的に再現した。特に甲虫の翅に注目し、ビデオ撮影やX線計測で調べたところ、体長が1cm以下の甲虫ではもっぱら弾性による展開機構を、体長が5cmを超える甲虫では弾性では展開しない明確なヒンジ構造を持つことが明らかになった。これはセンチメートルスケールのおりがみ構造の設計において示唆を与える。

(4) メートルスケールの折り紙構造の探索においては、薄い材料で自重を支えることが必要となる。そこで、気密を保った中空構造を作り、その内圧によって外殻を支える、インフレータブル構造を採用した。これは、軽量化かつシート材料で構成でき、ロボットの構造として有望である。折り紙構造の発展として、任意の3Dメッシュモデルを、2次元平面上に展開するアルゴリズムについても検討を行った。展開された型紙は2次元図形であるため、シート材料から製作することが可能である。面の折り曲げと接合によって元の3Dモデルを近似的に再構築可能である。

インフレータブル構造は厚みを持つため、可動にするためには、折り紙の薄い板状ヒンジとは異なる駆動方式が必要である。これを解決するために、構造変化に伴う体積変化を起こさないベローズ式の関節を埋め込んだ。これを受けて、提案システムは、立体構造の2次元展開と同時に、ベローズ式アクチュエータに必要なプリーツ（シワ）も考慮に入れた展開図を生成するようにした。

(5) ユーザーがロボット形状を与えず、タスクのみを与えるケースについても検討を行った。折り紙ロボットの形状を探索する必要がある。ここでは、物理シミュレーション中で進化的手法によって、変形するボクセルから構成される単純な形状のロボットの形状を探索した。特に複数のタスクに適合する

ロボットの設計には、単一の評価基準による探索は有効でない。そこで、異なるタスクそれぞれについて進化的探索を事前に行い、得られたロボット形状を合成するネットワークを提案した。合成後のロボットはさらに進化的探索によって改善を行った。

(6) おりがみ構造を動的に制御する技術の開発に取り組んだ。動的な構造変化によって、大面積の構造をコンパクトに収納し、必要に応じて展開する機能、折り目を関節としたおりがみロボットの実現などが可能になる。おりがみロボットの実現にあたっては、折り目を動的に制御することが必要になる。

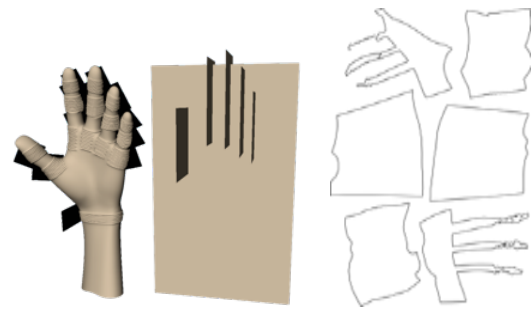


図3 大型の3Dモデルと得られた展開図

特に、歩行や跳躍などを行なう移動ロボットの実現にあたっては、すばやい動作が必要である。この課題に対して、比較的動作が遅い形状記憶合金ワイヤをアクチュエータとして用いるが、おりがみのような平板の飛び移り座屈という現象を利用することで、すばやい動作が実現できることを示した。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計3件)

- ① 新井 悠介、西川 鋭、新山 龍馬、國吉 康夫、Bistable 機構を用いた変形モジュールロボットによるダイナミックな運動の生成、第17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、2016.12.17、札幌コンベンションセンター（北海道・札幌市）
- ② 木村 友哉、金子 喬、新山 龍馬、國吉 康夫、事前進化させた複数ロボットの合成による多機能ソフトロボットの身体自動設計、第17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、2016.12.17、札幌コンベンションセンター（北海道・札幌市）
- ③ Yuki Itotani1, Tomoya Kikuno, Ryuma Niiyama, Yasuo Kuniyoshi, Scalable Pneumatic Actuator for Easy Creation of Animated Animal-shaped Objects, IEEE International Conference on

Robotics and Biomimetics, 2015.12.9,
Zhuhai (China)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

新山 龍馬 (NIIYAMA, Ryuma)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・講師

研究者番号 : 00734592