

報告日：2021年10月1日
報告者：早稲田大学 創造理工学部 准教授
石井 裕之

1. 研究概要

(和文)

(1) 課題名 蔦のように樹木を登る空気圧マニピュレータの開発

(2) 研究者氏名、職名 石井裕之 早稲田大学 創造理工学部 准教授

(3) 研究概要 本研究では、空気圧で伸長する高分子製インフレーターブルチューブとチューブを熱溶着する技術を融合することで、自在に湾曲させることが可能な全く新しい自己成長型マニピュレータの開発に取り組んだ。このマニピュレータは、長尺のインフレーターブルチューブとチューブにオンデマンド的に溶着部を作成する加熱部からなり、チューブの伸展と溶着を交互に行うことで任意の形状を作り出すことが可能となっている。マニピュレータ先端部にカメラや小型ハンド等を取り付けることで、作業者が容易にアクセスできない高所の観察や軽作業に用いることが可能となる。

(4) キーワード インフレーターブル構造, 自己成長型マニピュレータ, 熱溶着

(英文)

(1) Research title Development of vine-like growing manipulator using inflatable tube

(2) Name of researcher with title of position Hiroyuki Ishii, Associate professor, Waseda University

(3) Summary

We propose a novel mechanism for a vine-like growing manipulator using an inflatable tube. This mechanism consists of a long inflatable tube, a feeder for the tube, heaters to make welding points on the tube, and a compressor. This mechanism makes the manipulator grow, and form desired shapes developing bending points on the tube according to the instructions from the operator. Adding a camera or gripper on the tip, this manipulator can be used for inspections of higher points, such as the top of trees.

(4) Key Words Inflatable structure, self-growing mechanism, heat welding

2. 本研究の意義、特色

本研究では、インフレーターブル構造を応用した自己成長型マニピュレータの開発に取り組んでいる。従来型のマニピュレータは金属などで構成されるために、使用現場での形状変更の要望等への対応が困難であったが、自己成長型マニピュレータは使用現場での要望に合わせて成長によって形状を決定することが可能なため、事前に綿密な計画を作成することが困難な場所や用途での活躍が期待される。インフレーターブル構造を応用した自己成

長型マニピュレータに関する研究事例は国内外にいくつか見られるが、本研究は自己成長を実現するために長尺のインフレータブル構造に熱溶着を組み合わせている点で独創的である。

3. 実施した研究の具体的内容、結果

本研究では、申請書にて提案した図 1 に示すコンセプトにもとづき、図 2 に示す試作機を開発した。この試作機では、マニピュレータの伸長の根源となる『膨張前インフレータブルチューブ』は先端部のリールに巻いた状態で格納され、リールから導き出されたチューブの後端は『圧力調整バルブ』を介して『コンプレッサー』に接続されている。『コンプレッサー』からの送気にあわせて『チューブ送り出しローラ』を回転させることでチューブが膨張し、『膨張済みインフレータブルチューブ』が伸長することで、マニピュレータ先端を押し進めていく。その際、『チューブ溶着装置』でチューブの曲げたい箇所を熱で溶着することで、チューブに湾曲部をつくりだす。

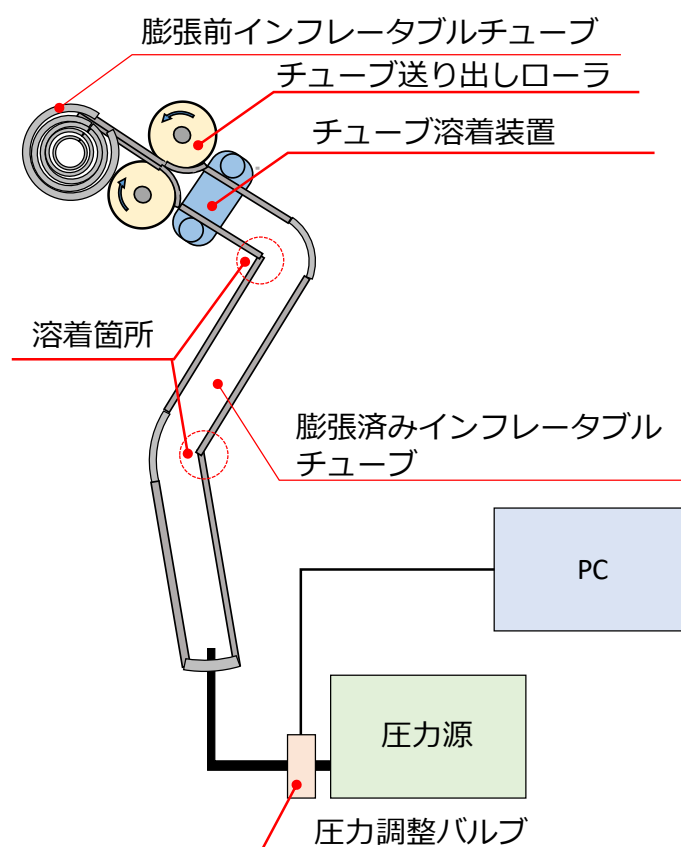


図 1 提案する自己成長型マニピュレータの概要

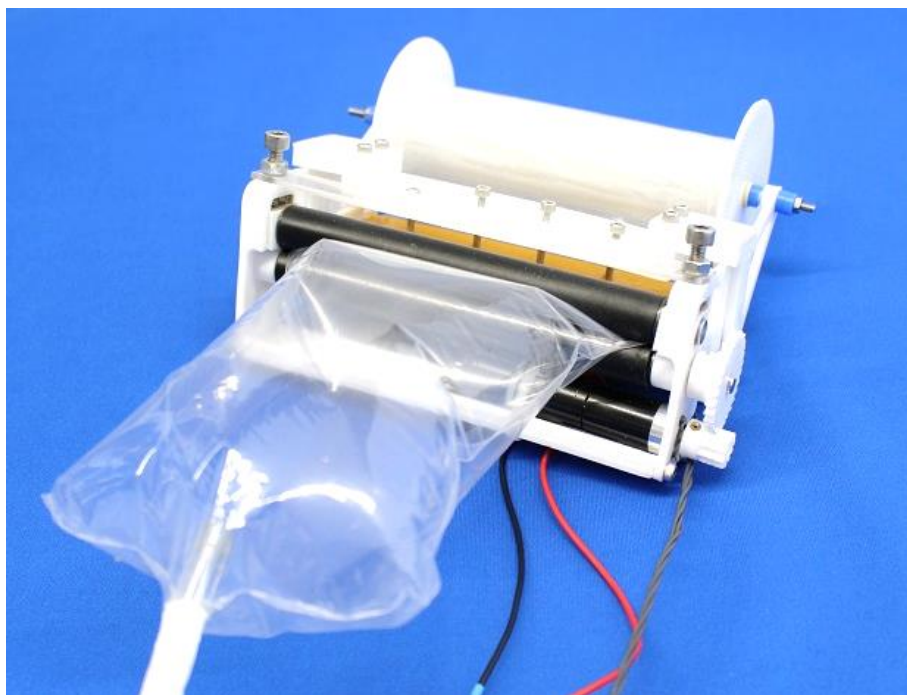


図 2 試作機の外観

開発に際してはまず、インフレータブルチューブの材料選定ならびに製作に取り組んだ。ここでは熱溶着が可能で、かつ軽く柔軟性が高く、さらに耐圧が高いインフレータブルチューブが必要との考えにもとづき、膜面材料に厚さ 15[um]のナイロンと厚さ 40[um]の低密度ポリエチレンからなるラミネートフィルムを採用した。このラミネートフィルムを用いて、融点が低い強度が不十分な低密度ポリエチレンを内側に、融点が高く強度に優れるナイロンを外側となるようチューブを作成することで、溶着性と強度の両立をはかった。チューブの作成に際しては特殊包装の専門業者の協力を得て、展開時の直径が 76[mm]となる長尺チューブを作成した。続いて、チューブ上に湾曲部を作り出すための溶着装置の開発に取り組んだ。熱源にはニクロム線を採用し、まずその配置について実験をおこない検討した。検討の結果、チューブの右端または左端を溶着することで、溶着を形成した側への湾曲を作り出すことが可能なことを確認した。またチューブ中央部を溶着することで、外力に応じて容易に任意の方向へ座屈する部分を作り出すことが可能なことを確認した。この結果にもとづき、溶着装置の右端、中央、左端の 3 か所にニクロム線を配置し、そのうちのいずれを加熱するかを電気的な切り替えで制御できる仕様とした。続いて、ニクロム線の温度ならびに加熱時間と、湾曲部の形状ならびに強度の関係について実験をおこない、高強度の湾曲部を作成するのに適した温度が 135-145[°C]で、加熱時間が 6[min]であることを導き出した。なお、温度ならびに加熱時間については、周囲の温度の影響を受けることも確認された。さらに内圧と溶着部の破壊強度についても実験をおこない、溶着部を破損させることなく安定的にチューブの伸展を実現するのに適当な内圧が 14[kPa]である

ことを導き出した。この結果にもとづき『チューブ溶着装置』を設計し、『膨張前インフレーターチューブ』ならびに『チューブ送り出しローラ』と統合した機構を設計した。『チューブ送り出しローラ』の駆動部には、定格出力 4.5[W]のギアヘッド付き (471:1) DC モータを採用した。これにより、18[mm/s]でチューブを送り出すことが可能となっている。設計に際しては、微細機構設計技術ならびにメカトロニクス技術を駆使して、小型、軽量、高耐圧の実現を目指した。製作に際しては、主要な構造部材を 3D プリンタによってポリカーボネート (PCmax $\Phi 1.75$ [mm]) で製作した。この結果、先端部の機構の重量は 491[g]となった。『圧力調整バルブ』ならびに『コンプレッサー』については、求められる圧力が 14[kPa]と低い値であったため市販品を利用することとした。

開発した試作機を用いて、湾曲形状を作成する実験を行った。まず図 3 に示すように、水平面上での湾曲形状の作成を行った。ここでは、伸展と溶着を交互に行うことで、任意の曲率の湾曲形状を作成可能であることを確認した。続いて図 4 に示すように、3次元空間内での湾曲形状の作成を行った。ここでは、床面上を伸展して壁面に達したところで溶着部を作成し、その後に再び伸展することで壁からの反力を利用してチューブを屈曲させた。そして先端が壁の上端に達したところで溶着部を作成し、その後再び伸展することで重力を利用してチューブを屈曲させ、段差に沿った伸展を実現した。また、後端のみを支持して先端を支持のない空間内へ水平に伸展させたところ、350[mm]の伸展が可能なが確認された。壁面にそって上方へ伸展させたところ、4000[mm]の伸展が可能なが確認された。これらの結果にもとづいて Comer と Levy のモデルを発展させた独自の数理モデルを構築した。

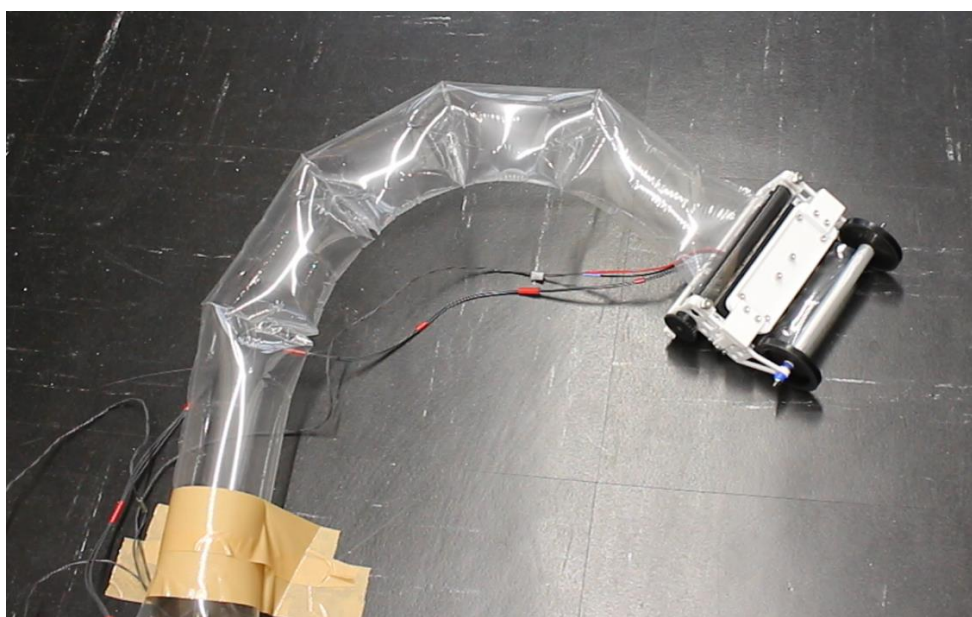


図 3 水平面上での湾曲形状の作成



図4 マニピュレータによる段差乗り越え

これらの実験結果にもとづくと、この試作機では、樹木の樹皮にそって上方へ伸展し、伸展距離が4000[mm]に達する前に遭遇する適当な枝の上方で屈曲部を形成し、その枝を足場としてさらに上方へ伸びていく運用が考えられる。あるいは崖下から、壁面の凸部に足場を形成しつつ上方へ伸びていく運用も考えられる。現在、このような環境での実験の準備を進めており、今後は生態学や植物学の専門家と連携し、人間が直接アクセスすることが難しい場所の調査での利用を進める計画である。

4. 本研究を実施したグループに属する主な研究者の氏名、職名

石井裕之 早稲田大学 創造理工学部 准教授

5. 研究実施時期

2019年3月1日から 2021年2月28日まで

6. 本研究に関連して発表した主な論文等

Satake, Y., Takanishi, A., & Ishii, H. (2020). Novel Growing Robot with Inflatable Structure and Heat-Welding Rotation Mechanism. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 25(4), 1869-1877.

7. 内外における関連研究の状況

米国のStanford UniversityやイタリアのItalian Institute of Technology, わが国では東北大学などで自己成長型マニピュレータの研究開発が行われている。本研究で開発している自己成長型マニピュレータは、そのいずれもと全く異なる様式で成長を実現しており、

独自の新技术として国内外の注目を集めている。

8. 今後の発展に対する希望

今後は、チューブの内圧を向上させマニピュレータの剛性強化をはかる。これを実現するには溶着部の強化が必要不可欠であるため、より強固な溶着部を作成する手法について検討する。また、設置点から目標点までの経路を自動的に生成し、マニピュレータを制御するシステムの構築に取り組む。