# 伸展型ソフト・インフレータブルロボットにおけるオンデマンドな分岐形状作成のための移動・設置機構の開発

○佐竹 祐紀（立命館大）　平井 慎一（立命館大）

先端から伸びるように動作する伸展型ソフトロボットにおいて，熱溶断を用いて分岐形状を作成する技術が実現されている．本研究では，分岐チューブを配置する機構をボディチューブ長手方向のみならず円周方向にも移動可能とすることで，ボディ上の任意の位置に分岐を作成できる機構を実現した．

## 1. 緒言

伸展型ソフトロボット（以下，伸展型ロボットと呼称する）は，細長形のボディを有し，先端から伸びるように動作するロボットである．伸展動作では，先端以外の部分のボディにおいて，周囲の環境との相対的な移動が生じないため，動作時に摩擦による抵抗を受ける部分が少ないという特徴を持つ[1]．また，先端で伸展方向を制御し，伸展済みのボディではその形状を維持することにより，少ないアクチュエータ数でありながらも極めて大きな形状自由度を実現することが可能である．これらの特徴を生かし，先端を移動ロボットに見立てた場合では，障害物が多く存在する空間や狭小な空間での活躍が期待されている[2].

また，伸展型ロボットの動作では，先端部分の移動した軌跡としてボディが残り続ける点も特徴として挙げられる．固定された根元部分で支持力を得ることができ，その力はボディを通じて先端部分へと伝えられるため，先端部分が空中に浮くような姿勢も維持することが可能である．

以上のような特徴から伸展型ロボットは注目を集め，近年では研究事例も増加傾向にある．その中に，伸展型ロボットのボディの形状に関する新たな研究として，分岐したボディ形状が提案され，その有効性が示されている．Blumenscheinらの研究グループは伸展型ロボットを展開式のアンテナとして活用する手法を提案し，その中で，幹となるチューブと分岐したチューブの寸法を変化させることで受信する周波数帯を変化させることが可能であると示している[3]．Glickらの研究グループは，分かれ道の多い環境に対しては，分岐を持たない伸展型ロボットを繰り返し用いるよりも，ランダムに分岐形状を作成した伸展型ロボットを用いた場合の方が，より高速に広範囲を探索可能であると示した[4].

以上のように，伸展型ロボットが分岐形状を有することの利点は既に示されている．しかし，これらの研究で用いられている分岐形状は事前に作成されたものであるという共通点がある．Glickらの研究によれば，広域に伸展させるうえでは事前に作成した分岐形状であっても一定の効果があるとされてはいるものの[4]，より環境に適応した形状を実現することや，分岐したボディに探索以外の役割を担わせることを目指した場合では，状況に応じて分岐形状を作成することが必要となる．

オンデマンドに分岐を作成する技術として，インフレータブル構造をボディに用いた伸展型ロボットに対して，熱溶断を用いて分岐を作成する技術が実現されている[5]．分岐作成機構は磁石を用いた移動機構と統合されており，伸展済みのボディ上を移動して分岐作成機構を設置することが可能である．

上述の技術によってオンデマンドな分岐作成が実現されたものの，分岐作成機構の設置可能箇所には制約が存在する．開発された移動機構では前進と後退動作しか行うことができないため，伸展型ロボットのボディ上を長手方向にしか移動することができない．そのため，分岐を設置したい箇所への移動経路上に既に他の分岐が存在した場合，移動機構はその分岐を避けて目標地点へと到達することができない．

以上の現状を踏まえ，本研究では，伸展型ロボットのボディ上の任意の位置に分岐を作成することを可能とするための移動機構と分岐設置機構の実現を目的とした．具体的には，伸展型ロボットのボディ上を長手方向だけでなく円周方向にも移動できるようにすることで，既にボディ上に設置された分岐を避けて移動することを可能とする．これにより，上述の研究事例で存在した設置の制約を取り除き，ボディ上の任意の位置に分岐を作成する手法の実現を目指す．なお，本研究においても，対象とする伸展型ロボットはインフレータブル構造をボディに用いたものとし，分岐の作成には熱溶断を用いることとする．

## 2. 提案機構

### 2.1 移動機構

先行研究の事例では，円筒型の磁石を車輪として用いた4輪型の機構を採用しており，後輪を連結した車軸が駆動軸となっていた．また，ボディを構成するインフレータブルチューブの表面に取り付く方法としては，チューブの内外に位置する機構が備えた磁石による磁力を利用する手法を用いていた[5]．本研究においても，チューブ表面に取り付く方法には磁力を用いる手法を採用し，これを前提として移動機構の考案を行った．

円周方向の移動を実現するためには，先行研究のような4輪機構にステアリング機構を組み合わせる方法や，クローラによる超信地旋回を用いる方法，オムニホイールのような全方位移動機構を用いる方法が考えられる．本研究では，インフレータブルチューブ上で小回りの利いた移動を実現することや，前述の磁力による取り付き機構との相性を考慮し，クローラによる移動機構を用いることとした．

提案する移動機構の概要を図1に示す．チューブのフィルムに近い箇所に位置する転輪を円筒型の磁石とすることで，チューブへの取り付きのための磁力を得る．左右のクローラはそれぞれ独立して駆動する方式とすることで，前進，後退動作の他に，信地旋回や超信地旋回といった動作を可能とする．これにより，伸展型ロボットのボディとなるインフレータブルチューブ上を，長手方向のみならず円周方向にも移動することを実現する．また，チューブ表面に取り付くために，チューブの内外に配置される2つのユニットのうち，駆動用のユニットをチューブ内部に配置することとした．これは，狭小な空間での伸展型ロボットの運用を想定し，より多くの要素から構成されているユニットをチューブ内部へと配置することで，周囲との干渉を避けた動作を狙ったためである．

### 2.2 分岐設置機構

設置の対象とする分岐作成機構は，先行研究の事例と同様に，熱溶断を行うためのニクロム線を搭載し，磁石によってチューブ表面に固定されるものとした．ただし，本研究ではチューブの内外に配置される各ユニットに対し，内側のユニットにニクロム線と分岐チューブの両方を搭載する構成とした．これにより，移動のために使用するモータや熱溶断のために使用するニクロム線へ通電するための電線を，全てインフレータブルチューブ内を通すことが可能となった．

分岐作成機構は移動機構の後部に配置されるものとした．しかし，この配置では，移動機構が旋回して円周方向へ移動する姿勢をとったとき，分岐作成機構がインフレータブルチューブの内壁と干渉する．そこで，両機構の間にピッチ軸まわりに回転する関節を1つ設け，移動時の干渉を回避できる構成とした．概要を図2に示す．図2(i)のように，移動時には，分岐作成機構は移動機構に対して90°回転した姿勢をとる．分岐を作成したい箇所に到達した場合，図2(ii)のように，チューブ壁面の方向へと分岐設置機構を回転させることにより，磁石による吸着を行う．その後，図2(iii)のように，ニクロム線に通電することにより，先行研究と同様に分岐を作成する．

## 3. 製作機体

製作した機体の外観を図3に示す．クローラのベルトにはクロロプレンゴム製のタイミングベルトを用い，転輪には直径10mm，厚さ8mmのネオジム磁石を用いた．クローラ駆動用のモータには6V-70rpmのギヤヘッド付きDCモータを，分岐設置機構の関節には6V-35rpmのギヤヘッド付きDCモータをそれぞれ用いた．分岐チューブには，膜厚0.03mm，幅40mmの低密度ポリエチレン製チューブを用いた．分岐作成機構のニクロム線には径0.2mmのものを用いた．幹チューブには，膜厚0.06mm，幅150mmの低密度ポリエチレン製チューブを用いた．

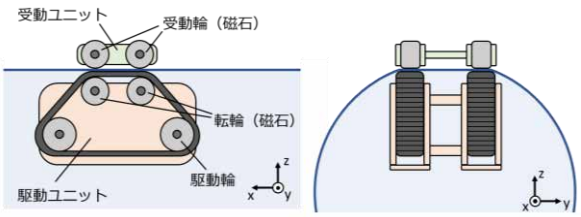



図 1　移動機構概要

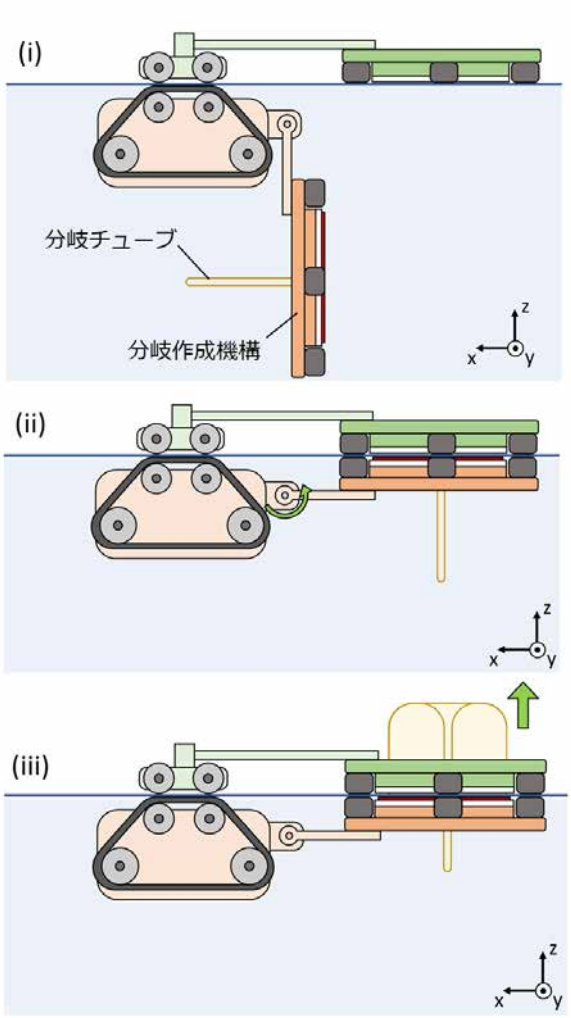



図 2　分岐設置機構概要
(i)移動時の状態．(ii)設置機構の動作により分岐作成機構を設置した状態．(iii)分岐チューブの伸展状態．

## 4. 実験結果

提案する機構の移動能力を確認する実験を行った．実験手順は以下に示す通りである．幹チューブ

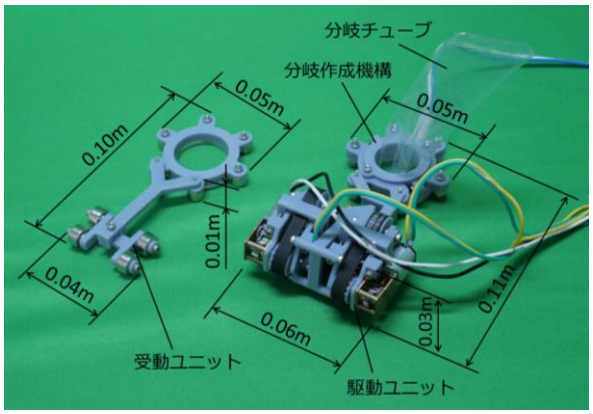


図 3　製作機体外観

の長さを0.4mとし，内圧10kPaで膨張させた．移動機構をチューブ長手方向に移動させた後，超信地旋回や円周方向への移動を組み合わせた移動を行った．その後，分岐作成機構を設置し，ニクロム線に1.2Aの電流を通電して分岐を作成した．なお，本実験では，幹チューブおよび分岐チューブの伸展動作の制御は行わないものとした．

実験結果を図4に示す．初期状態は，移動機構はチューブ長手方向を向いた姿勢とし，分岐作成機構は移動機構に対して90°回転した姿勢とした（図4(i)）．チューブ長手方向へと移動した後，停止し（図4(ii)），超信地旋回により移動機構を90°回転させ，円周方向を向く姿勢とした（図4(iii)）．円周方向へと移動した後（図4(iv)），再び超信地旋回および移動を繰り返し行った（図4(v)－(vii)）．その後，分岐を作成したい箇所にて停止し，分岐設置機構を動作させて分岐作成機構を設置した（図4(viii)）．最後に，分岐作成機構に搭載したニクロム線に通電し，分岐形状を作成した（図4(ix)）．以上より，提案する機構によって，チューブ長手方向および円周方向の移動，超信地旋回，分岐作成機構の設置の全ての動作を実現した．

## 5.　考察

先述の実験結果より，提案する機構を用いることで，チューブ長手方向および円周方向の移動，超信地旋回，分岐作成機構の設置の全ての動作が実現可能であることが確認できた．これにより，伸展型ロボットのボディであるインフレータブルチューブ上に既に設置された分岐チューブを避けながら移動できるため，先行研究で存在した設置の制約にとらわれず，任意の位置に分岐を作成することが可能となったと考えられる．また，先述の結果とは異なり，分岐設置機構の関節を動作させなかった場合では，分岐作成機構とチューブの内壁が接触し，旋回が行えないことも確認している．これより，提案した分岐設置機構が想定通りの効果を発揮していると考えられる．今後は，設置後の分岐作成機構と移動機構の分離や，屈曲状態にある幹チューブ上の移動の実現を目指す．

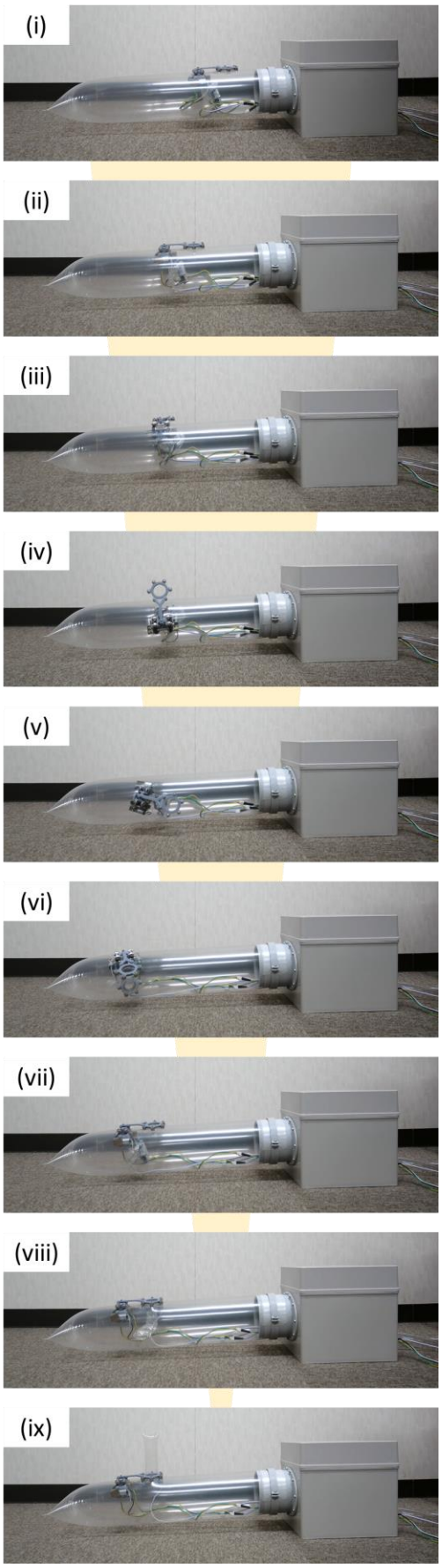


図 4　提案機構の動作の様子

## 参 考 文 献

[1] L. H. Blumenschein, *et al.*: “Design, modeling, control, and application of everting vine robot, Frontiers in Robotics and AI, col. 7, Art. no. 548266, 2020.

[2] M. M. Coad, *et al.*: “Design, teleoperation, and deployment for navigation and exploration,” IEEE Robotics and Automation Magazine, vol. 27, no. 3, pp. 120-132, 2020.

[3] L. H. Blumenschein, *et al.*: “A tip-extending soft robot enables reconfigurable and deployable antennas,” IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 3, no. 2, pp. 949-956, 2018.

[4] P. E. Glick, *et al.*: “Branching vine robots for unmapped environments,” Frontiers in Robotics and AI, vol. 9, Art. no. 838913, 2022.

[5] Y. Satake, *et al.*: "On-demand branching mechanism using heat cutting for soft inflatable growing robot," IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 9, no. 11, pp. 10105-10112, 2024.