

2本の伸縮可能なインフレータブルアームを備えたロボットの3次元移動手法の提案

○佐竹 祐紀（立命館大学） 多胡 靖歌（早稲田大学大学院）

石井 裕之（早稲田大学） 平井 慎一（立命館大学）

伸縮可能なインフレータブルアームで構造物を把持して自身のボディを引き寄せることにより、現在位置から離れた位置へと3次元的に移動することを可能とする移動手法の提案を行った。本提案手法を実現するために製作したロボットを用いて実験を行った結果より、実際にロボットは離れた位置に存在する構造物間を連続して移動可能であることが確認された。

1. 緒言

立体的な移動として登攀能力を有するロボットは、工業や農業など幅広い分野において人間に代わり危険を伴う作業を行うことが期待されている。作業環境や内容に合わせて種々のロボットが開発されており、例としてはパイプを登攀してインフラのような人工構造物の点検を行うロボット[1]や樹木を登攀してメンテナンスを行うロボット[2]が挙げられる。これらのロボットの多くは登攀対象物に取り付く能力を有する部分と、それらを接続するリンクによって構成されており、屈曲形状や分岐形状に対応して移動可能なものも存在する。また、近年ではソフトロボティクスの技術を用いた登攀ロボット[3], [4]も研究されており、その柔軟性から登攀対象物の形状に対して大きな適応能力を示すとともに、軽量の機体を実現している。このように、様々な用途、環境で用いることが可能なロボットがこれまで開発されてきている。

上述のロボットはそれぞれが想定している対象物の登攀を実現しているものの、その対象物はひとつづきの形状のものがほとんどである。これらのロボットが有する機構によって、ロボットが現在取り付いている対象物から離れた対象物へと移動することも不可能ではないが、その移動可能な距離はリンクやアームの全長に依存する。それらの全長を増加させることは機体全体の質量増加につながり、結果として移動能力の低下や脆弱な構造物での移動を困難とする要因となる。他方、ソフトロボットアームの研究に目を向けると、軽量でありつつも伸縮能力によって大きな全長を実現しているものが存在する。このような伸縮可能なアームを用いることにより、離れた対象物にも取り付けて移動可能なロボットが実現でき、移動可能な範囲を大きく拡大することが可能であると考えた。そこで、伸縮可能なアームを用いて空間内を3次元移動可能なロボットの開発を目的とし研究を行った。本稿では特に2本の伸縮可能なアームを用いた移動手法について提案を行う。

2. 2本のアームを用いた移動手法

本章では提案する移動手法について説明する。ロ

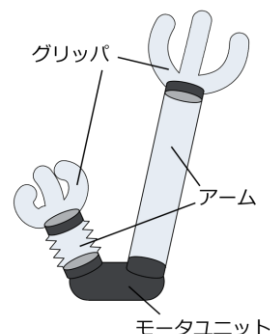


図1 ロボット構成概要

ボットの構成の概要を図1に示す。先端にグリップを2本搭載したアームを2本備えており、それらは独立して動作することが可能である。これらのアームは複数のモータによって構成されるモータユニットに接続されており、モータによってアームの伸展方向を制御することが可能である。

移動の手順を以下に説明する。初期状態は両アームが収縮しており、一方のグリップで構造物を把持しているものとする（図2(i)）。まず、初期状態において構造物を把持していない方のアームを移動したい構造物に向けて伸展させ、構造物を把持する（図2(ii)）。次に、初期状態で構造物を把持していた方のアームを弛んだ状態とし、新たに構造物を把持した方のアームを収縮させてモータユニットを引き寄せる（図2(iii)）。最後に、初期状態で構造物を把持していた方のグリップで構造物を解放し、アームを収縮させる（図2(iv)）。以上の動作を繰り返すことで離れた構造物に取り付けての3次元移動を実現する。

3. 機構

3.1 グリップ

グリップは空気圧を印加することで屈曲変形を生じるインフレータブルチューブによって構成される。チューブの片側はひだを作るように固定されており、もう片側にはゴムチューブが通されている。これにより、内部の圧力が高圧状態ではひだのある方へと屈曲し、大気圧状態ではゴムの弾性力により形状が復元する。アームの伸展方向を中心軸とした

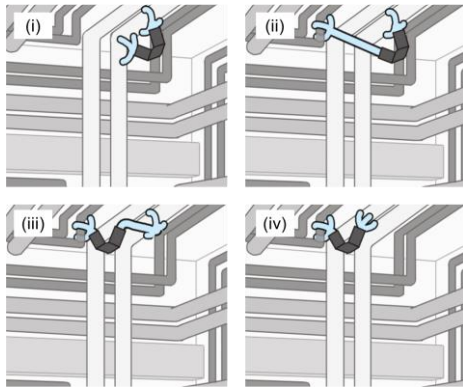


図2 提案移動手法の動作手順

時，その周りにチューブを 120deg の間隔で 3 本配置することでグリッパを構成している．この配置とチューブの柔軟性によってグリッパが接触可能な範囲に位置する物体に対しては，その姿勢に依らず把持することを可能としている．

3.2 アーム

アームはインフレータブルチューブを用いて製作した伸縮部と，収縮状態のチューブを収納する収納部によって構成される[5]．伸縮部のチューブ内部にはリング状のガイド部材がジグザグ状に取り付けられており，これによってチューブ内を負圧状態にした際にチューブが長軸方向に収縮変形するよう誘導している．また，伸展時にはこのガイド部材が収納部に備えられたストッパと干渉することによって動作が阻害され，先端からの段階的な伸展によって直進的な動作を実現している．

3.3 モータユニット

モータユニットは 4 つのサーボモータによって構成される．自由度配置図を図 3 に示す．本来，3 次元空間内でロボットアームの位置，姿勢を制御するためには 6 自由度が必要である．しかし，先述の通り本ロボットのグリッパは，向きの異なるよう配置された 3 本の柔軟なチューブで構成されており，対象物と接触可能な距離に位置するだけで姿勢制御を必要とせず把持することができる．そのため，本ロボットに求められる自由度は位置を決定するための 3 自由度となる．

例として，右側のグリッパで構造物を把持し，左側のアームの伸展方向を制御している場面を考える(図2(i)に示した状態)．この時，右側のアームは収縮した状態であるため図3中の(b)の直動自由度は使用することができず，制御可能な自由度としては直動1自由度，回転4自由度となる．グリッパの位置の制御に必要な自由度の数を上回っているため冗長ではあるが，左右に対称性を持たせることで操作を容易にすることと，部品同士の干渉により可動範囲に生じる制約を避けることを狙い，本研究では図3に示す自由度配置を採用した．

4. 製作機体

製作した機体の外観を図 4 に示す．アームの長さ

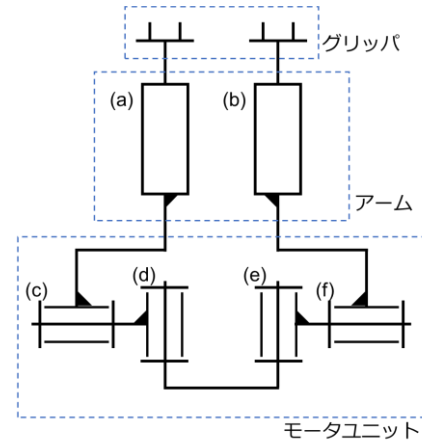


図3 自由度配置図

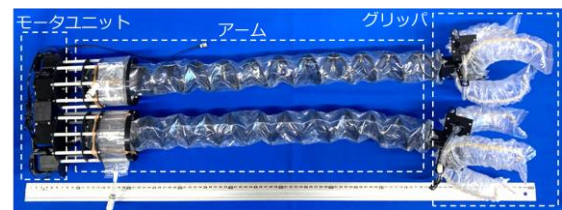


図4 製作機体

は 0.74m であり，機体全体の質量は 0.85kg である．アームやグリッパのインフレータブルチューブのフィルム材質にはナイロンとポリエチレンのラミネートフィルムを用いた．モータユニットのサーボモータ (KRS-2572R2HV ICS, 近藤化学株式会社) の最大トルクは 25.0kgf・cm である．サーボモータや空気圧回路に含まれる電磁弁の制御は PC のキーボードからの入力に基づき，マイコン (Nucleo-F401RE, STMicroelectronics) と通信することで行っている．

1つのグリッパとアームを動作させるための空気圧回路の構成を図5に示す．グリッパには高圧状態と大気圧状態を切り替えるために電磁弁が1つ接続されている．アームには伸縮部を高圧状態と大気圧状態，負圧状態で切り替えるために電磁弁が2つと，収納部のストッパを高圧状態と大気圧状態で切り替えるための電磁弁が1つ接続されている．空気圧源としてはエアークOMPレッサとバキュームポンプを用いている．

5. 評価実験

提案する移動手法を用いたロボットの移動性能の評価として，ロボットが実現可能な移動パターンを調査する実験を行った．

実験フィールドとして，直径 28mm のイレクターパイプを用いて図 6(a)に示すフィールドを作成した．実験の手順は以下に示す通りである．まず，両アームを収縮状態とし，片方のグリッパで動作の開始地点となるパイプを把持させた．この状態を初期状態とし，図 2 に示す手順で次の目標地点へと移動を行った．この動作を連続して行い，ロボットが実現に

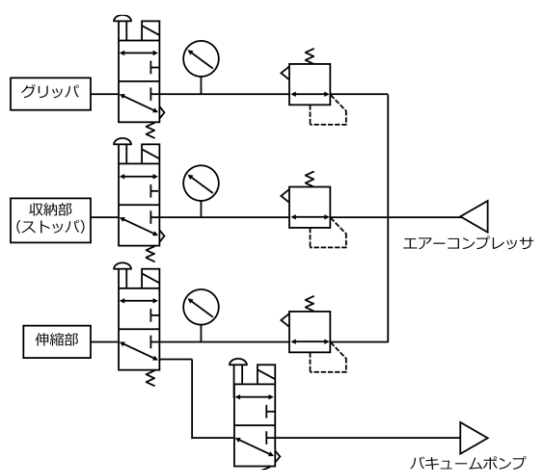


図5 空気圧回路図

成功した移動パターンを記録した．上記の一連の手順を8回繰り返し行った．

繰り返し動作を行ったうち，実現できた移動パターンを表1に示す．なお，表1中のアルファベット，およびギリシャ文字は図6(b)に示す各パイプの相対的な位置関係と対応するものとする．結果より，同一のパイプへの移動，直交するパイプへの移動，高さの異なる位置に存在するパイプへの移動に成功していることがわかる．また，パイプ同士を接続するジョイントへの移動も可能であった．

6. 考察

まず，提案する移動手法とそれを実現するために開発したロボットにより，離れた位置に存在するパイプへと移動可能であることが確認できた．表1に示した実験において確認した移動パターンに注目すると，左右対称な移動パターン（EからKへの移動とGからKへの移動の組み合わせやJからIへの移動とKからIへの移動の組み合わせ）を達成していることがわかる．これは，機体の自由度配置を左右対称にしたことが効果的に作用したものであると考えられる．これらの対称性や同一パイプ上で把持するグリップを入れ替える動作（KからKへの移動）が可能であることを考慮すると，表1に示した動作の方向を変更して組み合わせることにより，図6(b)中に示された各パイプ，ジョイントへの移動が可能であると考えられる．つまり，提案する移動手法とそれを実現するロボットによって空間内の任意の構造物の位置に移動することが可能であるとわかる．

7. 結言

2本の伸縮するインフレーターブルアームを用い，現在位置から離れた位置に存在する対象物に取り付いて移動する移動手法の提案を行った．同移動手法を実現する機構を有したロボットの製作を行い，ロボットのアームが到達可能な範囲において，ロボットが任意の構造物の位置に移動可能であることを確認した．

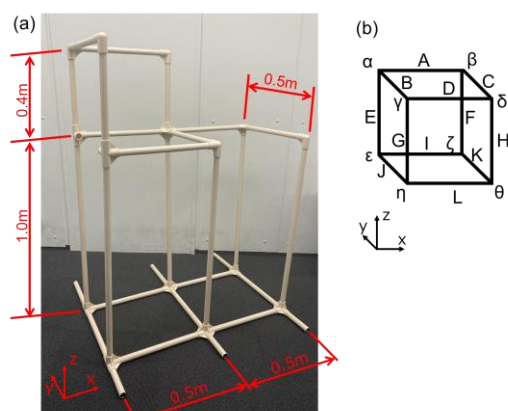


図6 実験フィールド．

(a)は実際に製作して用いたフィールドを示し，(b)は各パイプ，ジョイントの相対的な位置関係を示すものである．(b)中の大文字アルファベットはパイプを，ギリシャ文字はジョイントを表す．

表1 実現を確認した移動パターン

始点	到着点
B	F
E	K
G	K
I	ζ, θ
J	I, η
K	I, J, K,
L	G, I
θ	B, I

謝辞

本研究は JST, JSPS 科研費（15K00366, 19H01130, 21J20587, 21H05055, 22KJ2881, 23H03443），早稲田大学特定課題研究助成費（2020R-071），早稲田大学次世代ロボット研究機構の支援を受けて行われました．

参考文献

- [1] M. Tavakoli, A. Marjovi, L. Marques, and A. T. de Almeida, "3DCLIMBER: A climbing robot for inspection of 3D human made structures," in Proc. of 2008 IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Sys., Nice, France, 2008, pp. 4130–4135.
- [2] T. L. Lam and Y. Xu, "A flexible tree climbing robot: Treebot – design and implementation," in Proc of 2011 IEEE Int. Conf. on Robot. Autom., Shanghai, China, 2011, pp. 5849–5854.
- [3] Y. Sakuhara, H. Shimizu, and K. Ito, "Climbing soft robot inspired by octopus," in Proc. of 2020 IEEE 10th Int. Conf. Intelligent Systems, Varna, Bulgaria, 2020, pp. 463–468.
- [4] G. Singh, S. Patiballa, X. Zhang, and G. Krishnan, "A pipe-climbing soft robot," in Proc. of 2019 Int. Conf. Robot. Autom., Montreal, QC, Canada, 2019, pp. 8450–8456.
- [5] Y. Tago, Y. Satake and H. Ishii, "Novel design of a pneumatic longitudinal actuator for both extending and contracting motions," IEEE Robot. Autom. Lett., vol. 9, no. 2, pp. 1436–1443, Feb. 2024,