

受動変形を許容するモジュラートラスロボットの開発と 有限要素法に基づく制御

○大場 友暁（筑波大院） 磯部 大吾郎（筑波大）

In this paper, a deformable modular truss robot (DMTR) for space exploration, along with the control algorithm is developed. The robot can perform various tasks in various topology and consists of modules which can elongate and contract passively and actuated by electromagnets. The control algorithm is based on the finite element method, in which each module is modeled as a truss element. The algorithm computes currents for electromagnets through solving a stiffness equation. This paper also shows the optimal shape design for the electromagnet, followed by an explanation of the control experiment using developed DMTR.

1. 序論

宇宙探査ロボットには、ペイロードの制約から小型・軽量化が要求され、同時に様々な動作も行える必要があることから、ロボットを再構成可能なモジュラロボットとして構成することが効果的であると考えられる。また、宇宙空間では物体が地球上より減速しにくく、衝突事故の発生頻度が高いと予想されることから、ロボットが受動変形を許容する構造を持ち、事故時の自身や衝突相手の損傷リスクを軽減することも重要である。

一方、受動変形を許容するモジュラロボットは複数開発されている [1][2][3] が、これらは実験やシミュレーションから求めた制御入力-変形関係を用いて制御を行っている。このため、トポロジや動作、外力・自重の作用状態の数だけ実験やシミュレーションを行う必要があり、多様なトポロジや動作を実現することが困難である。

この問題は、制御アルゴリズム中でロボットの力学モデルを構成し、逆解析により制御入力を算出することで解決可能であるが、使用するモデル化手法にはロボットの変形特性を考慮でき、かつ入力データの変更のみで多様なトポロジや動作に対応できるものが望ましい。本研究では、このような特徴をもつモデル化手法として有限要素法に着目した。

以上の背景から本研究では、受動変形を許容する再構成可能なモジュールで構成され、有限要素法を用いて制御されるロボットの開発を目指し、1次元伸縮モジュールで構成されるトラスロボット (Deformable Modular Truss Robot: DMTR) と、トラス要素を用いた有限要素法に基づく制御アルゴリズムを開発した。

2. DMTR の概要

有限要素法は一般に高計算コストであり、制御に用いる場合計算コストを削減する工夫が必要となる。本研究では、次節で説明するように1モジュール1トラス要素でモデル化でき、計算コストを抑えられるという理由から、モジュラートラスロボット [3] に着目し、DMTR の着想を得た。

DMTR は、図 1a)b) に示すモジュールを組み合わせ図 2 に示す様々なトラス構造を構成し、動作を行う。図 2 においては、1つの部材が1つのモジュールに対応している。

モジュールは図 1c)d) に示す2つの部位から成り、伸縮時は上側の部位が伸縮方向に移動する。この移動は、

ばねとリニアブッシュにより弾性的かつ低摩擦で行われる。電磁石は互いに直列接続された2つのコイルから成り、永久磁石は上側の部位と共に移動する。このような構造により、モジュールは受動変形を許容しながら、電磁石に電流を流すことで図 3 に示す原理で伸縮力を発生させ、能動的に伸縮することができる。なお本研究では、電磁石が永久磁石に発生させる伸縮方向の力を伸縮力と呼ぶ。

また現段階では、モジュール同士は端部の関節に取り付けられたベアリングに軸を通して結合される。この様子を図 4 に示す。

3. 制御アルゴリズム

DMTR の制御アルゴリズムは、ロボットを1モジュール1トラス要素で有限要素モデル化し、与えられた目標節点変位から逆解析を行い各モジュールの電磁石に流すべき電流を算出する。なおロボットの動作は準静的に行われるものとし、静的な状態における力のつり合いのみ考慮した。

具体的な計算手順は次の通りである。まず制御ステッ

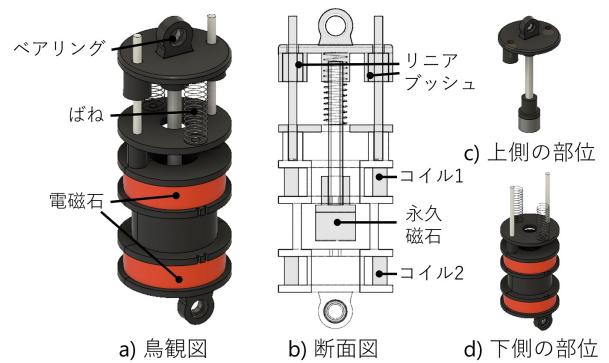


図1 モジュールの CAD モデル

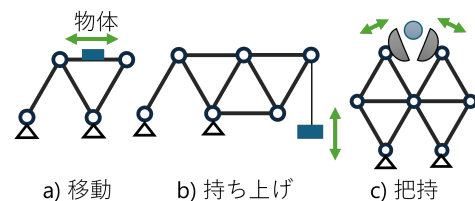


図2 DMTR が可能なトポロジ・動作の例

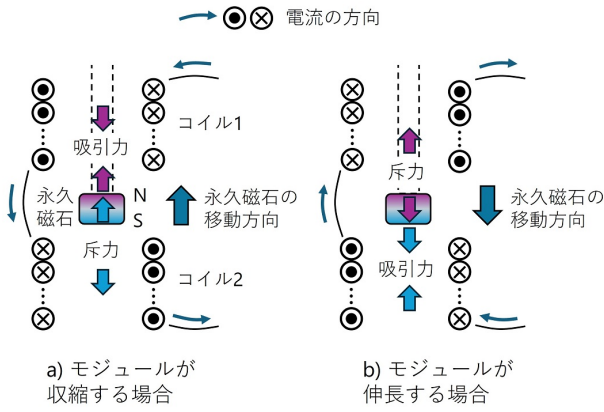


図3 電磁石を用いたモジュール伸縮の原理 (モジュールを真横から見た図)

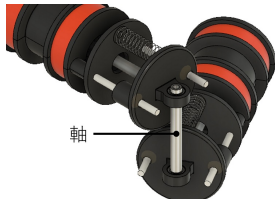


図4 モジュール同士
の結合方法

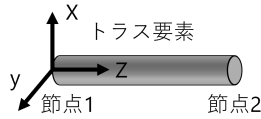


図5 要素座標系の定義

ステップ j において目標節点変位の増分が入力されると、式 (1) に示す剛性方程式を構成し、これを式 (2) に示す伸縮力ベクトル $\{f_a^j\}$ に対して解く。

$$\{f^j\} + [A^j]\{f_a^j\} = [K^j]\{\Delta u\} + \{R^{j-1}\} \quad (1)$$

$$\{f_a^j\} = \{f_{a1}^j \dots f_{am}^j \dots f_{aN}^j\}^T \quad (2)$$

ここで、 $\{f^j\}$ は外力ベクトル、 $[A^j]$ は系全体に対する伸縮力-節点力変換行列、 $[K^j]$ は全体剛性行列、 $\{\Delta u\}$ は目標節点変位の増分ベクトル、 $\{R^{j-1}\}$ はステップ $j-1$ での内力ベクトル、 f_{am}^j はモジュール m の伸縮力指令値、 N はモジュールの個数である。 f_{am}^j はモジュールを伸長させる向きを正とする。また $[A^j]$ と $[K^j]$ は各々、図5に示す要素座標系において式 (3)、式 (4) で表される要素ごとの伸縮力-節点力変換行列 $[A_e]$ とトラス要素の剛性行列 $[K_e]$ を全体座標系に変換し、全要素に対して足し合わせることで得られる。

$$[A_e] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \quad (3)$$

$$[K_e] = k \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

ここで、 k はモジュールに搭載されたばねのばね定数である。 $[A_e]$ は伸縮力を、要素両端の節点に互いに逆向きの節点力として与えることを表している。

続いて式 (5) により、 $\{f_a^j\}$ の各成分 f_{am}^j から各モジュールの電流指令値 i_m^j を算出する。

$$i_m^j = f_{am}^j \cdot g_m(d_m^j) \quad (5)$$

ここで、関数 $g_m(d)$ は電磁石の形状やモジュール伸縮量 d に依存し、実験により求められる。また、 d_m^j はステップ j でのモジュール m の伸縮量目標値である。

4. 実機製作

本研究では、モジュールの設計目標をベアリング中心間距離 100 mm、許容伸縮量 10 mm、最大伸縮力 2 N とし、これらを満たすように設計・製作を行った。

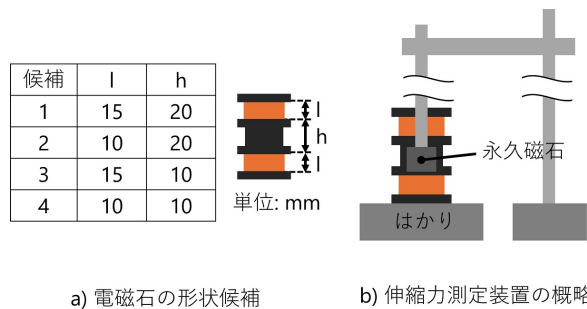
4.1 電磁石の最適形状の決定

モジュール製作に先立ち、電磁石の形状を決定する予備実験を行った。電磁石の形状により式 (5) 中の g_m の分布が変化するが、これは許容伸縮範囲内で低い値を取ることが望ましい。実験では図 6a) に示す 4 つの候補に対し、電流を 1A 流した時に生じる伸長力を様々な伸縮量にて測定し、 g_m の分布を求めた。図 6b) に伸縮力測定装置の概略を示す。電磁石ははかり上に固定し、永久磁石は別の台から吊り下げた。伸長力ははかりが示す値を用いた。なお、全ての候補に対し、永久磁石には幅 14 mm、高さ 10 mm の円形フェライト磁石を用い、導線には 0.5 mm 径のポリウレタン銅線を使用した。また、コイルの内径は 20 mm、巻き数は 1 コイル当たり 300 ターンとした。

図 7 に 4 つの候補に対し求められた g_m の分布を示す。伸縮量 d は正で伸長、負で収縮を表す。また 0 の時、永久磁石は 2 つのコイルの中央に位置する。図より候補 2 ($l = 10$ mm, $h = 20$ mm) において、 g_m の値が許容伸縮範囲内で低い値をとり、かつ最も緩やかに変化することが分かる。したがって本研究では、この形状の電磁石を採用した。

4.2 モジュールの製作

図 8 に、製作したモジュールの外観と寸法を示す。搭載されたばねのばね定数は 0.1 N/mm (0.05 N/mm を 2 並列) であり、使用した永久磁石は前節の予備実験で使用したものと同じ製品である。なお図中の黒い部品は 3D プリンタを用いて製作しており、ベアリングには通した軸を固定するための部品を被せている。また式 (5) 中の g_m は、モジュールごとに分布を求める実験を行い、結果を 4 次関数でフィッティングして制御アルゴリズム中で使用した。



a) 電磁石の形状候補

b) 伸縮力測定装置の概略

図6 電磁石の最適形状を決定する実験の概要

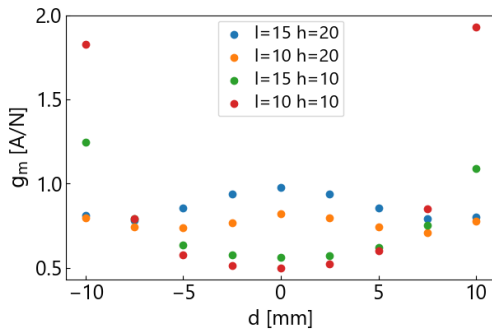


図7 各候補における g_m の分布

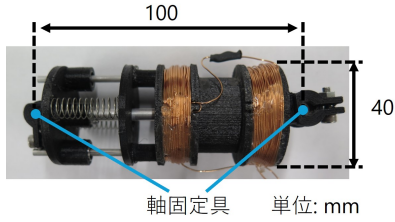


図8 製作したモジュールの外観

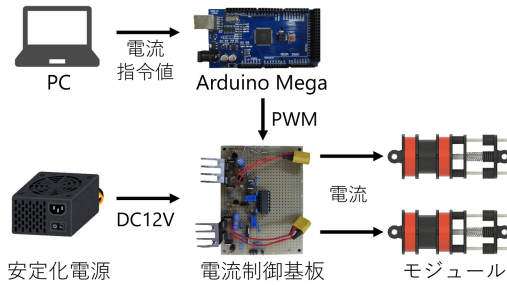


図9 DMTR の制御システム構成

4.3 制御システム構成

図9にDMTRの制御システム構成を示す。PC上で制御アルゴリズムの計算を行い、Arduino Megaと電流制御基板により電磁石に流れる電流を制御する。

5. 制御実験

本研究では2種類の制御実験を行い、開発した制御アルゴリズムの妥当性を評価した。なお動作中の関節位置の時間変化はモーションキャプチャシステムを用いて計測した。

5.1 水平面内の動作

まず図10a)に示すトポロジを構成し、先端関節に同図中の水色で示す目標軌道を与えた。図10b)に有限要素モデル、図11に各制御ステップにおける電磁石の電流指令値を示す。ここで、制御ステップ数は100とした。また、図12-図13に制御ステップを100 ms周期で実行した時の先端関節の軌跡と x, y 座標の時間変化を示す。これらの図より先端関節は乱れながらではあるが、比較的良好に目標軌道に追従しており、制御アルゴリズムから算出された電流指令値は妥当であるといえる。なおこの乱れはリニアブッシュ部でのがたつきから生じる摩擦によるものと考えられる。

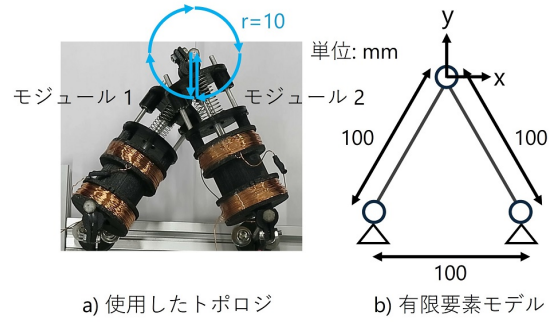


図10 使用したトポロジと有限要素モデル

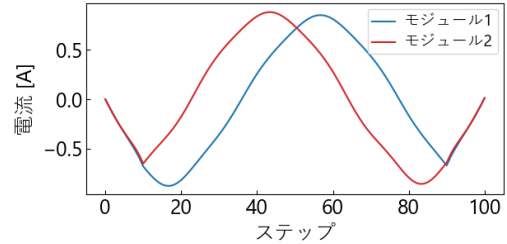


図11 電磁石の電流指令値

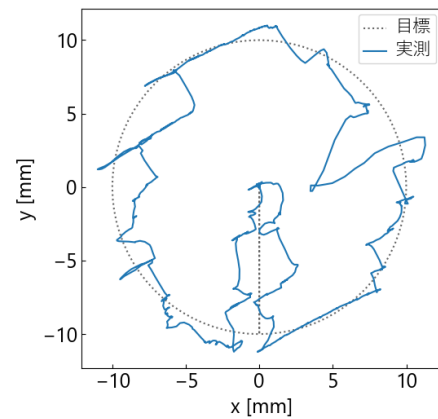


図12 先端関節の軌跡

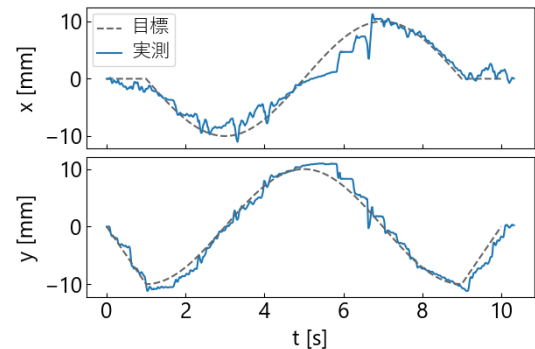


図13 先端関節 x, y 座標の時間変化

5.2 鉛直面内の動作

続いて、トポロジは変更せず図14a)に示すようにDMTRを鉛直面内に配置し、先端関節に重りを吊り下げた。そして、この関節に同図水色で示す目標軌道を与えた。この際、動作開始まで先端関節を変位しない

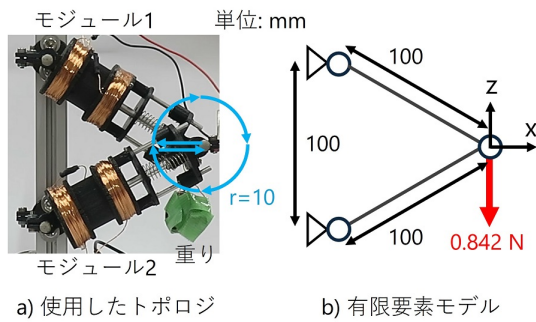


図 14 使用したトポロジと有限要素モデル

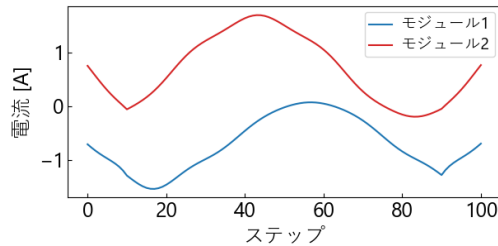


図 15 電磁石の電流指令値

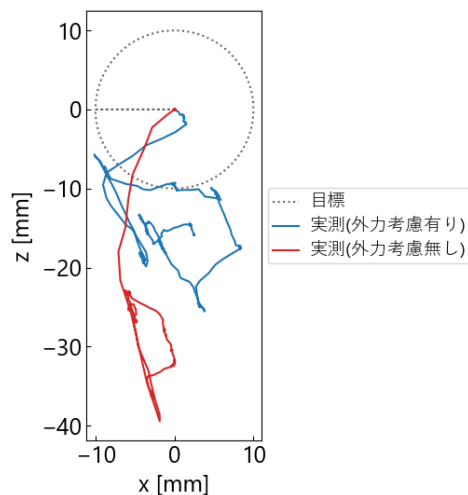


図 16 先端関節の軌跡

ように支え、動作開始と同時に支えを外した。図 14b) に有限要素モデルを示す。この図中の赤い矢印と数値は、重りとモジュール上側の部位の重量を考慮するために付加した外力の方向と値を表す。図 15 に各制御ステップにおける電流指令値を示す。制御ステップ数は前節と同様 100 である。図 16-図 17 に制御ステップを 100 ms 周期で実行した時の先端関節の軌跡と x, z 座標の時間変化を示す。これらの図において、赤線のグラフは外力を考慮せずに算出した電流指令値を用いて実験を行った時の結果を表す。図 16-図 17 より、外力を考慮して算出された電流指令値は、誤差が比較的大きいものの、実際の外力の影響をある程度考慮できていることが分かる。なお、図 16 に見られる軌跡の中心の目標軌道からのずれは、モデル化の際に考慮されていない電磁石の重量の影響によるものと考えられる。また図 17 に見られる階段状の値の変化は、リニアブッシュでの摩擦の影響がより強く現れた結果と考えられる。

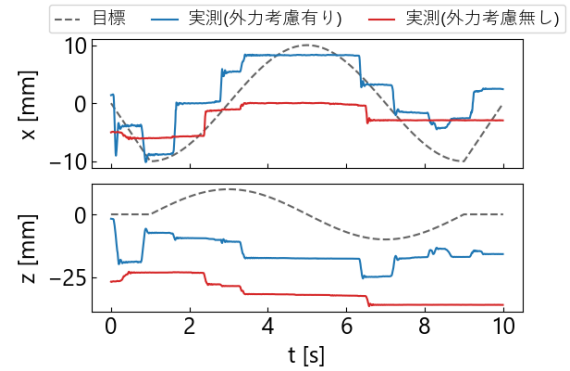


図 17 先端関節 x, z 座標の時間変化

6. 結論

本研究ではまず、ばねとリニアブッシュおよび電磁石を用いることで、受動変形を許容しつつ能動的にも伸縮可能なモジュールで構成されたモジュラートラスロボット (DMTR) を考案した。続いて、トラス要素を用いた有限要素法に基づく制御アルゴリズムを開発した。さらに、複数の電磁石の形状候補から最適なものを決定する実験を行い、得られた結果をもとに実機を製作した。そして、水平面内および鉛直面内で関節を目標軌道に追従させる実験を行い、制御アルゴリズムの妥当性を評価した。これらの結果より、水平面内では妥当な指令値を算出できるが、鉛直面内では電磁石の重量や摩擦等のモデル化されていない要素の影響が強く、誤差が比較的大きくなることが分かった。

今後は、まずリニアブッシュでのがたつきを改善し、摩擦の影響を抑える改良を行う。続いて、改良したモジュールを 4 個程度製作し、より複雑なトポロジでの制御実験を行う。また、アクチュエータ (電磁石と永久磁石) を搭載せず受動変形のみ行うモジュールを製作し、これらとアクチュエータ付きのモジュールを組み合わせたトポロジに対し制御実験を行うことも予定している。

参考文献

- [1] Wang, Wei, et al.: "Modular assembly of soft deployable structures and robots", Materials horizons, vol. 4, no. 3, pp. 367-376, 2017.
- [2] Jiao, Zhongdong, et al.: "Advanced artificial muscle for flexible material-based reconfigurable soft robots", Advanced Science, vol. 6, no. 21, 2019.
- [3] Lyder, Andreas, Ricardo Franco Mendoza Garcia, and Kasper Stoy.: "Mechanical design of Odin, an extendable heterogeneous deformable modular robot", 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IEEE, 2008.