モジュール型登攀ロボットの一部残置による組み立て動作の検証

○光永 春帆，　野田 哲男（大阪工業大学）

On the moon, tall structures are needed to establish bases and secure power sources. Modular robots are expected to play an active role in reducing transportation costs and increasing fault tolerance. This study investigates construction methods in which modular robots repeatedly climb and assemble structures. Previously, we reported on a method for geometrically determining the position and target posture of modules based on their shapes using space-filling solids. This paper reports on verifying operations involving climbing and assembly using structural modules as part of the robot.

1.　緒言

月面では拠点構築や電力源確保を目的として高層構造物の建設が求められており，輸送コストや耐故障性の観点からモジュール型ロボットの活躍が期待される．このロボットは結合・分離を行うことで目的や環境に合わせて自身の形態を再構成することができる．本研究では，月面での太陽光発電システム [1] の構築を目的とし，モジュール型ロボットによる高層構造物の建設を行う手法について提案する．

構造物の構築を目的としたモジュール型ロボットの先行研究として，Romanishin ら [2] による研究がある．これはロボットと構造物の区別がなく，モジュールの種類が 1 種類であることから形態の再構成は容易である一方，構造物としてはアクチュエータが過剰である．Abdel-Rahman ら [3] の研究では構造物にアクチュエータをもたないため大規模な構築に有利であり，モジュールが複数種類あるため作業性も高いが，モジュールの形状が異なるため結合形態は限定される．本研究では，複数種類あるモジュールの形状を同一にし，結合形態を限定せず作業性を向上させる．

著者らはこれまでにモジュールの形状として空間充填多面体に着目し，切頂八面体が最適であると結論付け，モジュール型ロボットが登攀と組み立てを繰り返す建設手法について提案した [4]. また，切頂八面体の空間充填性を利用し，モジュールの構成や目標位置，姿勢を幾何的に決定する手法について提案し，組み立て動作及び登攀動作に適用することで動作が行えることを確認した [5]．さらに，構造物とロボットのモジュールが同一形状であることを利用し，構造物をロボットの一部として登攀を行い，最高点到達時にその構造物を残置することで組み立てを行う手法について提案し，幾何的にモジュールの構成を検討した [6]．本稿では，図 1 に示す本研究で提案する手法のうち，一部残置による組み立て動作についての実機検証結果を報告する．

2.　検証に用いるモジュール

本研究では，これまでに切頂八面体の形状を基本としてロボット及び構造物のモジュールを作製した [4]. 本章では今回の検証に用いる構造物モジュールと joint モジュール，そして今回新たに試作した構造物モジュールと joint モジュールの両者と結合する EE(End-Effector)-joint モジュールについて述べる．

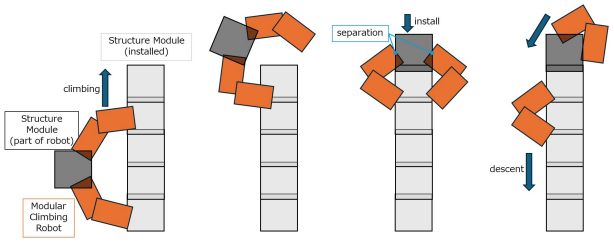


図 1 構造物をロボットの一部として用いて登攀を行い，組み立て後にロボットと分離する建設手法

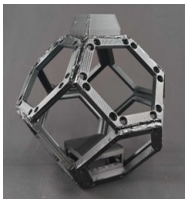


図 2　構造物モジュール



図 3　joint モジュール

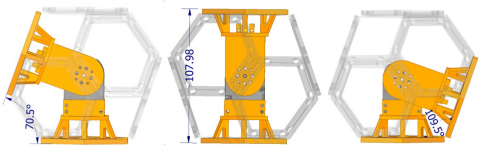


図 4　joint モジュールが切頂八面体の一部となる状態

2.1　構造物モジュール

構造物モジュール (図 2) はロボットの組み立て対象となるモジュールで，アクチュエータをもたない．本稿で検証する手法においてはリンク部としてロボットの一部分を担う．正方形の 2 面には構造物同士を結合するための誤差吸収パーツをもち，最大 25.5 [deg] の角度誤差，最大 12.7% の距離誤差を吸収可能である．

2.2　joint モジュール

joint モジュール (図 3) はロボットの関節を担うモジュールであり，他のモジュールとは磁石を介して結合する．結合面の 2 面が平行となる状態を 0 [deg] として，正負それぞれ 109.5 [deg] が最大可動域となる．この角度は切頂八面体の隣り合う面のなす角である．また，-70.5 [deg],0 [deg],109.5 [deg] のとき切頂八面体の面と一致し，部分的に同形状となる (図 4).

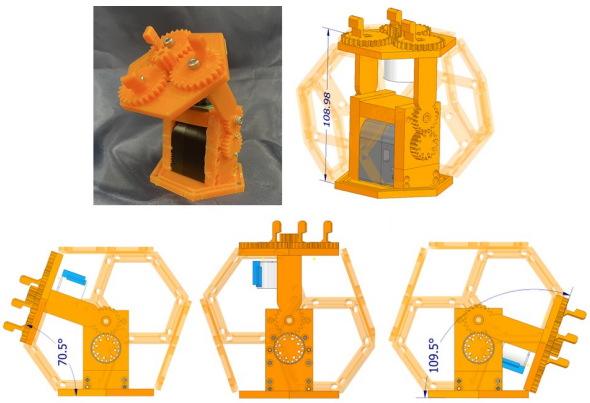


図 5　EE(End-Effector)-joint モジュール

2.3　EE(End-Effector)-joint モジュール

今回新しく試作した EE-joint モジュール (図 5) は構造物との結合を可能とする joint モジュールである．磁石の結合面を 1 つ, EE の結合部を 1 つ備えており, joint モジュール，構造物モジュールの両者と結合できる．可動域は joint モジュールと同様に，$-109.5 \leq \theta \leq 109.5$ [deg] であり，-70.5 [deg],0 [deg],109.5 [deg] のとき切頂八面体の面と一致し，部分的に同形状となる．

3.　提案手法と動作姿勢の幾何的検討

本稿では図 1 に示したような構造物モジュールをロボットの一部として用い，登攀対象である構造物モジュールの最高点に残置することで組み立てを行う手法についての実機動作検証を行う．著者らはこれまでに，提案する組み立て動作について空間充填性に着目し，モジュールの構成，目標位置，姿勢を幾何的に検討した [6]．検討した動作姿勢を図 6 に示す．これにより，各姿勢における各モジュールの目標角度が幾何的に決定された．本稿ではこの動作のうち，図中 3 の姿勢を初期姿勢，図中 4 の姿勢を目標姿勢とする組み立て動作について実機検証を行う．

4.　組み立て動作の検証

前章で述べたように，組み立て動作について実機検証を行った．登攀対象の構造物モジュールは図 7 に示すようにあらかじめ固定した状態でロボットを結合させた．モジュールの構成，ロボットの初期姿勢を図 8 に示す．なお，この初期姿勢は各モジュールを幾何的に決定された角度にした姿勢である．構造物モジュールとロボットは EE-joint モジュールのグリッパーによって，joint モジュールと EE-joint モジュールは磁石によって結合されている．

実機検証の様子を図 9 に示す．初期姿勢から目標姿勢までは，今回はウェイポイントを指定して動作させた．図から分かるように幾何的に決定された初期姿勢から 1 モジュール分の登攀を行い，登攀対象である構造物モジュールの最高点に到達した後，幾何的に決定された目標姿勢となることでロボットの一部である構造物モジュールを最上部に組み立てる動作を達成する様子が確認できた．

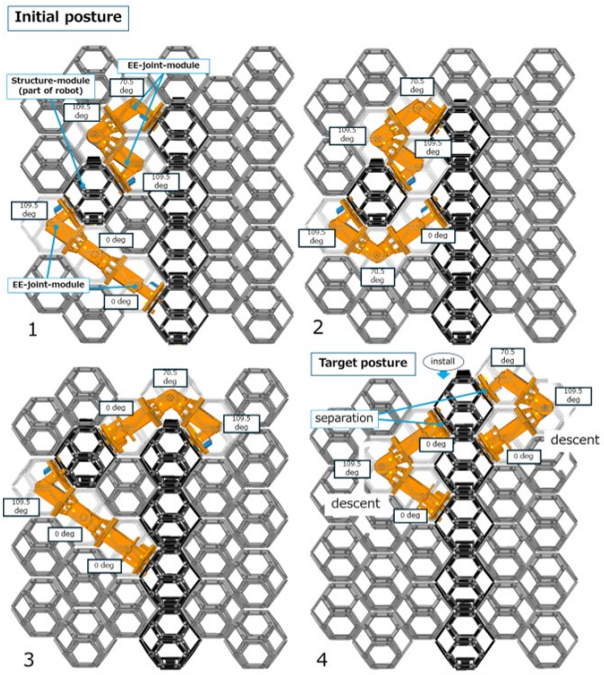


図 6　提案する建設手法を実現する動作姿勢の幾何的検討

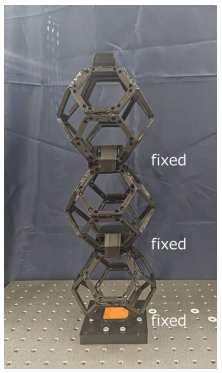


図 7 登攀対象の構造物

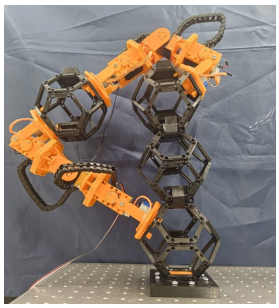


図 8 モジュールの構成と初期姿勢

5.　結言

本稿では，構造物モジュールと結合するための新たなモジュールとして EE-joint モジュールの試作を行い，モジュール型登攀ロボットを用いて提案している構造物の組み立て動作についての実機検証を行った．結果として，幾何的に得られた目標姿勢にロボットを遷移させることで組み立てを達成する様子が確認できた．このことから新たに試作した EE-joint モジュール及び目標姿勢の幾何的決定手法の有効性が示された．

今後の展望として，今回の動作はウェイポイント指定によるものであったが，自律的に幾何的に決定された姿勢遷移を行うための動作経路計画を行う必要がある．また，今回は組み立て動作についての検証を行ったが，登攀動作や分離後の動作を含めて提案手法の一連の動作を実機で検証する必要がある．

謝　辞　本研究は，JST ムーンショット型研究開発事業 (JPMJMS223B) の支援を受けたものです．

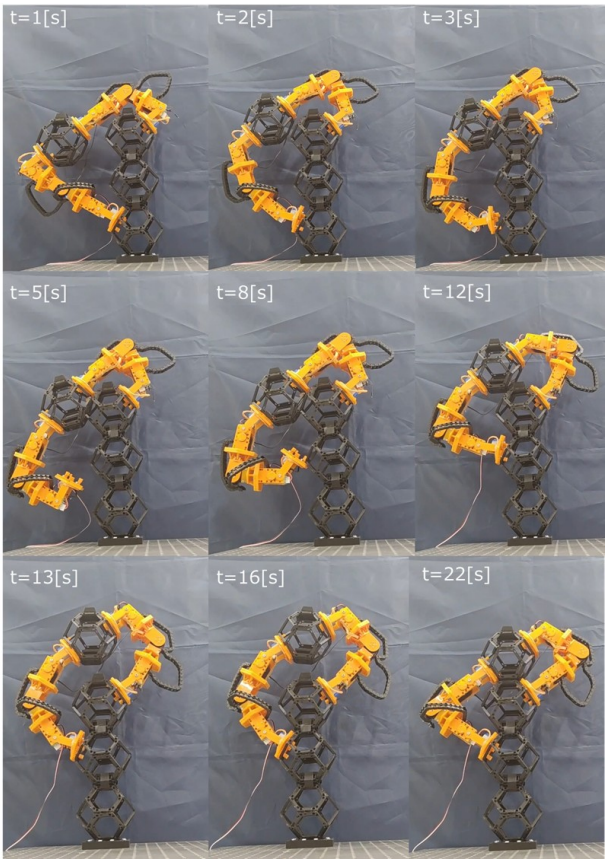


図 9　提案する組み立て動作の実機検証の様子

参　考　文　献

[1] 三菱総合研究所：”一般財団法人日本宇宙フォーラム: 令和３年度宇宙開発利用推進研究開発（月面におけるエネルギー関連技術開発（技術課題整理））報告書” url:https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2021FY/000341.pdf.

[2] Romanishin, John W., John Mamish, and Daniela Rus. :”Decentralized control for 3D M-blocks for path following, line formation, and light gradient aggregation.”,2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2019.

[3] A. Abdel-Rahman et al. :”Self-replicating hierarchical modular robotic swarms.”, Communications Engineering 1.1, p. 35,(2022)

[4] 光永春帆，野田哲男：”モジュール型登攀ロボットを用いる月面における建設手法の提案”, 計測自動制御学会 SI 部門講演会 SICE-SI 予稿集, pp. 1445 – 1447, (2023).

[5] 光永春帆，野田哲男：”高層構造物の建設を目的とした切頂八面体を用いるモジュール型登攀ロボット”, システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集 68,pp. 836 – 839, (2024). https://cir.nii.ac.jp/crid/1520019125726503808

[6] Haruho Mitsunaga and Akio Noda. :”Space-filling truncated octahedron climbing modular robots for the construction of high-rise structures on the lunar surface.”,2025 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), pages 1491 – 1496. IEEE, 2025.