

技術紹介

油圧モジュールロボットの開発 現場作業での利便性を考慮した脱着機構の開発

弘 中 剛 史 ・ 荒 川 拓 也 ・ 北 村 佳 彬
安 藤 了* ・ 玄 相 昊*

1 はじめに

本報は、立命館大学理工学部ロボティクス学科ヒューマノイドシステム研究室*とカヤバ株式会社（2023年度より旧KYB-YS株式会社から取組を移管）による2024年度の研究成果であり、第42回日本ロボット学会学術講演会およびICRA2024で発表した内容に関連するものである。

災害現場や建築現場においては、人が立入り困難な環境下での作業が求められる場面もあり、こうした状況に対応可能な作業用ロボットの需要が高まっている¹⁾。近年では様々なニーズに対応可能な汎用性を備え、トータルコストの低減が可能な新たなロボティクス技術として、図1のような単関節単位で分解可能なモジュール型ロボットが注目されている。

本研究では、モジュールロボットの利点を活かしつつ、人が立入り困難な環境下での重量物搬送等の作業に対応可能な、油圧駆動によるヘビーデューティ用モジュールロボットの開発を進めている²⁾。油圧駆動を採用することで、電動駆動方式と比較して高出力で耐衝撃性に優れ、前述のような過酷な作業環境において最適な性能を発揮すると考えられる。これまでモジュールロボット同士の結合方式として、ピン・ダボを用いた機械的接続機構³⁾やロープを利用したクサビ締結方式⁴⁾を提案してきた。また、油圧配管の接続に関しては、接続角度に自由度を持たせることが可能な同軸カプラ⁴⁾の構成を提示している。

本報では、これまでの取り組みについての概要説明の後、自動脱着が可能でヘビーデューティ用途に対応した高締結力を有する脱着機構の構造を説明し、同機構を実際に試作評価した内容を紹介する。

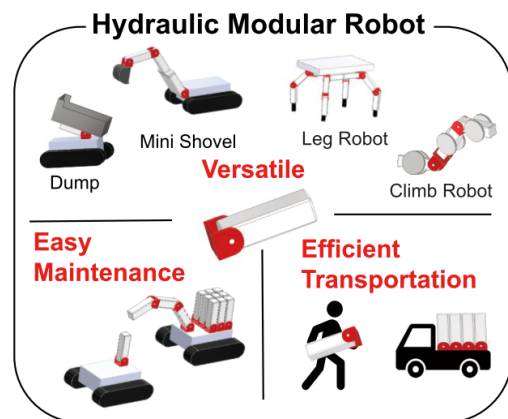


図1 油圧モジュールロボット概要

2 脱着機構の考案

2.1 脱着機構に必要な要件

前章で述べた課題を解決するために、油圧モジュールロボットに適用可能な脱着機構に求められる要件を以下に定義する。

- ①作業環境下で十分な締結力を発揮できること
- ②締結および解除が外部制御により可能であり、自動化に対応していること
- ③オス・メスの極性を持たない構造であること（ジェンダーレス）
- ④締結角度に自由度を有すること
- ⑤脱着動作と同時に複数の油圧配管の接続が可能であること

⑥脱着動作と同時に電氣的接続が可能であること
上記のうち③に関しては、図2に詳細を示す。図2(a)のように、継手にオス・メス極性が存在する場合、締結時に向きの制約が生じるため、組立作業の効率や柔軟性が低下する。一方、図2(b)のように極性の無いジェンダーレス構造とすることで、組立時の向きによる制約が排除され、利便性が向上する。

⑥については既報³⁾にて開発している。本報では、

*立命館大学 理工学部 ロボティクス学科

①②③④を満たす「ジェンダーレス締結機構」、さらに⑤を満たす「同軸カプラ」の2点について開発した内容の一端を紹介する。

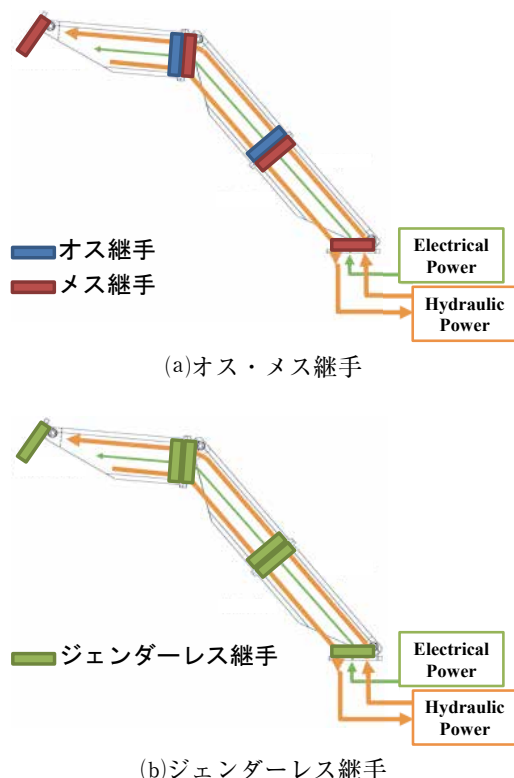


図2 継手のジェンダーレス化

2.2 ジェンダーレス締結機構

油圧モジュールロボット間の接続機構として、既報では、クサビ状のフランジに対応する溝パーツをロープで締め上げることで締結力を得る方式¹⁾を提案している。本報では、ロープを使用せず油圧力のみで締結する新たな方式として、図3に示す油圧式ロック構造を有するジェンダーレス締結機構を提案する。機構の構成は図3(b)に示す通りである。内部に配置されたリング状部品（橙色）を上下に動作させることで、円弧状部品（緑色）を押し付け、クサビ形状を有するフランジ部（灰色）に対してクサビ効果を利用して締結力を発生させる構造となっている。このうちリング状部品は、上下室に差圧を加えることで動作する油圧シリンダ構造となっており、各室に配管ポートを設けることで外部から動作を制御させることを可能としている。

2.3 同軸カプラ

油圧モジュールロボットの締結時における油圧配管の接続機構として、図4に示す同軸カプラ³⁾を考案した。本カプラは、複数系統の流路を同時に接続可能であり、かつ締結角度に自由度を持たせることが可能な構造となっている。

内部構造は図5に示す通り、同一円周上に配置さ

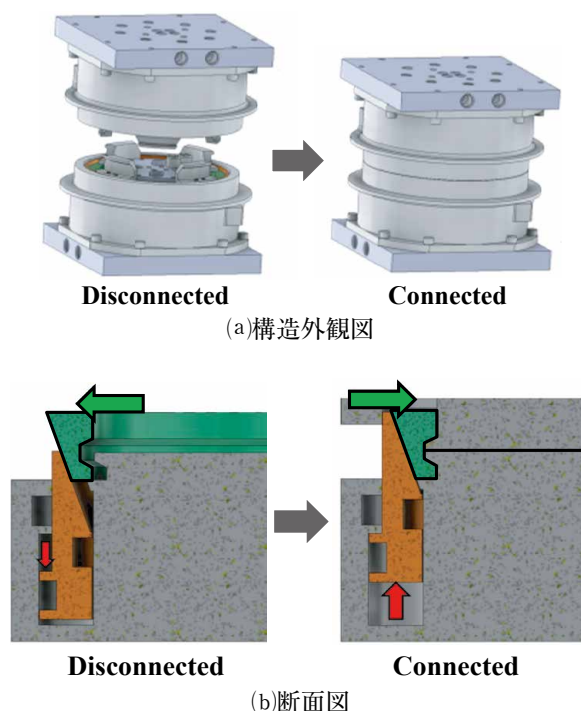


図3 ジェンダーレス締結機構

れた複数のカプラが、それぞれに対応するポートとして内部で流路を合流させる設計となっている。流路は3段の円形プレートによって形成され、ボルトにより締結されている。

油路接続の仕組みとしては、各ポートの継手を同心円状に配置し、オス・メスの極性を規則的に設けることで、図6に示すように継手を中心に90度毎に回転させた状態でも、複数系統の油路の接続を維持することが可能となる。この構造により、締結角度の自由度を確保しつつ、油圧配管の確実な接続を実現している。

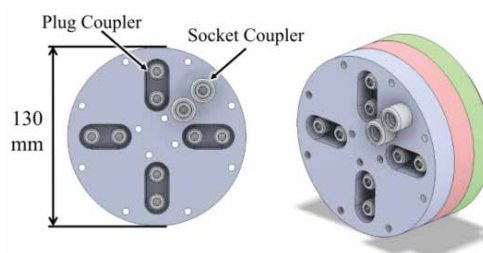


図4 同軸カプラの構造図

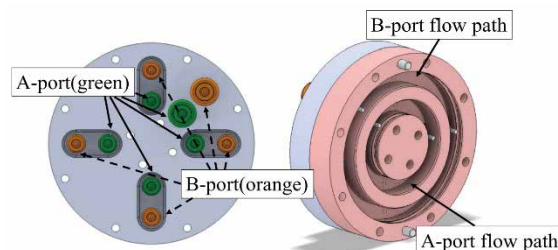


図5 同軸カプラのポート関係図

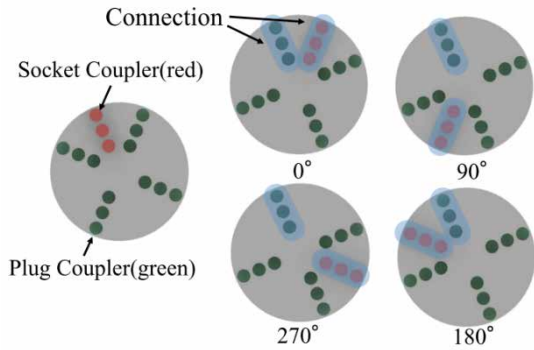


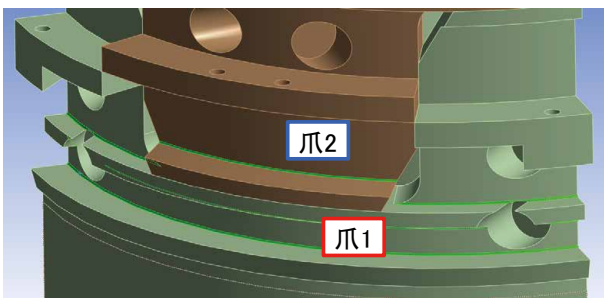
図6 同軸カプラの接続関係図

3 強度解析検証

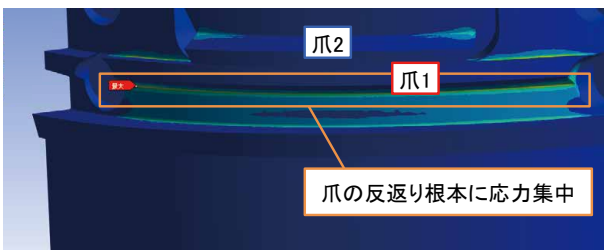
提案機構の原理確認を目的とした試作実験に先立ち、実験条件下において構成材料の強度に問題がないかを評価するため、有限要素解析ソフトウェアを用いた強度解析を実施した。本解析は、安全性を確保した実験条件の策定を目的としている。以下に、解析結果の一例を示す。

3.1 ジェンダーレス締結機構の強度解析

2章で述べたように、ジェンダーレス締結機構は、クサビ状のフランジをリテーナによって押し付けることで締結力を発生させる構造である。この構造においては、押付け力に起因するクサビ部の局所的な変形が懸念される。そこで締結力を発生させるための負荷圧力を与えた状態において、クサビ部の応力分布および材料強度の妥当性を評価する解析を実施した。解析結果は図7に示すように、クサビ部の爪



(a)クサビ部3Dモデル図



(b)クサビ部強度解析 (相当応力)

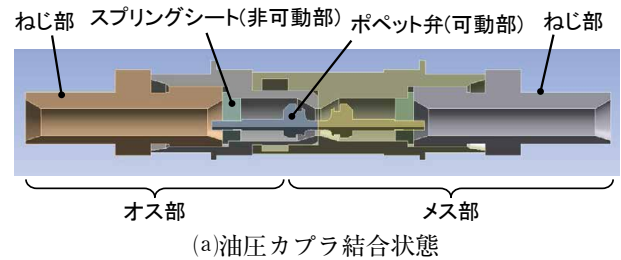
図7 締結機構強度解析例

の反張り根本部に応力集中が生じることが確認されたが、実使用条件下では材料の降伏強度を下回る応力レベルであることが判明し、構造的な安全性が確保されていることを確認した。

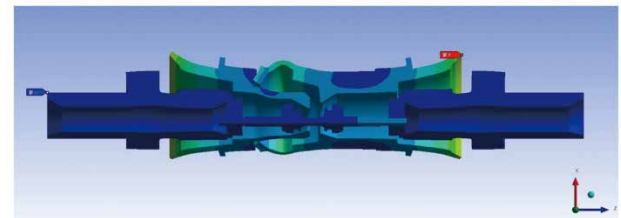
3.2 油圧カプラの強度解析

2章で述べた同軸カプラにおける各油圧カプラについて、結合状態および非締結状態における圧力負荷に対する構造強度の妥当性を評価するため、有限要素解析を実施した。締結状態では、流体が通過する際に生じる内部圧力に対してカプラ構成部品が十分な強度を有しているかを確認した。一方、非結合状態では、カプラ内に設けられたポペット弁が流体の流れを遮断する際に生じる圧力に対して、弁構造および周辺部品の強度を評価した。

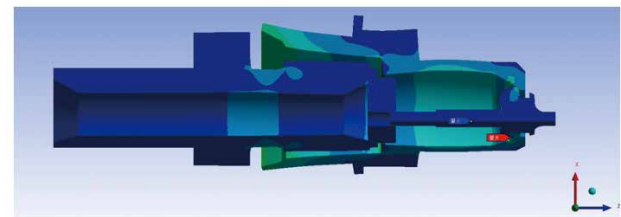
図8の(a)と(b)に結合状態、図8の(c)と(d)に非結合状態における強度解析結果を示す。いずれの状態においても、降伏には至らない程度の応力分布であり、



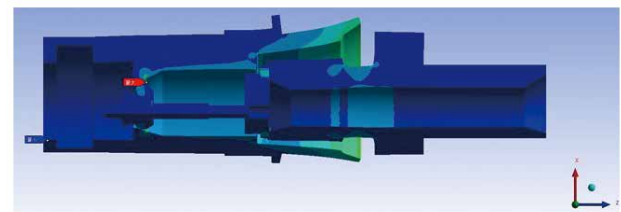
(a)油圧カプラ結合状態



(b)結合時強度解析 (相当応力)



(c)オス部単体の強度解析 (相当応力)



(d)メス部単体の強度解析 (相当応力)

図8 油圧カプラ解析例

実使用条件下において構造的な安全性が確保されていることを確認した。

3.3 同軸カプラユニット締結ボルト強度解析

2章で述べたように、同軸カプラは流路形成のため、図9に示すように3段円形プレートを中心部および外周部にてボルト締結して構成されている。この構造においては、流体の流れに伴って生じる内部圧力により、締結ボルトに過大な応力が加わることで破損が生じる可能性が懸念された。そこで、内部圧力を負荷した状態における締結ボルトの強度解析を実施し、構造的な安全性を評価した。解析の結果、使用条件下で想定される負荷圧力に対して、締結ボルトの応力は材料の許容応力以下であることが確認され、構造的な健全性が確保されていることを示した。

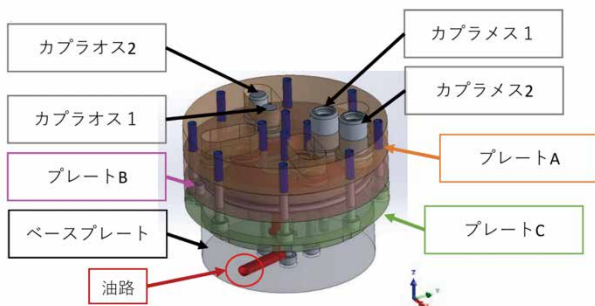


図9 同軸カプラ締結ボルト

4 両機能を有した脱着機構の製作

前章までに述べた「ジェンダーレス締結機構」および「同軸カプラ」を組み合わせ、両機能を有するモジュールロボット脱着機構の試作および評価を実施した。

4.1 ジェンダーレス締結機構部

製作したジェンダーレス締結機構部の外観を写真1に示す。本機構は、(a)に示す脱着・締結ポートから油圧を加えることで、ロックリングが上下に動作し、(b)に示すフランジの爪部に対してリテーナを内側から押し付けることで締結力を発生させる構造となっている。

動作確認試験として、写真2に示すように、締結機構を2対かみ合わせた状態で互いの締結ポートに油路を接続し、外部から加圧を行った。その結果、加圧に伴い、(a)から(b)のように締結部同士が接触方向に移動し、締め込み様子が観察された。このことから、クサビ効果が正常に機能していることが確認された。



(a)ポート部

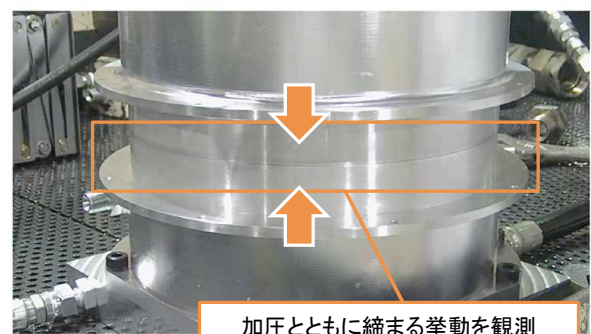


(b)外観図

写真1 ジェンダーレス締結機構製作



(a)締結ポート未加圧時



(b)締結ポート加圧時

写真2 締結機構の動作確認試験

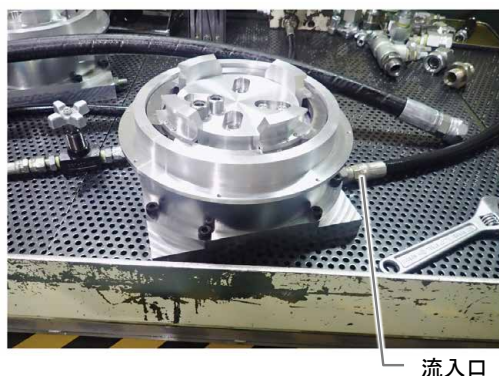
4.2 同軸カプラ部

製作した同軸カプラユニットの外観を写真3に示す。本ユニットは、2章で述べた通り、90度毎に回転させた向きでも接触可能な構造を有しており、締結角度に対する高い自由度を実現している。

動作確認試験として、試作品の同軸カプラの性能評価を実施した。まず未接続時における油漏れの有無を評価した。試験では、同軸カプラユニット(a)を、前節で紹介したジェンダーレス締結機構の中央部に挿入(b)し、未締結状態の継手単体に対して流入口から油圧を加えた。その結果、実使用条件下の圧力においても、同軸カプラからの油漏れは確認されず、シール性能に問題がないことを確認した。



(a)同軸カプラユニット部分



(b)ジェンダーレス締結機構との組合せ

写真3 同軸カプラ動作確認試験

4.3 両機能を有した機構の評価

前節に引き続き、ジェンダーレス締結機構および同軸カプラを組み合わせた脱着機構に対して、継手接続時の油流れおよび油漏れの有無を確認する評価試験を実施した。試験では、写真4に示すように、締結ポートに油圧を加えた状態で流入口から油を流入させ、動作中の流体挙動を観察した。その結果、締結機構が外れることなく、油は正常に流れ、接続部からの油漏れも確認されなかった。

以上の評価結果から、本試作機構は、ジェンダー

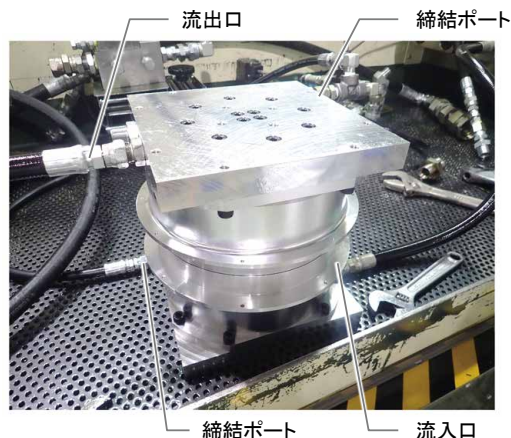


写真4 締結状態

レス締結機構および同軸カプラの両機能を問題なく実現しており、モジュールロボットにおける実用的な脱着機構として有効であることが示された。

5 本成果の外部展開

本研究で取り扱った脱着機構を含む油圧モジュールロボットの開発成果については、(一社)日本フルードパワー工業会が主催するIFPEX2024(油圧・空気圧・水圧国際見本市)において、カヤバおよび立命館大学玄研究室の各ブースにてパネル展示を実施した。

また本報で紹介した脱着機構の試作機については、写真5に示すように立命館大学ブースにて一般公開され、来場者に向けた実機展示を行った。

さらに、カヤバブースでは来場者アンケートを実施しており、20点を超える展示製品の中でも、本モジュールロボットは特に多くの来場者から関心を集めた製品のひとつとして評価された。これにより、本技術の実用性および社会的ニーズの高さが示唆されたと捉えている。



写真5 IFPEX2024での製作品展示

6 まとめと今後の展望

本報ではモジュールロボットにおける脱着機構として、モジュール同士の接続を可能とするで「ジェンダーレス締結機構」および「同軸カプラ」を提案し、それぞれの機構について試作および評価検証を実施した。

ジェンダーレス締結機構に関しては、ロックリング部に油圧を加えることで継手部が確実にロックされ、クサビ効果による締結力が正常に発揮されることを確認した。また、同軸カプラについては、未接続状態での加圧試験においても油漏れが発生せず、シール性能が十分であることを確認した。さらに、締結状態においても油漏れなく油圧が正常に流れることが確認され、両機構ともに実使用条件下での機能性と信頼性を有することが示された。

今後の展望としては、モジュール型ロボットの多様な要求に対応するため、継手構造のさらなる小型化・軽量化を含む設計改良を進める予定である。これにより、より高い汎用性と実用性を備えたモジュールロボットシステムの構築を目指す。

7 おわりに

2024年に発生した能登半島地震をはじめとする自然災害への復旧・復興対応を含め、農林水産、土木建築、物流、インフラ保守など、現代の社会経済において人の立ち入りが困難な作業現場は数多く存在する。こうした環境下において、本報で紹介した油圧モジュールロボットは、現場ごとのニーズに応じて柔軟かつ的確に貢献できる技術であると考えられる。

今後も本技術をはじめとする当社の技術資産を活用し、社会課題の解決に向けた多角的な視点からの取り組みを継続していく所存である。

最後に、本研究活動の推進にあたり、多大なるご支援とご協力を賜った立命館大学 玄相昊先生ならびに玄研究室の皆様、また解析・製作・評価に合同で取り組んで頂いた社内技術本部CAE推進部、生産本部工機センターならびにHC事業部開発実験部の関係者の皆様に心より感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 研究開発の俯瞰報告書：システム・情報科学技術分野、2.2.9 災害対応ロボット、科学技術振興機構 研究開発戦略センター、(2024年9月)。
- 2) 齋藤, 杉本, 玄: 油圧モジュラーロボットの開発, カヤバ技報第61号, (2020年10月)。
- 3) 安藤, 荒川, 弘中, 玄: 油圧モジュラーロボットのためのジェンダーレスな油圧・電気マルチコネクタの設計, 第42回日本ロボット学会学術講演会, (2024年9月)。
- 4) S. Hyon, et al.: Hardware Realization and Control of Modular Hydraulic Robots with Dowel Connectors, IEEE ICRA2024 (2024年5月)。

— 著 者 —



弘中 剛史

2009年入社。技術本部CAE推進部。油圧システムおよびソレノイドバルブの研究・開発に従事。



荒川 拓也

2016年入社。技術本部基盤技術研究所要素技術研究室。油圧機器の研究・開発に従事



北村 佳彬

2013年入社。技術本部基盤技術研究所要素技術研究室。油圧ポンプ開発，車両シミュレーション開発に従事。



安藤 了

2020年立命館大学入学。2024年立命館大学院入学。理工学研究科機械システム専攻在籍中。油圧モジュラーロボットに関する研究に従事。



玄 相晃

1998年早稲田大学大学院修士課程修了。2002年東京工業大学大学院後期課程修了。同年、東北大学大学院工学研究科助手。

2005 ATR脳情報研究所研究員。
2010年 立命館大学理工学部ロボティクス学科准教授。2020年教授。現在に至る。運動制御理論，油圧制御システム，人型ロボットの研究開発等に従事。博士（工学）。