

油圧モジュールロボットの開発

齊 藤 靖 ・ 杉 本 隼 一* ・ 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KYB-YS株式会社との2018年度研究成果であり、第38回日本ロボット学会学術講演会および2019国際ロボット展で発表した内容を主に報告する。

従来、油圧と言えば一般的に油圧ショベルなど、大きな力が必要なものに利用されてきたイメージがある。ロボットの様に繊細な動作が必要な機械については、電動モータの方が制御容易であり一般的である。近年、電動モータは日々出力密度を高め続けており、油圧市場の侵食が進んでいる。

そのような折、Boston Dynamics社が開発した人型ロボット‘アトラス (Atlas)’は悪路を正確に安定して動き、人々に衝撃を与えたことは記憶に新しい。本機体は、段差を軽快に飛び越えるなど、その高速で高負荷な動作は、電動ロボットにはない油圧の可能性を示していた。

我々も、油圧のコア技術を活用した新市場を生み出すべく、油圧ショベルが得意とする農林水産・土木建築・物流運搬・防災復興などの過酷な環境下での重作業だけでなく、人手不足が深刻化している業種で活用しやすい機器の市場参入を目指し、開発に着手した。油圧ショベルは特定のタスクに対して圧倒的に高い性能を発揮している。しかし、作業環境の変化や、多様なタスクに現場で適応することは不得意であり、搬入・搬出、タスクの切り替え方法・時間など、利便性の面で弱点が存在する。一方、近年の産業界での開発手法として、製品アーキテクチャは、従来のインテグラル型（擦り合わせ）からモジュール型（組み合わせ）への移行が進み、モジュール化による合理化により開発期間の短縮やコスト低減を図る動きが加速している。以上より、油圧ショベルの能力を包括し、油圧ロボットの長所を活用する手段の1つとして、モジュール化によるロボットのプラットフォーム化を提案することとした。

2 課題の抽出と解決手法

ほとんどの機械やロボットは、各々の用途に特化した構造設計がなされており、特定のタスクに対し高い能力を発揮するが、複数のタスクに対し形態を柔軟に変えて適応することは困難である。

災害発生時、復旧現場に、いち早く油圧ショベルを投入する方策として、分解・組立式の空輸可能な油圧ショベルの開発事例等があるが、部品の分解・組立に時間が掛かること、および部品形状が一定ではないため、効率のよい運搬ができないなどの課題がある。それらの弱点を最小化することができれば、油圧のメリットを最大化して活用することができるようになる。災害復旧に使用される、油圧ショベルの課題とモジュールロボットによる課題解決方法を表1に示す。

表1 課題と解決方法

油圧ショベルの課題	
A1)	大型かつ重量物であるため、輸送が困難である
A2)	油圧配管の取り回しが複雑で、油洩れがある
A3)	車輪やクローラ式では姿勢が安定しない環境では使用が困難である
A4)	先端アタッチメント交換だけでは、様々なニーズに対する汎用性には限界があり、パーツの換装も困難である
モジュールロボットによる課題解決方法	
B1)	軽量小型で輸送がしやすく、分解・組立が容易であること
B2)	油圧配管の取り回しが容易、或いは不要であり、電動ロボットのように取扱いが簡単であること
B3)	姿勢が安定しない環境では車輪だけでなく脚構造を使用するなど、多彩な移動機構を構成できること
B4)	モジュールの簡単な換装により、ロボットの形状を状況に合わせて変化させることで多様なニーズに対する汎用性を有すること

3 単関節モジュールの提案と概要

3.1 アクチュエータと回路構成

前項を受け、油圧モジュールロボットとして様々な形態が考えられるため、ここではアクチュエータ駆動方式について述べておく。

表2に油圧制御の構成パターンを示す。油圧回路の構成（開回路・閉回路）と油圧アクチュエータの選択（電動油圧アクチュエータ（Electro-Hydraulic Actuator）、直動運動の油圧シリンダ、回転運動の油圧モータ等）により、開発できるモジュールは無数に考えられる。本開発では開回路で出力密度が高く、ロボットフレーム内に配管が容易な油圧シリンダを用いることとした。

モジュールの更なる重量化を防ぎ、耐汚染性に優れた比例弁を使用する目的で、C1)の方式を選択した。

表2 油圧制御の構成パターン

油圧制御の構成
C1) 油圧源と制御弁を外部や胴体モジュールに集中配置し、開回路で駆動する方式
C2) 油圧源を外部や胴体モジュールに設置、制御弁を各モジュールに分散配置し、開回路で駆動する方式
C3) EHA方式のアクチュエータを各モジュールに分散配置し、閉回路で駆動する方式

3.2 モジュールの要求仕様

モジュールロボットを設計する際、モジュール化する範囲や構成部品が重要となる。既存の油圧ロボットでは、油圧ユニット・制御弁・アクチュエータ・フレーム構造など個別で設計されており、アクチュエータと制御弁はユニット化して搭載するのが一般的である。しかし、フィールドロボットでは腕や脚の本数の変更だけでは対応できない状況が多々あり、自由度とアクチュエータの再配置を含めた最適な形態を選択する必要がある。タスクに合わせた多様な形態を明確にするために、表3に要求仕様を示す。

表3 要求仕様

モジュールの要求仕様
D1) モジュール構造のみでロボットリンクの形成が可能であること
D2) 構造が単純で耐久性・耐衝撃性を有すること
D3) 分解と組立が容易な脱着機構を有すること
D4) 油圧回路・電気回路の接続が容易であること
D5) 関節の角度制御とトルク制御が可能であること
D6) 環境やタスクに合わせ、形態だけでなく、柔軟な力の操作が可能な制御システムを有すること
D7) 安価で大量に製造でき、輸送効率や整備性が高いこと

3.3 モジュールの関節仕様

次に、モジュールの関節仕様について決定する。

モータによる回転関節を駆動する構造が一般的であるが、本研究では表3の要求仕様D1)とD4)を重視して、表4のE1)構造を選択した。

表4 関節仕様

モジュールの関節仕様
E1) 直動アクチュエータ：シリンダとリンク機構で回転関節を駆動する構造
E2) 回転アクチュエータ：モータを回転軸に取り付け、直接関節を駆動する構造

3.4 単関節モジュール

本機体は、モジュール化のコンセプトを実証する目的で製作した最初の機体である。従って短納期かつ低コストで試作評価すべく、最低限の機能搭載に限定した。

開発した単関節モジュールを図1に示す。単関節モジュールは、油圧シリンダやセンサを搭載するメインフレームと、4節リンクで回転駆動されるサブフレームから構成される。メインフレームは、材質SPHC鉄鋼を板金加工により製作した。各々のフレーム背面と後面の接続面にボルト締結用の穴が設けられており、同一モジュールを締結可能とする。これにより要求仕様D3)を満たしている。油圧シリンダは内径φ25、ロッド径φ12.5のサイズを選定した。

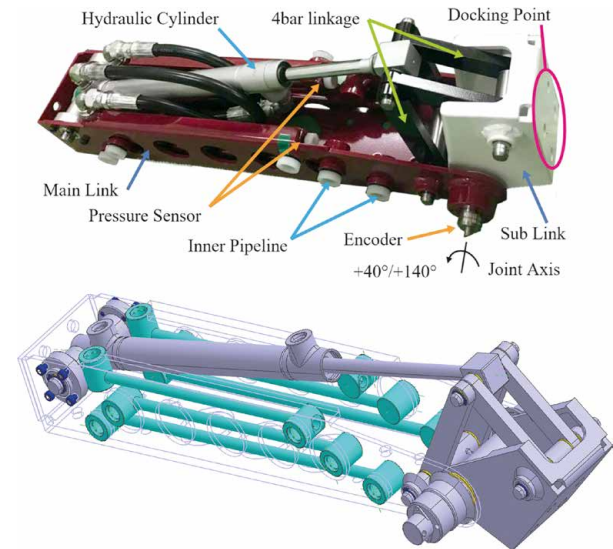


図1 単関節モジュールの構成要素および配管

3.5 単関節モジュールの活用方法

モジュールを適用したイメージを図2に示す。

開発のコンセプトは、図2に示すような多様な形態を構成できることであり、(i)~(vi)のように自在に組み替え可能である。また、油圧シリンダおよび搭載するエンコーダと圧力センサにより、関節の角度制御とトルク制御が可能であり、先端のアタッチメントを用途に応じてショベルのバケットやタイヤを選択することで、様々な用途・環境で使用できる。

- (i)油圧ショベル
- (ii)双腕型油圧ショベル
- (iii)2足型ヒューマノイドロボット
- (iv)6脚型ロボット
- (v)4脚型不整地適応ロボット
- (vi)4脚型ロボット

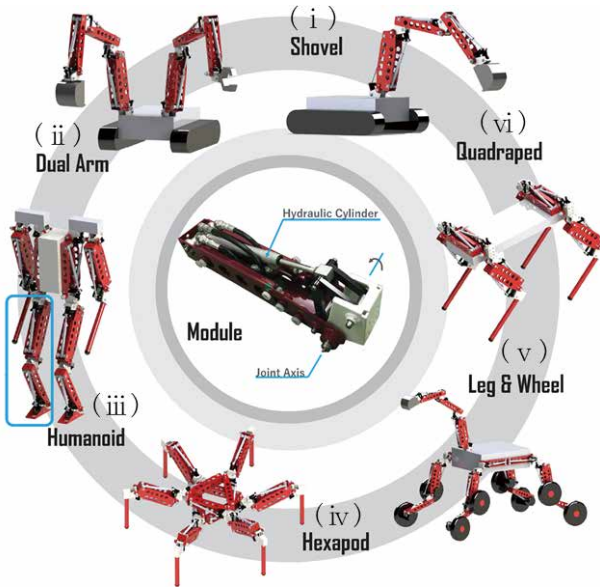


図2 モジュールの適用イメージ

もしモジュールが破損したとしても、予備品があれば、故障部位に因らず現場で交換可能であり、直ちに作業復帰することができる。破損したモジュールはメンテナンスに出せばよく、同一品のため、工場より代品を直ぐに発送・補充することもできる。また、使用頻度が高い部位のモジュールをローテーションさせ稼働時間を増やすことも可能である。

4 複数モジュールによるロボット構成

4.1 制御システム概要

複数組み合わせたモジュールを操作するにあたり、制御システム概要について図3に示す。Host PCとサーボコントローラから構成され、Ethernet通信により目標値やセンサ値を送受信して各モジュールを駆動する。運動計画や各モジュールへのトルク分配などの上位層演算はHost PC、角度・推力の関節サーボ制御の下位層演算はサーボコントローラで行い、制御弁へ指令電圧を与える。制御システムのアーキテクチャとして表5が挙げられる。

本報ではサーボコントローラの防油防塵対策が不要なF1)の方法を選択した。

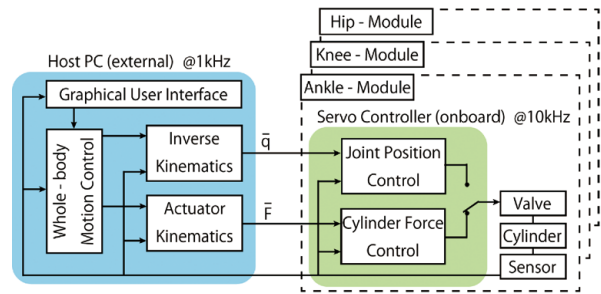


図3 制御システム概要

表5 制御システムアーキテクチャ

制御システムのアーキテクチャ	
F1)	Host PCとサーボコントローラを、外部や胴体モジュールに集中配置する方法
F2)	Host PCを外部や胴体モジュールに設置、サーボコントローラを各モジュールに分散配置する方法

4.2 脚ロボットの概要

1つ9.7kgのモジュールを3個結合して、先端にアタッチメントを追加すると図4に示すような股・膝・足首の関節を有する脚部ロボットができる。これは図2の適用イメージ(iii)の青枠に該当しており、構成の足部や配管を含む総重量は33.3kgである。本報では割愛するが、脚部の設計は2足歩行ロボットの着地動作やスクワット、スイング動作の運動シミュレーションを行い、必要な関節トルクや関節角速度を満足する4節リンクパラメータを設計している。

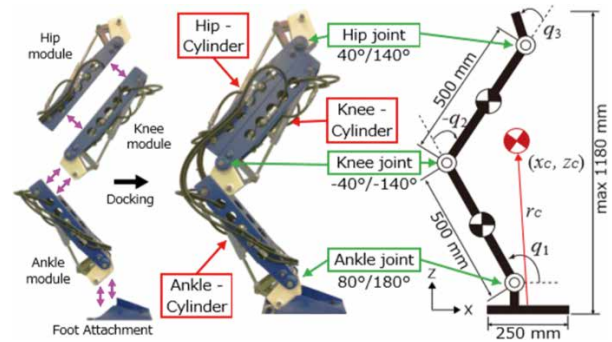


図4 ロボット脚部構成

また、表3の要求仕様D6)を検証するため、実機の制御実験を実施した。脚部ロボットの足裏を地面に固定し、位置制御の検証として股関節の軌道追従制御と、トルク制御の検証として膝・足首関節を用いた重力補償制御を行った。脚部ロボットの重量をキャンセルし、人間のわずかな力でロボットを任意の位置へ動かすことが可能であり、その任意の位置で手を放しても、ロボットはその位置を保持することが可能な制御である。写真1に重力補償制御実験状況を示す。

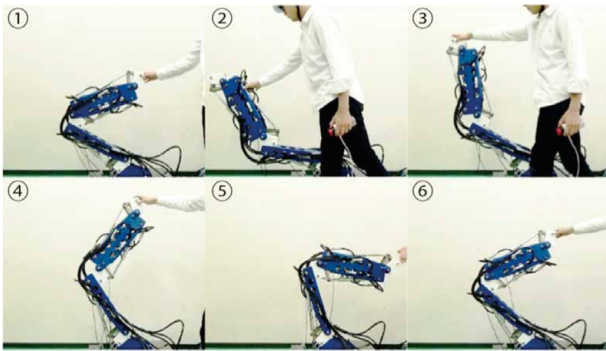


写真1 重力補償制御実験

4.3 マニピュレータロボットの概要

4.2節で述べたモジュールロボットの先端にハンド部を追加すると、写真2のようにマニピュレータロボットに置き替えることができる。本構成は2019国際ロボット展に出展しており、会場でデモンストレーションを実施した。

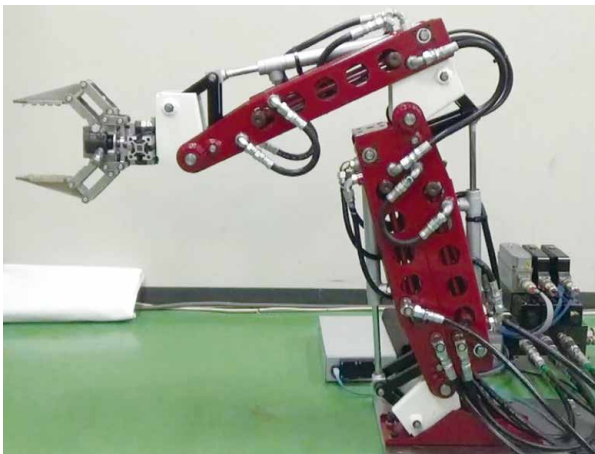


写真2 マニピュレータロボット

マニピュレータロボットの構成を図5に示す。展示会場ブースの狭いスペースでも問題なく動作でき、

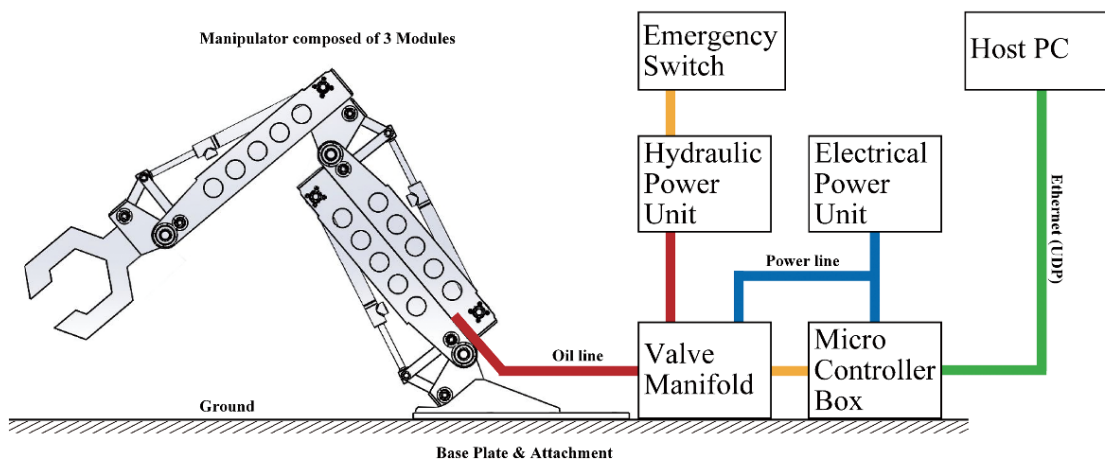


図5 マニピュレータロボット構成

電動モータの出展多数の中、油圧ロボットの存在を示すことができた。

5 モジュールの軽量化の方策

展示会場の設営でも感じたが、モジュールの運搬を考慮した場合、本機体の重量は運搬や現場での組立に影響するため、軽量化を図る必要がある。そこで、現状の鉄鋼材料から軽くて強い炭素繊維とエポキシ樹脂の複合材であるCFRP材を利用して、油圧シリンダの外筒およびモジュールフレームを製作した。試作品を写真3に示す。

モジュール総重量として1/2程度低減できた。CFRPシリンダの作動確認は実施したが、耐久性等の評価について完了しておらず、今後も開発を継続する。



写真3 CFRPモジュール（上）とCFRPシリンダ（下）

6 おわりに

本報では油圧ロボットとして、単関節モジュールロボットを提案し、有効性を検証するための脚部ロボットの評価を実施した。今後、各構成方法における検証を進めていく予定である。

モジュール単体については、フレーム構造や油圧配管を一体化し、トポロジー最適化手法や金属3Dプリンタを活用した軽量化と、脱着機構の改良を進

める考えである。

最後に、本研究に支援頂きました坂城町コトづくりイノベーション補助金事業に感謝致します。

著 者



齊藤 靖

1999年入社。KYB-YS(株)技術本部設計部実験課課長、生産技術部、岐阜北SA技術部、事業開発推進部、相模油機技術部、設計部設計課を経て現職。



杉本 隼一

2018年立命館大学工学部ロボティクス学科卒業。
2020年立命館大学工学研究科ロボティクスコース修了。
同年、トヨタ自動車入社。
在学中は油圧モジュラーロボットの研究に従事。



玄 相昊
(げんそうこう ; Sang-Ho Hyon)

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博士後期課程修了。
同年、東北大学大学院工学研究科助手、2005年講師。
2005 ATR脳情報研究所研究員。
2010年立命館大学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、人型ロボットの研究開発等に従事。博士(工学)。
日本ロボット学会、IEEEなどの会員。