

# 博士論文概要

## 論文題目

2足ヒューマノイドロボットを対象とした  
連動可能な油圧直接駆動システム  
に関する研究

Research on Interlocked  
Hydraulic Direct-Drive System  
for Biped Humanoid Robots

申請者

清水	自由理
Juri	SHIMIZU

生命理工学専攻 バイオ・ロボティクス研究

2019年11月

Society5.0(超スマート社会)を引き起こす第4次産業革命に向けて, AIやIoT, およびブロックチェーンなど様々なテクノロジーが注目されている. 第4次産業革命において実現するとされる技術の中で, 人々の期待が高いものに, サービスロボットがある. サービスロボットは, 現在の Society4.0 (情報社会) において人々の生活を変えたスマートフォンの様に情報を提供するのみならず, 物理的なサービスを提供することを期待されると考える. サービスロボットが, 物理的なサービスを提供するには, 人に近づく必要があり, 移動能力が重要になる. 人が生活する環境において, 人間と同等の移動性能を得る方策の1つは, 2足歩行である.

初期の2足歩行の研究では, 駆動システムに油圧や空気圧方式が用いられていた. これは, 当時のロボットに搭載可能なサイズの電磁モータの出力が, これらフルードパワーシステムより低かったためである. その後, 電磁モータの出力向上に伴い, 2足歩行の研究で使われるアクチュエータは電動モータ, および減速機の組合せが主流になった. この要因は, 油圧システムには, エネルギー効率や, 機器の応答性, および線形特性が電磁モータに及ばなかったことである.

近年, 新たに高効率・高応答でロボットに搭載可能な小型油圧機器が開発されてきたことを受け, 国内外で油圧システムを搭載したロボットが登場している. これらのロボットに搭載される従来の油圧システムは, 油圧回路内の損失が大きく効率が悪い, または関節毎の出力を保証するために圧力源が大型化するという課題があった.

そこで, 本研究では, エネルギー効率に優れ, 圧力源の大型化を抑制可能な油圧システムを提案することを目的とする.

本論文は, 以下に示す5章からなる.

第1章では, 序論としての本研究の研究背景と目的, その意義と関連研究の動向について述べた.

第2章では, 2足ヒューマノイド向けの油圧システムの課題のうち, エネルギー効率に優れたシステムとして, 油圧直接駆動システム(Hydraulic Direct-Drive system, 以下 HDD)を提案した. 一般的な油圧システムは, ポンプにより作動油を圧縮し, アクチュエータへ供給する流量をバルブの開口面積により制御する. バルブによる流量制御は, 圧力差と開口面積より制御されるため, 本質的に圧力損失を前提としたシステムであり効率が低い. さらに, バルブを通過する流量は圧力の平方根に比例する特性を持つため, 開口面積の変化に対する非線形性が強い. これに対して, ポンプ吐出流量で直接アクチュエータへ流入する流量を制御する HDD を提案した. HDD では, 流入流量制御にバルブを用いないため, 圧力損失によるエネルギー損失の抑制, および入力に対する線形特性の実現という利点がある.

ここで、アクチュエータの駆動方向と負荷の方向が拮抗する場合、アクチュエータの流入側のポート圧は流出側のポート圧より高い。この場合、ポンプの吐出流量で、アクチュエータの速度が制御可能である。一方で、アクチュエータの駆動方向と負荷方向が同じ場合、アクチュエータの流出側のポート圧が高くなり、ポンプの吐出流量ではアクチュエータの速度が制御できない。これに対応するため、アクチュエータの流出側ポートに比例弁を備えた。

脚機構に HDD を適用する場合、効率や出力特性から油圧アクチュエータには片ロッドシリンダが最適である。片ロッドシリンダを使用する HDD の最も簡易な実装回路として、ポンプと片ロッドシリンダを閉回路状に接続した構成を選択した。さらに片ロッドシリンダのキャップ室ポート側流路とロッド室ポート側流路に比例弁を設けた。片ロッドシリンダとポンプを閉回路状に接続するためには、受圧面積差分の流量を補償するための流量補償弁が必要になる。提案した実装回路では受動的に切り替わる実装性に優れた弁を採用した。しかし当該弁は、受動的に切り替わるため、片ロッドシリンダの駆動方向切換え時等に意図しない挙動となり制御誤差の原因となる。そこで、受動型流量補償弁の内部状態を推定可能なモデルを開発した。片ロッドシリンダの駆動方向切換え時に、積極的に受動型流量補償弁を切り換えるために、内部予測モデルを用いて一時的に圧力制御を適用する制御を開発した。

さらに、2足ヒューマノイドロボットの股関節 Pitch 軸に適用することを前提として、片ロッドシリンダで可動角を確保するために4節リンクの脚機構を開発した。評価用のベンチ装置では、4節リンク機構でシリンダのストロークの変化量と関節角度の変化量の関係が線形になるようにリンク比を決定した。この機構により、目標関節角度に対する片ロッドシリンダへの目標流量が容易に計算可能となった。開発した評価ベンチ装置を用いて、提案システムが、従来のバルブの開口面積で制御する方式と比較して、エネルギー損失が 64.9 % 低くできることを確認した。

第3章では、2足ヒューマノイド向けの油圧システムの課題のうち、圧力源の大型化を抑制するため、連動システムを開発した。HDD では、1つのアクチュエータを動かすために、1台のポンプが必要である。さらに各ポンプを駆動するためにはモータが必要になる。各関節が要求する出力を HDD 単体で実現するには、HDD を駆動するモータは、機械式伝達システムを使用する場合よりも大きくなる。これは、HDD で使用するポンプの効率や、配管の圧力損失のためである。この課題を解決するために、脚の構造的対称性と、歩行や走行時の運動の対称性に着目した。歩行や走行では、左右の脚は負荷が高くなる立脚期と、負荷が低くなる遊脚期を交互に繰り返す。そこで、負荷が低くなる遊脚側の HDD を、負荷が高くなる立脚側の HDD の補助に使用する連動システムを提案した。連動システムを

実現するために、2つのHDDを接続する3つの切換弁を用意した。HDDのシリンダのキャップ室同士を接続する切換弁と、ロッド室同士を接続する切換弁、および各ポンプのAポートとBポートを交差させて接続する切換弁である。これらの切換弁を開くことにより、2つのHDDのポンプの吐出流量を合流させ、立脚側の片ロッドシリンダのキャップ室に流入する。ロッド室からの流出流量は、遊脚側の片ロッドシリンダのロッド室に流入する。これにより、立脚側の片ロッドシリンダを駆動しつつ、遊脚側のシリンダも駆動可能となる。但し、立脚側の関節速度と遊脚側の関節速度は同じではない。そこで、遊脚側の片ロッドシリンダの速度を独立して制御するために、元々HDDに含まれる比例弁を使用した。左右の脚を模擬するため、2章で構築したベンチ装置を2セット用意して、提案した連動システムを評価した。片脚に立脚期の負荷を模擬するための錘を取り付け、歩行パターンを実施したところ、27.3%モータのピーク出力を低減できることを確認した。

第4章では、2足ヒューマノイドへ実装する前に解析モデルによる評価を行った。第2章、および第3章で述べた油圧直接駆動システムを用いたいくつかの歩行実験をシミュレーション上で行い、開発した手法の有効性の確認と考察を行った。まず、歩行実験を行うための油圧・機構連成モデルを構築した。油圧モデルは、各油圧機器の応答性、および圧力損失等の効率を機器の仕様、および要素実験の結果を考慮したモデルとした。油圧モデルのバリデーションは、第2章、および第3章で構築した評価ベンチ装置用の油圧回路を活用し、各点の圧力、ポンプの回転数、およびアクチュエータのストローク等の実験データを用いて行った。

また機構モデルは、著者の所属する早稲田大学の研究グループが開発してきた2足ヒューマノイドWABIAN-2Rをベースにリンク比、および重量配置を再現した動力学モデルとした。WABIAN-2Rはこれまでに様々な実証実験に活用されてきた実績があり、歩行パターンを実機上で出力できることが証明されているため、適用先として選定した。

構築した油圧・機構連成モデルを用いて、歩行実験を行った。まず第2章で提案した油圧直接駆動システム単体を左右の股関節Pitch軸に適用した。さらに、油圧直接駆動システムの出力を改善するために第3章で提案した連動システムを適用した場合のモータのピーク出力を比較した。連動システムを適用することにより、モータのピーク出力を24.3%抑制できることを確認した。

最後に、第5章では結論として以上の研究成果を総括として、エネルギー効率に優れ、圧力源の大型化を抑制可能な油圧システムが、油圧駆動の2足ヒューマノイドロボットの稼働時間の延長、および軽量化に貢献することを述べた。また今後の展望として、提案した油圧システムの2足ヒューマノイドへの実装に対する展望と課題について言及した。

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 清水 自由理 印

(2019年 11月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演	<p>○Simulation of an Interlocking Hydraulic Direct-Drive System for a Biped Walking Robot,  Proceedings of 2020 Proc. 2020 12th International Fluid Power Conference (IFK2020)  2020年3月（採択済）  清水自由理, 大谷拓也, 橋本健二, 高西淳夫</p>
講演	<p>○Experimental Validation of Hydraulic Interlocking Drive System for Biped Humanoid Robot  Proceedings of 2019 IEEE/RSJ Int. Conference Intelligent Robots and Systems (IROS2019)  2019年11月  清水自由理, 大谷拓也, 水上英紀, 橋本健二, 高西淳夫</p>
講演	<p>○Simulation of a Hydraulic Direct-Drive System for a Biped Walking Robot  Proceedings of 2019 The 16th Scandinavian International Conference on Fluid Power (SICFP16)  2019年5月  清水自由理, 大谷拓也, 橋本健二, 高西淳夫</p>
講演	<p>○Experimental Validation of High-Efficiency Hydraulic Direct-Drive System for a Biped Humanoid Robot  Proceedings of 2019 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2019)  2019年5月  清水自由理, 大谷拓也, 水上英紀, 橋本健二, 高西淳夫</p>
講演	<p>○Downsizing the Motors of a Biped Robot Using a Hydraulic Direct Drive System  Proceedings of 2018 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids2018)  2018年11月  清水自由理, 大谷拓也, 橋本健二, 高西淳夫</p>

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演	○2足ヒューマノイドロボット向け油圧直接駆動システムのモデルベース流量補償制御の開発 2019年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集 2019年11月 清水自由理, 大谷拓也, 水上英紀, 橋本健二, 高西淳夫
講演	ヒト走行運動に着想を得た油圧直接駆動システムの並列接続による2足ヒューマノイドロボットの股関節出力向上 2019年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集 2019年11月 水上英紀, 大谷拓也, 橋本健二, 清水自由理, 川上泰雄, 阪口正律, 高西淳夫
講演	骨盤運動に着目した2足走行ロボットの開発（第24報：2足走行ロボットへの搭載に向けた油圧駆動股関節機構） 第37回日本ロボット学会学術講演会予稿集 2019年9月 水上英紀, 大谷拓也, 橋本健二, 清水自由理, 峯下弘毅, 川上泰雄, 阪口正律, 林憲玉, 高西淳夫
講演	○2足ヒューマノイドロボット向け油圧直接駆動システムへの連動回路の適用 2019年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集 2019年5月 清水自由理, 大谷拓也, 水上英紀, 橋本健二, 高西淳夫
講演	○2足ヒューマノイドロボット向け油圧直接駆動システムの応答性の検討 平成30年度秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集 2018年11月 清水自由理, 大谷拓也, 水上英紀, 橋本健二, 高西淳夫
講演	○流量制御に基づく油圧システムの2足ヒューマノイドロボットへの適用 平成30年度春季フルードパワーシステム講演会講演論文集 2018年5月 清水自由理, 大谷拓也, 橋本健二, 高西淳夫