

博士論文審査報告書

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

2020年2月

本論文の審査過程における主な改訂点を以下にまとめる。

1. 予備審査会前の面談

論文の構成について、本論文では従来技術の2つの課題を解決しているが、それぞれの課題を解決するために提案した技術が関連していることから、以下の構成にする様決定した。第1章の序論で従来技術の課題の整理し、第2章で課題を解決する新しい油圧システム、第3章で提案した油圧システムの効果を向上するシステムについて述べる。そして、第4章で、第2章、第3章で提案したシステムを2足ヒューマノイドロボットに適用した場合の効果について述べる。

2. 予備審査会

近年ロボットの駆動システムに油圧システムを適用する事例が増加傾向にある理由を述べるべきとの指摘があった。本指摘事項に対して、第1章に油圧機器の技術の進歩に関する調査が追加され、さらに古典的な構成から最新の研究事例まで、代表的な油圧システムの事例が整理された。

また提案した新しい油圧システムの適用限界について言及すべきとの指摘があった。本指摘事項に対して、第3章の実験結果の考察に、提案した連動システムを走行動作に適用した場合は効果が得られない可能性があることを追記した。

さらに提案したシステムについて、2足ヒューマノイドロボットに限らず、他のロボットや機械システムへの応用を述べるべきという指摘があった。本指摘事項について、第5章の将来の展望に2足ヒューマノイドロボット以外への応用の可能性を追記した。

3. 予備審査会後の面談

本研究で提案したシステムを2足ヒューマノイドロボットに適用した効果に対して、モータのピーク出力のみならず、消費エネルギーの総量でも評価すべきという指摘があった。本指摘事項に対して、第4章の歩行シミュレーション実験の結果に、モータのピーク出力のみならず歩行中に消費したエネルギー総量の結果を追加し、それに関する考察も追記した。

論文全体を通して、表現を統一すべき(Valve base control と Valve based control が混在等)と指摘があり、論文内の表現を統一した。

4. 公聴会

評価ベンチ装置を用いた既存の油圧システムとの比較において、試験条件が不明確であるという指摘があった。本指摘事項について第2章の試験条件と、考察の一部が修正された。

また提案したシステムを適用したモータ出力の波形が乱れている点に関して、その要因と改善点に関する考察を追加すべきとの指摘があった。本指摘事項に対して、第3章の実験結果の考察に、その要因がメータアウト圧力の制御が充分でない点と、メータアウト圧の制御がエネルギー効率とトレードオフの関係にあることが追記された。

さらに提案したシステムを2足ヒューマノイドロボットに実装するための具体的な方法に関して言及すべきとの指摘があった。本指摘事項について、第5章の将来の展望に第5章に記した3Dプリンタを用いた実装の可能性の追記、および先行研究調査結果を追加した。

本研究では、ロボットに搭載可能な既存の油圧システムにおける、①油圧回路内の損失が大きく効率が悪い、②関節毎に最大出力を実現するために圧力源が大型化するという2つの課題に対する改善案が示された。本研究で提案された、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の特徴、および効果を以下に示す。

課題のうちエネルギー効率の改善を実現するために、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)が提案された。HDDでは、ポンプ吐出ポートとシリンダの流入側を直接接続する構成である。ポンプ吐出流量で直接シリンダ流入流量を制御するため、圧力損失によるエネルギー損失を抑制し、さらに入力(ポンプ回転数)と出力(シリンダ速度)の線形性を実現可能である。さらに、シリンダの駆動方向と外部負荷の方向が同じ場合でも、シリンダ流出流量を制御可能とするため、シリンダの流出側に比例弁を設けた。本研究では、ベンチ装置を開発し、HDDが、既存のバルブ開口面積で制御する油圧システムと比較して、エネルギー損失を64.9%低減できることを確認した。

圧力源の大型化を抑制するため、連動システムが開発された。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。各関節が要求する出力が増大する場合、HDD単体でこれを満足するには駆動するモータが大型化する。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。2足歩行では、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3つの切換弁により接続した。構築したベンチ装置により、連動システムは、歩行パターンにおいてモータのピーク出力を27.3%低減できることを確認した。

最終的に2足ヒューマノイドロボットの油圧・機構連成モデルを構築し、歩行シミュレーションにおいて、HDDに連動システム適用することにより、モータのピーク出力を24.3%低減できることを確認した。

本論文では、脚機構の様に構造的、動作対称性を備えたシステムに対して、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提案された。本研究の成果は、液圧システムの新たな可能性を示すものであり、よって博士(工学)の学位を授けるべきものと判断する。

2020年2月

(主査) 早稲田大学教授 工学博士 早稲田大学 高西 淳夫

早稲田大学教授 工学博士 早稲田大学 梅津 光生
医学博士 東京女子医科大学

早稲田大学教授 博士(工学) 早稲田大学 岩崎 清隆

早稲田大学准教授 博士(工学) 早稲田大学 石井 裕之

明治大学准教授 博士(工学) 早稲田大学 橋本 健二
