

令和 2 年 6 月 12 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03208

研究課題名(和文)油圧ハイブリッドサーボブースターによる多機能ロボットの構築と最適制御

研究課題名(英文) Construction and Optimal Control of Multi-Function Robots with Hydraulic Hybrid Servo Booster

研究代表者

玄 相昊 (Hyon, Sang-Ho)

立命館大学・理工学部・准教授

研究者番号：30344691

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：安価な低圧油圧開回路にサーボモータ駆動の小型ポンプを複数埋め込み、その圧力ブースト効果によって必要に応じて高負荷を精密に制御できる「油圧ハイブリッドサーボブースター」回路を多軸ロボットに適用した。ロボットの様々な場面に応じた実現回路の数理的解析にもとづく補償アルゴリズムを開発し、位置、力制御の両面でロボットの性能を明らかにし、実際にマニピュレータに適用した。また、当初計画になかった車載に適した油圧駆動回路や、実用的な水圧駆動回路の発明にも至った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

人が侵入し難い災害現場や廃炉原発などの極限環境において、直感的な遠隔操作で力強く精密に動く等身大ロボットへの期待が高まっている。ボトルネックはアクチュエータにあり、液圧駆動がそれを解決する高い可能性を秘めている。しかし、既存の回路はコストが高いため広く普及することが困難な状況にある。本研究によって小型で安価なサーボポンプを既存の安価な液圧回路に結合し、数理モデルを用いて制御アルゴリズムを工夫すれば、従来の油圧とは質的に異なる多機能なロボットを構成可能であることが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：A small number of small servomotor-driven pumps were embedded in an inexpensive low-pressure hydraulic open circuit. This "hydraulic hybrid servo booster" circuit was applied to a multi-axis robot that can precisely control a high load as required by the pressure boost effect. We developed a compensation algorithm based on mathematical analysis of the realization circuit for various situations of the robot, clarified the performance of the robot in terms of both position and force control, and actually applied it to a manipulator. In addition, we also came up with the invention of a hydraulic drive circuit suitable for in-vehicle use and a practical hydraulic drive circuit that were not initially planned.

研究分野：知能ロボティクス

キーワード：ロボット マニピュレータ アクチュエータ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

沿岸、水中、山林を含むフィールドや、人が侵入し難い災害現場や廃炉原発などの極限環境において、直感的な遠隔操作で力強く精密に動く等身大ロボットへの期待が高まっている。しかし現在、高い制御性と耐環境性、耐久性を兼ね備えるロボットを作ろうとすると既存技術ではコスト高になってしまい、広く普及することが困難な状況にある。産業用ロボットのアクチュエータはモータとギヤの組み合わせが主流であるが、等身大ロボットの分野では最近、油圧技術が注目を浴びている。

しかし典型的な油圧サーボシステムでは弁自体の製造コストとシステムの保守コストが膨らむため、普及型ロボットに適用することは難しい。そこで代表者らは過去の科研費萌芽研究において、「油圧ハイブリッドサーボブースター」回路を発明し、1軸のサーボプレス例でその有効性を示していた。

2. 研究の目的

本研究は安価な低圧油圧開回路(メインポンプと4つのバルブから構成)にサーボモータ駆動の小型ポンプを複数埋め込み、その圧力ブースト効果によって必要に応じて高負荷を精密に制御できる「油圧ハイブリッドサーボブースター」回路を多軸ロボットに適用する。様々な用途に応じた実現回路の数理的解析にもとづく多軸最適制御アルゴリズムを開発し、位置、力制御の両面でロボットの性能限界を明らかにすることで、サーボ弁を用いない頑健・高速・柔軟・精密な多機能ロボットを低コストに実現するための理論的基盤を確立する。最終的に人サイズの多関節マニピュレータと4脚歩行ロボットを構築し、その性能を実証することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 基本回路から出発したいくつかの派生回路に対して要素別に詳細な機能解析を行う。その解析をもとにアクチュエータが発揮できる速度、力、精度などの性能を明らかにする。1軸駆動を対象に各要素の制約を考慮した最適制御アルゴリズムを検討し、スライダ試験機に適用して各種性能を確認する。

(2) 1軸の制御則をさらに深化しつつ、多軸ロボットの全アクチュエータを最適に制御する回路およびアルゴリズムを検討する。具体的には多関節マニピュレータと4脚歩行ロボットを対象としたモデル化、シミュレーション、各種制御アルゴリズムの導出を行う。

(3) 実際のロボット(マニピュレータと脚ロボット)を設計製作し、制御システムを構築する。シミュレータで確認された制御アルゴリズムを実機に適用して実験的に性能を評価する。

4. 研究成果

(1) 1軸スライダの最適制御

初年度に油圧ダイナミクスを含むモデル予測制御を導出し、ライブラリーを用いたシミュレーション実装によって有効性を確認した。しかし、演算時間の問題により、実機適用には至らなかった。そのため、モデル予測最適制御は一旦保留し、以降は通常非線形モデルベース制御を検討してきた。制約条件をハンドリングできさえすれば問題ないと結論づけた。

(2) マニピュレータ適用

基本回路には3種類のモードが存在するが、閉回路モードとブーストモードにおいて回路特有の余剰圧力が懸案となっていた。本研究において図1に示すように、回路の圧力流量モデルに基づいた非線形補償を考案し、ロボットアームと油圧回路を結合したシミュレーションによってサージ圧が大幅に低減できることを確認した。さらに、保有する3軸マニピュレータを再構築し、駆動回路のコンポーネントを入れ替えるなどの性能向上を行った。そのうえで、根元関節の精密制御と力制御について集中的に検討を行い、増圧モードにおける同様の過負荷防止策を見出し、位置軌道追従制御、トルク制御ともに実機実験によって有効性を確認した。実験結果をIEEE RALに投稿し、採択された[1]。もう一つの補償方法として、従来の開回路モードと閉回路モードの間に緩衝区間のモードを設ける方法を見出した。従来よりもサージ圧を大幅に低減できることが確認されたので、現在論文にまとめている。

(3) 脚ロボットへの適用

当初目的にかかっていた保有する4脚ロボットの制御システム改造作業に重大な困難が発見されたため、拡張性のあるロボットモジュールを新規製作する方針に変更した。これは1つの関節を持つ油圧駆動の関節モジュールで、組み合わせることでマニピュレータにも脚ロボットにも転用できる(図2参照)。本研究の回路が実装できるよう、配管経路をいくつももたせた。成果をロボット学会で発表した[2]。現在このロボットにH2SBの基本回路または派生回路Aを適用する段階にある。また、脚ロボットに必要な力制御とインピーダンス制御については、マニピュレータを利用した実験で効果を確認し、論文[1]で発表済みである。

(4)派生回路の発明

目的(1)にかかげた基本回路からの派生回路を検討した。

サーボ弁を一部利用する回路を発明した。これはメインポンプも含めて車載可能な油圧システムを目指した改造案である。動的シミュレーションによって多軸ロボットへの有効性が確認されたため、現在実験を行っている。

油圧ではないが、ブースト効果を利用した「水圧」用のエアハイドロブースト回路を発明し、特許申請と学会発表を行った [3]。これは空気圧で実用水圧（実績値で 10MPa）を発生させる増圧器を空気圧サーボ弁で駆動するもので、現時点で位置制御に加えて力制御まで成功している。順次学会発表する予定である。これは当初計画にはなかった研究であるが、安価でクリーンな実用液圧ロボット実現のための新たな一歩とある貴重な成果となった。

(5)アウトリーチ活動

国際ロボット展 IREX2017, IFPEX2017, IREX2019 で油圧マニピュレータ, 脚ロボットを動展示し, 多くの関心を得ることができた。また, 各種雑誌の解説記事によって研究を紹介した ([4] 等)。

<引用文献>

[1] S. Hyon, Y. Taniyai, K. Hiranuma, K. Yasunaga, and H. Mizui, "Overpressure compensation for hydraulic hybrid servo booster applied to hydraulic manipulator," IEEE Robotics and Automation Letters, Vol.4, No.2, pp.942-949, 2019
 [2] 杉本準一, 上倉定幸, 齊藤靖, 玄相昊, "単関節モジュールを用いた分解組立が容易な油圧ロボットの開発", 第 37 回日本ロボット学会学術講演会 (2019 年 9 月 3 日~7 日), RSJ2019AC1C1-03.
 [3] 玄相昊, 谷口友美, 大谷優, "空気圧で操作する水圧アクチュエータ", 2019 年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集, pp.32-34, 2019.
 [4] 玄相昊, "安価な汎用部品を用いた油圧駆動回路とロボットへの応用", 計測と制御, vol.57, no.11, pp.769-774, 2018.

■ 余剰圧低減の提案手法

① シリンダの流入出力の関係

$$Q_r + Q_U = S_A \dot{l}$$

$$Q_U + Q_S = S_B \dot{l}$$

※圧力 $P_2 > P_3$ より流量 $Q_S = 0$

② サーボポンプの流量: Q_U

$$Q_U = D_p \omega$$

D_p : 押しのけ容積 ω : 回転数

③ 発生する余剰流量: Q_r

$$Q_r = \left(\frac{S_A}{S_B} - 1\right) Q_U$$

④ 余剰流量に対する弁の入力: i

$$i_3 = g^{-1}(Q_r, P_A - P_T)$$

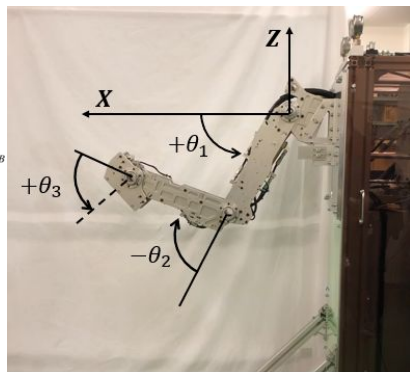
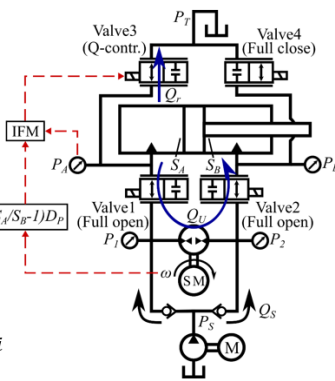


図 1 余剰圧の低減方法とマニピュレータへの適用

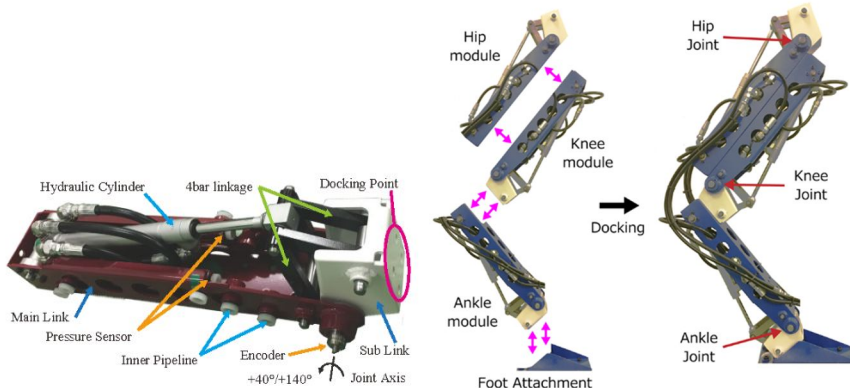


図 2 構築した脚ロボット

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 S. Hyon, Y. Taniyai, K. Hiranuma, K. Yasunaga, and M. Harutsugu	4. 巻 4
2. 論文標題 Overpressure compensation for hydraulic hybrid servo booster applied to hydraulic manipulator	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 942-949
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LRA.2019.2894868	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 玄相 昊	4. 巻 57
2. 論文標題 安価な汎用部品を用いた油圧駆動回路とロボットへの応用	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 計測と制御	6. 最初と最後の頁 769-774
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11499/sicejl.57.769	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Hyon, S., Ida, Y., Ishikawa, J. and Hiraoka, M.	4. 巻 4
2. 論文標題 Whole-body locomotion and posture control on a torque-controlled hydraulic rover	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 4587-4594
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LRA.2019.2926661	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 平山健太, 廣澤望, 玄相昊	4. 巻 38
2. 論文標題 トルク制御型油圧2足歩行ロボットにおける受動性に基づく床反力制御による不整地歩行	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本ロボット学会誌	6. 最初と最後の頁 104-112
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7210/jrsj.38.104	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 井田裕介, 石川淳一, 平岡実, 玄相昊
2. 発表標題 油圧式ローバーの最適接触力分配による不整地適応
3. 学会等名 第24回ロボティクスシンポジア
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平山健太, 玄相昊
2. 発表標題 全身トルク制御による適応二足歩行の実験的検証
3. 学会等名 第24回ロボティクスシンポジア
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 玄相昊, 谷口友美, 大谷優
2. 発表標題 空気圧で操作する水圧アクチュエータ
3. 学会等名 2019年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 榊原康平, 井田裕介, 石川淳一, 平岡実, 玄相昊
2. 発表標題 駆動輪と受動輪を有する油圧式脚車輪ローバーの最適接触力制御による4輪及び8輪スロープ走行
3. 学会等名 第37回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 杉本隼一, 上倉定幸, 齊藤靖, 玄相昊
2. 発表標題 単関節モジュールを用いた分解組立が容易な油圧ロボットの開発
3. 学会等名 第37回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K.Hirayama, N.Hirosawa and S.Hyon
2. 発表標題 Passivity-based compliant walking on torque-controlled hydraulic biped robot
3. 学会等名 IEEE-RAS 18th International Conference on Humanoid Robots (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Sangmin Lee, 谷合裕樹, 玄相昊
2. 発表標題 油圧ハイブリッドマニピュレータの試作(第2報): 旋回軸の追加とシステム再構築
3. 学会等名 第19回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 谷合祐樹, 谷本純一, 玄相昊
2. 発表標題 油圧ハイブリッドマニピュレータのトルク制御のためのリリース制御
3. 学会等名 第19回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 玄相 昊
2. 発表標題 次世代油圧ロボットの実現に向けて
3. 学会等名 第62回システム制御情報学会 研究発表講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hyon, S., Li, W. and Mori, Y.
2. 発表標題 Realization of fast 10-ton servo press using hydraulic hybrid servo booster
3. 学会等名 The 10th JFPS International Symposium on Fluid Power (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hyon, S., Tanimoto, S.
2. 発表標題 Joint torque control of a hydraulic manipulator with hybrid servo booster
3. 学会等名 The 10th JFPS International Symposium on Fluid Power (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 K.Suzumori, et al.(25名)	4. 発行年 2019年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 534
3. 書名 Disaster Robotics: Results from the ImPACT Tough Robotics Challenge	

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 液圧駆動装置	発明者 玄相 昊、水井 晴次	権利者 立命館大学
産業財産権の種類、番号 特許、2019-184405	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 モジュールロボット	発明者 杉本隼一, 玄相昊, 他5名	権利者 立命館大学, KYB-YS
産業財産権の種類、番号 特許、2019-119950	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

<p>解説記事： 玄相昊，油圧による柔軟で機動性の高い多脚ロボットの実現，日本ロボット学会誌，vol.37，no.2，pp.150-155，2019．DOI：10.7210/jrsj.37.150</p> <p>展示会 2017国際ロボット展（IREX2017） 油圧ハイブリッドロボットと双腕マニピュレータを展示，2017/11/29-12/2，来場者数：130,480名．</p> <p>第25回フルードパワー国際見本市，東京ビッグサイト東4ホールF-8-5，2017/9/13-15，「産学連携の結晶！油圧動展示」と題してハイブリッド油圧回路を用いたマニピュレータ・リニアステージ・サーボプレス等を動展示，来場者数：42,799名．</p>

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----