

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 19 日現在

機関番号：34315

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23656168

研究課題名(和文)ハミルトン系を規範とする省エネ運動制御理論と流体駆動ロボットへの応用

研究課題名(英文)Energy-saving motion control based on Hamiltonian systems and its application to hydraulic robots

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) 2,800,000円、(間接経費) 840,000円

研究成果の概要(和文)：アクチュエータの力や速度を精密に制御可能な高負荷油圧作業移動ロボットの実用化を目指し、周期運動に着目した省エネ駆動方法ならびにバルブマトリクスを利用したエネルギー分配・合流の方法を検討した。その結果、メインポンプで生成した圧油を小型サーボポンプで増圧することで、極めて高い負荷においてアクチュエータの位置や力を高精度制御できる新しいタイプの油圧ハイブリッド駆動回路を発明した。さらにその効果を1軸制御の典型例である油圧プレスに適用した結果、高負荷においてサブミクロンオーダーの位置決め制御と高速駆動を両立することに成功した。提案手法を油圧ショベルにも適用し、油圧ロボットへの展開可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：We proposed a novel hydraulic hybrid servo drive for high-precision servo application. Coupling a conventional open-loop circuit with a small servo-controlled pump, one can simultaneously achieve high-load, high-speed, and high-precision servo control performance. We showed the principle of the new circuit and one of the realizations for servo press application, and conducted simulation and experiments for a 10-tone servo press prototype. The both simulation and experimental results showed the position error can be less than 0.1 micrometer while applying 10-tone force to the work. This means that conventional hydraulic press can be renewed as a high-precision (even at submicron level) servo press at very low cost depending on the selection of the pumps. Finally, we implemented the proposed circuit on our hydraulic excavator testbed, and confirmed the position control performance at boosting mode. The results indicate our method has wide application to hydraulic machinery and robots.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械力学・制御

キーワード：運動制御 油圧制御

1. 研究開始当初の背景

エネルギー最適化という観点から自由系の挙動を調べ、それを制御器で追加的に安定化する試みは歩行ロボットのような周期運動を扱うロボットの研究で進められてきた。エネルギー保存はハミルトン系の性質である。そこで、申請者はとくにハミルトン系の対称性に着目した歩行軌道の生成方法を提案し、可変剛性関節を有する歩行、跳躍、走行ロボットを対象としてその有効性を示してきた。今回、その手法を一般機械系に適用すべく、理論拡張と実証実験を行うことを目指した。

2. 研究の目的

本研究の目的は、可動範囲に制約がある多自由度流体機械システム（油圧ロボット等）において、ロボストに運動目標を達成しつつエネルギー消費を極小化する新しい制御手法の開発にあった。まず、目標運動を可積分ハミルトン系の周期運動に埋め込む。次に、エネルギーを増減することで任意の速度で周期運動を漸近安定化する。最後に、蓄圧器を有する流体アクチュエータネットワークにフライホイール運動を吸収させる。以上により、全体としてエネルギーロスと入力パワーが極小化された最適運動が得られることを実証することを目的とした。

3. 研究の方法

理論面では、振子などの2自由度系を対象にひととおり解析を行ったうえで、それを一般系に拡張するというアプローチをとった。実験面では、バルブマトリクスを利用した流体エネルギーの合流や分流によって、多自由度油圧ロボットを駆動する計画を立てた。

当初は多自由ロボットを想定していたが、サーボアクチュエータの入手が困難となったため、初年度途中より計画を変更し、簡単な1自由度アクチュエータを対象に回路を考える方針に変更し、理論よりも先に、出口である実験から研究に着手したが、結果的にはこのアプローチの変更が研究内容に少なくない変更となってしまった。具体的には、多自由度機械を複数の流体エネルギー源によって操作するのではなく、1つの自由度をもつ機械を2つの流体エネルギー源によって操作することに終始することになった。また、この変更によって予想外の成果を得ることとなった。

4. 研究成果

本研究期間における最大の成果は、油圧回路の基本回路として知られている閉回路と増圧回路を回路的に組み合わせることで、高負荷かつ精密な運動・荷重制御を達成する「純油圧ハイブリッドサーボ回路」の発明である。図1に動作原理を示す。特徴は2点ある。メインの油圧ポンプと油圧アクチュエータからなる平凡な開回路の中に、サーボ

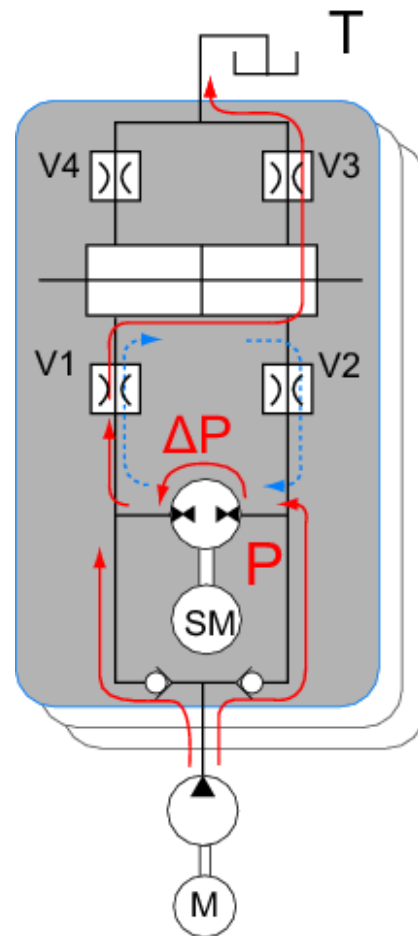


図1



図2

モータ駆動小型ポンプ（以下、サーボポンプと呼ぶ）と4つのバルブを用いた回路を組み込む。開回路では大容量バルブで大まかなパワー（圧力と流量）を制御し、必要に応じて閉回路のサーボポンプを回すことで増量・増

押し（図1ではP+ Pとなる）アクチュエータに必要な速度と推力を精密に制御する。

これは基本的には、大雑把な運動を達成したあとで、追加的にエネルギーを増減して望ましい軌道を達成するという、本研究の当初の思想から生まれているが、実装方法は当初想定していたものと大きく異なる。それは、通常の機械では達成できない、流体機械ならではの「増圧」という手法を用いているからである。従来から、サーボモータでポンプを駆動して、アクチュエータとの閉回路を構成して正転・逆転の速度制御等を行う「油圧ハイブリッド」という技術があるが、この方式はサーボモータが全てのパワーを担当する必要があるため、モータが大型化してコストが増大したり、細かい制御ができないという弱点がある。これに対して提案手法は、通常の開回路油圧回路に小型サーボモータとポンプを回路的に組み込むことにより、元の油圧源が発揮できる以上の力を発揮することができる。そればかりか、小型ポンプが生み出す速度分解能によって、アクチュエータの超精密な制御が可能となる。

提案手法の有効性を確認するために、1自由度の実験装置を作成しようとしたが、単なる試験装置では効果が見えにくいと判断し、企業と共同で2トンクラスの試験用油圧プレスを構成することとした（図2）。実験の結果、位置決め精度が従来の油圧の常識を覆す0.1ミクロン（センサー分解能）という驚異的な性能を発揮したため、ただちに特許出願した。

当初の理論研究が進まなかったため、最終年度の2013年度にはエネルギー保存という当初の目的に焦点をあてて、アクチュエータの動作を周期運動に拡張すべく、アクチュエータを用いた回路を検討して理論解析を行っていたが、5月に行ったフルードパワーシステム講演会を境にして複数のメーカーから上記回路に関する問い合わせが相次ぎ、アクチュエータの精度がどの程度なのか詳細なデータを提示する必要性に迫られた。実際、サブミクロンの位置決めの際応性は低かった。そこで2013年度後半には整定時間を大幅に短縮すべくポンプの再選定を行い、サーボモータの容量を変更やメインポンプを新たに購入して本体に搭載するなど、大幅な改良を行って実験を続けてきた。制御アルゴリズムにおいては通常のフィードバック制御に加えてフィードフォワードを併用した2自由度制御を導入した。その結果、10ミクロンから0.5ミクロン（センサー分解能）までの整定時間を5秒まで短縮することができた。この結果をイノベーションジャパン2013等の見本市に出展し、出展会場においても実験室と同じ性能が発揮できることを確認した。また、国内出願特許は国際特許に格上げした。この成果は日刊工業新聞にもとりあげられた。



実験内容

最初に弱い力で押しつけている(2MPa, 3000 N)
→目標力を7MPa, 7000 Nまで増加
こぞというときに「ぐいっと大きな力を出す」

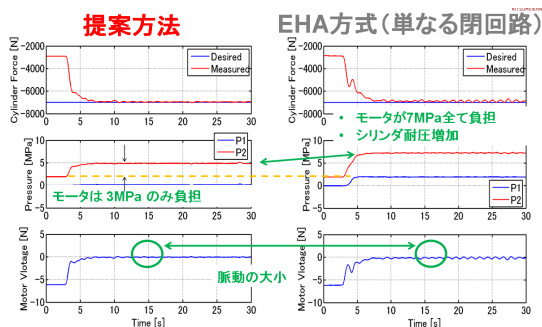


図3

最後に、本来の目的であった油圧ロボットへの応用を目指し、研究室で保有している油圧ショベルに提案回路を組み込み（図3）、プレスと同様な位置制御と増圧作用による力制御を実現し、学会発表を行った。

このように、産業界に大きく貢献できる革新的な油圧回路を発明し、限られた予算で大きな成果を収めたものの、当初予定していたのは複数の油圧回路の合流・分流であって、とくに理論面では発表できるほどの成果があがらなかったのが残念である。これから本研究はJSTのA-Stepにおいて継続する予定となっている。本研究で得られた基礎的な知見を高性能なプレスの実用化に活かそうというものであるが、目標性能の一つとして高速性を新たに加えている。実は、本研究で達成できなかった周期運動を鍛造プレスの往復運動で実現する意図を反映したものである。油圧プレスで高速省エネ周期運動を達成した成果を携えてもう一度、本研究で最初に掲げた目標に挑戦したいと考えている。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計9件)

Sang-Ho Hyon, Fumio Noda, Hiroshi Kosodo, Novel Hydraulic Hybrid Servo Drive for High Precision Application, The 9th JFPS International Symposium on Fluid Power, October 28, 2014, <

にびきメッセ島根県

Kohei Inoue, Taihei Maehara, Sang-Ho Hyon, Force Control of Hydraulic Excavator for Robotic Application, The 9th JFPS International Symposium on Fluid Power, October 28, 2014, くにびきメッセ島根県

玄相昊, 野田史男, 森悦宏, 水井晴次, エア hidro サーボ (第1報): 原理とシミュレーション, 平成26年春季フルードパワーシステム講演会, 2014年5月29日 機械振興会館東京都.

玄相昊, 野田史男, 森悦宏, 水井晴次, エア hidro サーボ (第2報): サーボプレスへの適用, 平成26年春季フルードパワーシステム講演会, 2014年5月29日, 機械振興会館東京都.

米田知生, 玄相昊, 圧力補償による油圧サーボアクチュエータの力制御, 平成26年春季フルードパワーシステム講演会, 2014年5月29日, 機械振興会館東京都.

Sang-Ho Hyon, Hydraulic Servo Drive for Legged Robots and Industrial Machinery, IEEE/RSJ IROS Workshop on New Applications of Hydraulic Actuation for Fast, Powerful, Efficient, Compact, and Compliant Robots, 2013/11/7, 東京ビッグサイト東京都 (招待講演)

玄相昊, 野田史男, 井上皓平, 米田知生, ブースト型純油圧ハイブリッドによるサーボシヨベルの提案, 第31回日本ロボット学会学術講演会講演, 2013年9月4日, 首都大学東京東京都.

玄相昊, 野田史男, 森悦宏, 小曾戸博, 水井晴次, 新しい純油圧ハイブリッドサーボ (第1報): 原理と油圧プレスへの適用, 平成25年春季フルードパワーシステム講演会, 2013年5月30日, 機械振興会館東京都.

Sang-Ho Hyon, From Legged Robots to Hydraulic Servo Press: The Design, Control, and Education, IEEE ICRA, Workshop on Design and Control of High-Performance Hydraulic Robots: Recent Advances and Perspectives, 2013/5/10, Karlsruhe ドイツ (招待講演).

〔図書〕(計1件)

玄相昊, 新しい油圧ハイブリッドサーボと油圧プレスへの応用, 油空圧技術, vol.53,

no.1, pp.14-17, 2014.1 (解説記事).

〔産業財産権〕
出願状況 (計3件)

名称: 液圧駆動回路
発明者: 玄相昊, 水井晴次, 森悦宏, 野田史男
権利者: 学校法人立命館、有限会社モリ工業
種類: 特願
番号: 2014-057405
出願年月日: 2014年3月20日
国内外の別: 国内

名称: 液圧駆動回路
発明者: 玄相昊, 水井晴次, 森悦宏
権利者: 学校法人立命館、有限会社モリ工業
種類: 特願
番号: 2013-236972
出願年月日: 2013年11月15日
国内外の別: 国内

名称: 液圧駆動回路
発明者: 玄相昊, 水井晴次, 森悦宏
権利者: 学校法人立命館、有限会社モリ工業
種類: 特願
番号: 2012-164773/PCT/JP2013/69900
出願年月日: 2012年7月25日
国内外の別: 国外、国内

取得状況 (計0件)

〔その他〕
日刊工業新聞

6. 研究組織
(1) 研究代表者

玄相昊 (Sang-Ho Hyon,)
立命館大学・理工学部・准教授
研究者番号: 30344691