

令和 3 年 5 月 31 日現在

機関番号：37111

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K06242

研究課題名(和文) 受動ストレージ要素を用いたマルチボディシステムの省エネルギー駆動法の拡張と実用化

研究課題名(英文) Extension and practical realization of the energy-saving control method for multibody systems using passive storage elements

研究代表者

岩村 誠人 (IWAMURA, Makoto)

福岡大学・工学部・教授

研究者番号：90341411

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：研究代表者は、先の研究でシリアル型ロボットに適用可能な「受動ストレージ要素を利用した省エネルギー駆動法」を提案していたが、その実用化には様々な課題が残されていた。本研究では、新たに剛性可変機構を開発し、制御手法にも改良を加えることによって、提案手法で問題となっていた境界条件の変更が困難、位置決め精度が不十分などの課題を解決した。また、シリアル型以外の構造のロボットにも適用できるように理論の拡張を行った。その結果、提案手法を広いクラスのマルチボディシステムに適用できる実用的な技術として確立することに成功した。実験により、提案手法の実用性や省エネルギー効果を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、機械システムに対して省エネルギー化の要求が非常に厳しくなっている。工場等で利用されているロボットや機械システムは周期的な運動を行っているものが多いが、本研究で確立した省エネルギー駆動法は、周期運動を行う広いクラスのマルチボディシステムに対して適用することが可能であり、従来よりも消費エネルギーを1/10以下に低減できることが明らかになっている。すなわち、これまで1台に消費していたエネルギーで10台を稼働できるようになるため、その意義は非常に大きいと考えられる。

研究成果の概要(英文)：In the previous research, the principal investigator proposed an "energy-saving control method using passive storage elements" that can be applied to serial robots, but various problems remained in its practical application. In this research, by developing a novel variable stiffness mechanism and improving the control method, we solved the problems such as difficulty in changing the boundary conditions and insufficient positioning accuracy, which were problems with the proposed method. In addition, the theory was extended so that it could be applied to robots with structures other than serial type. As a result, we succeeded in establishing the proposed method as a practical technology that can be applied to a wide class of multibody systems. The practicality and energy saving effect of the proposed method were demonstrated through actual machine experiments.

研究分野：工学

キーワード：ロボット 省エネルギー駆動 マルチボディダイナミクス 受動ストレージ要素 最適制御 剛性可変機構

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

(1) 東日本大震災以降、多くの原子力発電所が停止し、各方面で厳しい節電対策が求められていた。製造分野では、アクチュエータによって駆動される様々な機械やロボット（マルチボディシステム）が多数用いられており、膨大なエネルギーが消費されているため、マルチボディシステムの消費エネルギーを可能な限り低減することは極めて重要な課題となっていた。

研究代表者は、シリアル型ロボットの関節にばねを付加し（図1参照）、そのばねのパラメータとロボットの動作軌道を同時に最適化することによって、消費エネルギーを大幅に低減できる手法を提案した。最適制御理論に基づいて最適ばね定数や最適軌道を合理的に設計する手法も確立していた。

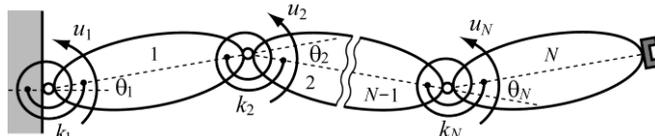


図1. 関節にばねを付加したロボット

提案した手法は、系の固有振動を利用するものであるため、関節にモータを有する既存のロボットには直接には適用することができなかった。そこで、提案した省エネルギー駆動法を適用可能な特殊な構造の水平多関節型（SCARA）ロボット（図2参照）を新たに考案した。従来のSCARAロボットと比較して消費エネルギーを1/10以下に低減できることを確認していた。

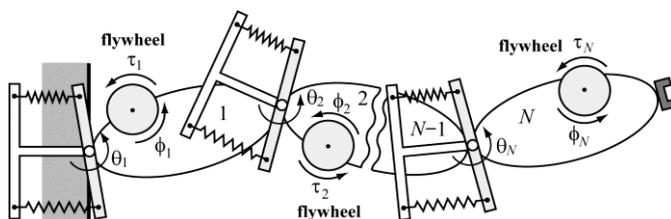


図2. 消エネ型 SCARA ロボットのモデル

(2) 提案した省エネルギー駆動法は非常に有用であると考えられたが、実証実験においては、位置決め精度が不十分であり、また、境界条件を変更する度にばねも変更する必要があるという不便性のため、実用化には至っていなかった。さらに、マルチボディシステムは、トポロジーにより図3に示すように分類されるが、提案手法はシリアル構造に対してしか適用できない定式化となっていた。産業界では、木構造や閉ループ構造のシステムも多用されているため、提案手法を任意構造のシステムに適用できるように拡張する必要があった。

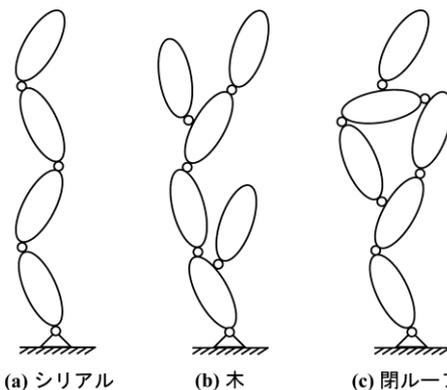


図3. マルチボディシステムのトポロジー

2. 研究の目的

(1) 提案した省エネルギー駆動法の実用化（位置決め精度の向上、境界条件設定の制約緩和）を第一の目的とした。

(2) 提案した省エネルギー駆動法の拡張（任意構造のシステムに適用できるように理論拡張、実験による検証）を第二の目的とした。

3. 研究の方法

(1) 提案手法は数式モデルから計算した系の固有振動数と固有モードに基づいて最小エネルギー制御を構成するため、制御性能が物理パラメータの精度に鋭敏に依存する。そこで、位置決め精度を向上させるために、未知パラメータが存在する場合にも良好な制御性能が得られると期待できる適応制御を導入する。提案する省エネ型ロボットは通常のロボットとは構造が大きく異なるため、従来のロボット用に開発された適応制御法は直接には適用することができない。そこで、提案型省エネロボットののための新たな適応制御則を設計する。また、任意点間を移動できるようにするためには、系の固有振動数を自由に変化させられなければならない。そこで、提案型省エネロボットののための剛性可変機構を新たに開発し、それを用いて、任意点間のPTP制御を実現する。

(2) 提案した省エネルギー駆動法はシリアル型ロボットのモデルに基づいて導出・定式化されているため、木機構や閉ループ構造のシステムに対しては適用することができない。そこで、複雑な機械システムのモデリング手法として汎用性があるマルチボディダイナミクスを用いて、提案手法を任意構造のシステムに対して適用できるように拡張する。さらに、閉ループ構造の簡

単な例である2関節 DELTA ロボットを試作し、拡張した省エネルギー駆動法の妥当性や得られる省エネルギー効果を実験により検証する。

#### 4. 研究成果

(1) 提案手法では、系の固有振動を利用して省エネルギー化を図る。そのため、関節は自由回転できる必要があり、関節にモータを有する従来のロボットには直接には適用できない。そこで、図4に示すように、関節は自由関節とし、リンク上に制御可能なフライホイールを設置して、そこからトルクを印加する方式とした。また、回転ばねは剛性の調整が難しいため、2本の引張ばねと特殊なスプリングホルダーによって関節に剛性を付与した。このような構造では、制御性能が系の物理パラメータに鋭敏に依存し、僅かなパラメータ誤差により位置決め誤差が生じる。そこで、新たに適応制御の導入を検討した。従来のロボットのために開発された適応制御法はそのままでは適用できないため、Slotineの方法を発展させた適応制御則を新たに導出した。数値シミュレーションおよび実機実験により、位置決め精度が向上することを確認した。

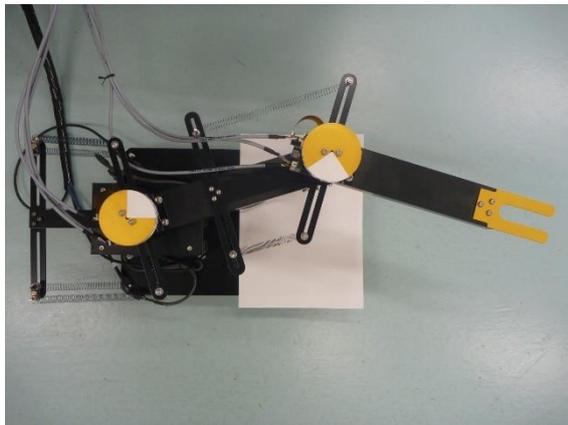


図4.省エネ型 SCARA ロボットの試作機

(2) 適応制御器は、数学モデルの形がある程度予測できる場合は十分な性能が得られるが、正確なモデルを作成することが困難な摩擦や空気抵抗、ケーブルによる引張などから外乱が生じた場合には、精度が悪化する。そこで、新たにこれらの非線形外乱を同定し、より高い精度が得らえると期待できるディープラーニングを用いた制御系を提案した。すなわち、図5に示すように計算トルク制御とディープラーニングを併用し、未知外乱トルク $F$ の補償のみをディープラーニングが行うものである。図6に示すようにディープラーニングへの入力を各関節の角度および角速度とし、出力を未知外乱トルクの推定値とした。学習には誤差逆伝播法を使用し、多層ニューラルネットワークの勾配消失問題に対処するために、スタックドオートエンコーダを用いた事前学習およびAdaGradによる学習率の自動調整を導入した。ニューロン数および層数を増やすことによって誤差が減少し、高精度な位置決めが可能になることを確認した。

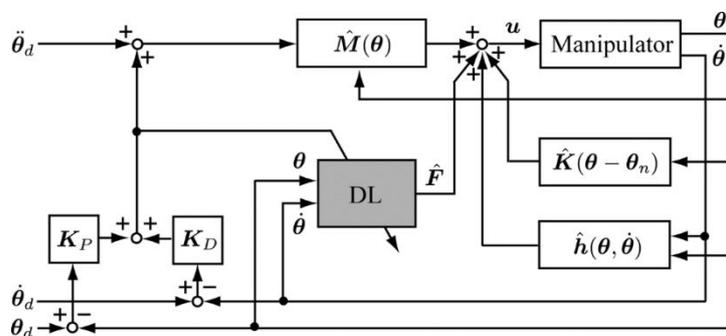


図5.ディープラーニングを併用した制御系

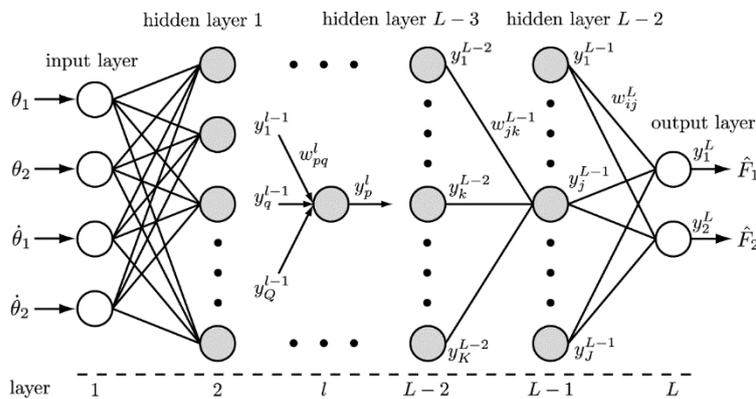


図6.非線形外乱を推定するディープラーニングの構成

(3) 提案手法では、始点または終点が変更されると系の固有振動を変える必要があるため、ばね剛性を変更しなければならない。そこで、図7に示すような剛性可変機構を新たに開発した。すなわち、スプリングホルダーをスライドさせられるようにし、ばねの取り付け位置を変化させて関節軸まわりの剛性を調整できるようにするものである。このような機構によりばね剛性を8倍程度変更できることを数値シミュレーションにより確認した(図8参照)。また、マルチボディダイナミクスを利用して、ばね取り付け位置のスライド量 $b$ と関節軸まわりのばね剛性 $k$ の関係を導出し、それを用いて逆に最適ばね定数 $k^*$ から必要なスライド量 $b$ を求めるための計算法を定式化した。考案した剛性可変機構を試作し、先に製作していた省エネ型 SCARA ロボットに実装して、その有効性を確認した。

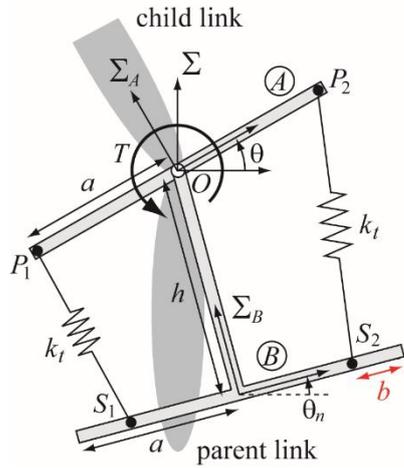


図 7.剛性可変機構

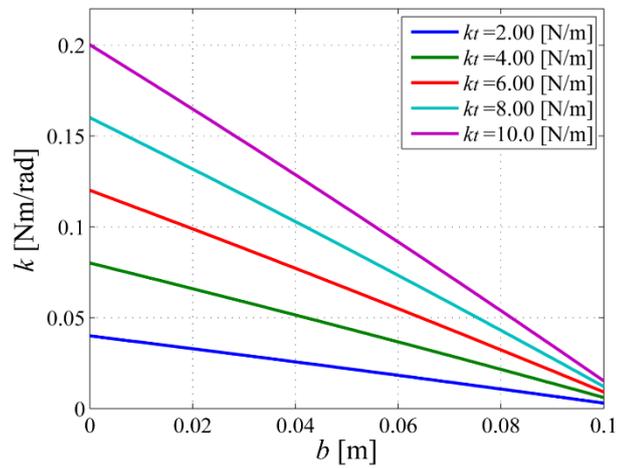


図 8.ばね定数調整範囲

(4) 提案した図 7 の剛性可変機構は、一つの関節に跨って設置されるため、ヒトや生物の関節でいえば単関節筋に相当するものであった。一方、ヒトや生物が腕や足を動かして力を発揮する際には、二つの関節に跨って繋がる二関節筋が大きな役割を果たしていることが知られている。そこで、図 9 に示すような二つの関節に跨って設置する二関節筋を模した剛性可変機構も新たに開発した。マルチボディダイナミクスを利用して、系の運動方程式を導出し、二関節筋に相当するばねが、それぞれの関節にどのような剛性をもたらすかを明らかにした。そして、単関節筋に相当する剛性可変機構と二関節筋に相当する剛性可変機構を併用することにより、関節軸まわりのばね剛性をより柔軟に変更させられることを示した。

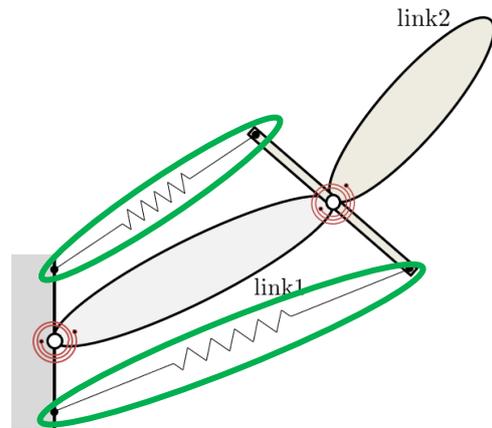


図 9.二関節筋を模した剛性可変機構

(5) 提案した省エネルギー駆動法は、図 3 (a) のようなシリアル型ロボットを想定して導出・定式化されていたため、それ以外のトポロジーを持つシステムに対しては直接には適用することができなかった。しかし、ロボットや工作機械等においては、木構造や閉ループ構造も多く見られ、例えばパラレル型ロボットは近年急速に利用範囲を広げている。そこで、複雑な機械システムのモデリング手法として高い汎用性を有するマルチボディダイナミクスを援用し、提案手法を任意構造のシステムに適用できるように拡張することを試みた。すなわち、マルチボディダイナミクスと経路パラメータ法とよばれる手法を融合することによって閉ループ構造を有するロボットの最小エネルギー軌道を見出す方法を定式化した。対象とする任意構造のシステムのどの位置にどのようにばねを付加し、どのように動かせば大きな省エネルギー効果が得られるか、という問題を効率的に解くことができる数値計算アルゴリズムを構築することができた。

(6) 任意構造のシステムに適用できるように拡張した理論の有効性を確認するために図 10 に示すような閉ループ構造を有する省エネ型 DELTA ロボットを試作した。具体的に受動ストレージ要素と動作軌道の同時最適設計を行い、実機実験を通じて提案手法の妥当性や得られる省エネルギー効果を検証した。概ね良好な結果が得られ、拡張した理論の妥当性を確認することができたが、リニアガイドにおける摩擦の影響で省エネルギー効果は理論から予想されるよりも小さかった。そのため、提案する省エネルギー駆動法の閉ループ構造を有するマルチボディシステムへの適用方法、および実装方法についてはさらなる検討が必要であり、今後実験装置の改良、制御手法の工夫等を行っていく予定である。

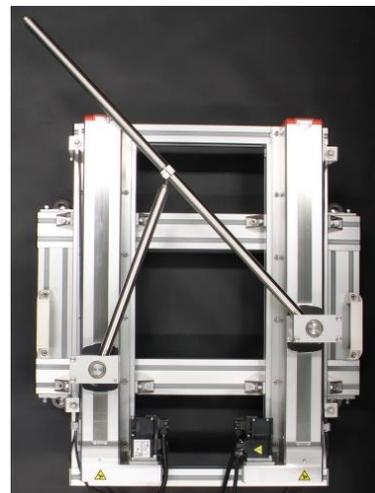


図 10.省エネ型 DELTA ロボットの試作機

(7) 提案する省エネルギー駆動法ではシステムに固有振動を生じさせる必要があるため、関節からモータを取り外して自由関節としていた。しかしながら、このことが位置決め精度の低下や境界条件設定の制約の大きな原因となっていた。そこで、モータのトルクを検出し、それがゼロとなるようにフィードバック制御を行うことによって関節を近似的に自由関節とする方法について検討した。図11に示す試作機を製作し、上記の方法によって提案する省エネルギー駆動法を実装可能であることを示すとともに、位置決め精度が大幅に向上することを確認した。

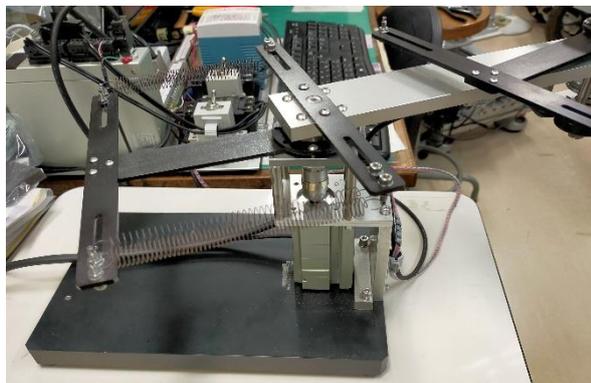


図11.ゼロトルク制御の試作機

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 小川聖, 阪田葵, 国松凌大, 東健斗, 岩村誠人
2. 発表標題 受動ストレージ要素と重心可変機構を用いた省エネルギーマニピュレータの開発
3. 学会等名 日本機械学会九州支部第74期総会講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 満田雄大, 松下龍一郎, 島上智士, 岩村誠人
2. 発表標題 経路拘束を利用したマルチボディシステムの最短時間軌道計画アルゴリズム（直動ジョイントを有する閉ループマニピュレータへの適用）
3. 学会等名 日本機械学会機械力学計測制御部門講演会D&D2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岩村誠人
2. 発表標題 マルチボディダイナミクスを援用した省エネルギーマニピュレータの開発
3. 学会等名 日本機械学会関西支部第20回秋季技術フォーラム（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山崎雄也, 小川聖, 遠藤透, 岩村誠人
2. 発表標題 二関節筋を模した剛性可変機構を有する省エネルギーマニピュレータの開発
3. 学会等名 日本機械学会機械力学計測制御部門講演会D&D2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 案浦忠彦, 内山伸悟, 岩村誠人
2. 発表標題 簡単な構造の剛性可変機構とそれを利用した省エネルギーマニピュレータの開発
3. 学会等名 日本機械学会機械力学・計測制御部門Dynamics and Design Conference 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 案浦忠彦, 山崎雄也, 岩村誠人
2. 発表標題 ディープラーニングによる省エネルギーマニピュレータの非線形外乱補償制御
3. 学会等名 日本機械学会九州支部第71期総会講演会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 岩村誠人	4. 発行年 2018年
2. 出版社 森北出版株式会社	5. 総ページ数 276
3. 書名 マルチボディダイナミクス入門	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関