

平成 28 年 5 月 14 日現在

機関番号：37111

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26820076

研究課題名(和文) 受動ストレージ要素を利用したマルチボディシステムの省エネルギー駆動法の確立と実証

研究課題名(英文) Development and Verification of an Energy-Saving Control Method for Multibody Systems Using 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) 1,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ロボットのような複数の物体が関節によって結合されたマルチボディシステムに適用できる新しい省エネルギー駆動法を開発した。すなわち、関節部にはね等の受動ストレージ要素を付加し、運動中に蓄えられるポテンシャルエネルギーを有効に利用することによって、消費エネルギーを大幅に低減する方法である。最適制御理論に基づいて、最大の省エネルギー効果が得られる条件を明らかにし、その結果に基づいてばねと動作軌道の同時最適設計法を確立した。さらに、提案手法を実現するための具体的な機械設計と制御の問題について検討した。試作機を製作して、実機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。

研究成果の概要(英文)：In this investigation, we proposed a novel energy saving control method for multibody systems such as robot manipulators using passive storage elements. Firstly, we examined the simultaneous optimization problem of spring parameters and trajectories with respect to the energy consumption based on optimal control theory. We analyzed the relationship between the consumed energy and the operating time, derived a condition for the operating time to be optimal, and proposed a corresponding design method for springs. After that, we considered the practical design and control problems to realize the proposed energy saving method. In order to verify the proposed method, a prototype 2DOF manipulator was developed by using linear springs and reaction wheels. The experimental results showed the effectiveness of the proposed energy saving control method.

研究分野：工学

キーワード：マルチボディシステム ロボットマニピュレータ 省エネルギー制御 受動ストレージ要素 リアクションホイール

1. 研究開始当初の背景

現在、エネルギー問題への対応が緊急の課題となっており、各方面で厳しい節電対策が求められている。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、加速・減速を繰り返すことによって膨大なエネルギーを消費している。そのため、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問題である。

研究代表者は、マルチボディシステムの最適制御問題、すなわち指定された初期状態と目標状態を結び、ある評価関数を最小にする軌道を見出す問題について研究を行ってきた。特に最小エネルギー制御問題を最重要課題と考え、瞬時パワー最小化のアイデアに基づく独自の最適化手法を提案し、さまざまなタイプのロボットに対して最小エネルギー動作軌道を見出してきた。しかし、動作軌道の最適化のみによってロボットの消費エネルギーを低減することには限界があると感じていた。

一方、ドイツ・シュトゥットガルト大学の Schiehlen (海外共同研究者)らは、スライダークランク機構の周期運動について考察し、適当な位置にばねを付加してそのばね定数を適切にチューニングすることにより、消費エネルギーを低減できることを示していた。

そこで、研究代表者の方法と Schiehlen の方法を融合する、すなわち、図1に示すようにロボットの関節部にばねを付加し、そのばねのパラメータと動作軌道を同時に最適化することによって、さらに大きな省エネルギー効果が得られるのではないかと考えた。2008年より Schiehlen と共同研究を開始し、実際に計算を行なってみると、ばねの剛性と取付角度、および動作軌道を同時に最適化することにより、従来よりも大幅に消費エネルギーを低減できることがわかった。さらに消費エネルギーがゼロとなる動作時間も存在することが確認できた。しかしながら、それらは数値探索によって得られた知見であり、理論的に十分な裏付けが行えておらず、実用的な設計法も確立できていなかった。また、実験による検証も行っていなかった。

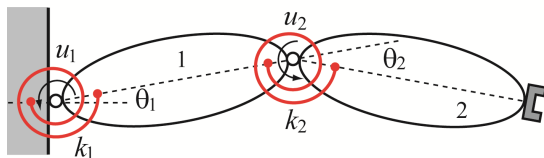


図1. 理論解析モデル

2. 研究の目的

本研究では、ばねのような受動ストレージ要素を利用するロボットの省エネルギー駆動法の理論的な裏付けを行い、実用的な設計法を確立することを第一の目的とする。また、

提案する省エネルギー駆動法の实用性や得られる省エネルギー効果を、実機実験によって検証することを第二の目的とする。

3. 研究の方法

先に行った数値探索に基づく研究により、ばねと動作軌道を同時に最適化することによって、動作軌道のみを最適化する場合よりも大幅に消費エネルギーを低減できる可能性があることがわかっている。そこで、本研究ではまず、ばねのパラメータや動作軌道をどのように選べば最大の省エネルギー効果が得られるかを最適制御理論に基づいて理論的に解析する。そして、消費エネルギーが最小となる理論条件を明らかにし、その結果を利用して、ばねと動作軌道の同時最適設計法を確立する。重力の有無によって運動方程式の構造が大きく異なり、問題の難しさも変わるため、平成26年度はまず比較的取り扱いが容易な重力が作用しない場合について検討する。そして、その結果を発展させて、平成27年度に重力が作用する一般的な場合の省エネルギー駆動法の確立を目指す。

提案する省エネルギー駆動法は、システムの固有振動数や固有モードを利用する方法であるため、ロボットの各関節が自由に回転できる構造でなければならない。従来のマニピュレータは関節部にダイレクトドライブモータやキヤードモータを有するため、提案する省エネルギー駆動法を直接には適用することができない。そこで、提案手法を適用することが可能なマニピュレータの構造について検討し、具体的な機械設計法を提案する。さらに、目標軌道に高い精度で追従させるための制御系設計についても検討する。実際に試作機を製作し、実機実験によって提案手法の実現可能性や得られる省エネルギー効果を検証する。

4. 研究成果

(1) 重力が作用しないマルチボディシステムに対する省エネルギー駆動法の理論解析および実用的な設計法の確立

平成26年度は、初段階として、重力が作用しない水平多関節型マニピュレータについて検討した。関節に付加されるばねの剛性が比較的大きいと仮定すると運動方程式中において遠心力・コリオリ力よりもばね力が優位になる。この仮定の下では最小エネルギー制御問題を解析的に解くことができ、最適軌道、最適制御入力、および消費エネルギーの最小値を動作時間の関数として閉じた形で表せることを示した。特に消費エネルギーはシステムの各次の固有モードによる消費エネルギーの総和として合理的に解釈できることを明らかにした。

さらに、得られた解析解に基づいて、消費エネルギーが最小となる動作時間の条件を明らかにし、その結果を利用してばねと動作軌道の同時最適設計法を確立した。特に2自

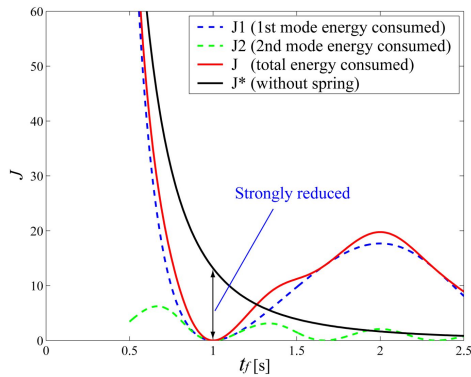


図2．動作時間と消費エネルギーの関係

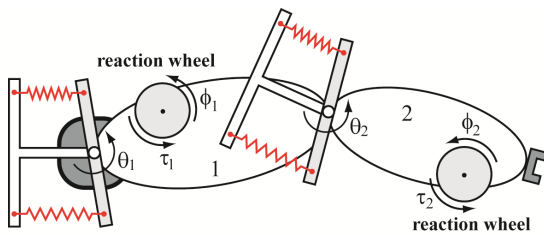


図3．実際の機械設計

自由度マニピュレータの場合は、振動数方程式から得られる2つの直角双曲線の交点として最適ばね定数を解析的に求められることも示した。

図2は最適設計を行った2自由度マニピュレータの動作時間と消費エネルギーの関係を表している。同図に示すように全消費エネルギーは、1次モードと2次モードの消費エネルギーの和となり、指定された動作時間において両モードの消費エネルギーの最小点を一致させることにより、全体の消費エネルギーを最小化できることを確認した。

(2) 水平型省エネルギーマニピュレータの機械設計と試作機の製作

平成26年度は、提案した省エネルギー駆動法に基づく水平型2自由度マニピュレータを試作した。理論解析モデルでは、図1のように関節部にモータを設置すると仮定していたが、提案手法では関節が自由回転できる必要があるため、関節部にモータを設置することはできない。そこで、図3に示すようにリンクの適当な位置にリアクションホイールを取り付け、そこからトルクを印加することにした。また、回転ばねは、ばね定数や取付角度の調整が難しいため、2つの直動ばねと特殊なスプリング受けを用いて関節部に剛性を付加する機構を新たに考案した。

以上のような機械設計に基づき、図4に示す試作機を製作した。提案した機構により、固有振動を生じさせることができること、およびリアクションホイールによりトルクの伝達が可能であることを確認した。しかし、リアクションホイールの設置位置や寸法の検討が不十分であったため、指令値に対して大きな遅れが生じ、目標軌道に対して追従することができなかった。

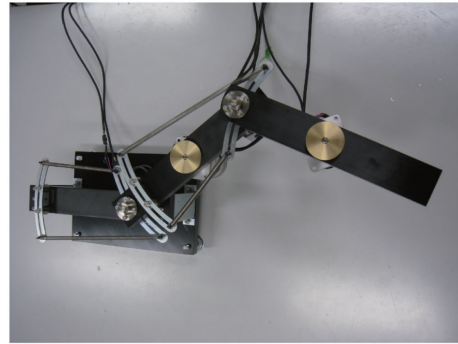


図4．試作機（1号機）

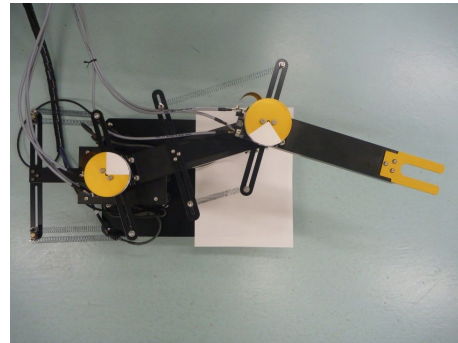


図5．試作機（2号機）

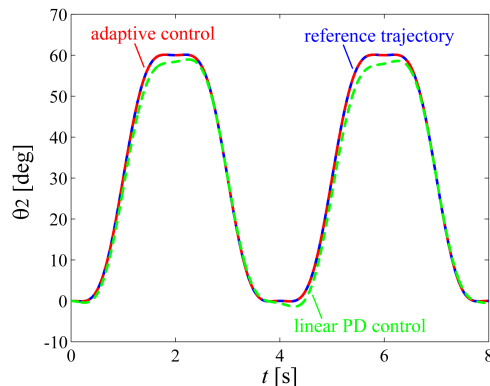


図6．軌道追従性能の比較検証

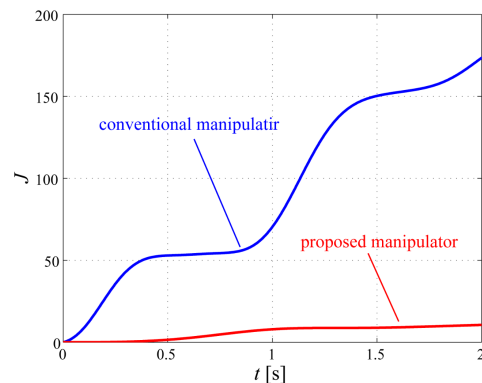


図7．実験による省エネルギー効果の確認

(3) 水平型省エネルギーマニピュレータの改良と制御系設計

平成27年度は、まず、平成26年度において製作した水平型実験装置の改良と制御則の検討を行った。リアクションホイールの

設置位置について詳細な検討を行い、根元の関節軸上に設置した場合に最も追従性が良くなることを理論的に示した。また、周波数解析を行ってバンド幅を求め、十分な追従性が得られるようにリアクションホイールの諸元を決定した。図5に改良した実験装置の外観を示す。

次に、提案する省エネルギー駆動法はパラメータに鋭敏に依存する手法であるため、数式モデルと実機の間には存在するパラメータ誤差を考慮することができる適応制御則の設計と実装を行った。図6に軌道追従制御性能の比較検証を行った結果を示す。図より、適応制御を用いることにより、線形PD制御を用いる場合よりも大幅に軌道追従性能が向上していることが確認できる。

さらに、実機実験を通じて従来のマニピュレータと提案する省エネルギーマニピュレータの消費エネルギーの比較を行った。図7に各モータのトルク2乗和の時間積分値を比較した結果を示す。指定した2秒間の作業において、提案型は従来型よりも約95%消費エネルギーを低減できており、提案手法の有効性を実証することができた。

(3) 重力が作用するマルチボディシステムへの拡張

平成26年度の研究を発展させ、平成27年度は重力が作用する場合の理論解析および設計法の確立について検討した。重力が存在する場合、ポテンシャルエネルギーはばねによる弾性ポテンシャルエネルギーと重力による重力ポテンシャルエネルギーの和となり、運動方程式中に非線形性の強い重力項もあらわれる。そこで、ばねがエネルギーのストレージとしてだけでなく、重力バランサーとしての役割も果たすようにすることで、水平型に対して提案した省エネルギー駆動法を垂直型に対して自然な形で拡張することができた。

さらに、垂直型2関節省エネルギーマニピュレータの試作も試みた。簡単な試作機を製作して、一つのばねにより、重力を補償しつつエネルギーを蓄えられることを確認している。今後、制御実験を通じて、垂直型の場合にも大きな省エネルギー効果が得られることを検証していく予定である。

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)

[学会発表](計7件)

Iwamura, M., Schiehlen, W., Control and Experiments with Energy-Saving SCARA Robots, 21st CISM IFTOMM Symposium on Robot Design, Dynamics and Control, Udine, Italy, 2016年6月発表予定。

Iwamura, M., Kawamoto, T., Uciyama, S., Schiehlen, W., Development of an Energy-Saving Manipulator and Its Model Reference Adaptive Control, The 4th Joint International Conference on Multibody System Dynamics, Montreal, Canada, 2016年6月発表予定。

Iwamura, M., Imafuku, S., Kawamoto, T., Schiehlen, W., Mechanical Energy Storage with Industrial Robots, Joint Annual Meeting of GAMM and DMV 2016, Braunschweig, Germany, 2016年3月7日発表。

河本貴大, 今福舜一, 岩村誠人, 下川哲司, ばねとリアクションホイールを用いた省エネルギーマニピュレータの設計と制御, 日本機械学会機械力学・計測制御部門 Dynamics & Design Conference 2015, 弘前, 2015年8月25日発表。

Iwamura, M., Imafuku, S., Kawamoto, T., Schiehlen, W., Development of an Energy-Saving Manipulator Using Storage Elements and Reaction Wheels, Eccomas Thematic Conference on Multibody Dynamics 2015, Barcelona, Spain, 2015年6月29日発表。

河本貴大, 今福舜一, 岩村誠人, 下川哲司, ばねとリアクションホイールを用いた省エネルギーマニピュレータの開発, 日本機械学会九州支部第68期総会講演会, 2015年3月13日発表。

今福舜一, 岩村誠人, 中原照幸, 下川哲司, 受動ストレージ要素を利用した水平2関節省エネルギーマニピュレータの設計と制御, 日本機械学会機械力学・計測制御部門 Dynamics & Design Conference 2014, 東京, 2014年8月26日発表。

[図書](計1件)

Iwamura, M., Imafuku, S., Kawamoto, T., Schiehlen, W., Springer, Development and Control of an Energy-Saving Manipulators Using Storage Elements and Reaction Wheels, In: Multibody Dynamics - Computational Methods and Applications, 2016, 20

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし