

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：50104

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420188

研究課題名(和文) 柔軟性と力学的干渉を活用した多リンクマニピュレータの省エネルギー軌道計画法の確立

研究課題名(英文) Establishment of an Energy-Saving Trajectory Planning Method for Multiple-Link Manipulators Using its Flexibility and Dynamic Interaction

研究代表者

阿部 晶 (ABE, AKIRA)

旭川工業高等専門学校・システム制御情報工学科・教授

研究者番号：30313729

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、複数の柔軟リンクから構成されるマニピュレータシステムの Point-To-Point制御に対し、省エネルギーフィードフォワード制御を提案した。提案手法において、マニピュレータの軌道をべき級数とサイクロイド関数の結合で表現した。生成される軌道はべき級数の係数に依存する。そこで、残留振動と駆動エネルギーが最小化されるよう最適化手法を用い、べき級数の係数をチューニングして最適軌道を生成させた。この軌道生成法を2リンク柔軟マニピュレータに適用し、柔軟性と力学的干渉を相互作用させた省エネルギー残留振動抑制軌道が生成されることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：This study proposed an energy-saving feed-forward control technique for the point-to-point control of a manipulator system consisting of multiple flexible links. In the proposed method, the trajectory of a manipulator was expressed by the combination of polynomial and cycloidal functions. The generated trajectory was dependent on the coefficients of the polynomial function. Thus, to generate the optimal trajectory achieving the minimization of the residual vibrations and driving energy, the coefficients were tuned by an optimization technique. The trajectory planning method was applied to a two-link flexible manipulator, and then we revealed that the optimal trajectory considering its flexibility and dynamic interaction was generated for energy-saving and residual vibration suppression.

研究分野：機械力学・制御

キーワード：柔軟マニピュレータ 軌道生成法 振動制御 省エネルギー

1. 研究開始当初の背景

工業分野における機械の高速化、軽量化あるいはエネルギーコストの低減の観点より、構造部材は厚肉から薄肉のものへと変わってきており、振動が生じ易い状況となっている。このような背景のもと、産業用ロボット等で広く用いられるロボットマニピュレータにおいても柔軟性に起因した振動が生じ、その位置決め後の振動制御を目的とした研究が盛んに行われている。しかしながら、振動抑制と省エネルギー駆動を両立させたフィードフォワード制御に関する研究は充分になされていない。ロボットマニピュレータはワーク搬送を繰り返し行う Pick-and-Place 作業するものが多く存在する。その振動制御法としては、センサーを要しなく安価にシステムを構築できるフィードフォワード制御が望ましいといえる。

研究代表者はこれまでに1リンク柔軟マニピュレータや柔軟ベースに搭載されたロボットアームの省エネルギーフィードフォワード振動制御に関する研究を実施してきた。これらの研究においては、抑制される振動のダイナミクスの数とアクチュエータの数が同じである。一方、アクチュエータの数が抑制される振動のダイナミクスの数よりも小さい方がさらなる省エネルギー化を図られる可能性を秘めているといえる。これより、多リンク柔軟マニピュレータを数少ないアクチュエータで制御することで、ロボットマニピュレータの新たな省エネルギー化への知見が得られると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、多リンク柔軟マニピュレータの位置決め制御問題に対し、位置決め後の残留振動を抑制するとともに消費エネルギー最小化を目的としたフィードフォワード制御法を提案する。多リンクマニピュレータにおいては、あるリンクの運動が他のリンクの運動に影響を及ぼす動学的干渉が存在する。そこで、省エネルギー化と振動抑制の両立の実現を試み、リンクの柔軟性と動学的干渉を巧みに相互作用させるリンク旋回角軌道の生成法の確立を目指す。ここで、1つのアクチュエータと2つの柔軟リンクから構成されるマニピュレータシステムを扱い、シミュレーションならびにモデル実験から提案手法の有用性を検証する。

3. 研究の方法

(1) 軌道生成法

はじめに、柔軟リンクを有するマニピュレータを指定された駆動時間 T_E で初期角度 θ_S から目標角度 θ_E まで回転させる Point-To-Point (PTP) 制御問題を扱い、そのときに発生する残留振動を抑制させ、かつ、消費エネルギーを最小化する関節角軌道の生成法を提案した。この提案手法においては、入力をべき級数

$$u(t) = \frac{t}{T_E} + (1 - T^2) \sum_{n=1}^N a_n T^{n-1}, \quad T = -1 + \frac{2t}{T_E} \quad (1)$$

で与えたサイクロイド関数

$$\theta_{opt}(t) = \theta_E \left\{ u(t) - \frac{\sin[2\pi u(t)]}{2\pi} \right\} + \theta_S \quad (2)$$

を用いて旋回角軌道を表現する。生成される軌道はべき級数の係数 a_n に依存することとなる。そこで、最適化手法を適用し、残留振動抑制と省エネルギー化が両立されるようなべき級数の係数をチューニングさせた。提案手法を図1、2に示される1リンク柔軟マニピュレータと柔軟ベースに搭載されたロボットアームの PTP 制御に適用し、その有効性を検証した。

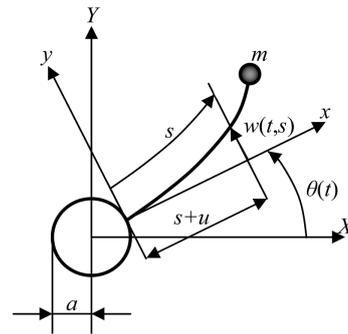


図1 1リンク柔軟マニピュレータ

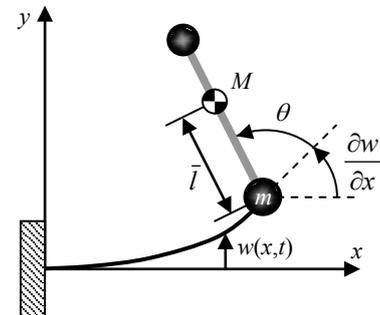


図2 柔軟ベースに搭載されたロボットアーム

(2) 2リンク柔軟マニピュレータ

(1)で提案された軌道生成法を1つのアクチュエータと2つの柔軟リンクから構成されるマニピュレータシステムに適用し、駆動エネルギー最小化と振動抑制の両立を試みる。

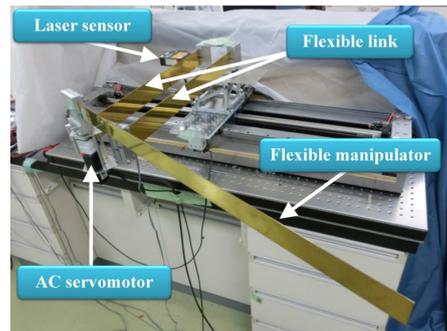


図3 2リンク柔軟マニピュレータの実験装置

はじめに、図3に示されるモデル実験装置を開発した。一端が固定され平行に設置された2つのはりを第1リンクと定義する。第1リンクの先端には、第2リンクを駆動するACサーボモータを搭載した。第2リンクを駆動すると動学的干渉から第1リンクにも振動が生じるシステムとなっている。

次いで、理論解析を実施し、モデル実験装置の力学モデルを導出した。ここで、高精度なモデルを得るために、パラメータ同定実験も行い、力学モデルのパラメータチューニングを実施した。

得られた力学モデルに(1)で確立された軌道生成法を適用し、第2リンクのPTP制御に対する省エネルギー振動制御に関する検討をシミュレーションから実施した。そして、シミュレーションの妥当性および実現性を検証するためにモデル実験を実施した。

4. 研究成果

(1) 軌道生成法

図4は1リンク柔軟マニピュレータのPTP制御における先行研究(引用文献①)と本手法との時系列データの比較図である。図(a), (b), (c)および(d)はそれぞれマニピュレータの旋回角, 角速度, マニピュレータ先端の変位, モータの駆動トルクを示している。駆動条件は($T_E = 0.8$ s, $\theta_S = 0$ and $\theta_E = \pi/6$ rad)を採用している。図4(c)より、本手法の最適軌道による最大振幅値は先行研究のものよりも小さく、本手法の有効性を認めることができる。

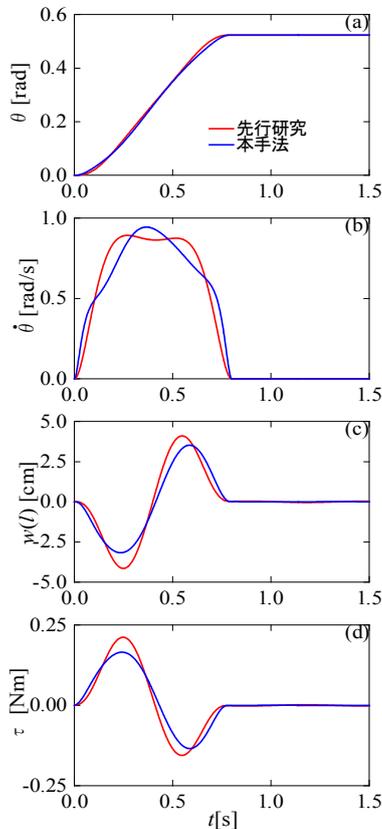


図4 1リンク柔軟マニピュレータにおける提案手法と先行研究の比較

表1 駆動エネルギーの比較 [J]

θ_E [rad]	T_E [s]	先行研究	本手法
$\pi/6$	0.8	6.27×10^{-2}	5.15×10^{-2}
$\pi/2$	1.0	4.01×10^{-1}	2.96×10^{-1}
$\pi/2$	1.1	3.44×10^{-1}	2.23×10^{-1}

表1は駆動条件($T_E = 0.8$ s, $\theta_S = 0$ and $\theta_E = \pi/6$ rad), ($T_E = 1.0$ s, $\theta_S = 0$ and $\theta_E = \pi/2$ rad), ($T_E = 1.1$ s, $\theta_S = 0$ and $\theta_E = \pi/2$ rad)での駆動エネルギーの比較である。これより、どの駆動条件においても本手法のものは先行研究よりもその値は小さく、エネルギー削減効果が顕著に表れている。したがって、提案手法は省エネルギーで残留振動抑制、さらには駆動中の変位をも抑制する軌道を生成していることが認められる。

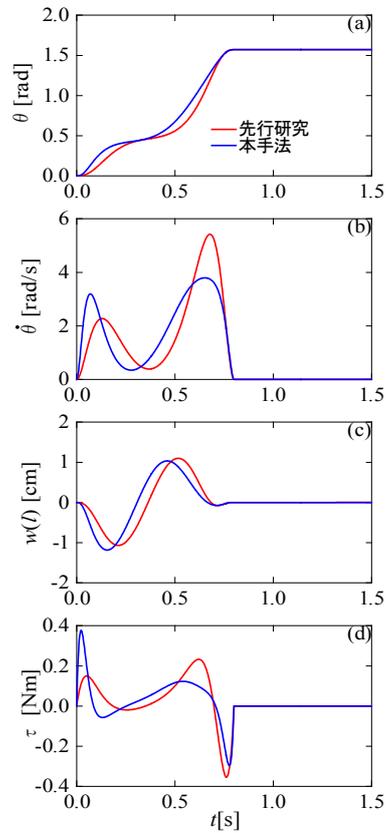


図5 柔軟ベースに搭載されたロボットアームにおける提案手法と先行研究の比較

柔軟ベースに搭載されたロボットアームのPTP制御において、駆動条件を($T_E = 0.8$ s, $\theta_S = 0$ and $\theta_E = \pi/2$ rad)とし、先行研究(引用文献①)との比較を図5に示す。図5(d)から、先行研究のものよりも本手法の駆動トルクがロボットアーム駆動直後に大きな値となっていることがわかる。この図から、一見して本手法の方が駆動エネルギーを増加しているのではないかと推測される。そこで、駆動エネルギーを比較したものを表2に示す。この表より、駆動条件($T_E = 0.8$ s, $\theta_S = 0$ and $\theta_E = \pi/2$ rad)では、本手法の方が駆動エネルギー削減に優位であることがわかる。また、他の

駆動条件においても本手法のものは先行研究よりも省エネルギー化が図られていることが認められる。したがって、提案手法によってさらなる省エネルギー化が図られるといえる。

表2 駆動エネルギーの比較 [J]

T_E [s]	θ_S [rad]	θ_E [rad]	先行研究	本手法
0.8	0	$\pi/2$	0.208	0.149
1.0	$-\pi/2$	$\pi/4$	0.155	0.143
1.2	$-\pi/2$	$\pi/2$	0.229	0.200

なお、式(1), (2)で表現される軌道生成法を1つのモータハブに2つの柔軟リンクが搭載されたシステムのPTP制御にも適用し、1つの関節角軌道から2つの柔軟リンクの残留振動が抑制されることをシミュレーションおよびモデル実験から確認した。さらには、1リンク柔軟マニピュレータの1次と2次振動モードを抑制する高速位置決め制御へ応用可能であることも明らかにした。したがって、式(1), (2)で表現される軌道生成法はマルチモードフィードフォワード制御に有用である。

(2) 2リンク柔軟マニピュレータ

前述の軌道生成法を図3に示される2リンク柔軟マニピュレータのPTP制御に適用し、2つのリンクに発生する残留振動の抑制と省エネルギー化の両立を試みた。

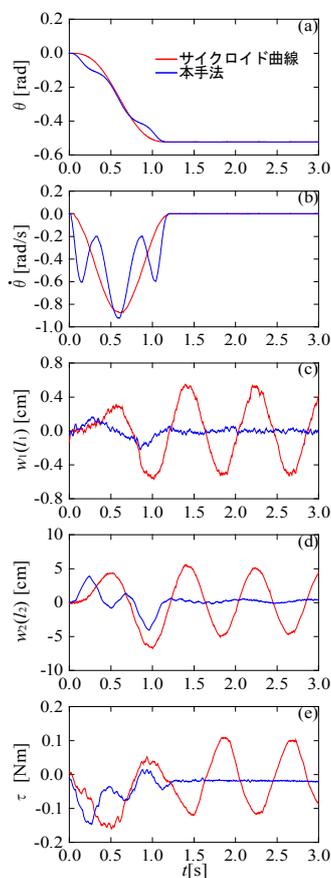


図6 本手法とサイクロイド曲線軌道の実験結果の比較

表3 駆動エネルギーの比較 [J]

T_E [s]	サイクロイド曲線	本手法
1.2	4.76×10^{-2}	2.84×10^{-2}
1.0	6.69×10^{-2}	2.79×10^{-1}
0.8	9.35×10^{-2}	3.81×10^{-1}

図6は駆動条件を($T_E = 1.2$ s, $\theta_S = 0$ and $\theta_E = -\pi/6$ rad)と設定し、本手法のシミュレーションから得られた第2リンクの関節角軌道を用いて実機で旋回させたときの時系列データ(青線)である。なお、参考までにサイクロイド曲線軌道で旋回させたときの結果を赤線で示している。図(a), (b), (c), (d)および(e)はそれぞれ第2リンクの旋回角, 角速度, 第1リンクの変位, 第2リンクの変位, モータの駆動トルクを示している。図に示されるように、サイクロイド曲線軌道では2つのリンクに位置決め後、すなわち、時間 $t = 1.2$ s以降に残留振動が発生している。一方、本手法ではこの2つの残留振動が抑制されている。表3は旋回時間を($T_E = 1.2$ s, 1.0 s, 0.8 s)と変化させたときの駆動エネルギーの比較である。これより、残留振動を抑制する本手法の方が残留振動を発生するサイクロイド曲線軌道よりも駆動エネルギーが減少していることがわかる。したがって、本手法では2つのリンク間の動力学干渉を巧みに相互作用させる軌道を生成し、残留振動抑制と省エネルギーの両立が達成されているといえる。

本研究では、柔軟リンクから構成されるマニピュレータシステムのPTP制御に対し、残留振動抑制ならびに駆動エネルギー最小化を目的としたフィードフォワード制御法を提案した。そして、シミュレーションおよびモデル実験から提案手法の有効性と実現性を示した。本研究成果は柔軟マニピュレータの位置決め制御性能の向上ならびに省エネルギー化に寄与するものと考えられる。

<引用文献>

- ① 阿部 晶, ベキ級数を用いた簡便な軌道生成法の提案(機械システムの残留振動抑制への適用), 日本機械学会論文集 C編, Vol. 79, No. 804, pp. 2869-2873, (2013)

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3件)

- ① 阿部 晶, 柔軟マニピュレータの残留振動を抑制させる高速駆動法(1次および2次振動モードの同時制振制御), 日本機械学会論文集, 査読有, Vol. 81, No. 824: 1-12, (2015)
<http://doi.org/10.1299/transjsme.14-00530>
- ② Akira Abe and Kotaro Hashimoto, A Novel Feedforward Control Technique for a

Flexible Dual Manipulator, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 査読有, Vol. 35, pp. 169–177, (2015)
<https://doi.org/10.1016/j.rcim.2015.03.008>

- ③ Akira Abe, An Effective Trajectory Planning Method for Simultaneously Suppressing Residual Vibration and Energy Consumption of Flexible Structures, Case Studies in Mechanical Systems and Signal Processing, 査読有, Vol. 4, pp. 19–27, (2016)
<https://doi.org/10.1016/j.csmssp.2016.08.001>

[学会発表] (計 16 件)

- ① 阿部 晶, 柔軟マニピュレータの残留振動を抑制させる高速駆動法, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2014, (2014.8.26), 東京
- ② 阿部 晶, 柔軟構造物の省エネルギーフィードフォワード制御 (さらなる省エネルギー化を目指した軌道生成法の改善), 第 57 回自動制御連合講演会, (2014.11.10), 伊香保
- ③ 阿部 晶, 柔軟マニピュレータの非線形モデリングと振動制御, 計測自動制御学会第 15 回 SI 部門講演会, (2014.12.17), 東京
- ④ 森脇 大, 阿部 晶, 柔軟マニピュレータに搭載されたロボットアームの省エネルギー駆動, 計測自動制御学会第 2 回制御部門マルチシンポジウム, (2015.3.5), 東京
- ⑤ 阿部 晶, 柔軟ベースに搭載された柔軟アームの省エネルギー効果, 第 47 回計測自動制御学会北海道支部学術講演会, (2015.3.9), 札幌
- ⑥ Akira Abe, Nonlinear Modeling and Vibration Control for a Flexible Manipulator, The 10th Asian Control Conference, (2015.6.3), コタキナバル(マレーシア)
- ⑦ Akira Abe and Yoshiki Kohari, Study of Optimal Trajectory Generation for Flexible Manipulator Mounted on Flexible Link, The 22nd International Congress on Sound and Vibration, (2015.7.15), フローレンス(イタリア)
- ⑧ 阿部 晶, ベースに搭載された柔軟アームの省エネルギー軌道計画法, 日本機械学会 2015 年度年次大会, (2015.9.14), 札幌
- ⑨ 阿部 晶, 柔軟マニピュレータの省エネルギーフィードフォワード制御のさらなる発展, 計測自動制御学会第 16 回 SI 部門講演会, (2015.12.16), 名古屋
- ⑩ 阿部 晶, 柔軟マニピュレータの 2 段階軌道生成法の提案, 第 48 回計測自動制

御学会北海道支部学術講演会, (2016.3.1), 札幌

- ⑪ Akira Abe and Hiromu Kitayama, Trajectory Planning Method for Flexible Arm Mounted on Flexible Base, The 23rd International Congress on Sound and Vibration, (2016.7.11), アテネ(ギリシャ)
- ⑫ 森脇 大, 阿部 晶, 柔軟マニピュレータの 2 段階軌道生成法の提案 (省エネルギー化への検討), 2016 年度精密工学会北海道支部学術講演会, (2016.8.27), 旭川
- ⑬ 阿部 晶, 柔軟構造物の PTP 制御のための新たな省エネルギー軌道計画法, 日本機械学会 2016 年度年次大会, (2016.9.12) 福岡
- ⑭ 阿部 晶, 柔軟性の特性に着目した柔軟マニピュレータの省エネルギー軌道計画法, 計測自動制御学会第 17 回 SI 部門講演会, (2016.12.15), 札幌
- ⑮ 加藤 圭吾, 阿部 晶, 2 リンク柔軟マニピュレータの省エネルギー軌道計画法, 計測自動制御学会第 4 回制御部門マルチシンポジウム, (2017.3.7), 岡山
- ⑯ 阿部 晶, 2 リンク柔軟マニピュレータの省エネルギー駆動に関する研究, 平成 29 年電気学会全国大会, (2017.3.17), 富山

[図書] (計 0 件)

該当なし

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

該当なし

○取得状況 (計 0 件)

該当なし

[その他]

該当なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

阿部 晶 (ABE, Akira)

旭川工業高等専門学校・システム制御情報工学科・教授

研究者番号 : 30313729

(2)研究分担者

該当なし

(3)連携研究者

該当なし

(4)研究協力者

該当なし