

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 13 日現在

機関番号：50104

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560274

研究課題名(和文) 飛躍的な省エネルギー化を実現する劣駆動フレキシブルマニピュレータの制御法の確立

研究課題名(英文) A novel control technique of underactuated flexible manipulators for realizing significant energy saving

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) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、剛体リンクの駆動関節とフレキシブルリンクの非駆動関節を有する劣駆動マニピュレータの省エネルギー駆動法の確立を試みた。ここで、非駆動関節にはブレーキ機構を装備させている。ブレーキで非駆動関節を固定させたとき、剛体リンクが省エネルギー、かつ、フレキシブルリンクに大きな振動を生じさせる駆動関節の軌道計画法を提案した。ここで得られた最適化軌道で剛体リンクを駆動させ、ブレーキの解放により非駆動関節に運動を発生させる仕組みとなっている。実験結果から、提案手法はサイクロイド曲線軌道のものよりも省エネルギー化が図られることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In this study, we attempt to establish an energy saving driving method for the underactuated manipulator consisting of one actuated rigid link and one unactuated flexible link. The unactuated joint contains a braking mechanism. We propose a minimum energy trajectory planning method with inducing large residual vibration of the flexible link for the actuated joint when the unactuated joint is fixed by the brake. The rigid link is driven along the obtained optimal trajectory, and then the motion of the unactuated joint can be generated by releasing the brake. We reveal that the proposed method attains the energy saving in comparison of a cycloidal motion from experiments.

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：軌道計画法 省エネルギー 劣駆動マニピュレータ 運動生成

1. 研究開始当初の背景

日本国政府は2010年6月に「グリーンイノベーションによる環境・エネルギー大戦略」と題した新成長戦略を発表し、2020年までに温暖化効果ガスの25%削減を目標としている。このような観点から、ものづくりの基盤となる産業用ロボット等においても、さらなる省エネルギー化が求められている。

一方、ロボットマニピュレータの位置決め後の振動抑制を目的としたフィードフォワード制御に関する研究は国内外でなされているが、消費エネルギー最小化をも考慮した残留振動抑制に関する研究は十分になされていない。そこで研究代表者は、1リンクフレキシブルマニピュレータのPTP (Point-To-Point) 制御問題を扱い、省エネルギー化と振動制御を両立させる新たなフィードフォワード制御法を提案してきた。そして、数値シミュレーションから、駆動エネルギー最小化と残留振動抑制の間にトレードオフの関係があることを明らかにした。さらに、数値シミュレーションとモデル実験結果の両面から、提案手法で生成された軌道を用いてマニピュレータを旋回させると、大きな残留振動が生じるサイクロイド曲線軌道よりも省エネルギー化が達成され、かつ残留振動が抑制されることをも明らかにした。

また、我々は身近に「棒高跳び」や「釣竿」等、弾性エネルギーを上手に利用することで、小さな駆動エネルギーから大きなパフォーマンスが得られることを経験的に知っている。体操選手が鉄棒競技の技の1つである「大車輪」を成し遂げるために、腰の動きのタイミングを巧み図ることにより鉄棒のしなりを利用していることが報告されている。「大車輪」の力学モデルは、系の自由度よりも少ないアクチュエータで駆動する劣駆動システムである。これより、フレキシブルリンクから構成される劣駆動マニピュレータにおいて、その弾性エネルギーを巧みに利用すれば、剛体マニピュレータよりも消費エネルギーを飛躍的に抑制できる可能性を秘めているといえよう。

2. 研究の目的

本研究では、ロボットマニピュレーション技術の省エネルギー化、すなわち、グリーンイノベーションの促進を目的とした、フレキシブルリンクから構成される劣駆動マニピュレータの新たな省エネルギー駆動法の確立を目指す。具体的には、第1リンクを非駆動関節のフレキシブルリンク、第2リンクを駆動関節の剛体リンクとした2リンクマニピュレータを扱う。ここで、非駆動関節である第1リンクにはブレーキ機構を装備させる。そして、このブレーキによって第1リンクを

固定して剛体リンクを駆動させ、フレキシブルリンクに弾性エネルギーを蓄えさせる。次いで、ブレーキを解放することで非駆動関節に運動を生じさせる。このとき、非駆動関節の運動を可能な限り省エネルギーで実現できる剛体リンクの最適軌道計画法の確立を目指す。

3. 研究の方法

はじめに、フレキシブルリンクに搭載された剛体アームの軌道計画法を実施し、アームの駆動エネルギーとフレキシブルリンクに発生する振動の関係を調べた。次いで、軌道計画法の改善を行った。最後に、これまでに得られた知見を基に劣駆動マニピュレータの省エネルギー駆動に関して検討を行った。

(1) フレキシブルリンクに搭載された剛体アームの軌道計画法

はじめに、図1に示される実験装置を開発した。実験装置では、真鍮製の2つのはりを平行に設置し、フレキシブルリンクとして用いた。剛体アームの旋回にはACサーボモータを用い、サーボドライブユニットの速度制御モードにより駆動させた。また、サーボモータに取り付けられたシリアルエンコーダにより、関節角の計測を行なった。フレキシブルリンクの変位の検出には、レーザ変位センサを用いた。

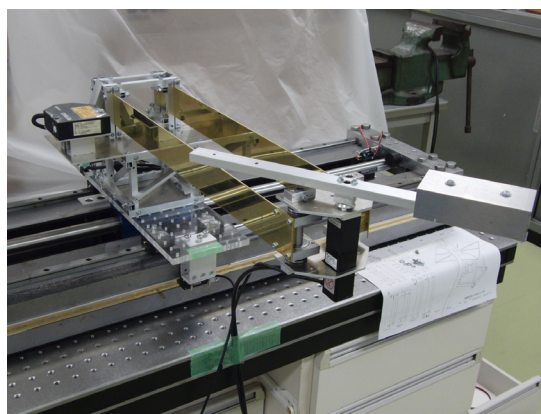


図1 フレキシブルリンクに搭載された剛体アームの実験装置

次いで、実験装置のモデリングを実施した。高精度の数学モデルを得るために、理論解析と実験装置を用いたパラメータ同定実験を併用した。

剛体リンクの消費エネルギーとフレキシブルリンクに発生する振動の関係を調べるために、剛体アームのPTP制御に関する軌道計画法を実施した。ここで、アームの軌道をニューラルネットワークで生成させた。残留振動と駆動エネルギーが最小となるよう多目的遺伝的アルゴリズム(NSGA-II)を適用し、

ニューラルネットワークをチューニングさせて最適軌道を求めた。数値シミュレーションならびにモデル実験から、本手法の妥当性を検証した。

(2) 2 リンク劣駆動マニピュレータの省エネルギー駆動

提案手法の妥当性および実現性を検証するには、モデル実験による検証が必須である。そこで、図2に示される2リンク劣駆動マニピュレータを開発した。ここで、非駆動関節の第1リンクはフレキシブルリンク、駆動関節の第2リンクは剛体リンクとし、非駆動関節には電磁ブレーキユニットを配置した。剛体リンクが駆動するとき非駆動関節をこのブレーキで固定させてフレキシブルリンクに振動を生じさせる。そして、ブレーキを解放することで、この弾性エネルギーを利用して非駆動関節に運動を発生させる仕組みとなっている。

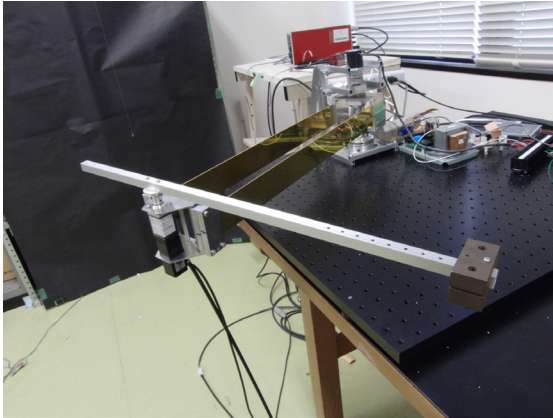


図2 2リンク劣駆動マニピュレータの実験装置

次いで、非駆動関節を固定させたとき、剛体リンクが省エネルギー、かつ、フレキシブルリンクに大きな振動を生じさせる駆動関節の軌道計画を試みた。これまでの軌道計画法においては、関節角軌道をニューラルネットワークで表現し、その係数をメタヒューリスティクスの最適化パラメータと設定した。しかしながら、ニューラルネットワークから生成される軌道は無限微分可能な滑らかな曲線となるものの、最適化するパラメータ数が多く、計算コストが高くなってしまいう短所がある。そこで、計算コストを削減させることを目的とし、べき級数とサイクロイド関数の結合から軌道を表現することを提案した。

シミュレーションの妥当性を検証するために、開発した装置を用いたモデル実験を実施した。ここで、非駆動関節のブレーキを開放させ非駆動関節に運動を生じさせることを試みた。この実験結果から、剛体リンクのエネルギーと発生する非駆動関節の運動の関係を調べ、省エネルギー化が図られているのかを検証した。

4. 研究成果

(1) フレキシブルリンクに搭載された剛体アームの軌道計画法

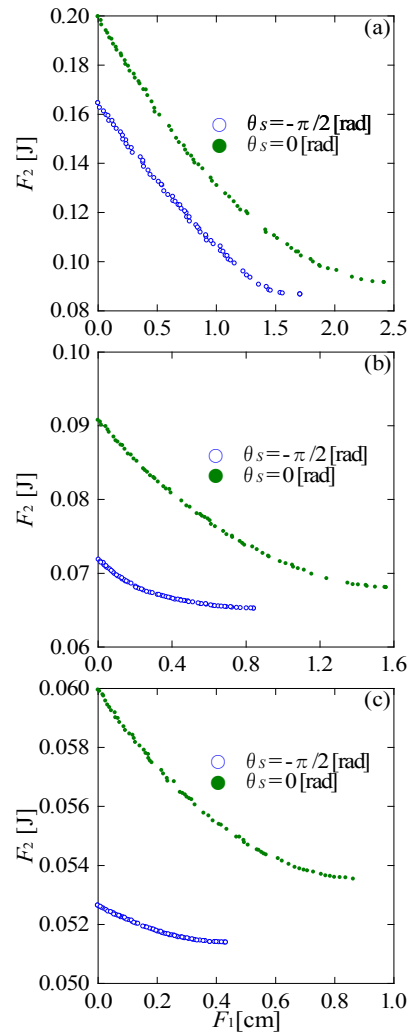


図3 パレート解の分布

駆動条件を $\theta_E - \theta_S = \pi/2$ [rad] と設定し、多目的遺伝的アルゴリズムから得られたパレート解の分布を図3に示す。ここで、 θ_S は剛体リンクの初期角度、 θ_E は目標角度である。また、2つの初期角度を $-\pi/2, 0$ [rad] を採用しており、図(a), (b), (c) はそれぞれ駆動時間 $T_E = 0.8, 1.0$ および 1.2 [s] の結果である。図中の横軸 F_1 はフレキシブルリンクに発生する残留振動の最大値、縦軸 F_2 は剛体リンクの駆動エネルギーを示している。この図より、残留振動の振幅が減少するにつれて駆動エネルギーが増加していることが見受けられる。ゆえに、残留振動抑制と駆動エネルギー最小化の間にはトレードオフの関係が成立していると考えられる。一方、残留振動の振幅が増加するにつれて剛体アームの駆動エネルギーが減少しており、この軌道計画法は劣駆動マニピュレータの省エネルギー駆動に応用できることも認められる。

本手法の実現性を検証するために、モデル実験を行った。図4はパレート解における残留振動が最小となる軌道でロボットアームを旋回させたときの実験結果であり、駆動条件を($T_E=0.8$ [s], $\theta_s=0$, $\theta_E=\pi/2$ [rad])と設定した。図(a), (b), (c), (d)はそれぞれ剛体アームの関節角, 角速度, フレキシブルリンクの変位およびモータのトルクである。また、実線は本手法で得られた残留振動が最小となる軌道, 破線はサイクロイド曲線軌道で旋回させたものである。図(c)より, サイクロイド曲線軌道においては大きな残留振動が生じるものの, 本手法では残留振動が抑制されていることがわかる。これより, 本手法の実現性を認めることができる。

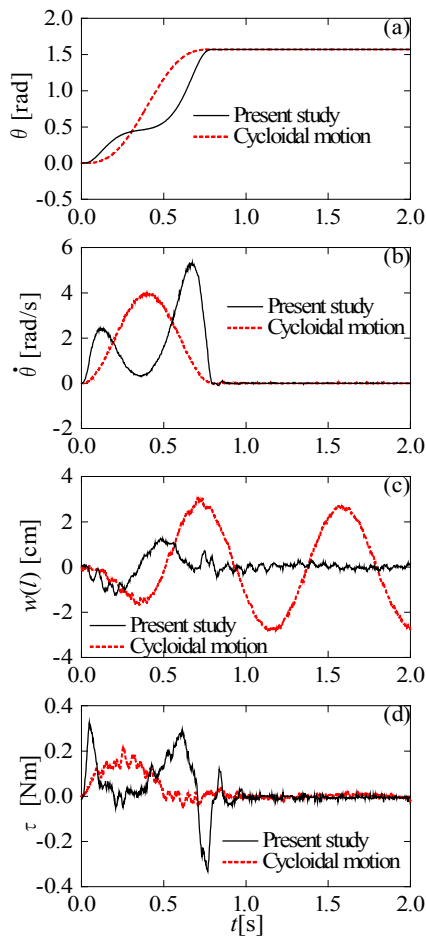


図4 本手法とサイクロイド曲線軌道の実験結果の比較

提案手法は遺伝的アルゴリズム, すなわち, 発見的手法に基づくものであり, 制御対象の運動方程式が数値積分可能であれば, あらゆる機械システムの位置決め制御問題に適用可能である。例えば, クレーンシステムや, 1つのモータハブに2つのフレキシブルリンクが搭載されたデュアルマニピュレータの位置決め制御問題にもこの手法が適用されており, その応用範囲が幅広いという特長を有している。

(2) 簡便な軌道生成法の提案

前述のニューラルネットワークを用いた軌道生成法は最適化パラメータ数が20個程と多くなり, 多目的遺伝的アルゴリズムから最適解を得るまでに多くの時間を要することとなる。そこで, 最適化パラメータを減少させる簡便な軌道生成法を提案した。ここで, べき級数とサイクロイド関数との結合により軌道を生成させた。

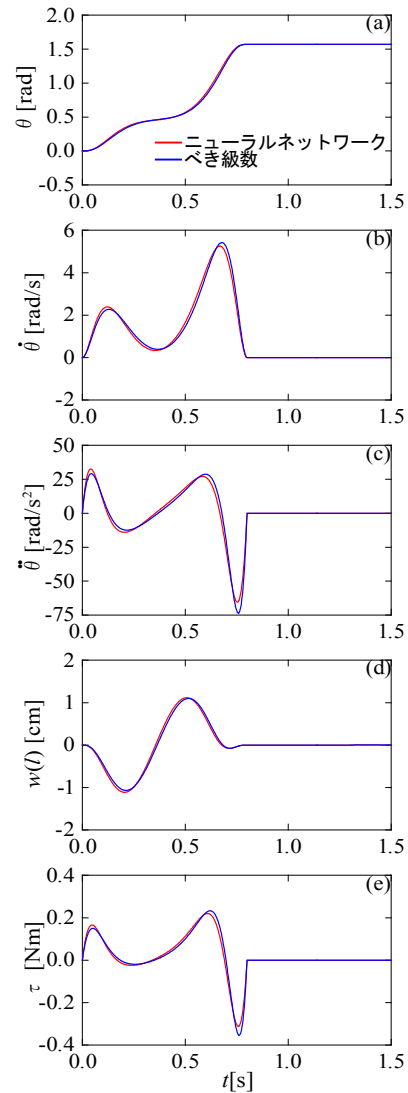


図5 ニューラルネットワークとべき級数による最適軌道の比較

図5は柔軟ベースに搭載されたロボットアームにおいて駆動条件を($T_E=0.8$ [s], $\theta_s=0$, $\theta_E=\pi/2$ [rad])と設定し, シミュレーションから得られた関節角, 角速度, 角加速度, フレキシブルリンクの変位ならびに剛体アームの駆動トルクの時系列データの比較を示している。図中の青線, 赤線はそれぞれべき級数およびニューラルネットワークの結果を示している。図5(d)から, べき級数はニューラルネットワークを用いたものと同様に残留

振動が完全に抑制されている。ニューラルネットワークではチューニングパラメータ数が 16 個となっているが、べき級数においては僅か 2 個である。これより、べき級数を用いた手法では、多目的遺伝的アルゴリズムの計算コストを 80%削減しながらも省エネルギー残留振動抑制軌道が生成可能となった。

(3) 2 リンク劣駆動マニピュレータの省エネルギー駆動

2 リンク劣駆動マニピュレータにおいて非駆動関節をブレーキで保持させて剛体リンクを駆動させ、省エネルギーでフレキシブルリンクを励起させることを試みた。手法としては、先程のべき級数を用いて剛体リンクの軌道を表し、フレキシブルリンクの振動がサイクロイド曲線軌道と同等の条件を課し、最適化手法によりエネルギー最小化を図った。

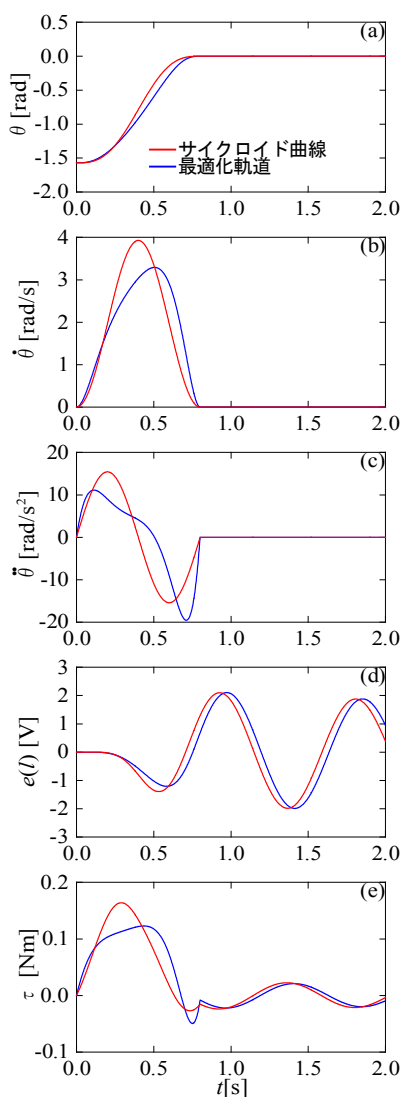


図 6 べき級数によるエネルギー最小化軌道とサイクロイド曲線軌道の比較

図 6 は、駆動条件($T_E = 0.8$ [s], $\theta_S = -\pi/2$ [rad],

$\theta_E = 0$)の下でエネルギー最小化軌道のシミュレーション結果である。図中の線の定義は図 5 と同じである。なお、図 6(d)の縦軸はフレキシブルリンクの振動を計測するストレインアンプの出力電圧を示しており、1 [V]は 50μ のひずみを表している。この図(d)より、2 つの残留振動の最大値はほぼ一致していることがわかる。一方、剛体リンクの消費エネルギーは、サイクロイド曲線軌道で 0.1700 [J], エネルギー最小化軌道で 0.1515 [J] と消費エネルギーが削減されている。

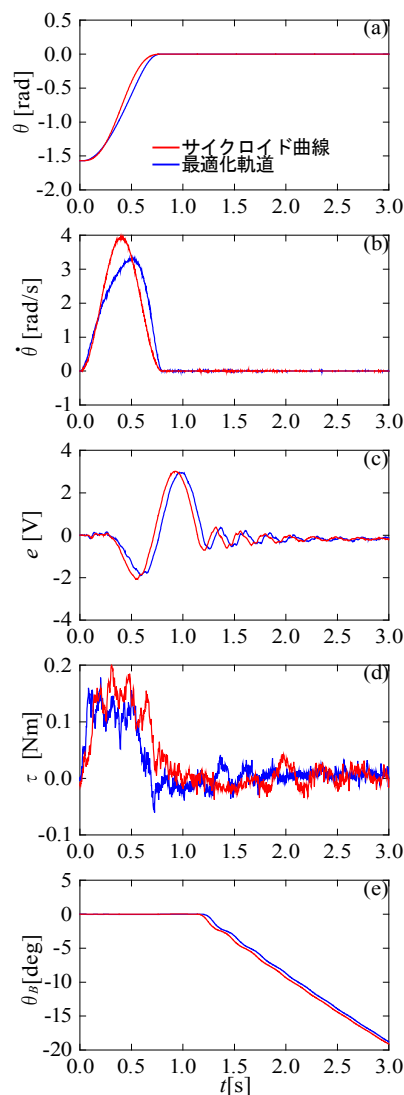


図 7 ブレーキ開放時の実験結果の比較

次いで、このエネルギー最小軌道で剛体リンクを回転させ、ブレーキを開放して非駆動関節に運動を発生させることを試みた。ここで、フレキシブルリンクの弾性エネルギーを効果的に活用するために、残留振動の変位が 0 となるタイミングでブレーキを開放させた。図 7 はこの実験結果である。図 7(e)の θ_B は非駆動関節の角度である。図(e)より、ブレーキの開放時間 1.2 [s] 程度から非駆動関節に運動が生じており、エネルギー最小軌道とサイ

クロイド曲線軌道の両者がほぼ一致している。また、図(c)から、ブレーキの開放後に残留振動が急激に減衰しており、弾性エネルギーが非駆動関節の運動に変換されていることがわかる。この実験における剛体リンクの駆動エネルギーは、サイクロイド曲線軌道で 0.1715 [J], エネルギー最小化軌道で 0.1587 [J] とシミュレーションと同様な結果を得た。これより、シミュレーションのエネルギー最小軌道計画法は妥当、かつ、有効であり、本手法を用いればサイクロイド曲線軌道と同等な非駆動関節の運動をより少ないエネルギーで実現できることを確認した。

今日の産業用ロボット等で用いられるマニピュレータは、ワークを Pick-and-Place する同じ動作パターンを繰り返すものが多い。したがって、本研究成果はこのようなロボットマニピュレーションの省エネルギー化に寄与しうるものと考えられる。

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 1 件)

- ① 阿部 晶, ベキ級数を用いた簡便な軌道生成法の提案, 日本機械学会論文集(C 編), 査読有, Vol. 79, No. 804, pp. 2869–2873, (2013).
<http://dx.doi.org/10.1299/kikaic.79.2869>

[学会発表] (計 11 件)

- ① 阿部 晶, 梶原裕哉, 柔軟劣駆動マニピュレータのフィードバック制御に関する研究, 日本機械学会北海道支部第 50 回講演会, (2011.10.1), 旭川.
- ② Akira Abe, Residual Vibration Suppression for Robot Manipulator Attached to a Flexible Link by Using Soft Computing Techniques, 2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, (2011.12.10), タイ・プーケット.
- ③ 阿部 晶, 岩井 啓介, 柔軟ベースに搭載されたロボットアームの軌道計画, 計測自動制御学会第 12 回 SI 部門講演会, (2011.12.23), 京都.
- ④ 阿部 晶, 柔軟デュアルマニピュレータの振動抑制に関する研究, 計測自動制御学会第 12 回 SI 部門講演会, (2011.12.23), 京都.
- ⑤ Akira Abe and Kohei Yoshida, Study on Residual Vibration Suppression for a Flexible Dual-Manipulator, 20th Mediterranean Conference on Control and Automation, (2012.7.4), スペイン・バルセロナ.

- ⑥ 阿部 晶・吉田 昂平, 柔軟デュアルマニピュレータの残留振動抑制を目的とした軌道計画法, 日本機械学会 2012 年度年次大会, (2012.9.10), 金沢.
- ⑦ 阿部 晶, 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軌道計画, 計測自動制御学会第 13 回 SI 部門講演会, (2012.12.20), 福岡.
- ⑧ 阿部 晶, 柔軟構造物の残留振動抑制のための簡便な軌道計画法, 第 5 回ロボット学会北海道ロボット技術研究専門委員会学術講演会, (2013.3.7), 札幌.
- ⑨ Akira Abe, Minimum Energy Trajectory Planning Method for Robot Manipulator Mounted on Flexible Base, 9th Asian Control Conference, (2013.6.24), トルコ・イスタンブール.
- ⑩ 阿部 晶, 機械システムの残留振動抑制を目的とした簡便な軌道計画法の提案, 日本機械学会第 13 回「運動と振動の制御」シンポジウム, (2013.8.28), 福岡.
- ⑪ 阿部 晶, ソフトコンピューティングを活用した柔軟構造物の振動制御, 計測自動制御学会第 14 回 SI 部門講演会, (2013.12.20), 神戸.

[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