

令和 6 年 6 月 27 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03934

研究課題名(和文)油圧アームの非線形動力学的特徴を駆使したモデル予測制御高速化

研究課題名(英文)Dynamics Based Fast NMPC for Hydraulic Arms

研究代表者

酒井 悟 (Sakai, Satoru)

信州大学・学術研究院工学系・教授

研究者番号：90400811

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)：遅い系(プラント, 船舶)から速い系へと高速化するNMPCには油圧アーム実装が期待されているものの, 非線形圧力ダイナミクスによって計算時間が許容されなかった. 動力学的特徴を駆使した等価変換・低次元化A(4次→3次)・低次元化B・特殊無次元化より, 厳密かつ高速に実装する提案法の有効性を示す. 許容値1msを下回ることを確認しつつ, P4(従来法)・C4(等価変換)・C3(C4+低次元化A)・C2(C4+低次元化AB)・P4*(P4無次元化)・C4*(C4無次元化)・C3*(C3無次元化)・C2*(C2無次元化)の各ケースの計算時間・計算誤差を比較した. 一般アクチュエータモデル解析から, 実装条件を示した.

研究成果の学術的意義や社会的意義

変化の遅い系(例: 化学プラント, 船舶)への実装から変化の速い系(例: 剛体アーム)への実装へと高速化が進展するモデル予測制御には, 対人対物安全性保証のため, 油圧アームへの実装が期待されている. しかし変化の非常に速い非線形圧力ダイナミクスの存在によって計算時間が許容されず, 油圧アームへの実装は未解決であった. しかし, 提案解法は, 近似を介さず「厳密に, かつ, 高速に」モデル予測制御の油圧アームへの実装を解決する点が学術的意義である. 安全性を保証するNMPCの油圧アームへの実装が可能となったため, 建設・農業・災害救助・地雷除去における作業機と作業者の新しい協働への道が開けたことが社会的意義である.

研究成果の概要(英文)：In hydraulic robotics and automation, NMPCs are expected in various application fields. The computational time of many NMPCs is a key since the dynamics is much faster than the conventional mechanical and chemical ones. NMPC computations should be exact, that is, dropping the nonlinear pressure dynamics should be avoided in terms of the safety. The report provides a set of four techniques. First, the original NMPC closed-loops by the pressures are transformed into another NMPC closed-loops by the Casimirs. The on-line optimization via the transformation was not investigated yet. Second, another NMPC closed-loops can be reduced into the other NMPC closed-loops by the sole Casimir and the nominal integrator. However, the contribution to NMPC computations via the reductions was not investigated yet. Finally, there were no papers to discuss the nondimensionalization of NMPC for hydraulic cylinder dynamics. In all, the computational time using the four techniques is studied in the report.

研究分野：メカトロニクス

キーワード：油圧アーム 非線形モデル予測制御 油圧ロボット ポート・ハミルトン系

1. 研究開始当初の背景

油圧アームは電動アームと比較して出力自重比が高く、制御ではなくハードによる重力補償効果有する等の長所から、建設・農業・災害救助・地雷除去等の広範囲に普及している。しかし油圧アームの非線形ダイナミクスの存在によって、従来解法(=油圧アームとモデル予測制御に関する報告済の解法の全て)の多くが前提とする標準モデル(=第一原理モデルよりも低精度であり、伝達関数や準静的系よりも高精度な、制御器設計用の公称モデル)に対して高度自動化を合理的に実現するモデルベース制御は未完成である。特に、高い出力自重比に由来する大きな速度(流量)・力(圧力)を含む不等式拘束を満足させる非線形モデル予測制御(Nonlinear Model Predictive Control=NMPC)は、対人対物安全性を保证するために強く期待されているものの、変化の非常に速い非線形圧力ダイナミクスの存在によって、計算時間が許容されず、(近似することなく)厳密にかつ高速な実装は重要な未解決問題である。

2. 研究の目的

本研究の目的は未解決問題に対する以下の解法を提案して有効性を実験的に示すことである。提案解法は、油圧アームの標準モデルの非線形動力学の4個の特徴(手順①~④に対応)を駆逐する手法である。提案解法以外に未解決問題を解決する手法は見当たらず、4個の特徴は過去の応募者によって報告されたものであって、学術的独自性がある。提案解法は、汎用ハード(広範囲に普及している弁・シリンダ・配管)のみを前提として、かつ、既存のモデル予測制御の(不等式拘束や目的関数の)設定自由度を制限しないため、汎用性が非常に高い。

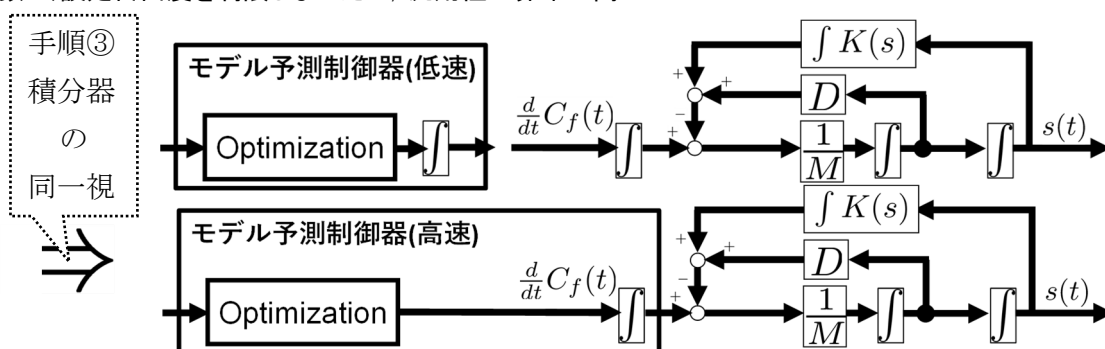


図1 手順③: 2個の積分器を同一視前の制御対象(上)は3次系(計算量多い), 同一視後の制御対象(下)は2次系(計算量少ない).

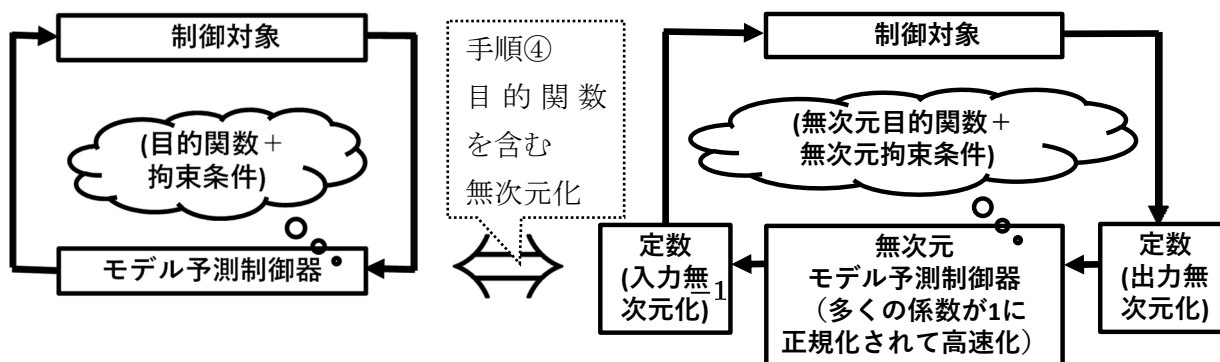


図2 手順④: 既存の目的関数(左)の時間と状態を無次元化した新しい目的関数(右)を用いた実装.

3. 研究の方法

従来解法の多くと同じく変位・速度・力 (トルク)の不等式拘束と目的関数からモデル予測制御器を設計して、汎用ハードのみを前提とする現有装置の改良版(3自由度アーム, 全長 2m, 供給圧力 7MPa, 制御周期 1ms 実時間制御用計算機)に実装した。多数の条件(例:ピストン面積の比, 目的関数の重み)のもと網羅的であるが数値的検証(=数値シミュレーションによる検証), 少数の条件のもと網羅的ではないものの実験的検証, の両面から各手順の有効性(計算時間, 制御性能(=整定時間,

ロバスト制御性能), 吸引領域(=許容可能な初期状態の集合)の形状と大きさ)を明らかとする。

★手順① 等価変換(圧力より変化の遅い量への座標変換・入力変換・ハミルトン関数置換)自明な圧力座標(変化の非常に速い量)ではなく, 1番目の特徴[S.Sakai, 2012]として, カシミール座標(変化の遅い量)への座標変換と入力変換・ハミルトン関数置換の特殊な組を介して, 近似を介さず厳密に, 標準モデルを等価変換できる。過去の数値的検証から一定程度(50%以上), モデル予測制御が高速化すると算定される。

★手順② 切り離し(近似を介さず厳密に, 制御対象を4次系から3次系に低次元化)

手順①の直後の等価変換モデルに対して, 適当な一部を切り離しても, 2番目の特徴[S.Sakai, 2018]として, 入力ー変位・速度・力間の応答は厳密に保存できる。ゆえに3次系だけを制御対象と考えればよく, 大幅に(80%以上), モデル予測制御は高速化すると算定される。

★手順③ 積分器同一視(近似を介さず厳密に, 制御対象を3次系から2次系に低次元化)

手順②の直後の制御対象である等価変換モデルの残部は, 3番目の特徴として「機械システム(マス・非線形バネ・ダンパ系)と入力端積分器(ハードウェアの積分器)の直列結合」を有する。ここで制御器が出力端積分器(ソフトウェアの積分器)を有するものと”仮定”すると, 出力端積分器と入力端積分器を同一視できる(図 1)。ゆえに出力端積分器の実装が不要となる(少しだけ高速化する)だけではなく, 機械システムの2次系だけを制御対象と考えればよく, 大幅に(再び 80%以上), モデル予測制御は高速化すると算定される。なお”仮定”を満たす既存のモデル予測制御は報告済である。実装支援のため湘南工科大と協力する。空圧アームや電動アームを含む一般的なアクチュエータへの拡張を解析のため Twente 大と協力する。

★手順④ 目的関数を含む無次元化(近似を介さず厳密に, 制御器の時間と状態を無次元化)

手順③の直後の制御対象は一般の2次系とは異なって, SI 単位が定義された機械システムであるため, 無次元化が定義可能である。特に4番目の特徴として, 無次元化の前後でパラメータ構造が保存される特殊な無次元化が, 既存の無次元化と比較して少ないパラメータ数で, 定義可能である。そこで制御対象に加えて(物理学では登場しない)目的関数にも特殊な無次元化を施した無次元目的関数を定義すると, 無次元化前のモデル予測制御器の設計と同一手順で, 無次元化後もモデル予測制御器を設計できる(図2)。無次元化後は一般に多くの係数が1に正規化されるため, 過去の数値的検証[S. Sakai et al. 2018]から一定程度(50%以上), モデル予測制御は高速化すると算定される。実験装置(図3)の同定結果を計算条件と実験条件とする。

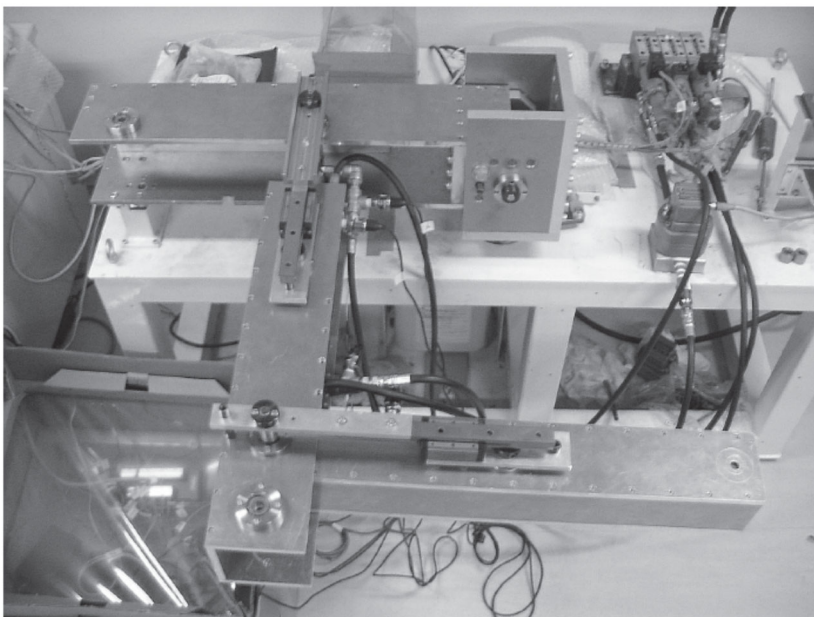


図3 計算条件と実験条件(物理パラメータは既報[S. Sakai et al. 2018]と同一)。

4. 研究成果

手順①②④(手順③を除いた手法)による研究成果, 手順④単体による研究成果, 手順①~④による研究成果に大別される。

手順①②④による研究として表1の8ケースについて数値実験した。図4に従来解法 P4 と提案解法 C3*(手順①②④)の比較を示す。閉ループ系の初期値応答におけるピストン位置・各圧力の過渡的・定常的な時間応答は一致しており, 提案解法(手順①だけではなく手順②と手順④)妥当性が検証された。図5に8ケースの計算時間の平均値と標準偏差を示す。平均値について, 従来解法 P4 の 1.2ms と比較して提案解法 C3*の約 0.9 は開発目標 1.0ms を下回っており, 提案解法の有効性が確認された。

表1 計算条件(Transform.:手順①, 手順②:Reduction, 手順④:Nondim.の各3手順の有無を含む8ケース, C3d と C3 は制御器ではなく制御対象の座標が異なる。)

	P4	C4	C3d	C3	P4*	C4*	C3d*	C3*
Transform.	N	Y	Y	Y	N	Y	Y	Y
Reduction	N	N	Y	Y	N	N	Y	Y
Nondimen.	N	N	N	N	Y	Y	Y	Y

The original NMPCs for hydraulic cylinder dynamics with four states including the pressures correspond to P4. The proposed NMPCs for hydraulic cylinder dynamics with three states including one of the Casimirs (whose plant simulator uses the two pressures) correspond to C3. The proposed NMPCs for hydraulic cylinder dynamics with three states including one of the Casimirs (whose plant simulator uses the two Casimirs) correspond to C3d.

標準偏差について, C3d の有効性が顕著であり, 制御実験ではなく制御シミュレーションにおいては圧力座標ではなくカシミール座標で(制御器だけではなく制御対象も)構築することの有効性も確認された。表1の8ケースの上位と下位の差は無次元化の有無に対応しており, 手順④単体による研究成果としての有効性も同時に確認された。

手順①~④による研究の事前研究として, 実験装置に計算時間は変化しないようにアルゴリズムの一部を単純化して実装して, 外乱応答(アーム手先に印加した被験者による手動外乱に対する応答)実験の結果, 制御周期 1ms の範囲内に処理され, 安定性(L2 安定性, 外乱が収束すると応答も収束)が達成された。線形近似(伝達関数への近似), 特異摂動(=非線形圧力ダイナミクス(時定数=数 ms 以下)を無視する従来解法は報告済であるが, 伝達関数や準静的系は標準モデルより低精度であって不等式拘束を実装段階では満足できず対人対物安全性は保証されない。専用ハード(例:高価な高速計算機)を用いる従来解法も報告済であるが, 現時点では汎用性が低く現実的でない。事前研究としてアルゴリズムの一部を単純化した点を除くと, NMPC は油圧アームに(近似することなく)厳密にかつ高速に実装され, 未解決問題を解決したと考えられる。

空圧アームや電動アームだけでなくヒトの神経筋アクチュエータを含む立場から提案された一般アクチュエータモデル[N. Hogan, 2015]をポート・ハミルトン系・回路理論(電源変換)・ボンドグラフの視点から解析した結果[S. Sakai, 2024], 標準モデル(油圧アーム非線形公称モデル)と同一構造の非2次形式ハミルトニアンを有するメカトロ系は Norton 型ではなく Thevenin 型であることが明らかとなった。本研究の提案解法は油圧アームだけではなく, 広く Thevenin 型のアクチュエータには拡張できること考えられる。

今後の課題は, 手順④が可能となる無次元化の必要十分条件(最適化問題の構造保存条件とアルゴリズムの構造保存条件)の導出を介して, 事前研究としてアルゴリズムの一部を単純化した点を排除した閉ループ系において, 手順③単体と手順①~④による研究成果を示すことである。

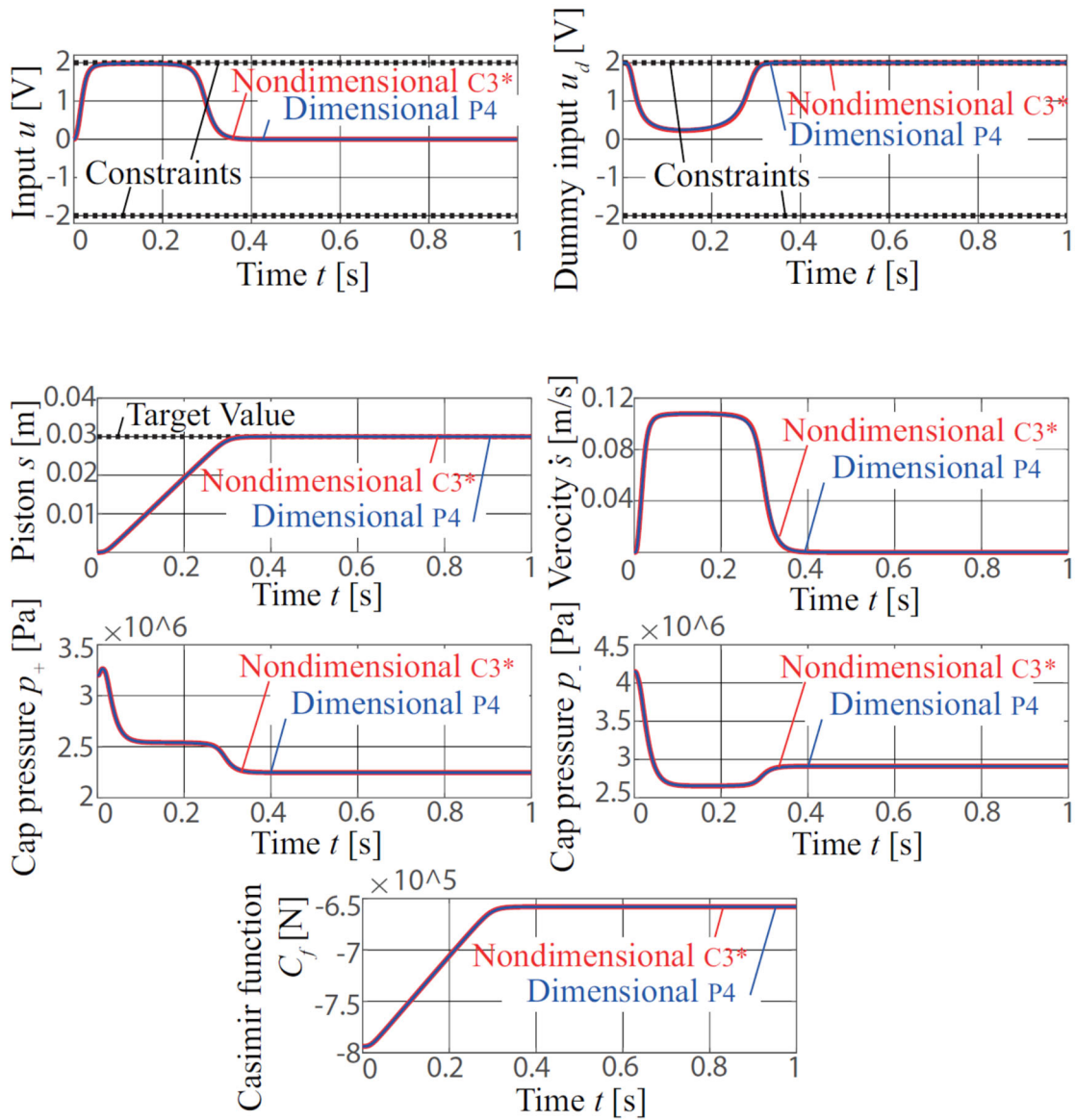


図4 従来解法 P4(圧力座標)と提案解法 C3*(無次元化+カシミール座標)の計算誤差.

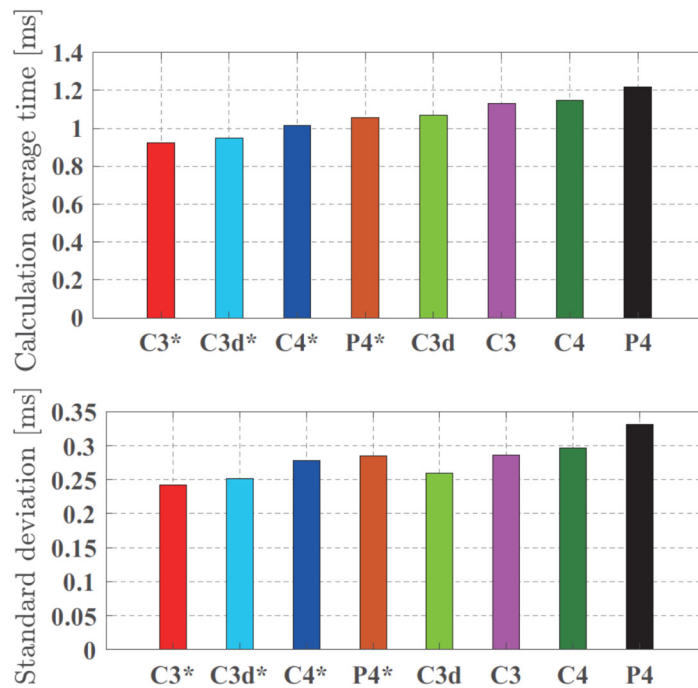


図5 NMPC 計算時間の平均値(上)と標準偏差(下).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Satoru Sakai	4. 巻 -
2. 論文標題 A Casimir Based Analysis of a Class of the General Actuator Model	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Proceedings of IFAC Workshop on Lagrangian and Hamiltonian Methods for Nonlinear Control	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Sakai Satoru, Takagi Takumu, Sawada Kohei, Yokogawa Tomoya, Arai Ryo	4. 巻 56
2. 論文標題 Further Result on Fast Search Method for NMPCs by Mixed Objective-Physical Nondimensionalizations for Mechatronic Systems	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IFAC-PapersOnLine	6. 最初と最後の頁 7529 ~ 7535
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ifacol.2023.10.652	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Satoru Sakai, Takumu Takagi, Yuichi Ikeda, Kohei Sawada, Tomoya Yokogawa	4. 巻
2. 論文標題 Fast Search Method for Stable NMPC by Objective Nondimensionalization of Mechatronic Systems	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)	6. 最初と最後の頁 442-448
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/AIM52237.2022.9863269	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Teruo Kato, Satoru Sakai, Ryo Arai	4. 巻 15-3
2. 論文標題 On the Uncertainty Analysis via Low Frequency Inputs for Hydraulic Cylinder Dynamics	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 JFPS International Journal of Fluid Power System	6. 最初と最後の頁 95-100
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5739/jfpsij.15.95	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 加藤輝雄, 新井遼, 酒井悟	4. 巻 53-1
2. 論文標題 油圧アームのための同定入力の修正法と応用	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本フルードパワーシステム学会論文集	6. 最初と最後の頁 10-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5739/jfps.53.10	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Satoru Sakai, Daiki Nakabayashi	4. 巻 33
2. 論文標題 On the Geometric Featureless Visual Velocity of UGV in an Agriculture Scale	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	6. 最初と最後の頁 1255-1264
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20965/jrm.2021.p1255	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Arai Ryo, Sakai Satoru, Tatsuoka Akihiro, Zhang Qin	4. 巻 14
2. 論文標題 Analytical, Experimental, and Numerical Investigation of Energy in Hydraulic Cylinder Dynamics of Agriculture Scale Excavators	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Energies	6. 最初と最後の頁 6210 ~ 6210
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/en14196210	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Satoru Sakai, Masaki Obara, Kenta Chikazawa	4. 巻 54
2. 論文標題 Parameter Identification via Nominal Integrator of Hydraulic Cylinder Dynamics	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IFAC-PapersOnLine	6. 最初と最後の頁 78-83
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ifacol.2021.10.332	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 宇佐美太一, 酒井悟, 新井遼
2. 発表標題 非線形油圧アームの力制御系の解析
3. 学会等名 2022年春季日本フルードパワーシステム講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中健太郎, 酒井悟, 新井遼
2. 発表標題 非線形油圧アームの劣駆動和圧に関する一検証
3. 学会等名 2022年秋季日本フルードパワーシステム講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ryo Arai, Satoru Sakai, Teruo Kato
2. 発表標題 Numerical Energy Behavior Analysis While Digging in Hydraulic Cylinder Dynamics of Agriculture Scale Excavators
3. 学会等名 SICE AC 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ryo Arai, Satoru Sakai
2. 発表標題 A Safety Problem of the Nonlinear Impedance Control for Collaborative Hydraulic Arms with Reachable Manifold
3. 学会等名 SICE MSCS/ISCS (国際学会)
4. 発表年 2021年 ~ 2022年

1. 発表者名 Atushi Takano, Satoru Sakai
2. 発表標題 An Experimental Validation of a Transformation between Output Spaces in Visual Feedback Control for Sloshing
3. 学会等名 SICE AC (国際学会)
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 Teruo Kato, Ryo Arai, Satoru Sakai
2. 発表標題 Numerical Study on Identification Input for Nonlinear Hydraulic Arms
3. 学会等名 International Symposium of JFPS (国際学会)
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 Ryo Arai, Teruo Kato, Satoru Sakai
2. 発表標題 On the Analysis of Energy Behaviors in Hydraulic Cylinder Dynamics via Modeling of Experimental Excavators
3. 学会等名 International Symposium of JFPS (国際学会)
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 宇佐美太一, 近澤健太, 酒井悟
2. 発表標題 非線形油圧アーム力制御のロバスト性について
3. 学会等名 2021年フルードパワーシステム講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 加藤輝雄, 新井遼, 酒井悟
2. 発表標題 油圧アームのための同定入力の修正法について
3. 学会等名 2021年春季フルードパワーシステム講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔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		
オランダ	Twente University		