

様 式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19（共通）

科学研究費助成事業

研究成果報告書



令和 6 年 6 月 28 日現在

機関番号：54601

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14111

研究課題名（和文）能動制御キャスターを複数同時制御する体系的振動制御手法

研究課題名（英文）Systematic vibration control method to simultaneous control multiple active controlled casters

研究代表者

須田 敦（SUDA, Atsushi）

奈良工業高等専門学校・機械工学科・准教授

研究者番号：90743211

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000 円

研究成果の概要（和文）：能動制御台車走行時の基礎的な振動抑制性能を確認するための制御システムを構築した。基礎的な制御実験を行い多入力単一出力制御システムの複数同時安定を確認した。走行時の制御実験に先立ちJIS B8923：産業用キャスターに準じて実験した。制御手法考察に必要な車台の動きを計測した。車台中央に取り付けた3軸加速度センサの鉛直軸方向の加速度を用いて振動抑制性能を評価した。突起乗り越え時の衝撃による加速度応答スペクトル、および突起乗り越え後の残留振動による加速度応答スペクトルを明らかにした。これにより、様々な制御手法を試すことが可能なプラットフォームとしての広がりが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

医療現場では新生児を高次医療施設まで搬送する保育器、製造業では半導体や精密機器、などの衝撃や振動を嫌う物品の運搬・搬送の場面において、路面の表面性状や突起乗り越えなどの外乱の影響を伝達しない手法にニーズがある。本研究では能動制御キャスターを4個搭載した運搬用台車（ハンドトラック）に関して、突起乗り越え時の衝撃性能や振動性能を評価した。制御工学における多入力単一出力制御システムの複数同時安定化問題解決に寄与する。実用的な能動制御台車の開発における設計指針を得ることができる。

研究成果の概要（英文）：A control system was constructed to verify primary vibration suppression performance during active control wheeled platform running. Primary control experiments were conducted to confirm the simultaneous stability of multiple control systems with Multi-Input Single-Output. Before the control experiment, the system was tested under JIS B8923: Industrial casters. The movement of the chassis was measured, which was necessary to consider the control method. Vibration suppression performance was evaluated using the acceleration in the vertical axis direction of a triaxial acceleration sensor mounted in the center of the chassis. The acceleration response spectrum was clarified due to the impact of over the bump, and the acceleration response spectrum was clarified due to the residual vibration after over the bump. The results suggest that the proposed system can be used as a platform for testing various control methods.

研究分野：設計工学・機械力学・制御

キーワード：キャスター 振動制御 メカトロニクス 輸送機器 台車

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。

様 式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

一般的な荷物の運搬・搬送分野に限らず、路面状態が清浄と考えられる半導体製造分野、航空・宇宙開発関連分野、などにおいても、衝撃や振動を極力抑える搬送のニーズが増加している。解決策としてこれまで、撃心機構(ラケットやバットなどの打具において持ち手に伝わる衝撃が最小になる点)を応用した構造に、ボイスコイルモータ(以下、VCM)をアクチュエータとして付け加えた能動制御型の制振・緩衝キャスターの研究を行っている。本研究を通じ最終的に、貨物や荷物の運搬用ハンドトラック(台車)に関して、低衝撃・低振動を実現する台車の実用化を目指す。特に、本研究では台車に使用する能動制御型キャスターに装着している VCM の制御に着目する。

2. 研究の目的

研究代表者はこれまでに能動制御型キャスターの研究を進めており、本研究では実環境での応用に指向し、能動制御型キャスターを複数個装着した台車に焦点をあてる。台車システムとしての制御手法は基礎段階の試行錯誤的であるので、本研究を通じ試行錯誤的である台車システムの制御手法を見直し、能動制御キャスターを複数同時制御する振動制御手法を体系的に明らかにするための設計指針を得ることを目的とする。制御工学における多入力多出力制御システムの安定化問題の解決に寄与する。

3. 研究の方法

(1) 台車制御システムの開発

実際に能動制御型キャスターを4輪装着した実験用台車を用いる。能動制御型キャスターは主に揺動アームとボイスコイルモータで構成され、VCMより車輪側とVCMより台車側の合計2か所に加速度センサを配置している。これら2か所の加速度センサから読み取った値を制御入力としVCMの制御信号を制御出力とする多入力単一出力を、4輪分同時に制御する多入力多出力制御システムを構築する。加えて、車台中央部に慣性計測装置(以下、IMU)を配置し、台車が走行する際の車台姿勢を定量的に評価する。

(2) 制御手法構築に向けて

台車が突起を乗り越えた際の加速度応答を計測する実験を行う。JIS B8923:産業用キャスタに準じて、半径2.5 mmで半円形の微小突起がある床面を、押し出し装置を用いて1100 mm/sで走行させる際の加速度を計測する。各キャスターの上下に配置した加速度センサからの鉛直方向加速度8種類と、車台中央部のIMUより得られるX軸方向/Y軸方向/Z軸方向の加速度3種類およびX軸回り(ロール)/Y軸回り(ピッチ)/Z軸回り(ヨー)の角速度3種類の多種信号を同期計測し、車台姿勢を評価し制御手法構築に向けての基礎特性を得る。

4. 研究成果

(1) 台車制御システム

図1に能動制御キャスターを4輪装着し多種信号を同期計測できるシステムを示す。400×600 mmの車台の四隅に能動制御キャスターを配置し、多種信号を同期計測し制御出力を演算するコントローラから構成される。走行路面には微小突起を設けている。図2に台車の詳細を示す。進行方向をX軸に取り、鉛直方向をZ軸に取る。前輪右側をFR、前輪左側をFL、後輪右側をRR、後輪左側をRLとする。

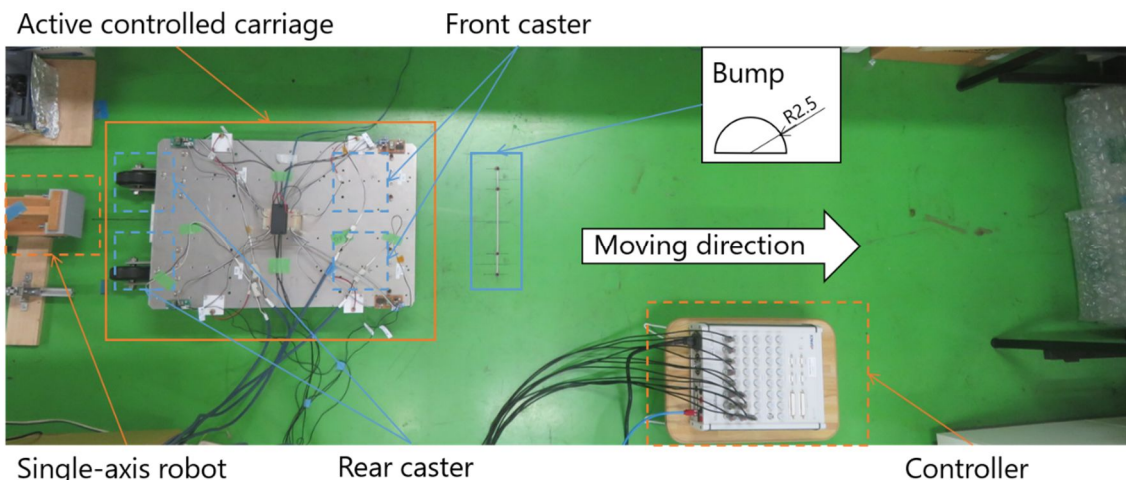


Fig.1 Experimental equipment

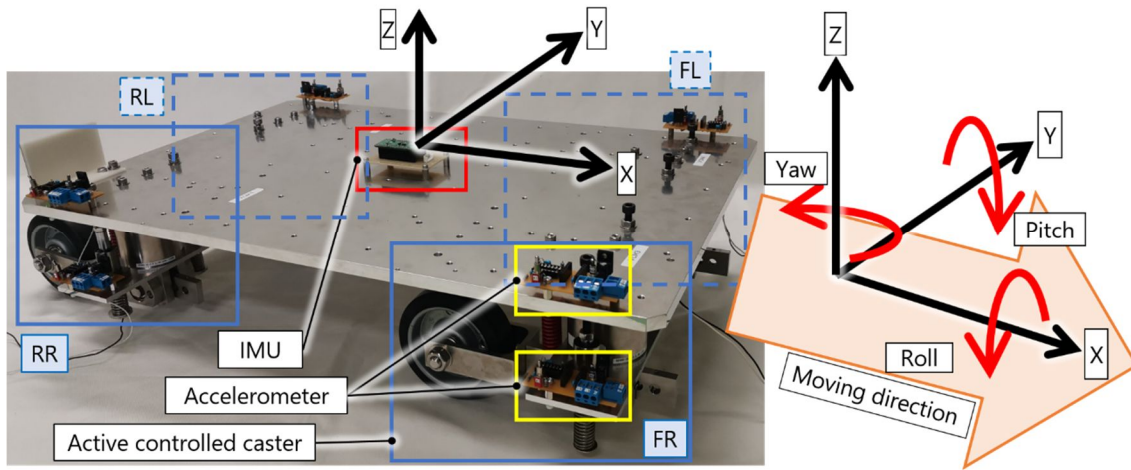


Fig.2 Configuration of active controlled carriage

(2) 台車の運動特性

押し出し装置を用いて 1100 mm/s で走行した際のロール/ピッチ/ヨー角速度の計測結果を図 3 に示す . ロール角速度より , 前輪および後輪が突起乗り越える際正方向の最大振幅 0.06 rad/s , 負方向の最大振幅 -0.05 rad/s の角速度が発生する . 原因としてばねや車輪偏心の製造時の個体差や機械部品の質量個体差および台車の進行方向が突起に対して直角でない可能性が推察できる . ピッチ角速度は台車押し出しの際 , 正方向の最大振幅 0.06 rad/s , 負方向の最大振幅 -0.09 rad/s の角速度が発生する . 前輪が突起を乗り越える際 , 押し出しの際のピッチ角速度により前輪が突起を乗り越える際のピッチ角速度が小さくなると考えられる . ヨー角速度は ± 0.02 rad/s の範囲で発生している .

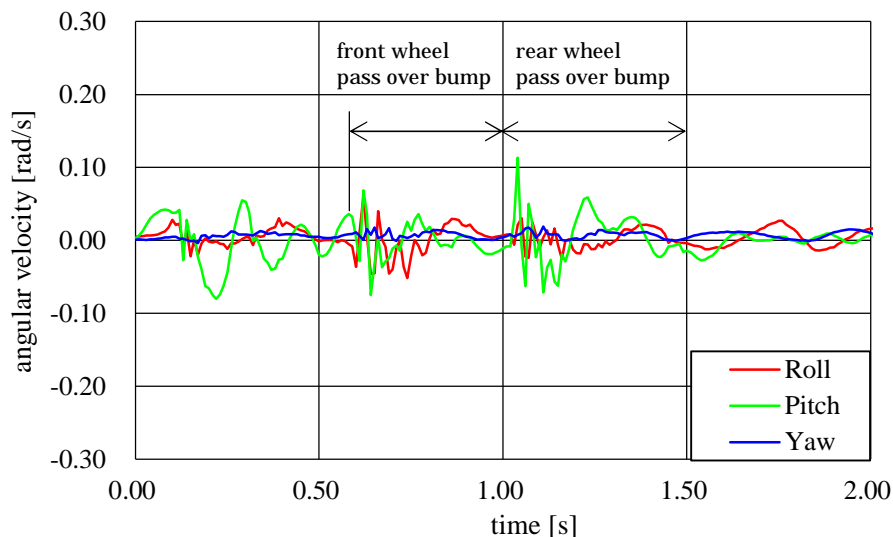
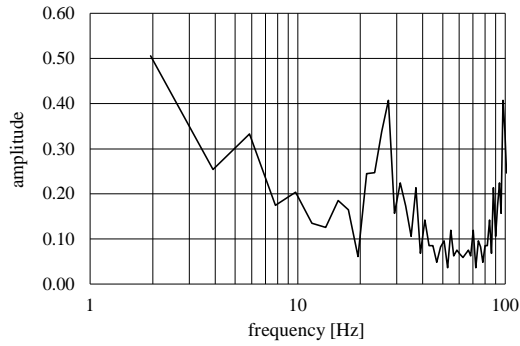


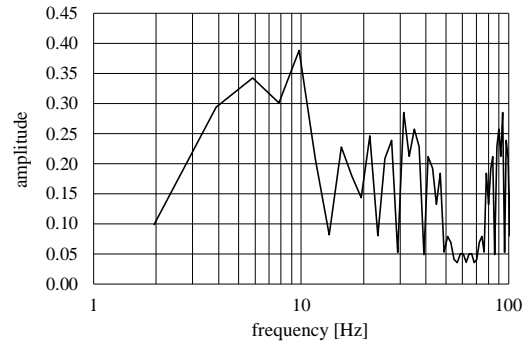
Fig.3 Time-sequence diagram of angular velocity in the roll, pitch, yaw

図 3 の 0.6 - 1.0 s 前輪突起乗り越え 部分におけるロール角速度の FFT 解析結果を図 4(a) , ピッチ角速度の FFT 解析結果を図 4(b) に示す . 図 4(a) より , ロール角速度の 1 次のピークは 2 Hz , 2 次のピークは 6 Hz , 3 次のピークは 27 Hz である . 図 4(b) より , ピッチ角速度の 1 次のピークは 10 Hz , 2 次のピークは 31 Hz である . 図 3 のロール角速度より , 0.6 から 0.8 s の 0.2 s 間で約 4.5 周期の振動であり , 突起乗り越え時に約 22.5 Hz の振動が発生していることが読み取れる . したがって 3 次のピーク 27 Hz は突起乗り越えによる台車振動であると推察できる .

図 3 の 1.0 - 1.5 s 後輪突起乗り越え 部分におけるロール角速度の FFT 解析結果を図 5(a) , ピッチ角速度の FFT 解析結果を図 5(b) に示す . 図 5(a) より , ロール角速度の 1 次のピークは 8 Hz , 2 次のピークは 25 Hz , 3 次のピークは 52 Hz である . 図 5(b) より , ピッチ角速度の 1 次のピークは 8 Hz , 2 次のピークは 15 Hz , 3 次のピークは 29 Hz である . 図 3 のロール角速度より 1.02 から 1.10 s の 0.08 s 間で約 2 周期の振動であり , 突起乗り越え時に約 25 Hz の振動が発生していることが読み取れる . したがって 2 次のピーク 25 Hz は , 突起乗り越えによる振動の可能性が考えられる . 3 次のピーク 52 Hz は比較的高い周波数であるため , IMU を設置している基板の固有振動数やキャスター機構部に由来している可能性が考えられる .

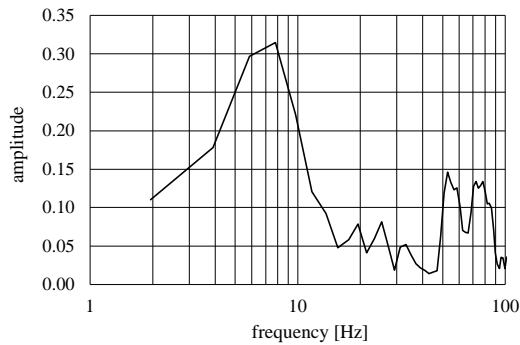


(a) FFT of roll angular velocity

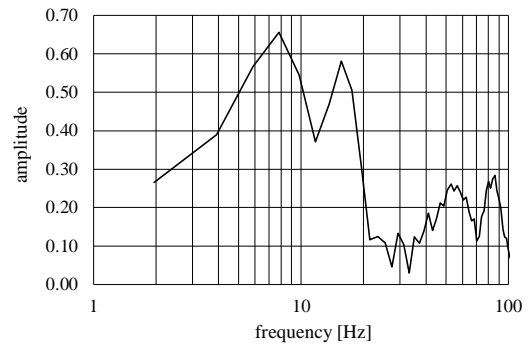


(b) FFT of pitch angular velocity

Fig.4 FFT of angular velocity of with bumps experiment
when the front wheels pass over bump



(a) FFT of roll angular velocity



(b) FFT of pitch angular velocity

Fig.5 FFT of angular velocity of with bumps experiment
when the rear wheels pass over bump

押し出し装置を用いて 1100 mm/s で走行した際の加速度応答を確認する．図 6 に各キャストのコイル側の加速度センサの結果を示す．台車が動き始めてから約 0.6 s 後に前輪が突起を乗り越え、約 1.0 s 後に後輪が突起を乗り越える．4 輪の加速度は約 0.6 から 1.0 s は前輪が突起を乗り越えたため振動し、約 1.0 から 1.4 s は後輪が突起を乗り越えたため振動する．後輪が突起を乗り越えた際に着目すると、正負両方向において第 1 ピークより第 2 の方が加速度の振幅が大きくなっていることが分かる．

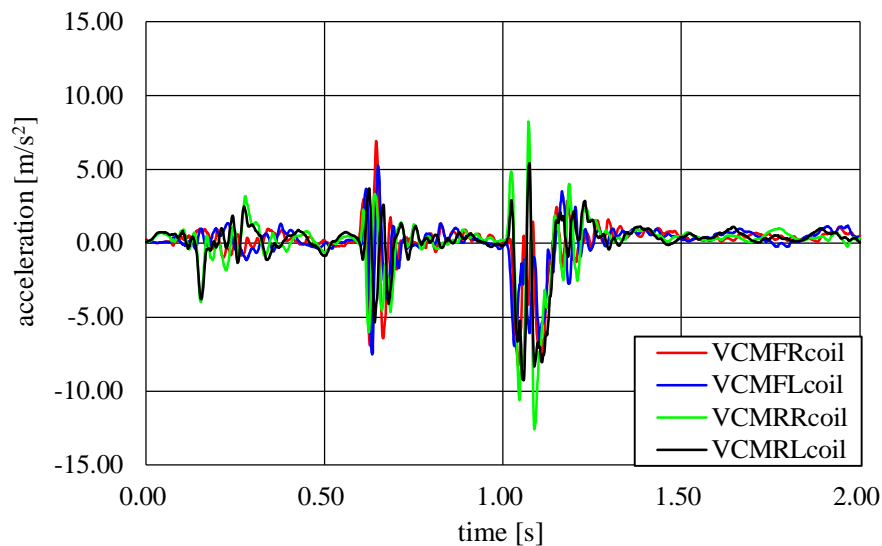


Fig.6 Comparison of the acceleration on the coil side of each caster

図 7 に各キャストのステーター側の加速度センサの結果を示す．VCM_{RR} よりも VCM_{FR} の方が先に加速度が発生し、VCM_{RL} よりも VCM_{FL} の方が先に加速度が発生する．前輪が突起乗り越え時、後輪よりも前輪の方が先に加速度が生じることが分かる．VCM_{FR} と VCM_{FL} は加速度が発生し始める時間は同じだが逆方向の加速度が発生している．VCM_{FR} は負の方向に加速度が発生している．揺動

アームの衝撃中心と車軸の関係から、車輪が突起を乗り越える際、加速度が負の方向に発生すると考えられる。そのため、 VCM_{FL} よりも VCM_{FR} の方が先に突起を乗り越えていると考えられる。

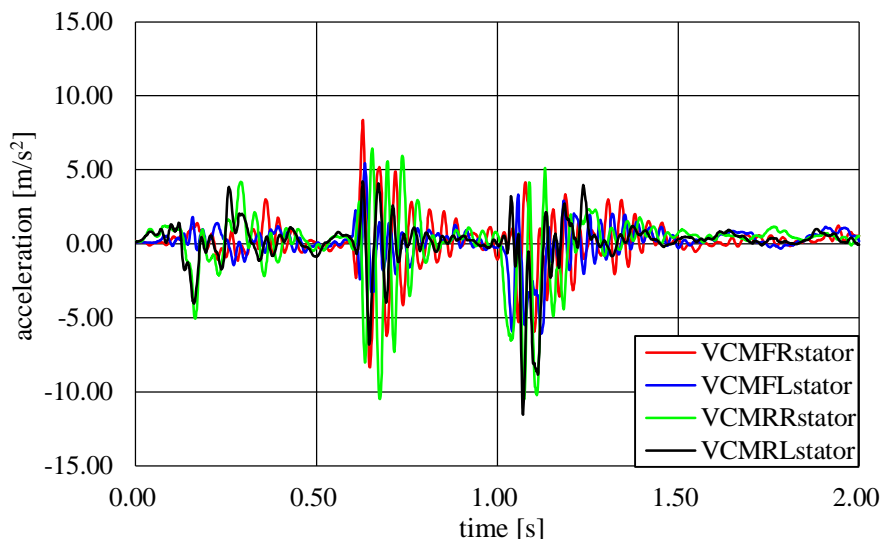


Fig.7 Comparison of the acceleration on the stator side of each caster

図8に VCM_{FR} のコイル側とステーター側の加速度センサの結果を示す。全体的にVCMより台車側（コイル側）に比べVCMより車輪側（ステーター側）の加速度の方が大きく収束が遅いことが分かる。キャスト1台につき3個のばねが搭載されているため、車台すなわちコイル側の加速度センサに伝わる衝撃力が軽減されていると考えられる。

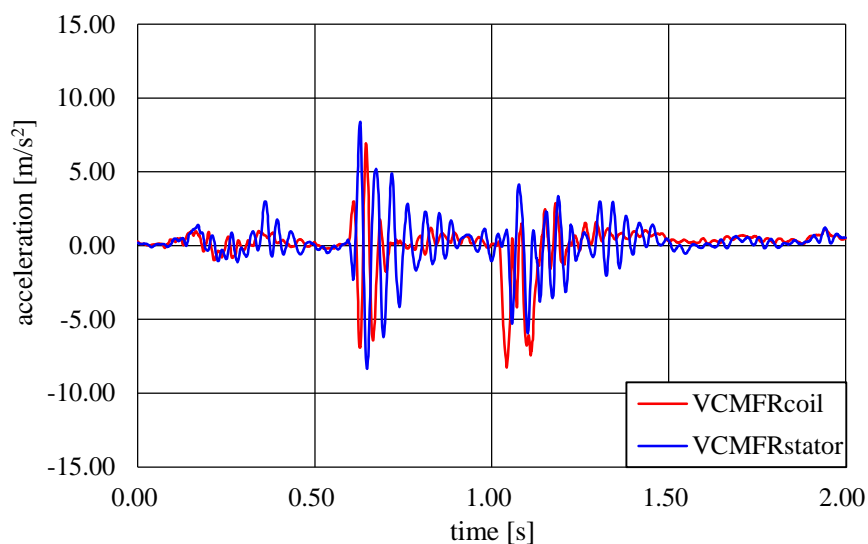


Fig.8 Relationship of acceleration between VCM_{FRcoil} and $VCM_{FRstator}$

以上より、多種信号を同期計測し、車台姿勢を評価し制御手法構築に向けての基礎特性が得られた。これらは、能動制御キャストを複数同時制御する振動制御手法を体系的に明らかにするための設計指針となる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 TAGAMI Masaharu, TAGAWA Yasutaka, IOI Kiyoshi, SUDA Atsushi	4. 巻 88
2. 論文標題 Control system design of an inertia force generator applying a vibration control system of loading platform of a push cart	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Transactions of the JSME (in Japanese)	6. 最初と最後の頁 22-00032
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/transjsme.22-00032	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3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 石井陽貴, 須田敦
2. 発表標題 能動制御カスターの開発 -新制御システムの提案-
3. 学会等名 日本機械学会関西支部第99期定時総会講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 山田弘貴, 須田敦
2. 発表標題 能動制御カスターによる振動制御台車の性能評価
3. 学会等名 日本設計工学会関西支部2022年度研究発表講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ogawa Nanako, Suda Atsushi, Iida Kenichi, Tagami Masaharu, Ioi Kiyoshi
2. 発表標題 Development of Active Controlled Caster (Experimental Evaluation of Chassis Motion by Passing Over Bumps)
3. 学会等名 Proceedings of the 10th IIAE International Conference on Industrial Application Engineering 2022 (国際学会)
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
---------	---------