

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：82626

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2019～2021

課題番号：19K24374

研究課題名（和文）牽引力錯覚を利用したハプティックインタフェースの人間工学研究

研究課題名（英文）An ergonomics study of a haptic interface using a pulling illusion

研究代表者

田辺 健（Tanabe, Takeshi）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・研究員

研究者番号：60847557

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：研究の目的は、モバイル環境下で利用できる視聴覚に続く新たな感覚情報提示技術を実現するために、牽引力錯覚を利用したハプティックインタフェースの設計論を明らかにすることである。ヒトは非対称振動を提示されたとき、振動を一方向に牽引力として錯覚することが知られている。本研究では、厳密に非対称振動刺激を制御できる装置を開発し、錯覚の特性を人間工学実験を通して明らかにした。また、人間工学実験を通して得られた知見に加えて、これまでに報告されてきた本錯覚の知見を網羅的に調査することで、ハプティックインタフェースの設計論を体系的に明らかにした。最後に、得られた知見をもとに本錯覚を体験できるモジュールを開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題において、振動刺激によって力の感覚を提示できるインタフェースの実現方法を体系的に明らかにした点が最大の成果である。牽引力錯覚を利用したハプティックインタフェースはハードウェア構成がシンプルであるため、モバイル・ウェアラブル機器に内蔵することができる。そのため、VRシステムにおける力覚フィードバックや経路誘導、動作教示に応用することができ、本研究の成果は、VRやヒューマンインタフェース分野への波及効果が期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, the design requirements of the haptics interface using the pulling illusion were clarified to achieve novel displays for mobile and wearable devices. When strong and weak stimuli are applied sequentially, the user perceives the former; however, they do not clearly perceive the latter. Therefore, the pulling illusion is induced using vibrations with asymmetric acceleration. However, the effect of the illusion has not been evaluated for scenarios where the acceleration profiles of asymmetric vibrations are marginally changed. Therefore, a vibrator that can provide flexible control for the asymmetric vibrations was developed. Using this vibrator, the characteristics of the illusion were clarified by ergonomics experiments. In addition to the findings obtained through ergonomics experiments, an academic survey determined the design requirements for the haptic interface. Finally, based on the obtained design requirements, modules to experience the illusion were developed.

研究分野：ヒューマンインタフェース

キーワード：牽引力錯覚 ハプティクス ヒューマンインタフェース

## 1. 研究開始当初の背景

モバイル・ウェアラブル機器が普及する現代において、視聴覚に続く感覚情報提示手法として触力覚(ハプティクス)への情報提示が注目されている。特にシンプルなハードウェア構成で高品質な触力覚情報を提示できることから錯覚現象を用いた手法が積極的に提案されており、その1つとして牽引力錯覚を用いた手法がある。ヒトは強い刺激には敏感に反応するが弱い刺激は反応しづらい傾向を持つ。よって強い加速度と弱い加速度が交互に繰り返される非対称な振動を指先に提示されたとき、弱い加速度を不鮮明に知覚することで非対称振動を一方向に牽引されるような力として錯覚(牽引力錯覚)する[1]。小型のボイスコイル型振動子(以下、振動子)に非対称な電流/電圧信号を入力することにより非対称振動を生成し、振動子を把持させることで牽引力錯覚を誘発することができる[2, 3]。小型の装置による振動刺激だけで空中で連続的な力を提示できることから、視覚障害者向けの歩行経路誘導[4]やVRシステムにおける力覚フィードバック[5]、身体動作の教示[6]が挙げられ、モバイル環境下で利用できる情報提示技術として期待されている。

しかし、従来の牽引力錯覚を利用したハプティックインタフェースの設計論はデバイス依存が大きいという課題がある。従来の設計論では振動子の特性をブラックボックスとして扱い、錯覚が顕著に生起する入力信号(電流/電圧信号)を固有の振動子ごとに実験的・経験的に選択するものであった[2, 3]。そのため、先行研究で得られた知見は固有の振動子の特性に依存した。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、モバイル環境下で利用できる視聴覚に続く新たな感覚情報提示技術を実現するために、牽引力錯覚を利用したハプティックインタフェースの設計論を明らかにすることである。

## 3. 研究の方法

牽引力錯覚をハプティックインタフェースとして利用するためには、錯覚が誘発される非対称振動刺激のパラメータを明らかにする必要がある。そのためには、非対称振動刺激を厳密に制御できる刺激装置が必要である。そこで、牽引力錯覚を評価するためのボイスコイル型振動子と非対称振動刺激の制御手法を考案した(研究1)。開発した装置を使用して非対称振動刺激のパラメータと錯覚の関係を明らかにした(研究2)。具体的な非対称振動のパラメータに基づいた評価を実施するために、式(1)の非対称振動波形の基本モデルを考案した。

$$\ddot{x}_{ref} = A_1 \sin(\omega t) + A_2 \sin(2\omega t + \varphi_0) \quad (1)$$

本モデルは基本波と二次高調波で構成されており、式(1)におけるは周波数成分間の位相差 $\varphi_0$ を表し、 $A_1$ と $A_2$ は各成分の加速度の振幅を表す。 $\omega$ は角周波数であり、周波数 $f$ との関係は、 $\omega = 2\pi f$ となる。本研究課題では、これらの各パラメータを変化させた際の錯覚の特性を明らかにした。また、これまで報告されてきた牽引力錯覚の知見を網羅的に調査し、ハプティックインタフェースの設計指針を明らかにした(研究3)。最後に、得られた知見をもとに牽引力錯覚を体験できるモジュールを開発した(研究4)。

## 4. 研究成果

## (1) 研究1 | 非対称振動刺激装置の開発

非対称振動刺激を厳密に制御できるボイスコイル型の振動子を開発した(図1)。本装置は一般的なボイスコイル型振動子と同様にボイスコイルモータ(Moticont Inc., GVCN-019-022-02)とバネ(SAMINI Co., Ltd., 12-0325)で構成されている。装置の共振特性が生成する刺激に与える影響を小さくするために、実験で使用する刺激の周波数帯域でフラットな周波数応答になるように設計した。また、牽引力錯覚は装置をつまむように把持することで生起する。この時、個人ごとに異なる指の機械的な特性の影響は少なからず受ける。参加者間で刺激を統制するために、把持した指と装置を含めた伝達関数 $G_h(j\omega)$ を同定して、非対称振動の制御信号(電流信号)を生成する手法を考案した。具体的な手法は次の通りである。本研究で使用した非対称振動刺激の基本モデルは、基本波と二次高調波はで構成されている。そのため、各周波数成分ごとに装置への入力(電流)と出力(振動の加速度)の利得と位相を明らかにすることができれば、それらを用いて式(1)を補正して、式(2)の電流信号 $i_{ref}$ を生成することができる。

$$i_{ref} = \frac{A_1}{|G_h(j\omega)|} \sin(\omega t - \angle G_h(j\omega)) + \frac{A_2}{|G_h(j2\omega)|} \sin(2\omega t + \varphi_0 - \angle G_h(j2\omega)) \quad (2)$$

開発した装置を使用して、目標とする非対称振動刺激を生成できることを検証した。具体的な評価方法として、参加者(N=3)に本装置を把持させ、制御あり/なしの条件で実際に生成された非対称振動刺激の位相差 $\varphi_0$ が比較された。その結果、制御あり条件の方が位相差の誤差が小さくなることが確認された(図2)。

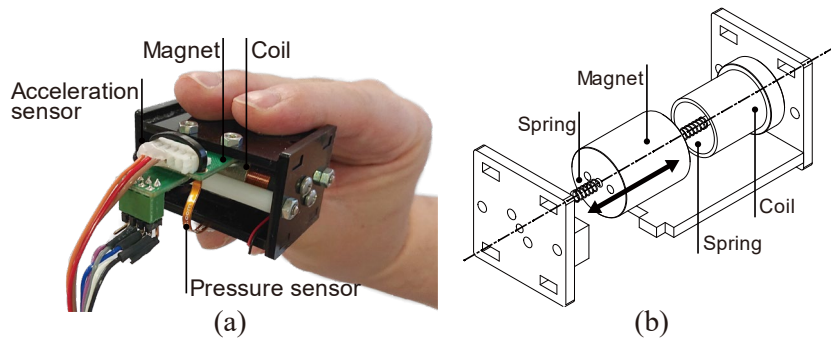


図 1 開発した非対称振動刺激装置 (a) 外観 (b) 構成図

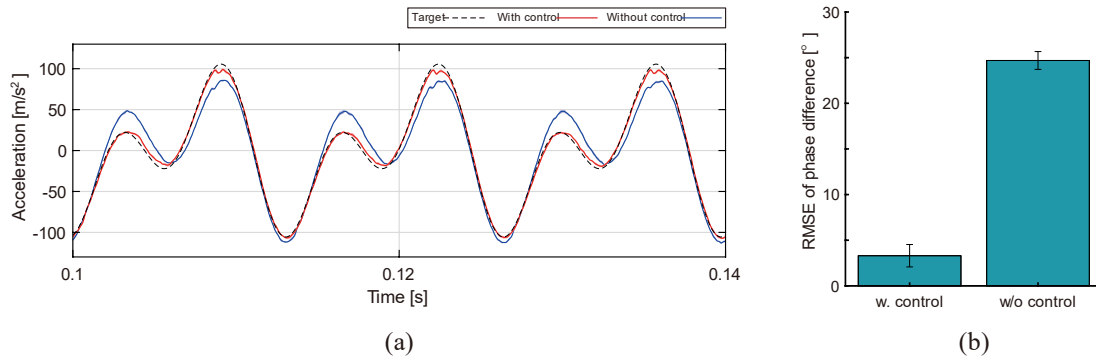


図 2 生成した非対称振動刺激 (a) 時系列データ (b) 位相差の誤差

## (2) 研究 2 | 非対称振動刺激のパラメータの同定

### ① 波形の非対称性と錯覚の関係

式(1)の基本モデルのなかで特に重要なパラメータは、周波数成分間の位相差 $\phi_0$ である。位相差が変化することで、のこぎり波に近い時間方向に非対称な波形から振幅が正負で異なる振幅方向に非対称な波形に変化する。従来の研究では、振動波形をどのように非対称にすることが錯覚に有効なのかは示すことはできていなかった。そこで、本研究では、基本モデルの位相差を変化させる方法を用いて、波形の非対称性を操作し、そのときの錯覚の影響を明らかにした。具体的には、位相差を $-180^\circ \sim 0^\circ$ の範囲で $15^\circ$ 刻みで変化させ、その時に参加者(N=10)が特定の方向の牽引力を錯覚する確率を強制二択課題によって求めた。

位相差が $0^\circ$ に近くなるにつれて、右方向の牽引力を錯覚する確率が高く、 $-180^\circ$ に近くなるにつれて、左方向の牽引力を錯覚する確率が高くなることが確認された(図 3)。本実験では、牽引力の方向を強制二択で参加者に回答させているため、チャンスレベルは 50%となる。チャンスレベルは特定の方向の牽引力を錯覚しなかった点となる。そこで、確率の曲線を心理測定関数でフィッティングし、錯覚が生じなかった点を求めた。その結果、位相差が $\sim 90^\circ$ で錯覚が生じなかったことが明らかになった。錯覚が生じなかった $0^\circ$ と $-180^\circ$ は時間方向に対して非対称な波形であり、錯覚が生じた $-90^\circ$ は振幅方向に非対称な波形である。そのため、牽引力錯覚を誘発するには、時間方向に非対称な波形が有効であることが示された。時間方向に非対称な波形では、振動加速度の立上りと立下りにおいて、単位時間あ

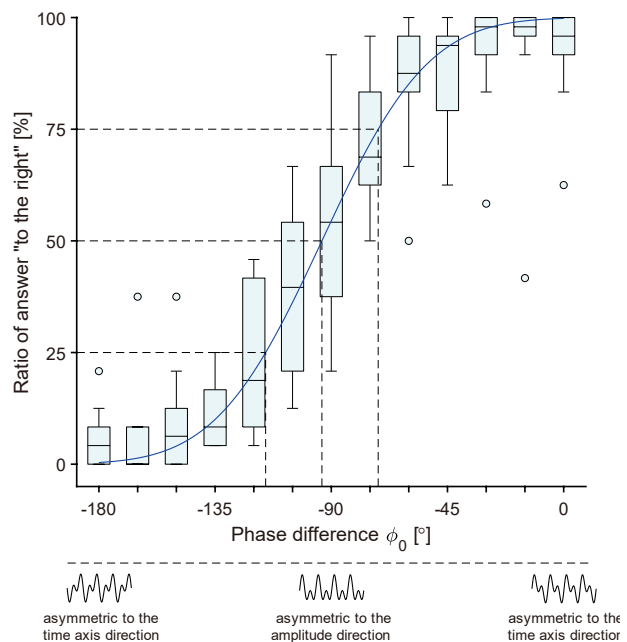


図 3 周波数成分間の位相差と錯覚の関係

たりの加速度の変化率が正負で異なっている。そのため、波形の非対称性の設計指針としては、加速度の立上り・立下りにおいて、変化率が非対称であることが示された。

## ②周波数の効果

次に、非対称振動刺激の基本波の周波数と錯覚の関係を明らかにした。ここでは、基本波の周波数を 40, 75, 110 Hz に変化させ、その時の錯覚が生起する閾値が恒常法によって計測された (N=16)。その結果、周波数が低下するにつれて、錯覚が生起する閾値が低下することが確認された (図 4)。一方で、装置の制約上、40 Hz より低い非対称振動刺激を生成できなかったため、錯覚の閾値が最も低くなる周波数を明らかにすることはできなかった。そのため、最適な周波数を明らかにすることは、今後の課題である。

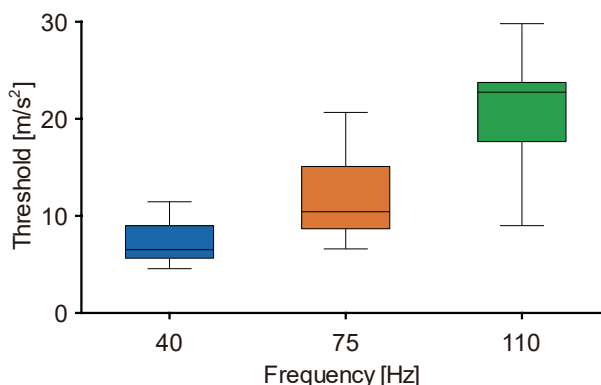


図 4 基本波の周波数と錯覚が生起する閾値の関係

## (3) 研究 3 | 学術調査に基づく設計論の体系化

研究代表者が行った研究のみならず、これまでに報告されてきた牽引力錯覚の知見を網羅的に調査することで、本錯覚をハプティックインタフェースとして利用するための設計論の体系化を試みた。まず、錯覚が生起する条件として、非対称振動の刺激方法及び刺激のパラメータを明らかにした。刺激方法では、刺激装置の接触方法・接触部位の形状・刺激する振動の方向が重要であることが明らかになった。刺激のパラメータに関しては、研究 2 で明らかにした条件が重要であることが示唆された。次に、錯覚される牽引力の大きさと方向を制御するための手法を整理した。また、開発したハプティックインタフェースにおいて、所望する錯覚が生起できていることを評価するための手法を調査した結果、これまで本錯覚を扱った研究では心理物理学的計測手法の恒常法が多く用いられていることが明らかになった。最後に、牽引力錯覚を利用したハプティックインタフェースの具体的な応用例を調査した結果、経路誘導・VR システム向けの力覚フィードバック・上肢の動作支援に主に利用されていることが明らかになった。以上の学術調査の内容を日本バーチャルリアリティ学会論文誌に総説論文として報告したため[7]、詳細については当該文献を参照されたい。

## (4) 研究 4 | 錯覚体験モジュールの開発

研究 2 において、非対称振動刺激のパラメータを明らかにし、研究 3 において、その他の錯覚が生起する条件に基づいた設計論を明らかにしたため、これらの知見に基づいて牽引力錯覚を体験できるモジュールが開発された (図 5)。錯覚体験モジュールはスタンドアロン型と無線型の 2 種類が開発された。スタンドアロン型は、簡易的な牽引力錯覚の体験会を想定して開発された。本モジュールでは、体験者がコントローラに取り付けたスイッチを押すことで任意の方法の錯覚を体験することができる。無線型は、ヘッドマウントディスプレイのコントローラやモバイル機器に内蔵することを想定して開発された。本モジュールは振動子とバッテリーと Bluetooth オーディオ回路で構成されている。オーディオ信号に変換された制御信号を PC や携帯端末から出力することで任意の非対称振動を生成することができる。今後はこれらのモジュールを用いて、牽引力錯覚を利用したハプティックインタフェースの展開を目指していく。

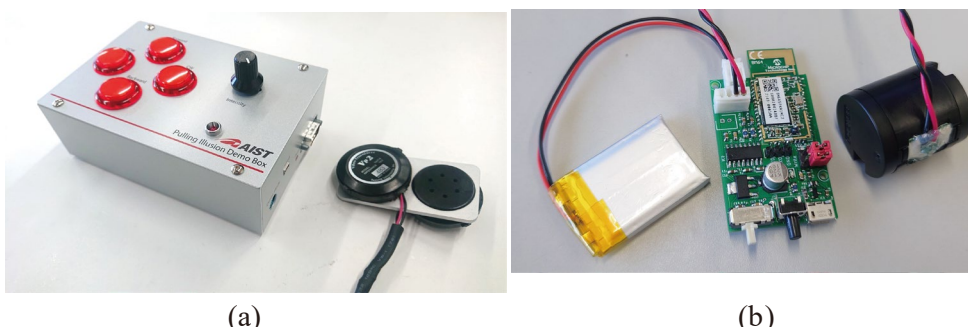


図 5 開発した錯覚体験モジュール (a) スタンドアロン型 (b) 無線型

(5) 研究成果のまとめ

本研究課題では、錯覚を評価するための装置開発(研究 1)から人間工学実験による錯覚の特性の評価(研究 2)、学術調査によるハプティックインタフェースの設計論の体系化(研究 3)とその知見に基づいたモジュール開発(研究 4)までを一貫して行った。以上の研究を通して、当初の目的通り、牽引力錯覚を利用したハプティックインタフェースの設計論を明らかにすることができた。特に、振動刺激によって力を提示できるインタフェースの実現方法を体系的に示した点は感覚情報提示技術が求められる VR やヒューマンインタフェース分野に貢献したといえる。成果の一部は、当該分野で権威ある国際誌の IEEE/ASME Transactions on Mechatronics 誌や Sensors 誌に掲載された。また、研究 3 の学術調査の内容を総説論文として日本バーチャルリアリティ学会論文誌に発表した。以上の通り、一定の成果を挙げる事ができた。

<引用文献>

- [1] T.Amemiya et al., “Lead-Me Interface for a Pulling Sensation from Hand-held Devices,” *ACM Trans. Appl. Perception*, vol.5, no.3, pp.15:1-15:17, 2008.
- [2] J.Rekimoto, “Traxion: a tactile interaction device with virtual force sensation,” In: *Proc. of the 26th Annu. ACM Symp. on User Interface Softw. and Technol.*, pp.427- 431, 2013.
- [3] T.Amemiya et al., “Distinct pseudo-attraction force sensation by a thumb-sized vibrator that oscillates asymmetrically,” *Haptics: Neuroscience, Devices, Modeling, and Appl.*, pp.88-95, 2014.
- [4] T.Amemiya et al., “Orienting Kinesthetically: A Haptic Handheld Wayfinder for People with Visual Impairments,” *ACM Trans. Accessible Comput.*, vol.3, no.2, pp.6:1-6:23, 2010.
- [5] I.Choi et al., “Gravity: A Wearable Haptic Interface for Simulating Weight and Grasping in Virtual Reality,” In: *Proc. of the 30th Annu. Symp. User Interface Softw. Technol.*, pp.119-130, 2017.
- [6] T.Tanabe et al., “Motion Guidance using Translational Force and Torque Feedback by Induced Pulling Illusion,” *Haptics: Science, Technology, Applications, LNCS*, vol.12272, pp.471-479, 2020.
- [7] 田辺ら, “非対称振動刺激による牽引力錯覚の研究動向,” 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.25, no.4, pp.291-301, 2022.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Tanabe Takeshi, Yano Hiroaki, Endo Hiroshi, Ino Shuichi, Iwata Hiroo	4. 巻 12272
2. 論文標題 Motion Guidance Using Translational Force and Torque Feedback by Induced Pulling Illusion	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Haptics: Science, Technology, Applications	6. 最初と最後の頁 471 ~ 479
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-58147-3_52	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 Tanabe Takeshi, Endo Hiroshi, Ino Shuichi	4. 巻 20
2. 論文標題 Effects of Asymmetric Vibration Frequency on Pulling Illusions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 7086 ~ 7086
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s20247086	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 田辺 健、雨宮 智浩、遠藤 博史、井野 秀一	4. 巻 25
2. 論文標題 非対称振動刺激による牽引力錯覚の研究動向	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本バーチャルリアリティ学会論文誌	6. 最初と最後の頁 291 ~ 301
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18974/tvrsj.25.4_291	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 Tanabe Takeshi, Yano Hiroaki, Endo Hiroshi, Ino Shuichi, Iwata Hiroo	4. 巻 26
2. 論文標題 Pulling Illusion Based on the Phase Difference of the Frequency Components of Asymmetric Vibrations	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE/ASME Transactions on Mechatronics	6. 最初と最後の頁 203 ~ 213
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMECH.2020.3009384	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7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 田辺 健、近井 学、遠藤 博史、井野 秀一
2. 発表標題 到達運動における牽引力錯覚の基礎的検討
3. 学会等名 第24回日本バーチャルリアリティ学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takeshi Tanabe, Hiroaki Yano, Hiroshi Endo, Shuichi Ino, and Hiroo Iwata
2. 発表標題 Motion Guidance using Translational Force and Torque Feedback by Induced Pulling Illusion
3. 学会等名 Euro Haptics 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田辺 健、遠藤 博史、井野 秀一
2. 発表標題 非対称振動の周波数の違いによる牽引力錯覚が生起する閾値への影響
3. 学会等名 第20回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田辺 健、矢野 博明、遠藤 博史、井野 秀一、岩田 洋夫
2. 発表標題 非対称振動の周波数成分間の位相差に基づく牽引力錯覚の特性
3. 学会等名 第24回日本バーチャルリアリティ学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田辺 健, 遠藤 博史, 井野 秀一
2. 発表標題 非対称振動の周波数の違いによる牽引力錯覚への影響
3. 学会等名 ヒューマンインタフェースシンポジウム2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田辺 健, 遠藤 博史, 井野 秀一
2. 発表標題 牽引力錯覚を利用した上肢リハビリテーションの実現に向けた基礎的検討
3. 学会等名 第19回日本VR医学会学術大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takeshi Tanabe, Hiroaki Yano, Hiroshi Endo, Shuichi Ino, and Hiroo Iwata
2. 発表標題 Pulling Illusion Based on the Phase Difference of the Frequency Components of Asymmetric Vibrations,
3. 学会等名 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021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
---------	---------