

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：34504

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H04566

研究課題名（和文）筋シナジーと随意運動・姿勢制御運動の相互依存性に基づく起立支援法

研究課題名（英文）Standing assistance considering interdependence of muscle synergy, voluntary and body postural control movements

研究代表者

中後 大輔（Chugo, Daisuke）

関西学院大学・工学部・教授

研究者番号：90401322

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、起立動作運動を随意運動と姿勢制御運動の重ねあわせとして捉え、その相互依存性を身体動力学的に明らかにすると共に、これら両動作に対応する筋肉の協同発揮現象を明らかにした。起立動作を成す随意運動とそのブレを補償する姿勢制御運動の組み合わせ方は、姿勢の安定範囲と残存筋力による動作の実行可能範囲により定義される安定余裕モデルによって表現できるようになった。さらに、このモデルを用いて筋シナジーの欠損を補う介入方策を導くことが可能とした。これにより、起立動作中の高齢者の随意運動を行おうとする自発的意思に寄り添った起立支援方策を実現し、試作支援ロボットにて有効性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、以下の通りである。起立動作を随意運動と姿勢制御運動に分解し、これらと筋シナジーとを関連付けることで、両運動の関連性を明らかにした。姿勢制御運動に安定余裕モデルという考えを初めて導入することで、随意運動だけでなく、そのブレ幅修正に必要な身体能力も定量的に表現した。

また、本研究の社会的意義は、以下の通りである。患者が起立時に必要とする支援力を定量的に明らかにした。その支援力を、人間と自由度や出力パワーの異なる起立支援機器にて与える方法を実現し、以て高齢者の自発的な起立動作に寄り添いながらの支援を実現した。

研究成果の概要（英文）：This study considered standing movements as a superposition of voluntary and posture control movements, identified their interdependence in terms of body dynamics, and clarified the phenomenon of cooperative exertion of the muscles corresponding to these two movements. The combination of voluntary movements consisting of standing movements and posture control movements to compensate for the fluctuation of the voluntary movements can be expressed by a stability margin model defined by the stability range of posture and the feasible range of movement by the remaining muscle strength. Furthermore, this model can be used to lead to intervention strategies that compensate for the deficit in muscle synergy. This enabled standing assistance procedures to be implemented that were in line with the voluntary exercise of the elderly during standing movements, and their effectiveness was confirmed with a prototype standing assistance robot.

研究分野：ロボット工学

キーワード：起立支援 随意運動 姿勢調整運動 筋シナジー

## 1. 研究開始当初の背景

人間の生活動作の根幹である起立動作は、健常者がはずみを付けた立ち上がり方（動的起立と称する）と、筋力の低下した高齢者が腕で支えたり後傾で立ち上がろうとして常に重心を安定に保とうとする立ち上がり方（静的起立と称する）に大別される。本研究で対象とする起立支援を要する患者は、この静的起立もままならない。一方、起立動作の運動は、動作開始時にははずみを付ける随意運動（開始後の半自動運動も含める）と、起立中の姿勢のブレを補償する無意識下の姿勢制御運動に分解できるとされる。

健常者が成す動的起立では、筋力やバランス感覚が優れており、大きなブレを姿勢制御運動で補償できるため、ブレが時として大きく生じたとしても、動的な随意運動でははずみをつけた方が起立運動全体として所要時間と消費エネルギーが小さくて済む。静的起立はこの逆で、わずかな姿勢制御運動で済むような静的な随意運動に起立動作の多くを頼らざるを得ない。

これらの運動は、当然ながら、筋シナジー（複数の筋肉がそれぞれ適したタイミングで協同して発揮すること）の発現であるが、一方でこれらの運動には、神経系や心理系の影響も内在するため、現象として区別することは難しい。そのため、随意運動は、重心、腰角度、足首関節・膝関節角度などの3次元空間内で観測できる姿勢状態で表現することが多い。一方、姿勢制御運動は随意運動と相互依存して発揮されるが、ブレの種類とそれに対応して発現する動作の組合せ数が膨大なため、起立中（起立後の立位姿勢ではなく）の姿勢制御運動の定量的表現法はこれまで明確にされていない。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、姿勢制御運動を身体力学の観点・筋シナジーの観点から定量的に表現するため、次の点を明らかにすることである。

- 課題1：随意運動の姿勢モデルと姿勢制御運動の安定余裕モデルは、相互依存すると考えられる。そこで、健常者、高齢者および患者に関して、その相互依存性を筋シナジーの観点から明らかにする。さらに、患者にある筋シナジーの部分的欠損がこれら相互依存性にどのような影響を与えるかを明らかにする。
- 課題2：課題1の結果を考察して、患者の静的起立または動的起立を可能とするには、どのような外力を与えたらよいかを明らかにする。
- 課題3：この外力を起立支援装置を用いて実現化を図るとき、人間とは自由度と出力パワーが異なる機械装置の設計論にどのように活かせばよいかを明らかにする。

## 3. 研究の方法

本研究の目的を実現するために、本研究の方法は以下の通りである。

### (1) 筋シナジー起立人間モデル論の構築（課題1に対応）

健常者に動的起立を、高齢者に静的起立を行ってもらい、姿勢変化、椅子・補助棒に頼るときの力の向きと大きさを測定する。同時に起立動作時の各筋電波形も計測する。測定データを基に、身体力学の観点から起立動作運動を随意運動と姿勢制御運動に分解する。これにより、随意運動を行う時に必要な姿勢制御運動の集合を得ることができるため、身体能力から実行可能な姿勢制御運動の集合（安定余裕空間）を得て、個々人の起立動作を表現する起立人間モデルを開発する。

次に筋電データを用いたシナジー解析を実施する。まず、ある動作に対して筋肉が協同発揮する現象を表す筋シナジーを抽出する。これと、実際に被験者に表れた姿勢制御運動と随意運動を時系列で比較して、各運動に対応する筋シナジーの組合せを抽出し、先に開発した起立人間モデルと組み合わせる。

### (2) 筋シナジーに基づく支援方策の確立（課題2に対応）

静的・動的な起立姿勢から筋シナジー欠損状態の推定を行うため、(1)で確立した起立人間モデルを用いる。ここに、ある一部欠損のある筋シナジー（筋シナジー起立人間モデルの入力）であっても起立姿勢（同、出力）がほぼ同じ場合がある。これは、残存する筋力が相互補完しての筋シナジー効果を示すためである。このため、下肢筋骨格の幾何学的性質を考慮して起立動作に使用される患者の筋力を推定する手法を開発する。さらに推定される筋力を起立人間モデルの入力として与え、このときの起立動作を見ることで、起立動作を達成できる支援力を見出す。

### (3) 起立支援装置の設計論（課題3に対応）

実際の支援機器はアクチュエータ機構の自由度や出力パワーは限定される。このため、本研究では主に静的起立支援を対象とする。装置による支援方策の実現化は、(2)の支援方策に何らかの近似を行わなければならない、この近似の指針として、患者の静的起立時の随意運動軌道に近いこと、機器の出力パワー限界値、患者固有の安定余裕空間が十分に許容できる、これら全てを満たすことを条件とする。

さらに導いた支援方策の有効性を確認するため、開発中の起立支援装置に実装し、被験者実験によってその有効性を明らかにする。

#### 4. 研究成果

##### (1) 筋シナジー起立人間モデル論の構築（課題1に対応）

東京都品川区八潮地区において、特定非営利活動法人 協働まちづくりのご協力の元、50人以上の高齢者を被験者とした計測実験を実施した(図1)。計測実験結果より得られた筋電信号を元に筋シナジー解析を行ったところ、静的起立であろうとも自力で起立できる高齢者の場合、主に三つの随意運動で起立動作が構成されていることが解った(図2)。そこで、これらの随意運動を基に、起立動作を構成する各高齢者の起立動作原理を説明できる起立人間モデルを得ると共に、安定余裕空間を得た(図3)。

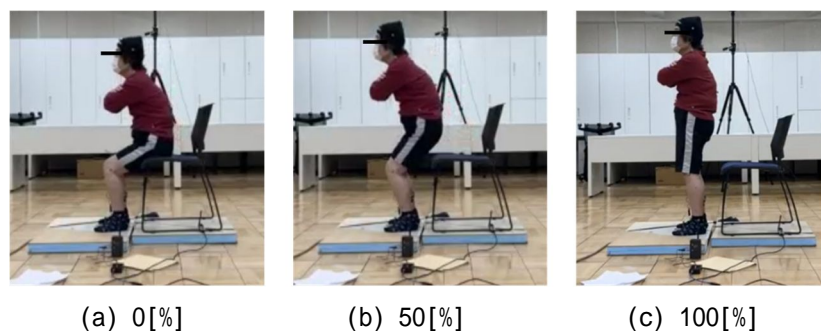
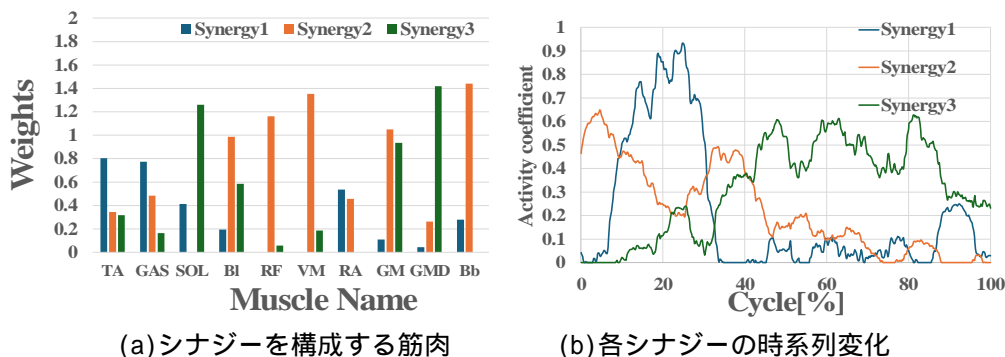


図1 高齢者の起立動作例（要支援2）



(a)シナジーを構成する筋肉

(b)各シナジーの時系列変化

図2 筋シナジー解析によって抽出された起立動作を構成する随意運動群(図1に示す高齢者)。この高齢者の場合、前方に体幹を前傾させる運動(シナジー1)、臀部を座面から持ち上げる運動(シナジー2)、体幹を伸展させる運動(シナジー3)から起立動作が構成されている。

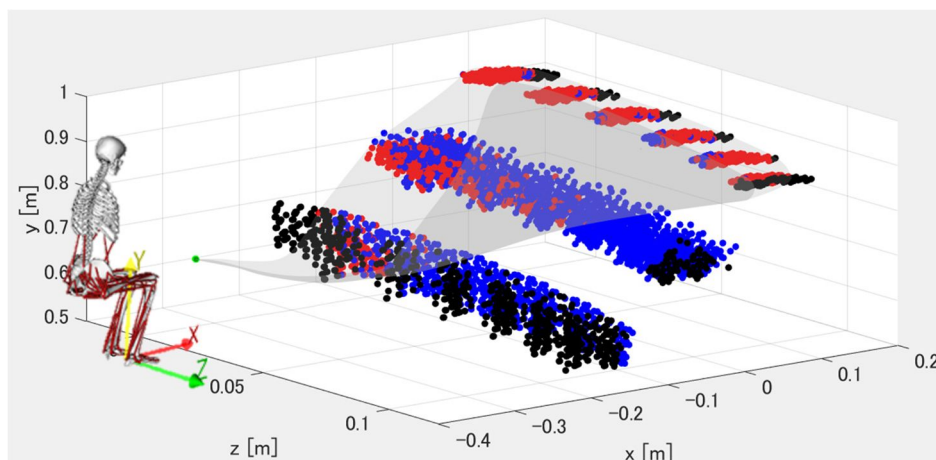
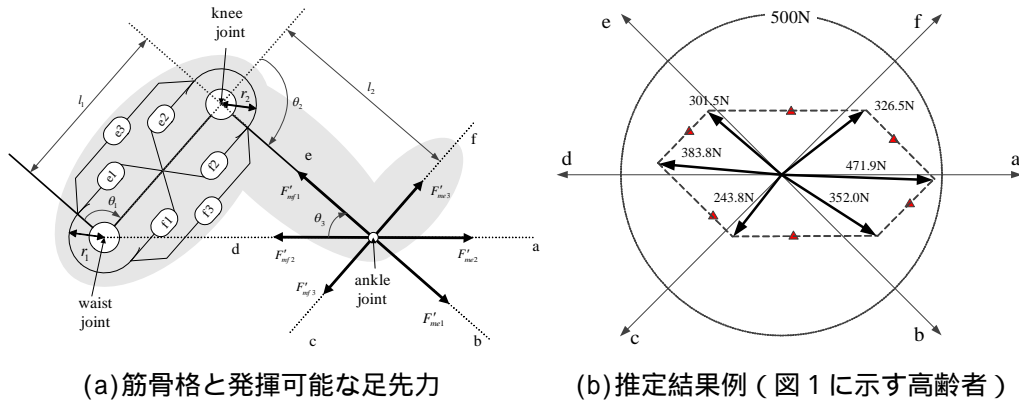


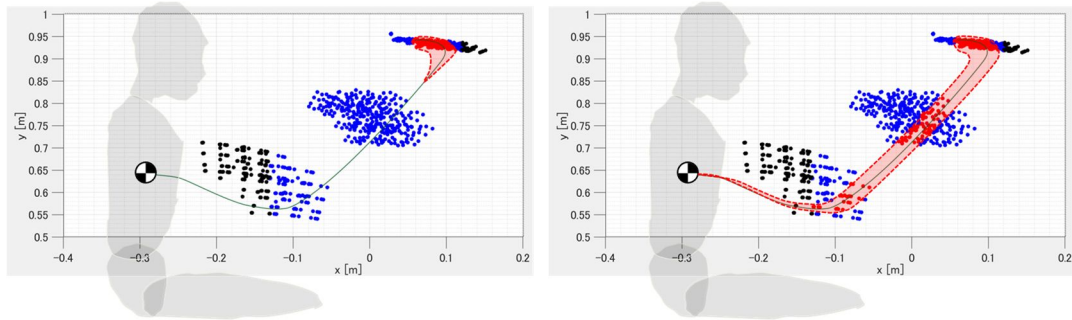
図3 図1に示す高齢者の起立動作を表す起立人間モデルとそれに基づく安定余裕空間。赤い点は、転倒しない姿勢(姿勢安定条件)で、かつその高齢者の筋力で実行可能な動作姿勢(筋力条件)を表す。青い点は、姿勢安定条件は満たすが筋力条件を満たさない動作姿勢を表す。黒い点は、姿勢安定条件、筋力条件共に満たさない動作姿勢を表す。

(2) 筋シナジーに基づく支援方策の確立 (課題2に対応)

人間の下肢筋骨格から、主要な筋肉が発揮できる下肢先端の方向が異なることを利用して、下肢筋力を推定した(図4)。さらに推定結果を(1)の起立人間モデルに入力として与えると、図5(a)のように患者個々人が自力で起立可能かを判定した。さらに、患者個々人の状態を表現する起立人間モデルに外力を試行錯誤的に入力することで、図5(b)のように起立動作が実現可能であることを確認した。



(a)筋骨格と発揮可能な足先力 (b)推定結果例(図1に示す高齢者)  
図4 下肢筋力の推定手法

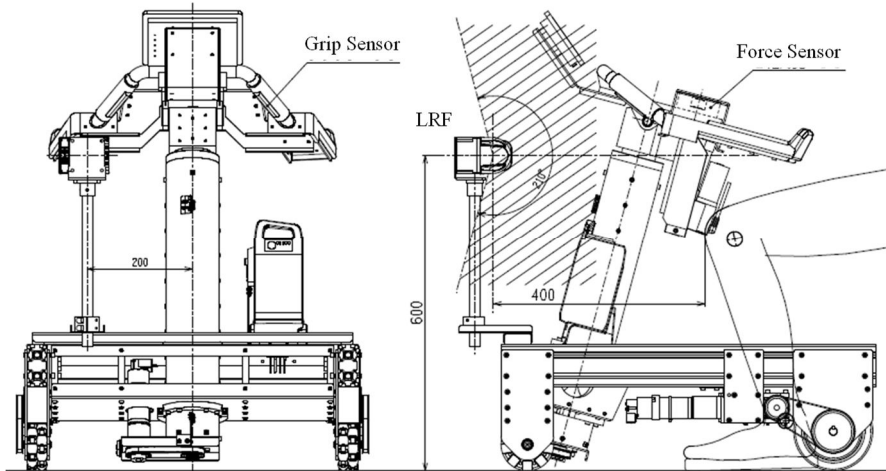


(a)外力がない場合 (b)適切な外力を設定した場合

図5 個々人の身体状況を表現する起立人間モデル例(要介護3の高齢者)。起立動作を安全に自力で行うためには、姿勢安定条件・筋肉条件が満たされた空間(赤く塗られた空間)で起立動作を行う必要がある。この患者の場合、(a)は起立動作完了に至る姿勢変化経路上に姿勢安定条件・筋肉条件が満たされた空間がないため、自力での起立動作は不可能である。(b)は適切な外力を設定した例である。起立動作完了に至る姿勢変化経路上に姿勢安定条件・筋肉条件が満たされた空間が繋がったため、この外力を与えれば患者が起立動作を完了できることが解る。

(3) 起立支援装置の設計論 (課題3に対応)

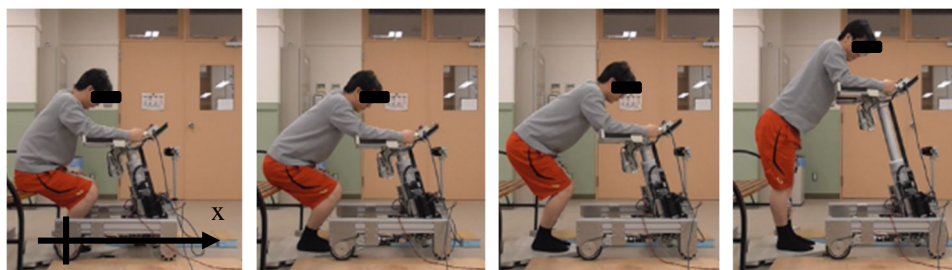
以上の提案手法より導かれた起立支援方策を図6に示す試作起立支援ロボットに実装した。本ロボットは自律歩行器型ロボットに体幹持ち上げ用アクチュエータを組み合わせている。また、姿勢計測用レーザーセンサや肘掛け部に体幹のバランスを測る力センサを内蔵している。



(a)正面図 (b)側面図

図6 試作起立支援ロボット

図6に示す試作起立支援ロボットによる支援例を図7、8に示す。図8のように、本研究で明らかにした安定余裕範囲内に身体重心を誘導していることがわかる。さらに図9に、提案手法を用いた場合と、従来一般に広く用いられる固定的な起立支援方策を用いた場合の被験者の筋電信号例を示す。提案手法を用いることで筋肉がより活発に働いていることが解る。図8、9を併せて確認すると、被験者の随意運動を誘導しながら姿勢調整運動をロボットが担っていることが解る。



(a) 0[%] (b) 35[%] (c) 75[%] (d) 100[%]

図7 試作起立支援ロボットの支援例（被験者は健常者）

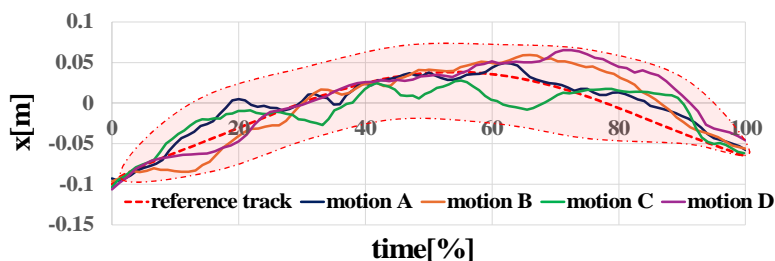
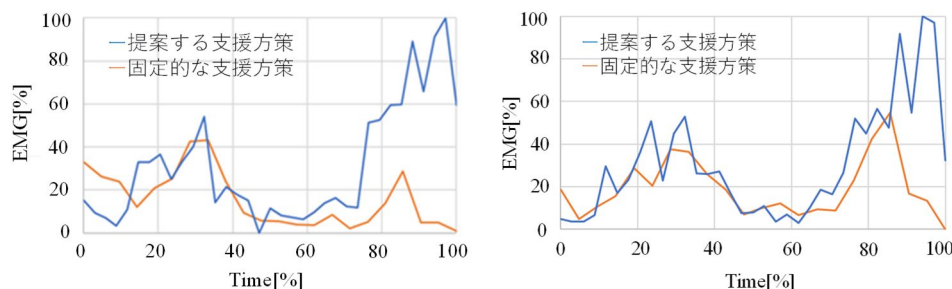


図8 安定余裕範囲と実際の被験者の前後方向の身体重心。四試行とも安定余裕範囲内に身体重心が安定余裕範囲内に誘導されていることが解る。動作C、動作Dでは起立動作中に被験者にわざと身体のバランスを崩すように依頼したが、起立支援ロボットは被験者の安定余裕範囲内に身体重心が収まるよう動作支援を行っていることが解る。



(a) 内側広筋 (b) 大殿筋  
図9 起立動作中の筋電信号（被験者は図7に示す健常者）

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 Chugo Daisuke, Muramatsu Satoshi, Yokota Sho, She Jin-Hua, Hashimoto Hiroshi	4. 巻 2(4)
2. 論文標題 Stand-Up Assistive Devices Allowing Patients to Perform Voluntary Movements Within the Safety Movement Tolerance	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Artificial Intelligence and Technology	6. 最初と最後の頁 164 ~ 173
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.37965/jait.2022.0121	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6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Daisuke Chugo, Yu Suzuki, Masahiro Yokota, Satoshi Muramatsu, Sho Yokota, Jin-Hua She, Hiroshi Hashimoto, Takahiro Katayama, Yasuhide Mizuta and Atsushi Koujina
2. 発表標題 Standing Assistance which realizes voluntary movements of the patient within a safety motion tolerance
3. 学会等名 21st International Conference on Climbing and Walking Robots（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Daisuke Chugo, Yuya Miyazaki, Satoshi Muramatsu, Sho Yokota, Jin-Hua She and Hiroshi Hashimoto
2. 発表標題 A simple method for estimating lower limb muscle strength in the elderly and standing assistance according to the individual's physical weakness
3. 学会等名 48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Daisuke Chugo, Yuya Miyazaki, Satoshi Muramatsu, Sho Yokota, Jin-Hua She and Hiroshi Hashimoto
2. 発表標題 Human Models Simulating the Physical Conditions of the Elderly Individual and Standing Assistance Method Based on These Models
3. 学会等名 22nd International Conference on Climbing and Walking Robots（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Daisuke Chugo, Yao Li, Satoshi Muramatsu, Sho Yokota, Jin-Hua She and Hiroshi Hashimoto
2. 発表標題 Assistive walker which stabilizes the user's posture and prevent falls through abnormal gait pattern recognition
3. 学会等名 23rd International Conference on Climbing and Walking Robots (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yuya Miyazaki, Daisuke Chugo, Satoshi Muramatsu, Sho Yokota, Jin-Hua She, Keio Ishiguro and Hiroshi Hashimoto
2. 発表標題 Muscle Synergy Analysis in Ergometer-Based Gait Recovery Training for Stroke Patients
3. 学会等名 49th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Pengzu Ren, Daisuke Chugo, Satoshi Muramatsu, Sho Yokota, Jin-Hua She and Hiroshi Hashimoto
2. 発表標題 A Simple Method for Estimating Individuals Muscle Weakness and Propositions for Standing Support Methods Based on the Estimate
3. 学会等名 The 2024 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (国際学会)
4. 発表年 2024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
研究分担者	しゃ 錦華  (She Jin-Hua)  (10257264)	東京工科大学・工学部・教授    (32692)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究 分 担 者	橋本 洋志  (Hashimoto Hiroshi)  (60208460)	東京都立産業技術大学院大学・産業技術研究科・教授    (22605)	

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