

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：32829

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K14945

研究課題名(和文) 装着型ロボットの同調制御に基づく運動教示による腰痛予防アシスト制御と装着部の開発

研究課題名(英文) Development of assistance control and wearable part for preventing backache by motion teaching based-on synchronization-based control on wearable robot

研究代表者

水上 憲明(MIZUKAMI, Noriaki)

東京国際工科専門職大学・工科学部・講師

研究者番号：50735397

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：関節角度軌道生成プログラムを開発し、同調ゲイン調整によって持上動作を補助する先行動作となる制御を実現した。装着部の開発では、腰ベルトと体幹ベルトを用いた腹部腰部の固定を可能にするコントローラBOXを製作した。更に動作識別機能の開発では、機械学習を用いて90%以上の高い正解率が得られる予測モデルの生成を実現し、ロボットに実装した実験検証によってシームレスなアシスト動作の切替わりを示した。腰アシスト効果の実験検証では、アシスト有り無しと比較においてアシスト有り筋使用量が低減した被験者の割合は88.9%、筋使用量の低減率が10%以上の被験者の割合は66.7%を示し、筋使用量の抑制効果を示唆した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来アプローチの力制御とは異なる関節軌道制御に基づく能力補償(力制御ではない)による腰アシストの実現を目指し、同調制御法に基づく股関節・膝関節の4関節軌道制御により、ロボットが持上動作を補助する先行動作となる腰アシスト制御法を確立した。実験によりアシスト無しに対するアシスト有りの筋使用量が低減することを確認し、本制御手法に筋使用量の低減効果があることを示唆した。本制御手法によって装着者の動作に同調した自然な動きの実現と、筋使用量の低減効果から腰部の疲労蓄積の軽減が期待できる。故に作業効率化や腰痛予防に貢献すると考える。

研究成果の概要(英文)：In algorithm development of joint angle trajectory design, control of preceding motion, which robot moves faster than human and assists lifting, was achieved by adjusting synchronization gain. In development of wearable part, a controller box, which has upper body belt and hip belt, was developed and achieved fastening hip and stomach by these belts. In development of motion identification, machine learning model was generated, and achieved correct motion identification of more than 90%. The model was mounted in robot, and experiments showed that assist motions changed seamlessly by identifying human motion. In evaluation of assist effect, muscle usage based-on EMG in assistance compared with muscle usage in no assistance. The percentage of examinees, whose muscle usage in assistance decrease from no assistance, is 88.9% and the percentage of examinees, whose muscle usage in assistance decreases more than 10%, is 66.7%. Thus, the assist control showed depression effect of muscle usage.

研究分野：工学

キーワード：腰痛予防 持上動作アシスト サーボモータ 同調制御法 非外骨格型構造 機械学習 筋電位(EMG)

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

腰痛は、介護や農業、製造業などの現場で年々増加傾向にあり、高齢者に関わらず若年層にも見られる。業務上疾患の60%以上が腰痛を占めており、離職率増加の理由ともなる大きな社会問題の一つである。この対策として人体装着型ロボットが注目されている。しかし、従来の腰アシストロボットの開発は、力の増幅機能を如何に実現して腰部負担を軽減するかという点に焦点が当てられてきたため、腰部負担を軽減するためのアシスト動作として、関節制御が適切かどうかには焦点を当てた研究開発は不十分であると考えられる。

### 2. 研究の目的

本研究では、力増幅に焦点を当てた従来とは異なる股関節と膝関節の補助により腰部の負担軽減を可能にする腰アシストの実現を目的とする。具体的には、以下に挙げる開発と検証を行う。

(1)同調制御法を用いた関節軌道制御に基づく能力補償(パワーアシストではない)による腰アシスト制御法を確立する。

(2)腰部の負担軽減を考慮した人体装着部の開発を行う。

(3)持上動作と歩行動作の一連の動作に対し装着者の動作意図を検知して、腰アシストと歩行アシストを自動的に連続で切替えるシステムの構築を行う。

(4)同調制御法を用いた関節軌道制御に基づく股関節・膝関節の4関節制御による腰部負担の軽減効果を検証する。

### 3. 研究の方法

(1)同調制御法を用いた関節軌道制御に基づくアシスト制御法の確立

本研究で開発した腰アシスト制御手法の手順を図1に示す。図1は人が立位状態でアシスト制御が開始され、持上動作を行い再び立位状態になるまでを表している。アシスト制御が開始されると同調ゲインは高レベルの設定となり、図1(A)の様に装着者の立位状態に同調して停止する。同調ゲインが高レベルなので、ロボットは装着者の動きに同調するように制御される。図1(B)の様に装着者が自身のタイミングで持上動作を開始して股関節と膝関節の屈曲動作を行い、ロボットが最大屈曲角度を検知すると、同調ゲインは低レベルに変化する。最大屈曲角度を検知すると持上動作へと移行するので、図1(C)の様に脚関節は屈曲動作から伸展動作に移行する。この際、低レベルの同調ゲインによるロボット寄りの全関節伸展補助動作を行うことで持上動作をアシストする。図1(D)の様に股関節と膝関節の伸展角が立位状態の角度に達すると、同調ゲインを高レベルへ変化し、立位状態に同調するようにする。立位状態で同調ゲインを高レベルとすることで、連続した持上動作を可能にした。

(2)腰部の負担軽減を考慮した人体装着部の開発

腰痛の原因となる脊柱起立筋への過度な負担の軽減を目指し、上体の姿勢を支える形状と固定方法を検討した。縦長のコントローラ Box を設計して、コントローラ Box 背面と装着者の背中が密着するように胸部と腹部の2カ所固定するベルトを備えるような設計とした。

(3)装着者の動作意図検知手法とアシスト制御モード切替え機能の開発

歩行と持上の動作意図を区別して連続的にアシスト機能を切替えるには、それぞれの動作を区別して識別する必要がある。本研究では、動作意図を検知する手法として分類に用いられる機械学習である決定木を用いた手法を提案した。立位静止、持上と歩行がセンサ情報を用いて分類できると考え、ロボットの左右股関節・膝関節の角度、腰部における3軸の加速度・角速度の計10種類のセンサ情報を機械学習に使用するデータとした。これらセンサ情報は、被験者がロボットを装着してアシスト機能をOFFにして立位静止と歩行、持上の一連の動作を行い収集した。

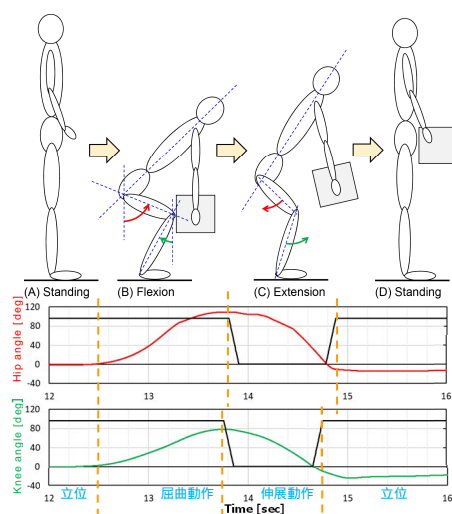
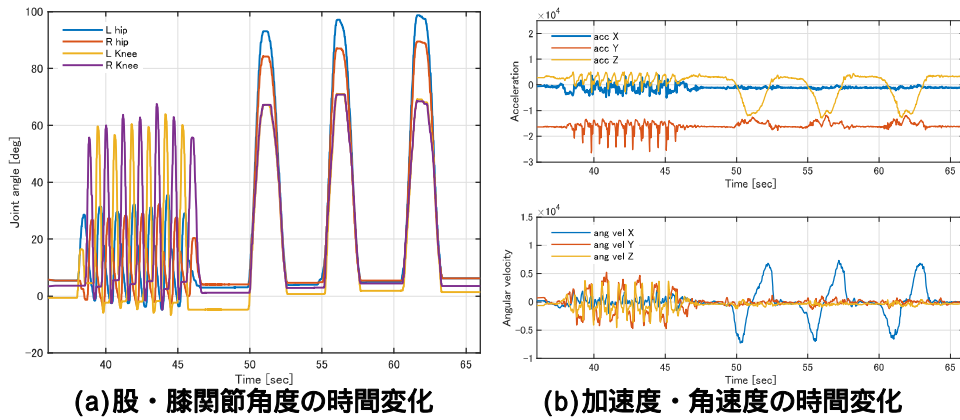


図1 腰アシスト制御手法の手順



(a)股・膝関節角度の時間変化 (b)加速度・角速度の時間変化  
**図2 訓練データ**

図2に訓練データの一部を示す．約10秒間の歩行の後，立位静止してから3回の持上動作を行った際の左右股関節と膝関節の角度，腰部における加速度・角速度の時間変化である．学習にはこの関節角度を速度に変換して10msec 平均値を用いた．教師ありの機械学習を行うので，センサ情報の時系列データに対応するように，動作状態のラベル付けを行った．動作検出番号として，立位静止は0，持上は1，歩行は2とした．Pythonのクラス DecisionTreeClassifier[1]のパラメータとして葉の最大値=35，分岐条件はジニ指標を設定して予測モデルを構築した．

歩行制御モード(歩行アシスト)と持上制御モード(腰アシスト)の切換えは，立位静止状態で行われる．そこで，立位静止状態から歩行制御モードへの切換えなのか，または持上制御モードへの切換えなのかを予測モデルの予測結果を用いて正確に最終判定する制御モード切換え機能を検討した．実装した予測モデルは，立位静止，持上，歩行の分類において全体として高い正解率となる場合でも，動作開始直後は，分類正解検知と誤検知が交互に発生するような不安定な動作検知になった場合，意図しないアシスト制御が実行されるので危険である．そこで，安全のために3つの動作に対して一定時間の連続検知によって動作識別を確定する方式を用いた．不安定な動作検出を無視する方法として，2秒間の立位静止を検知してから立位静止の識別確定として，制御モード切換え許可とした．歩行と持上は0.5秒間の検知から識別確定とした．制御モード切換え実行は，制御モード切換え許可と歩行または持上動作確定の両方の条件が成立した際のみに行われるようにした．歩行または持上の制御モード切換えが実行されると，立位静止以外への制御モード切換えを禁止することで，アシスト制御中の誤検知による急な制御モード切換えを回避する処理とした．

(4)股関節・膝関節の4関節制御による腰部負担の軽減効果の検証

持上動作をロボット未装着アシスト無しとロボット装着アシスト有りにおける筋電位(EMG)計測から，筋使用量を比較して，アシストによる筋使用量の低減率を評価した．被験者の男女比は8:2，年齢は20~22才，身長と体重は，それぞれ157~180[cm]，50~89[kg]である．腰痛症の要因は，脊柱起立筋に対する大きな負担である．そこで，計測筋を左右の脊柱起立筋とした．アシスト条件としては，伸展動作時の同調ゲインを低レベルの0.1への変化，動作周期を持上動作時間が1.5秒となるように設定した．また，十分な屈曲動作が行えるように関節角度は，90度に設定した．ロボット未装着アシスト無しとロボット装着アシスト有りにおいて，重量約9kgの錘を持ち上げる持上動作をそれぞれ3回3セット行い，その際の筋電位計測結果から iEMG(積分筋電図)を以下の式(1)，(2)を用いて算出した．また，アシストによる筋使用量の低減率[%]は式(3)から算出した．

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{(T_2 - T_1)} \int_{T_1}^{T_2} EMG^2 dt} \quad (1) \qquad iEMG = \sum RMS \quad (2)$$

$$\text{低減率[\%]} = (1 - \text{アシスト有り } iEMG \div \text{アシスト無し } iEMG) \times 100 \quad (3)$$

4. 研究成果

(1)同調制御法を用いた関節軌道制御に基づくアシスト制御法の確立

持上動作が適切な補助動作をしているかどうか検証した．立位状態から同時に全関節を屈曲して伸展動作をする Squat 法を行い，ロボット制御において，先行動作(ロボットの関節角度の方が装着者の関節角度より大きく，相互作用トルクは駆動トルクとして作用)と後続動作(ロボットの関節角度の方が装着者の関節角度より小さく，相互作用トルクは制動トルクとして作用)を検証した．図3は，股関節と膝関節の関節角度と相互作用トルク(補助作用)の時間変化を表している．相互作用トルクは，全関節で伸展動作に移行すると徐々に増大して伸展動作の中盤で最大値となることを確認した．また，ロボットは持上動作開始直後の屈曲動作は後続動作(青色ハイライト)で屈曲動作を補助する制御となっていないが，伸展動作の全域で先行動作(赤色ハイライト)となり，全関節の伸展動作を補助する制御となっていることを確認した．以上から伸展

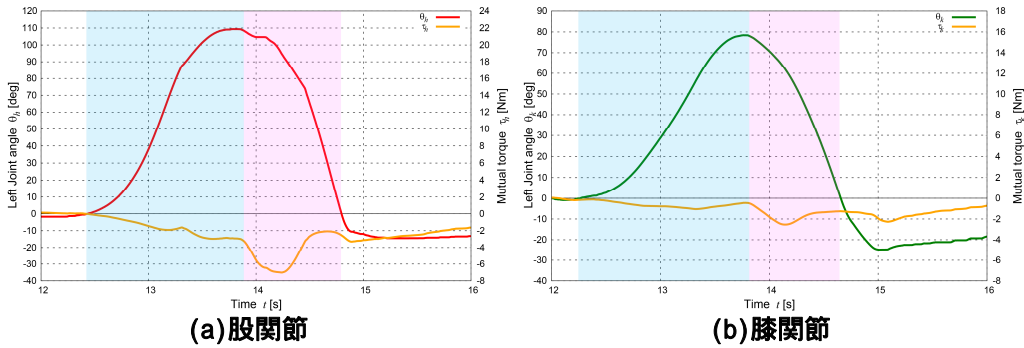


図3 関節角度と相互作用トルクの時間変化

動作を補助する適切な制御が行えていることを確認した。

(2)腰部の負担軽減を考慮した人体装着部の開発

図4に示す腰ベルト(腹部固定)・体幹ベルト(胸部固定)を用いた腹部腰部の固定を可能にするコントローラBOXを製作した。この固定により、持上動作における屈曲時に過度な前傾姿勢が抑制される傾向が確認された。

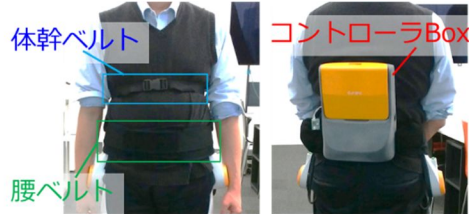


図4 開発した装着部

(3)装着者の動作意図検知手法とアシスト制御モード切換え機能の開発

図5に左股関節角度の時間変化と予測結果を示す。破線は動作検出番号を示しており、歩行中や持上動作終了時に誤検知が見られるだけで、全体で97.8%と高い正解率となった。この動作中の誤検知は、無視する仕組みで対策でき、制御モード切換えを判断する歩行開始と持上開始での誤検知は多くないので、この予測モデルをロボットに実装することにした。図6は構築した予測モデル木構造[2]である。図6左は全体像、図6右は左図の赤枠の拡大した一部を示す。訓練データがノードに集められてノードには加速度(ave\_acc)や関節速度(ave\_jntv)などの特徴変数が設定される。その特徴変数条件の真偽で分類が繰り返し行われることを確認した。

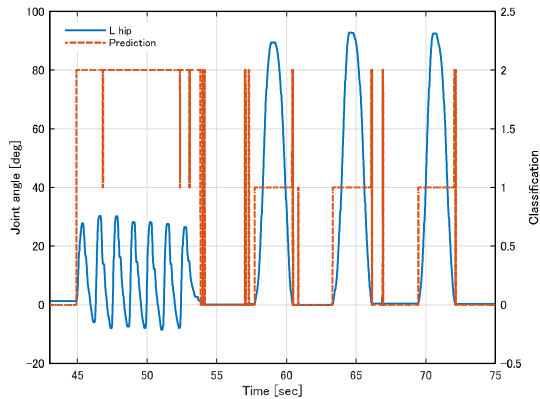


図5 関節角度の時間変化と予測結果

アシスト制御モード切換え機能の検証実験を行った。被験者は1名で、実装した予測モデルは、この被験者の訓練データが用いられて構築したものである。実験では、アシスト制御開始から2秒以上の立位静止の後、持上動作を数回、2秒以上の立位静止、歩行動作10秒程度の順で被験者は動作するようにした。被験者の動作を正しく識別して制御モード切換えが実行されたかどうか評価した。切換え機能の動作確認のために次に示すような動作識別を記録するようにした。2秒間の立位静止を検知して制御モード切換え許可となった場合の動作識別値を-10、0.5秒間の持上動作を検知して持上動作確定となった場合の動作識別値を-12、0.5秒間の歩行動作を検知して歩行動作確定となった場合の動作識別値を-14として記録した。また、制御モード切換え許可かつ持上動作確定の条件成立で持上制御モード実行となった場合の動作識別値を-18、制御モード切換え許可かつ歩行動作確定の条件成立で歩行制御モード実行となった場合の動作識別値を-16として記録した。

制御モード切換え機能の流れを確認するために、左股関節角度と動作識別値の時間変化を確認した(図7)。

アシスト制御開始直後の5秒程度の中に2回、制御モード切換え許可となっている(動作識別値-10)。5秒から10秒経過の間に正しく持上制御モード実行になっている(動作識別値-18)。17秒経過時点では立位静止状態になり、再び制御モード切換え許可となっている。21秒経過時点で、実際の歩行から1歩ほど遅れて歩行制御モード実行になっている(動作識別

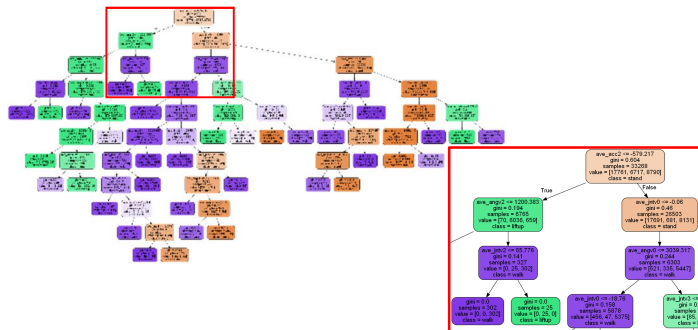


図6 予測モデルの木構造

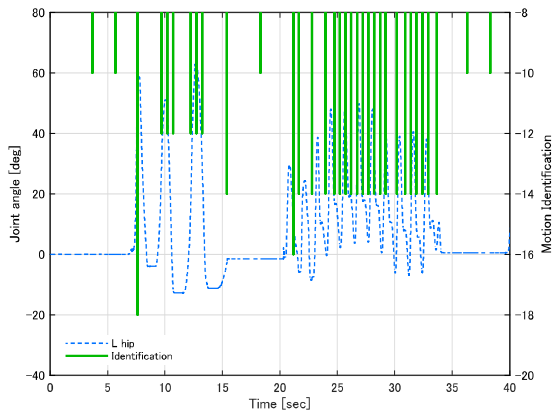


図7 関節角度と動作識別結果

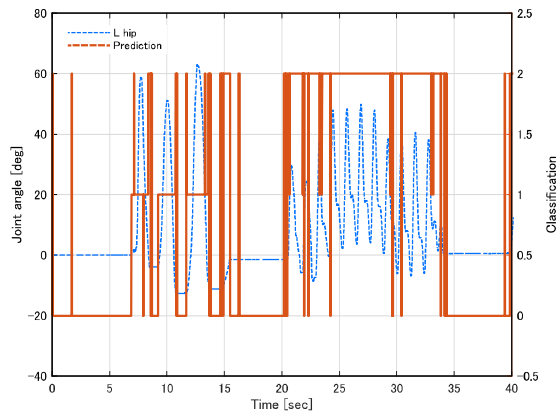


図8 関節角度と予測結果

値-16) .以上の結果から立位静止から歩行または持上動作の開始を識別して,正しい制御モードの実行が行えていることを確認した.また,持上動作終了時に誤った歩行動作確定(動作識別値-14)が記録されているが,持上制御モード実行中は制御モード切換えを禁止しているため,誤って歩行動作確定となっても条件は満たさないことから歩行制御モードは実行されていない.この結果は,誤検知によるアシスト制御中の急な制御モード切換の回避処理が有効に機能していることを示している.図7に示す動作識別結果となった理由を確認するために,実装した予測モデルによる予測結果を確認した.図8に左股関節角度と予測結果の時間変化を示す.予測結果の動作検出番号は,立位静止は0,持上は1,歩行は2である.事前に収集した未学習のテストデータを用いたオフラインでの予測モデルの評価では図5に示すような高い正解率を得ていたが,同等の正解率は得られていないことが分かった.特に歩行動作開始(20秒付近)の誤検知と正解検知が交互に発生する不安定な動作識別が起きているため歩行制御モードへの切換えが遅れたと考える.正しいアシスト制御モードの切換が行える場合もあるが,正しく制御モードが切換わらない場合もあった.実装した予測モデルの学習に用いた訓練データはアシスト制御OFFの状態で作成したデータであった.アシスト制御ONと制御OFFでのデータに差異があるために学習不足となり正解率が低下したと考える.アシスト制御ON中での動作においては正解率の低下がみられ正しい制御モードに切換わらない場合も確認した.制御ON中に収集した訓練データから予測モデルを構築して実装した場合の評価も必要と示唆された.

#### (4)股関節・膝関節の4関節制御による腰部負担の軽減効果の検証

図9は顕著なアシスト効果が表れた被験者2名のアシスト無し(No Assistance)とアシスト有り(Assistance)でのiEMGの結果である.棒グラフは,持上動作3回3セットの左右脊柱起立筋のiEMG平均値とエラーバーは標準偏差を表している.持上動作アシストによる筋使用量が,被験者ID04については約25.5%,被験者ID06については約27.9%低減したことを確認した.全被験者における持上動作のアシスト効果の検証結果としては,アシスト無しとアシスト有りの比較において,筋使用量がアシスト有りで低減した被験者の割合は88.9%,筋使用量の低減率10%以上の被験者の割合は66.7%となった.以上の結果から本制御手法を用いた持上動作アシストにおいて,筋使用量を抑制する効果が示唆された.

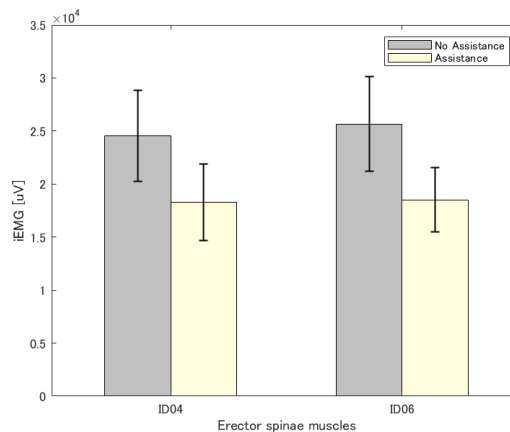


図9 被験者2名のiEMG結果

#### 5. 参考文献

- [1] <https://scikit-learn.org/stable/modules/tree.html> (2023年6月閲覧)
- [2] [www.webgraphviz.com](http://www.webgraphviz.com) (2023年6月閲覧)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 水上憲明, 橋本稔
2. 発表標題 同調制御に基づくロボティックウェアcuraraの4関節制御による挙上動作アシストの研究
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 水上憲明, 橋本稔
2. 発表標題 装着型ロボットにおける機械学習を用いた装着者の行動意図検知手法の提案
3. 学会等名 第39回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 水上憲明, 橋本稔
2. 発表標題 ロボット装着者の行動検出のための機械学習モデルの評価
3. 学会等名 第17回「運動と振動の制御」シンポジウム(MoVic2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 水上憲明, 橋本稔
2. 発表標題 装着型ロボットの動作識別を目的とした機械学習モデルの実装
3. 学会等名 第27回ロボティクスシンポジア
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 アシストウェア	発明者 橋本 稔/水上 憲明/ 竹内 志津江/鈴木 彩 乃/鉄矢 美紀雄	権利者 信州大学 /AssistMotion株 式会社
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-171310	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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
---------	---------