

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 23 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23300075

研究課題名(和文)人からの教示に基づく手の巧みさの構成論的研究

研究課題名(英文) Constructive Approach Study of Hand Dexterity based on the Teaching Data Demonstrated by a Human

研究代表者

横小路 泰義 (Yokokohji, Yasuyoshi)

神戸大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：30202394

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,700,000円、(間接経費) 4,710,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、人の「手の巧みさ」の本質を構成論的に明らかにするために、対象タスクとして折り紙を取り上げ、複数の折り紙作品が折れる程度に汎用性を持つロボットを設計製作し、実際に折り紙作品として「おたまじゃくし」に加えさらに複雑な作品である「蛙」が折れる性能を有するロボットを構成することができた。また人間による直接/遠隔教示動作から人の持つ暗黙知的な作業スキルをロボットに移植する手法を一般化し、新たに提案した機構を有するロボットが十分な教示の容易性と精度の高い教示動作の再生性能を有していることを確認した。

研究成果の概要(英文)：This research aimed at essential understanding of human hand dexterity through constructive approach study. "Origami-folding" was chosen as a target task and a robotic hand, which has a certain level of versatility so that it can fold several origami works, was designed and developed. We could successfully construct a robot system that can fold origami works not only "Tadpole" but also "Frog" which is much more complicate than "Tadpole". The way of transferring implicit task skill of humans from direct/remote teaching data was generalized and it was confirmed that the developed robot with novel mechanisms has high enough easiness of teaching and a precise enough playback performance of the teaching motions.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・(知覚情報処理・知能ロボティクス)

キーワード：マニピュレーション 作業スキル 作業教示 ロボットハンド 柔軟物操作

### 1. 研究開始当初の背景

「機械の現象学」を著した坂本賢三によれば、機械とは人間の持つ機能の外化であるという。石器から始まった人類の発明は、様々な道具、動力機関、計算機と次々に人間の機能を外化してゆき、果てはロボットとして人間そのものを外化しようとしている。しかし、「手」の機能の外化としてロボットハンドを見たとき、外観は人間の手に似るものが多いものの、人の「手の巧みさ」を完全に外化できたとはいえない。現在自動化が進まない自動車等のアセンブリ工程や将来のロボット市場として期待されるサービス分野などにおいても、ロボットの手の機能の未熟さがボトルネックとなっており、人間の手の機能的な外化もしくは「手の巧みさ」の構成論の確立が大きな課題である。

申請者は、平成 19～21 年度の科研費基盤研究(B)「ヒトの作業計測と機械による機能実現を通じての手の巧みさのメタ理解」において、「巧みさ」が必要とされる作業として「折り紙」を具体的に取り上げ、ヒトの手による作業の仔細な観察に基づいて実質的に同じ作業を実行できる機械を工学的に創生することで、「手の巧みさ」の本質的理解を目指した。具体的には「おたまじゃくし」という折り紙作品を折るロボットを設計試作し、実際に作品が折れることを示した。さらに、折り紙の柔軟性に起因する挙動の揺らぎの影響を補償するためのセンサフィードバック則を、人間が直接教示で実演した複数回の教示データの統計的性質から生成するという着想を得、その手法の有効性を折り紙作業で確認した。しかしながら上記研究では、対象作業が「谷折り」という特定の作業に限られており、用いたロボットも「おたまじゃくし」を折ることのみを念頭に設計されていたこと、直接教示でのスキル移植の着想が研究計画当初にはなく、必ずしも教示のし易いロボットではなかったこと、またさらには環境変動に適應するフィードバック則の生成では予め対応づけられた単一センサと単一の指の関係を前提としており、タスクが複雑になった場合に設計者が常にそのような適切な対応付けができるとは限らないこと、などが問題点として挙げられ、「手の巧みさ」の構成論の確立という意味ではまだ不十分であった。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、人の「手の巧みさ」の本質を明らかにして、それを機械的に実現するための構成法を確立することにある。研究の方針として、特定のタスクに限定した上での構成論を対象とし、具体的な対象作業として柔軟物である紙を複数の指先で操る「折り紙」を再び取り上げる。複数の折り紙作品が折れる程度に汎用性を持つロボットを設計製作し、人間による直接/遠隔教示動作の統計的性質から複数センサと複数の指先動作との

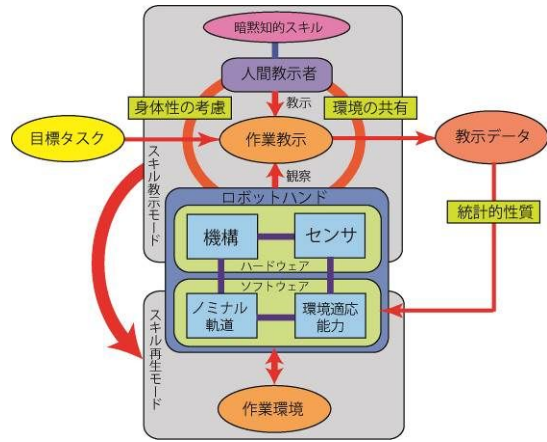


図1 「手の巧みさ」の構成

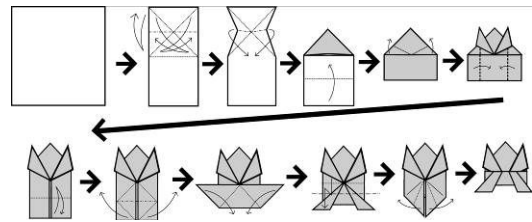


図2 蛙の折り手順

動的な対応付けを見出し、そこからセンサフィードバック則やコンプライアンスを自動的に抽出することで、人の持つ暗黙的な作業スキルをロボットに移植する。さらに複数指による協調動作、動作の階層性を表現した上で、目標作品を折る巧みな一連の動作を実現する。

### 3. 研究の方法

本研究は上記目的のため、図1に示すように「手の巧みさ」の構成論的アプローチをとり、具体的には以下のように研究を進める。

#### (1) 汎用性のある折り紙ロボットの機構設計製作

本研究ではこれまで対象としてきた「おたまじゃくし」だけでなく、図2の「蛙」も折れる程度に汎用性のあるロボットを設計・製作する。「蛙」の折り手順は「おたまじゃくし」に比べるとかなり複雑となるので、ある程度汎用性のあるロボットとなることが期待される。

以前の研究で開発した折り紙ロボットでは、設計の時点では直接教示をするという着想がなく、直接教示を行うには様々な問題点があったので、本研究では直接教示がし易くなる工夫を設計段階から積極的に織り込む。(2)人の実演の統計的性質からの感覚情報と運動成分との動的対応付けによるフィードバック則生成法の確立と作業スキル表現法の一般化

申請者が既に提案している人が複数回行った教示動作を隠れマルコフモデル(HMM)でモデル化し、その統計的性質からセンサフィードバック則を生成する手法を拡張し、教示データの力と速度の正準相関係数を用いる

ことで相関の方向依存性を考慮し、かつセンサフィードバック適用の重みを相関の大きさに応じて連続的に変化させることができるようにするとともに、複数の異なるセンサ情報から複数の指先運動へのフィードバック則が抽出できるようにする。

また、本研究では作業スキルを適切なノミナル軌道設定能力と適切な環境変動適応能力の組み合わせとし、コンプライアンス制御などによる環境変動適応能力の一般化に加え、これまでは不変と見なしていたノミナル軌道が初期条件や再生時の教示者の介入により修正可能となるように作業スキル表現法の一般化を目指す。

### (3) 遠隔教示可能なシステムへの拡張

設計・製作した折り紙ロボットに遠隔操縦装置を付加して、遠隔教示も可能なようにする。まず遠隔操作により目標作品である「蛙」を折ることで、製作したロボットが「蛙」を折るのに十分な性能を有することを確認する。

### (4) 複数指の協調動作および折り動作の分節化の記述方法の確立（一連の折り動作の実現）

「蛙」の折り紙作品を完成させるために、複数指での協調動作と各指の個別の動作が混在する作業を系統的に記述できる枠組みを確立する。一連の動作を記述には動作の分節化が必要であり、さらには動作を階層的に表現することで見通しの良い動作記述が可能となりうる。

## 4. 研究成果

### (1) 直接教示の容易性と高難度の折り紙作品の実現を考慮したロボットハンドの設計

巧みな動作を実現するための実験プラットフォームとして、申請者らがこれまでに開発した「おたまじゃくし」を折るロボットの機構を発展させ、「おたまじゃくし」に加えて「蛙」が折れる程度に汎用性のあるロボットを設計・製作した。以前の研究で開発した折り紙ロボットでは、設計の時点では直接教示でロボットに動作を教示するという発想がなく、その点での考慮を欠いた設計であったために直接教示を行おうとしたときに様々な問題点があったので、本研究では教示がし

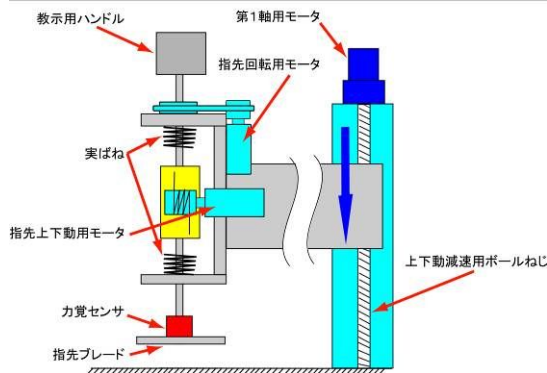


図3 教示の容易性と教示動作の高精度再生を考慮した機構

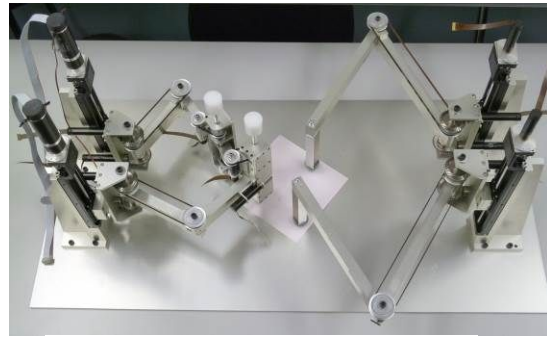


図4 製作した折り紙ロボット

易くなる工夫を設計段階から織り込んだ。まず機構のガタをなくし、特に紙を押し付ける方向に大きな力（約 20N）が必要であることから、スカラ型アームに倣って垂直方向に高い剛性を持たせる構造とした。また押しつけ力が加えられる鉛直方向にはコンプライアンス特性を実現できる小型モータ駆動の直動軸を新たに付加することで、手先部分がベースのリンク機構に対してフローティングマウントされ、教示時には機構全体の慣性を感じることなく容易に位置と力の教示が可能となり、再生時には小型モータによるコンプライアンス制御で 1N 程度のレンジでの精密な力制御と機械バネによる 20N 程度のレンジでの比較的大きな力の実現を共に可能とする機構とした。

### (2) 人間の直接教示動作の統計的性質からのロボットへの作業スキル移植

これまで提案してきた人間の直接教示動作の統計的性質に基づく動作生成法では、人間が複数回行った直接教示データを HMM でモデル化し、そこからノミナル軌道としての平均軌道とセンサフィードバック則を抽出していたが、本研究では、教示データの力と速度の正準相関係数を用いることで、相関の方向依存性が考慮されかつセンサフィードバックの適用の重みを相関に応じて連続的に変化させることができるようになった。この結果、これまでの提案手法では必要であったセンサフィードバック区間抽出のための閾値の設定が不要になった。図5に従来法と提案法でのフィードバック則の重みの時間変化を示す。従来法では重みは0か1しかとり得なかったが、提案手法では3つの方向に依

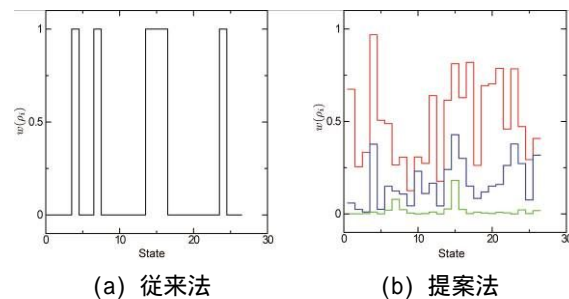


図5 フィードバック則の重みの時間変化



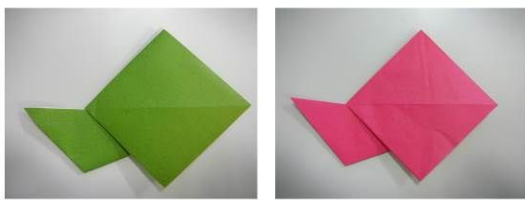
図6 遠隔教示システムの外観

存してそれぞれに連続的な重みが生成されている。また今回の拡張によって、任意の次元のセンサ、任意の自由度の指に対して対応できる一般的な形式とすることができた。

従来の直接教示法では教示からスキル抽出までがバッチ処理的であった点を改善するため、再生時に部分介入教示が可能となるように直接教示データに基づくスキル抽出法の修正を試みた。具体的には、これまでは教示データから構成された隠れマルコフモデルにより動作を再生する場合の状態遷移は時間経過とともに強制的に行っていたのに対し、隠れマルコフモデルの状態推定をリアルタイムで行う手法を新たに構築し、これにより再生時に教示者が介入してロボットの動きを止めた場合は、推定した状態が勝手に遷移せずにその場に留まることが確認できた。

(3) 高難度作品の実現を目指した折り紙ロボットの直接教示の容易性と教示データの再現性の検証

開発した折り紙ロボットにハプティックデバイスを付加して、遠隔教示が可能なシステムを構築した(図6)。構築した遠隔教示システムにより目標作品である「蛙」と「おたまじゃくし」が折れることを確認し、製作したロボットがハードウェアの性能として十分な性能を有していることが確認できた。図7, 8にロボットによって折られた作品と人



(a) ロボットによる (b)人間による

図7 折られた「おたまじゃくし」の比較



(a) ロボットによる (b)人間による

図8 折られた「蛙」の比較

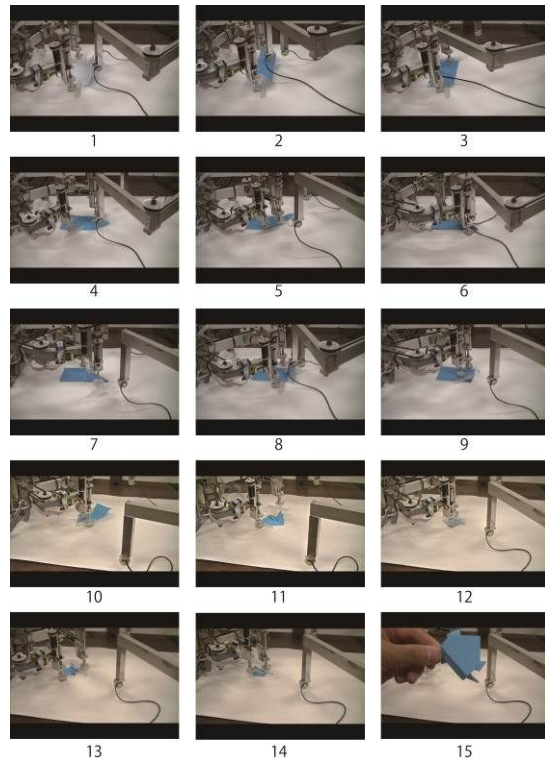


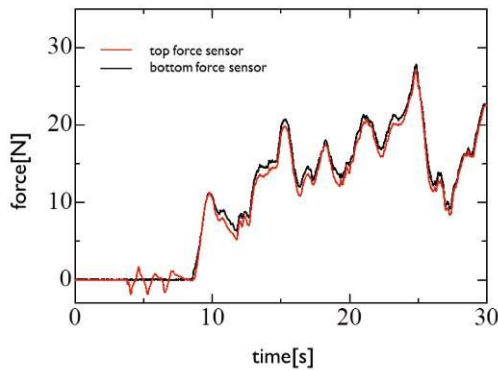
図9 遠隔操作による「蛙」の折り作業

表1 折りに要した時間の比較

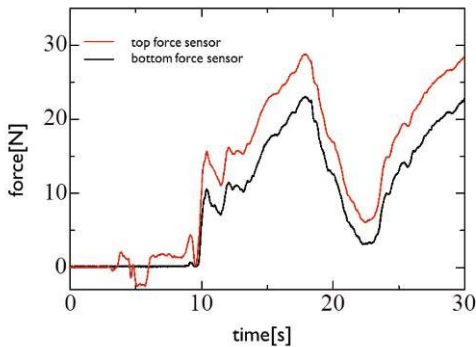
	直接教示	遠隔教示 (カメラあり)	遠隔教示 (カメラなし)
蛙	13 min.	35 min.	40 min.
おたまじゃくし	3 min.	6 min.	7 min.

間によって折られた作品との比較を示す。また図9に遠隔操作によって「蛙」を折った実験の過程を示す。ただし、折るのに要した時間は60分と直接人間が手で折るのに要した時間(3分)よりおよそ20倍長くかかったが、その後カメラ配置などを工夫し、教示者が装置を介しての折り紙作業に慣れるにつれ、作業時間は35分と約半分まで短縮し、作業に慣れた後はカメラなしでも40分で折れるようになり、カメラ情報の重要性は低下した(表1)。以上より、本研究では人間による折り作業と同じように「蛙」が折れるようにロボットを設計したが、ロボットを介しての折り作業には本来持っているスキルとは異なるスキルが必要であり、そのためには多少の訓練が必要であったこと、またスキル獲得のフェーズでは、視覚情報が重要であることが分かった。

次に製作した折り紙ロボットの直接教示の容易性を定量的に評価し、次いで教示された位置及び力の軌道の再現性を検証し、すべて所望の性能を有していることが確認でき



(a) 提案機構



(b) 従来機構

図 10 教示の容易性の評価実験結果

た．図 10 に，そのような検証実験の一例として，直接教示で指先を約 20mm/s の速度で降下させて床面に接触させた時の指先の力覚センサと教示用ハンドルに取り付けた力覚センサによる鉛直方向の力の変化を示す．開始から 10 秒付近で床面と衝突しており，提案機構では接触後もハンドル部の力（＝教示者が感じている力）と指先部の力（＝実際にロボットが押し付けている力）はよく一致しており，教示者が望み通りに教示を行うことが可能であるのに対し，提案機構のフローティングマウント部を機械的に固定して従来機構と同等の条件で実験を行ったところ，ボールねじ部の摩擦などの影響により，教示者が教示中に感じている力と，指先で実際に生じている力とは大きな隔たりがあり，教示者の思うような教示が出来ていないことが分かる．最後に直接教示により「蛙」の折り動作を行い，人による直接操作のおよそ 4 倍の時間で操作が可能であることが確認できた（表 1）．

#### (4) 手の巧みさの構成論的理解

本研究では，「人間の手の外観にはとらわれず，行うべきタスクを限定・明確化して必要最低限の機構を設計する」という方針で，対象作業として折り紙を選び，「おたまじゃくし」に続いて「蛙」も折れるロボットを設計し，遠隔操作では実際に「蛙」を折ることが確認できた．ではこのようなアプローチで本当に人の手の器用さの本質に迫れるのだろうか？この点に関しての現在の我々の見解を以下に述べたい．

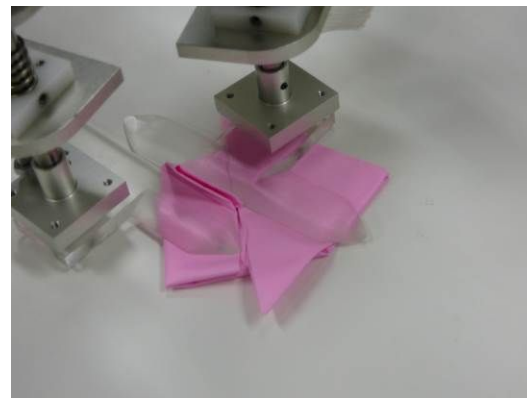


図 11 「蛙」が折れるロボットの指先ブレード

まず指の本数については，本研究によって「おたまじゃくし」でも「蛙」でも 4 本で十分であることが分かった．「鶴」のようなもっと複雑な作品になったときにはいったい何本の指が必要なのかはまだ不明であるが，実際に折り紙を折る際の我々の指の動きを見てみると，機能的には 2 本の固定指と 2 本の操作指と等価のように個々の指を動かしている（言い換えると機能を縮約している）ように見える．このように人の手の外観にとらわれずに設計を行うことで，対象タスクに必要な操作の本質部分を抽出できたように思う．

また図 11 に示すような本研究で製作した「蛙」を折るロボットに採用した指先ブレードの形状は，試行錯誤の後に決まったものであるが，このブレードにより「蛙」は直接手で折るよりもむしろ簡単に折れるようになった．このことから人間の手の形状は何も折り紙を折るために進化したわけではないことを再認識することができるが，巧みさ，器用さとはこのような最適ではない「ハードウェア」うまく使いこなすことではないだろうか．その意味では，本研究ではロボットに専用のブレードを取り付けて作業を簡単化したことは専用マシン化の方向であり，器用さの本質からはむしろ遠ざかってしまったとの見方もできるが，人間と同じように折るという制約のもとで，人間の手の形にこだわらない設計をすることで，ヒトの手の形状を越えたメタレベルでの器用さの理解につながるかと考えている．

器用な動作が必要と思われる作業でも，意外と大きな力が必要な時がある点も指摘したい．「蛙」を折る場合も，前半では 1～3N のレンジでの繊細な力制御が必要なのに，後半では 15～27N という大きな力が必要となる．人の手はこのように大きなダイナミックレンジに対応できており，内在筋と外在筋をうまく連携させたり，大きな力を出す際には機構を特異状態にしたりして対処している．本研究で製作した折り紙ロボットで採用した新機構も大きな力のダイナミックレンジを実現するための工夫の一例であり，

手の巧みさの一面を構成論的に理解したといえるのではないだろうか。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 3件)

木原康之, 横小路泰義, 人間の直接教示動作の統計的性質からのロボットへの作業スキル移植 折り紙動作を題材として, 日本ロボット学会誌, 査読あり, Vol.32, No.9, 2014, 掲載確定(ただし掲載号は予定).

横小路 泰義, 折り紙を折るロボット, 日本ロボット学会誌, 査読なし, Vol.31, No.4, 2013, pp.334-340.

横小路 泰義, テレロボティクスと教示, 日本ロボット学会誌, 査読なし, Vol.30, No.6, 2012, pp.602-605.

〔学会発表〕(計 6件)

若山 光男, 宮本喬行, 木原 康之, 横小路 泰義, 高難度作品の実現を目指した折り紙ロボットの直接教示の容易性と教示データの再現性の検証, 第 14 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, 神戸国際会議場, 2013年12月18日~20日.

宮本喬行, 木原 康之, 若山 光男, 横小路 泰義, 高難度の折り紙作品が実現でき直接教示の容易性を考慮したロボットの性能検証, 日本ロボット学会第31回学術講演会, 首都大学東京, 2013年9月4日~6日.

木原 康之, 横小路 泰義, 隠れマルコフモデルのリアルタイム状態推定を用いた直接教示による人間の動作移植, 第 13 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, 福岡国際会議場, 2012年12月18日~20日.

大島 裕貴, 木原 康之, 宮本喬行, 横小路 泰義, 直接教示による動作の再現の容易性と高難度の折り紙作品の実現を考慮したロボットハンドの設計, 日本ロボット学会第30回記念学術講演会, 札幌コンベンションセンター, 2012年9月17日~20日.

大島 裕貴, 木原 康之, 横小路 泰義, 直接教示の容易性と高難度の折り紙作品の実現を考慮したロボットハンドの設計, 第 12 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, 京都大学, 2011年12月23日~25日.

木原 康之, 横小路 泰義, 直接教示によるモード分岐を含む動作に対する作業スキルの生成方法, 第 12 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, 京都大学, 2011年12月23日~25日.

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

横小路 泰義 (Yasuyoshi YOKOKOHJI)

神戸大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 30202394

(2)研究分担者

該当なし

(3)連携研究者

該当なし