

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 6 日現在

機関番号：22605

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22760323

研究課題名（和文）全方位カメラを有する複数ロボットの視覚フィードバック協調制御—受動性アプローチ

研究課題名（英文）Visual Feedback Control for Multi-Robot with Panoramic Camera: Passivity-Based Approach

研究代表者

村尾 俊幸（MURAO TOSHIYUKI）

産業技術大学院大学・産業技術研究科・助教

研究者番号：00447038

研究成果の概要（和文）：本研究では全方位カメラを有する複数ロボットの協調制御のために、受動性に基づいた視覚フィードバック制御則および目標位置姿勢設計手法を提案した。はじめに、全方位カメラを有するシステムに対して、非線形オブザーバと制御則を提案した。つぎに、その制御則に与える目標位置姿勢の設計手法として、画像特徴点をカメラ視野内に常に維持できる手法と障害物を回避できる手法を提案した。最後に、複数ロボットの視覚フィードバック協調制御則として、リーダーとなる移動ロボットに他のロボットが追従できる制御則を提案した。それぞれの制御則に対して、安定性および収束性の議論を行い、実験により有効性の検証を行った。

研究成果の概要（英文）：This study investigates passivity-based visual feedback control for multi-robot with panoramic camera. Firstly, the vision-based estimation and pose control with a panoramic camera via the passivity approach are presented. Next, passivity-based pose control via an image space navigation function and an obstacle avoidance navigation function for three dimensional eye-in-hand visual feedback systems are designed. Finally, visual motion observer-based bilateral attitude and position control for eye-in-hand mobile robot systems is proposed. Stability analysis of the proposed control laws and convergence analysis of the proposed path planners are provided. The effectiveness of the proposed frameworks are verified through computer simulations and experiments.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：視覚フィードバック制御

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：制御工学，視覚フィードバック，シンクロ制御，機械力学・制御，知能ロボティクス

1. 研究開始当初の背景

フィードバックループに視覚情報を組み込む視覚フィードバック制御は、ロボットマ

ニピュレータに代表される主に単体で動く機械システムへの適用だけでなく、近年では患者の体を極力傷つけない低侵襲手術を支

援する医療用ロボットなどに対しても研究され始めており、工場だけでなく医療・福祉分野など様々な応用先への実用化が望まれている。また、安心・安全分野などにもつながる移動ロボットなどの複数のロボットが作業を行うシステムに対しても、機械システム以上に未整備の環境下で働くことが要求され、かつ協同で作業を行う相手の情報を得るために、視覚センサを持たせその情報に基づき制御を行うことが有益となる。しかし、複数ロボットが作業を行うときには相手とやり取りする情報をどのように制御に用いるかということが特に重要となるため、現在の視覚フィードバック制御で展開されているような基本的には単数台だけを対象とした制御手法だけでは複数台で行うことの特性を生かし切れない。

一方、複数台のロボットなどを対象としたマルチエージェントシステムの協調制御に関しても、飛行機や宇宙衛星、自動車のフォーメーション制御など幅広い工学的なタスクの実現に向けて近年盛んに研究されている。協調制御の中で現在熱心に議論されているものの一つに、情報交換を行うことによって各エージェントの状態を一致させる合意問題がある。しかしその目的は基本的には各エージェントの初期状態の平均値への収束のみであり、目標値が陽に与えられるような状況に対しては追従問題を考慮できないため十分とは言えない。また、前後方様々な位置に存在する相手をどのように測り制御系に組み込むかということに対しても議論されていない。

これらの視覚フィードバック制御と複数ロボットの協調制御は制御理論の分野では今まで独立に研究されてきており、理論的に融合して考えられることはなかった。しかし、これらを融合することは、危険物の探索、環境や施設の監視、防災システムなどの現代社会において特に必要とされる安心安全に直結する非常に有益なシステムへの構築につながると期待される。このことは、純粋なロボット分野からのアプローチにおいて、視覚情報を持つ複数移動ロボットに対して技術的に数々のアルゴリズム等が提案され始めていることから明らかである。しかしそのアプローチ手法では理論的な裏づけがまだ不十分であり、それらを制御理論的なアプローチから提案することは、安定性の保証はもとより、より一層の性能向上にもつながる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、視覚フィードバック制御と複数ロボットの協調制御を統合し、全方位カメラを有する複数ロボットに対して、システム全体の安定性を保証する視覚フィードバック協調制御を提案することを目的とする。

る。

申請者は従来研究で、ピンホールカメラを有する複数台のマニピュレータシステムに対して、動きを同調させるシンクロ視覚フィードバック制御則を提案してきた。この制御則は時不変な目標相対位置姿勢に対してマニピュレータが追従し、かつ情報交換を行うことでそれぞれのマニピュレータの同調を促すものであり、機械システム以外にもマニピュレータダイナミクスを考慮しない形で適用可能となる。しかし、カメラをピンホールカメラとしてモデル化しているために、移動ロボットを考えた場合に重要となる全方位の視覚情報の取得まで考慮できていない。さらに、時不変な目標値にしか追従できないために、障害物が多い場所での適用や各ロボットにより協調させて作業を行わせることが難しい。

そこで本研究ではこの研究を発展させ、障害物並びに特徴点喪失回避が可能な目標値の生成まで議論に入れた、全方位カメラを有する複数ロボットの視覚フィードバック協調制御の設計を目指す。カメラはピンホールカメラと双曲面鏡から構成される全方位カメラを想定することで、全方位視野を有する移動ロボットを制御対象としてモデリングし、制御系設計することとする。これにより、前後左右にいるロボットの位置姿勢が把握できるようになることから、横方向や後方のロボットとの情報もやりとりできるようになる。また目標値においては、人工ポテンシャル場の考えを発展させたナビゲーション関数を用いることで、特徴点喪失回避を保証し、かつ障害物と衝突しない目標値の生成手法を提案する。さらに複数ロボットの視覚フィードバック協調制御則として、リーダーとなる移動ロボットに対して、他の移動ロボットが追従可能となる制御則を提案する。本研究の視覚フィードバック協調制御は、視覚情報の取得からモデリングし、かつ目標値追従まで考慮されることから、結果をより発展させることで、特に危険物の探索、火災や不審者の進入等に対する環境や施設の監視など複数のシステムへの適用につながると考えられる。

本研究は、視覚フィードバックシステムが有する受動性という性質を保存したままシステムを構成することで、安定性を保証した制御則を提案する。本研究では、提案する制御則を実際の全方位カメラを用いた移動ロボットや小型自律飛行ロボットによる検証実験を通して、設計法の性能評価および有効性の検証を行う。

3. 研究の方法

本研究では、はじめに全方位カメラを有するロボットの視覚フィードバック制御を提

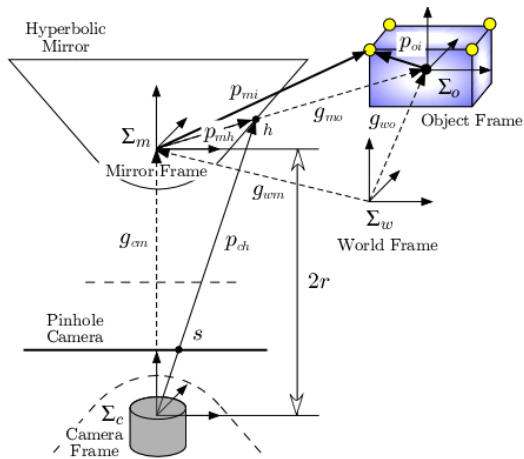


Fig. 1 全方位カメラモデル

案する。つぎに視覚フィードバック制御のための目標値生成法を設計する。最後に、視覚フィードバック協調制御則を提案する。それぞれの制御則は下記の方法で提案した。

はじめに対象とするシステムに対して、数学的にモデリングすることから始める。特に本手法では、非線形オブザーバを用いて、カメラからみた対象物への相対位置姿勢を推定するところに特徴を持つ。つぎに制御目的を設定し、その制御目的を満足するような制御系設計を行う。制御則はモデリングした視覚フィードバックシステムを受動システムとさせたことを上手く利用し、リアプノフの安定定理に基づく安定性解析および目標値の収束性解析を行う。提案する制御則の有効性を検証するために、計算用のソフトウェアであるMATLABとSimulinkを用いてシミュレーションを行う。さらに、車輪型全方向移動ロボットや小型自律飛行ロボットを用いて、提案する手法の実機による検証を行う。特に実装する際には、シミュレーションでの理論値との比較の他、カメラが特徴点を取りにくくなる位置や姿勢などを考慮して、どれくらい劣悪な環境でも有効なのかという制御則の評価を行い、生じる問題に対する解決策も検討する。

4. 研究成果

ここでは紙面の都合上、主要結果のポイントのみを述べる。詳細は「5. 主な発表論文等」にて示す下記の文献をそれぞれ参考にされたい。4.1節：雑誌論文⑤，4.2節：雑誌論文①及び④，4.3節：雑誌論文②，4.4節：学会発表①。

(1) 全方位カメラを有するロボットの視覚フィードバック制御

本研究では、全方位カメラを有する視覚フィードバックシステムに対する制御手法を提案した。はじめに、Fig. 1に示すような双曲面鏡とピンホールカメラから構成される

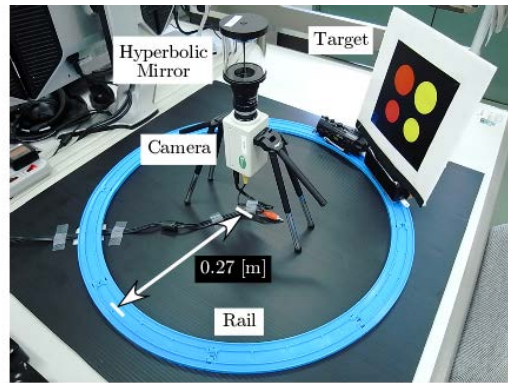


Fig. 2 全方位カメラに関する検証実験

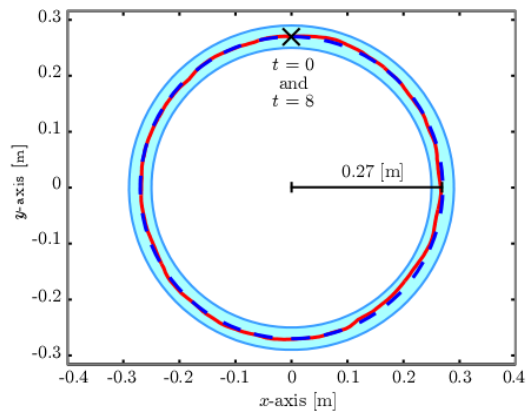


Fig. 3 全方位カメラに関する実験結果

全方位カメラモデルを数学的に定式化した。つぎに、全方位カメラモデルに対する非線形オブザーバを設計した。非線形オブザーバにより、2次元情報であるカメラ画像より得られる画像特徴量から、3次元情報であるカメラから対象物への相対位置姿勢を推定することができる。さらに、受動性を上手く用いることで、全方位カメラシステムに対する視覚フィードバック制御則を提案した。提案した視覚フィードバック制御則に対して、観測対象が静止しているときにはリアプノフの安定定理を用いた安定性の証明を、また、観測対象が運動する場合には、それらを外乱として捉えた外乱抑制問題を考えることで、 L_2 ゲイン制御性能解析を行っている。本制御手法はFig. 2で示した全方位カメラを用いた実験システムにより、推定問題に対する検証実験を行っている。Fig. 3の破線が対象物のトラジェクトリーを表しており、実線が非線形オブザーバにより得られるその推定値を表している。全方位カメラの特徴により、360度のカメラ視野が得られ、かつ実験結果によりカメラから観測対象物への相対位置姿勢が正確に推定できていることが確認できる。

(2) カメラ視野内に画像特徴点を維持する視覚フィードバックシステムに対する目標値生成

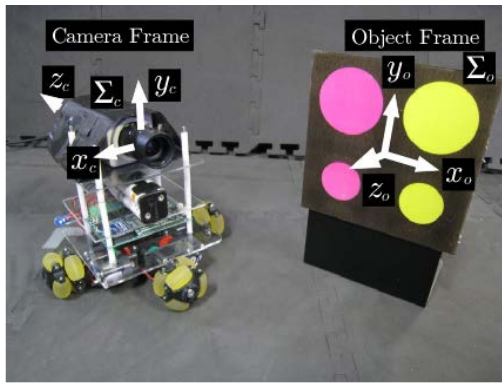


Fig. 4 カメラ視野に関する検証実験

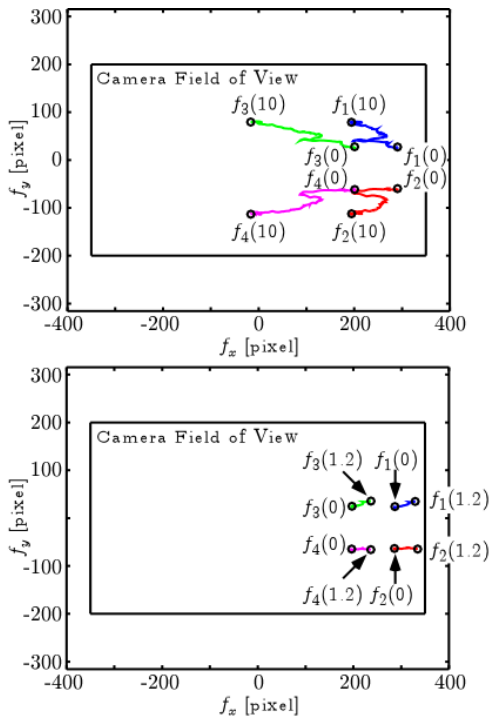


Fig. 5 カメラ視野に関する実験結果

本研究では、画像空間上のナビゲーション関数を用いて、カメラ視野内に画像特徴点を維持することができる安定化モデル予測制御則を提案した。はじめに、これまでは時不変で与えられていた目標位置姿勢が、時変となる場合の受動性に基づく視覚フィードバックシステムに対して、安定化モデル予測制御を提案した。さらに、カメラ視野の中に画像特徴点を常に保持できるように、画像空間上のナビゲーション関数を用いることでその目標位置姿勢を生成した。目標位置姿勢生成の際に必要な目標速度は、画像空間上のナビゲーション関数の勾配を用いて設計している。提案した目標位置姿勢生成手法は、ナビゲーション関数をリアプノフ関数候補とすることで、カメラ視野内に常に画像特徴点を維持し、かつ与えられる目標位置姿勢の最終値に収束することを証明している。本研究はピンホールカメラモデルで制御手法を

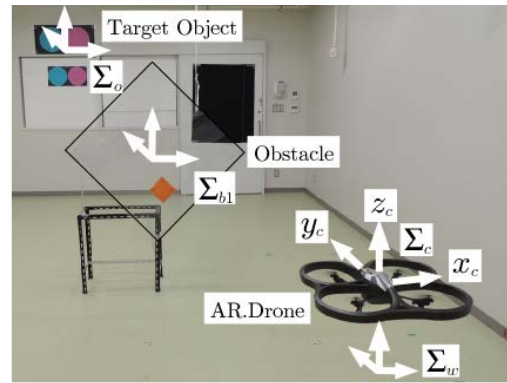


Fig. 6 障害物回避に関する検証実験

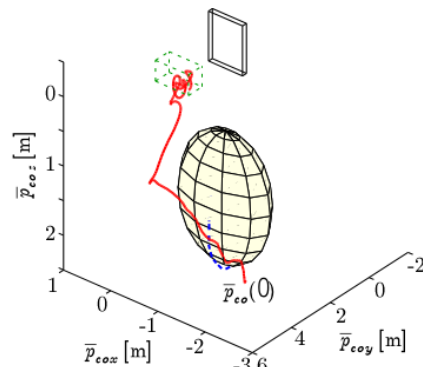


Fig. 7 障害物回避に関する実験結果

提案しているが、全方位カメラシステムに対しても拡張可能である。本研究は Fig. 4 に示すオムニホイールを有する全方向移動ロボットを用いた検証実験を行った。Fig. 5 の上の図が提案手法による実験結果、下の図が時不変の目標位置姿勢を用いる従来手法の実験結果を示している。従来手法は1.2秒でカメラ視野から対象物を外してしまったために、実験は失敗に終わっている。それに対して、上の提案手法を用いた実験結果の場合は、カメラ視野内に特徴点を維持したまま視覚フィードバック制御を行えており、最終的な目標位置姿勢にも収束している。

(3) 視覚フィードバックシステムに対する障害物回避可能な目標値生成

本研究ではさらに、障害物回避のためのナビゲーション関数を用いた安定化視覚フィードバック制御則を提案した。障害物回避においては障害物までの距離が重要となるが、本手法はカメラモデルを通じた画像特徴量から障害物の位置を推定する問題も含んだ上で目標位置姿勢の生成が可能な手法となっている。また、本手法は視覚情報を用いた他の障害物回避手法に対して、レンジセンサなどの測距センサを用いずに一台のカメラのみで障害物回避を行えるという利点がある。なお、ナビゲーション関数をリアプノフ関数候補とすることで、設計する目標位置姿勢が障害物に衝突しないことと設定する最

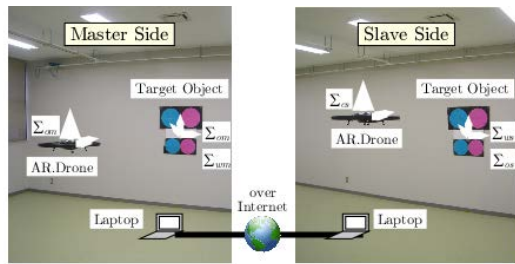


Fig. 8 パイラテラル制御に関する検証実験

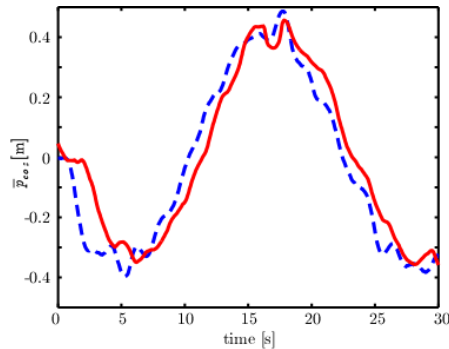


Fig. 9 パイラテラル制御に関する実験結果

終目標位置姿勢に収束することを示している。また、提案手法の有効性を検証するために、カメラを搭載した小型自律飛行ビークルを用いて検証実験を行った。Fig. 6 に実験環境を示す。この実験環境は目標対象物に向かって直進した場合、障害物に衝突することを想定している。Fig. 7 に実験結果を示す。Fig. 7 の破線で示すように、従来手法である時不変の目標位置姿勢を用いた制御手法では、障害物にぶつかり、最終目標値へ到達することができなかった。それに対して、提案した障害物回避ナビゲーション関数を用いた手法は、実線で示すように、障害物を回避しながら設定する最終目標位置姿勢へ収束させることができた。

(4) 移動ロボットに対する視覚フィードバックパイラテラル制御

本研究では最後に、複数ロボットの協調制御則として、リーダーとなる移動ロボットに対して、他の移動ロボット（以後、スレーブロボットと呼ぶ）が追従可能な視覚フィードバックパイラテラル制御則を提案した。本制御手法は、位置と姿勢それぞれに対してリーダーの動きに追従できるような制御手法となっており、外部に力が加えられた場合には、その力の伝達も可能な制御則となっている。本手法も非線形オブザーバで相手の位置姿勢を推定することが特徴となっており、ピンホールカメラでモデリングを行っているが全方位カメラに拡張することも可能である。リアプノフの安定定理とラサールの不変定理より、閉ループ系の安定性の議論を行っている。提案した制御手法に対して、Fig. 8 に

示した小型自律飛行ロボットを 2 台用いて、有効性の実験検証を行った。リーダーロボットとスレーブロボットを操作するそれぞれのパソコンはインターネットを介して接続されている。Fig. 9 は破線がリーダーロボットの、また実線がスレーブロボットの高さ方向のトラジェクトリを示している。Fig. 9 より、スレーブロボットがリーダーロボットの動きに追従して移動しているのが確認できる。

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 6 件）

- ① T. Murao, H. Kawai and M. Fujita, Stabilizing Predictive Visual Feedback Control via Image Space Navigation Function, Electronics and Communications in Japan, 査読有, Vol. 96, 2013 (to appear).
- ② 村尾俊幸, 河合宏之, 鶴尾有生, 藤田政之, ナビゲーション関数を用いた視覚フィードバック制御による障害物回避, 電気学会論文誌C, 査読有, Vol. 133, No. 7, Jul., 2013 (to appear).
- ③ 河合宏之, 村尾俊幸, 鶴尾有生, 藤田政之, 入力飽和を考慮した小型自律飛行ロボットの動的視覚オブザーバによる位置姿勢制御, 計測自動制御学会論文集, 査読有, Vol. 49, No. 6, Jun., 2013 (to appear).
- ④ 村尾俊幸, 河合宏之, 藤田政之, 安定化予測視覚フィードバック制御に対するナビゲーション関数を用いた目標位置姿勢生成, 電気学会論文誌C, 査読有, Vol. 132, No. 5, pp. 721-729, May, 2012. (DOI:10.1541/ieej.iss.132.721)
- ⑤ H. Kawai, T. Murao and M. Fujita, Passivity-based Visual Motion Observer with Panoramic Camera for Pose Control, Journal of Intelligent and Robotic Systems, 査読有, Vol. 64, No. 3-4, pp. 561-583, Dec., 2011. (DOI:10.1007/s10846-011-9557-5)
- ⑥ T. Murao, H. Kawai and M. Fujita, Stabilizing Predictive Visual Feedback Control for Fixed Camera Systems, Electronics and Communications in Japan, 査読有, Vol. 94, No. 8, pp. 1-11, Aug., 2011. (DOI:10.1002/ecj.10357)

〔学会発表〕（計 8 件）

- ① T. Murao, H. Kawai, Y. Tsuruo and M. Fujita, Visual Motion Observer-Based

- Bilateral Control for Eye-in-Hand Mobile Robot Teleoperation, The 2013 IEEE Multi-conference on Systems and Control, Hyderabad, India, Aug. 29, 2013 (to be presented).
- ② Y. Tsuruo, T. Murao, H. Kawai and M. Fujita, Visual Motion Observer-based Pose Control via Obstacle Avoidance Navigation Function for Eye-in-Hand Systems, The 38th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Montreal, Quebec, Canada, Oct. 25, 2012. (DOI:10.1109/IECON.2012.6388850)
- ③ T. Murao, H. Kawai and M. Fujita, Visual Motion Observer-based Stabilizing Receding Horizon Control via Obstacle Avoidance Navigation Function, The 2012 IEEE Multi-conference on Systems and Control, Dubrovnik, Croatia, Oct. 4, 2012. (DOI:10.1109/CCA.2012.6402426)
- ④ 鶴尾有生, 河合宏之, 村尾俊幸, 入力飽和を考慮した動的視覚オブザーバによる小型自律飛行ロボットの位置姿勢制御, 第12回SICEシステムインテグレーション部門講演会, 京都, Dec. 23, 2011.
- ⑤ T. Murao, H. Kawai and M. Fujita, Passivity-based Iterative Learning Control for Visual Feedback System, The 2011 IEEE Multi-conference on Systems and Control, Denver, Colorado, USA, Sep. 29, 2011. (DOI:10.1109/CCA.2011.6044394)
- ⑥ T. Murao, H. Kawai and M. Fujita, Visual Motion Observer-based Pose Control via Image Space Navigation Function, The 8th France-Japan Congress and 6th Europe-Asia Congress on Mechatronics, Yokohama, Japan, Nov. 22, 2010.
- ⑦ T. Murao, H. Kawai and M. Fujita, Visual Motion Observer-based Stabilizing Receding Horizon Control via Image Space Navigation Function, The 2010 IEEE Multi-conference on Systems and Control, Yokohama, Japan, Sep. 9, 2010. (DOI:10.1109/CCA.2010.5611200)
- ⑧ H. Kawai, T. Murao and M. Fujita, Visual Motion Observer-based Pose Control with Panoramic Camera via Passivity Approach, The 2010 American Control Conference, Baltimore, Maryland, USA, Jul. 1, 2010.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

村尾 俊幸 (MURAO TOSHIYUKI)
産業技術大学院大学・産業技術研究科・助教

研究者番号 : 00447038

(2) 研究分担者

()

研究者番号 :

(3) 連携研究者

()

研究者番号 :