

令和元年6月18日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06183

研究課題名(和文) 複眼動画像立体視認識による自律型水中ロボットの誘導嵌合制御の確立と実海域実証実験

研究課題名(英文) Establishment of Docking Control by Stereo-vision Real-time Space Perception for Autonomous Underwater Vehicle and Real-sea Verification Experiments

研究代表者

見浪 護 (Minami, Mamoru)

岡山大学・自然科学研究科・教授

研究者番号：80262608

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：ROVを用いてプールや瀬戸内海牛窓の実海域での連続嵌合実験を行い、(1)海水濁度レベルが低い(5FTU以下)、(2)昼間の光環境、(3)海流方向に対し模擬充電ステーションの嵌合穴方向の平行を維持、が満足されれば最大90回程度(約1時間)の連続嵌合(嵌合ストローク600mm)が可能であることを実証した。さらに嵌合穴とROVの相対位置・姿勢を測定する3次元マーカーを発光型に改良し、(a)濁度レベルが12FTU程度、(b)深夜の光環境、という深海模擬環境において連続嵌合が可能であることを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

AUVの自動嵌合はロボットのエネルギー源であるバッテリーの海底での自動充電につながり、深海底での自律型知能ロボットの長時間の自律連続運転や作業を行うことが可能になり、この技術は、長期間連続航行を要する海底資源探査・回収や海中未確認生物の生態調査等への利用が期待される。東京大学の協力を得て、プール環境で自律型水中ロボットAUV(Autonomous Underwater Vehicle)を用いた水中模擬充電実験(模擬水中充電ステーションに水中ロボットに装着した棒を嵌合させる実験)に成功した。この技術は、長期間連続航行を要する海底資源探査・回収や海中未確認生物の生態調査等への利用が期待される。

研究成果の概要(英文)：Through conducting continuous repeated docking in pool and real sea -Setouchi Inland Sea-, nearly ninety-times dockings with the stroke of 600[mm] have been verified to be executable, should the following prerequisite conditions be satisfied. The prerequisite conditions are (1)turbidity level is lower than 5[FTU], (2)lighting environment is daytime condition, (3)docking hole direction is kept to be parallel to the current orientation. Furthermore, by making the 3D-marker for detecting relative pose between the marker and the underwater vehicle being able to light-emitting, the restricting prerequisite condition on how much extent the vehicle can dock, has been expanded. The expanded abilities are (a)the turbidity could be successful up to 12[FTU], (b)pitch-dark lighting environment does not pose any problem for docking, which has been enabled by lighting-3D-marker.

研究分野：知能ロボット

キーワード：自律型水中ロボット 複眼カメラ 立体空間認識 模擬充電実験 ドッキング 自律型知能ロボット
海底資源探査 長期連続航行

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

【申請者の研究経緯】

気中(水中に対して陸上を「気中」と呼ぶ)では GPS 機能を用いた位置同定が可能であるが、水中では電波が届かないため不可能である。また音波(ソナー)による環境計測は精度が悪く、水中の計測技術は未熟である。申請者は、複眼で動画像を認識し空間計測に基づいてロボットを制御するビジュアルサーボ技術を水中ロボットに応用し、水中での自動充電を可能とする自動ドッキング(以下、嵌合)制御技術について研究を続けてきた。その結果深海底での継続的運用が可能なロボット作業の実現につながる自律水中ロボット(Autonomous Underwater Vehicle: AUV)の自動充電模擬実験(仮想充電ステーションとの嵌合を意味する)の実海域実証実験に成功した。さらに発光 3 次元マーカーを考案することで、深海底を模擬した漆黑光環境と海底泥舞上り条件下での実海域嵌合にも成功し、注目されている。

【日本の状況】

2013 年にスタートした第 2 次海洋開発 5 か年計画の中で海洋研究開発機構(JAMSTEC)が、自動充電を行いつつ海底調査タスクなどを長期にわたって実行できる AUV を開発する計画「無人探査機複合観測システムの基本設計及び試作評価」を発表した。具体的目標は、伊豆大島沖大室ダシで自動充電を行いつつ長期間自律行動が可能な知能ロボットシステムの開発であった。しかし計画完了年の 2017 年度時点で、この計画は達成されていない。これを受けて 2018 年 4 月に内閣府は「戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)次世代海洋資源調査技術(海のジパング計画)研究開発計画(第 3 次 5 か年計画)」を策定し、同年 7 月には「革新的深海資源調査技術研究開発計画」を発表した。深海資源調査技術の開発の中で水深 6000 メートルでの自律充電可能な AUV の開発と深海底充電ターミナルシステムによる長期潜航運用・実証を目指した計画である。また財団法人 JKA は、「救助ロボット搭載用立体視機能の調査補助事業報告書」で 3 次元構造を把握する空間認識の重要性を指摘した。この報告書は静止画像に対する検討であり、ステレオビジョン動画像を用いた立体視空間認識は記述されていなかった。この実時間空間認識の難しさは、現在でも変わらない。AUV の嵌合技術の課題は、水中位置姿勢の実時間計測をフィードバックした閉ループ系の制御安定性確保が難しい点である。

2. 研究の目的

上記 SIP 計画に沿った自律充電可能な AUV の研究開発と、両眼転導を用いた新しい複眼空間認識を研究し、海底長期滞在型知能 AUV の実現を目指している。世界各国の研究機関・大学は、上記嵌合タスクを実行できるシステムを構築しようと努力しているが、いまだ深海底での継続的自律充電の報告はない。本研究の目的は、深海底環境において海底探索、資源回収、基地建設、などの作業を行うことができる実用的知能 AUV の研究開発である。この目的を達成するためには、まず AUV のエネルギーの自律的確保が重要であり、確実な充電機への嵌合と充電が可能なシステムの構築すること、またその実用性を実海域で実証することが重要であり、これが本研究の目的である。研究項目を、「実海域深海模擬環境(深夜の漆黑光環境及び海底泥舞上り混濁環境)での自律水中ロボットの充電と長期滞在実証」とする。

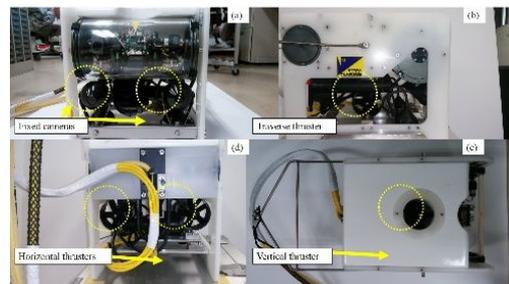
海洋開発技術や AUV の技術開発の特徴は、「実験実証的に開発を進める」という点にあり、実験室のみでの研究は意味を持たない。この点に留意し、本研究は瀬戸内海実海域に常設実海域実験場を建設し実証的に研究を進める。岡山大学は、理学部附属牛窓臨海実験所に漁業権の設定の無い海域を所有し、海面使用権を保持している。この海域に充電ステーションを建設し深夜の海を利用して深海模擬環境を作り出し、(a)帰巢、(b)嵌合、(c)充電、(d)離脱、(e)海底想定タスク、を繰り返す深海自律行動シナリオを達成する海底長期滞在型 AUV の開発と実証実験を行う。

期待される効果としては、常設実海域実験場の建設は、外洋で実験する場合の船で沖合に出る手間、時間、コストを省くことができることである。また常設設備を岡山大学理学部の臨海実験場に設置することが可能であることは、理学部に確認済みである。提案している「ステレオビジョンによるドッキング制御と実海域充電実証」を瀬戸内海常設実験場で行うことができれば、実際の深海での充電への一歩となる。

3. 研究の方法

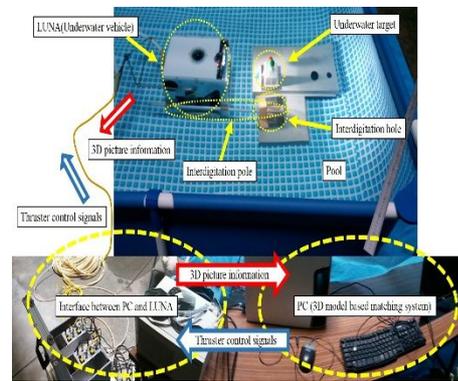
【水中ロボット系の構築と両眼転導機能の追加】

実海域使用の ROV (最大深度 50m) を右図に示す。以下の仕様は平成 26-27 年度の共同研究に使用した ROV(右上に推進装置、右中に 3D マーカーと嵌合筒水中ロボット、右下に制御コンピュータとアンプを示す)である。両眼視覚センサーとして、遠隔操縦用チルト機構付きカメラ 1 台と制御用として前方 2 台および下方 2 台(撮像素子 CCD、画素数 38 万画素、信号方式 NTSC、最低被写体照度 0.8[lx]) を搭載し、複眼構成で対象物の立体認識を行う。さらに両眼転導機能を追加し立体視機能を高めた構成とする。水中動力系では、水平スラスト 2 基、垂直スラスト 1 基、横スラスト 1 基(各 10.0[N]) に補強する。また、照度確保のため LED ライトを 2 基搭載する。



[水中実験系の構築]

簡易プール(4×6×0.7m)を準備実験用プールとして使用する。電源・画像送信用テザーケーブル(50m)を介して ROV への給電ならびに実験槽脇に設置した PC を介して対象物の画像情報ならびに制御信号等の通信を行う。PC 側では ROV 搭載の 2 台のカメラから送られる対象物の立体像情報を基に、実時間遺伝的認識法による 3D モデルベーストマッチングを行い 3D マーカーと水中ロボットの相対的位置姿勢を計測する。さらに、認識結果と相対的目標位置・姿勢との誤差に基づく PD 制御によって計算された指令電圧値を水中ロボットのスラスタに与えることで、推力を発生させ安定化させる。



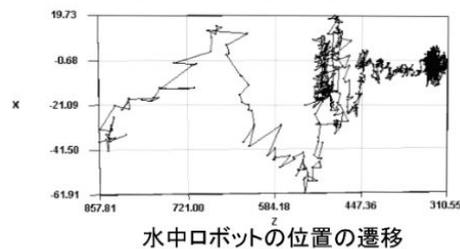
4. 研究成果

【研究の経緯】

[帰巢機能確認実験]

本計画での水中嵌合充電実験の予備実験データを右図に示す。アプローチから嵌合までの帰巢機能基本性能についてプール環境ではすでに確認済みである。

右図はアプローチから嵌合に至る水中ロボットの運動軌跡を調べた予備実験結果である。嵌合ロッドの半径方向の偏差余裕は 25mm であり、現在の世界の水中ロボットの位置決め精度ソナーによるメートル単位であることを考えると高精度の位置決めがすでに可能であることが分かった。右下図は水中ロボットのドッキング時の位置軌跡である。上記の準備実験でプールでの水中ロボットと充電器との自動嵌合が可能であることが確認されたが、外乱に満ちた実海域での海流、海藻、濁りなどの影響は未知であり瀬戸内海での実証実験を行う必要がある。



[実海域帰巢性能確認実験]

広和(株)(和歌山県有田市)所有の海水プールと付近の入江で帰巢性能確認実験を行った。実海域充電実験のためにすでに製作された自光マーカー、ソナー発信機、海中充電装置の動作をプールで実験し確認した後に、実海域で帰巢システムによるアプローチ嵌合実験を行った。

[3D マーカー認識に対する海流、海水の濁りの影響に関する実験]

実海域では、海流による海底砂泥舞い上がりやプランクトンによる視界不良状態となる場合が多い。このため 3D マーカーを自光式として視認距離を延ばす対策をとった。提案の認識方法はモデルベースとマッチング法であるため、マーカーの一部が海中浮遊物で隠れてしまう状態であってもロバストに認識できる性能を持つ。遮蔽物の存在下で 3D 実時間画像認識の実海域での画像認識のロバスト性を確認する。さらに潮流、海藻の動的変化による外乱の影響、アプローチ段階の運動制御性能などのデータを取得し、目標軌道追従特性と外乱抑制特性を兼ね備えた 2 自由度予測制御の有効性を実証する。

[気中での両眼転導複眼立体視によるロボット制御実現による準備]

水中ロボットでは、世界的に単眼での制御を行っている。これは 2 次元の縮退したカメラ撮像情報から、3 次元情報を逆射影して再構成する問題が不良設定問題と呼ばれている難問であることに由来している。つまりステレオビジョンで立体対象物の空間位置姿勢を認識しようとするとき、左右カメラに撮像された 2 次元平面内の対象物のそれぞれの点が立体対象物上の点に正しく対応していない場合に、3 次元位置姿勢は誤差を含み、生成された 3 次元情報は正しくない。この問題に対して申請者は 3 次元立体モデルをカメラ画像面に順射影して位置姿勢を測定する方法を提案し、その効果を気中ロボットのビジュアルサーボで実証した。この提案手法は逆射影ではなく順射影を用いることで、上記の不良設定問題を回避した方法である。さらに両眼転導(寄り目になる眼球運動)の有効性を実証した。

[ステレオビジョンによる実用性の確認]

一方、単眼カメラを用いた水中ロボットの位置姿勢認識は、複眼立体視を用いないためカメラ視線方向の位置と姿勢角の計測精度が悪く、水中ロボットのドッキングは位置姿勢精度の点で問題があった。このような状況の中で、申請者は上記の 3 次元認識方法を用いた複眼実時間空間認識に基づく AUV の嵌合を、瀬戸内海牛窓での実証実験で有効性を示した。

[海底泥舞い上がりによる混濁環境に対するロバスト性の実証]

また深海底環境である漆黒光環境での海底泥舞い上がりによる画像の劣化が原因で画像認識をベースにした制御方法は、実用性が乏しいと目されていた。その欠点を、LED を埋め込んだ発光型 3 次元マーカーを考案し回避することに成功し、深海底模擬環境(漆黒光環境での海底泥の舞い上がり)での実用性を実証した。

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 0 件)

Khin NWE LWIN, Myo MYINT, Kenta YONEMORI, Naoki MUKADA, Yoshiki KANDA, Akira YANOUE, Mamoru MINAMI, Dual-Eye Vision-Based Docking Experiment in the Sea for Battery Recharging Application, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 査読有、Volume 12, Issue 2, pp.47-55, 2019

DOI: <https://doi.org/10.9746/jcmsi.12.47>

Khin Nwe Lwin, MyoMyint, NaokiMukada, Daiki Yamada, Takayuki Matsuno, Kazuhiro Saitou, Waichiro Godou, Tatsuya Sakamoto, Mamoru Minami, "Sea Docking by Dual-eye Pose Estimation with Optimized Genetic Algorithm Parameters", Journal of Intelligent & Robotic Systems, 査読有、Vol.92, Issue 1, pp.159-186, 2018, IF=1.583

DOI : 10.1007/s10846-018-0970-x

Khin Nwe Lwin, Naoki Mukada, Myo Myint, Daiki Yamada, Akira Yanou, Takayuki Matsuno, Kazuhiro Saitou, Waichiro Godou, Tatsuya Sakamoto, Mamoru Minami, "Visual Docking against Bubble Noise with Three-dimensional Perception Using Dual-eye Cameras", IEEE Journal of Oceanic Engineering, 査読有、2018、pp.1-24, IF=2.065

DOI:10.1109/JOE.2018.2871651

松野 隆幸, 西田 祐也, 米森 健太, 李 想, 向田 直樹, 加藤 直輝, Myo MYINT, 山田 大喜, Nwe Lwin KHIN, 見浪 護, "複眼立体認識を用いた水中嵌合実験(AUV を用いた制御機能検証)", 日本機械学会論文集, 査読有、Vol.84, No.858、2018

DOI: 10.1299/transjsme.17-00242

Myo Myint, Khin Nwe Lwin, Naoki Mukada, Daiki Yamada, Takayuki Matsuno, Yuuichirou Yoda, Saitou Kazuhiro, Mamoru Minami, "Experimental Verification of Turbidity Tolerance of Stereo-vision-based 3D Pose Estimation System", Journal of Marine Science and Technology, 査読有、2018、1-24、IF=1.119

DOI : 10.1007/s00773-018-0586-7

Khin Nwe Lwin, Naoki Mukada, Myo Myint, Daiki Yamada, Mamoru Minami, Takayuki Matsuno, Kazuhiro Saitou, Waichiro Godou, "Docking at Pool and Sea by Using Active Marker in Turbid and Day/Night Environment", Artificial Life and Robotics, 査読有、2018、1-11

DOI 10.1007/s 10015-018-0442-1

米森 健太, 矢納 陽, Myo MYINT, Khin Nwe LWIN, 見浪 護, 複眼ビジュアルサーボによる水中ロボットの実海域嵌合実験、日本機械学会論文集、査読有、Vol.83、No.848、2017、1-14、

DOI: 10.1299/transjsme.16-00410

Myo Myint, Kenta Yonemori, Khin New Lwin, Akira Yanou and Mamoru Minami, Dual-eyes Vision-based Docking System for Autonomous Underwater Vehicle: An Approach and Experiments, Journal of Intelligent & Robotic Systems (impactor factor=1.583), 査読有、2017、1-28

DOI: <https://doi.org/10.1007/s10846-017-0703-6>

Myo Myint, Kenta Yonemori, Akira Yanou, Khin Nwe Lwin, Mamoru Minami, and Shintaro Ishiyama, Visual Servoing for Underwater Vehicle Using Dual-Eyes Evolutionary Real-Time Pose Tracking, Journal of Robotics and Mechatronics, 査読有、Vol.28、No.4、2016、543-558

DOI:10.20965/jrm.2016.p0543

矢納 陽, 米森 健太, 石山 新太郎, 見浪 護, 松野 隆幸, 3次元マーカを用いたビジュアルサーボ型水中ロボットの気泡外乱に対する制御特性、計測自動制御学会論文集、査読有、Vol.52, No.5、2016、284-291

DOI:10.9746/sicetr.52.284

[学会発表] (計 1 7 件)

Xiang Li, Yuichirou Toda, Mamoru Minami, " Guidance Control and Docking of Remote Operated Vehicles," 24th International Symposium on Artificial Life and Robotics, B-Con PLAZA, Beppu, JAPAN, pp.911-915, January 23-25, 2019

Horng-Yi Hsu, Naoki Mukada, Daiki Yamada, Khin Nwe Lwin, Myo Myint, Yuichiro Toda, Takayuki Matsuno, Keigo Watanabe, and Mamoru Minami, "Stereo-vision visibility analyses in relation with turbidity and distance for AUV recharge docking," 24th International Symposium on Artificial Life and Robotics, B-Con PLAZA, Beppu, JAPAN, pp.905-910, January 23-25, 2019

Yoshiki Kanda, Myo Myint, Naoki Mukada, Daiki Yamada, Khin Lwin, Takayuki Matsuno, Yuichiro Toda, Mamoru Minami, "Applying Lighting Marker and Stereo-vision to

V-shaped-thruster Vehicle for AUV Deep Sea Docking," Proceedings of OCEANS 2018 MTS/IEEE Charleston, DOI:10.1109/OCEANS.2018.8604730, Charleston, Japan, Oct 22-25,2018

Sho Nakamura, Daiki Yamada, Naoki Mukada, Myo Myint, Khin New Lwin, Takayuki Matsuno, Yuichiro Toda, Mamoru Minami, "Development of Dual-eyes Docking System for AUV with Lighting 3D Marker," Proceedings of OCEANS 2018 MTS/IEEE Charleston, DOI:10.1109/OCEANS.2018.8604527, Charleston, Japan, Oct 22-25,2018

Kohei Yamashita, Hsu Horng Yi, Daiki Yamada, Naoki Mukada, Khin New Lwin, Myo Myint, Takayuki Matsuno, Yuichiro Toda, Mamoru Minami, "Improvement of 3D Pose Estimation Abilities by Light-Emitting-3D Marker for AUV Docking," Proceedings of OCEANS 2018 MTS/IEEE Charleston, DOI:10.1109/OCEANS.2018.8604867, Charleston, Japan, Oct 22-25,2018

Khin Nwe Lwin, Myo Myint, Naoki Mukada, Daiki Yamada, Takayuki Matsuno, Mamoru Minami, "Robustness of 3D Pose Estimation against Turbidity Using Dual-eye Cameras and Active/Lighting 3D Marker for Visual-servoing Based AUV," Proceedings of IEEE/MTS Techno-Ocean Conference 2018, Paper No.171129-081, Kobe, Japan, May 29-31,2018

Daiki Yamada, Naoki Mukada, Myo Myint, Khin Nwe Lwin, Takayuki Matsuno, Mamoru Minami, "Docking Experiment in Dark Environment Using Active/Lighting Marker and HSV Correlation," Proceedings of IEEE/MTS Techno-Ocean Conference 2018, Paper No.171129-098, Kobe, Japan, May 29-31,2018

Yoshiki Kanda, Naoki Mukada, Daiki Yamada, Khin Lwin, Myo Myint, Kohei Yamashita, Sho Nakamura, Takayuki Matsuno, Mamoru Minami, "Development and Evaluation of Active/Lighting Marker in Turbidity and Illumination Variation Environments," Proceedings of IEEE/MTS Techno-Ocean Conference 2018, Paper No.171129-095, Kobe, Japan, May 29-31,2018

Daiki Yamada, Naoki Mukada, Myo Myint, Khin Nwe Lwin, Takayuki Matsuno, Mamoru Minami, "Improvement of 3D-Pose Real-time Estimation by Active Marker and HSV-evaluated Function," 23rd International Symposium on Artificial Life and Robotics, B-Con Plaza Beppu, January 18-20, 2018

Khin Nwe Lwin, Myo Myint, Naoki Mukada, Daiki Yamada, Takayuki Matsuno, Mamoru Minami, "Pose Estimation by Optimizing Real-time Multi-step GA's Parameters," 23rd International Symposium on Artificial Life and Robotics, B-Con Plaza Beppu, January 18-20, 2018[PDF]

Khin Nwe Lwin, Myo Myint, Naoki Mukada, Daiki Yamada, Takayuki Matsuno, Mamoru Minami, "Docking Performance Against Turbidity Using Active Marker Under Day and Night Environment," 23rd International Symposium on Artificial Life and Robotics, B-Con Plaza Beppu, January 18-20, 2018

Xiang Li, Yuya Nishida, Myo Myint, Kenta Yonemori, Naoki Mukada, Khin Nwe Lwin, Matsuno Takayuki, Mamoru Minami, "Dual-eyes Vision-based Docking Experiment of AUV for Sea Bottom Battery Recharging," MTS/IEEE OCEANS' 17, Aberdeen Scotland, June 19-22, 2017

Naoki Mukada, Kenta Yonemori, Myo Myint, Khin Nwe Lwin, Akira Yanou and Mamoru Minami, "Tracking Trajectory Control of Dual-eyes Visual-based Underwater Vehicle," IEEE/SICE International Symposium on System Intergration, Sapporo Convention Center, December 13-15, 2016

Khin Nwe Lwin, Kenta Yonemori, Myo Myint, Mukada Naoki, Mamoru Minami, Akira Yanou, Takayuki Matsuno, "Performance Analyses and Optimization of Real-time Multi-step GA for Visual-servoing Based Underwater Vehicle," Techno-Ocean 2016, October 6-8, 2016

Lwin Khin Nwe, Yonemori Kenta, Myint Myo, Yanou Akira, Minami Mamoru, "Autonomous Docking Experiment in the Sea for Visual-Servo Type Underwater Vehicle Three-Dimensional Marker and Dual-Eyes Cameras," The SICE Annual Conference 2016, September 20-23, 2016

Myo Myint, Mamoru Minami, Kenta Yonemori, Khin Lwin, Akira Yanou, "Dual-eyes Visual-based Sea Docking for Sea Bottom Battery Recharging," MTS/IEEE OCEANS' 16, September 19-23, 2016

Myo Myint, Kenta Yonemori, Akira Yanou, Khin Nwe Lwin, Mamoru Minami and Shintaro Ishiyama, "Visual-based Deep Sea Docking Simulation of Underwater Vehicle Using Dual-eyes Cameras with Lighting Adaptation," MTS/IEEE OCEANS ,Shanghai International Convention Center, April 10-13, 2016

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

出願状況（計 1 件）

名称：物体識別システム
発明者：見浪護
権利者：岡山大学
種類：特許
番号：特願 2017-226064
出願年：2017 年
国内外の別： 国内

取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：松野 隆幸

ローマ字氏名：Matsuno Takayuki

所属研究機関名：岡山大学

部局名：自然科学研究科

職名：准教授

研究者番号（8 桁）：50377842

(2)研究分担者

研究分担者氏名：矢納 陽

ローマ字氏名：Yanou Akira

所属研究機関名：川崎医療福祉大学

部局名：医療技術学部

職名：准教授

研究者番号（8 桁）：70351658

(3)研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。