

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：32685

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01534

研究課題名（和文）超高精度フォーメーションフライトと補償光学による合成開口望遠鏡の地上実証

研究課題名（英文）Ground Demonstration Experiment of a Synthetic Aperture Telescope with High Precision Formation Flight and Adaptive Optics

研究代表者

宮村 典秀（Miyamura, Norihide）

明星大学・理工学部・教授

研究者番号：50524097

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、静止軌道周辺に超小型衛星を配置することで高空間分解能と高時間分解能を両立する「静止リモセン」の学術分野を切り開くことを目指し、複数の超小型衛星が共同で光学系を構成する「合成開口望遠鏡」の実現手法を提案した。そのためのキー技術は、衛星間の位置と姿勢の制御による超高精度フォーメーションフライト、光学系を構成する鏡を直接制御する能動光学、残った誤差を光の波面制御により補償する補償光学と、これらの協調制御である。本研究では要素技術を確立するとともに、「合わせ技」による合成開口望遠鏡の地上実証を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、静止軌道周辺に超小型衛星を配置することで高空間分解能と高時間分解能を両立する「静止リモセン」の学術分野を切り開くことを目指し、複数の超小型衛星が協働して光学系を構成する「合成開口望遠鏡」の実現手法を提案した。従来、異なる研究分野であった小型衛星のフォーメーションフライトと能動光学・補償光学を合わせることで段階的に精度を高める手法を実証した。本研究により両分野の協調による学術分野を創出した点に学術的意義がある。また、本研究の成果により常時高分解能観測を実現することにより、特に災害監視等の重要な社会基盤技術の向上につながる点に社会的意義がある。

研究成果の概要（英文）：We have developed a method for creating a synthetic aperture telescope using multiple small satellites to form an optical system. This system aims to enable "geostationary remote sensing," allowing for high spatial and temporal resolution by positioning small satellites around a geostationary orbit. The key technologies involved are precise formation flight through control of satellite position and attitude, active optics for direct control of the primary mirror, adaptive optics to compensate for remaining errors by controlling the wavefront of light, and cooperative control of these technologies. In our research, we have established the fundamental technologies and successfully demonstrated a ground-based synthetic aperture telescope using a combined technique.

研究分野：宇宙システムに向けた能動光学・補償光学

キーワード：補償光学 能動光学 宇宙望遠鏡 フォーメーションフライト 小型衛星 合成開口

1. 研究開始当初の背景

超小型衛星では、その低コスト・軽量性を利用した多数化により観測頻度を高め、もっぱら小型でも高い空間分解能の達成を目指す研究開発が行われてきた。研究分担者である中須賀が進めた内閣府 FIRST プログラム「(通称)ほどうしプロジェクト」で開発し 2014 年に打ち上げた 60 kg クラスの衛星では地上 6m の空間分解能が達成され、研究代表者である宮村が参加したキャンノン電子の CE-SAT-1 (2017 年 6 月打上げ) では 70 kg の衛星で地上 1m を切る空間分解能を実現するなど、小型衛星でも十分な実用レベルに達しつつある。一方で観測頻度に関しては、1 日間隔程度までは、AxelSpace 社の目指す AXELGLOBE 構想のように 50 機程度の衛星群で十分であるが、10 分間隔程度のはるかに高い観測頻度が必要な森林火災検知などは、数百~千機程度の衛星群を必要とするため、低軌道で衛星を増やす方針では超小型衛星であっても実現は困難である。一方、豪州で気象衛星ひまわりが、空間分解能が 2km 程度にもかかわらず森林火災検知に使われているのは、静止軌道における高い観測頻度という大きなメリットのためである。これは重要なヒントであり、高頻度観測が容易に実現できる静止軌道周辺からの観測を前提に、森林火災検知に限らずミッションに応じて必要な空間分解能や観測波長を開拓する学術体系を「静止リモセン」として整備することで、災害監視等の高い観測頻度を必要とする衛星利用の地平を広げることが予想される。

しかし、高空間分解能を獲得するには、光学の物理法則である回折限界の大きな壁が立ちはだかり、特に静止軌道のような遠距離から高い空間分解能を獲得するには巨大な口径が必要である。エアバス社の GO3S は 1 機の超大型衛星に口径 4m の大型ミラーを搭載し、静止軌道から地上約 3m の高空間分解能を狙うが、衛星システム実現に一千億円を超える莫大なコストがかかる。そこで、近年では分割型主鏡 (図 1) による大口径化へのアプローチが主流になりつつある。この方式では、比較的 low コストの分割鏡を複数並べることで、一枚鏡と比較してさらに大口径の分割型主鏡を形成する。一般に、光学系の鏡には観測波長の数分の 1 の面精度が求められ、分割型主鏡では個々の分割鏡の精密調整が課題であったが、ミラー自体の位置・姿勢制御や曲率制御を組み合わせた「能動光学」によって、Keck 望遠鏡、せいめい望遠鏡などの地上望遠鏡がすでに実現され、口径 30m にもおよぶ TMT (Thirty Meter Telescope) も開発中である。また、宇宙望遠鏡では、大口径分割型主鏡を用いた NASA の JWST や LUVOIR、JAXA の静止光学衛星などの研究開発が進められている。しかし、分割型主鏡でも、大口径の構造を支持するため衛星は大型になり、小型衛星による実現は難しい。

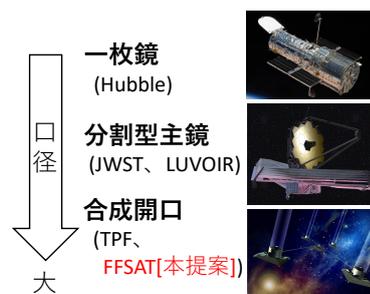


図1 主鏡の構成による大口径化

また、実現できる口径も打上げロケットの制約で 3.6m 程度、展開する場合でも 10m 程度と限界がある。

一方、人工衛星のフォーメーションフライト (FF) を用いて大口径を実現する合成開口方式 (図 1) が 2000 年代に注目され、NASA の TPF-I、ESA の DARWIN に代表される研究が世界的に進められた。しかし、光学系の相対位置・姿勢に求められる観測波長の数分の 1 の精度を FF 技術で達成することは困難であり、実現に至らなかった。ところが、近年、高精度なスラスターやセンサの発展により、FF の高精度化が進んでいる。超小型衛星ではトロント大の CanX-4&5 が 1m の相対位置制御精度を達成し、スタンフォード大の mDOT といった cm 級の相対位置精度により恒星の掩蔽で系外惑星探査をめざすプロジェクトも打ち上げを見据えて開発が始まっている。また、ESA の PROBA-3 では、mm 級の精度を目指した研究開発が進められている。このように、近年着々と「超高精度 FF」の研究開発が進んでいることを受けて、NASA/JPL 等、各国のチームが最新の FF 技術を利用した合成開口望遠鏡の概念設計や基礎実験に着手しているが、未だ決定的な実現方法は提案されていない。

合成開口望遠鏡実現の鍵を握るのが「補償光学」である。補償光学は大口径天体望遠鏡において、大気揺らぎを補正するために、鏡面形状を制御可能なデフォーダブルミラー (DM) を用いて光の波面を高速で補正する。ダイナミックレンジは数 μm から数十 μm であるが、高次の歪みを、観測波長の数分の 1 まで補正する技術であることから、代表者の宮村が「宇宙光学系の歪み補正に利用する手法を提案している。

このような背景から、我々は、mm 級を実現する超高精度 FF、数 μm 級を実現する能動光学、観測波長の数分の 1 の精度を実現する補償光学を組み合わせ合わせた合成開口望遠鏡の実現手法を提案し、地上実証することで、この分野でイニシアチブを取ることを狙う。

2. 研究の目的

本研究では、超高精度 FF、能動光学、補償光学を利用した超小型衛星による合成開口望遠鏡を提案し、地上実験によって技術実証する。

静止軌道からの地球観測は常時に近い観測ができることで災害監視に非常に有効だが、距離が遠くなることで空間分解能は低下する。合成開口方式では、複数の超小型衛星が分割鏡または検出器となり、軌道上で大口径望遠鏡を再構成する。打上げや構造の制約を受けず、超大口径の実現が可能であるが、従来一枚鏡、近年主流の分割型主鏡と比較すると、スパースな主鏡であることから口径に対する受光面積の比が小さく、空間周波数特性が中間領域で低下するというデメリットがある。しかし、静止軌道からの災害・森林火災検知のように、長時間露光により十分な光量が得られ、かつ発生源の位置、つまり高空間周波数情報が要求される場合、超大口径によって最大空間周波数を高めるメリットが特に活きる。これこそが、超小型衛星の社会貢献に向けての一つの大きな鍵となる。

ここで、合成開口望遠鏡の光学要素は、観測波長の数分の1の精度で相対位置・姿勢を保たなければならない。我々は、超高精度FFでmm級精度を、能動光学でmm～数μm級精度を、さらに補償光学で観測波長の数分の1の精度を達成し、さらにこれらを統合して合成開口望遠鏡を実現する手法の確立に向けて、既に要素技術の検証を進めている。実現の鍵は、最終成果物であり、補正すべき様々な誤差要因の影響が含まれた観測画像の効果的なフィードバックにあり、シミュレーションベースではすでにその実現可能性を示した。**本研究提案では、FFだけでは実現困難な超高精度を、能動光学、補償光学との統合により、現実的なFFの相対位置・姿勢制御精度でも実現する手法を示し、地上実験によって実証することを目的とする。**

3. 研究の方法

(1) 点光源の観測画像を用いたフォーメーションフライトと光学系の精密制御

点光源の観測により得られる Point Spread Function (PSF) を光学系が理想的な状態からどれだけずれているかを判定する情報として用いることができる。合成開口望遠鏡の主鏡を構成する鏡の像同士の干渉を利用して、高精度に主鏡の構成要素を調整する PSF Optimization method を提案した。はじめに、図2に示すように数学モデルを構築し、数値シミュレーションによって提案手法の検証を行った。さらに、高精度ステージ、レーザー干渉変位計、イメージセンサを用いた実験システムによって実証実験を行った。

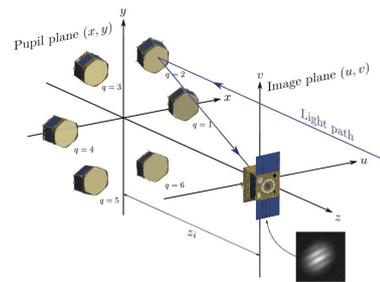
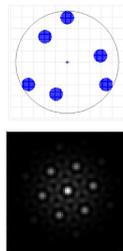


図2 合成開口望遠鏡のフォーメーションフライトと点光源観測像の数学モデル

(2) 観測画像を用いた合成開口望遠鏡の補償光学手法

合成開口望遠鏡システム構築の最終フェーズにおける精調整では観測波長の数十分の一程度まで精度を高める必要がある。本研究では、光の波面を調整する補償光学技術を用いて、方法(1)の調整で残った調整誤差を補正する手法を提案した。補償光学では、波面を調整する手段とともに、波面の誤差の測定または推定手法が重要である。我々は、特別な波面観測センサを用いずにミッションセンサで観測



$$\phi^{(1)}(\xi, \eta) = \sum_{j=1}^{J_f} a_j Z_j \left(\frac{2\xi}{D}, \frac{2\eta}{D} \right) + \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^{J_s} c_{ij} Z_j \left(\frac{2\xi}{D_s}, \frac{2\eta}{D_s} \right)$$

$$\phi^{(2)}(\xi, \eta) = \phi^{(1)}(\xi, \eta) + \theta(\xi, \eta)$$

$$L = \sum_{\mathbf{u}} \frac{|I^{(1)}(\mathbf{u}, v) S^{(2)}(\mathbf{u}, v) - I^{(2)}(\mathbf{u}, v) S^{(1)}(\mathbf{u}, v)|^2}{|S^{(1)}(\mathbf{u}, v)|^2 + |S^{(2)}(\mathbf{u}, v)|^2}$$

図3 光学系の波面関数の数学モデルと波面推定の評価関数

した画像をもとに波面推定を行う Phase diversity を合成開口望遠鏡の疎な開口に応用する手法を提案した。合成開口望遠鏡の光学波面 ϕ と波面推定の評価関数 L を図3のように定式化することで、数値計算により補償光学系の実証を行った。

(3) 合成開口望遠鏡システムの熱的実現性の検討

方法(2)で述べたように合成開口望遠鏡システム構築の最終フェーズにおいては補償光学系を用いて観測波長の数十分の一の精度で光学系を調整する。ここで、衛星光学系の熱歪みを補償光学系の調整範囲内に抑える熱設計が重要である。合成開口望遠鏡システムの熱構造モデルを図4のように構築し、数値シミュレーションによって、静止軌道上の熱環境を模擬した数値実証を行った。

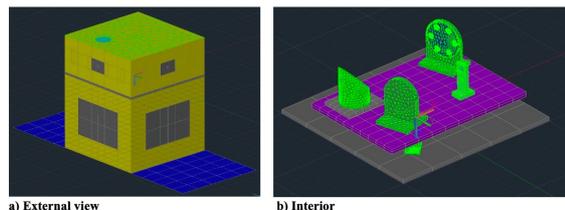


図4 撮像衛星の熱数学モデル

(4) 合成開口望遠鏡のハードウェアシミュレータによる地上実証実験

合成開口望遠鏡システムを波長オーダーで調整し、目標とする光学性能を達成することの地上実証を目的として、合成開口望遠鏡の地上実験システムを設計・構築した。提案手法により主鏡を構成する鏡同士の干渉を実現し、光学性能を達成可能であることを実証した。

4. 研究成果

(1) 点光源の観測画像を用いたフォーメーションフライトと光学系の精密制御

主鏡を構成する鏡同士の干渉像の特徴を利用して、鏡間の位置姿勢を調整することによって、数百波長の誤差を持った状態から、数波長程度の誤差まで精度を改善することが可能であることを示した(図5)。最終フェーズに置いて補償光学系によって補正可能な精度であり、合成開口望遠鏡システムの実現性を数値的に実証した。

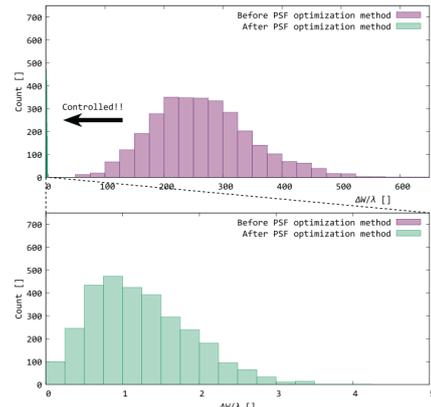


図5 数値計算による光学系のミスアラインメントの改善結果

(2) 観測画像を用いた合成開口望遠鏡の補償光学手法

地球観測を模擬した観測画像を用いて、提案した補償光学手法による最終フェーズの波面補償を行なった。各鏡に手法(1)の調整誤差程度の初期誤差を与えて、波面の乱れを推定し補正を行ない、理論限界程度の誤差まで追い込むことが可能であることを数値計算により実証した(図6)。

(3) 合成開口望遠鏡システムの熱的実現性の検討

静止軌道上の熱環境を模擬した熱解析、熱ひずみ解析(構造解析)を行なった。計算の前提とした光学系の構成において、軌道上での光学系の熱変形が補償光学系の制御能力の範囲に収まることが示された(図7)。

(4) 合成開口望遠鏡のハードウェアシミュレータによる地上実証実験

地球観測を模擬し、平行光を射出する光源装置、実際と同様の十数 μm 程度の過干渉距離を模擬した光源を用いて、3つの鏡による合成開口システムを構築し、観測画像を用いたミラーの制御実験を行なった(図8)。波長オーダーの制御を達成し、干渉画像の取得が可能であることが実証された。

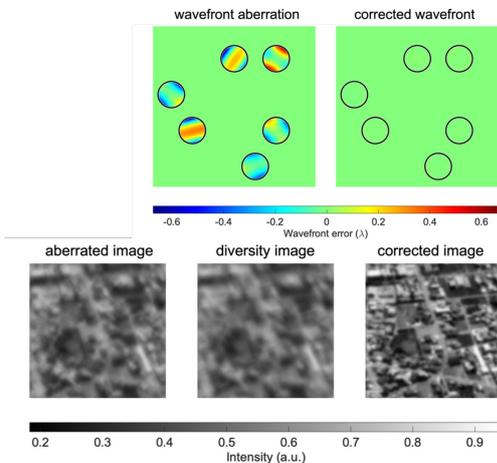


図6 数値シミュレーションによる観測画像を用いた補償光学系による波面補正結果

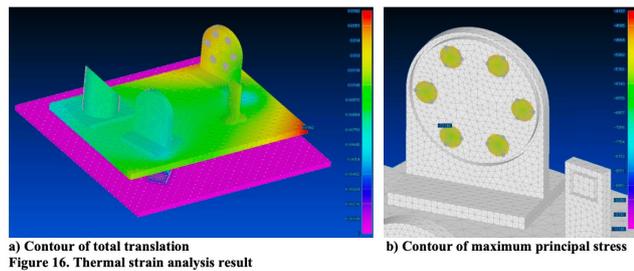


図7 合成開口望遠鏡撮像光学系の静止軌道上における熱解析結果

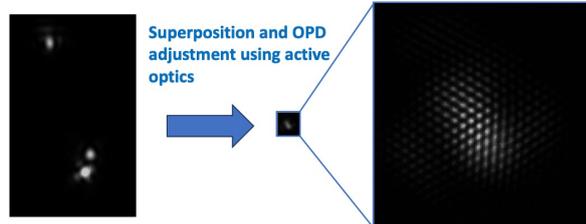
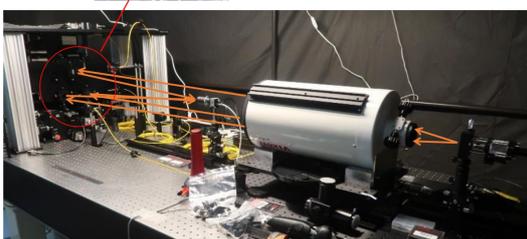


図8 合成開口実験システムと光学系の制御によって得られた観測画像

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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 Miyamura Norihide, Hirose Makoto, Sato Seichi	4. 巻 62
2. 論文標題 Sequential phase diversity for wavefront correction using a deformable mirror with modeling errors	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Applied Optics	6. 最初と最後の頁 7931 ~ 7931
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/AO.497155	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Norihide MIYAMURA, Ryo SUZUMOTO, Satoshi IKARI, Shinichi YOKOBORI, Shinichi NAKASUKA	4. 巻 1
2. 論文標題 Alignment and Wavefront Correction for the Formation Flying Synthetic Aperture Telescope (FFSAT)	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Evolving Space Activities	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.57350/jesa.42	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 -

1. 著者名 SUZUMOTO Ryo, IKARI Satoshi, MIYAMURA Norihide, NAKASUKA Shinichi	4. 巻 64
2. 論文標題 μ m-class Control of Relative Position and Attitude for a Formation Flying Synthetic Aperture Telescope with Micro-satellites	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES	6. 最初と最後の頁 101 ~ 111
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2322/tjsass.64.101	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 0件／うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Norihide Miyamura, Ryo Suzumoto, Satoshi Ikari, Shinichi Yokobori, Yosuke Kawabata, Shinichi Nakasuka
2. 発表標題 Phasing a synthetic aperture telescope using image-based adaptive optics
3. 学会等名 The 34th ISTS & 12th NSAT（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Norihide Miyamura, Ryo Suzumoto, Satoshi Ikari, Shinichi Nakasuka
2. 発表標題 Active optics for a formation flying synthetic aperture telescope
3. 学会等名 SPIE Sensors + Imaging 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 宮村典秀, 鈴木遼, 五十里哲, 中須賀真一
2. 発表標題 観測画像を用いた補償光学による合成開口望遠鏡 FFSAT の光学系調整手法
3. 学会等名 第 67 回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中村 介, 宮村 典秀, 五十里 哲, 鈴木 遼, 中須賀 真一
2. 発表標題 衛星編隊飛行による合成開口望遠鏡のための面光源を用いた高精度光学システムチューニング手法
3. 学会等名 日本航空宇宙学会 第55期 年会講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 宮村典秀, 鈴木遼, 五十里哲, 横堀慎一, 中須賀真一
2. 発表標題 補償光学を応用した合成開口望遠鏡 FFSAT の光学系調整
3. 学会等名 第 66 回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 横堀慎一, 鈴木遼, 宮村典秀, 五十里哲, 中須賀真一
2. 発表標題 Feasibility Study on Thermal Design for Synthetic Aperture Telescope Using Formation Flying Micro-satellites
3. 学会等名 51st International Conference on Environmental Systems (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木 遼, 宮村 典秀, 五十里 哲, 横堀 慎一, 中須賀 真一
2. 発表標題 超小型衛星フォーメーションフライトによる合成開口望遠鏡のための高精度位置・姿勢制御手法
3. 学会等名 第 66 回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ryo Suzumoto
2. 発表標題 Initial Result of High-precision Control Experiments with Optical System for Synthetic Aperture Telescope Using Formation Flying Micro-satellites
3. 学会等名 33rd International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木 遼
2. 発表標題 超小型衛星フォーメーションフライトによる合成開口望遠鏡のための光学系を伴う高精度制御実験
3. 学会等名 第65回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shinichi Yokobori
2. 発表標題 Feasibility Study on Thermal Design of Optical System for Synthetic Aperture Telescope Using Formation Flying Micro-satellites
3. 学会等名 33rd International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 横堀 慎一
2. 発表標題 超小型衛星FFにおける光学系の熱ひずみの観測性能への影響評価・改善手法の検討
3. 学会等名 第65回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Norihide Miyamura, Ryo Suzumoto, Satoshi Ikari, Shinichi Yokobori, Shinichi Nakasuka
2. 発表標題 Alignment and Wavefront Correction for the Formation Flying Synthetic Aperture Telescope (FFSAT)
3. 学会等名 33rd International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 宮村典秀, 鈴木遼, 五十里哲, 横堀慎一, 中須賀真一
2. 発表標題 フォーメーションフライトによる合成開口望遠鏡 FFSAT の光学系調整手法
3. 学会等名 第65回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 光の波面を補正するためのシステム、装置、方法、プログラム、及びプログラムを記憶した記憶媒体	発明者 宮村 典秀、広瀬 真、佐藤 世智	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2023-150252	出願年 2023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
研究分担者	五十里 哲 (Ikari Satoshi) (00802977)	明星大学・理工学部・主任研究員 (32685)	
研究分担者	横堀 慎一 (Yokobori Shinichi) (10898860)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・学術専門職員 (12601)	
研究分担者	中須賀 真一 (Nakasuka Shinichi) (40227806)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・教授 (12601)	
研究分担者	川端 洋輔 (Kawabata Yosuke) (80803006)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・助教 (12601)	

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
---------	---------