

令和 5 年 6 月 14 日現在

機関番号：23201
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2017～2022
課題番号：17K00275
研究課題名（和文）仮想・拡張・現実空間で書き込む空中筆記インタフェースの開発

研究課題名（英文）Research on Aerial Handwriting Interface in 3D Space

研究代表者

中井 満 (Nakai, Mitsuru)

富山県立大学・工学部・講師

研究者番号：60283149

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：現実空間の空中および仮想空間に文字を書き込むインタフェースの研究を行った。具体的には深度カメラ、加速度センサ、前腕表面筋電位センサなどから得られる信号を特徴量として用い、手の動きの情報を処理した。現実空間では空中に書いた見えない文字の認識、書いている人の識別・認証を行った。また、仮想空間では書いた文字の可視化、線画による物体検索などの研究を行った。これらの研究を通して自然な空中筆記のインタフェースを開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

研究成果の意義について、応用例を挙げて述べる。現実空間では、空中で文字入力するのでウェアラブルコンピューティングやライフログの記録に適している。筆跡を目視しない入力なので、画面をわき見するという危険行為も避けられる。仮想空間では、任意の場所に文字を書き留めることができる。現実空間の景観を損ねることなく、自身の記録やユーザ間の情報交換として役立つ。空中筆記は筆跡や指の跡を残さないため、非接触でロック解除/文字入力/操作ができる先進的なインタフェースである。

研究成果の概要（英文）：In this research, we developed aerial handwriting interface both in real space and virtual space. Specifically, signals obtained from a depth camera, an accelerometer, a forearm surface myoelectric potential sensor, were used as feature vectors for handwriting motion processing. In the real space, invisible characters written in the air were recognized and a person who wrote them were identified. Furthermore, those handwritten characters were visualized in the virtual space. Through these researches, we proposed a natural aerial handwriting interface.

研究分野：パターン認識

キーワード：手書き文字 空中筆記 文字認識 個人認証 ユーザインタフェース ジェスチャ インタフェース
バーチャルリアリティ パターン認識

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

三つの状況から空中筆記の構想に至った。一つ目は情報端末の小型化・ウェアラブル化である。スマートフォンのディスプレイではキーボード領域が狭く、文字を入力しづらい。ウェアラブル PC では文字入力は最大の課題と考えられ、新たな入力方式の習熟が必要になる。そこで、場所をとらない自然な入力方式として、空中に書いた文字を認識する空中筆記を考案した。二つ目は、拡張現実・複合現実の登場である。SFの世界では眼鏡をかけると現実空間には見えない物や情報がそこに見える。当時、斬新であったこのインタフェースも、今や実用レベルにまで発展している。現実空間では迷惑行為(落書き)ととられるような書き込みも、拡張空間では、自身の記録やユーザ間の情報交換として役に立つ。三つ目は、ジェスチャーインタフェースの普及である。家庭用ゲーム機の Nintendo Wii や Microsoft Kinect のように、人の動作の情報処理が容易になった。手の形状、指先や腕の動き、力の入れ方など、筆記した文字情報に加えて、筆記動作によるバイオメトリクス認証も可能である。以上の理由から、文字入力方式としての「手書き文字認識」と筆跡や署名による「筆記者識別・認証」を備えた「空中筆記インタフェース」の開発に至った。

2. 研究の目的

本課題は、「空中に文字を書く動作(ジェスチャー)」から、その「三次元的に書かれた文字」が「何の文字であるか」「誰が書いているか」「本人が書いているのか」をコンピュータで認識・認証する研究である。そして、その技術を応用して、現実空間や仮想空間において文字入力や筆跡を書き込む「空中筆記インタフェース」の開発を行うものである。具体的には以下のことを目標とした。

- (a) 現実空間での空中筆記：指先から前腕までに装着したセンサのみを用いて筆記する。空中での筆跡は見えないものとする。筆記中の手の位置座標や加速度信号を利用して、より小さな筆記では前腕の表面筋電位信号を利用して、文字を認識する。また、筆記者を識別する。
- (b) 仮想空間での空中筆記：ヘッドマウントディスプレイ(HMD)で筆跡を目視して筆記する。文字の認識ではなく、本人の筆跡を残す。できるだけ自然な筆記となるよう、筆記以外の操作は極力使わないことにする。

3. 研究の方法

(1) 空中手書き文字データの収集と整備

現実空間の空中筆記では筆跡は見えないので、指先を見ずに小さく筆記すると考えられる。そこで目視せずに筆記したときの手の位置座標と加速度信号を収集する。また、リラックスした状態で小さく筆記したときの前腕の表面筋電位信号を収集する。

(2) 仮想空間での空中筆記インタフェースの構築

現実空間の手の情報を仮想空間に映し、HMDで目視しながら指書きするシステムを構築する。仮想空間に筆記面を置く方法と自由な三次元空間に筆記する方法を検討する。筆跡そのものを可視化し、書き易さや筆記にかかる時間で評価する。

(3) 空中筆記を円滑にするためのジェスチャー認識

空中筆記では日常動作と筆記動作の境界が曖昧になる。筆記やジェスチャーの開始の検出方法を検討する。また、仮想空間ではペンを持つ(指でつまむ)動作を文字の書き始めとするなど、スムーズに操作できるインタフェースを検討する。

(4) 空中手書き文字の認識

筆跡の時系列パターンの認識に適した隠れマルコフモデル(HMM)、およびリカレントニューラルネットワーク(RNN)を用いる。筆跡を残さなくてよい文字認識では筆記途中で早期認識し、文字入力にかかる時間を短縮する。

(5) 空中筆記による筆記者の識別・認証

空中署名による個人認証の研究を行う。紙での筆記と異なって三次元的な回転や意図しない筆跡の崩れが生じる。それらに頑健な照合法を検討する。また、手をカメラで追跡する場合、筆跡以外の個人情報として手の形状も利用する。

4. 研究成果

(1) 空中手書き文字データの収集と整備

指先筆記とペン筆記の2種類の空中筆記について、手・指の位置座標を検出する深度カメラ (Microsoft Kinect, Leap Motion)、加速度センサを内蔵したペン (Nintendo Wii リモコン)、表面筋電位センサの腕輪 (Thalmic Labs, Myo)、これらを利用して筆記データを収集した。図1はデータを比較するため、文字「あ」を書く動作の信号を同時に収集した様子である。データ収集ではこれらを個別に使用して筆記した。

① Nintendo Wii リモコン :

手に持つタイプの空中筆記具として想定した。図では手の甲の側に固定しているが、実際のデータ収集では、ペンのように持つ、あるいはリモコンのように握って筆記した。3軸の加速度センサと3軸の角速度センサを内蔵し、10ミリ秒間隔でサンプリングした。図2はその加速度信号である。およそ60人のひらがな文字サンプルを収集した。

② Microsoft Kinect :

手からおおよそ80cm離れた正面に固定し、OpenNIのハンドトラッキングツールを使用して、手の重心点を追跡した。サンプリング間隔は50ミリ秒である。図3はその軌跡である。およそ20人のひらがな文字サンプルを収集した。また、ペンの持ち方情報を併用した筆記者認証の研究のため、筆記中の手形状の点群データも収集した。

③ Leap Motion :

手からおおよそ25cm真下のテーブルの上に固定し、人差し指先端の座標を追跡した。図4はその軌跡である。サンプリング間隔は10ミリ秒である。空中筆記では筆跡を見ずに書くので、図の「あ」の三画目のように位置関係が大きく崩れることもある。およそ20人のひらがな文字サンプルと14人の署名サンプルを収集した。また、ペンを持っているときの手・指関節24個の座標情報も収集した。

④ Thalmic Labs, Myo :

腕に装着するタイプの筆記具として想定した。8個の表面筋電位センサを前腕の周りに等間隔で配置した。図5は8個の表面筋電位のうち、腕の上側(y)と右側面(x)の電位の短時間パワーである。およそ10人のひらがな筆記時の表面筋電位データを収集した。



図1: 空中筆記動作の同時収集

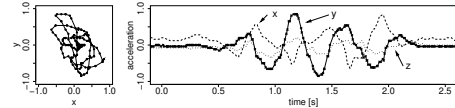


図2: 手の加速度 (Wii)

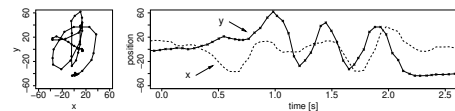


図3: 手の軌跡 (Kinect)

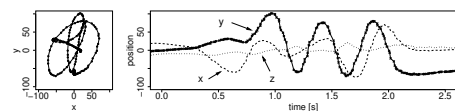


図4: 指の軌跡 (Leap Motion)

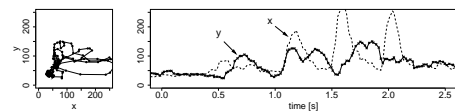


図5: 腕の表面筋電位 (Myo)

(2) 仮想空間での空中筆記インタフェースに関する研究

① 仮想ホワイトボード :

いつでもどこでも書ける仮想ホワイトボードを構想し、指先を追跡して筆記するインタフェースを構築した。手形状を検出するためにHMDの前面にLeap Motionを取り付けて使用した。仮想空間に呼び出した筆記面と人差し指先延長上の交点を筆点として筆跡を可視化した。図6のように仮想空間には白色で無地の平面オブジェクトがあり、これをホワイトボードとした。ホワイトボードに書くときは前方に手を伸ばし、人差し指の先端から数cm離れた座標に現れる球を筆記具として使用した。評価実験では、指定した文字列を10人の被験者になぞらせ、課題達成時間と筆跡誤差で評価した。筆記面の色・模様・透過度・傾斜角度や指先と筆記面までの距離などの条件を変えて、評価した結果、筆記面が45°、筆記具の長さ1.25cmのときが最も書き易く、達成時間と筆跡誤差ともに最小となることが分かった。

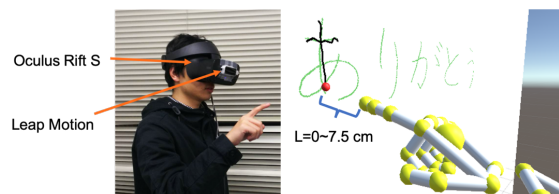


図6: 仮想ホワイトボード

② VR 空間筆記：

仮想ホワイトボードのようなオブジェクトのない空間で自然な手書きを試みると、一筆書きになる。図7はHMDのハンドトラッキング機能を利用して「あ」の二画目まで筆記したところである。親指と人差し指をつまむ動作で筆跡のON/OFFを切り換えることができるが、筆記中に筆記以外の動作を挿入するには慣れが必要である。そこで、一筆書きしたひらがなの筆跡から不要区間を削除することで、一画ずつ筆記したひらがなの筆跡を抽出することとした。抽出にはDPマッチングを使用した。過去に入力した筆跡と照合し、同一文字種がある場合には筆点のアライメントから筆記区間のみを抽出した。もし、同一文字種がない場合には一画ずつ筆記した文字を入力した。6人の被験者による実験では、同一文字種の検索成功率は93.5%であり、筆記区間の抽出一致率は平均で68.8%であった。なお、抽出一致率はON/OFFをラベル付けした筆点で定量的に評価した結果であり、主観的には文字として不要な筆跡の除去には成功していた。

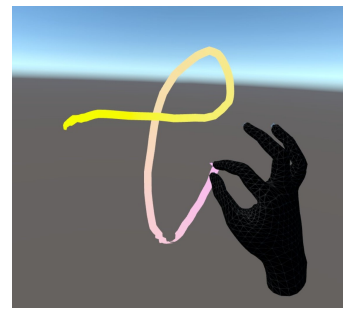


図7: VR 空間筆記

③ 線画をクエリとした3Dモデル検索：

3Dモデルの検索方法としてキーワード検索や三面図による検索などがある。仮想空間で配置したいオブジェクトを見つけるためには、その空間でラフに描いた線画から似ている3Dモデルを検索できると便利である。図8は面や柱で作られた3Dモデルを線画を描いて検索した結果である。基本的なアプローチは、線画と3Dモデルを共通のデータ形式に変換して距離計算を行うものである。提案法ではボクセルデータ化した3Dモデルを入力と出力にもつ3Dオートエンコーダを構築し、エンコーダ部で抽出した特徴ベクトルを使用した。実験ではModelNet40のchair 989個をサンプルにしてオートエンコーダを学習し、50個のターゲットモデルについて線画を描いて検索した。比較手法として、ボクセルデータのまま位置合せをして検索する手法、点群データに変換後に回転・スケール合せをして検索する手法を試みた。その結果、検索処理時間、検索精度ともにオートエンコーダの特徴量を使用した方がよいという結果が得られた。

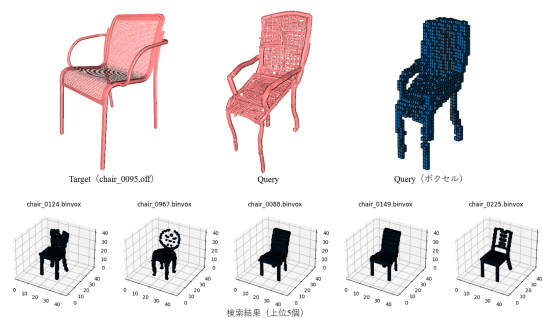


図8: 線画をクエリとした3Dモデル検索

(3) 空中筆記を円滑にするためのジェスチャー認識に関する研究

空中筆記やジェスチャー入力において、日常動作をジェスチャー動作として誤検出しないための研究を行った。この研究では区別しやすい両手を使ったジェスチャー開始動作を検討した。その一つとして、手を1回叩く動作をジェスチャー開始の合図とし、それを検出することとした。入力として深度センサとRGBカメラから得られた物体のXYZ座標値とRGB値を使用した。入力データから肌色点群のみを抽出し、クラスタリングによって物体をラベリングした。これを動画の全てのフレームに対して行い、肌色物体同士が接触しているかどうかを判定した。接触していると判定した場合は、2つの物体の軌跡から、ジェスチャー開始動作であるか日常動作であるかの識別を行った。被験者の5名には類似した日常動作とジェスチャー動作を10回ずつしてもらった。その結果、ジェスチャー開始動作の検出率は80%であった。

(4) 空中手書き文字の認識に関する研究

① 空中筆記の加速度信号を用いた認識

オンライン手書き文字認識には、隠れマルコフモデル(HMM)やDPマッチングがよく用いられてきた。近年は深層学習の発展によって、リカレントニューラルネットワーク(RNN)を用いた時系列信号の認識が見直されており、空中手書き文字認識についても識別器の比較実験を行うことにした。認識対象はひらがな46文字とした。60人分のデータ2760サンプルのうち、学習サンプルには30人分の1380サンプル、評価サンプルは残りの1380サンプルを用いた。その結果、認識率は97.9%となり、従来のHMMの認識率を超えることを確認した。

② 空中筆記の前腕の表面筋電位信号を用いた認識

前述の加速度センサの空中筆記よりもさらに小さい動きで文字を書くことを想定して、前腕の周りに 45° 間隔で 8 個の表面筋電位をつけ、その信号から文字を認識した。データ収集には ThalmicLabs 社製のアームバンド Myo を用いた。センサの位置ずれを考慮し、ひらがな 46 文字を 1 セットとして、6 日に分けて 60 セット収集した。位置ずれを補正する方法として、FFT でデータを 5° 間隔に補間し、ずれ角を推定して補正した。また、位置ずれに依存しない特徴量として、8 個の表面筋電位のパワーをレーダーチャートとしたときの重心ベクトルの角度変化量やフーリエ記述子を組み合わせた。実験では、10 セットを評価に、残りの 50 セットを学習データとして交差検証した。HMM を識別器に用いた実験では、1 位認識率は 52.8%、5 位までの累積認識率は 80.7% という結果を得た。一方、RNN を識別器に用いた実験では 1 位認識率で 88.3% という結果を得た。

③ 筆記支援のための文字の早期認識

手書き文字入力は、入力の自由度が高い反面、入力に時間がかかることが課題として挙げられる。そこで手書き文字の早期認識の研究を行った。識別器には RNN を用い、筆記途中の文字を加えて学習することを試みた。ひらがな 46 文字の早期認識実験では 60 人分のデータを用いて交差検証した。文字の種類によって早期認識できる筆記量は異なり、「ね」「れ」「わ」のような文字は 9 割以上筆記しないと確定しなかった。一方で「し」「つ」のような文字は 5 割筆記した時点で 1 位候補に挙がった。平均して、ひらがなでは 86.8% の筆記量が必要であることが分かった。新旧教育漢字 1016 文字の早期認識実験でも 60 人分のデータを用いて交差検証した。漢字の場合は文字の構造があり、例えば「林」を半分まで筆記したサンプルに「林」のラベルを与えると、「木」を書くつもりでも「林」に誤識別する恐れがある。そこで重み付きマルチラベルエンコーディングを考案し、認識率の低下を抑制した。その結果、漢字の場合、およそ 57.1% の筆記量で 1 位候補に挙がること分かった。

(5) 空中筆記による筆記者の識別・認証に関する研究

① 空中署名を用いた筆記者認証

指先の三次元位置座標を追跡して得られる筆跡から、個人を認証する研究を行った。筆跡を見ずに書く空中署名では、文字部品の位相ずれによる崩れや筆記面が自由なことによる位置ずれ・三次元的な回転が生じる。図 9 は空中署名の様子である。この環境で被験者 14 人から真筆と偽筆を収集した。1 人につき、登録署名を 3 個と真筆 20 個、そして他の 13 人の筆跡を真似た偽筆 26 個を書いてもらった。筆跡照合では筆点を時系列の三次元点群として考え、Iterative Closest Point (ICP) 法により回転と拡大・縮小を繰り返しながら登録署名に近付けた。ただし、点群の対応には時系列の順序制約を設けた。また、文字の崩れ対策として、局所的な正規化と登録パターンの分割照合を導入した。その結果、本人を拒否する誤りと他人を受け入れる誤りが等しくなる等誤り率 (EER) は 11.7% であった。

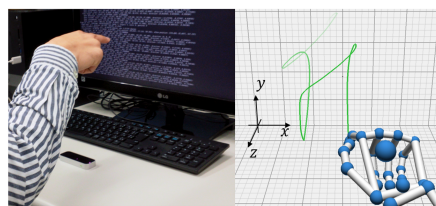


図 9: 空中署名

② ペンを持つ手形状を用いた筆記者識別

筆記中のペンの持ち方に個性があることに着目し、その手の形状で個人の識別を試みた。Leap Motion で筆記したデータより、手・指の 24 関節の情報を利用した。それらの三次元位置座標を特徴量とし、手の骨格構造をグラフとしたグラフ畳み込みニューラルネットワークで個人の識別実験を行なった。20 人の識別実験では識別率はおよそ 50% となった。ペンの持ち方が顕著に異なる 5 人のみの実験では識別率が 80% を超えた。また、深度カメラで筆記中の手形状を三次元点群として取得し、点群の位置合せによる照合も行なった。その結果、20 人の識別実験では静止画像で 92%、動画画像で 95% の識別率となった。

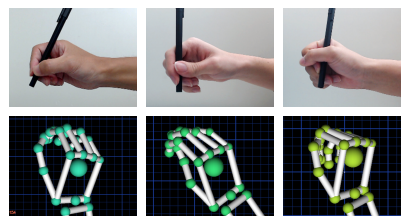


図 10: ペンを持つ手の形状

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計22件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 中井 満
2. 発表標題 より自然な空中筆記インタフェースを目指して
3. 学会等名 平成29年度 電気関係学会北陸支部連合大会（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 田中 緑, 中井 満
2. 発表標題 ペンを持つ手の動き情報を利用した筆記者認証
3. 学会等名 平成29年度 電気関係学会北陸支部連合大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 近江 亮祐, 中井 満
2. 発表標題 筆跡崩れに強い空中署名認証システム
3. 学会等名 平成29年度 電気関係学会北陸支部連合大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 田中 緑, 中井 満
2. 発表標題 ペンを持つ手の動き情報を用いた筆記者認証
3. 学会等名 情報科学技術フォーラム(FIT) 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 近江 亮祐, 中井 満
2. 発表標題 空中署名認証における筆跡崩れに頑健な特徴量の検討
3. 学会等名 情報科学技術フォーラム(FIT) 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 田中 緑, 中井 満
2. 発表標題 筆記中の手の深度動画像を用いた個人認証
3. 学会等名 第7回バイオメトリクスと認識・認証シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 近江 亮祐, 中井 満
2. 発表標題 局所分散正規化特徴量を用いた空中署名認証
3. 学会等名 第7回バイオメトリクスと認識・認証シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小原 秀幸, 中井 満
2. 発表標題 前腕の表面筋電位を用いた指書き文字認識
3. 学会等名 平成29年度 北陸地区 学生による研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉岡 和輝, 中井 満
2. 発表標題 RNNを用いたオンライン手書き文字認識
3. 学会等名 平成29年度 北陸地区 学生による研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 近江 亮祐, 中井 満
2. 発表標題 時系列対応ICPを用いた空中署名認証
3. 学会等名 平成30年度 電気関係学会北陸支部連合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 近江 亮祐, 中井 満
2. 発表標題 筆跡時系列の3次元回転位置合わせによる空中署名認証
3. 学会等名 情報科学技術フォーラム(FIT) 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 角川 勇貴, 中井 満
2. 発表標題 3次元点群を用いたジェスチャ開始動作の検出
3. 学会等名 平成30年度 北陸地区 学生による研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大原祐也, 中井 満
2. 発表標題 筆記モーションの分割登録と連結照合による空中署名認証
3. 学会等名 令和元年度 北陸地区 学生による研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 柴田凌輔, 中井 満
2. 発表標題 仮想空間でのハンドトラッキングを用いた筆記インタフェースの評価
3. 学会等名 令和元年度 北陸地区 学生による研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大原祐也, 中井 満
2. 発表標題 筆記モーションの分割登録を用いた空中署名認証
3. 学会等名 第19回情報科学技術フォーラム (FIT2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 柴田凌輔, 中井 満
2. 発表標題 仮想空間でのハンドトラッキングを用いた筆記システムの構築
3. 学会等名 第19回情報科学技術フォーラム (FIT2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大原祐也, 中井 満
2. 発表標題 筆記モーションの分割登録による空中署名認証
3. 学会等名 2020年度電気・情報関係学会北陸支部連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 柴田凌輔, 中井 満
2. 発表標題 仮想空間でのハンドトラッキングによる筆記システムの構築
3. 学会等名 2020年度電気・情報関係学会北陸支部連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 坂井浩志郎, 中井 満
2. 発表標題 前腕の表面筋電位を用いた RNN による指書き文字認識
3. 学会等名 第20回情報科学技術フォーラム (FIT2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 坂井浩志郎, 中井 満
2. 発表標題 前腕の表面筋電位を用いたRNN指書き文字認識
3. 学会等名 2021年度 電気・情報関係学会北陸支部連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 坂井浩志郎, 中井 満
2. 発表標題 前腕の表面筋電位を用いたRNN指書き文字認識の評価
3. 学会等名 2021年 電気学会 電子・情報・システム部門大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上馬拓己, 新田藍花, 中井 満
2. 発表標題 VR 空間に描いた線画像による 3D モデル検索
3. 学会等名 第21回情報科学技術フォーラム (FIT2022)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔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