

令和 6 年 9 月 24 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H03525

研究課題名（和文）力学解析向け個別人体相同モデル生成手法の開発

研究課題名（英文）Development of an individual human homologous model generation method for dynamics analysis

研究代表者

遠藤 維（Endo, Yui）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・主任研究員

研究者番号：40599073

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,300,000 円

研究成果の概要（和文）：身体運動を対象とした力学解析での利用に耐えうる個人別人体モデル生成手法を開発することを目的として研究を実施した。ポディスキャナから得られた個人の人体表皮形状から、CT画像テンプレートを使用して個人の人体ボリウムモデルを構築する手法を開発した。また、得られた個人の人体ボリウムモデルにもとづき、標準動作の計測データを入力として、個人の人体力学特性を同定する手法を開発した。さらに、動作中に発揮している筋活性度を推定するための人体全身の筋骨格モデルをシステムに統合した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の逆動力学解析における個人モデル生成では、簡便なモデルスケールリング手法を利用しているために剰余トルクが大きく、解析結果の信頼性を大きく損ねていた。一方、機器の多様化・高精度化にともない、力学解析を利用した人間の負担軽減やパフォーマンスの向上を目指した研究への期待が高まっており、利用される人体モデルの高精度化が急務であった。本研究によって、CTスキャナ等の身体的・導入負担の大きい装置を使用せず、簡便な3次元ポディスキャナから人体ボリウムモデルを構築し、個人の質量特性を明らかにすることが可能となり、その結果、力学解析の精度向上に大きく寄与することができた。

研究成果の概要（英文）：A study was conducted to develop a method for generating individual human body models that can withstand use in dynamics analysis of body motion. A method was developed to construct an individual human body volume model using a CT image template from an individual's human skin shape obtained from a body scanner. Based on the obtained human body volume model, we also developed a method to identify the human body dynamics properties of an individual using the measurement data of standard movements as input. Furthermore, a whole-body musculoskeletal model of the human body was integrated into the system to estimate the degree of muscle activation during movement.

研究分野：人間工学

キーワード：人間工学 CAD デジタルヒューマン 力学解析

1. 研究開始当初の背景

人間の生活や労働において、スポーツ、リハビリテーション、介護、荷物の運搬といった、身体に重い負荷がかかる動作が必要となる場面は数多く存在する。こういった動作を対象とし、その作業者や、作業者が装着・使用する機器の動作を力学的に解析することで、それらの動作改善や仕様改善、ひいては人間や機器の負荷軽減やパフォーマンスの向上が期待できる。

こういった、人間を含む系を対象とした力学解析を行う場合、人体のモデル化にあたっては、人体各部位をそれぞれ剛体とみなし、これらが関節によって接合されている、いわゆる「剛体リンクモデル」が用いられてきた。その際、各剛体リンクに対する力学解析向けの特性、すなわち、関節位置、質量、重心、および慣性テンソルを知る必要があるが、そのためには、人体の体型を再現し、体内に存在する器官の構造や特性を正確に再現する必要がある。ところが、人間の体内は膨大な数の器官によって構成されており、かつこれらの特性に対する個人差も大きいことから、従来の人体に対する力学解析に関する研究では、極めて簡易的な手法でこれらの個人別の特性が推定されてきた。これは例えば、個人の身長あるいは解剖学的特徴点セットから、テンプレートとなる人体モデルの各リンク長をスケールアップ(拡大・縮小)し、関節位置および重心を求め、同様に個人の体重から各リンクの質量を求める、といった手法である。

このような、個人の身長や体重、解剖学的特徴点のみを入力とする従来手法では、その体型や各器官の特性に対する多様性を正確に再現することは困難である。実際、上述の手法で得られた人体モデルを用いた力学解析において、系の力とトルクの平衡を矛盾なく満たす解が得られることは稀であり、各リンクが発揮している関節トルクと大差のないオーダーで余剰トルクが発生してしまうことが常であった。そのため、人体モデルの特性の誤差が解析精度に大きな影響を及ぼすケース、例えば、人体の数十の関節にかかるトルクから数百の筋肉の発揮力を推定する、あるいは、本来であれば推定可能であるはずの人体にかかる接触力を推定する、といった高度な力学解析を精度よく行うことが困難となっているのが現状である。

しかしながら、高度なスポーツトレーニングを行う際、動作中の筋発揮の推移を正確に知るとは、的確なインストラクションを行う上での大きな指針になり得る。また、人体への接触力を推定できれば、運動計測時にフォースセンサを減らす、あるいは使用しないことが可能となり、実験環境を離れた現場で、簡易な運動計測装置のみを利用した力学解析を実時間で処理しつつ、対象者の力学的フィードバックを行うことで動作改善をうながす、といった、高度な運動介入システム実現の可能性もみえてくる。すなわち、計算機の処理性能が向上し、多様なIoT機器の普及が実現され、十分な計測・解析環境が整った現在において、力学的な観点からみた個人別の人体モデル生成技術が不十分であることが、高度な力学解析・動作改善支援システムの開発を阻害する最も大きな要因になっているのではないかと、これが本研究の核心をなす学術的な「問い」である。

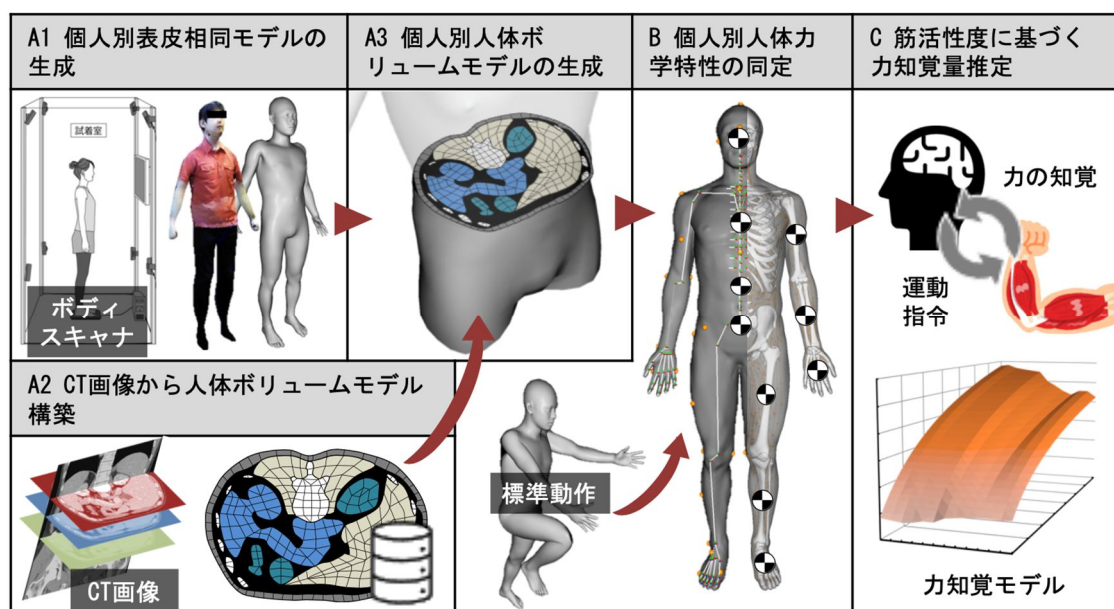


図1 本研究において開発される個人別人体モデル生成システムの概要

2. 研究の目的

以上のような学術的背景より、身体運動を対象とした力学解析での利用に耐えうる個人別人体モデル生成手法を開発することを本研究の目的とする。本研究全体の概要を図1に示す。本研究は大きく分けて3つの研究題目から構成される。その特徴を以下に示す。

研究題目A 個人別人体ポリウムモデル構築手法の開発 個人の全身の表皮形状から個人の3次元ポリウムモデルを自動生成する手法を開発する。表皮形状は3次元ポディスキナから計測される(図1-A1)。あらかじめ統計的に代表的な体型をもつ数名に対して全身のCT画像セットを取得し、これを用いて人体の3次元ポリウムモデルセットを構築しておく(図1-A2)。このモデルセットからテンプレートモデルを生成し、これを個人の表面形状にフィットするように変形させることで、立体要素の構造が等しい「相同な」個人の3次元ポリウムモデルが構築される(図1-A3)。

研究題目B 個人別人体力学特性の同定手法の開発 個人の標準動作から個人の人体力学特性を同定する手法を開発する。標準動作は、光学式モーションキャプチャを用いて計測されたランドマーク軌道セットより再現され、同時にフォースプレートを用いて計測された床反力シーケンスを含む。再現された標準動作を利用して、前述の3次元ポリウムモデルの各立体要素がもつ質量を器官ごとに同定する。さらに、人体の各リンクの力学特性(質量、重心、慣性テンソル)を推定する(図1-B)。

研究題目C 筋活性度に基づく力知覚量推定手法の開発 人が、自身が発揮する接触力の大きさについて、どのように知覚しているか(以後「力知覚量」と呼ぶ)を、筋活性度を用いてモデル化する手法を開発する。個人の動作中の筋活性度の変化は、前項までに得られた人体モデルを用いた逆動力学解析により推定される。本研究では、手首・手指、あるいは下肢・体幹が活動参加する動きに対して心理物理実験を実施し、知覚変換率を取得するとともに、筋活性度に基づく力知覚量推定への適用可能性を検証するとともに、筋骨格系の個人差と力感覚の個人差の関係を明らかにする(図1-C)。

3. 研究の方法

上述の研究目的を達成するため、研究開始当初に計画された研究実施方法を以下に述べる。

研究題目A 個人別人体ポリウムモデル構築手法の開発

A1 個人別表皮相同モデルの生成: 人体の全身3次元表皮形状を高速かつ高精度に計測可能なシステムを構築する。高速性のため、複数視点からの深度カメラによる撮影手法を用いる。深度カメラのレンズ歪みによる点群位置合わせ誤差の増大を防ぐため、距離の異なる平面を真正面から撮影した深度画像群を用いてレンズ歪み補正を行う。また、計測空間に配置された指標物体を用いて各深度カメラの位置姿勢推定を行う。計測された深度画像群から得られた高密度点群に対して、表皮形状のテンプレートとなる3次元メッシュがフィットするよう、コレスポンデンス性にもとづく非線形最適化手法を用いてこれを変形させる。A2 CT画像から人体ポリウムモデル構築: 全身CT画像から相同な人体ポリウムモデルを構築する、ポリウムレジストレーション手法を開発する。本手法は、局所的な画像相関演算により2つのCT画像間の対応点を探索することで、一方の画像を他方の画像へと変形するための空間的な変形場を計算する。変形場には人体形状の個人差に関する情報が含まれている。そのため、あるCT画像に対してセグメンテーションを行い、各器官のポリウムが特定された人体ポリウムモデルを構築しておけば、これを計算した、または統計分析の結果得られた変形場に従い変形させるだけで、他者や代表形態の人体ポリウムモデルが取得できる。また、このモデルは元々のモデルと相同な関係にある。変形場の計算を安定かつ高速に実現するために、スプライン補間による変形場表現とポリウムピラミッドを導入する。A3 個人別人体ポリウムモデルの生成: A2で得られた人体ポリウムモデルをテンプレートとし、その表皮形状が、与えられた個人の表皮形状に一致するよう、テンプレートモデルを変形する手法を開発する。A2と同様、ポリウムモデル空間に対し、前述の制約を満たすような変形場を計算する手法を導入する。本手法により、テンプレートモデルと相同な個人別人体ポリウムモデルが生成される。

研究題目B 個人別人体力学特性の同定 はじめに、個人別人体力学特性を同定するために必要となる標準動作を設計する。そのため、人体がバランスをくずさず、関節可動域の範囲内で、かつ各器官の質量を同定可能となる最低限の動作を特定する。ラジオ体操等の模範的な動作を当初案とし、条件を満たす動作を探索する。一方、人体ポリウムモデルに含まれる骨・筋・内臓などの物性の内部空間分布に対し、与えられた動作データから内部空間分布を構成する各物性の密度を同定する手法を開発する。各リンクの質量特性ではなく、人体を構成する物性ごとの同定となり、同定するパラメータ数が低次元化される。このため、運動計測データのみからは原理的に全てのパラメータは同定できないとされる、いわゆる「不可同定性」を回避することができ

る。

研究題目C 筋活性度に基づく力知覚量推定手法の開発 筋活性度にもとづいた人の力知覚量推定モデルを構築する。まず対象動作に応じた姿勢ならびに外力を与えた状態で基準刺激(外力)を与え、その力感覚を記憶してもらい。次に異なる姿勢または外力を与えたときに感じる力の感覚が、基準刺激に対してどれくらい異なるかを回答してもらい。これを繰り返し、刺激の物理量と知覚量との関係である力知覚特性ならびにそれを割合で表した知覚変換率を得る。同時に、対象動作に対して逆動力学解析を行い、各筋の筋活性度を推定することで、筋活性度と知覚変化率がひもづけられ、筋活性度から人の力知覚量を推定することが可能となる。

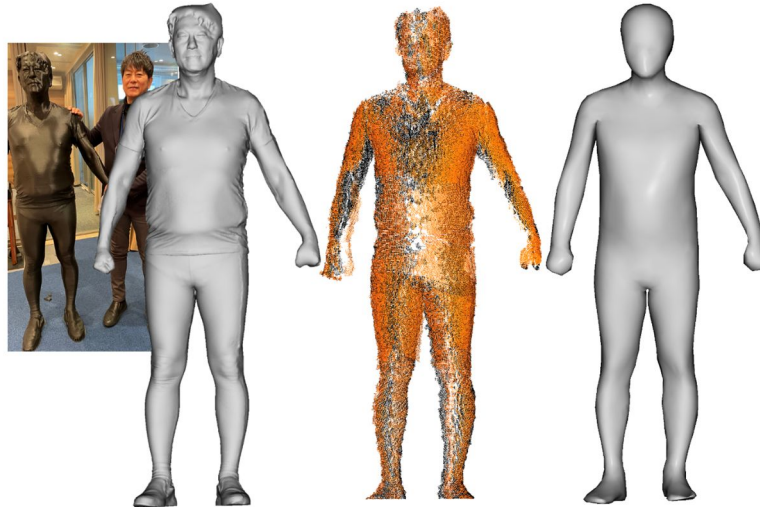


図2 提案するボディスキャンシステムから得られた結果(左から、被験者の体表面をハンディスキャナで計測した高密度メッシュおよびその3Dプリンタによる造形物、造形物を本システムによって計測して得られた高密度点群、点群から生成された相同メッシュモデル)

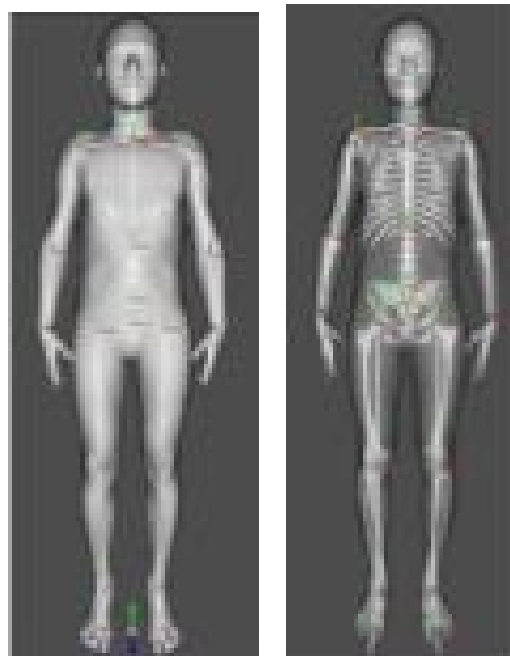


図3 個人別人体ボリュームモデル構築結果(左から、個人別人体表皮メッシュ、構築された個人別人体ボリュームモデルから表皮および骨格を抽出したもの)

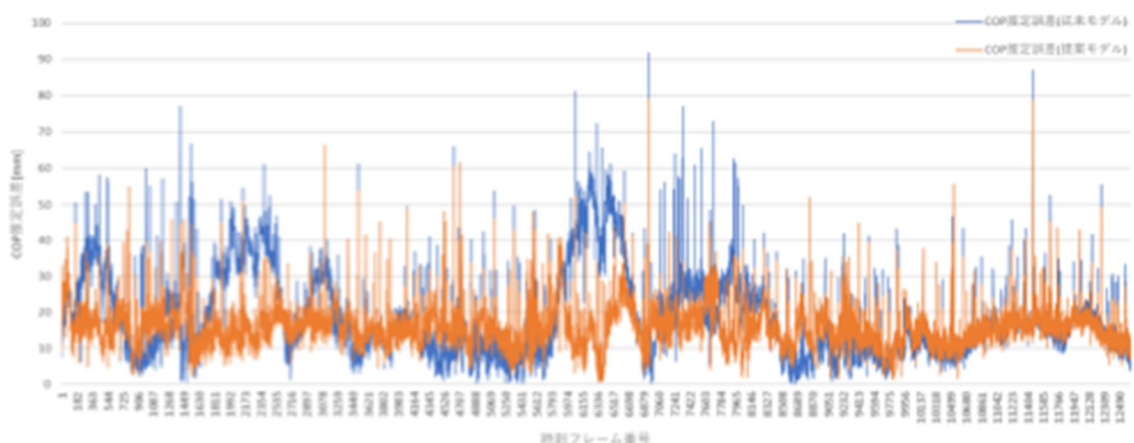


図4 COP 推定誤差の比較 (青線:従来手法による一様質量分布のモデル、橙線:提案モデル)

4. 研究成果

人体の全身3次元表皮形状を高密度点群として計測可能なボディスキャンシステムを構築した。複数視点からの深度カメラによる撮影手法を用い、計測プログラムからカメラ制御プログラム

を独立化させ、ネットワーク経由での通信とすることで、状況によって求められる、ボディスキャナに対する要求仕様の変化に応じてカメラ部を換装可能な汎用的なシステムとしつつ、マルチタスクおよび画像の高速通信により、12台のカメラ構成において1.5秒程度の極めて短い計測時間を実現させ、立位姿勢を保持する際の人間の「揺れ」による誤差の増大を抑えることが可能となった。また、計測空間に配置された指標物体を用いて各深度カメラの位置姿勢推定を行う手法を開発した。これは、各カメラから指標物体の任意の一部が撮影されることでカメラの位置姿勢推定が可能となるものであり、従来のように平面ボードの特定エリアが撮影される必要がないため、前述のようなスキャナに対する要求仕様に対応してカメラの台数や配置を変化させることが容易となった。さらに、今回のケースでは、人体の全身形状を模し、かつ3Dプリンタでの造形時に外部サポートの配置が不要となる形状を設計・造形することで、内部パラメータの補正が甘い、安価なカメラを用いても、身長に対し平均誤差0.5%以下の計測を実現させた。また、計測された深度画像群から得られた高密度点群に対して、表皮形状のテンプレートとなる3次元メッシュがフィットするよう、コレスポンデンス性にもとづく非線形最適化手法を用いてこれを変形させ、体型の変化によらず一定のメッシュ構造をもつ、いわゆる「相同な」全身表皮に対するメッシュを生成することが可能となった。得られたボディスキャンシステムに関する成果については、国際会議1件において発表された。

一方、相同な個人別人体ポリウムモデル構築手法を開発した。予めCT計測から構築された表皮・臓器・骨格を含む基準人体FEMメッシュを用意し、3次元ボディスキャンで得た個人別表皮形状に、この基準メッシュを形状適合するよう変形することで、個人適合人体FEMメッシュを一定精度で迅速に生成することを目的とし、体表面ランドマーク間対応と骨格部の統計的形状モデルにメッシュモーフィングを組み合わせ、個人表皮の計測点群データのみから主要骨格である脊柱・骨盤・肋骨部メッシュの個人適合を行う手法を開発した。なお、基準人体FEMメッシュとして、衝突解析用THUMSの男性立位メッシュを用いた。

さらに、得られた個人別人体ポリウムモデルを用いて質量特性の同定手法を開発した。光学式モーションキャプチャを用いて個人の全身動作を計測・再現し、本質量特性から推定されたCOPに対し、フォースプレートを用いて同時計測されたCOP（足圧中心）との誤差を検証した結果、従来の密度一定を仮定した同定手法による質量特性から推定されたCOPと比較して誤差が減少したことが確認された。得られた個人別人体ポリウムモデル構築手法および質量特性同定手法に関する成果については、国際会議1件、国内学会2件において発表された。

また、筋活性度に基づく力知覚量推定手法の開発については、計算機上に再現された動作中の各時刻の人体姿勢(関節角度セット)および人体への外力から逆動力学解析により筋活性度を自動的に推定する手法の本開発システムへの統合を実現させ、被験者の体表面および動作の計測から人体ポリウムモデル構築、筋骨格モデル構築、動作再現、筋活性度推定までを単一のシステムによって実現することが可能となった。

以上、本研究において開発された手法は、いずれも単一のデジタルヒューマン向けプラットフォームソフトウェアとして統合され、本システムに関する研究成果に関しては1件の国際誌において発表された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Endo Yui, Maruyama Tsubasa, Tada Mitsunori	4. 巻 17
2. 論文標題 DhaibaWorks: A Software Platform for Human-Centered Cyber-Physical Systems	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 International Journal of Automation Technology	6. 最初と最後の頁 292～304
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20965/ijat.2023.p0292	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 Endo Yui, Hayashi Kazuto	4. 巻 2023
2. 論文標題 iBODY: Human body shape reconstruction by using multiple depth cameras	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Human-Centered Design and User Experience. AHFE (2023) International Conference	6. 最初と最後の頁 296～305
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.54941/ahfe1004247	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 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 五月女 絢音、金井 理、伊達 宏昭、遠藤 維
2. 発表標題 三次元ボディスキャンに基づく個人適合人体FEMメッシュ生成手法の開発（第3報）
3. 学会等名 精密工学会学術講演会講演論文集
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 A. Sotome, S. Kanai, H. Date, Y. Endo
2. 発表標題 Personally Adapted Human Body Model Generation Based on 3D Body Scanning, Mesh Morphing, and Statistical Shape Model
3. 学会等名 Proceedings of the 19th international conference on precision engineering（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 五月女絢音、金井 理、伊達宏昭、遠藤維
2. 発表標題 三次元ボディスキャンに基づく個人適合人体FEMメッシュ生成手法の開発（第1報） 体表面ランドマーク・統計的形狀モデル・メッシュモーフイングを統合した主要骨格の個人適合
3. 学会等名 2022年度精密工学会春季大会学術講演会
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
研究分担者	多田 充徳 (Tada Mitsunori) (70392628)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・研究チーム長 (82626)	
研究分担者	丸山 翼 (Maruyama Tsubasa) (50817161)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・研究員 (82626)	
研究分担者	鮎澤 光 (Ayusawa Ko) (60649086)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・主任研究員 (82626)	
研究分担者	栗田 雄一 (Kurita Yuichi) (80403591)	広島大学・先進理工系科学研究科（工）・教授 (15401)	
研究分担者	名倉 武雄 (Nagura Takeo) (90306746)	慶應義塾大学・医学部（信濃町）・特任教授 (32612)	

6．研究組織（つづき）

	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	山田 祥岳 (Yamada Yoshitake) (60383791)	慶應義塾大学・医学部（信濃町）・講師 (32612)	

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