

令和 5 年 6 月 17 日現在

機関番号：32503

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2022

課題番号：18K04210

研究課題名(和文)可視化されたロバスト機構・制御系統統合化設計法の確立と次世代HDDへの応用

研究課題名(英文)Development of a visualized method for robust integrated design of mechanical and control systems and its application to next-generation HDDs

研究代表者

熱海 武憲 (Atsumi, Takenori)

千葉工業大学・工学部・教授

研究者番号：70772052

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)：本研究では、機構系と制御系を統合的に設計する「すり合わせ」手法として、「高性能ロバスト機構・制御系設計の可視化手法」を実現した。この手法では、機構系特性が変動した場合においても性能仕様を達成する条件を周波数応答上にて定量的に図示することで、機構系技術者および制御系技術者の両者が共通に理解できる新しい「すり合わせ」が可能となる。その後、提案手法をハードディスクドライブ(HDD)の磁気ヘッド位置決め制御系に応用し、「今後の高度情報化社会を支える次世代HDD」に必要な機構系および制御系の条件を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

研究成果の学術的意義：メカトロニクス技術にとって極めて重要となる、機構系と制御系を統合的に設計する手法を、可視化された理解しやすい手法として実現した。また、その手法を、多入力系となる制御対象に対しても適用可能とする手法を実現した。

研究成果の社会的意義：次世代HDDに必要な機構系および制御系の条件を明らかにし、高度情報化社会の発展の一助となる知見となった。また、開発された手法を用いることにより、マルチコプタなどの多入力系の制御対象となるメカトロニクス装置に対しても、簡易に制御性能を向上することが可能となった。

研究成果の概要(英文)：In this research, we developed an integrated design of mechanical and control systems. This method provides step-by-step guides for using a visualized tool that can account for structured uncertainties of controlled objects. As a result, mechanical and control engineers can exchange views on mechatronic systems design. Afterward, we applied the proposed method to the magnetic head positioning control system of hard disk drives (HDD) and elucidated the mandatory items in mechanical and control systems for the next-generation HDDs that will support future highly information-oriented societies.

研究分野：制御およびシステム工学関連

キーワード：メカトロニクス 制御系設計 機構系設計 すり合わせ ハードディスクドライブ

1. 研究開始当初の背景

メカトロニクスは、日本の研究機関が最先端の技術開発を牽引する世界に誇れる技術分野の一つである。このメカトロニクスでは、機構系と制御系のすり合わせが重要な技術課題となっている。特に、大量生産品でありながらナノメートル単位での位置決め精度が要求されるハードディスクドライブ(HDD)では、最先端の機構系技術と最先端の制御系技術を駆使し、低コストと超精密位置決め精度を両立させなければならない。そのため、機構系技術と制御系技術の各々が極めて高度化されることとなり、豊富な経験と高い技術力を有する技術者をもってしても、そのすり合わせは極めて困難なものとなっている。

その一方で、高度情報化社会の急激な発展に伴い、人類が必要とするデータ容量は年率35%以上増加する見込みである。特に、発展著しい人工知能技術は、膨大なデータ容量を必要とするため、大容量化を可能とする次世代HDDの開発が人類の科学技術の発展にとって急務となっている。

2. 研究の目的

本研究では、超精密メカトロニクス装置を対象に、機構系と制御系の「すり合わせ」に対して「可視化されたロバスト機構・制御系統合化設計法」を確立することを目的とした。その後、考案した手法をHDD磁気ヘッド位置決め制御系に応用し、今後の高度情報化社会を支える「次世代HDDに必要な機構系および制御系の条件」を明らかにすることを目指した。

3. 研究の方法

・「可視化されたロバスト機構・制御系統合化設計法」

制御系設計者および機構系設計者の両者が容易に理解できることを目指し、ロバスト制御性能を満たす条件をコントローラの周波数応答上に可視化する「Robust Bode (RBode) plot」を用いた手法を考案した。制御系設計者および機構系設計者の両者が容易に理解できる周波数応答を用いることにより、既存の制御系に対して容易にコントローラの改善箇所を知ることが可能となる。

・「次世代HDDに必要な機構系および制御系の条件」

研究開始当初のHDDでは、データの読み書きを行う磁気ヘッドの位置決め制御系は、位置決め系全体を駆動するVCM (Voice Coil Motor) と、磁気ヘッドが取り付けられてるサスペンション部分のみを駆動するPZTアクチュエータによる、2段アクチュエータ系により実現されていた。そこで、次世代HDD向けに磁気ヘッドの位置決め精度を向上するために、

3段アクチュエータ系による位置決め制御性能の改善

4段アクチュエータ系による位置決め制御性能の改善

の二種類の方法を検討した。

4. 研究成果

・「可視化されたロバスト機構・制御系統合化設計法」に関する研究成果

(1) 構造的な不確かさを有する制御対象に対して H_∞ 制御理論により設計されたコントローラを実装した位置決め制御系を対象に、RBode plot を用いたコントローラ改善手法を考案した(図1)。本研究で提案する手法を用いることで、機構系変動に対する過度な保守性を取り除くことが可能となり、位置決め制御性能を約15%改善可能であることを明らかにした。

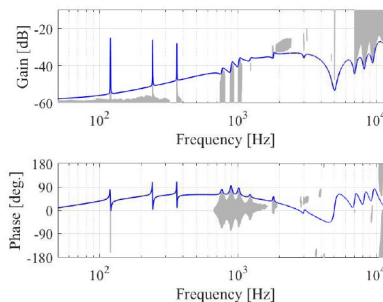


図 1

(2) 一般的なメカトロニクス装置として、倒立振り子ロボットに対する可視化されたロバスト機構・制御系統合化設計法の検討を行った。提案手法では、個体ごとの実験データから、目標性能仕様達成の可否を表す境界条件をサポートベクターマシンによる超平面から導出し、各超平面からの距離の最小値が最大となる座標を最適なコントローラとして与える(図2)。提案手法により、個体差に起因する制御対象の特性バラツキに対して、ロバスト制御性能を実現するコントローラを設計することが可能となった。

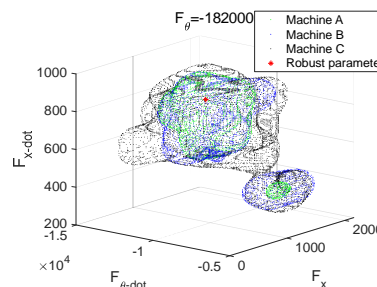


図 2

(3) 一般的なメカトロニクス装置として、マルチコプターの飛行制御系の研究を行った。本研究では、ダクト点検用マルチコプターを想定し、角筒内を飛行するマルチコプターの位置決め制御を行った(図3)。その際、マルチコプターに加わる流体起因振動を補償する制御系設計法として、RBode plot を用いたループ整形法を考案し、実験においてその有効性を明らかにした。

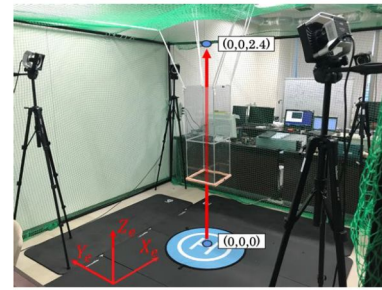


図 3

(4) 一般的なメカトロニクス装置として、マルチコプターの飛行制御系の研究を行った。本研究では、屋外におけるマルチコプターの軌道追従動作を想定し、風環境下でのマルチコプターの位置決め制御法について検討した。その際、マルチコプターに加わる風は上下方向ならびに水平方向とした。また、制御系設計法にはRBode plot を用いた。検討の結果、軌道追従誤差の実測結果から導出される重み関数を RBode plot を用いた制御系設計に導入することにより、軌道追従誤差を低減する制御系が構築可能となることを明らかにした。さらに、実験においてその有効性を示した(図4)。

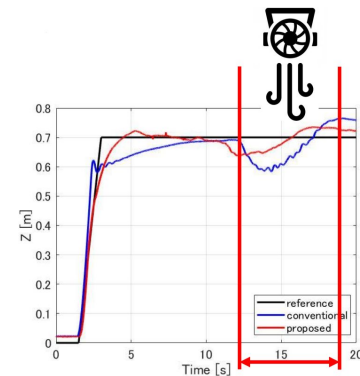


図 4

・「次世代 HDD に必要な機構系および制御系の条件」に関する研究成果

(1) ファイルサーバーを用いた振動測定を行い、ファイルサーバー内の HDD に加わる外部振動の特性を明らかにした。その際、ヘリウム密閉型ではない従来の HDD (Air HDD) を用いた場合とヘリウム密閉型 HDD (He HDD) を用いた場合で振動特性に大きな差があることも明らかにした(図5)。

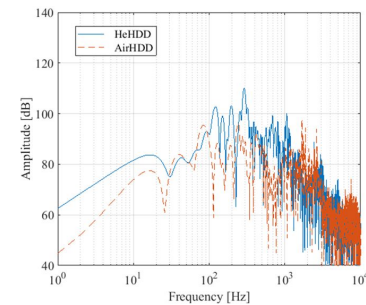


図 5

(2) HDD 向け 3 段アクチュエータ系に対して、構造的な不確かさを陽に考慮可能な RBode plot の適用方法について検討を行った。その結果、3つのアクチュエータが持つ不確かさを「アクチュエータごとの構造的な不確かさ」と「制御系全体として1つにまとめた非構造的な不確かさ」に分離することで、3段アクチュエータ系に対しても RBode plot を適用可能であることを明らかにした。

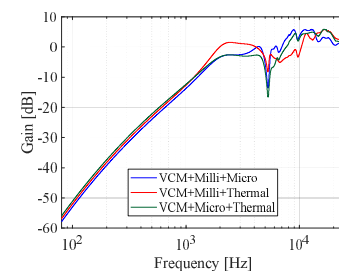


図 6

(3) 3 段アクチュエータシステムにおいて、アクチュエータ飽和と達成可能な制御性能の関係について検討した。その結果、3 段アクチュエータ系は、「VCM」「PZT ミリアクチュエータ」「PZT マイクロアクチュエータ」の組み合わせにおいて最も外乱抑圧性能が良いことを明らかにした(図6)。

(4) HDD 向け 4 段アクチュエータ系として、「VCM」「PZT ミリアクチュエータ」「PZT マイクロアクチュエータ」「熱膨張アクチュエータ」を用いた磁気ヘッド位置決め制御系について検討した。4 段アクチュエータを導入することにより、既存の 3 段アクチュエータを使用した制御系と比較して、位置決め精度が大幅に改善可能となることを明らかにした(図7)。

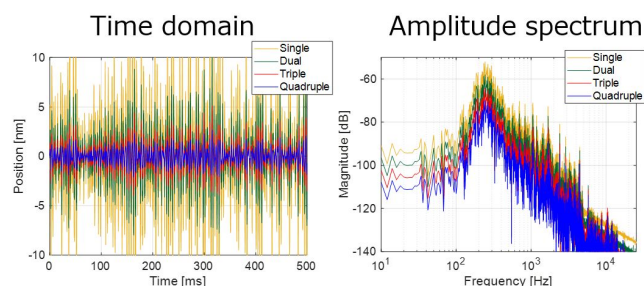


図 7

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4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 熱海武憲, 藪井将太	4. 巻 142
2. 論文標題 ストレージボックス内のハードディスクドライブに加わるファン起因外乱の補償方式	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電気学会論文誌D (産業応用部門誌)	6. 最初と最後の頁 330 ~ 341
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejias.142.330	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 Takenori Atsumi and Shota Yabui	4. 巻 Vol. 67, No. 11
2. 論文標題 Quadruple-Stage Actuator System for Magnetic-Head Positioning System in HDDs	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The IEEE Transactions on Industrial Electronics	6. 最初と最後の頁 9184,9194
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TIE.2019.2955432	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 Hayato Kato and Takenori Atsumi	4. 巻 Vol. 14, No. 4, No. 20-00058
2. 論文標題 Improving methodology for multi-input-single-output control system using the Robust Bode plot	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/jamdsm.2020jamdsm0053	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 Jun Ito, and Takenori Atsumi	4. 巻 12
2. 論文標題 Magnetic-head positioning control of HDDs with improved H controller by Robust Controller Bode (RCBode) plot	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing	6. 最初と最後の頁 JAMDSM0124
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/jamdsm.2018jamdsm0124	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34件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 18件）

1. 発表者名 Ryohei Sato, Miyu Hirose, and Takenori Atsumi
2. 発表標題 A Design Method for 2DOF Control System in Inverted Pendulum Robots Using Neural Networks
3. 学会等名 The 8th IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (国際学会)
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 Taiki Okada and Takenori Atsumi
2. 発表標題 Control System Improvement for Robot Arm with Readymade Servo Motors Using RCBoode plot
3. 学会等名 The 8th IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (国際学会)
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 Takenori Atsumi and Shota Yabui
2. 発表標題 Track-Following Control Using Resonant Filter for Dual-Stage-Actuator System in Hard Disk Drives
3. 学会等名 The 17th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control (国際学会)
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 吉村隆一郎, 熱海武憲, 中代重幸
2. 発表標題 RBode Plotを用いた放水マルチコプターの目標軌道追従性能の改善
3. 学会等名 第64回自動制御連合講演会
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 金井星士, 熱海武憲, 中代重幸
2. 発表標題 2自由度制御型ノイズキャンセリングヘッドフォンにおける風切り音の影響
3. 学会等名 第64回自動制御連合講演会
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 佐藤燎平, 熱海武憲, 中代重幸
2. 発表標題 ニューラルネットワークを用いた倒立振子ロボットの2自由度制御系設計
3. 学会等名 電気学会メカトロニクス制御研究会
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 岡田泰毅, 熱海武憲, 中代重幸
2. 発表標題 RCBode Plotを用いた描画ロボットの位置決め制御性能向上
3. 学会等名 電気学会メカトロニクス制御研究会
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 Takenori Atsumi and Shota Yabui
2. 発表標題 Loop-Shaping Technique for Quadruple-Stage-Actuator System in Hard Disk Drive
3. 学会等名 The 2022 International Power Electronics Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 竹田一裕, 五十嵐一穂, 熱海武憲, 中代 重幸
2. 発表標題 RCBode plotを用いたクワッドコプターの高速移動時における目標軌道追従性能の改善
3. 学会等名 第64回自動制御連合講演会
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 Keitaro Oriuchi, Ryota Seki, Ryu Obayashi, Hayato Kato, Takenori Atsumi, and Shigeyuki Nakadai
2. 発表標題 Improved Positioning Accuracy of the Multicopter for Vertically Applied Wind Disturbances
3. 学会等名 The 7th IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (国際学会)
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 Ryota Seki, Keitaro Oriuchi, Ryu Obayashi, Hayato Kato, Takenori Atsumi, and Shigeyuki Nakadai
2. 発表標題 Improvement of Wind-Induced Tracking Error in Horizontal Direction for a Multicopter
3. 学会等名 The 7th IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (国際学会)
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 Kazuho Igarashi, Ryo Igarashi, Takenori Atsumi, and Shigeyuki Nakadai
2. 発表標題 Feedforward Control for Track Seeking Control in Hard Disk Drive with Sampled-Data Polynomial Based on Causal First-Order Hold
3. 学会等名 The 7th IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (国際学会)
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 Natsuki Kageyama, Takeshi Nishimura, Takahiro Itoh, Takenori Atsumi, and Shigeyuki Nakadai
2. 発表標題 Discrimination of Magnetic Attraction Reduced Area Using a Disturbance Observer for Crawler Robots
3. 学会等名 The 7th IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (国際学会)
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 Natsuki Kageyama, Takeshi Nishimura, Takahiro Itoh, Takenori Atsumi, and Shigeyuki Nakadai
2. 発表標題 Detection of Reduced Magnetic Attraction Force Using a Disturbance Observer for Crawler Robots
3. 学会等名 The 2021 IEEE International Conference on Mechatronics (国際学会)
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 Kazuho Igarashi, Ryo Igarashi, Takenori Atsumi, and Shigeyuki Nakadai
2. 発表標題 Feedforward Control for Track-Seeking Control in Hard Disk Drive with Sampled-Data Polynomial Based on First-Order Hold
3. 学会等名 The 2021 IEEE International Conference on Mechatronics (国際学会)
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 Takenori Atsumi and Shota Yabui
2. 発表標題 Performance Comparison between Triple-stage Actuator Systems in HDDs
3. 学会等名 The 21st IFAC World Congress 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 織内奎太郎, 大林龍, 関亮太, 加藤勇人, 熱海武憲, 中代重幸
2. 発表標題 上下方向に加わる風邪外乱に対するマルチコプターの位置決め精度向上
3. 学会等名 電気学会メカトロニクス制御研究会
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 関亮太, 大林龍, 加藤勇人, 織内奎太郎, 熱海武憲, 中代重幸
2. 発表標題 水平方向に加わる風邪外乱に対するマルチコプターの位置決め精度向上
3. 学会等名 電気学会メカトロニクス制御研究会
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 影山夏樹, 伊藤崇浩, 西村健志, 熱海武憲, 中代重幸
2. 発表標題 磁石付きクローラ型ロボットにおける外乱オブザーバに基づく磁気吸着力検出
3. 学会等名 電気学会メカトロニクス制御研究会
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 五十嵐一穂, 熱海武憲, 中代重幸
2. 発表標題 HDDシーク制御における1次ホールドに基づくサンプル値多項式を用いたフィードフォワード制御
3. 学会等名 電気学会メカトロニクス制御研究会
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 Takenori Atsumi
2. 発表標題 Improving Methodology for Dual-Stage-Actuator System in HDDs Using the RBode Plot
3. 学会等名 第63回自動制御連合講演会
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 伊藤崇浩, 西村健志, 影山 夏樹, 熱海武憲, 中代重幸
2. 発表標題 磁石付きクローラを有する6クローラ型ロボットの外乱オブザーバに基づく磁気吸着力検出
3. 学会等名 日本機械学会 2020年度年次大会
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 大林龍, 関亮太, 加藤勇人, 辻翔平, 熱海武憲, 中代重幸
2. 発表標題 RBode plotを用いた風影響下におけるマルチコプターの目標軌道追従性能の改善法
3. 学会等名 日本機械学会 2020年度年次大会
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 Hayato Kato and Takenori Atsumi
2. 発表標題 Improving Methodology by Using RCbode Plot for Triple-Stage-Actuator System in HDDs
3. 学会等名 The 6th IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (SAMCON 2020) (国際学会)
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 Toshiki Kawahira and Takenori Atsumi
2. 発表標題 Study of Flow-Induced Tracking Error Caused by Passing Multicopters
3. 学会等名 The 6th IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (SAMCON 2020) (国際学会)
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 Hayato Kato and Takenori Atsumi
2. 発表標題 Control System Improvement for Triple-Stage-Actuator System of Hard Disk Drive Using the RBode Plot
3. 学会等名 The 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (国際学会)
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 加藤 勇人, 熱海 武憲
2. 発表標題 RBode Plotを使用したHDD三段アクチュエータシステムの制御系設計
3. 学会等名 電気学会メカトロニクス制御研究会
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 佐野仁亮, 熱海武憲, 中代重幸
2. 発表標題 熱膨張アクチュエータにおける周波数領域の解析
3. 学会等名 電気学会メカトロニクス制御研究会
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 川平星輝, 熱海武憲
2. 発表標題 すれ違う2機のクアッドコプターにおける流体関連振動の解析
3. 学会等名 電気学会メカトロニクス制御研究会
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 Toshiki Saito, Ryo Kikuchi, and Takenori Atsumi
2. 発表標題 Data-driven Optimization Method for Controller Parameters Using Support Vector Machine
3. 学会等名 The 5th IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshiyuki Otsuji and Takenori Atsumi
2. 発表標題 Estimation of Wind Disturbance for Quadcopter in Square Tube
3. 学会等名 The 5th IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toshiki Saito, Ryo Kikuchi, and Takenori Atsumi
2. 発表標題 Optimization Method for Controller Parameters Using Support Vector Machine
3. 学会等名 The 20th IEEE International Conference on Industrial Technology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshiyuki Otsuji and Takenori Atsumi
2. 発表標題 Estimation of Wind Disturbance for Quadcopter in Closed Space
3. 学会等名 The 20th IEEE International Conference on Industrial Technology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 加藤 勇人, 熱海 武憲
2. 発表標題 HDD三段アクチュエータシステムにおけるRBode plotを用いた制御系設計法
3. 学会等名 日本機械学会IIP2019 情報・知能・精密機器部門講演会
4. 発表年 2019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