

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 17 日現在

機関番号：17301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01513

研究課題名(和文) 自立飛行型斜張橋ケーブル点検ロボットシステムの開発

研究課題名(英文) Development of inspection robot system for cables in cable-stayed bridges

研究代表者

中村 聖三 (Nakamura, Shozo)

長崎大学・工学研究科・教授

研究者番号：40315221

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,500,000円

研究成果の概要(和文)：斜張橋ケーブルは、極めて重要な部材でありながら、極端に高所に設置される構造であるため、これまでは路面もしくは高所作業車からの遠望目視点検を行ってきた。ロープを用いた高所作業によって近接目視する点検方法もあるが、安全面や現場工期の長期化等の多くの課題があった。このような問題を解決すべく、本研究では主塔等への衝突防止機能を有し、点検時の移動速度の変動を許容される範囲内に収める自動制御を可能とした自立飛行型の点検ロボットを開発した。また、複数のビデオカメラで得られた動画からの損傷発見作業を効率化するため、動画の静止画分割と展開図の構築を効率的に可能とする画像処理システムも開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来のロープを用いた点検では、1日あたりケーブル2～3本しか点検できないのに対し、本ロボットでは10本程度以上の点検が可能である。また、ロープを用いた点検では、道具の落下の懸念など安全上の理由から、道路の全面通行止めや作業箇所直下の車線規制を行っているが、本ロボットは機体自体がケーブルから逸脱、落下しない構造であるため、点検作業中の道路の通行止めや交通規制が不要であり、現道交通への影響等の社会的損失が発生しない。作業スペース等の関係で規制を行う場合でも、現場工期が従来技術に比べ1/2～1/4程度と大きく短縮できるため、規制による現道交通への影響や社会的損失を大幅に軽減できる。

研究成果の概要(英文)：Cables are very important members in cable-stayed bridges. However, a distant visual inspection has been conducted from the road surface or platform for high-place works in special vehicles since their locations are very high. Although there is also an inspection method that allows close visual inspection by working at heights using ropes, it still has many problems such as safety concern and long inspection period. To solve such problems, we have developed a self-sustaining flight type inspection robot that enables the prevention of collision with the main tower and automatic control to keep the fluctuation of the moving speed within the allowable range during inspection. We have also developed an image processing system that makes it possible to efficiently divide movies obtained with multiple video cameras into still images and construct development diagram to streamline the damage finding work.

研究分野：鋼構造，橋梁工学，維持管理工学

キーワード：ロボット 斜張橋ケーブル 点検 画像処理 自動制御

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

中央道笹子トンネル事故等を踏まえ、国土交通省は平成 25 年を「社会資本メンテナンス元年」と位置付け、国民生活や経済の基盤であるインフラが的確に維持されるよう、様々な施設の老朽化対策に総合的かつ重点的に取り組んでいく姿勢を示した。平成 26 年度には道路法施行規則の一部改正が行われ、橋梁・トンネル等は、国が定める統一的な基準により、5 年に 1 回の頻度で、近接目視により点検を行うことを基本とすることが定められた。しかしながら、近接目視点検は多大な時間と労力、予算を必要とする。橋梁の架設位置や構造形式によっては高所作業も必要となることがあり、事故の発生リスクも高い。今後、少子高齢化および人口減少が加速することを考えると、定められた点検を、定められた頻度で実施するのは、近い将来きわめて困難になることが予想される。そのため、より少ない労力、予算で近接目視に相当する点検を実現できる技術の確立が求められていた。

2. 研究の目的

上記背景から、近年橋梁の維持管理へ UAV の適用が試みられている。UAV は風速変動等の外乱に弱く、GPS を用いた自動飛行の精度についても近接目視点検には不十分である。しかし、斜張橋ケーブルの点検に限れば、UAV のこうした問題点はケーブルをガイドにすることで解決可能であり、自動飛行するケーブル点検ロボットが開発可能ではないかとの着想に至った。さらに、マニュアルで操縦する軽量の試作機(図-1 参照)を開発し、実橋で点検実験を実施(図-2 参照)した。

本研究は、試作機を自立飛行型に改良するとともに、取得した動画の画像処理システムを開発することで、ケーブルの近接目視点検の安全性、効率性、経済性を飛躍的に向上させることを目的とするものである。具体的には、試作機を改良し、主塔等への衝突防止、移動速度の変動を許容される範囲内に収める自動制御、を可能とする。また、機体フレームの最適化を図る。さらに、複数のビデオカメラで得られた動画の静止画分割と展開図の構築を可能とする画像処理システムを開発する。

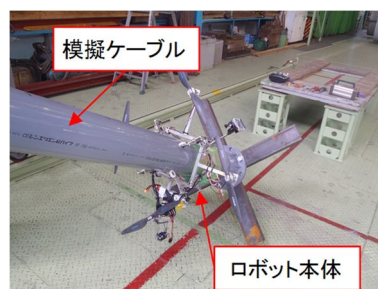


図-1 試作機と室内試験イメージ



図-2 実橋での実験状況

3. 研究の方法

(1) 衝突防止機能

ロボット本体に位置や障害物との距離を検知するためのセンサーを搭載し、障害物との距離が所定の距離まで近づいた際に操縦者に対してアラームを発信する機能や衝突前に自動停止する機能を追加するため、現在位置については高度センサー、障害物との距離については光学センサー、赤外線センサー等の利用を検討し、室内実験によりこれら各種センサーの適用性を明らかにした。その結果に基づき最適なセンサーを選択し、その配置を確定した。

(2) 移動速度の変動を許容される範囲内に収める自動制御

従来から利用されているモータの速度制御の構成と同様の制御システムの構成とした。まず、与えられた速度司令(目標信号)に対して、従来型の制御方式である PID 制御器を用いて制御するシステムを構成した。幾つかのケーブル傾斜角を想定した室内実験(図-1 参照)や数値解析で、速度司令からの変動を許容範囲に収める PID 制御器に含まれる 3 つの制御ゲイン(比例ゲイン・積分ゲイン・微分ゲイン)を各条件に対して調整した。

(3) 機体フレームの最適化

まず、試作機を用いた各種試験、国内の斜張橋の調査等によって、本体フレームの最適設計を実施するための要求仕様を明確にした。次に搭載すべきセンサー、カメラ、モータ等がおおむね決定した段階で、本体フレームに求められる剛性を満たしたうえで最大限の軽量化を図るよう、詳細な構造解析に基づき、使用材料及各部材の形状・寸法を最適化することを試みた。

(4) 外観展開画像作成アルゴリズム

自律撮影された 4 系統の動画像データをもとに、ケーブル被覆表面の展開画像を作成するアルゴリズムを構築するため、まず画像相関法と特徴分析を応用し、シーケンス画像の時間・空間方向の合成アルゴリズムの適用を試みた。次に、一般的な静止画分割を経ずに、動画像から直接、時間については不等間隔、距離については等間隔に、エンコーダデータに基づいて画像フレームを抽出することで、静止画分割の処理負荷を大幅に軽減するとともに、不要な重複のないフレームを抽出するアルゴリズムの構築を図った。

(5) 実証試験

以上の成果を統合して各種センサー、モータ、制御装置、カメラ、本体フレーム等が最適化された実証機を製作し、実橋(女神大橋)で制御性能や必要時間等を検証した。

4. 研究成果

(1) ロボット本体の概要

開発した点検ロボットの外観を図-3に示す。軽量化と剛性確保を両立させるため、新機体のフレームはCFRPを用いた4層構造となっている。また、速度制御用のセンサーとしてエンコーダが、主塔への衝突防止用センサーとしてレーザ距離計が設置されている。ガイドローラステアの取付け位置調整でケーブル径の10mm毎の変化に対応可能であり、ガイドローラフレーム取り付け位置を機体フレームに対して変更できる機構としたことで、機体フレーム外側に取り付けた場合で200~260mm、中央で120~180mm、内側で80~160mmの径に調整できる。すなわち、本機体1機で80~260mmのケーブルに適用可能である。ただし、ケーブル同士を制振対策で繋いでいる場合などには適用できない。

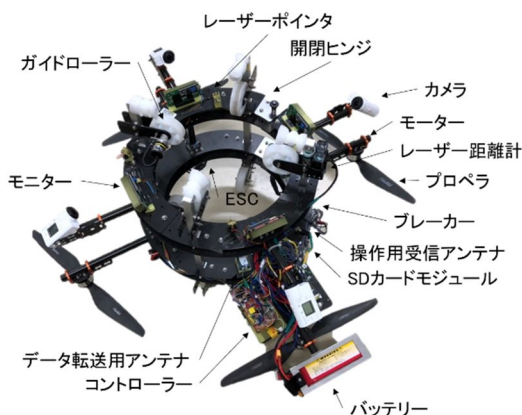


図-3 機体の外観比較

本ロボットの制御装置にはArduino Megaを、主電源には22Vリチウムポリマーバッテリーを使用している。また、安定した電力を供給するために、SDカードモジュールおよびXBeeモジュールには5Vの外部電源を装着している。XBeeモジュールをArduino Megaに接続したのは、PCに無線でデータを送信することで、点検中におけるロボットの状態をモニタリングするためである。なお、モニタリングを行う際には、processingを用いて受信したデータを可視化している。SDカードには、制御状態・経過時間・エンコーダ距離・レーザ距離・モータ出力値・メモリ使用状況・主電源電圧・機体速度のデータが、飛行中に記録される。

(2) ロボットの制御条件

本機体の制御は、表-1に示すように上昇時に5段階制御、下降時には6段階制御とした。上昇および下降の制御数はPID制御の係数を調整することで削減可能となるが、角度ごとにPID制御に用いる係数を細かく調整しなければならず、調整がうまくいかない場合には、上昇から下降に切替わる際、速度に急激な変化がおこってしまい、正常な制御が行われない可能性がある。そのため、本プログラムでは制御条件を多くすることで機体の制御を緩やかにしており、ケーブル角度等の条件が変化した場合でも安定した制御が可能である。

実際にケーブル点検を行う際には、下降制御距離 X 、上端制御距離 Y および上昇時最大速度 V_{max} の3項目を設定することになる。これらの値は、撮影された映像を確認し適宜調整する必要がある。また、ケーブルの角度や速度によって、点検終了時のエンコーダ距離に0.5m程度の誤差が生じるため、最終制御を行う距離はそのことを考慮して十分安全となるよう設定しなければならない。機体作動中、エンコーダ距離 D_E 、レーザ距離 D_L が計測され、エンコーダ距離に基づき算定される速度 V が表中の目標速度となるようにモータが制御される。

表-1 制御条件

(a) 上昇時

制御段階	目標速度	制御条件		
		機体速度	エンコーダ距離	レーザ距離
1st	$0.2 V_{max}$	$V = 0.0$	$D_E < X$	-
2nd	$1.0 V_{max}$	$V = 0.0$	$D_E < X$	$D_L < 5Y$
3rd	$0.6 V_{max}$	$V = 0.0$	-	$5Y > D_L < 3Y$
4th	$0.4 V_{max}$	$V = 0.0$	-	$3Y > D_L < 2Y$
5th	$0.2 V_{max}$	$V = 0.0$	-	$2Y > D_L < Y$

(b) 下降時

制御段階	目標速度	制御条件		
		機体速度	エンコーダ距離	レーザ距離
1st	$-0.2 V_{max}$	$V = 0.0$	-	$Y > D_L$
2nd	$-0.2 V_{max}$	$V = 0.0$	-	$Y > D_L$
3rd	$-0.4 V_{max}$	$V = 0.0$	-	$Y > D_L < 2Y$
4th	$-0.5 V_{max}$	$V = 0.0$	-	$2Y > D_L$
5th	$-0.4 V_{max}$	$V = 0.0$	$5X > D_E < 2X$	-
6th	$-0.2 V_{max}$	$V = 0.0$	$2X > D_E$	-

(3) 実橋における検証結果

概要

長崎港に架かる女神大橋において、機体の昇降状況、稼働時間、損傷検出状況等を確認するため、実証実験を行った。対象ケーブルは主に側径間上から3段目のC3ケーブル（ケーブル長さ201m、ケーブル傾斜28°）であるが、2段目のC2（211m、27°）、最下段のC13（70m、55°）ケーブルにおいても検証を行った。ケーブルは、亜鉛メッキ鋼線をポリエチレン被覆し、さらに表面を着色フッ素樹脂で被覆した構成となっている。

作業手順の確認

現地での作業手順を以下に示す。

- 1) 基部緩衝材※（図-4）の設置
- 2) 機体取付け
- 3) 動力バッテリー取付け、接続
- 4) カメラ4台の動画撮影スタート
- 5) 機体昇降（全周および全長の撮影）
- 6) 動力バッテリー切断、取外し
- 7) 動画撮影ストップ
- 8) 機体取外し
- 9) 基部緩衝材の撤去

機体取付け時の機体仮受けや、機体故障時にケーブル定着部への衝突を防止するため設置。

機体の昇降

機体の動作状況、稼働可能距離の確認を行った。動作については機体重量7kgに対し、プロペラによる設計最大推力15kgと約2倍の余裕を持たせた事で、最大出力の50%以下の出力でスムーズな昇降が可能であることを確認した。また、稼働可能距離については、対象ケーブル全長を往復し動力バッテリー使用量の確認を行った。ここに、動力バッテリー（リチウムポリマーバッテリー6セル容量5000mAh）の適正使用範囲は電圧で25.2V～19.2Vの範囲である。対象ケーブル昇降後の電圧が約22Vと全容量に対し50%程度の使用量であったことから、十分な稼働可能距離を有していることが確認できた。

カメラを用いた損傷確認

試作機を用いて、ケーブル表面に設置した疑似損傷（コンクリートのひびわれ計測に用いるクラックスケール）を動画撮影（動画画質：1920×1080px、60fps）した結果、撮影した動画からキャプチャした画像で0.1mm幅のラインが図-5(a)に示すように視認できることが確認されている。その際、機体の移動速度についても検証が行われており、移動速度60cm/s程度までは、パソコン画面上での目視で損傷が十分確認ができることが明らかにされている。今回の実証試験においても、図-5(b)に示すように、ケーブル下面の汚れや画像処理に利用することを意図したレーザーの点が鮮明に視認できる。



図-4 基部緩衝材と機体の設置状況



(a) 試作機



(b) 新機体

図-5 撮影動画からのキャプチャ画像の例

ケーブルで確認した損傷の位置

本ロボットは撮影した動画より損傷を確認する。その損傷の位置は、機体ガイドローラーに取り付けたロータリーエンコーダーの回転数にガイドローラーの周長（220mm）を乗じた値を1秒ごとに記録させたものと、動画で損傷を確認した時間の相関により算出している。点検終了時の機体側の位置計測誤差の最大値は、0.5m（ロータリーエンコーダー約2回転分）であった。これはケーブル長201mの0.25%に相当する。ケーブル長に対する相対誤差の最大値はケーブル長70mに対して0.4mの0.57%であった。

(4) 開発した画像処理システムの概要

対象とする点検ロボットは、機体の移動をコントロールする制御部のエンコーダと、ケーブル外観検査のための画像集録部、すなわち複数系統のカメラが独立したシステム構成を成してい

るため、動画の各フレームとケーブルの延長方向の位置の対応がとれない。さらに、機体の飛行速度および方向は風等の外乱によって変動するため、一定の間隔での静止画分割は有効ではなく、また、データ管理の観点でも不要なデータ重複のある点検記録といえる。この問題に対して、時間的には不等間隔で、ケーブルの延長方向に対して空間的に等間隔なフレーム抽出手法を考案し、展開画像作成のためのダイナミックな静止画分割と点検データの最適化を果たす「データ最適化プログラム」を構築した。さらに、抽出したフレームを系統（カメラ）別に、ケーブルの延長方向に重複なく結合するアルゴリズムと、全系統のケーブル全長画像を円周方向に結合するアルゴリズムで構成される「ケーブル展開画像作成プログラム」を構築した。図-6 に開発したシステムにおけるデータ処理の方法および流れを、図-7 にはこれらの画像処理技術の構成を示す。同図には、次のステップで構築予定の変状検出・識別プログラムも含めている。

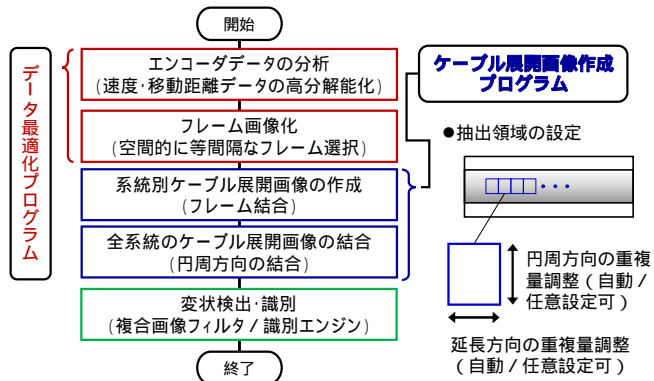
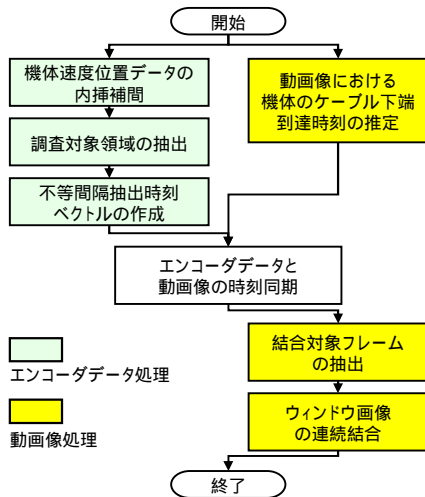


図-7 一連の画像処理プログラムの構成

図-6 データ処理の方法・流れ

(5) 画像処理システムの検証結果

構築した不等間隔フレーム結合手法を実際の点検データに適用し、静止画分割を経ずに、動画画像から直接、自動的かつ高速にケーブル外観画像を作成できることを確認した。図-8 に階調値補正を経ないケーブル外観画像の一部を例示する。処理の効率性については、約 10 分間（約 36,000 フレーム相当）の動画画像の場合、1 系統（1 カメラ映像）あたり約 600 フレームを自動抽出し、その処理時間は一般的な静止画分割処理を経る手法に対して約 5% と大幅に短縮することができた。

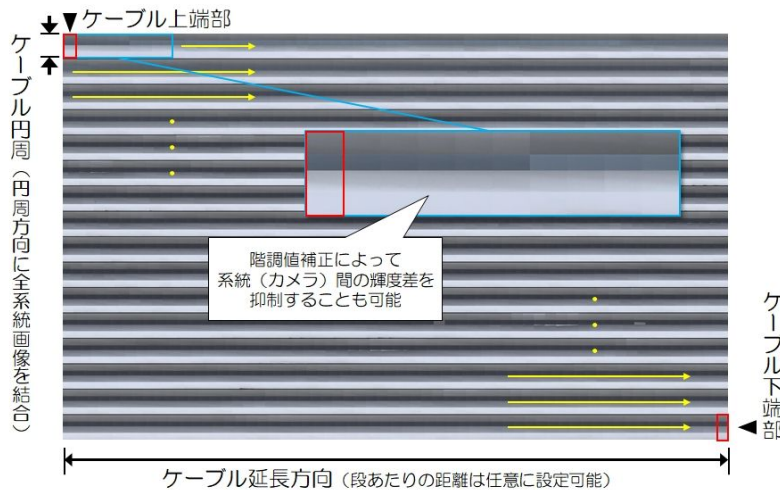


図-8 ケーブル外観画像 (階調値未補正) の例

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4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 0件）

1. 著者名 宮崎新一朗, 山本郁夫, 中村聖三, 下本陽一, 山口真司, 藤木剛, 梯誌修, 三浦尊敏, 酒井寿美雄, 中島貞治	4. 巻 57
2. 論文標題 斜張橋ケーブル点検ロボットの制御システムに関する研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 飛行機シンポジウム講演集	6. 最初と最後の頁 7-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 梯誌修, 藤木剛, 中村聖三, 山本郁夫, 中島貞治	4. 巻 第28巻
2. 論文標題 斜張橋ケーブルの点検に用いるロボットの開発と実績	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 鋼構造年次論文報告集	6. 最初と最後の頁 292-298
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 梯誌修, 藤木剛, 中村聖三, 山本郁夫, 中島貞治	4. 巻 Vol. 55, No. 8
2. 論文標題 斜張橋ケーブル点検ロボットの活用	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 橋梁と基礎	6. 最初と最後の頁 89-92
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 梯誌修, 藤木剛, 中村聖三, 山本郁夫, 中島貞治	4. 巻 No. 113
2. 論文標題 斜張橋ケーブル点検ロボットの開発と実橋への適用	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 鋼構造論文集	6. 最初と最後の頁 65-73
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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5件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 佐藤克飛, 中村聖三, 奥松俊博, 西川貴文
2. 発表標題 斜張橋ケーブル点検ロボットのフレーム構造に関する軽量化の検討
3. 学会等名 令和元年度土木学会西部支部研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 辻寛貴, 中村聖三, 奥松俊博, 西川貴文
2. 発表標題 斜張橋ケーブル点検ロボットのフレーム構造に関する検討
3. 学会等名 平成30年度土木学会西部支部研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中垣文那, 西川貴文, 中村聖三, 奥松俊博
2. 発表標題 橋梁ケーブル外観検査のための展開画像作成アルゴリズムの構築
3. 学会等名 平成30年度土木学会西部支部研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 櫻木卓哉, 山口真司, 宮崎新一郎, 下本陽一, 中村聖三, 山本郁夫
2. 発表標題 斜張橋ケーブル点検ロボット制御システムの開発
3. 学会等名 日本機械学会九州支部北九州講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ikuo Yamamoto
2. 発表標題 Machine learning, defect detection, digital twin and asset management using drones
3. 学会等名 DRONES&ROVS (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021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	山本 郁夫 (Yamamoto Ikuo) (10392953)	長崎大学・海洋未来イノベーション機構・教授 (17301)	
研究分担者	西川 貴文 (Nishikawa Takafumi) (50512076)	長崎大学・工学研究科・准教授 (17301)	
研究分担者	下本 陽一 (Shimomoto Yoichi) (80244036)	長崎大学・工学研究科・准教授 (17301)	

	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
研究協力者	梯 誌修 (Kakehashi Shinobu)	株式会社長大・第2構造事業部第8構造技術部	

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
研究協力者	中島 貞治 (Nakashima Sadaharu)	協和機電工業株式会社・メンテナンス本部産機システム部門	
研究協力者	藤木 剛 (Fujiki Tsuyoshi)	株式会社長大・第2構造事業部	

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