

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 15 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01347

研究課題名(和文) テクスチャ付き自由曲面金型の非加工時間短縮に向けた超精密切削加工システムの開発

研究課題名(英文) Development an Ultraprecision Cutting System for Highly Efficient Machining of Die Having Free-form Surface with Micro Textures

研究代表者

中本 圭一 (NAKAMOTO, Keiichi)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：90379339

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)：工業製品の小型化・高集積化に伴い、マイクロ・ナノメートルオーダーの複雑な3次元形状を創成できる超精密切削加工の重要性が増し、その効率化が喫緊の課題となっている。しかし、加工時間短縮に関わる研究がこれまでは主流であり、属人的な加工前のセッティングなどの効率化については研究されてこなかった。そこで、準備など非加工時間の大幅な短縮を目的に、産業用ロボットを援用した工具とワークのセッティング、汎用的な工作機械による荒加工後のワークの位置合わせ、自由曲面とマイクロテクスチャの設計式からの直接的な工具経路生成に取り組み、属人性を排除して誰でも素早く所望の形状創成が可能な超精密切削加工システムを開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超精密切削加工の高効率化を阻む障壁は数多いが、非効率な加工準備の本質的な要因はその属人性であり、自動化が全く進んでおらず技能に依存していることにある。また、非加工時間に着目して、超精密切削加工の高効率化を目指す取組みは極めて少ない。特に、工具やワークのセッティングは省略できない不可欠な手順にも関わらず、これまで属人的な技能として取り残され、セッティングの方法論も存在しておらず、ここに学術的意義がある。本研究の内容は泥臭いが故に確立すべき技術は数多く残っており、提案する超精密切削加工システムを開発することで、超精密切削加工の普及に寄与し、我が国の加工技術の優位性を更に高められる社会的意義がある。

研究成果の概要(英文)：To create precise parts for realizing their high performance, the whole ultraprecision machining process is usually conducted on the same machine tool to avoid setting errors by reducing setting operations. Thus, the study aims to develop an efficient ultraprecision machining system including an industrial robot to avoid manual setting and to automate the setting operations. In this system, ultraprecision machining is conducted based on a newly devised tool path generation method for the workpiece having a shape near the target shape, which is beforehand prepared by ordinary machine tools and is located on the machine table by means of an industrial robot. The differences from the ideal workpiece position and attitude are detected with a contact type of on-machine measurement device. NC data is finally modified to compensate the identified workpiece setting errors to machine the target shape on an ultraprecision machine tool.

研究分野：生産工学・加工学

キーワード：超精密切削加工 セッティング誤差 金型加工 マイクロテクスチャ

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

複雑で微細な形状を様々な材料へ比較的容易に低コストで創成する加工法として超精密切削加工には優位性があるものの、使用する加工機の位置決めや工具形状の誤差、選択する加工条件、環境などの非常にわずかな変動であっても加工精度は大きな影響を受ける。特に複雑形状加工のための多軸制御時においては、工具や被削材の取付け時に発生する相対的な位置合わせの誤差が支配的となり、極めて高い分解能を有した加工機本来の運動性能は未だ十分に発揮できていない。また、工具やワークの取付けは自動化が全く進んでいないため、取り付け位置の検出と NC プログラムの修正に相当な時間を要し、超精密切削加工の効率化を阻んでいる。

### 2. 研究の目的

ミラーやレンズなどの光学素子金型は大型化が進み、また自由曲面化へマイクロテクスチャを自在に付与することが望まれており、時間を要する超精密切削加工の効率化が喫緊の課題となっている。しかし、属人性の高いセッティングなどの非加工時間に着目して、超精密切削加工の高効率化を目指す取組みは極めて少ない。そこで本研究では、産業用ロボットを援用した工具とワークのセッティング、汎用的な工作機械による荒加工後のワークの位置合わせ、自由曲面とマイクロテクスチャの設計式からの直接的な工具経路生成に取り組み、準備など非加工時間を大幅に短縮する超精密切削加工システムの開発を目的とする。

### 3. 研究の方法

机上計測により加工形状をフィードバックするとともに、加工機上で工具を成形・再生して工具の位置合わせ誤差を根本的に解消できる自律型工作機械をこれまで開発してきた。この自律型工作機械を基盤として、まず産業用ロボットを援用した工具とワークのセッティングを実現する。産業用ロボットの位置決め誤差は、超精密加工機の分解能と比較にならない程大きいので、取り付け工具とワークの位置の補正が成功の鍵となる。また、高精度なものの加工速度が比較的遅い超精密加工機を重要な仕上げ加工のみに用いるため、汎用的な工作機械による荒加工後のワークの位置合わせを実現する。さらに、テクスチャを付与した大面積の自由曲面の CAD モデルは非常に重く、微小な直線補間の集合となる工具経路の生成には市販の CAM システムを用いると数十時間もかかる場合もあるため、曲面などの光学的な設計式からの直接的な工具経路生成に取り組む。これらの要素技術と自律型工作機械を組み合わせ、属人性を排除した高効率な超精密切削加工システムを開発する。

### 4. 研究成果

複雑で微細な 3 次元形状を創成する加工法として超精密切削加工には優位性があるものの、使用する加工機の位置決めや工具形状の誤差、加工条件、環境などの非常にわずかな変動であっても加工精度に大きな影響を与える。特に多軸制御時においては、工具や被削材の取付け時に発生する相対的な位置合わせ誤差（以下、セッティング誤差）の影響が支配的であり、高い分解能を有した加工機本来の性能は十分に発揮できていない。

そこで、試し削り用被削材（以下、ダミーワーク）を用いた新たな誤差補正手法を開発した。この誤差補正手法は大きく分けて 3 つの手順からなる。まず、加工機に被削材を取り付け、回転工具を用いて平面出しする。その後、図 1 に示すように被削材の上方を覆うようにダミーワークをジグに設置し、ジグをテーブルへ固定する。ダミーワークにも同様に平面出しを行い、2 つの平面の相対距離を加工機の機械座標から算出する。実際の工具中心点は、ダミーワークを取り外し、試し削りで施した溝を高分解能のレーザ顕微鏡で測定して検出する。次に、試し削りとしてダミーワークに単純形状を構成する溝を加工し、この加工痕を測定して実際の工具中心点の位置から理想的な工具中心点である回転軸中心までの距離を求め、セッティング誤差を検出する。最後に、セッティング誤差を補正するように NC データを修正する。

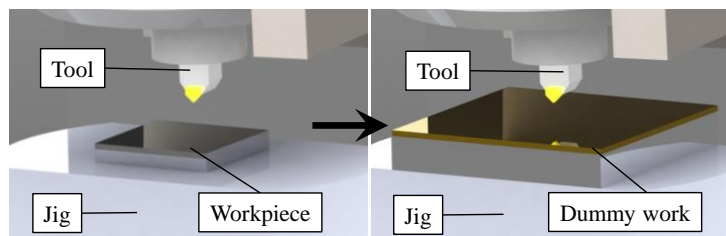


Fig. 1 Dummy work for trial cutting to detect setting errors

また、工作機械の創成運動に関する数学モデル、すなわち工作機械の形状創成理論を用いてセッティング誤差が創成運動に与える影響を解析することで、セッティング誤差を効果的に検出できる条件を求め、新たな試し削り溝も考案した。

提案したセッティング誤差補正手法を基に 3 次元複雑形状を加工し、その有効性を検証した。自由曲面を有する 3 次元形状を高精度に加工することができれば、複合機能を持つ光学素子や微細な機械部品などに対して超精密切削加工の適用範囲の拡大が期待できる。図 2 に示す目標

形状は自由曲面を有する高さ 2.25 mm、幅 2.2 mm のタービンプレードを模した形状であり、厚さは曲面の位置によって異なり、最も厚い部分では 0.4 mm、最も薄い部分では 0.1 mm となっている。工具経路は市販 CAM システム (DP Technology : ESPRIT 2015) を用いて生成し、半径 0.5 mm の単結晶ダイヤモンドボールエンドミルを用いて荒加工は 3 軸制御、曲面の仕上げ加工は同時 5 軸制御で加工した。

加工実験の結果を比較して図 3 に示す。セッティング誤差を意図的に残した場合には目標形状通りに加工ができておらず、オーバーカットやアンダーカットが発生していることが分かる。目標形状の上面の各寸法とそれらをレーザ顕微鏡で測定した結果、回転工具による同時多軸制御においても目標形状と 10  $\mu\text{m}$  程度の誤差に収まっていることから、自動化したセッティング誤差補正において高精度な 3 次元形状が得られており、提案するセッティング誤差補正手法の有効性が確認できた。

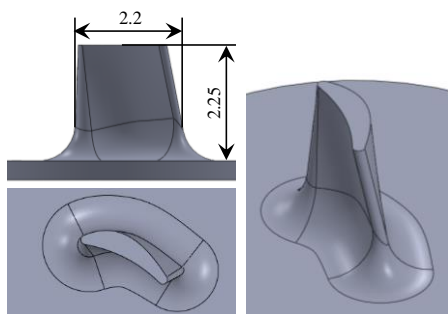
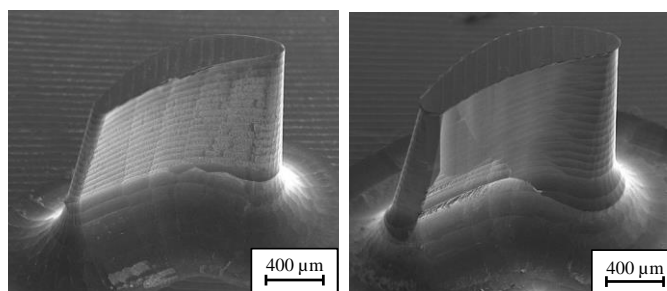


Fig. 2 Targeted 3D complex shape



(a) After compensation (b) With intentional setting errors  
Fig. 3 Machined results of 3D complex shape

上記により工具のセッティング誤差の影響を排除する補正手法を確立したが、ワークのセッティング誤差は考慮されていなかった。また、工具やワークの取付けは手作業であるため、取付け精度は作業者の技能に依存し、加工開始までに長い時間を要するなど、生産性には課題を残していた。そこで、超精密切削加工の高能率化に向けて、産業用ロボットで工具とワークを取り付け、それらのセッティング誤差を机上計測して補正することにより、取付け作業の自動化を達成する手法を考案した。

ロボットで取り付けた工具とワークの位置は、図 4 に示す接触式机上計測機 (FANUC NANOCHECKER) で検出した。この机上計測機は工具と同様に B 軸テーブル上に設置して、加工機の軸運動によりプローブがワーク表面を走査させることで C 軸テーブルに取り付けられたワークの形状を加工機から取り外すことなく測定できる。プローブの変位 V 軸の分解能は 1 nm であり、加工機の各軸の座標とともに 50 ms のサンプリング周期で記録する。このとき、加工機の B 軸回転によって机上計測機を回転させ、ワーク表面に対するプローブの姿勢を変化させることもできる。プローブの先端球は測定対象の形状や材質に応じて変更できるが、

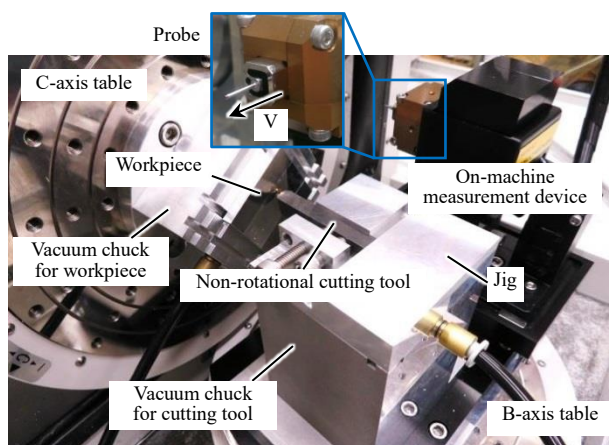


Fig. 4 Tool and workpiece setting on ultraprecision machining center

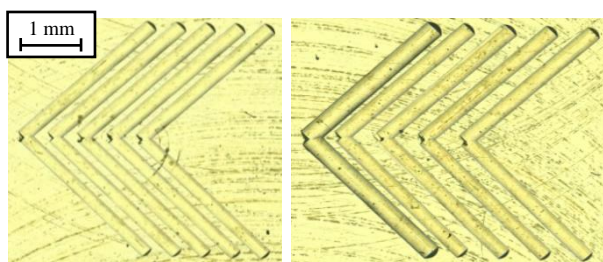
回転軸を用いて高精度に机上計測するためには、プローブ先端球の中心点と回転軸中心との位置関係を正確に把握する必要がある。そこで、机上計測機を加工機に取り付けたのち、基準球及び傾斜ミラーと呼ばれる専用の器具を用いてプローブ中心点の位置を算出する。

様々に変化するワークの位置、姿勢を正しく推定するためには、机上計測で高精度に検出できる基準が必要となる。ワーク加工面のエッジや端面も候補にはなるが、バリが残存した場合や端面の面粗さが悪化した場合には高精度な検出が困難となる。そこで本研究では、弓形の断面の 2 つの溝を十字状にワークへ予め加工しておき、位置、姿勢の基準として利用する。十字溝を加工したワークは、C 軸テ

ーブル上に設置した真空チャックにロボットで取り付けられた後、2 つの溝にそれぞれ交差するように机上計測機のプローブを走査させて十字溝の位置、姿勢を推定する。このとき、プローブ変位から得られる溝の断面を円弧近似することで溝の中心を検出し、十字溝の交点の位置や回転角度を推定する。

ワークのセッティング誤差補正の有用性を検証するため、L 字状のマイクロ溝を 5 本加工した。はじめにロボットを用いて、十字溝が予め加工されたワークを C 軸テーブルへ取り付け、机上計測機で基準となる十字溝を検出した。机上計測機のプローブの先端球には半径 0.25 mm の

ルビーを用い、測定時の送り速度は 1 mm/min.とした。その後、検出結果からワークのセッティング誤差を推定し、誤差の影響を排除するように修正した NC プログラムで L 字溝を加工した。この取付けから加工までの一連の作業をさらに 4 回繰り返し、L 字溝が並行で等間隔に加工されているかをレーザ顕微鏡で測定して検証した。



(a) With compensation (b) Without compensation

Fig. 5 Machined results of verification experiment of workpiece setting errors compensation

補正した場合及び補正しなかった場合の加工結果を図 5 に、測定結果を図 6 にそれぞれ示す。補正した場合には、溝同士の間隔が数  $\mu\text{m}$  程度の誤差に収まり、補正しなかった場合と比べて大幅に誤差が減少し、補正しきれていない工具のセッティング誤差を考慮すると、精度よくワークのセッティング誤差を補正できていることが確認できた。一方、溝同士の角度では最大で 0.01 deg. を超える誤差も生じたが、これは L 字溝の長さが 3 mm と短かったため、測定結果のばらつきが溝の角度の算出に影響を与えたものと考えられる。

一方、自由曲面にマイクロテクスチャを付与すると CAD モデルは極端に重く、小径工具で加工すると必然的に工具経路は長くなる。このため、微小な直線補間の集合となる工具経路の生成には相当の時間を要している。そこで、研究代表者らがこれまでに考案した工程設計及び工具経路生成手法を基に、CAD モデルを用いることなく自由曲面とテクスチャの光学的な設計式から直接的に工具経路を生成する手法を考案した。

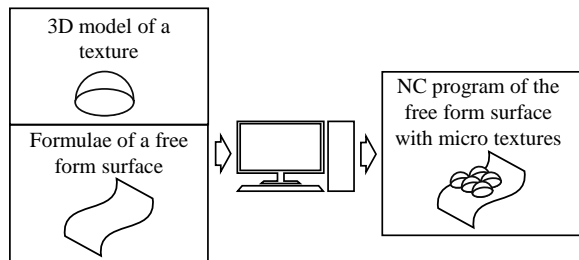
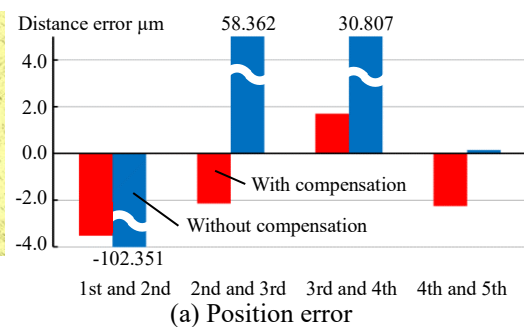
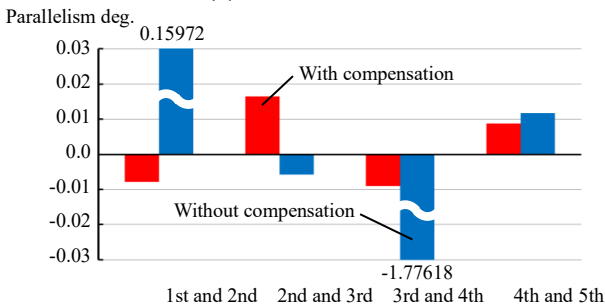


Fig. 7 Proposed tool path generation method



(a) Position error



(b) Rotation error

Fig. 6 Compensation of workpiece setting errors

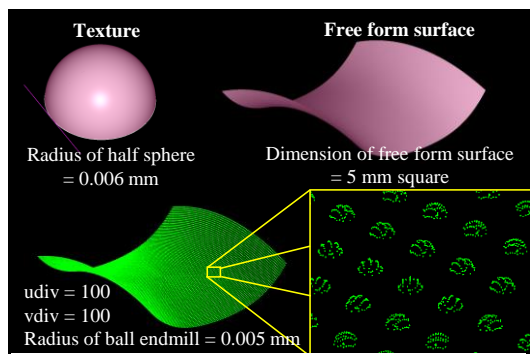


Fig. 8 Example of tool paths for free-form surface with micro textures

図 7 に示すように微細なテクスチャを有する大面積自由曲面に着目し、設計式によって表現される自由曲面上へテクスチャ単体の 3 次元形状を配置することで工具経路を直接生成する。この工具経路生成手法は、オープンソリッドカーネルである“Kodatuno”を用いており、ここでは 3 次元モデルが全て NURBS(Non-Uniform Rational B-Spline)表現されている。

本研究ではテクスチャを配置する自由曲面の設計式とテクスチャ単体の 3 次元形状を入力することで、テクスチャを配置した自由曲面を超精密切削加工するための工具経路を出力する自由曲面の設計式は関数  $z = f(x,y)$  の形式とし、テクスチャの 3 次元形状は汎用 3D データ形式である IGES または STL 形式としている。入力された自由曲面の設計式とテクスチャの 3 次元形状を NURBS 曲面へ変換し、それらの NURBS 曲面へテクスチャを配置するための座標と、テクスチャ単体に対する工具中心点群を取得する。最終的には、テクスチャ単体へ生成した工具中心点群を自由曲面上へ配置することで、テクスチャ付き自由曲面に対する工具経路を図 8 に示すように生成する。なお、テクスチャ同士の位置関係に次第では、工具中心点群に干渉等の不具合が生じないように距離が均一とならない不要な工具中心点は削除している。

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 3件）

1. 著者名 北川 廉, 徐 萌, 中本圭一, 竹内芳美	4. 巻 85巻, 8号
2. 論文標題 多軸制御超精密切削加工の高能率化に向けたセッティング誤差補正に基づく工具とワークの自動取付け	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 精密工学会誌	6. 最初と最後の頁 722-726
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 M. Xu, K. Nakamoto, Y. Takeuchi	4. 巻 Vol. 14, No. 1
2. 論文標題 Compensation Method for Tool Setting Errors Based on Non-Contact On-Machine Measurement	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Automation Technology	6. 最初と最後の頁 66-72
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20965/ijat.2020.p0066	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 M. Xu, K. Nakamoto, Y. Takeuchi	4. 巻 Vol. 5, Issue 1
2. 論文標題 An Efficient Ultraprecision Machining System Automating Setting Operations of Roughly Machined Workpiece	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Manufacturing and Materials Processing	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/jmmp5010011	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8件（うち招待講演 0件/うち国際学会 7件）

1. 発表者名 M. Xu, R. Kitakawa, K. Nakamoto, Y. Takeuchi
2. 発表標題 Automated Workpiece Setting Operation and Its Errors Compensation on an Ultraprecision Machine Tool
3. 学会等名 19th International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 N. Yokoyama, M. Xu, K. Nakamoto, Y. Takeuchi
2 . 発表標題 A Study on On-Machine Shaping of Diamond Tool to Realize Highly Efficient Ultraprecision Cutting
3 . 学会等名 8th International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 T. Hirano, K. Nakamoto, Y. Takeuchi
2 . 発表標題 A Study on Tool Path Generation for Ultraprecision Cutting of Free Form Surface with Micro Texture
3 . 学会等名 8th International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 R. Kitakawa, K. Nakamoto, Y. Takeuchi
2 . 発表標題 Three-dimensional Micro Shape Creation on a Workpiece Located by Industrial Robot
3 . 学会等名 International Symposium on Precision Engineering and Sustainable Manufacturing 2018 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 M. Xu, R. Kitakawa, K. Nakamoto, Y. Takeuchi
2 . 発表標題 A Study on Tool Setting Errors Compensation by Means of Non-contact Measurement on an Ultraprecision Machine Tool
3 . 学会等名 17th International Conference on Precision Engineering ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名 北川 廉, 徐 萌, 中本圭一, 竹内芳美
2. 発表標題 超精密切削加工の自動セッティングに向けたワークの取付け誤差補正に関する研究
3. 学会等名 2019年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Xu, K. Nakamoto, Y. Takeuchi
2. 発表標題 Efficient Ultraprecision Machining System by Means of Industrial Robot
3. 学会等名 20th International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 M. Xu, N. Yokoyama, K. Nakamoto, Y. Takeuchi
2. 発表標題 On-Machine Diamond Tool Shaping of to Realize Highly Efficient Ultraprecision Machining System
3. 学会等名 ASME 2020 International Symposium on Flexible Automation (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<a href="http://web.tuat.ac.jp/~nakalab/index.html">http://web.tuat.ac.jp/~nakalab/index.html</a>
---

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	笹原 弘之  (SASAHARA Hiroyuki)  (00205882)	東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・教授    (12605)	

	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	竹内 芳美  (TAKEUCHI Yoshimi)  (50107546)	中部大学・工学部・教授    (33910)	

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