

機関番号：24201

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560223

研究課題名(和文) 局所制御された自励振動アクチュエータによる多自由度振動系の分散制御

研究課題名(英文) Decentralized control of multi-degree-of-freedom system by self-excited vibration actuators with local control

研究代表者

栗田 裕 (KURITA YUTAKA)

滋賀県立大学・工学部・教授

研究者番号：70275171

研究成果の概要(和文)：

多自由度振動系を常に共振周波数で効率よく加振する方法を開発した。局所制御に、全周波数領域で位相が $-90^\circ$  でゲインがなるべく一定になるコントローラを用いることによって、すべての固有振動数で自励振動が発生するようにした。分散制御による共振点駆動の有効性を、4自由度振動系、8自由度振動系、大形構造物の多点加振試験、4足歩行動物の歩容の形成、平地における2足歩行の実験で検証した。

研究成果の概要(英文)：

A control method to always excite a multi-degree-of-freedom system efficiently at resonance frequency was developed. Self-excited vibration is generated at all the resonance frequencies by using a controller that has a phase lag of  $90^\circ$  and a constant gain in a wide frequency range. The validity of driving at resonance frequency by decentralized control was verified in the experiments of 4 and 8 degree-of-freedom vibration system, multipoint excitation of a large-sized structure, formation of gait of quadruped animals, and bipedal locomotion in the flat ground.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械力学・制御

キーワード：振動制御，自励振動，分散制御，多自由度振動系，共振点駆動，局所フィードバック，多点加振

## 1. 研究開始当初の背景

動物の4足歩行や魚の遊泳、腸の蠕動や異物を除去する繊毛運動など、生物は多自由度の運動をいとも簡単に制御し、見事な運動パターンを形成する。負荷変動など環境変化へ

の適応性に優れているにもかかわらず、簡単な神経細胞で制御されていることを考えると、全信号を1個所に集めて集中制御しているのではなく、局所的な制御が互いに協調しあって全体的な秩序を生み出していると考え

えられる。

人間の2足歩行や動物の4足歩行は、脊髄に存在する運動リズム生成器 CPG(Central Pattern Generator)によってもたらされると言われている。この CPG は、筋骨格系との相互引込みや、他の脚の CPG との結合による同調効果が指摘されているが、その関係は必ずしも明確ではない。一方、動物の筋骨格系自体にも4足歩行の歩容に類似した固有振動モードが存在する。歩行速度に合わせてこの固有振動を切り替えて利用すれば、効率のよい歩行が実現する。

本研究では、局所的な制御が協調する仕組みとして、コントローラ間の結合ではなく、多自由度振動系自体に内在するばねやダンパなどの力学的な結合に着目した。また、動物の歩行だけではなく、広く機械構造物の多点加振を対象とした。これまでに研究代表者らは、振幅によって速度フィードバックゲインを変化させることで、自励発振もアクティブ制振も可能にする自励振動子を開発した。この自励振動子を用いて、速度正帰還による共振点追尾、振幅一定制御による外乱抑圧、速度負帰還による減衰の増加と強制引込みを実現した。しかし、この制御方式では、1自由度振動系の共振点駆動、および独立した振動子間に相互引込みを起すことができたが、振動子同士が力学的に結合した多自由度振動系では、振動モードごとに振幅比が異なるため、各振動子の振幅一定制御が干渉し合い同期しなかった。

## 2. 研究の目的

振動系を固有振動数で加振すると、小さな力でも大きな振動が発生するので、効率よく加振できる(共振点駆動)。本研究では、多数の固有振動数をもつ多自由度振動系を、常に固有振動数で効率よく加振する技術を開発する。

多自由度振動系を固有振動数で加振するのに、集中制御されたアクチュエータで強制加振するのではなく、分散制御されたアクチュエータで自励発振させて加振する。分散制御することにより、アクチュエータをまわりから完全に独立した局所制御で駆動することでアクチュエータの増減が容易になる(拡張性)、多数のアクチュエータを振動系の各部に配置することで負担を分散し故障に強くなる(耐故障性)、常に共振周波数で自励発振する仕組みを制御に組み込むことでパラメータの変動や境界条件の変化に強くなる(環境適応性)という利点が生まれる。このような利点をもつ分散制御で多自由度振動系の共振点駆動を実現することを目指す。

## 3. 研究の方法

平成20年度は、多自由度振動系を自励発振

させるのに適した制御方式の開発を行うとともに、1自由度振動系において検証実験を行う。また、1自由度振動系と2自由度振動系に対する設計理論を確立する。平成21年度以降は、2自由度振動系・多自由度振動系の実験装置を製作し、検証実験を行うとともに、多自由度振動系に対する設計理論を確立する。

### <平成20年度> 制御方式の開発と1自由度振動系における検証

固有振動数に変化しても、常に固有振動数で自励発振させるために、広い周波数範囲で位相が $90^\circ$ 遅れるコントローラを用いる。1自由度振動系に対しては、変位の位相遅れ制御と速度正帰還制御のどちらでも同等の共振点追尾性能が得られる。しかし、それぞれ低周波域でハイゲイン、あるいは高周波域でハイゲインとなるため、多自由度振動系に対しては、それぞれを単独で用いると最低次あるいは最高次の振動モードが励起されやすく、所望の振動モードで発振させることが難しくなる。そこで、変位の位相遅れ制御と速度正帰還制御を組み合わせて、位相遅れが $90^\circ$ で、かつ、なるべく平坦なゲイン特性が得られるようにする。

自励振動の振幅を有限に抑え、定常振動(リミットサイクル)にするために、飽和要素を用いる。飽和要素は、入力大きさに応じて入出力のゲインが変化する(可変ゲイン)。振幅が一定になった定常振動の状態では、可変ゲインは一定値になるので、入出力の伝達特性は線形の伝達関数で表しうる。

制御対象となる振動系の減衰が小さい場合には、引込み現象が起こりにくい。そこで、速度負帰還によるアクティブ制振で、減衰を見かけ上大きくする。発振力と制振力の相殺が制御信号上で行われるので、実際の減衰のように加振力を不必要に増大させることはない。

1自由度振動系における検証として、まず、数値シミュレーションによって、自励発振、定常振動、強制引込みの同期範囲を調べる。また、定常状態では飽和要素の可変ゲインが一定になるので、強制引込みを線形の伝達関数で表す設計理論を作成し、シミュレーション結果と比較する。さらに、1自由度振動系の実験装置を作成して実験を行い、シミュレーション結果や理論解析結果と比較検討する。実験用コントローラには、8chの入出力信号を制御できるDSPボードを用いる。実験では、質量やばね定数の変動による固有振動数の変化を追尾できるのか、減衰や負荷の変動によって生じる振幅変化を抑えることができるのか、強制引込みの同期範囲は理論どおりか、発振力と制振力の相殺はうまくいくのかなどを調べる。

<平成 21 年度以降> 多自由度振動系における検証

平成 21 年度は、2 自由度振動系の振動装置を製作し、力学的結合だけで相互引込みが起これるかどうかなどを確認する。また、一方のアクチュエータに正弦波状の強制外力信号を加え、強制引込みが起これるかどうかなどを確認する。さらに、外力の周波数を変えたときの挙動を検討する。

また同時に、多自由度振動系における引込み特性についてシミュレーションを用いて調査する。相互引込みが起これるかを確認するだけでなく、特定のアクチュエータに強制外力信号を加えたとき、強制引込みが多自由度振動系全体にわたって起これるかどうかなどを検討する。さらに、自由度が増えても共振点追尾性能が維持されるのか、いくつかのアクチュエータが故障しても差し障りなく駆動できるのかなどを調べる。

平成 22 年度は、多自由度振動系の実験装置（8 自由度）を製作し、シミュレーションや理論的考察から得られた結果が正しいかどうかを検証する。

#### 4. 研究成果

(1) 多自由度振動系を自励発振させるのに適した制御方式の開発を行うとともに、数値シミュレーションによって基本性能の検証を行った。開発した局所フィードバック制御のブロック線図を図 1 に示す。

固有振動数に変化しても、常に固有振動数で自励発振させるために、広い周波数範囲で位相が  $90^\circ$  遅れるコントローラを用いた。1 自由度振動系に対しては、変位の位相遅れ制御と速度正帰還制御のどちらでも同等の共振点追尾性能が得られる。しかし、それぞれ低周波域でハイゲイン、あるいは高周波域でハイゲインとなるため、多自由度振動系に対しては、それぞれを単独で用いると最低次あるいは最高次の振動モードが励起されやすく、所望の振動モードで発振させることが難しくなる。そこで、変位の位相遅れ制御と速度正帰還制御を足し合わせて、位相遅れが

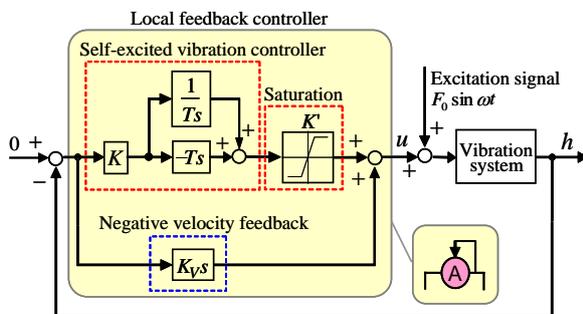


図 1 局所フィードバック制御

$90^\circ$  で、かつ、なるべく平坦なゲイン特性が得られるような自励発振コントローラを作成した。

また、自励振動の振幅を有限に抑え、定常振動（リミットサイクル）にするために、飽和要素を用いた。飽和要素は、入力に応じて入出力のゲインが変化する（可変ゲイン）。自励振動が成長し振幅が大きくなると、徐々に飽和要素の入出力ゲインが低下して、定常振動状態に落ち着く。

制御対象となる振動系の減衰が小さい場合には、小さな加振力でも大きな振動になる。また、減衰の変動に応じて振幅が大きく変化する。そこで、速度負帰還によるアクティブ制振要素を設けて、見かけの減衰を大きくした。

上記のように局所制御された自励振動アクチュエータを用いて、多自由度振動系を常に共振周波数で効率よく加振できるかどうかを数値シミュレーションで検討した。4 自由度振動系を対象にした数値シミュレーションによって、すべての固有振動数で自励振動を発生できることを示した。また、自励発振のきっかけとなる正弦波の周波数を変えることにより、所望の固有振動に切り替えることがわかった。

(2) 多自由度振動系を常に共振周波数で効率よく加振できるかどうかを、4 自由度振動系の実験装置を用いて検証した。

まず、分散制御によって 4 つの固有振動数すべてで共振点駆動できることを実証した（図 2）。また、コントローラ内で正弦波を与えることにより所望の固有振動数に切り替えて加振することができた。さらに、固有振動数に変化しても常に共振点駆動が維持できること（環境適応性）や、コントローラを変えることなくシステムの自由度を増減で

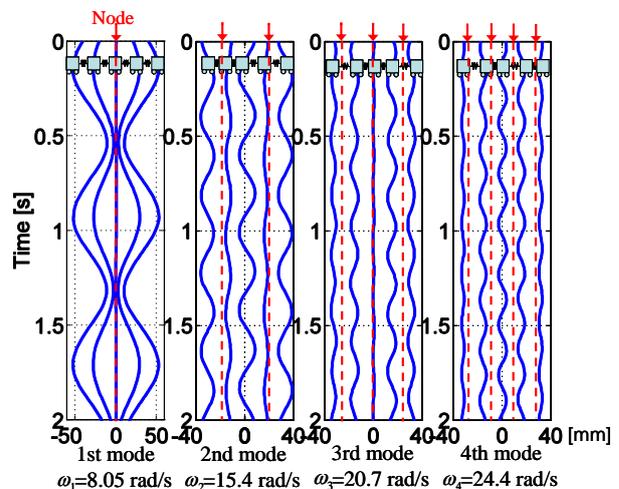


図 2 4 自由度振動系の共振点駆動

きること（拡張性）、アクチュエータが故障しても共振点駆動が維持できること（耐故障性）を示した。

(3) 分散制御による多自由度振動系の共振点駆動の有効性を、8 自由度振動系、大形構造物の多点加振試験、4 足歩行動物の歩容の形成、平地における 2 足歩行の実験で検証した。

8 自由度振動系の実験装置（図 3）を用いて、固有振動数が多くなった場合でも共振点駆動する方法を検討した。固有振動数が増えると、局所フィードバック制御だけでは、すべての固有振動数で共振点駆動することができなかった。そこで、隣接するアクチュエータ間のクロスフィードバック制御（図 4）を付け加えて、所望の振動モードになるようにフィードバックゲインの符号を与えたと

ころ、すべての固有振動数で共振点駆動することができた。

大型構造物を多点加振する実験では、航空機を模擬した薄板構造物を加振対象とした（図 5）。局所フィードバック制御されたアクチュエータを 8 台用いて、構造が複雑になっても、装置の 1 次から 4 次までの固有振動数を、分散制御によって発生する自励振動で加振できることを確認した。

4 足歩行動物の筋骨格構造を剛体リンクとモータで模擬した実験装置を用いて、固有振動を利用した効率のよい駆動ができるか検討した。4 足歩行動物の筋骨格系には、トロット、ペース、ギャロップと呼ばれる歩容に類似した固有振動モードが存在した。また、各脚の付け根に取り付けたアクチュエータを局所フィードバック分散制御することで、4 足歩行の歩容を効率のよい共振点駆動

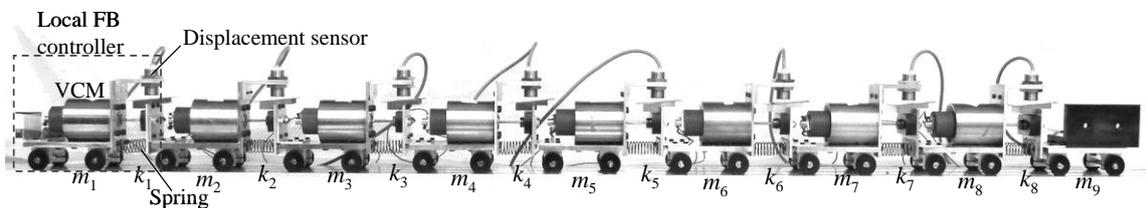


図 3 8 自由度振動系

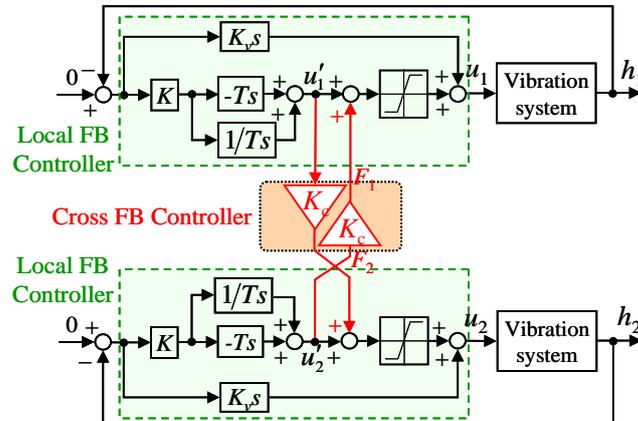


図 4 クロスフィードバック制御

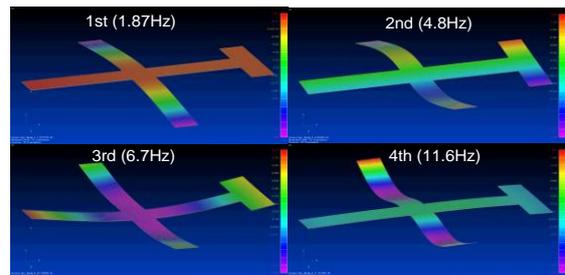
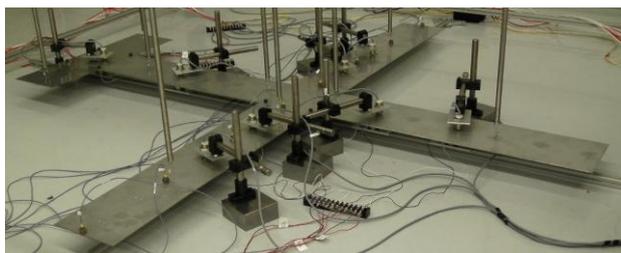


図 5 航空機を模擬した薄板構造物の多点加振試験

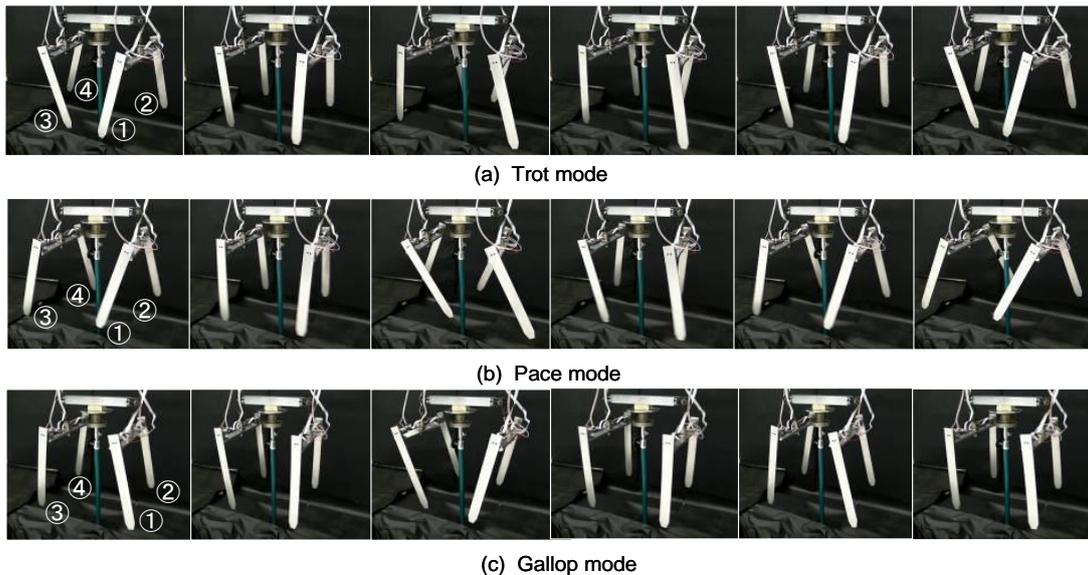


図6 分散制御による4足歩行の歩容の形成



図7 固有振動数を利用した2足歩行

が形成することができた(図6)。

別の研究で開発した受動形2足歩行器の構造をベースに、2本の脚の付け根と左右に振動する上体の根元にアクチュエータを取り付け、接地による振動の減衰を補うようにした実験装置(図7)を製作した。アクチュエータを局所フィードバックすることで共振点駆動が実現し、受動歩行と同様の固有振動を利用した効率のよい持続歩行が実現した。

(4) 今後の展望について述べる。多数の固有振動数をもつ機械構造物に、局所FB制御されたアクチュエータを多数取り付けすることで、構造物全体を所望の固有振動で加振できる。そこで、多自由度振動系の固有振動を生かした効率的な駆動が実現する。航空機や

高層ビルなど大形の構造物の多点加振試験や、多足歩行ロボットの制御、動物や人間の歩行運動の解明などへの適用が期待できる。今後、所望の固有振動で自励発振させる技術を確認するとともに、いくつかの事例研究を通して実用化のための課題抽出を行い、実用化の基礎固めをする必要がある。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計5件)

- ① Kurita, Y., Oura, Y., Matsuda, S., Nishide, H., Driving at Resonance Point of Multi-Degree-of-Freedom System by Decentralized Control (Development of Control Method and Verification of Basic Performance), Journal of System Design and Dynamics, 査読有, Vol. 5, No. 1(2011-1), 180-191.
- ② 栗田裕, 大浦靖典, 松田成勝, 分散制御による多自由度振動系の共振点駆動(直列結合形ばね連結台車を用いた実験), 日本機械学会論文集C編, 査読有, 76巻771号, 2010, 2909-2915
- ③ Kurita, Y., Oura, Y., Matsuda, S., Driving at Resonance Point of Multi-Degree-of-Freedom System by Decentralized Control (Experiment Using Five Carts Connected in Series by Four Springs), Proceedings of the 10th International Conference on Motion and Vibration Control, 査読有, 1B24, 2010.

- ④ 栗田裕, 大浦靖典, 松田成勝, 西出基, 分散制御による多自由度振動系の共振点駆動 (制御方式の開発と基本性能の検証), 日本機械学会論文集 C 編, 査読有, 76 巻 763 号, 2010, 557-564.
- ⑤ Kurita, Y., Oura, Y., Matsuda, S., Nishide, H., Driving at Resonance Point of Multi-Degree-of-Freedom System by Decentralized Control (Development of Control Method and Verification of Basic Performance), Proceedings of the 13th Asia-Pacific Vibration Conference, 査読有, 2009.

〔学会発表〕 (計 11 件)

- ① 井田皓一郎, 栗田裕, 大浦靖典, 分散制御による多自由度振動系の共振点駆動 (大型構造物の多点加振試験への適用), 日本機械学会関西支部第 86 期定時総会講演会, 2011. 3. 20, 論文 No. 913, 京都工芸繊維大学
- ② 村尾和弘, 栗田裕, 大浦靖典, 分散制御による多自由度振動系の共振点駆動 (クロスフィードバック制御の付加による自励発振モードの形成), 日本機械学会関西支部第 86 期定時総会講演会, 2011. 3. 20, 論文 No. 914, 京都工芸繊維大学
- ③ 平塚智裕, 栗田裕, 大浦靖典, 分散制御による多自由度振動系の共振点駆動 (4 足歩行の歩容の実現), 日本機械学会関西支部第 86 期定時総会講演会, 2011. 3. 19, 論文 No. 1008, 京都工芸繊維大学
- ④ 村尾和弘, 栗田裕, 大浦靖典, 松田成勝, 分散制御による多自由度振動系の共振点駆動 (クロスフィードバック制御の付加による自励発振モードの形成), 計測自動制御学会自律分散システムシンポジウム, 2011. 1. 30, 論文 No. 2B1-3, 北海道大学
- ⑤ 平塚智裕, 栗田裕, 大浦靖典, 松田成勝, 分散制御による多自由度振動系の共振点駆動 (4 足歩行の歩容の実現), 自律分散システムシンポジウム, 2011. 1. 30, 論文 No. 2B2-3, 北海道大学
- ⑥ 村尾和弘, 栗田裕, 大浦靖典, 松田成勝, 分散制御による多自由度振動系の共振点駆動 (クロスフィードバック制御の付加による自励発振モードの形成), 日本機械学会 D&D2010, 2010. 9. 17, 論文 No. 357, 同志社大学
- ⑦ 井田皓一郎, 栗田裕, 大浦靖典, 松田成勝, 分散制御による多自由度振動系の共振点駆動 (大型構造物の多点加振試験への適用), 日本機械学会 D&D2010, 2010. 9. 14, 論文 No. 112, 同志社大学

- ⑧ 平塚智裕, 栗田裕, 大浦靖典, 松田成勝, 分散制御による多自由度振動系の共振点駆動 (4 足歩行の歩容の実現), 日本機械学会 D&D2010, 2010. 9. 14, 論文 No. 513, 同志社大学
- ⑨ 松田成勝, 栗田裕, 大浦靖典, 壺東孝, 分散制御による多自由度振動系の共振点駆動 (直列結合形ばね連結台車を用いた実験), 日本機械学会 D&D2009, 2009. 8. 4, 論文 No. 333, 北海道大学
- ⑩ 松田成勝, 栗田裕, 壺東孝, 分散制御による多自由度振動系の共振点駆動 (直列結合形ばね連結台車を用いた実験), 日本機械学会関西支部第 84 期定時総会講演会, 2009. 3. 17, 論文 No. 1219, 近畿大学
- ⑪ 松田成勝, 栗田裕, 西出基, 分散制御による多自由度振動系の共振点駆動 (制御方式の提案と基本性能の検証), 日本機械学会 D&D2008, 2008. 9. 4, 論文 No. 449, 慶応義塾大学

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 1 件)

名称: 制御アクチュエータ及び振動制御方法

発明者: 栗田裕

権利者: 滋賀県立大学

種類: 特許出願

番号: 2008-220737

出願年月日: 2008. 8. 29

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

栗田 裕 (KURITA YUTAKA)

滋賀県立大学・工学部・教授

研究者番号: 70275171

(2) 研究分担者

( )

研究者番号:

(3) 連携研究者

( )

研究者番号: