

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 15 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289062

研究課題名(和文) 創成流場と非線形相互作用する昆虫飛翔の適応力のロボテック・バイオロジーによる解明

研究課題名(英文) Understanding of Adaptive Capability in Insect Flight that Nonlinearly Interacts with Generated Flow-field by Using Robotic Biology

研究代表者

泉田 啓 (SENDA, Kei)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：60206662

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,900,000円

研究成果の概要(和文)：蝶の羽ばたき飛翔を神経(制御)系-身体-環境(流場)の動的相互作用により成立する適応的運動能力(運動知能)と捉え、発現メカニズムの解明を目的とする。生体の蝶を用いた実験観測という生物学的アプローチにより、羽ばたき動作に対応する筋電のデータを得た。ロボティック・バイオロジー・アプローチにより、翅周りの流場の微細で複雑な渦構造を実験的に観測した。数値モデルを用いた工学的アプローチにより、渦列流場と翅の構造柔軟性を用いて不安定性を低減し、能動的制御により飛翔を安定化できること、渦との相互作用によりマヌーバが可能なることを示した。システム論的アプローチにより、生体の蝶の制御系のモデルを構築した。

研究成果の概要(英文)：A flapping flight of butterfly is an example of the motion intelligence, which emerges the flight by interactions of the nervous system, body, and environment. The objective of this study is to unveil the mechanism of the motion intelligence. This study approaches it by the biological analysis through experimental observations of living butterflies, by the robotic biology approach, by the synthetic approach with numerical models, and by systemic approach. The models clarify effects of vortices and flexibility of wings, maneuverability, detailed structure of flow, etc.

研究分野：システム工学

キーワード：昆虫 飛翔 非線形相互作用 適応能力 ロボティック・バイオロジー

1. 研究開始当初の背景

蝶は環境に渦列流場を創成しつつ羽ばたき飛翔する。蝶などの昆虫の飛翔では、レイノルズ数は 1000 のオーダーである。同程度のレイノルズ数では一様流中に置かれた円柱周りでもカルマン渦列が生じ、周期的に渦を生成する渦列流場パターンへと引き込まれ、比較的安定に渦列を生じ続ける。蝶も羽ばたき動作により逆カルマン渦列を生成するため、飛翔の安定化とマヌーバに適した環境を創成して飛翔を実現するという環境創成による運動知能という想定に至った。

蝶が飛翔しているとき、神経系は概ね周期的な制御指令を出し、翅は振動的に運動し、流場に周期的な渦列が創られる。各要素は個別の振動子のように振舞うが、力学的に情報的に強い相互作用を持っている。このような神経系 - 身体 - 環境の要素ダイナミクスと相互作用は蝶の飛翔に本質的であり、歩行などの他の運動知能にも共通する構造である。さらに、素早いマヌーバは適応的運動能力(運動知能)の現れであり、環境との強い非線形相互作用を活用すると考えられる。蝶では均質な流場を不均質な渦列流場に変化させ、創成環境と身体との非線形相互作用を引き出している可能性が高い。このように創成環境との非線形相互作用を利用する運動知能の発現という想定に至ったが、その発現メカニズムは未だ解明されていない。そのため、蝶の飛翔という問題は運動知能の発現メカニズム、特に環境の役割を理解する上で重要な意味を持つと考えられる。

ここに至る問題意識でこれまでも研究を行い、重要な成果を得てきたが、逆に多くの課題を突き付けられることになった。

まず、渦列流場による受動的安定の存在を示すとともに、ゆっくりとした飛翔制御も実現したが、それらを内包する生体の蝶のマヌーバ(運動知能)の方法は未だ理解されていない。前者は渦列流場との弱い非線形相互作用を用いるが、マヌーバには創成環境との強い非線形相互作用が必要と考えられる。関連して以下の課題が浮上した。

次に、シミュレーションで大域的渦構造に加え翅周りの乱流に近い微細構造を有する流場が示唆されたが、その意味や機能は不明である。この流場は、翅の微細構造、構造柔軟性等、正確にモデル化できない因子の影響を受けるため流場の精緻な実験観測は重要であるが、生体の蝶を用いた PTV (Particle Tracking Velocimetry) 手法の実験観測では大域的渦構造がなんとか捉えられただけである。精緻な観測のために、再現性の高い実験を繰返して合成する必要がある。

さらに、羽ばたき動作計測のみでは解析できなかったため、生体の蝶の制御信号である筋電の直接計測に基づく制御の解析が望まれる。

2. 研究の目的

生体の蝶を用いた生物学的アプローチで次の項目を解析する。

(i) 感覚器と身体機構と可能な羽ばたき動作

ロボティック・バイオロジー・アプローチを用い、ロボティクスを援用して

(ii) 刺激に対する応答動作と制御信号(筋電)

(iii) 蝶が創成する流場の詳細構造を観測して解析する。(ii)ではロボットアームに蝶を取付けて強制的に姿勢を変化させるなどの刺激を与えて羽ばたき動作と筋電を計測し、蝶の制御を調べる。(iii)では、生体の蝶の運動を再現する蝶型の観測ロボットを製作し PIV (Particle Image Velocimetry) 手法で流場のデータを得る。

数値モデルを用いたシミュレーションに基づく工学的アプローチにより以下を実現する。

(iv) 創成された流場との強い非線形相互作用を利用するマヌーバ(運動知能)

それにより環境がもたらす効果および制御方法を明らかにし運動知能の構成方法を検討する。

生物学的な解析から工学的な実現までを用いシステム論的アプローチによって以下を調べる。

(v) 項目(i)~(iv)で解析され実現された制御が生体の蝶の制御系として実在し得るか

系のダイナミクスは、自由度が高く、複雑であり、非線形性が強い。さらに、生体の蝶の制御系の内部自由度は高く、構造も解明されていない。そのため相当に困難と考えられるが、上記アプローチにより創成環境との非線形相互作用を利用する運動知能と制御系の解明に挑む。

3. 研究の方法

生物学的アプローチで生体の蝶の身体機構と動作、工学的アプローチで流場と蝶と相互作用を調べ、両者で困難な課題に対してロボティック・バイオロジーでアプローチし、システム論的アプローチをもって創成環境との非線形相互作用を利用する運動知能を明らかにする。

A. 生物学的アプローチ

生体の蝶の解剖学的観察と計測により、主に (i) 感覚器と身体機構と可能な動作を調べる。

B. ロボティック・バイオロジー・アプローチ

A と以下の B1 により、主に (ii) 刺激に対する応答動作と制御信号(筋電)を調べる。また、B2 と C により (iii) 蝶が創成する流場の詳細構造を明らかにする。

B1 強制的に姿勢を変化させる等の刺激を

与えて羽ばたき動作と筋電の計測を行う。

B2 生体の蝶の運動を再現する蝶型の観測ロボットを製作しPIVで流場の観測の実験を行う。

C. 工学的アプローチ

複数の数値モデルを用い、(iii) 蝶が創成する流場の詳細構造を解析し、(iv) 創成流場との強い非線形相互作用を用いるマヌーバを発現できるかを検討する。

D. システム論的アプローチ

生物学的に解析し、ロボティック・バイオロジーを援用し、工学的に実現された制御が生体の蝶の制御系として実在し得るか検討する。

4. 研究成果

A. 生物学的アプローチによる成果

アサギマダラを用いて羽ばたき中の筋電計測の実験を行った。電極を胸部の飛翔筋に取り付けて筋電を計測し、羽ばたき動作に対応する筋電のデータを得た。

B. ロボティック・バイオロジー・アプローチによる成果

蝶型ロボットを製作しPIV計測により、羽ばたき時の流れの大域的な渦構造とともに、翅周りの流れが乱流になることを実験的に観測できた。この観測は以前に行った数値計算と符合する。なお、このような詳細な実験観測は、これまで報告されていない。

C. 工学的アプローチによる成果

創成流場との非線形相互作用によるマヌーバ発現について2次元理論モデルにより研究した。

はばたき運動を特定位相で一定時間停止させることで、剥離渦の生成挙動に変化を生じさせ、これが定常飛行時に形成されていた渦構造の一時的な変化をもたらして、ある準定常飛翔状態を実現出来ることがわかった。停止時間の特性をパラメータを変えて調べた結果、重力加速度やレイノルズ数などを変えても同様の現象が観測されることがわかった。

この剥離渦の生成挙動をマヌーバに役立てるためには与えられた環境下における剥離渦の生成挙動を予測する必要がある。そのため非粘性流体に単一渦近似法を適用したモデルを用いてこの問題に取り組んだ。導かれる方程式を陰的に解くことで前述の要請を満たすことが出来ることを示した。この計算法を実際に平板及びV字型物体に適用し、剥離渦の挙動とそれに伴う力やトルクの計算を行った。

2次元単一渦モデルが渦構造の形成の基

礎モデルとして有効であることが分かったので、特に剥離渦形成のダイナミクスを解析した。具体的には物体から剥離する渦の運動について、様々な初期値からの起動や循環の時間発展の図示法を考案した。これにより、剥離渦に摂動が加わった場合の挙動が分かり、定性的に挙動が変化しない(あるいはする)領域が可視化できた。

この他受動飛行のモデルとして円錐形物体の落下について予備的研究を行った。

胸部の速度や姿勢に摂動を与え、その応答から縦方向の動的安定性を数値的に解析した。翅の打上げ後半と打下し前半で、トルクの姿勢に対する摂動への応答が大きかった。翅の打上げ後半で、姿勢の角速度に対する摂動への応答が大きかった。この応答が羽ばたき位相に強く依存することを用いてスライディングモード制御による姿勢制御を行うことで、流体構造連成問題における飛翔制御の機構解明に取り組んだ。

D. システム論的アプローチによる成果

生体の蝶の羽ばたき飛翔の制御法について、パネル法を用いた3次元数値モデルと生体の蝶の実験計測により研究した。

生物学的知見として、動物は階層的な制御機構を有していることが知られている。それに基づき、蝶の場合について、低位の制御および高位の制御が如何なるものか検討した。まず、低位の陰的制御として、後流の自由渦、および、翅の柔軟性が飛翔を安定化する効果があることを明らかにした。その後、高位の陽的制御として、動物の制御系として存在が確認されている、フィードフォワードとフィードバックの2自由度制御を構築した。その結果、安定な定常飛翔や上昇飛翔(ゆっくりとしたマヌーバ)が可能になった。

次に、生物学的知見として、生体の蝶に存在する機械的感覚器や視覚の時間遅れを考慮した。すると、この制御系は不安定化した。そこで、時間遅れを考慮してフィードバック制御系を設計しなおしたところ、時間遅れがあっても安定な制御系を構築できた。

さらに、得られた制御系が生体の蝶の制御系と近いものであるかを評価した。この制御系を組み込んだ数値モデルの定常飛翔と上昇飛翔の制御動作を生体の蝶の制御動作と比較したところ、定性的に良く一致した。それゆえ、構築した制御系は生体の蝶の制御系の特性を反映したモデルになっていると考えられる。

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 18件)

泉田 啓, 菱沼 徹, 谷 百合夏, プラント変動の推定に基づく近似ベイジアン強化学習とペグ・イン・ホール・タスクへの適用, システム制御情報学会論文誌, 査読有, 29-3, 2016, 122-129.

Kei Senda, Implicit and Explicit Controls in Flapping Flight of Butterfly, International Symposium on Nature-Inspired Technology, 査読有, January 13-15, 2016, Daejeon, Korea, S2-01, 51.

Kei Senda, Flight Control of a Flapping Butterfly Considering Time Delay, Asian-Pacific Conference on Biomechanics, 査読有, September 16-19, 2015, Sapporo, Japan, 72.

T. Yamaguchi and M. Iima, Numerical analysis of transient orbits by the pullback method for covariant Lyapunov vector, Theoretical and Applied Mechanics Japan, 査読有, 63, 2015, 91-96.

<http://doi.org/10.11345/nctam.63.91>

飯間 信, 二次元流中における非対称剥離渦が物体に及ぼす力の解析, 日本流体力学会年会 2015 講演論文集, 査読有, 2015, 4 pages.

横山直人, 飯間 信, 流れが駆動する平板のピッチ運動, 日本流体力学会年会 2015 講演論文集, 査読有, 2015, 4 pages.

N. Hirai, Y. Hirai, M. Ishii, Differences in pupal cold hardiness and larval food consumption between overwintering and non-overwintering generations of the common yellow swallowtail, *Papilio machaon* (Lepidoptera: Papilionidae), from the Osaka population, Entomological Science, 査読有, 2016 (in press).

平井規央, シルビアシジミのボルバキア感染と性比異常, 昆虫と自然, 51-1, 2016, 13-16.

Y. Sakamoto, N. Hirai, M. Ishii, Effects of photoperiod and temperature on the development and diapause of the endangered butterfly *Zizina emelina* (Lepidoptera: Lycaenidae), Journal of Insect Conservation, 査読有, 19, 2015, 639-645.

DOI: 10.1007/s10841-015-9786-1

吉村忠浩, 竹内剛, 森地重博, Anja Sliwa, 平井規央, 石井実, 大阪府北部の鴻心山周辺におけるギフチョウ個体群と食草群落の現状, 蝶と蛾, 査読有, 66-2, 2015,

62-67.

K. Senda, S. Hattori, T. Hishinuma, and T. Kohda, Acceleration of Reinforcement Learning by Policy Evaluation Using Nonstationary Iterative Method, IEEE Transactions on Cybernetics, 査読有, 44-12, 2014, 2696-2705.

DOI: 10.1109/TCYB.2014.2313655

K. Senda, N. Yokoyama, S. Lee, H. Yamamoto, N. Hirai, and M. Iima, A Study on the Flight Control of a Flapping Butterfly Considering Time Delay, International Symposium on Aero Aqua Bio-mechanisms, 査読有, 1, 2014, 101-106.

大山 達之, 飯間 信, 二次元流中における非対称剥離渦が物体に及ぼす力の解析, 日本流体力学会年会 2014 講演論文集, 査読有, 2014, 4 pages.

Y. Yoshiyasu, M. Sakakibara, and N. Hirai, A new *Anania* species from Japan, a close relative of *A. crocealis* in Europe (Lepidoptera, Crambidae), Lepidoptera Science, 査読有, 65, 2015, 142-149.

Y. Sakamoto, N. Hirai, T. Tanikawa, M. Yago, and M. Ishii, Population genetic structure and *Wolbachia* infection in an endangered butterfly, *Zizina emelina* (Lepidoptera, Lycaenidae), in Japan, Bulletin of Entomological Research, 査読有, 105, 2015, 152-165.

K. Senda, L. Seunggyu, M. Matsusaka, T. Obara, N. Yokoyama, N. Hirai, M. Iima, Comparison of Artificial Control with Flight Control of Living Butterfly, Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology, 査読有, 04-07-2, 2013, 9 pages.

K. Senda, N. Yokoyama, H. Yamamoto, T. Nishikata, T. Obara, M. Kitamura, N. Hirai, and M. Iima, Panel Method Model for Flapping Butterfly Compared with Experiment, Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology, 査読有, 04-06-1, 2013, 5 pages.

I. Tanahashi, T. Mifune, N. Hirai, and M. Ishii, Wing color change by sunlight irradiation in the spotless grass yellow butterfly, *Eurema laeta bethesba* (Lepidoptera, Pieridae), Lepidoptera Science, 査読有, 65-1, 2014, 44-49.

[学会発表](計 38件)

Kei Senda, Implicit and Explicit Controls in Flapping Flight of Butterfly, International Symposium on Nature-Inspired Technology (招待講演) (国際学会), 2016/1/13-15, Daejeon (Korea).

Kei Senda, Flight Control of a Flapping Butterfly Considering Time Delay, Asian-Pacific Conference on Biomechanics (招待講演)(国際学会), 2015/9/16-19, Hokkaido University (Sapporo).

泉田 啓, 菱沼 徹, 変動の推定に基づく強化学習とペグ・イン・ホール・タスクへの適用, ステム制御情報学会研究発表講演会, 2015/5/20-22, 中央電気倶楽部(大阪市).

泉田 啓, 横山直人, 井上裕登, 自由飛翔計測実験に基づく蝶の羽ばたき飛翔の解析, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015, 2015/5/17-19, 京都市勧業館(京都市).

泉田 啓, 中山弘幸, 蝶の羽ばたき飛翔における構造柔軟性による受動的安定性, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015, 2015/5/17-19, 京都市勧業館(京都市).

飯間 信, 単一渦近似を用いた翼からの剥離渦運動の解析, 日本物理学会第71回年次大会, 2016/3/19-22, 東北学院大学(仙台市).

M. Lima, Separation vortices dynamics of the single vortex model, The second workshop on Applied and Computational Complex Analysis(招待講演)(国際学会), 2016/1/18-19, 京都大学(京都市).

飯間 信, 二次元流中における非対称剥離渦が物体に及ぼす力の解析, 日本流体力学会年会, 2015/9/26-28, 東工大(東京都).

M. Lima, Analytical Study of the Dynamics of the Separation Vortices from the Body Using Single Vortex Approximation, T8th International Congress on Industrial and Applied Mathematics (招待講演)(国際学会), 2015/8/10-14, 北京(中国).

Jeeva Jayakumar, Kei Senda, Naoto Yokoyama, Longitudinal dynamic stability of two-dimensional butterfly model in forward flight, 京都大学数理解析研究所共同研究: 生物流体力学における運動の諸相, 2015/10/26-28, 京都大学(京都市).

横山直人, 飯間 信, 流れが駆動する平板のピッチ運動, 日本流体力学会年会, 2015/9/26-28, 東工大(東京都).

長谷川湧人, 竹内剛, 平井規央, 上田昇平, 石井実, ウラナミジャノメの保全遺

伝学的研究, 日本昆虫学会第76回大会・第60回日本応用動物昆虫学会大会合同大会, 2016/3/26-29, 大阪府立大学(堺市).

大津建大, 平井規央, 石井実, 鈴木丈詞, 天野洋, 温度条件から見たクロマダラソテツシジミの日本列島定着の可能性, 日本昆虫学会第76回大会・第60回日本応用動物昆虫学会大会合同大会, 2016/3/26-29, 大阪府立大学(堺市).

岡野凌一, 新居靖崇, 倉橋健介, 徳本勇人, 石井実, 平井規央, アサギマダラ幼虫の腸肉細菌叢の解析, 日本昆虫学会第76回大会・第60回日本応用動物昆虫学会大会合同大会, 2016/3/26-29, 大阪府立大学(堺市).

平井規央, 泉田 啓, 飯間 信, 横山直人, CT撮影によるアサギマダラの飛翔筋と胸部外骨格の構造, 日本鱗翅学会近畿支部第151回例会, 2015/5/9, 大阪府立大学I-siteなんば(大阪市).

K. Senda, N. Yokoyama, S. Lee, H. Yamamoto, T. Obara, T. Nishikata, N. Hirai, and M. Lima, A Study on the Flight Control of a Flapping Butterfly using Experiments and Numerical Models, 7th World Congress of Biomechanics(国際学会), 2014/7/6-14, Boston (USA).

泉田 啓, 大坪 立サミュエル, プラントの内挿による変動プラント・モデルを用いたロバスト強化学習とペグ・イン・ホールへの応用, 第58回システム制御情報学会研究発表講演会, 2014/5/21-23, 京都テルサ(京都市).

泉田 啓, 菱沼 徹, プラント変動の推定に基づく強化学習, 第58回システム制御情報学会研究発表講演会, 2014/5/21-23, 京都テルサ(京都市).

大山達之, 飯間 信, 運動直後の非対称剥離渦が物体に及ぼす力・モーメントの解析, 日本物理学会第70回年次大会, 2015/3/21日-24, 東京.

大山達之, 飯間 信, 二次元流中における非対称剥離渦が物体に及ぼす力の解析, 流体力学会年会 2014, 2014/9/15-17, 仙台.

21 大山達之, 飯間 信, 斜めにおかれた物体から発生する剥離渦のダイナミクス, 第12回日本流体力学会中四国・九州支部講演会, 2014/6/21, 博多.

22 横山直人, 飯間信, 平板のピッチ運動と流れの相互作用, 日本流体力学会年会 2014, 2014/9/15-17, 仙台.

23 横山直人, 流体構造相互作用としての蝶の飛翔における縦方向安定性, 航空宇宙学会関西支部第447回航空懇談会(招待講演), 2014/7/18, 京都.

24 平井規央, 坂本佳子, 矢後勝也, 石井 実, 石川県産シルビアシジミの生活史と遺伝

- 的変異, 日本鱗翅学会第 61 回大会, 2014/10/25-26, 鹿児島.
- 25 石井 実, 平井規央, 大阪におけるテングチョウの大発生と幼虫の体色の変異, 日本鱗翅学会第 61 回大会, 2014/10/25-26, 鹿児島.
- 26 平井規央, 坂本佳子, 矢後勝也, 石井 実, 石川県産シルビアシジミの遺伝的変異, 日本昆虫学会第 74 回大会, 2014/9/13-15, 東広島.
- 27 泉田 啓, 李 承珪, 山本啓貴, 横山直人, 羽ばたく蝶の実験とパネル法モデルに基づく制御の検討, 京都大学数理解析研究所研究集会「生物流体力学における流れ構造の解析と役割」, 2013/11/11-13, 京都.
- 28 泉田 啓, 李 承珪, 横山直人, 蝶の羽ばたき飛翔の制御, 日本機械学会 2013 年度 年次大会, 2013/9/8-11, 岡山.
- 29 泉田 啓, 山本啓貴, 横山直人, 羽ばたく蝶の流場の実験とパネル法モデルによる観測, 日本機械学会 2013 年度 年次大会, 2013/9/8-11, 岡山.
- 30 大山達之, 飯間 信, 円錐形を模した物体の落下時における渦発生の解析, 日本物理学会第 69 回年次大会, 2014/3/30, 平塚.
- 31 大山達之, 飯間 信, 空気中を自由落下する円錐形物体の非定常運動の解析, 日本機械学会 2013 年度 年次大会, 2013/9/8-11, 岡山.
- 32 飯間 信, 可視化情報と流体力学的力, 可視化情報シンポジウム(招待講演), 2013/7/16, 東京.
- 33 横山直人, 飯間 信, 泉田 啓, 平井規央, 蝶の羽ばたき飛翔の縦方向運動の時間スケール, 京都大学数理解析研究所研究集会「生物流体力学における流れ構造の解析と役割」, 2013/11/11-13, 京都.
- 34 横山直人, 飯間 信, 泉田 啓, 平井 規, 蝶の飛翔の縦方向安定性, 日本流体力学会年会 2013, 2013/9/14, 小金井.
- 35 棚橋一郎, 御船藤志, 平井規央, 石井実, 光によるツマグロキチョウの裏翅の変色, 日本鱗翅学会第 60 回大会, 2013/11/10, 大阪.
- 36 蓑原茂, 森地重博, 平井規央, 光によるツマグロキチョウの裏翅の変色, 日本鱗翅学会第 60 回大会, 2013/11/10, 大阪.
- 37 石井実, 谷川哲朗, 天満和久, 天満奈央, 平井規央, ギフチョウは気候温暖化により衰退するか?, 日本鱗翅学会第 60 回大会, 2013/11/10, 大阪.
- 38 佐々木理菜, 平井規央, 石井 実, モンシロチョウは赤い花が見えるか?, 日本鱗翅学会第 60 回大会, 2013/11/10, 大阪.

〔図書〕(計 2 件)

飯間 信(編), 京都大学 数理解析研究所, 数理解析研究所講究録 No.1940 「RIMS 共同研究『生物流体における計測問題』, 2015, 133.

飯間 信(編), 京都大学 数理解析研究所, 数理解析研究所講究録 No.1900 「RIMS 共同研究『生物流体における流れ構造の解析と役割』, 2014, 149.

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

京都大学 航空宇宙力学講座

<http://space.kuaero.kyoto-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

泉田 啓 (SENDA, Kei)

京都大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 60206662

(2) 研究分担者

飯間 信 (IIMA, Makoto)

広島大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号: 90312412

平井規央 (HIRAI, Norio)

大阪府立大学・大学院生命環境科学研究科・准教授

研究者番号: 70305655

横山直人 (YOKOYAMA, Naoto)

京都大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 80512730