

平成 30 年 6 月 25 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05858

研究課題名(和文) 制御仕様を過不足なく満たすパッシブ, アクティブ, セミアクティブ要素の系統的決定法

研究課題名(英文) Systematic design method of passive, active and semi-active devices to satisfy control specifications without excess or deficiency

研究代表者

平元 和彦 (HIRAMOTO, Kazuhiko)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：00261652

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：機械系の運動と振動の制御問題において、制御仕様に応じて適切なパッシブ要素の選択、アクティブ、セミアクティブ制御の導入およびそれらの要素の最適設計問題について検討を行った。アクティブ制御、セミアクティブ制御を混在させたアクティブ/セミアクティブハイブリッド制御系の設計問題を定式化した。本問題に対する制御系設計手法を複数提案し、アクティブ/セミアクティブハイブリッド制御手法が、セミアクティブ制御またはアクティブ制御単独の枠組みでは実現不可能な制御性能を達成できることを示した。

研究成果の概要(英文)：In the control system design of motion and vibration of mechanical systems, the selection (or introduction) of appropriate passive, active and semi-active control elements according to the control specifications and optimum design of those elements are studied. The control design problem which determine the optimal design parameters of an active and semi-active control elements existing in a single control object is formulated as the active/semi-active hybrid control problem. A design methods for the hybrid control problem is proposed. The design example showed that the active/semi-active hybrid control method can achieve high control performance that can not be realized by the conventional semi-active and/or active control framework.

研究分野：制御工学

キーワード：運動と振動の制御 アクティブ/セミアクティブハイブリッド制御

1. 研究開始当初の背景

機械構造系の運動と振動を制御するための手法は、パッシブ制御、アクティブ制御およびセミアクティブ制御に大別され、それらは現在まで活発に研究されている。

運動と振動の制御問題において、多くの場合、制御系全体のモデルは図1のように複数の剛体や質点 $m_i, i=1, \dots$ を接続要素 $C_k, k=1, \dots$ で接続した有限次元系と考えることができる。接続要素 C_k は、その性質から、図2に示すようなパッシブ要素、アクティブ要素、セミアクティブ要素の3種に分類できる。

従来までのパッシブ、アクティブ、セミアクティブ制御系設計問題は、接続要素 C_k を用いて、それぞれ以下のように考えることができる。

- (1) **パッシブ制御**: 接続要素 C_k のすべてがパッシブ要素. 設計変数は、各パッシブ要素中のダンパの粘性減衰係数 d やばね定数.
- (2) **アクティブ制御**: 接続要素の一部にアクティブ要素が存在する. 他の接続要素は確定済みのパッシブ要素. 設計変数は、アクチュエータを駆動するためのアクティブ制御則.
- (3) **セミアクティブ制御**: 接続要素の一部にセミアクティブ要素が存在する. 他の接続要素は確定済みのパッシブ要素. 設計変数は、セミアクティブ要素を駆動するためのセミアクティブ制御則.

一般に、制御系設計者は、与えられた制御仕様に対し上記3種類のうちいずれかの制御方式を最初を選択し、調整可能な設計変数を最適化してきた。それぞれの制御方式において、接続要素中の設計変数を決定するための方法（例：動吸振器理論によるパッシブ要素最適調整、(セミ)アクティブ制御手法など）が提案されている。しかし、その際、与えられた制御仕様を過不足なく満たすための接続要素として、パッシブ、アクティブ、セミアクティブ要素のどれを選択し、かつ各接続要素中の設計変数をどのように設計すればよいかという問題（以下**接続要素決定問題**とする）に対する系統的な解答は、あきらかに（アクティブ要素である）駆動用アクチュエータが必要になる運動制御の場合を除いて存在していない。従来までは、制御系設計者が過去の経験等から最初に制御方式を決定し、その下で上記(1)-(3)の枠組で調整可能な設計変数を最適化してきた。

2. 研究の目的

本研究課題では、接続要素決定問題の解法として、与えられた運動または振動に関する制御仕様を過不足なく満たすような制御方式を決定し、かつ選択された接続要素中の設計変数を最適化する一連の過程を系統的に行う接続要素決定手法を確立することを目的とし

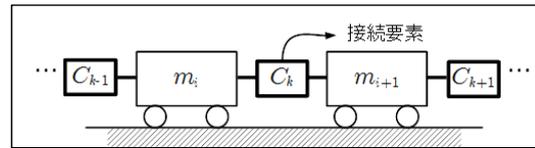


図1: 運動と振動の制御における制御系全体の一般表現

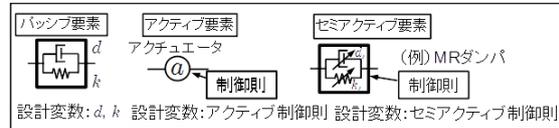


図2: 接続要素の種類 (パッシブ要素, アクティブ要素, セミアクティブ要素)

て研究を行った。

3. 研究の方法

- (1) **アクティブ・セミアクティブハイブリッド制御に関する研究** (雑誌論文②)

従来想定されていなかった制御系の中にアクチュエータとセミアクティブ要素が混在している状況下での制御系設計問題を「アクティブ・セミアクティブハイブリッド制御問題」として定式化した。

例として、図3に示すような可変減衰デバイスを位置決め機構に対し、運動と振動の制御を行う制御力 $u(t)$ と、可変減衰係数 $d(t)$ の指令信号を同時に決定する問題を考える。

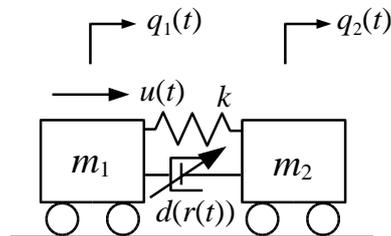


図3: 可変減衰デバイスを含んだ位置決め制御系のモデル図

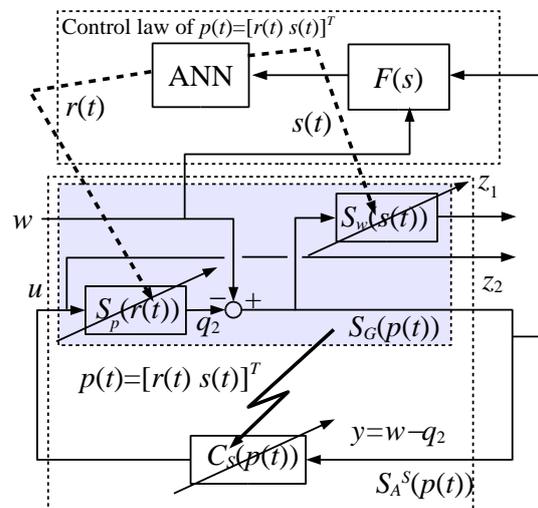


図4: アクティブ・セミアクティブハイブリッド制御系のブロック線図

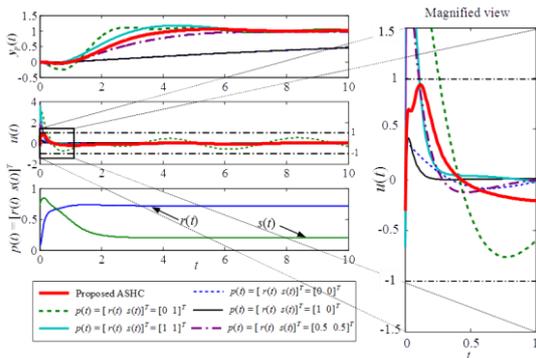


図5:ハイブリッド制御系のステップ応答. 赤線の最適化された制御系が、操作量 $u(t)$ に関する飽和条件の下で、整定時間、オーバーシュート、アンダーシュートを最小化している。

この問題に対し、図4のような、可変減衰係数とフィードバックコントローラ導出時の重みが時変パラメータ $r(t)$, $s(t)$ によって変化するような一般化プラントを定義し、 $r(t)$ や $s(t)$ の連続的な変化に対してコントローラを連続的に変化させるゲインスケジューリングコントローラ $C_s(p(t))$, $p(t)=[r(t) s(t)]^T$ を設計する。一般化プラントと $C_s(p(t))$ からなる閉ループ系に対し、制約を満たしながら制御系の性能を最適化する時変パラメータ $p(t)=[r(t) s(t)]^T$ を出力する機構として、制御系内の入手可能な信号を入力とし、時変パラメータ $p(t)=[r(t) s(t)]^T$ を出力とする人工ニューラルネットワーク (ANN) を導入する。ANN 中のパラメータを最適化することにより、制御系の性能を最適化する。

ANN 中のパラメータは、操作量に飽和が存在する条件の下で、ステップ応答の整定時間をオーバーシュートやアンダーシュートと共に最小化した。結果を図5に示す。最適解された制御系が、飽和制約を満たしながら、他の制御と比較して最も良好なステップ応答を実現していることが確認され、提案するアクティブ・セミアクティブハイブリッド制御系設計手法の有効性が示された。

(2) 出力規範に基づく構造系のセミアクティブ制御に関する研究 (雑誌論文③)

従来、地震外乱を受ける構造物のセミアクティブ振動制御系の設計においては、以下の手順が多く用いられていた。

- ① 図6右のようにセミアクティブ制御デバイスの設置位置にアクチュエータを設置した仮想制御対象を考え、仮想制御対象に対して良好な振動抑制性能を持つアクティブ制御則を設計する。
- ② (1)で設計されたアクティブ制御則が発生する制御力をできるだけ実現するようにセミアクティブ制御デバイス (例:MRダンパ) の可変パラメータ (例:可変減衰係数) をリアルタイム調整する。

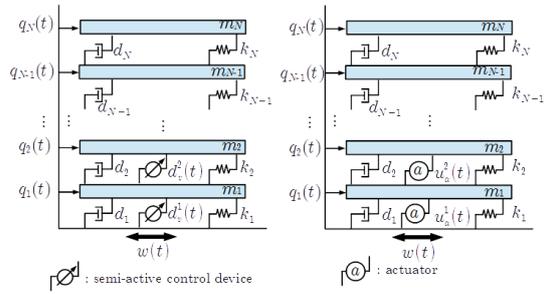


図6: 基準アクティブ制御に基づくセミアクティブ制御問題

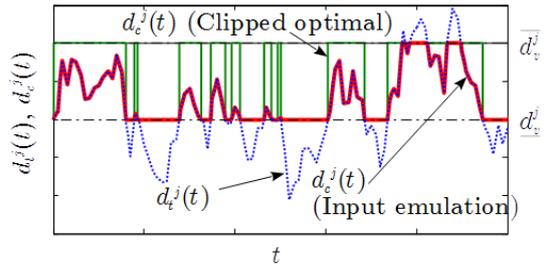


図7:基準アクティブ制御則に基づくセミアクティブ制御系を用いたときの可変パラメータの時刻暦の例 (可変減衰係数 $d(t)$ の場合)

この手法の代表的なものとして、いわゆる Clipped optimal control (Dyke et al., Smart Materials and Structures, Vol. 7, pp. 693-703, 1996) がある。

この手順で設計されたセミアクティブ制御系において、外乱を受けた際の可変パラメータの時刻暦は、図7のようになる。発生する制御力は、基準アクティブ制御系のその一部しか再現しない。これは、セミアクティブ制御デバイスがエネルギー消散特性 (可変ダンパの場合) またはエネルギー保存特性 (可変剛性の場合) しか取りえないことに起因し、セミアクティブ制御における本質的な制約である。

このため、仮に基準アクティブ制御系が良好な制御性能を発揮するように設計されていたとしても、このアプローチで設計されたセミアクティブ制御系の振動抑制性能がどのようになるかは不明であった。したがって、セミアクティブ制御として実装されることを前提とした合理的な基準アクティブ制御則を決定するための手法の確立が必要である。

本研究では、この問題に対する解答の一つとして、基準アクティブ制御則の制御入力ではなく、その制御出力をセミアクティブ制御によってできるだけ実現するような形に問題設定を変更し、図8に示すような制御系を構成する。この制御系では、基準アクティブ制御系の制御出力の短時間経過後の予測値に、セミアクティブ制御系のそれが最も近くなるように、セミアクティブ制御デバイスの可変パラメータに対する指令信号を選択可能な複数値 (例:最大または最小値) から決定する。基準アクティブ制御則は、この制御出力

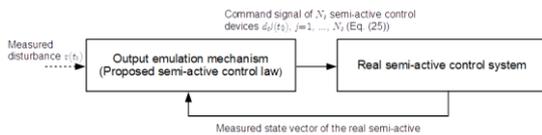


図 8: 制御出力を再現するようなセミアクティブ制御側の概要. 基準アクティブ制御系の短時間後の制御出力に, セミアクティブ制御系のそれが出来るだけ近くなるような可変パラメータ値 (例: 可変減衰係数) をリアルタイムに決定する.

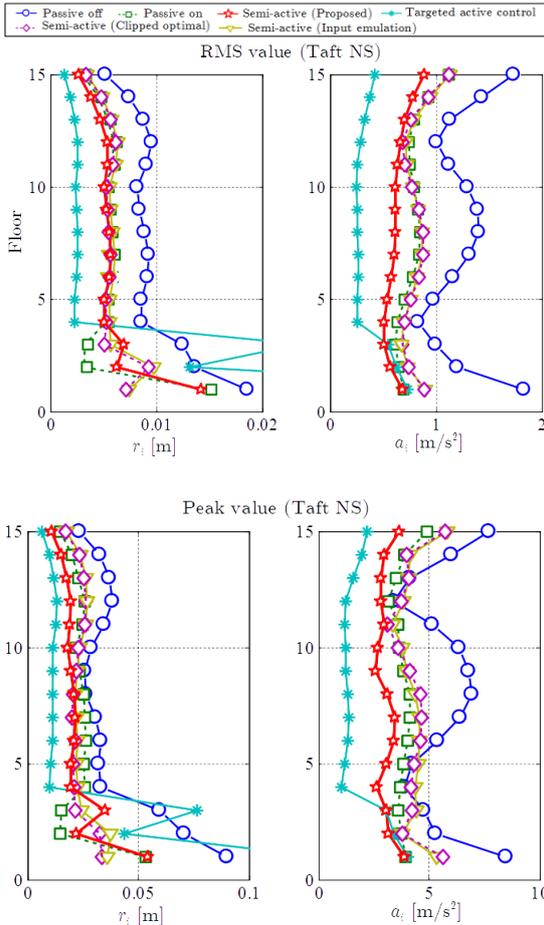


図 9: Taft NS 波 (1952) に対するシミュレーション結果 (隣接層間変位, 各層絶対加速度の RMS 値およびピーク値)

に基準としたセミアクティブ制御側を前提に決定されるため, 基準アクティブ制御側は, 振動抑制性能を改善しながら, セミアクティブ制御によってその制御性能が実現しやすい性質を持つように決定される.

本研究では, 基準アクティブ制御系は, その閉ループ系の極が配置される複素平面上の領域を決定するパラメータを調整することによって上記規範に基づいて最適化される.

設計例として, 下層 3 層にセミアクティブ制御デバイスを設置した 15 階建ての構造物に対し, 提案するセミアクティブ制御手法を適用した. Taft NS 波 (1952) を地震外乱としたときのシミュレーション結果を図 9 に示す.

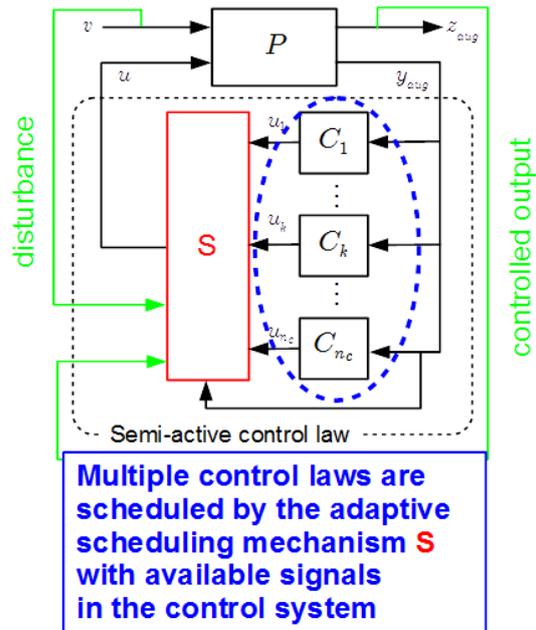


図 10: 複数制御則のスケジューリングによるセミアクティブ振動制御系のブロック線図

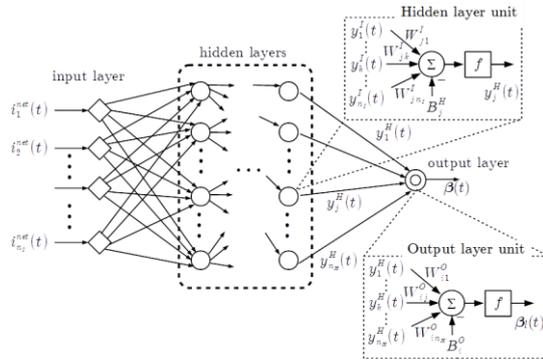


図 11: 補間機構として用いられる ANN

提案手法である赤線の制御性能が, Passive off, on 時のみならず, 従来手法である Clipped optimal control を上回り, かつ基準アクティブ制御系の性能 (水色線) に最も近くなっている. この結果から, 提案するセミアクティブ制御系設計手法が高い振動抑制性能を示しており, 従来手法と比較して有用な制御系設計手法であることが示された.

(3) ニューラルネットワークを用いた適応的ゲインスケジューリング型セミアクティブ振動制御 (雑誌論文①)

構造系の地震外乱に対する振動制御系設計において, 地震外乱の時間・周波数領域での性質によって制御性能が大きく異なることが, 特にセミアクティブ制御において顕著であることが知られている. たとえば, ある地震波に対して非常に良好な性能を持つセミアクティブ制御側が, 異なる地震外乱に対しては劣った性能しか示さないようなことがしばしば見られる.

本研究では, この問題に対処するため, 過去に記録された異なる時間・周波数領域での性質を持つ複数の地震波それぞれに対して高

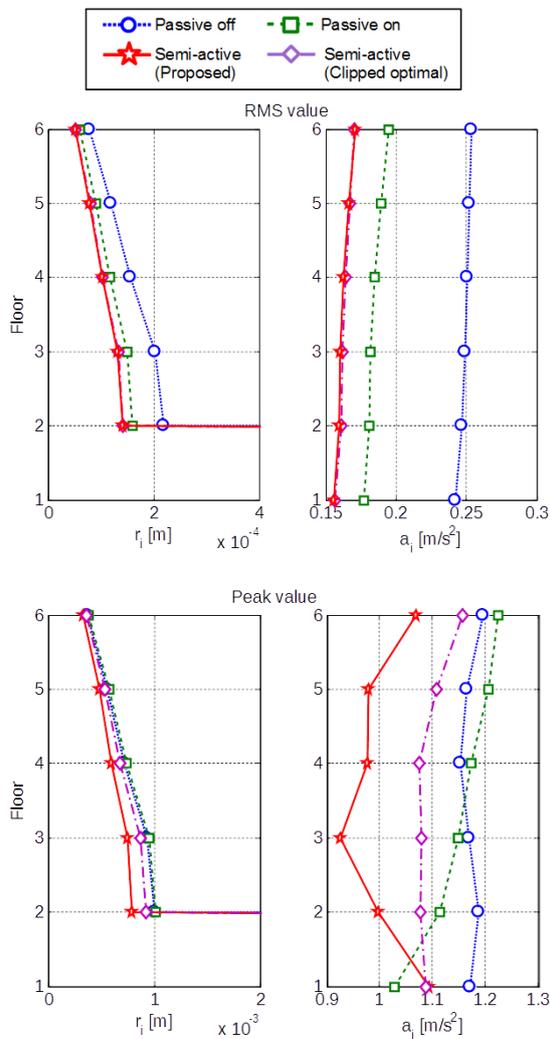


図 12: Akita NS 波(1983)に対するシミュレーション結果 (隣接層間変位, 各層絶対加速度の RMS 値およびピーク値)

い制御性能を有するセミアクティブ制御則を用意し, 将来の未知の地震波に対しては, 得られている複数のセミアクティブ制御をスケジューリングすることによって良好な性能を実現する. 制御系のブロック線図を図 10 に示す. ここで, \mathbf{S} は, 制御系内で入手可能な (外乱信号も含む) 信号を用いて, n_c 個の地震波それぞれに対して求められた最適な制御則 C_k , $k=1, \dots, n_c$ を適応的にスケジューリングする機構である. ここでは, 前小節の出力規範型セミアクティブ制御を前提とし, 複数の地震波それぞれに対して最適な性能を示す基準アクティブ制御を補間するような機構 \mathbf{S} として, 外乱信号を入力として補間パラメータを出力するような ANN (図 11) を考える. ANN の構造は一般的なフィードフォワード型の多層ニューラルネットワークを考え, その重み係数やバイアス値を, 前述の n_c 個の地震波や, それ以外の外乱が構造系に作用し, 補間機構 \mathbf{S} を用いて適応的にゲインスケジューリングを行ったとき, 良好な振動抑制性能が実現されるように最適化する.

提案する手法を用いて, 3 つの地震波 (E1 Centro NS 波 (1940), Hachinohe NS 波 (1968), JMA Kobe NS 波 (1995)) それぞれに対して最適化されたセミアクティブ制御則と GA (遺伝的アルゴリズム) によって最適化された補間機構 \mathbf{S} を用いて, 最適化に用いられていない Akita NS 波 (1983) を外乱としたときに制御結果を図 12 に示す. これより, 提案する適応的ゲインスケジューリング制御 (赤線) の性能は, Passive off (青線), Passive on (緑線) に加え, 従来型の Clipped optimal control (紫線) の性能を上回っており, 提案手法が種々の時間・周波数領域での性能を持つ地震外乱に対するセミアクティブ制御系の設計手法として有用であることが示された.

4. 研究成果

本研究課題では, 機械・構造系の運動と振動の制御系設計問題を接続要素決定問題として定式化した. この問題に対し, 以下のような制御系設計手法を提案した.

- (1) アクティブ要素, セミアクティブ要素が混在した制御対象に対し, アクティブ・セミアクティブハイブリッド制御問題を定式化した. ゲインスケジューリング制御と ANN による制御系設計手法を提案した.
- (2) セミアクティブ制御系設計問題において, 基準アクティブ制御の制御出力に着目したセミアクティブ制御系設計手法を提案し, 従来手法と比べより合理的な基準アクティブ制御系の決定法を提案した.
- (3) 外乱の時間・周波数領域の性質によってセミアクティブ制御系の性能が大きく異なってしまう問題に対し, 特定の性質を持つ地震波に対して高い制御性能を有する複数の制御則を ANN によって適応的にゲインスケジューリングする手法を提案した.

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 3 件)

- ① K. Hiramoto, T. Matsuoka and K. Sunakoda, Adaptive gain scheduled semiactive vibration control using a neural network, Shock and Vibration, 2018, 査読有
DOI: 10.1155/2018/3762784
- ② K. Hiramoto and K.M. Grigoriadis, Active/semi-active hybrid control for motion and vibration control of mechanical and structural systems, Journal of Vibration and Control, Vol. 22, 2016, 2704-2718, 査読有
DOI: 10.1177/107754631455700

- ③ K. Hiramoto, T. Matsuoka and K. Sunakoda, Semi-active vibration control of structural systems based on a reference active control law: output emulation approach, Structural Control and Health Monitoring, Vol. 23, 2016, 423-445, 査読有
DOI: 10.1002/stc.1770

[学会発表] (計 5 件)

- ① K. Hiramoto, T. Matsuoka and K. Sunakoda, Design method of semi-active control minimizing the error between the controlled signals of the semi-active and its reference active control systems, ASME 2017 PVP Conference, 2017
- ② 佐藤 馨, 平元 和彦, 遠隔地地震観測データを用いたニューラルネットワーク制御器による構造物のアクティブ振動制御, 第 59 回自動制御連合講演会, 2016
- ③ 佐藤 馨, 平元 和彦, 遠隔地地震観測データを用いた予見制御による構造物のアクティブ振動制御, 日本機械学会関東支部茨城講演会, 2016
- ④ K. Hiramoto, T. Matsuoka and K. Sunakoda, Scheduling strategy of multiple semi-active controllers with information on the disturbance and the structural response, ASME 2016 PVP Conference, 2016
- ⑤ 笹川 渉, 平元 和彦, 正実なコントローラによるセミアクティブ振動制御系設計, 日本機械学会北陸信越支部 第 53 期総会講演会, 2016

6. 研究組織

(1) 研究代表者

平元 和彦 (HIRAMOTO, Kazuhiko)
新潟大学・自然科学系・教授
研究者番号: 00261652

(2) 研究分担者

松岡 太一 (MATSUOKA, Taichi)
明治大学・理工学部・准教授
研究者番号: 80360189