

令和元年6月20日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06181

研究課題名(和文) ムカデ型ロボットの完全能動制御の実現と実機実証

研究課題名(英文) Control and verification of completely-active-actuation centipede-like robots

研究代表者

稲垣 伸吉 (Inagaki, Shinkichi)

名古屋大学・工学研究科・准教授

研究者番号：80362276

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：災害地などでの未知で複雑な環境を自由に移動できるムカデ型ロボット(一对の脚を持つ体節を連結した多脚移動ロボット)および6脚移動ロボットの制御法の開発と実機検証を行なった。具体的に、まず、脚と体節間関節の協調的分散制御法における逐次的な軌道・接地点生成法の開発と、胴体の姿勢安定性を考慮した接地点追従法の改良を行なった。そして、接地点と胴体軌道の同時計画に基づく運動計画手法を開発した。また、形式検証を利用した適応制御法(Timekeeper制御)を開発した。実機については3自由度能動体節間関節を持つムカデ型と6脚の移動ロボットを開発し、後者において不整地踏破実験により高い不整地踏破性能を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では災害地などで活用できる移動ロボットとして、特に6脚以上の多脚移動ロボットを開発した。これらのロボットは転倒しにくい様々な不整地環境での活躍が期待できる。その一方で、脚数が多いことから制御が難しく、これまでに期待される性能を実現するまでに至っていない。本研究では、分散型歩行制御法である接地点追従法を基盤として、制御性能の向上、運動計画による知能化、環境への適応能力の向上を行なった。そして、ムカデ型ロボットと6脚移動ロボットの実機を開発し、実験を通してその高い不整地踏破能力を実証した。

研究成果の概要(英文)：Centipede-like robots, which consist of segments with a pair of legs, and six-legged robots were addressed in this research. These robots are expected to walk on even unknown complex environment, such as disaster areas. First, a sequential trajectory and contact-points generation method was developed for the centipede-like robots, and the follow-the-contact-point (FCP) gait control was improved considering the posture stability of the trunk for the six-legged robots. Next, a motion planning method based on simultaneous planning of contact points and the body trajectory was developed. Additionally, a timekeeper control, an adaptive control method using formal verification, was developed. Finally, a centipede-like robot with three-degree active inter-segment joints and a six-legged robot were developed, and the six-legged robot showed its high traversal performance of the robots equipping the proposed control methods in this research.

研究分野：工学

キーワード： 知能機械学 ロボティクス 多脚歩行 分散制御 ムカデ型ロボット 6脚移動ロボット 接地点追従法

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

地震災害の多い日本においては、被災地探索などのために崩れた家屋内や瓦礫の上などの未知の複雑な環境を自由に移動できるロボットが求められている。その中で、一対の脚を持つ体節が体節間関節により結合して構成されるムカデ型ロボットは、高い移動能力が期待されて国内外で研究が進められている。この中で申請者は、脚間での情報伝播に基づく新しい分散歩行制御法「接地点追従法」を提案し2自由度の能動体節間関節（モータ駆動する関節）と3自由度の脚を有するムカデ型ロボットの物理エンジンを用いたシミュレーション（物理シミュレーション）により、他種のロボットでは移動できないような複雑な環境においても優れた移動性能を持つことを初めて実証した。しかし、被災地探索のような実用に向けては、さらなる移動性能の向上と自律性の実現、及び実機での実証が重要な課題であった。

2. 研究の目的

本申請研究は、脚と体節間関節（体節と体節を結ぶ関節）に共に3自由度を持ち、未知で複雑な環境を自由に移動できるムカデ型ロボットの実現を目指し、完全能動制御を実現するための脚と体節間関節の協調的分散歩行制御を開発すると共に、未知環境での自律性を付与するための環境探索に基づく接地点と胴体軌道の同時計画手法の開発を行い、全自由度に能動関節を持つムカデ型ロボットの実機を開発しながら屋内・屋外における実機実験を通して実用性を評価する。具体的には、瓦礫が積み重なる被災地において、ムカデ型ロボット自らが足場を選びながら瓦礫を踏破し、または瓦礫の隙間を通り抜けながら被災者を探索できる性能の実現を目指す。

3. 研究の方法

未知の複雑な環境を自由に移動できる完全能動制御に基づくムカデ型ロボットの実現を目指して、次の5項目に取り組んだ。

- (1) 情報伝播に基づく脚と体節間関節の協調的分散制御法を開発する。
- (2) 接地点と体節軌道の同時計画に基づく運動計画手法を開発する。
- (3) 全自由度の能動関節を持つムカデ型ロボット実機を開発する。
- (4) 分散制御と運動計画を矛盾なく同時に実行でき、かつ運動性能を向上させるために時間オートマトンと形式検証を利用した適応制御法を開発する。
- (5) 被災地などの未知の複雑な環境を想定した検証実験を行う。

平成28年度は、まず項目(1)と(2)について研究を進めた。ただし、これらの検証と評価には能動体節間関節を持つムカデ型ロボット実機がまだ開発されていなかったため、物理シミュレータと6脚ロボットを新たに開発して利用した。

平成29年度は、前年度から継続して項目(1)と(2)を進めると共に、項目(3)についてムカデ型ロボットを開発した。また、項目(1)統合制御と(2)運動計画を統合する上で、それらの制御パラメータは相互に関連しており独立に決めることが出来ない。そこで、それぞれを矛盾なく実行できかつ最大の機能を発現することを目的に、項目(4)適応制御法を研究開発した。

平成30年度は、項目(1)(4)を搭載した6脚移動ロボットを開発し、屋内において被災地を想定した複雑な環境での実験（項目(5)）を行なった。また同時に、ムカデ型ロボットの開発を進めた。

4. 研究成果

本研究によって得られた成果を以下にまとめる。なお、各番号は「3. 研究の方法」の項目に対応している。

(1)-1 脚と体節間関節の協調的分散制御法における逐次的な軌道・接地点生成

ムカデ型ロボットの運動性能の向上を目指して、接地点追従法による脚の制御に加え、体節間関節を能動的に同時に矛盾なく制御することで運動能力を向上させる方法を提案した。特に、従来では、予め計画された接地点と体節の軌道に対する追従制御を行ってきたが、実環境ではグローバルな接地点や経路を得られないことが多いという問題があった。そこで、接地点を用いたローカルな座標系において接地のたびに与えられるサブゴールをもとに先頭体節が逐次的に目標経路と接地点の生成する手法を新たに提案した。

具体的には、各体節間の相対的な位置と方向から三次スプライン曲線を用いて逐次的に胴体の軌道を生成する。先頭体節については、それより先に仮想的な体節を設定し、仮想的な体節の位置と進行方向を操作者の入力として与える。そして、先頭体節と仮想体節の間で逐次的に胴体軌道を生成する（図1）。また、先頭体節の接地点については、求めた胴体軌道に対して、「胴体経路を現在の接地点を通るように平行移動したときに、反対側の接地点からの距離がある距離以内である」および「平行移動後の経路上に体節中心からの距離がある値以内である」という条件を基に決定する。先頭以降の体節の脚は接地点追従法により、先頭体節が接地した接地点に接地する。シミュレーションにより、逐次的な軌道生成法でありながら、すべての体節がほぼ同じ軌道を描くことが明らかになった（図2）。

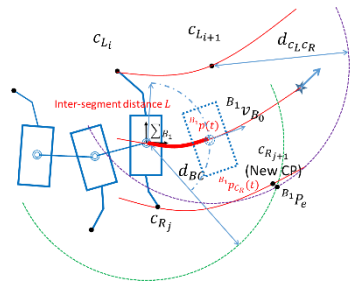


図1 仮想体節による先頭体節の逐次的軌道と目標接地点の生成

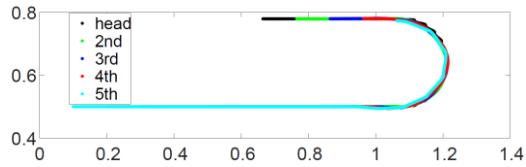


図2 ムカデ型ロボット (5体節) の胴体軌道

(1)-2 胴体の姿勢安定性を考慮した接地点追従法の改良

ムカデ型ロボットのように脚数が多い場合は常に静的安定性が保たれるため、転倒する心配はない。一方で、脚数が少なくなった場合、接地の如何によっては転倒の恐れがある。そこで、胴体姿勢と静的安定性が保たれるような接地の条件を陽に取り入れて、接地点追従法を改良した。特に6脚移動ロボットを対象としてその歩行制御法を研究した。

具体的には、接地点追従法において接地脚を遊脚するときの条件に、少なくとも対角の3脚が接地していること、かつ、指示多角形に重心投影点が入っていることを加えた。これにより、接地する脚の組み合わせが変わるときの転倒を防止することができる。また、接地脚の脚先軌道を求める際に、胴体の姿勢を胴体に設置した姿勢センサの値を元に計算することで、逐次的な姿勢制御を可能にした。これにより胴体を前進させるときの揺動を減らし、転倒を防止することができるようになった。図3のようなシミュレーションにより、これまでの6脚移動ロボットでは踏破が難しいような環境でも、優れた移動能力を実現出来ることが明らかになった。

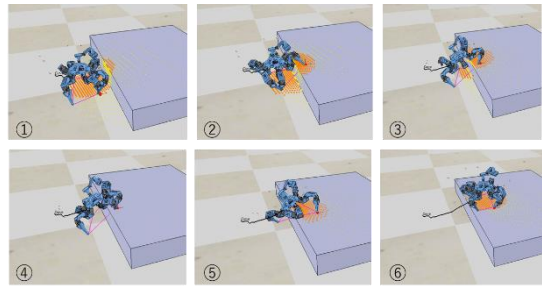


図3 段差不整地における6脚移動ロボットの歩行シミュレーション

(2) 接地点と体節 (胴体) 軌道の同時計画に基づく運動計画手法

目標となる接地点と体節 (胴体) 軌道は操作者が指示することで、ムカデ型ロボット (6脚移動ロボット) は歩行することができる。操作者は一步毎の指令を与えることで意図通りにロボットを移動させることができるが、その一方で、操作に熟練する必要がある。被災地での活用などの場面では、誰でも簡単に操作することが必要とされる。そこで、操作者は目標の方向のみを決め、目標となる接地点と体節 (胴体) 軌道を自動的に算出する手法を研究した。

具体的には、操作者が入力した目標方向と、ロボットに搭載した深度センサから得られる地形情報を元に、数歩先までの接地点と胴体軌道を計算する (図4)。地形情報はグリッドマップ上の高さ情報として与えられる。接地点の探索についてはグラフ探索手法であるダイクストラ法を元に開発した手法を用いることで、高速に計算することができる。本研究では6脚移動ロボットを対象としたが、ムカデ型ロボットへの転用も可能である。

シミュレーションによって簡単な操作で複雑な不整地踏破を実現出来ることが明らかになった (図6)。

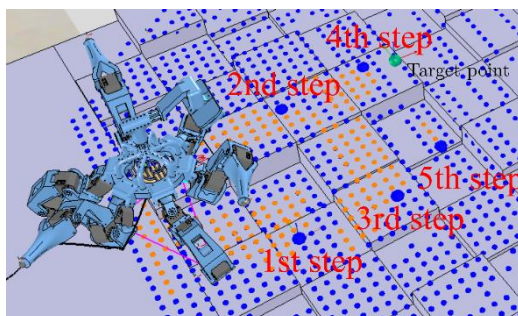


図4 深度センサによる地形情報 (地形上の点) と計画された接地点

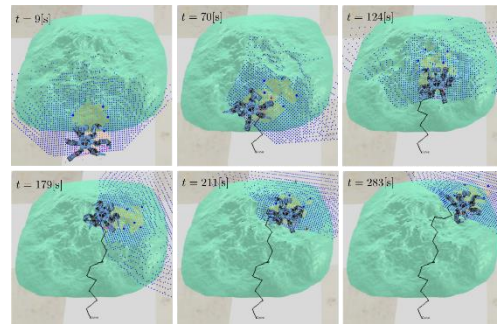


図5 ロボットとほぼ同じ高さ・最大斜度35度の不整地の踏破シミュレーション

(3) 体節間に3自由度能動関節を持つムカデ型ロボット実機の開発

ムカデ型ロボットの実証のために、体節間関節（体節と体節の間接）に3自由度の能動関節を埋め込んだムカデ型ロボットを新たに設計して製作した。各脚は3自由度を持つので、一つの体節は9自由度を持つ事になる。その製作においては、3Dプリンタを活用した。また、各体節を連結することで脚数の増減を可能とした（図7）。

体節間関節の設計においては、蛇型ロボットのようにモータを直列に繋げては、体節間の距離が離れてしまい、接地点交換が困難になる。そこで、平行リンク機構を用いてモータを並列に配置することでこの問題を解決した。この機構により、さらに体節間関節の各回転軸が1点でまた、脚の設計において一点交わるようにできるため、制御における計算が簡単化されるという利点も生じる。また、脚の設計においては接地点交換の際に脚同士の衝突を避けるような設計を行なった。ロボットの制御回路については、6脚移動ロボットと同じものを各体節に用意し、お互いを通信ネットワークで連携させて接地点追従法と体節間関節の制御を実現出来ることが分かった。

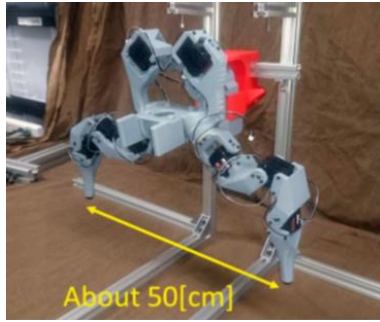


図6 3Dプリンタを活用して作成したムカデ型ロボットの体節

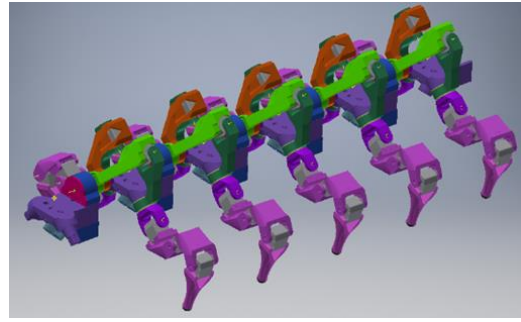


図7 体節を連結して5体節のムカデ型ロボットを構成した場合のイメージ図

(4) 形式検証を利用した接地点追従法における適応制御法：Timekeeper 制御の開発

ここまでの研究で、ムカデ型ロボットにおいては接地点追従法に体節間関節の制御を組み込み、6脚移動ロボットにおいては運動計画や姿勢制御を組み込んだ。このとき、ロボットが問題なく制御されて歩行できることを保証するような仕組みが必要になる。そこで、ロボットの挙動を時間オートマトンで記述し、『歩行ができる条件』を満たすことを保証するようなパラメータの範囲を形式検証で求めるアルゴリズムを開発した。パラメータの範囲とは、接地点追従法における4つの制御モード（3つの遊脚モードと1つ接地モード）の滞在可能時間の下限と上限を意味する。6脚移動ロボットに適用した場合、得られたパラメータの範囲が表1のように得られた。この中で k は任意に選ぶことができる正実数である。この任意性を利用して、ロボットの実際の動きから k を適応的に変化させ、かつ表1の範囲を守るように脚の動作に干渉させることで、『歩行ができる条件』を守るという Timekeeper 制御を開発した (Algorithm 1)。

表1 形式検証を利用したアルゴリズムによる接地点追従法の各制御モードにおける滞在可能範囲（上下限）： k は無次元係数であり、選択に任意性がある。

T_1^{max}	k	T_2^{max}	$\frac{k}{8}$	T_3^{max}	$\frac{k}{8}$	T_4^{max}	k
T_1^{min}	$\frac{k}{4}$	T_2^{min}	0	T_3^{min}	0	T_4^{max}	0

Algorithm 1 Timekeeper control

```

1:  $t_m^i$  : transition time of control mode  $m$  in Leg $[i]$ 
2:  $k$  : non-dimensional coefficient of time
3: Record transition time  $t_m^i$ .
4:  $k = \max_{i \in \{1, \dots, 6\}} \{\max(t_1^i, St_2^i, St_3^i, t_4^i)\}$ 
5: for  $i = 1$  to 6,  $m = 1$  to 4 do
6:   if  $t_m^i < T_m^{min}$  then
7:     Delay the movement in control mode  $m$  of Leg $[i]$ .
8:     if Leg $[i]$  is ready to transition then
9:       Prevent transition to next mode.
10:    end if
11:  end if
12: end for

```

(5) 未知の複雑な環境を想定した6脚移動ロボットによる検証実験

本研究において開発が先行した6脚移動ロボット実機に、上記の研究実施項目の各アルゴリズムを実装して、未知の不整地環境を想定した実験を行なった。ここでの未知の不整地環境とは、ロボットが歩行する事前に地形の情報を持っていない、という意味である。6脚移動ロボット（図8）は3Dプリンタを活用して作成されている。さらに深度センサとカメラが搭載されており、操作者はその画面を遠隔で見ながら接地点と胴体の目標姿勢を決定する。図9の不整地環境を歩行させた様子が図10である。これまでの6脚移動ロボットでは実現出来なかった、優れた不整地踏破能力を実現出来ており、多脚移動ロボットの研究分野の発展に大いに貢献できるものと考えられる。ムカデ型ロボットでの実機実験も進めていきたい。

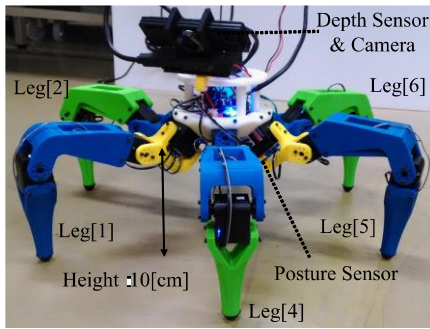
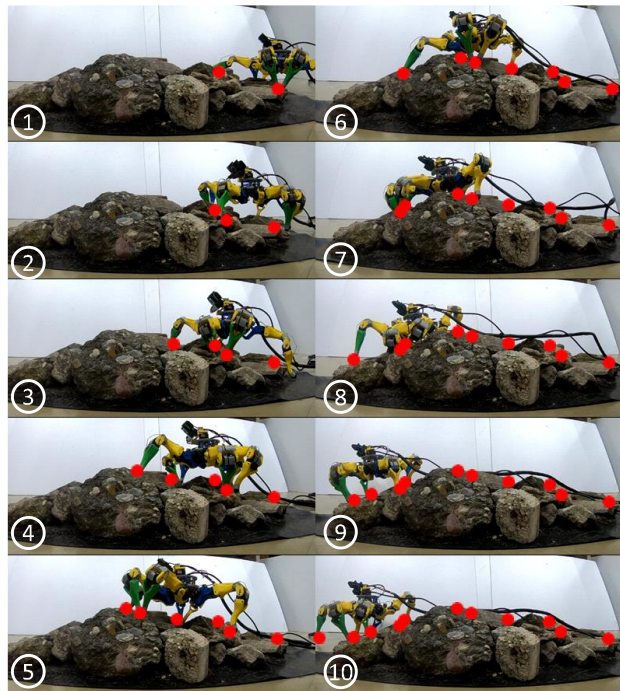


図 8 3Dプリンタを活用して作成した6脚移動ロボット



図 9 屋内に作成した不整地環境

図 10 不整地環境における 6 脚移動ロボットの踏破実験の様子：操作者は遠隔の操作画面を見ながら接地点を選択する。図中の赤い点は最前脚が接地した接地点であり、接地点追従法により中脚と後脚は同じ接地点に接地する。



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

- ① 鈴木 義久、村田 勇樹、稲垣 伸吉、接地点追従法に基づく 6 脚移動ロボットの接地点計画、第 31 回自律分散システム・シンポジウム、2019
- ② 稲垣 伸吉、村田 勇樹、解説：接地点追従法と 6 脚移動ロボット、ロボット学会誌、37 巻 2 号、2019、pp.156-159
- ③ 村田 勇樹、稲垣 伸吉、鈴木 達也、Timekeeper 制御を用いた接地点追従式 6 脚移動ロボットの適応歩行、計測自動制御学会論文集、55 巻 1 号、2019、pp. 51-58
- ④ Keisuke NOMURA、Shinkichi INAGAKI、Cutting a Parameter Space for a Multi-Legged Robot Based on Model Checking、SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration、10 巻 4 号、2017、pp. 317-323
- ⑤ 村田 勇樹、稲垣 伸吉、鈴木 達也、時間オートマトンとモデル検査を用いた 6 脚移動ロボットの接地可能領域の導出、計測自動制御学会論文集、53 巻 11 号、2017、pp.590-600

〔学会発表〕(計 15 件)

- ① 鈴木 義久、村田 勇樹、稲垣 伸吉、接地点追従法に基づく 6 脚移動ロボットの接地点計画、第 31 回自律分散システム・シンポジウム、2019
- ② 村田 勇樹、鈴木 義久、稲垣 伸吉、鈴木 達也、接地点追従法と姿勢制御に基づく 6 脚移動ロボットの実機実験、第 31 回自律分散システム・シンポジウム、2019
- ③ 村田 勇樹、鈴木 義久、稲垣 伸吉、接地点追従に基づく半自律 6 脚移動ロボットの実機開発、第 36 回日本ロボット学会学術講演会 (RSJ2018)、2018
- ④ 木俣 岳志、出島 貴将、稲垣 伸吉、平行リンク機構型 3 自由度体節間関節を持つムカデ型ロボットの実機開発、日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2018、2018
- ⑤ 鈴木 義久、村田 勇樹、稲垣 伸吉、姿勢安定化を考慮した接地点追従法に基づく 6 脚移動

- ロボットの適応歩行、日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2018、2018
- ⑥ 村田 勇樹、稲垣 伸吉、鈴木 達也、歩行可能条件を保証する Keeper Time 制御を用いた 6 脚移動ロボットの適応歩行、日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2018、2018
 - ⑦ 稲垣 伸吉、出島 貴将、木俣 岳志、3 自由度体節間関節を持つムカデ型ロボットの分散歩行制御と実機開発、第 62 回システム制御情報学会研究発表講演会 (SCI' 18)、2018
 - ⑧ 村田 勇樹、稲垣 伸吉、接地点追従法に基づく 6 脚移動ロボットの Time Keeper 制御、第 35 回日本ロボット学会学術講演会 (RSJ2017)、2017
 - ⑨ 稲垣 伸吉、接地点追従法と歩行についての一考察、第 30 回自律分散システム・シンポジウム、2018
 - ⑩ 鈴木 義久、村田 勇樹、稲垣 伸吉、6 脚移動ロボットの姿勢を考慮した接地点追従法での歩行、第 30 回自律分散システム・シンポジウム、2018
 - ⑪ 出島 貴将、稲垣 伸吉、歩行時における逐次的な軌道・接地点生成によるムカデ型ロボットの分散歩行制御、第 30 回自律分散システム・シンポジウム、2018
 - ⑫ 出島 貴将、村田 勇樹、稲垣 伸吉、3 次スプライン曲線を用いた逐次軌道生成によるムカデ型ロボットの歩行制御、日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017、2017
 - ⑬ 鈴木 義久、村田 勇樹、稲垣 伸吉、接地点追従法と接地点指令による 6 脚移動ロボットの歩行、日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017、2017
 - ⑭ 出島 貴将、村田 勇樹、稲垣 伸吉、能動体節間関節を持つムカデ型ロボットの歩行制御、第 22 回創発システム・シンポジウム、2016
 - ⑮ 出島 貴将、村田 勇樹、稲垣 伸吉、対側脚間の非同期制御に基づくムカデ型ロボットの歩行性能の向上、日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016、2016

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

www.suzlab.nuem.nagoya-u.ac.jp

6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：鈴木 達也

ローマ字氏名：SUZUKI TATSUYA

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。