

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：82706

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K14978

研究課題名（和文）隊形最適化による自律型無人潜水機集団運用のエネルギー効率と航行安定性の向上

研究課題名（英文）Improvement on energetic efficiency and stability of AUV group based on formation configuration optimization

研究代表者

李 根 (Li, Gen)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・付加価値情報創生部門(数理科学・先端技術研究開発センター)・研究員

研究者番号：00774035

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：AUV（自律型無人潜水機）の集団運用におけるエネルギー効率と航行安定性を向上させるための最適な隊形を調査した。AUV同士の間での流体力学的相互作用がエネルギー効率や安定性に与える影響を数値解析と実験手法で評価した。複雑なAUV周囲の流れ場をポテンシャル流で表現し、合理的なコストで多数のAUV集団の最適な隊形を計算した。曳航試験では単体と2台のAUV集団の抗力や外乱力を測定・比較した。結果として、AUVの数が増えるほどエネルギー節約効果が強まること、横方向の距離が重要であること、並列移動がエネルギー損失を引き起こすことが明らかになった。これらの知見は、将来のAUV運用における重要な参考資料となる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的意義：AUV（自律型無人潜水機）の集団運用におけるエネルギー効率と航行安定性の向上に関する新たな知見を提供することになる。先端の数値解析手法の開発、実験手法との組み合わせることで、複雑な流体力学的相互作用を解明し、合理的なコストでAUVなどの水中遊泳体の隊形を最適化手法を確立した。

社会的意義：AUVのエネルギー消費を最適化することで、持続可能な海洋開発に貢献できる点が挙げられる。効率的なAUV運用により、海洋資源の探索や環境モニタリングがより効果的に行えるようになり、環境保護や資源管理の改善に寄与する。これにより、将来的には経済的なメリットも期待でき、社会全体の持続可能性向上に繋がる。

研究成果の概要（英文）：This study investigated the optimal formation to improve energy efficiency and navigation stability in the collective operation of Autonomous Underwater Vehicles (AUVs). The impact of hydrodynamic interactions between AUVs on energy efficiency and stability was evaluated using numerical and analytical approaches, as well as experimental methods. The complex flow field around the AUVs was represented using potential flow, allowing the calculation of optimal formations for large AUV groups at a reasonable cost. Towing tests were conducted to measure and compare the drag and disturbance forces on both single and paired AUVs. The results showed that increasing the number of AUVs enhances energy-saving effects, that lateral distance is crucial, and that parallel movement causes energy loss. These findings provide valuable insights for future AUV operations.

研究分野：流体力学

キーワード：潜水機集団運用 隊形 最適化 エネルギー効率 航行安定性 流体力学 AUV

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

海洋は広大な空間が存在するだけでなく、膨大な資源やエネルギーを貯蔵しています。日本のような四方を海に囲まれた島国にとって、効率的な海洋の探査と開発は極めて重要です。AUV (Autonomous Underwater Vehicle、自律型無人潜水機) は、効率的で人的資源を節約する海洋開発の手段として、近い将来、より効率的な海洋探査、開発、清掃のために集団運用(複数 AUV の同時使用、参考文献[1]) が広く展開されることが期待されています。

自然界の飛行および遊泳する生物は、通常、エネルギーを節約するために集団で移動することが観察されています。ただし、これらは異なるエネルギー利用メカニズムを通じて行われます。鳥のような飛行生物は、リーダーの後流によって生成された上昇気流に乗ることで追加の揚力を得ることがありますが、水中で中性浮力の遊泳者は自分の体重を相殺するためにエネルギーを消費しません。そのため、魚群のエネルギー節約は主に流体の抵抗を最小限に抑え、前進推進効率を高めることから得られます。魚が集団での移動からエネルギー節約の利益を得るように、AUV も同様のメカニズムを採用してエネルギー効率を最大化する機会があります。

AUV の集団に関する現在の研究は、主にコミュニケーション、プランニング、およびナビゲーションアルゴリズムやシステムに集中しています。しかし、AUV 集団運用を流体力学の観点からも検討することが重要です。移動中の AUV は船体の周りに流れを発生させ、プロペラの後ろに後流を作り出します。これらの流動特性は、複数の AUV が近接して運用する際に相互作用を引き起こし、結果として AUV の推進エネルギー効率と安定性に影響を与える可能性があります。これまで、流体力学的観点から AUV の集団運用のエネルギー効率と航行安定性に関する研究は極めて少ないです。ここでのエネルギー効率とは、単位距離あたりのエネルギー消費量を指します。航行安定性とは、航行方向以外の外乱に対する姿勢安定性を意味します。

申請者は、2009 年から水中の魚などの生物の遊泳効率と安定性の研究に従事、生物集団遊泳による遊泳効率と安定性に及ぼす影響のメカニズムを明らかにしました。同時に、2018 年から海洋研究開発機構で水中ロボットと AUV の研究も行っています。複数の分野の観点を統合させることで、申請者は本研究で AUV 集団運用におけるエネルギー効率と航行安定性の向上を期待します。

2. 研究の目的

本研究は、流体力学の観点に基づいて、数値解析および実験手法を用いて、AUV 集団隊形によるエネルギー効率および航行安定性の影響の流体力学メカニズムの解明を目指します。また、これらの結果に基づき、最適な集団隊形を特定し、AUV による海洋探査と開発の効率を向上させることが最終的な目的です。本研究で得られる結果は、AUV だけでなく、他の水中機器にも応用でき、将来の大規模な海洋探査および海洋の持続可能な開発のための重要な技術的要素になると確信しています。

そのうち、数値解析研究の領域では、直接 CFD の精密計算とポテンシャル流理論の重ね合わせの原理を用いた解析モデルを組み合わせたハイブリッドな数値解析方法を開発し、2 つから数百の AUV 集団の最適な隊形を合理的なコストで計算します。

実験研究の領域では、本研究は自走を前提とし、2 つの AUV の小規模集団における様々な隊形の推進効率と安定性の影響を直接の精密測定をします。

3. 研究の方法

(1) 数値・解析研究領域

数値・解析研究の領域で使用されるハイブリッド数値アプローチは、個体レベルと集団レベルの解法で構成されています。

個体レベルでは、乱流モデルを用いた計算流体力学 (CFD) シミュレーションを実施し、個体 AUV の流れ場と推進性能を取得します。個体 AUV に関する CFD シミュレーションは、商用ソフトウェア Siemens Simcenter STAR-CCM+ 2020.1 とレイノルズ平均ナビエ・ストークス (RANS) 乱流モデルを使用して実施され、実際のプロペラ形状を持つ 1:1 スケールの AUV モデルがシミュレートされます。シミュレーションに使用されるハードウェアは、AMD EPYC 7502P プロセッサ (32 コア、64 スレッド、2.5-3.35 GHz) と 256GB のメモリ (2933 MHz) を搭載したワークステーションです。

個体レベルのシミュレーション中、最初に巡航プロペラの回転速度 (320 rpm) を設定します。複数回の反復なシミュレーションを通じて、巡航速度を決定します。そして巡航速度で推進の状態下プロペラの出力と AUV 周囲の流れ場が記録されます。さらに、追加のシミュレーションを実施して、巡航速度に対するプロペラの出力と流れ場の微分を計算します。

個体 AUV シミュレーションで得られた結果を、集団レベルの解法のためのソース情報として入力します。非定常流れ場は時間平均され、定常の軸対称流れに変換されます。集団レベルのシミュレーションは解析的なポテンシャル流モデルに基づいており、個体 AUV から遠く離れた速度場を複数のポテンシャル流の渦環と一つの無運動量のポテンシャル流の後流の合計で近似します。これにより、ポテンシャル流の重ね合わせの可能性により、多数の AUV 集団の高次元

最適化問題の計算コストを、既存のコンピュータで扱える範囲に軽減することができ、AUV 集団の最適化隊形を計算します。任意の AUV の位置での流入速度は、AUV 自身の巡航速度とすべての仲間 AUV によって誘発された速度の重ね合わせです。集団内の正規化された平均機械出力消費を最小化することを目指しており、その最適化パラメータは $3N - 3$ です。ここで、 N は集団内の AUV の数です。

(2) 工学実験領域

実験では、簡易化された AUV を製作します。AUV は艇体と推進プロペラ（モーターを含む）で構成され、推進力が外部制御によって調整され、自走モード（推力 = 抗力）で曳航試験を行います。また、AUV 模型が水槽の上を走行する計測台車に連結するための接続フレームを作成します。このフレームは、AUV の流れ場への影響を最小限に抑える構造・断面を使用し、AUV との接続部に 6 自由度の力覚センサーを設置します。フレームには 1~2 個の AUV を配置でき、AUV 間の相対位置を調整することができます。

4. 研究成果

研究期間全体を通じて、AUV 集団隊形によるエネルギー効率および航行安定性の影響の解明を目指し、複数の領域で進歩が達成されました。

(1) 数値解析研究領域

数値解析研究の領域では、ポテンシャル流の原理に基づくハイブリッドアルゴリズムが構築されました。このアルゴリズムを用いて、複雑な AUV 周囲の流れ場をポテンシャル流で表現することに成功しました。ポテンシャル流の重ね合わせの可能性により、多数の AUV 集団の高次元最適化問題の計算コストを既存のコンピュータで扱える範囲に軽減することができ、AUV 集団の最適隊形を計算することができました。AUV 集団のエネルギー最適化の隊形が発見されました[1-2]。

2 機から数十機に及ぶ AUV 集団において、特定の並列間隔を維持することが最もエネルギー効率の良い編成であることを発見しました。最もエネルギーを節約できる相対位置は、各 AUV が最も近い仲間 AUV の斜め後ろの配置であり、そして、大規模な AUV 集団にとって最適な編成は「チェーン」形態になります[1]。多くの自然界の生物と同様に、AUV もエネルギー効率を高める集団移動戦略を活用することができます。2 機、3 機、および 11 機から成る集団の最適な隊形構成は図 1 に示されています。

「チェーン」の最適な編成形態を発見するとともに、以下の特性も明らかになりました（図 2）。AUV の数が増えるほど集団のエネルギー節約効果が強くなります。AUV の間の横方向の距離が重要で、AUV が横方向に近づくほどエネルギー節約効果が強くなります。しかし、横方向の距離が AUV の半径の 7 倍を超えると、エネルギー節約率最大限は 2% 未満になります。大規模な AUV 集団はエネルギー節約効果を向上させますが、その効果には限界があります。この情報に基づき、AUV の集団編成を最適化するための指針が得られます。

更に、流体力学モデルを使用して、本研究では大規模な AUV 集団のさまざまな編成形態を調査しました。編成形態のエネルギー効率の高い順から低い順は以下の通りです[3]：

チェーン編成（最適化の限界）> ウェッジ編成 > 円錐スパイラル編成 > 斜め線編成 > 直線編成 > 方形編成

特に、直線編成と長方形編成のように AUV が並列に移動する場合、エネルギー効率が低下するため、避けるべきです。

これらの発見は、今後の AUV 集団運用にとって重要な意味を持ちます。最もエネルギー効率の良い編成を理解することで、AUV オペレーターは、エネルギー消費を最適化し、全体的なパフォーマンスを向上させるための決定を行うことができます。これらの発見は、流体力学分野の権威のある学術論文誌「Journal of Fluid Mechanics」に掲載されました[1]。

(2) 工学実験領域

3D プリント技術を使って、実際のサイズの AUV 外殻を 2 台作成しました。その上に電子機器耐圧容器とプロペラを取り付けました。この 2 台の簡略化された AUV は、外部からケーブルで電力を供給し、推進力を制御することで、曳航実験中に自走行（推力 = 抵抗）の状態を達成できます。さらに、水中で 2 台カスタマイズした 6 自由度力センサーを使用、それぞれの AUV にかかる力をリアルタイムで測定できました（図 3）。

海洋研究開発機構の水槽で、単体の AUV と 2 台 AUV 集団の曳航試験を実施しました。自走モード（推力 = 抗力）で私たちは 2 台の AUV の相対位置を調整し、27 の異なる相対位置の状態 AUV にかかる力の測定を行いました。それぞれの相対位置で複数回測定を行いました。そして、2 台の AUV それぞれの力を個体 AUV の力と比較し、2 台の AUV 集団内の推進効率と安定性を分析しました。

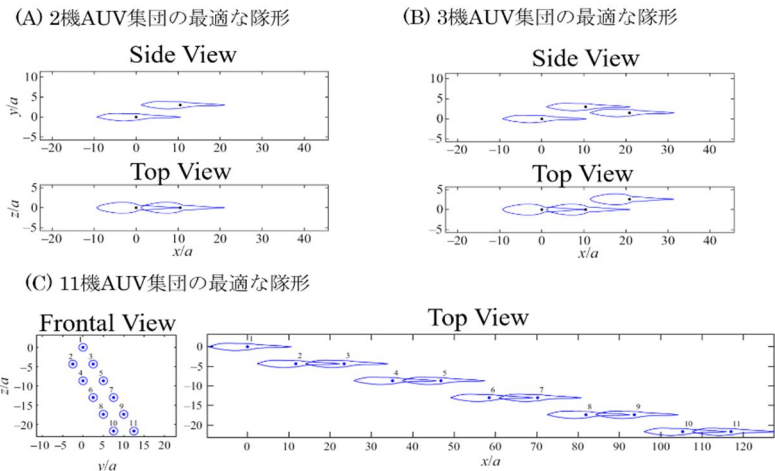


図1 2機、3機、および11機から成る集団の最適な「チェーン」隊形構成の例(参考文献[1])

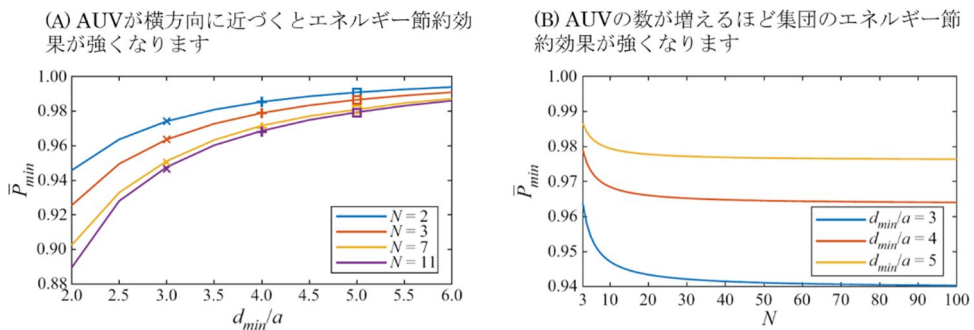


図2 AUV 集団運動の特性。(A) AUV が横方向に近づくほどエネルギー節約効果が強くなります ; (B) AUV の数が増えるほど集団のエネルギー節約効果が強くなります。ここで \bar{P}_{min} : AUV 集団の平均パワー、 d_{min} : AUV の間横方向距離、 a : AUV 直径、 N : AUV 数量。(参考文献[1])

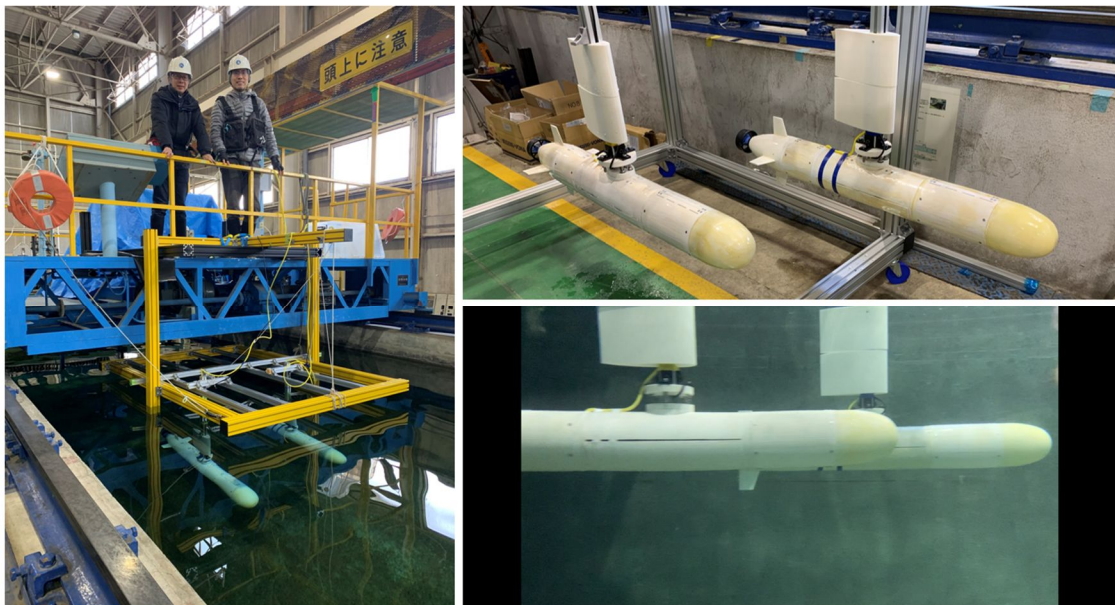


図3 海洋研究開発機構の水槽でのAUV 曳航試験

推進効率の分析は二つの部分に分けられます。まず、AUV 集団内の一つの AUV (以下、着目 AUV (英語で focused AUV) と呼びます) に注目します。図 4 A は、座標原点に位置する仲間の AUV が存在する場合における着目 AUV の各相対位置での自身の前進方向力の変化を示しています。結果は、着目 AUV が仲間 AUV の斜め前方や斜め後方のいくつかの位置にいる場合に前進方向力が向上することを示していますが、他のいくつかの位置では前進方向力が低下することも示しています。

図 4 B は、座標原点に仲間 AUV が存在する場合における着目 AUV の各位置での 2 台の AUV の集団平均推進効率の変化を示しています。この結果は、2 台の AUV が斜め前方/斜め後方の形態の編成で配置されると全体の推進効率が向上することを示していますが、並列で進行する場合には全体の推進効率が低下することも示しています。この結果は、数値・解析モデル計算の結果ともよく一致しています。

航行の安定性に関しては、AUV が互いに近づくると横方向の力やトルクに顕著な変化が生じます。例えば、図 5 A は、座標原点に仲間 AUV が存在する場合における着目 AUV の各位置での横方向の力の変化を示しています。これにより、いくつかの位置では、着目 AUV が仲間 AUV から離れる方向に強い横方向の力が発生することが分かりますが、他の位置では、着目 AUV が仲間 AUV に近づくような横方向の力が発生するが分かります。

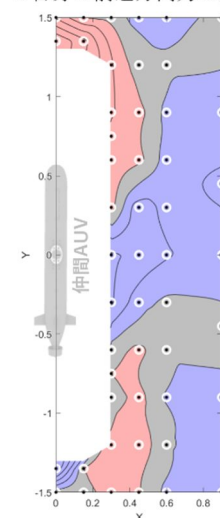
図 5 B は、座標原点に仲間の AUV が存在する場合における着目 AUV の各位置でのトルクの変化を示しています。これにより、いくつかの位置では、着目 AUV が時計回りに回転する強いトルクが働くことが分かりますが、他の位置では、着目 AUV が反時計回りに回転するトルクが働くことが分かります。

これらの横方向の力やトルクの顕著な変化は、航行の安定性に大きな影響を与える可能性があります。これらの結果は、AUV 集団の運動において推進効率を向上させるためには、安定性への消極的な影響を克服するための制御手段が必要であることを示しています。これは、将来の AUV 集団の運用にとって重要な参考となります。本報告では、いくつかの定性的な分析のみを示していますが、定量的な結果は現在、海洋工学関連の学術誌への投稿準備中です。

参考文献

- [1] Li, G., Duan, L., Sesterhenn, J., Godoy-Diana, R., Thiria, B., & Kolomenskiy, D. (2023). Far-field hydrodynamic interaction in a group of swimmers. *Journal of Fluid Mechanics*, 974, A34.
- [2] Li, G., Godoy-Diana, R., Duan, L., & Thiria, B. (2023, March). Group formation of autonomous underwater vehicles that optimizes energetic efficiency in cruising. In *2023 IEEE Underwater Technology (UT)* (pp. 1-6). IEEE.
- [3] Li, G., Godoy-Diana, R., Duan, L., & Thiria, B. (2024, April). Understanding AUV Formations through Fluid Dynamics: Strategies for Enhanced Energetic Efficiency. In *IEEE OCEANS 2024 Singapore*.

(A)着目AUVの各相対位置での自身の前進方向力の変化



(B)着目AUVの各相対位置での集団平均推進効率の変化

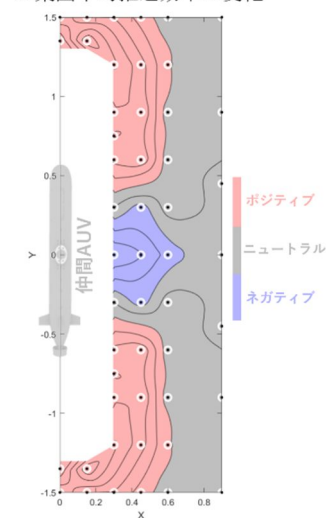
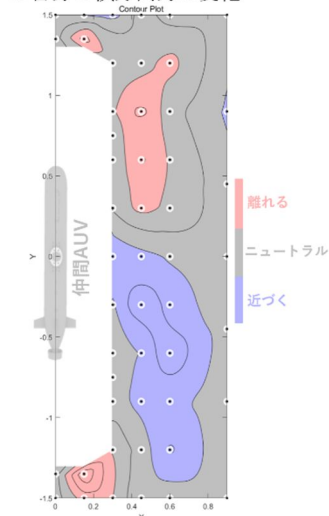


図4 着目 AUV の仲間 AUV に対して相対位置の変化により (A) 自身の前進方向力の変化と (B) 2 台の AUV の集団平均推進効率の変化

(A)着目AUVの各相対位置での自身の横方向力の変化



(B)着目AUVの各相対位置での自身のトルクの変化

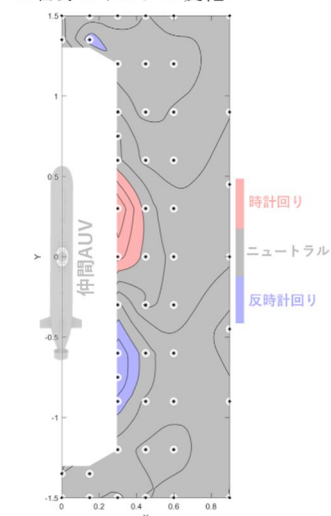


図5 着目 AUV の仲間 AUV に対して相対位置の変化により (A) 自身の横方向力の変化と (B) 自身のトルクの変化

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 7件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Li Gen, Kolomenskiy Dmitry, Liu Hao, Godoy-Diana Ramiro, Thiria Benjamin	4. 巻 8
2. 論文標題 Intermittent versus continuous swimming: An optimization tale	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Fluids	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevFluids.8.013101	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Duan Lei, Sun Qinghong, He Zanyang, Li Gen	4. 巻 260
2. 論文標題 Wake topology and energy recovery in floating horizontal-axis wind turbines with harmonic surge motion	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Energy	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.energy.2022.124907	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Li Gen, Godoy-Diana Ramiro, Duan Lei, Thiria Benjamin	4. 巻 -
2. 論文標題 Group Formation of Autonomous Underwater Vehicles that Optimizes Energetic Efficiency in Cruising	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Underwater Technology (UT)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/UT49729.2023.10103369	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Li Gen, Liu Hao, Muller Ulrike K., Voesenek Cees J., van Leeuwen Johan L.	4. 巻 288
2. 論文標題 Fishes regulate tail-beat kinematics to minimize speed-specific cost of transport	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1098/rspb.2021.1601	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 該当する

1. 著者名 Li Gen, Kolomenskiy Dmitry, Liu Hao, Thiria Benjamin, Godoy-Diana Ramiro	4. 巻 9
2. 論文標題 Hydrodynamical Fingerprint of a Neighbour in a Fish Lateral Line	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Frontiers in Robotics and AI	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/frobt.2022.825889	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 該当する

1. 著者名 Li Gen, Ashraf Intesaaf, Francois Bill, Kolomenskiy Dmitry, Lechenault Frédéric, Godoy-Diana Ramiro, Thiria Benjamin	4. 巻 4
2. 論文標題 Burst-and-coast swimmers optimize gait by adapting unique intrinsic cycle	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Communications Biology	6. 最初と最後の頁 40-40
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s42003-020-01521-z	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 該当する

1. 著者名 Fang Yuan, Li Gen, Duan Lei, Han Zhaolong, Zhao Yongsheng	4. 巻 218
2. 論文標題 Effect of surge motion on rotor aerodynamics and wake characteristics of a floating horizontal-axis wind turbine	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Energy	6. 最初と最後の頁 119519 ~ 119519
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.energy.2020.119519	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計7件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 Gen Li, Lei Duan, Ramiro Godoy-Diana, Benjamin Thiria, Dmitry Kolomenskiy
2. 発表標題 Understanding AUV Formations through Fluid Dynamics: Strategies for Enhanced Energetic Efficiency
3. 学会等名 IEEE OCEANS 2024 (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Gen Li, Lei Duan, Ramiro Godoy-Diana, Benjamin Thiria, Dmitry Kolomenskiy
2. 発表標題 Group Formation of Autonomous Underwater Vehicles that Optimizes Energetic Efficiency in Cruising
3. 学会等名 IEEE Underwater Technology 2023 (UT23) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Gen Li, Dmitry Kolomenskiy, Hao Liu, Benjamin Thiria, Ramiro Godoy-Diana, Thomas Engels
2. 発表標題 Investigation of the Swimming Pattern of a Magnetic Drive Soft Robot by an Integrated Numerical Approach with Fluid-Structure-Motion Interaction
3. 学会等名 8th International Symposium on Aero-aqua Bio-Mechanisms (ISABMEC 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Gen Li, Lei Duan, Ramiro Godoy-Diana, Benjamin Thiria, Dmitry Kolomenskiy
2. 発表標題 Optimization in Autonomous Underwater Vehicle (AUV) Group Formation by Computational Model
3. 学会等名 19th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Gen Li, Lei Duan, Ramiro Godoy-Diana, Benjamin Thiria, Dmitry Kolomenskiy
2. 発表標題 Optimizing the Energetic Efficiency in Autonomous Underwater Vehicle (AUV) Group by A Multi-Level Computational Model
3. 学会等名 WCCM-APCOM YOKOHAMA 2022 (15th World Congress on Computation Mecchanics & 8th Asian Pacific Congress on Computation Mechanics) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Godoy-Diana Ramiro, Li Gen, Ashraf Intesaaf, Kolomenskiy Dmitry, Francois Bill, Lechenault Frederic, Thiria Benjamin
2. 発表標題 Lechenault, Benjamin Thiria Burst and coast: on the intermittent tail-beat kinematics in steady-swimming fish
3. 学会等名 74th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics, American Physical Society, Phoenix Convention Center, Phoenix, Arizona, USA (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Li Gen
2. 発表標題 Li Gen Computational physics reveal smart strategy in fish swimming: not only efficient, but also simple
3. 学会等名 RIMS Workshop "Toward an integration of fluids, ecology, and evolution". Kyoto University, Japan (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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

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