

(様式5)

指導教員 承認印	主	副	副
			

令和 2年 5月 8日
Year Month Day

学位 (博士) 論文要旨
(Doctoral thesis abstract)

論文提出者 Ph. D. Candidate	生物システム応用科学府 <u>生物機能システム科学</u> 専攻		
	博士後期課程 第2 専修グループ(Department Course)		
氏名 (Your Name(Family, First) and Seal)	平成 <u>29</u> 年度入学(Your Entrance Fiscal Year)		
	石田 華子 		
主指導教員 氏名 Chief Advisor's Name	石田 寛	副指導教員 氏名 Vice Advisor's Name	池上 貴志
論文題目 Title	ザリガニの嗅覚探索行動の解析と噴流を利用した能動化学センシング手法の開発		

論文要旨 (和文要旨(2000字程度)または英文要旨(500words))

※欧文・和文どちらでもよい。但し、和文の場合は英訳を付すこと。

Write a summary in Japanese (2000 characters) or in English (500words).

If the abstract is written in Japanese, needed to translate into English.

ザリガニは、様々な場面で匂いを使ったコミュニケーションを行っており、その際に、自ら生成した流れを上手く利用している。例えば縄張り争いの際には、エラから排出された水で噴流(噴き出す流れ)を作り、自分の尿を相手に送って匂いを相手に伝える。また、餌を探す際にも、口元にある3対の顎脚を振って左右に噴流を作り出す。すると、周囲の流体が噴流に巻き込まれ、噴流に向かう流れが誘起される。ザリガニに向かって周囲の流体と共に匂いが引き寄せられるため、ザリガニは餌を探索する際に高感度に匂いを検出できると言われている。さらに、ザリガニは噴流を放出する方向を変え、匂いを引き寄せる流れの指向性を操ることができる。これは他の生物では見られない行動であり、このザリガニの行動を解明できれば、漏れ出した化学物質を辿って環境汚染物質などを探索するロボットの開発に役立つと期待される。

本研究では、ザリガニの噴流生成の効果を解析すると共に、噴流を応用した能動センシング手法の開発を行った。まず、左右に噴流を放出する装置により、嗅覚探索行動時におけるザリガニの噴流生成をモデル化し、噴流の方向を変えた際の流体の引き寄せ範囲と速度を実験的に評価すると共に、数値流体力学シミュレーションによってその効果を定量的に評価した。さらに、自由に歩行するザリガニのアクティブな噴流生成を観察するため、ザリガニが背負って歩ける大きさの噴流可視化装置を開発し、ザリガニの嗅覚探索行動の観察実験を行い、行動戦略を解析した。また、ザリガニの縄張り行動における噴流生成をヒントに、噴流を利用して地表付近に漂うガスを巻き上げ、ドローン上のセンサに届けて検出する手法を着想した。ごみの埋立地におけるメタンガスモニタリングへの応用を目指し、数値流体力学シミュレーションで流れ場を計算し、実現可能性を示した。本論文の各章の概略を以下に示す。

第1章では、ザリガニのケミカルコミュニケーションを紹介し、水中化学物質源探査ロボットに関する研究と、ごみの埋立地におけるメタンガスモニタリングの現状をまとめた。そして、本研究の位置づけと目的を述べた。

第2章では、ザリガニをモデル化した噴流生成装置の周囲に形成される流れ場を、実験と数値流体力学シミュレーションの両面から解析した結果を述べた。装置はザリガニと同程度の大きさであり、正面から水を吸引し、その水を左右から噴流として放出する。ザリガニがどの範囲にある匂いをどの程度の速さで引き寄

せているのか、定量的に解析した。噴流の放出方向を変えると、流体を引き寄せることができる範囲が変わることが知られている。そこで、左右の真横に噴流を放出した場合と、左右の後方 45°に放出した場合を比較する実験を行った。流体を引き寄せる角度範囲については、噴流を後方 45°に放出した方が、広範囲から装置に向かって流体が引き寄せられる。一方、流速については、左右真横に噴流を放出した方が、周囲の流体を速く引き寄せられることが確認された。

第3章では、数値流体力学シミュレーションを用い、噴流による流体の引き寄せ時間を定量的に解析した結果を述べた。噴流は層流から乱流へと遷移していく流れであり、十分に発達した乱流をモデル化した数値計算では十分な計算精度が得られないことがある。そこで、流速変化が大きい領域のメッシュを細かくして、乱流モデルや境界条件を変更した結果、実験値と近いシミュレーション結果を得ることができた。噴流を左右の真横と後方 45°へ放出した場合の2通りのシミュレーションを行い、流体の引き寄せ速度の減衰を表すモデル式を得た。

第4章では、自由に歩行するザリガニに背負わせる噴流可視化装置について述べた。第3章までに述べた研究では、水中に静止した噴流生成装置が作る流れ場を調査した。しかし、餌を探索しながら移動しているザリガニが、いつ噴流の方向を切り替え、どの程度先から匂いを集めているか、明らかではない。そこで、防水のためにシリコンゴムで封止した小型インク放出装置をザリガニの頭胸甲に載せ、顎脚付近にインクを放出することで噴流を可視化することを提案し、実際に装置を試作した。

第5章では、開発した噴流可視化装置を用いて行ったザリガニの嗅覚探索行動観察実験について述べた。先行研究にて、ザリガニは直進している際には左右両側の顎脚を振っており、転回時には転回方向とは逆側の顎脚のみを振っていることを示した。しかし、顎脚の振動の有無を観察するだけでは、真横や上方など噴流の三次元的な角度方向を調査することはできない。本研究にて自由に歩行するザリガニの噴流を可視化できるようになり、直進時にはザリガニが左右の後方に噴流を放出し、転回時には転回方向とは逆側の真横に噴流を放出していることが明らかになった。

第6章では、ドローンが生成する噴流を利用し、ごみの埋立地において地表を漂うメタンガスをドローン上のセンサまで巻き上げて検出する手法について述べた。連結した2台のドローンが生成する下降気流（噴流）を地表で衝突させて、巻き上がる気流を作る。ドローンが作る気流場の数値流体力学シミュレーションを行い、噴流を利用した能動化学センシング手法の実現可能性を示した。

第7章では、本研究で得られた知見をまとめ、今後の課題と展望を述べた。

(英訳) ※和文要旨の場合(300 words)

If the abstract is written in Japanese, needed to translate into English.(300 words)

Crayfish generate jet-like water currents during food search by using fan-like flagella of their maxillipeds. The jets generated toward their sides induce an inflow from the surroundings to the jets, which promotes odor sample collection to the olfactory organs. Crayfish also use their forward gill currents to deliver their urine to their opponents during their territorial fights. The objective of this research is to study the effects of such active jet discharge in crayfish behavior and to investigate applications of jet discharge in chemical sensing robots.

First, flow fields generated by a device that models the jet discharge of crayfish were investigated. The results of experiments and computational fluid dynamics (CFD) simulations showed that water samples are drawn from the surroundings to the jet discharge device in much shorter time than by simple water suction. The results also showed that there is a tradeoff between the angular range of chemical sample collection and the sample collection time.

It is also known that crayfish can generate the jets in several different directions and change the direction of the inflow. To investigate this behavior, a small ink discharge device was developed. The device enables ink release near the maxillipeds of a freely walking crayfish so that the directions of the jets can be visualized. It was shown for the first time that crayfish adaptively change the jet directions during their food search.

Finally, a gas sensing method based on active jet discharge was proposed for an aerial robot. As a crayfish uses a water current to deliver its urine to the opponent, the proposed system uses the jets generated by two connected quadcopters to deliver gas drifting near the ground to an onboard gas sensor. The CFD simulation results showed the feasibility of this method for methane emission monitoring in landfill sites.