



ムーンショット目標3

2050年までに、AIとロボットの共進化により、自ら学習・行動し
人と共生するロボットを実現

終了報告書

人・AI ロボット・生物サイborgの共進化に
よる新ひらめきの世界

森島 圭祐

大阪大学 大学院工学研究科



1. 研究開発プロジェクトの実施概要

(1) 研究開発プロジェクトの概要

本プロジェクトでは、生物の感覚・知覚・行動に関する情報の取得と働きかけを可能とする生物サイボーグ群開発エンジンを構築し、生物サイボーグをツールとすることで、生物の生来的な振る舞いを活用しつつ、付加的な制御によって、所望の自己組織化を創発させる AI 技術である自己組織化プラットフォームを開発する。自己組織化プラットフォームにより、難環境で自在に振る舞う生物の行動ルールを見出し、これをもとに生物に自己組織的な振る舞いを行わせるための制御ルールを設計し、その有効性、有用性に関して生物サイボーグ群を用いた実験によって実証することにより、難環境でも協調タスクを行える生物サイボーグ群を実現する。さらに、動作やセンシング機構を改変し生物の行動ルールを組み込んだロボット、いわば生物化されたロボットに制御ルールを適用する。これにより難環境でも事前に環境情報を把握せずとも自己組織的な協調作業を可能とする群ロボットを実現する。

(2) 研究開発プロジェクトの実施概要

研究開発項目 1

生物を無線で電気刺激して行動制御を行う生物サイボーグの電子基盤、バックパックの小型化に取り組み、世界最小となる 10mm×10mm のものを製作することができた。また、電極の取り付けをスムーズに行うユニットを設計・製作し、生物サイボーグの製作プロセスを効率化した。バックパックの小型化に伴い、それを背負わせるのではなく、完全に生物の体内に埋め込んだ状態で行動制御することを世界で初めて実現した。これにより、バックパックが航行の障害となることはなくなり、生物本来の動きを妨げずに行動制御を行うことが可能になった。

研究開発項目 2

研究開発項目 1 との協働のもと、協調運搬の創発に向けた行動ルール $I(t)$ の抽出・モデル化、ならびに編隊行動や協調運搬を創発する制御ルール $E(t)$ の設計が行われ、生物サイボーグ 20 匹での編隊移動等を成し遂げた。

研究開発項目 3

環境情報、生体内部情報、生物サイボーグの物理量を収集できるシステムを構築した。また、生物の活性度の計測実験手法を確立し、生物活性度の指標となる生物の知覚・行動変化を見出し、これらの計測に必要なデバイスの小型化を行った。

(3) プロジェクトマネジメントの実施概要

日常的にメールや Slack を通じて連絡をとると同時に、必要に応じて PM および PI 間で課題推進者会議を実施し、進捗や計画について議論した。さらに、代表機関における関連部局の支援に加え、本プロジェクトにかかる PM 補佐を配置し、PM 支援体制チームの充実を図った。研究成果の展開として、国際ワークショップや学会誌を通じた研究者と交流し、国内外の研究動向を把握するとともに、国内外の企業や機関とも交流を行ない、技

術の展開について議論を行なった。一般に対しても、大阪大学共創 DAY を通じてショッピングモールで交流をし、本プロジェクトの目標や取り組みについて紹介を行なった。特に、令和 5 年度は佐藤 PI と若宮 PI が緊密な連携をとることで、生物サイボーグ 20 体での編隊移動のデモンストレーションを成功させた。広報、アウトリーチとして、JST のムーンショット事業特設ホームページを通じた情報発信のため、本プロジェクトの概要を作成した。データマネジメントに関する取り組みとして、実験データやソースコードは各課題申請者がそれぞれプライベートリポジトリを用意して管理した。

2. 研究開発プロジェクトの実施内容

(1) 研究開発項目 1: 生物サイボーグ群開発エンジン

研究開発課題 1-1: 生物サイボーグ用バックパックの小型化・機能化

実施内容:

令和4年度に 15mm×15mm サイズのバックパックの設計を終え、令和 5 年度の早々に製作が完了したため、このバックパックを用いた生物サイボーグを用意し、若宮グループと連携して群制御を実施した。さらに小型の 10mm×10mm サイズの設計を行なった。ここでは、テストコネクタを基板の側面に配置した端面スルーホールを採用し、部品の実装スペースを確保したことに加えて、小型の MCU を導入して基本設計を行い、世界最小のバックパックの製作に成功した。さらに、生物の背面にバックパックを背負わせるのではなく、これを完全に体内に埋め込み、電極を刺激箇所配置し、行動制御を行うことにも世界で初めて成功した。これにより、バックパックが航行の障害となることはなくなり、生物本来の動きを妨げずに群制御を行うことができるようになった。また、生物の体に何かを被覆したり塗布したりすることが可能になり、断熱材や防水材で生物を覆って、生物にとっての過酷な環境、例えば、水中、寒冷地、火中や宇宙空間などで生物サイボーグを活用する可能性が高まった。

課題推進者: 佐藤裕崇 (南洋理工大学)

研究開発課題 1-2: 制御入力 $U(t)$ の精度向上・環境刺激法の探索

実施内容:

生物サイボーグ (マダガスカルゴキブリを使用) は、両方の触角に埋め込んだ電極に 1 秒間 1.5 V の刺激を与えると、 17.3 ± 1.6 mm/s (平均±標準誤差, $n=20$) で後進した。一方、前胸と後胸に設置した電極に 1 秒間 4.5 V の刺激を与えると、 33.9 ± 2.8 mm/s (平均±標準誤差, $n=16$) で、刺激された部位と反対側に並進した。この刺激パラメータを利用して、生物サイボーグは行き止まりのある丁字路を通り抜けることができた。また、3D モーションキャプチャシステムを配した空間にマダガスカルゴキブリを放ち、その自由歩行中の位置と時間のデータを取得し、これを若宮 PI に提供した。若宮 PI はディープラーニングモデルを使って昆虫の歩行経路をモデル化することにより、昆虫の現在の位置からその後の経路を予測することが可能になった。また、若宮 PI にて、障害物のある平地での昆虫群の自由航行のデータから、機械学習の時系列予測モデルを用いて離散時間写像が得られた。具体的には、周辺他個体と障害物の位置と直近の経路情報から直後の位置を予測するモデ

ルである。そのままでは個体と障害物の位置と方向が組み合わせ爆発を起こすため、幾何学的同変性を保証する特殊なグラフニューラルネットワークを提案することで自由航行の予測が効率的に可能となり、通常の深層学習による予測と比較して予測誤差を83%削減することができた。さらに、生物の体重で変形し肢の空振りが起きる地盤に大小の障害物を配置して狭所も設けた環境を用意し、生物サイボーグ20体を群制御することに世界で初めて成功した。

課題推進者:佐藤裕崇(南洋理工大学)

研究開発課題1-3:生物サイボーグ製作技術の効率化

実施内容:

本プロジェクトでは20体の生物サイボーグの自己組織的な群制御を行うことを目的の1つとしている。それだけの数の生物サイボーグを要する実験を効率的に行うには、効率的な製作プロセスが必要となる。本課題では、電気刺激に使う電極のデザインや製作方法、電極の固定方法、バックパックの生物への実装方法を改善し、生物サイボーグを製作する工程を効率化した。まず、電極の固定法の改善が可能なウェアラブルデバイスの製作プロセスを確立した。生物の腹部の両脇に埋め込んだ電極を保護するための連結ベルトを設計した。これによって、湾曲している生物の体節に合致する形状であり、連結部分の調整により長さを変えられ、プラスチック製であるために生物の体格の個体差に関係なく装着できるようになった。また、バックパックを生物にマウントするための土台となるユニットを製作し、連結ベルトと一体化できる構造とした。一方、触角に埋め込んだ電極を固定するための筒状のウェアラブルデバイスも設計した。これは空洞の内部に溝が設けられており電極を圧着固定できるようになっている。これらは、手作業で生物の体節に取り付けることにはなるが、体節形状に合致しているため、セルフアライメント的に装着することが可能となり、慎重さや技能、経験は必要なくなり、作業効率を向上させることが可能となった。また、電極の埋め込みを手作業ではなく自動的に行うために、生物の形状から埋め込み位置を特定する画像認識モデルを用意し、埋め込み位置へ電極を埋め込むためのロボットアームの動作アルゴリズムを開発し、実際に電極を生物の背面に埋め込むことに成功した。

課題推進者:佐藤裕崇(南洋理工大学)

(2) 研究開発項目2:自己組織化プラットフォームの研究開発

研究開発課題2-1:生物の行動を学習し生物の行動ルールを抽出する AI の開発

実施内容:

本研究開発課題では、生物の行動ルール $I(t)$ のモデル化・抽出に取り組んだ。崩れやすく起伏に富んだ軟弱な地盤に様々な障害物がある難環境で自律的に自由航行する生物サイボーグ群の振る舞いのモデル化に取り組み、LSTM とベクトル自己回帰モデルを用いてモデル化を行うことにより、再現度 80%を達成した。なお、再現度の指標としては、ゴキブリの軌跡の一致度(軌跡の絶対誤差 0 を再現度 100%と定義)を用いた。また、協調運搬動作の創発に向けて、他の個体や障害物などの接触しうる物体が存在する環境下での行動ルールのモデル化を行い、シミュレーションにおいて再現度 81.3%を達成した。複数の個体が協調運搬するとき、状態が高次元となって組み合わせ爆発を起こすため、通常の

深層学習では学習が困難であることから、深層学習モデルに幾何学的な正規化を加えることで、学習の効率化を行った。また、単独自由航行する個体の行動ルールについて、幾何学的正規化と離散時間シンボル回帰を用いデータから方程式化を行うという未踏の課題に挑戦し、慣性運動の強さなど一定の解釈が可能な方程式を得ることに成功した。

課題推進者:若宮直紀(国立大学法人大阪大学)

研究開発課題2-2:生物サイボーグに所望の自己組織的な振る舞いを創発させる制御ルールを設計する AI の開発

実施内容:

本研究開発課題では、まず、先行研究等で示されているゴキブリの行動モデルをもとにした簡易的な行動ルール $I(t)$ を用いて、生物に所望の自己組織化を創発させるための付加的な制御である制御ルール $E(t)$ の設計に取り組んだ。生物に実施可能な制御 $U(t)$ の制約を佐藤 PI の研究グループとの打ち合わせを通して確認し、ゴキブリの行動の予測不確実性に起因する制御性能の劣化を低減するために、スライディングモード制御の手法を用いた。その結果、群れの凝集度および群れにおける速度の一致度の加重和により定義した自己組織化度 93%を達成した。さらに、本手法を改良するとともに、個体間の制御関係(距離)をモデル化した最小全域木の辺の長さの標準偏差を求め、その指数関数の逆数としてあらたに自己組織化度を定義した上で、生物生来の走性を活用した自律行動への介入度合いの小さな制御アルゴリズムによる編隊移動を実現した。シミュレーションにおいて 93%、生物サイボーグを用いた実験においては 83~92%の自己組織化度を達成した。また、協調運搬については、運搬対象を羊の群と見なしたシェパードイングアルゴリズムとリーダー・フォロワー型の編隊移動アルゴリズムを組み合わせた制御アルゴリズムにより、起伏や障害物の無いシミュレーション環境での初期実験において 92%以上の自己組織度を達成した。

課題推進者:若宮直紀(国立大学法人大阪大学)

研究開発課題2-3:生物の行動を学習し生物の行動ルールを抽出する AI の開発

実施内容:

本研究開発課題では、行動ルール $I(t)$ と制御ルール $E(t)$ の評価環境として、汎用的な開発プラットフォームである unity を用いてシミュレーション環境を構築した。起伏の乗り越えや障害物の迂回に加え、物体の推進(運搬)のシミュレーションが行えるようにした。また、3D スキャナやモーションキャプチャのデータを取り込むことにより、実験フィールドや実際の生物サイボーグの行動をリアルタイムでシミュレーションに組み込むことを可能とした。さらに、研究開発課題 2-2 で設計された制御ルールを、研究開発項目 1(佐藤 PI)で製作された生物サイボーグに導入することにより、生物サイボーグ 20 匹による編隊移動を達成した。実験フィールドにおいて、単体の生物サイボーグによるゴール到達の平均所要時間が 53.6 秒であったのに対し、10 回の実験における 20 匹の生物サイボーグの平均所要時間は 64.7 秒と高々 1.21 倍であったことから、編隊移動タスクの成功が実証され、そのタスク達成率は 100%であった。

課題推進者:若宮直紀(国立大学法人大阪大学)

(3) 研究開発項目3:生物活性度計測

研究開発課題3-1:生物の活性度の計測実験手法の確立

実施内容:

マダガスカルゴキブリの生体内部情報、体節の屈折などの生物の細かな振る舞いを含めた物理量、実験フィールド内の環境情報を各種センサーから収集し、同期させて時系列データとして収集できるシステムを構築した。また、これまでは電気刺激時に発生するノイズのため、生物際ボーク稼働時には正確な神経興奮度合を測定することができなかったが、このノイズを除去して生物サイボーグ本来の神経興奮度合を測定できる方法を開発した。

生物活性度に関する定義を外部カメラや 3D モーションキャプチャシステムで捉えられないが、行動や知覚に影響を与える一つ以上の生体内部情報の指標の組み合わせと定め、測定値を指標に変換する際は「測定値/測定可能な上限値」を計算して正規化するとした。この算出方法は今後より普遍的に使用可能な方法に改良していく。また、実験により心拍情報が生物活性度の指標として利用可能であることを示した。このことは行動をモデル化する際には内部状態を含む情報が必要であることを示唆しており、内部状態を含んだ $I(t)$ をもとに制御ルール $E(t)$ を設計し、 $E(t)$ にも生物活性度を組み込むことで、自己組織化プラットフォームで生物の内部状態を扱えるようになると考えられる。

また、負の走光性を利用してゴキブリに特定のルートをたどらせて目的地まで誘導する手法の開発に成功した。電気刺激によらない生物サイボーグの制御方法の開発によって、自然な状態で生物活性度の測定が可能になるだけでなく、触角や尾葉を切断し電極を刺すといった大きな負担がかかる手術を行わずに生物サイボーグを作成できる可能性が示唆された。

課題推進者:森島圭祐(国立大学法人大阪大学)

研究開発課題3-2:生物の活性度を計測するデバイスの小型化

実施内容:

神経の興奮度・筋電位・心拍情報等の生体の内部情報を計測するデバイス、自由行動化の行動情報を取得するための3軸慣性センサーユニット、及びこれらを固定する治具を生物サイボーグにすべて搭載しても活動可能になるように 30mm×20mm までバックパックを小型化することに成功した。また、これらを使用してオンボードによる自由歩行下での生物活性度の計測に成功した。さらに、測定デバイスを搭載した生物サイボーグを使用して、外部カメラや 3D モーションキャプチャシステムを使わずに、自由航行、自律移動しながら、障害物回避するデモに成功した。

これに加えて、測定デバイスからの情報を効率的に制御に活用するために、複数の距離センサーを組み合わせた情報のみによるフィードバック制御で障害物を自動回避しつつ目的地まで到達する手法を開発した。また、生物サイボーグを操作する時間としない時間の割合を変化させることで探索パターンが変化することを発見した。これらは、無限定環境下での制御の簡易化や、目的や状況に応じた行動パターンの調整に新たな選択肢を増やすことができると考えられる。

課題推進者:森島圭祐(国立大学法人大阪大学)

3. プロジェクトマネジメント実施内容

(1) 研究開発プロジェクトのガバナンス

進捗状況の把握

PM と課題推進者は電子メール・SLACK・オンライン会議を通じて密に連絡をとり、プロジェクト開始後も引き続きこの通信手段を継続した。また、PM と課題推進者が集まる会議を必要に応じて開催し、研究の進捗状況を共有した。課題推進者は各々が独立した研究室を運営しており、その中で学生・研究スタッフが実験・データ解析を行っており、課題推進者の裁量で各研究開発課題を解決していくが、適宜 PM へ進捗を報告した。課題間で開発デバイスの提供、サンプル交換やデータの受け渡しを行う際は、会議で内容を再確認した。

研究開発プロジェクトの展開

ステージゲート評価会に伴い、プロジェクトが終了と判断されたため、令和 6 年度は研究成果の取りまとめを行なうことになった。これに伴い、令和 5 年度は 1 月から 3 月にかけて、令和 5 年度の研究計画にあった課題を完遂した。

(2) 研究成果の展開

Bio-inspired, Bio-mimetic and Bio-hybrid (Cyborg) Systems という国際ワークショップを IEEE ICRA といったロボットのトップの国際会議にて開催し、また学会誌を通じて国内外の研究動向の把握に努めた。また、第 2 回日欧ワークショップに出席し、本プロジェクトの課題等について紹介・議論を行ない、ムーンショットに閉じない形で本プロジェクトの課題を学術界で国際的に展開させることを試みた。

国内外の企業との連携や意見交換を行ない、産業分野でのニーズを踏まえた技術開発を展開した。知的財産に関しては、新規性だけでなく産業分野でのニーズを考慮しながら知財出願の有無を PM、PI 及びその所属機関が連携して判断した。その結果、費用対効果及び機密性の観点から本プロジェクトにおけるすべての成果の出願を見送ることとした。

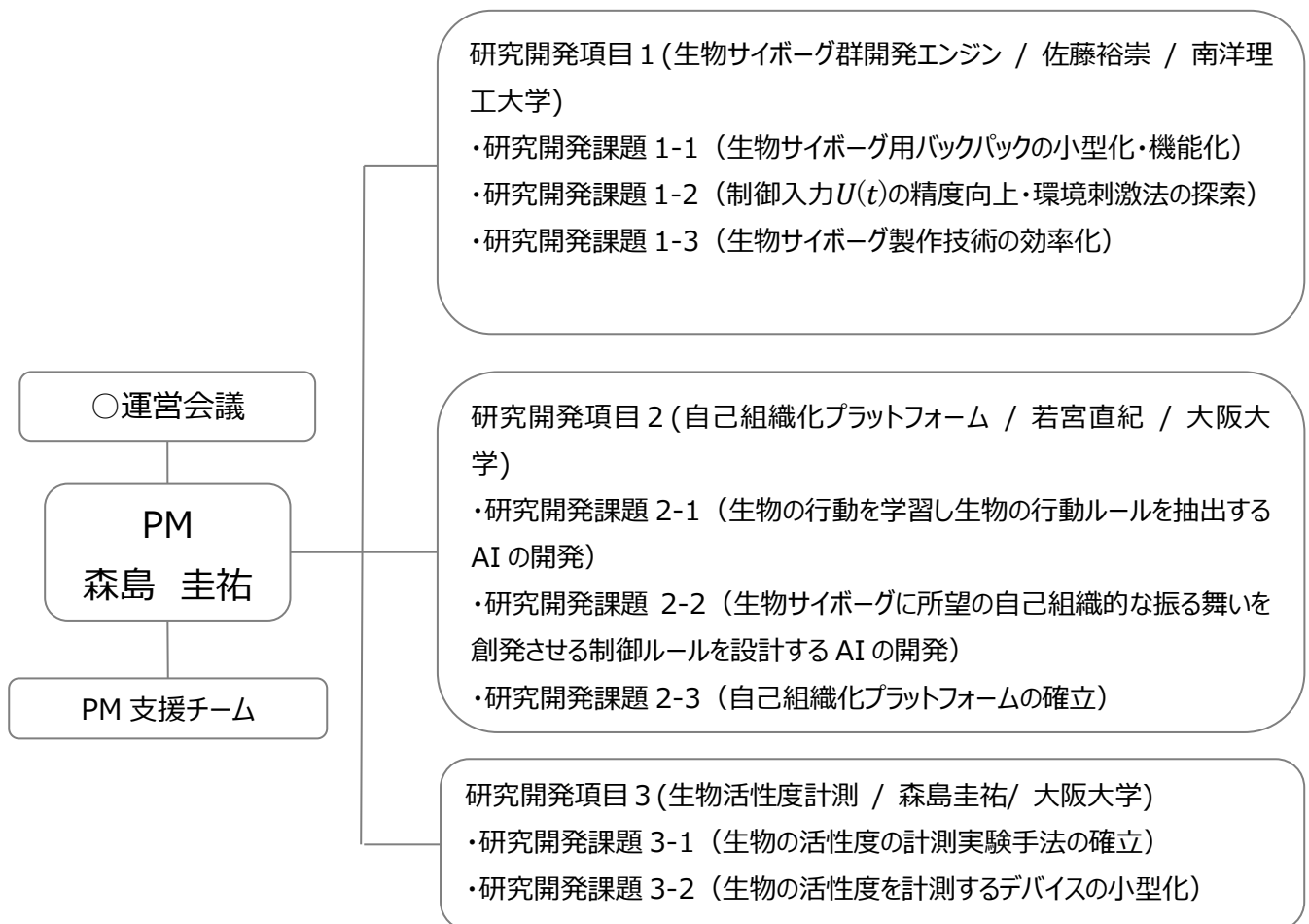
(3) 広報、アウトリーチ

大阪大学共創 DAY を通じたショッピングモールでの非研究者との交流や、中高生向けの講演会を通じて、本プロジェクトの技術とそれによる社会貢献について紹介と発信を行なった。中高生向けの講演会ではアンケートを実施し、講演を聞いた感想を収集することで、本プロジェクトに対する意識や態度の変化を調べることも行なった。また、簡易なホームページを開設し、本プロジェクトの目標や成果について日本語と英語で紹介を行なった。

(4) データマネジメントに関する取り組み

実験データやソースコードは各課題申請者がそれぞれプライベートリポジトリを用意して管理した。実験に使用したデータは機密性を鑑みて非公開とすることとした。

4. 研究開発プロジェクト推進体制図



知財運用会議

本プロジェクトでの開催なし。

運営会議 実施内容

毎月第一週の月曜日に PM と課題推進者が集まる会議を定例でオンライン開催し、研究の進捗状況を共有する。課題間で開発デバイスの提供、サンプル交換やデータの受け渡しを行う際は、本会議で内容を再確認する。

5. 研究開発プロジェクト成果

| 知的財産権件数 | | | | |
|----------|----|------------|----------|----|
| | 特許 | | その他産業財産権 | |
| | 国内 | 国際(PCT 含む) | 国内 | 国際 |
| 未登録件数 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 登録件数 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 合計(出願件数) | 0 | 0 | 0 | 0 |

| 会議発表数 | | | |
|--------|----|----|----|
| | 国内 | 国際 | 総数 |
| 招待講演 | 6 | 5 | 11 |
| 口頭発表 | 6 | 8 | 14 |
| ポスター発表 | 7 | 2 | 9 |
| 合計 | 19 | 15 | 34 |

| 原著論文数(※proceedings を含む) | | | |
|-------------------------|----|----|----|
| | 国内 | 国際 | 総数 |
| 件数 | 0 | 3 | 3 |
| (うち、査読有) | 0 | 3 | 3 |

| その他著作物数(総説、書籍など) | | | |
|------------------|----|----|----|
| | 国内 | 国際 | 総数 |
| 総説 | 1 | 1 | 2 |
| 書籍 | 0 | 0 | 0 |
| その他 | 0 | 0 | 0 |
| 合計 | 1 | 1 | 2 |

| 受賞件数 | | |
|------|----|----|
| 国内 | 国際 | 総数 |
| 2 | 0 | 2 |

| |
|-----------|
| プレスリリース件数 |
| 0 |

| |
|------|
| 報道件数 |
| 5 |

| |
|-------------------|
| ワークショップ等、アウトリーチ件数 |
| 11 |