学術・技術論文

脳–身体–環境の相互作用ループに能動的に介入する 昆虫微小脳を用いた脳–機械融合系の構築[†]

髙嶋 淳^{*1} 峯岸 諒^{*2} 倉林 大輔^{*1} 神 崎 亮 平^{*2}

Construction of a Brain-Machine Hybrid System to Investigate Adaptive Functionality of a Micro Brain

Atsushi Takashima^{*1}, Ryo Minegishi^{*2}, Daisuke Kurabayashi^{*1} and Ryohei Kanzaki^{*2}

We have created a brain-machine hybrid system (BMHS) which is able to solve the chemical plume tracing (CPT) problem using a micro brain of a male silkworm moth. The purpose of the system is to investigate adaptability which is derived from interactions between the microbrain, body, and environment. In this paper, we describe a method of creating the BMHS. The BMHS is a kind of cyborg system in which the body of a living being is replaced with a mobile robot and its brain is used to control the robot. The artificial body is controlled by motor commands for the original body that are extracted from a signal recorded in the brain. For that purpose, a small measurement system to record the signals was created and a method to reconstruct the motor commands from the signals was established. We demonstrate the BMHS can behave like a silkworm moth and then confirmed the system can solve the CPT problem in an experimental environment. Our system has the potential to reveal principles of adaptability in silkworm moth behavior.

Key Words: Brain-machine Hybrid System, Microbrain, Adaptive Behavior, Brain Machine Interface, Chemical Plume Tracing, Silkworm Moth

1. はじめに

少子高齢化社会の解決策として、ロボットの社会進出に期待 が集まっている[1].しかし、現在のロボットは環境の変化に対 応する能力に乏しく、あらかじめ想定されている環境の中でし か満足に活動できない.我々の生活環境では、想定できない出 来事が日々少なからず発生し、ロボットはそれに適切に対処で きる能力を獲得する必要がある.

一方,我々人間を含めて生物は時々刻々と変化する環境の中 で活動し,いとも簡単に自らの目的の行動を実現することがで きる.この,生物がもつ動的に変化する環境に適応する能力,す なわち適応能の発現メカニズムを解明することは,ロボットに 適応能を実装する上で不可欠であり,生物学からも脳機能解明 の糸口として期待が集まっている.

この適応能は, 脳-身体-環境による複雑な相互作用によって 発現している, と考えられている. そのため, 脳を環境から隔 離した状態で調べてもその発現メカニズムを解明することは困 難である.一方,従来の脳研究手法は,計測技術からくる制約 などにより,脳を安定で静的な状態にして行われることが多く, 得られる情報も静的なものがほとんどであった.そのため,適応 能解明のためには動的な計測を可能にする新しい実験手法が必 要となる.そこで,我々は脳-身体-環境の相互作用に能動的に 介入できる実験系である,脳-機械融合系を提案してきた[2][3]. 脳-機械融合系とは,生物の身体を機械に置き換え,脳をコ ントローラとして用いる,いわばサイボーグである.脳からの 行動指令を神経活動から抽出し,直接人工身体を駆動する.そ のため,脳への刺激入力と行動出力の関係を明瞭に記録したり, 人工身体の特性を動的に変化させることで,脳-身体-環境との 相互作用ループに能動的に介入することができる.これによっ て,脳が環境に適応する過程や,その可塑性を検証できると期 待される.

本研究では、脳-身体-環境との相互作用を知る上での重要な 足がかりとして昆虫微小脳をその最適な対象として捉え、その 適応性を解明する実験系を構築する.我々は昆虫、その中でも 特に微小脳に対する入出関係が明瞭なカイコガを対象生物に選 び、脳-機械融合系を構築した.本論文では、その脳-機械融合 系の構築手法について述べる.

原稿受付 2009 年 8 月 10 日

^{*1}東京工業大学大学院

^{*2}東京大学

^{*&}lt;sup>1</sup>Tokyo Institute of Technology

^{*&}lt;sup>2</sup>The University of Tokyo

[■]本論文は提案性で評価されました.

[†]A. Takashima and R. Minegishi contributed equally to this work.

2. 本研究の目的

2.1 関連研究

446

従来の脳研究は,遺伝学,解剖学,神経生理学などによる微視 的な知見を集約することで,動物行動学などによる大域的な知 見が発現するメカニズムを解明しようとしていた.しかし,微 視的な知見は,静的な情報に偏っていたため,適応能など動的か つ大域的な神経活動を解析,解明することは困難であった.そ のため,いかにして動的な神経活動を計測するのか,また,得 られた知見を元にどのようにして脳機能を解析するのか,その 手法が模索されていた.

近年, fMRI, PET, EEG, 埋め込み型電極などによる活動 状態にある脳を計測する手法 [4] [5] が開発され, それによって, 身体, 環境との相互作用を残しつつ計測することができるように なってきた. その代表的なものに, Brain-Computer Interface (BCI) がある [6].

Chapin らは、ラットの脳の運動野に電極を刺し、神経信号 から水を飲むために追加したロボットアームを操作できること を示した [7]. この研究は、脳から直接ロボットアームの運動指 令を記録することに成功した点や、脳が持つ柔軟な情報処理の 可能性を示した点が有意義である.一方で、哺乳動物の脳規模 は非常に大きく、より小さな脳を対象としたほうがその応答の 解析が容易になると考えられる.そこでより規模が小さく、特 定の刺激に対して明確な応答をとる生物を選定することが望ま しいと考える.

Reger ら, Kositsky らはラットに比べて神経系が単純なヤツ メウナギを対象生物に選び,その脳の一部を光センサを搭載し た移動ロボットに接続し,ロボットによる正および負の走光性 動作を実現することに成功した [8] [9].彼らは,ヤツメウナギ の脳にある複数の感覚入力と運動野とをつなぐ部位から神経信 号を計測し,その信号によって移動ロボットのモータを動かし た.同時に,搭載された光センサからの電気信号を脳の平衡感 覚に関する部位に入力することで外界情報を脳にフィードバッ クし,ロボットの向きを光源方向へ向ける,走光性を実現する システムを実装した.この研究は,神経生理学による知見を元 に,部分的にではあるが脳と人工身体の接続を実現し,神経系, 身体,環境の関係性を構築し,統合情報による感覚運動学習が このシステムで実現できることを示した点が有意義である.

一方,長澤[10]は雄カイコガの雌カイコガ探索行動の発現機 構を対象に、その特徴行動を発現する微分方程式モデルを提案 した.これに基づいて実際のカイコガ触角を移植した自律ロボッ トを動作させることで、合目的的行動の達成を確認した.しか し、情報処理系には抽象化された数理モデルが用いられており、 脳研究の知見が盛り込まれているとはいえ、脳そのものを解析 しているとはいいがたい.

我々は, 脳-身体-環境の相互作用に基づいて, 脳がいかなる 適応能をどのように発揮するかを解析するために, 脳そのもの を要素に含みながら, 相互作用に介入可能な脳-機械融合系を構 築する.

2.2 対象生物の選定

本研究では、脳-機械融合系を構築するにあたり、対象生物と



Fig. 1 Pheromone-source orientation behavior of a male silkworm moth



Fig. 2 Pheromone plume and its filament

してカイコガ成虫の雄を用いる.カイコガは,**Fig.1**に示すように,体長 20 [mm],体幅 10 [mm] ほどの白いガの一種で,古くから家畜として人に飼われ,品種改良を施されてきた生物である.そのため他の生物にはない特徴を複数備えている.本研究でカイコガを用いる理由は,以下の3点である.

まず,昆虫であるカイコガは脳の構造が比較的単純で,神経 細胞数が少ないことが挙げられる.哺乳動物の脳には 10¹¹ 個 程度の神経細胞が含まれるのに対し,カイコガのそれは 10⁵ 個 程度にすぎない.また昆虫の脳では,同定ニューロンと呼ばれ る特定の役割をもつ神経細胞の解析や,神経細胞間における接 続関係の解明が進められており,利用できる知見の蓄積が多い 点からも有用である [11].

また、刺激(入力)と行動(出力)の関係が明瞭であることが 挙げられる.カイコガ成虫が見せる行動は、ほぼ交尾のための 行動に限られる.それ以外の摂食・逃避等の行動は行わず、雄は 雌の性フェロモン刺激があるまでじっと止まったままである.一 方で、性フェロモンを検知した際には一連の特徴的な行動を行 うため、その対応関係をはっきりと知ることができる[12][13].

そして、カイコガの雄が交尾のために行う雌への定位行動が、 Chemical Plume Tracing (CPT) [14] [15] と呼ばれる一種の難 間解決に相当していることが挙げられる.カイコガの雄は、雌 が放出する性フェロモンを手がかりに雌の位置まで移動し交尾 する.ここで空気中の化学物質は Fig.2 に示すように、均等に 拡散するのではなく、Filament と呼ばれる塊状となる.つま り、空気中の性フェロモンを手がかりに雌個体にたどり着くと いう行為は、濃度勾配を辿ればよい、というような自明な問題 ではない、カイコガの脳は哺乳動物等と比較して小規模である と述べたが、その一方で、小規模な脳による信号処理によりこ の問題を解決する能力を有することができる.



Fig. 3 Programmed sequence of a pheromone-source searching behavior of a male silkworm moth. In response to pheromonal stimulation the silkworm moth shows the behavior consisting of surge, zigzag turns and loop



Fig. 4 Concept of a brain-machine hybrid system. The brainmachine hybrid system makes investigation of a brain possible, by replacing an organism's body with an artificial body whose specification is well-known

さて、カイコガは性フェロモン刺激を受けた際、雌に向かっ て定位するために Fig. 3 に示すような一連の動作を行う.すな わち、(1) Surge:性フェロモンが触角に当たっている間は直進 し、(2) Zigzag:刺激が途切れると、ジグザグと左右に進行方 向を変えながら歩行し、(3) Loop:それでも刺激が得られない と、ぐるりと姿勢を回転させるループを行う.一方、(4) Surge や Zigzag, Loop の途中に性フェロモン刺激を受けると、(1) から再度一連の動作を行う.これら個々の動作は、遺伝子にプ ログラミングされた行動とされているが、その発現にあたって は様々な神経修飾がなされ、行動発現に至る刺激強度のしきい 値や発現パターンの強度を巧みに調整することによって適応性 を生んでいると予想されている[16].ただし、神経生理学の知 見によると、Zigzag と Loop は同一の神経回路による行動であ り区別はないが[17]、ここでは見かけの動きにより便宜上分類 した.

我々は,カイコガの脳を要素に含む脳-機械融合系を構築する ことで,雌への定位行動における脳-身体-環境との相互作用と 適応能発現の連関解明を目指す.

2.3 本研究の問題設定

本研究で提案する, "脳-機械融合系"の概念を **Fig.4** に示す. Fig.4 の左の囲みは生物 (Organism), ここではカイコガを表 し, Fig.4の右の囲みは提案する脳-機械融合系(Brain-machine hybrid system)を表す.

脳-機械融合系とは、生物の脳と身体を切り離し、特性が既知 である人工身体によって身体を置き換えることで、身体性や体 性感覚といった観測の困難な事象から脳のみを分離して計測で きるシステムである.

特にこのシステムは,生物における身体から脳への作用以外 すべてを包含しており,従来不可能であった,生物を自由に行 動させながらの脳計測を可能にするものである.

また、人工身体の特性を動的に変化させることで、脳-身体-環境の相互作用ループに能動的に介入することができ、脳が身 体の変化にどのように適応するかを調べることができると期待 する.

本論文では、カイコガの脳を用いた脳-機械融合系の構築を目 的とし、以下の動作を実現する.

(1) フェロモン単発刺激による定型行動

(2) 自律動作によるフェロモン源定位行動

(1)の定型行動の発現をもって、カイコガの身体置き換えが正常に行われたかどうか確認する.さらに、(2)のフェロモン源 定位行動の発現によって、カイコガが人工身体にうまく適応で きていることを示す.

これらの行動を実現するためのシステム構成は, **Fig.5**のようになる.

Fig.5の点線で囲まれた Measuring system 部分は,ハード ウエアとして実装する部分である.この部分によって,カイコ ガの脳で生成された行動指令を含む神経信号をガラス吸引電極 (Glass suction electrodes)により吸引計測し,フィルタおよ び計装アンプによって十分に増幅する.

Fig.5の点線で囲まれた Internal processing 部分は、ロボットに搭載されたマイクロコントローラのソフトウエアとして実装する部分である.この部分は、Measuring system から入力された神経信号から、神経信号に含まれるスパイクを検出、計数し、その情報から行動指令を抽出し再構成する.それに基づいてロボットのアクチュエータを制御することによって、ロボットの行動としてカイコガの行動を再現する.

以下では、脳-機械融合系の各要素をハードウエアとソフトウ エアの面にそれぞれ分けて説明する.

3. 脳-機械融合系の人工身体構成

3.1 カイコガの行動指令に関する神経系

構築する脳-機械融合系のハードウエア構成は,カイコガの脳 から神経信号を計測する神経信号計測系,カイコガの行動を実 現する行動出力系からなる.

昆虫は一般に、頭部、胸部、腹部からなり、各部に神経細胞の 塊である神経節が存在する。その神経節がおのおのに対応する 体節を制御している. Fig.6 にカイコガの神経標本を示す。行 動指令は主に頭部の神経節である脳(Brain)で生成され、腹髄 神経索(Ventral nerve cord)と呼ばれる太い神経束を通り胸 部神経節(Thoracic ganglion)やほかの神経節に入力される。 胸部神経節で翅や脚の実際の動きに変換され、羽ばたきや歩容 として行動に反映される。







Fig. 6 Central nervous system of the silkworm moth

本研究では,脳からのみの行動指令を計測するために,胸部 神経節に入力される前の神経信号を計測する.しかし,縦連合 は数百本の神経からなる太い束であり,多数の神経信号が流れ ている.そのなかから行動指令を伝達する神経のみを分けて計 測するのは非常に困難である.

一方,カイコガは,その解剖学的知見より頸を動かす筋肉に 接続される5本の神経からなる神経束,2nd CNb に直接行動 指令が投射していることが分かっており,そこから行動指令を 計測することができる[17].

そこで, 2nd CNb を計測対象に選び, 脳による行動指令とす ることとした.

3.2 神経信号計測系

本節では、2nd CNb の神経信号を計測するための計測系について述べる。神経信号計測系は、

●カイコガ頭部

● 2nd CNb を吸引計測するガラス吸引電極

ガラス吸引電極からの信号を増幅するアンプ

からなる.

計測に用いるカイコガは以下のように準備する. 解剖には4°C に約 30 分間保つことで麻酔したカイコガを用い, 神経計測の 妨げにならないよう腹, 翅, 脚を取り除く. カイコガを仰向け に解剖台に固定し, 頸部から 2nd CNb を露出させる. 露出部 に生理食塩水を与え, 電解液および乾燥防止とする. こうする ことで 2nd CNb から数時間以上にわたる正常な神経活動値の 計測が行うことができる. なお, 腹部側から解剖する都合によ り, カイコガは仰向けの状態で解剖台に固定することになるが, フェロモンに対する応答および行動は, 向きによる変化は見ら







Fig. 8 Neural activities recorded from 2^{nd} CNb. Five different neural activities are recorded with different amplitudes

れないという観察結果から、問題ないと判断した.

細胞外の神経活動の計測に用いる電極には、フック電極やガ ラス吸引電極などいくつか種類がある。そのうちの一つ、ガラス 吸引電極は安定した計測が行え、さらに神経束を吸引するため 振動に強いのが特徴である。ここではその利点に注目し、Fig.7 のように 2nd CNb をガラス吸引電極により吸引計測する方法 を採用した.一方、ガラス吸引電極は出力抵抗が大きいため、神 経信号を増幅するアンプには入力抵抗の大きな計装アンプを必 要とする.

微小な神経信号をロボット上のマイクロコントローラで扱える 電圧にまで増幅するために、神経計測用の計装アンプを以下の仕 様を満たすように設計製作した.計測対象の神経信号は **Fig.8** に示すような振幅が数 [μ V],主な周波数成分が数 [kHz] である スパイク状の微小な信号である.ガラス吸引電極の出力抵抗は 数 [MΩ] であり、計装アンプの入力抵抗はそれより十分大きく なくてはならない.入力抵抗を大きく設計すると、空気中の電 磁波などの影響を強く受けるため、シールドを施す. さらに、信 号以外のノイズ成分を取り除くバンドパスフィルタを設置する.

試作を繰り返し,最終的に実験に用いる計装アンプは,入力抵 抗 100 [MΩ],増幅率は最大 80 [dB]の可変,150 [Hz]~3.2 [kHz] の通過域になるように設計した. それらをアルミパンチ板によ るシールドボックスに収め,電磁波の影響を遮断した.これに より神経信号を十分な S/N 比で増幅でき,生理計測一般に用 いられる,生体電気用アンプ(AB-651J,日本光電,入力抵抗 500 [MΩ],最大ゲイン 80 [dB],通過域 150 [Hz]~3 [kHz])と 比較して十分な性能があることを確認した.

3.3 行動出力系

カイコガの人工身体としての行動出力系は,カイコガの自然 な動きが再現できる必要がある一方,できるだけ単純で制御し やすいものがよい.

カイコガは,二次元平面に置かれ,フェロモン刺激を受けた 場合,真横や後方に移動することは原則ないことが分かってい る.そこで,この運動をもっとも簡単に実現できる人工身体と して,差動二輪車を採用した.

この目的に照らし、人工身体のベースとして、移動機構に差動二輪車モデルを採用し、神経信号を計測および後述の行動変換則を実行するのに十分な計算能力をもった CPU を搭載している市販の小型実験ロボットシステム、e-puck [18] を採用した.

製品としての e-puck が持つタイヤでは十分なグリップ力が 得られないため、グリップ力の高い直径 50 [mm] のゴムタイヤ に交換した.それにより十分な駆動力を得られることを、別途 予備実験で確認した.

3.4 人工身体の全体構成

神経計測系と行動出力系とを統合し, 脳-機械融合系を構築 した.構築した脳-機械融合系は, 全長約 110 [mm], 全幅約 110 [mm], 全高約 50 [mm] (突起部を除く) で, **Fig.9** にその 外観を示す.

解剖台上のカイコガ頭部がロボットによる気流の乱れの影響 を受けにくいようにロボット前面に、また、床からの高さを実 物のカイコガに近い高さ(5[mm])になるよう台を作製し設置 した、Fig.9において、破線に囲まれた Chamber と記された



Fig. 9 Complete view of the brain-machine hybrid system

部分がそれに相当する.これにより前面からくるフェロモンを カイコガ同様に検出できるようになった.

行動出力系上でガラス吸引電極を用いて神経計測を行うため には、ガラス微小電極を保持し神経束へと操作する微小作業用 のマニピュレータが必要である. Fig.9 において Manipulators と示された部分がそれに相当する. ロボットの移動による振動 の影響を受けにくいように、重量の小さな小型のマニピュレー タ (US-3F, ナリシゲ) 左右一対をロボットに固定した.

Fig.9において、白い破線で囲まれた Amplifier board と記 された部分が作製した神経計測用のアンプである.そのアンプを 接続基板を介して e-puck に接続し、e-puck に搭載された CPU に増幅した神経信号を入力できるようにした.

なお, 画像処理によって走行軌跡を得るため, 車軸上には LED によるマーカをつけた. マーカは, Fig.9の LED で示す位置 につけた.

以上,本章で検討してきた構成要素を接続し,脳-機械融合系のハードウエアを構築した.

4. 神経活動から人工身体駆動指令への変換則

4.1 行動変換則の導出方法

前述のとおり解剖学的な知見により,脳で生成された行動指 令が頸運動神経である 2nd CNb に投射していることが分かっ ている.しかし,行動指令を含む神経信号が胸部神経節でどの ように行動に変換されているかは明らかにされておらず,同様 に 2nd CNb を流れる神経信号がどのような信号処理を経て行 動に結びつくのか明らかにはされていない.そのため,本研究 の目的とするカイコガの行動再現のためには,神経信号から行 動への変換則の導出が必須である.カイコガを歩行させながら, 同時に神経信号を計測できれば対応関係を調べることが可能で あると考えられるが,解剖技術面および計測技術面において困 難であるため,直接的な対応関係を導くかわりに,間接的に対 応関係を推定することとした.

定型行動中のカイコガの動きを各体節の動きに注目して観察 すると、Zigzag, Loop に合わせて、頸の曲げが同期して発現 するのが確認できる [19]. そこで、本論文では、これらの知見 を統合し、神経活動から頸の曲げを推定、頸の曲げから行動を 推定する、2 段階の変換によって行動変換則を導出する.

まず、フェロモン刺激によって解発される頸の動きとカイコ ガの歩行運動との対応関係を導く.

次に, 頸運動神経の解剖学的な接続情報と, 神経信号の意味 から神経信号によって実現される頸の動きを推定する.

最後に,導出されたカイコガの動きを人工身体の動きに変換 する変換則を導き,神経活動から人工身体駆動指令への変換則 とする.

4.2 頸運動と身体行動との対応関係

フェロモン刺激を受けたカイコガは, 頸を振りながら, Zigzag, Loopの定型行動を行う. その際, カイコガの頭軸角度と体軸角 度の変化タイミングが同期することが分かっている [20].

そこで、予備実験として、通常のカイコガにフェロモン単発 刺激を与えた際の頭軸角度 ϕ と、体軸角速度 $\dot{\theta}$ を記録した. **Fig. 10** に示すようにカイコガを1節リンクとみなし、頭軸角



Fig. 10 Body axis and head axis



Fig. 11 Correlation between a head angle (A) and body angular velocity (B). Pheromonal stimulation is given at 0 [s]

度 ϕ および体軸角度 θ を定義する. **Fig. 11**: A に, 実験にお ける頭軸角度 ϕ , B には体軸角速度 $\dot{\theta}$ を示す. いずれも横軸が 経過時間を秒 [s] で示している. 開始 0 秒のときにフェロモン 刺激を与え定型行動を発現させた.

Fig. 11: A によれば、頭軸は刺激直後、区間(a) において左 を向いたあとすぐ右を向き、区間(b) において左を向きなお し、区間(c) において右を向いたままになる。Fig. 11: B の体 軸角速度によれば、同様にそれぞれ対応する枠内において、反 時計回り、時計回り、反時計回り、その後時計回りに回転する、 Zigzag および Loop を示している。頭軸角度 ϕ と体軸角速度 $\dot{\theta}$ の変化タイミングと傾向は枠内で一致する。

以降,正比例の関係があるとみなして以下の式で頭軸角度 ϕ から体軸角速度 $\dot{\theta}$ に変換する.

$$\dot{\theta} = \alpha \phi \tag{1}$$

α は比例定数である.

4.3 頸運動神経の活動と頸運動との対応関係

次に,解剖学的知見に基づき,2nd CNb の神経信号から頸の 動きを推定する.2nd CNb は,5本の運動神経からなり,それ ぞれ頸を横に動かす頸筋を支配するが,本論文ではすべて頸を 曲げる筋肉として区別しない.また,2nd CNb の神経信号は以 下の特徴をもつ.スパイクの振幅は興奮状態によらず神経ごと に一定であり,スパイクの数,すなわち発火頻度のみが興奮状 態に合わせて増減する.以降,発火頻度に注目する.

Fig. 12 に, 解剖したカイコガにフェロモン単発刺激を与え て, 2nd CNb の神経信号を記録したものを示す. 開始 5 秒で, 左の触角にフェロモン刺激を与えた. 上が左の 2nd CNb の発 火パターンで,下が右の発火パターンである. フェロモンを与



Fig. 12 Simultaneous neural activities recorded from a left and right 2^{nd} CNbs. Pheromonal stimulation is indicated by black triangle



Fig. 13 Spike frequency histograms of a left and right 2nd CNbs. Same data as the Fig. 12. Pheromonal stimulation is shown by black triangle

えると,発火頻度が増加し,区間(a)において右の発火頻度が 下がり,区間(b)において左右の発火頻度が入れ替わる.同様 に区間(c)においても入れ替わりが見られる.これが左右の頸 振りに対応していると考えられる.

一定時間ごとの神経信号のスパイクを計数しヒストグラムにす ると、その対応関係はよりはっきりとみることができる。一定時 間(0.1 [s])ごとにスパイクを計数したヒストグラムを Fig. 13 に示す。フェロモンを与えた 5 秒を境にスパイク数は増加し、 区間(a)においては左に、区間(b)においては右、区間(c) においては左と、左右の切り替えがはっきりと分かる。

生物学的知見によると、筋肉はスパイクごとに微小な力を発 生していると考えられる。前述の発火頻度変化と、この仮定を 用いて、微小時間 ΔT の間に n 回スパイクが計数されたとき の頸の筋肉が発するトルク T を、以下の式で定義する。

$$T \triangleq \beta \sum^{\Delta T} n \tag{2}$$

β は比例定数である.

神経信号から頭軸角度を算出するために、以下の仮定が成り 立つとする。筋肉が発する力が頸を傾けるトルクTとし、同時 に頭を正面に保つ頭軸角度 ϕ に比例する力を出す、バネ成分kが働くとする。頭の質量や頸の粘性は十分小さく無視できると する。

一定時間のスパイク数を左右それぞれ n_l , n_r とすると, 式 (2) より,

$$T = \beta(n_l - n_r) \tag{3}$$

(4)

$$k = T$$

より,

$$\phi = \frac{T}{k}$$
(5)
$$= \frac{\beta(n_l - n_r)}{k}$$
(6)

 $k や \beta を現実に求めるのは難しいので、以下のように実験値$ から算出する。頸は一定角度以上に曲がらないので、左右の神 $経スパイク数差の最大値 <math>n_{dmax}$ としてそのときの頭軸角度を ϕ_{max} とすると、

ф

$$\phi = \phi_{max} \frac{n_l - n_r}{n_{dmax}} \tag{7}$$

が得られる.

式 (1) より,

$$\dot{\theta} = \gamma (n_l - n_r) \tag{8}$$

ただし, $\gamma \triangleq \alpha(\phi_{max}/n_{dmax})$ である. これにより, 神経信号 から体軸角速度への変換則が導出できた.

次に、神経信号から前進速度を導く、カイコガはフェロモン 刺激を与えなければ歩行を開始しない一方で、2 [Hz] 以上の頻 度でフェロモン刺激を与えると直線的に歩行する [21]. 同様に、 2nd CNb の活動もフェロモン刺激を与えなければ低い発火頻度 を示すが、2 [Hz] 以上のフェロモン刺激下では最大の発火頻度 を示すことが予備実験で分かっている. また、脳と運動中枢で ある胸部神経節とを結ぶ腹髄神経索の活動と 2nd CNb の活動 を同時計測すると、発火頻度には相関がある [19]. そこで定型 行動中の前進速度と 2nd CNb のスパイク発火頻度には相関が あると考えられる. それに従い、前進速度 v を神経発火頻度か ら以下のように導出する.

$$v = \zeta(n_l + n_r) \tag{9}$$

ただし, $\zeta \triangleq (v_{max}/2n_{max}), v_{max}$ はカイコガの前進速度の最 大値, n_{max} はスパイク発火頻度の最大値である.

以上のように、神経信号からカイコガの行動を導出する.

4.4 カイコガと人工身体との対応関係

カイコガの身体を差動二輪車で置換するにあたって,カイコ ガの移動中心点である胸部と,人工身体の移動中心点である車 軸の中心との動きを一致させるものとする.

Fig. 14 に示すように、再現するカイコガ(以下、仮想カイコ ガと呼ぶ)の体幅を 2r とし、作製した人工身体の車幅を 2R と する. 移動中心点を O とし、その速度を v_o 、角速度を $\dot{\theta}_o$ とす る. 仮想カイコガが作り出す左右の脚の速度をそれぞれ v_l 、 v_r とする. 人工身体による左右の車輪の速度をそれぞれ v_L 、 v_R とする.

移動中心点 O の θ。は、両輪の速度より

$$\dot{\theta_o} = \frac{v_l - v_r}{2r} \tag{10}$$

同様に, v_o は,

$$v_o = \frac{v_l + v_r}{2} \tag{11}$$



Fig. 14 Virtual moth and robot

となる. 仮想カイコガの移動中心点とロボットの移動中心点が 同じ軌跡を描くように、*vL*、*vR*を求めると、

$$v_L = \frac{v_l + v_r}{2} + \frac{R}{r} \frac{v_l - v_r}{2}$$
(12)

$$v_R = \frac{v_l + v_r}{2} - \frac{R}{r} \frac{v_l - v_r}{2}$$
(13)

となる.式(8)(9)(12)(13)より, v_l, v_rを消去すると

$$v_L = \zeta r(n_l + n_r) + \gamma R(n_l - n_r) \tag{14}$$

$$v_R = \zeta r(n_l + n_r) - \gamma R(n_l - n_r) \tag{15}$$

が得られ、神経信号からロボットの速度出力への変換則が得られた.この行動変換則を脳-機械融合系に適用し実験を行う.

5. 脳-機械融合系による行動実験

5.1 行動実験設定

前章までに説明した人工身体に行動変換則を組み込み,その 計算処理を搭載している CPU 上ですべて処理することで,人 工身体以外の要素を一切必要としない完全自律のサイボーグが 実現できた.このシステムを,カイコガのサイボーグであるこ とから,Mothborg と呼称する.本章では,Mothborg がサイ ボーグカイコガとして正常に機能するのか,行動実験によって 検証を行う.

はじめに、神経信号から行動指令へ適切に変換できているか どうかを定型行動の再現性によって論じる.ここでは、フェロ モンの単発刺激を与えてその走行軌跡を確認する.次に、カイ コガの人工身体への適応を調べるために、フェロモン源への定 位行動を観察する.

本節では、行動実験に用いた実験環境と実験に用いた定数に ついて説明する.

カイコガはフェロモン源に定位する際,羽ばたきによって気 流を作り出し余剰なフェロモンを給排気することで定位性能を 向上させていることが知られている [22]. Mothborg に用いる カイコガは,翅を除去しているため,翅に代わる給排気機構が 必要である.そこで,一定の空気の流れを与える風洞を実験環 境に用いた.用いた風洞は,幅 840 [mm],長さ 1800 [mm],高 さ 300 [mm] であり,風速を 0.7 [m/s] に設定した.これにより, フェロモンの適切な給排気が可能になった.

解析に用いる Mothborg の移動軌跡は以下の方法で取得する. 風洞上部にカメラ(30fps, VGA)を設置し、Mothborg の車軸 上にある LED によるマーカを撮影した. 画像処理により移動軌



452

Fig. 15 Trajectory of the mothborg in response to a pulsed pheromonal stimulation. The black star indicates the start point and the white star indicates the end point. The black dot indicates the position of the mothborg at 15 [s] where the mothborg changed its behavior



Fig. 16 Neural signals of a left and right 2nd CNbs recorded from the mothborg while experiment in a wind tunnel. Upper and lower traces are of left and right CNbs respectively. The time scale of the rectangular area shown in A is expanded in B

跡を算出した.また、実験中のカイコガの神経信号は、Mothborg のアンプから有線によって引き出し、PC で記録した.

実験に用いた定数を以下に示す.本論文では、あらかじめ予備 実験としてフェロモン単発刺激によるカイコガの行動を記録し た.その値からカイコガの前進最大速度 $v_{max} = 32.8 \, [\text{mm/s}]$, 最大回転速度 $\dot{\theta} = 1 \, [\text{rad/s}]$ とし、式(8)より定数 γ を導い た.また、移動中心点を Mothborg の車軸間の中心とした.

この実験環境および定数を用いて、2種の行動実験を行った.

5.2 フェロモン単発刺激による定型行動発現

Mothborg がカイコガの神経信号から行動指令を正しく抽出 し実行できるか確認した. Mothborg にフェロモン単発刺激を 与えた際の移動軌跡の一例を **Fig. 15** に示す. Mothborg を風 洞の下流, 図中の位置(0,0)に設置し,実験開始と同時に触 角にフェロモンのパフ刺激を与えた. 風洞の風は, Fig. 15 の太 い矢印方向に流れる.

Mothborg はフェロモンを与えた直後から風上に向かって激 しく左右の回転を繰り返しながら前進し,(100,30)地点でそ の場回転をした.これはそれぞれ定型行動の,Zigzag, Loopに 相当する.

Fig. 16 に神経信号を, Fig. 17 にそのヒストグラムをそれ



Fig. 17 Spike frequency histogram of 2^{nd} CNbs. Upper and lower histograms are of left and right CNbs respectively. Same data as Fig. 16



Fig. 18 Differences in spike frequency between the left and right CNbs. When the value is in positive the mothborg turns to right. While the value is in negative, the mothborg turns to left. Same data as Fig. 16



Fig. 19 Angular velocity of mothborg. The area whose value is positive means that the mothborg turns counterclockwise. Same data as Fig. 16

ぞれ示す. Fig. 16: A を見ると,実験を通して神経信号のスパ イクが計測できていることが分かる. Fig. 16: B は Fig. 16: A の一部 (5.0 [s]~5.1 [s])を拡大したもので,スパイクが無い部 分の電圧が一定でスパイクに対して明確なノイズも重畳してい ないことが分かる.

これは,激しく回転移動しているにもかかわらず,移動に伴う振動やモータからのノイズの重畳がみられないことを示している.

続いて, Fig. 17 をみると, 左右の発火頻度に定常的な差はみ られず, 左右ともに 5 [spikes/0.1s] 前後と同程度のスパイク発 火頻度を示している.

このことは、神経計測がほぼ左右均等に実現できていること を示している。

ここで, 左右のヒストグラムの差を **Fig. 18** に, そのときの Mothborg の回転角速度を **Fig. 19** に示す.

Fig. 18 をみると実験開始 0 [s] から 15 [s] まで,発火頻度が 左が多い領域と,右が多い領域とが入れ替わる様子が見られる. 同様に, Fig. 19 において, Mothborg の回転角速度も左右が入 れ替わる様子がみられ, Fig. 11: B に照らし合わせると,0~ 15 [s] が Zigzag の発現といえる. これは,移動軌跡 (Fig. 15) の (0,0) から (100,30) に対応している.



Fig. 20 Trajectory of the mothborg in a wind tunnel. The black line indicates the trajectory of the mothborg. The black star indicates the start point and the white star indicates the end point. The black triangle represents the location of the pheromone source

15 [s] 以降は Fig. 18 をみると左の発火頻度が右の発火頻度を 上回った状態を維持していることが分かる.また, Fig. 19 も, 反時計回りに持続的に回転していることを示している.これは, Loop に移行したことを示しており,移動軌跡の(100, 30)以 降の Loop と矢印で示した螺旋部分に対応している.

これらの結果より、フェロモン単発刺激によって、カイコガ の定型行動の実現ができたことを確認した.

このことにより,脳-機械融合系の実現に必要な以下の3点の 性能が検証できた.

(1) 移動するロボット上での、神経信号の持続的で安定した計測

(2) 搭載している CPU による,計測した神経信号から行動指 令のリアルタイム抽出

(3) 抽出した行動指令からロボットの行動出力の再構築 次に、匂い源定位実験を行う.

5.3 フェロモン源定位実験

前節では、フェロモン単発刺激による定型行動の発現を確認 した.実験を通じて安定した神経計測ができること、また神経 信号を適切に行動指令に変換できることを示した.

本節では、カイコガの適応行動の普遍性を調べる.具体的に はフェロモン源探索問題において、Mothborg 化における身体 構造の変化と、胸部神経節など行動に重要な神経節を取り除い たことによるフェロモン源定位行動への影響を調べる.

フェロモン源定位実験において 14 個体での試行中 9 個体で フェロモン源への定位が得られた.そのうちの典型的な一例の軌 跡を Fig. 20 に示す. Fig. 20 において,風洞の下流,位置(0, 0) に Mothborg を設置し,そこから 600 [mm] 上流の(600, 0) にフェロモンをしみ込ませたろ紙を設置し,フェロモン源と した.フェロモン源の半径 100 [mm] 以内に Mothborg のカイ コガ頭部部分が入ったときをフェロモン源定位とした.風洞の 風は, Fig. 20 の太い矢印方向に流れる.

Fig. 20 の定位例では, Mothborg はフェロモン源の風下から 風上へ直線状に向かい,フェロモン源に定位した.

風の流れからフェロモンは風下に幅を持った帯状に流れてい ると推測される.この定位例に示すような、カイコガ頭部がフェ ロモンの風下から逸れることのない条件では、フェロモン源から のフェロモン刺激が絶えずカイコガに供給されていると考えら れる.そのため定型行動のうち、振幅の大きい Zigzag や Loop の発現には至らずに, Surge や小幅の Zigzag の発現を繰り返 し, その結果, 直線状の軌跡を辿ったと考えられる.

今回の実験は,非常に限定された条件の下で行われたもので あるが,高い確率での定位がみられた.

今後さらに様々な匂い環境において定位実験を行う必要があ るが、本システムがカイコガの人工身体としてカイコガの行動 を再現できる十分な性能をもっていると考えられる.

6. おわりに

本研究では、カイコガの身体を人工物に置き換え、完全自律 なサイボーグ、Mothborg を構築し、それによるフェロモン源 探索行動を達成した。

また、適応能が必要なフェロモン源定位実験により、カイコ ガが人工身体に適応し、適応能が Mothborg においても発揮で きることを示した.これらの行動実験結果により、本論文の実 験においては、脚を車輪に置き換えたことによる行動に対する 影響は十分小さいと考えられる.

最後に, 脳-機械融合系を用いることによって, フェロモン源 探索における適応能について, 2 点の示唆が得られた.

1 点目は、半数以上の個体でフェロモン源に定位できたこと から、カイコガの脳は、胸部神経節など他の神経節からの情報 や身体からの体性感覚などのフィードバックが無くても CPT 問題を解決できることが示唆される.

2 点目は、Zigzag, Loop が Mothborg においても依然とし て発現し、その結果としてフェロモン源に定位できていること から、機械によって身体を置き換えても、CPT 問題解決法とし てカイコガのフェロモン源探索戦略は有効であることが示唆さ れる.

今後, Mothborg の移動速度の変更や左右の移動速度を不均 等に設定するなど,身体性を動的に変更することで,脚と車輪 との違いによる行動の変化や,これらの示唆に対する検証を行 い,脳の身体性の獲得過程,適応過程の解明に寄与する.

謝 辞 本研究において, Haupt Stephan Shuichi 氏 (東京 大学先端科学技術センター) には様々な助言をいただき, 頭軸 角度と体軸角速度の同時計測には, 同氏製作の実験装置を使わ せていただいた. また, この研究の一部は, 科学研究費補助金 17075007 および 09J01188 の支援を受けた.

参考文献

- [1] 経済産業省:ロボット分野に関するアカデミック・ロードマップ, 2008.
- [2] 神崎, 倉林: "生体-機械融合システムによる生物の環境適応能の理解 と構築", 計測と制御, vol.46, no.12, pp.76-81, 2007.
- [3] 鳥井原,峯岸,倉林,神崎:"脳-機械融合システムを用いた昆虫適応 能の評価",第19回自律分散システムシンポジウム予稿集,2007.
- [4] K.K. Kwong et al.: "Dynamic magnetic-resonance-imaging of human brain activity during primary sensory stimulation," Proc. Natl. Acad. Sci. USA, vol.89, no.12, pp.5675–5679, 1992.
- [5] R. Cabeza and L. Nyberg: "Imaging cognition II: an empirical review of 275 PET and fMRI studies," J. of cognitive neuroscience, vol.12, no.1, pp.1–47, 2000.
- [6] J.R. Wolpaw, N. Birbaumer, D.J. McFarland, G. Pfutscheller and T.M. Vaughan: "Brain-computer interfaces for communication and control," Clinical neurophysiology, vol.113, no.6, pp.767-791, 2002.

- [7] J.K. Chapin, K.A. Moxon, R.S. Markowitz and M.A.L. Nicolelis: "Real-time control of a robot arm using simultaneously recorded neurons in the motor cortex," Nature neuroscience, vol.2, no.7, pp.664-670, 1999.
- [8] B.D. Reger, K.M. Fleming, V. Sanguineti, S. Alford and F.A. Mussa-lvaldi: "Connecting brains to robots: an artificial body for studying the computational properties of neural tissues," Artificial Life, vol.6, no.4, pp.307–324, 2000.
- [9] M. Kositsky, A. Karniel, S. Alford, K.M. Fleming and F.A. Mussa-Valdi: "Dynamical dimension of a hybrid neurorobotic system," IEEE Trans. neural system and rehabilitation engineering, vol.11, no.2, pp.155–159, 2003.
- [10] 長澤: "工学的再構成による昆虫の嗅覚情報処理モデルの評価",博士 論文,東京大学,2001.
- [11] 神崎: "昆虫の環境適応行動の発現機構", 計測と制御, vol.44, no.9, pp.615-620, 2005.
- [12] Y. Obara: "Bombyx mori mating dance: an essential in locating the female," Applied Entomology and Zoology, vol.14, no.1, pp.130-132, 1979.
- [13] R. Kanzaki, N. Sugi and T. Shibuya: "Self-generated zigzag turning of *Bombyx mori* males during pheromone-mediated upwind walking," Zoological science, vol.9, no.3, pp.515–527, 1992.
- [14] J.A. Farrell, S. Pang and W. Li: "Chemical plume tracing via an autonomous underwater vehicle," IEEE J. of Oceanic Engineering, vol.30, no.2, pp.428-442, 2005.
- [15] W. Naeem, R. Sutton and J. Chudley: "Chemical plume trac-



高嶋 淳(Atsushi Takashima)

2005年東京工業大学大学院理工学研究科修士課程 修了.現在同博士課程に在籍.自律分散システム, 生物機械融合システム等の研究に従事.計測自動制 御学会の学生会員.(日本ロボット学会学生会員)



倉林大輔(Daisuke Kurabayashi)

1998年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了. 同年より理化学研究所基礎科学特別研究員.2001 年より東京工業大学大学院理工学研究科講師.2003 年より同助教授(現准教授).自律分散システム,生 物規範型情報処理システム等の研究に従事.博士 (工学).日本機械学会,精密工学会,計測自動制御 会員. (日本ロボット学会正会員)

学会, IEEE 等の会員.

ing and odour source localisation by autonomous vehicles," J. of Navigation, vol.60, no.2, pp.173–190, 2007.

- [16] L. Gatellier, T. Nagao and R. Kanzaki: "Serotonin modifies the sensitivity of the male silkmoth to pheromone," J. Experimental Biology, vol.204, no.14, pp.2487–2496, 2004.
- [17] S. Wada and R. Kanzaki: "Neural control mechanisms of the pheromone-triggered programmed behavior in male silkmoths revealed by double-labeling of descending interneurons and a motor neuron," J. of comparative neurology, vol.484, no.2, pp.168–182, 2005.
- [18] e-puck education robot HP: http://www.e-puck.org/
- [19] R. Kanzaki and T. Mishima: "Pheromone-triggered 'flipflopping' neural signals correlate with activities of neck motor neurons of a male moth, *Bombyx mori*," Zoological science, vol.13, no.1, pp.79–87, 1996.
- [20] T. Mishima and R. Kanzaki: "Coordination of flipflopping neural signals and head turning during pheromone-mediated walking in a male silkworm moth *Bombyx mori*," J. of Comparative Physiology A, vol.183, no.3, pp.273–282, 1998.
- [21] R. Kanzaki, N. Sugi and T. Shibuya: "Self-generated zigzag turning of *Bombyx mori* males during pheromone-mediated upwind walking," J. of Zoological SCIENCE, vol.9, no.3, pp.515– 527, 1992.
- [22] M. Sakuma: "Virtual reality experiments on a digital servosphere: guiding male silkworm moths to a virtual odour source," Computers and Electronics in Agriculture, vol.35, no.2–3, pp.243–254, 2002.



峯岸 諒 (Ryo Minegishi)

2009 年筑波大学大学院生命環境科学研究科博士前 期課程生物科学専攻修了.現在,東京大学工学系研 究科先端学際工学専攻に在籍.2009 年 4 月より日 本学術振興会特別研究員(DC1).神経行動学,生 物機械融合システム等の研究に従事.日本動物学 会,日本比較生理生化学会,計測自動制御学会の学

生会員.



神崎亮平(Ryohei Kanzaki)

1986年筑波大学大学院生物科学研究科修了.1987 年アリゾナ大学神経生物学研究所博士研究員.1991 年筑波大学生物科学系助手,講師,助教授を経て, 2003年同教授.2004年東京大学大学院情報理工学 系研究科知能機械情報学専攻教授.2006年より東 京大学先端科学技術研究センター生命知能システム

分野教授. 昆虫のセンサ・脳・運動システムをモデルに生物学的マル チスケール分析(遺伝子,ニューロン,神経回路,行動と異なる階層 での分析)を用いたアプローチと,情報学・工学による構成論的アプ ローチにより,それを理解し,活用する研究に従事.博士(理学). 国 際神経行動学会,日本動物学会,日本比較生理生化学会(評議員,副 会長)等会員.