

昆虫サイborgの生体情報解析に向けた2次元・3次元神経マップの構築

機械工学専攻 機械工学コース
森島研究室 山本 康太郎

1. 研究背景

昆虫サイborgは昆虫と機械を融合させたハイブリッドロボットである(Fig.1)。生きた昆虫の背側に電子バックパックを取り付け、感覚器官を刺激することで行動を制御する。昆虫サイborgの研究方針は「昆虫の持つ優れたセンシング能力、自律判断能力、運動能力といった昆虫要素と機械知能を統合することで、昆虫要素と機械要素の相乗的な能力向上を実現する」ことにある。しかし、従来研究は探索救助ロボットとしての性能向上に偏重しており、昆虫の運動能力のみを用いていた。近年、生物の振る舞いを考慮した制御則設計がなされているものの、生体センサ情報や自律判断情報を直接取得できていない。本研究は生体情報の1つである神経信号に着目し、神経信号から昆虫のセンサー情報、情報処理プロセスを読み解き、それらを活用した制御則の設計を目的とする。



Fig.1 Cyborg Insect

2. 原理

本研究ではマダガスカルゴキブリを用いる。昆虫サイborgの制御原理は電気刺激による逃避行動の誘発に基づく。触角と、尾葉と呼ばれる腹部後端の感覚器官に刺激用電極を挿入し、電子バックパックから電圧を印加する。電気刺激を受けた昆虫は刺激箇所から逃避するように行動する。例えば、左触覚を刺激すると右旋回を行う。この逃避行動を利用して行動制御を行う。

昆虫サイborgの計測原理は中枢神経系の局所電圧の計測に基づく。昆虫の中枢神経系には巨大介在ニューロンが存在し、脳から腹部神経後端まで投射している。食道下神経節(頸部)に電極を挿入し、アンプと接続し計測する。Fig.2に電気刺激時の昆虫サイborgの生体信号データの一例を示す。電気刺激箇所は右触角、計測箇所は食道下神経節である。上から個体A, B, Cのデータであり、縦軸は信号強度、横軸は時間である。青線は未処理データ、赤線は波形データをヒルベルト変換し、移動平均フィルターをかけた平滑化信号振幅包絡線である。個体A, Bでは電気刺激時の信号振幅が0.75程度出のに対し、個体Cでは1.0に到達する。また、個体によって電気刺激時以外のノイズ強度が異なる。電気刺激時のバックパック電源による待機電圧によるノイズであると考えられるが、個体B, Cに比べ、個体Aはノイズが小さい。電気刺激前後の1[s]の信号発火数[Hz]を計測すると、個体B, Cでは40Hz~60Hzであるのに対し、個体Aでは20Hz前後である。先行研究[6]と比較すると個体Aは神経信号ではない可能性が高い。図2で計測

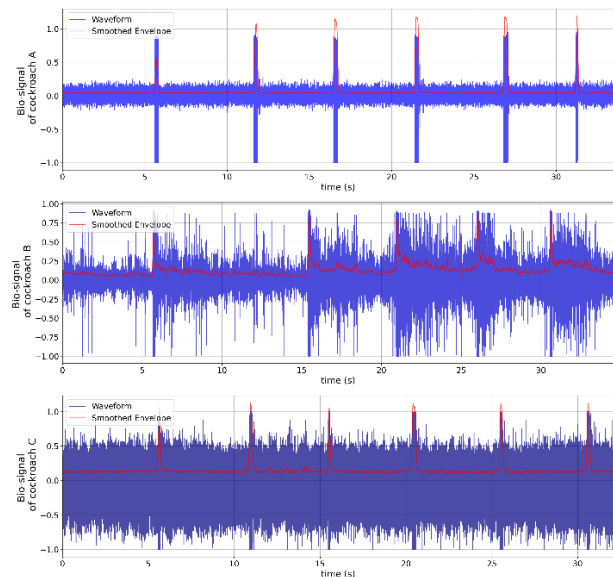


Fig.2 Bio-signal in Electrical Stimulation

した生体データには神経信号，大顎の内転筋，外転筋の筋電位，バックパックの待機電圧による入力混在しており，電極挿入精度が低いことにより神経信号のみを特定して抽出することが困難である。

3. 修士論文：神経マップの構築

修士研究では電極挿入精度の向上のため，神経の可視化，もとい神経マップの構築に取り組んだ。

解剖により神経を露出させ，中枢神経系の特定，神経節-神経索間の距離を計測する。全長を1として各距離を正規化することで2次元マップを得る。

解剖では深さ方向の計測が困難である。よって，X線顕微鏡を用いてマダガスカルゴキブリの断層画像を取得し，深さ方向を含めた3次元神経マップの構築を試みる。マダガスカルゴキブリを細胞固定液(1%グルタルアルデヒド)，エタノール(30%，50%，70%，99%)，ヨウ素溶液に浸漬し，観察が容易になるよう

前処理を行う。X線顕微鏡(InspeXio SMX-100CT)撮影は神戸大学理学研究科青沼研究室の協力のもと行われた。解析ソフトの3次元多断面再構成(3D MPR)機能と解剖データとの比較から中枢神経を特定する。セグメンテーション機能を用いて神経領域を抽出し，3Dモデルを作成する。

作成した3DモデルをFig.4に示す。黄土色部分は自動閾値設定(閾値 36063~65535)により抽出された外骨格及び内臓群，緑色部分(WL値 49401，WW値 30925，閾値 26239~65535)は自ら抽出した神経である。腹部外骨格直上に神経系が通っているのが確認できる。これにより，神経の深さ方向の計測が可能となる(Fig.4(b))。一方，画像データは腹部中間から途切れており，胸部神経節及び腹部第三神経節まで抽出している。また，頭部と重なっていたために食道下神経節は特定できない。神経節-神経索は透過率が他の組織と大きな差がなく，特定できなかった箇所は断線している。今後，前処理工程を改善し，サンプル数を増やすことで高精度な3次元マップの構築が見込まれる。

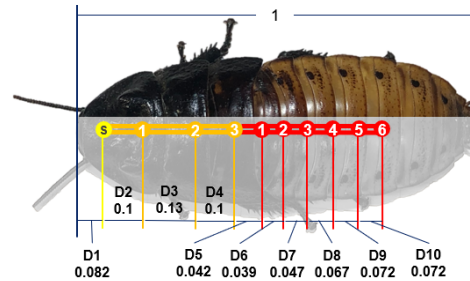


Fig.3 Construction of 2D map by anatomy

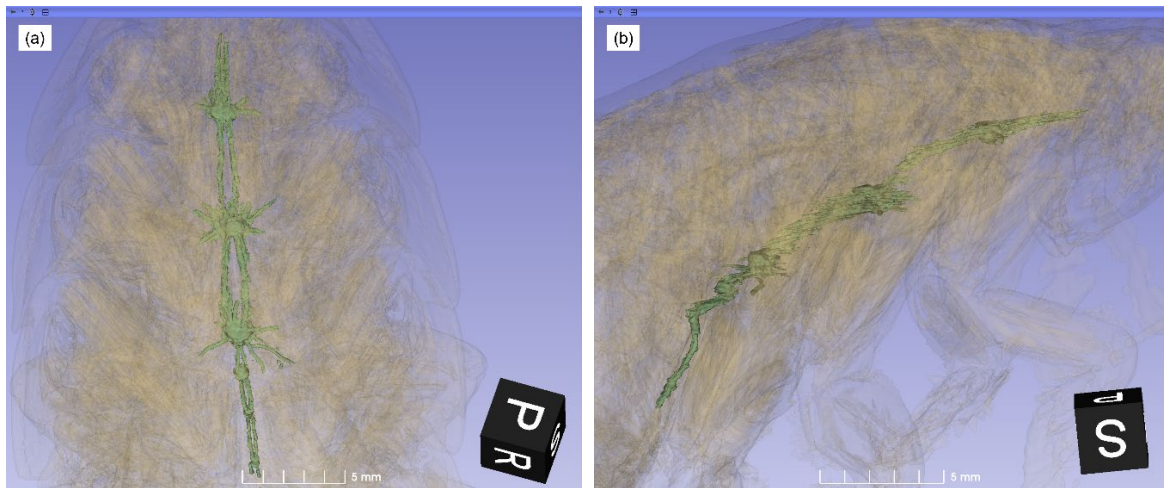


Fig.4 Construction of 3D map by X-ray imaging, (a)top view, (b)side view

4. 今後の展望

修士論文で構築した3Dマップは正規化が行われておらず個体差が考慮されていない。今後，サンプル数を増やして正規化を行う必要がある。有意な神経信号の取得には，構築した神経マップによる電極挿入精度の改善に加え，電極デザイン，電極固定法の改善が求められる。今後，前述した課題に加え，本研究の目標である神経信号を用いた制御則設計に向けて，神経計測回路のバックパック化，機械学習による神経信号パターン分類，それに基づく制御則の構築に取り組む。