

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 長澤 純人

本論文は「工学的再構成による昆虫の嗅覚情報処理モデルの評価」と題し、5章から構成される。本論文の目的は、カイコガの嗅覚情報処理系を生物学・生理学的知見に基づいてモデル化し、工学的システムとして再構成することで、その評価を行うことである。

本論文ではカイコガ(*Bombyx mori*)の雄が行う定位行動(性フェロモンを検知して雌の場所まで定位する行動)を対象とし、触角によりフェロモン刺激を検知してから一連の定位行動が発現するまでの嗅覚情報処理系をモデル化した。従来、生物の感覚情報処理系のモデルは、神経の細胞内記録やその構造解析などの生物学的解析手法によって立てられている。その立証には一般に対象となる生物が用いられるが、生物は様々な感覚受容系を持つため、どの感覚受容によって応答や行動が発現したのかを厳密に論じるのは困難である。これに対し、工学的システムとしてそのモデルを再構成することで、対象とする感覚情報処理だけを純粹に考察できる。本論文では、このような工学的再構成を用いた感覚情報処理系のモデル評価の一例として、カイコガの嗅覚情報処理系を生物学的知見に基づいてモデル化し、ロボットに組み込んでその妥当性を検証した。これにより工学的再構成による感覚情報処理系のモデル評価手法の有効性を示した。特にフェロモン場のような数式での記述が困難な実環境では、本手法は有用である。

第1章「序論」では、研究の目的、背景を述べた後、目的達成のためには、1. フェロモン刺激の検知、2. 定位行動パターンの生成モデルの構築、3. モデルの評価手法の確立、4. 実機へのモデルの組み込み・評価、という各フェーズを行う必要があることを述べた。

第2章「嗅覚情報処理モデル」では、フェロモン刺激検知から定位行動パターンの発現までの一連の嗅覚情報処理系を、「触角電位モデル」と「定位行動発現モデル」の2つに分けてそれぞれモデル構築を行った。「触角電位モデル」では、フェロモン刺激の検知に用いている触角電位の発生機構を考察し、フェロモン刺激強度と触角電位振幅の関係、触角電位の時間波形をモデル化した。時間波形モデルによりフェロモン刺激の検出精度を向上させ、触角電位振幅からフェロモン刺激強度の類推が可能であることを示した。また「定位行動発現モデル」では、生物学的知見に基づいて定位行動パターンを実際に生成するダイナミクス・モデルを構築した。数百msの一過性のフェロモン刺激によって数十秒も持続する定位行動を発現させるために、本モデルでは神経修飾物質を考慮することで長期応答を生成させており、定位行動パターンの

基本となる「Flip-Flop」と「Reset」機能を自然な解釈で実現したモデルになっている。

第3章「モデル評価手法」では、第2章で構築したモデルに関して客観的な評価を行うための手法を検討した。本論文では同一環境中でカイコガが行った行動と、組み込んだモデルによってロボットが発現した行動を、統計的手法を用いて比較解析を行った。まず風洞を用いた同一環境の整備を行い、この同一環境が昆虫とロボットに行動発現を起こさせるのに十分な性能を持つことを確認した。また、トラッキング・ボールを用いた行動計測装置を用いてカイコガの行動を計測し、その統計量から各行動要素の統計的特徴が判別可能であることを示した。

第4章「実機による実験と評価」では、構築されたモデルを小型移動ロボットにインプリメントし、第3章で検討した同一環境内で行動を発現させた。ロボットは周囲のフェロモン場を極力カイコガと同一にするために、カイコガと同サイズまで小型化した。特にフェロモン刺激を検出するのに用いている触角は、ロボットに取り付けられた状態で、カイコガの触角と同じ幅・高さになるように設計した。ロボットにモデルを組み込む際の技術的問題を解決しつつ、同一環境内でのロボットの行動発現に成功した。更にロボットは15 cmほど離れた位置から定位行動を発現しながらフェロモン源まで到達することに成功し、構築したモデルが実環境においてフェロモン源定位の機能を有することが確認された。このときのロボットの行動とカイコガの行動を統計的手法で比較解析し、モデルの問題点も明らかにした。

第5章「結論」では、本研究で得られた結果を述べた。生物学的知見に基づいて構築された感覚情報処理系のモデル評価手法として、モデルをロボット・システムとして工学的再構成し、実際の生物と統計的に比較解析することでモデル評価を行う手法を提案した。その一例としてカイコガの嗅覚情報処理系を扱った。構築したモデルを組み込んだロボットは実際のフェロモン場で定位行動を発現し、フェロモン源まで定位・到達することに成功した。このときの行動記録から、構築したモデルの評価を行い、モデルの妥当性と問題点を明らかにし、このモデル評価手法の有効性を示した。本研究のように工学的システムを生物学的モデルの評価手法として利用することは新しい試みであり、ロボット・システムのアプリケーションとしても独創的な研究といえる。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。