

審査の結果の要旨

氏名 河野 プーンサーブ

生物は、嗅覚と視覚を統合することで効率良く匂い源探索を行っている。一方、視覚情報の統合の効果は、生物の状態に依存することが近年報告されており、状況に応じた複数感覚の使い方の解明が待たれている。本論文では、昆虫（カイコガ）をモデルとして、匂い源探索行動における視覚情報統合の役割を行動学的に明らかにするとともに、その神経基盤を神経解剖学的手法により解析している。そして、視覚情報の統合過程が、匂い源探索の行動状態に依存して異なることを明らかにするとともに、解剖学的知見をもとにその神経メカニズムについて、回路モデルを提案している。さらに、実験結果に基づき行動モデルを提案し、その匂い源探索性能をシミュレーションで評価している。

第一章の序論では、まず匂い源探索の社会的需要から始まり、ロボットによる匂い源探索の先行研究について、生物模倣によるアプローチを中心に概説する。次に生物の匂い源探索の先行研究から、視覚情報統合の有効性を論じ、本研究のテーマである状態依存的な感覚統合について問題提起を行う。モデル動物のカイコガの嗅覚系の知見について概説した後、本研究の目的、意義を述べ、最後に本論文の構成が記されている。

第二章では本論文を読むうえで必要な情報が、先行研究をもとにまとめられている。匂い源探索行動、複数感覚統合、状態依存的な嗅覚視覚統合、昆虫脳の構造と機能、モデル動物のカイコガ匂い源探索行動の神経基盤、そして生物模倣の匂い源探索行動アルゴリズムについて、過去から最新の知見まで網羅的に述べられている。

第三章では、背景の流れ(オプティックフロー)という視覚情報が、匂い源探索行動を構成する直進歩行(サージ)およびジグザグ歩行という2つの行動状態それぞれに、どのような影響を与えるかを行動学的に解析している。球状トレッドミルによる歩行計測と、開ループ・閉ループのオプティックフロー刺激を組み合わせた実験系により、匂い受容時のサージでは視運動反応による角速度の調節が起こる一方で、ジグザグ歩行では閉ループ実験下でターン持続時間が調節されることを報告している。

第四章では、第三章で報告した匂い源定位行動における状態依存的な視覚情報の統合機構の神経基盤を明らかにするため、カイコガ脳内における視覚情報の投射経路を、神

経解剖学的に解析している。視覚の一次中枢である視葉から蛍光色素を導入することで、視覚情報は複数の経路を通り、匂い源探索行動発現に関わる脳内の機能構造へ投射することを明らかにしている。そして、これらの知見と、先行研究で報告されている他の昆虫種に関する知見を総合し、行動実験で明らかになった状態依存的な視覚情報の統合の神経基盤を説明するモデルを提案している。

第五章では、第三章の行動学的知見をもとに、行動状態依存的に視覚を統合した匂い源探索行動モデルを作成し、片側への旋回バイアスを与えた摂動のある条件での匂い源探索性能をシミュレーションで検証している。この結果、行動実験と同じくサージ時のみ視運動反応を行うモデルが、与えられたバイアスを補償し匂い源に定位できることを示している。さらに、先行研究で報告されている左右の匂い濃度差に基づく方向決定に、本研究のオプティックフローによる視運動反応を組み合わせたモデルを作成し、シミュレーションを実施することで、外乱のある実環境で効率良く匂い源探索を行うための嗅覚・視覚センサの構成やゲイン設定など、ロボットへの応用へ向けた提案も行っている。

第六章では、本論文の結論をまとめるとともに、今後なすべき研究の方向について、行動、神経ネットワーク、そして行動シミュレーションの各レベルから、具体的な実験手法を提案している。

本論文では、生物が時々刻々と変化する匂い環境に応じて、動的に視覚情報の使い方を変化させることで、効率の良い匂い源探索を実現していることを、行動学、神経解剖学、そしてシミュレーションという3つの手法を用いて明らかにした。複数感覚情報の利用が探索効率を高めることはこれまでに報告されているが、本論文の知見は、その統合過程において、個々の感覚情報の行動発現に対する重みづけが、行動状態依存的に、そして、短い時間スケールにおいても動的に変化することを初めて明らかにするものである。さらに、行動実験結果から視覚情報の統合に関わる神経回路を推測し、神経解剖学的手法による解析へ展開させ、状態依存的な視覚情報統合の神経メカニズムの解明の基盤となる回路モデルを提案した。これは、今後の電気生理学やイメージングによる機能解析の重要な礎となる成果と言える。また、生物模倣の観点から、状態依存的な視覚統合を用いた匂い源探索が、摂動に対しても高い探索性能を示すことをシミュレーションにより明らかにするとともに、視覚・嗅覚センサの効果的な使用方法についても提案している。したがって、本論文は、生物学だけでなく、工学分野にも資する知見を有しており、今後、複数感覚統合の神経メカニズムの解明、および生物模倣による匂い源探索の性能向上への展開が期待できる重要な成果であると言える。

よって本論文は博士（情報理工学）の学位請求論文として合格と認められる。