

論文の内容の要旨

論文題目 身体性システムの知覚運動系における生物情動規範型ノイズ・ゆらぎ活用メカニズムに関する研究

氏名 米倉 将吾

本論文は、身体を有し運動を生成するシステム-身体性システム-の神経系におけるノイズによる秩序創発現象、特に、神経系の感覚情報処理における確率共鳴の利用方法について、理論的解析・数値実験を行うものである。身体性システムにおいては、神経系のノイズのみを扱うだけでは不十分であり、運動に含まれるノイズ、数十分から数時間タイムスケールで変動する行動ゆらぎ、さらには、運動・行動起因の感覚ノイズなどを包括的に扱う必要がある。

生物の情動においては、情動と関連して、機能神経群の再構成、脳の多くの領域における平均発火率増加に起因した伝達信号ゲインの増加と背景雑音の変化、運動生成システムにおけるフィードバックゲイン変化、筋平均発生力と発生力ゆらぎの変化、長期行動パターンの変化などが起こっていると考えられる。本論文の目的は、これらの情動と関連した身体性システムの変化が情報処理にどのように貢献しうるか、理論的に考察しつつ、また、計算機実験を用いて確認する事である。

本論文は全8章より構成されている。1章では、身体運動系を有するシステムにおいて、神経ノイズ・運動ノイズ・行動ゆらぎを有効に活用して感覚情報処理を行うための研究アプローチを論じている。特に、生体情動と神経系・運動生成システムにおけるノイズとの関連を簡単に指摘し、生物の情動を規範とした工学的なノイズ活用システム構築のためのアプローチを論じている。

2章においては主に、4章以降で用いる、ノイズ・ゆらぎを入力に受ける神経系における統計力学的解析を行うための物理に関する道具立てを行う。具体的には確率微分方程式の概説、ポアソン過程の概説を行い、確率微分方程式の統計的解析解を導出するために必要不可欠な Fokker-Planck 方程式の概説、神経系の発火率の理論計算の仕方の簡単な説明などを行い、確率共鳴現象について詳細にレビューを行う。さらに、生体の運動におけるゆらぎを記述説明する2つの方法:統計力学によるブラウン運動と決定論的拡散ゆらぎによるブラウン運動という2つの視点を導入する。

3章において、生体におけるノイズは、環境・センサ・神経系・アクチュエーターなど、ほぼ全ての生体構成要素に遍在しているのみならず、システム全体として生成された運動レベル・行動レベルにおいても存在しており、また、特に、行動レベルにおけるゆらぎは数時間に渡るタイムスケールにおいて存在している(あるいは、定義されている)事を示す。さらに、生体におけるノイズ・ゆらぎは生体の情動プロセスによって密に調整を受けていると同時に、確率共鳴など

を通して、認知プロセスに大きな影響を与えている事を指摘する。同時に、3章においては、生体がノイズを調整しつつノイズによる秩序創発を利用するために、どのような基本メカニズムを用いている可能性があるか、ノイズ利用のために必要となる生物情動規範型の身体性システムの構成要素を抽出し、本研究の目的・論文構成を詳細に論じる。

4章においては、生体の神経系における確率共鳴原理を詳細に検討する。特に、通常シビアなノイズ調整が必要である確率共鳴(stochastic resonance, SR) に対して、信号を受け取るニューロン集団の規模を大きくすればノイズ調整がほぼ必要なくなる事が報告されているSR without tuning 現象を線形応答理論によって厳密な理論解析を行う。この理論解析によって入力信号のゲインがSR without tuning 現象にとって非常に重要な役割を果たしており、ニューロン集団規模よりも効率的にSR without tuning 効果を実現しうる事を示す。これにより、生体神経系における発火率の上昇による信号ゲインの増大はSR without tuning 効果をもたらしている可能性を指摘する。

第5章では(a) 運動ノイズの存在によって、自身の運動制御器への制御入力信号が確率過程となる場合、(b)運動ノイズが感覚器へのセンサノイズとなる場合、の二つの場合についてそれぞれ、ノイズを有効活用するための枠組みを、主にロボットシミュレーションを通して構成論的に実験・検証している。

(a)の場合には、運動制御信号がノイズによって確率過程化し、第4章で論じた SR without tuning 原理が適用される場合に、運動精度もしくは「捕食対象物」の捕食効率、などの運動性能の評価指標が向上する事を示している。

(b)の場合には、生体の認知情報処理ならびに情動的覚醒のトリガーである予測的感覚情報処理を評価指標として、自身の運動ノイズのピーク周波数が感覚神経系の動作周波数の約3倍程度であれば感覚神経系に確率共鳴を誘発可能であり、かつ、広い範囲の運動ノイズ強度に対して予測性能の向上が可能となる事を示している。また、運動ノイズのスペクトル調整のためにはフィードバック制御器のゲインが直接的な役割を果たす事を示している。

6章においては、運動・行動ゆらぎの生成原理としての決定論的拡散を検討し、運動・行動ゆらぎの調整をシステムのエネルギー調整問題として捉えるための基本的枠組みを議論する。具体的には、生体における行動ゆらぎを、神経系における確率的行動選択システムに還元させるアプローチでは説明できない、行動・休止のべき乗則が環境・身体運動系の相互作用に基づく決定論的なゆらぎ現象として捉え、これにより、行動のゆらぎがシステムのエネルギー状態と対応付けが可能となる事を示す。

第 7 章では、運動パターンの決定論的ゆらぎを生成するロボットシステムにおいて、運動の長期タイムスケールでのゆらぎ強度の変化によって、運動系列自体に含まれ **Recurrence Quantification Analysis** で定量化される複雑性が変化し、その結果、運動によって変化する感覚入力の予測的情報処理能力が変化しうる事、さらに、これらの感覚情報処理の変化が拡散相と関係することを示している。これらにより、生体における運動系列パターンが生体の感覚予測性能を変化させる事を示している。

8 章においては、4 章-7 章の結果をまとめ、ノイズを活用した感覚運動能力向上の原理を総括し、これが、生体情動の主要因の一つである情動的覚醒をもたらす認知機能と対応づけられることを論じている。同時に、ノイズを利用した新しい工学的注意システムやノイズと運動ゆらぎによる生体情動の調整可能性などの萌芽的研究展開について論じている。また、生体システムがノイズを用いて情報処理した場合、多くの場合において、生体情動の誘発要因となる予測誤差を減少させる事が可能である事を指摘し、これによって、生体がノイズを用いて **Emotion regulation** 機能を実現している可能性を指摘する。