

## 審査の結果の要旨

氏名 米倉 将吾

本論文は、「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」と題し、身体・センサ・アクチュエータ・神経系からなる身体性エージェントにおいて、生物情動を規範とするノイズ利用方法によって、感覚刺激の予測的情報処理能力ならびに身体運動における運動精度・効率を向上可能であることを、統計力学的理論解析と構成論的研究によって示し、それが生物情動と認知の関係と対応づくことを文献調査に基づき論じている。論文は全8章より構成されている。

第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（数10秒～数時間単位の長いタイムスケールでの運動パターン変化）を有効に活用して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、生体において観察される運動系列におけるノイズならびに神経系のノイズは情動的覚醒度と強い関係性を有している事を論じ、生物の情動を規範としてノイズを工学的に利用するための研究アプローチを論じている。

第2章では、身体性システムにおいてノイズを情報処理に利用する際に中心的な役割を果たす確率共鳴(Stochastic Resonance, SR)および決定論的拡散現象等の概念に関して調査・整理すると共に、従来の確率共鳴の理論解析の問題点を整理している。

第3章では、生物におけるノイズ調整機構が情動と深く関連している事を文献調査によって明らかにし、ノイズ利用のための基本要素として、(1) 神経系の平均発火率増加による信号ゲインの増大、(2) 運動フィードバック制御ゲインの増大、(3) エネルギーの散逸バランスの変化による行動ゆらぎの調整、の3要素を抽出している。

さらに、身体性システムに特有なノイズを分類し、(a)自身の運動ノイズが運動制御器への確率的非周期制御信号となる場合、(b)運動ノイズが感覚ノイズになる場合、などを挙げ、身体性を考慮した場合には、従来の生体におけるノイズの理解とは大きく異なる観点が必要となる事を論じている。

第4章においては、従来の遅く弱い信号入力に対する神経系の確率共鳴に関する理論解析では捉えられない、身体性システムに付随する速く大きい信号に対する確率共鳴の理論解析を行っている。具体的には Fokker-Planck 方程式の線形応答解の厳密な導出によって、任意入力に対する神経系の出力の相関係数の導出を行っている。これにより、入力信号強度の増大と、同一入力を処理するニューロン集団サイズの2点が、広い範囲のノイズ強度に対して神経系が確率共鳴を引き起こす SR without tuning のために重要である事を導出している。

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。

第6章ならびに第7章においては、統計力学的な枠組みでは扱う事が困難な、決定論的ゆらぎ構造を有する身体性システムの情報処理を構成論的アプローチによって扱っている。具体的に第6章においては、ブラウン運動ならびにレヴィフライト等の異常拡散、さらには定常運動を決定論的に生成可能な新しい身体運動生成系を構築し、拡散相の切り替えが環境と身体の相互作用における散逸バランスの変化に依る事を示している。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感覚情報処理能力が変化する事、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。

第8章では、以上の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が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。

以上これを要するに、本論文は、身体性システムに適用可能な確率共鳴の厳密な理論解析、ノイズ活用による感覚運動能力向上を具体的に示したロボットシミュレーション実験、生体の情動・認知との関係の文献調査と分析に基づき、確率共鳴等のノイズによる秩序創発現象を身体性システムに適用して感覚運動能力の向上が起こることを初めて示し、これが生体の情動的覚醒による認知機能と対応づけられる事を示した。これにより、ノイズによる秩序創発現象の新たな領域での理解を構築し、ロボット等の感覚運動系の新たな性能向上原理を提示し、生物情動と認知の関係について独自の新たな解釈とモデルを示しており、学問的にも応用上も重要な先導的寄与を含む。

以上の理由から、本論文は情報理工学上重要な貢献と見なされる。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。