

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 レモ サンドロ ストルニ

近年、様々な計算機システムの基板となる電子回路設計では、その超高密度化・超微細化が進行した結果として、隣接素子間の干渉や熱的なノイズの影響が深刻な問題となってきた。また他方で、国際的な二酸化炭素排出削減や震災の影響などから、計算システムで生じるエネルギーの削減もまた新たな課題として浮かび上がってきた。このような状況のもと、ノイズ影響下で安定に機能する計算システムを設計する問題は、応用分野においてその重要性を急速に増してきているといえる。本論文は、ノイズを抑制するのではなく逆にうまく活用して計算システムを設計する理論的な枠組みとして、確率共振現象を応用した論理的確率共振(logical stochastic resonance, 以降 LSR と略記)に注目し、その拡張可能性を明らかにすることを旨とするものである。

本論文は「Noise-Assisted Computation with Logical Stochastic Resonance」(論理的確率共振を用いた雑音緩用計算)と題し、8章からなる。

第1章「Introduction」(序論)では、トランジスタをベースにした計算システム、micro electromechanical systems (MEMS) や nano electromechanical systems (NEMS)、そして生体システムにおけるノイズの問題に関して歴史的な背景を概説すると共に、ファインマンラチェットや確率共振、そして論理的確率共振の例を上げ、ノイズを活用する試みやアイデアについてまとめている。

第2章「What is Stochastic Resonance?」(確率共振とは何か?)では、確率共振現象に関する理論的な事項を、数式や具体的なシミュレーションを用いて説明している。またフォッカープランク方程式など以後の章で活用される理論的な方法論もあわせて概説している。

第3章「Logical Stochastic Resonance」(論理的確率共振)では、先行研究に沿って論理的確率共振の既知の知見を詳説し、過去の結果の独自の再検討および評価などを行なっている。

第4章「Extending LSR to Multi-stable Systems: the Triple Wells Gate」(多安定システムへの論理的確率共振の拡張: 3重井戸ポテンシャルを持つゲート)では、2つの安定状態のみを持つ系で提案されてきた論理的確率共振を、多数の安定状態を持つ系へと拡張している。3つの安定状態を持つポテンシャルで論理的確率共振を構築し、シミュレーションによって論理演算が行われうるパラメータ領域の探索およびシステムのロバスト性の評価を行なっている。さらに、安定状態間のポテンシャル差を用いた評価によって、システムが機能しうるパラメータ領域を推定できることを提案し、数値シミュレーションによる検証によってその有効性を示している。そして、実験的な実装の可能性について議論している。

第5章「LSR in Multidimensional Systems」(多次元システムにおける論理的確率共振)では、1次元空間で展開されていた論理的確率共振理論を多次元へと拡張し、遺伝子スイッチのモデルを用いて数値的にその有効性を実証している。またシステムが安定に期待通り動作するパラメータ範囲もあわせて評価をしている。そして、多次元論理的確率共振が並列的な論理演算に活用できることを例証している。

第6章「LSR in Discrete Time Systems」(離散時間システムにおける論理的確率共振)では連続時間

で提案されていた論理的確率共振を離散時間へと拡張し、その有効性を検討している。双曲線正接関数および区分線形関数の2つの場合について2つの安定状態を持つシステムを検討し、適切なノイズ強度の条件において論理ゲートとして機能しうることを数値計算によって示している。さらに、3つの安定状態を持つシステムを区分線形関数で構成し、多様な論理演算へ拡張可能であることを確かめている。

第7章「Circuit of LSR Gates」（論理的確率共振ゲートによる回路）では、論理的確率共振ゲートを組み合わせて回路を設計することを検討している。ゲートへの入力と出力を関連させる関数としてシグモイド関数を提案し、それを用いてNORを実行する論理的確率共振ゲートの組み合わせからXORゲートを構成している。回路として正確なXORの結果を出力できるように個々のNORゲートに求められるパラメータの範囲を解析し、その領域の変化からゲートをカップルさせるシグモイド関数の非線形性が回路全体の正確さに大きな影響を持つことを明らかにしている。

第8章「Conclusion」（結論）では、以上の結果に対するまとめと考察を述べている。

なお、日本語題目の「雑音緩用」は、適切な量のノイズにより実効的にポテンシャル障壁を緩める効果を表現するための造語である。

以上を要するに、本論文は論理的確率共振の拡張可能性を検討するため、確率微分方程式やフォッカー-プランク方程式などの数理モデルとそのシミュレーションに基づいて、多安定システム、多次元システム、離散時間システム、そして多数の論理的確率共振で構成される回路などを多角的に解析し、新たな知見を得ている。これはノイズ環境下での論理演算設計の問題における数理情報学の有用性を明確に示したものである。

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。