

学位論文の要旨

専攻名	物質生産工学	ふりがな氏名	とよ けい けい 優 介 
学位論文題目	瞬時リアプノフ指数による非線形システムの減衰度推定とその生体システムへの応用に関する研究		
<p>Lyapunov 指数のうち最大のものを、最大 Lyapunov 指数といい、非線形システムの解(フロー)が遠ざかっていく速さのもっとも大きなものを代表している。この値が正であると、フローが現在の位置から離れていくことを意味しており、その位置が局所安定ではないことを物語っていると考えられている。Lyapunov 指数を応用面から注目するとアトラクタの種類の判別に用いられることが多くさまざまな信号処理のカオス状態の判定にも用いられている。しかしながら、安定な同期多様体のいくつかの不安定不変集合の存在から、負の Lyapunov 指数がカオス同期のための十分条件でも必要条件でもないことが報告され、また Lyapunov 指数を正確に計算するためには、ダイナミクスが完全に既知でなければならず、未知パラメータを含む場合には、計算することができないという問題点がある。また、時系列データの瞬時値から安定性や同期性を判定するためには、無限時間区間での極限值が必要とする Lyapunov 指数を直接用いることはできない。そこで本研究では従来提案されてきた Lyapunov 指数の問題点を改善し未知パラメータを含む場合でも計算可能な瞬時リアプノフ指数(Instantaneous Lyapunov Exponent, ILE)を提案しその有効性を確認する。またその際に非線形システム特有のリミットサイクルやカオス状態等、応答波形のみでは判別できない種類の応答についても特徴付けできるのかを最小 CAM 植物モデルや Hindmarsh-Rose ニューロンモデルといった生体システムの内部状態の推定問題を基にあわせて検証する。これらの問題は生体系の非線形現象を制御理論に取り組むための足がかりを得ることも目的としている。</p> <p>最小 CAM 植物モデルはアロエ・サボテンなどの多肉植物が行う単一細胞の有機酸代謝を基に数式モデルにしたものである。このモデルは内部状態変数に細胞内の液胞膜分子構造に依存する並びを基にした変数を要求したり、膨大な測定データが必要な液胞膜に関する特性を表す非線形関数を必要とするため、実際に測定を行うのは非常に難しい。そこで簡易に測定できる変数(この場合は細胞内の内部二酸化炭素濃度をさす)を基に最小 CAM モデルの内部状態を推定するオブザーバを構成し、その性能を検証する。本論文で提案するのは各状態変数の挙動の速度の差に注目を行い、Critical Manifold と呼ばれる 2 次近似式を導出し、それをもとにオブザーバを構成していく。</p> <p>Hindmarsh-Rose ニューロンモデルはイカの神経軸策を測定した実験データを基にした Hodgkin-Huxley モデルの安定挙動を表すモデルである。また内部パラメータの変更により発火パターンを分類することができ、変更したパラメータの種類によりさらにニューロン自体の特性とそのニューロンを結合した際の特性と分類することが可能である。このモデルの内部状態推定問題は各特性について膜電位と呼ばれるニューロンの活動を示す電位のみから Zhang らの多入出力オブザーバを用いて推定を行うものである。</p> <p>今回、非線形フローを基にした ILE と線形化フローを基にした 2 種類の ILE を提案し、このシステムの減衰率を評価する指標を内部状態の推定の際の誤差システムや状態変数の応答自身に適用することで安定・不安定の判別を行うことにより性能の検証を行った。さらにリアプノフスペクトラムと比較することにより、その有効性について検証を行った。リアプノフスペクトラムでは分類できない非線形系特有のカオス状態・リミットサイクル・ヘテロクリニック軌道などの応答の判別についても、対象の信号の微分値を入力に用いた瞬時リアプノフ指数を用いることによりその波形の特徴からそれぞれの応答について判別が可能であることを示した。また Lorenz システムを用いた内部パラメータの同期問題については Lorenz システ</p>			

(様式課程博士3)

ムとそのオブザーバに同期度を適用することでその性能を確認し想定した性能が得られていることを確認した。提案した瞬時リアプノフ指数は対象のシステムの内部状態が未知でも使用でき、算出するために極限を利用しないという点で従来までに提案されたものよりも優れていると考えられる。

生体システムの内部状態推定問題については、最小 CAM モデルについては提案した Critical Manifold をもとに構成したオブザーバにより 2 つの状態変数から内部状態の推定が可能であることを示した。今後の研究としてはさらに既知の状態変数を絞り込んだオブザーバの構成が可能かの検討を行い、リズム制御が可能か検証する。また HR ニューロンモデルについては Zhang らのオブザーバをもとに新たに構成しその検証を行った。その結果内部パラメータが時変である場合は Zhang らのオブザーバより良い性能が確認できたが低精度なものでありさらなる改善を行う必要がある。

学位論文審査結果の要旨

専攻	物質生産工学専攻	氏名	十時 優介
論文題目	瞬時リアプノフ指数による非線形システムの減衰度推定とその生体システムへの応用に関する研究		
主査	松尾 孝美		
審査委員	小川 幸吉		
審査委員	今戸 啓二		
審査委員	柴田 克成		
審査委員	高坂 拓司		
審査結果の要旨 (1000 字以内)			
<p>本研究の目的は、動的システムから生成される時系列データの瞬時値から安定性や同期性を判定する指標を提案することである。従来提案されているLyapunov 指数は、動的システムの各時刻における2つの軌道の間広がりの率として定義され、指数関数 $\exp(\lambda t)$ で近似した時に傾き λ で表わされる量である。しかしながら、従来提案されているLyapunov指数は、無限時間区間での極限值が必要で、また、動的システムのパラメータが既知であるなどの制約条件がある。本研究では、時系列データが基準関数と比較したときの減衰/成長度を与える瞬時リアプノフ指数を提案している。特に、基準関数を時間の指数乗で与えることにより、指数関数よりも遅い減衰/成長度を評価することができる特徴を持っている。さらに、定義した瞬時リアプノフ指数において、時系列データの微分値を用いることにより平衡点からの減衰/成長度を与えることができること、また、直接時系列データを用いることにより、指定した基準点からの減衰/成長度を与えることができることを明らかにしている。また、制御理論における推定器の推定性能を評価するために、2つの軌道が同一時刻で指定した許容誤差内に存在するかどうかを判定する同期度を提案している。これらの結果は、レギュラーでない非線形システム、2次不安定システム、およびLorenzシステムに適用され、その有効性を確認している。特に、Shinらが提案している瞬時リアプノフ指数との相違点についても明らかにしている。さらに、安定性の数式的証明が難しい非線形システムである生物学的ニューロンモデルや光合成システムモデルの内部状態推定問題に適用され、それらの時系列データの減衰/成長度の指標として瞬時リアプノフ指数や同期度を見ることにより、現時点での減衰/成長度や同期度をリアルタイムに評価できることを明らかにしている。</p> <p>以上の研究において提案された瞬時リアプノフ指数は従来提案されているリアプノフ指数と異なった特徴をもち、制御理論における推定器の性能評価において有効な手法である。また、研究結果の口頭発表とその後の口頭試問により、上記の学生は当該分野の知識を備えていることを確認した。以上のことから、本論文は博士(工学)の学位に値するものと認められる。</p>			