

[平20~3]

早稲田大学大学院理工学研究科

博士論文概要

論文題目

カオス理論に基づく短期予測法を用いた
予測制御法に関する研究

(Study on Predictive Control Method Using a Short-Term Prediction Method Based on Chaos Theory)

申請者

増本 憲泰

Noriyasu Masumoto

機械工学 構造振動

2000年12月

将来を予測するという行為は基本的かつ日常的な行為であり、人間は近くは数秒後から、遠くは数十年後までのあらゆる時間間隔の将来予測を頻繁に行ってい る。制御工学においては長い間フィードバック制御法が中心的役割を果たしてき ているが、これは将来の情報ではなく過去の情報を基に制御入力を算出する制御 手法であると考えられる。上記のように、将来の予測情報を用いた制御法は人間 の行動等では日常的なものであるにもかかわらず、工学的な応用は試みられることは多くはなかった。

そこで本研究では、時系列を予測の対象とし、将来の予測情報を積極的に利用 しつつ機械構造系の振動制御に適用することが可能な制御法の開発を主として対 象とする。時系列の予測手法としては線形系や非線形系に適用可能な、特にカオ ス現象の予測に有効とされているカオス理論に基づく時系列の決定論的非線形短 期予測法（以下、簡単にカオス短期予測法と称する）に注目し、既存のカオス短 期予測法に補足的な概念を導入し、機械構造系の振動制御への適用を前提とした 新たなカオス短期予測法の開発を行い、新しい予測制御法を確立することを本研 究の目的とする。

本論文は、第1章から第6章までの6章から構成されており、第1章では序 論、第2章から第5章までで本論、第6章では結論を述べる。

第1章の序論では研究の背景、本研究で用いる予測という術語の定義、関連研 究、研究目的について述べる。また、論文全体の構成や概要について示す。

第2章では本研究で提示する予測制御法の中で用いられる新たなカオス短期予 測法の提示を行う。既存のカオス短期予測法では主としてカオス時系列の高精度 の短期予測を目的としており、したがって予測値の算出時間短縮化に関しては追 究されていないためにそのままでは機械構造系の振動制御に応用することが非常 に困難である。そこで予測制御法への適用を前提として、既存のカオス短期予測 法では扱われない幾つかの考え方を補足的に導入した新たな方法を開発する。補 足した主項目を次に示す。

- (a) 部分時系列 (Partial Time Series)
- (b) 前方地平線 (Forward Horizon)
- (c) 統一埋め込み次元 (Unified Embedding Dimension)
- (d) 後方地平線 (Backward Horizon)
- (e) 最適サンプリング周期 (Optimum Sampling Period)

以上の項目は本研究で新たに導入された概念であり、それらの用語の定義とそれ ぞれの算出法を提示する。部分時系列および後方地平線は予測精度の向上、前方 地平線は制御性能の向上、統一埋め込み次元は予測値算出時間の短縮化のため 有用である。最適サンプリング周期はカオス短期予測法を連続時間信号に適用す る際に必要となる。提示するカオス短期予測法を、離散時間系に対しては Hénon 写像から得られる時系列に、連続時間系では Lorenz 方程式から得られる時系列

に適用し、線形回帰モデルと比較した際の優位性などを含めて提示手法の有効性 を示す。Hénon 写像、Lorenz 方程式の両者共、ある条件下でカオスが起こること が知られており、その条件下で予測値を算出する。Lorenz 方程式へ適用する場合 には最適サンプリング周期の算出を行う必要があるが、比較的明確に算出できる ことも示す。

第3章では、制御対象をモデル既知の線形系、予測対象を外乱時系列とする場 合の予測制御法を提示し、数値計算例を通して提示手法の有効性を検討する。第 3章から第5章を通じて本研究で提示する予測制御法では、制御入力を予測値か ら算出される予測制御入力とフィードバック制御入力の和と定義して議論する。 ここでは将来の外乱時系列を第2章で提示するカオス短期予測法により算出し、 得られた予測外乱値より予測制御入力を算出する。また、予測制御入力を算出する 際に用いる予測値の個数について、1個のみを用いる場合と2個以上の複数個 の予測値を用いる場合に分けて別々の制御則を提示する。特に1個の予測値のみ を用いて予測制御入力を算出する場合は外乱相殺的な制御手法となり、この場 合には予測制御法を適用できる対象系が限られたものとなる。そこで、本研究では 適用可能条件を明確にし、4種類の適用可能条件を示す。複数個の予測値を用い る場合は、モデルが既知で外乱が測定可能であれば全ての線形系を対象とできる ような予測制御法とする。提示した予測制御法を2自由度の自動車用サスペンシ ョンモデルの振動制御問題に対する数値計算例に適用し、予測制御法の有効性 を示す。計算結果からは、1個の予測値のみを用いるよりも前方地平線を考慮し て複数個の予測値を用いて予測制御入力を算出する方が、制振効果が著しく向上 することを示す。また、前方地平線を用いる方が制御入力の大きさを大幅に低減 でき制御エネルギーを抑えられることも示す。

第4章では第3章と同様に制御対象をモデル既知の線形系とするが、対象系の 出力を予測対象とする予測制御法に関して議論する。ここでは、外乱は測定不可 能であるが出力であれば測定可能であるような場合を想定しているため、外乱は 未知と仮定する。外乱が測定可能であれば外乱を予測対象として第3章で議論す る予測制御法を適用すればよい。しかしながら、予測制御入力は第3章と同様に 外乱の予測値から算出する方法をとる。これは、制御入力と外乱との関係をある 程度明確にするためである。したがって、外乱の予測値を出力情報に基づき逆問 題を解くことによって算出しなければならない。そこで、外乱を以下に示す3種 類に分け、それぞれを区別して議論する。

- (a) 真の外乱 (True Disturbance)
- (b) 疑似外乱 (Pseudo Disturbance)
- (c) 予測外乱 (Predicted Disturbance)

また、対象系の出力を制御開始前のものと開始後のものに分けて議論を行い、カ オス短期予測法を適用する際の予測対象は制御開始前の出力でなければならない

ことを示す。上記の疑似外乱は制御開始前の出力の実測値からモデルを通して逆算されたものを表すが、算出値であるという意味で真の外乱とは異なるため疑似という修飾語を用いる。予測外乱は制御開始前の出力の予測値から算出される。制御開始前の出力の予測値をカオス短期予測法により算出していくことは、制御開始後も開始前の出力を仮想的に継続させることを意味する。提示した予測制御法を簡単な弾性ロータモデルの振動制御問題に対する数値計算例および実験例に適用し、提示手法の有効性を示す。また、数値計算例で得られるのと同様の結果を実験例においても検証し、実用面での有効性の一端も示す。

第5章では制御対象が非線形系となる場合の予測制御法について議論し、数値計算例を通してその有効性を検討する。予測制御入力を算出する考え方は第3章および第4章で述べる手法に準じている。非線形系の場合には対象系を支配する微分方程式あるいは状態方程式をマトリクス表示することができないため、線形系を対象とする場合ほど具体的な議論が展開できない。したがって、数値計算例による検討を主として行う。また、ここでのフィードバック制御入力は、非線形系をある条件下で線形化した系から得られるフィードバックゲインを用いて算出する。外乱を予測対象とする場合の計算モデルとしては、1自由度の強制 Duffing 系を取り扱う。この系は変位の3次関数として表される剛性をもち、変位の増大に伴って剛性の線形性が崩れるような構造モデルとして用いられることが多い。また、ある条件下でカオスが生じることが知られている。基本的には調和励振を考えるが、特に強制振幅がカオス領域の中で周期的に変動しあつ白色雑音が重畳するものとなる強制外乱を考え、この外乱時系列を予測対象とする。出力を予測対象とする場合には、2種類の強制振子系に対して予測制御法を適用する。すなわち、振子の支持点に周期強制トルクが加わる場合と、同じく支持点に水平方向の周期強制変位入力が作用する場合である。両者とも振子の振れ角が微少量とみなせない場合には、系を支配する微分方程式が非線形となり、これらの場合も Duffing 系と同様にある条件下でカオスが現れることが知られている。ここでは、これらの振子の振れ角の振動制御問題に対して予測制御法を適用する。これらの数値計算例も連続時間系に対するものであるため、第2章で提示するカオス短期予測法を適用するためには最適サンプリング周期の概念が必要となる。いずれの数値計算例においても、予測対象時系列に対する時系列解析によって最適サンプリング周期が明確な値として得られ、良好な時系列解析結果が得されることを示す。また、例題を通してではあるが、予測制御結果から本研究で提示する予測制御法が、線形系だけではなく非線形系の振動制御問題に対しても適用できることを示す。

第6章では、本論文の総括を述べ、開発したカオス短期予測法、線形系および非線形系に対する提示した予測制御法に関する結論を述べる。また、今後の研究課題についても言及する。