

氏名	周 ^{シュウ} 軍 ^{ケン}
学位(専攻分野)	博士(工学)
学位記番号	工博第2153号
学位授与の日付	平成14年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科・専攻	工学研究科電気工学専攻
学位論文題目	Harmonic Analysis of Linear Continuous-Time Periodic Systems (線形連続時間周期系における調和解析)
論文調査委員	(主査) 教授 萩原 朋道 教授 荒木 光彦 教授 片山 徹

論文内容の要旨

本論文は、一般的な線形連続時間周期時変システムに関する安定性などの解析問題を、Fourier 解析理論に基づいて作用素理論の視点から研究したものであり、5章からなっている。

第1章は序論であり、本研究において取り扱っている周期時変システムについての関連分野の現状、背景と主な問題点について述べている。とくに、周期時変システムにおける漸近安定性判別法と周波数応答作用素の定義のしかたについて、さまざまな考え方とそれぞれの特徴および問題点を述べ、本研究における着目点と理論的手法の概要を紹介している。

第2章では、まず一般的な線形連続時間周期時変システムの数学的記述と基本性質、および周期関数の Fourier 解析理論の主な結果を整理している。次に、これらの数学的準備に基づいて、作用素理論の視点から、一般的な有限次元線形連続時間周期系（以下ではFDLCPシステム：finite-dimensional linear continuous-time periodic systemと略称）の調和作用素表現を示している。なかでも、とくに周期時変システムにおける相似変換関係式の調和作用素表現について、厳密な数学的解釈を行い、周期時変システムの調和システム作用素の固有値構造をはじめて解明している。この相似変換関係式は10年前に他の研究者によりすでに示唆されていたが、この関係式の数学的に厳密な証明、ならびに、それに基づくFDLCPシステムの性質の本質的解明は、本研究の重要な貢献の1つとなっている。

続いて、第3章では、調和作用素アプローチを使って、FDLCPシステムに関する安定性などの解析問題について論じている。すなわち、この部分の研究の理論基盤は、すでに第2章で確立された周期関数に関する Fourier 解析のさまざまな定理、補題とそれらに基づく作用素論アプローチであり、得られた主な成果は次の通りである。1. FDLCPシステムの漸近安定性と調和リアプノフ方程式。2. Gerschgorin 円盤判定法の FDLCPシステムの漸近安定性判別への拡張。3. FDLCPシステムの周波数応答作用素の厳密な定義とその性質の解明。4. H_2 ノルムと H_∞ ノルムの定義と、おのおのの時間領域と周波数領域間での定義の等価性の証明。5. 調和リアプノフ方程式に基づく H_2 ノルムのトレース公式。

一方、第4章は、第3章で取り扱われた問題の理論結果に関する数値計算法と、それに関連した収束性などの議論が重要な内容となっている。数値解析の主な成果として、調和リアプノフ方程式を利用することで、近似モデルに基づく FDLCPシステムの実用的な安定判別が可能となることが導かれている。さらに、周波数応答作用素の行列表現に対して、斜め打ちきり法を提案することで、FDLCPシステムの H_2 ノルムと H_∞ ノルムを、ある有限次元 LTI システムの対応するノルム計算問題に漸近的に変換する方法も導かれている。すなわち、FDLCPシステムの H_2 ノルムと H_∞ ノルムはそれぞれ、有限次元 LTI システムの代数リアプノフ方程式に基づくトレース公式、および Hamilton 判別法に基づく二分法により、任意精度で計算できる。この方法の特徴は、FDLCPシステムの H_2 ノルムと H_∞ ノルムの計算を、リフティング法により時不変離散時間系のノルム計算法に変換させる方法とは異なり、線形時不変連続時間系のノルム計算法に帰着させている点にある。この方法のもう一つの利点は、周波数応答作用素の行列表現が Fourier 解析から容易に計算できるため、 H_2 ノルムと H_∞ ノルムの計算に必要な有限次元 LTI モデルが直接かつ簡単に得られることである。

最後に、第5章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。

論文審査の結果の要旨

本論文は、自然界中、および回転などを伴う人工物の中に数多く存在する、一般的な有限次元線形連続時間周期系の解析問題に関して、とくにシステム制御の観点から論じたものである。具体的には、フーリエ解析の考え方を作用素理論の視点から適用した成果を論じたものであり、そのような議論を通して、周期系の制御性能の定量的評価のための新たな枠組みが構築できることを示している。さらに、そのような手法による制御性能の理論解析、数値解析に関する知見についても取りまとめており、得られた成果は以下の通りである。

1. 周期系の漸近安定性について、それが時変係数行列のフーリエ級数展開を通して得られる無限次元行列（作用素）と、ある非有界な作用素を用いて特徴づけられることを示し、周期系の安定解析に対して調和リアプノフ方程式という概念をはじめ導入した。さらにこの方程式に基づき、実用的な安定判別法を導いた。
2. 周期系を周波数領域で取り扱うことを目的として、周期系に対する周波数応答作用素について入出力信号の定常調和解析に基づく考察を行い、その存在条件ならびに性質を明らかにした。これにより、周期系を調和解析に基づく作用素理論の視点から一般的に取り扱うための十分な理論的基盤が整備された。
3. 上記の成果に基づき、周期系の制御性能評価に関する指標となる H_2 ノルムや H_∞ ノルムの計算法を明らかにした。具体的には、調和リアプノフ方程式を基礎とする H_2 ノルムの計算法や、周波数応答作用素の斜め打ち切りと呼ばれる提案手法に基づく H_2 ノルムや H_∞ ノルムの計算法を与えた。加えて、打ち切り次数の増加とともに斜め打ち切り法の計算誤差が0に収束することを証明した。
4. 周期系に対する H_2 ノルムや H_∞ ノルムの計算を、有限次元のリアプノフ方程式やハミルトン行列に基づく計算法に漸近的に帰着させて行うことも可能であることを明らかにするなど、線形周期時変系と線形時不変系との密接な関係に対して数々の知見を与えた。

以上要するに、本論文は、線形連続時間周期系の性能解析に関して、とくにシステム制御の観点から論じたものである。とくに、調和解析と作用素理論を基礎として得られたその理論解析、数値解析手法に関する成果は、周期系の制御に対する新たな方向性を示唆するものであり、学術上、實際上、寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成14年1月28日、論文内容とそれに関連した事項について試問した結果、合格と認めた。