

学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

(博士後期課程博士用)

山口大学大学院理工学研究科

報告番号	理工博甲 第 700 号	氏名	劉 棟博
最終試験担当者		主 査	藤井 文武
		審査委員	大林 正直
		審査委員	田中 幹也
		審査委員	江 鐘偉
		審査委員	小河原 加久治
【論文題目】			
A study on modeling and compensation of the rate-dependent hysteresis of a piezo electric actuator based on soft computing (ソフトコンピューティングを利用した piezo アクチュエータの速度依存ヒステリシス現象のモデル化と補償に関する研究)			
【論文審査の結果及び最終試験の結果】			
<p>本研究は、ソフトコンピューティングの手法を多面的に活用した piezo アクチュエータの速度依存ヒステリシス現象のモデル化と、その補償に取り組んだ結果をまとめたものである。piezo アクチュエータはマイクロ/ナノメートルレベルの高精度な位置決めが可能なアクチュエータで、小サイズ、高剛性、高速応答性などの優れた特性から、精密位置制御を必要とする産業機器を中心に、デジタルカメラやインクジェットプリンタヘッドなどの民生機器に至るまで多くの装置に応用されている。</p> <p>piezo アクチュエータを汎用の位置決めに用いる場合、入出力間のヒステリシスが位置決め精度悪化をもたらす要因となる。piezo アクチュエータは、入力信号の掃引速度や入力周期信号の周波数変化に伴ってその特性が変化する「速度依存ヒステリシス」を示すことが知られており、この現象を正確に表現する数学モデルの構築と、速度依存ヒステリシスを補償して高精度な位置決めを達成する制御系の構築は、その産業応用上の価値の高さも相まって極めて多くの研究者の興味を喚起し、活発に研究がなされてきた課題と言える。本研究は、この課題の解決へソフトコンピューティング手法を活用する一方法を提案するものである。</p> <p>本論文は全5章からなる。第1章では、この分野における研究の進展を、関連する先行研究を引用しながら説明している。Preisach, Play/Stop, Bouc-Wen, Maxwell-slip, Duhem モデルなどの有名な現象論的ヒステリシスモデルと、それらの応用研究が紹介される。ヒステリシスの補償に関しては、上述のモデルの逆特性を示す要素を直列に挿入して補償を行うフィードフォワード補償と、フィードバック補償の両方について関連研究を紹介した上で、本研究が目指す方向が説明される。</p> <p>第2章では、本研究で用いる Bouc-Wen モデルとソフトコンピューティングツールの概略が説明される。特に、G. Paun により提案された Membrane Computing の数学的な定式化と、著者が提案する Membrane Structure Genetic Algorithm (以下 MSGA) について概説される。後者に関しては、極小値を多数有する関数の最小値を探索する問題をベンチマークとして、PSO, GA を用いた場合との比較結果が与えられる。Membrane Computing は生体組織内での物質移動とそれによる状態の変化を表現する数学的構造を規定した計算モデルであるが、特に最適化問題の解決ツールに限定されない応用が可能である。そこに GA を組み合わせる著者の提案の利点が見られる。</p> <p>第3章では、piezo アクチュエータの速度依存ヒステリシス特性のモデリングについて論じられている。現象論的ヒステリシスモデルの中でも決定すべきパラメータ数が少ない Bouc-Wen モデルと、RBF ニューラルネットワーク (以下 RBF-NN) を利用した入出力モデルのそれぞれに対して、実測した piezo アク</p>			

チュエータの応答変位信号を希望出力として行われたモデルパラメータの最適化が詳述される。ここでも、MSGA, PSO, GA の3手法を用い、異なる駆動周波数におけるピエゾアクチュエータの変位応答を再現するモデルパラメータの学習が行われている。その結果として、どちらのモデルを用いた場合でも、MSGA と PSO ではほぼ同等の当てはめ精度を実現できるが、MSGA の方が少ない反復計算回数で良好な当てはめを与えるパラメータ値を探索できることが示されるとともに、当てはめ対象のモデル構造の比較では、どの周波数でも RBF ネットワークモデルの方が良好な精度を与えることが示される。

第4章では、ピエゾアクチュエータの速度依存ヒステリシス特性を補償する制御系の構成が提案される。提案される制御系は、Morari らによる内部モデル制御の構造を応用したものである。その内部モデルとしては、前章のモデリングに関する検討で得られた RBF-NN モデルが用いられる。一方、駆動信号の周波数変化による制御対象のピエゾアクチュエータのヒステリシス特性変化を補償するためコントローラにも RBF-NN を利用するダブルネットワーク型の制御系が提案される。この際、コントローラ用ネットワークのパラメータは、入力信号の動的な周波数変更に適応的に対応可能とすべく誤差逆伝播法によりオンラインでパラメータ更新されるよう構築されている。提案した制御系の性能は、周波数可変の入力信号に対する RMSE 値で評価され、狭帯域信号なら入力信号振幅の 1.5%程度、広帯域の場合でも 3%程度の追従精度が確保できることが示されている。また、この制御系でコントローラ部分を PID に変更した場合の制御性能比較の結果も与えられ、RBF-NN コントローラの優位性・妥当性が示されている。

第5章では、本研究で得られた結果をまとめた上で、今後の研究の方向性に示唆が与えられる。

公聴会での主な質問は、モデリングにおいて現象論的モデルから Bouc-Wen モデルを選択した理由、RBF-NN のノード数がモデル性能に与える影響、Bouc-Wen モデルを用いた場合により精度を上げるために考えられる方法などであった。いずれの質問に対しても、発表者からの的確な回答がなされた。

以上より、本研究は提案性、有効性、信頼性、実用性ともに優れ、博士（工学）の論文に十分値するものと判断した。

論文内容及び審査会、公聴会での質問に対する応答などから、最終試験は合格とした。

なお、主要な論文の発表状況は下記のとおりである。（関連論文 計5編、参考論文 計1編）

- (1) Dongbo Liu and Fumitake Fujii, "An Adaptive Internal Model Control System of a Piezo-ceramic Actuator with two RBF Neural Networks," Proc. 2014 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA) in Tianjin, China, pp. 210-215, 2014
- (2) Dongbo Liu and Fumitake Fujii, "Adaptive internal model control design for positioning control of a piezo-ceramic actuator with rate-dependent hysteresis," Mechanical Engineering Journal, Vol. 2, No. 6, 2015 [DOI: 10.1299/mej.15-00190]
- (3) Dongbo Liu and Fumitake Fujii, "Bouc-Wen Hysteresis Modeling of a Piezo-Ceramic Actuator with Membrane Structure Genetic Algorithm," Proc. 2015 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII2015) in Nagoya, Japan, pp. 235 - 240, 2015