

氏名	Alrijadjis
授与学位	博士(工学)
学位記番号	理工博甲第640号
学位授与年月日	平成26年9月24日
学位授与の要件	学位規則第4条1項
研究科, 専攻の名称	理工学研究科(博士後期課程) 情報・デザイン工学系専攻
学位論文題目	Research of Intelligent Self-Tuning PID Control using Enhanced Particle Swarm Optimization for Ultrasonic Motor
論文審査委員	主査 山口大学 教授 田中 幹也 山口大学 教授 江 鐘偉 山口大学 教授 南 和幸 山口大学 教授 大林 正直 山口大学 准教授 中島 翔太

【学位論文内容の要旨】

In this dissertation, my doctoral research of intelligent self-tuning PID controller using Enhanced Particle Swarm Optimization (EPSO) for ultrasonic motor (USM) is presented. In order to get a satisfactory performance of USM servo system, a new control method based on intelligence soft computation called EPSO has been proposed and verified in this research.

The object of the research is USM. USM is new type motor that is driven by ultrasonic vibration of piezoelectric materials. USM was produced commercially at the first time by Sashida in 1980. USM has excellent features such as compactness, lightweight, high torque, high position accuracy, Electromagnetic Compatibility (EMC) compliance, silence, self-brake without power and quick response. In recent years, USM can be applied in many applications such as for auto-focus of camera, micro-robot, meal robot assistance, finger robot, MRI (Magnetic Resonance Imaging) and micro-surgical robot.

Although, USM has excellent features and offers great advantages, USM has problems. Because of no accurate mathematical model and characteristic changes during operation, the control of USM is not easy. Deriving a mathematical model of USM using physical analysis is too hard because of its strong nonlinearity, uncertainty, and complexity in working principle. Moreover, due to temperature, loading, input frequency and other disturbances, the characteristics of USM are easily changed during operation. How to control USM is the focus of our research. To overcome those problems, we proposed a new control method for USM called intelligent PID controller using Enhanced Particle Swarm Optimization (EPSO). We decided to use PID controller because of no accurate model of USM. Moreover, PID controller has superior features, such as simple, efficient, effective and robust. Then, to compensate the characteristic changes of USM and difficulties of tuning process, self-tuning scheme was used. Due to self-tuning scheme, the PID gain can be adjusted automatically and easily according to USM's behavior. Recently, self-tuning scheme using intelligence soft computation called intelligent self-tuning is developed to avoid the difficulty and complexity in conventional self-tuning scheme. PSO is one of the intelligent self-tuning that has superior features such as simple algorithm, faster convergence and efficient in time-calculation. EPSO is a new development of PSO to overcome the shortcoming of PSO, namely premature convergence and easy to get stuck or fall into local optima. The shortcoming of PSO may lead to a poor performance, especially in loaded condition.

PSO is a population-based optimization technique inspired by behavior of birds flocking or fish schooling for finding a food. It was reported that the causes of the shortcoming of PSO are unbalance between exploration-exploitation ability, lost-diversity and lack-information due to fast rate flow in sharing information. There are three parameters in PSO, i.e., inertia weight, cognitive coefficient and social coefficient. Among them, the most important parameter is inertia weight because of its capability in control the balance between exploration-exploitation abilities.

We proposed and investigated two types of EPSO, i.e., new inertia weight approach PSO (e.g., PSO with nonlinearly decreased inertia weight or PSO-NDW and PSO with random inertia weight or PSO-RIW) and adaptive inertia weight approach PSO (e.g., adaptive PSO or APSO, adaptive PSO with random inertia weight or APSO-RIW and hybrid adaptive improved PSO or HAIPSO). PSO-NDW is proposed to control the usage period of exploration-exploitation abilities. In here, inertia weight is decreased nonlinearly from maximum value to minimum value. PSO-RIW is proposed to overcome the lack ability in PSO-NDW and PSO-LDW (PSO with linearly decreased inertia weight). In here, inertia weight is randomized from minimum value to maximum value. APSO is proposed to accelerate in obtaining a proper balance between exploration-exploitation abilities. In here, inertia weight is adjusted according to the swarm condition, i.e., fitness value of P_{best} (best known position of particle) and g_{best} (best known position among all particles). APSO-RIW is proposed to combine the benefit of APSO and PSO-RIW. The benefit of APSO is faster in obtaining a proper balance. The benefit of PSO-RIW is high searching ability. In here, inertia weight is adjusted according to the swarm condition and then randomized. HAIPSO is proposed to overcome the causes of shortcoming simultaneously by using combination of three strategies. The first strategy called adaptive inertia weight is to accelerate in obtaining a proper balance. The second strategy called additional part is to create a new particle's movement and to compensate the lack-information and fast rate flow in sharing information. In the second strategy, a new additional part called socio-cognitive part for connecting directly between g_{best} and p_{best} is inserted into PSO algorithm. The third strategy called mutation operator is to keep the diversity of swarm and to avoid premature convergence.

To evaluate the effectiveness of the proposed control method, we tested it and compare with the previous control methods by using histogram, average error, success-rate (SR) and convergence speed. The experimental results showed that the proposed control method has a best performance in both unloaded and loaded condition. The proposed EPSO has shown faster convergence speed and higher SR. It means the proposed EPSO can reduce effectively the risk of premature convergence and fall into local optima. The proposed EPSO has proved an effective strategy for improving PSO. Due to EPSO-based PID controller, the accuracy of USM servo system can be increased significantly. The contents of the research are organized into five chapters summarized as the following.

Chapter 1 is the introduction of this research. In this chapter, the background of the research, related works, the motivation, the problem statement and target are introduced.

In Chapter 2, USM and PSO-based PID controller are provided. The basic principle of USM, PID controller, PSO algorithm, and the configuration of PSO-based PID controller for USM are explained.

In Chapter 3, new inertia weight approach PSO (PSO-NDW and PSO-RIW) is explained. Then, the effectiveness of PSO-NDW based PID and PSO-RIW based PID are investigated experimentally.

In Chapter 4, adaptive inertia weight approach PSO (APSO, APSO-RIW and HAIPSO) is explained. Then, the effectiveness of APSO based PID, APSO-RIW based PID and HAIPSO based PID are investigated experimentally.

Finally, in Chapter 5, the discussion and conclusion are summarized.

【論文審査結果の要旨】

本研究では超音波モータの改良型粒子群最適化手法を用いた知的セルフチューニング PID 制御手法を提案し、実機実験によりその有用性を明らかにしている。

超音波モータ(Ultrasonic Motor: USM)は、小型、軽量、低速時高トルク、高応答性、高度な電磁両立性などの優れた特性があり、カメラのオートフォーカス機構や MRI 内手術支援ロボットのアクチュエータなどに応用されている。しかし、USM は摩擦駆動であるため正確な数学的なモデルが存在しないことや非線形性が強く、動作中に特性が変化するため、制御が容易でないという問題があった。このため従来は USM の制御には数学モデルを必要としない PID 制御が採用されていたが、PID 制御だけでは USM の特性変動や非線形性を補償できないため PID 制御のゲインを、粒子群最適化手法(Particle Swarm Optimization: PSO)を用いて調整する知的セルフチューニング PID 制御手法が提案された。PSO は、群知能の一種であり昆虫の大群や魚群において、一匹がより良い経路を発見すると、群れの残りはどこにいても素早くそれに倣うことができ群全体が最適な行動をとるというものを工学的に実現したものである。この従来型 PSO は単純なアルゴリズムで、実装が容易であり、収束も早く、計算時間も効果的であるという特徴がある。この従来型 PSO を用いた知的セルフチューニング PID 制御により、USM の特性変動と非線形性をある程度まで補償できるようになった。PSO の更新式は慣性重量係数、認知係数、社会係数という 3 つのパラメータを持っている。その中でも慣性重量係数は探索能力のバランスを制御する重要なパラメータであり、従来型 PSO ではこれを線形的に減少させていた。このためグローバル探索能力とローカル探索能力がアンバランスであり、情報交換が速過ぎるため多様性が失われ、情報不足になるという問題があり、USM の高精度な制御性能を達成できていなかった。

本研究では、従来型 PSO の問題点を解決するため慣性重量係数に着目して従来型 PSO の改良を図り、つぎの 5 つの改良型 PSO を提案している。

- ・改良型 PSO 1：慣性重量係数を非線形的に減少させ、グローバル探索能力とローカル探索能力の使用区間を制御している。
- ・改良型 PSO 2：慣性重量係数を最大値から最小値の範囲でランダムに与えている。
- ・改良型 PSO 3：慣性重量係数を粒子状態に基づいて適応的に調整し最適なバランスを達成している。
- ・改良型 PSO 4：適応慣性重量係数とランダム慣性重量係数を組み合わせて探索能力を向上している。
- ・改良型 PSO 5：各改良型 PSO を組み合わせ、探索のバランスを早期に達成し、新しい情報交換により情報不足や収束速度を補償し、突然変異を導入して多様性も確保している。

提案した PSO を用いた知的セルフチューニング PID 制御の有用性を評価するために、USM サーボ系で実機実験を行っている。この結果、提案した制御方法は従来の制御方法より位置決め精度、平均誤差、収束速度、成功率の全てにおいて優れていることを確認している。また、提案した改良型 PSO の比較では、構成の容易性と収束性で改良型 PSO 3 が、精度と成功率で改良型 PSO 5 が優れていることを明らかにしている。

本研究で得られた改良型 PSO を用いた知的セルフチューニング PID 制御の知見は、USM の高機能化を達成し、産業応用にも寄与するものである。

公聴会における主な質問は、電磁力モータと USM の違い、従来型 PSO と提案 PSO の相違点、PSO の能力と限界、研究の将来展望などであった。いずれの質問にも発表者からの確かな回答がなされた。

以上より、本研究は独創性、信頼性、有効性、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。