

学 位 論 文 題 名

ステッピングモータの回転子振動抑制に関する研究

学位論文内容の要旨

近年、FA・OA機器や家電製品等に用いられる小形モータに対して、高い制御性が要求されている。制御用小形モータの中でも、ステッピングモータは、スイッチングにより励磁を順次切り換えていくという方法で駆動が可能であり、デジタル量のみで動作指令を与えることができる。また、開ループで角度および速度制御が可能となるという利点も有している。ただし、その駆動時には、回転子の慣性に起因して振動が現れるという大きな問題も生じる。

本論文において著者は、上記のようなステッピングモータの回転子振動を抑制する手法の構築に関する検討を行っている。ここでは特に、駆動条件の変化に柔軟に対応できるソフトウェア的な手法を用い、従来あまり考慮されてこなかった負荷の変化等による機器パラメータの変動に対するロバスト性を保証することを目的としている。具体的には、振動特性への影響が大きい回転子の慣性モーメントの変動を考慮し、ステッピングモータの代表的な駆動法である開ループ駆動、閉ループ駆動およびマイクロステップ駆動のそれぞれに対して、以下に述べる4つのアプローチを行い、その効果を検討している。

まず、第1のアプローチとして、ステッピングモータの開ループ駆動において、そのスイッチングの順序およびタイミングを決定する励磁シーケンスを調整して回転子振動を抑制する方法に関して検討を行っている。励磁シーケンスの調整による振動抑制法は従来から用いられてきたが、本手法においては特に、負荷の変動に対応するため、各ステップの励磁タイミングを駆動状況に合わせて自動的に調整することを試みている。具体的には、励磁シーケンスの調整による振動抑制法の中でも調整パラメータが最も少ないハーフステップ励磁シーケンスによる方法を採用し、現代制御理論におけるレギュレータの理論に基づいてその励磁タイミングを自動調整するアルゴリズムを構築している。また、励磁タイミングは、各ステップにおける回転子角度の応答波形に基づいて修正されるが、角度センサが不要であるという開ループ駆動の長所を維持するため、この波形を巻線の励磁電流波形からニューラルネットワークを用いて推定するという方法も提案している。実験システムにこれらの手法を適用したところ、駆動状況の変動に対して励磁タイミングが逐次適切な値に修正され、回転子振動が抑制された。

上記のアプローチには、制御開始時や負荷変動時には励磁タイミングを適正な値に修正するための調整期間が必要になるという欠点を持っている。これを解消するため、第2のアプローチとして、開ループ駆動に用いる励磁シーケンスそのものに機器パラメータに対するロバスト性を持たせ、タイミング調整を不要とする方法についての検討を行っている。

ステッピングモータの回転子はトルク平衡点の移動に伴って回転する。特に、負荷の慣性が大きい場合には、各ステップにおいて回転子はトルク平衡点のステップ状の変化に対して追従できなくなり、このずれが振動という形で現れる。このとき、トルク平衡点の移動に含まれる周波数成分は、回転子が追従可能である周波数領域を逸脱した高い領域のものを含んでいる。本手法では、負荷の慣性モーメントに最大値を設定し、この条件において、回転子がトルク平衡点に接近した状態で追従可能である周波数の上限をモータの周波数特性に基づいて導き、トルク平衡点の時間変化波形をその上限周波数以下の成分のみを持つ非振動的な形状とするように励磁シーケンスの調整を行う。負荷の慣性が最大である状況において回転子がトルク平衡点の移動に追従可能であれば、それ

以外の駆動条件においても追従は可能となるので、結局ロバスト性が保証されることになる。また、励磁シーケンスの調整過程を最適化問題と見なし、その解法として遺伝的アルゴリズムを用いることによりその調整を自動化している。これらの手法を実験システムに適用したところ、回転子慣性の変動に対してロバストに振動を抑制できる励磁シーケンスを実際に得られることが確かめられた。

以上二つのアプローチは、開ループ駆動を行う場合に対するものであった、他方で、特に信頼性や高い制御性能を重視するシステムにおいては、回転子の角度をフィードバックして駆動を行う閉ループ制御が採用される。本論文における第3のアプローチとして、上記のような閉ループ系において回転子慣性の変動に対してロバストに振動抑制を行う方法の検討を行う。

閉ループ駆動を行う場合には、各々の時刻におけるフィードバック量を元にしてその時刻におけるスイッチングの状態を決定する適切な制御則を与えればよい。本手法においては、スライディングモード制御の理論に基づいてこの制御則を与える。スライディングモード制御を用いれば、切換面を境界としたスイッチングにより制御則を与えることが可能になるので、スイッチングによる駆動が行われるステッピングモータへの適用に関して好都合となる。本システムにおいては、角度-トルク特性をある直線上に拘束することにより振動の抑制が可能となることを利用して切換面の設計を行っている。実験システムにこの手法を適用したところ、回転子慣性の変動に対してロバストに振動が抑制できることが実証された。また、先に述べた第1および第2のアプローチに比較した場合、本手法の方が振動抑制の効果が高いことが示され、開ループ駆動に対する閉ループ駆動の優位性も確認された。

上記3つのアプローチは、ステッピングモータをスイッチングにより駆動する場合に関するものであった。他方で、励磁電流値を微小量ずつ変化させ、回転子を微小角度ずつ移動させるマイクロステップ駆動に関しても、励磁電流値を適切に調整すれば、駆動時のトルク脈動が減少し、結果として振動の抑制が可能となる。この場合には、発生トルクそのものの振動分が減少するので、回転子慣性の変動に無関係にあらゆる状況において振動分が減少することになり、ロバスト性の保証につながる。これを考慮し、本論文における第4のアプローチとして、マイクロステップ駆動を行う場合に関し、モータの動的な特性を支配する角度-トルク特性を考慮した上で励磁電流値を調整し、これを用いて駆動を行う方法を提案している。

実際には、各マイクロステップにおけるトルク平衡点の移動を等間隔にしてその移動速度を一定とすることにより発生トルクの脈動を減少させることを考慮し、調整過程全体を現代制御理論におけるレギュレータとしてモデル化して励磁電流調整システムを構築している。これを用いて実際に励磁電流値の調整を行ったところ、トルク平衡点の移動が等間隔となるような励磁電流値が自動的に得られることが確認された。また、調整された励磁電流値を用いてモータを連続的に駆動したところ、回転子慣性が変化した場合でも、常に振動が減少するという結果が得られ、回転子慣性の変動に対するロバスト性を保証する上で実際に効果的となることが示された。

以上のように、ステッピングモータの回転子振動抑制のソフトウェア的な手法に関し、特に回転子慣性の変動に対するロバスト性を考慮して4つのアプローチを試み、そのいずれにおいても高い効果が得られることが確認された。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 土 谷 武 士

副 査 教 授 島 公 脩

副 査 教 授 長谷川 淳

副 査 教 授 酒 井 洋 輔

学 位 論 文 題 名

ステッピングモータの回転子振動抑制に関する研究

近年、FA・OA機器や家電製品等に用いられているステッピングモータは、スイッチングにより励磁を順次切り換えていくという方法で駆動が可能であり、デジタル量のみで動作指令を与えることができる。ただし、その駆動時には、回転子の慣性に起因して振動が現れるという大きな問題も生じる。

本論文において著者は、上記のような回転子振動を抑制する手法に関する検討を行っている。ここでは特に、駆動条件の変化に柔軟に対応できるソフトウェア的な手法を用い、従来考慮されてこなかった機器パラメータの変動に対するロバスト性を保証することを目的としている。具体的には、振動特性への影響が大きい回転子慣性の変動を考慮し、代表的な駆動法である開ループ駆動、閉ループ駆動およびマイクロステップ駆動に関して、以下に述べる4つのアプローチを行っている。

まず、第1のアプローチとして、ステッピングモータの開ループ駆動において、励磁シーケンスを調整して回転子振動を抑制する方法に関して検討を行っている。本手法においては特に、負荷の変動に対応するため、ハーフステップ振動抑制励磁シーケンスに関して、レギュレータの理論に基づいてその励磁タイミングを自動的に調整し、負荷変動に対応するアルゴリズムを構築している。また、このとき用いるステップ毎の角度情報を励磁電流波形からニューラルネットワークを用いて推定するというセンサレス化手法も提案している。実験により、駆動状況の変動に対して励磁タイミングが逐次適切な値に修正されることが確かめられた。

上記のアプローチには、励磁タイミングの調整期間が必要になるという欠点がある。これを解消するため、第2のアプローチとして、開ループ駆動に用いる励磁シーケンスそのものにロバストを持たせ、再調整を不要とする方法についての検討を行っている。

ステッピングモータの駆動時において、負荷の慣性が大きい場合には、回転子はトルク平衡点の位置変化に対して追従できなくなり、このずれが振動という形で現れる。本手法では、負荷慣性に最大値を設定し、この条件において、回転子がトルク平衡点からずれを生じない状態で追従可能である周波数の上限をモータの動特性に基づいて導き、トルク平衡点の時間変化波形をその周波数以下の成分のみを持つ非振動的な形状とするように励磁シーケンスの調整を行う。最大負荷時に回転子がトルク平衡点の移動に追従可能であれば、それ以外の場合条件でも追従は可能となるので、結局ロバスト性が保証されることになる。また、励磁シーケンスの自動調整法として遺伝的アルゴリズムを用いている。本手法を実験システムに適用したところ、回転子慣性の変動に対してロバストに振動を抑制できる励磁シーケンスを実際に得られることが確かめられた。

以上二つのアプローチは、開ループ駆動を行う場合に対するものであった、他方で、信頼性や高い制御性能を重視する場合は閉ループ制御が採用される。本論文における第3のアプローチとして、このような閉ループ系において回転子慣性の変動に対してロバストに振動抑制を行う方法の検討を行う。

本手法においては、スライディングモード制御の理論に基づいて制御則を与える。これを用いれば、切換面を境界としたスイッチングにより制御則を与えることが可能になるので、スイッチングによる駆動が行われるステッピングモータへの適用に関して好都合となる。本システムにおいては、角度トルク特性をある直線上に拘束することにより振動の抑制が可能となることを利用して切換面の設計を行っている。実験により、実際に回転子慣性の変動に対してロバストに振動が抑制できることが確認された。

上記3つのアプローチは、ステッピングモータをスイッチングにより駆動する場合に関するものであった。他方で、励磁電流値を微小量ずつ変化させ、ステップ角を細分化するマイクロステップ駆動に関しても、ステップ毎の移動量を一定とすれば、駆動時のトルクそのものの脈動が減少するので、回転子慣性の変動に無関係に振動が抑制されることになり、ロバスト性の保証につながる。これを考慮し、本論文における第4のアプローチとして、マイクロステップ駆動を行う場合に関し、モータの角度トルク特性を考慮した上で励磁電流値を自動調整する方法を提案している。調整された電流値を用いて実際にモータを駆動したところ、回転子慣性の変動に対するロバスト性を保証しつつ振動が抑制されることが実証された。

これを要するに、著者は、ステッピングモータの回転子振動抑制に関して検討を加え、性能改善のための新知見を得たものであり、ステッピングモータの駆動技術の進歩に対して貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。