

審査の結果の要旨

氏名 朱 洪 忠

本論文は、「**Servo Performance Enhancement of Motion Systems via Quantization Noise Suppression and Model-Based Friction Compensation** (量子化ノイズの抑圧とモデルベース摩擦補償を用いたモーションシステムのサーボ性能の改善)」と題し、メカトロニクスシステムの制御精度を改善するための量子化ノイズ抑圧と非線形摩擦補償を扱ったものである。量子化ノイズ抑圧のために、多項式近似法とオブサーバ技術を統合した凸最適化手法に基づく信号の再構成法と、センシングノイズを考慮したディザ技術とカルマンフィルタを用いた原信号の推定法を提案している。また、ゼロ速度近傍の機械システムの弾性変形を分析し、反転運動と非反転運動を考慮した新たな摩擦補償法を提案している。理論と応用の両方面から量子化ノイズと非線形摩擦の問題を解決し、実験によりその有効性を検証したもので、英文で記述された8章より構成されている。

第1章「**Introduction**」では、本論文の背景と研究の動機を述べている。モーションシステムのサーボ性能を改善するため、量子化ノイズの抑圧と非線形摩擦補償の過去の研究を分析し概説している。量子化で失った情報を正確に再現する必要があることと、運動条件を考慮した使いやすい摩擦補償法が必要であることを示した。これが本論文の動機であることを述べ、章の最後には本論文の構成を示している。

第2章から第4章まででは、量子化ノイズの抑圧と非線形摩擦の補償についての新しい理論的枠組を構築した。第2章「**Smooth Output Reconstruction Based on Convex Optimization**」では、線形システムにおける凸最適化手法を用いて量子化観測値から原信号を再構成するための理論を展開している。まず、 l_1 minimization を用いた多項式フィッティング手法で、信号の曲度により多項式の次数と係数を自動的に決定する。次に、オブサーバで推定した状態と量子化の特徴を活かした拘束条件により、精度を信号分解能以下に保った上で出力を滑らかに再構成する。この出力再構成問題は凸最適化問題に帰着している。最後に、この最適化問題を効率的に解くため、近似アルゴリズムも提案している。

第3章「**Quantization Noise Suppression Based on Dithering Techniques and Kalman Filter**」では、ディザ技術とカルマンフィルタを用いた量子化ノイズの抑圧を提案している。量子化ノイズを白色化する減算型ディザ技術と非減算型ディザ技術を紹介している。さらに、センシングノイズを考慮した上で、量子化ノイズを白色化する最適なディザを理論的に解析している。次に、白色化されたノイズの影響をさらに低減するためにカルマンフィルタを設計し、原信号を推定する手法を示している。

第4章「**Friction Model and Friction Compensation in Zero-Speed Region**」では、ボールねじステージシステムを対象にし、ゼロ速度領域におけるメカニカルシステムの弾性変

形を考慮した摩擦補償法を提案している。そのための新しいモデルを構築し、このモデルに基づくメカニカルシステムの弾性変形を分析している。ゼロ速度領域における運動条件に応じた弾性変形のパターンを解明している。次に、弾性変形を考慮した簡易な摩擦モデルを提案し、非反転運動も含んだ摩擦補償法を示している。

第5章から第7章まででは、前半部で構築した理論を、実際のモーションシステムへ適用している。第5章「Applications of Output Reconstruction Method」では、第2章で提案した量子化観測値からの原信号再構成法を、高精密ステージの位置制御系に対してシミュレーションと実験を行い、従来型の手法に比べて、サーボ性能が格段に優れていることを実証している。次に、提案法を速度推定に拡張し、DCモータに対してシミュレーションと実験を行い、有効性を示している。

第6章「Applications of Dithering Techniques Combined with Kalman Filter for Suppressing Current Quantization Noise」では、第3章で提案したディザ技術とカルマンフィルタを結合した量子化ノイズの抑圧法を、SPMSMモータの電流制御系に適用して、量子化ノイズで生じたトルクリプルが抑圧できることをシミュレーションと実験により検証している。これにより、サーボ性能が大幅に改善することを実証している。

第7章「Applications of Friction Compensation Methods in Zero-Speed Region」では、第4章で提案した摩擦モデルと摩擦補償法を、ボールねじステージに適用し、従来型の手法で摩擦の補償ができない非反転運動でも位置決め誤差が抑圧できることを実証している。また、高減加速度での反転運動でも、提案法はハードウェアの限界に近い高性能が得られることを示している。

第8章「Conclusion」では、本論文のまとめとして、提案した量子化ノイズの抑圧法と非線形摩擦の補償法を振り返り、それぞれの関連性を見通している。

以上これを要するに、本論文は、信号分解能の限界を超越する量子化ノイズの抑圧法と、メカニカルシステムに内在する摩擦の補償法を提案し、その理論の構築とともに、シミュレーションと実験によって、モーションシステムの高性能運動制御における有効性を実証し、産業界の発展にも大きく寄与するもので、電気工学、制御工学への貢献が少なくない。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。