審 査 の 結 果 の 要 旨

氏　　名　　大西　亘

本論文は，「High-Precision Motion Control for Nonminimum Phase Systems with Applications to Positioning Stages（非最小位相系に対する精密位置決め制御法と位置決めステージへの応用）」と題し，制御が難しいことで知られる非最小位相系の精密位置決め制御技術について，フィードフォワード・フィードバック制御の両面から取り扱ったものである。英語で記述された全９章と付録により構成されている。

精密位置決め技術は，半導体や液晶パネル製造装置をはじめ，工作機械，産業用ロボット，ハードディスク装置などに欠かせない技術である。その高速高精度の位置決め性能が製品の性能に直結しており，その要求性能は年々厳しくなっている。このような装置は，目標値追従性能と外乱抑圧性能を両立させるため，フィードフォワード制御器とフィードバック制御器をあわせ持つ２自由度制御を行うのが一般的である。そこで，制御対象が非最小位相系である場合，高性能なフィードフォワード制御器，フィードバック制御器を設計することが難しくなるという課題がある。非最小位相系は，i) 不安定零点を持つ系，ii) 遅延を持つ系，に大別される。

第１章においては，序論として精密位置決め制御の背景を述べた。そして，非最小位相系がもたらす制約について述べた。さらに，メカトロ機器の制御に用いられるディジタル制御が本質的に持っている零次ホールドによって生じる不安定な離散化零点が問題であることを述べた上で，その厳密な安定逆系の設計法であるマルチレートフィードフォワード制御法について概観した。

第 I 部の第２章においては，無限時間の Preview (未来の軌道を予見すること) と Preactuation (指令値が変化するより前に制御入力を印加すること)および，マルチレートフィードフォワード制御によりあらゆる零点配置の制御対象に対し完全追従することが可能な Preactuation Perfect Tracking Control (PPTC) 法を提案した。本手法は，離散時間系の零点には，1) 連続時間系の零点由来の真性零点，2) 離散化により生じる離散化零点，の２つがあることに着目し，それを別々に補償することを特徴としている。第３章においては， Preactuation を有限時間行うことを考え，Preactuation 中の出力を最適化し，Preactuation 後の完全追従を達成する手法を提案した。実際に目標軌道が印加される際の追従誤差が重要な半導体・液晶製造装置や工作機械において特に有効な手法である。さらに第４章においては，制御入力とプラント出力の制約を陽に考慮したうえで，最短時間 Preactuation 法を提案した。本手法により，Preactuation 時間と位置決め誤差，必要な制御入力のトレードオフを明確に定式化した上で，要求仕様を満たす最短の Preactuation 時間を導出することが可能となった。また，第５章においては，Preactuation を一切用いないという条件の上で，制御入力の制約とプラント出力の制約を満たした最適な状態変数軌道生成法を提案した。これは，Preactuation なしの条件における性能限界を示したと言える。第６章においては，

従来では高次モデルを用いることにより低下していた数値的安定性を，モード正準系を用いることにより向上させる手法を提案した。

第 II 部において，遅延をもつ制御対象への軌道追従制御法を提案した。遅延をもつ制御対象の例として，空気圧アクチュエータを取り上げた。空気圧アクチュエータは精密位置決めステージの軽量化・低価格化・低発熱化に大いに有用であるが，入力遅延や位置依存・無限次の共振により高帯域なフィードバック制御ができず，高精度位置決めが難しいという課題があった。そこで，第７章では入力遅延に着目し，純積分器を持つ制御対象にも適用可能な修正スミス法を提案・適用した。スミス法は通常漸近安定な制御対象にしか用いることができず，また軌道追従制御問題に用いられることは少ない。実際の空気圧駆動ステージに適用し，位置決め誤差が改善されることを確認した。本手法は，空気圧アクチュエータのみならず，通信を介するために遅延がある制御対象や化学プラントなど広く適応可能である。さらに第８章では，空気圧アクチュエータのチャンバ長依存でかつ無限個存在する共振モードを，波動方程式を用いて内部遅延によりモデル化した。さらに，通常波動方程式では考慮することが難しいダンピングもモデル化する手法を示した。次に，このモデルから共振モードのみを取り出す操作を行い，その逆系を求めることで Wave Cancellation Filter を提案した。このフィルタは，モデル化誤差がなければ波動方程式に起因する全ての共振モードを一つのフィルタで相殺することができる。

第９章では，本論文を振り返り，提案された手法の位置づけを行い，それぞれの関連性を見通した。従来は，軌道追従制御のためなるべく不安定零点を持たないよう強い制約を受けて機構設計を行うか，また不安定零点を持たざるをえない場合は近似逆系を用いて完全追従を諦めていた。そこで，Preactuation とマルチレートフィードフォワード制御を用いた提案手法により，機構設計の制約を緩和し，新たな選択肢を提示することに成功した。またその枠組は Preactuation 時間，制御入力，位置決め誤差の制約を陽に考慮したものであり，産業応用上の要請に対して達成可能な性能の答えを明確に与えるものである。また，空気圧アクチュエータを例にとり，遅延や位置依存性の共振を持つ制御対象への軌道追従制御法を提案した。これにより，安価であるが非最小位相系であるため精密位置決めに使いづらいとされていた空気圧アクチュエータを活用する道を開いたといえる。

以上これを要するに，本論文では非最小位相系の制御法について，不安定零点に対しては Preactuation とマルチレートフィードフォワード制御に基づく安定逆系設計法および最適状態変数軌道生成法を提案し，また遅延に対しては修正スミス法と Wave Cancellation Filter を提案し，それぞれ実験検証することで，非最小位相系の精密位置決め制御法をフィードフォワード制御・フィードバック制御の両面から確立したといえ，学界のみならず産業界においても大いに有用であることを実証したものであり，制御工学，電気工学，精密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。