

論文の内容の要旨

論文題目 Sliding-Mode Control Design for Spacecraft Maneuver

(宇宙機マヌーバのためのスライディングモード制御設計)

氏名 小島 広久

人工衛星、宇宙ロボットといった宇宙機は軌道上での修理が困難であるため、簡素で信頼性の高い制御手法が望まれる。本論文では、簡素で信頼性を要求される宇宙機のマヌーバ制御問題に従来のスライディングモード制御を適用した際に問題点が起きうることを指摘し、その問題を解決すべく、いくつかの非線形要素を導入した新しいスライディングモード制御設計法を提案した。そして、デブリ除去プロセスを構成するフォーメーションフライト、姿勢同期、ロボットハンド制御による捕獲ならびにアクチュエータ故障衛星の回転運動停止問題に適用し、その有効性を検証した。各章での概要は以下の通りである。

第1章では、まず、スライディングモード制御の宇宙機に適用された過去の研究事例を総括し、次にデブリ除去プロセスに要求される運動が位置・姿勢がカップリングした非線形制御問題であることについて述べ、従来の単純なスライディングモード制御を本問題に適用したときに発生する問題点を指摘した。また、宇宙機にはフォールトトレランス性が要求されることを述べた。そして、その解決にむけてスライディングモード制御にどのような機能を新たに開発追加すればよいかについて述べた。

第2章では、対象衛星との通信や捕獲対象衛星の故障個所の特定を可能するためのフライアラウンド運動制御手法について提案した。本提案制御手法は、対象衛星のチェイサ衛星カメラ視野上での位置を縦横個別に制御できるように厳密線形化手法を援用するとともに、チェイサ衛星カメラ視野から対象衛星がロストすることを防ぐための非線形ポテンシャル関数をスライディングモード制御に新たに導入した制御系である。提案制御系の安定性の証明を与えると同時に有効性を数値シミュレーションにより確認した。

第3章では、フライアラウンド運動により対象衛星の特定面を観測・追尾したチェイサ衛星が、その後、対象衛星を捕獲しやすいように姿勢運動を同期させるための制御手法について述べた。宇宙機の姿勢追従マヌーバに通常のスライディングモード制御手法を適用した際、制御の初期段階で大きな制御量が要求されることになり、姿勢制御のための燃料が限られている宇宙機にとっては望ましくない。そこで本研究では、対象衛星の回転運動

に滑らかに追従する「平滑規範モデル」と呼ぶ仮想の規範運動モデルを導入して2自由度制御問題にすることで初期制御量を低減した。さらに、対象衛星は非協力衛星であることを考慮し、対象衛星の慣性能率比を推定する適応則を導入し、対象衛星の回転運動に的確に追従できるスライディングモード制御系を設計した。そして宇宙機でよく用いられるクオタニオンフィードバックの一つであるアイゲンアクシスマヌーバ制御ならびに適応則を含まないスライディングモード制御と性能比較し、本提案法がより少ない制御量で姿勢誤差を効果的に減少でき、捕獲対象衛星の慣性能率比を正しく推定できることを確認した。

第4章では、姿勢同期が終了した後に行なうロボットハンドによる捕獲フェーズにおける制御手法について検討を行なった。宇宙ロボットハンドは地上ロボットハンドと異なり、ハンドの運動の反作用によりハンド先端の位置・姿勢が影響を受ける。この問題に対して幾つかの制御手法が過去に提案されているが、宇宙ロボットハンドの特異点を明示的に回避する制御手法を提案した例は過去にない。本研究では、宇宙ロボットが本体も制御できる自由飛行型ロボットであることに着目し、ロボットハンド特異点を効率よく回避するためのロボット本体移動タイミングと移動方向を決定する簡便な方法を考案した。本手法ではロボット本体の移動によりハンド先端への外乱が入力されるため、本体移動加速度分を相殺するようにハンド先端の制御加速度方向を仮想的に修正した。また、初期制御量の低減と定常偏差を少なくするために、切り替え面の傾きを変化させるゲインスケジューリングを実施した。ハンド特異点回避を含まない制御手法では特異点近傍でリミットサイクルに入り捕獲対象衛星の目標点までハンド先端を誘導できないのに対し、本提案手法ではハンド特異点が回避でき捕獲目標点へハンド先端を誘導可能であることを確認した。

第5章では、アクチュエータが1つ故障した非対称衛星の2トルクによる回転運動安定化問題を取り扱った。この問題は劣駆動制御問題に分類される問題であり、時変制御や切り替え制御などの手法が要求される制御問題である。これまでの研究では制御量の大きさがPWPFモジュレータを介して可変であることを前提にしたものが大半であった。しかしながら、PWPFモジュレータが故障し一定の大きさの制御量しか発生できない状況も起こりえる。特に修理ができない宇宙機においてはこの問題に対する制御手法を用意しておくことは衛星の延命すなわちデブリにさせないという意味で重要である。本研究ではこの問題に対処するために、制御量の大きさが一定であるという制約を設け、回転運動が安定化できる角速度の組み合わせの曲面(マニフォールド)を解析的に求めた。そして、任意の角速度状態から停止状態へ遷移するための制御トルク符号と制御の切り替えタイミングを、角速度軌道とマニフォールドとの交点として求める手法を示した。本手法は、フィードバック制御ではないためロバスト性はないものの、PWPFモジュールが故障した際のバックアップ制御手法として使用でき、また、回転運動停止までに必要な制御量・制御時間が見積もれる特徴を持ち、その妥当性を数値解析で確認した。

第6章では、本研究の成果をまとめると同時にさらなる研究課題について述べた。