

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 吉河 章二

工学修士 吉河章二提出の論文は、「宇宙における剛体間の衝撃力解析と回転物体の姿勢整定制御への応用」と題し、8章と付録からなっている。

宇宙ロボットが軌道上で物体を捕捉・回収して点検・修理・廃棄等のサービスを行うことは、デブリ化防止や高いコストを払って軌道上に投入した物体を最大限に活用する手段として構想され、これまでに広く検討されてきた。軌道上で物体を捕捉する技術は、協力的なターゲット、つまり姿勢制御により姿勢が安定している物体については、スペースシャトルや ETS-VII などの実験衛星ですでに軌道上実証されているが、非協力的なターゲット、つまり姿勢が不安定で高速に回転している物体については以下に述べる問題があって研究レベルに留まっている。まず、高速に回転するターゲットにハンドを追従させて捕捉するには機構的限界があり、仮に捕捉できてもターゲットの持つ大きな角運動量を瞬時に宇宙ロボットが受け持たなければならないという問題があった。また、捕捉時の制御のためには、ターゲットに接触する時に生じる衝撃力を捕捉に先立って予測する必要があるが、関節部に内在する剛性を考慮して過渡応答を含めたターゲットとハンドとの干渉の定式化と解析が行われていないために、正確な衝撃力予測のもとで収束性を保障した制御ができないという問題があった。

本論文では、これらの問題を踏まえ、軌道上で高速に回転しているターゲットを捕捉するための制御技術を開発することを目的として、衝撃力を中心にすえた一つの捕捉シナリオを提案した。まず、ハンドで衝撃力を繰り返し与えて姿勢運動を段階的に整定させ、ついで、捕捉に際して過度な衝撃力が発生しないようにハンドの接近速度や捕捉時の姿勢を選択した上で捕捉を行うという手法である。

この捕捉シナリオは、姿勢運動を整定させるためにどのような力積を与えたらよいかという「誘導」の部分と、その力積をどのように実現するかという「制御」の部分とに分けられる。「誘導」の部分について、衝撃力を与えることが可能な方向に制約があるときの姿勢整定制御則を示すとともに、接触部のモデル化誤差や運動の計測誤差と閉ループ系の安定性との関係を解析的に明らかにしている。「制御」の部分については、関節部に内在する剛性を考慮して過渡応答を含めたターゲットとハンドとの干渉を定式化し、衝撃力の評価式を導出し、数値シミュレーションとハードウェア実験でその有効性を検証している。

第1章は序論であり、軌道上での物体の捕捉の必要性と同技術の動向をまとめた上で、本研究の位置づけを行っている。

第2章では、物体の捕捉にかかわる従来技術を概観し、問題点を整理して、軌道上で高速に運動している非協力物体の捕捉が未解決の課題として残っていることを示している。

第3章では、衝撃力を中心にすえた捕捉シナリオを提案し、その中で本論文が扱う要素技術として、捕捉時の衝撃を事前に評価する技術と軌道上で高速に運動しているターゲッ

トの姿勢を整定制御する技術の2つを抽出している。

第4章では、ハンドがターゲットに接触後にターゲットが拘束される場合について、捕捉時の衝撃を事前に評価する技術を確認している。特に、ハンドで捕捉するという短い時間のダイナミクスに着目して、関節部の剛性および関節角制御の目標軌道の影響を考慮した力積の評価式を導出し、数値シミュレーションとハードウェア実験によりその有効性を検証している。

第5章では、第4章の手法をターゲットがはじかれる場合を含むように拡張し、目標とする力積をターゲットに与えるための技術を確認している。また、捕捉しやすさを定量化するために、ターゲットがはじかれるまでの接触時間とハンドに対するターゲットの最終的な相対速度の2つの指標を導入してその評価式を導出し、数値シミュレーションとハードウェア実験によりその有効性を検証している。

第6章では、高速に運動している物体に力積を与えてその姿勢を整定制御する場合の運動を定式化し、各制御時刻において適切な力積を算出する制御則を導出している。制御則の導出にあたり、制御力の飽和の問題も考察している。

第7章では、第6章で設計した制御則を用いて姿勢運動を整定する場合のロバスト特性を議論している。ロバスト特性として、対象物体に固定した座標系で見て一定外乱を受ける場合、接触部にモデル化誤差がある場合、および衛星の角速度の計測値に誤差がある場合について、閉ループ系の挙動を解析している。特にモデル化誤差については、制御ゲインとの関係によっては解が不安定になったり挙動のパターンが変化したりすることを示し、安定性やパターン変化の条件を明らかにしている。これらの解析は数値シミュレーションにより妥当性を検証している。

第8章は結論であり、提案した制御方法と検討の結果得られた知見をまとめ、今後の課題と展望を述べている。

付録では、第4章から第7章で使用した式の導出を説明している。

以上要するに、本論文は、軌道上で高速に回転している物体を捕捉するという、宇宙インフラストラクチャに欠かせない機能の実現に向けて、衝撃力を中心にすえた捕捉シナリオを提案し、姿勢運動の整定制御則と整定に用いる衝撃力の事前評価方法を具体的に提示し、解析、数値シミュレーションおよびハードウェア実験を通じてその有効性と適用範囲を検証したものであり、宇宙工学上貢献するところが大きい。

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。