

学位論文内容の要旨

北海道工業大学大学院工学研究科

機械システム工学専攻

博士後期課程

熱流体システム部門

申請者氏名

石川 智浩

画像処理技術を利用した超小型衛星の制御に関する研究

人工衛星を利用した位置計測や気象観測・通信は、今や我々の生活になくてはならない技術である。人工衛星は1960年代から打ち上げられ、その数は増加の一途を辿り、現在では数千に及ぶ人工衛星が運用されている。しかし、その一方で将来の人工衛星打ち上げに危機的で重大な問題が発生している。人工衛星は、通常長くても寿命により10数年で運用停止となるが、度重なる不具合や事故、隕石の衝突により突如として宇宙航行できなくなった場合などにより運用停止に陥ったケースは数多く存在する。その結果、宇宙に漂流するいわゆる“宇宙ゴミ”は数千機に及んでいる。この“宇宙ゴミ”は、さらなる“宇宙ゴミ”との衝突により、指数的に数を増やしており、新たなロケットの打ち上げや人工衛星運用の大きな弊害になりつつある。現在、この問題を解消するために様々な方向から検討が進められているが、その一つに軌道上サービス衛星として使用する超小型衛星が期待されている。

軌道上サービス衛星とは、故障や燃料切れが原因で運用を停止した人工衛星の調査や補修、燃料補給などを行う宇宙作業用ロボット衛星のことである。軌道上サービス衛星の研究は、近年多数の研究者により検討されており、時代の進歩とともに、その実現性は高まってきている。最近では、その一部となるロボットアームがスペースシャトルや日本の技術実証衛星で実験されている。軌道上サービス衛星に求められる機能は、接近・接触・作業であり、上述の宇宙ゴミのケースでは、接近・回収に続いて修理もしくは投棄があげられる。とくに、接近に関しては信頼性の高い技術が必要であり、衛星には近距離での相対位置や姿勢を検出するセンサが必要不可欠である。相対位置を計測するには、レーザーレンジファインダなどの光学距離センサがあれば計測できるが、レーザー光を照射するには、計測対象との相対姿勢情報が必要である。現在、相対姿勢センサとして最も有望視されているのが、カメラを用いた画像計測技術を利用するものである。

「画像情報による対象物体の位置計測および制御」技術は、産業ロボット分野を中心に浸透し数多く実用化されているが、宇宙分野への適用例は少ない。この技術の宇宙分野への応用は、過去に様々な理論的検討や計算機シミュレーションが行われてきたが、実験的検討を行うことが非常に難しい。産業ロボット分野の画像処理においては、二次元解析の実験的検討が安易であることから急速に発展したが、三次元での適用は少ない。対象が宇宙機になると、上述した軌道上サービスの場合には三次元的な画像処理解析を必要とし、さらに実験環境は無重力三次元空間を模擬しなければならない。

画像情報による宇宙機の位置計測および制御の技術は、人工衛星や天体に接近・着陸・ドッキング

グする際には非常に有用である。特に対象物体との相対姿勢計測および制御においては、数ある計測制御技術の中でも画像処理を利用するものが最も適しており、今後の宇宙開発分野で発展させる価値と意義がある。本研究では、この技術の将来性と技術的価値に着目し、過去の研究例が少ない実験的研究の側面から検討を行った。

本論文では、画像処理技術を利用した超小型衛星の相対姿勢計測および制御に関する技術の将来性と技術的価値を説明し、この技術に関する実験的検討の結果と考察を述べている。

第1章では、軌道上サービス衛星のキーテクノロジーである「画像情報による宇宙機の相対姿勢計測および制御」について概観し、本研究の目的と実験的検討内容の意義について述べている。

第2章では、実験場所や実験条件について述べている。実験場所は無重力実験施設（北海道上砂川の地下無重力実験センター）であるため、この実験施設の仕様に合わせた実験条件を提示している。また、軌道上サービス衛星を模擬した超小型衛星と故障した衛星に相当する対象物体両者の位置関係や画像処理システムの構築条件を示している。

第3章では、実験で用いた画像処理による対象物体の特徴点検出および相対姿勢計測方法について説明し、実測値と計測値の比較をすることで、画像処理による計測誤差の検討結果について述べている。すなわち、画像情報から得られる対象物体の特徴点を幾つか検出し、画像上の特徴点の動きから対象物体との相対姿勢計測を行う手法を提案している。

第4章では、姿勢制御 CPU の宇宙放射線実験の意義、宇宙放射線実験評価方法、実験方法、実験機器を説明し、宇宙放射線耐性評価について述べている。地球周辺の宇宙空間で降り注いでいる宇宙放射線は、CPU や SRAM などの記録情報の損傷や素子破壊を引き起こすことから、姿勢制御 CPU がどの程度の頻度でこれらの影響を受けるかが重要な問題となる。本章では、この問題を宇宙放射線実験により明らかにし、実験結果で得られた影響内容をもとに、姿勢制御回路の設計指針を提示している。本 CPU は市販部品であり、この実験は民生技術の宇宙転用化として位置づけられる。実験手法は、電離放射線影響に関する試験および解析方法に準拠しており、宇宙放射線の影響については、宇宙用 CPU 評価用のエラー発生確率予測解析ソフトを用いている。評価結果から市販 CPU が宇宙用 CPU に劣らない宇宙放射線耐性を持っていることを定量的に明らかにしている。

第5章では、超小型衛星用姿勢制御アクチュエータである超小型リアクションホイールについて、性能や仕様の説明、無重力実験の結果について述べている。本研究では、超小型リアクションホイールと角速度センサを取り付けた衛星模擬機を製作し、無重力三次元空間での衛星姿勢制御実験を行っている。

第6章では、無重力下における超小型衛星の画像情報を利用した対象物体との相対姿勢制御の実験について説明し、重力下一次元空間での1軸相対姿勢制御実験と無重力三次元空間での3軸相対姿勢制御実験の結果と考察を述べている。すなわち、本研究で製作した実験装置を無重力三次元空間で機能実証を行うことにより、重力下での実験で現れなかった多軸での姿勢制御効果が、無重力三次元空間で現れていることを確認した。その結果から、無重力三次元空間での実験の重要性を指摘している。

第7章は本論文の結論であり、本研究で開発した画像処理装置の実験的検討結果と研究成果を要約している。

本研究により、無重力三次元空間における「画像情報による宇宙機の相対姿勢計測および制御」の技術を実証することができ、軌道上サービス衛星としての超小型衛星の今後の開発にとって有用な基礎資料を得た。