

修士（工学）久保勇貴提出の論文は「Simultaneous Body Reconfiguration and Nonholonomic Attitude Reorientation of Free-flying Space Robots（フリーフライング宇宙ロボットの形態再構成と非ホロノミックな姿勢変更の同時実現）」と題し、英語で書かれ、本文8章と付録からなっている。

多自由度・大変形が可能なフリーフライング宇宙ロボットは、宇宙環境で多目的の作業を適応的にこなす宇宙システムの有力な候補である。事実、燃料補給、修理、デブリ回収などの軌道上サービスの構想が近年盛んに提案されている。

これらの構想の多くは、ロボットアームなどの多自由度・大変形可能な部位を具備する宇宙システムを念頭に置いた宇宙ロボティクスの問題に帰着される。このようなシステムを宇宙で実用的に機能させるためには、ロボットの形態と姿勢を同時に目標に到達させる制御が必須である。内力アクチュエータによるフリーフライング宇宙ロボットにおける姿勢運動は非ホロノミック性を有することが知られ、宇宙ロボティクス分野で多く研究がなされてきた。非ホロノミック性の特徴は、順問題が容易に解ける一方で、逆問題を解く一般解法が存在しないことである。逆問題の求解が難しいために、従来研究の多くは、多自由度マニピュレータの動きにより生ずる反力トルクを打ち消すためにベース部の衛星本体に制御アクチュエータによるトルクを印加することを前提にしていたり、運動を平面等に拘束することで一部の非ホロノミック性が発現しないように制約を課していたりしており、多自由度・大規模・複雑な変形をするフリーフライング宇宙ロボットの形態と姿勢を、一般性を損なわずに同時に制御する手法は未開拓であった。

そこで本研究では、多数のボディ要素が回転ジョイントで接続された多自由度・大変形可能な宇宙システムを「トランスフォーマーロボット」と呼称し、その形態と姿勢を同時制御する変形経路生成問題、すなわち上述の逆問題の解法を取り扱っている。全回転ジョイントの角度と宇宙機の全機形態・姿勢を結びつけるキネマティクス方程式を導出した上で、その全回転ジョイントの角度経路を設計する問題に帰着した。その上で本研究では、「区分直線法」「多様体法」という2つの手法を構築している。これらは所望の形態と姿勢を同時達成することを企図した運動計画法であり、その得失や有効性、限界を、解析的手法と数値シミュレーションにより考察している。

第1章では、序論として、多自由度・大規模変形可能なフリーフライング宇宙ロボットの研究の必要性を述べ、従来研究の課題と対比しながら本研究の意義を説明している。また、本研究が扱うトランスフォーマーロボットのコンセプトを提示している。

第2章は、フリーフライング宇宙ロボットの姿勢運動を取り扱うにあたり必要な定式化と、非ホロノミック系の一般的な性質の整理などを行っている。

第3章は、前章の定式化をもとに、姿勢運動の解析を実施している。角運動量ゼロ、外力ゼロのシステムに対して、ジョイント角速度を制御入力としたキネマティクス方程式を導出した上で、Magnus展開を利用することにより、変形時の姿勢運動の一般解を導出している。また、Magnus展開の各項が積分可能となるようなジョイント駆動パターンを例示し、特にジョイント空間を直線的に動く場合の解（直線解）の有用性を示している。さらに、

任意の初期状態から任意の終端状態へ到達する変形過程が物理的に実現しうるか、すなわち可到達性についての考察を加えている。

第 4 章は、前章を受けて、任意の初期状態から任意の終端状態に到達する区分直線経路の設計法（「区分直線法」と呼ぶ）を提示している。ジョイント空間内で任意の数の経由点を設定し、その間を直線で結ぶ経路を作成した上で、経由点の配置を最適化するアルゴリズムを導出した。また、特異点の存在により、可解性が保証できないなどの課題が抽出された。

第 5 章は、第 3 章で導出した直線解の多様体構造を活用することで、準フィードバック的に、所望の形態および姿勢に収束させる手法（「多様体法」と呼ぶ）が提示されている。本手法はフィードフォワード的な第 4 章の手法と対照的な性質を有しており、局所的な誤差の補償に適していることが示されている。

第 6 章は、区分直線法と多様体法の両運動計画で可到達性の妨げとなる、特異点の性質について考察した上で、複数の特異点回避策を考案し、実用的な活用法を提示している。

第 7 章は、実応用例として、トランスフォーマーロボットを太陽-地球ラグランジュ点まわりの太陽光圧を利用した人工周期軌道に投入し、形態・姿勢の同時制御により平衡姿勢を操作して目標軌道を維持する数値シミュレーションを実施し、本研究が提唱する制御法の実用性を評価している。

第 8 章は、本論文の結論と今後の課題について述べている。

以上要するに、本論文は、多自由度・大変形が可能なフリーフライング宇宙ロボットの形態と姿勢を同時制御する変形経路生成問題を取り扱っており、求解困難な非ホロノミック系の逆問題を、ジョイント空間内の大域的な経路に対する姿勢運動の解析解を利用して求解する具体的な手法と、その有効性および限界を、解析的手法と数値シミュレーションにより示したものであり、宇宙工学・システム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。