

# 「力学構造」「非線形性」「確率」を特色とした 宇宙機の軌道・姿勢制御技術開発

機械工学専攻 知能制御学講座

宇宙機ダイナミクス制御領域 教授 佐藤 訓志

## 1. はじめに

私は、2017年4月に知能制御学講座に講師として着任し、2019年10月に同准教授を経て、2022年5月16日付で教授に昇任いたしました。本学に着任する前は、2010年3月に名古屋大学で学位を取得した後、同年4月から広島大学大学院工学研究院機械システム・応用力学部門の助教として、教育・研究活動に取り組んできました。広島大学在職時までは、ダイナミクスが非線形微分方程式で表される非線形システム、ハミルトンの正準方程式を一般次元へと拡張した一般化ハミルトン力学系、非線形確率微分方程式で表されるダイナミクスに確率的不確かさを伴う非線形確率システムをそれぞれ対象とした制御理論を開発してきました。本学に着任してからは、これらの先進的な制御理論を強みとした宇宙機の次世代制御技術開発に注力して参りました。宇宙機の軌道・姿勢運動は本質的に非線形であり、従来法の多くが必要とする線形近似が不要である本研究のアプローチは、近似誤差の抑制、安定化可能領域の拡大、制御性能の向上が可能となります。また、宇宙機の運動は一般化ハミルトン力学系として記述でき、一般化正準変換、対称性、エネルギー散逸などの力学系特有の性質を陽に利用することで、自然で高効率な制御器が導出できます。さらに、宇宙環境や各種センサには不規則外乱やノイズが伴うため、確率システム解析を用いて推定や制御への影響を解析することで、従来の確定解析では得られない確率的不確かさに対する定量的な性能評価や解析的な性能保証を与えることが可能になります。ここでは、研究テーマの中から軌道制御と姿勢制御に関するトピックを一つずつご紹介します。

## 2. 力学系の時間発展対称性を利用した未知重力場での学習的最適軌道制御

小惑星探査ミッションにおける困難として、事前に目標小惑星の十分な精度の力学モデルが得られないこと、小惑星は形状が一様ではなく不規則な重力場を形成することがあります。本研究では、一般化

ハミルトン力学系の時間発展対称性を利用した勾配計算法に基づく最適制御の学習的解法を開発しました。提案法は、制御対象のモデル情報を用いず、実際の軌道運動から得られる入出力情報のみから、設計者が定めた評価関数

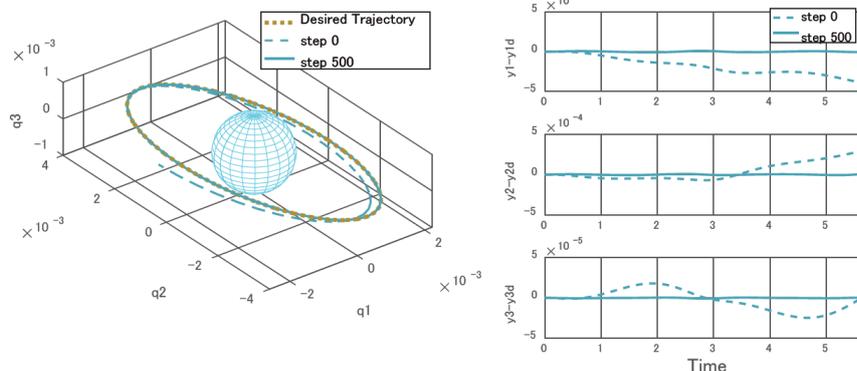


図1 学習最適制御による未知重力場での軌道追従制御の結果

を最小化するための制御入力に関する勾配情報が計算できます。これにより、事前の力学モデルを必要とせず、未知重力環境下における複数回の周回軌道運動の情報から、追従誤差と推力消費を最小とする最適な制御器の学習的生成を可能としました。図1左図中の点線が目標周回軌道、破線が学習前の周回軌道、実線が学習後の周回軌道を表しています。右図は天体中心座標系における目標軌道に対する軌道誤差の時間履歴です。未知の重力摂動の影響で、学習前は目標軌道に十分に追従できていませんが、周回軌道の情報を用いた学習により、最小の燃料消費で目標軌道に追従する最適軌道追従制御器を獲得しています。

### 3. 確率的不確かさ考慮した姿勢運動の確率システムモデルの構築と姿勢制御実験

本研究では、大気ドラッグ、太陽光輻射圧、地磁気などの環境外乱やセンサノイズに含まれる確率的不確かさを伴う宇宙機の姿勢運動を、確率システムとしてモデル化し、確率システム制御理論および確率解析を駆使した系統的な姿勢制御器の設計法およびその定量的な性能保証を与える枠組みを開発しました。図2左図は、研究室で開発した宇宙空間における3次元姿勢制御が地上で模擬できる実験装置です。宇宙機を模した金属テーブルに自律制御のためのコンピュータ、姿勢変更アクチュエータとしてコントロールモーメントジャイロ(CMG)4基、加速度・ジャイロセンサなどが搭載されており、テーブル底面の球面軸受けから圧縮空気を送ってテーブルを浮上させ、重りの位置を調整して実験機の質量中心と回転中心を一致させることで、摩擦と重力トルクの影響を低減し、宇宙空間における3次元姿勢制御が検証可能となっています。センサノイズの統計的特性を考慮した姿勢制御実験装置の確率シ

ステムモデルと実験結果の比較を右図に示しており、目標姿勢に追従する姿勢追従制御系を設計し、センサノイズに対する姿勢追従の二乗平均誤差に関する定量的な上限を導出し、実機実験においてその有効性を示しました。

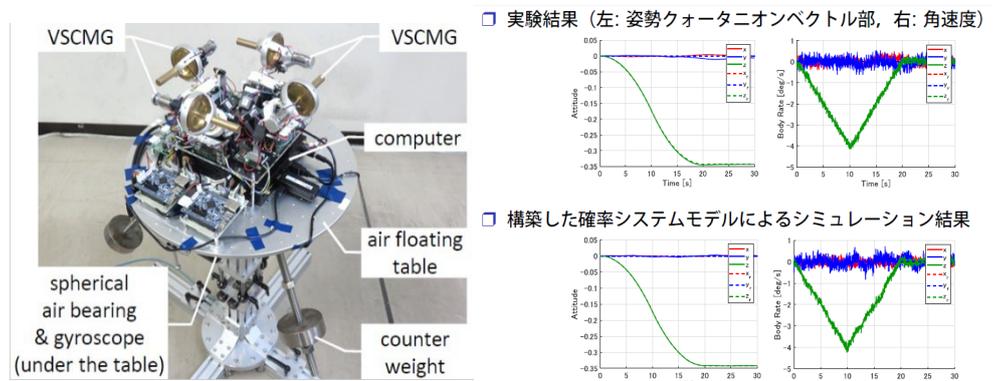


図2 CMG搭載姿勢制御実験機と構築した確率システムモデル

### 4. おわりに

本領域は機械工学専攻の中にある宇宙工学に関する研究室であるという特色を積極的に活かし、機械工学と宇宙工学の相互発展のためのハブとなり両分野の融合領域を開拓していく所存です。本学機械工学専攻で養った力学と制御の高い専門性を活かした宇宙機制御技術を有する人材を積極的に宇宙工学の第一線に輩出し、一方で宇宙工学にあるニーズ・シーズを積極的に取り込むことで、機械工学の発展や新たな価値創造を目指します。

(名古屋大学 機械航空工学科 2005年卒  
機械理工学専攻 2007年前期 2010年後期)