

補助事業番号 2024M-437
補助事業名 2024年度 柔軟ネットを用いた宇宙デブリ捕獲シミュレータの開発 補助事業
補助事業者名 九州工業大学 永岡健司

1 研究の概要

本研究では、近年研究開発が本格化している、柔軟なネット構造（網）を用いた宇宙デブリ（宇宙ゴミ）捕獲技術を実応用レベルに引き上げるべく、微小重力環境下において、多様な形状・慣性・運動を有する浮遊するデブリを柔軟ネットで捕獲する際の動的挙動を包括的に解析可能な動力学シミュレータを開発する。とりわけ、従来研究では積極的に議論されてこなかった柔軟なネット同士の絡まり合い挙動、さらには複雑形状を有する浮遊デブリと柔軟ネットとの三次元の引っ掛かり現象を数理的に表現し、捕獲完了までの捕獲フェーズを一貫して評価・解析できる計算機環境を構築する。これにより、地上において柔軟ネットの設計最適化や捕獲前後で必要となる制御則構築を促進し、信頼性を担保した宇宙デブリ捕獲システムの実用化を加速させることができる。本研究で開発する動力学シミュレータは、汎用的な高性能演算装置1台を前提として、計算コストを最小化した動力学モデルを新たに導入することで、柔軟ネットを用いた宇宙デブリ捕獲技術の実用化を押し進める個人や組織が広く利用可能な基盤技術である。また、本研究においては、柔軟ネットを用いた宇宙デブリ捕獲の数理モデリングを精緻化と計算機への実装を並列して押し進める研究開発体制により、動力学シミュレータの開発を実現した。加えて、動力学シミュレータの結果を実験結果と比較・検証・評価するため、模擬無重力環境（屋内実験室での模擬実験、および落下塔を用いた微小重力実験）での柔軟ネットを用いた宇宙デブリ捕獲挙動に関する試験装置の製作と実機試験を実施した。本研究では、これら実験結果との比較・検証を通じて、開発した動力学シミュレータの妥当性・有効性を示す成果を実現している。

2 研究の目的と背景

現在、国内外で宇宙利用が急拡大する一方で、持続可能な宇宙環境の利用に向けた障壁として、故障した人工衛星やロケット部品に代表される、地球周回軌道上の宇宙デブリの除去は喫緊の課題とされている。一般に、宇宙デブリは大小さまざまな形状を有しており、その多くは姿勢や軌道が制御不能な状態で複雑にスピン運動している。近年、柔軟ネット（網）を用いた宇宙デブリ捕獲技術の研究開発が本格化しており、デブリの形状・慣性（質量・慣性モーメント）・運動に依存しない捕獲手法として有望視されているが、その研究開発は萌芽段階であり、実用化に向けた技術課題は山積している。従来研究では捕獲初期フェーズの柔軟ネットを展開する射出法に関する技術開発が主流であり、その後の捕獲完了フェーズまでを包括した技術への発展が望まれる。とりわけ、柔軟ネットと宇宙デブリとの複雑な絡まり合いや引っ掛かり、さらには捕獲後にデブリのスピン運動によってネットが振り回される

挙動を適切に解析できる基盤技術が必須である。加えて、地上で軌道上の微小重力環境を再現して実機実証を実施することが容易ではないことから、動力学モデルに基づく数値解析技術の活用で実用化を後押ししていくことが切望されている。

以上の背景を踏まえて、本研究では、持続可能な宇宙環境利用を実現するための、多様な形状・慣性・運動を有する宇宙デブリを対象に、柔軟ネットによる捕獲フェーズを包括的に解析可能な動力学シミュレータを開発することを目的とする。柔軟ネット構造と宇宙デブリとの複雑かつ高次元な接触現象をモデル化し、柔軟ネットの射出・展開から捕獲完了までの一連の動作を動学的にシミュレーションすることで、実用化に向けた当該技術の信頼性の定量的な評価を実現する。

本研究では、柔軟ネットを用いた宇宙デブリ捕獲の動力学シミュレータ開発に向けて、以下の4項目を具体的な目的（技術課題）とする。

- (1) 省計算コストな動力学モデリングと計算機実装
- (2) 屋内実験室での模擬実験解析
- (3) 落下塔での微小重力実験解析
- (4) 動力学シミュレータと実験結果との比較検証

3 研究内容

- (1) 省計算コストな動力学モデリングと計算機実装

本研究では、宇宙デブリと相互作用する柔軟ネットの動学的挙動をモデル化する。ネットの変形、ネットとデブリの接触、ネット同士の接触のモデルを複数の方程式を組み合わせで表現する。これらの相互作用をモデル化することで、軌道上で宇宙デブリを捕獲するプロセスを定量的に評価とする動力学シミュレータの開発を目指す。

① 動力学モデリングの前提条件

はじめに、動力学モデリングに際して以下の前提条件を設定した。

- ネットとデブリの接触は常に相対的な滑りを伴い、動摩擦のみを考慮
- ネットのサイズ、質量、力学特性（軸剛性係数、減衰係数）は既知
- デブリのサイズ、質量、重心、慣性モーメント、直進速度、回転速度は既知
- ネットとデブリ間の力学特性（軸剛性係数、減衰係数、動摩擦係数）は既知
- デブリ捕獲を行うチェイサー衛星の運動は制御可能

次に、モデル化に用いた座標系として、実験時の鉛直上向きまたはネットの進行方向をz軸とした右手系の慣性座標系（xyz座標系）と、接触面座標系（ntb座標系）を設定した。接触面座標系（ntb座標系）は、ネット格子点とデブリとの接触面およびネット格子点同士の接触面を基準として、垂直方向（n軸）と水平方向（t軸、b軸）に軸を持つ。

動力学モデルの詳細は、以降の②③④に分けて記述する。

② ネットの変形の動力学モデル

先行研究より、ネットの変形時に各格子点に働く力は、線形ばねダンパモデルで表現できるとしてモデル化をおこなった(図1)。このとき、ネットの変形時に格子点が隣り合う点から受ける力をモデル化した。この変形力のモデルには、ネットの軸剛性係数、減衰係数、格子点と隣り合う点との距離、展開状態における格子点と隣り合う点との基準距離が、パラメータとして含まれる。

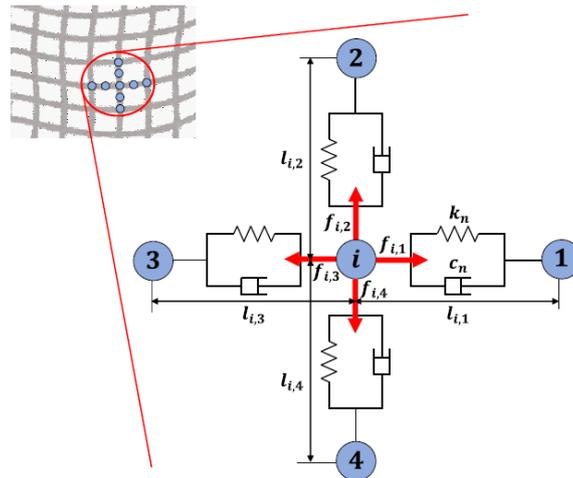


図1：ネット変形の動力学モデル

③ ネットとデブリの接触の動力学モデル

ネットとデブリの接触時には、ネット格子点はデブリに仮想的にめり込む(貫入する)ものとし、ネット格子点のデブリへの仮想めり込み量を定義した(図2)。本モデルでは、デブリがネットの格子点から受ける垂直抗力と動摩擦力をそれぞれモデル化した。垂直抗力ベクトルは、上記②と同様に、線形ばねダンパモデルで表現できるものとした。これら接触力のモデルには、ネット格子点のデブリへの仮想めり込み量ベクトルと仮想めり込み速度、垂直抗力を表現する軸剛性係数と減衰係数、ネット格子点に対するデブリ表面上の接触点の相対速度の接触面との平行方向成分が含まれる。

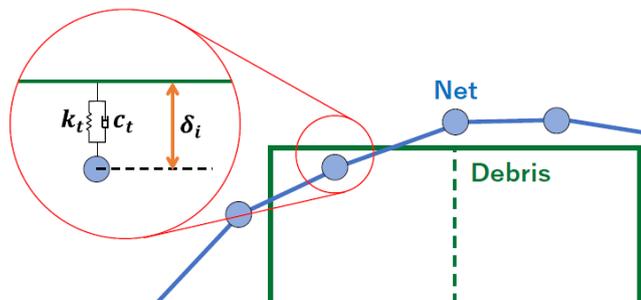


図2：ネットとデブリの接触力モデル

④ ネット同士の接触の動力学モデル

ネットの格子点同士の接触挙動は、接触後の各格子点の速度が運動量保存則と反発係数の関係式で表現できるものとしてモデル化した。これは、ネットの各接触点は相対的に軽量であり、接触が短時間で完了することから、計算コストを最小化する目的で離散モデルによって表した。本モデルには、ネット格子点の質量、接触前後のネット格子点の速度に加えて、接触パラメータとして相対速度に基づく反発係数が含まれている。これにより、図3に示すようなネット同士の絡まりあいの表現を実現した。

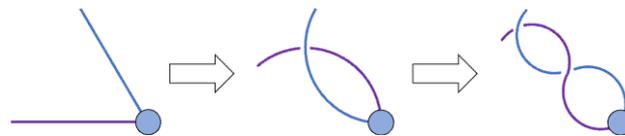


図3：ネット同士の絡まりあいの表現

また、ネット同士の絡まりあい挙動を検証するシミュレーションとして、ネットの折り畳み動作の解析をおこなった。図4にシミュレーション結果を示す。これにより、低計算コストでネット同士の接触を表現可能であることを示すことができた。

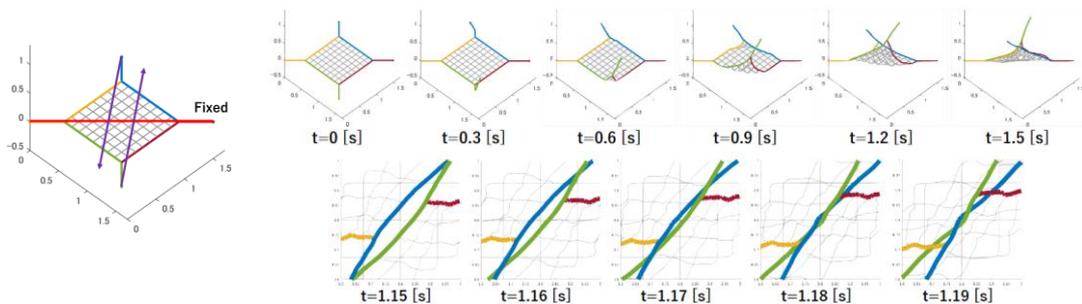


図4：ネット折り畳み動作のシミュレーション解析の結果

(2) 屋内実験室での模擬実験解析

① ネットの軸剛性係数の推定実験

実験で使用する柔軟ネットの変形時の軸剛性係数を推定するために、ネットの静的たわみ形状に関する実験とシミュレーションの比較を実施した。図5に比較結果を示す。これにより、柔軟ネット（実物）の軸剛性係数を決定した。

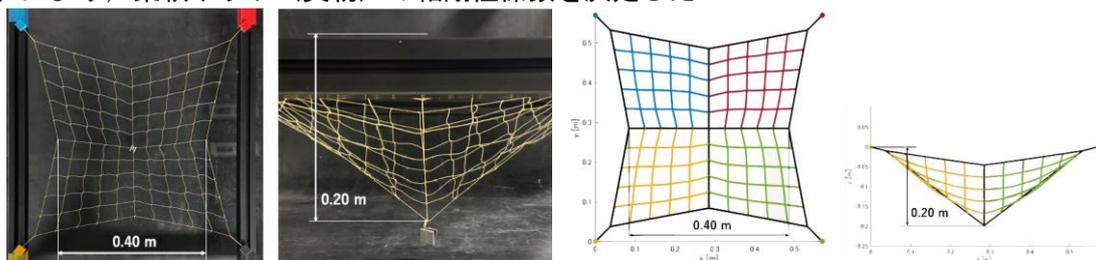


図5：ネット軸剛性係数の比較結果

② 自由落下するデブリの捕獲実験

構築したネットの変形の動力学モデル，ネットとデブリの接触の動力学モデル，ネット同士の接触の動力学モデルの妥当性を評価するために，展開状態のネットに対してデブリを自由落下させる実験を実施し，動力学シミュレーションの結果との比較解析を実施した．図6に比較結果を示す．実験では，画像解析からデブリおよびネット四隅の錘の位置を解析した．比較結果より，動力学シミュレーションによって，デブリの包み込み捕獲挙動を再現できていることが定量的に確認でき，妥当性を示すことができた．

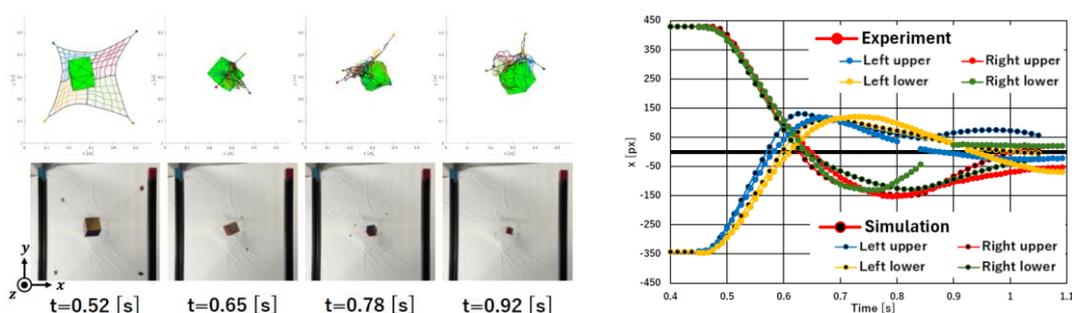


図6：自由落下するデブリの捕獲実験との比較結果

(3) 落下塔での微小重力実験解析

北海道赤平市にある株式会社植松電機が保有する落下塔施設COSMOTORREを用いて，微小重力環境下での柔軟ネットによる浮遊デブリの捕獲実験を実施した．図7に落下塔施設の外観および落下カプセル内の実験装置の概観を示す．本施設は，世界でも三箇所しか現存しない質の高い微小重力環境を比較的短時間模擬することが可能な実験設備であり，国内唯一の大型実験施設である．落下塔の高さは約50mであり，約3秒間の微小重力環境を作り出すことができる．これにより，軌道上の微小重力に近い環境における動力的な挙動を観察・解析することが可能である．

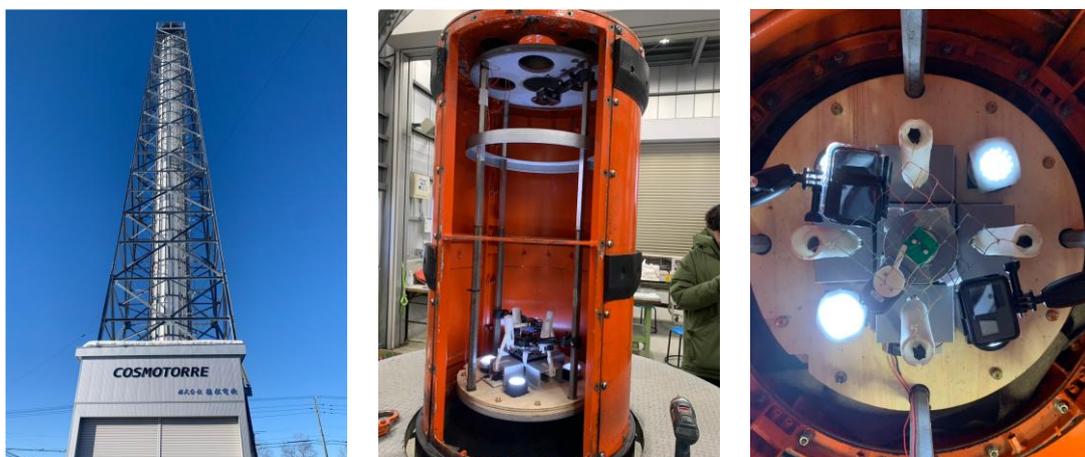


図7：自由落下するデブリの捕獲実験との比較結果

図8に落下塔微小重力実験における結果の一例を示す。ネットによるデブリ捕獲の動的挙動を複数のカメラで撮像し、自由落下実験と同様に、画像解析からデブリおよびネット四隅の錘の位置を解析した。その解析結果に基づいて、ネットの動的挙動の時間履歴を解析し、動力学シミュレーションの結果とも相違ない挙動であることが確認できた。これにより、開発した動力学シミュレーションの有効性を確認することができた。

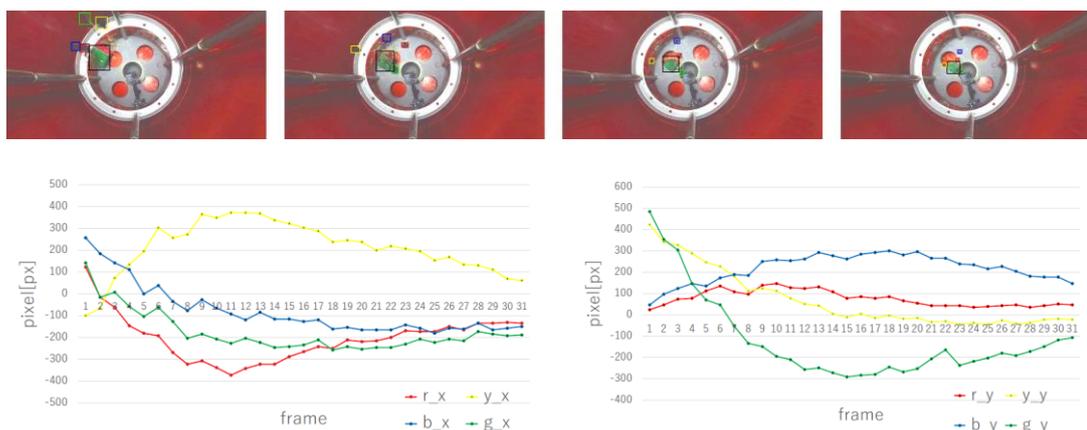


図8：自由落下するデブリの捕獲実験との比較結果

(4) 動力学シミュレータと実験結果との比較検証

動力学シミュレータと実験結果との比較検証としては、前項(2)(3)にてまとめて示してある通りであり、本研究で目標としていた柔軟ネットによる宇宙デブリ捕獲を解析可能な動力学シミュレーション環境が構築できたと結論付けられる。

4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

本研究の成果は、世界中で実用化に向けて研究開発が本格化する柔軟ネットを用いた宇宙デブリ捕獲を支える動力学シミュレーション技術である。柔軟ネットによる宇宙デブリ捕獲の設計・開発・解析に直接的な結果を定量的に提示することが可能な基盤技術であることから、実用化を目指した多様なネット構造とデブリの組み合わせに対して、幅広く応用・展開していくことが期待される。地上実験との整合性を保証した動力学シミュレーションを開発できたことにより、実社会への応用につなげていくことが期待できる。

5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

本研究において、柔軟ネットによる宇宙デブリ捕獲に関する動力学シミュレータを開発し、ネットの射出から捕獲完了までを表現可能な数値解析環境を構築した。宇宙デブリ捕獲は世界的にも関心が寄せられる宇宙開発が抱える環境問題であり、軌道上サービスの中核技術として、今後ますます研究開発が加速していくことが見込まれる。本研究で得られた成果を基盤技術として、実用化に向けて、高信頼な柔軟ネット捕獲手法の実現を目指した研究開発を進めていく。

6 本研究にかかわる知財・発表論文等

大山達也, 伊藤悠真, 吉田亮介, 永岡健司: スペースデブリ捕獲のための地上実験に基づく柔軟ネットの挙動解析, 第42回日本ロボット学会学術講演会, #2K2-06, 2024年9月.

Tatsuya Oyama, Kenji Nagaoka: Dynamics simulation involving entanglement of flexible nets for space debris capture, The 17th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space, #S3.P2-3 (pp. 118-126), 2024年11月.

大山達也, 森友哉, 永岡健司: スペースデブリ捕獲時の柔軟ネットの包み込みと巻き付きに関する動力学シミュレーション, ロボティクス・メカトロニクス講演会2025, 2022年6月.

7 補助事業に係る成果物

(1) 補助事業により作成したもの
該当なし.

(2) (1) 以外で当事業において作成したもの
該当なし.

8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名: 九州工業大学 大学院工学研究院 (ダイガクインコウガクケンキュウ
イン)

住 所: 〒804-8550

福岡県北九州市戸畑区仙水町1-1

担 当 者: 教授 永岡 健司 (ナガオカ ケンジ)

担 当 部 署: 機械知能工学研究系 (キカイチノウコウガクケンキュウケイ)

E - m a i l : nagaoka.kenji572@mail.kyutech.jp

U R L : <http://www.mech.kyutech.ac.jp/srl>