

Nakatani ARIP プログラム 修了報告書

(所属) 京都大学 工学部 物理工学科 宇宙基礎工学コース B3

(滞在先) ドイツ人工知能研究センター ロボティックスイノベーションセンター

内田 大智

この度、Nakatani ARIP プログラムを通して、2025 年 2 月から 4 月の間、私はドイツ人工知能研究センター ロボティックスイノベーションセンター（ドイツ・ブレーメン）に訪問し、研究させていただきました。7 自由度の産業用ロボットアームを対象とした実機の ROS 設定および宇宙ゴミ（非協力的衛星）の追従のシミュレーションを行いました。



1. 現地での生活と研究室の様子

今回私の滞在した場所は、ドイツのブレーメンという北部の都市でした。私の大学のある京都からは、ちょうど 10,000km 程離れています。北部では二番目に大きい都市で、隣接都市のハンブルグはドイツで二番目に人口が多い都市でもあり、ハンブルグとともに大規模な北部ドイツ経済圏を形成しています。他国と国境を面していないものの、外国人率がドイツで二番目に高く、中心部では私を含め多くの外国人が見られました。ドイツ全土で有名な Beck Beer の本拠地があることや、ブンデスリーガ 1 部の Werder Bremen、ブレーメンの音楽隊などでも知られています。一方で、ブレーメンはヨーロッパ有数の航空宇



宙の都市としても知られています。ドイツ航空宇宙センター(DLR)、欧州宇宙機関

(ESA)、Airbus Aerospace などの公的宇宙開発機関や大企業をはじめとして、宇宙関連の Bremen University の研究室や各研究機関、中小企業も集まっています。私の滞在したドイツ人工知能研究センター(DFKI)も、ブレーメンにはロボティックスイノベーションセンター(RIC)を構え、人工知能の利用に限らない広範囲のロボティックス研究を担っています。その中でも宇宙ロボティックスは盛んに研究されており、RIC には月の試験フィールドや、無重力を再現するための水深 10m のプールなど、大規模実験設備が整っており、ラボ

に始めて行ったその日からワクワクが止まりませんでした。(RIC 公式紹介動画 <https://youtu.be/-Ig7FDOMCNk?feature=shared>) RIC は、ほとんどがブレーメン市のからの資金調達成り立っており、どの研究者も資金源からの制限を大きく受けずに自由な発想で理論から実機まで多様な研究を行っており、所内での対話はとても刺激的でした。さらにあくまでも体感ですが、昨夏滞在したアメリカと比べ、非常に日々の生活を大事にしている人が多く、積極的に休暇をとり、自分の時間や家族との時間を大切にしているように感じました。身近にこの差を経験したことで、ワークライフバランスが私自身のキャリア像を描く上で非常に重要な観点となりました。また、アウトリーチや交流活動として日本でも meet up イベントや公開講義などがありますが、RIC でも同様のイベントが盛んに開かれており、私も積極的に参加しました。日本と大きく違うところは主に 2 点で、開催時間と開催場所です。RIC の場合、多くの場合、開催時間は夜 9 時以降、そして開催場所は近隣のバーでした。ドイツではバーを夜に貸し切って、若い人から年配の方まで集まって、カジュアルにビールを飲みながら、専門家の公開講演を聞くことが多くあるそうです。みなさんお酒が入っているせいか質問も多く出て、周りとの交流も生まれ、ビール大国ならではの良い文化であると感じました。アメリカ留学の際も心がけましたが、積極的に現地の人に混じって、研究や交流を広げることで新たな発見を多くすることができました。

2. 現地の研究

2.1 背景 1 宇宙ゴミ問題

人類の積極的な宇宙開発の結果、人工衛星やロケットの残骸、またそれらが衝突して発生した破片などが、大量に地球の周回軌道を高速で飛び交っています。現在、宇宙にスペースデブリ（宇宙ゴミ）は、35000 個追跡調査されており、1cm 以上のデブリは 100 万個以上あるとされています(ESA Space Environment Report 2024, 19th Sep 2024)。これらの宇宙ゴミは稼働中の人工衛星や有人宇宙船に衝突するリスクがあり宇宙ミッションの大きな脅威となります。また、稼働中の宇宙機と衝突することで新たな宇宙ゴミを生み出すといった悪循環にもつながるため、早急な対処が求められています。Active Debris Removing(ADR) と呼ばれる考え方は、既存のデブリの除去に焦点を当てた宇宙ゴミ対策であり、軌道上にある既存の宇宙ゴミを、ロボットアームやレーザーなどによって積極的に除去することを指します。ロボットアームで宇宙ゴミを除去するためには、宇宙ゴミ化して制御不能となった高速で移動・回転する人工衛星等を捕縛し、安定化させる必要があります。このように無重力下で任意の動作をする物体を追従・捕縛・安定化する動きは、ADR だけでなく、宇宙空間での実験やドッキングなどで応用範囲が広く、宇宙ミッションの可能性を広げる点でも重要な技術です。

2.2 背景 2 試験環境作成のための研究

この技術を研究開発するにあたって問題となるのが実機研究の難しさです。たとえ無重力下で任意の動作をする物体を追従・捕縛・安定化するためのよりよい制御則を発見したとしても、あくまでシミュレーションしかできず、実際に地上で実機検証することは、無重力環境を長時間作ることが地上では難しいため、不可能です。そこで、無重力空間を対象としたさらなる研究促進を目指して考案されたのが、ロボット型試験プラットフォームです。これは、空気圧等で浮かせた板の上に置かれた物体に対して捕縛等の検証を行うことで、擬似的に二次元平面上に無重力空間を再現する試みです。これまで欧州宇宙機関（ESA）が中心となって、ACROBAT や ROOTLESS シリーズなど、さまざま試みがなされました。(Tobias et al., 2019) これらの試みは、改良を続け、一定の成果を上げたものの、予算の都合でどれも頓挫してしまいました。そこでドイツ人工知能研究センター ロボティックスイノベーションセンターで、新たな試験プラットフォームを作るプロジェクトが立ち上がり、さまざま

まなチームが共同して、試験環境（対象の物体（衛星模型等）をのせて二次元上に無重力環境を再現する試験プラットフォームと、その物体を追従・捕縛・安定化する試験を行うロボットアーム自体）を作成しています。

2.3 研究概要

試験環境のために購入した産業用の7自由度のロボットアームに、試験環境に合うように動かせるようにするためにするために、シミュレーションを作成し、また、シミュレーション上で制御器を作成し回転運動する衛星を追従する制御を行いました。（本研究はロボットアームを用いて無重力下で任意の動作をする物体を追従・捕縛・安定化するための制御理論の研究と合同で行われましたが、そちらは論文発表前のため省略させていただきます。）

2.4 研究手法

URDF データを読み込み、シミュレーション上にロボットを表示する

ロボットを平面に固定し、各軸を定義する

現在の位置および速度などの状態情報を受け取る

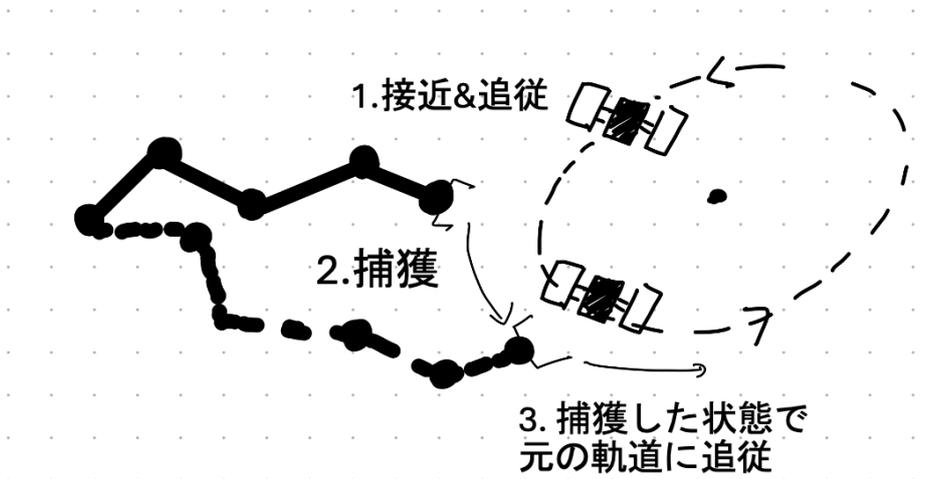
重力補償トルクを送信し、ロボットをその場に静止させる

一定のトルクを送信してロボットを動かす

目標とする軌道を定義し、逆運動学を用いて各関節の目標位置および目標速度を計算する

PID 制御を用いて目標位置と目標速度に基づくトルクを算出し、ゲインを調整する

計算結果に基づき、トルクをロボットに動的に送信する



2.5 研究結果

スムージングやトルク制限を課したロボットアームシミュレーションを作成し、一定度の安定した動きのできる制御器を作成できた一方で、実機への導入はより安定した制御が求められる。

2.6 研究の展望

実機への導入を行い、試験プラットフォームと合わせた運用実験を行い、試験環境を構築する。

3. 学んだことと今後の構想

今回は EU 圏内ということで、以前よりも行動範囲を広げてフランスやポーランド、北欧など多くの場所まで積極的に足を運び、さまざまな人と出会い、多くの経験をしました。未知の価値観と出会い、人脈が増えるだけでなく、自身のキャリアにとどまらず私自身の価値観にも変化がありました。また、今回は 1 人で赴き、先生とコンタクトをとり、住居を探し、生活をする初めての経験をして、非常に貴重な経験でした。しかし実際は決して 1 人ではなく、炊飯器や箸を用意してくれた優しい大家さんや、ついてすぐご飯に連れて行ってくれた研究室のメンバー、サッカーを毎週した友達など、周りを見れば常に支えてくれる人

がいました。現代社会において例え未知の世界に行っても周りには多くに人がいるので、困ったときにどのような人が周りにいるかを考え、どのように他者に接するかを意識することが大事であると実感しました。また、今回であれば RIES 2024 fellows には、時には Zoom や電話を通して、相談に乗ってもらいました。例え周囲に頼れる人がいなくても、頼れる仲間の存在にも再度気づきました。この度の ARIP を通して、PI とたくさん議論をして、宇宙機制御の道へ進むことを決心することができ、次のステップに進むこともできました。RIES そして ARIP は、海外での研究経験や生活経験に留まらず、海外のトップ研究者との人脈、そして同年代の仲間と知り合わせてくれたと再認識しました。心から感謝申し上げますと共に、この機会を経た責務として得た経験と人脈を最大限活かして、自身の夢に向かって精進いたします。

4. 謝辞

本研究にあたり多大なる協力をしてくださった Mr. Shubham Vyas、および本研究に関わった全ての共同研究者の方々に心から感謝を申し上げます。また、本研究インターンシップを支援してくださった中谷財団の皆様をはじめとするすべての方に感謝を申し上げます。最後に、同じくドイツに滞在し現地でも遊んでくれた中島君をはじめとする RIES 2024 の JP fellows の全員は滞在前から研究や生活の相談に乗ってくれ、また彼らの活躍の話は強いモチベーションにもなりました。特別な感謝を申し上げます。

5. 引用

1. European Space Agency, Space Debris Office. 31 March 2025. ESA'S ANNUAL SPACE ENVIRONMENT REPORT
2. Ullrich, Tobias & Krishnamoorthy, Shanker & Gerdes, Levin & Zwick, Martin. (2019). Advancement of a Robotic Testbed for Floating-Dynamics Simulation.