

# 実証用ロボットを用いた非ホロノミック姿勢制御の軌道上実験システムの検討状況

○小林 紗也(青学大・院), 久保 勇貴(東大・院), 永山 皓基(青学大・学), 高崎 健太郎(青学大・学), 菅原 佳城(青学大), 川口 淳一郎(東北大)

## 軌道上実験システム

### 国際宇宙ステーション(ISS)内における軌道上実験の概要

ISS内の「きぼう」日本実験棟の船内環境を利用する実験テーマ(フィジビリティスタディ(FS)テーマ)として、2019年度に「可変構造ロボットによる非ホロノミック姿勢制御の実証」が採択された。本実験ではISS内の微小重力環境を利用し、本グループが提案する非ホロノミック姿勢制御をハードウェアレベルで実証することを目的としている。本グループでは昨年度から今年度にかけて、ISS内で実験を行うために軌道上実験システムの検討を行ってきた。

### 軌道上実験システム

本グループで現在検討中の項目は主に以下の3つになっている。

- ・ 軌道上実証用の小型ロボットの開発
  - ・ 電源・通信を含むバスシステムの構築
  - ・ 軌道上実験のための把持・リリース機構の構築
- 以上の項目に対して真空槽や落下塔を用いて実証実験を行い、その実現性を検討している。

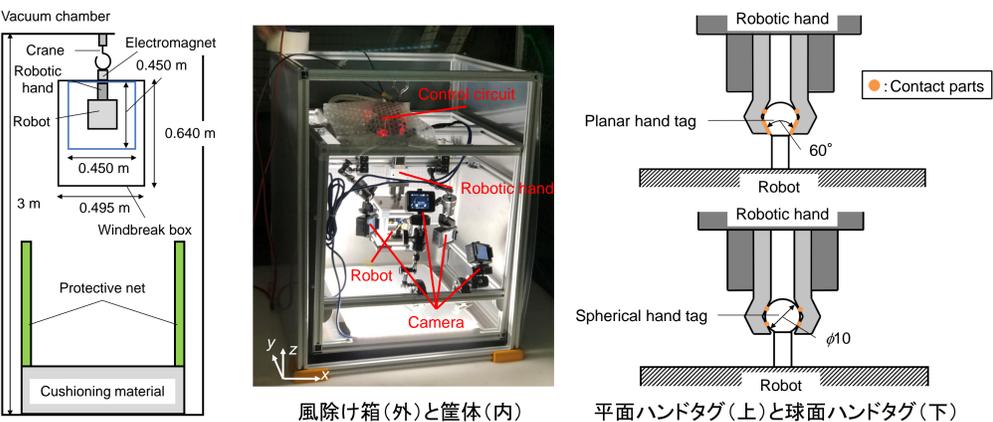
## ロボットハンドを用いた把持・リリース実験

### 実験目的

ISSにおける非ホロノミック姿勢制御の実証実験では、形態と姿勢の同時制御の有効性を確認するために、ロボットにおける予期しない運動量・角運動量の発生を抑制する必要がある。そこで、実験開始時にロボットを静かにリリースすることが可能な把持・リリース機構が必要となる。本グループでは、ロボットハンド・電磁石それぞれを用いた把持・リリース機構の2種類が提案されている。本実験では、ロボットハンドを用いた把持・リリース機構の実現性を定性的に評価した。

### 実験概要

本実験はJAXA内の真空槽で行われた。実験装置の概要図を以下に示す(左下図)。実験装置は、0.450 m × 0.450 m × 0.450 mの筐体と気流の影響を防ぐための風除け箱で構成されている。これらは真空槽の上部からクレーンおよび電磁石によって吊り下げられている。風除け箱は筐体に引っかかるように設計されており、筐体上部の電磁石がOFFになると筐体・風除け箱ともに落下する仕組みになっている。筐体内部ではロボットがロボットハンドによって把持されている。ロボットには3台のレーザーポインタが設置されており、ロボットから見て-x・+y・-z方向の筐体側面にある方眼紙へ光が射出されている。筐体リリース後、筐体の加速度が0.2 m/s<sup>2</sup>未満になったときロボットハンドが開き、ロボットがリリースされる。本実験では、ロボットのリリース時の挙動と3台のレーザーポインタの軌跡を、4台のカメラを用いて確認した。尚、ハンド解放から着地までの時間は約0.56秒であり、この間ロボットおよびレーザーポインタの挙動を120 fpsで撮影した。また、ロボットの把持部には平面と球面の2種類のハンドタグ(右下図)を使用して実験を行った。



**実験結果**  
動画より、ハンドタグとロボットハンドの接触部に力のモーメントがかかり、ロボットに初期角速度が発生している様子が確認された。ロボットハンドとの接触面積が大きい平面ハンドタグを用いた場合に、その傾向は強く確認された。以上の結果より、ロボットハンドを用いた把持・リリース機構は、予期しない運動量・角運動量を抑えることに不向きであると考えられる。

## 小型模型を用いた落下塔実験

### 実験目的

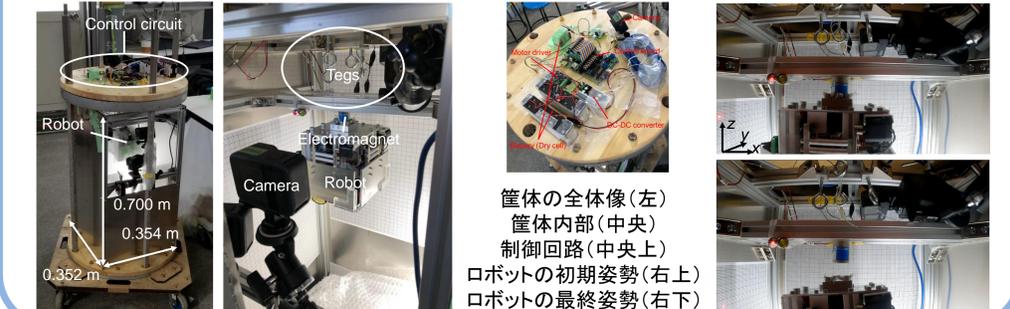
本実験では北海道・赤平の50 m落下塔で、本グループで提案された2種類の把持・リリース機構のうち、電磁石を用いた機構の挙動を評価する微小重力実験を行った。それに加え、小型ロボットを用いた非ホロノミック運動の実証を行った。

### 実験概要

実験装置を以下の図に示す。実験装置は図に示されている筐体とその上部に設置された制御回路で構成され、筐体内部にはロボットが電磁石とテグスによって把持されている。ロボットには3台のレーザーポインタとサーボモータによって駆動するパネルが2枚装着されている。本実験で使用した電磁石KE-2HAの磁力の強さは、強モード・弱モードの2モードに分けられる。電源OFF時は常に弱モードであり、+24 V通電した際は強モードとなり、-24 V通電した際は磁力がOFFとなる。落下塔における実験の手順として、まず筐体上昇時は電磁石を通電せず電磁石とテグスでロボットを把持する。筐体上昇後に電磁石を通電させ強モードにした後、テグスを焼き切り電磁石のみによる把持に切り替える。筐体落下後、筐体の加速度が0.5 m/s<sup>2</sup>未満になったとき電磁石がOFFとなり、ロボットがリリースされる。リリース後、ロボットの2枚のパネルを交互に動作させロボットに非ホロノミック運動を2回行わせる。本実験ではロボットハンドを用いた実験と同様、ロボットのリリース時の挙動と3台のレーザーポインタの軌跡を4台のカメラを用いて確認した。電磁石OFFから着地までの時間は約2.72秒であり、この間ロボットおよびレーザーポインタの挙動を120 fpsで撮影した。また、1回の非ホロノミック運動にかかった時間は、0.787秒であった。

### 実験結果

ロボットの初期姿勢および2回の非ホロノミック運動後のロボットの姿勢を以下に示す。動画より、2回の非ホロノミック運動によってロボットの姿勢角が変化したことが確認された。ミスによりz軸回りの変位を確認することはできなかったが、x軸回りに-2.00 deg、y軸回りに-3.01 degの角度変位が確認された。また、ロボットのリリースについては、電磁石OFF直後にはリリースは確認されず、ロボットのパネルが動作した反作用によってロボットが電磁石からリリースされたことが確認された。これは、筐体上昇後、電磁石が強モードになってからリリースまでの時間が長かったため、把持部の鉄が磁化したことが原因であると考えられる。以上より、把持・リリース機構に電磁石を用いる場合、把持部の強磁性体の磁化も考慮する必要があるとわかる。



## 把持・リリース機構を含む軌道上実験システムの検討

### 電磁石を用いた把持・リリース機構の追加実験

落下塔で行った電磁石を用いた把持・リリース実験では、強磁性体が磁化したことにより、電磁石の磁力がOFFとなった後もロボットがリリースされないという問題点が発覚した。この問題への対策として、以下の3項目についての実験を行っている。

- 実験項目① 機体の把持部と電磁石の間に薄膜を挟む
- 実験項目② 電磁石をOFFにした後磁性を逆転させ、斥力を発生させる
- 実験項目③ 機体の把持部と電磁石の間に弾性体を挟む

①については、落下塔実験後にJAXA内の真空槽で行った実験により、電磁石と強磁性体の間に40 μmのフィルムを挟むことでロボットのリリースが正常に行われることが確認された。本グループでは現在、②、③についての検証実験を行っており、ここでは③の実験についての詳細を述べる。

### 実験装置概要

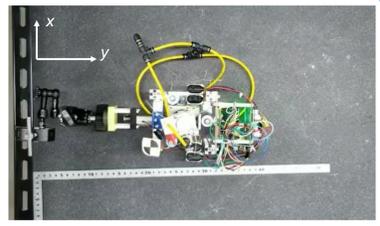
実験装置を右下図に示す。この図の通り、実験装置は把持側とリリース側の装置で構成される。把持側の装置には、カメラマウントに強磁性体として鉄(SS400)が取り付けられている。また、強磁性体には左下図のように、弾性体としてプランジャSPJK12を取り付けられている。尚、このプランジャのノーズ長さは3.5 mmである。プランジャには外側にピッチ1.75 mmのネジ部があり、これの巻き数を調節することで弾性力を調節することができる。リリース側の装置には落下塔実験と同じ電磁石KE-2HAが搭載されており、この電磁石に把持側の強磁性体を吸着させることで機体を把持している。装置下部にはエアベアリングが3つ取り付けられており、浮上テーブル上で動作するようになっている。本実験では、機体の把持部にプランジャを取り付けてプランジャのノーズ部分を電磁石で挟み込むことで、電磁石の磁力がOFFになった後弾性力によって機体がリリースされるような機構となっている。

### 実験手順

本実験の手順として、まず電磁石を強モードにして強磁性体を把持する。その後、電磁石に-24 Vの電圧をかけ、電磁石を5秒間OFFの状態にする。この間に機体は弾性力によりリリースされる。本実験では、プランジャの巻き数を調節することにより、ノーズの高さを0.875 mm、1.75 mm、3.5 mmとした場合の3つのケースで実験を行った。リリース側ロボットの上部にはマーカが付いており、浮上テーブル上部からカメラを用いて30 fpsで動画の撮影を行った。実験後、画像解析ソフトを用いて動画からロボットのy方向変位を求めた。

### 実験結果

リリース側ロボットのy方向変位の時間変化を右下図に示す。この図からわかる通りロボットはリリース後ほぼ等速度で運動し、その後停止している。時間が経過するにつれて浮上テーブル上の摩擦の影響が大きくなるため、リリース後から10秒の時点までのデータを線形近似し、各ノーズ高さでの速度を求めた。この結果、ノーズ高さが0.875 mmの場合は0.0137 m/s、1.75 mmの場合は0.0382 m/s、3.5 mmの場合は0.0619 m/sであった。ここで、「きぼう」の船内実験室は長さ11.2 mである。「きぼう」内で本実験と同様の把持・リリース機構を使用すると仮定すると、室内の気流の影響を無視した場合の実験可能時間は、ノーズ高さが3.5 mmの場合で、約180.9秒になると考えられる。弾性体によりロボットのリリースを行う場合は今後、実際に非ホロノミック姿勢制御にかかる時間も考慮して把持部の弾性体を選定する必要がある。



### 把持・リリース機構に関する今後の展望

現在の実験装置の問題点として、初期状態の管理が困難であること、CO<sub>2</sub>タンクやチューブにより重心が偏ること、プランジャの巻き数管理が困難なことが挙げられる。今後、これらを考慮した装置の改良や把持部の変更を行い、電磁石を用いた把持・リリース機構の再実験をする予定である。

### 軌道上実験システムの検討と今後の展望

本グループでは、今回紹介した実験に加え、右下に示すような地上実験装置を用いた非ホロノミック姿勢制御の実証を行ってきた。このような実験での検討内容を考慮した軌道上実験システムは、以下のブロック図で表される。本グループでは今後、よりISS内での実験を考慮した実験システムの詳細を決定していく。具体的には、バッテリーやマイコン、DC-DCコンバータの選定や、クルーの作業を考慮した実験プロセスを検討していく予定である。

