

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23760214

研究課題名(和文)軌道上無人輸送機の自律ドッキングハイブリッドシミュレーション

研究課題名(英文)Hybrid Simulation for Autonomous Docking of Orbital Transfer Vehicle

研究代表者

安孫子 聡子 (Abiko, Satoko)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：40560660

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、軌道上サービスを対象とした微小重力下での浮遊物体の自律ドッキング制御の確立である。同研究の検証のために、柔軟ワイヤと剛体の接触力学モデルを実験的に導出し、実軌道上で運用されたH-II Transfer Vehicle (HTV) の宇宙ロボットアームSSRMSによる捕獲時のデータと比較・検証することで、導出した接触力学モデルの妥当性を示した。また、ワイヤの柔らかさを活かした接触維持制御の構築を実施し、任意の浮遊物体の動力学パラメータに対しても、上記の係数を適切に設定することで接触維持を可能とする制御を構築した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to establish a safe autonomous docking control system for capturing a floating object in orbital servicing mission. To capture it, the enclosed capturing approach with flexible wires is applied. For this purpose, contact dynamics model between flexible wire and a rigid body was empirically derived. The derived model is verified and compared with real flight data of the capture mission of the H-II Transfer Vehicle (HTV) by space robotic arm, SSRMS. Besides, a control method to maintain contact between the wire and the floating object and to prevent the floating object bouncing away was developed. To adjust coefficients of the controller adaptively, the contact maintaining control was achieved for floating objects with arbitrary dynamic parameters.

研究分野：宇宙ロボティクス

キーワード：接触力学 閉空間把持 柔軟マニピュレータ

1. 研究開始当初の背景

次世代の宇宙利用では、軌道上ソーラーパネルなどの大型構造物の組立や有人宇宙活動のための無人レスキュー機のドッキング等の軌道上サービスが求められている。これらのミッションを遂行するためには、安全な軌道上ドッキング制御技術がその基盤をなす。安全なドッキングには、宇宙ロボットと浮遊ターゲットが微小重力下で接触する際に生じる位置・姿勢擾乱を最小限に抑え、確実にドッキングする制御が必要不可欠である。2009年には、日本が独自に開発した無人補給機 (HTV) が国際宇宙ステーション (ISS) に搭載される柔軟宇宙ロボットアーム SSRMS により捕獲され、ISS とのドッキングに成功した (図 1)。この技術は、1997 年に日本が世界に先駆けて開発した技術試験衛星 VII 型 (ETS-VII・図 2) において実証した無人宇宙ロボットによる軌道上ランデブー・ドッキング技術の成果が大きく反映されている。これらのロボット技術の成功は国際的に高い評価を得、シャトル退役後の次世代の有人活動および軌道上サービスへの日本の活躍が期待されている。一方で、軌道上ドッキングは、浮遊物同士が必然的に接触を伴う極めて危険なミッションである。そのため、宇宙ロボットとターゲットとのドッキングには、作用・反作用の力の授受によってターゲットの捕獲を完了する前にターゲットを弾き飛ばしてしまう恐れがある。特に、SSRMS のような構造的柔軟性を有する宇宙ロボットアームによるドッキングは、予期せぬ衝

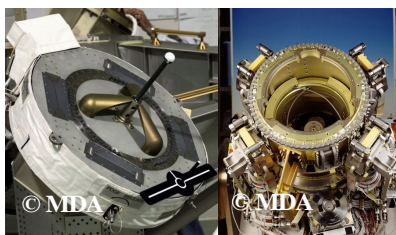


図 1 軌道上捕獲機構の例

突の危険性が増すことが知られる。これらの問題が指摘されて久しいが、いまだ、その明快な解決法は確立されておらず、操縦者の経験則に依存しているのが現状であり、無人浮遊ターゲットとドッキング宇宙ロボット双方が完全に自律したドッキング制御は実用化されていない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、軌道上無人輸送機のドッキングや構造物組立等の軌道上サービスを対象とした微小重力下での浮遊物体同士の必然的な衝撃、および偶発的な衝突の際の安全性を考慮した自律ドッキング制御の確立である。特に、SSRMS のようなロボットアームで対象物を把持する場合、スネアワイヤと呼ばれる閉空間把持を実現するエンドエフェクタシステムを用いる。ここでは、柔軟ワイヤと剛体の接触力学に着目し、安全な把持・捕獲を可能とする制御手法の確立を目指す。

3. 研究の方法

本研究では、地上微小重力模擬環境であるハイブリッドモーションシミュレータと空気浮上テストベッド、さらに数値シミュレーションを用い、それぞれの利点を活かし、相補的な実験を実施することで研究を進めた。ハイブリッドモーションシミュレータとは、衝突を伴うハードウェア部分を実環境に構築し、実環境上で生じた衝突現象を、動力学シミュレータに組み込むことによって、軌道上システム全体の無重力環境下での運動を検証する手法である。この方法は、接触を伴う場所の多点接触や摩擦等の影響を実現象より計測するため、モデル化が難しい部分の現象の再現性に優れる特徴を有する。一方で、動力学シミュレーションによって計算した運動を実環境のモーションテーブルシステムに提示するため制御時間遅れが生じるという問題がある。この問題を解決することも、本研究のシステム構築の上で重要な課題である。

数値シミュレーションでは、基礎的な制御手法の検証を行うための初期検討方法として不可欠な手法である。ここでは、柔軟

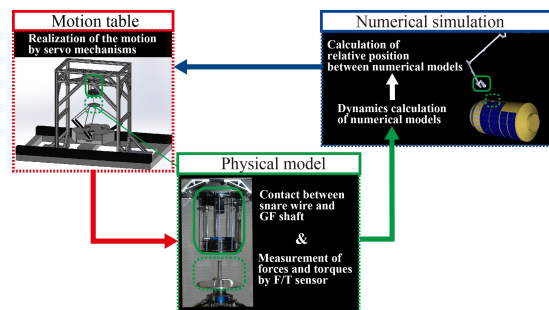


図 2 ハイブリッドシミュレータ概要

ワイヤと剛体の接触力学を実験的にモデル化することで、簡易モデルを作成し、制御手法を提案するためのシミュレータを構築した。また、それらの実験検証のために、摩擦抵抗が少なく地上にて微小重力環境を作り出す空気浮上テストベッドを補完的に使用した。

4. 研究成果

まずは、柔軟ワイヤと剛体の接触力学モデルを構築するために、任意の初期形状からの押し込み量と押し込み力を計測することで、基礎的な接触力学モデルの構築を行った。ワイヤの初期条件が接触力学モデルの構築に不可欠であるため、その導出を実施した。その結果、ワイヤの初期形状がワイヤの全長とたるみ量から楕円積分によって理論的に導出できるに至った。また、接触力学モデル自身は、解析式の導出が困難であるため、実験式の導出を実施した。接

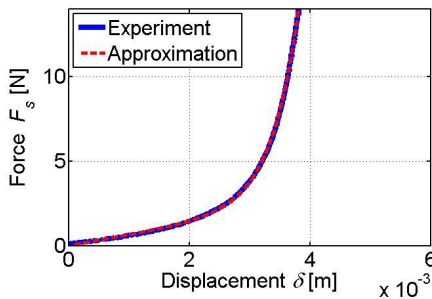


図3 たるみワイヤの接触力学モデル

触力と押し込み量の関係は、幅広い押し込み量や初期たわみ量の条件化において成立する実験式を導出することができた。

・ワイヤの接触力学モデル（実験式）

$$F_s(\delta) = \alpha(e^{\beta\delta} - 1) + \gamma\delta$$

この接触力学モデルをもとに、現実にも即した動力学数値シミュレータを構築した。対象として、実軌道上にて運用されているH-II Transfer Vehicle (HTV) の宇宙ロボットアームSSRMSによる捕獲シミュレータを開発した。実軌道上データと比較・検証することで、数値シミュレータの妥当性を示した。さらに、ケーススタディとして、シミュレータを用いて、捕獲危険条件の検証を実施した。開発した数値シミュレータを用いて、実軌道上でのHTV捕獲時のロボットアーム手先に対する相対運動の推定を行った。その結果、3本のスネアワイヤが一定速度で

閉じていく間に3回ほどのはね返りを繰り返して、最終的な締め上げ把持を行ったと推定された。また、ケーススタディを実施し、捕獲失敗となる相対速度の検証を実施し、実軌道ミッションにて想定している安全基準よりも数倍大きな速度においても安全な捕獲・把持が可能であることが示された。

一方、ハイブリッドモーションシミュレータでは、宇宙ロボットアームSSRMSによるHTVの捕獲を対象として、スケールダウンした数理モデルを用い、数値シミュレーション同様に捕獲危険条件の検証を実施した。ハイブリッドモーションシミュレーションを用いることにより、数値シミュレーションでは、正確にモデリングされ切れていない摩擦・すべりや多点接触等の影響を含んだ接触現象を再現でき、数値シミュレーションのみでは検証できない捕獲危険条件の細分化ができる。閉空間把持機構であるワイヤの柔らかさと宇宙ロボットアームの関節が有する柔軟性の特徴を活かした接触維持制御を構築した。ロボットアームの手先インピーダンスと接触力学モデルに基づき、粘性係数、剛性係数を接触力により可変にすることで、浮遊物体がワイヤに接触した後であっても、弾き飛ばすことなく接触を維持する制御を構築し、まずは、動

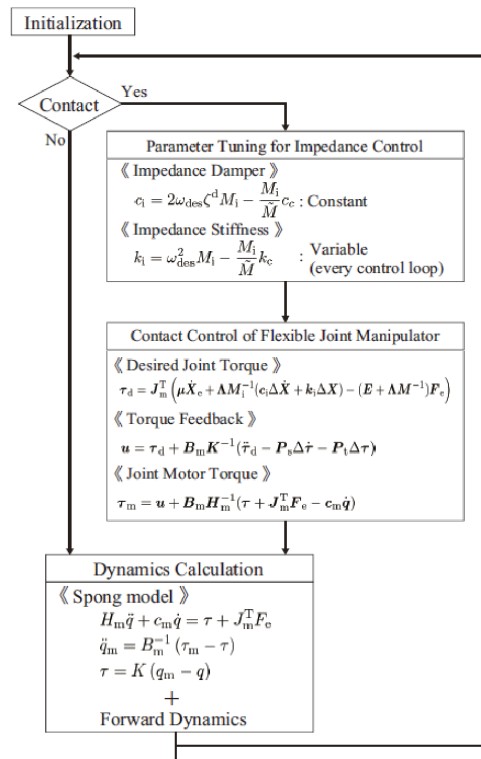


図4 制御則のフローチャート

力学シミュレータにより検証した。また、任意の浮遊物体の動力学パラメータに対しても、上記の係数を適切に設定することで接触維持を可能とする制御を構築した。

また、実験の過程において、問題となるハイブリッドモーションシミュレータ特有の遅れ時間に関して、反発係数に基づく補償法を提案してきた。反発係数に着目することで、システムの安定性および実現象との差異を定量的に評価できる。そこで、対象とする接触現象の周波数解析を行った。その結果、対象とする接触周波数では、ハイブリッドモーションシミュレータシステムが安定な領域で検証が可能であることが示された。また、空気浮上テストベッドによる接触現象と同様の運動をハイブリッドモーションシミュレータにより実施し、両者の結果を比較した結果、遅れ時間の影響により運動模擬の完全な一致は得られないが、遅れ時間の影響を定量的に見積もることで、対象とするシミュレーション運動が開発したハイブリッドモーションシミュレータを用いて検証可能であるとの結論に至った。

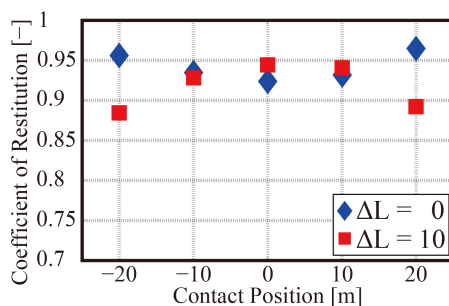


図5 反発係数による安定解析

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計3件)

高橋一平, 安孫子聡子, 姜欣, 辻田哲平, 内山勝, “宇宙ステーション補給機HTV捕獲のハイブリッドモーションシミュレータの構築,” 日本航空宇宙学会論文集, vol. 62, no. 6, pp. 204-211, 2014, 査読有.

S. Abiko, Y. Satake, X. Jiang, T. Tsujita,

and M. Uchiyama, “Delay Time Compensation Based on Coefficient of Restitution for Collision Hybrid Motion Simulator,” Advanced Robotics, vol. 28, no. 17, pp. 1177-1188, 2014, DOI:10.1080/01691864.2014.913501, 査読有.

F. Sugai, S. Abiko, X. Jiang, A. Konno and M. Uchiyama, “Compensation for Dead Band of Force Measurement Based on the Coefficient of Restitution in a Hybrid Simulator,” Advanced Robotics, vol. 27, no. 12, pp. 907-917, 2013, 査読有.

〔学会発表〕(計10件)

I. Takahashi, S. Abiko, X. Jiang, T. Tsujita, M. Uchiyama, H. Nakanishi, H. Ueno, and M. Oda, “Hybrid Motion Simulator for Capturing H-II Transfer Vehicle by Flexible Space Manipulator,” Proc. of the 12th Int. Symp. on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space (i-SAIRAS’14), Montreal, Canada, 17-19 June, 2014, (CD-ROM).

R. Yoshimitsu, A. Kobayashi, Y. Yuguchi, R. Takano, K. Nagaoka, K. Yoshida, S. Abiko, H. Nakanishi, and M. Oda, “Dynamic Simulator for HTV Capture with the Space Station Remote Manipulator System,” Proc. of the 12th Int. Symp. on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space (i-SAIRAS’14), Montreal, Canada, 17-19 June 2014, (CD-ROM).

S. Abiko, N. Uyama, Testuya Ikuta, Kenji Nagaoka, Kazuya Yoshida, Hiroki Nakanishi and Mitsushige Oda, “Contact Dynamics Simulation for Capture Operation by Snare Wire Type of End Effector,” Proc. of the 11th Int. Symp. on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space (i-SAIRAS’12), Turin, Italy, 4-7 September 2012, (CD-ROM).

F. Sugai, S. Abiko, X. Jiang, A. Konno and M. Uchiyama, "Delay Time Compensation of a Hardware-in-the-loop Simulator Based on Contact Dynamics," Proc. of the Ninth Int. Conf. on Flow Dynamics, pp. 600-601, Tohoku Univ. Sendai, Japan, 19-21 September 2012.

I. Takahashi, S. Abiko, X. Jiang, A. Konno and M. Uchiyama, "Hybrid Simulation of Capturing a Massive Payload by Space Manipulators," Proc. of the Ninth Int. Conf. on Flow Dynamics, pp. 674-675, Tohoku Univ. Sendai, Japan, 19-21 September 2012.

S. Abiko, Y. Satake, X. Jiang and M. Uchiyama, "On the Hardware-in-the-loop Simulation Subjected to Collision," Proc. of the 30th Annual Conf. of the Robotics Society of Japan, 4D3-5, Sapporo Convention Center, Sapporo, Japan, 17-20 September 2012. 招待論文

F. Sugai, X. Jiang, S. Abiko, A. Konno, and M. Uchiyama, "Stabilization of Hardware in the Loop Simulation," Proc. of the Eighth Int. Conf. on Flow Dynamics, pp. 616-617, Tohoku Univ. Sendai, Japan, 9-11 November 2011.

榑崎翔太, 安孫子聡子, 菅井文仁, 姜欣, 辻田哲平, 内山勝, 「衝突ハイブリッドモーションシミュレータの周波数解析とその応用」, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013, つくば国際会議場, 茨城, 5月22日 25日, 2013.

佐竹恵和, 安孫子聡子, 辻田哲平, 姜欣, 内山勝, 「ハイブリッドモーションシミュレータの回転運動に対する遅れ時間補償」, 第30回日本ロボット学会学術講演会, 札幌コンベンションセンター, 札幌, 9月17日 20日, 2012.

高橋一平, 姜欣, 安孫子聡子, 阿部幸勇, 近野敦, 内山勝, 中西洋喜, 上野浩史, 小田光茂, 「宇宙ステーション搭載アームによる補給機 HTV の捕獲ハイブリッドシミュレータの構築」, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2011, 岡山コンベンションセンター, 岡山, 5月26日 28日, 2011.

6 . 研究組織

(1)研究代表者

安孫子 聡子 (ABIKO, Satoko)
東北大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号 : 40560660