

Modellprädikative Gesamtregelung für orbitale Robotersysteme

Peter Kötting

Institut für Systemdynamik und
Regelungstechnik
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Peter.Koetting@dlr.de

Schlüsselwörter: Modellprädikative Regelung, Überaktuierte Robotik, Orbitale Robotik, Autonome Systeme

On-Orbit-Servicing (OOS) ist eine Schlüsseltechnologie für die weitere Erforschung und Nutzung des Weltraums. Der Einsatz robotischer Systeme im OOS ermöglicht zusätzliche Missionaufgaben wie die Inspektion, das Auftanken, die Aufrüstung, oder die Reparatur von Satelliten. Weitere Einsatzszenarien sind in die Entsorgung von Weltraumschrott sowie die Wartung und der Bau großer orbitaler Strukturen. Ein Space Manipulator System (SMS) besteht hierbei, wie in Abbildung 1 dargestellt, typischerweise aus einem Raumfahrzeug, das mit einem robotischen Manipulator ausgestattet ist. Dementsprechend sind SMS überaktuierte Systeme, die zusätzlich zu den Gelenkmotoren translatorische und rotatorische Bewegungen durch die Aktuatoren des Raumfahrzeugs, u.a. durch Triebwerke und Schwungräder, erzeugen können.

Gesamtregelungsansätze (Englisch: Combined Control) für SMSs kommandieren alle verfügbaren SMS-Aktoren. Aktuelle Ansätze regeln sowohl die Basis als auch den Manipulator explizit [1]-[4], sodass eine Trajektorienplanung für alle Systemfreiheitsgrade benötigt wird. Dies führt zu offenen Problemen: (i) Zustandsbeschränkungen werden ausschließlich für die Referenzwerte erfüllt; (ii) Eingangsbeschränkungen werden nicht

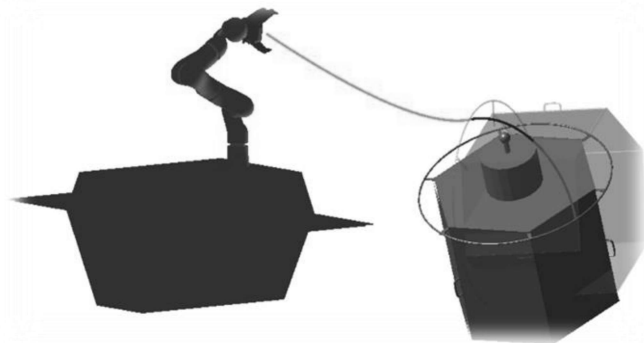


Abbildung 1: On-Orbit Servicing Scenario mit einem Space Manipulator System (links) und einem Target Satelliten (rechts)

explizit berücksichtigt; (iii) eine Trajektorienplanung, die die Dynamik des Robotersystems mit System- und Sicherheitsbedingungen über die gesamten Missionsphasen berechnet, ergibt ein nichtlineares Optimierungsproblem mit sehr hohem Rechenaufwand, das teilweise offline gelöst werden muss und nur eine begrenzte Menge von Geometrien und Zuständen des spinnenden/taumelnden Target Satelliten abbildet [5].

In dieser Arbeit wird das Regelungsproblem aus einer anderen Perspektive formuliert, indem nur eine Endeffektor-Trajektorie angenommen wird. Dementsprechend wird die Komplexität der Optimierung von der Trajektorienplanung auf das Regelungssystem verlagert. Durch die Verwendung einer Modellprädikativen Regelung (Englisch: Model Predictive Control, MPC)

wird für einen beschränkten Prädiktionshorizont optimiert, was eine Echtzeitlösung ohne Vorausberechnung der gesamten Missionsphasen ermöglicht. Diese Arbeit formuliert einen Ansatz mit einer nichtlinearen *Output Tracking MPC*, welcher eine Abwandlung des MPC Konzeptes [6] darstellt. Entsprechend wird der Referenzpose des Endeffektors als Output gefolgt. Die Allokierung der Referenzzustände wird mittels *Artificial Reference* vorgenommen, um so eine optimale Nutzung der Überaktuierung zu erreichen. System- und Sicherheitsbeschränkungen, wie Kollisionsvermeidung, Sichtbereich von Sensoren und Gelenkwinkelbegrenzungen, werden explizit durch Zustandseinschränkungen berücksichtigt. Aktuatorbeschränkungen, wie Minimal- und Maximalschub der Triebwerke und die Maximalbeschleunigung der Gelenkmotoren werden explizit als Eingangsbeschränkungen formuliert.

Es wird eine neuartige Zeitskalentrennung der SMS-Dynamik vorgenommen, indem die schnelle Gelenkdynamik von der Gesamtsystembeschreibung entkoppelt wird. Basierend darauf wird die MPC basierte Gesamtregelung als oberste Regelungsschicht mit einer untergeordneten Gelenkraumregelung entworfen. Der Vorteil dieser Kaskadierung besteht darin, dass die Regler in zwei verschiedenen Taktraten ausgewertet werden können, um den Anforderungen der Hardware von Satelliten (z.B. 10 Hz Taktrate) und Manipulatoren (z.B. 1000 Hz Taktrate) gerecht zu werden. Außerdem wird die Zuweisung von ausreichend Rechenzeit für das Optimierungsproblem der MPC ermöglicht. Die Leistung, Flexibilität und Zuverlässigkeit des Verfahrens werden in den sicherheitskritischsten Phasen mittels Simulation aufgezeigt. Zu diesen sicherheitskritischen Phasen gehören das Annähern des SMS an ein nicht-kooperatives, taumelndes Raumfahrzeug, das Stabilisieren desselben sowie das sichere Entfernen des SMS beim Auftreten sicherheitskritischer Ereignisse. Als nächster Schritt ist eine Hardware-in-the-Loop Simulation auf robotischen Testanlagen des DLR geplant.

Literatur

- [1] F. Aghili, "Coordination control of a free-flying manipulator and its base attitude to capture and detumble a noncooperative satellite," *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, St. Louis, MO, USA, 2009, pp. 2365-2372.
- [2] M. J. Reiner, "Combined control for active debris removal using a satellite equipped with a robot arm", *Proceedings for the GNC 2017, 10th International ESA Conference on Guidance, Navigation and Control Systems*, Salzburg, Austria, 2017.
- [3] E. Papadopoulos and S. Dubowsky, "Coordinated manipulator/spacecraft motion control for space robotic systems," *Proceedings. 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Sacramento, CA, USA, 1991, pp. 1696-1701 vol.2.
- [4] A. M. Giordano, C. Ott and A. Albu-Schäffer, "Coordinated Control of Spacecraft's Attitude and End-Effector for Space Robots," in *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 4, no. 2, pp. 2108-2115, 2019.
- [5] R. Lampariello and G. Hirzinger, "Generating feasible trajectories for autonomous on-orbit grasping of spinning debris in a useful time," *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Tokyo, Japan, 2013, pp. 5652-5659.
- [6] R. Soloperto, J. Köhler and F. Allgöwer, "A Nonlinear MPC Scheme for Output Tracking Without Terminal Ingredients," in *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 68, no. 4, pp. 2368-2375, 2023.