

AI-enabled Cyber-Physical In-Orbit Self-Recovering Factory

Teilvorhaben: Fehlertolerante und adaptive telerobotische Montage mit KI Methoden

Schlussbericht zu Nr. 3.2 nach BNBest-BMBF 98



ACOR

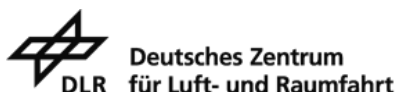
AI-enabled Cyber-Physical In-Orbit Self-Recovering Factory

Zuwendungsempfänger:	TU München	Förderkennzeichen:	50RP2240A
Vorhabenbezeichnung:	ACOR - AI-enabled Cyber-Physical In-Orbit Self-Recovering Factory		
Laufzeit des Vorhabens:	01.08.2022 - 31.10.2024		
Berichtsdatum:	31.12.2024		
Autoren (ORCID):	Maximilian Mühlbauer (0000-0002-7635-0248) Thomas Hulin (0000-0002-3814-075X) Alessandro Massimo Giordano (0000-0003-2291-7525) Alin Albu-Schäffer (0000-0001-5343-9074)		

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Inhalt

I. Kurzdarstellung.....	3
1. Aufgabenstellung.....	3
2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....	4
3. Planung und Ablauf des Vorhabens.....	5
4. Zugrundeliegende Arbeiten wissenschaftlicher und technischer Art.....	5
5. Zusammenarbeit mit den Projektpartnern.....	7
II. Eingehende Darstellung.....	8
1. Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse.....	8
1.1 KI-basierte fehlertolerante Virtual Fixtures (AP110).....	9
1.2 KI-basierten Korrektur von Virtual Fixtures (AP 120).....	9
1.3 Regelung von KI-basierten Virtual Fixtures (AP130).....	10
1.4 Anbindung an den Digitalen Prozesszwilling (AP140).....	13
1.5 Finales Demonstrationsszenario (AP150).....	13
2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	14
3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	14
4. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit.....	14
5. Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	15
6. Veröffentlichungen der Ergebnisse.....	15

I. Kurzdarstellung

1. Aufgabenstellung

Ziel des Projektes ACOR ist die Integration von Recovery-Methoden in die on-demand Montage von Satelliten auf einer In-Orbit Plattform. Methoden der künstlichen Intelligenz werden dabei zur Fehlererkennung und -behebung (Fault Detection, Isolation and Recovery, FDIR) eingesetzt. Der im Rahmen dieses Arbeitspakets entwickelte und evaluierte Teleoperationsansatz erlaubt einen assistierten menschlichen Eingriff in den Montageprozess unterstützt durch robuste und adaptive Virtual Fixtures (virtuelle Kraftfelder).

Die Teleoperationschnittstelle erlaubt dabei einen menschlichen Eingriff in die Fabrik im Orbit, welcher im Gegensatz zu einer Fabrik auf der Erde nicht durch direkte menschliche Intervention möglich wäre. Im Rahmen der Vorgängerprojekte „Space Factory 4.0“ und „AI-In-Orbit-Factory“ konnte gezeigt werden, dass die Nutzung solcher Virtual Fixtures unabdingbar für eine präzise Teleoperation im Orbit ist sowie dass die Nutzung verschiedener Eingabemodalitäten (Positions- und Bilddaten) die Fixture entscheidend flexibilisiert.

Allerdings erlauben diese Formulierungen noch nicht, mit fehlerhaften Messwerten umzugehen. Deshalb wurden im ACOR-Projekt Methoden entwickelt, um fehlertolerante und adaptive Virtual Fixtures aus Daten zu lernen sowie diese mittels KI-Verfahren zu adaptieren. Weiterhin wurden Methoden entwickelt, um unsicherheitsbehaftete Kamerabilder zur Generierung von Fixtures zu verwenden. Final wurden die Fixtures in einem Regelungsframework implementiert, welches die Anwendung unter hohen Latenzen, wie sie in der Kommunikation über geostationäre Satelliten auftreten, erlaubt.

Im Rahmen des Teilvorhabens AP100 „Fehlertolerante und adaptive telerobotische Montage mit KI Methoden“ war die Aufgabenstellung der TU München die teleoperierte Montage von Kleinstsatelliten mittels kraftsensitiven Robotern sowie der Test des entwickelten Systems im Labordemonstrator.

Dabei wurden folgende Arbeitspakete bearbeitet:

1. KI-basierte und fehlertolerante Virtual Fixtures
2. KI-basierte Korrektur von Virtual Fixtures
3. Regelung von KI-basierten Virtual Fixtures
4. Anbindung an den Digitalen Zwilling
5. Demonstration

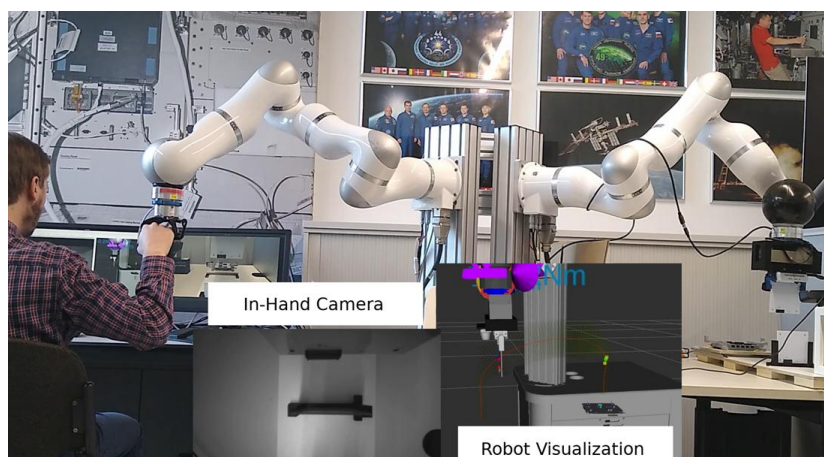


Abbildung 1: Aufbau des Demonstrators.

Abbildung 1 zeigt den Aufbau des Demonstrators, bei dem die Integration eines Subsystems in die Backplane eines CubeSats teleoperiert durchgeführt wird. Die verwendeten Stecker erfordern eine hohe Präzision, wobei die Erkennung der Steckverbinder durch die Kamera mit Unsicherheiten behaftet ist. Entsprechend ergibt sich die Notwendigkeit, den gesamten Ansatz entsprechend fehlertolerant auszulegen. Folgende Fragestellungen wurden deshalb zentral für den Entwurf der Virtual Fixtures untersucht:

1. Wie lassen sich Unsicherheitsschätzungen in Virtual Fixtures abbilden?
2. Wie kann eine Fusion von unsicheren Virtual Fixtures erfolgen?
3. Wie können KI-basierte Virtual Fixtures korrigiert werden?
4. Welche Regelungsmethoden sind zur Umsetzung dieser Virtual Fixtures notwendig?
5. Wie ist eine sichere Entwicklung und Test dieser Virtual Fixtures möglich?

Bei der In-Orbit-Teleoperation ergeben sich zwangsläufig hohe Signallaufzeiten von bis zu 600ms (Roundtrip) mit Jitter bei Kommunikation über geostationäre Satelliten. Um dabei die regelungstechnische Stabilität der bilateralen Teleoperation mit Kraftfeedback sowohl aus der entfernten Welt als auch von den Virtual Fixtures sicherzustellen, wurden die Fixtures in ein passivitätsbasiertes Teleoperationsframework integriert, welches verbessertes Kraftfeedback erlaubt.

Weiterhin wurde von der TU München das Arbeitspaket AP010 „Vorbereitung In-Orbit-Demonstrator“ durchgeführt. Ziel dieses Arbeitspakets war die Evaluierung von Umsetzungsmöglichkeiten der Projektinhalte in einem In-Orbit-Demonstrator, dem Knüpfen von Kontakten mit Raumfahrtagenturen und Projekten, welche robotische Demonstratoren im Weltraum betreiben, sowie der konkreten Planung von Arbeitsschritten zur Umsetzung in einem Folgeprojekt. Aus diesem Arbeitspaket ergaben sich schon zur Projektlaufzeit Möglichkeiten zur Verwertung der Projektinhalte auf dem 42. DLR-Parabelflug sowie zur Integration der Technologien in das „SpaceDREAM“-Projekt, welches einen Weltraumflug mit einem Roboterarm zum Ziel hat.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Für die Durchführung des Vorhabens wurde auf das Robotersystem „HUG“ des DLR-Instituts für Robotik und Mechatronik zurückgegriffen (Abbildung 1). Dieses System besteht aus zwei kraftsensitiven Leichtbaurobotern, welche sowohl die Interaktion mit dem Menschen mit haptischem Feedback als auch eine sensitive Interaktion mit der Umgebung erlauben.

Haptische Eingabestation und teleoperierte Roboter mit Greifer

Die Eingabestation mit kraftsensitiven Robotern erlaubt es, dem Operator ein Kraftfeedback zu geben und feinfühlig mit der Umgebung zu interagieren. Weiterhin ist eine Übertragung von Kamerabildern für den Operator notwendig für einen optischen Eindruck der Manipulationsaufgabe. Der teleoperierte Roboter ist weiterhin mit einem Greifer mit integrierter Kamera ausgestattet, um die notwendigen Eingabedaten für die kamerabasierten Fixtures zu erhalten.

Implementierung der Virtual Fixtures und Regelung

Für ein hochwertiges und transparentes Kraftfeedback ist die Implementierung der Fixtures direkt im Roboterregler notwendig. Dabei muss eine Berechnung der Kräfte in Echtzeit sichergestellt werden, was eine Auslagerung nicht strikt echtzeitfähiger Berechnungen in separate Module notwendig macht. Dies sind beispielsweise iterative Berechnungen für die probabilistische kamerabasierte Fixture oder die Extraktion der nächsten Attraktorpunkte der positionsbasierten Fixture, welche mit einer flexiblen Anzahl an Attraktorpunkten parametrisiert werden kann. Bei der Entwicklung der Regelungskonzepte sollen bereits Raumfahrtrichtlinien, wie das Regulierungsdokument „NASA - Orion Guidance, Navigation and Control standards“, beachtet werden. Weiterhin soll die Stabilität auch unter Zeitverzögerungen berücksichtigt werden sowie eine roboterunabhängige Implementierung angestrebt werden, welche eine einfache Portierung der entwickelten Methoden auf andere Systeme erlaubt.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Die anspruchsvollen Projektziele wurden in der Vorhabenbeschreibung auf 5 Arbeitspakete aufgeteilt, welche eng mit den Arbeitspaketen der Projektpartner verknüpft sind. Tabelle 1 zeigt die Planung der Arbeitspakete und zugehörige Meilensteine. Um das anspruchsvolle Demonstrationsszenario aus AP150 zu erreichen, wurde die Projektlaufzeit kostenneutral um 3 Monate verlängert. Summa summarum konnten somit innerhalb des Projektbudgets die Projektziele vollständig erreicht werden. Außerhalb des Projekts konnte sogar innerhalb des Projektzeitraums eine erste Verwertung der Ergebnisse erzielt werden.

Tabelle 1: Gantt-Chart des Arbeitspakets AP100 aus der Vorhabenbeschreibung.

Jahre	1												2											
Monate	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
AP000	Projektmanagement																							
AP010	Vorbereitung In-Orbit-Demonstrator																							
AP100	Fehlertolerante adaptive telerobotische Montage mit KI Methoden																							
AP110	KI-basierte fehlertolerante Virtual Fixtures																							
AP120	KI-basierte Korrektur von Virtual Fixtures																							
AP130	Regelung von KI-basierten Virtual Fixtures																							
AP140	Anbindung an den Digitalen Zwilling																							
AP150	Demonstration und Validierung der Ergebnisse																							

4. Zugrundeliegende Arbeiten wissenschaftlicher und technischer Art

Virtual Fixtures^{1,2,3} (virtuelle Kraftfelder) sind ein lange etabliertes Konzept zur haptischen Unterstützung eines menschlichen Operators sowohl bei Hands-on- als auch bei

¹ Rosenberg, Louis B. "Virtual fixtures: Perceptual tools for telerobotic manipulation." *Proceedings of IEEE virtual reality annual international symposium*. IEEE, 1993.

² Bowyer, Stuart A., Brian L. Davies, and Ferdinando Rodriguez y Baena. "Active constraints/virtual fixtures: A survey." *IEEE Transactions on Robotics* 30.1 (2013): 138-157.

Telemanipulationsaufgaben. Im Vorgängerprojekt wurden neuartige Fixtures basierend auf der Kombination von Positions- und Bildinput entwickelt^{4,5} welche somit die Robustheit von Positionssensorik mit der Adaptivität von Kameradaten vereinen.

Da im ACOR-Projekt die Fehlertoleranz des entwickelten Ansatzes im Vordergrund steht, sind probabilistische Verfahren zur Erzeugung und Adaption von Virtual Fixtures^{6,7} von großer Bedeutung. Für die Arbitrierung zwischen den verschiedenen Virtual Fixtures wird auf Vorarbeiten zur Arbitrierung in Shared Control Ansätzen⁸ zurückgegriffen. Diese werden mit bekannten probabilistischen Machine Learning Methoden⁹ kombiniert. Zur Berücksichtigung der Geometrie des Problems, speziell von Orientierungen, sind Methoden auf Riemannschen Mannigfaltigkeiten notwendig.¹⁰

Um eine stabile Krafrückkopplung sowohl der entfernten Umgebung als auch der Virtual Fixtures sicherzustellen, wird auf einen energiebasierten Regelungsansatz¹¹ zurückgegriffen welcher die Stabilität des gekoppelten Gesamtsystems sicherstellt. Als robotisches System zur Implementierung der Ansätze wird das System HUG¹², basierend auf dem Leichtbauroboter LBR¹³ verwendet.

³ Rosenberg, Louis B. "The use of Virtual Fixtures to Enhance Operator Performance in Time Delayed Teleoperation." (1993).

⁴ Mühlbauer, Maximilian, et al. "Multi-phase multi-modal haptic teleoperation." *2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE, 2022.

⁵ Leutert, Florian, et al. "AI-enabled Cyber-Physical In-Orbit Factory-AI approaches based on digital twin technology for robotic small satellite production." *Acta Astronautica* 217 (2024): 1-17.

⁶ Calinon, Sylvain. "A tutorial on task-parameterized movement learning and retrieval." *Intelligent service robotics* 9 (2016): 1-29.

⁷ Raiola, Gennaro, et al. "Co-manipulation with a library of virtual guiding fixtures." *Autonomous Robots* 42 (2018): 1037-1051.

⁸ Balachandran, Ribin, et al. "Adaptive authority allocation in shared control of robots using Bayesian filters." *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, 2020.

⁹ Jacobs, Robert A., et al. "Adaptive mixtures of local experts." *Neural computation* 3.1 (1991): 79-87.

¹⁰ Zeestraten, Martijn JA, et al. "An approach for imitation learning on Riemannian manifolds." *IEEE Robotics and Automation Letters* 2.3 (2017): 1240-1247.

¹¹ Panzirsch, Michael, et al. "Exploring planet geology through force-feedback telemanipulation from orbit." *Science robotics* 7.65 (2022): eabl6307.

¹² T. Hulin, K. Hertkorn, P. Kremer, S. Schätzle, J. Artigas, M. Sagardia, F. Zacharias, and C. Preusche, "The DLR bimanual haptic device with optimized workspace", in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2011.

¹³ G. Hirzinger, N. Sporer, M. Schedl, J. Butterfaß, M. Grebenstein, "Torque-controlled lightweight arms and articulated hands: Do we reach technological limits now?", in *The Int. Journal of Robotics Research*, 23(4-5), 2004.

5. Zusammenarbeit mit den Projektpartnern

Die Partner im Projekt AI-In-Orbit-Factory sind

- die Technische Universität München (TUM), Prof. Dr.-Ing. Alin Albu-Schäffer,
- das Zentrum für Telematik Würzburg (ZfT), Prof. Dr. rer. nat. Klaus Schilling und
- die Technische Universität Darmstadt (TUDa / DiK), Prof. Dr.-Ing. Reiner Anderl.

Die Technische Universität München übernahm sowohl die Projektkoordination als auch die Bearbeitung der Arbeitspakete AP100 und AP010. Die enge Verzahnung der Arbeitspakete aller Projektpartner erforderte einen intensiven Austausch, welcher sowohl über halbjährliche Workshops als auch über virtuelle Meetings alle zwei Wochen stattfand. Daten, Dokumente und Ergebnisse wurden zwischen den Projektpartnern auf der von der Technischen Universität München bereitgestellten Plattform „lrz sync + share“ im Konsortium geteilt.

Die in AP100 durchgeführte teleoperierte Montage von Satellitenkomponenten erforderte dabei die Expertise des Zentrums für Telematik insbesondere bezüglich der Satellitenkomponenten und deren Handhabung mit Robotern. Die TU Darmstadt trug mit ihrer einschlägigen Erfahrung in den Bereichen Industrie 4.0 und Digital Twin zu einer erfolgreichen Durchführung des Arbeitspaketes bei.

II. Eingehende Darstellung

1. Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Das Teilvorhaben AP100 befasste sich mit der „Fehlertoleranten und adaptiven telerobotischen Montage mit KI Methoden“. Im Vorhabenzeitraum wurde an KI-basierten fehlertoleranten Virtual Fixtures (AP110), der KI-basierten Korrektur von Virtual Fixtures (AP 120), der Regelung von KI-basierten Virtual Fixtures (AP130), der Anbindung an den Digitalen Prozesszwilling (AP140) sowie dem finalen Demonstrationsszenario (AP150) gearbeitet. Weiterhin wurde das Arbeitspaket AP010, die Vorbereitung des In-Orbit-Demonstrators bearbeitet. Alle Unterarbeitspakete wurden planmäßig abgeschlossen. Eine detaillierte Beschreibung der Ergebnisse und der Entwicklungsprozesse befindet sich in den Berichten des Technischen Universität München. Ein Zwischenstand der gemeinschaftlich erzielten Ergebnisse wurde auf der DLR-Konferenz Digitalisierung der Raumfahrt¹⁴ vorgestellt. Der finale Projektstand wurde in einem gemeinsam mit den Projektpartnern verfassten Konferenzbeitrag¹⁵ auf dem IAC (International Astronautical Congress) 2024 vorgestellt. Die neu entwickelte probabilistische Visual Servoing Fixture wurde bereits auf dem Workshop „Probabilistic Robotics in the Age of Deep Learning“ auf der IROS 2022 vorgestellt¹⁶. Das vollständige Virtual Fixtures Framework für die Teleoperation des CubeSat-Zusammenbaus wurde im Journal-Paper „A Probabilistic Approach to Multi-Modal Adaptive Virtual Fixtures“¹⁷ präsentiert, welches zusätzlich auf der ICRA@40 im Jahr 2024 vorgestellt wurde. Eine weitere Publikation zum finalen Projektstand ist in Vorbereitung. Eine Verwertung der Projektergebnisse fand bereits auf dem 42. DLR-Parabelflug statt^{18,19}, die zugehörigen Experimente wurden auf der i-SAIRAS 2024 vorgestellt²⁰. Die Virtual Fixtures Technologie wurde auf demselben Robotersystem auch für das Projekt „SpaceDREAM“, welches einen Weltraumflug des Roboterarms zum Ziel hat, integriert; die zugehörige Software wird auf der IEEE Aerospace 2025 vorgestellt²¹. Die sich daraus ergebenden Synergien und die Vision einer Weltraumfabrik im Orbit wurde auf dem „7th Annual General Satellite Servicing Forum and Exhibition“ von Satellite Confers einem internationalen Raumfahrtpublikum vorgestellt²². Die durgeführten Arbeiten und die erzielten Ergebnisse sind in diesem Abschnitt beschrieben.

¹⁴ Mühlbauer, Maximilian Sebastian, et al. "ACOR-AI-enabled Cyber-Physical In-Orbit Self-Recovering Factory." *Digitalisierung der Raumfahrt*. 2023.

¹⁵ Mühlbauer, Maximilian Sebastian, et al. "AI-based Robust and Failure-Tolerant Processes for In-Orbit Manufacturing of Modular Small Satellites." *75th International Astronautical Congress, IAC 2024*. 2024.

¹⁶ Mühlbauer, Maximilian Sebastian, et al. "Mixture of experts on Riemannian manifolds for visual-servoing fixtures." *2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Workshop on Probabilistic Robotics in the Age of Deep Learning*. 2022.

¹⁷ Mühlbauer, Maximilian, et al. "A Probabilistic Approach to Multi-Modal Adaptive Virtual Fixtures." *IEEE Robotics and Automation Letters* (2024).

¹⁸ <https://www.cit.tum.de/en/cit/news/article/collaborative-robot-algorithms-in-weightlessness/>

¹⁹ https://www.instagram.com/reel/C_ICMwUo9kx

²⁰ Maurenbrecher, Henry, et al. "RoboGrav-Towards Force Sensitive Space Manipulators." *i-SAIRAS 2024 International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space*. 2024.

²¹ Mühlbauer, Maximilian, et al. "Software for the SpaceDREAM robotic arm." *arXiv preprint arXiv:2409.17562* (2024).

²² Mühlbauer, Maximilian Sebastian. "Towards an In-Orbit CubeSat Factory." (2024).

1.1 KI-basierte fehlertolerante Virtual Fixtures (AP110)

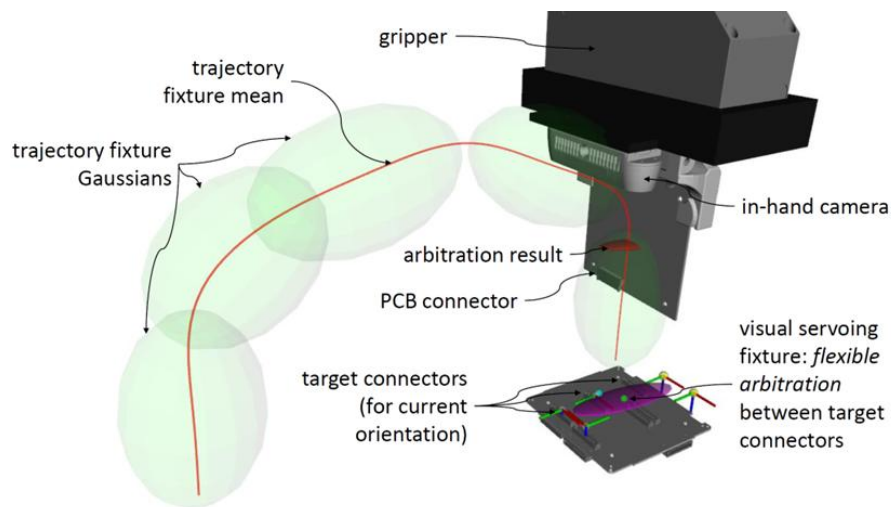
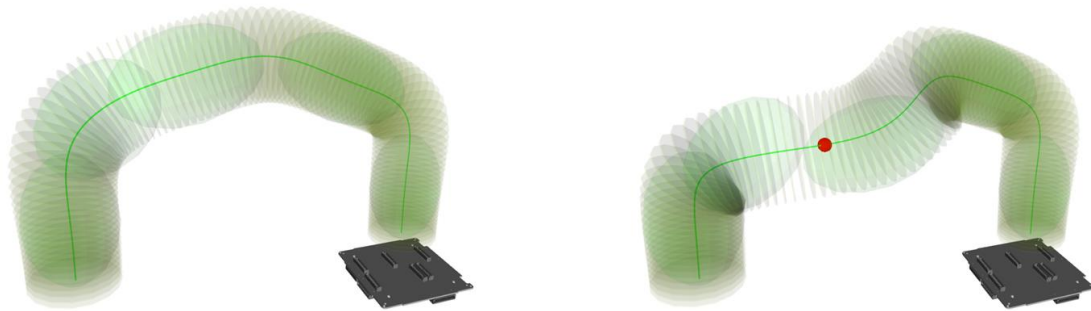


Abbildung 3: Schematische Darstellung der verwendeten probabilistischen Virtual Fixtures.

In AP 110 wurden nach Literaturrecherche probabilistische Visual Servoing Virtual Fixtures entwickelt. Basierend auf einer probabilistischen Objekterkennung und der aktuellen Endeffektorposition erlauben es diese dem Teleoperator, zwischen verschiedenen Fixtures zu wählen. Der probabilistische Ansatz erlaubt dabei, die von den Fixtures erzeugten Kräfte je nach Unsicherheit zu skalieren. Diese Skalierung wurde sodann für eine bessere Nutzbarkeit verfeinert sowie um positionsbasierte probabilistische Virtual Fixtures erweitert. Diese Kombination erlaubt dem Operator, Kraftfeedback über den ganzen Arbeitsbereich zu erhalten wobei die jeweils optimale Fixture ausgewählt wird.

1.2 KI-basierten Korrektur von Virtual Fixtures (AP 120)

In AP 120 wurden verschiedene Korrekturmöglichkeiten untersucht. Dabei sollen sowohl automatische Korrekturen, z.B. basierend auf Kollisionsgeometrien, als auch eine nutzergesteuerte Korrektur u.a. durch die Vorgabe von Via-Punkten möglich sein. Für die Berücksichtigung von Via-Punkten wurden verschiedene Verfahren, u.a. Kernelized Movement Primitives, eine optimierungsbasierte Adaption der probabilistischen Trajektorie sowie die Einfügung von „Patch-Trajektorien“ im probabilistischen Ansatz aus AP 110 untersucht. Für die automatische Korrektur wurden optimierungsbedingte Verfahren evaluiert welche basierend auf gegebenen Geometrien Via-Punkte errechnen.



(1) Original trajectory.

(2) Modified trajectory passing through the red via point.

Abbildung 4: Visualisierung der optimierungsbasierten Adaption der Virtual Fixture aufgrund eines durch den Nutzer gesetzten Via-Punkts (roter Punkt im rechten Bild).

Für den Einsatz im Demonstrator wurde dabei eine optimierungsbasierte Adaption der Fixture ausgewählt (Abbildung 4). Für die automatische Korrektur wurden optimierungsbedingte Verfahren entwickelt, welche basierend auf gegebenen Geometrien Via-Punkte errechnen. Weiterhin können Start- und Zielpunkte der Fixture über einen „Task Parametrized“ Ansatz modifiziert werden (Abbildung 5). Diese Fixture-Adaption kann im Demonstrator über den Digitalen Prozesszwilling gesteuert werden.



(1) Original task-parametrized trajectory not starting from the current end effector pose.

(2) Modified trajectory starting from the current end effector pose.

Abbildung 5: Visualisierung der Adaption der Virtual Fixture über einen „Task Parameterized“ Ansatz.

1.3 Regelung von KI-basierten Virtual Fixtures (AP130)

In AP 130 wurden mehrere geometriebasierte Virtual Fixtures implementiert, welche flexibel zur Laufzeit parametrisiert werden können. Dabei kann sowohl die Geometrie der Fixture als auch das Referenzkoordinatensystem flexibel parametrisiert werden. Für die geometrischen Methoden wurden entsprechende mathematische Operationen implementiert (Abbildung 6) und in parametrisierbaren Simulink-Blöcken umgesetzt (Abbildung 7). Weiterhin wurde die Visualisierung der Methode optimiert und ein Python-Interface programmiert (Abbildung 8), welches eine flexible Parametrisierung der Fixtures z.B. aus einer Programmsteuerung erlaubt. Als zusätzliches Feature wurde eine distanzbasierte Unsicherheitsadaption implementiert, welche trajektorienbasierte Fixtures deaktiviert, wenn sich der Roboter außerhalb ihres Definitionsbereichs befindet. Diese Adaption erlaubt die simultane Verwendung einer Vielzahl von Fixtures im Arbeitsraum, wobei nicht alle Fixtures gleichzeitig aktiv sind.

Manifold Library

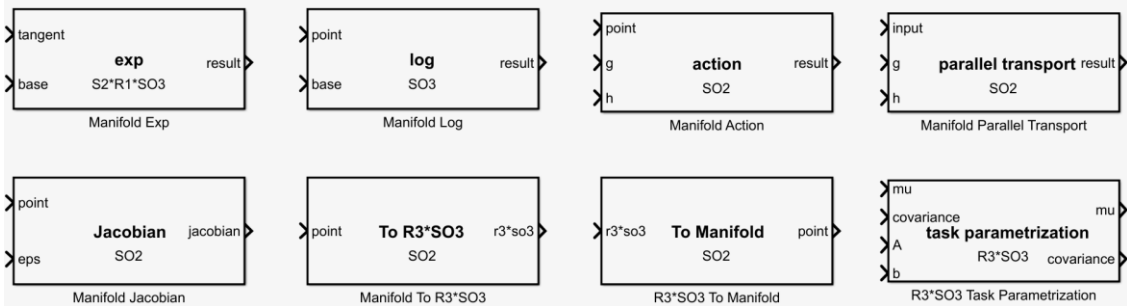


Abbildung 6: Grundlegende mathematische Operationen für geometrische Virtual Fixtures.

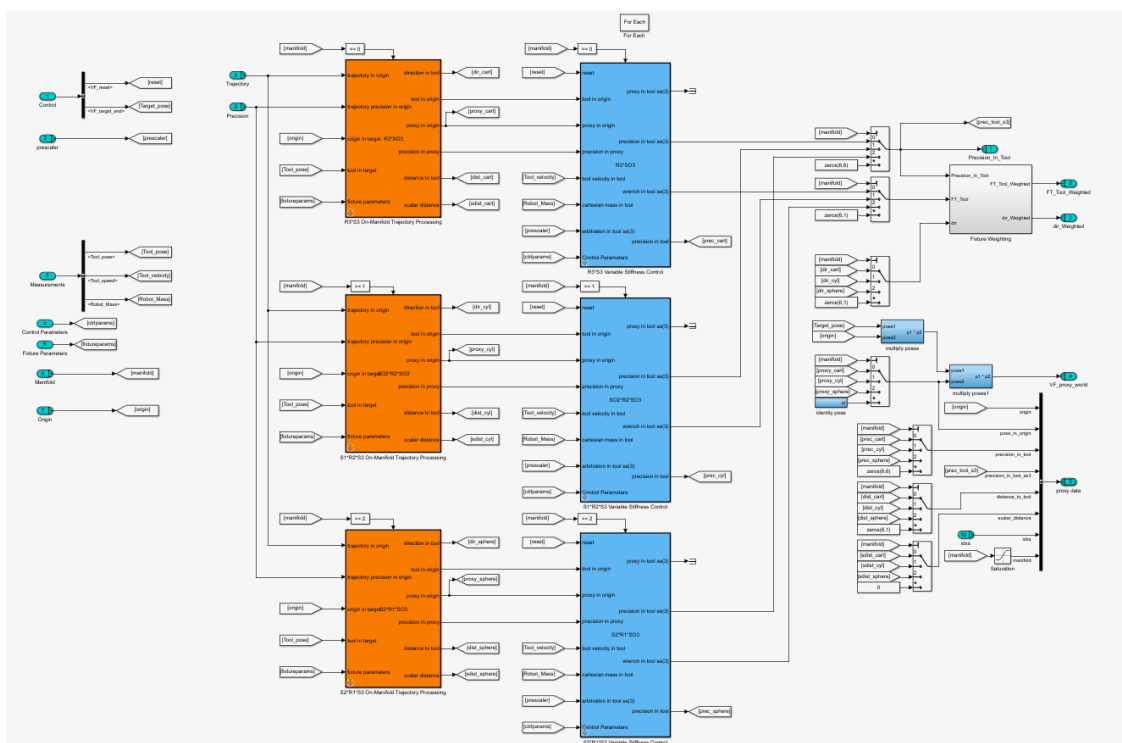


Abbildung 7: Regelungsstruktur für geometrische Trajektorien-Fixtures.

Weiterhin wurde am Dämpfungsdesign der Methode gearbeitet, sodass zu jedem Zeitpunkt die optimale Dämpfung und damit eine geschmeidige Roboterbewegung sichergestellt ist. Außerdem wurden Vorbereitungen getroffen, einen Regelungsansatz zur optimalen Berücksichtigung von Zeitverzögerung im Zusammenspiel mit den Virtual Fixtures in der Kommunikation mit der In-Orbit-Fabrik zu integrieren.

Um regelungstechnische Stabilität der Virtual Fixtures auch bei den hohen Latenzen, wie sie bei der Kommunikation mit einer Fabrik im Orbit auftreten sicherzustellen wurde ein fortschrittlicher Teleoperationsregler²³ in das Framework integriert.

²³ Panzirsch, Michael, et al. "Exploring planet geology through force-feedback telemanipulation from orbit." *Science robotics* 7.65 (2022): eabl6307.

```

import json
from typing import Optional

import numpy as np
from robotutils.geom.manifold import ProductManifold

class AdaptiveFixturesInterface:
    def __init__(self, client, fixture_prefix: Optional[str] = None) -> None:
        """
        Initialize the interface.
        """

        if fixture_prefix is None:
            fixture_prefix = "fixtures"

        self.client = client

        # load parameters
        self.parameters = self.client.get_parameters(fixture_prefix)

        # find services
        services = self.client.find_services_with_interface("telepresence/multimodal/trajectory_fixture/set_params")
        self.svc_set_trajectory = self.client.get_service(services, "telepresence/multimodal/trajectory_fixture/set_params")
        services = self.client.find_services_with_interface("telepresence/multimodal/velocity_fixture/set_params")
        self.svc_set_velocity = self.client.get_service(services, "telepresence/multimodal/velocity_fixture/set_params")
        services = self.client.find_services_with_interface("telepresence/multimodal/visual_servoing_fixture/set_params")
        self.svc_set_moe_params = self.client.get_service(
            services, "telepresence/multimodal/visual_servoing_fixture/set_params"
        )

    def load_impedance_parameters(self, parameters_file: str) -> None:
        """
        Load the impedance parameters from a file.

        :param parameters_file: Path to the yaml file containing the parameters.
        """

        f = open(parameters_file, "r")
        imp_params = json.load(f)
        f.close()

```

Abbildung 8: Python-Interface zur Parametrierung der Virtual Fixtures.

1.4 Anbindung an den Digitalen Prozesszwilling (AP140)

Für AP140 wurde ein Kommunikationsprotokoll basierend auf dem Industriestandard OPC-UA implementiert. Über diese Schnittstelle können aktuelle Roboter-Diagnosedaten mit dem digitalen Prozesszwilling geteilt werden sowie Ziel- und Viapunkte der Fixtures gesetzt werden (Abbildung 9). Dazu wird die in AP120 entwickelte Korrektur genutzt.

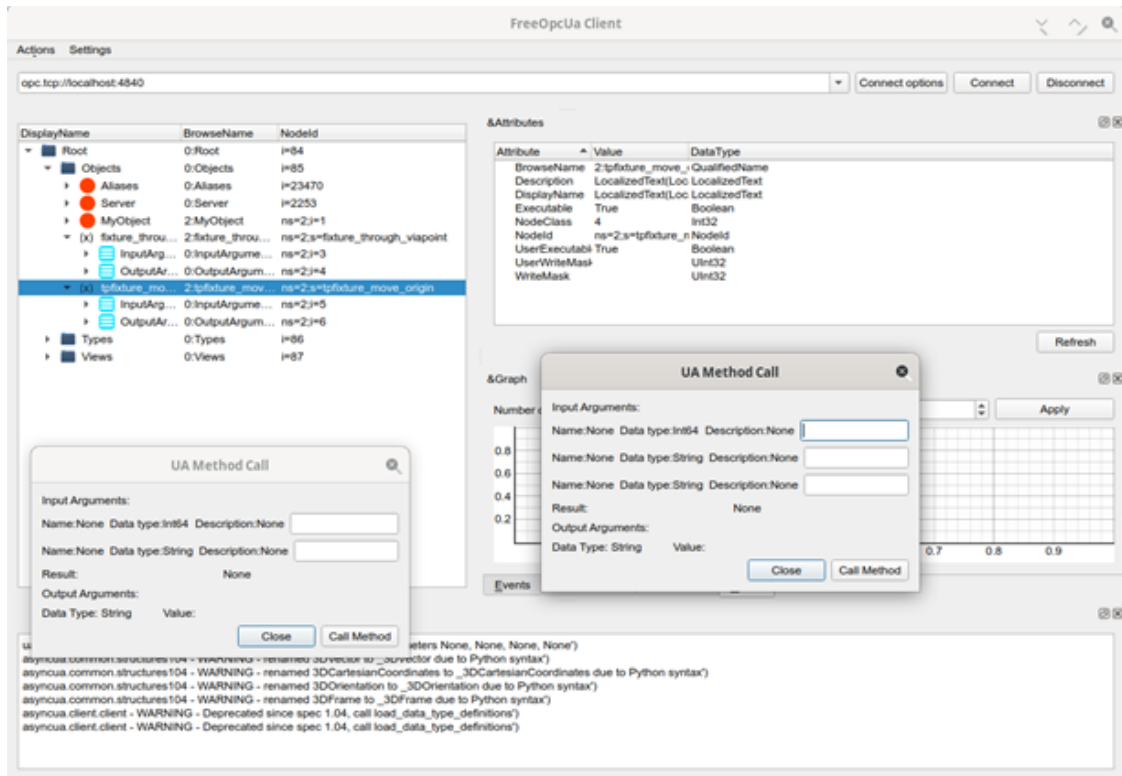


Abbildung 9: OPC-UA Interface zu den in AP100 entwickelten Methoden.

1.5 Finales Demonstrationsszenario (AP150)

Für AP 350 wurde das Virtual Fixture Framework flexibilisiert, so wurde die Berechnung der Visual Servoing Fixture in eine externe wiederverwertbare sowie konfigurierbare C++-Komponente ausgelagert. Weiterhin wurde ein Optimierungsverfahren entwickelt um die Parameter der Visual Servoing Fixture optimal bestimmen zu können.

Basierend auf dem nun vervollständigten Virtual Fixtures Framework wurde eine Nutzerstudie durchgeführt, welche die Nutzbarkeit der Methode evaluiert. Die Ergebnisse wurden in einer Publikation¹⁷ veröffentlicht.

2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Kosten des Teilvorhabens umfassten die Personalkosten für wissenschaftliche Arbeiten, sowie Hardwarekosten. Der Umfang der einzelnen Position sind der zahlenmäßige Nachweis zu entnehmen, der dem Projektträger von der TU München vorgelegt wurde.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Notwendigkeit der Arbeiten des Forschungsvorhabens ist in der Vorhabenbeschreibung dargelegt. Die ambitionierten Projektziele hinsichtlich der KI-basierten Recovery für Telemanipulation sind neu und bisher noch nicht Teil des Forschungsspektrums, sondern gehen über die aktuellen Forschungsthemen der TUM hinaus. Ohne die in diesem Vorhaben beantragte Finanzierung von wissenschaftlichem Personal und technischer Ausrüstung war die Bearbeitung dieses neuartigen Forschungsthemas nicht realisierbar und durch die bisherigen Finanzmittel nicht stemmbar. Es wird ein sehr hohes wirtschaftliches Potential in diesen AI unterstützten Recovery-Methoden gesehen, da sie sich nicht nur für Weltraumanwendungen eignen, sondern sich aufgrund ihrer Generalisierbarkeit für zahlreiche terrestrische Anwendungen eignen.

Insbesondere eignen sich die entwickelten Ansätze für die robotische Chirurgie. Wie in Weltraumanwendungen sind dort KI-Methoden bislang noch kaum vertreten da robuste Recovery-Strategien fehlen, die eine Umsetzung in diesem Bereich erlauben. Erst die erhöhte Fehlertoleranz und automatische -korrektur erlaubt eine Anwendung, ohne den Patienten zu gefährden.

Diese Forschungsthematik stellt auch die Grundlage zukünftiger, angelegter Forschungstätigkeiten dar, insbesondere da AI-unterstützte Recoverymethoden auch außerhalb der Telemanipulation in vielen Bereichen der Robotik notwendig sind.

Ohne Unterstützung waren eine solche Kooperation und Kollaboration nicht möglich. Die Antragsteller benötigten Unterstützung in Form einer öffentlichen Förderung, da sie die anfallenden Arbeiten in diesem Umfang im Rahmen der vorhandenen Kapazitäten und die mit ihnen verbundenen Risiken nicht allein tragen konnten. Daraus ergab sich die Notwendigkeit der Zuwendung, um das Vorhaben realisieren zu können.

4. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit

Andere Projekte können direkt von den durchgeführten Arbeiten und deren Ergebnissen profitieren. Eine besondere Relevanz der Ergebnisse besteht aufgrund der Übertragbarkeit auf andere Anwendungsfelder der Teleoperation sowie im Learning from Demonstration-Bereich, d.h. die Regelungsarchitektur und entwickelten Virtual Fixtures können sowohl für Weltraum- als auch für terrestrische Anwendungen zum Einsatz kommen, in denen ein hohe Präzision während einer Teleoperation nötig ist. Entsprechende Verwertungen wurden schon während der Projektlaufzeit begonnen^{20,21}.

Weiterhin können die entwickelten Ansätze zur Unterstützung in der Alten- und Krankenpflege durch die Telerobotik verwendet werden. Bei der Telerobotik muss sich die Tele-Pflegekraft nicht in der direkten Nähe des Patienten oder der pflegebedürftigen Person aufhalten, wodurch eine

Ansteckungsgefahr vermieden wird. Ein weiterer Vorteil dieser Technologie im Umfeld der Pflege ist die Verbesserung der Selbständigkeit von pflegebedürftigen Personen, da dadurch eine personalintensive Rund-um-die-Uhr-Betreuung vor Ort umgangen und somit ein längeres Wohnen in der eigenen Wohnung ermöglicht werden kann.

Damit die Ergebnisse auch wirtschaftlich genutzt werden können, sollen die KI-basierten Recoverymethoden für Teleoperation innerhalb eines Transferprojekts in der Industrie etabliert werden. Dabei steht die Erhöhung des TRLs dieser innovativen Technologie im Vordergrund, um die Einstiegshürde weiter zu senken und die Technologie attraktiver zu machen.

5. Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Von dritter Seite sind während der Vorhabendurchführung keine neuen Ergebnisse bekannt geworden, die für die Arbeiten relevant sind. Daher waren diesbezüglich auch keine Änderungen in der Zielsetzung notwendig.

6. Veröffentlichungen der Ergebnisse

Die wissenschaftlich relevanten Ergebnisse im Konsortium wurden innerhalb eines Konferenzbeitrags¹⁵ auf dem IAC sowie zahlreicher Vorträge^{14,22} veröffentlicht. Die speziellen Ergebnisse des AP 100 wurden in einem Workshop-Beitrag¹⁶ auf der IROS 2022 sowie im Journal „Robotics and Automation Letters“ im Jahr 2024 mit Vorstellung auf der ICRA@40¹⁷ veröffentlicht. Die Veröffentlichungen beschreiben im Detail den Demonstrator sowie die entwickelten Virtual Fixtures, sowie die Ergebnisse der durchgeführten Tests und Pilotstudie.

Aktuell ist eine Publikation in Vorbereitung, in der die finalen Projektergebnisse des AP100 detailliert vorgestellt werden sollen.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart Schlussbericht	
3a. Titel des Berichts AI-enabled Cyber-Physical In-Orbit Self-Recovering Factory Teilvorhaben: Fehlertolerante und adaptive telerobotische Montage mit KI Methoden		
3b. Titel der Publikation		
4a. Autoren des Berichts (Name, Vorname(n)) Mühlbauer, Maximilian; Hulin, Thomas; Giordano, Alessandro Massimo; Albu-Schäffer, Alin		5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.10.2024
4b. Autoren der Publikation (Name, Vorname(n))		6. Veröffentlichungsdatum
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Lehrstuhl für Sensorbasierte Robotersysteme und intelligente Assistenzsysteme TUM School of Computation, Information and Technology Technische Universität München Friedrich-Ludwig-Bauer-Str. 3 85748 Garching bei München		7. Form der Publikation
13. Fördernde Institution (Name, Adresse) Deutsche Raumfahrtagentur im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. Königswinterer Str. 522-524 53227 Bonn		9. Ber.Nr. Durchführende Institution
		10. Förderkennzeichen 50RP2030A
		11a. Seitenzahl Bericht 16
16. Zusätzliche Angaben		11b. Seitenzahl Publikation
		12. Literaturangaben 21
		14. Tabellen
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)		15. Abbildungen 9
		18. Kurzfassung Dieser Bericht beschreibt die Tätigkeiten und Ergebnisse des Teilvorhabens "Fehlertolerante und adaptive telerobotische Montage mit KI Methoden" des Verbundprojekts "AI-enabled Cyber-Physical In-Orbit Self-Recovering Factory". Übergeordnetes Projektziel ist die Entwicklung eines fehlertoleranten Prozesses zur In-Orbit-Produktion von Kleinstsatelliten. Mittels Methoden der Künstlichen Intelligenz (KI) zur Fehlererkennung und -behebung (Fault Detection, Isolation and Recovery, FDIR) sollen Fehler sowohl auf Komponenten- als auch auf Prozessebene automatisch erkannt und korrigiert werden. Diese Methodiken stellen ein entscheidendes Puzzlestück zur Etablierung einer automatisierten Produktion im Weltraum. Der Fokus des beschriebenen Teilvorhabens liegt dabei auf der (i) Erforschung neuartiger probabilistischer Virtual Fixtures, (ii) deren optimaler Fusion, (iii) der Korrektur und Adaption dieser Fixtures, (iv) der Umsetzung entsprechend notwendiger Regelungsmethoden sowie (iv) der Evaluierung sowie der Durchführung von Nutzerstudien.
19. Schlagwörter Weltraumfabrik, Robotische Montage, Kleinstsatelliten, KI, Telerobotik, Telemanipulationsregelung, Kraftrückkopplung, Virtual Fixtures		
20. Verlag		21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. Type of Report Final Report
3a. Report Title AI-enabled Cyber-Physical In-Orbit Self-Recovering Factory Teilvorhaben: Fehlertolerante und adaptive telerobotische Montage mit KI Methoden	
3b. Title of Publication	
4a. Author(s) of the Report (Family Name, First Name(s)) Mühlbauer, Maximilian; Hulin, Thomas; Giordano, Alessandro Massimo; Albu-Schäffer, Alin	5. End of Project 31.10.2024
4b. Author(s) of the Publication (Family Name, First Name(s))	6. Publication Date
8. Performing Organization(s) (Name, Address) Lehrstuhl für Sensorbasierte Robotersysteme und intelligente Assistenzsysteme TUM School of Computation, Information and Technology Technische Universität München Friedrich-Ludwig-Bauer-Str. 3 85748 Garching bei München	7. Form of Publication
13. Sponsoring Agency (Name, Address) Deutsche Raumfahrtagentur im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. Königswinterer Str. 522-524 53227 Bonn	9. Originator's Report No.
16. Supplementary Notes	10. Reference No. 5ORP2030A
17. Presented at (Title, Place, Date)	11a. No. of Pages Report 16
18. Abstract This report describes the activities and results of the sub-project "Fault-tolerant and adaptive telerobotic assembly with AI methods" of the joint project "AI-enabled Cyber-Physical In-Orbit Self-Recovering Factory". The overarching project goal is to develop a fault-tolerant process for the in-orbit production of micro-satellites. Using artificial intelligence (AI) methods for fault detection and recovery (Fault Detection, Isolation and Recovery, FDIR), faults are to be automatically detected and corrected at both component and process level. These methods represent a crucial piece of the puzzle for establishing automated production in space. The focus of the sub-project described here is on (i) research into novel probabilistic virtual fixtures, (ii) their optimal fusion, (iii) the correction and adaptation of these fixtures, (iv) the implementation of the necessary control methods and (iv) the evaluation and implementation of user studies.	11b. No. of Pages Publication
19. Keywords Space factory, robotic assembly, small satellites, AI, telerobotics, telemanipulation control, force feedback, virtual fixtures	12. No. of References 21
20. Publisher	14. No. of Tables
21. Price	15. No. of Figures 9