

Forschungsstatement

Mertcan Kaya • Doktorand & Robotik-Ingenieur

Hochschule Coburg & Technische Universität München (TUM)

Kontakt: mertcan.kaya@hs-coburg.de • Website: mertcan-kaya.github.io/index-de.html

1. Forschungsvision & Philosophie

Meine Forschung ist an der Schnittstelle von **fortschrittlicher Regelungstheorie, Roboterkinematik und Mensch-Roboter-Interaktion (HRI)** angesiedelt. Das übergeordnete Ziel meiner Arbeit ist es, komplexe mathematische und biomechanische Formulierungen in flüssige, einsatzfähige und menschenbezogene Software-Stacks für kollaborative autonome Systeme zu übersetzen.

Während Roboter zunehmend isolierte Industrieanlagen verlassen und in komplexe, gemeinsam mit Menschen genutzte Arbeitsräume eintreten, versagen klassische Algorithmen zur Trajektoriengenerierung, da sie menschliche Akteure lediglich als statische Hindernisse betrachten. Mein Forschungsansatz stellt dieses Paradigma in Frage: Ich entwerfe vereinheitlichte Regelkreise, in denen der Manipulator menschliche physische und visuelle Bewegungsmuster in Echtzeit aktiv interpretiert, modelliert und sich daran anpasst. In den vergangenen fünf Jahren habe ich diese Vision systematisch entlang von drei Hauptachsen skaliert: Low-Level-Kraftnachgiebigkeitsregelung, hochfrequente rekursive Parameterschätzung und multimodale räumliche Aushandlungsmodelle (Spatial Negotiation).

2. Grundlegende Forschung & Zentrale Beiträge

A. Hybride Positions-/Kraft-Compliance-Regelung (Master-Forschung)

Während meiner Forschung an der Istanbul Technical University (ITU) konzentrierte ich mich auf die Herausforderung des kontinuierlichen physischen Kontakts innerhalb von Multi-Agenten-Systemen. Ich entwickelte mathematische Formulierungen für geschlossene kinematische Ketten, die Lastverteilungsmatrizen im Arbeitsraum direkt auf redundante Aktorräume abbilden. Dies ermöglichte es mehreren Manipulatoren, Kontaktkräfte sicher zu verteilen und gleichzeitig Umgebungsbeschränkungen zu bewältigen. Ich validierte diese Modelle empirisch auf physischen Mehrachsen-Plattformen und legte damit den Grundstein für sichere, kraftnachgiebige Mensch-Roboter-Regelkreise.

B. Hochfrequentes rekursives Parameter-Tracking (JIRS 2024)

Ein wesentlicher Engpass bei der modellbasierten adaptiven Roboterregelung ist der extreme Rechenaufwand, der zur Online-Berechnung hochdimensionaler Regressor-Matrizen erforderlich ist. Um diese Limitierung zu überwinden, entwickelte ich einen alternativen, rekursiven Parameter-Tracking-Algorithmus, abgeleitet aus inversen Newton-Euler-Formulierungen.

- **Die Kernmetrik:** Durch die systematische Umgehung expliziter Regressor-Aufbauparameter skaliert die Rechenkomplexität linear mit der Anzahl der Gelenke, wodurch Matrizeninversionslatenzen vollständig vermieden werden.
- **Ergebnis:** Diese Arbeit, veröffentlicht im *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, hat bewiesen, dass adaptive Regelkreise auf Standard-Mikroprozessoren auf hohe Iterationsfrequenzen skaliert werden können, was die Nachlaufverzögerung bei der Trajektorienverfolgung an physischen Roboterarmen drastisch reduziert.

C. Mathematische Modellierung motorischer Interferenz (Interaction Studies 2026)

Um zu verstehen, wie Menschen sich an nahegelegene Automatisierungstechnik anpassen, führte ich umfangreiche multimodale Probandenstudien durch, bei denen visuelle Blickmuster, Fehlerraten im Arbeitsraum und menschliche kinematische Gelenkanpassungen erfasst wurden.

- **Die Entwicklung von DAV:** Herkömmliche Tracking-Metriken vermischen routinemäßig beabsichtigte menschliche Aufgabenpfade mit unbeabsichtigtem Regelungsrauschen. Zur Lösung dieses Problems formulierte ich eine neuartige computergestützte Metrik namens **Distractor-Aligned Variance (DAV)**, die Trajektorienvariationen isoliert, die strikt orthogonal zum aktiven Aufgabenvektor $\mathbf{x}(t)$ verlaufen:

$$\text{DAV} = \frac{1}{T} \int_0^T \|\mathbf{e}(t) - (\mathbf{e}(t)^T \hat{\mathbf{v}}_d(t)) \hat{\mathbf{v}}_d(t)\|^2 dt$$

- **Ergebnis:** Veröffentlicht in *Interaction Studies*, konnte diese mathematische Pipeline erfolgreich nachweisen, dass interne Nullraumkonfigurationen eines Roboters (z. B. veränderte Ellenbogenausrichtungen ohne Bewegung des Endeffektors) bei menschlichen Bedienern unbewusste, unfreiwillige biomechanische Pfadanpassungen auslösen.

3. Aktueller Fokus: Hierarchische Bewegungsplanung (DFG CoSMoC Projekt)

Gegenwärtig arbeite ich als Wissenschaftlicher Mitarbeiter im DFG-geförderten **CoSMoC-Projekt** (Förderkennzeichen: KU 2486/9-1, 8-1, 8-2) daran, meine biomechanischen Interferenzmodelle mit hochrangigen Software-Architekturen zu verknüpfen. Ich entwickle ein hierarchisches, kongruenzsensitives C++/Python-Bewegungsplanungs-Framework, das nativ in einem ROS 2-Middleware-Stack auf kollaborativen Hardware-Plattformen (Franka Emika Panda, UR3) läuft.

Dieses Framework nutzt inverse optimale Steuerung und dynamische Online-Zustandsschätzung, um menschliche Aufgabensequenzen zu interpretieren. Anstelle herkömmlicher reaktiver Bremsvorgänge verwendet die Planungs-Engine das DAV-Signal als direkte Feedback-Primitive, modifiziert Costmap-Gewichte online und synthetisiert vorausschauend Trajektorienausrichtungen, die menschlichen kognitiven Sichtlinien entsprechen. Gleichzeitig habe ich, um plattformübergreifende Flexibilität zu gewährleisten, meinen Fokus auf autonome mobile Roboter (AMRs) ausgeweitet. Hierbei implementiere ich maßgeschneiderte Laser-SLAM-Pipelines und ROS 2 Nav2-Konfigurationen auf Plattformen wie AgileX Scout Mini und TurtleBot 4, um autonome Navigationsschleifen zu steuern.

4. Zukünftige Forschungsagenda (Nächste 3–5 Jahre)

Für die Zukunft strebe ich an, eine eigenständige Forschungslinie mit dem Fokus auf **kognitiv-kongruente Trajektorienoptimierung für gemeinsame Arbeitsräume** zu leiten. Ich plane, auf meinem DFG-Framework aufzubauen und externe Forschungsgelder (wie EU Horizon, DFG-Sachbeihilfen oder institutionenspezifische Programme) einzuwerben, um drei hochwirksame Bereiche zu erschließen:

Thema I: Multimodale menschliche Intentionsprimitiven zur prädiktiven Trajektorien-synthese

Aktuelle prädiktive Planer verlassen sich stark auf niedrigdimensionale Tracking-Eingaben (z. B. Handgelenksposition). Ich beabsichtige, robuste Sensor-Fusions-Schleifen aufzubauen, die großflächiges LiDAR, Skelett-Tracking und tragbare IMU-Daten direkt in probabilistische Trajektorienmodelle integrieren. Durch die Abbildung dieser Eingaben in Echtzeit-Trajektorienoptimierungs-Frameworks wie TrajOpt oder Movelt wird der kollaborative Roboter flüssige Ausweichbewegungen synthetisieren können, noch bevor eine physische Kollisionsgrenze erreicht wird.

Thema II: Dezentralisierte Steuerung und Navigation für heterogene AMR-Manipulator-Flotten

Aufbauend auf meinen jüngsten ROS 2 Nav2- und Manipulator-Setups werde ich die Kopplung zwischen mobilen Basen und kooperierenden Roboterarmen untersuchen. Dies umfasst die Entwicklung von verteilten Model-Predictive-Control (MPC)-Schleifen, die die Mobilität der Basis mit den Tracking-Metriken des Arm-Manipulators koordinieren, um eine flüssige, unterbrechungsfreie mobile Manipulation in dynamischen Umgebungen (z. B. kollaborative Fertigung oder Logistikzentren) zu ermöglichen.

Thema III: Standardisierung kognitiver Sicherheitsbenchmarks für industrielle HRI

Während physische Sicherheitsprotokolle in ISO-Normen streng reguliert sind, existieren kognitive Sicherheitsmetriken praktisch nicht. Ich strebe an, den Distractor-Aligned Variance (DAV)-Algorithmus als industriellen Standard-Benchmark für die Zertifizierung der Verhaltenssicherheit kollaborativer Software-Stacks zu etablieren. Ziel ist die Schaffung einer öffentlichen, quelloffenen Testplattform, die es Entwicklungsteams ermöglicht, Planungsalgorithmen gegen reale Metriken menschlicher Verhaltensreaktionen zu validieren.

5. Methodische Einordnung & Engagement in der Lehre

Meine Forschungsmethodik ist tief in der **empirischen Reproduzierbarkeit** verwurzelt. Jeder theoretische Ansatz, den ich entwerfe, wird durch Open-Source-Codebasen und direkte Hardware-Demonstrationen an physischen Systemen validiert. Über meine eigene Forschung hinaus engagiere ich mich intensiv im akademischen Mentoring. Durch meine Tätigkeiten als Associate Editor und Program Committee Reviewer für bedeutende Robotik-Konferenzen (IEEE ARSO, RO-MAN, ICSR) sowie als Dozent für fortgeschrittene Regelungstechnik-Labore, plane ich aktiv eine kollaborative Laborumgebung zu fördern. Mein Ziel ist es, Masterstudierenden zu ermöglichen, komplexe Regelkreise effizient zu kompilieren, zu debuggen und auf realer Roboterhardware auszuführen.