

## Dissertationen

Juan Jairo Inga Charaja\*

# Methoden für inverse dynamische Spiele zur Identifikation des Verhaltens kooperativer Systeme

Inverse dynamic game methods for identification of cooperative system behavior

<https://doi.org/10.1515/auto-2021-0054>

Empfangen 16. März 2021; angenommen 16. März 2021

**Zusammenfassung:** Diese Arbeit behandelt inverse dynamische Spiele, welche eine Verallgemeinerung des inversen Problems der optimalen Regelung darstellen. Ziel dabei ist die Identifikation von Kostenfunktionen auf Basis von beobachteten optimalen Trajektorien. Die identifizierten Kostenfunktionen können individuelles Verhalten in kooperativen Systemen beschreiben, beispielweise menschliches Verhalten während der haptischen Interaktion mit anderen Menschen oder mit Maschinen.

**Schlagwörter:** optimale Regelung, dynamische Spieltheorie, Identifikation, kooperative Systeme

**Abstract:** This thesis addresses inverse dynamic games, which generalize the inverse problem of optimal control, and where the aim is to identify cost functions based on observed optimal trajectories. The identified cost functions can describe individual behavior in cooperative systems, e. g. human behavior in human-machine or human-human haptic shared control scenarios.

**Keywords:** optimal control, dynamic game theory, identification, cooperative systems

## Motivation

Automatisierte technische Systeme arbeiten schon heute nicht mehr außerhalb der Reichweite des Menschen, sondern interagieren zunehmend mit diesem auf physische Weise, wie zum Beispiel in der kollaborativen Robotik oder in kooperativen hochautomatisierten Fahrzeugen. Mensch und Maschine werden in diesen Fällen gleichberechtigt

---

\*Korrespondenzautor: Juan Jairo Inga Charaja, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Regelungs- und Steuerungssysteme (IRS), Kaiserstr. 12, 76131 Karlsruhe, Germany, E-Mail: [jairo.inga@kit.edu](mailto:jairo.inga@kit.edu)

te Partner in einem kooperativen Gesamtsystem. Für eine sichere und effektive Interaktion benötigen Maschinen die Fähigkeit, das Verhalten unbekannter Partner, wie beispielsweise des Menschen, zu beschreiben und vorherzusagen, wofür Modellierungsansätze und Identifikationsmethoden erforderlich sind.

Die dynamische Spieltheorie und das Gleichgewichtskonzept nach John F. Nash bieten ein mächtiges mathematisches Grundgerüst für die Beschreibung von Interaktionen in kooperativen Systemen. Die Kooperationspartner bzw. Spieler werden durch ihre individuellen Kostenfunktionen dargestellt, deren Optimierung sie anstreben. Das Identifikationsproblem lässt sich somit als inverses dynamisches Spiel darstellen, welches auf die Ermittlung von Parametern der Kostenfunktionen unbekannter Spieler auf Basis von Beobachtungen ihrer Steuergrößen und der resultierenden Zustandstrajektorie abzielt. Dieses inverse Problem generalisiert damit das ursprünglich von Rudolf E. Kalman aufgestellte inverse Problem der optimalen Regelung, welches als inverses dynamisches Spiel mit einem einzigen Spieler aufgefasst werden kann.

## Problemstellung

Inverse dynamische Spiele können mit direkten Methoden gelöst werden, welche Kostenfunktionsparameter iterativ anpassen. Jedoch ist in jeder Iteration die Berechnung eines Nash-Gleichgewichts mit den aktuellen Parametern notwendig, was zu sehr großen Rechenzeiten führen kann und eine Übertragung des Identifikationskonzepts in die Anwendung erschwert. Das Ziel dieser Dissertation ist es daher, Methoden für die Lösung inverser dynamischer Spiele zu entwickeln, die eine für die Anwendung in praktischen Regelungssystemen hinreichend schnelle Identifikation ermöglichen.

## Ergebnisse

Die Arbeit präsentiert zunächst eine allgemeine, formalisierte Beschreibung von inversen dynamischen Spielen mit einer beliebigen Anzahl an Spielern. Die Problemstellung wird mithilfe der Definition von Basisfunktionen, die die Struktur der Kostenfunktionen vorgeben, als Parameteridentifikationsproblem definiert. Mit dieser Formulierung wird ein indirektes Lösungsverfahren hergeleitet, welches auf den notwendigen Bedingungen für Nash-Gleichgewichte, die sich aus dem Minimum Prinzip von Pontryagin ergeben, beruht. Da inverse dynamische Spiele schlecht gestellt sind, werden hinreichende Bedingungen für die Eindeutigkeit der Lösung hergeleitet. Weiterhin wird für die weitverbreitete Klasse der linearquadratischen dynamischen Spiele mithilfe der algebraischen Riccati-Gleichungen ein Verfahren für die Identifikation der Kostenfunktionsmatrizen entwickelt. Mit diesem ist es zusätzlich möglich, explizite Mengen aufzustellen, die alle möglichen Lösungen des inversen Problems beschreiben. Notwendige und hinreichende Bedingungen für die Eindeutigkeit der Lösung werden auch für diese Problemklasse vorgestellt.

Ein weiterer vorgeschlagener Lösungsansatz basiert auf Prinzipien des Inverse Reinforcement Learnings. Der ursprünglich aus der Informatik stammende Ansatz führt eine probabilistische Betrachtung inverser dynamischer Spiele ein, um das Prinzip der maximalen Entropie zu nutzen. Dies führt zu einer Darstellung des Identifikationsproblems als Maximum-Likelihood-Schätzungsproblem. Schließlich werden Ergebnisse zur Erwartungstreue der Schätzung sowie Beispiele für die Anwendung in linearquadratischen dynamischen Spielen präsentiert.

Alle entwickelten Methoden werden in unterschiedlichen Simulationsszenarien getestet und mit einem direkten Ansatz aus dem Stand der Forschung verglichen. Darüber hinaus wird die Robustheit aller Methoden in Bezug auf strukturelle Fehler in der Kostenfunktion durch falsche Basisfunktionen sowie in Bezug auf Messrauschen in den beobachteten Trajektorien untersucht. Abschließend erfolgt eine Anwendung der Methoden auf die Identifikation von menschlichem Verhalten in der kooperativen Regelung eines Lenksystems, womit sich die Effektivität und insbesondere die viel höhere Effizienz der vorgestellten Ansätze bestätigen.

## Dissertation

Die Dissertation wurde 2020 in englischer Sprache beim Karlsruher Institut für Technologie eingereicht und von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik genehmigt. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Sören Hohmann und apl. Prof. Dr.-Ing. Daniel Görjes. Die Arbeit erscheint im KIT Scientific Publishing Verlag als Teil der Reihe „Karlsruher Beiträge zur Regelungs- und Steuerungstechnik“.

## Autoreninformationen



### Juan Jairo Inga Charaja

Karlsruher Institut für Technologie (KIT),  
Institut für Regelungs- und  
Steuerungssysteme (IRS), Kaiserstr. 12,  
76131 Karlsruhe, Germany  
[jairo.inga@kit.edu](mailto:jairo.inga@kit.edu)

Dr.-Ing. Juan Jairo Inga Charaja war wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Regelungs- und Steuerungssysteme (IRS) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT). Seit Mai 2020 leitet er die Forschungsgruppe „Kooperative Systeme“ des IRS. Seine Forschungsarbeit umfasst die optimale Regelung, die dynamische Spieltheorie sowie Reinforcement-Learning-Ansätze für die Anwendung auf die Modellierung, Identifikation und Regelung kooperativer Systeme.