

Diss. ETH No. 24098

NONPARAMETRIC DISTURBANCE CORRECTION
AND NONLINEAR DUAL CONTROL

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES OF ETH ZURICH
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

EDGAR DIETRICH KLENSKE

Dipl.-Ing., University of Stuttgart
born 1986-08-13
citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Melanie N. Zeilinger, examiner
Dr. Philipp Hennig, co-examiner
Prof. Dr. Carl E. Rasmussen, co-examiner

2017

Abstract

Automatic control is an important aspect of modern technology, and many devices we use on a daily basis are using automatic control for actuation and decision-making. However, many advanced automatic control methods need a model of the system to control—a mathematical representation of the system’s behavior. These models are not always easy to come by because of the underlying complexity of the system or the required measurement precision. Therefore, often a big portion of time is used for identification and tuning of these models.

Machine learning methods with the available regression and inference frameworks offer a new potential in the combination with model-based control methods to speed up, or even entirely automate, the process of model-creation, identification and tuning. This potential similarly extends to disturbance prediction: Methods from time-series forecasting can be used to infer a model of the environmental disturbances, which then can be used in predictive control methods.

The first concept covered in this thesis is the identification of quasiperiodic models for disturbance forecasting. Quasiperiodic disturbances are encountered in many applications that are affected by the ubiquitous day-night-cycle, revolving mechanical parts or recurring motions from biological objects. Being able to forecast disturbances, such as the outside air temperature, recurring gear errors or the beating motion of a heart, can help to increase control performance of the affected systems, especially in combination with model predictive control. In this thesis a quasiperiodic Gaussian process regression framework is used to learn and to predict periodic disturbances. A subsequent reference tracking model predictive controller then uses these predictions to control the system to a higher precision. The benefits of using this method are not only shown with simulated experiments, but also on hardware, on a telescope tracking setup in the laboratory. Since the development of this method was driven by a real problem in astronomical imaging, it is described how the method was implemented as a software solution. The advantage of the disturbance prediction method is shown on telescope tracking experiments in the field. The use of automatically identified quasiperiodic Gaussian process models makes it possible to use disturbance forecasting on a variety of systems not necessarily known at modeling time.

The second concept presented in this thesis is nonlinear dual control. While methods for simultaneous identification and control were published already in the 1960s, most approaches are either too complex to be used in practice or too simple to retain all critical features of the original dual control framework: *caution*, *exploration* and *selectiveness*. The dual control framework in this thesis is based on one approximation to the—theoretically ideal, but fundamentally intractable—optimal dual control problem. So far being used for linear systems only, this framework is extended to nonlinear systems. This is done by employing regression methods from machine learning; namely parametric regression, Gaussian process regression and neural network regression. Furthermore, the framework, which was originally only suitable for systems with quadratic cost, is extended to a general cost setting. This makes it possible to apply dual control to problems of economic cost. An exemplary application to a nonlinear building control problem shows the potential that dual control offers for real world applications. Overall, the presented extensions make it possible to use approximation-based dual control in the context of nonlinear regression models and flexible cost structures.

Zusammenfassung

Regelungstechnik ist ein wichtiger Bestandteil der modernen Technik, und viele Geräte, die wir täglich nutzen, arbeiten nur mit Hilfe von Reglern zuverlässig. Viele moderne Regler benötigen dynamische Modelle—mathematische Beschreibungen des Systemverhaltens—um zu funktionieren. Leider ist es aufgrund der Komplexität und der erforderlichen Messgenauigkeit nicht immer einfach, diese Modelle zu erstellen. Deshalb ist die Systemidentifikation und das Anpassen der Modelle an die realen Begebenheiten oftmals mit einem hohen Zeiteinsatz verbunden.

Methoden des maschinellen Lernens bieten die Möglichkeit, den Prozess der Modellierung und Anpassung zu beschleunigen oder gänzlich zu automatisieren. Dieses Potential gilt auch für Methoden zur Vorhersage von Störungen: Algorithmen zur Zeitreihenvorhersage können genutzt werden, um den zukünftigen Verlauf externer Störungen vorherzusagen. Diese Vorhersagen können anschließend in der modellprädiktiven Regelung genutzt werden, um die Regelgenauigkeit zu verbessern.

Das erste Konzept, welches in dieser Arbeit behandelt wird, ist die Identifikation von quasiperiodischen Modellen für die Vorhersage von Störungen. Quasiperiodische Störungen findet man in vielen Anwendungen, insbesondere bei solchen, die vom Tag- und Nacht-Zyklus, rotierenden mechanischen Teilen oder anderen periodischen Bewegungen abhängen. Die Möglichkeit, Störungen wie die Außentemperatur, Getriebefehler oder das Schlagen eines Herzens vorherzusagen, kann die Regelgenauigkeit der betroffenen Systeme erheblich verbessern. In dieser Arbeit wird ein quasiperiodischer Gauß-Prozess eingesetzt, um periodische Störungen zu modellieren und vorherzusagen. Ein Referenzfolgesystem auf Basis modellprädiktiver Regelung nutzt diese Vorhersagen, um die Nachführgenauigkeit des Reglers zu verbessern. Die Vorteile dieser Methode werden nicht nur mit simulierten Experimenten, sondern auch auf einem mechanischen Versuchsträger, einem Teleskop-Aufbau im Labor, gezeigt. Für die Verbesserung der Regelung von Teleskopen in der Astrophotographie wurde der Algorithmus in einer Softwarelösung implementiert und der Nutzen der Störungsvorhersage mit Experimenten im Feldversuch demonstriert. Mit dieser Softwarelösung ist es nun möglich, die Störungsvorhersage auf einer Vielzahl von Systemen zu nutzen, die zur Zeit der Modellierung nicht notwendigerweise bekannt sein müssen.

Das zweite Konzept in dieser Arbeit ist die nichtlineare duale Regelung. Während Methoden für die zeitgleiche Identifikation und Regelung dynamischer Systeme schon in den 1960er-Jahren publiziert wurden, sind die meisten Ansätze entweder zu komplex um in der Praxis eingesetzt zu werden, oder zu einfach um alle wichtigen Eigenschaften der dualen Regelung zu erhalten: *Vorsicht*, *Exploration* und *Selektivität*. Der Ansatz in dieser Arbeit basiert auf einer Approximation des—theoretisch idealen, aber praktisch nicht lösbaren—optimalen dualen Regelungsproblems. Diese bisher nur für lineare Systeme eingesetzte Methode wird auf nichtlineare Modelle erweitert. Dies wird durch die Nutzung verschiedener nichtlinearer Regressionsmethoden erreicht: parametrische Regression, Gauß-Prozess-Regression und Regression auf Basis neuronaler Netze. Weiter wurde der Ansatz, der bisher nur für Systeme mit quadratischen Kosten nutzbar war, auf allgemeine Kostenstrukturen erweitert. Dies ermöglicht es, duale Regelung auch auf Probleme mit ökonomischen Kosten anzuwenden. Eine beispielhafte Anwendung auf nichtlineare Gebäuderegelung zeigt das Potential, welches duale Regelung für praktische Anwendungen bietet. Insgesamt machen es die vorgestellten Erweiterungen möglich, approximative duale Regelung im Kontext nichtlinearer Regressionsmodelle und flexiblen Kostenstrukturen einzusetzen.