

Claudia Krull

Virtual Stochastic Sensors: Formal Background and Example Applications

Reconstructing the Behavior of Partially Observable
Discrete and Hybrid Stochastic Systems



OTTO VON GUERICKE
UNIVERSITÄT
MAGDEBURG

INF

FAKULTÄT FÜR
INFORMATIK

OTTO-VON-GUERICKE-UNIVERSITY MAGDEBURG

Department of Computer Science

**Virtual Stochastic Sensors:
Formal Background and Example Applications**

**Reconstructing the Behavior of Partially Observable Discrete and
Hybrid Stochastic Systems**

HABILITATIONSSCHRIFT

zur Erlangung der Venia Legendi für

Angewandte Informatik

angenommen durch die Fakultät für Informatik
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

von: Dr.-Ing. Claudia Krull
geb. am: 10.03.1979 in Magdeburg

Gutachterinnen / Gutachter:
Prof. Dr.-Ing. habil. Graham Horton
Prof. Dr.-Ing. habil. Katinka Wolter
Prof. Dr.-Ing. habil. Armin Zimmermann

Magdeburg, 05.05.2021

Berichte aus der Informatik

Claudia Krull

**Virtual Stochastic Sensors:
Formal Background and Example Applications**

Reconstructing the Behavior of Partially Observable Discrete
and Hybrid Stochastic Systems

Shaker Verlag
Düren 2021

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: Magdeburg, Univ., Habil.-Schr., 2021

Copyright Shaker Verlag 2021

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8242-5

ISSN 0945-0807

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Phone: 0049/2421/99011-0 • Telefax: 0049/2421/99011-9

Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Abstract

Many real-world problems can be described by using discrete or hybrid stochastic systems. Modeling and simulation of such systems is possible, if they are directly and completely observable. Traditionally, modeling and simulation of stochastic systems concentrates on forward problems, investigating effects of different system configurations, modifications or specific characteristics on system performance.

Unfortunately, complete observability is often not possible or not feasible, due to economic or safety considerations, or simply because the system has not been observed during the time period of interest. Instead, often one may only see output or effects of the system of interest, making the systems partially observable. Inferring the cause of such observations by reconstructing unobserved system behavior can be considered an inverse problem in modeling and simulation, which to our knowledge have not been investigated thus far.

Some existing methods, mainly from the domain of pattern recognition such as hidden Markov models (HMM) and extensions, can also solve inverse problems of stochastic systems, albeit with severe restrictions in modeling power. They are limited to Markovian processes or only a specific subset of non-Markovian processes, and thus cannot represent most real world systems accurately, limiting applicability and in some cases solution accuracy.

In this thesis we introduce the concept of virtual stochastic sensors (VSS) for the specification and solution of inverse problems for a broad class of non-Markovian partially observable stochastic systems. VSS enable the reconstruction of specific system behavior or quantities of interest based on observable system output or effects.

In the first part of the thesis we present modeling paradigms and analysis methods for inverse problems of specific types of partially observable discrete and hybrid stochastic systems. Hidden non-Markovian models (HnMM) and converse hidden non-Markovian models (CHnMM) are characterized by a discrete state space, multiple concurrent non-Markovian activities and discrete output symbols emitted when an activity is finished. Hybrid hidden non-Markovian models (HHnMM) expand these to include continuous model quantities with mutual influence between continuous and discrete system part.

In the second part of the thesis we show the feasibility of the VSS concept by solving inverse problems in three example application areas. As an industrial application, we reconstruct workflows in a job-shop production environment in a joint research project. In the context of future energy solutions we perform non-intrusive appliance load monitoring (NIALM) using real world benchmark data. As a method of Human Computer Interaction (HCI), we use VSSs for interaction gesture recognition and online signature recognition for verification

purposes, again using publicly available corpora and popular benchmark methods, achieving competitive performance in both cases.

The thesis introduces the concept of inverse problems in the realm of modeling and simulation. By providing a framework for defining and solving such problems, we hope to enable the successful application to questions not solvable so far, and the further advancements of the concepts provided in this thesis and beyond.

Zusammenfassung

Viele realweltliche Probleme lassen sich durch diskrete oder hybride stochastische Systeme beschreiben. Die Modellierung und Simulation solcher Systeme ist möglich, wenn sie direkt und vollständig beobachtbar sind. Traditionell konzentrieren sich Modellierung und Simulation stochastischer Systeme auf direkte Fragestellungen (Vorwärtsprobleme), und untersuchen die Effekte von unterschiedlichen Systemkonfigurationen, Modifikationen oder spezifischen Charakteristika auf die Systemleistung.

Leider ist vollständige Beobachtbarkeit oft nicht möglich oder nicht sinnvoll machbar, etwa aufgrund von ökonomischen oder sicherheitsrelevanten Aspekten, oder da das System während des zu untersuchenden Zeitraums nicht beobachtet wurde. Stattdessen sieht man oft nur Ausgaben oder Auswirkungen des Zielsystems, was das System selbst partiell beobachtbar macht. Aus solchen Beobachtungen das nicht-beobachtete Systemverhalten zu rekonstruieren, kann als inverses Problem im Bereich Modellierung und Simulation betrachtet werden, welche unseres Wissens nach bisher noch nicht untersucht wurden.

Einige existierende Methoden, hauptsächlich aus dem Bereich Mustererkennung, wie Hidden Markov Modelle und deren Erweiterungen, können auch inverse Probleme im Bereich stochastischer Systeme lösen, allerdings nur bei starker Einschränkung der Modellierungsmächtigkeit. Sie sind beschränkt auf Markovsche Prozesse oder nur spezifische nicht-Markovsche Prozesse, und können daher die meisten realweltlichen Systeme nicht exakt nachbilden, was ihre Anwendbarkeit und in manchen Fällen auch die Lösungsgenauigkeit einschränkt.

In dieser Arbeit führen wir das neue Konzept der virtuellen stochastischen Sensoren (VSS) zur Spezifikation und Lösung inverser Probleme für eine große Klasse nicht-Markovscher partiell beobachtbarer stochastischer Systeme ein. VSS ermöglichen die Rekonstruktion des spezifischen Systemverhaltens oder von Zielgrößen basierend auf beobachtbaren Systemausgaben oder Effekten.

Im ersten Teil der Arbeit präsentieren wir Modellierungsparadigmen und Analysemethoden für inverse Probleme für spezifische Ausprägungen von partiell beobachtbaren diskreten und hybriden stochastischen Systemen. Hidden non-Markov Modelle (HnMM) und “gesprächige” Conversive HnMM sind charakterisiert durch einen diskreten Zustandsraum, mehrere gleichzeitige nicht-Markovsche Aktivitäten und diskrete Ausgabesymbole, die emittiert werden wenn eine Aktivität endet. Hybride HnMM erweitern diese Modellklasse um kontinuierliche Größen mit gegenseitigem Einfluss zwischen diskretem und kontinuierlichem Systemteil.

Im zweiten Teil der Arbeit zeigen wir die Einsetzbarkeit von virtuellen stochastischen Sensoren bei der Lösung inverser Probleme in drei exemplar-

ischen Anwendungsbereichen. Als Industrieanwendung rekonstruieren wir Workflows in Werkstattprozessen aus einer Forschungsk Kooperation. Im Kontext von zukünftigen Energielösungen führen wir nicht-invasive Überwachung des Geräteverbrauchs (non-intrusive appliance load monitoring) anhand realer Benchmarkdaten durch. Als Methode in der Mensch-Computer Interaktion nutzen wir VSS zur Gestenerkennung in der Interaktion und zur Verifikation in der online Unterschriftenerkennung, wiederum unter Nutzung öffentlich zugänglicher Corpora und gängiger Vergleichsmethoden, mit in beiden Fällen konkurrenzfähigen Ergebnissen.

Diese Arbeit führt das Konzept inverser Probleme im Bereich von Modellierung und Simulation ein. Durch die Bereitstellung eines Rahmens zur Definition und Lösung solcher Probleme, hoffen wir, die erfolgreiche Anwendung auf bisher nicht beantwortbare Fragestellungen und die weitere Entwicklung der Konzepte in dieser Arbeit und darüber hinaus zu ermöglichen.

Contents

1	Introduction	1
1.1	Introduction - Complex Technical and Natural Systems	1
1.2	Motivation - Partially Observable Complex Systems	2
1.3	Are There Existing Solutions to This?	4
1.4	Research Goals - Virtual Stochastic Sensors for Stochastic Systems	4
1.5	Technical Requirements	6
1.6	Structure of the Thesis	7
2	Background and Related Work	9
2.1	Background: Doubly Stochastic Processes as Models of Partially Observable Systems	10
2.2	Background: Discrete and Hybrid Stochastic Systems - Models and Their State Spaces	13
2.3	Previous Work: State Space-Based Analysis of Discrete Stochastic Models Using Proxels	19
2.4	Related Work: Machine Learning Methods for Analysis of Partially Observable Systems	21
2.5	Scientific Gap	23
2.6	Conclusion and Thesis Outlook	24
I	Models	27
3	Augmented Stochastic Petri Nets	29
3.1	A User Model for Virtual Stochastic Sensors	29
3.2	Discussion of Existing Modeling Paradigms	30
3.3	Formal Specification of Augmented Stochastic Petri Nets and Hybrid ASPN	31
3.4	Reviewing Technical Requirements	34
3.5	Example ASPN and H-ASPN	35
3.6	Discussion and Outlook	42
4	Hidden Non-Markovian Models	43
4.1	Combining Hidden Markov Models and Discrete Stochastic Models - What Is the Idea Behind That?	43
4.2	Formalization of HnMM - Basic and Variants	44
4.3	Proxel-Based HnMM Behavior Reconstruction Algorithm	48
4.4	Academic Models and Experiments	52

4.5	Discussion of HnMM	63
5	Conversive Hidden Non-Markovian Models	65
5.1	Restriction in Modeling Power	65
5.2	Formalization - Making HnMM Conversive	66
5.3	Fast Behavior Reconstruction Algorithms	66
5.4	Academic Models and Experiments	75
5.5	Discussion of CHnMM	85
6	Hybrid Hidden Non-Markovian Models	87
6.1	Making HnMM Hybrid	87
6.2	Formalization - Rewards and Guards	88
6.3	Behavior Reconstruction of Hybrid HnMM	89
6.4	Academic Models and Experiments	97
6.5	Discussion of HHnMM	107
II	Applications	109
7	Applications in Engineering	111
7.1	Introduction and Motivation	111
7.2	Optibox - Virtual Stochastic Sensors for Tracking in Workshop Environments	112
7.3	NIALM - Virtual Stochastic Sensors for Disaggregation of Smart Meter Data	121
7.4	Discussion of Applicability in Engineering	129
8	Applications in Movement Recognition and Analysis	133
8.1	Introduction and Motivation	133
8.2	Existing Approaches for Movement Recognition	135
8.3	Wii-Mote and Multi-Touch Table - Preliminary Studies on Vir- tual Stochastic Sensors for Gesture Recognition	139
8.4	Stroke Map - Virtual Stochastic Sensors for the Recognition of Freeform Trajectories	141
8.5	Discussion of Applicability in Movement Trajectory Recognition	150
9	Conclusion	153
9.1	Summary	153
9.2	Contributions and Goal Evaluation	154
9.3	Recommendations for Users	156
9.4	Benefit and Outlook	157
9.5	Further Research	157
	List of Acronyms	161
	Bibliography	167