Haifeng Song

Development and analysis of a Train-centric Distance Measurement System by means of Colored Petri Nets

SHAKER VERLAG

Technische Universität Braunschweig

Development and analysis of a Train-centric Distance Measurement System by means of Colored Petri Nets

Von der Fakultät Maschinenbau
der Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von:	M.Sc. Haifeng Song
aus:	Henan, China
eingereicht am:	01.03.2018
mündliche Prüfung am:	13.04.2018

Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Eckehard Schnieder
	Prof. Dr. Wei Zheng

2018

Berichte aus der Automatisierungstechnik

Haifeng Song

Development and analysis of a Train-centric Distance Measurement System by means of Colored Petri Nets

Shaker Verlag
Düren 2019

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.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2018

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6742-2
ISSN 0945-4659

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

Acknowledgments

This dissertation is based on my research work in Institute for Traffic Safety and Automation Engineering (iVA) at TU Braunschweig. It would not be possible without the support from many people. I would like to express my great gratitude to all the people who helped and supported me in the last four years.

First, I would like to show my deepest gratitude to my supervisor Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Eckehard Schnieder. It is honorable that I can be his last Ph.D. student. He gave me not only the research direction but also the attitude toward life. This will be helpful for my whole life.

My gratitude also goes to Prof. Dr. Wei Zheng from Beijing Jiaotong University, who has reviewed this work and provided valuable comments. Many thanks to Prof. Dr.-Ing. Rainer Tutsch from Institute of Production Metrology (iprom) for hosting my doctor defense. He gave me useful suggestions for the defense in a preliminary talk.

I must thanks all the colleagues at iVA for their contribution to an enjoyable working environment. Thanks Susanne Arndt for her language modification of my publications; thanks Dr.-Ing. Uwe Becker, Andreas Dodinoiu, Arne Geffert, Dieter Schnäpp, Geltmar von Buxhoeveden, Jan Welte, Rasmus Rüdiger, and all the other colleagues.

Furthermore, I am very grateful to the Chinese Scholarship Council (CSC) to provide the scholarship for my research. Thanks Mr. Tuo Shen from Tongji University for providing valuable experiment data.

Last but not least, I wish to thank my parents Shude Song and Yanzhen Wang, who decided 29 years ago to give birth to me. Even though they have no idea about my work, they encourage and stand by me all the time.

Braunschweig, June 2018 Haifeng Song

Contents

List of Figures

List of Tables

Kurzfassung

Basierend auf technologischen Trends sollte das Zugbeeinflussungssystem den Anteil der Bodenanlagen reduzieren und den Zügen mehr Eigeninitiative geben als in der Vergangenheit, da so die funktionale Sicherheit und die Flexibilität des Zugbeeinflussungssystems erhöht werden können. In dieser Arbeit wird ein verbessertes System vorgeschlagen, das die Vorteile der zugbezogenen Kommunikation mit den aktuellen Fahrbefehlsmechanismen kombiniert. Um die notwendigen Daten des Zugabstandsintervalls zu erhalten, werden die Bordausrüstung und ein neues Zug-zu-Zug-Entfernungsmesssystem (TTDMS) als normale bzw. Backup-Strategien angewendet.

Während verschiedene Ortungstechnolgien zur Zugdatenerfassung genutzt wurden, bleibt die Entwicklung und Validierung neuer Systeme eine Herausforderung. In dieser Arbeit werden formale Ansätze zur Entwicklung und Verifikation von TTDMS vorgestellt. Zur Unterstützung der Systementwicklung werden CPNs zur Formalisierung und Bewertung der Systemstruktur und ihres Verhaltens eingesetzt. Basierend auf dem CPN-Modell wird die Systemstruktur validiert. Zusätzlich wird eine Methode vorgeschlagen, mit der eine Code-Architektur aus dem formalen Modell generiert werden kann. Die Systemleistung wird im Erfassungsbereich und in der Genauigkeit beurteilt. Daher werden sowohl eine mathematische Simulation als auch eine praktische Validierung der Messungen implementiert. Die Ergebnisse zeigen, dass das System in der Lage ist, Entfernungsmessungen in Metro- und Eisenbahnlinien durchzuführen. Zudem sind die formalen Ansätze bei der Entwicklung und Verifikation anderer Systeme wiederverwendbar.

Die Abstandsmessung mit TTDMS basiert auf einem Frequenzspreizungsverfahren. Die Messung wird durchgeführt, indem die Ankunftszeit angewendet wird, um den Abstand zwischen zwei Zügen zu berechnen. Dieses Verfahren erfordert keine Synchronisierung der Zeitquellen der Übertragung. Der Zeitunterschied kann damit berechnet werden, indem die Autokorrelation des Pseudo-Random-Noise-Codes verwendet wird. Im Unterschied zu Systemen im Luft- und Seeverkehr benötigt dieses System keine andere Lokalisierungseinheit als die Kommunikationsarchitektur.

Um zu gewährleisten, dass ein System wie vorgesehen funktioniert, muss es validiert werden. Nur wenn das Systemverhalten validiert wurde, sind Bewertungen anderer relativer Leistungen sinnvoll. Aufgrund ihrer eindeutigen Definition kann das TTDMS mit formalen Methoden viel klarer beschrieben werden als mit ausführbaren Codes.

Abstract

Based on the technology trends, the train control system should weaken the proportion of ground facilities, and give trains more individual initiative than in the past. As a result, the safety and flexibility of the train control system can be further improved. In this thesis, an enhanced movement authority system is proposed, which combines advantages of the train-centric communication with current movement authority mechanisms. To obtain the necessary train distance interval data, the onboard equipment and a new train-to-train distance measurement system (TTDMS) are applied as normal and backup strategies, respectively.

While different location technologies have been used to collect data for trains, the development and validation of new systems remain challenges. In this thesis, formal approaches are presented for developing and verifying TTDMS. To assist the system development, the Colored Petri nets (CPNs) are used to formalize and evaluate the system structure and its behavior. Based on the CPN model, the system structure is validated. Additionally, a procedure is proposed to generate a Code Architecture from the formal model. The system performance is assessed in detection range and accuracy. Therefore both mathematical simulation and practical measurements validation are implemented. The results indicate that the system is feasible to carry out distance measurements both in metropolitan and railway lines, and the formal approaches are reusable to develop and verify other systems.

As the target object, TTDMS is based on a spread-spectrum technology to accomplish distance measurement. The measurement is carried out by applying Time of Arrival (TOA) to calculate the distance between two trains, and requires no synchronized time source of transmission. It can calculate the time difference by using the autocorrelation of Pseudo Random Noise (PRN) code. Different from existing systems in air and maritime transport, this system does not require any other localization unit, except for communication architecture.

To guarantee a system can operate as designed, it needs to be validated before its application. Only when system behaviors have been validated other relative performances' evaluations make sense. Based on the unambiguous definition of formal methods, TTDMS can be described much clearer by using formal methods instead of executable codes.