

Hrsg. Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Kays

Jianshuang Xu

**Spatial Signal Processing in Optical  
Display-Camera Communication**

# **Spatial Signal Processing in Optical Display-Camera Communication**

von der Fakultät

für Elektrotechnik und Informationstechnik

der Technischen Universität Dortmund

genehmigte

**Dissertation**

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften

von

**Jianshuang Xu**

Dortmund, 2022

Tag der mündlichen Prüfung: 27.01.2023

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Kays

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. André Kaup



Dortmunder Beiträge zur Kommunikationstechnik

Band 20

**Jianshuang Xu**

**Spatial Signal Processing in Optical Display-Camera  
Communication**

D 290 (Diss. Technische Universität Dortmund)

**Shaker Verlag  
Düren 2023**

**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.: Dortmund, Technische Univ., Diss., 2023

Copyright Shaker Verlag 2023

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 978-3-8440-8992-9

ISSN 1863-9054

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

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

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • e-mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## **Vorwort**

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Kommunikationstechnik der Technischen Universität Dortmund im Zeitraum von 2017 bis 2023.

Die Idee der unsichtbaren Display-Kamera Kommunikation hat mich von Anfang an fasziniert. Ich möchte mich daher von ganzem Herzen bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Kays dafür bedanken, dass er diese Arbeit ermöglicht, begleitet und begutachtet hat. Die stets motivierende und inspirierende Betreuung hat maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. André Kaup vom Lehrstuhl für Multimediakommunikation und Signalverarbeitung der Friedrich-Alexander-Universität danke ich für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Korreferats.

Des Weiteren bedanke ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen, studentischen Hilfskräften und Abschlussarbeitern des Lehrstuhls für Kommunikationstechnik für ihr Engagement, viele spannende Diskussionen und ein hervorragendes Arbeitsklima. Einen besonderen Dank möchte ich meinen Schreibtischnachbarn und Projektmitstreitern für die großartige Zusammenarbeit und Freundschaft aussprechen.

Mein ganz besonderer Dank gilt meiner Frau Yukun Wang, die mich durch alle Höhen und Tiefen begleitet und mich mit ihrer unendlichen Geduld und Liebe unterstützt hat. Zudem möchte ich meinen Eltern danken, dass sie mir das Studium ermöglicht haben und mich jederzeit in allen Belangen unterstützt haben.

Dortmund, Februar 2023

Jianshuang Xu



# Contents

<b>Kurzfassung</b>	<b>ix</b>
<b>Abstract</b>	<b>xi</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation . . . . .	1
1.2 Outline and Contributions . . . . .	4
<b>2 Display-Camera Communication</b>	<b>7</b>
2.1 Conventional Matrix Codes . . . . .	7
2.2 DCC Concepts with Perceptible Modulation . . . . .	9
2.3 DCC Concepts with Imperceptible Modulation . . . . .	11
2.4 DaViD: Data Transmission Using Video Devices . . . . .	14
2.4.1 Modulation Concept . . . . .	14
2.4.2 System Overview . . . . .	16
2.5 Data Throughput . . . . .	24
2.6 Summary . . . . .	26
<b>3 Optical Channel and Spatial Distortions</b>	<b>27</b>
3.1 Overview . . . . .	27
3.2 Optical Channel Model . . . . .	28
3.2.1 Display Nonlinearity . . . . .	29
3.2.2 Camera Signal and Noise . . . . .	29
3.2.3 SNR and Error Probability Performance . . . . .	30
3.3 Spatial Characteristics . . . . .	33
3.3.1 Pixel Structure and Aperture . . . . .	34
3.3.2 Optical Projection . . . . .	37



3.3.3	Camera Motion . . . . .	38
3.3.4	Lens Distortion . . . . .	41
3.3.5	Lens Blur . . . . .	43
3.4	Spatial Modeling of Geometric Distortions . . . . .	45
3.4.1	Frame Position . . . . .	45
3.4.2	Symbol Position . . . . .	49
3.5	Summary . . . . .	52
<b>4</b>	<b>Frame Position Recovery</b>	<b>55</b>
4.1	Error Probability Performance with Frame Position Error . . . . .	55
4.1.1	Static Spatial Offset . . . . .	56
4.1.2	Dynamic Frame Position Error . . . . .	59
4.2	Possible Solutions . . . . .	62
4.2.1	Stabilization-based Recovery . . . . .	62
4.2.2	Localization-based Recovery . . . . .	66
4.3	Display Localization Marker . . . . .	68
4.4	Display Area Detection with DLM . . . . .	72
4.4.1	“L”-edge Detection . . . . .	72
4.4.2	Validation Procedure . . . . .	80
4.5	Image Warping . . . . .	88
4.6	Summary . . . . .	89
<b>5</b>	<b>Symbol Position Recovery</b>	<b>91</b>
5.1	Error Probability Performance with Sampling Jitter . . . . .	92
5.2	Data-aided Symbol Position Recovery Techniques . . . . .	98
5.3	A Non-data-aided Approach to Symbol Position Recovery . . . . .	103
5.3.1	Initial Perspective Correction . . . . .	104
5.3.2	Symbol Position Estimation . . . . .	104
5.3.3	Symbol Curve Extraction . . . . .	111
5.3.4	Sampling Grid Assembly . . . . .	116
5.4	Summary . . . . .	117

---

<b>6</b>	<b>Evaluation</b>	<b>119</b>
6.1	Evaluation: Frame Position Recovery . . . . .	119
6.1.1	Benchmark Methods . . . . .	119
6.1.2	Simulation . . . . .	120
6.1.3	Experiments . . . . .	126
6.2	Evaluation: Symbol Position Recovery . . . . .	132
6.2.1	Data Frame and Test Images . . . . .	132
6.2.2	Benchmark Methods . . . . .	133
6.2.3	Simulation . . . . .	134
6.2.4	Experiments . . . . .	139
6.3	System-level Performance . . . . .	148
6.4	Summary . . . . .	150
<b>7</b>	<b>Conclusion</b>	<b>151</b>
7.1	Summary . . . . .	151
7.2	Outlook . . . . .	154
<b>A</b>	<b>Lens Distortion Measurements</b>	<b>157</b>
<b>B</b>	<b>Algorithm for “L”-edge Drawing</b>	<b>163</b>
<b>C</b>	<b>Further Evaluation Results</b>	<b>167</b>
	<b>List of Abbreviations</b>	<b>181</b>
	<b>List of Symbols</b>	<b>185</b>
	<b>List of Figures</b>	<b>193</b>
	<b>List of Tables</b>	<b>199</b>
	<b>Glossary</b>	<b>201</b>
	<b>Bibliography</b>	<b>207</b>
	<b>Author’s Publications</b>	<b>223</b>

**Author's Supervised Theses**

**225**