

Hrsg. Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Kays

Johannes Klein

**Timing Recovery for Asynchronous
Optical Display-Camera Communication**

Timing Recovery for Asynchronous 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

Johannes Klein

Dortmund, 2021

Tag der mündlichen Prüfung: 20. Mai 2022

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Kays

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Holger Blume

Dortmunder Beiträge zur Kommunikationstechnik

Band 19

Johannes Klein

**Timing Recovery for Asynchronous Optical
Display-Camera Communication**

D 290 (Diss. Technische Universität Dortmund)

Shaker Verlag
Düren 2022

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., 2022

Copyright Shaker Verlag 2022

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 978-3-8440-8684-3

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 • e-mail: 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 2016 bis 2021.

Die Idee der optischen Display-Kamera Kommunikation hat mich von Anfang an begeistert. Ich möchte mich daher an dieser Stelle ganz herzlich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Kays dafür bedanken, dass er diese Arbeit ermöglicht und begleitet hat. Die Betreuung war stets motivierend und hilfreich und hat einen wesentlichen Teil zum Gelingen beigetragen.

Des Weiteren danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Holger Blume vom Institut für Mikroelektronische Systeme der Leibniz Universität Hannover für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Korreferats.

Ich danke außerdem meinen ehemaligen und aktuellen Kolleginnen und Kollegen für ihr Engagement, viele spannende Diskussionen und ein hervorragendes Arbeitsklima. Ein besonderer Dank gilt meinen Bürokollegen und Projektmitstreitern für die großartige Zusammenarbeit und die vielen unvergesslichen gemeinsamen Momente. Ferner danke ich allen Studierenden, deren Abschlussarbeit ich betreut habe, sowie allen wissenschaftlichen Hilfskräften, die mich mit ihrer Arbeit unterstützt haben.

Zu guter Letzt danke ich meiner Mutter, meinem Vater, meinen Brüdern und meinen Großeltern sowie allen weiteren Familienmitgliedern und Freunden für die immerwährende Unterstützung und Motivation.

Dortmund, Juni 2022

Johannes Klein

Contents

Vorwort	i
Kurzfassung	ix
Abstract	xi
1 Introduction	1
1.1 Motivation	1
1.2 Outline and Contributions	4
2 Concepts of Visible Light Communication	7
2.1 Overview	7
2.2 LED/Laser-Photodiode Communication	8
2.3 Optical Camera Communication	9
2.3.1 LED-Camera Communication	9
2.4 Display-Camera Communication (DCC)	10
2.4.1 DCC - State of the Art	11
2.4.1.1 Lack of Synchronization	12
2.4.2 DaViD - Data Transmission using Video Devices	13
2.4.3 Displays	16
2.4.3.1 LCD and OLED Characteristics	16
2.4.3.2 Reuse as Transmitter	18
2.4.4 Cameras	19
2.4.4.1 Cameras in Mobile Devices	20
2.4.4.2 Signal Modeling	21
2.4.4.3 Reuse as Receiver	22
2.5 Conclusion	22

3	System Design	23
3.1	Modulation Concept	23
3.1.1	Data Frames	23
3.1.2	Temporal Differential Modulation	24
3.1.3	Modulation Channel Options	26
3.2	System Overview	28
3.3	Transmitter	29
3.3.1	Data Preprocessing	30
3.3.1.1	Channel Encoding + Packetizing	30
3.3.1.2	Interleaving + Data Whitening	32
3.3.2	Data Frame Generation	33
3.4	Channel	34
3.5	Receiver	36
3.5.1	Data Frame Extraction	37
3.5.1.1	Spatial Processing	38
3.5.1.2	Temporal Processing	40
3.5.2	Data Recovery	40
3.6	Conclusion	41
4	Temporal Sampling	43
4.1	Sampling in Digital Communication	43
4.2	Modeling on Pixel Level	44
4.2.1	Display Model	44
4.2.2	Camera Model	46
4.2.3	Sampling Model	46
4.2.3.1	Synchronous Sampling	47
4.2.3.2	Asynchronous Sampling	48
4.3	Spatio-Temporal Modeling	49
4.3.1	Image Refresh of LCDs and OLEDs	50
4.3.2	Display Model	51
4.3.3	Camera Model	52
4.3.4	Sampling Model	53
4.3.4.1	Camera to Display Orientation	53

4.3.4.2	Synchronous Sampling	56
4.3.4.3	Asynchronous Sampling	58
4.4	Conclusion: Synchronization vs. Timing Recovery	59
5	Timing Recovery	63
5.1	Basic Concept	64
5.1.1	Spatial Subdivision	65
5.2	Temporal Processing	66
5.2.1	Continuous Difference Evaluation	67
5.2.1.1	Determination of the Recovery Scheme	69
5.2.1.2	Viterbi based Path Search	71
5.3	Evaluation Criterion	72
5.3.1	Signal Strength based Approach	72
5.3.1.1	Dynamic Image Content	76
5.3.1.2	Options for Extension	79
5.3.2	Extension by a non-modulated Image Channel	80
5.3.2.1	Prerequisites with DaViD	81
5.3.2.2	Inter-Channel Correlation in Video Frame Differences	82
5.3.2.3	Realization in DaViD	86
5.3.2.4	Y-Channel Recovery	88
5.4	Conclusion	90
6	Evaluation	93
6.1	Experimental Setup	93
6.1.1	Bit Error Rate Measurements	96
6.1.2	Sequences and Subjective Image Quality	97
6.2	Temporal Oversampling and Exposure Time	98
6.2.1	Global Shutter Camera / OLED	99
6.2.2	Global Shutter Camera / LCD	102
6.2.3	Rolling Shutter Camera	103
6.3	Number of Sections	105

6.4	Unstable Camera Clock	106
6.4.1	Frame Rate Measurements	108
6.5	Evaluation Criterion	110
6.6	Spatial Subsampling	115
6.7	Camera to Display Orientation	117
6.7.1	Transmission Distance	117
6.7.2	Projection Angle	119
6.8	Conclusion	121
7	Conclusion	123
7.1	Summary	123
7.2	Discussion and Outlook	125
A	Additional Tables for the Experiments	127
B	Additional Experiments	131
B.1	Clock Jitter: Smartphone measurements	131
B.2	Clock Jitter: BER measurements with motion images	137
B.3	Evaluation Criterion: BER Measurements	138
	List of Abbreviations	143
	List of Symbols	147
	List of Figures	153
	List of Tables	157
	Glossary	159
	Bibliography	165
	Publications by the Author	175
	Student Works Supervised by the Author	177

Curriculum Vitae

179

Kurzfassung

Im Bereich der Visible Light Communication (VLC), der drahtlosen Übertragung von Daten mit sichtbarem Licht, ist die Display-Camera Communication (DCC) eine Unterkategorie, bei der Displays als Sender und Kameras als Empfänger verwendet werden. Die Daten werden durch zweidimensionale Codes repräsentiert, die vom Sendebildschirm dargestellt werden und durch das Empfängersystem aufgenommen und decodiert werden. Die Darstellung geschieht entweder in Form einer direkten Anzeige (Visible Codes) oder durch eine Modulation des Videosignals, die für das menschliche Auge nicht oder kaum wahrnehmbar ist (Invisible Codes) [1].

Am Lehrstuhl für Kommunikationstechnik wurde im Rahmen des Data Transmission using Video Devices (DaViD) Projekts ein System zur unsichtbaren DCC entwickelt. Die Datenmuster werden dem Videosignal differentiell in Form einer geringfügigen Modulation der Chrominanzinformation überlagert. Je nach verwendeter Hardware wurden Datenraten zwischen 10 Mbit/s und 100 Mbit/s erreicht.

Neben einer hohen räumlichen Auflösung der Datenmuster ist die effiziente Nutzung der zeitlichen Kapazität des DCC-Kanals entscheidend für die Erzielung hoher Datenraten. Die Herausforderung hierbei ist die Asynchronität von Bildwiedergabe und Videoaufnahme. Aufgrund des zufälligen Aufnahmezeitpunkts und unterschiedlicher Aufnahme-/Wiedergabecharakteristiken entstehen bei unsynchronisierten Aufnahmen in vielen Fällen Mischbilder, die Teile von zwei oder sogar drei aufeinanderfolgenden Display-Frames enthalten. Die sukzessive Decodierung der gesendeten Datenmuster setzt jedoch voraus, dass im Empfänger vollständige Aufnahmen jedes Display-Frames vorliegen.

Zur Ermittlung geeigneter Aufnahmeparameter wird die zeitliche Abtastung

in der DCC modelliert. Hierbei werden sowohl die unterschiedlichen Kamera-Shuttervarianten (Rolling Shutter (RS) und Global Shutter (GS)), als auch der typische zeilenweise Bildaufbau moderner Flachbildschirme berücksichtigt. Mithilfe des Modells wird ermittelt, in welcher Beziehung Bildschirm- und Kameraparameter zueinander stehen müssen, damit eine vollständige Rekonstruktion der Display-Frames aus asynchronen Kameraaufnahmen möglich ist. Aus dieser Beziehung lässt sich die minimale Aufnahmezeit der Kamera bzw. die maximal verfügbare Belichtungszeit ableiten. Diese Parameterbeziehungen sind unabhängig vom gerätespezifischen Scanverhalten und somit allgemein gültig.

Es wird ein Timing Recovery (TR) Verfahren für die unsichtbare DCC vorgestellt, mit dem das Timing der Bildwiedergabe durch Auswertung der nicht synchronisierten Kameraaufnahmen zurückgewonnen werden kann. Auf diese Weise können die Display-Frames im Empfänger vollständig rekonstruiert werden, wodurch die Decodierung der Datenmuster ohne die Notwendigkeit einer Synchronisation möglich ist. Die Information über die korrekte Zusammensetzung wird dabei aus der differentiellen Datenmodulation sowie dem Bildinhalt selbst gewonnen, sodass keine sichtbaren Synchronisationsmarker eingebettet werden müssen. Hierzu wird ein Bewertungskriterium vorgeschlagen, das eine zuverlässige Zuordnung bei beliebigen Bildinhalten, inklusive starker Bildbewegungen, ermöglicht. In einer umfangreichen Auswertung werden die theoretischen Parameterbeziehungen experimentell untersucht und bewertet und die robuste Funktionalität der TR unter verschiedenen Übertragungsbedingungen demonstriert.

Abstract

In the field of Visible Light Communication (VLC), which refers to the wireless transmission of data with visible light, Display-Camera Communication (DCC) is a subcategory in which displays are used as transmitters and cameras as receivers. Data are represented in two-dimensional codes that are displayed by the transmitter screen to be recorded and decoded by the receiver system. Code representation is done either by directly displaying the code (Visible Codes) or by modulating the video signal in a way that is (almost) imperceptible to the human eye (Invisible Codes) [1].

A system for invisible DCC has been developed at the Communication Technology Institute within the "Data Transmission using Video Devices (DaViD)" project. Here, the data patterns are differentially superimposed on the video signal as a slight modulation of the video chrominance. Depending on the hardware used, data rates between 10 MBit/s and 100 MBit/s have been achieved.

In addition to a high spatial resolution of the data patterns, the efficient use of the temporal capacity of the DCC channel is crucial for achieving high data rates. The key challenge here is the asynchronous nature of the image playback and video recording. Due to the random acquisition start as well as the different recording/playback characteristics, unsynchronized recordings often result in mixed images that contain parts of two or even three consecutive display frames. However, successive decoding of the transmitted data patterns requires recordings of full display frames.

To determine appropriate acquisition parameters, the temporal sampling in the DCC is modeled. The modeling takes into account the different camera shutter variants (Rolling Shutter (RS) and Global Shutter (GS)) as well as the typical line-by-line image refresh of modern displays. It is used to determine the

relationship between display and camera parameters which is required for a full recovery of the display frames from asynchronous camera frames. From this relationship, the minimum required capture rate and the maximum available exposure time can be derived. These parameter relationships are independent of the device-specific scanning behavior and therefore generally valid.

A Timing Recovery (TR) method for invisible DCC is proposed that allows the timing of the video playback to be recovered by evaluating unsynchronized camera recordings. This enables the display frames to be fully reconstructed in the receiver, thus allowing the decoding of the data patterns without the need for synchronization. The information about the correct composition is obtained from the differential data modulation and the image content, so no visible synchronization markers have to be embedded. For this purpose, an evaluation criterion is proposed that allows reliable assignment in the presence of arbitrary image content, including strong motions. In a comprehensive evaluation, the theoretical parameter relationships are experimentally investigated and evaluated, and the robust functionality of the TR under various transmission conditions is demonstrated.