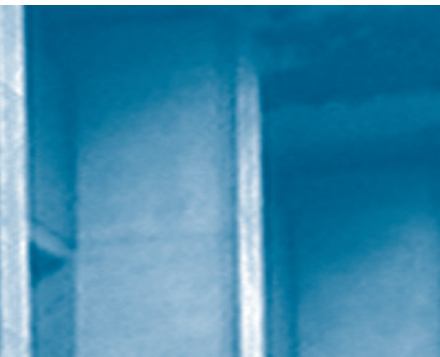




Volume 24

Jens Schneider

Sparse Signal Modeling in Video Coding

Aachen Series on Multimedia and
Communications Engineering



RWTHAACHEN
UNIVERSITY

Sparse Signal Modeling in Video Coding

**Von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der
Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation**

vorgelegt von
Jens Schneider, M. Sc.
aus Aachen

Berichter:
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jens-Rainer Ohm
Univ.-Prof. Dr.-Ing. André Kaup

Tag der mündlichen Prüfung: 26.11.2021

Aachen Series on Multimedia and Communications Engineering

Volume 24

Jens Schneider

Sparse Signal Modeling in Video Coding

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.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2021)

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 978-3-8440-8401-6

ISSN 1614-7782

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

Mir geht es nur
gut im Institut.

Das Känguru

Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Nachrichtentechnik der RWTH Aachen. In guter Tradition möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Jens-Rainer Ohm für die Betreuung und die mir gelassene Freiheit bedanken. Durch die am IENT gelebte Arbeitsweise wurde ich vor die eine oder andere Herausforderung gestellt, die sowohl meine fachliche als auch persönliche Entwicklung geprägt hat. Für die Entwicklung, die ich so nehmen konnte, bin ich sehr dankbar. Ebenso gilt mein Dank Prof. Dr.-Ing. André Kaup für das Interesse an meiner Arbeit und die Erstellung des Zweitgutachtens.

In meiner Zeit am Institut waren die beiden Oberingenieure Priv. Doz. Dr.-Ing. habil. Mathias Wien und Dr.-Ing. Christian Rohlfing zu verschiedenen Zeiten an der Institutsleitung beteiligt. Auch euch danke ich für euren Einsatz, die von euch ausgetüftelten organisatorischen Details und die fachlichen Ratschläge. Dir, Christian, gilt ein besonderer Dank für MatlabSumit, IENT.TikZ und viele weitere gemeinsame größere und kleinere Projekte. Dir, Mathias, danke ich dafür, dass du mir mit meiner Masterarbeit die Chance gegeben hast, als Student der Energietechnik in die Videocodierung einzusteigen.

Auf Etage 3 möchte ich mich bedanken bei: Julian - für den Einstieg ins Tennis, Christian - für die Arbeit am YUView, Iris - für deine Entschlüsselungsfähigkeiten, Max - für den fachlichen Austausch und die beste Florida Reise aller Zeiten, Johannes - für deine Arbeit an Anysim, Maria - für jede politische Diskussion, Thibaut - für den Einstieg in GNU Emacs, Domi - für die Unterstützung auf dem Weg zu SCIP und Clemens - für all den Spaß in der Kaffeebude. Die Atmosphäre im Institut war und ist mit Sicherheit einzigartig und wird mir für folgende Aufgaben als Maßstab gelten. Ich freue mich auf weitere Sommerfeste und letzte schöne Tage mit euch. Außerdem gilt mein Dank allen weiteren MitarbeiterInnen des Instituts. Auch Eure/Ihre Arbeit hat mir eine sehr freie Forschungsatmosphäre ermöglicht.

Als letztes danke ich meiner Familie: Meinen Eltern für den Einsatz, den ihr gezeigt habt, damit ich studieren und schließlich diese Arbeit schreiben konnte. Meiner Frau Judit für deine Unterstützung über die gesamte Zeit und besonders in Situation, in denen ich selbst die größten Zweifel an meiner Arbeit hatte.

Aachen, im Dezember 2021

Contents

1	Introduction	1
1.1	Contributions and structure of this thesis	2
2	Fundamentals	5
2.1	Mathematics	5
2.1.1	Kronecker Product and Vectorization	5
2.1.2	Vector and Matrix Norms	6
2.1.3	Moore-Penrose Pseudo Inverse and Least Squares Solution	7
2.2	Video Coding Fundamentals	7
2.2.1	The Hybrid Video Coding Scheme	8
2.2.2	Intra Prediction	12
2.2.3	Loop Filtering	14
2.2.4	Performance Evaluation	16
2.3	Sparse Coding and Dictionary Learning	18
2.3.1	Mathematical Formulation	18
2.3.2	Algorithms	20
2.4	Sparse Coding-based Image Processing	24
2.4.1	Basic Dictionaries – Choosing and Learning	25
2.4.2	Sparsity in overcomplete dictionaries	29
3	Sparse Coding-based Approaches to Inverse Problems	31
3.1	Denoising	32
3.1.1	Sparse Coding-based Denoising	33
3.1.2	Analysis	35
3.1.3	Summary	38
3.2	Super-Resolution	38
3.2.1	Downsampling and Upsampling	38
3.2.2	Performance Evaluation	40
3.2.3	Dictionary Learning-based Super-Resolution	44
3.2.4	DLSR – The convolutional point of view	48
3.2.5	Summary	52
3.3	Complexity considerations	52
3.3.1	Sparse Coding Complexity	53
3.3.2	Complexity Reduction by Sub-dictionaries	56
3.3.3	Summary	59
4	Sparse Coding-based In-loop Filtering	61
4.1	Sparse Coding-based Loop Filtering in HEVC	63
4.2	Sparse Coding-based Loop Filtering in VVC	64
4.3	Summary	69

5	Video Coding with varying Resolution	71
5.1	Scalable Video Coding	71
5.1.1	DLSR on coded base layer pictures	73
5.1.2	Sparse coding-based inter-layer prediction in SHVC	75
5.2	Reference Picture Resampling (RPR)	76
5.2.1	Test conditions and performance evaluation	77
5.2.2	Dictionary learning-based RPR in VVC	79
5.2.3	Experimental Setup and Results	80
5.3	Sparse Coding-based Adaptive Resolution Change	82
5.3.1	Adaptive Resolution Change using uncoded Subpictures	82
5.3.2	Simulation Setup and Results	85
5.3.3	Summary	87
5.4	Summary and Conclusion	87
6	Sparse Coding-based Intra Prediction	89
6.1	SCIP – The core Idea	89
6.1.1	Dictionary and Regressor Learning	91
6.2	Experimental Setup and Results	93
6.2.1	Initial Assessment	93
6.2.2	VVC Integration and Rate-Distortion Performance	96
6.3	Summary	97
7	Summary and Outlook	101
7.1	Summary	101
7.2	Outlook	102
A	Data Sets	107
A.1	Training Set $\mathcal{S}_{91}$ and Test Set $\mathcal{S}_{14}$	107
A.2	JVET test sequences	107
A.3	SHVC test sequences	108
A.4	Training Set used for SCIP	108
B	Auxiliary Results	113
B.1	Denoising by classical Wiener filter	113
B.2	Correlation between signal and noise	113
B.3	Orthogonality of error terms	114
B.4	Preliminary experiment regarding SCLF	115
	Bibliography	117