



Volume 17

Cordula Heithausen

Coding of Higher Order Motion Parameters
for Video Compression

Aachen Series on Multimedia and
Communications Engineering



RWTHAACHEN
UNIVERSITY

Coding of Higher Order Motion Parameters for Video Compression

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

vorgelegt von
Diplom-Ingenieurin
Cordula Heithausen
aus Tönisvorst

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

Tag der mündlichen Prüfung: 24.11.2017

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten
der Hochschulbibliothek online verfügbar.

Aachen Series on Multimedia and Communications Engineering

Volume 17

Cordula Heithausen

**Coding of Higher Order Motion Parameters
for Video Compression**

Shaker Verlag
Aachen 2018

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, 2017)

Copyright Shaker Verlag 2018

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 978-3-8440-5784-3

ISSN 1614-7782

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen

Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9

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

“For a moment, nothing happened.
Then, after a second or so, nothing continued to happen.”

Douglas Adams, *The Hitchhiker’s Guide to the Galaxy*

Vorwort

Diese Doktorarbeit ist das Ergebnis meiner Zeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Nachrichtentechnik der RWTH Aachen. Während der fünf Jahre, die ich dort mit Forschung, Lehre, Studentenbetreuung und nicht zuletzt Grübeln und Zweifeln verbrachte, habe ich nicht nur im Gebiet der Videokodierung, des wissenschaftlichen Arbeitens und der Selbstorganisation, sondern auch über mich selbst gelernt. Dabei wurde ich von vielen Menschen auf unterschiedliche Weise unterstützt. Für diese Unterstützung möchte ich mich im Folgenden bedanken.

Meinem Doktorvater Jens Ohm danke ich für seine kompetente Betreuung, viele gute Ratschläge und den stets freundlichen, zuversichtlichen und verständnisvollen Umgang. Ebenso möchte ich mich bei Prof. André Kaup für sein Interesse an meiner Arbeit und sein Engagement als Zweitgutachter bedanken.

Ein herzliches Dankeschön gebührt Mathias Wien, der ein wichtiger Ansprechpartner während kleiner und größerer Krisen war und mir außerdem als musikalischster Mitarbeiter und Leader der gelegentlichen Institutsband kreative Abwechslung ermöglichte.

Besonders dankbar bin ich für die angenehme Atmosphäre am Institut und somit jedem meiner ehemaligen Mitarbeiter, die diese mitgetragen haben. Ich habe sowohl kollegiale Hilfsbereitschaft als auch fröhliches Beisammensein genießen dürfen. Stellvertretend möchte ich mich dafür einerseits bei Max Bläser, den ich stets mit fachlichen Fragen und Programmierproblemen nerven durfte, und andererseits bei Clemens Jansen bedanken. Ohne Clemens wäre meine Zeit als Doktorandin nicht annähernd so herzlich und lustig gewesen. Das bringt mich zu einer wichtigen Konstante im Institutsalltag, die ich von nun an sicherlich vermissen werden: die täglichen Kaffeepausen mit lieben Kollegen, amüsanten Gesprächen und skurrilen Diskussionen. Danke an alle Kaffe-, Teetrinker und Kekesser, die dabei waren!

Dank gilt auch meinen Studenten, deren Anschlussarbeiten meine Forschung unterstützten, allen voran Hendrik Vorwerk. Fabian Jäger danke ich dafür, dass er mir damals als Diplomarbeitsbetreuer einen motivierenden Einstieg am Institut ermöglichte und Jahre später als ehemaliger Kollege und Freund ein offenes Ohr schenkte. Meinem besten Freund Christian, der als ehemaliger Kommilitone und Kollege mein langjährigster Wegbegleiter an der RWTH ist, danke ich für gegenseitige moralische Unterstützung, Ehrlichkeit und Spaß.

Auch außerhalb des Instituts haben liebe Menschen zu meinem „Dr.-Ing.“ beigetragen. So bin ich meinen Eltern sehr dankbar, weil sie mir meinen Lebensweg und meine Ausbildung ermöglicht und mich unterstützt haben, wo sie konnten. Für jahrelanges Zuhören und wichtige Denkanstöße möchte ich außerdem Raimund Kohl danken.

Danke meinen beiden Katzen Emil und Elfine, die mich auch in stressigen Momenten immer wieder - meist unfreiwillig - zum Lachen brachten.

Mein abschließender und wichtigster Dank gilt natürlich Jan, der während der letzten Jahre immer für mich da war, mir zugehört, sich mit mir beraten und gefreut und mir in schwierigen Zeiten Trost und Kraft gegeben hat.

Aachen, im Januar 2018

Contents

1	Introduction	1
2	Fundamentals	5
2.1	Mathematical Fundamentals	5
2.1.1	Collinearity of Points and Vectors	5
2.1.2	Change of Basis Transformation	5
2.1.3	Inverse and Pseudo-Inverse of a Matrix	8
2.1.4	Singular Value Decomposition	8
2.1.5	QR Decomposition	9
2.1.6	Gradient	10
2.1.7	Sobel Operator	10
2.1.8	Norms and Error Measures	10
2.1.9	Statistical Measures of Central Tendency	11
2.1.10	Regression Analysis: Methods of Solving Over-determined Systems	12
2.1.11	Quantization	14
2.1.12	Uniform Quantization	14
2.2	Fundamentals of Video Coding	16
2.2.1	Lossless and Lossy Coding	16
2.2.2	Video Format	17
2.2.3	Hybrid Video Coding	17
2.2.4	Predictive Coding	18
2.2.5	Intra Prediction in Video Coding	19
2.2.6	Inter Prediction in Video Coding	19
2.2.7	Estimation of Translational Motion Vectors in Video Coding	19
2.2.8	Motion Compensation in Video Coding	21
2.2.9	Video Distortion and Distance Metrics	22
2.2.10	Rate Distortion Optimization	23
2.2.11	Bjøntegaard Metric	24
2.3	Inter Prediction in HEVC	25
2.3.1	Temporal and Spatial Structuring in HEVC	25
2.3.2	Motion Vectors and Motion Vector Fields in HEVC	27
2.3.3	Motion Vector Estimation	29
2.3.4	Motion Compensation in HEVC	30
2.3.5	RDO-based Motion Prediction Decisions	31
2.3.6	Motion Vector Signalling and Coding in HEVC	32
2.3.7	Motion Vector Prediction in HEVC	33
2.3.8	Motion Vector Prediction Modes	35
2.3.9	Reference Software for HEVC and beyond	37

3	State of the Art in Higher Order Motion Compensation	39
3.1	Beforehand, a little retrospection...	39
3.2	Gradient-based Affine Motion Estimation	41
3.2.1	Affine Parameter Estimation Algorithm	41
3.2.2	Integration into HEVC	42
3.2.3	Performance	43
3.3	Higher Order Motion from Control Points at Block Corners	43
3.3.1	Simplified Affine Motion from Two Block Corners	44
3.3.2	Affine Motion with up to Six Parameters from up to Three Block Corners	46
4	Higher Order Motion Models, their Parameter Estimation and Suitability	49
4.1	Motion in Video Sequences	49
4.1.1	Camera Models	50
4.1.2	Motion Representation in Image Plane	51
4.2	Parametric Motion Models	51
4.2.1	Translational Motion Model	52
4.2.2	Perspective Motion Model	53
4.2.3	Affine Motion Model	53
4.2.4	Zoom & Rotation Motion Model	55
4.2.5	Bilinear Motion Model	56
4.2.6	Quadratic Motion Model	56
4.3	Examination on Suitability of Higher Order Motion Models for HOMC	57
4.3.1	Motivation for Video Motion Representation beyond Translation	57
4.3.2	Considered Higher Order Motion Models	58
4.3.3	Parameter Estimation for Considered Motion Models	60
4.3.4	Motion Model Evaluation	65
4.3.5	Motion Transformation Representation with Homogenous Coordinates	68
4.4	Conversion between Motion Models	69
4.4.1	Translational Motion Model to/from Zoom&Rotation Motion Model	70
4.4.2	Translational Motion Model to/from Affine Motion Model	71
4.4.3	Zoom&Rotation Motion Model to/from Affine Motion Model	73
5	Higher Order Motion Compensation (HOMC) in HEVC	75
5.1	Integration and Adjustments	76
5.1.1	Estimation	76
5.1.2	Compensation	78
5.1.3	Interpolation	78
5.1.4	Quantization	81
5.1.5	Signaling and Coding	83
5.2	Experimental Results and Evaluation of HOMC in HEVC	84
5.2.1	Experimental Setup	84
5.2.2	Bit-Rate Reduction of HOMC-extended HEVC over Conventional HEVC	86
5.2.3	Evaluation	92
5.3	HOMC Performance for Coder Settings beyond HEVC	95
5.3.1	Increase of Maximum Coding Unit Size (CTU size)	95
5.3.2	Increase of Maximum Transform Unit Size (TU size)	98

6	Improvements of Prediction and Coding of Higher Order Motion Parameters	103
6.1	Block-to-Block Translational Shift Compensation	103
6.1.1	Motion Vector Predictor	103
6.1.2	Block-to-Block Deviation of Motion Parameter Predictor	104
6.1.3	Compensation of Translational Shift	105
6.1.4	BBTSC Algorithm	106
6.1.5	BBTSC in AMVP and MRG/SKIP Mode	107
6.1.6	Experimental Results and Evaluation of HOMC with BBTSC	111
6.2	Higher Order Distance Scaling	117
6.2.1	Conventional Distance Scaling as Performed on Translational Motion Vector Predictors in HEVC	117
6.2.2	Motivation for Higher Order Distance Scaling (HODS)	117
6.2.3	Distance Scaling of Higher Order Motion Parameters via Matrix De- composition	118
6.2.4	Experimental Results	127
6.3	Flexible Temporal Motion Parameter Prediction	130
6.3.1	Motivation for Flexible Temporal Motion Parameter Prediction	130
6.3.2	Density of Translational Motion Vector Field	132
6.3.3	Concept of FTMPP	132
6.3.4	Conversion between Translational Motion Parameters and Transla- tional Motion Vector Fields	133
6.3.5	Conversion between Higher Order Motion Parameters and Transla- tional Motion Vector Fields	134
6.3.6	Generating PU-wise Translational Motion Parameters from Transla- tional Motion Vector Field	135
6.3.7	Generating PU-wise Higher Order Motion Parameters from Transla- tional Motion Vector Field	137
6.3.8	Integration of FTMPP into Temporal Prediction Process	140
6.3.9	Temporal Prediction from TMVF in AMVP Mode	141
6.3.10	Temporal Prediction from TMVF in MRG/SKIP Mode	142
6.3.11	Experimental Results	142
7	Investigation of Improved HOMC Version	153
7.1	Combination of HODS and FTMPP	153
7.2	Different Encoder Configurations	155
7.3	Motion Compensation - per Pixel or per Subpartition of 4×4 Pixels?	155
7.4	Sequence-wise Rate-Distortion-Curves	156
8	Conclusion and Outlook	157
8.1	Summary and Conclusion	157
8.2	Outlook	158
8.2.1	Higher Order Motion Parameter Estimation	158
8.2.2	HOMC Integration into Coding Process	158
8.2.3	Global Motion Compensation	159
8.2.4	HODS	160
8.2.5	FTMPP	160

8.2.6	Efficient combination of HODS and FTMPP	161
8.2.7	Conclusion of Outlook	162
Appendices		163
A	Appendix	165
A.1	Sequences of the HOMC target group	165
A.2	Sequence-wise Rate-Distortion-Curves	169
A.2.1	BlueSky	170
A.2.2	BQSquare	172
A.2.3	Cactus	174
A.2.4	Jets	176
A.2.5	ShieldsPart	178
A.2.6	SlideShow	180
A.2.7	Spincalendar	182
A.2.8	Station	184
A.2.9	Tempete	185
A.2.10	TractorPart	188
Bibliography		191