

Image Compression by Microtexture Synthesis

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
Diplom-Ingenieur
Johannes Ballé
aus Dortmund

Berichter:
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jens-Rainer Ohm
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Vary

Tag der mündlichen Prüfung: 30.8.2012

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten
der Hochschulbibliothek online verfügbar.

Aachen Series on Multimedia and Communications Engineering

Volume 11

Johannes Ballé

Image Compression by Microtexture Synthesis

Shaker Verlag
Aachen 2012

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, 2012)

Copyright Shaker Verlag 2012

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 978-3-8440-1449-5

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

I don't want to live on in my work,
I want to live on in my apartment.

Woody Allen

Vorwort

Das vorliegende Manuskript ist das Ergebnis meiner fünf Jahre dauernden Bemühungen als Doktorand am Institut für Nachrichtentechnik in Aachen. Es war das umfangreichste Projekt, dem ich mich bisher verschrieben habe; es war auch das erste Mal, dass mein Ziel nicht nur die Entwicklung eines funktionalen Prototyps war. Was mich besonders motivierte, war der Wunsch, ein Verständnis der fundamentalen Zusammenhänge zwischen menschlicher Wahrnehmung einerseits und der Statistik und mathematischen Modellierung von Bildern andererseits zu erlangen.

Die Wege und Irrwege dieses Unterfangens verschlangen einen großen Teil meiner Zeit, zum Leidwesen meines Lebensgefährten Thomas, der sich zudem immer in der Rolle des Trostspenders wiederfand, wenn ich von Selbstzweifeln geplagt wurde. Ihm ist dieses Werk gewidmet – wiewohl dies nur eine symbolische Geste ist, die ihn nicht im Geringsten entschädigen kann.

So sehr mich die wissenschaftliche Arbeit fesselte, so sehr sind mir die Mitarbeiter, Studenten und Freunde des Instituts als Wegbegleiter ans Herz gewachsen. Nicht nur der offenherzige und uneitle Umgang miteinander, die vielen inoffiziellen Aktivitäten, sondern insbesondere auch der legendäre IENT-Humor, den man Außenstehenden allenfalls als entartet beschreiben kann, werden mir immer in Erinnerung bleiben. Viele der Studenten, die ich bei ihren Arbeiten betreuen durfte, sind später zu Kollegen geworden. Ihnen und auch den anderen bin ich zu Dank verpflichtet, da ohne sie diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre. Ich wünsche allen zukünftigen Doktoren am Institut gutes Gelingen und den übrigen Mitarbeitern (weiterhin) eine gute Zeit.

Mein besonderer Dank gilt Jens-Rainer Ohm dafür, dass er mir immer mit einem Ratschlag oder berechtigter Kritik zur Seite stand, und dass er mich mit Wohlwollen gewähren ließ – insbesondere in der Zeit, in der ich selbst noch nicht so genau wusste, wohin die Reise gehen würde. Diese Art der Betreuung habe ich mir gewünscht, obgleich sie mich vor so manche Probe gestellt hat. Ich danke auch Mathias Wien, der meines Erachtens der Ausgangspunkt für das hervorragende Arbeitsklima am Institut ist, und der mir seit meiner Diplomarbeit ein Mentor war. Die beispielhafte Integrität der Institutsleitung ist mir auf Dauer zu einer scheinbaren Selbstverständlichkeit geworden.

Köln, im Oktober 2012

Contents

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Introduction | 1 |
| 2 | Preliminaries | 5 |
| 2.1 | Fields | 5 |
| 2.1.1 | Random fields | 5 |
| 2.1.2 | Convolution | 7 |
| 2.1.3 | Bochner's theorem | 8 |
| 2.2 | Higher order statistics | 9 |
| 2.2.1 | Moment and cumulant functions | 9 |
| 2.2.2 | Moment and cumulant spectra | 12 |
| 2.2.3 | Moment functions and spectra of deterministic fields | 12 |
| 2.2.4 | Generalized Wiener–Lee Theorem | 13 |
| 2.2.5 | IID and white noise fields | 14 |
| 2.2.6 | Coherency functions | 15 |
| 2.3 | Gauss–Markov Random Fields | 16 |
| 2.3.1 | Finite Gaussian fields | 16 |
| 2.3.2 | Stationary GMRFs | 18 |
| 2.4 | Estimation theory | 18 |
| 3 | Applied Gauss–Markov Random Fields | 21 |
| 3.1 | Inverse filtering | 21 |
| 3.2 | Filter inversion and stability | 22 |
| 3.3 | Estimation | 26 |
| 3.3.1 | Estimator for σ | 28 |
| 3.3.2 | Estimator for \mathbf{b} | 28 |
| 3.3.3 | Other estimators | 29 |
| 3.4 | Conditional sampling | 30 |
| 3.5 | Similarity metrics | 32 |
| 3.5.1 | 2D Itakura Distance | 33 |
| 3.5.2 | Log-spectral distance | 34 |
| 3.5.3 | STSIM | 34 |
| 3.5.4 | SSTSIM | 35 |
| 3.5.5 | Magnitude and power root mean square error | 36 |
| 3.6 | Subjective similarity of Gauss–Markov Texture | 36 |
| 3.6.1 | Experimental setup and analysis | 37 |
| 3.6.2 | Prior distribution of texture model parameters | 37 |
| 3.6.3 | Presentation of stimuli | 38 |
| 3.6.4 | Analysis of subjective scores | 38 |
| 3.6.5 | Results | 40 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 4 | Image analysis | 47 |
| 4.1 | Biological vision | 47 |
| 4.2 | Quadrature feature detection | 48 |
| 4.3 | Statistical interpretation | 51 |
| 4.4 | Sparsity, kurtosis, and Gaussian texture | 56 |
| 5 | Compression of Gaussian texture in natural images | 59 |
| 5.1 | Structure–texture classification and decomposition | 59 |
| 5.1.1 | Filterbank | 60 |
| 5.1.2 | Space–frequency partitioning | 63 |
| 5.1.3 | Parameter selection | 67 |
| 5.2 | Reconstruction | 75 |
| 5.3 | Texture parameterization | 80 |
| 5.4 | Coding | 83 |
| 5.4.1 | Partitioning information | 83 |
| 5.4.2 | Spectral magnitude information | 84 |
| 5.5 | Experimental results | 86 |
| 6 | Summary and conclusion | 97 |
| A | Further results | 99 |
| | Bibliography | 129 |

Notation

| | |
|---|---|
| $\mathbb{N}, \mathbb{Z}, \mathbb{R}, \mathbb{C}$ | set of natural, integral, real, and complex numbers, respectively |
| $(\cdot)^T$ | matrix/vector transpose |
| $(\cdot)^*$ | complex conjugate |
| $\mathbf{a} = (a_0, \dots, a_{n-1})^T$ | n -vector |
| $\mathbf{A} = [A_{mn}]$ | $m \times n$ matrix |
| $\mathbf{x} = (x_0, x_1)^T \in \mathbb{Z}^2$ | pixel position 2-vector |
| $\mathbf{f} = (f_0, f_1)^T \in \mathbb{R}^2$ | Fourier domain 2-vector |
| $\mathbf{z} = (z_0, z_1)^T \in \mathbb{C}^2$ | z -domain 2-vector |
| $j = \sqrt{-1}$ | complex unit |
| $e^{(\cdot)}, \exp(\cdot)$ | element-wise natural exponentiation, s.t. $e^{\mathbf{x}} = (e^{x_0}, e^{x_1})^T$ |
| $\ln(\cdot)$ | element-wise natural logarithm |
| $\arg(\cdot)$ | argument (phase) of a complex number or 2-vector |
| $s : \mathbf{x} \mapsto s(\mathbf{x})$ | 2D field $\mathbb{Z}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ |
| $s^- : \mathbf{x} \mapsto s(-\mathbf{x})$ | 2D field conjugate to s |
| $s * h$ | 2D convolution |
| $\delta(\mathbf{x}) = \delta(x_0)\delta(x_1)$ | Kronecker delta |
| $s(\mathbf{x}) \xrightarrow{z} S(\mathbf{z})$ | 2D z -transform of s |
| $s(\mathbf{x}) \xrightarrow{F} S(e^{j2\pi f})$ | 2D Fourier transform of s |
| $P(\cdot)$ | probability |
| $p(\cdot)$ | probability density |
| $p(\cdot \cdot)$ | conditional probability density |
| $E\{\cdot\}$ | expectation |
| $\text{Re}\{\cdot\}$ | real part |
| $\text{Im}\{\cdot\}$ | imaginary part |
| $ \mathbf{a} = \sqrt{\mathbf{a}^T \mathbf{a}^*}$ | real/complex/vector magnitude |
| $ M $ | cardinality of the set M |
| $\frac{\partial \cdot}{\partial t}$ | partial derivative with respect to t |
| $\int \cdot d\mathbf{f}$ | double integral with respect to elements of \mathbf{f} |
| $\square = (-1/2, 1/2]^2$ | unit square |