

IMAGE REPRESENTATION AND CODING BASED ON ZERO-CROSSINGS

THÈSE N° 1379 (1995)

PRÉSENTÉE À LA SECTION DE SYSTÈMES DE COMMUNICATION

ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES TECHNIQUES

PAR

Andrea BASSO

**Laurea in ingegneria elettronica dell' Università degli studi di Trieste, Italia
de nationalité italienne**

acceptée sur proposition du jury:

**Prof. M. Kunt, rapporteur
Prof. P. Delogne, corapporteur
Prof. J.-P. Hubaux, corapporteur
Dr R. Milanese, corapporteur
Prof. G.-L. Sicuranza, corapporteur**

**Lausanne, EPFL
1995**

Résumé

Le sujet de ce travail de thèse est la représentation et le codage d'images sur la base de ses passages par zéro. Dans le cadre de la décomposition de l'image en sous-bandes il sera démontré que la représentation basée sur les passages par zéro est efficace pour le cas des sous-bandes à basse fréquence.

La représentation basée sur les passages par zéro est une alternative valable s'il existe des algorithmes efficaces de reconstruction du signal. Dans le cadre de cette thèse, deux nouveaux algorithmes seront proposés.

La représentation basée sur les passages par zéro et les méthodes de reconstruction ont été appliquées aux domaines du traitement et du codage d'images. Deux méthodes de codage des passages par zéro seront proposées. Entre autre, un système de codage vidéo comprenant les algorithmes de reconstruction basés sur les passages par zéro pour le codage intra-frame et utilisant des opérateurs morphologiques pour le codage inter-frame seront exposés.

L'organisation de ce travail de thèse est la suivante. Elle s'ouvre par une présentation et une discussion de la théorie de représentation des signaux basée sur les passages par zéro. Par après sont présentés les algorithmes existants dans la littérature.

L'étude de nouveaux algorithmes pour la reconstruction des signaux sur la base des passages par zéro est motivée par la constatation qu'aucun algorithme existant n'exploite complètement la nature bidimensionnelle du signal. Des améliorations peuvent donc y être apportées. Deux nouveaux algorithmes, caractérisés par une représentation compacte et tenant compte de la nature bidimensionnelle du signal, sont introduits. Ils sont basés sur des méthodes itératives.

La représentation et les algorithmes de reconstruction proposés ont été appliqués au traitement et à la compression d'images. Deux méthodes de compression des passages par zéro seront discutées. La première technique utilise la méthode de compression sans perte d'images binaires appelée JBIG. La deuxième méthode est basée sur la modélisation des passages par zéro en utilisant un modèle d'approximation itérative. Afin de démontrer la valeur et l'efficacité des méthodes proposées, une comparaison avec le standard JPEG sera effectuée. Finalement, un système de codage vidéo bien adapté aux très bas débits sera présenté. Il incorpore les techniques basées sur les passages par zéro pour le codage intra-frame et utilise des opérateurs morphologiques pour le codage inter-frame.

Abstract

This thesis addresses the problem of image representation and coding on the basis of zero-crossings. It will be shown that in the framework of image sub-band decomposition the zero-crossing based representation of the sub-band signals can be efficient for representing the low frequency bands of an image. The zero-crossing representation can be a valid and efficient alternative if efficient reconstruction algorithms are available. Two novel reconstruction algorithms will be presented.

The proposed zero-crossing representation of signals has been applied to still and sequence image processing and coding. Two methods for the coding of the zero-crossing patterns coming from subband-decomposed still images will be proposed. Finally a video codec which incorporates the zero-crossing based techniques for intra-frame coding and uses morphological operators for inter-frame coding will be presented.

The thesis is organized as follows. We will start with a general overview of the theory of representation of signals on the basis of their zeros. We will then review the literature regarding the existing algorithms for signal reconstruction based on zero-crossings. The motivation for the study and the design of new reconstruction algorithms based on zero-crossing representations relies on the fact that none of the existing methods exploits completely the nature of a 2D signal in terms of bandwidth and zero-crossings constraints. This leaves space for further improvements, in terms of representation compactness and reconstruction quality. We will present two novel algorithms for 2D signal reconstruction based on zero-crossing that rely on a compact representation and in which the 2D intrinsic nature of the signal is taken into account. Both are based on iterative methods which constraint the 2D signal in spatial and spectral domain alternatively.

The proposed representation has been applied to still and image sequence processing and coding. A preliminary study of the zero crossing patterns of bandpass signals will enlight potential strategies to be used for the coding of the zero-crossing patterns. Two methods for zero crossing data coding will be then discussed. The first proposed technique is based on the lossless compression method for binary images called JBIG. The second method is based on the modelization of the zero-crossing patterns and on an iterative model refinement. It will be shown how it is possible to separate great part of the non-relevant zeros of the signal from the relevant ones and how the first set can be modeled and efficiently coded through a parametric model. A comparison of the proposed coding schemes with standard still image coding techniques such as JPEG will be presented showing the effectiveness of the

proposed scheme. Finally a video codec well adapted to very low bit rates will be shown. It incorporates the zero-crossing based techniques for intra-frame coding and uses morphological operators for inter-frame coding.

Contents

Remerciements	i
Résumé	iii
Abstract	iv
1 Overview	1
1.1 Definition of the problem	2
1.2 Investigated approach	2
1.3 Organization of the thesis	4
1.4 Main contributions	6
2 Theory of Signal Representation based on Zeros	9
2.1 Introduction	10
2.2 Signal representation	12
2.2.1 Introduction	12
2.2.2 Valid, unique and unambiguous representations	12
2.3 Algebraic and Trigonometric Polynomials	13
2.3.1 Introduction	13
2.3.2 Unique representation of algebraic polynomials	13
2.3.3 Unique representation of trigonometric polynomials	15
2.3.4 Summary	18
2.4 Entire Functions	18
2.4.1 Introduction	18
2.4.2 The notion of entire function	18
2.4.3 Characterization of entire functions	19
2.4.4 Entire functions of exponential type (EFETs)	19
2.4.5 Product Expansion	20
2.4.6 B-functions	21
2.4.7 Summary	23
2.5 Band-Limited Functions	23
2.5.1 Introduction	23
2.5.2 Band-limited functions and EFETs	24
2.5.3 Zeros of BL-functions	25

2.5.4	Full real zeros B-Functions	26
2.5.5	Summary	27
2.6	Bandpass Functions	28
2.6.1	Introduction	28
2.6.2	Unique representation of bandpass functions	28
2.6.3	Extension to two-dimensional signals	29
2.6.4	Summary	30
2.7	Multi-dimensional Zero-Crossings representations	30
2.8	Zero-crossings of Multi-scale representations	30
2.8.1	Introduction	30
2.8.2	The gradient at zero crossing points	31
2.8.3	Integral values between zero-crossings	31
2.9	Summary	31
3	Reconstruction Algorithms based on Zero-crossings	35
3.1	Introduction	36
3.2	Algorithms based on full RZ conversion	37
3.2.1	Introduction	37
3.2.2	Description of the algorithm	37
3.2.3	Discussion	38
3.3	Algorithm of Rotem and Zeevi	40
3.3.1	Introduction	40
3.3.2	Description of the algorithm	40
3.3.3	Application to images	43
3.3.4	Discussion	45
3.4	Algorithms of Curtis and Oppenheim	46
3.4.1	Introduction	46
3.4.2	Description of the iterative algorithm	46
3.4.3	Description of the Linear Equation method	47
3.4.4	Application to images	47
3.4.5	Discussion	49
3.5	Reconstruction algorithms in scale-space	49
3.5.1	Introduction	49
3.5.2	Wavelet Transforms	50
3.5.3	Description of the algorithm	51
3.5.4	Application to images	53
3.5.5	Discussion	53
3.6	Summary	54

4	Novel Reconstruction Algorithms	57
4.1	Introduction	58
4.2	Natural images and their representation	59
4.2.1	Introduction	59
4.2.2	Characteristics of natural images	60
4.2.3	1D and 2D signal representations	60
4.3	Requirements and Choices	62
4.4	Importance of 2D constraints	62
4.4.1	Introduction	62
4.4.2	1D signal reconstruction	63
4.4.3	Reconstruction results	63
4.4.4	Post-processing	64
4.4.5	Reconstruction results	65
4.4.6	Conclusions	66
4.5	First 2D reconstruction algorithm	66
4.5.1	Introduction	66
4.5.2	Normalization constraints	66
4.5.3	Bandpass constraints	67
4.5.4	Description of the algorithm	67
4.5.5	Initial point of iteration	72
4.5.6	Convergence parameters	72
4.5.7	Improvements in convergence speed	74
4.5.8	Two-dimensional reconstruction results	76
4.5.9	Conclusions	76
4.6	Reconstruction error estimation procedure	76
4.6.1	Introduction	76
4.6.2	Analysis	78
4.6.3	Limits of the error estimation	80
4.7	A new error estimation procedure	80
4.7.1	Introduction	80
4.7.2	Preliminary observations	83
4.7.3	Sobolev Spaces	84
4.7.4	Norm minimization in H^1	84
4.7.5	Other constraints	85
4.7.6	Error estimation	86
4.7.7	Normalization and bandpass constraints	86
4.8	Second 2D reconstruction algorithm	86
4.8.1	Introduction	86
4.8.2	Projection in alternate spaces	87
4.8.3	Description of the algorithm	87
4.8.4	Two-dimensional reconstruction results	88

4.9	Comparative reconstruction results	91
4.9.1	Introduction	91
4.9.2	Filter bank structure	91
4.9.3	Image reconstruction results	92
4.9.4	Discussion	92
4.10	Error Analysis	94
4.10.1	Introduction	94
4.10.2	Zero losses	94
4.10.3	Zero position perturbations	94
4.10.4	Perturbation of a real zero	95
4.10.5	Perturbation of complex-conjugate pairs	97
4.10.6	Conclusions	98
4.11	Summary	99
5	Still Image Coding based on Zero-crossings	101
5.1	Introduction	102
5.2	Preliminary remarks	102
5.2.1	Introduction	102
5.2.2	Zero-crossing patterns of 1D bandpass signals	103
5.2.3	Zero-crossing patterns of 2D bandpass signals	103
5.2.4	Conclusions	105
5.3	Introduction to the JBIG standard	106
5.3.1	The JBIG encoder	107
5.3.2	Resolution reduction	107
5.3.3	Typical prediction	108
5.3.4	Deterministic prediction	108
5.3.5	Model templates	108
5.3.6	Adaptive templates	108
5.3.7	Lowest resolution layer	109
5.3.8	The JBIG decoder	109
5.3.9	JBIG performances	109
5.4	Coding of zero-crossing patterns with JBIG	111
5.4.1	Introduction	111
5.4.2	Description of the coding strategy	111
5.4.3	Coding results	112
5.4.4	Conclusions	114
5.5	Model-based Coding of zero-crossing patterns	117
5.5.1	Introduction	117
5.5.2	Modelization of the carrier component	117
5.5.3	Iterative refinement	119
5.5.4	Modeling results	121

5.5.5	Coding results	124
5.6	Comparison of the two methods	124
5.7	Comparison with JPEG standard	125
5.7.1	Introduction	125
5.7.2	Comparative coding results	125
5.8	Summary	128
6	Image sequence coding based on Zero-crossings	131
6.1	Introduction	132
6.2	Image sequence coding approaches	133
6.2.1	Introduction	133
6.2.2	Hybrid codecs	133
6.2.3	Image formats	133
6.3	Intra-frame coding	134
6.4	Inter-frame coding	134
6.4.1	Motion estimation	135
6.4.2	Block Matching	136
6.4.3	Arithmetic Coding	138
6.5	Overview of the proposed coder	139
6.5.1	Introduction	139
6.5.2	DFD segmentation	140
6.5.3	Motion estimation	141
6.6	Codec performances	141
6.7	Conclusions	144
6.8	Summary	144
7	Conclusions	147
7.1	Conclusion	148
7.2	Future perspectives	151