

# **DIGITAL IMAGE WATERMARKING: HIDING INFORMATION IN IMAGES**

THÈSE N° 2054 (1999)

PRÉSENTÉE AU DÉPARTEMENT D'ÉLECTRICITÉ

ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES TECHNIQUES

PAR

**Martin KUTTER**

Master of Science in Electrical Engineering, University of Rhode Island, Kingston, USA  
de nationalité suisse et originaire de Homburg (TG)

acceptée sur proposition du jury:

Prof. M. Kunt, directeur de thèse  
Prof. T. Ebrahimi, rapporteur  
Dr A. Herrigel, rapporteur  
Prof. B. Macq, rapporteur  
Prof. D. Mlynek, rapporteur  
Prof. T. Pun, rapporteur

Lausanne, EPFL  
1999

---

# Contents

---

<b>List of Figures</b>	<b>XIII</b>
<b>Abstract</b>	<b>XV</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>XVII</b>
<b>Version abrégée</b>	<b>XIX</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>1</b>
1.1 Statement of the Problem . . . . .	1
1.2 Investigated Approach . . . . .	2
1.3 Organization of the Thesis . . . . .	3
1.4 Main Contributions . . . . .	4
<b>2 Watermarking Challenge</b>	<b>7</b>
2.1 History: From paper watermarks to digital watermarks . . . . .	7
2.2 Terminology . . . . .	9
2.3 Generic Digital Watermarking System . . . . .	11
2.3.1 Definition . . . . .	11
2.3.2 Requirements and algorithm design issues . . . . .	12
2.4 Image Watermarking: State of the Art . . . . .	15
2.4.1 Introduction . . . . .	15
2.4.2 Spatial domain watermarking . . . . .	18
2.4.3 Watermarking based on fractals . . . . .	20
2.4.4 Discrete cosine transform (DCT) domain watermarking . . . . .	21
2.4.5 Frequency domain watermarking . . . . .	23
2.4.6 Wavelet domain watermarking . . . . .	25
2.4.7 Comparison . . . . .	25
2.5 Security, Robustness and Cryptanalysis . . . . .	26
2.5.1 Introduction . . . . .	26
2.5.2 Watermark Robustness . . . . .	26
2.5.3 Remedies against watermark ambiguities . . . . .	29
2.6 Watermark Robustness Test Utilities . . . . .	31

2.7	Conclusions . . . . .	31
<b>3</b>	<b>The Human Visual System</b>	<b>35</b>
3.1	Introduction . . . . .	35
3.2	The Physiology of the Human Visual System . . . . .	35
3.2.1	Introduction . . . . .	35
3.2.2	Optics of Vision . . . . .	36
3.2.3	Photoreceptors and Retina . . . . .	40
3.2.4	Central Neurophysiology of Vision . . . . .	44
3.2.5	Eye movements . . . . .	46
3.3	Visual Phenomena . . . . .	47
3.3.1	Introduction . . . . .	47
3.3.2	Contrast Sensitivity . . . . .	47
3.3.3	Lightness Curves . . . . .	49
3.3.4	Pattern Sensitivity and Masking . . . . .	49
3.3.5	Opponent Colors . . . . .	51
3.4	Vision Modeling . . . . .	53
3.5	Summary . . . . .	54
<b>4</b>	<b>Watermark embedding and extraction</b>	<b>57</b>
4.1	Introduction . . . . .	57
4.2	Underlying model and approach . . . . .	58
4.3	Watermark embedding . . . . .	59
4.4	Watermark extraction . . . . .	61
4.4.1	Introduction . . . . .	61
4.4.2	Watermark detection based on alternative sign correlator . . . . .	62
4.4.3	Watermark detection based on linear detectors . . . . .	68
4.5	Detector performance after linear filtering . . . . .	72
4.6	Performance improvement through prediction . . . . .	75
4.6.1	Introduction . . . . .	75
4.6.2	Linear interpolation and prediction filter . . . . .	76
4.6.3	Square and cross-shaped Wiener filtering . . . . .	88
4.7	$M$ -ary modulation . . . . .	94
4.8	Conclusions . . . . .	103
4.9	Major achievements . . . . .	104
<b>5</b>	<b>Watermark detection and extensions</b>	<b>107</b>
5.1	Introduction . . . . .	107
5.2	Detector Structure . . . . .	107
5.3	Robustness to translation and cropping . . . . .	110
5.4	Robustness to generalized geometrical transformations . . . . .	114
5.4.1	Introduction . . . . .	114
5.4.2	Generalized geometrical transformation . . . . .	115
5.4.3	The concept of self-reference . . . . .	116
5.4.4	On detecting peaks . . . . .	120
5.4.5	Resistance to scaling and rotation . . . . .	124

---

5.4.6	Resistance to generalized geometrical transformation . . . . .	129
5.4.7	A word on interpolation . . . . .	131
5.5	Conclusions . . . . .	133
5.6	Major achievements . . . . .	134
<b>6</b>	<b>Watermark Adaptation</b> . . . . .	<b>137</b>
6.1	Introduction . . . . .	137
6.2	Contrast of Simple Patterns . . . . .	137
6.3	Contrast for Complex Scenes . . . . .	138
6.3.1	Definition . . . . .	138
6.3.2	Isotropic local contrast . . . . .	140
6.4	Masking . . . . .	142
6.5	Application to Watermarking . . . . .	145
6.6	Empirical Results . . . . .	147
6.6.1	Introduction . . . . .	147
6.6.2	Global parameters . . . . .	148
6.6.3	Luminance specific parameters . . . . .	148
6.6.4	Blue channel specific parameters . . . . .	150
6.7	Discussion . . . . .	153
6.8	Conclusions . . . . .	154
6.9	Major Contributions . . . . .	157
<b>7</b>	<b>Applications</b> . . . . .	<b>159</b>
7.1	Introduction . . . . .	159
7.2	Creating the Pseudo-Random Patterns . . . . .	160
7.3	Identifying System Parameters . . . . .	161
7.3.1	Embedding channel . . . . .	161
7.3.2	Embedding density . . . . .	162
7.3.3	Watermark Embedding Shifts . . . . .	164
7.3.4	Watermark detection threshold . . . . .	166
7.4	Designing the Final System . . . . .	170
7.4.1	Introduction . . . . .	170
7.4.2	Watermark embedding system . . . . .	170
7.4.3	Watermark detection system . . . . .	171
7.5	Results . . . . .	172
7.5.1	System parameters . . . . .	172
7.5.2	JPEG compression . . . . .	172
7.5.3	Scaling . . . . .	172
7.5.4	Rotation . . . . .	173
7.5.5	Print-scan process . . . . .	174
7.5.6	Fun Stuff . . . . .	174
7.6	Discussion . . . . .	176
7.7	Conclusions . . . . .	176
7.8	Major Contributions . . . . .	178

---

<b>8</b>	<b>Conclusions</b>	<b>181</b>
8.1	Summary . . . . .	181
8.2	Discussion . . . . .	184
8.3	Possible extensions . . . . .	185
<b>A</b>	<b>Results of subjective tests</b>	<b>191</b>
A.1	Luminance Watermarking . . . . .	191
A.2	Blue Channel Watermarking . . . . .	191
<b>B</b>	<b>Test image database</b>	<b>193</b>
B.1	Image Description . . . . .	193
B.2	Images . . . . .	193
	<b>Bibliography</b>	<b>195</b>
	<b>Curriculum Vitae</b>	<b>207</b>

---

# Abstract

---

With the advent of digital images and worldwide distribution channels, such as the Internet, new tools are required which allow for image tracking and copyright protection. One class of tools, which provide these desired functionalities, are digital watermarks. The concept of digital watermarking is to add an information, for example an identification number, to the image. The addition has to be done such that the image is not visually altered. Furthermore, the watermark has to be robust, which means that subsequent processing of the watermarked image should not impair the detection of the embedded information.

In this work, we investigate efficient ways to watermark digital gray-scale and color images. The work is built on the foundations of spread spectrum communication in the spatial domain. The concept is extended by making the embedding channel sparse, that is, not all pixels are used for the embedding process. Two different watermark detectors are introduced, the alternative sign detector and the linear correlator detector. Both are theoretically and empirically analyzed, and then compared. To increase the robustness of the watermarking scheme, a pre-processing step is introduced prior to the watermark extraction process. The goal of the preprocessing step is to compute an estimate of the embedded watermark. We will show that, for appropriate pre-processing filters, this may result in a significant performance increase. Four different filters are introduced and analyzed. We will show that, in general, adaptive filters result in a larger performance increase. Furthermore, we show that the use of  $M$ -ary modulation, instead of binary signaling, is advantageous in the context of digital watermarking.

Following the introduction and analysis of the basic watermarking scheme, several extensions are presented. First, a technique is developed to detect if an image under investigation is watermarked. The method is based on the theory of detection of weak signals in non-Gaussian noise, and locally optimum detection. Furthermore, a watermark detection reliability index is developed and analyzed. Then, the new concept of self-reference is introduced. This concept allows the identification of geometrical image transformations, and hence provides a functionality which allows for the design of watermarking schemes which are resilient to geometrical alterations.

The invisibility of the embedded watermark is a very important issue. To optimally adapt the watermark to the image, we introduce a new watermark weighting mask. The design of the mask is adapted to the human visual system by exploiting the contrast sensitivity and masking phenomena. Furthermore, because the human visual system is not that sensitive to blue colors,

we suggest to embed the watermark in the blue image component instead of the luminance. We will show that a blue channel watermark may contain substantially more energy than a luminance watermark.

The work terminates with the design and performance analysis of a watermarking system. We will show that the scheme features an impressive overall performance and is even resilient to modification such as motion-blur, dithering, color-inversion, image composition, and embossing. Furthermore, it is, to our knowledge, the first scheme that is robust to affine transformations.

---

# Kurzfassung

---

Mit dem Aufkommen digitaler Bilder und weltweiten Netzwerken wie zum Beispiel dem Internet werden auch neue Werkzeuge benötigt, um der Verteilung der Bilder zu folgen und das Urheberrecht zu schützen. Das Konzept der digitalen Wasserzeichen beschreibt eine Klasse von Werkzeugen mit der gewünschten Funktionalität. Die Idee der digitalen Wasserzeichen besteht darin, Information, zum Beispiel in Form einer Nummer, in ein Bild einzufügen. Das Einfügen der Information muss so geschehen, dass die Änderungen im Bild nicht sichtbar sind. Zusätzlich muss das Wasserzeichen auch robust sein. Robustheit im Kontext von digitalen Wasserzeichen beschreibt die Charakteristik, dass es möglich sein sollte das Wasserzeichen zu lesen, auch wenn das Bild bearbeitet und verändert wurde.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, effiziente Wege zu finden um digitale Graustufen und Farbbilder zu signieren, das heisst, sie mit einem digitalen Wasserzeichen zu versehen. Die Arbeit basiert auf den Grundlagen der Spread-Spectrum-Übertragungssysteme im räumlichen Bereich. Das Konzept wurde erweitert, indem der räumliche Bereich nur teilweise ausgenutzt wird. In anderen Worten, es werden nicht alle Pixel benutzt um das Wasserzeichen ins Bild einzufügen. Zwei unterschiedliche Detektoren, der modifizierte Vorzeichendetektor und der lineare Detektor, werden eingeführt, theoretisch sowie empirisch analysiert und verglichen. Um die Robustheit des Wasserzeichens zu vergrössern wird vor der Detektion des Wasserzeichens das Bild zusätzlich bearbeitet. Das Ziel dieses Schrittes ist es, mittels digitaler Filterung eine Vorhersage des eingefügten Wasserzeichens zu berechnen. Wir werden demonstrieren, dass mit gezielt gewählten Filtern die Gesamtleistung des Systems beträchtlich zunimmt. Wir führen vier verschiedene Filter ein und analysieren deren Einfluss auf die Leistung des Systems. Die Untersuchung wird nachweisen, dass adaptive Filter generell einen grösseren Leistungsanstieg zur Folge haben. Zusätzlich werden wir zeigen, dass es in der Modulation von Vorteil ist, mehr als vier Symbole zu gebrauchen.

Im Anschluss an die Einführung und Analyse des Grundsystems gehen wir auf mögliche Erweiterungen und Verbesserungen ein. Zuerst entwickeln wir eine Methode um festzustellen, ob ein Bild ein Wasserzeichen enthält. Diese Methode basiert auf zwei verwandten Theorien: Detektion von schwachen Signalen in nicht-gaussischem Rauschen und lokal optimale Detektoren. Zusätzlich stellen wir einen Detektionsindex vor, welcher angibt, wie zulässig das detektierte Wasserzeichen ist. Anschliessend führen wir das neue Konzept der Selbst-Referenz ein. Dieses Konzept erlaubt es uns, geometrische Transformationen eines Bildes zu identifizieren. Anhand

dieser Identifikation ist es möglich, Wasserzeichensysteme zu entwickeln, die auch geometrischen Alterationen widerstehen.

Die Unsichtbarkeit des digitalen Wasserzeichen ist eine der Hauptanforderungen an das System. Um das Wasserzeichen optimal an das Bild anzupassen, entwickeln wir eine neue Skalierungsmaske. Das Design der Maske beruht auf zwei Effekten des menschlichen visuellen Systems, nämlich der Kontrastempfindlichkeit und der Maskierung von Signalen. Zusätzlich schlagen wir vor, den Blauteil des Bildes für das Einfügen des Wasserzeichens zu nutzen. Da das menschliche Auge für blaue Farbtöne weniger empfindlich ist, hat dies zur Folge, dass ein solches Wasserzeichen mehr Energie enthalten kann als ein Wasserzeichen in der Luminanz.

Die Arbeit endet mit der Entwicklung und Analyse eines kompletten digitalen Wasserzeichensystems. Wir werden zeigen, dass das System eine eindrucksvolle Leistung aufweist und Änderungen wie zum Beispiel Bewegungsunschärfe, Farbumkehrung, oder dem Zusammenfügen mehrerer Bilder widersteht. Zusätzlich ist das eingeführte System nach unserem Wissen zur Zeit das einzige, das gegen affine Transformationen robust ist.

---

# Version abrégée

---

L'apparition des images numériques et des réseaux mondiaux, comme par exemple l'Internet, a créé un besoin de nouveaux outils qui permettent le suivi des données et la protection des droits d'auteurs. Une classe d'outils ayant les fonctionnalités désirées est le tatouage numérique. Le concept de tatouage numérique est d'insérer une information, par exemple un numéro d'identification, dans une image. L'insertion de cette information doit être fait de telle sorte que les modifications en résultant dans l'image ne soient pas visibles. De plus, le tatouage doit être robuste, c'est-à-dire que la détection doit être possible même si l'image a été modifiée.

Dans ce travail, nous investiguons diverses possibilités pour tatouer des images en niveaux de gris et en couleurs. Le travail est basé sur la théorie de la télécommunication à spectre étalé dans le domaine spatial. Le concept est étendu en rendant le canal d'insertion incomplet, c'est-à-dire, en n'utilisant pas tous les pixels pour insérer le tatouage. Deux détecteurs différents sont introduits, le détecteur à signe alternatif, et le détecteur à corrélation linéaire. Ces détecteurs sont analysés, testés et comparés. Pour augmenter la robustesse du système, nous introduisons un processus de traitement préalable dans le système de détection. Le but de ce traitement est de calculer une estimation du tatouage. Nous allons montrer que, en utilisant des filtres appropriés, on peut augmenter de manière significative la performance du système. Nous allons aussi démontrer que les filtres adaptatifs sont meilleurs pour ce traitement préalable. De plus, l'utilisation de plus de deux symboles dans le système de modulation est un avantage dans le contexte de tatouage numérique.

Suite à l'introduction et l'analyse du système de base des tatouages numériques, plusieurs extensions sont présentées. D'abord, une technique est développée pour détecter si une image est tatouée ou non. Cette technique est basée sur la théorie de détection de signaux faibles dans du bruit non-Gaussien, et des détecteurs à optimum local. De plus, un index indiquant la fiabilité du tatouage extrait est développé et analysé. Ensuite, le nouveau concept de référence-propre est introduit. Ce concept permet l'identification des transformations géométriques appliquées à l'image, et fournit la fonctionnalité nécessaire pour développer un système de tatouage numérique résistant aux transformations géométriques.

L'invisibilité du tatouage est une des plus importantes exigences d'un système de tatouage numérique. Pour adapter le tatouage à l'image, nous introduisons un nouveau masque de pondération. Le développement de ce masque est basé sur les caractéristiques du système visuel humain.

Deux effets sont explicitement exploités, c'est-à-dire la sensibilité au contraste et le masquage. Parce que le système visuel est moins sensible à la couleur bleue, nous proposons de tatouer la composante bleue au lieu de la luminance. Nous allons montrer que le tatouage de la composante bleue a une énergie nettement supérieure au tatouage dans la luminance.

Ce travail se termine avec le développement et l'analyse de la performance d'un système de tatouage complet. Les résultats démontrent que la performance du système est impressionnante, et que le système résiste même à des altérations comme le brouillage de mouvement, dithering, l'inversion de couleurs, ou la composition des images. De plus, le système est le premier du genre, qui résiste à des transformations affines.