

Utilisation de la Transformée de Fourier Quaternionique en tatouage d'images couleur

Patrick BAS, Nicolas LE BIHAN, Jean-Marc CHASSERY
Laboratoire des Images et des Signaux (LIS) INPG/CNRS,
BP. 46 38402 Saint Martin d'Hères cedex

Patrick.Bas@lis.inpg.fr, Nicolas.LeBihan@lis.inpg.fr, Jean-Marc.Chassery@lis.inpg.fr

Résumé – Ce travail présente une méthode de tatouage utilisant d'une part un espace de représentation adapté aux images couleur par la transformée de Fourier quaternionique, d'autre part une approche psychovisuelle fondée sur les espaces couleur uniformes. Les quaternions sont des nombres possédant une partie réelle et trois parties imaginaires et peuvent naturellement être utilisés pour représenter des pixels couleur. Nous utilisons une décomposition fréquentielle, la transformée de Fourier quaternionique (TFQ), pour isoler un espace propre à l'insertion d'un tatouage. La TFQ dépendant d'un quaternion pur μ , nous utilisons ce degré de liberté afin d'obtenir un espace de décomposition optimal au sens perceptif. Le choix de μ dans l'espace RGB est obtenu par calcul différentiel sur les espaces perceptifs uniformes Lab et Luv. L'information est ensuite insérée dans l'image couleur par une méthode de quantification. Enfin les résultats offerts par cette méthode montrent qu'elle permet d'obtenir un compromis invisibilité/robustesse important pour des traitements affectant la luminance de l'image.

Abstract – This work presents a watermarking method that uses in one hand a frequencial transform suitable for color images (the quaternionic Fourier transform) and in the other hand a psychovisual approach based on uniform color spaces. Quaternion numbers are defined by a real part and three imaginary parts and may naturally be used to represent color pixels. The quaternionic Fourier transform (QFT) is used to isolate an appropriate embedding space. The QFT depends on a pure quaternion μ that can be used as a parameter to yield to an optimal perceptual embedding space for color image watermarking. The choice of μ in the RGB space is performed by differential calculus on the Luv and Lab perceptually uniform color spaces. The information is afterwards embedded in the color image using a classical quantification-based scheme. Finally the results offered by such a method outline that a balance between robustness and invisibility can be achieved for processes that affect the luminance of the image.

1 Introduction

Le tatouage d'images consiste en l'insertion d'une information imperceptible et robuste au sein d'une image. Dans ces travaux, le système de tatouage est développé de manière à pouvoir insérer une information de taille importante. Cette information peut par exemple représenter une méta-donnée qui permettra de répondre à plusieurs problèmes tels que l'authentification, l'indexation ou encore l'ajout de fonctionnalités¹. Nous dressons dans un premier temps un inventaire des méthodes de tatouage qui utilisent l'information de tri-chromacie.

◊ Une des premières solutions envisagées en tatouage d'images couleur consiste à utiliser le canal bleu comme espace d'insertion car c'est le canal qui est le moins sensible de la décomposition RVB. Ainsi dans [7], l'insertion s'effectue en modifiant la composante bleue B de certains pixels dont les positions sont définies à partir d'une clef secrète.

◊ Il est également possible de prendre en compte les trois composantes couleurs plutôt qu'une seule pour augmenter l'espace d'insertion de l'image. Dans [9], la puissance de la signature dépend de la réponse de l'oeil humain aux différentes longueurs d'onde. Ainsi l'amplitude de la signature est environ 10 fois plus importante sur la composante

bleue α_B que sur la composante verte α_V et 5 fois plus importante sur la composante bleue que sur la composante rouge α_R .

◊ La décomposition Lab présente également des propriétés intéressantes dans le contexte du tatouage car elle offre un espace euclidien "sensitif". Le schéma de tatouage présenté dans [6] est issu de la décomposition Lab. Les auteurs proposent d'utiliser une extension de la décomposition Lab, appelée S-CIELAB, qui dépend également de la structure locale de l'image. Cette décomposition exploite le fait que la perception des couleurs diffère entre les zones homogènes et les zones texturées. L'insertion de la signature s'effectue en ajoutant une grille sinusoidale pondérée par le masque obtenu dans la bande de couleur Jaune/Bleu (O_3). La détection de la signature s'effectue par une détection de pics correspondant à la présence de sinusoides dans le spectre de la composante O_3 .

◊ L'utilisation d'autres espaces de représentation achromatiques a été étudiée par d'autres auteurs [8] [1]. Il en ressort que l'utilisation des composantes IQ de l'espace YIQ ou UV de l'espace YUV est intéressante pour le tatouage.

Notre démarche dans ce travail a consisté à utiliser pleinement la représentation couleur des images par le biais de sa représentation quaternionique. Cette représentation nous a permis d'isoler un espace de décomposition fréquen-

1. Ces travaux sont supportés par le projet RNRT Artus.

tiel significatif du point de vue perceptif.

2 Présentation de la Transformée de Fourier Quaternionique

2.1 Définition

Les quaternions, également appelés nombres hypercomplexes ont été largement utilisés pour représenter les images couleurs par Sangwine et Ell[4, 5]. Un nombre quaternionique q peut être vu comme une extension des nombres complexes. Il possède quatre composantes, une partie réelle w et trois parties imaginaires x , y et z :

$$q = w + xi + yj + zk$$

Comme dans le cas des nombres complexes, i , j et k sont des opérateurs imaginaires ayant les propriétés suivantes:

$$\begin{aligned} i^2 = j^2 = k^2 = ijk = -1 \\ ij = k \quad jk = i \quad ki = j \\ ji = -k \quad kj = -i \quad ik = -j \end{aligned}$$

En utilisant cette représentation, une image couleur $I(x, y)$, de taille $N \times N$, peut être considérée comme un tableau de quaternions purs (i.e. avec une partie réelle nulle):

$$I(x, y) = R(x, y)i + G(x, y)j + B(x, y)k$$

où $R(x, y)$, $G(x, y)$ et $B(x, y)$ représentent les composantes rouge, verte et bleu. Sangwine et Ell ont également défini la transformée de Fourier Quaternionique (QFT) et sa transformée inverse [10] par:

$$I(x, y) = S \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} e^{\mu 2\pi(\frac{xv}{M} + \frac{yu}{N})} QFT_I(v, u)$$

sa transformée inverse est définie par:

$$QFT_I(v, u) = S \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} e^{-\mu 2\pi(\frac{xv}{M} + \frac{yu}{N})} I(x, y)$$

Dans cette formule $S = 1/\sqrt{MN}$. Il est important de préciser que le résultat de la QFT dépend de la définition d'un quaternion pur μ (i.e. $\mu^2 = -1$ et $\Re(\mu) = 0$). Cette transformée peut être facilement calculée en utilisant des transformées de Fourier classiques par le biais d'une décomposition symplectique [3]. Si le signal obtenu après la Transformée de Fourier peut être interprété grâce à son spectre et sa phase, la QFT peut être décomposée en deux composantes [10], l'une parallèle à μ , $QFT_{\parallel I}$, l'autre orthogonale à μ , $QFT_{\perp I}(v, u)$:

$$QFT_I(v, u) = QFT_{\parallel I}(v, u) + QFT_{\perp I}(v, u)$$

$QFT_{\parallel I}$ représente la composante qui sera par la suite affectée par l'insertion de la signature.

3 Vers une transformée perceptuelle

Dans l'optique d'insérer une information imperceptible dans une image couleur, notre démarche a été de sélectionner les valeurs de μ tels que l'impact visuel de l'image

reconstruite soit minimal. Pour cela nous avons ajouté dans un premier temps des motifs sur des blocs de taille 8×8 de l'image et nous avons évalué leur incidence sur des écrans CRT et LCD. Nous avons retenu la valeur de μ présentant les plus faibles distorsions. Par exemple la valeur $\mu_{Perc} = (-2j + 8k)/\sqrt{68}$ permet d'obtenir un espace d'insertion présentant un masquage important pour l'ensemble des images testées. La figure 1 illustre l'impact visuel produit par la perturbation de $QFT_{\parallel I}$ pour $\mu = \mu_{Perc}$ et $\mu = \mu_{Lum} = (i + j + k)/\sqrt{3}$ avec d'une part la même erreur quadratique moyenne (EQM) et d'autre part la même erreur absolue moyenne (EAM).

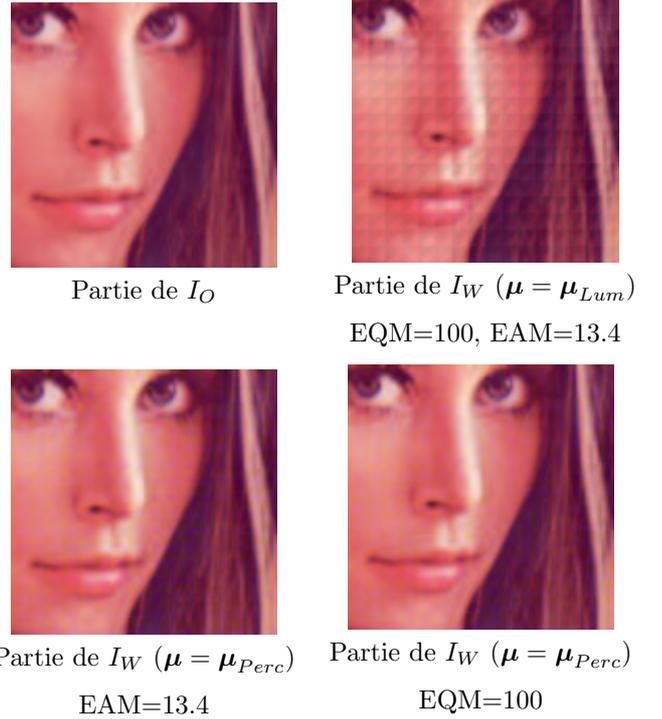


FIG. 1: Effets de perturbations pour différentes valeurs de μ .

Même si le choix précédent de $\mu = \mu_{Perc}$ conduit à un domaine d'insertion satisfaisant du point de vue perceptif, nous avons observé que les effets de masquage ne sont pas indépendants de la couleur moyenne de chaque bloc. Par exemple pour $\mu_{Perc} = (-2j + 8k)/\sqrt{68}$, le phénomène de masquage est moins important pour la gamme des bleus que pour d'autres gammes de couleur. En nous basant sur cette constatation, nous avons décidé de prendre comme hypothèse que le vecteur μ_{Mask} , qui représente la direction de masquage optimale, est fonction des attributs couleurs locaux de l'image. L'étape suivante de cette section consiste donc à chercher une fonction $f()$ telle que $\mu_{Mask} = f(R, G, B)$, (R,G,B) représentant les composantes couleurs d'un pixel ou de la moyenne d'un bloc de pixel de l'image.

Notre démarche a donc consisté à définir un modèle permettant de calculer de manière automatique et adaptative le vecteur de masquage μ . Pour cela nous nous sommes

appuyés sur des représentations couleur uniformes telles que les espaces Lab ou Luv et nous avons ensuite dérivé leurs propriétés différentielles sur l'espace RGB.

Un espace couleur uniforme est construit de manière à ce que la norme euclidienne entre deux couleurs, si elle est constante provoque une dégradation visuelle "uniforme", c'est à dire conduisant à une gêne comparable, sur tout l'espace couleur [11]. Les deux espaces couleur uniformes les plus connus sont l'espace CIELuv et l'espace CIELab, leur différence couleur ΔE est définie par:

$$\begin{aligned}\Delta E_{Luv} &= (\Delta L^2 + \Delta u^2 + \Delta v^2)^{1/2} \\ \Delta E_{Lab} &= (\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2)^{1/2}\end{aligned}$$

Une dégradation visuelle constante se traduit alors par $\Delta E^2 = cte$ et est alors représentée par une sphère dans chacun des espaces uniformes (Lab ou Luv). La représentation matricielle de l'équation de cette sphère est donnée par:

$$\Delta E_{Lab}^2 = [\Delta L \Delta a \Delta b] I [\Delta L \Delta a \Delta b]^T = cte \quad (1)$$

où I est une matrice identité. Par un calcul différentiel il est en outre possible d'obtenir les matrices de passage entre les différentielles $[\delta R \delta G \delta B]$ dans RGB et $[\delta L \delta a \delta b]$ dans Lab (pour cela il est nécessaire de passer par l'espace intermédiaire XYZ). L'équation 1 est alors équivalente à:

$$\Delta E_{RGB}^2 = [\Delta R \Delta G \Delta B] A^T A [\Delta R \Delta G \Delta B]^T = cte \quad (2)$$

où

$$\begin{aligned}A &= [\delta R \delta G \delta B \triangleright \delta L \delta a \delta b] \\ &= [\delta R \delta G \delta B \triangleright \delta X \delta Y \delta Z] [\delta X \delta Y \delta Z \triangleright \delta L \delta a \delta b]\end{aligned}$$

(2) représente l'équation d'une ellipsoïde Γ de matrice caractéristique $A^T A$ dans l'espace RGB (un calcul équivalent peut être réalisé dans l'espace Luv). Le vecteur masquant μ représente le vecteur permettant la plus grande distorsion dans l'espace RGB tout en gardant une différence ΔE constante dans l'espace couleur uniforme. Il correspond donc à l'axe principal de l'ellipsoïde Γ .

Les tests effectués ont cependant montré que l'influence du facteur ΔL dans les modèles d'espaces uniformes était visuellement trop importante. Pour pallier à ce problème, nous avons donc choisi de rajouter à la contrainte (2) une deuxième contrainte en situant le vecteur masquant dans le plan Ψ perpendiculaire à l'axe des luminances L :

$$\Delta L = 0 \Leftrightarrow \alpha \Delta R + \beta \Delta G + \gamma \Delta B = 0 \quad (3)$$

Les point satisfaisant ces deux contraintes sont donc localisés sur une ellipse (intersection de Γ et Ψ) dont l'axe principal représente un vecteur masquant. Cet axe principal est calculé en diagonalisant la matrice caractéristique B de la conique et en retenant le vecteur propre associé à la valeur propre la plus importante. Nous obtenons finalement $\mu_{Mask}(R, G, B) = x\mathbf{i} + y\mathbf{j} + z\mathbf{k}$ ou $[x, y, z]^T$ est un vecteur propre de B (cf FIG. 2).

4 Algorithme de tatouage utilisé et résultats obtenus

Afin d'évaluer l'intérêt d'utiliser une Transformation de Fourier Quaternionique perceptive nous avons choisi

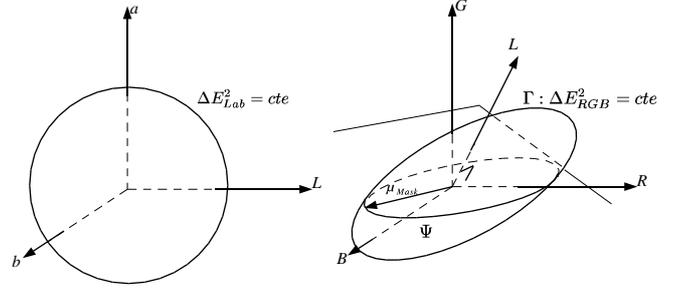


FIG. 2: Surfaces de dégradation uniforme dans les espaces Lab et RGB. Représentation géométrique du calcul du quaternion μ_{Mask}

d'insérer une signature dans la composante $QFT_{||r}$. Notre choix s'est porté sur un algorithme classique de tatouage substitutif de type QIM[2] permettant d'insérer une quantité d'information importante tout en garantissant une robustesse. L'insertion d'un message $b[n]$ s'effectue ici en quantifiant les coefficients $C = \Re(QFT_{||r}(1, 1))$ en utilisant l'algorithme suivant:

Insertion:

$$\begin{aligned}\text{Si } b[i] = 1 : C_w &= \Delta A \left(\frac{C + \Delta/4}{\Delta} \right) + \Delta/4 \\ \text{Si } b[i] = 0 : C_w &= \Delta A \left(\frac{C - \Delta/4}{\Delta} \right) - \Delta/4\end{aligned}$$

Detection:

Si

$$|C - \Delta A \left(\frac{C + \Delta/4}{\Delta} \right) + \Delta/4| < |C - \Delta A \left(\frac{C - \Delta/4}{\Delta} \right) - \Delta/4|$$

$$\Rightarrow b[i] = 1$$

Sinon

$$\Rightarrow b[i] = 0$$

où A est une fonction arrondissant à l'entier le plus proche.

Nous avons ensuite évalué la robustesse du schéma présenté face à des traitements classiquement utilisés en traitement d'image. Nous avons retenu la compression JPEG et un filtre passe-bas gaussien. Pour ces deux traitements le nombre de bits erronés à été évalué pour deux valeurs de μ : $\mu = \mu_{Mask}$ et $\mu = \mu_{Lum}$ en choisissant une erreur absolue moyenne qui soit égale. Nous avons préféré utiliser la EAM car la norme L^1 est plus fidèle visuellement sur des images 3-composantes. Les résultats sont présentés dans les tables 1 et 2.

EAM	5	10	20
$\mu = \mu_{Mask}$: Taux d'erreur(%)	15.30	8.54	3.39
$\mu = \mu_{Lum}$: Taux d'erreur(%)	29.32	20.7	13.25

TAB. 1: Taux d'erreur après filtrage gaussien.

Ces résultats soulignent deux propriétés importantes propres au tatouage dans le domaine QFT. D'un coté la table 1 montre que pour $\mu = \mu_{Mask}$ le schéma est d'avantage robuste aux opérations de filtrage sur la luminance que le schéma où $\mu = \mu_{Lum}$. Ceci vient du fait que la

EAM	5	10	20
$\mu = \mu_{Mask}$: Taux d'erreur(%)	22.58	2.39	0.0
$\mu = \mu_{Lum}$: Taux d'erreur(%)	0.14	0.0	0.0

TAB. 2: Taux d'erreur après compression JPEG (Facteur de qualité = 85%).

composante $QFT_{||I}(v, u)$ est orthogonale à l'axe des luminances. De l'autre coté la table 2 propose une comparaison inverse vis à vis de la compression JPEG. De tels résultats s'expliquent par le fait que le schéma de compression JPEG dissocie les composantes de luminance des composantes de chrominance et dégrade les composantes de chrominance par rapport aux composantes de luminance en utilisant des tables de quantification différentes et en sous-échantillonnant les composantes de chrominance. Néanmoins, comme il est montré sur la figure 3, pour un taux d'erreur équivalent, l'insertion perceptuelle est moins perceptible que l'insertion basée sur la luminance.



$I_W (\mu = \mu_{Lum})$ $I_W (\mu = \mu_{Perc})$
 JPEG= 80%, EAM= 4. JPEG= 80%, EAM= 15.3
 Taux d'erreur= 0.9% Taux d'erreur= 0.9%

FIG. 3: Evaluation de l'impact visuel pour une robustesse similaire par rapport à la compression JPEG avec un facteur de qualité de 80%.

5 Conclusion et perspectives

Ce résumé présente l'utilisation de la QFT dans le contexte du tatouage d'images couleur. Nous avons montré que cette transformation permet d'appréhender les images couleur sans avoir à utiliser une décomposition préalable et permet d'extraire des composantes perceptives fréquentielles de manière aisée. Néanmoins cette étude souligne également que l'utilisation d'un espace de masquage offre une robustesse moindre face aux techniques de compression qui cherchent à s'affranchir de ce type d'information. Nous travaux futurs vont donc se tourner vers un espace d'insertion offrant un compromis entre ses performances de masquage et sa robustesse à la compression.

6 Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier Mr David Alleyson du Laboratoire de Psychologie et NeuroCognition de Grenoble pour ses conseils sur l'utilisation des espaces couleur uniformes.

Références

- [1] P. Bas, B. Roue, and J-M Chassery. Tatouage d'images couleur additif: vers la sélection d'un espace d'insertion optimal. In *Coresa03*, Lyon, France, 2003.
- [2] B. Chen and G. W. Wornell. Quantization index modulation: A class of provably good methods for digital watermarking and information embedding. *IEEE Transactions on Information Theory*, 47(4):1423–1443, 2001.
- [3] T. Ell and S. Sangwine. Decomposition of 2d hypercomplex fourier transforms into pairs of complex fourier transforms. In *Proc. EUSIPCO*, volume II, pages 1061–1064, Tampere, Finland, Sept 2000.
- [4] C.J. Evans, S. Sangwine, and T. Ell. Colour-sensitive edge detection using hypercomplex filters. In *Proc. EUSIPCO*, volume I, pages 107–110, Tampere, Finland, Sept 2000.
- [5] C.J. Evans, S. Sangwine, and T. Ell. Hypercomplex color-sensitive smoothing filters. In *Proc. ICIP*, volume 1, pages 541–544, Sept 2000.
- [6] D. Fleet and D. Heeger. Embedding invisible information in color images. In *IEEE-ICIP'97*, volume 1, pages 532–535, Santa Barbara (Cal) Usa, 1997.
- [7] M. Kutter, F. Jordan, and F. Bossen. Digital signatures of color images using amplitude modulation. In *SPIE, EI97 Proceedings*, pages 518–526, San Jose, California USA, February 1997.
- [8] A. Parisi, P. Carré, and C. Fernandez-Maloigne. Watermarking et couleur: étude de différents espaces de représentation couleur. In *Coresa01*, Dijon, France, 2001.
- [9] A. Piva, M. Barni, F. Bartolini, and V. Cappelini. Exploiting the cross-correlation of rgb-channels for robust watermarking of color images. In *IEEE-ICIP'99*, volume I, pages 306–310, Kobe (Japan), October 1999.
- [10] S. Sangwine and T. Ell. Hypercomplex fourier transforms of color images. In *Proc. ICIP*, volume 1, pages 137–140, Thessaloniki, Greece, 2001.
- [11] G. Wyszecki and W. S. Stiles. *Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae*. John Wiley & Sons, 2000.