

基于圆锥曲面反射映射的彩色图像盲水印方法^{*}

李岩山^a, 曹文明^b

(深圳大学 a. ATR 国防科技重点实验室; b. 信息工程学院, 广东 深圳 518060)

摘 要: 讨论了 Clifford 代数中反射映射和旋转的性质和三维 Clifford 空间中彩色图像的 Clifford 傅里叶变换的特点,构造了彩色图像水印圆锥曲面,并证明了水印圆锥曲面应用于彩色图像水印的可行性;提出基于圆锥曲面反射映射的彩色图像盲水印方法,该方法运用简单直观的 Clifford 反射映射将水印信息嵌入到原始图像中,且水印提取不需要原始图像。实验结果显示,该方法能较好地抵抗多种滤波、加噪、旋转、剪切等攻击,是一种行之有效的彩色图像盲水印方法。

关键词: Clifford 代数; 彩色图像; 盲水印; 圆锥曲面; 反射映射

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2011)05-1894-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2011.05.085

Blind color image watermarking method based on conic surface and reflection

LI Yan-shan^a, CAO Wen-ming^b

(a. ATR National Key Lab. of Defense Technology, b. College of Information Engineering, Shenzhen University, Shenzhen Guangdong 518060, China)

Abstract: This paper introduced the properties of reflection and rotation in Clifford algebra and discussed some useful characteristics of the Clifford Fourier transform of the color image in 3D Clifford algebra space. In order to add watermark effectively, firstly structured a conic surface of the color image watermarking and proved the feasibility of using it to the color image watermarking. Then proposed the blind color image watermarking method based on the conic surface and reflection, which used the theory of the reflection in Clifford algebra to add the watermark to the color image, and got the watermark from the marked image without the original image. The result of the experiment shows the algorithm has good performance of the resistance to the attack of many filtering, noise, rotation and cutting, and is an effective method.

Key words: Clifford algebra; color image; blind watermark; conic surface; reflection

0 引言

近年来,随着多媒体技术的发展,对水印技术研究也由灰度图像转向彩色图像的水印嵌入和提取技术的研究。其原因在于彩色图像包含多通道信息,比灰度图像有更大的信息嵌入容量,而且更贴近实际的需要,彩色图像水印技术具有更好的实用性和发展空间。文献[1]将图像的 RGB 空间转换为 YIQ 空间,然后使用传统的 DCT 水印嵌入算法将水印信息嵌入到 Y 分量中;文献[2]利用小波变换将水印信息嵌入;文献[3,4]将彩色图像的每个通道进行处理,然后将水印信息按照一定的策略嵌入载体图像中,水印检测利用三个彩色通道的信息提取水印。

Clifford 代数将传统的欧几里德空间扩展到代数空间,运用代数运算进行几何空间中的运算,将标量、多维矢量纳入了一个统一的框架中进行计算。Clifford 代数为充分利用各维信息及其之间的关系提供了一种有效的方法。文献[5]用 Clifford 代数对传感器网络覆盖进行研究,取得了较好的效果;文献[6,7]用 Clifford 代数来进行图像处理取得了较好的效果,运用 Clifford 代数将具有多维信息的彩色图像信息用 Clifford 数来描述,然后进行分析和处理运算,可以有效地简化图像处理的运算,并能达到较好的效果;文献[8]运用 Clifford 傅里叶

变换,将水印信息嵌入到 CFT 系数中,取得了较好的效果。

本文在文献[8]的基础上运用 Clifford 代数知识对彩色图像的三维信息进行综合分析,利用彩色图像的多维信息,构造了一种基于 Clifford 代数圆锥曲面反射映射的彩色图像盲水印方法。本文阐述了 Clifford 代数及 Clifford 代数中反射映射(reflection)相关基本理论,引进了水印圆锥曲面的概念及条件,然后构造了用于彩色图像盲水印技术的圆锥曲面,并证明了将其用于水印技术的可行性,然后提出了一种彩色图像数字水印的嵌入和提取的方法。

1 Clifford 代数基础

1.1 三维的 Clifford 代数空间

设 V^n 是实数域上的 n 维向量空间,则在 V^n 上定义 Clifford 代数空间,即 $G_n = G(V^n)$ 。

三维空间中, G_3 的正交基由 8 级向量构成:

$$\alpha, \{\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3\}, \{\sigma_1 \wedge \sigma_2, \sigma_2 \wedge \sigma_3, \sigma_3 \wedge \sigma_1\}, \sigma_1 \wedge \sigma_2 \wedge \sigma_3 \quad (1)$$

其中: $\wedge$ 是 Clifford 外积; α 为标量; $\{\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3\}$ 可以看做 G_3 的三维向量空间的基向量 $\{x, y, z\}$; $\{\sigma_1 \wedge \sigma_2, \sigma_2 \wedge \sigma_3, \sigma_3 \wedge \sigma_1\}$ 则看做由向量空间张成的几何平面子空间,该子空间位

数同样是 3。由于 $\sigma_1 \wedge \sigma_2 \wedge \sigma_3$ 所构成的所有可能有向空间体之间呈线性比例关系,它对应一个一维的 G_3 子空间。由此可以看出, G_3 空间中的 Clifford 代数由一系列子空间代数运算组合而成(标量也可作为 0 维标量子空间),不依赖于固定坐标系。

将 $\sigma_1 \sigma_2 \sigma_3$ 记为 I ,则 $\sigma_1 \sigma_2 = I \sigma_3, \sigma_2 \sigma_3 = I \sigma_1$ 以及 $\sigma_3 \sigma_1 = I \sigma_2$,并满足

$$(\sigma_1 \sigma_2)^2 = (\sigma_2 \sigma_3)^2 = (\sigma_3 \sigma_1)^2 = -1 \tag{2}$$

1.2 G_3 空间中的反射和旋转

设任意矢量 $v, v' \in G_3$,任意子空间 $M \in G_3, v'$ 为 v 通过 M 的反射映射,记为 $v' = \text{ref}_M(v)$ 。其中, M 可以是 Clifford 代数空间中的任意子空间,包括矢量、面、体等。 v 的反射映射可以通过式(3)计算得到

$$v' = \text{ref}_M(v) = -\hat{M} v M^{-1} \tag{3}$$

其中: $\hat{M} = (-1)^g M, g$ 为 M 的阶。

在 Clifford 代数空间中,矢量 v' 是矢量 v 在平面 I 内旋转了 θ 后的向量,则记为 $v \mapsto v' = R v R^{-1}, R$ 称为旋量(rotor),且

$$R = \cos(\theta/2) - i \sin(\theta/2), i = \text{unit}(I) \tag{4}$$

根据欧拉公式可得

$$R = e^{(-i\theta/2)} \tag{5}$$

所以可得

$$v' = e^{(-i\theta/2)} v e^{(i\theta/2)} \tag{6}$$

由式(6)可以得到 v 的反射映射为

$$v' = v e^{(i\theta)} \tag{7}$$

2 水印嵌入与提取

2.1 图像的 CFT 变换的特点

在 G_3 空间中彩色图像可以表示为

$$f(x, y) = f_R(x, y) e_1 + f_G(x, y) e_2 + f_B(x, y) e_3 \tag{8}$$

其中: $f_R(x, y), f_G(x, y), f_B(x, y)$ 分别为一个 $f(x, y)$ 的 RGB 分量。其 Clifford 傅里叶变换可以表示为

$$F[f] = F_1 e_1 + F_2 e_2 + F_3 e_3 \tag{9}$$

记 $\text{GOU}^F = \{v_i | v_i = F_1 e_1 + F_2 e_2 + F_3 e_3, i = 1, 2, \dots, n\}$ 为 CFT 系数组成的 Clifford 数集合。

本文选择 Clifford 傅里叶变换的系数(CFT 系数 v_i)嵌入水印信息。图 1 为 Lena 图的 CFT 系数 GOU^F 在 G_3 空间中的分布情况,可以看到 CFT 系数密集分布于原点附近 0.5×10^3 的各个象限中,离原点越远,其密度越小,组成 CFT 系数的数量部分有正有负。

图 2 是将 Lena 图的模小于 0.5×10^3 的 CFT 系数置零,然后进行 Clifford 傅里叶反变换,得到的图像。从图中可以看出,它保留了原图的绝大部分信息,区别只在细节部分,因此可以利用模较大的 CFT 系数进行信息隐藏。

2.2 水印圆锥曲面

本文的水印嵌入方法主要是基于几何代数方法对图像的 CFT 变换后的系数进行分析,得出水印嵌入和提取的策略。通过实验发现图像的 CFT 系数分布于三维坐标系中的各个象限中,本文算法的实现需要一个曲面能有效区分有水印信息的矢

量和没有水印信息的矢量,而由该曲面构成的几何体能包络三维空间中的所有点。

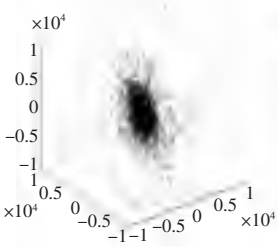


图 1 GOU^F 的分布图



图 2 CFT 系数的模大于 0.5×10^3 组成的图像

为了能对原始图像进行水印嵌入并在提取时不需要原始图像,本文构造了一个圆锥曲面,该曲面构造方法如下:

$\forall v \in G_3$,取矢量 $F = a_1 e_1 + a_2 e_2 + a_3 e_3, a_1, a_2, a_3$ 为有理数,作经过原点和 F 的直线 l ,以 l 为轴心、原点为圆锥顶点作圆锥曲面 S ,本文将它称为水印圆锥曲面。令 δ 是 F 到 S 的角度, Ω 为 S 包络的子空间。

定理 1 $\forall v \in G_3, S$ 是水印圆锥曲面, Ω 为 S 包络的子空间, δ 是 F 到临界曲面 S 的角度, $P = v \wedge F, m = P \cap S, v' = \text{ref}_m(v)$,当 $\frac{\pi}{6} \leq \delta \leq \frac{\pi}{2}, v \notin \Omega$ 时,有 $v' \in \Omega$;当 $\frac{\pi}{6} \leq \delta \leq \frac{\pi}{2}, v \in \Omega$,有 $v' \notin \Omega$ 。

证明 当 $v \notin \Omega$ 时, φ 是 v 到 m 的角度, θ 是 F 到 v 的角度, $0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$,要证明 $v' \in \Omega$ 只需证明

$$\varphi < 2\theta \tag{10}$$

$$\text{又} \quad \theta + \varphi < \frac{\pi}{2} \tag{11}$$

由式(10)(11)可得到

$$\frac{\pi}{6} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \tag{12}$$

所以在 $\frac{\pi}{6} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$ 的条件下,当 $v \notin \Omega$,有 $v' \in \Omega$,得证。同理可得,当 $v \in \Omega$,有 $v' \notin \Omega$ 。

2.3 水印嵌入

根据 2.1 节中构造的水印圆锥曲面和定理 1,进行数字图像的嵌入和提取。对一幅图像 f 有

$$f(x, y) = f_R(x, y) e_1 + f_G(x, y) e_2 + f_B(x, y) e_3$$

作平面 $P = (e_1 - e_2) \wedge (e_1 - e_3), l$ 为过 $F = a_1 e_1 + a_2 e_2 + a_3 e_3$ (本文取 $a_1 = a_2 = a_3 = 1$) 的直线,可得 $l \perp P$ 。

水印信息为二值序列 $W = \{w_i | i = 1, 2, 3, \dots, N\}$,水印嵌入步骤如下:

a) 将原始图像分成 $M \times M$ 的子块,对每个子块进行 CFT 变换,得到 CFT 系数集合 $V = \{v_i | v_i = F_1 e_1 + F_2 e_2 + F_3 e_3, i = 1, 2, \dots, M \times M\}$,对 V 中的每个向量按模的大小进行排序,并取前 N 个 v_i 。

b) 取水印序列 w_i, F 为 l 上的矢量, $P = v_i \wedge F, m = P \cap S, \varphi$ 是 v_i 到 m 的角度, δ 是 F 到 m 的角度, θ 是 F 到 v_i 的角度,可得

$$\theta = \arccos((\text{unit}(F \cdot v_i))(\frac{|\text{rej}_F v_i|}{|v_i|})) \tag{13}$$

其中: $\text{rej}_F v_i$ 是 v_i 到 F 上的投影。

$$\delta = \arccos((\text{unit}(F \cdot m))(\frac{|\text{rej}fm|}{|m|})) \quad (14)$$

$$\varphi = \delta - \theta \quad (15)$$

其中: $\text{unit}(F \cdot v_i)$ 用于确定 v_i 到 m 的角度是否大于 $\frac{\pi}{2}$, 如果 $\varphi > \frac{\pi}{2}$, 则 $F = -F$, 以使 $\varphi \leq \frac{\pi}{2}$ 。

如果 $w_i = 1$, 并且 $v_i \in \Omega$, 则水印嵌入程序不进行任何处理;

如果 $w_i = 1$, 并且 $v_i \notin \Omega$, 则将 v_i 反射映射到 Ω 内, 根据式 (7) 可得 $v'_i = v_i \times R, R = e^{-I(2(\theta-\delta))}, I = \text{unit}(F \wedge v_i)$;

如果 $w_i = 0$, 并且 $v_i \in \Omega$, 则将 v_i 反射映射到 Ω 外, 根据式 (7) 可得 $v'_i = R \times v_i, R = e^{-I(2(\theta-\delta))}, I = \text{unit}(F \wedge v_i)$;

如果 $w_i = 0$, 并且 $v_i \notin \Omega$, 则水印嵌入程序不进行任何处理。

c) 对 v'_i 序列进行 Clifford 傅里叶反变换 (ICFT), 并将 Clifford 数转变为图像的 RGB 值, 得到嵌有水印的图像, 即完成水印的嵌入过程。

2.4 水印提取

水印的提取步骤如下:

a) 将嵌有水印的图像分成 $M \times M$ 的子块, 对每个子块进行 CFT 变换, 得到 CFT 系数序列 $V' = \{v'_i | v'_i = F'_1e_1 + F'_2e_2 + F'_3e_3, i = 1, 2, \dots, M \times M\}$, 对 V' 中的每个向量按模的大小进行排序, 并取前 N 个 v'_i 。

b) 对于前 N 个 v'_i 进行如下判断:

如果 $v' \in \Omega$, 则 $w'_i = 1$;

如果 $v' \notin \Omega$, 则 $w'_i = 0$ 。

由 w'_i 组成的序列即为提取的水印信息。

3 实验结果

本文使用 $512 \times 512 \times 8$ 的彩色测试图像 (Lena、peppers、airplane) 为水印载体图像, 二值图像 64×64 为水印信息 (图 3), 对本文方法进行了数字水印嵌入和提取的实验, 同时, 也对文献 [1] 的算法进行模拟计算, 并将两种算法的实验结果进行比较。采用峰值信噪比 PSNR 和相关系数 NC 来衡量水印效果。相似度衡量采用如下定义:

$$S = \frac{\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y W(x,y) \oplus W(x,y)}{X \times Y} \quad (16)$$



图 3 彩色测试图像原图和水印原图

首先对彩色测试图像 (Lena、peppers、airplane) 的嵌有水印的图像进行各种攻击, 然后提取水印。图 4(b) 是在不进行攻击的条件下, 从嵌入水印的图像中提取出的水印。对嵌入水印的图像进行一系列攻击, 包括高斯低通滤波、椒盐加噪、旋转 5° 、JPEG 压缩 (压缩质量因子为 80%)、剪切攻击 (左上角剪去整图的 1/4) 以及缩放攻击等。图 4(a) 为嵌入水印的图像, 图 4(b) 为提取水印, 图 4(c) 为受到高斯低通滤波攻击后提取的水印, 图 4(d) 为椒盐加噪攻击后提取的水印, 图 4(e) 为受到

旋转攻击后提取的水印, 图 4(f) 为受到剪切左上角后提取出来的水印, 图 4(g) 为受到缩放攻击后提取的水印, 图 4(h) 为受到中值滤波攻击后提取的水印。从图 4 可以看出, 本文的方法具有较好的鲁棒性, 特别是对于滤波攻击、加噪攻击、剪切攻击、旋转攻击, 但是经过缩放后, 提取的水印具有较大的噪声。

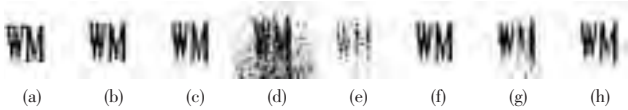


图 4 Lena 彩色图像的数字水印实验结果

然后用同样的攻击方法对文献 [4] 的水印嵌入算法的实验结果进行攻击, 结果如表 1 所示。从表中可以看出, 本文的算法比文献 [1] 的算法具有更好的性能, 尤其在抗几何攻击上具有非常好的鲁棒性, 文献 [1] 的方法在抗压缩攻击上具有非常好的鲁棒性。

表 1 两种方法的攻击测试结果 (Lena 图)

水印嵌入和提取方法	N C							
	高斯低通滤波攻击	椒盐加噪攻击	维纳滤波攻击	中值滤波攻击	压缩攻击	缩放攻击	旋转攻击	剪切攻击
	PSNR=40.2	PSNR=27.9	PSNR=40.9	PSNR=40.8	PSNR=35.0	PSNR=33.2	PSNR=15.9	PSNR=20.2
本文方法	0.86697	0.42929	0.82986	0.83754	0.1592	0.71166	0.5455	0.90708
文献[1]方法	0.6356	0.3593	0.3560	0.4479	0.9649	0.1302	0.0407	0.0321

4 结束语

本文提出一种运用 Clifford 代数进行彩色数字图像盲水印的提取和嵌入的方法, 该方法应用 Clifford 代数的反射映射和水印圆锥曲面, 综合利用图像的多维信息, 在彩色图像中嵌入隐藏信息。实验结果表明, 该方法具有能够满足水印算法的不可见性、可提取性和鲁棒性的要求, 能较好地抵御对图像的各种攻击, 具有几何方法的直观性, 具有较好的可扩展性和可优化性, 为彩色图像盲水印技术提供了一个新的发展方向。

参考文献:

[1] AHMIDI N,SAFABAKHSH R. A novel DCT-based approach for secure color image watermarking[C]//Proc of International Conference on Information Technology: Coding and Computing. 2004:709-713.

[2] 孙锐,孙洪,姚天任. 多通道的小波域彩色图像水印算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2003,15(8):992-997.

[3] NIKOLAIDIS N,PITAS I. Robust image watermarking in the spatial domain[J]. Signal Processing,1998,66(3):385-403.

[4] 胡裕峰,朱善安. 基于双混沌置乱和扩频调制的彩色图像盲水印算法[J]. 光学学报,2008,28(9):1691-1696.

[5] 谢维信,曹文明,蒙山. 基于 Clifford 代数的混合型传感器网络覆盖理论的研究[J]. 中国科学 E 辑:信息科学,2007,37(8):1018-1031.

[6] BATARD T,SAINT-JEAN C,BERTHIER M. A metric approach to nD images edge detection with Clifford algebras[J]. Journal of Mathematical Imaging and Vision,2009,33(3):296-312.

[7] LABUNTES V G. Clifford algebras as a unified language for multicolor image processing and pattern recognition[M]//Computational Non-commutative Algebra and Applications. [S. l.]: NATO Advanced Study Institute,2003:6-19.

[8] 李岩山. 基于 Clifford 代数的数字图像水印技术[J]. 电子学报,2008,36(5):852-855.