

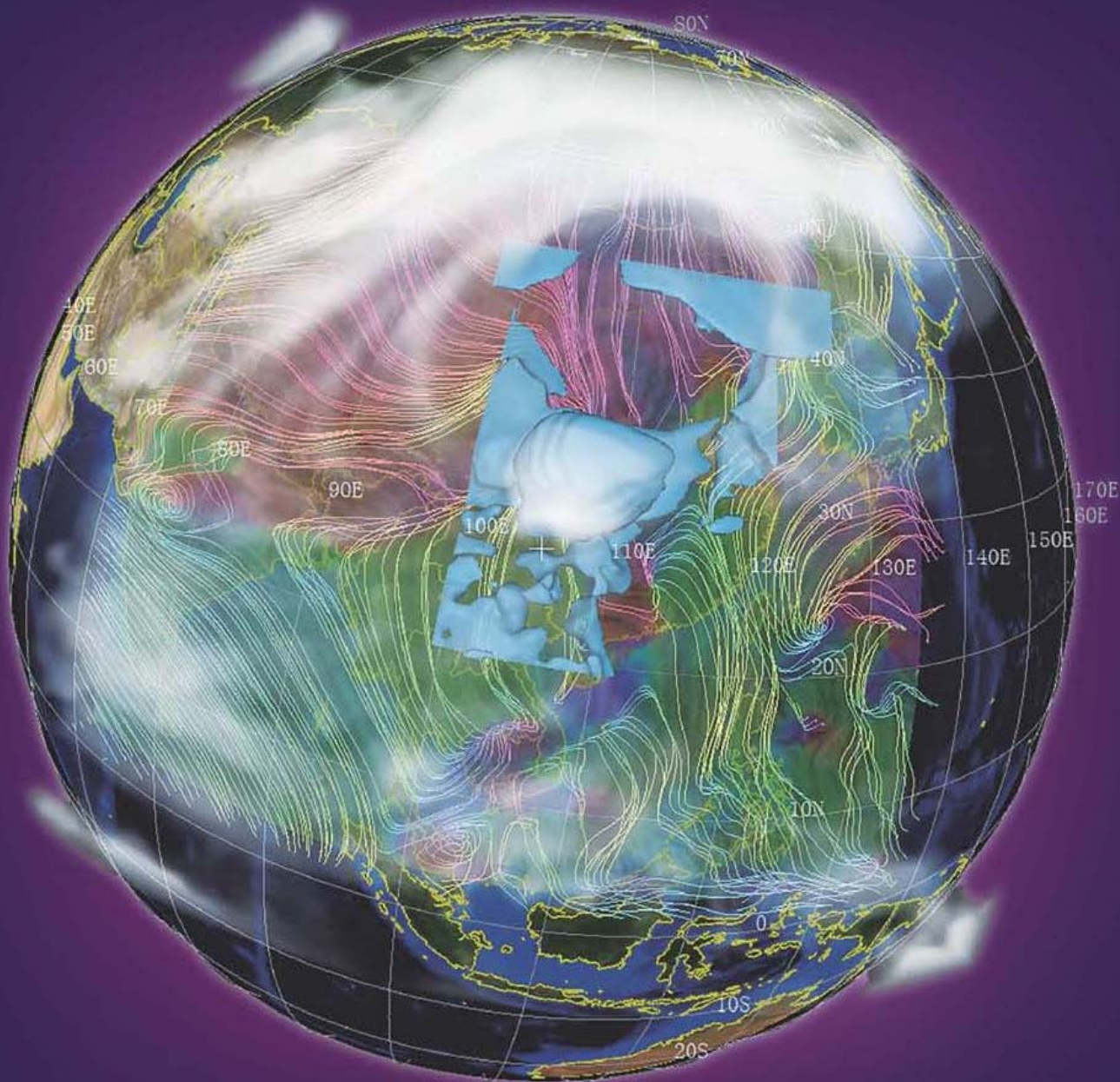


主办: 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

2015
05
VOL.20

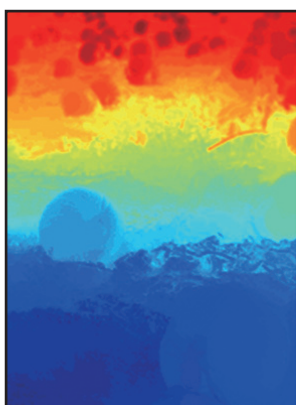
ISSN1006-8961
CN11-3758/TB



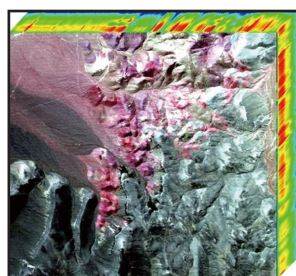
风场云场混合可视化



面向彩色增强图像的客观质量评价算法(第0643页)



使用柯西分布点扩散函数模型的单幅散焦图像深度恢复(第0708页)



基于蛙跳算法的离散粒子群优化端元提取(第0724页)

综述

中国图像工程: 2014

章毓晋 0585

图像分割中的超像素方法研究综述

宋熙煜, 周利莉, 李中国, 陈健, 曾磊, 闫钊 0599

图像处理和编码

结合通道共生和选择集成的彩色图像隐写分析

栗风永, 张新鹏 0609

复数基下的图像伪装算法

朱喜玲, 陈伟, 宋瑞霞, 齐东旭 0618

复杂自然环境下感兴趣区域检测

肖志涛, 王红, 张芳, 耿磊, 吴骏, 李月龙, 李峰 0625

结合调整差值变换的(K,N)有意义图像分存方案

欧阳显斌, 邵利平, 陈文鑫 0633

图像分析和识别

面向彩色增强图像的客观质量评价算法

李子印, 倪军 0643

基于局部模型匹配的几何活动轮廓跟踪

刘万军, 刘大千, 费博雯, 曲海成 0652

密集特征加权跟踪算法

罗会兰, 梅晶, 孔繁胜 0664

利用Kolmogorov-Smirnov统计的区域化图像分割

赵泉华, 张洪云, 李玉 0678

混合生成式和判别式模型的图像自动标注

李志欣, 施智平, 张灿龙, 王金艳 0687

基于协作表示残差融合的3维人脸识别

詹曙, 臧怀娟, 相桂芳 0700

图像理解和计算机视觉

使用柯西分布点扩散函数模型的单幅散焦图像深度恢复

明英, 蒋晶珏 0708

计算机图形学

用户驱动的微博可视化搜索

周霞娟, 汪飞, 金玲, 陈为, 王章野 0715

遥感图像处理

基于蛙跳算法的离散粒子群优化端元提取

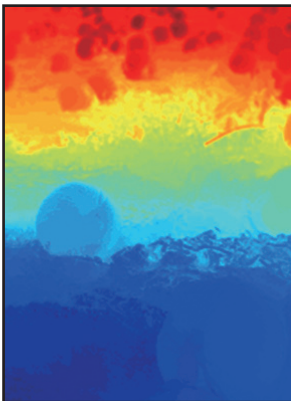
吴国伟, 赵艳玲, 王龙, 倪巍, 许立江, 冉艳艳 0724

CONTENTS

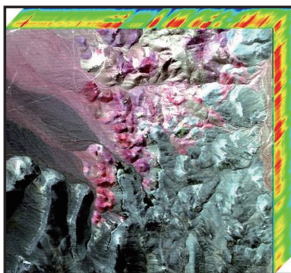
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Objective quality assessment
for enhanced chromatic
images(P0643)



Depth recovery from a single
defocused image using a
Cauchy-distribution-based
point spread function model
(P0708)



Discrete particle swarm
optimization endmember
extraction based on shuffled
frog leaping algorithm
(P0724)

Review

Image engineering in China: 2014 Zhang Yujin	0585
Review on superpixel methods in image segmentation Song Xiyu, Zhou Lili, Li Zhongguo, Chen Jian, Zeng Lei, Yan Bin	0599

Image Processing and Coding

Steganalysis for color images based on channel co-occurrence and selective ensemble Li Fengyong, Zhang Xinpeng	0609
Image disguise algorithm based on complex number base Zhu Xiling, Chen Wei, Song Ruixia, Qi Dongxu	0618
ROI detection under the complicated natural environment Xiao Zhitao, Wang Hong, Zhang Fang, Geng Lei, Wu Jun, Li Yuelong, Li Feng	0625
Meaningful (K, M) image sharing scheme combined with the adjusting difference transformation Ouyang Xianbin, Shao Liping, Chen Wenxin	0633

Image Analysis and Recognition

Objective quality assessment for enhanced chromatic images Li Ziyin, Ni Jun	0643
Geometric active contour tracking based on locally model matching Liu Wanjun, Liu Daqian, Fei Bowen, Qu Haicheng	0652
The dense feature-weighted object tracking Luo Huilan, Mei Jing, Kong Fansheng	0664
Regionalized image segmentation using Kolmogorov-Smirnov statistics Zhao Quanhua, Zhang Hongyun, Li Yu	0678
Hybrid generative/discriminative model for automatic image annotation Li Zhixin, Shi Zhiping, Zhang Canlong, Wang Jinyan	0687
Three dimensional face recognition by fused residual based on collaborative representation Zhan Shu, Zang Huaijuan, Xiang Guifang	0700

Image Understanding and Computer Vision

Depth recovery from a single defocused image using a Cauchy-distribution-based point spread function model Ming Ying, Jiang Jingjue	0708
--	------

Computer Graphics

User-driven visual micro-blog search Zhou Xiajuan, Wang Fei, Jin Ling, Chen Wei, Wang Zhangye	0715
--	------

Remote Sensing Image Processing

Discrete particle swarm optimization endmember extraction based on shuffled frog leaping algorithm Wu Guowei, Zhao Yanling, Wang Long, Ni Wei, Xu Lijiang, Ran Yanyan	0724
--	------

中图法分类号: 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2015)05-0618-07

论文引用格式: Zhu X L, Chen W, Song R X, Qi D X. Image disguise algorithm based on complex number base[J]. Journal of Image and Graphics, 2015, 20(5): 0618-0624. [朱喜玲, 陈伟, 宋瑞霞, 齐东旭. 复数基下的图像伪装算法[J]. 中国图象图形学报, 2015, 20(5): 0618-0624.] [DOI: 10.11834/jig.20150504]

复数基下的图像伪装算法

朱喜玲¹, 陈伟², 宋瑞霞¹, 齐东旭¹

1. 北方工业大学理学院, 北京 100041; 2. 江南大学数字媒体学院, 无锡 214122

摘要: 目的 图像的表达始终是图像处理领域的基础问题之一, 本文研究了数字图像表达为一个复数的方法, 进一步将这种表示方法应用于图像伪装。方法 在位值制记数法中, 取复数为基, 将数字图像在复数基下表达为一个高斯整数, 从而将图像与复平面上的点建立对应关系。这种数字图像表达方法, 能够将图像间的关系转化为复平面上点之间的关系, 从而借助几何学方法研究图像问题。据此实现了一种图像伪装算法。结果 该算法不仅可以伪装一幅图像, 还可以同时伪装多幅图像, 也可以进行一幅图像的多次伪装。结论 实验检测结果表明该伪装算法数值稳定, 在理想传输环境下可准确恢复图像, 如果传输过程中受到噪声污染, 也能较好地恢复保密图像。

关键词: 位值制记数法; 复数基; 数字图像表达; 图像伪装

Image disguise algorithm based on complex number base

Zhu Xiling¹, Chen Wei², Song Ruixia¹, Qi Dongxu¹

1. College of Sciences, North China University of Technology, Beijing 100144, China;

2. School of Digital Media, Jiangnan University, Wuxi 214122, China

Abstract: **Objective** Image representation has always been a basic problem in image processing. This paper studies the approach of a digital image expressed as a complex number. The new approach has been applied to image disguise, and the result is satisfying. **Method** A one-to-one correspondence established between an image and a point in a complex plane based on complex bases under positional number system notation. The relationships between different images can be converted into a plain vector operation, which helps image study using geometric method. Thus, a new image disguise method is realized. **Result** This image disguise algorithm can not only disguise one or many images, but also allows an image to be disguised many times. **Conclusion** Experimental results show that our method is numerically stable, can accurately restore secret images in an ideal transmission environment, and can restore secret images with some satisfaction even in a noisy transmission environment.

Key words: positional number system; complex number base; digital image representation; image disguise

收稿日期: 2014-12-10; 修回日期: 2015-01-14

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973) 基金项目(2011CB302400); 国家自然科学基金项目(61272026, 61272364, 61170320); 北京市自然科学基金重点项目暨北京市教委科技发展计划重点项目(KZ201210009011); 中央高校基本科研业务费专项资金(JUSRP11416)

第一作者简介: 朱喜玲(1989—), 女, 北方工业大学理学院数学专业在读硕士研究生, 研究方向为计算机图形学。E-mail: zhuxl@126.com

通信作者: 宋瑞霞, 教授, E-mail: songrx@ncut.edu.cn

Supported by: National Basic Research Program of China (2011CB302400); National Natural Science Foundation of China (61272026, 61272364, 61170320)

0 引言

数系,比如自然数、整数、有理数、实数、复数等在数学中始终扮演着最基本的角色,而如何表示数便是数学发展的根本问题之一。在漫长的人类文明进程中,记数法是数学研究的永恒课题。近代科学技术的进步特别是数字计算机出现,更使记数法研究显示出基本的重要性。位值制系统、基数系统和 β -展开系统等记数法的出现,都是为了对数进行表示^[1-4]。它们都是建立在某个基 B 和有限数字符号集 S 之上。人们最熟悉的十进制系统与二进制系统,它们的数字符号集分别是 $S = \{0, 1, 2, \dots, 9\}$ 和 $\{0, 1\}$,这时10与2分别称为十进制和二进制系统的基。还有研究者讨论了基为非整数情形下数的表示,比如,基于斐波那契数列,文献[2]讨论了以黄金比例 $(1 + \sqrt{5})/2$ 为基的情形。

位值制系统中的基不只限于正整数、负整数及非整数,复数也可以作为位值制系统中的基。可惜的是,迄今为止,只有少部分文献从数学理论方面研究了复数基^[1,5-6]。

在现代计算机及网络环境下,一切对象都以数字化的形式出现,将数字信息以复数基的形式进行表达,有许多特殊的现象和性质出现。文献[7]将复数基与分形结合起来,强调了两者的内在联系,文献[8-9]分别研究了复数基在工程图数字水印与图像分存中的应用,文献[10]利用复数基实现了一种中、英、日等多种文档的信息隐藏。这些新颖的方法与结果,表明复数基方法有重要的研究价值与应用潜力。

本文研究数字图像在复数基下的表达,给出图像与复数之间的相互转换算法,使得图像与复平面中的点建立一一对应关系,从而将不同图像之间的转化变成复平面中向量之间的运算关系,展现了用几何学方法研究图像的一个前景。本文将这种方法应用于图像伪装中,具体阐述了该方法在图像伪装应用中的有效性。

图像伪装是信息安全领域的一个重要分支,关于图像伪装的算法不少,文献[11]提出了基于数字图像三角形剖分的信息伪装算法,文献[12]提出了基于图像伪装的电子文档安全交换算法,文献[13]提出了一种基于图像插值方法的图像伪装算法,文

献[14]提出了利用线性变换的方法实现图像的伪装,这些算法都是在图像的像素表达下的研究,本文则是把图像转化为复平面上的点来进行研究,借助特定的数学变换实现图像的信息伪装。

1 复数基^[7]

在位值制记数法中,若选取复数为基,这时在基中出现虚数单位 $i = \sqrt{-1}$ 。设 x, y 为实整数,则称 $z = x + iy$ 为高斯整数。若选定复数基,用字母 b 表示,按照位值制记数法原则,高斯整数可写成 $z = \sum_{j=0}^k r_j b^j$,这时称 z 在复数基 b 下是可表示的。

在 z 的表示中,如果所有允许的 r_j 做成的集合形成模 b 的完全剩余类,便可以把整数基之下表示数的标准算法推广到复数基的情形^[5-6]。

当取 b 为复数的时候,势必同时要数字符号集合 S 做出某种规定。高斯早年已经证明,如果 ξ 与 η 互素,那么 $S = \{0, 1, 2, \dots, \xi^2 + \eta^2 - 1\}$ 形成了模 $b = \xi + i\eta$ 的完全剩余类。否则,若 ξ 和 η 有公因子,则模 $b = \xi + i\eta$ 的任何完全剩余类必定含有虚部非零的数。为了使在复数基 $b = \xi + i\eta$ 之下所能表示的高斯整数尽可能的多,自然应该要求 $\eta = \pm 1$,这是因为基 b 的所有幂 $(\xi + i\eta)^j$ 的虚部均可被 η 整除。这样一来,研究集中于 $b = \xi \pm i$ 的基,此时相应的数字符号集 $S = \{0, 1, 2, \dots, \xi^2\}$ 。

另一方面,基于数字计算机的特点,我们自然应该规定 $S = \{0, 1\}$,这就是说限定 $\xi, \eta = \pm 1$ 。于是可考虑的复数基仅有4个: $1 + i, 1 - i, -1 + i, -1 - i$ 。进一步,在上述4个复数基中,互相共轭的复数 $-1 + i$ 与 $-1 - i$ 是恰当基, $1 + i$ 与 $1 - i$ 是非恰当基。现在,将这4个基统一记作 $b = \xi + i\eta, \xi, \eta = \pm 1$ 。

2 复数基下的数字转换算法

讨论在给定复数基 $b = \xi + i\eta, \xi, \eta = \pm 1$ 的情形下,数字信息与高斯整数之间的相互转换算法。本节仅给出大致思想,理论细节可参见文献[7]。

2.1 高斯整数转换为数字信息

设高斯整数为 $P_0 + iQ_0$,其对应的0-1序列记为 $e_{N-1} \dots e_2 e_1 e_0$,为了确定 $\{e_j\}, j = 0, 1, \dots, N$,使得

$$P_0 + iQ_0 = e_N b^N + e_{N-1} b^{N-1} + \dots + e_0 b^0 \quad (1)$$

构造递推式的算法:首先把式(1)写成

$$P_0 + iQ_0 = (\xi + i\eta)(P_1 + iQ_1) + e_0 = \xi P_1 - \eta Q_1 + (\eta P_1 + \xi Q_1)i + e_0 \quad (2)$$

由此推得

$$\begin{aligned} P_0 &= \xi P_1 - \eta Q_1 + e_0 \\ Q_0 &= \eta P_1 + \xi Q_1 \end{aligned} \quad (3)$$

从而可得到递推关系

$$\begin{bmatrix} P_{k+1} \\ Q_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \xi & \eta & -\xi \\ -\eta & \xi & \eta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_k/2 \\ Q_k/2 \\ e_k/2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

为了保证 P_k, Q_k 都是整数,只需取 $e_k = |(P_k - Q_k) \bmod 2|$,即若 P_k, Q_k 的奇偶性相同,则取 $e_k = 0$;否则,取 $e_k = 1$ 。当 P_k, Q_k 同时为零时,迭代停止。由计算的结果,依序排列得到 $e_N e_{N-1} \cdots e_2 e_1 e_0$ 。

这样一来,当给定一个高斯整数 $P_0 + iQ_0$ 时,通过递推式(4),就可以得到它相应的在复数基 $b = \xi + i\eta$ 之下的 0-1 序列表达,即可以表示为一个数字信息。

2.2 数字信息转换为高斯整数

若已知一个数字信息的 0-1 序列 $e_N e_{N-1} \cdots e_2 e_1 e_0$,在复数基 $b = \xi + i\eta$ 下计算它代表哪一个高斯整数。

如果令 $(\xi + i\eta)^k = r_k + is_k$,那么,在这样的记法之下,当 $k=0$ 时,显然有 $r_0 = 1, s_0 = 0$ 。为了构造递推算式,令

$$(\xi + i\eta)^k = (\xi + i\eta)(r_{k-1} + is_{k-1}) = \xi r_{k-1} - \eta s_{k-1} + i(\eta r_{k-1} + \xi s_{k-1}) \quad (5)$$

由此得到

$$\begin{aligned} r_k &= \xi r_{k-1} - \eta s_{k-1} \\ s_k &= \eta r_{k-1} + \xi s_{k-1} \end{aligned} \quad (6)$$

从而得到递推关系

$$\begin{bmatrix} r_{k+1} \\ s_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \xi & -\eta \\ \eta & \xi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_k \\ s_k \end{bmatrix} \quad (7)$$

根据

$$P_0 + iQ_0 = e_N b^N + e_{N-1} b^{N-1} + \cdots + e_0 b^0 = e_N(r_N + is_N) + e_{N-1}(r_{N-1} + is_{N-1}) + \cdots + e_0$$

可得到

$$\begin{aligned} P_0 &= \sum_{j=0}^N e_j r_j \\ Q_0 &= \sum_{j=1}^N e_j s_j \end{aligned} \quad (8)$$

于是 $P_0 + iQ_0$ 就是在复数基 $b = \xi + i\eta$ 之下该 0-1 序

列对应的高斯整数,也就是说,对任意给定的 0-1 序列,在复平面上找到它对应的一个点。

综上所述,任何一个表达为 0-1 序列的数字信息均可以通过式(7)转化为复平面上的一个点;反之,复平面上任何一个高斯整数对应的点都可以通过式(4)转化为一个 0-1 码,即一个数字信息。

3 基于复数基的数字图像伪装

针对数字图像,给出基于复数基的图像伪装算法。以下,取复数基 $b = -1 + i$ 。

一般地,可以作如下定义:函数 $G(x):x \rightarrow N$ 为信息媒体(不限于数字图像)编码到 0-1 序列的变换函数, $G^{-1}(N):N \rightarrow x$ 为其逆变换;函数 $F_b(N):N \rightarrow (P, Q)$ 定义为 0-1 序列映射到复平面上点的过程, $F_b^{-1}(P, Q):(P, Q) \rightarrow N$ 为其逆变换。那么,复合函数 $T(x) = F_b(G(x):x \rightarrow (P, Q))$ 即为信息媒体编码到复数的变换。在本文中,信息媒体 x 特指数字图像。

首先,将灰度数字图像 A 从 2 维信号变换到 0-1 序列(若为彩色图像,可将 R、G、B 3 个分量分别处理),根据式(7)计算出该 0-1 序列对应的高斯整数 Z_1 ,即将图像 A 映射到复平面上的点 $Z_1 = (P_1, Q_1)$ 。同样地,对于另外一幅数字图像 B ,计算出它在复平面上的另一个点 $Z_2 = (P_2, Q_2)$ 。当对不同的数字图像,在复平面上分别找到它们各自对应点之后,原来的图像之间的关系就转换为复平面上点与点之间的关系。这样一来,平面几何学的许多知识将有助于我们建立这种具体的转换过程。

下面举一个简单的例子说明这一转化过程:如图 1 所示,在复数基 b 意义下,图像 $A(Z_1)$ 减去图像 $B(Z_2)$ 即为图 1 中的差向量 $Z' = Z_1 - Z_2$ 。

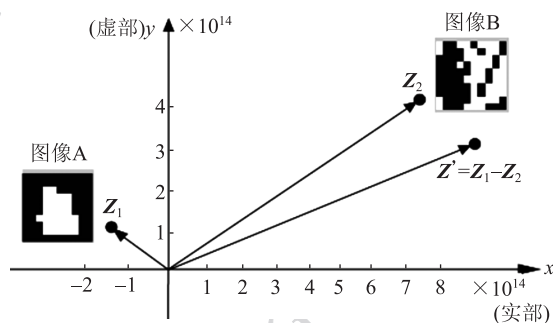


图 1 图像的复数基表达及伪装

Fig. 1 Image representations and disguise based on complex number system

假设图像 A 是需要保密的图像, 图像 B 是选取的任意一幅与其无关的图像。那么, 可以从公开的图像 B 中恢复出图像 A , 即 $Z_1 = Z_2 + Z'$, 这里 Z' 即为密钥。需要说明的是, 这里用的密钥 $Z' = Z_1 - Z_2$ 仅是举例。事实上, 由于平面上 3 个向量的关系表达方式是各种各样的, 所以密钥有多种选择的余地。

注意到复数基下能表示的, 不仅仅是高斯整数, 那么对复平面上点的几何处理将出现更多的灵活性。下面提出另一类算法:

设 $Z_0, Z_1, Z_2, \dots, Z_n$ 为复平面上的点, 它们分别对应数字图像 $A_0, A_1, A_2, \dots, A_n$ 。通过如下算法将 $\{Z_i\}, i=0, 1, \dots, n$ (从而对 $\{A_i\}$) 建立联系如图 2 所示, Z_0, Z_1, Z_2 之间有

$$Z_2 - Z_1 = \alpha_1 e^{i\theta_1} (Z_1 - Z_0) \quad (9)$$

式中, θ_1 为 $Z_1 - Z_0$ 转向 $Z_2 - Z_1$ 的角度, α_1 为旋转后的长度变化。一般说来, 有

$$Z_{k+1} = Z_k + \alpha_k e^{i\theta_k} (Z_k - Z_{k-1}) \quad (10)$$

$$k = 1, 2, \dots, n-1$$

以数据 $\alpha_k, \theta_k (k = n-1, n-2, \dots, 1)$ 为密钥, 根据式(10)可求得 Z_0 , 便可重构出相应的图像 A_0 ; 也可以假设图像 $A_0, A_1, \dots, A_{n-2}$ 都是保密图像, 经过这个伪装过程都可以同时恢复。这个过程说明图像可以经过多次伪装, 也说明可以一次伪装多幅图像。

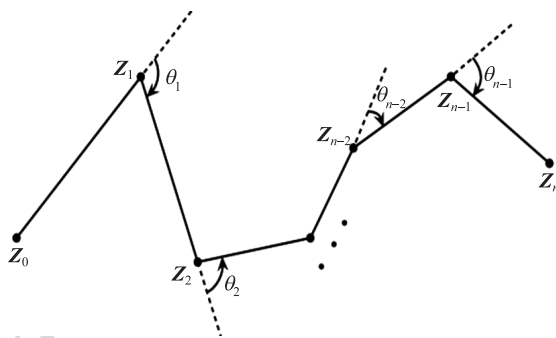


图2 复平面上点的关系

Fig. 2 The relationship among the points in the complex plane

4 实验

4.1 实验1 一幅图像对另一幅图像的伪装

图3(a)是一幅需要保密的图像(A), 不能公开, 大小为 384×512 ; 图3(b)是一幅不相干的图像(B), 可以公开, 大小为 677×450 。首先, 将两幅图像按从上到下, 从左到右的顺序写成 0-1 码序列, 显

然这个 0-1 码序列会非常长, 分别为

$$384 \times 512 \times 8 = 1\,572\,864$$

$$677 \times 450 \times 8 = 2\,437\,200$$

利用本文算法, 将图像 A 与图像 B 对应的 0-1 码分别以复数基 $b = -1 + i$ 表达, 结果分别对应两个高斯整数, 记为 Z_A, Z_B 。它们的实部与虚部都是大整数, 数量级分别为 $10^{236\,740}$ 和 $10^{366\,835}$, 将 $Z' = Z_A - Z_B$ 作为密钥, 那么, 通过公开的图 B 与密钥, 可以精确重构出图像 A , 从而实现了图像 B 对图像 A 的伪装。



(a) 待保密图像(384×512) A



(b) 公开图像(677×450) B

图3 图像伪装成另一幅图像

Fig. 3 An image is disguised as another image

实验1中数据量非常大, 需要处理大数运算, 如果把一幅大图像分割成若干幅小图像来处理, 则要处理的整数量级会小得多。

4.2 实验2 一幅图像伪装成多幅图像

如图4所示, 图4(a)是一幅尺寸为 108×108 的彩色保密图像, 将它分割成 9 幅大小为 36×36 的小图, 它们对应复平面上 9 个点 $Z_{A1} \sim Z_{A9}$; 图像 $B1 \sim B9$ 是与图像 A 不相关的 9 幅 36×36 的公开彩色图像, 它们对应复平面上 9 个点 $Z_{B1} \sim Z_{B9}$ 。构造密钥 $k_i = Z_{Ai} - Z_{Bi}$, 则利用公开图像 Bi , 可以恢复图像 Ai , 进而得到图像 A 。即利用这 9 幅公开的小图像, 实现了对图像 A 的伪装。相比实验1, 实验2中处理的 0-1 码长度和高斯整数的数量级都大大

减少。

4.3 实验3 一幅图像经过多次伪装

如图5所示,图像A、图像B是大小均为 219×340 的图像,它们分别对应复平面上的点 Z_0, Z_1 ,其中图像A为保密图像。根据式(10)生成复数 Z_2 与 Z_3 ,这里取 $\alpha_1 = \alpha_2 = 1, \theta_1 = \frac{\pi}{2}, \theta_2 = -\frac{\pi}{2}, Z_2$ 与 Z_3 对应的图像为图像C与图像D(看上去毫无意义)。可以根据公开图像C与D,用密钥 $\alpha_1 = \alpha_2 = 1, \theta_1 = \frac{\pi}{2}, \theta_2 = -\frac{\pi}{2}$ 先重构图像B,即

$$Z_{1\text{recovery}} = Z_2 - e^{\frac{\pi}{2}}(Z_3 - Z_2)$$

图像B并不是最终要恢复的保密图像,进一步经过算法

$$Z_{0\text{recovery}} = Z_{1\text{recovery}} - e^{-\frac{\pi}{2}}(Z_2 - Z_{1\text{recovery}})$$

重构图像A,这才是真正的保密图像。这个实验特点是保密图像经过两次伪装。



图4 一幅图像伪装成多幅图像

Fig. 4 An image is disguised as many images

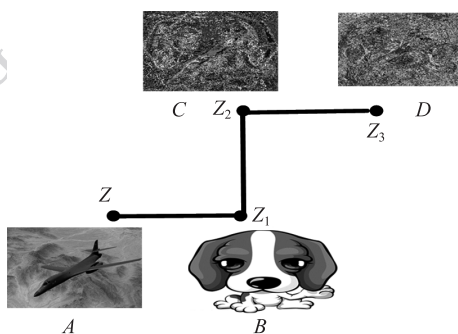


图5 多次伪装一幅图像

Fig. 5 An image is disguised for many times

4.4 实验4 同时伪装两幅图像

与实验3类似,如图6所示,图像A、图像B是

保密图像,大小均为 360×480 ,它们分别对应复平面上的点 Z_0, Z_1 ,图C是由 $Z_0 Z_1$ 旋转 $\theta_1 = \frac{\pi}{2}$ 生成,图D是由 $Z_0 Z_1$ 旋转 $\theta_2 = -\frac{\pi}{2}$ 生成,根据公开图像C与D,依密钥 $\alpha_1 = \alpha_2 = 1, \theta_1 = \frac{\pi}{2}, \theta_2 = -\frac{\pi}{2}$ 重构出保密图像A及B,此时的重构公式为

$$Z_{1\text{recovery}} = \frac{Z_2 + Z_3}{2}$$

$$Z_{0\text{recovery}} = Z_{1\text{recovery}} - e^{-\frac{\pi}{2}}(Z_3 - Z_{1\text{recovery}})$$

据此,精确重构了图像A与图像B。这个实验中两幅保密图像在同一个算法及密钥下被伪装和恢复。

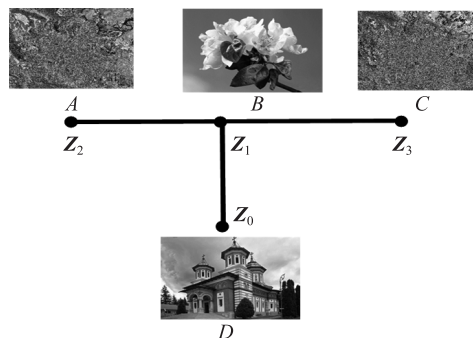


图6 同时伪装两幅保密图像

Fig. 6 Two images are disguised at the same time

上述实验结果表明,基于复数基的图像伪装算法实现起来简单,特别是算法编程只涉及整数运算使得计算过程是数值稳定的,因而保证了信息重构的精确性。但是如果图像在传输过程中受到噪声污染,则保密图像的恢复质量也将受到影响。

4.5 实验5 公开图像受到噪声影响

如图7,A是公开图像,C是保密图像,假设图像A在传输过程中受到噪声污染如图像B,由图像B得到恢复图像D,一般来说D也会带有噪声。本实验中,图B是在图A中加入噪声密度为0.01的椒盐噪声后得到的图像,D是恢复的保密图像。可见,如果公开图像受到噪声污染,恢复的图像质量会受到影响,在不要求精确图像的情况下,基本上可以满足需求,图像清晰度较好。

4.6 实验6 运行时间比较

文献[14]中提出对于两幅图像A和B,利用

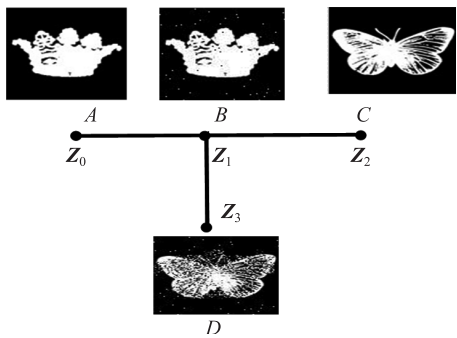


图 7 由噪声图像恢复保密图像

Fig. 7 Recovery secret image using the noised image

线性变换关系 $C = (B - A) \times t + A$ 可得到中间图像 C , 利用图像 B 、 C 和 t 的值可恢复保密图像 A 。将本文算法与文献[14]进行运行时间的比较, 实验结果如表 1 所示。本文编码时间较长, 但解码时间较短, 从效率上来说相差无几。但从算法上比较, 文献[14]需要两幅公开图像, 且中间图像包含保密图像的轮廓, 密钥也过于简单(只是一个 t 值), 很容易破解; 而本文算法的公开图像视觉上没有保密图像的信息, 而且密钥相对复杂不容易破解。

表 1 与文献[14]运行时间的对比
Table 1 Time comparison with the reference[14]

	公开图像	恢复的保密图像	编码时间/s	解码时间/s
文献[14]			0.036	0.982
本文算法			0.390	0.918

5 结 论

从位值制记数法的思想出发, 取复数为基表达数字图像, 探讨了将数字图像映射到复平面上一个点的算法, 从而将不同图像之间的关系转化为复平面上点的关系。这种思想有助于将经典的几何学方法引入到图像处理领域。据此, 实现了一种数字图像伪装算法, 并通过实验验证了算法的有效性。本文算法简单, 虽然当图像很大时, 会涉及大数运算, 但由于算法编程只涉及整数运算, 因此计算过程是数值稳定的, 保证了信息重构的精确性。本文算法安全性高, 既可以一幅图像伪装成多幅图像, 也可以一次伪装多幅图像, 还可以一幅图像经过多次伪装。本文还通过实验分析了当公开图像受到噪声污染时, 恢复图像会受到影响, 如果精度不要求很高, 依然可以满足要求。但是本文算法对剪切攻击比较敏感, 所以公开图像在传输过程中要完整。

不难看出, 凡是能够表示成 0-1 序列的其他类型的信息, 都可以作类似的研究。因此, 复数基方法有重要的研究价值与应用潜力。

参考文献 (References)

[1] Knuth D E. The Art of Computer Programming[M] // Seminumerical Algorithms. Massachusetts, America: Addison-Wesley, 1969.

[2] Bergman G. A number system with an irrational base[J]. Math Magazine, 1957, 31(2):98-110. [DOI:10.2307/3029218]

[3] Wu W J. Theorem Proving by Machine and Its Application[M]. Changsha: Hunan Science Technology Press, 1999. [吴文俊. 王者之路——机器证明及其应用[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1999.]

[4] Parry W. On the β -expansions of real numbers[J]. Acta Math. Acad. Sci. Hung, 1960, 11: 401-416. [DOI: 10.1007/BF02020954.]

[5] Katai I, Szabo J. Canonical number system for complex integers[J]. Acta Sci. Math, 1975, 37(3):255-260.

[6] Gilbert W J. Fractal geometry derived from complex bases[J]. Mathematical Intelligence, 1982, 4(2):78-86.

[7] Qi D X. Fractal and Computer Generating[M]. Beijing: Science Press, 1994:76-83. [齐东旭. 分形及其计算机生成[M]. 北京: 科学出版社, 1994:76-83.]

[8] Sun W, Qi D X. Complex number system based algorithm for engineering graph digital watermarking[J]. Journal of Image and Graphics, 2003, 8(spe):626-630. [孙伟, 齐东旭. 基于复数系的工程图数字水印算法[J]. 中国图象图形学报, 2003, 8(特

- 刊):626-630.]
- [9] Sun W, Yang Z H, Qi D X. The conversion method from image to complex number and its application in image secret sharing [J]. Journal of Image and Graphics, 2004, 9 (11): 1331-1335. [孙伟, 杨志华, 齐东旭. 图像的复数表示及其在图像秘密分存中的应用 [J]. 中国图象图形学报, 2004, 9 (11): 1331-1335.] [DOI: 10. 11834/jig. 2004011256]
- [10] Song R X, Huang J, Sun W, et al. Coding based on complex number system and its application for information disguise [C] // Chinagraph' 2004. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2004: 324-327. [宋瑞霞, 黄静, 孙伟, 等. 复数基系统下的编码及其在信息伪装中的应用 [C] // 第五届中国计算机图形学大会论文集. 西安: 西北工业大学出版社, 2004: 324-327.]
- [11] Yu J D, Song R X, Qi D X. A scheme for steganography based on triangular partition of digital images [J]. Journal of Computer Research and Development, 2009, 46 (9): 1432-1437. [余建德, 宋瑞霞, 齐东旭. 基于数字图像三角剖分的信息伪装算法 [J]. 计算机研究与发展, 2009, 46 (9): 1432-1437.]
- [12] Gao G Y, Li X W. Secure electronic document interchange arithmetic based on image disguise [J]. Computer Engineering, 2008, 34 (21): 147-149. [高光勇, 黎新伍. 基于图像伪装的电子文档安全交换算法 [J]. 计算机工程, 2008, 34 (21): 147-149.]
- [13] Wang S, Li Q, Yang B, et al. A novel and secure image interpolation methods for image disguise [C] // Proceedings of 6th International conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing. Darmstadt Germany: IEEE Computer Society Press, 2010: 482-485. [DOI: 10. 1109/IIHMS. 2010. 123]
- [14] Su W J. Disguise and recovery experiments of digital image information based on Matlab [J]. Automation & Instrumentation, 2013, 4: 191-195. [宿维军. 基于 Matlab 的数字图像信息的伪装与恢复实验 [J]. 自动化与仪器仪表, 2013, 4: 191-195.]