

# 基于空间-色度多维向量模糊量化的彩色图象压缩

孙 薇 张艳霞 何永保

(复旦大学计算机科学系, 上海 200433)

**摘 要** 在 Fuzzy k-means 算法的基础上, 考虑到真实图象中的色度信息与空间相关性, 提出了空间-色度复合的多维向量模糊聚类量化方法。它能有效地压缩彩色图象信息, 量化失真小, 并在不使图象边缘钝化的条件下去除图象的高频噪声。该方法在彩色图象处理的实验中取得了良好的效果。

**关键词** 彩色图象压缩 向量量化 模糊聚类 空间-色度多维向量

## 0 引 言

随着多媒体技术的发展和全球互连网络的兴起, 图象通信包括图象传输与图象显示变得日益重要。在计算机中, 彩色图象的每个象素一般是由红、绿、蓝3个字节(共24比特)组成, 最多可表示 $2^{24}$  (= 16 777 216) 种颜色。通常一幅彩色图象含有上万种颜色, 这对传输带宽和图象显示设备提出了过高的要求, 因此我们必须对图象进行压缩。

彩色图象压缩主要是压缩颜色信息, 就是设法从原图中提取几种或十几种主要的颜色重构原图象。基于 RGB 三维直方图的统计聚类方法是常用的一种分色压缩方法, 但由于它是从灰度图象的一维直方图门限分割方法发展而来, 对于处理多维数据有很大的局限性, 例如统计直方图所需存储空间太大, 直方图门限确定困难等。近年来, 模糊聚类方法被应用于彩色图象处理, 它避免了直方图的门限求取, 且克服了精确聚类算法容易收敛于局部极小值的缺点, 但它仍是仅限于三维色度空间的聚类, 没有考虑象素间的空间相关性。马尔可夫场方法从概率统计的角度将空间相关性与色度结合起来, 在数据压缩的同时, 保持了较好的图象质量。但是一般采用的一阶马尔可夫链模型只考虑了相邻象素之间的作

用, 而考虑更多象素相互作用的高阶马尔可夫链则计算复杂。另外, 如何去除真实图象中的高频噪声也是图象压缩的一个重要问题。传统的平滑方法虽能达到一定的去噪目的, 但不可避免地造成了图象边缘的钝化, 尤其是对彩色图象, 平滑将导致颜色的畸变, 因此需要寻找新的解决途径。

本文提出的基于多维向量模糊量化的压缩方法, 引入空间信息与色度信息复合的多维向量, 并利用了模糊聚类算法的优点, 能有效地压缩彩色图象信息, 并解决了去除高频噪声与避免图象边缘钝化和颜色畸变的矛盾, 在彩色图象处理的实验中取得了令人满意的效果。

## 1 多维向量模糊量化的彩色图象压缩方法

本文在 Fuzzy k-means 算法<sup>[1]</sup>的基础上, 采用空间-色度复合的多维向量模糊聚类的量化方法实现彩色图象压缩。设彩色图象包含  $M$  个象素, 每个象素用复合信息向量  $X_i = (x_i, y_i, R_i, G_i, B_i)^T$  ( $i = 1, 2, \dots, M$ ) 表示, 其  $(x_i, y_i)$  中为该象素在图象平面的空间坐标,  $R_i, G_i, B_i$  分别为该象素的 RGB 颜色分

• 本研究得到国家自然科学基金项目(No. 69475016)资助。

收稿日期: 1997-07-07; 收到修改稿日期: 1998-09-14

量。给定颜色类数  $k$ , 则像素  $X_i$  对第  $j(j=1, 2, \dots, k)$  类的隶属程度可通过隶属函数  $\mu_j(X_i)$  计算得到。

### 1.1 隶属函数的确定

隶属函数必须满足约束条件:

$$\begin{cases} \mu_j(X_i) \in [0, 1] \\ 0 < \sum_{i=1}^M \mu_j(X_i) < M, \forall j=1, 2, \dots, k \\ \sum_{j=1}^k \mu_j(X_i) = 1, \forall i=1, 2, \dots, M \end{cases} \quad (1)$$

由于 Fuzzy k-means 算法的隶属函数形式复杂, 计算量大, 本文根据上述约束条件提出一种简化形式:

$$\mu_j(X_i) = \frac{1}{\sum_{C_l \in I_i(v)} d^2(X_i, C_l)} \quad (2)$$

$C_j(j=1, 2, \dots, k)$  其中表示第  $j$  类的复合中心向量,  $I_i(v)$  表示第  $v$  次迭代后以像素向量  $X_i$  为中心的多维超面所包含的复合中心向量集,  $d^2(X_i, C_j)$  表示  $X_i$  与  $C_j$  的复合距离:

$$d^2(X_i, C_j) = (X_i - C_j)^T A (X_i - C_j) \quad (3)$$

$A$  是一个  $5 \times 5$  的常系数矩阵, 由于复合信息向量的5个分量之间相关性较小,  $A$  基本上可用一个对角矩阵代替。当  $a_{11} = a_{22} = 1, a_{33} = a_{44} = a_{55} = 0$  时, 本方法即降解为单纯的二维图象平面上的空间聚类; 当  $a_{11} = a_{22} = 0, a_{33}, a_{44}, a_{55} > 0$  时, 本方法即是单纯的三维色度空间聚类。当这5个参数皆大于0时, 即成为多维复合向量的聚类方法, 这就是本文的主要特点。

### 1.2 模糊聚类的迭代过程

设第  $v$  次迭代后的中心向量为  $C_j^{(v)}$ , 根据式(2)计算象素向量  $X_i(i=1, 2, \dots, M)$  与以  $X_i$  为中心的超面内的  $C_j^{(v)}$  的隶属函数  $\mu_j(X_i)$ , 于是中心向量更新为

$$C_j^{(v+1)} = \frac{\sum_{i=1}^M \mu_j(X_i)^m X_i}{\sum_{i=1}^M \mu_j(X_i)^m} \quad (4)$$

其中模糊指数  $m$  的范围为  $0 < m < \infty$ , 其大小决定了超面的陡度,  $m$  越大, 超面越陡。在更新中心向量的同时,  $X_i(i=1, 2, \dots, M)$  的超面收缩, 这一收缩过程可采用平均复合距离门限方法实现。我们定义平均复合距离:

$$\bar{d}^2(X_i) = \frac{1}{N(I_i(v))} \sum_{C_j \in I_i(v)} d^2(X_i, C_j) \quad (5)$$

其中  $N(I_i(v))$  表示  $I_i(v)$  所包含的中心向量数。以  $\bar{d}^2(X_i)$  为门限, 则第  $v+1$  次迭代后的中心向量集为

$$I_i(v+1) = \{C_j \in I_i(v) : d^2(X_i, C_j) \leq \bar{d}^2(X_i)\} \quad (6)$$

当超面收缩至只包含一个中心向量(设为  $C_{j^*}$ ) 时, 则  $\mu_{j^*}(X_i) = 1, \mu_j(X_i) = 0(j \neq j^*)$ 。若对  $\forall i, N(I_i(v)) = 1$ , 则模糊聚类过渡为精确聚类。

为了综合评价压缩后的图象质量, 包括存储空间需求量和图象失真, 我们可以定义代价函数:

$$E = \alpha \log_2 k + \beta D \quad (7)$$

其中  $k$  即压缩后的颜色类数,  $D$  为 LBG 算法<sup>[2]</sup> 中向量量化的平均失真, 在这里表示图象的平均复合失真, 其定义如下:

$$D = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M d_{\min}^2(X_i) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \min_j d^2(X_i, C_j) \quad (8)$$

当代价函数  $E$  趋于最小时, 图象压缩取得最佳结果。一般  $k$  是预先给定的, 所以只需考虑平均复合失真  $D$ 。我们采用 Karayiannis 的方法<sup>[3]</sup>, 当聚类迭代至  $[D(v) - D(v+1)]/D(v) < \epsilon$  ( $\epsilon$  为预先设定的很小的正数) 时, 聚类结束。

### 1.3 中心向量的初始化

本文采用有约束的随机初始化代替完全的随机初始化, 有利于提高聚类速度并减小陷入局部极小的可能性。设门限  $\theta_1$  和  $\theta_2$ , 初始化时必须满足任意2个中心向量的复合距离都大于  $\theta_1$ ; 在聚类过程中若某一中心向量的零阶矩  $\sum_{i=1}^M \mu_j(X_i)^m$  小于  $\theta_2$ , 则对该中心向量进行再初始化。

## 2 实验结果与分析

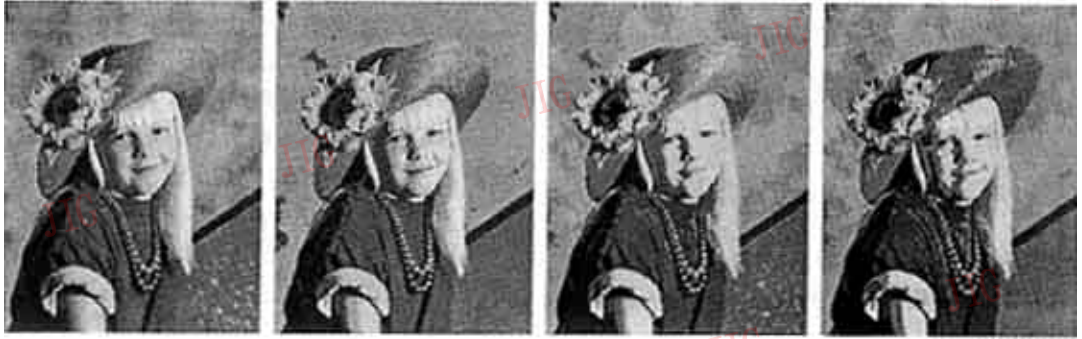
本算法中  $k$  表示压缩后的颜色类数, 决定颜色压缩比的大小。 $k$  值越大, 则图象压缩的失真越小, 但颜色压缩比降低; 而减小  $k$  值, 提高压缩比, 又会增大图象的失真。本算法取  $k = 2^3 = 8$ , 在压缩比较高的条件下保证较小的失真, 同时也便于压缩后图象的二进编码。失真门限  $\epsilon$  的选择也会影响算法的速度和失真的大小。 $\epsilon$  越大, 失真越小, 但迭代次数较高。实验表明,  $\epsilon < 10^{-3}$  时, 图象压缩的结果基本不受  $\epsilon$  取值的影响, 因此本文取  $\epsilon = 0.0001$ , 对这幅24位真彩色“肖像”图象进行压缩处理。

### 2.1 图象压缩结果

“肖像”的图象大小为  $200 \times 256$ , 即象素数

$M=51200$ ,原图含36004种颜色。压缩为8种颜色,颜色压缩比为4500,见图1。[注:由于打印设备所限,本文彩色图象以灰度图象显示]。其中,图1(b)各

主要部分皆能聚类于相近的颜色,并能抑制高频噪声;而图1(c)中有部分细节损失,且未能去除噪声;图1(d)失真较大。



(a)原图象:“肖像”  
( $M=51200,36004$ 色)  
(b)采用空间-色度多维  
向量压缩后的图象(8色)  
(c)单纯色度空间压缩后的  
图象(8色)  
(d)采用完全随机初始化  
压缩后的图象(8色)

图1 图象压缩结果示例( $k=8, \epsilon=0.0001$ )

### 2.2 模糊指数 $m$ 对图象压缩结果的影响

模糊指数  $m$  决定了超面的陡度。取  $m=0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8$ , 比较压缩处理结果。实验表明:当  $m < 1$  即超面平坦时,失真  $D$  较大;当即超面陡峭时,  $D$  较小。当  $m$  取值大于1时,效果就基本令人满意。表1列出了模糊指数  $m$  与迭代次数  $v$  及平均复合失真  $D$  的关系。

表1 模糊指数  $m$  与迭代次数  $v$  及平均复合失真  $D$  的关系( $k=8, \epsilon=0.0001$ )

| $m$  | 肖像( $\theta_1=1000$ ) |         |
|------|-----------------------|---------|
|      | $v$                   | $D$     |
| 0.25 | 7                     | 1252.15 |
| 0.5  | 7                     | 1166.50 |
| 1    | 7                     | 1014.79 |
| 2    | 7                     | 911.75  |
| 4    | 7                     | 897.90  |
| 8    | 7                     | 978.72  |

### 2.3 初始化方式对图象压缩结果的影响

取  $m=2$ , 比较  $\theta_1 \neq 0$  (即有约束的随机初始化) 和  $\theta_1=0$  (即完全的随机初始化) 的处理结果。从表2 可以看到:采用有约束的随机初始化时失真  $D$  较小。

表2 各种处理结果的比较

| 肖像    |       | $\theta_1$ | $D$     |
|-------|-------|------------|---------|
| 初始化方化 | 有约束随机 | 1000       | 911.75  |
|       | 完全随机  | 0          | 1422.47 |
| 量化方式  | 模糊量化  | 1000       | 911.75  |
|       | 精确量化  | 1000       | 1879.53 |

门限  $\theta_1$  的适当选择决定于被处理图象的统计特性。以“肖像”的压缩处理为例, 给定  $m=2$ , 取  $\theta_1=0, 100, 1000, 5000, 10000$ , 比较失真  $D$ , 发现:随着  $\theta_1$  的增大,  $D$  逐渐减小(图表略)。但  $\theta_1$  不能取得过大, 否则算法将不能找到  $k$  个满足初始化条件的中心向量。

### 2.4 模糊量化与精确量化的处理结果比较

在一定的条件下, 采用 k-means 算法对“肖像”作精确聚类的量化处理并与本文方法进行比较。从表2可见:精确聚类量化失真严重。

### 2.5 多维向量模糊量化与平滑方法的去噪效果比较

采用  $3 \times 3, 5 \times 5, 7 \times 7$  的模板对原图象作平滑处理, 结果表明:采用  $3 \times 3$  和  $5 \times 5$  的模板时噪声仍明显可见, 采用  $7 \times 7$  模板时噪声被基本去除, 但此时图象清晰度大大降低, 边缘信息损失严重, 且出现颜色畸变现象(图略)。而采用多维向量模糊量化处理后, 图

象噪声被完全去除,且图象清晰度不受影响。

### 3 讨 论

多维复合向量模糊量化的彩色图象压缩方法采用空间-色度复合距离计算隶属函数,并将平均复合失真用于图象的综合评价中,这种方法融合了色度信息和空间相关性,有利于去除图象区域内的噪声,而它对图象边缘却不起钝化作用,不会造成颜色的畸变,故此优于低通平滑去噪方法。

局部极小一直是传统聚类方法的一个重要问题。传统聚类采用0-1精确判决,极易收敛于局部极小值,且处理结果对初始化有很大的依赖性。本文利用模糊聚类的优点,按隶属度大小进行模糊判决,使所有待分类向量都能参与类中心向量的生成,削弱了初始化对量化结果的影响。同时,本文采用有约束的随机初始化,而不是完全的随机初始化,进一步降低了局部极小的出现概率。

合理选择隶属函数是模糊聚类的一个关键。Karayiannis 于1995年在灰度图象压缩编码工作中,考虑到隶属函数随距离增大而单调递减的特性提出了一种简单的形式<sup>[3]</sup>,即

$$\mu_j(X_i) = 1 - \frac{d^2(X_i, C_j)}{d_{\max}^2(X_i)} \quad (9)$$

其中  $d_{\max}^2(X_i) = \max_{C_j \in I_i(\omega)} d^2(X_i, C_j)$ 。但是该形式不

满足归一化的约束条件,容易产生虚假的高隶属度或低隶属度,使中心向量的更新发生偏差;另外,它对象素向量作分类判决时排除了距离最大的中心向量的参与,使超面收缩过快,导致量化失真较大。本文提出式(2)的隶属函数符合归一化条件,形式简单,计算量小,能取得很好的处理效果。

本方法特别适用于含大面积连通区域图象的压缩处理。若图象的区域连通性较差,则可增加对同色像素作空间分割的过程,进而采用分裂-合并算法对  $k$  值作调整,这有待于进一步探索工作。

### 参 考 文 献

- 1 Bezdek C. Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithm, New York: Plenum, 1981.
- 2 Linde, Buzo A, Gray R M. An Algorithm for Vector Quantizer Design. IEEE Trans. Commun., 1980, 28: 84~95.
- 3 Karayiannis B, Pai P. Fuzzy Vector Quantization Algorithms and Their Application in Image Compression. IEEE Trans. Image Processing, 1995, 4(9): 1193~1201.



孙 薇 复旦大学计算机科学系计算机应用专业硕士,1995年获上海交通大学电子工程系学士学位,主要研究方向为图象处理、模式识别和人工智能。



张艳霞 复旦大学计算机科学系计算机应用专业研究生,主要研究方向为神经网络、模式识别和计算智能。



何永保 复旦大学计算机科学系教授,主要从事人工智能与模式识别、神经网络理论与应用、智能控制等方面的研究。

## Color Image Compression by Fuzzy Quantization of Multidimensional Vectors

Sun Wei, Zhang Yanxia, He Yongbao

(Department of Computer Science, Fudan University, Shanghai 200433)

**Abstract** A fuzzy quantizer of multidimensional vectors for color image compression is proposed. It exploits the spatial redundancy as well as the chromatic information by defining the membership function with spatial-chromatic combined vectors. As its hypersphere determined by the membership function shrinks, each vector, which is assigned to multiple clusters in the early stages of iteration, falls in one cluster. The initial codebook is generated by a constrained random initialization to help

avoid the local minimum. Experiment results demonstrated that this approach of spatial-chromatic vector quantization can achieve high compression efficiency. The results also revealed that the method is capable of diminishing noise without blurring edges in the image.

**Keywords** Color image compression, Vector quantization, Fuzzy clustering, Spatial-chromatic multidimensional vector

## 首届全国电脑动画设计和制作大赛

“首届全国电脑动画设计和制作大赛”是经原电子部计算机司批准,由中国计算机用户协会、中国电视艺术家协会、中央电视台、中国计算机报社联合主办的首届全国性电脑与艺术的综合赛事。

“首届人全国电脑动画设计和制作大赛”坚持邓小平的科学技术是第一生产力的理论;坚持党的“十五大”提出的“科教兴国”的方针;坚持以江泽民总书记的指示“以科学的理论武装人,以正确的舆论引导人,以高尚的精神塑造人,以优秀的作品鼓舞人”,李鹏委员长题词“发展动画事业,增进国际儿童文化交流”及国务委员宋健的题词“科学与艺术联姻创造新时代文化”的精神为指导,加强物质文明和精神文明建设、弘扬主旋律,提倡多样化,满足人民群众“多出精品,快出精品”的迫切愿望;把社会效益放在首位,从全党全国工作大局出发,努力提高评选的科学性、权威性和公正性。

本世纪以来,随着计算机的诞生,科学技术得到空前迅猛的发展,科研成果与高新技术的开发都伴随着计算机的应用扩展到各个领域,同时也给人们的物质生活和精神生活带来了巨大的变化。计算机图象、图形技术既是一门综合性很强的独立基础学科,又是一门应用领域非常广泛,跨行业、跨学科的现代高科技。它在科研、地矿、石油、铁道、纺织、宇航、机械、冶金、仪表、气象、测绘、邮电、农林、公安、军事、国防和医学等领域,还有工美、影视、广告等文化部门的推广和应用上,以节省人力、物力、财力和时间,极大提高工作质量和工作效率为突出特点,发挥着越来越重要的作用,已成为衡量国家综合国力的重要标志之一。

我国计算机图象、图形的技术研究和理论已达到了国际先进水平,但是在开发与应用方面,特别是在电脑动画应用的广度和深度上还存在着一定的差距。自改革开放以来,随着国家大力发展科学技术方针的落实,逐步建立和发展了一批计算机行业的骨干企业,取得了很大的成绩,近年来在电脑动画设计与制作方面,国内涌现出一大批颇具实力的企业和单位,也培养了一大批优秀的专业人才。在影视、广告等专项领域中,无论是从艺术创作的表现形式和手法上,还是从艺术作品的内涵和质量上都达到了一定的水平,极大地丰富了人们的文化生活和艺术享受。但是,我们也应看到我国电脑动画的整体应用水平还不高、应用领域还不够广泛,尚需科技界、艺术界的人士加强广泛的交流与合作,为共同提高我国电脑动画水平而努力。为了贯彻落实党中央“科教兴国”的战略,加强物质文明和精神文明建设,“弘扬主旋律,坚持多样化”,满足人民群众“多出精品、快出精品”的迫切要求,《首届全国电脑动画设计和制作大赛》拟于一九九八年十一月至一九九九年九月在北京举行。

### 一、举办的目的

1、更广泛地联合和发挥各行各业科技人才和艺术人才的优势,提高我国电脑动画的应用水平、扩大应用领域,引导并营造潜在电脑动画市场;

2、发现优秀人才,同时为广大的电脑动画爱好者提供参与和交流的舞台,发挥大赛的纽带和桥梁作用;

3、发掘和推出一批能够反映时代风貌和民族内涵的优秀作用,走出一条文艺作品来源于民、惠归于民的新路。

### 二、举办的前提和背景

1、我国国民经济持续稳定发展,计算机技术与应用在经济发展和进步中的作用越来越重要;

2、计算机图象、图形、多媒体及数码合成技术的不断发展给人类生活和社会进步带来了巨大的变革。举办这一活动,不仅是既有成果的展示,预示着更深远的延续;

3、美术、艺术在我国有着悠久的历史,我们有优秀的艺术家、美术家和影视广告创作家,能创造出丰富多彩的世界。

4、随着社会主义市场经济的发展,计算机与艺术应用不断深入,复合型人才辈出,它给社会带来的变革及由此所蕴育的巨大的潜在市场,说明了中国这块市场是本世纪到下一个世纪最具吸引力和影响力的市场;因此,举办本次大赛所产生的效应是无法用金钱来衡量的。

### 三、大赛的宗旨

此次活动旨在推动国内电脑动画事业的发展、提高电脑动画的普及和应用水平,展现我国在计算机图象图形和动画方面的最新技术成果。发现并鼓励在动画、图象、图形等方面的专业、业余及艺术创作人才;集中和完整地反映当代国人的精神风貌和艺术素养,促使以计算机为龙头的电子产业作为国家的支柱产业之一发挥更好的社会效益和经济效益。

### 四、大赛的主题

- 1、“祖国万岁”内容包括:(向国庆五十周年献礼)
  - (1)歌颂祖国悠久的历史,赞美祖国的锦绣山河;
  - (2)展现改革开放以来现代化建设所取得的辉煌成就和社会主义市场经济的繁荣发展;
  - (3)讴歌人民对美好生活的憧憬,歌颂人间真、善、美;
  - (4)可爱的小动物人性化;
  - (5)为了孩子们美好明天;(儿童短片)
  - (6)历史人物卡通形象;
  - (7)城市规划房屋建筑;
  - (8)工程技术设计以及工业造型、原子分子结构等;
  - (9)工业、企业及产品形象广告设计;
  - (10)各民族的悠久文化服饰、佩饰及民间艺术品;
  - (11)科幻短片;
- 2、以二十一世纪新的“十万个为什麼”为题(可创作一至几个为什麼)

组委会秘书处地址:北京海淀区学院路37号

北京航空航天大学中国计算机用户协会图象分会

邮编:100083

联系人:郭庆云 孙惠贤

电话:010-82316545(兼传真) 63951155转2797,2798

网站:(intoWeb);http://WWW.ciW.COM.CN

E-mail:DHDS@ciw.com.CN