

基于再生核空间的自适应图像彩色化算法

陈 颖^{1,2}, 姚 恒², 舒明磊¹

(1 上海应用技术学院 计算机科学与信息工程学院, 上海 201418; 2 上海大学 通信与信息工程学院, 上海 200072)

摘 要: 针对传统的图像彩色化算法中彩色化结果质量不佳、参数设置不合理等问题, 提出一种新的基于再生核空间的自适应灰度图像彩色化算法. 该方法通过求泛函极值建立非线性方程, 设置与图像像素亮度相关的自适应再生核, 用最小二乘法对方程进行数值求解得到彩色化结果. 与其他灰度图像彩色化技术相比, 该方法能在自适应选择参数的同时, 有效提高图像彩色化质量.

关键词: 图像彩色化; 自适应; 再生核; Hilbert 空间; 最小二乘法

中图分类号: TP391.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2012)10-0022-04

Adaptive Image Colorization Based on Reproducing Kernel Hilbert Spaces

CHEN Ying^{1,2}, YAO Heng², SHU Ming-lei¹

(1 School of Computer Science and Information Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China;

2 School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: An adaptive image colorization algorithm based on reproducing kernel Hilbert spaces is proposed in this paper aiming at overcoming unsatisfactory and inefficiency in the traditional colorization algorithm. A nonlinear equation is established through minimization of a functional. By choosing adaptive reproducing kernel related to the image properties. A colorized image is obtained by numerically solving the equation with a least-square approach. The simulation results show that the proposed algorithm outperforms previous method in improving the image quality and selecting adaptive parameter.

Key words: image colorization; adaptability; reproducing kernel; Hilbert spaces; least-square algorithm

1 引言

灰度图像彩色化是指采用计算机处理技术给灰度图像或视频加上颜色的处理过程, 这种技术可广泛地应用于图像通信、视频编辑以及科学、工业和军事等多个领域^[1].

常见的图像彩色化方法是局部颜色扩展法, 这种方法是先给灰度图像赋予一些初始颜色, 然后将颜色从局部扩展到全局. Levin 等人提出的图像彩色化方法是先人工在图像各区域涂上适当的彩色线条^[2], 颜色扩展过程是使所有像素与其相邻像素色度加权差的平方和最小, 这种方法不适合处理大尺

寸图像. Sapiro 将偏微分方程引入图像彩色化中^[3], 在图像不同区域描绘初始彩色线条后, 由亮度梯度决定的引导场将颜色扩展到整幅图像中, 这种方法不能很好地解决图像边界的定位问题. 胡伟等人提出一种对高分辨率图像进行彩色化的方法^[4].

再生核理论是求解非线性方程的有用工具. 文献^[5]初步形成系统的再生核理论. Dodd 在再生核 Hilbert 空间中用梯度迭代法解决数值逼近的问题^[6]. Hilbert 空间的再生核框架理论已经被应用于小波变换、信号处理、图像处理、机器学习等研究领域.

为提高图像彩色化的质量, 本文提出一种新的

收稿日期: 2012-03-06; 修回日期: 2012-04-09

基金项目: 上海应用技术学院科研基金项目(KJ2009-15)

基于再生核 Hilbert 空间的自适应灰度图像彩色化算法。

2 再生核空间

再生核 Hilbert 空间理论适合分析和处理一些非线性问题^[7]。再生核 Hilbert 空间的定义为:设 H 是 Hilbert 函数空间,其元素是某个非空抽象集合 E 上的实值或复值函数,内积定义为:

$$\langle f, g \rangle = \langle f(t), g(t) \rangle, \langle f, g \in H \rangle, \text{ 设}$$

$K(s, t)$ 是二元函数, $s, t \in E$ 。如果

(1) 对任何 $t \in E$, $K(s, t) \in H$;

(2) 对任何 $t \in E$ 及 $f \in H$, 有 $f(t) = \langle f(s), K(s, t) \rangle$;

则称 $K(s, t)$ 是 Hilbert 函数空间 H 的再生核,把具有一个再生核的实值或复值函数的 Hilbert 空间称为再生核希尔伯特空间,简称再生核空间。

3 图像彩色化算法

3.1 图像彩色化方程

灰度图像的彩色化问题可看作是解决非线性方程的问题,本文用再生核空间理论来解决灰度图像彩色化问题。图像彩色化的方法是先在灰度图像各区域粗略地涂上初始颜色,在保持涂色像素颜色不变的前提下,按合适的方法使不同颜色的彩色线条在一定范围内扩展,最后将整幅图像完成彩色化。将再生核空间理论引入到图像彩色化过程中,认为图像的彩色化可使最小化以下泛函来实现。

$$G(C) = \inf_C \{ \lambda \| C \|_{H_K(\Omega)}^2 + \| C - C_0 \|_{L^2(D; R^3)}^2 \} \quad (1)$$

其中 $H_K(\Omega)$ 是再生核空间,再生核 K 依赖于原始灰度图像 u 。 C 是待求的彩色化图像, C_0 是初始染色图像, λ 是实数参数, Ω 是整幅图像区域, D 表示图像中已经初始染色的部分,有 $D = (x_1, x_2, \dots, x_z)$ 且 $D \subset \Omega$, 范数 $\| \cdot \| = \langle \cdot, \cdot \rangle^{1/2}$ 。在式(1)中第一项是正则项,表示能在约束条件下进行颜色扩散。第二项是保真项,使 C 与初值 C_0 尽量接近,保持图像中的重要信息。

3.2 自适应的再生核

再生核 K 控制着颜色扩散的行为。再生核选择正确与否决定彩色化方程是否有效。传统的再生核空间方法中定义的高斯再生核用下式表示:

$$F(x, y) = \exp\left(-\frac{\|x - y\|^2}{\sigma^2}\right) \quad (2)$$

式中,参数 β 和 σ 的取值直接影响颜色扩散方

法对图像颜色细节的保持能力,实验结果表明, σ 为常数时效果不佳,而要随着图像亮度变化才能有效保持颜色细节。

以式(2)作为再生核不能得到满意的彩色化效果,因此要确定更合适的再生核。对于图像 Ω , 定义局部亮度均值如下:

$$w_Y(i, j) = \frac{1}{(2S+1)(2E+1)} \sum_{m=i-S}^{i+S} \sum_{n=j-E}^{j+E} Y(m, n) \quad (3)$$

其中 $Y(m, n)$ 是像素的亮度, $(2S+1)(2E+1)$ 是关于点 (i, j) 对称的窗口尺寸,在实验中,取 $S=E=2$ 。亮度的局部方差为:

$$W(i, j) = \frac{1}{(2S+1)(2E+1)} \sum_{m=i-S}^{i+S} \sum_{n=j-E}^{j+E} [Y(m, n) - w_Y(i, j)]^2 \quad (4)$$

本文提出以下函数是再生核的表达式:

$$K(x, y) = k(x, y) I_{3 \times 3} \quad (5)$$

其中:

$$k(x, y) = \exp\left(-\frac{|u(x) - u(y)|^2}{10W^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{|x - y|^2}{10(P^2 + Q^2)}\right), \forall x, y \in \Omega \quad (6)$$

在式(5)中 $I_{3 \times 3}$ 是尺寸为 3×3 的单位矩阵,在式(6)中 $u(x)$ 表示灰度图像 u 在像素点 x 处的亮度值,整幅图像区域 Ω 的尺寸大小为 $P \times Q$ 。如此定义的再生核结合了图像本身的性质,并克服了估计参数 β 和 σ 的困难,可有效提高图像彩色化的质量。

3.3 算法的实现

利用最小二乘法^[8],为求解方程式(1),可通过计算以下方程式来实现:

$$C_\lambda = \sum_{i=1}^z K(x, x_i) b_i \quad (7)$$

此处 b_i 可通过求解以下方程得到:

$$\left\{ \sum_{j=1}^z K(x_i, x_j) b_j \right\} + \lambda b_i = C_0(x_i) \quad (8)$$

本文实现图像彩色化算法的主要步骤如下:

(1) 将待染色的灰度图像进行预处理后涂上初始颜色,即得到 C_0 的值。

(2) 设置实参数值, λ 的值由像素点 (i, j) 的四邻域的亮度均值决定,在实验中,取初始值 $\lambda = 10$ 。

(3) 利用最小二乘法,求解方程式(7),可得到图像每点像素的颜色值。

(4) 将得到的图像每点像素的颜色值与已知的亮度值合成,得到最终的彩色化结果图像。

4 实验结果与分析

为了验证本文的算法,对大量图像进行了灰度图像彩色化处理.图 1 是利用本文方法进行图像彩色化的部分实验结果.(a)列是 3 幅灰度图像,(b)列为初始染色图像,(c)列是用上述方法得到的彩色化结果.可见用本文的方法对动物、植物、风景等不同类型的图像进行彩色化处理,都可得到清晰自然的彩色图像,视觉效果良好^[9-10].

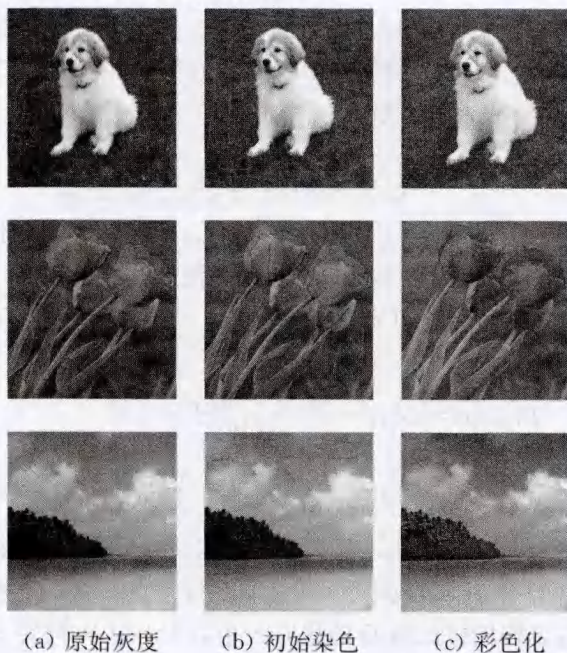


图 1 灰度图像彩色化实验结果

现将本文的算法与文献[3]的算法进行比较.实验中将彩色图像的颜色分量去掉,转换为黑白图像,基于同样的初始染色,用不同的方法进行彩色化,将得到的结果相对于原始彩色图像计算峰值信噪比(PSNR),PSNR 的值越大,说明彩色化的效果越好.图 2 给出了对一幅图像的实验测试结果.

从实验结果可知,图 2(c)的彩色化效果不能令人满意,由于文献[3]的方法是采用基于泊松方程的各向同性扩散,颜色的均匀扩散导致了在不同颜色交界处出现了颜色模糊的现象.在图中不同区域交界处有颜色模糊的现象,如在图中妇女背后的木板上出现了衣服上的蓝色,妇女衣服上的颜色也模糊不清.图 2(d)是采用本文算法的实验结果,采用基于再生核空间的自适应彩色化算法,设置与图像像素亮度相关的自适应再生核,使在图像彩色化过程中在不同区域中能有效的进行颜色扩散,得到的最终彩色化后的图像颜色柔和自然,在图像不同颜色

区域交界处颜色清晰精确,得到了良好的彩色化效果.



图 2 彩色化实验结果比较

相对于原始彩色图像,计算彩色化图像的 PSNR,采用的图像为图 1 中的 dog、flower、seaside 和图 2 中的 woman,实验结果见表 1.可见用本文方法得到的彩色化后图像具有较高的 PSNR 值,比文献[3]算法约提高 2~3dB.

表 1 算法的 PSNR 值比较

图像名称	文献[3] PSNR(dB)	本文算法 PSNR(dB)
Dog	26.5	28.8
Flower	23.4	25.6
Seaside	24.2	26.3
Woman	27.8	30.4

5 结束语

针对传统的灰度图像彩色化算法效果不佳、参数选择困难等问题,本文将再生核空间引入图像彩色化中,先通过求泛函的极值建立图像彩色化方程,并设置与图像亮度相关的自适应再生核,在算法实现中采用最小二乘法求解方程,应用此算法能有效的实现颜色扩散,最终得到效果良好的彩色化图像.对多幅自然图像进行了仿真实验.结果表明,本文算法能明显改善彩色化效果,得到清晰自然的彩色图

像,峰值信噪比有所提高.

参考文献:

- [1] 贾云涛,胡事民. 基于图切分的交互式图像染色算法[J]. 计算机学报,2006,29(3):509-512.
- [2] Levin A, Lischinski D, Weiss Y. Colorization using optimization [C]//Proceedings of ACM SIGGRAPH. Los Angeles, USA,2004: 689-693.
- [3] Sapiro G. Inpainting the colors[C]// IEEE International Conference on Image Processing. Genoa, Italy, 2005:698-701.
- [4] 胡伟,秦开怀. 高分辨率灰度图像的快速多分辨率彩色化[J]. 计算机学报,2009,32(5):1062-1068.
- [5] Aronszajn N. Theory of reproducing kernels [J]. Trans. Amer. Math. Soc. . 1950(68):337-404.
- [6] Dodd T, Harrison R. The gradient iteration for approximation in reproducing kernel hilbert spaces[J]. Oxford University Press,2004,21(4):359-376.
- [7] Minh H Q, Sung H K, Triet M L. Image and video colorization using vector-valued reproducing kernel hilbert spaces[J]. Journal of Mathematical Imaging and Vision,2010,37(1):49-65.
- [8] Carmeli C, De V E, Toigo A. Vector valued reproducing kernel Hilbert spaces and universality [J]. Anal. Appl, 2010, 8(1):19-61.
- [9] Cucker F, Smale S. On the mathematical foundations of learning [J]. Bull. Am. Math. Soc, 2002,39(1): 1-49.

- [10] Caponnetto A, De V E. Optimal rates for regularized least squares algorithm[J]. Found. Comput. Math, 2007,7(3):331-368.

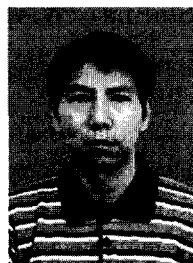
作者简介:



陈 颖 女,(1974—),博士研究生,副教授,CCF 会员(E2000 17193). 研究方向为数字图像处理、信息安全.



姚 恒 男,(1982—),博士研究生. 研究方向为图像处理、被动认证.



舒明磊 男,(1979—),博士,讲师. 研究方向为图像处理、移动计算.