

一种高效的灰度图像真彩化方案

王文锦, 丁浩, 陆平, 赵书国, 贾世奎
(中国船舶重工集团公司第七一八研究所, 河北邯郸 056000)

摘要:提出了一种高效的灰度图像真彩化方案。该方案的关键技术包括:YUV 亮色分离、采样点序列去冗余精简和基于像素空间相关性的匹配点搜索。YUV 亮色分离技术在复杂度低、计算量小的同时,有效去除了 RGB 颜色空间中存在的相关性。通过去除采样点序列的数据冗余,节省了后续整幅目标图像的匹配点搜索时间。利用图像像素点的空间相关性进行匹配点搜索,提高了搜索效率和准确性。经实验验证,本文算法在取得和 Welsh 算法相近效果的同时,可以节省 50% ~ 70% 的彩色化处理时间。

关键词:图像真彩化;YUV 亮色分离;采样点去冗余;匹配点搜索

中图分类号:TP391.41 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2012.02.020

Efficient colorization scheme for grayscale image

WANG Wen-jin, DING Hao, LU Ping, ZHAO Shu-guo, JIA Shi-kui
(The 718th Research Institute of CSIC, Handan 056000, China)

Abstract:This paper presents an efficient grayscale image colorization scheme that mainly consists of three components including YUV-transformation, sample sequence redundancy removal and space relativity based pixel matching. The low-complexity YUV-transformation technique can effectively remove the correlation existing in RGB color space. A sample sequence redundancy removal strategy is proposed to cut down the pixel matching time of the whole target image. A space relativity based pixel matching algorithm is employed to improve searching efficiency and accuracy. The experimental results show that while obtaining results similar to Welsh algorithm's performance, the proposed efficient grayscale image colorization scheme can save time from 50% to 70% for the colorization process.

Key words:image colorization; YUV-transformation; sample sequence redundancy removal; pixel matching

1 引言

由于人眼的彩色敏感细胞能分辨出几千种彩色色调和亮度,但对黑白灰度级却不敏感,因此,对灰度图像进行彩色化处理可以在极大程度上改善图像的视觉效果,增强图像的色彩表现力。

在医学、遥感、红外夜视等领域,为突出显示图像内容通常会采用伪彩色化处理方法。伪彩色处理过程按照某种规则生成映射表,每个灰度级根据映射表对应到彩色空间上的一点,可以将单色图像映射为一幅彩色图像。伪彩色化后的图像容易产生明显的变形,颜色不自然,失真严重,严重影响了图像的视觉效果^[1]。

局部颜色扩张法多应用于早期黑白电影的彩色

化处理。该方法的大体思路是先在黑白图像上设置局部的引导色,再设法将局部颜色扩展到全幅范围。这类方法的代表性算法有 Horiuchi 算法^[2]、Levin 算法^[3]、偏微分方程法^[4]、颜色混合法^[5]等。该方法需要人工干预,不利于自动化实现。尤其是对大数据量的视频进行彩色化处理时,需要耗费更多的人力。

Welsh 提出了基于颜色转移的灰度图像彩色化方法^[6],通过选择合适的彩色参考图像,将图像颜色转移到灰度目标图像。该方法在取得良好图像真

作者简介:王文锦(1985-),女,硕士,助理工程师,现主要研究方向为黑光夜视摄像技术。E-mail:shuzidianlu@126.com

收稿日期:2011-07-18; **修订日期:**2011-08-18

彩化效果的同时,也耗费了大量的处理时间。对作为当前发展趋势的高清图像进行处理时,更加显现出该方法的局限性。因此,提高 Welsh 算法的实时性是当前迫切需要解决的问题。

通过对 Welsh 算法的深入研究,本文发现了 Welsh 算法的几个较为耗时的环节,并分别对其进行了改进。经实验验证,本文算法在和 Welsh 算法取得相同彩色化效果的前提下,可以节省 50% ~ 70% 的彩色化处理时间。

2 经典 Welsh 算法简介

在 Welsh 算法中,将需要彩色化的灰度图像作为目标图像,选择和该灰度图像内容类似的彩色图像作为源图像,通过算法将源图像的色彩转移到灰度目标图像。Welsh 算法主要由源图像色彩空间变换、亮度重新映射、采样点序列建立和匹配点搜索 4 个处理过程组成。下面介绍各过程的实现方式。

2.1 源图像色彩空间变换

由于 RGB 颜色空间的各分量之间存在相关性,改变一个像素点的颜色需要同时改变 RGB 三个分量的数值,这给灰度图像的彩色化过程带来了难度。因此,首先将源图像由彩色 RGB 空间转换到 $l\alpha\beta$ 空间^[7]。其中 l 表示非彩色的亮度分量, α 表示黄-蓝色度分量, β 表示红-绿色度分量。在 $l\alpha\beta$ 颜色空间下,当其中一个分量发生改变时,其他分量受到的影响很小,从而避免了三个通道间的串扰问题。因此在后续算法中,可以对 $l\alpha\beta$ 三个分量独立进行运算,反变换到 RGB 空间后不会出现人工干预引起的失真现象。

将源图像转换后的非彩色亮度分量记作 l_s ,由于目标图像本身就是灰度图像,因此直接记作 l_t 。

2.2 亮度重新映射

经大量实验发现,当源图像和目标图像的亮度分布一致时,算法才会表现出优异的性能。因此在预处理过程中,对源图像的亮度分布 l_s 做一次线性映射,目的是使源图像 l_s 和目标图像 l_t 具有一致的一阶和二阶亮度分布特性。

亮度重新映射的公式为:

$$\hat{l}_s(p) = \frac{\sigma_t}{\sigma_s}(l_s(p) - \mu_s) + \mu_t \quad (1)$$

其中, μ_s, μ_t 分别为源图像、目标图像中所有像素的亮度平均值; σ_s, σ_t 分别为源图像、目标图像中所有像素的亮度标准差; $l_s(p)$ 为源图像当前被处理像素的亮度值; $\hat{l}_s(p)$ 为该像素重新映射后的亮度值。

2.3 采样点序列建立

对源图像进行采样时,为保留图像各种纹理信息的完整性,采样点需随机分布在源图像的整个区域。确定采样点后,计算每个采样点在周围小邻域内的平均亮度和标准差,分别记为 μ_{sp}, σ_{sp} 。

Welsh 发现该小邻域的尺寸取 7×7 像素点时,将算法应用于大部分图像就可以取得良好的效果^[6]。

2.4 匹配点搜索

对于灰度目标图像中的所有像素,计算各像素在周围小邻域的亮度均值和标准差,然后遍历源图像的采样点序列来寻找最匹配的像素。公式(2)是匹配准则:

$$T = 0.5 |u_t(p) - \mu_{sp}(i)| + 0.5 |\sigma_t(p) - \sigma_{sp}(i)| \quad (2)$$

其中, $u_t(p), \sigma_t(p)$ 分别表示目标图像的当前待匹配像素点的小邻域亮度均值和标准差; $\mu_{sp}(i), \sigma_{sp}(i)$ 是采样点序列的第 i 个均值和标准差。遍历采样点序列后, T 值最小的 μ_{sp}, σ_{sp} 所对应的像素点即为当前目标图像像素的匹配点。

将各匹配点的色度分量赋给灰度目标图像的所有像素,生成目标图像的色度分量矩阵 α_t, β_t 。将 l_t, α_t, β_t 三个分量转换到 RGB 空间,即可得到目标图像彩色化后的图像。

3 高效的灰度图像真彩化方案

为了保证算法效果的同时提高实时性,本文算法主要从颜色空间变换、样本来冗余精简和基于图像数据空间相关性的匹配点搜索等方面对 Welsh 算法进行了改进。

3.1 YUV 亮色分离

在 Welsh 算法中,将彩色源图像由 RGB 空间转换到 $l\alpha\beta$ 空间,虽然去除了 RGB 三个分量之间的相关性,但同时也耗费了大量的时间。一个像素点完成一次转换需要 18 次乘法、12 次加法和 3 次对数运算,且处理的全部是浮点数。如果将算法移植到嵌入式设备,会更加影响算法的实时性。

因此本文采用 YUV 来替代 $l\alpha\beta$ 色彩模型。YUV 是欧洲 PAL 电视系统中采用的颜色空间, Y 是指像素点的亮度, UV 是色差信号,其中包含色调和饱和度。RGB 空间到 YUV 空间的转换公式为:

$$\begin{pmatrix} Y \\ U \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ -0.148 & -0.289 & 0.437 \\ 0.615 & -0.515 & -0.1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (3)$$

以上 YUV 转换过程算法简单,运算量小,可以

成功地将像素点的亮度信号和色度信号分离。

3.2 采样点序列去冗余精简

对灰度目标图像的每个像素点进行匹配点搜索时,需要遍历采样点序列中的所有数据。通过大量实验发现,不同源图像的采样点序列均存在不同程度的数据冗余,这在搜索过程中是一笔不小的时间开支。因此,有必要对源图像的采样点序列进行数据精简。

精简过程如下:

(1) 将精简后的采样点序列记为 μ'_{sp}, σ'_{sp} 。
 $\mu'_{sp}(0) = \mu_{sp}(0), \sigma'_{sp}(0) = \sigma_{sp}(0)$ 。 $N=0, N'=1$ 。

(2) 如图 1(a)、图 1(b) 所示,考察原采样点序列的第 N 个均值 $\mu_{sp}(N)$ 和标准差 $\sigma_{sp}(N)$, 遍历精简后采样点序列的第 0 个到第 $(N'-1)$ 个数据。如果有数据满足公式(4), 停止遍历。

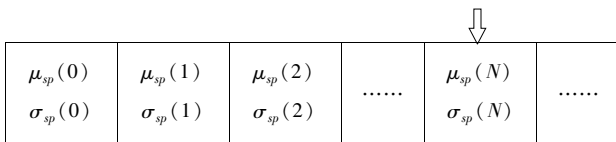
$$|\mu_{sp}(N) - \mu'_{sp}(i)| + |\sigma_{sp}(N) - \sigma'_{sp}(i)| < T_1 \quad (4)$$

其中, $\mu'_{sp}(i), \sigma'_{sp}(i)$ 分别指精简后采样点序列的第 i 个均值和标准差; T_1 是根据经验设定的阈值。

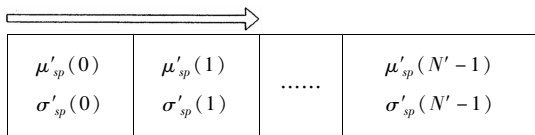
(3) 遍历所有数据后, 如果没有足够相近的 $\mu'_{sp}(i), \sigma'_{sp}(i)$, 那么如图 1(c) 所示, 将 $\mu_{sp}(N), \sigma_{sp}(N)$ 的值分别添加到新采样点序列的末尾: $\mu'_{sp}(N'), \sigma'_{sp}(N')$, 然后 $N' = N' + 1$ 。

(4) 如果 $\mu_{sp}(N), \sigma_{sp}(N)$ 已到采样点序列的末尾, 那么精简过程结束; 否则, $N = N + 1$, 重复(2), (3), (4) 过程。

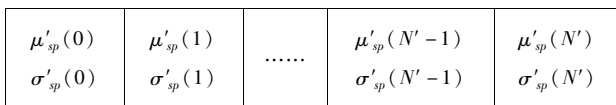
经过以上的采样点数据去冗余过程, 不同图像内容的采样点序列均得到了一定程度的精简, 节省了后续匹配点查找过程中所有目标图像像素点的匹配搜索时间。



(a) 精简前原采样点序列示意图



(b) 新采样点序列遍历过程示意图



(c) 新采样点序列添加数据示意图

图 1 采样点序列精简过程示意图

3.3 基于像素空间相关性的匹配点搜索

二维图像数据在空间上具有一定的相关性, 特别是同一景物各点的灰度和颜色之间往往存在着空间连贯性^[8], 因此, 目标图像的相邻像素点很有可能具有相同的匹配点。利用以上特点, 本文在寻找匹配点时, 首先考察当前像素点周围已完成匹配的各像素点, 如图 2 所示。具体过程为: 依次计算当前像素点和周围已完成匹配像素点均值和标准差的偏离程度 T_c , 最后选出偏离程度最小的 T_{cmin} , 如果 T_{cmin} 在经验设定的阈值范围内, 那么直接利用该 T_{cmin} 对应的邻域像素点的匹配结果; 如果 T_{cmin} 不满足相似度的要求, 才在采样点序列中进行全局搜索。

经大量实验发现, 以上做法可以有效缩减匹配点的搜索时间, 尤其对于平坦区域较多的图像, 理论上搜索效率的提高程度会更加显著。

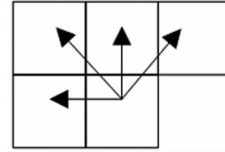


图 2 待匹配点邻域像素考察示意图

4 实验结果与分析

为了验证本文算法的有效性, 对灰度图像彩色化算法研究者经常使用的几幅图像进行了测试。分别使用本文算法和 Welsh 算法进行彩色化处理, 在视觉效果和处理时间上进行了对比。为了测试方便, 将处理过程中用到的所有图像调整为 237×170 像素分辨率的 raw 格式图像。实验仿真的软件平台是 Visual C++ 6.0, 电脑配置为: 主频 2.8 GHz 的双核 CPU, 2 GB 内存。

图 3 ~ 图 5 分别给出了 3 组图像的彩色化结果和处理时间对比。从图中可以看出, 本文算法和 Welsh 算法生成的图像在视觉效果上基本没有差异。本文算法由于充分利用了图像相邻像素的空间相关性, 所以相比较 Welsh 算法, 本文算法的颜色填充效果更加均匀和自然, 色彩具有更好地空间连贯性, 没有看出彩色失真现象, 更符合人眼的视觉特性。

从处理时间来看, 由于 3 组图像分辨率一致, 所以 Welsh 算法处理 3 组图像所耗费的时间大约都为 170 ms。而灰度目标图像 3 的平坦区域较少, 相比较目标图像 1、目标图像 2 而言, 图像内容更加复杂, 存在更多的纹理细节。这就导致了在第 3 组实验过程中, 精简后的采样点序列仍然保留有大量的亮度和纹理数据, 同时图像像素点的空间相关性较

差,可利用的邻域匹配结果较少。以上原因导致了本文算法对目标图像 3 比目标图像 1、目标图像 2 需要更多的彩色化时间。但是处理目标图像 3 时本

文算法的速度仍然是 Welsh 算法的 2.2 倍,处理目标图像 1、目标图像 2 时本文算法的速度分别达到了 Welsh 算法的 3.5 倍和 3.4 倍。

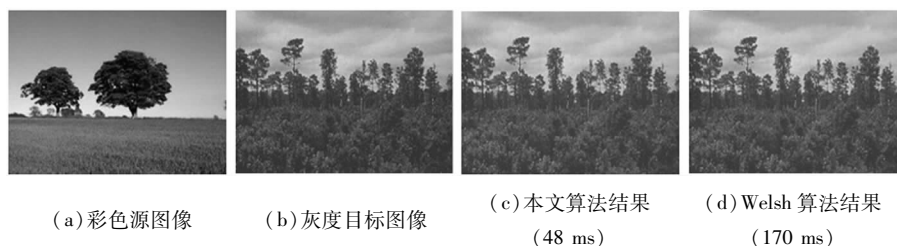


图 3 灰度目标图像 1 的彩色化结果和处理时间对比

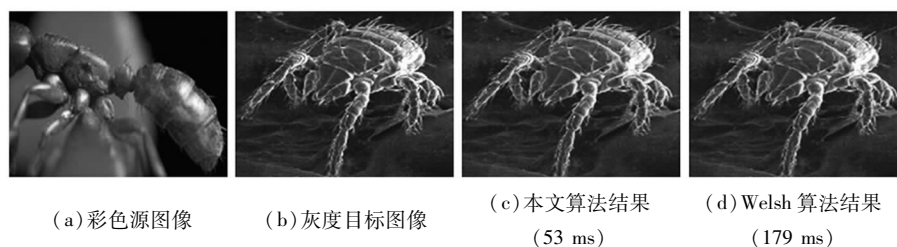


图 4 灰度目标图像 2 的彩色化结果和处理时间对比

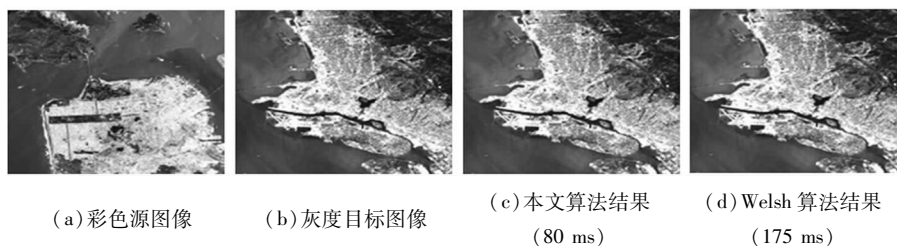


图 5 灰度目标图像 3 的彩色化结果和处理时间对比

5 结 论

本文提出了一种高效的灰度图像真彩化方案。RGB 到 YUV 的色彩空间转换过程在成功将亮度信号和色度信号进行分离的同时,具有算法简单、运算量小的特点。采样点数据去冗余后,可以不同程度地精简采样点序列的数据量,节省了目标图像所有像素的匹配点搜索时间。基于像素空间相关性的匹配点搜索节省了大量的重复搜索时间,在提高搜索效率的同时也保证了搜索的准确性。实验结果表明,本文算法在和 Welsh 算法彩色化效果相近的前提下,可以节省 50% ~ 70% 的彩色化处理时间。在今后的研究工作中可以将算法拓展到视频彩色化领域,进行优化移植到嵌入式系统,投入产业化生产会具有广阔的市场前景。

参考文献:

- [1] Gonzalez. Digital image processing [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2001: 212 - 214.
- [2] Takahiko Horiuchi. Colorization algorithm for grayscale image by propagating seed pixels [C]. Proc. International Conference on Image Processing, 2003: 457 - 460.
- [3] Anat Levin, Dani Lischinski, Yair Weiss. Colorization using optimization [C]. Proceedings of ACM Siggraph, 2004, 689 - 694.
- [4] Guillermo Sapiro. Inpainting the colors [EB/OL]. <http://www.ima.umn.edu/reprints/may2004/1979.pdf>.
- [5] L Yatziv, G Sapiro. Fast image and video colorization using chrominance blending [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(5): 1120 - 1129.
- [6] T Welsh, M Ashikhmin, K Mueller. Transferring color to grayscale images [C]. Proc. ACM Siggraph, 2002: 227 - 280.
- [7] D L Ruderman, T W Cronin, C C Chiao. Statistics of cone responses to natural images; implications for visual coding [J]. Journal of the Optical Society of America, 1998, 15(8): 2036 - 2045.
- [8] Chuntian Zhang, Yuting Su. Digital image compression and coding [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 105 - 106.