

基于局部线性变换的色阶映射算法

刘宗玥, 席志红

(哈尔滨工程大学 信息与通信工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 为了提高高动态图像显示的视觉效果, 提出了一种基于局部线性变换的色阶映射算法; 针对图像直接线性压缩能力较差的缺点, 本文提出一种局部的线性变换模型; 由于局部窗的结构, 是利用局部窗的中心像素点与窗内的其他像素点的均值, 方差的关系构造而成, 因此基于局部线性变换的色阶映射算法能够抑制由具有高对比度的图像边缘所引起的鬼影和光晕现象; 首先, 根据线性变换将图像的色阶映射转换为求解泛函的最优解; 其次, 通过推导求解出线性变换的参数并将泛函最优化问题转换为求解一个线性方程组问题; 最后求解线性方程组, 得出视觉效果较好的低动态范围图像; 有效避免传统色阶映射出现的光晕和亮度不连续的现象, 能够更多的保留高动态图像的细节; 最后通过实验结果对比分析, 通过信息熵和对比度两个参数可以体现文中算法较好。

关键词: 高动态范围图像; 色阶映射; 线性变换; 泛函最优化; 低动态范围图像

Tone Mapping Algorithm Based on Local Linear Transformation

Liu Zongyue, Xi Zhihong

(College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to improve the visual effect of the high dynamic image display, a tone mapping algorithm based on local linear transformation is proposed. A local linear transformation model is proposed in this paper, which is based on the poor ability of direct linear compression of the image. Due to the structure of the local window, using the mean of other pixels within the local window of the central pixel point and window, the covariance structure, therefore based on local linear transformation of the color gamut mapping algorithm is able to suppress by having a high contrast image edge caused by ghosts and halo phenomenon. Firstly, according to the linear transformation will be the image color gamut mapping function to be solved for the optimal solution; secondly, through the derivation of a linear transformation parameters and functional optimization problem is transformed into solving a linear equation group; finally solving a linear system of equations that visual effects better low dynamic range images. Effectively avoid the phenomenon of halo and brightness of the traditional color gamut mapping is discontinuous, able to retain more high dynamic image details. Finally, through the comparative analysis of experimental results, the algorithm is better than other algorithms in this paper.

Keywords: high dynamic range image; tone mapping; linear transformation; functional optimization; low dynamic range image

0 引言

由于自然界的亮度范围很广, 而常规的显示设备由于传感器和技术局限所能显示的动态范围^[1]很低, 因此通常需要利用色阶映射技术尽可能的压缩图像的动态范围, 从而在不损失图像质量的情况下输出高动态范围 (high dynamic range, HDR) 图像^[2]。常用的色阶映射算法^[3]一般分为全局色阶映射算法和局部色阶映射算法。

全局色阶映射算法对每一个像素都应用同一条色阶映射曲线, 变换曲线可以预先指定或者根据图像的内容获取, 不同的曲线有不同的效果。在全局色阶映射算法^[4]中主要分为: 基于直方图均衡化的色阶映射和基于 Sigmoid 方程的色阶映射。基于直方图均衡化的色阶映射^[5]缺点就是容易出现亮度饱和现象。基于 Sigmoid 方程的色阶映射^[6]在对比度和饱和度上有影响, 需要再进行色彩的调整。

局部色阶映射算法^[7]是根据不同的空间位置进行映射, 主要分为: 基于分层模型的色阶映射、基于梯度域的色阶映射, 基于人类视网膜成像的色阶映射, 基于双边滤波的色阶映射算法等。基于分层模型^[8]的色阶映射算法适用于有光晕和亮度不连续的图像。基于梯度域的色阶映射算法能够很好的保留细节信息。基于人类视网膜成像的算法可以减少光晕的产生。

通常情况下局部色阶映射算法相对于全局色阶映射算法具有更好的图像压缩效果, 但是局部色阶映射也会出现部分光晕^[9]和亮度不连续的现象。本文针对局部色阶映射的问题进行改进, 并通过实验仿真, 验证了本文算法相对于其他几种算法具有更好的处理效果。

1 线性变换的模型

高动态范围图像本文是基于局部线性变换的色阶映射算法, 将线性变换的模型单独提出进行研究。可设高动态范围图像的亮度值已知且为 I^h , 高动态范围的压缩算子为 $f(\cdot)$, 根据 $I^l = f(I^h)$, 可以计算出低动态范围的亮度值 I^l 。根据图像对比度压缩的特点, 可以分为两种情况进行讨论, 如图 1 所示。

图中 p 代表由高动态范围图像的亮度值 I^h 压缩为低动态范围亮度值 I^l 的关系曲线的斜率, q 代表图像的基本辐亮度。当 $p > 1$ 时, 如图 1 (a) 所示, 增强图像局部对比度可以使压

收稿日期: 2016-02-18; 修回日期: 2016-02-24。

基金项目: 国家自然科学基金项目(60875025)。

作者简介: 刘宗玥(1989-), 女, 黑龙江哈尔滨人, 硕士研究生, 主要从事数字图像处理方向的研究。

席志红(1965-), 女, 黑龙江哈尔滨人, 教授, 硕士研究生导师, 主要从事图像处理与应用方向的研究。

缩后的图像在较暗区域呈现的细节信息更好；当 $p < 1$ 时，如图 1b 所示，降低图像见的伪影^[10]例如光晕。

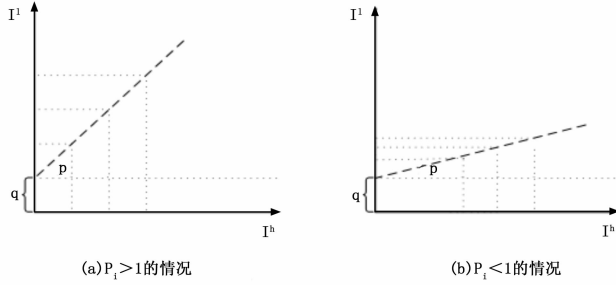


图 1 两种不同方式的线性压缩

利用线性曲线的特点，该方程可表示为公式 (1) 所示：

$$I^l(j) = p_i I^h(j) + q_i, j \in w_i \quad (1)$$

局部线性变换是以像素 i 为中心，局部窗口 w_i 为 3×3 可调节的矩形窗口，系数 p_i, q_i 在局部窗口 w_i 内，能够控制两种方式的映射。 q_i 的大小决定了基本光照水平，而 p_i 表示一次函数的斜率。可以控制局部对比度，如图 2 中所示不同 p_i 值的图像映射效果。



图 2 不同 p_i 值的映射效果图

比较图 2 (a) 和图 2 (b)，可以明显看出，图 2 (a) 的亮度低，较亮区域内的图像细节可以用肉眼分辨，图 2 (b) 的亮度相对较高，在相对暗的区域内的细节部分可以清楚显示；由此可以看出不同的导致图像不同程度的对比度压缩，在 2 (a) 图中，令 $p_i > 1$ 可以使图像的较暗区域的细节有更好的显示，在图 2 (b) 中，令 $0 < p_i < 1$ 可以使较亮部分的图像细节有更好的显示。

2 线性变换的局部色阶映射算法与实现

2.1 线性变换的局部色阶映射算法

本文算法利用移动窗口的方式对整幅图像进行处理，利用窗口内局部图像的亮度对比度和亮度均值约束线性变换方程中系数的大小，然后利用线性变换将高动态范围图像映射成低动态范围图像。虽然本文算法采用的是局部算子，但是算法中并不涉及尺度的分解、层分离，或者图像的分割。

根据上一节的线性变换的模型，将高动态图像每一个像素点 i 所在窗口满足的方程做线性累加，得到如下计算表达式 (2)，求其最小值，即可得到局部线性映射方程的系数。表达式 (2) 如下所示：

$$\sum_i \sum_{j \in w_i} (I^l(j) - p_i I^h(j) - q_i)^2 \quad (2)$$

然而直接求解最小化公式 (2) 并不能得到有效的系数 p_i 和 q_i ，因为方程存在平凡解。例如 $p_i = 1, q_i = 0$ 时，对于所有的 i 都会有结果 $I^l = I^h$ 。所以需要加一些约束条件，注意到了在公式 (1) 中，参量 p_i 直接控制局部对比度的变化。所以通过对参量 p_i 取值大小的约束来改变全局对比度，同时保留图像的局部细节，最终目标函数如式 (3) 所示：

$$f = \sum_i \left(\sum_{j \in w_i} (I^l(j) - p_i I^h(j) - q_i)^2 + \epsilon c_i^{-2} (p_i - c_i)^2 \right) \quad (3)$$

其中，权值参数 ϵ 在本文的实验中统一设为 0.1。 c_i 可以预先设定为正值，调节局部对比度，适当的取值可以抑制局部强对比度，并提高弱对比的。 c_i 取值与高动态图像亮度值 I^h 的局部标准差 σ_i ，局部均值 μ_i 和局部辐亮度 $I^h(i)$ 相关，具体关系如公式 (4) 所示：

$$c_i = (\mu_i^{\beta_1} \sigma_i^{\beta_2} I^h(i)^{\beta_3} + \kappa)^{-1} \quad (4)$$

其中，权值参数 κ ，在本文的实验中设为 0.05，防止 c_i 取到 0。通常 $\beta_1 \in [0.4, 0.9], \beta_2 \in [0.1, 0.4], \beta_3$ 设为固定值 0.1。最小化公式 (3) 可以通过分解，表示成如下式 (5) 的形式：

$$\begin{aligned} \operatorname{argmin}_{p_i, q_i} f &= \operatorname{argmin}_{p_i, q_i} \sum_i \operatorname{argmin}_{p_i, q_i} f_i \\ f_i &= \left(\sum_{j \in w_i} (I^l(j) - p_i I^h(j) - q_i)^2 + \epsilon c_i^{-2} (p_i - c_i)^2 \right) \end{aligned} \quad (5)$$

因为 f_i 是一个连续的凸函数，所以可以通过设置方程偏导数为零求解方程的最值，设定 (p_i^*, q_i^*) 是最优解，得到如下方程 (6)：

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_i}{\partial p_i} \Big|_{p_i = p_i^*, q_i = q_i^*} &= 2 \frac{\epsilon}{c_i^2} (p_i^* - c_i) - \sum_{j \in w_i} 2 I^h(j) \\ [I^l(j) - p_i^* I^h(j) - q_i^*] &= 0 \\ \frac{\partial f_i}{\partial q_i} \Big|_{p_i = p_i^*, q_i = q_i^*} &= - \sum_{j \in w_i} [I^l(j) - p_i^* I^h(j) - q_i^*] = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

根据以上公式，计算出最优解 p_i^* 和 q_i^* ，其矩阵方程的形式如式 (7)：

$$H_i \cdot [p_i^* \quad q_i^*]^T = \eta \quad (7)$$

其中：

$$H_i = \begin{bmatrix} \epsilon c_i^{-2} + \sum_{j \in w_i} I^h(j)^2 & \sum_{j \in w_i} I^h(j) \\ \sum_{j \in w_i} I^h(j) & \sum_{j \in w_i} 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\eta = \begin{bmatrix} \epsilon c_i^{-1} + \sum_{j \in w_i} I^h(j) I^l(j) \\ \sum_{j \in w_i} I^l(j) \end{bmatrix} \quad (9)$$

结合公式 (8) (9) 可得矩阵 $[p_i^* \quad q_i^*]^T$ 的最优解：

$$[p_i^* \quad q_i^*]^T = H_i^{-1} \cdot \eta = \frac{1}{m_i \cdot \Delta_i} \begin{bmatrix} 1 & -\mu_i \\ -\mu_i & \Delta_i + \mu_i^2 \end{bmatrix} \cdot \eta \quad (10)$$

其中，

$$m_i = \sum_{j \in w_i} 1, \mu_i = \frac{1}{m_i} \sum_{j \in w_i} I^h(j), \Delta_i = \sigma_i^2 + \left(\frac{\epsilon c_i^{-2}}{m_i} \right).$$

再利用与求解公式 (6) 相同的方法，可以求解 I^l ：

$$\frac{\partial f}{\partial I'(k)} \Big|_{I' = \hat{I}'} = a - 2(\hat{I}'(k) - p_i * I^h(k) - q_i * *) = 0 \quad (11)$$

将所得到的 I' 同样表示为线性系统 (7) 的形式, 如公式 (12) 所示:

$$S \cdot \hat{I}' = B \quad (12)$$

2.2 本文算法的实现流程图

基于局部线性变换的色阶映射算法, 将整体的线性压缩转变为每个局部窗内的线性变换。将每个窗内的中心像素点与其邻域内的像素点构成局部窗的结构, 利用局部窗内的微调系数, 均值, 标准差和高动态范围图像亮度进行窗内映射的控制, 可以将每个不同局部图像的分别处理的同时, 也实现了图像整体的动态范围压缩。本文算法的流程图如图 3 所示。

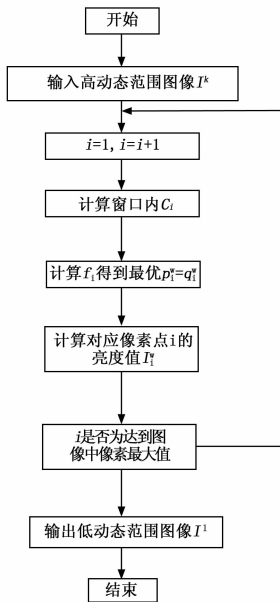


图 3 本文算法流程图

3 实验结果与分析

3.1 实验仿真结果与分析

本文的实验部分实验部分采用的硬件平台是 Pentium Dual-Core 2.70GHz 处理器, 2.00GB 内存, 软件系统为 Windows XP SP3, 仿真软件编程环境是 Microsoft Visual Studio 2010。通过实验结果和相应的数据给出一个评价本文算法的标准, 实验部分首先通过 Reinhard 方法, Lee 方法, Khan 方法, Duan 算法, Fattal 方法以及本文算法对图像 church 以及 fog 进行实验, 验证了本文算法有助于提高图像的主观视觉效果。本文对图像 church 和图像 fog 进行比较, 分别是利用其它 5 种经典算法与本文算法从图像的视觉效果和客观的评价指标进行比较, 评价的指标是信息熵和相似度, 利用信息熵可以表示图像所含有的信息量, 信息熵越大, 证明图像的细节越清楚。利用相似度可以验证与原图像的像一致性。经过映射后图像 church 的实验结果如图 4 所示。

实验进行多组对比可以验证本文算法的有效性和稳定性, 所以对图像 fog 进行验证, 经过映射后的对比图像如图 5

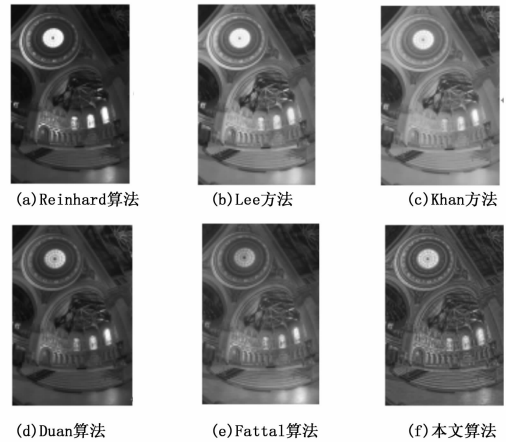


图 4 场景 church 生成的低动态范围图像

所示。

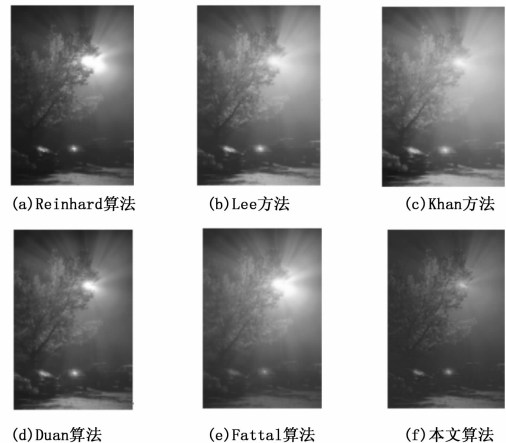


图 5 场景 fog 生成的低动态范围图像

各算法对应的客观评价系数如表 1 所示。从表 1 可以看出, 表中的数据与图 3 与图 4 所示的视觉效果基本一致, 通过本文算法进行映射后得到的低动态范围图像显示的细节较突出, 图像较为清晰, 信息量较丰富。通过多组实验的对比发现本文的局部色阶映射技术具有一定的稳定性和有效性。

表 1 各算法的评价指标

算法名称	church		fog	
	信息熵	相似度	信息熵	相似度
Reinhard 算法	7.44	0.931	6.43	0.933
Lee 算法	7.18	0.877	6.77	0.867
Khan 算法	8.13	0.825	8.01	0.822
Duan 方法	6.22	0.850	5.14	0.858
Fattal 算法	7.57	0.837	7.10	0.884
本文算法	8.81	0.881	8.57	0.907

3.2 实测数据结果与分析

实测部分采用 SONY 公司推出的数字相机 a57, 配合三脚架对场景 bridge 进行多次曝光拍摄, 通过对同一场景的多次曝光可以合成一幅高动态范围图像, 并将合成的高动态范围图像利用本文的方法进行色阶映射, 获得低动态范围图像。实

(下转第 290 页)

参考文献:

[1] 吴 军, 徐 昕, 连传强, 贺汉根. 协作多机器人系统研究进展综述 [J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2011, 6 (1): 13 - 27.

[2] NISSAN. Nissan EPORO robot car "Goes to School" on collision-free driving by mimickingfishbehavior [EB/OL]. [2010 - 06 - 11]. http://www.nissan-global.com/EN/NEWS/2009/_STORY/091001-01-e.html.

[3] 倪克奎. 基于 IEEE802.11 无线局域网多机器人通信技术的研究 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2010.

[4] 赵志强, 杨旭东. 一种通用通信模块的设计与应用 [J]. 自动化仪表, 2014, 35 (4): 53 - 54.

[5] 任孝平, 蔡自兴, 陈爱斌. 多移动机器人通信系统研究进展 [J]. 控制与决策, 2010, 25 (3): 327 - 332.

[6] 施文灶, 王 平. 基于案例的异构多机器人系统的协作研究 [J]. 网络新媒体科学, 2012, 1 (5): 50 - 53.

[7] Lucia G. Menezo, Valentin Puente, Jose-Angel Gregorio. Flask

Coherence: A Morphable Hybrid Coherence Protocol Balance Energy [J], Performance and Scalability. IEEE, 2015, 14 (15): 198 - 209.

[8] 王首浩, 仲 悦, 张 巍, 王怀侠. 一种用于分布式控制的光纤通信协议设计与仿真 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (9): 3044 - 3046.

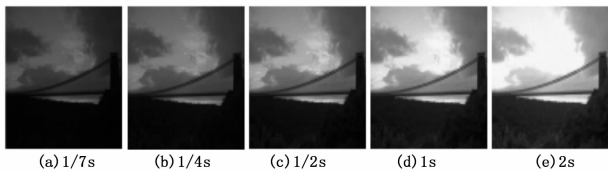
[9] Joseph M. Guerrero, YaosuoXue. Smart Inverters for Utility and Industry Applications [J]. PCIM Europe 2015, 2015: 277 - 284.

[10] Feng Zhang, Alei Liang, Haibing Guan. Performance of a Multi-channel MAC Protocol Implemented in Multi-robot System [A]. 2011 Seventh International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Networks [C]. 2011, 5 (8): 209 - 214.

[11] Lluc Alvarez, Lluís Vilanova, Marc González, Nacho Navarro, Xavier Martorell. Hardware - Software Coherence Protocol for the Coexistence of Caches and Local Memories [J]. IEEE Transactions on Computers, 2015, 6 (4): 152 - 165.

(上接第 285 页)

验结果如图 6 所示。



利用多曝光图像的方法合成高动态范围图像



图 6 色阶映射后的低动态范围图像

通过图 6 的实验结果显示, 通过实际的数码相机结合本文的色阶映射方法, 能够获得一幅细节清晰, 与实际场景相近的图像。

4 结论

针对高动态范围图像直接线性压缩效果较差的缺点, 本文提出了一种基于局部线性变换的色阶映射算法。基于局部线性变换的色阶映射技术可以将高动态范围图像在普通显示器上进行显示。算法利用局部线性窗的结构, 具有较高的边缘保持能力的特点, 有效地抑制由伪边缘造成的光晕现象。以一个像素点为中心, 划分的局部窗, 在窗口内可以根据当前像素点的情况选择适当的线性变换, 可以很好的抑制图像较高的对比度, 增强较弱的对比度。根据输入的高动态图像的亮度值, 通过矩阵变换 LQ 分解求出最优的低动态范围图像的亮度值, 得到显

示设备输出的图像。通过实验结果可以知道, 本文的算法易于实现, 并且具有一定的稳定性, 可以有效保留图像纹理细节且避免了光晕的产生, 但运算速度上有待进一步提高。

参考文献:

[1] Srikantha A, Sidibé D. Ghost detection and removal for high dynamic range images: Recent advances [J]. Signal processing: Image Communication, 2012, 27 (6): 650 - 662.

[2] 刘冬梅. 高动态范围图像显示算法的研究 [D]. 上海: 上海交通大学出版社, 2009.

[3] 谢一淞, 方俊永. 高动态范围图像色阶映射技术的发展与展望 [J]. 照明工程学报, 2011, 22 (5): 11 - 17.

[4] Eilertsen G, Wanat R, Mantiuk R K, et al. Evaluation of Tone Mapping Operators for HDR - Video [J]. Computer Graphics Forum. 2013, 32 (7): 275 - 284.

[5] 陆许明, 朱雄泳, 李智文, 等. 一种亮度可控与细节保持的高动态范围图像色阶映射方法 [J]. 自动化学报, 2015, 41 (6): 1080 - 1092.

[6] 都 琳, 孙华燕, 张廷华, 等. 基于相机响应曲线的高动态范围图像融合 [J]. 计算机工程与科学, 2015, 37 (7): 1331 - 1337.

[7] Farbman Z, Fattal R, Lischinski D, et al. Edge-Preserving Decompositions for Multi-Scale Tone and Detail Manipulation [J]. Proc. ACM SIGGRAPH, 2008.

[8] Fattal R, Lischinski D, Werman M. Gradient Domain High Dynamic Range Compression [J]. Proc. ACM SIGGRAPH, 2002. 251 - 254.

[9] Li Y, Sharan L, Adelson E H. Compressing and Companding High Dynamic Range Images with Subband Architectures [J]. Proc. ACM SIGGRAPH, 2005. 840 - 842.

[10] Lischinski D, Farbman Z, Uyttendaele M, et al. Interactive Local Adjustment of Tonal Values [J]. Proc. ACM SIGGRAPH, 2006. 650 - 653.

[11] 李晓光, 李凤慧, 卓 力. 高分辨率与高动态范围图像联合重建研究进展 [J]. 测控技术, 2012 (5).