

图像和视频亮度的自动调整

王 想¹, 郭延文^{1*}, 杜振龙^{2,3}, 武港山¹, 张福炎¹, 彭群生²

(1. 南京大学计算机软件新技术国家重点实验室, 江苏南京 210093; 2. 浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室, 浙江杭州 310058;
3. 南京工业大学信息科学与工程学院, 江苏南京 210009)

摘 要: 对曝光不足的图像和视频进行亮度调整具有重要的理论研究和实际应用价值, 本文提出一种基于梯度域操作的图像和视频亮度自动调整算法. 对于静态图像, 算法首先将图像分割为不同的亮度区域; 然后分别计算各区域的亮度调整算子; 最后通过求解一个梯度约束方程得到结果图像. 我们进而将该算法延伸到视频, 首先选取若干关键帧并使用上述图像亮度调整算法进行处理; 然后对非关键帧进行分割并通过光流算法确定非关键帧上的分割区域与前后关键帧区域的对应关系; 最后利用对应关系通过关键帧区域的亮度调整算子以及调整后的亮度指导非关键帧上各区域的亮度调整, 并生成结果视频序列. 本文算法可以有效处理空间和时间上曝光不足和不均的图像和视频, 并能够较好地保持图像、视频的细节纹理信息, 实验结果表明了算法的有效性.

关键词: 图像视频亮度调整; 梯度域处理; 对比度增强

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2009) 4A-079-08

Automatic Brightness Adjustment for Image and Video

WANG Xiang¹, GUO Yan-wen^{1*}, DU Zhen-long^{2,3}, WU Gang-shan¹, ZHANG Fu-yan¹, PENG Qun-sheng²

(1. State Key Laboratory for Novel Software Technology, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China;

2. State Key Laboratory of CAD&CG, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China;

3. College of Information Science and Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing, Jiangsu 210009, China)

Abstract: We present a new approach for automatically adjusting the brightness of under-exposed digital images and video sequence. Our approach employs "divide-and-conquer" scheme with gradient domain operation. The under-exposed image is first segmented into different regions according to the brightness. We then compute the brightness enhancement function for each region. Finally a constrained energy function on gradient domain is solved for preserving continuity among different regions. The algorithm is further extended to video. Several key frames are selected from the input video. We adjust them using the image brightness adjustment algorithm. Afterwards, through optical flow, we find the relationship of the regions between the key frames and intermediate frames, and use such relation to adjust the brightness of intermediate frames. Our approach works effectively for dealing with spatially non-uniformly exposed image and temporally non-uniformly under-exposed video. Meanwhile, detail information, such as strong structures as well as textures, is faithfully preserved, as demonstrated by experimental results.

Key words: brightness adjustment; gradient domain processing; contrast enhancement

1 引言

图像和视频的亮度调整是数字图像视频处理中一个基本问题. 近年来, 随着数码相机、摄像机等图像视频获取设备的普及, 越来越多的人选择将摄影作为业余生活的一部分. 但由于拍摄技术水平和外界条件的限制, 往往会拍摄出一些效果不理想的照片和视频, 尤其在拍摄环境光线较暗或侧光拍摄的情况下, 所拍摄的照片和视频中的某些区域会因为曝光不足而显得暗淡, 使人眼无法辨识其中蕴涵的场景细节; 另一方面, 当光线较强或正对光源进行拍摄时, 拍摄的效果往往曝光过度, 同样降

低了照片和视频的质量. 如何自动或交互地调整这些照片、视频使其亮度分布均匀、自然具有非常重要的理论研究和实际应用价值. 虽然目前市场上也存在一些商业软件可以进行自动的亮度调整, 但一般定价较高且技术细节保密. 针对这种情况, 开发出能够自动调整图像和视频亮度的有效算法必能得到广泛的应用. 光不足的图像效果并不理想. 后来研究者提出了一些

1.1 相关工作

图像亮度调整算法经历了一个从简单到复杂、从整体到局部的过程. 早期的亮度调整算法如直方图定制^[1]、增益-偏差调整 (Gain offset)^[1]等算子处理局部曝

较为复杂的图像曝光调整算法^[2~5],这些算法大都使用一个类似于 γ 函数的全局色调映射函数非线性地拉伸图像亮度,使得图像整体对比度得到增强,从生理学角度讲,人类的感知能力与外界的刺激对数成比例,因此这些调整算法都是在亮度的对数域上进行操作.但该类算法一般需要相对复杂的参数设置^[2]或用户交互^[4],使用不够方便;另外由于图像不同区域之间存在一定的制约关系,采用全局映射函数往往需要牺牲高亮区域的对比度来增强欠曝区域的对比度,从而导致曝光充分区域的对比度有所降低,以致丢失原图中所具有的亮度层次感,这是全局映射算子的共有缺点.

鉴于全局算子的上述缺点,近几年一些学者提出了基于梯度域的亮度调整算法. Fattal 等人在处理高动态范围图像时基于交互指定区域的亮度理想值构造调整后图像的梯度约束^[6],使得结果图像的梯度与给定约束尽可能一致,从而求得图像亮度. Pérez 等人借助梯度域的处理方法,可以无缝地将一幅图像中的区域组合到另一幅图像中去^[7]. 基于梯度域处理的图像处理算法能够较好地保持原图中的细节信息和层次感,目前还没有自动、有效的图像亮度梯度域调整算法.

目前视频亮度调整方面的研究工作还不成熟,由于处理效率以及如何保持调整后视频时空一致性问题,图像的亮度调整算法并不能直接应用于对视频的处理. Bennett 等人给出了一个对像素虚拟曝光的相机模型以及自适应的时空滤波器来增强视频序列^[8],前者利用图像以及前后对应位置的像素信息来对像素进行虚拟曝光,后者通过时间和空间的双边滤波降低虚拟曝光所产生的噪音. 该方法是基于像素点的直接操作,并不能很好地保持原始视频帧的细节层次感;另外,由于采用时空的双边滤波,算法的整体效率不高,处理一段几百帧的视频序列通常需要几个小时的时间. 视频亮度调整的研究还处于起步阶段,现有方法无论是在效率还是处理的结果质量上都无法令人满意.

1.2 本文工作

针对目前图像和视频亮度调整算法存在的问题,本文首先提出了一种梯度域的图像亮度调整算法. 由于难以通过全局的调整算子对整幅图像进行有效处理,我们算法采用“分而治之”的策略,首先将图像分割为不同的亮度区域;然后分别计算不同区域的亮度调整算子;为了保持各个区域之间边界的连续性和图像对比度,算法最后通过求解一个梯度约束方程计算调整后的结果图像.

我们进而将此算法拓展到对视频的处理. 视频由一系列具有前后一致关系的图像帧组成,对视频的处理不能够孤立地处理视频序列的每一帧,必须考虑到处理后视频帧间的相关性. 为此,算法首先选取若干关键帧并

使用上述图像亮度调整算法进行处理;然后对非关键帧进行分割,并通过光流算法确定非关键帧上的分割区域与前后关键帧区域的对应关系;最后,利用对应关系通过关键帧区域的亮度调整算子和调整后的亮度指导非关键帧上区域的亮度调整并生成结果视频序列.

本文提出的基于梯度域处理的亮度调整方法可以应用于图像和视频的有效处理. 相对于前人的工作,该方法有以下优点:

有效处理时空曝光不足或不均的图像和视频. 算法由于采用了“分而治之”的策略,可以对曝光不同的图像区域或视频序列的不同帧区域进行分别地亮度调整,视频上同时通过关键帧指引的思想处理相同场景区域时间上曝光不一致的情况,保证处理后其效果的一致性,获得较优的亮度调整效果.

有效保持处理效果的细节信息. 基于梯度域的处理不是孤立地对像素点进行调整,而是考虑了原始图像、视频上像素的空间邻接关系,使得结果图像或视频帧的梯度尽可能与原始效果一致,因此我们的方法可以很好地保持原始图像、视频帧大量的细节纹理信息和高亮区域的层次感.

本文第2节详细介绍了基于梯度域的图像亮度自适应调整算法;从图像到视频的推广在第3节中讨论;第4节给出了实验结果和算法分析;最后在第5节我们对研究工作进行了总结和展望.

2 基于梯度域的图像亮度自动调整

曝光不足的图片往往由于用户拍摄技术水平或成像条件限制拍摄得到,对于整体曝光不足的图像我们可以选择一个线性或非线性的调整算子提升其整体亮度. 然而一个具有挑战性的情况是由于侧光拍摄所得到的局部曝光不足的图像,图像中往往部分区域曝光不足且曝光不足的区域曝光程度不一,而其它区域的亮度适中,非线性的全局映射函数往往难以根据细微的曝光差异设计合理而统一的色调映射算子对该类图像进行调整.

事实上,对该类图像处理的关键所在是如何在合理分级提升欠曝区域亮度的同时,保持曝光充分区域的亮度不变. 为此,我们的算法采用“分而治之”的策略首先把图像按照亮度进行分割,然后分别对图像的不同亮度区域进行处理,进而为保证处理后不同区域间的连续性和保持图像细节,通过求解一个梯度约束方程计算调整后的结果图像. 算法的主要步骤包括:

亮度图像分割:基于图像的亮度采用金字塔分割算法把原始图像分割为亮度不同的区域;

分割图像调整:对不同的分割区域依据其自身不同属性分别采用简单的非线性映射函数调整其亮度

比对图像的亮度调整复杂. 一方面, 由于一段视频序列通常包含几百帧图像, 单纯孤立地对视频的每一帧进行处理是不可行的; 另一方面, 由于视频相邻帧间内容的相关性, 必须保证调整后视频的时空一致性; 另外, 与图像对应的一种特殊情况是: 视频中可能包含时空欠曝的场景或物体, 例如最初的拍摄环境光线较暗, 所获取的视频图像可能整体或局部欠曝, 而随着拍摄过程中环境光照增强, 随后拍摄的视频部分场景或物体可能曝光适中, 对这样的视频进行处理必须保证处理后相同场景或物体在时空上亮度调整效果的一致性.

一个可行的解决方案是首先选取视频的若干关键帧并对其运用上述的图像调整算法, 进而以关键帧亮度的调整指导对非关键帧的处理. 我们假设处理的对象为包含单一场景的视频片段, 通常包含几百帧以内的图像, 算法主要包括以下步骤:

通过一维均值提升算法选取视频序列 $\{I_n | n = 1, 2, \dots, N\}$ 中的 K 帧关键帧, 记为 $\{I_{K,k} | k = 1, 2, \dots, K\}$;

使用第 2 节介绍的基于梯度的亮度调整算法对关键帧进行处理;

对非关键帧进行分割, 并通过光流算法确定非关键帧上的分割区域与前后关键帧区域的对应关系; 最后利用对应关系通过关键帧对应区域的亮度调整算子指导非关键帧上区域的亮度调整, 最后进行边界优化后得出结果视频序列.

3.1 关键帧选取

选取视频序列中若干代表性的关键帧在视频摘要的研究中具有一定应用^[12~14]. 一个简单的选取方式是对视频每间隔 10~20 帧选取一帧为关键帧, 但这种方法选取的关键帧不能很好地反映视频内容的变化, 因此不具代表性. 显见, 如果视频内容变换平缓, 可以选取较少的关键帧, 而如果视频内容变化较快, 必须选取相对较多的关键帧, 为此我们首先计算相邻帧间的 L_2 距离, 然后将一维均值提升 (Mean-shift) 算法^[15] 作用于视频序列, 从而提取若干视频帧聚类的中心为视频亮度调整所需要的关键帧. 在计算帧间相似性的时候, 为提高算法效率, 我们利用下采样的图像进行计算. 另外, 在均值提升算法中采用一个相对较小的距离阈值, 从而保证充分多的关键帧被选取.

3.2 视频帧的亮度调整

我们采用第 2 节提出的梯度域亮度调整算法对关键帧进行亮度调整, 进而通过关键帧调整的效果来指导对非关键帧的处理.

设 $I_{K,k}$ 和 $I_{K,k+1}$ 是间隔为 d 的连续的两个关键帧 (如图 2), I_n 是 $I_{K,k}$ 和 $I_{K,k+1}$ 之间的某一非关键帧, 记 d' 为 I_n 和 $I_{K,k}$ 之间的间隔距离, 即中间帧数. $R_{I_n}^i$ 表示 I_n 分

割后的一个区域, $R_{I_{K,k}}^i$ 和 $R_{I_{K,k+1}}^i$ 分别是我们利用光流算法得到的 $I_{K,k}$ 和 $I_{K,k+1}$ 上与 $R_{I_n}^i$ 相对应的区域, $f_{I_{K,k}}^i$ 和 $f_{I_{K,k+1}}^i$ 分别为对关键帧 $I_{K,k}$ 和 $I_{K,k+1}$ 区域 $R_{I_{K,k}}^i$ 和 $R_{I_{K,k+1}}^i$ 的亮度调整算子, 对于 $R_{I_n}^i$ 中的任意点 p , 原始亮度记为 $I_n^i(p)$, 调整后的亮度 $\bar{I}_n^i(p)$ 通过以下式 (8) 来计算.

$$\bar{I}_n^i(p) = \frac{d-d'+1}{d+1} * f_{I_{K,k}}^i(I_n^i(p)) + \frac{d'}{d+1} * f_{I_{K,k+1}}^i(I_n^i(p)) \quad (8)$$

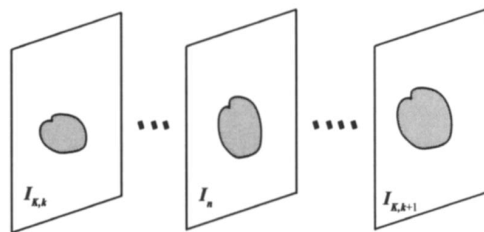


图2 利用关键帧区域亮度调整算子指导对非关键帧对应区域的调整. 其中 $I_{K,k}$ 和 $I_{K,k+1}$ 为两帧连续关键帧, 而 I_n 为它们之间的一非关键帧; 图中显示了对应的分割区域: $R_{I_{K,k}}^i$, $R_{I_{K,k+1}}^i$ 和 $R_{I_n}^i$.

我们采用光流算法^[16] 确定 $R_{I_n}^i$ 在关键帧 $I_{K,k}$ 和 $I_{K,k+1}$ 上对应的区域 $R_{I_{K,k}}^i$ 和 $R_{I_{K,k+1}}^i$. 首先在区域 $R_{I_n}^i$ 中随机选取若干点 $\{p_i | i = 1, 2, \dots, i_0\}$, 然后通过双向光流跟踪算法找到这些点在关键帧 $I_{K,k}$ 和 $I_{K,k+1}$ 上的对应点, 分别记为 $\{p_i' | i = 1, 2, \dots, i_0\}$ 和 $\{p_i'' | i = 1, 2, \dots, i_0\}$, 最后计算出这两组点的重心 $p'(x, y)$ 和 $p''(x, y)$, 它们所在各自关键帧上的区域被视为所需估计的 $R_{I_{K,k}}^i$ 和 $R_{I_{K,k+1}}^i$.

上述的调整方法通过两关键帧的调整算子指导对中间非关键帧的处理, 但当视频上存在随时间变化曝光不均的物体时, 该方法可能在调整欠曝关键帧亮度的同时过度提升某些非关键帧上曝光适中的对应区域, 为了解决这个问题, 一个合理的方法是应用关键帧上区域调整的结果指导对非关键帧的调整. 假设非关键帧 I_n 上 $R_{I_n}^i$ 的点集 $\{p_i | i = 1, 2, \dots, i_0\}$ 其重心为 $\bar{p}$, 而通过光流跟踪得到的在 $I_{K,k}$ 和 $I_{K,k+1}$ 上对应点集的重心分别为 p' 与 p'' , 我们通过 $f_{I_{K,k}}^i$ 和 $f_{I_{K,k+1}}^i$ 对 p' 与 p'' 的调整结果指导对点 $\bar{p}$ 的调整, 即对 $\bar{p}$ 的调整算子 $f_{I_n}^i$ 需满足:

$$f_{I_n}^i(I_n^i(\bar{p})) = \frac{d-d'+1}{d+1} * f_{I_{K,k}}^i(I_{K,k}^i(p')) + \frac{d'}{d+1} * f_{I_{K,k+1}}^i(I_{K,k+1}^i(p'')) \quad (9)$$

我们通过上述等式求解 $f_{I_n}^i$ 中的参数 φ^i , 最后利用该算子对非关键帧 I_n 上的区域 $R_{I_n}^i$ 进行调整.

在对非关键帧进行亮度调整后, 仍需对其进行边界优化以消除不连续性, 这里使用 2.3 小节所述的图像梯度域调整算法. 在得到最终的结果后, 我们按原视频序列顺序组合处理的结果图像, 生成新的视频序列.

4 实验结果及分析

我们在一台配备有 Intel 奔腾 4 3.0GHz CPU 主频处理器、1G 内存的计算机上采用 Microsoft Visual Studio 2005 实现了本文提出的图像和视频亮度调整算法,并测试了一些典型的图像和视频,实验结果表明:我们的算法对曝光不足、侧光以及包含阴影的图片和视频都取得了较优的调整结果。

图 3 对比了本文算法的调整效果与利用传统亮度

调整算法所生成的效果(444 × 333 分辨率).传统的 Gain-offset 算法对于这种局部亮度需要调整的图像处理作用甚微;直方图均衡增强了整幅图片的对比度,但却严重损失了室外区域的图像细节;采用文献[8]中的方法利用算子(1)的调整效果如图 和 所示,显见该方法或对源图亮度调整作用微弱,或在调整暗淡区域的同时过分提升了原本曝光适中区域的亮度;而本文算法可以很好地处理这类图像中各区域曝光不均的情况.

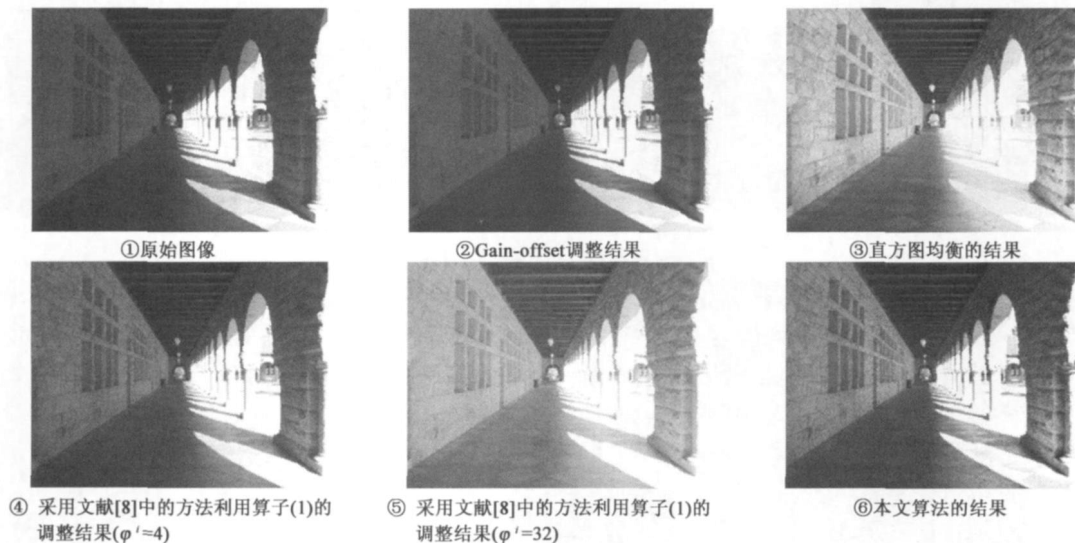


图3 与其他亮度调整算法的比较

图 4 对比了对源图像(500 × 625 分辨率) 亮度调整中仅仅对各区域运用调整算子的调整效果 和经过梯度域调整后的效果 . 易见,仅仅孤立地对各区域作用

映射算子(1)得到的效果在分割区域边界处亮度变化过剧烈,而经过梯度域求解后得到的结果图像消除了这些瑕疵.



图4 图像亮度调整中仅仅对各区域运用调整算子的调整效果和经过梯度域调整后效果的对比

图 5 给出了我们的算法对不同曝光情况图像调整的效果,上排为原始图像,下排为调整后的图像. 其中是曝光不足的图像,分辨率为 420 × 374,处理时间为 0.27 秒,算法处理后的效果在有效保持图像对比度的同时保持并恢复了部分原图不可见的图像细节,如原图树枝下部区域和地面阴影部分的纹理细节. 是我们的算法对于背光图片的处理效果(580 × 386 分辨

率),处理时间 0.51 秒,原始图像主体的前景较暗淡,调整后的效果在有效保持原本曝光充分区域如天空和云彩对比度的同时使得原始低亮的森林清晰可见. 是算法处理从车内往车外拍摄的照片(585 × 428 分辨率),处理时间为 0.6 秒,可见处理后的效果不仅车内以及街道两边的房子对比度增加了,天空对比度也有一定程度的增强.



图5 对不同情况图像的亮度调整

图6 给出了一段包含 28 帧的视频序列中的五帧及对应效果,该段视频包含剧烈的前景人体运动,第 3、22 帧为自动选取的两帧关键帧,第 17 帧是利用这两个关键帧为指导生成的效果,原本视频背景中不可见的网状物经过调整后清晰可见.图 7 给出了对一段包含 240

帧的视频序列的处理效果,其中第一、三排为部分原始帧,而二、四排为处理后的对应帧,生成该效果算法共用时 63.2 秒.视频效果请参见网页:

<http://cs.nju.edu.cn/ywguo/html/Demo.avi>.

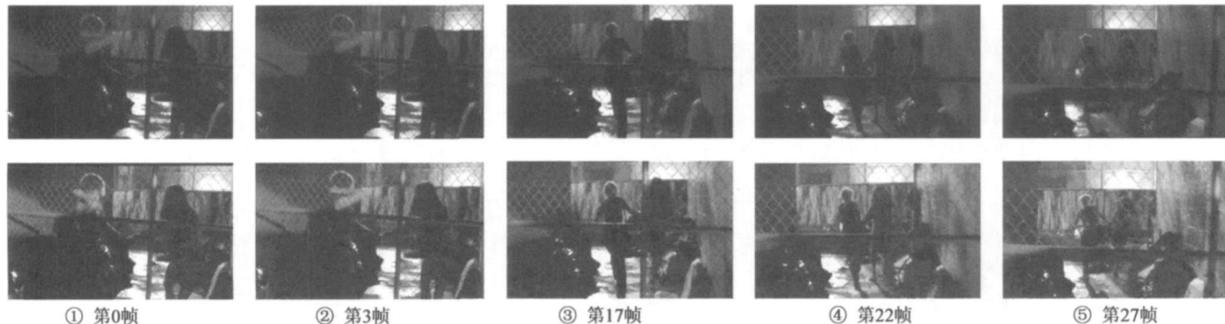


图6 视频亮度的调整结果.原始视频28帧,第一行为原始帧,第二行是调整后效果





图7 视频的亮度调整效果.原始视频240帧,第一、三行为原始帧,而二、四行为调整后的效果

5 总结与展望

亮度调整是图像和视频处理中的基本问题,有非常重要的实用价值.本文提出了基于梯度域的图像和视频亮度自动调整算法,对图像的亮度调整采用分而治之的策略,首先把图像按照亮度进行分割,然后分别对图像的不同亮度区域进行处理,最后通过求解一个梯度约束方程计算调整后的结果图像;对视频的调整首先选取视频的若干关键帧并对其运用图像调整算法,进而以关键帧亮度的调整指导对非关键帧的处理.运用本文算法对欠曝的图像和视频进行调整可以有效处理时空欠曝或曝光不均的图像和视频,在保持图像和视频帧对比度的同时保持拍摄场景的细节纹理,不丢失层次感.

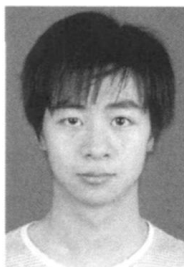
对图像和视频进行亮度调整可能在提升部分区域亮度的同时放大噪声,使得原本不可见的噪声显现出来,这是本文方法目前存在的缺陷,我们计划未来将噪声去除算法结合到本文的方法中去^[17~19],在改善图像亮度的同时达到最优的处理效果;另外在求解梯度方程方面,可以采用基于图形硬件的加速算法,以提高算法整体的效率,达到实时处理.

参考文献:

- [1] R Gonzalez, R Woods. Digital Image Processing (Second Edition) [M]. New Jersey: Prentice Hall, 2002.
- [2] F Drago, K Myszkowski, T Annen, N Chiba. Adaptive logarithmic mapping for displaying high contrast scenes [A]. In Proceedings of Eurographics [C]. Granada: Blackwell Publishing, 2003. 419 - 426.
- [3] G Larson, H Rushmeier, C Piatko. A visibility matching tone reproduction operator for high dynamic range scenes [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 1997, 3 (4): 291 - 306.
- [4] D Lischinski, Z Farbman, M Uyttendaele, R Szeliski. Interactive local adjustment of tonal values [J]. ACM Transactions on Graphics, 2006, 25 (3): 646 - 653.
- [5] E Reinhard, M Stark, P Shirley, J Ferwerda. Photographic tone reproduction for digital images [J]. ACM Transactions on Graphics, 2002, 21 (3): 267 - 276.
- [6] R Fattal, D Lischinski, M Werman. Gradient domain high dynamic range compression [J]. ACM Transactions on Graphics, 2002, 21 (3): 249 - 256.
- [7] P Pérez, M Gangnet, A Blake. Poisson image editing [J]. ACM Transactions on Graphics, 2003, 22 (3): 313 - 318.
- [8] E Bennett, L McMillan. Video enhancement using per-pixel virtual exposures [J]. ACM Transactions on Graphics, 2005, 24 (3): 845 - 852.
- [9] D Comaniciu, P Meer. Mean Shift: A robust approach toward feature space analysis [J]. IEEE Trans Pattern Anal, 2002, 24 (5): 603 - 619.
- [10] Y Boykov, M Jolly. Interactive graph cuts for optimal boundary and region segmentation of objects in n-d images [A]. Proceedings of IEEE ICCV 2001 [C]. Vancouver: IEEE Computer Society, 2001. 105 - 112.
- [11] J Shewchuk. An introduction to the conjugate gradient method without the agonizing pain [R]. Pittsburgh: Carnegie Mellon University, 2002.
- [12] Y Gong, X Liu. Video summarization and retrieval using singular value decomposition [J]. Multimedia Systems, 2003, 9: 157 - 168.
- [13] H Kang, Y Matsushita, X Tang, X Chen. Space-time video montage [A]. Proceedings of IEEE CVPR [C]. New York: IEEE Computer Society, 2006. 1331 - 1338.
- [14] C Ngo, Y Ma, H Zhang. Automatic video summarization by graph model [A]. Proceedings of IEEE ICCV [C]. Nice: IEEE Computer Society, 2003. 104 - 109.

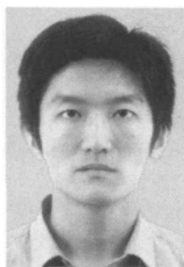
- [15] Y Cheng. Mean shift, mode seeking, and clustering[J]. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1995, 17(8): 790 - 799.
- [16] M Black, D Fleet, Y Yacoob. Robustly estimating changes in image appearance [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2000, 78(1): 8 - 31.
- [17] L Liu, J Wang, X Chen, Y Guo, Q Peng. A robust and fast non-local means algorithm for image denoising[J]. Journal of Computer Science and Technology, 2008, 23(2): 270 - 279.
- [18] 易翔, 王蔚然. 一种概率自适应图像去噪模型[J]. 电子学报, 2005, 33(1): 63 - 66.
Yi Xiang, Wang Wei-ran. A probability model for adaptive image denoising[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(1): 63 - 66. (in Chinese)
- [19] 杨晓慧, 焦李成, 李伟. 基于第二代 bandelets 的图像去噪[J]. 电子学报, 2006, 34(11): 2063 - 2067.
Yang Xiao-hui, Jiao Li-cheng, Li Wei. Second generation bandelets based image denoising [J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(11): 2063 - 2067. (in Chinese)

作者简介:



王 想 男, 1984 年出生. 南京大学计算机科学与技术系硕士研究生, 从事多媒体技术、图像视频处理等方面的研究.

E-mail: wangxiang@graphics.nju.edu.cn



郭延文 男, 1980 年出生, 博士, 讲师, 主要研究方向为计算机图形学、图像和视频处理.

E-mail: ywguo@nju.edu.cn

(上接第 134 页)

- [5] Gonzalez, F, Dasgupta D, Gomez J. The effect of binary matching rules in negative selection[A]. Proceedings of Genetic and Evolutionary Computation Conference (CECCO) [C]. Chicago: Springer Berlin/ Heidelberg, 2003, Volume 2723. 195 - 206.
- [6] Gonzalez, F, Dasgupta D, Nino F L. A randomized real-valued negative selection algorithm [A]. Proceedings of 2nd International Conference on Artificial Immune System (ICARIS) [C]. UK: Springer-Verlag, 2003. 261 - 272.
- [7] Gonzalez, F, Dasgupta D. Anomaly detection using real-valued negative selection[J]. Journal of Genetic Programming and Evolvable Machines, 2003, 4(4): 383 - 403.
- [8] D 'haeseleer P. Further efficient algorithms for generating antibody strings [R]. Technical Report CS95-3, The University of New Mexico, Albuquerque, NM, 1995.
- [9] Helman P, Forrest S. An efficient algorithm for generating random antibody strings[R]. Technical Report CS-94-07, The University of New Mexico, Albuquerque, NM, 1994.
- [10] D 'haeseleer P, Forrest S, Helman P. An immunological approach to change detection: algorithms, analysis and implications [A]. J. McHugh and G. Dinolt, editors, Proceedings of the 1996 IEEE Symposium on Computer Security and Privacy [C]. USA: IEEE Press, 1996. 110 - 119.
- [11] Ji Zhou, Dasgupta D. Real-valued negative selection using variable-sized detectors[A]. Proceedings of International Conference on Genetic and Evolutionary Computation (GECCO) [C] Seattle, WA, 2004, June 26 - 30.
- [12] 张衡, 吴礼发, 张毓森, 曾庆凯. 一种 r 可变阴性选择算法及其仿真分析[J]. 计算机学报, 2005, 28(10): 1614 - 1619.
- [13] 何申, 罗文坚, 王熙法. 一种检测器长度可变的非选择算法[J]. 软件学报, 2007, 18(6): 1361 - 1368.
- [14] Balthrop J, Forrest S, Glickman R M. Revisting LISYS: parameters and normal behavior [A]. Proceedings of the 2002 Congress on Evolutionary Computation CEC2002 [C]. USA: IEEE Press, 2002. 1045 - 1050.
- [15] Farmer D J, Packard H N, Perelson S A. The immune system, adaptation, and machine learning[J]. Physical D, 1986, 22(1 - 3): 187 - 204.