

基于图切割的图像拼接技术研究

方贤勇^{1),2)} 张明敏¹⁾ 潘志庚¹⁾ 罗斌²⁾ 王鹏¹⁾

¹⁾(浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室, 杭州 310058)

²⁾(安徽大学计算智能与信号处理教育部重点实验室, 合肥 230039)

摘要 虽然图像拼接技术已进行多年研究,但是鬼影和曝光差异仍然难以消除。为解决这两个问题,提出了一种基于图切割的图像拼接方法。该方法结合图切割和泊松融合技术,首先利用每个像素邻域统计得到的梯度方向直方图来计算重叠区的带权有向图的权值,并通过实现稳定的图切割缝线搜索,以消除鬼影;然后利用重叠过渡的泊松融合过程解决了缝线拼接后的曝光差异问题,从而最终实现平滑的图像拼接。实验表明,该算法能够有效地消除鬼影和曝光差异。

关键词 图像拼接 图切割 泊松融合 鬼影 曝光差异

中图分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2007)12-2050-07

Research of Image Mosaic Based on Graph Cut

FANG Xian-yong^{1),2)}, ZHANG Ming-min¹⁾, PAN Zhi-geng¹⁾, LUO Bin²⁾, WANG Peng¹⁾

¹⁾(State Key Laboratory of CAD&CG, Zhejiang University, Hangzhou 310058)

²⁾(Key Laboratory of Intelligent Computing and Signal Processing of MOE, Anhui University, Hefei 230039)

Abstract Image mosaic has been researched for several years, but still it is hard to realize mosaic without ghosting and exposure difference. In this paper, for resolving these two problems, a new image mosaic method based on graph cut is presented. This method integrates two techniques: first graph cut, it is used to calculate a robust graph cut seam-line for deghosting by initializing the weighted directed graph with gradient direction histogram of each pixel; second Poisson image fusion, to further eliminate the exposure difference by an overlap transition Poisson image fusion procedure. Experimental results demonstrate the efficiency of our proposed method.

Keywords image mosaic, graph cut, Poisson image fusion, ghosting, exposure difference

1 引言

图像拼接技术^[1-3]通常是指将相邻的小视域照片粘接一起,以得到一幅大视域图像的技术。这些小视域的源图像一般是由用户在某一固定点用手持相机环视场景拍得的,因此不可避免地存在鬼影(ghosting)和曝光差异(exposure difference)^[1]的问题。鬼影是指同一物体相互重叠的现象,可以分为配准鬼影和合成鬼影两种,前者是由于无法准确配准计算而造成的,后者则是由于运动物体而造成的。

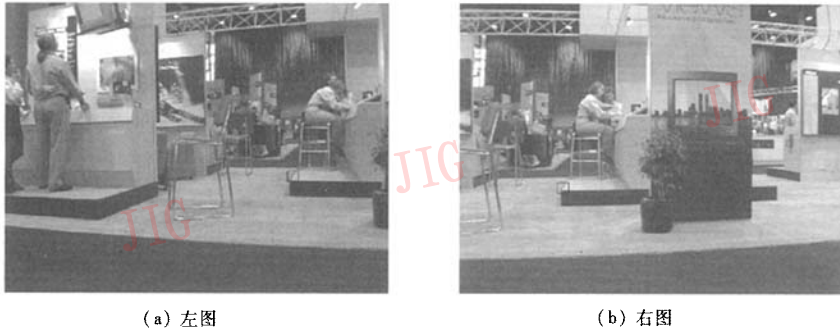
而曝光差异则是由于手持相机自动曝光所造成的拼接图像因源图像色彩强度不同而形成的曝光瑕疵。图1所示的两幅相邻图像就是因为运动物体和曝光不同而无法拼接。

前人在配准求精方面已做了大量工作^[3-5],虽已可以较好地解决配准鬼影问题,但是在合成鬼影去除方面,目前尚无非常稳定的方法。要消除合成鬼影,比较好的方法是对拼接图像中每个重叠的运动物体只从一幅图像中选取。基于这一思路,研究者分别提出了以下3类拼接方法:第1类是根据运动关系只从一幅图像切割出一条切片进行合成的流

基金项目:国家自然科学基金项目(60375010);国家自然科学基金重点项目(60533080);安徽高校省级自然科学研究一般项目(KJ2007B005)

收稿日期:2005-06-01;改回日期:2006-05-17

第一作者简介:方贤勇(1978~),男,博士,讲师。研究方向为计算机视觉、计算机图形学和图像处理。E-mail: fangxianyong@ahu.edu.cn



(a) 左图

(b) 右图

图 1 会造成鬼影和曝光差异的拼接源图像

Fig. 1 Neighboring source images with moving objects and different exposures

形拼接方法^[6,7];第 2 类是先找到每幅图像中运动物体的部分,然后对同一物体只从一幅图像中选取的顶点覆盖方法^[8];最后一类是直接将重叠区分割成两部分,其每一部分都是从一幅图像上选取的基于缝合线的拼接方法^[1,9,10]。

由于流形拼接要求相邻的图像位移很小,而且切割的切片也很窄,因此对图像中运动物体的大小和运动幅度要求很有限。顶点覆盖方法虽然可以较好地解决鬼影,但是由于需要在相邻图像中查找出所有的运动物体,并对每个运动物体计算顶点覆盖,因此这个方法执行过程非常复杂。而基于缝合线的拼接方法则由于只需查找将图像分割成两部分的最佳缝合线就可以较好地解决鬼影,故比顶点覆盖方法简单。但是由于已有的基于缝合线的拼接方法都是采用局部最优的缝合线,因此不能够稳定地求解最佳缝合线。Kwatra 等提出了利用图切割技术 (graph cut)^[11] 查找全局最佳缝合线来实现纹理合成的方法^[12],较好地克服了前人缝合线搜索的局部性。Agarwala 等则将这一技术运用到图像蒙太奇中,通过交互,一条切割线就可以将来自多幅图像中的多个感兴趣物体拼接到一起^[13]。文献[14], [15]则将这一技术运用到交互式的前景提取之中。上述几个文献提出的方法在应用于图切割时的不同点是带权有向图的权值计算方法,但是研究发现,这些权值或者基于梯度强度或者基于像素色彩强度或者两者结合进行考虑,即实际上由于只考虑强度上的变化,而没有考虑图像中纹理变化方向的影响,因此不可避免地不稳定。

曝光差异的去除可以通过特征融合算法 (featuring algorithm)^[16],多分辨率拼接方法 (multiresolution spline mosaic)^[1,4,17]或基于梯度域

的融合方法 (gradient domain fusion)^[18,19]来实现。由于特征融合算法只对重叠区进行加权平均,因此只在重叠区实现融合过渡,很难消除合成鬼影,且对配准误差很敏感。而多分辨率拼接方法虽然不能消除合成鬼影,但是通过将图像分解成多幅尺度图像再合成,不仅可实现整图范围内的融合过渡,并可降低对配准误差的敏感度。多分辨率拼接的不足是由于多次滤波会造成信号减弱,因此最终合成的图像会变暗和模糊。基于梯度域的融合方法是利用梯度场实现合成,由于需要计算出重叠区的梯度场,因此合成的图像不会出现多分辨率拼接中存在的变暗和模糊的现象。Levin 等提出利用梯度加权融合、梯度逼近等多个方法计算重叠区的梯度场^[18],并分析出基于 L1 准则的梯度逼近求解方法最好,但是由于这个方法需要求解一个线性优化过程,因此不能保证稳定地收敛。Pérez 等则提出泊松融合的图像合成方法^[19]。该方法借助于一个指导场,通过求解泊松方程得到待融合的未知区域的梯度场来实现稳定的图像融合。Agarwala 等则在文献[19]方法的基础上进一步提出利用纽曼边界条件 (Neumann boundary conditions) 实现多个合成片段的平滑过渡^[13]。

由于图切割可以查找到全局最优的缝合线,而泊松融合技术又可以实现稳定的纹理保持的合成,因此本文将这两者相结合,提出一种新的基于图切割的图像拼接方法。这一方法的实现过程是先用相位校正方法计算出相邻图像间的位移;然后利用图切割方法计算出最佳的缝合线,最后利用泊松融合技术进行图像合成。为了提高算法的稳定性,本文提出一种新的基于梯度方向直方图统计的权值计算方法,即将梯度强度和方向相结合,从而克服了前人只是基于强度而得到的权值的不稳定性,较好地实现了

图切割。本文还提出采用重叠过渡的泊松融合方法来消除曝光差异,即先通过将重叠区划分成两个片段,然后分别执行泊松融合,以实现重叠区的平滑过渡。下面就重点讨论本文方法中的图切割和泊松融合技术,有关相位校正的方法请参见文献[20]。

2 最佳缝合线搜索

图 2 显示如何对重叠区进行图切割的初始化。在图 2(a)中, I_M 和 I_N 表示两幅相邻的图像, I_{over} 表示重叠区。图切割初始化时,首先建立两幅图像间如图 2(b)所示的带权有向图,这里假设重叠区的大小为 3×3 , M 和 N 分别是重叠区内图像 I_M 和 I_N 上的像素点, M 代表源点, N 代表接收点;然后由点 M 和 N 分别向相邻的重叠区内的像素发出弧 t , 同时由重叠区内的像素向 4 个邻域像素发出弧 e 。弧 t 的权值大小为 ∞ , 这样就可以保证切割的缝合线不穿过重叠区的边界,以保证切割成功。如何定义弧 e 的权值呢?

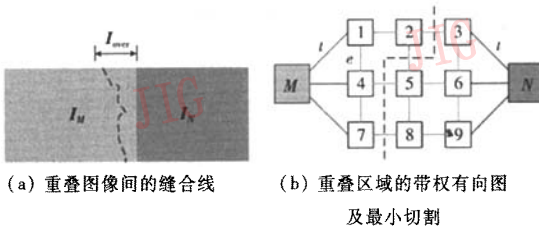


图 2 图切割拼接原理

Fig. 2 Principle of image mosaic based on graph cut

前人的方法都是基于梯度强度或色彩强度进行弧 e 的权值计算。由于相邻图像存在曝光差异,因此基于色彩的强度差是不稳定的。梯度强度差虽然在一定程度上强调了几何结构上的相似性,但是由于噪声和配准误差的影响,仅仅梯度强度上的相似性也是不够的,还必须要考虑图像中纹理变化方向的相似性,即梯度方向上的相似性。为此可以先通过对每个像素的邻域进行统计来得到该像素的梯度方向直方图;然后将弧 e 权值的求解建立在相邻像素间的梯度方向直方图比较之上,这样得出的权值,由于结合了梯度强度和方向的影响,因此可以有效表达该像素点及其周围像素的特点。具体的弧 e 权值求解过程如下:

(1) 初始化各个像素的梯度方向直方图 对于图像上的每个点计算相邻区域的梯度方向直方图。

如图 3(a)所示,梯度方向直方图统计是以该像素点为中心对周围半径 r 的圆形区域,采用高斯加权的方式对邻域内所有像素点在各个梯度方向的强度之和进行统计。高斯加权一方面可降低噪声的影响,另外一方面也强调了离中心点近的像素的作用。

(2) 峰值求精 由于梯度方向直方图峰值反映了像素及其邻域的主要分布特征,因此需要对其进行求精。求精的方法是首先对峰值方向的强度和其相邻 3 个方向的强度进行抛物线拟合,然后用拟合得到的抛物线的峰值替代原峰值。对于图 1 中的两幅图像,其重叠部分内的黑框分别进行放大显示(图 3(b)和图 3(c)),其中的点 p 和点 q 表示重叠区的两个位置。这两个位置的像素经峰值求精处理后的梯度方向直方图为图 3(e)和图 3(f)。观察发现,直方图呈现出局部集中的特性,其反映了像素点及其邻域像素是沿着某些纹理方向分布的(梯度方向直方图中强度较大的方向定义为主方向),这说明将方向和强度相结合必然能够更加准确地表达该像素点的特征。

(3) 计算相邻像素的弧 e 权值:这里分为以下两步:第 1 步计算不同图像上同一位置处的加权距离向量 d 。对于点 p ,其距离向量 d_p 的第 i 个量 $d_p(i)$ 的计算方法如下:

$$d_p(i) = |\lambda(H_{p_{i_1}}(i) - H_{p_{i_2}}(i))|$$

$$\lambda = \max(H_{p_{i_1}}(i), H_{p_{i_2}}(i))$$

上式中, p_{i_1} 和 p_{i_2} 分别表示图像 I_1 和图像 I_2 中点 p 的位置, $H(i)$ 表示梯度方向直方图 H 的第 i 个分量。 λ 是加权系数,其目的是强调梯度方向直方图中主方向的作用,以增加直方图相似性的度量准确度。

第 2 步根据距离向量计算相邻两个位置弧 e 的权值。对于相邻位置 (p, q) ,其权值的计算公式为 $W(p, q) = \|d_p\| + \|d_q\|$ 。

图 3(g)给出了点 p 和点 q 在两幅图像中的梯度方向直方图的绝对差,由图 3(g)可以看出,两幅图像在点 p 和点 q 处虽然有区别,但是不够明显。而图 3(h)给出的加权距离向量却可以清楚表达两幅图像在点 p 和点 q 处的差异。

根据初始化的带权有向图,最终的全局优化的缝合线就可以用图切割方法^[11,12]计算出。图 3(d)图中的虚线就是最终求解得到的缝合线,由此可以看出,切割线经过了与点 p 相连的弧 e 。当然,切割线经过与点 p 相连的弧 e ,不仅仅是点 p 的功劳,周围的顶

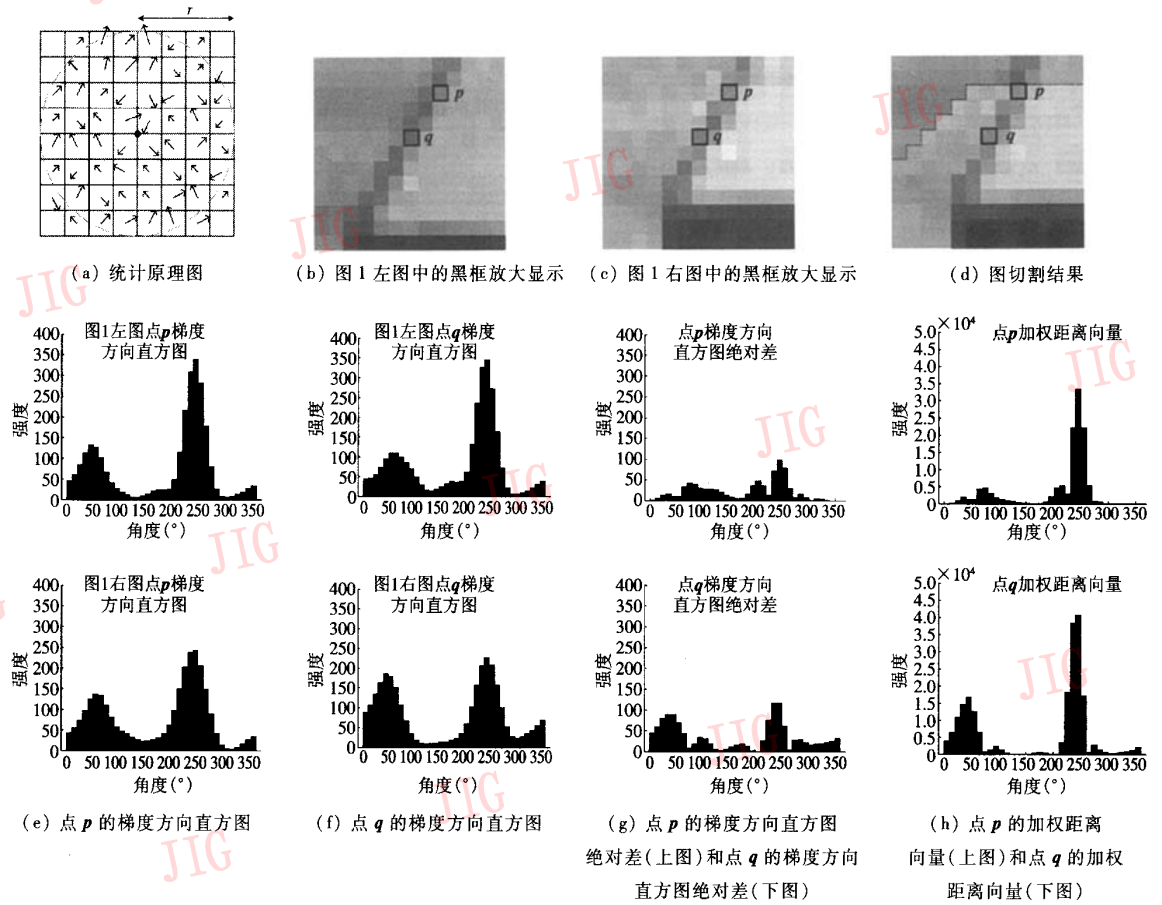


图 3 梯度方向直方图统计
Fig. 3 Statistics of gradient direction histogram

点也做出了贡献,因而造成全局最优缝合线经过点 p 。如果点 p 处的弧 e 的权值比点 q 高,那么全局最优的缝合线最终可能选择经过与点 q 相连的弧 e 。

3 重叠过渡的泊松融合

泊松融合来源于模插值。模插值可以概括为:对于图像定义域 \mathbf{R}^2 上的封闭子集 S, Ω 是 S 上的一个封闭子集,其边界是 $\partial\Omega$, \hat{f} 是定义在 $\partial\Omega$ 上已知的标量函数,模插值就是求解定义在 Ω 上未知的标量函数 f 。由于上述模插值的求解的结果会比较模糊,为此引入一个指导场 v ,让 f 的分布去逼近 v ,这就是泊松融合。Pérez 等利用有限差分法得到如下的求解公式^[19]:

$$|N_p|f_p - \sum_{q \in N_p \cap \Omega} f_q = \sum_{q \in N_p \cap \partial\Omega} \hat{f}_q + \sum_{q \in N_p} v_{p,q} \quad (1)$$

其中, $|N_p| \leq 4$ 表示每个像素点的相邻像素的个数。

本文在上述泊松融合原理的基础上,提出了一种重叠过渡的泊松融合方法用于实现图切割后的图像融合处理。该方法通过将每个重叠区域划分成两个相邻的未知区域,两者相邻的边的像素强度取两幅源图像上相应位置的像素强度均值,而与相邻边相对的边的像素强度则只取一幅图像上的像素强度,以实现重叠过渡。图 4 显示了这一融合处理过程,具体如下:

(1) 未知区域划分:先将重叠部分划分成两个

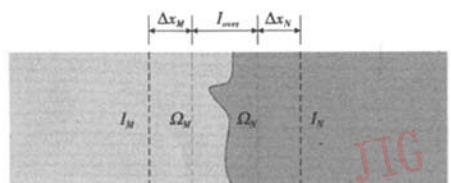


图 4 重叠过渡的泊松融合

Fig. 4 Principle of overlap transition poisson image fusion

未知区域,然后分别进行融合,划分的方法是从重叠区的边界分别向左和右扩展 Δx_M 和 Δx_N 。这样得到的新边界与缝合线就分别定义了两个泊松融合的未知区域 Ω_M 和 Ω_N 。

(2) 泊松融合参数初始化: Ω_M 和 Ω_N 的指导场分别取两幅源图像相应区域的梯度,两个区域的边界中,位于缝合线两侧的边界 $\partial\hat{\Omega}$ 取该边界处图像 I_M 和 I_N 的像素值平均。比如对于 Ω_M 边界 $\partial\hat{\Omega}_M$ 上的点 a ,其像素值为

$$\partial\hat{\Omega}_M(a) = \frac{I_M(a) + I_N(a)}{2}$$

与上述邻边相对的边界,可取原图上的像素值。而两个区域的上下边界则不取任何像素值,即为 0。

(3) 未知区域泊松融合求解。对每个未知区域可利用式(1)进行求解,最后合到一起就完成了融合过渡。

将由未知区域的每个像素点得到的式(1)组合到一起,就可得到 $UX = V$ 的形式。由于系数矩阵 U 是对称稀疏的正定矩阵,因此可以用超松弛的高斯-塞德尔迭代方法(SOR)求解,迭代过程如下式所示:

$$x_i^{(k+1)} = x_i^{(k)} + \frac{w}{u_{i,i}} \left(v_i - \sum_{j=1}^{i-1} u_{i,j} x_j^{(k+1)} - \sum_{j=i+1}^n u_{i,j} x_j^{(k)} \right) \quad (2)$$

对于两个重叠率占到 1/3 的 640×480 大小的图像来说,每个未知区域通常大约会有 50 000 pixels,这样就会得到一个 U 为 $50\,000 \times 50\,000$ 左右的超定方程组,显然直接用 SOR 法计算不仅占用空间太大,且计算速度慢。

但是因为每个像素最多有 4 个近邻,所以在

式(2)的 n 个未知解中只存在 4 个未知数需要更新。假设图像坐标系原点在图像的左下角,逐行逐列编号,则这 4 个数分别为编号小的左邻和下邻以及编号大的右邻和上邻。因此,假定第 i 个像素的下邻和上邻的编号分别为 s 和 t ,则结合式(1)可以将式(2)简化为

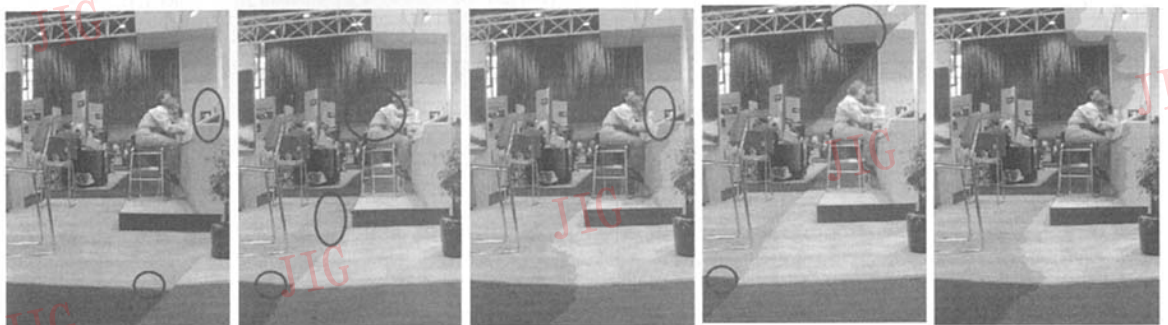
$$x_i^{(k+1)} = x_i^{(k)} + \frac{w}{u_i} (v_i + x_{i-1}^{(k+1)} + x_{i+1}^{(k+1)} + x_{i+1}^{(k)} + x_{i-1}^{(k)}) \quad (3)$$

式中, u_i 表示第 i 个像素的相邻像素的个数,即 $|N_p|$ 。上述简化计算不仅明显加快了计算速度,并节约了存储空间。

4 实验

图 5 显示了利用几个不同的权值对图 1 的两幅图像进行图切割拼接的效果对比,该图还没有进行泊松融合,且图中对不齐的地方用黑色圈标出。由图 5 可以看出,基于色彩强度的方式或者将色彩强度和梯度强度相结合的方式得到的缝合线对不齐的地方较明显,基于梯度的方法也不能对齐缝合线两边的像素(与桌子相连墙壁处不连续),而本文提出的基于梯度方向直方图的方法则能够较稳定地算出缝合线,可取得最佳的缝合效果。图 6 给出了对图 5(f)进行泊松融合的结果,该图已经看不出任何曝光差异。

图 7 显示了 3 幅含有多个运动物体的源图像的图切割拼接,并给出了用重叠过度的泊松融合、多分辨拼接两种方法进行合成的结果。由图 7 可以看出,图切割较好地避开了运动物体。对比图 7(c)和



(a) 文献[19]中的式(1) (基于色彩权值)的拼接结果
(b) 文献[19]中的式(5) (基于色彩和梯度相结合权值)的拼接结果
(c) 文献[13]中的式(1) (基于梯度权值)的拼接结果
(d) 文献[13]中的式(1) (基于色彩和梯度之和权值)的拼接结果
(f) 本文提出的权值拼接结果

图 5 图 1 的图切割拼接效果对比

Fig. 5 The graph cut mosaic result of the images in Fig. 1



Fig. 6 The overlap transition poisson image fusion result of Fig. 5(f)



(a) 源图像



(b) 重叠物体示意



(c) 图切割 + 重叠过渡的泊松融合结果



(d) 图切割 + 多分辨率拼接结果

图 7 含有动态物体的 3 幅图像拼接

Fig. 7 The mosaic of three images with moving objects

图 7(d) 可以看出,多分辨率拼接使图像变暗和模糊,而重叠过渡的泊松融合则可以较好地保持原有的纹理特征。

通常高斯平滑的方差取 4,每个像素的统计邻域 r 取 8,梯度方向直方图取 36 个方向,而泊松融合中,左右两边的扩展区域则要根据重叠区的大小以及缝合线的位置来定,通常重叠区重叠 2% 就可以了。

5 结 论

本文对基于图切割的图像拼接技术进行了研究。与前人方法相比,本文创新点可以归纳如下:

(1) 提出了基于图切割的图像拼接方法。该方法首先利用图切割查找出一条全局最佳缝合线,然后用泊松融合技术实现最终的合成。

(2) 提出了基于梯度方向直方图统计的权值计算方法。该方法先通过计算每个像素点邻域的梯度方向直方图,然后将像素点的梯度强度和方向结合在一起进行权值计算,从而克服了前人方法基于色彩强度或梯度强度的权值计算方法的不稳定性,完成了较好的图切割缝合线搜索。

(3) 提出了重叠过渡的泊松融合方式,即通过将重叠区划分成两个未知区域,分别定义实现平滑过渡过的边界值来实现曝光差异的处理。

实验表明,本文提出的方法具有较强的稳定性和较高的应用价值。

参考文献 (References)

1 Fang Xian-yong, Pan Zhi-geng, Xu Dan. An improved algorithm for

- image mosaics [J]. *Computer Aid Design and Computer Graphics*, 2003, **15**(11): 1362 ~ 1366. [方贤勇, 潘志庚, 徐丹. 改进的图像拼接算法[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2003, **15**(11): 1362 ~ 1366.]
- 2 Szeliski R. Image Alignment and Stitching [R]. Technical Report, MSR-TR-2004-92, Preliminary draft, 2005.
- 3 Szeliski R, Shum H Y. Creating full view panorama image mosaics and environment maps [A]. In: *Proceedings of 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques [C]*, Los Angeles, CA, USA, 1997: 251 ~ 258.
- 4 Brown M, Lowe D. Recognising panorama [A]. In: *Proceedings of 9th International Conference on Computer Vision [C]*, Nice, France, 2003: 1218 ~ 1225.
- 5 Shum H Y, Szeliski R. Construction and refinement of panoramic mosaics with global and local alignment [A]. In: *Proceedings of 6th International Conference on Computer Vision [C]*, Bombay, India, 1998: 953 ~ 958.
- 6 Peleg S, Rousso B, Rav-Acha A, *et al.* Mosaicing on adaptive manifolds [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, **22**(10): 1144 ~ 1154.
- 7 Rousso B, Peleg S, Finci I. Mosaicing with generalized strips [A]. In: *Proceedings of Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) Image Understanding Workshop [C]*, New Orleans, Louisiana, USA, 1997: 255 ~ 260.
- 8 Uyttendaele M, Eden A, Szeliski R. Eliminating ghosting and exposure artifacts in image mosaics [A]. In: *Proceedings of 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C]*, Hawaii, USA, 2001, **2**: 509 ~ 516.
- 9 Davis J. Mosaics of scenes with moving objects [A]. In: *Proceedings of 1998 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C]*, Santa Barbara, CA, USA, 1998: 354 ~ 360.
- 10 Duplaquet M L. Building large image mosaics with invisible seam-lines [A]. In: *Proceedings of SPIE Visual Information Processing VII [C]*, Orlando, USA, 1998: 369 ~ 377.
- 11 Boykov Y, Veksler O, Zabih R. Fast approximate energy minimization via graph cuts [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2001, **23**(11): 1222 ~ 1239.
- 12 Kwatra V, Schödl A, Essa I A, *et al.* Graphcut textures: image and video synthesis using graph cuts [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2003, **22**(3): 277 ~ 286.
- 13 Agarwala A, Dontcheva M, Agrawala M, *et al.* Interactive digital photomontage [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2004, **23**(3): 294 ~ 302.
- 14 Li Y, Sun J, Shum H Y. Lazy snapping [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2004, **23**(3): 303 ~ 308.
- 15 Rother C, Kolmogorov V, Blake A, *et al.* "GrabCut"-interactive foreground extraction using iterated graph cuts [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2004, **23**(3): 309 ~ 314.
- 16 Szeliski R. Video mosaics for virtual environments [J]. *IEEE Transactions on Computer Graphics and Applications*, 1996, **16**(2): 22 ~ 30.
- 17 Burt P J, Adelson E H. A multiresolution spline with application to image mosaics [J]. *ACM Transactions on Computer Graphics*, 1983, **2**(4): 217 ~ 236.
- 18 Levin A, Zomet A, Peleg S, *et al.* Seamless image stitching in the gradient domain [A]. In: *Proceedings of 2004 European Conference on Computer Vision [C]*, Prague, Czech Republic, 2004: 377 ~ 389.
- 19 Pérez P, Gangnet M, Blake A. Poisson image editing [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2003, **22**(3): 313 ~ 318.
- 20 Brown L G. A survey of image registration technologies [J]. *ACM Computing Survey*, 1994, **24**(4): 325 ~ 376.