

改进 Closed_Form Solution 方法进行 前景物体运动模糊抠图*

侯金鑫, 张 军

(国防科学技术大学 信息系统与管理学院, 长沙 410073)

摘 要: 针对 Closed_Form Solution 图像抠图方法在进行前景物体运动模糊抠图时容易受到复杂背景影响而产生抠图不精确问题, 提出一种结合运动模糊物体局部梯度统计特征以及透明度连续性特点的抠图方法。该方法在原来 Closed_Form Solution 方法中加入一项含有权重的透明度值之差的约束平滑项, 通过相邻像素运动梯度统计特征和透明度差值约束改善传统方法抠图不精确问题。仿真实验和真实运动模糊抠图实验结果表明, 改进算法相对传统 Closed_Form Solution 方法能够更有效地提取出前景物体运动模糊区域, 抠图结果更为平滑。

关键词: Closed_Form Solution 抠图; 运动模糊; 梯度统计特征; 透明度

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2013)05-1554-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2013.05.071

Improved Closed_Form Solution method for foreground object motion blurred image matting

HOU Jin-xin, ZHANG Jun

(College of Information System & Management, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Closed_Form Solution to matting the foreground motion blurred object usually can't get motion region exactly when background is complex. This paper presented an improved algorithm which combined the local image grads statistics of motion blurred object with the continuity of transparency α . The algorithm added a smooth constraint term on the original to get exact region, and constructed this constraint term by the difference of the local transparency value on each pixel. Simulation experiment and real motion image experiment show that the matting quality is improved and the matting result is smoothness.

Key words: Closed_Form Solution matting; motion blur; grads statistics character; transparency

数字图像抠图技术(image matting)是把图像中一部分从其他部分分离出来的一种图像处理技术。一般而言, 图像抠图问题将输入图像 I 看成前景图像 F 和背景图像 B 的合成, 即满足如下图像合成方程^[1]:

$$I_i = \alpha_i F_i + (1 - \alpha_i) B_i \quad (1)$$

其中: α_i 是指在任意像素点 i 前景色所占比例或者称为前景色的不透明度。对于一幅三通道 RGB 图像, 合成方程的左边是三个已知的量, 而方程的右边是七个未知量。因此图像抠图问题是一个不适定问题, 不可能求得精确解。目前, 较为经典的单幅图像抠图方法主要有 Poisson 方法^[2]、Bayes 方法^[3]、Closed_Form Solution 方法^[4]、Spectral matting 方法^[5]等。最新的单幅图像抠图方法主要有 L1 matting 方法^[6]、Nonlocal matting 方法^[7]等。这些方法基于图像的不同特性提出了不同的求解模型, 在一定程度上解决了图像抠图问题, 特别是 Closed_Form Solution 方法建立的颜色线性模型在进行自然图像抠图时得到了较好的前景图像。

当前运动前景物体提取主要有两个方向的研究, 一是单幅图像中运动模糊前景物体抠图, 这是运动去模糊问题的第一个步骤^[8]; 另一个是视频序列中运动前景物体提取, 主要用于运动目标跟踪^[9,10]。对于单幅图像而言, 图像抠图技术是实现前

景运动物体提取的唯一途径。虽然现有的图像抠图方法在单幅自然图像抠图方面已取得了一定的效果, 但是目前的抠图算法基本都是针对图像中静态物体的提取而设计的。由于受到运动模糊以及复杂背景的影响, 已有图像抠图方法在进行运动模糊物体抠图时往往不能起到很好效果^[11]。静态物体抠图方法在进行运动模糊物体提取时能够较好地得到物体大致轮廓, 但是模糊程度严重的物体边缘部分细节丢失程度也相对严重, 或者产生过度抠图的情况。

1 Closed_Form Solution 方法

由于自然图像抠图问题是一个不适定问题, 因此图像抠图必须进行适当的条件假设。Closed_Form Solution 方法从灰度图像抠图开始推导, 假设图像前景灰度值和背景灰度值在一个以任意像素为核心的小窗口内几乎不变, 即前景和背景满足局部平滑条件, 但并不是图像全局平滑。在此假设基础上, 可以将式(2)重新表示为

$$\alpha_i \approx a I_i + b \quad \forall i \in w \quad (2)$$

其中: $a = \frac{1}{F - B}$, $b = -\frac{B}{F - B}$, w 表示以像素点 i 为中心的小窗

收稿日期: 2012-07-21; 修回日期: 2012-09-27 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61170159)

作者简介: 侯金鑫(1988-), 男, 四川宜宾人, 硕士研究生, 主要研究方向为图像处理(jinqianghou@163.com); 张军(1976-), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为图像处理、计算机视觉。

口。Closed_Form Solution 方法为了从灰度图像中提取出前景物体,根据式(2)提出了一个代价函数如式(3):

$$J(\alpha, a, b) = \sum_{j \in l} \left(\sum_{i \in w_j} (\alpha_i - a_j I_i - b_j)^2 + \varepsilon a_j^2 \right) \quad (3)$$

其中: w_j 是指以像素 j 为中心的小窗口。对于一幅含有 N 个像素点的图像,上面的代价函数有 $3N$ 个未知量。经过一系列的推导和证明,可以将代价函数简化为

$$J(\alpha) = \alpha^T L \alpha \quad (4)$$

其中: L 是一个 $N \times N$ 的拉普拉斯矩阵。矩阵元素 (i, j) 的值为

$$\sum_{kl(i,j) \in w_k} \left(\delta_{ij} - \frac{1}{|w_k|} \left(1 + \frac{1}{\frac{\varepsilon}{|w_k|} + \sigma_k^2} (I_i - \mu_k)(I_j - \mu_k) \right) \right) \quad (5)$$

经过灰度图像 Closed_Form Solution 方法的推导可以看出,该方法的核心是提出局部小窗口平滑的假设,然后利用局部小窗口中每一个像素点之间的相关性构造了一个拉普拉斯权重矩阵,通过求解该权重矩阵的最小特征向量可以求得代价函数的最优值,而这个最小特征向量即为所求的前景透明度。

类似于灰度图像的 Closed_Form Solution 方法,彩色图像的 Closed_Form Solution 方法假设彩色图像中前景和背景满足颜色线性模型。颜色线性模型是指任意局部小窗口中前景像素点和背景像素点分别可以用两个基本的前景像素和背景像素线性表示,即 $F_i = \beta_i F_1 + (1 - \beta_i) F_2$, $B_j = \gamma_j B_1 + (1 - \gamma_j) B_2$, $i, j \in w$ 。

根据颜色线性模型假设, Closed_Form Solution 方法将表达式(2)重新表示为符合彩色图像的形式:

$$\alpha_i \approx \sum_c a^c F_i^c + b \quad \forall i \in w \quad (6)$$

其中: c 表示彩色图像 R, G, B 三个通道。经过类似灰度图像抠图算法的推导过程,可以得到彩色图像 Closed_Form Solution 方法的代价函数表达式仍然是 $J(\alpha) = \alpha^T L \alpha$, 其中的拉普拉斯矩阵的表达式为

$$\sum_{kl(i,j) \in w_k} \left(\delta_{ij} - \frac{1}{|w_k|} \left(1 + \frac{1}{\sum_k + \frac{\varepsilon}{|w_k|} I_3} (I_j - \mu_k) \right) \right) \quad (7)$$

其中: δ_{ij} 是克罗诺克符号,当 $i=j$ 时为 1, 否则为 0; μ_k 表示窗口 w_k 中颜色的平均值; $\sum_k$ 表示窗口中颜色的协方差; ε 是一个调整参数; 而 $|w_k|$ 表示窗口中像素点的个数。

单幅图像抠图算法通常需要输入一幅手工标记的三分图,即将原始图像确定的前景区域和背景区域以及不确定区域进行标记,抠图算法以前景点和背景点作为约束条件对不确定区域进行计算,从而获得整幅图像的前景图像。Closed_Form Solution 方法中同样利用这样一个标记图像进行约束,虽然这个标记图像并不需要严格地按照三分图的标准样式,但是仍然需要明确标记部分前景背景。经过标记图像约束后,抠图问题表示为求解如下一个约束条件下最优透明度 α 值问题:

$$\alpha = \arg \min \alpha^T L \alpha + \lambda (\alpha^T - b_s^T) D_s (\alpha - b_s) \quad (8)$$

其中:前一项为前面推导得到的无约束条件的代价函数,即式(4);后一项为三分图标记的前景和背景约束项; b_s 是一个向量,向量中前景点标记为 1, 其他为 0; D_s 是一个斜对角矩阵,其中斜对角线上的元素为 1 表示该点是确定的前景或背景,否则即为不确定区域点。式(8)可以通过求解式(9)得到

$$(L + \lambda D_s) \alpha = \lambda b_s \quad (9)$$

式(9)即为 Closed_Form Solution 方法最终解的求解方程。该方法只需要计算这个简单的稀疏线性方程组就可以将自然图

像前景物体较好地提取出来。

从 Closed_Form Solution 方法的推导过程中可以看出,该方法是建立在自然图像满足颜色线性条件假设的基础上的。Levin 等人在文献[4]中指出,颜色线性模型假设对于自然图像抠图能够求得很好的效果,但是并非所有图像都能很好地满足颜色线性模型。对于背景纹理比较丰富的图像来说,由于在不确定区域的前景和背景混杂严重,使得不确定区域不满足颜色线性模型,从而造成抠图不精确或者产生过度抠图的现象。

2 改进 Closed_Form Solution 方法

相对于自然图像前景物体与背景之间的边界而言,运动模糊图像的模糊区域面积较大,前景和背景叠加交杂部分较多,前景物体边缘受到背景影响也更大。复杂背景下的自然图像抠图,往往由于背景影响使得一些局部边缘并不满足颜色线性模型,从而使抠图不精确。对于运动模糊图像抠图,由于模糊区域受到更多背景影响,有更大量的区域会不满足颜色线性模型,如图 1 所示。

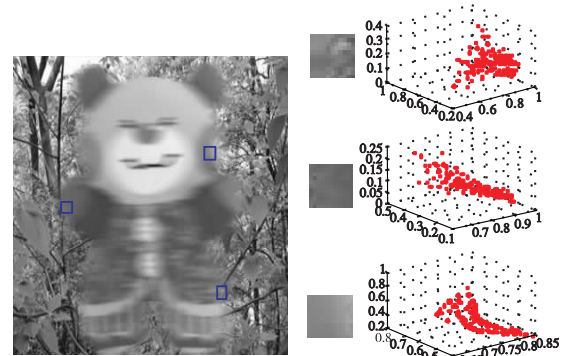
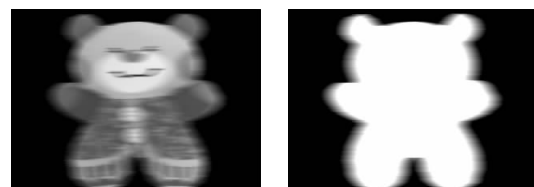


图1 运动模糊边缘局部区域散点图

为了使运动模糊图像抠图更精确,解决传统自然图像抠图方法在进行运动图像抠图时产生的细节丢失以及过度抠图问题,本文结合运动模糊图像中模糊区域运动信息,在传统的 Closed_Form Solution 方法基础上加以改进,获得更为精确的运动模糊前景图像透明度 α 值。由于造成运动模糊现象的具体运动方式往往无法预先得知,通常需要估计物体的运动方式来获得相应的运动参数。通常情况下,假设物体运动在局部区域是满足线性运动的,即在运动模糊区域边缘前景物体呈线性的方式叠加到背景中。因此在局部线性运动假设下,前景物体的透明度从完全前景到完全背景的过程中随着线性运动方向呈线性变化。如图 2 所示, (a) 是仿真图像,其前景物体的运动方向是水平方向。图 2 中运动物体在纯色背景下透明度变化是沿着水平方向线性变化的。



(a) 纯色背景下运动模糊图像 (b) 仿真图像真实 α 值

图2 纯色背景下透明度连续性示意图

由于运动模糊区域不满足颜色线性模型,使得 Closed_Form Solution 方法在一些局部区域产生不精确抠图,这些不精

确的区域直观表现为透明度 α 值的不连续,进而使得提取的前景图像也表现出明显的不连续。为了获得更为精确的运动模糊前景图像,结合局部运动线性假设,在进行运动模糊图像抠图时将透明度 α 值连续性考虑到 Closed_Form Solution 方法中。改进的 Closed_Form Solution 方法在原有代价函数求解式(8)的基础上增加一项平滑约束项,得到新的表达式为

$$\alpha = \arg \min \alpha^T L \alpha + \lambda (\alpha^T - b_s^T) D_s (\alpha - b_s) + \sum_{i=1}^N m_i (\alpha_i - \alpha_{id})^2 \quad (10)$$

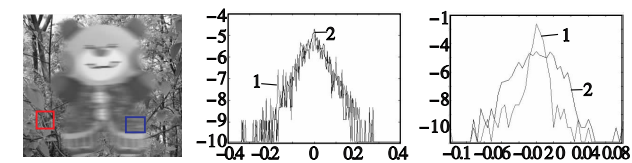
其中:增加的平滑约束项将每一个像素点透明度 α 值与运动方向上相邻的透明度 α 值求取方差; m_i 表示规整化后运动大小的权重值; α_{id} 表示在运动方向上与第 i 个像素相邻的透明度值。显然,经过添加上面的相邻像素透明度值之间的平方差求和项,并且每一个点给予相应的运动大小权重,可以将透明度值之间的不连续变为相对连续,从而改善由于复杂背景造成的透明度 α 值计算不精确问题。

改进的 Closed_Form Solution 方法中,平滑约束项与运动物体每一点的运动模糊大小和方向相关。通过将运动物体的每一点运动大小和方向规整化为一个权重参数 m_i ,作为当前点在运动方向上透明度值方差的加权重,从而使得到的透明度 α 值更为精确。在添加的平滑约束项中,如何将权重参数规整化从而达到合适的约束和改善作用是一个难点问题。平滑约束项中的权重参数需要满足以下条件才能有比较好的约束效果:

a) 所有的权重参数都不能太大,权重参数的取值应该在一定的范围之内。在平滑约束项中权重参数过大将导致透明度在一个方向上出现过度平滑的现象,这样会使得一些本来应该存在的细节丢失掉。

b) 如果在一些像素点上没有运动模糊或者模糊较小,权重参数的取值也应该相应较小或者为零。这种情况下,原有的 Closed_Form Solution 抠图方法已经能够取得较好的效果,权重参数取较小的值,可保持原有抠图方法的作用。

在添加的平滑约束项中,权重参数是和运动方向大小密切相关的。权重参数取值依赖于运动方向和大小的估计。本文结合模糊图像局部运动梯度特征^[12],提出相应的运动参数估计方法,从而得到合适的平滑项权重。图像梯度统计特征是指静态自然图像的梯度在统计上呈现出重拖尾分布。而文献[12]提出在运动模糊图像中,运动模糊区域的局部小区域由于运动模糊使得重拖尾分布向分布中心靠拢,分布的重拖尾明显减弱,如图3所示。(b)表示(a)中灰色局部小区域梯度分布;(c)表示(a)中黑色局部小区域梯度分布情况。梯度分布图中,曲线1表示 x 方向梯度分布,曲线2表示 y 方向梯度分布。从图3中可以看出,沿着运动方向的梯度分布重拖尾效应在减弱,梯度分布向中心靠拢。



(a) 前景运动模糊图像 (b) 背景区域梯度分布 (c) 运动模糊区域梯度分布

图3 局部区域梯度分布对比

文献[12]给出了一个混合高斯模型用于刻画局部小区域梯度重拖尾分布情况,其表达式为

$$G(x) = \pi_0 G(x; u_0, \sigma_0) + \pi_1 G(x; u_1, \sigma_1) \quad (11)$$

其中:两个高斯分布的均值 $u_0 = u_1 = 0$,方差分别为 σ_0, σ_1 ,并且假定 $\sigma_1 > \sigma_0$ 。图3给出了指定的局部小区域在水平方向和垂直方向上的梯度统计分布曲线,从中可以看出,在静态区域水平方向和垂直方向的梯度统计曲线近似相同,因此得到的混合高斯曲线也基本相同。而在运动模糊区域的梯度统计曲线相差较大,沿着运动方向的梯度统计曲线明显集中于中心,而垂直运动方向的梯度统计曲线与静态图像上的梯度统计曲线类似,分布比较分散。

根据上述运动模糊图像中静态局部小区域和运动模糊局部小区域的梯度统计分析以及混合高斯建模可以得到,在运动模糊区域中梯度统计可以作为点的运动方向估计的一个方法。以一点为中心的局部运动小区域中不同方向梯度的混合高斯曲线之间存在差异,可以认为不同梯度方向混合高斯曲线得到的分布曲线下方面积较小的一个方向是该点运动方向。又因为静态局部小区域中不同方向梯度的混合高斯模型基本相同,而运动模糊小区域中不同方向的梯度混合高斯模型差别较大,可以利用运动模糊局部小区域不同方向梯度得到的混合高斯分布曲线下方面积之差作为运动大小,不同方向曲线包含的面积之差越大,表明运动越剧烈。根据图3所示的局部运动区域梯度混合高斯模型,可以得到式(10)中的每一点规整化权重参数 m_i 为

$$m_i = \max \text{Area} - \min \text{Area} \quad (12)$$

其中: $\max \text{Area}$ 表示以点 i 为中心的局部区域各个方向梯度统计曲线拟合的混合高斯分布曲线下方最大面积, $\min \text{Area}$ 表示混合高斯分布曲线下方最小面积。运动的方向和面积最小的方向相同。

3 实验结果

本文改进 Closed_Form Solution 方法考虑了运动模糊形成过程中透明度 α 值的连续性,将透明度 α 值在运动方向上的连续性作为一个参数项增加到原有抠图算法中,利用局部梯度特征进行参数项的权重值估计,将运动信息很好地结合到抠图算法中。改进后的 Closed_Form Solution 方法对前景物体运动模糊抠图有更好的效果。为了验证本文改进方法的效果,本文分别进行了仿真图像抠图实验和真实模糊图像抠图实验,并且比较了本文方法和原有方法的抠图结果。

3.1 仿真图像抠图实验

图4进行的是仿真图像抠图算法对比。图4(a)是运动模糊仿真合成图像,前景物体运动模糊大小为水平方向 20 pixel;(b)是仿真图像的三分图;(c)是 Closed_Form Solution 方法进行抠图的结果。通过结果可以看出,利用原方法进行运动模糊图像抠图得到的结果中存在部分细节丢失和透明度不连续的问题,如在小熊的脚部位置有明显的 discontinuity;(d)是本文算法得到的透明度结果;相对于(c)得到的结果,本文算法在透明度的连续性上明显更好,特别是脚部位置的连续性更好。脚部抠图效果如(f)~(i)所示,从脚部的局部图像可以看到,本文算法在透明度的连续性上明显要好,并且更接近原始图像。

3.2 真实运动模糊图像抠图实验

表1展示了本文算法与静态 Closed_Form Solution 方法对

两组实际运动模糊图像进行抠图的结果。从两组真实图像抠图结果中可以看出,Closed_Form Solution 方法对运动模糊图像抠图在细节上明显有缺失,使得抠图结果存在较为严重的不连续现象,特别是在一些受到背景严重干扰的地方不连续表现得更为明显。而用本文改进的 Closed_Form Solution 方法对运动模糊图像能够提取出更连续清晰的前景图像。表1中对一些严重受到背景干扰的局部小区域的抠图效果进行了对比,在局部放大对比图像中,上边小区域图像表示原有 Closed_Form Solution 方法得到的局部运动模糊区域效果,下边小区域图像表示本文方法得到的抠图效果。从表中也可以看出,本文方法在连续性、清晰性以及准确性上相对原有方法效果更好。

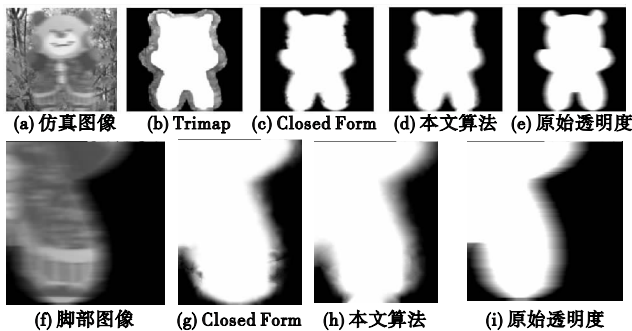
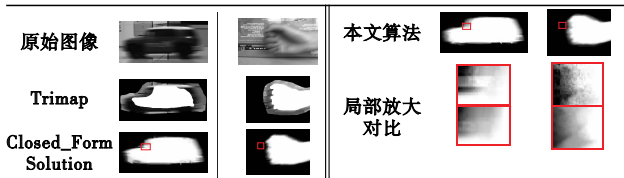


图4 改进算法前后仿真实验对比

表1 两组真实运动模糊图像抠图



4 结束语

本文提出了一种改进的 Closed_Form Solution 方法用于运动模糊图像抠图。相对于原有方法,本文方法利用运动模糊产生过程中透明度平滑连续的特点,在原有方法的基础上增加了一项平滑约束项,使得对于运动模糊物体提取能够获得更为平滑和真实的图像。平滑约束项主要通过结合运动模糊图像局部梯度统计特征,将运动方向和运动大小这两个运动参数作为平滑项的方向和权重信息规整化为约束项,使得平滑约束项在

运动模糊抠图中取得很好的效果。不足之处是局部梯度统计特征在进行运动方向和大小估计时并不能保证完全估计准确,使得抠图在有些部分也不能取得十分满意的效果。下一步研究的方向是将抠图得到的运动前景进行去模糊,得到清晰的原始图像。

参考文献:

- [1] PORTER T, DUFF T. Compositing digital images[J]. *Computer Graphics*, 1984, 18(3): 253-260.
- [2] SUN Jian, JIA Jia-ya, TANG C K, et al. Poisson matting[C]//Proc of ACM SIGGRAPH. New York: ACM Press, 2004: 315-321.
- [3] CHUANG Y, CURLESS B, SALESIN D, et al. A Bayesian approach to digital matting[C]//Proc of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2001: 264-271.
- [4] LEVIN A, LISCHINSKI D, WEISS Y. A closed form solution to natural image matting[J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2008, 30(2): 228-242.
- [5] LEVIN A, RAV-ACHA A, LISCHINSKI D. Spectral matting[J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2008, 30(10): 1699-1712.
- [6] LEE P G, WU Y. L1 matting[C]//Proc of the 17th IEEE International Conference on Image Processing. 2010: 4665-4668.
- [7] LEE P G, WU Y. Nonlocal matting[C]//Proc of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2011: 2193-2200.
- [8] DAI S, WU Y. Motion from blur[C]//Proc of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2008: 1-8.
- [9] 甘明刚, 陈杰, 刘劲, 等. 一种基于三帧差分法和边缘信息的运动目标检测方法[J]. *电子与信息学报*, 2010, 32(4): 894-897.
- [10] CHRISTODOULOU L, KASPARIS T, MARQUES O. Advanced statistical and adaptive threshold techniques for moving object detection and segmentation[C]//Proc of the 17th IEEE International Conference on Digital Signal Processing. 2011: 1-6.
- [11] SHAN Qi, XIONG Wei, JIA Jia-ya. Rotational motion deblurring of a rigid object from a single image[C]//Proc of the 11th IEEE International Conference on Computer Vision. 2007: 1-8.
- [12] LIU Ren-ting, LI Zhao-rong, JIA Jia-ya. Image partial blur detection and classification[C]//Proc of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2008: 1-8.

(上接第1553页)图像细化后用最小二乘法来拟合基线得到倾斜角,其在小角度范围精度较高,但是在未能正确切分文本本行的情况下会得出错误的结果。所以,本文将两者结合,得出图像的倾斜角并校正。实验证明,此方法精度高,对于倾斜的维文文本能得到较好的校正效果。下一步的工作是将拟合基线法用在维文字符切分工作中。

参考文献:

- [1] 张顺利,李卫斌,吉军. 基于投影的文档图像倾斜校正方法[J]. *计算机工程与应用*, 2010, 46(3): 166-168.
- [2] 阿里木江·亚森,哈力木拉提·买买提. 维吾尔文联机手写识别的预处理与特征提取[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2010.
- [3] 周冠纬,平西建,程娟. 基于改进 Hough 变换的文本图像倾斜校正方法[J]. *计算机应用*, 2007, 27(7): 52-57.
- [4] 李晓,袁保社. 印刷体维吾尔文识别系统预处理研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2012.

- [5] 孙楠,刘志文. 一种改进的中文文档图像倾斜检测方法[J]. *计算机仿真*, 2006, 23(9): 184-187.
- [6] SAFABAKHSH R, KHADIVI S. Document skew detection using minimum-area bounding rectangle[C]//Proc of IEEE International Conference on Information Technology. Washington DC: IEEE Computer Society, 2000: 253-258.
- [7] 程鹏飞,闫浩文,韩振辉. 一个求解多边形最小面积外接矩形的算法[J]. *工程图学学报*, 2008, 29(1): 122-126.
- [8] 岳宁,段会川. 新的文本图像倾斜检测及校正算法[J]. *计算机工程与设计*, 2007, 28(23): 5671-5673.
- [9] 刘云飞. 脱机手写体汉字识别中细化、特征提取和相似字识别[D]. 长沙: 湖南大学, 2006.
- [10] 陈波,王加俊,吴陈. 基于页面前景和最小二乘法的倾斜校正[J]. *计算机工程*, 2007, 15(33): 202-204.
- [11] 何西平,李云峰,朱庆生. 彩色文档图像的倾斜自动校正算法[J]. *中国图象图形学报*, 2006, 11(13): 367-370.