

# 基于最佳缝合线的序列遥感图像拼接融合方法

秦绪佳<sup>1,2</sup> 王琪<sup>1</sup> 王慧玲<sup>1</sup> 郑红波<sup>1</sup> 陈胜男<sup>1,2</sup>

(浙江工业大学计算机科学与技术学院 杭州 310032)<sup>1</sup>

(浙江省可视媒体智能处理技术研究重点实验室 杭州 310032)<sup>2</sup>

**摘要** 在图像融合过程中常采用重叠区域像素加权融合方法,这会存在鬼影现象。为解决这一问题,提出了一种改进的最佳缝合线生成算法和沿最佳缝合线的融合方法,并将其应用于序列遥感图像的拼接融合。首先在重叠图像中,对重叠区域的边赋予权值,然后进行最大流最小割,最终获取最佳缝合线。在计算边权值时引入了图像梯度信息,使缝合线更准确。在图像融合时,沿最佳缝合线生成一个条带形融合区域,采用渐入渐出法对缝合线两侧的条带形融合区域图像进行过渡处理,使拼接后的图像更为真实。在序列遥感图像拼接上,采用捆绑调整算法调整拼接图像的参数来实现全局误差最小化。实验表明,该方法能够有效消除鬼影并且能获得准确的拼接图像与融合,对于序列遥感图像的拼接融合能够获得很好的效果。

**关键词** 图像拼接, 图像融合, 缝合线, 图切割, 序列图像

**中图分类号** TP391 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.10.062

## Image Fusion Method Based on Best Seam-line for Serial Remote Sensing Images Mosaic

QIN Xu-jia<sup>1,2</sup> WANG Qi<sup>1</sup> WANG Hui-ling<sup>1</sup> ZHENG Hong-bo<sup>1</sup> CHEN Sheng-nan<sup>1,2</sup>

(School of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China)<sup>1</sup>

(Key Laboratory of Visual Media Intelligent Process Technology of Zhejiang Province, Hangzhou 310032, China)<sup>2</sup>

**Abstract** Pixels weighted fusion in overlapped region is a key technology in image fusion processing, but ghosting will appear. In this paper, an improved algorithm for generating optimal seam-line and fusion method along the best seam-line for image fusion were presented and applied to mosaic and fusion for serial remote sensing images. Firstly, the edge weights are set in the overlapping area of the images. Then the maximum flow minimum cut is calculated, and eventually the best seam-line in images overlapping area is got. In the calculation of the weights of edges, the image gradient information is introduced, and the seam-line is more accurate. In image fusion processing, along the best seam-line a strip-shaped fusion area is generated, and the image in the strip-shaped fusion area of both sides of the seam-line is transited using gradated in and out method to make mosaic images more real. In serial remote sensing images mosaic, the bundle adjustment algorithm is used to adjust the parameters of images mosaic to achieve the global error minimization. Experimental results show that this method can effectively eliminate ghosting and obtain accurate image mosaic and fusion, and can get good results for serial remote sensing images mosaic and fusion.

**Keywords** Image mosaic, Image fusion, Seam-line, Graph cut, Serial images

## 1 引言

图像拼接及融合技术是图像处理研究方向的一个重要分支。图像拼接处理就是将若干有重叠部分的图像进行匹配,然后进行融合处理,最终形成一幅宽视角、高分辨率的无缝拼接图像,在遥感、航拍图像的处理中有着重要应用。图像拼接有两个关键技术:图像配准和图像融合。由于待拼接的图像的获取时间、拍摄角度以及光照条件不同,使得图像之间会存在差异。图像融合以图像配准为基础,对拼接后的图像消除图像间的差异,使得拼接后的图像能自然平滑过渡。

拼接后序列图像的融合是采用图像融合技术对配准后的

图像序列的重叠部分区域内的信息进行取舍的方法。由于待融合图像受到配准和几何变换误差影响,以及图像获取时光照条件的变化、曝光差异等,采用通常的重叠区域加权函数的融合方法,即多分辨率金字塔方法,往往会出现鬼影、模糊等现象,或出现明显的拼接缝。针对此问题, Su 等人<sup>[1]</sup>提出了一种在小波域中进行图像融合的方法,该方法先利用小波分解将待拼接的图像分解成不同层上的小图像,然后对小图像分别进行拼接融合,最后叠加得到拼接融合图像。Su 提出的算法采用了小波域下混色处理,复杂度比较高。

在整合处理中,目前较好的方法是基于最佳缝合线方法,将拼接图像重叠区域分割成两部分。该方法针对整个拼接图

到稿日期:2014-10-29 返修日期:2015-01-27 本文受国家自然科学基金(61075118, 61303140)资助。

秦绪佳(1968—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为计算机图形学, E-mail: qxj@zjut.edu.cn; 王琪(1991—),女,硕士生,主要研究方向为计算机图形学、图像处理; 王慧玲(1990—),女,硕士生,主要研究方向为计算机图形学、图像处理; 郑红波(1977—),女,博士,讲师,主要研究方向为图像处理、地理信息系统; 陈胜男(1982—),女,博士,讲师,主要研究方向为图像处理、虚拟现实。

像区域通过引入能量函数来计算图像的切割因子和融合因子。对于最佳缝合线的搜索,在两幅具有重叠区域的图像中,Davis<sup>[2]</sup>提出在重叠区域内找出一条缝合线,使得沿这条缝合线上两幅图像间的像素差异最小,在该线的两侧分别只取一幅图像的像素,从而避免了产生叠影的情况。在具体实现中通常采用 Dijkstra 算法来寻找最佳缝合线,但算法复杂度较高。Duplaquet<sup>[3]</sup>采用动态规划寻找最佳缝合线。文献[4]将图像的重叠区域表示为带权的有向图,通过最大流方法求解图的最小切割从而搜索最佳缝合线,取得了不错的效果。Kerschner<sup>[5]</sup>使用 Twin Snake 算子来自动选择图像的拼接线,但这存在一个问题即这个算子并不能保证选出最优拼接线。Chon<sup>[6]</sup>提出对缝合线动态规划,并且消除拼接缝。Kwatra 等<sup>[7]</sup>提出了利用图切割技术(graph cut)查找全局最佳缝合线来实现纹理合成,较好地解决了多数缝合线搜索的局部性问题。

直接沿最佳缝合线进行拼接后的图像由于两图像间的亮度、对比度等差异,会沿缝合线出现明显的拼接缝。在图像拼接缝的消除方面,通常使用重叠影响进行混色处理。朱述龙<sup>[8]</sup>通过将拼接线两边的灰度差值进行强制改正来对拼接缝进行消除。Szeliski<sup>[9]</sup>采用渐入渐出算法,通过图像的灰度值平滑过渡,这个方法简单快速,但是方向上只支持一维。

在序列图像拼接融合方面,王云丽等<sup>[10]</sup>提出了设计梯度域内同时融合多帧图像的策略,根据图像边界将拼图进行划分,再根据设定的条件进行一次性融合。孙华燕等<sup>[11]</sup>提出先对图像进行校正,再进行拼接。李洋洋等<sup>[12]</sup>提出了对重叠区域进行边缘融合处理,以消除视觉差异。

本文针对同源多条带图像拼接的融合问题,提出了基于最佳缝合线的序列遥感图像拼接融合方法。本文首先介绍了图像拼接融合的鬼影与拼接缝问题;然后重点介绍了拼接图像最佳缝合线的搜索算法,及基于最佳缝合线的融合,并将其应用于条带序列遥感图像的拼接融合处理中;最后展示了本文方法的序列图像拼接融合结果,并且对结果进行了分析。

## 2 拼接图像融合中的鬼影问题

图像拼接的思路如下:首先需要获取到的遥感图像进行预处理,再对序列图像提取特征点,并且匹配相邻图像的特征点,之后用算法去除特征点对中的外点,利用最大内点集估计出变换矩阵,然后需要求解全局配准模板,将每帧图像变换到基准图像坐标系下,最后进行图像融合,实现图像无缝拼接。

利用加权函数进行重叠区域的融合,越靠近边界的部分权值越小,能改善明显的不连续性,但却无法解决“鬼影”现象,其表现到图像上即为图像模糊。由于遥感图像的成像特点,图像重叠区域中心部分的配准精度要优于边界部分,若对重叠区域直接进行加权融合,在重叠区域的边界部分就会出现较为严重的“鬼影”现象,如图1所示。



图1 存在鬼影的拼接结果图像

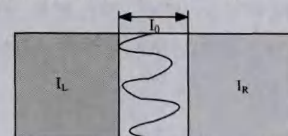
为防止融合区域“鬼影”现象的出现,采用图切割方法搜索最佳缝合线,并采用渐入渐出方法沿最佳缝合线进行亮度过渡。

## 3 基于最佳缝合线的拼接图像的融合

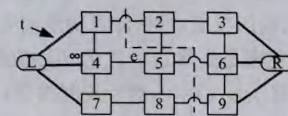
### 3.1 拼接图像最佳缝合线搜索算法及其改进

本文采用最佳搜索算法在重叠图像中获得最佳缝合线,下面简要介绍该算法的具体实现。

二元组  $G = \langle V, E \rangle$  中,  $G$  表示带权图,  $V, E$  分别是点的集合和边的集合。  $s$  和  $t$  是它的源点和汇点,边  $(u, v)$  的容量  $c(u, v)$  表示该边的权值,  $s-t$  割将所有  $V$  中的点集合分类成  $S$  和  $T$  两个不同的集合,其实质是对点集合的二划分,它总的容量定义为  $c(S, T) = \sum \{c(u, v), u \in S, v \in T\}$ 。其实所谓的最小割问题就是对所有的节点进行分类划分,使取得的总容量最小。根据优化理论中最大流最小割定理所述<sup>[13]</sup>,求解有向图的最小切割问题和最大流问题实质上是一样的,现今对最大流问题的研究已经非常深入<sup>[14]</sup>。



(a) 重叠区域的缝合线



(b) 重叠区域的带权有向图  $G$  和最小割

图2 图切割法查找最佳缝合线

在图2(a)中,  $I_L$  和  $I_R$  是两幅图像,对应着左侧和右侧区域,它们的重叠区域  $I_0$  是中间的部分,  $I_0$  中这条曲折的线就是要查找的目标缝合线。图2(b)是该重叠部分的简易带权有向图和最佳缝合线(用虚线表示),该缝合线就是用最大流计算而来的最小缝合线。权值的设置是搜索和查找缝合线的关键。如图2(b)所示,将图片重叠区域简化为  $3 \times 3$  个像素点,  $L$  点和  $R$  点是这块区域的中断点,所有的边分为与终端点相连的边和两个普通节点相连的边两类,前者用  $t$  表示,为图中粗实线的边;后者用  $e$  表示,为图中细实线的边。为了保证缝合线在  $I_0$  区域内部,边  $t$  的权值需要设为无穷大  $\infty$ 。本文采用基于像素亮度差的方法来计算  $e$  边的权值,计算公式如下。

水平方向上:

$$w_h = (f_L(x, y) - f_R(x, y))^2 + (f_L(x+1, y) - f_R(x+1, y))^2 \quad (1)$$

垂直方向上:

$$w_v = (f_L(x, y) - f_R(x, y))^2 + (f_L(x, y+1) - f_R(x, y+1))^2 \quad (2)$$

其中,  $f_L, f_R$  分别表示左右图在重叠部分的像素灰度值,  $e$  边的权值为它所连接两点的  $f_L, f_R$  之差的平方和。求解最佳缝合线的过程就是在两幅图像重叠部分中找出像素灰度值之差最小的那组点,然后通过计算对边赋予权值以实现图的最小割。在搜索该线的同时需要将物体的几何结构考虑在内,因为沿着物体的边界将物体与背景分开才是最好的分割方

法。考虑到边缘的完整性问题,这里特别引入 Sobel 算子,用来计算某像素点在水平和垂直方向上的梯度信息,卷积模板如下:

$$S_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$S_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

利用以上所得的梯度值,计算梯度域上边的权值。

水平方向上:

$$\omega_h = D_{Lx}(x,y) + D_{Lx}(x+1,y) + D_{Rx}(x,y) + D_{Rx}(x+1,y) \quad (5)$$

垂直方向上:

$$\omega_v = D_{Ly}(x,y) + D_{Ly}(x,y+1) + D_{Ry}(x,y) + D_{Ry}(x,y+1) \quad (6)$$

其中, $D_{Lx}$ , $D_{Ly}$ , $D_{Rx}$ , $D_{Ry}$ 分别表示左图和右图在  $x$  和  $y$  方向上的梯度信息,得来的  $\omega_h$  与  $\omega_v$  的比值作为最终的判断权值,分别加上一个  $\epsilon$  来避免出现除 0 操作,因此得到最终的权值为:

$$\omega'_v = \frac{\omega_v + \epsilon}{\omega_h + \epsilon} \quad (7)$$

以上表明,改进后的权值权衡了像素灰度值之差和梯度信息,计算得到初始的权值,然后即可用最大流算法找出最佳缝合线。具体的实现是先将边的流的初始值都设为 0,即对所有点  $u, v \in V$ ,有  $f(u, v) = 0$ ,然后反复迭代,每次迭代要搜索出一条增广路径,可以看成从  $s$  到  $t$  之间的一条路径,沿着这条路可以压入更多的流,从而达到增加流的数量目的。这样反复迭代,直到没有更多的增广路径,此时的流  $f$  就是图  $G$  中的一个最大流。

图 3 中白色线为改进算法获得的最佳缝合线。

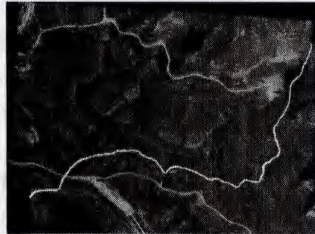


图 3 图像融合的最佳缝合线

### 3.2 图像沿最佳缝合线拼接与融合

将两幅原图像进行特征点检测匹配后,在重叠区域内利用上述方法搜索最佳缝合线,得出图像对应权值分布图,在融合时根据权值进行两幅图像的融合,在缝合线的两侧,分别各取一幅原图像内容。这样处理能有效消除叠影现象,但会出现缝合线两侧亮度突变问题,存在明显的拼接痕迹。为解决这一问题,需要对缝合线两侧区域进行融合处理。图 4 所示的黑色条带区域为融合处理区域。

图像融合处理上,刘坤等<sup>[5]</sup>提出了基于区域分割的序列红外图像融合算法,但是该算法只是针对背景信息基本保持不变的序列红外图像融合,存在一定的局限性。

我们采用了渐入渐出的方法对图 4 所示的过渡区域进行融合。如果待融合灰度图像 A、B 的灰度值表示为  $h_1(i, j)$  和

$h_2(i, j)$ ,那么融合处需要进行过渡处理的图像的灰度值  $g(i, j)$  可表示为:

$$g(i, j) = \lambda h_1(i, j) + (1 - \lambda) h_2(i, j) \quad (8)$$

式中, $\lambda$  为渐变系数。根据式(8)可以看出,随着  $\lambda$  从 1 变至 0,拼接处的灰度值从  $h_1(i, j)$  过渡至  $h_2(i, j)$ ,完成了图像的融合过渡处理。对于彩色图像,只要将图像 R、G、B 的数值按式(8)分别进行计算。

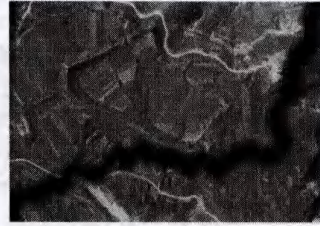


图 4 融合处理条带区域

图 5 为采用最佳缝合线搜索得出的拼接的结果,图 6 所示为图 1 和图 4 中白色虚线框处局部放大的效果图,从图 6 (b)中可以看出叠影现象得到了有效改善。

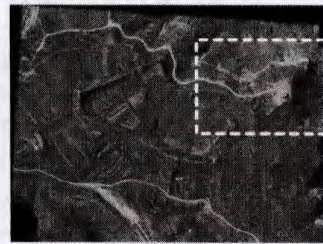
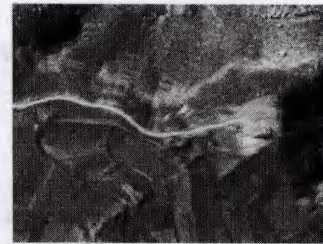
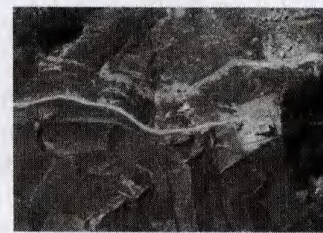


图 5 采用最佳缝合线的融合结果



(a)图 1 中白色虚线框局部放大效果图



(b)图 4 中白色虚线框局部放大效果图

图 6 不同融合方法局部放大效果图

### 3.3 序列图像的拼接与融合

对于序列图像拼接与融合,若采用逐幅图像拼接法,即将每一幅新图像和已经拼接好的图像再进行拼接,而实际情况中任何两幅图像由于获取角度及参数存在微小差别,不可能达到完全匹配,则会导致拼接的累积误差越来越大,最终导致图像的特征区域发生明显错位。

可以通过计算匹配的两点距离的均方差,动态调整拼接

图像的参数来减少总的误差,从而达到全局误差最小化的结果。本文采用捆绑调整算法<sup>[6]</sup>,需要先确定参考平面。参考平面的选取综合考虑了序列图像间存在的重叠关系的数量、重叠的面积以及匹配点的组数。为了使每幅图像得到参考平面的变换矩阵,需要对两两图像进行矩阵运算,再利用矩阵映射完成序列图像的配准。

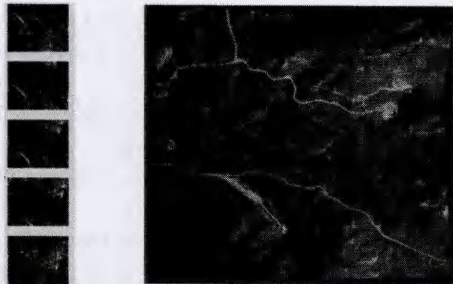
实现序列图像的配准后,采用 3.1 节的方法获得两两重叠图像间的最佳缝合线,然后再用 3.2 节的方法根据最佳缝合线得到融合区域,并用渐入渐出法对融合区域进行融合,得到序列图像最终的拼接融合结果。

#### 4 实验结果及分析

本文实验都是在 PC 机(Inter(R) Core(TM)2 Quad CPU 2.50GHz,内存 4GB)上采用 VC++2008 编程实现。

对文中提出的序列图像拼接算法进行验证。利用 C++ 进行编程实现,其中捆绑调整和图像融合环节参考了一些开源软件中的实现方法。通过读取多幅遥感图像,利用改进的特征提取和匹配算法,在全局误差最小化上采用捆绑调整法,同时引入基于图割的最佳缝合线搜索融合策略。

将最佳缝合线融合算法应用于多幅遥感图像,实验结果如图 7 和图 9 所示。图 7(a)为输入的 5 张条带图像序列图,图 7(b)为对这 5 幅图像进行拼接融合的效果图。图 8 为输入的 20 张条带图像序列图,采用最佳缝合线融合算法对其进行拼接,得到图 9 所示的拼接融合效果图。图 10 为图 9 中白色框区域的放大效果图。



(a) 5 幅待拼接图像 (b) 拼接及融合结果

图 7 5 幅序列图像拼接及融合

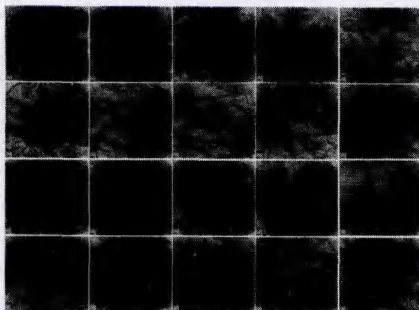


图 8 20 幅待拼接融合序列图



图 9 20 幅序列图像拼接融合结果图



图 10 拼接融合结果局部放大图

**结束语** 对于图像的融合拼接,利用加权函数对重叠区域进行融合容易导致“鬼影”图像的出现,影响结果的准确性。对于序列图像,采用基于局部配准技术的逐幅图像拼接法,将每一幅新图像和已经拼接好的图像再进行拼接,会导致拼接的累积误差越来越大,最终导致图像的特征区域发生明显错位。本文提出了基于最佳缝合线的序列遥感图像拼接与融合方法,首先采用改进的最佳缝合线搜索算法生成拼接缝合线,在计算边权值时,引入了图像梯度信息,使缝合线更准确;然后沿缝合线生成融合区域带,并采用渐入渐出法对融合区域进行融合。对于序列图像,通过动态调整拼接图像的参数来实现全局误差最小化。将本文方法应用于航拍条带的序列遥感图像拼接融合,能够取得较好的结果。

#### 参考文献

- [1] Su M S, Hwang W L, Cheng K Y. Analysis on multi resolution mosaic images [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(7): 952-959
- [2] Davis J. Mosaics of scenes with moving objects [C]// Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'98). IEEE, 1998: 354-360
- [3] Duplaquet M L. Building large image mosaics with invisible seamlines [C] // Proceedings of SPIE Visual Information Processing VII Orlando, USA, 1998: 369-377
- [4] 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
- [5] Kerschner M. Seamline detection in colour orthoimage mosaicking by use of twin snakes [J]. Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2001, 56(1): 53-64
- [6] Chon J, Kim H, Lin C S. Seam-line determination for image mosaicking: a technique minimizing the maximum local mismatch and the global cost [J]. Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2010, 65(1): 86-92
- [7] Kwatra V, Schodl 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
- [8] 朱述龙, 钱曾波. 遥感影像镶嵌时拼接缝的消除方法 [J]. 遥感学报, 2002, 6(3): 183-187  
Zhu Shu-long, Qian Zeng-bo. The Seam-line Removal under Mosaicking of Remotely Sensed Images [J]. Journal of Remote Sensing, 2002, 6(3): 183-187
- [9] Szeliski R. Video mosaics for virtual environments [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 1996, 16(2): 22-30
- [10] 王云丽, 高超, 张茂军. 航拍视频拼图中基于梯度域的多帧图像融合方法 [J]. 航空学报, 2009, 30(9): 1705-1710  
Wang Yun-li, Gao Chao, Zhang Mao-jun. A Gradient-domain Method to Blend Multiple Images for Aerial Video Mosaic [J].

- [11] 孙华燕, 周道炳, 李生良. 一种序列图像的拼接方法[J]. 光学精密工程, 2000, 8(1): 35-39  
Sun Hua-yan, Zhou Dao-bing, Li Sheng-liang. Method for sequence image coalescence[J]. Optics and Precision Engineering, 2000, 8(1): 35-39
- [12] 李洋洋, 赵刚, 刘利. 多摄像机图像拼接视觉归一化技术研究[J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(20): 188-193  
Li Yang-yang, Zhao Gang, Liu Li. Research on visual normalization of multi-camera image stitching[J]. Computer Engineering and Applications, 2013, 49(20): 188-193
- [13] Papadimitriou C H, Steiglitz K. Combinatorial Optimization; Al-

- [14] Yazdi S M S, Savari S A. A Max-Flow/Min-Cut Algorithm for Linear Deterministic Relay Networks[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2011, 57(5): 3005-3015
- [15] 刘坤, 郭雷, 陈敬松. 基于区域分割的序列红外图像融合算法[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(3): 553-558  
Liu Kun, Guo Lei, Chen Jing-song. Sequence infrared image fusion algorithm using region segmentation[J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(3): 553-558
- [16] Fang X Y, Pan Z G, Luo B, et al. Robust image mosaic with RANSAC and bundle adjustment[J]. Journal of Computational Information Systems, 2008, 4(4): 1613-1619

(上接第 305 页)

的特征, 增强了模型对人脸局部遮挡的鲁棒性, 同时可以将模型的大小压缩到原来的 5% 左右。本文提出的模型在 LFPW、Helen 和 COFW 等自然场景下的人脸数据库上取得了很好的配准结果, 具有速度快、精度高、模型小的特点。在三星 Note3 智能手机上的测试结果表明, 每幅人脸图像的配准时间大约为 10ms, 满足实时性的要求。

目前, 本文算法对于极度夸张的表情、严重遮挡等情况的适应性还有待提高。在今后的工作中, 我们将尝试融合人脸检测和关键点定位的算法, 以进一步提高定位速度和精度, 增强模型的鲁棒性。

## 参 考 文 献

- [1] Hua G, Fu Y, Turk M, et al. Introduction to the special issue on mobile vision[J]. International Journal of Computer Vision, 2012, 96(3): 277-279
- [2] Shan Shi-guang, Chang Yi-zheng, Gao Wen, et al. Curse of misalignment in face recognition: problem and a novel mis-alignment learning solution[C]//Proceedings of the Automatic Face and Gesture Recognition, 2004. Seoul, Korea, 2004: 314-320
- [3] Cootes T F, Taylor C J. Active shape models—'smart snakes'[C]//Proceedings of the British Machine Vision Conference, 1992. London, England, 1992: 266-275
- [4] Cootes T F, Taylor C J, Cooper D H, et al. Active shape models—their training and application[J]. Computer vision and image understanding, 1995, 61(1): 38-59
- [5] Cootes T F, Edwards G J, et al. Active appearance models[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2001, 23(6): 681-685
- [6] Matthews I, Baker S. Active appearance models revisited[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 135-164
- [7] Cristinacce D, Cootes T. Automatic feature localisation with constrained local models[J]. Pattern Recognition, 2008, 41(10): 3054-3067
- [8] Zhu Xiang-xin, Ramanan D. Face detection, pose estimation, and landmark localization in the wild[C]//Proceedings of the Computer Vision and Pattern Recognition, 2012. Rhode, America, 2012: 2879-2886
- [9] Zhou Feng, Brandt J, Zhe Lin. Exemplar-based graph matching for robust facial landmark localization[C]//Proceedings of the International Conference on Computer Vision, 2013. Sydney, Australia, 2013: 1025-1032
- [10] Yi Sun, Wang Xiao-gang, Tang Xiao-ou. Deep convolutional net-

work cascade for facial point detection[C]//Proceedings of the Computer Vision and Pattern Recognition, 2013. Portland, America, 2013: 3476-3483

- [11] Zhou Er-jin, Fan Hao-qiang, Cao Zhi-min, et al. Extensive Facial Landmark Localization with Coarse-to-Fine Convolutional Network Cascade[C]//Workshops of the International Conference on Computer Vision, 2013. Sydney, Australia, 2013: 386-391
- [12] Piotr D, Welinder P, Perona P. Cascaded pose regression[C]//Proceedings of the Computer Vision and Pattern Recognition, 2010. San Francisco, America, 2010: 1078-1085
- [13] Cao Xu-dong, Wei Yi-chen, Wen Fang, et al. Face alignment by explicit shape regression[C]//Proceedings of the Computer Vision and Pattern Recognition, 2012. Rhode, America, 2012: 2887-2894
- [14] Xiong Xue-han, De T F. Supervised descent method and its applications to face alignment[C]//Proceedings of the Computer Vision and Pattern Recognition, 2013. Portland, America, 2013: 532-539
- [15] Yan Jun-jie, Zhen Lei, Dong Yi, et al. Learn to Combine Multiple Hypotheses for Accurate Face Alignment[C]//Workshops of the International Conference on Computer Vision, 2013. Sydney, Australia, 2013: 392-396
- [16] Burgos A, Xavier P, Perona P, et al. Robust face landmark estimation under occlusion[C]//Proceedings of the International Conference on Computer Vision. Sydney, Australia, 2013: 1513-1530
- [17] Ren Shao-qing, Cao Xu-dong, Wei Yi-chen, et al. Face Alignment at 3000 FPS via Regressing Local Binary Features[C]//Proceedings of the Computer Vision and Pattern Recognition. Columbus, America, 2014: 1685-1692
- [18] Hare S, Saffari A, Torr P H S. Efficient online structured output learning for keypoint-based object tracking[C]//Proceedings of the Computer Vision and Pattern Recognition. Rhode, America, 2012: 2887-2894
- [19] Tibshirani R. Regression shrinkage and selection via the lasso[J]. Journal of the Royal Statistical Society, 1994, 58(1): 267-288
- [20] Heikkila M, Pietikainen M, Schmid. Description of interest regions with local binary patterns[J]. Pattern Recognition, 2009, 42(3): 425-436
- [21] Gross R, Matthews I, Cohn J, et al. Multi-pie[J]. Image and Vision Computing, 2010, 28(5): 807-813
- [22] Sagonas C, Tzimiropoulos G, Zafeiriou S, et al. 300 Faces in-the-Wild Challenge: The first facial landmark localization Challenge[C]//Workshops of the International Conference on Computer Vision. Sydney, Australia, 2013: 397-403