

文章编号: 0258-7025(2010)Supplement 1-0234-05

适合表面疵病检测的图像拼接方法

刘旭¹ 任寰¹ 杨一¹ 袁静¹ 杨甬英² 陆春华² 刘东² 肖冰²

(¹中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)
(²浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要 图像拼接是大口径光学元件表面疵病检测的关键环节之一。通过分析各种图像拼接的方法,结合大口径光学元件表面疵病检测的需要,采用基于模板匹配的方法实现大口径光学元件表面疵病检测的图像拼接。实验证明,块匹配的拼接方法能取得非常好的拼接效果,为实现大口径光学元件表面疵病的高精度、高效率、自动化检测提供了一定的指导。

关键词 光学测量;表面疵病;显微散射成像;图像拼接;大口径光学元件

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201037s1.0234

Sub-Aperture Synthesis Method for Detecting Defects of Optical Components

Liu Xu¹ Ren Huan¹ Yang Yi¹ Yuan Jing¹ Yang Yongying²
Lu Chunhua² Liu Dong² Xiao Bing²

¹Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics,
Mianyang, Sichuan 621900, China

²State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University,
Hangzhou, Zhejiang 310027, China

Abstract Imaging synthesis plays an important role in the defects testing of large aperture optics. To make sure the successful synthesis of sub-apertures, the template matching is used for sub-aperture stitching, by analyzing all kinds of stitching method and combining the needs of defects testing of large aperture optics. Template matching gets great success in the experiment of defects testing of large aperture optic, so it is useful for detecting surface defects of large aperture optics accurately, efficiently and automatically.

Key words optical measurement; surface defects; microscopic scattering imaging; synthesis; large aperture optics

1 引言

随着高功率激光装置通量的提升,光学元件激光损伤阈值成为限制通量提升的瓶颈,表面疵病作为导致损伤发生的根源之一,其评价和定量检测已是亟待解决的问题。

目前,在光学元件生产及使用中采用的疵病检测方法基本上仍为目测法,存在检测效率低、检测周期长、检测结果主观因素比较大、不能定量及精确定位等问题,该检测方法和效率已不能满足生产和使

用的实际要求。另外,理论上较为成熟的还有成像法(低通滤波成像、高通滤波成像、自适应傅里叶滤波成像等)和角谱分析法(漫散射光接收、角谱接收等)^[1,2],但由于口径及分辨力限制,也不能满足当前检测需求。

实验中基于疵病的散射特性^[3],利用强光照射被测元件表面,通过 CCD 采集疵病的散射像,结合数字图像处理,实现了表面疵病等级和位置的评定。由于 CCD 的视场大小有限,其视场一般约为几毫米

收稿日期: 2010-04-27; 收到修改稿日期: 2010-06-16

作者简介: 刘旭(1983—),男,硕士,助理研究员,主要从事光电信息和检测技术等方面的研究。

E-mail: zjuliuxu@gmail.com

至几十毫米,要完全复原光学元件表面疵病分布,必须将扫描采集到的图像进行拼接,这样,精确的全孔径拼接就成了该检测方法的难点之一。如果拼接精度不够高,则在相邻图像的拼接处会产生明显的拼接裂缝,导致拼接处的疵病产生断裂^[4],最终影响疵病量级的正确评定。为实现大口径光学元件表面疵病的正确评定,必须找到一种快速精确的全孔径拼接方法。本文通过分析各种图像拼接的方法,结合大口径光学元件表面疵病检测的需要,采用基于模板匹配的方法实现大口径光学元件表面疵病检测的图像拼接。

2 大口径表面疵病检测系统原理

根据光学元件表面疵病的散射成像理论,建立大口径光学元件表面疵病检测系统如图 1 所示。多束 LED 光源呈环形分布,以特定角度照射到被检测元件表面上,调整被测元件与光源的距离,使环形排布的光源照射到被测元件表面上并形成一圆形光斑,再调整 CCD 的前后距离使成像质量达到最佳。位于光学系统物面上的入射光经被测光学元件表面反射从另一端出射,表面疵病诱发的散射光进入光学成像系统形成疵病的像。CCD 及光源固定在可沿 XY 方向精确定位的扫描平移系统上,当检测大口径光学元件时,CCD 及光源随扫描平移系统移动,逐步完成被测元件表面疵病的扫描成像。扫描得到的图像是一系列带有重叠区域的子孔径图,必须对它们实施拼接才能完全复原带有完整表面疵病信息的全孔径图,得到表面疵病的全孔径图后,结合数字图像处理技术完成疵病量级的评定。由于被测光学元件口径大,而 CCD 的视场有限,所以检测大口径光学元件所需拼接的图像很多。为避免大量的数据计算,全孔径拼接的算法必须要确保算法的合

理性,保证拼接的快速性与精确性。

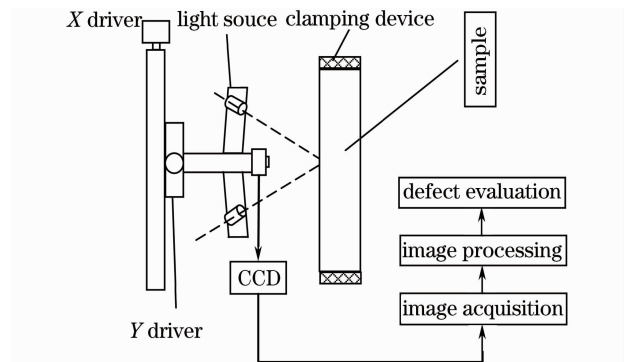


图 1 疵病检测系统原理图

Fig. 1 Layout of defects testing system

3 表面疵病检测的图像拼接

目前国内外主要利用 CCD 采集疵病的散射像检测光学元件表面疵病,因此该图像拼接方法主要针对散射成像法采集的带有表面疵病信息的灰度图像进行图像拼接分析。

图像匹配主要是指在待拼接的两幅图像中进行特征检测,确定关键点的位置,再根据关键点的位置确定两图像的拼接关系。图像匹配技术是全孔径拼接的核心技术,在实际应用的时候不仅要求匹配精确而且必须足够地快。如果匹配精度不够高,则在拼接过程中必然出现拼接错位的现象。在表面疵病检测过程中,如果拼接过程中出现相邻两子孔径图出现拼接错位^[5],那么就可能导致拼接处的疵病产生断裂而使一个较长疵病变成两个短疵病(如图 2 所示),这在疵病检测中是不允许的,所以保证匹配精度是图像匹配的重点。同时,图像拼接必须足够快,因为大口径光学元件表面疵病检测需拼接的图像较多,数据量较大,因此保证拼接速度是确保快速检测光学元件表面疵病的关键。

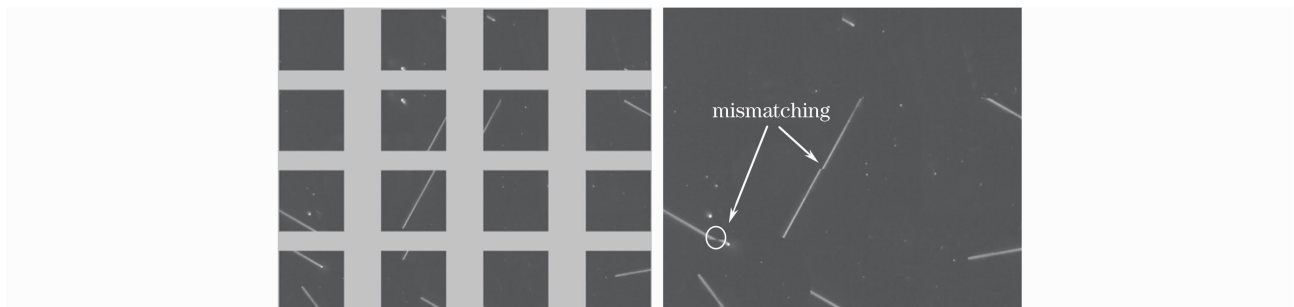


图 2 待拼接的图像及拼接产生错位的关系图

Fig. 2 Relationship between sub-aperture and mismatching in the full-aperture

光学元件表面疵病主要包括麻点、划痕、破边等,当采用散射法采集此类疵病的像时得到的是暗

背景的疵病亮像,所以,图像拼接过程中可以直接将疵病特征当作拼接特征处理。但是由于大口径光学

元件表面疵病较多,而且有较多相似疵病(比如麻点),因此采用特征点的方法可能会导致找到多个相似点的情况,所以在光学元件表面疵病检测中主要用到了基于模板匹配的方法。其拼接原理是:在图像采集过程中,确保相邻两图像存在重叠区域,且该重叠区域存在相同的景物内容。第一幅图像选取区域 A,根据 10%~30%的重叠原理,在第二幅图中,加上误差范围,即可得到区域 B。但是区域 A 必须包括足够多的物体特征,否则容易导致算法失败。如何在第一幅图像中选取可作为模板的区域 A 并找到与之相匹配的区域是图像匹配技术需要完成的任务。

模板匹配的方法主要包括:块匹配和比值匹配^[6~10]。

3.1 块匹配

块匹配算法是最常用的一种图像匹配算法,根据图像的特征,在拼接前将图像命名为原图和匹配图。在原图中取一个模板图像,然后用此模板对匹配图进行相似程度的运算,其示意图如图 3 所示。其中 T 为原图上重叠区域的模板, T 叠放在匹配图 S 的重叠区域上平移,模板覆盖下的那块图像叫做子图 $Q^{i,j}$ (如图 3 所示), (i, j) 为子图的左上角像素点在匹配图 S 中的坐标。从图 3 中可以看出, i 和 j 的取值范围分别为

$$U - Q < i < U - M + 1$$

$$1 < j < V - N + 1$$

式中 M, N 为模板的宽和高, U 和 V 为匹配图 S 的宽和高。

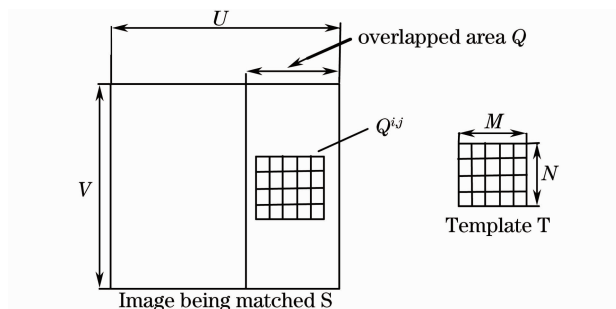


图 3 模板匹配法示意

Fig. 3 Sketch of template matching

子图 $Q^{i,j}$ 与模板 T 的相似程度可由(1)式的评价函数^[6,7]进行评价。当该函数值 $D(i, j)$ 为最小时说明二者就是最为相似的模块,此时能实现两幅图的匹配。所以,在拼接时只需将原图重叠区域中的模板左上角像素与坐标为 (i, j) 的匹配图像素重合即可实现两图拼接。

$$D(i, j) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M [Q^{i,j}(m, n) - T(m, n)]^2, \quad (1)$$

式中 $D(i, j)$ 是子图的左上角坐标为 (i, j) 时该子图与模板的相似程度; $Q^{i,j}(m, n)$ 是子图左上角坐标为 (i, j) 时,其子图内坐标为 (m, n) 的像素灰度值; $T(m, n)$ 是模板中坐标为 (m, n) 对应的像素灰度值。

3.2 比值匹配

与模板匹配方法不同,比值匹配则主要是将原图和匹配图重叠区域模块间像素相比,根据其比值与 1 的接近程度评价二者的相似程度。

比值匹配原理如图 4 所示。在原图像的重叠区域取出部分像素,通常取 2 列,用它们的比值作为模板,然后在匹配图中搜索最佳的匹配。即对匹配图由左至右依次从间距相同的 2 列上取出部分像素,并逐一计算其对应像素灰度值的比值;然后将这些比值依次与模板进行比较,其比值最接近时所对应的模板就是最佳匹配。

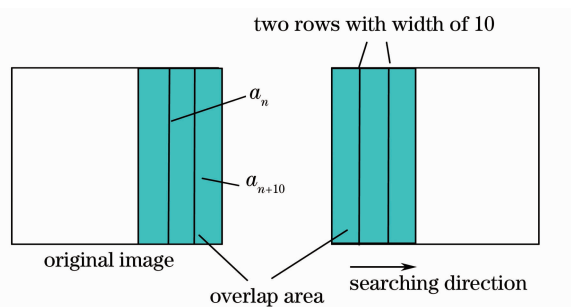


图 4 比值匹配原理图

Fig. 4 Matching by proportion

在原图像的重叠区域,在相隔 10 个像素的两列数据上各取 m 个像素作为模板。计算其比值得到了一个浮点数组 $base[m]$,将它作为比较的模板。

$$\text{令 } \mathbf{a}_n = \begin{Bmatrix} a_{1,n} \\ a_{2,n} \\ a_{3,n} \\ \vdots \\ a_{m,n} \end{Bmatrix}, \mathbf{a}_{n+10} = \begin{Bmatrix} a_{1,n+10} \\ a_{2,n+10} \\ a_{3,n+10} \\ \vdots \\ a_{m,n+10} \end{Bmatrix} \text{ 为图像矩阵的}$$

特征列向量,则有

$$base[m] = \begin{Bmatrix} a_{1,n}/a_{1,n+10} \\ a_{2,n}/a_{2,n+10} \\ a_{3,n}/a_{3,n+10} \\ \vdots \\ a_{m,n}/a_{m,n+10} \end{Bmatrix}$$

在选取两列作为模板的像素时,如果任意选择两列像素,也许会由于所选两列像素中特征不够明

显,从而造成匹配困难,所以选取该模板时应进行预先筛选。具体方法是:先对原图像的重叠区域进行扫描,分别计算每隔 10 列像素的两列向量中间 m 个元素的比值向量,然后将该比值向量的各个元素相加,取该和值最大的两列向量,它们的比值矩阵就是 $base[m]$ 矩阵,即比值匹配时的模板。

4 实 验

4.1 两种匹配方法的比较

基于块匹配的方法拼接精度较高,只要模块取得足够大其精度也将会大大提高,但模块取得太大必然引入大量数据计算,从而影响拼接速度。因此,在拼接时,模板的选取应在保证拼接精度的情况下使模板尽量小。根据块匹配原理对图 5(a) 的图像

进行块匹配,得到的全孔径图如图 5(b) 所示。

当图像本身质量较好,或者图像灰度偏暗而且特征比较复杂时,比值匹配的方法可以实现准确匹配,可以说该算法对特征复杂的图像拼接效果较好。但是,对于特征不明显,灰度变化很小的两幅图像,由于在拍摄过程中两幅图像的拍摄条件的差异,很容易造成误匹配,效果不佳。根据比值匹配原理对图 6(a) 的图像阵列进行比值匹配,得到的全孔径图如图 6(b) 所示,由图中可以看出,与图像上下边缘平行的疵病比实际变短,其原因是含有该疵病的图像进行比值匹配时,待拼接的相邻两孔径所取的模板及搜索区域像素灰度变化不明显,导致没能正确找到关键点,而造成误匹配。

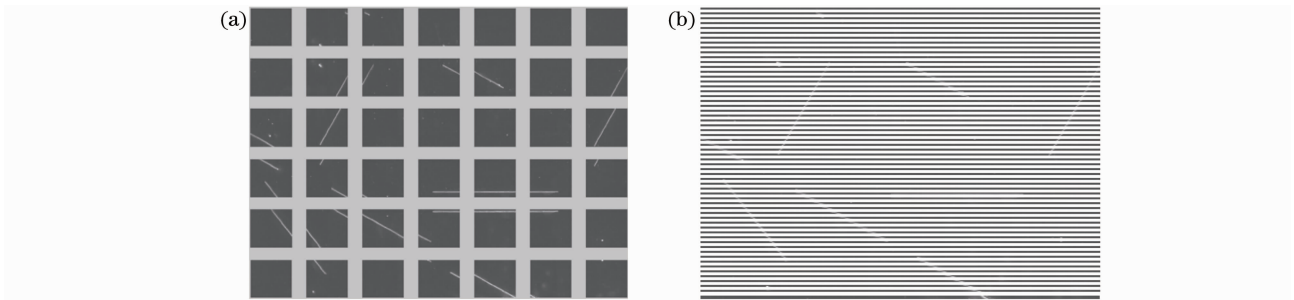


图 5 块匹配。(a) 6×7 图像阵列, (b) 全孔径图

Fig. 5 Template matching. (a) 6×7 sub-aperture arrays, (b) full-aperture

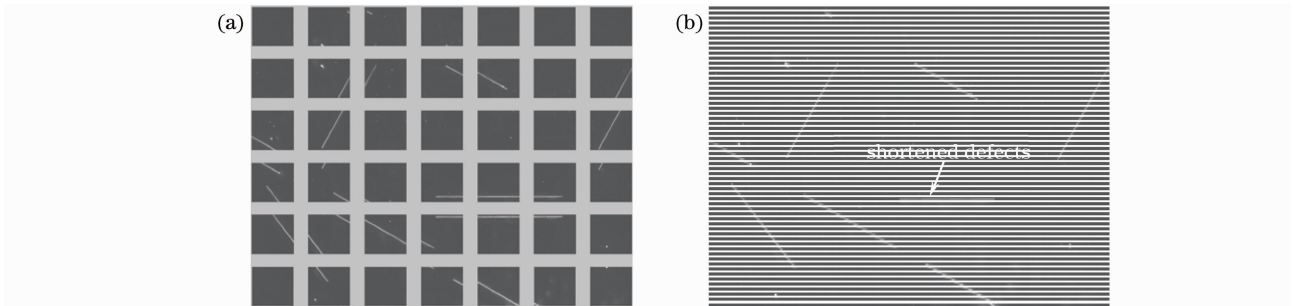


图 6 比值匹配。(a) 6×7 图像阵列, (b) 全孔径图

Fig. 6 Proportion matching. (a) 6×7 sub-aperture arrays, (b) full-aperture

在表面疵病检测中,疵病分布是不规律的,而且通常存在某些区域无疵病的情况。也就是说,在表面疵病检测中,通常存在待拼接的两幅图的重叠区域灰度差异不大,特征也不明显,若利用比值匹配的方法很容易造成误匹配,从而影响表面疵病的正确评价。

4.2 大口径光学元件检测实验

实验中,对高功率激光装置中使用的口径为 $330 \text{ mm} \times 330 \text{ mm}$ 的某光学元件的表面疵病分布进行检测。CCD 采集的单个子孔径口径大小为 $20 \text{ mm} \times 18 \text{ mm}$,再按一定比例对两子孔径间重叠区域大小进行适当设置。当步进电机带动 CCD 及

照明系统对被测元件沿 XY 方向进行扫描成像后,得到一系列子孔径图[如图 7(a) 所示]。由图可以看出,被测元件表面疵病在每幅子孔径中的分布是不规律的,并且所有子孔径图的灰度分布是不规律的,由 4.1 节分析可知,图 7(a) 的子孔径系列应当采用块匹配的方法实现全孔径图的拼接,从而再现被测元件表面疵病在全孔径图中的分布。拼接结果如图 7(b) 所示,可以看出利用块匹配的方法能完全再现光学元件表面疵病的分布情况,从而为进一步的数字图像处理如:二值化、疵病特征提取、疵病大小计算等创造了基础条件。

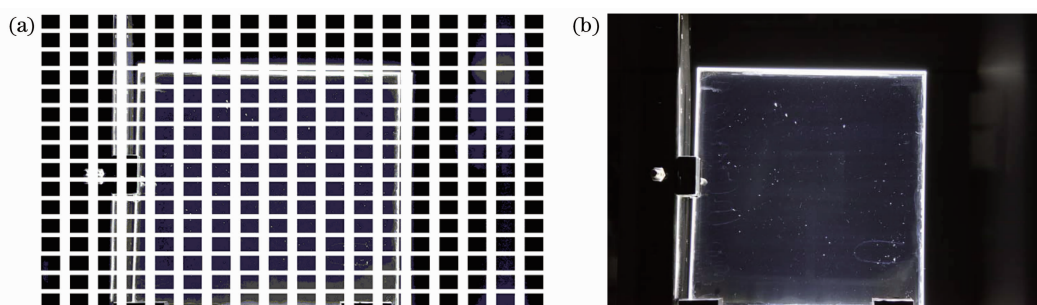


图 7 检测大口径光学元件表面疵病。(a)子孔径图,(b)块匹配的拼接结果

Fig.7 Surface defects testing of large aperture optic. (a) sub-aperture, (b) result of template matching

5 结 论

通过分析两种匹配拼接方法的优缺点,结合大口径光学元件表面疵病检测的需求,提出采用块匹配的方法实现大口径光学元件表面疵病检测的图像拼接。由大口径光学元件表面疵病实际检测结果可以看出,利用块匹配的方法能完全再现元件表面疵病分布的全景图,为进一步的数字图像处理提供可靠的数据支持。同时,该方法的检测精度取决于每个子孔径对光学元件表面疵病的检测精度,因此有效地将大口径光学元件表面疵病的检测难题简化为“小口径”元件处理,提高了检测精度,因而能有效解决目前大口径光学元件表面疵病的无法定量检测的难题。

参 考 文 献

- Zhang Shunde, Lu Bingheng, Ding Yucheng. Study on data registration of subdivided shapes in optical 3-D profilometry[J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(6): 531~536
张舜德, 卢秉恒, 丁玉成. 光学三维形面分区域测量数据的拼接研究[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(6): 531~536
- Song Helun, Jiang Wenhan, Xian Hao *et al.*. Technology of co-phasing of the segmented mirrors based on a Michelson interferometric system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5): 748~751
宋贺伦, 姜文汉, 鲜浩等. 基于迈克耳逊干涉系统的拼接主镜共相位检测技术[J]. *中国激光*, 2008, **35**(5): 748~751
- J. M. Elson. Theory of light scattering from a rough surface with an in-homogenous dielectric permittivity[J]. *Phys. Rev. B*, 1984, **30**: 5460~5480
- Liu Xu, Yang Yongying, Liu Dong *et al.*. Error analysis of sub-

aperture synthesis for detecting surface defects of optical components[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2008, **19**(8): 1088~1093

刘旭, 杨雨英, 刘东等. 光学元件表面疵病检测子孔径拼接的误差分析[J]. *光电子·激光*, 2008, **19**(8): 1088~1093

5 Zuo Yanlei, Wei Xiaofeng, Zhu Qihua *et al.*. Far field analysis after chirped pulse passing through a misalignment tiled-grating compressor[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(7): 922~927

左言磊, 魏晓峰, 朱启华等. 啁啾脉冲通过失调拼接光栅压缩池后的远场分析[J]. *中国激光*, 2006, **33**(7): 922~927

6 Yang Yongying, Lu Chunhua, Liang Jiao *et al.*. Microscopic dark-field scattering imaging and digitalization evaluation system of defects on optical devices precision surface[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 1031~1038

杨雨英, 陆春华, 梁蛟等. 光学元件表面缺陷的显微散射暗场成像及数字化评价系统[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6): 1031~1038

7 Wang Fengquan, Yang Yongying, Sun Dandan. Research of digital inspection system of precise surface defect [J]. *Optical Instruments*, 2006, **28**(3): 71~75

汪凤全, 杨雨英, 孙丹丹. 精密表面缺陷的数字化评价系统的研究[J]. *光学仪器*, 2006, **28**(3): 71~75

8 Cheng Xiaofeng, Xu Xu, Zhang Lin *et al.*. Defect testing of large aperture optics based on high resolution CCD camera[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **21**(11): 1678~1680

程晓峰, 徐旭, 张林等. 基于高分辨率的大口径光学元件疵病检测[J]. *强激光与粒子束*, 2009, **21**(11): 1678~1680

9 Dai Mingkui, Xu Deiyuan. The present situation of imperfections testing and researching on the optical components[J]. *Optical Instruments*, 1996, **18**(4): 32~39

戴名奎, 徐德衍. 光学元件的疵病检验与研究现状[J]. *光学仪器*, 1996, **18**(4): 32~39

10 Li Zhigang, Ji Yubo, Xue Quan. A fast stitching algorithm for edge overlapping images [J]. *Computer Engineering*, 2000, **26**(5): 37~38

李志刚, 纪玉波, 薛全. 边界重叠图像的一种快速拼接方法[J]. *计算机工程*, 2000, **26**(5): 37~38