

基于标志点匹配的散斑图像变形初值估计法

张红颖, 于之靖

中国民航大学电子信息与自动化学院, 天津 300300

摘要 在数字散斑相关测量方法中,可靠的变形初值估计是获得亚像素精度的关键。利用标志点匹配技术,提出了一种新的变形参数初值估计法。该方法在散斑上粘贴反射系数极高的圆形标志点,为消除散斑背景对标志点提取的影响,提出一种改进的尺度不变特征转换算法,将极值点检测约束在显著的边缘区域,从而大大减少冗余特征点的提取,最后通过单应性变换得到全场变形,进而使得感兴趣区域中各像素点快速完成初值估计。制作散斑板子进行实验验证,结果表明,该方法得到的变形初值,只需要 3~4 次迭代就能够使亚像素迭代收敛,并获得准确、可靠的测量结果。

关键词 相干光学; 光学测量; 亚像素精度; 初值估计; 标志点匹配; 尺度不变特征转换算法

中图分类号 TN247 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0303001

Initial Displacement Estimation Method for Speckle Image Based on Marker Matching

Zhang Hongying, Yu Zhijing

College of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China

Abstract For digital speckle correlation methods, the reliable initial displacement estimation is particularly important to achieve sub-pixel accuracy. Utilizing marker matching technology, a new initial value estimation method is proposed. This method sticks circular markers with high reflection coefficient on the speckles. In order to eliminate the effects of speckles on extracting points, an improved scale invariant feature transform algorithm detecting extreme points within significant edge region is presented, so the redundant feature points are greatly reduced in this way. At last, the homography transformation is executed to complete full field deformation, and the initial value of each pixel in the region of interest is estimated rapidly. Experiments are performed through making speckle plate and the results show that the initial values obtained by the proposed method can reach a fast convergence within 3-4 iterations and consequently get accurate and reliable measurement results.

Key words coherence optics; optical measurement; sub-pixel accuracy; initial value estimation; marker matching; scale invariant feature transform algorithm

OCIS codes 030.6140; 030.6610; 100.4550

1 引 言

在数字散斑相关匹配中,合理的初值估计对于亚像素迭代尤其重要^[1-2]。在搜索过程中,对于每一个参考子区,如能预先得到较好的迭代初值,那么就可以通过亚像素搜索算法,迭代求得最佳匹配;相反,若初值偏差过大会导致误匹配。因此,对变形参数初值估计法的研究尤其重要。

传统的位移初值估计法为整像素搜索法^[3-5],这种方法简单易行,但是需要对每一个子区进行相关搜索,在测量范围较大时匹配效率特别低。而且,由于整像素搜索的前提是假设变形图像子区变化不大,因此在双摄像机夹角导致的子区变化较大的情况下,两幅图像的相关性较低,匹配时可能会搜索不到极值点进而得不到变形初值。变形初值还可以通过另外一些方法来计算,潘兵等^[6]提出一种人机交互的方法,先在参考子区

收稿日期: 2016-09-29; **收到修改稿日期:** 2016-10-22

基金项目: 国家自然科学基金民航联合基金(U1333105)、中央高校基本科研业务费(3122015C016)

作者简介: 张红颖(1978—),女,博士,副教授,主要从事计算机视觉与图像处理方面的研究。

E-mail: carole_zhang0716@163.com

中手动选择三个或三个以上易识别的点,然后再手动在目标子区中找出相匹配的点,最后利用两个子区坐标之间的关系解算得初值。该方法提高了匹配精度,但计算过程不能完全自动化,在大视场测量时由于处理的系列变形图片过多导致计算较为繁琐。近来对变形初值估计的研究多根据一种假设条件,即同一状态下临近点的变形是连续的^[7-8],在这个条件下首先任意选定种子点并用整像素搜索法对其完成匹配,然后根据所得匹配坐标值,扩散开来完成所有点的匹配。这种利用种子点的优化初值进行参数扩散的方法,解决了人工交互的问题,具有很高的匹配效率且应用广泛,但也有不足之处,因为在大变形或双目摄像机引起的图像变形情况下,很难保证初始化种子点的匹配准确性,进而影响到其他点的初值估计。

综上所述,整像素初值估计法基于小变形假设且搜索效率较低;人机交互的方法,需要手动选择特征点,在多系列图像处理时会异常繁琐;自动初始化种子点的方法,很难保证初值估计的准确性。

鉴于以上问题,本文将近景工业摄影测量中的标志点匹配技术^[9-10]引入到数字散斑相关匹配的变形参数初值估计中,提出了一种新型的变形参数初值估计方法。该方法中标志点的识别与匹配过程能够自动完成,即不需要人为参与也不需要设定变形假设条件。而且,由于标志点的匹配具有高稳健性,即使在摄像机视角不同造成的变形下,也能够实现精确匹配,进而得到可靠的初值。

2 基于标志点匹配的全场初值估计法

2.1 算法原理

为实现对被测物的精确匹配,在摄影测量学中,一般会在被测物表面粘贴具有鲜明特点的人工标志点^[11],通过对标志点的识别与匹配,实现对被测物的测量或重建。将标志点匹配技术引入到数字散斑图像的匹配中,实现对变形参数的可靠初值估计。算法原理如图1所示。

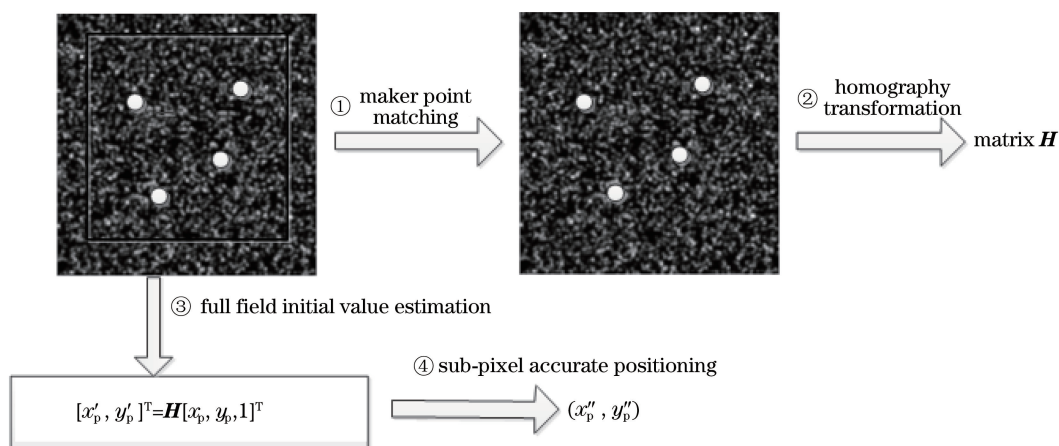


图1 算法原理图

Fig. 1 Schematic of the proposed method

首先,在待测散斑图像上选定感兴趣区域(ROI),如图1中方框所示,并在该区域中随机粘贴不完全共线的4对标志点;然后,运用本文改进的尺度不变特征转换(SIFT)算法提取特征点并完成标志点匹配;最后,根据4对标志点坐标求得两幅图像间的单应性矩阵 H ,即整体相对变形,而后可得各点变形后的位移初值 (x'_p, y'_p) ,完成全场初值估计。

该算法避免了对每个点都要进行耗时的相关搜索,提高了计算速度。在完成初值估计以后,以该初值作为亚像素搜索的迭代初值,通过迭代优化即可得到精确位移值 (x''_p, y''_p) 。由于特征点识别度高且匹配具有很高的稳健性,因此在摄像机视角不同的情况下,也能够得到合理的匹配点对,以这些点对为基础,可以得到可靠的全场初值,从而使亚像素迭代能够精确收敛,而不陷入局部极值。

2.2 标志点选取

在工业摄影测量中,经常采用布设人工标志点的方式产生高对比度且足够数量的特征点。标志点多采用回光反射材料制成,使得标志点与背景图像的灰度对比极其明显,具有良好的识别性,能够克服人工选点

的不足,实现特征点的自动提取与匹配。

标志点种类繁多,图 2 列举了几种常用的标志点。

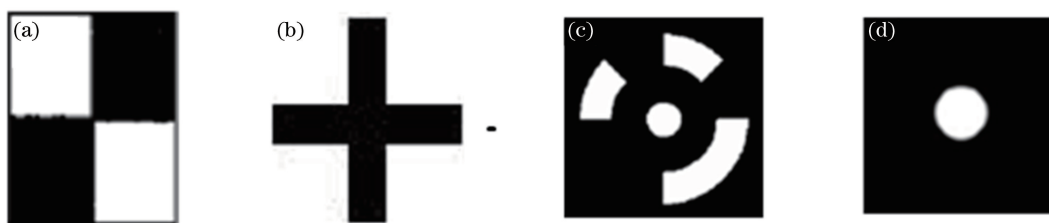


图 2 标志点示意图。(a)对角标志点;(b)十字标志点;(c)编码标志点;(d)圆形标志点

Fig. 2 Diagram of markers. (a) Diagonal marker; (b) cross marker; (c) coded marker; (d) circular marker

经分析可知,相比于对角标志点、十字标志点以及研究较多的编码标志点,圆形标志点具有以下优点^[11]:1) 特征简单易识别,且识别速度快;2) 对图像质量的要求较低;3) 特征点形状简单占用空间小,易于根据不同的测量情况布设不同的密度,具有很大的灵活性。因此,本文采用一种厚度为 0.1mm 的回光材料制成白色圆形标志点贴敷于散斑图像上,作为初值估计的特征点。

2.3 基于改进 SIFT 算法的标志点匹配

SIFT 算法^[12]具有非常好的尺度、旋转和视角不变性,且定位准确,对于简单图像也能检测出丰富的特征点,是目前图像匹配算法中性能较好的算法。它包括检测尺度空间极值点、精确定位极值点、指定特征点方向参数和生成特征描述子 4 个步骤。

使用传统 SIFT 算法对本文标志点进行匹配,经过尺度空间提取之后会存在大量无效的特征点,如图 3 所示。

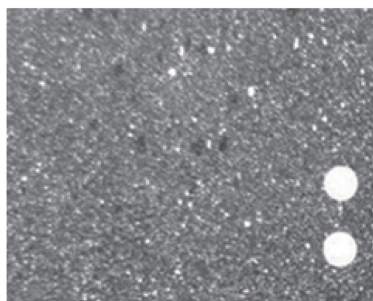


图 3 散斑图像

Fig. 3 Speckle image

图 3 中反射系数极高的圆形标志点为检测目标,背景为散斑图像。由于散斑图像由许多微小的散斑颗粒组成,在对标志点进行检测时,由于散斑颗粒的存在,会检测出许多无意义的候选特征点,而这些检测出的过多冗余点又会降低后续处理的效率。

为提高极值点检测的有效性,提出了一种改进的 SIFT 极值检测算法,该算法可以大大减少冗余特征点的检测,有利于后续描述子的快速生成。

由图 3 可知,在以散斑为背景的图像上,特征点具有极其明显的边缘结构,基于该特点,提出了一种施加边缘约束的算法,使特征点的检测只在显著的边缘区域进行。施加约束的操作步骤如下:1) 获得原图产生的高斯差分金字塔(DOG)每组第一层图像;2) 对该差分图进行基于最大类间方差法(OTSU)^[13]的自适应阈值分割,得到二值图,即对应原始图像中的显著边缘区域;3) 将二值图作为特征点检测时的约束条件,使 SIFT 检测只在二值图中值为“1”的部分进行。

其中,OTSU 基于图像的灰度特征进行阈值选取,计算简单且不受实验环境中难以避免的亮度和对比度的影响,在阈值选取中具有最佳性能。经理论分析,通过这两步即可完成对候选特征点的精简,去除大量的散斑特征点。

2.4 散斑图像全场初值估计

在完成标志点的检测与匹配,并得到标志点对坐标之后,通过单应性变换来求得参考散斑图像和目标散斑图像间的整体变换,进而使 ROI 中各像素点快速完成初值估计。

平面单应性^[14]定义为从一个平面到另一个平面的投影映射,它通过单应性矩阵将两个平面关联起来。若假设 $\mathbf{p} = (x, y, l)^T$ 和 $\mathbf{q} = (u, v, 1)^T$ 分别是参考图像和目标图像中的对应点坐标,则有

$$\mathbf{q} = \mathbf{H}\mathbf{p}, \quad (1)$$

式中 \mathbf{H} 为相应的单应性矩阵,表征了两幅待匹配散斑图间的平移、旋转及缩放等变化,表示为

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{h}_1^T \\ \mathbf{h}_2^T \\ \mathbf{h}_3^T \end{pmatrix}, \quad (2)$$

式中 $\mathbf{h}_i^T = (h_{i1}, h_{i2}, h_{i3})^T, i=1,2,3$, 平面单应性矩阵只有 8 个自由度,令 $h_{33}=1$ 。

经整理可得

$$\begin{cases} h_{11}x + h_{12}y + h_{13} - uh_{31}x - uh_{32}y = u \\ h_{21}x + h_{22}y + h_{23} - vh_{31}x - vh_{32}y = v \end{cases}, \quad (3)$$

(3)式为关于 h_{ij} 的八元一次方程组,只需要 4 对标志点坐标即可求得矩阵 \mathbf{H} 。实验中为了得到精确度更高、稳健性更好的变换参数,在散斑图像上布设多于 4 对的标志点,并运用最小二乘法求解最优单应性变换矩阵。

单应性矩阵代表了两幅图像的整体变形,对于 ROI 中所有计算点,可通过(1)式求得在目标图像中的匹配点坐标,即完成了全场变形参数初值估计。

3 实验验证

3.1 改进 SIFT 算法有效性验证

为了验证上述边缘约束思想用于本文标志点检测时的有效性,对实验用散斑板子进行特征点检测与提取。如图 4 所示,图 4(a)为采集的原始图像,图 4(b)和(c)分别为传统 SIFT 算法以及改进的 SIFT 算法的特征点提取结果。

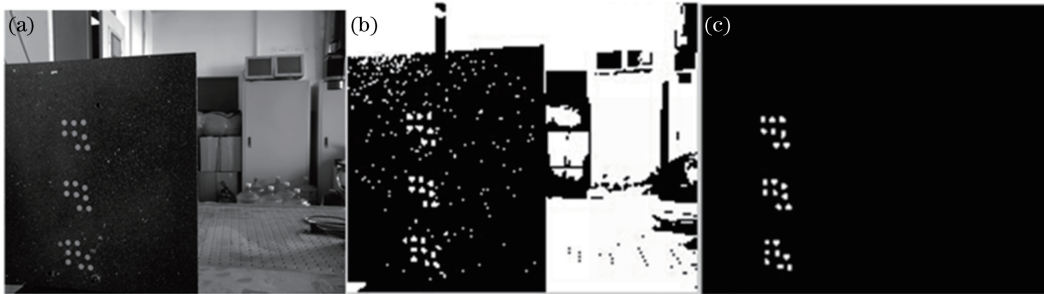


图 4 特征点检测结果对比。(a)采集的图像;(b)使用传统 SIFT 算法的提取结果;(c)使用改进的 SIFT 算法的提取结果

Fig. 4 Comparison of feature points detection. (a) Acquisition of image; (b) extraction result with conventional SIFT algorithm; (c) extracting result with proposed SIFT algorithm

由图 4 可以看出,采用传统 SIFT 算法检测时,虽然提取的标志点较为明显,但同时也存在大量的冗余特征点,这是散斑背景造成的。而经过改进的 SIFT 算法提取之后,冗余特征点已经被大量去除,提取的标志点清晰可见。由此可以验证,改进的 SIFT 算法大大提高了目标标志点检测提取的有效性,使后续特征点精确定位和特征描述子的生成效率提高,也在一定程度上提高了整个算法的计算时间,为后续标志点匹配奠定了良好的基础。

3.2 初值估计法可行性验证

为了验证所提出的初值估计算法的有效性,通过散斑板子进行实验。使用人工喷漆的方式制作散斑,首

先在板子表面均匀地喷涂黑色哑光漆,再随机喷涂白色斑点。散斑图完成之后,划定 ROI 贴敷圆形标志点。为了更好地验证方案的可靠性,在实验板子上划出三部分 ROI,每一块区域粘贴不完全共线的 8 个圆形标志点。实验分为两步完成:1) 验证圆形标志点的匹配精度;2) 选用一对变形图像进行反向组合型高斯牛顿法(IC-GN)亚像素迭代实验,用来验证初值估计法的准确性。实验环境及第二块感兴趣区域 ROI2,如图 5 所示。

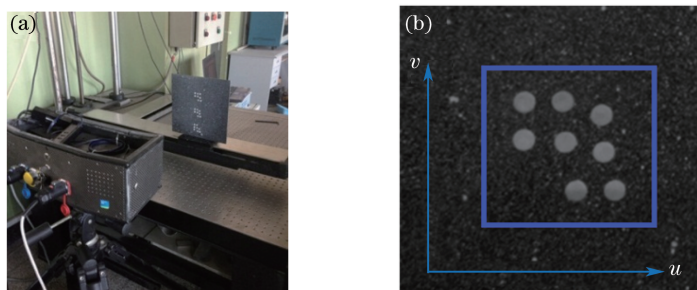


图 5 (a)实验环境;(b) ROI2

Fig. 5 (a) Experimental environment; (b) ROI2

实验在图 5 所示的高精度平移台上进行。摄像机为 Point Grey FL3-GE-50S5M 工业双目相机,CCD 型号为 Sony ICX655AL,最大像素尺寸为 $2448 \text{ pixel} \times 2048 \text{ pixel}$,感光尺寸为 $2/3''$,有效焦距 $f=8 \text{ mm}$ 。根据实验室空间环境将相机固定在三脚架上,为获得良好的测量结果,固定在离平移台 1 m 远处,且两台相机的主光轴夹角为 20° 。控制器控制散斑板子以 1 mm/s 的速度沿 u 方向平移,双目摄像机每隔 10 s 进行一次图像采集,共采集得 15 对图像。

第一步,采用 2.2 节所述算法对标志点进行匹配,图 6 给出了其中一对双目图像的标志点匹配结果。

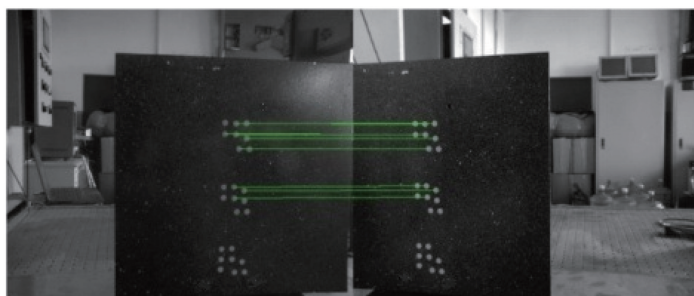


图 6 双目图像的标志点匹配

Fig. 6 Marker matching of binocular images

由图 6 可以直观看出,对于双摄像机拍摄的左右图像,标志点的匹配结果较好。因此,选取右摄像机拍摄的共 10 幅 9 对图像,每一对均为连续拍摄,平移量为 10 mm 。仍然用 2.2 节中改进的 SIFT 算法进行匹配,表 1 列举了每一对变形图像的标志点在匹配之后测得的平均位移数据及其误差。

表 1 各对标志点的平均位移及误差

Table 1 Average displacement and error of each pair of mark points

Image pairs	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
Measurement value /mm	10.06	10.13	9.93	9.88	10.11	9.91	9.96	9.85	10.07
True displacement /mm	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Absolute error /mm	0.06	0.13	0.07	0.12	0.11	0.09	0.04	0.15	0.07
Relative error /%	0.6	1.3	0.7	1.2	1.1	0.9	0.4	1.5	0.7

由表 1 可以看出,各标志点匹配误差均在 0.15 mm 以内,标志点匹配的精度很高。

第二步,为了验证基于标志点匹配的变形初值估计法的准确性,从 15 对连续变形图像中任选一对进行 IC-GN 亚像素迭代实验,实验中选用第 3 对图像。首先根据第一步得到各标志点匹配坐标,用 2.3 节方法分别求出三块 ROI 的整体相对变形,然后求得其中每个计算点的变形初值,最后进行 IC-GN 亚像素迭代优化求得精确位移值。表 2 分别给出了三块 ROI 中各计算点的平均位移初值、迭代次数以及收敛到的精确值,

并给出了位移真值作为比较。

表 2 ROI 的平均位移初值、迭代次数和精确值

Table 2 Average initial displacement, iteration number and convergence value of ROI

ROI	ROI1	ROI2	ROI3
Initial displacement /mm	10.29	10.17	10.09
Iteration number	3.6	3.1	3.4
Convergence value /mm	10.08	10.06	9.96
True displacement /mm	10	10	10

从表 2 中明显可以看出,位移初值与最终收敛值非常接近,利用本文提出的初值估计法能够使 IC-GN 方法快速收敛,通常只需要 3~4 次迭代即可完成。同时可以看出,亚像素迭代得到的精确值与施加的位移真值误差很小。

经过以上实验结果表明,本文提出的变形初值估计方法能够为 IC-GN 亚像素迭代提供精确的初值。此外,由于不需要逐个像素求取初值,整个过程平均用时不长,满足实际测量中对实时性的要求。

4 结 论

针对散斑图像变形初值估计问题进行研究,提出了一种基于标志点匹配的变形参数初值估计法。该方法在散斑上粘贴简单易识别的圆形标志点,并提出改进的 SIFT 算法对其进行提取,以减少散斑背景造成的冗余特征点,而后利用单应性变换得到全场初值估计。通过制作散斑板子验证该算法的有效性。实验结果表明,该方法具有良好的收敛速度,经过 3~4 次迭代之后,能够获得亚像素精度,可满足实际应用中的实时性要求。所提出的算法提高了利用数字散斑相关法进行测量的精度,可为飞行器的机翼变形测量提供重要的理论指导,下一步工作主要是将该算法应用于机翼变形测量的实验平台上。

参 考 文 献

- [1] Wang Yonghong, Liang Heng, Wang Shuo, *et al.* Advance in digital speckle correlation method and its applications [J]. Chinese Optics, 2013, 6(4): 470-480.
王永红, 梁 恒, 王 硕, 等. 数字散斑相关方法及应用进展[J]. 中国光学, 2013, 6(4): 470-480.
- [2] Zhang Huajun, Li Guihua, Liu Cheng, *et al.* Reliable initial guess based on SURF feature matching digital image correlation[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(11): 1112005.
张华俊, 李桂华, 刘 程, 等. 基于 SURF 特征匹配的数字图像相关变形初值可靠估计[J]. 光学学报, 2013, 33(11): 1112005.
- [3] Zhang Xiaochuan. Study on improved extended digital image correlation method and its application[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012: 11-12.
张晓川. 改进扩展数字图像相关方法及其应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2012: 11-12.
- [4] Wang Yonghong, Zhang Hao, Chen Li, *et al.* Adaptive decision inertia weight PSO correlation searching algorithm [J]. Opto-Electronic Engineering, 2015, 42(8): 1-7.
王永红, 张 浩, 陈 李, 等. 自适应决策粒子群的相关搜索优化[J]. 光电工程, 2015, 42(8): 1-7.
- [5] Zi Xinyun, Geng Shuai, Zhao Shufan, *et al.* Research on principle of saft dynamic torque measurement based on digital industrial photogrammetry technology[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(2): 0208002.
资新运, 耿 帅, 赵殊帆, 等. 数字工业摄像技术用于转轴动态扭矩测量原理的研究[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0208002.
- [6] Pan Bing, Xie Huimin, Xia Yong, *et al.* Large-deformation measurement based on reliable initial guess in digital image correlation method[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(2): 400-406.
潘 兵, 谢惠民, 夏 勇, 等. 数字图像相关中基于可靠变形初值估计的大变形测量[J]. 光学学报, 2009, 29(2): 400-406.
- [7] Shao XinXing, Dai Yuntong, He Xiaoyuan, *et al.* Real-time digital image correlation for quasi-static test in civil engineering[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(10): 1012003.
邵新星, 戴云彤, 何小元, 等. 实时数字图像相关用于土木准静态实验测量[J]. 光学学报, 2015, 35(10): 1012003.
- [8] Tang Zhengzong, Liang Jin, Xiao Zhenzhong, *et al.* Digital image correlation method based on seed point for large

- deformation measurement[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(11): 51-55.
- 唐正宗, 梁 晋, 肖振中, 等. 大变形测量数字图像的种子点匹配方法[J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(11): 51-55.
- [9] Su Xinyong, Huang Xuemei, Zhu Mingjian. Recognition and detection of targets in digital close-rang industrial photogrammetry[J]. Manufacturing Automation, 2014, 36(5): 31-33.
- 苏新勇, 黄雪梅, 朱明健. 数字近景工业摄影测量中标志点的识别与检测[J]. 制造业自动化, 2014, 36(5): 31-33.
- [10] Cao Lin, Li Zongchun, Feng Qiqiang, *et al.* A dual camera matching algorithm based on invariance relative relationship [J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2015, 32(2): 174-177.
- 曹 林, 李宗春, 冯其强, 等. 一种基于相对关系不变性的双相机标志点匹配算法[J]. 测绘科学技术学报, 2015, 32(2): 174-177.
- [11] Wu Fanlu, Liu Jianjun, Ren Xin, *et al.* Deep space exploration panoramic camera calibration technique based on circular markers[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(11): 1115002.
- 吴凡路, 刘建军, 任 鑫, 等. 基于圆形标志点的深空探测全景相机标定方法[J]. 光学学报, 2013, 33(11): 1115002.
- [12] Zhang Feifei. Research on object recognition and tracking based on the improved SIFT[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology. 2015: 9-12.
- 章菲菲. 基于改进 SIFT 算法的目标识别与跟踪技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015: 9-12.
- [13] Yuan Xiaocui, Wu Lushen, Chen Huawei. Rail image segmentation based on Otsu threshold method[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(7): 1772-1781.
- 袁小翠, 吴禄慎, 陈华伟. 基于 Otsu 方法的钢轨图像分割[J]. 光学 精密工程, 2016, 24(7): 1772-1781.
- [14] Zhang Hongying, Hu Zheng, Moving object detection in combination of CenSurE and spatial-temporal information[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(9): 2452-2463.
- 张红颖, 胡 正. CenSurE 特征和时空信息相结合的运动目标检测[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(9): 2452-2463.