

文章编号 1004-924X(2017)增-0288-09

## 高速铁路基沉降监测系统靶面图像中心定位

闵永智<sup>1,2\*</sup>, 郭薇<sup>1</sup>, 党建武<sup>1</sup>

(1. 兰州交通大学自动化与电气工程学院, 甘肃兰州 730070;

2. 甘肃省轨道交通电气自动化工程实验室(兰州交通大学), 甘肃兰州 730070)

**摘要:**无砟轨道表面沉降监测系统通过定位激光图像中心得到测量标靶沉降前后的距离数据差值,以此来反映监测点相对于基准点的路基沉降变形程度,靶面图像的中心定位技术关系到监测系统的测量精度。针对传统光条中心定位技术在对激光与靶面距离较远时的激光图像定位会产生较大误差的问题,提出了利用十字光斑交点粗定位和局部灰度质心法精确定位的两步定位十字光斑图像中心的算法。首先在图像预处理的基础上提取十字光斑图像的形状特征,得到二值化图像;然后根据十字光斑图像的形状特征,粗略定位十字中心交点,在局部矩形区域内使用灰度质心法定位得到图像中心。实验结果表明,整个实验过程计算时间为1 s,实验标准差为0.145。与使用灰度质心法定位椭圆光斑相比,本文算法具有较高的计算精度,用时较短,适用于无砟轨道表面沉降监测系统。

**关键词:**无砟轨道;沉降监测;十字光斑;灰度质心法;中心定位

**中图分类号:**U213.244 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172513.0288

## Center positioning of target surface image for subgrade settlement monitoring system of high-speed rail

MIN Yong-zhi<sup>1,2\*</sup>, GUO Wei<sup>1</sup>, DANG Jian-wu<sup>1</sup>

(1. School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. Rail Transit Electrical Automation Engineering Laboratory of Gansu Province, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

\* Corresponding author, E-mail: minyongzhi@mail.lzjtu.cn

**Abstract:** Affects measurement accuracy of monitoring system was affected by the center positioning technology of target image. Aimed at the problem that laser image positioning of traditional laser strip center positioning technology causes larger error when the distance between laser and target surface is relatively far, algorithm of positioning cross light spot image center with two steps by precise positioning using coarse positioning of cross light spot intersection and local gray centroid method was proposed: shape features of cross light spot image were extracted based on image preprocessing to obtain binary image firstly; secondly cross centre intersection was positioned coarsely according to shape features of cross light spot images, and image center was obtained by positioning with gray centroid

收稿日期:2017-07-05;修订日期:2017-07-27.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61663022);国家自然科学基金资助项目(No. 61461023);甘肃省高原信息工程及控制重点实验室开放课题基金资助项目(No. 20161105)

method in local rectangular region. Experimental result shows that calculation time of the whole experimental process is 1 s and standard deviation of the experiment is 0.145. Compared with elliptical light spot positioning with gray centroid method, algorithm in the article has higher calculation accuracy with shorter time and is applicable to surface settlement monitoring system of ballastless track.

**Key words:** ballastless track; settlement monitoring; cross sport; gravity center method; center positioning

## 1 引言

我国时速 300 km 及以上高速铁路全面采用无砟轨道<sup>[1]</sup>,为确保路基上无砟轨道结构的安全可靠,制定了严苛的毫米级施工后沉降监测标准。无砟轨道路基水准线观测按二等水准测量精度要求形成附合水准路线,路基沉降观测水准测量的精度要求为 $\pm 1.0$  mm<sup>[2]</sup>。相对于传统的观测桩、沉降板、沉降水杯等不能自动连续的监测方式,激光测距法是一种新型的、非接触式的即刻式沉降测量方法。

图像中心定位技术是测量系统的重要部分,直接影响测量精度。监测系统大多应用点结构光进行测量,而基准点发出的点光源与监测点的接受靶面相隔较远,由于衍射效应,靶面光斑为具有中心亮斑的多级衍射环<sup>[3]</sup>,这些圆环条纹的出现扩大了激光的干扰面积,增强了激光对相机的干扰效果<sup>[4]</sup>;由于监测系统中激光与相机分别位于靶面两侧,因此选择可透光的有机玻璃作为靶面,但平板玻璃的厚度不能忽略不计,而且现场监测时很难保证点激光与靶面垂直,所以点激光投射到靶面时由于反射与折射作用,靶面上不仅仅只有一个光斑,对光斑中心定位产生很大干扰。针对以上两点,使用十字激光器作为光源时,靶面上的十字光斑形状较规则。摄像机标定是从二维图像获取三维空间信息的关键过程,是视觉研究的第一步。使用点激光的监测系统一般使用张正友平面标定法,但此方法对标定物要求精度高,制作成本昂贵,加工与维护比较困难,而且标定流程复杂,过程缓慢,不适用于在线监测系统的摄像机标定。线结构光较点结构光测量的信息大大增加,而实现的复杂性却并未增加,仅需利用空间中已知的特征直线,建立摄像机参数和特征线间的约束方程,即可实现摄像机的内参数标定<sup>[5-6]</sup>。相对点激光定位需要精密标靶的传统标定法,十字光斑中心定位可以使用

自标定方法进行相机内参数标定。相机自标定法标定相机仅需要用到相机运动过程中多幅图像之间的对应关系,并不需要特定的标定参照物,算法灵活,实用性强,更适合应用于沉降监测现场。因此本文首次讨论将十字激光器应用于无砟铁路路基沉降系统。

理想状态下结构光光条截面上的最亮点或亮度饱和区域的几何中心即为光条的中心。提取光条图像的特征,常用方法有边缘法、阈值法、灰度质心法和曲线拟合法<sup>[7-10]</sup>。边缘法算法简单、速度快,但受噪声影响大;阈值法没有考虑光带的方向,在光带曲率变化较大处易出现误判;高斯拟合法不适合窄带光条中心的提取,鲁棒性不佳。在通常的情况下,对图像中圆、椭圆和矩形等中心对称的激光图像进行定位最常用的是质心法。基于灰度的质心法具有处理速度快、精度较高及容易实现等优点,其提取精度可以达到亚像素级,从而对噪声不敏感。但十字光斑图像中心分布于全局图像很小的范围内,在全局范围内使用灰度质心法受周围干扰影响较大。

本文在充分分析和研究光条中心提取方法的基础上,根据监测系统的监测需求,提出利用十字光斑交点粗定位和局部灰度质心法精确定位的两步定位算法来提取十字光斑图像中心。首先对获取的十字光斑图像使用自适应中值滤波来去除图像噪声;再用最大类间方差阈值分割得到图像的十字结构,并用形态学开闭运算平滑十字边界,提取出图像的基本结构,得到二值化图像;然后使用局部灰度质心法在以十字交点为中心的局部矩形区域内进行中心定位计算,相对传统算法提高了定位精度,改善了图像式无砟轨道沉降监测系统的测量精度。

## 2 监测系统模型

国内学者不断尝试将视觉检测技术应用于路基沉降监测系统<sup>[11-13]</sup>,在将激光准直及图像检测

技术应用于无砟轨道表面沉降监测的过程中建立了铁路路基表面沉降变形相机链视觉传递测量系统(如图 1 所示),并进行了实验室和铁路上线实验验证<sup>[14-16]</sup>。此监测系统主要包括基准站、监测站和传递站三部分。测量基准站即沉降观测的基

准点,传递监测站要监测本监测点相对于基准点的沉降变形,并将本监测点沉降变形数值传递到下一级传递监测站。这样利用监测站和传递站通过首尾光学相连的方式形成了一个“链条”,从而实现了沉降变形的传递视觉监测。

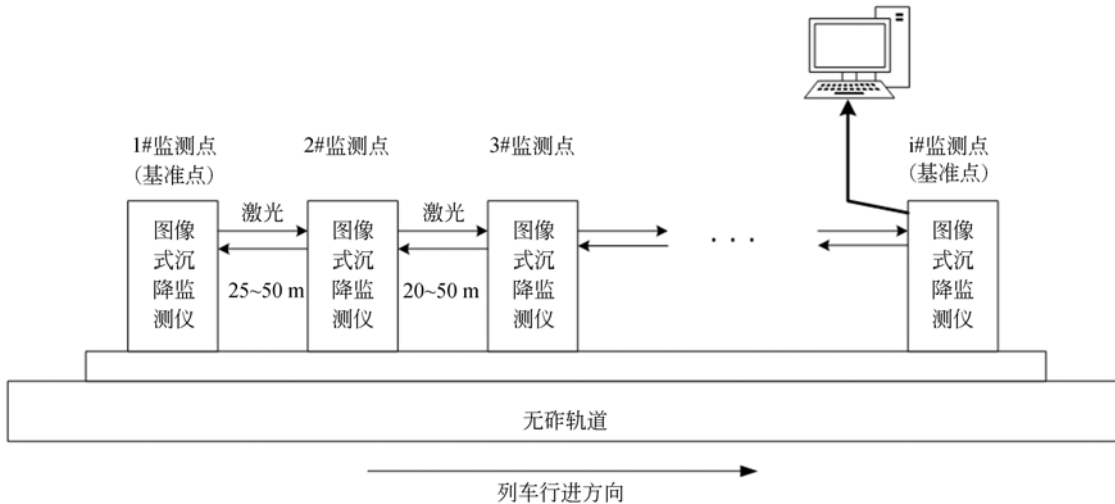


图 1 无砟轨道表面沉降变形相机链视觉传递监测系统

Fig. 1 Measurement system of image-based ballastless track surface settlement deformation camera chain visual transfer

### 3 十字光斑图像中心定位算法

图像中心定位技术直接影响测量精度,然而由于实际测量中普遍存在大面积背景干扰和复杂光照环境的干扰,图像边缘模糊,不利于对目标图像的检测,实际接收器靶面十字光斑图像如图 2 所示。

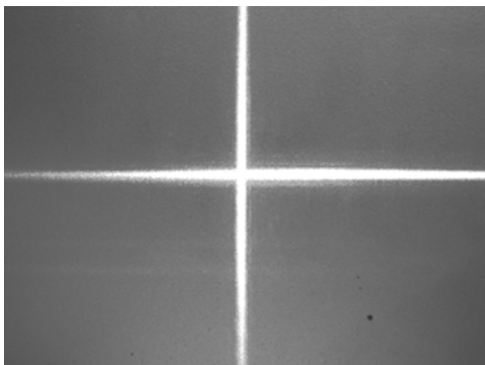


图 2 实际接收器靶面十字光斑图像

Fig. 2 Actual cross laser image on target surface receivers

#### 3.1 自适应中值滤波

在图像采集过程中不可避免得会受到噪声影响,如光照不均、空气中的浮沉产生的噪声以及由于电磁波的干扰在传输过程中产生的脉冲噪声等。为了减少噪声对图像中心定位的影响,并有效地保留图像边缘特征,并与后续的程序匹配,本文首先对采集到的十字光斑进行自适应中值滤波平滑处理。

自适应中值滤波与传统的中值滤波方式一样,都使用一个矩形窗口的模板对图像进行滤波,但在滤波过程中,自适应中值滤波会根据一定的设定条件而改变模板窗口大小,这就使得自适应中值滤波在细节的完整性和细节的保护上效果更好。其算法如下<sup>[17]</sup>:

(1) Level A: 若  $f_{\min} < f_{\text{med}} < f_{\max}$  (其中  $f_{\min}$ 、 $f_{\text{med}}$ 、 $f_{\max}$  分别为设定的邻域  $S$  (即将被处理的子图像) 中的最小亮度值、亮度中值以及最大亮度值), 则转向 Level B; 否则增加窗口尺寸, 窗口尺寸  $\leq S_{\max}$  ( $S_{\max}$  为允许的最大自适应滤波器窗口的大小), 重复 Level A。

(2)Level B:若  $f_{\min} < f(x, y) < f_{\max}$  ( $f(x, y)$  为图像中某点的像素值,  $x, y$  代表其坐标位置),则输出  $f(x, y)$ ; 否则输出  $f_{\text{med}}$ 。

### 3.2 最大类间方差阈值分割

为了辨识和分析图像中的目标,需要将它们从图像中分离出来,在此基础上对目标进行测量计算,对图像加以利用。阈值分割对目标与背景对比强的图像分割效果好,选取合适的分割阈值是阈值化算法的关键问题。最大类间方差阈值也叫大津阈值,是 1980 年由大津展之提出,他是在判别与最小二乘法原理的基础上推导出来的,可以得到较好的结果,此方法不需要人为设定其他参数,是一种自动选择阈值的方法。把图中的像素用阈值  $T$  分成两类  $C_0$  和  $C_1$ ,  $C_0$  由灰度值在  $[0, T-1]$  的像素组成,  $C_1$  由灰度值在  $[T, L-1]$  的像素组成。  $P_0$  和  $P_1$  分别为区域  $C_0$  和  $C_1$  发生的概率,  $\mu_0$  和  $\mu_1$  分别是区域  $C_0$  和  $C_1$  的平均灰度,两个区域的总方差为:

$$\sigma_B^2 = P_0 P_1 (\mu_0 - \mu_1)^2, \quad (1)$$

让  $T$  在  $[0, L-1]$  范围内依次取值,使  $\sigma_B^2$  最大的  $T$  值便是最佳区域分割阈值。

### 3.3 形态学处理

在对十字光斑图像进行增强和二值化阈值分割之后,二值图像仍然不可避免存在着杂点,十字光斑图像还可能存在着边缘毛刺和内部空洞,甚至是阈值分割后结构光产生断裂等情况,严重影响十字交点粗定位。针对此情况,可以进行形态学开闭运算分析处理。膨胀和腐蚀运算是形态学图像处理的基础,是图像平移形式(结构元素)的并集(或交集)定义两种基本的形态学运算,在实际应用中多以组合形式出现。开运算、闭运算是较常用的膨胀和腐蚀的组合,可以有效解决结构光边缘有毛刺,内部空洞甚至断裂等情况。

### 3.4 两步定位算法介绍及区域确定

在图像中心定位的计算过程中,粗定位图像中心位置,可以减少定位范围和定位时间。在以粗定位点为中心的局部矩形区域内再次计算中心,提高了定位精度。算法具体实现步骤如图 3。

#### 3.4.1 局部灰度质心法

在以粗定位十字交点为中心,稍大于线宽的矩形区域内计算质心,得到精确定位中心。灰度

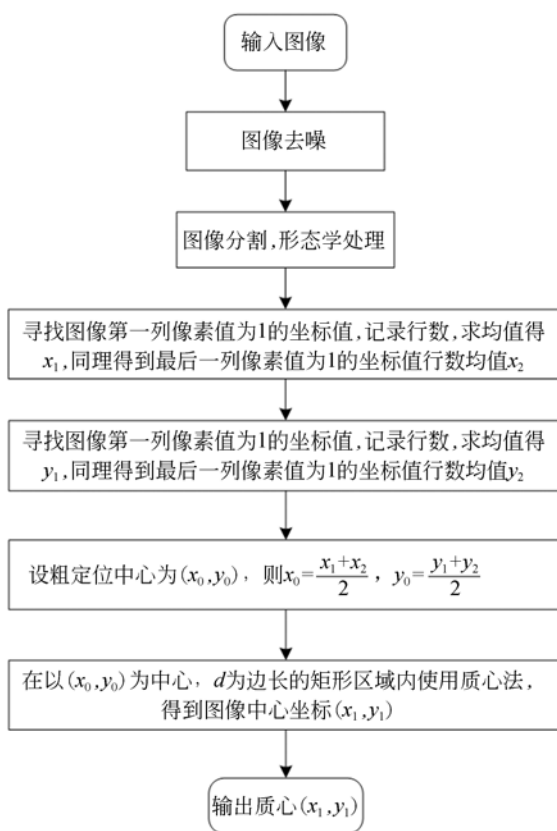


图 3 中心定位技术流程图

Fig. 3 Flow chart of center positioning technology

质心法把光条截面上像素点灰度分布的质心视为该截面的中心点,这种方法对光条的平移不敏感,也可以有效消除因激光强度分布不对称而造成的误差,且抗噪声干扰能力较强,降低了噪声对识别结果的影响。但当噪声逐渐增大时,带阈值的质心法可以有效地减小图像背景噪声,提高图像信噪比,提取效果更理想<sup>[18]</sup>。带阈值的质心法是将目标图像内各像素的灰度值减去其所处图像局部区域的背景灰度值后再进行质心计算的方法。阈值化过程如下:

$$F(x, y) = \begin{cases} f(x, y) & f(x, y) \geq T \\ 0 & f(x, y) < T \end{cases} \quad (2)$$

由于阈值化过程在本文图像分割过程中已实现,所以在局部矩形区域内可以直接使用质心法进行图像中心计算。沿行或列方向获取某一区间内所有像素点的灰度值,按距离权重计算,是最基本的质心估计方法也是目前应用最为广泛的质心计算方法。质心法实际上就是计算二值化后图像的一阶矩,即:

$$\left\{ \begin{aligned} x_0 &= \frac{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n F(x, y) x}{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n F(x, y)} \\ y_0 &= \frac{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n F(x, y) y}{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n F(x, y)} \end{aligned} \right. , \quad (3)$$

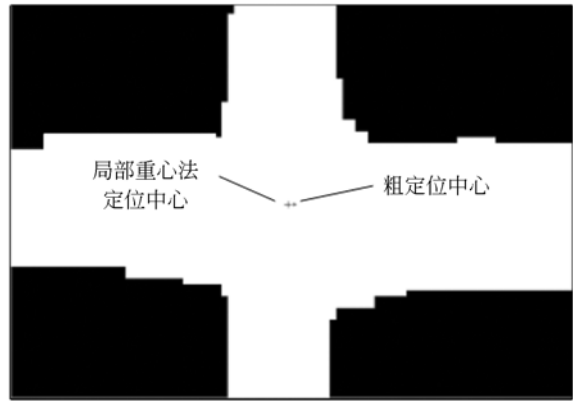
$(x_0, y_0)$  即为所要求取的光条中心。

虽然以粗定位的十字的中心交点作为初始点受周围干扰的影响,中心位置会存在一定偏差,但图像中心位置一定在初选点周围的亮度区域内。在局部矩形区域内使用一阶质心法计算质心时,不再受区域外的噪声干扰,而感兴趣区域内的噪声相对权值比重变小,影响相对减弱。针对图 2 所示图像,使用局部灰度质心算法定位结果如图 4。

### 3.4.2 局部矩形区域的选取

局部矩形区域的大小直接影响图像中心定位精度:当局部矩形区域选取过大时,目标图像面积相对变小,干扰因素相对增多,故质心定位误差变大;反之,当局部矩形区域选取过小时,目标图像的有效信息不能完全被包括,致使定位误差变大。因此选取与目标图像匹配的局部矩形区域大小能有效提高定位精度。

可以根据光条横截面灰度值之间的关系,估算宽度  $\omega$ 。设光条中心点 C 灰度值为  $p_c$ ,以点 C 为中心,沿法线方向两边延伸依次搜寻约  $p_c$  的 5%~20% 的灰度的点作为该处光条法向横截面的起始点 A 和终止点 B,则  $\omega = l_{AB}$ ,如图 5 所示。局部矩形区域大小确定过程:首先得到图像



(b)中心定位结果局部放大图  
(b)Center positioning results

图 4 算法定位结果图

Fig. 4 Graph of algorithm positioning result

的灰度三维分布图,然后经过图像中心位置分别从  $x$  和  $y$  坐标处切开,得到的截面图即可得到光条平面灰度二维分布图,进一步计算得到光条宽度  $\omega$ ,矩形区域边长稍大于光条宽度  $\omega$ 。

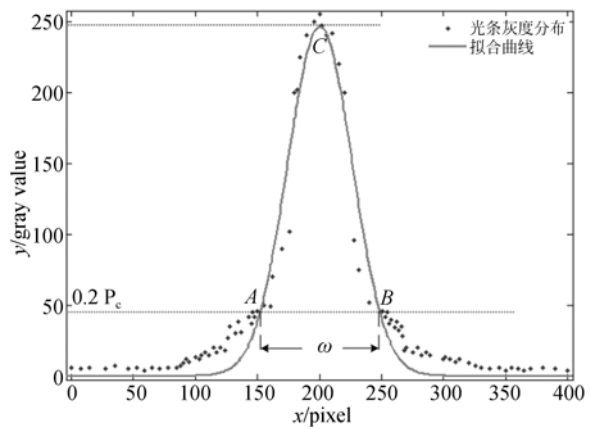


图 5 光条宽度估计示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the laser stripe width estimate



(a)中心定位结果图  
(a)Center positioning results

图 6 所示为某十字光斑图像的灰度三维分布图,图 7 和图 8 分别是激光图像经过中心位置从  $x$  和  $y$  坐标处切开的截面图。同样地,图 8 横坐标为  $y$  的像素坐标,纵坐标表示灰度值。根据光条宽度的算法,  $\omega = 14$ 。由于噪声的影响,一般局部矩形区域的边长要比光条线宽稍大一些。局部矩形区域边长大小一般比线宽大 1 或 2 个像素,局部矩形区域大小选奇数,由此选定局部矩形区域大小为  $15 \times 15$ 。

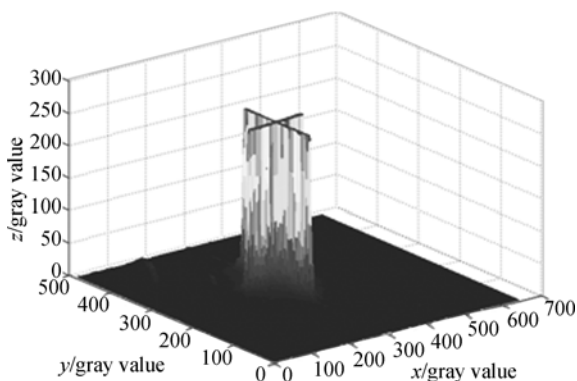


图 6 灰度三维分布图

Fig. 6 Three-dimensional distribution of light intensity

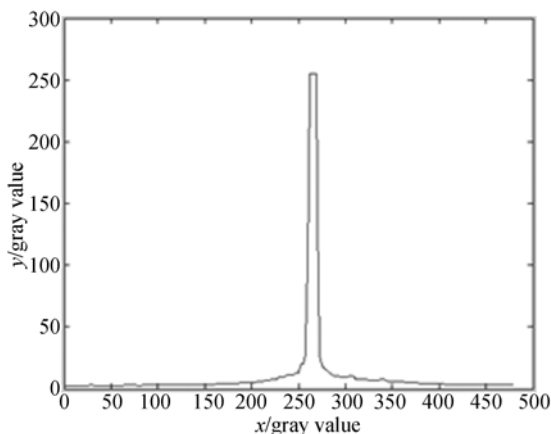


图 7 x 坐标平面灰度二维分布图

Fig. 7 Two-dimensional distribution of light intensity on x-coordinate system

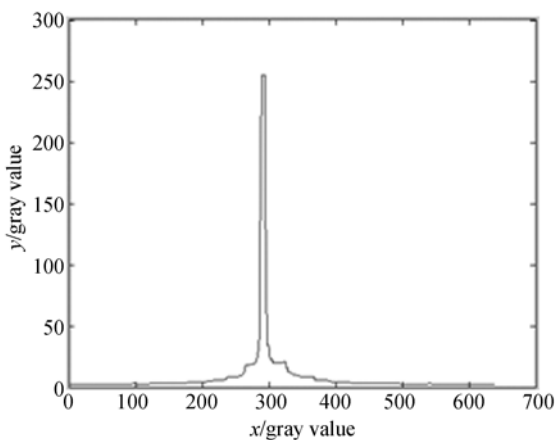


图 8 y 坐标平面光强二维分布图

Fig. 8 Two-dimensional distribution of light intensity on y-coordinate system

### 4 实验结果及分析

#### 4.1 算法评价指标的选取

在十字光斑图像稳定时,进行多次测量,再对多次测量结果的标准差进行比较分析。评价精度的评价是先使十字激光器产生确定的位移,然后评估算法计算出的激光图像中心竖直方向位移量  $y_i$  与实际平移量  $\mu$  的符合关系,利用标准差公式:

$$\sigma_{\Delta y} = \sqrt{(n-1)^{-1} \sum (y_i - \mu)^2}, \quad (4)$$

计算  $n$  次测量的标准差。

#### 4.2 实验系统

无砟轨道表面路基沉降监测装置采用加拿大 NanoLine Laser 公司生产的 SNF-501 型半导体激光器作为激光光源,波长 658 nm,最大输出功率 50 mW。激光发射器固定在一个 SLGB60 三维高精位移平台上,通过微调螺栓可以在量程内自由升降,精度 0.01 mm,投影靶面尺寸 120 mm×150 mm,光学成像系统安装在投影靶面正后方 0.2 m 处,镜头焦距 16 mm。相机采用 Microvision 公司的 MV3000UC CMOS 相机,分辨率为 2 048×1 536。实验原理图如图 9 所示。

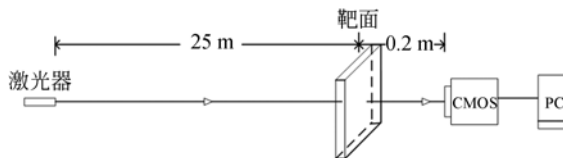


图 9 实验原理图

Fig. 9 Schematic diagram of experiment

#### 4.3 实验结果

将激光器固定在靶面前 25 m 处,通过三维高精位移平台调整激光器上下位置,用相机采集每个位置的图像数据,通过自适应中值滤波、阈值分割和形态学开闭处理后,再利用局部灰度质心法与粗定位计算出接收端激光光斑图像的中心位置的平均值(pixel),在实验室摄像机标定的基础上转换成十字光斑中心变化的位移变化值(mm)。在相同的实验条件下,对点激光投射到靶面的光斑使用灰度质心法,得到椭圆光斑中心变化的位移变化值。实验结果如表 1 所示。

表 1 沉降测量结果

Tab. 1 Test data

(mm)

激光器升降值	灰度质心法			局部灰度质心法		
	实测值	绝对误差	标准差	实测值	绝对误差	标准差
-7.00	-6.47	0.53	0.475	-6.95	0.15	0.145
-5.00	-4.34	0.66		-5.10	-0.10	
-4.00	-3.55	0.45		-4.11	-0.11	
-2.00	-2.15	-0.15		-2.16	-0.16	
-1.00	-1.05	-0.05		-1.19	-0.19	
1.00	0.70	-0.30		1.18	0.18	
2.00	1.62	-0.38		2.10	0.10	
3.00	2.33	-0.67		3.10	0.10	
6.00	5.46	-0.54		6.13	0.13	
7.00	6.67	-0.33		7.12	0.12	

由表 1 可见,灰度质心法的误差最大 0.67 mm,标准差 0.475;采用局部灰度质心法误差最大 0.19 mm,标准差 0.145,满足无砟轨道沉降检测要求。两种算法在整个实验过程时间均为 1 s,由于无砟轨道沉降是一个缓慢的过程,故对采样时间要求不高,其重点关注的是精度。

## 5 结 论

本文依据无砟轨道表面沉降监测技术精度要求高的特点,介绍了铁路路基表面沉降变形相机链视觉传递测量系统测量原理。针对传统光条中

心定位技术在对激光与靶面距离较远时的激光图像定位会产生较大误差的问题,在对靶面激光图像去噪、阈值分割和平滑处理的基础上,研究了一种利用十字光斑交点粗定位和局部灰度质心法精确定位的两步定位十字光斑的算法。实验表明,相同的环境下,本文算法的定位精度优于相同条件下点激光的灰度质心算法,其中心定位最大误差为 0.19 mm,小于路基监测系统的 0.2 mm 定位精度要求,且重复中心定位精度也优于 0.2 mm,试验标准差为 0.145,所以本文算法能适应检测环境细微变化,满足了铁路路基沉降观测标准要求。

## 参考文献:

- [1] 赵国堂. 高速铁路无砟轨道—路基变形计算模型的研究[J]. 中国铁道科学, 2016, 37(4): 1-8.  
ZHAO G T. Calculation model of ballastless track and subgrade deformation on high speed railway[J]. *China Railway Science*, 2016, 37(4): 1-8. (in Chinese)
- [2] 安国栋. 高速铁路无砟轨道技术标准与质量控制[M]. 中国铁道出版社, 2009: 188-191.  
AN G D. Technical standard and quality control of high-speed railway ballastless track [M]. *China Railway Publishing House*, 2009: 188-191. (in Chinese)
- [3] 阮鹏, 潘其坤, 谢冀江, 等. 非链式 DF 激光器非稳腔数值仿真与实验[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(2): 1-6.  
RUAN P, PAN Q K, XIE J J, et al. Numerical simulation and experiment on unstable cavity of non-chain DF laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(2): 1-6. (in Chinese)
- [4] 王彦斌, 元凤杰, 李华, 等. 脉冲激光辐照可见光面阵 CCD 的入瞳衍射效应[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(1): 1-5.

- WANG Y B, QI F J, LI H, *et al.*. Diffraction effect of pupil by irradiating visible light array CCD with pulsed laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(1): 1-5. (in Chinese)
- [5] 杨景豪, 刘巍, 刘阳, 等. 双目立体视觉测量系统的标定[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(2): 300-308.
- YANG J H, LIU W, LIU Y, *et al.*. Calibration of binocular vision measurement system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 26(1): 1-5. (in Chinese)
- [6] 洪洋. 基于正交消隐点无穷单应的摄像机内参数自标定方法[J]. *中国激光*, 2015, 42(12): 1-11.
- HONG Y. An intrinsic parameters self-calibration technique based on infinite homography between orthogonal vanishing points [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(12): 1-11. (in Chinese)
- [7] 曹远佳, 尉广军, 李先龙. 激光光斑的图像处理及边缘检测的改进[J]. *激光与红外*, 2016, 46(9): 1160-1164.
- CAO Y J, WEI G J, LI X L. Image processing and improvement of edge detection of laser spot [J]. *Laser & infrared*, 2016, 46(9): 1160-1164. (in Chinese)
- [8] 王利, 陈念年, 巫玲, 等. 高噪声背景下激光条纹亚像素中心的提取[J]. *应用光学*, 2016, 37(2): 322-325.
- WANG L, CHEN N N, WU L, *et al.*. Extraction of laser strip sub-pixel center in high-noise background [J]. *Journal of Applied Optics*, 2016, 37(2): 322-325. (in Chinese)
- [9] 贾振元, 樊超楠, 刘巍, 等. 双目视觉测量中等匹配点的光条中心提取[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(7): 1582-1591.
- JIA ZH Y, FAN CH N, LIU W, *et al.*. Extraction of laser stripe centers based on equal matching points for binocular vision measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(7): 1582-1591. (in Chinese)
- [10] 段振云, 王宁, 赵文珍, 等. 基于高斯积分曲面拟合的亚像素边缘定位算法[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(1): 219-225.
- DUAN ZH Y, WANG N, ZHAO W Z, *et al.*. Sub-pixel edge localization algorithm based on Gauss integral curved surface fitting [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(1): 219-225. (in Chinese)
- [11] FENG H, JIANG ZH G, XIE F Y, *et al.*. Automatic fastener classification and defect detection in vision-based railway inspection systems [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2014, 63(4): 877-888.
- [12] 郭寅, 刘常杰, 郝继贵, 等. 高速列车动态包络线测量系统[J]. *中国激光*, 2013, 40(2): 0208002.
- GUO Y, LIU CH J, ZHU J G, *et al.*. Measurement system for dynamic envelope curve of high-speed train [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(2): 0208002. (in Chinese)
- [13] LI Q, REN S. A real-time visual inspection system for discrete surface defects of rail heads [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2012, 61(8): 2189-2199.
- [14] 闵永智, 党建武, 张振海. 图像式无砟轨道表面沉降在线监测系统[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(6): 1621-1627.
- MIN Y ZH, DANG J W, ZHANG ZH H, *et al.*. Online surface settlement monitoring system of image-based ballastless track [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(6): 1621-1627. (in Chinese)
- [15] 闵永智, 康飞, 党建武, 等. 无砟轨道沉降监测系统光斑中心定位技术研究[J]. *铁道学报*, 2014, 36(2): 81-85.
- MIN Y ZH, KANG F, DANG J W, *et al.*. Technology of light spot center positioning of ballastless track settlement monitoring system [J]. *Journal of The China Railway Society*, 2014, 36(2): 81-85. (in Chinese)
- [16] 闵永智. 铁路路基表面沉降相机链视觉测量方法研究[D]. 兰州交通大学, 2014.
- MIN Y ZH. Study on visual measurement method of camera chain for surface subsidence of railway subgrade [J]. *Lanzhou Jiaotong University*, 2014. (in Chinese)
- [17] 王睿, 漆泰岳, 雷波, 等. 隧道衬砌裂缝特征提取方法研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(6): 1211-1217.
- WANG R, QI T Y, LEI B, *et al.*. Characteristic extraction of cracks of tunnel lining [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(6): 1211-1217. (in Chinese)
- [18] 杨君, 张涛, 宋靖雁, 等. 星点质心亚像素定位的高精度误差补偿法[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(4): 1004-1006.
- YANG J, ZHANG T, SONG J Y, *et al.*. High accuracy error compensation algorithm for star image sub-pixel subdivision location [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(4): 1004-1006. (in Chinese)

## 作者简介:



闵永智(1975—),男,陕西城固人,教授,博士后,2004年于武汉大学获得硕士学位,2014年于兰州交通大学获得博士学位,主要从事智能测试及机器视觉的研究。E-mail: minyongzhi@mail.lzjtu.cn



党建武(1963—),男,陕西省富平县人,博士,教授,博士生导师,1992年和1996年分别于西南交通大学获硕士、博士学位。主要从事人工智能研究。E-mail: Dangjw@mail.lzjtu.cn



郭薇(1994—),女,河北衡水人,硕士研究生,2016年于华北电力大学科技学院获得学士学位,主要从事智能测试及机器视觉的研究。电话(Tel.): 18215183592; E-mail: hb-dldxgw@163.com