

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2109109

面向盾构导向激光标靶的抗杂光算法研究*

黄喆,赵世艺,周卫斌,徐叶倩,沈小玲

(天津科技大学电子信息与自动化学院 天津 300222)

摘要:由于施工现场杂光的干扰,盾构导向激光光斑无法被准确识别。针对这一问题,利用导向激光的脉冲特性,提出了一种基于数字图像处理的抗杂光算法。首先,对工业相机曝光时间与激光脉冲周期之间的关系进行分析,通过调节工业相机曝光时间,可以有效地采集到导向激光产生脉冲的前后两帧图像;之后,差分两帧图像以获得目标光斑;最后,利用合适的结构元素腐蚀图像中的杂光残影,彻底地消除杂光带来的不良影响。实验结果表明:在激光标靶适用距离内,利用本文抗杂光算法,导向激光光斑的识别准确率优于93.75%;通过与其他抗杂光算法进行对比,在近中远距离下,识别准确率分别提升了21.87%、23.13%、26.87%,能够满足盾构导向施工要求,具有良好的应用前景。

关键词:激光标靶;数字图像处理;曝光时间;激光脉冲;抗杂光

中图分类号: TH741 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 560.20

Research on the anti stray light algorithm for shield guided laser target

Huang Zhe, Zhao Shiyi, Zhou Weibin, Xu Yeqian, Shen Xiaoling

(College of Electronic Information and Automation, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222, China)

Abstract: Aiming at the problem that the shield guided laser spot cannot be accurately recognized due to the interference of stray light in the construction site. To address this issue, an anti stray light algorithm based on the digital image processing is proposed, which utilizes the pulse characteristics of guided laser. Firstly, the relationship between the exposure time of the industrial camera and the laser pulse period is analyzed. Two images before and after the guided laser pulse can be effectively acquired in the stray light environment by adjusting the exposure time of the industrial camera. Then, the difference of two frames of images to obtain the target spot. Finally, the appropriate structural element is used to corrode the residual shadow in the image to completely eliminate the adverse effects of stray light. Experimental results show that the recognition accuracy of guided laser spot is better than 93.75% by using the anti stray light algorithm within the applicable distance of laser target. Compared with the other anti stray light algorithm, the recognition accuracy is improved by 21.87%, 23.13%, and 26.87%, respectively in short, medium and long distance, which can meet the requirements of shield guided construction and has a good application prospect.

Keywords: laser target; digital image processing; exposure time; laser pulse; anti stray light

0 引言

随着我国近几十年综合国力的不断增强,地下轨道交通等基础设施得到了快速发展,许多城市已经具备完善的轨道交通体系,这些都得益于盾构机的广泛使用以及盾构技术在我国隧道掘进工程中发挥出的重要作用^[1]。在盾构施工过程中,为了保证盾构机的掘

进路线与预先设计好的隧道路线之间的误差在可控的范围内,在隧道掘进过程中必须利用激光标靶对盾构机的姿态进行实时监测。在利用激光标靶对盾构机进行导向的同时,施工现场的杂光环境影响到激光光斑的采集和识别,导致用于盾构导向的激光光斑无法正确定位,影响后续准确获得盾构机姿态信息^[2]。因此,准确地识别激光光斑是盾构导向中一个非常重要且不可缺少的环节。

收稿日期:2021-12-30 Received Date: 2021-12-30

* 基金项目:天津市自然科学基金(18JCYBJC88600)、天津大学精密测试技术与仪器国家重点实验室开放课题(pilab1905)项目资助

激光标靶可视为一个光学系统,目前针对光学系统在工作中被杂光干扰的问题有诸多研究方法被提出。陈沛东提出通过调节圆孔光阑的大小,牺牲相机视场,使杂光光斑不成像,进而消除杂光影响^[3]。利用该方法采集到的目标光斑亮度低,轮廓不清晰,严重影响后续的光斑质心提取工作。Kizhofer等^[4]提出利用窄带滤波器对目标光进行滤波处理的抗杂光方法,该方法可获取特定波长的目标光,进而实现对杂光的有效抑制。但是在施工现场中,杂光的种类繁多,且波长不尽相同,窄带滤波器无法保证滤除全部杂光,同时部分目标光信号也会被吸收,致使无法达到理想的光斑成像效果。一些学者提出利用结构光照明技术来消除杂光干扰的方法,该方法可将光信号分为有效信号和杂光信号^[5-8]。经数据处理后,有效信号的强度会保持不变,杂光信号会因空间频率不同而被剔除掉,该方法可有效提高光学成像质量。但是,当杂光强度较高时,该方法抑制杂光的能力会减弱。基于图像处理算法^[9],邵涛提出利用形态学中的开运算和闭运算来消除噪声对目标光光斑的干扰,该方法具有简单易操作的特点,但是对形态学运算所用结构元素的选择较为苛刻,且易受到外界干扰,杂光消除率不高。

针对上述问题,本文以消除影响盾构导向系统工作的杂光为目的,提出一种适用距离长、抗干扰能力强、导向激光光斑识别准确率高的抗杂光算法。该算法利用导向激光的脉冲特性,对工业相机曝光时间与导向激光脉冲周期之间的关系进行分析,通过调整工业相机的曝光时间,可有效地采集到导向激光产生脉冲的前后两帧图像,利用帧间差分来获取导向激光光斑,结合腐蚀运算消除差分图像的杂光残影,完成抗杂光工作。该算法不需要对差分背景进行单独采集,提升了盾构导向施工效率,且在消除杂光的同时保证了目标光斑的识别质量,不会对光斑的后续处理造成影响,能够很好地应用到工程项目中。

1 激光标靶工作原理

激光标靶是实现盾构导向的重要设备,其内部主要由工业相机、倾角仪和嵌入式模块组成,其外壳上嵌有一个带透明三角面的全反射棱镜^[10]。激光标靶搭配全站仪使用可对盾构机的空间姿态进行测量,其工作原理如图1所示。

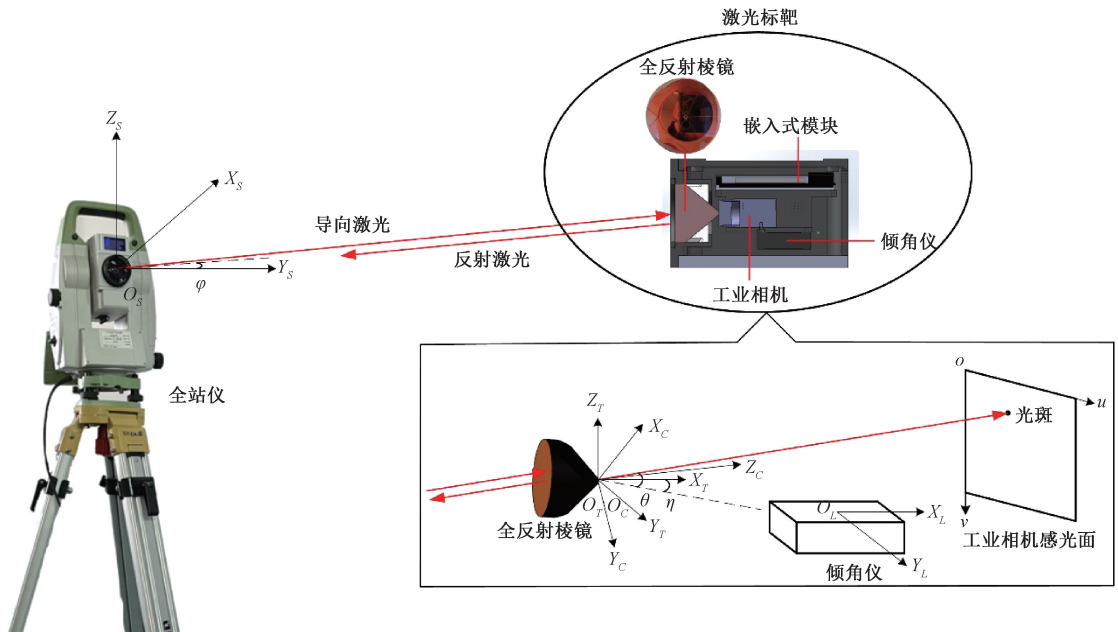


图1 激光标靶工作原理

Fig. 1 Work principle of the laser target

全站仪发射导向激光至激光标靶的全反射棱镜,利用该棱镜在角锥处的透明三角面,一部分激光按原路返回至全站仪,用于获得激光标靶的位置信息,另一部分激光透过透明三角面,最终在工业相机感光面上成像。成像系统得到光斑在工业感光面上的位置,进而测得激光标靶相对导向激光的位姿关系,结合激光标靶内置倾

角仪测量数据,最终可解算出自身姿态,实现盾构机3个姿态量的测量^[11]。

空间刚体的姿态可通过欧拉角进行描述^[12],激光标靶的空间姿态可利用滚转角 γ 、俯仰角 β 和水平角 α 表示。图1中, $O_s - X_s Y_s Z_s$ 为全站仪坐标系, $O_T - X_T Y_T Z_T$ 为激光标靶坐标系, $O_c - X_c Y_c Z_c$ 为相机坐标系, $O_l - X_l Y_l Z_l$

为倾角仪坐标系, $o-uv$ 为像素坐标系。其中, 激光标靶坐标系与相机坐标系的坐标原点均为全反射棱镜的反射中心。

激光标靶在全站仪坐标系下的滚转角和俯仰角可直接利用内置倾角仪获得。设倾角仪 X_L 轴输出的数据为 β' , Y_L 轴输出的数据为 δ 。 β' 和 δ 分别为倾角仪 X_L 轴和 Y_L 轴与水平面的夹角。根据空间几何关系^[13] 可得激光标靶的俯仰角 β 和滚转角 γ 为:

$$\begin{cases} \beta = \beta' \\ \gamma = \arcsin\left(\frac{\sin \delta}{\cos \beta'}\right) \end{cases} \quad (1)$$

导向激光被激光标靶内部的成像系统接收, 在感光平面上形成光斑, 通过相机标定原理^[14] 可获得光斑质心对应入射光线在相机坐标系下的姿态角, 激光标靶坐标系与相机坐标系的相对位姿关系可由相机内部参数进行确定。根据激光标靶标定原理^[15], 利用激光光斑质心可以解算出导向激光在激光靶坐标系下的俯仰角 θ 和水平角 η , 结合文献[11]所述算法可得到激光标靶在全站仪坐标系下的水平角 α 为:

$$\alpha = \varphi + \arctan\left(\frac{\cos \gamma \times \tan \eta - \sin \gamma \times \tan \theta}{\cos \beta + \sin \beta (\sin \gamma \tan \eta + \cos \gamma \tan \theta)}\right) \quad (2)$$

其中, φ 是导向激光在全站仪坐标系下的水平角。

利用全站仪测得激光标靶在自身坐标系下的坐标为 T_{TS} , 利用上述算法可解算出激光标靶在全站仪坐标系下的3个姿态角, 其中3个姿态角可构成激光标靶相对于全站仪的旋转矩阵 R_{TS} 。根据空间坐标转换关系, 全站仪坐标系下任意空间点 p_s 与激光标靶坐标系下坐标 p_T 满足下列关系:

$$p_s = R_{TS} p_T + T_{TS} \quad (3)$$

其中, R_{TS} 可被表示为:

$$R_{TS} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix}$$

根据上述姿态测量的原理可知, 准确地识别导向激光光斑是对盾构机进行导向的基础。

2 图像采集原理

2.1 杂光分析

施工现场的杂光主要为灯带、探照灯和红外摄像头发射出的连续光, 杂光光源如图2所示。

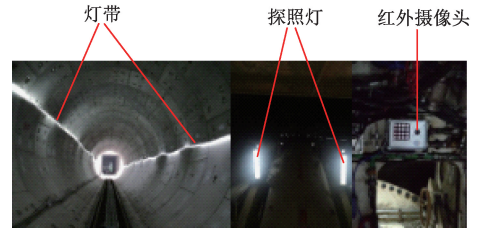


图2 施工现场杂光光源

Fig. 2 Stray-light sources of construction site

由于上述光源可长时间输出杂光, 在利用激光标靶进行姿态测量过程中, 内置工业相机可持续采集到杂光光斑, 致使无法准确提取导向激光光斑的质心, 盾构机姿态测量工作受阻, 盾构导向工作效率降低。

2.2 导向激光分析

全站仪为导向激光提供光源, 在自动目标识别 (automatic target recognition, ATR) 模式下^[16], 全站仪射入激光标靶的导向激光为红外激光。该激光为脉冲光, 即在周期内可以产生一个光脉冲, 且脉冲存在的时长固定。其脉冲时序图如图3所示, 该图表示随着时间的变化, 导向激光脉冲的存在状态, 其中, 1代表激光产生脉冲, 0代表激光未产生脉冲。

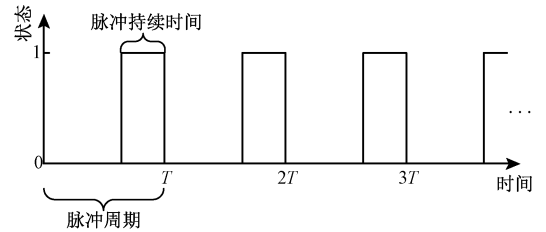


图3 导向激光脉冲时序图

Fig. 3 Pulse sequence diagram of the guidance laser

在图3中, 两个相邻相同状态之间的时间间隔为脉冲周期, 导向激光存在的时间为脉冲持续时间。

2.3 导向激光光斑采集

基于杂光的连续性和导向激光的脉冲性, 可在杂光环境下利用工业相机采集导向激光产生脉冲的前后两帧图像, 原理如图4所示。从图中可知, 在导向激光产生脉冲之前, 工业相机只采集到了杂光的光斑, 记为第 k 帧图像; 导向激光产生脉冲之后, 工业相机采集到了导向激光光斑和杂光光斑, 记为第 $k+1$ 帧图像。对上述两帧图像进行差分可有效地消除杂光干扰。

由于导向激光产生脉冲的时间极短, 在常规模式下利用工业相机无法采集到其产生脉冲的前后两帧图像。本文提出利用工业相机曝光时间与激光脉冲周期之间的关系, 通过控制曝光时间来采集导向激光产生脉冲的动态变化。曝光时间是光投射到相机感光材料的感光面

上,被感光面接收的时间^[17]。根据图4,理论上可以将曝光时间 T_b 设置在导向激光不产生脉冲的时间 T_n 至激光

脉冲周期 T_p 之间,即:

$$T_n \leq T_b \leq T_p \quad (5)$$

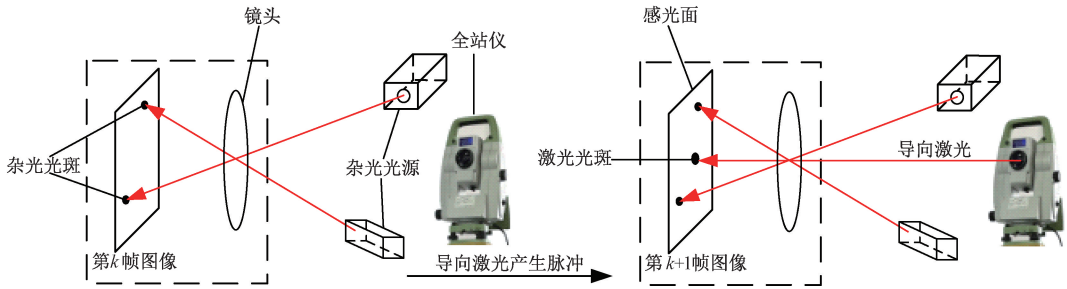


图4 导向激光光斑采集原理

Fig. 4 Acquisition principle of the guided laser spot

已知TS16全站仪ATR模式下的红外激光脉冲周期为27ms,脉冲持续时间为11ms。根据式(5),准确采集该激光产生1次脉冲的动态变化,需将工业相机的曝光

时间设置在16~27ms。为证明图4原理的可实现性,将工业相机调至不同的曝光时间,对导向激光与不同杂光的光斑进行采集,结果如图5所示。

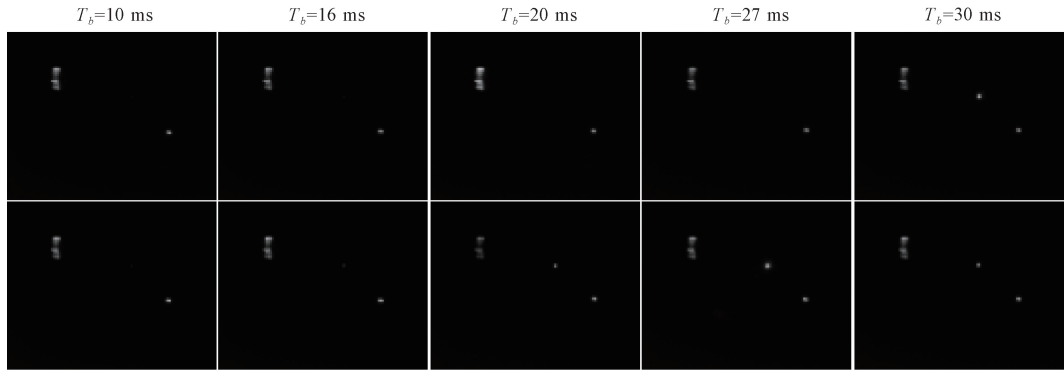


图5 导向激光光斑采集样例

Fig. 5 Sample of the guided laser spots acquisition

从图5可以看出,具有连续性的杂光在连续两帧均成像,具有脉冲性的导向激光在连续两帧存在动态变化。在理论曝光时间值之内,导向激光脉冲的动态变化均可被采集到,随着曝光时间不断增加,感光面接收激光的时间逐渐变长,采集到的光斑逐渐清晰。当曝光时间过小或过大时,这种动态变化无法被采集。

由于在采集导向激光光斑过程中,无法保证感光面接收激光时恰好激光能够产生脉冲,利用图4的方法采集光斑存在不确定性。针对上述问题,本文对导向激光光斑进行循环采集,保证采集到导向激光产生脉冲的前后两帧图像,具体流程为:

- 1) 调节工业相机的曝光时间,利用全站仪向激光标靶发射导向激光;
- 2) 利用工业相机采集任意两帧图像;
- 3) 对这两帧图像进行判断,如果这两帧图像中存在激光脉冲变化,则进行之后的抗杂光步骤,反之则重新采集图像,直至导向激光的脉冲变化被采集到为止。

3 抗杂光算法实现

完成光斑图像的采集工作后,利用本文提出的抗杂光算法对图像进行处理,抗杂光流程为:

- 1) 将采集到的两帧图像输入至抗杂光算法中;
- 2) 利用帧间差分法消除两帧图像中的杂光;
- 3) 对差分后的图像进行判断,如果存在杂光残影可利用形态学运算进行后续处理,反之可直接输出图像。

3.1 帧间差分法

帧间差分法为相邻的前后两帧图像对应像素灰度差值与二值化阈值进行比较,突出图像中发生变化的部分,实现对运动目标的检测^[18]。帧间差分原理如图6所示。

根据原理图可将帧间差分公式化为:

$$D_k(x, y) = |P_{k+1}(x, y) - P_k(x, y)| \quad (6)$$

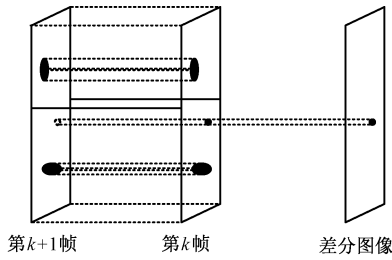


图6 帧间图像差分原理图

Fig. 6 Schematic diagram of inter frame image difference

式中: $P_k(x, y)$ 和 $P_{k+1}(x, y)$ 为相邻两帧图像在 (x, y) 处的灰度值, $D_k(x, y)$ 为两帧图像差分后在 (x, y) 处的灰度值。

将曝光时间调至 27 ms, 对采集到的两帧图像进行差分运算, 结果如图 7 所示。

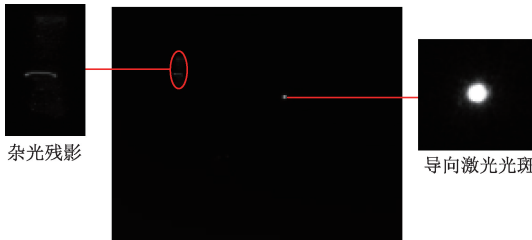


图7 帧间差分结果

Fig. 7 Result of the inter frame different method

由图 7 可知, 导向激光的光斑得到保留, 大部分杂光被消除。由于杂光光源在交流电的作用下, 杂光亮度时刻发生改变, 采集到的杂光光斑在相邻两帧图像里的亮度不同, 经差分运算后出现残影。

为了突出差分图像中的导向激光光斑与杂光残影光斑, 需设定一个阈值 ε , 对差分图像按像素点进行二值化处理。经二值化处理后的图像只存在白和黑两种颜色, 公式表达为:

$$F_k(x, y) = \begin{cases} 1, & D_k(x, y) > \varepsilon \\ 0, & D_k(x, y) < \varepsilon \end{cases} \quad (7)$$

其中, 灰度值为 0 的像素点为差分图像的背景部分, 灰度值为 1 的像素点为差分图像的前景部分, 即杂光残影与导向激光的光斑。本文采用 OTSU 算法对阈值进行计算^[19], 利用计算出的阈值对差分图像 D_k 进行二值化处理, 结果如图 8 所示。

3.2 腐蚀运算

针对图像中存在杂光残影的问题, 主要通过形态学处理中的腐蚀运算将其消除^[20]。腐蚀运算的原理为: 利用 $m \times m$ 的结构元素 T_E , 从左至右、从上至下遍历二值图像 F_k 中每个元素, 用结构元素与其覆盖的每个像素做灰度值“与”运算, 如果运算结果都为 1, 则输出图像的中心

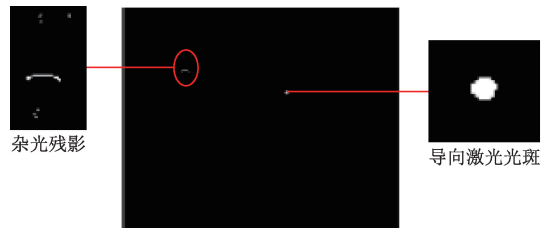


图8 图像二值化结果

Fig. 8 Result of image binarization

值为 1, 否则为 0, 腐蚀示意图如图 9 所示。

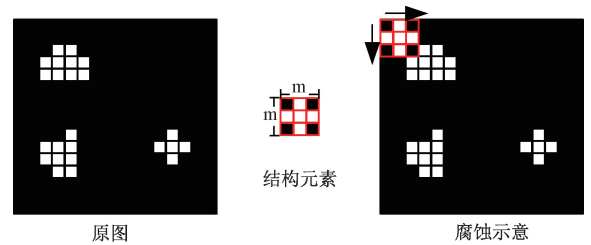


图9 腐蚀运算示意图

Fig. 9 Schematic diagram of erosion operation

根据腐蚀运算的原理和示意图可将其公式化为:

$$(F_k \ominus T_E)(x', y') = \text{AND}_{i,j=0:(i,j) \in T_E} [F_k(x' + i, y' + j) \& T_E(i, j)] \quad (8)$$

式中: $F_k \ominus T_E$ 表示利用结构元素 T_E 对图像 F_k 进行灰度腐蚀, (x', y') 表示输入图像 F_k 中某像素点, $F_k(x', y')$ 表示该像素点处的灰度值; (i, j) 表示结构元素 T_E 中某像素点, $T_E(i, j)$ 表示该像素点处的灰度值, $(x' + i, y' + j)$ 表示结构元素对输入图像的遍历过程。

为保证杂光消除效果和导向激光光斑的完整性, 需要选择一个合适的结构元素^[21]。根据图像中杂光光斑与导向激光光斑的形状差异和面积差异, 可以选择 3×3 的圆盘结构元素, 既保护了目标光斑的圆形结构又消除了杂光残影, 其值为:

$$T_E = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

利用上述结构元素对图像进行腐蚀运算的结果如图 10 所示。从图中可以看出, 导向激光光斑的形状得到了保持, 且探照灯残影被消除。

4 实验与分析

为了验证抗杂光算法的有效性, 设计如下实验。由于地层较硬, 盾构机在掘进过程中刀盘刀具与土体直接接触产生了持续的振动^[22], 振动频率不大于 30 Hz, 振动幅度不大于 5 mm。为了更好地体现本文算法的工程应

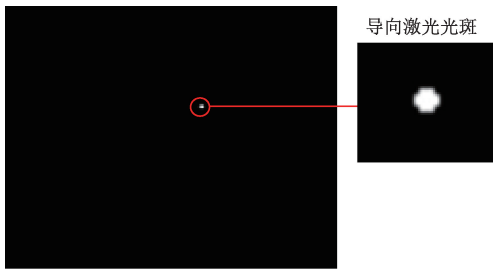


图 10 腐蚀运算结果

Fig. 10 Result of erosion calculation

用性,本文在模拟杂光环境的同时,利用振动频率为 30 Hz、振动幅度为 5 mm 的振动装置来模拟振动环境。在两种环境相融合的情况下,对本文算法进行实验。实验装置还包括:激光标靶、全站仪、探照灯、红外光摄像头,其技术参数如表 1 所示。

实验环境如图 11 所示,图中的反光镜用于延长实验距离。

表 1 技术参数

Table 1 Technical parameters

硬件名称	技术参数	数值
工业相机	分辨率 pixel/	1 280×1 024
	型号	BASLER acA1300-60gm
	像素值/×10 ⁴	130
倾角仪	测角精度/(°)	≤0.01
	型号	Leica TS16
全站仪	测距精度	2 mm+2 ppm
	测角精度/(")	1
	重复性精度/mm	0.1
亚明 LED 白光灯	使用功率/W	600
乔安红外摄像头	使用功率/W	6
振动装置	振动频率/Hz	30
	振动幅度/mm	5

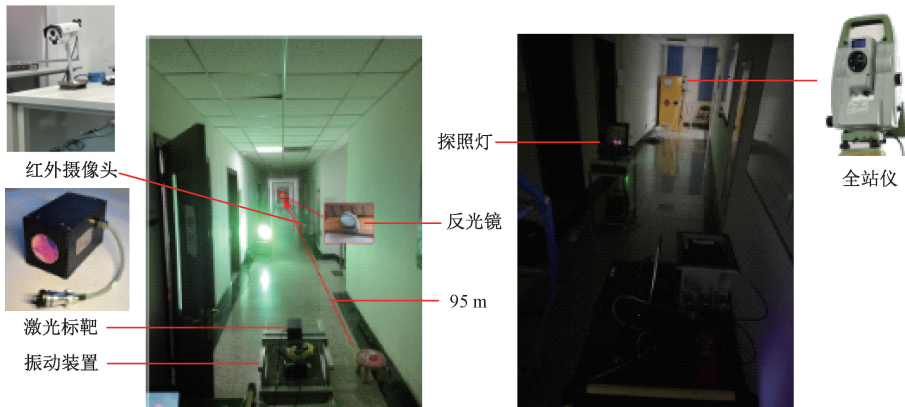


图 11 实验环境

Fig. 11 Experimental environment

4.1 近中远距离导向激光光斑识别情况

为了验证本文算法在不同测量距离下的抗杂光效果,设计如下实验:

固定激光标靶与不同杂光的位置保持不变,开启振动装置,移动全站仪至距离激光标靶 10、95 和 190 m 的位置,开启全站仪的自动目标识别模式,将导向激光射入激光标靶,工业相机曝光时间调至 27 ms,利用本文算法对导向激光光斑进行识别。

为了更好地体现识别效果,利用文献[10]中的灰度质心算法对识别到的光斑进行质心提取并以该光斑质心为中心划定 ROI 区域。实验结果如图 12 所示,实验距离从左至右依次为 10、95 和 190 m。

在图中有两条互相垂直且呈“十”字的交叉线,该垂直交叉线用于对提取出的光斑质心进行标记,两条直线

的重点即为检测到的光斑质心位置。从图 12 可以看出,在激光标靶适用距离内,利用该抗杂光算法均可有效地完成对导向激光光斑的识别工作。

4.2 导向激光光斑识别准确率分析

为了验证本文算法在工程施工上的适用性与优越性,设计如下实验:

在上述实验环境与实验方法的基础上,利用本文算法与文献[9]所述算法分别对导向激光光斑进行识别,将本文算法定义为算法 1,文献[9]所述算法定义为算法 2。通过识别准确率来比较两种算法的性能,实验数据如表 2 所示。其中,识别准确率的计算公式为:

$$A_{acc} = \frac{K_r}{K_r + K_e + K_d} \quad (10)$$

式中: A_{acc} 为准确率, K_r 为识别到正确光斑的次数, K_e 为

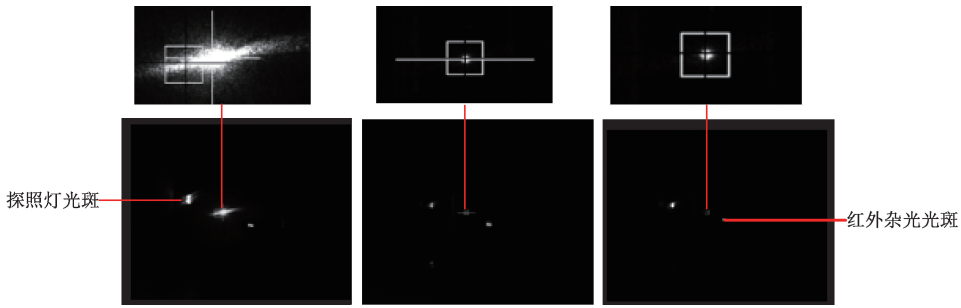


图 12 不同测量距离下导向激光识别结果

Fig. 12 Recognition results of guided laser recognition at different measurement distances

表 2 导向激光光斑识别结果对比

Table 2 Comparison of recognition results of the guided laser spot

实验距离/m	抗杂光算法	测量次数	K_r /次	K_e /次	K_d /次	A_{acc} /%
10	算法 1	160	157	1	2	98.12
	算法 2	160	122	20	18	76.25
95	算法 1	160	154	3	3	96.25
	算法 2	160	117	24	19	73.12
190	算法 1	160	150	6	4	93.75
	算法 2	160	107	32	21	66.88

识别到错误光斑的次数, K_d 为未识别到任何光斑的次数。

通过对实验数据分析,在 10~190 m 的测量范围内,利用算法 1 对导向激光进行识别的准确率均优于算法 2。

为了更直观地比较实验距离对两种算法的影响,本文对表 2 中实验距离与导向激光光斑识别准确率进行幂函数拟合,其拟合模型为:

$$y_{1,2} = a_{1,2}x^{b_{1,2}} \quad (11)$$

式中: y_1 和 y_2 分别表示算法 1 和算法 2 对导向激光光斑的识别准确率, x 表示不同的实验距离。通过计算,得到相对应的常数 $a_1 = 101.470\ 23$ 、 $a_2 = 83.645\ 81$ 、 $b_1 = -0.013\ 67$ 、 $b_2 = -0.037\ 14$, 根据模型表达式与数据绘制出该模型的曲线,如图 13 所示。

在图 13 中,横坐标代表实验距离,纵坐标代表利用两种算法对导向激光光斑进行识别的准确率,两条曲线表示随着实验距离变远,两种算法的识别准确率变化趋势。从图中可以看出,算法 1 的拟合曲线比算法 2 的拟合曲线平缓,说明算法 1 受到实验距离的影响小,抗杂光稳定性更优越。

4.3 现场测试

基于上述激光标靶抗杂光的原理和实验,本文设计的抗杂光算法已成功在青岛某地铁隧道区间进行测试,测试现场图如图 14 所示。

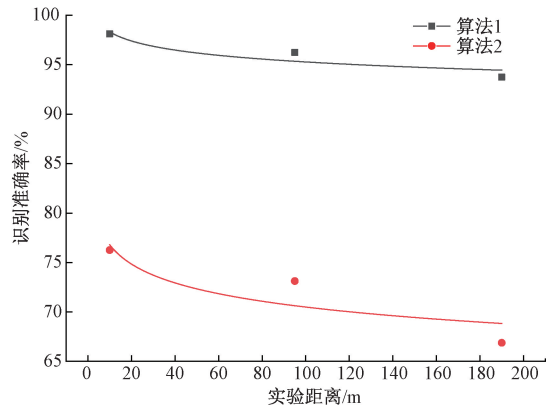


图 13 距离-识别准确率拟合曲线图

Fig. 13 Fitting curve of distance-recognition accuracy

本现场测试累计推进了 12 环管片,每环管片的宽度为 1 600 mm,全站仪与激光标靶的起始相距 110 m,共推进约 20 m。为保证掘进效率,在掘进期间需要利用激光标靶每 30 s 对盾构机进行一次导向,测试结果如表 3 所示。

表 3 现场测试结果

Table 3 Results of on-site test

导向周期/s	测试次数/次	K_r /次	K_e /次	K_d /次	A_{acc} /%	测试平均耗时/s
30	905	865	28	12	95.58	<1.5

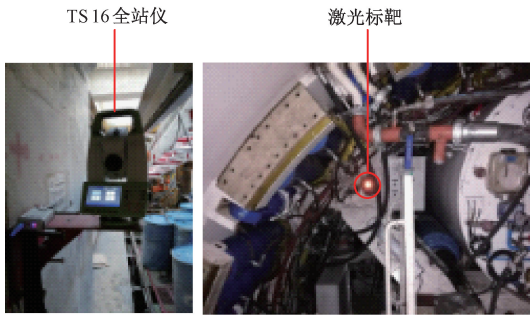


图14 现场测试示意图

Fig. 14 Schematic diagram of field test

由表3可知,在测试过程中,利用本文抗杂光算法,导向激光光斑能够被良好地识别,且盾构导向效率得到提升。

5 结 论

本文针对盾构导向激光光斑受到施工现场的杂光影响而无法被准确识别问题,基于导向激光的脉冲特性,设计了一种帧间差分与腐蚀运算相结合的抗杂光算法。首先,对工业相机曝光时间与激光脉冲周期之间的关系进行分析,通过调节曝光时间,可准确有效地采集到导向激光产生脉冲前后的两帧图像,之后对这两帧图像进行差分以达到识别导向激光光斑的目的,最后运用腐蚀运算对差分图像中的杂光残影进行处理,彻底地消除杂光对导向激光光斑识别带来的不良影响。实验结果表明:该算法的适用距离长、抗杂光效果稳定。经过与其他抗杂光算法进行对比,利用本文抗杂光算法后,导向激光光斑识别准确率有了明显的提升,能够很好的应用于工程施工中。

在之后的工作中还需要对以下两个方面进行研究:1)针对循环采集导向激光光斑耗时较长的问题,后续还需要对工业相机曝光时间进行进一步分析,筛选出最适用于本文算法的曝光时间,减少循环采集次数,缩短采集光斑的时间,进一步提升抗杂光的效率;2)针对光斑被腐蚀后变暗的问题,后续考虑使用开运算对算法进行优化,增加算法的适用性。

参考文献

[1] CHEN R P, ZHANG P, WU H N, et al. Prediction of shield tunneling-induced ground settlement using machine learning techniques[J]. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 2019, 13(6): 1363-1378.

[2] 于鲲, 丛明煜, 戴文聪. 基于三维模型的空间目标视觉位姿测量[J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(4): 179-188.

YU K, CONG M Y, DAI W C. Spatial target vision pose measurement based on 3D model[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(4): 179-188.

[3] 朱国力, 陈沛东. 盾构姿态测量中基于边缘检测的中心定位算法[J]. *机械工程与自动化*, 2014(5): 39-41.

ZHU G L, CHEN P D. Positioning algorithm based on edge detection in shield attitude measurement[J]. *Mechanical Engineering & Automation*, 2014(5): 39-41.

[4] KIZHOFFER J, NONN T, BRUCKER C. Generation and visualization of volumetric PIV data fields[J]. *Experiments in Fluids*, 2011, 51(6): 1471-1492.

[5] KRISTENSSON E, BERROCAL E, RICHTER M, et al. Nanosecond structured laser illumination planar imaging for single-shot imaging of dense sprays[J]. *Atomization and Sprays*, 2010, 20(4): 337-343.

[6] KRISTENSSON E, BOOD J, ALDEN M, et al. Stray light suppression in spectroscopy using periodic shadowing[J]. *Optics Express*, 2014, 22(7): 7711-7721.

[7] CHEN D M, LI Y F, WANG Y R, et al. The zooming and homogenizing laser illumination system for shortwave infrared imaging[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2018, 37(3): 278-283.

[8] 闫博, 陈力, 陈爽, 等. 结构光照明技术在二维激光诱导荧光成像去杂散光中的应用[J]. *物理学报*, 2019, 68(21): 295-301.

YAN B, CHEN L, CHEN SH, et al. Structured illumination for two-dimensional laser induced fluorescence imaging to eliminate stray light interference[J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(21): 295-301.

[9] 邵涛. 用于盾构姿态测量的激光标靶关键技术[D]. 武汉:华中科技大学, 2012.

SHAO T. Key technology for laser target used in shield attitude measurement[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2012.

[10] 高扬. 面向大型精密工程的六自由度测量技术研究[D]. 天津:天津大学, 2017.

GAO Y. Research on 6-DOF measurement in large-scale precision engineering[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.

- [11] 孟祥瑞, 杨学友, 高扬, 等. 激光标靶六自由度测量技术[J]. 光电工程, 2015, 42(5): 27-33.
MENG X R, YANG X Y, GAO Y, et al. Laser target six-degree-of-freedom measurement technique[J]. Opto-Electronic Engineering, 2015, 42(5): 27-33.
- [12] 刘春, 陈豪, 戴雷, 等. EWT算法在姿态解算中的应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(8): 220-227.
LIU CH, CHEN H, DAI L, et al. Application of EWT algorithm in attitude angle calculation[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(8): 220-227.
- [13] 卢艳军, 陈雨荻, 张晓东, 等. 基于扩展 Kalman 滤波的姿态信息融合方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(9): 281-288.
LU Y J, CHEN Y D, ZHANG X D, et al. Attitude information fusion method based on extended kalman filter[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(9): 281-288.
- [14] 李茂月, 马康盛, 许勇浩, 等. 基于单目结构光的形貌测量误差补偿方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(5): 19-31.
LI M Y, MA K SH, XU Y H, et al. Research on morphology measurement error compensation method based on the monocular structure light [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(5): 19-31.
- [15] YUE M, SUN W, HU P. Dynamic coordinated control of attitude correction for the shield tunneling based on load observer[J]. Automation in Construction, 2012, 24: 24-29.
- [16] 李洋, 瞿剑苏, 李鸿儒. 大型火箭橇位置参数测量方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(5): 16-22.
LI Y, QU J S, LI H R. Method for measuring position parameter of large rocket sled[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(5): 16-22.
- [17] 刘士兴, 周启航, 马登科, 等. 基于单目视觉的电梯曳引轮磨损检测系统研制[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(9): 55-61.
LIU SH X, ZHOU Q H, MA D K, et al. Development of elevator traction sheave wear detection system based on monocular vision[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(9): 55-61.
- [18] 李梦, 韩帮国. 双参数车辆行驶偏离提醒与预警策略研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(10): 82-90.
LI M, HAN B G. Study on prompting and alarming strategy of two-parameter vehicle driving deviation[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(10): 82-90.
- [19] 吴京城, 洪欢欢, 施露露, 等. 反背景差分结合 Otsu 的细胞图像分割方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(4): 82-89.
WU J CH, HONG H H, SHI L L, et al. Cell image segmentation method combined with anti-background subtraction and Otsu [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(4): 82-89.
- [20] 黄梦涛, 连一鑫. 基于改进 Canny 算子的锂电池极片表面缺陷检测[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(10): 199-209.
HUANG M T, LIAN Y X. Lithium battery electrode plate surface defect detection based on improved Canny operator[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(10): 199-209.
- [21] 丑永新, 张爱华, 顾亚, 等. 一种快速的数学形态学滤波方法及其在脉搏信号处理中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(2): 253-262.
NIU Y X, ZHANG AI H, GU Y, et al. Fast mathematical morphological filtering method and its application on pulse signal processing [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(2): 253-262.
- [22] YAN Q X, ZHANG J C, CHEN W Y, et al. Dynamic characteristics of intersection structure consisting of twin shield tunnels and a transverse passage [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019, 23(11): 4824-4835.

作者简介



黄喆, 2011 年于东北大学获得学士学位, 2016 年于天津大学获得博士学位, 现为天津科技大学讲师, 主要研究方向为几何量精密测量、地下掘进装备导航与监制及视觉测量。

E-mail: huangzhe@tust.edu.cn

Huang Zhe received his B.Sc. degree from Northeastern

University in 2011, and received his Ph. D. degree from Tianjin University in 2016. He is currently a lecturer at Tianjin University of Science and Technology. His main research interests include geometric precision measurement, navigation and supervision of underground excavation equipment and visual measurement.



赵世艺, 2021年于天津科技大学获得学士学位, 现为天津科技大学硕士研究生, 主要研究方向为几何量精密测量。

E-mail: zsy13011386910@163.com

Zhao Shiyi received his B. Sc. degree from Tianjin University of Science and Technology in 2021. He is currently a master student at Tianjin University of Science and Technology. His main research interest is geometric precision measurement.



周卫斌 (通信作者), 2004年于湖南大学获得学士学位, 2007年于天津大学获得硕士学位, 2010年于天津大学获得博士学位, 现为天津科技大学副教授, 主要研究方向为Android、Linux嵌入式系统设计与开发、智能信息与物联网技术、通信系统设计与实现、数字图像处理与生物特征识别。

E-mail: zhouweibin@tust.edu.cn

Zhou Weibin (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Hunan University in 2004, and received his M. Sc.

degree and Ph. D. degree both from Tianjin University in 2007 and 2010, respectively. He is currently an associate professor at Tianjin University of Science and Technology. His research interests include design and development of Android and Linux embedded systems, intelligent information and internet of things technology, design and implementation of communication system, digital image processing and biometric recognition.



徐叶倩, 2019年于天津科技大学获得学士学位, 现为天津科技大学硕士研究生, 主要研究方向为几何量精密测量。

E-mail: 956065130@qq.com

Xu Yeqian received her B. Sc. degree from Tianjin University of Science and Technology in 2019. She is currently a master student at Tianjin University of Science and Technology. Her main research interest is geometric precision measurement.



沈小玲, 2020年于燕山大学里仁学院获得学士学位, 现为天津科技大学硕士研究生, 主要研究方向为几何量精密测量。

E-mail: 1738291018@qq.com

Shen Xiaoling received her B. Sc. degree from Liren College of Yanshan University in 2020. She is currently a master student at Tianjin University of Science and Technology. Her main research interest is geometric precision measurement.