

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201809030



光学皮带秤测量方法及实验对比

陈睿¹, 杨建红¹, 房怀英¹, 黄文景², 林伟端², 王惠风²

(1. 华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021;
2. 福建南方路面机械有限公司, 福建 泉州 362021)

摘要: 基于激光测距技术,提出一种新型皮带输送物料的体积测量方法,该方法利用激光测距传感器拟合得到物料横截面,并结合皮带速度计算得到物料瞬时流量.通过皮带上物料的运动特征分析主要误差源,并优化轮廓提取算法;通过搭建实验台(带宽为 200 mm 的皮带机),测量在带速为 $0\sim 0.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时的物料流量.实验结果表明:误差补偿之后,测量结果的重复性和准确性的误差均在 $\pm 1\%$ 以内,该方法具有非接触、结构简单、精度高等优点,可以满足工业带式输送机的实时测量要求.

关键词: 激光测距; 皮带秤; 非接触; 误差修正

中图分类号: TH 741 文献标志码: A 文章编号: 1000-5013(2019)01-0014-06

Comparative Study on Measuring Method and Experiment of Optical Belt Weigher

CHEN Rui¹, YANG Jianhong¹, FANG Huaiying¹,
HUANG Wenjing², LIN Weiduan², WANG Huifeng²

(1. College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
2. Fujian South Highway Machinery Company Limited, Quanzhou 362021, China)

Abstract: Based on laser ranging technology, a new method for measuring the material volume on belt conveyors was proposed. A the method uses laser ranging sensor was used to measure and fit the cross section of material and the instantaneous flow rate of material was calculated together with belt speed. According to the movement characteristics of the material on the belt, the main error sources were analyzed and the contour extraction algorithm was optimized. An experimental platform with a bandwidth of 200 mm was set up to measure the material flow rate when the belt conveyer moved at a speed in the range of $0\sim 0.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. The experimental results show that: the repeatability error and accuracy error of measurement results are within $\pm 1\%$ after error compensation. This method has the advantages of non-contact measurement, simple structure and high precision, and can meet the real-time measurement requirements of industrial belt conveyor.

Keywords: laser ranging; belt weigher; non-contact; error correction

目前,应用于皮带机上的称量设备主要是电子皮带秤,其作为一种接触式测量,皮带工作过程中的张力、倾斜、受力不均等多种因素都会影响电子秤的测量结果^[1].近年来,随着光电传感器与计算机技术的发展,光学检测技术越来越多地应用在物体三维轮廓检测领域中.光学测量具有非接触、高精度、高效率、稳定测量等一系列优点,主要可分为视觉检测与激光测量 2 种^[2]. Andersson 等^[3]利用高分辨率三

维成像确定粒度与质量之间的变换函数. Romashko 等^[4]提出一种利用自适应全息干涉测量原理和基于谐振微称质量的微纳米质量测量系统进行实验. 梁漫春等^[5]通过预先标定相机与投线仪相对姿态参数提取影像轮廓线, 得到物料的三维轮廓线. 张小虎等^[6]在单摄像机基础上, 针对一些形貌变化多样, 且材质反射效率低等特性的物料提出激光投线仪扫描辅助下的双目摄影测量方法. 上述方法主要基于单维和 multidimensional 视觉检测测量, 具有一定的可行性, 但处理速度受提取纹理特征与复杂算法的限制^[7], 且易受光照条件的影响. 考虑激光测量具有高效率、高精度和强抗干扰能力等优点^[8], 本文利用激光测距传感器和测速传感器获取物料的横截面的高度值与皮带的传输速度, 并利用 CCD 相机实时采集图像以优化轮廓提取算法, 从而将质量测量转化为体积测量, 并将开发的测量系统在实验机上进行实验验证.

1 测量原理及实验方法

1.1 测量原理与实验台搭建

相较于普通传感器, 激光位移传感器具有测量速度快、非接触等优点, 在许多逆向工程领域, 如复杂曲面检测得到成功的应用^[9-11]. 激光三角法是当前激光位移传感器的主要测量方法^[12], 其测量原理, 如图 1 所示. 图 1 中: α 为被侧面反射角; β 为光敏面接受角; F 为透镜焦点; C, O, D 为被测点; C', O', D' 为被测点在光敏面上的镜像.

若被测物体在激光光轴方向移动的距离为 y , 光板像在光敏面上的相对位移为 x , 则利用相似三角形各边的比例关系可得 $y = L_{OF} x \sin \beta / [L_{OF} \sin \alpha - x \sin(\alpha + \beta)]$. 其中, L_{OF} , L_{OF} 分别为测量光斑点与光斑成像点到透镜的距离. 设计的光学皮带秤主要由若干激光位移传感器和速度传感器组成, 测量示意图, 如图 2 所示.

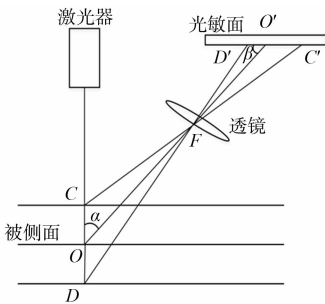


图 1 激光三角测量法原理图

Fig. 1 Schematic diagram of laser triangulation

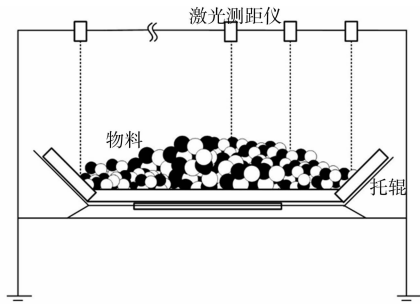


图 2 测量示意图

Fig. 2 Schematic diagram of survey

皮带输送的瞬时流量可通过物料当前横截面积与输送带瞬时速度的乘积表示^[13]. 为得到物料截面轮廓的准确信息, 将激光测距传感器垂直于皮带运行方向, 并将其安装于皮带机上方, 采集当前物料截面的高度值 (L_i). 将物料横截面的高度数据拟合为物料截面的轮廓信息, 将采样的距离信息与测量传感器的序号进行坐标转换, 如图 3 所示. 图 3 中: $L(x_m, y_i)$ 为第 m 个传感器在 i 时刻的物料高度, 其中, m 为传感器的最大个数; $L(x_n, y_i)$ 为第 n 个传感器在 i 时刻的物料高度, 其值由传感器测得的距离 $L_m(x_n, y_i) - L_b(x_n, y_i)$ 确定; $L_b(x_n, y_i)$ 为空皮带时, 传感器测得的距离.

$S(i)$ 为 i 时刻测量位置的物料横截面. 由于皮带的高度在运行过程中保持不变, 即横截面的下轮廓线固定, 则横截面积计算公式

$$S(i) = \int_0^X L(x) dx. \quad (1)$$

式(1)中: X 为测量系统覆盖宽度; 函数 $L(x)$ 为利用物料轮廓的离散点拟合出的物料截面上轮廓线的近似曲线. 由于皮带输送机的粘弹特性和托辊的阻力作用^[14], 皮带的速度 v_i 在相对短的时间内不会发生突变. 因此, 结合得到的物料横截面积 $S(i)$ 和皮带速

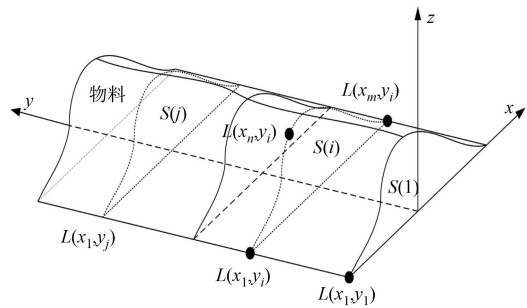


图 3 物料横截面采样点

Fig. 3 Material cross section sampling point

度,可得物料的体积流量 V ,即

$$V = \sum_{i=0}^N v_i S_j.$$

(2)

采用 HG-C1000 系列微型激光测距传感器(江苏省苏州市松下神视电子有限公司),其测量精度为 $\pm 1\text{ mm}$,测量范围为 $0\sim 400\text{ mm}$. 为保证激光传感器测量点处的皮带基准面不因物料质量的改变而改变,传感器的安装位置选择在皮带托辊的正上方. 最终实验台的搭建,如图 4 所示.

图 4 中:实验平台的皮带带宽为 200 mm ,使用 ACS550 系列变频器(北京 ABB 电气传动公司)驱动,带速范围为 $0\sim 0.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;使用欧姆龙 E6B2-CWZ6C 型编码器(上海欧姆龙自动化有限公司)测量皮带实时速度,传感器安装高度 h 为 300 mm .

1.2 数据的提取与误差的补偿

提取物料的轮廓线能否真实地反映物料的横截面是文中测量的关键,而灰尘、皮带振动、物料表面反射异常等因素都会给最终的测量结果带来误差. 因此,为精确提取物料的轮廓,需要对物料的激光测量数据进行预处理. 通过分析发现,物料流的轮廓数据具有如下特征:1) 物料具有中间区域较高,并向左右两边呈现缓慢减小的趋势,相邻两点之间的高度差较小;2) 测量范围应大于皮带上物料的宽度,因此,物料轮廓线的端点位于左右两边第一个不为零点的传感器内测.

物料的反射、表面纹理等都会引入异常值. 根据物料流的轮廓数据特征 1),当某一数据点与邻值差值超出规定阈值时,可认为该点为异常点. 为消除异常点对轮廓线拟合造成的影响,采用算术平均值替代异常点的滤波方法,对异常值点进行逐个剔除.

$$y'_i = \begin{cases} y_i, & |y_i - y_{i-1}| \leq T, \\ (y_{i-1} + y_{i+1})/2, & |y_i - y_{i-1}| > T. \end{cases}$$

(3)

将一组包含有异常值的数据用 MATLAB 绘制物料堆积的三维模型,如图 5 所示.

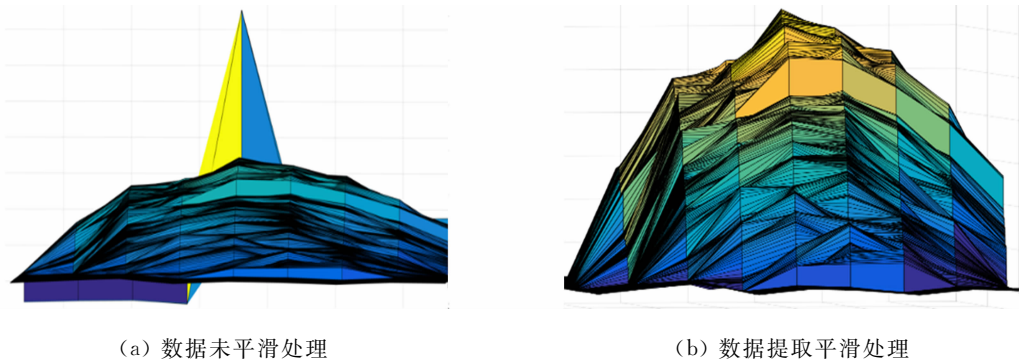


图 5 奇异点处理前后物料堆积模型

Fig. 5 Material accumulation model before and after singular point processing

由图 5 可知:通过优化提取数据后,可将引入误差的异常值剔除掉,从而使计算模型更符合真实的物料流动模型.

对于物料流的轮廓数据特征 2),由于传感器间隔之间的物料边缘信息无法准确获取,因此,将给计算带来较大误差. 边缘误差分析情况,如图 6 所示. 图 6 中:A 点为 1 号激光测距传感器的测量点;B 点为物料实际的边缘位置;虚线为传感器信号拟合得到的轮廓线 $f_m(x)$;实线为实际物料的轮廓线 $f_r(x)$. 此时,计算当前物料的横截面积误差为

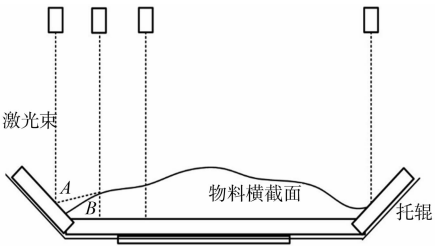


图 6 边缘误差分析

Fig. 6 Edge error analysis

$$\Delta S = \int_0^L f_m(x) - \int_B^L f_r(x).$$

为消除该因素带来的误差,选择使用 CCD 相机对皮带秤测量点处进行实时的图像采集,以辅助获取皮带上物料的边缘位置.当摄像头与所测物体的距离固定,采集图像中的像素点与实际物体尺寸比例即为固定值.因此,只需获得图像中物料的左右两侧像素点位置便可得到物料的具体宽度,从而确定轮廓线端点位置.

背景减除法是将当前的视频帧与建立的背景模型进行比较,通过判定灰度等特征的变化或直方图等统计信息的变化来分割运动目标^[15-16],可有效提取运动区域信息.首先,采用平均背景法建立检测背景,取某一时间段内 N 帧的皮带空载图像;然后,将图像累加之后,取像素平均值,得到背景图像的像素数据 $B(i, j)$. 其中, $B(i, j) = \sum_{i=1}^N B_i(i, j) / N$. 设当前时刻的图像数据为 $I_i(i, j)$, 差值图像为 $D_i(i, j) = |I_i(i, j) - B(i, j)|$, 差值图像 $D_i(i, j)$ 像素的平均值 \bar{d} 和标准差 δ 分别为

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=0}^{i < w} \sum_{j=0}^{j < h} d(i, j)}{wh}, \quad \delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{i < w} \sum_{j=0}^{j < h} [d(i, j) - \bar{d}]^2}{wh}}.$$

上式中: w 为图像宽度; h 为图像高度. 阈值 $T = \bar{d} + \alpha\delta$, 其中, α 为阈值调节系数.

$$D'_i(i, j) = \begin{cases} 255, & D_i(i, j) \geq T, \\ 0, & D_i(i, j) < T. \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中: $D'_i(i, j)$ 为采用阈值 T 对差值图像进行二值化处理后的数据结果. 处理结果, 如图 7 所示.

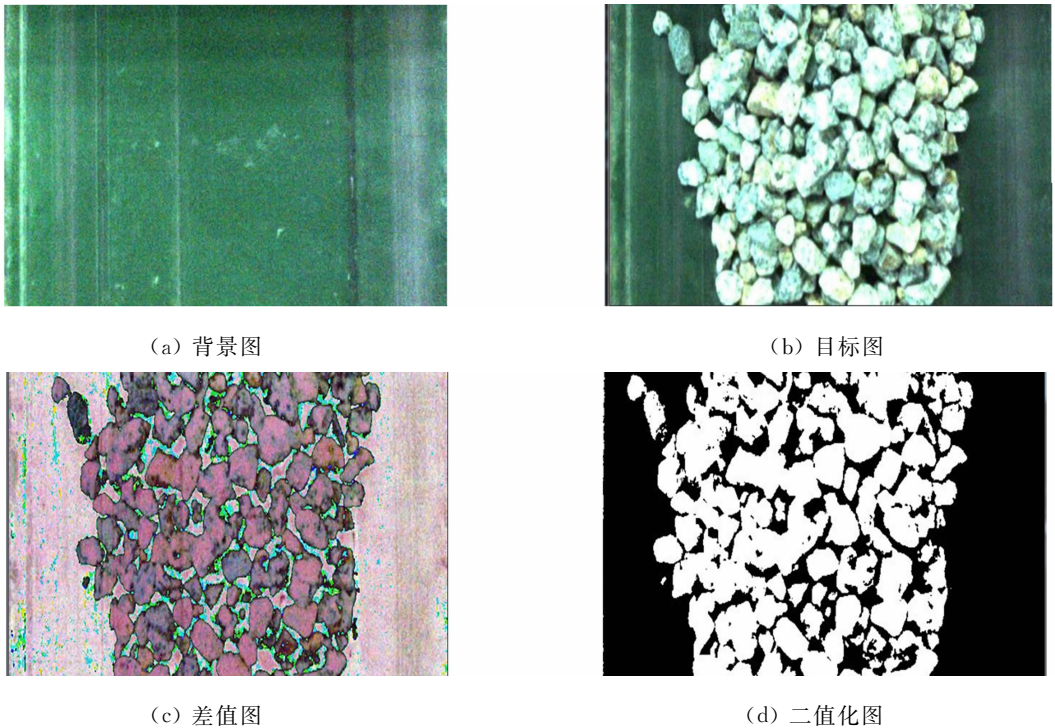


图 7 背景减除法检测结果

Fig. 7 Background subtraction test results

得到二值化图像后,提取左右两边第一个白色像素点的坐标 x_j 与 x_k . 对于标定后的相机位置,可通过像素点获得物料边界在皮带上的具体位置,即 $X_L = x_j K$, $X_R = L - x_k K$. 其中: K 为位置系数,由相机与皮带之间的相对位置确定; X_L , X_R 分别为皮带上物料边缘位置距离皮带边界的距离.

2 实验对比与分析

为选取合适的传感器数量,利用离散元仿真软件(EDM)对该测量系统进行模拟仿真.仿真的测量物料横截面积为 $75\,000\text{ mm}^2$,以相同的进料速度通过皮带正上方设置的采样点,皮带宽度设置为 200

mm. 传感器个数与测得横截面积的曲线关系,如图 8 所示. 图 8 中: S 为测量面积; n 为传感器个数. 由图 8 可知:对于上述仿真条件,当传感器数量小于 8 时,横截面积的计算准确性随着采样个数的增加而显著增大;当数量继续增加,准确性趋于平稳. 因此,在同时考虑测量精度及设计成本的基础上,选择最佳实验激光测距传感器个数为 9(安装间隔为 25 mm).

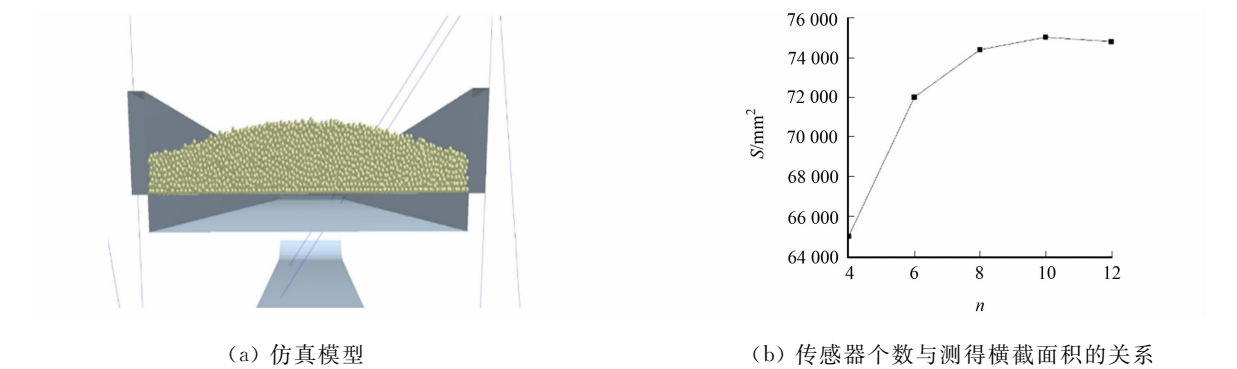


图 8 传感器个数与横截面积仿真
Fig. 8 Simulation of sensor number and cross section area

被测的物料为花岗岩,分别采集变频器在频率为 25,30,35,40,45 Hz,以及 3 种不同规格标准容积 9.72, 19.64,29.50 L 时的物料的测量结果,如表 1 所示. 表 1 中: f 为变频器频率; V_m 为测量体积; V_r 为实际体积; e 为误差.

表 1 激光皮带秤体积测量值
Tab. 1 Volume measurement value of laser belt scale

编号	f/Hz	V_m/L	V_r/L	$e/\%$	编号	f/Hz	V_m/L	V_r/L	$e/\%$
1	25	9.65	9.72	0.70	6	25	29.34	29.50	0.50
2	25	9.67	9.72	0.50	7	30	9.69	9.72	0.30
3	25	19.52	19.64	0.60	8	35	9.62	9.72	1.00
4	25	19.65	19.64	0.03	9	40	9.68	9.72	0.40
5	25	29.38	29.50	0.40	10	45	9.69	9.72	0.30

由表 1 可知:测量结果的重复性和准确性的误差均小于 $\pm 1\%$;速度变化与称质量的差异误差也都小于 $\pm 1\%$,测量结果与带速和称质量体积无关. 此次实验验证了文中所提测量方法的可行性,对于实际工程项目则需要进一步分析系统测量误差的主要来源. 1) 工业生产中的皮带打滑,皮带的振动幅度较大等使皮带的速度无法被传感器准确测量,使测量结果出现误差;2) 测量大颗粒物料时,物料堆积将会出现较多空隙,使横截面轮廓线的拟合出现较大误差;3) 室外恶劣的工作环境,测量者使用不当等容易引入实验测量误差. 因此,需要进一步分析研究合理的计算模型,通过实验验证消除可能存在的误差源,切实有效地提高测量精度,以降低误差.

相同带速下,误差修正前后的测量对比,如图 9 所示. 图 9 中: V 为体积. 由图 9 所示:误差修正前,由于边缘位置的不确定,导致拟合出的轮廓线宽于真实的横截面,测量结果总是大于实际的体积;误差修正后的测量结果明显更贴近真实体积,准确性提高 1%左右.

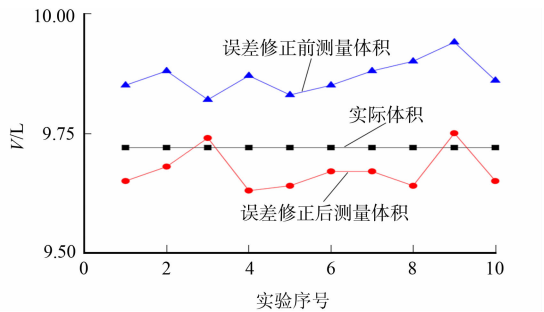


图 9 误差修正前后的测量对比
Fig. 9 Measurement comparison before and after error correction

3 结论

利用激光测距技术结合 CCD 相机辅助测量,设计一种新型的光学皮带称质量系统,并搭建试验台进行试验,得到以下 3 点结论.

1) 从原理出发,分析传统电子皮带秤所固有的缺陷,提出一种基于激光测距的皮带机动态称质量方法. 采用若干数量的激光测距传感器,设计搭建采集物料横截面轮廓线的光学系统,实现皮带输送物料的流量测量.

2) 结合皮带上物料的运动特征,分析 2 个主要误差源,即测量异常值和物料轮廓线端点位置引起的拟合误差。通过均值滤波剔除异常值,并借助 CCD 相机对物料进行实时的图像采集分析,以优化物料轮廓,提取算法后测量误差减小 1%。

3) 设计的新型激光皮带秤(带宽为 200 mm)测量在带速为 $0\sim 0.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时的物料瞬时流量,结果表明,测量结果的重复性与准确性误差均小于 $\pm 1\%$ 。该方法结构简单,测量精度高、实时性强,有较强的实用性与可靠性,有助于为带式输送机提供实时、精确的输送量数据。

参考文献:

- [1] 王昶. 动态称重系统的动态干扰因素分析和抑制[J]. 中国交通信息化, 2011(5): 74-79. DOI: 10. 13439/j. cnki. itsc. 2011. 05. 003.
- [2] LI Ping, WANG Yanwen, XU Cong. Research on dynamic measurement system for bulk material based on machine vision[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 273: 768-772. DOI: 10. 4028/www. scientific. net/AMM. 273. 7 68.
- [3] ANDERSSON T, THURLEY M J, CARLSON J E. A machine vision system for estimation of size distributions by weight of limestone particles[J]. Minerals Engineering, 2012, 25(1): 38-46. DOI: 10. 1016/j. mineng. 2011. 10. 001.
- [4] ROMASHKO R V, EFIMOV T A, KULCHIN Y N. Laser adaptive holographic system for microweighing of nanoobjects[J]. Quantum Electronics, 2014, 44(3): 269-273. DOI: 10. 1070/QE2014v044n03ABEH015348.
- [5] 梁漫春, 衣宏昌, 张志康. 一种新的在线称重方法[J]. 核电子学与探测技术, 2006, 26(4): 443-445. DOI: 10. 3969/j. issn. 0258-0934. 2006. 04. 014.
- [6] 张小虎, 欧建良, 苑云, 等. 投影轮廓线辅助下的堆场三维形貌摄影测量研究[J]. 光学学报, 2011, 31(6): 92-99. DOI: 10. 3788/aos201131. 0612002.
- [7] 李璐璐, 赵文川, 伍凡, 等. 摄像机标定中的特征点提取算法研究与改进[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 171-178. DOI: 10. 3788/aos201434. 0515002.
- [8] 郑明杰, 刘鑫. 激光测距技术国内外发展状况及原理[J]. 科技创新导报, 2014(1): 35. DOI: 10. 16660/j. cnki. 1674-098x. 2014. 01. 003.
- [9] 邵海燕, 张振海, 李科杰, 等. 用于远距离检测的线结构光传感器特性分析[J]. 激光杂志, 2015(2): 75-77. DOI: 10. 14016/j. cnki. jgzz. 2015. 02. 075.
- [10] 常方强, 孟希, 罗才松. 激光测距仪在海崖剖面形态快速测量中的应用[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2015, 36(2): 215-220. DOI: 10. 11830/ISSN. 1000-5013. 2015. 02. 0215.
- [11] 何原荣, 潘火平, 陈鉴知, 等. 宋代古船的三维激光扫描技术重建与模型 3D 打印[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2017, 38(2): 245-250. DOI: 10. 11830/ISSN. 1000-5013. 201702021.
- [12] 王晓嘉, 高隼, 王磊. 激光三角法综述[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(增刊 3): 601-604. DOI: 10. 3321/j. issn: 0254-3087. 2004. z3. 185.
- [13] ZENG Fei, WU Qing, DAI Chaolei. Speed control simulation system of bulk terminal conveyor belts[C]// International Conference on Transportation Information and Safety. Wuhan: ASCE, 2013: 2062-2069. DOI: 10. 1061/9780784413036. 277.
- [14] 陈岩, 陈开胜. 皮带传动系统动态特性研究[J]. 机械传动, 2014(7): 46-50. DOI: 10. 16578/j. issn. 1004. 2539. 2014. 07. 014.
- [15] CONTE D, FOGGIA P, PERCANNELLA G, *et al.* An experimental evaluation of foreground detection algorithms in real scenes[J]. Eurasip Journal on Advances in Signal Processing, 2010(1): 373-384. DOI: 10. 1155/2010/373 941.
- [16] MONNET A, MITTAL A, PARAGIOS N, *et al.* Background modeling and subtraction of dynamic scenes[C]// IEEE International Conference on Computer Vision. Nice: IEEE Press, 2003: 1305-1312. DOI: 10. 1109/iccv. 2003. 123 8641.

(编辑: 李宝川 责任编辑: 陈志贤 英文审校: 崔长彩)