

基于多传感器集成的堆场激光测量技术应用

张德津^{1,2} 李必军^{1,2} 何 莉^{3*}

¹武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430079
²武汉大学交通研究中心, 湖北 武汉 430079
³湖北工业大学自动化系, 湖北 武汉 430068

摘要 针对采用体积和密度换算测量大型堆场储量时体积计算精度低、数据获取周期长、堆场类型不能统一测量与计算的问题,提出利用高速激光扫描仪、距离传感器、角度传感器及俯仰传感器集成技术,快速获取堆场三维坐标数据,并推导统一的三维坐标求解算法,建立堆场空间三维坐标系解算堆场三维坐标,准确计算堆场储料体积。同时,提出系统建设架构、组成、数据处理方法和需要考虑的问题。该方法有效解决了大型料场现有测量所面临的问题,提高了测量效率、准确性和安全性。在试验条件下,绝对精度达到 0.4%。多个项目实例表明,该方法简洁、高效、准确,普通 200 m 的料场一次测量时间不超过 20 min,测量体积重复测量误差小于 0.7%,具有良好的应用前景和推广价值。

关键词 测量;激光测量;体积测量系统;三角网建模;传感器集成

中图分类号 TP23; TP212; TP319 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0208005

Application on Laser Measurement for Large Storage Yard Based on Multi-Sensor Integration

Zhang Dejin^{1,2} Li Bijun^{1,2} He Li³

¹ State Key Laboratory for Information Engineering of Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430079, China
² Transportation Research Center, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430079, China
³ Department of Automation; Hubei University of Technology, Wuhan, Hubei 430068, China

Abstract It is difficult to calculate the content of a large storage yard by volume and density, which causes low precision and long period of data acquisition and disunity among measurement and calculation. A integration technology to achieve the 3D coordinate data by applying high-speed laser scanner, distance sensor, angle sensor and pitch sensor is proposed. Then a unified algorithm of 3D coordinates is deduced and 3D coordinate system of yard space is established to calculate the volume of material storage accurately. The system architecture, components, data processing methods and issues to be considered are also proposed, which can solve the measurement problem in a large material storage and improve the efficiency, accuracy and safety. In the experimental conditions, the absolute accuracy is less than 0.4%. Several projects show the simplicity, efficiency and accuracy of the proposed method. Measuring time less than 20 min for normal yard about 200 m once and the repeated error is less than 0.7%, which has good prospects and application worthy.

Key words measurement; laser measurement; volume measurement system; triangle irregular network; sensor integration

OCIS codes 120.5800; 120.6650; 120.4290

收稿日期: 2011-08-30; **收到修改稿日期**: 2011-10-31

基金项目: 国家火炬计划(2004EB011086)资助课题。

作者简介: 张德津(1975—),男,博士研究生,主要从事激光测量、智能交通、空间信息服务等方面的研究。

E-mail: djzhang@whu.edu.cn

导师简介: 李清泉(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事摄影测量、智能交通、空间数据模型、空间信息服务、激光测量、交通影像处理等方面的研究。E-mail: qqli@whu.edu.cn

* **通信联系人**。E-mail: Heli.edu@hotmail.com

1 引 言

在大型资源消耗型企业中,生产资源如燃煤、矿石等均以不规则形状存储于大型堆场,快速、准确获取堆场储量是企业进行生产核算、成本控制、生产计划安排的重要依据。在现有技术手段下,采用体积和密度换算储料质量是最为有效的方法。由于堆场体积大,形状不规则,传统方法测量堆场体积比较困难^[1]。便携式单点测量存在效率低、精度差和人为影响大的缺点;利用计算机视觉测量的方法中,基于影像的三维重建技术存在着数据处理手段复杂的缺点,涉及到相机的检校、方位元素的求解、影像中同名基元的匹配等一系列关键问题^[2];三维激光扫描仪可以测量单点的坐标,同时能以点云的方式获取几乎整个观测目标表面的空间信息^[3],但存在对某些介质的表面无法进行测量以及难以直接获得目标表面的语义信息,缺乏对目标表面几何特征的有力表达等方面问题^[2];部分利用二维激光扫描仪测量采用高速扫描仪获取堆场三维数据,但没有考虑载体姿态,而采用时间平均法模拟,导致精度低、误差大,不能满足生产需要。

激光视觉测量技术由于具有非接触、全视场测量,并且能够提供测量的一致性、重复性和精度高等特点,被广泛应用于几何量的尺寸测量、地形测绘、精密零部件或产品的三维外形检测等领域中^[4~6]。激光光学坐标测量作为一种先进的测量手段由于具

备精度高、测量范围大等优点在工业环境中得到了广泛应用^[7~10]。文献[11,12]利用激光雷达对体积测量进行了完整的研究,介绍了激光扫描测量的原理、激光测量系统几何模型及精度分析、堆体体积测量的方法和系统模型实现。本文提出的基于高速激光扫描仪、距离传感器、角度传感器和数据采集控制设备的测量方法,是基于文献[11,12]的理论,对实际堆场数据获取、计算和无效数据过滤的有益补充。提出了数据计算、堆场坐标系建立、无效数据过滤的方法,推导了统一的计算公式。

2 测量原理

多传感器集成堆场测量首要问题是建立测量空间基准以及多传感器时间基准,使得多传感器数据能在统一时空高效可靠融合。以堆取料机为例,Z值测量传感器安装在大臂前端,距离传感器安装在行走轮前部,角度传感器安装在回转中心。在测量系统中,将激光扫描测量系统搭载到堆取料机上,从而使外方位元素中的角度参量及 d_{y0} 和 d_{z0} 均为定值(d_{z0} 为扫描器中心至参考水平面的距离, d_{y0} 为扫描中心到旋转中心的距离),可在系统安装或集成时在实验室标定或在现场布设控制点一次性测定,简化测量和计算过程; d_{x0} 、 s 和 θ 为变量。图1是激光扫描测量系统的工作原理和坐标系统^[10]。

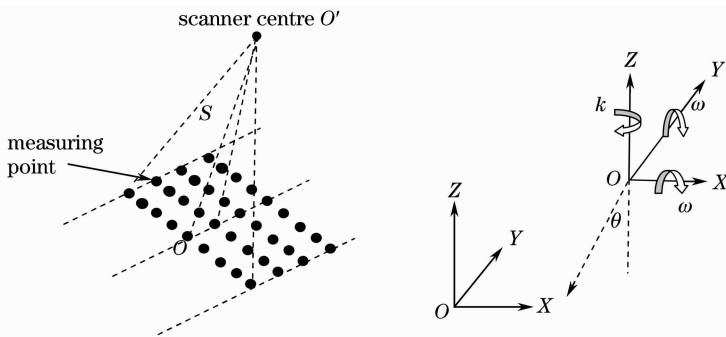


图1 激光扫描测量系统坐标示意图

Fig. 1 Sketch map of laser-scanning surveying system

首先建立堆场测量平面坐标系 XOY ,平面坐标系根据测量现场的堆场包络矩形建立,其次确立堆场 Z 轴坐标,其值由高速激光扫描仪测量值结合俯仰角度传感器角度、堆取料机大臂长度进行换算得到。激光扫描仪的工作方式为固定由一侧开始(如从左到右),覆盖某个角度范围(如 $0 \sim 180^\circ$),以某个角度间隔(如 0.5°)逐点扫描,每个扫描周期为一个测量断面,测量结果为扫描仪到被测点的实际距

离。距离和角度传感器以脉冲的方式返回脉冲值,通过标定换算出实际距离和大臂角度。通过以固定距离间隔连续获取堆场扫描断面,采集整个堆场三维坐标数据,从而为建立堆场三维模型提供支持。

传感器时间基准通过采集控制设备实现,采集控制设备向各传感器发送采集指令并对数据进行时间标签标示,实现采集数据时间同步,系统扫描仪采用 SICK 的 LD-LRS3100,角度和距离传感器采用

SICK 的 E6B2-C 型编码器, 控制器属自主研发, 数据和控制过程通过 3 G 无线网络进行。采集控制原理图如图 2 所示。

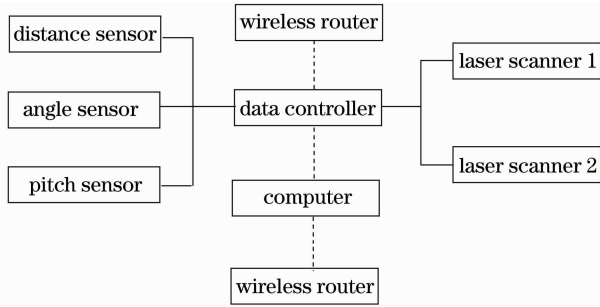


图 2 采集控制原理图

Fig. 2 Collection and control schematic

图中数据控制器采用了内置 SD 卡, 采集到的数据存储在 SD 卡中, 同时, 可以选择利用无线路由器, 通过 GPRS 网络发送到工作站计算机进行处理。

3 算法

3.1 算法理论

堆场总储量采用体积乘以密度换算, 密度值由实测获得或采用经验值。体积计算步骤为: 先建立堆场物料三维模型, 利用激光扫描测量断面并解算断面三维坐标, 采用不规则三角网 (TIN) 算法得到被测表面的近似表示, 再以此为表面生成无缝连接的五面体集合, 分别计算每个小五面体的体积 P_i , 根据所有五面体的体积和近似求出堆场体积 V :

$$P_i = \iint Z_i(x, y) dx dy, \quad (1)$$

$$V = \sum_{i=0}^n P_i. \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (2)$$

当断面间隔 ΔS 相等 (为 Δq), 且断面内点距相等 (为 Δp) 时, 计算体积的精度 σ_v 为^[11]

$$\sigma_v = \sqrt{\left(n - \frac{3}{2}\right) \left(m - \frac{3}{2}\right) \Delta p \Delta q \sigma_z}, \quad (3)$$

式中 n 为断面采集的点数, m 为采集的断面数, σ_z 表示通过内插后获得的断面点高程精度。由于测量平台运行姿态角以及由激光扫描仪测量的扫描角和激光测距等参数存在测量误差, 导致 TIN 失真, 产生测量误差, 其中集成传感器测量平台姿态角时的误差, 称为姿态角测量误差。姿态角测量误差包含系统误差和随机误差, 通常经过事前校正或事后补偿, 可消除系统误差的影响, 而姿态角随机测量误差一般认为是符合正态分布的白噪声, 不能通过上述方

法消除^[13]。

系统误差包括测距误差、测角误差、同步误差、误差传递等多个方面, 在测距方面, 系统选择的 SICK3100 传感器精度小于 25 mm, 料场一般的堆积高度在 10 m 以上, 25 mm 的误差在允许的测量范围内, 此误差在料场高度越高影响越小。在侧角误差方面, 系统选用的传感器分辨率在 3700 p/r, 外接直径 20 cm 的转动轮, 单圈的精度极高, 但由于轨道的不平顺、打滑等显现, 系统会产生累积误差, 经测试, 对于 200 m 的料场其误差小于 0.3 m。在同步误差方面, 由于传输效率和同步不一致丢失数据, 会导致断面数的丢失, 另外, 传感器测距随着距离增大, 相邻两个测点的距离会加大直接导致在 TIN 建网时三角形底面积增大, 从而增大误差。

同时, 由于堆场往往是不规则形状, 每次测量不能保证进行无盲区测量, 测量不到的地方会根据各种限制参数进行模拟, 从而人为产生误差。经统计, 在所有这些误差产生的原因中, 由于测量盲区模拟导致的误差是系统最大的误差来源, 也即系统要求测量时尽量做到无盲区或保持堆场形状的基本规则。

考虑堆场形状和测量理论中提及的坐标系统, 需要建立不同类型堆场的解算模型, 综合不同模型的特点, 推导统一的求解算法, 以此计算堆场三维坐标。

3.2 堆场模型

按照传感器安装位置和数据的用途并结合堆场坐标系统, 长形堆场模型需要考虑的参数有载体大臂与载体行走轨道的夹角、激光扫描仪与地面和大臂的夹角、大臂与水平面夹角以及扫描断面与轨道夹角等, 得到如图 3 所示的堆场模型。

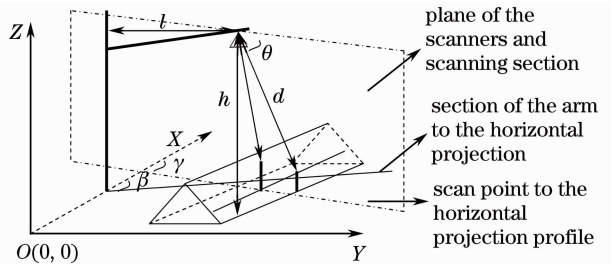


图 3 长形堆场模型

Fig. 3 Rectangular yard model

对于圆形堆场, 堆取料机围绕旋转中心转动, 不需要获取距离数据, 只考虑激光扫描仪与水平面夹角、扫描断面与扫描仪本身夹角等, 得到如图 4 所示的堆场模型。

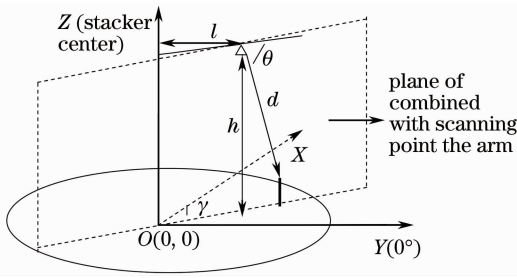


图 4 圆形堆场模型

Fig. 4 Circle yard model

图 3,4 中, l 为大臂长度即激光扫描仪到斗轮机旋转中心的距离, d 为激光扫描仪测距值即被测点到扫描仪的距离, h 为激光扫描仪到地面的高度, α 为激光扫描仪与水平面的夹角, β 为大臂与轨道的夹角, γ 为扫描断面与 X 轴方向的夹角, θ 为扫描断面与激光扫描仪的夹角。

3.3 三维坐标求解

根据堆场计算模型, 距离传感器返回的距离 X 、激光扫描仪的安装高度 h 、堆取料机大臂的长度 l 等参数, 对于长形堆场三维点坐标 (x, y, z) 的计算(3)式可以推导为

$$\begin{cases} x = X + l \cos \beta - d \cos(\alpha + \beta) \cos \gamma \\ y = l \sin \beta - d \cos(\alpha + \theta) \sin \gamma \\ z = h - d \sin(\alpha + \beta) \end{cases} \quad (4)$$

对于圆形堆场三维点坐标 (x, y, z) 的计算(4)式可以推导为

$$\begin{cases} x = l - d \cos(\alpha + \theta) \cos \gamma \\ y = l - d \cos(\alpha + \theta) \sin \gamma \\ z = h - d \sin(\alpha + \theta) \end{cases} \quad (5)$$

对比(4)、(5)式可知, 长形料场坐标计算公式中, 只需要令 $X=0, \beta=\gamma$, 即可得圆形料场坐标。由此推导统一料场三维坐标为

$$\begin{cases} x = X + l \cos \beta - d \cos(\alpha + \beta) \cos \gamma \\ y = l \sin \beta - d \cos(\alpha + \theta) \sin \gamma \\ z = h - d \sin(\alpha + \theta) \end{cases} \quad (6)$$

式中 α 为大臂与轨道的夹角或与 γ 相等, γ 为扫描断面与轨道的夹角或扫描断面与 X 轴正方向的夹角。

但是堆场往往存在干燥棚等设施, 或由于存在超高超导导致不能完全扫描等情况, 计算时需要考虑几个额外因素: 1) 根据堆场范围过滤不在此范围无效数据或消除测量中的噪声数据, 同时可以解决异形堆场问题, 即利用平面堆场范围过滤不在范围内的测点, 同时利用边界补充边界测点从而提高精度; 2) 对于不能扫描到的区域, 根据堆场范围边

界与同侧最后一个测点进行插密插补填充数据, 插密时采用线性算法, 这样会人为产生误差; 3) 对于采集中可能出现的异常数据需要进行滤波处理, 滤波处理方法请参见文献[11]介绍; 4) 由于堆场物料受到堆放时间、天气、物料品质等影响, 不同高度密度往往不一样, 在应用计算中, 考虑进行体积分层计算, 但计算方法同本文论述; 5) 对于堆场数据的分割需要结合 TIN 建网方法, 在分割后重新构网, 同时注意处理分割边界数据, 保证在分割线存在锐角的情况下不会出现重复覆盖。

4 试 验

依据等比缩放原则, 一般实际料场长度为 200 m, 实际采样间隔设置为 20 cm。试验中选取的固定体积的木箱子代替料场, 分别为 1.0、1.5、2.0 m, 选取的采样间隔应该为 $M=20/(200/2)=0.2$ cm。考虑到实际情况, 过低的采样间隔将会导致断面丢失, 因此, 试验选择的采样间隔为 $M_1=2$ cm。同时, 按照 2 cm 一个断面, 理论上 1 m 可以获取 50 个断面。实际获取的断面数必须为理论断面数的 90% 以上, 否则, 该组数据无效。绝对精度按照 $\bar{a} = |(V_t - V_f)| / V_f$ (式中 V_t 为测量值, V_f 为实际值) 计算。试验模型如图 5 所示。试验结果如表 1 所示。



图 5 长形堆场效果图

Fig. 5 Test site and devices

表 1 精度测量结果

Table 1 Results of the accuracy test

Distance / m ³	1st / m ³	2st / m ³	3st / m ³	result / %
1.0	1.001	0.986	1.004	0.3
1.5	1.494	1.500	1.496	0.2
2.0	2.001	2.011	2.012	0.4

同时, 试验中进行了增量绝对精度测试, 增量值测量精度, 即测量计算基于物体本次测量值与上次

测量值的差值以及本次实际值与上次实际值的差值,增量测量精度: $\bar{a} = |V_t - V_a| / V_a$, 式中 V_a 为实际增量值。分别选取了 0.5 m^3 和 1.0 m^3 两种增量测试,即量测测量料场体积差为 0.5 m^3 和 1.0 m^3 。 1.0 m^3 的木质箱体的实际测量体积为 0.997 m^3 , 1.5 m^3 的木质箱体的实际测量体积为 1.495 m^3 。由上述数据得到:两次测量差值为 $V = 1.497 - 0.997 = 0.5 \text{ m}^3$,而实际物体两次的差值为 0.5 m^3 ,吻合度达到 100% 。 1.0 m^3 的木质箱体的实际测量体积为 0.997 m^3 , 2 m^3 的木质箱体的实际测量体积为 2.008 m^3 。由上述数据得到,两次测量差值为 $V = 2.008 - 0.997 = 1.011 \text{ m}^3$,而实际物体两次的差值为 1.0 m^3 ,吻合度达到 98.9% 。该吻合度较差,可能与实际情况下,木质箱体之间衔接时的缝隙,导致拼装的箱体体积大于 2.0 m^3 有关。该结果也与 2.0 m^3 体积测量值偏大相吻合。

5 算法验证

利用上述算法,选定了多个火电企业进行实地测量验证(包括圆形堆场和长形堆场),在不同堆取

料机速度下,大臂与行走轨道成不同夹角进行连续 3 次测量,计算结果显示三维图形一致,其体积重复误差不超过 0.7% 。同样对圆形堆场,以不同旋转速度测量 3 次,进行计算后显示三维图形一致,其体积重复误差不超过 0.7% ,计算参数如表 2 所示。

表 2 堆场实际测量参数

Table 2 Yard measured parameters

	1st yard	2nd yard	3st yard
X_{\min}	-60	-60	5.5
X_{\max}	60	60	55.5
Y_{\max}	60	60	178.0
Y_{\min}	-60	-60	0
Range resolution	0.00009769	0.00009769	0.000731113
Angular resolution	N/A	N/A	0.000943396
Scanner height	34.50	34.63	18.67
Radius	38.00	37.50	32.37
Yard max radius	60.00	60.00	N/A
Yard min radius	5.00	5.00	N/A
Round height	4.50	5.00	N/A

矩形堆场采用每间隔 10 cm 采集一个断面,圆形堆场采用每 0.5° 采集一个断面,计算结果部分坐标数据如表 3 所示。最终效果如图 6,7 所示。

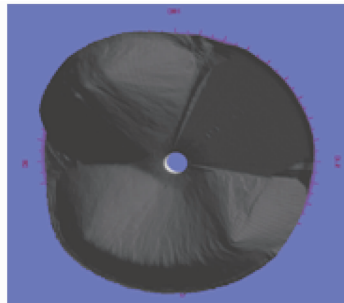
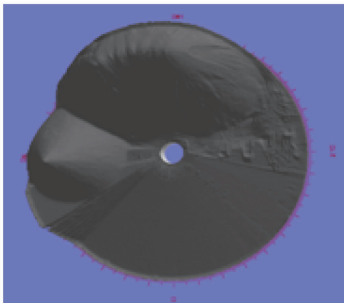


图 6 圆形堆场效果图

Fig. 6 Rectangular yard result

表 3 3 个料场计算结果

Table 3 Example for 3 yards calculated result

	1st result	2nd result	3rd result	error /%
1#	89474.464	89287.280	89407.231	<0.1
2#	136338.593	136460.525	136410.650	<0.1
3#	44504.935	44410.340	44401.550	<0.1



图 7 长形堆场效果图

Fig. 7 Circle yard result

6 结 论

采用高速激光扫描仪结合距离和角度传感器集成技术,可以实现非接触式测量,解决传统测量中人为影响大、周期长、精度低的问题。

1) 利用角度传感器实时记录测量断面的测量姿态,保证每个测量断面都具有测量角度,最终达到测量过程中载体大臂可以任意角度测量。

2) 长形堆场和圆形堆场计算方法统一。建立统一坐标系,推导不同类型堆场的计算模型,形成统一的坐标系和计算公式。

3) 高精度和高效率。设备载体可以工作速度进行测量,实现自动化测量,测量全程无需人工干预,测量数据可以利用公用通信网络传输到后台服

务器进行处理。根据测量需要可以调整采样点密度以便达到需要的精度。

实践测量效果表明,该方法是一种良好的非接触式测量大型堆场体积的方法,可以在大型钢铁、火电等企业进行推广应用,具有良好的应用前景。由于实际环境限制,本文没有进行大体积的绝对精度测量,这将是后续研究的重点。同时,随着无人值守料场的推广,实时测量和利用3G网络实时传输也将是后续研究的重点。

参 考 文 献

- 1 Liang Zhiyuan, He Guiming, Wu Yuanbao. Camera calibration in volume measurement of material stack based on computer vision [J]. *Application Research of Computer*, 2004, **21**(10): 134~138
梁志远, 贺贵明, 吴元保. 计算机视觉测量堆料体积中的摄像机定标方法[J]. 计算机应用研究, 2004, **21**(10): 134~138
- 2 Gao Zhi. 3D Reconstruction by Integrating LIDAR and Stereovision System[D]. Wuhan: Wuhan University, 2007
高 智, 激光雷达与视觉系统集成实现三维重建[D]. 武汉: 武汉大学, 2007
- 3 Cai Lailiang, Wu Kan, Zhang Shu. Application of point cloud plan fitting to deformation monitoring using 3D laser scanner[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2010, **35**(5): 231~232
蔡来良, 吴 侃, 张 舒. 点云平面拟合在三维激光扫描仪变形监测中的应用[J]. 测绘科学, 2010, **35**(5): 231~232
- 4 Tong Qingbin, Zhang Xiaodong, Ding Zhenliang *et al.*. Accurate measurement method for the thickness of quartz pendulous reed based on laser vision[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, **31**(6): 1358~1363
佟庆彬, 张晓冬, 丁振良等. 基于激光视觉的石英摆片厚度精密测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2010, **31**(6): 1358~1363
- 5 P. Q. Xu, X. H. Tang, S. H. Yao. Application of circular laser vision sensor (CLVS) on welded seam tracking[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, **205**(1-3): 404~410
- 6 Jia Fangxiu, Ding Zhenliang, Yuan Feng *et al.*. Real-time laser range finding system for moving target based on all-phase Fourier transform spectrum analysis [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 2928~2934
贾方秀, 丁振良, 袁 峰等. 基于全相位快速傅里叶变换谱分析的激光动态目标实时测距系统[J]. 光学学报, 2010, **30**(10): 2928~2934
- 7 Bian Xintian, Su Xianyu, Chen Wenjing. A novel three-dimensional coordinates measurement method based on inverse photogrammetry [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(7): 1832~1836
边心田, 苏显渝, 陈文静. 基于反向摄影的三维坐标测量方法[J]. 中国激光, 2010, **37**(7): 1832~1836
- 8 Xu Xinhua, Wang Qing, Qian Zheng. Automatic measurement system of invar rods based on image processing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(6): 1520~1522
徐新华, 王 青, 钱 峥. 基于图像处理的钢钢尺自动检测系统[J]. 光学学报, 2009, **29**(6): 1520~1522
- 9 Huang Fengshan. Study on the Key Technique of Single Camera 3D Coordinate Vision Measurement System Using a Light Pen [D]. Tianjin: Tianjin University, 2005
黄凤山. 光笔式单摄像机三维坐标视觉测量系统关键技术的研究[D]. 天津: 天津大学, 2005
- 10 Wu Qingyang, Li Jingzhen, Su Xianyu *et al.*. An approach for calibrating rotor position of three-dimensional measurement system for line-structure light [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(8): 1224~1227
吴庆阳, 李景镇, 苏显渝等. 线结构光三维测量系统中旋转轴的标定方法[J]. 中国激光, 2008, **35**(8): 1224~1227
- 11 Li Qingquan, Li Bijun, Chen Jing. Research on laser range scanning and its application [J]. *Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping*, 2000, **25**(5): 387~391
李清泉, 李必军, 陈 静. 激光雷达测量技术及其应用研究[J]. 武汉测绘科技大学学报, 2000, **25**(5): 387~391
- 12 Chen Jing, Li Qingquan, Li Bijun. Application research on laser-scanning surveying system [J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2001, **10**(1): 49~52
陈 静, 李清泉, 李必军. 激光扫描测量系统的应用研究[J]. 测绘工程, 2001, **10**(1): 49~52
- 13 Wang Jianjun, Xu Lijun, Li Xiaolu. Impacts of random attitude measurement errors on airborne laser scanning image [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(3): 0314001
王建军, 徐立军, 李小路. 姿态角随机测量误差对机载激光扫描成像的影响[J]. 中国激光, 2011, **38**(3): 0314001

栏目编辑:何卓铭