

基于激光传感的料堆体积测量在线标定方法

赵其杰^{1,2} 孟庆栩^{1*}

¹上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200072

²上海市智能制造及机器人重点实验室, 上海 200072

摘要 为提高激光传感三维测量系统的测量效率和系统适应性, 提出一种基于结构化参数的激光三维测量系统的在线标定方法。该方法通过对已知参数的结构化标定板进行扫描和测量, 分别建立其在激光扫描器坐标系和惯性测量传感器坐标系内的模型, 提取被扫描面上的直线特征, 利用结构参数约束条件解算出相对位姿关系。在不同工况下进行在线标定测量实验, 标定出系统初值并进行实物测量和实验分析, 在线测量的平均相对误差小于0.9%, 实验结果表明提出的标定测量方法具有较高的准确性和适应性。

关键词 测量; 体积测量; 激光三维测量; 在线标定; 结构参数

中图分类号 TN24

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.1208004

On-Line Calibration Method of Stockpile Volume Measurement Based on Laser Sensors

Zhao Qijie^{1,2} Meng Qingxu¹

¹School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China

²Shanghai Key Laboratory of Intelligent Manufacturing and Robotics, Shanghai 200072, China

Abstract In order to enhance the precision of the three-dimensional (3D) measurement system based on the laser sensors, an on-line calibration process based on structure parameter is proposed in this content. In this method, the structure object with known parameters is measured by the laser scanner, with its model being established within the laser scanner coordinate system and inertial measurement sensor coordinate system separately, and the linear feature on the scanned plane being extracted, then the relative position and orientation relationship is calculated with the constraint conditions of the structure parameters. The initial value calibration experiment is conducted on the 3D measurement system, then the initial values is used to conduct on-line calibration experiment, and the average relative error of measurement is below 0.9%, which means the calibration and measurement method is accurate and can adapt to different work conditions.

Key words measurement; volume measurement; 3D laser measurement; on-line calibration; structure parameter

OCIS codes 150.1488; 280.3420; 280.4750

1 引 言

大型堆积物料体积测量技术为钢铁、能源企业的原料物流管理提供必要的信息, 对于维护安全库存量和降低库存成本有重要意义^[1-2]。堆积物体的体积测量常用方法有激光传感测量^[3-4]、双目视觉测量^[5]等, 其中基于激光传感的测量方法具有非接触、远距离大范围测量的特点^[6-7], 适合于大型堆积物料的测量。激光传感三维(3D)体积测量系统主要由多种传感器与传动平台构成, 面对不同的实际测量环境, 系统各部分间存在位置、姿态等多种变化, 为了保证系统的可靠性和精确的测量结果, 对测量系统进行标定是非常必要的工作。

收稿日期: 2015-07-03; 收到修改稿日期: 2015-08-07

基金项目: 国家自然科学基金(61101177)

作者简介: 赵其杰(1977—), 男, 博士, 副教授, 主要从事传感检测与控制、机器视觉、人机交互及智能系统方面的研究。

E-mail: zqj@shu.edu.cn

*通信联系人。E-mail: mechmqx@yeah.net

针对基于激光传感的测量方法,国内外的一些学者在标定方面开展了一些工作,如通过引入同轴可见光源^[8]和借助硅电池^[9],寻取激光扫描线的扫描位置,借助全站仪在物方坐标系和像方坐标系下寻取同名控制点的方法建立约束关系进行系统标定;通过构建标准模板直接标定激光扫描装置的相对几何关系,如金字塔形标定模板^[10]、平面纸靶^[11]和特制铝板^[12],这类方法对提高测量精度有一定的效果,但比较适合离线初始状态标定。面向大型堆积物料体积测量的实际环境较为复杂^[13-14],测量系统除了进行离线初始标定外,测量过程的在线标定对提高测量效率和准确性很有意义。

本文针对大型堆积物料体积测量系统放置在高低不平地面情况下,测量过程中激光扫描器跟随传动平台摆动和震动等造成位置、姿态的变化情况,提出利用惯性测量传感器、激光传感器及具有定位功能的驱动平台等构建满足不同工况进行三维测量的系统。在具体信息处理方面,提出一种基于结构化标定板的标定方法,该方法通过对采集数据的特征提取并结合结构参数列出约束方程求出初始状态标定值,并利用初始状态值和测量过程中获取的系统位置姿态变化量实现在线标定和测量。

2 理论模型

通过对大型堆积物料积测量系统和过程分析,提出采用如图1所示模型的方案, $X_0Y_0Z_0$ 是某工况下测量系统基础坐标系,定义为传动平台位于初始位置时惯性测量传感器(IMU)的坐标系。激光扫描传感器(LMS)在传动平台驱动下,沿着堆积物料一侧运动并进行大范围扫描采集被测点相对LMS的空间坐标信息,根据惯性传感器、激光扫描传感器和定位传动平台的相对位姿,将物料上被测点的坐标转换至测量系统基础坐标系下,进而采用积分的方式实现物料体积测量。

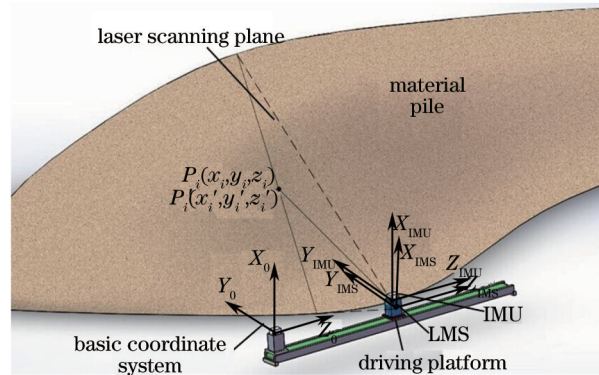


图1 测量方案模型

Fig.1 Measurement scheme model

为了进行体积积分计算,堆积物料上被测目标点 $P_i(x_i, y_i, z_i)$ 相对 LMS 坐标系需要变换到测量系统基础坐标系 $X_0Y_0Z_0$ 中,变换后的被测目标点坐标为 $P'_i(x'_i, y'_i, z'_i)$,采用(1)式所示积分模型得到料堆的体积 V :

$$V = \sum_{i=0}^N \Delta S_i(y'_i, z'_i) \cdot x'_i, \quad (1)$$

式中 ΔS_i 是点 P'_i 所在区域在底面的投影面积, N 为有效扫描点总数。 P_i 到 P'_i 的转换由图2所示,转换公式如下:

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = r_{IMU} + R_{IMU} \cdot [R \cdot \begin{bmatrix} x'_i \\ y'_i \\ z'_i \end{bmatrix} + p], \quad (2)$$

式中 r_{IMU} 是 IMU 在系统基础坐标系下的实时坐标值, R_{IMU} 是 IMU 的实时角度对应旋转矩阵,由 IMU 测量单元测得, R 是 LMS 相对 IMU 的旋转矩阵, p 是 LMS 相对 IMU 位移, R 和 p 作为系统初始状态。图2中 XYZ'_{LMS} 为 XYZ_{LMS} 坐标系平移后的坐标系,与坐标系 XYZ_{IMU} 各坐标轴夹角分别为 α 、 β 、 γ ,对应于两坐标系之间的旋转矩阵 R ,由标定得到。

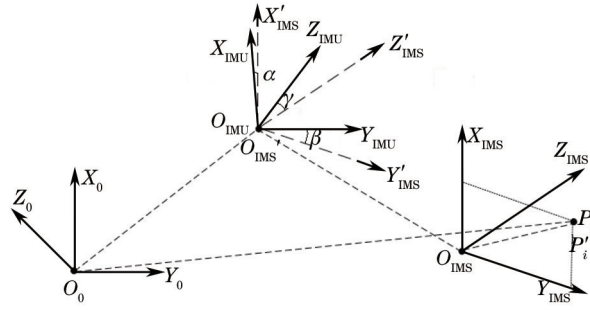


图2 坐标系转换模型

Fig.2 Coordinates transformation model

3 标定方法

标定内容包括初始状态的标定和在线标定过程。初始状态标定来完成基础坐标系的定义和测量系统内部参数的确定,标定完成后在整个测量过程中保持不变;在线标定用初始状态参数和传感器数据确定被测点在系统基础坐标系中的位置。系统中惯性测量传感器和激光扫描传感器的坐标系之间存在一个固定的转换关系:

$$\begin{bmatrix} r'_{IMU} \\ 1 \end{bmatrix} = [R|p] \cdot \begin{bmatrix} r_{LMS} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中 r'_{IMU} 为测量点在 IMU 坐标系下的坐标, R 和 p 是惯性测量传感器和激光扫描传感器坐标系转换的旋转矩阵和平移向量。其中 p 可以通过装配后仪器结构尺寸计算得出,所以重点标定的参数是 R ,即 LMS 相对 IMU 的俯仰角 α 、侧翻角 β 和偏航角 γ 。本文提出基于结构特征的标定方法,如图 3 所示。首先静态采集激光扫描传感器数据进行直线拟合,根据结构特征和几何约束列出约束方程,然后动态采集激光测距传感器的数据进行标定板偏角计算,最后结合惯性测量传感器数据进行角度计算。

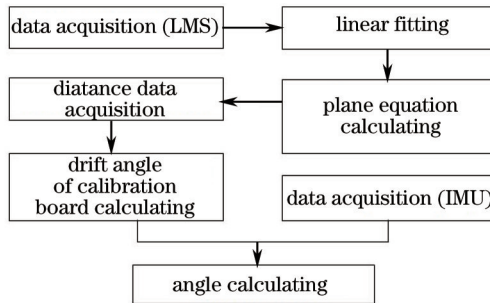


图3 基于结构化标定板的标定算法框架

Fig.3 Diagram of calibration algorithm based on structured object

3.1 俯仰角 α 和侧翻角 β 的标定

分别对不同结构参数的标定板平面进行扫描,如图 4 所示,图中激光扫描器坐标系经过平移后使原点与惯性测量传感器坐标原点重合。激光扫描传感器在同一位置对三个平面 P_1 、 P_2 、 P_3 进行扫描,对获取的扫描点用 RANSAC 法^[15-16]拟合出直线方程,并设立对应的平面方程,直线 l_i 所在平面的法向量分别为 (A_i, B_i, t_i) ,其中 A_i 、 B_i 为 RANSAC 法拟合数值, t_i 为未知数, $i=1,2,3$ 。根据标定板结构参数由余弦定理可得出如下约束方程:

$$\begin{cases} \cos \theta_1 = \frac{|A_1 A_2 + B_1 B_2 + t_1 t_2|}{\sqrt{A_1^2 + B_1^2 + t_1^2} \cdot \sqrt{A_2^2 + B_2^2 + t_2^2}} \\ \cos \theta_2 = \frac{|A_1 A_3 + B_1 B_3 + t_1 t_3|}{\sqrt{A_1^2 + B_1^2 + t_1^2} \cdot \sqrt{A_3^2 + B_3^2 + t_3^2}} \end{cases}, \quad (4)$$

式中 θ_1 和 θ_2 分别为标定板结构参数。根据三平面交线统一的约束关系可列出下式:

$$\frac{B_1 t_2 - B_2 t_1}{B_1 t_3 - B_3 t_1} = \frac{A_2 t_1 - A_1 t_2}{A_3 t_1 - A_1 t_3} = \frac{A_1 B_2 - B_1 A_2}{A_1 B_3 - B_3 A_3}, \quad (5)$$

解出未知数 t_i , 根据标定板底面水平可以计算出 LMS 的俯仰角 α_{LMS} 和侧翻角 β_{LMS} 以及标定板面在 LMS 坐标系里的偏转角 γ_{LMS} :

$$\begin{cases} \alpha_{LMS} = \arctan \frac{(B_1 \cdot t_2 - B_2 \cdot t_1)B_1 - (A_2 \cdot t_1 - A_2 \cdot t_1)A_1}{(A_2 \cdot t_1 - A_2 \cdot t_1)t_1 - (B_1 \cdot t_2 - B_2 \cdot t_1)B_1} \\ \beta_{LMS} = \arctan \frac{(A_1 \cdot B_2 - A_2 \cdot B_1)A_1 - (B_1 \cdot t_2 - B_2 \cdot t_1)t_1}{(A_2 \cdot t_1 - A_2 \cdot t_1)t_1 - (B_1 \cdot t_2 - B_2 \cdot t_1)B_1} \\ \gamma_{LMS} = \arctan \frac{t_1}{B_1} \end{cases} \quad (6)$$

结合 IMU 的倾角信息 (α_{IMU} 、 β_{IMU} 、 γ_{IMU}), 根据激光扫描器与惯性测量传感器分别相对水平面的俯仰角和侧翻角之差可标定出二者之间的相对俯仰角 α 和侧翻角 β :

$$\begin{cases} \alpha = \alpha_{IMU} - \alpha_{LMS} \\ \beta = \beta_{IMU} - \beta_{LMS} \end{cases} \quad (7)$$

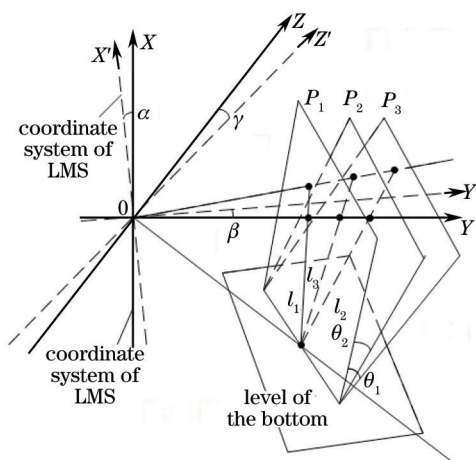


图4 俯仰角和侧翻角标定原理
Fig.4 α and β calibration principle

3.2 偏航角 γ 标定

由传动平台移动位移 d , 运动前后 LMS、IMU 的数据以及标定板上激光光斑 A 、 B 位置, 计算激光测距传感器的数据之差 d_{AB} , 原理如图 5 所示, 其中 AC 平行于运动方向, O 和 O' 分别为运动前后 IMU 坐标系原点位置。在 $\triangle ABC$ 中由余弦定理可计算出标定板与平台运动方向角 γ_c :

$$\cos \gamma_c = \frac{l_{AB}^2 + d^2 - d_{AB}^2}{2 \times l_{AB} \cdot d} \quad (8)$$

结合 3.1 节中计算出的 γ_{LMS} , $|\gamma_{LMS} - \gamma_c|$ 即激光扫描器相对运动方向的偏转角; 由点 O' 在 IMU 坐标系 YOZ 中的坐标可知 IMU 前进坐标轴相对运动方向的偏转角 γ_m 。以运动方向为基准可标定出 LMS 相对 IMU 的偏航角 γ :

$$\gamma = \gamma_m - |\gamma_{LMS} - \gamma_c| = \arctan \frac{Y'}{Z'} - |\gamma_{LMS} - \gamma_c| \quad (9)$$

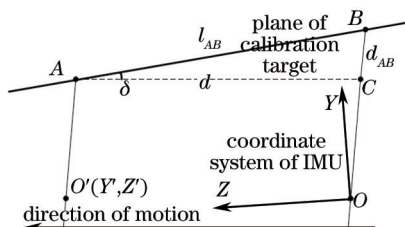


图5 偏航角标定原理
Fig.5 γ calibration principle

4 实验和分析

根据提出方法搭建激光三维测量系统如图6所示,该系统由二维激光扫描器、惯性测量传感器、激光测距传感器、结构化标定版、直线运动平台及驱动等装置组成。该测量系统在二维激光扫描器 LMS511 的基础上,采用步进电机驱动滚珠丝杠实现激光扫描器的直线运动,以获取场景三维点云数据。在上述三维测量系统中,惯性测量传感器能够实时标定激光扫描器的姿态。

标定实验包括初始状态标定和在线实时标定。在此实验平台上,针对 IMU 和 LMS 相对位姿进行初始状态标定实验。首先将结构化标定板底面水平放置在测量系统的场景中,用 LMS 采集不同结构参数标定板的表面点坐标,并用 RANSAC 方法拟合直线方程,拟合结果如图7所示,计算 LMS 相对水平面的夹角以及相对标定板的偏转角;用传动平台上的激光测距传感器测量其到标定板不同点的距离并记录,采集 IMU 的姿态信息和运动时的加速度信息,计算 IMU 坐标系和运动方向的夹角;最后根据标定方法(3)式计算 LMS 与 IMU 的相对角度和其坐标变换矩阵。

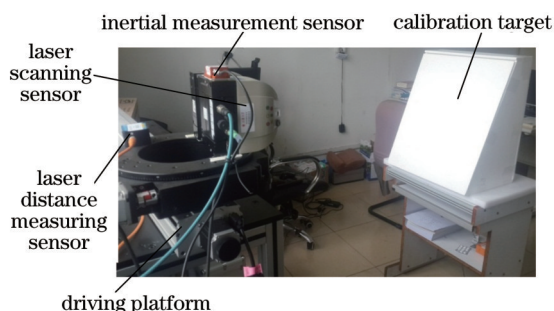


图6 激光三维测量系统

Fig.6 3D laser measurement system

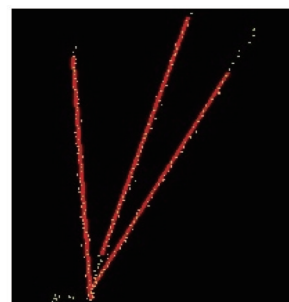


图7 直线拟合结果

Fig.7 Linear fitting results

表1 初始状态标定结果

Table 1 Calibration result of initial values

Deflection angle (RPY) / (°)	[0.1243 -3.7614 -0.1339]
Rotation matrix / R	$\begin{bmatrix} 0.9978 & 0.0656 & 0.0023 \\ -0.066 & 0.9978 & 0.0022 \\ -0.0022 & -0.0023 & 0.9999 \end{bmatrix}$
Translation vector / (p/mm)	[-84.50 57.05 112.75]

上述标定出的旋转矩阵 R 和平移向量 p 作为系统坐标变换中激光扫描传感器到惯性测量传感器相对

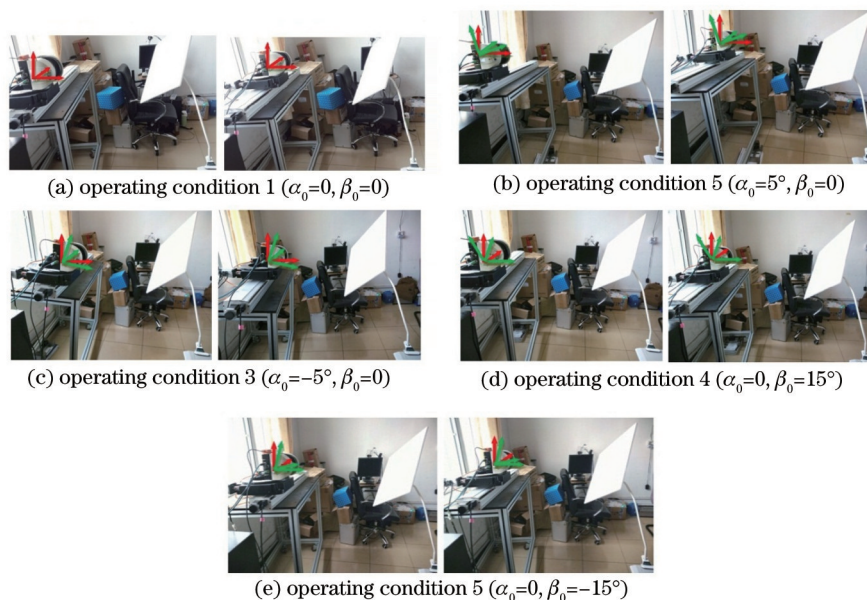


图8 实物测量实验

Fig.8 Actual measurement experiment

位姿的初值。利用提出的在线测量方法,针对测量时可能出现不同程度俯仰、倾斜的工况(OC)进行实验。如图8所示,每种工况分别包含初始状态(左)和测量过程中的状态(右),初始状态俯仰角 α_0 范围为 $\pm 5^\circ$,侧翻角 β_0 范围 $\pm 15^\circ$,红色坐标系为测量系统在相对平整的地面上的坐标系,绿色坐标系为测量系统在每种工况下的当前坐标系。实验中对一矩形被测对象的四个角和四条边长分别进行在线标定测量,通过对角度和边长测量结果的分析判断标定的效果。矩形目标的边长分别为450 mm和500 mm,四个角为直角,利用激光传感扫描目标表面获取数据,进行拟合处理测得角度和边长。表2为记录的实测角度和边长,其中A1~A4为实测角,L1~L4为实测边长,并利用真实值与测量值的差除以真实值得到相对误差,通过相对误差从宏观上反映不同工况下的标定测量效果,如图9所示。

表2 测量结果

Table 2 Measurement results

	Measured value of angle /($^\circ$)				Measured value of length /mm			
	A1	A2	A3	A4	L1	L2	L3	L4
OC 1	89.36	89.39	90.24	90.34	449.35	504.82	453.22	495.25
OC 2	90.46	89.34	90.52	89.68	452.42	504.63	444.14	496.02
OC 3	90.27	89.58	90.63	89.33	455.07	502.82	454.83	496.55
OC 4	89.56	90.66	90.58	89.48	455.47	504.87	454.47	496.21
OC 5	90.62	90.376	89.52	89.78	454.96	503.99	451.45	495.11
Average	90.05	89.87	90.30	89.72	453.45	504.23	451.62	495.83

图9(a)、(b)为每种工况下被测对象角度和边长的测量相对误差,尽管在不同工况下有一定的波动,但测量角度和边长相对误差分别小于0.8%和1.2%。图9中(c)、(d)为被测对象的各角度和边长在五种工况下的测量相对误差的平均值,从表2的实测值和图9中平均相对误差来看,角度测量和边长测量的平均相对误差低于0.9%。该测量系统具有平动和转动机构,扫描角度为 $0^\circ\sim 190^\circ$,可以测量距测量系统0~80 m范围内的物体,对于大型堆积物体来说,这样的相对误差是比较低的。尽管不同测量方法在误差的评价方面有差异,但与车载式激光测量方法^[1,8-9]相比,提出的方法在测量准确性方面与传统方法接近,但该方法可以适应多工况下快速标定应用。实验中测量误差主要由传感器精度、信号处理方法等引起,通过提高传感器精度及改进信号处理方法将会得到更为准确的测量结果,实验表明提出的方法具有较好的适应性和准确性。

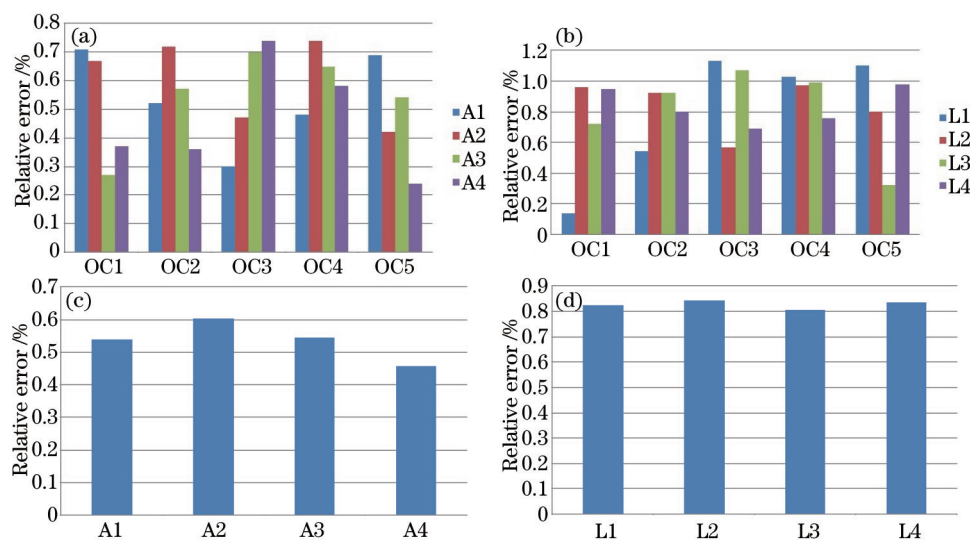


图9 测量结果相对误差对比

Fig.9 Relative error comparison of measurement results

5 结 论

大型堆积物料积测量系统是冶金、能源等企业物流自动化管理系统重要组成部分,为企业资源管理及时提供库存数据。为了提高测量系统在复杂环境下的适应性,提出了一种基于激光三维测量系统的在线标

定方法,使用惯性传感器实时标定激光扫描器的姿态。首先对系统初值进行标定,通过对结构化标定板的扫描和特征提取,根据不同坐标系下同样特征的不同描述列出参数方程,求解出系统的旋转矩阵,结合平移向量完成初值标定工作。使用完成初值标定的测量系统进行在线标定测量实验,通过实测具有确定参数的对象进行实验,测量结果相对误差达到传统单一工况下的精度,表明提出的方法具有较好的准确性和适应性。另外,实验主要在实验室进行,验证了标定测量方法的有效性,但未能对大型堆积物体进行测量,在后期工作中将对提出的信息处理方法进行改进,并针对实际堆积物体进行体积测量的研究。

参 考 文 献

- 1 Wang Haibo, Zhang Dejin, He Li. Research on large stockyard laser measurement methods[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0508002.
王海波,张德津,何莉.大型露天料场激光测量方法研究[J].中国激光,2013,40(5):0508002.
- 2 Kim Byung-In, Koo Jeongin, Park Brian Sung. A raw material storage yard allocation problem for a large-scale steelworks[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 41(9): 880-884.
- 3 Fojtik D Measurement of the volume of material on the Conveyor Belt measuring of the volume of wood chips during transport on the Conveyor Belt using a laser scanning[C]. 15th International Carpathian Control Conference (ICCC), 2014: 121-124.
- 4 Diskin Y, Asari, V K. Dense 3D point-cloud model using optical flow for a monocular reconstruction system[C]. 2013 IEEE Applied Imagery Pattern Recognition Workshop: Sensing for Control and Augmentation, 2013: 1-6.
- 5 Gui-ji Tang, Tao Peng. Non-contact measurement of object based on binocular stereo vision[C]. 5th International Congress on Image and Signal Processing (CISP), 2012: 267-270.
- 6 Zhou Sen, Guo Yongcai, Gao Chao. Development of a laser-based geometric measurement system for large-scale conical[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 0508008.
周森,郭永彩,高潮.基于激光扫描的大尺寸圆锥体几何测量系统[J].中国激光,2014,41(5):0508008.
- 7 Hu Jinzhong, Yu Xiaofen, Ren Xing, *et al.*. Optical layout of three-dimensional coordinate measurement system based on laser multi-lateration[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(7): 0708001.
胡进钟,余晓芬,任兴,等.基于激光多边法的坐标测量系统最佳布局[J].中国激光,2014,41(7):0708001.
- 8 Li Lei, Yan Jie, Ruan Youtian. Calibration of vehicle-borne laser mapping system[J]. Chinese Optics, 2013, 6(3): 353-358.
李磊,严洁,阮友田.车载激光测绘系统的标定[J].中国光学,2013,6(3):353-358.
- 9 Kang Yongwei, Zhong Ruofei, Wu Yu. Research of calibrating vehicle laser scanner's external parameters[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(S3): 249-253.
康永伟,钟若飞,吴昊.车载激光扫描仪外参数标定方法研究[J].红外与激光工程,2008,37(S3):249-253.
- 10 Guo Yang, Du Zhengchun, Yao Zhenqiang. Calibration method of three dimensional (3D) laser measurement system based on projective transformation[C]. 2011 Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA), 2011, 1: 666-671.
- 11 Lao Dabao, Yang Xueyou, Zhu Jigui, *et al.*. Optimization of calibration method for scanning planar laser coordinate measurement system [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(4): 870-877.
劳达宝,杨学友,郝继贵,等.扫描平面激光坐标测量系统校准方法的优化[J].光学精密工程,2011,19(4):870-877.
- 12 González-Jorge H, Riveiro B, Armesto J, *et al.*. Procedure to evaluate the accuracy of laser-scanning systems using a linear precision electro-mechanical actuator[J]. Sci Meas Technol, 2012, 6(1): 6-12.
- 13 Liu Zhengjun, Li Qi, Wang Qi. Target recognition of coherent lidar range image using feature selection[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(8): 0814003.
刘正君,李琦,王骥.基于特征选择算法的相干激光雷达目标识别[J].中国激光,2013,40(8):0814003.
- 14 Hebel Marcus, Stilla Uwe. Simultaneous calibration of ALS systems and alignment of multiview LiDAR scans of urban areas[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(6): 2364-2379.
- 15 Bazin Jean-Charles, Pollefeys Marc. 3-line RANSAC for orthogonal vanishing point detection[C]. 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2012: 4282-4287.
- 16 Haifeng L, Rong C. Optimal line feature generation from low-level line segments under RANSAC framework[C]. 26th Chinese Control and Decision Conference (CCDC), 2014: 4589-4593.