

基于基准面提取的物料体积在线测量方法<sup>\*</sup>赵其杰<sup>1,2</sup>, 孟庆翔<sup>1</sup>, 张曦<sup>1,2</sup>, 卢建霞<sup>1</sup>, 屠大维<sup>1,2</sup>

(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:** 针对测量装置与物料放置底面相对姿态变化影响测量结果的问题, 提出一种实时校正及积分基准面提取的物料体积测量方法。该方法通过姿态传感器实时检测激光传感器的姿态, 并获取被测物体表面点云, 对点云归一化处理, 多次迭代拟合确定积分基准面及被测物料边界, 进行三维重建, 最后提出基于剖分原理的三棱微元逼近的体积计算方法。利用提出的测量方法搭建测量系统, 在多种工况下进行实测实验和对比分析, 测量结果的平均相对误差为 1.69%, 表明提出的方法具有较好的适应性及准确性, 为物料体积测量提供了新思路。

**关键词:** 在线测量; 三维点云; 模型重建; 体积计算

**中图分类号:** TH39 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

On-line measurement method for material volume based  
on reference plane extractionZhao Qijie<sup>1,2</sup>, Meng Qingxu<sup>1</sup>, Zhang Xi<sup>1,2</sup>, Lu Jianxia<sup>1</sup>, Tu Dawei<sup>1,2</sup>(1. School of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China;  
2. Shanghai Key Laboratory of Intelligent Manufacturing and Robotics, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the relative posture variation of the measurement equipment and the material stacking ground influences the measurement result, a material volume measurement method is proposed based on the real-time calibration and extraction of integral reference plane. In this method, the point cloud of the measured object surface is gathered by the laser scanning sensor, which is calibrated by the gesture sensor, then the normalization processing of the point cloud is conducted for easier retrieval. Through several times of iteration fitting, the integral reference plane and the boundary of the material to be measured are determined, and the three dimensional reconstruction is carried out. Finally, a volume calculation method based on the dividing principle and triangular infinitesimal element approximation is proposed. A measurement platform was set up based on the proposed method, and measurement experiment and comparison analysis under different working conditions were conducted on the built platform. The experiment result shows that the average relative error of the measurement result is 1.69%, which indicates that the proposed method has good adaptability and accuracy, and provides a new idea for the stacked material volume measurement.

**Keywords:** online measurement; 3D point cloud; model reconstruction; volume calculation

## 1 引言

物料体积的测量是工矿企业、港口码头等领域进行库存盘点和物料管理重要的工作。其中堆积物体是典型的物料体积测量, 如钢铁冶金企业和矿石企业对物料体积的测量<sup>[1]</sup>、港口码头对集装箱及堆积货物量<sup>[2]</sup>或船体<sup>[3]</sup>的测量、甚至集

装箱或船舱内货体积的测量<sup>[4]</sup>都为合理利用资源和安排生产, 提高生产效率发挥了重要作用。根据测量原理的不同, 物料体积测量技术主要分为激光传感测量<sup>[5]</sup>和计算机视觉测量<sup>[6-7]</sup>。其中激光测量具有非接触、长距离和抗干扰的优点<sup>[8-10]</sup>, 更适合在户外大范围测量的应用。

在物料体积激光测量方面, 国内外的学者已经展开了一些工作, 如采用角坐标正交测量法<sup>[11]</sup>通过机械安装

收稿日期: 2015-10 Received Date: 2015-10

<sup>\*</sup> 基金项目: 国家自然科学基金(61101177, 51205243) 项目资助

保证运动方向和传感器扫描方向正交以完成测量数据的坐标变换;校正测量法<sup>[12]</sup>通过姿态传感器实时校正激光传感器姿态以完成数据的采集。在获取被测物体的点云之后采用剖分法<sup>[13-14]</sup>、凸包<sup>[15]</sup>、切片法<sup>[4]</sup>等方法进行体积计算,其中剖分法和切片法是分别通过棱柱微元和片状微元进行积分求解,而凸包法通过最小包络体估算被测物体体积。这些方法能够有效地采集被测物体表面点,但是在体积计算时采用给定相对测量装置高度的方法确定积分基准面,不能校正传感器姿态整体漂移或者给定高度不准确而造成的测量误差,对于采用角坐标测量原理的激光测量系统对上述误差比较敏感<sup>[11-12]</sup>。因此,在进行体积计算时采用自适应积分基准面提取对提高测量准确性有很大意义。

针对测量时不能实时校正测量设备姿态以及计算时积分底面不准确造成测量结果不准确及测量装置适应性差等问题,提出一种由姿态传感器校正激光扫描器的测量方法,并针对该测量方法设计一种基于积分基准面提取的物料体积计算算法。该方法对点云数据进行归一化检索处理和筛选,拟合出积分基准面并提取被测物体边缘,对提取出的被测物上的点云数据进行剖分计算,用三棱柱微元逼近的体积算法计算被测物体体积。

## 2 测量方法

通过对物料体积测量计算方法的分析,提出如图1所示的测量方案,系统主要由激光扫描传感器(laser measurement sensor, LMS)、惯性测量传感器(inertial measurement unit, IMU)、传动平台等构成, $X_0Y_0Z_0$ 是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的坐标系。激光扫描传感器在传动平台驱动下,沿着物料一侧运动并进行大范围扫描采集被测点 $P_i$ 相对LMS的空间坐标信息 $(x'_i, y'_i, z'_i)$ ,根据惯性传感器、激光扫描传感器和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得到三维点云数据。对三维点云数据进行归一化和去噪处理,利用物体边缘信息进行多次优化拟合确定积分基准面,并进行三维重建计算被测物体体积,信息处理过程如图2所示。

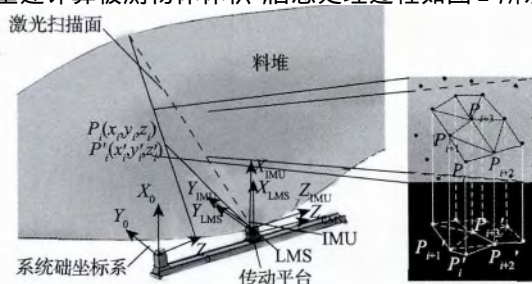


图1 测量方法模型

Fig. 1 Measurement method model

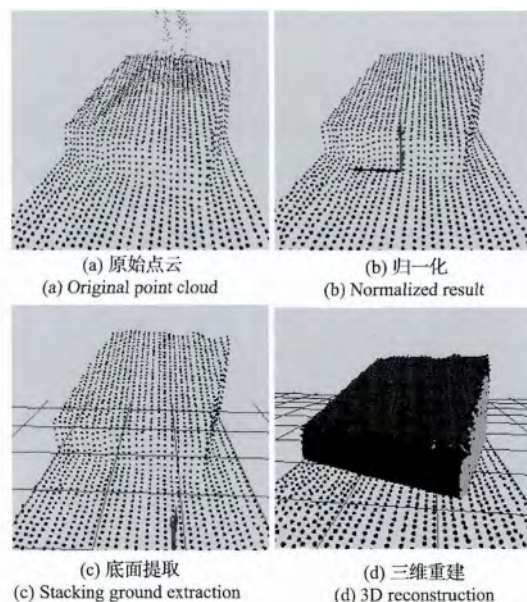


图2 数据处理流程

Fig. 2 Data processing flow

体积计算采用基于剖分的微元积分法计算,图1中右侧点 $P_i, P_{i+1}, P_{i+2}, P_{i+3}$ 是三角剖分的任意两个相邻三角形的四顶点,点 $P'_i, P'_{i+1}, P'_{i+2}, P'_{i+3}$ 是对应的在堆积平面上投影点,由这些点形成的三棱柱是被测物的体积微元 $V_i, V_{i+1}$ ,当剖分密度足够大时,微元构成的体积之和为被测物体体积。因此,被测物体体积通过积分得:

$$V = \sum_{i=0}^{n-1} V_i \quad (1)$$

式中: $V$ 是被测物的体积, $V_i$ 是剖分结果及其投影点构成的体积微元, $n$ 是三角剖分出的三角形的个数。

由于激光传感器、被测对象处于不同空间中,因而,需要将被测目标点坐标归一化转换至测量系统基础坐标系,如图3所示。堆积物料上被测目标点 $P'_i(x'_i, y'_i, z'_i)$ 点相对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 $P_i(x_i, y_i, z_i)$ ,变换关系为:

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

式中: $R$ 是LMS相对IMU的旋转矩阵, $p$ 是LMS相对IMU位移, $R$ 和 $p$ 作为系统初始状态可借助工具一次标定<sup>[16-17]</sup>得到, $r_{\text{IMU}}$ 是IMU在系统基础坐标系下的实时坐标值, $R_{\text{IMU}}$ 是IMU的实时角度对应旋转矩阵,由IMU测量单元测得。

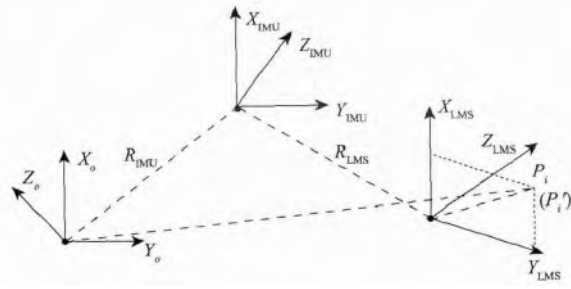


图 3 坐标系转换模型

Fig. 3 Coordinate system transformation model

### 3 信息处理算法

由传感器测量采集的信息包括环境噪声、目标对象等,利用提出的数据处理思路,重点进行噪声处理、边界及积分基准面确定和三维重建及体积积分计算处理。

为了方便散乱点云数据处理需首先进行归一化操作。根据激光传感器的扫描规则,建立基于扫描线的检索机制,如图 4 所示,将点云按照扫描采集时每一条扫描线进行处理,定义  $L_i$  是第  $i$  条扫描线,  $PC$  是点云集合,  $P_{ij}$  为点云中第  $i$  条扫描线上第  $j$  个点,  $LN$  是点云中扫描线条数,  $PN_i$  为第  $i$  条扫描线上点的个数,则点云集合及检索方法表示为:

$$PC = \{P_{ij} \in L_i \mid L_i = \sum_{j=0}^{PN_i} P_{ij}, 0 \leq i \leq LN, 0 \leq j \leq PN_i\} \quad (3)$$

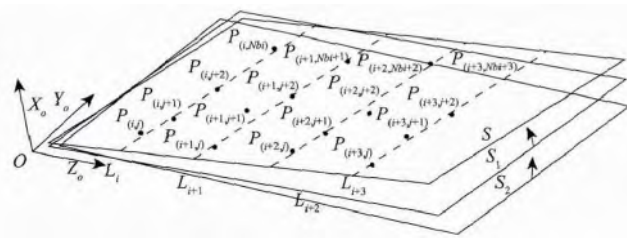


图 4 积分基准面提取

Fig. 4 Extraction of the integral reference plane

基于上述检索机制,对点云中被测区域进行裁剪,去除环境噪声,先采用给定阈值初定位,再根据最高点原则进一步筛选。定义  $PC_{cut}$  为裁剪后的点云数据集,  $x_p$  是点  $P$  的  $x$  坐标值,  $X_{min}$  和  $X_{max}$  分别是被测区域最大和最小范围阈值;根据测量方法特性可知,单侧测量时最高点对其后面区域造成遮挡,所以被测区域点云局部最高点即为被测物点云上边界,设定  $PC_{flt}$  是筛选后的被测区域点云,  $Nmax_i$  是第  $i$  条直线最高点的序号,则选取的有效点云集为:

$$PC_{cut} = \{P \in PC \mid X_{min} < x_p < X_{max}\} \quad (4)$$

$$PC_{flt} = \{P_{ij} \in PC_{cut} \mid \sum_{i=0}^{LN} \sum_{j=0}^{Nmax_i} P_{ij}\} \quad (5)$$

积分基准面提取采用选取种子点拟合直线和平面,按照点到直线或平面的距离阈值滤除非底面点,积分基准面提取采用多次拟合迭代的方法,设定种子点  $PC_{seed}$ ,按照给定比例的原则对堆积物前端堆积底面区域进行选取  $k$  为选定比例,种子点集为:

$$P_{seed} = \{P_{ij} \in PC_{flt} \mid \sum_{i=0}^{LN} \sum_{j=0}^{Nmax_{i,k}} P_{ij}\} \quad (6)$$

利用初步选取的种子点进行直线拟合进一步确定基准面包含的点集(见图 4),  $L_i (i = 0, 1, 2, \dots)$  为拟合出的直线。定义  $d_{ij}$  是点  $P_{ij}$  到第  $i$  条直线的距离,  $D_{thd}$  为扫描线上点到直线的距离阈值,若  $d_{ij} < D_{thd}$  则认定当前点属于基准面,设定  $PC_{DN1}$  为筛选所得的基准面点集,选取方法表示为:

$$PC_{GN1} = \{P_{ij} \in PC_{seed} \mid d_{ij} < D_{thd}\} \quad (7)$$

$$d_{ij} = A_i(P_{ij} \cdot x - x_i) + B_i(P_{ij} \cdot y - y_i) \quad (8)$$

式中:  $P_{ij} \cdot x$ 、 $P_{ij} \cdot y$  分别为点  $P_{ij}$  的  $x$  和  $y$  坐标,  $A_i$  和  $B_i$  分别为第  $i$  条拟合的扫描直线  $L_i$  方程的系数。

利用筛选所得的基准面点集  $PC_{GN1}$  再次进行平面拟合,得到初次拟合平面  $S_0$ ,如图 4 下方平面所示。定义  $d_{ij2p}$  是点  $P_{ij}$  到拟合平面的距离,  $D_{thdp}$  为筛选所得点到拟合平面的距离阈值,若  $d_{ij2p} < D_{thdp}$  则认定该点属于后续基准面,多次迭代筛选直到前后两次拟合平面法向量夹角小于阈值  $Th_{agl}$ ,得到一组优选基准面点集  $PC_{GN}$ ,并拟合得到优化后的最终积分基准面  $S$ (如图 4 中上方面),确定方法表示为:

$$PC_{GN} = \{P_{ij} \in PC_{flt} \mid d_{ij2p} < D_{thdp}\} \quad (9)$$

$$d_{ij2p} = A_0(P_{ij} \cdot x - x_0) + B_0(P_{ij} \cdot y - y_0) + C_0(P_{ij} \cdot z - z_0) \quad (10)$$

式中:  $P_{ij} \cdot x$ 、 $P_{ij} \cdot y$ 、 $P_{ij} \cdot z$  分别为点  $P_{ij}$  的  $x$ 、 $y$ 、 $z$  坐标,  $A_0$ 、 $B_0$ 、 $C_0$  分别为拟合平面方程系数。

被测区域点云中每一条扫描线的堆积底面点的最后序列点即底面边缘,边缘序列之后的点可以认定为被测物上的测量点  $PC_{obj}$ ,则:

$$PC_{obj} = \{P_{ij} \in PC_{flt} \mid \sum_{i=0}^{LN} \sum_{j=Nb_i}^{Nmax_i} P_{ij}\} \quad (11)$$

针对筛选出的被测物点云提出一种基于剖分三棱微元逼近的体积算法,如图 5 所示。其中  $P_1$  是 3 点中到积分基准面距离最近的一点,  $P'_2$ 、 $P'_3$  分别是点  $P_2$ 、 $P_3$  在通过  $P_1$  点平行于积分基准面的平面上的投影点。因此体积微元可细分为 3 部分,上层曲面片、中部四棱锥和下部三棱柱,即:

$$V = \sum_{i=0}^{n-1} (V_{1i} + V_{2i} + V_{3i}) \quad (12)$$

$$V_{2i} = \frac{1}{2} h_{P_1} \cdot S_{P_2 P_3 P'_2 P'_3} \quad (13)$$

$$V_{3i} = |P_1 P_{1j}| \cdot S_{\Delta P_1 P_2 P_3} \quad (14)$$

式中:在图5(b)四棱锥中 $h_{P_1}$ 是点 $P_1$ 到底面 $P_2 P_3 P'_3 P'_2$ 的高,由四点计算出底面平面方程,由点到平面的距离确定高 $S_{P_1 P_2 P_3 P'_3}$ 是四边形 $P_2 P_3 P'_3 P'_2$ 的面积,在图5(c)中三棱柱中, $|P_1 P_{1j}|$ 是点 $P_1$ 到积分基准面的距离, $S_{\Delta P_1 P_2 P_3}$ 是 $\Delta P_1 P_2 P_3$ 的面积。 $V_{1i}$ 对应的体积单元,考虑到其在基于剖分的体积计算中有类似积分中高阶无穷小,且随着其在不同位置的不同曲率,其值有正有负, $V_{1i}$ 可以忽略。

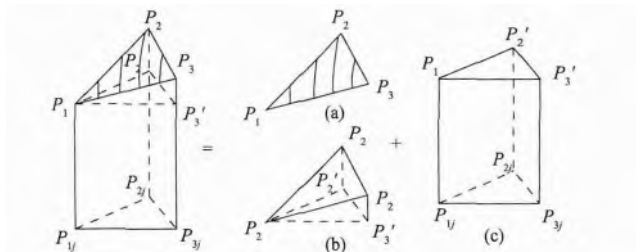


图5 三棱体积微元划分

Fig. 5 Triangular infinitesimal element volume partitioning

## 4 实验

实验环境和系统如图6所示,该系统由激光扫描器、惯性测量传感器、传动平台、计算机以及数据电缆等装置组成。使用SICK LMS511型号的激光扫描器,分辨率为 $0.5^\circ$ ,测距精度为 $\pm 24$  mm;惯性测量传感器型号为XSENS MTi-30,分辨率为 $0.01^\circ$ ;传动平台定位精度为 $0.02$  mm,重复定位精度为 $0.005$  mm。惯性传感器实时检测标定激光扫描器的姿态获取被测物体表面点坐标,

在传动平台驱动下完成对三维信息的采集,利用提出的测量方法进行坐标变换,将采集的点云转换到统一坐标系下实现信息处理、三维重建和体积计算。

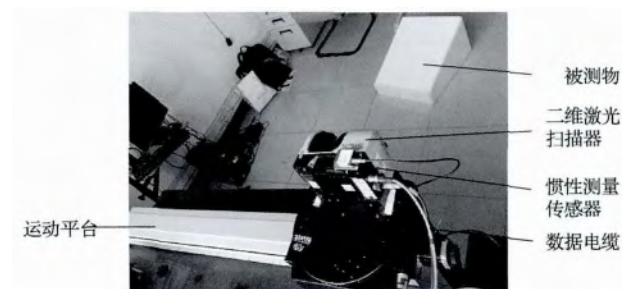


图6 激光传感体积测量系统

Fig. 6 Laser sensing volume measurement system

由信息处理算法分析可知,堆积物的几何外观对于文中提出的底面提取方法和体积微元积分算法没有显著影响,因此在实验室环境中用多面体模拟堆积物体堆放情况进行测量试验。实验环境温度为 $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ ,被测物体到测量装置的距离为 $2 \sim 4$  m,被测物体长宽高尺寸为 $0.5$  m左右,对5种箱体堆积在地面从不同角度进行测量其体积,测量过程中测量装置保持相同的状态。运动平台带动二维激光扫描器运动进行三维场景扫描,同步获取激光扫描器和惯性测量传感器的数据,经过坐标变换后得到被测数据点云,扫描完成后执行点云处理及体积计算。利用提出的体积计算方法计算被测物体体积,实验过程记录了测量值并计算了相对误差和绝对误差,如表1所示,图7为数据处理过程、模型重建和体积计算的部分结果。

表1 实验数据统计

Table 1 Experiment result

对象	实际体积/ $\text{m}^3$	对象方位序列	测量体积/ $\text{m}^3$	绝对误差/ $\text{m}^3$	相对误差(%)
测量对象1	0.062 7	1	0.061 5	0.001 2	1.9
		2	0.061 3	0.001 4	2.3
		3	0.0617	0.001 0	1.7
测量对象2	0.047 7	4	0.049 1	0.001 4	2.8
		5	0.048 1	0.000 4	0.81
		6	0.048 8	0.001 1	2.3
测量对象3	0.116 6	7	0.115 2	0.001 4	1.2
		8	0.114 6	0.002 0	1.8
		9	0.113 7	0.002 9	2.6
测量对象4	0.145 2	10	0.142 4	0.002 8	2.0
		11	0.141 4	0.002 7	2.7
		12	0.141 7	0.001 7	2.4
测量对象5	0.116 7	13	0.119 0	0.002 0	1.7
		14	0.118 4	0.001 4	1.2
		15	0.118 7	0.001 7	1.5



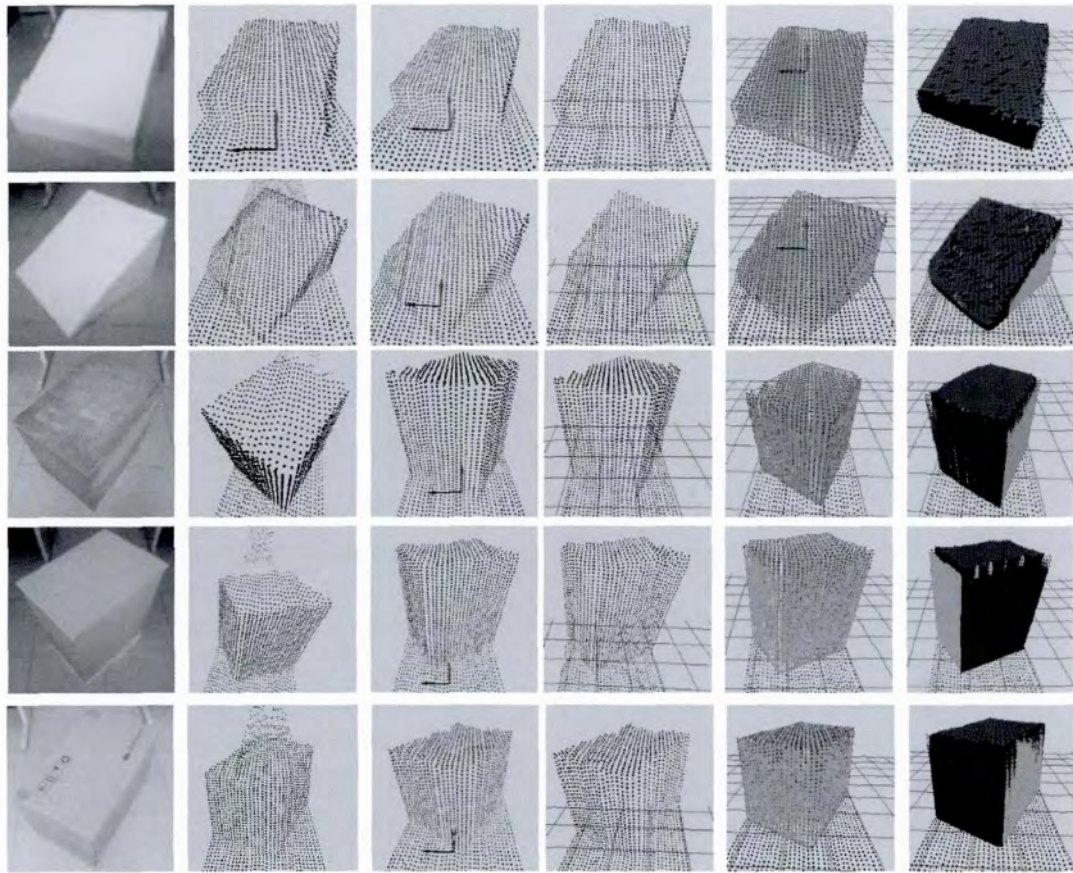


图 7 数据处理和重建效果

Fig. 7 Diagram of data processing and reconstruction result

表 1 中绝对误差是测量体积与实际体积的差, 相对误差是绝对误差占实际体积的百分比。可以看到, 对每个测量对象不同方位的测量最大相对误差 2.8%, 综合以上测量结果计算可得平均测量精度为 1.9%。每一个被测物在 3 种方位下的测量结果的标准差为  $1.6 \times 10^{-4}$ 、 $4.2 \times 10^{-4}$ 、 $6.2 \times 10^{-4}$ 、 $4.2 \times 10^{-4}$ 、 $2.5 \times 10^{-4}$ , 由标准差可知测量结果浮动不大, 测量系统具有一定的重复测量精度。这里标准差  $\sigma = \sqrt{\frac{1}{3} \sum_{i=0}^3 (x_i - \mu)^2}$ ,  $x_i$  测量值  $\mu$  是  $x_i$  的均值。

图 7 中, 第 1 列到第 6 列图依次为实物图像、采集的原始点云、归一化去噪筛选的点云、积分底面提取、三维重建线框、渲染体积计算的实体图示。从图 7 可以看出本文提出的算法能够较好地过滤掉背景噪声, 确定堆积底面, 并且能够有效地重建出被测物轮廓及模型。

考虑到测量装置在实际测量过程所处环境不同, 如装置前后倾斜或者左右倾斜, 为分析所提出的测量方法

的适应性, 在被测目标及其环境不变的情况下, 改变测量装置的姿态(如测量装置前后倾斜和左右倾斜角度范围在  $0^\circ \sim 10^\circ$ ) 分析装置相对物料状态变化工况下测量的效果。实验过程中对 5 种被测对象再次进行测量, 记录了实际体积、装置水平放置测量体积 1、装置前后倾斜测量体积 2、装置左右倾斜测量体积 3, 表 2 所示为每种工况测量体积的平均值。图 8 为不同工况下测量体积、相对误差的对比。3 种工况下测量体积与实际体积相比的平均相对误差分别为 1.95%、1.18%、1.92%。

表 2 改变测量装置姿态前后的测量结果

Table 2 The measurement results before and after changing the measurement equipment posture ( $\text{m}^3$ )

测量对象	实际体积	测量体积 1	测量体积 2	测量体积 3
1	0.062 7	0.061 5	0.062 8	0.062 4
2	0.047 7	0.048 7	0.047 1	0.046 5
3	0.116 6	0.114 5	0.116 7	0.115 4
4	0.145 2	0.141 8	0.147 9	0.142 8
5	0.116 7	0.118 7	0.119 5	0.121 9

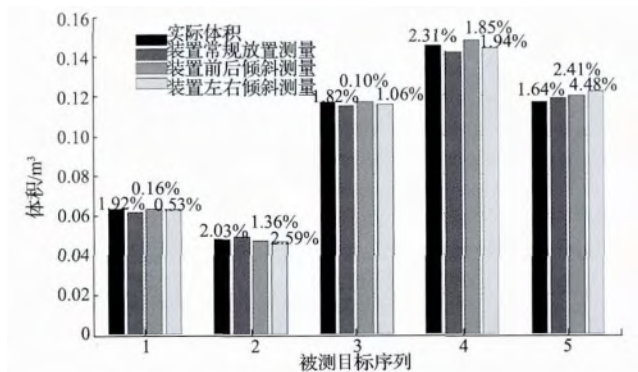


图8 测量结果对比及相对误差

Fig. 8 Comparison of the measurement results and relative errors

从表2和图8可以看出,测量装置相对物料状态变化前后的测量结果与真实值相差不大,3种工况测量结果的平均相对误差为1.69%,3种工况下体积测量的标准差分别为1.46、0.92、0.21,标准差的平均值为0.86,标准差较小表明不同工况下测量误差相对稳定,提出的方法能够在一定程度上适应测量装置相对物料状态的变化,在实际应用中能够满足多种测量工况的需求。

该测量系统具有平动和转动机构,扫描角度为 $190^\circ$ ,测量范围为0~80 m,对于大型物体来说,3%以内的相对误差是可以接受的。尽管在测量装置和体积计算算法上有一定区别,但是与正交测量法<sup>[12]</sup>(相对误差为3.78%)及车载激光测量<sup>[18]</sup>(相对误差为6.7%)等方法相比,本文提出的方法在精度上有较大的提高。从表1、2及图8的实验比较看出,提出的方法在适应测量装置相对物料状态变化方面有一定的适用性。实验中测量误差主要由传感器精度、数据处理方法等引起,通过提高传感精度和改进数据处理方法将会得到更为准确的测量结果。

## 5 结 论

物料体积测量技术是能源、冶金等企业物流自动化管理技术的重要组成部分,通过该技术企业能够及时掌握库存数据。为了提高测量系统在多种工况下的适应性和测量结果的准确性,本文提出了一种基于姿态传感器实时校正激光测量传感器的物料体积测量方法和基于剖分的体积近似逼近算法。

首先,按照提出的测量方法搭建测量系统,用该系统对测量对象进行扫描测量,采集传感器数据并在上位机中根据预定程序进行坐标变换,提取被测对象上的点和堆积底面点,并拟合出堆积底面,采用体积近似逼近算法计算被测物体积。然后,对放置在地面上的箱体进行了

测量实验,并改变测量装置的姿态进行对比实验分析装置的适应性,实验测量结果平均误差为1.69%,单箱体测量验证了积分底面提取及边界确定方法的可行性。相对于单体测量情况,在数据获取方面堆积体体积庞大,需要多台传感器进行数据的拼接,但在底面边界及体积计算方面单体测量方法是大型堆积体测量的基础,因而,本文提出的方法可以扩展至大型堆积体底面不确定情况下的体积测量,运用提出的方法针对大型堆积物体体积测量将是未来工作进一步研究的方向。

## 参考文献

- [1] 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):1-8.  
WANG H B, ZHANG D J, HE L. Research on large open stockyard laser measurement methods[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(5): 1-8.
- [2] CHANG D F, LU H J, MI W J. Bulk terminal stockpile automatic modeling based on 3D scanning technology[C]. International Conference on Future Information Technology and Management Engineering (FITME), 2010(1): 67-70.
- [3] 杨云涛,王省书,黄宗升,等.船体变形测量中激光陀螺零偏误差的补偿[J].仪器仪表学报,2014,35(12):2755-2761.  
YANG Y T, WANG X SH, HUANG Z SH, et al. Bias error compensation of laser gyroscope for autonomous measurement of ship hull angular deformation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(12): 2755-2761.
- [4] 石晶欣,蔡友发,梁慧,等.基于激光断面扫描的卧式罐容积计算方法研究[J].电子测量与仪器学报,2014,28(9):1021-1026.  
SHI J X, CAI Y F, LIANG H, et al. Study on horizontal tank volume calculating method based on laser tomoscan[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(9): 1021-1026.
- [5] 任春华,陈灿,王满喜,等.一种惯性测量与距离组合的定位修正方法研究[J].仪器仪表学报,2013,34(11):2513-2519.  
REN CH H, CHEN C, WANG M X, et al. Research on a positioning correction method with inertial measurement in combination with distance[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(11): 2513-2519.
- [6] 占栋,于龙,肖建,等.多摄像机结构光大视场测量中全局标定方法研究[J].仪器仪表学报,2015,36(4):903-912.  
ZHAN D, YU L, XIAO J, et al. Study on multi-cameras and structured-light vision system calibration approach study in large field view measurement[J]. Chinese Jour-

- nal of Scientific Instrument, 2015, 36(4): 903-912.
- [7] 沈彤, 刘文波, 王京. 基于双目立体视觉的目标测距系统[J]. 电子测量技术, 2015, 38(4): 52-54.  
SHEN T, LIU W B, WANG J. Distance measurement system based on binocular stereo vision [J]. Electronic Measurement Technology, 2015, 38(4): 52-54.
- [8] ROSEN B G, BAATH L, DIMKOVSKI Z. On variation of surface topography and robust product performance [J]. The 4th International Symposium on Test Automation and Instrumentation (ISTAI'2012), 2012(8): 8-11.
- [9] 周美丽, 白宗文. 基于 2D-PSD 的激光位移测量系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(2): 64-66.  
ZHOU M L, BAI Z W. Design of the laser displacement measurement system based on 2D-PSD [J]. Foreign electronic measurement technology, 2015, 34(2): 64-66.
- [10] 史红梅, 张继科. 基于激光三角测量原理的规矩检测系统研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 34(9): 1934-1940.  
SHI H M, ZHANG J K. Study on track gauge measurement system based on laser triangulation principle [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 34(9): 1934-1940.
- [11] ZHAO SH, LU T F, KOCH B, et al. Stockpile modeling using mobile laser scanner for quality grade control in stockpile management [C]. The 12th International Conference on Control Automation Robotics & Vision (ICARCV), 2012: 811-816.
- [12] 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.  
LI L, YAN J, RUAN Y T. Calibration of vehicle-borne laser mapping system [J]. Chinese Optics, 2013, 6(3): 353-358.
- [13] GUO J R, WANG Y L, YU L, et al. Resolution of object surface and method of surface areas and volumes calculation [J]. Journal of Shandong University of Technology: Natural Science Edition, 2014, 28(6): 73-78.
- [14] ZHANG W J, WU T. Remote 3D measurement & visualization system based on laser scanning & 3D reconstruction [C]. IEEE Symposium on Photonics and Optoelectronic (SOPO), 2010: 1-5.
- [15] 毕银丽, 齐礼帅, 陈书琳, 等. 基于点云数据的株冠体积测量方法[J]. 科技导报, 2013, 31(27): 31-36.  
BI Y L, QI L SH, CHEN SH L, et al. Canopy volume measurement method based on point cloud data [J]. Science and Technology Review, 2013, 31(27): 31-36.
- [16] 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]. IET Science Measurement & Technology, 2012, 6(1): 6-12.
- [17] 康永伟, 钟若飞, 吴保. 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(增刊 3): 249-253.  
KANG Y W, ZHONG R F, WU Y. Research of calibrating vehicle laser scanner's external parameters [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37 (Suppl. 3): 249-253.
- [18] 曹毓, 冯莹, 杨云涛, 等. RANSAC 平面估计算法在路面物体体积测量中的应用[J]. 传感技术学报, 2012, 25(3): 413-416.  
CAO Y, FENG Y, YANG Y T, et al. Application of plane estimation algorithm based on RANSAC in volume measurement of object on road surface [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2012, 25(3): 413-416.

#### 作者简介



赵其杰(通讯作者), 分别于 1999 年、2002 年在辽宁科技大学获得学士学位和硕士学位, 2005 年于上海大学获得博士学位, 现为上海大学机电工程与自动化学院副教授, 主要研究方向为传感检测与控制、机器视觉、人机交互与智能信息处理。

E-mail: zqj@shu.edu.cn

**Zhao Qijie** (Corresponding author) received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from University of Science and Technology Liaoning in 1999 and 2002, respectively; and received his Ph. D. degree in 2005 from Shanghai University. Now, he is an associate professor in Shanghai University. His research interests include measurement and control of sensors, machine vision, human-robot interaction, and intelligent information processing.



孟庆栩, 于 2013 年在上海大学获得学士学位, 现在上海大学攻读硕士学位, 主要研究方向为光学测量、机器视觉及机器人技术。

E-mail: mechmqx@yeah.net

**Meng Qingxu** received his B. Sc. degree from Shanghai University in 2013. Now, he is studying for master degree in Shanghai University. His research interest is optical measurement, computer vision and robotic technology.