大型露天料场激光测量方法研究

王海波[1,2] 张德津[1,3] 何 莉[4*]

[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] 湖北工业大学管理学院，湖北 武汉 430068；[3] 武汉武大卓越科技有限责任公司，湖北 武汉 430223；
[4] 湖北工业大学电气与电子工程学院，湖北 武汉 430068

摘要 针对当前大型露天料场测量由于没有载体安装测量设备而采用人工测点测量方法导致效率低、周期长、精度差和人为影响大的问题，提出了在车载平台上安装伸缩机构，集成激光扫描仪、惯性制导、全球定位系统和电子云台，对料场采用分区独立扫描测量，统一坐标变换合并的方法，快速获取料场三维坐标数据，准确计算料场体积从而实现储量换算，实验条件下绝对精度达 0.4%。露天堆场现场测试表明 8000 m^2 分十区测量能在 1 h 内完成，重复测量误差小于 0.9%，矿山测量没有现场实验，依据设备参数推算精度要低于以上结论，但能满足行业测量需要。该方法有效解决了散堆露天料场的测量问题，能广泛应用于露天堆场、矿山测量，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；分区融合；料场；车载

中图分类号 TP23；TP319 **文献标识码** A **doi**：10.3788/CJL201340.0508002

Research on Large Open Stockyard Laser Measurement Methods

Wang Haibo[1,2] Zhang Dejin[1,3] He Li[4]

[1] *State Key Laboratory for Information Engineering of Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan, Hubei* 430079, *China*
[2] *School of Management, Hubei University of Technology, Wuhan, Hubei* 430068, *China*
[3] *Wuhan Wuda ZOYON Science and Technology Co., Ltd., Wuhan, Hubei* 430223, *China*
[4] *School of Electrical and Electronic Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan, Hubei* 430068, *China*

Abstract Artificial measuring point measurement method is used for measurement in large open-air stockyard because of no carrier installed measurement equipment, which can result in low efficiency, long life cycle, poor accuracy and man-made influence. To solve above problem, telescoping mechanism installation on the vehicle platform is proposed. Laser scanner, inertial navigation, GPS and electronic pan/tilt/zoom (PTZ) are integrated, and partition independent scanning measurement of stockyard and unified coordinate transformation combination are used to quick access to the stockyard 3D coordinate data and to accurately calculate the size of the stockyard enabling reserves converter. Under test conditions, the absolute accuracy is up to 0.4%. Open yard field tests show that the separated ten districts measurement of 8000 m^2 can be completed within one hour with the error of repeating measurement less than 0.9%. Field test of mine surveying isn't taken and the accuracy is lower than the above conclusions based on the device parameters, but it can meet the measurement need of the industry. This method is an effective solution to the measurement problem, and can be widely used in the open yard, mine surveying, with good application and promotion prospects.

Key words measurement; laser measurement; volume measurement; zoning fusion; stockyard; automobile carrying

OCIS codes 120.5800; 120.6650; 120.4290

收稿日期：2012-11-29；**收到修改稿日期**：2013-01-21

基金项目：国家 863 计划(2012AA112503)资助课题。

作者简介：王海波(1980—)，男，博士研究生，主要从事空间信息服务、GIS 和激光测量等方面的研究。E-mail：wang_whb@163.com

导师简介：樊 红(1968—)，女，教授，博士生导师，主要从事空间信息服务、空间数据模型、GIS、地图制图和测量等方面的研究。E-mail：geohfan@163.com

* **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、成本控制和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。由于堆场体积大且形状不规则，传统方法测量堆场体积比较困难[1]。已有学者基于便携式单点测量、计算机视觉测量[2,3]、三维(3D)激光扫描仪测量[4~6]和多传感器[7,8]集成的固定式安装测量[1]等方法进行了深入的研究并取得了良好效果。其中，基于多传感器集成的测量方法具有最好的应用价值，但是该方法需要将设备安装在规定载体如斗轮机上进行测量，在没有载体的场合，如大型露天料场、矿场等，根本不具备安装这些设备的条件，因此，需要研究新的测量方法，以满足这些测量环境的需求。

由于激光光学坐标测量具有精度高、测量范围大等特点，目前已作为一种先进的测量手段广泛应用于工业环境之中[9~11]。陈静等[12]完整地研究了如何运用激光雷达测量体积，介绍了测量原理、堆体体积测量方法和模型实现。本文在文献[1,11]的基础上，通过与激光扫描仪、实时动态载波相位差分技术(RTK)、倾角传感器、卫星罗经进行数据通信，并采集扫描点、全球定位系统(GPS)、俯仰角、转向角等数据，最终形成原始采集数据，并按照一定规则存储于本地。并通过建立物方坐标系，操作坐标旋转、平移和剔除，提出了可用于车载的大型露天料场的体积测量方法。

2 系统组成与测量原理

2.1 系统组成

系统由数据采集传感器、采集控制器和数据处理软件三部分组成，数据采集传感包括卫星罗经、RTK、倾角传感器和激光扫描仪等，采集控制器由直流工控机和控制笔记本组成，图 1 和图 2 分别为系统组成和测量示意图。

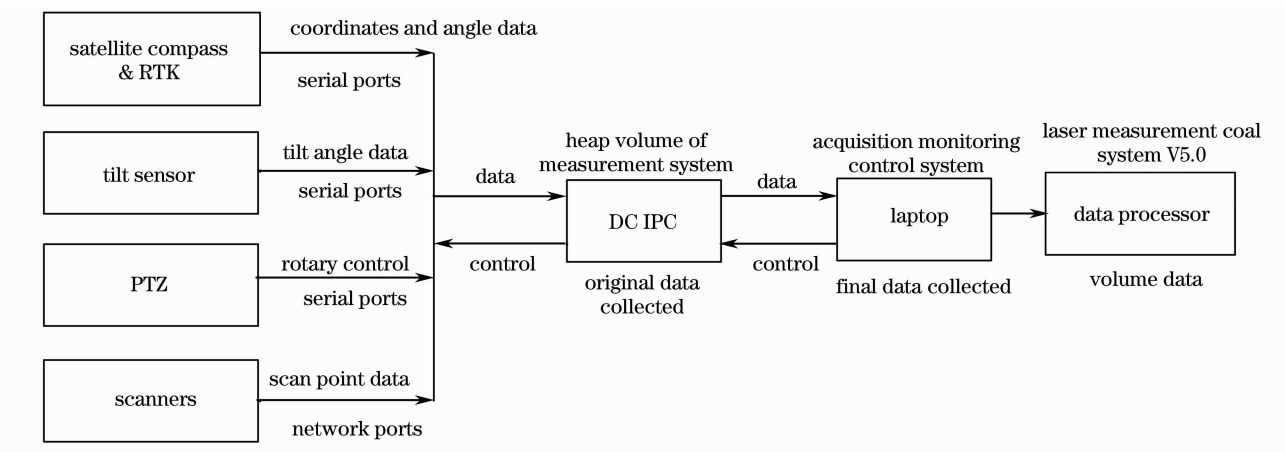

图 1　系统组成图

Fig. 1　System components

图 2　工作示意图

Fig. 2　Working schematic

2.2 体积计算原理

散堆料场由小颗粒物料堆积而成，且外观尺寸复杂多变，无法用固定容器进行盛装，故无法通过常规测量方法进行体积测量。所提出的方法测量时需要先获取料场外形轮廓点的三维坐标，再通过数学建模，将料堆分成许多三棱柱(如图 3 所示)，计算出三棱柱的体积和，即可以获得被测物的近似体积(所分三棱柱底面积越细，测量体积越精确)。

总体积可表示为

$$V = \sum_{i=0}^{n} V_i, \tag{1}$$

其中每个三棱柱的体积为

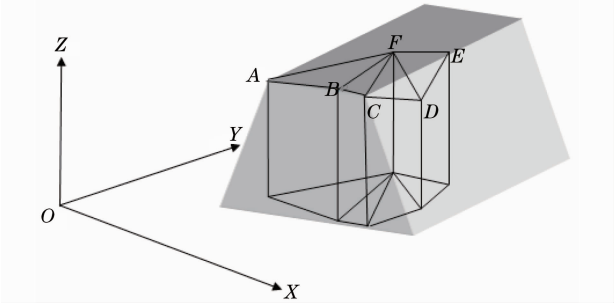

图 3 料场三维模型

Fig. 3 3D model of stockyard

$$V_i = s_i h_i, \tag{2}$$

式中 s 为三棱柱的底面积，h 为三棱柱的高。

体积模型中三棱柱的密集程度取决于料场外形轮廓的测量点的密集程度，且点坐标的准确性直接决定了最后计算体积的准确性，因此外形轮廓的测量点至关重要。为完成对散堆料场的体积测量，需要获得能覆盖整个料场外形轮廓的测量点的三维坐标。通过现场实际考察，部分散堆料场尺寸较大，最大尺寸可达 393 m。而实验时成熟使用的扫描仪产品的安全扫描距离约为 80 m，最大能覆盖半径为 80 nm的圆形区域。因此单次扫描难以覆盖整个料场，只能采取分区扫描的方式完成对料场的测量。

2.3 分区扫描

如图 4 所示，粗体线框包围区域是需要测量的料场，小矩形框为扫描仪在一个测量基点能覆盖测量的区域(实际测量区不一定是矩形)。为完成对整个料场的测量，在一个料场上需要选择很多测量基点(图中 A、B、C、D、E 等，可根据堆体外形人为选择)，在每个测量基点，首先通过定位设备获得测量基点坐标(相对于基准站 O)，再通过扫描仪的转动，可以扫描到一定范围内料场的外形轮廓数据，即相对于当前测量基点的相对坐标。完成一个测量基点的扫描工作，移动测量车移动到下一个基点进行扫描，采集控制器对已测区域进行标记，防止测量过程中料场数据的漏测和重复测量，直至覆盖料场所有范围。测量完成之后，通过坐标换算，就可以将图中所有测量点的坐标都转换到以基准站 O 为原点的统一坐标系中，然后进行下一步的三维建模。

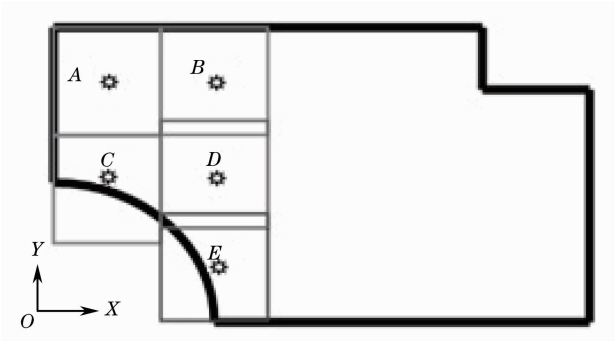

图 4 覆盖测量示意图

Fig. 4 Sketch map of coverage measurement

2.4 重叠区域处理

在实际测量时，每个测量基点覆盖的测量区域并不是呈规则的矩形。根据不同的扫描方式，覆盖区域可能是圆形，也可能是其他形状。为完全覆盖整个料场，只有让部分区域相互衔接，也即存在对部分区域的重复扫描。对于扫描重叠的区域，这里采用剔除法，如图 5 所示，实线框内的点是分别在两个测量基点上获取的数据，虚线框内的点是重叠点，按照预先设定的规则，没有重叠的区域按照正常的规则进行构网，重叠区域的测量点进行三角网络构建，然后剔除重叠点。

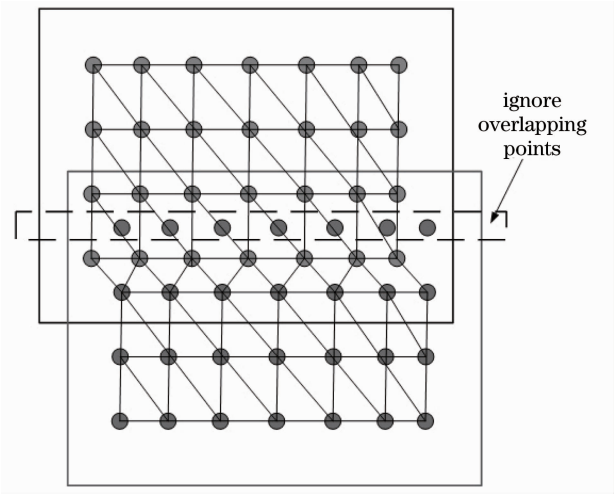

图 5 重叠区的处理

Fig. 5 Overlap region processing

3 算 法

图 6 和图 7 为测量算法基础，但在每个基准点，车体总会发生倾斜。坐标系统 O-XYZ 是大地水平直角坐标系，O' 是以车体航向为 X 轴，车身左侧为 Y 轴，云台支柱为 Z 轴的 O'-$X'Y'Z'$ 坐标系的坐标原点，T 是云台顶端旋转中心，S 是扫描仪。扫描仪距旋转中心长度为 L，即 S 距 T 的的距离是 L；云台顶端的水平高度为 H，即 T 距 O' 点的距离是 H。O'-$X'Y'Z'$ 相对 O-XYZ 分别绕 X，Y，Z 轴逆时针旋转了 φ，ω，κ。扫描线 SE 长度为 D。

计算点 E 在坐标系 O-XYZ 中坐标分三个步骤：

1) 计算点 E 在物方坐标系 O'-$X'Y'Z'$ 中的坐标；

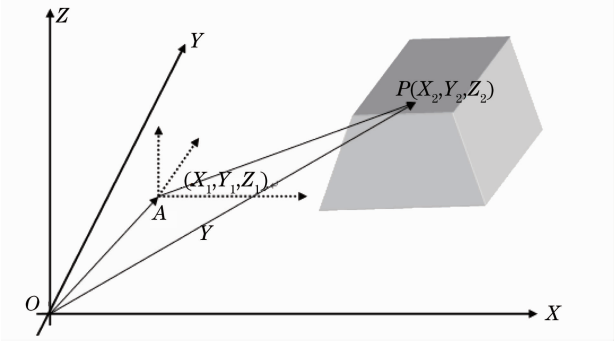

图 6　测量原理示意图

Fig. 6　Measurement principle schematic

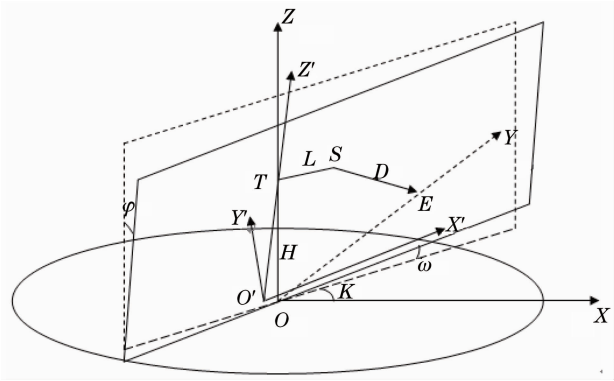

图 7　基准点测量计算示意图

Fig. 7　Sketch of reference point measurement

2）计算点 E 在坐标系 O'-$X'Y'Z'$ 绕 O' 点旋转成大地水平坐标系中的坐标；

3）将步骤 2 得到的坐标加上向量 $\boldsymbol{OO'}$ 的坐标。

3.1　计算物方坐标系中的坐标

扫描仪在物方坐标系 O'-$X'Y'Z'$ 中的坐标模型如图 8 所示，坐标换算公式为

$$\begin{cases} x = L\cos\gamma + D\cos\theta\cos\gamma \\ y = L\sin\gamma + D\cos\theta\sin\gamma \\ z = H - D\sin\theta \end{cases}, \tag{3}$$

式中 D 代表扫描仪测距值即被测点到扫描仪的距离，H 为扫描仪到地面的高度，γ 为扫描断面与 x 轴方向的夹角，该角度即云台角度，θ 为扫描线与扫描仪的夹角（此角度与扫描方向有关），L 是扫描仪距离旋转中心的距离。

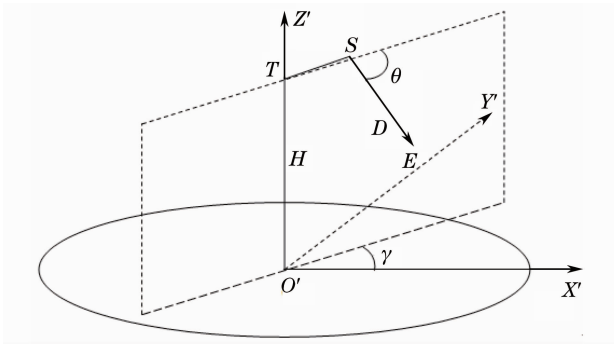

图 8　物方坐标计算模型

Fig. 8　Object coordinate computing model

3.2　坐标系旋转

O'-$X'Y'Z'$ 坐标系绕 Z' 轴顺时针旋转 κ 度，为了简化计算，从 Z' 轴观察 YOX 平面旋转可得到二维旋转模型如图9(a)所示，点E在$Y'OX'$平面内坐标

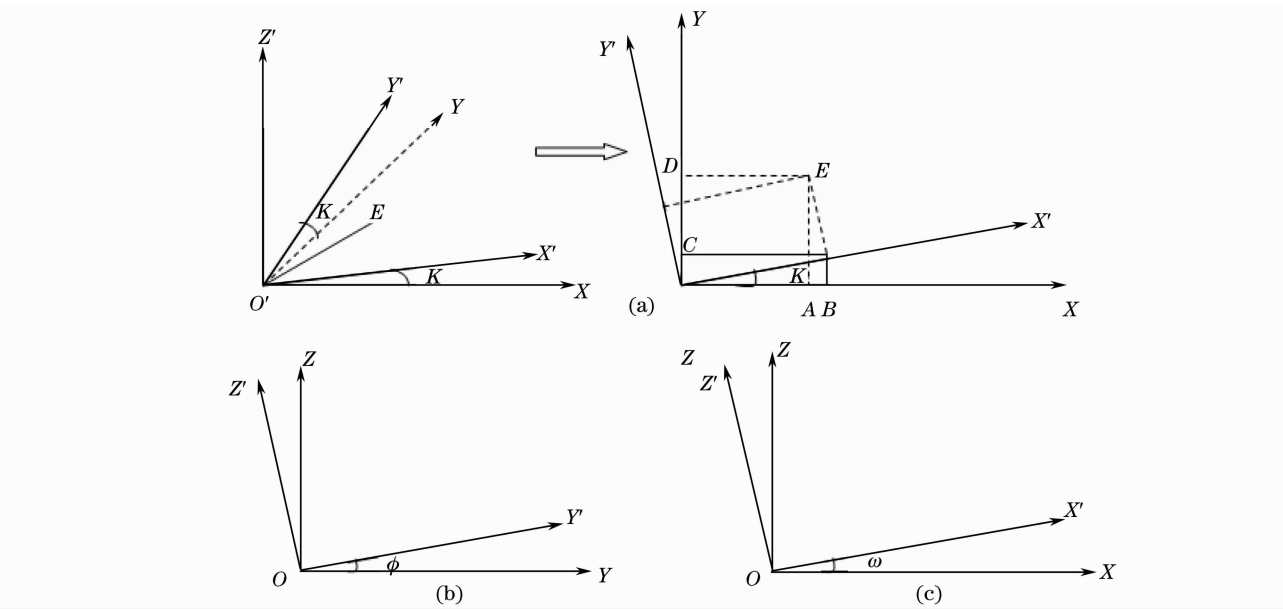

图 9　二维旋转模型。(a) 旋转 κ 度；(b) 旋转 φ 度；(c) 旋转 ω 度

Fig. 9　Two-dimensional rotation model. (a) Rotary κ degree; (b) rotary φ degree; (c) rotary ω degree

为(X',Y')，在YOX平面内坐标为(X,Y)：

$$X = OB - OA = X'\cos\kappa - Y'\sin\kappa,$$
$$Y = OC + CD = X'\sin\kappa + Y'\cos\kappa. \quad (4)$$

因此点E在O'-XYZ'中的坐标与在O'-$X'Y'Z'$中的坐标转换公式为

$$\begin{cases} X = X'\cos\kappa - Y'\sin\kappa \\ Y = X'\sin\kappa + Y'\cos\kappa. \\ Z = Z' \end{cases} \quad (5)$$

旋转矩阵为

$$\begin{bmatrix} \cos\kappa & -\sin\kappa & 0 \\ \sin\kappa & \cos\kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

O'-$X'Y'Z'$坐标系绕X'轴旋转φ度后，二维旋转模型如图9(b)所示，坐标换算过程同上，转换关系为

$$\begin{cases} X = X' \\ Y = Y'\cos\varphi - Z'\sin\varphi. \\ Z = Y'\sin\varphi + Z'\cos\varphi \end{cases} \quad (7)$$

旋转矩阵为

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi & -\sin\varphi \\ 0 & \sin\varphi & \cos\varphi \end{bmatrix}. \quad (8)$$

O'-$X'Y'Z'$坐标系绕Y'轴旋转ω度后，二维旋转模型如图9(c)所示，坐标换算过程同上，转换关系为

$$\begin{cases} X = X'\cos\omega - Z'\sin\omega \\ Y = Y' \\ Z = X'\sin\omega + Z'\cos\omega \end{cases}. \quad (9)$$

旋转矩阵为

$$\begin{bmatrix} \cos\omega & 0 & -\sin\omega \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\omega & 0 & \cos\omega \end{bmatrix}. \quad (10)$$

因此，将O'-$X'Y'Z'$坐标系统绕点O'，按Z'轴、X'轴、Y'轴依次顺时针旋转κ、φ、ω后，即将上述三个旋转矩阵按顺序相乘，得出坐标旋转公式为

$$\begin{cases} X = (\cos\omega\cos\kappa + \sin\varphi\sin\omega\sin\kappa)X' - (\cos\varphi\sin\kappa)Y' + (-\sin\omega\cos\kappa + \sin\varphi\cos\omega\sin\kappa)Z' \\ Y = (\cos\omega\sin\kappa - \sin\varphi\sin\omega\cos\kappa)X' + (\cos\varphi\cos\kappa)Y' - (\sin\omega\sin\kappa + \sin\varphi\cos\omega\cos\kappa)Z' \\ Z = (\cos\varphi\sin\omega)X' + (\sin\varphi)Y' + \cos\varphi\cos\omega Z' \end{cases}, \quad (11)$$

将E点在物方坐标系中的坐标值代入后，其坐标算式为

$$\begin{cases} X = (\cos\omega\cos\kappa + \sin\varphi\sin\omega\sin\kappa)(L\cos\gamma + D\cos\theta\cos\gamma) - \cos\varphi\sin\kappa(L\sin\gamma + D\cos\theta\sin\gamma) + \\ \quad (-\sin\omega\cos\kappa + \sin\varphi\cos\omega\sin\kappa)(H - D\sin\theta) \\ Y = (\cos\omega\sin\kappa - \sin\varphi\sin\omega\cos\kappa)(L\cos\gamma + D\cos\theta\cos\gamma) + \cos\varphi\cos\kappa(L\sin\gamma + D\cos\theta\sin\gamma) -. \\ \quad (\sin\omega\sin\kappa + \sin\varphi\cos\omega\cos\kappa)(H - D\sin\theta) \\ Z = \cos\varphi\sin\omega(L\cos\gamma + D\cos\theta\cos\gamma) + \sin\varphi(L\sin\gamma + D\cos\theta\sin\gamma) + \cos\varphi\cos\omega(H - D\sin\theta) \end{cases} \quad (12)$$

3.3 坐标平移

计算O'在O-XYZ坐标系中的坐标采用如下方法计算：

1) 以T为原点旋转坐标系，则O'旋转前的坐标为$(0,0,-H)$，旋转后，O'在坐标系T-XYZ中的坐标为$[-(\sin\omega\cos\kappa + \sin\varphi\cos\omega\sin\kappa)H, -(\sin\omega\sin\kappa - \sin\varphi\cos\omega\cos\kappa)H, -\cos\varphi\cos\omega)H]$。

2) O点在T-XYZ坐标系中的坐标为$(0,0,-H)$，则O'在O-XYZ坐标系中的坐标为$[-(\sin\omega\cos\kappa + \sin\varphi\cos\omega\sin\kappa)H, -(\sin\omega\sin\kappa - \sin\varphi\cos\omega\cos\kappa)H, -\cos\varphi\cos\omega)H + H]$。

3) 得到E在O-XYZ坐标系的坐标为

$$\begin{cases} X = (\cos\omega\cos\kappa + \sin\varphi\sin\omega\sin\kappa)(L\cos\gamma + D\cos\theta\cos\gamma) - \cos\varphi\sin\kappa(L\sin\gamma + D\cos\theta\sin\gamma) - \\ \quad D\sin\theta(-\sin\omega\cos\kappa + \sin\varphi\cos\omega\sin\kappa) \\ Y = (\cos\omega\sin\kappa - \sin\varphi\sin\omega\cos\kappa)(L\cos\gamma + D\cos\theta\cos\gamma) + \cos\varphi\cos\kappa(L\sin\gamma + D\cos\theta\sin\gamma) + \\ \quad D\sin\theta(\sin\omega\sin\kappa + \sin\varphi\cos\omega\cos\kappa) \\ Z = D\cos\varphi\sin\omega\cos\theta\cos\gamma + D\sin\varphi\cos\theta\sin\gamma - D\sin\theta\cos\varphi\cos\omega + H + L\sin\varphi\sin\gamma + \\ \quad L\cos\varphi\sin\omega\cos\gamma \end{cases}, \quad (13)$$

式中 D 为扫描仪测距值即被测点到扫描仪的距离，H 为扫描仪到地面的高度，γ 为扫描断面与 x 轴方向的夹角，该角度即云台角度，θ 为扫描线与扫描仪的夹角，L 为扫描仪距旋转中心的距离，φ 为坐标系按原点绕 X 轴顺时针旋转的角度，ω 为坐标系按原点绕 Y 轴顺时针旋转的角度，κ 为坐标系按原点绕 Z 轴顺时针旋转的角度。

3.4　坐标剔除

在将各采集点坐标换算到统一坐标系时，要剔除掉重复扫描的点，即 X 值与 Y 值相同的重复坐标。剔除的原则是当对每个基准点的坐标进行换算后，如果坐标数组中不存在重复坐标，则存入坐标数组中；如已经存在，则丢弃。这里判断坐标数组中是否已经存在重复坐标是查找该基准点相邻基准点检测区域内是否有重复坐标，以提高效率。实现示意图如图 5 所示，具体程序算法实现步骤为：

1）在 Z 值确定的情况下，获取已经换算成统一坐标的两基准点之间区域的所有点的 X 值与 Y 值，形成二维数组；

2）假设该区域有 n 个点（X_0，Y_0）至（X_{n-1}，Y_{n-1}）；

3）当 $x = X_0$ 时，从 $y = Y_0$ 开始对所有 Y 值进行比对，若重复则丢弃；

4）令 $x = X_1$，循环操作第 3）步，直到 $x = X_{n-1}$；

5）获得没有重复值的所有点坐标。

4　实验验证

利用上述算法，选取了多个火电企业进行实地测量验证，选定的两个大型露天料场成型图如图 10 和图 11 所示，由于料场体积过大，测量车可根据现实情况进行移动选取测量基点，如每间隔 30 m 或 50 m 选取一个测量点。在实验过程中，料场 1 选取了 11 个基准测量点，料场 2 选取了 3 个测量点，具体参数如下表 1 和表 2 所示。

测量结果的精度受到两个方面的影响，一个是 RTK 或连续运行卫星定位服务综合系统（CORS）的精度带来测量误差，另一个则是算法本身产生的误差。当前 RTK 的精度在厘米量级，扫描仪的精度在毫米级别，故第一个方面带来的误差可以忽略。

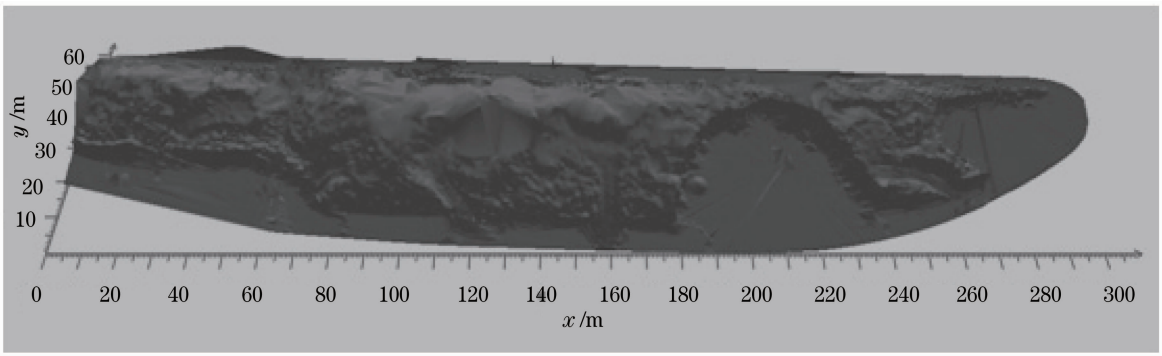

图 10　料场 1 成图

Fig. 10　Map of the stockyard I

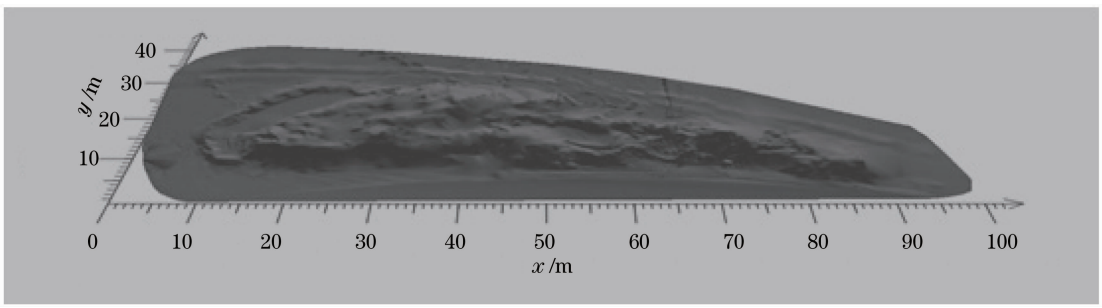

图 11　料场 2 成图

Fig. 11　Map of the stockyard II

表 1 料场 1 参数

Table 1 Parameter of the stockyard I

Point	Latitude and longitude /(°)	Heading angle /(°)	Elevation /m	Vertical inclination /(°)	Lateral inclination /(°)
1	102.2123351,38.4950217	292.664	1554.85	−1.011	−1.135
2	102.2115933,38.4950251	292.562	1554.87	−1.097	−1.172
3	102.2120717,38.4947317	272.592	1554.84	−1.376	−1.028
4	102.2109201,38.4950001	294.621	1554.94	−1.413	−1.599
5	102.2104683,38.4951667	296.547	1554.84	−1.071	−1.173
6	102.2099551,38.4954801	292.822	1554.75	−1.046	−1.286
7	102.2094967,38.4956601	297.132	1554.73	−1.024	−1.088
8	102.2099733,38.4959517	114.888	1555.05	1.032	−1.631
9	102.2114551,38.4953883	115.585	1555.13	1.746	−2.214
10	102.2109233,38.4955933	108.317	1554.99	−1.303	−3.731
11	102.2105117,38.4957483	295.372	1555.06	−1.314	−2.241

表 2 料场 2 参数

Table 2 Parameter of the stockyard II

Point	Latitude and longitude /(°)	Heading angle /(°)	Elevation /m	Vertical inclination /(°)	Lateral inclination /(°)
1	102.2032167,38.4959051	113.302	1556.09	−1.534	1.093
2	102.2036201,38.4963833	27.785	1555.96	2.772	−1.457
3	102.2031501,38.4963451	206.895	1555.21	−2.336	−1.336

根据前期研究的成果[1]，在不同的夹角情况下进行了连续 3 次测量并对实验进行了精度绝对增量测试，计算结果显示三维图形基本一致。其单点重复率为每次的测量结果除以平均值与标准单位 1 的绝对差值相加后在取平均，如点 1 的重复率计算结果为 0.85%，所有点的单点重复率再取平均，则不超过 0.9%。误差则按每次结果的差值除以平均值再取平均，如点 1 的误差计算结果为 0.0046，除点 11 外其他点均小于 0.4%，具体测量结果如表 3 和表 4 所示。

表 3 料场 1 测量结果

Table 3 Measurement results of the stockyard I

Point	Single point of volume 1 /m^3	Single point of volume 2 /m^3	Single point of volume 3 /m^3	Repeatability single point
1	1992.8	2026.5	2035.9	0.008455542
2	5845.7	5880.8	5894.6	0.003178008
3	3654.8	3602.8	3633.5	0.005062237
4	7977.8	7964.1	7813.9	0.008814689
5	8610.7	8787.5	8613.2	0.008998619
6	8227.5	8293	8159.7	0.005432155
7	4622.1	4690.9	4693.5	0.006673092
8	4188	4165.2	4207.1	0.003434101
9	4597.6	4633.4	4662.6	0.004836759
10	4129.9	4098.3	4176.4	0.006696441
11	4412.1	4422.3	4320.2	0.009831795

表 4 料场 2 测量结果

Table 4 Measurement results of the stockyard II

Point	Single point of volume 1 /m^3	Single point of volume 2 /m^3	Single point of volume 3 /m^3	Repeatability single point
2	980.5	991.7	986.5	0.003875576
3	1139.1	1135.8	1133.3	0.001780021

5 结　论

将多传感器集成在车载伸缩机构上，很好地解决了大型露天料场的料堆体积测量问题，并且通过多次测量结果的融合计算算法，提高了传统测量的效率和精度。

1）通过数学模型将外观尺寸复杂多变的料堆分成多个三棱柱，运用多种传感器集成采集料堆数据，并按照一定规则存储于本地，最终达到大型露天料场体积的车载测量。

2）设计物方坐标向大地坐标的转换算法，形成统一的坐标系和计算公式，推导出多外形多尺寸料堆的体积计算模型。

3）高精度、高效率和高适应性。设备载体可移动，无需露天料场解决安装环境。可以实现自动化测量，还可以通过调整采样点的密度以达到需要的精度。

实践测量结果表明，该方法是一种良好的非接触式测量大型露天料场料堆体积的方法，可以在矿产企业中进行推广，具有较好的应用前景。但本文对两次单点测量的交汇区域的重复测量数据没有很好利用，即对于同一区域的数据，只以某个单点测量里的数据为准，其他数据则直接丢弃，后续需要研究更高效、可靠的数据融合方法，并充分利用掉重复数据，去掉毛刺抖动，提高测量计算精度。

参 考 文 献

1 Zhang Dejin, Li Bijun, He Li. Application on laser measurement for large storage yard based on multi-sensor integration [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(2): 0208005
张德津，李必军，何　莉. 基于多传感器集成的堆场激光测量技术应用[J]. 中国激光，2012，**39**(2)：0208005

2 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

3 Chen Ying, Pan Junmin. Volume measurement method of large material stack based on computer vision [J]. *J. Shanghai Jiao Tong University*, 2002, **36**(7): 984～986
陈　莹，潘俊民. 大型物料堆体积的计算机视觉测量方法[J]. 上海交通大学学报，2002，**36**(7)：984～986

4 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

5 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

6 Cai Lailiang, Wu Kan, Zhang Shu. Application of point cloud plan fitting to deformation monitoring using 3D laser scanner [J]. *Science of Surveying and Map*, 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

7 Zhang Rui, Li Wenxiu. Accuracy analysis of multi-laser interferometers target tracking [J]. *J. System Simulation*, 2002, **14**(10): 1390～1394
张　锐，李文秀. 多传感器激光跟踪测量精度与分析[J]. 系统仿真学报，2002，**14**(10)：1390～1394

8 M. Vincze, J. P. Prenninger, H. Gander. A laser tracking system to measure position and orientation of robot end effectors under motion [J]. *International J. Robotic Research*, 1994, **12**(4): 305～314

9 Xu Xinhua, Wang Qing, Qian Zheng. Automatic measurement system of invar rods based on image processing [J]. *Acta Optica Sinaca*, 2009, **29**(6): 1520～1522
徐新华，王　青，钱　峥. 基于图像处理的镧钢尺自动检测系统[J]. 光学学报，2009，**29**(6)：1520～1522

10 Huang Fengshan. Study on the Key Technique of Single Camera 3D Coordinate Vision Measurement System Using a Light Pen [D]. Tianjin: Tianjin University, 2005
黄风山. 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

11 Huang Chenggong, Wu Junhui, Zhao Linfeng *et al.*. A 3D measuring technique of laser scattering characteristic data for surface [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(7): 0708004
黄成功，吴军辉，赵琳峰 等. 一种表面激光散射特性数据三维测量方法[J]. 中国激光，2012，**39**(7)：0708004

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

栏目编辑：何卓铭