

投影轮廓线辅助下的堆场三维形貌摄影测量研究

张小虎^{1,2} 欧建良^{1,2} 苑云^{1,2} 马钦华^{1,2} 朱肇昆^{1,2} 于起峰^{1,2}

(¹ 国防科学技术大学航天与材料工程学院军事航天系, 湖南长沙 410073)
² 图像测量与视觉导航湖南省重点实验室, 湖南长沙 410073)

摘要 散装物料大型堆场三维形貌参数的准确快速测量是现代物流管理、装卸工程机械智能化作业的重要工作。由于堆场形貌复杂、纹理特征贫乏和材质反射效率低等特性,非接触方式中的激光扫描、摄影测量难以准确有效测量,传统光刀法也很难做好大型堆场测量工作。提出了激光投线仪扫描辅助下的双目摄影测量方法,并从影像梯度与核线关系解决立体影像同名点匹配、同名点交会平差获得轮廓边缘三维点集、基于投影轮廓线空间特征重建三维轮廓线的模型算法。通过该方法,双目相机在不同工作测站均可对堆场进行扫描与局部三维形貌重建。实验证明该方法具有速度快、精度高、自动化程度高和工作稳定可靠的特点。

关键词 测量;堆场测量系统;双目交会;轮廓线重建;同名特征匹配;物方空间分析

中图分类号 O438 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0612002

Stack-Yard 3D Measurement Based on Photogrammetry and Projected Contour Aiding

Zhang Xiaohu^{1,2} Ou Jianliang^{1,2} Yuan Yun^{1,2} Ma Qinhu^{1,2} Zhu Zhaokun^{1,2} Yu Qifeng^{1,2}

¹ Department of Military Aerospace, College of Aerospace and Materials Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

² Hunan Key Laboratory of Videometrics and Vision Navigation, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract Fast and accurate 3D measurement of large stack-yard is important job in bulk load-and-unload and logistics management. Stack-yard holds its special features as complex and irregular shape, single surface texture and low material reflectivity, thus its 3D measurement is quite difficult to be realized by non-contacting technologies, such as LiDAR and photogrammetry. Light section is good at the measurement of small bulk-flow but not suitable for large-scale bulk yard yet. An improved method based on stereo cameras and laser-line projector is proposed. The due theoretical model and algorithm include: corresponding point of contour edge matching in stereo imagery based on gradient and epipolar-line relation, 3D point-set calculating for stereo imagery projected-contour edge with least square adjustment and forward intersection, then 3D contour reconstructed by random sampling consensus (RANSAC) and contour spatial features from 3D point set of single contour edge. In this way, stack-yard surface can be scanned easily by the laser-line projector, and certain region's 3D shape can be reconstructed automatically by stereo cameras on an observing position. Experiment proves that the proposed method is effective for bulk-yard 3D measurement in fast, automatic, reliable and accurate way.

Key words measurement; stack-yard measurement system; binocular intersection; projected-contour reconstruction; corresponding matching; object space analysis

OCIS codes 120.6650; 150.0155; 150.6910

1 引言

在各种工程领域常有一些大型散装物料堆需要

测量三维形貌参数,如电厂的煤堆,码头仓库的煤炭、矿石粉和粮食等^[1~3],这也是仓库码头物流管

收稿日期: 2010-12-29; 收到修改稿日期: 2011-03-01

基金项目: 国家自然科学基金(11072263)资助课题。

作者简介: 张小虎(1973—),男,博士,研究员,主要从事摄像测量和实验力学等方面的研究。

E-mail: zhangxiaohu@vip.163.com(中国光学学会会员号: S040111790S)

理、装卸工程机械智能化作业的重要工作。由于物料堆场体积大、形状不规则,过去依靠人工堆场整形与估测,工作量大、时间长、精度低,迫切需要新的测量技术来解决。近年来,各种基于光学非接触形式的被动成像与主动扫描技术的不断发展革新,逐渐出现了解决各种复杂形貌物体三维测量问题的重要方法^[4~6]。

光学非接触测量方法主要包括:激光三维扫描(LiDAR)、摄影测量与光刀法。其中 LiDAR 对于光滑或者反射率较高表面的三维测量效果很好,但堆场由于漫反射与材质吸光等问题,使得原路径返回且反射强度难以保障,导致测量能力显著降低^[7];摄影测量^[8]具有非接触、功耗低及自动化程度高等特点,但直接用于表面纹理贫乏、起伏复杂多变、反射率低的堆场测量时,存在特征提取困难、同名点搜索匹配计算量大、可靠性低等不足;文献^[9]提出在料堆表面人为投放标志点,多角度摄影成像后提取影像特征,近似计算表面形状与体积,该方式简单易行,但作业中标志点分布与数量不同,重建测量结果也就不同,而且只是一种半自动作业,时间较长、精度有限和实时性低。此外,激光投线仪等线结构光结合相机的三角测量,如光刀法^[10,11],预先标定相机与投线仪相对姿态参数,激光投线仪在堆场表面投射轮廓线,相机对轮廓线成像,提取影像轮廓线中心后与投影平面共同解算三维轮廓线;该方法适用于投线仪与相机均固定、而物料以皮带传输等方式运动条件下的物料断面三维测量,而大型堆场测量中需将测量装置架设于移动设备或堆场多个位置作业,此时多个投影线之间的三维拼接依靠设备运动参数等信息进行,难以保障整体精度和满足需求。

为此,本文结合线激光投影与相机成像的三角

测量、立体摄影测量方法,针对大型物料堆场的特点和三维形貌测量需求,提出一种新的三维形貌测量方法——激光投线仪扫描辅助下的双目摄影测量,有效克服了 LiDAR、摄影测量和光刀法等不足,可以更好地适应大型堆场三维形貌测量需求。

2 激光投线仪扫描辅助下双目摄影测量堆场三维形貌的工作原理

提出的激光投线仪辅助下双目摄影测量方法,有三层含义:1)为增加物料堆场表面可成像特征,以激光投线仪在堆场表面形成可被相机捕捉成像的轮廓线;2)两台相机固定连接、以两步法标定^[12,13]和相对定向^[14]后构成可量测立体相机,加载激光波长一致的滤光镜后,对堆场表面轮廓线成像,形成包含轮廓线特征的立体影像,从中重建三维投影线;3)通过投线仪对堆场表面的扫描,与基于立体影像的轮廓线三维重建,形成轮廓线集合以准确表达整个堆场三维形貌。图 1 表示了该方法的两种概念模型,其中图 1(a)将整个测量装置架设在移动平台上,此方式适用于堆场范围大,并固定铺设了行动轨道、测量装置以工程机械为移动平台开展堆场测量的情况;而图 1(b)表示相机安装在堆场固定立柱上而投线仪随移动平台运动,此方式适用于较小或者不规则堆场,相机按对堆场观测成像的需要设计视场,固定安装在多个立柱上,移动平台随堆场测量需要灵活运动。两种方式的基本原理一致,区别包括:图 1(a)方式系统安装维护简单、使用灵活,而图 1(b)方式系统设计安装与维护较为复杂,但三维量测整体精度较高。

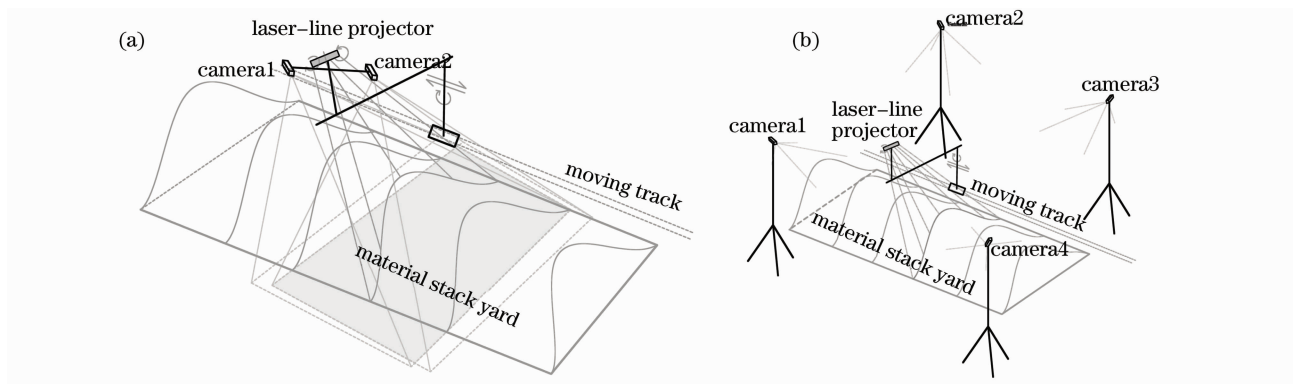


图 1 激光投线仪辅助下的堆场双目摄影测量概念模型

Fig. 1 Conceptual model of laser-line projector aided stack-yard's stereo camera measurement

对照现有技术如 LiDAR、摄影测量、光刀法等 在堆场三维形貌测量中的不足,该方法具有两个特点: 1)提供了激光投线仪对堆场扫描的运动灵活性,双目相机在同一位置姿态即可对堆场区域内轮廓线成像与重建三维轮廓线,从而不同位置可形成具有较大空间重叠度的三维表面然后合成,能明显提高大型物料

堆场三维测量整体精度和效率;2)将光刀法中单影像光线与轮廓线平面相交的三角测量,改进为立体影像的同名点交会平差,从而可进行包含观测数据误差的处理、与独立开展基于轮廓线空间特征的分析,从理论上保障轮廓线三维解算的稳定性与精度。图 2 说明了堆场形貌三维重建的基本过程。

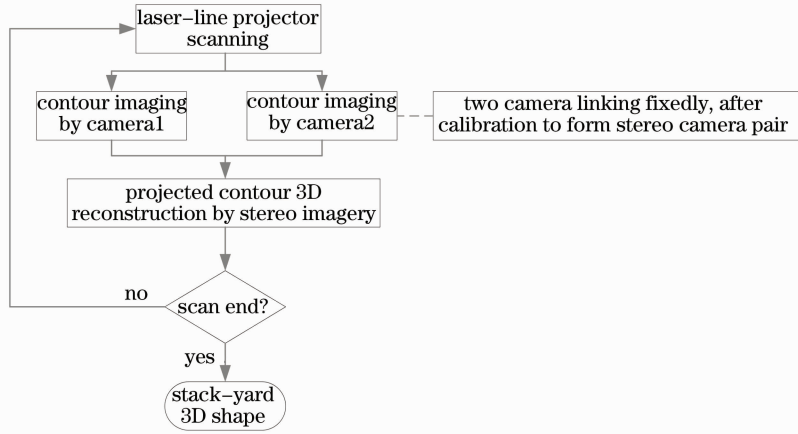


图 2 基于轮廓线扫描与双目成像的堆场三维形貌重建

Fig. 2 Flowchart of stack-yard 3D reconstruction based on contour scan and stereo imagery

本文方法的关键在于立体影像中堆场表面轮廓线的三维重建,而如何有效结合轮廓线在双目相机影像的像方约束与物方特征实现快速准确重建,是本文的研究重点。双目视觉方法具有较高的测量精度和可靠性,但堆场影像纹理贫乏,属于近景影像,景深变化大,一般同名点匹配需按全核线搜索进行^[15],如何实现同名特征点的可靠匹配与降低计算量是其中难点;此外,堆场成像条件复杂多变,直接提取影像中轮廓中心线稳定性差^[16,17],需从其它角度考虑影像轮廓线特征的快速可靠提取与提取后轮廓线空间特征的保障。

会平差以及轮廓线物方空间分析。其中影像像方处理包括二值化轮廓区域分割、影像梯度计算、立体影像基于影像梯度强度相似性和梯度方向与核线夹角同名性的边缘点匹配,该方式对解决影像中同名点全核线搜索匹配的计算量大、影像窗口匹配相关系数普遍大的问题非常有效,是此研究工作的一个亮点。基于立体影像共线方程的交会平差,可提高同名点三维解算精度、有效排除匹配粗差。物方空间分析,包括轮廓线空间平面约束、堆场表面轮廓线宽度,结合随机采样一致(RANSAC)原理^[18],实现三维轮廓中心线的拟合与过滤,再结合投影面内轮廓线的一维有序特征进行粗差过滤与拟合等;轮廓线的物方空间分析,是此研究工作的另一亮点。以上工作不但降低了立体影像处理的复杂性,还减少了计算量,提高了整体处理能力。图 3 列出了轮廓线三维重建的步骤要点。

3 基于立体影像轮廓线三维重建的理论分析

为提高轮廓线三维重建的速度、计算精度与可靠性,开展了如下工作:影像像方处理、立体影像交



图 3 基于立体影像轮廓线的三维重建

Fig. 3 Flowchart of 3D contour reconstruction based on stereo imagery

3.1 立体影像的轮廓线边缘提取与同名匹配

首先,对于轮廓线特征比较明显的影像,采用阈值分割得到轮廓线带是一种简单实用的方法。它是

一种基于区域的图像分割。常用的阈值确定方法包括单阈值、最大类间距离与最大类间方差法等^[19]。为提高处理速度并兼顾适应性,采用了最大类间距

离的计算方式以得到影像轮廓线区域。

影像轮廓线区域分割后,注意到堆场表面的轮廓线仅具有宽度而不存在厚度,在基线较短、相机视场相似性大、成像同步[图 1(a)]的条件下,双目影像中的轮廓线边缘具有很好的同名性,不但在影像梯度强度上非常接近,且梯度方向与核线的夹角在轮廓线同侧边缘很接近而异侧差异很大。这是实现轮廓线边缘点快速同名匹配、去噪等处理的理论基础。关于影像梯度、核线方程与夹角计算的分析如下。

3.1.1 影像梯度计算

设影像 I 的灰度矩阵为 $G_{i,j}$, 其中 $0 \leq i \leq W_{\text{width}}$, $0 \leq j \leq H_{\text{height}}$, 则影像边缘任一点 $p(i, j)$ 的梯度矢量为

$$\text{梯度值: } |V_{i,j}| = \sqrt{(G_{i+1,j} - G_{i-1,j})^2 + (G_{i,j+1} - G_{i,j-1})^2} / 2, \quad (1)$$

$$\text{梯度方向: } A_{V_{i,j}} = \arctan[(G_{i,j+1} - G_{i,j-1}) / (G_{i+1,j} - G_{i-1,j})]. \quad (2)$$

3.1.2 立体影像 I, I' 的同名点核线计算

根据摄影测量原理,若 $p(x, y), p'(x', y')$ 为立体影像中一对同名点,在立体影像参数已标定的情况下,过两影像点的核线方程^[9]分别为

$$p(x, y) : y = xA/B + fC/B, \quad (3)$$

$$p'(x', y') : y' = x'A'/B' + f'C'/B', \quad (4)$$

式中

$$\begin{cases} A = fB_Y + yB_Z \\ B = fB_X + xB_Z \\ C = yB_X - xB_Y \\ A' = -Aa'_1 + Bb'_1 - Cc'_1 \\ B' = Aa'_2 - Bb'_2 + Cc'_2 \\ C' = Aa'_3 - Bb'_3 + Cc'_3 \end{cases} \quad \begin{cases} |V_i| \geq V_0, & |V'_i| \geq V'_0 \\ |V_i - V'_i| \leq t_v \\ d = |A'x' + B'y' + C| / \sqrt{A'^2 + B'^2} \leq t_d \\ \|A_i - \alpha - |A'_i - \alpha'\| \leq t_a \end{cases}, \quad (6)$$

像对基线 $B = (B_X, B_Y, B_Z)$, 两影像相对旋转矩阵

$$R' = \begin{bmatrix} a'_1 & a'_2 & a'_3 \\ b'_1 & b'_2 & b'_3 \\ c'_1 & c'_2 & c'_3 \end{bmatrix},$$

f, f' 分别为影像 I, I' 的等效焦距。

核线在立体影像的平面倾斜角 α, α' 分别为

$$\begin{cases} \alpha = \arctan(A/B) \\ \alpha' = \arctan(A'/B') \end{cases}. \quad (5)$$

3.1.3 基于像点梯度与核线约束的轮廓线边缘点同名判断

在立体影像轮廓区域分割的基础上,进行轮廓线边缘同名点的判断。以影像梯度强度、梯度方向

与核线夹角、边缘点到核线距离 3 个条件综合判断边缘同名点,这是克服立体影像同名点搜索匹配计算量大、可靠性低的关键,步骤如下:1)判断两待定像点梯度值是否大于轮廓区域梯度均值、梯度值之差是否小于给定阈值;2)判断像点到核线距离是否小于给定阈值;3)判断立体影像中核线与梯度方向夹角差值是否小于给定阈值。其中有关阈值确定的说明:以投影轮廓线在图像中面积的比例(小于 1%)进行投影轮廓线区域的二值化分割、以梯度方向与核线夹角差异(如 90°)区分轮廓线同侧或异侧、以梯度强度的相似性(梯度值差异不大于一半)判断同名性;由于采集立体影像之前经过精确标定,同名点间的核线关系最为准确,以像点到对应核线的距离最小为最终依据,在最大不超过 5 pixel 范围内进行其它相似性判断。因为核线与轮廓边缘一般有两个交点,而梯度方向与核线夹角在轮廓边缘的同侧差异很小,而异侧大,从而消除同名歧义;当核线与轮廓线边缘超过两个交点时,此同名判断准则仍有效。需补充说明一下的是,在实验中,阈值并未做特别仔细的挑选,而得到的同名点匹配效果均相当稳定,这也说明了该方法的稳健性。

假设立体影像 I, I' 边缘点集分别为: $p_i (i = 0, \dots, n), p'_i (i = 0, \dots, n')$, 其梯度值与方向分别为: $V_i, A_i (i = 0, \dots, n), V'_i, A'_i (i = 0, \dots, n')$ 。那么,根据本文提出的方法,影像 I 任意边缘点 $p(x, y)$ 在 I' 同名点 $p'(x', y')$ 的数学判断准则为

$$\begin{cases} |V_i| \geq V_0, & |V'_i| \geq V'_0 \\ |V_i - V'_i| \leq t_v \\ d = |A'x' + B'y' + C| / \sqrt{A'^2 + B'^2} \leq t_d \\ \|A_i - \alpha - |A'_i - \alpha'\| \leq t_a \end{cases}, \quad (6)$$

式中 α 为 $p(x, y)$ 在影像 I 的核线倾角; A', B', C' 为影像 I' 中的同名核线方程参数, α' 为其倾角; t_a, t_v, t_d 为判断同名相似度的像素距离、梯度值、角度阈值, V_0, V'_0 分别为 I, I' 的边缘点梯度平均值, $p'(x', y')$ 为 I' 待定点。核线与边缘点梯度方向关系如图 4 所示。

3.2 立体影像的同名点交会平差

从 3.1 得到立体影像 I, I' 中轮廓线边缘同名点集 $p_i(x_i, y_i), p'_i(x'_i, y'_i) (i=0, 1, \dots, n)$, 按立体影像共线方程的最小二乘前方交会,得到轮廓线边缘的三维点集。注意到像点影像坐标均带有误差,或存在少量同名匹配粗差,为提高交会结果的精度与稳定

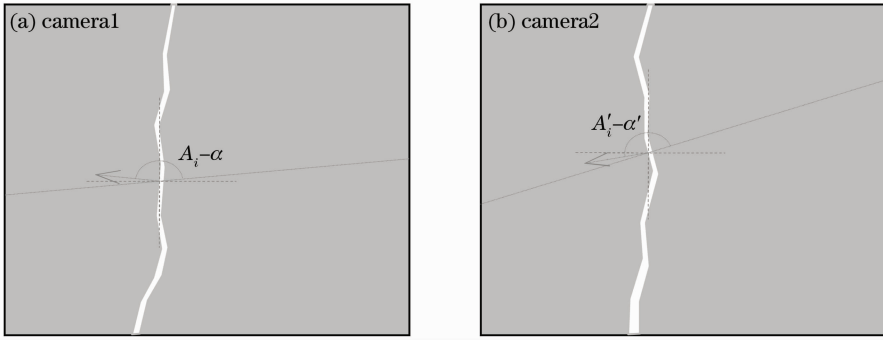


图 4 基于梯度与核线关系的轮廓线边缘点同名匹配

Fig. 4 Corresponding point matching of contour edge based on gradient and epipolar-line

性,这里以前方交会和最小二乘平差进行迭代收敛的求解。有关共线方程与前方交会平差的分析如下。

3.2.1 摄影测量原理共线方程

根据摄影测量原理,列立体影像同名点的共线方程为^[9]

$$\begin{cases} x - x_0 = -f \frac{a_1(X - X_S) + b_1(Y - Y_S) + c_1(Z - Z_S)}{a_3(X - X_S) + b_3(Y - Y_S) + c_3(Z - Z_S)} \\ y - y_0 = -f \frac{a_2(X - X_S) + b_2(Y - Y_S) + c_2(Z - Z_S)}{a_3(X - X_S) + b_3(Y - Y_S) + c_3(Z - Z_S)} \\ x' - x'_0 = -f' \frac{a'_1(X - X'_S) + b'_1(Y - Y'_S) + c'_1(Z - Z'_S)}{a'_3(X - X'_S) + b'_3(Y - Y'_S) + c'_3(Z - Z'_S)} \\ y' - y'_0 = -f' \frac{a'_2(X - X'_S) + b'_2(Y - Y'_S) + c'_2(Z - Z'_S)}{a'_3(X - X'_S) + b'_3(Y - Y'_S) + c'_3(Z - Z'_S)} \end{cases}, \quad (7)$$

式中两影像各自旋转矩阵分别为 $\mathbf{R} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix}$, $\mathbf{R}' = \begin{bmatrix} a'_1 & a'_2 & a'_3 \\ b'_1 & b'_2 & b'_3 \\ c'_1 & c'_2 & c'_3 \end{bmatrix}$, $P(X, Y, Z)$ 为同名点三维坐标,

$P_S(X_S, Y_S, Z_S)$, $P'_S(X'_S, Y'_S, Z'_S)$ 为相机成像点三维坐标。

3.2.2 立体影像前方交会的最小二乘平差

根据间接平差理论^[20],由(7)式列立体影像同名点前方交会最小二乘平差模型如下:

$$\mathbf{V} = \mathbf{A} \mathbf{X} + \mathbf{L}, \quad (8)$$

式中

$$\mathbf{V}_{4 \times 1} = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_{x'} \\ v_{y'} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_{4 \times 3} = \begin{bmatrix} \partial x / \partial X, \partial x / \partial Y, \partial x / \partial Z \\ \partial y / \partial X, \partial y / \partial Y, \partial y / \partial Z \\ \partial x' / \partial X, \partial x' / \partial Y, \partial x' / \partial Z \\ \partial y' / \partial X, \partial y' / \partial Y, \partial y' / \partial Z \end{bmatrix}, \quad \mathbf{X}_{3 \times 1} = \begin{bmatrix} dX \\ dY \\ dZ \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{L}_{4 \times 1} = \begin{bmatrix} x - x_0 + f \frac{a_1(X_0 - X_S) + b_1(Y_0 - Y_S) + c_1(Z_0 - Z_S)}{a_3(X_0 - X_S) + b_3(Y_0 - Y_S) + c_3(Z_0 - Z_S)} \\ y - y_0 + f \frac{a_2(X_0 - X_S) + b_2(Y_0 - Y_S) + c_2(Z_0 - Z_S)}{a_3(X_0 - X_S) + b_3(Y_0 - Y_S) + c_3(Z_0 - Z_S)} \\ x' - x'_0 + f' \frac{a'_1(X_0 - X'_S) + b'_1(Y_0 - Y'_S) + c'_1(Z_0 - Z'_S)}{a'_3(X_0 - X'_S) + b'_3(Y_0 - Y'_S) + c'_3(Z_0 - Z'_S)} \\ y' - y'_0 + f' \frac{a'_2(X_0 - X'_S) + b'_2(Y_0 - Y'_S) + c'_2(Z_0 - Z'_S)}{a'_3(X_0 - X'_S) + b'_3(Y_0 - Y'_S) + c'_3(Z_0 - Z'_S)} \end{bmatrix},$$

式中 (X_0, Y_0, Z_0) 为初值,由(7)式中任意 3 个方程解得。

3.3 基于物方空间分析的轮廓中心线生成

物方空间分析是重建三维轮廓线的关键点。分析本文轮廓线的三维形态,有两个特征:1)空间共面,投

线仪向堆场投射的光线均位于一个空间平面即投影平面内,因而由 3.2 交会得到的三维轮廓线应分布在该平面内;2)一维有序,堆场表面上的轮廓线相当于从投线仪所在空间点位以平面扇形方式向堆场表面发射得到,因而在堆场主平面(即地平面)与投影面的交线上,轮廓线上所有点的垂足为一维有序排列。下面据此展开分析,从 3.2 交会得到的三维点集生成三维轮廓线。

3.3.1 共面约束的轮廓线三维点集过滤与插值拟合

由于成像噪声等因素,从 3.2 获得的三维点集可能包含极少量非轮廓线数据。此外,由于投线仪存在一定的发散角,因而在堆场表面的轮廓线有一定的宽度,本文基于 RANSAC 原理,从点集获取三角形并做基于法方向的共面判断,生成投影平面方程。

设 $\Pi: AX+BY+CZ+D=0$ 为共面三角形拟合的空间投影面, d_0 为轮廓线最大宽度, $p_i(x_i, y_i, z_i)$ ($i=0, 1, \dots, n$) 为交会后的三维点集,结合有关解析几何中三维点到平面垂足垂距的计算,可得到轮廓线拟合与粗差去除的数学准则如下:

$$d_i = (-AX_i - BY_i - CZ_i - D) / (A^2 + B^2 + C^2),$$

$$|d_i| \leq d_0/2, \quad \begin{cases} X' = X + Ad \\ Y' = Y + Bd \\ Z' = Z + Cd \end{cases} \quad (9)$$

$P'_i(X'_i, Y'_i, Z'_i)$ [$i=0, 1, \dots, m(m \leq n)$] 为 $P_i(X_i, Y_i, Z_i)$ ($i=0, 1, \dots, n$) 按(9)式去除匹配粗差后的三维点集。

3.3.2 投影面内轮廓线的排序与过滤

从 3.3.1 得到的三维点集被严格归算到一个拟合为投影面的空间平面内。为更好地提高三维轮廓线的可靠性,排除误差干扰,以轮廓线的一维有序特征为出发点,对 3.3.1 处理后的三维点集做进一步处理。有关步骤如下:

- 1) 投影面与地面基准平面的交线计算;
- 2) 三维点在交线上垂足,及垂足点到交线上某固定点的一维距离标量计算;
- 3) 以距离标量值为参考,对三维点集排序;
- 4) 重复 2), 3), 完成所有点排序;
- 5) 对排序后点集按预定间距,沿交线搜索拟合区段内三维点子集;
- 6) 三维点子集以各点垂足与该区段中心距离为权,拟合三维中心点结果并去除粗差;
- 7) 重复 5), 6), 拟合得到交线上等间距、滤除粗差后的三维轮廓线。

分析了在投线仪向堆场表面投影形成轮廓线的条件下,从立体像对重建三维轮廓线有序点集的模式算法,包括立体影像中投影线边缘快速匹配、交会平差与基于轮廓线物方特征的过滤拟合。与其它方法相比,该模型算法具有计算简单、效率高、稳健性好的特点。此外,实验中对经过以上处理得到的轮廓线上三维点集,还继续进行了一阶线性与二次曲线的插值,以解决轮廓线断裂问题。但结果并不理想,应用中还需要以调整投线仪和双目相机的姿态位置,以达到轮廓线对堆场表面尽可能多的覆盖和成像,从而得到更具堆场表面完整性、连续性的三维轮廓线。

4 实验分析

到目前为止,进行了多次室内模拟实验,室外实验的主要差别在于视场范围、投线仪功率和相机对轮廓线的成像能力,这不是目前关注的重点。实验以投线仪向复杂地形沙盘的投影扫描和三维轮廓线重建来检验方法的可行性和效率,以标定架标准平面为投影扫描对象,计算离面距离均方差、标准平面夹角差值来检验精度。

4.1 实验条件

为检验本文方法和模型算法的轮廓线重建能力(速度精度),架设了投线仪扫描与双目成像的实验平台,并开发了实验软件。实验以支架板固定架设了两台相机,在相机标定和相对定向后,激光投线仪架设在可转动支架上,向沙盘或标定架投射轮廓线,两相机同步采集形成序列立体影像。沙盘形貌复杂,基本尺寸为 $2 \text{ m} \times 1.5 \text{ m} \times 0.47 \text{ m}$ [图 5(a)];标定架具有精确尺寸,平面网格 $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ 、每格 2 cm ,误差小于 0.1 mm ,两平面垂直,误差小于 0.1° [图 5(b)];激光投线仪波长 532 nm ,出瞳功率 150 mW ,视距 5 m 时轮廓线宽度小于 5 mm ;相机焦距 6 mm 、500 万像素($2592 \text{ pixel} \times 1944 \text{ pixel}$);为提高对轮廓线的捕捉能力,镜头配有滤光镜。

4.2 实验结果分析

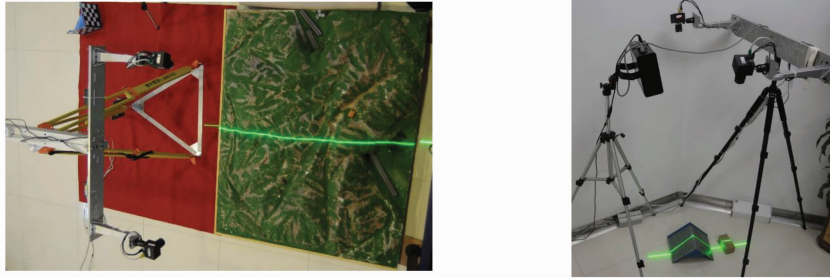
所采集数据经过实验软件的全自动处理,得到了三维轮廓线序列,实现了初步的三维形貌重建,具体如下。

4.2.1 沙盘三维形貌重建

在立体影像 200 万像素($1600 \text{ pixel} \times 1200 \text{ pixel}$)条件下,轮廓线三维重建速度大于 5 Hz ,对照文献[21]中光刀法从 33 万像素($640 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$)影像重建投影线速度不超过 8 Hz ,本文方法有明显优

势;以 1.5 mm 的一维间距拟合三维轮廓线,单根轮廓线上三维点平均 690.3,达到所扫描沙盘宽度的 70%。图 6 是从 341 对立体影像重建得到的三维轮廓线,在 OpenGL 三维框架中转动缩放,检查重建结果与沙盘地形的吻合细节;在大于 20 万个三维点中,

整体表面之外的粗差点个数极少(小于 10)(说明:投线仪的不均匀扫描运动造成图 6 中轮廓线之间的疏密变化,其左上及右上角两处因相机臂对投影线遮挡产生空缺)。



(a) laser-line scanning indoor complex terrain model (b) laser-line scanning calibration frame

图 5 堆场三维形貌测量的室内模拟实验

Fig. 5 Indoor simulated experiment of stack-yard 3D measurement

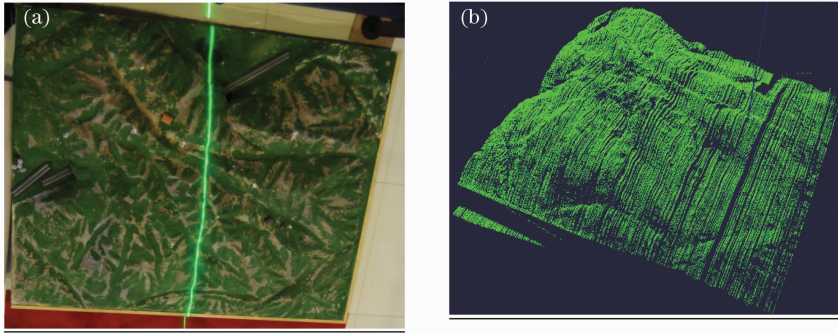


图 6 (a)沙盘实景与(b)三维轮廓线重建结果对比

Fig. 6 Comparison of (a) terrain sand model and (b) reconstructed 3D contour

4.2.2 轮廓线三维重建精度分析

以标定架为扫描对象,获得轮廓线三维点集后,以 RANSAC 拟合得到标定架标准平面方程,计算点到平面距离的均方差,以及两平面夹角得到夹角

差值,以此检验本文方法的精度。实验结果显示两平面的离面距离均方差分别为 0.5 mm 和 0.6 mm,两平面夹角差值为 0.9° 。图 7 是标定架与三维轮廓线重建结果的对比。

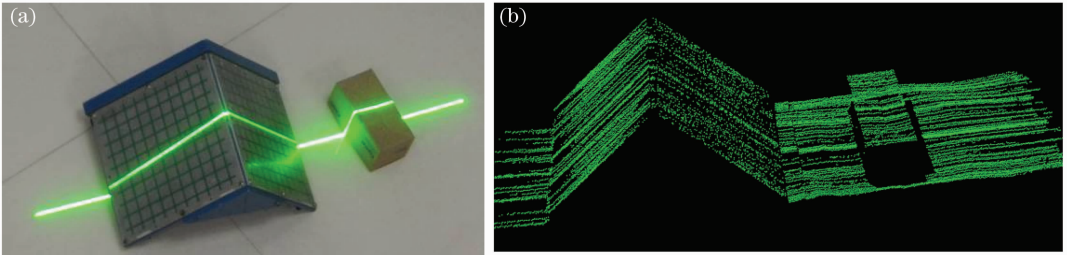


图 7 (a)标定架扫描和得到的(b)三维轮廓线

Fig. 7 Comparison of (a) calibration-frame scanning and (b) reconstructed 3D contour

5 结 论

对散装物料大型堆场三维形貌的自动快速测量问题进行了研究,针对其形貌不规则、表面纹理贫乏

以及材质反射率低等特点,提出了激光投线仪扫描辅助下双目摄影测量的方法。具体要点包括:像方处理以轮廓线边缘点梯度与核线约束提取同名点集,无需计算量很大的全核线搜索与影像窗口匹配;

通过同名点交会平差形成三维点集,再分析轮廓线空间形态特征展开物方分析,得到属于轮廓线的三维点集。已有实验结果表明:该方法增加了激光投线仪扫描的灵活性、可实时重建三维轮廓线,轮廓线扫描三维绝对精度达到了亚毫米级,整个过程实验自动执行;实现了初步的三维表面重建,为堆场三维形貌测量打下基础。

接下来,将继续提高三维轮廓线的重建速度与连续性、实现现场条件下多站位三维形貌测量结果的综合^[22],与形貌参数测定;在室外堆场实际工作场景下,提高室外光照条件下的投影成像能力;开发可满足实际需求的堆场测量系统与新技术产品。

参 考 文 献

- Ji Guangqin, Wang Quanxi, Li Xinghua *et al.*. Automatic laser coal inventory system[J]. *Electric Power*, 2000, **33**(2): 72~73
姬广勤, 王全喜, 李兴华 等. 激光自动盘煤系统[J]. 中国电力, 2000, **33**(2): 72~73
- Xiong Youhui, Li Peisheng, Zou Xianhong *et al.*. Principle and application of portable laser surveying system for coal stockpile [J]. *Electric Power*, 2003, **36**(6): 48~51
熊友辉, 李培生, 邹显宏 等. 便携式激光盘煤系统原理及应用 [J]. 中国电力, 2003, **36**(6): 48~51
- Wei Shan. Mobile Laser Scanning and Surveying System for Coal Stockpile[D]. Hefei: Anhui Agriculture University, 2004
韦 山. 便携式计算机的车载激光扫描盘煤系统研究[D]. 合肥: 安徽农业大学硕士学位论文, 2004
- Wang Xianwen, Wang Zhong, Cheng Xianxia. Using vertical-section method to measure stockpile's volume[J]. *J. Shenyang Electric Power Institute*, 2002, **4**(2): 34~36
王贤文, 王 忠, 程显侠. 利用断面法计算机辅助测量料堆的体积[J]. 沈阳电力高等专科学校学报, 2002, **4**(2): 34~36
- Liu Haoran, Xu Gang, Zhang Wenming. A three-dimensional reconstruction method of cement clinkers based on depth candidates[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2329~2332
刘浩然, 徐 刚, 张文明. 基于候选深度信息的水泥熟料三维重建方法[J]. 光学学报, 2010, **30**(8): 2329~2332
- Shi Hui, Wang Boxiong, Jia Qianqian *et al.*. Establishment of customized shoe last expert system based on light sectioning method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 712~717
史 辉, 王伯雄, 贾倩倩 等. 基于光切法形貌测量的鞋楦定制专家系统[J]. 光学学报, 2009, **29**(3): 712~717
- Li Qingquan, Li Bijun, Chen Jing. Research on laser range scanning and its application[J]. *J. Wuhan Technical University of Surveying and Mapping*, 2000, **25**(5): 387~392
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): 387~392
- Wang Zhizhuo. Photogrammetry [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2007. 489~490
王之卓. 摄影测量原理[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2007. 489~490
- Wang Xiumei, Song Xuebin, Liu Weigang *et al.*. Volumetric calculations of stockpiles by using computer-aided measuring technique[J]. *J. University of Science and Technology Beijing*, 1999, **21**(5): 494~497
王秀美, 宋学斌, 刘炜刚 等. 利用计算机辅助测量技术测量料堆体积[J]. 北京科技大学学报, 1999, **21**(5): 494~497
- T. Takatsuji, A. Kirita, T. Kurosawa. A simple instrument for measuring edge angles using a light sectioning method [J]. *Measurement Science & Technology*, 1997, **8**(7): 782~786
- Chen Ying. Volume Measurement of Large Material Stack Based on Computer Vision [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2000. 24~25
陈 莹. 大型物料堆体积估算的计算机视觉方法[D]. 上海: 上海交通大学硕士学位论文, 2002. 24~25
- R. Y. Tsai. A versatile camera calibration technique for high accuracy 3D machine vision metrology using of-the-shelf TV camera and lenses [J]. *IEEE J. Robotics and Automation*, 1987, **3**(4): 323~344
- Yu Qifeng, Shang Yang. Videometrics: Principles and Researches[M]. Beijing: Science Press, 2009. 53~55
于起峰, 尚 洋. 摄像测量原理与应用研究[M]. 北京: 科学出版社, 2009. 53~55
- Chen Ying. Digital Photogrammetry for Remote Sensing Image [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2004. 85~88, 95~98, 31~32
陈 鹰. 遥感影像的数字摄影测量[M]. 上海: 同济大学出版社, 2004. 85~88, 95~98, 31~32
- Ou Jianliang. 3D Line-Segment Extraction and Object Recognition Based on Ground Mobile Mapping Sequential Stereo Imagery[D]. Shanghai: Tongji University, 2009. 62~80
欧建良. 基于地面移动测量序列立体影像的三维线段提取和物体识别[D]. 上海: 同济大学博士学位论文, 2009. 62~80
- Jia Qianqian, Wang Boxiong, Luo Xiuzhi. Extraction of central positions of light stripe in sub-pixel in 3D surface measurement based on light sectioning method [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(2): 390~396
贾倩倩, 王伯雄, 罗秀芝. 光切法形貌测量中光条中心的亚像素提取[J]. 光学精密工程, 2010, **18**(2): 390~396
- Wu Qingyang. A Study for Key Techniques of 3D-Sensor Based on Line-Structure Light [D]. Chengdu: Sichuan University, 2006. 21
吴庆阳. 线结构光三维传感中关键技术研究[D]. 成都: 四川大学博士学位论文, 2006. 21
- M. Fischler, R. Bolles. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with application to image analysis and automated cartography[J]. *Communication of the ACM*, 1981, **24**(6): 381~395
- Yu Dianhong. Image Detection and Processing [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2006. 152~162
于殿泓. 图像检测与处理技术[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2006. 152~162
- Wang Suihui. Error Theory and Survey Adjustment [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2009. 115~119
王穗辉. 误差理论与测量平差[M]. 上海: 同济大学出版社, 2009. 115~119
- Zhao Weibo. 3D Measurement System Based on Liner Laser Scanned and Camera Triangulation [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008. 22~24
赵伟博. 基于线激光扫描的三维测距系统[D]. 杭州: 浙江大学硕士学位论文, 2008. 22~24
- Zhu Jigui, Guo Lei, Ye Shenghua. Principle and implementation method of three-dimensional precision positioning in large field working space[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1872~1876
郝继贵, 郭 磊, 叶声华. 现场条件下大空间三维精密定位原理与方法[J]. 光学学报, 2009, **29**(7): 1872~1876