

基于双目立体视觉的煤体积测量^①

高如新, 王俊孟

(河南理工大学 电气工程与自动化学院, 焦作 454000)

摘 要: 给出一种双目立体视觉结合 SURF(Speeded Up Robust Features)算法的小型煤堆的体积测量方法, 首先, 简要介绍了双目视觉的原理和基于 SURF 算法的立体匹配, 其次, 给出了煤堆的三维重建和体积计算方法, 讨论了影响计算精度的主要因素及解决方法, 实现了煤堆体积的非接触测量, 最后, 实验结果证明了该方法具有可行性, 有一定的实用价值.

关键词: 煤堆体积测量; 双目立体视觉; SURF 算法

Volume Measurement of Coal based on Binocular Stereo Vision

GAO Ru-Xin, WANG Jun-Meng

(School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000 China)

Abstract: A method for volume measurement of small coal heap based on combination of SURF feature and binocular vision is presented in this article. Firstly, the principle of binocular vision and stereo matching based on SURF algorithm is briefly introduced. Then, in order to achieve the non-contact volume measurement of coal heap, the 3D reconstruction and volume measurement method of coal heap is given, and the main factors influencing the calculation accuracy and related solution are discussed. Finally, the feasibility and application value of this method used for volume measurement of coal has been proved according to the experimental results.

Key words: volume measurement of coal; binocular vision; SURF feature matching

① 收稿时间:2013-09-17;收到修改稿时间:2013-10-28

煤的体积是衡量煤矿企业经济效益的一项重要指标, 由于煤堆没有固定的形状, 所以其体积测量就显得比较困难. 目前对煤的体积的测量主要是针对较大的煤堆的体积测量, 测量方法主要有: 人工测量法及仪器测量法, 人工测量法就是将煤堆人为地整理成一定的几何形状, 然后计算出其体积, 这种方法虽然简单易行, 但是耗时耗力, 准确性差, 测量效率低; 仪器测量法主要有激光测量法和超声波测量法等^[1-2], 这些方法自动化程度和技术含量很高, 测量精度及测量效率也大有提高, 但是测量设备价格昂贵, 投资成本高, 所以不宜推广使用.

对于较大煤堆的体积测量显得比较困难, 在煤矿企业的生产过程中, 传送带输煤是必不可少的环节, 如果在煤的输送过程中就能够测得煤的体积, 这将大大简化传统的煤的体积测量方法. 按照一定的时间间

隔, 把每一时间间隔内经过传送带上一定区域的煤的体积计算出来, 将各个时间间隔内的煤的体积累加, 那么, 一定时间内传送带输送的煤的体积就能计算出来, 煤的体积计算最终转化为一系列小型煤堆的体积计算问题. 针对这个问题, 文章研究了基于视觉的小型煤堆的体积测量方法, 提出了采用双目视觉系统结合 SURF 算法的煤堆体积计算方法, 实验结果验证了该方法的可行性, 具有一定的应用价值.

1 双目立体视觉原理

双目立体视觉是计算机视觉领域的一个重要分支, 模拟人眼对看到的场景具有深度感知的能力, 利用两台摄像机同时获取同一场景的立体图像对, 找到图像

对中相对应的匹配点,再利用双目视觉成像原理,将图像像素点所对应的场景中的点的三维坐标计算出来,以此来获得场景的几何信息,利用这些信息可以进行场景重建、目标定位、距离测量等。双目立体视觉经过多年的发展,在工业检测、机器人导航、医学机器成像、控制与检测位姿以及在军事和航空测绘上等众多领域中得到了越来越广泛的应用。

双目立体视觉获得场景中点的三维坐标信息,一般包括立体标定、立体匹配、三维坐标计算等步骤。

1.1 针孔摄像机模型

针孔摄像机模型一般包含 4 个坐标系^[3]:世界坐标系 $X_w Y_w O_w Z_w$, 摄像机坐标系 $X_c Y_c O_c Z_c$, 图像坐标系 XOY , 图像像素坐标系 $u_p v_p$, 如图 1 所示。若采用齐次坐标,则空间某点 P 的世界坐标 $[X_w \ Y_w \ Z_w \ 1]^T$ 与该点对应的投影点像素坐标 $[u \ v \ 1]^T$ 间的关系为:

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x & 0 \\ 0 & f_y & c_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

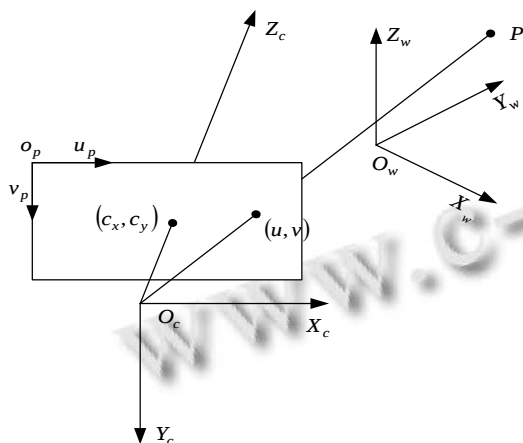


图 1 针孔摄像机模型

其中 $T = [t_x \ t_y \ t_z]^T$ 为世界坐标的原点 O_w 在摄像机坐标系的坐标, $R = (r_{ij})_{3 \times 3}$ 为世界坐标系转化到摄像机坐标系的正交旋转矩阵, f_x 、 f_y 、 c_x 、 c_y 为摄像机的内参数,这些参数均可通过摄像机标定获得^[4-5],这一表达式确立了点的三维坐标与其投影点的像素坐标之间的对应关系。

标之间的对应关系。

式(1)展开化简后,可以得到两个方程:

$$\begin{cases} A_1 X_w + B_1 Y_w + C_1 Z_w = D_1 \\ A_2 X_w + B_2 Y_w + C_2 Z_w = D_2 \end{cases} \quad (2)$$

其中 $A_1 = f_x r_{11} - (u - c_x) r_{31}$, $B_1 = f_x r_{12} - (u - c_x) r_{32}$, $C_1 = f_x r_{13} - (u - c_x) r_{33}$, $D_1 = (u - c_x) t_z - f_x t_x$, $A_2 = f_y r_{21} - (v - c_y) r_{31}$, $B_2 = f_y r_{22} - (v - c_y) r_{32}$, $C_2 = f_y r_{23} - (v - c_y) r_{33}$, $D_2 = (v - c_y) t_z - f_y t_y$ 。式(2)确定了空间的一条直线。

1.2 双目视觉计算三维坐标

双目视觉模型如图 2 所示。

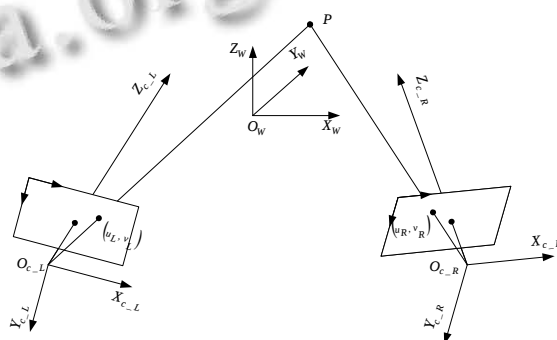


图 2 双目视觉模型图

设左右摄像机与世界坐标架对应的旋转矩阵和平移矢量分别为 R_L 、 R_R 和 T_L 、 T_R , 点 P 的投影点像素坐标分别为 $[u_L \ v_L]^T$, $[u_R \ v_R]^T$, 根据式(2), 可以得到下面的四个方程:

$$\begin{cases} A_{L-1} X_w + B_{L-1} Y_w + C_{L-1} Z_w = D_{L-1} \\ A_{L-2} X_w + B_{L-2} Y_w + C_{L-2} Z_w = D_{L-2} \\ A_{R-1} X_w + B_{R-1} Y_w + C_{R-1} Z_w = D_{R-1} \\ A_{R-2} X_w + B_{R-2} Y_w + C_{R-2} Z_w = D_{R-2} \end{cases} \quad (3)$$

记为:

$$M_{L-R} P = D_{L-R} \quad (4)$$

方程组(3)的系数的意义和式(2)一样, 已知左右摄像机的内参数以及世界坐标架与其对应的外参数 R_L 、 R_R 和 T_L 、 T_R , 那么点的三维坐标可以由其投影点的像素坐标 $[u_L \ v_L]^T$, $[u_R \ v_R]^T$ 通过方程组(3)确定^[6]。

实际的计算应用中, 方程组(3)为不相容方程组, 可以采用最小二乘法求得其近似解:

$$P = (M_{L-R}^T M_{L-R})^{-1} M_{L-R}^T D_{L-R} \quad (5)$$

2 基于SURF算法的立体匹配

立体匹配作为双目立体视觉的关键的步骤,一直以来都是双目立体视觉研究的难点和重点,其目的是找出两幅图像中像素的对应关系,立体匹配算法主要分为两大类^[7]:基于局部约束的立体匹配算法和基于全局约束的立体匹配算法,基于全局约束的立体匹配算法具有视差准确度高的优点,但是计算复杂度高,实时性差,基于局部约束的立体匹配算法主要有基于区域的匹配算法和基于特征的匹配算法.基于特征的立体匹配方法具有很好的鲁棒性,计算量小,速度快,成为匹配研究的主流方向.

SURF 算法是一种高鲁棒性的局部特征点检测器, SURF 特征具有尺度、旋转等不变特性,因此常用于图像拼接、三维重建、视频跟踪、目标识别等,由 Herbert Bay 等人在 2006 年提出,该算法采用积分图像、Haar 小波变换和近似的 Hessian 矩阵运算来提高运算速度,采用 Haar 小波变换增加鲁棒性,与 SIFT 算法相比, SURF 算法更具有鲁棒性和实时性^[8].

2.1 SURF 特征匹配

SURF 特征匹配分为三个步骤:提取特征点,构建特征描述符,快速特征匹配.

2.1.1 提取特征点

SURF 算法通过计算图像像素点的 Hessian 矩阵来提取图像特征点,这需要图像和高斯函数做卷积运算,根据卷积运算性质,图像与高斯函数的卷积可以转化为积分图像与高斯二阶导数模板的卷积运算,而高斯二阶导数模板实际上只是一些简单的权重区域的组合,这样卷积运算就变成了积分图像的加减运算,因此,可以提高图像特征点提取的速度.

SURF 算法采用盒子滤波器近似高斯二阶偏导数,最终获得近似的 Hessian 矩阵,通过改变盒滤波器的模板大小建立尺度图像金字塔. Hessian 矩阵的行列式的局部最大值点即为特征点.

2.1.2 构建特征描述符

对于提取到的特征点,建立特征向量对其进行描述, SURF 算法在特征点圆形区域内通过 Haar 小波响应确定一个主方向,使特征向量具有旋转不变性,再以特征点为中心,构建正方形区域,经过 Haar 小波响应最终生成一个 64 维的特征向量.

2.1.3 特征匹配

对于待匹配图像与参考图像特征点的匹配, SURF

算法采用最近邻域匹配方法,首先计算待匹配图像上的特征点特征向量到参考图像上所有特征点特征向量的欧氏距离,得到一个距离集合,其次通过对距离集合进行比较运算得到最小欧氏距离和次最小欧氏距离 d_2 .

$$\frac{d_1}{d_2} < T \quad (6)$$

式(6)中 T 为设定的阈值,一般为 0.6,当最小欧氏距离 d_1 和次最小欧氏距离 d_2 的比值小于该阈值时,认为特征点与对应最小欧氏距离的特征点是匹配的,否则没有点与该特征点相匹配.

设定的阈值越小,匹配越稳定,但匹配点数目相应越少.

2.2 极线约束

双目立体视觉系统采集到的左右两幅图像的某一匹配点对像素坐标分别为 $[u_L \ v_L]^T$, $[u_R \ v_R]^T$,两者之间存在如下的关系式:

$$\begin{bmatrix} u_R \\ v_R \\ 1 \end{bmatrix}^T \mathbf{F} \begin{bmatrix} u_L \\ v_L \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (7)$$

式(7)称为极线约束, $\mathbf{F}$ 称为基础矩阵,可通过立体标定求得.

SURF 算法提取到的图像匹配点对存在一些误匹配点,由于匹配点对之间满足极线约束关系,采用关系式(7)可以有效地去除这些误匹配点.

3 煤堆三维重建及体积测量

双目立体视觉测量煤体积的实验场景如图 3 所示,首先,需要建立双目立体视觉系统,并完成立体标定,获得左右摄像机的内参数,以及两台摄像机坐标系之间对应的基础矩阵,其次,确定一个世界坐标系,计算出其与两个摄像机坐标系之间对应的旋转矩阵和平移矢量等外部参数.在世界坐标系的 $X_w O_w Y_w$ 平面放置煤堆,煤堆应在两个摄像机的视场范围内,使得两台摄像机采集到的煤堆图像能够显示出整个煤堆.

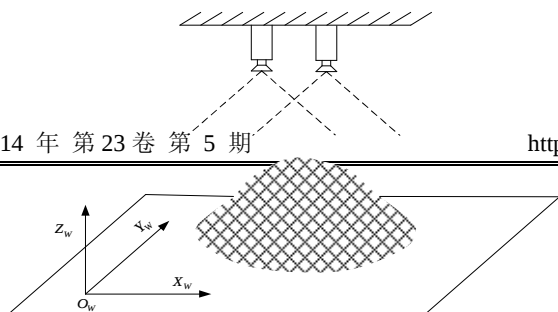


图 3 双目视觉测量煤体积实验场景图

3.1 煤堆三维重建

提取双目立体视觉采集得到的左右两幅煤堆图像的 SURF 特征, 通过特征匹配, 找到匹配的图像点对, 将其像素坐标带入式(5), 求取对应空间点的三维坐标, 记 (X_i, Y_i, Z_i) 为获得的第 i 个点的三维坐标。

为了重建煤堆表面形状, 将求得的点 (X_i, Y_i, Z_i) , $(i=1, 2, \dots)$ 投影到 $X_w O_w Y_w$ 平面上, 对投影点集 (X_i, Y_i) , $(i=1, 2, \dots)$ 做 Delaunay 三角剖分, 借助于 MATLAB 软件的三维网格绘图函数重构煤堆的表面, 整个表面将由一系列的三角形张成^[9]。

3.2 煤堆体积计算

记 Δ_i 为投影点集 Delaunay 三角剖分的第 i 个三角形, 如图 4 所示, 其对应的三个顶点的二维坐标分别为 (X_{i1}, Y_{i1}) 、 (X_{i2}, Y_{i2}) 、 (X_{i3}, Y_{i3}) , 三个顶点对应的煤堆表面的点的坐标为 (X_{i1}, Y_{i1}, Z_{i1}) 、 (X_{i2}, Y_{i2}, Z_{i2}) 、 (X_{i3}, Y_{i3}, Z_{i3}) , 则整个煤堆的体积计算如下:

$$V = \sum_i S(\Delta_i) \cdot \min(Z_{i1}, Z_{i2}, Z_{i3}) \quad (8)$$

其中 $S(\Delta_i)$ 为第 i 个三角形的面积, 显然 $S(\Delta_i) \cdot \min(Z_{i1}, Z_{i2}, Z_{i3})$, 只是图中的不规则柱体的近似值, 为了提高计算精度, 可以求出不规则柱体的精确的体积 V_i , 此时有煤堆的体积计算公式:

$$V = \sum_i V_i \quad (9)$$

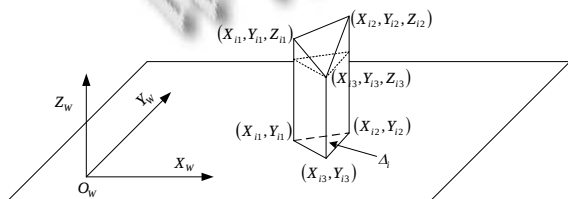


图 4 体积计算

3.3 体积计算误差

影响煤堆体积计算精度的因素主要有以下几种:

①双目立体视觉计算三维坐标的误差。摄像机标

定的精度将影响到摄像机的内部参数以及外部参数的准确度, 基于 SURF 特征的立体匹配求得的图像特征点像素坐标存在一定的误差, 最终通过式(5)计算特征点对应空间点的三维坐标将存在误差, 使求得的三维空间中的点并不在实际的煤堆表面上, 而是存在一定的偏离。

提高标定的精度以及立体匹配的精度, 可以减小这种误差。

②煤堆体积计算的离散化方法引入的误差。煤堆表面可以抽象成为一种光滑的曲面, 煤堆体积的计算即二重积分的计算, 而采用基于局部约束的 SURF 特征匹配方法, 只能求得煤堆表面的一系列点集, 用这些点集的三角剖分张成的三角形网格面来代替煤堆表面, 煤堆的体积计算转化为不规则柱状体的求和过程。

合理地设置 SURF 特征匹配的阈值 T , 提高图像的对比如^[10], 可以增加匹配点的密度, 进而减小离散化引入的误差。

4 煤堆体积计算实验

为了验证煤堆体积计算方法的可行性, 建立图 3 所示的实验场景, 设定一个世界坐标系, 将煤堆置于世界坐标架的 $X_w O_w Y_w$ 平面上。由于煤的特性, 在光照较差的场景中, 煤的表面特征不够清晰, 为了提取到高密度的特征点, 要保证场景具有良好的光照条件。

4.1 立体标定

选择 6×9 的平面棋盘格作为标定物, 每个棋盘格规格为 $25.5\text{mm} \times 25.5\text{mm}$, 棋盘图像如图 5 所示, 让左右摄像机同时采集 25 组空间位置不同的棋盘图像, 采用 MATLAB 摄像机标定工具箱对双目立体视觉系统进行标定, 其标定结果如表 1 所示。

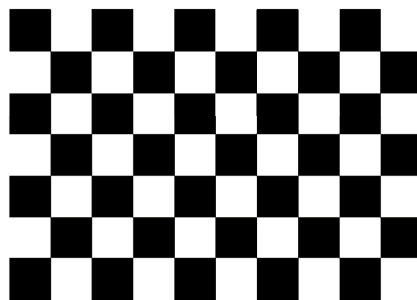


图 5 标定板

表 1 中 R_{L_R} 、 T_{L_R} 为左右摄像机坐标架对应的

旋转矩阵和平移矢量, $\mathbf{F}$ 为基础矩阵。

实际情况中, 相机的主点 c_x 、 c_y 并不位于图像中心, 两者存在一定的偏差, 而且 X 方向的等效焦距 f_x 和 Y 方向的等效焦距 f_y 也不相等。实验中摄像机拍摄的图片大小为 480×640 , 从表中数据可以看出这些都符合实际情况, 两个摄像机的摆放位置由于接近于理想状态, 即两个摄像机的主光轴平行、投影平面共面、摄像机向上的方向平行, 所以旋转矩阵接近于单位矩阵, 平移矢量的第二、三个分量远小于第一分量。

表 1 摄像机标定结果

摄像机 内外参数	左摄像机	右摄像机
f_x	753.065	761.870
摄像机 f_y	754.460	762.693
内参数 c_x	306.485	341.820
c_y	252.889	243.671
R_{L-R}	$\begin{bmatrix} 0.999 & -0.004 & 0.007 \\ 0.004 & 0.999 & 0.006 \\ -0.007 & -0.006 & 0.999 \end{bmatrix}$	
摄像机 外参数 T_{L-R}	$[-64.363 \ -0.833 \ 2.823]$	
$\mathbf{F}$	$\begin{bmatrix} 1.738 \times 10^{-8} & 7.568 \times 10^{-6} & 1.995 \times 10^{-4} \\ 6.332 \times 10^{-6} & 1.002 \times 10^{-6} & 0.129 \\ 4.139 \times 10^{-4} & -0.129 & 1.000 \end{bmatrix}$	

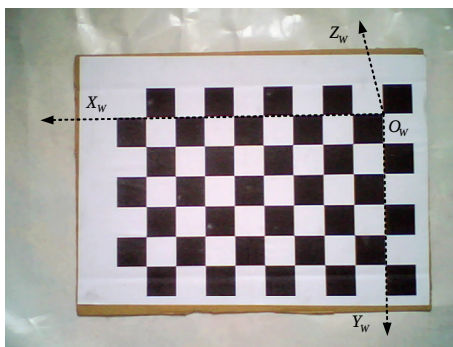


图 6 设定的世界坐标架

图 6 即为设定的世界坐标架在左右两幅图像上的投影, 采用右手坐标系, 选取棋盘右上角的角点做为世界坐标架的原点 O_w , 棋盘格的长度方向为世界坐标架的 X 轴方向, 宽度方向为世界坐标架的 Y 轴方向, Z 轴方向为垂直于棋盘平面的方向。双目立体视觉系统根据式(5)求得的三维坐标均是在此坐标系下的坐标。

世界坐标架与左右摄像机坐标架对应的旋转矩阵与平移矢量如表 2 所示。

表 2 旋转矩阵和平移矢量表

	世界坐标架与 左摄像机坐标架	世界坐标架与 右摄像机坐标架
旋转 矩阵	$\begin{bmatrix} -0.999 & 0.010 & -0.028 \\ 0.011 & 0.999 & -0.036 \\ 0.028 & -0.036 & -0.999 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.999 & 0.005 & -0.040 \\ 0.007 & 0.999 & -0.047 \\ 0.040 & -0.048 & -0.998 \end{bmatrix}$
平移 矢量	$[138.616 \ -63.549 \ 458.450]$	$[77.704 \ -61.233 \ 460.485]$

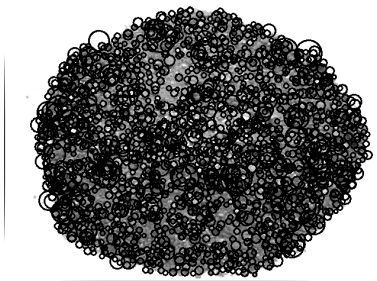
4.2 立体匹配

双目立体视觉采集到的煤堆图像如图 7 所示, 可以看出两幅图像的对比度比较小, 提取两幅图像的 SURF 特征点, 进行特征匹配, 特征点提取及特征匹配结果分别如图 8、表 3 所示, 图 9 为增强图像对比度后的煤堆图像, 提取其特征点并进行特征匹配, 结果如图 10、表 4 所示。

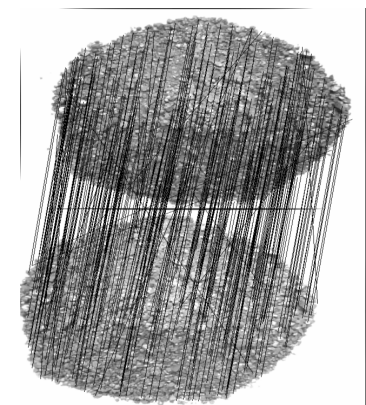




图 7 双目视觉系统采集的煤堆图像



(a) 提取 SURF 特征点



(b) SURF 特征匹配

图 8 SURF 特征点及特征匹配图

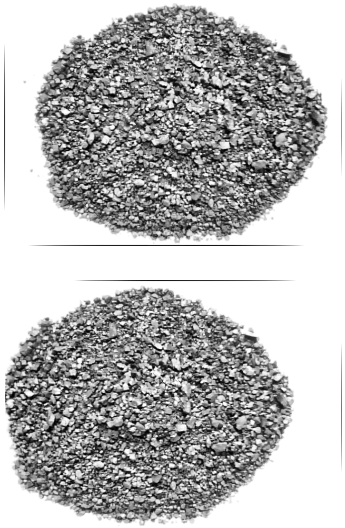
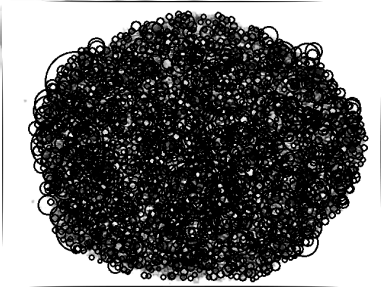


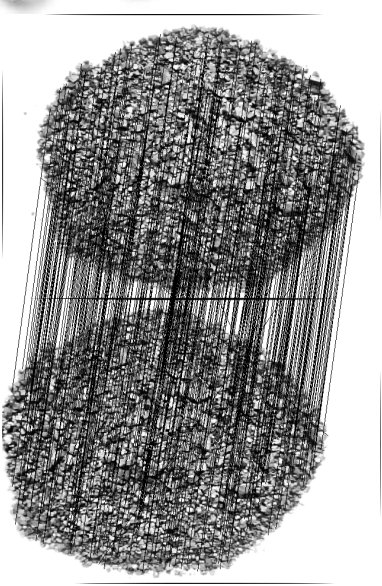
图 9 对比度增强后的图

表 3 特征点提取及匹配结果

	左图像	右图像
特征点提取数目	1842	1808
特征点提取 耗时(单位: ms)	657.454	574.821
特征匹配数目	286	
特征匹配耗时 (单位: ms)	10047.100	



(a) 提取 SURF 特征点



(b) SURF 特征匹配

图 10 对比度增强后的 SURF 特征点及特征匹配图

表 4 增强对比度后特征点提取及匹配结果

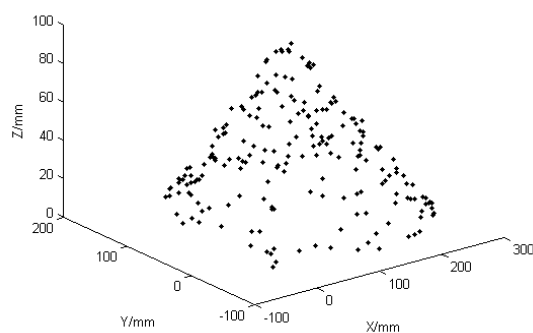
	左图像	右图像
特征点提取数目	2343	2320
特征点提取 耗时(单位: ms)	915.774	847.209
特征匹配数目	328	
特征匹配耗时 (单位: ms)	13007.300	

从表 3 及表 4 数据结果可以看出在增加图像对比度后, 提取到的特征点密度明显增加了, 同时匹配点对的数目也增加了, 但是耗时却增加了。

4.3 三维重建

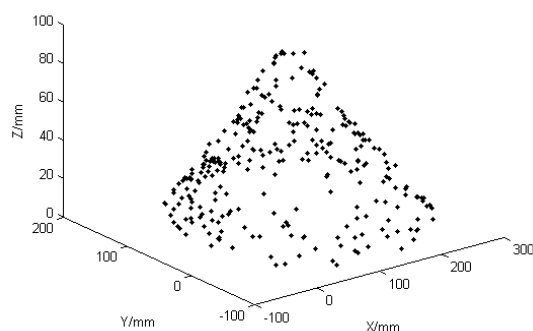
利用公式(5)求取匹配点对对应的空间点的三维坐标, 即对应的煤堆表面点的世界坐标, 计算结果如图 11 所示, 显然, 其外形轮廓很接近实际煤堆。

三维点云数据



(a) 对比度加强前

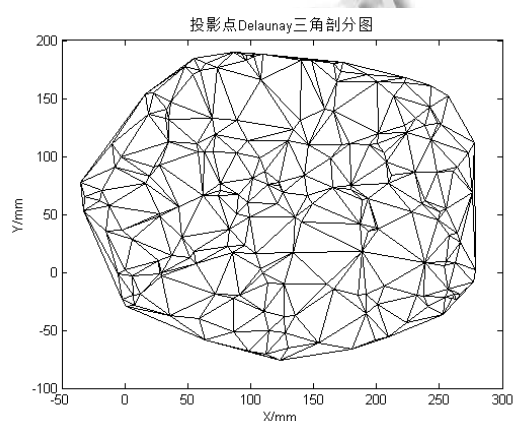
三维点云数据



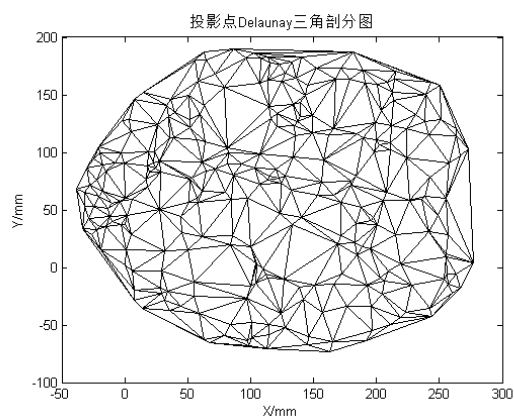
(b) 对比度加强后

图 11 双目视觉系统求得的离散点云数据

图 12 所示为求得的点集在世界坐标系 $X_wO_wY_w$ 平面投影点的 Delaunay 三角剖分图, 可以看出, 其轮廓与图 7 煤堆的轮廓很相似, 两者所不同的是图像方向不同, 这是由于图 6 中设定的世界坐标架 X_w 、 Y_w 的方向与图 12 所示的坐标方向正好相反。



(a) 对比度加强前



(b) 对比度加强后

图 12 投影点 Delaunay 三角剖分结果

将空间点按照其投影点的 Delaunay 三角剖分结果连接成一系列的三角形, 在三维空间张成一个曲面, 该曲面就是煤堆表面的三维重建, 结果如图 13 所示。

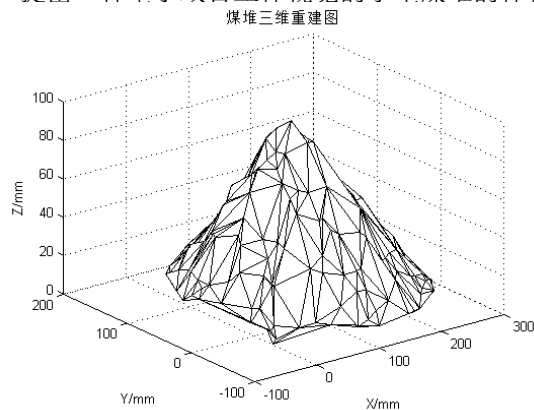
4.4 体积计算

按照 3.2 节分析的求解煤堆体积的方法, 求得的煤堆体积分别为: 2189.258cm^3 、 2248.171cm^3 , 实际测得的煤堆体积为 2366.496cm^3 , 计算相对误差为

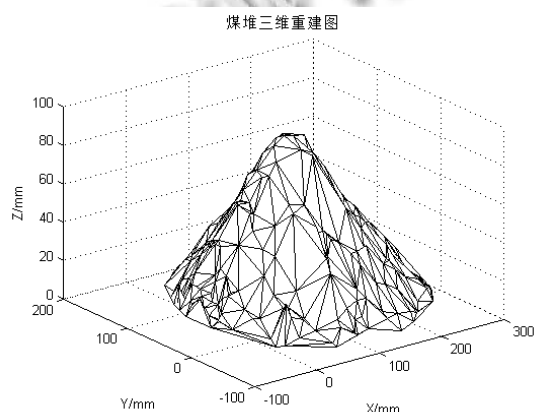
7%、5%.

6 小结

提出一种基于双目立体视觉的小型煤堆的体积测



(a) 对比度加强前



(b) 对比度加强后

图 13 煤堆三维重建图

量方法, 采用 SURF 特征匹配算法进行立体匹配, 实验结果表明, 该方法具有可行性, 有一定的实用价值. 煤堆的 SURF 特征点密度受光照影响较大, 而且特征

点提取密度的增加要以时间的增加为代价, 如何高效的提取高密度的特征点, 从而使得煤堆的三维重建和体积计算更精确, 速度更快, 成为下一步的研究重点.

参考文献

- 1 张文军, 舒新前, 姜洪才, 白丽珍. 基于激光三维扫描的不规则煤场测量系统设计. 煤炭科学技术, 2009, 37(5): 112-114.
- 2 范会敏, 曹长剑. 一种实用的激光盘煤系统设计. 工业仪表与自动化装置, 2011(1): 57-59.
- 3 吴福朝. 计算机视觉中的数学方法. 北京: 科学出版社, 2008: 59-100.
- 4 刘倬材, 谢明红, 王伟. 双目视觉的立体标定方法. 计算机工程与设计, 2011, 32(4): 1508-1512.
- 5 夏艳, 苏中, 吴细宝. 双目视觉测量系统的标定及 3 维测量. 中国图象图形学报, 2008, 13(7): 1298-1302.
- 6 曲学军, 张璐. 基于双目视觉的三维测量方法. 计算机仿真, 2011, 2(28): 373-377.
- 7 Scharstein D, Szeliski R. A taxonomy and evaluation of dense two frame stereo correspondence algorithms. International Journal of Computer Vision, 2002, 47(1/3): 7-42.
- 8 Bay H, Ess A, Tuytelaars T. SURF: Speeded Up Robust Features. Computer Vision and Image Understanding (CVIU), 2008, 110(3): 346-359.
- 9 梁群仙, 许宏丽. 一种基于点云数据的快速曲面重构方法. 计算机工程, 2013, 39(2): 237-240.
- 10 郭宝龙, 孙伟. 数字图像处理系统工程导论. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2012: 30-58.