

基于双目视觉的玻璃料滴体积测量方法^①



方 陈^{1,2}, 邹光明^{1,2}, 侯 宇^{1,2}, 刘源洞^{1,2}, 肖 洒^{1,2}, 许家旺^{1,2}

¹(武汉科技大学 冶金装备及其控制教育部重点实验室, 武汉 430081)

²(武汉科技大学 机械传动与制造工程湖北省重点实验室, 武汉 430081)

通信作者: 邹光明, E-mail: zouguangming@wust.edu.cn

摘 要: 针对目前玻璃料滴常规称量方法测量效率低且受环境影响较大的问题, 提出一种基于双目视觉的非接触式测量方法. 搭建双目视觉系统, 对采集的图像进行滤波去噪和特征轮廓提取, 基于融合料滴图像梯度信息的 Census 变换立体匹配算法得到边缘信息完整的视差图. 分别分析发生相机平面方向偏转和相机景深方向偏转的料滴对水平切片法精度的影响, 首先采用最小外接矩形算法对发生相机平面方向偏转的料滴进行校正, 然后利用视差信息修正发生相机景深方向偏转的料滴, 最后基于水平切片法累加水平切片获得料滴体积及质量. 实验结果验证, 该方法对发生空间偏转的料滴也能达到精度标准, 能够满足玻璃瓶生产的需求.

关键词: 双目视觉; 立体匹配; 特征融合; 偏转校正; 水平切片; 三维重建

引用格式: 方陈, 邹光明, 侯宇, 刘源洞, 肖洒, 许家旺. 基于双目视觉的玻璃料滴体积测量方法. 计算机系统应用, 2022, 31(8):402-407. <http://www.c-s-a.org.cn/1003-3254/8656.html>

Measurement Method of Glass Gob Volume Based on Binocular Vision

FANG Chen^{1,2}, ZOU Guang-Ming^{1,2}, HOU Yu^{1,2}, LIU Yuan-Jiong^{1,2}, XIAO Sa^{1,2}, XU Jia-Wang^{1,2}

¹(Key Laboratory of Metallurgical Equipment and Control Technology of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

²(Hubei Key Laboratory of Mechanical Transmission and Manufacturing Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

Abstract: Given that the conventional method of weighing glass gobs has a low measurement efficiency and is greatly influenced by the environment, this study proposes a non-contact measurement method based on binocular vision. For this purpose, a binocular vision system is built to filter and de-noise the collected images and extract their feature contours. A disparity map with complete edge information is obtained with the Census transform-based stereo matching algorithm integrating the gradient information of the gob images. The influences of gobs deflecting along the directions of the camera plane and the camera depth of focus, respectively, on the precision of horizontal slicing are analyzed. Specifically, the minimum bounding rectangle algorithm is utilized to correct gobs deflecting along the direction of the camera plane. Then, disparity information is used to correct gobs deflecting along the other direction. Finally, horizontal slices are accumulated through horizontal slicing to obtain the gob volume and mass. The experimental results show that the proposed method also reaches the precision standard on gobs with spatial deflection and it thus meets the demand of glass bottle production.

Key words: binocular vision; stereo matching; feature fusion; deflection correction; horizontal slice; 3D reconstruction

① 基金项目: 国家自然科学基金 (51874217); 湖北省技术创新专项重大项目 (2018AAA027)

收稿时间: 2021-11-15; 修改时间: 2021-12-13, 2021-12-21; 采用时间: 2022-01-05; csa 在线出版时间: 2022-06-16

目前,在工业领域中玻璃制品具有卫生、外形美观、耐高温、耐腐蚀等特点,已在医药、卫生、化工等领域中有十分广泛的应用^[1].玻璃制造过程中的第一步就是将玻璃配合料熔制成均匀无气泡且符合成型要求的玻璃料滴,玻璃料滴的质量控制直接影响产品成品率.玻璃料滴质量的检测以往多是由人工检测,不仅效率低还易受环境影响,稳定性较差^[2].因此,研究一种非接触式的测量方法有利于提高生产效率和产品合格率.双目立体视觉是基于视差原理并由多幅图像获取物体三维几何信息的方法.吴琪波^[3]通过半全局匹配算法获得图片的深度信息,提取目标高度信息和上表面积,得到目标物体体积.丁嗣禹等^[4]通过插值算法填充视差图中的空洞,用阈值分割算法提取出了堆料区域的结构信息.梁乐^[5]通过最小切割算法提升了立体匹配算法精度,更加完整的重建出待测物体的三维坐标信息.料滴经过剪刀剪切后,在下落过程中会发生空间上的偏转.利用外截面面积和视差填充^[6]测量料滴体积及质量会产生较大误差,三维重建方法^[7]计算较为复杂,不能满足实时测量需求.本文通过搭建冷态玻璃料滴测量系统,基于双目立体视觉获得料滴的三维信息,提出一种空间校正切片法来完成玻璃料滴的非接触式测量.

1 实验系统及双目视觉测量模型

1.1 实验系统及算法流程

实验装置如图1所示.主要包括料滴接受装置、料滴模拟运动装置和CCD摄像头,用密度均匀的黏土来模拟玻璃料滴,测量采用海康威视的2台型号为MV-CE060-10UC摄像头进行采集,采集下落过程中的料滴图像进行处理并获取结果.

图像处理算法主要包括5个模块:摄像机标定、

$$z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{dx} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{dy} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = M_2 M_1 \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

2 图像处理及立体匹配

2.1 摄像机标定

首先通过张正友平面标定法^[8]得到摄像机的内外参数,可计算求得两摄像机之间的旋转平移矩阵,标定过程如下:若棋盘格上任意一点P在世界坐标系中为P_w,则点P点在左右两个摄像机坐标系中的坐标分别为:

图像校正、特征轮廓提取、立体匹配和空间校正切片法求体积.处理流程如图2所示.

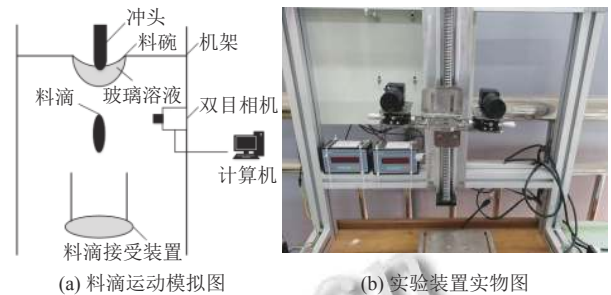


图1 实验装置

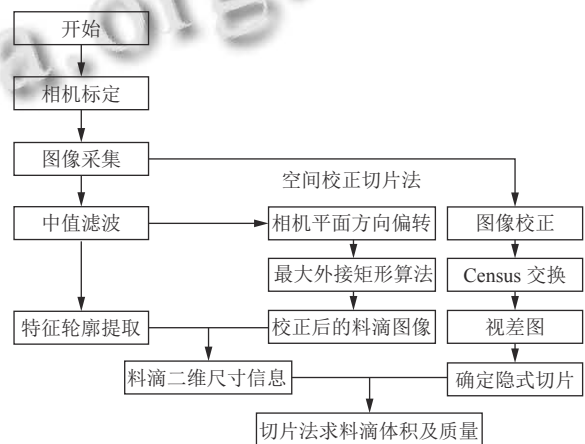


图2 图像处理算法流程图

1.2 双目视觉测量模型

双目立体视觉模型如图3所示.世界坐标系中任意点A(X,Y,Z)在双目摄像机采集的左右图像的投影分别为a_l(u_l,v_l)和a_r(u_r,v_r).这两个像素点坐标结合摄像机内外参数,通过计算获得空间中待测点A的三维空间坐标.

综上所述,整个成像系统可用式(1)表示:

$$\begin{cases} P_l = P_l P_w + T_l \\ P_r = P_r P_w + T_r \end{cases} \quad (2)$$

选择左摄像机坐标系为双目立体视觉系统的基准坐标系,因此,P_r和P_l应满足:

$$P_l = R^T (P_r - T) \quad (3)$$

联立式(2),式(3)可以得到左右摄像机坐标之间的变换关系:

$$\begin{cases} R = R_r R_l^{-1} \\ T = T_r - R_r R_l^{-1} T_l \end{cases} \quad (4)$$

其中, R 和 T 分别为旋转矩阵和平移向量. 本次采集的标定板图像如图 4 所示, 拍摄多组不同位置的标定板图像, 基于 Matlab 中的 Stereo Camera Calibration 工具箱对左右相机采集到的棋盘格标定板图片完成左右相机的标定, 对多组外参数进行非线性优化, 得到立体标定最优的外参数 R 和 T .

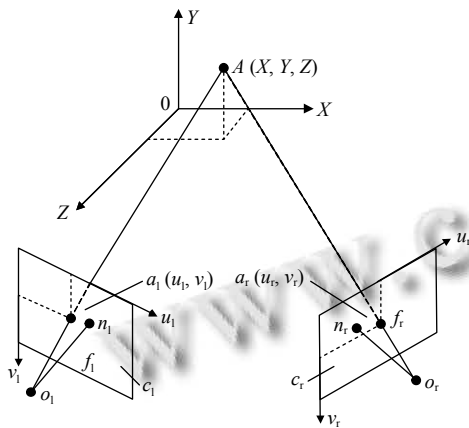


图 3 双目视觉测量原理

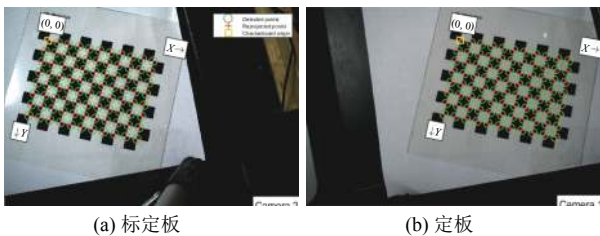


图 4 实验标定板图像

2.2 图像校正

由于两个相机的安装不可能完全平行, 使得左右相机获取的图片存在细微的角度偏差, 为了保证双目图像在同一平面上使左右图像对应极线平行, 以提高立体匹配速度及精度, 需要对左右相机采集到的图像进行校正. 图像的畸变使用 BOUGUET 校正算法对采集的图像对进行校正, 能够很好地消除相机产生的畸变和误差^[9].

2.3 特轮廓提取

中值滤波是一种空间滤波方法, 能有效抑制图像中的噪声, 料滴图像采用中值滤波能较好地保护边缘信息^[10]. 图 5 为料滴轮廓提取的过程, 滤波后图像如图 5(b). 迭代式阈值分割是自动计算阈值, 实现简单且

计算量小, 便于实时检测. 本文选择使用迭代式阈值分割算法来分割图像. 阈值分割后后图像如图 5(c) 所示.

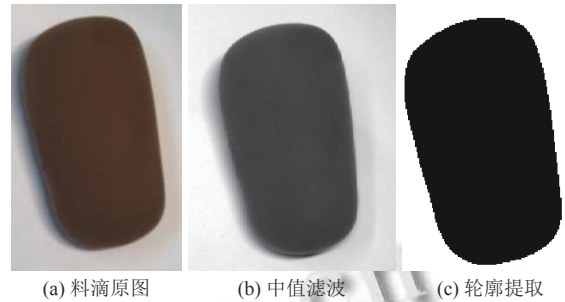


图 5 料滴轮廓提取过程

2.4 融合梯度信息的 Census 变换立体匹配算法

Census 变换的基本原理是: 在一个变换窗口内, 将窗口中每个像素的灰度值与领域像素的灰度值进行比较并映射到一个比特串. 选择一个 5×5 的矩形窗口遍历整个图像, 具体定义为:

$$Census(p) = \otimes_{q \in N_p} \xi(p, q) \quad (5)$$

$$\xi(p, q) = \begin{cases} 1, I_q > I_p \\ 0, I_q \leq I_p \end{cases} \quad (6)$$

用 \otimes 来表示汉明距离算子, 则基于 Census 变换的匹配代价计算:

$$C_{cen}(p, d) = Census(p) \otimes Census(q) \quad (7)$$

图像梯度信息包含了丰富结构信息, 能反映图像灰度变化的速度, 灰度变化较大的区域经常发生在图像的边缘位置^[11]. 在 Census 算法的基础上, 融入图像的梯度信息, 能够更清晰地表现图像边缘的信息, 能够增强立体匹配在边缘匹配的准确度. 融合梯度信息的 Census 匹配代价计算方法为:

$$C_{grad}(p, d) = |\nabla_x I_L(p) - \nabla_x I_R(p, d)| + |\nabla_y I_L(p) - \nabla_y I_R(p, d)| \quad (8)$$

视差图如图 6 所示.

3 料滴体积测量方法

3.1 垂直下落状态方法分析

通过观察常见料滴形状具有回转体特征, 因此可利用其任意横截面为圆形的特征求取料滴体积并计算其质量^[12]. 如图 7 所示, 按水平切片法原理沿垂直方向扫描料滴图像, r_e 、 r_s 分别为料滴顶端和底端像素所在的行向量坐标, 切片厚度 Δy 为 1 pixel; d_r 为切片的直径. 料滴的体积可由式 (9) 求得:

$$V = \sum_{r=r_s}^{r_e} \frac{\pi d_r^2}{4} \Delta y \quad (9)$$

利用 $m = \rho v$ 计算料滴质量 (g); ρ 为料滴的密度 (g/cm^3).

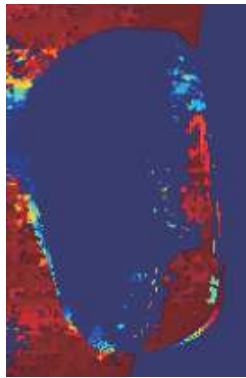


图6 料滴视差图

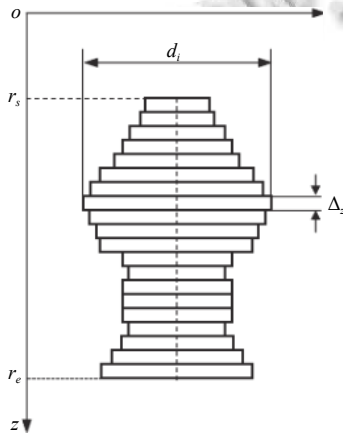


图7 料滴投影水平分割示意图

3.2 空间校正切片法

料滴经过剪刀剪切后,在下落过程中会发生空间上的偏转,此时将偏转方向分解为相机平面方向和相机景深方向.当料滴对称轴发生相机平面偏转时,料滴水平截面发生变形,影响水平切片法计算精度.利用最小外接矩形算法^[13]确定对称轴和偏转角度,然后将料滴校正至水平方向.如图8(a)所示,图像最小外接矩形的高边角度可以反映出料滴图像的方向信息.如图8(b)所示,过对称轴线 AB 的中点 O 作垂线交轮廓线于 E, F 点,再分别过 AO, BO 的中点作垂线交轮廓线于点 C, D, G 和 H .

为了验证最小外接矩形算法选取对称轴的准确度,引入判断料滴关于轴线是否对称的变量 L_λ :

$$L_\lambda = (S_1 - S_2)^2 + (S_3 - S_4)^2 + (S_5 - S_6)^2 \quad (10)$$

其中, L_1, L_2, L_3, L_4, L_5 和 L_6 , 分别为 C, D, E, F, G 和 H 到扫描直线的距离.若 L_λ 的值越小,则料滴关于对称轴的对称性越好.选择合适的对称轴按切片法原理计算料滴体积.

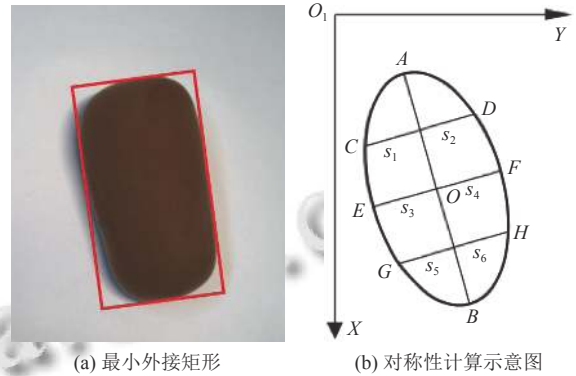


图8 最小外接矩形实验

相机景深方向的偏转如图9所示,景深方向的偏转影响了对称轴的高度,料滴真实高度为 l_2 , 图像上投影高度为 l_1 , 其对称轴高度影响的是切片的数量,影响结果的准确性.在三角形 ABC 中,利用视差变化计算出景深方向偏转的距离 BC , 结合投影对称轴高度 AC , 计算出料滴真实对称轴高度 AB . 表达式如下:

$$l_2 = AB = \sqrt{(BC)^2 + l_1^2} \quad (11)$$

$$BC = Z_b - Z_a \quad (12)$$

如图10双目视觉横向模式成像示意图,景深与视差成反比,其公式为:

$$z = \frac{f \times b}{(x_l - x_r)} \quad (13)$$

其中, f 为焦距, b 为左右摄像机之间的距离, x_l, x_r 分别为左右图像的像素点距离各自中心点的距离.对于左图像的任意一个像素点 x_l , 都在右图中找到相对应的极线,然后扫描极线找到最匹配的点 x_r , 最后计算视差,并根据公式 $x_l - x_r$ 求取景深.

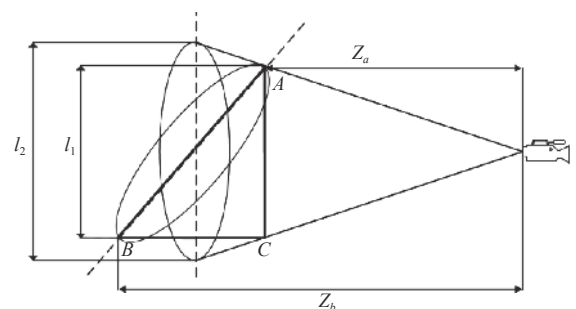


图9 相机景深方向偏转示意图

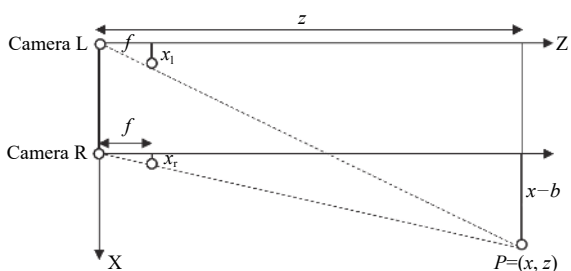


图 10 双目横向模式成像示意图

联立式 (11), 式 (12) 可以得真实对称轴高度 l_2 表达式如下:

$$l_2 = \sqrt{(Z_b - Z_a)^2 + l_1^2} \quad (14)$$

其中, Z_a, Z_b 分别为料滴图像上下顶点景深.

料滴对称轴高度变化产生了如图 11 所示隐式切片, 隐式切片高度为 $l_2 - l_1$, 隐式切片的直径 d_i 可计为料滴切片直径的算术平均数. 隐式切片体积 V_s 计算公式如下:

$$V_s = \frac{\pi \left(\sum_{r=r_s}^{r_e} d_r / (r_e - r_s) \right)^2}{4} \Delta y (l_2 - l_1) \quad (15)$$

隐式切片体积可补偿在最小外接矩形切片法中因料滴发生相机景深方向偏转产生的影响.

4 实验结果与分析

为验证空间校正切片法在发生空间偏转状态下的准确性及实用性, 在实验过程中模拟 3 种下落状态, 分为垂直下落、发生相机平面方向偏转下落、发生空间偏转下落. 选取质量分布均匀且在常用质量区间的 3 个料滴分别模拟在 3 种状态的图像如图 12 所示, 其中, 编号 a、d、g 为垂直下落状态, 编号 b、e、h 为发生相机平面方向偏转下落状态, 编号 c、f、i 为发生空

间偏转下落状态. 利用水平切片法、最小外接矩形切片法、空间校正切片法分别计算 3 组料滴在 3 种状态的测量体积, 表 1 所示为实验测量数据. 将由表 1 得到的 3 种方法测量体积相对误差进行比较, 结果如图 13.

垂直下落的 3 组料滴 a、d 和 g 三种方法的相对误差均在 1% 以内. 对于发生相机平面方向偏转的料滴 b、e 和 h, 水平切片法相对误差达到 5% 以上, 而最小外接矩形切片法相对误差降至 1%~2%, 最小外接矩形切片法对发生相机平面方向偏转的料滴精确度有明显提高. 发生空间偏转的料滴 c、f 和 i, 水平切片法误差较大, 其中料滴 i 相对误差达到 9.25%, 最小外接矩形切片法可提高测量准确度, 其测量相对误差可降至 3% 左右, 而空间校正切片法可进一步测量精度, 其相对误差降至 1% 以内. 空间校正切片法对发生空间偏转的料滴有较为稳定的测量精度, 基本能控制在 1% 以内. 3 种测量方法测量的平均误差与标准差如表 2 所示. 水平切片法测量发生偏转的料滴相对误差误差较大, 最小外接矩形切片法测量稳定性有一定提高, 空间校正切片法具有较高稳定性.

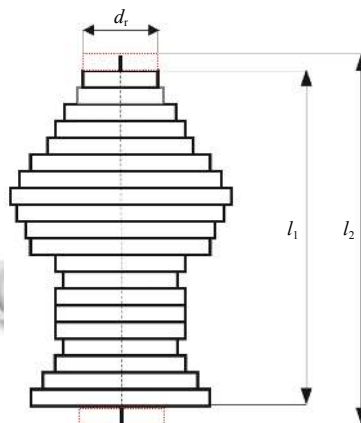


图 11 隐式切片示意图

表 1 实验料滴体积测量数据

编号	a	b	c	d	e	f	g	h	i
Q (g)	240.552	240.552	240.552	151.089	151.089	151.089	89.562	89.562	89.562
V_0 (cm ³)	197.956	197.956	197.956	121.849	121.849	121.849	71.454	71.454	71.454
V_1 (cm ³)	196.725	184.805	180.143	122.471	130.811	112.715	70.858	65.178	64.842
V_2 (cm ³)	196.145	195.847	189.857	122.842	119.547	117.487	72.478	72.781	65.814
V_3 (cm ³)	197.105	196.915	195.864	121.752	120.421	122.457	71.251	70.925	71.958

注: Q 为真实质量; V_0 为真实体积; V_1 为水平切片法测量体积; V_2 为最小外接矩形切片法测量体积; V_3 为空间校正切片法测量体积

5 结论

料滴经剪刀剪切在下落过程中会发生空间偏转,

当料滴发生相机平面方向偏转后, 切片形状发生变化, 水平切片法平均误差明显上升, 最小外接矩形算法对

相机平面方向偏转的料滴图像进行校正,提高了测量精度.当料滴发生相机景深方向偏转,影响切片高度,最小外接矩形切片法对有相机景深方向偏转的料滴仍具有较大误差,空间校正切片法适用于发生空间偏转的料滴,空间校正切片法测量的平均误差与标准差分别为0.81%和0.19.对于发生空间偏转的料滴,空间校正切片法具有较高的测量精度和稳定性.

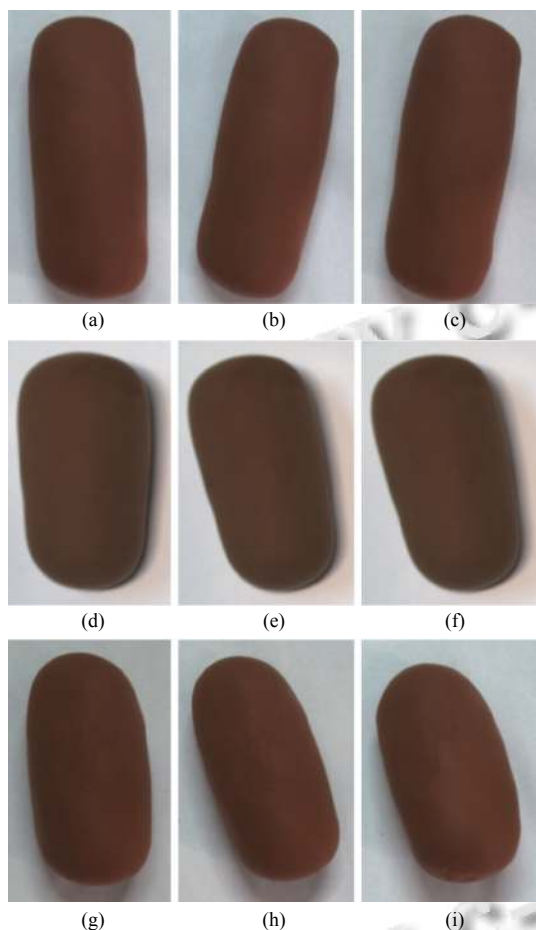


图12 不同状态料滴图像

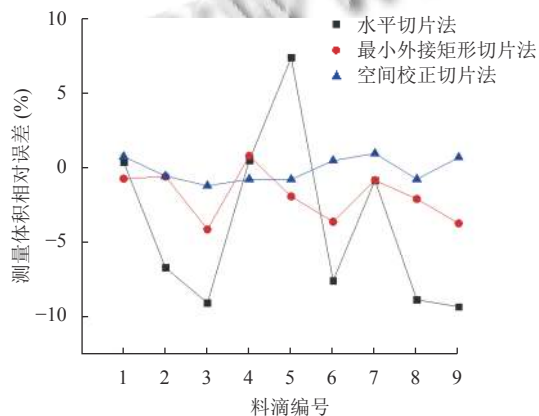


图13 3种方法对不同料滴的测量误差比

表2 不同方法测量料滴体积的平均误差与标准差

方法	平均误差 (%)	标准差
水平切片法	5.59	3.85
最小外接矩形切片法	2.02	1.43
空间校正切片法	0.81	0.19

参考文献

- 李宏洲. 对玻璃包装容器行业发展的观察与思考(之二)——玻璃包装容器(瓶罐)行业技术进步的思考. 中国包装, 2016, 36(9): 50–59. [doi: 10.3969/j.issn.1003-062X.2016.09.025]
- 伦小羽, 王辉. 瓶罐玻璃生产关键工艺性能测量方法与应用. 玻璃与搪瓷, 2019, 47(2): 50–55, 49.
- 吴琪波. 基于双目立体视觉的规则物体体积测量方案. 现代信息科技, 2020, 4(18): 112–114, 118.
- 丁嗣禹, 苗红霞, 齐本胜, 等. 基于双目视觉的不规则堆料体积测量研究. 计算机测量与控制, 2020, 28(4): 71–74, 84.
- 梁乐. 基于双目立体视觉的不规则物体体积测量方法研究 [博士学位论文]. 西安: 西安理工大学.
- 郑太雄, 黄帅, 李永福, 等. 基于视觉的三维重建关键技术研究综述. 自动化学报, 2020, 46(4): 631–652.
- Aoyama S, Hayashi K, Hosokawa S, *et al.* Shapes of ellipsoidal bubbles in infinite stagnant liquids. International Journal of Multiphase Flow, 2016, 79: 23–30. [doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2015.10.003]
- Ma WP, Li WX, Cao PX. Binocular vision object positioning method for robots based on coarse-fine stereo matching. International Journal of Automation and Computing, 2020, 17(4): 562–571. [doi: 10.1007/s11633-020-1226-3]
- 王才东, 李志航, 王新杰, 等. 机器人平面工具 TCP 的双目视觉标定方法. 机械设计与制造, 2019, (1): 239–244. [doi: 10.3969/j.issn.1001-3997.2019.01.062]
- Hu GL, Zhou ZF, Cao JZ, *et al.* Highly accurate 3D reconstruction based on a precise and robust binocular camera calibration method. IET Image Processing, 2020, 14(14): 3588–3595. [doi: 10.1049/iet-ipr.2019.1525]
- 邹光明, 周世凡, 王兴东, 等. 基于轴线偏转切片法的料滴体积测量方法. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(6): 1526–1533. [doi: 10.11817/j.issn.1672-7207.2020.06.007]
- 袁冬冬, 应俊, 解利军, 等. 基于机器视觉的轴承防尘盖检测算法. 计算机系统应用, 2019, 28(1): 212–215. [doi: 10.15888/j.cnki.csa.006708]
- 侯占伟, 贾玉兰, 王志衡. 基于最小外接矩形的珠宝定位技术研究. 计算机工程, 2016, 42(2): 254–260, 271. [doi: 10.3969/j.issn.1000-3428.2016.02.045]

(校对责编: 牛欣悦)