

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2416410

# 基于三维重建的液滴接触角测量方法<sup>\*</sup>

许武 田汉民 刘维龙 王纪伟 曹蕊

(河北工业大学电子信息工程学院 天津 300401)

**摘要:** 针对不均匀材料表面的液滴 2D 投影接触角存在误差,且仅有少数国际设备商提供三维接触角测量方案。本文提出一种基于三维重建的液滴接触角测量方法,旨在提供一个完整且效果可行的的三维接触角测量解决方案。该系统利用阵列圆点结构光进行三维检测,适用于接触角小于 90°且具良好漫反射的液体。主要步骤包括:特征区域筛选、三维点云获取、液滴曲面拟合和接触角测量。其中,图像预处理部分,提出了基于 HSV 空间结合形态学操作的方法;在特征区域筛选中,提出一种面积筛选法;通过几何计算完成二维点云到三维点云的转换;提出点云匹配算法以优化点云融合。与二维测量方法对比,实验结果表明,本文方法在测量精度和可靠性上均有显著提升,实现了最大误差小于 1°,大部分误差小于 0.5°,并能进一步分析材料的物理特性及表面均匀性。

**关键词:** 接触角测量;图像处理;三维重建;结构光

中图分类号: TP391; TN98 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.4050

## Droplet contact angle measurement method based on three-dimensional reconstruction

Xu Wu Tian Hanmin Liu Weilong Wang Jiwei Cao Rui

(School of Electronic Information Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

**Abstract:** Errors can occur in the 2D projection contact angle measurements of droplets on uneven material surfaces, and currently, only a few international equipment manufacturers offer 3D contact angle measurement solutions. This paper proposes a 3D droplet contact angle measurement method aimed at providing a complete and practical 3D contact angle measurement solution. The system employs an array of circular structured light for 3D detection, suitable for liquids with contact angles less than 90° and good diffuse reflection properties. The main steps include: feature region selection, 3D point cloud acquisition, droplet surface fitting, and contact angle measurement. In the image preprocessing stage, a method based on HSV space combined with morphological operations is proposed. For feature region selection, an area filtering method is introduced. Geometric calculations are used to convert 2D point clouds to 3D point clouds, and a point cloud matching algorithm is proposed to optimize point cloud fusion. Compared to 2D measurement methods, experimental results show that the proposed method significantly improves measurement accuracy and reliability, achieving a maximum error of less than 1°, with most errors being less than 0.5°. Additionally, it allows for further analysis of material physical properties and surface uniformity.

**Keywords:** contact angle measurement; image processing; 3D reconstruction; structure light

## 0 引言

接触角<sup>[1-2]</sup>描述的是水滴在光滑,惰性,均匀的理想固体表面所能获得的平衡状态,或在倾角和体积的变化下所能获得的一组接触角的数值,可以对印刷<sup>[3]</sup>、油水分离<sup>[4]</sup>、农药喷洒<sup>[5]</sup>、膜分离<sup>[6]</sup>等过程静动态润湿效应进行更深入地分析。

目前最常见的液滴接触角测量方法<sup>[7]</sup>是图像外形法,主要包括液滴的图像获取、图像预处理、三相接触点定位、轮廓拟合以及接触角的计算几个步骤。在液滴图像获取过程中,通过显微镜或高速摄像机获取液滴的 2D 侧面投影图像,确保液滴边界的清晰。图像预处理阶段,通常采用边缘检测和降噪技术,以获得准确的液滴轮廓。三相接触点定位则是确定液体、固体和气体三相交界的具体位置,通常

收稿日期:2024-07-10

\*基金项目:中国中车重大项目(2023CKA362-1)资助

利用轮廓变化的边缘特征来精确定位这些交点。随后,使用圆弧或椭圆等曲线拟合方法对液滴的外形进行轮廓拟合,最后通过计算拟合曲线与固体表面交点处的切线斜率,确定液滴的接触角。现在对接触角的测量优化也基本是对这些部分进行优化从而取得更好的结果。例如,对于图像预处理部分,张天等<sup>[8]</sup>提出了一种基于粒子群算法的 canny 算子边缘检测算法,使得提取的液滴轮廓更清晰且抗干扰性强,但是此方法计算量较大,计算速度较慢。对于三相点定位部分,高心悦等<sup>[9]</sup>基于 U-Net 网络提出一种图像分割法,可以有效提取液滴图像的三相接触点,但是只适用于非疏水液滴图像。对于轮廓拟合部分,李健等<sup>[10]</sup>提出,使用液滴高度 2/5 范围内的液滴轮廓进行圆拟合可有效对超疏水液滴进行接触角检测,但是此方法会已有数据的使用量,从而降低对亲水液滴接触角测量精度。刘维龙等<sup>[11]</sup>提出了一种基于螺线拟合的轮廓拟合法,可以有效对液滴的动态接触角进行拟合,但是在拟合超疏水液滴时效果会比较差。这些部分的改进虽然提高了液滴接触角的测量精度,但是这些方法都是在假设接触角测量时,材料表面是化学均匀且平整光滑的,然而真实的材料表面并非如此,根据科诺公司的研究,由于表面粗糙度增强现有的润湿行为,并对粘附性产生影响,液滴在不同的 2D 投影中接触角会出现差异,而且因为由于材料本身客观存在的表面粗糙度、化学多样性、异构性(含晶体生成结构的方向性)等原因,在顶视条件下 98% 样品呈现不规则的圆形结构,所以选取液滴的某一个侧面 2D 投影所得接触角数值将受表面异构性影响,造成接触角计算的误差,这个值在水稻这样的存在各向异性的接触角情况下,可能偏差值超过 10°以上。

在这种情况下,获取液滴的 3D 接触角是一个非常有意义的事情,可以帮助从真正意义上评估固体材料物理化学性质。因此,许多研究者致力于探索如何准确获取液滴的三维接触角。科诺公司设计了一种可以旋转的样品台,可以将液滴进行旋转,获取多个液滴的 2D 侧面投影,从而获得多个液滴的接触角测量结果,从而达到近似 3D 接触角的效果。但是此方法不适用于样品台不方便转动的场景。Rios-Lopez 等<sup>[12]</sup>提出了一种方法,通过分析液滴的俯视图和侧视图图像来测量 3D 接触角。他们首先独立地分析这些液滴图像的侧视图和俯视图,提取液滴的轮廓。然后,利用这些轮廓来计算液滴的三维几何特征,进行液滴形状的三维重建。尽管这种方法被称为三维重建,但在仅了解液滴的侧视图和俯视图的情况下,对液滴的三维形态进行圆形拟合可能导致对液滴真实三维形貌的不准确猜测。克吕氏公司设计了一种 3D 接触角测量仪器 Ayríis,利用反射成像和激光测距的方法对液滴进行三维重建,可以有效对液滴进行 3D 接触角测量,但具体方案流程并未进行公布。

针对以上现状本文结合三维重建技术<sup>[13]</sup>的结构光法,提出了一种基于等距阵列圆点结构光作为标记点的三维接

触角测量方法,对特定结构光下采集的液滴图像进行预处理、光斑轮廓中心点提取、点云深度信息获取,液滴曲面三维重建以及曲面上取点并进行接触角优化计算。其中,图像预处理部分,提出了基于 HSV 空间结合形态学操作的方法;在特征区域筛选中,提出一种面积筛选法;通过几何计算完成二维点云到三维点云的转换;提出点云匹配算法以优化点云融合。此方法运算量小,计算快,准确率高,可对 90°接触角以下具有良好漫反射的液体进行接触角三维检测。

## 1 设计原理

### 1.1 实验平台

基于等距阵列圆点结构光<sup>[14]</sup>的接触角三维测量装置如图 1 所示,由投影仪、准直透镜、左相机、右相机和样品台组成。其中液滴滴在样品台中央,投影仪透过准直透镜投出等距阵列圆点结构光在液滴上,样品台左右分别设置一台相机倾斜 45° 拍摄液滴表面阵列圆点结构光图像。

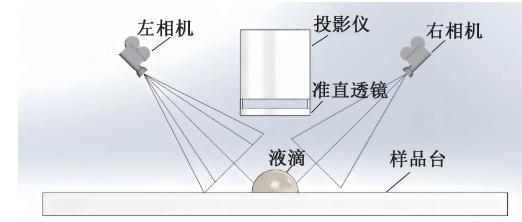


图 1 实验平台结构图

Fig. 1 Structure of the experimental platform

### 1.2 总体方案流程图

液滴三维接触角测量流程图如图 2 所示,主要包括特征点提取、3D 点云获取和液滴曲面拟合并测量接触角 3 部分。特征点提取部分包括图像采集、图像预处理以及激光中心点提取,因实验平台搭建较难,所以采用 solidworks 软件对实际场景进行模拟获得实验所用图像,所获得液滴仿真图如图 3 所示。3D 点云获取部分包括点云深度信息获取以及左右两侧点云匹配融合。液滴曲面拟合并测量接触角部分包括液滴曲面拟合、曲面上获取多条接触角插值曲线以及通过插值曲线拟合测量接触角。

### 1.3 点云深度获取原理

本课题的主要点云深度信息获取原理涉及利用液滴存在时所获取的阵列激光中心点的二维点云以及通过推导出的液滴不存在时激光中心点二维点云之间的差距,从而计算点云的深度信息。具体原理如图 4 所示:液滴上激光中心点标记为 C,其在样品台上的投影点为 D,而 CD 在摄像机投影面上的投影点为 AB。设点 A 的坐标为  $(a, b)$ ,点 B 的坐标为  $(c, d)$ 。

此点的深度  $z$  值可根据以下公式计算:

$$z = \frac{a - c}{\sin(\alpha)} \quad (1)$$

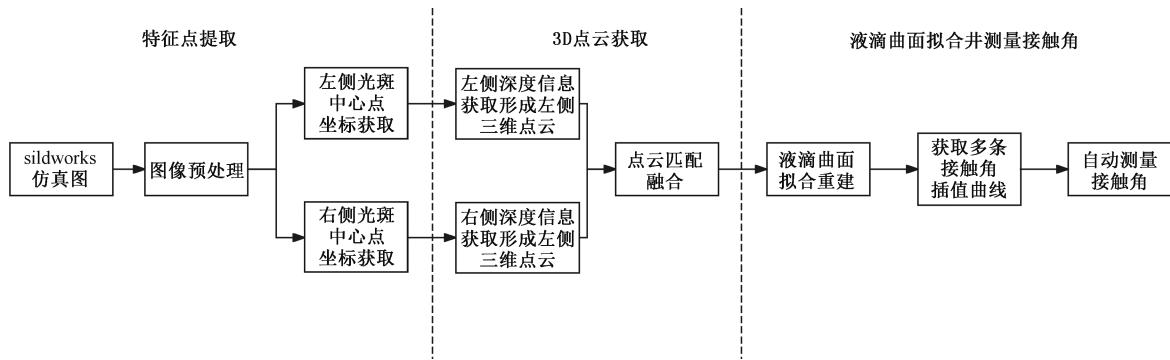


图 2 总体方案流程图

Fig. 2 Overall scheme flowchart

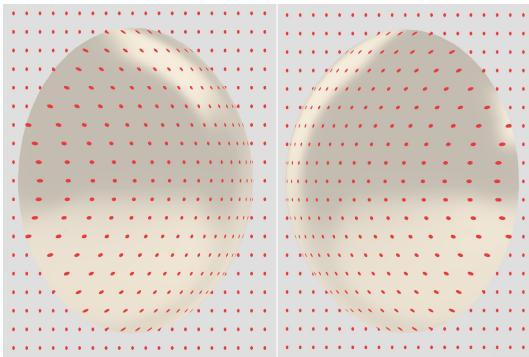


图 3 液滴仿真图

Fig. 3 Droplet simulation diagram

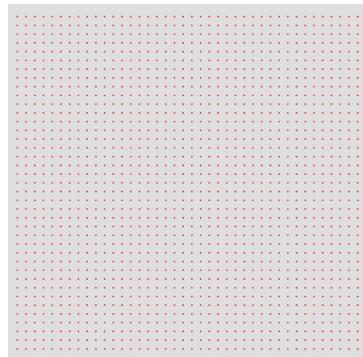


图 5 等距阵列激光结构光

Fig. 5 Equidistant array laser structured light

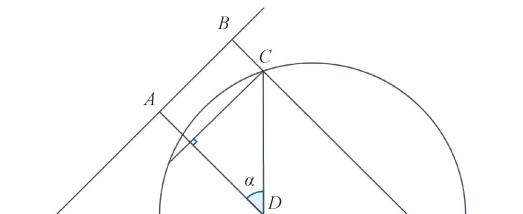


图 4 深度信息计算原理图

Fig. 4 Principle diagram of depth information calculation

依次根据式(1)计算每个点 $z$ 值,得到三维点云。其中液滴不存在时的点云是通过未照射在液滴上的阵列光点的第一行和第一列推导得出,依据是利用第一列和第一行激光中心点的平均间距,点云类似于图 5 所示。

## 2 算法及实现

### 2.1 特征点提取

对于目标物体的三维重建来说,目标物体的表面纹理越是丰富,所能提取到的特征信息越多,三维重建的结果越是精确。但是对于液滴的三维重建,由于液滴表面往往是较为均匀且平滑的,相对来说很难提取到足够的数据进行三维重建。本课题设计采用投影仪通过准直透镜投射等距阵列圆点结构光,并通过调节结构光点的密度与大小调节三维重建的精度和速度。

特征点提取主要分为以下几步:图像预处理、特征区域提取以及通过轮廓重心法提取等距阵列光斑的激光中心点。

在特征点提取过程中,图像的预处理至关重要。传统液滴图像预处理中,通常将采集到的彩色图像转换为灰度图像,并依次进行图像增强、滤波、二值化处理和液滴边缘提取。例如 Zuo 等<sup>[15]</sup>则提出了一种基于区域分割的自动化分量标记方法,能够有效区分图像中的气泡与孤立噪声,尤其在去除液滴轮廓附近噪声时表现出优异的效果。然而,在本课题的液滴特征信息提取中,结构光照射下的光斑才是所需的关键特征区域,而液滴边缘信息反而成为干扰因素。采用传统图像预处理方法可能会引入过多噪声,影响特征区域的提取。此外,传统的图像阈值二值化处理也可能产生不必要的特征信息,如特征光斑被分割为多个小区域,或液滴本身的干扰信息,这些都会对三维重建结果产生负面影响。为解决上述问题,本文提出了一种基于 HSV 空间<sup>[16]</sup>结合形态学操作的处理方法,通过将包含光斑信息的图像转换为 HSV 空间,并根据色相、饱和度和明度进行筛选,去除液滴的边缘信息,以提高特征区域的筛选效率。同时,结合形态学操作进一步强化所提取的特征区域,确保所提取信息的准确性和完整性。

特征区域的提取也对特征点的获取有着极大的影响。

通过准确提取特征区域,可以显著提升特征点提取的准确度。此外,阈值面积筛选能够对提取到的特征区域进行进一步优化,确保其精度和有效性。

对所获得的特征区域计算面积均值作为筛选依据:

$$S = \frac{\sum_{i=0}^n S_i}{n} \quad (2)$$

其中,  $S_i$  为特征区域面积,  $n$  为特征区域数量。设定面积筛选阈值为  $[0.2S, 5S]$ , 面积不属于自己范围的区域进行筛除, 实验结果表明此方法可以有效对非特征区域进行筛除。

在特征区域筛选完成后, 通过轮廓重心法计算轮廓中心:

$$x = m_{\cdot}m_{10}/m_{\cdot}m_{00} \quad (3)$$

$$y = m_{\cdot}m_{01}/m_{\cdot}m_{00} \quad (4)$$

其中,  $m_{\cdot}m_{00}$  为给定轮廓零阶距(轮廓面积),  $m_{\cdot}m_{10}$  和  $m_{\cdot}m_{01}$  为给定轮廓在  $x$  方向上和  $y$  方向上的加权和。实验结果表面此方法可以有效计算特征区域的轮廓重心坐标。

特征点提取的程序流图如图 6 所示, 特征点提取结果如图 7 所示。



图 6 特征点提取算法流程

Fig. 6 Feature point extraction algorithm flowchart

## 2.2 三维点云获取

因为单方向拍摄图像不能获取液滴所有的曲面信息, 所以本课题通过在液滴左右两侧分别设置相机来获取液滴曲面所有信息, 并在后边对两侧相机获取的点云融合成一个完整液滴点云。三维点云获取主要是分为以下几步: 点云深度信息获取、点云匹配和点云融合。首先, 通过两

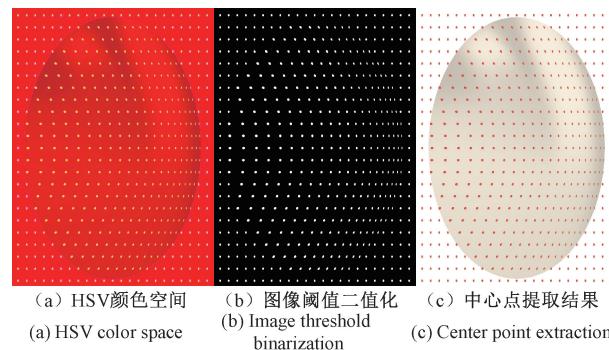


图 7 特征点提取结果图

Fig. 7 Feature point extraction results

侧图像的二维点云分别获取三维信息部分, 本课题设计了等距阵列圆点结构光, 并通过 1.3 节推导的点云深度信息获取原理将特征点提取步骤获取的左右两侧二维点云分别计算三维点云。

在进行三维重建的过程中, 既依赖于液滴本身三维结果对等距阵列圆点结构光产生形变计算深度信息, 也因为液滴本身的三维结构, 拍摄液滴单侧图像时会对投射的等距阵列圆点结构光产生遮挡, 使得图像中后面的部分特征点失去可信度。由于不同行点云, 特征点失去可信度的位置不易计算, 且当保留一半列数以上特征点时, 可保证剩余的特征点足够用于液滴曲面三维重建的信息完整, 所以本文将每行点云中心点后边一列往后可信度较低的点云删除, 然后在进行点云匹配和融合。

点云匹配与融合是本课题中的关键环节, 对于三维重建而言, 这一过程不仅影响三维点云的还原精度, 还直接关系到液滴三维重建能否得到高精度且完整的液滴曲面。史艳侠等<sup>[17]</sup>提出了一种基于二维图像站位的点云粗拼接方法, 但由于 RANSAC 算法依赖于参数的选择, 处理复杂场景时可能无法完全剔除所有误匹配点。李梦帅等<sup>[18]</sup>则提出了一种基于预筛选和局部单应性的图像匹配方法, 但该方法假设待匹配点及其候选匹配点所在区域为局部近平面, 在具有复杂三维结构或曲面的场景中, 这一假设可能不再适用, 从而影响匹配精度。

基于此前点云匹配和融合中存在的问题和本课题中点云存在的特点, 提出了一种基于三维曲线相似的点云匹配与融合方法, 程序流图如图 8 所示。

## 2.3 液滴曲面拟合并测量接触角

因液滴表面的光滑性和连续性, 采用了 NURBS(非均匀有理 B 样条)曲面拟合算法<sup>[19]</sup>, 此算法其几何灵活性能够适应各种形状的液滴, 数学表达能力使得少量控制点和权重即可准确拟合复杂曲面, 同时保持光滑性和连续性, 使得拟合结果更贴近真实液滴形状, 而参数化控制则使得对液滴形状的调整和优化更为方便。本文的液滴的 NURBS 曲面拟合算法将点云按照  $y$  坐标进行分组为多条曲线点云, 并分别对  $u(x)$  方向和  $v(y)$  方向上进行插值, 获

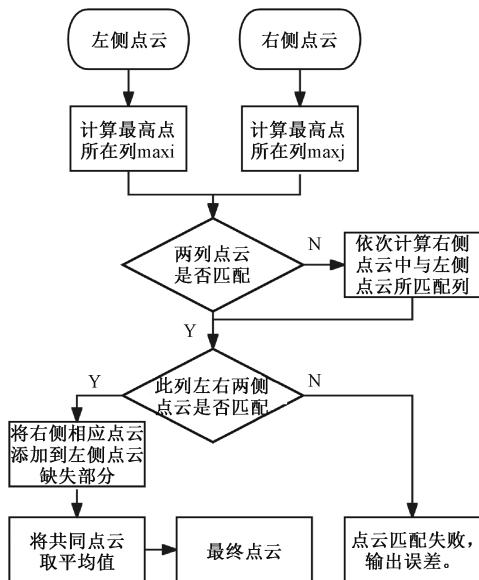


图 8 点云匹配和融合程序流图

Fig. 8 Point cloud matching and fusion workflow

得最终的 NURBS 曲面。NURBS 曲面拟合流程图如图 9 所示,曲面拟合中使用到的对曲线点云插值流程图如图 10 所示,曲面拟合结果图如图 11 所示。

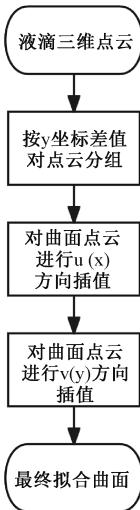


图 9 曲面拟合流程图

Fig. 9 Surface fitting flowchart

对于在拟合曲面上取曲线点部分,由于 NURBS 曲面拟合获得的曲面并不是一个固定的表达式,而是由点云组成的曲面网格,所以在曲面上取曲线点需要进行拟合逼近取点,本文采用的是在曲面网格上进行二分化迭代取交点获得曲线,首先获得通过最高点的一条已知  $x$  和  $y$  坐标的二维曲线,然后对不同的曲线点,固定  $x$  在拟合曲面取  $x$  相同的一条交线,在固定  $y$  在之前获得的交线上取交点,以此类推获得曲线,二分迭代法程序流图如图 12 所示。在曲面取点时,需要找到液滴的中心点,并且通过中心点



图 10 曲线点云插值流程图

Fig. 10 Curve point cloud interpolation flowchart

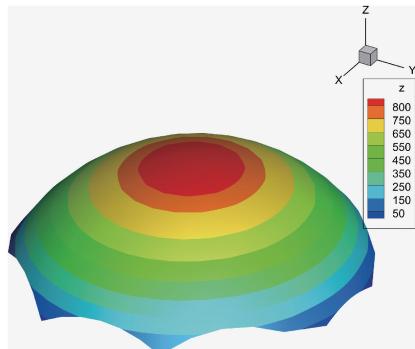


图 11 曲面拟合结果图

Fig. 11 Surface fitting results

类似切蛋糕的形式来取多条曲线点,因为液滴曲面实际的中心点难以获取,而在理想情况下,液滴俯视图的中心点和最高点位置重合,所以本文将默认中心点为最高点。曲面取点结果图如图 13 所示,通过最高点,从俯视图上看,取如式(5)和(6)所示的 8 条过中心点曲线点:

$$y = b, x = b, y = x + b, y = -x + b, y = 2x + b \quad (5)$$

$$y = -2 + b, y = -0.5x + b, y = 0.5x + b \quad (6)$$

对拟合曲面上取样的曲线点用于测量接触角部分,因取点曲线是位于垂直于  $z$  平面的平面上的,所以可以将曲线推至二维曲线,使用常用的二维曲线测量接触角的方法测量。但是由于三维重建曲面会在曲面边缘有信息缺失,无法定位到真正的三相接触点,所以类似于常用的量高法,样条曲线拟合法无法适用于三维重建曲面上的接触角

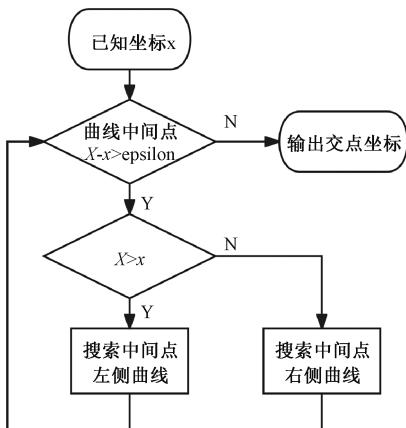


图 12 二分迭代法程序流程图

Fig. 12 Bisection iteration method workflow

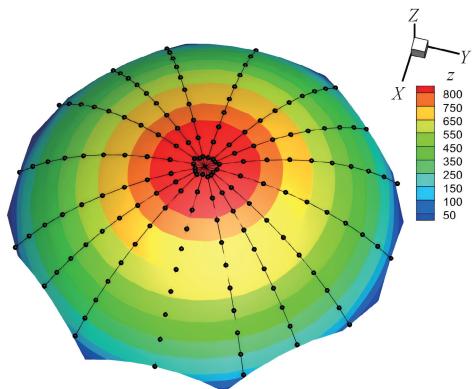


图 13 曲面取点结果图

Fig. 13 Surface sampling results

测量,本文采用的方法是最小二乘的椭圆拟合法<sup>[20]</sup>,使用此方法可以在已知最高点高度的情况下求得高度为零时,椭圆在已有信息拟合的椭圆延长线处的切线与 x 轴夹角,即为本文所求接触角。

本文用的椭圆方程一般表达式方程为:

$$F = Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + 1 \quad (7)$$

椭圆的几何中心:

$$X_c = \frac{BE - 2CD}{4AD - B^2} \quad (8)$$

$$Y_c = \frac{BE - 2AE}{4AD - B^2} \quad (9)$$

长轴倾角:

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan \left( \frac{B}{A - C} \right) \quad (10)$$

长短半轴分别为:

$$a^2 = 2 \frac{AX_c^2 + CY_c^2 + BX_cY_c - 1}{A + C + \frac{1}{2}((A - C)^2 + B^2)} \quad (11)$$

$$b^2 = 2 \frac{AX_c^2 + CY_c^2 + BX_cY_c - 1}{A + C - \frac{1}{2}((A - C)^2 + B^2)} \quad (12)$$

### 3 实验结果及分析

因液滴本身类似于椭球,所以本课题通过对椭球的接触角仿真来测试算法的可行性,如图 14 所示为 6 组仿真原图。本课题通过对椭球从底部截取椭球部分来仿真具有不同角度的接触角,当截取高度为零时,表示该椭球为半椭球。图中  $A \times B \times C \times D \times E$  分别的含义是: $A$  代表 y 长轴长度, $B$  代表  $x, z$  长轴长度, $C$  代表从半椭球底部开始被截取的高度, $D$  表示仿真所使用的阵列圆点结构光的光斑半径, $E$  表示阵列圆点结构光光点之间的距离(具体数值表达的是比例关系)。

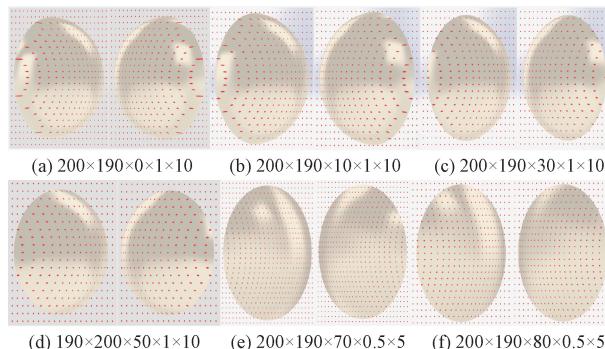


图 14 仿真原图

Fig. 14 Original simulation image

针对这 6 组仿真图片的三维点云提取结果误差分析,本课题通过点云匹配时的误差进行表示,如表 1 点云匹配误差表所示,使用左侧相机图片中点云最高点所在曲线点云以及此曲线左右两侧点云的高度与右侧相应位置点云高度相对误差表示曲面点云误差。根据图中数据,本文提出的两侧点云匹配融合算法误差在 0.6 pixel 以内,可以对仿真椭球进行有效的三维信息获取。

对于这 6 组仿真图进行曲面拟合并通过最高点取线测量的结果图如图 15 所示,曲面拟合出的曲面均有不错的连续性和光滑性。

根据这 6 组图像获得的曲线点数据,可以获得 48 条用于拟合接触角的曲线坐标集合,96 个接触角值,如图 16 测得接触角值与理论真值对比图所示。根据仿真图像获得的数据,本文提出的三维重建拟合液滴接触角算法,最大误差不超过 1°,大部分误差在 0.5° 以内,可以有效对液滴进行三维重建并测量接触角。

表 2 显示了本文方法与传统 2D 接触角测量方法在不同样本下的对比结果。本文方法在测量精度和可靠性方面表现出显著优势。具体来说,在处理不同样本时,本文方法的接触角测量值接近理论真值,偏差较小,例如样本 200×190×0 和 200×190×10 的测量值分别为 89.78° 和 83.48°,与理论真值 90° 和 83.79° 的偏差较小。此外,本文方法在不均匀样本如 190×200×50 和 200×190×70 中也展现出优越的稳定性,其测量值分别为 60.64° 和 41.78°,

表 1 点云匹配误差表

Table 1 Point cloud matching error table

样本类型	$z$ 最高点坐标(pixel)	最高点线误差 /	最高点左侧线误差 /	最高点右侧线误差 /
	和 $z$ 半轴比例	pixel	pixel	pixel
$200 \times 190 \times 0 \times 1 \times 10$	1 310.393:95	0.453	0.368	0.463
$200 \times 190 \times 10 \times 1 \times 10$	1 192.799:85	0.342	0.279	0.492
$200 \times 190 \times 30 \times 1 \times 10$	960.084:65	0.625	0.368	0.334
$190 \times 200 \times 50 \times 1 \times 10$	1 056.960:45	0.421	0.548	0.461
$200 \times 190 \times 70 \times 0.5 \times 5$	517.460:25	0.319	0.325	0.387
$200 \times 190 \times 80 \times 0.5 \times 5$	386.726:15	0.401	0.295	0.267

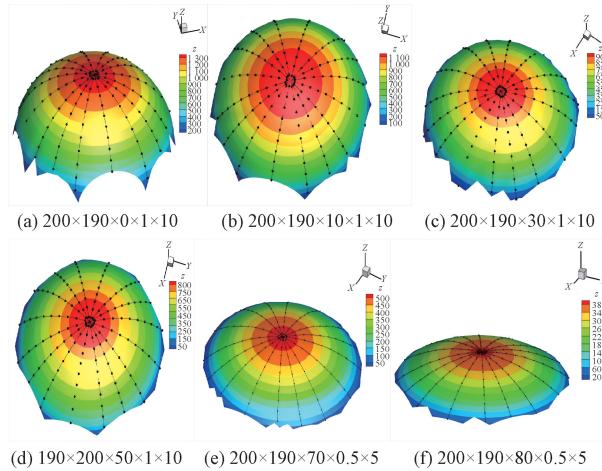


图 15 曲面拟合并取点结果图

Fig. 15 Surface fitting and sampling result

接近理论真值  $60.62^\circ$  和  $41.79^\circ$ 。总体而言,本文方法通过综合考虑液滴的三维信息,相较于传统的二维投影方法,能够提供更为准确和稳定的接触角测量结果,显示出其在接触角测量领域的显著优越性。(对于均匀性评判,若 3D 接触角测量中液滴各位置角度偏差小于  $1^\circ$ ,则认为材料稳定且均匀。本文方法的接触角理论真值与测量结果为同一液滴模型的多次平均值,而其他方法基于液滴 3D 仿真图的任意 2D 投影进行测量。表中样本类型的  $A \times B \times C$  代表: $A$  为液滴在  $y$  轴上的长轴长度,  $B$  为  $x$  和  $z$  轴上的长轴长度,  $C$  为从半椭球底部起始截取的高度。)

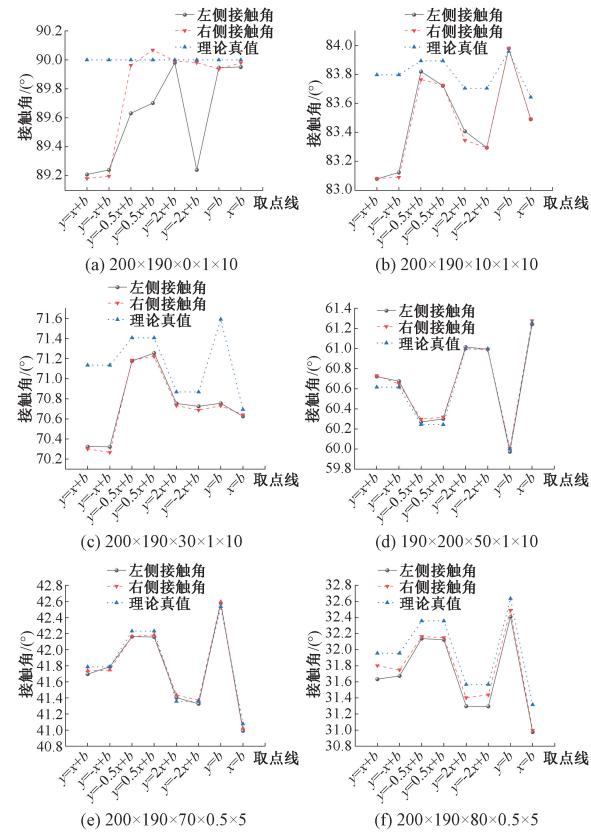


图 16 测得接触角值与理论真值对比图

Fig. 16 Comparison of measured contact angle values with theoretical true value

表 2 本文方法与传统 2D 方法对比

Table 2 Comparison of the proposed method with traditional 2D methods

(°)

样本类型	young-laplace 法	圆拟合法	双圆拟合法	双椭圆拟合	椭圆拟合	4 次多项式拟合	本文方法	理论真值
$200 \times 190 \times 0$	89.60	89.78	89.73	89.74	89.55	89.45	89.78(均匀)	90(均匀)
$200 \times 190 \times 10$	83.54	83.57	83.59	84.40	83.34	83.07	83.48(均匀)	83.79(均匀)
$200 \times 190 \times 30$	70.67	71.05	71.14	71.60	70.86	71.58	70.72(均匀)	71.13(均匀)
$190 \times 200 \times 50$	59.56	59.42	59.32	60.10	59.33	61.46	60.64(不均匀)	60.62(不均匀)
$200 \times 190 \times 70$	42.09	41.68	41.87	42.86	41.58	43.31	41.78(不均匀)	41.79(不均匀)
$200 \times 190 \times 80$	不适用	32.40	32.41	33.11	32.37	32.17	31.77(不均匀)	31.96(不均匀)

## 4 结 论

当前,大多数接触角测量方法仍停留在二维层面,只有少数国际设备商提供三维接触角测量方案。针对这一现状,本文提出了一种基于阵列圆点结构光的三维重建接触角测量方法,构建了一个完整且可行的三维接触角测量系统,包括特征点提取、3D点云获取和液滴曲面拟合等步骤,并最终实现接触角测量。针对研究中遇到的问题,本文提出了多种算法:在特征区域筛选方面,结合面积筛选和形态学腐蚀膨胀技术,以实现对特征区域的有效筛选;通过几何计算,完成了二维点云到三维点云的转换;提出了点云匹配算法,有效地匹配和融合两侧点云;并将二维接触角测量方法结合到三维接触角重建中,以实现三维接触角的测量。最后通过与2D接触角测量方法的对比实验,证明了本文提出方法不仅在测量精度和可靠性方面得到了提升,实现了最大误差小于1°,大部分误差小于0.5°的接触角测量,还能够进一步分析材料的物理特性及其表面均匀性。

未来的研究中将根据此流程搭建硬件系统,并对本算法流程中特征点提取部分尝试椭圆拟合中心点提取特征点以及尝试B样条曲面逼近算法和Young-Laplace方程组测量接触角的方法,对本课题算法流程进行进一步优化。

## 参考文献

- [1] DIAZ M E, SAVAGE M D, CERRO R L. Prediction of static contact angles on the basis of molecular forces and adsorption data [J]. Physical Review E, 2016, 94(2):6.
- [2] JIN M, SANEDRIN R, FRESE D, et al. Replacing the solid needle by a liquid one when measuring static and advancing contact angles[J]. Colloid and polymer science, 2016, 294(4):657-665.
- [3] 崔忻羽. 喷墨印刷液滴的铺展特性研究[D]. 西安:西安理工大学,2022.
- [4] CUI X Y. Study on spreading characteristics of inkjet printing droplets [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2022.
- [5] 王文文. 液下超双疏性材料的制备及其油水分离性能研究[D]. 吉林:吉林大学,2022.
- [6] WANG W W. Preparation of underwater superamphiphobic materials and their oil-water separation performance[D]. Jilin:Jilin University,2022.
- [7] 谭富雪. 含氮杂环农药噻唑磷的热性能及在疏水叶片表面浸润行为的影响[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2020.
- [8] TAN F X. Thermal performance of nitrogen heterocyclic pesticide thiazophos and its effect on the wetting behavior on hydrophobic leaf surfaces [D].
- [9] Shenyang: Shenyang University of Technology, 2020.
- [10] 蔡雨婷. 多孔材料改性PEBA/PES复合膜分离 VOCs 性能研究[D]. 舟山:浙江海洋大学,2022.
- [11] CAI Y T. Study on VOCs separation performance of modified PEBA/PES composite membranes with porous materials [D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2022.
- [12] BIOLE D, WANG M, BERTOLA V. Assessment of direct image processing methods to measure the apparent contact angle of liquid drops [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2016, 76: 296-305.
- [13] 张天,田汉民,戎小莹,等. 粒子群优化Canny算子在高精度接触角测量中的应用研究[J]. 河北工业大学学报, 2018, 47(3): 30-35.
- [14] ZHANG T, TIAN H M, RONG X Y, et al. Application of particle swarm optimization canny operator in high-precision contact angle measurement [J]. Journal of Hebei University of Technology, 2018, 47(3): 30-35.
- [15] 高心悦,田汉民. 基于改进U-Net网络的液滴分割方法[J]. 计算机科学, 2022, 49(4): 227-232.
- [16] GAO X Y, TIAN H M. Droplet segmentation method based on improved U-Net network [J]. Computer Science, 2022, 49(4): 227-232.
- [17] 李健,费潇,王腊梅,等. 基于液滴局部轮廓的接触角测量方法[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(24): 10134-10139.
- [18] LI J, FEI X, WANG L M, et al. Contact angle measurement method based on droplet local contour[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(24): 10134-10139.
- [19] 刘维龙,刘文芳,高心悦,等. 基于螺线拟合的高精度接触角测量方法[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(2): 699-706.
- [20] LIU W L, LIU W F, GAO X Y, et al. High-precision contact angle measurement method based on spiral fitting [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(2): 699-706.
- [21] RIOS-LOPEZ I, KARAMAOYNAS P, ZABULIS X, et al. Image analysis of axisymmetric droplets in wetting experiments: A new tool for the study of 3D droplet geometry and droplet shape reconstruction[J]. Colloid and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2018, 553: 660-671.
- [22] 刘志海,代振锐,田绍鲁,等. 非接触式三维重建技术综述[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(23): 9897-9908.
- [23] LIU ZH H, DAI ZH R, TIAN SH L, et al. Review of non-contact 3D reconstruction technology[J]. Science

- Technology and Engineering, 2022, 22 ( 23 ): 9897-9908.
- [14] 陈凤东, 刘国栋, 刘炳国. 基于阵列圆点结构光的柔性薄膜表面几何形貌视觉检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(6): 1292-1297.
- CHEN F D, LIU G D, LIU B G. Visual detection method for surface geometric profile of flexible thin films based on array dot structured light[J]. Journal of Instruments and Measurement, 2014, 35(6): 1292-1297.
- [15] ZUO Y Y, DO C, NEUMANN A, et al. Automatic measurement of surface tension from noisy images using a component labeling method[J]. Colloids & Surfaces A Physicochemical & Engineering Aspects, 2007, 299(1-3): 109-116.
- [16] 刘佳, 唐鋆磊, 林冰, 等. 基于 HSV(色相-饱和度-明度)与形状特征的涂层锈点图像识别[J]. 中国表面工程, 2023, 36(4): 217-228.
- LIU J, TANG Y L, LIN B, et al. Coating rust spot image recognition based on HSV (hue-saturation-value) and shape features [J]. China Surface Engineering, 2023, 36(4): 217-228.
- [17] 史艳侠, 娄小平, 李伟仙. 线结构光点云粗拼接方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(6): 12-16.
- SHI Y X, LOU X P, LI W X. Research on coarse stitching method for line structured light point clouds[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(6): 12-16.
- [18] 李梦帅, 燕必希, 董明利, 等. 基于预筛选和局部单应性的风电叶片图像匹配方法[J]. 电子测量技术, 2022, 45(6): 155-161.
- LI M SH, YAN B X, DONG M L, et al. Image matching method for wind turbine blades based on pre-selection and local homography [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(6): 155-161.
- [19] 李博, 吴丽娟, 韩松, 等. B 样条曲面构建算法设计与实现[J]. 河南科技, 2019(2): 14-16.
- LI B, WU L J, HAN S, et al. Design and implementation of B-spline surface construction algorithm [J]. Henan Science and Technology, 2019(2): 14-16.
- [20] 宋保全, 杜文华, 段能全, 等. 非接触眼压计的人眼瞳孔定位算法研究[J]. 电子测量技术, 2022, 45(3): 112-117.
- SONG B Q, DU W H, DUAN N Q, et al. Research on pupillary positioning algorithm for non-contact tonometry [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(3): 112-117.

### 作者简介

许武, 硕士研究生, 主要研究方向为图像处理、接触角测量等。

E-mail: 1945434809@qq.com

田汉民(通信作者), 博士, 副教授, 主要研究方向为图像处理、接触角测量、钙钛矿太阳能电池。

E-mail: tianhanmin@hebut.cn

刘维龙, 硕士研究生, 主要研究方向为图像处理、接触角测量等。

E-mail: 1948641204@qq.com

王纪伟, 硕士研究生, 主要研究方向为钙钛矿太阳能电池。

E-mail: 2536304013@qq.com

曹蕊, 硕士研究生, 主要研究方向为缺陷检测、图像融合等。

E-mail: 1020977824@qq.com