

基于图像处理的液位测量技术研究现状与发展趋势

付耀衡, 彭泳卿, 刘 鹏, 冯红亮
(北京遥测技术研究所 北京 100076)

摘要: 基于图像处理的液位测量技术具有非接触式测量、应用范围广、占用体积小等突出优势, 在工业、化学以及水文监测等领域有着广阔的应用和发展前景。随着图像处理算法的改进和工业相机性能的提升, 图像液位测量技术的各项性能指标也得到了显著提高。为进一步研究基于图像处理的液位测量技术, 梳理其基本工作原理、分类及研究现状, 并分析发展趋势和前景, 为研究精度更高、应用更广的液位测量技术提供依据。

关键词: 图像处理; 液位测量; 图像分割; 边缘检测

中图分类号: TB921 文献标识码: A 文章编号: CN11-1780(2020)04-0018-10

Status and development trend of image liquid level measurement technology

FU Yaoheng, PENG Yongqing, LIU Peng, FENG Hongliang
(Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

Abstract: Image liquid level measurement technology has the advantages of non-contact measurement, wide application range and small occupancy volume, etc. It has extremely broad application and development prospects in the fields of industrial, chemical and hydrological monitoring. With the improvement of image processing algorithms and the improvement of industrial cameras' performance, the performance indicators of image liquid level measurement technology are also significantly improved. In order to further study the image liquid level measurement technology, the basic working principle, classification and research status are sorted out. Finally, the paper gives a perspective to the trend for the image liquid level measurement technology.

Key words: Image processing; Liquid level measurement; Image segmentation; Edge detection

引 言

数字图像处理起源于上个世纪二十年代, 此后由于遥感、航天等领域的应用, 图像处理技术逐渐受到重视并得到相应的发展。由于当时技术的局限, 早期的数字图像处理发展缓慢, 直到第三代计算机出现, 数字图像处理才开始迅速发展并得到广泛应用^[1]。目前, 数字图像处理技术已成为工程学、信息科学、物理学、医学等各领域学习和研究的对象。

基于图像处理的液位测量技术通过图像摄取装置将待测目标转化成数字图像信号, 再通过图像处理系统的转换和计算得到液位测量结果。这种技术凭借其非接触式测量、应用范围广、占用体积小等突出优势得到人们的广泛关注^[2]。

根据液位测量方式的不同, 基于图像处理的液位测量方法主要包括激光式图像液位测量、标尺式图像液位测量、浮子式图像液位测量和直接式图像液位测量等四种。本文将对以上几种图像液位测量技术的研究现状及特点进行介绍, 并对图像液位测量技术的未来发展进行展望。

1 激光式图像液位测量技术研究现状

激光式图像液位测量系统的图像摄取装置一般包括激光光源和工业摄像机。激光光源以一定的角度射入容器中, 在液体表面形成入射光斑或光条, 相机捕获带有激光特征的数字图像, 再通过相应的图像处理算法得到目标的液位信息^[3]。

目前，激光式图像液位测量的研究较成熟，在工业环境下已有部分应用。原理上，主要采用的是激光三角法，也有利用折射和双目视觉等其他方式进行测量的方法。

1.1 激光三角法

在对激光三角法的研究中，浙江大学的 XIANG S W 等人提出改进的激光三角法来测量单晶硅熔融液位，测量系统如图 1 所示^[4]。该系统使用线激光器投射激光线到熔体表面，镜像隔热罩底部的激光线会产生两个激光条，这些光条被顶部的相机捕获。因为两个激光条的端点距离与被测液位之间是线性关系，采用优化的自适应识别算法可以准确地获得熔体液位信息。经现场实验，测量范围为 0~30mm，误差在 0.2mm 以内。

同样是测量单晶硅熔融液位，西安理工大学的 ZHANG X Y 等人针对激光点随液面波动的问题提出一种基于表决机制的激光点坐标计算方法，同时，加入卡尔曼滤波用于校正液位测量数据并补偿丢失的数据，以此获得更加准确的液位测量数据^[5]。在实际应用中，被测液位每变化 1mm，最大绝对误差为 0.07mm。

类似地，东北大学的 SU Z Q 提出应用激光三角测距对中间包钢水覆盖剂高度进行测量^[6]，装置如图 2 所示。根据工业现场的干扰特性，该系统在时间相隔 0.2s 的两幅图像中，取其中灰度值低的进行融合，去除高温滤泡；运用形态学滤波消除大面积的热辐射干扰；设计伪目标去除算法清除烧结态覆盖剂的硬壳干扰。最后提取激光信号，通过三角测距得到高度信息。经现场实验，测量误差在 3mm 以内。

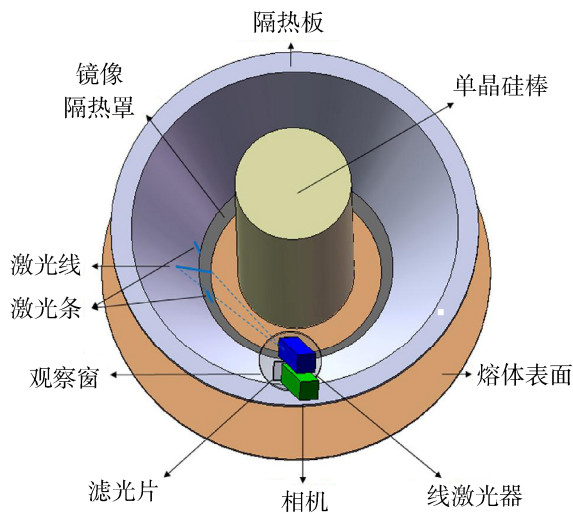


图 1 浙江大学单晶硅熔融液位测量系统
 Fig. 1 The schematic diagram of monocrystalline silicon melting liquid level measurement system by Zhejiang University

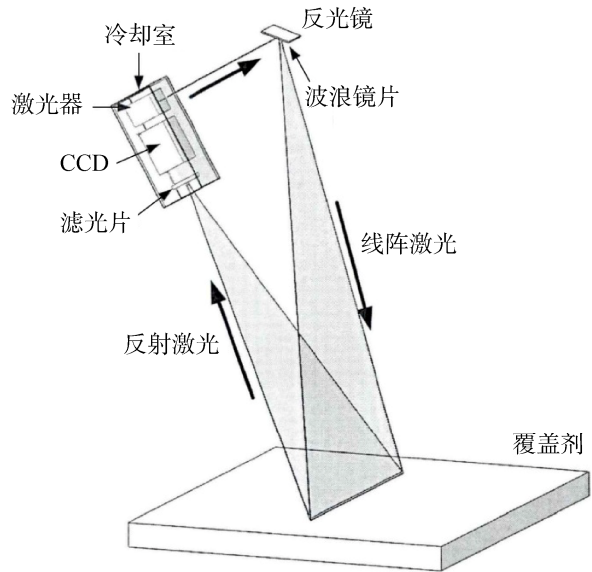


图 2 东北大学覆盖剂高度检测装置
 Fig. 2 The schematic diagram of covering agent height measurement device by Northeastern University

1.2 其他方法

在工业环境应用中，还有利用激光和双目视觉原理进行液位测量的研究。冶金自动化研究设计院的张云贵等人采用双目立体视觉测距法对钾盐生产浮选池里混合料浆的液位进行测量，检测系统如图 3 所示^[7]。该方法不再是对液体表面的激光点定位来换算液位，而是利用预处理后图像中的激光点与正常液面灰度值差别明显这一特性，设置一个固定阈值将激光点的区域提取出来，再基于双目视觉原理获取高度信息。在测量高度为 25cm~45cm 时，误差在 0.5cm 以内。

除了工业环境应用，激光式图像液位测量技术在实验室玻璃仪器的液位检测中也有应用。中国计

量大学的张竞月等人针对玻璃容器的液体体积计量, 提出一种利用激光和图像处理的液位测量方式, 测量原理如图 4 所示^[8]。该系统选取十字激光射向玻璃容器, 因为光从空气射入水中传播方向发生改变, 穿过液体表面的激光线发生折射, 使感光芯片上的激光线图像出现间隙。通过边缘检测确定所测量线段的两个端点, 设置下降沿查找确定断点, 换算得到所求线段实际距离。在 100mL 玻璃量器中进行试验, 绝对误差在 0.2mL 以内。

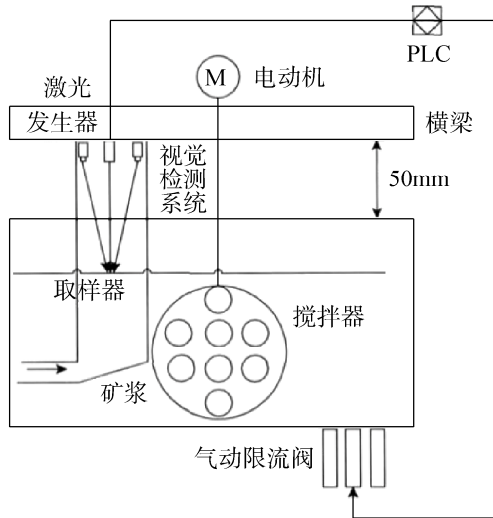


图 3 钾盐生产浮选池液位检测系统

Fig. 3 The schematic diagram of potassium salt production flotation tank level detection system

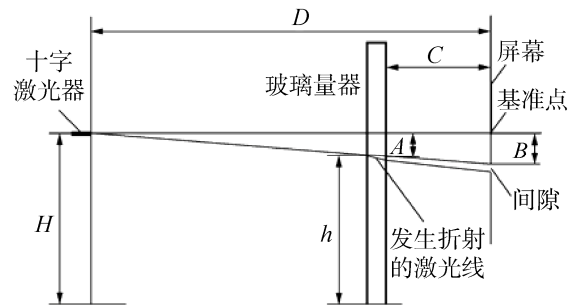


图 4 中国计量大学十字激光投射测量系统

Fig. 4 The schematic diagram of cross laser projection measurement system by China Jiliang University

综上所述, 激光式图像液位测量技术研究现状及其特点如表 1 所示。

表 1 激光式图像液位测量技术研究现状及其特点

Table 1 Research status and characteristics of laser image liquid level measurement technology

| 研究机构 | 被测液体 | 方法 | 特点 |
|------------|-------|--|-----------------------|
| 浙江大学 | 硅熔液 | 采用改进的激光三角法产生两个光条, 再依据线性关系利用自适应光条检测法得到液位 | 原理简单、识别方法仅需校准一个参数 |
| 西安理工大学 | 硅熔液 | 采用投票机制对激光点位置进行预判, 再通过激光三角法换算得到液位 | 避免脉冲噪声的产生, 提高了鲁棒性 |
| 东北大学 | 中间包钢水 | 加入图像融合、形态学滤波、去除伪目标算法来提取激光信号, 最后通过激光三角法得到液位 | 工业环境下适用性好, 精度高 |
| 冶金自动化研究设计院 | 混合浆液 | 确定固定阈值提取激光点, 双目视觉确定其空间坐标进而得到液位 | 光照、色差等环境因素对双目视觉测距影响很小 |
| 中国计量大学 | 水 | 采用十字激光投射, 边缘检测确定折射产生间隙的端点, 换算得到实际液位 | 精度高、重复性小, 可以作为标准器使用 |

2 标尺式图像液位测量技术研究现状

标尺式图像液位测量方法是发展较早的一种形式, 最初是利用图像处理自动识别温度计^[9], 到如今, 通过检测液位计刻度线或标尺等多种形式来获取液位信息。目前, 标尺式图像液位测量方法在工业自动化、水域监测等领域已有应用, 充分解决了数字化采集、信息化处理等诸多问题。

标尺式图像液位测量主要有两种形式, 一种是利用液位计或观察管间接进行测量, 还有一种是将标尺放在液体中直接进行测量。

2.1 间接测量

间接测量方法最典型的的就是利用各式液位计或观测管进行测量，根据其特性，提取显示部分的液位分界面来获取液位。东南大学的羊冰清等人根据基地式液位仪表的特点，建立如图 5 所示的测量系统读取液位信息^[10]。该系统首先基于颜色阈值分割确定仪表盘在图像中的大致位置，然后利用 Canny 算子检测液位分界处的边缘，并结合模板匹配得到了液位的数字量。在实验室环境下测试，该系统测量值与参照值之间的绝对误差在 1mm 以内。

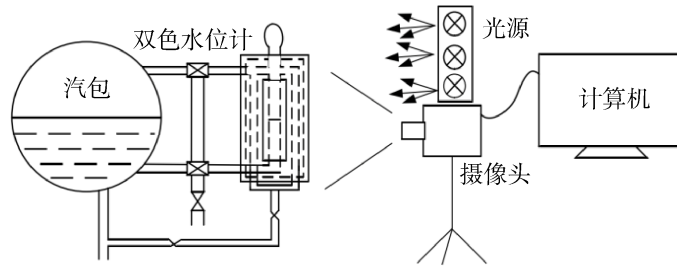


图 5 东南大学双色水位计视觉检测系统

Fig. 5 The schematic diagram of two-color water level gauge visual detection system by Southeast University

另一种类似的形式，哈尔滨工程大学的 CAIC T 等人利用钢尺和伺服电机对观察管液位实现自动跟踪测量，测量装置如图 6 所示^[11]。该方法通过实时获取水罐中液位的高度，将信息反馈给伺服电机，控制滑块带着相机移动，实现自动跟踪测量的目的。其中，该算法利用模板匹配从图像中找到一个数字，将数字图像从规则图像中划分出来再进行处理，极大地优化了时间消耗问题。在实际应用中，量程达到了 8000mm，误差不超过 20mm。

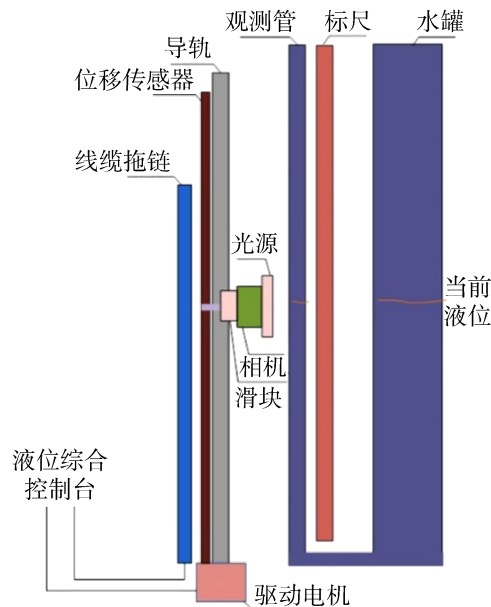


图 6 哈尔滨工程大学液位自动跟踪测量系统

Fig. 6 The schematic diagram of automatic liquid level tracking measurement system by Harbin Engineering University

2.2 直接测量

直接测量方法将容器和标尺相结合，应用场景更加全面。兰州工业学院的张总等人利用透明容器和标尺，使用工业相机获取容器背景及液位图像，系统总体方案如图 7 所示^[12]。该系统以 Lab VIEW

为操作平台, 由 IMAQ Caliper 功能函数获取被测图像中液位的变化面积。采用 PID 调节器实现液位变化信息的获取与控制。

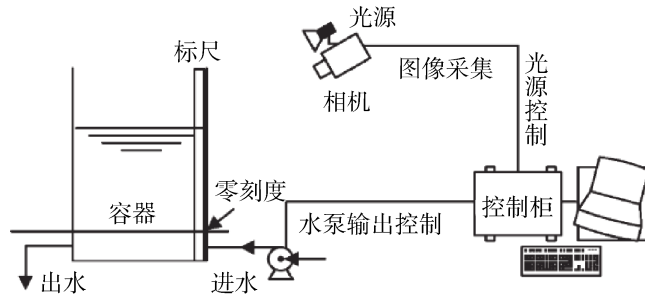


图 7 兰州工业学院液位检测与控制系统

Fig. 7 The schematic diagram of liquid level detection and control system by Lanzhou Polytechnical College

在更开阔的地方, 荷兰 Delft University of Technology 的 Bruinink M 等人在水域固定标尺, 通过移动设备获取图像进行水位测量, 其自动水位检测算法如图 8 所示^[13]。该系统首先使用纹理识别与增强分类器获得标尺形状和数字, 然后基于随机森林分类器进行光学字符识别, 并对标尺形状进行条形检测。结合识别的线和数字, 获得度量值。在具有反射和污渍干扰的实际测量中, 该系统的准确率达到了 97%。

同样是水位测量, 南京邮电大学的 PAN J Q 等人比较字典学习和卷积神经网络的实际应用情况, 最后选择卷积神经网络对水体与标尺进行归类^[14]。卷积神经网络在不需要标尺和水两个子类的情况下, 可将训练图像分为两个类。同时, 还可以处理来自不同场景的所有训练样本。最后, 进行线性转换将以像素为单位的水位转换为以米为单位的水位。在六种实际场景中 (图 9 为其中一个应用场景), 应用卷积神经网络的测量系统平均误差为 1.3cm。

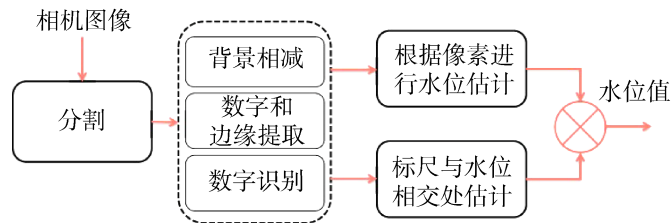


图 8 Delft University of Technology 自动水位检测算法

Fig. 8 The flow chart of automatic water level detection algorithm by Delft University of Technology



图 9 南京邮电大学水位监测系统工作场景

Fig. 9 The application scenario diagram of water level monitoring system by Nanjing University of Posts and Telecommunications

总结两种形式的标尺式图像液位测量技术研究现状及其特点，如表 2 所示。

表 2 标尺式图像液位测量技术研究现状及其特点

Table 2 Research status and characteristics of scale image liquid level measurement technology

| 研究机构 | 被测液体 | 方法 | 特点 |
|--------------------------------|------|--|-------------------|
| 东南大学 | 水 | 通过改进的 Canny 算法和窗口峰值查找算法进行边缘查找，最后模板识别得到液位 | 分辨力高，适应性好 |
| 哈尔滨工程大学 | 水 | 基于深度学习的动态水位线识别算法检测液位，结合二次确认算法识别数字获取液位 | 减少识别时间，可以实时定位水位线 |
| 兰州工业学院 | 水 | 由 IMAQ Caliper 函数获取液位变化面积得到液位 | 利用现有软件包，实现简单，运行稳定 |
| Delft University of Technology | 水 | 利用分类器分别获得标尺形状和数字，再进行字符识别和形状检测，得到水位 | 对多种角度的图像都能良好地识别处理 |
| 南京邮电大学 | 水 | 利用卷积神经网络将标尺和水分类，进行线性转换得到水位 | 可在多个场景直接使用，适应性好 |

3 浮子式图像液位测量技术研究现状

浮子式图像液位测量系统借鉴传统的浮子式液位传感器，图像摄取装置结合液体表面的浮子，捕捉浮子表面积，根据近大远小的原理，从表面积换算得到的像素信息中获取液位结果。

哥伦比亚 Nueva Granada Military University 的 Mauledoux M 等人使用 3D 视觉相机 Kinect 和红色浮子构造液位测量系统，如图 10 所示^[15]。该处理算法基于相机的 RGB 颜色空间到 YCrCb 空间的变换，其中 Cr 分量通过抑制其他分量来突出图像中的所有红色。再通过浮子表面积所对应的像素换算得到浮子相距位置，最后得到液位值。在实验环境下，对于低液位状态，误差在 2.4% 以内，而对于高液位状态，误差接近为零。

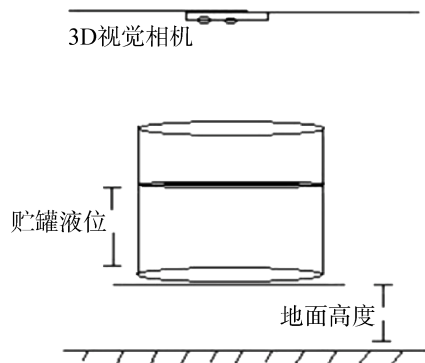


图 10 Nueva Granada Military University 液位测量系统

Fig. 10 The schematic diagram of liquid level measurement system by Nueva Granada Military University

圣约翰科技大学的 Wang T H 等人加入更多圆形浮子来测量液罐中的液位，构建如图 11 所示的液位测量系统^[16]。该系统选择与液罐中液体颜色不同的浮子，使用色度过滤和阈值技术来计算图像中浮标的像素数。建立浮子直径的像素数与拍摄距离之间的关系，测量系统以此有效地测量液位。该系统在浮子下方放置一个沉降片，可以减少液体晃动对测量的影响。经实验，平均测量误差小于 1%。

除了加沉降片之外，还可以使用保护塔来加强稳定性。印度 Sri Krishna College of Technology 的 Abinaya N S 等人提出了一种带有垂直塔的浮子式图像液位测量系统，当液位变化时浮子在垂直塔中自由移动，如图 12 所示^[17]。该系统计算图像的梯度，并应用阈值以创建二进制蒙版，使用创建的结构元素删除不感兴趣的其他对象，然后构造菱形元素对图像进行两次蚀刻，以平滑对象。对分割后的结

果提取其尺寸, 最后, 使用变换算法来得到储罐的液位。经实验, 该系统均方根误差为 0.04895。

浮子式图像液位测量技术研究现状及其特点如表 3 所示。

表 3 浮子式图像液位测量技术研究现状及其特点

| 研究机构 | 被测液体 | 方法 | 特点 |
|-----------------------------------|------|--------------------------------------|-----------------------|
| Nueva Granada Military University | 水 | 通过 Cr 分量抑制其他颜色分量来突出红色, 便于提取浮子像素得到液位值 | 该方法原理简单, 高液位状态下, 精度较高 |
| 圣约翰科技大学 | 水 | 通过色度过滤和阈值技术来计算图像中浮子的像素数, 再转换为液位值 | 浮子加装沉降片, 提高稳定性, 应用范围广 |
| Sri Krishna College of Technology | 水 | 采集浮子图像进行目标检测、扩张和平滑以提取其尺寸, 再转换为液位值 | 有垂直塔保护, 不受湍流、侵蚀的影响 |

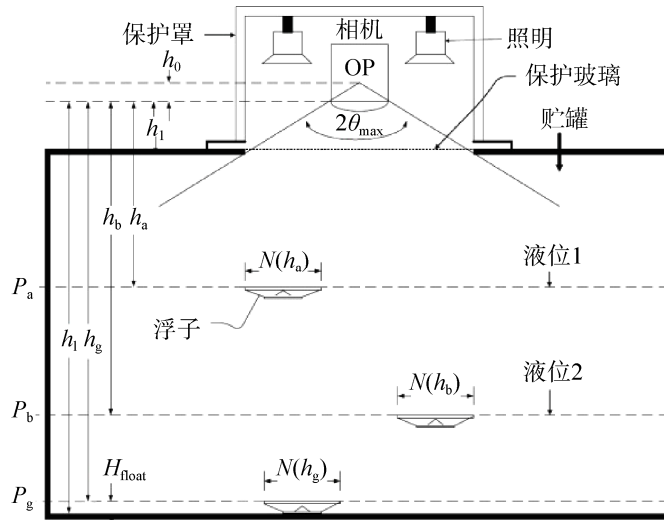


图 11 圣约翰科技大学浮子式液位检测系统

Fig. 11 The schematic diagram of float type liquid level detection system by St. John's University

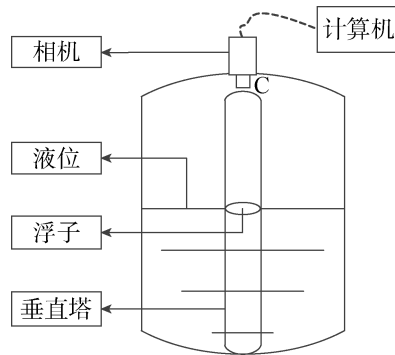


图 12 Sri Krishna College of Technology 液位检测系统

Fig. 12 The schematic diagram of liquid level detection system by Sri Krishna College of Technology

4 直接式图像液位测量技术研究现状

直接式图像液位测量系统不借助其他辅助工具, 直接摄取图像, 从图像中获取特征信息, 进而得到液位信息。这种方式装置简单, 不影响液体情况, 是最合适的方式, 但是需要在特定环境根据其特点进行方案设计, 以获取更好的准确度。

浙江大学的洪登峰针对窄视野情况，提出使用双目视觉对单晶硅熔融液位进行测量，测量系统如图 13 所示^[18]。该系统的特征点不由激光产生，而是寻找光环边缘作为检测特征。单晶硅光环具有亮度高、边界区分明显的特点，该算法采用高斯曲线模型和最小二乘法对光环边缘的灰度梯度进行拟合，选取灰度梯度最大的点作为光环边缘点。再利用该特征点进行后续的立体匹配，获取三维位置，并将其转换为液位信息。在实验环境下，测量精度在 0.5mm 以内。

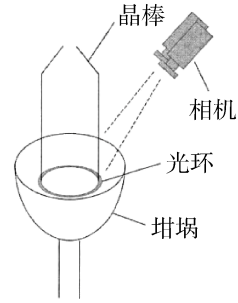


图 13 浙江大学单晶炉双目视觉检测系统
Fig. 13 The schematic diagram of monocrystal furnace binocular vision inspection system by Zhejiang University

在其他条件苛刻的工业环境中，东华大学的吴云飞针对钢液高温、高亮度的测量特点，提出了一种利用数字图像处理技术对钢包进行曲线拟合，得到钢包上升高度的测量方法，钢液边缘曲线拟合结果如图 14 所示^[19]。该系统通过调整图像曝光时间，获取较短曝光时间下的钢液包图像，再将其与正常曝光时间下的图像进行配准，采用 Sobel 算子进行轮廓检测，使用最小二乘法进行椭圆拟合，最终检测出钢液液面高度。

在家用方面，德国 University of Freiburg 的 Do C 等人使用 3D 视觉相机 Kinect 来估计未知液体的填充高度^[20]。3D 视觉相机由一个红外投影仪和一个红外摄像头组成，红外投影仪通过斑点图案照亮测试场景，红外摄像头可以检测图案，再使用三角剖分来计算深度，原理如图 15 所示。该系统根据含有大量噪声的 RGB 数据和深度数据，确定杯子中液体高度的概率模型。

直接式图像液位测量技术研究现状及其特点如表 4 所示。

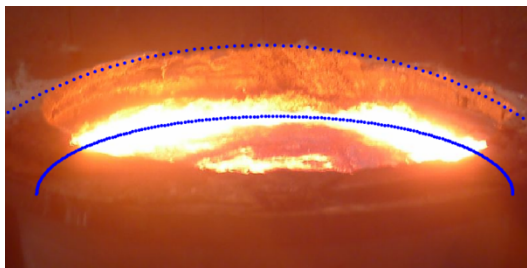


图 14 东华大学钢液边缘曲线拟合示意图
Fig. 14 The schematic diagram of liquid steel edge curve fitting by Donghua University

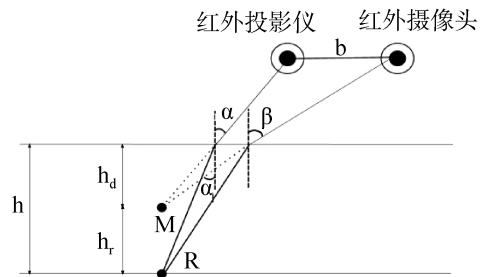


图 15 University of Freiburg 3D 测距原理
Fig. 15 The schematic diagram of 3D ranging by University of Freiburg

表 4 直接式图像液位测量技术研究现状及其特点

| Table 4 Research status and characteristics of direct image liquid level measurement technology | | | |
|---|------|--|-------------------|
| 研究机构 | 被测液体 | 方法 | 特点 |
| 浙江大学 | 硅熔液 | 线性插值和多项式拟合检测光环边缘特征，利用双目识别对此进行测距 | 装置简单，不需要很大的视野范围 |
| 东华大学 | 钢液 | 短曝光图像和正常曝光图像配准，使用 Sobel 算子检测，通过最小二乘法进行椭圆拟合获取液位 | 装置简单，解决了高亮度识别问题 |
| University of Freiburg | 常见液体 | 红外摄像头检测液面上红外投影仪图案，并对特征进行三角剖分以计算深度 | 应用范围广，能够区分液体的不透明度 |

5 基于图像处理的液位测量技术发展趋势

近些年来，伴随着工业应用对液位测量技术的迫切需求、图像处理算法研究的进步以及工业相机的性能提升，不仅使基于图像处理的液位测量方法受到广泛关注，而且在测量精度与工业环境适应性

等方面也有了显著提升。结合前文对基于图像处理的液位测量技术研究现状的调研结果, 给出如下三点发展趋势:

①在应用较为成熟的领域, 提高精度仍是图像液位测量技术的重点研究方向。随着现代工业的发展, 具有更高分辨力的图像液位测量技术将在工业环境中得到应用; 并且随着图像处理技术的成熟与完善, 采用更高效的图像处理算法, 使得上位机能够获得更加清晰的液位图像。例如, 在对单晶硅熔融液位测量研究的二十余年中, 图像测量方法不再局限于激光三角法^[5,18], 误差也由 4%到 0.7%不断减小^[4,21]。

②基于图像处理的液位测量技术在需求日益增长的工业场合得到了越来越广泛的应用。同时, 在应用中很好地解决了数字化采集、自动化处理等应用问题。在一些灌装生产线, 图像液位测量技术能够对灌装品质进行监测, 例如, 对红酒灌装后的液位、杂质等进行快速检测^[22], 对不透明容器使用 X 射线成像进行内部检测^[23]。在一些采用人工判别的应用场景, 图像液位测量技术提供一个准确、客观的判断结果, 例如, 利用捕捉的图像控制钢液包上升^[19]。

③随着机器学习的加入, 基于图像处理的液位测量技术环境适应性得到了显著提升。近几年, 基于深度学习和人工智能的现代方法应用于图像液位测量, 极大地提高了算法性能, 特别是在环境改变、光线变化的情况下。例如, 使用卷积神经网络和深度递归神经网络重构低分辨率的标尺图像^[24], 使用经过训练的分类器对水和标尺进行归类, 使其应用于更多复杂场合^[13]。

参考文献

- [1] GONZALEZ R C, WOODS R E. 数字图像处理(第三版)[M]. 阮秋琦, 阮宇智, 译. 北京: 电子工业出版社, 2017.
- [2] 叶昕鑫. 基于图像的微化工过程液位与流量测量[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
YE Xinxin. Image based liquid level and flow measurement technology for micro-chemical processes[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [3] 白莹. 基于图像传感器的储罐液位测量系统的研制[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2012.
BAI Ying. Level measurement for a liquid tank based on image method[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2012.
- [4] XIANG S W, PAN F, XIANG K, et al. Melt level measurement for the CZ crystal growth using an improved laser triangulation system[J]. Measurement, 2017, 103: 28–35.
- [5] ZHANG Z Y, LIU D, WANG S M, et al. Silicon melt liquid level detection based on improved laser trigonometry[C]. Proceedings of the 37th Chinese Control Conference, 2018: 4169–4173.
- [6] SU Z Q, HE Q, XIE Z. Indirect measurement of molten steel level in tundish based on laser triangulation[J]. Review of Scientific Instruments, 2016, 87(3): 035117.
- [7] 张云贵, 龚波, 陈宏志, 等. 基于双目立体视觉测距的浮选槽液位检测系统[J]. 冶金自动化, 2016, 40(1): 59–63, 76.
ZHANG Yungui, GONG Bo, CHEN Hongzhi, et al. Flotation tank liquid level detection system based on binocular stereo vision technology[J]. Metallurgical Industry Automation, 2016, 40(1): 59–63, 76.
- [8] 张竟月, 孙斌, 谢玄达, 等. 基于激光和机器视觉的微量液体容量计量方法[J]. 计量学报, 2018, 39(4): 504–509.
ZHANG Jingyue, SUN Bin, XIE Xuanda, et al. Volume metrology method for micro liquid based on laser and machine vision[J]. Acta Metrologica Sinica, 2018, 39(4): 504–509.
- [9] TAKAGI Y, TSUJIKAWA A, TAKATO M, et al. Development of a noncontact liquid level measuring system using image processing[J]. Water Science and Technology, 1998, 37(1): 381–387.
- [10] 羊冰清, 张周燕, 朱小良. 基于数字图像处理的液位测量系统的研究与实现[J]. 电力工程技术, 2018, 37(4): 57–64.
- [11] CAI C T, MENG H Y, QIAO R J, et al. Liquid-level measurement system based on second-confirm recognition algorithm[J]. Journal of Electronic Imaging, 2018, 27(6): 063009.
- [12] 张总, 王建莉. 基于机器视觉的液位检测与控制系统设计[J]. 自动化与仪表, 2017, 32(7): 49–51.
ZHANG Zong, WANG Jianli. Design of liquid level detection and control system based on machine vision[J]. Automation & Instrumentation, 2017, 32(7): 49–51.

- [13] BRUININK M, CHANDARR A, RUDINAC M, et al. Portable, automatic water level estimation using mobile phone cameras[C]. 14th IAPR International Conference on Machine Vision Applications (MVA), 2015: 426–429.
- [14] PAN J Q, YIN Y, XIONG J, et al. Deep learning-based unmanned surveillance systems for observing water levels[J]. IEEE Access, 2018.
- [15] MAULEDOUX M, ROBINSON J M, PAOLA A N S. Tank level measurement using 3D vision systems[J]. International Journal of Applied Engineering Research, 2018, 13(18): 13772–13775.
- [16] WANG T H, LU M C, HSU C C, et al. Liquid-level measurement using a single digital camera[J]. Measurement, 2009, 42(4): 604–610.
- [17] ABINAYA N S, KUMAR S R. Design of float-image level transmitter for level measurement using image processing technique[J]. Sensors & Transducers Journal, 2012, 145(10): 33–40.
- [18] 洪登峰. 基于双目视觉的单晶炉液位检测技术方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
HONG Dengfeng. Research on liquid level detection technology of single crystal furnace based on binocular vision[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [19] 吴云飞. 钢液液面高度自动测量系统的研制[D]. 上海: 东华大学, 2016.
WU Yunfei. The research and development of automatic measurement system for steel liquid surface height[D]. Shanghai: Donghua University, 2016.
- [20] DO C, SCHUBERT T, BURGARD W. A probabilistic approach to liquid level detection in cups using an RGB-D camera[C]. 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2016: 2075–2080.
- [21] LI Z X, KOZIOL J. A theoretical analysis of the laser melt-level monitoring system for the Czochralski crystal growing furnaces[J]. Instrumentation and Measurement, 1997, 46(3): 722–730.
- [22] 陈露, 程红, 秦帅, 等. 基于机器视觉的红酒灌装品质检测[J]. 包装工程, 2017, 38(9): 146–150.
CHEN Lu, CHENG Hong, QIN Shuai, et al. Filling quality detection of wine base on machine vision[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(9): 146–150.
- [23] 张霞, 张晓洁, 靳晨. 基于 X 射线成像的易拉罐液位检测系统[J]. 电子制作, 2018, 21: 88–89.
- [24] 程高庆. 基于数字图像处理的水位标尺识别研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
CHENG Gaoqing. Research on water level scale recognition based on digital image processing[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.

[作者简介]

- 付耀衡 1997年生, 在读研究生, 主要研究方向为计算机视觉检测技术。
彭泳卿 1980年生, 博士, 研究员, 主要研究方向为先进航天传感技术。
刘 鹏 1984年生, 高级工程师, 主要研究方向为传感器及仪器仪表。
冯红亮 1976年生, 研究员, 主要研究方向为传感器及仪器仪表。