

基于OpenCV的溶液浓度监测装置的设计与实现

祁浩然¹, 雷明晴¹, 郭书畅¹, 蒋子琦¹, 张益恺², 申子嫣^{2,*}

¹北京化工大学信息科学与技术学院, 北京 102200

²北京化工大学机电工程学院, 北京 102200

摘要: 溶液浓度的检测在科研、教学以及工业应用中具有重要意义。为了解决传统溶液检测方法流程复杂、耗时耗材、成本高等问题, 本文介绍了基于颜色特征值设计出的有色溶液浓度检测方法。该方法利用一套检测溶液颜色的简易装置, 研究出一种基于朗伯-比尔定律和图像比色法相结合的溶液颜色图像识别系统。利用OpenCV (Open Source Computer Vision Library)对系统采集到的不同浓度的溶液的图像进行处理, 从而建立溶液的HSV (Hue, Saturation, Value)颜色特征值与其浓度的回归模型以便实现对溶液浓度的准确测量。实验结果表明该方法的线性拟合效果良好, 为实验教学与工业生产质量监测提供了新的解决方案。此外, 该方法所设计的检测装置进一步改良, 还可以应用于测量溶液的包括pH等在内的其他数据。

关键词: 有色溶液浓度; OpenCV; 机器视觉系统; HSV颜色空间

中图分类号: G64; O6

Design and Implementation of a Solution Concentration Monitoring Device Based on OpenCV

Haoran Qi¹, Mingqing Lei¹, Shuchang Guo¹, Ziqi Jiang¹, Yikai Zhang², Ziyang Shen^{2,*}

¹ College of Information Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 102200, China.

² College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 102200, China.

Abstract: Solution concentration detection plays a crucial role in research, education, and industrial applications. To address the complexity, time consumption, and high costs associated with traditional methods, this study introduces a color-based solution concentration detection method. The method employs a simplified device to capture solution color, mitigates the effects of ambient light, and utilizes a system for solution color image recognition based on the Lambert-Beer law and image colorimetry. Using OpenCV (Open Source Computer Vision Library), images of solutions with varying concentrations are processed to establish a regression model correlating HSV (Hue, Saturation, Value) color features with solution concentrations, enabling accurate measurement. Experimental results demonstrate strong linear correlation ($R^2 = 0.99$) between HSV values and concentrations, particularly with copper sulfate solutions ranging from 0 to 50 mg·mL⁻¹. This method offers a novel solution for quality control in industrial production and enhances educational experiments. Furthermore, the adaptable design of the detection device facilitates measurement of additional solution parameters, including pH, expanding its utility in diverse applications.

Key Words: Concentration of colored solution; OpenCV; Machine vision system; HSV color model

收稿: 2024-04-07; 录用: 2024-07-02; 网络发表: 2024-10-30

*通讯作者, Email: shenzy@buct.edu.cn

基金资助: 教育部工程创客教育虚拟教研室青年项目; 北京市高等教育学会2022年立项课题(MS2022391); 北京化工大学2023本科教育教学改革重点研究项目(2023BHDJGZ06)

溶液浓度的检测在教育和工业领域具有广泛的重要性。在教学领域，溶液浓度的检测对于学生的实验操作技能和科学思维的培养具有基础性意义。通过学习溶液制备、稀释和浓度计算等实验技巧，学生能够加深对溶液浓度概念的理解，并提高实验操作能力^[1]。在工业领域中，精确测量溶液浓度对产品的性能和效果至关重要，同时还可以降低生产成本。此外，溶液浓度的监测也对环境保护具有重要意义。目前，溶液浓度的检测主要采用化学分析法、光谱法和紫外-可见分光光度法等方法。然而，这些方法存在一些局限性。具体而言，化学分析法的检测流程复杂，耗时长，需要大量的化学试剂，容易对环境造成二次污染。光谱法的测量数据包含各种噪声，例如光注入、电注入噪声和传输噪声，这些噪声会在一定程度上干扰测量结果。而紫外-可见分光光度法在实际应用过程中也存在光线干扰、样品反应等不足之处。此外，大多数仪器的测量设备成本高昂，损耗快，使用寿命较短，维护成本也相对较高。

采用机器视觉系统测量有色溶液浓度的研究方法逐渐成为溶液浓度检测领域的热点。Shafer^[2]提出DRM (Digital Rights Management)模型，模型的主要思想认为光的反射是由镜面反射和漫反射组成；Tominaga^[3]利用DRM模型通过色品图识别不同的物质，该方法适用于金属及其他许多物质；李宏东等^[4]用量子统计思想估计光谱识别不同的材料也取得了一定的效果；张建新等^[5]将机器学习的算法应用到吸收光谱的分析，提高了染液浓度预测的准确性，对三组分混合染液进行离线的浓度检测，可将相对误差控制在 $\pm 10\%$ 。该团队还研制了一种基于双波长分光光度法的吸光度检测装置，在较大程度上消除了背景干扰，与标准吸光度检测装置的检测结果对比相对误差为 $\pm 5\%$ ；房文杰等^[6]采用吸收光谱峰面积法和一阶导数法对颜色相近的双组分染液浓度进行了测定，可在有限的配比范围内将测定相对误差控制在 $\pm 5\%$ ，并且使用光纤光谱仪对染色过程中的染液检测进行了初步的探索。

本文受到朗伯-比尔定律^[7]的启发，提出了利用树莓派和OpenCV技术，通过对溶液色相、饱和度和色明度颜色特征值(HSV)^[8,9]分析来进行浓度检测的方法。该方法通过摄像头获取溶液图像，经过ROI (region of interest)区域选取，高斯滤波^[10]等图像处理，提取溶液的HSV颜色空间，将HSV颜色特征值与溶液浓度建立多元线性回归方程。此外，本研究还对机器视觉检测溶液浓度的硬件实验平台进行了优化，设计了一个稳定可控的无光环境，进一步提高了检测的准确性。与传统的方法相比，这种基于机器视觉的溶液浓度检测方法具有更高的精确度和可重复性，并且具备更长的使用寿命和较低的维护成本。沈继忱等^[7]基于图像比色法研究发现在 $0\text{--}50\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的浓度范围内，硫酸铜溶液颜色值与浓度存在线性关系且相关系数高达0.99。基于上述理论及硬件基础，本文以硫酸铜溶液为例，研究建立了预测硫酸铜溶液浓度的模型，实验结果表明在 $3.8\text{--}48.9\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 浓度范围内HSV值与硫酸铜浓度的相关系数均达到0.99以上，为基于OpenCV的溶液浓度监测装置提供数据支持。

1 测量有色溶液浓度的理论基础

1.1 朗伯-比尔定律

有色溶液吸光度与其溶液浓度的关系可由光的吸收定律朗伯-比尔定律表示^[11,12]。一束具有相应波长的单色光透过有色溶液时，由于一部分光被有色溶液中的吸光粒子吸收，故光的辐射就减弱。而有色物质的浓度越大，液层越厚，则代表有色物质的吸光粒子数越多。若保持溶液厚度(或光程长) b 不变，入射光的波长 λ 不变，有吸光度 A 与浓度 c 成正比。溶液厚度 b 、吸光度 A 与浓度 c 之前的关系可表示为： $A = \kappa bc$ ，其中 κ 为摩尔吸光系数，它与吸收物质的性质及入射光的波长 λ 有关。

1.2 图像比色法

在色度原理中，红(R)、绿(G)、蓝(B)三种颜色按不同比例混合可以得到任意颜色，因此RGB也被称为三原色。图像处理中最初采集到的颜色为RGB值。

朗伯-比尔定律指出，有色溶液颜色的深浅取决于溶液吸收光的量的多少，即取决于有色溶液中某些有色粒子浓度的高低。在此基础上，本文利用摄像头读取不同浓度的溶液图像，利用OpenCV进行ROI区域的选取以及高斯滤波的平滑处理，再使用OpenCV中的cv2.cvtColor将其转化为HSV值，利

用溶液的浓度与其H、S、V颜色特征值成正比的线性关系，从而可以计算出被测溶液的浓度。

2 溶液颜色图像识别系统的搭建与溶液颜色的采集

2.1 溶液颜色图像识别系统的搭建

本文搭建了溶液颜色图像自动识别系统，设计了简易的检测装置，该装置作为图像检测池用于为摄像头对溶液图像的获取提供单一光源的环境，避免外界环境干扰。嵌在检测装置最上方正方槽中的分辨率为720p摄像头向下垂直拍摄下方正对的溶液，避免了装置内壁光反射可能造成的反光影响，同时固定的相对位置保证了取样的溶液颜色图像相对条件一致。检测池正中央挖一个与试管尺寸相符的孔洞，并在孔洞下方放置白色磨砂材质的聚丙烯(PP)扩散板，一方面降低了光反射的影响，另一方面试管插入后即可实现其位置的固定。试管使用相同型号的玻璃试管，试管圆形的底部减少了因底部形状引起的局部折射或反射，更容易让光线穿透试管底部并传播，相同的圆弧度使透过溶液的光线条件相同。从制备好的浓度梯度容量瓶中量取5 mL溶液至试管中，进一步保证了摄像头与溶液的距离一致。孔洞下方设计圆心凹槽用于放置光源，本装置的光源采用LED白光灯圈，可以使得图像处理区域的光照强度充足。本装置的设计如图1所示。实物图如图2所示。

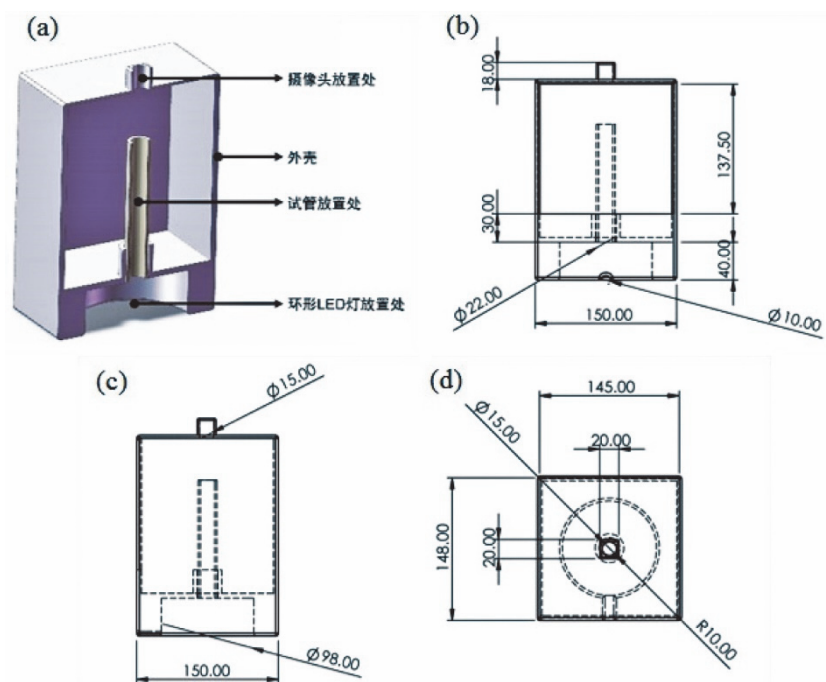


图1 检测装置(检测池)剖视图(a)、主视图(b)、左视图(c)和俯视图(d)

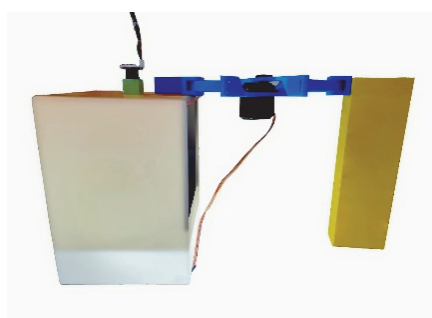


图2 检测装置(检测池)与机械臂实物图

2.2 溶液HSV颜色特征值的采集

本文编写了一个基于python-OpenCV的机器视觉程序,旨在满足测量溶液浓度的需求。该程序具有稳定性和便捷性,能够自动化地采集溶液的HSV颜色特征值。它利用OpenCV库提供的功能调用摄像头并进行图像读取和预处理,并最终能够准确地提取出溶液的HSV颜色特征值。此外,通过提取出的HSV数值,运用NumPy库,对已知浓度溶液的HSV数值和浓度进行拟合,建立起溶液浓度与其HSV颜色特征值的线性回归方程。该方程可以用于计算未知浓度溶液的浓度,最终实现溶液浓度的自动化检测。

3 基于OpenCV的图像处理

3.1 图像ROI区域的选取

ROI区域(region of interest)的选取作用在于对图像进行局部化处理和分析,能够提高计算效率和精确度。由于摄像头的位置已经固定且其位于试管的正上方,可知在摄像头拍摄图像的最中间部分即为实验需要的溶液颜色图像。本文利用OpenCV库来捕获图像并选取中部的指定矩形区域作为图像ROI区域^[13]。

此部分的程序首先打开摄像头并创建一个视频捕获对象。然后,通过cap.read函数获取一帧视频,并将其存储在变量中。随后,通过指定矩形区域的左上角坐标、宽度和高度来确定区域的位置和大小,将此矩形区域定位于图像中溶液颜色呈现最佳的区域。最后,从获取的视频帧中提取指定矩形区域的图像,并将其存储在ROI变量中,作为图像的ROI区域。

3.2 图像的高斯滤波处理

在图像处理的过程中,为了改善图像质量以便于进行更高层次的处理,本文通过使用高斯滤波减弱图像噪声并使图像变得模糊且平滑,即对整幅图像进行加权平均。每一个像素点的值,都由其本身和邻域内的其他像素值经过加权平均后得到。但由于中心点与边缘点的距离不同,越靠近的点关系越密切,越远离的点关系越疏远^[14,15]。

高斯滤波是一种基于高斯函数的卷积操作。滤波实现的主要步骤如下。

假设构造宽(列数)为 W ,高(行数)为 H 的高斯卷积算子 $\text{gaussKernel}_{H \times W}$,其中 W 和 H 均为奇数,参考点的位置在 $(\frac{H-1}{2}, \frac{W-1}{2})$ 。

首先计算高斯矩阵:

$$\text{gaussMatrix}_{H \times W} = [\text{gauss}(r, c, \sigma)]_{0 \leq r \leq H-1, 0 \leq c \leq W-1, r, c \in N} \quad (1)$$

其中

$$\text{gauss}(r, c, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \times e^{-\frac{(r-\frac{H-1}{2})^2 + (c-\frac{W-1}{2})^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

然后计算高斯矩阵之和 $\text{sum}(\text{gaussMatrix}_{H \times W})$ 并进行归一化。

$$\text{gaussKernel}_{H \times W} = \text{gaussMatrix} / \text{sum}(\text{gaussMatrix}_{H \times W}) \quad (3)$$

得到高斯卷积内核并进行卷积运算。以上运算过程通过OpenCV中的cv2.GaussianBlur函数完成。

处理前后图像及明暗分布直方图见图3和图4。

3.3 图像HSV的提取

标准工作曲线的建立和回归分析与颜色特征值的选取密切相关,颜色特征值的选取也直接影响着溶液浓度测量的灵敏度和准确度。

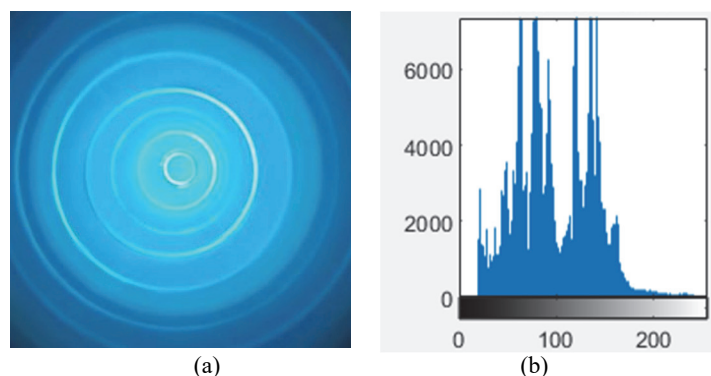


图3 处理前摄像头拍摄图像(a)以及图像明暗分布直方图(b)

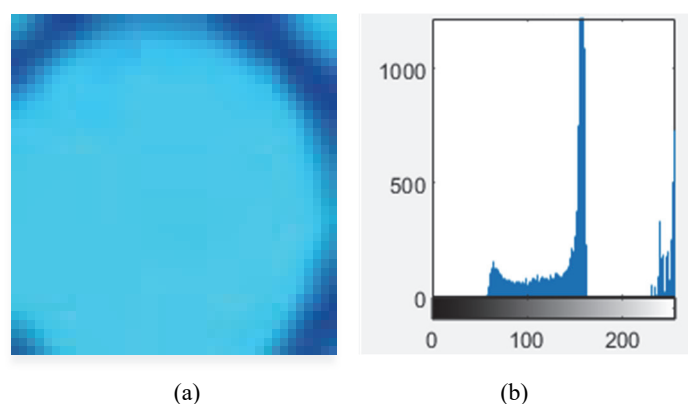


图4 处理后摄像头拍摄图像(a)以及图像明暗分布直方图(b)

将溶液放入试管中，对溶液图像进行采集和处理后获取图像中心点的坐标，并用cv2.cvtColor函数获得图像的HSV值，统计HSV颜色空间下各颜色特征值与溶液浓度之间的变化规律。流程见图5，部分程序及运行结果见图6。

4 实验结果分析与回归模型的建立

4.1 实验结果分析

与一般的HSV定义不同，在OpenCV中，色相H的取值范围是0到179度，饱和度S的取值范围是0到255，亮度V的取值范围是0到255，其中饱和度和亮度的单位是无单位的整数。

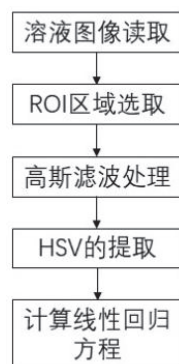


图5 HSV颜色特征值的提取流程

```

6 def capture_hsv():
7     # 调用摄像头并读取图像
8     cap = cv2.VideoCapture(0)
9     ret, frame = cap.read()
10
11     # 定义ROI区域 (x,y表示左上角起始点坐标, w,h表示矩形宽度和高度)
12     x, y, w, h = 300, 220, 40, 40
13
14     # 获取ROI区域
15     roi = frame[y:y + h, x:x + w]
16
17     # 对ROI区域进行高斯滤波
18     gauss = cv2.GaussianBlur(roi, (5, 5), 0)
19
20     # 获取中心点坐标
21     x_roi, y_roi = 20, 20
22
23     # 获取HSV值
24     hsv = cv2.cvtColor(gauss, cv2.COLOR_BGR2HSV)
25
26     # 输出当前溶液HSV值以确定其是否出错
27     h, s, v = hsv[y_roi, x_roi]
28     print("当前溶液HSV值: ", h, s, v)
29
30     cap.release()

```

请放置第1个溶液并按Enter键进行采样
当前溶液HSV值: 68.8 11.8 180.5

请放置第2个溶液并按Enter键进行采样
当前溶液HSV值: 75.0 25.5 187.5

图6 HSV颜色特征值提取的部分程序以及运行结果

以硫酸铜浓度 c 为自变量, HSV色彩空间的H、S、V特征值为因变量, 根据实验得到硫酸铜溶液浓度与其HSV颜色特征值的关系(见表1), 并根据此数据得到图7。

表1 硫酸铜溶液浓度与其HSV颜色特征值的关系

硫酸铜溶液浓度/($\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$)	3.8	9.9	16.4	20.3	24.2	29.9	32.1	40.2	45.7	48.9
H	68.8	75.0	83.5	86.5	90.0	94.0	97.8	104.0	109.3	112.3
S	11.8	25.5	39.8	47.3	53.5	65.5	70.5	85.8	97.0	103.3
V	180.5	187.5	190.8	196.8	200.5	207.8	210.0	218.3	223.5	227.0

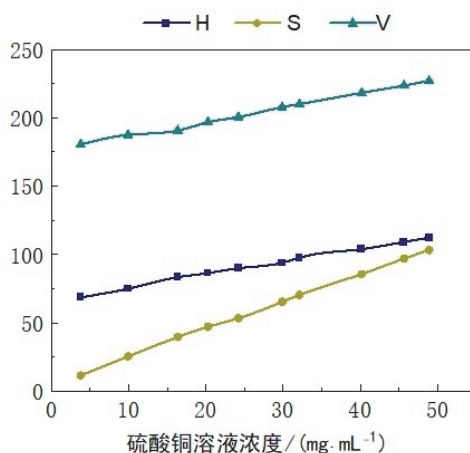


图7 硫酸铜溶液浓度与其HSV颜色特征值的关系

4.2 回归模型的建立

根据实验结果, 硫酸铜溶液的HSV颜色特征值与其浓度有着明显的线性关系, 根据计算可得硫酸铜溶液浓度与其HSV值有如下线性回归方程:

$$H = 0.9541 \times c + 66.461 \quad R^2 = 0.9957 \quad (4)$$

$$S = 2.0044 \times c + 5.6029 \quad R^2 = 0.9993 \quad (5)$$

$$V = 1.0444 \times c + 175.92 \quad R^2 = 0.9962 \quad (6)$$

由此可见, 硫酸铜溶液浓度与其H、S、V三值之间的相关系数均达到0.99以上。故若要根据H、S、V特征值计算硫酸铜溶液浓度, 只需将H、S、V三组特征值代入线性回归方程计算得到3个溶液浓度 c 并计算其均值即可。根据以上方程, 本文编写了硫酸铜溶液的浓度检测程序, 利用本文所设计的溶液颜色图像识别系统, 可以自动化地获取任意浓度硫酸铜溶液的浓度。

5 结语

通过基于OpenCV技术设计的溶液浓度监测装置, 以及基于颜色特征值的有色溶液浓度检测方法, 本研究成功建立了溶液的HSV颜色特征值与浓度的回归模型, 实现了对溶液浓度的准确测量。实验证明, 在硫酸铜溶液3.8–48.9 mg·mL⁻¹的浓度范围内, H、S、V值与硫酸铜浓度的相关系数均高达0.99以上, 展现出较高的精确度和可靠性。该研究为实验教学与工业生产质量监测提供新的解决方案, 并具有较低成本和更长使用寿命的优点。未来, 仍需进一步探索如何应用该技术在不同类型溶液的浓度检测中的适用性和泛化能力, 以及在实际应用中的稳定性和可靠性。同时, 对于不同种类和颜色较为复杂的溶液浓度检测可能需要进一步优化算法和模型

参 考 文 献

- [1] 卢运, 许燕红, 覃稔. 化学教学, **2019**, No. 8, 80.
- [2] Shafer, S. A. *Color Res. Appl.* **1985**, 10, 210.
- [3] Tominaga, S. *Color Res. Appl.* **1994**, 19, 277.
- [4] 李宏东, 刘济林, 叶秀清, 顾伟康. 中国图形图像学报, **1999**, 4 (2), 20.
- [5] 张建新, 张银露, 胡旭东. 纺织学报, **2017**, No. 7, 90.
- [6] 房文杰, 屠天民, 张骞李, 鹏飞. 印染, **2011**, No. 7, 12.
- [7] 沈继忱, 王雪晴, 刘邦利, 张卫红. 光学仪器, **2008**, 30 (2), 9.
- [8] 汪成龙, 陈国壮, 马秋立, 方浩群, 何宣, 陈泽涛, 孙培宜. 电子测量技术, **2018**, No. 16, 91.
- [9] 刘星星, 王烁烁, 徐丽明, 袁全春, 马帅, 于畅畅, 牛丛, 陈晨, 袁训腾, 曾鉴. 农业工程学报, **2019**, 35 (23), 176.
- [10] 卢嫚, 谢磊鑫. 自动化与仪表, **2023**, No. 8, 120.
- [11] 施家凯, 沈雅琪, 马松山, 束传存. 物理实验, **2023**, 34 (4), 44.
- [12] 庞琳, 高庆吉, 金立忠, 秦玉华, 张术勇. 东北电力大学学报, **2005**, 25 (1), 32.
- [13] 郭凯. 机器视觉微试剂原位水质监测仪远程监控系统设计[硕士学位论文]. 北京: 北方工业大学, 2020.
- [14] 赵博文, 张力夫, 潘在峰, 王蓉, 郭雅馨. 信息与电脑, **2020**, No. 15, 78.
- [15] 卓帆, 袁锐. 电脑知识与技术, **2022**, 18 (23), 36.