

# 基于移动最小二乘法的微型光谱仪标定方法

陈 朋<sup>1</sup>, 韩洋洋<sup>2</sup>, 严宪泽<sup>2</sup>, 咎 昊<sup>2</sup>

(1. 浙江工业大学 计算机科学与技术学院, 杭州 310023;

2. 浙江工业大学 信息工程学院, 杭州 310023)

**摘要:** 针对现有微型光谱仪缺少一种统一、可靠标定方法的问题, 提出了一种基于移动最小二乘法 (Moving Least Squares, MLS) 的微型光谱仪标定方法: 首先, 微型光谱仪分别获取汞氙灯和氖灯的标准光谱图; 然后对含有高频噪声的原始光谱图进行小波去噪, 之后通过峰值定位算法找到特征峰并筛选出需要参与拟合的特征峰所对应的像元序号, 最后筛选出一定数量的标定点使用 MLS 进行拟合; 选取一定数量的未参与标定的特征峰代入到拟合函数中进行精度验证; 实验表明: 基于 MLS 拟合标定后, 标定集的误差标准差为 0.136 nm, 测试集的误差标准差为 0.192 nm, 高于传统的最小二乘法曲线拟合, 该方法实现了快速、准确地对微型光谱仪进行标定, 在实际工程应用中具有重要的指导意义。

**关键词:** 微型光谱仪; 移动最小二乘法; 小波去噪; 标定方法

## Research on Calibration Method of Micro Spectrometer Based on Moving Least Squares

Chen Peng<sup>1</sup>, Han Yangyang<sup>2</sup>, Yan Xianze<sup>2</sup>, Zan Hao<sup>2</sup>

(1. College of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China;

2. College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

**Abstract:** In view of the lack of a unified and reliable calibration method for existing micro spectrometer, a calibration method for micro spectrometer based on moving least square (MLS) method is proposed. First, the standard spectrograms of mercury-argon lamp and neon lamp were obtained by spectrometer. Then, the original spectral image containing high frequency noise was de-noised by wavelet. After that, the characteristic peak was found through the peak positioning algorithm. The corresponding pixel number of the characteristic peak that needed to participate in the fitting was selected. Finally, a certain number of standard points were selected and fitted by moving least square method. A certain number of characteristic peaks not involved in the calibration were selected and substituted into the fitting function for accuracy verification. The experimental results show that the standard deviation of calibration set is 0.136 nm and the standard deviation of test set is 0.192 nm after calibration based on moving least square method, which is higher than traditional least square method. This method can realize fast and accurate calibration of micro spectrometer, and it has important guiding significance in practical engineering application.

**Keywords:** micro spectrometer; moving least squares; wavelet de-noising; calibration method

## 0 引言

微型光谱仪在现代工程应用中, 对成分的检测发挥着越来越重要的作用。由于每种物质成分都有其独特的光谱特征, 通过微型光谱仪分析检测物质可以快速准确地得到正确的结果, 相比于其他检测方法, 其具有重量轻、体积小、探测速度快等优点<sup>[1]</sup>, 其对物质的非破坏性更具有独特的优越性。

微型光谱仪在设计制造后, 标定是一个重要的步骤。微型光谱仪的标定是确定光电传感器像元与光谱波长的对应关系。目前光谱仪标定主要有两种方法: 光学方程计算法和波

长标定实验法。光学方程计算法是用光栅公式直接计算出波长的具体位置, 这种方法通常受仪器工艺、安装位置等因素影响, 误差较大。波长标定实验法是采用特征光谱在光电传感器对应的像元上找到相应的位置<sup>[2]</sup>, 并采用最小二乘法<sup>[3]</sup>拟合等方法实现波长的标定。根据拟合得到的数学模型, 可以将所有像元对应的波长值计算出来<sup>[4-5]</sup>。

为了精确和有效地标定光谱仪, 波长标定通常使用标准光源, 用拟合或插值方法进行标定。目前国内外对光谱仪标定方法研究主要有对标定装置的研究和标定算法的研究<sup>[6]</sup>。在对标定装置研究上, 吴越<sup>[7]</sup>等人在分析实验室常用波长定标方法的基础上, 搭建了一种基于 CO<sub>2</sub> 激光器+积分球的波长定标装置, 采用该定标装置进行波长标定, 然后用多项式算法拟合获得了较高的标定精度。毛靖华<sup>[8]</sup>等人选取超静氙灯作为标定光源, 构建了基于中阶梯衍射光栅的波长标定装置, 对仪器进行了波长标定。Yu Z<sup>[9]</sup>等人采用波导梳状滤波器对分光计进行波长校准, 解决了基线

收稿日期: 2019-10-09; 修回日期: 2019-11-01。

基金项目: 浙江省属高校基本科研业务费专项资金 (RF-C2019001); 浙江省教育厅一般科研项目 (GZ18571030014)。

作者简介: 陈 朋 (1981-), 男, 浙江温州人, 教授, 博士生导师, 主要从事嵌入式系统设计、图像处理和模式识别方向的研究。

校准不好、特征峰分布不均匀的问题, 有效地改善了多项式拟合精度低的缺点。以上通过对标定装置的改进都在不同程度上增加了标定装置自身误差对标定结果的影响。同时标定装置操作复杂, 难以商业化。

在标定方法研究上, Cho J<sup>[10]</sup>等人利用一个带有两个三角项的波长校准模型, 将水平像元与低压汞灯五条线的已知波长进行最小二乘拟合。Zhang F<sup>[11]</sup>等人在光栅衍射方程的基础上, 结合分析光栅、正弦杆和扫描机构螺杆之间的机械传动关系, 建立了波长误差和机械误差的数学模型, 提出了一种基于正弦棒长度调整和误差补偿的波长精确标定方法。Kim<sup>[12-13]</sup>等人只需要一个精确的波长就可以指定整个波长范围。在标定方法研究上, 大多基于最小二乘法拟合方式<sup>[14]</sup>, 拟合之后的光谱信号由于受到噪声等因素的影响, 波长和感光元件的像元之间并不是严格的多项式关系, 误差的标准差较大。

综上所述, 本文针对标准光源的特征光谱和传统拟合方法的缺点, 首次提出基于 MLS 的微型光谱仪标定方法, 解决了最小二乘法误差标准差较大的问题。该方法使用 C# 作为编程语言, 在 WPF 平台 (Windows Presentation Foundation) 上实现该方法。首先使用汞氙灯和氙灯作为标定光源, 然后针对原始特征光谱图中存在的高频噪声使用小波去噪法<sup>[15-16]</sup>去除, 之后使用峰值图像定位算法找到特征光谱峰所对应的像元位置, 最后筛选一部分标定点, 使用移动最小二乘法标定。

### 1 标定方法总体介绍

本文提出的基于移动最小二乘法的微型光谱仪标定方法如图 1 所示。

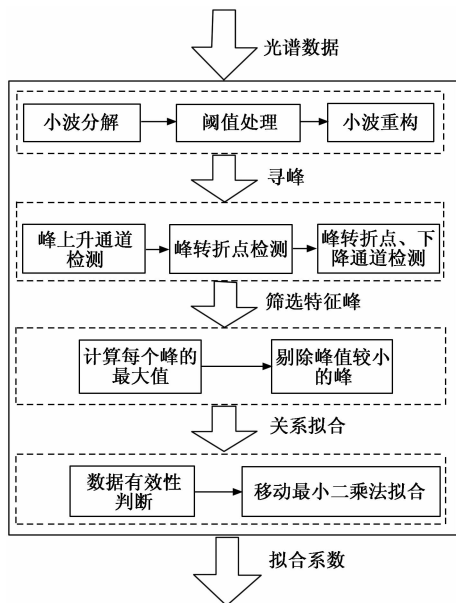


图 1 标定方法设计图

该方法由小波去噪、寻找特征峰、筛选有效标定点和标定关系拟合四部分组成。

第一部分: 由于原始光谱图中存在大量的高斯白噪声,

使用小波去噪使信号的噪声得到抑制并且反映原始信号的特征尖峰得到很好地保留; 第二部分: 选取合适的特征峰起始位置决定了标定的精度, 使用比较法, 定位每个特征峰像元所在的位置; 第三部分: 筛选一部分均匀覆盖的特征峰所对应的像元位置参与标定; 第四部分: 选取指数型权重函数和线性基函数, 使用移动最小二乘法算出标定关系。

### 2 小波去噪去除高频噪声

微型光谱仪采集的信号包含各种噪声和干扰, 微型光谱仪标定前需要进行平滑处理提高光谱数据的信噪比, 同时还需要保留光谱特征。

首先对接收到的光谱数据进行平均去噪, 然后再进行小波去噪。平均去噪认为相邻帧同一像元位置之间存在相关性, 通过平均去噪, 使光谱曲线预处理为较平滑。

小波理论是在傅里叶理论基础上来发展而来, 其主要原理基于短时傅里叶变换。小波去噪的实质是将含有噪声的信号从时域到小波空间的最优映射。小波去噪包括小波变换、阈值处理、小波重构三个步骤<sup>[17]</sup>。

小波变换首先要选择一个合适的小波基, 小波基有很多种, 小波基应该选择与待去除的噪声信号波形相似的小波函数。根据光谱仪高频噪声的特点, 本文选取 db3 小波作为小波变换的小波基, db3 小波的尺度函数和小波函数如图 2 所示, 对原始光谱信号进行 3 层小波分解。

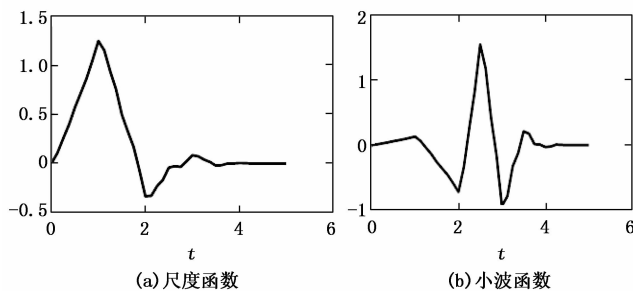


图 2 db3 小波尺度和小波函数

微型光谱仪感光元件获得的信号为离散数字信号, 用滤波器执行离散小波变换如图 3 所示。图中  $a_0(k)$  为原始离散信号,  $k$  为离散数据的序号, 离散信号的总长度为  $n$ ; 离散小波变换相当于将原信号  $a_0$  (长度为  $n$ ) 与滤波器函数  $H$  和  $L$  (长度为  $f$ ) 做卷积, 然后进行降采样, 舍弃一半的卷积结果, 得到信号的近似值  $a_1(k)$  和信号的近似值  $d_1(k)$ , 之后对  $a_1(k)$  继续分解。

阈值处理的作用是根据小波变换后各尺度的小波系数大小, 去除噪声的小波系数并保留有效信号的小波系数。本文选用软阈值法, 软阈值函数定义为式 (1):

$$w_{new} = \begin{cases} \text{sgn}(\omega)(|\omega| - T), & |\omega| \geq T \\ 0, & |\omega| < T \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $\omega$  为小波分解后的小波系数,  $T$  为设置的阈值。

选取刚好大于噪声的最大水平的阈值  $T$ , 可以证明的是噪声的最大限度以非常高的概率低于  $\sigma \sqrt{2 \ln N}$ , 参数  $\sigma$  是

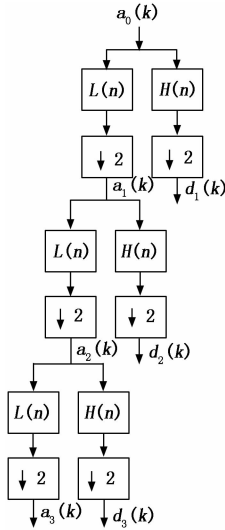


图 3 滤波器实现 3 层离散小波分解

通过计算第一级小波变换分解出的小波系数，即整个系数绝对值中间位置的值估计出来的噪声标准偏差。本文用此阈值去处理各尺度上的细节系数，注意所谓全局阈值就是近似系数不做任何阈值处理外，其他均阈值处理。

### 3 特征光谱定位算法

汞氙灯等标准光源的光谱图峰值相对尖锐，存在重叠峰的情况<sup>[18]</sup>。本文针对此类光谱图和实验所用具有 512 点感光像元的微型光谱仪特点，基于比较法设计的光谱峰图像定位算法主要有两步：1) 寻找每个峰的起始点、转折点和终止点，并进行标注；2) 根据所作的标注判断特征峰的类型。

标注阶段：如图 4 所示，横轴为线阵感光元件的像元序号，纵轴为光强，从原点开始搜寻，当出现  $I(i) < I(i+1) < I(i+2) < I(i+3)$  时，则认为第  $i$  点的像元为一个峰的起始点，标注为  $I\_up$ ；当出现  $I(k-2) < I(k-1) < I(k) \leq I(k+1)$  时，则认为第  $k$  点为一个峰的下陷点，标注为  $I\_down$ 。如图 5 所示，光谱仪获取的标准光源的光谱图像中会存在重叠峰，为了区分这种峰，认为当出现  $I(i-1) < I(i) < I(i+1)$  时，第  $i$  点为一个峰的转折点，标注为  $I\_turn$ 。

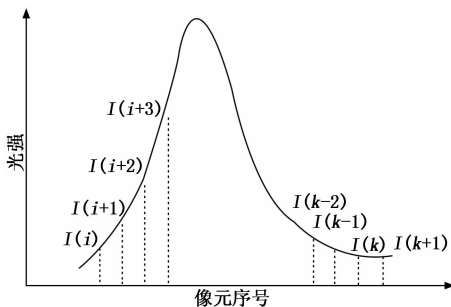


图 4 光谱特征峰起始点和终止点标注示意图

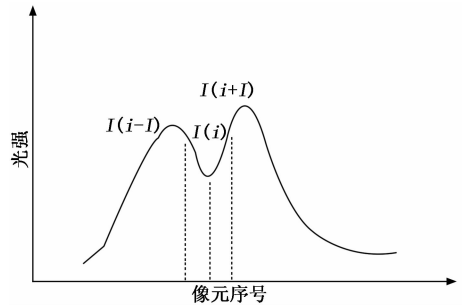


图 5 光谱特征峰转折点标注示意图

型判断，如图 6 所示。

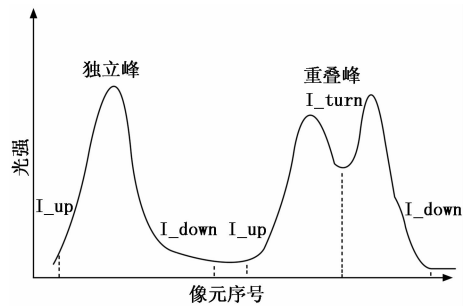


图 6 判断光谱特征峰类型示意图

$I\_up$  与  $I\_down$  之间出现一个独立峰；当出现  $I\_turn$  时则认为出现一个重叠峰，搜寻峰的极大值时，按照  $I\_up$  与  $I\_turn$ 、 $I\_turn$  与  $I\_down$  的规律看作是两个独立峰。本文使用的光谱仪感光元件的像元较少，获得的特征峰相对尖锐，对于特征峰所对应的像元只需要按照寻找极大值的方式即可找到，对于感光元件像元较多的光谱仪，还需要使用高斯拟合法、对称零面积卷积法等方法进一步处理<sup>[19]</sup>，本文不再进一步分析。

### 4 MLS 标定关系建立

设函数  $f(x)$  在求解域  $\Omega$  内的近似为  $f^h(x)$ ， $f(x)$  在计算点  $x$  的邻域  $\Omega_x$  内局部近似为：

$$f^h(x, \bar{x}) = \sum_{i=1}^m p_i(\bar{x}) a_i(x) = p^T(\bar{x}) a(x) \quad (2)$$

其中： $x$  是计算点， $\bar{x}$  是计算点支撑域内的坐标， $m$  是基函数的项数， $p(\bar{x})$  是基函数， $a(x)$  为待求系数。

基函数常用单项式，本文选取一维空间中单项式线性基函数，线性基如下：

$$p^T(x) = [1, x], m = 2 \quad (3)$$

待求系数  $a(x)$  的选取要求近似函数  $f^h(x, \bar{x})$  在计算点  $x$  的邻域  $\Omega_x$  内是待求函数  $f(x)$  在加权最小二乘法意义下的最佳近似值<sup>[20]</sup>。

求解域  $\Omega$  用  $n$  个节点离散，在每个节点  $x_l$  的权函数定义为：

$$w_l = w(x - x_l), l = 1, 2, \dots \quad (4)$$

近似函数  $f^h(x)$  在节点处的误差的加权平方和为：

$$J(x) = \sum_{l=1}^n w(x - x_l) [p^T(x_l) a(x) - y_l] \quad (5)$$

对滤波之后的标准光源光谱图标注之后再行峰值类

其中:  $n$  是用于插值的场点数。

式 (5) 两边对  $a(x)$  求导得:

$$\frac{\partial J}{\partial a} = A(x)a(x) - B(x)y = 0 \quad (6)$$

$$a(x) = A^{-1}(x)B(x)y \quad (7)$$

其中:

$$A(x) = \sum_{l=1}^n w(x-x_l) p(x_l) p^T(x_l) \quad (8)$$

$$B(x) = [w_1(x) p(x_1), w_2(x) p(x_2), \dots, w_n p(x_n)] \quad (9)$$

$$y = [y_1, y_2, \dots, y_n]^T \quad (10)$$

为了求解系数  $a(x)$ , 把式 (7) 代入式 (2) 得到移动最小二乘拟合函数:

$$f(x) = p^T(x)A^{-1}(x)B(x)y \quad (11)$$

MLS 标定的关键步骤是选取合适的权函数, 权函数的选取应该满足非负性、紧支性、单调递减性和平滑性。常用的权函数类型有高斯函数、指数型函数、样条型函数和径向基函数等。根据微型光谱标定曲线线性特性, 本文选取指数型函数作为基函数, 形式如下:

$$w_l = e^{-((x-x_l)/\alpha)^2} \quad (12)$$

其中: 参数  $\alpha$  越大,  $w_l$  越平滑, 本文经过多次试验, 选取  $\alpha = 60$ , 此时微型光谱仪拟合效果最好。

移动最小二乘法的优点是应用较低阶的基, 选取适当的权函数获得具有较高连续性和相容性的函数。

### 5 实验分析

#### 5.1 标定实验设计

本文选用美国 Pyxis 公司研发的 SQ-3000 型可见波段的微型光谱仪作为标定精度测试对象。此光谱仪可检测的波段波长范围为 380~800 nm, 光谱仪的波长分辨率为 1.5 nm, 该型号微型光谱仪使用切尔尼-特纳光学结构, 光电传感器为滨松 S8378-512Q 线性 CMOS, 各像元有其确定的编号, 从 1 开始到 512 结束。由式 (11) 得到像元和波长的关系函数为:

$$\lambda(i) = p^T(i)A^{-1}(i)B(i)y \quad (13)$$

其中:  $i$  为像元序号,  $\lambda(i)$  为像元  $i$  所对应的波长。

波长标定需要通过测量标准物质的发射谱来完成, 常用的波长标定光源为: 氙灯发射谱、汞氙灯发射谱、氙灯发射谱等光源。随着微型光谱仪的发展, 使用单一光源很难获得均匀分布的特征谱线, 本文同时使用汞氙灯和氙灯对微型光谱仪标定, 可以获得均匀分布的特征谱线, 具有成本低、操作简单、精度高的优点, 非常适合对 200~1700 nm 波段的微型光谱仪进行波长标定。标定装置的连接如图 7 所示。

实验的流程如下: 首先, 完成微型光谱仪与汞氙灯标定光源的连接, 微型光谱仪与计算机的连接; 然后打开上位机软件, 通过上位机软件调节积分时间采集合适的光谱图像并将其呈现到计算机上, 记录此时的光谱图像; 断开微型光谱仪与汞氙灯的连接, 将微型光谱仪与氙灯进行连接, 调节合适的积分时间, 记录此时的光谱图像; 通过上

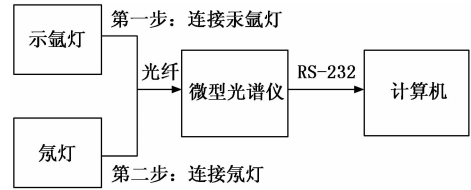


图 7 标定装置连接图

位机软件, 将两次保存的光谱图像进行小波去噪、寻峰。

#### 5.2 标定集特征点选取

光谱仪标定集 (参与标定的谱线特征点) 选取的原则: 谱线覆盖在光谱仪工作波长范围内, 谱线的数目越多越好, 谱线的间隔要大于光谱仪分辨率并且越均匀越好<sup>[5]</sup>。汞氙灯和氙灯的合成特征谱线在可见波段微型光谱仪去噪和寻峰后分布情况如图 8 所示, 深色线为 Hg-Ar 灯的光谱图, 浅色线为 Ne 灯的光谱图。根据特征谱线分布情况实验共选取 11 个特征点作为标定点, 如表 1 所示。

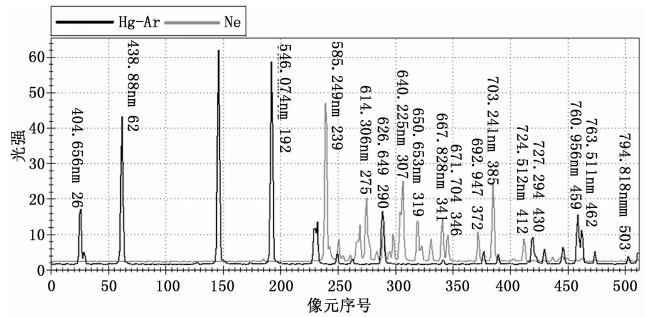


图 8 去噪后特征光谱分布图

表 1 标定集特征谱线的波长和像元序号对应关系

特征谱波长/nm	像元序号	谱线来源
404.656	26	Hg-Ar
435.88	62	Hg-Ar
546.074	192	Hg-Ar
585.249	239	Ne
614.306	275	Ne
640.225	307	Ne
667.828	341	Ne
703.241	385	Ne
724.512	412	Ne
760.956	459	Hg-Ar
794.818	503	Hg-Ar

#### 5.3 标定结果及对比分析

标定结果检验方法: 选取另一组未参与标定的特征点, 测出相应的像元位置, 将像元位置代入到拟合方程中, 算出标定波长, 特征谱线的真值与标定波长预测值之差即为标定误差。

本实验从汞氙灯和氙灯的合成特征光谱图中均匀地选取 5 个未参与标定的特征谱线作为测试集, 测出相应的像元位置, 将像元位置代入到拟合之后的方程中, 算出标定

波长, 测试集的波长分别为 626.649 nm、671.704 nm、692.947 nm、727.294 nm、763.511 nm。

为了验证标定精度, 将测试集和标定集的像元位置均代入到标定关系函数中进行误差测试, 标定误差如表 2 所示。

表 2 MLS 标定结果

标准波长/nm	拟合波长/nm	误差/nm	标准波长/nm	拟合波长/nm	误差/nm
404.656	404.659	0.003	671.704	671.691	-0.013
435.88	435.817	-0.063	692.947	692.547	<b>-0.401</b>
546.074	546.092	0.018	703.241	702.930	-0.311
585.249	584.908	-0.341	724.512	724.259	-0.253
614.306	614.281	-0.025	727.294	727.379	0.084
626.649	626.449	-0.199	760.956	760.853	-0.103
640.225	640.222	-0.003	763.511	763.173	-0.338
667.828	667.675	-0.153	794.818	794.843	0.025

通过对表 2 分析可知: 采用基于移动最小二乘法的拟合绝对误差在 0.401 nm 内, 满足标定所用微型光谱仪 1.5 nm 的分辨率要求。

进一步计算: MLS 方法的拟合优度  $R^2=0.9993$ , 拟合优度接近 1, 说明模型的拟合度较好。

为了验证使用 MLS 标定方法的优越性, 分别使用最小二乘法三次多项式拟合 (LS3)、最小二乘法四次多项式拟合 (LS4)、三次样条插值法 (CS) 用相同的标定集进行标定对比。

标定之后, 测试集和标定集的误差标准差对比如表 3 所示, 其中 CS 拟合中标定集一定在拟合曲线上, 故没有评价意义。通过对四种标定方法误差标准差比较可知, MLS 标定的测试集误差标准差为 0.192 nm, 标定集误差标准差为 0.136 nm, 高于其他三种拟合方式, 说明 MLS 法标定结果更加稳定。

表 3 多种标定方法误差标准差比较结果

	MLS/nm	LS3/nm	LS4/nm	CS/nm
测试集标准差	<b>0.192</b>	0.218	0.207	0.256
标定集标准差	<b>0.136</b>	0.183	0.159	—

## 6 结论

针对微型光谱仪缺少一种统一、可靠的标定方法的问题, 本文提出了一种基于移动最小二乘法的微型光谱仪标定方法, 相比传统的最小二乘法多项式拟合方式, 移动最小二乘法可以灵活地选取不同阶的基函数改变拟合精度, 选取不同的权函数改变拟合的光滑度。首先, 微型光谱仪标定中, 本文提出同时使用汞氙灯和氙灯标定可见波段微型光谱仪, 获得均匀覆盖的特征谱线。然后, 经过小波去噪之后, 高频噪声信号得到明显地去除, 使用峰值寻峰法可以准确地找到所有的特征峰所对应的像元位置。最后, 选取一组特征谱线作为标定集, 使用移动最小二乘法对微型光谱仪做标定; 选取一组未参与标定的谱线作为测试集,

进行误差分析。由实验可以得出: 基于移动最小二乘法拟合标定后, 标定集的误差标准差为 0.136 nm, 测试集的误差标准差为 0.192 nm, 拟合优度为 0.9993。本文提出的标定方法和传统的最小二乘法三次拟合标定方法比较得到: 标定集误差标准差减小了 0.026 nm, 测试集误差标准差减小了 0.047 nm, 标定结果具有较高的稳定性, 在实际工程应用中具有重要的指导意义。

### 参考文献:

- [1] 时凯, 侯文政, 胡凯. 微型光纤光谱仪波长标定技术的研究 [J]. 光学技术, 2012, 38 (4): 493-496.
- [2] 徐丹阳, 童建平, 高建勋, 等. 光纤光谱仪光路模拟优化及波长标定 [J]. 中国激光, 2015, 42 (5): 333-337.
- [3] 印忠, 庄松林, 张保洲. 基于线阵 CCD 的光谱仪定标研究 [J]. 仪器仪表学报, 2011, 32 (3): 546-550.
- [4] Kai Zhang, Pascal Burasa, Yves Audet. A novel CMOS spectrometer based on wavelength absorption [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2017, 268: 9-15.
- [5] 张诗荟. 便携式宽波段多通道光谱仪的自动标定系统 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2016.
- [6] 吴骅. 微型 Czerny-Turner 光栅光谱仪的光学设计与分析 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
- [7] 吴越, 刘家祥, 方勇华, 等. 中空型平板波导红外光谱仪的波长定标 [J]. 光学学报, 2018, 38 (11): 379-384.
- [8] 毛靖华, 王咏梅, 石恩涛, 等. 基于中阶梯光栅的波长定标方法研究 [J]. 中国光学, 2017, 10 (3): 376-382.
- [9] Yu Z, Huang M, Wang Y, et al. Fast wavelength calibration method for spectrometers based on waveguide comb optical filter [J]. Review of Scientific Instruments, 2015, 86 (4): 043103.
- [10] Cho J, Gemperline P J, Walker D. Wavelength Calibration Method for a CCD Detector and Multichannel Fiber-Optic Probes [J]. Applied Spectroscopy, 1995, 49 (12): 1841-1845.
- [11] Zhang F, Chen C, Liu J, et al. Error analysis of mechanical system and wavelength calibration of monochromator [J]. Review of Scientific Instruments, 2018, 89 (2): 023112.
- [12] Kim J H, Han J H, Jeong J. Accurate Wavelength Calibration Method for Spectrometer Using Low Coherence Interferometry [J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33 (16): 3413-3418.
- [13] Kim J H, Han J H, Jeong J. Wavelength calibration of dispersive near-infrared spectrometer using relative k-space distribution with low coherence interferometer [J]. Optics Communications, 2016, 367: 186-191.
- [14] Liu H Y, Ying C P, Chen K F, et al. Research on calibration technology of the wide spectrum grating monochromator wavelength accuracy [A]. 2016 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (URSI AP-RASC) [C]. IEEE, 2016, 1744-1747.
- [15] 高建丰, 周韶彤, 何笑冬. 提升小波改进阈值算法在输气管道泄漏信号降噪处理中的应用 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (7): 223-226.

[16] Kaiyuan Z, Chuantao Z, et al. Near-infrared broadband cavity-enhanced sensor system for methane detection using a wavelet-denoising assisted Fourier-transform spectrometer [J]. *Analyst*, 2018, 143-155.

[17] Shabani Z, Sabouri S G, Khorsandi A. Performance of discrete wavelet technique in the de-noising of noisy spectrum in the mid-infrared region near 4.5  $\mu\text{m}$  [J]. *Optical and Quantum*

*Electronics*, 2016, 48 (12): 526-541.

[18] 陈志军, 白 剑, 吴祖堂, 等. 光纤布喇格光栅反射谱寻峰算法优化及比较 [J]. *光子学报*, 2015, 44 (11): 83-88.

[19] 袁靖超, 赵江山, 李 慧, 等. 基于准分子激光绝对对波长校准的寻峰算法研究 [J]. *中国激光*, 2018, 45 (7): 19-25.

[20] 孙 婷. 基于移动最小二乘近似权函数的选取及其应用 [D]. 苏州: 苏州大学, 2010.

(上接第 232 页)

速度匀速行进。记录每次机器人进行过程中字符识别的情况, 结果如表 5~8 所示。

表 5 Hu 矩的 C-SVC 标识符识别结果

行驶速度(m/min)	检出数量	真实数量	检测准确率/%
20	36	32	88.89
30	36	32	88.89
40	36	30	83.33
50	36	29	80.56

表 6 改进 Hu 矩的 C-SVC 标识符识别结果

行驶速度(m/min)	检出数量	真实数量	检测准确率/%
20	36	36	100
30	36	36	100
40	36	35	97.22
50	36	35	97.22

表 7 Hu 矩的 KNN 标识符识别结果

行驶速度(m/min)	检出数量	真实数量	检测准确率/%
20	36	30	83.33
30	36	30	83.33
40	36	28	77.78
50	36	27	75

表 8 改进 Hu 矩的 KNN 标识符识别结果

行驶速度(m/min)	检出数量	真实数量	检测准确率/%
20	36	34	94.44
30	36	34	94.44
40	36	33	91.67
50	36	33	91.67

由以上 4 个表的数据可知, 移动机器人在不同的行进速度下, 改进 Hu 矩算法对 C-SVC 分类器和 KNN 分类器的分类准确率比 Hu 矩算法都有所提升, 在动态检测中, 改进 Hu 矩算法具有更好的鲁棒性。

以上离线测试和在线测试结果表明, 改进 Hu 算法处理的特征值更利于分类, 算法是可行的; C-SVC 分类器相较于 KNN 分类器更适用于本实验的机器人系统, 其操作简单, 分类准确率高, 鲁棒性好。

#### 4 结束语

为验证改进 Hu 矩算法的性能, 首先通过对 UCI 图像数据库进行检测, 实验结果显示, 改进后的算法比原 Hu 矩算法具有更快的提取速度。其次利用机器学习分类算法 C-SVC 和 KNN, 对特征值进行分类, 即分类标识符。最后对移动机器人进行实时在线实验测试。实验结果显示, 改进后的 Hu 矩算法大大提高了 C-SVC 和 KNN 的分类准确率, 说明改进后的算法提取的特征值精确度更高。以上研究结果显示, 改进后的 Hu 矩算法可以更快更精确地提取标识符特征参数, 有利于提高标识符识别的实时性和精度, 对于智能移动机器人视觉导航字符识别具有较好的参考价值。

#### 参考文献:

[1] 范莹莉. 基于机器视觉的 AGV 导航标识符识别方法研究 [J]. *伺服控制*, 2011 (2): 57-59.

[2] 林克全. 车牌字符识别技术的研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2011.

[3] 朱明秀. 基于图像处理技术的车牌识别方法研究 [J]. *信息记录材料*, 2019, 20 (3): 224-226.

[4] Hu M K. Visual Pattern Recognition by Moment Invariants [J]. *Information Theory, IRE Transactions on*, 1962, 8 (2): 179-187.

[5] Zhang C, Shao X, Li D. Knowledge-based Support Vector Classification Based on C-SVC [J]. *Procedia Computer Science*, 2013, 17: 1083-1090.

[6] 郭显娥, 武 伟, 刘春贵, 等. 多类 SVM 分类算法的研究 [J]. *山西大同大学学报 (自然科学版)*, 2010, 26 (3): 6-8.

[7] 范洪华, 付应雄, 罗志成, 等. 基于 KNN 分类器的分层图像特征提取 [J]. *湖北大学学报 (自然科学版)*, 2019, 41 (1): 44-47.

[8] 余肖生, 周宁, 张芳芳. 基于 KNN 的图像自动分类模型研究 [J]. *中国图书馆学报*, 2007 (1): 74-76.

[9] Otsu N. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1979, 9 (1): 62-66.

[10] Wei Z, Jin H. E. Construction and generalization of Hu moment invariants [J]. *Journal of Computer Applications*, 2010, 30 (9): 2449-2452.

[11] 阎晓娜. 支持向量机的核方法在人脸识别中的应用研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.