

PSO-ASVR在三波长路面状态传感器定量标定中的应用

杨森 田雨卉 张厚庆

Application of PSO-ASVR in quantitative calibration of three-wavelength pavement state sensor

YANG Sen, TIAN Yuhui, ZHANG Houqing

引用本文:

杨森, 田雨卉, 张厚庆. PSO-ASVR在三波长路面状态传感器定量标定中的应用[J]. 应用光学, 2023, 44(1): 145–152. DOI: 10.5768/JAO202344.0103005

YANG Sen, TIAN Yuhui, ZHANG Houqing. Application of PSO-ASVR in quantitative calibration of three-wavelength pavement state sensor[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(1): 145–152. DOI: 10.5768/JAO202344.0103005

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0103005>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

全视角高精度三维测量仪光学系统误差分析研究

Error analysis of optical system for full-view and high-precision three-dimensional measuring instrument

应用光学. 2018, 39(3): 392–399 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0303004>

二维振镜扫描系统调向误差分析

Directional error analysis of 2D galvanometer scanning system

应用光学. 2018, 39(2): 180–186 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0201004>

FBG传感器在空腔爆炸压力测量中的应用研究

Application research of FBG sensors used in cavity explosion for pressure measurement

应用光学. 2019, 40(2): 300–305 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0203004>

一种单目视觉位姿测量系统的误差分析方法

Error analysis method for monocular vision pose measurement system

应用光学. 2019, 40(1): 79–85 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0103001>

基于最小二乘法多项式拟合三角测量模型研究

Laser triangulation measurement model based on least square polynomial fitting method

应用光学. 2019, 40(5): 853–858 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0503003>

波长和强度同时响应的锥形多模光纤温度传感器

Tapered multi-mode fiber temperature sensor based on simultaneous response of wavelength and intensity

应用光学. 2017, 38(2): 331–335 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0208001>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 01-0145-08

PSO-ASVR 在三波长路面状态传感器 定量标定中的应用

杨 森, 田雨卉, 张厚庆

(东北林业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘 要: 路面状态传感器是路面状态定性识别和定量测量的重要工具, 其定量测量性能依赖于定量标定模型的准确性。为了解决路面状态传感器定量标定数据非线性和非均匀分布问题对定量测量的不利影响, 提出基于 PSO-ASVR (particle swarm optimization - adaptive support vector regression) 的路面状态传感器定量标定模型。构建 AP (adaptive preprocessing) 流程进行标定数据最优化预处理, 降低路面状态传感器非均匀分布问题影响下的标定数据处理误差。采用基于结构风险最小化的 SVR (support vector regression) 算法进行标定数据拟合, 并利用 PSO (particle swarm optimization) 算法实现 SVR 中参数最优化, 降低路面状态传感器标定数据非线性引入的数据拟合误差。不同路面状态条件下标定数据处理实验表明: 新方法相比于传统方法在均方根误差 RMSE 上至少可减小 63%, 验证了其在提高定量标定模型精度上的有效性, 实现了路面状态传感器定量标定误差的降低。

关键词: 路面状态传感器; 标定模型; 数据拟合; 误差分析

中图分类号: TN206

文献标志码: A

DOI: [10.5768/JAO202344.0103005](https://doi.org/10.5768/JAO202344.0103005)

Application of PSO-ASVR in quantitative calibration of three-wavelength pavement state sensor

YANG Sen, TIAN Yuhui, ZHANG Houqing

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: Pavement state sensor is an important tool for qualitative identification and quantitative measurement of pavement state, and its quantitative measurement performance depends on the accuracy of quantitative calibration model. In order to solve the problem of nonlinearity and nonuniform distribution of quantitative calibration data of pavement state sensor, a quantitative calibration model of pavement state sensor based on particle swarm optimization-adaptive support vector regression (PSO-ASVR) was proposed. Firstly, the adaptive preprocessing (AP) process was constructed to optimize the pre-processing of the calibration data to reduce the calibration data processing error under the influence of the nonuniform distribution of the pavement state sensor. Then, the support vector regression (SVR) algorithm based on structural risk minimization was used to fit the calibration data, and the particle swarm optimization (PSO) algorithm was used to realize the parameter optimization in the SVR to reduce the data fitting error introduced by the nonlinear calibration data of the pavement state sensor. Experiments on calibration data processing under

收稿日期: 2022-03-21; 修回日期: 2022-07-04

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (2572019BF01)

作者简介: 杨森 (1987—), 男, 博士, 讲师, 主要从事路面状态检测、红外辐射测量和食品安全检测技术研究。

E-mail: yangsen@nefu.edu.cn; 张厚庆 (1998—), 男, 硕士, 主要从事路面状态检测和红外辐射测量等技术研究。

E-mail: 1695641968@qq.com

通信作者: 田雨卉 (1997—), 女, 硕士, 主要从事路面状态检测和红外辐射测量等技术研究。E-mail: 1620673814@qq.com

different pavement states show that the root-mean-square error (RMSE) of the new method can be reduced by at least 63% compared with that of the traditional method, which verifies the effectiveness of the new method in improving the accuracy of the quantitative calibration model and realizes the reduction of the quantitative calibration error of the pavement state sensor.

Key words: pavement state sensor; calibration model; data fitting; error analysis

引言

路面状态的精确监测可以有效保证冬季道路安全管控,利用路面状态传感技术实现对积水、结冰和积雪等多种路面条件的快速察觉,不但能够为日常出行提供便利,还能够大大减少交通事故的发生^[1],对于交通安全、保障人民的生命和财产安全都具有极其重要的意义。目前国内外主要的路面状态检测方法包括红外多光谱法、偏振法、雷达技术检测、气象模型法和图像分析法,这几种方法都可以在识别不同道路状态时达到较高的分类准确率。

通过路面状态传感器定量测量路面覆盖物厚度可以进一步表征路面特征,基于现有的路面状态检测技术研制的传感器包括电容式、电阻式、图像式、近红外式传感器等多种类型,并且均可以对结冰、积雪、积水等多种路面状态进行有效分类。SHEN Y C 采用电容传感方法检测霜层生长,基于边缘效应设计制作了一种数字式电极电容式传感器^[2]。Habib 等人提出了一种嵌入式的电阻传感器系统,实现了道路和桥梁表面的湿、干、冻路面状况的高效检测^[3]。翟子洋等人基于路面湿滑状态检测模块采集路面图像,并利用神经网络模型识别路面湿滑状态信息,进而设计了一种基于路面湿滑状态识别的车辆安全预警导航系统^[4]。Ruiz-Llata 等人研制了一种基于半导体激光器的近红外漫反射光谱路面状况传感器,实现了对路面存在水、泥或冰的状况的准确测量^[5]。Ruan C 等人研制了一种基于多波长的远程路面气象状况传感器,利用多波长光学遥感技术和近红外光源实现了干、湿、冰和雪 4 种路面状态以及路面水膜厚度的定量测量^[6]。

在路面状态传感器的定量标定中,标定模型一般通过路面覆盖物厚度 D 和传感器响应电压 V 的拟合实现,标定数据处理精度直接影响路面状态定量测量的准确性。Lovén 等人基于线性混合拟合模型定量校准了移动车辆安装的道路天气传感器的观测结果,有效降低了传感器测量值的拟合误差^[7]。许一飞等人采用多项式拟合模型标定机

场结冰检测系统^[8]。Gui 等人采用三次多项式拟合模型对基于双传感器的 6 种路面条件的路况探测器进行标定,通过评估不同路况条件下的传感器的输出值,验证了该模型的拟合性能^[9]。然而,路面状态传感器的标定数据存在非线性和非均匀分布问题,传统定量标定模型在应对上述问题时存在局限性^[10],拟合精度的不足会直接降低数据处理精度,大大限制了路面状态传感器定量测量精度的提升。

针对上述问题,本文利用基于结构风险最小化的 SVR 方法进行标定数据拟合,并利用 PSO 算法实现 SVR 中参数最优化,进而降低路面状态传感器标定数据非线性引入的处理误差。同时,构建 AP 流程进行标定数据最优化预处理,降低路面状态传感器标定数据非均匀分布引入的处理误差。在此基础上,提出了基于 PSO-ASVR 的路面状态传感器标定模型,并通过三波长路面状态传感器标定数据处理的实际应用,对比验证其在降低路面状态传感器定量标定误差上的有效性。

1 基本原理

1.1 支持向量回归(SVR)算法

路面状态传感器定量标定数据存在非线性问题,传统拟合方法在此条件下拟合效果不佳。为了降低上述问题引入的拟合误差,本文采用 SVR 算法实现最佳数据拟合,该算法面对小样本和非线性数据具备较好的拟合性能^[11-12]。对于训练样本:

$$\{(x_i, y_i) | x_i \in R^n, y_i \in R^n, i = 1, 2, \dots, m\} \quad (1)$$

通过 SVR 训练使得拟合值与真实值之差不超过误差阈值 ε , 预测方程为

$$y_i = w \cdot x_i + b \quad (2)$$

式中: w 为权重矢量; b 为阈值。针对误差阈值 ε 外的数据,通过调整惩罚程度保证模型精度,边界的上方和下方赋予 2 种不同的惩罚值, ξ 是松弛因子:

$$\begin{aligned} t_i &\leq y_i + \varepsilon + \xi^+ \\ t_i &\geq y_i - \varepsilon - \xi^- \end{aligned} \quad (3)$$

通过风险最小化函数来实现优化:

$$R(w, b, \xi) = \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^n (\xi_i^+ + \xi_i^-) \quad (4)$$

式中: C 为惩罚因子, 由核函数 $k(x_i, x)$ 定义内积:

$$\langle \phi(x_i), \phi(x) \rangle = \sum \phi(x_i) \phi(x) = k(x_i, x) \quad (5)$$

支持向量是样本点子集的线性组合^[13], 方程为

$$f_{w,b}(x) = \sum \beta_i k(x_i, x) + b \quad (6)$$

本文中采用径向基函数, 其中 σ 是核参数:

$$k(x_i, x_j) = e^{-\sigma \|x_i - x_j\|^2} \quad (7)$$

1.2 自适应预处理(AP)流程

路面状态传感器定量标定数据存在非均匀分布问题, 会影响数据的拟合精度。为降低上述问题引入的拟合误差, 本文构建 AP 流程来实现最佳的数据预处理。AP 流程图如图 1 所示, 以均方根误差 RMSE 为基准, 从不同的数据转换方法和数据平移方法中选择最优模型^[14]。其中, 采用的数据预处理方法包括归一化、Log 变换、数据平移等多种类型。RMSE 可表示为

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - t_i)^2} \quad (8)$$

式中: y_i 为拟合值; t_i 为真实值, 均方根误差越小, 表明数据预处理效果越好。



图 1 AP 流程框图

Fig. 1 Block diagram of AP flow

1.3 粒子群(PSO)算法

SVR 算法的内部参数惩罚因子 C 、不敏感损失参数 ε 和径向基函数核参数 σ 直接决定拟合性能。为降低人工设置参数引入的拟合误差, 本文选用 PSO 算法实现 SVR 算法中的参数最优化。PSO 算法中每个问题的解都可以看作一个粒子, 群体中第 i 个粒子的位置为 $x_i(k)$, 速度为 $v_i(k)$ ^[15]。当前时刻的局部极值记为 P_{ibest} , 全局极值记为 g_{best} 。在每次迭代中, 通过跟踪粒子个体、全局极值和前一时刻的状态调整当前时刻的位置和速度, 迭代公式如下:

$$v_i(k+1) = \omega \cdot v_i(k) + c_1 \cdot r_1 \cdot (P_{ibest} - x_i(k)) + c_2 \cdot r_2 \cdot (g_{best} - x_i(k)) \quad (9)$$

$$x_i(k+1) = x_i(k) + v_i(k+1) \quad (10)$$

式中: $v_i(k)$ 、 $v_i(k+1)$ 、 $x_i(k)$ 、 $x_i(k+1)$ 分别是粒子当前时刻、下一时刻的速度和位置; ω 是惯性因子; c_1 和 c_2 是学习因子。

基于 PSO 算法实现 SVR 参数最优化步骤如下:

- 1) 初始化粒子群参数;
- 2) 用 (8) 式计算 RMSE, 确定局部极值初始值;
- 3) 用 (9) 式和 (10) 式更新粒子位置和速度;
- 4) 通过 (8) 式计算 RMSE 并确定全局极值;
- 5) 比较局部和全局极值, 更新全局极值;
- 6) 若得到最优值则终止, 否则继续寻优。

1.4 PSO-ASVR 方法

基于上述流程和算法的融合, 本文提出 PSO-ASVR 方法应用于路面状态传感器标定数据处理, 以期降低标定数据非线性和非均匀分布下的数据处理误差。首先利用 AP 流程对标定数据做最优数据预处理; 然后基于 SVR 算法进行标定数据最优拟合, 其中通过 PSO 算法实现 SVR 参数 (C , ε , σ) 最优化。该方法覆盖标定数据获取后的预处理过程和拟合过程, 在 2 个流程中都以 RMSE 最小为评价指标实现最优化, 最终实现标定数据处理误差的最小化。PSO-ASVR 方法流程图如图 2 所示。

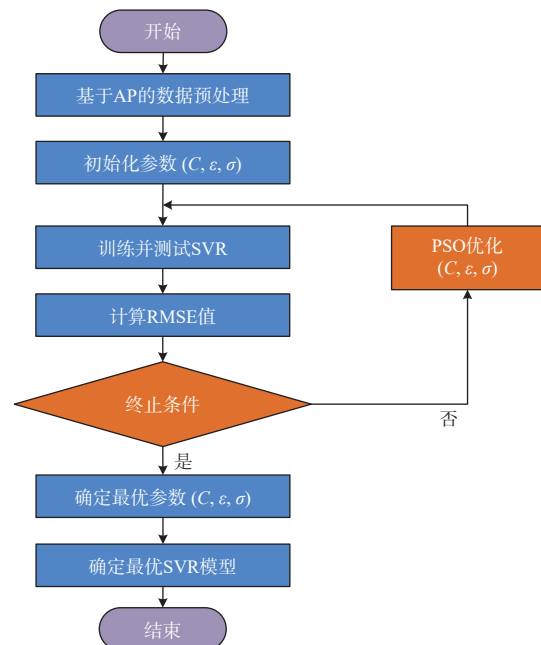


图 2 PSO-ASVR 方法流程图

Fig. 2 Flow chart of PSO-ASVR method

2 实验分析

本节首先基于三波长路面状态传感器开展路

面状态定量标定实验,获取冰、雪和水 3 种路面状态条件下的定量标定数据;然后开展标定数据处理方法对比实验,通过与传统拟合方法(PLS 和 LS)对比,验证 PSO-ASVR 方法在降低标定数据处理误差上的有效性。

2.1 路面状态定量标定实验

三波长路面状态传感器由光学系统、电路系统和云平台 3 部分组成,其结构框图如图 3 所示。光学系统包括光学镜头和光电探测器;电路系统包括激光驱动电路、光开关、继电器、I/V 转换电路、前置放大电路、锁相放大器、单片机模块、GPRS 模块;下位机数据通过 GPRS 模块传输至云平台,云平台中内置 LabVIEW 程序进行数据处理、存储和显示。

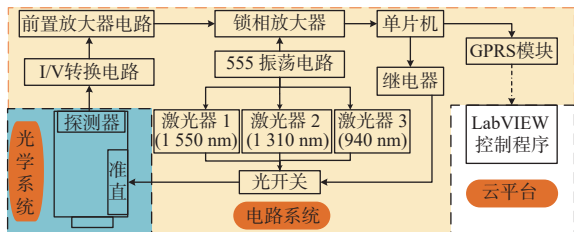


图 3 传感器结构框图

Fig. 3 Block diagram of sensor structure

基于三波长路面状态传感器开展路面状态定量标定实验时,被测路面状态为不同厚度的冰、雪和水,将其放置于铺有沥青层的容器中作为标准样本。其中,水为日常饮用且无杂质的自来水,雪为雪天后室外采集,冰由雪和水的混合物制成。传感器和标准样本实物图如图 4 所示。传感器光学镜头前端距离标准样品 150 mm,镜头光轴与标准样本角度设置为 90°。其中,标准样本厚度和标定距离采用数显游标卡尺(BK-318, 标康)和数显千分尺(0~25 mm 和 25 mm~50 mm, SHSIWI)测量,标定角度采用数显角尺(JDC-200, 标康)测量。为保证测量一致性,所有实验都以相同方式进行。具体标定步骤如下: 1) 测量标准样品响应

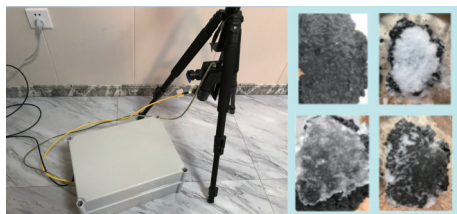


图 4 传感器和标准样本实物图

Fig. 4 Physical picture of sensor and standard samples

和背景电压 V_s 、 V_b ; 2) 计算标定电压 V : $V=V_s-V_b$; 3) 测量样品中冰、雪和水的厚度 D ; 4) 基于 PSO-ASVR 方法得到 $V-D$ 拟合关系; 5) 将拟合参数输入测量程序。

基于三波长路面状态传感器和标准样本获取的标定数据如图 5 所示。由图 5 可知,由于选用等间距的路面覆盖物厚度,该传感器的标定数据存在非线性和非均匀分布的问题。从标定的角度分析,标定数据中存在的测量误差主要分为传感器稳定性引起的电压测量误差以及标准样本形状非一致性(特别是冰)引起的厚度测量误差。

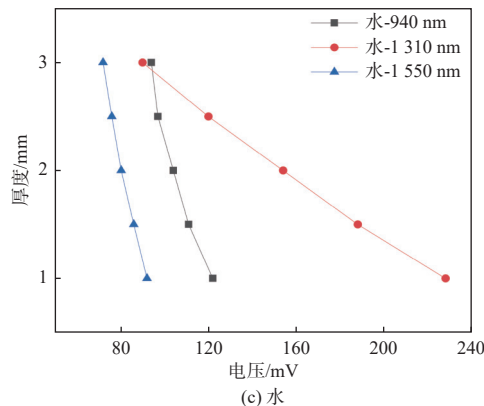
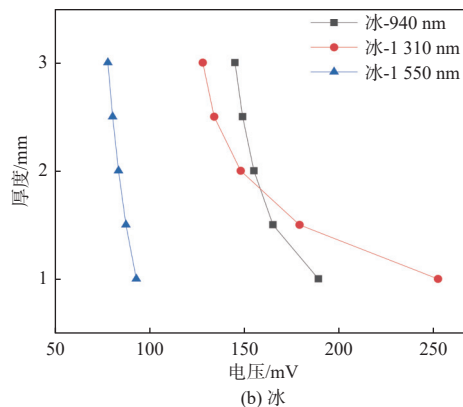
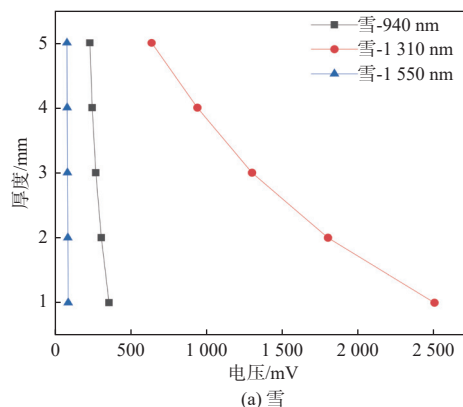


图 5 标定数据

Fig. 5 Diagram of calibration data

2.2 标定模型对比实验

为了验证 PSO-ASVR 方法的优越性, 将其与 PLS 和 LS 方法进行性能对比。按照 2.1 节中的标定数据获取流程, 测量了另一组数据作为验证数据, 如图 6 所示。

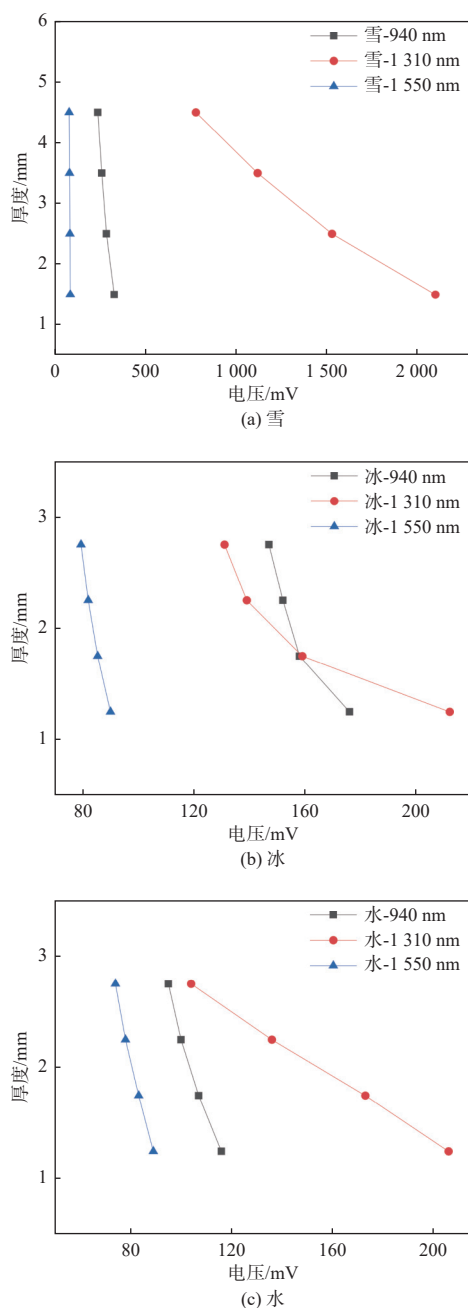


图 6 测试数据

Fig. 6 Diagram of test data

在对 PSO-ASVR 方法进行训练时, PSO 算法参数设置为: $c_1 = 1.5$, $c_2 = 1.7$, $\omega = 1$, 粒子最大速度 $V_{\max} = 5$, 种群规模 $\text{sizepop} = 20$, 最大迭代次数为 200。此外, LS 方法中多项式的阶数设置为 3。针对测试数据, 3 种方法得到的拟合误差 δ 分别如图 7、图 8、图 9 所示。

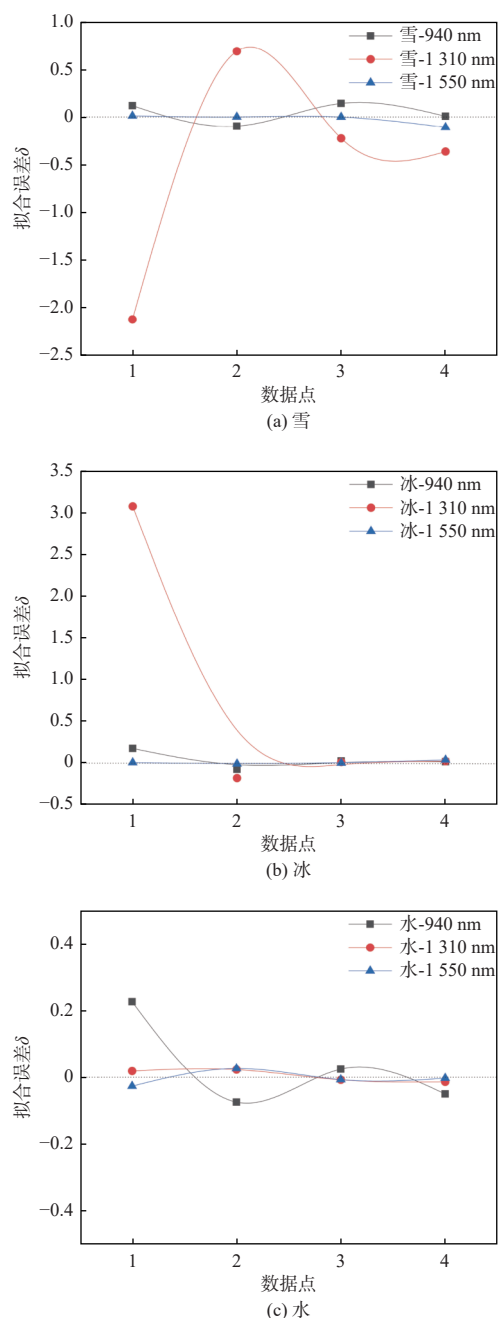
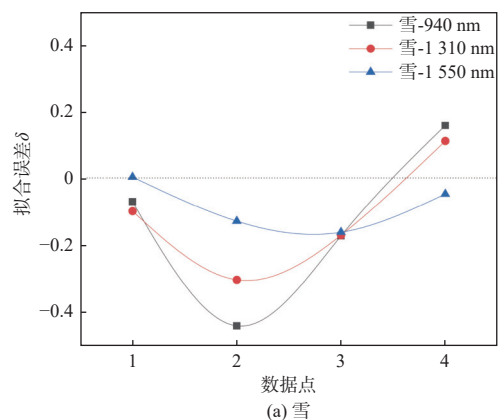


图 7 最小二乘法得到的拟合误差 δ

Fig. 7 Fitting error δ obtained by least square method



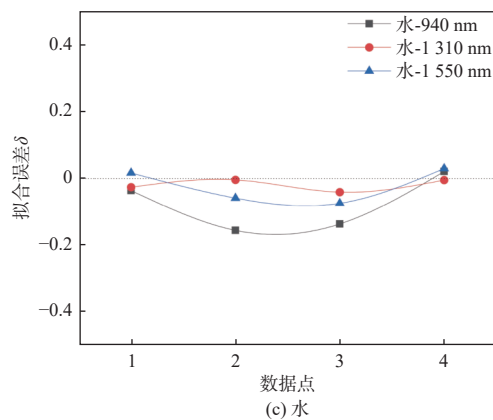
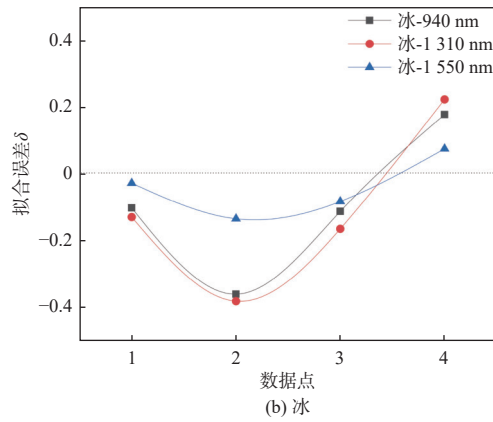


图 8 偏最小二乘法得到的拟合误差 δ

Fig. 8 Fitting error δ obtained by partial least square method

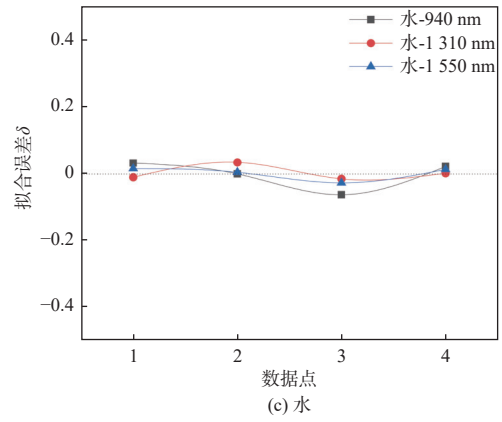
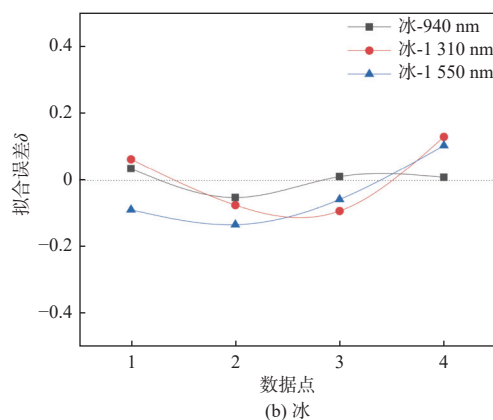
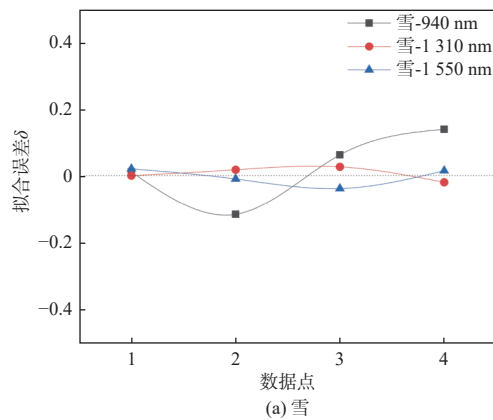


图 9 粒子群优化自适应支持向量回归得到的拟合误差 δ

Fig. 9 Fitting error δ obtained by PSO-ASVR

由图 7~图 9 可知, 3 种方法均出现了不同程度的振荡。其中 LS 方法幅度最大, 其次是 PLS, 最小的是 PSO-ASVR, 由此表明 PSO-ASVR 方法可以有效降低标定数据拟合过程中存在的振荡问题。从算法对比的角度分析, 除了标定过程中存在的测量误差外, 验证数据和测试数据存在的重复性误差也是测量误差的来源之一, 会直接影响不同算法的拟合效果和对标效果。

下面针对不同波长、不同路面状态和不同方法开展标定模型对比, 以 δ 为对比数据, 以 RMSE 为对比指标。表 1 为针对不同波长的 RMSE, 即 RMSE 值根据某个波长和某个方法下对应于不同路面状态的 δ 值计算所得, 计算公式为公式 (8), 计算数据来源于图 7~图 9。

表 1 针对不同波长的 RMSE

Table 1 RMSE for different wavelengths

波长/nm	LS	PLS	PSO-ASVR
940	0.109 7	0.199 8	0.062 4
1 310	1.103 9	0.178 2	0.056 3
1 550	0.034 8	0.083 8	0.059 3

由表 1 可知, 针对 940 nm 和 1 310 nm, PSO-ASVR 方法的 RMSE 低于 PLS 和 LS 方法, 定量上至少可降低 43%; 针对 1 550 nm, LS 方法的 RMSE 最低, 其次是 PSO-ASVR 方法, PLS 方法最高。

表 2 为针对不同路面状态的 RMSE, 即 RMSE 值根据某种路面状态和某个方法下对应于不同波长的 δ 值计算所得, 计算公式为公式 (8), 计算数据来源于图 7~图 9。由表 2 可知, 针对雪、冰、水 3 种路面状态, PSO-ASVR 方法的 RMSE 明显低于其他 2 种方法, 在定量测量上至少可降低 62%。综

合表 1 和表 2 可知, PSO-ASVR 方法性能更优越, 且在针对不同路面状态的标定建模中优越性更明显。

表 2 针对不同路面状态的 RMSE
Table 2 RMSE for different pavement states

路面状态	LS	PLS	PSO-ASVR
雪	0.658 5	0.190 7	0.058 4
冰	0.890 5	0.194 2	0.080 6
水	0.072 3	0.068 1	0.025 9

表 3 为针对不同方法的 RMSE, 即 RMSE 值根据某个波长和某个路面状态下对应于不同方法的 δ 值计算所得, 计算公式为公式 (8), 计算数据来源于图 7~图 9。由表 3 可知, 针对三波长路面状态传感器的测试数据, PSO-ASVR 方法在 LS 方法基础上 RMSE 值减小了 91%, 在 PLS 方法基础上 RMSE 值减小了 63%, 验证了 PSO-ASVR 方法在三波长路面状态传感器标定建模中的优越性。

表 3 针对不同方法的 RMSE
Table 3 RMSE for different methods

方法	LS	PLS	PSO-ASVR
RMSE	0.640 8	0.162 0	0.059 4

3 结论

为降低路面状态传感器定量标定误差, 本文提出了一种基于 PSO-ASVR 的三波长路面状态传感器标定模型。首先建立了 AP 流程, 并融合 PSO 算法和 SVR 算法, 提出了一种基于 PSO-ASVR 的标定数据处理方法; 然后, 基于三波长路面状态传感器开展了冰、雪、水 3 种路面状态的定量标定实验; 最后, 开展了 PSO-ASVR 方法与传统方法的对比实验。实验结果表明, PSO-ASVR 方法在面对标定数据非线性和非均匀分布问题时数据处理效果更好, 相比于 LS 和 PLS 方法在 RMSE 上至少可减小 63%, 实现了传感器定量标定误差的降低。

参考文献:

[1] 汤筠筠, 郭忠印, 李长城, 等. 基于路面摩擦因数的冬季典型路面状态识别模型[J]. 中国公路学报, 2014, 27(11): 25-30.
TANG Junjun, GUO Zhongyin, LI Changcheng, et al. Identification model of typical road state in winter based

on road friction factor[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(11): 25-30.
[2] SHEN Y C, WANG S. Condensation frosting detection and characterization using a capacitance sensing approach[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 147: 118968.
[3] HABIB T, MOHAMMED A. A novel concrete-based sensor for detection of ice and water on roads and bridges[J]. Sensors, 2017, 17(12): 2912.
[4] 翟子洋, 畅宏达, 董世浩, 等. 车路协同环境下基于路面湿滑状态识别的车辆安全预警导航系统[J]. 科学技术创新, 2021(21): 77-78.
ZHAI Ziyang, CHANG Hongda, DONG Shihao, et al. Vehicle safety early-warning navigation system based on road slippery state identification in vehicle-road cooperative environment[J]. Science and Technology Innovation, 2021(21): 77-78.
[5] RUIZ-LLATA M, RODEIGUEZ-CORTINA M, MARTIN-MATEOS P, et al. LiDAR design for road condition measurement ahead of a moving vehicle[J]. IEEE , 2017(13): 1-3.
[6] RUAN C, WANG Y, MA X, et al. Road meteorological condition sensor based on Multi-wavelength light detection[C]. Xi'an: 3rd International Conference on Photonics and Optical Engineering, 2019: UNSP110521F.
[7] LOVEN L, KARSISTO V, JARVINEN H, et al. Mobile road weather sensor calibration by sensor fusion and linear mixed models[J]. Plosone, 2019, 14(2): e0211702.
[8] 许一飞, 叶林, 许丹丹, 等. 基于多传感器技术的机场地面结冰检测系统[J]. 仪表技术与传感器, 2012(9): 36-38.
XU Yifei, YE Lin, XU Dandan, et al. Airport ground icing detection system based on multi-sensor technology[J]. Instrument Technique and Sensor, 2012(9): 36-38.
[9] GUI K, YE L, GE J F, et al. Road surface condition detection utilizing resonance frequency and optical technologies[J]. Sensors and Actuators A:Physical, 2019, 297: 111540.
[10] YANG S. Hybrid PSO-AMLS-based method for data fitting in the calibration of the infrared radiometer[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(8): 20200471.
[11] 于连栋, 常雅琪, 赵会宁, 等. 基于支持向量回归机的机器人定位精度提高[J]. 光学精密工程, 2020, 28(12): 2646-2654.

- YU Liandong, CHANG Yaqi, ZHAO Huining, et al. Method for improving positioning accuracy of robot based on support vector regression[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(12): 2646-2654.
- [12] 徐英, 谷雨, 彭冬亮, 等. 基于DRGAN和支持向量机的合成孔径雷达图像目标识别[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(3): 727-735.
- XU Ying, GU Yu, PENG Dongliang, et al. SAR ATR based on disentangled representation learning generative adversarial networks and support vector machine[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(3): 727-735.
- [13] 吴羽峰, 吴佳琛, 郝然, 等. 基于深度学习的粒子场数字全息成像研究进展[J]. *应用光学*, 2020, 240(4): 662-674.
- WU Yufeng, WU Jiachen, HAO Ran, et al. Research progress of particle field digital holography based on deep learning[J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 240(4): 662-674.
- [14] 廖宇铖, 伍世度, 邓高旭, 等. 基于方向图变换的快速不连续相位展开[J]. *应用光学*, 2021, 246, 42(4): 678-684.
- LIAO Yucheng, WU Shiqian, DENG Gaoxu, et al. Fast discontinuous phase unwrapping based on orientation diagram transformation[J]. *Journal of Applied Optics*, 2021, 246, 42(4): 678-684.
- [15] 乔贵方, 吕仲艳, 张颖, 等. 基于BAS-PSO算法的机器人定位精度提升[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(4): 763-771.
- QIAO Guifang, LYU Zhongyan, ZHANG Ying, et al. Improvement of robot kinematic accuracy based on BAS-PSO algorithm[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(4): 763-771.