

柔性力敏传感器的快速标定方法的研究

吴云杰^{1,2} 徐 超¹ 周 旭² 杨先军² 姚志明² 孙怡宁²

(1.安徽大学 合肥 230601; 2.中国科学院合肥物质科学研究院 合肥 230031)

摘 要: 由于柔性力敏传感器阵列敏感点多,每个敏感点输出值差异大,为了解决传感器标定复杂的问题,给出了一种基于 BP 神经网络建立一个标定分类模型的快速标定方法,运用面积法给传感器阵列上的敏感点标定曲线分类,使用 BP 神经网络训练出分类模型,再运用最小二乘法拟合出每一类的标定曲线。通过验证样本检查了分类模型的分类正确率达到 98% 以上,实验验证了算法的标定结果准确性,标定时间小于 1 s。实验结果表明,该方法对大面积柔性力敏传感器的标定效果理想,标定速度快,可以用来做柔性力敏传感器的标定。

关键词: 柔性;压力传感器;标定;BP 神经网络;分类;拟合

中图分类号: TN301.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

Fast calibration method for flexible force sensors

Wu Yunjie^{1,2} Xu Chao¹ Zhou Xu² Yang Xianjun² Yao Zhiming² Sun Yining²

(1. Anhui University, Hefei 230601, China; 2. Hefei Institute of Material Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: Due to the large number of sensitive points of the flexible force sensitive sensor array, the output value of each sensitive point varies greatly. In order to solve the complex problem of sensor calibration, a fast calibration method based on BP neural network to establish a calibration classification model is given. The classification of sensitive points on the sensor array was calibrated. The BP neural network was used to train the classification model, and then the least squares method was used to fit each type of calibration curve. Through the validation sample, the classification accuracy of the classification model is over 98%. The experiment verifies that the calibration result of the algorithm is accurate. Calibration time is less than 1 s. The experimental results show that this method is ideal for calibration of large-area flexible force sensor, and it can be used to calibrate the flexible force sensor.

Keywords: flexibility; pressure sensor; calibration; BP neural network; classification; fitting

0 引 言

医学研究表明,在老年人的衰老过程中,由于神经系统功能和生理功能衰退,导致了老年人行走能力的下降,使其左、右两侧步态不对称,造成老年人在站立、步行时容易跌倒,从而引发各种老年性疾病^[1]。研究大面积柔性力敏传感器标定方法能够获取步态类运动的足底压力分布信息,能够帮助分析老年人行走时的压力分布,提前预防老年人跌倒的风险。本文选用量程范围为 0~150 kPa 的柔性力敏传感器进行标定,能够测量老年人正常行走时的脚底压力分布。

本文中的柔性力敏传感器属于电阻式传感器,当接触力作用在力敏电阻元件上,力敏电阻元件将物理量转化为电阻变化,通过变换电路又转化为电压变化从而得到相关

的力学信息^[2]。由于柔性力敏传感器受传感器本体的加工误差、敏感元件的安装误差、敏感元件质地的不均匀性以及阵列点阵多等方面的影响,阵列传感器输出的理论值和实际值有很大的出入,各阵列点之间性能有所不同^[3-5],使得柔性力敏传感器的标定成为了当下的一个难题。

传统柔性力敏传感器的标定通过标定传感器阵列中的每一个敏感点从而得到一个标定矩阵,在传感器阵列比较小时得到了广泛的应用^[6-9],但对于传感器阵列点数目较大时,柔性力敏传感器传统标定方法标定时间长,对于大面积的柔性力敏传感器标定很不适用。为了满足工业生产需要,降低大规模柔性传感器标定过程的时间成本,本文提出一种针对大面积传感器阵列点的一种快速标定方法,通过对传感器阵列标定曲线分类进行建模,拟合出模型的每一类标定曲线。对柔性力敏传感器进行标定时,不需要拟合

出传感器的每个敏感点的标定曲线,将标定数据直接输入分类模型,即可得到传感器每个敏感点所属类别,大大降低了传感器的标定时间。

1 标定系统

如图1所示,柔性力敏传感器标定系统由柔性传感器阵列、面积标定试验台、数据采集系统以及上位机数据处理系统部分组成^[10]。

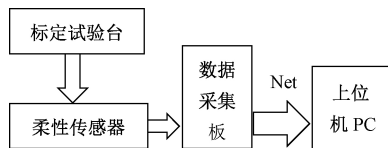


图1 柔性力敏传感器标定系统

1.1 柔性力敏传感器

实验中使用的传感器为中科本元公司生产的BYScanF型号F50×50C系列柔性力敏传感器。传感器采用上下两层结构,在上下层接触表面形成接触电阻^[11-12],该接触电阻与压力的变化关系如图2所示。可以看出接触电阻和压力呈非线性反比例关系。

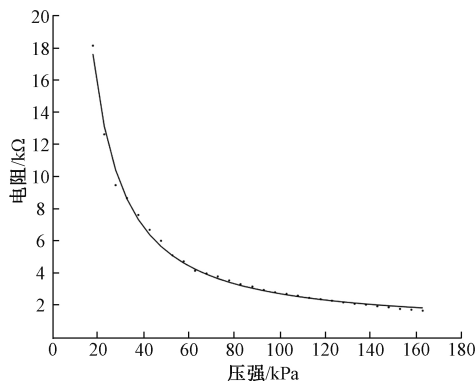


图2 压力输入-电阻输出特性曲线

1.2 面标定平台

本文实验使用面积标定系统^[13-14],其标定原理是:根据气体压强的各向同性,在柔性阵列压力传感器的敏感测试区加载确定的气压,通过信号检出电路得到该气压下传感器敏感点的电压输出,在量程范围内设定若干压力测试点,即可得到每个敏感点在全量程范围内的压力输入-电压输出的特性关系。

面积标定系统采用气压加载方式,由密封箱体、气囊、气泵、电磁阀、气压表、标准压力传感器等主要部件构成。电磁阀1控制气源气体进入气压控制系统,电磁阀2控制气体进入标定装置气囊,电磁阀3控制标定装置气囊气体释放,标准压力由气压控制系统产生,标定装置系统气路原理如图3所示。柔性传感器的标定过程是:将待标定柔性阵列压力传感器放置于密封箱体并安装固定,通过气泵向

密封箱体内气囊注入气体加压,实时检测标准压力传感器的输出值作为比对加载压力值,通过电磁阀的开关放气作用控制密封箱内气囊的气压大小,实现传感器标定加载/卸载控制。面标定系统实物如图4所示。

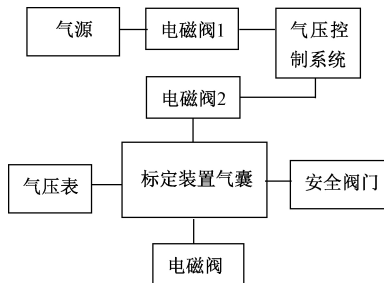


图3 标定装置系统气路原理



图4 面积标定系统实物

1.3 数据采集系统

柔性力敏传感器数据采集系统由数据采集板,下位机采集软件 and 上位机数据处理显示软件构成。采集板采集柔性传感器每个敏感点在给定压力下的电压数据,通过网络协议将数据发送给上位机处理,上位机将下位机AD采集的结果转化为0~256的数值进行显示。

采集板设计二级放大电路对柔性传感器电压值进行放大以便于电压测量,电压放大电路如图5所示。使用STM32F205ZET6单片机芯片采集放大后的电压值,由于STM32F205ZET6单片机为12位ADC,能够读取的数值范围为0~4096,将ADC采集的数据右移4位,得到0~256范围的数据进行显示。单片机将采集到的数据转发给WIZnet W5300网络模块,网络模块通过TCP/IP协议将数据上传给上位机处理。

采集方式使用逐行施加电压,逐列采集电压数据,每次采集一个敏感点的电压值。采集频率100 Hz,在1 s内能够完成一次所有敏感点的电压采集。

电源模块使用USB供电,由于采集板使用了运放芯片,需要提供正负电源供电,使用WRA_S_3WR2芯片提供稳定的正负双电源供电。使用电压转化芯片转换输入电压给单片机供电。

上位机对下位机上传的数据进行处理并显示,可以通过上位机软件保存采集的压力数据。软件操作时,需要对传感器数据归零处理,软件每次显示的数据为电压值与归

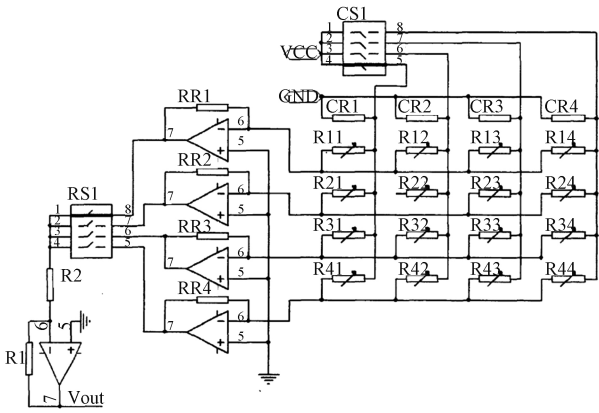


图 5 柔性传感器电压放大电路

零电压的差值。

2 标定方法

2.1 标定数据采集及处理

实验使用同一型号柔性力敏传感器 8 张,对每张传感器单独标定。每次加压 10 kPa,分别采集每张传感器在气压为 0~150 kPa 范围内的 3 次标定数据。每次加压后,当气压值达到指定气压时,保存每次加压后的上位机显示的数据,使用 3 次采集的数据平均值作为最终标定数据^[15]。为了保证分到每一类的敏感点足够多,类别拟合曲线更加准确,任取其中 5 份标定数据作为训练集训练分类模型,剩余 3 份标定数据作为验证集测试分类模型的泛化能力。

2.2 标定数据分类及标签制作

选择几组敏感点标定数据,使用 MATLAB 画出标定数据散点图,根据散点图判断出标定曲线近似符合二次多项式函数关系,实验中的标定数据电压为传感器当前压力下输出电压与压力差为 0 时的参考电压的差值,拟合曲线应该为经过零点的一条曲线,二次多项式常数项设为 0。使用 MATLAB 软件的 lsqcurvefit 函数对训练集和验证集中的每个敏感点分别作二次多项式 $y=ax^2+bx$ 拟合,其中 x 为标定压强, y 为输出电压,记录每个敏感点的拟合系数。lsqcurvefit 函数使用最小二乘法对数据进行拟合,是数据拟合一种最常用的方法,所以拟合的误差为最小均方误差。

用 MATLAB 画出在传感器量程内的拟合曲线,分析拟合曲线与 x 轴围成的面积发现,相近的曲线与 x 轴围成的面积也非常接近,据此可以使用面积法对传感器敏感点的标定曲线进行分类。传感器类别数目会影响传感器最终输出结果,类别过多会导致神经网络训练复杂,也会产生训练过拟合现象,类别太少会导致传感器输出误差太大,经过多次实验发现,本文中的传感器敏感点划分为 20 类时效果比较好。

计算拟合曲线 $y=ax^2+bx$ 在 0~150 范围内积分,按照积分区域的范围将传感器的敏感点划分为 20 类,并制作训练标签和验证标签。

2.3 BP 神经网络训练分类模型

使用 BP 神经网络建立传感器的分类模型,神经网络的输入为传感器的每个敏感点标定数据,文中每个敏感点标定数据为 16 个,神经网络的输出层为分类的类别数。

建立 BP 神经网络,输入层神经元 16 个,输出层神经元 20 个,经过多次实验隐含层取 20 时其泛化能力达到最佳。网络使用 Levenberg-Marquardt 算法训练,该算法结合了高斯-牛顿算法以及梯度下降法的优点,能够更好地训练分类模型。经过多次参数调整,学习率设为 0.01,最大训练轮数 300,期望误差 1×10^{-7} 。网络设置验证检查,随着网络利用训练样本进行训练的过程中,确认样本的误差曲线连续 6 次迭代不再下降,这时训练停止。网络训练均方误差如图 6 所示。可以看出神经网络训练到 63 轮时模型最佳。

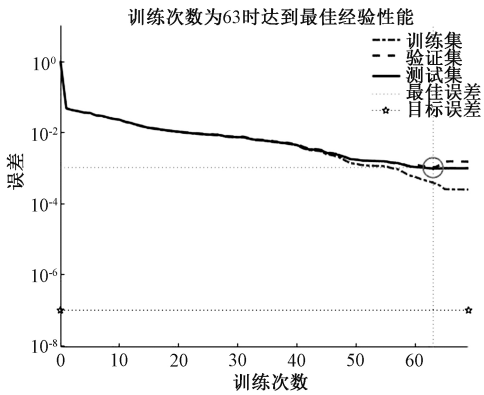


图 6 神经网络训练误差

2.4 分类模型泛化能力检查

将 3 份验证集数据分别输入 BP 神经网络模型,得到其分类结果,与验证集标签对比,计算每张传感器的分类正确率。每张传感器敏感点 2 500 个,验证结果如表 1 所示。

表 1 BP 神经网络训练模型泛化能力验证

项目	验证集 1	验证集 2	验证集 3
分类正确个数	2 462	2 476	2 459
分类正确率/%	98.48	99.04	98.36

由验证的结果可以得出结论:使用 BP 神经网络对柔性力敏传感器敏感点分类结果准确,错误分类率不足 2%,分类模型有较好的泛化能力。

2.5 标定曲线

平均数能够表示数据的一般水平表征数据的集中位置,使用每类标定数据的平均数拟合出的标定曲线能够代表这一类别所有标定曲线。

将训练集中的敏感点按标签分类,计算每类标定数据各个压力下的平均值,将平均值进行二次多项式 $y=ax^2+bx$ 最小二乘法拟合,得到最终分类标定曲线。最终标定曲

线如图7所示。每类标定曲线表示属于该类所有敏感点的标定曲线。

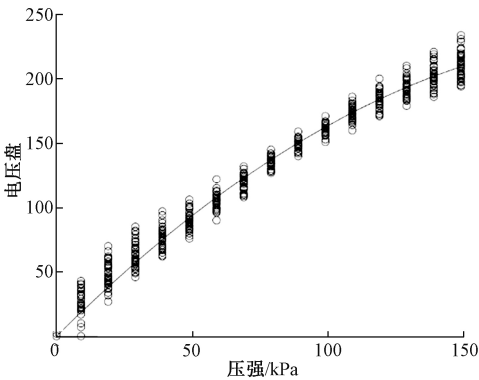


图7 类标定曲线

2.6 算法性能分析

2.6.1 计算结果准确性分析

类别拟合曲线使用的函数为 $y = ax^2 + bx$, 为压力输入-电压输出曲线, 标定最终要得到的是电压输入, 压力输出曲线, 即标定曲线的反函数。

函数 $y = ax^2 + bx$ 的反函数为:

$$y = \frac{\sqrt{4ax + b^2} - b}{2a} \tag{1}$$

式中: x 为输入电压; y 为输出压力值。得到电压输入-压力输出曲线, 分别用传统算法和本文算法对柔性力敏传感器输出结果进行验证。将任意气压下输出传感器的电压值带入公式得到传感器的最终气压, 用计算的平均压强值评估误差, 并计算出传感器的精度。标定结果如表2所示。

表2 标定结果

气压/ kPa	传统算 法结果/ kPa	绝对 误差/ kPa	精度/ (%F·S)	本文算 法结果/ kPa	绝对 误差/ kPa	精度/ (%F·S)
0	0	0	0	0	0	0
10	0.83	9.17	6.11	0.85	9.15	6.1
20	14.86	5.14	3.43	15.12	4.88	3.25
30	28.81	1.19	0.79	28.86	1.14	0.76
40	41.08	1.08	0.72	40.77	0.77	0.51
50	48.72	1.28	0.85	48.21	1.79	1.19
60	58.81	1.19	0.79	58.11	1.89	1.26
70	70.01	0.01	0.01	69.22	0.78	0.52
80	80.74	0.74	0.49	79.91	0.09	0.06
90	90.26	0.26	0.17	89.46	0.54	0.36
100	101.51	1.51	1.00	100.73	0.73	0.49
110	110.57	0.57	0.38	109.84	0.16	0.11
120	119.97	0.03	0.02	119.25	0.75	0.50
130	130.28	0.28	0.19	129.46	0.56	0.37
140	140.32	0.32	0.67	139.16	0.84	0.56
150	149.35	0.65	0.43	148.60	1.40	0.93

通过 F 检验判断两种方法计算的精度有无显著性差异, F 检验过程如下:

$$x_A = \frac{1}{16} \sum_{i=1}^{16} x_i = 1.003 \tag{2}$$

$$s_A^2 = \frac{1}{16-1} \sum_{i=1}^{16} (x_i - x_A) = 2.505 \tag{3}$$

式中: $x_i (i = 1, 2, 3, \dots, 16)$ 为传统算法计算的精度值; x_A 为传统算法计算的精度平均值; s_A^2 为传统算法计算的精度的方差。

$$x_B = \frac{1}{16} \sum_{i=1}^{16} x_i = 1.060 \tag{4}$$

$$s_B^2 = \frac{1}{16-1} \sum_{i=1}^{16} (x_i - x_A) = 2.380 \tag{5}$$

$$F = \frac{s_B^2}{s_A^2} = 1.048 \tag{6}$$

式中: $x_i (i = 1, 2, 3, \dots, 16)$ 为本文算法计算的精度值; x_B 为传统算法计算的精度平均值; s_B^2 为传统算法计算的精度的方差。由式(5)计算出两组精度数据的 F 值。

自由度 $f_{\text{大}} = f_{\text{小}} = 15$, 在置信度 95% 查 F 值得得 $F_{\text{表}}$, 即 $F_{\text{表}} = 2.4$ 。由 $F = 1.048 < F_{\text{表}} = 2.4$, 说明两组精度数据无显著差异(置信度 95%)。由 F 检验表明, 本文算法计算的精度结果与传统算法计算的精度结果基本一致。

从标定结果数据可以得出, 在气压小于 30 kPa 时, 两种方法测量的传感器精度均在 2~10 %F·S 区间, 本文算法与传统算法计算的传感器精度都比较低, 绝对误差大, 可以通过合适的算法补偿以提高传感器在此量程的精度。当气压大于 30 kPa 时, 传统方法计算的传感器精度小于 1 %F·S, 绝对误差小于 1.51 kPa, 本文算法计算的传感器精度小于 1.26 %F·S, 绝对误差小于 1.89 kPa, 两种算法都能达到较高的精度, 能够满足一般的应用需求。

2.6.2 标定过程时间分析

传统标定算法需要拟合每一个敏感点的标定曲线, 算法主要的时间为曲线拟合所需要的时间, 本文中算法使用大量样本点训练出分类模型, 拟合出每类标定曲线, 在对传感器进行标定时, 将敏感点标定数据输入分类模型, 分类模型输出每个敏感点的类别, 减少了大量敏感点标定曲线的运算量。算法主要的时间为敏感点分类时间。实验采用的传感器有 2 500 个敏感点, 两种算法时间对比如表3所示。由表中统计数据得出, 本文算法标定时间远少于传统标定算法, 更适用于敏感点数目多的传感器。

表3 算法时间对比

算法	时间/s
传统算法	25
本文算法	<1

2.6.3 算法先进性分析

本算法通过预先建立的分类模型对柔性力敏传感器阵

列敏感点进行分类,得到每个敏感点的类标定曲线。与传统算法相比,本文算法减少了标定过程中标定数据拟合的复杂性,简化了标定运算,优化了算法标定时间,降低了计算机的开销,尤其是对于含有大量阵列敏感点的柔性力敏传感器,本文算法能够快速地将标定参数传入传感器中,减少了标定过程的等待时间。

2.7 误差分析

1)实验使用的装置为面积标定装置,密封箱体内气囊壁对压强的均匀性有影响。

2)传感器采用上下两层结构,在上下层接触表面形成接触电阻,当压强不足时,上下表面的接触电阻不能充分接触,使传感器输出不准确。

3)使用最小二乘法拟合误差。最小二乘法根据最小化均方差的方法拟合数据,拟合过程存在误差。

4)分类模型分类错误产生误差。使用 BP 神经网络训练出敏感点的分类模型,分类准确率不能达到 100%,分类错误的情况下会产生误差。

5)算法以每一类的标定数据平均值代替每一类所有敏感点标定曲线误差。

3 结 论

本文介绍了柔性力敏传感器标定系统以及标定方法。通过与传统标定算法对比,新的标定方法达到了柔性力敏传感器的标定的预期精度,降低了柔性力敏传感器标定过程的运算量,大大减少了标定时间。但在传感器小量程端,传感器标定的精度较低,如何在算法上对传感器进行补偿以提高传感器在此量程的精度将是下一步需要研究的内容。

参考文献

- [1] 李立,陈玉娟,翟凤鸣,等.老年人不同运动形式下足底压力分布特征研究进展[J].中国老年学杂志,2011,31(16):3210-3212.
- [2] 杨敏,陈洪,李明海.柔性阵列式压力传感器的发展现状简介[J].航天器环境工程,2009,26(S1):112-115.
- [3] SOLÓRZANO A, RODRÍGUEZ_PÉREZ R, PADILLA M, et al. Multi-unit calibration rejects inherent device variability of chemical sensor arrays[J]. Sensors and Actuators B: Chemical,2018(2):142-154.

- [4] BALZANO L, NOWAK R. Blind calibration of sensor networks[J]. Center for Embedded Networked Sensing 2007(4):79-87.
- [5] BYCHKOVSKIY V, MEGERIAN S, ESTRIN D, et al. A collaborative approach to in-place sensor calibration[C]. Lecture Notes in Computer Science, 2003,2634:301-316.
- [6] 王东升,秦岚.导电橡胶触觉传感器阵列的标定实验研究[J].传感器与微系统,2008,27(12):21-23.
- [7] 董健康,韩庆奎.线性压力传感器的静态标定[J].天津大学学报,1996,29(5):709-715.
- [8] 郭小辉,黄英,解志成,等.柔性触觉传感器阵列力觉标定及加载系统[J].仪器仪表学报,2016 37(11):2613-2618.
- [9] 王永强,肖英淋,刘长林,等.自制 PVDF 薄膜压力传感器标定[J].实验技术与管理,2014,31(5):84-86,90.
- [10] 杨先军.柔性力敏传感及其应用技术研究[D].合肥:中国科学技术大学,2012.
- [11] 肖立志,郭兰申,张磊.基于应变片压阻效应的柔性传感器阵列的设计[J].仪表技术与传感器,2017(7):4-6,19.
- [12] 王鹏,丁天怀,徐峰,等.炭黑/硅橡胶复合材料的压阻特性研究与改进[J].传感技术学报,2004(1):15-18.
- [13] 李新娥,祖静,李水利.压力传感器标定装置高压密封垫的设计[J].润滑与密封,2009,34(9):98-101.
- [14] 宋箭,宋月,范松伟,等.压力分布传感器标定测量装置:中国,CN104089741A[P].2014-10-08.
- [15] 马锦垠,梁斌.传感器标定数据处理方法对爆炸压力测量误差的影响[J].电子测量技术,2012,35(6):58-61.

作者简介

徐超,1962 年出生,教授级高级工程师,主要研究方向为大数据、网络与智能系统。

E-mail:graymagpie@163.com

周旭,1975 年出生,硕士生导师,主要研究方向为 HMI 信息获取方法与测试装置、智能康体装备、人体运动行为感知技术、自动控制及嵌入式系统等。

E-mail:xzhou@iim.ac.cn