

宋泽乾, 罗轩梓, 刘爱萍. 基于电容式传感阵列的空间三维力解耦系统开发[J]. 智能计算机与应用, 2024, 14(11): 35-42.  
DOI:10.20169/j.issn.2095-2163.24051903

# 基于电容式传感阵列的空间三维力解耦系统开发

宋泽乾, 罗轩梓, 刘爱萍

(浙江理工大学 理学院, 杭州 310018)

**摘要:** 为提升应力应变传感器对空间三维力的检测能力,提高传感阵列系统的传感性能和可靠性,本文将普通的电容式传感器阵列化,结合多通道的外围采集电路将采集到的传感器数据进行处理,探究了其在空间三维力解耦上的能力。另外将所得传感数据作为支持向量机(SVM)算法的输入端,利用SVM算法较强的泛化能力对空间三维力进行精确的解耦识别,极大地优化了整个电容式传感阵列系统的传感性能。实验结果表明,该传感系统不仅具有对空间三维力的解耦能力,并具备较高的识别准确率和稳定性,识别准确率可达99.3%,能适用于大部分检测场景。

**关键词:** 电容式传感阵列; 外围电路; 三维力解耦; SVM; 识别准确率

中图分类号: TP242.6

文献标志码: A

文章编号: 2095-2163(2024)11-0035-08

## Development of spatial three-dimensional force decoupling system based on the capacitive sensing array

SONG Zeqian, LUO Xuanzi, LIU Aiping

(School of Science, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** In order to improve the ability of stress-strain sensors to detect three-dimensional forces in space, and improve the sensing performance and reliability of the sensing array system, this paper arrays ordinary capacitive sensors and processes the collected sensor data in combination with multi-channel peripheral acquisition circuits, and explores their ability to decouple three-dimensional forces in space. In addition, the obtained sensing data is used as the input port of the Support Vector Machine(SVM) algorithm, and the strong generalization ability of the SVM algorithm is used to accurately decouple and identify the three-dimensional force in space, which greatly optimizes the sensing performance of the entire capacitive sensing array system. Experimental results show that the sensing system not only has the ability to decouple the three-dimensional force in space, but also has better recognition accuracy and stability, with a recognition accuracy of 99.3%, which can be applied to most detection scenarios.

**Key words:** capacitive sensing arrays; peripheral circuits; three-dimensional force decoupling; SVM; recognition accuracy

## 0 引言

随着移动互联网和智能终端的发展,可穿戴电子设备展现出广阔的市场前景。人们对于智能医疗、健康检测、可穿戴设备等领域的关注不断增加,对于能够适应人体曲面、并具备三维力检测能力的传感器需求也逐渐凸显<sup>[1-2]</sup>。目前,常见的传感器检测系统通常存在以下的问题。一方面,现如今常见的应力应变传感器只能感应和识别单一方向上的

一维力,如法向力、切向力等,因此会带来识别信息不全、应用范围有限等问题<sup>[3-4]</sup>;另一方面,个别采用传感阵列或具有多维识别能力的应力应变传感器并没有对所得数据进行总体评估和性能优化,实际测试中存在的大量无效数据会对传感结果造成影响,从而降低识别的准确率。因此,在现有的电容式传感器的基础上,本文对传感阵列用于多维力检测和识别准确率提升,及传感性能的优化上进行了重点的研究。

**基金项目:** 国家自然科学基金(12272351);浙江省自然科学基金(Z24A020008)。

**作者简介:** 宋泽乾(1999—),男,硕士研究生,主要研究方向:电子信息,智能传感技术;罗轩梓(1999—),男,硕士研究生,主要研究方向:电子信息,智能传感技术。

**通信作者:** 刘爱萍(1979—),女,博士,教授,主要研究方向:柔性传感材料,电子器件。Email: liuaiping1979@gmail.com, aipingwz@163.com。

收稿日期: 2024-05-19

迄今为止,针对传感器的三维力检测能力和性能提升问题,已有众多学者展开了相关研究。Xi等学者<sup>[5]</sup>设计了一款 $3 \times 3$ 阵列式分布的压阻式传感阵列。当传感器受到所施加外力时,阵列中不同电阻的变化可用于求解三维力的大小和方向,因此可被用于三维力检测。吴佳贝等学者<sup>[6]</sup>搭建了一款多通道电容采集系统,能够对其设计制备的电容式三维力触觉传感器所测得的数据进行实时的采集和解耦。朱江等学者<sup>[7]</sup>则利用SVM算法对火灾警报系统传感器组合进行了优化研究,并准确评估了各类常用传感器组合在实验中的优劣,极大地提升了传感系统的工作效率和精确度。

以上文献阐明了三维力检测能力和SVM算法优化处理在传感器系统领域上具有重要的价值与意义。为提高传感器系统的三维力检测能力和识别准确率,本文设计了一种电容式传感阵列,并基于该传感阵列搭建了一套多通道电容采集系统,将多通道电容采集系统采集到的传感数据作为输入,通过SVM进行高维的处理识别,最后通过SVM识别的结果来判断传感器所受三维力的大小和方向,实现准确解耦。

## 1 电容式传感阵列的设计与制备

### 1.1 电容式传感阵列的设计

常见的具有三维力检测能力的传感器有电阻式、电容式、压电式和摩擦电式<sup>[8]</sup>等。相较于其他传感器,电容式传感器具有响应速度快、灵敏度高、可适用于动态响应等特点,于是我们采用电容式传感器用于空间三维力解耦。一般来说,用如下公式来计算电容式传感器的电容大小:

$$C = \frac{\varepsilon A}{d} \quad (1)$$

其中, $\varepsilon$ 表示介电常数; $A$ 表示上下极板间重叠面积; $d$ 表示两极板间距离。当传感器受到应力作用后,两极板间距离 $d$ 和上下极板间重叠面积发生变化,导致电容也随之变化。根据电容式传感器相对电容的变化,就可以得到外力的大小和分布情况,从而分析外界信息。据此,可以得知通过改变上下电极板的正对面积和极板间间距就可以改变电容值的大小。于是采用了一对四型的十字变间距变面积型传感阵列作为电容式传感系统的传感单元。当外界作用力作用在传感器上时,受制于作用力的大小和方向,4个电容所对应区域的极板间重叠面积和极板间距离变化量不同,导致其电容的变化量不同。

通过4个不同的电容变化量,就可以求解出作用力在 $X$ 轴、 $Y$ 轴、 $Z$ 轴三个方向上的分力,进而得到力的大小和方向。

### 1.2 电容式传感阵列的制备

图1显示了电容式传感阵列的结构,该电容式传感阵列由上电极(铜箔)、下电极( $2 \times 2$ 阵列铜箔)和中间介电层组成。将附着在聚酰亚胺(PI)基板上的铜箔进行激光切割,以获得所需的上、下电极。中间的介电层为PVDF-TrFE+DMF(1:9比例混合)。用PI胶带将3层组装起来,形成具有三维力检测能力的电容式传感阵列,铜线用导电银浆固定在上、下电极板上。整个电容式传感阵列的直径为15 mm,厚度为1 mm,便于固定在可穿戴设备上进行三维力识别。

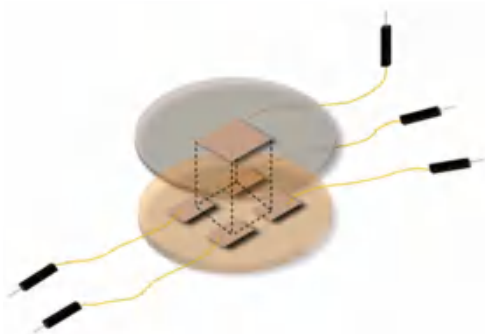


图1 电容式传感阵列的结构

Fig. 1 The structure of a capacitive sensing array

## 2 多通道电容采集系统的搭建

### 2.1 测试电路的搭建

本文将电容式传感阵列用于空间中3个方向上的力(三维力)的检测,鉴于传感器采用的是一对四的电容阵列设计,所以需要构建一个能够同步测量并记录多路电容变化值的电路。此电路主要包含两大模块:电容采集模块和数据处理模块。其中,电容采集模块负责实时捕捉各路电容的数值变化;数据处理模块则对采集到的数据进行处理和分析,确保数据的准确性和可靠性。

电容采集模块的核心是FDC2214测量电容芯片(如图2所示)。FDC2214是基于频率测量原理进行工作的,通过测量电容的变化来计算电容值。具体就是使用内部振荡器产生一个固定频率的电信号,并将其驱动到待测电容上,待测电容的大小会影响信号的频率,通过测量信号频率的变化幅度,可以确定电容的值。数据采集模块的主控是APM32E103,通过OT322540晶振在FDC2214上采

集到电容,通过 ADC 将模拟信号转为数字信号,送入到 APM32 中进行处理。另外,整个电路还配有 ADM2587,该设备具有限流和过热关断功能,能有效预防输出短路的发生,同时避免总线争用导致的功耗过高问题,确保设备的安全稳定运行;配有 AMS1117 作为稳压电源芯片,其主要任务是将不稳

定键入电压转换为稳定的电压,并提供稳定的电流导出,对整个电路进行供电。图 3 为该测试电路的原理框图,将 FDC2214 采集到的数据通过 I2C 传入到 APM32 中,通过 APM32 进行数模转换,经由串口传入到 PC 端以获取需要的传感数据,另外配以电源对整个测试电路进行供电。

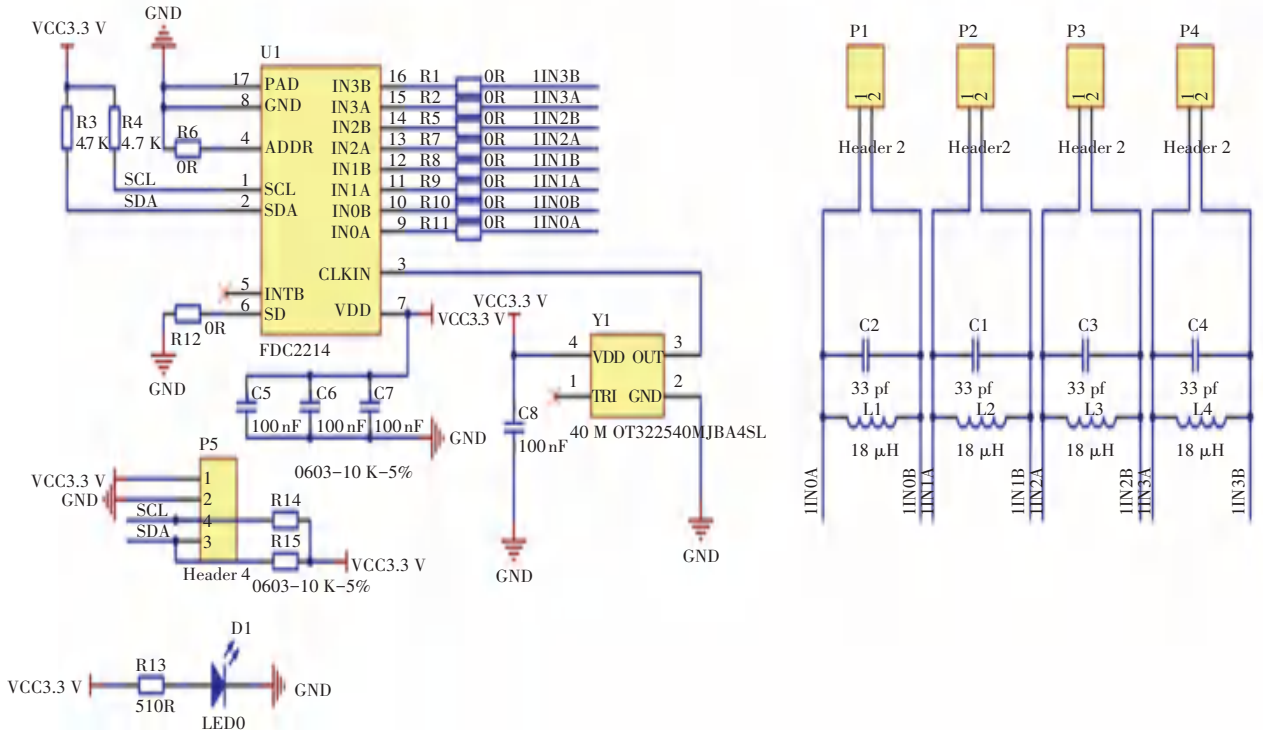


图 2 FDC2214 芯片及外围电路

Fig. 2 FDC2214 chips and peripheral circuits

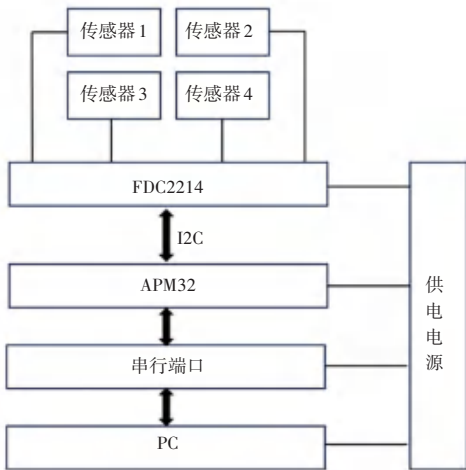


图 3 系统硬件架构图

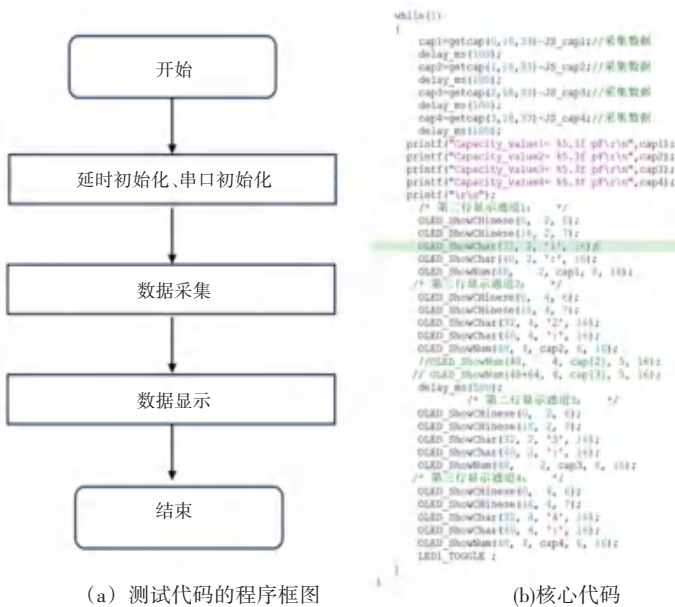
Fig. 3 Diagram of the system hardware architecture

常用的电容采集电路往往受限于其高输出阻抗、较差的负载能力、较大的寄生电容以及非线性

性的输出特性,在实际应用中可能带来诸多弊端,于是本文采用了高分辨率、多通道的电容采集芯片。相对于传统的开关电容结构,FDC2114 采用了 L-C 谐振器,也称为 L-C 谐振腔,作为传感器。与其他电容传感解决方案相比,窄带结构具有很强的电磁抗扰度并大大降低了本底噪音。

### 2.2 测试代码

在确认所需电路和关键硬件模块后,需要测试代码以激活电路。该代码功能主要分为 2 部分。一部分用于多通道电容的采集,另一部分则用于将采集到的电容值显示在 LED 屏幕上或传输至 PC 端。图 4 是测试代码的程序框图及核心代码。通过搭建电路和运行测试代码,可以顺利地获取到所需的电容实时数据,可以通过 LED 端显示或通过 PC 串口助手端传输。图 5 为 LED 端和串口助手端的实时显示。

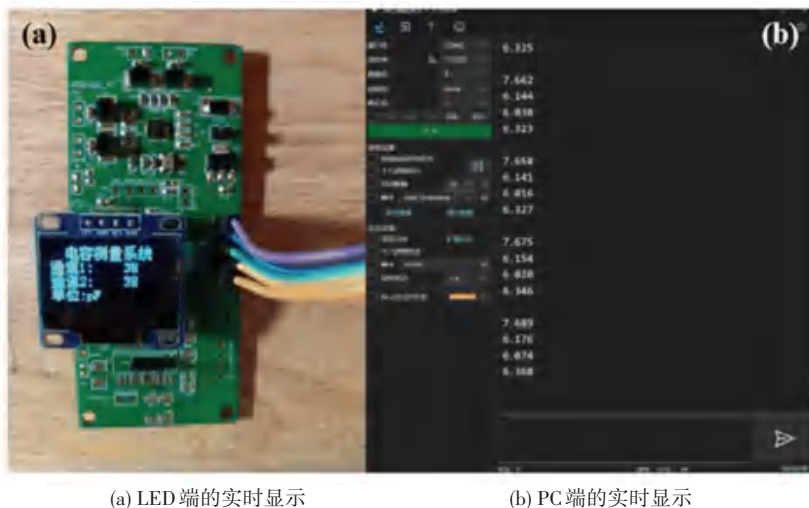


(a) 测试代码的程序框图

(b) 核心代码

图4 测试代码的研发

Fig. 4 Development of test code



(a) LED端的实时显示

(b) PC端的实时显示

图5 实时显示结果

Fig. 5 Results of real-time display

### 3 通过机器学习对传感器系统进行性能优化

#### 3.1 不同机器学习下的性能提升对比

鉴于一般的电容式柔性三维力传感器存在温漂或测试环境的影响,其输入输出是非线性和不均匀的<sup>[9]</sup>。由此产生的误差使得传感器在解耦过程中难以完全反映三维力的真实情况。为解决这些问题,引入了机器学习方法来提高解耦精度,以更准确地获取三维力的信息。

机器学习是一种人工智能(AI)的分支领域,其目标是使计算机系统能够通过数据学习并改进性能,而无需进行软件开发。简而言之,机器学习算法

利用数据来构建数学模型,使计算机能够从中学学习并做出预测或决策。这些算法可以根据输入的数据进行学习和优化,以便识别模式、进行分类、预测趋势或做出决策<sup>[10]</sup>。在机器学习之前,首先对样本数据进行采集,如图6所示。具体对以下12组数据分别采集500组,整个数据集分成2部分。其中,400组用于训练作为训练集(Training Set),剩下100组用于验证作为测试集(Test Set)。这里的训练集相当于课后的练习题,用于日常的知识巩固,而测试集相当于周考,用来纠正和强化学到的知识。通过训练集与测试集之间不断地交叉验证,对比取均值,以求获得更精准的训练模型<sup>[11]</sup>。

Count	C1	C2	C3	C4	N <sub>i</sub> *	Count	Force(N)	degree(°)
1					3,0	1	3	0
2					3,30	2	3	30
3					3,45	3	3	45
4					3,60	4	3	60
5					5,0	5	5	0
6					5,30	6	5	30
7					5,45	7	5	45
8					5,60	8	5	60
9					7,0	9	7	0
10					7,30	10	7	30
11					7,45	11	7	45
12					7,60	12	7	60

图 6 采集到的样本数据

Fig. 6 Collected sample data

收集到所需数据后,分别用 4 种常用的机器学习解决方案对上述数据进行学习并对比准确率。研究可知,采用 SVM 模型的准确率最高,达到了 95.3%; KNN 模型的准确率最低,只有 92.6%; 而树型(Tree)的准确率只有 93.3%, 二次判断分析

(Quadratic Discriminant)的准确率为 94.6%。

对以上 4 种模型进行了混淆矩阵<sup>[12]</sup>的对比分析,图 7(a)~(d) 分别表示 SVM 模型、二次判别分析模型、树型和 KNN 模型的混淆矩阵。从图 7 中可以看出,SVM 的准确率最高、错误率最低。

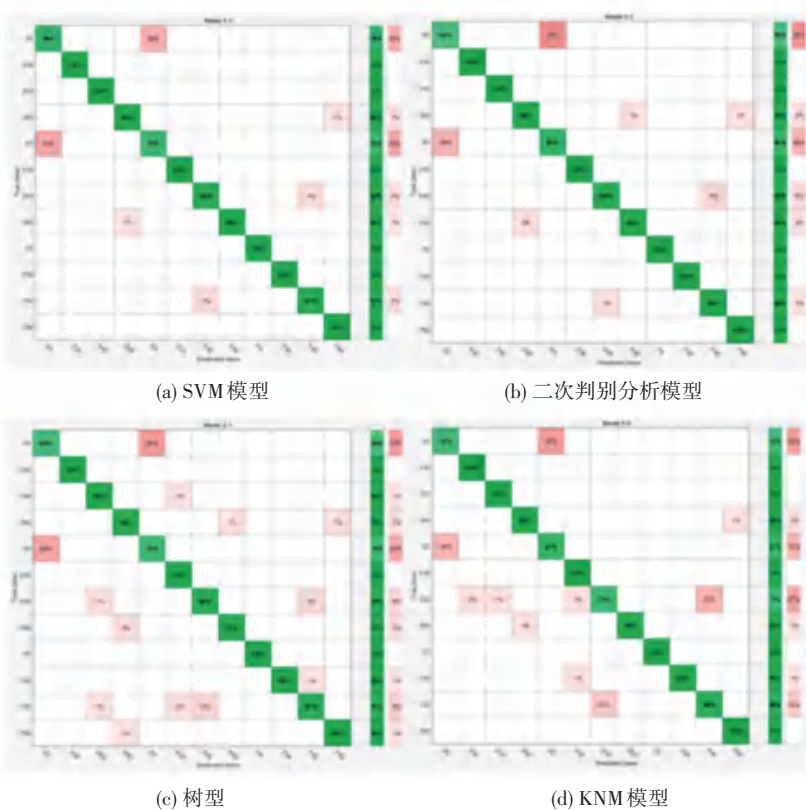


图 7 4 种机器学习方法的混淆矩阵

Fig. 7 Confusion matrices for four machine learning methods

另外,对上述 4 种模型的评估指标进行了对比分析,图 8(a)~(d) 分别表示树型、二次判别分析模型、SVM 模型和 KNN 的模型评估指标。从图 8 中可以看出,SVM 的 ROC 曲线最饱和,其 AUC 达到了 0.99,最接近于 1,证明 SVM 模型更适用于本文的传感数据进行机器学习<sup>[13]</sup>。总之,通过准确率、混淆矩阵、模型评估指标等进行综合对比分析,选择 SVM 模型作为机器学习的解耦模型。

### 3.2 SVM 模型下的性能提升

图 9 是 SVM 模型下的散点图,其中“·”表示正确,“×”表示错误。图 9 中展示了 4 个电容在不同力大小和角度标签下的散点图分布<sup>[14]</sup>。图 10 是 SVM 模型下的平行坐标图,这是一种数据可视化的方法,图中的实线代表正确结果,虚线代表错误结果。图 10 中,相同颜色的折线较为集中,不同颜色有一定的间距,则说明该模型对于预测电容阵列值有较大的帮助<sup>[15]</sup>。

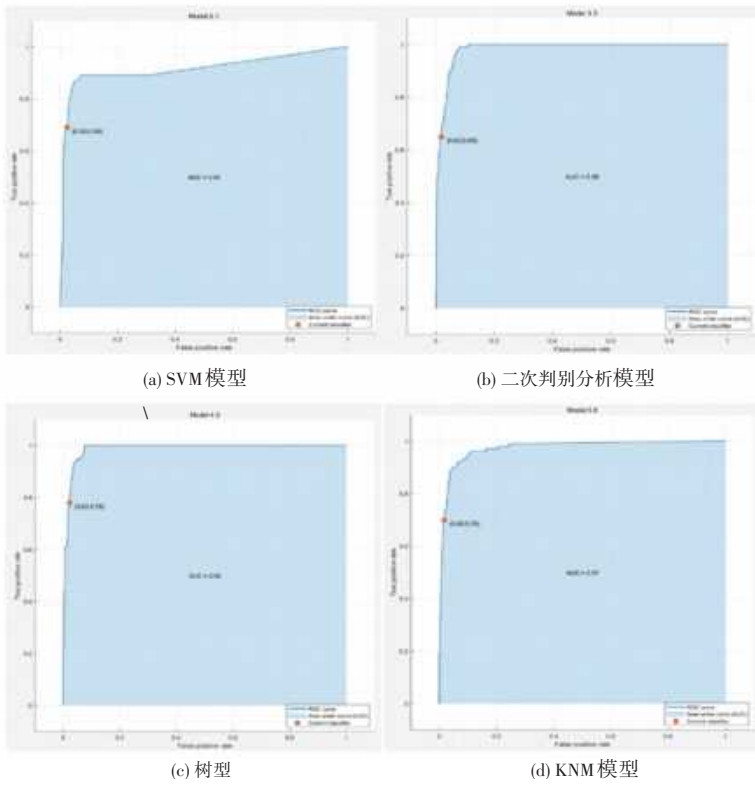


图 8 4 种机器学习方法的模型评估指标

Fig. 8 Model evaluation metrics for four machine learning methods

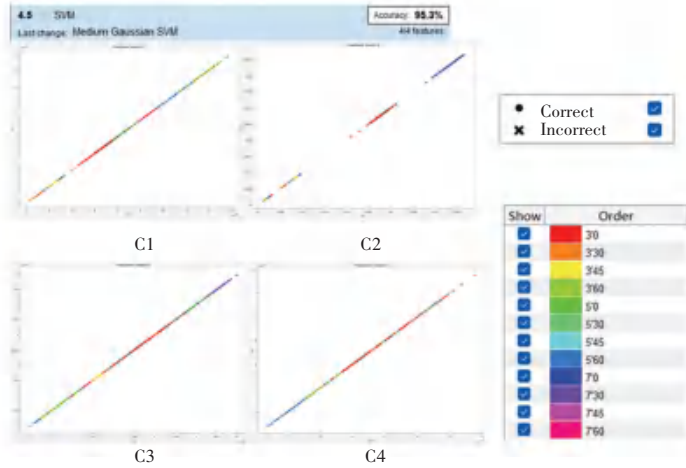


图 9 SVM 模型下的散点图

Fig. 9 Scatter plot in SVM model

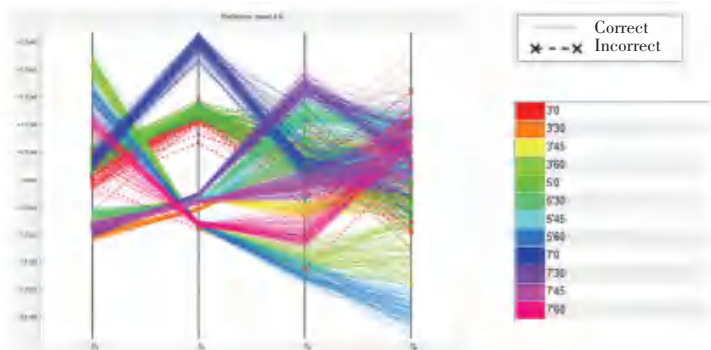


图 10 SVM 模型下的平行坐标图

Fig. 10 Parallel coordinate plot in SVM model

### 3.3 SVM 模型下识别精度测试

在获取了上述 12 种不同受力大小和方向的传感阵列数据后,把实验收集到电容数据作为特征量,建立一个三维力解耦识别的数据库<sup>[16]</sup>。当传感器随机受到不同大小和方向的力并输出相应的电容信号时,将这些信号与数据库中预存的特征值进行对比分析<sup>[17]</sup>。通过计算测试值与特征值之间的欧几里得距离<sup>[18]</sup>,能够精确判断信号是否吻合。系统模型流程如图 11 所示。

为了验证这一方法的准确性,在实验中针对不同大小和方向的力进行了 100 次受力测试,并将每次实验的结果汇总成识别率矩阵<sup>[19]</sup>,如图 12

所示。在总计 1 200 次的抓取实验中,仅有 8 次识别错误,从而实现了高达 99.3% 的识别准确率。这充分证明了该电容式传感阵列在 SVM 算法优化下的准确性,以及其在未来三维力解耦识别中的良好应用前景<sup>[20]</sup>。

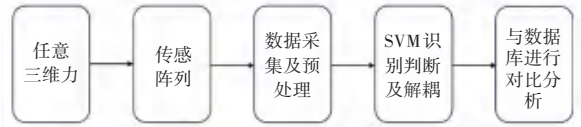


图 11 SVM 模型对任意三维力进行解耦分析的系统模型

Fig. 11 A system model that performs decoupled analysis of arbitrary three-dimensional forces in SVM model

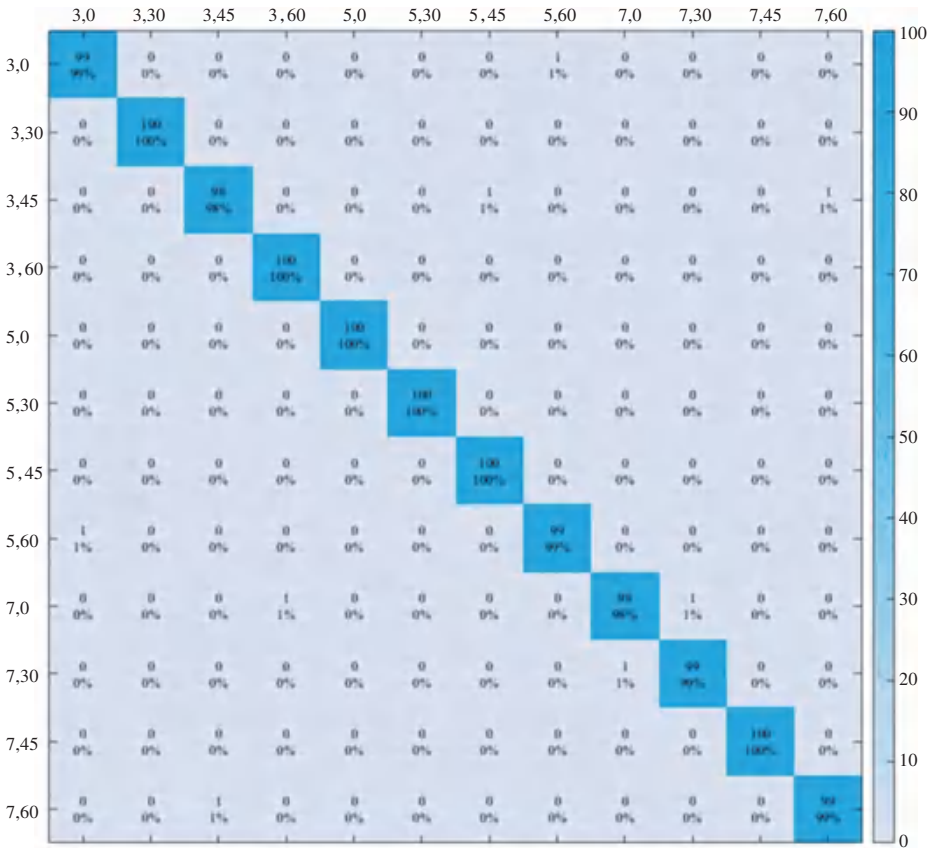


图 12 12 种受力情况的识别率矩阵

Fig. 12 Recognition rate matrix for twelve force cases

## 4 结束语

本文设计了一种电容式传感阵列,以实现三维力的感知。利用 FDC2214 芯片对阵列数据进行多通道采集,利用 APM32 作为核心控制器将收集到的数据进行实时显示并发送至 PC 端,将所收集到的数据通过机器学习来提升解耦的准确性,通过对比 4 种机器学习的方法,衡量比照后选用准确率最高的 SVM 算法来提升传感阵列对三维力的解耦准确度。最后选

用收集到的不同受力情况下的传感阵列数据建立识别数据库,并在不同受力情况下对其进行识别率测试。结果表明,该电容式传感阵列在 SVM 算法优化下具有极高的准确性,可以很好地应用于三维力解耦,证明了该电容式传感阵列相较于传统传感器在解耦能力和解耦精度上得到较大提升。

## 参考文献

[1] WANG Xiangfu, YU Jihong, CUI Yixuan, et al. Research progress

- of flexible wearable pressure sensors[J]. *Sensors and Actuators A-Physical*, 2021, 330: 112838.
- [2] 蔡依晨, 黄维, 董晓臣. 可穿戴式柔性电子应变传感器[J]. *科学通报*, 2017, 62(7): 635-649.
- [3] LI Jing, BAO Rongrong, TAO Juan, et al. Recent progress in flexible pressure sensor arrays: From design to applications[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2018, 6(44): 11878-11892.
- [4] XU Fenlan, LI Xiuyan, SHI Yue, et al. Recent developments for flexible pressure sensors: A review[J]. *Micromachines*, 2018, 9(11): 580.
- [5] XI Kailun, WANG Yancheng, MEI Deqing, et al. A flexible tactile sensor array based on pressure conductive rubber for three-axis force and slip detection [C]//*Proceedings of IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*. Piscataway, NJ: IEEE, 2018: 476-481.
- [6] 吴佳贝, 刘仪琳, 卢佳飞, 等. 电容式三维力触觉传感器的设计与解耦研究[J]. *科学技术创新*, 2023(9): 13-16.
- [7] 朱江, 徐梦瑶, 李达, 等. 基于 SVM 的火灾警报系统传感器组合优化研究[J]. *智能计算机与应用*, 2020, 10(3): 313-317.
- [8] KIM J S, KIM G W. Hysteresis compensation of piezoresistive carbon nanotube/polydimethylsiloxane composite - based force sensors[J]. *Sensors*, 2017, 17(2): 229.
- [9] CHUN S, HONG A, CHOI Y, et al. A tactile sensor using a conductive graphene-sponge composite [J]. *Nanoscale*, 2016, 8(17): 9185-9192.
- [10] 张嘉伟, 姚鸿博, 张远征, 等. 通过机器学习实现基于摩擦纳米发电机的自驱动智能传感及其应用[J]. *物理学报*, 2022, 71(7): 384-408.
- [11] 张友浩, 赵鸣, 徐梦瑶, 等. 时序数据挖掘的预处理研究综述[J]. *智能计算机与应用*, 2021, 11(1): 74-78.
- [12] 唐永锋, 柯永斌, 庄立运, 等. 基于混淆矩阵神经网络的管道超声导波分类研究(英文)[J]. *电子器件*, 2023, 46(2): 469-477.
- [13] 陈萌. 基于 FCM 混合模型指标关联下的航班风险评估研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
- [14] 唐航. 基于深度学习的散点图相似性探索[D]. 长沙: 中南大学, 2023.
- [15] 李珍珍. 平行坐标图的密度失真与重影簇的反走样方法研究[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2021.
- [16] 杨明敏. 基于深度学习的唇语识别数据库构建和算法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [17] 黄艺驰, 邹月娟, 柳俊宏. 面向智能手机信道的中文说话人识别数据库 MTDSR [C]//*第十四届全国人机语音通讯学术会议 (NCMMSC'2017) 论文集*. 连云港: 中国中文信息学会语音信息专业委员会, 2017: 54-58.
- [18] BALAJI R, BAPAT R B, GOEL S. Generalized Euclidean distance matrices [J]. *Linear and Multilinear Algebra*, 2021, 70(21), 6908-6929.
- [19] 李润青. 基于 PCA 改进与 SVM 相结合的人脸识别算法研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2018.
- [20] SONG Yang, WANG Feilu, ZHANG Zhenya. Decoupling research of a novel three-dimensional force flexible tactile sensor based on an improved BP algorithm[J]. *Micromachines*, 2018, 9(5): 236-252.