

DOI:10.19344/j. cnki. issn1671-5276.2024.04.020

基于图像处理方法的鼠标足部压力数据处理

王振强^{1a,1b}, 王文波^{1a,1b}, 唐业忠^{1a,1b,2}

(1. 南京航空航天大学 a. 机电学院; b. 江苏省仿生功能材料重点实验室, 江苏 南京 210016;

2. 中科院 成都生物研究所, 四川 成都 610041)

摘要:针对现有足部压力采集设备采集到的压力影像含有噪声以及分辨率低的问题,提出卷积阈值去噪算法和边缘响应插值算法进行改善。使用基于柔性压力传感器阵列的压力采集板采集小鼠足部的压力矩阵数据,利用所提出的卷积阈值去噪算法对含噪压力矩阵进行去噪处理,再利用提出的边缘响应插值算法对去噪后的压力矩阵进行插值处理,获取到分辨率高的低噪小鼠足部压力图。结果表明:所提出的去噪算法去噪效果好、小鼠足部边缘低压力值信息保存完整;其插值算法相较于同类其他插值算法插值效果更平滑、计算复杂度大幅降低。

关键词:足部压力图像;去噪;插值;压力传感器

中图分类号:TP391.41 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2024)04-0106-05

Data Processing of Mouse Foot Pressure Based on Image Processing Method

WANG Zhenqiang^{1a,1b}, WANG Wenbo^{1a,1b}, TANG Yezhong^{1a,1b,2}

(1. a. College of Mechanical and Electrical Engineering; b. Jiangsu Key Laboratory of Bionic Functional

Materials, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

Abstract: To improve the noise and low resolution in the pressure image collected by the existing foot pressure acquisition equipment, the convolution threshold denoising algorithm and edge response interpolation algorithm are proposed. The pressure acquisition board based on the flexible pressure sensor array is applied to collect the pressure matrix data of the mouse foot, the convolution threshold de-noising algorithm is utilized to de-noise pressure matrix with noise, and by edge response interpolation algorithm, the de-noised pressure matrix is interpolated, thus the high-resolution low-noise mouse foot pressure map obtained. The results show that the proposed denoising algorithm has good denoising effect, and the information of low pressure value at the edge of mouse foot is saved completely. Compared with other interpolation algorithms of the same kind, the interpolation effect of the proposed interpolation algorithm is smoother and the computational complexity is greatly reduced.

Keywords: foot pressure image; denoise; interpolation; pressure sensor

0 引言

足部压力数据在航天医学、病理毒理学、疾病诊疗与康复训练等领域都有着非常重要的研究价值。近年来,各种各样的足部压力采集设备被研发出来。根据研究目的的不同和装备适宜性等因素可以使用不同的压力采集设备采集所需足部压力数据,但常用的主要有足底平台系统和鞋内系统^[1]。CHEN 等^[2]详细探讨了足底鞋垫压力检测系统在慢性疾病检测领域的应用;CHATWIN 等^[3]分析了足部压力测量在预测和预防糖尿病足溃疡中的作用;刘薛勤等^[4]利用采集到的足底周期性运动步态的压力数据,结合支持向量机实现

了对足底压力感知的智能步态识别。这些研究的开展都离不开足部压力采集系统。

在很多情况下,不能直接以人为对象进行实验,这就需要用到实验动物代替人作前期实验。压力采集板采集足底压力获取到的压力分布图像会有噪声以及分辨率低等问题出现,为此需要对采集到的压力图像数据作去噪、插值等预处理来获取高分辨率的低噪声图像^[5]。根据获取的低噪声图像,再利用卷积神经网络等算法提取足部压力影像的特征信息,进行相应的分类识别等工作。结合装备适宜性等因素,本文足部压力采集系统选用足底平台系统形式,实验对象为小鼠。

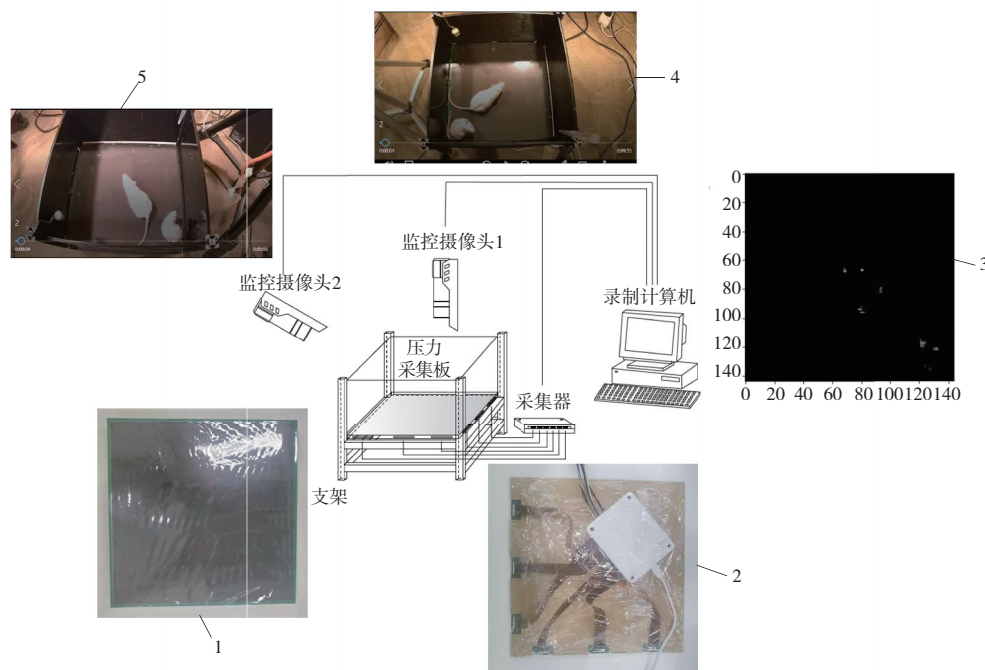
基金项目:国家自然科学基金资助项目(31970423);中科院装备研制项目(YZ201603)

第一作者简介:王振强(1998—),男,河南洛阳人,硕士研究生,研究方向为模式识别,443138846@qq.com。

1 小鼠足部压力信息采集系统

小鼠足部压力信息采集系统(图1)核心部分主要由一块柔性压力采集板构成。根据接收到外部刺激产生信号的原理不同,可以将柔性压力传感器分为压阻式、电容式、压电式、摩擦电式和晶体管式五大类^[6-7],本文所使用的柔性传感器则为压阻式传感器。该压力采集板分为采集电路和压阻薄膜,其中压阻薄膜表面为PET材质,在

25 cm×25 cm 的采集电路板上压力传感器排列为144×144,一共20 736个传感器单元,如图1中压力采集板。小鼠足部接触到压力板后会得到一个144×144的压力矩阵,该矩阵所显示的数值与小鼠踩到的传感器真实压力值成线性关系,由此便可得到小鼠足部压力分布矩阵。同时为辅助收集实验数据,该系统还在俯视方向与斜侧方向架设了两个摄像头拍摄视频信息,如图1所示。



1—压力采集板正面;2—压力采集板背面;3—压力采集板采集小鼠足部压力灰度图;
4—摄像头俯视拍摄;5—摄像头斜侧视拍摄。

图1 小鼠足部压力信息采集系统结构图

2 小鼠足部压力信息采集

实验小鼠为无特定病原体(specific pathogen free, SPF)的昆明小鼠,所有实验符合四川省动物伦理管理规定。所做实验为双鼠社交行为实验,所有实验均在隔音室中完成。实验时将小鼠放在压力采集板上,小鼠足部通过与压力采集板接触获取压力分布矩阵,将原始压力分布矩阵显示为灰度图(图1中3)。为了更直观理解采集到的足部压力矩阵所对应的小鼠行为姿态,使用系统中的摄像头拍摄对应时刻的躯体影像辅助识别(图1中4,5)。

3 小鼠足部压力矩阵去噪

在压力板采集数据的过程中,传感器因灵敏度较高,小鼠踩到压力板保护膜上会导致保护膜的弯

曲形变,所产生的张力被传感器采集到,从而有噪声的出现。此外,采集器与压力板之间的排线接触不稳定也会产生随机噪声,所采集到的压力矩阵会出现闪烁噪声、散粒噪声、爆裂噪声等^[8]。本研究采集到的含噪压力矩阵成像如图2(a)所示,对图像局部放大数值化显示如图2(b)、图2(c)所示。

根据压力矩阵中噪声的像素值通常较小的特点,先采取相对简单的固定阈值去噪的方法,原理公式为

$$g(i,j)=\begin{cases} f(i,j) & f(i,j)>\theta \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $g(i,j)$ 为去噪之后位置 (i,j) 对应的像素值; $f(i,j)$ 为含噪压力矩阵像素值; θ 为去噪所设定的阈值。

设定固定阈值10,固定阈值去噪算法可有效去

除图像中存在的噪点,如图 2(d)、图 2(e)所示,滤除了噪声信息,保留了重要的小鼠足部压力信息。

固定阈值去噪算法尽管可以有效去除噪声,但去噪后的无噪矩阵脚印压力信息是突变的。基于此,本文提出了卷积阈值去噪算法。原理公式为:

$$\varphi(i,j) = \max \begin{cases} f(i-1,j-1) & f(i-1,j) & f(i-1,j+1) \\ f(i,j-1) & f(i,j) & f(i,j+1) \\ f(i+1,j-1) & f(i+1,j) & f(i+1,j+1) \end{cases} \quad (2)$$

$$g(i,j) = \begin{cases} f(i,j) & \varphi(i,j) > \theta \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

在使用卷积阈值去噪算法之前先对含噪压力矩阵使用 Zero-padding 填充。 $\varphi(i,j)$ 为 (i,j) 位置为中心,卷积核为 3 的覆盖区域内含噪矩阵的最大值。

设置阈值为 10,固定阈值去噪算法在有效去除压力矩阵中噪点的同时保留了更多小鼠足部压力信息。图 2(f)、图 2(g)所示为卷积阈值去噪算法去噪效果示意图。

整体分析图 2 可以看出,两种算法均有效去除了小鼠足部周边多余的噪点,但是卷积阈值去噪算法(图 2(g))保留了更多有效压力信息。

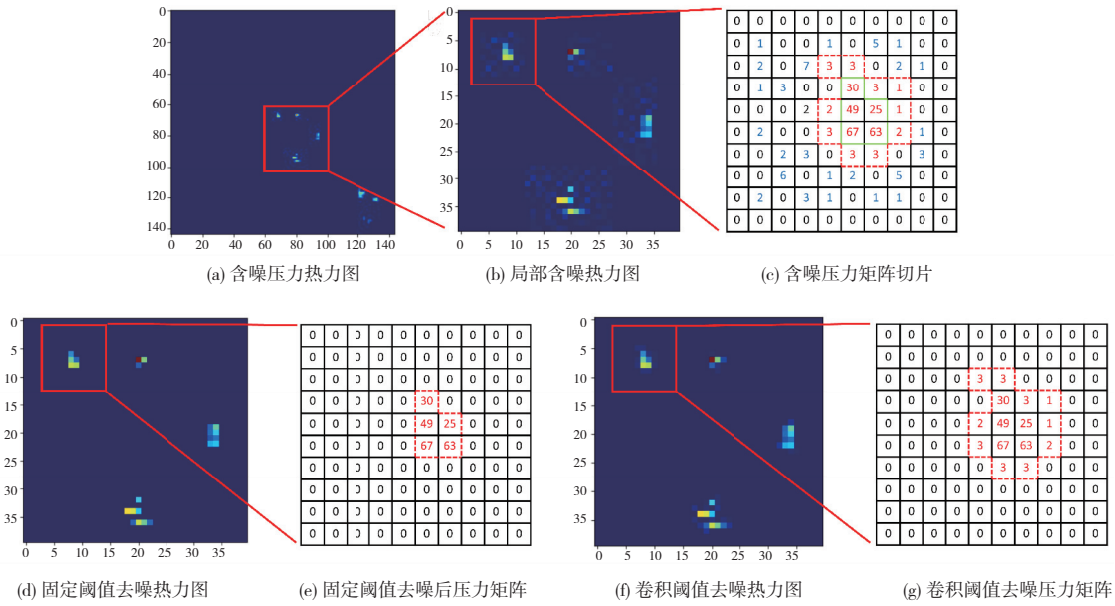


图 2 小鼠足部压力图像去噪

4 小鼠足部压力矩阵插值

原始压力矩阵分辨率较低,为了更清晰直观地观察到小鼠足部压力分布情况,需要对图像进行放大处理。

常见的插值算法有最近邻插值方法(Nearest)、双线性插值方法(Bilinear)^[9]以及双立方插值方法(Bicubic)^[10-12]。下面分别介绍这几种插值算法原理。

1) 最近邻插值

最近邻插值是最简单的插值方法,但该方法图像放大效果通常较差,放大倍数高时会出现严重的失真问题。其插值映射原理公式为

$$\begin{cases} s_{rx} = d_{sx} / s_{cale} \\ s_{ry} = d_{sy} / s_{cale} \end{cases} \quad (4)$$

式中: s_{rx} 、 s_{ry} 为原图像中的坐标; d_{sx} 、 d_{sy} 为放大图

像中的坐标; s_{cale} 为插值放缩倍数。根据该公式可将放大图像中的像素点对应到原图像素点。

2) 双线性插值

双线性插值是最常用的插值方法,它可以保证插值效果较好且运算速度较快,综合效果最好。它的插值像素值由原图对应相邻 4 个像素值决定,原理公式为

$$\begin{cases} f(i+u,j) = (1-u) \times f(i,j) + u \times f(i+1,j) \\ f(i+u,j+1) = (1-u) \times f(i,j+1) + u \times f(i+1,j+1) \\ f(i+u,j+v) = (1-v) \times f(i+u,j) + v \times f(i+u,j+1) \end{cases} \quad (5)$$

式中 $(i+u,j+v)$ 为像素值未知的插值点在原图对应位置。插值过程为:先在水平和竖直两个方向上完成一阶线性内插,然后使用线性组合的方式确定插值点像素值。

3) 双立方插值

双立方插值是基于双线性插值的改进,相较

于前两种插值方式,其计算复杂度更高,插值效果通常更好。插值的像素点由邻域 16 个像素值加权得到,插值原理公式为:

$$W(x) = \begin{cases} 0 & |x| \geq 2 \\ A_1 |x|^3 + B_1 |x|^2 + C_1 |x| + D_1 & 1 \leq |x| < 2 \\ A_2 |x|^3 + B_2 |x|^2 + C_2 |x| + D_2 & 0 \leq |x| < 1 \end{cases} \quad (6)$$

$$f(x, y) = \sum_{i=-1}^2 \sum_{j=-1}^2 f(x_i, y_j) W(x - x_i) W(y - y_j) \quad (7)$$

式中:\$(x, y)\$为插值点坐标;\$(x_i, y_j)\$为原始图像上的像素点;\$W(x)\$为双立方插值所需的基函数,常见的插值基函数有三角采样基函数、Hermit 分布基函数、B 样条曲线基函数、Bell 分布基函数。

对卷积阈值去噪之后的压力矩阵使用上述插值算法,插值效果如图 3 所示。

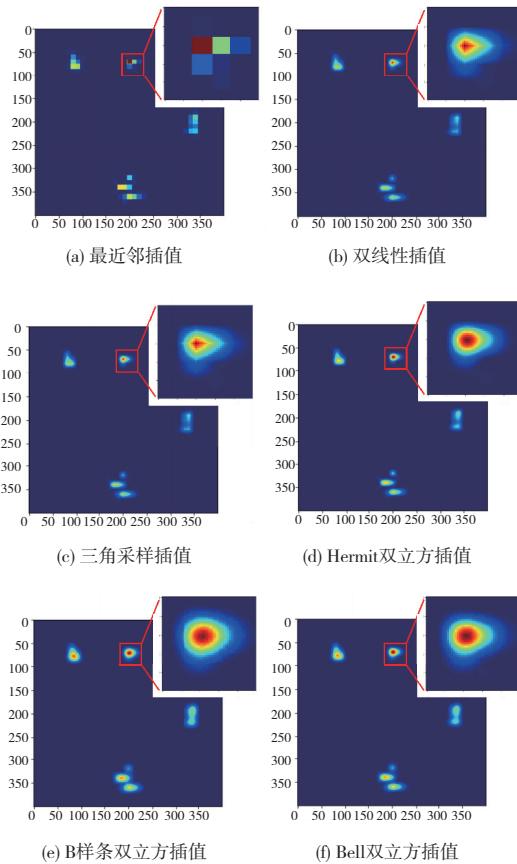


图 3 常见插值算法对比

根据前面插值算法的优缺点以及压力矩阵插值特点,将双立方插值影响点从 16 个点减少到 8 个点,提出边缘响应插值算法。如图 4 所示,根据待插值点\$(i+u, j+v)\$所处 \$4 \times 4\$ 阵列中位置不同,8 个插值响应点的选取也不同,插值响应点的选取

如图中扇形中 8 个点所示。使用 Bell 核函数,插值原理公式为:

$$W_{\text{Bell}}(x) = \begin{cases} 0 & |x| > 1.5 \\ 0.5(x+1.5)^2 & -1.5 \leq x \leq -0.5 \\ 0.75 - x^2 & -0.5 < x \leq 0.5 \\ 0.5(x-1.5)^2 & 0.5 < x \leq 1.5 \end{cases} \quad (8)$$

$$\varphi(h, w) = \begin{cases} 0 & 1 < |h| < 1.5 \text{ 和 } 1 < |w| < 1.5 \\ 1 & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

$$f(x, y) = \sum_{i=-1}^2 \sum_{j=-1}^2 f(x_i, y_j) W_{\text{Bell}}(x - x_i) W_{\text{Bell}}(y - y_j) \varphi(x - x_i, y - y_j) \quad (10)$$

式中:\$W_{\text{Bell}}(x)\$为 Bell 分布核函数;\$\varphi(h, w)\$获取响应点函数。

对卷积阈值去噪之后的压力矩阵使用边缘响应插值算法,插值效果如图 5 所示。

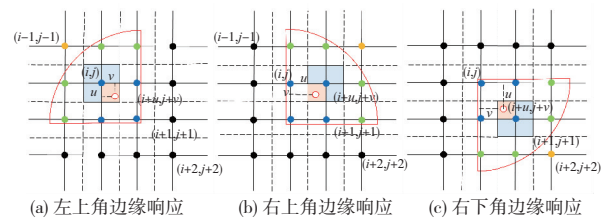


图 4 边缘响应插值算法原理

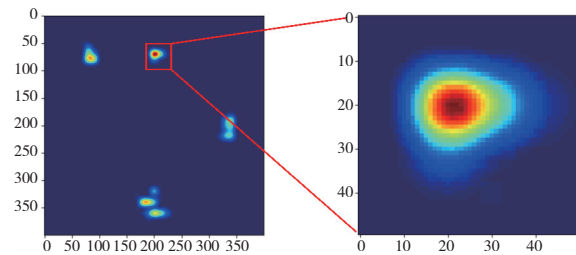


图 5 边缘响应插值效果示意图

可以看出边缘响应插值算法相比于双立方插值算法计算量降低将近一半,插值效果类似,插值图像相比于其他插值算法更加平滑清晰,表现效果好。

5 讨论

1) 去噪算法

目前主流的图像去噪算法在评价去噪效果时会利用客观指标作比较,可以使用无噪图与去噪图计算峰值信噪比(PSNR)和结构相似性(SSIM)两个客观指标对去噪算法的性能作比较。本文所

使用的压力板采集到的含噪压力矩阵噪声分布与目前主流的图像噪声分布并不相同,且由于硬件条件限制以及采集图像分辨率等因素导致无法获取到不失真压力图像(ground truth),故无法直接应用现有的图像去噪算法进行去噪。

鉴于本文压力板的噪声分布规律较为简单,去噪的目标主要是将小鼠足部周围的低值噪点去除,若采用固定阈值去噪方法会使得小鼠足部边缘的低压力值信号滤除。为此,需要设计出一种既可以保留小鼠足部边缘低压力值信号又能去除周围噪点的算法,本文提出的卷积阈值滤波去噪算法则可以有效实现这一目标。观察图 2(f)可以很明显看出使用卷积阈值去噪算法之后,小鼠足部周围的低值噪点可以有效过滤掉,且足部边缘的低值信号也保存较为完整,这就证明了本算法的有效性。

2) 插值算法

当前与图像放大相关的研究有传统的插值算法和基于深度学习的超分辨率图像重建算法,本文使用的压力板无法获取到合适的高清原图,从而导致有监督形式的算法无法使用。为此,本文主要针对常见的插值放大算法作相应的对比分析,包括最近邻插值、双线性插值和双立方插值。其中最近邻插值法计算量小、算法简单,但插值图像连续性不明显,图像质量损失较大;双线性插值法效果优于最近邻插值,它考虑到了周围 4 个像素点的相关性影响,计算量稍大,基本克服了插值图像不连续的问题;双立方插值法计算量最大,算法也更为复杂,它不仅考虑到了周围核心 4 个点的影响,还考虑到外层 12 个点的灰度值变化率的影响,因此能够克服前两种方法的不足,产生的插值图像边缘比前两种方法更加平滑,精度更高,效果也是最佳。

分析了几种插值算法的优缺点之后,本文提出了边缘响应插值算法,从图 3 和图 5 中可以看出边缘响应插值算法在边缘信息保留与插值平滑性上均有较好表现,且相比于双立方插值,其算法复杂度与计算量大幅下降,有效提升了算法的计算效率。

6 结语

本文利用压力采集板获取小鼠足部的压力分布图像,为了使获取到的小鼠足部压力分布图像噪声更少、分辨率更高,使用图像分析的方法对小鼠足部压力数据进行处理。根据采集到的压力矩

阵噪声特点,提出了卷积阈值去噪算法,相比于其他去噪方法,去噪效果好且小鼠足部边缘低压力值信息保存完整。为了使得小鼠足部压力图像分辨率更高且连续性更高,故提出了边缘响应插值算法,相比于双立方插值算法,在计算量降低近一半的同时插值效果也相近,相比于其他常见插值算法,插值图像更加平滑清晰。

参考文献:

- [1] ZULKIFLI S S, LOH W P. A state-of-the-art review of foot pressure[J]. Foot and Ankle Surgery, 2020, 26(1): 25-32.
- [2] CHEN J L, DAI Y N, GRIMALDI N S, et al. Plantar pressure-based insole gait monitoring techniques for diseases monitoring and analysis: a review[J]. Advanced Materials Technologies, 2022, 7(1): 2100566.
- [3] CHATWIN K E, ABBOTT C A, BOULTON A J M, et al. The role of foot pressure measurement in the prediction and prevention of diabetic foot ulceration - a comprehensive review [J]. Diabetes/Metabolism Research and Reviews, 2020, 36(4): e3258.
- [4] 刘薛勤, 刘宁, 苏中, 等. 基于足底压力感知的智能步态识别方法研究[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(11): 2572-2578.
- [5] 林丽红, 周文强, 罗冠泰, 等. 基于图像分析方法的足部压力数据处理[J]. 中国医疗器械信息, 2021, 27(3): 17-18, 159.
- [6] HOMAYOUNFAR S Z, ANDREW T L. Wearable sensors for monitoring human motion: a review on mechanisms, materials, and challenges[J]. SLAS Technology, 2020, 25(1): 9-24.
- [7] 姚佳烽, 邓琪, 刘凯. 基于医工融合的高端医疗装备研究进展[J]. 机械制造与自动化, 2022, 51(2): 1-4, 8.
- [8] 李韦豪. 基于足底压力分布特征的下肢损伤检测与评估方法研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2018.
- [9] FRANKE R. Scattered data interpolation: tests of some methods [J]. Mathematics of Computation, 1982, 38(157): 181-200.
- [10] KEYS R. Cubic convolution interpolation for digital image processing[J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1981, 29(6): 1153-1160.
- [11] PARK S K, SCHOWENGERDT R A. Image reconstruction by parametric cubic convolution [J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1983, 23(3): 258-272.
- [12] MEIJERING E H W, NIESSEN W J, VIERGEVER M A. Piecewise polynomial kernels for image interpolation: a generalization of cubic convolution [C]//Proceedings 1999 International Conference on Image Processing (Cat. 99CH36348). Kobe, Japan: IEEE, 2002: 647-651.