

Multidirectional foot force feedback data acquisition system under FPAA hybrid control

Xu Hang¹ Guliang Yang¹ Liang Zhang² Ting Yang¹

1. School of Medical Information and Engineering, Xuzhou Medical University, Xuzhou, Jiangsu, 221004, China

2. Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang, 150006, China

Abstract

Based on the importance of plantar pressure measurement and its application in diagnosis and rehabilitation in medical and sports science, this paper studies a multi-directional force feedback data acquisition system based on FPAA. By integrating multiple sensors and FPAA technology, the system can collect and process plantar pressure data in real time, reduce the impact of leakage rate, provide users with detailed plantar pressure data, and improve the accuracy and practicability of plantar pressure measurement. The experimental section includes pressure measurements in normal and abnormal gait situations, verifying the effectiveness of the system in different application scenarios. After experimental comparative analysis, the system shows great potential in improving the accuracy of plantar pressure measurement and providing support for rehabilitation, indicating its broad application in the future of medical and sports science.

Keywords

FPAA; force feedback; multi-directional data collection; plantar pressure data; medical rehabilitation

基于 FPAA 混合控制下的多方位足底力反馈数据采集系统

杭旭¹ 杨顾亮¹ 张亮² 杨婷¹

1. 徐州医科大学医学信息与工程学院, 中国·江苏 徐州 221004

2. 哈尔滨工业大学, 中国·黑龙江 哈尔滨 150006

摘要

基于目前医学和运动科学领域中, 对足底压力测量的重要性及其在诊断和康复中的应用, 本文研究了一种基于FPAA混合控制的, 多方位力反馈数据采集系统。该系统通过集成多个传感器和FPAA技术, 能够实时收集和處理足底压力数据, 降低漏采率的影响, 为用户提供详细的足底压力数据, 提高足底压力测量的精度与实用性。实验部分包括正常和异常步态情况下的压力测量, 验证了系统在不同应用场景下的有效性。经过实验对比分析, 该系统在提高足底压力测量精确性, 和为康复提供支持方面表现出极大的潜力, 预示着其在未来医疗和运动科学领域的广泛应用前景。

关键词

FPAA; 力反馈; 多方位数据采集; 足底压力数据; 医学康复

1 引言

足踝是人体下肢行走的主要器官。近年来, 由于自身疾病或者外部原因, 踝足功能异常的人数增加, 给患者康复带来不少难题。在医学和运动科学领域, 足底压力测量是一项关键的诊断和评估工具。它不仅有助于了解个体的步态和平衡能力, 还对预防和治疗与步态异常相关的多种疾病至关重要^[1]。

Xu, C. 等^[2]研究的Footscan平台系统能够有效地测量足底的压力分布, 并展示出良好的重复性。这项研究突显了现代足底压力测量技术的精确性和实用性, 为临床医生和运动科学家提供了重要的数据支持。李宏恩等^[3]研究了不同因素对青少年足底压力数据分布的影响。这项研究为青少年不良步姿矫正、初步临床疾病诊断与预防等提供了重要的理论依据。Tekscan公司^[4]提供了一系列的足底压力测量系统, 这些系统在不同领域中都有广泛的应用, 说明了足底压力测量技术在不同场景下的广泛适用性, 并突显了其在未来医疗和运动科学领域中的潜在发展空间。

孟青云等^[5]开发了基于Arduino Uno R3的足底压力采集系统, 利用六个FSR传感器和蓝牙HC-05模块实现数据的实时采集和传输。系统记录了4位实验对象在不同姿势下的足底压力, 并绘制压力曲线图分析各区域压力变化。结论

【作者简介】杭旭(2003-), 男, 中国江苏南京人, 在读本科生, 从事智能医学工程研究。

【通讯作者】杨婷(1986-), 女, 博士, 从事路径规划算法、平台设计与搭建研究。

显示,该系统轻便易携,适用于步态分析和康复计划制定。兰悦等^[6]设计了足底压力信号采集分析与评定系统,用于评估下肢关节疾病康复。系统包含数据采集和接收处理模块,结果可在移动端和电脑端显示,结果显示该系统有一定的可靠性和稳定性。

王梦等^[7]设计了基于PIC18F4550的多通道压力传感器平台,实时采集和显示数据,系统稳定性良好,误差在1%以内。程翔等^[8]研究介绍了可穿戴式足底压力监测系统(WFPMS)的常见类型及其在医疗健康、生物力学和日常监测中的应用,讨论了其发展方向和局限性,并提出了结合可穿戴技术与人工智能的应用展望。

然而,尽管现有的技术已经取得了显著的进展,但在足底压力测量数据接收部分的设计和实现方面,仍存在一些挑战。例如,对于测量系统的实时数据的接收准确性、系统易用性以及成本效益性的需求,都促使研究者和工程师不断寻求更优化的解决方案。为此本文研究了基于FPAA混合控制下的,多方位力反馈数据采集系统,旨在更准确地采集足底压力数据。

2 系统设计

2.1 FPAA 介绍

可编程模拟门阵列(Field Programmable Analog Array, FPAA),是一种可编程模拟电路。在电路中使用FPAA的主要优势是,可以简化模拟阵列的设计过程,缩短模拟电路的调试时间。FPAA的设计,使得模拟控制系统的构建更加快速和高效,在规避漏采率的同时,提供了更加灵活的选择。另一方面,FPAA还可以结合数字控制部分,提高系统的对于复杂算法的需求,从而提高系统的透明性^[9]。

2.2 基于FPAA力反馈足底采集设备的设计思路

力反馈技术是一种先进的触觉交互技术,它允许用户通过触觉接触,直接感受到虚拟或远程环境中的物理互动。将FPAA和足底压力数据采集器结合,可以构建出一个高度灵活的监测系统,尤其适用于个性化医疗和运动科学的领域。

2.2.1 设计思路

①传感器的集成。

足底压力数据采集器通常包含多个压力传感器,这些传感器可以被放置在鞋垫,或者专门的穿戴设备中,也可以直接接触皮肤,可以用来实时测量足部不同区域的压力变化数值。

②信号处理。

FPAA可以通过模块化设计,实现各种模拟信号的处理。例如放大、滤波和信号转换,以优化压力信号的质量和可读性。同时,FPAA没有离散采样过程,消除了漏采率带来的信号丢失,从而提高数据的准确性和可靠性。

③数据转换与传输。

在处理模拟信号后,FPAA可以与数字处理单元进行配合,将模拟信号转换为数字信号,以便进一步的分析和远程传输。

④实时反馈。

结合FPAA的快速处理能力,系统可以提供实时反馈。例如在运动训练或康复治疗中,系统可以及时调整负载或警告用户改变行走或跑步的姿势。设计流程图如图1所示。

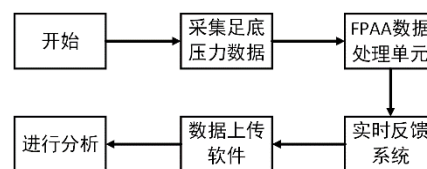


图1 设计流程图

2.2.2 系统优势

①可定制性。

通过FPAA,我们可以根据不同用户群体的要求,个性化定制处理流程,无需更换硬件。

②节省成本和时间。

与传统的硬件设备相比,FPAA系统可以通过自身软件的更新来改变功能,大大减少了设计的时间和成本。

③适应性。

FPAA系统可以通过简单的软件实时更新设计,从而根据不同用户的反馈,实现个性化需求,以此来优化或增加功能。

综上所述,使用FPAA的足底压力采集系统,不仅可以提高数据采集的性能和灵活性,还可以推动个性化医疗和运动科学的发展,为用户提供更加精确和实用的健康监测数据。这种集成系统在疾病预防、康复治疗甚至定制化踝足矫形器的应用上都有着广泛的前景。

3 基于力反馈的数据采集系统

3.1 实验设计

本实验的主要实验器材包括薄膜压力传感器(5个),薄膜压力传感器控制器,薄膜压力传感器,FPAA,Rauch平滑滤波器,由USB线与电脑相连,FSR控制器测试软件v3.0。薄膜压力传感器量程为3~50kg。直径30mm传感器5个。

表1 青年学生基本情况

指标	踝足正常	踝足不正常
身高(m)	1.71 ± 7.11	1.72 ± 6.98
体重(kg)	60.25 ± 8.34	60.45 ± 6.77
年龄(years)	20.03 ± 1.37	20.23 ± 1.45
鞋码(EU)	39.98 ± 2.56	37.99 ± 3.93

本实验应用足底压力测试分析系统测试足底压力,将踝足正常者作为对照组,踝足疾病者作为实验组,通过动态模拟方式,测得两组学生的步态数据。

各个传感器位置:一号传感器位于第一跖骨,二号传

传感器位于第五跖骨，三号传感器位于足中部，四号传感器位于足跟内侧，五号传感器位于足跟外侧。各传感器均有效固定。

实验中各个测试者均脱袜进行，行走时目视前方。确保四个传感器与皮肤直接接触。测试者按照正常行走的方式匀速来回测试三次。单次行走1分钟，每次行走间隔30秒。确保实验数据有效。测试过程中观察软件分析出的时间-压力曲线及峰值压力（一个步态周期中压力的最大值）确保数据有效。

3.2 应用 APP 介绍

本文为了实际应用，基于 flutter 开发了一个实际应用 APP。

根据市场调研，APP 用户主要为足底患有疾病，需要康复矫正足内翻的患者。患者穿戴携带本系统的设备行走时，系统会将收集的数据与标准库进行对比，提醒患者步态进行调整。

本踝足矫正数据分析系统，配有一个登录页面，佩戴者可以通过账号密码登录。账号密码通过购买设备时获取。

登录页的前端界面主要通过 Flutter 自带的 TextFiled、TextButton、Image、ListView、Column 等组件实现输入框、按钮、Logo 的显示以及页面的布局。通过 controller 监听输入框的传值变换，最终在点击登录时，将输入框中的值通过接口传递给后端。

登录页面后端，主要通过接口接收前端传递的数据，进行规则校验是否符合账号及密码编辑规则，校验通过在数据库中查询是否存在相关的记录，若存在则返回用户数据，以及用户类型用于页面的转换。

3.3 数据处理

通过对比实时响应，基于力反馈技术，系统可以有效接收到需康复人群的数据。以行走时间1.2秒为一个周期，与对照组数据对比发现明显差异（ $P < 0.05$ ）。

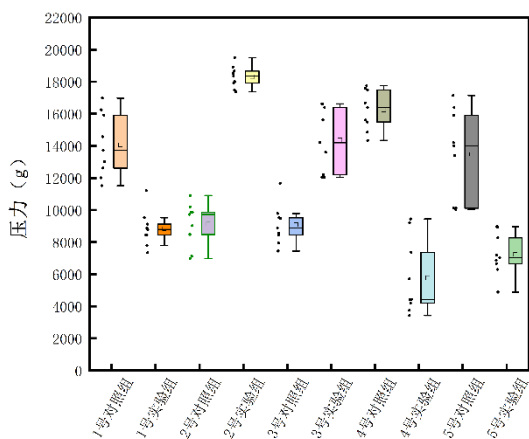


图 2 结果箱线图

一号位传感器的数据显示，对照组的最大峰值出现在

约 0.656 秒，峰值范围在 12000~17000 之间。而实验组根据本装置接收和反馈的数据显示，最大峰值提前至约 0.618 秒，峰值范围上限降低至 11000，下限降低至 7000。这表明实验组在行走时，一号位的峰值压力显著减少，同时与地面的接触时间也略有缩短。

在二号位传感器上，对照组的最大峰值集中在 0.668 秒，峰值范围在 7000~11000。相比之下，实验组的最大峰值提前至 0.636 秒，且峰值范围上升至 17000~20000，显示峰值压力显著增加。然而，与地面的接触时间仍然略有减少。

三号位传感器的数据显示，对照组的最大峰值出现在约 0.634 秒，峰值范围在 8000~12000。实验组的数据则显示，最大峰值出现在接近的 0.638 秒，但峰值范围上升至 12000~17000，表明峰值压力同样显著增加，而与地面的接触时间则大致保持不变。

在四号位传感器处，对照组的最大峰值出现在约 0.604 秒，峰值范围在 14000~18000。实验组的数据则显示，最大峰值提前至 0.583 秒，但峰值范围显著缩小至 4000~9000，说明峰值压力明显减少，与地面的接触时间也相应减少。

最后，五号位传感器的数据显示，对照组的最大峰值出现在约 0.636 秒，峰值范围在 11000~17000。实验组的数据中，最大峰值提前至 0.612 秒，但峰值范围大幅缩小至 5000~9000，表明峰值压力同样显著增加，与地面的接触时间也有所减少。

研究者进一步发现，实验组外侧传感器所受到的力明显高于内侧传感器，总体所受压力相较于正常值偏低。此外，实验组峰值到达的时间普遍略早于对照组，与地面的接触时间也相应减少。这些结果为本文提供了关于行走过程中足部受力分布及时间特征的深入见解。

3.4 显著性检验

显著性差异可以用于描述两组或多组数据之间的差异是否足够大，显著性值 $P > 0.5$ 则表明数值不可信。

在足底压力数据分析中，显著性差异的使用是为了确定不同条件、不同时间点或不同个体之间足底压力分布的差异是否具有统计意义。

p 值计算：

问题：想知道健康人群和非健康人群之间的足底压力是否存在显著性差异。

本文选择的是两个独立的样本（健康人群和非健康人群），选择独立样本 t 检验。

计算公式为：

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}}$$

\bar{x}_1, \bar{x}_2 是两个样本的均值。

n_1, n_2 是两个样本的大小。

s_1^2, s_2^2 是两个样本的方差

表 2 显著性检验结果表

	组别	个案数	平均值	标准 偏差	t	p	显著性
一号位	对照组	9	14061.11	1965.80	6.948	0	√
	实验组	9	8831.77	1110.63			
二号位	对照组	9	9125.11	1359.39	-18.142	0	√
	实验组	9	18254.44	656.47			
三号位	对照组	9	9077.11	1236.98	-6.757	0	√
	实验组	9	14368.78	1997.28			
四号位	对照组	9	16238.67	1243.44	11.892	0	√
	实验组	9	5769.33	2330.06			
五号位	对照组	9	13478.00	2807.65	6.044	0	√
	实验组	9	7229.22	1317.59			

4 总结

偏瘫患者由于足底肌力不平衡，易出现足内翻在内的多种异常步态。本文基于 FPAA 混合控制技术和力反馈技术，建立了数据采集系统。该系统可以通过降低漏采率，提高数据采集的性能和灵活性，降低收集成本，为用户提供更加理想的体验感。同时，该系统提供足底多方位的数据传输点，将数据传入定制的 APP。自设计的应用 APP 将偏瘫患者的足底行走数据，与正常人群足底数据库对比，进行差异分析 ($P < 0.05$)，为 APP 使用者提供个性化的步态调整建议。本文实验证明，患者在使用本系统后，可以有效识别出患病人员的膝过伸现象（改善前五个点位的峰值时间分别为 0.6563s, 0.6685s, 0.6338s, 0.6036s, 0.6364s, 改善后分别为 0.6180s, 0.6362s, 0.6386s, 0.5833s, 0.6122s），实验表明，当面向正常人群时，足底压力更加均匀、合理（一号位提高 59.2%，二号位降低 50.1%，三号位降低 36.8%，四号位提高 181.6%，五号位提高 86.4%）。综上所述，该系统可以通过检测膝过伸现象和足底压力分布，判断偏瘫患者的行走状态，从而有利于下一步对应正常人群，制定纠正和康复方案，更有助于他们逐步恢复正常的步态功能。本文所介绍的数据采集系统和配套 APP，有助于为偏瘫患者提供基于力反馈数据的步态康复方案。它们不仅能够精准地分析患

者的步态问题，还能够提供个性化的调整建议，帮助患者逐步恢复正常的足部运动能力。

参考文献

- [1] 祝光志. 基于足底压力检测装置的数据分析系统设计[D].四川: 电子科技大学,2014. DOI:10.7666/d.D499836.
- [2] Xu, C., Wen, XX., Huang, LY. et al. Normal foot loading parameters and repeatability of the Footscan® platform system. *J Foot Ankle Res* 10, 30 (2017).
- [3] 李宏恩,秦明源,刘俞奇,等.大学生足底压力分布差异影响因素分析[J].中国皮革,2024,53(04):62-67. <https://www.tekscan.com/applications/foot-pressure-measurement>.
- [4] 孟青云,许鑫,刘观鑫,等.基于Arduino的足底压力采集系统设计[J].现代仪器与医疗,2023,29(03):6-11+30.
- [5] 兰悦,殷悦,陈谦宇,等.足底压力信号采集分析系统设计[J].生物医学工程学进展,2022,43(01):7-11.
- [6] 王梦,葛斌,徐明哲,等.基于单片机的多通道足底压力采集系统设计[J].电子科技,2017,30(09):30-33.
- [7] 程翔,郭瑞,伍晓明,等.可穿戴式足底压力监测系统的应用及进展[J].机器人外科学杂志(中英文),2024,5(02):143-147.
- [8] 杨婷. 双边遥操作微创手术系统中FPAA混合控制系统的研究[D].哈尔滨工业大学,2018.