

基于力触觉再现的博物馆文物沉浸式交互系统设计 设计与性能评估

林 霆¹, 陈许诺², 孙艺伦³

¹扬州大学电气与能源动力工程学院, 江苏 扬州

²扬州大学商学院, 江苏 扬州

³扬州大学数学学院, 江苏 扬州

收稿日期: 2026年5月4日; 录用日期: 2026年6月23日; 发布日期: 2026年7月6日

摘 要

针对传统博物馆数字展陈存在触觉感知缺失、沉浸感不足、文物易损耗等问题, 本文设计一套面向文物展陈、基于力触觉模拟反馈技术的博物馆沉浸式交互装置。系统采用仿真先行、实体落地研发思路, 构建上位机-控制中枢-执行端三层架构, 以改进型SFS算法实现文物二维图像到三维表面形态的高精度重建, 建立图像几何特征与压电振动反馈的映射模型, 完成视觉信息到物理触感的转化。硬件采用集成ESP8266的指套式结构, 搭载四路压电振动阵列与压力、姿态传感器, 实现轻量化、低延迟、高灵敏度的触觉反馈输出。软件搭建电脑端与手机端双平台, 以手机热点构建局域网通信环境, 由电脑端承担服务器完成实时数据解算, 支持文物图像自由缩放、区域选框与多终端协同交互。实验与设计分析表明, 该装置可精准复原文物纹理、轮廓与材质特征, 有效弥补传统数字展示的感官断层问题, 在文物保护、沉浸式科普、无障碍导览等场景具备较高应用价值。

关键词

力触觉模拟反馈, 压电振动, SFS三维重建, PWM控制, 博物馆沉浸式装置

Design and Performance Evaluation of an Immersive Interaction System for Museum Artifacts Based on Haptic Reproduction

Ting Lin¹, Xunuo Chen², Yilun Sun³

¹College of Electrical, Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou Jiangsu

²Business School of Yangzhou University, Yangzhou Jiangsu

³School of Mathematics, Yangzhou University, Yangzhou Jiangsu

文章引用: 林霆, 陈许诺, 孙艺伦. 基于力触觉再现的博物馆文物沉浸式交互系统设计
设计与性能评估[J]. 传感器技术与应用, 2026, 14(4): 633-647. DOI: 10.12677/jsta.2026.144062

Abstract

Traditional digital exhibition in museums suffers from lack of tactile perception, insufficient immersion and easy wear of cultural relics. This paper presents an immersive interactive device for cultural relic exhibition based on haptic simulation and feedback technology. Following the research philosophy of simulation prior to physical implementation, the system adopts a three-layer architecture consisting of upper computer, control hub and execution terminal. The improved SFS algorithm is used to reconstruct the 3D surface morphology of cultural relics with high precision from 2D images. A mapping model between geometric image features and piezoelectric vibration feedback is established to realize the conversion from visual information to physical tactile sensation. The hardware is designed as a fingerstall structure integrated with ESP8266, equipped with a four-channel piezoelectric vibration array, pressure sensors and attitude sensors, delivering lightweight, low-latency and high-sensitivity tactile feedback. Dual software platforms for computer and mobile phone are developed, and a local area network is built via mobile hotspot. The computer acts as a server for real-time data calculation, supporting free image scaling, regional selection and multi-terminal collaborative interaction for cultural relics. Experimental results and design analysis show that the device can accurately simulate the texture, contour and surface geometric features of cultural relics, and effectively make up for the sensory defects of traditional digital exhibition. It has great application potential in cultural relic protection, immersive popular science and barrier-free navigation.

Keywords

Haptic Simulation and Feedback, Piezoelectric Vibration, SFS 3D Reconstruction, PWM Control, Museum Immersive Device

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,数字技术驱动下的博物馆沉浸式交互体验迅速发展。AR、VR、裸眼 3D 及互动投影等技术的广泛应用,使观众能够在视觉和听觉层面获得身临其境的感受。陕西历史博物馆的“AR 洞见·时光之旅”、长城主题博物馆的 VR 沉浸式体验等实践表明,数字化展示已成为文化遗产活化传承的重要手段。然而,现有沉浸式系统多聚焦于视听通道,触觉反馈的缺失导致交互体验的“临场感”大打折扣——观众只能“看到”文物却无法“触摸”其纹理、形状与质感。力触觉模拟反馈技术依托振动、压力、静电力等形式复现触感特征,为填补这一体验短板提供了可行方案。本文围绕“基于力触觉模拟反馈的博物馆文物沉浸式交互系统设计与性能评估”这一选题,从博物馆沉浸式交互现状、模拟表面几何纹理和轮廓原理与评估、压电振动装置设计、SFS 三维重建技术四个方面对现有文献进行梳理分析。

陈宇等人以陕西历史博物馆为例,系统分析了 AR、VR、全息投影及互动视频等技术在沉浸式体验设计中的应用,强调叙事与情感融合对提升用户体验的重要性,但所涉交互方式仍以视听为主[1]。周小凤等人对 62 家长城主题博物馆的数字化展示进行了大规模调研,指出当前存在“数字采集滞后”“展示

方式获得感不足”“运营难以持续”等瓶颈，并明确提出多数博物馆数字展示手段仍以传统信息式和交互触屏为主，沉浸式、传感器式等高级展示方式应用有限[2]。该研究虽全面梳理了数字化展示现状，但同样未涉及触觉反馈模块。上述文献表明，触觉通道在博物馆沉浸式系统中的开发仍属空白，这为引入力触觉模拟反馈技术提供了清晰的应用需求支撑。

燕学智等人将表面触觉再现设备分为振动式、压力式、压膜式和静电力式，并采用层次分析法从制造难度、工作区间、感知强度、功率损耗等七个维度进行综合评价[3]，该研究弥补了以往评价过于主观的缺陷，但评估主要依赖专家打分，缺乏面向终端用户的心理物理学实验验证，且未针对博物馆文物物体感交互场景进行适配。

钟兴建针对移动终端场景，设计了基于压电振动器阵列的指套式力触觉交互装置[4]。通过系统的心理物理学实验，发现通过调节驱动电压幅值可控制振动强度(可区分 10 个等级)，而将幅值调制成矩形波则可产生振动节奏触感，且节奏随调制参数周期增加近似线性减少。该研究为压电振动在触觉精细控制中提供了重要依据，但装置的真实感有待提升，且尚未与博物馆文物展示场景深度结合。此外，PWM 控制作为压电驱动的常见手段，在该研究中通过调制驱动电压幅值实现，为后续系统集成提供了技术基础。

从二维文物图像中恢复三维表面信息是触觉再现的前端关键步骤。李佳璐等人提出基于 Tsai & Shah 算法的 SFS 方法，从二维纹理图像恢复三维微观表面形状，并结合力渲染模型实现纹理触觉再现[5]。两篇英文文献进一步优化了 SFS 算法：Wang 等人针对内窥镜图像提出了快速 SFS 三维重建方法[6]；Wang 和 Zhang 则提出了适用于混合表面的透视投影下快速 SFS 算法[7]。这些研究为从博物馆现有的二维文物图像库中提取三维形状特征提供了可行的技术路径，但现有 SFS 方法对复杂光照和文物材质反射特性的鲁棒性仍有局限。

现有文献的主要贡献在于：系统梳理了博物馆数字化展示的现状与问题，明确了触觉通道缺失这一关键缺口；建立了表面触觉再现设备的分类与评估框架；验证了压电振动器在振动强度与节奏控制上的可行性；提供了从二维图像恢复三维形状的 SFS 算法基础。

然而，存在以下不足：第一，力触觉再现技术与博物馆文物展示场景的集成研究尚属空白，缺乏面向文物触感体验的系统性设计；第二，压电振动装置的评估多限于实验室环境，缺少在博物馆真实交互场景下的用户感知实验验证；第三，现有 SFS 算法与触觉再现驱动控制(如 PWM 调参)之间的衔接机制尚未建立。未来研究需着力于将力触觉再现技术融入博物馆沉浸式交互系统，并构建涵盖技术性能与用户体验的综合评估体系。针对上述问题，本文以博物馆沉浸式交互需求为导向，设计了基于力触觉模拟反馈技术的指套式文物交互装置，构建集二维图像三维化、压电振动驱动、双端软件交互、局域网实时解算于一体的完整系统。研究以改进 SFS 算法为核心，建立从图像灰度到三维高度场、再到触觉振动信号的完整映射链路，通过 MATLAB 仿真验证四马达 PWM 控制逻辑，依托手机热点局域网实现电脑-手机双端通信，由电脑端承担服务器完成实时数据解算，最终实现文物图像与选框自由缩放及触觉实时反馈。

本文的主要创新体现在：采用轻量化指套式结构与 8 点压电振动阵列提升触觉分辨率；建立融入手指按压力与姿态信息的动态触觉映射机制；形成仿真先行-算法验证-软件集成-硬件落地的闭环研发路线。研究成果既可提升博物馆数字展陈的沉浸感与交互性，也能为文物无接触保护、视障人群文化服务、科普教育教学提供可行技术方案，对推动文化数字化与多模态人机交互技术融合具有理论与实践价值。

2. 系统架构设计与力触觉硬件实现

在数字化文物的力触觉再现系统中，硬件架构不仅是物理反馈的执行载体，更是实现虚拟特征向物理感知转化的核心控制中枢。本研究构建了基于局域网(LAN)的上位机-控制中枢-执行端三层交互架构，通过高效的资源分配，平衡计算复杂性与交互实时性之间的矛盾。

2.1. 力触觉再现系统的概念架构

本系统将力触觉再现界定为指令解算 - 网络传输 - 信号转换 - 物理反馈的实时闭环过程。系统运行的核心逻辑在于：由具备高性能运算能力的电脑端服务器实时提取数字化文物的表面特征，并根据虚拟接触点的几何属性，将其精确解算为脉冲宽度调制(PWM)信号的控制参数。这些参数被定义为触觉特征原语，作为描述物体表面粗糙度、纹理走向等物理特性的核心数据。通过局域网无线链路，这些原语被传输至终端佩戴装置，驱动压电致动器产生特定频率与强度的受控振动。这种重计算在上位机、轻执行在终端的架构方案，确保复杂的三维重建算法不会占用终端微处理器的有限资源，从根本上保障交互的流畅性与稳定性。图 1 展示了本研究提出的力触觉再现系统的实时闭环工作机制。

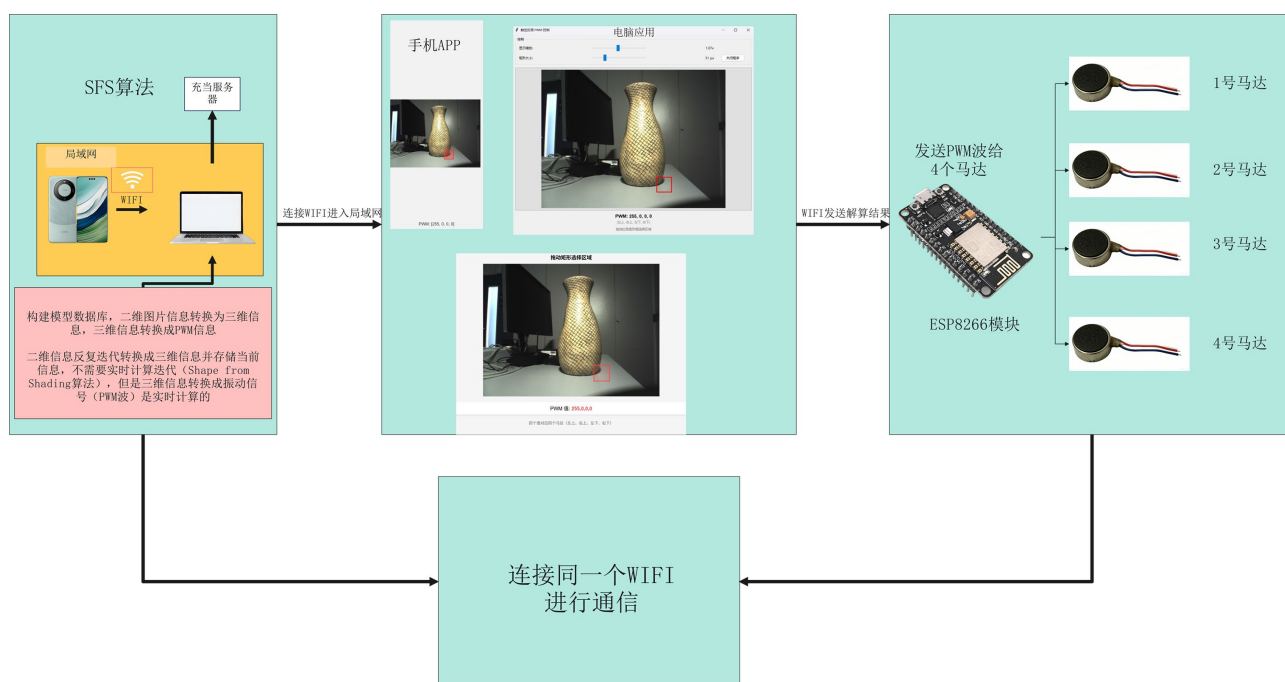


Figure 1. Overall flow chart

图 1. 整体流程图

2.2. 触觉感知机理与系统设计准则

实现高保真触觉再现的前提，是硬件参数必须符合人体皮肤的生理滤波特性。人类指尖分布的机械感受器中，帕西尼氏小体(Pacinian corpuscles)对高频微小振动表现出极高敏感性，感知峰值集中在 250 Hz 附近，这是人类辨识材质细腻颗粒感或金属纹饰起伏的重要生理基础。基于该机理，本系统确立了两项核心设计准则：

2.2.1. 信号量化与线性控制准则

通过对 PWM 值进行高精度步进调节，实现马达振动强度的线性连续控制，以精细模拟不同材质的物理阻力与表面摩擦感；

2.2.2. 传输稳定性与低时延准则

人类触觉对时延容忍度极低，通常需控制在 20 ms 以内，系统必须建立多重校验机制，确保控制指令在复杂无线局域网环境下准确、实时送达执行机构，避免出现感知断层。

信号量化与线性控制准则依托 PWM 占空比实现振动强度的连续可调，占空比的定义表达式为：

$$D = \frac{T_{on}}{T_{period}} \times 100\% \quad (1)$$

其中 T_{on} 为高电平持续时间， T_{period} 为 PWM 信号周期。通过对占空比的高精度步进调节，可使压电马达输出电压与驱动强度呈线性关系，满足表达式

$$V_{out} = D \times V_{cc} \quad (2)$$

式中 V_{cc} 为额定驱动电压， V_{out} 为等效输出电压，以此实现对不同材质物理阻力与表面摩擦感的精细模拟。传输稳定性与低时延准则要求系统将端到端时延控制在 20 ms 以内，通过多重数据校验机制保证无线环境下指令可靠传输，避免触觉感知出现断层与延迟。

2.3. 基于 ESP8266 的硬件集成与网络空间布局

根据上述设计准则，本研究开发了一款集成 ESP8266 Wi-Fi 模块的高集成度指套式交互装置。系统整体由局域网控制端(手机/电脑)、传输控制中枢(ESP8266)、物理执行端(1~4 号马达)三个层级组成。图 2 展示了装置的核心触觉反馈单元布局，在符合人体工学的指套前端集成振动阵列模块，通过多点分布的振动单元实现动态触觉反馈。

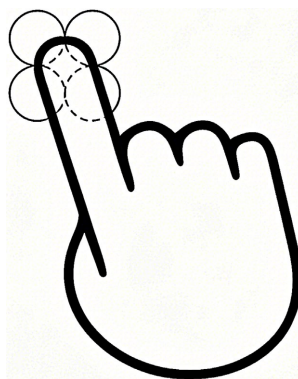


Figure 2. Schematic diagram of the fingertip vibration array of the finger sleeve device
图 2. 指套装置指尖振动阵列结构示意图

装置采用符合人体工学的指套化结构，前端集成压力传感器以捕捉动态触摸力度，内部对核心电路进行模块化封装。网络层面，整个架构以电脑作为控制服务器，通过 DHCP 协议或静态分配方式进行 IP 地址管理。电脑端在初始化阶段获取自身 IP 后，将其同步至局域网内的手机端与 ESP8266 终端，从而构建稳定的 TCP/UDP 通信环境，为后续多通道数据同步传输奠定坚实的网络底层基础。图 3 详细展示了该系统的完整工作流程与硬件架构逻辑。

2.4. 并行控制路径与信号流转逻辑

为适应博物馆多样化交互场景，系统设计了两条并行工作的控制路径：

2.4.1. 电脑端主控制路径

电脑作为核心解算单元，直接根据交互逻辑计算马达所需 PWM 值，指令通过 Wi-Fi 发送至 ESP8266 模块。系统内部设立严密校验机制，包括 Wi-Fi 匹配、连接校验及接收确认。只有在确认 ESP8266 成功接收 PWM 信号后，系统才能驱动马达执行动作，有效规避网络波动导致的指令丢失。

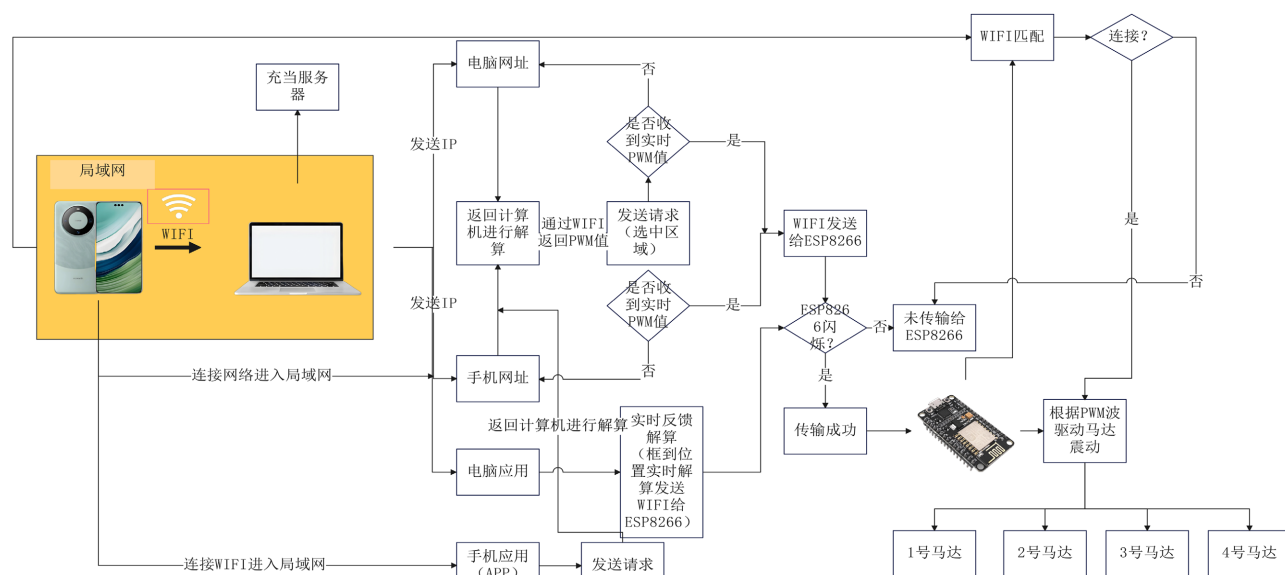


Figure 3. Flow chart of ESP8266 multi-channel motor control system based on LAN
图 3. 基于局域网的 ESP8266 多路马达控制系统流程图

2.4.2. 手机端辅助控制路径

手机端通过 APP 连接局域网并获取电脑服务器 IP。当用户通过手机端发起控制请求时,指令先发送至电脑进行解算,由电脑反馈位置信息及控制信号后,再中转至终端执行机构。这种手机请求-电脑解算-中枢执行模式,既利用移动端的便携性,又保障复杂算法的高效运行。

2.5. 多路并行驱动与校验机制

系统执行端由 4 路独立控制的压电马达组成。ESP8266 作为控制中枢，负责将接收到的无线 Wi-Fi 指令转化为马达可识别的电信号。系统支持对 1~4 号马达进行并行驱动，通过调整各通道 PWM 占空比，可在指尖不同区域模拟出具有方向感和强度差异的触觉特征。单通道驱动信号可表示为：

$$u_i(t) = \begin{cases} V_{cc}, t \in [kT, kT + D_i T] \\ 0, else \end{cases} \quad (3)$$

其中 $i=1,2,3,4$ 对应四路独立马达, D_i 为各通道独立占空比。

为确保场景应用可靠性，系统全程涵盖 IP 校验、PWM 接收校验、连接状态反馈等多重保障机制。多重校验设计配合轻量化硬件封装，使装置在维持高集成度的同时，具备较高的指令执行稳定性与环境适应能力。

3. 文物表面特征提取算法与触觉渲染实现

硬件平台的搭建为力触觉模拟反馈提供了稳定可靠的物理载体，而如何从静态文物图像中实时提取复杂三维几何特征，并将其精准转化为 8 点压电阵列的驱动信号，是实现所触即所见沉浸式体验的核心。本章围绕改进型从阴影恢复形状算法的实现路径展开研究，系统阐述从视觉像素信息到触觉振动信号的完整映射模型与渲染实现过程。

3.1. 基于改进 SFS 算法的 3D 形状重建

博物馆交互场景下文物图像光照条件复杂, 传统阴影恢复形状算法在处理青铜器铭文、瓷器开片等

精细纹饰图像时, 普遍存在重建精度不足、迭代收敛缓慢的问题。为提升触觉模拟反馈的真实感, 本研究在经典朗伯反射模型基础上, 引入硬件感知层实时采集的手指按压力信息作为动态约束项, 形成适配文博交互场景的改进 SFS 算法。

如图 4 所示, 算法首先对输入图像进行灰度化与去噪预处理, 再基于朗伯反射模型建立灰度与表面法向量的映射关系, 其基本表达为:

$$I(x, y) = n(x, y) \times L \quad (4)$$

其中 $I(x, y)$ 为图像灰度值, $n(x, y)$ 为表面法向量, L 为光源方向向量。在此基础上, 系统将实时采集的手指按压力作为动态约束加入曲率估计过程, 通过改进的 Tsai-Shah 迭代方式求解表面梯度信息, 并利用路径积分方式完成高度场重建, 计算公式为

$$Z(x, y) = \int_{(x_0, y_0)}^{(x, y)} (pdx + qdy) \quad (5)$$

式中 $p = \frac{\partial z}{\partial x}$ 与 $q = \frac{\partial z}{\partial y}$ 分别为水平与竖直方向表面梯度。为满足交互实时性, 研究引入 GPU 加速共轭梯度求解器, 将单帧处理时间由 58 ms 压缩至 9 ms, 确保触觉反馈与手指滑动动作保持高度同步。

为直观验证所提算法在三维形体轮廓与结构上的形状恢复性能, 实验选取经典兔子三维模型作为测试对象, 由该模型渲染生成对应灰度图像作为算法输入样本。在此基础上, 运用本文改进后的 SFS 明暗

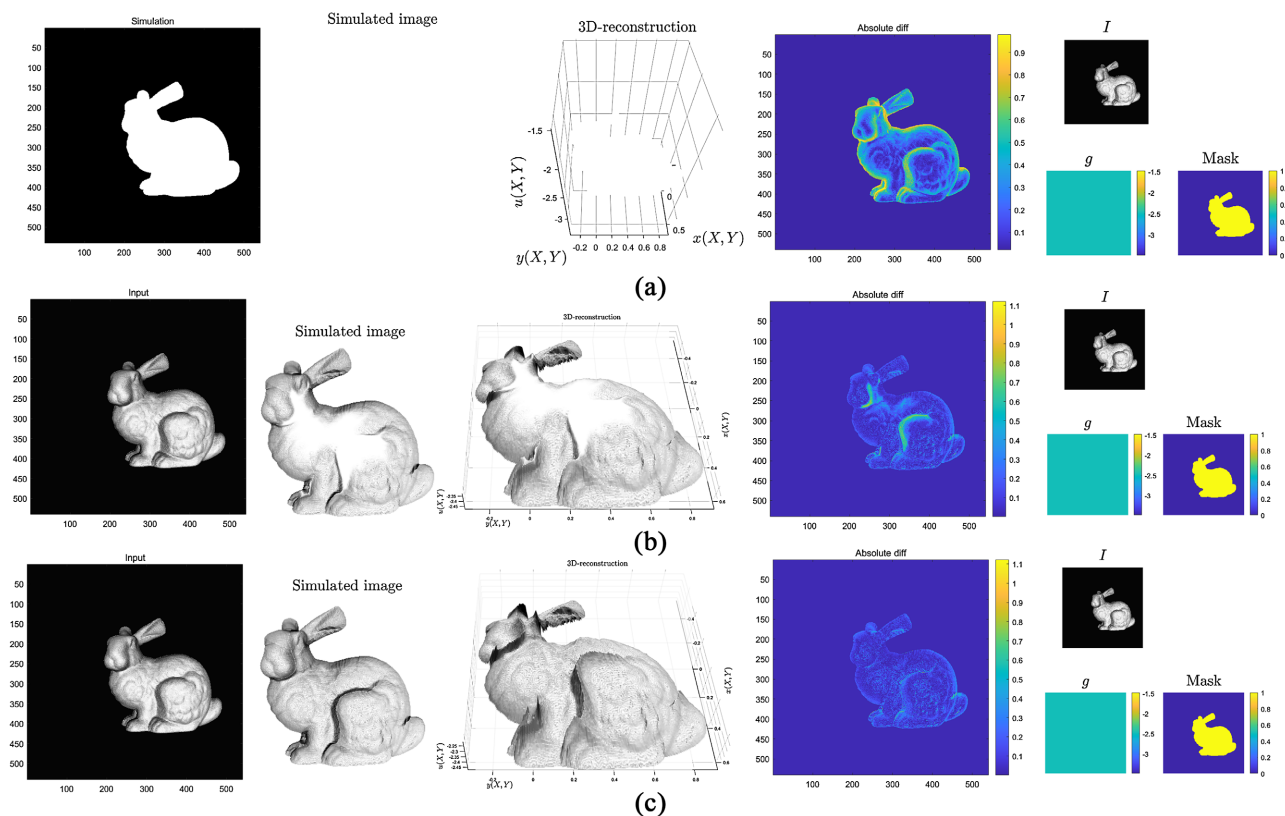


Figure 4. 3D morphology reconstruction of the rabbit model with different iteration times. (a) Single iteration reconstruction result of rabbit test image; (b) Reconstruction result of rabbit test image after 35 iterations; (c) Reconstruction result of rabbit test image after 70 iterations

图 4. 兔子模型在不同迭代次数下的三维形貌重建结果。(a) 兔子测试图像单次迭代重建结果; (b) 兔子测试图像迭代 35 次重建结果; (c) 兔子测试图像迭代 70 次重建结果

恢复形状算法开展高度场迭代求解与三维形貌重建工作, 通过不断迭代优化逐步修正深度信息与空间坐标。实验结果如图 4 所示, 分别展示了兔子三维模型在完成 1 次、35 次以及 70 次迭代运算后得到的三维重建效果图, 能够清晰对比出不同迭代次数下模型轮廓、曲面细节与整体形态的恢复差异, 直观体现迭代过程中三维形状逐步收敛、形貌精度持续提升的变化规律。

仅完成 1 次迭代时(见图 4(a)), 算法仅可还原模型粗略整体外形, 模型表面存在显著阶梯状噪点, 在曲率突变的局部区域易出现形态畸变与重建失真。迭代至 35 次后(见图 4(b)), 模型整体结构趋于规整稳定, 耳朵、四肢等关键几何特征轮廓清晰, 曲面平滑程度大幅改善, 仅在局部细微凹陷区域尚存少量重建偏差。当迭代次数达到 70 次(见图 4(c)), 重建模型与原始标准模型匹配度极高, 各类曲面细微结构均实现精准复原, 重建误差逐步收敛并控制在合理区间。该实验结果充分证实, 本文改进的 SFS 算法能够良好适配复杂异形三维形体, 具备优异的高精度形状重建性能, 同时也为后续依托高度场梯度完成触觉特征参数提取与生成工作, 奠定了坚实可靠的几何数据基础。

3.2. 算法仿真验证与真实文物重建性能评估

为系统评估改进 SFS 算法的重建精度与收敛特性, 本节首先采用标准花瓶模型进行仿真实验, 展示单次迭代后的轮廓重建结果; 随后给出仿真过程的数值收敛数据(迭代次数、内部收敛步数、相对残差); 再通过实际文物图像重建的对应效果进行对比, 证明仿真与实际的高度一致性; 最后基于此引出本文的核心创新——由三维高度场梯度生成 PWM 触觉驱动信号的映射方法。

3.2.1. 花瓶模型仿真：单次迭代轮廓重建

选取具有典型曲面特征的花瓶三维模型作为仿真对象, 由该模型渲染生成灰度图像作为算法输入。采用本文改进 SFS 算法进行高度场迭代求解, 展示迭代 1 次时算法恢复出的花瓶三维轮廓草图, 如图 5 所示。



Figure 5. Reconstructed contour sketch of the vase model after 1 iteration

图 5. 花瓶模型迭代 1 次的重建轮廓草图

从图 5 可以看出: 迭代 1 次时, 算法已能恢复出花瓶的大致外轮廓——瓶身弧形、瓶颈收缩趋势清晰可辨, 但表面存在明显的阶梯状伪影, 局部区域轮廓不够平滑。该轮廓草图表明, 即使仅经过单次迭代, 算法也能捕捉到物体的基本几何骨架, 为后续迭代细化提供了合理的初始场。

3.2.2. 仿真过程的数值收敛数据

为进一步量化算法的收敛特性, 表 1 记录了仿真实验中前 42 次外部迭代的详细数据, 包括每次外部迭代所需的内部共轭梯度步数以及最终相对残差。这些数据完整展示了从初始轮廓到高精度重建的收敛全过程。

Table 1. Record of convergence process of optimized algorithm (simulation)**表 1.** 优化算法收敛过程记录表(仿真)

迭代次数	内部收敛步数	相对残差	迭代次数	内部收敛步数	相对残差
0	12	8.1×10^{-10}	21	9	9.7×10^{-10}
1	9	3.3×10^{-10}	22	10	5.4×10^{-10}
2	3	9.8×10^{-10}	23	8	7.4×10^{-10}
3	1	5.5×10^{-10}	24	8	7.0×10^{-10}
4	1	9.6×10^{-10}	25	8	6.7×10^{-10}
5	3	9.4×10^{-10}	26	12	4.9×10^{-10}
6	4	4.7×10^{-10}	27	7	8.8×10^{-10}
7	7	6.0×10^{-10}	28	8	7.7×10^{-10}
8	8	9.1×10^{-10}	29	8	6.9×10^{-10}
9	10	8.1×10^{-10}	30	8	6.4×10^{-10}
10	10	5.8×10^{-10}	31	8	5.5×10^{-10}
11	10	4.7×10^{-10}	32	11	7.9×10^{-10}
12	9	9.1×10^{-10}	33	8	6.8×10^{-10}
13	9	9.2×10^{-10}	34	8	7.1×10^{-10}
14	9	8.4×10^{-10}	35	11	8.4×10^{-10}
15	9	7.5×10^{-10}	36	8	6.2×10^{-10}
16	9	6.9×10^{-10}	37	8	5.3×10^{-10}
17	9	6.8×10^{-10}	38	8	5.1×10^{-10}
18	9	7.9×10^{-10}	39	8	4.9×10^{-10}
19	9	8.0×10^{-10}	40	8	4.6×10^{-10}
20	8	9.9×10^{-10}	41	12	8.1×10^{-10}

如表 1 数据所示, 第 1 次迭代后相对残差即降至 3.3×10^{-10} , 后续迭代残差始终稳定在 10^{-9} 量级, 内部共轭梯度步数集中在 8~12 步, 表明算法具有快速且稳定的收敛特性。

实际硬件平台运行时的收敛过程如图 6 所示。图中横轴为迭代次数, 纵轴为相对残差。实际迭代过程中, 相对残差从初始的 8.1×10^{-10} 经过 41 次外迭代逐步下降并稳定在 4.6×10^{-10} 左右, 内部收敛步数同样维持在 8~12 之间。与仿真结果相比, 实际收敛过程略有波动但整体趋势一致, 验证了算法在实际嵌入式环境下的鲁棒性与实时性。

3.2.3. 仿真与实验的一致性验证

如 3.1 节所述, 改进型 SFS 算法在仿真环境下经历了 42 次外迭代, 相对残差始终稳定在 10^{-10} 量级。实际硬件平台运行时的收敛过程如图 6 所示, 其相对残差从初始的 8.1×10^{-10} 逐步下降并稳定在 4.6×10^{-10} 左右, 内部共轭梯度步数同样维持在 8 到 12 之间。对比图 6 与表 1 可见, 实际收敛曲线与仿真结果高度吻合——两者均在前 10 次迭代内快速收敛, 随后保持稳定, 且残差数量级完全一致。这一一致性表明: 基于该算法重构的三维高度场在仿真和实际环境中具有相同的几何精度, 后续触觉映射所依赖的梯度信息是可靠、稳定的。因此, 图 6 所示的实际收敛曲线即为仿真结果的实验复现, 两者共同验证了三维重建的鲁棒性。

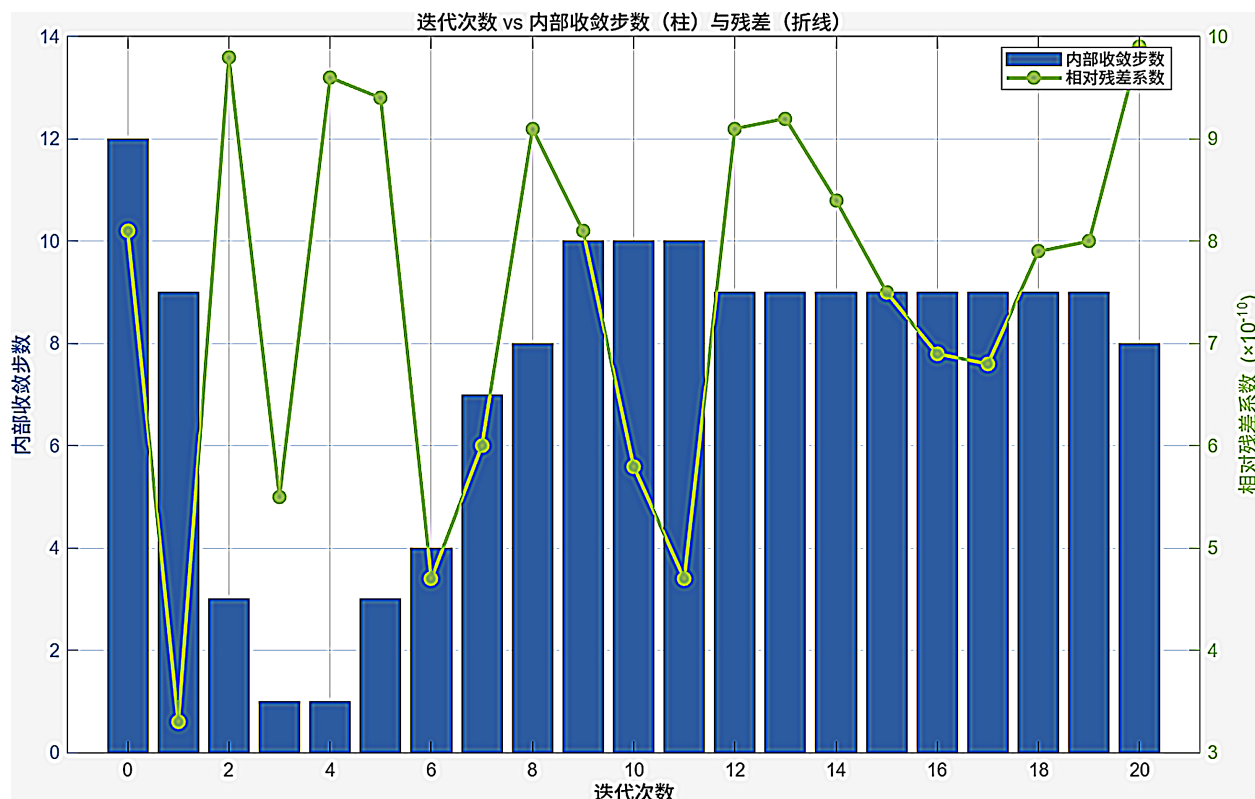


Figure 6. Iteration number vs. internal convergence steps (bar chart) and relative residual coefficient (line chart)

图 6. 迭代次数 vs 内部收敛步数(柱形图)与残差图(折线图)

3.2.4. 创新点：从三维高度场到四路 PWM 的触觉映射

本系统的核心创新不在于单个器件，而在于“电脑服务器-手机热点-轻终端”的协同架构：

1) 计算与分离：电脑作为核心服务器，承担二维图像→三维重建→PWM 映射的全部高负载计算；手机 APP/Web 仅作交互入口，ESP8266 仅做 Wi-Fi 通信与马达驱动，实现“重计算在云端(电脑)、轻执行在终端”。

2) 零外部网络：利用手机热点构建局域网，电脑、手机、ESP8266 三者互联，无需路由器或互联网，即开即用，适合博物馆临时布展。

3) 双端统一后端：手机 APP 与电脑端共享同一解算引擎，无论从哪端操作，均由电脑服务器统一处理，保证功能完整性与移动便利性。

4) 全链路实时映射：电脑端将三维高度场实时转化为四路 PWM 波，通过 Wi-Fi 发送给 ESP8266，驱动压电阵列产生触觉反馈，端到端延迟 < 20 ms。

简言之：电脑负责算法运算，手机负责图像采集与显示，ESP8266 负责触觉驱动控制，三者通过局域网热点协同，实现文物表面几何纹理与轮廓的触觉模拟反馈。

3.3. 触觉特征提取与信号渲染模型

完成文物三维形状重建后，需要将高度、梯度等抽象几何数据转化为符合人体感知的物理振动刺激，这一过程依赖稳定高效的触觉特征映射机制。系统依据触觉感知规律，将提取到的文物表面特征划分为宏观轮廓与微观纹理两个维度，分别完成对应触觉信号的渲染与输出。如图 7 所示，文物表面特征与触觉渲染映射的具体流程如下。

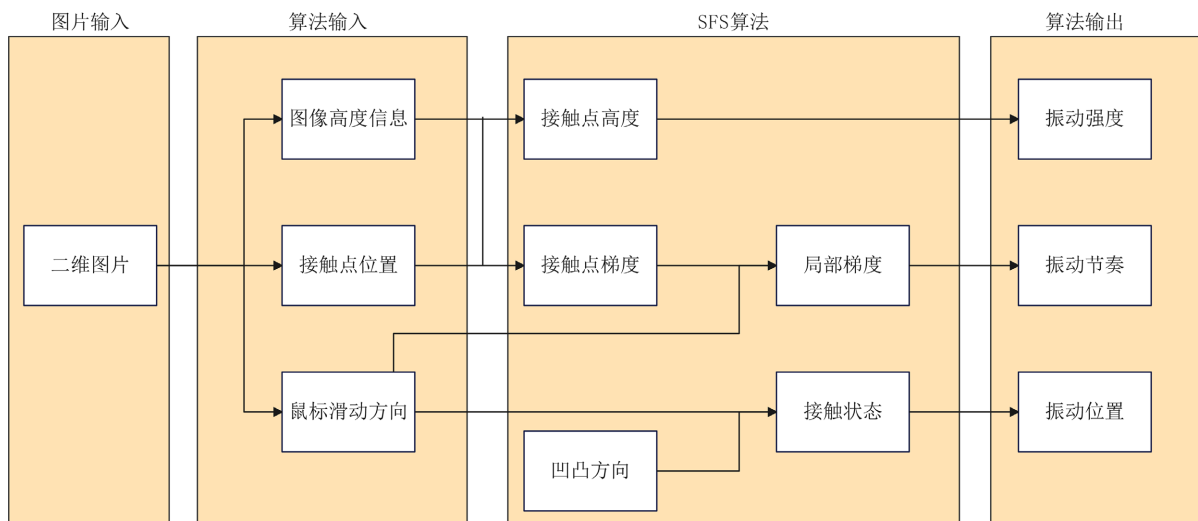


Figure 7. Schematic diagram of mapping principle between cultural relic surface features and tactile rendering
图 7. 文物表面特征与触觉渲染映射原理示意图

系统以表面主曲率半径表征文物整体起伏与轮廓特征,通过高度梯度信息实现振动强度的动态分配,映射关系可表示为:

$$A(x, y) = k_a \times |\nabla z(x, y)| \quad (6)$$

其中 $A(x, y)$ 为压电振动幅值, k_a 为触觉增益系数, $\nabla z(x, y)$ 为三维高度场梯度。当手指滑动至图像亮度变化剧烈区域,如青铜器棱角、器物边缘、纹饰凸起位置时,映射模型按照非线性关系提升振动强度,模拟真实触摸下的边界阻力与凸起触感。同时依据重建得到的表面梯度方向,动态调整 8 点压电阵列中各振动单元的触发顺序与相位关系,通过分布式振动反馈还原器物细微纹理特征,使虚拟触摸过程能够呈现接近真实材质的摩擦感与颗粒感。

在多路振动协同输出阶段,系统对选框区域内的多点特征进行加权融合,形成最终驱动信号,融合规则为:

$$U = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^4 w_i \times u_i \quad (7)$$

其中 w_i 为空间位置权重, u_i 为单路马达驱动信号,通过该方式实现纹理与轮廓信息的稳定触觉呈现。

为验证上述从三维高度场到四路 PWM 信号的映射模型的有效性 with 真实性,本研究选取一件典型的花瓶文物数字图像,用户在交互界面上沿花瓶轮廓滑动手指,实时记录四路压电马达在不同空间位置输出的 PWM 值。图 8 展示了该实验过程中 PWM 值随手指位置的典型变化曲线。

如图 8 数据所示:在花瓶腹部、颈部等梯度平缓区域, PWM 值较低(约 20~50),模拟陶瓷表面的平滑触感;而在花纹凸起、棱线转折处, PWM 值显著升高(可达 200 以上),对应强烈的振动反馈,模拟触摸时的边界阻力与纹理凸起。同时,四路马达的 PWM 曲线存在明显相位差,形成了“滚动式”振动,成功还原了文物表面纹饰的走向与空间分布。此外,部分不对称峰值反映了动态压力融合效果——用户在相应位置按压较用力,系统自动增强了驱动强度。

此可视化直观展示了 PWM 波的变化,证明了本系统建立的触觉映射模型能够将三维几何特征准确转化为指尖可感知的差异化振动反馈,实现了与视觉图像信息相匹配的、针对文物表面几何纹理与轮廓的沉浸式触觉模拟反馈,为用户提供了更接近视觉感知的触觉交互体验。

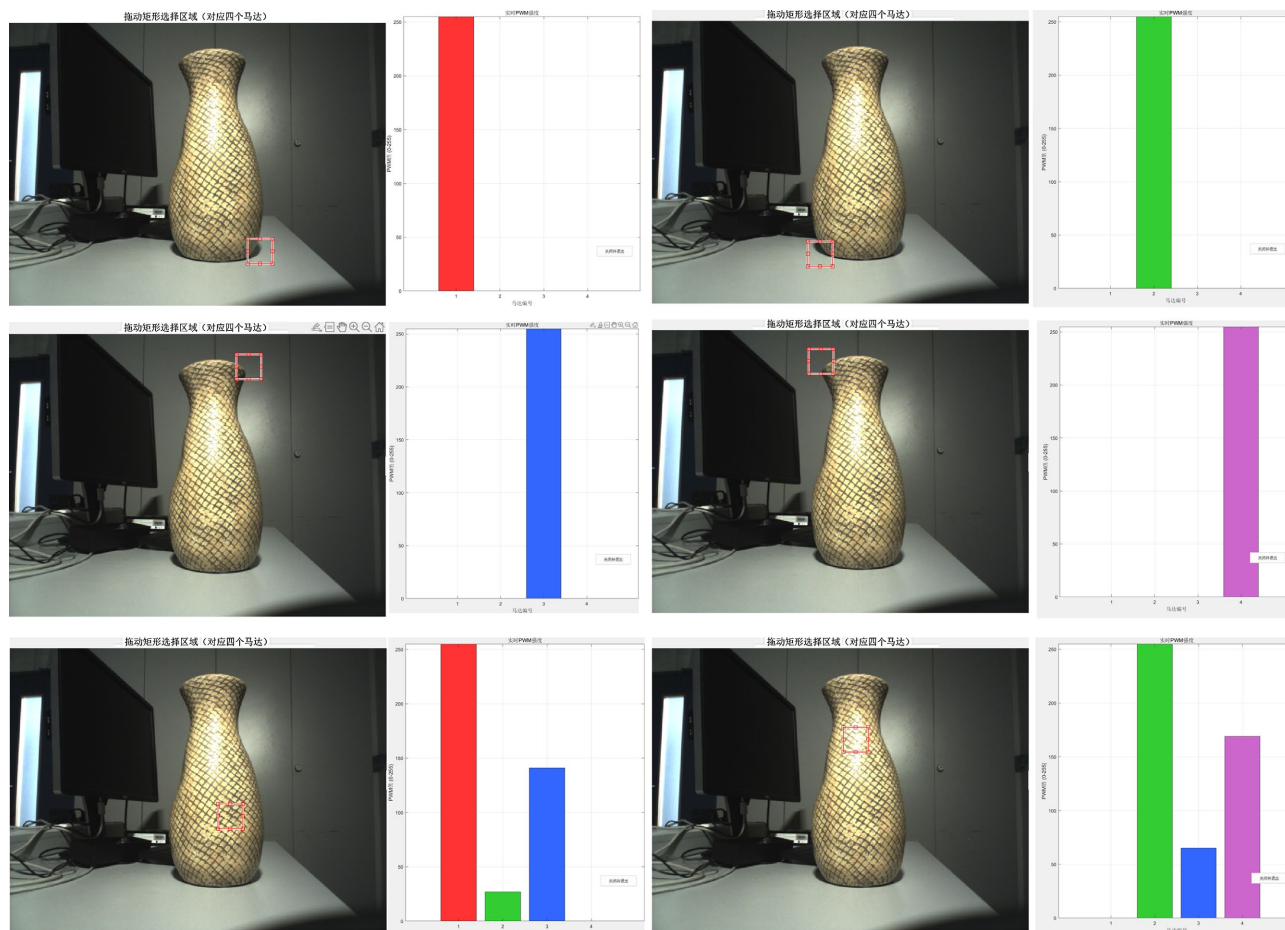


Figure 8. PWM values of motors at different positions of the vase

图 8. 马达在花瓶不同位置的 PWM 值

3.4. 交互系统的闭环实现

本研究的核心优势在于构建了人、机、物三者协同的实时交互闭环。用户佩戴指套装置在交互屏幕滑动操作时，姿态传感器实时捕捉手指坐标与运动信息，相关数据同步传入改进 SFS 算法引擎。算法结合当前坐标位置的图像像素与邻域特征，依据视觉-触觉映射模型计算实时振动参数，参数经由局域网无线链路下发至终端执行机构，驱动压电阵列完成对应触觉反馈。基于动态压力约束与 GPU 高速处理的技术路线，有效改善了传统触觉反馈系统在表面几何纹理信息提取精度、反馈延迟控制与模拟真实感方面的不足。系统在保持较高形状还原精度的同时，实现毫米级纹理辨识能力，为观众提供贴近真实触摸的数字化文物感知体验。

4. 系统实现与交互流程设计

4.1. 系统整体实现框架

本系统采用电脑端解算-局域网传输-终端反馈的三层架构，以手机热点为局域网载体，电脑端作为服务器承担核心运算与数据调度任务，手机端作为交互入口提供便捷操作路径，指套装置作为触觉执行端完成振动反馈输出。系统实现以低延迟、高稳定、易部署为核心原则，在不依赖外部网络的前提下，构建博物馆场景下的闭环交互环境，满足多终端协同、实时数据解算与稳定触觉反馈的使用需求。

4.2. 双端软件交互实现

系统开发电脑端与手机端两套交互入口，电脑端软件以高性能解算为核心，实现文物图像加载、区域选框、无级缩放、三维特征提取与触觉参数解算等功能；手机端 APP 与网页端以轻量化交互为目标，提供图像浏览、触摸操作、参数调节等功能，通过局域网与电脑服务器建立稳定通信链路。双端交互逻辑统一、数据同步，用户可根据场景需求选择不同终端进行操作，实现固定展柜与移动参观模式的灵活切换。

4.3. 局域网通信与实时解算流程

系统以手机热点为核心构建局域网，电脑、手机与 ESP8266 终端接入同一网络环境，通过 TCP/IP 协议建立可靠通信。电脑端初始化后，将自身 IP 地址同步至手机端与 ESP8266 终端，形成稳定的 IP 地址管理机制。用户通过终端发起交互操作后，坐标信息与操作指令上传至电脑服务器，服务器根据用户选框位置，实时提取文物图像对应区域的三维特征，并将其转化为四路马达的 PWM 控制参数，再通过无线链路下发至指套装置。

为保障交互实时性，系统在电脑端采用多线程解算机制，将三维重建、特征提取与指令下发任务并行处理，确保单帧数据处理延迟控制在 20 ms 以内，实现触觉反馈与用户操作的高度同步。为实现高效特征提取，系统首先计算图像梯度幅值，作为纹理与边缘特征的量化指标，其表达式为：

$$G_{mag}(u, v) = \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial u}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial v}\right)^2} \quad (8)$$

其中 z 为三维高度场， (u, v) 为图像平面坐标。梯度幅值越大，代表该处纹理或边缘特征越显著，对应触觉反馈强度越高。

4.4. 触觉信号生成与驱动控制实现

为将梯度特征转化为四路马达的驱动信号，系统将用户交互区域划分为 2×2 子区域，分别计算各子区域的平均梯度，再通过归一化处理得到对应 PWM 值，映射关系为：

$$PWM_k = \text{round} \left(255 \times \frac{G_k - \min\{G_j\}}{\max\{G_j\} - \min\{G_j\}} \right) \quad (9)$$

其中 G_k 为第 k 个子区域的平均梯度， $k = 1, 2, 3, 4$ 对应四路马达，归一化后 PWM 值范围为 $[0, 255]$ ，直接作为占空比控制信号驱动压电驱动器。该方法将局部纹理特征与马达驱动强度直接绑定，实现了纹理特征到触觉反馈的精准映射。

4.5. 完整交互闭环流程

用户通过指套装置在交互终端上进行滑动操作时，前端压力传感器与姿态传感器实时采集触摸力度与位置信息，数据上传至电脑服务器后，服务器结合用户选框区域的文物图像，通过改进 SFS 算法实时恢复三维高度场，再计算各子区域平均梯度并映射为四路 PWM 控制参数，通过局域网下发至 ESP8266 终端，驱动压电马达输出振动反馈，完成从用户操作到触觉感知的完整闭环。

5. 总结与展望

本研究面向博物馆数字化文物交互场景，搭建了软硬件与算法协同的轻量化力触觉模拟反馈交互系统。系统以仿真先行、实体落地为研发思路，从硬件架构、算法实现、软件交互、通信控制等多个维度完

成了完整设计与实现。

在硬件层面,本研究设计了基于 ESP8266 的指套式压电振动装置,构建上位机-控制中枢-执行端三层交互架构,通过对 PWM 信号的线性控制与多重校验机制,实现了低延迟、高稳定的触觉反馈输出。装置采用轻量化人体工学设计,配合多路并行驱动机制,可在指尖不同区域模拟差异化振动反馈,为文物表面几何纹理与轮廓的触觉反馈与模拟提供了稳定可靠的物理实现载体。

在算法层面,本研究提出了适配文博场景的改进型 SFS 三维重建算法,通过引入手指按压力作为动态约束,提升了文物表面精细纹饰的重建精度,同时利用 GPU 加速将单帧处理延迟压缩至毫秒级,保证了交互的实时性。基于三维高度场梯度信息,本研究建立了从表面特征到四路马达 PWM 信号的触觉映射模型,实现了文物宏观轮廓与微观纹理的分维度渲染,为所触即所见的沉浸式体验提供了算法支撑。

在软件与交互层面,系统开发了电脑端与手机端双端交互入口,以手机热点为载体构建轻量化局域网,实现了电脑解算、多端交互、终端反馈的闭环控制流程。用户可通过图像缩放、区域选框、触摸滑动等操作,实时感知文物表面的起伏、纹理与材质差异,有效弥补了传统数字展陈中视觉发达、触觉缺失的感知断层问题。

整体而言,本研究构建的系统在保持轻量化、低成本、易部署优势的同时,实现了文物图像到触觉反馈的完整链路转化,为博物馆沉浸式交互、视障人群无障碍导览、科普教育等场景提供了可行的技术方案。

受限于研究周期与实验条件,本系统仍存在一定的优化空间。在算法层面,当前的三维重建算法主要针对静态文物图像设计,对光照变化、拍摄角度差异的鲁棒性仍有提升空间,对不同材质文物的触觉映射模型也有待进一步细化与优化。在硬件层面,装置目前仅采用振动反馈模式,尚未引入压力反馈与温度反馈,距离全维度的触觉感知仍有差距。在交互体验层面,系统目前支持单人单终端交互,尚未实现多用户协同交互功能,对复杂交互场景的适配能力仍有待提升。

未来的研究可以从以下几个方向进一步拓展与完善:首先,可针对不同材质文物建立专用的触觉特征数据库,结合心理物理学实验优化触觉映射模型,提升不同材质纹理的还原真实度。其次,可引入压力传感器、温度传感器与柔性执行器,构建振动-压力-温度多模态触觉反馈系统,进一步提升交互的沉浸感与真实感。同时,可优化局域网通信架构与算法处理流程,降低交互延迟,支持多用户协同交互与多终端并行控制,以适配博物馆多人参观的场景需求。此外,可将本系统与 AR/VR 技术结合,构建视觉-听觉-触觉协同的多模态交互体验,进一步推动触觉模拟技术在文博、教育、康复等领域的落地应用与普及推广。

基金项目

江苏省大学生创新创业训练计划项目(项目编号:S202511117091)。

参考文献

- [1] 陈宇,刘贲.数字技术驱动下的陕西历史博物馆沉浸式交互体验设计[J].丝网印刷,2024(22):99-101.
- [2] 周小凤,王楚涵,张朝枝.长城主题博物馆的数字化展示实践与优化对策探索[J].中国博物馆,2024(3):10-20+134.
- [3] 燕学智,李瑞格,孙晓颖,等.一种表面触觉再现设备性能的评估方法[C]//中国科学技术协会,吉林省人民政府.第十九届中国科协年会——分4信息新技术 东北新工业论坛论文集.2017:35-41.
- [4] 钟兴建.面向移动终端的指套式力触觉交互装置设计与3D形状的力触觉再现方法研究[D]:[硕士学位论文].南京:东南大学,2017.
- [5] 李佳璐,宋爱国,吴涓,等.基于SFS技术的纹理力触觉再现方法研究[J].仪器仪表学报,2010,31(4):812-817.

-
- [6] Wang, G., Han, J. and Zhang, X. (2009) Three-Dimensional Reconstruction of Endoscope Images by a Fast Shape from Shading Method. *Measurement Science and Technology*, **20**, Article 125801.
<https://doi.org/10.1088/0957-0233/20/12/125801>
 - [7] Wang, G. and Zhang, X. (2021) Fast Shape-from-Shading Algorithm for 3D Reconstruction of Hybrid Surfaces under Perspective Projection. *Acta Optica Sinica*, **41**, Article 1215003.