高技术通讯 2026 年 第36卷 第8期:836 - 848

doi:10.3772/j.issn.1002 - 0470.2026.08.006

Perception Booster:基于无刷电机的力反馈可视分析交互旋钮①

刘 健② 孙子峰③ 张歌斐 汤井威 吴一鸣 蒋 莉 孙国道

(浙江工业大学计算机科学与技术学院 杭州 310023)

摘 要 随着数据环境的日益复杂和抽象,传统的单一视觉交互模式在信息展示中逐渐显现出局限性。为此,本文提出了一种基于力反馈机制的交互式数据可视化方法,旨在通过多感官交互拓宽信息感知渠道,克服传统可视化图表在复杂数据呈现上的不足。本文设计并开发了一款名为 Perception Booster(PB)的力反馈装置,该装置采用无刷直流电机作为核心驱动,并基于 Field-Oriented Control(FOC)算法实现动态力反馈调节。PB 通过4种力反馈调控策略(映射模式、棘轮模式、弹簧模式及恒定模式)灵活适应不同应用场景,增强用户对数据的直观感知和理解。实验结果表明,PB 显著提高了用户在数据可视化图表中的信息捕捉与理解效率,为复杂数据解析提供了新的视角和工具。

关键词 力反馈;触觉;可视化;人机交互;多感官

如何直观高效地获取数据信息一直是可视化与人机交互交叉领域的热点问题。随着大数据人工智能等领域的不断发展,海量数据的处理成为了常态,这类数据往往具有较高的复杂度与抽象性,传统的仅依赖视觉表现的可视化方法常常会由于复杂的图标布局造成信息的损失。鉴于此,本文提出了一种通过融合力反馈交互机制来丰富信息感知的方法。这一方法的目标在于弥补视觉交互在展示复杂数据时所存在的局限性。

视觉作为人类信息获取的首要渠道,其便捷性不言而喻。许多学者通过多种视觉通道进行数据展示,诸多研究者利用多样化的视觉手段来展现数据,旨在探索能够优化和强化人类认知处理能力的数据呈现方法,例如颜色变化[1]、形状差异[2]以及其他视觉线索有助于人们在视觉搜索过程中迅速且有效地获取有效信息。也有许多学者采用交互的方式探索可视化图表例如太阳黑子图[3]。

图表作为一种数据展示工具具有显著优势,然而其内在局限性同样不可忽视。在解析包含复杂图形与色彩的图表时,将不可避免出现视觉误导引起认知偏差,挖掘数据信息的难度显著增加。随着数据复杂度的攀升,单纯依赖图表呈现数据信息无可避免地会走向两种极端情况:一是牺牲局部细节以优化整体视图;二是增加图表结构的复杂性以力求详尽的信息传达。然而,这两种策略均存在明显的局限性。

鉴于此,多感官融合的数据信息展示方案应运而生,旨在突破视觉主导的感知极限,有研究围绕触觉[4-6]、听觉[7]等互补性感知方式与视觉协同作用,构建一个全面且精细的数据认知方案[8]。这些方案不仅能够加深用户对数据本质的理解,有效规避视觉感知的固有限制。

受此启发,本文设计并实现了一种结合力反馈辅助视觉分析的方法,研发了一款可以提供力反馈的旋钮装置,名为 Perception Booster(PB)。该装置具有一定的可扩展性和适应性,可以针对不同用户需求进行定制化的力反馈交互。PB 的核心组件是一款 2208 型无刷电机,基于 Field-Oriented Control

① 国家自然科学基金优秀青年科学基金(62422607)和浙江省自然科学基金杰出青年科学基金(LR23F020003)资助项目。
② 男,1988 年生,博士,硕士生导师;研究方向:大数据管理,新硬件存储优化,边缘计算;E-mail:jliu83@zjut.edu.cn。
③ 通信作者,E-mail:guodao@zjut.edu.cn。
(收稿日期:2025 - 03 - 13)

(FOC)算法精确调节输出扭矩。当用户使用 PB 进行可视化图表的探索时,PB 会根据图表中的潜在信息生成相应的力矩,向用户传达数据背后的特征。力反馈有效地分担了用户在可视分析时的视觉压力,帮助减少视觉误导引发的认知偏差,同时,力反馈的加入为用户提供了更为丰富、直观的数据感知渠道,增强了探索过程的沉浸感。同时本文通过 PB 实现了映射模式、棘轮模式、弹簧模式及恒定模式 4 种力反馈模式从而可以适用于不同的应用场景,实现了更便于理解数据信息的交互方式,使可视分析过程更加直观。

为深化验证 PB 在提升数据可视分析效率与准确性上的效能,本文设计并执行了一项综合性实验。实验选取了直方图、散点图和平行坐标图 3 种典型的数据可视化应用场景,旨在通过这些场景深入分析 PB 对于数据冗余、异常检测及特定统计量(如方差)的识别效能。为了增强实验的科学性,本文设置了两组实验:实验组基于视觉交互并结合 PB 做力反馈辅助分析,对照组则仅依赖传统的可视分析。实验选取了 3 种场景分别是散点图、直方图以及平行坐标图。散点图与平行坐标图采用经典的鸢尾花数据集测试 PB 在数据冗余的情况下的表现,同时评估 PB 在刷选场景下的效能。直方图选用了某地区的物价分布数据集,以此来探究 PB 对数据方差的反馈能力。实验招募了 15 名参与者,要求每位参与者在同等条件下,分别经历实验组和对照组的全部实验流程,以确保结果的公正性和可比性。实验结束后,对参与者进行详尽的问卷调查和深度访谈,全面评估 PB 在实际数据探索任务中的应用表现,特别是在提升用户操作效率和增强数据理解能力方面的作用。此外,实验还特别关注了参与者对 PB 操作性的主观体验反馈,以及他们关于力反馈辅助机制在数据可视化任务中所发挥作用及影响的个人洞见,力求从多个维度深入了解 PB 的实际应用效果及其潜在优化方向。总结起来,本文的工作包括以下贡献。

(1)提出了基于多感官参与的数据呈现方法,使用无刷电机基于 FOC 算法增加力反馈通道。

(2)设计实现了多种力反馈模式,以满足 Perception Booster 的多功能性。这些模式使用户能够体验不同类型的力反馈,满足其特定需求,提高其交互体验。

(3)设计综合实验结合 3 个实际应用场景对 Perception Booster 的实用性进行了评估。通过用户反馈和评估结果,对 Perception Booster 的性能以及力反馈在增强用户与图表交互和探索视觉数据方面的潜力有了更深入的了解。

1　相关研究

1.1　力反馈与人机交互

触觉通过皮肤上的感受器传递信息,可以非常即时且直观地感知压力、振动等物理刺激。在人机交互领域获得了广泛应用。

对于力反馈交互设备而言,其交互体验高度依赖于多种外观要素,包括大小、形状等[9],同时,平滑度和行程长度也是评价用户体验的关键因素[10]。当前,力反馈大致可以分为两大类:一类是基于振动频率的调频震动反馈,另一类是基于力反馈幅度的触觉反馈。

基于振动频率的调频震动反馈主要应用于虚拟按钮和电子设备中,通常通过线性共振器实现。这类反馈机制建立了振动频率与数据信息之间的映射关系,通过调整不同的振动频率来传达信息[11]。然而,由于物体具有固有的振动频率[12],振动频率的设计往往无法线性增加,这在一定程度上限制了其应用范围。此外,对于虚拟按钮而言,由于其交互行程有限,这可能会降低用户的交互体验。

基于此本文选择采用基于力反馈大小调幅的方式对旋钮进行设计实现,以此克服调频方式操作行程不足的弊端,旨在提高用户在交互时的操作自由度。

1.2　人机交互与可视分析

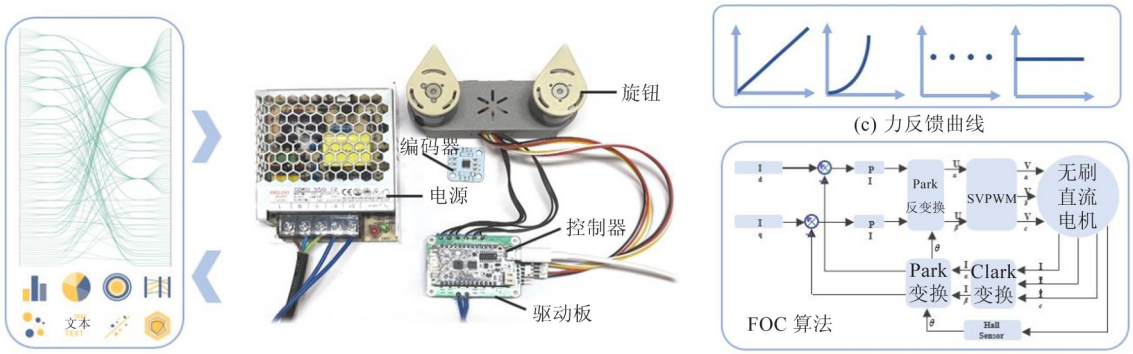
许多研究项目已经开始研究在可视化的背景下如何将数据集的特征物理化。大多数早期的物理可视化设备是静态的,但近年来逐渐出现了许多动态且存在交互能力的设备,这些系统大多采用了运动阵列的形式[13]。这类设备通常依赖于昂贵的定制化硬件,并且交互性能有限[14]。为了提供更通用的

控制并促进更丰富的交互，Goc 等人[15]开发了 Zooids：小型机器人，它们能够在桌面上通过外部跟踪重新排列自身，以提供多种可视化模式并适应不同的数据集。这些小型机器人还可用作多功能控制器，与它们显示的数据进行交互，但是由于体积较小，Zooids 无法为用户提供力反馈。

本文受到了一些商业设备及其他力反馈系统所提供的启发，其中包括 Surface Dial 以及其他广泛应用于可视化领域的触觉笔。这些设备已被用于让用户通过力反馈感知和探索标量场及向量场，甚至模拟医学检查[16-17]。然而，这些设备及相关研究项目大多并未将可视数据信息交互与力反馈结合。相比之下，本文受到了 Lischke 等人[18]工作的启发，使用无刷电机作为旋钮实体，通过力矩输出反馈当前数据信息。本文研究了这种解决方法在可视化任务中的应用，并提出了多种力矩输出模式以适应不同的工作场景，从而在交互过程中提供直观大小适合的力反馈。

2　Perception Booster 下位机概述

Perception Booster 分为上位机（图 1（a））与下位机（图 1（b））2 大核心组件，二者协同工作共同构建了一个完整的交互系统，用于实现数据处理、可视展示以及力反馈交互等功能。下位机专注于实现 PB 的力反馈响应输出，主要实现旋钮转动的流畅性、力反馈响应的快速性以及力矩输出的稳定性，以确保 PB 在实际使用中能够提供良好的用户体验。下位机硬件配置包含以下关键组件：一是高性能 ESP32 微控制器，负责信号处理与控制逻辑执行；二是专用于驱动无刷电机的驱动板，确保精确的动力输出；三是高精度霍尔位置传感器，用于实时监测电机转子位置；四是双 2208 型外转子无刷电机；四者组合共同构成力反馈生成单元，确保 PB 在操作过程中的可靠性。



(a) 上位机　(b) 下位机　(d) 控制算法框图

图 1　PB 的上位机、下位机工作流程与实现原理

上位机则聚焦于数据的定制化处理与动态可视化呈现，借助 Flask 轻量级 Web 框架实现数据流的高效接收、解析与发送，确保与下位机之间数据通信的流畅与实时性。同时，上位机利用 D3. js 这一强大的数据可视化库，将处理后的数据转化为直观的可视分析图表，为用户提供沉浸式的可视分析体验。上、下位机之间通过串口通信协议（Universal Asynchronous Receiver/Transmitter，UART）传输专门的通讯帧实现数据与指令的双向可靠传输，确保系统整体运作的高效稳定。

2.1　下位机总览

图 1 展示了 PB 的系统框架。为了使 PB 达到期望的功能特性，最终所需要构建的下位机旋钮需要具备以下特点。

（1）符合人体工程学设计：秉持人体工程学理念，确保用户在与旋钮进行长时间交互时的舒适性和可用性。

（2）支持力矩调节：PB 需具备输出差异性力矩的能力，使用户能通过感知与数据信息相关联的阻力变化，实现对数据特性的直观认知与深度理解。

（3）支持快速响应：为确保旋钮操作与可视化图表动态响应的高度同步，必须严格控制因交互产生的力反馈与图表变化之间的延迟，力求实现近乎实时的反馈效果，以保障用户沉浸式体验与直观交

互的流畅性。

(4)具有一般性:具有适应不同场景和根据特定情境调整反馈特性的灵活性。

图1(b)所示为Perception Booster的硬件实体构造。旋钮实体采用了成本效益显著的双2208电机,不仅性能卓越,而且尺寸适宜,完美贴合用户手部抓握需求,彰显了其在性价比与人体工学设计上的双重优势。编码器模块选用了精度高达12位的AS5600传感器,工作电流仅为15 mA,紧凑的体积与2208电机无缝对接,确保了设备的微型化与低能耗特性。通过I^2C通讯协议,该模块能够高效传输数据至控制器,同时维持线路布局的简洁性与规范性。

电机驱动板基于simpleFOC开源框架,专门定制了一款适用于双路无刷电机的驱动板,支持12 V至24 V的宽范围工作电压,保证了动力系统的稳定与高效。控制器方面,PB选择了兼容Arduino平台的ESP32芯片,凭借其强大的处理能力和丰富的拓展性,为系统的智能化运行奠定了坚实基础。为了操作便利,本项目基于SolidWorks软件设计了一款专用支架,并通过三维(Three-Dimensional,3D)打印技术将其制作成型。至于电源供应,PB配置了一台额定电压12 V、功率60 W的恒压电源,为整个下位机系统提供稳定的能量保障。

2.2　霍尔传感器与滤波算法

为实现电机的精确力矩调控,首要步骤涉及确定电机转子相对于定子的瞬时位置。为了兼顾可靠性与便捷性,本文选用非接触式的霍尔传感器来精准捕捉转子的当前位置信息。霍尔传感器具有无磨损、响应快速的特点,确保转子位置信息的准确性和可靠性。当电机持续旋转时,霍尔传感器的输出电压随之呈现出动态变化。依据电压数值与电机角度之间的映射关系,控制器通过I^2C通讯能够迅速计算出电机转子的当前角度位置,进而实现对电机运动状态的实时监控,为力矩的精准调节打下基础。

尽管12位霍尔传感器采集精度在多数应用场景中存在冗余,但FOC算法需要对电机转子位置进行高频读取并运算,因此必须尽可能降低高频噪声信号在数据采集阶段可能造成的潜在干扰。鉴于此,有必要对采集的位置数据实施高效的滤波处理以过滤高频噪声,从而确保FOC算法精准执行和优化PB下位机整体性能。

考虑到嵌入式系统中处理器资源通常相当有限且PB系统要求较高的实时性,本文特别针对RC(resistor-capacitor)低通滤波算法进行了系统优化,以期与PB更加兼容。该优化不仅兼顾了算法的计算效率和资源使用情况,还兼顾了滤波效果与实时性之间的平衡,确保在不过度占用处理器资源的前提下,有效抑制高频噪声,提升数据质量,进而增强FOC算法的稳定性和准确性。

在连续时间域中,RC低通滤波器是一个一阶线性系统,其微分方程可以描述为

$$RC\frac{\mathrm{d}V_{\mathrm{out}}(t)}{\mathrm{d}t}+V_{\mathrm{out}}(t)=V_{\mathrm{in}}(t) \tag{1}$$

式中:$V_{\mathrm{in}}(t)$是输入电压,$V_{\mathrm{out}}(t)$是输出电压,R是电阻值,C是电容值。为了分析这个系统,需对上面的微分方程进行拉普拉斯变换,得到:

$$RCsV_{\mathrm{out}}(s)+V_{\mathrm{out}}(s)=V_{\mathrm{in}}(s) \tag{2}$$

式中:s是复数频率变量。

整理后得到传递函数$H(s)$。

$$H(s)=\frac{V_{\mathrm{out}}}{V_{\mathrm{in}}}=\frac{1}{1+RCs} \tag{3}$$

为了将这个连续时间系统转换到离散时间系统,使用Z变换将s平面映射到z平面。

$$s=\frac{z-1}{zT} \tag{4}$$

式中:T是采样周期。将双线性变换的公式代入传递函数中,替换s得到:

$$H(z)=\frac{V_{\mathrm{out}}(z)}{V_{\mathrm{in}}(z)}=\frac{T}{RC(1-z^{-1})+T} \tag{5}$$

将$H(z)$转换成差分方程,得到:

$$V_{\mathrm{out}}(n)=\frac{1}{1+\frac{RC}{T}}V_{\mathrm{in}}(n)+\frac{\frac{RC}{T}}{1+\frac{RC}{T}}V_{\mathrm{out}}(n-1) \tag{6}$$

记滤波系数为A,可得:

$$A=\frac{T}{RC+T} \tag{7}$$

$$V_{\mathrm{out}}(n)=AV_{\mathrm{in}}(n)+(1-A)V_{\mathrm{out}}(n-1) \tag{8}$$

该滤波器的性能取决于 RC 的值，由于一阶滤波无法完美地兼顾灵敏度和平稳度，故此动态调整滤波系数，兼顾灵敏度和平稳度的要求同时又不太消耗系统的内存。实现伪代码如算法 1 所示。

算法 1：滤波算法

```
初始化滤波系数
初始化滤波计数器
初始化上轮滤波结果
while 有新采样值采样：
  当前采样值 = 获取新采样值()
  差值 = 当前采样值 - 上轮采样值
  差绝对值 = 绝对值(差值)
  if 差绝对值 > 阈值：
    if 差值 × 上轮采样值 > 0：
      if 滤波计数器 > = 最大值：
        滤波系数 = 最大值
        滤波计数器 = 0
      else：
        滤波系数 = 滤波系数 + 系数增量
        滤波计数器 = 滤波计数器 + 1
      else：
        滤波计数器 = 滤波计数器 + 2
      上轮滤波结果 = 滤波系数 × 当前采样值 + (1 - 滤波系数) × 上轮滤波结果
      return 上轮滤波结果
```

获取到电机当前的角度后就可以通过求导的方式获得当前电机的转动角速度 $\omega(n)$ 与角加速度 $\beta(n)$：

$$\omega(n) = \frac{Y(n) - Y(n-1)}{\Delta t} \tag{9}$$

$$\beta(n) = \frac{\omega(n) - \omega(n-1)}{\Delta t} \tag{10}$$

式中：$Y(n)$ 表示电机在第 n 次采样时刻的位置(角度)。

2.3　PID 控制算法与 FOC 算法力矩控制

无刷电机的 FOC 控制算法主要有 3 个比例积分微分(proportional-integral-derivative，PID)控制环，分别是位置环、速度环以及电流环，通常来说用户可以对无刷电机的位置环与速度环进行调节来达到使用无刷单机模拟各种物理效果的目的。

2.3.1　PID 算法

通常来讲，在电机控制中力矩与电流大小直接相关，但 FOC 算法使得用户可以通过调节电机的速度环 PID 与位置环 PID 来实现对电机输出力矩大小的控制。

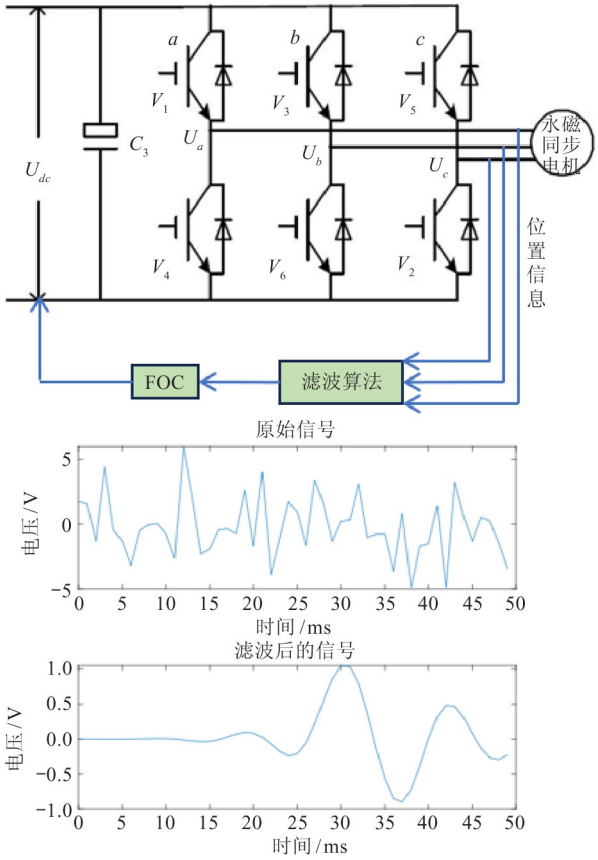


图 2　RC 低通滤波效果图

假定控制对象为 M，希望通过 PID 算法控制对象 M 达到目标的数值 M_{target}。对于一个闭环反馈系统来说可以测得当前的对象 M 的数值记录为 $M_{measure}$，可以由控制器测得对象 M 当前距离 M_{target} 的差值 M_{error}，然后通过一个 PID 控制器输出控制量(Output)就可以让这个闭环系统快速实现目标：

$$M_{error} = M_{target} - M_{measure} \tag{11}$$

$$\text{Output} = P \times M_{error} + I \times \sum M_{error} + D \times \Delta M_{error} \tag{12}$$

式中：P、I、D 分别代表了 PID 控制器的比例、微分、积分 3 个参数，通过调节这 3 个参数就可以实现控制系统的各种功能。

2.3.2　FOC 算法电流环

以外转子无刷电机为例，电机的转子可以看成是一个极性方向确定的磁铁，当定子的三相线圈开始通电时随着电流的改变可以看作是一个极性会发

生变化的磁铁(图3(d))。当定子线圈中的电流变化时定子的等效磁铁也会发生变化,转子也会受到不同方向的力。以转子本身作为参考系,转子受到的力根据作用不同可以分为垂直于转子极性方向的 $F1$ 与沿着转子极性方向的 $F2$,其中 $F1$ 作用可以让转子发生旋转,而 $F2$ 作用最后会造成发热。因此需要控制定子三相线圈的电流使定子的等效磁体方向始终与转子的等效磁铁方向垂直。

图1(d)展示了 FOC 算法的电流环部分。首先对当前的电机定子三相电流进行采样获得三相电压分别为 I_a、I_b 与 I_c(图3(a)),对这三相电流进行一次克拉克(Clark)变换,将三相线圈电流投影到以定子为参考系的直角坐标系上,变换成为 I_α 与 I_β(图3(b))。

$$\begin{pmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix} \tag{13}$$

再将 Clark 变换得到的电流通过派克(Park)变换旋转到以转子为参考系的直角坐标系上得到电流 I_q 与 I_d,以定子为参考系记转子的当前角度为 θ(图3(c),θ 由霍尔传感器读取)。

$$\begin{pmatrix} I_d \\ I_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{pmatrix} \tag{14}$$

考虑到定子的等效磁体方向始终与转子的等效磁铁方向垂直,因此 I_d 的值在理想情况下应该为0。

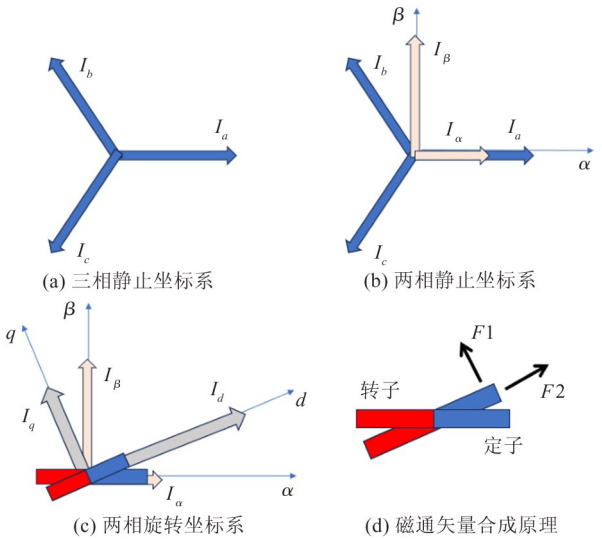


图3　FOC 电流变换示意图

通过上述电流变换以后控制对象就从开始的线圈电流 I_a、I_b 与 I_c(正弦波电流)变成了 I_q 与 I_d(定值线性电流)。对于线性电流就可以使用 PI 控制器来实现反馈控制输出控制电压 U_q 与 U_d。反馈信号再通过一次反 Park 变换并用空间矢量脉宽(space vector pulse width modulation,SVPWM)控制金属-氧化物-半导体(metal-oxide-semiconducter,MOS)管来输出定子三相电流形成电流闭环控制。

2.4　旋钮模式

通过调节运动环与速度环可以完成不同模式的力反馈,为了满足 PB 的普适性,PB 实现了4种运动模式:映射模式、棘轮模式、弹簧模式及恒定模式。

2.4.1　恒定模式

模式总览:恒定模式下转动旋钮所需要的力矩大小恒定不随任何外部条件发生改变。根据旋钮输出力矩方向的不同又可以分为定阻尼模式与悬浮模式。这一模式对于运用多样化的交互技术而言是理想的,例如,将旋钮向右旋转可以缩小当前视图的显示比例,而向左旋转则能够放大视图。在此模式下,恒定的力反馈机制赋予用户在可视化界面上自如地浏览与选取各类信息的能力,极大地促进了用户与界面间的互动参与度。恒定模式下 PB 的工作情况如图4所示。

实现方式:将位置环参数全部清0,速度环参数只设置比例 P。当 P 为正数时 PB 为定阻尼模式,此时转动 PB 会感受到阻碍旋转的阻尼,P 值越大,阻尼越大。当 P 为负数时 PB 为悬浮模式,此时 PB 在脱离手动控制后,将以释放瞬间的角速度为初速度,经历一段逐渐减速直至静止的过程;当 P 值绝对值适中,PB 能够在放手后维持一段匀速旋转;当 P 值绝对值较大时,PB 则展现出加速旋转的趋势。

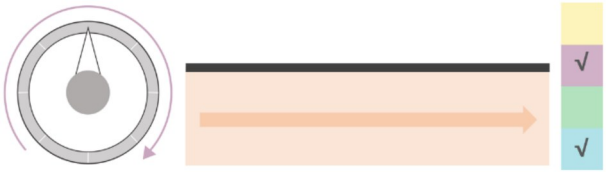


图4　恒定模式下的 PB 工作情况

2.4.2　映射模式

模式总览:映射模式是指力反馈旋钮扮演着可

变阻尼控制器的角色,这一模式通过动态调整力反馈的强度,协助用户以触觉洞察当前数据的状态,从而更加高效地辨识数据中的异常点与细节特征,显著提升数据解析的直观性与准确性。在映射模式下,力反馈旋钮与可视化图表信息之间建立起了一种紧密的耦合关系。随着图表数据的实时更新或用户操作引起的视图变化,旋钮所施加的阻尼力亦随之调整。这种调整机制不仅反映了数据本身的属性变化,还为用户提供了额外的触觉反馈线索。此外,映射模式下力反馈的动态调整还有助于用户在复杂数据集中快速定位关键信息。当数据出现异常波动或重要趋势时,旋钮阻尼力的突变能够立即吸引用户的注意,提示用户聚焦于数据的异常区域,从而加速异常检测与数据分析的进程。映射模式下 PB 的实际工作情况如图 5 所示。

实现方式:映射模式可被视为定阻尼模式的一种演进型态,其核心特色在于阻尼系数并非固定不变,而是能够依据数据情境的动态变化而自主调节,从而实现更为细腻与情境适配的力反馈体验。将位置环所有参数清 0,将速度环中比例 P 设置为变量,P 值随着数据信息变化而改变,数据信息越重要 P 值越大。

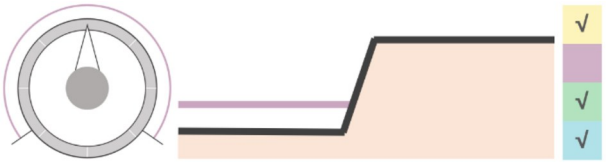


图 5　映射模式下的 PB 工作情况

2.4.3　弹簧模式

模式总览:弹簧模式通过模拟弹簧力学原理,建立了力反馈与旋钮位置变化之间的非线性映射关系。当用户旋转旋钮偏离初始位置时,系统会根据当前位置与起始点之间的距离,动态计算出一个恢复力,促使旋钮倾向于回归至预定的平衡位置。这一机制确保了用户在探索复杂可视化数据时,能够快速而准确地定位至关键数据点,同时在完成特定操作后,旋钮能够平滑地复位至默认或中心状态,为下一轮交互做好准备。弹簧模式下的力反馈机制,不仅提升了用户在数据可视化界面中操作的直观性和反馈感,还有效辅助了用户在海量数据中快速定位异常点或模式特征。例如,在分析多维数据集时,用户可以借助旋钮的旋转与回弹特性,轻松地在不同维度间切换视角,快速识别数据分布的异常趋势或聚类模式。弹簧模式的这一特性,可以为数据分析师和科研人员提供了更为高效、直观的数据探索工具,极大地促进了数据洞察的生成与知识发现的过程,如图 6 所示。

实现方式:弹簧模式通过位置环控制。初始阶段,目标是确定比例增益 P 的最优值。为此,采用了一种直观的扰动法。具体而言,在给定的静态条件下,人为地使电机从其基准位置偏移,然后迅速释放。此过程的关键在于仔细感知并量化电机在脱离人为干预后,自动回弹至原位时所产生的力矩大小,同时,记录下系统从偏离状态恢复至平衡状态所需的时间。通过多次实验,系统能够逐步逼近一个理想的 P 值,该值能显著减少系统响应时间,此时有可能会出现超调现象。在初步确定了比例增益之后,调节目标转向积分增益 I 的微调,这是平衡系统超调的关键步骤。基于已获得的 P 值,渐进式地增加积分增益,直至系统展现出最佳的稳态误差性能。

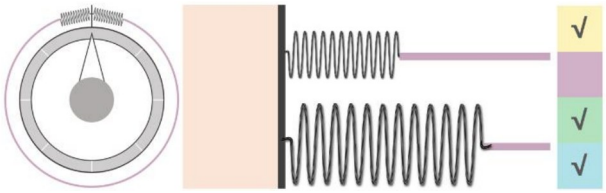


图 6　弹簧模式下的 PB 工作情况

2.4.4　棘轮模式

模式总览:棘轮模式可被视为一种离散步进式的力反馈旋钮,工作模式类似于电风扇上的档位开关。在这一模式下,力反馈旋钮被设计成在旋转过程中,能够在一个预设的、有限的几个位置之间进行切换,每个位置对应于数据集中的一个特定级别或分类。每当旋钮转动至下一个预设位置时,用户会明显感受到一次力反馈的跃变,这种力反馈的变化既是系统对用户操作的确认,也是数据模式切换的直观显示。通过这种方式,用户可以在数据集的不同级别或分类之间快速切换,识别出数据集中的关键特征与趋势,从而提升数据模式识别的效率与准确性,如图 7 所示。

实现方式:棘轮模式相对较为复杂需要同时采用设定分段式位置环。首先根据所分挡位 m 将旋钮角度进行分档,每个挡位间隔角度大小为 $2\pi/m$,分档完成后将先设置位置环,当旋钮偏离挡位范围在[0, π/m],此时按照弹簧模式设置位置环参数,当旋钮偏离挡位范围超过了 π/m,此时挡位发生改变,设置新的挡位。

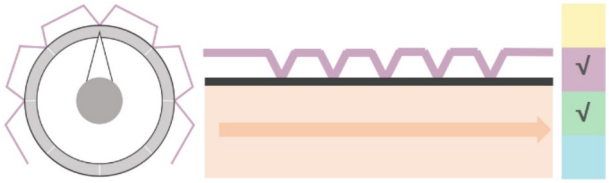


图 7　棘轮模式下的 PB 工作情况

2.4.5　PID 调参

不同模式需要根据实际需求调节不同的 PID 参数以满足实际的用户需求。以弹簧模式为例,图 8 是弹簧模式下 PB 从偏离中心 100 °的位置恢复到稳定状态在不同位置环 PID 参数下的时域响应控制曲线,可以看到,当 P 参数增大,响应的快速性获得提升,反映在用户体验上就是回弹的动力得到增强,然而当 P 参数过大将会产生一定的超调量,即旋钮在回弹的过程中会超过目标位置发生振荡,此时就需要适当增大 I 参数,用来对累计误差进行修正。然而实际使用场景中,适当的振荡可以提高用户使用体验的趣味性,甚至在某些设备中,适当的振荡可以提高用户的使用安全性,所以具体的PID参数需要

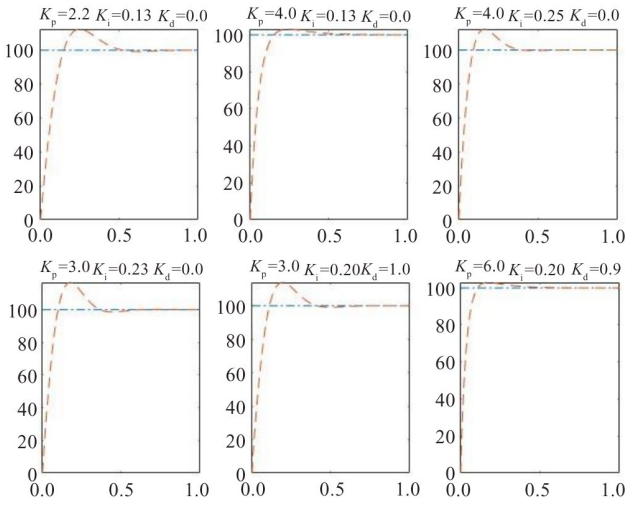


图 8　弹簧模式的时域控制曲线

根据实际的用户需求与使用场景进行灵活调节取舍以达到最适合的模式。

2.5　面向 PB 的定制化通讯协议设计与实现

为了实现装置上位机与下位机之间的数据传输通讯,本文设计实现了通过 8 位数据 1 位停止无校验的 USART 协议进行上位机与下位机之间的数据通讯。将 8 位数据位进行划分,如图 9 所示。

(1)使能:当下位机初始化完成时该位置为 1 时表明当前帧有效,允许上位机与下位机之间的通讯,当上位机将该位置为 0 时表明通讯结束。

(2)电机:上位机可以通过设置该位来选择控制的电机,置 0 选择右电,机置 1 选择左电机。

(3)模式选择:上位机通过设置模式选择来指定无刷电机的工作模式。

(4)阻尼大小:上位机通过指定该 4 位来设置无刷电机的力反馈大小。

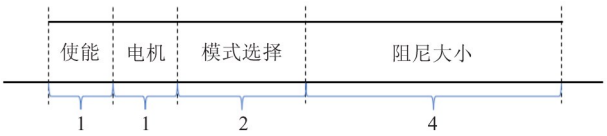


图 9　面向 PB 的定制化通讯协议帧

2.6　上位机总览

Perception Booster 的上位机主要分为后台数据处理系统与前端可视分析界面 2 个部分。后台数据处理系统使用 Flask 框架进行编写,主要作用是衔接下位机与可视分析界面的通讯;前端可视分析界面使用 D3. JS 进行编写,两者通过 Ajax 进行数据交互。其中后台数据处理系统按照功能可以分为模式选择与数据处理 2 个部分。当用户使用 PB 时,后台数据处理系统通过串口读取下位机发送的数据,解码后通过 Ajax 与前端页面建立通讯连接将数据传递给前端可视分析界面,随后前端可视界面将会做出动态的响应并将当前视图中的信息量化后再由 Ajax 协议回传给后台数据处理系统,后台处理系统进行编码组帧后通过串口指示下位机做出力反馈。

2.7　压力测试

为了测试 PB 的快速性,本文随机生成了 20 万条双精度浮点数(double)类型数据使用 Python 编写堆排序算法(复杂度为 $O(n\log(n))$),测试用处理器

为 i7-13700H,内存 16 GB,一次性将测试数据全部读入内存。测试过程未开启多线程加速,通过转动 PB 控制排序过程。实验中的延时与跳 ping 情况如表 1 所示。可以看到 PB 的性能足以满足个人电脑下大多数日常任务。当遇到对性能要求较高的场景时,可以通过开启多进程加速对计算密集型任务进行性能优化。

表 1　PB 操作时延与数据量之间的关系

数据量	时延/ms	跳 ping 情况
0 ~ 1 000	小于 200 (基本没有感觉)	没有
1 000 ~ 10 000	小于 200	没有
10 000 ~ 50 000	不高于 500	基本没有
50 000 ~ 100 000	不高于 800	略微跳 ping
100 000 ~ 150 000	不高于 1 000	较为明显
150 000 ~ 200 000	大于 1 000	很明显
>200 000	大于 1 000	很明显

3　案例测试

为验证 Perception Booster 的实用性,本文专门设计了 3 个常见的实际图表场景,并在这些场景中嵌入某些可视化陷阱。邀请了 8 位志愿研究参与者按照先直接观察后使用旋钮辅助分析的方式进行对比实验。

实验开始前先作如下约定,当某个可视化图表有 k 个可变参数时就称呼该图表的自由度为 k,记所有可变参数的集合为 V。显然,由于单个电机只具有 1 个旋转自由度,记 PB 中所有电机的集合为 M_{all},则 PB 可以完全控制该图表的充要条件如下:

$$\forall m_1, m_2 \in M_{all},\ m1 \neq m2 \text{ 且 } f(m_1) \neq f(m_2) \tag{15}$$

$$\forall v \in V, \exists m \in M_{all}, f(m) = v \tag{16}$$

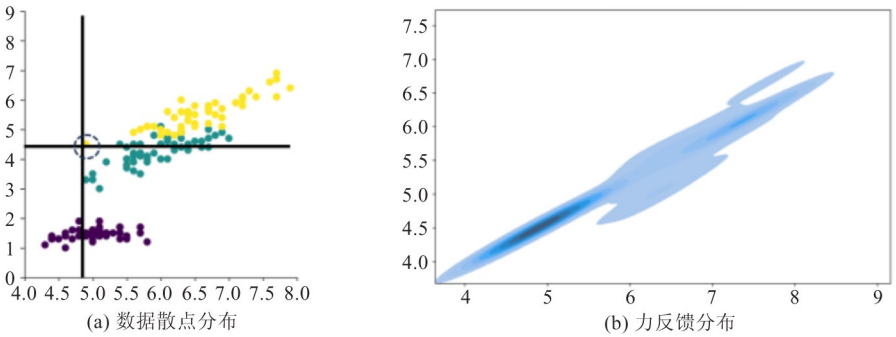
$$|M_{all}| = |V| \tag{17}$$

容易发现只要满足式(17)就可以构造从电机映射到图表可变参数的满射 f。

3.1　PB 辅助下的散点图冗余数据检测

3.1.1　实验设置

散点图对于数据中的极端值或异常值十分敏感。这些异常值可能会显著影响数据点的分布模式,从而误导对变量关系的解读。取鸢尾花(Iris)数据集中的花萼长度(Sepal _ length)和花瓣长度(Petal _ length)2 列数据,使用散点图可视化这 2 个特征的关系,并可能根据鸢尾花的种类(Species)对点进行着色,人为选取一个独立散点重复绘制 100 次(图 10(a)中虚线圈中的点)得到实验散点图如图 10(a)所示。



(a) 数据散点分布　　(b) 力反馈分布

图 10　映射模式下 PB 对散点图的力反馈分析

不失一般性,定位平面上的一个点需要横坐标值 h 与纵坐标值 z 两个参数。如图 10(a)所示,直线 $L1$ 和 $L2$ 分别垂直于 x 轴和 y 轴,得到两直线方程为

$$\begin{cases} L1: x = h \\ L2: y = z \end{cases}$$

通过建立电机与可变参数之间的关系,通过上位机的后台处理系统实现表 2 中的控制效果(电机 $M1$ 控制直线 $L1$,电机 $M2$ 控制直线 $L2$),进而实现了通过 Perception Booster 遍历平面上的所有散点。

随着 Perception Booster 遍历平面中的所有点,可视分析界面将实时计算以该点为中心、半径为0.5个坐标单位的圆内的散点个数为 num。将所得个数

通过 Ajax 回传给后台处理系统,选择阻尼模式,并通过式(18)计算得到力反馈数值大小 F 后进行组帧传递给下位机实现与用户的力反馈交互。

$$F = \lfloor \frac{num}{100} \times 32 \rfloor \tag{18}$$

式中:$\lfloor \cdot \rfloor$表示向下取整。

表 2　电机与散点图可变参数之间的控制关系

电机编号	电机转向	响应
$M1$	顺时针	h 值增大,$L1$ 右移
$M1$	逆时针	h 值减小,$L1$ 左移
$M2$	顺时针	z 值增大,$L2$ 上移
$M2$	逆时针	z 值减小,$L2$ 下移

可以看出力反馈的大小与散点的密度呈现一个正相关的线性函数。图 10(b)是 PB 在探索散点图时在不同位置的力反馈分布情况,较为精确地反映了散点的密度分布情况。到这里散点图的直接观察组与旋钮辅助组全部设计完成。

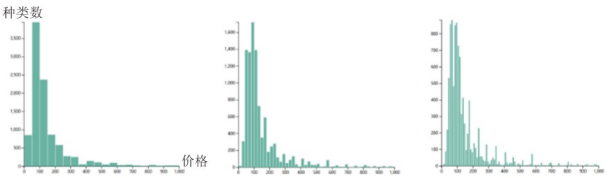
3.1.2　实验结果

在经过视觉观察与旋钮辅助分析的对比体验后,8 名实验参与者反馈一致,PB 作为辅助工具有效地实现了多感官融合,在该任务下协助用户识别了仅凭视觉难以察觉的异常点。此外,力反馈交互机制提升了信息传递的直观性和用户对异常事件响应的快速性。进一步的分析显示,相比于单一视觉感官的交互,实验参与者在使用基于 PB 的多感官融合交互时,探索散点图的时间明显延长,并且注意力更加集中。实验结果表明,在散点图场景下,基于 PB 的多感官融合交互在数据探索和异常检测方面具有显著优势。

3.2　PB 辅助下的直方图数据方差估计

3.2.1　实验设置

直方图的构建关键在于数据区间的选择,这一选择直接决定了直方图的形态和解读。不合理的区间划分可能导致直方图无法真实反映数据的分布特性。以 GitHub 上的开源数据集 OneNum 为例(该数据集是某地区各种商品的价格统计),通过改变划分 x 轴的价格刻度并绘制相应的直方图(如图 11 所示),可以发现 y 轴的商品数目分布有较大差异,可见 x 轴刻度大小的选择对数据特性的展示具有显著影响。过小的刻度可能忽略数据的宏观特征,而过大的刻度则可能丢失数据的微观细节。因此,单张直方图在全面展示数据特征时存在局限性。



(a) 低刚度分布　(b) 中刚度分布　(c) 高刚度分布

图 11　棘轮模式下 PB 对直方图的力反馈分析

针对同一数据集,若将 x 轴刻度视为可变变量,直方图将仅具有一个自由度。这意味着通过单个电机即可全面调控并绘制出所有潜在区间分割下的直方图。设数据集中作为 x 轴的数据范围为 $[a,b]$,若需要按区间大小为 k 进行划分,则 k 必须满足特定的式(19),以确保区间的有效性和直方图的准确性,可以看出 k 的所有可取值构成一个离散集合,为了实现 PB 与离散值之间可以一一对应,因此选择 PB 为棘轮模式。

$$(\lceil b \rceil - \lfloor a \rfloor) \equiv 0(\mathrm{mod}(k)) \tag{19}$$

式中:$\lfloor \cdot \rfloor$表示向上取整,mod 表示取模。

取区间[0,50]作为考察对象(数据分布较为密集),取分布方差作为观察量,当转到不同挡位时可视分析界面将计算当前[0,50]区间下的数据分布方差 S^2,记当前区间密度为 k 且柱状图分布满足 $f(x)$(x 为柱状图区间标号)则可以计算 S^2 为

$$\overline{f(k)} = \frac{k \times \sum_{m=1}^{m=\frac{50}{k}} f(m)}{50} \tag{20}$$

$$S^2 = \frac{k \times \sum_{m=1}^{m=\frac{50}{k}} (f(m) - \overline{f(k)})^2}{50} \tag{21}$$

将 S^2 通过后台数据处理系统换算为力反馈大小后组帧发送给下位机就完成了直方图的力反馈实验设计。

3.2.2　实验结果

得益于无刷电机独特的动力学特性,实验邀请的 8 位参与者均对棘轮模式下的 PB 给出了积极正面的评价。通过体验分段式的力反馈,实验参与者对于离散量的边界有了更加清晰的把握。值得一提

的是,一些参与者指出,使用 PB 探索可视化图表的过程,在一定程度上类似于利用游戏手柄进行主机游戏的体验。这不仅增加了交互中的趣味性,也超越了单一视觉反馈所能提供的体验感。此外,通过 PB,用户将多张不同区间划分的直方图进行了统一处理,显著降低了视觉压力,提高了数据解读效率。参与者还建议,可以尝试引入阻尼模式对时序数据进行探索,以便利用 Perception Booster 进行更为精确的时间点分析。这些建议为后续研究提供了宝贵的参考。

3.3　PB 辅助下的平行坐标图数据密度检测

在数据高度密集的情况下,平行坐标图可能展现出显著的视觉复杂性,导致不同数据点或趋势之间的区分和识别变得困难。这种现象可能增加用户理解和分析数据的难度,从而影响数据解读的有效性和准确性。因此平行坐标图通常与刷选功能一起搭配使用,然而受限于鼠标的每英寸点数(dots per inch,DPI),当数据高度密集时不论是刷选框大小的选取还是刷选框的移动都存在一定的误差局限。

3.3.1　实验设置

在平行坐标图的刷选过程中,存在刷选框大小与刷选框位移 2 个可变参数,因而需要 2 个无刷电机来与之配合进行精确控制。刷选框大小控制需要有较高的精度,而刷选框位移不仅要求高精度,还需根据当前框内数据分布进行反馈调整,以补偿平行坐标图在展示单一变量数据分布方面的局限性。

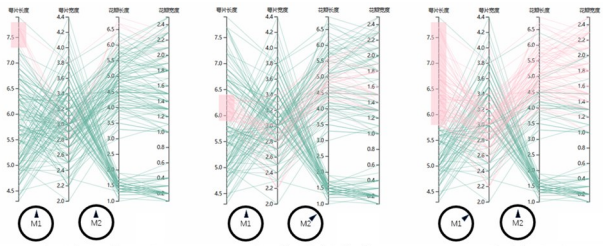
设计电机 *M*1 匹配刷选框大小控制,电机 *M*2 匹配刷选框位移控制。设置控制逻辑如表 3 所示。设置 *var* 作为电机转角 α 与刷选框位移 d 之间的映射系数,如式(22)所示,就可以实现控制 *var* 来达到连续可变的分辨值。

$$d = \frac{\alpha_n}{var_n},\ n \in \{M1, M2\} \tag{22}$$

表 3　电机与平行坐标图可变参数之间的控制关系

用户操作	电机模式	响应
*M*1 顺时针	恒定模式	刷选框下边沿下移
*M*1 逆时针	恒定模式	刷选框下边沿上移
*M*2 顺时针	映射模式	刷选框整体下移
*M*2 逆时针	映射模式	刷选框整体上移

如图 12 所示,初始阶段用户转动 *M*1 来控制刷选框的大小(图 12(a)与图 12(c)),之后转动 *M*2 进行遍历刷选(图 12(a)与图 12(b)),可视分析界面将实时计算刷选框内的数据点个数。将所得个数通过 Ajax 回传给后台处理系统,选择阻尼模式,并通过式(18)计算得到力反馈数值大小 *F* 后进行组帧传递给下位机实现与用户的力反馈交互。



(a) 初始参数分布　(b) 调节过程分布　(c) 最终筛选结果

图 12　映射模式下 PB 对平行坐标图的力反馈分析

3.3.2　实验结果

在对比了单一视觉反馈与旋钮辅助的力反馈刷选方式后,8 名实验参与者指出,力反馈不仅有助于他们在视觉上观察平行坐标图中不同变量间的关系,还能提供对当前单一变量变化的即时感知。此外,通过调节可设置的映射参数 *var* 使得 PB 可以灵活适应不同场景下的刷选精度要求。

3.4　实验总结

为了量化评估用户对力反馈交互的主观感受,本文对实验数据进行了统计分析,具体评分结果如表 4 所示。从表 4 可以看出,用户在操作流畅度和反馈清晰度 2 个维度上给出了较高的评价,这表明 PB 模式下的力反馈能有效辅助用户理解数据分布。然而,在长时间使用的舒适性方面,这可能是因为棘轮模式下的频繁震动导致了一定的手部疲劳,未来将进一步优化力反馈算法以改善这一问题。

如图 13 所示,PB 在可视分析中起到了较为优秀的辅助作用。在可视化图表中,重复数据会导致覆盖现象,PB 通过引入力反馈增加了用户的感知渠道,相比于仅依靠视觉反馈,这增加了用户接收信息的维度,从而提高了对重复数据的识别能力。此外,在分析数据的统计值时,力反馈相较于纯视觉反馈能够更直观地反映当前统计值的大小,进而帮助用户更好地理解数据分布的变化。最后,得益于 PB

的高度可定制性,相较于传统的鼠标刷选,PB 具有更高的刷选精度。实验实拍如图 14 所示。

表 4　PB 使用体验评分表(5 分制)

编号	问题	评分(平均值±标准差)
1	是否愿意在未来继续使用 PB	3.85±0.42
2	PB 是否易于使用	4.50±0.15
3	PB 的设计是否过于复杂	2.20±0.30
4	相较于单纯依赖视觉的可视分析,PB 是否提高了分析效率	4.02±0.40
5	PB 是否集合了多种功能	3.73±0.23
6	是否存在与描述不一致的使用体验	1.40±0.12
7	是否愿意帮助推广 PB	4.20±0.46
8	PB 是否难以使用	1.50±0.40
9	对 PB 的使用体验是否自信	4.70±0.15
10	使用 PB 是否需要一定的前置知识	3.95±0.43

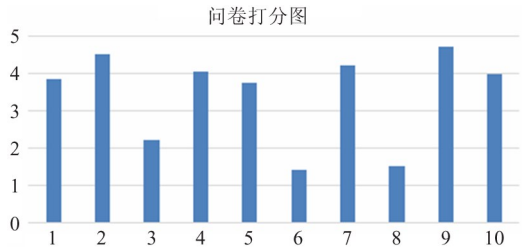


图 13　实验用户评分统计图

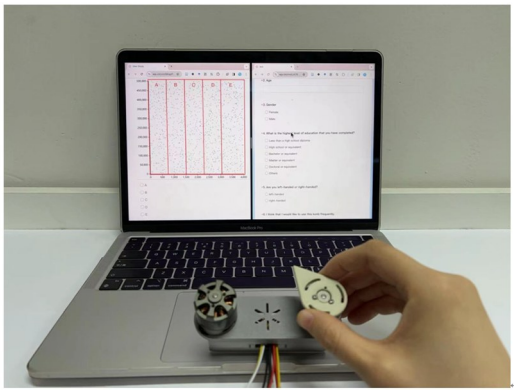


图 14　实验实拍图

4　结　论

本文介绍了一种创新性的力反馈装置 Perception Booster,该装置旨在通过力反馈与可视化分析相结合的方式,增强用户对数据的感知和理解,实现多感官参与的数据呈现方法。本文详细探讨了 PB 的实现原理及其设计应用算法,确保装置能够准确地传递力反馈信号,并有效地与用户的交互动作相协调。

通过 PB 装置探索数据的经历,在某种程度上类似于使用游戏手柄进行主机游戏的体验,这表明力反馈技术在数据可视化领域有着巨大的应用潜力。这种多感官融合的方式不仅提升了用户体验的趣味性,还能够帮助用户更好地理解和记忆数据信息。

未来的研究方向将着重于进一步探索 PB 装置在不同数据集和应用场景下的潜在优势,包括但不限于金融、医疗、教育等多个领域。此外,设置 2 组实验还将继续优化 PB 的设计和功能,以确保其能够在实际应用中发挥最大效能,为数据可视化领域的技术创新和发展提供新的视角和可能性。

参考文献

[1] Bu C Z, Zhang Q J, Wang Q W, et al. SineStream: improving the readability of streamgraphs by minimizing sine illusion effects[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2021,27:1634-1643.

[2] Lu M, Fish N, Wang S Q, et al. Enhancing static charts with data-driven animations[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2022,28:2628-2640.

[3] Trautner T,Bolte F,Stoppel S,et al. Sunspot plots: model-based structure enhancement for dense scatter plots[J]. Computer Graphics Forum, 2020,3(39):551-563.

[4] Messerschmidt M A, Cortes J P F, Nanayakkara S. CoTacs: a haptic toolkit to explore effective on-body haptic feedback by ideating, designing, evaluating and refining haptic designs using group collaboration[J]. International Journal of Human-Computer Interaction, 2024,41(9):1-21.

[5] Tavana A,Habili H S,Fateminia M. The impact of affective haptic design of wearable devices on persian users[J]. International Journal of Human-Computer Interaction, 2024,41(7):1-13.

[6] Alma U A, Rosenkranz R, Altinsoy M E. Perceptual substitution based haptic texture rendering for narrow-band reproduction[J]. IEEE Transactions on Haptics, 2023, 16:424-435.

[7] Joao G, Kim Y J, Rodrigo N, et al. The design space of the auditory representation of objects and their behaviours in virtual reality for blind people[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2023,5(29): 2763 - 2773.

[8] Dai S Z, Smiley J, Dwyer T, et al. RoboHapalytics: a robot assisted haptic controller for immersive analytics [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2023,1(29):451 - 461.

[9] Jason A, John H, Stephen W. Characterising the physicality of everyday Bottons[C] // Proceesings of the 9th ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces. New York, USA:ACM, 2014:205 - 208.

[10] Liu Q, Tan H, Jiang L, et al. Perceptual dimensionality of manual key clicks[C] //2018 IEEE Haptics Symposium. San Francisco, USA:IEEE,2018:112 - 118.

[11] Kildal J. 3D-press: haptic illusion of compliance when pressing on a rigid surface[C] // Proceedings of International Conference on Multimodal Interfacesand the Workshop on Machine Learning for Multimodal Interaction. Minneapolis, USA: ACM, 2010:1 - 8.

[12] Park C,Yoon J,Oh D,et al. Augmenting physical buttons with vibrotactile feedback for programmable feels[C] // Proceedings of Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology. Minneapolis, USA:ACM,2020: 924 - 937.

[13] Follmer S, Leithingrt D, Olwal A, et al. Inform: dynamic physical affordances and constraints through shape and object actuation[C]//Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology. New York, USA: ACM, 2013:417 - 426.

[14] Taher F, Hardy J, Karnik A, et al. Exploring interactions with physically dynamic bar charts[C] // Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computer Systems. New York, USA:ACM, 2015: 3237 - 3246.

[15] Goc L M, Kim L H, Parsaei A, et al. Zooids: building blocks for swarm user interfaces[C] // Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology. New York ,USA:ACM, 2016:97 - 109.

[16] Sebastian U, Torsten K. Haptic palpation for medical simulation in virtual environments[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2012,4(18): 617 - 625

[17] 卢振利,王乾,PEN ČI Ć Marko,等. 基于人机交互技术的社交型无奈式耸肩动作脑瘫康复训练系统设计[J]. 高技术通讯,2023,33(6):652 - 660.

[18] Lischke L W, Wozniak P, Mayer S, et al. Using variable movement resistance sliders for remote discrete input[C] // Proceedings of the 2017 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces. New York, USA: ACM, 2017:116 - 125.

Perception Booster: a force feedback visual analytics interaction knob based on brushless motors

Liu Jian, Sun Zifeng, Zhang Gefei, Tang Jingwei, Wu Yiming, Jiang Li, Sun Guodao
(College of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023)

Abstract

As data environments become increasingly complex and abstract, the limitations of traditional single-modal visual interaction in information presentation are becoming more apparent. To address this issue, this paper proposes an interactive data visualization method based on force feedback mechanisms, aiming to broaden information perception channels through multi-sensory interaction and overcome the shortcomings of traditional visualization charts in presenting complex data. We design and develop a force feedback device called Perception Booster (PB), which uses brushless direct current motors as the core actuator and dynamically adjusts force feedback based on Field-Oriented Control (FOC) algorithms. PB employs four force feedback control strategies (mapping mode, ratchet mode, spring mode, and constant mode) to flexibly adapt to various application scenarios, enhancing users' intuitive perception and understanding of data. Experimental results show that PB significantly improves users' ability to capture and understand information in data visualization charts, providing a new perspective and tool for complex data analysis.

Key words: force feedback, haptics, visualization, human-computer interaction, multisensory