

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.2109083

基于触摸屏交互的指套式盲文再现系统^{*}

陈大鹏^{1,2}, 高亚洲^{1,2}, 宋爱国³, 刘佳^{1,2}, 曾洪³

(1. 南京信息工程大学自动化学院 南京 210044; 2. 南京信息工程大学江苏省智能气象探测机器人工程研究中心 南京 210044; 3. 东南大学仪器科学与工程学院 南京 210096)

摘要:在当今信息时代,传统的纸质盲文书籍在传播知识方面存在很多不足,逐渐无法满足视障人士的盲文阅读需求。受可穿戴装置的启发,提出了一种基于触摸屏交互的指套式盲文再现系统。根据标准盲文的结构特点、视障人士感知盲文的方式,以及指套式装置对小型化要求,设计了一种新型的盲文点执行器,并通过有限元分析对其结构和参数进行了优化。性能分析和用户实验的结果表明,提出的盲文点执行器具有刷新频率高、功耗低和体积小等优点,并能够实现最高位和最低位的锁止操作。提出的盲文再现系统将便携的指套式装置与数据可刷新的触摸屏相结合,并利用4个压电陶瓷执行器的振动触觉反馈引导手指在触摸屏上的运动方向,为视障人士提供了一种便捷阅读盲文的新途径。

关键词:盲文阅读;指套式装置;盲文点执行器;触摸屏交互;位置锁止功能

中图分类号: TH7 TP391 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Fingertip braille display system based on touch screen interaction

Chen Dapeng^{1,2}, Gao Yazhou^{1,2}, Song Aiguo³, Liu Jia^{1,2}, Zeng Hong³

(1. School of Automation, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;
2. Jiangsu Province Engineering Research Center of Intelligent Meteorological Exploration Robot (C-IMER),
Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 3. School of
Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: In the current information age, the traditional paper-based Braille books have many deficiencies in disseminating knowledge, and are gradually unable to meet the Braille reading needs of the visually impaired. Inspired by wearable devices, this article designs a fingertip Braille display system based on touch screen interaction. According to the structural characteristics of standard Braille, the way visually impaired people perceive Braille, and the miniaturization requirements of fingertip devices, this article designs a new type of Braille dot actuator and optimizes its structure and parameters through finite element analysis. The results of performance analysis and user experiments show that the proposed Braille dot actuator has the advantages of high refresh rate, low power consumption and small size, which could achieve locking operations at the highest and lowest positions. The Braille display system combines the portable fingertip device with the touch screen that can refresh data, and employs the vibrotactile feedback of four piezoelectric ceramic actuators to guide the movement direction of the finger on the touch screen, providing a new way for visually impaired people to read Braille conveniently.

Keywords: braille reading; fingertip device; braille dot actuator; touch screen interaction; position lock function.

收稿日期: 2021-12-24 Received Date: 2021-12-24

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金(62003169, 61773219, 62173089)、江苏省自然科学基金青年基金(BK20200823)、江苏省高等学校自然科学基金项目(20KJB520029)、江苏省创新创业人才计划项目(JSSCBS20200576)资助

0 引 言

根据世界卫生组织的最新报告,全世界至少有 22 亿人视力受损,其中相当一部分为盲人^[1]。一直以来,盲人主要通过纸质盲文书籍进行学习,但纸质盲文书籍不仅体积大、不便于携带,且功能单一。随着信息技术的发展,盲文书籍向数字化、电子化方向发展已经成为趋势,视障人士也迫切需要具有盲文再现功能的电子产品^[2],以帮助他们更加方便地阅读和获取更多数字信息。

近年来,国内外学者们致力于创造可刷新、低成本的盲文再现装置。盲文再现装置中的盲文点执行器可以不断刷新,以组合成不同的盲文字符。盲文点执行器的工作性能直接决定了盲文再现装置的刷新频率和反馈力。目前常用的几种驱动形式有气压驱动式、热敏和电敏材料形变式,以及电磁或电机驱动式^[3]。例如,在气压驱动方面,利用气阀、弹性膜和微液压装置等开发的盲文显示器^[4-9]在刷新频率、盲文点位移和锁止力方面的表现基本可以满足盲文再现的使用要求。但气动执行机构通常需要外部高压空气泵、压力控制阀^[10]和复杂的气管通道。如果没有触点的锁紧结构,气动执行器需要长时间保持一定水平的高压气体以提供盲文点的锁止力,并且它们的点刷新频率相对较低^[11-12]。

热敏感可变形材料一般采用形状记忆合金。电敏感可变形材料主要包括电话性聚合物^[13]和压电材料。Velazquez 等^[14]和 Besse 等^[15]均使用形状记忆合金设计了锁止力和位移均满足使用要求的执行器。但相关研究表明,由于形状记忆合金材料变形速度慢、疲劳强度低,其很难满足盲文显示器对盲文点执行器耐久性的要求^[16]。Frediani 等^[17]尝试使用电话性聚合物开发盲文点执行器,但其点位移和形变量非常小,几乎不足以满足使用要求,且反馈力非常弱。同时,电话性聚合物需要使用高压电源激活,对盲人构成了潜在危险^[17-21]。相比之下,压电致动器在制作盲文显示器方面更具优势。压电致动器具有较高的点刷新频率、合适的点反馈力和点位移^[22]。在 5~12 V 工作电压的作用下,压电致动器可以有效地驱动触觉点上下移动,形成盲文字符^[23-24]。目前,大多数商用盲文显示器都是基于压电致动器设计的^[25-26]。由于制作盲文显示器的压电致动器多为条形,带有压电致动器的盲文显示器的行距通常比传统盲文纸文档的行距长。此方案可能不适合开发多行盲文显示器。另外,压电致动器的成本较高。对于盲人,尤其是发展中国家的盲人来说,基于压电致动器的盲文显示器难以得到广泛的推广。

电磁或电机执行器^[27-30]利用电磁效应产生电磁力来驱动盲文点。通常,带有电机的盲文点执行器需要传动

机构,将电机的旋转运动转换为盲文点的线性运动^[24]。虽然电磁执行器具有响应速度快、反馈力大、可靠性高等优点,但需要解决锁止问题。否则,电磁执行器必须长时间持续通电,以将触点保持在凸起位置,这会导致功耗高、温度高和用户体验差等问题。

虽然目前已经取得了许多成果,但盲文再现装置的研发仍然面临如下几个方面的挑战。1) 标准盲文点的直径小、排列密集,增加了执行器设计、制造和组装的难度。2) 为了满足盲人实时人机交互的要求,盲文点必须具有很快的响应速度,通常刷新频率需要超过 10 Hz^[23]。3) 为了降低执行器的功耗,盲文点需要能够在最高位置锁止,但由于盲文点执行器排列密集且刷新频率高,使得此项任务变得困难。4) 盲文点执行器必须具有足够的上弹力和锁止力才能使盲人清楚的识别盲文字符,但执行器通常体积偏小,很难提供足够大的力。5) 价格昂贵。

为了有效解决上述问题,本文设计了电磁驱动的盲文点执行器,通过在上下位置安装永磁体来解决位置锁止问题,并利用有限元分析对盲文点执行器的结构和参数进行优化。同时,受可穿戴式触摸屏交互装置^[31-33]和盲文触感摸读^[34]的启发,开发了用于触摸屏交互的指套式盲文再现装置,可实时再现触摸屏上对应位置的文字信息。触摸屏作为当前广泛使用的智能设备的核心部件,具有检测交互位置和信息处理的功能,而且可以随时刷新和显示近乎无限量的数据。由指套式装置和触摸屏组成的盲文再现系统不仅数字化程度高,而且为盲文阅读提供了新途径。为了让盲人能够自主感知并完成阅读,指套式盲文再现装置利用上方的姿态检测模块以及触摸屏检测到的交互位置来确定接下来的运动方向,并通过 4 个压电陶瓷执行器的振动触觉反馈引导手指在触摸屏上的运动^[33]。性能测试和用户实验均表明本文提出的系统满足盲文再现的使用要求。

1 指套式盲文再现装置的设计

1.1 总体结构设计

盲人在阅读盲文书籍时,通常使用食指在盲文点上滑动,以通过指尖感知对应的盲文信息。触摸屏虽然允许用户使用单指或多指通过点击、拖拽和缩放等动作与其进行交互,但触摸屏本身并不具备再现凸起盲文点的功能。为了让盲人能够通过触摸屏阅读盲文或汉字,开发能与触摸屏交互且能够进行盲文再现的装置成为本文研究的重点。

图 1 展示了提出的指套式盲文再现装置与触摸屏交互的场景。它可以分为 4 个部分:1) 交互部分,2) 探针阵列模块,3) 方向引导部分,4) 电源和控制器部分。交互部分由用于与触摸屏点接触的电容触头组成。探针阵列

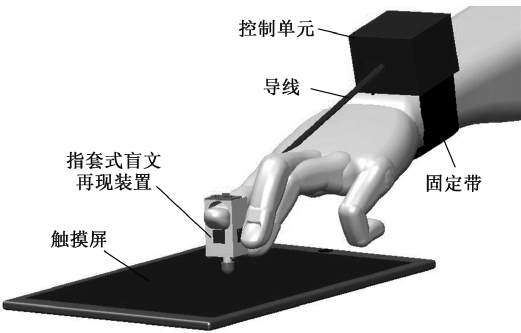


图 1 指套式盲文再现装置与触摸屏交互的场景
Fig. 1 The scene of the fingertip Braille display device interacting with the touch screen

模块由 6 个盲文点执行器按照 3 行 2 列且间隔 2.5 mm 进行排列而组成。方向引导部分由 4 个压电陶瓷执行器安装在框架四周而组成。最后一部分集成了可充电电池、控制器和拨动开关。

图 2(a) 显示了指套式盲文再现装置的整体结构示意图,装置从上到下分别包括姿态检测模块、上框架、盲文点、压电陶瓷执行器、接线口、下框架、螺钉和电容触

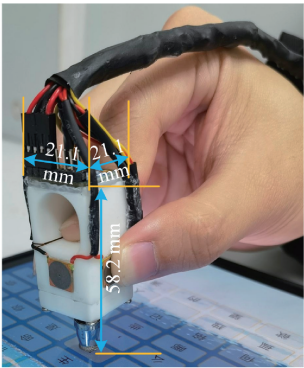
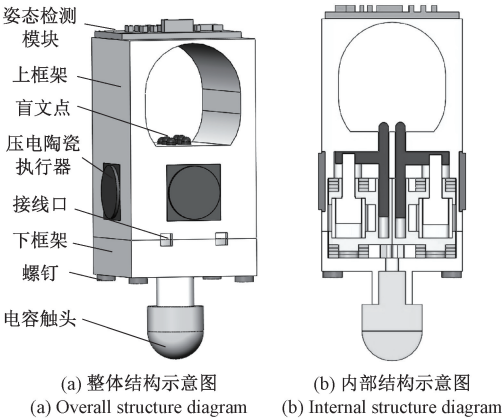


图 2 指套式盲文再现装置的结构示意图和样机
Fig. 2 Schematic diagram and prototype of the fingertip Braille display device

头,压电陶瓷执行器安装在上框架的 4 个侧面上。如图 2(b)所示,6 个盲文点执行器安装在上框架内部,底部通过下框架封闭,并采用螺钉固定。下框架底部装有电容触头。姿态检测模块、盲文点和压电陶瓷执行器的电源线通过接线口与外部控制器相连。装置的尺寸与穿戴方式如图 2(c)所示,实物总重量为 58.8 g。

1.2 工作原理

图 3 说明了指套式盲文再现装置与触摸屏上显示的文字进行交互的工作原理,其中虚线表示电源供电,点画线表示数据传输,实线表示驱动器的控制信号。首先,指套式盲文再现装置需要与智能设备建立蓝牙连接,以便执行对控制指令的无线数据传输。当电容触头接触触摸屏时,系统启动盲文交互进程。智能设备检测到接触点范围对应的文字,首先在上位机软件中将汉字转化为对应的汉语拼音,其次根据拼音与盲文点的对应关系进行盲文编码,最后转化为盲文点的控制指令,并通过蓝牙模块传送到指套式盲文再现装置。

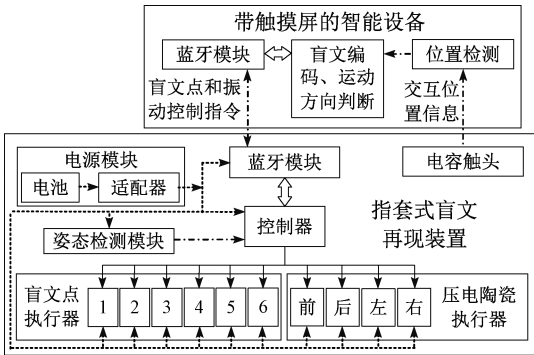


图 3 指套式盲文再现系统的工作原理
Fig. 3 Working principle of the fingertip Braille display system

同时,上位机将检测到的交互位置数据通过蓝牙发送给控制器。电容触头在触摸屏上滑动的过程中,姿态检测模块实时检测装置的姿态,并将数据传送给控制器。当在触摸屏上阅读一行文字时,控制器驱动与该行文字排版方向相对应的一个或两个压电陶瓷执行器产生方向性的振动提示。若电容触头的滑动方向偏离了该行文字的排版方向,控制器驱动压电陶瓷执行器产生向上或向下的方向性振动提示,引导电容触头回到正确的文字所在行,然后继续阅读该行文字,直至该行结束。其中,左右两侧和内侧的压电陶瓷执行器均有手指与它们直接接触,外侧压电陶瓷执行器产生的振动提示可以间接地被感知,从而引导盲人按照正确的文字排版顺序进行阅读。通过这种方式,指套式装置就可以再现触摸屏上显示的文字,并为盲人正确地阅读一行文字提供方向引导。

在实际使用时,盲人使用者的右手穿戴指套式装置将电容触头放在触摸屏上。智能设备将电容触头的接触

位置和触摸屏中显示的第 1 行文字的起始位置通过蓝牙模块传输至控制器。控制器判断两个位置是否重合。如果不重合,则控制器通过控制压电陶瓷执行器的振动来引导盲人将电容触头移动到第 1 行文字的起始位置。此时,使用者可以将左手放在触摸屏的左侧作为外部参考系,右手穿戴装置按照页面的排版顺序进行阅读。第 1 行阅读结束时,左手往下移动一行,右手带动装置将电容触头移动到第 2 行的开头继续进行阅读。此过程中,压电陶瓷执行器实时进行运动方向引导。

1.3 盲文点执行器

指套式盲文再现装置由 6 个独立的盲文点执行器组成。每个盲文点执行器在最高位和最低位都具有不通电情况下的位置锁止功能,结构相对简单、响应速度快且解锁方便。

1) 盲文点执行器的结构设计和工作原理

为了保证盲文点的显示密度与国标盲文一致,盲文点执行器必须实现微型化。如图 4 所示,盲文点执行器主要由接触点、连杆、上永磁体、铁芯、线圈、框架以及下永磁体组成。接触点、连杆与框架采用 3D 打印制成;上下永磁体均选用外径 3 mm、内径 1.5 mm、厚度 2 mm 的钕铁硼 N38 材质永磁体;铁芯由半径 2 mm、高度 4 mm 的电工纯铁 (DT4C) 制成,具有易磁化、剩磁感应强度小、磁导率高和饱和磁感应强度高特点;线圈由直径 0.15 mm 的漆包铜线在铁芯上绕制而成。考虑到盲文点的直径为 1.0 ~ 1.6 mm,盲文点间的间距为 2.2 ~ 2.8 mm,本文设计的盲文点执行器将驱动部分与接触点并列设计,两者用连杆连接传递运动。

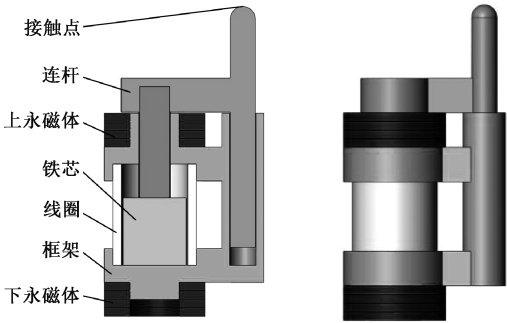


图 4 盲文点的结构及外观示意图

Fig. 4 Structure and appearance diagram of the Braille dot

盲文点执行器的位置锁止功能是基于永磁体对铁芯的吸引力实现的。在不显示盲文时,如图 5(a) 所示,铁芯受到下永磁体的吸引力而被锁止在最低位。当显示盲文时,线圈通入逆时针方向的电流,铁芯瞬间被磁化为如图 5(b) 所示的电磁铁,且铁芯的上部为 N 极、下部为 S 极。由于上永磁体的上部为 N 极,下部为 S 极;下永磁体的上部为 S 极,下部为 N 极。此时被磁化的铁芯同时受到上永磁体向上的吸引力和下永磁体向上的推力,从而克服重力向上运动。当达到最高位时,铁芯被上永磁体锁止。此时线圈断电,盲文点仍保持在最高位,如图 5(c) 所示。当已凸起的盲文点不再显示盲文时,线圈通入顺时针方向的电流,铁芯瞬间被磁化为如图 5(d) 所示的电磁铁,此时的铁芯同时受到上永磁体向下的推力和下永磁体向下的吸引力,以及自身的重力,在 3 个力的共同作用下,铁芯运动到最低位,同时被下永磁体锁止,回到初始状态。

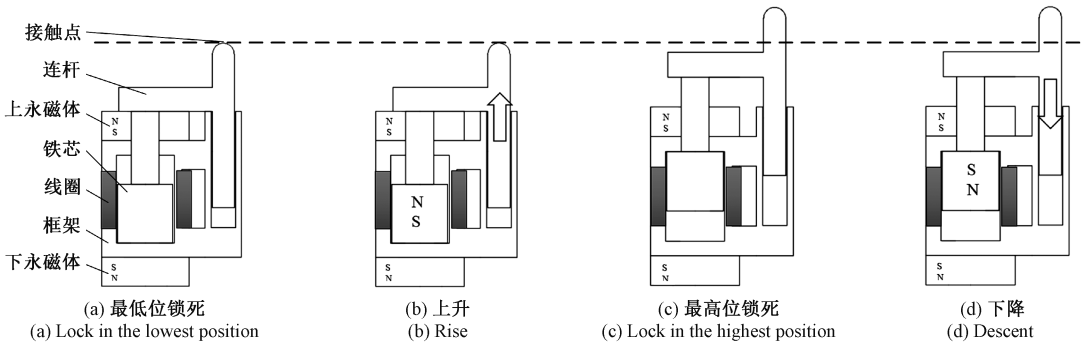


图 5 盲文点的工作原理

Fig. 5 Working principle of the Braille dot

2) 电磁设计

除了机械结构设计,也需要对盲文点执行器中铁芯的受力状况进行分析。根据盲文点执行器的工作原理可知,铁芯在运动过程中同时受到上下永磁体与线圈磁力的合力。通过对铁芯在最高位和最低位的受力情况分析,可以得到线圈驱动铁芯运动时所产生的磁场强度,从

而得到线圈的安匝数。

线圈本质是定长的螺旋管,由于环形线圈的对称性使得其非轴向的磁场对铁芯产生的磁力相互抵消,因此只需考虑轴线上的磁场变化即可。线圈中心轴上任意一点的磁场强度^[35]可表示为:

$$B_x = 0, B_y = 0,$$

$$B_z = \frac{\mu_0 NI}{2} \left[\frac{z + \frac{L_{coil}}{2}}{\sqrt{R_{coil}^2 + \left(z + \frac{L_{coil}}{2}\right)^2}} - \frac{z - \frac{L_{coil}}{2}}{\sqrt{R_{coil}^2 + \left(z - \frac{L_{coil}}{2}\right)^2}} \right] \quad (1)$$

其中, μ_0 为真空磁导率, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$; NI 为线圈的安匝数; L_{coil} 为线圈的长度; R_{coil} 为线圈的平均半径。

线圈中的铁芯在磁化后, 会增加线圈周围的磁场。所以含有铁芯的线圈磁感应强度为:

$$B_z' = \mu_r B_z \quad (2)$$

其中, μ_r 为铁芯的相对磁导率。

在磁场分布均匀且磁极表面为平面结构时, 根据麦克斯韦电磁力计算公式, 磁吸引力可表示为^[36]:

$$F = \frac{B_z'^2 A}{2\mu_0} \quad (3)$$

其中, A 为铁芯的有效横截面积。

(1) 当铁芯位于最低位

线圈通入逆时针方向的电流, 铁芯的受力情况可用如下等式表示:

$$F_{Uma} + F_{Ula} - F_{Dma} + F_{Dlp} = G \quad (4)$$

其中, F_{Uma} 表示铁芯受到的上永磁体吸力; F_{Dma} 表示铁芯受到的下永磁体吸力; F_{Ula} 表示铁芯仅受线圈产生的磁场作用时受到的上永磁体吸力; F_{Dlp} 表示铁芯仅受线圈产生的磁场作用时受到的下永磁体推力。

F_{Ula} 与 F_{Dlp} 可通过如下公式计算得到:

$$F_{Ula} = \frac{B_U^2 A}{2\mu_0} \quad (5)$$

$$F_{Dlp} = \frac{B_D^2 A}{2\mu_0} \quad (6)$$

其中, B_U 、 B_D 可分别通过式(2)求得。联立式(2)、(4)、(5)、(6), 可求得 $NI = 61.3 \text{ A}$ 。

(2) 当铁芯位于最高位

线圈通入顺时针方向的电流, 铁芯的受力情况可用如下等式表示:

$$F_{Dma} + F_{Dla} - F_{Uma} + F_{Ulp} = G \quad (7)$$

其中, F_{Ulp} 表示铁芯仅受线圈磁场单独作用时受到的上永磁体推力; F_{Dla} 表示铁芯仅受线圈磁场单独作用时受到的下永磁体吸力。 F_{Ulp} 与 F_{Dla} 可通过如下公式计算得到:

$$F_{Ulp} = \frac{B_U^2 A}{2\mu_0} \quad (8)$$

$$F_{Dla} = \frac{B_D^2 A}{2\mu_0} \quad (9)$$

联立式(2)、(7)、(8)、(9), 可求得 $NI = 219.5 \text{ A}$ 。对比最低位和最高位两个位置的 NI 值, 为满足驱动要求, 选择最大值进行线圈的设计。

考虑到此类设计存在 10% ~ 35% 漏磁的情况, NI 值将选取最大漏磁时所需的值, 即 296.3 A。首先, 可根据如下公式求得铜丝的直径:

$$d = \sqrt{\frac{4 \times \rho_t \times D \times NI}{U}} \quad (10)$$

其中, ρ_t 为铜丝的电导率; D 为线圈内外径的平均值; U 为盲文点的工作电压, 其值为 35 V。最终求得铜丝直径为 0.15 mm 最佳。线圈匝数的计算公式为:

$$N = \frac{4f_k Lb}{\pi d^2} \quad (11)$$

其中, f_k 为线圈填充系数; L 为线圈长度; b 为线圈厚度; d 为铜丝直径。计算得匝数为 110 匝。

3) 有限元分析

盲文点执行器的设计需要综合考虑结构设计、电磁设计和动力学特性等因素。这些因素都会对盲文点执行器的性能产生影响, 且各个因素之间具有耦合和约束关系。为了对执行器的结构进行优化, 提高执行器的性能, 本文使用 ANSYS 公司的 ANSYS Maxwell 软件对盲文点执行器的结构和参数进行有限元分析。有限元分析的目的在于使盲文点执行器能够在最小的体积和功率消耗情况下, 输出满足需求的上弹力, 并在动力学特性的基础上兼顾体积、重量、发热量等因素。该软件可对驱动器在运动过程中的瞬时磁场进行仿真, 以便研究铁芯在各个时刻的受力和运动情况, 以确定符合设计要求的参数。

本文进行有限元分析的步骤主要有如下几个方面: 建立执行器模型、定义执行器各部件材料、设定边界条件和激励条件、对执行器进行网格划分和求解设置。求解结束后, 可查看分析各个类型的场图。经过对结构及参数的几轮分析, 得到盲文点执行器的最优结构参数如表 1 所示。当线圈通入 2 A 直流电时, 轴对称有限元分析结果如图 6 所示。铁芯运动过程中的力-位置关系如图 7 所示。

2 性能测试

根据有限元分析得到的结构参数, 我们制作了盲文点执行器, 如图 8 所示。

盲文点执行器的性能测试主要包括上弹力测试、锁止力测试, 以及响应时间测试。盲文点的上弹力与锁止力的测试场景如图 9 所示, 测力计 (ZTS-50N, IMADA 公司, 日本) 被固定在盲文点执行器的上方。测试上弹力时, 测力计的前端位于执行器上方 1 mm 处, 给执行器上电并读取测力计数值。测试锁止力时, 缓慢匀速向下移

表 1 盲文点执行器的结构和功能参数

Table 1 Structure and functional parameters of Braille dot actuator

参数	标示	值
铁芯长度/mm	L_0	4
铁芯最大行程/mm	L_1	2
铁芯半径/mm	R_0	2
磁铁高度/mm	L_2	2
磁铁外半径/mm	R_1	3
磁铁内半径/mm	R_2	1.5
线圈的外半径/mm	r_0	3
线圈的内半径/mm	r_1	2.2
线圈匝数	N	110
盲文点执行器重量/g	M	5.8

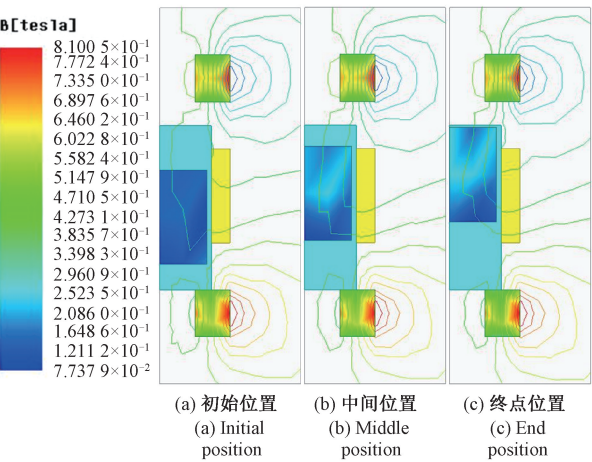


图 6 盲文点执行器的轴对称有限元分析结果

Fig. 6 Axisymmetric finite element analysis results of Braille dot actuator

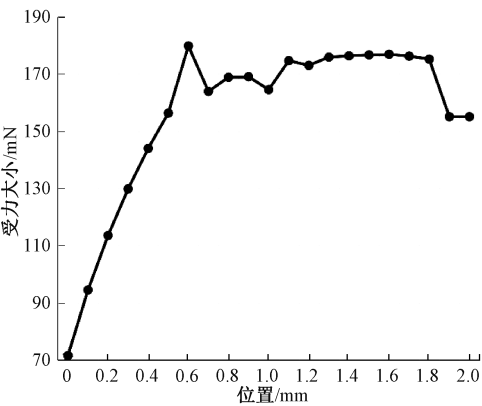


图 7 铁芯运动过程中的力-位置关系

Fig. 7 Force-position relationship during iron core movement

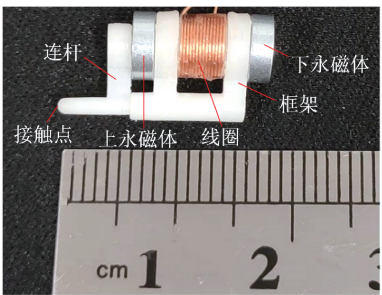


图 8 盲文点执行器样机

Fig. 8 Prototype of the Braille dot actuator



图 9 测试盲文点执行器上弹力与锁止力的实验平台

Fig. 9 Experimental platform for testing upper elastic force and locking force of Braille dot actuators

动测力计,当铁芯由最高位运动到最低位时,读取测力计数值。

分别对制作的 6 个盲文点执行器进行测试,上弹力和锁止力的测试结果分别如表 2 和 3 所示。为了保证视障人士在阅读过程中盲文点不会从最高位下落,从而在手指端产生足够的触感来识别盲文,需要盲文点执行器在最高位处提供一定的锁止力^[22,29]。测试数据显示,设计的盲文点执行器在最高位处的锁止力在 61~70 mN 之间,满足设计要求。

表 2 盲文点上弹力的测试结果

Table 2 Test results of upper elastic force of Braille dots

序号	上弹力/mN
1	26
2	24
3	25
4	25
5	23
6	24

表 3 盲文点锁止力的测试结果

Table 3 Test results of locking force of Braille dots	
序号	锁止力/mN
1	70
2	61
3	65
4	68
5	68
6	69

盲文点执行器的响应时间决定了盲文显示的速度,直接影响使用者的阅读体验。本文使用与测力计 ZTS-50N 搭配的 Force Recorder Professional 软件测量盲文点执行器从接收到显示指令到最终完全弹起的时间,该软件的采样间隔为 1 ms。分别对 6 个盲文点执行器进行测量,结果如表 4 所示。结果表明,盲文点执行器的响应时间在 230~289 ms 之间。

表 4 盲文点响应时间的测试结果

Table 4 Test results of response time of Braille dots	
序号	响应时间/ms
1	230
2	261
3	252
4	289
5	276
6	253

3 用户实验

为了验证装置在实际使用过程中的性能,本实验安排了 10 名有过至少 5 年盲文学习经验的视障人士参与。其中包含 5 名女性,年龄均在 20~30 岁之间。没有受试者报告他们的感知能力存在任何缺陷,且他们在此之前并没有接触过用于盲文再现的电子产品。实验工具包括指套式盲文再现装置和联想平板电脑。在正式实验之前,使用实验示例让每个受试者熟悉提出的指套式盲文再现系统的工作流程和使用方法,并让他们感受装置再现盲文的特点。

3.1 实验方法与过程

该实验在触摸屏上随机显示一段文字,所显示的文字均为常用文字。1 个汉字对应的盲文由 1 个声母方、1 个韵母方和 1 个声调方组成。装置的电容触头接触触

摸屏上的文字时,平板电脑每间隔 0.5 s 分别将再现一个汉字所需的三方阵列组合指令依次通过蓝牙发送给控制器。受试者依次感受包括汉字和符号在内的共 30 个文字,并在感受过程中将感知到的汉字说出来,供工作人员统计准确率。实验过程中没有语音提示和其他辅助。10 名受试者均参与了该实验。实验时,平板电脑水平放置在桌面上,一名受试者穿戴好指套式盲文再现装置,并戴着播放白噪音的耳机坐在桌子前。为了保证实验结果的准确性,每位受试者在实验全程均需配带眼罩。受试者姿势固定后,在触摸屏上依次感知文字,实验场景如图 10 所示。本次实验共安排两轮,两轮实验再现的文字不同。所有受试者依次完成实验后,实验者统计每位受试者的识别准确率以及完成每轮实验所用的时间。



图 10 受试者使用指套式装置在触摸屏上感知文字的场景
Fig. 10 The experiment scene where a subject uses the fingertip device to perceive characters on the touch screen

3.2 实验结果

按照上述实验程序,受试者的识别准确率和所用时间的统计结果分别如表 5 和 6 所示。可以看出,受试者通过穿戴指套式盲文再现装置,对文字的阅读准确率基本保持在 83.3% 以上,30 个文字的阅读时间在 78.6~116.1 s 之间。

表 5 第 1 轮实验结果

Table 5 Results of the first round of experiments		
受试者	准确率/%	时间/s
NO. 1	83.3	85.6
NO. 2	80.0	91.7
NO. 3	86.7	78.6
NO. 4	90.0	103.1
NO. 5	83.3	111.5
NO. 6	83.3	96.9
NO. 7	93.3	88.8
NO. 8	86.7	102.2
NO. 9	76.7	90.4
NO. 10	80.0	116.1

表 6 第 2 轮实验结果

Table 6 Results of the second round of experiments

受试者	准确率/%	时间/s
NO. 1	86. 7	80. 3
NO. 2	83. 3	90. 8
NO. 3	86. 7	77. 9
NO. 4	93. 3	99. 2
NO. 5	83. 3	110. 6
NO. 6	93. 3	94. 9
NO. 7	90. 0	87. 1
NO. 8	90. 0	99. 3
NO. 9	80. 0	88. 8
NO. 10	86. 7	105. 7

为了调查受试者使用装置的熟练度是否会对文字阅读的用时和准确率造成影响,在每位受试者均能熟练地使用指套式装置阅读文字后继续按照上述的实验方法和过程进行了第 3 轮实验。该实验再现的 30 个文字与前两轮均不同,实验结果的统计如表 7 所示。

表 7 第 3 轮实验结果

Table 7 Results of the third round of experiments

受试者	准确率/%	时间/s
NO. 1	90. 0	69. 3
NO. 2	86. 7	72. 5
NO. 3	93. 3	67. 2
NO. 4	96. 7	79. 9
NO. 5	90. 0	82. 3
NO. 6	100. 0	78. 5
NO. 7	93. 3	77. 6
NO. 8	90. 0	81. 6
NO. 9	86. 7	71. 7
NO. 10	93. 3	83. 2

通过第 3 轮实验可以发现,受试者在熟练使用装置感知触摸屏上的文字后,平均阅读准确率可以达到 92%,且 30 个文字的平均阅读时间为 76. 38 s。实验结果说明,本文提出的装置不但能帮助盲人准确地阅读和理解触摸屏中显示的虚拟文字,而且在熟练使用后,盲人阅读的准确率和速度都能得到改善。

4 结 论

本文提出了一种用于触摸屏交互的新型指套式盲文再现装置。该设备是一个小型、轻便、便携和低功耗的独

立系统,非常适合于移动应用。为了满足盲文的显示需求,本文设计了一种盲文点执行器。通过将 6 个独立的盲文点执行器按照标准盲文阵列的要求进行集成,提出的指套式盲文再现装置能够对触摸屏上显示的文字进行再现,并通过 4 个方向上的压电陶瓷执行器进行运动方向引导。盲文点执行器具有体积小、响应速度快、功耗低等特点,且在最高位和最低位均具有位置锁止功能。本文采用有限元分析方法对盲文点执行器进行结构和参数优化,得到最优的结构参数。与触摸屏组成的盲文再现系统不仅数字化程度高,更为盲文阅读提供了一种新途径和工具。性能测试及用户实验验证了本文提出的装置在再现盲文方面的有效性,盲人在无人引导的情况下也可自主在触摸屏上感知完成阅读。

参考文献

[1] World Health Organization. “World report on vision.”, Accessed: 2021. [Online]. Available: <http://www.who.int/publications/i/item>.

[2] RAY A, GHOSH S, NEOGI B. An overview on tactile display, haptic investigation towards beneficial for blind person [J]. International Journal of Scientific & Engineering Research, 2015, 6(5): 88-95.

[3] 杨文珍, 许艳, 吴新丽, 等. 盲文显示装置的研究进展[J]. 浙江理工大学学报, 2015, 33(9): 660-668. YANG W ZH, XU Y, WU X L, et al. Research progress of Braille display device [J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2015, 33(9): 660-668.

[4] WU X, ZHU H, KIM S H, et al. A portable pneumatically-actuated refreshable Braille cell [C]. IEEE International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference, 2007: 1409-1412.

[5] WU X, KIM S H, ZHU H, et al. A refreshable Braille cell based on pneumatic microbubble actuators [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2012, 21(4): 908-916.

[6] RUSSOMANNO A, GILLESPIE R B, O'MODHRAIN S, et al. Modeling pneumatic actuators for a refreshable tactile display [C]. International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications, 2014: 385-393.

[7] RUSSOMANNO A, XU Z, O'MODHRAIN S, et al. A pneu shape display: Physical buttons with programmable touch response [C]. IEEE World Haptics Conference, 2017: 641-646.

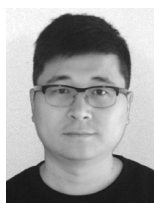
[8] GOETHALS P, LINTERMANS H, SETTE M M, et al.

- Powerful compact tactile display with microhydraulic actuators [C]. International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications, 2008: 447-457.
- [9] LEE J S, LUCYSZYN S. A micromachined refreshable braille cell [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2005, 14(4): 673-682.
- [10] RUSSOMANNO A, GILLESPIE R B, O'MODHRAIN S, et al. The design of pressure-controlled valves for a refreshable tactile display [C]. IEEE World Haptics Conference, 2015: 177-182.
- [11] FAN R E, FEINMAN A M, WOTTAWA C, et al. Characterization of a pneumatic balloon actuator for use in refreshable Braille displays [J]. Studies in Health Technology and Informatics, 2009, 142: 94-96.
- [12] KHIN P M, LOW J H, LEE W W, et al. Soft haptics using soft actuator and soft sensor [C]. IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, 2016: 1272-1276.
- [13] 吴一川, 孟欢欢, 黄启洋, 等. 面向触觉力反馈的可穿戴柔性执行器研究现状[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(9): 244-252.
- WU Y CH, MENG H H, HUANG Q Y, et al. Research status of wearable and flexible actuators for haptic force feedback [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(9): 244-252.
- [14] VELAZQUEZ R, PISSALOUX E E, HAFEZ M, et al. Tactile rendering with shape-memory-alloy pin-matrix [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2008, 57(5): 1051-1057.
- [15] BESSE N, ROSSET S, ZARATE J J, et al. Understanding graphics on a scalable latching assistive haptic display using a shape memory polymer membrane [J]. IEEE Transactions on Haptics, 2018, 11(1): 30-38.
- [16] BISWAS S, VISELL Y. Emerging material technologies for haptics [J]. Advanced Materials Technologies, 2019, 4(4): 1900042/1-1900042/30.
- [17] FREDIANI G, BUSFIELD J, CARPI F. Enabling portable multiple-line refreshable Braille displays with electroactive elastomers [J]. Medical Engineering & Physics, 2018, 60: 86-93.
- [18] LEE H S, PHUNG H, LEE D H, et al. Design analysis and fabrication of arrayed tactile display based on dielectric elastomer actuator [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2014, 205: 191-198.
- [19] LEVARD T, DIGLIO P J, LU S G, et al. Core-free rolled actuators for Braille displays using P (VDF-TrFE-CFE) [J]. Smart Materials and Structures, 2012, 21(1): 012001/1-012001/7.
- [20] QU X, MA X, SHI B, et al. Refreshable Braille display system based on triboelectric nanogenerator and dielectric elastomer [J]. Advanced Functional Materials, 2020, 31(5): 2006612/1-2006612/9.
- [21] RUNYAN N H, CARPI F. Seeking the 'holy Braille' display: Might electromechanically active polymers be the solution? [J]. Expert Review of Medical Devices, 2011, 8(5): 529-532.
- [22] CHO H C, KIM B S, PARK J J, et al. Development of a Braille display using piezoelectric linear motors [C]. SICE-ICASE International Joint Conference, 2006: 1917-1921.
- [23] YANG W, HUANG J, WANG R, et al. A survey on tactile displays for visually impaired people [J]. IEEE Transactions on Haptics, 2021, 14(4): 712-721.
- [24] 李志瑶, 孙禹泽, 田晓超, 等. 压电驱动柔性盲文点显装置实验研究 [J]. 机械研究与应用, 2020, 33(5): 1-4.
- LI ZH Y, SUN Y Z, TIAN X CH, et al. Experimental study on piezoelectric driven flexible Braille display device [J]. Mechanical Research & Application, 2020, 33(5): 1-4.
- [25] VÖLKEL T, WEBER G, BAUMANN U. Tactile graphics revised: The novel BrailleDis 9000 pin-matrix device with multitouch input [C]. International Conference on Computers for Handicapped Persons, 2008: 835-842.
- [26] Metec, "hyperbraille-F", Accessed: Dec. 28, 2020. [Online]. Available: <https://www.metec-ag.de/downloads/hyperbraille-f.pdf>.
- [27] MASUYAMA S, KAWAMURA A. A novel electromagnetic linear actuator with inner and outer stators and one moving winding for tactile display [C]. IEEE International Conference on Industrial Technology, 2016: 628-633.
- [28] BENALI-KHOUDJA M, HAFEZ M, KHEDDAR A. VITAL: An electromagnetic integrated tactile display [J]. Displays, 2007, 28(3): 133-144.
- [29] STREQUE J, TALBI A, PERNOD P, et al. New

- magnetic microactuator design based on PDMS elastomer and MEMS technologies for tactile display [J]. IEEE Transactions on Haptics, 2010, 3(2): 88-97.
- [30] 吴新丽, 祝盼飞, 杨文珍, 等. 触觉再现的分层电磁式盲文点显器[J]. 系统仿真学报, 2016, 28(9): 2220-2226, 2234.
- WU X L, ZHU P F, YANG W ZH, et al. Layered electromagnetic Braille point display for tactile reproduction [J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(9): 2220-2226, 2234.
- [31] 余玉卿, 宋爱国, 陈大鹏, 等. 用于触摸屏图像感知的指端力触觉再现系统[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(6): 1523-1530.
- YU Y Q, SONG A I G, CHEN D P, et al. Fingertip haptic rendering system for touch screen image perception [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument. 2017, 38(6): 1523-1530.
- [32] CHEN D, SONG A, TIAN L, et al. FW-Touch: A finger wearable haptic interface with an MR foam actuator for displaying surface material properties on a touch screen [J]. IEEE Transactions on Haptics, 2019, 12(3): 281-294.
- [33] CHEN D, LIU J, TIAN L, et al. Research on the method of displaying the contour features of image to the visually impaired on the touch screen [J]. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2021, 29: 2260-2270.
- [34] 褚少微, 朱科颖. 手机盲文触感阅读方法的设计与评估[J]. 北京理工大学学报, 2019, 39(2): 181-186.
- ZHU SH W, ZHU K Y. Designing for tactile Braille reading methods on smartphones [J]. Transaction of Beijing Institute of Technology, 2019, 39(2): 181-186.
- [35] 邱捷, 钱秀英. 多种矩形截面导线的磁场计算解析式及奇异积分处理[J]. 西安交通大学学报, 1995, 29(12): 11-17.
- QIU J, QIAN X Y. An analytical formula for computing 3-D magnetic of conductors with rectangular cross section [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1995, 29(12): 11-17.
- [36] 阎秀恪, 谢德馨, 高彰燮, 等. 电磁力有限元分析中麦克斯韦应力法的积分路径选取的研究[J]. 电工技术学报, 2003, 18(5): 32-36.
- YAN X G, XIE D X, GAO ZH X, et al. Research on integration path selection of maxwell stress tensor method

used in electromagnetic force FEM analysis [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2003, 18(5): 32-36.

作者简介



陈大鹏, 2011 年于安徽理工大学获得学士学位, 2019 年于东南大学获得博士学位, 现为南京信息工程大学自动化学院讲师、硕士生导师, 主要研究方向为力触觉再现、人机交互、康复工程。

E-mail: dpchen@nuist.edu.cn

Chen Dapeng received his B.Sc. degree from Anhui University of Science and Technology in 2011, and his Ph.D. degree from Southeast University in 2019. He is currently a lecturer and a master advisor in the School of Automation at Nanjing University of Information Science & Technology. His main research interests include haptic display, human-computer interaction, and rehabilitation engineering.



宋爱国, 分别在 1990 年和 1993 年于南京航空航天大学获得学士学位和硕士学位, 1996 年于东南大学获得博士学位, 现为东南大学仪器科学与工程学院教授、博士生导师, 主要研究方向为力触觉再现、康复工程、机器人遥操作技术。

E-mail: a. g. song@seu.edu.cn

Song Aiguo received his B.Sc. and M.Sc. degrees both from the Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 1990 and 1993, respectively, and his Ph.D. degree from Southeast University in 1996. He is currently a professor and a Ph.D. advisor in the School of Instrument Science and Engineering at Southeast University. His main research interests include haptic display, rehabilitation engineering, and robotic teleoperation technology.



刘佳 (通信作者), 2008 年于东南大学获得博士学位, 现为南京信息工程大学自动化学院教授、硕士生导师, 主要研究方向为力触觉再现、虚拟/增强现实。

E-mail: liujia@nuist.edu.cn

Liu Jia (Corresponding author) received her Ph.D. degree from Southeast University in 2008. She is currently a professor and a master advisor in the School of Automation at Nanjing University of Information Science & Technology. Her main research interests include haptic display and virtual/augmented reality.