

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1904627

# 指端可穿戴式力触觉交互装置设计与评估\*

莫依婷, 宋爱国, 秦欢欢

(东南大学仪器科学与工程学院 南京 210096)

**摘要:**可穿戴式力触觉交互技术作为力触觉交互技术的一个分支,可以为操作者提供更为真实、自然的人机交互体验。设计了一种指端可穿戴式力触觉交互装置,装置由穿戴于腕部的控制盒以及穿戴于指尖的部分组成,穿戴于指尖的部分重约30 g,尺寸为38 mm×31 mm×50 mm。装置采用连杆机构,可实现三自由度的力触觉反馈。装置使用蓝牙通信,具有小型轻便、穿戴方便的特点。通过方向感知与识别实验证明,装置可在指腹面产生8个有效的方向性信息,而且每个方向都可以为人所正确感知。此外,虚拟环境交互实验证明,装置可帮助人在虚拟环境中控制交互力的大小,并提高人机交互的效率。

**关键词:**指端可穿戴式装置;力触觉交互;连杆机构

**中图分类号:** TH89 TP249 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40 510.8040

## Design and evaluation of a wearable fingertip haptic interaction device

Mo Yiting, Song Aiguo, Qin Huanhuan

(School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** As a branch of haptic interaction technology, wearable haptic interaction technology can provide operators with a more realistic and natural human-computer interaction experience. In this work, a wearable fingertip haptic interaction device is designed. The device consists of a control box worn on the wrist and a structure worn at the fingertip, and the structure weighs only about 30g with a size of 38 mm×31 mm×50 mm. The device uses linkage mechanism and can realize 3 DOF haptic feedback. The device adopts bluetooth communication and is small, lightweight and easy to wear. The direction perception and recognition experiment indicate that the device can produce 8 effective directional information on the finger pad, and each direction can be correctly perceived by subjects. In addition, the virtual environment interaction experiment proves that the device can help people control the interaction force in the virtual environment and increase the efficiency of human-computer interaction.

**Keywords:** wearable fingertip device; haptic interaction; linkage mechanism

## 0 引言

力触觉交互技术是一种接触式、具备双向信息传递能力的新型人机交互技术,其通过力触觉交互装置获得体验者的位姿等信息,同时,将计算机渲染出来的力、触觉信息反馈给体验者,为体验者提供“身临其境”的真实感受。近年来,力触觉交互技术已经广泛应用于军事、医疗、娱乐等诸多领域<sup>[1-3]</sup>。大部分力触觉交互装置都使用桌面式或地面式设计,比如 Force Dimension 公司的 Omega 及 Sigma 系

列商用设备、东南大学研制的六自由度力反馈设备<sup>[4-5]</sup>等。这些装置虽然可以为操作者提供较强的反馈力,但是往往较为笨重,且存在操作者肢体运动受限等问题。为了追求更为自然的人机交互方式,可穿戴式力触觉交互装置应运而生。可穿戴式力触觉交互装置常常穿戴于操作者肢体上(如手指、手臂、腰部等),对肢体运动影响较小,具有小型轻便、交互自然的特点<sup>[6]</sup>。

在手指可穿戴式力触觉交互技术领域,Fontana 等<sup>[7]</sup>设计了一种可为食指与拇指提供力反馈的外骨架式力触觉交互装置。该装置通过连杆与轴承组成的复杂机械结

构,使用电机作为驱动器件,为食指与拇指分别提供3个运动自由度。然而,装置的穿戴部分包括机械结构和电机,在穿戴装置后,手指需要承受510 g的重量,这极大地限制了手指运动,降低了穿戴的舒适程度。Iqbal等<sup>[8]</sup>同样设计了一款外骨架式手指力触觉交互装置。该装置通过机构设计为每根手指分别提供4个运动自由度,同时,使用4个直流电机作为驱动器件。然而,考虑到电机的重量,穿戴于手部的装置整体重量达到460 g,仍然不是十分轻便。Pacchierotti等<sup>[9]</sup>认为,外骨架式设计虽然是可穿戴式力触觉交互装置的一种实现形式,但是装置重量普遍较大,手部负担较重,装置实用性低。Minamizawa等<sup>[10]</sup>设计了Gravity Grabber,一种穿戴于指端的力触觉交互装置。装置对指端的负担仅有35 g,但可以对指腹产生法向压力和切向摩擦力。装置上有两个沿手指径向放置的电机,电机轴上绑定皮带。当电机反向转动时,皮带对指腹产生法向压力;当电机同向转动时,皮带在指腹上摩擦,产生切向摩擦力。但是该装置无法从指腹非接触状态转变为指腹接触状态。Tsetserouk等<sup>[11]</sup>设计了一款名为LinkTouch的指端力触觉交互装置。穿戴于指尖的部分仅重13.5 g,可实现二个自由度的力反馈,可实现指腹非接触-接触状态的切换。装置使用五连杆机械结构,其中相邻两个关节分别固定在两个电机的轴上,其余3个关节自由。当两个电机反向转动时,与指腹接触的关节对指腹产生法向压力;当两个电机同向转动时,该关节则使指腹感受到切向摩擦力。然而,其装置运动仍局限在其运动平面与指腹面相交的曲线内。Chinello等<sup>[12]</sup>设计出一种RRS(revolute-revolute-spherical)结构的指端力触觉交互装置,可实现3个自由度的力触觉反馈。装置穿戴于指端上,配有3个舵机,舵机轴分别与3根铰接腿锁定,3根铰接腿共同连接在一个小平台上,通过舵机轴的旋转,小平台可运动到指腹面上任意一点,可使小平台对指腹产生法向压力或切向摩擦力。小平台与指腹接触的一侧贴有压力传感器,而小平台的另一侧贴有振动马达,用于产生振动触觉刺激。

外骨架式与指端式是可穿戴式力触觉交互装置的两种主要形式。相较于前者,指端可穿戴式力触觉交互装置通常具有更为紧凑的机构设计,基本不影响手指运动的灵活性,提供更为自然的人机交互体验。

本文设计了一种指端可穿戴式力触觉交互装置。装置采用连杆结构,可为指端提供1个自由度的法向压力以及2个自由度的切向摩擦力。装置采用蓝牙通信,重约30 g,具有小巧轻便、穿戴方便等特点。实验表明,该装置可以帮助操作者在虚拟环境中控制交互力的大小,提高人机交互效率。

## 1 机械设计与建模

### 1.1 机械结构设计

指端可穿戴式力触觉交互装置机械设计如图1所示,穿戴效果如图2所示。装置上共有3个舵机,型号均为Hitec HS5035HD,分别命名为#1、#2、#3(见图1)。底座两侧分别向下伸出5 mm高的小凸台,小凸台上各有对称的两个小圆孔,用于安装弹力绳。通过弹力绳的固定,底座便可穿戴在手指上。底座中央有一个向上凸起的T形凸台,相对应地,滑台中央的下方有向下凹陷的T型槽。T型槽与底座的T型凸台相配合之后,滑台便可在底座凸台的限位下前后滑动。T型槽的支撑面被切割为倒三角形,减少底座与滑台之间的接触面积,从而减少滑台滑动时的摩擦力。

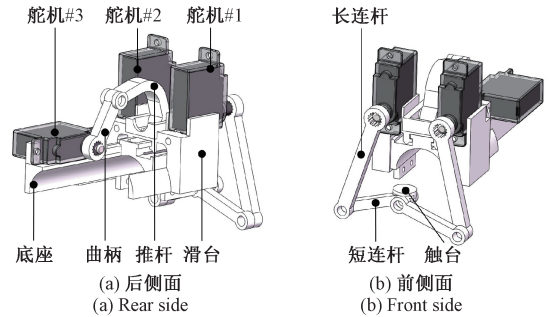


图1 装置机械设计

Fig.1 Device mechanical design

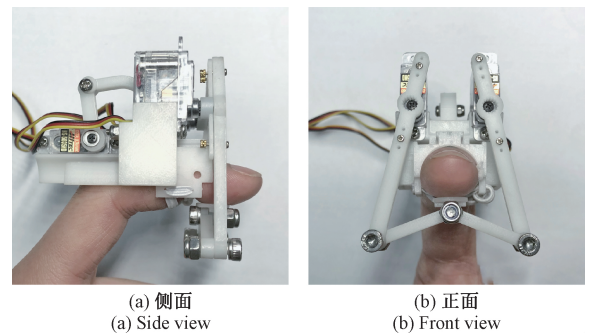


图2 手指穿戴装置示意图

Fig.2 Device worn at fingertip

舵机#3通过螺丝被固定在底座上。舵机轴上有齿,与曲柄一端圆孔的内齿相配合,舵机#3便可带动曲柄旋转。曲柄的另一端有圆孔,圆孔与推杆一端的圆孔大小一致。用螺丝穿过曲柄与推杆的圆孔,并使用自锁螺母进行固定,使曲柄与推杆组成曲柄滑块机构。推杆另一端的圆孔套在滑台上方方型槽内的中央圆杆上,因此推杆便可绕该圆杆旋转。根据上述设计,曲柄滑块机构可将舵机轴的旋

转转化为滑台在底座上的前后滑动。由于滑台前方为五连杆机构,触台位于五连杆机构的一个关节上,因此触台和滑台同步运动,便获得沿手指方向的一个自由度。

滑台上安装有舵机#1与舵机#2,使用螺丝进行固定。滑台前方为五连杆机构,五连杆机构中两个相邻关节与舵机#1、#2的轴绑定,其余3个关节处于活动状态。长连杆一端有内齿,舵机轴上嵌套长连杆,长连杆另一端通过螺丝和自锁螺母与短连杆连接在一起。短连杆的另一端有一个圆孔,而触台下方有一个内径与该圆孔大小一致的圆环,圆环被夹在两个短连杆的圆孔之间,用螺丝与自锁螺母进行装配。根据Chebyshev-Gruebler-Kutzbach公式<sup>[13]</sup>,  $DOF = 3(l - 1) - 2j$ ,其中 $l$ 为连杆数, $j$ 为关节数,可知滑台前方五连杆机构的自由度为2。

由于五连杆机构,触台具有了平面内的两个自由度,同时,滑台为触台提供了沿手指方向的一个自由度。相较于Gravity Grabber<sup>[10]</sup>、LinkTouch<sup>[11]</sup>等具有一、二自由度的指端力触觉交互装置,三自由度的设计使得触台可以模拟非接触-接触状态的转换,并且可以提供指腹面上多个方向的滑动摩擦感受。

### 1.2 逆运动学建模

装置通过控制触台与指腹接触的形式,产生法向压力或切向摩擦力。

五连杆机构模型如图3所示,设舵机#1和舵机#2轴心分别为点A和点B,点C和点E分别为长连杆与短连杆相接的圆孔中心,触台位置为点D。 $l_2$ 为舵机#1与舵机#2轴心之间的距离, $l_1$ 和 $l_3$ 为长连杆长度, $l_4$ 和 $l_5$ 为短连杆长度。

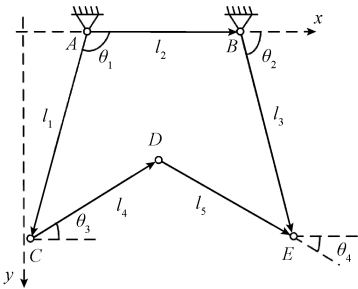


图3 五连杆机构建模

Fig.3 Modelling of five-bar linkage mechanism

以点A为坐标原点,设点D坐标为 $(x_d, y_d)$ ,根据向量投影关系,有:

$$\begin{cases} x_d = l_1 \cos\theta_1 + l_4 \cos\theta_3 \\ y_d = l_1 \sin\theta_1 - l_4 \sin\theta_3 \end{cases} \quad (1)$$

将两个等式两边取平方再相加,可得:

$$x_d^2 + y_d^2 - 2l_1 x_d \cos\theta_1 - 2l_1 y_d \sin\theta_1 + l_1^2 = l_4^2 \quad (2)$$

设 $\mu = \tan \frac{\theta_1}{2}$ 。由三角变换,可得 $\cos\theta_1 = \frac{1 - \mu^2}{1 + \mu^2}$ ,

$\sin\theta_1 = \frac{2\mu}{1 + \mu^2}$ ,代入式(2)并整理,得到关于 $\mu$ 的一元二次方程,如下:

$$(x_d^2 + y_d^2 + l_1^2 - l_4^2 + 2l_1 x_d)\mu^2 - 4l_1 y_d \mu + x_d^2 + y_d^2 + l_1^2 - l_4^2 - 2l_1 x_d = 0 \quad (3)$$

求解式(3)得,

$$\mu = \frac{2l_1 y_d \pm \sqrt{4l_1^2(x_d^2 + y_d^2) - (x_d^2 + y_d^2 + l_1^2 - l_4^2)^2}}{x_d^2 + y_d^2 + l_1^2 - l_4^2 + 2l_1 x_d}, \text{ 由此,}$$

可得到 $\theta_1$ 的表达式,如下:

$$\theta_1 = 2\arctan \frac{2l_1 y_d + \sqrt{4l_1^2(x_d^2 + y_d^2) - (x_d^2 + y_d^2 + l_1^2 - l_4^2)^2}}{x_d^2 + y_d^2 + l_1^2 - l_4^2 + 2l_1 x_d} \quad (4)$$

根据向量投影关系,有:

$$\begin{cases} x_d = l_2 + l_3 \cos\theta_2 - l_5 \cos\theta_4 \\ y_d = l_3 \sin\theta_2 - l_5 \sin\theta_4 \end{cases} \quad (5)$$

将两边等式取平方和得:

$$(x_d - l_2)^2 + y_d^2 - 2l_3(x_d - l_2) \cos\theta_2 - 2l_3 y_d \sin\theta_2 + l_3^2 = l_5^2 \quad (6)$$

设 $\omega = \tan \frac{\theta_2}{2}$ ,则有 $\cos\theta_2 = \frac{1 - \omega^2}{1 + \omega^2}$ , $\sin\theta_2 = \frac{2\omega}{1 + \omega^2}$ ,代

入式(6)并整理,得到关于 $\omega$ 的一元二次方程,如下:

$$[(x_d - l_2)^2 + 2l_3(x_d - l_2) + y_d^2 + l_3^2 - l_5^2]\omega^2 - 4l_3 y_d \omega + (x_d - l_2)^2 - 2l_3(x_d - l_2) + y_d^2 + l_3^2 - l_5^2 = 0 \quad (7)$$

求解式(7)得,

$$\omega = \frac{2l_3 y_d \pm \sqrt{4l_3^2((x_d - l_2)^2 + y_d^2) - [(x_d - l_2)^2 + y_d^2 + l_3^2 - l_5^2]^2}}{(x_d - l_2)^2 + 2l_3(x_d - l_2) + y_d^2 + l_3^2 - l_5^2}, \text{ 因}$$

此, $\theta_2$ 的表达式如下:

$$\theta_2 = 2\arctan \frac{2l_3 y_d - \sqrt{4l_3^2((x_d - l_2)^2 + y_d^2) - [(x_d - l_2)^2 + y_d^2 + l_3^2 - l_5^2]^2}}{(x_d - l_2)^2 + 2l_3(x_d - l_2) + y_d^2 + l_3^2 - l_5^2} \quad (8)$$

综上所述,五连杆机构的逆运动学解算方程组为:

$$\begin{cases} \theta_1 = 2\arctan \frac{2l_1 y_d + \sqrt{4l_1^2(x_d^2 + y_d^2) - (x_d^2 + y_d^2 + l_1^2 - l_4^2)^2}}{x_d^2 + 2l_1 x_d + y_d^2 + l_1^2 - l_4^2} \\ \theta_2 = 2\arctan \frac{2l_3 y_d - \sqrt{4l_3^2((x_d - l_2)^2 + y_d^2) - [(x_d - l_2)^2 + y_d^2 + l_3^2 - l_5^2]^2}}{(x_d - l_2)^2 + 2l_3(x_d - l_2) + y_d^2 + l_3^2 - l_5^2} \end{cases} \quad (9)$$

另一方面,对曲柄滑块机构进行逆运动学建模与解算。该部分机构模型图如图4所示,其中点A为舵机#3的轴中点,点C为曲柄与推杆相连处的关节点,点B为滑台上中央圆杆的圆心。由于BC两点相对位置不变,因此将点BC用直线相连,使用 $a$ 代替 $\widehat{CB}$ 进行解算。

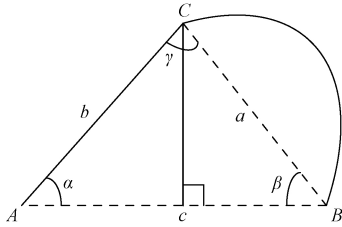


图4 曲柄滑块机构建模

Fig.4 Modelling of slider-crank linkage mechanism

不难看出, $c = a \cos \beta + b \cos \alpha$ ,而根据 $\cos^2 \beta + \sin^2 \beta = 1$ ,可以得到:

$$c = a \sqrt{1 - \left(\frac{b}{a} \sin \alpha\right)^2} + b \cos \alpha \quad (10)$$

由此,得到了使用输入角度 $\alpha$ 来表达点B直线运动距离的表达式,反向展开之后,如式(11)所示,便可以在给定点B移动距离的情况下,推算出杆件b需要旋转的角度。

$$\alpha = \arccos\left(\frac{-a^2 + b^2 + c^2}{2bc}\right) \quad (11)$$

## 2 装置效用评估实验

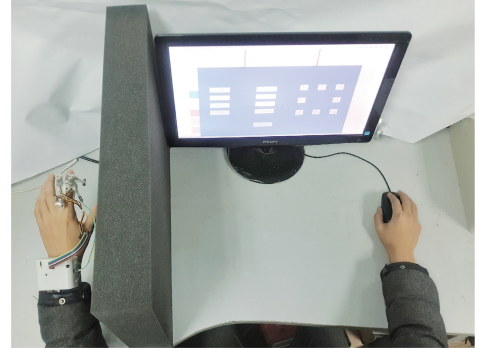
为了验证该装置的效用,本文设计了两组实验。第1组实验验证装置是否可通过对触台位置的控制,使触台在指腹表面的8个方向上滑动,并为人所感知与识别。第2组实验通过在虚拟环境中设置双手搬运任务,并限制最大作用力,探究装置是否可以帮助人在虚拟环境中控制交互力大小。

### 2.1 方向感知与识别实验

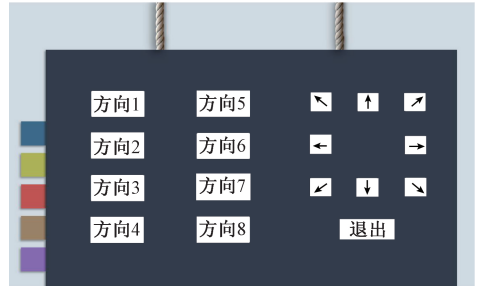
通过皮肤中具有极高灵敏度和分辨率的机械刺激感受器,人手获得压力、触觉、牵张等丰富的感受<sup>[14]</sup>。可穿戴式力触觉交互装置的一项预期功能是可以为手指提供清晰、明确的力触觉信息,因此,设计了一组方向感知与识别实验。

安排16名受试者参与到方向感知与识别实验中,其中男性为8名,女性为8名,从1~16进行编号。16名受试者中,双手食指均健全,且在以往的生活历程中,均未发生过感知方面的障碍。实验现场如图5(a)所示,每位受试者需要进行1组方向感知与识别实验,1组实验包括“上”、“下”、“左”、“右”、“左上”、“左下”、“右上”、

“右下”8个方向。实际上,手指的指腹面为曲面,而不是平面,因此实验中每个方向均需要3个舵机的协同配合,实验设置8个方向的运动图示如图6所示。实验中每个方向对每位受试者而言是不可预知的,在程序初始化时由程序对方向进行随机分配。



(a) 实验现场  
(a) Experiment scene



(b) 实验界面  
(b) Experiment interface

图5 方向感知与识别实验

Fig.5 Direction perception and recognition experiment

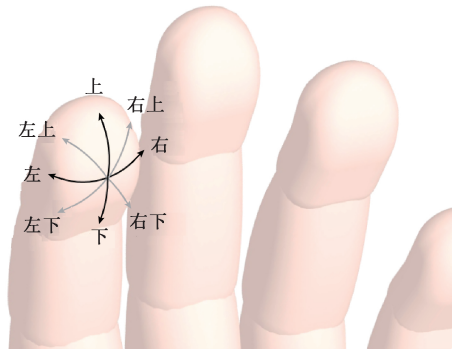


图6 方向感知与识别实验方向示意图

Fig.6 Schematic diagram of directions in experiment

首先,受试者将装置穿戴在左手食指上,受试者的左手用遮挡物屏蔽,以防受试者在看到装置的运动情况之后,对方向进行预先判断。等待蓝牙匹配好之后,触台会自动移动到初始位置,此时需要实验人员辅助,调节装置的穿戴位置,使触台位于指腹面正中央的下方位置。实验正式开始时,计算机显示屏上显示有17

个按键,如图 5(b)所示。受试者右手点击鼠标,按下左侧按键区里的“方向 1”,触台会先贴紧指腹,然后按照程序分配的方向 1 的既定轨迹开始运动。与此同时,受试者感知方向,并且需要感知两次。在触台运动结束之后,由受试者判断方向,在右侧按键区里的“上”、“下”、“左”、“右”、“左上”、“左下”、“右上”、“右下”8 个方向中选择一个方向。在方向 1 的感知与识别结束之后,依次进行方向 2~8 的感知与识别实验,步骤仍同方向 1 的实验步骤相同。在 8 个方向的感知与识别结束之后,按下“退出”按键,实验结束,程序会将实验结果存储为 Excel 文件。

根据实验结果,得到 16 位受试者的方向识别正确率,如图 7 所示,其中虚线表示 16 位受试者的平均识别正确率。实验结果表明,16 位受试者的平均方向识别正确率为 85.2%,其中识别正确率为 100%、87.5%、75% 的受试者各有 5 位,剩余 1 位受试者的识别正确率为 50%。在 Leonardis 等<sup>[15]</sup>的指端可穿戴式力触觉交互装置研究中,进行了 8 个方向的感知与识别实验,识别正确率为 69%,低于本实验中 85.2% 的平均识别正确率。本文实验识别结果更优的原因可能是本实验中装置触台在指腹表面的滑移行程大约为 8 mm,而在 Leonardis 等的实验中,滑移行程仅有 1 mm,对受试者感知要求更高。因此,本文所设计的指端可穿戴式力触觉交互装置可以在指腹面的 8 个方向上滑动,并且受试者可以正确识别滑动方向。

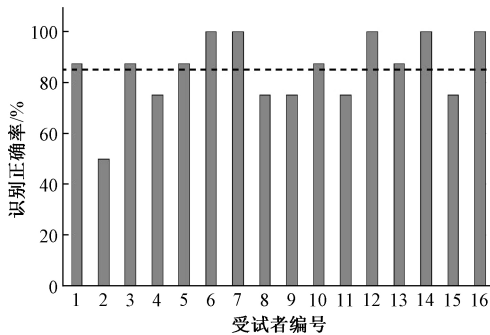


图 7 方向感知与识别实验结果

Fig.7 Results of direction perception and recognition

此外,将实验中 16 位受试者对 8 个方向的识别结果进行整理,识别结果的混淆矩阵如图 8 所示。纵轴表示装置产生的真实方向,而横轴表示受试者在感受方向后做出的判断。表格中的数据表示人数比例,如对于右方向的判断中,16 位受试者中,88% 判断为右方向,6% 判断为右上方向,剩余 6% 判断为右下方向。按照人数比例的大小,使用表格颜色的由深到浅表示选择人数的从多至少,混淆矩阵右侧的彩条图例展示颜色与比例的具体对应关系。

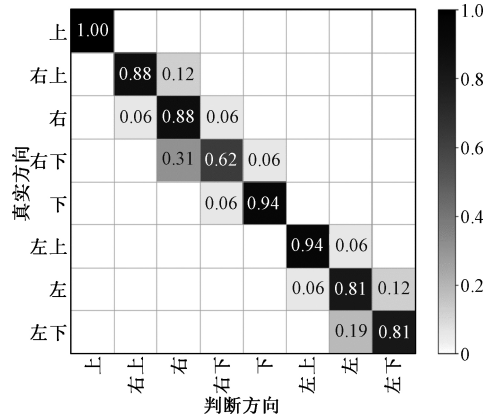


图 8 实验结果混淆矩阵

Fig.8 Confusion matrix of experimental results

根据混淆矩阵,受试者对上方向的识别效果最佳,每位受试者都正确判断了这个方向。正确率位于其次的是下、左上两个方向,均有 94% 的受试者做出了正确判断。从混淆矩阵可以看出,在下、左上方向的识别实验中,容易与之混淆的方向为其邻近方向。比如对于下方向的识别中,有 1 位受试者将其认成了右下方向,而对于左上方向的识别中,有 1 位受试者将其认成了左方向。根据混淆矩阵,识别正确率次之的方向是右(88%)、右上(88%)、左(81%)、左下(81%)。类似的,被误判的方向仍为其邻近方向,比如左下方向的识别中,有 19% 的受试者误认成左方向。识别程度最差的是右下,16 位受试者中仅有 10 位受试者正确识别其为右下方向,其余 5 位受试者误认为右方向,剩余 1 位受试者认为装置产生的是右下方向的滑动。受试者对右下识别效果最差的原因可能是右下方向行程较短。整体上,受试者能对装置提供的滑动方向进行比较准确的判断,即使产生了误判,也均产生在真实方向的相邻方向中,偏差没有太大。

### 2.2 交互力控制实验

在人体感官的反馈下,人手可以对施加在物体上的力进行控制,完成精确抓取以及操纵物体的动作<sup>[16]</sup>。因此,为了探究指端可穿戴式力触觉交互装置能否为人手提供有效的反馈信息,设计了一组交互力控制实验。

使用 Leap Motion 体感控制器获取位姿信息,在 Unity3D 软件中搭建虚拟场景显示虚拟手的模型,虚拟手的姿态和位置与现实手的姿态和位置实时同步。实验交互现场如图 9 所示,屏幕中有一个长为 14 cm 的木纹方块,以及一个内边长为 16 cm 的木框,实验需要受试者用左右手的两根食指将虚拟木块抬起,并放至木框中,以两根食指之间的距离作为反映手指对木框作用力大小的指标。当两指距离为 14 cm 时,两指刚好碰到木块,此距离代表着抬起木块所需的最小力。在实验中设定,当两指距离小于 12 cm 时,手对虚拟木块的作用力会导致木块

破碎,表示“抬起-放置”任务失败。当木块破碎之后,由在一旁辅助的实验人员点击屏幕上的“复位”按键,之前失败任务中的实验数据会被清零,在虚拟场景中产生新的虚拟木块。当受试者将木块完全放入木框中,则表示“抬起-放置”任务成功。此时,由实验人员点击屏幕上的“退出”按键,程序会自动记录受试者完成搬运任务的时长、搬运过程中两指最小距离、木块破碎的次数。其中任务完成的时长和两指之间最小距离均指成功完成“抬起-放置”任务时的时间与距离,而木块破碎的次数则与实验人员点击“复位”按钮的次数相同。

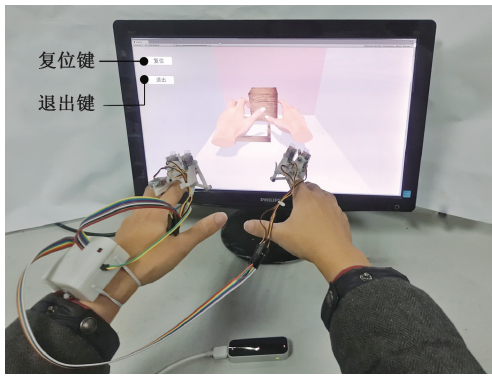


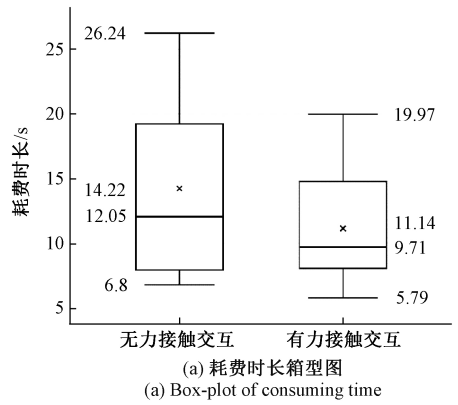
图9 交互力控制实验实验现场

Fig.9 Experiment of interaction force control

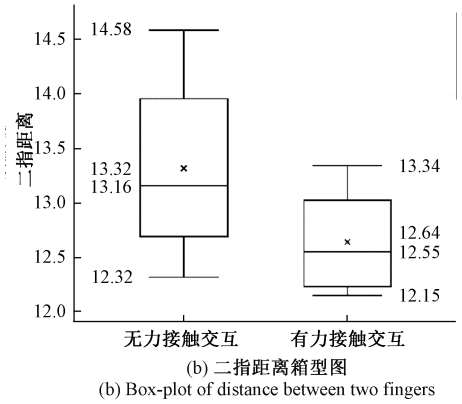
实验安排 16 名受试者,其中有 8 名男性和 8 名女性,从 1~16 进行编号,每位受试者在以往的生活历程中均没有产生过感知方面的障碍,且四肢健全。由于并非所有受试者都有过在虚拟环境中进行交互的经历,因此,实验前要求每位受试者熟悉 Leap Motion 体感控制器的交互区域、虚拟木块破碎的压力阈值。正式实验开始时,每位受试者需要先后进行两次实验。考虑到穿戴装置的手部识别可能影响实验结果,两根食指始终分别穿戴一个指端可穿戴式力触觉交互装置。第 1 次为受试者与虚拟环境进行无力触觉交互,装置不提供任何反馈信息。第 2 次为受试者与虚拟环境进行力触觉交互,根据碰撞信息,装置对指腹产生作用力。实验过程中分别记录每次实验的完成任务时长、执行任务过程中两指的最小距离以及木块的破碎次数。16 位受试者的实验数据整理成箱型图,如图 10 所示。

对无力触觉交互和有力触觉交互的两次实验下受试者平均完成时长进行分析,可以发现,在有力触觉交互的情况下,平均时长少于无力触觉交互的情况(3.08 s)。从图 10(a)可以看出,无力触觉交互实验的任务完成时长集中在 6.8~12.05 s,而有力触觉交互实验的任务完成时长集中在 5.79~9.71 s。任务完成时长有差距的原因主要是为了降低压碎木块的可能性,受试者在无力触觉反馈的情况下执行“抬起-放置”任务时,两根食指对木块

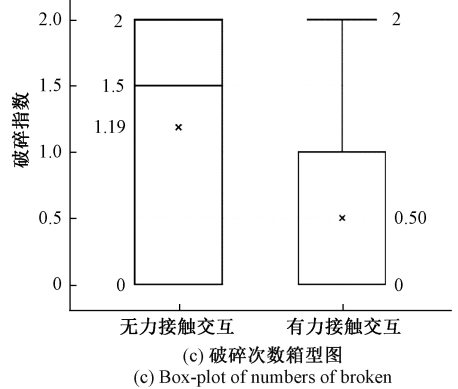
的压力往往比有力触觉反馈情况下的压力小,更趋近于抬起木块所需的最小力,因此木块会更容易滑落。重新抬起木块的时间是任务完成时长有差距的主要原因。



(a) 耗时时长箱型图  
(a) Box-plot of consuming time



(b) 二指距离箱型图  
(b) Box-plot of distance between two fingers



(c) 破碎次数箱型图  
(c) Box-plot of numbers of broken

图 10 交互力控制实验结果

Fig.10 Results of interaction force control

根据图 10(b) 所示的二指距离实验数据,有力触觉反馈情况下的两指平均距离比无力触觉反馈情况下的两指平均距离小约 5.34%,且前者数据中的最大值与后者数据中的最大值小 1.16 cm。就数据集中程度而言,力触觉交互情况下的二指距离比无力触觉交互情况下的二指距离更小,数据集中在 12.15~12.55 cm。由于两指距离反映的是人手对虚拟木块的作用力大小,因此可以看出,受试者在有力触觉交互情况下的对虚拟木块施加的作用

力更大。Bergamasco 等<sup>[17]</sup>将人手抓取物体的最小力与实际施加的力之差定义为安全裕度,认为在人手得到的反馈有限的情况下,为了防止物体滑落,安全裕度会提高。而在本文的实验中,得到了与之相反的结果,在无力触觉反馈时,安全裕度比有力触觉反馈时的安全裕度更小。出现该结果的原因是,木块破碎次数是实验中的一项考察指标,而木块滑落次数不是考察指标。受试者意图通过对虚拟木块提供比较小的作用力,降低木块破碎的可能性,导致安全裕度降低。而在力触觉交互情景中,由于受试者在实验之前通过穿戴力触觉交互装置直接感受到了虚拟木块破碎的压力阈值,在正式实验中,受试者可以根据装置对手指的实时反馈,主动调节手指位置,因此使得手指位置更逼近于使虚拟木块破碎的位置。但是由于在力触觉交互中,受试者对交互力的控制比较准确,压碎虚拟木块的次数不会随着安全裕度提高而提高。

根据图 10(c)所示的虚拟木块破碎次数实验数据,16 位受试者在无力触觉反馈交互实验下的虚拟木块破碎总次数比有力触觉交互实验下的虚拟木块破碎总次数多 11 次,说明在有力触觉反馈下,受试者在进行“拾起-放置”操作时,能更精确控制对虚拟木块的施力大小,致使木块不容易破碎。结合二指距离的实验数据,不难看出,虽然力触觉交互情景中,人手对虚拟木块的安全裕度更大,更加逼近于使木块破碎的压力阈值,但是破碎次数却不及无力触觉交互的情景,这说明力触觉交互装置可以帮助人在虚拟环境中控制交互力的大小。

通过对以上数据的整理和分析,可以得出结论,在虚拟环境交互过程中,相较于无力触觉交互的情况,指端可穿戴式力触觉交互装置可以帮助人控制交互力的大小,并在一定程度上提高交互效率。

### 3 结 论

本文设计了一种指端可穿戴式力触觉交互装置,装置使用连杆结构设计,采用微型舵机作为驱动器,使装置与手指指腹接触的触台拥有 3 个自由度,可对指腹产生一个方向的法向压力与两个方向的摩擦力,为虚拟环境中的人机交互提供力触觉交互信息,具有结构紧凑、轻便易穿戴的特点。本文描述了机械结构设计以及各零件之间的配合关系,建立了装置的逆运动学模型。此外,本文通过 16 位受试者的两组实验,分别用以验证装置可为手指提供多个有效的方向力触觉信息以及可帮助控制虚拟环境中交互力大小。实验结果证明,装置可为手指提供 8 个方向的滑动信息,并且所有方向都可以被人正确感知。另外,装置所提供的力触觉交互信息可以帮助人控制碰触、抓取虚拟物体时的力大小,有利于完成需要精准操作的任务,提高与虚拟环境的交互效率。

### 参考文献

- [1] 宋爱国. 力觉临场感遥操作机器人(1):技术与现状[J]. 南京信息工程大学学报, 2013, 5(1):1-19.  
SONG AI G. Force telepresence telerobot (1): Review of the history and development [J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition), 2013, 5(1):1-19.
- [2] 肖勇. 基于虚拟现实的牙齿根管预备手术仿真训练系统开发[D]. 南京:东南大学, 2017.  
XIAO Y. Design of a surgical simulator for root canal preparation training based on virtual reality[D]. Nanjing: Southeast University, 2017;
- [3] 于宁波, 李思宜, 赵营泉, 等. 基于共享控制的人机灵巧力触觉交互系统设计与实现[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(3):602-611.  
YU N B, LI S Y, ZHAO Y Q, et al. Design and implementation of a dexterous human-robot interaction system based on haptic shared control [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(3):602-611.
- [4] 秦欢欢, 宋爱国, 莫依婷, 等. 带有双手力觉反馈的人机交互系统设计[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(7):66-73.  
QIN H H, SONG AI G, MO Y T, et al. Design of human-machine system with two-handed force feedback [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(7):66-73.
- [5] HUANHUA Q, AIGUO S, YUQING L, et al. Design and calibration of a new 6 DOF haptic device [J]. Sensors, 2015, 15(12):31293-31313.
- [6] 莫依婷, 宋爱国, 秦欢欢, 等. 可穿戴式双通道指端力触觉反馈方法与系统[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(11):188-194.  
MO Y T, SONG AI G, Q H H, et al. Method and system of wearable fingertip force/tactile feedback with dual-channel [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(11):188-194.
- [7] FONTANA M, DETTORI A, SALSEDO F, et al. Mechanical design of a novel hand exoskeleton for accurate force displaying [C]. IEEE International Conference on Robotics & Automation, 2009:1704-1709.
- [8] IQBAL J, TSAGARAKIS N G, CALDWELL D G. Four-fingered lightweight exoskeleton robotic device accommodating different hand sizes [J]. Electronics Letters, 2015, 51(12):888-890.
- [9] PACCHIEROTTI C, SINCLAIR S, SOLAZZI M, et al.

- Wearable haptic systems for the fingertip and the hand: Taxonomy, review, and perspectives [J]. *IEEE Trans Haptics*, 2017, 10(4):580-600.
- [10] MINAMIZAWA K, FUKAMACHI S, KAJIMOTO H, et al. Gravity grabber: Wearable haptic display to present virtual mass sensation[C]. *SIGGRAPH'07 ACM*, 2007.
- [11] TSETSERUKOU D, HOSOKAWA S, TERASHIMA K. LinkTouch: A wearable haptic device with five-bar linkage mechanism for presentation of two-DOF force feedback at the fingerpad[C]. *IEEE Haptics Symposium*, 2014.
- [12] CHINELLO F, PACCHIEROTTI C, MALVEZZI M, et al. A three revolute-revolute-spherical wearable fingertip cutaneous device for stiffness rendering. [J]. *IEEE Transactions on Haptics*, 2018, 11(1):39-50.
- [13] GOGU G. Chebychev-Grübler-Kutzbach's criterion for mobility calculation of multi-loop mechanisms revisited via theory of linear transformations[J]. *European Journal of Mechanics*, 2005, 24(3):427-441.
- [14] JONES L A, LEDERMAN S J. *Human hand Function*[M]. Oxford: Oxford University Press, 2006.
- [15] LEONARDIS D, SOLAZZI M, BORTONE I, et al. A 3-RSR haptic wearable device for rendering fingertip contact forces[J]. *IEEE Transactions on Haptics*, 2016, 10(3):305-316.
- [16] MACKENZIE C L, IBERALL T. *The Grasping Hand*[M]. Amsterdam; New York: North-Holland, 1994.
- [17] BERGAMASCO M, AVIZZANO C A, FRISOLI A, et al. Design and validation of a complete haptic system for manipulative tasks [J]. *Advanced Robotics*, 2006, 20(3):367-389.

### 作者简介



莫依婷, 2017 年于南京航空航天大学获得学士学位, 现为东南大学博士研究生, 主要研究方向为可穿戴式力触觉反馈装置。  
E-mail: moeating@yeah.net

**Mo Yiting** received her B. Sc. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2017. She is now a Ph. D. candidate in Southeast University. Her main research interest is wearable haptic device.



宋爱国 (通信作者), 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, 现为东南大学教授、博士生导师, 主要研究方向为机器人传感与控制技术、信号处理、遥操作技术等。

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

**Song Aiguo** (Corresponding author) received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 1990 and 1993, and Ph. D. degree from Southeast University in 1996, respectively. Currently, he is a professor and Ph. D. supervisor in Southeast University. His main research interests include robotic sensor and control, signal processing, tele-operation, and etc.