



FootUI:设计和检测足部手势, 以帮助上半身运动障碍的人在床上使用智能手机

Xiaozhu胡

香港综合系统及设计部

香港科技大学

中国香港

计算机科学与技术学系,

清华大学

中国,北京

xhubk@connect.ust.hk

半年前高

计算机科学与技术系,

中国北京清华大学

王gww20@mails.tsinghua.ed

u.cnJiting

计算机科学与技术系,

中国北京清华大学

while1incrp@hotmail.com

涌泉胡

澳大利亚悉尼新南威尔士大学计算机科学与工程学院

yongquan.hu@unsw.edu.au

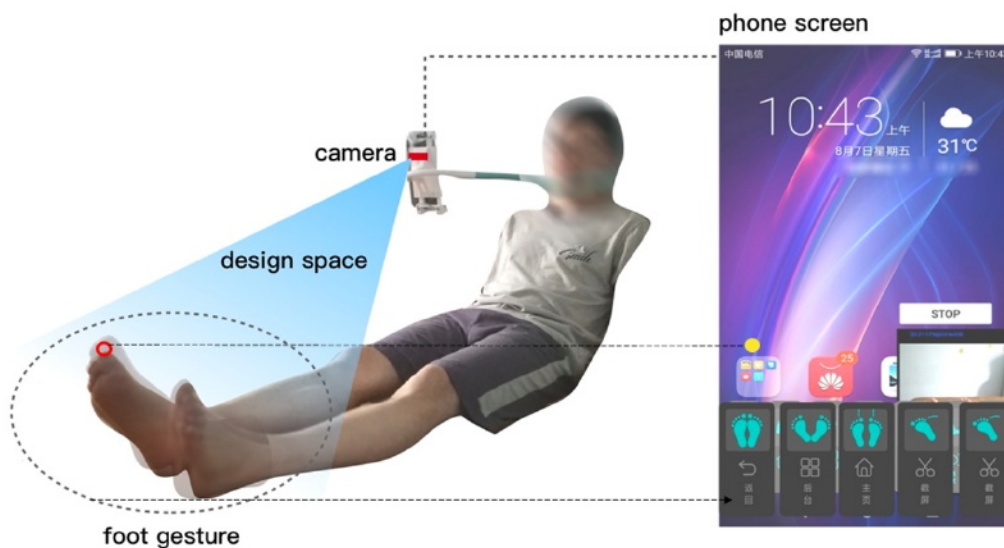


图1:FootUI使用场景

摘要

一些上肢运动障碍但下肢健全的人通常用脚与智能手机互动。然而,用大脚趾触摸触摸屏很累,效率很低,也很容易

Permission to make digital or hard copies of all or part of this work for personal or classroom use is granted without fee provided that copies are not made or distributed for profit or commercial advantage and that copies bear this notice and the full citation on the first page. Copyrights for components of this work owned by others than ACM must be honored. Abstracting with credit is permitted. To copy otherwise, or republish, to post on servers or to redistribute to lists, requires prior specific permission and/or a fee. Request permissions from permissions@acm.org.

mistouch。针对这一痛点,我们提出了FootUI,它利用手机摄像头跟踪用户的脚,并将脚的手势转换为智能手机操作。这种技术可以让用户在躺在床上的同时与智能手机进行交互,提高用户的舒适度。在本文中,我们通过用户研究以及FootUI的开发和评估来介绍足部手势的设计和评估。结果表明,基于脚趾的足部手势不仅不易被感知,而且令人不舒服。FootUI避免了使用基于脚趾的手势,对于上肢运动障碍但下肢健全的人来说,这是一种简单、有效和有趣的输入技术。

ASSETS ' 22, October 23–26, 2022, Athens, Greece

©2022 Association for Computing Machinery. ACM
ISBN 978-1-4503-9258-7/22/10...\$15.00 <https://doi.org/10.1145/3517428.3563285>

CCS的概念

· 以人为中心的计算→无障碍技术。

关键字

无障碍, 足部互动, 上半身运动障碍, 智能手机

ACM参考格式:

胡晓珠, 王济廷, 高伟伟, 胡永泉. 2022. FootUI: 设计和检测足部手势, 以帮助上半身运动障碍的人在床上使用智能手机. 第24届国际ACM SIGACCESS计算机和可访问性会议 (ASSETS' 22), 2022年10月23日至26日, 希腊雅典. ACM, 美国纽约, 11页. <https://doi.org/10.1145/3517428.3563285>

1 介绍

在社交媒体上, 我们可以看到, 一些上肢运动障碍但下肢健全的人, 用脚作为手的补偿, 做很多日常工作, 比如写字、画画、挑东西。这群人虽然人数不多, 但值得关注。我们关注的是他们的智能手机交互, 并尝试为他们提供一种适合足部输入的交互技术。

已经有一些针对上肢运动障碍患者的基于触摸的[9-12]和解放双手的[3]交互技术的研究, 但仍然缺乏专门为下肢健全的人设计的交互技术。虽然基于头部或语音的交互技术对其中的一些人是可用的, 但那些严重的上肢瘫痪或有语音障碍的人无法使用这些技术。然而, 他们都能够使用脚。此外, 尽管有很多关于足部互动的研究, 但这些非常依赖脚的人长期以来一直被忽视。他们中的一些人选择用脚通过触摸手机屏幕来与智能手机进行交互[2], 这种方式既疲劳又低效。

在之前的工作中, 我们探索了上半身运动障碍患者的需求和痛点, 定义了使用场景, 并提出了一种基于视觉的交互技术, 帮助他们在躺在床上时通过脚的手势与智能手机进行交互。在这项工作中, 我们提出了足部手势的设计和评估, 以及FootUI最终评估的更多细节。结果表明, 基于脚趾的足部手势不仅对计算机视觉算法的可感知性较差, 而且对用户来说也不舒服。FootUI避免了使用基于脚趾的手势, 被证明是一种简单、有效和有趣的输入技术, 方便上肢运动障碍但下肢健全的人在躺在床上时与智能手机互动。

这项工作的贡献是: 1) 我们提出了一个基于技术和用户中心视角的足部手势集, 并展示了基于脚趾的手势的弱点。2) 我们展示了FootUI的发展和性能, 并详细介绍了参与者的主观反馈。

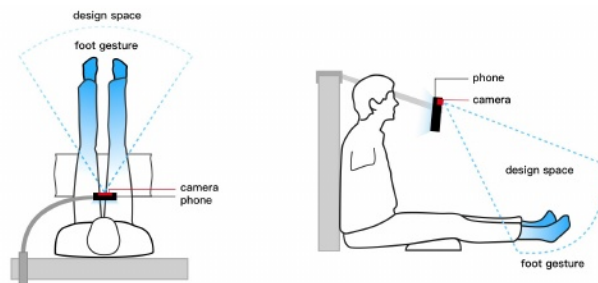


图2:使用FootUI的姿势和场景

2 相关工作

有很多研究提出了互动技术来帮助上肢运动障碍的人使用他们的上肢运动障碍与信息设备进行互动。基于光标的输入技术, 如PointAsist[14]、Steady Clicks[16]和Click Control[6]已经被开发出来, 以减少指向困难。Wobbrock等人[18-20]实验了使用物理边缘来帮助运动受损的用户, 并提出了Barrier Pointing[4]。为了提高触摸精度, 研究人员探索了用户的交互行为, 并开发了手势识别算法, 如共享用户建模框架[9]、会话特定模型[10]、智能触摸[11]和集群触摸[12]。然而, 这些技术对于截肢者和严重上半身瘫痪的人来说是不可用的。

对于上肢运动能力有限但下肢健全的人来说, 帮助他们使用下肢可能是更好的选择。对足部互动的研究历史悠久。Velloso等人[17]从用户特征、基于脚的系统 and 基于脚的交互三个方面对基于脚的交互进行了调查。Katsumi等人[8]比较了凝视输入、头部输入和足部输入, 得出结论:足部输入是坐位时免提交互的一种选择。对于设计和感知移动设备控制的足部手势的研究, Scott等人研究了背伸、足底屈伸、脚趾旋转和脚跟旋转四种手势的人体工程学特征和设计空间, 用于与口袋中的移动设备进行无眼交互[15]。Alexander等人[1]为移动设备命令创建了一个用户定义的手势集, 并验证了基于速率的技术比基于位移的技术明显更快、更准确, 并且导致的目标交叉要少得多。然而, 缺乏可访问的足部输入研究, 侧重于利用足部手势作为主要的输入技术形式来支持完全免提交互。此外, 当用户斜倚在床上时, 对于适合相机检测和实际使用的足部手势知之甚少。

3 footui的设计

基于我们之前的发现[5], 我们总结了上肢运动障碍智能手机用户的特征, 并定义了使用场景。对于灵活的足部运动, 我们定义用户斜倚在床上, 将智能手机固定在智能手机支架上。用户的脚在手机摄像头的视野内, 摄像头一直开着跟踪用户的足部动作。用户可以

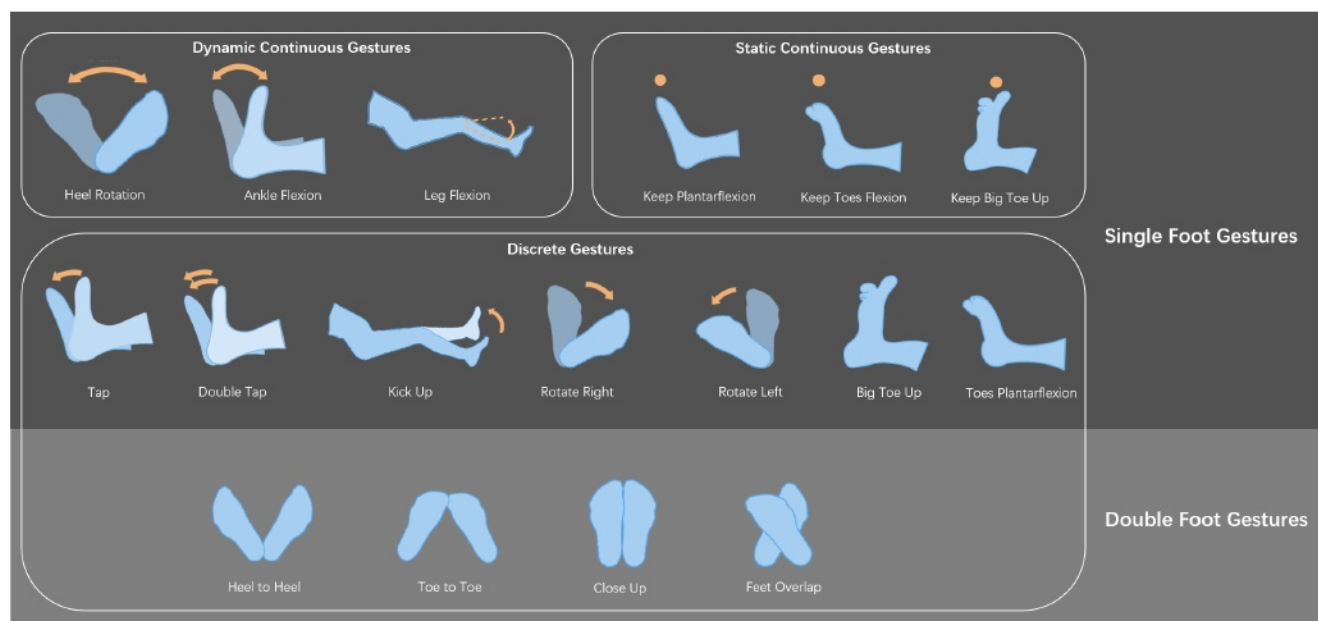


图3:初始足部手势词汇

将枕头或靠垫放在腿下，方便抬腿(见图2)。基于使用场景，我们创建了初始手势词汇表，通过用户研究评估手势词汇表，并开发了手势跟踪识别算法。根据手势评估和识别精度的结果，我们选择了11个手势，创建了最终的足部手势集，并将足部手势映射到智能手机操作上。

3.1 初始足部手势词汇

足部动作分为连续足部动作和离散足部动作两大类[1]。我们将连续的足部动作分为动态连续的足部动作和静态连续的足部动作。动态连续足部手势是指一种持续的足部运动状态，比如“脚跟旋转”、“踝关节弯曲”，类似于手指拖动，可以通过实时动态反馈进行连续跟踪。静态连续的足部动作是指让足部在特定的姿势上保持一段时间，比如“keep Plantarflexion”和“keep Big Toe Up”，类似于手指长触，可以连续跟踪，触发一些离散反馈。离散手势也被描述为信号手势(semaphoric gestures)[13]，它可以作为指令的标志性触发器，但也携带连续信息[17]。基于[17]中的运动学分析和信号手势总结，我们设计了17种足部手势(见图3)，将足部手势分为三组:动态连续手势、静态连续手势和离散手势。其中13种为单脚手势，4种为双脚手势。

3.2 用户研究1:评估初始足部手势词汇

本研究旨在从易用性、疲劳性、速度和用户偏好的角度对初始足部手势词汇中的足

部手势进行评价。本研究的结果是选择足部手势和创建最终足部手势集的基础。在本研究中，我们还收集了足部手势的视频片段，用于构建足部手势数据集。

3.2.1参与者。由于上肢运动障碍人群的不便，以及我们的目标用户与健全人群的足部运动能力相似，我们通过网络联系的方式招募了10名健全参与者(女5名，男5名)和2名上肢运动障碍参与者(均为女性)。他们的平均年龄为28.50岁($SD=10.55$)，其中一半为Android智能手机用户。我们为参与者的参与提供了金钱奖励。

3.2.2装置。我们在参与者的生活环境中进行了这项研究。床上预装了一个手机座。Android智能手机(华为荣耀8)上安装了一个显示脚部手势的应用程序，我们提前把手机放在了手机座上。

3.2.3过程。参与者躺在床上，大腿下放一个垫子(见图2)，然后我们启动脚部手势显示app，app会逐一显示脚部手势。对于初始手势词汇中的13个单脚手势，app分别显示了左脚和右脚所做的足部手势的图片。因此，应用程序中显示了30个(13×2)脚的手势。应用程序以随机顺序为每个参与者显示了两次这30个脚的手势。在第一轮的展示中，我们向参与者展示了每个脚的手势。我们要求参与者去表演，这样参与者就能获得关于脚部动作的直观体验。在第二轮中，在每个手势的展示之后，应用程序为参与者提供了一个5分的李克特量表，包括易用性(1=最难执行，5=最容易执行)，疲劳度(1=最疲劳，

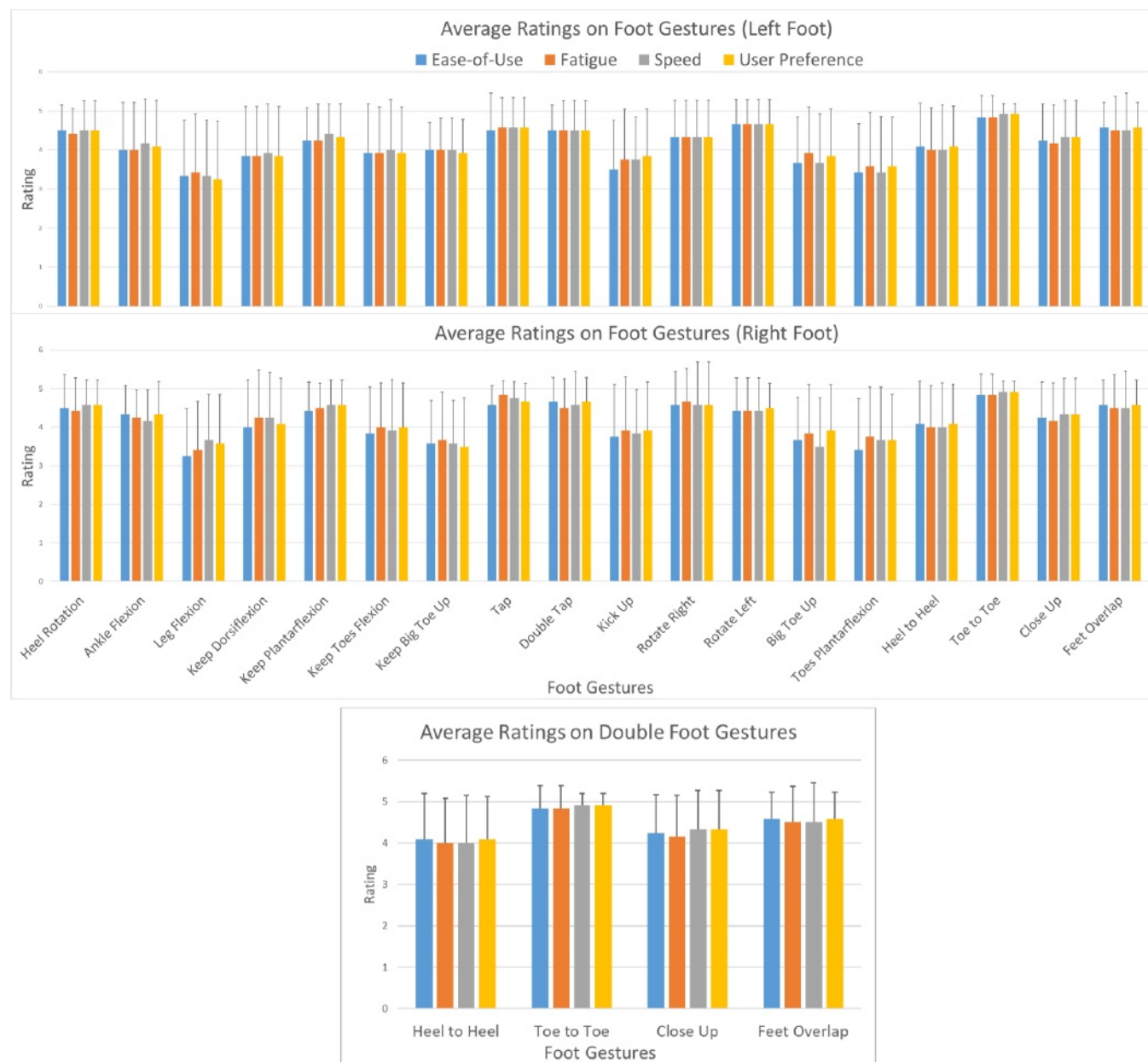


图4:对足部手势的平均评分

5=最不疲劳), 速度(1=最慢完成, 5=最快完成)和用户偏好(1=最低用户偏好, 5=最高用户偏好)的脚手势, 以便参与者可以方便地评估。在研究过程中, 手机的后置摄像头一直开着, 参与者被要求在每一轮中完成每一种足部手势。这些足部动作数据被记录下来, 用于算法开发。我们还进行了一个小的后期采访, 对极端评分进行了一些解释, 并对手势设计提出了建议。

3.2.4条结果。图4显示了足部手势在易用性、疲劳性、速度和用户偏好方面的平均评分。Wilcoxon sign -rank检验显示, 在所有指标上, 左脚和右脚在执行所有单脚手势方面没有显著差异。我们计算了四个指标上每个足部手势的平均值作为总分, 在这个总分上, 左右脚之间没有出现显著差异。在这种情况下, 每个单脚手势的总分有24个评分(左脚12分, 右脚12分), 双脚手势的总分有12个评分。图5显示了足部手势的平均总分。

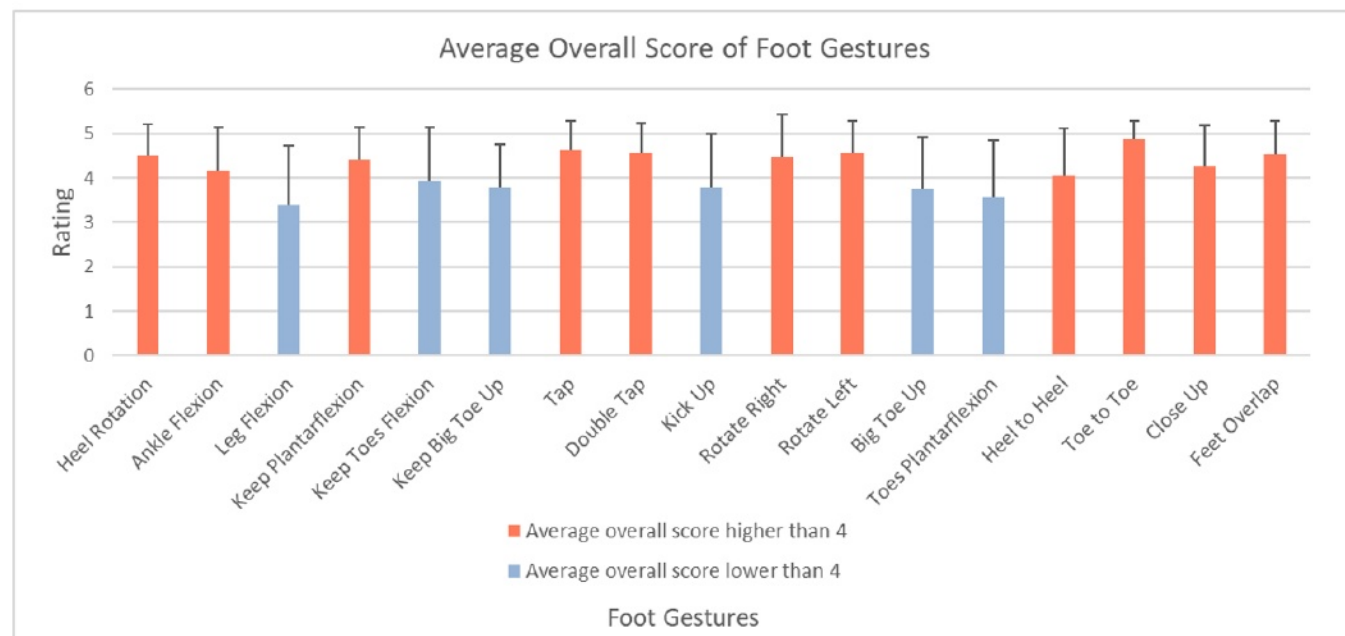


图5:Foot Gestures的平均总分

考虑到动态连续手势、静态连续手势、单脚离散手势和双脚离散手势的不同运动学特征，我们比较了每组手势的总体得分。Friedman检验显示，每一组对总分都有显著影响(动态连续手势 $\chi^2=29.83$, $p<0.001$;静态连续手势 $\chi^2=16.26$, $p<0.001$;单脚离散手势 $\chi^2=70.01$, $p<0.001$;双脚离散手势 $\chi^2=12.44$, $p<0.01$)。

对于动态连续足部动作，Bonferroni校正事后分析显示，“脚跟旋转”总分($M=4.50$, $SD=0.70$)和“踝关节屈曲”总分($M=4.17$, $SD=0.98$)均显著高于“腿屈曲”总分($M=3.41$, $SD=1.32$), $p<0.01$;“脚跟旋转”总分($M=4.50$, $SD=0.70$)也显著高于“踝关节屈曲”总分($M=4.17$, $SD=0.98$), $p<0.05$ 。对于静态连续足部动作，“Keep跖屈”($M=4.41$, $SD=0.73$)的综合得分显著高于“Keep大脚趾向上”($M=3.78$, $SD=0.97$)和“Keep脚趾弯曲”($M=3.94$, $SD=1.20$)，差异有统计学意义($p<0.01$)。单足离散动作中，“轻拍”($M=4.64$, $SD=0.64$)、“Double Tap”($M=4.55$, $SD=0.69$)、“向右旋转”($M=4.47$, $SD=0.97$)和“向左旋转”($M=4.55$, $SD=0.73$)的总分显著高于“大脚趾向上”($M=3.75$, $SD=1.17$)和“脚趾Plantarflexion”($M=3.56$, $SD=1.28$)，差异均有统计学意义($p<0.01$)。“Kick Up”的总分也明显低于“Tap”($M=4.64$, $SD=0.64$)、“Double Tap”($M=4.55$, $SD=0.69$) ($p<0.01$)、“右旋”($M=4.47$, $SD=0.97$)和“左旋”($M=4.55$, $SD=0.73$) ($p<0.05$)。对于双足离散手势，事后分析显示，“脚趾到脚趾”($M=4.88$, $SD=0.41$)的总分显著高于其他足部手势($p<0.05$)。

在这次小访谈中，我们得到了两个发现。1)参与者不喜欢“大脚趾朝上”、“脚趾跖屈”等基于脚

趾的手势，这与数据分析结果一致。p7表示她在做“脚趾跖屈”时感到小腿疼痛，p8表示她在做脚趾动作时感到很困难。2)对于“向左旋转”、“向右旋转”等与脚跟旋转相关的足部动作，被试通常倾向于用脚向同一方向旋转。对于右脚，P4, p7和p9都更喜欢“右旋转”而不是“左旋转”，但对于左脚则相反。

3.3 手势跟踪和识别算法

3.3.1数据处理。在用户研究1中，我们从后置摄像头中收集了720个(12名参与者 \times 2轮 \times 30个原始手势)视频作为我们的数据集。我们手动分割视频，并在参与者没有执行所需的足部手势时删除视频和帧。视频片段的长度从4到96帧不等，分辨率为960 \times 1280像素。最终的数据集包含543个视频，总共11920帧。

3.3.2脚分割和特征点提取。我们首先在HSV (Hue, Saturation and Value)空间中通过颜色将脚从背景中分割出来。为了提高分割的准确性，我们要求参与者穿纯色的袜子，以便与背景清晰区分。在录制视频之前，他们被要求把脚放在一个固定的位置作为校准。记录两只脚的中心颜色，并将与它们具有相似色调的像素分割为脚区域。

然后，我们检测足部区域的轮廓。对于每一帧中的每一只脚，将一个椭圆放入其轮廓中，确定其大小和方向。大脚趾的指尖被检索为

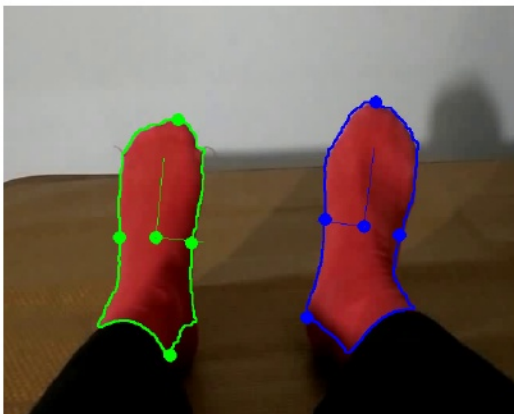
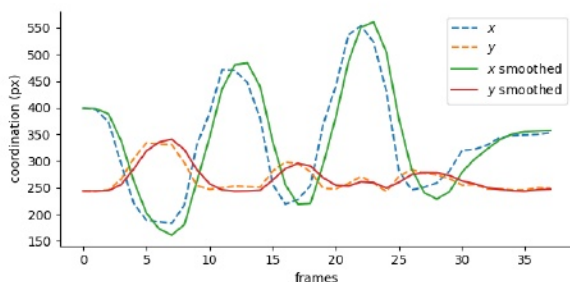


图6:从足部轮廓提取的特征点

图7:使用卡尔曼滤波的平滑跟踪结果



在其主轴方向上找到的轮廓上的最远点。同样，我们提取了特征点，或者是不同方向上的最远点，如图6所示。考虑到要用指尖的坐标来控制光标，为了使跟踪结果更平滑，我们使用了卡尔曼滤波，如图7所示。

3.3.3 手势分类。我们注意到不同的参与者以明显不同的速度执行相同的手势，他们中的一些人在执行轻敲或滑动时可能会犹豫。为了将密集的长度变化特征点序列浓缩为低维特征，我们将连续的指尖运动分解为离散的笔划。笔画被定义为指尖在短时间内的累计运动，直到指尖向后移动或停止移动，例如，“Tap”由向下的笔画和向上的笔画组成。最复杂的手势是“Double Tap”，由四个笔划组成。因此，保留了每只脚最近的四个笔划作为输入功能。在标准化的32维特征(4个笔画 \times 2维度坐标 \times 2点，指尖和脚跟 \times 2脚)上训练随机的for-est分类器来对手势进行分类。

3.4 手势选择和最终的手势集

我们的跟踪算法可以平滑地跟踪指尖，这意味着用户可以使用他们喜欢的动态连续足部手势进行指向。对于离散手势，我们训练了我们的分类器

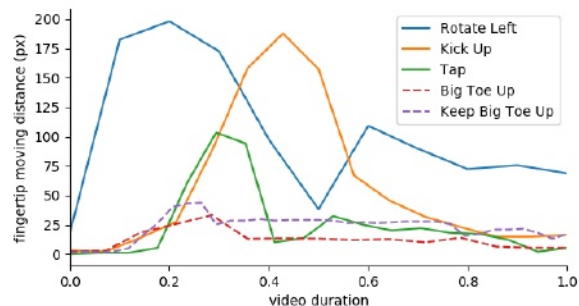


图8:与其他手势相比，基于脚趾的手势的可感知性较差

，并进行了留一人的交叉验证，显示出手势之间的巨大差异，如表1，阶段1。“脚重叠”与“Toe to Toe”和“Close Up”的区别较小，因此我们将其从手势集中删除。此外，“Keep Plantarflexion”经常与单一的“Tap”混淆，因为它们唯一的区别是脚踏之间的间隔，这取决于每个参与者的个人行为。结合3.2.4节的用户评价结果，我们在“点击”中加入了“Keep Plantarflexion”。

在选择最后的足部手势时，我们注意到基于脚趾的手势增加了显著的识别难度。与其他足部手势(图8为例)相比，这些动作很难被注意到。巧合的是，第3.2.4节的用户评价结果也显示，用户对基于脚趾的手势并不满意，这意味着基于脚趾的手势既无法被CV技术检测到，也会让用户感到不舒服。因此，我们从手势集中删除了基于脚趾的手势。

在去除可能模棱两可且难以使用的手势后，我们选择了8个离散的足部手势作为最终的足部手势集。留一交叉验证准确率为90.53% (SD=6.62)。表1, Phase 2显示了这些手势之间的混淆矩阵。结果表明，包括“向左旋转”、“向右旋转”、“踢腿”和“点击”在内的简单手势都可以被高精度地检测到。复杂的手势识别不太准确，因此用户可能需要学习以更标准的方式来执行这些手势。

图9显示了最终的足部手势集，其中包含3个动态连续的足部手势和8个离散的足部手势。用户主要可以使用“脚跟旋转”和“踝关节弯曲”进行指向，有时也可以使用“腿部弯曲”来指向手机屏幕的顶部区域。离散的足部手势可以作为智能手机操作的标志性触发器。

3.5 从足部手势映射到智能手机操作

我们按照将用户最喜欢的足部手势映射到最必要的智能手机操作的规则，将足部手势映射到智能手机操作。智能手机操作分为基本操作和快捷方式。图10展示了从脚部手势到智能手机操作的映射。“右脚跟旋转”水平移动光标，“右脚踝关节旋转”(用于精细动作)和“右腿旋转”的组合

表1:分类中的识别准确率和混淆矩阵。在第一阶段，识别精度低或用户努力程度高的手势被移除。最后保留下来的手势在第二阶段进行分类。

Raw Gesture	Phase 1		Phase 2: Confusion Matrix							
	Precision	Recall	CU	RL	RR	KU	DTap	T2T	H2H	Tap
Close up (CU)	0.737	0.933	0.800	0.067	0.067	0	0	0	0.067	0
Rotate left (RL)	0.931	0.964	0	0.929	0.036	0	0	0	0	0.036
Rotate right (RR)	0.824	0.966	0	0	0.931	0	0	0	0	0.069
Kick up (KU)	0.967	1.000	0	0	0	0.931	0.034	0	0	0.034
Double tap (DTap)	0.828	0.800	0	0	0	0	0.900	0	0	0.100
Toe to Toe (T2T)	0.533	0.533	0.067	0	0	0	0	0.933	0	0
Heel to Heel (H2H)	1.0	0.600	0.067	0.067	0.067	0	0	0	0.800	0
Tap	0.543	0.655	0	0	0.034	0	0.034	0	0	0.931
Keep Plantarflexion	0.636	0.519	-	-	-	-	-	-	-	-
Feet Overlap	0.444	0.286	-	-	-	-	-	-	-	-

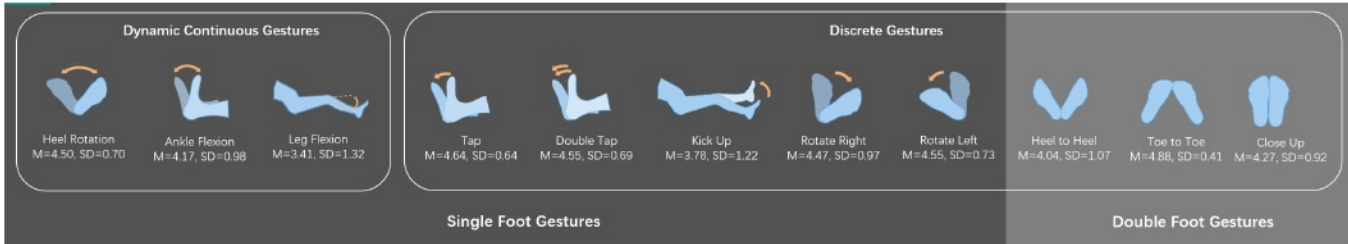


图9:最终的足部特征集，每个手势的平均总分

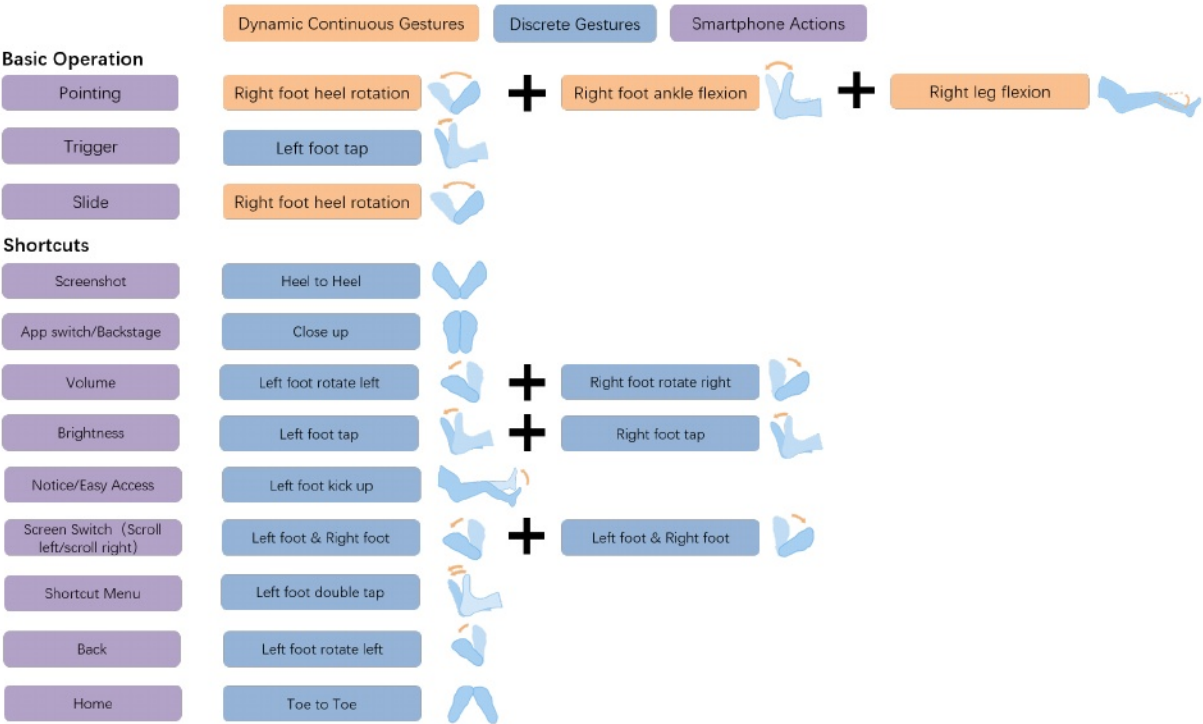


图10:从足部手势到智能手机操作的映射

(对于粗糙的动作)垂直移动光标,“左脚轻拍”触发。当界面上有滑块时,“右脚跟旋转”会滑动滑块。快捷方式方面,“脚后跟到脚后跟”映射为“截图”,“近距离”映射为“app开关”,“左脚踢上”映射为注意,“左脚向左旋转”映射为“后退”,“脚尖到脚尖”映射为“home”,“左脚双击”则唤起快捷菜单。我们还将单脚手势的组合映射到一些快捷键上,比如双脚轻拍会唤起亮度滑块。当用户将两只脚向左旋转时,屏幕会向左滚动,当用户将两只脚向右旋转时,屏幕会向右滚动。当用户将右脚向右旋转,同时将左脚向左旋转时,音量滑块出现。

4 用户研究2:footui的可用性评估

4.1 参与者

由于上肢运动障碍者的不便和健全者与上肢运动障碍者的足部运动能力相似,我们通过网络联系招募了14名健全的大学生参与者(7女7男)和2名上肢运动障碍者(均为女性)。他们的平均年龄为25.94岁($SD=7.52$),其中10人使用Android智能手机。6名健全参与者和2名上肢运动障碍参与者(双臂截肢者)参加了用户研究1。我们为他们的参与提供了一些金钱奖励。

4.2 装置

对于双臂截肢者,我们在他们的生活环境中进行了这项研究,在他们的床上安装了一个手机座。对于身体健全的参与者,我们在一个房间里进行实验,房间里有一张带手机座的可折叠床。我们将一部安装了FootUI和E-Reading应用程序的智能手机(华为荣耀8)放置在手机座上,用于研究。

4.3 过程

4.3.1交互任务。为了模拟用户和智能手机之间真实的交互过程,我们设计了一个交互任务,用电子阅读app阅读和听电子书,这个任务不仅涵盖了设计的脚的手势,还模拟了用户在野外的交互行为。我们将任务分为十个子任务(见表2),并允许参与者自行决定完成任务的顺序。

4.3.2学习FootUI。在本研究开始时,我们向参与者解释足部手势,引导他们利用各种足部手势来完成互动任务,帮助他们熟悉FootUI。以下是教学步骤。这个阶段对每个参与者来说大约需要10分钟。

第一步:帮助参与者校准设备上的脚。

第二步:教授脚部手势和相应的智能手机操作。我们根据足部手势对应的智能手机操作将其分为2组(见图10),并教他们如何执行足部手势以及他们映射的智能手机操作。1)基于指向的手势,用户

可以在屏幕上移动光标并触发指向的对象。2)快捷手势,用户可以用它来唤起一些智能手机的快捷方式。

第三步:教授互动任务。我们向他们介绍了交互任务的子任务(见表2),并引导他们利用足部手势逐一完成子任务。当由于不正确的足部手势而出现错误时,我们会纠正他们的足部手势,并教他们如何处理错误。

第四步:额外练习。经过一轮带练习的教学后,参与者被允许练习任务并复习脚的手势。我们回答了他们在练习时提出的所有问题。

4.3.3用户测试。当参与者完成练习,准备测试时,主持人会给他们一个开始指令,开始计时,并观察他们的动作。为了保证互动过程的连续性,主持人可以在参与者寻求帮助时提醒他们的任务或手势,但对手势的查询会被记录为记忆错误。

上肢运动障碍的参与者只需用FootUI完成一轮任务,而健全的参与者则需要用手指触摸和FootUI各完成一轮任务。对手指触摸和FootUI的使用顺序进行了平衡,并记录了这两种交互方式的整个任务完成时间。手指触摸和FootUI交互过程的计时是一个“闭环”[7],即如果参与者在交互过程中发生错误后恢复过来,则处理错误的时间将被计入任务完成时间。整个交互过程被视频记录下来,供后续评价。

4.3.4任务后问卷和访谈。在完成上述任务后,我们要求参与者填写一份关于FootUI和手指触摸的用户满意度(1=最低用户满意度, 5=最高用户满意度),疲劳(1=最疲劳, 5=最不疲劳),易用性(1=最难使用, 5=最容易使用)和易学性(1=最难学习, 5=最容易学习)的问卷。参与者被要求对上述四个指标进行5分制李克特评分。之后,我们对每位参与者进行了访谈,了解他们的互动体验,并得到了一些关于FootUI应用的启示。

4.4 结果与讨论

4.4.1 FootUI的准确性和可记忆性。我们标记了操作步骤和任务中出现的错误,发现错误主要发生在三种方式:1)光标没有移动到指定位置。2)算法对足部手势的分类不正确,导致FootUI引发了不正确的智能手机操作。3)参与者混淆了一些手势或向主持人询问他们忘记的手势。我们将第一类错误的次数定义为指向错误,第二类错误的次数定义为分类错误,第三类错误的次数定义为记忆错误。因此,我们defined 1)指向精度 =

$1 - \frac{\text{指向错误的次数}}{\text{指向步数}}$

,其中指向步数表示参与者移动光标进行指向的步数,2)分类精度 = $1 - \frac{\text{分类错误的次数}}{\text{分类步数}}$

$\frac{\text{指向步数}}{\text{指向步数} + \text{分类错误的次数}}$

表2:交互任务和操作

Start the e-reading app	
FootUI	Point to the e-reading app with the cursor (right foot dynamic continuous gestures) ->Trigger (left foot tap)
Finger Touch	Touch the e-reading app
Listen to a phonetic reading of a book	
FootUI	Point to a phonetic book with the cursor (right foot dynamic continuous gestures) -> Trigger (left foot tap) -> Move the cursor to the start button (right foot dynamic continuous gestures) -> Trigger (left foot tap)
Finger Touch	Touch a phonetic book -> Touch the start button
Tune the volume	
FootUI	Evoke volume bar (left foot rotate left + right foot rotate right) -> Slide the volume bar (right foot heel rotation) OR Evoke shortcut menu (left foot double tap or pointing+trigger) -> point to the volume button with the cursor (right foot dynamic continuous gestures) -> Trigger (left foot tap) -> Slide the volume bar (right foot heel rotation)
Finger Touch	Press the volume side-button
Suspend the phonetic reading	
FootUI	Point to the suspend button (right foot dynamic continuous gestures) -> Trigger (left foot tap)
Finger Touch	Touch the suspend button
Read the title page of the e-book	
FootUI	Point to the e-book with the cursor (right foot dynamic continuous gestures) -> Trigger (left foot tap) -> switch screen left (both feet rotate left)/switch screen right (both feet rotate right) or scroll down (press the scroll button or drag down)/scroll up (press the scroll button or drag up)
Finger Touch	Touch the e-book -> scroll left -> scroll right or scroll down ->scroll up
Tune the screen brightness	
FootUI	Evoke brightness bar (both feet tap once) -> Slide the brightness bar (right foot heel rotation) OR Evoke shortcut menu (left foot double tap or pointing+trigger) -> point to the brightness button with the cursor (right foot dynamic continuous gestures) -> Trigger (left foot tap) -> Slide the brightness bar (right foot heel rotation)
Finger Touch	Pull down easy access menu -> drag the brightness bar
Take a screenshot	
FootUI	Perform screenshot gesture (Heel to Heel) OR Evoke shortcut menu (left foot double tap) -> Move the cursor to the screenshot button (right foot dynamic continuous gestures) -> Trigger (left foot tap)
Finger Touch	Press the combination of side-buttons
Go to home screen	
FootUI	Perform home gesture (Toe to Toe) OR Evoke shortcut menu (left foot double tap) -> Move the cursor to the home button (right foot dynamic continuous gestures) -> Trigger (left foot tap)
Finger Touch	Press the home button
Read the notice and get back	
FootUI	Perform notice/easy access gesture (left foot Kick up) -> Perform back gesture (left foot rotate left) OR Evoke shortcut menu (left foot double tap) -> Move the cursor to the notice button (right foot dynamic continuous gestures) -> Trigger (left foot tap)-> Move the cursor to the back button (right foot dynamic continuous gestures)->Trigger (left foot tap)
Finger Touch	Scroll down the screen from the top -> Scroll up
Get into app backstage and return to the e-reading app	
FootUI	Perform app switch gesture (feet close up) -> Point to the e-reading app with the cursor (right foot dynamic continuous gestures) ->Trigger (left foot tap)
Finger Touch	Touch the app switch button -> Touch the e-reading app

和 3) 记 忆 准 确 性 = $1 - \frac{\text{遗忘的足部动作数量}}{\text{参与者的总足部动作数量}}$, 在 离 散 步 骤 $\frac{\text{参与者的总足部动作数量}}{\text{参与者的总足部动作数量}}$ 表示参与者所做的离散足部动作的数量。平均指向准确率为96.75% (SD=8.36), 平均分类准确率为84.65% (SD=8.14), 平均记忆准确率为92.97% (SD=6.59)。

指向精度表明, FootUI可以稳定地跟踪足部, 用户可以准确地指向界面上的物体。分类误差表明足部手势识别算法的鲁棒性有待提高。分类错误的另一个原因是参与者的手势不准确

表3:FootUI主观评价结果(从1 -不好到5 -好)

Statement	FootUI	Finger touch
user satisfaction	3.63 (SD=0.86)	4.44 (SD=0.70)
fatigue	3.38 (SD=0.78)	4.44 (SD=1.11)
ease-of-use	3.56 (SD=1.00)	4.44 (SD=0.79)
learnability	3.75 (SD=1.09)	4.19 (SD=1.18)

标准。他们的一些潜意识的脚动作也会错误地引发捷径。考虑到学习时间较短，记忆正确率显示FootUI具有较高的记忆能力。

4.4.2 FootUI效率。效率以任务完成时间来衡量。我们比较了FootUI和手指触摸的任务完成时间和任务完成率，以便更直观地评价。由于两名身体健全的参与者的手指触摸数据丢失。我们收集了160例(16*10=160)FootUI试验和120例手指触摸试验。通过手指触摸，参与者能够完成所有的任务(100%)。使用FootUI，参与者能够完成95.63%(160个中的153个)的路径。一些参与者由于忘记了一些子任务和易出错而未能完成任务。手指触摸的平均任务完成时间为96.33s (SD=32.04)，FootUI的平均任务完成时间为198.10s (SD=86.07)。任务完成时间由同时使用手指触摸和FootUI完成所有子任务的参与者计算(删除5名参与者的数据)。

4.4.3 主观反馈。

用户体验。表3显示了FootUI和手指触摸在四个指标上的平均评分。Wilcoxon sign -rank检验显示，手指触摸在用户满意度、疲劳度和易用性上获得了显著更高的评分($p < 0.01$)。而FootUI与手指触摸在易学性上无显著差异($p = 0.08 > 0.05$)，说明FootUI易学。

访谈结果显示，指脚是疲劳的，快捷手势并没有带来太大的疲劳。P5说“右脚移动光标会给右脚带来一些负担”，他也说“快捷手势不会带来疲劳”。P6和P9还表明，右脚连续指点是疲劳的主要来源，快捷手势不疲劳。部分参加者表示FootUI易学易用。P7表示：“虽然对脚部姿势的要求有点严格，但是熟悉之后感觉使用体验还是不错的。”P3说：“我认为这是一个很好的方式，可以帮助上半身运动障碍的人方便地使用智能手机。互动过程很顺利，学习成本也相对较低。”P5、P7和P11均表示使用FootUI进行智能手机交互是新颖有趣的。

两位上半身运动障碍的参与者也对FootUI表达了积极的态度，并肯定了它的可用性。P15(双臂截肢者)说：“当我靠近手机仔细阅读时，我的脚碰不到它，你们的软件真的解决了这个问题。”

合适的使用。P15和P16表示，由于双臂截肢者可以以不同的姿势使用智能手机，而且躺在床上使用智能手机并不是他们唯一的使用场景，因此FootUI无法取代他们目前用脚触摸智能手机屏幕的互动方式。P16(双臂截肢者)说：“我认为脑瘫患者和那些刚刚因事故失去手臂的人可能比我更需要这项技术。”他们还表示，FootUI可以帮助他们与智能手机互动，特别是当他们躺在床上浏览手机时。P15(双臂截肢者)说：“这很方便。看小说、看视频的时候，不用一直低头看手机，操作也比较简单。”P16(双臂截肢者)表示FootUI非常适合电子阅读和视频观看。她说：“现在感觉看小说和看电视都很方便。我可以用一个简单的动作翻页或做其他事情，这很好。”一些健全的参与者也提出，在这种情况下，FootUI对健全的人是有用的。P2说她想在床上一边看视频一边吃东西一边使用FootUI。P11说：“我认为这对身体健全的人来说也是一次有趣的经历。例如，当我把手机扔到墙上时，用脚可能比触摸手机更好。”

5 结论和未来的工作

我们展示了FootUI，一种新颖的交互技术，使上肢运动障碍但下肢声音正常的人可以躺在床上使用智能手机。我们为FootUI设计了足部手势集，发现基于脚趾的手势不适合这个场景。相应的手势跟踪识别算法在8种手势分类中，平均准确率达到了90.53%。可用性评估表明，FootUI使用简单、高效、有趣，可以帮助上肢运动障碍人士在这种场景下更顺畅、舒适地与智能手机互动。

在未来的工作中，我们会解决一些限制，比如:(i)由于招募上肢运动障碍参与者的困难，我们招募了一些健全的参与者来进行我们的用户研究，我们的目标用户数量很少。我们将在未来招募更多的上肢运动障碍参与者来评估FootUI。(ii) FootUI的评估是粗略的，我们会选择一个合适的基线，对FootUI进行全面的评估。

参考文献

- [1] Jason Alexander, Teng Han, William Judd, Pourang Irani, and Sriram Subramanian. 2012. Putting Your Best Foot Forward: Investigating Real-World Mappings for Foot-Based Gestures. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (Austin, Texas, USA) (CHI '12). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1229–1238. <https://doi.org/10.1145/2207676.2208575>
- [2] Lisa Anthony, YooJin Kim, and Leah Findlater. 2013. Analyzing User-Generated Youtube Videos to Understand Touchscreen Use by People with Motor Impairments. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (Paris, France) (CHI '13). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1223–1232. <https://doi.org/10.1145/2470654.2466158>
- [3] Y. L. Chi, S. K. Ong, M. L. Yuan, and A. Y. C. Nee. 2007. Wearable Interface for the Physical Disabled. In Proceedings of the 1st International Convention on Rehabilitation Engineering & Assistive Technology: In Conjunction with 1st Tan Tock Seng Hospital Neurorehabilitation Meeting (Singapore) (i-CREATE '07). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 28–32. <https://doi.org/10.1145/1328491.1328500>

- [4] Jon Froehlich, Jacob O. Wobbrock, and Shaun K. Kane. 2007. Barrier Pointing: Using Physical Edges to Assist Target Acquisition on Mobile Device Touch Screens. In Proceedings of the 9th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility (Tempe, Arizona, USA) (ASSETS '07). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 19–26. <https://doi.org/10.1145/1296843.1296849>
- [5] Xiaozhu Hu, Jiting Wang, Weiwei Gao, Chun Yu, and Yuanchun Shi. 2021. FootUI: Assisting People with Upper Body Motor Impairments to Use Smartphones with Foot Gestures on the Bed. In Extended Abstracts of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (Yokohama, Japan) (CHI EA '21). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 436, 7 pages. <https://doi.org/10.1145/3411763.3451782>
- [6] Christopher Kwan, Isaac Paquette, John J. Magee, Paul Y. Lee, and Margrit Betke. 2011. Click Control: Improving Mouse Interaction for People with Motor Impairments. In The Proceedings of the 13th International ACM SIGAC-CESS Conference on Computers and Accessibility (Dundee, Scotland, UK) (AS-SETS '11). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 231–232. <https://doi.org/10.1145/2049536.2049582>
- [7] Guan hong Liu, Yizheng Gu, Yiwen Yin, Chun Yu, Yuntao Wang, Haipeng Mi, and Yuanchun Shi. 2020. Keep the Phone in Your Pocket: Enabling Smartphone Operation with an IMU Ring for Visually Impaired People. *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.* 4, 2, Article 58 (June 2020), 23 pages. <https://doi.org/10.1145/3397308>
- [8] Katsumi Minakata, John Paulin Hansen, I. Scott MacKenzie, Per Bækgaard, and Vijay Rajanna. 2019. Pointing by Gaze, Head, and Foot in a Head-Mounted Display. In Proceedings of the 11th ACM Symposium on Eye Tracking Research & Applications (Denver, Colorado, USA) (ETRA '19). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 69, 9 pages. <https://doi.org/10.1145/3317956.3318150>
- [9] Kyle Montague, Vicki L. Hanson, and Andy Cobley. 2012. Designing for Individuals: Usable Touch-Screen Interaction through Shared User Models. In Proceedings of the 14th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility (Boulder, Colorado, USA) (ASSETS '12). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 151–158. <https://doi.org/10.1145/2384916.2384943>
- [10] Kyle Montague, Hugo Nicolau, and Vicki L. Hanson. 2014. Motor-Impaired Touchscreen Interactions in the Wild. In Proceedings of the 16th International ACM SIGACCESS Conference on Computers & Accessibility (Rochester, New York, USA) (ASSETS '14). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 123–130. <https://doi.org/10.1145/2661334.2661362>
- [11] Martez E. Mott, Radu-Daniel Vatavu, Shaun K. Kane, and Jacob O. Wobbrock. 2016. Smart Touch: Improving Touch Accuracy for People with Motor Impairments with Template Matching. In Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (San Jose, California, USA) (CHI '16). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1934–1946. <https://doi.org/10.1145/2858036.2858390>
- [12] Martez E. Mott and Jacob O. Wobbrock. 2019. Cluster Touch: Improving Touch Accuracy on Smartphones for People with Motor and Situational Impairments. In Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (Glasgow, Scotland UK) (CHI '19). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1–14. <https://doi.org/10.1145/3290605.3300257>
- [13] Francis Quek, David McNeill, Robert Bryll, Susan Duncan, Xin-Feng Ma, Cemil Kirbas, Karl E. McCullough, and Rashid Ansari. 2002. Multimodal Human Discourse: Gesture and Speech. *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.* 9, 3 (Sept. 2002), 171–193. <https://doi.org/10.1145/568513.568514>
- [14] Guarionex Salvia and Juan Pablo Hourcade. 2013. PointAssist: Assisting Individuals with Motor Impairments. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (Paris, France) (CHI '13). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1213–1222. <https://doi.org/10.1145/2470654.2466157>
- [15] Jeremy Scott, David Dearman, Koji Yatani, and Khai N. Truong. 2010. Sensing Foot Gestures from the Pocket. In Proceedings of the 23rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (New York, New York, USA) (UIST '10). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 199–208. <https://doi.org/10.1145/1866029.1866063>
- [16] Shari Trewin, Simeon Keates, and Karyn Mofatt. 2006. Developing Steady Clicks: A Method of Cursor Assistance for People with Motor Impairments. In Proceedings of the 8th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility (Portland, Oregon, USA) (ASSETS '06). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 26–33. <https://doi.org/10.1145/1168987.1168993>
- [17] Eduardo Velloso, Dominik Schmidt, Jason Alexander, Hans Gellersen, and Andreas Bulling. 2015. The Feet in Human-Computer Interaction: A Survey of Foot-Based Interaction. *ACM Comput. Surv.* 48, 2, Article 21 (Sept. 2015), 35 pages. <https://doi.org/10.1145/2816455>
- [18] Jacob Wobbrock. 2003. The Benefits of Physical Edges in Gesture-Making: Empirical Support for an Edge-Based Unistroke Alphabet. In CHI '03 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems (Ft. Lauderdale, Florida, USA) (CHI EA '03). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 942–943. <https://doi.org/10.1145/765891.766083>
- [19] J. O. Wobbrock, B.A. Myers, and S. E. Hudson. 2003. Exploring edge-based input techniques for handheld text entry. In 23rd International Conference on Distributed Computing Systems Workshops, 2003. Proceedings.
- [20] Jacob O. Wobbrock, Brad A. Myers, and John A. Kembel. 2003. EdgeWrite: A Stylus-Based Text Entry Method Designed for High Accuracy and Stability of Motion. In Proceedings of the 16th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (Vancouver, Canada) (UIST '03). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 61–70. <https://doi.org/10.1145/964696.964703>