

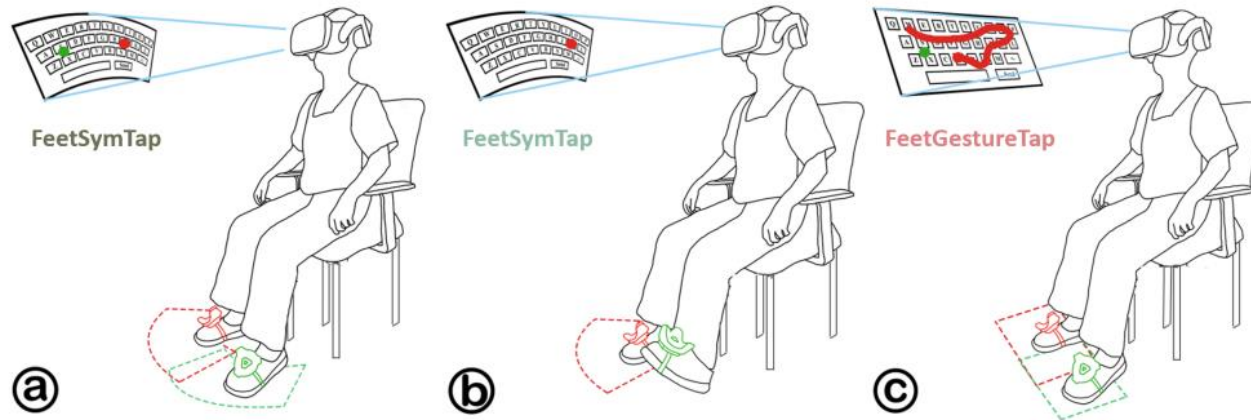


CHI 2024
Surfing the World

11-16 May 2024

Exploration of Foot-based Text Entry Techniques for Virtual Reality Environments

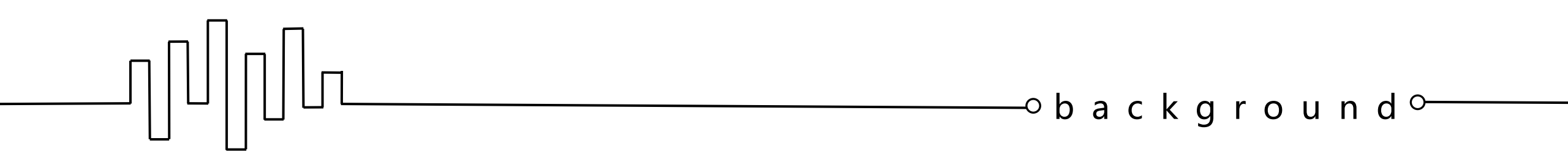
Tingjie Wan; Liangyuting Zhang; Hongyu Yang;
Pourang Irani; Lingyun Yu; Hai-Ning Liang





1

Introduction



双手占用

Virtual Reality

控制器和手势



免手操作

语音识别



环境噪声和准确性

头部输入



颈部疲劳和运动晕动症

眼动互动



校准问题和眼疲劳



脚部输入

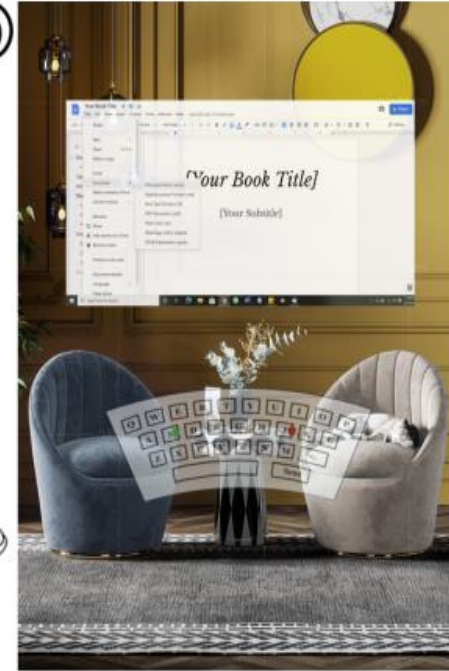
background



a



b



脚部交互

下肢提供了广泛的运动范围、各种能够有效捕捉脚部位置的设备



↓
选择，作为附加输入方法的潜力或方式

点击输入



碰撞体进入与键盘平面对齐的碰撞体
开/关事件

滑动输入

绘制连续的手势来输入文本，根据

- 1、首次系统地探讨了脚部文本输入技术在VR环境中的可行性和适用性
- 2、设计并评估了三种不同的脚部输入技术，通过用户实验这些技术表现出了高效的性能和可接受的工作负荷。
- 3、引入了一种拱形Qwerty键盘，具有符合脚部和腿部自然运动轨迹的符合人体工学的布局，提高了用户的舒适性和可用性。



2 Implementation



○ Research Questions ○

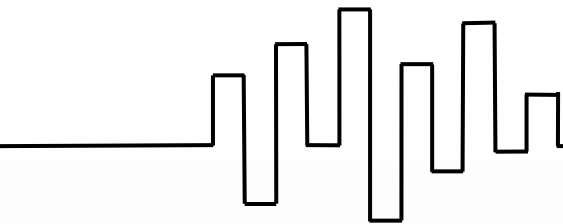
- ✓ RQ1: 在VR场景中, 坐着和站着进行基于脚的文本输入是否可行? 是否需要长期学习?
- ✓ RQ2: 如何为VR设计基于脚文本输入技术, 以实现可接受的免手操作文本输入性能并减少工作负担?
- ✓ RQ3: 脚势输入与脚击输入哪种方法更好? 这两种输入方法能达到怎样的文本输入速度和错误率?

初步研究

- ✓ 评估了坐姿和站姿下的可行性和可学习性
- ✓ RQ1

用户研究

- ✓ 比较了三种技术 (FeetSymTap、FeetAsymTap 和 FeetGestureTap) 的性能和用户体验
- ✓ RQ2
- ✓ RQ3

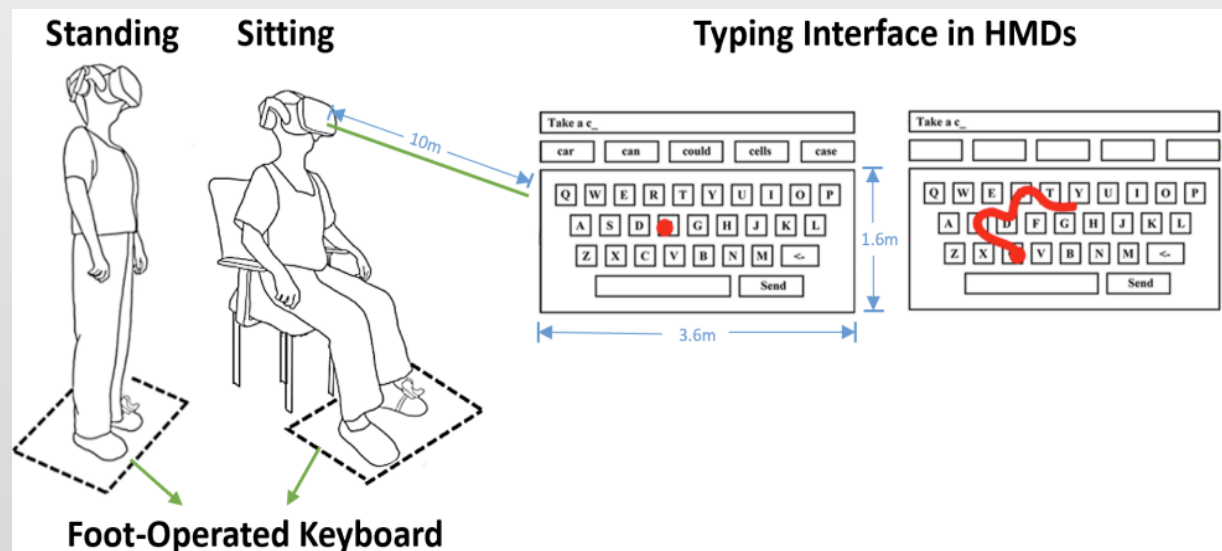


Implementation

Apparatus

HTC Vive Pro 2、Intel i9-11900 CPU、Nvidia GeForce GTX 3090 GPU、Unity3D (v2021.3.1f1) 、SteamVR Unity插件、HTC Vive Tracker 2.0

UI





Implementation

Foot-based Interaction

键盘尺寸80cm × 35cm

输入方法: **基于脚的滑动**

基于脚的击打



脚趾击打



脚跟击打

上升角度超过10度

统计解码算法

使用**最大似然估计和贝叶斯推断**来选择最可能的单词

词势识别

姿势解码为词汇表中预定义的单词, 每个单词都被转换为**连接单词中连续字母的关键点的线**

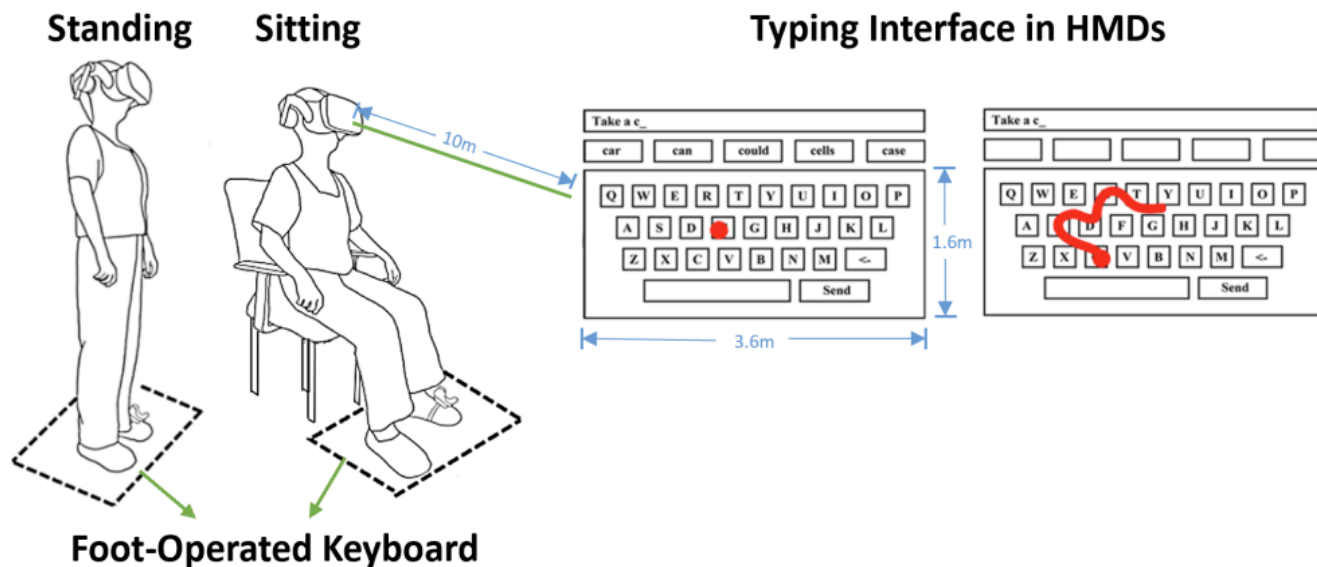


3

PRELIMINARY STUDY

探索站立和坐姿下的脚部文本输入

○ PRELIMINARY STUDY ○



FootTap: 用户使用非支撑脚与 VR 环境中显示的虚拟键盘进行交互 ➡ 选择虚拟按键、轻敲确认

FootGesture: 通过非支撑脚的脚趾轻敲来启动滑动姿势 ➡ 非支撑脚在地面上滑动，勾画出单词词势形状
➡ 再次轻敲脚趾来结束滑动姿势 ➡ 从候选单词中选择

参与者： 招募了8名参与者，所有参与者都熟悉 Qwerty 键盘布局，并且有 VR 经验。

实验设计： 被试内设计，其中技术和姿势作为两个独立变量，形成四种条件。总共进行了320次试验用于分析
(= 8名参与者 × 2种文本输入技术 × 2种姿势 × 10个句子)。

评价指标：

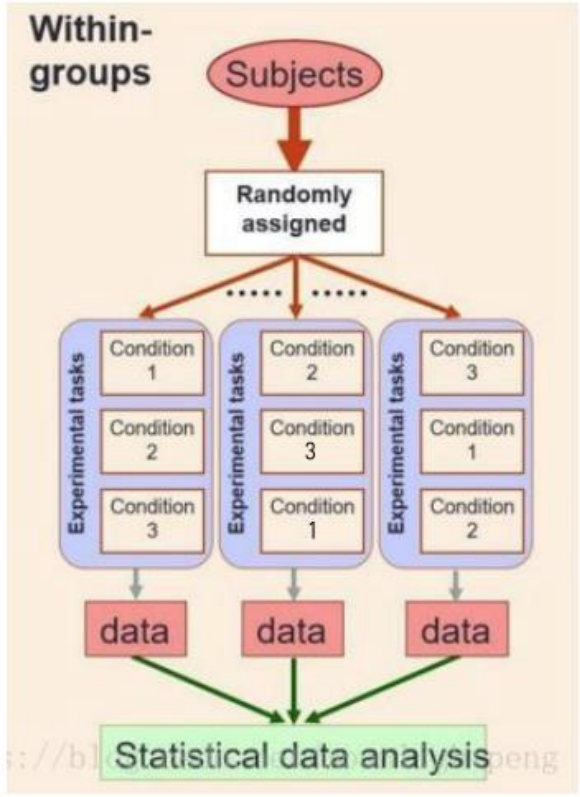
- 输入速度：每分钟输入单词数 (**WPM**)
- 错误率：总错误率 (**TER**) = 未纠正错误率 (**NCER**) + 纠正错误率 (**CER**) 的总和
- 工作负荷： **NASA-TLX** 工作负荷问卷，包括心理需求、身体需求、时间需求、挫折感、努力和表现
- 可用性：场景后问卷 (**ASQ易用性**) 和研究后系统可用性问卷 (**PSSUQ满意度**)
- 访谈：半结构化访谈内容，
 - (1) 参与者在手部无法使用时愿意使用脚进行输入的意愿；
 - (2) 在每种姿势下使用 FootTap 和 FootGesture 的体验；
 - (3) 对脚部文本输入的任何可能改进建议。

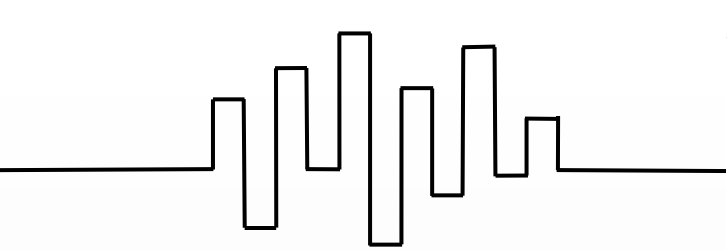
实验设计：被试内设计，其中技术和姿势作为两个独立变量，形成四种条件。使用**拉丁方**方法对四种条件的顺序进行了平衡。转录句子取自 **MacKenzie 和 Soukoreff 的短语集**。总共进行了320次试验用于分析（= 8名参与者 × 2种文本输入技术 × 2种姿势 × 10个句子）。

设计类型	被试内设计	被试间设计
实验描述	每位参与者在三个不同条件（安慰剂、低剂量、高剂量）下测试焦虑水平	将参与者分为三组，每组接受一种特定条件（安慰剂、低剂量或高剂量）
参与者安排	30名参与者都接受所有三个条件，每个条件在不同时间点测试	30名参与者分为三组，每组10人，每人只接受一个条件
控制方法	随机化条件顺序，避免顺序效应（如疲劳或学习效应）	随机分配参与者到不同组，确保各组人数均等，减小个体差异影响
数据分析方法	重复测量方差分析（Repeated Measures ANOVA）	独立样本t检验或独立组方差分析（ANOVA）

被试内:同一组参与者接受多个实验条件的测量。
被试间:不同的参与者分别被分配到不同的实验条件中

拉丁方:用于控制实验中两个无关变量的潜在干扰





输入速度：每分钟输入单词

错误率：总错误率（TER

$$Total Error Rate = \frac{\text{Total Error}}{\text{Total Characters}}$$

主观因素：工作负荷：NASA

可用性：场景后

访谈：半结构化

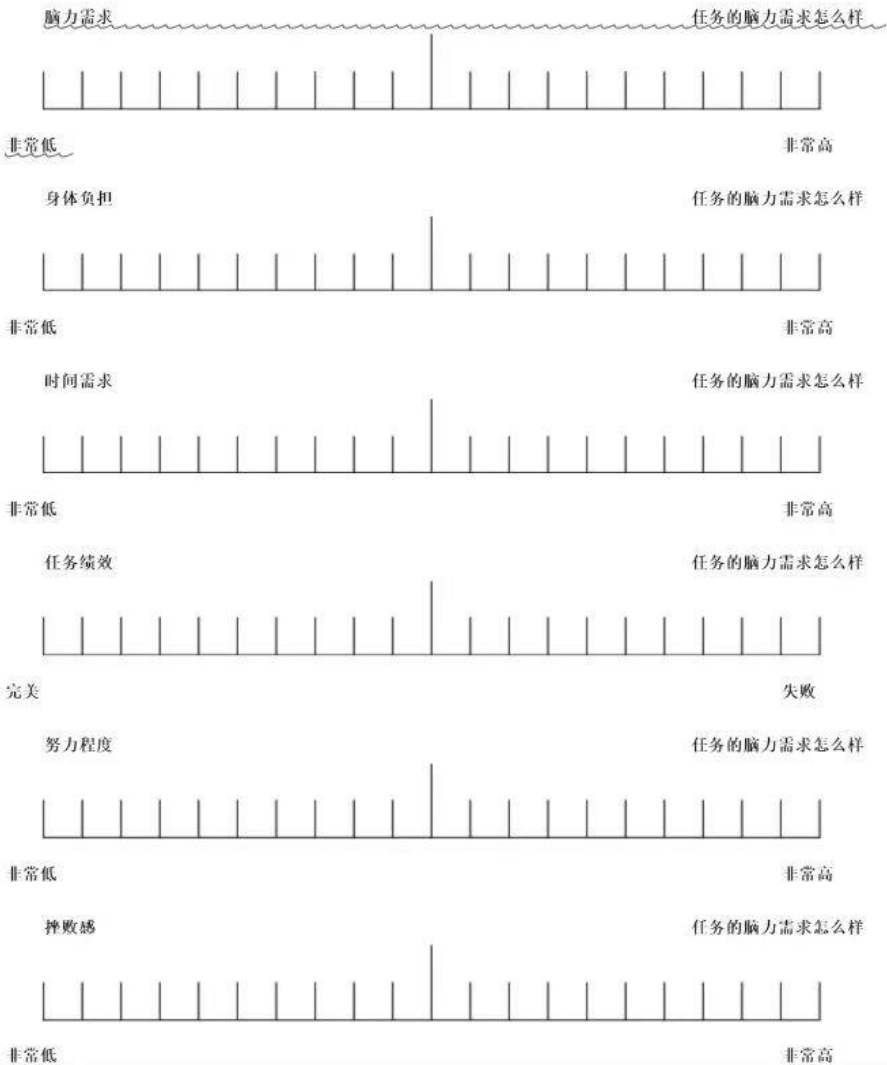
表 5：NASA_TLX 测量表

实验组号：

姓名：

美国航空航天局任务负荷指数 NASA-TLX 量表

Hart and Sreveland 的美国航空航天局任务负荷指数，通过五位七点的方式评估工作负荷。每个点的高、中、低的增量值反应在 21 个等级上。



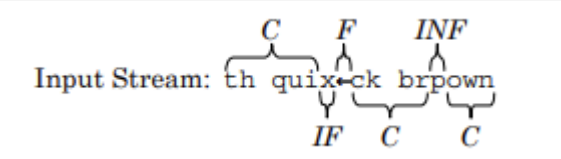
LIMINARY STUDY

jumps over the lazy dog (43 characters)
t = 20 seconds

的总和。

$$\%, (11)$$

$$(12)$$



时间需求、挫折感、努力和表现

(UQ满意度)

却进行输入的心愿；
Gesture 的体验；
义。

实验结果

○ PRELIMINARY STUDY ○

使用 SPSS 26 进行数据分析，使用**重复测量方差分析**（RM-ANOVA）和**多变量方差分析**（MANOVA）

数据分析软件： Spss，强大的图形功能，界面友好

Stata，强大的统计能力，灵活的编程



数据分析方法： **t检验**（t-test），用于**比较两个样本均值之间**的差异，以确定这种差异是否显著。它适用于样本量较小且总体方差未知的情况。

卡方检验（Chi-square test），用于**检验分类数据中变量之间的关联性**或**分布的适合度**。它通过比较观察到的频数与预期频数来判断是否存在显著差异。

方差分析（ANOVA），用于**比较三个或更多组之间**的均值差异，以确定组间差异是否显著。

正态性检验：要求每个组的数据应近似正态分布（Shapiro-Wilk检验）

球形假设：适用于重复测量ANOVA，要求各组之间的方差相等（Mauchly's球形检验）

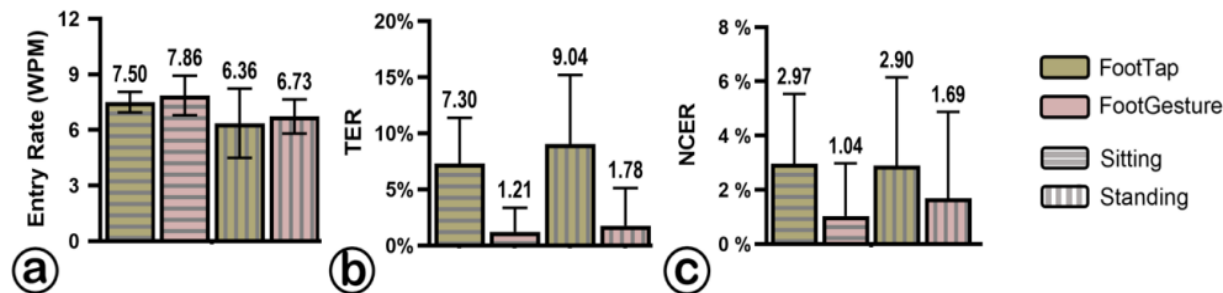
p值（p-value）用于衡量观察到的数据与零假设之间的一致性

实验结果

PRELIMINARY STUDY

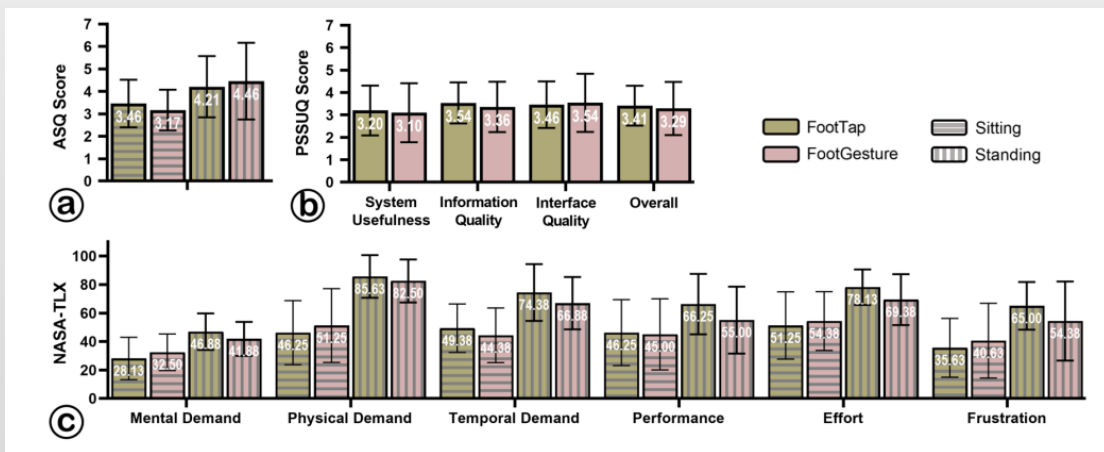
使用 SPSS 26 进行数据分析，使用**重复测量方差分析**（RM-ANOVA）和**多变量方差分析**（MANOVA）

输入速度和错误率：



总的来说，FootTap 和 FootGesture 在这项短期研究中都达到了**可接受的输入速度**（坐姿时均超过 7 WPM，站姿时超过 6 WPM）和**错误率**（低于 2%）。

可用性和感知工作负荷：



ASQ 和 NASA-TLX 的分数在**站姿条件下显著高于坐姿条件**，这表明用户**在坐姿时更愿意使用脚进行输入**，因为他们的工作负荷（主要是身体需求）较低。

访谈：

- 1、所有参与者 (N=8) 一致认为，当双手不可用时，**脚部文本输入**是可行的。
- 2、用户在选择脚部输入时表现出对**右脚**（主导脚）的明显偏好。
- 3、参与者表示 **FootTap 更容易掌握**，尽管他们很快学会了使用 FootGesture。
- 4、对于 FootTap，所有参与者期望能像使用物理键盘打字一样同时**使用双脚**，这样可以减少腿部疲劳。
- 5、在 FootGesture 的情况下，五名参与者感到需要**逐字输入**的要求限制了他们的灵活性

经验：

- L1、用户在坐姿和站姿下**均可以使用**点击和滑动输入方法进行文本输入，且**无需**进行大量学习。然而，长时间在站立姿势下进行足部打字的可行性较低，因为会导致**身体疲劳 (RQ1)**
- L2、在站立姿势下，短小的文本输入任务更为合适，在坐姿下，轻量级的文本输入任务更为可行。
- L3、与仅使用一只脚进行输入相比，参与者更希望协调并**利用双脚**进行文本输入。
- L4、在站立姿势下，滑动输入方法相较于点击输入方法会导致**较少的疲劳**

A decorative graphic on the left side of the page. It features a thin black diagonal line that starts from the bottom left, passes through a small white circle, and continues upwards. Another thin black diagonal line starts from the top left and extends downwards, also passing through a small white circle. Between these two lines, there are several thin, black-outlined rectangles of varying sizes, some of which are slightly tilted, creating a sense of movement or a staircase effect.

4

USER - INSPIRED TECHNIQUES

用户启发的双足输入文本输入技术

USER-INSPIRED TECHNIQUES

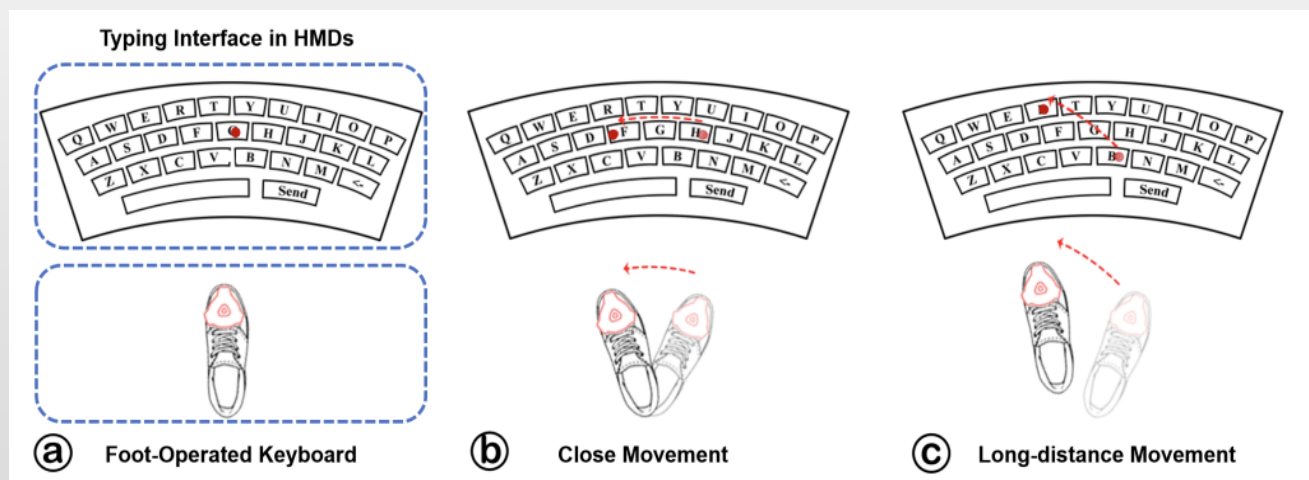
改进:

单足输入 ➡ 双足输入

矩形布局 ➡ 弧形布局

将点击机制整合到滑动输入方法中，以解决其灵活性不足的问题

弧形键盘布局:



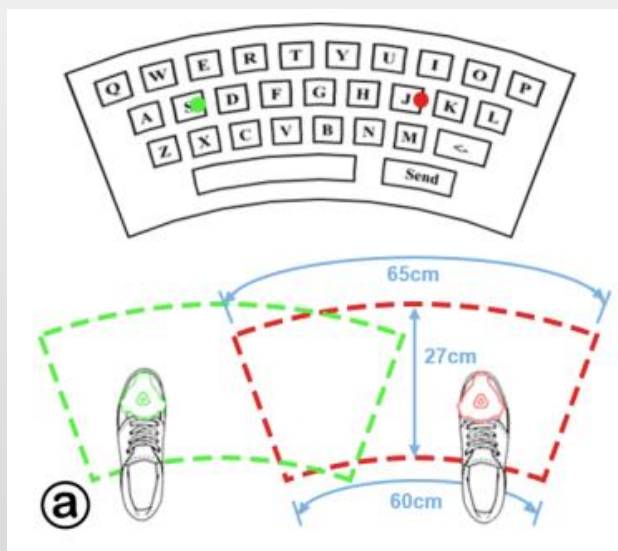
用户启发的双足输入文本输入技术

USER-INSPIRED TECHNIQUES

改进的三种输入技术：

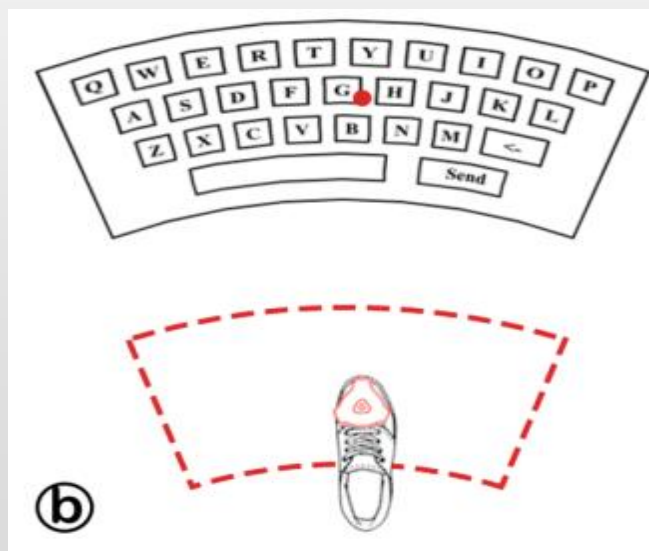
FeetSymTap:

对称的双足离散文本输入技术



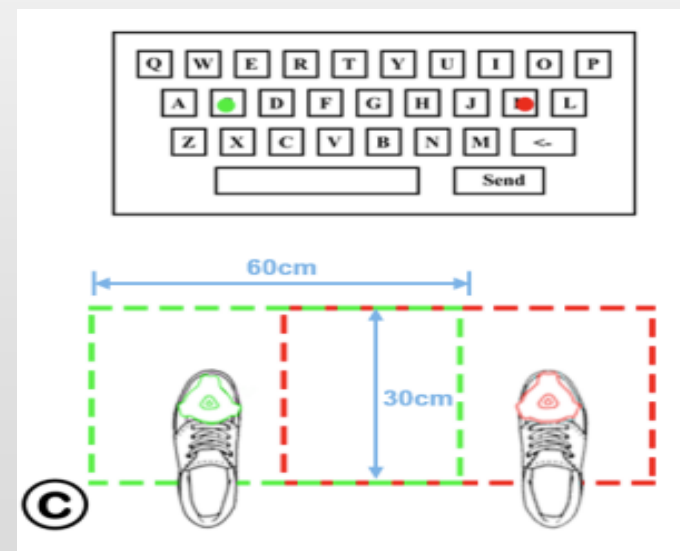
FeetAsymTap:

不对称的双足离散文本输入技术



FeetGestureTap:

不对称的双足文本输入技术
结合了滑动和点击方法



An abstract graphic on a light gray background. A thin black line runs diagonally from the bottom left towards the top right. Along this line, there are two small white circles. To the right of the lower circle is a large, bold, black letter 'S'. Further up the line, to the right of the upper circle, is a series of seven rectangular blocks of varying sizes and orientations, arranged in a staggered, ascending pattern.

S

**U S E R
S T U D Y**

参与者： 招募了18名参与者

实验设计： 被试内设计，其中Technique 作为自变量。总共 540 次试验（= 18 名参与者 × 3 种文本输入技术 × 10 个句子）。

评价指标： 输入速度：每分钟输入单词数（WPM）

错误率：总错误率（TER）=未纠正错误率（NCER）+纠正错误率（CER）的总和

工作负荷： **NASA-TLX** 工作负荷问卷，包括心理需求、身体需求、时间需求、挫折感、努力和表现

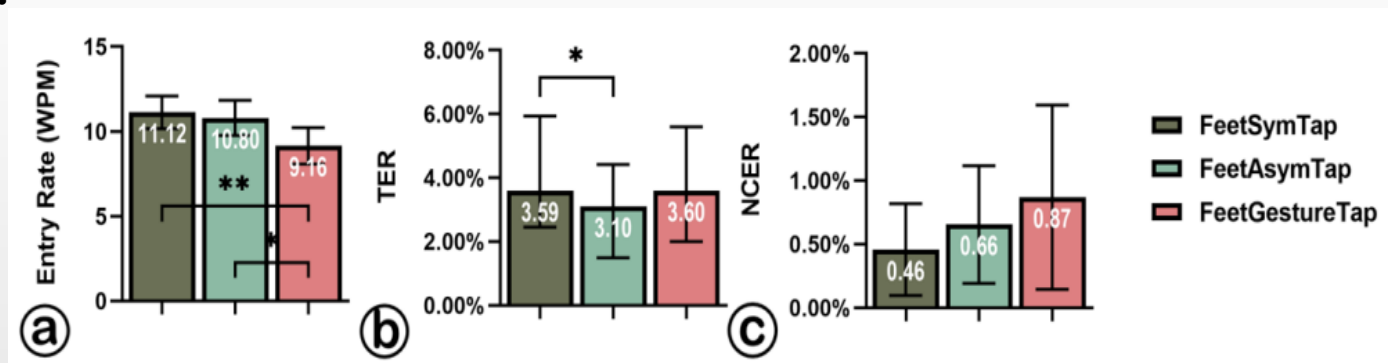
可用性：场景后问卷（**ASQ**）和研究后系统可用性问卷（**PSSUQ**）

实验结果

○ USER STUDY ○

使用 SPSS 26 进行数据分析，使用**重复测量方差分析**（RM-ANOVA）和**多变量方差分析**（MANOVA），使用 Greenhouse-Geisser 校正，Bonferroni 校正的事后配对比较

输入速度和错误率：



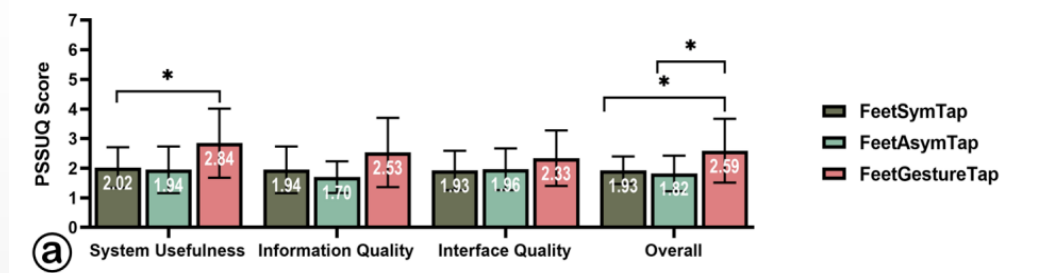
分析结果表明，技术对输入速度有显著影响，事后配对比较表明，FeetGestureTap 的输入速度显著慢于 FeetSymTap 和 FeetAsymTap。

比较均值表明，技术对 TER 有显著影响，但对 NCER 的影响不显著。事后测试发现，FeetAsymTap 的错误率低于 FeetSymTap。

实验结果

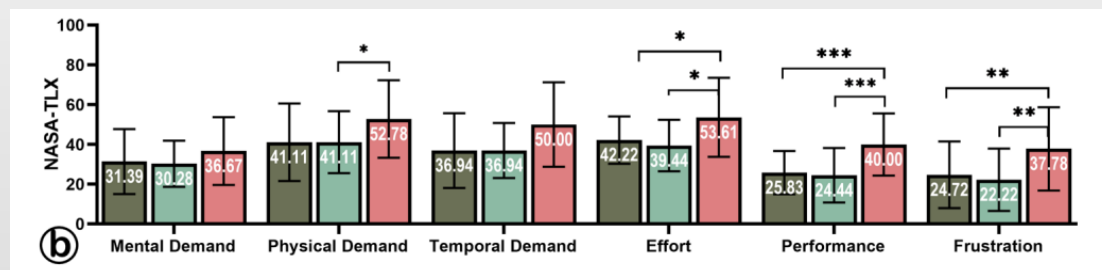
USER STUDY

可用性:



分析结果显示**技术**在 PSSUQ 总体评分、系统有用性评分和信息质量评分方面存在显著差异。事后配对比较表明，FeetGestureTap 的 PSSUQ 总体评分和系统有用性均显著**高于**FeetSymTap。FeetGestureTap 的总体评分显著**高于**FeetAsymTap。

感知工作负荷:



分析结果显示感知工作负荷**存在显著差异**。对于 NASA-TLX 的每个维度，RM-ANOVA 显示物理需求、时间需求、努力、表现和挫折方面存在显著效果。事后测试表明，FeetAsymTap 所需的物理需求**低于**FeetGestureTap。

两种基于脚的点击**文本输入技术速度**与其他免手输入技术相当，且三种技术的**错误率都**很低。用户对三种基于脚的输入技术的**可用性评价**都很高，所有三种技术的**工作负荷水平**都可以接受。

对称与不对称双脚点击技术：精确控制脚部运动对于准确定位和点击至关重要 **(RQ2)**

脚部点击与滑动姿势的比较：使用点击机制与滑动机制的文本输入效率受到双脚交替使用的影响。 **(RQ3)**

人体工学键盘布局：拱形 Qwerty 键盘，与脚部的自然运动路径对齐。这种人体工学设计减少了腿部的伸展运动，提高了点击键的便捷性和准确性。



L5、关于文本输入性能和主观反馈的结果证实了三种基于双脚的技术在 VR 环境下实现**可接受**的免手动输入速度的能力

L6、同一只脚上协调点击和定位是一项要求较高的任务，**频繁在脚趾点击和侧向移动**之间的转换增加了复杂性，可能导致错误。

L7、相较于滑动输入技术，**交替使用双脚**是一种有效减少脚部疲劳的方式。

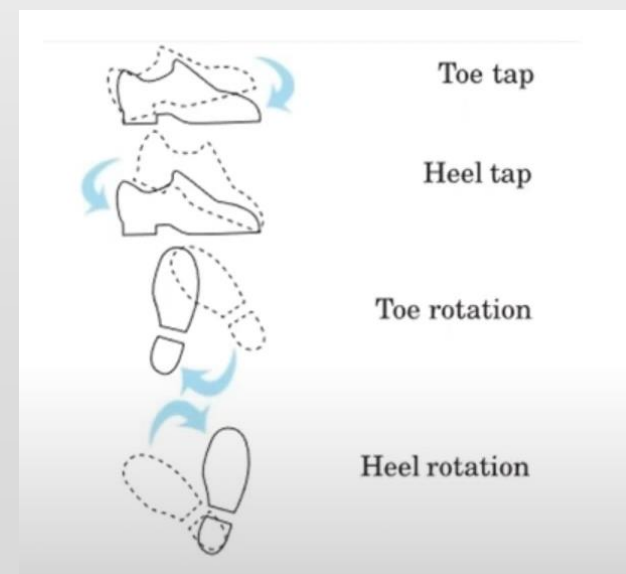
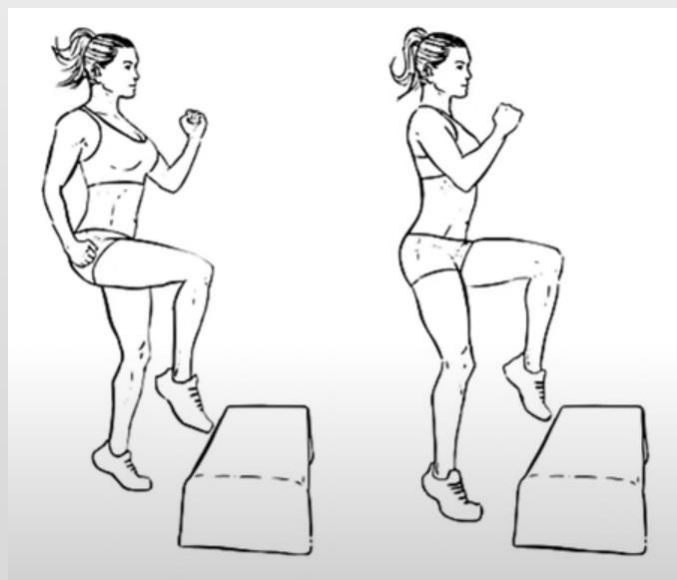
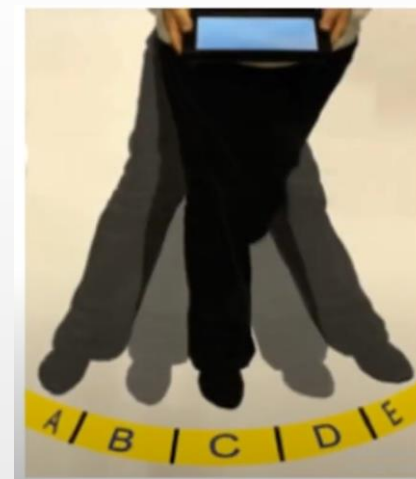
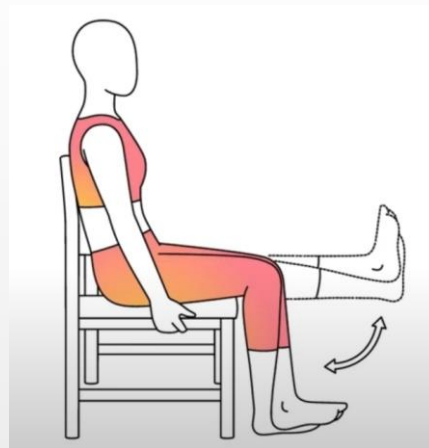


6

LIMITATIONS AND FUTURE WORK

设计建议

- 1、最小化腿部移动
- 2、重新设计键盘布局
- 3、交替使用双脚
- 4、根据脚的灵活性映射任务
- 5、优先考虑简单动作



局限性:

- 1 跟踪设备的局限性**
动作跟踪器在公共或移动环境中的使用存在局限性
较小传感器集成到鞋子上，利用压力传感器和加速度计来获取更丰富的脚部运动信息
- 2 意外触发操作的风险**
关于潜在意外触发操作的风险尚未详细研究
- 3 脚部动作识别的准确性**
用户解剖结构的差异、鞋类类型和其他可能影响脚趾敲击识别准确性的因素
- 4 VR环境之外的扩展性**
混合现实（MR）和增强现实（AR）中的脚部文本输入

交互类论文

1

交互方法相关技术的以往研究及其问题

设计布局：圆形布局、分段布局

交互方法：有手与无手、控制器、手部追踪、触控板、语音、脚步、眼动...

2

交互设计方法

布局设计理念、交互方法设计

3

预实验：确定优化选项和最终形式

不同布局、交互方法、小优化

4

用户实验：测试性能和对比其他方法

确定最终形式，开展连续实验测试性能

5

应用场景、后续设计建议、优势劣势

交互类论文

1

交互方法相关技术的以往研究及其问题

设计布局：圆形布局、分段布局

交互方法：有手与无手、控制器、手部追踪、触控板、语音、脚步、眼动...

2

交互设计方法

布局设计理念、交互方法设计

3

预实验：确定优化选项和最终形式

不同布局、交互方法、小优化

4

用户实验：测试性能和对比其他方法

确定最终形式，开展连续实验测试性能

5

应用场景、后续设计建议、优势劣势

FanPad: A Fan Layout Touchpad Keyboard for Text Entry in VR

Jian Wu^{1*}

Ziteng Wang^{1†}

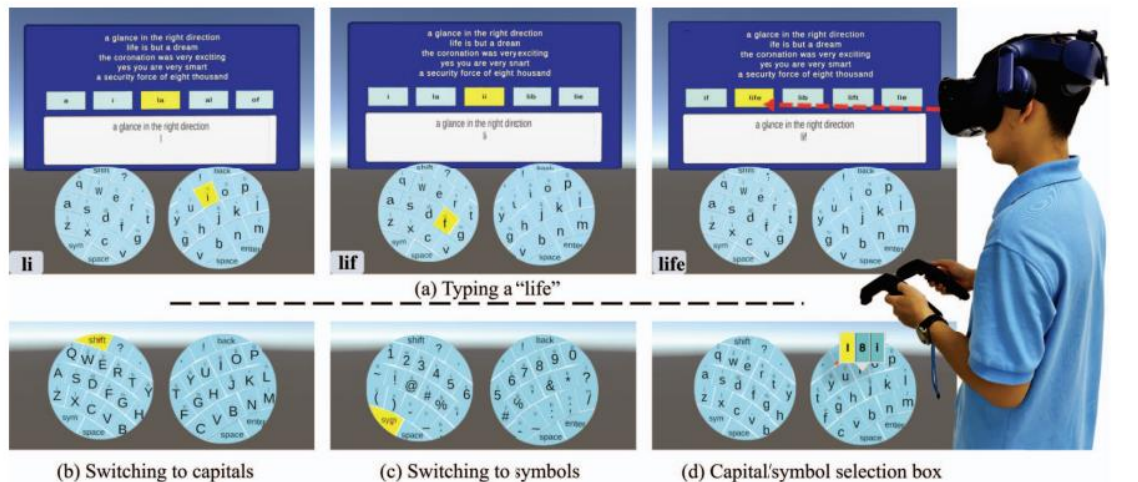
Lili Wang^{1,2‡}

Yuhan Duan^{1§}

Jiaheng Li^{1¶}

¹ State Key Laboratory of Virtual Reality Technology and Systems, School of Computer Science and Engineering, Beihang University, Beijing, China

² Peng Cheng Laboratory, Shenzhen, Guangdong, China



1

交互方法概

设计布局：圆形和

交互方法：有手和

2

交互设计方

布局设计理念、3

3

预实验：确定优化选项和最终形式

不同布局、交互方法、小优化

4

用户实验：测试性能和对比其他方法

确定最终形式，开展连续实验测试性能

5

应用场景、后续设计建议、优势劣势

2 PRIOR WORK

This section briefly reviews the recent prior text entry techniques in VR. For a more detailed existing methods examination, please refer to the survey work [8].

2.1 Non-controller-based Techniques

Using physical keyboards to type in VR is a familiar and effective technique [44]. However, it is a problem how to combine the physical keyboards and VR environments well. Many researchers have attempted to overcome the usability challenges in HMDs [32,43].

et al. proposed GlanceWriter, which allows users to enter text by glancing over keys one by one [6]. Head or gaze-based techniques are likely to cause motion sickness [52] or eye strain.

In summary, non-controller-based technologies either necessitate extra physical keyboards or touchscreen devices, reducing their practicality, or they must be paired with speech recognition or eye-tracking modules, leading to diminished input accuracy or potential dizziness.

2.2 Controller-based Techniques

Handheld controllers are widely used in current VR HMDs. Text

交互类论文

3.1 Keyboard Layout

The design of our FanPad is roughly divided into two stages: mapping and curving stages.

3.1.1 Mapping: SKPad

Inspired by the efficiency and familiarity of typing on a T26 QWERTY keyboard on a smartphone, we propose the *SKPad* layout. This layout optimizes the transition from mobile to touchpad typing, minimizing the learning curve and maintaining high input efficiency.

To achieve this, we divided the QWERTY keyboard on a mobile phone into two halves, mapping each to the respective touchpad on the left and right controllers as shown in Fig. 3. To address variations in users' typing habits, particularly for keys in the middle like 'g' and 'v,' we overlap them with the space key, ensuring dual allocation.

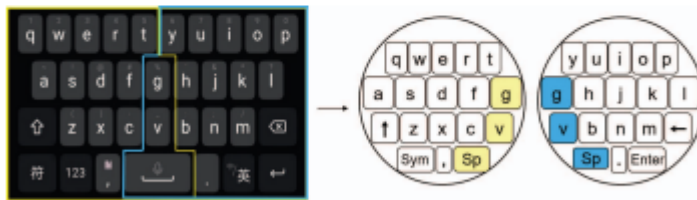


Figure 3: The split keyboard on a phone and the mapping onto touchpads. The rounded quadrilateral is for illustrative purposes, as the keys effectively cover the entire touchpad with even divisions in each row.

— H C I 论文文章结构 —

1

交互方法相关技术的以往研究

设计布局：圆形布局、分段布局

交互方法：有手与无手、控制器、手部追踪、触控

2

交互设计方法

布局设计理念、交互方法设计

3

预实验：确定优化选项和最终

不同布局、交互方法、小优化

4

用户实验：测试性能和对比其他方法

确定最终形式，开展连续实验测试性能

5

应用场景、后续设计建议、优势劣势

3.2 Typing Interaction

We use the HTC VIVE controller as the input device. The functional buttons on the controller and how we use them are shown in Fig. 5

3.2.1 Typing on Touchpad

Due to the perception loss of the thumbs' specific position in the VR environment, it's difficult to accurately locate the keys as in other

交互类论文

4 USER STUDY 1: LAYOUT COMPARISON

We conducted the first user study to evaluate whether FanPad brings a better experience than SKPad. Besides, the performance and differences between the two overlapping areas are also explored. The evaluation metrics include text entry speed, error rate, and workload.

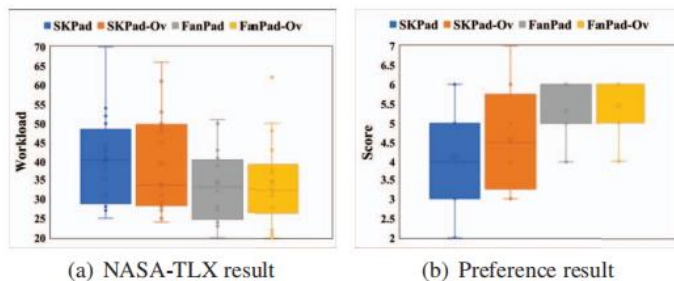
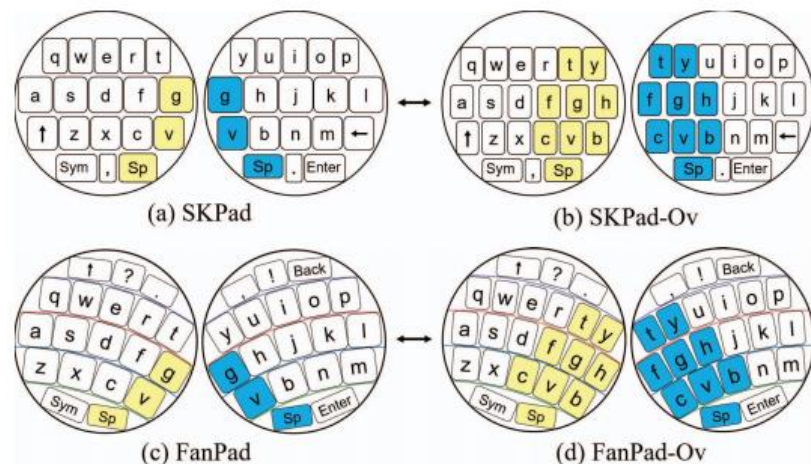
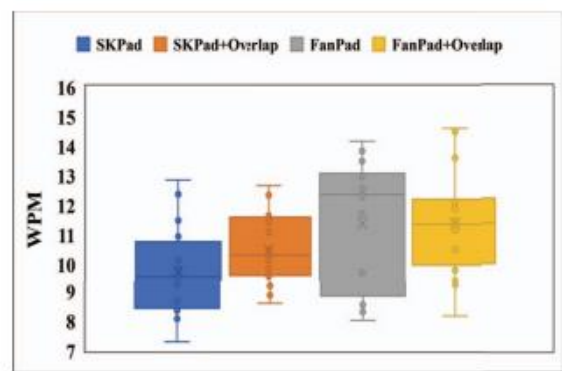
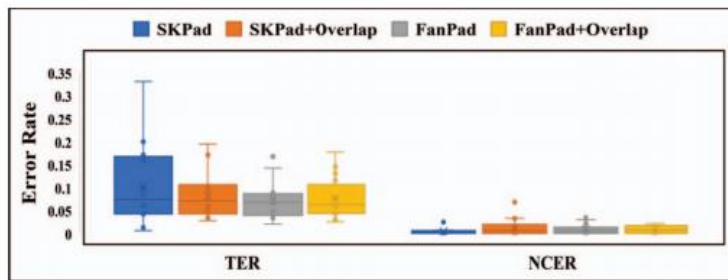
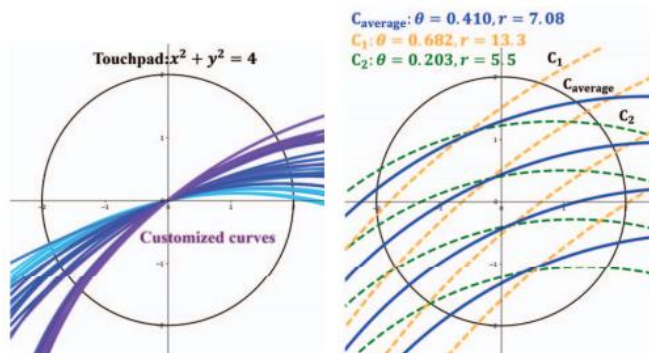


Figure 8: NASA-TLX result and Participants' preference scores for the four layouts. Refer to Fig. 6 for the meanings of the horizontal lines, box edges, and fork markers.

4.4.3 Customized Curve Parameters

We collected the customized parameters θ , r for each test (both FanPad and FanPad-Ov) and visualized them as curves they derive. Fig. 9(a) shows all the curves derived from the collected parameters, while C_1 , C_2 , and C_3 in Fig. 9(b) shows the maximum, minimum, and average θ and r accordingly. The average length of thumbs is 7.08cm, and the inclination angle is 0.410rad, aligning well with our curving model in Sect. 3.1.2.



1

交互方法相关技术的以往研究及其

设计布局：圆形布局、分段布局

交互方法：有手与无手、控制器、手部追踪、触控板、i

2

交互设计方法

布局设计理念、交互方法设计

3

预实验：确定优化选项和最终形式

不同布局、交互方法、小优化

4

用户实验：测试性能 and 对比其他方

确定最终形式，开展连续实验测试性能

5

应用场景、后续设计建议、优势劣

交互类论文

○ HCI 论文文章结构 ○

1

交互方法相关技术的以往研究及其问题

设计布局：圆形布局、分段布局

交互方法：有手与无手、控制器、手部追踪、触控板、语音、脚步、眼动...

2

交互设计方法

布局设计理念、交互方法设计

3

预实验：确定优化选项和最终形式

不同布局、交互方法、小优化

4

用户实验：测试性能和对比其他方法

确定最终形式，开展连续实验测试性能

5

应用场景、后续设计建议、优势劣势

5 USER STUDY 2: PERFORMANCE AND IMPROVEMENT EVALUATION IN LONG TIME USE

After finishing the first study, we conclude that the typing performances on FanPads outperform SKPads, and users have different preferences towards different overlap areas, making it a customization option. Thus, we had 8 participants in the previous to conduct an additional six-day experiment on FanPads with their customized overlap area. The goal of the experiment is to evaluate the learning cost of FanPads. We were also interested in the improvement curve and the best performance after a period of practice.

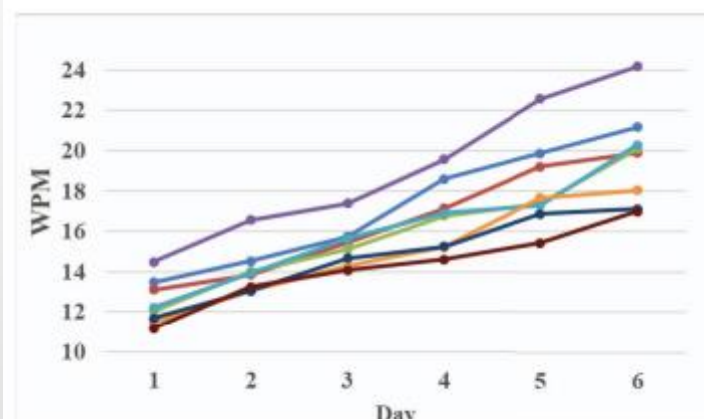
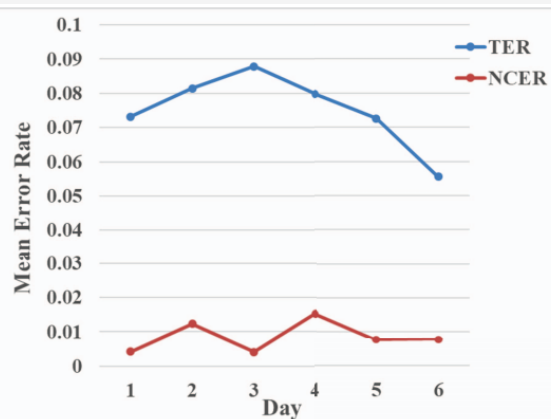


Table 2: Comparison with Flower, HiPad, and Climbing keyboard on the average WPM on the last day of the user study. For Flower and FanPad, the WPM increment between the first day and the last day, and the average TER and NCER during all six days

Technique	WPM	WPM increment	TER	NCER
FanPad	19.73	58.47%	7.51%	0.86%
Flower	17.65	96.99%	2.50%	0.09%
HiPad	13.57	-	-	-
Climbing	16.48	-	-	-



交互类论文

○ HCI 论文文章结构 ○

- 1 交互方法相关技术的以往研究及其问题
设计布局：圆形布局、分段布局
交互方法：有手与无手、控制器、手部追踪、触控板、语音、脚步、眼动...

- 2 交互设计方法
布局设计理念、交互方法设计

- 3 预实验：确定优化选项和最终形式
不同布局、交互方法、小优化

- 4 用户实验：测试性能和对比其他方法
确定最终形式，开展连续实验测试性能

- 5 应用场景、后续设计建议、优势劣势

3.3 Generalizability

Generally speaking, our method is designed for controllers equipped with circular touchpads, allowing for direct compatibility with devices featuring such touchpads. However, many controllers incorporate touchpad designs that deviate from circular shapes (such as the Meta Quest Touch Pro). Our method cannot be directly applied in these cases as these touchpads might possess different usage characteristics. For such input devices, some additional adaptation is required to ensure the proper functionality of our method.

Fundamentally, our FanPad layout is designed around the arc-shaped motion of the thumb around the CMC joint during touch input. Consequently, for other touch input devices where finger touch movements follow an arc rotation, the FanPad can be readapted.

Moreover, the size of the touchpad is a crucial factor influencing the performance of our FanPad method. Within this study, we recommend touchpad radii to fall within the range of 1.5cm to 3.5cm for direct application of our method. Touchpads that are too small might result in significant input ambiguity, necessitating additional methods to resolve ambiguities. On the other hand, oversized touchpads may cause discomfort for users when frequently reaching the device's far edges, requiring prior calibration to confine input within the recommended size range.

