

振动触觉的量化感知与触觉文字编码设计

褚少微

(浙江传媒学院新媒体学院 杭州 310018)
(chu@cuz.edu.cn)

摘要: 针对移动设备上实现触觉交互和触觉阅读文字的难题, 提出一种触觉感知量化和编码模型, 并设计了振动数量索引字符表和摩斯电码 2 种触觉文字编码方案. 该模型首先对振动触觉的振动时长、间隔时长、连续振动次数进行量化设计; 然后通过实验测定用户对振动量化感知的数值; 再对不同的振动时长和振动次数进行编码; 最后组合不同的编码来表达文字. 对编码文字的用户识别率及满意度的可用性评估实验的结果表明, 通过对振动触觉进行量化感知设计和编码可以有效地提高触觉阅读效率, 比传统基于盲文等的编码方案具有更高的阅读效率及更好的易用性; 文中模型可在移动设备上设计触觉交互界面, 实现高效的触觉文字阅读系统.

关键词: 振动触觉; 触觉文字编码; 触觉界面; 触觉建模

中图法分类号: TP391 **DOI:** 10.3724/SP.J.1089.2019.17291

Understanding the Perception of Vibrations and Designing Tactile Reading on Smartphones

Chu Shaowei

(New Media College, Communication University of Zhejiang, Hangzhou 310018)

Abstract: The design of tactile interaction and tactile reading on mobile phones presents a number of challenges. In this paper, we present a quantization and coding model of tactile perception for developing efficient tactile reading systems. The model first quantifies the duration, interval and number of vibrations and then measures the ability of the user to perceive vibrations in experiments; next, it combines different vibration intervals and number of vibrations into code patterns, and finally, the model encodes different patterns of vibrations into characters. Based on the model, two kinds of tactile text coding schemes, a character index table and Morse code, were implemented. The experimental results showed that high reading speeds and accuracy, and user satisfaction were achieved with the proposed tactile coding schemes. Compared to traditional coding schemes based on Braille, the two proposed coding schemes were more effective for tactile reading. The proposed tactile coding model can be used effectively to design tactile interfaces and implement efficient tactile reading systems on mobile devices.

Key words: vibrotactile; tactile codes tactile interface; haptic modeling

触觉感知计算与触觉交互界面是 21 世纪以来
智能人机交互技术研究的重要内容. 触觉交互相

比于视觉、听觉交互具有独特的优点, 如可以实现
私密性的信息获取、表达接触式的情感信息、虚拟

收稿日期: 2018-05-28; 修回日期: 2019-04-02. 基金项目: 国家自然科学基金(61502415); 国家重点研发计划(2018YFB1004901); 浙江省自然科学基金(LQ19F020012); 浙江省公益项目(LGF19E050005). 褚少微(1982—), 男, 博士, 讲师, CCF 会员, 主要研究方向为人机交互.

仿真、设计盲用交互界面等^[1-5]。此外, 触觉交互在特定的应用场景中也发挥着重要作用, 如士兵在战场上视觉和听觉都被战况信息所占用的情况下, 设计在武器和装备上的触觉交互界面就成为军官和士兵信息传递的必要手段^[6]。还有, 在虚拟现实的应用中, 触觉反馈可以作用在用户身体的不同部位来表达交互信息, 进一步提高沉浸式体验^[7]。

人机交互从鼠标、键盘过渡到触屏, 再到移动可穿戴设备, 交互方式正发生着根本性的变化。“无屏时代”等理念倡导非视觉的信息传递, 是当今智能人机交互技术研究的重要方向。设计触觉感知计算模型及触觉文字编码来传递语义信息, 是触觉交互技术研究的基础和关键问题^[6]。

本文针对由振动产生的触觉刺激, 探究人对振动触觉的量化感知能力, 进而设计触觉文字编码方案。在分析振动间隔时长、连续振动次数等内容的基础上, 设计了振动数量索引字符表和摩斯电码2种编码方案来实现触觉阅读。在手机上实现了原型系统, 通过用户实验探究不同触觉参数对阅读识别率的影响, 以及评估触觉阅读的可用性问题。

1 相关工作

1.1 触觉感知设计

手机振动触觉感知设计主要是设计振动强度、频率、脉冲波、节奏, 以及组合应用以上方法, 通过各个参数数值的变化来表达不同的触觉样式让用户感知和识别。

在振动强度的设计方面, Hoggan 等^[8]对不同振动强度所表达的触觉样式进行实验, 发现用户对不同振动强度所表达触觉样式识别率较低, 平均约为 61%; 且调节振动强度设备会产生较大的噪声, 影响交互的私密性。

实验表明, 人的皮肤可以感知到 10~400 Hz 之间的振动频率, 但识别区分度较低^[9]。Hoggan 等^[8]对 6 Hz、70 Hz 和 250 Hz 这 3 种频率的触觉样式进行了识别实验, 结果表明, 用户的识别率约为 81%。

对脉冲波式触觉, 主要是设计正弦波式、锯齿式、方波式等的触觉样式^[1,8]。实验发现, 用户的识别率最高可达 94.2%, 然而需要触觉反馈作用时长超过 1 s 用户才能够识别^[8]。

对于振动节奏, 通过设计不同的振动时长和振动间隔时长来设计触觉样式。例如, 组合长、短 2 种不同的振动时长, 或利用时序上振动的不同间隔时

长表达轻、重、缓、急的触觉样式等^[5,10-11]。实验结果表明, 用户可以准确地识别 4 种以内的触觉样式, 但需要触觉反馈作用较长时间(约 4 500 ms)才能够识别。

组合多种振动反馈类型也是设计触觉感知的方案之一, 但往往识别率不高。Azadi 等^[12]的实验组合了不同频率(50 Hz, 100 Hz, 200 Hz)以及不同强度(52 μm , 80 μm , 237 μm)所表达的 9 种触觉样式对用户识别率的影响结果发现, 组合应用多种触觉参数并不能有效地提高识别率(约为 77%)。

综上所述, 通过对振动强度、频率、脉冲波、节奏等进行触觉感知设计虽能够取得一定的识别准确率, 但往往需要较长的触觉反馈时间用户才能够识别。

1.2 触觉文字编码

在触觉文字编码方面, 主要是借鉴六点盲文编码。Rantala 等^[13]提出了 3 种触觉编码方案: Scan, Sweep 和 Rhythm。其中, Scan 和 Sweep 方法根据手指在屏幕上滑动过程中依次感受到的触觉反馈有/无判断所对应盲文点的凹凸; Rhythm 方法根据振动序列在时间序列上产生有节奏的触觉反馈编码来表达盲文点的凹凸, 再通过盲文获得文字信息。3 种方法的阅读准确率平均在 93%左右, Rhythm 方法取得了较好的阅读效率, 耗时最短, 每字符需 1 250 ms。

Al-Qudah 等^[14]扩展了 Rhythm 方法, 将 6 点盲文拆解成左右 2 部分, 分别根据字符在词汇中出现的频率进行编码, 再参考摩斯电码添加长短不同的振动触觉来增加编码维度, 提高了字符表达的效率。实验结果表明, 该方法的阅读速度有较大提高, 平均耗时每字符 797 ms, 识别准确率最高达 88.9%; 但由于其混合盲文和摩斯电码 2 种编码方案, 使得编码复杂度较高, 用户的学习难度较大。

另一方面, 利用空间触觉来设计文字编码的方法也被广泛地采用。如 V-braille^[15]将手机屏幕分成 6 个区域, 每个区域分别对应盲文的 6 个点, 手指点按对应的区域反馈相应的盲文点信息; 该方法利用空间的对应关系使得其学习起来较为容易, 已成功地应用于盲童的教学中^[16]。但该类方法由于需要依次点击屏幕上 6 个不同的区域, 信息获取的效率低, 阅读耗时为每字符 4.2~26.6 s。为了提高触觉编码效率, UbiBraille^[17]设计了可穿戴在双手 6 个手指上的微型振动马达, 每个马达对应盲文的 6 个凹凸点, 可同时振动表达一个字符信息; 这种方法虽然提高了字符表达效率, 但识别率较低, 平均约为 82%, 并且手机需要配备额外的硬件设

备使得其难以得到广泛的应用。

Dhar 等^[18]提出手机与智能手表协同输出触觉编码的方法,该方法仍是采用盲文,将盲文的前 3 个点用手机上的振动触觉来表达,后 3 个点在手表上的振动触感来表达;实验结果表明,其识别准确率最高可达 92%,阅读耗时平均每字符为 3 s。

综上所述,当前手机触觉文字编码方案大多数是借鉴盲文;然而,使用盲文编码需要依次感知盲文中 6 个点的凹凸信息,阅读效率较低,且识别的准确率也很难提高。

2 振动触觉的量化感知及编码模型

本文提出利用振动触觉的量化感知进行触觉文字编码设计的方法。本文认为,相比于振动频率、脉冲、节奏等振动触觉感知方法,振动数量和振动长短的感知更容易被量化;而经过量化的触觉更易于被人感知和识别,触觉表达速度会更快,进而有利于提高触觉文字阅读效率。基于此,本文设计了新型的触觉感知及编码模型,如图 1 所示。

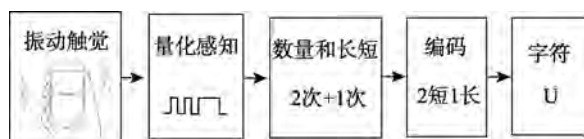


图 1 触觉量化感知和文字编码模型

图 1 中,振动触觉是指由移动设备的振动马达所产生的振动反馈,可以通过程序实时动态控制振动的发生与停止;量化感知是指对振动触觉表达样式进行设计,使其可以量化,例如,设计为可量化的振动数量,振动长、短的数量等,使触觉表达更便于被用户感知和识别;数量和长短是指具体量化的方法和结果,本文认为将触觉量化为振动数量和振动长、短的数量较为合适,为后续的编码提供基础的元素;编码是指将振动数量进行组合编码,如振动的 2 短 1 长的数字组合表达某一字符的语义等,使用数量进行编码的好处是已有多种成熟的解决方案可以直接使用,如 ASCII 码、摩斯码、汉字电报码等,同时也可以借鉴已有编码方案设计出更适合于触觉的新编码方案;字符是指经过对振动数量编码后所表达的文字信息。

3 触觉量化感知设计

本文首先设计高效的振动数量感知方法,然

后根据振动数量感知设计触觉文字编码方案。

振动数量感知方法需要考虑 3 个人因方面的问题,如图 2 所示。

(1) 振动间隔时长 t_1 。2 个振动之间的停顿时间记为 t_1 。 t_1 越大振动的数量越容易被人准确地感知;相反,振动数量越不易被人准确地感知,但同一时间内能表达的振动数量更多,编码效率高。

(2) 连续振动数量 n 。在 t_1 确定的情况下,连续振动的数量记为 n 。 n 值越大,同一时间内表达的振动数量越多;但该值越大,人越难以准确地感知振动的数量。

(3) 连续振动之后与下次振动的间隔时长 t_2 。作为连续振动之后的停顿时长, $t_2 > t_1$ 。

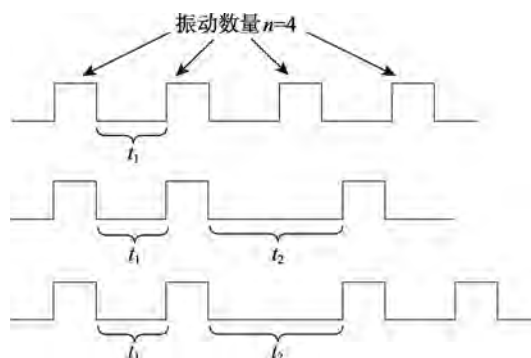


图 2 振动数量感知的 3 个关键参数示意图

本文根据设计人员的先前实验,确定了用户可感知的最短振动时长为 40 ms,即图 2 中凸起部分的时长,图中凹陷为停止振动。下面通过 2 个用户实验分别测定 t_1 , n 和 t_2 合适的触觉参数值。

3.1 实验 1

通过测试不同 t_1 及 n 值对识别率的影响,找出最小的 t_1 值及最合适的 n 值。测试了 t_1 取 90 ms, 80 ms, 70 ms, 60 ms, 50 ms, 40 ms 共 6 种时间间隔,以及 n 取 2, 3, 4 和 5 共 4 种不同振动数量,组合共计 24 种振动触觉。

使用 HTC S720e 手机作为实验平台,该手机配备了 4.7 英寸的屏幕、质量为 130 g,以及 1 个柱状振动马达传感器。共邀请 12 名大学生(6 名男生,6 名女生)作为实验对象,平均年龄 20.5 岁,标准偏差 (standard deviation, SD)=0.5。所有实验对象都具有至少 2 年智能手机使用经验,且为习惯右手使用手机;他们对手机振动触觉都有了解,但从未接触过触感编码。每个实验对象的实验总时长约为 60 min,每隔 5 min 休息 1 min。

实验过程中,手机随机出现以上具有不同时间间隔以及振动数量的触觉样式给实验对象,

实验对象将感知到的振动数量报告给实验人员做记录; 实验对象被要求戴上隔音耳机以防止振动的声音提示或环境的干扰. 实验测试任务的总次数为: 6 种时间间隔 $\times$ 4 种不同的振动数量 $\times$ 10 次重复实验 $\times$ 12 名用户=2 880 次实验.

实验结果如图 3 所示, 可以看出, 当 $t_1 \geq 70$ ms 时识别率超过 91%, 当 $t_1 < 70$ ms 时识别准确率快速下降. ANOVA (analysis of variance) 方差分析发现, 当 t_1 分别为 90 ms, 80 ms 和 70 ms 时识别率没有显著性差异, $F(2,33)=1.13$, $p=0.334$; 但 $t_1=70$ ms 与 $t_1=60$ ms 之间的 T 检验发现其具有显著性差异, $p=0.025$. 因此, 本文选定 $t_1=70$ ms, 既可以保证较高的识别准确率, 又可以在时间上提供较快的触觉表达速度.

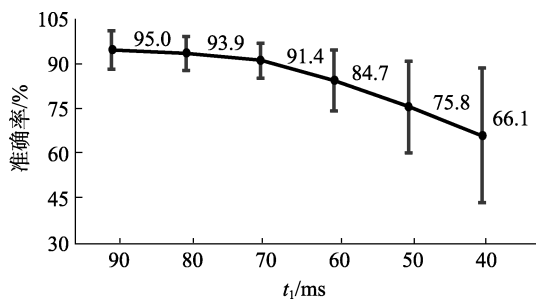


图 3 不同 t_1 的识别率

确定 $t_1=70$ ms 之后, 本文进一步分析振动数量 n 对感知准确率的影响. 从图 4 可以看出, 识别准确率整体随着振动数量的增加而降低, 当 n 取 2, 3, 4 和 5 时, 准确率分别为 98.3%(SD=3.9), 91.7%(SD=11.9), 84.2%(SD=9.0) 和 64.2%(SD=19.8). ANOVA 方差分析发现显著性差异($F(3,44)=15.51$, $p<0.01$). 组间两两比较 T 检验发现, $n=2$ 与 $n=3$ 即具有显著性差异($p=0.044$). 因此, 为了保证较高的感知准确率, 本文设定连续振动数量为 $n=2$ (准确率 98.3%).

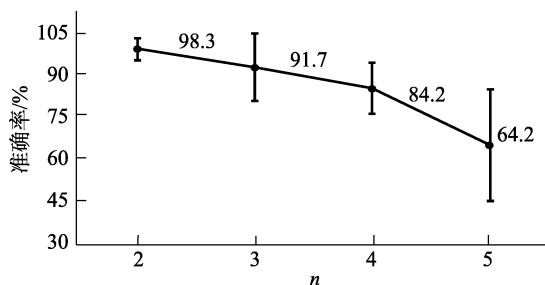


图 4 不同 n 的识别率

3.2 实验 2

测试在连续振动之后的停顿时长 t_2 , 如图 2

所示. 本实验测试了 t_2 取 140 ms, 130 ms, 120 ms, 110 ms, 100 ms 和 90 ms 共 6 种时长. 测试任务的总次数为: 5 种时长 $\times$ 6 种不同的振动数量 $\times$ 10 次重复 $\times$ 12 名用户=3600 次. 实验设备和实验对象与实验 1 相同, 实验时长约为 70 min, 每隔 5 min 休息 1 min.

实验结果如图 5 所示, 可以看出, 识别率整体随 t_2 的减小而下降, 当 t_2 取 130 ms、120 ms 和 110 ms 时, 识别率超过 90%. ANOVA 方差分析发现显著性差异($F(4,55)=25.37$, $p<0.01$), 组间两两比较 T 检验发现 $t_2=110$ ms 与 $t_2=100$ ms 具有显著性差异($p=0.012$). 因此, 本文选定 $t_2=110$ ms, 在保证较高的识别率同时又具有较快的触觉表达速度.

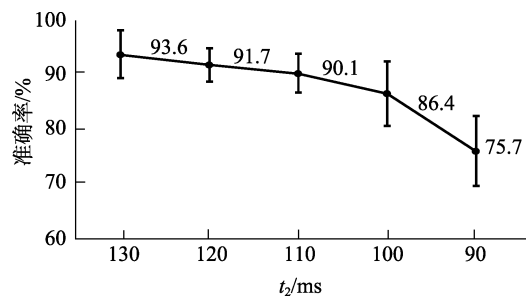


图 5 不同 t_2 的识别率

4 触觉文字编码设计

确定基础参数后, 依照图 1 的模型, 本文利用振动的数量和长短进行编码设计表达文字信息. 共设计了行列索引和摩斯电码 2 种触觉文字编码方案, 来验证模型的有效性.

4.1 行列索引

如表 1 所示, 4 行 7 列的字母表是最为常见也是 ABC 字母歌中字母的排列方式, 最为大众所熟悉, 也容易记忆. 同时, 该排列方式中每个字母都可以用行数数列来定位, 例如字母 j 为 2 行 3 列. 通过对字母行数数列进行振动数量索引, 即可以达到触觉文字编码的目的. 例如, 字符在 m 行即振动 $m-1$ 次, 然后再振动所在列的数量即可在字母表中定位字符.

表 1 利用振动数量进行编码的行列索引触觉文字

行	列						
	1	2	3	4	5	6	7
1	a	b	c	d	e	f	g
2	h	i	j	k	l	m	n
3	o	p	q	r	s	t	
4	u	v	w	x	y	z	

本文将字母所在行数用单次振动表示,列数用连续振动及单次振动表达.第1行直接开始列振动,行列切换用 $t_2 \times 2 = 220 \text{ ms}$ 表达.例如,字母 j 在 2 行 3 列,编码方案如下:(1) 振动 1 次代表第 2 行,停顿 220 ms 代表行振动结束;(2) 再连续振动 2 次,停顿 110 ms,再振动 1 次代表第 3 列.整个过程花费时间为 $40+220+40+70+40+110+40=560 \text{ ms}$.基于此,可以计算出所有字母的振动触觉表达时长:最短的为字母 a (40 ms),最长的为字母 z (1 170 ms).根据字母在英文词汇中出现的频率,可计算出单个字母振动触觉的表达时长平均为 617.8 ms.

4.2 摩斯电码

摩斯电码是一种在时序上由滴、哒,及滴哒之间的停顿组成的时通时断的信号代码,通过不同的排列顺序来表达不同字母的编码方式,如图 6 所示为国际上标准的摩斯电码编码方案.



图 6 利用振动数量和长短编码的摩斯电码触觉文字

通常,滴=1t, 哒=3t, 滴哒之间=1t 进行时序编码.因此,根据上文的实验数据,本文将振动触觉参数设定如下:滴=40 ms, 哒=3×滴=120 ms, 滴哒之间= $t_1=70 \text{ ms}$.例如,字母 j(滴哒哒哒)的振动触觉方案为 1 次滴 40 ms、停顿 70 ms, 1 次哒 120 ms、停顿 70 ms, 1 次哒 120 ms、停顿 70 ms, 1 次哒 120 ms、停顿 70 ms, 整个触觉表达时长为 $40+70+120+70+120+70+120=610 \text{ ms}$.

基于此方案,可以计算出所有字母的振动触觉表达时长平均为 289.5 ms.

5 评估实验及分析

对本文设计的 2 种触觉文字编码方案进行识别率及满意度的可用性评估实验.实验设备与实验对象同第 3.1 节实验 1, 他们均参加了实验 1 和实验 2.

5.1 实验过程

实验采用 Within subjects 方法进行,每名实验对象均参加 2 种编码方案的测试.为了避免学习效应的影响,实验中一半用户先进行行列编码方案的测试,再进行摩斯电码编码方案的测试;另一半用户的测试顺序则与之相反.

实验环境如图 7 所示,实验对象坐在椅子上,右手单手握持手机,使用右手大拇指进行操作;他们有 5 min 左右的时间熟悉系统和振动编码方案,然后开始正式实验,且不需要记忆编码对应的字母.实验中,系统随机给出一个字母的振动触觉序列,实验对象感知到触觉后向实验人员说出对应的触觉编码,每次实验只有一次机会来感知并对实验人员说出触觉编码;在整个实验过程中实验对象戴上隔音耳机防止环境噪声干扰.每名实验对象的实验总时长约为 30 min,实验完成后填写一份 5 分制的 Likert 问卷调查.测试任务的总次数为:15 个随机字母×3 组重复测试×2 种编码方案×12 名用户=1080 次实验.



图 7 实验环境

5.2 实验结果

行列索引和摩斯电码 2 种触觉编码的识别准确率如图 8 所示,他们的平均识别准确率分别为 91.9%(SD=10.1)和 85.7%(SD=12.1).ANOVA 方差分析发现两者具有显著差异($F(1,70)=4.55, p=0.036$).2 种触觉编码方式的识别准确率随着用户使用熟练程度的增加都有所提高,但对 3 组实验数据的 ANOVA 方差分析并未发现 3 组实验之间具有显著性差异.其中,行列索引的 $F(2,33)=0.40, p=0.672$;摩斯电码的 $F(2,33)=0.57, p=0.573$.

用户主观满意度方面的评估结果如图 9 所示.可以看出,行列索引触觉编码在易于学习、易于感知和用户偏好方面略优于摩斯电码触觉编码,但是, Friedman 测试并没有发现显著性差异($p=0.103, p=0.257, p=0.527$);在效率方面 2 种方案相近, Friedman 测试亦未发现显著性差异($p=0.414$).

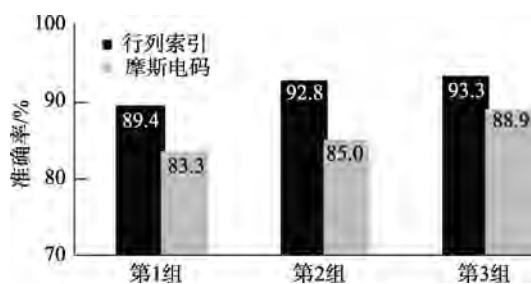


图 8 2 种触觉编码的实验识别准确率

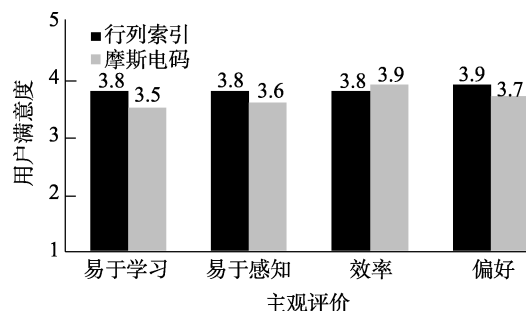


图 9 2 种触觉编码的用户满意度

5.3 讨 论

本文提出的 2 种触觉编码方案表达字符的时长固定, 根据英文字符在词汇中出现的概率, 可计算出平均阅读耗时分别为每字符 617.8 ms 和 289.5 ms。表 2 所示为近年来几种触觉文字编码方案及其对应的阅读速度和阅读准确率, 可以看出, 本文提出的 2 种方案在阅读速度方面都优于传统的方案, 在阅读准确率方面也具有一定的优势。因此, 对振动触觉进行量化感知再进行编码设计的模型(如图 1 所示), 是实现触觉文字阅读的有效方法。

在保证高识别准确率的情况下, 本文测定了用户可感知的最短振动时间间隔 $t_1=70$ ms, 可识别的最多连续振动数量 $n=2$, 多组连续振动之间的长时间间隔 $t_2=110$ ms, 这些数值是设计振动触觉编码的基础, 可为后续的触觉感知及触觉交互界面

设计提供参考。同时, 本文也发现, 实验中有 3 名熟练实验对象可以在 $t_1=50$ ms 的情况下准确地识别 5 个甚至更多次的连续振动, 这使得今后为专门针对熟练用户单独设计触觉参数提供了可能性。例如, 可以通过触觉参数的个性化定制来适应不同用户的需求等。熟练用户可以设定更快的振动触觉参数, 而非熟练用户也可以通过调节参数适应自身感知能力的需求。

在实验对象的反馈中本文发现, 虽然基于摩斯电码的触觉编码方案阅读速度更快, 但实验对象普遍反映行列索引字符表的编码方式更为直观且易于接受, 也更容易学习掌握; 而基于摩斯电码的编码方案学习成本较高, 需要学习掌握后才能够识别字母信息, 不易于被实验对象所接受。

本文的局限在于并未考虑用户对字符识别的反应时间, 因为对编码字母的识别问题与用户对编码方案掌握的熟练程度有关, 难以得出一个普适性的结论。今后将开展用户对不同的编码方式的学习代价、识别的反应时间, 以及多字符连续阅读的方案设计等研究, 同时进一步应用触觉数量感知设计更多的触觉文字编码方案。

6 结 语

本文将振动数量感知应用在触觉文字编码的设计中, 实验发现, 对振动数量进行编码设计可以有效地实现触觉文字阅读, 振动数量触觉编码设计可以提高触觉文字阅读的效率, 增强触觉阅读的易用性。后续研究将进一步探讨连续文字阅读的方法, 以及结合手势的触觉阅读交互界面等; 还将探索振动数量感知设计应用在其他移动设备上, 如智能手环、智能手表、智能眼镜等。

表 2 6 种触觉文字编码方案的比较

方法	方案	耗时/ms	准确率/%	
Rantala 等 ^[13]	盲文编码	扫描	5 700	97
		横扫	5 100	91
		韵律	3 700	92
Jayant 等 ^[15]	盲文空间编码	4 200~26 600	90	
Al-Qudah 等 ^[14]	混合盲文及摩斯电码	标准方案	898	76
		间隔为 80 ms	870	68
		间隔为 400 ms	798	69
Dhar 等 ^[18]	手机手表同时表达盲文	3 000~4 500	92	
本文	行列索引	618	91	
	摩斯电码	290	87	

参考文献(References):

- [1] Mullenbach J, Shultz C, Edward Colgate J, *et al.* Exploring affective communication through variable-friction surface haptics[C] //Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. New York: ACM Press, 2014: 3963-3972
- [2] Guerreiro T. Accessibility layers: levelling the field for blind people in mobile social contexts[J]. ACM SIGACCESS Accessibility and Computing, 2015(113): 22-28
- [3] Lee M K, Yoo J, Nam H. Analysis and improvement on a uni-modal haptic PIN-entry method[J]. Mobile Information Systems, 2017, 2017: Article No.6047312
- [4] Song Aiguo, Tian Lei, Ni Dejing, *et al.* Multi-mode haptic interaction technique and its application[J]. SCIENTIA SINICA Informationis, 2017, 47(9): 1183-1197(in Chinese)
(宋爱国, 田磊, 倪得晶, 等. 多模态力触觉交互技术及应用[J]. 中国科学: 信息科学, 2017, 47(9): 1183-1197)
- [5] Chen Shi, Zheng Kaihong, Sun Lingyun, *et al.* Design and application of vibration emoticons in wearable computing devices[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2015, 49(12): 2298-2304(in Chinese)
(陈实, 郑楷洪, 孙凌云, 等. 可穿戴计算设备中振动表情的设计与应用[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2015, 49(12): 2298-2304)
- [6] Prasad M, Russell M, Hammond T A. Designing vibrotactile codes to communicate verb phrases[J]. ACM Transactions on Multimedia Computing Communications and Applications, 2014, 11(1s): Article No.11
- [7] Wang Dangxiao, Jiao Jian, Zhang Yuru, *et al.* Computer haptics: haptic modeling and rendering in virtual reality environments[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2016, 28(6): 881-895(in Chinese)
(王党校, 焦健, 张玉茹, 等. 计算机触觉: 虚拟现实环境的力触觉建模和生成[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2016, 28(6): 881-895)
- [8] Hoggan E, Brewster S. New parameters for tacton design[C] //Proceedings of the CHI'07 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems. New York: ACM Press, 2007: 2417-2422
- [9] Brewster S, Brown L M. Tactons: structured tactile messages for non-visual information display[C] //Proceedings of the 5th Conference on Australasian User Interface. Sydney: Australian Computer Society, Inc., 2004: 15-23
- [10] Saket B, Prasajo C, Huang Y F, *et al.* Designing an effective vibration-based notification interface for mobile phones[C] //Proceedings of the Conference on Computer Supported Cooperative Work. New York: ACM Press, 2013: 149-1504
- [11] Brown L M, Brewster S A, Purchase Helen C. Multidimensional tactons for non-visual information presentation in mobile devices[C] //Proceedings of the 8th Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services. New York: ACM Press, 2006: 231-238
- [12] Azadi M, Jones L A. Evaluating vibrotactile dimensions for the design of tactons[J]. IEEE Transactions on Haptics, 2014, 7(1): 14-23
- [13] Rantala J, Raisamo R, Lylykangas J, *et al.* Methods for presenting braille characters on a mobile device with a touchscreen and tactile feedback[J]. IEEE Transactions on Haptics, 2009, 2(1): 28-39
- [14] Al-Qudah Z, Doush I A, Alkhateeb F, *et al.* Utilizing mobile devices' tactile feedback for presenting braille characters: an optimized approach for fast reading and long battery life[J]. Interacting with Computers, 2014, 26(1): 63-74
- [15] Jayant C, Acuario C, Johnson W, *et al.* V-braille: haptic braille perception using a touch-screen and vibration on mobile phones[C] //Proceedings of the 12th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility. New York: ACM Press, 2010: 295-296
- [16] Milne L R, Bennett C L, Ladner R E. VBghost: a braille-based educational smartphone game for children[C] //Proceedings of the 15th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility. New York: ACM Press, 2013: Article No.75
- [17] Nicolau H, Guerreiro J, Guerreiro T, *et al.* UbiBraille: designing and evaluating a vibrotactile braille-reading device[C] //Proceedings of the 15th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility. New York: ACM Press, 2013: Article No.23
- [18] Dhar A, Nittala A, Yadav K. TactBack: Vibrotactile braille output using smartphone and smartwatch for visually impaired[C] //Proceedings of the 13th Web for All Conference. New York: ACM Press, 2016: Article No.13