

研究论文

人手指振动触觉感知的短时记忆特性

童新宇, 吴新丽, 李思儒, 黄金鹏, 杨文珍*

浙江理工大学虚拟现实实验室, 杭州 310018

摘要: 本文旨在探究人手指振动触觉感知的短时记忆特性。采用自制振动触觉表达装置, 在20名20~30岁被试(10男, 10女)首先进行了一项回忆性实验, 确定了手指振动强度触觉感知的记忆容量, 然后在该范围内进行了再认性实验, 对人手指振动强度触觉感知的再认正确率和被试反应时间进行了分析, 得到了以下几个重要特性: (1)人手指振动触觉记忆容量为 4 ± 1 ; (2)振动强度间隔越大, 手指振动强度记忆容量越大; (3)振动持续时间过长或过短都会导致振动记忆容量减少, 男性最佳持续时间为400 ms, 女性为300 ms; (4)振动刺激系列越长, 再认正确率越低, 反应时间越长; (5)振动刺激序列按强度递增或递减的顺序排布要比按混乱的顺序排布更容易记忆; (6)手指振动触觉感知的短时记忆信息提取是按照逐个进行比较的系列扫描方式进行的。这些实验结果有助于了解人手指指尖触觉感知特性, 为触觉反馈技术的研究提供生理学依据。

关键词: 振动触觉感知; 振动强度离散间隔; 记忆容量; 再认正确率; 再认反应时

中图分类号: TP24; B842

Short-term memory characteristics of vibro-tactile perception in human fingertips

TONG Xin-Yu, WU Xin-Li, LI Si-Ru, HUANG Jin-Peng, YANG Wen-Zhen *

Virtual Reality Laboratory; Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China

Abstract: This paper discusses the short-term memory of vibro-tactile perception of human fingertips. By using a self-developed vibro-tactile expression device, a recall experiment was firstly carried out among 20 subjects aged 20–30 (10 males and 10 females) to discover the memory span about the vibro-tactile perception of human fingertips. Within this memory span, a cognitive experiment analyzing the recognition accuracy and the reaction time was carried out. The results showed: (1) The vibro-tactile memory span of human fingertip is 4 ± 1 ; (2) The vibro-tactile memory span increases as the discrete intensity between vibration stimuli increases; (3) Too long or too short vibration duration will reduce the vibro-tactile memory span, and the optimal vibration duration for men is 400 ms, for women is 300 ms; (4) The more the number of vibration stimuli is perceived by the human fingertip, the lower the recognition accuracy and the longer the reaction time it needs; (5) Compared with the vibration stimuli in disorder, people are more likely to remember the vibration stimuli in increasing/decreasing order; (6) The information extraction mechanism of the short-term memory about fingertip vibro-tactile perception bases a point to point scanning process among these stimuli. These results help to understand the human fingertip tactile characteristics and provide a physiological basis for the study of tactile feedback technologies.

Key words: vibro-tactile perception; discrete vibration of intensity; memory span; recognition accuracy; recognition reaction time

触觉是人体分布最广泛、最复杂的感觉系统, 也是人与外界交流的重要渠道之一。随着虚拟现实

技术和远程交互技术的发展, 许多触觉设备被开发出来。Ninu 等提出了一种新型的可穿戴振动触觉设

Received 2019-11-08 Accepted 2020-03-19

This work was supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFB1004901), the Natural Science Foundation (No. LY20F020019, LQ19F020012, LQ20F020001), Basic Public Welfare Research Project (No. LG-F19E050005) and Major Scientific Research Project of Zhejiang Lab (No. 2019MC0AD01) of Zhejiang Province, China.

*Corresponding author. Tel: +86-571-86843662; E-mail: ywz@zstu.edu.cn

备, 相比普通的振动马达, 该设备可以独立调整振幅和频率来提供更加详细的振动刺激^[1]。Chinello 等提出了一种尺寸小、重量轻的可穿戴触觉显示器, 该设备可以在指尖上模拟广泛的接触力^[2]。Mun 等提出了一种软致动器, 由多层电活性聚合物 (electro-active polymer, EAP) 薄膜制成的, 通电激活后, 软致动器产生大而垂直的变形, 当用户的皮肤接触时, 用户可以感觉到触觉输出^[3]。Dharma 等提出了一种由 60 个振动触觉执行器组成的触觉背心, 可以产生具有复杂空间和时间特性的多种触觉模式^[4]。

触觉的应用范围广, 视听觉障碍人士可利用触觉进行交流。Ozioko 等提出了一种基于触觉和驱动的智能手指套, 可帮助盲人实现面对面或远程交流^[5]。Hasdak 等提出一种便于聋哑人使用的通讯装置, 该设备可以将普通人的语音信息转换为摩斯密码形式的振动触觉输出, 佩戴该设备的用户也可以按照摩斯密码序列弯曲手指以发送信息, 大大增强了聋哑人士的交流能力^[6]。触觉还可用于辅助导航。Schaack 等提出了一种触觉项圈原型, 该设备是一个带有振动触发器的颈部佩戴带, 可实现无视觉的触觉导航^[7]。Flores 等提出了一种可以指导用户步行的触觉带, 用户佩戴后能够接收到复杂路径的方向信息, 且不会对用户的听觉和感知环境的能力造成不良影响^[8]。触觉反馈可提高用户在虚拟环境中与虚拟物体进行交互时的真实感。Lin 等提出了一个可以提供物体表面纹理真实反馈的用户界面^[9]。Sawada 等提出了一种触觉笔, 可以根据显示器中的纹理图像呈现各种触感^[10]。

记忆是人脑对事物的识记、保持、再现或再认过程, 它是思维、想象等高级心理活动能够成功进行的基础。记忆按时间长度可分为三类: 瞬间记忆、短时记忆和长时记忆。Sternberg 是最早开始研究短时记忆信息提取机制的, 他提出的串行搜寻模型^[11]为短时记忆信息提取研究奠定了基础。随后自动停止的搜寻模型、平行加工模型等各种短时记忆信息提取模型相继被提出。近年来, 对于短时记忆的研究越来越深入。Xiao 等研究了短时记忆的提取机制, 他们发现短时记忆的提取不是以系列全扫描形式进行的, 而是受记忆集大小的影响^[12]。他们的另一项研究表明短时记忆信息的提取与判断标准有关^[13]。Irwin 研究了眨眼对短时记忆的影响, 他们发现眨眼可能会干扰注意力从而减少短期记忆容量^[14]。Zhang 等研究了不同背景噪音干扰情况对人的数字

短时记忆的影响^[15]。Liu 等在一种柔性触觉装置上研究了人手指柔性触觉记忆特性^[16]。Hao 等研究了人手腕部振动强度触觉感知的短时记忆特性^[17]。

手指是人与外界交互的重要器官, 了解其触觉感知特性有助于手部触觉呈现技术的研究, 但目前针对手指振动触觉感知的短时记忆特性的研究仍很少。因此, 本文通过回忆和再认两项实验, 探究了人手指振动强度触觉感知的短时记忆特性, 为触觉交互设备研发提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 实验装置设计 实验装置由直流电机驱动模块、蓝牙模块 (型号为 HC-05)、电源、振动强度控制模块等组成, 采用一种硬币型电机作为振子, 壳外径 8 mm, 厚度 2.7 mm, 装置如图 1A 所示。振子用双面胶固定在一个“魔术贴”上, 便于调节松紧度以适应不同被试的手指, 实验过程中被试手掌朝上, 振子置于手指指端并贴合皮肤放置 (图 1B)。使用型号为 Dell Vostro 14-5480 的笔记本电脑, 通过 HC-05-USB 串口适配器发送预设的振动编码规则使振子产生相应的振动刺激。

1.1.2 被试 实验共招募了 20 名被试, 10 男, 10 女, 被试年龄处于 20~30 岁之间, 其优势手都是右手, 身体健康, 没有感知障碍类疾病, 没有做过类似实验。

1.1.3 实验点选取 微型电机转子上具有一质量偏心块, 使得转子的重心偏离了轴中心, 在旋转过程中转子的重心不断改变, 从而产生了振动。由于电机的这种机械结构特性, 使得其振动强度与转子转速有关, 转速越快则振动越强。可通过改变电压大小调节电机转速, 实现电机振动强度的控制, 但其振动频率和振幅只能相应地同时增大或减小, 无法单独改变。

通过 8 位 (256 级) 的脉宽调制来调整电机的电压 (0~5 V), 从而控制电机的振动强度。振动强度用占空比 (0~100%) 表示。振动强度不宜设置过弱, 否则被试很难感知到振动刺激, 也不宜设置过强, 否则会引起被试不适。根据预实验结果 (见 1.2.1), 本实验的振动强度范围设置为 30%~80%, 分别按照占空比离散间隔 5%、8%、10% 三种水平选取了不同的振动强度等距离离散序列。离散间隔为 5% 时, 选取了 11 个振动强度, 分别是 30%、35%、

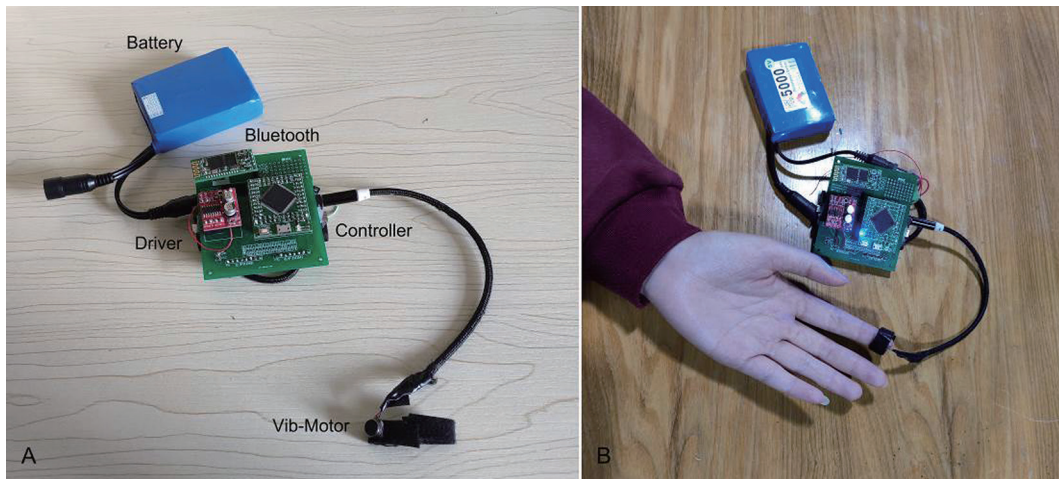


图 1. 振动触觉表达装置

Fig. 1. The vibro-tactile device used in the experiments. A: The structure of the device. B: The application of the device in the experiment.

40%、45%、50%、55%、60%、65%、70%、75%、80%；离散间隔为8%时，选取了7个振动强度，分别是30%、38%、46%、54%、62%、70%、78%；离散间隔为10%时，选取了6个振动强度，分别为30%、40%、50%、60%、70%、80%。

1.2 实验方法

1.2.1 预实验 预实验共选择了8名被试，男女各4名，将振动刺激按强度递增的顺序呈现给被试，发现被试在65~75级之间的时候刚好能明显察觉到振动，换算成占空比为25.49%~29.80%，而被试在强度超过204级时容易感觉到麻痹的不适感，换算成占空比为80%。所以振动强度范围设置为30%~80%。在该范围内随机选取了一系列振动刺激，每次以不同的振动持续时间和不同的间隔时间呈现给被试，要求被试对这三个振动刺激进行强弱判断。当振动持续时间和间隔时间太长或太短都不利于实验，太长时被试容易注意力不集中，太短时被试来不及做出反应。经测定最佳振动持续时间为200~500 ms，振动刺激间隔时间为300 ms。

在再认性实验前需要再进行预实验确定探测刺激与刺激系列的间隔时间，被试在感受振动刺激时能通过该间隔时间区分出探测刺激与刺激系列。回忆性实验确定男性被试振动持续时间为400 ms，女性被试持续时间为300 ms，振动刺激系列之间的间隔时间为300 ms。随机选取长度为4的刺激系列和一个探测刺激以不同的间隔时间呈现给被试，发现当这两种刺激间隔时间 ≥ 600 ms时被试能明显正确区分这两种刺激。考虑到该间隔时间不宜选择过大，

所以系列刺激和探测刺激间隔时间设置为600 ms。

1.2.2 实验环境 实验在一个光线较暗的房间内进行，环境温度控制在25℃。采用的微型振动电机是完全封装好的，被试无法观察其内部结构，无法获取判断电机振动强度的视觉信息，从而排除视觉干扰。振动电机在运转时会产生一定的声音，被试可根据声音来判断电机振动强弱以及电机的启动和停止情况，对触觉感知效果会产生一定的影响，因此在实验中，我们要求被试戴上耳罩，排除听觉干扰。实验过程中不允许交流，实验者不能向被试透露其回答是否正确等实验相关信息。

1.2.3 回忆性实验 回忆性实验的目的是测试人手指的振动触觉记忆容量以及回忆正确率，即被试能通过回忆将短时间内呈现给指尖的一系列不同强度的振动刺激按照实验要求的顺序排序，记录正确排序振动刺激系列长度和正确率（简称回忆正确率），其中正确排序的最大系列长度就是振动触觉记忆容量。

1.2.3.1 实验设计 实验中，振动持续时间和振动间隔时间设置过短或过长都不利于实验，过短被试来不及反应，过长则容易注意力不集中。根据预实验结果，共设置了4个振动持续时间，分别是200 ms、300 ms、400 ms、500 ms；振动系列间隔设置为300 ms。

本实验采用重复测量两因素的 $2 \times 3 \times 4$ 三因素混合实验设计，实验自变量有3个，其中自变量一为性别，分为男性和女性两种水平，为被试间变量；自变量二为振动强度离散间隔，分为5%、8%、

10% 三种水平, 为被试内变量; 自变量三为振动持续时间, 分为 200 ms、300 ms、400 ms、500 ms 四种水平, 为被试内变量; 因变量为振动强度记忆容量和回忆正确率。

1.2.3.2 实验程序 本实验程序的设计借鉴了 Jacobs 的记忆容量研究^[18]。实验中, 在被试的手指上随机呈现一系列的振动强度刺激, 被试感知完该系列刺激后需通过自己的回忆将该系列刺激由强到弱排序。每一个被试的测试系列起点都是 2 个振动刺激, 每个系列测试 10 次, 如果 10 次测试中正确的次数累计有 5 次及以上, 则系列长度增加 1, 然后再进行测试。若被试给出的结果中正确次数低于 5 次, 则实验结束。记录实验中被试能达到最大的系列长度, 即振动强度记忆容量。

1.2.4 再认性实验 本实验有两个目的, 一个是考察在手指振动强度触觉记忆容量范围内, 系列长度和结果为“是”和“否”的反应对再认正确率的影响; 另一个是考察系列长度和结果为“是”和“否”对振动触觉再认反应时的影响。

1.2.4.1 实验设计 根据回忆性实验与预实验结果, 再认性实验的设计参数如下: (1) 测试系列长度选取为 3、4、5; (2) 振动强度序列选取为 30%、40%、50%、60%、70%、80%; (3) 男性被试振动持续时间设定为 400 ms, 女性被试振动持续时间设定为 300 ms; (4) 系列刺激间隔时间设置为 300 ms; (5) 被试在实验中要能区分系列刺激与探测刺激, 将系列刺激和探测刺激的间隔时间设置为 600 ms。

1.2.4.2 实验程序 再认性实验的设计借鉴了 Sternberg 经典的短时间记忆反应时研究^[11]。被试通过手指指端感知一系列振动刺激, 600 ms 后感知一个探测刺激, 然后被试快速准确地判断探测刺激是否出现在前面的一系列振动刺激内, 他们只需回答“是”或“否”。如果被试判断结果为“是”, 则还需判断是系列中的哪个刺激。实验者需记录测试刺激结束时到参与者给出答案时的时间间隔。每组振动刺激系列包含 N 个独立的振动刺激 (N 分别取 3、4、5), 每组系列测试 10 次, 一共测试 30 次, 结果为“是”和“否”各设置 5 次。

1.2.5 统计分析方法 实验数据采用 mean ± SD 的形式表示, 通过方差分析找出对因变量有显著影响的因素, 然后通过双侧 *t* 检验比较两组间的均值。当 $P < 0.05$ 时认为差异具有统计学意义。

2 结果

2.1 回忆性实验结果

2.1.1 振动强度离散间隔对振动强度记忆容量的影响

实验数据结果显示, 振动强度离散间隔的主效应极其显著 [$F(2, 36) = 18.82, P < 0.001$], 说明不同振动强度离散间隔下被试的振动强度记忆容量也不同; 振动强度离散间隔与振动持续时间之间的交互效应无显著性差异 [$F(6, 108) = 1.30, P > 0.05$]; 振动强度离散间隔与性别之间的交互效应无显著性差异 [$F(1, 18) < 1$]。

受限于实验条件, 本实验共设置了三种振动强度离散间隔。由于振动强度离散间隔与振动持续时间之间的交互效应无显著性差异, 我们比较了持续时间 300 ms 下 5%、8%、10% 三种离散间隔测试水平的振动强度记忆容量和回忆正确率的均值差异。结果如图 2 所示, 振动离散程度越高, 被试振动记忆容量越大, 回忆正确率也越高。图 2A 显示, 8% 测试水平下的振动强度记忆容量为 4.60 ± 0.82 ($n = 20$), 高于 5% 测试水平下振动强度记忆容量 4.10 ± 0.72 ($n = 20$), 差异具有显著性 ($P < 0.05$); 10% 测试水平下的振动强度记忆容量为 4.85 ± 0.75 ($n = 20$), 明显高于 5% 测试水平下振动强度记忆容量, 差异具有较高的显著性 ($P < 0.01$)。图 2B 显示, 8% 测试水平下的回忆正确率为 $(66.15 \pm 5.38)\%$ ($n = 20$), 高于 5% 测试水平下的回忆正确率 $(59.72 \pm 7.79)\%$ ($n = 20$), 差异具有较高的显著性 ($P < 0.01$); 10% 测试水平下的回忆正确率为 $(69.68 \pm 5.84)\%$ ($n = 20$), 明显高于 5% 测试水平下振动强度记忆容量, 差异具有极高的显著性 ($P < 0.001$)。

2.1.2 振动持续时间对振动强度记忆容量的影响

方差分析结果显示, 振动持续时间的主效应极其显著 [$F(3, 54) = 25.28, P < 0.001$]; 振动持续时间与振动强度离散间隔之间交互作用不显著 [$F(6, 108) = 1.30, P > 0.05$]; 振动持续时间与被试性别之间交互作用极其显著 [$F(3, 54) = 17.15, P < 0.001$], 所以需要振动持续时间和被试性别进行简单效应分析。固定性别水平, 考察振动持续时间的效应。结果显示振动持续时间在男性被试组的简单效应具有极高的显著性 [$F(3, 54) = 20.20, P < 0.001$]; 振动持续时间在女性被试组的简单效应极其显著 [$F(3, 54) = 22.23, P < 0.001$]。因此, 振动持续时间对振动强度记忆容量的主效应具有显著性。

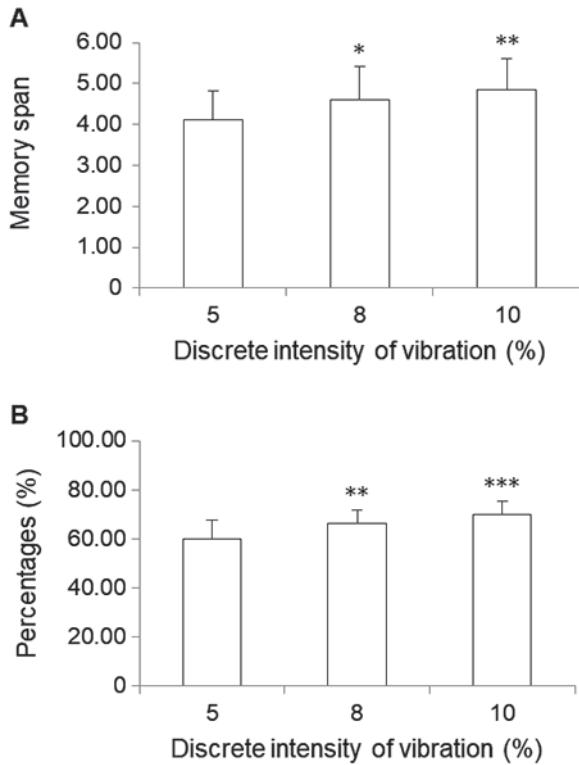


图 2. 不同振动强度离散间隔下的记忆容量和回忆正确率
Fig. 2. Comparison of different memory span (A) and percentage of correct recall (B) under different discrete intensity of vibro-tactile stimuli. The vibration intensity memory span and the recall accuracy increase as the discrete intensity increases. All experimental data were obtained when the vibration duration was 300 ms. Mean \pm SD, $n = 20$. * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$ vs 5% condition.

2.1.3 被试性别对振动强度记忆容量的影响

方差分析结果显示，被试性别的主效应不显著 [$F(1, 18) < 1$]；被试性别与振动强度离散间隔之间交互作用不显著 [$F(2, 36) < 1$]；被试性别与振动持续时间之间交互作用极其显著 [$F(3, 54) = 17.15, P < 0.001$]，需要对被试性别与振动持续时间做简单效应分析，固定持续时间测试水平，考察被试性别的影响。分析结果显示，被试性别在持续时间 200 ms 和 300 ms 测试水平上简单效应具有更高的显著性 ($P < 0.01$)；被试性别在持续时间 400 ms 和 500 ms 测试水平上简单效应显著 ($P < 0.05$)。

对实验数据进行双侧 t 检验，比较了男女被试在四个持续时间下的记忆容量和回忆正确率的差异。结果如图 3A 显示，在振动持续时间 200 ms 和 300 ms 水平下的振动强度记忆容量性别差异具有较高的显著性 ($P < 0.01$)，在振动持续时间 400 ms 和

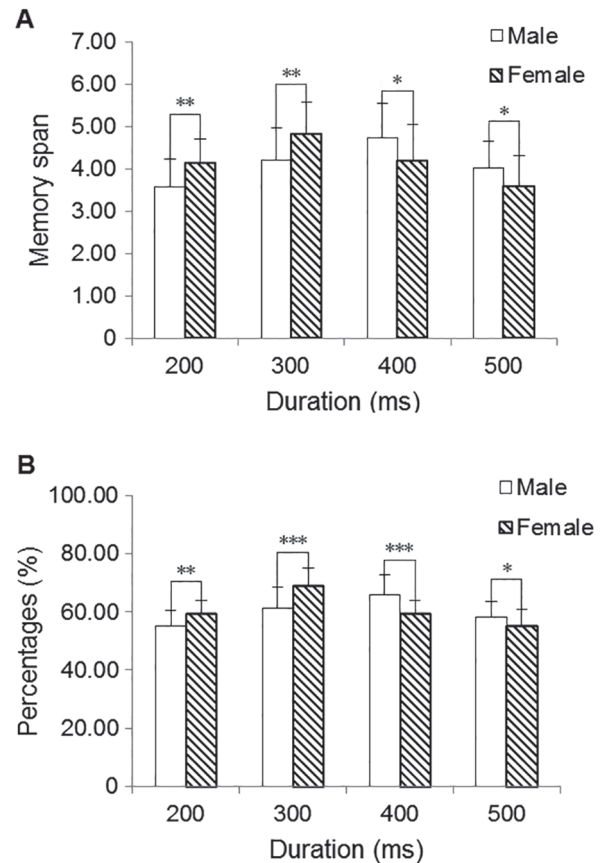


图 3. 振动强度记忆容量和回忆正确率的性别差异
Fig. 3. Gender differences in memory span and percentage of correct recall. A: Difference in memory span between male and female. B: Differences in percentage of correct recall between male and female. Mean \pm SD, $n = 20$. * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$.

500 ms 水平下振动强度记忆容量性别差异显著 ($P < 0.05$)。图 3B 显示，在振动持续时间 200 ms 水平下的回忆正确率性别差异具有较高的显著性 ($P < 0.01$)，在振动持续时间 300 ms 和 400 ms 水平下的回忆正确率性别差异极其显著 ($P < 0.001$)，在振动持续时间 500 ms 水平下的回忆正确率性别差异显著 ($P < 0.05$)。

如图 3 所示，在 200 ms 和 300 ms 水平下，女性被试的实验表现相对男性被试优势极其显著 ($P < 0.001$)；在 400 ms 和 500 ms 水平下，男性被试的实验表现相对女性被试优势具有较高显著性 ($P < 0.01$)。在 300 ms 水平下，女性被试记忆容量和回忆正确率达到最大，分别为 4.83 ± 0.747 和 $(68.93 \pm 5.65)\%$ ；在 500 ms 水平下，女性被试记忆容量和回忆正确率达到最小，分别为 3.60 ± 0.724 和 $(55.24 \pm 5.37)\%$ 。男性被试在 400 ms 水平下记忆容量和回

表1. 再认正确率(%)

Table 1. Mean percentages of correct scores (%)

	3 items	4 items	5 items	Yes		No.	Total
				Partial correct	Correct		
Female	44 ± 5	32 ± 6	18 ± 6	82 ± 12	27 ± 6	34 ± 7	31 ± 12
Male	41 ± 7	25 ± 12	14 ± 12	79 ± 10	21 ± 8	30 ± 5	27 ± 15
Total	43 ± 6	29 ± 10	16 ± 9	80 ± 11	24 ± 8	32 ± 7	29 ± 14

Mean ± SD, $n = 20$.

表2. 再认反应时(s)

Table 2. Mean reaction time (s)

	3 items	4 items	5 items	Yes	No.	Total
Female	1.41 ± 0.13	1.72 ± 0.10	1.92 ± 0.15	1.74 ± 0.14	1.61 ± 0.12	1.68 ± 0.13
Male	1.53 ± 0.27	1.76 ± 0.24	1.97 ± 0.24	1.84 ± 0.18	1.67 ± 0.24	1.76 ± 0.22
Total	1.47 ± 0.22	1.74 ± 0.18	1.94 ± 0.19	1.79 ± 0.13	1.64 ± 0.20	1.71 ± 0.28

Mean ± SD, $n = 20$.

忆正确率达到最大, 分别为 4.73 ± 0.828 和 $(65.94 \pm 6.90)\%$; 而在 200 ms 水平下记忆容量和回忆正确率达到最小, 分别为 3.57 ± 0.679 和 $(54.94 \pm 5.50)\%$ 。因此, 被试振动触觉记忆容量基本为 3~5。在 300 ms 和 400 ms 区间内, 男性被试的振动强度记忆容量和回忆正确率与振动持续时间是正相关的, 而女性被试的记忆容量和回忆正确率与振动持续时间是负相关的, 因此二者的抵消作用才使得数据分析中性别对振动强度记忆容量主效应不显著, 所以该主效应其实是显著的。

2.2 再认性实验结果

被试再认正确率如表 1 所示。对实验数据进行方差分析, 结果显示, 系列长度主效应极其显著 [$F(2, 57) = 46.49, P < 0.001$]。通过事后检验进行两两比较, 结果显示三组内任意两组间的差异都极其显著 ($P < 0.001$)。系列长度为 3 的平均再认正确率为 43%, 系列长度为 4 的平均再认正确率为 29%, 系列长度为 5 的平均再认正确率为 16%。再认正确率随着振动系列长度的增加而减少。在“是”反应中, 男性被试仅回答出正确测试刺激在振动系列中, 但没有准确回答出测试刺激在振动系列中位置的平均再认正确率 (partial correct) 为 79%, 能够准确回答出测试刺激位置的平均再认正确率 (correct) 为 21%; 女性被试仅回答出正确测试刺激在振动系列中, 但没有准确回答出测试刺激在振动系列中位置的平均再认正确率为 82%, 能够准确回答出测试刺激位置的平均再认正确率为 27%。在“否”反应中, 男性被试的平均再认正确率为 30%, 女性被试的平

均再认正确率为 34%。双侧 t 检验结果显示, 女性被试的平均再认正确率均高于男性被试的平均再认正确率 ($P < 0.01$)。

在某种程度上, 被试做出错误判断反应的反应时包含了一定的主观上的偏差, 会对总反应时造成影响, 所以在统计平均反应时的情况时删除了每个被试全部反应中的错误判断反应时数据。被试再认反应时如表 2 所示。方差分析结果显示, 系列长度对被试再认反应时主效应极其显著 [$F(2, 57) = 31.17, P < 0.001$], 通过事后检验进行两两比较, 结果显示系列长度 3 分别与系列长度 4 和系列长度 5 之间差异极其显著 ($P < 0.001$), 系列长度 4 与系列长度 5 之间差异较显著 ($P < 0.01$)。而被试性别对再认反应时主效应不显著 ($P > 0.05$)。被试性别与系列长度之间的交互效应不显著 ($P > 0.05$)。从表 2 中可以看出无论是男性被试还是女性被试, 其再认反应时皆随着振动系列长度的增加而增加。双侧 t 检验结果显示, 被试“是”反应的平均再认反应时长于“否”反应平均再认反应时 ($P < 0.01$)。

2.3 振动记忆规律性

振动触觉记忆具有一定的规律性。不少被试反映若不考虑其他的实验条件, 振动刺激系列按强度递增或递减的顺序呈现要比混乱顺序呈现更容易记忆。通过分析回忆性实验的数据, 发现被试对按照强度递增或递减顺序呈现的振动刺激系列的平均回忆正确率为 89%, 而混乱顺序呈现的振动刺激系列的平均回忆正确率为 43%, 后者约为前者的一半。

3 讨论

3.1 振动触觉记忆容量

本实验结果显示人手指振动触觉记忆容量为 4 ± 1 ，Hao 等^[17]的研究表明人手腕部振动强度记忆容量为 3 ± 1 ，Liu 等^[16]的研究表明手指柔性触觉记忆容量平均为 3~4，都低于 Miller^[19]通过研究人视觉和听觉得出的短时记忆容量 (7 ± 2)。这表明触觉记忆容量比视觉、听觉的记忆容量小，触觉相对于视觉和听觉记忆难度更大，人能保存触觉记忆的时间也更短。同时，手指的振动触觉记忆容量略大于手腕处，说明手指的振动强度感知能力要比手腕强。

3.2 振动触觉反应时间

由 Sternberg 提出的短时记忆信息提取机制表明，短时记忆信息提取是按照逐个进行比较的系列扫描方式进行的，无论是“是”反应还是“否”反应，其反应时都随着系列长度增加而增加^[11]。本文的触觉实验结果证实手指尖振动触觉短时记忆特性符合该短时记忆信息提取机制，实验结果显示随着振动刺激系列长度增加，“是”和“否”反应时间均增加，这是因为在实验过程中被试需要将最后的探测刺激感觉与之前的刺激系列感觉逐一进行对比，这与 Sternberg 提出的短时记忆信息提取机制是相同的。由于 Sternberg 的实验是针对数字的记忆实验，而本实验的振动刺激相比数字而言更容易混淆，辨别时间也更长，记忆难度更大，所以本实验的再认正确率低于 Sternberg 实验的再认正确率，再认反应时也更长。特别是在“是”反应中，若几个振动刺激强度差异不大，被试更难判断振动刺激出现的位置，判断所需要的时间也更长，这也是被试在“是”反应中实验表现要逊于“否”反应的原因。因此，在以后的研究工作中应尽可能选择差异性大的振动刺激。

本文使用一种振动触觉表达装置，探究了人手指振动触觉感知的短时记忆特性，主要得到以下结论：(1) 人手指振动触觉记忆容量为 4 ± 1 ，略高于手腕部振动触觉记忆容量，低于视觉和听觉的记忆容量；(2) 振动强度离散间隔对振动强度记忆容量的主效应极其显著，振动强度离散间隔越大，振动触觉记忆容量越大；(3) 振动持续时间对振动强度记忆容量的主效应极其显著，持续时间过长或过短都会导致振动记忆容量减少，男性最佳持续时间为 400 ms，女性为 300 ms；(4) 振动系列长度增加，

再认正确率降低，再认反应时增加；(5) 手指振动触觉记忆具有一定规律性，振动刺激序列按强度递增或递减的顺序排列时更容易记忆，若序列强度顺序混乱，则更难记忆；(6) 手指振动触觉感知的短时记忆信息提取是按照逐个进行比较的系列扫描方式进行的。这些实验结果有助于了解人手指指尖触觉感知特性，为自然人机交互研究、触觉反馈设备研制等提供生理学依据。

参考文献

- 1 Ninu A, Dosen S, Farina D, Rattay F, Dietl H. A novel wearable vibro-tactile haptic device. Proceedings 2013 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE); 2013 Jan 11–14, Las Vegas, NV, USA, 51–52. DOI: 10.1109/ICCE.2013.6486791.
- 2 Chinello F, Malvezzi M, Pacchierotti C, Prattichizzo D. A three DoFs wearable tactile display for exploration and manipulation of virtual objects. Proceedings 2012 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS); 2012 March 4–7, Vancouver, BC, Canada, 71–76. DOI: 10.1109/HAPTIC.2012.6183772.
- 3 Mun S, Yun S, Nam S, Park SK, Park S, Park BJ, Lim JM, Kyung KU. Electro-active polymer based soft tactile interface for wearable devices. IEEE Trans Haptics 2018; 11(1): 15–21.
- 4 Dharma AAG, Ariwa E, Tomimatsu K. Green technology and wearable haptic feedback display with 5×12 arrays of vibrotactile actuators. Proceedings 2013 IEEE Third International Conference on Consumer Electronics - Berlin (ICCE-Berlin); 2013 Sept 9–11, Berlin, Germany. 272–274. DOI: 10.1109/ICCE-Berlin.2013.6698027.
- 5 Ozioko O, Taube W, Hersh M, Dahiya R. SmartFinger-Braille: A tactile sensing and actuation based communication glove for deafblind people. Proceedings 2017 IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE); 2017 June 19–21, Edinburgh, UK, 2014–2018. DOI: 10.1109/ISIE.2017.8001563.
- 6 Hasdak AR, Nur IA, Neon AA, Zaman HU. Deaf-Vibe: A vibrotactile communication device based on morse code for deaf-mute individuals. Proceedings 2018 9th IEEE Control and System Graduate Research Colloquium (ICSGRC); 2018 Aug 3–4, Shah Alam Malaysia, 39–44. DOI: 10.1109/ICSGRC.2018.8657547.
- 7 Schaack S, Chernyshov G, Ragozin K, Tag B, Peiris R, Kunze K. Haptic collar-vibrotactile feedback around the neck for guidance applications. Proceedings 10th Augmented Human International Conference (AH); 2019 MAR 11–12, Reims, France, 1–4. DOI: 10.1145/3311823.3311840.
- 8 Flores G, Kurniawan S, Manduchi R, Martinson E, Morales

- LM, Sisbot EA. Vibrotactile guidance for wayfinding of blind walkers. *IEEE Trans Haptics* 2015; 8(3): 306–317.
- 9 Lin ZH, Smith S. A natural user interface for realistic tactile perception of object surface texture. Proceedings 2017 9th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC); 2017 Aug 26–27, Hangzhou, China, 370–373. DOI: 10.1109/IHMSC.2017.194.
- 10 Sawada H, Takeda Y. Tactile pen for presenting texture sensation from touch screen. Proceedings 2015 8th International Conference on Human System Interaction (HSI); 2015 June 25–27, Warsaw, Poland, 334–339. DOI: 10.1109/HSI.2015.7170689.
- 11 Sternberg S. High-speed scanning in human memory. *Science* 1966; 153: 652–654.
- 12 Xiao CH (肖崇好), Huang XT. A research on the retrieval of information from short-term memory. *Psychol Sci (心理科学)* 1999; 22(4): 302–304 (in Chinese with English abstract).
- 13 Xiao CH (肖崇好), Huang XT. A research on the factors influencing the retrieval of information from short-term memory. *Psychol Exp (心理学探新)* 2001; 21(3): 17–19 (in Chinese with English abstract).
- 14 Irwin DE. Short-term memory across eye blinks. *Memory* 2014; 22(8): 898–906.
- 15 Zhang L (张乐), Liang NJ. A study on the short-term memory of numerals in different background noises. *Psychol Sci (心理科学)* 2006; 29: 789–794 (in Chinese with English abstract).
- 16 Liu J (刘佳), Song AG. Remembrance characteristic of softness haptic perception in human fingertips. *Acta Physiol Sin (生理学报)* 2007; 59(3): 387–392 (in Chinese with English abstract).
- 17 Hao F (郝飞), Chen LJ, Wei LU, Song AG. Short-term memory characteristics of vibration intensity tactile perception on human wrist. *Acta Physiol Sin (生理学报)* 2014; 66(6): 683–690 (in Chinese with English abstract).
- 18 Jacobs J. Experiments on “Prehension”. *Mind* 1887; 12: 75–79.
- 19 Miller GA. The magical number seven, plus or minus two. *Psychol Rev* 1956; 63: 81–97.