

【工业设计】

基于振动触觉感知研究的头戴预警 设备开发设计

欧静¹, 方滢洁¹, 罗菁²

(1.湖南大学, 长沙 410082; 2.深圳大学, 深圳 518060)

摘要: **目的** 在预警场景下应用振动触觉传递警报信号以弥补受损的感觉通道, 探索头戴振动设备的合理形式, 从而为头戴振动设备的工业设计提供指导。**方法** 围绕空间分布位置、时间和振动参数设置实验, 研究振动触觉的特征, 提出一种振动触觉系统。在实验一中, 对头部进行触觉感知性测量以比较不同位置的灵敏性, 确定振动作用于头部的适宜部位。在实验二中, 组合不同的时间模式以及强弱程度形成7种振动模式, 通过比较得出适于传达警报信息的触觉模式。基于实验结论, 设计出一款应用于建筑工地场景下的工程预警头盔。**结果** 前额无毛区域与颞部中央区域感受性最灵敏; 时间间隔短、强度高的振动模式更适于传达警报信息。**结论** 感知实验的结论为振动组件的布置和振动警报模式的参数设定提供了依据, 并有效地被运用于针对具体场景的头戴设备设计中。

关键词: 振动触觉; 预警; 头戴设备设计; 触觉感知性; 振动模式

中图分类号: TB472 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2021)22-0094-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.22.012

Development and Design of Head-mounted Warning Device Based on the Study of Vibrotactile Perception

OU Jing¹, FANG Ying-Jie¹, LUO Jing²

(1. Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

ABSTRACT: This study aims to compensate for impaired sensory channels through vibrotactile warning signals and explore ideal forms of head-mounted vibrotactile devices to provide guidelines for industrial design. In order to study features of vibration, experiments in this study focused on the spatial locations, temporal patterns and parameters of vibrotactile stimuli, and proposed a vibrotactile early warning system. In the first experiment, measurements of tactile perception were conducted to assess the sensitivity of different positions on the head to identify suitable vibration positions. In the second experiment, seven vibrotactile patterns composed of different temporal patterns and intensities were compared to identify suitable warning patterns. Based on experiments, a vibrotactile warning helmet was designed to be used in construction sites. The results showed that the hairless region around the forehead and the center of the temporal regions have higher sensitivity, and those vibrotactile patterns with short intervals and high intensity are more suitable for transmitting warning information. These results from perceptual experiments provided evidence for placing vibration modules and determining parameters of vibrotactile stimuli, which can be applied to the design of head-mounted devices based on a specific situation.

KEY WORDS: vibrotactile; early warning; head-mounted device design; tactile perception; vibrotactile pattern

收稿日期: 2021-09-23

基金项目: 教育部人文社会科学研究项目(21YJC760056); 湖南省普通高等学校教学改革研究项目(HNJG-2020-0093); 中央高校基本科研业务费

作者简介: 欧静(1981—), 女, 湖南人, 博士, 湖南大学副教授, 主要研究方向为工业设计、人机工程学、智能交互硬件及产品开发、智能可穿戴设计及智能装备等。

2018 年 3 月我国成立了国家应急管理部门，旨在防范化解安全风险^[1]，而危机预警是应急管理体系中极其重要的一环，在应急场景下及时、准确地传递警报信息，可为缓解危情、降低损失提供保障。当前，人们获取警报的主要方式是通过声光交互，如语音提示、警笛与警报灯等。然而在实际生产作业中，视觉、听觉感知通道容易受到干扰甚至过载，比如烟雾弥漫的火灾救援现场、噪声巨大的建筑工地，都会影响到警报信息的有效接收。触觉在感知信息方面具有独特的优势，已被证明能够弥补其他感觉通道的不足^[2-3]，适宜在视觉、听觉感知受损的环境下传递警报信息。本文以头部的振动触觉感知性为研究对象，以帮助需要佩戴头戴设备执行任务的人员（如建筑工人、消防员），使他们即使在视觉、听觉感知受阻的环境下也能获得有效的警报信息，避免潜在的危險。本文围绕振动触觉的特征设置了两部分实验，探究振动触觉警报提示应用于头戴设备的潜力。根据实验结论确定了触觉模块在头部的作用部位和触觉警报语言的合适参数，为头戴振动设备的设计提供了一定的指导，并最终基于建筑工程场景和 BIM（Building Information Modeling）建筑信息定位系统^[4]设计了一款预警头盔。

1 振动触觉的特征属性

人体皮肤通过机械感受器感受到的触觉主要有压力和振动两种形式，而其中振动触觉技术的应用更为广泛，是触觉领域的研究重点。触觉的感知取决于对构成触觉的特征属性的参数控制，振动触觉的特征属性主要有以下参数：振动幅度、频率、时间和空间属性^[5]。振动幅度是振动体运动的范围，频率是振动体在单位时间内振动循环的次数，即振动的速度。振动触觉的特征参数见图 1。

振幅与频率共同决定了皮肤感知到的振动强度的大小^[6]。振动触觉的时间模式由刺激持续时间、刺激间隔、重复周期组成，通过不同时间参数的组合，能够形成多种复杂的振动节奏^[7]。空间分布模式也是振动触觉的一个重要特征，包括振动的作用部位、触点之间的间距、振动电机的数量等参数^[5]。

本研究围绕振动触觉的属性展开，在基于头戴设备的形式下，探讨用于传达预警信息的合理触觉参数，以达到最佳的警报接收效果。

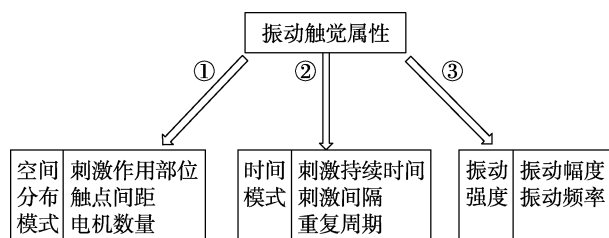


图 1 振动触觉的特征参数

Fig.1 Features and parameters of vibrotactile stimuli

1.1 头部振动触觉感知性的相关研究

人体通过分布在皮肤下的感知受体来感知触觉，由于感知受体在不同身体部位的分布密度不同，因此各个部位对于振动触觉刺激的敏感度不同^[8]。对头部触觉感知性的研究通常集中在对振动强度感知阈值的测量或者是对定位精度的测定方面，并基于国际 10-20 电极放置系统排布测定部位。根据此系统，Myles K 和 Kalb J T 设置了阈值实验，来比较头部 8 个部位的触觉感知性差异，他们发现位于头部前额、枕骨和太阳穴区域的点对振动刺激较为敏感^[9]。此后的研究工作中研究人员开发了一种触觉头带，来比较前额、额颞、颞部与枕部 4 处区域的定位精度，其结果表明前额区域最能准确辨别振动所在位置^[10]。而最近的一项研究工作得出的结论与之并不完全一致，Diener V 等人基于 10-20 电极系统对头部各个区域的定位精度进行评估，他们发现枕骨和太阳穴区域是定位准确性最高的区域，而头部中部和额部区域准确性较差^[11]。

影响触觉空间感知的其他参数，如触点间距已经有了较为明确的结论，用于应急预警场景下的触点间距需要控制在 15 mm 以上^[10]。在只提供一处刺激的情况下，被试对于触觉部位的识别正确率最高，多处刺激可能会造成识别上的混淆^[12]。因此本研究的重点在于探究单个触觉刺激作用于头部的较佳部位，是对 Myles 和 Kalb 研究工作的进一步拓展和验证。本文第一部分实验是基于 10-20 电极系统对头部 13 个部位进行感知阈值的测量，以探究头部各个区域的触觉敏感性程度差异，明确适于传递警报触觉信息的部位，确定警报触觉在头部的空间分布位置。

1.2 振动模式的设计

不同的触觉刺激能够给人们带来不同的感官体验，在感性层面上营造独特的情绪体验^[13]。通过组合不同的振动时间参数与强度参数，能够设计出不同的振动模式，这些模式可以传递不同的情感内涵，并被人们所识别，包括愤怒、害怕、高兴等^[14]。而相比较强度差异，不同模式之间时间参数上的差异更容易被用户所识别^[15]。

另一方面，使用触觉的挑战之一便是确定何种触觉模式能够更为有效地表达警报含义，因为具有不同特征参数的振动模式带有不同的语义象征，会引起用户不同的情感。根据 Russell 提出的情绪模型，情绪可以从效价—唤醒度两个维度来度量，效价水平表示情绪的积极或消极程度，而唤醒水平表示情绪的放松或兴奋程度^[16]。因此许多研究使用经典的效价与唤醒度量表来获得人们对于不同的振动模式的主观评价，并且发现连续的触觉刺激与高唤醒度和正效价（愉悦的情绪体验）有关，而间断性的刺激较令人不悦^[17]。高强度的振动通常会引起高唤醒度，低强度的振动则

较令人放松^[18]。

如今触觉参数与情感之间的对应关系尚无明确的理论框架，用何种振动形式表达预警信息有待探索。因此在实验二中，通过设置响应任务与情绪评价量表来评估所设计的不同振动模式，确定使人们警觉程度高的振动模式参数。

2 振动触觉设备的应用

振动触觉技术最早被用于帮助视障人士感知环境信息，且多以可穿戴设备的形式呈现。20世纪90年代后期，麻省理工学院研究人员设计并测试了一件振动背心，通过内嵌于背部的4×4振动电机矩阵，为盲人用户发送关于方位和导航指令的触觉信号，其研究结果证明了利用振动触觉传递信息的可能性^[19]。

振动触觉作为一种预警手段也被广泛地应用于辅助驾驶领域，为驾驶者提供警报信息以保障其安全。通过小型振动器为驾驶员提供手部或者腰部的振动触觉警报信号，这种新型警报形式已被证明可以提高驾驶员的警觉性，加快制动响应速度，降低追尾碰撞的风险^[20]，被认为具备补充甚至替代听觉警报的潜力^[21]。

振动触觉在工程场景下也有重要的应用。英国谢菲尔德大学的研究团队开发了一种振动触觉头盔，其内置有振动电机阵列，能在检测到障碍物时提供触觉反馈以提醒佩戴者^[22]。该设计旨在帮助消防员在能见度低的环境下躲避障碍，Hamideh等人开发的触觉头盔见图2。其研究成果表明将振动触觉应用于头戴式设备，可以为处于复杂环境的佩戴者传达提醒信号，避免潜在的危险。

以上研究表明，触觉在人机交互领域的各种具体场景下具有广泛的应用，振动触觉设备能够为佩戴者提供额外的信息传递通道，起到提示或者警报的作用。本文的研究工作主要基于建筑工地场景，将振动触觉模块集成到工程类头盔的设计中，希望能够开辟触觉作为新的预警信息传输通道，来为应急场景下工人的生产规范、生命安全提供进一步的保障。

3 实验一

3.1 实验装置

为了比较不同头部位置点的触觉敏感性差异，实验装置基于国际10-20电极系统，对处于中线及左侧头部位置点共计13个部位进行阈值测量，见图3。使用弹性尼龙带和粘扣贴将硬币型振动电机连接于头部，使振动头带能够根据头部尺寸进行位置调节使用1034型号的振动电机，直径10mm，厚度3.4mm，额定电压为5V。触觉头戴装置见图4。

振动装置各组件之间的关系见图5。通过单片机Arduino Mega2560开发板来控制13个振动电机，并且与基于PC端的图形用户界面(GUI)进行通信，GUI基于JavaScript运行库。开发板发送给振动电机的PWM(脉冲宽度调制)波，能够调节输出的电源平均电压，决定了振动电机的振动强度。因此研究人员通过PC端的GUI发送数字信号来调节PWM波的占空比，进而控制振动电机的强度大小。

3.2 实验被试

本实验招募了志愿被试15人，均为来自湖南大学的研究生和本科生，被试年龄在18~24岁(M=19.7, SD=1.6)。其中，男生8名，女生7名。所有被试均身体健康，无头部疾患。

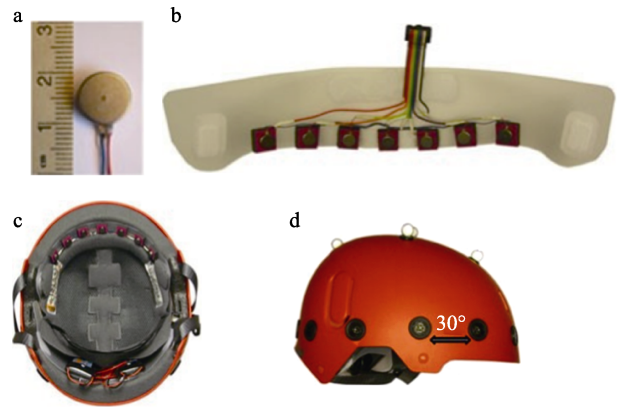


图2 Hamideh等人开发的触觉头盔
Fig.2 The vibrotactile helmet developed by Hamideh et.al

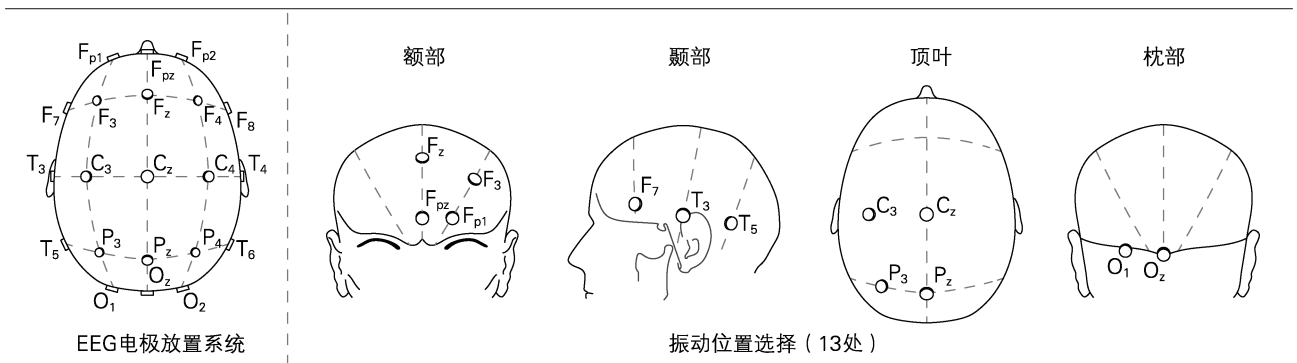


图3 振动电机排布位置
Fig.3 The location of vibration motors

3.3 实验设计

实验一的目的在于比较头部所测 13 处的敏感性。实验自变量为刺激的作用部位，因变量为测量的感知阈值。在实验过程中，由研究人员通过 PC 端的 GUI 给被试发送触觉刺激，依次测试选定的 13 个部位，每发送一次刺激信号，被试都需要示意能否感知到振动刺激的存在。为了确定振动阈值水平（即被试感受到振动的最小电压），发送的刺激信号逐渐从 0 增加到最大值，对应电机的振动强度也从 0 增加到最大，直至参与者的反应为“是”（即感知到振动），再将振动强度从最大逐渐向下减弱，直到被试感知不到振动，经历多次反转直到振动阈值限定在一定的误差以内。

3.4 实验过程

- 1) 被试坐在空教室的标准办公椅上，由研究人员提供签到表与实验同意书，参与者完成基本信息（姓名、性别、年龄、实验时间）签署。
- 2) 实验准备阶段，研究人员为被试佩戴白噪耳机以避免振动电机发出的噪声影响感知判断；研究人员为被试佩戴头戴实验装置，检查并调整头带以确保与被试的头皮正确接触。
- 3) 开始实验前，被试依次感受每个振动电机发出的振动刺激，以便熟悉任务。
- 4) 正式实验阶段，参与者依次经历振动强度从 0 增加到大，以及从大减弱到无感知；PC 端的 GUI 界面会记录下每一次振动的强度与时刻。
- 5) 是/否任务：对于每个刺激，参与者都要以举手的方式向研究人员表示他们是否感觉到振动触感（若感知到振动，则举手示意，反之则无需举手）；在每一次判断中，为每个头部位置提供 2 次振动，每次持续 1 s。

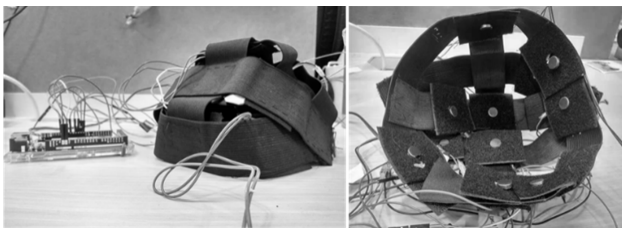


图 4 触觉头戴装置
Fig.4 The vibrotactile helmet prototype

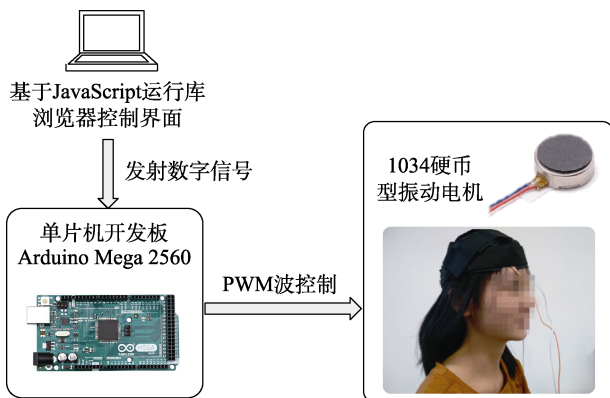


图 5 实验装置各组件之间的关系
Fig.5 Relationship between components of the experimental device

手的方式向研究人员表示他们是否感觉到振动触感（若感知到振动，则举手示意，反之则无需举手）；在每一次判断中，为每个头部位置提供 2 次振动，每次持续 1 s。

6) 每测定完一个位置，被试可以休息 1 min 以放松头部，每位被试的实验时间在 45 min 左右。

3.5 数据分析与实验结果

统计了每位被试在 13 个部位的阈值测量情况，以标准箱型图的形式展示。方框内的黑色菱形表示每组数据的平均值，并显示了中位数和上、下四分位数，方框外线段的上下边缘表示一组数据中的最大值和最小值。13 个部位的振动阈值见图 6。

运用 SPSS 对 13 组头部部位数据进行 ANOVA 分析。前额点 Fp、Fp1 与颞部中央点 T3，此 3 个部位的数据与其余 10 个部位的数据均存在显著性差异，但 3 个部位互相之间均不存在统计学上的显著性差异 ($P>0.05$)。表明这 3 个部位均属于阈值较低，感受性较为灵敏的位置。顶叶后部 P3 点平均阈值最高，在统计学上显著高于除了 Pz 点之外的部位。P3 与 Pz 点之间不存在显著性差异 ($P>0.05$)，表明顶叶后部两点均属于感受性较差的位置。

将数据按照振动位置所在的头部区域分为额部、颞部、枕部、顶部 4 组数据，进行 ANOVA 分析：发现额部与顶部的阈值数据存在显著性差异 ($P=0.001$)，同时额部与枕部数据存在显著性差异 ($P=0.005$)；但额部数据与颞部数据之间不存在显著性差异 ($P>0.05$)，顶部数据与枕部数据之间不存在显著性差异 ($P>0.05$)。

3.6 讨论

通过对头部 13 个位置进行感知阈值的测量评估，发现不同部位之间的触觉感知性差异较大。从对 4 个区域的比较来看，额部和颞部的灵敏度要高于顶部和枕部，这也符合 Myles 和 Kalb 的研究结论^[9]。实验结果进一步表明，以额头无毛区点 Fp、Fp1 与颞部中央点 T3 最为灵敏；而顶叶后部点 P4、Pz 是头部灵敏度最差的部位，到枕骨部位点 Oz、O1 感知性又有所提高。同时我们的实验结果也佐证了现有的研究中已经提出的中线效应，由图 6 可知，位于中线上的点显示出比其左侧点更低的感知阈值，如 $Fz<F3$ ，

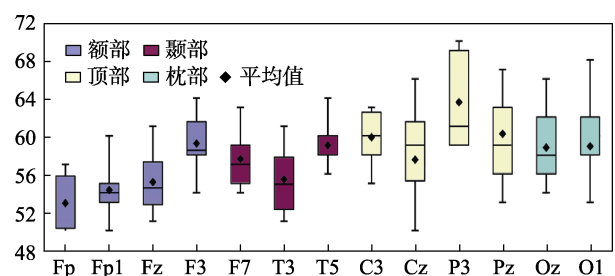


图 6 13 个部位的振动阈值
Fig.6 Vibrotactile threshold of 13 positions

Cz<C3, Pz<P3。

振动位置的选择决定了警报信息传递的效率,根据实验结果,应该选择灵敏度较高的前额无毛区与颞部靠近耳朵的区域作为提供振动警报的部位。同时应该避免将振动提示点置于顶部偏后的区域,因该部位对于振动刺激的感受性较差。

4 实验二

4.1 实验被试

本实验招募了志愿被试 14 人,均为来自湖南大学的本科生,且未参与过实验一,被试年龄在 18~20 岁 (M=18.5, SD=0.7)。其中,女生 8 名,男生 6 名。所有被试均身体健康,无头部疾患。

4.2 实验设计

为了设计警报触觉模式,研究人员设置了预实验以确定用户偏好的振动持续时长与间隔时间。预实验结果显示被试偏好的振动持续时长为 0.5 s、1.5 s。被试对于间隔的偏好集中在 0.5 s 和 1 s,认为间隔时间短才能令人产生紧张感。根据预实验结果并结合前人提出的振动模式设计思路^[15,18],设计了 7 种振动模式,由不同的振动时长、间隔时长与两种振动强度组成,见图 7,其中黑色实线表示强振动,灰色虚线表示弱振动。

实验二的目的在于比较 7 种模式以得出适于传递警报信息的振动模式,因此通过 2 种方式评估所设计的模式:客观刺激响应时间和主观效价—唤醒度量表。自变量为不同的振动模式与运动条件(分别为静态条件和动态条件),因变量为响应时间、情绪效价和情绪唤醒度。

4.3 实验过程

1) 被试进入实验室,完成基本信息的登记。在实验开始前,研究人员为参与者佩戴可拉伸头戴设备,并向被试介绍响应任务和情绪量表。

2) 客观响应实验。根据实验一的结论,振动刺激部位选择在前额中心,7 种警报振动模式将以随机

顺序呈现 2 次,要求用户在感知到振动刺激后按压左手边的按钮来响应刺激。设置静态与动态两种实验条件。静态条件下被试坐在办公椅上感受振动即可,而动态条件下则要求被试观看健身教学视频并跟随视频中的指令运动。振动刺激在实验过程中随机开始,被试每一次响应所用的时间都会在 PC 端被记录下来,用以之后分析比较用户对于不同警报模式的反应速度。动静态实验场景见图 8

3) 主观评价方法:由被试控制 PC 端的 GUI 界面,可依次体验 7 种振动模式,并被允许多次重复体验,直到完成唤醒度和效价的评分,量表见图 9。

序号	振动时长	间隔	振动模式
P1	连续强振动	0	
P2	1.5 s	0.5 s	
P3	0.5 s	0.5 s	
P4	3 s	1 s	
P5	0.5 s 强振动 0.5 s 弱振动	0.5 s	
P6	1.5 s 强振动 0.5 s 弱振动	1 s	
P7	0.5 s 强振动 1.5 s 弱振动	1 s	

图 7 7 种振动模式

Fig.7 Seven vibrotactile patterns

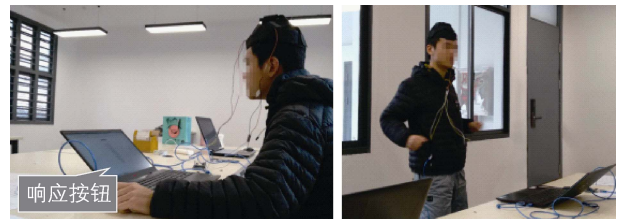


图 8 动静态实验场景

Fig.8 Experiments under dynamic and static conditions

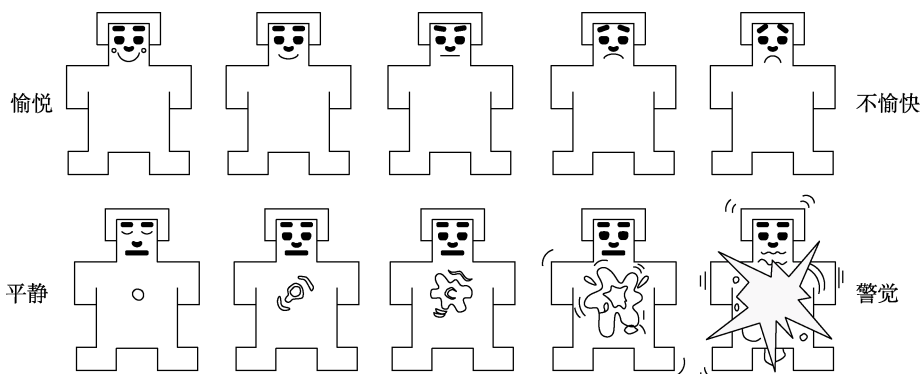


图 9 效价—唤醒度量表

Fig.9 The valence and arousal scale

4.4 数据结果

对不同振动模式下被试的平均响应时间和量表打分进行统计,不同振动模式各测量指标情况见表 1。可以看出,在静态与动态两种条件下被试的响应时间存在明显差异,在动态条件下,被试对任意一种触觉模式刺激都需要更长的时间来响应。无论是在静态还是动态条件下,具有短周期的强振动模式(P3)所需的平均响应时间都是最短的,其次是强振动与弱振动的组合振动模式 P6。长时间连续强振动模式(P1)与长周期的强振动模式(P2)下反应时间也较短。相比之下,在弱振动持续时间较长的振动模式刺激下(P4、P7),被试需要更长的时间来响应。

从主观情绪量表的评分情况来看,连续强振动模式(P1)效价得分最高(SD=4.14),且唤醒度评分也较高(SD=3.86)。效价得分其次的是强振动在周期中持续时间长的振动模式(P2、P6),此两种模式的唤醒度平均分也较高。P3 模式在 7 种模式中唤醒度评分最高(SD=3.86),但不愉悦度较低。在 4 种强、弱振动交替的振动模式中,弱振动在周期中持续 1.5 s 的模式唤醒度分值较低(P4、P7)。

4.5 讨论

在运动状态下被试的注意力会被分散,需要用更长时间的警报刺激唤醒。综合 3 项指标来比较 7 种振动模式,可以看出响应时间与唤醒度评分存在一定的相关性。振动强烈且间隔时间短的振动模式(P2、P3)响应时间最短,且此 2 种振动模式的唤醒度评分较高,令人警觉。预警场景下响应速度至关重要,因此这两种振动模式适于作为警报的触觉语言使用。呈现该结果的原因可能是较短的间隔时间形成了一种快节奏感,令人警觉度高^[23]。弱振动时长在周期中占比高的振动模式 P4、P7 所需的响应时间较长,唤醒度平均得分也最低。

同时发现强振动的持续时长与效价得分有关。连续强振动模式(P1)被评为是最不愉快的,其次是强振动持续时间长(1.5 s)的振动触觉模式(P2、P6)更能引起被试的不悦。弱振动在周期中占比高的模式

则趋于令人平静。

5 振动预警头盔设计实例

5.1 设计需求与技术背景

在建筑工程项目的施工现场,危害工人人身安全的事故时有发生。近年来的事故调查报告显示,建筑施工事故多发生在具有高处坠落、物体打击隐患的高风险区域,其中由于施工人员未正确佩戴安全帽而导致事故发生的案例占到总事故的 67.95%^[24]。因此有必要针对工人进入高风险区域与安全帽佩戴不当这两种场景,使用振动触觉加强工人对警报信息的接收度。

而建筑工程安全预警系统的实现需要基于 BIM 建筑信息模型和 RFID 射频定位技术,可以对工地上的高风险区域进行标定,以实现现场工人位置的实时监控与安全预警^[4,25],工地现场定位预警系统的架构见图 10。

5.2 设计说明

参照基于特定场景的智能头盔设计方法^[26],所设计的振动触觉头盔外观造型与尺寸见图 11(设计案例由研究组成员提供),采用一体式的结构设计,顶筋和散热孔位于头盔上方。其尺寸考虑人机工程学的要求,符合国家安全帽标准的相关参数要求^[27],同时帽箍具有一定的调节范围,以提高佩戴的舒适性。

头盔主要由帽壳与内衬上下两部分组成,见图 12,内衬部分与头部直接接触。考虑到头盔实际的功能结构^[28],并基于实验一的结论,将振动模块置于内衬的里侧,位于用户的颞部附近,以更高效地传递预警信息。

为实现预警功能,所设计头盔的各个功能组件,振动模块位置见图 13。通过电源开关 1 和充电孔 2,给振动电机和其他组件模块进行供电;调节旋钮 3 用来调节头围大小,便于单手操作。头盔后方壳体内

表 1 不同振动模式各测量指标情况

Tab.1 Average value of all measurement indicators for different vibrotactile patterns

振动模式	静态响应时间/ms	动态响应时间/ms	效价	唤醒度
P1	2 759	2 863	4.14	3.79
P2	2 744	2 881	3.21	3.79
P3	2 436	2 672	2.71	3.86
P4	2 863	3 253	3.14	3.29
P5	2 906	3 046	2.71	3.5
P6	2 654	2 763	3.21	3.57
P7	2 996	3 389	2.79	2.71

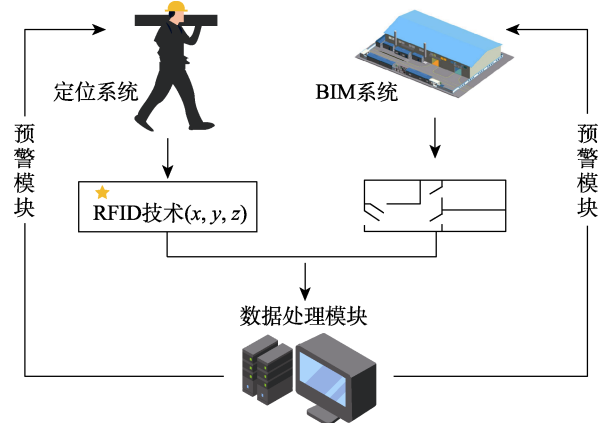


图 10 工地定位预警系统架构
Fig.10 The framework of positioning and early warning system

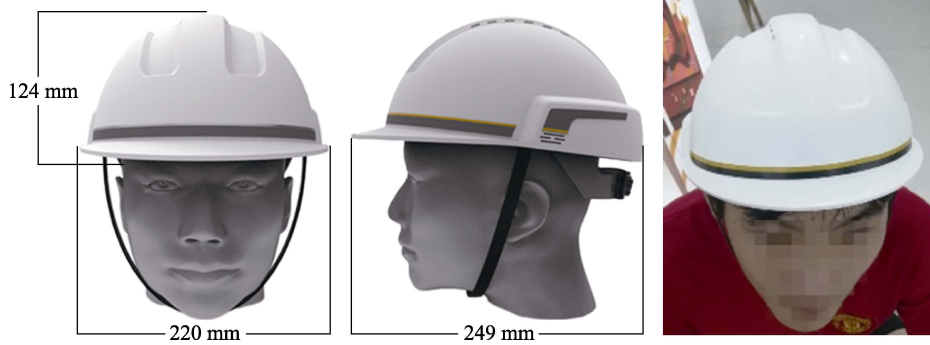


图 11 头盔外观与尺寸

Fig.11 Helmet renderings and dimensional drawings



图 12 振动模块位置

Fig.12 The location of vibration module

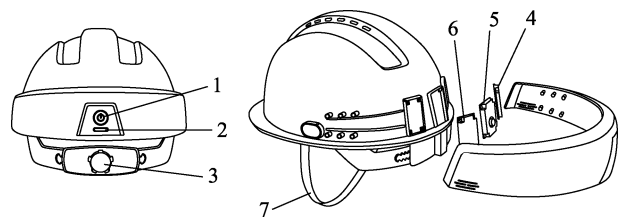


图 13 头盔功能组件

Fig.13 Helmet function assembly

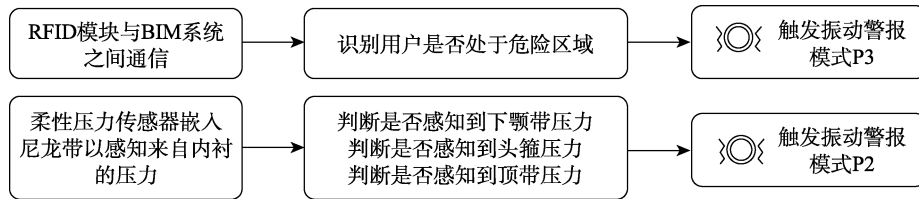


图 14 定位预警系统工作过程

Fig.14 The working process of positioning and early warning system

置有处理器模块 4,能够对来自 BIM 系统的信息进行处理,通信模块 5 和声音模块 6 支持与外界联络和对讲。同时在头盔下颚带、箍带、顶带中内置有柔性压力传感器 7。

基于 BIM 的定位预警系统判断过程,警报途径一是通过安置于安全帽内部的 RFID 标签,实时将工人的位置信息传输到 BIM 系统中,进而判断工人是否处于危险区域,见图 14。警报途径二是通过内置的柔性压力传感器判断是否感应到相应部位的压力,从而判断工人是否佩戴了头盔以及是否正确佩戴了下颚带。根据实验二的结论,振动模式(P2、P3)唤醒度较高、所需响应时间短,更适于传递预警信息。因此两种警报途径被设定为会分别触发 P2、P3 振动模式,以使用户对不同的危险情况进行区分。

在振动触觉头盔原型设计制作完成后,对用户进行了简要的评估测试,见图 11 右。评估结果表明,基于现有结构的头盔设计基本可以实现触觉预警功能,用户在移动状态下也能明显感知到振动。但现有的头盔设计在佩戴舒适性方面还存在一些问题,如振动触点不够贴合头部,头带可调节部分太短以及可调

节部分与头带之间连接不够牢固等。在之后的研究工作中会进一步改进现有头盔的结构设计,并在实际场景中对手盔进行可用性测试。

6 结语

本文基于应急预警场景,探索以触觉刺激作为警报信号在空间分布、时间参数和强度方面的合理形式,及其应用于头戴设备的可行性。开发了一项头戴式振动原型系统,来进行头部感知性测量实验和不同振动警报模式的效用评估。实验结果表明:(1)前额无毛区域与颞部靠近耳的区域对于振动刺激的灵敏度最高,是头戴设备传递触觉警报较为合适的作用区域;(2)被试对振动周期短、强度大的振动模式响应速度较快,并能被引起高唤醒度。实验结论具有实用性,为头戴设备设计中振动组件的放置位置,以及振动警报模式的参数提供了一定的参考。基于建筑场景设计了一款工程安全头盔,并根据头盔实际结构将振动组件置于颞部区域,选择响应速度快且效价、唤醒度高的两种强振动模式传达多级预警信息。

本研究提出的头戴式振动警报系统缺乏与传统听觉、视觉警报方式的比较与整合,在之后的研究中会进一步依托于实际的作业任务来验证振动警报方案的可用性,以获得更为可信的研究成果。本研究的发展方向会进一步拓展应用场景,为处于感知受损环境下的各类工作人员,如建筑工人、消防员和其他应急人员提供辅助警报设备。

参考文献:

- [1] 钟开斌. 组建应急管理部的现实意义[J]. 紫光阁, 2018(4): 35-36.
ZHONG Kai-bin. The practical significance of establishing an emergency management department[J]. Zi Guang Ge, 2018(4): 35-36.
- [2] GOOD A, REED M, RUSSO F. Compensatory Plasticity in the Deaf Brain: Effects on Perception of Music[J]. Brain Sciences, 2014, 4(4): 560-574.
- [3] 胡新明, 徐伶俐, 胡晓涛. 基于触觉感知的视障儿童玩具开发设计研究[J]. 包装工程, 2018, 39(8): 126-131.
HU Xin-ming, Xu Ling-li, HU Xiao-tao. Development and Design of Visual Impairment Children's Toys Based on Tactile Perception[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(8): 126-131.
- [4] 郭红领, 于言滔, 刘文平, 等. BIM和RFID在施工安全管理中的集成应用研究[J]. 工程管理学报, 2014, 28(4): 87-92.
GUO Hong-ling, YU Yan-tao, LIU Wen-ping, et al. Integrated Application of BIM and RFID in Construction Safety Management[J]. Journal of Engineering Management, 2014, 28(4): 87-92.
- [5] JONES L A, SARTER N B. Tactile Displays: Guidance for Their Design and Application[J]. Human Factors, 2008, 50(1): 90-111.
- [6] GAUDENI C, MELI L, JONES L A, et al. Presenting Surface Features Using a Haptic Ring: A Psychophysical Study on Relocating Vibrotactile Feedback[J]. IEEE transactions on haptics, 2019, 12(4): 428-437.
- [7] PHANOMCHOENG G, CHANCHAROEN R, LUMIA R. Developing vibrotactile haptic stimuli based on measured human capabilities[J]. Virtual Reality, 2017, 21(4): 203-212.
- [8] DIM N K, REN X. Investigation of Suitable Body Parts for Wearable Vibration Feedback in Walking Navigation [J]. International Journal of Human Computer Studies, 2017, 97: 34-44.
- [9] MYLES K, KALB J T. Guidelines for Head Tactile Communication[R]. Defense Technical Information Center, 2010.
- [10] OLIVEIRA V A D J, NEDEL L, MACIEL A, et al. Spatial Discrimination of Vibrotactile Stimuli Around the Head[C]. NJ: the IEEE Computer Society Press, 2016.
- [11] DIENER V, BEIGL M, BUDDE M, et al. Studying Vibrotactile Localization on the Human Head With an Unobtrusive Wearable Tactile Display[C]. New York, NY: Association for Computing Machinery, 2017.
- [12] DOBRZYNSKI M K, MEJRI S, WISCHMANN S, et al. Quantifying Information Transfer Through a Head-Attached Vibrotactile Display: Principles for Design and Control [J]. IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering, 2012, 59(7): 2011-2018.
- [13] 胡新明, 陈紫嫣. 盲人用品触觉感性化设计研究[J]. 包装工程, 2016, 37(10): 103-107.
HU Xin-ming, CHEN Zi-yan. Tactile Sensation Perceptual Design of Blind Activities[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(10): 103-107.
- [14] 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.
CHEN Shi, ZHENG Kai-Hong, SUN Ling-yun, et al. Design and Application of Vibration Emoticons in Wearable Computing Devices[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2015, 49(12): 2298-2304.
- [15] 褚少微. 振动触觉的量化感知与触觉文字编码设计[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2019, 31(6): 1046-1052.
CHU Shao-wei. Understanding the Perception of Vibrations and Designing Tactile Reading on Smartphones[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2019, 31(6): 1046-1052.
- [16] POSNER J, RUSSELL J A, PETERSON B S The Circumplex Model of Affect: An Integrative Approach to Affective Neuroscience, Cognitive Development, And Psychopathology[J]. BMC Medical Education, 2005, 17(3): 715-734.
- [17] KORRES G, CAMILLA B F J, PARK W, et al. A Vibrotactile Alarm System for Pleasant Awakening[J]. IEEE Transactions on Haptics, 2018: 1-1.
- [18] SONG Si-chao, YAMADA S. Expressing Emotions Through Color, Sound, and Vibration With an Appearance-Constrained Social Robot[C]. Vienna: Human-Robot Interaction, 2017.
- [19] ERTAN S, LEE C, WILLETS A, et al. A Wearable Haptic Navigation Guidance System[C]. Pittsburgh: the IEEE Computer Society Press, 1998.
- [20] ZHU A, CAO S, YAO H, et al. Can Wearable Devices Facilitate a Driver's Brake Response Time in a Classic Car-Following Task?[J]. IEEE Access, 2020, 8: 40081-40087.
- [21] AHTAMAD M, GRAY R, HO C, et al. Informative Collision Warnings: Effect of Modality and Driver Age[J]. Iowa Research Online, 2015: 324-330.
- [22] KERDEGARI H, KIM Y, PRESCOTT T J. Head-Mounted Sensory Augmentation Device: Designing a Tactile Language[J]. IEEE Transactions on Haptics, 2016, 9(3): 376-386.
- [23] SEIFI H, MACLEAN K E. A first look at Individuals'

- Affective Ratings of Vibrations[C]. World Haptics Conference. Piscataway: the IEEE Computer Society Press, 2013.
- [24] 常欣, 刘鑫萌. 建筑施工人员不合理佩戴安全帽事故树分析[J]. 吉林建筑大学学报, 2018, 35(6): 65-69.
CHANG Xin, LIU Xin-meng. Fault Tree Analysis of Unreasonably Wearing Helmets for Builders[J]. Journal of Jilin Jianzhu University, 2018, 35(6): 65-69.
- [25] 李鑫, 蒋绮琛, 于鑫. 基于Revit二次开发的施工场地布置与优化技术[J]. 土木建筑工程信息技术, 2020, 12(2): 50-54.
LI Xin, JIANG Qi-chen, YU Xin. Optimization Technology of Construction Site Layout Based on Revit Secondary Development[J]. Journal of Information Technology in Civil Engineering and Architecture, 2020, 12(2): 50-54.
- [26] 胡康, 许芳婷, 艾险峰. 基于情境构建法的消防头盔设计[J]. 包装工程, 2018, 39(12): 155-158.
HU Kang, XU Fang-ting, AI Xian-feng. Fire Helmet Design Based on Situation Construction Method[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(12): 155-158.
- [27] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化委员会. 安全帽 GB 2811—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Safety helmet. GB 2811—2007[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.
- [28] 袁晓东. 模块化智能头盔的应用设计研究[J]. 包装工程, 2015, 36(22): 88-91.
YUAN Xiao-dong. The Application Design of Modular Intelligent Helmet[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(22): 88-91.

(上接第77页)

- [92] Goodfellow Ian J, Jean Pouget-Abadie, Mehdi Mirza, et al. Generative Adversarial Nets[C]. Montreal: Paper Presented at the Advances in Neural Information Processing Systems, 2014.
- [93] Kato N, Osone H, Oomori K, et al. Gans-based Clothes Design: Pattern Maker is All You Need to Design Clothing[C]. Univ Tokyo: Proceedings of the 10th Augmented Human International Conference, 2019.
- [94] Elgammal, Ahmed, Bingchen Liu, et al. CAN: Creative Adversarial Networks Generating "Art" by Learning About Styles and Deviating from Style Norms[C]. Atlanta: Paper Presented at the 8th International Conference on Computational Creativity (ICCC), 2017.
- [95] Chatterjee A. Neuroaesthetics: Growing Pains of a New Discipline[M]. A. Shimamura and S. Palmer (Eds.): Aesthetic Science, 2012.
- [96] 王乃弋, 罗跃嘉, 董奇. 审美的神经机制[J]. 心理科学进展, 2010, 18(1): 19-27.
WANG Nai-ge, LUO Yue-jia, DONG Qi. Aesthetic Neurological Mechanisms[J]. Advances in Psychological Science, 2010, 18(1): 19-27.
- [97] Pelowski Matthew, et al. Visualizing the Impact of Art: an Update and Comparison of Current Psychological Models of Art Experience[C]. Frontiers in Human Neuroscience 10, 2016.
- [98] 鲁越, 郭超, 林懿伦, 等. 绘画艺术图像的计算美学: 研究前沿与展望[J]. 自动化学报, 2020, 46(11): 2239-2259.
LU Yue, GUO Chao, LIN Yi-lun, et al. Computational Aesthetics of Painting Art Images: Research Frontiers and Prospects[J]. Journal of Automation, 2020, 46(11): 2239-2259.
- [99] Leder H, Belke B, Oeberst A, et al. A Model of Aesthetic Appreciation and Aesthetic Judgments[J]. British Journal of Psychology, 2004, 95(4): 489-508.
- [100] 银宇堃, 陈洪, 赵海英. 人工智能在艺术设计中的应用[J]. 包装工程, 2020, 41(6): 265-274.
YIN Yu-kun, CHEN Hong, ZHAO Hai-ying. The Application of Artificial Intelligence in Art Design[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(6): 265-274.
- [101] Feist Gregory J. A Meta-Analysis of Personality in Scientific and Artistic Creativity[J]. Personality and Social Psychology Review, 1998(2): 290-309.
- [102] 耿纪朋, 郑小红, 龚珍旭. 艺术创作的心理学机制分析[J]. 湖北函授大学学报, 2014(16): 177-178.
GENG Ji-peng, ZHENG Xiao-hong, GONG Zhen-xu. Analysis of the Psychological Mechanism of Artistic Creation[J]. Journal of Hubei Correspondence University, 2014(16): 177-178.
- [103] 范凌. 2017 设计与机器智能报告[J]. 时代建筑, 2018(1): 72-73.
FAN Ling. 2017 Design and Machine Intelligence Report[J]. Time Architecture, 2018(1): 72-73.