

触感技术的现状与发展

Status and Development of Haptic Technology



曾繁荣/ZENG Fanrong, 房颖/FANG Ying, 赵铁松/ZHAO Tiesong

(福州大学 福建省媒体信息智能处理与无线传输重点实验室, 中国 福州 350108)
(Fujian Key Lab for Intelligent Processing and Wireless Transmission of Media Information, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

摘要:触觉作为互联网的第三种媒体流,将广泛应用于未来的触感应用中。在触觉交互任务中,要将用户的体验质量维持在最佳水平,仍是一个具有挑战性的任务。介绍了触觉信号的主要特点和触觉交互面临的挑战,并对触觉信息获取与再现、编码、传输等技术的研究进行了综合讨论。未来多模态的触觉设备、高效率的触觉编码与双边遥操作控制方法的相互融合,以及标准的网络传输协议的发展,都将推动触感技术在多媒体交互任务中的应用。

关键词: 动觉; 肤感信号; 触觉编码; 触觉通信

Abstract: As the third media stream of the Internet, haptics will be widely used in haptic applications. However, it is still a challenge to maintain the user's quality of experience at the optimal level in the haptic interaction. The main characteristics of haptic signals and the challenges of haptic interaction are introduced and the technologies of haptic signals acquisition, reproduction, coding, and transmission are analyzed. In the future, the mutual integration of multi-modal tactile devices, high-efficiency tactile coding, and bilateral tele-operation control methods, as well as standard network transmission protocols will all promote the growth of tactile technology in multimedia interactive tasks.

Keywords: kinesthetic; tactile signal; haptic encoding; haptic communication

DOI: 10.12142/ZTETJ.202106002
网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20211208.1032.008.html>

网络出版日期: 2021-12-08
收稿日期: 2021-11-08

随着数字信号处理及多媒体通信技术的飞速发展,人们的视听需求得到了极大的满足。人们开始追求多媒体交互体验的沉浸感,希望实现从视听互动到多感知交互的转变。其中,触觉作为仅次于听觉与视觉的第三种交互媒体,为人机互动增加了一个新的维度。触感技术根据反馈信息实现了动觉与肤感的再现,人类或机器可以远程且实时地感知或控制真实或虚拟物体。研究表明,将触感技术整合到现有的视听多媒体服务中,实现人与环境的双向交

流,可以增强多媒体交互性及用户的沉浸感^[1]。视、听、触的多感知融合,能够实现“所见即所触”,在智能交通、远程医疗、工业物联网等人机交互场景中得到广泛应用。

触觉交互系统是一个“人在回路”的混合闭环控制系统,以实现双边触觉远程操作。融合触觉的多媒体交互系统典型结构如图1所示^[2],由主控域、网络域和受控域组成。主控域通常由操作人员和人机触觉交互界面组成。人机触觉交互界面实

现触觉信号(位置、速度等信号)的采集、处理与传输,同时接收受控域的多模态(听觉、视觉、触觉)信号的反馈,从而实现远程交互环境的感知与交互命令的调整。在受控域中,远程控制的机器人或受控操作人员执行主控域的远程交互命令,同时将场景信息通过多模态信号反馈到主控域中。主控域与受控域之间通过网络域上的双向数据通信链路形成全局控制回路,从而实现多感知的交互。

触感技术使现实或虚拟环境的完全沉浸式多感官远程体验成为可能,将成为未来交互应用中的第三种

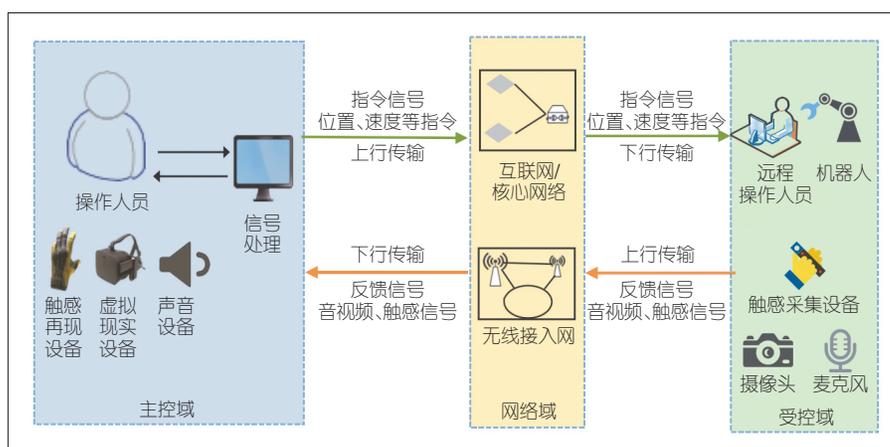
媒体流。然而,将用户的体验质量维持在最佳水平,仍是一个具有挑战性的任务。因此,目前学者对触觉信息获取及呈现、压缩编码、信息传输等方面进行了研究。电气与电子工程师协会(IEEE)等国际标准组织也着力于P1918.1触觉互联网相关标准的制定。本文讨论触觉信息获取及再现技术、触觉信号的压缩技术,同时结合触觉网络传输架构及触觉数据通信协议等,对触觉媒体传输关键技术进行了总结。

1 触觉信息的获取与再现

触觉包括位于关节和韧带内的动觉感知和位于皮肤真皮层及表皮层的肤感。动觉感知包括力、扭矩、位置、速度、角速度等信息。肤感包括静态压力、振动、摩擦、表面纹理、皮肤拉伸、三维形状、热觉和痛觉等^[3-4]。触觉反馈技术基于人体触觉感知机制,通过生成刺激信号,再现了触觉交互过程。动觉和肤觉由于记录的刺激数据不同,适用的触觉设备也有所差异。

1.1 动觉信息获取与再现

动觉信息(力、扭矩、位置、方向)的获取与再现目前主要是利用力反馈设备^[5]。力反馈设备包括传感器和由直流电动机控制的执行器。传感器提供关于设备在虚拟/现实世界中的位置和方向的信息。一旦设备与物体发生互动,执行器就会向用户显示所产生的力/扭矩。如图2所示,力反馈设备包括接地设备与非接地设备:Novint Falcon、Phantom的Omni和Premium等接地设备将其反作用力施加在一个巨大的静止物体上;Rutgers Master、Gyro Moment Display等非接地设备能够产生自平衡力,无须机械接地,便能将其反作用力施加在操作



▲图1 融合触觉媒体的交互系统



▲图2 交互信息获取与再现方式

者身体的某个部位。

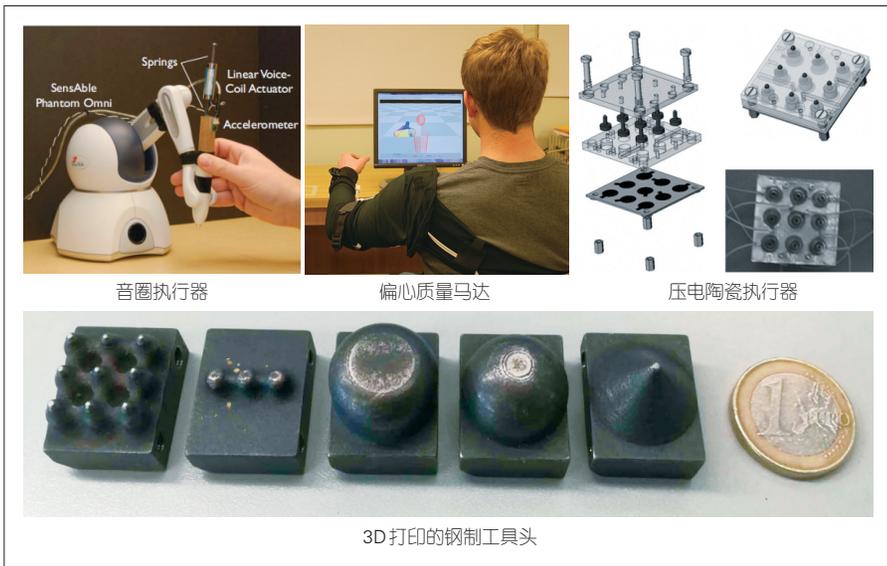
1.2 肤感信息获取与再现

传感器是产生肤感的设备,通常安装在用户终端,用于感测与周围环境交互产生的振动、温度等信息,并反馈传达给用户。目前传感器主要是对摩擦力、硬度、温度、粗糙度进行测量^[6]。相应的触觉再现设备主要是基于振动、超声波以及静电驱动方式^[6]的。振动触觉执行器可以使用音圈执行器、偏心质量马达、压电陶瓷执行器或3D打印的钢制工具头,如图3所示。

以上触感再现技术只关注到个别的触觉维度,而多模态触觉反馈设备能同时刺激人的肤感与动觉感知,产生多个维度的触觉刺激,包括力、

振动、扭矩、位置、热刺激等,使用户感知到物体的多种属性,支持更为精细的操作。目前,多模态触觉反馈设备可利用运动学机制、软执行器、针式矩阵和热显示器、静电效应、平台渲染物体表面、音圈与制动器的融合,或是内置紧凑的触觉显示器和一个振动模块来实现用户的多模态触觉反馈^[4]。例如,H.CULBERTSON和K.J.KUCHENBECKER利用Phantom Omni设备和振动机械执行器产生了特定触觉刺激(摩擦、硬度和粗糙度)^[6],利用螺线管柱塞和一个滚动的不锈钢球来呈现不同的摩擦力^[7]。

但是到目前为止,只有少数设备可以同时模拟3种基本模式(柔软度、纹理和热反馈),没有设备能同时模拟更多的模态。为了产生多模态的



▲图3 振动触觉常用执行器

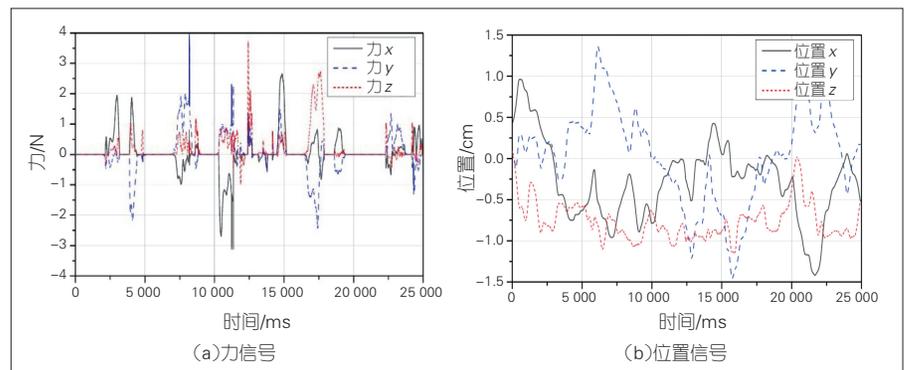
触觉,新型触觉设备可以使用能同时支持多模态启动的新型功能材料,或将触觉设备执行器内嵌多个传感器。需要注意的是,当多种模式被整合时,不同制动器之间可能产生空间干扰;当用户同时感知多种模式时,某些模式组合的耦合效应与用户的感知阈值会出现变化。

2 触觉信号的编码

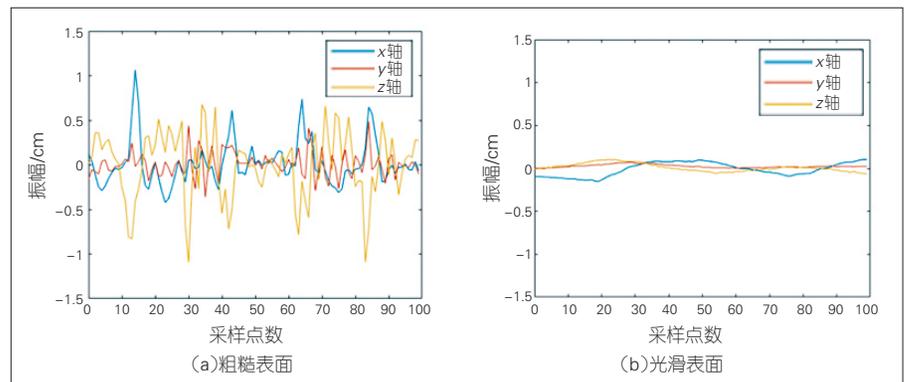
触觉信号采样率越高,信号幅值则越小。动觉信号的采样率为1 kHz甚至更高,位置和力的信号集中在-1.0~+1.0和-3.0~+3.0的范围内^[8],如图4所示^[9]。肤感信息包括硬度、导热性、摩擦力、微观粗糙度和宏观粗糙度,目前主要通过振动触觉信号来解决微观粗糙度和摩擦力问题。在高精度触觉交互任务中,振动触觉信号采样率在5 kHz以上。在数据库^[10]中,振动触觉信号采样率为2 800 Hz,其信号幅度值为0~1.5,如图5所示。

较高的采样率需要较高的数据包传输率,这会产生大量的数据开销,从而导致延迟的增加。随着触觉应用所需的自由度数量的增加,触觉数据将与之成比例地增加。尽管5G

网络的数据传输能力可以满足用户的触觉数据传输需求,但在实际的多媒体交互任务中,还需要同时传输音频和视频数据,因此必须对触觉数据进行压缩。动觉信号与肤感信号分别应用于不同的场景,对于通信延迟



▲图4 动觉信号实例



▲图5 肤感信号实例

有着不同的需求,这两类信号的压缩有其根本区别。

2.1 动觉信号的编码

动觉信号主要应用于闭环的通信场景中,对网络延迟有着较高的要求,因此动觉编码器的主要目标是降低网络数据传输时的平均数据包率,同时保持较高的用户体验质量。目前,动觉信号编码主要包括实时编码及延迟编码^[11]:前者在完成信号采样的同时进行数据传输,在交互过程中不需要控制机制来保证交互稳定性;后者则允许在通信延迟超过5 ms的情况下,在交互过程中增加系统稳定控制机制。

(1) 实时编码

实时编解码器主要基于感知死区的动觉压缩方案^[11]。该类编解码器是基于韦伯的可察觉差异定律(JND)的,如公式(1)所示。只有当前信号X与之前传输的最后动觉信号

X_{n-1} 之间的相对差异超过韦伯分数 δ 时,信号 X 才需要被传输,否则当前信号将被丢弃。

$$\left| \frac{X - X_{n-1}}{X_{n-1}} \right| \geq \delta \quad (1)$$

δ 在编码方案中被称为死区参数。死区参数阈值决定了压缩率和感知的失真。 δ 值较小将导致压缩率不足; δ 值过大可能导致显著的失真。图6^[12]为一维动觉信号的感知死区压缩原理。带黑点的采样点代表输出动觉信号,灰色区域定义了感知死区。如果信号样本值位于定义的感知死区范围内,则说明信号间的相对差异值较小且无法被人所感知。在编码过程中,该部分信号将被舍弃。

基于感知死区及预测模型的感知编码可以进一步降低触觉数据包的速率。如图7^[3]所示,相同的预测器在主控域和受控域两边并行。在发送端,预测器在每个采样瞬间产生预测的触觉信号。如果预测误差小于相应的感知死区阈值,则不触发更新;否则,输入样本被传输到另一侧,同时传输的样本被用于更新预测模型。如果接收端收到了一个数据包,就直接作为动觉输出,收到的触觉信号被用于更新预测模型;否则,接收端预测器会产生一个预测的触觉信号作为当前的输出。基于感知死区的方法可能会引起用户感知的“抖动效应”,并且随着触觉设备自由度的增加,压缩率可能会有所下降。

(2) 延迟编码

延迟编码器用额外的延迟来换取更好的编码效率。延迟可能会影响主观体验和客观质量,甚至影响触觉设备的可用性,因此通常需要增加一个控制机制来保持系统的稳定性。差分脉冲编码调制(DPCM)以及自适应差分脉冲编码调制(ADPCM)技术

被引入该类编解码器中,压缩率可以达到11:1,同时将视觉和动觉失真保持在人类生理感知的阈值以下。除此之外,离散余弦变换(DCT)、快速DCT(FDCT)以及小波包变换(WPT)算法也应用于单一自由度的动觉系统中。其中,在DCT变换中加入气泡排序算法的选择DCT(sDCT)算法^[13],使得动觉信号的压缩率和信噪比进一步提高。文献[9]提出了一种高效、低延迟、感知无损的混合结构动觉编解码器。该解码器能够减少编码延迟,优化熵编码器,并通过预处理消除编码损失。该编码器由放大器、DCT、量化器、行程编码、熵编码器组成。利用文献[9]提出的算法可使位置信号和力信号的传输率比其他算法降低了50%以上,最大缓冲延迟仅为7 ms,有效保证了动觉交互的用户体验。

2.2 肤感信号的编码

肤感信息通常发生在开环通信场景中,对延迟的容忍度有所提高。目前肤感信号编解码器通常是指振动触觉数据的压缩,主要包括波形编码、参数编码以及混合感知编码。

(1) 波形编码

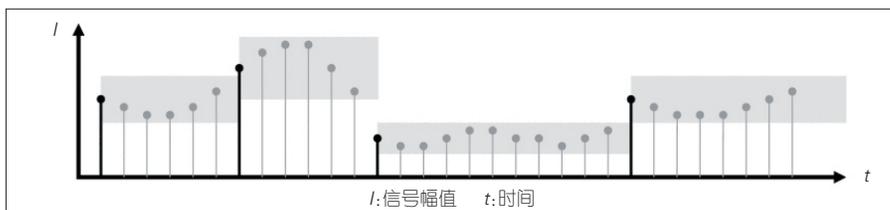
波形编码可以使用正交线性变换,例如DCT或离散小波变换(DWT),将振动触觉信号转换至其他数据域中,通过量化消除振幅低于阈值的信号,减少原始信号中的关联性再进行熵编码。

(2) 参数编码

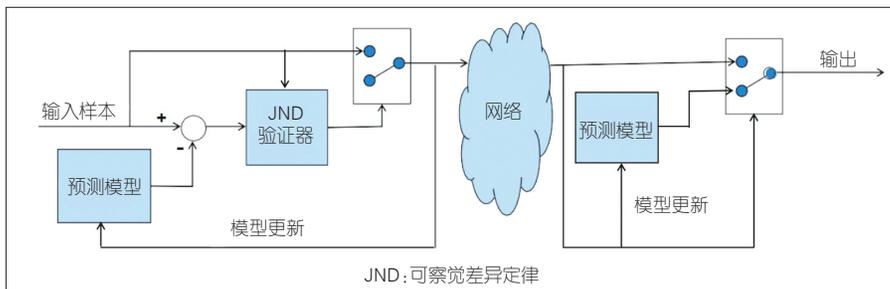
肤感特征可以被提取,以形成参数化表征。例如,物体表面的摩擦、粗糙度等被捕捉后,每种材料的特征向量被发送到远端触觉渲染框架,用于在虚拟环境中再现触觉感知。肤感信号特征是基于人为提取或基于深度学习自动提取的。基于线性预测编码(LPC)的振动触觉信号压缩方法采用分析合成技术,只存储或传输于分析阶段捕获的滤波器参数中^[14]。

(3) 混合感知编码

感知压缩的目标是通过尽可能多地保留可感知信号信息,来降低所需的数据传输速率。目前性能较好的感知小波量化振动编解码器(VCPWQ)^[16]利用心理触觉模型,将损伤阈值纳入感知绝对阈值函数;利用感知的绝对阈值和掩蔽现象,动态提取其接收到的输入信号的必要属性;同时使用DWT有效地去除输入信号的相



▲图6 感知死区原理



▲图7 基于感知死区及预测模型的感知编码机制

关性;采用嵌入式均匀量化器,使用多级树集合分裂(SPIHT)算法及算术编码,得到了较好的触觉编码性能。基于稀疏线性预测的感知振动触觉信号压缩算法(PVC-SLP)^[16]则采用了加速敏感度函数(ASF)以构建触觉敏感度模型。该压缩算法在线性预测方案中对残差和预测系数都引入了稀疏性约束,目前被选为IEEE P1918.1.1触觉编解码标准的一部分。

迄今为止,业界开发的触觉数据压缩算法只适用于动觉或肤感信号。但在现实中,动觉信号和肤感信号是相互影响的。因此,有必要设计一种兼容两种信号的通用编码方法^[1]。此外,大部分算法只解决单点触觉互动。随着触觉数据采集的改进,多点场景的重要性越来越高,因此需要开发针对多点触觉场景的压缩算法,并可以考虑利用通道间或空间的相关性来获得最大的压缩性能。最后,必须定义多模态编码方案,以支持触觉互联网信息不同模态,而不增加端到端的延迟。

3 触觉信号的传输

触觉交互实现了实时感知、操纵或控制真实和虚拟的物体或进程,其信号本质上是主动和双向的。互联网需要由原先的内容传输进一步演变为技能传输。相比于视频、声音、图像等其他多媒体应用,触觉应用对数据丢失和带宽的容忍度高,对延迟、可靠性的要求更高。为了保证更自然的交互操作,触觉互联网必须是高可靠低延时的,因此它的网络架构及传输协议都与传统互联网不同。

3.1 网络体系结构

触觉通信网络架构对于确保低时延、高可靠、鲁棒性,以及与其他网络的兼容至关重要。触觉互联网架

构分为独立于具体应用的通用结构和与具体应用相关联的专用架构。

通用架构包括IEEE P1918.1标准组提出的通用架构^{[11][17]}、移动边缘计算(MEC)增强蜂窝架构^[18]、基于以太网无源光网络(EPON)的网络架构^[19]、FiWi增强型蜂窝架构^[20](HetNet)以及新型互联网架构FlexNGIA^[21]。

IEEE P1918.1标准组提出的触觉互联网(TI)通用架构,旨在支持大多数TI的实际使用。该通用结构由网络域和边缘域组成,包括触觉设备、网关节点、网络控制器、支持引擎、触觉服务管理器、用户平面实体和控制平面实体。每个触觉边缘的触觉设备可以通过网络域(包括共享无线网络、共享有线网络、专用无线网络、专用有线网络)进行触觉信息的通信。除了传统的物理接口外,参考架构还确定了各种逻辑接口,这些接口可以通过包括5G在内的任何连接技术,映射到各种触觉互联网应用程序。

边缘计算增强蜂窝架构为一个多层云系统,该系统在蜂窝网络中提供迁移能力,以支持触觉互联网应用。该系统分别由在最低、中间和最高级别上的微云、小型云和核心云单元组成。该架构旨在将蜂窝网络的业务转移到云端,以减少数据往返的延迟和网络拥塞。

基于EPON^[18]的光云分布网络(OCLDN)架构提供高速、可编程可扩展的光接入网络,以支持低延迟服务。它允许光网络单元(ONU)同时通过多个波长通道传输流量,增加网络容量。

HetNet通用架构具有光纤回程共享和WiFi迁移功能。它利用EPON技术在核心和边缘网络之间形成回程链路,并利用千兆无线局域网(WLAN)技术构建FiWi接入网络。

新型互联网架构FlexNGIA则利

用未来网络基础设施中计算资源的可用性,来实现网络内计算。该架构还定义了一个商业模式:网络运营商不仅可以提供数据传输,还可以提供对性能、可靠性等有严格要求的服务功能链。该架构可使网络提供更好的拥塞控制和可靠性服务。

触觉互联网专用架构主要针对具体应用设计,包括实时远程控制任务、虚拟现实、工业应用、智慧城市等。其中,文献[22]提出了一种全新的体验质量(QoE)驱动的智慧城市触觉互联网专用架构。该架构包含5层:感知层、传输层、存储层、计算层和应用层。感知层的主要任务是从智慧城市中的分布式传感器收集大数据,然后对数据进行预处理;传输层旨在为智慧城市的数据传输提供超可靠的连接;存储层利用分布式数据存储和区块链技术,为数据存储和用户隐私信息保护方面提供保障;计算层使用渗透计算技术实现对触觉设备的控制;应用层通过挖掘触觉和现有的视听数据提升用户的QoE。

3.2 传输协议

近年来,针对触觉数据的特殊性,研究人员提出了新的触觉通信中数据传输协议、应用层迁移协议、切换协议以及触觉握手协议。触觉通信协议(FRTPS)^[23]基于实时传输协议(RTP)协议,使用连续网络探测流控制机制和模糊逻辑速率自适应机制,提高了触觉数据传输性能。敏捷云迁移(ACM)的应用层迁移协议^[24]由客户端、控制器和引擎组成,为触觉交互提供更高的可靠性。文献[25]提出的垂直切换协议,可实现IEEE 802.11p和长期演进(LTE)网络之间的无缝切换。IYOSHI等^[26]着重设计了一种触觉握手机制,以协调(通常)异构的触觉设备。他们还开发了“触

觉互联网信息”的信息传递格式,用于在触觉握手期间交换元数据。

4 结束语

触觉交互系统是一个“人在回路”的混合闭环控制系统,它可以实现双边触觉远程操作,人类或机器可以实时获取、感知、操作或控制远端真实或虚拟的物体。本文分别对触觉信息的获取与再现、数据压缩编码技术及数据传输架构与触觉通信协议进行了总结与分析,并对相应技术未来的挑战进行了探讨。

参考文献

- [1] ZHOU L, WU D, CHEN J, et al. Cross-modal collaborative communications [J]. IEEE wireless communications, 2020, 27(2): 112–117. DOI: 10.1109/MWC.001.1900201
- [2] SHARMA S K, WOUNGANG I, ANPALAGAN A, et al. Toward tactile internet in beyond 5G era: recent advances, current issues, and future directions [J]. IEEE access, 2020, 8: 56948–56991. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2980369
- [3] ANTONAKOGLU K, XU X, STEINBACH E, et al. Toward haptic communications over the 5g tactile Internet [J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2018, 20(4): 3034–3059. DOI: 10.1109/COMST.2018.2851452
- [4] WANG D, OHNISHI K, XU W. Multimodal haptic display for virtual reality: a survey [J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2020, 67(1): 610–623. DOI: 10.1109/TIE.2019.2920602
- [5] STEINBACH E, STRESE M, EID M, et al. Haptic codecs for the tactile Internet [J]. Proceedings of the IEEE, 2019, 107(2): 447–470. DOI: 10.1109/JPROC.2018.2867835
- [6] CULBERTSON H, KUCHENBECKER K J. Importance of matching physical friction, hardness, and texture in creating realistic haptic virtual surfaces [J]. IEEE transactions on haptics, 2017, 10(1): 63–74. DOI: 10.1109/TOH.2016.2598751
- [7] CULBERTSON H, KUCHENBECKER K J. Un-grounded haptic augmented reality system for displaying roughness and friction [J]. IEEE/ASME transactions on mechatronics, 2017, 22(4): 1839–1849. DOI: 10.1109/TMECH.2017.2700467
- [8] IEEE P1918.1.1 Haptic Codecs for the Tactile Internet Task Group. Kinesthetic reference setup data traces [EB/OL]. (2020–03–30) [2021–11–07]. <https://cloud.lmt.ei.tum.de/s/4FmHUCsoUvwRle3>
- [9] ZENG C Y, ZHAO T S, LIU Q, et al. Perception-lossless codec of haptic data with low delay [C]// Proceedings of the 28th ACM International Conference on Multimedia. ACM, 2020: 3642–3650. DOI:10.1145/3394171.3413728
- [10] KIRSCH J, NOLL A, STRESE M, et al. A low-cost acquisition, display, and evaluation setup for tactile codec development [C]// 2018 IEEE International Symposium on Haptic, Audio and Visual Environments and Games (HAVE). IEEE, 2018: 1–6. DOI: 10.1109/HAVE.2018.8547512
- [11] HOLLAND O, STEINBACH E, PRASAD R V, et al. The IEEE 1918.1 “tactile Internet” standards working group and its standards [J]. Proceedings of the IEEE, 2019, 107(2): 256–279. DOI: 10.1109/JPROC.2018.2885541
- [12] STEINBACH E, HIRCHE S, KAMMERL J, et al. Haptic data compression and communication [J]. IEEE signal processing magazine, 2011, 28(1): 87–96. DOI: 10.1109/MSP.2010.938753
- [13] BARAN E A, KUZU A, BOGOSYAN S, et al. Comparative analysis of a selected DCT-based compression scheme for haptic data transmission [J]. IEEE transactions on industrial informatics, 2016, 12(3): 1146–1155. DOI: 10.1109/TII.2016.2555982
- [14] CHAUDHARI R, SCHUWERK C, DANAEI M, et al. Perceptual and bitrate-scalable coding of haptic surface texture signals [J]. IEEE journal of selected topics in signal processing, 2015, 9(3): 462–473. DOI:10.1109/JSTSP.2014.2374574
- [15] NOLL A, NOCKENBERG L, GÜLECYÜZ B, et al. VC-PWQ: vibrotactile signal compression based on perceptual wavelet quantization [C]//2021 IEEE World Haptics Conference (WHC). IEEE, 2021: 427–432. DOI:10.1109/WHC49131.2021.9517217
- [16] HASSEN R, GUELECYUEZ B, STEINBACH E G. PVC-SLP: perceptual vibrotactile-signal compression based-on sparse linear prediction [J]. IEEE transactions on multimedia, 2674, 99: 1. DOI: 10.1109/TMM.2020.3042674
- [17] AJAZ A, DAWY Z, PAPPAS N, et al. The IEEE P1918.1 reference architecture framework for the tactile Internet and a case study [C]//GLOBECOM 2020 – 2020 IEEE Global Communications Conference. IEEE, 2020: 1–6. DOI: 10.1109/GLOBECOM42002.2020.9322128
- [18] ATEYA A A, VYBORNOVA A, KIRICHEK R, et al. Multilevel cloud based tactile Internet system [C]//2017 19th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT). IEEE, 2017: 105–110. DOI: 10.23919/ICACT.2017.7890067
- [19] NEAIME J, DHAINI A R. Resource management in cloud and tactile-capable next-generation optical access networks [J]. Journal of optical communications and networking, 2018, 10(11): 902–914. DOI: 10.1364/JOCN.10.000902
- [20] BEYRANVAND H, LÉVESQUE M, MAIER M, et al. Toward 5G: FiWi enhanced LTE-A HetNets with reliable low-latency fiber backhaul sharing and WiFi offloading [J]. IEEE/ACM transactions on networking, 2017, 25(2): 690–707. DOI: 10.1109/TNET.2016.2599780
- [21] ZHANI M F, ELBAKOURY H. FlexNGIA: a flexible Internet architecture for the next-generation tactile Internet [J]. Journal of network and systems management, 2020, 28(4): 751–795. DOI: 10.1007/s10922-020-09525-0
- [22] WEI X, DUAN Q, ZHOU L. A QoE-driven tactile Internet architecture for smart city [J]. IEEE network, 2020, 34(1): 130–136. DOI: 10.1109/MNET.001.1900078
- [23] KONTOGIANNIS S, KOKKONIS G. Proposed fuzzy real-time HaPticS protocol carrying haptic data and multisensory streams [J]. International journal of computers communications & control, 2020, 15(4). DOI: 10.15837/ijccc.2020.4.3842
- [24] BRAUN P J, PANDI S, SCHMOLL R, et al. On the study and deployment of mobile edge cloud for tactile Internet using a 5G gaming application [C]//14th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC). IEEE, 2017: 154–159
- [25] DU W Q, LIU Q, GAO Z G, et al. Seamless vertical handoff protocol for LTE-802.11p hybrid vehicular communications over the tactile Internet [C]//2018 IEEE International Symposium on Haptic, Audio and Visual Environments and Games (HAVE). IEEE, 2018: 1–5. DOI: 10.1109/HAVE.2018.8548055
- [26] IYOSHI K, TAUSEEF M, GEBREMEDHIN R, et al. Towards standardization of haptic handshake for tactile Internet: a WebRTC-based implementation [C]//2019 IEEE International Symposium on Haptic, Audio and Visual Environments and Games (HAVE). IEEE, 2019: 1–6. DOI:10.1109/HAVE.2019.8921013

作者简介



曾繁荣,福州大学电子信息工程专业在读本科生;主要研究方向为触觉通信。



房颖,福州大学物理与信息工程学院讲师;主要研究方向为触感信息与触感网。



赵铁松,福州大学物理与信息工程学院教授、福建省媒体信息智能处理与无线传输重点实验室主任、国家级青年引才计划入选者、福建省“闽江学者”特聘教授、福建省引进海外高层次人才,现任第6届中国青年科技工作者协会理事,并担任计算机学会多媒体专委会委员、电子学会青年科学家俱乐部成员及网络多媒体专委会委员、图象图形学会多媒体专委会委员、IEEE高级会员、《IET Electronics Letters》编委等;入选福建省高层次人才创新创业人才百人计划;主要研究方向为图像处理与计算机视觉、智能视频编码与通信、触感信息与触感网;承担多项科研项目;发表论文80余篇。