

中图法分类号: TN911.7 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2024)10-3022-11

论文引用格式: Shi J H, Sun S Y, Yang F Y and Chen J. 2024. Spatiotemporal modulation method for ultrasonic airborne haptic graphic presentation. Journal of Image and Graphics, 29(10):3022-3032(时佳豪, 孙士友, 杨芳雁, 陈建. 2024. 超声波空中触觉图形呈现的时空调制方法. 中国图象图形学报, 29(10):3022-3032)[DOI:10.11834/jig.230756]

超声波空中触觉图形呈现的时空调制方法

时佳豪¹, 孙士友², 杨芳雁¹, 陈建^{1*}

1. 吉林大学通信工程学院, 长春 130022; 2. 深圳市腾讯计算机系统有限公司, 深圳 518054

摘要: 目的 超声波空中触觉反馈技术为虚拟现实、混合现实提供非接触、无约束的触觉体验, 是混合现实领域触觉呈现的主要途径。使用传统调制方法对多点图形进行聚焦呈现时, 在每个调制周期内只进行单点聚焦, 发射阵列的使用率较低, 聚焦过程中产生噪声较大。针对现有调制方法的不足之处, 提出了一种新型时空调制方法来提高阵列利用率并降低聚焦时产生的噪声。**方法** 首先, 根据所需呈现图形获取多个焦点的位置数据, 计算每个焦点聚焦时发射器所需延时时间并进行储存; 其次, 将调制信号的周期按聚焦点个数进行平均分配, 并生成超声发射器驱动信号; 最后, 将驱动信号发送至延时模块, 并在调制信号周期的不同时间片内, 将各聚焦点的延时数据送入, 实现多点聚焦触觉同步的效果。**结果** 通过实验对新型调制方法进行测试, 在进行占空比为10%和20%的两点聚焦时, 相比于传统调制方法, 调制噪声分别降低了8.4%和13%, 聚焦功耗提高了80%和86%; 在进行占空比为10%和20%的四点聚焦时, 相比于传统调制方法, 调制噪声降低了6.3%和10.1%, 聚焦功耗分别提高了60%和100%。在主观图形识别实验中, 三角形、矩形、圆形的识别率分别提升了25%、19%、35%。实验结果表明新型调制方法降低了聚焦噪声, 提高了阵列利用率以及对呈现图形的识别率。**结论** 本文所提出的新型时空调制方法有效减小了聚焦噪声, 提供了更好的触觉图形反馈效果。

关键词: 图形呈现; 时空调制; 超声波反馈; 空中触觉; 多点触觉

Spatiotemporal modulation method for ultrasonic airborne haptic graphic presentation

Shi Jiahao¹, Sun Shiyu², Yang Fangyan¹, Chen Jian^{1*}

1. College of Communications Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China;

2. Shenzhen Tencent Computer System Co., Ltd., Shenzhen 518054, China

Abstract: Objective With the continuous development of computer vision, human-computer interaction, virtual reality, augmented reality, the visual and auditory interaction field has reached a commercialization level. Haptic interaction enables users to perceive the tactile characteristics of virtual graphics, and the integration with visual and audio makes virtual graphics have more physical attributes and enhances the user's immersive experience. For example, purchasers can realistically feel the texture of online materials, drive a car without having to shift their eyes to distract themselves from some screen operations, shop at home, and experience different products, and doctors can remotely perform surgical simulations and planning. Furthermore, science and technology to the good, such as the blind, deaf, and dumb and other spe-

收稿日期: 2023-10-24; 修回日期: 2024-03-12; 预印本日期: 2024-03-19

* 通信作者: 陈建 chenjian@jlu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(62332003)

Supported by: National Natural Science Foundation of China(62332003)

cial groups through the sense of touch, can also fully enjoy the “era of map reading” to avoid not seeing and hearing is not capable of using the poor situation. The extensive use of haptic feedback technology brings the user a sense of immersion, greatly enhancing the sense of immersion and the sense of reality, virtual reality, augmented reality, mixed reality, and other areas of future research focus direction. Ultrasonic airborne haptic feedback technology provides noncontact and unconstrained haptic experience for virtual reality and mixed reality and is the main way of haptic presentation in the field of mixed reality. The current ultrasonic haptic feedback devices generally use the method of rapidly and repeatedly moving the ultrasonic focus on a given path when performing multipoint focusing to present an ideal pattern, and only single point focusing is performed in one modulation cycle, with low efficiency of array usage and large noise generated during the focusing process, which affects the user’s sense of experience. To solve the above problems, a novel ultrasonic haptic multipoint synchronous focusing method based on spatiotemporal modulation is proposed in this study; it can generate multiple focal points in each modulation period, reduce modulation noise, and enhance haptic synchronization effect while eliminating the directivity between focal points. **Method** First, data are received for a plurality of focal points that must be focused, and the focusing information is sent to a calculation module via the top-level module. After receiving the coordinates of the focal points sent by the top-level module, the calculation module calculates the distance S from each ultrasound emitter to the focal point. Given that the ultrasonic emitters used are not omnidirectional, the ultrasonic emission angle has a limit. The maximum effective emission angle should be considered for calculating the path. A comparison can be made by calculating the longest emission distance L within the emission range. To achieve the focus of each transmitter transmitting signal at each focal point, the delay time of each transmitter driving signal must be controlled so that each signal is transmitted at different times, with the farthest emitter emitting ultrasonic waves first and the nearest emitter emitting ultrasonic waves last, thus ensuring that the ultrasonic waves emitted by each transmitter arrive at the same focus at the same time. The time delay required to focus each focal point is calculated and stored. Second, a modulation frequency f_0 that can be perceived by the human body is chosen, and all focal points are emitted within the same modulation period T_0 . Under the assumption that there are I focal points, the modulation period T_0 is divided into I equal parts of the time slice ($T_1 \sim T_I$), and each focal point occupies a modulation period of T_0/I , that is, each focusing time is T_0/I . The required modulation frequency signal and rendering signal are generated, and the cycle time of the modulation signals is equally distributed according to the number of focusing points to obtain the final ultrasonic transmitter driving signal. Finally, the drive signal is sent to the delay module, which sends the delay data of the previous different focus points in different time slices of the modulation signal cycle to achieve the effect of multipoint focusing haptic synchronization. **Result** Testing of the new modulation method through experiments showed that compared with traditional modulation methods, the modulation noise decreased by 8.4% and 13% when focusing on two points with duty cycles of 10% and 20%, respectively. However, the focusing power consumption increased by 80% and 86%. When focusing on four points with duty cycles of 10% and 20%, the new modulation method reduced modulation noise by 6.3% and 10.1%, while the focusing power consumption increased by 60% and 100%, respectively. In subjective graphic recognition experiments, the recognition rates for triangles, rectangles, and circles increased by 25%, 19%, and 35%, respectively. Comparative experimental results demonstrate that the new modulation method reduces focusing noise, enhances array utilization, and improves the recognition rates of presented graphics. **Conclusion** In this study, we present a novel spatiotemporal modulation method for ultrasonic focused haptics. Experimental results show that this method can considerably reduce noise focusing noise and provide stronger feedback force.

Key words: graphic presentation; spatiotemporal modulation; ultrasonic feedback; aerial tactile; multitouch

0 引言

人有五感“色声香味触”,对应五根“眼耳鼻舌身”,未来感知科技,必然是向五感全开的真人完整体验进化。目前,随着计算机视觉、人机交互、虚拟

现实、增强现实和混合现实等技术的不断发展,视觉和听觉交互领域已经达到了商业化水平。触觉交互能够让用户感知虚拟图形的触觉特征(Trinitatova和Tsetserukou, 2023),与视音频融合后能够使虚拟图形具有更多物理属性(Morisaki等, 2023),增强用户沉浸式体验(Zenner等, 2021)。例如采购人员可以

真实地感受到网上材料的纹理质地,开车时不用转移视线分神也可以进行一些屏幕操作(Pitts等,2009;Väänänen-Vainio-Mattila等,2014;Breitschaft等,2022),购物时可以坐在家中体验不同的商品,医生可以远程进行手术模拟和规划(O'Hara等,2014;Ribeiro等,2017)。进一步,科技向善,如盲人、聋哑人等特殊群体通过触觉也能充分享受“读图时代”(吴涓等,2011),避免看不到听不到则没有能力使用的局面。触觉反馈技术的大量使用将带给用户身临其境的感觉,极大增强沉浸感和真实感,是虚拟现实、增强现实和混合现实等领域未来研究的重点方向。目前,触觉反馈技术的实现主要有接触式触觉反馈技术和非接触式触觉反馈技术两种。接触式触觉反馈技术只能在设备与皮肤接触的地方产生触觉,而且附着在人体上的设备会妨碍人们在三维空间中的自由活动,同时也存在公共卫生等问题,具有较强的局限性。因此,近来逐渐将研究重点放在非接触式触觉反馈技术上。

第1个基于超声波辐射压力的触觉反馈装置由日本东京大学的Iwamoto等人(2008)开发。该装置被制作成一个六边形阵列,共使用81个超声发射器,从内到外分为12层。其通过对每一层超声波发射器延时控制发射超声波的时间,最终使所有超声波在焦点处聚焦,聚焦点的直径为20 mm,能够产生0.8 gf(gf:每克物体所产生的重力)的反馈力,只能实现单点触觉反馈。一年后,Hoshi等人(2009)设计了 18×18 阵列的超声波触觉反馈系统,这个设备可以对阵列上的每一个超声发射器进行单独的延时控制,从而在半空中实现聚焦反馈,该设备能够在阵列上方200 mm处产生直径为20 mm的聚焦点,反馈力达到1.6 gf。除此之外,还添加了红外摄像头构建触觉交互系统,其功能为跟踪用户手部位置,实现动态触觉反馈的效果。随后Hasegawa和Shinoda(2018)使用9个 18×18 超声波阵列,将其合并组成一个大的聚焦阵列,测试的合力达到7.4 gf,扩大了工作范围,提高了聚焦的强度和分辨率。Inoue等人(2015)构建了八棱镜结构超声阵列,共使用3 984个超声波发射器,并提出超声波立体触觉反馈的全空中调制方法,可以降低调制噪声,提高触觉呈现分辨率,但仍受超声波传感器发射频率的限制,分辨率为8.5 mm。2020年,Chen等人(2020)针对计数器占用资源较多的问题,提出了一种基于变长移位

寄存器的多通道超声聚焦延时控制方法。该方法只使用一个移位寄存器实现超声聚焦,不需要额外的硬件电路,从而占用较少的系统资源。Yuan等人(2019)对超声发射阵列换能器声场进行建模与仿真,对单点与多点触觉反馈的数学模型建立并优化求解,实现单点与多点的聚焦反馈。

在虚拟场景应用方面,Sand等人(2015)将超声发射阵列与手部传感器安装在头戴式虚拟现实显示器的前表面,设计出了一款能够提供三维触觉反馈的设备。Shen等人(2022)将超声波发射器阵列安装于虚拟现实设备下方,将超声波聚集到嘴部区域,在口腔附近产生持续振动的效果,增强了虚拟现实的沉浸感和真实感。Malladi等人(2023)设计了一种与虚拟现实放松场景相对应的超声触觉反馈刺激,能有效地使用户放松和减压。

在进行空间超声触觉反馈图形的呈现时,目前主要基于时空调制(spatiotemporal modulation, STM)、幅度调制(amplitude modulation, AM)以及横向调制(lateral modulation, LM)3种调制方式。幅度调制(Howard等,2019)最初是改善焦点感知的主要方法。其主要针对超声聚焦点的幅度进行调制,通过信号调幅,使焦点强度按照指定的调制波形频率进行变化,从而刺激手掌部分的机械感受器,使用户手产生相应的触觉感受。完成振幅调制需要用到脉冲宽度调制(Hasegawa和Shinoda,2018),声波波形通过控制驱动信号由占空比来决定。此方法运用于多点聚焦时,随着聚焦点数量的增加,聚焦设备所产生的声功率在这些焦点之间被分散,会使得每个焦点都变弱。当同时出现的焦点数量过大时,焦点就不再被感知。横向调制(Takahashi等,2020),是一种焦点在目标位置连续来回移动的方法(例如,沿着5 mm的轨迹)。同样是对手部的进行多点刺激,但该方法是在超声聚焦点的强度是始终维持在最高点,通过在超声聚集点的横向进行短距离的来回移动,以达到刺激手掌的机械感受器的目的,最终使手掌产生的触觉感受。多用于对单个聚焦点反馈的加强。时空调制(Frier等,2018)的方法是创造一个没有振幅调制的控制点,使控制点的强度维持在峰值,并沿着任意形状和大小的任意轨迹连续移动。连续移动一个焦点会导致可测量的皮肤位移,从而刺激手掌部分的机械感受器,产生可感受到的时空调制,使用户产生相应的触觉感受。

由于超声波触觉反馈技术可实现三维触觉反馈,产生触觉焦点的时空变化可以通过相控阵进行延时控制,具有良好的可控性和再现性。但是在多点聚焦过程中,传统的顺序时空调制噪声过大,在对复杂的多点触觉图形进行聚焦时反馈力较弱,是目前主要存在的问题。

1 算法设计思路

1.1 时空调制原理

由于超声发射器的谐振频率(一般为40 kHz~70 kHz)远大于人体可感知频率(1 Hz~1 000 Hz),因此需要在人体可感知的频率范围内选取合适的调制频率,通过对谐振频率信号进行调制,产生人体可以感知的触觉反馈。图1为采用传统顺序时空调制聚焦的方法进行两点聚焦时产生驱动波形的示意图。在最终生成的驱动波形中可以看出,在调制频率为低电平时,超声发射器不工作,造成了资源浪费,降低了使用率,聚焦反馈力度下降,降低用户的体验感,还会引起聚焦指向性问题,产生额外噪声干扰。

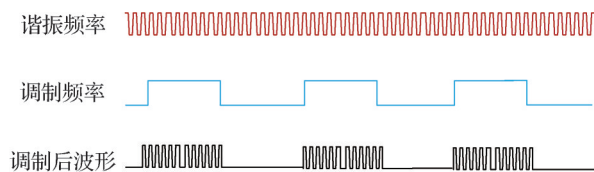


图1 单点顺序调制

Fig. 1 Single point sequential modulation

1.2 驱动波形设计思路

针对上述问题,提出了一种新型的基于时空调制的超声波空中触觉图形反馈方法。首先确定所需呈现图形的形状、大小以及方位,根据现有超声阵列焦点的大小、调制频率等条件,从图形中选取数量合适的坐标点;其次,将选取点的坐标依次传入超声波发射装置中,对多点的信息进行处理,将所有通道的聚焦延时信息计算完毕并存储后,进行调制信号以及驱动的产生,在1个周期内,将多点的延时信息分别发送至负责延时信号的延时控制模块,实现在1个周期内对多个点进行聚焦处理。

下面以两点为例,进行图示说明。图2为同时进行两点聚焦时产生驱动波形的示意图。可以看

出,在调制频率的1个周期内,对两点分别进行了一次聚焦,提高了资源使用率。

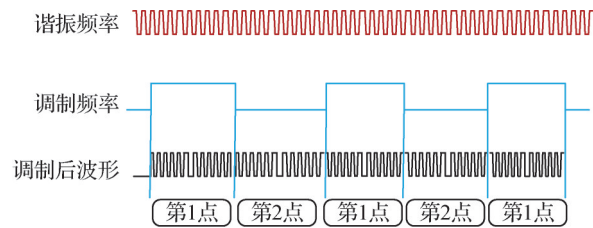


图2 新型时空调制

Fig. 2 New spatiotemporal modulation

2 新型超声聚焦时空调制方法的实现

超声波聚焦产生人体可感知触觉反馈的原理是通过超声发射器阵列所发射的超声波在空间某一点进行叠加来实现。通过控制各超声波发射器的延时时间,来控制发射超声波的相位,从而使得每个超声发射器发出的超声波在到达空间中某一点时具有相同的相位,在该点叠加增强,产生人手可感知的触觉反馈。实现该系统框架需要选取合适的调制频率,根据所需聚焦点数在调制频率内进行等分,按照顺序对各点依次进行聚焦。在对每一点进行聚焦时,需要计算出发射阵列上所有发射器的延时时间,在计算完成后,产生发射波形,在等分的时间片内完成聚焦,最终实现在1个调制周期完成多点聚焦。具体实现步骤如下:

选定人体可感知的调制频率 f_0 ,在1个调制周期 T_0 内,将所有聚焦点发射出去,假设共有 I 个聚焦点,则将调制周期 T_0 分成 N 等份的时间片($T_1 \sim T_I$),每个聚焦点占用1个时间片 T_0/I ,即每个点聚焦时长为 T_0/I 。如图3所示,在对每个点进行聚焦时,各个发射器到达聚焦点的距离不同,通过对各发射器进行延时控制,可完成超声波的同步聚焦。

首先需要进行聚焦点的延时计算与延时数据的存储。确定需要聚焦的点的个数后,分别接收所有

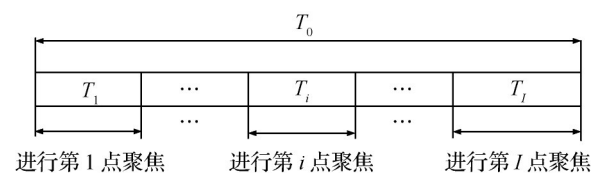


图3 单周期内实现的多点聚焦

Fig. 3 Multi-spot focus realized in a single cycle

聚焦点的坐标信息,将每一聚焦点的延时信息分别计算出来,每计算完个个焦点后,将计算完成的延时数据打包发送给负责储存延时数据的延时存储模块,具体流程如图4所示。

每个发射器到达聚焦点的距离 S_{mni} 计算方法为:首先将坐标信息发送给超声发射阵列,以第 i ($i = 1, \dots, I$)个聚焦点为例,超声发射阵列将焦点信息发送给专门负责计算延时信息的计算模块,计算模块接收到第 i 个聚焦点坐标后,分别对阵列上的每个发射器到达焦点的距离进行计算,超声发射阵列上的第 m 行第 n 列个发射器到聚焦点 i 的距离 S_{mni} 计算为

$$S_{mni} = \sqrt{(x_m - x_i)^2 + (y_n - y_i)^2 + z_i^2} \tag{1}$$

式中, x_i, y_i, z_i 为第 i 聚焦点坐标, x_m, y_n 为阵列中第 m 行第 n 列的发射器坐标;由于所采用的超声发射器不是全向的,因此超声发射角有一个限值。为计算路径应考虑最大有效发射角度。发射器是否工作的确定方法如下:发射范围内最长发射距离 $L_{\max}$ 计算为

$$L_{\max} = \frac{z_i}{\cos \frac{\theta}{2}} \tag{2}$$

式中, z_i 为聚焦点距离超声波发射器阵列的距离,即焦点的 z 轴坐标,同时也是最小发射路径; θ 为超声波发射器的衰减角(实验使用的超声波发射器的有效发射角度 $\theta = 80^\circ$);判断发射器到聚焦点的距离

S_{mni} 和最长发射距离 $L_{\max}$ 的大小,确定发射器是否在最大有效发射角度内,即是否处于工作状态。若 $S_{mni} > L_{\max}$,则该发射器处于不工作状态,若 $S_{mni} \leq L_{\max}$,则该发射器处于工作状态。

若要使各个发射器发射信号在聚焦点处聚焦,需要控制每个发射器的驱动信号的延迟时间,使各个发射器信号在不同时间发射,距离最远的发射器最先发射超声波,距离最近的发射器最后发射超声波,从而保证各发射器发射的超声波在同一时间到达同一焦点处。

由于发射器的大小不可忽略,发射器的直径为 r ,则相邻的发射器中心点之间的距离也为 r ,则任一发射器 n_a 的驱动信号相对于中心发射器 n_b 的驱动信号需要延迟的时间 τ_{mni} 计算为

$$\tau_{mni} = \frac{\sqrt{(n_a \times r)^2 + z_i^2} - \sqrt{(n_b \times r)^2 + z_i^2}}{c} \tag{3}$$

式中, $0 \leq n_a \leq n, 0 \leq n_b \leq n$,中心发射器 n_b 为距离聚焦点最近的发射器, n_a 为距离焦点最远的发射器, z_i 为聚焦点距离发射器的高度, r 为相邻两发射器中心点之间的距离, c 为超声波在空气中的传播速度。得到延时时间后,将其量化为系统工作时钟下的周期数并存储。其他聚焦点以此类推,重复以上步骤。如图5所示。将一个聚焦点的所有发射器延迟数据计算完成后,将延时数据打包发送至延时存储模块进行存储。

在完成所有聚焦点延时数据的计算以及存储后,通过时钟分频产生超声发射器驱动信号以及调制信号,并将调制信号按照聚焦点数进行均匀分片。驱动信号产生后,启动聚焦使能信号,并按照调制周

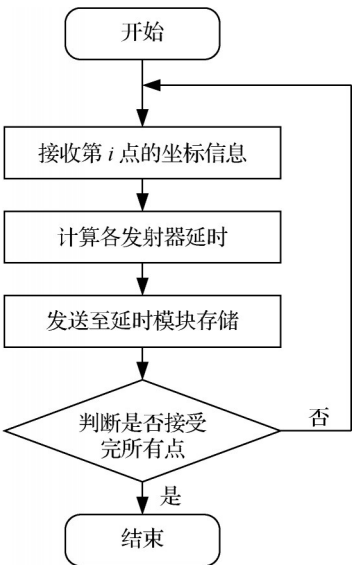


图4 接收聚焦点流程图

Fig. 4 Flow chart of receive the focus

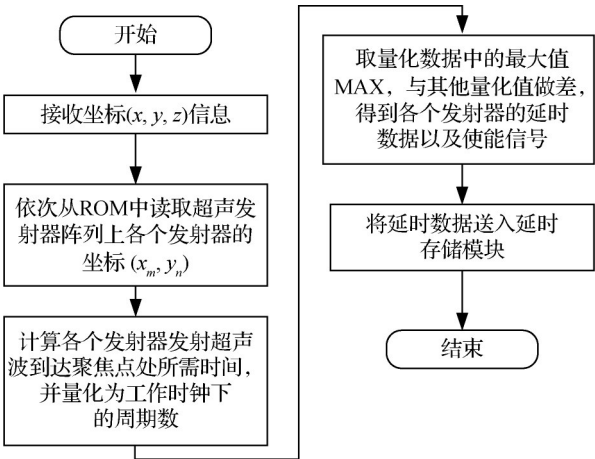


图5 计算延时信息流程图

Fig. 5 Flow chart of calculate delay information

期的时间片顺序将不同聚焦点的延迟数据发送至负责信号延时的控制模块。

接收到聚焦使能信号后,启动信号延时控制,根据接收到的延时数据,对各通道的驱动信号进行延时,经过延时后,发射各通道驱动信号,调制周期的第1时间片 T_1 发射第1个聚焦点,调制周期的第2时间片 T_2 段发射第2个聚焦点,以此类推,直至 I 点全部发射完毕,如图6所示。驱动信号经过驱动电路进行放大后,驱动该通道超声波发射器发射超声波。各个发射器发射的超声波在经过延时后在三维空间中某个位置进行叠加,从而产生人体可感知到的触觉反馈。同时,在1个调制周期内,实现了对多个聚焦点的聚焦。

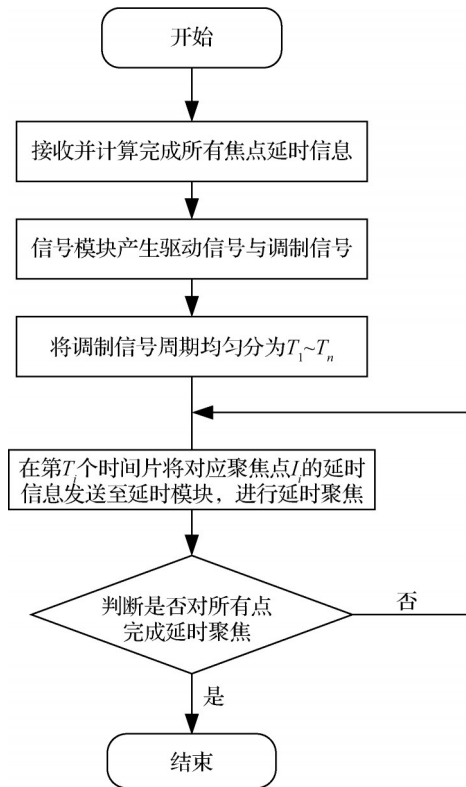


图6 多点聚焦流程图

Fig. 6 Flow chart of multipoint focusing

3 实验测试

3.1 实验环境搭建

3.1.1 超声波发射阵列

为实现超声聚焦产生触觉反馈,需要系统对多通道发射信号进行并行控制,单独计算每个发射器

的驱动信号和延时,需要丰富的逻辑资源和I/O资源,为了实现多路信号的处理与控制,在实验室自主研发的超声触觉发射装置中选用现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)作为整个超声触觉反馈系统的核心控制单元。主要由外围电路、驱动电路、超声发射阵列3部分组成。

外围电路包括时钟电路、通信接口电路和存储器电路。其中,外部时钟源为24 MHz有源晶振,可提供24 MHz时钟输入,通过时钟模块进行分频、倍频等步骤后,产生系统所需要的工作时钟。通信接口电路与上位机进行通信,接受上位机发送的关于坐标点位置、调制频率和调制波形等信息。存储器电路为FPGA提供外部存储器,在FPGA上电初始化后将存储器中程序下载到FPGA中,实现上电配置功能。

驱动电路位于FPGA和超声发射器阵列之间,主要用于对FPGA产生的超声发射信号进行幅值放大,然后将放大后的信号输入到超声发射器的引脚上驱动发射器运行。

超声发射阵列按照 18×18 的形式排列成方阵,共由324个超声发射器组成,每一个发射器的驱动信号通过FPGA计算控制延时后发出,使其按照一定的先后顺序发射超声波,使得所有发射器的超声波相位在选定交点处进行叠加,从而产生人体可感知的触觉反馈。

3.1.2 其他实验器材

实验设备包含:由MA40S4S型超声波发射器组成的实验室自研空中超声触觉发射装置(18×18 超声波传感器阵列)、Brüel & Kjær公司的4939型麦克风、连接4939型麦克风的2670型前置放大器(灵敏度可达4.0 mV/Pa)和Rigol MSO5204型号信号示波器,实验装置如图7所示。将搭建好的金属支架与实验室自研超声波触觉反馈装置放置在水平桌面上,在超声波发射器阵列上方200 mm处固定4939型麦克风,麦克风另一端连接至2670型前置放大器,放大器输出端口连接信号示波器,对麦克风接收到的波形信号进行显示。

驱动信号经过放大电路放大后由空中超声触觉发射装置发射,各个通道超声信号分别进行调制和延迟控制后,各路超声波信号在同一时间汇聚到一点从而产生人体可感知的聚焦点。实验过程中,将供电电源电压设置为24 V对超声阵列进行供电,记

录工作电流,通过计算得到功率。使用Delixi 数字噪声计进行噪声测试,将收音端口放置于人耳处进行收集并记录,得到噪声数据。移动麦克风采集焦点处附近的声压,通过前置放大器放大声压信号,由示波器采集获得实验数据。

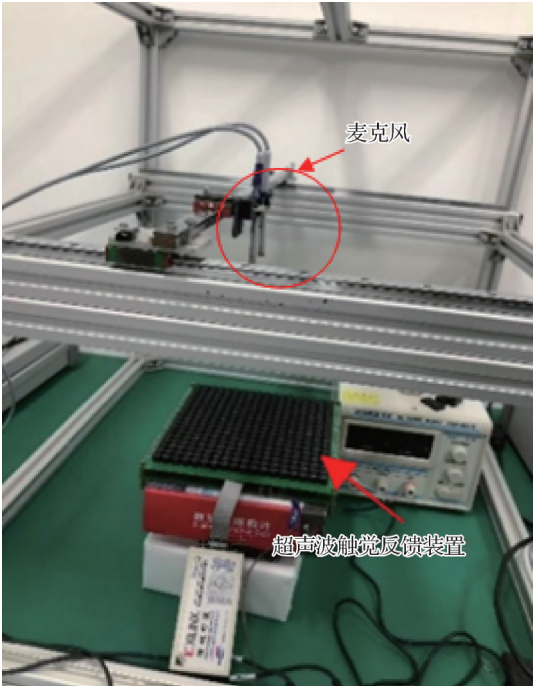


图7 实验装置
Fig. 7 Experimental installation

3.2 实验验证

首先,以位于超声波发射器阵列第1行第1列的发射器的中心点为坐标原点,建立 x - y - z 空间坐标系;其次,设置超声波发射器的驱动信号为200 Hz调制的,占空比按正弦规律变化且最大占空比为

20%的40 kHz 脉冲信号,系统延迟控制时钟为4 MHz,对焦点A(70 mm, 90 mm, 200 mm)、焦点B(100 mm, 90 mm, 200 mm)进行新型时空调制。随后,采用图7所示的实验装置,将麦克风的 z 坐标设置为200 mm、 y 坐标设置为90 mm、 x 坐标在0 mm~180 mm范围内移动(非焦点附近以5 mm为间隔,焦点附近以1 mm为间隔),测得周期内各个位置的声压值,并记录。最后,将所有数据以所有测量结果的最大声压值为基准进行归一化处理,并绘制如图8所示的曲线。

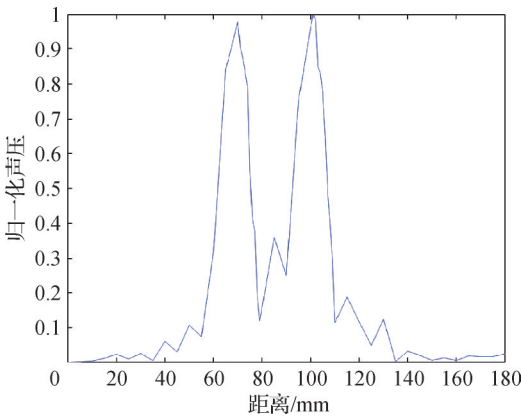


图8 焦点归一化声压分布
Fig. 8 Focus normalized sound pressure distribution

使用示波器记录下波形并使用MATLAB进行处理,并记录下功率和噪声。随后,对点A(70 mm, 90 mm, 200 mm)和点B(100 mm, 90 mm, 200 mm)两点进行顺序调制,并记录下频谱,功率以及噪声。新型时空调制的示波器图像与频谱图如图9所示。

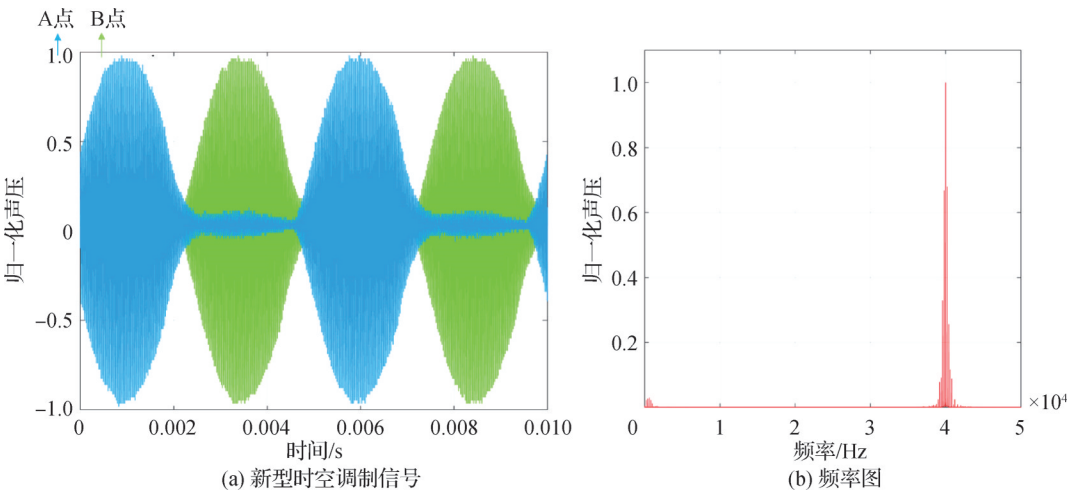


图9 新型时空调制信号和频谱图
Fig. 9 New spatiotemporal modulated signal and spectrogram ((a) new spatiotemporal modulation signal; (b) spectrogram)

顺序调制的示波器图像与频谱图如图 10 所示。两种调制方法所测功耗与噪声分别如图 11 所示。人耳可听频率范围在 20~20 kHz,由图 9 和图 10 中的频谱图可看出,在 4 k~20 kHz 内几乎没有音频分布,所以截取信号的低频段 0~4 kHz 进行分析,如图 12 所示,从低频段频谱图中可以看出,新型时空调制信号与顺序调制信号的低频段频率峰值均在 600 Hz 处,前者归一化处理后的大小为 0.028,而后者归一化处理后的大小为 0.044。根据低频段总体的频率幅值数据可以得出,在可听频率范围内,新型时空调制信号的能量小于顺序调制信号的能量。结合示波器显示信号声辐射压力时域图分析,新型时空调制在每一个周期内所有时间都发送信号,频率比较集中,所叠加产生的低频较少;而顺序调整在每

个周期内都会有近一半的时间空隙,导致叠加产生的低频较多。所以新型时空调制信号在增加功率提高聚焦反馈强度的同时,产生的噪声较小。随后,又将上述实验中驱动波形占空比调整为 10% 进行测试,将调制频率调整为 100 Hz,并在一个周期内发送 4 个点进行测试,分别将占空比调整为 2 点和 4 点,测量结果如表 1 所示。从表 1 可以看出,在使用新型时空调制时,功耗相比较顺序调制有所提高,而噪声却显著降低。且随着驱动波形占空比的增加,两者之间的差距也更加明显。

3.3 主观实验

本实验主要研究不同调制方法对人体主观感受的影响,分别使用两种调制方法进行调制,驱动超声波发射器阵列进行不同图形的聚焦,并邀请多名实

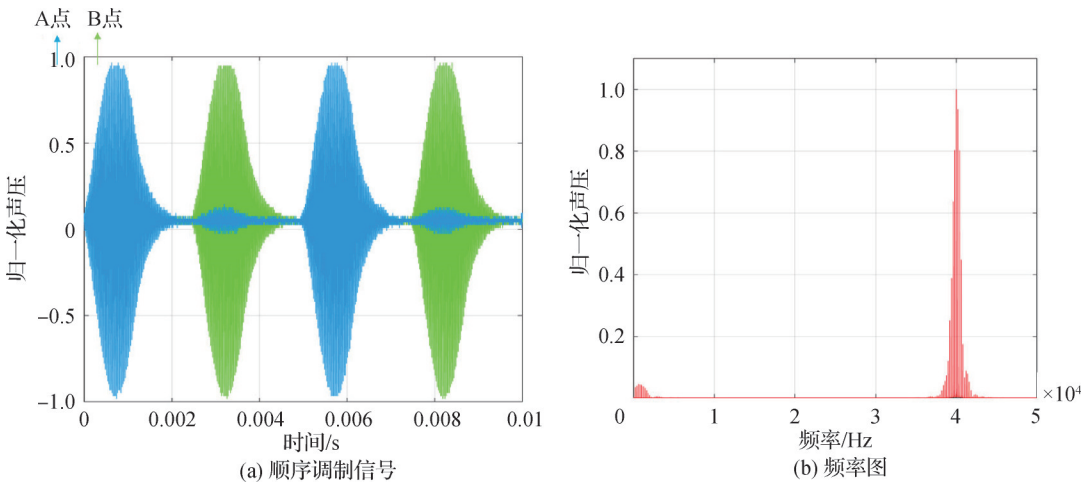


图 10 顺序调制的信号和频谱图

Fig. 10 Sequence modulated signal and spectrogram ((a) sequence modulated signal; (b) spectrogram)

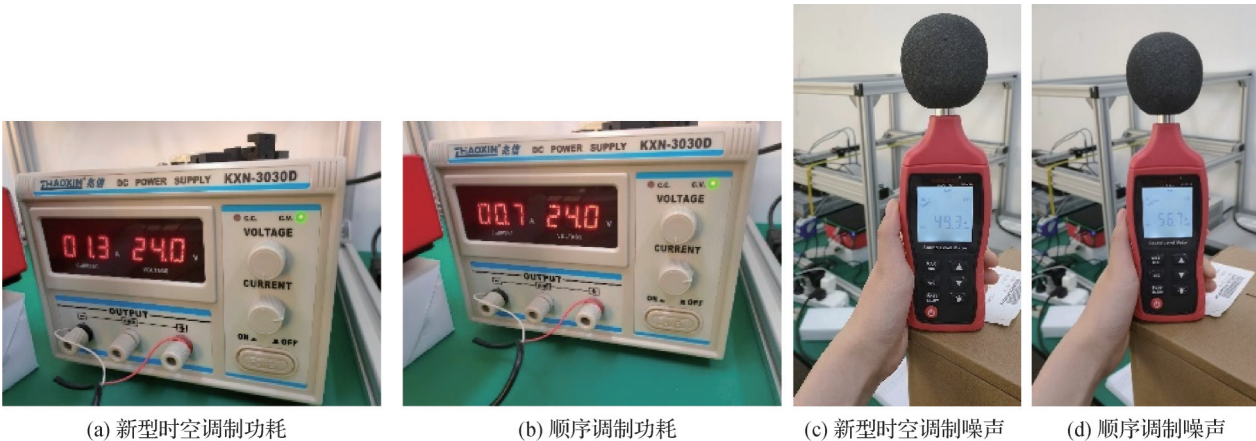


图 11 功耗与噪声测试

Fig. 11 Power and noise test ((a) new spatiotemporal modulated power; (b) sequence modulated power; (c) new spatiotemporal modulated noise; (d) sequence modulated noise)

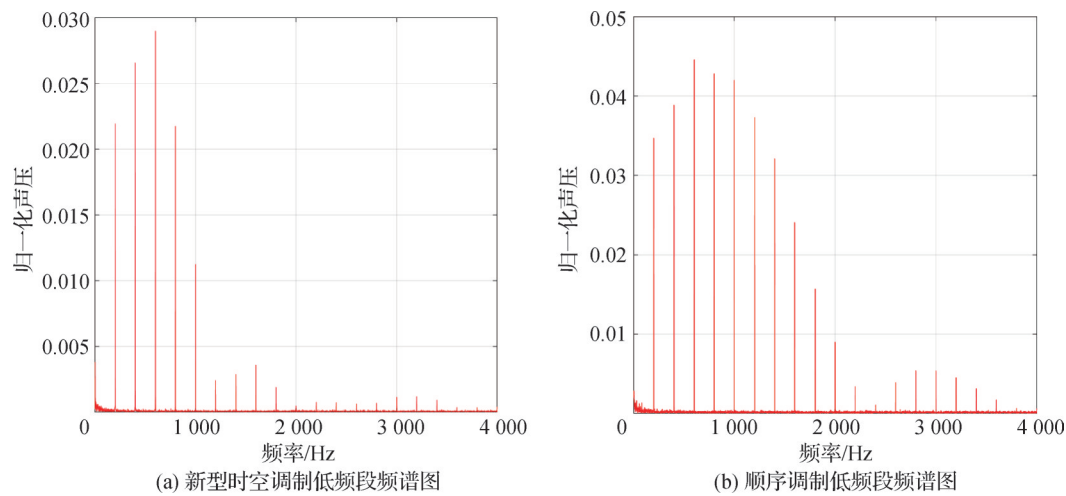


图 12 低频段频谱图

Fig. 12 Low-band spectrogram ((a) new spatiotemporal modulation low frequency spectrum diagram;
(b) sequence modulated low frequency spectrum diagram)

表 1 两种调制方法功耗与噪声比较
Table 1 Comparison of power and noise between
two modulation methods

点数	占空比/%	功耗/W		噪声/dB	
		顺序调制	本文方法	顺序调制	本文方法
2点	10	12	21.6	47.4	43.4
2点	20	16.8	31.2	56.7	49.3
4点	10	12	19.2	48.7	45.6
4点	20	16.8	33.6	57	51.2

注:加粗字体表示最优结果。

验者感受系统聚焦效果并进行评价,以此对比分析两种调制方法对人体主观感受的影响。

本实验共 16 名实验者参加,平均年龄为 24 周岁,其中包括 8 名男性和 8 名女性,16 名实验者在触觉感知和听觉方面没有任何障碍和疾病。

在实验之前,首先告知实验人员所有聚焦形状,然后分别使用两种调制方式,以随机顺序向实验人员进行展示,并要求对每一次感受到的形状进行投票。最终结果如表 2 和表 3 所示,其中第 1 行为实际聚焦形状以及模拟该形状使用聚焦点个数,下方为实验人员做出的投票选项。由实验结果可以看出,在进行点与线等简单图形聚焦时,两种调制方法都较容易识别。而三角形、矩形和圆形的图形复杂度上升,聚焦点数增加,在使用新型调制时,图形感知的正确率有明显的提升。此外,大多数实验者表明,在感受顺序调制时,可以分辨出有的图形聚焦点不是在同一时刻出现;在感受新型时空调制时,多点图形几乎是在同一时间出现,没有间断的感觉。所有参与实验者均表示在感受新型调制时,聚焦感觉明显较强,且发出的噪声相对于顺序调制有所减小。

表 2 顺序调制方法形状识别情况
Table 2 Shape recognition of sequential modulation methods

实际轨迹	两点	四点	直线(6点)	三角形(6点)	矩形(8点)	圆形(10点)	正确率/%
两点	16	0	0	0	0	0	100
四点	0	16	0	0	0	0	100
线	0	0	16	0	0	0	100
三角形	0	0	0	7	4	6	44
矩形	0	0	0	3	7	6	44
圆形	0	0	0	5	5	6	40

表 3 新型调制方法形状识别情况
Table 3 Shape recognition of novel modulation methods

实际轨迹	两点	四点	直线(6点)	三角形(6点)	矩形(8点)	圆形(10点)	正确率/%
两点	16	0	0	0	0	0	100
四点	0	16	0	0	0	0	100
线	0	0	16	0	0	0	100
三角形	0	0	0	11	3	2	69
矩形	0	0	0	2	10	4	63
圆形	0	0	0	1	3	12	75

4 结 论

本文提出一种超声波空中触觉图形呈现的时空调制方法,首先对所需呈现图形的多个焦点进行确定,通过对调制周期进行分配,按照聚焦点个数划分成对应聚焦时间片,每个时间片内完成一个焦点的聚焦,在一个调制周期内完成所有焦点的聚焦,使得每个调制周期内所有焦点都产生一次聚焦,提高发射器聚焦效率,降低聚焦噪声,产生更强的聚焦反馈。

实验结果表明,使用新型时空调制方法在进行多点聚焦时,在功耗增大近一倍的情况下,聚焦产生的噪声有显著下降,图形呈现时更连贯,且能够提供更强的聚焦触觉反馈,提升触觉交互体验沉浸感。该方法可运用于虚拟场景下的隔空手势触觉反馈,当手部模型与虚拟场景交互时,超声发射阵列可产生相应的触觉反馈,进一步提升用户体验。

本文所提方法通过新型时空调制进行多点触觉反馈时,将驱动波形占空比调整至 20% 以上时,仍然会产生不小的噪声,如何通过新型时空调整进一步减小噪声、提高聚焦分辨率以呈现人手可感知的清晰触觉图形将是后续的重要工作之一。

参考文献(References)

Breitschaft S J, Pastukhov A and Carbon C C. 2022. Where’s my button? Evaluating the user experience of surface haptics in featureless automotive user interfaces. *IEEE Transactions on Haptics*, 15(2): 292-303 [DOI: 10.1109/TOH.2021.3131058]
Chen J, Yu F, Wang Z Q and Lin L. 2020. Multichannel ultrasound focusing delay control method based on variable-length shift regis-

ter for airborne ultrasound tactile feedback. *IEEE Access*, 8: 24904-24913 [DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2970451]
Frier W, Ablart D, Chilles J, Long B, Giordano M, Obrist M and Subramanian S. 2018. Using spatiotemporal modulation to draw tactile patterns in mid-air//*Proceedings of the 11th International Conference on Haptics: Science, Technology, and Applications*. Pisa, Italy: Springer: 270-281 [DOI: 10.1007/978-3-319-93445-7_24]
Hasegawa K and Shinoda H. 2018. Aerial vibrotactile display based on multiunit ultrasound phased array. *IEEE Transactions on Haptics*, 11(3): 367-377 [DOI: 10.1109/TOH.2018.2799220]
Hoshi T, Iwamoto T and Shinoda H. 2009. Non-contact tactile sensation synthesized by ultrasound transducers//*Proceedings of the 3rd Joint EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*. Salt Lake City, USA: IEEE: 256-260 [DOI: 10.1109/WHC.2009.4810900]
Howard T, Gallagher G, Lécuyer A, Pacchierotti C and Marchal M. 2019. Investigating the recognition of local shapes using mid-air ultrasound haptics//*Proceedings of 2019 IEEE World Haptics Conference*. Tokyo, Japan: IEEE: 503-508 [DOI: 10.1109/WHC.2019.8816127]
Inoue S, Makino Y and Shinoda H. 2015. Active touch perception produced by airborne ultrasonic haptic hologram//*Proceedings of 2015 IEEE World Haptics Conference*. Evanston, USA: IEEE: 362-367 [DOI: 10.1109/WHC.2015.7177739]
Iwamoto T, Tatzono M and Shinoda H. 2008. Non-contact method for producing tactile sensation using airborne ultrasound//*Proceedings of the 6th International Conference on Haptics: Perception, Devices and Scenarios*. Madrid, Spain: Springer: 504-513 [DOI: 10.1007/978-3-540-69057-3_64]
Malladi N S S V, Paneva V and Müller J. 2023. Feel the breeze: promoting relaxation in virtual reality using mid-air haptics//*Proceedings of 2023 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct*. Sydney, Australia: IEEE: 322-327 [DOI: 10.1109/ISMAR-Adjunct60411.2023.00070]
Morisaki T, Fujiwara M, Makino Y and Shinoda H. 2023. Noncontact haptic rendering of static contact with convex surface using circular movement of ultrasound focus on a finger pad. *IEEE Transactions*

- on Haptics [DOI: 10.1109/TOH.2023.3338230]
- O' Hara K, Gonzalez G, Sellen A, Penney G, Varnavas A, Mentis H, Criminisi A, Corish R, Rouncefield M, Dastur N and Carrell T. 2014. Touchless interaction in surgery. *Communications of the ACM*, 57(1): 70-77 [DOI: 10.1145/2541883.2541899]
- Pitts M J, Williams M A, Wellings T and Attridge A. 2009. Assessing subjective response to haptic feedback in automotive touchscreens// *Proceedings of the 1st International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*. Essen, Germany: ACM: 11-18 [DOI: 10.1145/1620509.1620512]
- Ribeiro M L, Lederman H M, Elias S and Nunes F L S. 2017. Techniques and devices used in palpation simulation with haptic feedback. *ACM Computing Surveys*, 49(3): #48 [DOI: 10.1145/2962723]
- Sand A, Rakkolainen I, Isokoski P, Kangas J, Raisamo R and Palovuori K. 2015. Head-mounted display with mid-air tactile feedback//*Proceedings of the 21st ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*. Beijing, China: ACM: 51-58 [DOI: 10.1145/2821592.2821593]
- Shen V, Shultz C and Harrison C. 2022. Mouth haptics in VR using a headset ultrasound phased array//*Proceedings of 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New Orleans, USA: ACM: #275 [DOI: 10.1145/3491102.3501960]
- Takahashi R, Hasegawa K and Shinoda H. 2020. Tactile stimulation by repetitive lateral movement of midair ultrasound focus. *IEEE Transactions on Haptics*, 13(2): 334-342 [DOI: 10.1109/TOH.2019.2946136]
- Trinitatova D and Tsetserukou D. 2023. Study of the effectiveness of a wearable haptic interface with cutaneous and vibrotactile feedback for VR-based teleoperation. *IEEE Transactions on Haptics*, 16(4): 463-469 [DOI: 10.1109/TOH.2023.3265713]
- Väänänen-Vainio-Mattila K, Heikkinen J, Farooq A, Evreinov G, Mäkinen E and Raisamo R. 2014. User experience and expectations of haptic feedback in in-car interaction//*Proceedings of the 13th International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia*. Melbourne, Australia: ACM: 248-251 [DOI: 10.1145/2677972.2677996]
- Wu J, Song Z Z, Wu W X, Li L Y and Song A G. 2011. Design of image vibrotactile display system for the blind. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 41(5): 973-977 (吴涓, 宋振中, 吴伟雄, 李莅圆, 宋爱国. 2011. 用于盲人的图像振动触觉显示系统设计. *东南大学学报(自然科学版)*, 41(5): 973-977) [DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2011.05.015]
- Yuan Y Y, Long Z L, Jiang Z T and Li C. 2019. Simulation for multi-point haptic feedback based on ultrasound phased array//*Proceedings of 2019 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*. Dali, China: IEEE: 2445-2449 [DOI: 10.1109/ROBIO49542.2019.8961576]
- Zenner A, Ullmann K and Krüger A. 2021. Combining dynamic passive haptics and haptic retargeting for enhanced haptic feedback in virtual reality. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 27(5): 2627-2637 [DOI: 10.1109/TVCG.2021.3067777]

作者简介

- 时佳豪,男,硕士研究生,主要研究方向为超声空中触觉技术。E-mail:995684921@qq.com
- 陈建,通信作者,男,教授,主要研究方向为智能感知与多模态人机交互技术、阵列信号处理。
E-mail:chenjian@jlu.edu.cn
- 孙士友,男,工程师,主要研究方向为生物特征识别技术和创新型人机交互技术。E-mail:friendsun@tencent.com
- 杨芳雁,女,博士研究生,主要研究方向为超声空中触觉技术。E-mail:3158679191@qq.com