

多通道延时遥交互研究综述

王海鹏 黄天彪 任崇帅 姚五一
(西北工业大学计算机学院 西安 710129)

摘要 多通道遥交互(Multimodal Tele-interaction, MMTI)旨在通过使用多种交互设备和协作方式,并利用多交互通道间的互补特性,以便有效传达和理解用户交互信息,提高交互效率,增进交互自然性,最终使用户能够以“预期的想法”完成遥交互任务。近年来,随着多通道遥交互的发展,人们对深空、深海和远程医疗的探索和开发不断增强,由于通信时延的约束,多通道遥交互面临着交互异步和通道缺失等问题,对用户行为、心理和认知等人素特性产生了根本影响,切断和阻碍了交互通道的连续性、实时性和自然性,降低了交互的用户体验,并进一步影响了系统的有效性,因此迫切需要大时延约束下的多通道遥交互技术进行研究。分析了国内外研究现状,给出了遥交互的一个定义,讨论了遥交互研究问题和关键技术(包括时延、异步和缺失问题),讨论了其关键应用领域,最后展望了遥交互的发展趋势和研究挑战。

关键词 遥交互,多通道交互,通信时延,人素特性,交互异步

中图分类号 TP242 文献标识码 A

Survey of Multimodal Delay Tele-interaction

WANG Hai-peng HUANG Tian-biao REN Chong-shuai YAO Wu-yi

(School of Computer Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

Abstract Multimodal Tele-interaction aims to use a variety of interactive modal and collaborative way and complementary characteristics and information between multiple modal, to communicate and understand the user interaction desires, improve the efficiency of interaction, enhance the naturalness of interaction, and enable users to complete the remote tasks in their “expectations”. Recently, with the applications of multimodal tele-interaction on the space exploration, deep sea exploitation and tele-surgery, the delay is introduced into the process of tele-interaction, which is produced mainly by the communication delay and bandwidth. The significant delay causes the problems of asynchronous interaction and lack of interaction modal, which results a fundamental effect on the user's behavior, psychological and cognitive characteristics, breaks and blocks the continuity, real-time and naturalness of interaction, not only degrade interactive user experience, but also is difficult to guarantee validity. The article defined the concept of multimodal tele-interaction, presented its key applications, and discussed the key technology, including the delay issue, asynchronous interaction and lack of interaction modal. Finally, we presented research challenges in the future.

Keywords Tele-interaction, Multimodal tele-interaction, Communication delay, Human factor, Asynchronous interaction

1 引言

多通道遥交互技术广泛应用于深空探测、深海探索和远程手术等应用中,它旨在通过综合使用用户的多种交互功能方式即效应通道和感觉通道,以并行和协作的方式完成与设备的远程交互任务。它与传统的单一通道交互的最大不同之处在于多种交互方式的同时使用以及来自多个交互通道的信息整合^[1]。其中,由于通信时延引起的多通道遥交互异步、缺失等问题是一种普遍存在的现象。大时延不但引起人与设备交互性能的不稳定,而且会大幅度降低远程信息的呈现能力及用户体验^[2]。例如,在深空探测多通道遥交互系统中,地面

控制中心和月球车之间的地月通信时延约为 15s 左右,延时不但影响闭环控制系统的稳定性,导致控制指令混乱、数据传输的有效性差等问题,而且限制了地面控制中心对月球表面环境的感知和判断能力,导致地面端操作员的交互行为、心理和认知出现“质”的变化,最终可能导致交互失败。因此,对大时延交互技术和多通道延时交互的研究具有重要价值。

2 遥交互的概念

遥交互(Tele-interaction)是一类特定约束条件下的新型交互模式,广泛存在于远距离人机交互应用中,例如,空间探索、深海探测和远程医疗^[3-9]。其形式表现为在空间上交互两端

本文受 CAST-BISEE 基金(2015MC1001061),中央高校基本科研业务费专项(3102015BJ007),西北工业大学研究生创新创业种子基金(Z2016201720, Z2016194),西北工业大学研究生双创项目,航天科技支撑计划项目(2014HTXGD),陕西省科技攻关项目支持项目(2016GY-100)资助。

王海鹏(1975—),男,博士,副教授,CCF 会员,主要研究方向为人机交互、机器学习, E-mail: haipeng@nwpu.edu.cn;黄天彪(1985—),男,硕士生,主要研究方向为人机交互;任崇帅(1992—),男,硕士生,主要研究方向为人机交互;姚五一(1985—),男,硕士生,主要研究方向为人机交互。

分离,在时间上存在远超人体感官体验的延迟特性。据此可给出一个定义:大时延约束下的一种人机分离交互模式,具有典型的大时延约束、交互环路分离和交互通道异步和缺失的特点。其中,遥交互不但会因时空距离而导致大时延,而且也存在通信带宽所引起的时延效应。

遥交互包含多通道交互的特性,但与传统多通道交互相比,遥交互下的时延引入导致了許多独特的交互问题^[10]。狭义上讲,多通道延时交互是指用户对远端设备进行多种连续、直接的控制,在用户与远端设备之间形成闭合的、多个通道的控制回路,在此控制回路中存在较大时间延迟;广义上讲,多通道延时交互泛指在用户和远端设备中间的多路信息通道存在较大通信时延的人机交互系统。大时延约束下的多通道遥交互对用户行为、心理和认知产生根本影响,难以保障交互的用户体验和交互通道的有效性。如果无法全面了解多通道延时交互中的人素特性,就极易误导用户的操作行为,最终导致交互失败。从人素特性研究的角度,传统人素特性研究主要针对用户在某种工作环境中所引起的身体结构、生理和心理等变化,重在研究用户自身局限性^[11-13]。对于遥交互下的人素特性,其研究重点在于用户行为、心理和认知层面,更多关注交互环路中用户感知和行为特性,以及由其导致的交互环路可靠性问题。一个典型的例子:地面与地球同步轨道卫星的遥交互中,5~7s的回路通信时延使得操作人员难以实时且充分地获取操作现场的反馈信息,重要信息的感知滞后性导致操作人员的空间感和时间感分离,使其心理和认知负担过重,最终导致交互紧张和任务疲劳^[14]。

3 研究问题和关键技术

3.1 时延问题

大时延约束对遥交互用户行为、心理和认知等人素特性产生了根本影响。当用户在执行遥交互任务时,延时会显著降低人的运动感觉以及任务表现,因此需通过采用特殊的“等待”或减少控制精度来解决通信时延对用户性能的影响^[10]。

3.1.1 视觉通道影响

研究表明,视觉通道上250~500ms的延时会交互任务产生不同程度的影响^[15]。例如,Liu等^[16]在探索延时对视觉通道的影响研究中发现,500ms的差异可以对视觉分析产生重大的影响。最新的调查研究表明,在远程机器人手术中延迟是影响视觉反馈的重要因素。其中,延迟达到250ms时,会对任务的完成时间和任务执行的灵活性产生重要影响。此外,当延迟达到400ms时,操作员就需要采取“执行等待”的策略^[17]。在涉及视觉通道的信息呈现中,认知通道上的延迟会大幅影响用户判断,视觉反馈上的延迟会极大地降低任务的执行能力^[18-20]。Brutlagz指出在纵向研究用户的视觉搜索行为时,看似无关紧要的时间单元差异对用户行为有显著的影响^[21]。

3.1.2 力-触觉通道影响

时延是影响触觉信息交互性能的另一个重要因素。基于Fitt's Law理论可以分析不同时延对交互的影响程度^[22]。Mackenzie等^[23]在模拟触觉延时对任务难度的影响实验中发现,时延会使任务的难度成倍增加,225ms的时延使用户更难完成任务。Miyasato等人^[24]利用意见评分等级(MOS)的时延评估方法,综合研究了视触觉通道信息间的时延为100~

120ms,指出触觉时延增加了完成任务的时间并影响了用户下一步的运动方向。在虚拟环境中完成相互协作任务时,用户“预期移动”的这种自然趋势受到触觉延时的严重影响^[25]。Kaaresoja等^[26]在研究触觉反馈时延对设备的可用性和用户体验的影响时指出,在18~118ms的力反馈延时范围内不会显著破坏用户行为,但延迟使用户体验变得很糟。在力反馈遥交互手术中,外科医生在500ms延迟下能够完成所有的实验任务,但大时延会影响任务的完成时间(TCT)和错误率^[27]。例如,远程手术中,遥交互任务的延迟从0ms增加到500ms时,任务完成时间显著增加。Anvari等^[28]在力触觉延迟对远程手术任务的影响实验中发现,随着延迟增大,错误率显著上升,任务完成时间和错误率呈显著相关。

3.1.3 晕动症效应

在长航时沉浸式的虚拟环境中,时延会造成用户实际的身体动作和图像显示动作间的“时空扭曲”现象,用户会出现诸如眼部问题、定向障碍、平衡障碍以及恶心等晕动症现象,这极大地降低了用户的存在感和现实感^[29]。晕动症的严重程度随时间的增加而增强^[30]。Riccio指出^[31]在HMDs(穿透式头盔显示器)的实验中,大的时延会导致晕动症的发生,出现虚拟影像漂浮的问题。文献^[32-36]提到,在沉浸式虚拟环境中存在低延迟是有必要的,只有这样才能使得用户的运动和图像运动分离,但是目前的研究尚不清楚这些影响对系统的更新率有哪些滞后影响。

3.2 交互异步

交互的发生至少需要有两个物体和两个行动^[37]。例如,在视听双通道下,感知到的延时比单通道下的显著得多,这是因为在双通道交互下视觉反馈比听觉反馈更能引起受试者注意,若存在一定的延迟条件,则会引起交互通道的异步^[38]。

3.2.1 交叉同时性

交叉同时性(Cross-modal simultaneity)在人类对外界形成感知时非常重要。它提供了时间线索,对感知对象和事件形成连续知觉,有助于区别目标和背景^[39],因此可以通过控制单个通道信息的传输速度来找出用户对多个通道的感知顺序和时间^[40]。文献在研究多通道视觉与听觉信息反馈中指出,异步时延达到250ms时,两种信息才能被用户同时接受。显然,多通道的同步和异步过程从低级的神经编码到更高级的认知取决于很多因素。例如,当视觉和听觉同时刺激大脑时,听觉有更快的处理过程,以使用户更容易发现视听异步^[10,41]。在虚拟环境下模拟的远程监控系统中,视-触事件同时呈现在窗口上的异步时间大约为几十到几百毫秒,在交叉同时窗口收到以下信息的干扰,如感觉运动反馈、反馈信号的丢失以及之前的适应性^[42]。尽管对交叉同时性已有了一些深入调查^[43-49],但是在多通道交互接口上延时如何影响交叉同步以及有什么样的自发行为,目前对此的研究较少。在一项重要研究中,Vogels^[50]指出即使触觉异步超过50ms,受试者都能很容易地检测到视觉信息,用户同时接受视觉和触觉刺激时,都会被动地紧握操纵杆,这变相反映用户的紧张情绪。Thompson等人^[51]对比了本地外科手术和由远程操控的力反馈手术,2s的通信时延显著影响了医务人员执行手术的性能,异步力反馈比同步使用工具的外科医生完成任务所需的时间更多。

3.2.2 交互阈值

输入到感官的信息具有到达时间差异,对一事物物的多种感觉由不同的物理到达时间阈值来刺激眼睛和耳朵^[52]。当声音到达的时间领先于视觉 20ms 且视觉高达 150ms 时,其他的感知才能同时到达^[53]。在单通道和多通道的时间感知研究上,提出了常用的两种方法:SAS(同步-异步的判断)和 TOL(时间顺序的判断)^[54]。先前已有一些相关研究,如文献^[55](视-听)、文献^[56](视-触)、文献^[57](听-触)。作者们通过使用时间顺序判断方法(TOL)感知顺序,发现了时间顺序感知的临界值:一个视觉和触觉的异步刺激是 68ms;听觉和触觉时间顺序感知的异步刺激阈值最小应设计为 43ms;音频先于 25ms 和触觉先于其他通道信息到达之前 45ms 时,只有 75% 的音频和触觉刺激被成功感知^[49]。Dixon 的研究表明^[48],听觉语言落后于与之匹配的视觉语言,被认为约有 250ms 的异步。被定义为激励呈现异步(SOA)的人最有可能判断声音和视觉是同步的,当声音到达的时间领先于视觉 20ms 且视觉高达 150ms 时,其他的感知才能同时到达^[46]。

3.3 交互缺失

大时延所引起的交互通道缺失使得用户难以全面掌握远端环境信息,无法进行正确的指令操作,容易造成遥交互的失败或者远端设备的损坏^[14]。在临场感系统中用户需要高度的沉浸感。Brandi 等人^[58]指出在实时的应用程序中,触觉通道上的采样频率和传输速率通常为 1Hz 和 1000 包/s,可能会导致数据包通信出现网络拥塞和丢失;同时由于时延的存在,音频和视频通道也会增加丢包率,导致交互通道上的信息缺失,进而影响用户的感知。

3.3.1 交互通道的适应性

交互通道经过连续刺激后,其敏感性降低的现象称为适应性。交互通道被持续刺激一段时间后,在刺激不变的情况下,随着延时的出现,感觉会逐渐减少以致消失。远程手术时,视觉与力触觉的同时性很重要。通信时延引起的视觉丢包很大程度上影响了医务人员的会诊质量,使其“无法下手”。关于视觉丢包的损失,Shi 等人^[59]指出当视觉延迟增加 25ms 时,视觉丢包率增加约 10%,用户能很容易地区分这是一个流畅的视频流还是迟滞丢包的视频流。同时,随着时延的增加,当触觉通道逐渐适应了视觉反馈通道的丢包时,用户就会习惯这种“缺失”现象。从视-听异步的研究中也发现了类似的适应效应^[60]。

3.3.2 交互通道的相关性

在一定条件下,感觉器官对其适宜刺激的感受能力将受其他刺激的影响而降低,由此使用户感受性发生变化。Tam J 等人^[61]在实验中使用一个视听通讯设备,在参与者的交互过程中,同步增加音频和视频的延迟来验证延迟对交互的影响。结果表明:时延显著地影响用户的舒适性和自然性,同时会削弱两个通道(音频和视频)的可用性,当延迟达到 500ms 时,只有音频通道可用。在只有音频信息的条件下同时进行了比较视听的实验,视频削弱延时 500ms 时对话的自然性产生了负面影响,而音频延时削弱 400ms 以上时会对对话产生负面影响。文献^[62-63]指出,视觉通道上的缺失对用户的交互产生负面影响;音频通道的缺失导致人们更频繁地打断对方,并付出更多的时间获得控制或澄清谈话。

4 应用领域

随着遥交互技术的快速发展,其应用领域日益拓展^[64]。

4.1 深空探测

遥交互技术广泛应用于深空探测的遥操作中。例如,基于视觉临场感的遥操作系统^[65-68]以视频信息的方式直接将机器人的状态和执行信息反馈给用户,体现了一种自然的交互过程。Held 等^[69-70]研究了遥交互下将“执行等待”模式(move-and-wait)应用在遥操作应用中。Buss^[71-72]研究了基于多模态的临场感遥操作应用。Stassen 等^[73-74]研究了遥操作中的临场感问题,从人机交互的角度发现了交互通道的缺失是导致遥交互失效的重要因素,而临场感技术是有效处理该问题的方法之一。

国内在空间探索中的应用起步较晚,但相关科研机构已经开展了这方面的研究工作,并取得了一定的成绩^[75-81]。东南大学宋爱国等^[82]针对双边交互通讯环节上存在的大时延(>2s)问题,指出时延是造成虚拟环境中力觉和运动信息缺失的本质原因,并提出相应的人素理论解决办法。

4.2 深海探索

国外在深海探索领域中对遥交互技术的应用也开展了很多研究,例如:海洋立体测绘^[83]、海底地质采样^[84-85]和深海遥操作^[86]等。其中,时延是制约深海探索的关键问题之一^[87]。Labonte^[88]研究了深海遥操作相关的多通道问题,提出了基于虚拟现实的交互方法。Huber 等^[89-90]研究了遥操作中基于多通道实时的真图 3D 环境重建问题,针对环境中的地面、目标和背景提出了基于真实感图像的环境重建方法。

国内在该领域也取得了显著的成就^[91]。在观测方面,高艳波等人^[92]指出发展海底多平台立体观测技术、数据通信和组网技术,建立长期的水下或海底多通道交互观测网,为今后的深海遥交互数据的采集有重要作用。其他方面的研究包括:通过远程操作辅助机械手实现海底钻机水下钻杆自动加接;梁睿思等人分析了时延引起信息呈现的不确定性,从用户的角度出发,提出了载人潜水器遥交互的研究方法。

4.3 远程医疗

在远程医疗方面,国外从最初的电视监护、电话远程诊断等单通道模式发展到利用高速网络进行数字、图像、语音的多通道综合传输,实现了语音和高清晰图像的交流,为多通道遥交互的应用提供了更广阔的发展空间,并且开展了许多应用实例^[93-94]。具有代表性的系统为 UIC-EVL 实验室的 Tera-Vision 和 SAGE 系统^[95-96],其主要利用图像、视频压缩技术降低网络带宽的占用率,减少信息流交互的异步和缺失;Friesen 等人^[97]采用视频捕获技术来同步多路视频流,处理了时延引起的交互异步问题,但是目前只局限于单通道交互;Ottawa 大学的 Thakur Y 等人^[98]研究了遥交互中的时延问题,没有提供前端的力反馈信息,缺乏真实的临场感,不利于用户操作。

国内也开展了一系列多通道远程手术的研究^[99-100]。北京航空航天大学 and 海军总医院合作开发了 BH-7 机器人系统,为了解决卫星通信时延问题,其采用虚拟手术技术将远程的视频图像与预测的虚拟图像相融合,降低时延对系统及用户特性的影响;哈尔滨工业大学的刘浩等提出基于实时三维医学模拟图像的导管介入机器人系统,由于该系统采用的是

主机构,而且缺乏实时动态的力反馈功能,使得医护人员的传统经验不能得到充分发挥,降低了用户的操作行为。

5 发展趋势和挑战

随着遥交互应用领域的不断扩大,环境的非结构化以及非确定性因素日益增加,任务复杂性也不断增强,大时延约束下的多通道遥交互面临巨大挑战。未来发展趋势和挑战集中在以下几个方面。

5.1 复杂任务协同遥交互

面向复杂操作任务的多人-多机遥交互技术是未来空间、深海和远程医疗遥交互的发展趋势之一。随着人们的不断开发和距离的延伸,势必会导致通信时延的进一步增大,这对多通道延时遥交互提出了更高的要求。如今,遥交互大多针对单操作者单操作对象;然而,由于遥交互任务的复杂性,往往需要考虑在不同交互方式、不同网络、不同平台之间的无缝过渡和扩展,支持用户通过通信网络使用多种简单的自然方式进行交互,因此如何实现多人-多机协调、合作控制完成复杂的遥交互任务也是下一步需要研究的内容。例如:基于分布式的遥交互控制体系能够支持多人不同控制平台的遥交互远程执行能力,适合于不同领域专家在不同地方对远程执行机构实现协同遥交互。

5.2 遥交互的性能评价体系

鉴于遥交互中人素特性的重要性,需要建立起完善的性能评价体系。目前已有相关文献进行了研究^[101-103],但是以上均只针对用户的某一方面或某一因素进行了评价,不能体现用户的整体性能,其中一些评价方法也不是完全针对遥交互中用户的人素特性。目前,用户与机器人进行远程交互时,用户对机器人有几个自由度等具体指标并不是很关心,关心的是机器人是否好用,操作起来是否得心应手,即能否可靠、方便、高效地进行遥交互,完成预期的交互任务,因此需要建立一种“以人为本”的综合用户性能指标来反映整体的用户性能水平,使用户和操作员有一个明确的评价指标,使设计人员有一个最终的优化目标。具体而言,不仅需要拟订遥交互中典型任务的用户影响机理,还需要针对遥交互的不同环节拟订具有针对性的性能指标,最终形成一套科学实用的性能评价体系,以促进遥交互的研究朝着量化的方向发展。

5.3 遥交互的仿真环境建模

对于大时延遥交互,建立时延交互的仿真模型对相关技术的研究和推动至关重要。在仿真模型中可以融合交互系统的状态和控制参数,对遥交互的不同因素进行预演^[104]。早期的交互环境建模一般通过主从之间简单的位置和力跟踪来实现,由于主从之间的信息交互有限,多采用“移动-等待-移动”的策略,因此不但降低了系统工作带宽,而且造成了力信息的模糊性。这不仅加重了操作人员负担,同时使得作业方式不灵活。目前普遍采用通过虚拟预测仿真增强现实的环境建模的方法,遥交互系统不再单纯地完成主、从端的位置和力反馈,还可以传递更为丰富有效的控制和状态信息,提高了交互系统的可操作性。因此,如何综合改进现有模型,建立一种既能精确描述遥交互中用户与环境接触的动力学特性,又易于用户人素参数在线辨识的模型至关重要。

结束语 多通道延时遥交互有着巨大的应用价值,在深空探测、深海探索和远程医疗中应用日益广泛。本文针对遥

交互在各个领域内的应用,定义了遥交互的概念,从应用领域出发,对大时延约束下的多通道遥交互的研究背景、关键技术和国内外有关研究进行了综述分析,指出了建立合理的多通道延时仿真环境是探讨多通道延时遥交互的必要手段,在此基础上讨论了遥交互的发展趋势和挑战。

参考文献

- [1] 董士海,王坚,等. 人机交互和多通道用户界面[M]. 北京:科学出版社,1999.
- [2] 周芝庭,帅立国,等. 互联网应用中触觉通信时延问题分析[J]. 测控技术,2008,27(4):53-55.
- [3] VITTORIAS I, KAMMERL J, HIRCHE S, et al. Perceptual coding of haptic data in time-delayed teleoperation[C]// EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. 2009:208-213.
- [4] HIRCHE S, BUSS M. Transparent data reduction in networked telepresence and teleaction systems. part ii: Time-delayed communication[J]. Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 2007, 16(5):532-542.
- [5] HINTERSEER P, STEIBACH E, CHAUDHURI S. Model based data compression for 3D virtual haptic teleinteraction[C]// Digest of Technical Papers, International Conference on Consumer Electronics. 2006:23-24.
- [6] SUOMELA J. Tele-presence Aided Teleoperation of Semi-autonomous Work Vehicles[D]. Helsinki University of Technology, 2001.
- [7] 朱士俊. 远程医学的建立和发展[J]. 解放军医院管理, 1998, 5(3):297.
- [8] 张珩,李庚田. 遥科学的概念、应用与发展[J]. 中国航天, 1997(11):15-20.
- [9] SATO K, HISATAKA T. Unmanned system for heavy construction equipment[C]// Proc. of the 5th Int. Symp. on Robotics in Construction. Tokyo, Japan, 1988:449-458.
- [10] FERRELL W R. Remote manipulation with transmission delay [J]. IEEE Transactions on Human Factors in Electronics, 1965(1):24-32.
- [11] PAVLOVYCH, ANDRIY, STUERZLINGER W. Target following performance in the presence of latency, jitter, and signal dropouts [C]// Proceedings of Graphics Interface Canadian Human-Computer Communications Society. 2011:33-40.
- [12] PANTEL L, WOLF L C. On the impact of delay on real-time multiplayer games[C]// Proceedings of the 12th International Workshop on Network and Operating Systems Support for Digital Audio and Video. ACM, 2002:23-29.
- [13] KAHNEMAN D. Attention and effort[M]. Englewood Cliffs, NJ:Prentice-Hall, 1973.
- [14] 黄攀峰,刘正雄. 空间遥操作技术[M]. 长沙:国防工业出版社, 2015.
- [15] YORIZAWA I, TAKIKAWA K, OKUBO S, et al. Subjective effects of talker echo and transmission delay in video conferencing via communication satellite [J]. Trans. IECE Japan, 1981, 64(11):1281-1288.
- [16] LIU Z, HEER J. The effects of interactive latency on exploratory visual analysis[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2014, 20(12):2122-2131.
- [17] KIM T, ZIMMERMAN P M, WADE M J, et al. The effect of

- delayed visual feedback on telerobotic surgery[J]. *Surgical Endoscopy And Other Interventional Techniques*, 2005, 19 (5): 683-686.
- [18] SMITH K U, WARGO L, JONES R, et al. Delayed and space-displaced sensory feedback and learning[J]. *Perceptual and Motor Skills*, 1963, 16(3): 781-796.
- [19] FERRELL W R, SHERIDAN T B. Remote manipulative control with transmission delay[J]. *IEEE Transactions on Human Factors in Electronics*, 1963, HFE-4(1): 25-29.
- [20] SMITH W M, MCCRAY J W, SMITH K U. Delayed visual feedback and behavior [J]. *Science*, 1960, 132 (3433): 1013-1014.
- [21] BRUTLAG J. Speed matters for Google web search[R]. Google, June, 2009.
- [22] JOTA R, NG A, DIETZ P, et al. How fast is fast enough?: a study of the effects of latency in direct-touch pointing tasks[C]// *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. ACM, 2013: 2291-2300.
- [23] MACKENZIE IS, WARE C. Lag as a determinant of human performance in interactive systems[C]// *Proceedings of the INTERACT'93 and CHI'93 Conference on Human Factors in Computing Systems*. ACM, 1993: 488-493.
- [24] MIYASATO T, NAKATSU R. Allowable delay between images and tactile information in a haptic interface[C]// *International Conference on Virtual Systems and MultiMedia*, 1997. IEEE, 1997: 84-89.
- [25] JAY C, GLENCROSS M, HUBBOLD R. Modeling the effects of delayed haptic and visual feedback in a collaborative virtual environment[J]. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI)*, 2007, 14(2): 8.
- [26] KAARESOJA T, ANTTILA E, HOGGAN E. The effect of tactile feedback latency in touchscreen interaction[C]// *2011 IEEE World Haptics Conference (WHC)*. IEEE, 2011: 65-70.
- [27] HIRZINGER G, BRUNNER B, DIETRICH J, et al. ROTEX-the first remotely controlled robot in space[C]// *1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1994. IEEE, 1994: 2604-2611.
- [28] ANVARI M, BRODERICK T, STEIN H, et al. The impact of latency on surgical precision and task completion during robotic-assisted remote telepresence surgery[J]. *Computer Aided Surgery*, 2005, 10(2): 93-99.
- [29] LEWIS C H, GRIFFIN M J. Human factors consideration in clinical applications of virtual reality [J]. *Studies in Health Technology and Informatics*, 1997: 35-58.
- [30] LAWTHORPE A, GRIFFIN M J. The motion of a ship at sea and the consequent motion sickness amongst passengers[J]. *Ergonomics*, 1986, 29(4): 535-552.
- [31] HETTINGER L J, RICCIO GE. Visually induced motion sickness in virtual environments[J]. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 1992, 1(3): 306-310.
- [32] WLOKA M M. Lag in multiprocessor virtual reality [J]. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 1995, 4(1): 50-63.
- [33] LIU A, THARP G, FRENCH L, et al. Some of what one needs to know about using head-mounted displays to improve teleoperator performance[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1993, 9(5): 638-648.
- [34] THARP G K, LIU AM, FRENCH L, et al. Timing considerations of helmet-mounted display performance[C]// *SPIE/IS&T 1992 Symposium on Electronic Imaging: Science and Technology*. International Society for Optics and Photonics, 1992: 570-576.
- [35] LIU A, THARP G, HIROSE M, et al. Visual factors affecting human operator performance with a helmet-mounted display [R]. SAE Technical Paper, 1991.
- [36] HELD R, DURLACH N. Telepresence, time delay and adaptation[J]. *Pictorial Communication in Virtual and Real Environments*, 1991: 232-246.
- [37] DWYER T F. Telepsychiatry: psychiatric consultation by interactive television[J]. *American Journal of Psychiatry*, 1973, 130 (8): 865-869.
- [38] NORDAHL R. Self-induced footsteps sounds in virtual reality: Latency, recognition, quality and presence[C]// *The 8th Annual International Workshop on Presence (PRESENCE 2005)*. 2005: 353-355.
- [39] MOUTOUSSIS K. Functional segregation and temporal hierarchy of the visual perceptive systems[J]. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 1997, 264(1387): 1407-1414.
- [40] FERRELL W R. Remote manipulation with transmission delay [J]. *IEEE Transactions on Human Factors in Electronics*, 1965, (1): 24-32.
- [41] DIXON N F, SPITZ L. The detection of auditory visual desynchrony[J]. *Perception*, 1980, 9(6): 719-721.
- [42] SHI Z, ZOU H, MULLER H J. Temporal perception of visual-haptic events in multimodal telepresence system[M]. In *Tech*, 2010.
- [43] VATAKIS A, SPENCE C. Evaluating the influence of frame rate on the temporal aspects of audiovisual speech perception [J]. *Neuroscience Letters*, 2006, 405(1): 132-136.
- [44] VAN ERP J B F, WERKHOVEN P J. Vibro-tactile and visual asynchronies: Sensitivity and consistency[J]. *Perception*, 2004, 33(1): 103-111.
- [45] FJISKAI W, SHIMOJO S, KASHINO M, et al. Recalibration of audiovisual simultaneity[J]. *Nature Neuroscience*, 2004, 7(7): 773-778.
- [46] STONE J V, HUNKIN N M, PORRILL J, et al. When is now? Perception of simultaneity[J]. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 2001, 268(1462): 31-38.
- [47] SPENCE C, SHORE D I, KLEIN R M. Multisensory prior entry [J]. *Journal of Experimental Psychology: General*, 2001, 130 (4): 799.
- [48] DIXON N F, SPITZ L. The detection of auditory visual desynchrony[J]. *Perception*, 1980, 9(6): 719-721.
- [49] LEVITIN D J, MACLEAN K, MATHEWS M, et al. The perception of cross-modal simultaneity[J]. *Proc. of International Journal of Computing Auticipatory Systems*, 2008, 517(1): 323-329.
- [50] VOGELS I M L C. Detection of temporal delays in visual-haptic interfaces[J]. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 2004, 46(1): 118-134.
- [51] THOMPSON JM, OTTENSMEYER M P. Human factors in telesurgery: effects of time delay and asynchrony in video and control feedback with local manipulative assistance[J]. *Telemed J*, 1999, 5(2): 29-37.

- [52] SPENCE C, SQUIRE S. Multisensory integration: maintaining the perception of synchrony[J]. *Curr Biol*, 2003, 13(13): R519-R521.
- [53] ANDERSON R J, SPONG MW. Bilateral control of teleoperators with time delay[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1989, 34(5): 494-501.
- [54] KIM T, ZIMMERMAN P M, WADE M J, et al. The effect of delayed visual feedback on telerobotic surgery[J]. *Surgical Endoscopy And Other Interventional Techniques*, 2005, 19(5): 683-686.
- [55] ZAMPINI M, SHORE D I, SPENCE C. Audiovisual temporal order judgments [J]. *Experimental Brain Research*, 2003, 152(2): 198-210.
- [56] SPENCE C, SHORE D I, KLEIN R M. Multisensory prior entry [J]. *Journal of Experimental Psychology: General*, 2001, 130(4): 799-832.
- [57] ZAMPINI M, BROWN T. Audiotactile temporal order judgments[J]. *Acta Psychologica*, 2005, 118(3): 277-291.
- [58] BRANDI F, KAMMERL J, STEINBACH E. Error-resilient perceptual coding for networked haptic interaction[C]// *Proceedings of the 18th ACM International Conference on Multimedia*. ACM, 2010: 351-360.
- [59] SHI Z, ZOU H, RANK M, et al. Effects of packet loss and latency on the temporal discrimination of visual-haptic events[J]. *IEEE Transactions on Haptics*, 2010, 3(1): 28-36.
- [60] FJISAKI W, SHIMOJO S, KASHNO M, et al. Recalibration of audiovisual simultaneity[J]. *Nature Neuroscience*, 2004, 7(7): 773-778.
- [61] TAM J, CARTER E, KIESLER S, et al. Video increases the perception of naturalness during remote interactions with latency [C]// *Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems (CHI'12)*. ACM, 2012: 2045-2050.
- [62] VITTORIALS I, KAMMERL J, HIRCHE S, et al. Perceptual coding of haptic data in time-delayed teleoperation[C]// *EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (World Haptics 2009)*. Third Joint, IEEE, 2009: 208-213.
- [63] HIRCHE S, HINTERSEER P, STEINBACH E, et al. Transparent data reduction in networked telepresence and teleaction systems. part i: Communication without time delay[J]. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 2007, 16(5): 523-531.
- [64] 俸文. 多通道人机交互技术的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2004.
- [65] TAKAHASHI Y, MASUDA I. A visual interface for security robots[C]// *IEEE International Workshop on Robot and Human Communication*, 1992. IEEE, 1992: 123-128.
- [66] LIN Q, KUOC. Virtual tele-operation of underwater robots [C] // *1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1997. IEEE, 1997, 2: 1022-1027.
- [67] 徐旭明, 叶榛. 基于视觉临场感的机器人遥操作系统[J]. *高技术通讯*, 2000(3): 57-61.
- [68] 艾海舟, 张鹏飞. 室外移动机器人的视觉临场感系统[J]. *机器人*, 2000, 22(1): 28-32.
- [69] IMAIDA T, YOKOKOHJI Y, DOI T, et al. Ground-space bilateral teleoperation of ETS-VII robot arm by direct bilateral coupling under 7-s time delay condition[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2004, 20(3): 499-511.
- [70] HELD R, EFSTATHIOU A, GREENE M, et al. Adaptation to Displaced and Delayed Visual Feedback from the Hand[J]. *Journal of Experimental Psychology: General*, 1966, 2(6): 887-891.
- [71] BUSS M, PEER A, SCHAUSS T, et al. Multi-modal multi-user telepresence and teleaction system[C]// *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2008 (IROS 2008). IEEE, 2008: 4137-4138.
- [72] USS M, PEER A, SCHAUSS T, et al. Development of a Multi-modal Multi-user Telepresence and Teleaction System[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2010, 29(10): 1298-1316.
- [73] FERRARI E, CAVALLO E. Operator-machine interaction: ergonomic evaluation of a vineyard teleoperated machine[C]// *International Conference of Agricultural Engineering-CIGR-AgEng 2012: Agriculture and Engineering for a Healthier Life*. Valencia, Spain, CIGR-EurAgEng, 2012.
- [74] STASSEN H G, SMETS G J F. Telemanipulation and Telepresence[J]. *Control Eng. Practice*, 1997, 5(3): 363-374.
- [75] 徐旭明, 叶榛. 基于视觉临场感的机器人遥操作系统[J]. *高技术通讯*, 2000, 10(3): 57-60.
- [76] 戴炬. 异机构遥控主从手的双向力反映[J]. *控制理论和应用*, 1996(13): 259-261.
- [77] 游松. 基于国际互联网的遥操作机器人系统的研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2000.
- [78] 吴国钊, 傅雪冬. 基于 Internet 的机器人实时跟踪系统[J]. *机器人技术与应用*, 2000(1): 24-26.
- [79] 马宏鹏, 安刚. 基于互联网的机器人遥操作系统平台[J]. *自动化与仪表*, 2000, 15(6): 3-7.
- [80] 韦庆, 李杰. 基于事件反馈的机器人监控技术及其在大时延遥操作中的应用[C]// *空间机器人及遥科学技术研讨会论文集*. 1999: 307-313.
- [81] 陈辉, 宋爱国. 带有力觉和触觉临场感的灵巧手主从系统的设计[J]. *机器人*, 1998, 20(6): 437-441.
- [82] 宋爱国, 曾庆军. FTP 技术中多传感器信号的无源传输算法[J]. *电子学报*, 1996, 24(11): 108-112.
- [83] 刘准. 国外深海技术发展研究[J]. *船艇*, 2006(10): 6-8.
- [84] SAGER W W, SANO T, GELDMACHER J. IODP Expedition 324: Ocean Drilling at Shatsky Rise Gives Clues about Oceanic Plateau Formation[J]. *Scientific Drilling*, 2011(12): 24-31.
- [85] GUPTA H, NAYAK S, COMMITTEE K W. Deep scientific drilling to study reservoir-triggered Earthquakes in Koyna, Western India[J]. *Scientific Drilling*, 2011, 12: 53-54.
- [86] 莫杰, 肖菲. 深海探测技术的发展[J]. *科学*, 2012, 64(5): 11-15.
- [87] 徐文, 钱洪宝, 张杰, 等. 我国海洋监测高技术发展的回顾与思考[J]. *海洋技术学报*, 2015, 34(3): 59-61.
- [88] LABONTE D, BOISSY P, MICHAUD F. Comparative analysis of 3-D robot teleoperation interfaces with novice users[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics (Part B)*, 2010, 40(5): 1331-1342.
- [89] HUBER D, HERMAN H, KELLY A, et al. Real-time photo-realistic visualization of 3D environments for enhanced teleoperation of vehicles[C]// *IEEE 12th International Conference on Computer Vision Workshops (ICCV Workshops)*, 2009. IEEE, 2009: 1518-1525.
- [90] KIM S, KANG J, CHUNG M J. Probabilistic voxel mapping using an adaptive confidence measure of stereo matching[J]. *Intelligent Service Robotics*, 2013, 6(2): 89-99.

- [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2014, 53(21):8831-8843.
- [57] GE Z Q, CHEN X R. Supervised Linear Dynamic System Model for Quality Related Fault Detection in Dynamic Processes[J]. *Journal of Process Control*, 2016, 44:224-235.
- [58] VAPNIK V, GOLOWICH S, SMOLA A. Support Vector Method for Function Approximation, Regression Estimation, and Signal Processing[J]. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 1996, 9:281-287.
- [59] 马笑潇, 黄席樾, 柴毅. 基于 SVM 的二叉树多类分类算法及其在故障诊断中的应用[J]. *控制与决策*, 2003, 18(3):272-284.
- [60] WU Q, LAW R. Complex System Fault Diagnosis based on a Fuzzy Robust Wavelet Support Vector Classifier and an Adaptive Gaussian Particle Swarm Optimization [J]. *Information Sciences*, 2010, 23(1):4514-4528.
- [61] GE Z Q, GAO F R, SONG Z H. Batch Process Monitoring based on Support Vector Data Description Method [J]. *Journal of Process Control*, 2011, 21(6):949-959.
- [62] KHEDIRI I B, WEIHS C, LIMAM M. Kernel k-means Clustering based Local Support Vector Domain Description Fault Detection of Multimodal Processes[J]. *Expert Systems with Applications*, 2012, 39(2):2166-2171.
- [63] LIU Z W, CAO H R, CHEN X F, et al. Multi-fault Classification based on Wavelet SVM with PSO Algorithm to Analyze Vibration Signals from Rolling Element Bearings[J]. *Neurocomputing*, 2013, 99(1):399-410.
- [64] WANG A N, SHA M, LIU L M, et al. A New Process Industry Fault Diagnosis Algorithm based on Ensemble Improved Binary-Tree SVM[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2015, 24(2):258-262.
- [65] YIN Z Y, HOU J N. Recent Advances on SVM based Fault Diagnosis and Process Monitoring in Complicated Industrial Processes[J]. *Neurocomputing*, 2016, 174(PB):643-650.
- [66] DENG X G, TIAN X M, CHEN S. Modified Kernel Principal Component Analysis based on Local Structure Analysis and Its Application to Nonlinear Process Fault Diagnosis[J]. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2013, 127(16):195-209.
- [67] MIAO A M, GE Z Q, SONG Z H, et al. Nonlocal Structure Constrained Neighborhood Preserving Embedding Model and Its Application for Fault Detection[J]. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2015, 142:184-196.
- [68] 王健, 冯健, 韩志艳. 基于流形学习的局部保持 PCA 算法在故障检测中的应用[J]. *控制与决策*, 2013, 28(5):683-687.
- [69] XIANG X Q, ZHOU J Z, LI C S, et al. Fault Diagnosis based on Walsh Transform and Rough Sets[J]. *Electric Power Systems Research*, 2009, 23(4):1314-1326.
- [70] ZHANG X Y, ZHOU J Z, GUO J, et al. Vibrant Fault Diagnosis for Hydroelectric Generator Units with a New Combination of Rough Sets and Support Vector Machine[J]. *Expert Systems with Applications*, 2012, 39(3):2621-2628.
- [71] 叶昊, 王桂增, 方崇智. 小波变换在故障检测中的应用[J]. *自动化学报*, 1997, 23(6):736-741.
- [72] LEI Y G, LIN J, HE Z J, et al. A Review on Empirical Mode Decomposition in Fault Diagnosis of Rotating Machinery [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2013, 35(1/2):108-126.
- [73] TIAN Y, MA J, LU C, et al. Rolling Bearing Fault Diagnosis Under Variable Conditions Using LMD-SVD and Extreme Learning Machine[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2015, 90:175-186.
- [74] YAN R Q, GAO R X, CHEN X F. Wavelets for Fault Diagnosis of Rotary Machines: A Review with Applications[J]. *Signal Processing*, 2014, 96(5):1-15.
- [75] 王耀南, 李树涛. 多传感器信息融合及其应用综述[J]. *控制与决策*, 2001, 16(5):518-522.
- [76] 朱大奇, 刘永安. 故障诊断的信息融合方法[J]. *控制与决策*, 2007, 22(12):1321-1328.
- [77] ZHANG F Y, GE Z Q. Decision Fusion Systems for Fault Detection and Identification in Industrial Processes [J]. *Journal of Process Control*, 2015, 31:45-54.

(上接第 6 页)

- [91] 马厦飞, 连珺. “海马”号 4500 米级 ROV 系统研发历程[J]. *船舶与海洋工程*, 2015, 31(1):9-12.
- [92] 高艳波, 李慧青. 深海高技术发展现状及趋势[J]. *海洋技术*, 2010, 29(3):119-124.
- [93] DWYER T F. Telepsychiatry: psychiatric consultation by interactive television[J]. *American Journal of Psychiatry*, 1973, 130(8):865-869.
- [94] SINGH R, JEONG B, RENAMBOTET L. TeraVision: a distributed, scalable, high resolution graphics streaming system [C] // 2004 IEEE International Conference on Cluster Computing. IEEE, 2004:391-400.
- [95] JEONG B. Collaborative Visualization Architecture in Scalable Adaptive Graphics Environment [C] // IBM Visualization and Graphics Student Symposium, TJ Watson Research Hawthorne and Yorktown, 2007.
- [96] FRIESEN J A, TARMAN T D. Remote high-performance visualization and collaboration[J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2000, 20(4):45-49.
- [97] YHAKUR , BAX J S, HOLDSWORTH D W, et al. Design and performance evaluation of a remote catheter navigation system [J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2009, 56(7):1901-1908.
- [98] 刘浩. 导管机器人系统的建立及其关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [99] 李显凌. 用于微创介入手术的导管导向机器人研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- [100] RAHMAN S M M, IKEURA R, NOBE M, et al. Control of a power assist robot for lifting objects based on human operator's perception of object weight [C] // The 18th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, 2009(RO-MAN 2009). IEEE, 2009:84-90.
- [101] WATANABE T, YOSHIKAWA T. Grasping optimization using a required external force set[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2007, 4(1):52-66.
- [102] SHELTON J N, CHIU G T C, PIZLO Z. Exponentially segmented positioning of a single link mechanism: A control algorithm that satisfies Fitts' Law [C] // American Control Conference, 2007(ACC'07). IEEE, 2007:5983-5988.
- [103] 熊友军. 基于增强现实的遥操作关键技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.