

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201610052



# LMC 在机器人交互操作 应用领域新进展

张国亮, 王展妮, 刘勇, 张泽, 丁培

(华侨大学 计算机科学与技术学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 以手势运动检测器(LMC)为研究对象,分别从机器人-人接口(HRI)人机交互的发展、LMC 的传感方式、定位精度及手势接口特性等多个角度,详细阐述 LMC 的相关理论与技术.通过系统地梳理近 3 年 LMC 在 HRI 应用中的最新进展,对当前亟需解决的问题进行详细地分析,指出其应用中存在的不足,并总结今后发展的趋势.

**关键词:** 手势运动检测器; 人机交互; 自然用户接口; 医疗康复

**中图分类号:** TP 242      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-5013(2018)03-0317-07

## New Progress in Application of LMC on Human-Robot Interactive Operation

ZHANG Guoliang, WANG Zhanni,  
LIU Yong, ZHANG Ze, DING Pei

(College of Computer Science and Technology, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** Leap motion controller (LMC) as the research object, is investigated in detail from the perspective of the human-robot interfaces (HRI) development, sensing principle, positioning accuracy and gesture interface. Related theory and technology is presented. Then, the application of LMC on HRI is systematically studied in detail for recent three years and some urgent problem is analyzed. Finally, the development of LMC for HRI in the future is summarized.

**Keywords:** leap motion controller; human robot interaction; natural user interface; medical rehabilitation

近年来,随着机构日益复杂,且对于操作有着特殊化需求的特种机器人的大量出现,以机器人为研究对象的新型人机交互接口机器人-人接口(HRI)正逐渐受到学者的广泛关注<sup>[1]</sup>.相对于传统的二维图形用户界面,以手势运动检测器(leap motion controller, LMC)为代表的自然交互接口 NUI(natural user interface)可使操作者在 3D 空间直接操控机器人,成为当前机器人人机交互领域研究的一个新方向.然而,虽然学者已注意到 LMC 在机器人领域应用的潜在价值,但由于 LMC 设备和技术较为新颖,对于其特性的研究从 2013 年刚刚开始,目前尚未发现对这一新型传感器最新研究进展的报道.为此,本文从 HRI 人机交互的发展、LMC 的传感方式、定位精度及手势接口特性等多个角度,详细阐述 LMC 的

**收稿日期:** 2016-10-30

**通信作者:** 张国亮(1978-),男,副教授,博士,主要从事机器人视觉伺服、机器人遥操作的研究. E-mail: zgl0227@sjna.com.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(61403150); 高校新世纪优秀人才项目(NCET-10-0117); 福建省高校杰出青年计划项目(JA10006); 福建省自然科学基金资助项目(2016J01302)

相关理论与技术,展望未来的发展方向.

## 1 LMC 工作原理及特性分析

为了有效分析 LMC 的工作原理和控制性能,分别从结构组成、传感方式、定位精度及手势接口等 4 个方面对其特性进行分析. LMC 具有双目结构,包含 3 个红外发光二极管(LED)和 2 个红外摄像机,利用这些光学传感器及数字信号处理芯片,能够完成手掌和手指的动态追踪.作为一种新型的手势和位置跟踪传感器,其定位精度可以达到亚毫米级,由于仅追踪手部运动,而不像 Kinect 那样追踪全身,因此,LMC 可实现更低的处理器占用率,更精确的动作识别率,其硬件也能够做得更小巧. LMC 工作时会以自身的中心为原点,设置一个包含 X,Y,Z 三轴的坐标系,视角范围呈  $150^\circ$  倒立椎体,传感器会定期以数据帧的形式捕获手掌、手指和手势的运动信息、坐标系及工作空间.

对于传统光学传感器的精度分析在文献[2]中已有详细的论述.与普通的光学传感器相比,LMC 的定位传感器精度较高,为衡量其工作特性,往往需要一个精确的外部参考系统对它进行评价,如 Frank 等<sup>[3]</sup>最早在真实环境中对 LMC 进行测试,采用精度更高的工业机器人作为跟踪评价系统,比较由机器人逆运动学计算的末端位置与 LMC 实时测量的位置,验证其准确性和重复定位精度,实验结果表明,LMC 的定位精度在静态条件下为 0.2 mm,动态条件下为 1.2 mm,远高于 Kinect 的 1.5 cm 深度动态定位精度<sup>[4]</sup>. Guna 等<sup>[5]</sup>以专业的光学捕获系统(qualisys motion capture system)作为参考,对静态和动态条件下的跟踪性能及采样率变化等展开研究. Guna 指出,LMC 的静态测量偏差符合正态分布,但动态环境下具有时空扭曲的特点,即不同的空间位置具有不同的定位精度,测量数据的一致性随着深度的增加或靠近传感器两侧边缘逐渐下降;当深度超过 250 mm 后,采样率也会显著下降,其时移偏差达到 12.8 Hz.

对于以手势作为操作基础的 LMC,其接口形式具有一定的特殊性.由于机器人手势控制是近年来刚刚兴起的研究方向,目前尚无一个通用性的手势语义接口规范.但一些通用的人机接口设计原则可以作为 LMC 接口设计的参考<sup>[6]</sup>,如采用符号化的指令简化接口操作,或加入可视性、反馈性、操作不间断性、可调整性和可靠性等技术指标提高接口性能.例如,Nacenta 等<sup>[7]</sup>给出 4 条手势接口的通用设计原则:1) 仅使用识别鲁棒性好的手势;2) 手势不要过多,尤其在有压力情况;3) 手势识别后,加入反馈,将使操作者更加专注于操作任务;4) 为操作者提供仿真环境,加强操作训练.

## 2 LMC 在 HRI 中的应用进展

### 2.1 LMC 在医疗康复及外科手术中的应用

2.1.1 医疗康复 进入 21 世纪以来,老龄化问题成为困扰世界各国的一个社会问题.有数据显示,截止到 2050 年,欧洲老龄化人口将从目前的 25% 上升到 54%,即从目前的 4 人供养 1 个老人上升到 2 人供养 1 个,而中国将有近 5 亿人口超过 60 岁,这一数字将超过美国人口总数,几乎占全球老年人口的 1/4.为了应对老龄化问题,有学者提出生活环境辅助(AAL)的概念,即通过智能医疗器械使老年人享有独立并有尊严的生活.医疗辅助机器人的出现满足了上述需求,但高昂的价格使其难以向大众普及.以机器人助行器(robotic walker)为例,它为患者提供了行走的便利,但出于安全的考虑,人们又担心其发生倾覆,这使用户从心理上感觉必须购买更加昂贵的医疗设备才能安心,从而使与之相关的医疗康复技术和设备的价格居高不下.

传统的医疗康复设备通常利用力觉信息感知患者意图,但稳定的力觉感知需要将闭环反馈周期设定在 1 kHz 以上,同时,力觉信息对于外界干扰极其敏感,若不对噪声实施有效的滤波,则难以形成稳定的控制.因此,以力觉感知为基础的医疗设备价格往往非常昂贵,如 PAMM 和 PAM-AID 机器人助行器在手柄处均采用了高精度的六维力/力矩传感器,而 MARC 机器人助行器则在 2 个手柄处各采用 1 个,价格更加昂贵.为替代价格昂贵的力传感设备,有学者考虑采用价格相对低廉的力传感方法,如 Shi 等<sup>[8]</sup>在手柄处采用价格较低的力敏电阻;Chang 等<sup>[9]</sup>采用类似超市购物车的结构,将力敏电阻置于横梁处;Rentschler 等<sup>[10]</sup>采用简易开关机构替代力传感,虽然力觉控制得到了简化,但接口的过渡和切

换并不自然. 另一种替代力传感的方法是借助于光学辅助设备, 如 Patel 等<sup>[11]</sup>采用环形超声和红外阵列辅助实施导航及避障行为. 近 3 年来, LMC 控制器在医疗康复领域也得到了发展, 如 Bassily 等<sup>[12]</sup>提出利用 LMC 控制机械臂辅助患者完成日常活动, 通过将传统的机械臂控制与日常环境结合, 使具有移动障碍的患者获得一定自由运动的能力. Joao 等<sup>[13]</sup>针对当前机器人助行器在成本和安全等方面的问题, 提出一种基于 LMC 的机器人助行器系统 HMI. 该系统将视觉交互与以用户为中心的安全保障控制结合, 为下肢移动障碍的患者提供支撑及机动能力, 以达到康复训练的目的, 如图 1 所示. HMI 通过 LMC 跟踪手柄两侧的位置及运动确定患者所施加力的合理性, 并基于模糊逻辑的结果给出患者下一步的动作指示, 如合理安全, 则由机构辅助实施运动, 如不合理则机构锁死, 保持固定, 防止倾覆. 目前, 该系统只进行了健康人群的测试, 尚未见到临床测试.

LMC 在医疗康复领域另一个研究方向是将目前发展迅速的虚拟现实(VR)技术融入传统的力觉感知应用. 例如, Sucar 等<sup>[14]</sup>将力觉反馈与 VR 结合, 设计虚拟场景及康复任务; Klamroth 等<sup>[15]</sup>证实该方法能够为患者带来更加深入的沉浸感, 从而改善受损的运动功能; Yu 等<sup>[16]</sup>通过设计管道弹性飞行任务辅助患者进行上肢灵巧操控, 并利用 LMC 和力觉传感器 OMEGA. 7 研究了视力协调双手康复训练方法<sup>[17]</sup>, 有效激活了患者身体同侧和对侧的运动机能.

2.1.2 外科手术 医疗机器人系统在国内尚不多见, 但在国外应用已较为普遍. 截至 2013 年, 美国 1/4 的医院已配备医疗机器人系统, 如著名的达芬奇商用手术机器人系统<sup>[18]</sup>目前已广泛应用于包括泌尿科、妇科、心内和普外等多项外科手术. 其他较为著名的医疗机器人系统还有德国航空航天中心研制的 Mirosurge<sup>[19]</sup>和华盛顿大学的 Raven<sup>[20]</sup>. 这些医疗机器人多采用主从式遥操作控制方法, 医生在主端直接操纵机械关节设备记录其操作运动, 从端手术设备接收医生的指令完成手术任务. 然而, 传统的主从遥操作控制在操作主端存在一些缺陷, 一是大的支点造成内窥镜等医疗设备运动范围有限; 二是由于存在机械限位, 使手动操作和机器人自动操作之间不易平滑转换, 转向困难. 非接触式光学跟踪设备的引入为解决这些问题提供了一种良好的解决方案<sup>[21-26]</sup>. 近两年来, 基于 LMC 的控制在此方向也开展了相关研究, 如 Yonjae 等<sup>[27]</sup>以 0.05 mm 定位精度的库卡机器人作为参考系统, 从距离范围、单指静态定位误差、手势运动及延时等方面, 分析 LMC 用于外科遥操作手术任务的可行性.

Travaglini 等<sup>[28]</sup>利用 LMC 控制同心管机器人完成内鼻腔模拟手术(图 2), 并与力觉反馈方法进行实验比较, 研究成果证实, 两种传感器可以取得近似的切除比例和时间, 但 LMC 在精度方面较力觉方法差一些. 相比于传统的接触式或力觉操作方式, 无接触接口具有相对短的学习曲线, Kim 等<sup>[29]</sup>虽然从理论和实验角度证实了 LMC 在仿真实验环境下具有较高的测量精度和重复定位精度, 然而, 由于从端机器人和外科手术的多样性, 以及主端操作者的非确定性, 目前, 仍很难确定其广泛应用于临床是否可行.

## 2.2 LMC 在工业机器人中的应用

LMC 在工业机器人领域的研究目前尚处于理论方法及实践应用的探索阶段, 如针对工业机器人开放的接口较少问题, Sanfilippo 等<sup>[30]</sup>设计了针对 LMC 等接口设备的开源软件平台; Lorenzo 等<sup>[31]</sup>研究了基于 LMC 捕获的手势对工业机械臂实施自治可调遥操作的方法; Bassily 等<sup>[32]</sup>利用 LMC 直接控制 6DOF 雅可比机械臂; Liu 等<sup>[33]</sup>提出结合卡尔曼滤波和遥操作控制对操作者实施焊接动作做出预测, 但该方法只是对手臂的运动进行了预测, 没有考虑遥操作过程中运动震颤及时延等问题; Huang 等<sup>[34]</sup>利

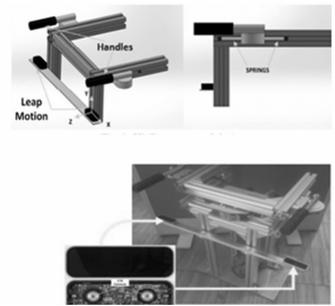


图 1 HMI 概念设计及传感器设置  
Fig. 1 HMI concept and sensor configuration

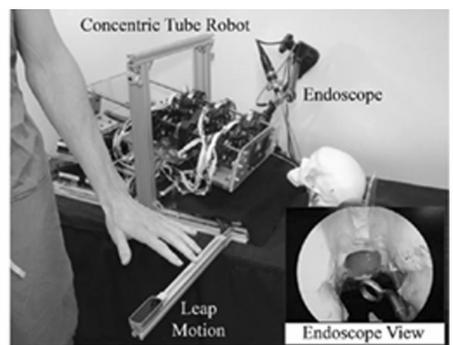


图 2 LMC 控制同心管机器人完成内鼻腔手术  
Fig. 2 Concentric tube robot for endoscope manipulated by LMC

用 LMC 监控气体钨极氩弧焊中的焊枪割炬位置,研究了基于非线性自适应模糊控制方法估计机器人手臂的响应.

### 2.3 LMC 操控多指灵巧手

多指灵巧手,指具有拟人外观和功能的多关节手型机器人,由于具有高度的灵巧性和复杂性,普通的图形接口往往难以对其进行有效控制,目前,其操作主要以接触型数据手套直接进行运动映射<sup>[2]</sup>.数据手套可以在三维空间中直接获取手的位姿信息,具有测量精确、实时识别手势种类多等优点,但数据手套价格昂贵,操作者必须佩戴的要求一定程度上削弱了人机交互的自然性和灵活性,更换操作者后,又必须重新进行繁琐的标定.与之相比,基于视觉的裸手手势识别无需佩戴任何机械装置,能够使操作者以更加自然的方式进行人机交互,但由于人手存在柔性形变及手指自遮挡等问题,使这一操作控制方法难度非常大.因此,利用裸手直接对多指灵巧手进行操控的文献尚不多见.例如,Almeida 等<sup>[35]</sup>从理论上探讨了将手势用于操作臂或夹持器的控制,提升操作者灵巧度的可能性;Igor 等<sup>[36]</sup>利用 LMC 控制 3 指灵巧手实施目标捕捉,不过该系统的手势识别是将整手看作成一个夹持器,并没有对手指进行独立地控制;Futoshi 等<sup>[37]</sup>根据操作者手势的位姿自主定位 5 指机械手的移交位置,提出的运动映射策略是目前较少见的直接利用 LMC 控制灵巧手的方法,但是该方法只考虑了位姿估算和移交操作,对于手指的抓握模式及指尖力封闭等精确抓取问题没有深入考虑.基于 LMC 的 5 指灵巧手操作,如图 3 所示.

## 3 LMC 在 HRI 应用中的若干问题

与目前较为流行的多点触控手势识别相比,LMC 提供了一种新颖的、无接触、高精度手势识别及跟踪方法,其自然交互的形式为用户带来良好的操作体验,但由于控制方法尚不成熟,在实际应用中暴露出一些问题,存在以下 4 点不足.

### 3.1 定位精度动态稳定性问题

LMC 在精度测量方面存在不稳定性问题,如 Weichert 等<sup>[38]</sup>指出其室外环境条件下的测量精度优于室内环境,虽然静态测量时,精度较为稳定,但在动态运动时,其测量精度远小于厂商宣称的精度;当测量深度大于 250 mm 后,不仅其空间定位精度显著下降,时间采样率也存在很大的偏移,这很难将 LMC 和其他实时系统进行同步化控制.因此,需要采用一定的预处理或后处理技术消减采样偏移对控制系统的影响.

### 3.2 人手震颤对 LMC 的影响

LMC 针对以手势为基础的用户接口,人手的震颤对其测量造成的影响不容忽视.手部震颤是指参与者非自觉的、具有节奏性的肌肉运动.针对年龄的不同,抖动的幅度也有变化,年轻人为 0.2~0.4 mm,老年人为 0.6~1.1 mm,而帕金森症等患者的震颤幅度则更高<sup>[39]</sup>.由于 LMC 本身的测量精度非常高,在静态下精度最高可达 0.01 mm,因而非受控的震颤对于 LMC 的测量是具有直接影响的.因此,为保证测量精度和控制的可靠,需要针对操作者及操作任务的不同,建立震颤滤波模型.此外,也可以通过 LMC 检测手部颤抖验证某种疾病先兆,例如,Lo 等<sup>[40]</sup>给出一种在家庭环境中对运动迟缓进行测量的方法.

### 3.3 噪声对 LMC 的影响

LMC 是一种定位跟踪传感器,它不仅包含一般传感器具有的白噪声等干扰,而且其噪声还具有某些特殊性,如其测量数据具有大量的冗余性<sup>[41]</sup>,这些冗余信息对于系统的实时性及控制的稳定性都具有一定的影响,必须予以抑制.例如,Du 等<sup>[42]</sup>注意到了噪声对于手势位姿的影响,采用扩展卡尔曼滤波估计手的姿态,粒子滤波估计手的位置,并结合自适应空间变换提高机械臂的精度.Zhang 等<sup>[43]</sup>采用 CMAC 算法克服测量噪声,并利用过阻尼克服人为因素干扰;与扩展卡尔曼滤波相比,该方法在精度和实验时间有所提高,但超过操作范围后,必须加入重置手势重新操作.

### 3.4 工作空间问题

LMC 的手势测量空间是以传感器中心为原点的 150°倒立椎体,其测量单位为物理世界的毫米坐

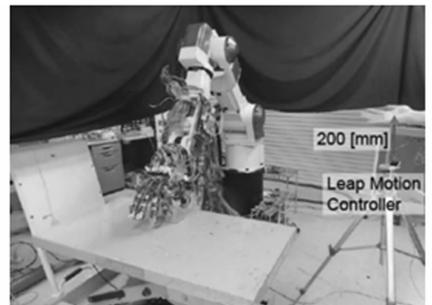


图 3 基于 LMC 的 5 指灵巧手操作  
Fig. 3 Five fingers dexterous hand manipulated by LMC

标,相对于机器人所需的操作范围,其工作空间过于狭窄,只能进行小幅度的机器人控制操作.因此,为适应大范围的机器人操作,往往需要在操作者的操作空间和机器人的操作空间之间进行尺度空间变换,典型的方法是在操作者端加入运动缩放变换,但这种变换往往存在空间映射不一致等问题<sup>[44]</sup>.如Zhang等<sup>[45]</sup>提出同时利用5个LMC控制工业机械臂实施简单操作,但对于多个LMC信息之间的通信及过渡等问题没有考虑,扩展操作空间的同时是否会降低采样率、实时性等问题也没有论及.

## 4 发展趋势

从目前LMC在机器人领域中的应用来看,虽然在工业和民用已有一定发展,但整体应用的案例较少,尚未形成规模,目前的研究主要集中在机器人的空间运动映射方面,尤其是在串联型手臂机器人方面,研究者对如何将这种新型传感器应用于工业领域进行了有益的探索,但对于LMC较为擅长的手势近景下的机械灵巧手操作尚不多见.

近年来,LMC在医学方面的研究发展迅速,将成为这一领域今后发展的一个重要方向.涉及医疗应用的研究主要包括医疗手术操作、医疗设备辅助、医疗康复3个方向.在医疗手术方面,采用无接触的交互设备,对于防止手术场所的病原体污染,提高医生操作的灵活性具有明显的优势.目前,从定位精度而言,LMC已完全适合外科手术任务,但在动态测量时,空间定位精度的下降和时间采样率的偏移会对系统的可靠性带来影响.因此,研究鲁棒性的操作和控制方法将是研究者今后重点考虑的课题.

此外,日益严峻的全球老龄化问题必然带来医疗辅助设备需求的大幅增长,如LMC这样使用自然和便利的医疗设备,无疑将会给肢体残障的患者或行动不便的老年人带来生活上的便利.在医疗康复方面,相比于价格昂贵的力觉康复设备,LMC低廉的价格很容易占领消费级的用户市场,其操作控制也比精密的力觉设备容易.因此,研究基于LMC等光学设备的辅助康复训练方法,对缩短康复训练周期,提高康复训练水平具有积极的促进作用.

## 5 结束语

综述了基于NUI方法的LMC在HRI应用领域研究的最新进展,从医疗康复及外科手术、工业机器人、多指灵巧手操控等多方面对LMC技术的研究现状及其未来发展进行系统的总结与评价,并对LMC的定位精度动态稳定性、工作空间映射、人手震颤和噪声影响等问题进行了详细的分析,指出其应用中存在的不足,展望了LMC在HRI领域未来的发展方向.

### 参考文献:

- [1] CHO K B, LEE B H. Intelligent lead: A novel HRI sensor for guide robots[J]. *Sensors*, 2012, 12(6): 8301-8318. DOI:10.3390/s120608301.
- [2] STOYANOV T, LOULOU DI A, ANDREASSON H, *et al.* Comparative evaluation of range sensor accuracy in indoor environments[C]// *Proceedings of the European Conference on Mobile Robots*. Orebro: Elsevier, 2013: 1094-1105.
- [3] FRANK W, DANIEL B, BARTHOLOM R, *et al.* Analysis of the accuracy and robustness of the leap motion controller[J]. *Sensors*, 2013, 13(5): 6380-6393. DOI:10.3390/s130506380.
- [4] KHOSHELHAM K, ELBERINK S O. Accuracy and resolution of kinect depth data for indoor mapping applications [J]. *Sensors*, 2012, 12(2): 1437-1454. DOI:10.3390/s120201437.
- [5] GUNA J, GREGA J, MATEVŽ P, *et al.* An analysis of the precision and reliability of the leap motion sensor and its suitability for static and dynamic tracking[J]. *Sensors*, 2014, 14(2): 3702-3720. DOI:10.3390/s140203702.
- [6] NORMAN D A, NIELSEN J. Gestural interfaces: A step backward in usability[J]. *Interactions*, 2010, 17(5): 46-49.
- [7] NACENTA M A, KAMBER Y, QIANG Y, *et al.* Memorability of pre-designed and user-defined gesture sets[C]// *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. Paris: ACM, 2013: 1099-1108.
- [8] SHI Fei, CAO Qixin, LENG Chuantao, *et al.* Based on force sensing-controlled human-machine interaction system for walking assistant robot[J]. *Intelligent Control and Automation*, 2010, 20(1): 6528-6533. DOI:10.1109/WCICA.2010.5554167.

- [9] CHANG Mingfang, MOU Weihao, LIAO Chenke, *et al.* Design and implementation of an active robotic walker for Parkinson's patients[C]//Proceedings of SICE Annual Conference. Akita; Society of Instrument and Control Engineers, 2012; 2068-2073.
- [10] RENTSCHLER A J, SIMPSON R, COOPER R A, *et al.* Clinical evaluation of Guido robotic walker[J]. Journal of Rehabilitation Research and Development, 2008, 45(9): 45-52. DOI: 10.1682/JRRD.2007.10.0160.
- [11] PATEL M, MIRO J V, DISSANAYAKE G. A hierarchical hidden markov model to support activities of daily living with an assistive robotic walker[C]//IEEE Ras and Embs International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics. Rome: IEEE Press, 2012; 1071-1076. DOI: 10.1109/BioRob.2012.6290936.
- [12] BASSILY D, GEORGOULAS C, GUETTLER J, *et al.* Intuitive and adaptive robotic arm manipulation using the leap motion controller[C]//International Symposium on Robotics. Munich: VDE-Verlag, 2014: 78-85.
- [13] JOAO P, PEIXOTO P, NUNES U. A novel vision-based human-machine interface for a robotic walker framework [C]//IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication. Kobe: IEEE Press, 2015: 134-139. DOI: 10.1109/ROMAN.2015.7333590.
- [14] SUCAR L E, ORIHUELA-ESPINA F, VELAZQUEZ R L, *et al.* Gesture therapy: An upper limb virtual reality-based motor rehabilitation platform[J]. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2014, 22(3): 634-643. DOI: 10.1109/TNSRE.2013.2293673.
- [15] KLAMROTH-MARGANSKA V, BLANCO J, CAMPEN K, *et al.* Three-dimensional, task-specific robot therapy of the arm after stroke: A multicentre, parallel-group randomised trial[J]. Lancet Neurol, 2014, 13(2): 159-166. DOI: 10.1016/S1474-4422(13)70305-3.
- [16] YU Ningbo, WANG Kui, LIU Jingtai. Dexterous haptic interaction for functional rehabilitation and assessment of the upper limb[C]//IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Bali: IEEE Press, 2014: 1351-1355. DOI: 10.1109/ROBIO.2014.7090521.
- [17] YU Ningbo, XU Chang, LI Huanshuai, *et al.* Fusion of haptic and gesture sensors for rehabilitation of bimanual coordination and dexterous manipulation[J]. Sensors, 2016, 16(3): 395-415. DOI: 10.3390/s16030395.
- [18] 常宝, 覃宏荣, 张占国, 等. 15例达芬奇机器人辅助腹腔镜肝切除术的手术配合[J]. 护理学报, 2016, 23(2): 60-62. DOI: 10.16460/j.issn1008-9969.2016.02.060.
- [19] HAGN U, KONIETSCHKE R, TOBERGTE A, *et al.* DLR MiroSurge: A versatile system for research in endoscopic telesurgery[J]. International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, 2009, 5(2): 183-193. DOI: 10.1007/s11548-009-0372-4.
- [20] LUM M J H, FRIEDMAN D C W, SANKARANARAYANAN G, *et al.* The RAVEN: Design and validation of a telesurgery system[J]. International Journal of Robotics Research, 2009, 28(9): 1183-1197. DOI: 10.1177/0278364909101795.
- [21] DESPINOY F, SANCHEZ A, ZEMITI N, *et al.* Comparative assessment of a novel optical human-machine interface for laparoscopic telesurgery[C]//Processing in Computer-Assisted Interventions. New York: Springer, 2014: 21-30. DOI: 10.1007/978-3-319-07521-1\_3.
- [22] KIM Y, LEONARD S, SHADEMAN A, *et al.* Kinect technology for hand tracking control of surgical robots: Technical and surgical skill comparison to current robotic masters[J]. Surg Endosc, 2014, 28(6): 1993-2000. DOI: 10.1007/s00464-013-3383-8.
- [23] VARGAS H, VIVAS O. Gesture recognition system for surgical robot's manipulation[C]//Symposium on Image, Signal Processing and Artificial Vision. [S. l.]: IEEE Press, 2014: 1-5. DOI: 10.1109/STSIVA.2014.7010172.
- [24] DRAGAN A D, SRINIVASA S S, LEE K C T. Teleoperation with intelligent and customizable interfaces[J]. Journal of Human-Robot Interaction, 2013, 2(2): 33-57. DOI: 10.5898/JHRI.2.2.Dragan.
- [25] DU Guanglong, ZHANG Ping, MAI Jianhua, *et al.* Markerless kinect-based hand tracking for robot teleoperation [J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2012, 9(1): 36-46. DOI: 10.5772/50093.
- [26] OIKONOMIDIS I, KYRIAZIS N, ARGYROS A A. Tracking the articulated motion of two strongly interacting hands[C]//IEEE Conference of Computer Vision and Pattern Recognition. Washington D C: IEEE Press, 2012: 1862-1869.
- [27] YONJAE K, PETER C, KIM W, *et al.* Experimental evaluation of contact-less hand tracking systems for teleoperation of surgical tasks[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Hong Kong: IEEE Press,

- 2014;3502-3509. DOI:10.1109/ICRA.2014.6907364.
- [28] TRAVAGLINI T A, SWANEY P J, KYAL D W, *et al.* Initial experiments with the leap motion as a user interface in robotic endonasal surgery[C]// Proceedings of the 4th IFToMM International Symposium on Robotics and Mechatronics. Poitiers: Kluwer Academic, 2016; 171-180.
- [29] KIM R A, ZAKARIA N F, ZULKIFLEY M A, *et al.* Telepointer technology in telemedicine: A review[J]. Biomedical Engineering Online, 2013, 12(1): 1-19. DOI: 10.1186/1475-925X-12-21.
- [30] SANFILIPPO F, HATLEDAL L I, ZHANG H, *et al.* JOpenShowVar: An open-source cross-platform communication interface to Kuka robots[C]// IEEE International Conference of Information and Automation. Hailar: IEEE Press, 2014; 1154-1159. DOI: 10.1109/ICInfA.2014.6932823.
- [31] LORENZO P, FILIPPO B, CARLO A A, *et al.* Immersive ROS-integrated framework for robot teleoperation[C]// IEEE Symposium on 3D User Interfaces. Arles: IEEE Press, 2015; 177-178. DOI: 10.1109/3DUI.2015.7131758.
- [32] BASSILY D, GEORGOULAS C, GUETTLER J, *et al.* Intuitive and adaptive robotic arm manipulation using the leap motion controller[C]// ISR/Robotik 41st International Symposium on Robotics. Munich: VDE-Verlag, 2014; 1-7.
- [33] LIU Yukang, ZHANG Yuming. Toward welding robot with human knowledge: A remotely-controlled approach [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2015, 12(2): 769-775. DOI: 10.1109/TASE.2014.2359006.
- [34] HUANG Ning, CHEN Shujun, ZHANG Yuming. Machine assisted manual torch operation in gas tungsten arc welding process[C]// IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Busan: IEEE Press, 2015; 1478-1482. DOI: 10.1109/AIM.2015.7222750.
- [35] ALMEIDA L, PATRAO B, MENEZES P, *et al.* Be the robot: Human embodiment in tele-operation driving tasks [C]// IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication. Edinburgh: IEEE Press, 2014; 477-482. DOI: 10.1109/ROMAN.2014.6926298.
- [36] LGOR Z, GRANOSIK G. Using integrated vision systems: Three gears and leap motion to control a 3-finger dexterous gripper[J]. Advances in Intelligent Systems and Computing, 2014, 267: 553-562. DOI: 10.1007/978-3-319-05353-0\_52.
- [37] FUTOSHI K, KOUKI O, FUMIO K. Robot-human handover based on position and posture of human hand[C]// International Symposium on Advanced Intelligent Systems. Kitakyushu: IEEE Press, 2014; 918-922.
- [38] WEICHERT F, BACHMANN D, RUDAK B, *et al.* Analysis of the accuracy and robustness of the leap motion controller[J]. Sensors, 2013, 13(5): 6380-6393.
- [39] STURMAN M M, VAILLANCOURT D E, CORCOS D. Effects of aging on the regularity of physiological tremor [J]. Journal of Neurophysiology, 2005, 93(6): 3064-3074.
- [40] LO G, SURESH A R, STOCCO L, *et al.* A wireless sensor system for motion analysis of Parkinson's disease patients[C]// IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops. Seattle: IEEE Press, 2011; 372-375.
- [41] KIM J, GONZALEZ D A, MINTZ A, *et al.* Motor control assessment using leap motion: Filtering methods and performance in indoor and outdoor environments[C]// World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering. Toronto: Springer, 2015; 1150-1155.
- [42] DU Guanglong, ZHANG Ping. A markerless human-robot interface using particle filter and Kalman filter for dual robots[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(4): 2257-2264.
- [43] ZHANG Ping, LI Bei, DU Guanglong. An adaptive human-robot system using CMAC and over damping[C]// IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation. Shenyang: IEEE Press, 2015; 835-840.
- [44] MUNOZ L M, CASALS A. Improving the human-robot interface through adaptive multispace transformation[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2009, 25(5): 1208-1213.
- [45] ZHANG Ping, LIU Xin, DU Guanglong, *et al.* A markerless human-manipulators interface using multi-sensors[J]. Industrial Robot, 2015, 42(6): 544-553.

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 吴逢铁)