

基于 KUKA 工业机器人的遥操作控制系统设计 与异构主从控制方法研究

汤卿^{1,2},刘丝丝¹,尚留记¹,李勇¹

(1. 中国东方电气集团有限公司 中央研究院,四川 成都 611731;2. 四川大学 制造科学与工程学院,四川 成都 610065)

摘要:为了适应特种环境作业的需求,提出一套以 KUKA 工业机器人为从操作手的遥操作控制系统设计方法。通过 Eth. KRLXML 软件接口与主控计算机建立 TCP/IP 连接进行通信,实时地反馈机器人的关节角度与末端位姿等信息,同时接收并执行主控计算机的控制命令。针对异构型主从遥操作控制系统,提出一套基于相对位姿尺度变换的遥操作控制算法,将主操作手的运动信息经过相对坐标变换和尺度变换换算到 KUKA 机器人的末端,实现对不同大小工作空间的精确异构遥操作控制。最终所设计的遥操作控制系统和异构型尺度变换遥操作控制方法的有效性在实物抓取释放实验中得到了验证。

关键词:KUKA 工业机器人;异构遥操作;主从控制;尺度变换;同胚映射

中图分类号:TP24

文献标志码:A

Design of Teleoperation System of KUKA Industrial Robot and the Control Algorithm with Heterogeneous Master/Slave Structure

TANG Qing^{1,2}, LIU Sisi¹, SHANG Liuji¹, LI Yong¹

(1. Dongfang Electric Co., R & D Center, Chengdu 611731, China;

2. School of Manufacturing Sci. and Eng., Sichuan Univ., Chengdu 610065, China)

Abstract: The design method of the teleoperation control system using industrial robot KUKA for was introduced the hazard environment and the control algorithm with heterogeneous master/slave structure. Using the Eth. KRLXML software package, a communication based on TCP/IP was connected between the robot controller and the remote computer. The joint angles and positions of the endpoint of the KUKA robot were sent periodically to the remote computer and commands from the remote computer were received and executed by the KUKA robot. Teleoperation control algorithm with relative scale transformation was adopted in the teleoperation system. Motions of the master manipulator was transformed to the slave manipulator's coordinate. By implementing the scaled relative position and pose transformation, the proposed control algorithm not only could be used in the designed heterogeneous master/slave structure, but also could satisfied different operation space requirements with high accuracy. Physical experiments verified the proposed teleoperation system and the proposed master/slave control algorithm.

Key words: KUKA industrial robot; heterogeneous teleoperation; master/slave control; scale transformation; homeomorphic transformation

随着机器人技术的蓬勃发展,工业机器人也越来越成熟,正在广泛地应用于汽车、电子、食品等行业代替人类从事重复的劳动。然而在航空航天、深海勘探等接触成本过高的领域^[1-2],或者是核与辐射、高压输电、易燃易爆等危险领域^[3-4],或者是医

疗手术、建筑施工等空间尺度或者力量尺度变化较大的领域^[5-6],人类对于机器人的需求也日益强烈。研究能广泛应用于此类环境的工业机器人遥操作控制技术是当前机器人领域的一个热门话题^[7-10]。

与特种机器人相比,工业机器人不仅价格相对

收稿日期:2015-04-22

基金项目:特殊环境机器人技术四川省重点实验室开放基金资助项目(13zxtk01)

作者简介:汤卿(1982—),男,高级工程师,博士。研究方向:机器人轨迹规划;机器人运动控制;遥操作控制技术等。E-mail:tangqing_scu@163.com

http://jsuese.scu.edu.cn

低廉,而且机械结构也进行了优化,是一个应用于特种环境中代替人类从事危险工作的良好本体。早在 2006 年,法国就采用 Staubli 的机器人 RX170 用于核环境的作业,从而防止人直接接触核与放射性物质从而产生危险^[3]。Moradi 等^[11]也在 ABB 工业机器人的基础上开发研究了基于力矩的遥操作控制方法,通过建立 TCP/IP 连接实现计算机与机器人的通信。Chinello 等^[12-13]采用 KUKA 工业机器人提供的 Eth. RSIXML 通信协议实现了外部计算机对 KUKA 机器人的控制。可以发现通过建立机器人与外部计算机的连接,从而实现机器人的外部控制,将机器人的在线轨迹规划融入到现有的机器人控制结构之中是工业机器人的一个重要的研究方向。

遥操作控制的研究始于 20 世纪 40、50 年代,Goertz 采用机械同构实现了主从遥操作控制用于抓取放射性物质^[9]。之后遥操作控制技术迅猛发展,现阶段遥操作系统均属于异构型遥操作系统^[14-15],研究也主要集中在遥操作控制中的时延问题^[16-17]、遥操作控制在移动机器人平台上的应用^[18],以及遥操作过程中的力觉感知与力觉牵引问题^[19-20]。对于异构结构给遥操作控制带来的工作空间大小不匹配等相关问题关注甚少。

工作空间大小不匹配是异构遥操作中的一个普遍存在的问题。首先,小的主操作手工作范围不能满足从操作手大工作区间中的工作要求;其次,如果简单地采用比例变换方法将小的工作区间映射到大的工作范围,则主从控制的精度将会大下降;再次,简单的比例放大方法可能将操作人员控制主操作手时的微小抖动放大为从操作手末端的较大的抖动,这会对遥操作控制系统的操作造成严重的影响。因此研发能适应不同工作空间大小、保证控制精度并适用于异构型遥操作系统的控制算法是一个十分重要且有意义的课题。

作者从工业机器人 KUKA 的遥操作控制系统设计着手,研究基于相对位姿尺度变换的异构遥操作控制方法。

1 KUKA 遥操作控制系统的设计

已经构建的 KUKA 遥操作控制系统由以下几个部分组成:KUKA 机器人本体与控制柜、工业摄像机组、网络通信设备、计算机与姿态感知系统。系统组成如图 1 所示。图 1 中:KUKA 机器人是遥操作系统中的从操作手;姿态感知系统则对应于姿态感知系统中的主操作手;工业摄像机组对应于用于现

场观察的眼睛;计算机是遥操作系统中的大脑,用于各种数据的处理与转换;而网络通信设备则主要负责遥操作控制系统中的信号传递。其中,KUKA 机器人型号为 KR16-2,主机械手型号为 Geomagic Touch 位姿感知系统,摄像机为 Hikvision 监控摄像机。

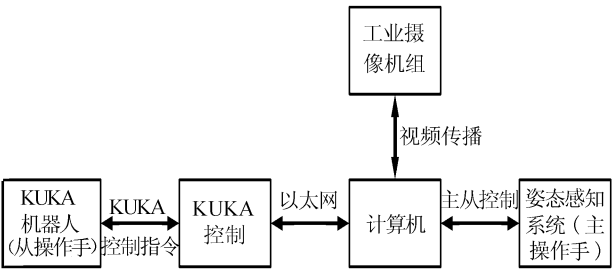


图 1 遥操作控制系统组成图
Fig. 1 Composition of tele-operation system

2 KUKA 机器人通信设计

为了实现外部计算机对 KUKA 工业机器人的控制,作者采用 Eth. KRLXML 软件接口建立 TCP/IP 连接。通信的内容应该包括以下 2 个部分:

- 1) KUKA 机器人可以定时将自身的状态(关节角度、末端位姿等)反馈给主控计算机;
- 2) KUKA 机器人能够接收来自主控计算机的运动控制指令。

根据以上要求,拟定通信格式为 XML 文本块,通信内容均包含在 KukaData 字段中,每一段 Kuka-Data 字段中又分别包含 1 个命令字段、2 个命令参数字段以及 6 个数据字段。通信协议格式如下:

```
< KukaData >
  < Command > int </Command >
  < S1 > float </S1 >
  < S2 > int </S2 >
  < Axis >
    < Axis01 > float </Axis01 >
    < Axis02 > float </Axis02 >
    < Axis03 > float </Axis03 >
    < Axis04 > float </Axis04 >
    < Axis05 > float </Axis05 >
    < Axis06 > float </Axis06 >
  </Axis >
</KukaData >
```

在 KUKA 机器人控制器端采用机器人编程语言 KRL 进行设计。程序内部循环执行由主控计算机发送的控制命令;机器人以 12 ms 为周期定期向

主控计算机反馈机器人的状态信息,包括机器人的关节位置、机器人的末端位姿等;主控计算机也可以即时通过 XML 结构向机器人发送控制指令,机器人通过中断对由主控计算机发送的控制指令进行快速的响应。

3 相对位姿尺度变换遥操作控制算法

因为异构型主从遥操作控制系统的主从操作手在机械结构、工作空间,自由度等方面均存在较大差异,例如,所采用的 KUKA 机器人 KR16-2 的最大工作范围为 1 610 mm,而主操作手的工作范围仅为 160 mm × 120 mm × 70 mm,主从手之间的连杆比例也不尽相同,所以,研究基于相对位姿尺度变换遥操作控制算法以有效地解决此类主从工作空间大小不匹配的问题。

常见的遥操作控制算法是将主操作手的工作空间直接一一映射至从操作手的工作空间,如图 2(a)所示。这样控制的缺点在于一一映射的控制方法适用于同构遥操作系统,对于异构遥操作系统而言,当从操作手的工作区间比主操作手大时,控制的精度会下降,末端的抖动也会更加明显。为解决此类问题,而又不降低控制所需的精度,提出基于相对位姿尺度变换的异构遥操作控制方法,如图 2(b)所示。该方法的控制思路是:从操作手工作空间由一系列空间较小的控制工作空间组所覆盖;每一个控制工作空间都是由主操作手工作空间根据控制精度要求进行缩放而来,与主操作手工作空间一一映射。根据该思路,分 2 个步骤介绍该控制方法:1)基于相对位姿的异构遥操作控制方法;2)尺度变换方法。

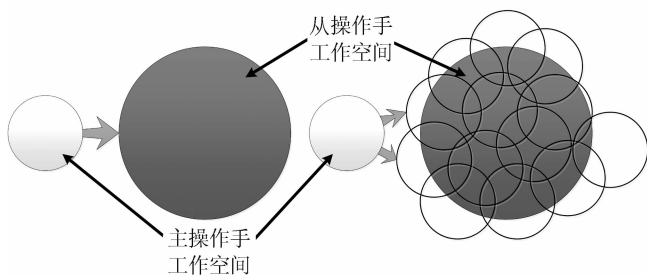


图 2 遥操作控制系统的控制策略

Fig. 2 Control strategy of teleoperation system

3.1 相对位姿异构遥操作控制方法

相对位姿异构遥操作控制方法主要解决如何采用小的控制工作空间组覆盖较大的从操作手工作区间,其主要方法是传递主操作手的运动信息代替位姿信息。提出的方案采用主操作手上的一个按钮作

为使能开关,用以触发遥操作控制指令。当按钮处于按下状态时,系统使能遥操作控制,主操作手的控制将以运动的方式发送到从操作手;当按钮处于释放状态时,关闭遥操作控制,此时主操作手的运动对机器人不产生任何影响。因此当主操作手前后 2 次的使能结束位置与使能起始位姿不同时,控制工作空间也不相同。通过每次结束和起始位置的不同就可以实现不同控制工作空间的切换,从而实现对从操作手空间的整体覆盖,满足遥操作控制在工作空间上的完备性。

操作人员控制主操作手的运动 M 可以分为旋转运动和平移运动,由于旋转运动和平移运动都可以表示为通用旋转变换的同胚映射,因此主操作手的运动可以描述为在主操作手坐标系下的一个旋转变换矩阵 T_{Mm} ,相对运动对应的旋转变换矩阵 T_{Mm} 的具体表现形式如式(1)所示:

$$T_{Mm} = \begin{bmatrix} R_m & P_m \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, R_m 和 P_m 分别为相对运动 T_{Mm} 的旋转量和平移量,分别对应主操作手控制的旋转运动与平移运动。

遥操作控制的目标是将主操作手所获得的末端运动 T_{Mm} 转换为机器人坐标系下的末端运动 T_{Rm} ,实现在摄像机坐标系下的机器人末端运动效果与操作人员坐标系下的运动效果等同。因此控制分为 3 个步骤,如图 3 所示。

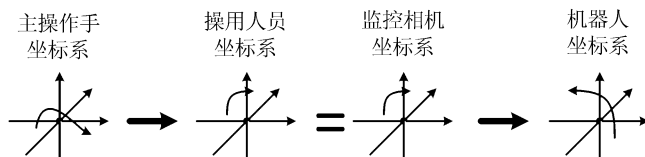


图 3 主操作手、操作人员、监控相机与机器人坐标系变换关系

Fig. 3 Coordinate transformation among the master manipulator, the operator, the camera and the slave robot

- 1) 将主操作手坐标系下的末端运动转换为操作人员坐标系下的运动;
- 2) 将操作人员坐标系下的运动设定为监控摄像机坐标系下的机器人运动;
- 3) 将监控摄像机坐标系下的机器人运动转换为机器人在自身坐标系下的末端运动并执行。

因此主操作手末端的运动 M 以及其在主操作手坐标系的运动变换矩阵 T_{Mm} 可以计算为:

$$T_{Mm} = T_{M0}^{-1} T_{MC} \quad (2)$$

其中, T_{M0} 为使能开关按下时的主操作手的位姿矩

阵, T_{MC} 为使能开关按下后的主操作手的当前位姿矩阵。运动变换矩阵 T_{Mm} 反映操作人员控制机器人运动的运动指令与意图。

运动旋转矩阵 T_{Mm} 主要受旋转变化的影响, 因此主操作臂末端的运动在操作人员坐标系下可以表示为:

$$T_{Pm} = T_{MP} T_{Mm} T_{MP}^{-1} \quad (3)$$

其中, T_{MP} 为从主操作手坐标系到操作人员坐标系的齐次旋转变换矩阵。

为了实现所见即所得的效果遥操作控制效果, 令机器人在监控相机下的运动与主操作手在操作人员坐标系下的运动相同, 即:

$$T_{Cm} = T_{Pm} \quad (4)$$

其中, T_{Cm} 为监控相机坐标系下的运动变换矩阵。

为了控制机器人的运动, 需要获取该运动在机器人坐标系下的运动变换, 可以得到:

$$T_{Rm} = T_{CR} T_{Cm} T_{CR}^{-1} \quad (5)$$

其中, T_{Rm} 为机器人坐标系下的运动变换矩阵, T_{CR} 为监控相机坐标系到机器人坐标系的旋转变换矩阵。联立式(3)~(5), 可以得到:

$$T_{Rm} = T_{CR} T_{MP} T_{Mm} T_{CR}^{-1} T_{MP}^{-1} \quad (6)$$

获得了机器人相对于初始状态的位移之后, 可以通过按下遥操作使能开关时记录的机器人的初始位姿计算机器人当前的目标位姿 T_{RC} :

$$T_{RC} = T_{R0} T_{Rm} \quad (7)$$

已知机器人的目标位姿与当前位姿, 就可以通过第2节所设计的通信协议控制 KUKA 机器人向目标位姿运动, 从而实现 KUKA 工业机器人的遥操作控制。

3.2 尺度变换遥操作控制方法

尺度变换可以让遥操作控制的精度和灵活度得到更大的提升。常见的尺度变换可以分为各向同性和各向异性的尺度变换。尺度变换系数可以定义为:

$$T_{scale} = \begin{bmatrix} k_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中, k_x 、 k_y 、 k_z 分别为变换坐标系下的 x 、 y 、 z 方向的比例系数。由于各项同性比较符合绝大多数应用场景, 因此通常情况下 $k_x = k_y = k_z = k$ 。将尺度变换应用于遥操作控制之中, 式(4)被改写为:

$$\hat{T}_{Cm} = T_{Pm} T_{scale} \quad (9)$$

用 $\hat{T}_{Cm}$ 代替 T_{Cm} 实现之后的坐标变换, 这样就实现了相对位姿异构遥操作控制的尺度变换。

4 实验结果

为了验证所提出的基于 KUKA 工业机器人的遥操作控制方法的有效性, 设计的实验分为2个部分, 即主从操作手跟踪数据对比分析实验和模拟物体抓取实验。

通过所提的控制方法, 采用主操作手在空间中随机做类圆形轨迹运动, 通过记录主操作手的位姿和机器人反馈的末端位姿进行对比, 如图4所示。

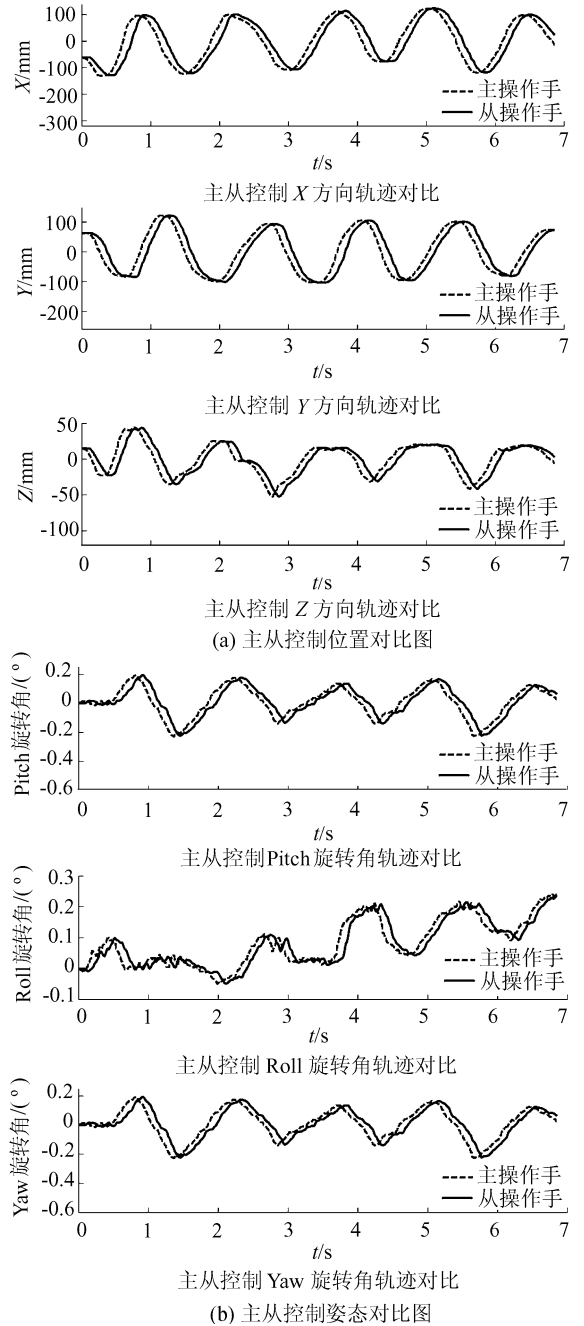


图4 主从控制轨迹跟随对比图

Fig.4 Comparison of master and slave manipulator trajectories

通过数据对比,图 4 中实线表示的从操作手的运动曲线能够很好地跟随虚线表示的主操作手运动曲线。在遥操作中由于网络、响应等产生的时延也比较固定,实验中约为 0.13 s,基本上接近人的反应时间,遥操作人员的体验良好。

为验证尺度变换遥操作控制算法的稳定性,设比例放大系数 $k = 0.5$, 同样控制主操作手在空间中做类圆运动,记录主操作手的位姿和机器人反馈的末端位姿并进行对比,如图 5 所示。由图 5 可以看出,实线所示的从操作手的轨迹波形形状与虚线所示的主操作手的波形形状基本保持一致,而运动幅度减少一半,实现了工作空间减少一半,精度提高 1 倍的主从控制效果。

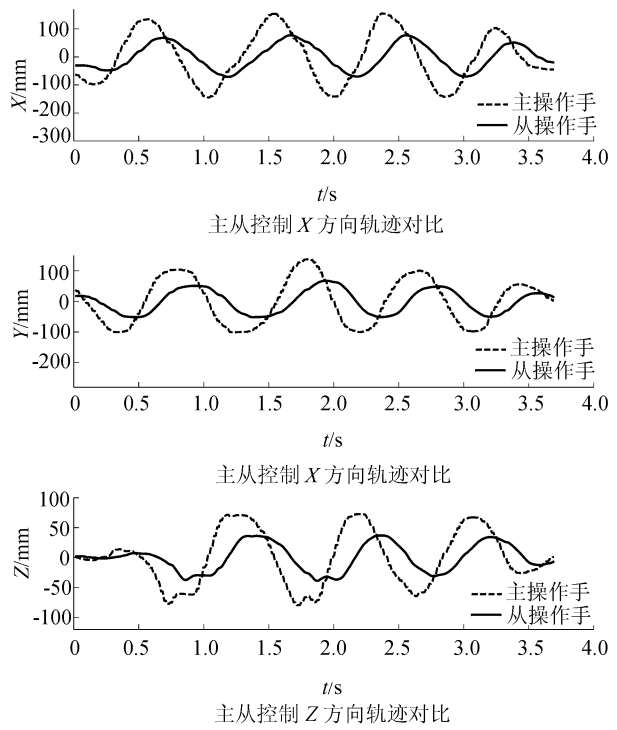


图 5 主从控制轨迹跟随对比图,比例放大系数 $k = 0.5$
Fig.5 Comparison of master and slave manipulator trajectories with scale coefficient $k = 0.5$

为进一步验证该遥操作控制系统及控制方法在特种环境作业中的可行性,采用 2 个弓形物体分别模拟遥操作的手爪和目标物体,通过所设计的遥操作控制方法,实现物体抓取、移动与释放,模拟在核环境中将散落的危险放射性物体移动到目标安全区域,近距离操作的过程如图 6 所示。

为了进一步验证远距离遥操作控制算法的有效性,在实验中增加了遥操作的距离。通过在 3 楼办公室控制 1 楼实验室机器人的抓取、移动和释放,从远距离的遥操作的角度进一步验证了所设计的遥操

作控制系统的功能完备性和遥操作控制算法的有效性。

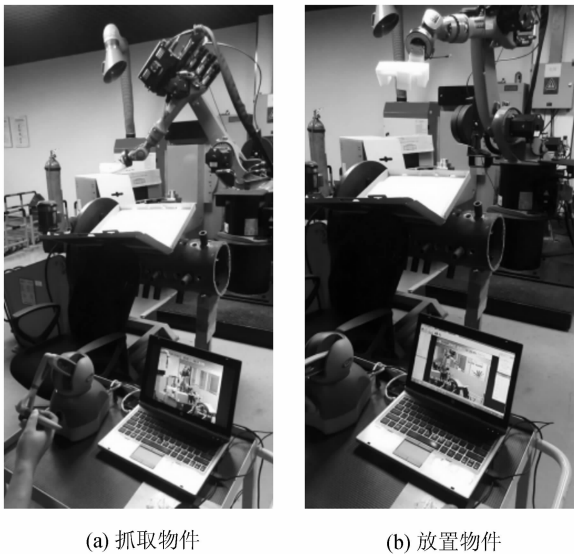


图 6 基于 KUKA 机器人的遥操作系统模拟抓取放置实验
Fig.6 Grasping and placing experiment using our teleoperation system based on KUKA industrial robot

5 结 论

提出 1 套以 KUKA 工业机器人为从操作手,位姿感知单元为主操作手的机器人遥操作控制系统设计方法。KUKA 机器人通过 Eth. KRLXML 接口实现外部主控计算机通信,实时返回当前的状态信息,及时响应并执行控制计算机发送的控制命令。使得工业机器人的控制不再局限于传统的示教模式,而可以采用计算机在外部进行控制,从而进一步扩大了工业机器人的适用范围;也使得现阶段日益成熟、价格低廉、系统稳定的工业机器人能够更加迅速地进入特种机器人领域,实现更加复杂控制。

同时,提出基于相对位姿尺度变换的异构遥操作控制方法。该方法将主操作手的运动通过坐标变换变换到机器人坐标系,实现采用多个小的控制子空间覆盖大的从操作手空间的异构遥操作控制方法。使得遥操作机器人的控制既可以适应异构型的机械结构,也能够实现不同的精度要求。最终通过实物抓取释放实验验证了提出的控制方法的有效性。该控制方法进一步完善异构遥操作的控制策略,使得遥操作机器人能够适应更加丰富的控制需求(如工作空间大小、控制精度等),从而进一步推进工业机器人在特种环境中的应用。

参考文献:

- [1] Vozar S, Leonard S, Kazanzides P, et al. Experimental evaluation of force control for virtual-fixture-assisted teleoperation for on-orbit manipulation of satellite thermal blanket insulation[C]. 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA). Seattle:IEEE, 2015:4424-4431.
- [2] Wilde M, Chua Z K, Fleischner A. Effects of multivantage point systems on the teleoperation of spacecraft docking[J]. IEEE Transactions on Human-Machine Systems, 2014, 44(2):200-210.
- [3] Desbats P, Geffard F, Piolain G, et al. Force-feedback teleoperation of an industrial robot in a nuclear spent fuel reprocessing plant[J]. Industrial Robot: An International Journal, 2006, 33(3):178-186.
- [4] Mukherjee J K. Fast visualisation technique for view constrained tele-operation in nuclear industry[C]. 2014 International Conference on Information Science and Applications(ICISA). Seoul:IEEE, 2014:1-4.
- [5] Nisky I, Hsieh M H, Okamura A M. Uncontrolled manifold analysis of arm joint angle variability during robotic teleoperation and freehand movement of surgeons and novices[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2014, 61(12):2869-2881.
- [6] Pacchierotti C, Abayazid M, Misra S, et al. Teleoperation of steerable flexible needles by combining kinesthetic and vibratory feedback[J]. IEEE Transactions on Haptics, 2014, 7(4):551-556.
- [7] Mersha A Y, Stramigioli S, Carloni R. On bilateral teleoperation of aerial robots[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2014, 30(1):258-274.
- [8] Glas D F, Kanda T, Ishiguro H, et al. Teleoperation of multiple social robots[J]. Systems, Man and Cybernetics, Part A:IEEE Transactions on Systems and Humans, 2012, 42(3):530-544.
- [9] Nuño E, Basañ L, Ortega R. Passivity-based control for bilateral teleoperation: A tutorial[J]. Automatica, 2011, 47(3):485-495.
- [10] Rebelo J, Sednaoui T, den Exter E B, et al. Bilateral robot teleoperation: A wearable arm exoskeleton featuring an intuitive user interface[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2014, 4(21):62-69.
- [11] Moradi D M, Nahavandi S. Teleoperation of ABB industrial robots[J]. Industrial Robot: An International Journal, 2014, 41(3):286-295.
- [12] Chinello F, Scheggi S, Morbidi F, et al. KUKA control toolbox[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2011, 18(4):69-79.
- [13] Chinello F, Scheggi S, Morbidi F, et al. KCT: A MATLAB toolbox for motion control of KUKA robot manipulators[C]//2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Anchorage:IEEE, 2010:4603-4608.
- [14] Cui Jianwei. Design of heterogeneous haptic in force sensed teleoperation system[D]. Nanjing: Southeast University, 2011. [崔建伟. 力觉临场感系统中的异构式手控制器设计[D]. 南京:东南大学, 2011.]
- [15] Liu Y C, Chopra N. Controlled synchronization of heterogeneous robotic manipulators in the task space[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2012, 28(1):268-275.
- [16] Liu Y C, Chopra N. Control of semi-autonomous teleoperation system with time delays[J]. Automatica, 2013, 49(6):1553-1565.
- [17] Yang Y, Hua C, Guan X. Finite-time synchronization control for bilateral teleoperation under communication delays[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2015, 31:61-69.
- [18] Hasunuma H, Nakashima K. The tele-operation of the humanoid robot-workspace extension of the arm with step motion[C]. 2005 5th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots. Tsukuba:IEEE, 2005:245-252.
- [19] Park J, Khatib O. A haptic teleoperation approach based on contact force control[J]. The International Journal of Robotics Research, 2006, 25(5/6):575-591.
- [20] Polushin I G, Takhmar A, Patel R V. Projection-based force-reflection algorithms with frequency separation for bilateral teleoperation[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2015, 20(1):143-154.