

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.046

基于手控器触觉共享控制的主从遥操作

倪涛 朱厚文 张红彦 黄玲涛 郑幻飞 巩明德

(吉林大学机械科学与工程学院, 长春 130022)

摘要: 为了提高主从遥操作的效率和系统的安全性,设计了能够实现主从位移控制的手控器,构建了基于虚拟墙引导主动控制模型,通过融合操作者的人工控制和机器人的视觉引导,实现机器人遥操作中主从两端的信息共享和相互引导,对手控器和从端作业机器人进行控制。通过搭建基于共享控制策略的手控器-机器人系统实验平台,验证所设想控制方法的有效性,最终实现了提升主从遥操作的作业效率,减轻了机器人对环境的瞬间冲击,提高了系统的安全性。

关键词: 主从遥操作; 手控器; 共享控制; 虚拟力引导; 导纳控制

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)12-0367-06

Master-slave Teleoperation Based on Haptic Device Tactile Shared Control

Ni Tao Zhu Houwen Zhang Hongyan Huang Lingtao Zheng Huanfei Gong Mingde

(College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: Because of the development limitation of control, sensor and intelligence in robotics, it is hard to fulfill the fully autonomous of robot in the changeable environment immediately. Hence, the master-slave teleoperation is becoming increasingly important in the extreme working environment. The haptic device could work as an interface and fulfill the interactional control between operator and slave working environment. In order to improve the efficiency of the master-slave teleoperation and system security, a haptic device was designed to achieve master-slave displacement control. The kinematics and dynamics property of the designed structure was analyzed, the parameters of the device were instantiated, and the rationality of the design was estimated. Active control mode was established based on virtual wall guide, through the fusion of operator's manipulation and robotic visual guidance, information sharing and mutual guidance were realized in the teleoperation. Experiments were conducted by using a haptic device - robot system experimental platform. Compared with the trajectory of manual mode, the trajectory of active mode was smoother and more stable. Through the evaluation of haptic device's real performance, the active control mode could ensure the stability of robot under the master-slave control. The effectiveness of the control method was verified by the experiments. Finally, the efficiency improvement of master-slave teleoperation, impact reduction of robot on environment and security improvement of the system were achieved.

Key words: master-slave teleoperation; haptic device; shared control; virtual force guide; admittance control

引言

在机器人遥操作过程中,操作者主要依靠作业

现场的视觉信息来指导其操纵过程的进行,此过程图形数据在远距离传输中不可避免地存在较大时滞。而且常用的移动-等待操纵策略还需要操作者

收稿日期: 2016-07-16 修回日期: 2016-10-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(51305153, 51575219)和高等学校博士学科点专项科研基金项目(20130061110009)

作者简介: 倪涛(1978—),男,教授,博士生导师,主要从事遥操作、虚拟现实和机器人技术研究, E-mail: nitao@jlu.edu.cn

通信作者: 张红彦(1973—),女,副教授,主要从事智能车辆研究, E-mail: zhanghy@jlu.edu.cn

根据主端获取的二维平面图像推断机器人与作业对象的三维空间相对位姿,整个过程需要不断尝试和调整,不利于操作效率的提升^[1-2]。在主从操作控制中,手控器能够为操作者提供和呈现从端执行器的力觉控制信息^[3]。国内外相关研究相继开发了一系列力觉/触觉反馈装置,能够在操作者的控制下与从端的环境进行交互并感知触觉信息,在医学仿真训练和力临场感遥操作等领域有着广泛的应用^[4-10]。因此,可通过手控器结合操作者的人工控制和从端反馈回的视觉引导,共同完成遥操作任务。

共享控制策略将机器人的局部自动化控制融合到操作者的人工决策,是机器人领域的发展趋势^[3,11-12]。现有的共享控制方法存在传感信号多、控制系统复杂等问题,而且操作者的智能与机器人的智能在控制回路依旧相对独立,融合度不高,难以适应复杂、多变的作业环境^[14-16]。

本文提出一种机器人的视觉和力觉融合的共享控制策略。手控器的驱动信号不仅包括操作者所主导的操纵力,还包括机器人视觉对从端虚拟场景分析和认知所产生的虚拟引导力。通过对手控器末端位置进行规划和控制,产生对手操纵“推拽”的示教效果,为操作者提供力觉引导,提高机器人的局部自主性和作业效率,降低对操作人员熟练程度的要求,并对可能发生的机器人与环境间的碰撞进行预测,以保证机器人作业系统的安全性^[17-18]。

1 系统组成及工作原理

基于触觉共享控制的遥操作系统由主端手控器子系统和从端机器人作业子系统组成,系统的工作过程原理结构如图1所示。

操作者参考由从端反馈回的视觉信息,操纵主端的手控器机构实现对从端机器人的位姿控制。具体实现过程为:手控器采集操作者的力觉交互信息,与图形计算机生成的视觉引导力信息融合,通过位姿求解器实现轨迹规划,控制手控器和从端机械手的运行。

基于触觉共享控制的遥操作在参考从端反馈回的视频信息基础上,依赖于手控器平台,通过融合操作者的触觉交互力和从端的视觉伺服信息完成主从控制任务。反馈回主端的视觉引导信息以视觉伺服力的形式参与控制过程,构建视觉伺服力和操作者交互力共享控制模型,实现操作者和机械手运动的相互引导。视觉伺服力通过从端的 Kinect 相机和双目相机实时获取目标的图像和深度信息,基于目标物体的位置和图像误差构建而成。

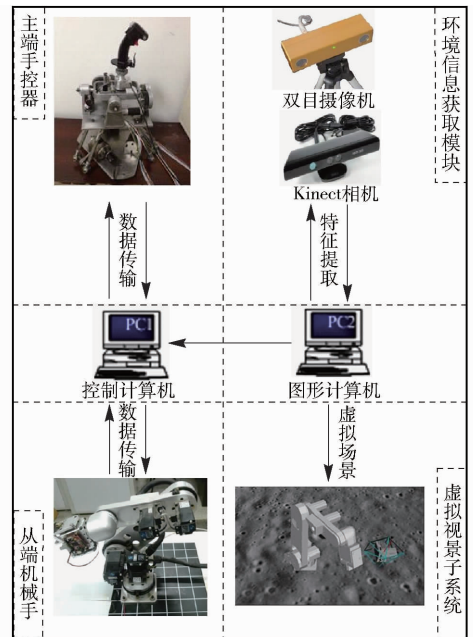


图1 基于共享控制的手控器-机器人系统控制原理

Fig. 1 Control theory of haptic device - robot system based on shared control

2 基于触觉共享控制的手控器设计及运动学分析

手控器由力觉信息处理模块、运动轨迹规划模块和电动机驱动模块组成。力觉信息处理模块实现对操作者控制力的采集处理并与从端反馈回的虚拟力融合。轨迹规划模块分别针对虚拟墙引导主动和被动模式,以融合力作为系统输入规划得到手控器运行的期望运动轨迹。电动机驱动模块驱动并记录机构的位置信息,将得到的手控器位姿信息同步给从端的机器人系统,控制其完成对目标物体的跟踪任务。手控器的上、下平台串联安置,能够在空间3个方向的转动和移动,手控器运动平台的结构简图如图2所示。

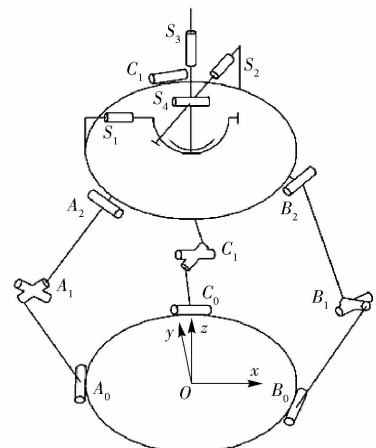


图2 手控器运动学模型

Fig. 2 Kinematic model of haptic device

定义 $\mathbf{q}_x = (\theta_1, \theta_2, \theta_3)^T$ 为移动平台驱动关节的位移分量, $\mathbf{q}_r = (\theta_4, \theta_5, \theta_6)^T$ 为旋转平台驱动关节的位移分量。

根据旋转机构的运动学特性, 可直接得到关于手控器旋转平台末端位移和驱动关节位移的雅可比矩阵 \mathbf{J}_r 为

$$\mathbf{J}_r = \begin{bmatrix} \cos\theta_6 & -\sin\theta_6 & 0 \\ \sin\theta_6 & \cos\theta_6 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

下平台为并联机构, 简化为如图 3 所示的空间几何, 根据向量参数关系求解其运动学关系。

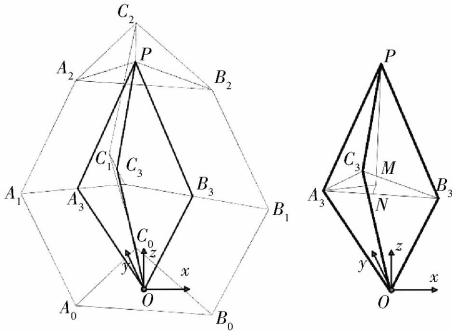


图 3 DELTA 机构的运动学几何模型

Fig. 3 Kinematic geometric model of DELTA mechanism

定义手控器移动平台末端的位置为 $\mathbf{X}_p = (x_p, y_p, z_p)$, 底座中心为空间坐标系的原点, 下平台 3 个驱动关节的位移为

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \arcsin \frac{x_p^2 + y_p^2 + z_p^2 + L_1^2 - L_2^2}{L_1 \sqrt{4z_p^2 + (\sqrt{3}x_p + y_p)^2}} + \arcsin \frac{\sqrt{3}x_p + y_p}{\sqrt{4z_p^2 + (\sqrt{3}x_p + y_p)^2}} \\ \arcsin \frac{x_p^2 + y_p^2 + z_p^2 + L_1^2 - L_2^2}{L_1 \sqrt{4z_p^2 + (\sqrt{3}x_p - y_p)^2}} - \arcsin \frac{\sqrt{3}x_p - y_p}{\sqrt{4z_p^2 + (\sqrt{3}x_p - y_p)^2}} \\ \arcsin \frac{x_p^2 + y_p^2 + z_p^2 + L_1^2 - L_2^2}{2L_1 \sqrt{z_p^2 + y_p^2}} - \arcsin \frac{y_p}{\sqrt{z_p^2 + y_p^2}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 L_1 ——曲柄长度 L_2 ——连杆长度

对时间微分得到

$$\frac{d\mathbf{q}_x}{dt} = \frac{d\mathbf{q}_x}{d\mathbf{X}_p} \frac{d\mathbf{X}_p}{dt} \quad (3)$$

因此, 描述移动平台末端和驱动关节的运动关系的逆向雅可比矩阵为

$$\mathbf{J}_p^{-1} = \frac{d\mathbf{q}_x}{d\mathbf{X}_p} \quad (4)$$

六自由度手控器末端位姿和各驱动关节的雅可比逆矩阵为

$$\mathbf{J}_{pr}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_p^{-1} & \mathbf{O}_{3 \times 3} \\ \mathbf{O}_{3 \times 3} & \mathbf{J}_r^{-1} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中 \mathbf{O} ——零矩阵

3 虚拟墙引导下的共享控制策略

基于触觉共享控制的遥操作系统, 首先通过立体视觉技术获取作业物体的空间位置信息, 以目标对象为导向构建引导机器人接近目标对象的虚拟引导力(包括引力、斥力和图像伺服力), 虚拟引导力可实现机器人的局部自主控制^[2,13]; 在视觉引导力的基础上, 根据虚拟墙引导的主动和被动控制, 融合操作者手动控制和机器人的自主控制, 生成手控器的期望轨迹, 控制从端机器人完成作业任务^[19-20]。

3.1 视觉引导力的构建

以机器人末端当前位姿与期望位姿的相对量为参数, 在已获取的作业对象特征和各像素点空间坐标的基础上, 依据引力场中物体的受力关系计算机器人所受的作业对象虚拟引力, 并映射到各驱动关节^[2,13], 得到

$$\mathbf{F}_\zeta = -\zeta \mathbf{J}_{rq}^{-1} (\mathbf{X}_c - \mathbf{X}_d) \quad (6)$$

式中 ζ ——引力系数

\mathbf{X}_c ——机器人末端的当前位姿向量(6 维)

\mathbf{X}_d ——机器人末端的期望位姿向量(6 维)

\mathbf{J}_{rq}^{-1} ——从端机械手末端和驱动关节的逆向雅可比矩阵

以机器人末端当前位姿与期望位姿的相对量为参数, 结合环境相机测得的背景环境(或障碍物)高程信息, 求解机器人末端沿其速度方向与背景环境的距离, 依据斥力场中物体的受力关系公式, 计算机器人所受的障碍物虚拟斥力并映射到各驱动关节^[2,13], 得到

$$\mathbf{F}_Y = \begin{cases} -k \mathbf{J}_{rq}^{-1} \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0} \right) \mathbf{v} & (\rho < \rho_0) \\ 0 & (\rho \geq \rho_0) \end{cases} \quad (7)$$

式中 k ——比例因子

ρ ——机器人末端沿其速度方向与背景环境或障碍物的距离

ρ_0 ——设定的机器人末端与障碍物或环境间的安全距离

\mathbf{v} ——机器人末端运动速度的单位向量(6 维)

对于从端基于视觉的虚拟引导力控制子系统, 为使图像中的作业对象始终位于相机视野中心区域附近, 以作业对象的图像特征点坐标为参数, 根据机器人运动参数和目标视觉成像位置关系雅可比矩阵, 构建基于目标图像运动位置的图像伺服引导力, 将其映射到各驱动关节, 得到

$$\mathbf{F}_s = \begin{cases} -\mathbf{K}_s \left[\frac{\partial \mathbf{S}}{\partial \xi_r} \right]^+ \nabla_s^T \mathbf{V}_s & (\mathbf{S}_i \notin \mathbf{C}) \\ 0 & (\mathbf{S}_i \in \mathbf{C}) \end{cases} \quad (8)$$

其中 $S_i = (u_i, v_i)$
 式中 S_i ——当前图像特征点位置
 $S \subseteq \{S_0, \dots, S_i, \dots, S_n\}$ ——提取的目标图像特征点位置集合
 C ——相机图像视野区域
 $\left[\frac{\partial S}{\partial \xi_r} \right]^+$ ——机械手末端相机视野中目标图像速度和驱动关节速度关系的逆向雅可比矩阵

3.2 虚拟墙模型

虚拟墙模型旨在实现从端机器人的自主运动对操作者的引导效果,此模式下运行的手控器能够引导操作者沿着从端的虚拟力生成的轨迹进行操作任务。当从端生成虚拟引导力并反馈回主端时,通过生成期望位姿来引导手控器的运行。虚拟力 F_{pw} 定义为

$$F_{pw} = K_w (X - X_{pw}) \quad (9)$$

式中 K_w ——设置的虚拟墙弹性系数
 X ——手控器末端运动轨迹
 X_{pw} ——设置的虚拟墙位置

虚拟墙通过在期望运动轨迹 X_d 周围建立一条圆形截面管状空间约束手控器的末端运动轨迹, X_{pw} 即为空间的内外交界面,当手控器的末端位姿偏离时,操作者可感受到虚拟力的约束,并调整对手控器的位置控制。虚拟墙设置如图4所示。

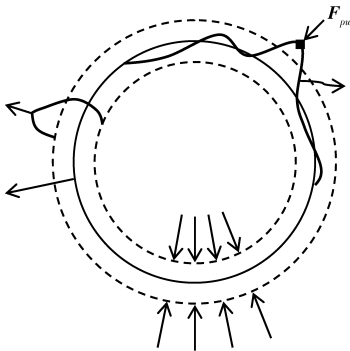


图4 轨迹追踪下的虚拟墙模型

Fig.4 Trajectory tracking of virtual wall model

3.3 虚拟墙引导下的主动模式

基于虚拟墙引导的主动模式主要实现操作者的智能决策对从端机器人与作业环境的交互效果,一方面操作者控制手控器的运行,在工作空间内生成期望的运动轨迹,从端机器人跟随此轨迹运动,但在从端实时生成的虚拟引导力并不参与机器人的运动轨迹生成过程;另一方面,依据虚拟墙模型,在期望运动轨迹周围生成基于主动控制模式下的虚拟墙,当手控器末端受到从端构建的虚拟引导力影响时,由此虚拟墙的约束产生的虚拟力能够引导纠正操作者的控制,对手产生拖拽效果,确保从端机械手沿

着目标物体的方向运行。定义虚拟墙在此过程中所产生的虚拟力为

$$F_{aw} = K_w (X - X_{aw}) \quad (10)$$

式中 X_{aw} ——设置主动模式下的虚拟墙位置

在虚拟引导力的影响下,如果手控器的末端位姿偏离 X_{aw} ,虚拟墙立刻产生推挤的效果,生成虚拟力 F_{aw} ,对手控器的运动产生约束,确保手控器的轨迹按照操作者期望的方向运动,同时引导操作者沿着目标物体所在方向控制机器人。

根据导纳控制策略,引导手控器运行的腕部质量-阻尼-弹簧模型为

$$F_v = M_v \ddot{X}_e + D_v \dot{X}_e + K_v X_e + \lambda F_{aw} \quad (11)$$

主动模式下的导纳控制策略以从端实时生成的虚拟引导力 F_v 和虚拟墙的约束力 F_{aw} 为输入,经由系统控制器得到手控器末端的规划轨迹,根据逆向运动学和动力学控制手控器的运行。当 $\|X - X_{aw}\| \leq \Delta d$ 时, $\lambda = 0$,手控器的运行轨迹不受虚拟墙的约束作用,手控器的运动仅由操作者控制力决定;当 $\|X - X_{aw}\| > \Delta d$ 时, $\lambda = 1$,虚拟力 F_{aw} 对手控器的末端轨迹产生约束,从端的虚拟引导力通过手控器对手产生拖拽效果,影响操作者的控制决策。

4 实验

以手控器为主端,以四自由度工业机器人为从端,分别在有虚拟墙引导和无虚拟墙引导的条件下进行主从遥控操作实验,搭建的手控器平台和从端作业环境如图5所示,实验场景如图6所示。本系统主要针对机器人末端到达目标位置的轨迹进行实验分析。



图5 手控器-机器人遥操作系统实验平台

Fig.5 Experimental platform of haptic device - robot teleoperation system

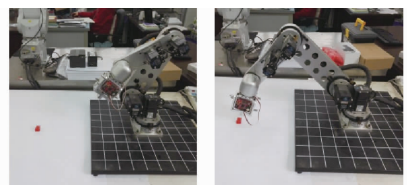


图6 实验场景

Fig.6 Scene of experiments

图7为无引导模式下,手动控制从端机械手运动的轨迹图。黑色曲线表示在手动模式下手控器的期望运动轨迹,蓝色曲线表示手控器在操作者控制

下的实际运动轨迹。

由图 7 可以看出,手动模式下机器人末端运动轨迹有较大的抖动,特别是末端欧拉角的变化非常大,虽然最终也能到达目标位置,但是工业机器人在

运动过程中承受较大的抖动,稳定性较差。

依据主动模式下的导纳控制策略,操作者施加如图 8 所示的力在手控器末端,生成并得到从端机器人末端的期望运动轨迹,如图 9 所示。

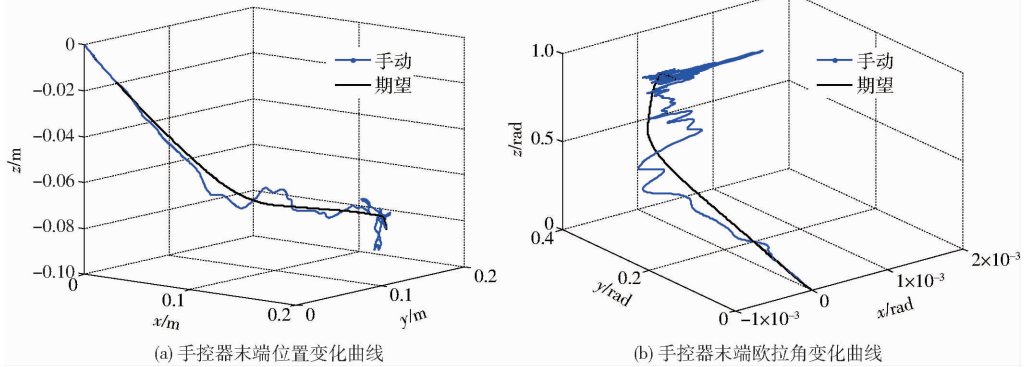


图 7 无引导模式下手控器末端的运动轨迹

Fig. 7 Haptic device end-effector trajectory in no boot mode

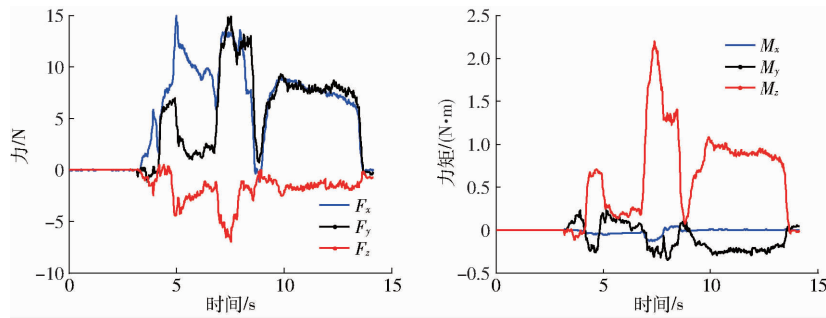


图 8 操作者对手控器施加的控制力和力矩

Fig. 8 Forces and torques that operator applied to robot

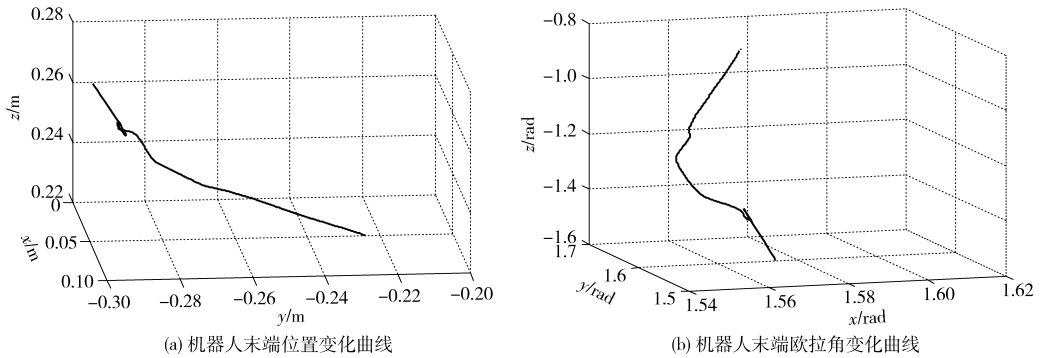


图 9 从端机器人的运动轨迹

Fig. 9 Trajectories of slave robot

在从端机械手运行的过程中,实时构建基于目标物体位置的虚拟引导力,并将引导力反馈回主端控制回路,根据建立的虚拟墙控制模型,手控器的运动轨迹将受到虚拟引导力的作用,偏离操作者所施加的期望运动轨迹,实现引导力在主动模式下对手控器的力觉引导作用。手控器在虚拟引导力的影响下产生的运动轨迹如图 10 所示。

端机械手运动的初始阶段,视觉引导力较大,对手控器的控制参与度较高,引导操作者操纵机器人朝着目标物体运动;随着接近目标物体,视觉引导力对系统的参与度减小,同时受虚拟墙的影响,手控器和机械手主要由操作者控制。

黑色曲线表示主动模式下手控器在操作者的控制力下的期望运动轨迹,蓝色曲线表示手控器在融入视觉引导力下的实际运动轨迹。在手控器控制从

在虚拟墙主动引导模式下,系统以操作者的控制为主导,以机械手末端生成的视觉引导力为辅。由图 10 可以看出,在机械手即将接近目标的过程中,手控器的运动速度和期望数值保持一致,该控制策略可以很好地引导机器人到达目标位置,机器人

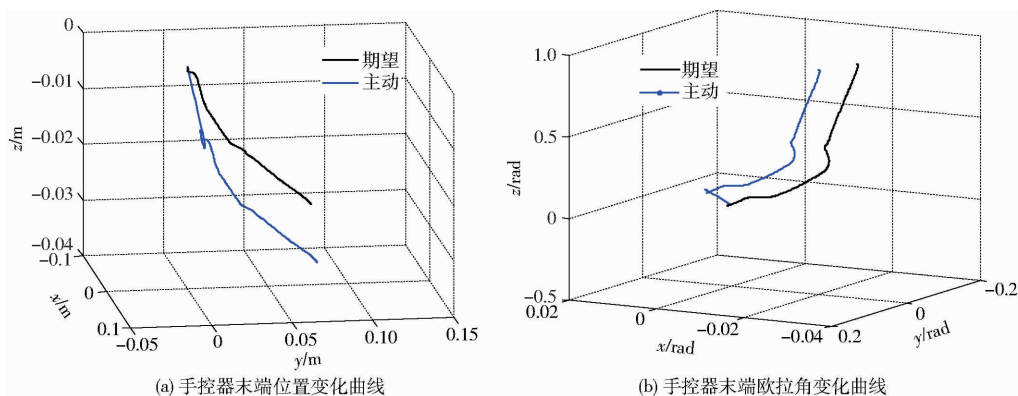


图10 主动模式下手控器末端的运动轨迹

Fig. 10 Haptic device end-effector trajectories in active mode

对环境的冲击大大减小,提升了作业效率。

5 结束语

结合手控器的触觉控制和从端机器人的视觉引导控制,将视觉对现场环境的认知结果以虚拟力的方式参与到机器人的自主任务规划当中,并利用基于虚拟墙引导的共享控制操纵手控器控制从端机械

手。虚拟墙引导下的共享控制方法体现了操作者手动控制和机器人自主运动的相互合作,以操作者的人工控制为主同时融入视觉伺服的辅助引导。实验结果表明,通过空间多自由度手控器能够实现操作者触觉控制和机器人自主引导的有效结合,实现机器智能与人的高级决策有机集成,解决了机器人操控过程中存在效率低、瞬间冲击大的问题。

参 考 文 献

- 1 REGELUNGSTECHNIK S. Autonomous robot manipulation in uncertain human environments using purely haptic feedback [D]. Munich: Technical University of Munich, 2009.
- 2 NI T, ZHANG H, XU P, et al. Vision-based virtual force guidance for tele-robotic system [J]. Computers & Electrical Engineering, 2013, 39(7): 2135 - 2144.
- 3 CASTRO A C, POSTIGO J, MANZANO J. Integration of a force feedback joystick with a virtual reality system [J]. Latin American Applied Research Journal, 2000, 30(2): 171 - 178.
- 4 巩明德, 赵丁选, 冯汝扬. 电液伺服遥操纵机器人主-从位置控制器 [J]. 农业机械学报, 2009, 40(6): 189 - 193.
GONG Mingde, ZHAO Dingxuan, FENG Ruyang. Master-slave position controller of electron-hydraulic servo telerobot [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(6): 189 - 193. (in Chinese)
- 5 安宏雷. 双边遥操作力反馈手控器研制 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008.
- 6 吴剑锋, 宋爱国, 李建清. 一种三维力反馈手控器 [J]. 传感技术学报, 2010, 23(10): 1417 - 1420.
- 7 BARK K, MCMAHAN W, REMINGTON A, et al. In vivo validation of a system for haptic feedback of tool vibrations in robotic surgery [J]. Surgical Endoscopy, 2013, 27(2): 656 - 664.
- 8 BLANK A, OKAMURA A M, KUCHENBECKER K J. Identifying the role of proprioception in upper-limb prosthesis control: studies on targeted motion [J]. ACM Transactions on Applied Perception (TAP), 2010, 7(3): 15.
- 9 KURIHARA Y, TAKEI S, NAKAI Y, et al. Haptic robotization of the human body by data-driven vibrotactile feedback [J]. Entertainment Computing, 2014, 5(4): 485 - 494.
- 10 STANLEY A A, KUCHENBECKER K J. Evaluation of tactile feedback methods for wrist rotation guidance [J]. IEEE Transactions on Haptics, 2012, 5(3): 240 - 251.
- 11 CHRISTENSEN Q M. Three degree of freedom haptic feedback for assisted driving of holonomic omnidirectional wheelchairs [D]. Salt Lake City: The University of Utah, 2011.
- 12 WANG X, SHI Z, ZHANG F, et al. Mutual trust based scheduling for (semi) autonomous multi-agent systems [C] // 2015 American Control Conference (ACC). IEEE, 2015: 459 - 464.
- 13 倪涛, 李骁鹏, 张红彦, 等. 基于立体视觉的遥操作机器人力感示教控制策略 [J]. 农业机械学报, 2013, 44(1): 244 - 247.
NI Tao, LI Xiaopeng, ZHANG Hongyan, et al. 3-D vision-based kinesthesia teaching control strategy for telerobotics [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(1): 244 - 247. (in Chinese)
- 14 JANABI-SHARIFI F, HASSANZADEH I. Experimental analysis of mobile-robot teleoperation via shared impedance control [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 2011, 41(2): 591 - 606.
- 15 KIM Jungsik, CHANG Dongjune, LADJAL Hamid, et al. Evaluation of telerobotic shared control for efficient manipulation of single cells in microinjection [C] // 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2011: 3382 - 3387.

- 2015,116(17):6-9.
- 22 GAN G J, NG M K. Subspace clustering with automatic feature grouping[J]. *Pattern Recognition*,2015,48(11):3703-3713.
- 23 SHI B Q, LIANG J, LIU Q. Adaptive simplification of point cloud using k-means clustering[J]. *Computer-Aided Design*,2011,43(8):910-922.
- 24 KINDLMANN G L, ESTEPAR R S J, SMITH S M, et al. Sampling and visualizing creases with scale-space particles[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*,2009,15(6):1415-1424.
- 25 YU Z W, WONG H S, PENG H, et al. ASM: an adaptive simplification method for 3D point-based models[J]. *Computer-Aided Design*,2010,42(7):598-612.
- 26 GOSWAMI P, EROL F, MUKHI R, et al. An efficient multi-resolution framework for high quality interactive rendering of massive point clouds using multi-way kd-trees[J]. *The Visual Computer*,2013,29(1):69-83.
- 27 NING X J, WANG Y H, HANG X P. Hierarchical model generation for architecture reconstruction using laser-scanned point clouds[J]. *Optical Engineering*,2014,53(6):061612.
- 28 SMITH M, POSNER I, NEWMAN P. Adaptive compression for 3D laser data[J]. *The International Journal of Robotics Research*,2011,30(7):914-935.
- 29 VANDERHYDE J, SZYMCAK A. Topological simplification of isosurfaces in volume data using octrees[J]. *Graph Models*,2008,70(1-2):16-31.
- 30 HOPPE H, DEROSE T, DUCHAMP T, et al. Surface reconstruction from unorganized points[C]//*ACM SIGGRAPH Conference Proceedings*,1992:71-78.
- 31 LEVIN D. Mesh-independent surface interpolation[M]//BRUNETT G, HAMANN B, MUIER H. *Geometric modeling for scientific visualization*. Berlin: Springer,2003:37-49.
- 32 ALLIEZ P, COHEN-STEINER D, TONG Y, et al. Voronoi-based variational reconstruction of unoriented point sets[C]//*Eurographics Symposium on Geometry Processing*,2007:39-48.
- 33 何学铭, 嵯永盛, 庞明勇. 点云模型中孔洞边界曲线多准则提取算法[J]. *农业机械学报*, 2014,45(2):291-296.
HE Xueming, ZHUO Yongsheng, PANG Mingyong. An algorithm for extracting hole-boundary from point clouds[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014,45(2):291-296. (in Chinese)
- 34 GROSS M, PFISTER H. *Point-based graphics*[M]//*The Morgan Kaufmann series in computer graphics*. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2007.
- 35 SUN W, BRADLY C, ZHANG Y F, et al. Cloud data modeling employing a unified non-redundant triangular mesh[J]. *Computer-Aided Design*, 2001,33(2):183-193.
- 36 FRANK P Ferrie, JEAN Lagarde, PETER Whaite. Darboux frames, snakes, and super-quadratics: geometry from the bottom up[C]//*Proceedings of the 1989 Workshop on Interpretation of 3D Scenes*,1989:27-29.
- 37 AMENTA N, BERN M. Surface reconstruction by voronoi filtering[C]//*SCG'98: Proceedings of the Fourteenth Annual Symposium on Computational Geometry*, 1998:39-48.
- 38 DEY T K, GOSWAMI S. Provable surface reconstruction from noisy samples[J]. *Computational Geometry: Theory and Applications*, 2006, 35(1-2):124-141.
- 39 谢友金, 王仲奇, 康永刚, 等. 球面逼近求解变形曲面法向矢量算法研究[J]. *现代制造工程*, 2010(7):51-55.
XIE Youjin, WANG Zhongqi, KANG Yonggang, et al. Study of algorithm on solving normal vector of deformed surface by sphere approximation[J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2010(7):51-55. (in Chinese)
- 40 CIGNONI P, ROCCHINI C, SCOPIGNO R. Metro: measuring error on simplified surfaces[J]. *Computer Graphics Forum*, 1998, 17(2):167-174.

(上接第372页)

- 16 李海超, 高洪明, 吴林, 等. 基于共享控制策略的遥控弧焊机器人焊缝跟踪[J]. *焊接学报*, 2006,27(4):5-8.
- 17 TCHING L, DUMONT G, PERRET J. Haptic assembly of CAD models using virtual constraint guidance[C]//*ASME 2010 World Conference on Innovative Virtual Reality*, 2010:11-19.
- 18 TSUMAKI Y, NARUSE H, NENCHEV D N, et al. Design of a compact 6-DOF haptic interface[C]//*1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1998, 3:2580-2585.
- 19 ALAMDARI A, KROVI V. Parallel articulated-cable exercise robot (PACER): novel home-based cable-driven parallel platform robot for upper limb neuro-rehabilitation[C]//*ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, Paper No. DETC 2015-46389,2015,5A:V05AT08A031-1-10.
- 20 ALAMDARI A, KROVI V. Modeling and control of a novel home-based cable-driven parallel platform robot: PACER[C]//*2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2015:6330-6335.