

# 基于立体视觉的遥操作机器人力感示教控制策略<sup>\*</sup>

倪涛 李骁鹏 张红彦 许鹏 马兆建

(吉林大学机械科学与工程学院, 长春 130025)

**摘要:** 为提高遥操作机器人的安全性和操作性能,利用人类对力觉信息更敏感的特点和视觉特有的“预测与导引”功能,将视觉对现场环境的认知结果以虚拟力(包括作业对象引力、障碍物斥力)的方式同操作者的操纵力信号融合,提出遥操作机器人的力感示教控制策略。力感示教控制策略将机器智能与人类高级决策的优点相结合,可有效提高遥操作机器人的作业效率与局部自主,降低对操作者熟练程度的要求,以及避免大时延系统中由图像时滞导致的机器人操控盲目性。对该控制系统的体系结构、作业环境空间信息的提取、控制方法等进行了阐述,并通过实验验证了控制方法在提高遥操作机器人作业效率和安全性等方面的优越性。

**关键词:** 遥操作机器人 立体视觉 力感示教 控制策略

中图分类号: TP242.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2013)01-0244-04

## 3-D Vision-based Kinesthesia Teaching Control Strategy for Telerobotics

Ni Tao Li Xiaopeng Zhang Hongyan Xu Peng Ma Zhaojian

(*Institute of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China*)

**Abstract:** In order to improve the safety and manipulation performance for telerobotic system, a kinesthesia teaching control strategy for telerobotics was presented. Utilizing the characteristics of human's sensitivity to force information as well as the specific feature of vision's forecast and guidance, the control force of the operator with the virtual forces was merged, including the attraction force from objectives, and the rejection force from obstacles, which were generated from the recognition results of working fields based on vision techniques. Furthermore, it combined the advantages of machine intelligence with human's high-level decision, which could improve effectively the working efficiency as well as local autonomy of tele-robot, and reduce the proficiency requirements of operator. Especially, in a teleoperation system with large time delay, the method could avoid the blinded manipulation of robot caused by lagging transmission of image. The system structure, extraction of the operating environment spatial information and control methods were introduced in detail. The superiority of the proposed control strategy in improving the operating efficiency and security of the telerobotic system were verified by relative experiments.

**Key words:** Telerobotic 3-D vision system Kinesthesia teaching Control strategy

### 引言

在主从机器人控制过程中,操作者由于与机器人相距较远而无法亲身感知作业现场的真实环境,只能依据现场反馈的图像、声音、力/触觉等信息来

完成作业任务。主从机器人控制领域仍有许多问题有待解决:首先,机器人作业任务完成的成功与否以及效率高低,过多地依赖于操作人员的技能水平和熟练程度;其次,现场反馈的视频图像信息在远距离传输中不可避免地存在较大时滞,而传统的“移

收稿日期: 2012-08-24 修回日期: 2012-09-04

<sup>\*</sup> 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20110061120033)和吉林省科技发展计划资助项目(201101027)

作者简介: 倪涛,副教授,主要从事机器人技术及应用研究,E-mail: nitao@jlu.edu.cn

通讯作者: 张红彦,副教授,主要从事智能车辆研究,E-mail: zhanghy@jlu.edu.cn

动一等待”策略大大降低了机器人的作业效率；同时，操作者由于无法直接感知图像中的景深信息，也就难以精确把握机器人与作业对象的距离，势必导致机器人操控效率低下；再次，现有的主从机器人双向伺服控制策略<sup>[1-3]</sup>几乎无一例外地强调“作业反力”的“再现与感知”，力反馈效果产生的前提是机器人已经与作业环境接触。这在某些诸如高速、重载等应用场合，机器人对作业环境的瞬间冲击，很可能在操作人员感知现场作业反力之前便已造成无法弥补的损失。

针对目前主从机器人系统存在的效率低、难操控、安全性差等问题，提出一种全新的基于视觉的力感示教型双向伺服控制策略，采用立体视觉技术对现场环境中的作业对象及背景环境（障碍物）进行识别与空间信息提取，在此基础上构建虚拟的引导力，并向操作者反馈，从而对操作者的操纵行为予以力感指引。

## 1 系统组成及工作原理

有力感示教的遥操作机器人控制系统主要由主端和从端构成，如图 1 所示。其中，主端系统主要包括虚拟视觉子系统、力感示教子系统等；从端系统主要由机器人子系统、图像采集子系统、伺服控制单元等构成。力感示教子系统主要包括两台 Logitech Wingman 操纵杆，该操纵杆由 Direct Input 和 Force Feedback 模块驱动，可实现特定方向上的力反馈效果；现场机器人具有一个沿垂直轴的回转和 3 个沿水平轴的转动共 4 个自由度，其末端为可开合手爪；图像采集子系统主要包括 Kinect<sup>[4]</sup> 摄像头和相应的数据处理与传输模块，通过内置的红外投射、接收装置，利用黑白光谱的方式来感知环境（纯黑代表无穷远，纯白代表无穷近，黑白之间的灰色地带对应物体到传感器的物理距离），通过收集相机视野内的每一点，可实现像素点三维空间坐标的实时计算，并形成一幅代表周围环境的景深图像，其帧速率可达 30f/s。

遥操作机器人工作时，操作者处于安全地点，通过力反馈操纵杆控制现场的机器人完成作业任务。Kinect 摄像头固连于机器人基座上方，实时采集工作现场的视频图像和景深图像信息，进而生成机器人作业的三维虚拟环境，为操作者提供虚拟视觉反馈。同时，操作者借助虚拟环境中的“移动视点”技术，动态改变虚拟现实辅助遥操作中的观察方位。当机器人距离作业对象较远时，视点位置较高，以便俯瞰全局；当机器人执行抓取任务时，视点位置距作业对象较近，以便观察机器人与作业对象的接触状

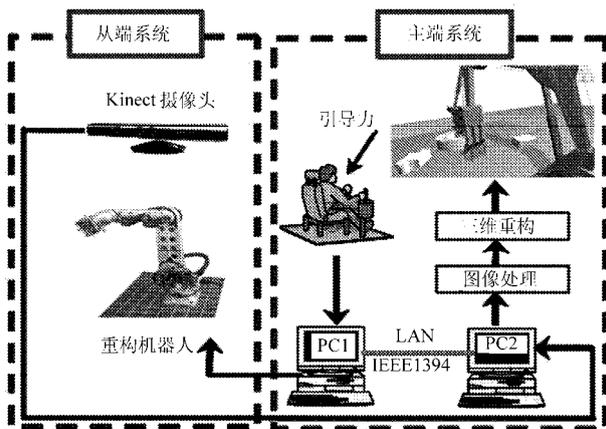


图 1 有力感示教的遥操作机器人控制系统原理图

Fig. 1 Schematic of construction telerobotic system with force guidance

态。以虚拟场景中机器人末端与作业对象、障碍物的相对位姿为参数，构建作业对象对机器人的虚拟引力及障碍物对机器人的虚拟斥力，二者的合力反馈到主端的力反馈操纵杆上，为操作者提供“示教”的力觉信息指引，从而引导操作者控制现场机器人迅速地接近作业对象，并自动远离障碍物，避免同环境发生不必要的碰撞。

## 2 基于视觉的作业环境空间信息提取

本系统的机器人力感示教控制策略，本质上讲就是在图像理解与分析的基础上，将视觉对作业环境的认知结果以力觉的形式反映到现场机器人的运动控制上。引导力的建模方式客观上要求将作业对象视为单独的三维实体，从背景环境中识别并分离出来。

### 2.1 作业对象的三维重构

作业对象的位姿识别与三维空间信息提取是“虚拟引力”构建的前提和基础。为侧重于引导力的建模，系统假定作业对象与背景环境间存在明显的颜色、灰度或纹理差异。作业对象的位姿计算过程如下：

- (1) 依据图像中各像素点的颜色或灰度特征，采用局部动态阈值的方法，实现前景和背景的二值化分割。
- (2) 通过膨胀-腐蚀算法去除二值图像中由于图像噪声导致的微小孔隙。
- (3) 对图像中各个物体进行标号，并移除面积小于 100 个像素的物体。
- (4) 采用分裂-合并算法提取作业对象的区域轮廓。
- (5) 根据相机标定的结果，实时计算作业对象区域各像素点的空间坐标。

## 2.2 障碍物的高程信息提取

高程数据模型是用一组有序数值阵列形式表示地面高程信息的一种实体地面模型,通过有限的地形高程数据实现对地形曲面的数字化模拟。

本系统的工程机器人主要以地表物体的抓取、搬运为任务目标。为保证机器人操控的实时性,将图像中除作业对象外的一切区域均视为障碍物(背景地形,简称地形),并以高程数据来对其进行描述。实现过程如下:

(1) 根据图像中各像素点的颜色、灰度或纹理特征,从中剔除作业对象区域,以获得背景地形图像。

(2) 根据相机标定的结果,实时计算背景地形图像中各像素点的空间坐标,并生成3D点云。其中,作业对象区域内像素点的空间坐标通过基于空间自相关性的内插方式来估计。

(3) 以半径为 $r_0$ 的球顺次遍历背景地形的3D点云,若包含于球域内的像素个数小于一预设的常数 $k_0$ ,则将该点视为孤立的误匹配点,从点云中予以剔除,本实验环境下, $r_0$ 取0.8, $k_0$ 取30。

## 2.3 作业环境的虚拟重构与特征提取

依据作业对象的3D点云,通过降采样的Power Crust算法<sup>[5]</sup>,重构作业对象的三维模型;依据障碍物的3D点云,采用Delaunay<sup>[6]</sup>三角网格算法来实现背景地形的三维建模;在此基础上,实现机器人作业环境的虚拟重构。现场环境照片及三维重构结果如图2所示。

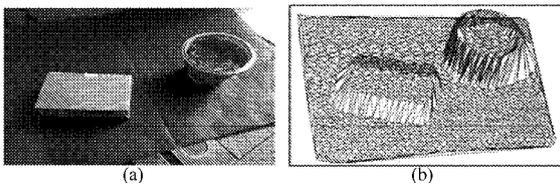


图2 作业环境的虚拟重构

Fig.2 3-D reconstruction of working field

(a) 现场作业环境 (b) 作业环境三维重构

在虚拟场景中,以作业对象OBB包围盒<sup>[7-8]</sup>轴线方向为期望姿态 $R$ ,以沿该轴线方向距离包围盒质心 $(l_0/2 + d)$ 处为期望位置 $T$ ,实时计算机器人末端的期望位姿 $\gamma = [R \ T]$ ,其中 $l_0$ 为包围盒长度, $d$ 为设定的常数;通过机器人末端速度向量与三维地形的求交运算,实时计算机器人与环境间的距离 $\rho$ 。 $\gamma$ 、 $\rho$ 为机器人虚拟引导力的建模依据。

## 3 机器人的力感示教控制策略

在基于视觉的力感示教控制策略下,操作者在主端操作手柄上的感知力包括作业对象对机器人的

“虚拟引力”,以及障碍物或环境对机器人的“虚拟斥力”。

设机器人处于由目标和障碍物构成的虚拟势场 $V$ 中,根据Khatib的人工势场法<sup>[9]</sup>原理,沿着势场负梯度方向的虚拟力 $F(\gamma_0) = -\nabla_{\gamma_0}^T V$ 可保证机器人的运动收敛于系统的低势能点,其中 $\gamma_0$ 为机器人末端的当前位姿向量, $\nabla_{\gamma_0}^T V$ 为势函数 $V$ 在 $\gamma_0$ 处梯度向量的转置。

为引导操作者控制机器人快速、便捷地接近目标物体,可构建作业对象引力 $F_c$ 为

$$F_c = -(\gamma_0 - \gamma) \quad (1)$$

为引导操作者控制机器人在不发生碰撞的前提下及时躲避障碍物,可构建障碍物虚拟斥力 $F_o$ 为

$$F_o = \begin{cases} -\eta \left( \frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0} \right) \frac{1}{\rho^2} \mathbf{v} & (\rho \leq \rho_0) \\ 0 & (\rho > \rho_0) \end{cases} \quad (2)$$

式中 $\rho_0$ ——设定的机器人末端与障碍物安全距离

$\eta$ ——常数

$\mathbf{v}$ ——机器人末端运动速度的单位向量

综上所述,引导力定义为

$$F_m = \alpha F_c + \beta F_o \quad (3)$$

式中 $\alpha$ 、 $\beta$ ——虚拟引力、虚拟斥力的影响系数

本实验环境下, $\alpha$ 取0.7, $\beta$ 取0.3。

由引导力的构建规则可知,基于人工势场法的作业对象引力能够保证机器人稳定、快速的靠近目标物体;在障碍物斥力的作用域内,机器人会被虚拟斥力“推离”障碍物,从而保证机器人系统的安全、可靠。

## 4 实验

以预设的多面体为作业对象,地面及地表其它物体视为障碍物,以作业对象的抓取为任务目标,分别在有力感示教和无力感示教的条件下进行机器人的虚拟现实辅助遥操纵实验。控制软件采用C++面向对象的方式,在Visual Studio 2008编程环境中实现;虚拟场景通过OpenSceneGraph(OSG)构建。

实验用机器人采用深圳元创兴公司的四自由度工业机器人,实验场景如图3所示。

实验结果如图4所示。其中,图4a表示实验过程中机器人末端与作业对象之间的相对距离变化结果;图4b为机器人末端的三维空间轨迹曲线。

由图4a可知,在虚拟现实辅助遥操纵中,将力感示教引入机器人的实时操控,可明显缩短作业任务的完成时间。虚拟场景可为操作者提供对现场环境较为直观的三维视觉认知,然而在向屏幕的二维投影过程中,往往丢失了部分景深信息。操作者依

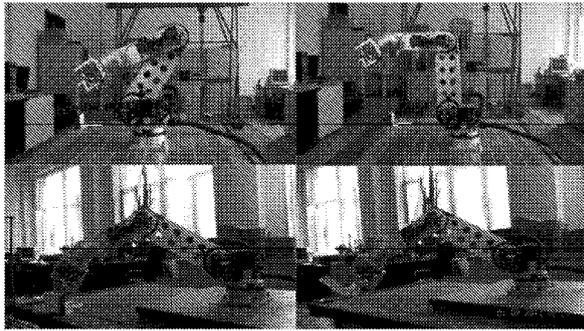


图 3 实验场景

Fig. 3 Scene of experiments

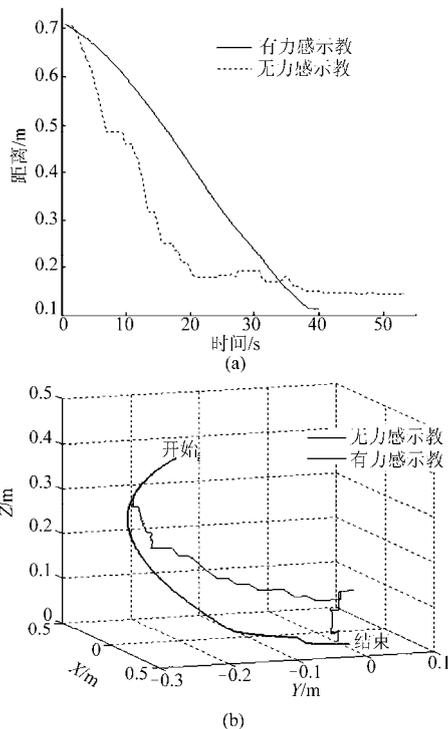


图 4 实验结果

Fig. 4 Results of experiments

旧需要由二维图像来估计机器人与作业对象的相对距离,无疑会导致机器人操控效率低下,且长时间的操作容易造成操纵人员的心理紧张及决策疲劳。

此外,由于主端手控器在结构形式、尺寸、活动空间等方面与从端机器人相差甚大,操作者在控制机器人过程中,由于不熟练或反馈信息不足,往往要经过多次、反复的位姿调整,如图 4b 所示。力感示教控制策略将机器人与作业对象、障碍物的相对距离信息以虚拟力的形式向操作者反馈,从而对其操纵行为予以方向的指引,形成“示教”的效果,可以保证机器人快速、平稳地到达目标位置,避免了机器人操控时的停顿与反复,从而显著提高了系统的作业效率。

## 5 结束语

提出的基于视觉的力感示教控制策略将机器智能与人类高级决策的优点有机集成,可有效提高遥操作机器人的作业效率与局部自主,降低对操作人员熟练程度的要求;并能够对可能发生的机器人与环境间的碰撞进行预测,从而有效保证机器人作业系统的安全性。此外,在有大时延的遥操纵系统中,虚拟引导力在现场机器人控制回路实时计算,具有数据量小、信息丰富、超前预测等优点,该力向操作者提供的运动视觉和力觉提示,能够在不增添网络负担的前提下,避免图像时滞导致的机器人操控盲目性。

力感示教控制策略赋予操纵杆一定的自主性和主动性,且对机器人智能的要求易于实现,就目前的科技水平来说,是一种优化的、可行的控制方式。

## 参 考 文 献

- 1 Ilija G Polushin, Peter X Liu, Chung-Hornng Lung, et al. Position-error based schemes for bilateral teleoperation with time delay: theory and experiments [J]. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2006, 12(11): 312 ~ 317.
- 2 倪涛, 赵丁选, 张宏彦. 电液手控器遥操作机器人力反馈控制策略[J]. 农业机械学报, 2010, 41(12): 190 ~ 194.  
Ni Tao, Zhao Dingxuan, Zhang Hongyan. Bilateral servo control of tele-robot based on electro hydraulic manipulator [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(12): 190 ~ 194. (in Chinese)
- 3 Soheil Ganjefar, Somayeh Najibi, HamidReza Momen. A novel structure for the optimal control of bilateral teleoperation systems with variable time delay [J]. Journal of the Franklin Institute, 2011, 348(7): 1 537 ~ 1 555.
- 4 Amenta N, Choi S, Kolluri R K. The prower crust [C] // Proceedings of the 6th ACM Symposium on Solid Modeling and Applications, 2001: 249 ~ 260.
- 5 Noonan P J. The design and initial calibration of an optical tracking system using the microsoft kinect [C] // Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), IEEE, 2011, 24(11): 441 ~ 445.
- 6 武晓波, 王世新, 肖春生. Delaunay 三角网的生成算法研究[J]. 测绘学报, 1999, 28(1): 27 ~ 35.  
Wu Xiaobo, Wang Shixing, Xiao Chunsheng. A new study of Delaunay triangulation creation [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 1999, 28(1): 27 ~ 35. (in Chinese)
- 7 章勤, 黄琨, 李光明. 一种基于 OBB 的碰撞检测算法的改进[J]. 华中科技大学大学学报: 自然科学版, 2003, 31(1): 46 ~ 48.  
Zhang Qin, Huang Kun, Li Guangming. Improvement of collision detection algorithm based on OBB dies [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Nature and Science Edition, 2003, 31(1): 46 ~ 48. (in Chinese)

## 参 考 文 献

- 1 陈修龙, 贾帅帅, 邓昱, 等. 新型 4-UPS-UPU 并联坐标测量机刚柔耦合动力学性能[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2011, 41(4): 1020 ~ 1024.  
Chen Xiulong, Jia Shuaishuai, Deng Yu, et al. Dynamic behaviors of rigid-flexible coupling for novel 4-UPS-UPU parallel coordinate measuring machine [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2011, 41(4): 1020 ~ 1024. (in Chinese)
- 2 陈修龙, 贾帅帅, 邓昱. 高速空间并联式坐标测量机动力学优化设计[J]. 农业机械学报, 2012, 43(3): 213 ~ 218.  
Chen Xiulong, Jia Shuaishuai, Deng Yu. Dynamics optimization design of high-speed spatial parallel coordinate measuring machine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(3): 213 ~ 218. (in Chinese)
- 3 白志富, 韩先国, 陈五一. 基于 Lagrange 方程三自由度并联机构动力学研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(1): 51 ~ 54.  
Bai Zhifu, Han Xianguo, Chen Wuyi. Study of a 3-DOF parallel manipulator dynamics based on Lagranges equation [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 30(1): 51 ~ 54. (in Chinese)
- 4 王洪波, 黄真. 六自由度并联式机器人拉格朗日动力方程[J]. 机器人, 1990, 12(1): 23 ~ 26.  
Wang Hongbo, Huang Zhen. Lagranges dynamic equation of six-DOF parallel multi-loop robot manipulator [J]. Robot, 1990, 12(1): 23 ~ 26. (in Chinese)
- 5 陈根良, 王皓, 来新民, 等. 基于广义坐标形式牛顿-欧拉方法的空间并联机构动力学正问题分析[J]. 机械工程学报, 2009, 45(7): 41 ~ 48.  
Chen Genliang, Wang Hao, Lai Xinmin, et al. Forward dynamics analysis of spatial parallel mechanisms based on the Newton-Euler method with generalized coordinates [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(7): 41 ~ 48. (in Chinese)
- 6 孔令富, 张世辉, 肖文辉, 等. 基于牛顿-欧拉方法的 6-PUS 并联机构刚体动力学模型[J]. 机器人, 2004, 26(5): 395 ~ 399.  
Kong Lingfu, Zhang Shihui, Xiao Wenhui, et al. Rigid body dynamics model of the 6-PUS parallel mechanism based on Newton-Euler method [J]. Robot, 2004, 26(5): 395 ~ 399. (in Chinese)
- 7 郭祖华, 陈五一, 陈鼎昌. 6-UPS 型并联机构的刚体动力学模型[J]. 机械工程学报, 2002, 38(11): 53 ~ 57.  
Guo Zuhua, Chen Wuyi, Chen Dingchang. Dynamics model on the 6-UPS parallel mechanism [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(11): 53 ~ 57. (in Chinese)
- 8 Tsai L W. Solving the inverse dynamics of a Stewart Gough manipulator by the principle of virtual work [J]. ASME Journal of Mechanical Design, 2000, 122(1): 3 ~ 9.
- 9 赵永生, 郑魁敬, 施毅. 5-UPS/PRPU 五自由度并联机床动力学建模[J]. 机械设计与研究, 2004, 20(3): 45 ~ 47.  
Zhao Yongsheng, Zheng Kuijing, Shi Yi. Dynamics modeling of 5-UPS/PRPU 5-DOF parallel machine tool [J]. Machine Design & Research, 2004, 20(3): 45 ~ 47. (in Chinese)
- 10 Zhao Y J, Yang Z Y, Huang T. Inverse dynamics of delta robot based on the principle of virtual work [J]. Transactions of Tianjin University, 2005, 11(4): 268 ~ 273.

~~~~~

(上接第 247 页)

- 8 Tu Chaoqiang, Yu Lizhen. Research on collision detection algorithm based on AABB-OBB bounding volume [C] // First International Workshop on Education Technology and Computer Science, ETCS'09, 2009, 5(26): 331 ~ 333.
- 9 Khatib O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robot [J]. The International Journal of Robotics Research, 1986, 5(1): 90 ~ 98.
- 10 侯敬巍, 赵丁选, 巩明德, 等. 液压力觉双向伺服系统的策略切换控制[J]. 农业机械学报, 2012, 43(7): 190 ~ 193.  
Hou Jingwei, Zhao Dingxuan, Gong Mingde, et al. Strategy-switching control for hydraulic force bilateral servo system when catching objects [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(7): 190 ~ 193. (in Chinese)