

面向柔软物体抓取的遥操作工程机器人位置反力控制*

黄玲涛 倪涛 黄海东

(吉林大学机械工程学院, 长春 130022)

摘要: 为改善工程机器人系统的操作性,并提高在抓取和搬运柔软物体过程中的安全性,对主从遥操作系统的控制进行了研究,提出了位置速度/位置反力混合控制的方法。工程机器人在自由移动时,采用位置速度控制,工程机器人与环境间产生反馈力时,切换到位置反力控制。利用反馈力作为反馈信号,实现对力的间接控制。设计并开展了抓取与搬运柔软物体的实验,并对抓取和搬运过程中的物体最大变形量以及活塞杆平均位移进行了统计分析 & 配对 t 检测。结果表明:相比传统的位置速度控制方法,位置反力控制方法能够改善主从遥操作系统的操作性,确保在抓取和搬运过程中柔软物体的安全性。

关键词: 工程机器人 位置反力控制 力反馈 遥操作 主从控制

中图分类号: TP24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)10-0357-07

Position Reaction Force Control of Teleoperation Construction Robot for Grasping Soft Objects

Huang Lingtao Ni Tao Huang Haidong

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

Abstract: In teleoperation, it is very important to ensure that task objects are not severely grasped in grasping and conveying processes. A master-slave system for a teleoperation construction robot employed an excavator with four degrees of freedom (swing, boom, arm and fork glove) as slave and two joysticks with force feedback as master was established. Since the fork glove was regarded as the hand of the robot, the control for the fork glove was the focus. A position velocity control system was previously proposed, and it was found that soft objects were severely crushed in grasping and conveying processes at slow speed. To solve this problem, a position reaction force control method, in which reaction force to the joystick was used as feedback instead of piston velocity, was proposed to improve the controllability. The position velocity control was adopted when the construction robot moving in free space and the position reaction force was introduced when reaction force generated in the grasping process. Grasping experiments were conducted using a tin and urethane foam blocks as task objects by human and control PC at slow velocity, and the experimental results confirmed the validity of the position reaction force control method during slowly grasping of a fragile or soft object. In addition, conveying experiments, which simulated transformation task in practical use by using a tire, a piece of urethane foam and a piece of sponge foam as task objects, were conducted by the position velocity and position reaction force control methods. Experimental and statistical analysis results proof that position reaction force control method is valid to safely transfer soft objects in teleoperation work and it can improve the controllability of the construction robot.

Key words: Construction robot Position reaction force control Force feedback Teleoperation Master-slave control

收稿日期: 2015-01-09 修回日期: 2015-02-02

* 国家自然科学基金资助项目(51305153)和吉林省重点科技攻关资助项目(20130206034GX)

作者简介: 黄玲涛, 讲师, 主要从事遥操作、力反馈及机器人控制研究, E-mail: hlt@jlu.edu.cn

通讯作者: 倪涛, 教授, 主要从事遥操作、虚拟现象和机器人技术研究, E-mail: nitao@jlu.edu.cn

引言

智能机器人的研究因受到传感器技术、材料技术以及机器人技术发展的限制,在未知或者复杂环境下作业的完全自主式智能机器人的研发难以实现^[1]。随着航空航天、海洋探索以及核能应用等技术的发展,又迫切需要大量高级机器人代替人类在危险或不利于人类健康的环境下进行作业,因此许多学者对遥操作机器人作业方面展开研究^[2]。在遥操作中,远端机器人及其周边环境的信息需要充分提供给操作者,使操作者能够身临其境,充分感受到机器人的作业现场。文献[3-4]表明,除视觉信息外,力反馈信息能够增强遥操作的临场感,提高遥操作的工作效率。

力反馈技术要求,在对机器人位置控制的基础上,也要对机器人与环境间的相互作用力进行控制。力的控制方法主要有:位置/力混合控制^[5]和阻抗控制^[6]。前者利用位置与力的正交原理实现位置与力的切换控制;后者通过控制位置实现对机器人与环境间作用力的间接控制。这两种力的控制方法在抛光、打磨、焊接、康复训练等工业机器人上已得到广泛应用^[7-13]。

一些学者认为位置/力混合控制方法并不适用工程机器人,因为机器人末端(斗齿尖、抓手)与物体接触的瞬间,由位置控制切换到力控制,存有多余力,会出现机械臂抖动的问题,因而提出一些阻抗控制方法^[14-16]。Yamada等提出了改进可变增益的位置对称型控制方法^[17],该方法利用阻抗控制的方法计算可变增益及反馈力,提高了系统的感知度。为改善工程机器人的操作性, Kim等提出利用安装在人体手臂上的3个传感器来检测手臂运动,进而实现控制挖掘机的操控方法^[18]。此方法依然是位置对称型的控制方法,存在操作精度不高、操作者容易疲劳等缺点。Yamada等进一步提出,用速度代替位置作为反馈的位置速度控制方法^[19],该方法实现了工程机器人控制方式的根本性改变。根据心理物理学韦伯定律^[20],笔者提出了对柔软物体的位置速度控制方法^[21-22],该方法能够使操作者真实地感知到抓取物体时初始阶段的反馈力,粗略地计算出物体的“硬度”。但工程机器人在搬运物体过程中仍然存在柔软物体被严重挤压等问题,无法保证搬运过程中物体的安全性。

本文根据位置/力混合控制的特点,提出一种位置反力控制法,在机器人与环境产生反馈力时由位置速度控制切换到位置反力控制,通过控制反馈力实现对力的间接控制。

1 主从操作系统

主从遥操作系统^[22]如图1所示,该主从系统包括主系统(操作杆)、从系统(工程机器人)及相应的处理计算机(控制端计算机及图像处理计算机)。计算机间通过TCP/IP协议通讯,传递必要的工作信息。操作者根据虚拟空间所构造的图像信息及操作杆的反馈力,控制工程机器人进行作业。

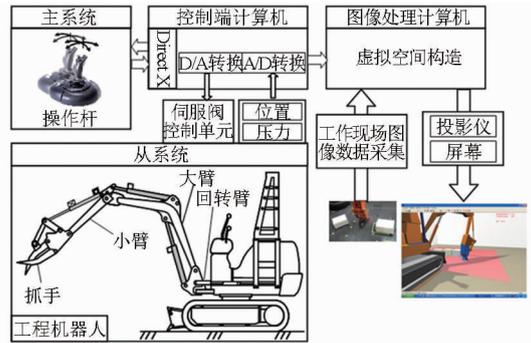


图1 操作系统框图

Fig. 1 Schematic diagram of operation system

抓手被视为工程机器人的“手”,故主要对抓手的控制进行研究。文中所提到的参数都是与抓手相关的数据。此外,除抓手驱动力外,主要参数全部为标准化后的标量值,取值范围为 $[-1, 1]$ 。

2 主从控制方法

2.1 位置速度控制

图2为主从控制示意图。其中,主手反馈力矩(反馈力) τ_r 的表达式为

$$\tau_r = T[k_{pm}(Y_m - \dot{Y}_s) + h_n k_{tm} f_s] + \text{sgn}(T)\tau_s \quad (1)$$

式中 T ——反馈力增益

k_{pm} ——主手比例项增益, $\text{N} \cdot \text{m}$

Y_m ——抓手操作杆位移

\dot{Y}_s ——活塞杆移动速度

h_n ——物体“硬度”

k_{tm} ——从手比例项增益, V

f_s ——活塞杆驱动力, kN

τ_s ——感知补偿力矩, 为 $0.097 \text{ N} \cdot \text{m}$

位置反力控制及反馈力表达式为

$$T_h = T[k_{pm}(Y_m - \dot{Y}_s) + h_n k_{tm} f_s] / \tau_{0r} \quad (2)$$

式中 τ_{0r} ——标准反馈力矩, 为 $0.57 \text{ N} \cdot \text{m}$

2.2 问题及分析

图3表示利用位置速度方法分别抓取和搬运混凝土块、聚氨酯泡沫的实验数据。为了确保物体在搬运过程中不被严重挤压,操作者感觉到反馈力后,不得不动操作杆回到中间位置(零输入位置)。移动操作杆回到零位置时存在两个问题。第1个问题

速度反馈信号,计算伺服阀的控制信号,其表达式为

$$u = k_{ps}(k_m Y_m - T_h) \quad (6)$$

式中 k_m ——敏感系数,取 0.5

其控制框图如图 2 中位置反力控制部分。

抓取动作时($Y_m > 0$),抓手缓慢地抓取物体,反馈力产生并逐渐变大,但阀控信号 u 会相应逐渐变小直至为零。即使操作杆不回到零位置,位置反力控制方法也能够确保操作者真实地感受到反馈力,避免脆性或柔软物体被严重挤压。

3 实验

3.1 抓取实验

3.1.1 操作者操控抓取实验

利用位置反力方法抓取聚氨酯泡沫及空油罐的实验结果如图 5 所示^[23]。绿色区域和蓝色区域分别表示,在抓取空油罐和聚氨酯泡沫的过程中,操作者感受到反馈力后,移动操作杆控制机器人停止抓取的操作,物体的抓取照片如图 5e 所示。黄色区域则表示逐步抓取聚氨酯泡沫的操作。在图 5c 中,实线表示聚氨酯泡沫与抓手刚刚接触,而没有被挤压的情况下活塞杆的位移;虚线则表示实验过程中活塞杆的位移, Y_s 越大表示抓手闭合越紧。

从图 5 可知,在抓取的初始阶段,聚氨酯泡沫的变形量很小。这是因为在切换到位置反力控制后,通过 k_m 使阀控信号变小,抓手抓取速度变慢,反馈力产生并使阀控信号变为零,从而避免脆性或柔软物体被严重挤压。利用位置反力控制方法抓取柔软物体的过程中, Y_m 和 T_h 呈现出较好的对应关系,这证明了位置反力控制方法是完全可行的。

3.1.2 电脑控制抓取实验

电脑控制抓取是控制端电脑通过发送一个固定输入信号(操作杆位移),控制抓手抓取物体的操作。因为操作者通常在低速情况下抓取柔软物体,所以输入信号被设定为 0.20。图 6 是分别采用位置速度及位置反力方法抓取聚氨酯泡沫的实验曲线。由图 6a 可知,位置速度控制时,约在 10 s 处反馈力出现,并缓慢地增大,最终达到最大值,即聚氨酯泡沫被缓慢地挤压,最后完全被压瘪。相反,采用位置反力控制方法时,反馈力产生后,其大小基本没有变化,即物体没有被持续地挤压。图 7 是输入信号分别为 0.20、0.25 和 0.30 时,采用 2 种控制方法的活塞杆位移曲线。由图可知,位置速度控制时,物体在抓取过程中被迅速地压瘪,特别是在输入信号为 0.3 时,反馈力产生后大约经过 10 s,物体就被完全压瘪。相

反,位置反力控制时,活塞杆位移变化很小,即物体变形量小。这进一步证明了位置反力控制方法可以有效避免在抓取过程中柔软物体被过度挤压。

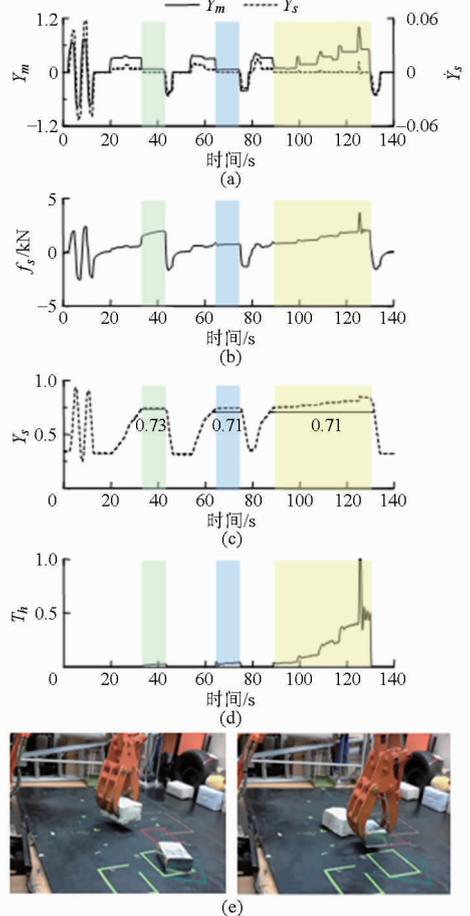


图 5 位置反力方法抓取聚氨酯泡沫及空油罐
Fig. 5 Grasping a piece of urethane foam and a tin by position-force control method

(a) 主手位移及从手速度 (b) 驱动力 (c) 从手位移
(d) 反馈力 (e) 抓取物体照片

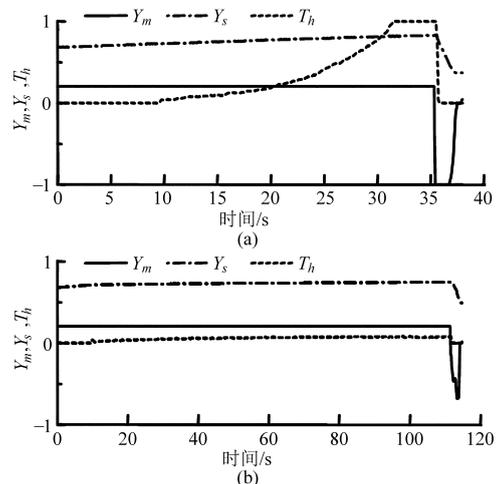


图 6 位置速度及位置反力方法抓取聚氨酯泡沫
Fig. 6 Grasping a piece of urethane foam by position velocity control and position reaction force control methods
(a) 位置速度方法 (b) 位置反力方法

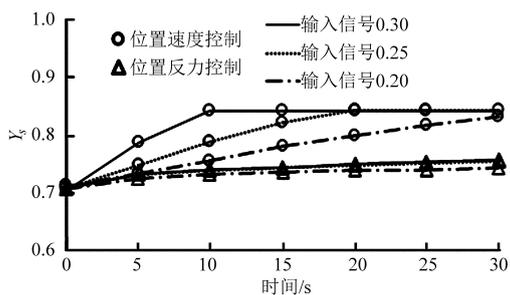


图 7 不同抓取控制信号下聚氨酯泡沫的变形量

Fig. 7 Object deformation while grasping a piece of urethane foam with different input signals

3.2 柔软物体搬运实验

3.2.1 实验方法

设计的柔软物体搬运实验如图 8 所示,首先在 B 放置任务物体,操作者控制机器人抓取该物体后,控制机器人分别缓慢地上下移动 5 次,左右移动 2 次,最后将物体重新放置在 B 处。上移的指定位置为大臂行程的 95%,下移的指定位置为抓手指尖距地面 10 cm 处。左右移动范围为回转臂行程的 5% ~ 80%。操作者控制机器人移动到各行程位置后,虚拟空间中的抓手颜色会产生变化,提示操作者,确保机器人移动到指定位置。本文选取以轮胎、聚氨酯泡沫和海绵泡沫为材料制作的矩形块作为实验对象,其大小约为 30 cm × 16 cm × 22 cm,其中轮胎最硬,海绵泡沫最柔软。

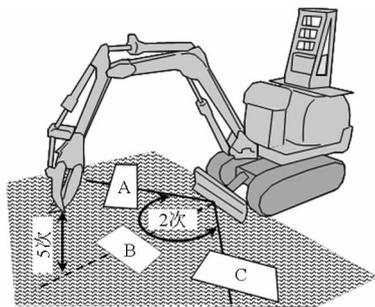


图 8 柔软物体搬运示意图

Fig. 8 Diagram for soft objects conveying tests

3.2.2 实验评价方法

提出位置反力方法的目的是为了改善系统的操作性以及确保抓取和搬运过程中物体的安全性。因此,实验评价方法将不采用工作效率。在抓取和搬运过程中,物体的挤压程度可根据活塞杆位移 Y_s 来衡量, Y_s 越大物体被挤压程度越严重。采用活塞杆平均位移及物体最大变形量作为实验评价方法。

(1) 活塞杆平均位移 Y_{sa}

活塞杆平均位移是指在抓取及搬运过程中,反馈力 T_h 产生后活塞杆位移的平均值。

(2) 物体最大变形量 d_m

在抓取及搬运过程中,物体的最大变形量为

$$d_m = Y_{s2} - Y_{s1}$$

式中 Y_{s1} ——抓取过程中 T_h 产生时的 Y_s

Y_{s2} ——抓取搬运中 Y_s 的最大值

(3) 配对 t 检测

本实验选取 10 名男性作为实验的操作者。每名操作者经过 4 h 的操作培训及训练后,进行实验操作。为了判断采用位置速度与位置反力控制所获得的实验数据是否具有显著差异,采用配对 t 检测分析上述两种评价方法的实验数据。工程上通常假设显著水平为 0.05,即选取的置信度为 95%;当 $p < 0.05$ 时,认为实验数据的差异确实由于采用位置反力控制方法所引起的。

3.2.3 实验数据及分析

抓取轮胎、聚氨酯泡沫及海绵泡沫的实验结果如图 9 所示。PV 和 PF 分别表示采用位置速度和位置反力控制方法。从这些图中可以看出,在抓取及搬运柔软物体过程中, Y_{sa} 及 d_m 的变化趋势基本相同。采用位置反力控制方法后, Y_{sa} 及 d_m 都有不同程度的下降。因此,位置反力控制方法能够改善机器人的操作性及柔软物体在抓取和搬运过程中的安全性。

对 10 位操作者的实验数据进行平均统计及配对 t 检测,其结果如表 1 所示:每一列中 Y_{sa} 与 d_m 由于任务物体的软硬程度不同而依次增加,采用位置反力控制方法测得的数据相比传统控制方法测得的数据均有所减少,任务物体的挤压程度变轻。此外,这 6 对数据都存在显著差异 ($p < 0.05$),即采用位置反力控制方法使实验数据发生显著差异。综上所述,位置反力控制方法能够改善主从系统的操作性,提高抓取和搬运过程中物体的安全性。

表 1 统计分析结果

Tab. 1 Statistical analysis result

参数	位置速度控制	位置反力控制	p 值
$Y_{sa-T}^{(A)}$	0.732 ± 0.024	0.707 ± 0.012	0.009 *
$Y_{sa-UF}^{(A)}$	0.802 ± 0.042	0.766 ± 0.016	0.017 *
$Y_{sa-SF}^{(A)}$	0.848 ± 0.033	0.818 ± 0.019	0.005 *
$d_{m-T}^{(A)}$	0.042 ± 0.026	0.015 ± 0.007	0.004 *
$d_{m-UF}^{(A)}$	0.051 ± 0.013	0.028 ± 0.038	0.001 *
$d_{m-SF}^{(A)}$	0.083 ± 0.038	0.053 ± 0.021	0.004 *

注:A 数值越小结果越好;* 表示 $p < 0.05$; p 值为纳量值。

4 结论

(1) 提出了位置速度/位置反力混合控制方法,在抓取及搬运过程中,切换至位置反力控制,利用反馈力作为反馈信号,通过控制反馈力,实现对力的间接控制。

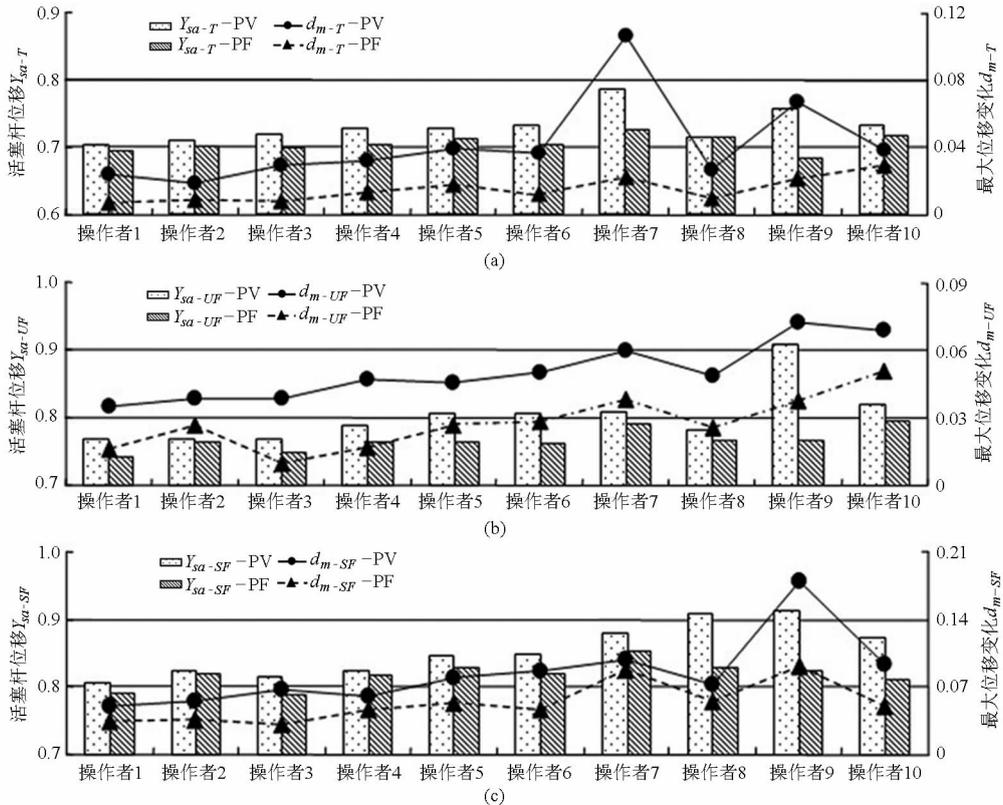


图9 实验曲线

Fig. 9 Experimental result

(a) 轮胎 (b) 聚氨酯泡沫 (c) 海绵

(2) 通过柔软物体的抓取及搬运实验,验证了所提出的位置反力控制方法的可行性,改善了系统的操作性,提高了物体在抓取搬运过程中的安全性。

(3) 对实验中10位操作者的实验样本进行了配对 t 检测,检测结果表明样本存在显著差异,即实验数据的差异是因为采用位置反力控制方法而引起的。

参 考 文 献

- 1 宋爱国. 力觉临场感遥操作机器人技术研究进展[J]. 机械制造与自动化, 2012, 41(1): 1-5.
Song Aiguo. The development of force telepresence telerobot technique[J]. Machine Building and Automation, 2012, 41(1): 1-5. (in Chinese)
- 2 Hung N V Q, Narikiyo T, Tuan H D. Nonlinear adaptive control of master-slave system in teleoperation[J]. Control Engineering Practice, 2003, 11(1): 1-10.
- 3 Massimino M, Sheridan T B. Teleoperator performance with varying force and visual feedback[J]. Human Factors, 1994, 36(12): 145-157.
- 4 Osafo-Yeboah Benjamin, Jiang Steven, Delpish Ritson, et al. Empirical study to investigate the range of force feedback necessary for best operator performance in a haptic controlled excavator interface[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2013, 43(3): 197-202.
- 5 Raibert M H, Craig J J. Hybrid position/force control of manipulator[J]. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1981, 103(2): 126-133.
- 6 Neville Hogan. Impedance control: an approach to manipulation; part II—implementation[J]. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1985, 107(1): 8-16.
- 7 李正义. 机器人与环境间力/位置控制技术研究与应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
Li Zhengyi. Research and application of robot force position control methods for robot-environment interaction [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)
- 8 张庆伟, 韩利利, 徐方, 等. 基于打磨机器人的力/位置混合控制策略研究[J]. 化工自动化仪表, 2013, 39(7): 884-887.
Zhang Qingwei, Han Lili, Xu Fang, et al. Research on hybrid position/force control for grinding robots[J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2013, 39(7): 884-887. (in Chinese)
- 9 王坤东, 颜国正, 鄢博. 基于被动柔顺性的机器人位置/力控制[J]. 中国机械工程, 2006, 17(7): 661-665.
Wang Kundong, Yang Guozheng, Yan Bo. Position/force control of robot based on passive compliance[J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(7): 661-665. (in Chinese)
- 10 倪涛, 李骁鹏, 张红彦, 等. 基于立体视觉的遥操作机器人力感知控制策略[J]. 农业机械学报, 2013, 44(1): 244-247, 243.

- 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, 243. (in Chinese)
- 11 毕寻, 罗杨宇, 李成荣. 引导力训练系统的位置:力模糊控制方法研究[J]. 控制工程, 2013, 20(增刊): 30 - 38.
Bi Xun, Luo Yangyu, Li Chengrong. Study on position-force fuzzy control in training system with haptic guidance [J]. Control Engineering of China, 2013, 20(Supp.): 30 - 38. (in Chinese)
- 12 游有鹏, 张宇, 李成刚. 面向直接示教的机器人零力控制[J]. 机械工程学报, 2014, 50(3): 10 - 17.
You Youpeng, Zhang Yu, Li Chenggang. Force-free control for the direct teaching of robots [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(3): 10 - 17. (in Chinese)
- 13 王学林, 肖永飞, 毕淑慧, 等. 机器人柔性抓取试验平台的设计与抓持力跟踪阻抗控制[J]. 农业工程学报, 2015, 31(1): 58 - 63.
Wang Xuelin, Xiao Yongfei, Bi Shuhui, et al. Design of test platform for robot flexible grasping and grasping force tracking impedance control [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(1): 58 - 63. (in Chinese)
- 14 刘强, 童昕, 冯培恩, 等. 挖掘机机器人伺服控制技术综述[J]. 中国工程机械学报, 2007, 5(2): 235 - 239.
Liu Qiang, Tong Xin, Feng Peien, et al. Overview of servo control technologies for excavators [J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2007, 5(2): 235 - 239. (in Chinese)
- 15 Ha Q P, Nguyen Q H, Rye D C, et al. Impedance control of a hydraulically actuated robotic excavator [J]. Automation in Construction, 2000, 9(5 - 6): 421 - 435.
- 16 Ha Q P, Santos M, Nguyen Q, et al. Robotic excavation in construction automation [J]. IEEE Robotics and Automation Magazine, 2002, 2(1): 20 - 28.
- 17 Yamada Hironao, Kato Hidetoshi, Moto T. Master-slave control for construction robot teleoperation [J]. Journal of Robotics and Mechatronics, 2003, 15(1): 35 - 42.
- 18 Kim Dongmok, Kim Jongwon, Lee Kyouhee, et al. Excavator tele-operation system using a human arm [J]. Automation in Construction, 2009, 18(2): 173 - 182.
- 19 Yamada Hironao, Gong Mingde, Zhao Dingxuan. A master-slave control for a tele-operation system for a construction robot (application of a velocity control method with a force feedback model) [J]. Journal of Robotics and Mechatronics, 2007, 19(1): 60 - 70.
- 20 Rose H E, Murray D J. Weber on the tactile senses [M]. 2nd edition. Erlbawu, UK: Taylor & Erancis, 1996.
- 21 Huang Lingtao, Kawamura Tasuchi, Yamada Hironao. Master-slave control method with force feedback for grasping soft objects using a teleoperation construction robot [J]. International Journal of Fluid Power, 2012, 13(2): 41 - 49.
- 22 Huang Lingtao, Kawamura Tasuchi, Yamada Hironao. Construction robot operation system with object's hardness recognition using force feedback and virtual reality [J]. Journal of Robotics and Mechatronics, 2012, 24(6): 958 - 966.
- 23 Huang Lingtao, Kawamura Tasuchi, Yamada Hironao. Application of a position-force control method in a master-slave teleoperation construction robot system [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 229 - 231: 2243 - 2247.

~~~~~

(上接第 349 页)

- 14 McRuer D T. A review of quasi-linear pilot models [J]. IEEE Transactions on Human Factors in Electronics, 1967(3): 231 - 249.
- 15 Hess R A, Modjtahedzadzadeh A. A control theoretic model of driver steering behavior [J]. Control Systems Magazine, 1990, 8: 3 - 8.
- 16 高振海, 管欣, 郭孔辉. 驾驶员方向控制模型及在汽车智能驾驶研究中的应用 [J]. 中国公路学报, 2000, 13(3): 106 - 109.  
Gao Zhenhai, Guan Xin, Guo Konghui. Driver directional control model and the application in the research of intelligent vehicle [J]. China Journal of Highway and Transport, 2000, 13(3): 106 - 109. (in Chinese)
- 17 Legouis T, Laneville A, Bourassa P, et al. Characterization of dynamic vehicle stability using two models of the human pilot behaviour [J]. Vehicle System Dynamics, 1986, 15(1): 1 - 18.
- 18 Macadam C C, Johnson G E. Application of elementary neural networks and preview sensors for representing driver steering control behavior [J]. Vehicle System Dynamics, 1996, 25(1): 3 - 30.
- 19 李英. 方向与速度综合控制驾驶员模型及在 ADAMS 中的应用 [D]. 长春: 吉林大学, 2008.  
Li Ying. Direction control and speed control combined driver model and its application to ADAMS [D]. Changchun: Jilin University, 2008. (in Chinese)
- 20 王洪礼, 刘晟, 迟仲玉. 汽车四轮转向运动的稳定性分析 [J]. 机械强度, 2000, 22(1): 23 - 25.  
Wang Hongli, Liu Sheng, Chi Zhongyu. Analysis of the motion stability for four wheel vehicle steering system [J]. Journal of Mechanical Strength, 2000, 22(1): 23 - 25. (in Chinese)
- 21 张继业, 杨桐仁, 曾京. Hopf 分岔的代数判据及其在车辆动力学中的应用 [J]. 力学学报, 2000, 32(5): 596 - 605.  
Zhang Jiye, Yang Xuren, Zeng Jing. The algebraic criteria for Hopf bifurcation and its application in vehicle dynamics [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2000, 32(5): 596 - 605. (in Chinese)
- 22 舒仲周, 张继业, 曹登庆. 运动稳定性 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2001.