

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.12.039

电液手控器型遥操作机器人力反馈控制策略*

倪涛 赵丁选 张红彦

(吉林大学机械科学与工程学院, 长春 130025)

【摘要】 针对现有电力反馈操纵装置存在刚度小、力效果不明显的问题,设计了电液伺服力反馈手控器。该手控器在水平方向上具有X、Y两个旋转自由度,每个自由度采用单独的伺服阀控液压马达驱动,空间运动互不干涉。综合传统的力反射伺服型和并列型双向伺服控制算法的优点,提出力/位置偏差复合型主从双向控制策略。以液压手控器为主手,四自由度工程机器人为从手,进行主从遥操作力反馈双向伺服试验研究。验证了力/位置偏差复合型控制算法能有效提高系统响应的快速性和稳定性。

关键词: 遥操作机器人 手控器 力/位置偏差复合算法 双向伺服控制

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)12-0190-05

Bilateral Servo Control of Tele-robot Based on Electro Hydraulic Manipulator

Ni Tao Zhao Dingxuan Zhang Hongyan

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

Abstract

Aiming at the problem of low stiffness and indistinctive force perception existing in current electronic manipulator, an electro-hydraulic force feedback manipulator was set up. The manipulator had two rotational degree of freedom along X and Y direction in horizontal space, and each was driven by a single hydraulic servoing motor. Therefore, the motion of the manipulator along its different rotational axes would not interfere each other. Synthesizing the advantages of traditional bilateral control algorithm of force reflection servo type and parallel type, a combination of force/position deviation bilateral control strategy was put forward. Taking the hydraulic manipulator as the master and a 4-DOF construction robot as the slave, a tele-robot operation experiment was tested to study the bilateral servoing algorithm. Experiment showed that the combination of force/position deviation bilateral control strategy could effectively improve the dynamic response and stableness of the system.

Key words Tele-robot, Electro hydraulic manipulator, Combination of force/position deviation, Bilateral servo control

引言

遥操作机器人在高温、高压、强辐射、窒息等极限环境下完成作业任务时发挥愈来愈重要的作用。在遥操作过程中,操作者与机器人往往相距甚远,无

法亲身感知作业现场环境,因此,高保真的机器人与环境间作用力反馈,对于提高遥操作工作效率,保证系统安全具有重要意义。

手控器作为遥操作机器人系统的人机接口,是人们感知环境,并对现场机器人进行控制的重

收稿日期: 2009-12-25 修回日期: 2010-05-05

* 国家自然科学基金资助项目(50470270)和吉林大学科学前沿与交叉学科创新项目(200903167)

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

通讯作者: 赵丁选,教授,博士生导师,主要从事电液伺服控制研究, E-mail: zdx@jlu.edu.cn

要媒介。手控器性能的好坏直接影响到整个遥操作系统的执行效率及可靠性^[1]。传统的手控器通常采用电动机作为驱动机构,当现场机器人受到大负载作用导致运动受阻时,由于力矩电动机堵转电流的限制,其力反馈的量值范围受到制约,操作者仍然能够克服电动机堵转力矩继续操纵手控器运动,不能很好地模拟现场机器人的实际受力状况,甚至给操作人员以错误的机器人运动信息提示。

为解决现有电动手控器的动态响应慢、系统刚度低、反馈力过小等问题,本文对基于电液伺服控制的遥操作机器人力反馈操纵装置进行研究。针对该手控器采用液压驱动这一特点,提出一套与之相适应的新型力反馈(力/位置偏差复合)控制策略,并同传统的力反射伺服型、并列型等双向伺服控制算法相比较。以满足工业机器人在大负载、高输出扭矩等特殊作业场合的操纵性能要求。

1 电液伺服力反馈手控器结构原理

本系统的力反馈手控器如图 1 所示。轴 1 和轴 2 安装在箱体 3 的孔中,轴 1、轴 2 以及操纵手柄 4 在空间布置上互相垂直相交,交点位于轴 2 圆环的圆心处;弯轴 2 的半圆环部分为滑槽,当操纵手柄 4 摆动时,滑套 9 可以在滑槽内滑动;液压马达 5 所在的驱动轴 1 的摆动角度由角位移传感器 6 检测;液压马达 7 所在的驱动轴 2 的摆动角度由角位移传感器 8 检测。通过滑套与滑槽的相互配合,轴 1 和轴 2 的转动互相不干涉。操纵手柄的位姿由轴 1、轴 2 的合成运动结果确定。由于每根轴的转动可以分别控制机器人的不同自由度运动,因此,该手控器具有两个自由度;同时,由于被控对象为四自由度工程机器人,因此,本系统需要两个手控器。

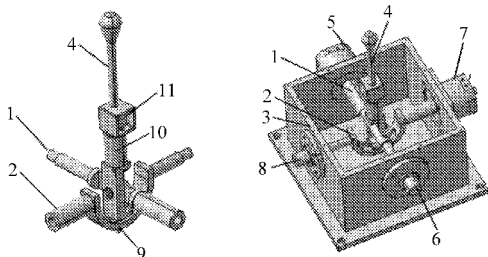


图 1 2-DOF 电液手控器结构示意图

Fig. 1 Structure profile of 2-DOF electro hydraulic manipulator

1. 直轴 2. 弯轴 3. 箱体 4. 操纵手柄 5, 7. 液压马达 6, 8. 角位移传感器 9. 滑套 10. 力传感器 11. 信号调理电路

2-DOF 力反馈操纵杆的工作原理如图 2 所示。操作者扳动操纵手柄,通过手柄上的二维应变式力传感器检测操纵力的大小,角位移传感器检测对应

转轴的摆动角度,力信号和角位移信号经过滤波、放大等处理后,由 A/D 送入控制计算机;现场机器人各关节角位移信号,以及与环境的作用力信号经预处理后也由 A/D 送入计算机;计算机控制系统将采集到的主从力信号、位移信号依据控制算法算出相应的控制量;该控制量经过 D/A 输出,一路送入手控器的伺服阀驱动器,控制相应伺服阀的油路通道开度大小及方向切换,使摆动液压马达带动操纵手柄摆动,保证操作者能够推动该液压手控器,另一路送入现场机器人伺服阀驱动器,对机器人相应的关节自由度进行位置控制。

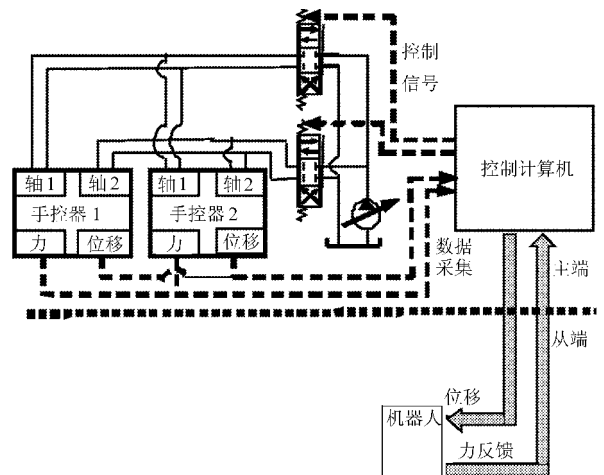


图 2 2-DOF 电液手控器工作原理图

Fig. 2 Control illustration of 2-DOF electro hydraulic manipulator

2 主从遥操作双向伺服控制

在主从遥操作系统中,操作者通过主端操纵手柄(主手)向从端机器人(从手)发送位置指令,控制机器人的运动;同时将机器人与现场环境的作用力在操纵手柄上反馈与再现,使操作者能够感知机器人与外界环境交互的力信息,以便指导操作者更好地完成遥操作的任务。在理想情况下,从手的位置等于主手的位置,同时操作者感知的力等于从手与环境之间的相互作用力。

2.1 传统的双向伺服控制算法

比较经典的双向伺服控制策略有力直接反馈型、力反射伺服型、位置对称型以及并列型等^[2~4]。其中,位置对称型通过主-从手之间的位置偏差来推算操作者感知的反馈力,该控制策略由于未引入人手的操纵力信号,使得操作者正常情况下根本无法推动本系统的液压手控器。力直接反馈型将机器人与环境间的接触力直接用于主手的控制,相对电动手控器而言,接触瞬间的冲击对电液伺服手控器的影响更大,极易造成主手的振荡。因此,传统的主从

双向伺服控制算法中只有力反射伺服型和并列型控制策略能更好地适应本系统的电液伺服力反馈手控器。

(1) 力反射伺服型双向控制算法

设 F_0 、 F_e 分别为操作者施加的力和从手与环境之间的作用力； X_m 、 X_s 分别为主、从手的位移； K_f 为力反馈增益； K_{spm} 、 K_{sps} 、 K'_{spm} 、 K'_{sps} 分别为主手与从手位移的比例系数、微分系数； M_m 、 B_m 分别为主手运动部分的质量和阻尼系数。

在力反射伺服型控制系统中，从手在伺服控制上是对主手的位置跟随。主手的驱动力 F_m 、从手的驱动力 F_s 以及操作人员的感知力 F_0 计算式为

$$F_m = [0 \quad K_f] \begin{pmatrix} X_m \\ F_0 \end{pmatrix} - [0 \quad K_f] \begin{pmatrix} X_s \\ F_e \end{pmatrix}$$

$$F_s = \left[K_{spm} + K'_{spm} \frac{d}{dt} \quad 0 \right] \begin{pmatrix} X_m \\ F_0 \end{pmatrix} - \left[K_{sps} + K'_{sps} \frac{d}{dt} \quad 0 \right] \begin{pmatrix} X_s \\ F_e \end{pmatrix}$$

$$F_0 = (1 - K_f)^{-1} (M_m \ddot{X}_m + B_m \dot{X}_m) - (1 - K_f)^{-1} K_f F_e \quad (1)$$

由式(1)可看出，如果力反馈增益 K_f 取得足够大，则近似有 $F_0 = F_e$ ，消除主手各关节的惯量和阻尼的影响。但是 F_e 对主手产生的冲击影响依然存在。

(2) 并列型双向控制算法

在并列型双向伺服系统中，主手和从手的伺服控制处于并列的位置。主手的驱动力 F_m 、从手的驱动力 F_s 以及操作人员的感知力 F_0 计算式为

$$F_m = \left[K_{spm} + K'_{spm} \frac{d}{dt} \quad K_f \right] \begin{pmatrix} X_m \\ F_0 \end{pmatrix} - [0 \quad K_f] \begin{pmatrix} X_s \\ F_e \end{pmatrix}$$

$$F_s = [0 \quad K_f] \begin{pmatrix} X_m \\ F_0 \end{pmatrix} - \left[K_{sps} + K'_{sps} \frac{d}{dt} \quad K_f \right] \begin{pmatrix} X_s \\ F_e \end{pmatrix}$$

$$F_0 = (1 - K_f)^{-1} (M_m \ddot{X}_m + B_m \dot{X}_m + K_{spm} X_m + K'_{spm} \dot{X}_m) - (1 - K_f)^{-1} K_f F_e \quad (2)$$

从式(2)可以看出， F_0 一方面可以体现外界作用力 F_e ，同时还要克服由主手运动产生的附加力。主手位移越大，附加力就越大。其缺点是只实现了力的闭环控制，而对于主-从位移信号，却是开环控制，所以，容易造成系统不稳定；同时，由于该控制策略存在的弹簧效果，使得操作者控制机器人即使在空载运动时，也会有操纵沉重的感觉。

2.2 力/位置偏差复合型控制算法

力反射伺服型控制策略将主、从手的力偏差作为主手的控制量，将二者的位置偏差作为从手

的控制量^[5]，本质上仍旧是从手对主手的位置跟随，即主手先动，从手跟随。对于诸如液压手控器^[5]等大刚度操纵机构，主从响应的滞后极有可能导致从手与环境间产生过大的接触力，从而引发破坏。

为此，有学者提出采用主、从手力偏差信号驱动从手产生位移；主、从手之间的位置偏差信号控制主端操纵手柄位移，使主手位移完全跟随从手位移的双向伺服控制策略^[6]，实现从手先动，主手跟随的控制效果。当从手与环境接触而产生较大接触力时，操作者无法继续扳动主端操纵手柄，提高了系统的安全性。该控制策略本质上是主手对从手的位置跟随，二者间的滞后依旧不可避免。

并列型双向伺服控制策略由于主、从控制信号的同步传递，减少了主、从位移跟随的“时滞”。

综合上述控制策略的优点，提出力/位置偏差复合型双向伺服控制策略，在保证从手跟随主手位移的同时，将主、从手受力 F_0 和 F_e 之差引入从手的位移控制。该力差起到控制“先行”的作用，可有效提高从手的响应速度。系统框图如图3所示。

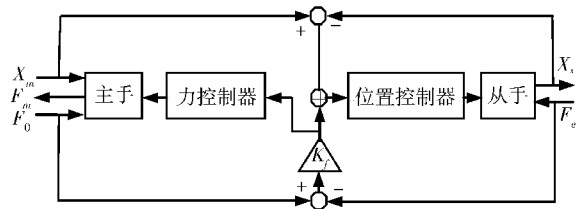


图3 力/位置偏差复合型控制策略框图
Fig.3 Control scheme of force/position deviation combination type

主手的驱动力 F_m 、从手的驱动力 F_s 以及操作人员的感知力 F_0 计算式为

$$F_m = [0 \quad K_f] \begin{pmatrix} X_m \\ F_0 \end{pmatrix} - [0 \quad K_f] \begin{pmatrix} X_s \\ F_e \end{pmatrix}$$

$$F_s = \left[K_{spm} + K'_{spm} \frac{d}{dt} \quad K_f \right] \begin{pmatrix} X_m \\ F_0 \end{pmatrix} - \left[K_{sps} + K'_{sps} \frac{d}{dt} \quad K_f \right] \begin{pmatrix} X_s \\ F_e \end{pmatrix}$$

$$F_0 = (1 - K_f)^{-1} (M_m \ddot{X}_m + B_m \dot{X}_m) - (1 - K_f)^{-1} K_f F_e \quad (3)$$

从式(3)可以看出，如果力反馈增益 K_f 取得足够大，则能够消除主手各关节的惯量和阻尼的影响，近似有 $F_0 = F_e$ ；同时，由于从手的位置信号受到主-从力偏差以及位移偏差的综合控制，使得从手能够同步响应主手的动作，而不仅仅是类似传统的“主手先动，从手跟随主手运动”，从而大大提高系

统反应速度。

3 试验结果分析

以两个二自由度电液伺服力反馈操纵杆作为主手,四自由度液压驱动工程机器人为从手,进行主从遥操作试验。试验过程中,分别以小刚度的轮胎和大刚度的硬木为作业对象,如图 4 所示,对力反射伺服型、并列型和力/位置偏差复合型双向伺服控制算法进行比较分析。二自由度力反馈操纵杆在运动控制上完全解耦,本系统主要针对机器人抓手自由度进行力觉反馈试验分析。

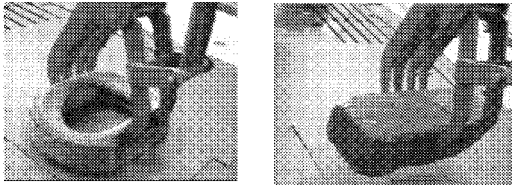


图 4 轮胎和硬木抓取试验

Fig. 4 Experiment of grasping tire and hard wood

图 5~7 分别为抓取轮胎及硬木时力反射伺服型、并列型和力/位置偏差复合型双向伺服控制算法所对应的主从位置跟随曲线及力反馈曲线。

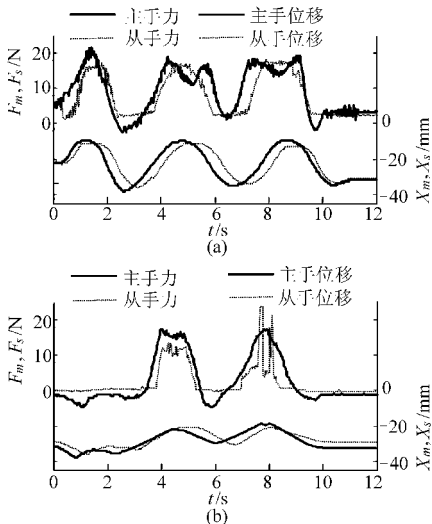


图 5 力反射型算法试验曲线

Fig. 5 Experiment results of force reflection servo control algorithm

(a) 抓取轮胎试验 (b) 抓取硬木试验

由图 5 和图 6 可以看出,力反射伺服型和并列型力反馈控制算法在机器人抓取小刚度物体(轮胎)时,能够为操作者提供较真实的力觉提示。随着轮胎变形的加大,反馈回力也越来越大,感觉就像接触到“弹性”物体。而在抓取大刚度物体(硬木)时,机器人抓手与硬木的接触瞬间对操作者有较大的冲击力。这主要由于:在接触瞬间从手的反馈力大于主手上的操纵力,使得主手被“弹回”,同时从

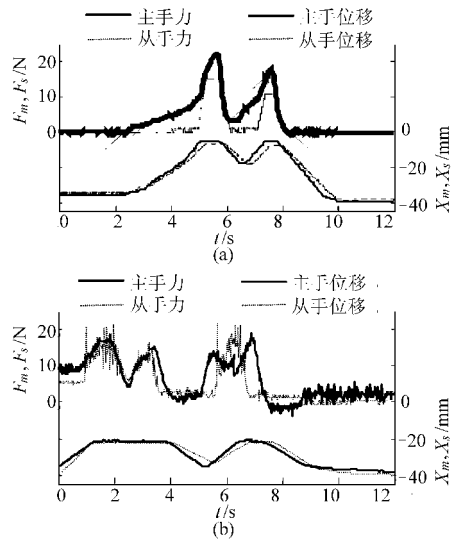


图 6 并列型算法试验曲线

Fig. 6 Experiment results of parallel control algorithm

(a) 抓取轮胎试验 (b) 抓取硬木试验

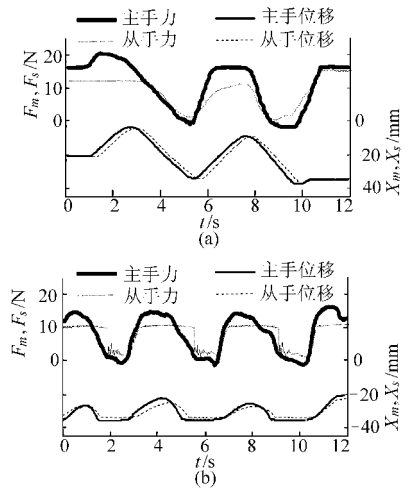


图 7 力/位置偏差复合型算法试验曲线

Fig. 7 Experiment results of force/position deviation combination control algorithm

(a) 抓取轮胎试验 (b) 抓取硬木试验

手也由接触状态变为半接触甚至非接触状态,导致从手的反馈力瞬间猛烈下降,此时主手的操纵力大于从手与环境作用力,从手在主手的控制下再次夹持物体,于是从手就一直处于同环境接触和非接触状态间跃变,造成系统振动,并且主手有被撞击的感觉。

由图 7 可以看出,力/位置偏差复合型控制算法由于将主-从手的力偏差信号引入从机器人的控制回路,使得从机器人可同步响应操作者的操纵信号,降低了机器人对主手位置跟随的“时滞”。并且从反馈力曲线可以明显看出该控制策略能很好地反映物体的软硬程度,夹持大刚度物体时对操作者的冲击也大大减小。

4 结束语

结合传统的力反射伺服型、并列型主从控制算法各自优缺点,针对手控器采用液压驱动这一特点,提出了力/位置偏差复合型主-从双向伺服控制算法。该算法在实际应用中,具有更好的稳定性和响

应特性。在自由运动时,从手对主手的位移跟随几乎不存在滞后;在抓取小刚度物体和大刚度物体时,主手上的反馈力能够如实反映出物体的软硬程度。因此,可有效提高遥操作过程中操作者对现场环境的感知程度,从而大大提高工作效率。

参 考 文 献

- 1 邓乐, 赵丁选, 倪涛, 等. 基于 Stewart 平台的 6 自由度力反馈手控器[J]. 农业机械学报, 2005, 36(7): 118 ~ 121.
Deng Le, Zhao Dingxuan, Ni Tao, et al. Design of a manual controller of 6-DOF force feedback based on Stewart platform [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36 (7) :118 ~ 121. (in Chinese)
- 2 邓乐, 赵丁选, 倪涛, 等. 具有临场感的主从机器人系统双边控制策略研究[J]. 吉林大学学报:工学版, 2002, 9(5): 681 ~ 684.
Deng Le, Zhao Dingxuan, Ni Tao, et al. Bilateral control scheme of master-slave telerobotic system with telepresence [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2002, 9(5) :681 ~ 684. (in Chinese)
- 3 Kudomi S, Yamada H, Muto T. Development of a hydraulic parallel link force display improvement of manipulability using a disturbance observer and its application to a master-slave system [J]. Journal of Robotics and Mechatronics, 2003, 15 (4) : 391 ~ 397.
- 4 Kudomi S, Yamada H, Muto T. Development of a hydraulic master-slave system for tele-robotics haptic display device for usage of a hydraulic servo system [C]//Proceedings of 1st FPNI-PhD Symp., Hamburg, 2000: 467 ~ 474.
- 5 冯石柱, 赵丁选, 尚涛, 等. 遥操作工程机器人 p-f 力反馈控制方法[J]. 农业机械学报, 2008, 39(2): 120 ~ 124.
Feng Shizhu, Zhao Dingxuan, Shang Tao, et al. Research on p-f control for construction telerobot with force telepresence [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(2) :120 ~ 124. (in Chinese)
- 6 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)