

遥操作机器人执行末端的力反射 型变增益力反馈算法

赵丁选,侯敬巍,尚 涛,唐新星

(吉林大学 机械科学与工程学院, 长春 130022)

摘要:在以遥操作工程机器人执行末端为从端的力反馈双向伺服系统中,为了使主端受力真实地反映从端执行末端叉手所受的环境力,在力反射型算法的基础上,提出了一种变增益力反馈算法。根据机器人叉手的运动模型建立叉手液压缸位移与驱动力关系的数学模型,以此调节主端的力反馈控制增益。为了验证该算法的优越性,将该算法与常用的力反射型算法进行了比较实验。实验证明,该算法在保证系统稳定性的前提下,精确地反映了机器人叉手在运动中的惯性和阻尼力所带来的影响,操作者可以更为真实地感知机器人从手所受环境力的变化,有利于系统工作性能的提高。

关键词:流体传动与控制;力反馈;主从控制;变增益算法;系统辨识

中图分类号:TH137;TP242 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5497(2008)03-0570-05

Gain-switching force feedback algorithm for teleoperation robot end actuator

Zhao Ding-xuan, Hou Jing-wei, Shang Tao, Tang Xin-xing

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

Abstract: A novel gain-switching force feedback algorithm was proposed based on the common force reflect algorithm to make the master-end force truly reflect the force acting on the end actuator forkglove of the slave robot in the bidirectional force feedback servo-system of the master-slave system of the teleoperation engineering robot. A mathematical model for the relationship between the displacement and the driving force of the robot forkglove cylinder was built based on the kinematics of the forkglove to adjust the force feedback control gain of the master-end. The proposed gain-switching algorithm was compared experiment-ally with the common force reflect algorithm. It was proved that the novel algorithm accurately reflects the effects of the inertia force and the damp force of the robot forkglove during its motion process under the prerequisite for system stability, the operator can sense more truly the variation of the force acting on the stave-end of the robot, which helps to improve the working capability of the teleoperation system.

Key words: turn and control of fluid; force feedback; master-slave control; gain-switching; system identification

收稿日期:2007-07-24.

基金项目:国家自然科学基金项目(50475011);教育部优秀青年教师资助计划项目.

作者简介:赵丁选(1965-),男,教授,博士生导师.研究方向:流体传动与力反馈. E-mail:zdx@jlu.edu.cn

通讯联系人:侯敬巍(1978-),男,博士研究生.研究方向:力反馈与虚拟现实. E-mail:hjw19781025@email.jlu.edu.cn

现代通信技术的发展使得由人在安全地区操作,由机器人代替人在危险环境中进行复杂作业的遥操作机器人系统成为可能。为了使操作者有效地完成操作任务,需要实时地为操作者提供工作现场的工作信息。其中,力反馈信息是遥操作系统中非常重要的一种信息。在遥操作系统中加入力反馈信息,有助于操作者准确地了解工作现场及工作对象物体的状况,为准确地实施操作提供判断依据可极大地提高遥操作系统的工作性能。由于力反馈在遥操作中的重要作用,中外学者对此进行了广泛的研究。当前对力反馈信息的讨论主要包含两个部分:其一为根据主从端的位移或速度差得出的反馈力^[1-3],另一部分为根据环境力形成的环境反馈力^[4,5]。与 Liya 等人的研究^[3,6]不同的是,本文的研究对象是作为工程机器人执行末端的叉手,在执行现场工作时主要考虑的是叉手所受的环境力,因此将根据采用环境力作为控制量的力反射型算法以及机器人执行末端叉手的运动特性进行新算法的构建。

1 力反射型算法

力反射型^[5]算法是最基本的一种力反馈算法,该算法的公式为

$$f_m = k_m \times f_s$$

$$u_s = k_{ps}(Y_m - Y_s) + k_{ds}(\dot{Y}_m - \dot{Y}_s)$$

式中: f_m 为主端反馈力; u_s 为从端控制输入; f_s 为从端液压缸受力; Y_m 为主端位移; Y_s 为从端位移; k_{ps} 为从手的比例增益系数; k_{ds} 为从手的微分增益系数。

力反射型算法的控制流程图如图 1 所示,该算法的原理是把从动操作机上力的大小检测出来直接传回主端。这种算法适用于重负荷、大功率场合,但是在系统启动后,从动机的惯性力及阻尼力会直接传送给主手,如果从手自重很大,操作者将难以准确掌握从端环境力的变化,有碍于操作的实施。

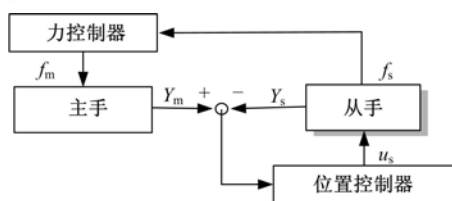


图 1 力反射型算法

Fig. 1 Force reflect scheme

本文的双边伺服控制采用 PD 控制,这是因为当采用积分控制时,相当于在复平面[S]的左半平面上加入了一个实极点,虽然可以改善力反馈的稳态精度,但降低了系统的稳定裕度,鲁棒性差,对机器人的非线性动力学特性更为敏感,易产生超调和振荡,不利于临场感的实现^[7]。

2 力反射型变增益力反馈控制模型的建立

2.1 变增益力反馈算法

为了正确地建立力反馈控制模型,需要对工程机器人力反馈伺服系统的运动进行分析。在液压机器人执行末端的主从双向控制系统中,从端的叉手的运动具有如下特点:①在空载时,从手根据主手的位置变化运动,所受的阻力为零;②在抓取硬物时,从手的力作近似阶跃运动迅速到达最大控制输入力,之后处于抓取状态;③在抓取柔软物体时,从手将在主端的控制输入和环境力的共同作用下运动。

为了在保持良好的稳定性的情况下达到系统控制要求,主手受力应满足如下要求:在空载的情况下,主手受力为零,在抓取硬物(即刚度较大的物体)时,需要为主手的反馈力确定一个最大值,避免震动过大使操作者难以忍受,在抓取软物(即小刚度物体)时,主手受力需要准确反映从端的受力变化。

由以上分析可得变增益算法的计算公式为

$$f_m = G \times k_m \times f_s$$

$$u_s = k_{ps}(Y_m - Y_s) + k_{ds}(\dot{Y}_m - \dot{Y}_s) \quad (1)$$

式中: k_m 为主手增益系数, u_s 为从手增益,可调增益系数 G 为

$$G = \begin{cases} 0; (|f_s| \leq |f_k|) \\ \frac{f_s - f_k}{f_{\text{max}} - f_k}; (f_s > 0, f_s > f_k) \\ \frac{f_s - f_k}{f_{\text{max}} - f_k}; (f_s < 0, f_s < -f_k) \end{cases} \quad (2)$$

式中: f_{max} 为主手伸程的最大驱动力; f_{max} 为液压缸回程的最大驱动力; f_k 为机器人叉手做运动时,液压缸需要克服从端所受的惯性力、阻尼力以及摩擦力的总和,设 f_e 为叉手所受的环境力,则 $f_s = f_e + f_k$ 。

变增益力反射型算法的控制流程图如图 2 所示。由于本文的研究目的是使主手力反馈真实地反映从端环境力的变化情况,因而并未考虑主从

手间的位置差产生的反馈力。

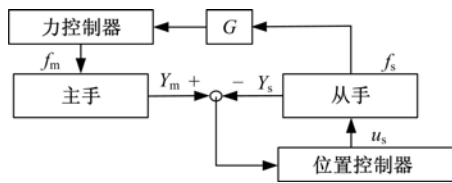


图 2 力反射型变增益算法

Fig. 2 Gain-Switching force reflect scheme

2.2 驱动力 f_k 的求取

在图 2 所示的机器人叉手中,忽略摩擦力,驱动力 f_k 可以通过叉手的角度位移 α_3 表示为

$$f_k = J\ddot{\alpha}_3 + B\dot{\alpha}_3 \quad (3)$$

式中: J 为惯性系数; B 为阻尼系数。

在图 3 所示叉手的结构图中,易知

$$\alpha + \alpha_0 + \alpha_1 = \pi \quad (4)$$

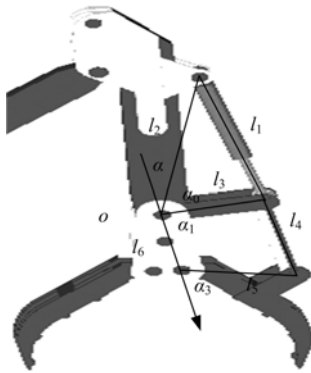


图 3 抓手的结构

Fig. 3 The structure of fork-glove

在 l_1, l_2, l_3 构成的三角形中,由余弦定理可得

$$l_1^2 = l_2^2 + l_3^2 - 2l_2l_3\cos\alpha_0 \quad (5)$$

在图 4 所示的由 l_3, l_4, l_5, l_6 组成的四连杆机构中,根据平面运动分析

$$l_3\cos\alpha_1 + l_4\cos\alpha_2 = l_6 + l_5\cos\alpha_3$$

$$l_3\sin\alpha_1 + l_4\sin\alpha_2 = l_5\sin\alpha_3$$

设 $l_4/l_3 = m, l_5/l_3 = n, l_6/l_3 = l$, 可推得

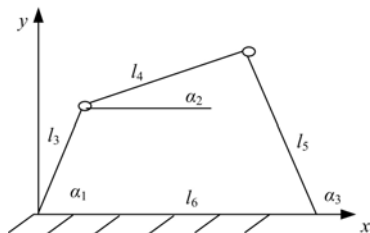


图 4 四连杆机构

Fig. 4 The four-bar mechanism

$$\cos\alpha_1 = n\cos\alpha_3 - n/[l\cos(\alpha_3 - \alpha_1)] + (l^2 + n^2 + 1 - m^2)/(2l)$$

$$\text{即 } \cos\alpha_1 = p_1\cos\alpha_3 - p_2\cos(\alpha_3 - \alpha_1) + p_3 \quad (6)$$

将式(6)对时间分别求取一次导数和二次导数,可得

$$[\sin\alpha_1 - p_2\sin(\alpha_3 - \alpha_1)]\dot{\alpha}_1 = [p_1\sin\alpha_3 - p_2\sin(\alpha_3 - \alpha_1)]\dot{\alpha}_3 \quad (7)$$

$$\ddot{\alpha}_1[\sin\alpha_1 - p_2\sin(\alpha_3 - \alpha_1)] + \dot{\alpha}_1^2[\cos\alpha_1 + p_2\cos(\alpha_3 - \alpha_1)] + 2p_2\dot{\alpha}_3\dot{\alpha}_1\cos(\alpha_3 - \alpha_1) = \ddot{\alpha}_3[p_1\cos\alpha_3 - p_2\cos(\alpha_3 - \alpha_1)] + \dot{\alpha}_3^2[p_1\sin\alpha_3 - p_2\sin(\alpha_3 - \alpha_1)] \quad (8)$$

由液压缸的长度 l_1 及式(5)(6)(7)(8)组成的方程组可求得任意时刻的 $\dot{\alpha}_3, \ddot{\alpha}_3$ 。通过系统辨识即可求得公式(3)中的 J 与 B , 由此可实时地得出 f_k 。

3 实验

3.1 实验系统及实验过程

为了验证变增益算法的工作性能,在图 5 所示的遥操作系统中进行了变增益算法与力反射算法的比较实验。实验系统的主手为力反馈手柄,从手为遥操作机器人,主手的控制信号通过 USB 传送到计算机中,由控制器计算所得的控制信号通过 D/A 卡,经放大后对从手的液压缸伺服阀进行控制,以此控制从手的运动,从手的位移信号与力信号由 A/D 卡采集后送入计算机中,由此计算出力反馈信号实现对主手的力控制。

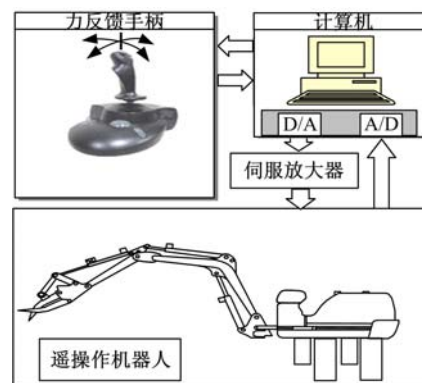


图 5 遥操作系统

Fig. 5 Teleoperation system

实验包含如下 3 个步骤的操作:

(1)空载实验,操纵主手来回运动几次;

(2)小刚度物体实验,操纵主手首先迅速地抓取轮胎一次,然后再缓慢地抓取一次;

(3)大刚度物体实验,操纵主手首先迅速地抓取硬木一次,然后再缓慢地抓取一次。

3.2 实验结果分析

图 6 所示为力反射型算法的实验结果,图 7 所示为变增益力反射型算法的实验结果。图中主手力为主手的真实力,从手力为真实的从手力乘以一个使主手能够相比的比值。 m_i 为主手力, s_i 为从手力, m_p 为主手位移, s_p 为从手位移。

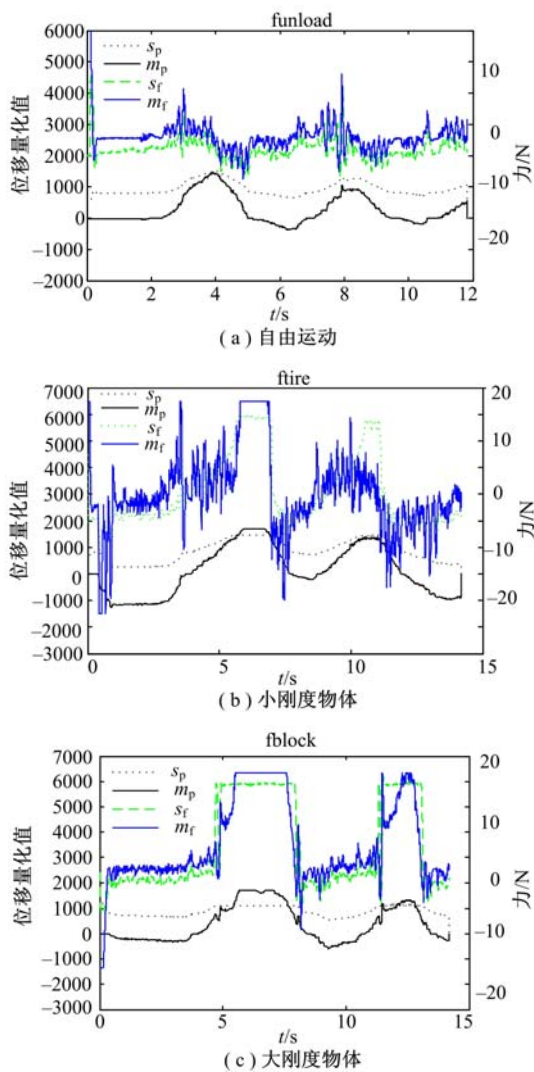


图 6 力反射型算法实验结果

Fig. 6 The result of force reflect scheme

从实验结果得到的曲线可以看出,在自由运动实验中,使用变增益算法有效地屏蔽了从手的惯性力和阻尼力,主手只能感受到很小的反馈力,而力反射型算法会感受到很大的主手反馈力,难以真实地反映从手所受的环境力。在小刚度物体实验中,由于从手惯性力与阻尼力的影响,力反射型算法反映的环境力不够准确,尤其是在作变速运动时,主手力受到较大干扰,与真实情况不完全

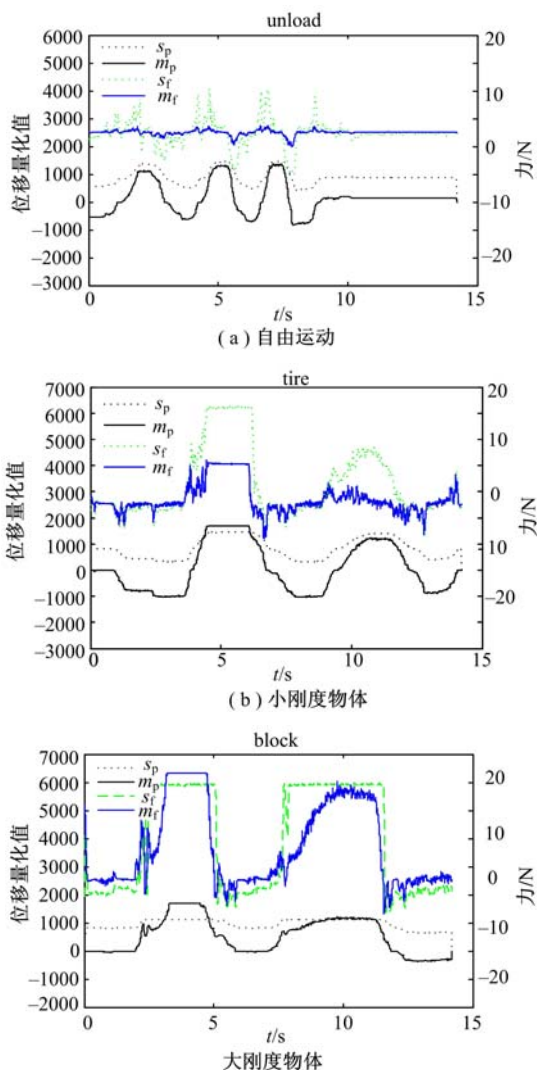


图 7 变增益算法实验结果

相符;变增益力反射型算法比力反射型算法对环境力的反应更为真实灵敏。在大刚度物体实验中,变增益力反馈算法对物体刚度的感知度与力反射算法差别不大,但在运动时不会受到额外的作用力的影响,有利于操作者进行操作。综上所述,在三种情况下,相对于力反射型算法,使用变增益力反馈算法的主手反馈力对从手的环境力的感知均有不同程度的提高,更为真实准确地反映了从手环境力的变化,有助于系统操作性能的提高。

4 结束语

为了使遥操作力反馈系统的主端反馈力能够真实地反映机器人叉手所受的环境力,建立了由力反馈操纵杆和工程机器人叉手液压控制系统构成的双向伺服系统。在力反射算法的基础上,通

过分析从系统的运动特性建立与机器人叉手动力学特性对应的变增益力反馈算法,并通过实验验证了该算法的工作性能。实验证明,该算法能更好地反映从手环境力的变化,有助于操作者在操作过程中与环境进行更好的信息交互,提高了遥操作系统的工作性能。

参考文献:

- [1] Hashtrudi-Zaad K, Salcudean S E. Adap-tive transparent impedance reecting releoperation[C]// Proc IEEE Int Conf Robotics and Automation, Minneapolis, Minnesota, 1996,4: 1369-1374.
- [2] Mengnan (Mary) Wu, Jake J Abbott, Allison M Okamura. Effects of velocity on human force[C]// Control Proceedings of the First Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2005.
- [3] Liya Ni David, Wang W L. A gain-switching control scheme for position-error-based Force-reflecting[C] // Teleoperation Proceedings of the 10th Symp on Haptic Interfaces for Virtual Envir & Teleoperator Sysys. (HAPTICS.02) 2002 IEEE.
- [4] 刘威,宋爱国. 力觉临场感遥操作机器人变增益力-位置控制技术研究[J]. 测控技术, 2006, 25 (2): 215-220.
- Liu Wei, Song Ai-guo. Gain-switch scheme based on force-position for force-refelecting teleoperation [J]. Measurement & Control Technology, 2006, 25 (2):215-220.
- [5] Yamada H, Kato H, Muto J. Master-slave control for construction robot teleoperation[J]. Journal of Robotics and Mechanronics, 2003(1):54-60.
- [6] Lawrence D A. Stability and transparency in bilateral teleoperation[J]. IEEE Trans Robot Automat, 1993, 9(5):624-637.
- [7] 邓乐, 赵丁选. 具有临场感的主从机器人系统双边控制策略[J]. 吉林大学学报:工学版,2006 ,36(5) : 681-686.
- Deng Le, Zhao Ding-xuan. Bilateral control scheme of master slave telerobotic system with telepresence [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2006 ,36(5) :681-686.
- [8] 李言俊, 张科. 系统辨识理论及应用[M]. 北京:国防工业出版社,2003.
- [9] 倪博溢, 萧德云. MATLAB 环境下的系统辨识仿真工具箱[J]. 系统仿真学报,2006,18(6):1492-1496.
- Ni Bo-yi, Xiao De-yun. System identification and simulation toolbox under MATLAB environment [J]. Journal of System Simulation, 2006, 18 (6): 1492-1496.