

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.07.035

液压力觉双向伺服系统的策略切换控制*

侯敬巍 赵丁选 巩明德 栗英杰 倪 涛
(吉林大学机械科学与工程学院, 长春 130025)

【摘要】 在主手为液压力反馈手柄而从手采用液压缸位置伺服装置驱动的力觉双向伺服系统中,为解决从手与刚性物体接触时产生的震荡问题,提出策略切换控制算法。针对柔性负载,采用包含主从手力及位移的四通道式从端驱动型策略,使用主从手力之差驱动从手,再以主手跟随从手位移;在刚性负载下,为避免从手力突变影响位置环而产生震荡,采用不包含从手力的三通道策略;根据从手负载力和速度设计判断指标,控制两种策略的切换。通过刚柔性两种物体的抓取实验证明该策略对刚柔性物体均有良好的力反馈控制效果,并避免了原有的从端力驱动型策略在抓取刚性物体时产生的震荡问题。

关键词: 主从控制 电液伺服控制 刚性负载 力反馈
中图分类号: TH137.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)07-0190-04

Strategy-switching Control for Hydraulic Force Bilateral Servo System when Catching Objects

Hou Jingwei Zhao Dingxuan Gong Mingde Li Yingjie Ni Tao
(College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract

The research object is a force bilateral servo system in which the master side is a hydraulic manipulator and the slave side is a hydraulic cylinder actuated robot. Facing the concussion problem occurred when the slave hand contact rigidity object, a strategy-switching algorithm was proposed. A four-channel slave driving strategy was used to the flexible load and a three-channel strategy without slave force was used to the rigidity load. The switch was judged by the ratio of slave force and velocity. It is proved by the experiments that the strategy is valid and the concussion problem of the former strategy when catching rigidity object could be avoided.

Key words Master - slave control, Hydraulic servo control, Rigidity load, Force feedback

引言

采用电液伺服系统驱动的力反馈手柄能够提供许多其它类型的力反馈装置无法实现的功能:刚度大,可提供充分的力感觉;精度高,可提供准确的限位功能。因此在对动力学特性有较高要求的主从控制系统中具有巨大的潜在应用^[1]。由于液压系统刚性较大,液压力反馈操纵杆只能以操作者施加力为信号进行系统的位置控制,所以其力反馈算法在

结构上与电动手柄的力反馈算法有较大不同。
久富、Kudomi 等对液压并联手柄进行了深入研究,提出了位置对称型、力逆送型、并列型等力反馈算法的基本框架,并提出了力位置复合式的改进并列型策略来解决从端遇到刚性负载时产生的震荡问题^[2~3]。其实质是采用刚性接触时的位置突变抵消力突变,以消除力突变带来的影响。倪涛等提出了采用从端驱动算法的新型力-位置复合算法^[4]。赵丁选等认为力-位置复合的控制方法动态特性较差,

收稿日期: 2012-02-13 修回日期: 2012-03-19
* 国家自然科学基金资助项目(50475011)、吉林省科技发展计划重点资助项目(20090335)和吉林省科技发展计划资助项目(201101027)
作者简介: 侯敬巍, 讲师, 博士, 从事流体传动与控制研究, E-mail: houjw@jlu.edu.cn
通讯作者: 赵丁选, 教授, 博士生导师, 主要从事流体传动与控制研究, E-mail: zdx@jlu.edu.cn

因此提出了从端驱动型的力反射伺服型算法^[5~6]。陈铁华等提出了力并列型算法^[7]。这两种算法使主从手的位置跟随特性得到了改善,但是在面对刚性接触时依然存在问题。

笔者认为液压主从力反馈系统产生冲击震荡的根本原因是突变的反馈力被引入到了系统的位置控制环节,因此拟从消除突变的角度从根本上解决问题。

文献[8~10]在包含冲击力的液压系统中,采用策略切换的方式进行控制,均取得了令人满意的效果。参照这个思路,本文在从端驱动型算法的基础上提出基于策略切换的新型控制策略,以创建一种既具有良好动态性能、又能避免刚性冲击的力反馈方法。

1 液压力反馈主从控制系统

吉林大学工程机器人实验室开发的液压力反馈主从控制系统原理图如图 1 所示。

其主端为一对液压二自由度力反馈操纵杆。操纵杆的手柄由一对弯轴固定在工作台上,通过伺服阀控摆动液压缸来驱动弯轴实现手柄运动及力反馈。通过摆动液压缸上的角位移传感器采集手柄的角位移信号,通过安装在手柄上的应变式力传感器采集操作者施加在手柄上的力。这两个信号经 AD 环节输入控制计算机作为控制信号。

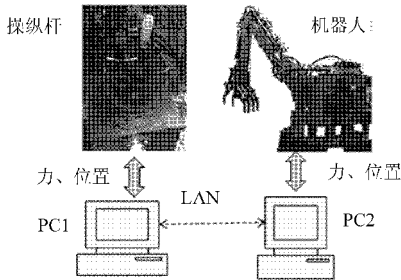


图 1 液压力觉双向伺服系统原理图
Fig. 1 Schematic diagram of hydraulic force bilateral servo system

其从端为小型挖掘机改装的液压四自由度机器人,具有 4 个自由度:抓手、基座、大臂、前臂,分别由 4 个比例阀控制的液压缸驱动。在各个液压缸的缸体安装有直线位移传感器采集液压缸的位移,在液压缸的正负两腔装有压力传感器采集液压缸两腔液压的压强,间接得到 4 个部件的关节驱动力。

主从两端均有通过局域网连接的控制计算机,分别控制操纵杆与机器人的运动。由此力反馈操纵杆与机器人构成了 4 自由度的力觉双向伺服系统^[8]。

2 控制策略

2.1 主从手动力学建模

对于图 1 所示的主从控制系统^[5~6],在力和位置完全透明的理想情况下,双向伺服控制应使操作者感受到的力成比例地等于从手受到被操作对象的作用力 F_e ,同时从手位移 X_s 成比例地等于主手的位移 X_m 。设主手和从手的惯量和阻尼矩阵分别为 M_m 、 B_m 和 M_s 、 B_s 。主手和从手作用于主手的力增益矩阵分别为 K_{mfm} 、 K_{sfm} 。环境力作用于主手和从手的力增益矩阵分别为 K_{mf} 、 K_{sf} 。 M 、 B 、 K 为环境物体的质量、阻尼和弹性系数增益矩阵。应用主、从手位置和力的全部信息来进行交互控制的系统,经控制器控制增益确定主手的动力学方程及控制策略为

$$F_o = M_m \ddot{X}_m + B_m \dot{X}_m + F_m \tag{1}$$

$$F_m = K_p (X_m - X_s) + K_v (\dot{X}_m - \dot{X}_s) + K_a (\ddot{X}_m - \ddot{X}_s) + K_{sfm} F_o - K_{mf} F_e \tag{2}$$

从手的动力学方程及控制策略为

$$F_s = M_s \ddot{X}_s + B_s \dot{X}_s + F_e \tag{3}$$

$$F_s = K_p (X_m - X_s) + K_v (\dot{X}_m - \dot{X}_s) + K_a (\ddot{X}_m - \ddot{X}_s) + K_{sfm} F_o - K_{sf} F_e \tag{4}$$

- 式中 K_p ——主从手控制器确定的主手的位置与力反馈增益矩阵
 K_v ——主从手控制器确定的主手的速度与力反馈增益矩阵
 K_a ——主从手控制器确定的主手的加速度与力反馈增益矩阵
 F_o ——操作者施加给主手的作用力,为从手受到被操作对象的作用力
 F_m ——主手所受的反馈力
 F_s ——从手的驱动力
 F_e (环境力) 为

$$F_e = M \ddot{X}_e + B \dot{X}_e + K X_e \tag{5}$$

式中 X_e ——环境物体的位移

2.2 当前控制策略

图 2 所示为从端力驱动型(力反射伺服型)算法。

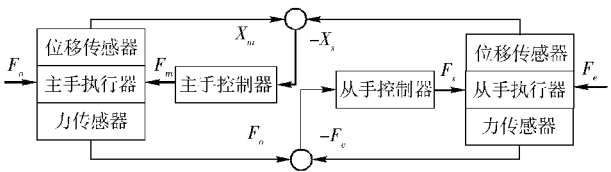


图 2 从端力驱动算法原理图
Fig. 2 Schematic diagram of slave driving algorithm

主手驱动力 F_m 的计算公式为^[4]

$$\mathbf{F}_m = \mathbf{K}_p(\mathbf{X}_m - \mathbf{X}_s) + \mathbf{K}_v(\dot{\mathbf{X}}_m - \dot{\mathbf{X}}_s) + \mathbf{K}_{mf}\mathbf{F}_s \quad (6)$$

由式(4)~(6)联立可得操作者的感知力

$$\mathbf{F}_o = \mathbf{M}_m\ddot{\mathbf{X}}_m + \mathbf{B}_m\dot{\mathbf{X}}_m + \mathbf{K}_p(\mathbf{X}_m - \mathbf{X}_s) + \mathbf{K}_v(\dot{\mathbf{X}}_m - \dot{\mathbf{X}}_s) + \mathbf{K}_{mf}\mathbf{F}_s \quad (7)$$

在由公式(3)~(7)构成的主从系统中,在操作者对主手施加力的时候,可以通过力信号驱动从手,然后主手对从手进行位置跟随运动,实现了主从端的位置一致。当从手受到外力的时候,外力产生的信号将与主手施加力的信号相加,由两个力信号的和共同驱动从手运动,这样操作者便可感受到从端的受力,实现力反馈。

由于力反馈操纵杆具有的高刚性,这种算法在从端遇到刚性物体时能顺利运行的条件是:通过调节主手输入和从端输入增益的方式使主手力输入大于从手力,否则会产生反向的变位,而主手力的作用又会使从手向前运动,这样便产生了震荡。这种震荡会影响从端的位置精度,对于有精确定位要求的场合,如进行抓取等,会使其动作实现比较困难;另外这种反复的受力会使从手产生疲劳,影响使用寿命。

2.3 策略切换算法

图3所示为策略切换算法。

以从端驱动型算法为基础,增加了一个切换增益作为从手反馈力的开关,通过这个开关控制从手力是否输入控制器与主手力相减,这样主从控制器将变为两套不同的算法。另外,由于从端驱动型算法的反馈力会改变位置,因此它的反馈力增益较小,而策略切换算法的反馈力增益较大。

这种算法的特点是,在空载或柔性负载时,能够按照从端驱动型算法运行。之前的研究^[7]证明,这种算法有较好的效果。在遇到刚性冲击时,能够切换为仅含有主手力驱动的四通道型算法,如图4所示。在冲击过后,又将恢复为原来的四通道型算法。

在接触到刚性物体时刻,操作者感受到的力和从手的控制策略分别为

$$\mathbf{F}_o = \mathbf{M}_m\ddot{\mathbf{X}}_m + \mathbf{B}_m\dot{\mathbf{X}}_m + \mathbf{K}_p(\mathbf{X}_m - \mathbf{X}_s) + \mathbf{K}_v(\dot{\mathbf{X}}_m - \dot{\mathbf{X}}_s) + \mathbf{F}_m \quad (8)$$

$$\mathbf{F}_s = \mathbf{K}_{sfm}\mathbf{F}_o \quad (9)$$

在由式(3)、(4)、(5)、(8)构成的主从系统中,类似于电动手柄的位置对称型算法,在从手与刚性物体接触时,会受到阻力而处于静止状态。主手跟随从手的运动也处于静止状态,由于液压机构具有的高刚性特性,操作者施加的力与主手驱动力相等,类似于操作者推动刚性物体的感觉。由于主手力不

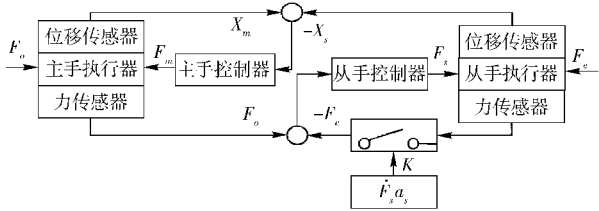


图3 策略切换算法原理图

Fig.3 Schematic diagram of strategy-switching algorithm

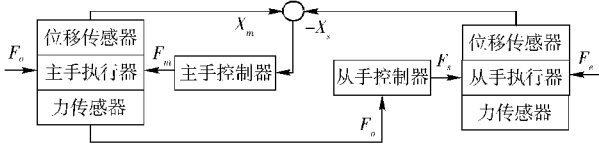


图4 刚性冲击时的算法原理图

Fig.4 Schematic diagram of algorithm during rigidity contact

为零,从手会受到驱动信号继续向前运动,而保持良好的抓取特性和位置控制特性。

在从手发生柔性接触时,不会切换到三通道策略中,会保持力反射伺服型算法的优越特性。

2.4 切换增益的建立

切换增益是为了检测刚性冲击的产生,控制两种策略间的切换。由于在进行刚性接触时,产生的变化主要包括力的突变与速度的突变。根据这个目的,采用较为简单的通过从端力变化率与加速度的乘积来判断主从手策略的切换增益。

$$K = \begin{cases} 0 & (|\dot{F}_s a_s| > K_0) \\ 1 & (|\dot{F}_s a_s| \leq K_0) \end{cases} \quad (10)$$

式中 K ——切换增益

a_s ——从手加速度

K_0 ——控制策略切换的阈值

保证力-位置突变达到刚性负载的要求时进行策略切换。这样在从端处在空载或刚性较小的柔性负载时,会沿用力反射伺服型算法。而在负载刚度超过这个阈值的时候则切换到三通道型算法以避免刚性冲击。

这种策略的设计符合液压力反馈机构的特点。首先,液压机构具有较大的刚性,在从端遭遇刚性接触时,位移很小。对应的,操作者将难以向前推动主手,这与刚性接触的情形类似。其次,对于本文的主从系统,在遭遇刚性接触时,要求从手向前运动,而应尽量避免反向运动,以保证物体能够顺利抓取。当然,在面对其他不同的工况时,切换后算法的设计可能会有所不同。

3 实验与结果分析

为了验证新型力反馈算法的力反馈效果,使用

液压力反馈手柄控制机器人的抓手分别进行了两次实验,通过抓取柔性物体(轮胎)和刚性物体(石块)的实验来验证新算法的效果,并通过使用原有算法抓取石块的实验与策略切换算法的实验对比验证本文算法的优越性。实验结果如图 5~7 所示。

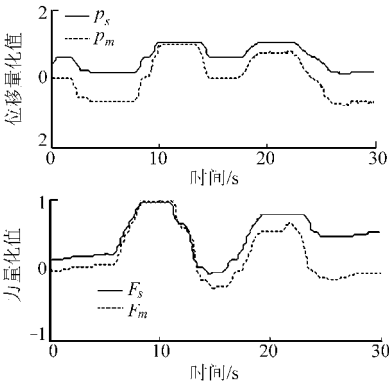


图 5 新算法轮胎抓取实验曲线

Fig. 5 Result of tire catching experiment of new algorithm

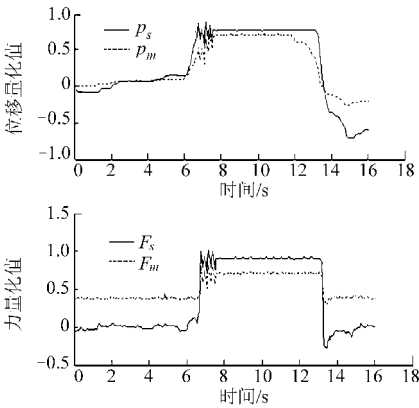


图 6 原有算法石块抓取实验曲线

Fig. 6 Result of stone-block catching experiment of the former algorithm

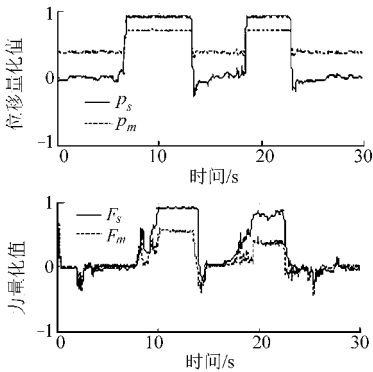


图 7 新算法石块抓取实验曲线

Fig. 7 Result of stone-block catching experiment of new algorithm

在图 5~7 中, p_m 为主手位移量化值, p_s 为从手位移量化值, F_m 为主手力量化值, F_s 为从手力量化值。上述量化值为实验结果与传感器测量范围的比值。

在图 5 所示的轮胎抓取实验中, 操作者操纵手柄两次抓取轮胎, 在第 6 秒与第 16 秒, 当从手抓取到轮胎后, 主手的反馈力逐渐增大, 且随着从手位移的增大逐渐变大, 这与抓取到柔性物体的感觉相似。因此操作者可以感知从手抓取到了弹性物体。由策略切换算法的特点可知, 在轮胎抓取实验中, 原有算法与策略切换算法^[7]具有相同的结果。

图 6 所示为采用原有算法的石块抓取实验结果, 在第 7 秒, 当从手抓取到刚性物体时, 由于将突变的反馈力引入到了位置控制环节, 主手会产生瞬间的反向位移, 之后在操作者作用力的作用下, 主从手又会向前运动, 这个过程会多次反复产生震荡。这种缺陷是由液压系统高刚性的独有特点以及该系统将突变的力信号引入位置控制环节的结构特点引起的。

图 7 所示为采用新算法抓取刚性物体的实验结果, 在第 7 秒与第 18 秒, 当从手抓取到刚性物体时, 主手会立刻感受到较强的反作用力突变, 之后主从手位移不变, 主手力和从手力始终维持在一个较高的状态, 且主手力与操作者施加的力相等。当施加反向作用力时, 主手力与从手力瞬间变小, 这与抓取到一个刚性物体的感觉相似。可见, 采用新算法的力反馈系统, 在进行刚性与柔性物体抓取时, 均能够使操作者通过主手的反馈力感知从端物体的特性, 该算法具有良好的力反馈效果和抓取效果。对比图 6 的实验结果可知, 通过引入新的策略切换算法, 原有算法的冲击问题得到了很好的解决。

4 结束语

针对当前液压力反馈主从系统中因从端遭遇刚性冲击时产生的震荡问题, 指出该问题的成因在于将突变的反馈力信号引入位置控制环节, 并根据当前在刚性接触液压系统中常用的策略切换算法的思路, 在原有从端驱动型算法的基础上, 设计了一种新型的算法。详细描述了新算法的原理及实现过程。通过实验证明了该算法具有优越的工作性能。并证明了该算法相对从端驱动型算法在刚性接触时的优越性。

参 考 文 献

1 Shigeki Kudomi, Hironao Yamada, Muto Takayoshi. 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. (下转第 211 页)

- Song Jian, Sun Xueyan, Zhang Tiezhong, et al. Design and experiment of opening picking robot for eggplant [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(1): 143 ~ 147. (in Chinese)
- 5 Zhu Chi. In-pipe robot for inspection and sampling tasks [J]. Industrial Robot, 2007, 34(1): 39 ~ 45.
- 6 马孜, 张旭, 黄进, 等. 大孔径管道 4 自由度内部检测机器人系统[J]. 机械工程学报, 2009, 45(6): 267 ~ 273.
Ma Zi, Zhang Xu, Huang Jin, et al. Inner inspection robot system with 4 degrees of freedom for large size pipes [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(6): 267 ~ 273. (in Chinese)
- 7 英红, 谈至明. 基于双目视觉的水泥混凝土路面错台检测方法[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2011, 39(2): 247 ~ 252.
Ying Hong, Tan Zhiming. Cement concrete pavement faulting detection and recognition based on binocular vision [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2011, 39(2): 247 ~ 252. (in Chinese)
- 8 胡天翔, 郑加强, 周宏平. 基于双目视觉的树木图像测距方法[J]. 农业机械学报, 2010, 41(11): 158 ~ 162.
Hu Tianxiang, Zheng Jiaqiang, Zhou Hongping. Measurement method of depth information of tree images based on binocular vision [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(11): 158 ~ 162. (in Chinese)
- 9 浦世亮. 基于激光干涉原理的颗粒场测量技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
Pu Shiliang. The study on particle field measurement based on laser interferometric [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008. (in Chinese)
- 10 Jure Rejc, Justin Činkelj, Marko Munih. Dimensional measurements of a gray-iron object using a robot and a laser displacement sensor [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2009, 25(1): 155 ~ 167.
- 11 Pham A M, Descantes Y, de Larrard F. Determination of sieve grading curves using an optical device [J]. Mechatronics, 2011, 21(1): 298 ~ 309.
- 12 Liao C W, Tarn Y S. On-line automatic optical inspection system for coarse particle size distribution [J]. Powder Technology, 2009, 189(3): 508 ~ 513.
- 13 黄凤, 汤炳新. 振动给料机的模型参考自适应控制[J]. 河海大学常州分校学报, 2007, 21(1): 33 ~ 36.
Huang Feng, Tang Bingxin. The model reference adaptive control of vibration feeder [J]. Journal of Hohai University Changzhou, 2007, 21(1): 33 ~ 36. (in Chinese)
- 14 Paulo Menezes, Frédéric Lerasle, Jorge Dias. Towards human motion capture from a camera mounted on a mobile robot[J]. Image and Vision Computing, 2011, 29(6): 382 ~ 393.

(上接第 193 页)

- 2 久富茂樹, 光井輝彰, 飯田佳弘, et al. 並列リンク型力覚ディスプレイの研究[R]. 岐阜県生産情報技術研究所研究報告, 1999.
- 3 Kudomi S, Yamada H, Muto T. Development of a hydraulic parallel link type of force display[C]//Proc. 5nd JHPS Inter. Symp. on Fluid Power, 2002: 471 ~ 476.
- 4 倪涛, 赵丁选, 张红彦. 电液手控器型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)
- 5 张祝新, 赵丁选, 陈铁华. 具有力觉临场感的主从机器人双向控制策略[J]. 农业机械学报, 2008, 39(10): 164 ~ 167.
Zhang Zhuxin, Zhao Dingxuan, Chen Tiehua. Bilateral control strategy of master-slave manipulators with force tele-presence [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(10): 164 ~ 167. (in Chinese)
- 6 侯敬巍, 赵丁选, 倪涛. 液压二自由度力反馈操纵杆设计[J]. 工程设计学报, 2008, 15(2): 90 ~ 93.
Hou Jingwei, Zhao Dingxuan, Ni Tao. Design of hydraulic two-DOF force feedback joystick [J]. Journal of Engineering Design, 2008, 15(2): 90 ~ 93. (in Chinese)
- 7 陈铁华, 赵丁选, 张祝新. 主/从机器人系统设计与双向伺服控制[J]. 农业机械学报, 2008, 39(12): 141 ~ 145.
Chen Tiehua, Zhao Dingxuan, Zhang Zhuxin. Design of master-slave manipulators system and bilateral servo control strategy [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(12): 141 ~ 145. (in Chinese)
- 8 Niksefat N, Sepehri N Y, Wu Q. Design and experimental evaluation of a QFT contact task controller for electro-hydraulic actuators[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2007, 17(2 ~ 3): 225 ~ 250.
- 9 Sekhavat P, Sepehri N, Wu Q. Impact stabilizing controller for hydraulic actuators with friction: theory and experiments[J]. Control Engineering Practice, 2006, 14(12): 1423 ~ 1433.
- 10 Lee S H, Lim J T. Switching control of H_{∞} gain scheduled controllers in uncertain nonlinear system[J]. Automatica, 2000, 36(7): 1067 ~ 1074.