

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.09.042

液压并联机器人力/位混合控制策略研究

陶 晗 曲智勇 丛大成
(哈尔滨工业大学机电工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 针对液压驱动的六自由度并联机构,提出了基于机器视觉的力/位混合控制策略,以实现并联机构的跟随对接等需要与环境密切接触的任务。平台的视觉系统由一架 CCD 摄像机和一个激光测距器构成,用来测量平台与目标之间的相对距离,同时通过一个平板式六自由度力传感器对接触过程的作用力进行测量。其控制器由内外两个闭环构成,并通过补偿环节对外力扰动进行修正。最后通过若干试验验证整个控制方式的有效性。试验结果表明,整个系统在相对位置跟踪和接触力控制方面具有优异的性能。在整个对接试验过程中,接触力被控制在 300 N 之内。

关键词: 并联机构; 混合控制; 液压伺服; 视觉伺服

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)09-0361-06

Hybrid Position/Force Control Scheme for Hydraulic Parallel Manipulator

TAO Han QU Zhiyong CONG Dacheng
(School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The aim was to propose a combined position/force control scheme for Stewart parallel platform's interacting tasks with environment or human body based on force sensor and vision system. The vision system included a high resolution camera and a laser range finder which aimed at providing global position information. To enhance the performance of industrial tasks interacting with the environment, a novel hybrid position/force control algorithm using exteroceptive vision system for hydraulic Stewart parallel platform was proposed. A two control-loop scheme was designed for interacting tasks, and gravity compensation was demonstrated to balance the disturbance. A full experimental system was built and a number of experiments were performed. The whole experimental system consisted of two parts, which was the hydraulic parallel manipulator and the docking simulation system. Firstly, a relative position tracking experiment was conducted to investigate the manipulator's high-speed tracking ability. Movement commands of ± 100 mm/s in y axis and ± 80 mm/s in z axis were given to actuate the manipulator. From the experiment result, the relative position tracking errors of y and z axes were both smaller than 10 mm. And then the dynamic docking experiment was performed to investigate the interacting performance with the target object of the proposed combined position/force control law, where the movement speeds of the docking simulator was driven along the y axis at 50 mm/s and z axis at 40 mm/s. In dynamic docking experiment, the contact force of the manipulator was controlled within 300 N, the hydraulic manipulator could track and dock with the moving target reliably and quickly. The above two experiments were conducted and the experiment results demonstrated the effectiveness and stability of the proposed algorithm.

Key words: parallel manipulator; hybrid control; hydraulic servo; vision servo

0 引言

由于具有承载能力强、响应速度快、高刚度、高

精确度等特点,并联机构已经在各个行业得到了广泛的应用^[1-2]。尤其是六自由度 Stewart 平台,在外科手术和装配、剖光等需要和环境密切接触的领域

中,并联机构同样因其高精度的特点得到了广泛的应用^[3]。

目前,六自由度的各种运动控制方法已经得到了广泛的研究,其技术相对比较成熟。然而由于工作环境的不确定性,与并联机器人的运动控制相比,其需要与环境接触的力控制策略更为复杂^[3-5]。为了能够实现更为复杂的任务同时提高并联机构的可控性,基于多传感器的控制方式被开发出来,其系统的工作效率、鲁棒性和柔顺性都得到了相应的提升^[6]。在诸多位置测量方式中,视觉传感器因其可以在较大范围空间中进行非接触位置测量而得到广泛的应用^[7]。通过引入机器视觉,控制系统对执行器和交互目标在空间的位置精确度的要求更低,能够更好地完成与目标的交互任务^[3]。

将视觉传感器和力传感器相结合可以克服其自身各自的局限性,通过视觉传感器对目标进行非接触的测量并对整个工作环境进行建模,使用力传感器检测与环境互动的作用力以保证交互任务的安全性。目前已经有学者对这种基于视觉的力/位混合控制进行研究^[5-7]。

液压并联机器人由于其液压系统自身高度非线性的特点,基于自身动力学建模的力位混合控制常常难以实现^[8-11]。为了使六自由度液压并联机构更好地实现与目标互动对接,文本提出使用视觉和力传感器融合的力/位混合控制策略,并对提出的混合控制进行一系列对接试验验证,以证明这种控制方式的有效性。

1 系统模型

1.1 液压并联机构与目标工装

整个系统的构成如图 1 所示,为一水平放置的液压驱动六自由度并联机构,其下平台固定在地基上,上平台上搭载着对接装置,可以在工作空间内自由移动以捕捉目标工装^[10]。平台由 6 个液压缸进行驱动,每个液压缸通过虎克铰与上下平台进行连接。其中,每个液压驱动器由 1 个非对称伺服阀和非对称液压缸构成。在上平台和对接装置之间设有一个平板式六自由度力传感器以测量并联平台与环境之间力、力矩作用。

考虑到固定在滑动平台上的目标工装质量较大且需要在较大的范围内进行摆动,试验中设置 x 、 y 、 z 方向 3 条互相垂直的滑动轨道,并通过步进电机进行驱动,以保证目标工装可以连续平稳地滑动。为了更好地与目标工装进行对接,在平台对接机构上安装了 2 个圆柱形导向销并在目标工装上对应设置

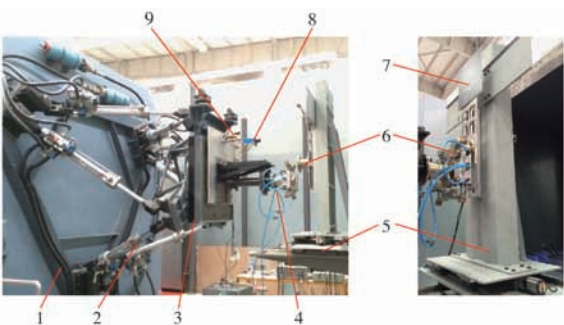


图 1 液压并联机构及目标工装

Fig. 1 Hydraulic manipulator and target object

1. 地基 2. 液压并联机构 3. 力传感器 4. 末端执行器 5. 滑动轨道 6. 对接装置 7. 激光靶盘 8. 激光测距仪 9. 摄像头

了 2 个导向孔,当二者完全对接后,通过气缸进行锁紧。为了得到更为精确的并联平台与目标工装之间的相对距离,本方案通过 CCD 摄像机捕捉目标工装上的二维靶标,以计算二者之间的相对位姿。为了弥补这种单目视觉对相对距离计算不准确的问题,使用了激光测距仪对所测得距离进行修正。

1.2 系统建模

如图 1 所示,体坐标系 $O_p x_p y_p z_p$ 固定在动平台上,同时静坐标系 $O_b x_b y_b z_b$ 固定在基座上。在初始状态下,两个坐标系的原点重合。

通过运动学反解^[12]计算并联机构液压驱动器液压缸的缸长,缸长计算表达式为

$$l = \|R(q_o)A - B + q_p\| \tag{1}$$

式中 l ——上下铰点间距离

q ——铰点位置向量

A ——上铰点的位置矩阵

B ——下铰点的位置矩阵

R ——从体坐标系到惯性坐标系之间的转换矩阵

通过运动学正解^[19],用并联机构驱动器长度 l 计算出上平台位置坐标 q 。使用牛顿欧拉法,计算公式为

$$q_{n+1} = q_n + J(q_n)^{-1}(l_m - l_n) \tag{2}$$

式中 n ——迭代的次数

l_m ——并联机构支腿测量长度

l_n ——第 n 次迭代计算出来的支腿长度

J ——雅可比变换矩阵

并联机构驱动器的速度和上平台的速度 $\dot{l}$ 关系式可以表示为

$$\dot{l} = J(q)\dot{\tilde{q}} \tag{3}$$

式中 $\dot{\tilde{q}}$ ——上平台中心点在惯性坐标系下的速度和角速度向量

并联平台的动力学模型可以表示为

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = J(q)^T f + F_e \quad (4)$$

式中 M ——质量矩阵 G ——重力矩阵
 C ——摩擦力和科氏力矩阵
 f ——驱动器力向量
 F_e ——广义接触力向量

2 控制系统

2.1 控制器内环

控制系统位置内环基于铰点空间坐标系建立,通过运动学反解计算出平台特定位姿的液压缸支腿长度。因此,通过运动学反解可以计算每个驱动器所需要的长度,以控制平台实现指定位姿。系统通过位移传感器采集液压缸的伸出长度来实现位置闭环,并采用动压反馈来进一步提升系统的动态特性^[13]。当液压并联机构在某一方向跟踪正弦信号时,往返方向负载特性的非对称性将降低跟踪精度。而且,在这种侧向放置的并联机构中重力作为外界干扰将进一步增大系统的稳态误差,因此在控制器系统设计中采用了动态重力补偿(DGC)以期提高系统整体性能^[12]。另外,液压伺服阀的负载敏感性也会影响整个闭环系统的性能,本文采用了非线性补偿环节以抵消其对性能产生的影响。整个系统的内环位置控制框图如图2所示^[13-15]。

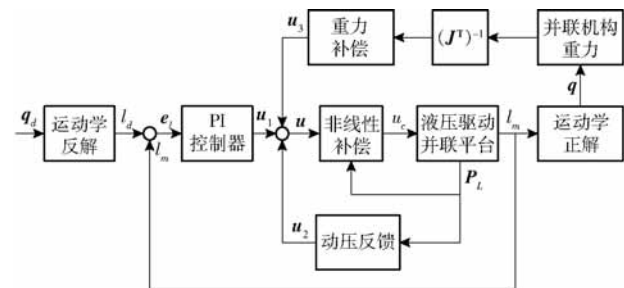


图2 位置内环控制策略

Fig.2 Block diagram of inner loop controller

在控制内环中动压反馈系数 u_2 ^[16]为

$$u_2 = k_{fp} \frac{T_p s}{T_p s + 1} P_L \quad (5)$$

式中 T_p ——时间常数

k_{fp} —— 6×6 正交增益矩阵

P_L 为负载压力矩阵,其定义如下

$$P_L = P_1 - n_1 P_2 \quad (6)$$

式中 n_1 ——液压缸有杆腔和无杆腔有效面积比例

P_1 ——液压缸有杆腔压力

P_2 ——液压缸两腔的压力

如图2所示,根据由运动学正解实时解算出来的平台当前位置,可以解算出液压平台的重力项。矩阵 J 将重力项 G 从笛卡尔空间坐标系转换到铰

点坐标系^[8-9]。如图2所示,通过转换矩阵 V 将铰点空间上的作用力转换到液压缸伺服阀上的信号。其控制方法可以表示为

$$u_3 = V (J^T)^{-1} G \quad (7)$$

与PI控制器相结合,整个控制方案表示为

$$u = k_p e_l + k_i \int_0^t e_l dt - k_{fp} \frac{T_p s}{T_p s + 1} P_L + V (J^T)^{-1} G \quad (8)$$

式中 k_p ——比例项 6×6 正交增益矩阵

e_l ——控制器输入信号

u ——控制器输出信号

k_i ——积分项 6×6 正交增益矩阵

为了降低伺服阀的负载敏感性,非线性补偿模块设计为

$$u_{e_i} = \sqrt{P_s / (k_i P_s - \text{sign}(u_i) P_{L_i})} u_i = h(P_{L_i}) u_i \quad (9)$$

其中 $k_i = \begin{cases} 1 & (u_i \geq 0) \\ n_1 & (u_i < 0) \end{cases}$

$$\text{sign}(u_i) = \begin{cases} 1 & (u_i \geq 0) \\ -1 & (u_i < 0) \end{cases}$$

式中 P_s ——油源压力

P_{L_i} ——第 i 个液压缸的负载压降

这样,最终整个控制系统的内环控制表达为

$$u_c = h(P_L) \left(k_p e_l + k_i \int_0^t e_l dt - k_{fp} \frac{T_p s}{T_p s + 1} P_L + V J^T \right) \quad (10)$$

联立式(5)、(10),并联系系统控制表达式为

$$J^T V^{-1} u_c + F_e = M(q) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} + G(q) \quad (11)$$

当平台未发生碰撞时,将式(10)代入式(11)并简化可得

$$J^T V^{-1} h(P_L) \left(k_p e_l + k_i \int_0^t e_l dt - k_{fp} \frac{T_p s}{T_p s + 1} P_L \right) = M(q) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} \quad (12)$$

当系统达到稳态时,平台的速度、加速度和压力变化等于零,式(12)可简化为

$$k_p \dot{e}_l + k_i e_l = 0 \quad (13)$$

如上所述,文中提出的控制系统达到稳态时其稳态偏差将逐渐接近于零。

2.2 力/位混合控制

通过 6×6 正交分解矩阵,将整个工作空间坐标系分解为位置控制空间 Sq 和力控制空间 $(I - S)q$ ^[3]。在力控制空间 Sq ,控制系统表达式为

激光测距器和分辨率 658 像素 × 492 像素的 Mako G-032 型高性能相机。接触力传感器采用 BERTEC 六维平板式力传感器,其在 y 、 z 方向最大量程 10 000 N, x 方向最大量程则达 20 000 N。

为了验证所提出的控制策略的有效性,首先进行了平台的动态位姿跟踪试验,试验中通过使平台在初始位置跟踪目标工装 y 、 z 方向的运动,以验证算法的基于视觉的位置跟踪性能。然后,试验系统进行了完整对接试验以验证提出的基于视觉的力/位混合控制策略。

3.1 动态位置跟踪试验

动态位姿跟踪试验主要用来验证平台对目标工装移动的跟踪性能,同时也为下一步动态对接试验做准备。为了尽量消除惯性力对试验的影响,目标工装在步进电机的驱动下做近似三角波运动。目标工装运动速度分别为 y 向 ± 100 mm/s 和 z 向 ± 80 mm/s,其运动幅值设定为 ± 100 mm。在试验开始时,平台固定在其初始零位,在控制系统中的相对位置为 $x = 0$, $y = 0$, $z = 120$ mm。试验结果如图 5 所示,具体分别为 y 和 z 方向的位置偏差、平台受力和平台位置。

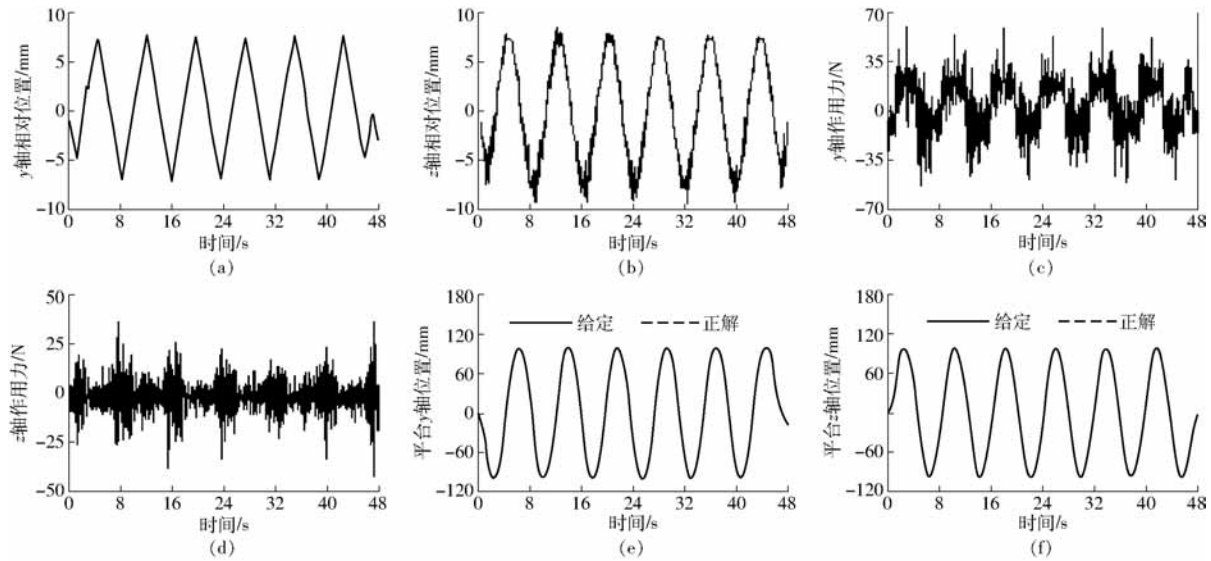


图 5 位置跟踪试验结果
Fig. 5 Dynamic tracking experiment

整体看来,试验中 y 、 z 方向的动态位姿跟踪误差均小于 10 mm,同时 z 方向的跟踪误差要较大一些而且存在着一定的噪声,其原因是跟踪过程中受到平台自身重力的影响。 y 和 z 方向的力偏差较小但是仍存在一定的噪声,从图 5c、5d 可以看出,大概有 ± 70 N 的偏差,这是因为控制系统中并未考虑惯性力对系统的影响^[8]。位置控制的给定信号和运动学正解计算的平台实际位置信号对比如图 5e、5f 所示,可以看出,液压并联平台的位置控制精度较高,这也证实了 2.1 节中所提出的位置控制内环的算法有效性。

3.2 动态对接试验

整个动态对接过程包含 7 个阶段,每个阶段的具体起点和终点在图 6 中标出:初始重置、回退、非接触对接、接触对接、锁紧并跟踪、解锁并回退以及最后的终止阶段。目标工装通过滑轨进行 x 、 y 、 z 3 个方向的混合运动,其 x 、 y 轴方向速度 50 mm/s, z 轴方向速度 40 mm/s,两个方向的运动速度幅值均为 ± 100 mm。在初始阶段,并联平台锁定在初始零位,目标工装固定在惯性坐标系下 $x = 133$ mm、 $y =$

-26 mm、 $z = -93$ mm 位置。为了进一步提高对接速度, x 方向的进给速度由 y 、 z 方向的位置偏差决定。当 x 方向距离较大或 y 、 z 方向的位置偏差小于 10 mm 时,平台将沿着 x 方向接近目标工装。当平台末端与目标工装距离小于 144 mm 时, y 、 z 方向的位置误差允许范围降到 7 mm,这是为了保证平台末端的导向销可以准确平稳地插入目标工装上的导向孔。

如图 6 所示,在回退阶段, y 和 z 方向的相对位置误差快速进入额定范围之内, x 方向在 15 s 时开始移动。其中, y 、 z 方向的位置和作用力较为接近,故只用 y 方向数据表示。在第 51 秒之前,并联平台和目标工装之间并未发生接触故测量到的接触力很小。发生接触之后,通过文中所提出的基于机器视觉的力/位混合控制策略,其接触力可以控制在 300 N 以内。从图 6 中可以清楚地看出,从第 15 秒到 67 秒之间的对接过程,路径生成模块不断地发出 x 方向的前进指令以保证整个对接过程平稳地进行。试验结果证明了文中所提出的控制算法的有效性。

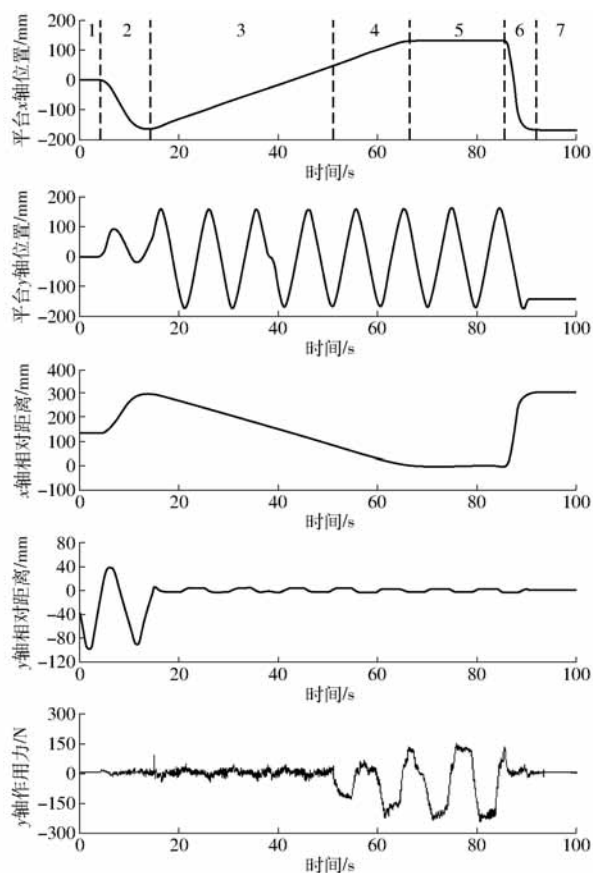


图6 动态对接试验结果

Fig. 6 Dynamic docking experiment

4 结论

(1)提出了一种用于实现液压并联平台与环境对接交互任务的基于机器视觉的力/位混合控制策略。控制系统由内外两层闭环构成,在内环中,由安装在液压驱动器上的油压传感器和位置传感器提供闭环反馈信息,并采用了动压反馈和非线性补偿来进一步提高系统的动态性能。在控制系统外环,通过 CCD 摄像机和激光测距器来提供全局相对位置并使用六维力传感器测量在对接过程中的接触力。系统控制外环将采集到的位置信息和力的信息综合以决定平台的运动轨迹,同时通过控制系统内环来实现对目标工装的精确跟踪。

(2)建立了完整的试验系统模型并对文中提出的控制算法进行了若干验证试验。在动态位姿跟踪试验中,目标工装通过进行三角波运动以期减弱并联机构惯性力对控制系统稳定性的影响。在目标以高速运动的状态下, x 、 y 方向跟踪的相对位置误差均不超过 10 mm。之后进行了快速的动态对接试验,试验中实现了对目标快速的跟踪和稳定的对接交互,且整个对接过程中相对作用力均不超过 300 N,能够很好地完成装配等环境交互任务,满足安全性要求。

参考文献

- 高峰. 机构学研究现状与发展趋势的思考[J]. 机械工程学报, 2005, 41(8): 3-17.
GAO Feng. Reflection on the current status and development strategy of mechanism research[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(8): 3-17. (in Chinese)
- BELLAKEHAL S, ANDREFF N, MEZOUAR Y, et al. Vision/force control of parallel robots[J]. Mechanism & Machine Theory, 2011, 46(10): 1376-1395.
- RAIBERT M H, CRAIG J J. Hybrid position/force control of manipulators[J]. Journal of Dynamic Systems Measurement & Control, 1981, 103(2): 126-133.
- HOGAN N. Impedance control: an approach to manipulation[C]// American Control Conference. IEEE, 2009: 481-489.
- NELSON B J, KHOSLA P K. Force and vision resolvability for assimilating disparate sensory feedback[J]. IEEE Transactions on Robotics & Automation, 1996, 12(5): 714-731.
- DENG L, JANABI-SHARIFI F, HASSANZADEH I. Comparison of combined vision/force control strategies for robot manipulators[C]// Optomechatronic Systems Control. International Society for Optics and Photonics, 2005: 605202-605202-12.
- CARELLI R, OLIVA E, SORIA C, et al. Combined force and visual control of an industrial robot[J]. Robotica, 2004, 22(2): 163-171.
- JUNG S, HSIA T C, BONITZ R G. Force tracking impedance control of robot manipulators under unknown environment[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2004, 12(3): 474-483.
- HARIB K, SRINIVASAN K. Kinematic and dynamic analysis of Stewart platform-based machine tool structures[J]. Robotica, 2003, 21(5): 541-554.
- LEBRET G, LIU K, LEWIS F L. Dynamic analysis and control of a Stewart platform manipulator[J]. Journal of Field Robotics, 1993, 10(5): 629-655.
- 侯敬巍, 倪涛, 唐新星, 等. 液压 Stewart 主从系统六维控制策略[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(8): 334-338. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140853&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.08.053.
HOU Jingwei, NI Tao, TANG Xinxing, et al. 6-dimension control strategy for hydraulic Stewart master-slave system [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 334-338. (in Chinese)

- actuator[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(5): 1128–1137. (in Chinese)
- 15 YANG Zhaoshu, HE Zhongbo, LI Dongwei, et al. Direct drive servo valve based on magnetostrictive actuator: multi-coupled modeling and its compound control strategy [J]. Sensors and Actuators: Physical, 2015, 235: 119–130.
- 16 邱大龙, 田东林, 刘浩, 等. 基于 GMM 直动阀位移放大机构的结构研究[J]. 液压与气动, 2013, 25(11): 90–93.
- QIU Dalong, TIAN Donglin, LIU Hao, et al. Research on structures for displacement amplifier of direct-acting valve based on GMM[J]. Journal of Hydraulic and Pneumatic, 2013, 25(11): 90–93. (in Chinese)
- 17 俞军涛, 焦宗夏, 吴帅. 基于液压微位移放大结构的新型压电陶瓷直接驱动阀设计及仿真[J]. 机械工程学报, 2013, 49(2): 151–158.
- YU Juntao, JIAO Zongxia, WU Shuai. Design and simulation study on new servo valve direct by piezoelectric actuator using hydraulic amplification[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(2): 151–158. (in Chinese)
- 18 林超, 才立忠, 纪久祥, 等. 多维微传动平台设计及基于 RPY 角的运动特性分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2014, 42(9): 46–52.
- LIN Chao, CAI Lizhong, JI Jiuxiang, et al. Multidimensional micro transmission platform design and RPY angle-based movement characteristic analysis[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2014, 42(9): 46–52. (in Chinese)
- 19 赵正龙, 何忠波, 李东伟, 等. 骨导耳听器发音振子的弓张结构设计仿真研究[J]. 计算机仿真, 2016, 33(5): 235–239.
- ZHAO Zhenglong, HE Zhongbo, LI Dongwei, et al. Analysis and research on the bow-type structure of GMM pronunciation vibrator[J]. Journal of Computer Simulation, 2016, 33(5): 235–239. (in Chinese)
- 20 马立, 谢炜, 刘波, 等. 柔性铰链定位平台的设计[J]. 光学精密工程, 2014, 22(2): 338–345.
- MA Li, XIE Wei, LIU Bo, et al. Design of micro-positioning stage with flexible hinges[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(2): 338–345. (in Chinese)
- 21 杜志元, 闫鹏. 基于桥式放大机构的柔顺微定位平台的研究[J]. 机器人, 2016, 38(2): 185–192.
- DU Zhiyuan, YAN Peng. Analysis on compliant micro positioning stage based on bridge-type amplification mechanism[J]. Robot, 2016, 38(2): 185–192. (in Chinese)
- 22 林超, 俞松松, 陶桂宝, 等. 微/纳米定位平台的桥式机构静、动态优化设计[J]. 浙江大学学报(工学版), 2012, 46(6): 1068–1073.
- LIN Chao, YU Songsong, TAO Guibao, et al. Static and dynamic optimal design of bridge-type mechanism of micro/nano-positioning platform[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2012, 46(6): 1068–1073. (in Chinese)
- ~~~~~

(上接第 366 页)

- 12 李强, 王宣银, 程佳. 基于逆动力学模型的 Stewart 平台干扰力补偿[J]. 机械工程学报, 2009, 45(1): 14–19.
- LI Qiang, WANG Xuanyin, CHENG Jia. Interference force compensation of Stewart platform based on inverse dynamic model [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(1): 14–19. (in Chinese)
- 13 MORINAGA S, KOSUGE K. Collision detection system for manipulator based on adaptive impedance control law[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2003. Proceedings. ICRA. IEEE, 2009: 1080–1085.
- 14 FLOHIC J L, PACCOT F, BOUTON N, et al. Application of hybrid force/position control on parallel machine for mechanical test [J]. Mechatronics, 2018, 49: 168–176.
- 15 ROVEDA L, PEDROCCHI N, BESCHI M, et al. High-accuracy robotized industrial assembly task control schema with force overshoots avoidance[J]. Control Engineering Practice, 2018, 71: 142–153.
- 16 黄玲涛, 倪涛, 黄海东, 等. 面向柔软物体抓取的遥操作工程机器人位置反力控制[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(10): 357–363. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20151048&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.10.048.
- HUANG Lingtao, NI Tao, HUANG Haidong, et al. Position reaction force control of teleoperation construction robot for grasping soft objects[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(10): 357–363. (in Chinese)
- 17 郑国昆, 李道平, 王小军. 运载火箭加注连接器自动对接尾段轨迹规划研究[C]//第 33 届中国控制会议, 2014: 7854–7857.
- ZHENG Guokun, LI Daoping, WANG Xiaojun. Research on trajectory planning at the end of auto-docking of launch vehicle fuel connector [C]//Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference, 2014: 7854–7857. (in Chinese)
- 18 李保平, 徐华, 何庆. 某加注连接器位姿补偿机构设计及优化[J]. 导弹与航天运载技术, 2017(5): 80–83.
- LI Baoping, XU Hua, HE Qing. Design and optimization of a position and pose compensation mechanism of fuel loading connector [J]. Missiles and Space Vehicle, 2017(5): 80–83. (in Chinese)
- 19 TA T N, TRAN C S, HWANG Y L. The kinematic and dynamic analysis of hydraulic control system based on the Lagrangian force method[J]. International Journal of Computational Methods, 2017(4): 1850041.
- 20 NGUYEN M N, TRAN D T, AHN K K. Robust position and vibration control of an electrohydraulic series elastic manipulator against disturbance generated by a variable stiffness actuator[J]. Mechatronics, 2018, 52: 22–35.