

文章编号: 2095-2163(2019)02-0244-04

中图分类号: TP13

文献标志码: A

# 关节驱动机器人的饱和反馈力学控制方法研究

林荣霞

(广东工业大学 华立学院, 广州 511325)

**摘要:** 关节驱动机器人容易受到饱和跟踪误差干扰, 导致机器人的力学控制稳定性不好, 为了提高关节驱动机器人的力学输出稳定性, 提出一种基于幅值饱和和非线性状态反馈的关节驱动机器人力学稳定性控制方法, 关节驱动机器人力学稳定性控制过程是一个多变量、非线性、强耦合系统, 采用饱和和非线性系统构建机器人的被控对象模型, 将关节驱动机器人行走的稳态控制问题转化为高维 C-空间中的多约束运动规划问题, 采用闭环系统反馈修正方法进行反馈力学误差的补偿, 采用连杆端动力学控制方法, 实现对关节驱动机器人的饱和反馈力学控制。仿真结果表明, 采用该方法进行关节驱动机器人控制的输出力学参量平稳性较好, 控制输出的稳定性较强, 提高了机器人关节驱动的稳健控制能力。

**关键词:** 关节驱动机器人; 力学; 控制; 误差修正

## Research on saturated feedback mechanics control method for joint driven robot

LIN Rongxia

(Huali College, Guangdong University of Technology, Guangzhou 511325, China)

**[Abstract]** Joint driven robot is easily disturbed by saturation tracking error, which leads to poor mechanical control stability. In order to improve the mechanical output stability of joint driven robot, a mechanical stability control method for joint driven robot based on amplitude saturation nonlinear state feedback is proposed. The mechanical stability control process of joint driven robot is a multivariable, nonlinear, strong coupling system. The controlled object model of the robot is constructed by a saturated nonlinear system. The steady state control problem of the joint driven robot is transformed into a multi-constrained motion planning problem in a high-dimensional C-space. The feedback correction method of closed loop system is used to compensate the feedback mechanical error, and the dynamic control method of connecting rod end is adopted to realize the saturated feedback mechanical control of the joint driven robot. The simulation results show that the stability of the output mechanical parameters and the stability of the control output are good, and the robust control ability of the robot joint drive is improved.

**[Key words]** joint drive robot; mechanics; control; error correction

## 0 引言

关节驱动机器人作为仿生机器人的一类, 采用关节连杆驱动方法进行机器人的输出力学控制, 实现机器人的行走、步进、抓取以及姿态平稳性控制等方面要求。关节驱动机器人现已广泛应用在机械作业、安全探测、野外探测等领域, 在拓展人类作业的环境限制性和安全性等方面发挥重要作用。在关节驱动机器人的驱动设计中, 需要进行驱动动力学的稳定性控制, 降低关节的扰动影响, 提高机器人的力学驱动稳定性。研究关节驱动机器人的饱和反馈力学控制方法在机器人的优化设计中具有重要意义<sup>[1]</sup>。

关节驱动机器人反馈力学控制受到行走、姿态变换、抓握等因素的影响, 导致关节驱动机器人力学驱动控制具有不确定性, 主要分为 2 种类型: 结构 (structured) 不确定性和非结构 (unstructured) 不确定性<sup>[2]</sup>, 传统方法中, 对关节驱动机器人反馈力学

控制方法主要有模糊 PID 控制方法和反演控制方法, 结合机器人路径规划模型和惯性参数调节, 进行关节驱动机器人的连杆驱动反馈力学控制<sup>[3]</sup>。文献[4]中提出一种基于传感量化融合跟踪的关节驱动机器人反馈力学控制方法, 采用敏感陀螺仪进行机器人姿态参量采集, 提高机器人的连杆驱动的反馈力学控制能力, 但该方法容易受到小扰动影响, 导致控制的精准度不高。文献[5]中提出一种基于末端位姿修正的关节驱动机器人反馈力学控制算法。构建关节驱动机器人的运动学参数模型, 结合拟线性规划模型进行关节驱动机器人的连杆动力学分析, 提高控制平稳性, 但该方法的计算量较大, 控制的实时性不好。针对上述问题, 本文提出一种基于幅值饱和和非线性状态反馈的关节驱动机器人力学稳定性控制方法, 首先采用饱和和非线性系统构建机器人的被控对象模型, 将关节驱动机器人行走的稳态控制问题转化为高维 C-空间中的多约束运动规划

**作者简介:** 林荣霞(1978-), 女, 硕士, 讲师, 主要研究方向: 嵌入式技术、机器人控制系统及算法、算法研究。

收稿日期: 2018-11-10

问题,然后采用闭环系统反馈修正方法进行反馈力学误差的补偿,采用连杆端动力学控制方法,实现对关节驱动机器人的饱和反馈力学控制。最后通过仿真实验进行性能测试,展示了本文方法在提高关节驱动机器人的饱和反馈力学控制平稳性和稳健性方面的优越性能。

## 1 关节驱动机器人的驱动力学模型和控制约束参量分析

### 1.1 关节驱动机器人的驱动力学模型

为了实现对关节驱动机器人反馈力学控制和姿态调节与自适应修正,首先构建关节驱动机器人的运动学参数模型,结合空间规划模型进行关节驱动机器人的连杆动力学分析,关节驱动机器人姿态稳定性控制建立在运动姿态调节和控制物理信息参量采集基础上<sup>[6]</sup>,假设观测机器人采集的位姿信息是  $N \times 1$  维的高斯随机向量,附加噪声是高斯白噪声,假设存在  $p$  个分布式的机器人运动连杆,机器人驱动连杆的相干分布源模型可表示为:

$$z(t) = \sum_{i=1}^p s_i(t) b_i(\theta_i) + n(t), \quad (1)$$

结合惯性姿态参数调节方法,进行关节驱动机器人的反馈力学控制优化设计。设计机器人的连杆驱动反馈力学控制律,结合二维参数谱峰搜索方法进行机器人的姿态信息采集和运动力学分析,实现机器人控制优化<sup>[7]</sup>,机器人的目标位姿参数采集的中心波达方向  $\theta_i$  和扩展  $\sigma_i$ , 在二维运动空间中,满足:

$$(\theta_i, \sigma_i) = \operatorname{argmin} b_i^H(\theta, \sigma) \hat{U}_n \hat{U}_n^H b_i(\theta, \sigma), \quad (2)$$

其中,  $M$  阶对角矩阵  $\Phi(\theta_i) = \operatorname{diag}(a(\theta_i))$ , 表示机器人的驱动惯性力矩矢量矩阵,为一个  $M$  阶矢量  $h_i = \int_{-\pi}^{\pi} a(\theta) g_i(\theta) d\theta$ , 结合传感量化融合跟踪识别方法,得到机器人的输出转矩满足:

$$b_i(\theta_i) = \Phi(\theta_i) h_i. \quad (3)$$

若机器人的信号源角信号分布函数  $g_i(\theta)$  为共轭对称函数,即  $g_i(\theta) = g_i^*(-\theta)$ , 则矢量  $h_i$  为实数矢量,由此构建关节驱动机器人的驱动力学模型,为进行力学控制提供参量输入基础。

### 1.2 机器人的被控对象和参量分析

采用饱和非线性系统构建机器人的被控对象模型,在关节驱动机器人控制输入变量确定的情况下,得到输出的稳定性特征泛函状态量  $x_0(x_0 =$

$[\varphi_0, \dot{\varphi}_0, \theta_0]^T$ ), 根据测量误差的反馈修正,得到关节驱动机器人的力学控制值输出平衡条件:  $f(x_0, u_0) = 0$ 。将关节驱动机器人行走的稳态控制问题转化为高维 C-空间中的多约束运动规划问题,得到关节驱动机器人进行力学控制的姿态动力学非线性方程组的数学表述为:

$$\begin{cases} m\dot{V} = -mg\sin\theta - c_x q S_M + P; \\ mV\dot{\theta} = -mg\cos\theta + c_y^{\alpha} q S_M \alpha + P(\alpha + \delta_{\varphi}) + m_R l_R \ddot{\delta}_{\varphi}; \\ J_{z1} \ddot{\varphi} = -c_{y1}^{\alpha} q S_M (x_g - x_T) \alpha - q S_M m_{dk} l_k^2 \dot{\varphi} / V; \\ -P(x_R - x_T) \delta_{\varphi} - m_R \dot{W}_{x1} l_R \delta_{\varphi} - m_R l_R \ddot{\delta}_{\varphi} (x_R - x_T) - J_R \ddot{\delta}_{\varphi}. \end{cases} \quad (4)$$

描述关节驱动机器人的接触刚度和有效惯量之间运动变量有  $\varphi, \dot{\varphi}, \alpha, \theta, \delta_{\varphi}$  等,增加位置控制项,在已知的控制力矩系数和关节驱动系数下,构建机器人的关节驱动转向系统的动能  $T$ , 计算公式具体如下:

$$\begin{aligned} T = & \frac{1}{2} M_{RL} \dot{X}_{RL}^2 + \frac{1}{2} M_{RR} \dot{X}_{RR}^2 + \frac{1}{2} J_{RL} \dot{\theta}_{RL}^2 + \\ & \frac{1}{2} J_{RR} \dot{\theta}_{RR}^2 + \frac{1}{2} M_P [(\dot{\theta}_P L \cos \theta_P + \dot{X}_{RM})^2 + \\ & (-\theta_P L \cos \theta_P)^2] + \frac{1}{2} J_{P\theta} \dot{\theta}_P^2 + \frac{1}{2} J_{P\delta} \delta^2, \end{aligned} \quad (5)$$

采用 PD 控制器进行自适应误差补偿,计算各柔性关节的刚度和各个电机的电势<sup>[8]</sup>, 可以将控制系统解耦得到 2 个独立的控制子系统:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_m \\ \dot{v}_m \\ \dot{\theta} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -2K_m K_e b_2 / R & a_{23} & 2K_m K_e b_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -2K_m K_e b_4 / R & a_{43} & 2K_m K_e b_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_m \\ v_m \\ \theta \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ K_m b_2 \\ 0 \\ K_m b_4 \end{bmatrix} U_{\theta}, \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\delta} \\ \dot{\delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -DK_m K_e b_6 / R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \\ \dot{\delta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ K_m b_6 \end{bmatrix} U_{\delta}. \quad (7)$$

由上式可以看出关节驱动机器人行走绕 Y 轴左右旋转的状态转移矩阵为常值矩阵,将关节驱动机器人行走的稳态控制问题转化为高维 C-空间中的多约束运动规划问题,对关节驱动机器人行走位移和摆杆倾角控制稳定性进行优化设计<sup>[9]</sup>。

## 2 饱和反馈力学控制的优化设计

### 2.1 反馈调节与误差修正

在构建机器人的被控对象模型的基础上,进行机器人控制律的优化设计,本文提出一种基于幅值饱和和非线性状态反馈的关节驱动机器人力学稳定性控制方法,在存在稳态误差的条件下,采用 ML 估计法求得关节驱动机器人的关节刚度估计的参数为:

$\boldsymbol{\eta} = [\psi_0, \sigma_\psi, \sigma_s^2, \sigma_n^2]^T$ 。结合连杆端动力学模型,进行最优驱动力学参数估计,得到估计值:  $\hat{\boldsymbol{\eta}} = \arg \min_{\boldsymbol{\eta}} L(\boldsymbol{\eta})$ , 在这里:

$$L(\boldsymbol{\eta}) = \ln \det \mathbf{R}_x(\boldsymbol{\eta}) + \text{trace}(\mathbf{R}_x^{-1}(\boldsymbol{\eta}) \hat{\mathbf{R}}_x), \quad (8)$$

采用反馈线性化的控制方法找出使式  $\mathbf{U}_s = \mathbf{A}(\boldsymbol{\theta}) \mathbf{T}$  成立的一个矩阵  $\mathbf{T}$ , 在控制器稳定性最好的条件下,幅值饱和和非线性状态的反馈特征向量为:

$$\boldsymbol{\theta}, \hat{\mathbf{T}} = \min \|\mathbf{U}_s - \mathbf{A} \hat{\mathbf{T}}\|_F^2, \quad (9)$$

其中,固定  $\mathbf{A}$  就可以求出  $\hat{\mathbf{T}}$  的最小二乘解,即关节驱动机器人行走的稳态特征解方程为:

$$\hat{\mathbf{T}} = (\mathbf{A}^H \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^H \mathbf{U}_s = \mathbf{A}^+ \mathbf{U}_s, \quad (10)$$

当外界扰动使得连杆的位置偏离时,通过自适应的饱和误差补偿,进行力学控制<sup>[10]</sup>,可得:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\theta} = \min \|\mathbf{U}_s - \mathbf{A} \mathbf{A}^+ \mathbf{U}_s\|_F^2 = \\ \min \text{tr}\{\mathbf{P}_A^\perp \mathbf{U}_s \mathbf{U}_s^H\} = \\ \max \text{tr}\{\mathbf{P}_A \mathbf{U}_s \mathbf{U}_s^H\}. \end{aligned} \quad (11)$$

很显然:  $\hat{\mathbf{T}} = (\mathbf{A}^H \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^H \mathbf{U}_s = \mathbf{A}^+ \mathbf{U}_s$  形成的优化问题就是关节驱动机器人行走空间拟合 (SSF) 的解,根据上述分析,实现对关节驱动机器人反馈力学误差调节。

### 2.2 控制律设计与参数优化

当连杆偏离期望位置,采用模糊控制方法,推广可得更一般形式下的加权子空间拟合问题,采用多维补偿方法进行线性加权学习,得到机器人的力学控制的稳态解满足:

$$\boldsymbol{\theta}, \hat{\mathbf{T}} = \min \|\mathbf{U}_s \mathbf{W}^{1/2} - \mathbf{A} \hat{\mathbf{T}}\|_F^2, \quad (12)$$

则可得关于  $\boldsymbol{\theta}$  的解:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\theta} = \min \text{tr}\{\mathbf{P}_A^\perp \mathbf{U}_s \mathbf{W} \mathbf{U}_s^H\} = \\ \max \text{tr}\{\mathbf{P}_A \mathbf{U}_s \mathbf{W} \mathbf{U}_s^H\}, \end{aligned} \quad (13)$$

在控制增益矩阵中,当权矩阵满足:

$$\mathbf{W}_{\text{Sopt}} = (\hat{\boldsymbol{\Sigma}}_s - \sigma^2 \mathbf{I})^2 \hat{\boldsymbol{\Sigma}}_s^{-1}, \quad (14)$$

机器人的问题控制增益矩阵子阵 1 的阵列流行  $\mathbf{A}_1(\boldsymbol{\theta}) = \mathbf{A}(\boldsymbol{\theta})$ , 子阵 2 的阵列流型  $\mathbf{A}_2(\boldsymbol{\theta}) = \mathbf{A}(\boldsymbol{\theta}) \boldsymbol{\Phi}$ , 对控制输入作了一定的限幅处理,此时存

在优化的特征解:

$$\boldsymbol{\Phi} = \text{diag}[e^{j\phi_1}, \dots, e^{j\phi_P}], \quad (15)$$

可知,系统的闭环动力学方程的解满足:

$$\phi_i = \frac{2\pi f_0 \Delta \sin \theta_i}{c}, \quad i = 1, 2, \dots, P, \quad (16)$$

将 2 个子阵模型进行合并,即

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}(t) \\ \mathbf{y}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}(\boldsymbol{\theta}) \\ \mathbf{A}(\boldsymbol{\theta}) \boldsymbol{\Phi} \end{bmatrix} \mathbf{s} + \mathbf{n} = \bar{\mathbf{A}}(\boldsymbol{\theta}) \mathbf{s} + \mathbf{n}, \quad (17)$$

对于不同的敏感特征参数,在未知扰动下机器人连杆驱动稳态调节的力矩方程为:

$$\text{span}\{\mathbf{U}_s\} = \text{span}\begin{bmatrix} \mathbf{U}_{s1} \\ \mathbf{U}_{s2} \end{bmatrix} = \text{span}\{\bar{\mathbf{A}}(\boldsymbol{\theta})\}. \quad (18)$$

其中,  $\mathbf{U}_s$  是两子阵合并的信号子空间,  $\mathbf{U}_{s1}, \mathbf{U}_{s2}$  分别是子阵  $\mathbf{Z}_x$  和  $\mathbf{Z}_y$  的惯性力矩分布子空间。根据上述算法设计,实现了对关节驱动机器人的饱和反馈力学控制。

## 3 仿真实验分析

为了测试本文方法在实现关节驱动机器人反馈力学控制中的性能,进行仿真实验,实验采用 Matlab 7 仿真软件设计,对关节驱动机器人原始的驱动力学参数采集采用阵元数目为 64 的分布式传感阵列,传感器为敏感陀螺仪,机器人力学控制的信噪比定为 -5 dB,位置驱动控制的目标方位  $2.5^\circ$ ,目标扩展角度  $1^\circ$ ,对机器人的姿态信息采集的快拍数为 1 000,自适应调节参数  $\varepsilon_1 = 0.1$ ,初始位姿为  $\mathbf{X} = [0.3 \ 0.25 \ 0.14 \ 0]^T$ ,根据上述仿真环境和参数设定,进行机器人的反馈力学控制仿真,得到机器人控制的归一化修正空间谱分布如图 1 所示。

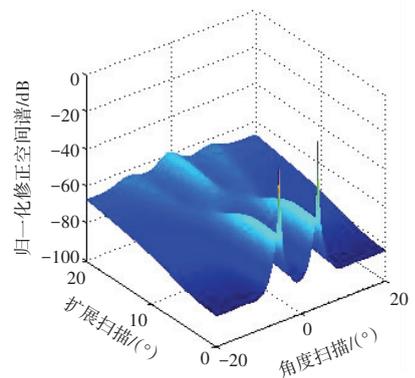


图 1 机器人控制的归一化修正空间谱分布

Fig. 1 Normalized modified spatial spectral distribution of robot control

分析图 1 得知,采用本文方法进行机器人的反馈力学控制的输出谱特征量的波束聚集性能较好,

说明控制的抗扰动能力较强。测试不同方法进行机器人控制的输出误差,得到对比结果如图2所示。

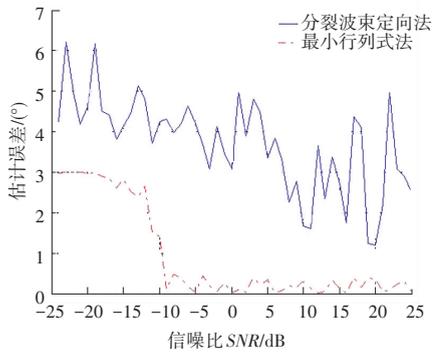


图2 机器人的控制误差对比

Fig. 2 Comparison of control errors of robot

分析图2得知,采用该方法进行关节驱动机器人控制的输出力学参量平稳性较好,控制输出的稳定性较强,输出控制误差较低。

## 4 结束语

在关节驱动机器人的驱动设计中,需要进行驱动动力学的稳定性控制,降低关节的扰动影响,提高机器人的力学驱动稳定性。本文提出一种基于幅值饱和和非线性状态反馈的关节驱动机器人力学稳定性控制方法,采用饱和和非线性系统构建机器人的被控对象模型,将关节驱动机器人行走的稳态控制问题转化为高维C-空间中的多约束运动规划问题,采用闭环系统反馈修正方法进行反馈力学误差的补偿,采

用连杆端动力学控制方法,实现对关节驱动机器人的饱和反馈力学控制。研究得知,本文方法进行关节驱动机器人反馈力学控制的抗扰动能力较好,误差较低,控制鲁棒性较强。

## 参考文献

- [1] 张兴宇,刘满禄,张华,等. 基于任务调度的双边控制机器人书法系统设计[J]. 传感器与微系统,2018,37(6):83-85,88.
- [2] WANG Yagang, SHAO Huihe. PID auto-tuner based on sensitivity specification[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2000,78(2): 312-316.
- [3] ZHANG Jingmei, SUN Changyin, ZHANG Ruimei, et al. Adaptive sliding mode control for re-entry attitude of near space hypersonic vehicle based on backstepping design[J]. IEEE/CAA Journal of Automatic Sinica, 2015, 2(1):94-101.
- [4] 尹伟,孙雷,王萌,等. 用于柔性关节机器人位置控制的幅值饱和和非线性状态反馈控制器[J]. 机器人,2017,39(4):458-465.
- [5] 柳长安,鄢小虎,刘春阳,等. 基于改进蚁群算法的移动机器人动态路径规划方法[J]. 电子学报,2011,39(5):1220-1224.
- [6] 何大阔,高飞雪,杨乐,等. 一类未知MIMO非线性离散系统的改进自适应滑模解耦控制[J]. 控制与决策,2016,31(5):783-789.
- [7] 刘倩,谭文,李东海. 一种多变量自抗扰控制结构的设计研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版),2014,41(6):97-103.
- [8] 鞠晓东,郑振. 基于末端轨迹修正的导弹跟踪稳定性控制方法[J]. 智能计算机与应用,2018,8(2):121-125.
- [9] 李可,米捷. 基于变结构PID的仿生机器人机电控制算法[J]. 河南工程学院学报(自然科学版),2016,28(2):32-37.
- [10] GINOYA D, SHENDGE P D, PHADKE S B. Sliding mode control for mismatched uncertain systems using an extended disturbance observer[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(4):1983-1992.

(上接第243页)

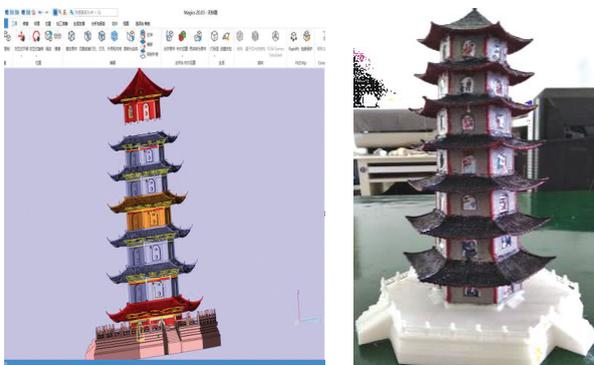


图7 3D打印设计图和模型实物图

Fig. 7 3D printed design drawings and model physical maps

## 4 结束语

本文设计并实现了一套具有音频播放功能的3D打印的塔形工艺品。该系统通过碰触塔身的装饰人物触发对人物所代表民族的音频介绍,推介

范围涵盖民族的历史、语言、经典故事、歌曲等多种内容,并且该工艺品平台的音频内容可根据不同的民族地区进行随意定制。该工艺品可以作为民族地区旅游纪念品进行销售,在获得经济效益的同时,也达到了宣传民族文化的目的。

## 参考文献

- [1] 林伯珊. 论民族地区高校在“文化软实力-民族文化”传承创新中的重要作用——以黔南民族师范学校为例[J]. 内蒙古科技与经济,2018(5):19-21.
- [2] 杨建忠. 论民族地方高校的民族文化传承创新价值与方式[J]. 黑龙江高教研究,2012,30(10):69-72.
- [3] 王慧敏. 少数民族文化保护与动态传承[J]. 求索,2009(3):106-107,88.
- [4] 阿利·热合买提. 探索少数民族地区的民族文化传播方法[J]. 科技展望,2015,25(34):251.
- [5] 李丽娜. 文化多样性视域下我国少数民族文化建设研究[D]. 沈阳:辽宁大学,2014.