

基于参数融合机器人旋转关节轴鲁棒性控制律

张亚婉, 陆兴华, 吴宏裕

(广东工业大学华立学院, 广东 广州 511325)

摘要: 机器人旋转关节受到小扰动作用, 导致控制鲁棒性不好。为了提高机器人旋转关节轴抗扰动鲁棒控制能力, 提出一种基于运动参数融合的机器人旋转关节轴鲁棒性控制律。构建机器人旋转关节轴的动力学模型, 根据阻尼力矩与末端位姿协同控制的关联关系, 得到位姿修正的反馈最小信息熵。采用姿态传感器进行机器人旋转关节轴的运动姿态参数采集, 对采集的姿态参数采用 Kalman 滤波算法进行误差补偿和信息融合处理, 采用滑膜积分控制方法进行机器人旋转关节轴运动的稳态控制, 构建机器人旋转关节轴运动姿态稳定控制的数学模型和动力学模型。采用非交换微分调控方程, 得到机器人旋转关节轴鲁棒性控制的边值周期解向量, 根据运动参数的融合结果采用模糊控制方法进行机器人旋转关节轴控制律设计。仿真结果表明, 采用该方法进行机器人旋转关节轴控制的鲁棒性较好, 抗扰动能力较强。

关键词: 运动参数融合; 机器人; 旋转关节轴; 鲁棒控制

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2019)11-0102-05

doi: 10.3969/j.issn.1673-629X.2019.11.021

Robust Control Law for Rotating Joint Axis of Robot Based on Parameter Fusion

ZHANG Ya-wan, LU Xing-hua, WU Hong-yu

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

Abstract: The rotation joint of the robot is subjected to small disturbance, which leads to poor control robustness. In order to improve the anti-disturbance robust control ability of robot rotation joint axis, a robust control law based on motion parameter fusion is proposed. The dynamic model of robot rotation joint axis is constructed. According to the relationship between damping torque and terminal position and attitude control, the feedback minimum information entropy of position and attitude correction is obtained. The attitude sensor is used to collect the kinematic attitude parameters of the robot rotation joint axis, and the Kalman filter algorithm is used to compensate the errors and process the information fusion. The synovial integral control method is used to control the motion of the robot rotation joint axis. The mathematical model and dynamic model of the robot rotation joint axis motion stability control are constructed, and the non-exchange differential control equation is adopted. The boundary value periodic solution vector of rotative joint axis robust control of robot is obtained. According to the fusion result of motion parameters, fuzzy control method is used to design the control law of robot rotation joint axis. The simulation shows that the proposed method has excellent robustness and anti-disturbance ability.

Key words: motion parameter fusion; robot; rotation joint axis; robust control

0 引言

机器人旋转关节轴是机器人进行抓取、攀爬以及行走等作业的重要部件, 该部件的稳定控制是保障机器人稳定可靠性运行的关键。对机器人旋转关节轴的准确、可靠控制是建立在对关节的准确定位和测姿基础上的。结合对运动参数的融合处理, 提高对移动机器人旋转关键轴的可靠控制能力, 最终将控制律嵌入

到机器人的惯性导航系统 (inertia navigation system, INS) 中^[1], 提高机器人的动态稳定控制能力, 研究机器人的稳定控制律, 在机器人的控制设计中具有很好的应用价值。

传统方法中, 对机器人旋转关节轴的内控制方法主要有 PID 控制方法、反演积分控制方法以及卡尔曼滤波控制方法等。无论哪种方法, 都需要对机器人的

收稿日期: 2018-12-09

修回日期: 2019-04-10

网络出版时间: 2019-06-27

基金项目: 2015 年广东省教育重点平台及科研项目青年创新人才类项目 (自然科学类) (2015KQNCX218); 2018 年“攀登计划”广东大学生科技创新培育专项资金立项项目 (pdjh2018a0629)

作者简介: 张亚婉 (1980-), 女, 硕士, 讲师, 研究方向为嵌入式技术、机器人运动控制方法。

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20190627.1102.032.html>

旋转关节轴进行绝对角度解算,得到姿态角,结合惯性参量融合,进行机器人的鲁棒性控制。Marins 等提出了一种四元素的扩展卡尔曼滤波方法(EKF)^[2],采用三轴坐标系模型构造机器人旋转关节轴的运动学方程,使用欧拉角计算姿态角,从而消除了姿态估计误差,但该方法的计算开销较大,对机器人控制的实时性不好^[3-4]。文献[5]中提出一种基于机器人姿态跟踪的旋转关节轴控制方法,融合扩展卡尔曼滤波和无迹卡尔曼滤波(UKF),提高姿态估计和控制参数的融合能力,但该方法进行机器人控制的鲁棒性较差,抗扰动性不好。

针对上述方法存在的问题,文中提出一种基于运动参数融合的机器人旋转关节轴鲁棒性控制律。构建机器人旋转关节轴的动力学模型,采用姿态传感器进行机器人旋转关节轴的运动姿态参数采集,对采集的姿态参数采用 Kalman 滤波算法进行误差补偿和信息融合处理,根据运动参数的融合结果采用模糊控制方法进行机器人旋转关节轴控制律设计。最后进行仿真实验分析,验证该方法在提高机器人旋转关节轴鲁棒性控制能力方面的优越性能。

1 被控对象描述和参量分析

1.1 机器人旋转关节轴的动力学模型

为了实现机器人旋转关节轴鲁棒性控制优化,首先构建机器人旋转关节轴的动力学模型,采用姿态传感器进行机器人旋转关节轴的运动姿态参数采集^[6],构建机器人旋转关节轴的无阻尼自由振动系统方程:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \dot{f}_{x_1} & \dot{f}_{x_2} \\ g_{x_1} & g_{x_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1(1 - \frac{2x_1}{N_1} - \frac{\sigma_1 x_2}{N_2}) & -\frac{r_1 \sigma_1 x_1}{N_2} \\ -\frac{r_2 \sigma_2 x_2}{N_1} & r_2(1 - \frac{\sigma_2 x_1}{N_1} - \frac{2x_2}{N_2}) \end{bmatrix} \quad (1)$$

假设机器人旋转关节轴的末端位姿运动是一个纵向的线性运动模型,根据阻尼力矩与末端位姿协同控制的关联关系,得到位姿修正的反馈最小信息熵泛函数学模型:

$$\begin{pmatrix} X \\ P(X) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1, a_2, \dots, a_m \\ p(a_1), p(a_2), \dots, p(a_m) \end{pmatrix} \quad (2)$$

其中, $0 \leq p(a_i) \leq 1 (i=0, 1, \dots, m)$, 表示机器人旋转关节轴控制系统在一定时间演变范围内呈现出振荡,且 $\sum_{i=1}^m p(a_i) = 1$ 。机器人旋转关节轴运动姿态控制的运动方程可以分解为纵向运动、侧向运动两组动力学运动方程,得到机器人旋转关节轴进行运动姿态控

制的动力学非线性方程组:

$$\begin{cases} m\dot{V} = -mg\sin\theta - c_x q S_M + P \\ mV\dot{\theta} = -mg\cos\theta + c_y^\alpha q S_M \alpha + P(\alpha + \delta_\varphi) + \\ \quad m_R l_R \ddot{\delta}_\varphi \\ J_{z1} \dot{\varphi} = -c_{y1}^\alpha q S_M (x_g - x_T) \alpha - q S_M m_{dz} l_k^2 \dot{\varphi} / V - \\ \quad P(x_R - x_T) \delta_\varphi - m_R \dot{W}_{x1} l_R \delta_\varphi - \\ \quad m_R l_R \ddot{\delta}_\varphi (x_R - x_T) - J_R \ddot{\delta}_\varphi \end{cases} \quad (3)$$

描写机器人旋转关节轴纵向运动的变量有 φ 、 $\dot{\varphi}$ 、 α 、 θ 、 δ_φ 等。考虑对机器人姿态参数采集的时间间隔 $n \in [n_1, n_2]$, n_1, n_2 之间的所有扰动项满足正态分布 K , $f(x)$ 是关于 $x = WVD(n, k(n))$ 的非增函数,得到机器人旋转关节轴的动力学参数调节方程满足:

$$\delta \cdot p_1 - 2p_2 + \rho_2 A_2 - \delta \rho_1 A_1 + c_2 + c_r = 0 \quad (4)$$

$$\rho_2(p_2 - c_2 - c_r) - \delta \cdot (1 - \delta) \mu_2 A_2 = 0 \quad (5)$$

在 Lyapunov 泛函中,引入了机器人旋转关节轴输入状态项 $\int_{t-\sigma}^t \begin{bmatrix} y(s) \\ f(y(s)) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \mathbf{R}_1 & \mathbf{E} \\ \mathbf{E}^T & \mathbf{R}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y(s) \\ f(y(s)) \end{bmatrix} ds$ 。

根据方程唯一性的设定,矩阵 \mathbf{E} 提供了额外的自由度,由此构建机器人旋转关节轴的动力学模型,为进行控制律设计提供动力学模型基础。

1.2 机器人旋转关节轴的运动姿态参数分析

在构建了机器人旋转关节轴的运动学模型的基础上,进行运动姿态参数分析^[7]。构建机器人旋转关节轴的测量方程为 $\dot{x} = f(x, u)$, 在机器人旋转关节轴控制输入变量确定的情况下,得到输出的稳定性特征泛函的状态量 $x_0 (x_0 = [\varphi_0, \dot{\varphi}_0, \theta_0]^T)$, 得到机器人旋转关节轴的稳定性控制的线性化小扰动方程为:

$$\begin{cases} mV\Delta\dot{\theta} = (c_y^\alpha q S_M + P) \Delta\alpha + mg\sin\theta \Delta\theta + \\ \quad P\Delta\delta_\varphi + m_R l_R \Delta\ddot{\delta}_\varphi + F_{gr} \\ J_{z1} \Delta\dot{\varphi} = -c_{y1}^\alpha q S_M (x_g - x_T) \Delta\alpha - q S_M m_{dz} l_k^2 \Delta\dot{\varphi} / V - \\ \quad P(x_R - x_T) \Delta\delta_\varphi - m_R \dot{W}_{x1} l_R \Delta\delta_\varphi - \\ \quad m_R l_R \Delta\ddot{\delta}_\varphi (x_R - x_T) - J_R \Delta\ddot{\delta}_\varphi + M_{gr} \end{cases} \quad (6)$$

根据磁力计对旋转关节轴的采集结果进行信息融合,用 $\Psi_2(d_2(t))$ 表示矩阵 $\mathbf{L} (\mathbf{Z}_2 + \mathbf{Z}_3)^{-1} \mathbf{L}^T$ 与 $\mathbf{M}^T (\mathbf{Z}_2 + \mathbf{Z}_3)^{-1} \mathbf{M}^T$ 的 Bergmann 核^[8], 由此判定机器人的旋转关节轴控制系统是否稳定,判决方程为:

$$\left(\frac{1}{2} (u_A^+ - u_A^-) - \frac{1}{2} F_{A_1}, \frac{1}{2} (u_A^+ - u_A^-) - \frac{1}{2} (F_B + F_{A_1}) \right) \quad (7)$$

采用滑膜积分控制方法进行机器人旋转关节轴运动的稳态控制,构建机器人旋转关节轴运动姿态稳定控制的数学模型和动力学模型^[9],得到机器人旋转关节轴助力转向系统的动能 T 和势能 V :

$$T = \frac{1}{2}M_{RL}\dot{X}_{RL}^2 + \frac{1}{2}M_{RR}\dot{X}_{RR}^2 + \frac{1}{2}J_{RL}\dot{\theta}_{RL}^2 + \frac{1}{2}J_{RR}\dot{\theta}_{RR}^2 + \frac{1}{2}M_P[(\dot{\theta}_p L \cos \theta_p + \dot{X}_{RM})^2 + (-\theta_p L \sin \theta_p)^2] + \frac{1}{2}J_{P0}\dot{\theta}_p^2 + \frac{1}{2}J_{P0}\dot{\delta}^2 \quad (8)$$

$$V = M_P g L \cos \theta_p \quad (9)$$

对采集的姿态参数采用 Kalman 滤波算法进行误差补偿和信息融合处理^[10],得到机器人旋转关节轴控制的平衡解满足:

$$0 \leq -2 \sum_{i=1}^n t_{i1} f_i(y_i(t)) [f_i(y_i(t)) - \rho_i y_i(t)] - 2 \sum_{i=1}^n t_{i2} f_i(y_i(t - \delta(t))) [f_i(y_i(t - \delta(t))) - \rho_i y_i(t - \delta(t))] = -2f^T(y(t))T_1 f(y(t)) - 2f^T(y(t - \delta(t)))T_2 f(y(t - \delta(t))) + 2y^T(t)\Sigma T_1 f(y(t)) + 2y^T(t - \delta(t))\Sigma T_2 f(y(t - \delta(t))) \quad (10)$$

结合约束条件,可以得到机器人旋转关节轴运动控制的稳态条件^[11]。

2 控制律的优化设计

2.1 运动参数的 Kalman 滤波融合算法

在构建机器人旋转关节轴的动力学模型,采用姿态传感器进行机器人旋转关节轴的运动姿态参数分析的基础上,进行机器人旋转关节轴控制律的优化设计。文中提出一种基于运动参数融合的机器人旋转关节轴鲁棒性控制律。机器人旋转关节轴的运动姿态调节的概率分布项为 $\{p(x_1), p(x_2), \dots, p(x_m)\}$ 。机器人旋转关节轴在 7 自由度空间内进行稳态调节,在控制约束方程的两端同时除以 $pqr s d_p$,得到:

$$\frac{e}{pqr s} = \frac{k}{d_p} \left(\frac{p-1}{pqr s} + \frac{1}{kpqr s} \right) \quad (11)$$

构建机器人旋转关节轴问题控制的微分方程代数方程组:

$$G(x) = \begin{cases} \partial f(x), x \in \text{Levf} \\ a, x \in \text{Levf} \\ \partial C(x) \end{cases} \quad (12)$$

其中,稳定性平衡点满足:

$$\begin{cases} a(H_{ac}) = 1 - \frac{H_{ac}}{\max(H_{ac}) + l} \\ \max(H_{ac}) = \log_2 k \end{cases} \quad (13)$$

采用 Kalman 滤波算法进行误差补偿和信息融合

处理^[12],Kalman 滤波传递函数为:

$$\sum_{i=0}^F \binom{n}{i} p_L^{n-i} (1-p_L)^i = \frac{1}{2}(1-C) \quad (14)$$

$$\sum_{i=F}^N \binom{n}{i} p_H^{n-i} (1-p_H)^i = \frac{1}{2}(1-C) \quad (15)$$

误差补偿和信息融合处理后机器人稳态控制的稳定性参数模型满足:

$$\begin{aligned} m_i'([p_H, p_L]) &= \omega_i \times m_i([p_H, p_L]) \\ m_i'([0, 1]) &= \omega_i \times m_i([0, 1]) + 1 - \omega_i \end{aligned} \quad (16)$$

当 $([p_H, p_L]) \subseteq ([p_H, p_L])$ 时,表示命题 A_j 支持 A_i ,即 $A_j \subset A_i$,由此得到了机器人旋转关节轴控制的周期解稳定性约束条件^[13]。

2.2 机器人鲁棒性控制律

根据运动参数的融合结果采用模糊控制方法进行机器人旋转关节轴控制律设计,采用非交换微分调控方程^[14],得到机器人旋转关节轴鲁棒性控制的边值周期解向量的分配函数为:

$$\begin{cases} \frac{p_H - p_L}{1 - 0} \times m_i([0, 1]) + m_i([p_L, p_H]) = C_i \\ m_i([p_L, p_H]) + m_i([0, 1]) = 1 \end{cases} \quad (17)$$

当双边界条件下,若矩阵 A 满足 $A = A^H$,其中 $A^H = (A^*)^T$,“ $*$ ”代表求共轭,引入误差反馈调节,得到机器人旋转关节轴避障控制参量调节的控制修正分配函数。机器人旋转关节轴的位姿平衡点位于平面坐标系象限时,即 $(x_1, x_2 \geq 0)$ 才有实际意义。由 Schwartz 不等式可知 $|\rho_{ik}| \leq 1$,那么对机器人旋转关节问题控制的边值周期解的插值拟合式为:

$$\begin{aligned} F_\alpha [e^{j\pi(2f_d + k_d^2)}] &= G_\alpha(u - v \sin \alpha) e^{-j\frac{\pi}{2} \sin \alpha \cos \alpha + j\pi \cos \alpha} \\ &= \sqrt{\frac{1 + i \tan \alpha}{1 + k_0 \tan \alpha}} \\ &\cdot \exp \left[i\pi \frac{u^2(k_0 - \tan \alpha) + 2uf_0 \sec \alpha - f_0 \tan \alpha}{1 + k_0 \tan \alpha} \right] \end{aligned} \quad (18)$$

采用模糊控制方法进行机器人旋转关节轴控制律设计,模糊控制函数 $m(A)$ 满足:

$$m(A) = \begin{cases} \frac{\sum \prod m_i(A_i)}{1 - K} & A \neq \emptyset \\ 0 & A = \emptyset \end{cases} \quad (19)$$

$$K = \sum \prod_{\cap A_j = \emptyset, 1 \leq j \leq n} m_i(A_j) \quad (20)$$

令 $A \in C^{n \times n}$ ($n \times n$ 维复数空间),采用运动参数融合方法,得到机器人旋转关节轴鲁棒控制的最优解分别为:

$$P_F = \sum_{j=k}^N \sum_{u_i=j}^N \prod_{i=1}^N (P_{fi})^{u_i} (1 - P_{fi})^{1-u_i} \quad (21)$$

$$P_D = \sum_{j=k}^N \sum_{\sum u_i=j}^N \prod_{i=1}^N (P_{di})^{u_i} (1 - P_{di})^{1-u_i} \tag{22}$$

将机器人的鲁棒控制周期解问题转换为求超定方程的最优解问题^[15],收敛性评价规则如下:

$$\begin{aligned} N_{i,j} = & (f(\mathbf{A})_{i,1} \otimes f(\mathbf{B})_{1,j}) \oplus (f(\mathbf{A})_{i,2} \otimes f(\mathbf{B})_{2,j}) \\ & \oplus \cdots \oplus (f(\mathbf{A})_{i,h} \otimes f(\mathbf{B})_{h,j}) = \\ & ((K_A \cdot (A_{i,1} + rp) \cdot k_A^r \bmod n) \cdot (K_B \cdot (B_{1,j} + \\ & rp) \cdot k_B^r \bmod n)) \oplus \cdots \oplus \\ & ((K_A \cdot (A_{i,h} + rp) \cdot k_A^r \bmod n) \cdot (K_B \cdot (B_{h,j} + \\ & rp) \cdot k_B^r \bmod n)) = \\ & \sum_{u=1}^h ((K_A \cdot (A_{i,u} + rp) \cdot k_A^r \bmod n) \cdot (K_B \cdot \\ & (B_{u,j} + rp) \cdot k_B^r \bmod n)) \bmod n = \\ & \sum_{u=1}^h ((\frac{s \cdot l}{k_A^r} \cdot (A_{i,u} + rp) \cdot k_A^r \bmod n) \cdot (\frac{s \cdot l}{k_B^r} \cdot \\ & (B_{u,j} + rp) \cdot k_B^r \bmod n)) \bmod n = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & (s \cdot l)^2 \sum_{u=1}^h ((A_{i,u} + rp) \cdot (B_{u,j} + rp)) \bmod n = \\ & (s \cdot l)^2 \sum_{u=1}^h (A_{i,u} \cdot B_{u,j} + (A_{i,u} + B_{u,j}) \cdot \\ & rp + r^2 p^2) \bmod n \end{aligned} \tag{23}$$

根据稳定性判决条件,得到文中设计的机器人旋转关节轴抗扰动鲁棒控制律是渐进稳定的。

3 仿真实验与结果分析

通过仿真测试文中方法在提高机器人旋转关节轴控制中的应用性能。采用 AD 公司出品的 MSP430 系列超低功耗 16 位信号传感器进行机器人旋转关节轴信息采集,设定 PLL_LOCKCNT 寄存器,OUTD 管脚输出电压为 0 ~ 15 V,对机器人的运动参数采集的初始频率为 100 Hz,截止频率为 300 Hz,在小扰动信噪比(SNR)分别为-5 dB、5 dB、20 dB 的条件下,得到姿态参数融合结果,如图 1 所示。

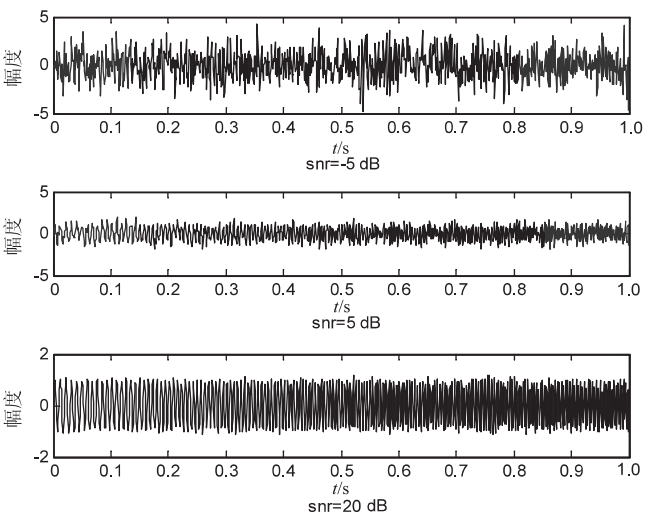


图 1 机器人的运动参数采样结果

对采集的姿态参数采用 Kalman 滤波算法进行误差补偿和信息融合处理,根据运动参数的融合结果进行机器人旋转关节轴鲁棒性控制,得到控制参数融合结果输出,如图 2 所示。

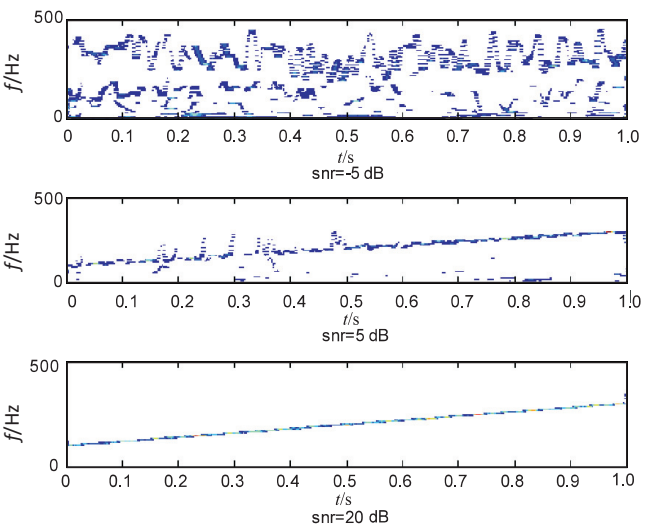


图 2 机器人旋转关节轴的参数融合输出

分析图 2 得知,采用文中方法进行机器人旋转关节轴控制的鲁棒性较好。测试不同方法进行控制的精度,得到的对比结果如图 3 所示。分析图 3 得知,该方法进行机器人旋转关节轴控制的精度较高,抗扰动能力较强。

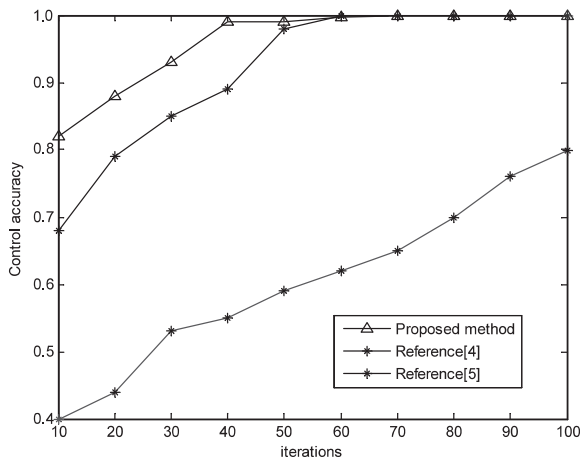


图 3 控制精度对比

4 结束语

对机器人旋转关节轴的准确、可靠控制是建立在对关节的准确定位和测姿基础上的,结合对运动参数的融合处理,提高对移动机器人旋转关键轴的可靠控制能力。文中提出一种基于运动参数融合的机器人旋转关节轴鲁棒性控制律。构建机器人旋转关节轴的力学模型,采用姿态传感器进行机器人旋转关节轴的运动姿态参数采集,对采集的姿态参数采用 Kalman 滤波算法进行误差补偿和信息融合处理,根据运动参数的融合结果采用模糊控制方法进行机器人旋转关节轴控制律设计。

仿真结果表明,利用该方法进行机器人旋转关节轴控制的鲁棒性较好、精度较高。

参考文献:

[1] 程桂芳,丁志帅,慕小武. 自治非光滑时滞系统的有限时间稳定[J]. 应用数学学报,2013,36(1):14-22.

[2] 张 韧,张绍义. 非线性自回归序列的平稳解及其矩的存在性[J]. 数学物理学报,2013,33(2):260-266.

[3] 张凯院,朱寿升,刘晓敏. 双矩阵变量 Riccati 矩阵方程对称解的迭代算法[J]. 应用数学学报,2013,36(5):831-839.

[4] KRIZHEVSKY A, SUTSKEVER I, HINTON G E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks[M]// Advances in neural information processing systems. Cambridge, USA: MIT Press, 2012:1097-1105.

[5] MAITIN - SHEPARD J, CUSUMANO - TOWNER M, LEI Jinna, et al. Cloth grasp point detection based on multiple-view geometric cues with application to robotic towel folding [C]// IEEE international conference on robotics and automation. Anchorage, AK, USA: IEEE, 2010:2308-2315.

[6] 陆兴华. 姿态融合滤波的无人机抗干扰控制算法[J]. 传感器与微系统, 2016, 35(7):116-119.

[7] 董 博,刘克平,李元春. 受动态约束的谐波传动式可重构模块机器人分散积分滑模控制[J]. 控制与决策, 2016, 31(3):441-447.

[8] 王 硕,禹 梅,谭 文. 具有丢包补偿网络化控制系统的量化反馈稳定性分析[J]. 系统科学与数学, 2015, 35(3):287-297.

[9] 景奉水,杨 超,杨国栋,等. 机器人轨迹纠偏控制方法研究[J]. 机器人, 2017, 39(3):292-297.

[10] FLORES - ABAD A, MA O, PHAM K, et al. A review of space robotics technologies for on-orbit servicing[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2014, 68:1-26.

[11] 孙克辉,贺少波,董燕青. 简化洛伦兹混沌系统的追踪同步控制[J]. 信息与控制, 2015, 44(4):393-397.

[12] 唐贤伦,周 维,张 衡,等. 一种基于多目标混沌 PSO 的机器人足球防守策略[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(1):51-55.

[13] 杨兴明,余忠宇. 两轮移动倒立摆的开关切换模糊极点配置控制器设计[J]. 电路与系统学报, 2012, 17(4):58-62.

[14] 熊 柯,夏智勋,郭振云. 倾斜转弯高速飞行器滚动通道的自适应全局积分滑模控制[J]. 国防科技大学学报, 2012, 34(2):114-118.

[15] 何信旺,芮 赞,王宗杰,等. 滤波器组 UMTS 系统的信道估计研究[J]. 计算机技术与发展, 2015, 25(9):57-60.