

针对气动肌肉仿生肘关节抖振现象的Kalman-PID控制

杨辉, 郝丽娜[†], 陈洋, 薛帮灿

(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 本文为了抑制气动人工肌肉(PAM)抖振现象, 首先利用PID控制律近似代替其数学模型, 求得离散状态方程并代入到离散卡尔曼递推公式中, 进而提出基于PID控制参数的卡尔曼PID(Kalman-PID, KPID)控制算法. 为了验证算法的有效性, 以3自由度PAM仿生肘关节为控制对象, 分别利用PID及KPID控制器对其进行位姿控制. 由实验结果可知, 该算法相较于PID控制器拥有更高的控制精度, 提升了系统的鲁棒性, 能够有效抑制由系统过程误差及测量误差所引起的PAM抖振现象, 从而使仿生肘关节运动更加平稳. 此外, 不同于传统卡尔曼滤波算法与控制算法相结合的方式, KPID控制算法无需事先知道被控对象精准的数学模型及噪音特性的先验知识, 从而避免复杂的数学建模过程, 扩大了卡尔曼滤波算法的应用范围.

关键词: 气动人工肌肉(PAM); PID控制参数; 卡尔曼PID(KPID); 仿生肘关节

中图分类号: TH122 **文献标识码:** A

Kalman-PID control for chattering phenomena of bionic elbow joint actuated by pneumatic artificial muscles

YANG Hui, HAO Li-na[†], CHEN Yang, XUE Bang-can

(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang Liaoning 110819, China)

Abstract: For restraining the chattering phenomena of pneumatic artificial muscles (PAMs) caused by process errors and measurement errors, the mathematical model of a PAM was replaced by PID control law whose discrete state equations was solved and taken into the discrete Kalman recursive formulas. Then, the Kalman-PID (KPID) controller based on the PID control parameters was proposed. In order to verify effectiveness of KPID controller, a 3-DOF bionic elbow joint actuated by three pneumatic artificial muscles was treated as the controlled object and controlled via PID controller and KPID controller, respectively. From the results, KPID controller has higher control precision and better robustness than PID controller. KPID controller can restrain the chattering phenomena effectively, which makes the bionic elbow joint rotate smoothly. Moreover, KPID controller does not need the accurate mathematical model of controlled objects and priori knowledge of the noise characteristics, which avoids complicated modeling process and expands the application range of Kalman filtering algorithm.

Key words: pneumatic artificial muscles (PAM); PID control parameters; Kalman-PID (KPID); bionic elbow joint

1 引言(Introduction)

气动人工肌肉(pneumatic artificial muscle, PAM) 相较于传统的气动执行机构具有结构简单、功率密度比大、能量转换效率高、仿生性能好等优点^[1-5], 故国内外将其作为驱动器应用在仿生工程、康复医疗、航空航天等领域中^[6-8]. 目前, 对气动肌肉的控制方法主要通过考虑摩擦、磁滞等非线性因素建立气动肌肉驱动器较为精确的动力学模型, 并结合智能控制算法实现对人工肌肉驱动机器人的精密控制, 例如: 芬兰坦佩雷大学Jouppila通过建立PAM力学模型、压强模型以

及高速开关阀的流体质量模型, 利用滑模控制策略对气动肌肉驱动系统进行控制, 保证系统当负载变化时拥有较好的鲁棒性^[9]; 韩国韩南大学Kang通过分析拮抗式PAM机械臂的柔顺特性, 利用PAM变刚度特性提出了滑模力控制策略, 其相较于传统PID拥有更高的控制精度^[10]. 然而, 上述方法仅是从气动肌肉本身特性出发, 在对其控制过程中由于存在过程误差以及传感器的测量误差, 从而很容易导致PAM在运动中出现抖振现象, 影响其控制精度.

目前, 针对控制过程中存在的过程误差及测量误

收稿日期: 2016-07-21; 录用日期: 2017-01-19.

[†]通信作者. E-mail: haolina@me.neu.edu.cn; Tel.: +86 13390158387.

本文责任编辑: 方浩.

国家自然科学基金面上项目(61573093), 国家高技术研究发展计划(“863”计划)(2015AA042302)资助.

Supported by National Natural Science Foundation of China(61573093) and National High Technology Research & Development Program of China (“863” program)(2015AA042302).

差常采用最小均方算法(least mean square, LMS), 递归最小二乘算法(recursive least square, RLS)、卡尔曼滤波算法以及典型模拟滤波器等^[11-13]. 其中卡尔曼滤波算法为线性无偏最小均方误差递推滤波, 其对于零均值不相关白噪声是最优的线性滤波器, 具有误差小、实时性及平滑性好等特点, 适用于平稳和非平稳的随机过程, 以及时变和非时变的系统^[14]. 目前常将卡尔曼滤波算法与PID控制、滑模控制、鲁棒控制等控制算法相结合, 从而提高系统的响应速度及稳定性^[15-20]. 但上述方法中均需要被控对象精确的数学模型, 以及噪音统计特性的先验知识, 且由于PAM存在较强的非线性特性, 很难获得精准的数学模型, 故这些方法在对PAM的控制应用上存在一定的局限性.

本文针对上述问题, 提出基于PID控制参数的卡尔曼滤波PID(Kalman-PID, KPID)控制算法. PID作为一种无模型控制算法, 其控制律为被控对象输入与其输出的关系表达式. 当无法获得被控对象精确数学模型及结构参数时, 通过调节PID控制参数则可获得较好的控制结果, 而此时PID控制律可认为是被控对象的线性模型, 故通过求得PID控制律的离散状态方程, 代入到卡尔曼滤波器中, 从而形成KPID控制算法. 该算法避免了传统基于卡尔曼滤波控制算法必须知道被控对象精确的数学模型以及噪音统计特性先验知识方面的要求. 通过将该算法应用到3-TCT(T为虎克铰, C为圆柱副)PAM仿生肘关节的位姿控制并与传统PID控制相比较可以发现: KPID控制器有效抑制了由过程误差及测量误差所引起的抖振现象, 提高了系统的鲁棒性.

2 KPID控制器的设计(Design of KPID controller)

设系统理想输出为 y_d , 实际输出为 y , 系统误差为 $e_1 = y - y_d$, 则PID控制器的控制律为

$$u = K_p e_1 + K_i \int e_1 dt + K_d \dot{e}_1, \quad (1)$$

式中: u 为控制器输出, 即被控对象输入; K_p 为比例系数, K_i 为积分系数, K_d 为微分系数. 对式(1)两端进行求导则有

$$\dot{u} = K_p \dot{e}_1 + K_i e_1 + K_d \ddot{e}_1, \quad (2)$$

则其传递函数可表示为

$$G(s) = \frac{E(s)}{U(s)} = \frac{s}{K_d s^2 + K_p s + K_i}. \quad (3)$$

由式(3)可知其连续状态方程为

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} -\frac{K_p}{K_d} & -\frac{K_i}{K_d} \\ 1 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} u, \quad (4a)$$

$$e_1 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{K_d} & 0 \end{bmatrix} x, \quad (4b)$$

式中 x 为系统状态变量. 根据误差表达式, 则式(4)可化为

$$\begin{cases} \dot{x} = \begin{bmatrix} -\frac{K_p}{K_d} & -\frac{K_i}{K_d} \\ 1 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} u, \\ y = \begin{bmatrix} -\frac{1}{K_d} & 0 \end{bmatrix} x + y_d. \end{cases} \quad (5)$$

当选取合适的PID控制参数时, 式(5)则为被控对象的线性数学模型. 对其进行离散化处理则有

$$\begin{cases} x(k) = \mathbf{A}x(k-1) + \mathbf{B}u(k-1), \\ y(k) = \mathbf{C}x(k) + \mathbf{D}, \end{cases} \quad (6)$$

式中:

$$\begin{cases} \mathbf{A} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} B_{11} \\ B_{21} \end{bmatrix}, \\ \mathbf{C} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{K_d} & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{D} = [y_d(k)], \end{cases} \quad (7)$$

其中:

$$\begin{aligned} A_{11} &= e^{\frac{TK_p}{2K_d}} \cosh\left(\frac{T\sqrt{0.25K_p^2 - K_d K_i}}{K_d}\right) + \\ &\frac{K_p}{2\sqrt{0.25K_p^2 - K_d K_i}} \sinh\left(\frac{T\sqrt{0.25K_p^2 - K_d K_i}}{K_d}\right), \\ A_{12} &= \frac{2K_i e^{\frac{TK_p}{2K_d}}}{\sqrt{-K_p^2 + 4K_d K_i}} \sin\left(\frac{T\sqrt{-K_p^2 + 4K_d K_i}}{2K_d}\right), \\ A_{21} &= -\frac{2K_d e^{\frac{TK_p}{2K_d}}}{\sqrt{-K_p^2 + 4K_d K_i}} \sin\left(\frac{T\sqrt{-K_p^2 + 4K_d K_i}}{2K_d}\right), \\ A_{22} &= e^{\frac{TK_p}{2K_d}} \cosh\left(\frac{T\sqrt{0.25K_p^2 - K_d K_i}}{K_d}\right) - \\ &\frac{K_p}{2\sqrt{0.25K_p^2 - K_d K_i}} \sinh\left(\frac{T\sqrt{0.25K_p^2 - K_d K_i}}{K_d}\right), \\ B_{11} &= \frac{K_d e^{\frac{TK_p}{2K_d}}}{\sqrt{0.25K_p^2 - K_d K_i}} \sinh\left(\frac{T\sqrt{0.25K_p^2 - K_d K_i}}{K_d}\right), \\ B_{21} &= -\frac{K_d e^{\frac{TK_p}{2K_d}}}{K_i} \cos\left(\frac{T\sqrt{-K_p^2 + 4K_d K_i}}{2K_d}\right) - \frac{K_d}{K_i} - \\ &\frac{K_d K_p e^{\frac{TK_p}{2K_d}}}{K_i \sqrt{-K_p^2 + 4K_d K_i}} \sin\left(\frac{T\sqrt{-K_p^2 + 4K_d K_i}}{2K_d}\right), \end{aligned}$$

其中 T 为系统采样周期. 由式(7)可知, K_i, K_d 作为分母其可以设置为很小的数, 但不能为0.

设系统过程噪声信号为 $r(k)$, 测量噪声信号为 $m(k)$, $x^-(k)$ 为第 k 个采样点的状态量先验估计值, $x^+(k)$ 为第 k 个采样点的状态量后验估计值. $P^-(k)$, $P^+(k)$ 分别为 $x^-(k)$ 和 $x^+(k)$ 的估计误差协方差. 其中根据式(7), 可得 $P^-(k)$ 的更新方程为

$$P^-(k) = AP^+(k-1)A^T + BQB^T, \quad (8)$$

式中 Q 为过程噪声信号 $r(k)$ 的协方差矩阵. 由式(8)可知卡尔曼增益矩阵为

$$M(k) = \frac{P^-(k)C^T}{CP^-(k)C^T + R}, \quad (9)$$

式中 R 为测量噪声信号 $m(k)$ 的协方差矩阵. 由式(8)-(9)可得 $P^+(k)$ 的更新方程为

$$P^+(k) = (E - M(k)C)P^-(k). \quad (10)$$

状态量先验估计值 $x^-(k)$ 的更新方程为

$$x^-(k) = Ax^+(k-1) + Bu(k-1). \quad (11)$$

由式(9)和式(11)可得状态量后验估计值 $x^+(k)$ 的更新方程为

$$x^+(k) = Ax^-(k) + M(k)(y_v(k) - CAx^-(k)), \quad (12)$$

式中 $y_v(k)$ 为带有测量噪声信号的系统输出信号.

根据式(12)可得离散卡尔曼滤波算法输出 $y_e(k)$ 为

$$y_e(k) = Cx^+(k) + D. \quad (13)$$

将滤波输出信号 $y_e(k)$ 与系统理想输出信号 $y_d(k)$ 相减, 可得系统输出误差为 $e_2(k) = y_d(k) - y_e(k)$, 则KPID控制算法的控制律为

$$u(k) = K_p e_2(k) + K_i T \sum_{j=0}^k e_2(j) + K_d \frac{e_2(k) - e_2(k-1)}{T}. \quad (14)$$

3 控制仿真(Simulation)

以单根PAM作为控制对象, 则KPID控制算法的控制系统结构简图如图1所示.

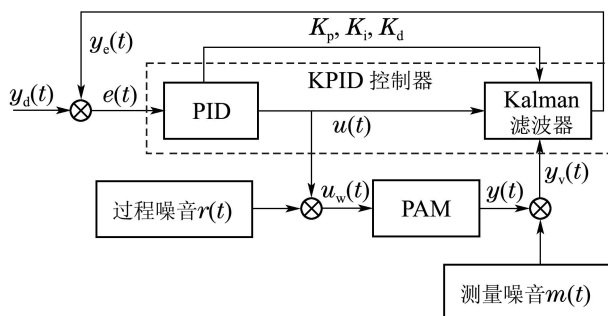


图1 KPID控制系统框图

Fig. 1 Control schematic diagram of KPID

图1中 $u_w(t)$ 为带有过程噪声信号的控制信号. 通过等压实验获得 Shadow 机器人公司生产的直径30 mm气动肌肉(S30AM-S-1)充气压力与收缩位移间的关系数据, 通过辨识可知该气动肌肉的差分方程如式(15)所示, 其与实验数据对比如图2所示.

$$y(k) = 0.3914y(k-1) + 0.333y(k-2) + 0.2745y(k-3) + 0.0111u(k-1) + 0.0102u(k-2) + 0.0093u(k-3). \quad (15)$$

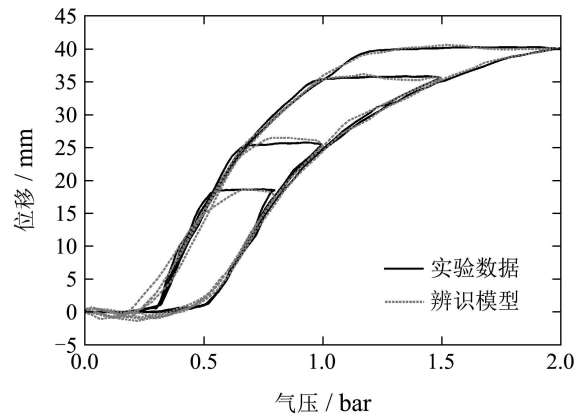
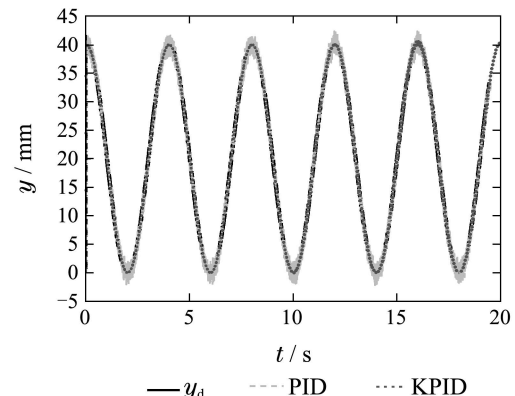


图2 模型与实验数据对比

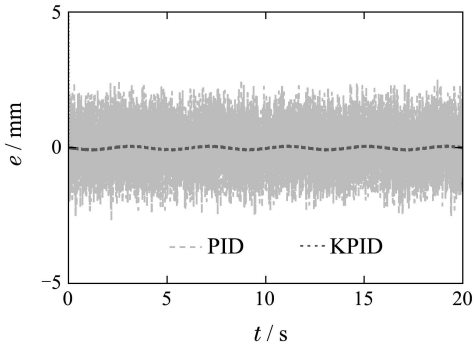
Fig. 2 The comparison between experimental data and identification model

由图2可以看出, 该模型精度约为4.58%, 辨识模型能够表征气动肌肉的特性, 满足应用需求.

设系统过程噪声信号 $r(k)$ 是幅值为1的白噪声信号、测量噪声信号 $m(k)$ 是幅值为10的白噪声信号. 根据常规PID参数调节方法-临界比例度法, 设KPID控制器的控制参数分别为 $K_p = 25$, $K_i = 0.000001$, $K_d = 0.001$, $T = 0.001s$, $Q = 1$, $R = 1$; PID控制器的3个控制参数与KPID相同. 令气动肌肉分别按照轨迹 $y_d(k) = 20 \cos(0.5\pi kT) + 20$ 和 $y_d(k) = 30$ 进行运动, 以PAM输出位移 $y(t)$ 作为比较对象, 则两种控制器仿真结果对比如图3-4和表1-2所示.

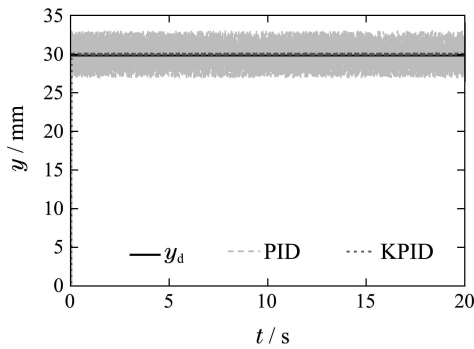


(a) 轨迹跟踪

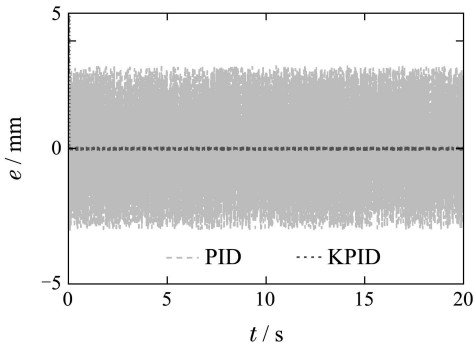


(b) 跟踪误差

图3 控制仿真结果($y_d(k) = 20 \cos(0.5\pi kT) + 20$)
Fig. 3 Simulation results ($y_d(k) = 20 \cos(0.5\pi kT) + 20$)



(a) 轨迹跟踪



(b) 跟踪误差

图4 控制仿真结果($y_d(t) = 30$)
Fig. 4 Simulation results ($y_d(t) = 30$)

表1 动态性能比较(周期信号)

Table 1 Indicators of dynamic performance (periodic signal)

控制器	PID	KPID
跟踪精度/%	3.75	0.1

表2 动态性能比较(阶跃信号)

Table 2 Indicators of dynamic performance (step signal)

控制器	上升时间/s	超调量/%	调整时间/s	稳态误差/mm
PID	0.0171	0	0.0171	2.97
KPID	0.005	0	0.005	0.04

由图3-4可以看出,当系统存在过程噪声及测量噪声时,传统PID的控制结果出现明显的抖振现象;相反,KPID控制器则能很好地抑制噪声对控制效果的影响,避免抖振现象的发生,提高了系统的鲁棒性.由表1-2可以看出,当系统存在噪声信号时,KPID控制器相较传统PID控制器,系统的动态性能得到了明显的改善,拥有更高的跟踪精度及响应速度.

4 控制实验(Experiment)

以PAM仿生肘关节为控制对象,该仿生肘关节为3-TCT并联机构,由3根PAM作为驱动器,拥有3个旋转自由度,则KPID的控制原理图如图5所示.

图5中 $\Theta_d = (\theta_{xd}, \theta_{yd}, \theta_{zd})$ 和 $\Theta = (\theta_x, \theta_y, \theta_z)$ 分别为PAM仿生肘关节运动平台的期望转角及实测转角, l_{di} 和 $l_i (i = 1, 2, 3)$ 分别为通过仿生肘关节逆运动学方程计算所求得的3根PAM期望长度和实际长度, $l_{ei} (i = 1, 2, 3)$ 为KPID控制器滤波后输出的3根PAM的长度, $l_{ri} (i = 1, 2, 3)$ 为3根PAM的实际输出长度, $u_i (i = 1, 2, 3)$ 为KPID控制器输出.整个实验系统如图6所示.

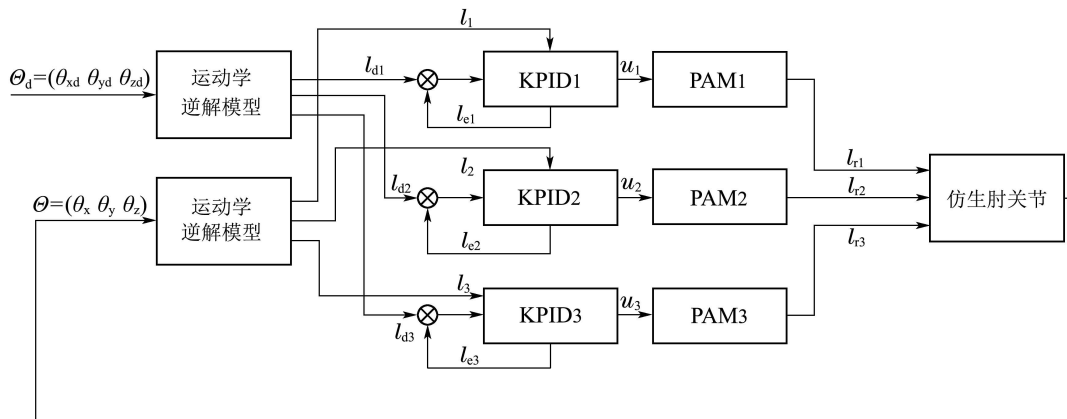


图5 PAM仿生肘关节KPID控制原理图

Fig. 5 Control schematic diagram of KPID for PAM bionic elbow joint

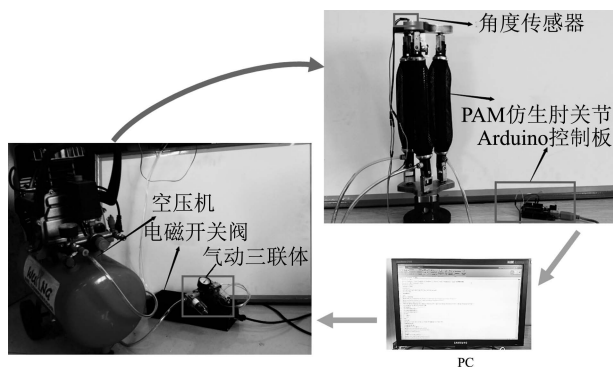
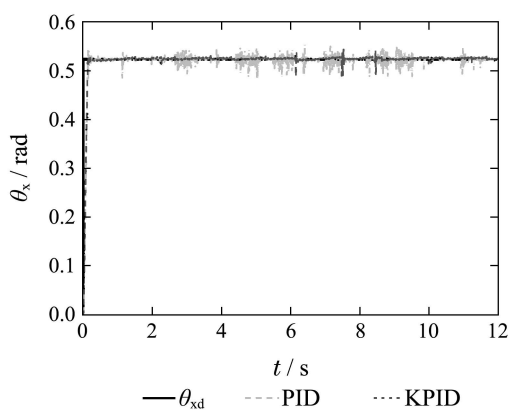


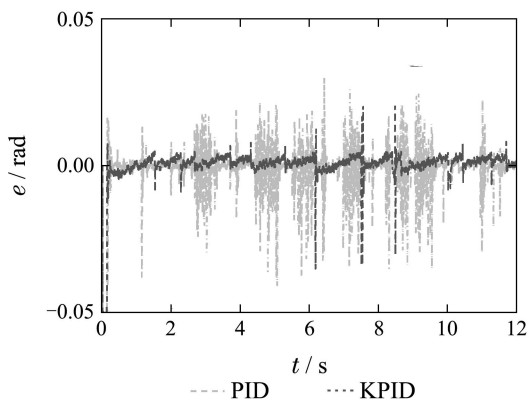
图6 实验测试系统

Fig. 6 Experimental measurement system

负载为0时, 令充气端压力维持在2.5 bar; 分别利用PID及KPID对PAM仿生肘关节进行控制, 根据常规PID参数调节方法—临界比例度法, 设置3个KPID控制参数均为 $K_p=10$, $K_i=0.000001$, $K_d=0.001$, $T=0.001s$, $Q=1$, $R=1$; 3个PID控制器参数与KPID相同. 使PAM仿生肘关节运动平台分别对轨迹 $\theta_{xd} = \pi/6$, $\theta_{xd} = \text{abs}(\pi/9 \sin(\pi/10t))$ 进行跟踪, 其实验对比结果如图7-8和表3-4所示.



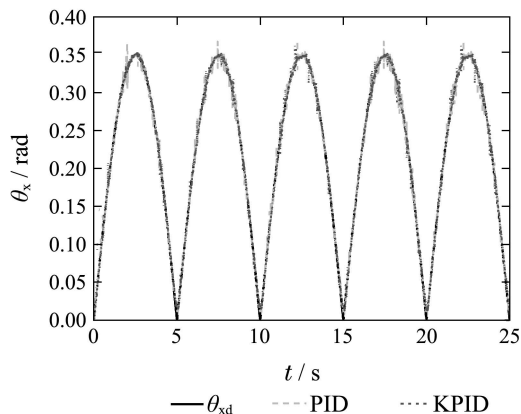
(a) 轨迹跟踪



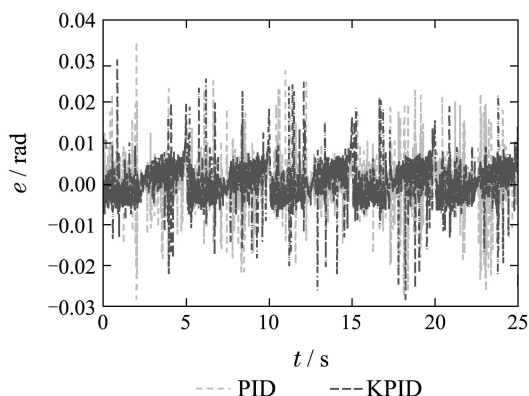
(b) 跟踪误差

图7 控制实验结果($\pi/6$)

Fig. 7 Experiment results ($\pi/6$)



(a) 轨迹跟踪



(b) 跟踪误差

图8 控制实验结果($\text{abs}(\pi/9 \sin(\pi/10t))$)

Fig. 8 Experiment results($\text{abs}(\pi/9 \sin(\pi/10t))$)

表3 动态性能比较(阶跃信号)

Table 3 Indicators of dynamic performance (step signal)

控制器	上升时间/s	超调量/%	调整时间/s	稳态误差/rad
PID	0.14	3.24	0.25	0.0036
KPID	0.13	1.15	0.15	0.002

表4 动态性能比较(周期信号)

Table 4 Indicators of dynamic performance (periodic signal)

控制器	PID	KPID
跟踪误差/rad	0.0037	0.0032

由图7-8可以看出, 相较PID控制器, KPID控制器显著抑制了由系统过程误差及测量误差所导致的仿生肘关节运动平台抖振现象的发生. 由表3-4可知, KPID控制器与传统PID控制器相比拥有更好动态性能及控制精度, 进一步说明KPID控制器能够有效降低过程误差及测量误差对系统运动精度的影响, 提升系统的鲁棒性.

5 结论(Conclusions)

本文为了削减系统过程误差及测量误差所引起的气动肌肉抖振现象,提出了一种基于PID控制参数的卡尔曼PID(KPID)控制算法.该算法主要基于当选择的PID控制参数较为合适时,其控制律可近似的认为是被控对象的数学模型,故本文首先求得PID控制器的状态方程,从而得到基于PID控制参数的被控对象离散状态方程;将所得状态方程中的状态矩阵带入到离散卡尔曼递推公式中,从而得到KPID控制算法.该方法突破了传统卡尔曼滤波算法与智能控制算法相结合时必须知道被控对象精确数学模型及噪声统计特性先验知识的限制,从而扩大了卡尔曼滤波算法的应用范围.此外,从仿真及实验结果可以看出,KPID控制算法相较传统PID控制算法拥有更好的控制精度及系统鲁棒性,且能够有效抑制由系统误差所引起PAM抖振现象,提高了其运动稳定性.

参考文献(References):

- [1] YANG Gang, LI Baoren, FU Xiaoyun. Parallel manipulation driven by pneumatic muscle actuators [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 42(7): 29 – 45.
(杨刚, 李宝仁, 傅晓云. 气动人工肌肉并联机器人平台 [J]. 机械工程学报, 2006, 42(7): 29 – 45.)
- [2] SUI Liming, ZHANG Lixun. Comparison of pneumatic muscle and pneumatic cylinder characteristics [J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2011, (11): 99 – 102.
(隋立明, 张立勋. 气动肌肉与气缸的特性对比研究 [J]. 液压与气动, 2011, (11): 99 – 102.)
- [3] WU J, HUANG J, WANG Y J, et al. Nonlinear disturbance observer-based dynamic surface control for trajectory tracking of pneumatic muscle system [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2014, 22(2): 440 – 455.
- [4] SAROSI J, BIROB I, NEMETHC J, et al. Dynamic modeling of a pneumatic muscle actuator with two-direction motion [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2015, 85: 25 – 34.
- [5] DO T N, TJAHOJOWIDODO T, LAU M W S. A new approach of friction model for tendon-sheath actuated surgical systems: nonlinear modeling and parameter identification [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2015, 85(3): 14 – 27.
- [6] SAWICKI G S, FERRIS D P. A pneumatically powered knee-ankle-foot orthosis (KAFO) with myoelectric and inhibition [J]. *Journal of Neuro Engineering and Rehabilitation*, 2009, 23(6): 1 – 16.
- [7] PARK Y L, CHEN B R, PÉREZARANCIBIA N O, et al. Design and control of a bio-inspired soft wearable robotic device for ankle-foot rehabilitation [J]. *Bioinspiration and Biomimetics*, 2014, 9(1): 016007.
- [8] III R D V, KOTHERA C S, WERELEY N M. Mechanism and bias considerations for design of a bi-directional pneumatic artificial muscle actuator [J]. *Smart Materials and Structures*, 2014, 23(12): 125039.
- [9] JOUPPIA V T, GADSDEN S A, BONE G M, et al. Sliding mode control of a pneumatic muscle actuator system with a PWM strategy [J]. *International Journal of Fluid Power*, 2014, 15(1): 19 – 31.
- [10] KANG B S. Compliance characteristic and force control of antagonistic actuation by pneumatic artificial muscles [J]. *Meccanica*, 2014, 49(3): 565 – 574.
- [11] TAN J F, OUYANG J Z. A novel variable step size adaptive filtering algorithm [J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 1997, (6): 171 – 174.
- [12] CHEN Liwei, TAN Zhiliang, CUI Lidong. An improved LMS adaptive filtering algorithm for adaptive noise cancellation [J]. *Radio Engineering*, 2015, 45(6): 70 – 73.
(陈立伟, 谭志良, 崔立东. 改进的LMS算法在噪声抵消中的应用 [J]. 无线电工程, 2015, 45(6): 70 – 73.)
- [13] DAN S. *Optimal State Estimation-Kalman, H_∞ , and Nonlinear Approaches* [M]. Hoboken: John Wiley and Sons Ltd, 2013.
- [14] LI Haifen, TAN Yonghong, DONG Ruili, et al. Non-smooth Kalman filter based state estimation for Hammerstein systems with hysteresis [J]. *Control Theory & Applications*, 2016, 33(6): 745 – 752.
(李海芬, 谭永红, 董瑞丽, 等. 含有迟滞Hammerstein系统的非光滑卡尔曼状态估计 [J]. 控制理论与应用, 2016, 33(6): 745 – 752.)
- [15] HUIYONG K, JUN H P, KWANG S L. A Kalman filter-based R2R control system with parallel stochastic disturbance models for semiconductor manufacturing processes [J]. *Journal of Process Control*, 2014, 24(12): 119 – 124.
- [16] MIAO Zhengge, LIU Di, LIANG Chenglin, et al. Simulation research of the application of Kalman filter in PID control [J]. *Electronic Design Engineering*, 2011, 19(18): 11 – 13.
(苗正戈, 刘迪, 梁成林, 等. 卡尔曼滤波器在PID控制中的仿真研究 [J]. 电子设计工程, 2011, 19(18): 11 – 13.)
- [17] JOAO M K, RODRIGO V T, HUMBERTO P, et al. Robust adaptive controller combined with a linear quadratic regulator based on Kalman filtering [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2016, 61(5): 1373 – 1378.
- [18] RAKHEE P, BIDYADHAR S. Performance enhancement of shunt active power filter using a kalman filter based H_∞ control strategy [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, 32(4): 2622 – 2630.
- [19] SHE Zhiting, ZOU Wei, DONG Wanghua, et al. Extended Kalman filters combined with feed-forward compensation for permanent magnet synchronous moter position estimation [J]. *Control Theory & Applications*, 2016, 33(10): 1312 – 1318.
(余致廷, 邹薇, 董旺华, 等. 扩展卡尔曼滤波结合前馈补偿永磁同步电机位置估计 [J]. 控制理论与应用, 2016, 33(10): 1312 – 1318.)
- [20] YUAN Fang, ZHU Daqi, YE Yinzong. Sliding-mode fault-tolerant control method of underwater vehicle based on reduced-order Kalman filter [J]. *Control and Decision*, 2011, 26(7): 1031 – 1035.
(袁芳, 朱大奇, 叶银忠. 基于降阶卡尔曼滤波器的水下机器人滑模容错控制 [J]. 控制与决策, 2011, 26(7): 1031 – 1035.)

作者简介:

杨辉 (1987–), 男, 博士研究生, 主要从事机器人柔顺性控制研究, E-mail: 405377205@qq.com;

郝丽娜 (1968–), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事机器人建模与智能控制研究, E-mail: haolina@me.neu.edu.cn;

陈洋 (1988–), 男, 博士研究生, 主要从事IPMC制备、建模及控制研究, E-mail: 774546064@qq.com;

薛帮灿 (1990–), 男, 硕士研究生, 主要从事PAM助力机械臂控制研究, E-mail: xbc19900418@126.com.