

基于视觉检测板球系统的变论域模糊控制研究^①

史智慧, 刘 枫, 祁 虔

西南大学 计算机与信息科学学院, 重庆 400715

摘要: 板球系统作为一个典型的多变量、非线性控制对象, 适用于检测各种控制方案, 具有学术和实用研究价值. 以板球系统为对象, 以小球的定位为控制目标, 采用 LQR 方法建立状态观测器, 并设计变论域模糊控制器进行控制. 实时控制的实验表明, 该方法能使系统达到全局渐进稳定, 切实有效, 与 LQR 方法、模糊 PID 控制方法相比, 控制精度较高, 控制时间更短, 具有较强的抗干扰性和鲁棒性.

关 键 词: 板球系统; 定位控制; 变论域模糊控制器; LQR 状态观测器

中图分类号: TP273⁺.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2017)02-0148-05

板球系统是一个多变量、非线性控制系统, 属于球杆系统^[1]的二维扩展, 系统自由度的数目大于执行器的数目, 并在 x 和 y 方向存在耦合作用, 所以控制较为复杂, 主要用来学习和研究各种控制方法, 是控制理论应用的实验平台. 板球系统的控制目标有两个, 一是定位, 即控制小球运动到指定的位置; 二是轨迹跟踪, 即控制小球按照给定的轨迹运动.

常见的板球系统根据反馈系统的类别, 主要分为基于摄像头的板球系统和基于触摸屏的板球系统. 所有的板球系统都是通过不断地调整平板的角度, 达到控制平板上小球的位置和运动状态的目的. 实验室所采用的板球系统, 机械部分如图 1 所示, 由平板、小球、摄像机、步进电机和相应的控制设备组成.

1 板球系统数学模型

以板球系统的实物模型为参考, 平板所在的平面为基准, 建立平板坐标系, 板球系统动力学模型如图 2 所示, 并对板球系统进行动力学分析, 计算后得到如下状态方程^[2-3]:

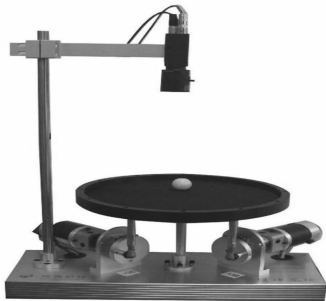


图 1 板球系统实物模型

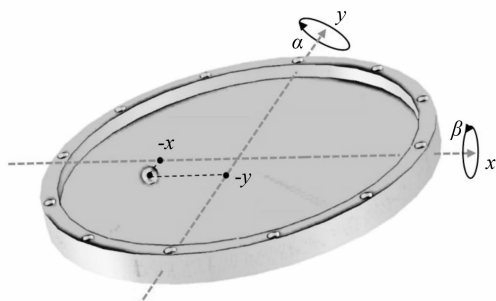


图 2 板球系统动力学模型

① 收稿日期: 2015-06-01

作者简介: 史智慧(1991-), 女, 吉林抚松人, 硕士研究生, 主要从事控制理论与控制方法、计算智能与智能控制系统研究.
通信作者: 刘 枫, 教授.

$$x: \left(m + \frac{I_b}{r_b^2}\right)\ddot{x} - m(\dot{x}\ddot{\alpha} + \dot{\alpha}\dot{x}) + mg \sin \alpha + \mu mg \sin \alpha = 0 \quad (1)$$

$$y: \left(m + \frac{I_b}{r_b^2}\right)\ddot{y} - m(\dot{y}\ddot{\beta} + \dot{\beta}\dot{y}) + mg \sin \beta + \mu mg \sin \alpha = 0 \quad (2)$$

$$\alpha: (I_b + I_p + mx^2)\ddot{\alpha} + m(xy\ddot{\beta} + \dot{x}y\dot{\beta} + x\dot{y}\dot{\beta} + 2x\dot{x}\dot{\alpha}) + mgx \cos \alpha = F(\tau_x) \quad (3)$$

$$\beta: (I_b + I_p + my^2)\ddot{\beta} + m(xy\ddot{\alpha} + \dot{x}y\dot{\alpha} + x\dot{y}\dot{\alpha} + 2x\dot{x}\dot{\beta}) + mgy \cos \beta = F(\tau_y) \quad (4)$$

选取角度控制量, 即平板的转角 α, β , 因为电机的位置不受力矩的影响, 所以方程(3), (4)可以忽略; 对稳定状态附近的微分方程(1), (2)进行线性化. 令 $x = [x_1, x_2, x_3, x_4]^T = [x, \dot{x}, y, \dot{y}]^T$, $y = x$, $u = [\alpha, \beta]^T$, 摩擦系数 $\mu \approx 10^{-4}$ 较小, 可以忽略摩擦力, 则系统的状态描述方程为

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = x \end{cases} \quad (5)$$

其中, $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -7.007 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -7.007 \end{bmatrix}$.

经计算, 系统可控. 板球系统在水平位置线性化后, x, y 方向是解耦的且结构一致, 即系统解耦合后, x 轴和 y 轴的控制相互独立, 可以针对 x 轴和 y 轴分别设计控制器, 传递函数的表达式均为

$$G(s) = \frac{7.007}{s^2} \quad (6)$$

2 系统控制方案

板球系统的非线性模型在平板的水平位置附近进行线性化, 符合线性二次型最优控制问题, 利用线性系统的控制理论可以直接得到系统的状态反馈矩阵. 因此, 利用 LQR 方法设计控制器, 可以达到控制目标, 但控制效果单一, 如果要调节控制精度或者控制时间, 必须重新计算 Q, R , 计算繁琐且效果不明显^[3-5]. 文献[6]中提出以变论域为手段的自适应模糊控制器, 在规则数量不变的条件下, 使变量的模糊论域根据偏差和偏差变化率的变化而进行伸缩变换, 减缓了控制精度与控制规则之间的矛盾, 简化了控制器的分析和设计.

针对以上考虑, 设计控制方案如图 3 所示: 根据 LQR 方法设计状态观测器, 时刻观测系统的状态变量: 偏差和偏差变化率, 并将其输出给控制器. 利用变论域模糊控制原理设计控制器, 对 LQR 的输出进行优化, 最终达到控制要求, 并对控制效果做调节.

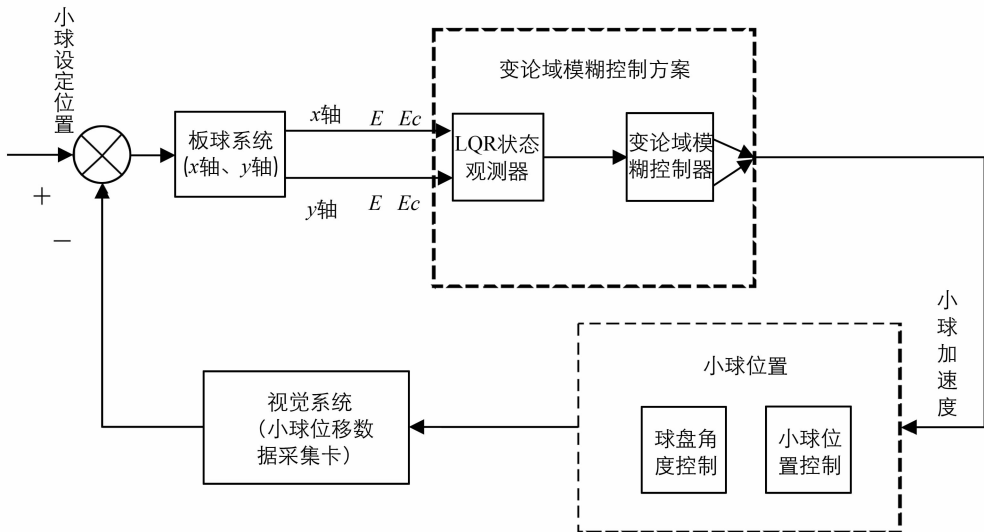


图 3 系统控制方案

2.1 LQR 状态观测器

对板球系统进行动力学分析得到系统的状态方程，非线性模型在平板的水平位置附近得以线性化^[3-4]，利用线性系统的控制理论来设计 LQR 状态观测器^[5]。LQR 状态观测器的设计归结为选取合适的加权矩阵 Q, R ，得到 x, y 方向的反馈增益矩阵 K_x, K_y ^[5]，应用到实时控制实验中。在状态观测器的输出端引入权重因子 KE 和 KEC ，调节权重因子可以达到不同的控制效果，调节权重因子 KE ，可以改善系统的控制时间，调节权重因子 KEC ，可以改善平板在运动中的转角范围及平板旋转角度的最大超调量。

2.2 变论域模糊控制器

在 LQR 状态观测器得到的控制量分别为输入量 E 和 EC ，选用双输入单输出控制器，设计变论域模糊控制器，其中，变论域模糊控制的规则和论域伸缩因子如表 1 所示^[6]：

$$\beta(x, y) = 1 - \lambda e^{-k_1 x^2 - k_2 y^2} \qquad k_1, k_2 > 0, \lambda \in (0, 1)$$

表 1 变论域模糊控制规则^[6]

EC	E						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	-5/6	-5/6	-2/3	-1/2	-1/3	-1/6	0
NM	-5/6	-2/3	-1/2	-1/3	-1/6	0	1/6
NS	-2/3	-1/2	-1/3	-1/6	0	1/6	1/3
ZO	-1/2	-1/3	-1/6	0	1/6	1/3	1/2
PS	-1/3	-1/6	0	1/6	1/3	1/2	2/3
PM	-1/6	0	1/6	1/3	1/2	2/3	5/6
PB	0	1/6	1/3	1/2	2/3	5/6	5/6

3 实时控制实验

按照图 3 所示的控制方案搭建控制系统，设定平板中心为定点位置，将设计出的状态观测器和变论域模糊控制器应用于实时控制实验中。

利用 LQR 方法设计控制器，图 4(a)显示小球位置的变化趋势，在系统运行 20 s 后，小球的运动状态达到一个稳态，此时，小球稳定位置的坐标是(-6.793 3, -0.976 8)；小球在平板上的运动轨迹如图 4(b)所示，小球在平板上运动时，位移偏差较大，但不超过 130 mm，即控制过程中，平板的摆动角度较大，容易产生波动，系统达到稳态时， y 轴方向的稳态误差较小， x 轴方向稳态误差大，所需控制时间长。

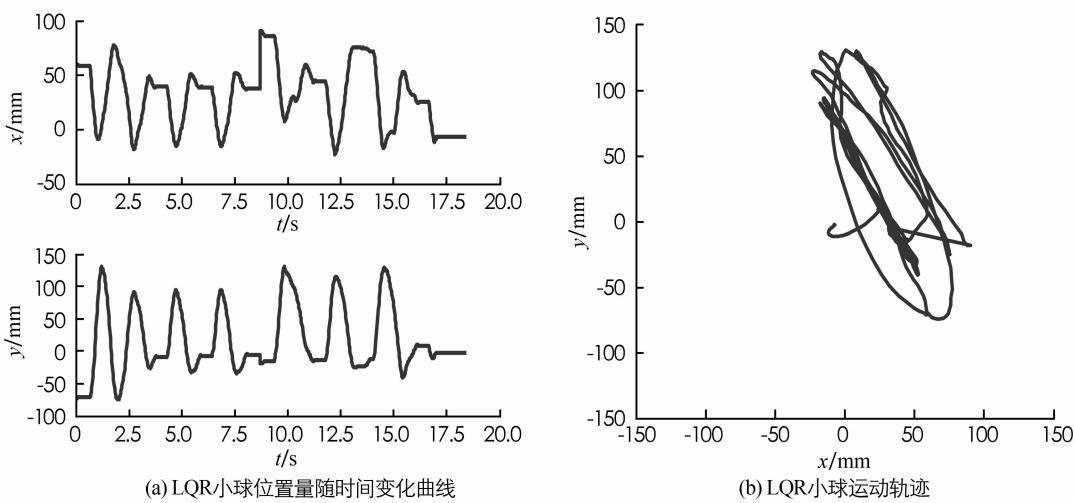


图 4 LQR 控制系统控制效果

以模糊 PID 控制原理设计控制器的控制系统输出结果如图 5 所示。图 5(a)显示小球位置的变化曲线，在系统运行 1.25 s 后，小球的运动达到一个平缓状态，略微调节后，小球运动状态发生轻微波动，在系统运行 5s 后，小球的运动状态达到一个平稳，小球在 y 轴的位置基本达到稳定，在 x 轴上进行缓慢调节，以

减小位置误差, 最终, 小球稳定位置的坐标为 $(-1.680\ 1, 0.636\ 1)$. 小球在平板上的运动轨迹如图 5(b), 运动轨迹并不杂乱, 位移偏差最大不超过 80 mm. 利用模糊 PID 方法设计控制器, 控制时间较短, 稳态误差较小, 但控制过程中易产生波动.

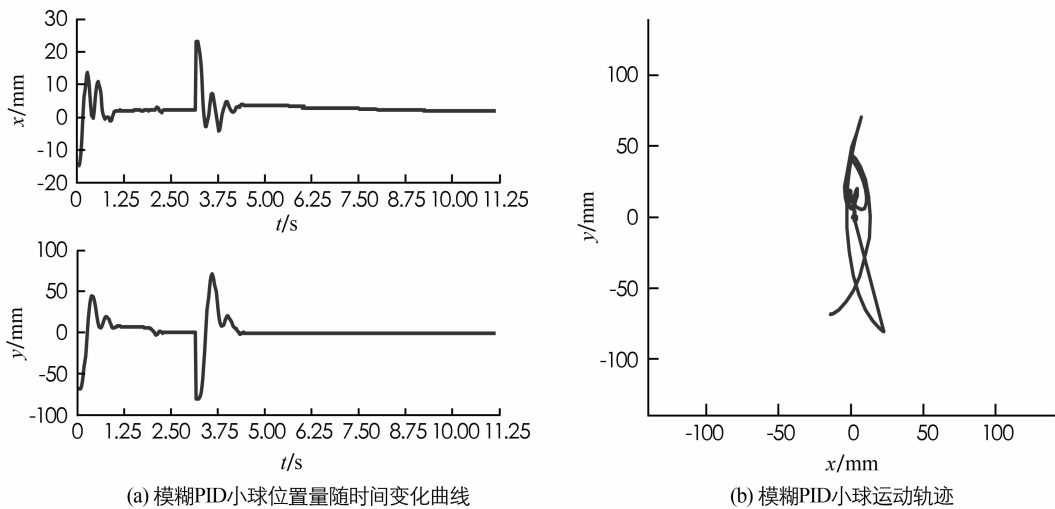


图 5 模糊 PID 控制系统控制效果

图 6 显示了以变论域模糊控制原理设计控制器的控制系统输出结果. 在图 6(a)中, 系统运行 4.5 s 后达到一个稳态, x 轴与 y 轴均能到达稳态值并稳定在 $(2.314\ 0, -0.108\ 7)$; 小球在平板上的运动轨迹如图 6(b)所示, 位移偏差最大不超过 100 mm, 经过一段时间的调节, 系统输出使得小球在运动中逐渐减小位置偏差, 最终趋于稳定. 利用变论域模糊控制方法设计控制器, y 轴方向稳态误差近似于 0, x 轴方向稳态误差小, 系统达到稳态时所需的控制时间短.

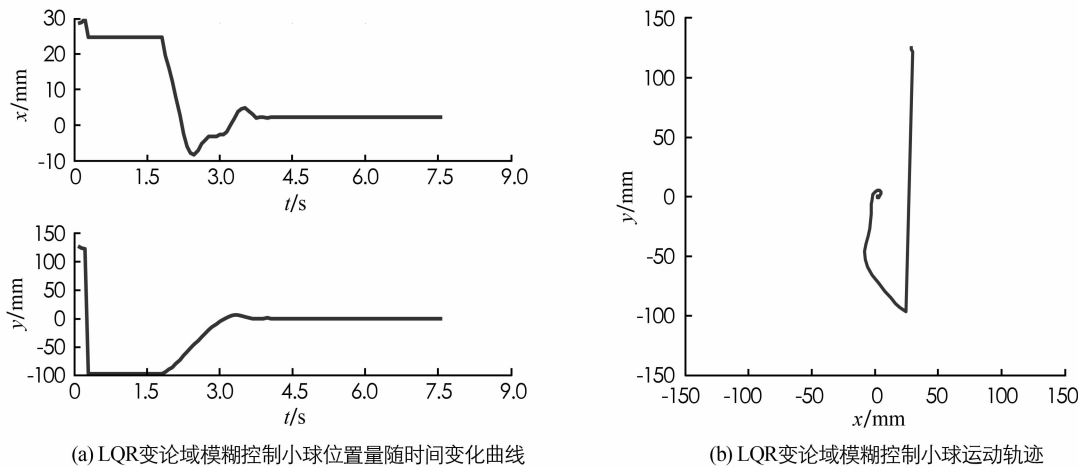


图 6 基于 LQR-变论域模糊控制系统控制效果

对以上 3 种控制方法的结果图进行观察与对比可以发现: 以达到最终控制目标——定位于平板中心点为目的, 采用 LQR 方法设计控制器时, 控制时间最长, 系统稳态时位置偏差较大; 采用模糊 PID 方法设计控制器时, 控制时间较短, 达到稳态时的位置偏差最小, 但由于存在积分作用, 不断对小球的位置做调整, 使得小球更靠近平板中心位置, 所以系统调节过程中易产生波动; 基于变论域模糊方法设计控制器, 控制时间最短, 稳态时的位置误差较小, 调节过程中系统波动最小, 运动轨迹最简洁.

4 结 论

本文针对板球系统的定位控制做研究, 采用视觉检测实时反馈小球的位置信息, 利用 LQR 方法设计

状态观测器和变论域模糊控制原理设计控制器,对板球系统进行实时控制.实验结果表明,与 LQR 方法、模糊 PID 控制方法相比,基于 LQR 的变论域模糊控制可以达到控制要求,控制时间最短,控制效果较优,该方案切实有效,简单实用.

参考文献:

- [1] HAUSER J, SASTRY S, KOKOTOVIC P. Nonlinear Control via Approximate Input-Output Linearization: the Ball and Beam Example [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1992, 37(3): 392—398.
- [2] 李宗信. 工程力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [3] 王红睿, 田彦涛. 板球系统的参数自调整反步控制 [J]. 控制与决策, 2009, 24(5): 749—753.
- [4] DUAN Hui-da, TIAN Yan-tao, LI J S, et al. Control for a Class of Higher Order Nonlinear System Based on of Active Disturbance Rejection Control [J]. Control and Decision, 2012, 27(2): 216—220.
- [5] 刘 豹, 唐万生. 现代控制理论 [M]. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [6] 李洪兴, 苗志宏, 王加银. 四级倒立摆的变论域自适应模糊控制器 [J]. 中国科学(E 辑), 2002, 32(1): 65—75.
- [7] LI Yu-feng, WIKANDER JAN. Model Reference Discrete Time Sliding Mode Control of Linear Motor Precision Servo Systems [J]. Mechatronics, 2004, 14(7): 835—851.
- [8] 郑恩让, 聂诗良. 控制系统仿真 [M]. 北京: 中国林业出版社, 北京大学出版社, 2006.
- [9] WANG Hong-rui, TIAN Yan-tao. Nonlinear Output Tracking Control for a Class of Underactuated Systems [J]. Control and Decision, 2011, 26(6): 953—956.
- [10] 马 洁. 模糊推理的 FMT 问题研究 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2013, 38(5): 37—42.

Variable Universe Fuzzy Control of Ball & Plate System Based on Visual Inspection

SHI Zhi-hui, LIU Feng, QI Qian

College of Computer & Information Science, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: Ball & Plate system is a typical multi—variable, nonlinear control object. It is suitable for testing various control schemes, and it has academic research significance and practical research value. This paper takes Ball & Plate as object, making the ball go to the specified location as the control target, and using LQR method to build the state observer and design variable universe fuzzy controller of system. Real experimental results show that this design is effective and practical, can reach the global asymptotic stability of the system, and compares with the fuzzy PID control method and LQR method, the control precision is higher, the control time is shorter, and it has good anti—interference and robustness.

Key words: Ball & Plate System; positioning control; variable universe fuzzy controller; LQR State Observer

责任编辑 汤振金