

文章编号 1004-924X(2015)06-1664-09

斜轴式天文望远镜机架的驱动控制

周旺平^{1*}, 刘 文¹, 刘 伟²

- (1. 南京信息工程大学 江苏省大气环境与装备技术协同创新中心, 江苏 南京 210044;
2. 中国科学院 紫金山天文台, 江苏 南京 210008)

摘要:针对斜轴式天文望远镜传统机架中的非垂直轴系结构会导致像场旋转, 从而影响天文望远镜指向和跟踪控制的问题, 研发了新的 45°斜轴式天文望远镜机架。设计时, 选取太阳为跟踪目标来搭建硬件机架驱动控制系统; 利用图像传感器实时捕获目标, 经数字信号处理(DSP)芯片精确解析目标质心, 通过图像消旋解耦出方位与斜轴两方向的偏差。然后, 结合模糊控制与神经网络的各自特点, 设计了单神经元模糊自适应 PID 控制算法实施偏差调节, 以实现目标的定位与跟踪。实验结果显示, 该驱动控制系统的水平与斜轴方位的跟踪偏移误差均在 ± 2 pixel 以内, 水平指向偏移误差均值为 $0.123 2^\circ$, 俯仰指向偏移误差均值为 $0.155 3^\circ$ 。得到的结果表明该驱动系统鲁棒性强, 能够克服斜轴机架像场旋转导致的控制问题且满足精度要求。

关键词:天文望远镜; 机架; 斜轴; 数字信号处理器; 单神经元模糊自适应 PID

中图分类号: TH751; TP273 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152306.1664

Driving control for mounting rack of slant axis astronomical telescopes

ZHOU Wang-ping^{1*}, LIU Wen¹, LIU Wei²

- (1. Jiangsu Collaborative Innovation Center on Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;
2. Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

* Corresponding author, E-mail: wpzhou@nuist.edu.cn

Abstract: The non-vertical structure in traditional mounting rack of a slant axis astronomical telescope may cause an image field rotation, which will effect the pointing and tracking of the telescope. Therefore, a mounting rack with a slant axis of 45° is developed. By selecting the sun as the tracking target, a hardware driving control system for the mounting rack is designed. Capturing the target by a camera in real time, the system uses Digital Signal Processors(DSPs) here for analyzing exactly the centroid position of target image and decouples the deviation between the two directions by image despun scheme. Combined the fuzzy control and neural network, a self-adaptive fuzzy PID approach with a single neuron is proposed for regulating the position errors of the slant and azimuth respectively to achieve tracking and positioning. The experimental results show that the horizontal and slant axis azimuth tracking bias errors are within 2 pixels, and the average tracking error is $0.123 2^\circ$ for the horizontal orientation and $0.155 3^\circ$ for the vertical direction respectively. Experimental results indicate that the driving system is very robust. It solves the control problem caused by image rotations and can

收稿日期: 2015-01-20; 修订日期: 2015-02-25.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 10903003, No. 11322329)

meet the precision requirement.

Key words: astronomical telescope; mount; slant axis; Digital Signal Processor(DSP); single neuron adaptive fuzzy PID

1 引言

大型天文望远镜是观测天体、探索宇宙奥秘的大型高精度仪器^[1-2],它综合应用了当代光学系统、机械装置和电控系统的最新技术和成果。望远镜机架作为望远镜电控系统的对象,是各种光学仪器、测量传感器的承载体。高性能的天文望远镜除了良好的光学系统,还要有高速、稳定、高精度的机架驱动控制系统,用于对所观测的天体进行精密跟踪,把望远镜焦点上像斑能量保持在比较集中的状态,以便获得更好的被观测天体信息。随着天文观测领域研究的发展,需要获得更精细的天体信息,这使天文望远镜的口径不断增大,也导致望远镜的机架驱动系统承受了更多的非线性干扰,从而给其精密驱动控制带来极大的挑战^[2-3]。

目前国内外常见的新一代大型天文望远镜多数采用地平式结构^[4-5]。该结构又称为俯仰-方位模式,其主要由绕水平方向旋转的俯仰轴和绕垂直方向旋转的方位轴组成。方位轴系连接着机架的底座,支撑整个转动部分,为望远镜提供方位回转运动,俯仰轴系用于支撑镜筒,为镜筒提供俯仰动作。这种结构模式具有优越的力学性能和较好的对称性,同时机械形变对望远镜的指向影响较小;缺点在于望远镜在穿越天顶区域时,方位轴的驱动速度无穷大,存在振动。

针对上述机架特征,Roland Lemke 等人提出了一种新型斜轴式结构的望远镜机架设计思想,以克服在望远镜定位上的机械限制^[6],但目前只停留在概念阶段,并未涉及具体设计及实现。国内,中国科学院南京紫金山天文台也提出了此类结构,并计划在南极冰穹 A 的 5 m 太赫兹望远镜项目上采用^[7]。斜轴结构可有效克服地平式结构在天顶处存在的振动,并且使得望远镜的安全性及对低温环境的适应性都有较大提高,是天文望远镜的一种新的驱动结构,将成为未来一段时间的研究热点。不过,这种结构的斜轴平面位置状态的变化会给水平方位引入新的分量,使得水平

轴面位置状态随之改变,导致观测视场内星体位置移动,出现像场旋转,给天文望远镜的指向与跟踪控制带来了新的困难。

本文借鉴国外提出的斜轴式结构思想,研发设计了 45°斜轴式天文望远镜机架。针对非垂直轴系结构导致的像场旋转问题,以该斜轴机架为实验对象,选取太阳为跟踪目标,搭建了硬件驱动控制系统,采用视觉伺服控制与图像分析相结合的方法,实现了对目标的精确定位与跟踪。

2 系统结构及工作原理

2.1 机架驱动控制系统结构

斜轴式天文望远镜机架驱动控制系统整体结构如图 1 所示,它主要由斜轴式机架转台、图像采集模块、DSP 主运算控制模块、电机驱动模块、无线通信模块、上位机模块、液晶显示模块等构成。

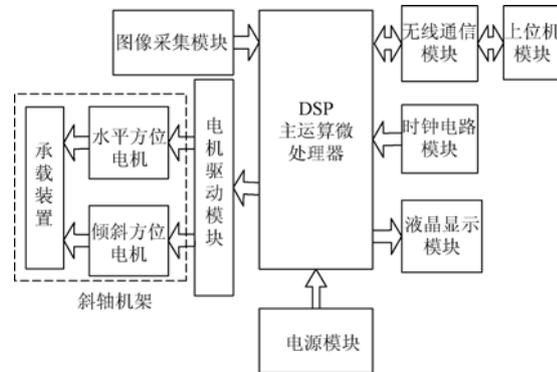


图 1 天文望远镜机架控制系统结构图

Fig. 1 Block diagram of mounting rack control system

斜轴式机架是由方位轴和斜轴构成的 2 轴平台,方位轴垂直于竖直方向,斜轴则与方位轴相交并成 45°夹角。两轴均采用外径 200 mm 的深沟球轴承构成回转轴系,并均采用 1 对永磁直流力矩减速电机和一级齿轮减速传动系统。电机内部减速比为 700,齿轮减速比为 2,总减速比为 1 400。机架采用 4 个螺钉用于调平和紧固,斜轴处包含 1 个口径为 500 mm 的天线,便于承载成像采集单元。其指向水平、指向天顶时的机械结

构如图 2 所示。

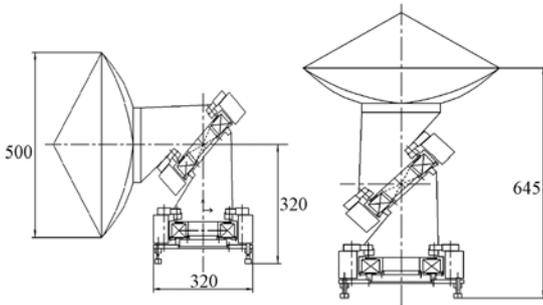


图 2 天文望远镜机架结构示意图

Fig. 2 Framework of telescope mounting rack

图像采集模块包含滤光片、OV7620 CMOS 图像传感器等器件,用于捕获目标天体。主运算控制器模块主要负责图像处理与控制算法的运算,以及对机架的驱动控制。选用了 TMS320F2812 芯片,因为它具有高的运算能力,很容易实现复杂的控制算法和控制功能。同时通过对其 DSP 的 BOOT 和 CMD 文件编程,实现了程序从 FLASH 到 RAM 的搬移,进一步提高了运算效率。电机驱动模块采用 ST 公司的 L298N 专用芯片,其芯片内含 2 个由功率管构成的高电压大电流 H 桥驱动器,便于实现对水平与倾斜两位置力矩直流电机的方向控制,并利用脉冲宽度调制(PWM)技术,实现对电机的变电压调速。液晶显示模块采用 3.2 inch (8 cm) TFT LCD 电容式触屏,用于实时显示经图像分析后的目标拟合边缘轮廓和目标所在的质心点及其坐标,形成动态可视化的观测界面,便于系统测试调节。无线通信模块相比有线通信更稳定,不受环境的限制,用于实现 DSP 控制器与上位机的串口通信,形成良好的人机界面,使得系统监控,人工校正调节更加快捷方便。

2.2 机架驱动控制工作原理

该系统的基本工作原理为:首先 DSP 主运算控制模块捕获图像传感器的场同步(VSYNC)和行同步(HREF)信号,按信号时序实现对目标图像的有效采集,将采集的信息以二维数组形式保存到 SRAM 中。接着 DSP 对目标图像进行滤波、二值化、连通域标记、目标识别、边缘检测等处理。根据目标特征,采用最小二乘法圆拟合确定目标质心位置,通过图像消旋对机架的水平与斜轴方位解耦来计算相对于图像传感器视场中心的

误差,并对误差采用单神经元模糊自适应 PID 控制。最后 DSP 依据这一系列控制结果产生相应的 PWM 对机架转台的水平和倾斜方位的永磁直流电机实施闭环驱动,使得目标质心位置始终保持在图像传感器视场中心,以实现目标的跟踪与定位。

3 系统目标信息获取

通过设置 OV7620 图像传感器,采集的图像输出为灰度图像,其值存储在定义 SRAM 中的二维整型数组里。利用 DSP 对此数组元素的处理即是对目标图像的处理。目标信息获取如图 3 所示。

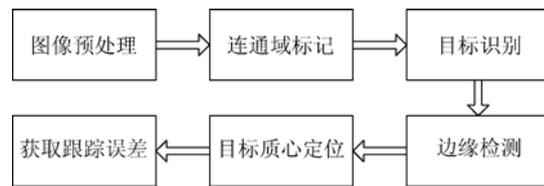


图 3 目标信息获取

Fig. 3 Target information acquisition

3.1 图像预处理

图像在拍摄或者传输过程中会掺杂噪声,这不仅影响图像的质量,还会影响后续图像处理的精度。因此 DSP 主运算控制器首先对图像进行预处理(包括:图像滤波、图像二值化)^[7]。像滤波通常分为线性滤波和非线性滤波两类。线性滤波对高斯噪声有较好的平滑作用,但其它噪声的抑制效果较差,而且会模糊边缘。而非线性滤波中的中值滤波对孤立噪声点的消除十分有效,并且能保护边缘轮廓信息。故采用中值滤波来实现图像的平滑。

在二维数字图像中,设 $\{x_{ij}, (i, j) \in I^2\}$ 表示图像各点的灰度值,则滤波窗口为 A 的二维中值滤波定义为:

$$y_{ij} = \text{Med}_A \{x_{i+r, j+s}, (r, s) \in A, (i, j) \in I^2\}. \quad (1)$$

图像二值化的目的是将目标图像与背景图像分离。最为常用的方法是阈值分割法,该方法特别适用于目标与背景有较强对比的情况,本系统采用最大类间方差法(OTSU 算法)求取图像的

最佳分割阈值。设灰度图像灰度级为 L , 则灰度范围为 $[0, L-1]$, 利用 OTSU 算法计算图像的最佳阈值为:

$$T = \text{Max}[\omega_0(t) \times (\mu_0 - \mu)^2 + \omega_1(t) \times (\mu_1 - \mu)^2], \quad (2)$$

其中: 当分割阈值为 T 时, ω_0 和 ω_1 分别为背景图像比例与目标图像比例, μ_0 , μ_1 和 μ 依次为背景像素均值、目标像素均值和整幅图像均值, 使得式(2)最大的 T 即为最佳阈值。

3.2 连通域标记与目标识别

在实际测试中发现天空中云朵等物质表面反射的光线也有少部分在图像传感器里成像, 造成二维图像数组里存在多个连续像素点为 1 的区域, 严重影响了目标识别和其质心定位的精度^[8]。为此引入连通域标记来处理此类现象。系统采用新型的基于区域生长的广度优先标记算法, 在内存中定义一个与目标图像数组一样大小的标记数组并元素初始化为 0。算法结束后, 标记数组里存放的是由 0 到连通域个数的整数, 其中 0 表示太阳图像数组里的背景像素, 其它值则表示太阳图像数组中目标像素的连通域编码。

(1) 对上述标记数组进行一次遍历, 统计除 0 以外各连通域编码 $L_i (i=1, 2, 3, \dots)$ 在数组里的个数 N_i , 将 N_i 中最大值 N_k 所对应编码 L_k 所在的连通区域初步视为目标光斑区域。

(2) 若 $n_{\min} \leq N_k \leq n_{\max}$, 则说明太阳光斑区域的像素点个数合理, 图像传感器已经捕获到了较为清晰的太阳图像, 其中 n_{\min} , n_{\max} 分别为目标光斑区域像素点最小个数和最大个数(实际运行测定)。反之, 则表明没有获取到目标, 退出图像处理流程。

(3) 最后将二维图像数组里除目标光斑区域以外的所有像素点置 0, 以便实现只有一块连续像素点为 1 的区域, 该区域即为目标区域。

3.3 边缘检测

为了兼顾 DSP 对图像处理的效率, 减少运算量, 常用的边缘检测算法有 Prewitt 算子和 Sobel 算子^[9-11]。其中 Sobel 算子效果较好, 应用更为广泛。它易于在控制器上实现, 对噪声具有一定的平滑作用并且能够提供较为精确的边缘方位信息。因此选用 Sobel 算子, 其原理是利用像素点上下、左右邻点的灰度加权算法, 根据在边缘点处达到极值这一现象进行边缘的检测。对于数字图

像 $\{f(i, j)\}$, Sobel 算子定义为:

$$|\Delta_x f| = |(f(i-1, j-1) + 2f(i-1, j) + f(i-1, j+1)) - (f(i+1, j-1) + 2f(i+1, j) + f(i+1, j+1))|, \quad (3)$$

$$|\Delta_y f| = |(f(i-1, j-1) + 2f(i, j-1) + f(i+1, j-1)) - (f(i-1, j+1) + 2f(i, j+1) + f(i+1, j+1))|, \quad (4)$$

$$s(i, j) = |\Delta_x f| + |\Delta_y f|, \quad (5)$$

其卷积算子为:

$$\Delta_x f = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}, \Delta_y f = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

选取适合的门限 TH , 作如下判断: 若 $s(i, j) > TH$, (i, j) 为阶跃状边缘点, $\{s(i, j)\}$ 即为 $\{f(i, j)\}$ 的边缘图像。

3.4 目标质心定位

采集到的图像通过边缘检测后得到目标边缘点坐标的集合。采用最小二乘法圆拟合中心算法, 精确计算图像中目标的质心位置坐标。最小二乘法是一种最佳平方逼近方法, 通过最小化误差的平方和来确定函数的参数, 即使圆形边缘图像不完整, 也可利用其拟合出该完整的圆, 得出圆心和半径。其原理可描述如下:

令圆方程为:

$$R^2 = (x-A)^2 + (y-B)^2, \quad (7)$$

其展开形式为:

$$R^2 = x^2 + y^2 - 2Ax - 2By + A^2 + B^2, \quad (8)$$

令:

$$a = -2A, b = -2B, c = A^2 + B^2 - R^2, \quad (9)$$

式(8)可变为:

$$x^2 + y^2 + ax + by + c = 0. \quad (10)$$

设边缘点坐标集合为 $(x_i, y_i), i=1, 2, \dots, N$, 则 (x_i, y_i) 到圆心距离的平方与半径平方的差为:

$$\delta_i = (x_i - A)^2 + (y_i - B)^2 - R^2 = x_i^2 + y_i^2 + ax_i + by_i + c. \quad (11)$$

残差平方和函数为:

$$Q(a, b, c) = \sum \delta_i^2 = \sum [x_i^2 + y_i^2 + ax_i + by_i + c]^2. \quad (12)$$

根据最小二乘法原理:

$$\frac{\partial Q(a, b, c)}{\partial a} = \frac{\partial Q(a, b, c)}{\partial b} = \frac{\partial Q(a, b, c)}{\partial c} = 0. \quad (13)$$

由于 $Q(a, b, c)$ 始终大于 0, 求解其极值问题即是求解 a, b, c 参数问题。通过运算求取 a, b, c 值, 便可得到图形圆心坐标和半径的拟合值。

3.5 跟踪误差获取

根据斜轴平台上的绝对编码器送来的旋转角度, 将通过最小二乘法得到的目标质心坐标按照同样的角度进行反旋转, 从而达到消除图像旋转影响的目的。设数字图像中原目标质心坐标为 (x, y) , 经绕点 (一般为图像的中心点 (x_0, y_0)) 旋转 θ 角度后得到新坐标 (x', y') , 那么 (x, y) 与 (x', y') 之间的转换对应关系为:

顺时针旋转:

$$\begin{cases} x = (x' - x_0) \cos \theta - (y' - y_0) \sin \theta + x_0 \\ y = (x' - x_0) \sin \theta + (y' - y_0) \cos \theta + y_0 \end{cases} \quad (14)$$

逆时针旋转:

$$\begin{cases} x = (x' - x_0) \cos \theta + (y' - y_0) \sin \theta + x_0 \\ y = (y' - y_0) \cos \theta - (x' - x_0) \sin \theta + y_0 \end{cases} \quad (15)$$

由图像消旋后得到的目标质心坐标与传感器视场中心坐标之差即为水平与俯仰方位的跟踪误差。

4 系统驱动控制器设计

4.1 单神经元模糊 PID 控制器

天文望远镜机架控制系统本身是一个具有强耦合性、非线性等特性的复杂系统, 加之系统运行时受到负载扰动等不确定因素的干扰, 甚至系统参数随时间和工作环境的变化而变化, 使得传统 PID 控制器难以实现对其精确控制。为了减小这一系列因素带来的影响, 采用单神经元模糊 PID 作为控制器, 它结合了模糊理论处理的不确定特性以及神经网络在线自学习的能力, 能够无限逼近任意非线性和不确定系统, 可以使得控制性能更加优越, 更加智能^[12-13]。

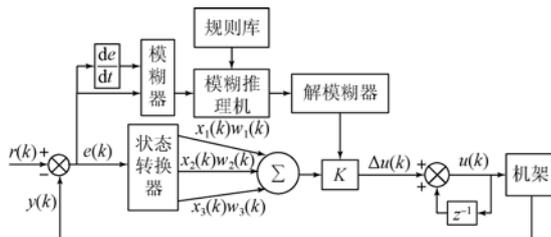


图 4 单神经元模糊自适应 PID

Fig. 4 Single neuron fuzzy adaptive PID

单神经元模糊自适应 PID 控制器机构如图 4 所示。根据系统设定的期望值 $r(k)$ 和被控对象输出值 $y(k)$, 得到误差信号 $e(k)$, 经转换器转换后得到神经元学习控制所需的状态量 $x_1(k), x_2(k), x_3(k)$ 。 $w_i(k) (i=1, 2, 3)$ 为神经元输入 $x_i(k)$ 的连接权值, 它根据当前误差 $e(k)$ 、误差变化率、学习速率和控制量 $u(k)$ 从上一时刻神经元的值得到, 神经元正式通过对连接权值的在线修正来实现自适应、自学习的功能, 权值 $w_i(k)$ 在线修正算法由有监督的 Hebb 学习规则实现, 其算法如式 (15) 所示。 $K (K > 0)$ 为神经元自适应系数, 由模糊控制器通过检测 $e(k), \Delta e(k)$, 利用模糊控制算法并根据一定的模糊规则输出。 $u(k)$ 为神经元输出的控制量, 按一定的比例关系转化为最终控制电机的 PWM 占空比:

$$\begin{cases} x_1(k) = r(k) - y(k) = e(k) \\ x_2(k) = e(k) - e(k-1) = \Delta e(k) \\ x_3(k) = e(k) - 2e(k-1) + e(k-2) \end{cases} \quad (16)$$

$$w_i(k) = w_i(k-1) + \eta_i e(k) u(k) [e(k) + \Delta e(k)], \quad (17)$$

$$w'_i(k) = \frac{w_i(k)}{\sum_{i=1}^3 |w_i(k)|}, \quad (18)$$

$$u(k) = u(k-1) + K \sum_{i=1}^3 w'_i(k) x_i(k), \quad (19)$$

式中: $\eta_i (i=1, 2, 3)$ 为学习速率, 通过设定不同的学习速率来完成对不同权系数的调整。 $w'_i(k)$ 为对权值的归一化处理, 随着误差和误差标准化率的减小, 其值趋近于恒值。单神经元模糊自适应 PID 的 3 个连接权值均是根据系统实时情况在线调整, 同时还增加了自适应参数 K , 通过模糊控制算法在线对输出控制量调整, 因此具有较好的自学习适应能力, 使得控制系统更加灵活, 以适应外界干扰的改变, 提高了系统的鲁棒性。

4.2 自适应系数 K 的模糊控制

单神经元自适应系数 K 反映了控制器对系统动态过程的过去、现在和将来信息的利用程度, 对整个控制系统性能影响较大。运用模糊控制, 根据跟踪误差和误差变化率对 K 进行在线调整, 择优利用系统动态过程的信息, 以适应对象的变化, 使系统达到最优控制效果。

为提高对 K 在线调整的质量, K 值采用增益调节的方式, 令 $K = K_0 + K'$, K_0 根据实控效果设定, K' 为调节增益。控制器输入量误差 E 与误差变化率 E_c 的变化范围在模糊集合上的论域为: $\{-15, -10, -5, 0, 5, 10, 15\}$, 输出量 K' 在模糊集上的论域为: $\{-0.6, -0.4, -0.2, 0, 0.2, 0.4, 0.6\}$, 相应的语言值为 {负大(N_B), 负中(N_M), 负小(N_S), 零(Z_O), 正小(P_S), 正中(P_M), 正大(P_B)}。输入输出变量隶属函数采用 S 型函数和三角函数, 其隶属曲线如图 5 所示。

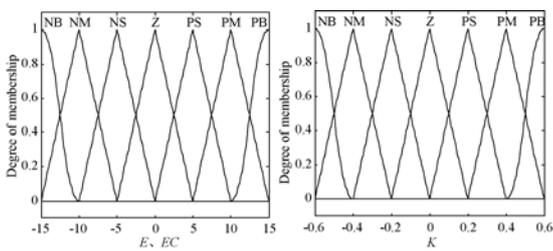


图 5 输入输出隶属度函数

Fig. 5 Membership functions of inputs and outputs

模糊控制规则是模糊控制器的核心, 本模糊控制原则为: 当跟踪误差较大时, 允许 K 值较大, 以获得系统的快速响应性能; 当跟踪速度较小时, 减小 K 值, 避免超调, 保证系统稳定。增益 K' 的模糊控制规则如表 1 所示, 其控制输出三维曲面如图 6 所示。模糊推理选用 Mamdani 方法, 通过模糊推理得到的结果是一个模糊集合, 而在实际控制中需要一个确定值, 因此需要进行模糊量的清晰化, 这里采用重心法进行清晰化。

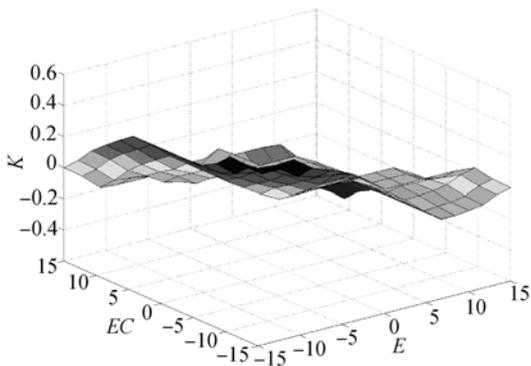


图 6 控制输出曲面图

Fig. 6 Surface chart of control output

表 1 模糊控制规则

Tab. 1 Fuzzy control rules

K'	E						
	N_B	N_M	N_S	Z_O	P_S	P_M	P_B
N_B	P_B	P_B	P_M	P_S	P_S	P_S	Z_O
N_M	P_B	P_M	P_S	P_S	P_S	Z_O	N_S
N_S	P_M	P_S	Z_O	Z_O	Z_O	N_S	N_M
E_c	Z_O	P_M	P_S	Z_O	Z_O	Z_O	N_S
P_S	P_M	P_S	Z_O	Z_O	Z_O	N_S	N_B
P_M	P_S	Z_O	N_S	Z_O	N_M	N_M	N_B
P_B	Z_O	N_S	N_S	N_S	N_S	N_S	N_B

5 测量实验与结果

斜轴机架与其驱动控制系统如图 7 所示, 图像传感器固定于机架天线中心位置, 以便采集获取目标信息, 无线模块与上位机实时通信, 反馈采集与跟踪定位信息。

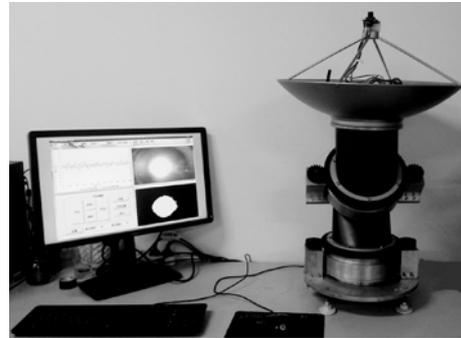


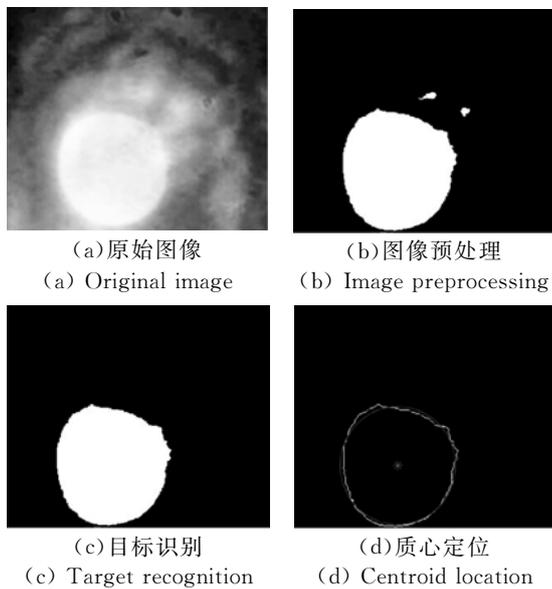
图 7 机架与其驱动控制系统

Fig. 7 Mounting rack and drive control system

5.1 系统捕获与定位目标实验

为了测试机架驱动控制系统能否准确获取目标信息, 对目标进行定位。将该系统置于户外对天空中的太阳实施捕获, 并将捕获的信息进行处理, 结果如图 8 所示。其中 8(a) 为捕获到的目标原始图像, 经过图像预处理后得到图 8(b), 由 8(b) 可知图像中存在杂散光斑干扰, 因此引入连通域标记处理, 以便识别太阳目标和滤除干扰, 处理后得到图 8(c)。图 8(d) 为对图 8(c) 边缘检测和圆拟合后最终得到的结果, 其中“*”为测定的

目标质心坐标位置。结果表明驱动控制系统能够识别目标并精确锁定目标质心位置。



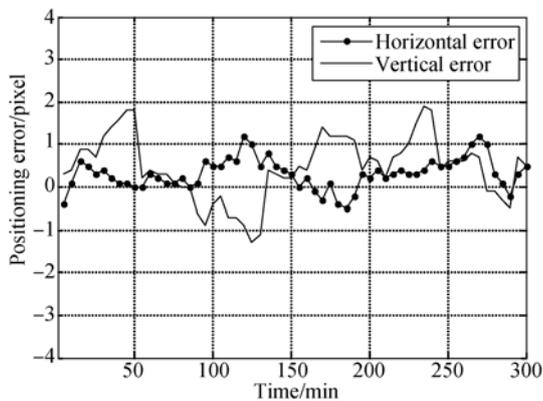
(a) 原始图像 (a) Original image
(b) 图像预处理 (b) Image preprocessing
(c) 目标识别 (c) Target recognition
(d) 质心定位 (d) Centroid location

图 8 目标捕获与图像处理

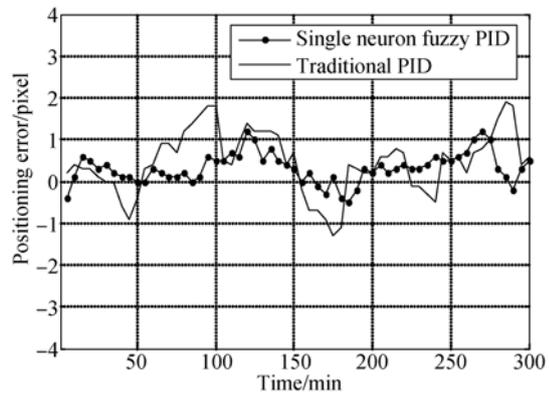
Fig. 8 Target acquisition and image processing

5.2 跟踪误差测量实验

为测试系统对其机架驱动控制的动态性能,以本系统对户外太阳目标进行跟踪与定位,系统跟踪前,需手动将成像单元对准太阳目标,以便其后系统自动跟踪,每分钟读取 1 次跟踪误差存储于 Flash 中并用上位机显示,绘制系统对目标的水平与俯仰方位跟踪像素误差曲线如图 9(a)所示。同时设计了与传统 PID 控制器的对比实验,绘制两控制器对水平方位跟踪的像素误差曲线如图 9(b) 所示。



(a) 水平与俯仰方位误差
(a) Horizontal error and vertical error



(b) 两控制器误差曲线
(b) Error curves of two controllers

图 9 跟踪误差曲线

Fig. 9 Tracking error curve

由图 9(a)可知,水平与俯仰方位的跟踪偏移误差均在 ± 2 pixel 以内,经计算其水平与俯仰方位偏移误差均值分别为 0.361 与 0.362 pixel。通过图 9(b)可知本系统控制器的控制效果明显优于传统 PID 控制器,该驱动控制系统运行更为稳定,具有更好的鲁棒性,表现出更高的跟踪连续性。

为测量系统的控制精度,实验首先调节好机架与太阳目标之间的位置,保证图像采集模块能够捕获到目标信息,并使得太阳图像质心处于图像传感器的视场中心。

表 2 跟踪实验测量结果

Tab. 2 Measuring results of tracking experiment ($^{\circ}$)

测量次数	水平轴转角	斜轴转角	水平轴偏差	斜轴偏差
1	5.088	5.162	0.088	0.162
2	5.187	5.274	0.187	0.274
3	5.065	5.157	0.065	0.157
4	5.092	5.263	0.092	0.263
5	5.213	5.137	0.213	0.137
6	5.143	5.054	0.143	0.054
7	5.164	5.087	0.164	0.087
8	5.068	5.121	0.068	0.121
9	5.039	5.182	0.039	0.182
10	5.173	5.116	0.173	0.116
均值	5.123 2	5.155 3	0.123 2	0.155 3
标准差	0.060 0	0.070 3		

然后调整机架的两轴转角,使得机架的水平与倾斜方向分别转动一个固定标准角度(这里选 5°),接着给系统通电启动控制系统,从而对机架的双轴电机实施驱动,使得太阳图像质心重新处于图像传感器的视场中心位置。最后,通过安装在机架上的绝对编码器,获取机架两轴在转回时的实际转动角度,并与标准角度进行对比,得到跟踪角度偏差。经200次测量实验,随机抽取10组数据如表2所示。由测量结果可知,系统在水平轴的跟踪误差为 0.1232° ,在斜轴的跟踪误差为 0.1553° 。

6 结 论

为有效驱动控制望远镜的机架,克服像场旋转,实现对目标的精确跟踪与定位,本文研发设计

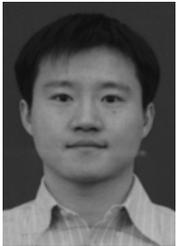
了一台 45° 斜轴式天文望远镜机架,并以此为实验对象,选取太阳为跟踪目标,设计了基于单神经元模糊自适应PID控制方法,搭建了硬件机架驱动控制系统。为提高对目标信息获取的准确性和精确性,系统引入连通域标记、边缘检测、最小二乘法拟合等关键算法。为减小系统本身和外界不确定因素的干扰,本文结合模糊控制与神经网络的各自特点,设计了单神经元模糊自适应PID控制器,使得系统的控制性能更加优越,更加智能。实验结果证明:该驱动控制系统具有很强的鲁棒性,跟踪连续性好,水平与斜轴方位的跟踪偏移误差均在 ± 2 pixel以内,水平方位偏移误差均值为 0.1232° ,俯仰方位偏移误差均值为 0.1553° 。系统能够克服斜轴机架像场旋转导致的控制问题且满足精度要求。

参考文献:

- [1] 杨世海,王国民. 天文光学望远镜摩擦驱动滑移动态检测与修正[J]. 光学精密工程, 2013, 21(8): 2056-2063.
YANG SH H, WANG G M. Detection and correction of slippage from friction drive for astronomical optical telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(8): 2056-2063. (in Chinese)
- [2] 孙航,张海波,曹立华,等. 大口径光电探测设备主镜晃动的误差补偿[J]. 光学精密工程, 2014, 22(1): 85-91.
SUN H, ZHANG H B, CAO L H, et al.. Error compensation for primary mirror shaking of large aperture optical detection equipment [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(1): 85-91. (in Chinese)
- [3] 周旺平,徐欣圻. 大型天文光学望远镜机架驱动高阶滑模控制仿真[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(13): 3487-3491.
ZHOU W P, XU X Q. Higher order sliding mode simulation for mount driving of large optical astronomical telescopes [J]. *Journal of System Simulation*, 2008, 20(13): 3487-3491. (in Chinese)
- [4] 赵勇志. 4 m级地基光电望远镜跟踪架结构研究[D]. 北京: 中国科学院, 2011.
ZHAO Y ZH. *Research on the four meters ground-based electro-optical telescope mount* [D]. Beijing: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2011. (in Chinese)
- [5] 柳光乾. 云台红外太阳望远镜驱动控制系统仿真[D]. 北京: 中国科学院, 2004.
LIU G Q. *The simulation for the control system of Yun Nan Solar Telescope* [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2004. (in Chinese)
- [6] LEMKE R, KÄRCHER H J, NOETHE L. Telescope positioning and drive system based on magnetic bearings, technical challenges and possible applications in optical stellar interferometry[C]. *SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation. International Society for Optics and Photonics*, 2012: 844440-1-8.
- [7] YANG J, ZUO Y X, LOU Z, et al.. Conceptual design studies of the 5 m terahertz antenna for Dome A, Antarctica [J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2013, 13(12): 1493-1508.
- [8] 王红睿,王玉鹏,方伟. 智能双模式太阳跟踪器[J]. 光学精密工程, 2011, 19(7): 1605-1611.
WANG H R, WANG Y P, FANG W. Intelligent solar tracker with double modes [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(7): 1605-1611. (in Chinese)
- [9] 乔培玉,何昕,魏仲慧. 加权整体最小二乘法在光学自准直法测量挠曲角中的应用[J]. 光学精密工程, 2012, 20(9): 1953-1959.
QIAO P Y, HE X, WEI ZH H. Application of weighted total least squares in measurement of de-

- flection angle with optical self-collimation method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(9): 1953-1959. (in Chinese)
- [10] 陈阔,冯华君,徐之海,等.亚像素精度的行星中心定位算法[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(7): 1881-1890.
CHEN K, FENG H J, XU ZH H, *et al.*. Sub-pixel location algorithm for planetary center measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(7): 1881-1890. (in Chinese)
- [11] 章毓晋. 图像处理和分析教程[M]. 北京:人民邮电出版社,2009.
ZHANG Y J. *A Course of Image Processing and Analysis* [M]. Beijing: Posts and Telecom Press, 2009. (in Chinese)
- [12] CHEN W B, ZENG G H, ZOU H J, *et al.*. Study of a single neuron fuzzy PID DC motor control method [C]. *Intelligent System Design and Engineering Application, IEEE Conference*, 2012: 1125-1128.
- [13] 朱丹丹. 基于单神经元的望远镜伺服控制系统研究[D]. 北京:中国科学院, 2011.
ZHU D D. *Study on the servo control system of telescope based on the single neuron* [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2011. (in Chinese)

作者简介:



周旺平(1975—),男,安徽枞阳人,博士研究生,副教授,2004年于安徽理工大学获得硕士学位,2007年于中国科学院南京天光所获得博士学位,主要研究方向:计算机与自动控制技术。
E-mail:wpzhou@nuist.edu.cn



刘文(1989—),男,江苏南京人,硕士研究生,2012年于南京信息工程大学获得学士学位,主要研究方向:计算机与自动控制技术。E-mail:lw891102@126.com

(版权所有 未经许可 不得转载)