

一种嵌入式的运动目标控制与自动追踪系统

邹辉¹, 潘宁¹, 李伟¹, 王增旭^{2†}

(1. 南京邮电大学电子与光学工程学院, 江苏 南京 210023; 2. 南京邮电大学理学院, 江苏 南京 210023)

摘 要:针对无人机能更准确和无误的实现监控,设计了一种基于嵌入式技术的运动目标控制与自动追踪系统。本系统由STM32单片机、树莓派、二维电控云台、摄像头模块、OLED屏和声光提示模块构成。采用摄像头模块拍摄获取屏幕角点、激光点等的坐标,利用树莓派进行摄像头实时图像特征提取并将提取的数据打包至单片机,单片机根据图像处理后的特征信息通过PID算法控制二维电控云台驱动舵机完成相应的目标控制或追踪动作,并将有效信息显示在显示屏上和发出声光提示。经测试,本系统能实现高精度的运动目标控制及自动追踪,在自动化控制领域具有广泛应用。

关键词:嵌入式系统;目标控制;自动追踪;STM32;PID;图像处理

中图分类号:TP368.1

文献标识码:A

Embedded Motion Target Control and Automatic Tracking System

ZOU Hui¹, PAN Ning¹, LI Wei¹, WANG Zengxu^{2†}

(1. School of Electrical and Optical Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210023, China;

2. School of Science, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210023, China)

Abstract: A motion target control and automatic tracking system based on embedded technology has been designed to achieve more accurate and error-free monitoring for drones. This system consists of an STM32 microcontroller, a Raspberry Pi, a two-dimensional electric control gimbal, a camera module, an OLED screen, and an audio-visual alert module. The camera module is used to capture the coordinates of screen corners, laser points, etc. The Raspberry Pi performs real-time image feature extraction from the camera and sends the extracted data to the microcontroller. The microcontroller controls the two-dimensional electric control gimbal drive servo based on the processed image features using a PID algorithm to achieve the corresponding target control or tracking actions. The system displays relevant information on the screen and provides audio-visual alerts. Through testing, the system has demonstrated the capability to achieve high-precision motion target control and automatic tracking, making it widely applicable in the field of automation control.

Key words: embedded system; target control; automatic tracking; STM32; PID; image processing

在计算机视觉和自动控制领域中,运动目标控制^[1]与自动追踪系统一直是研究的热门课题。随着现代社会对于智能化、自动化系统需求的增长,这一技术各个领域都具有广泛的应用前景,如安防监控、机器人导航、无人机监控等。运动目标控

制与自动追踪系统的主要目标在于通过计算机视觉^[2]、传感器数据分析以及控制算法的综合应用,实现对于运动目标的准确、稳定的追踪与控制^[3]。本文主要基于嵌入式技术设计了一种目标控制和追踪的系统,具有快速响应及优异的实时处理能力

收稿日期:2024-03-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61405096);国家重点实验室开放基金(M28035)

作者简介:邹辉(1982—),男,江苏邳州人,博士,副教授,研究方向:低频光电信号与信息处理技术。

†通信联系人,E-mail: wangzengxu@njupt.edu.cn

等特性,在自动控制领域有着广泛的应用。

1 系统硬件设计

1.1 系统结构搭建

系统结构的搭建如图 1 所示。系统结构主要包含两个激光笔,采用红色激光笔模拟移动目标与绿色激光笔实现自动跟踪^[4]。红色激光笔发出的红色光斑旨在模拟移动目标,此红色光斑被映射至 1 m 远的白色屏幕上,其红色光斑直径控制在 1 cm 以内。通过精密控制装置,可在显示界面上自由调

整红色光光斑的具体位置。

绿光标记定位模块用于控制绿光激光笔发出的绿色光斑,实现对屏幕上红光激光笔产生的红光点进行自动跟踪,以模拟目标的自动追踪效果。绿色激光笔可以任意放置在红色激光笔两侧的线段上,且与红色激光笔的距离在 0.4 m 到 1 m 之间。

激光笔照射的屏幕为白色,其有效面积不小于 0.6 m 乘 0.6 m。在屏幕中心,用铅笔画出一个边长为 0.5 m 的正方形,作为屏幕的边线标识,并将正方形的中心标记为原点。本系统的铅笔痕迹宽均不大于 1 mm。

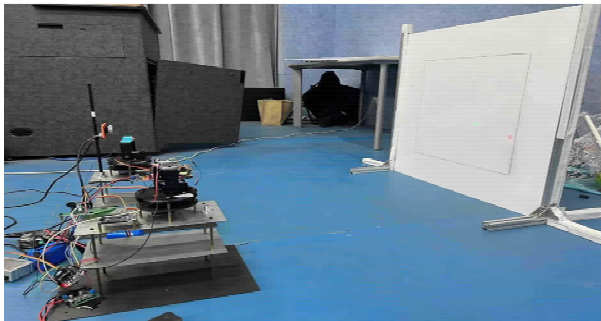


图 1 运动目标控制与自动追踪系统结构及摆放位置

1.2 系统框图

系统主要由摄像头、树莓派、STM32 单片机、显示屏、二维电控云台、舵机、激光源和声光提示等模块构成,系统框图如图 2。

本系统采用两套完全相同的系统方案实现对红、绿激光的控制。红色光斑位置控制系统模拟目标的运动,绿色光斑位置控制系统实现自动追踪的

功能。其中树莓派^[5]主要获取摄像头模块拍摄获取屏幕角点、激光点等的坐标,并将图像信息以数据包发送给单片机,单片机解包后根据获得的位置信息通过 PID 算法控制^[6]二维电控云台驱动舵机控制激光源执行相应的目标运动和追踪^[7-9]任务。OLED 屏可用于选择需要执行的任务和显示参数。声光提示模块主要由蜂鸣器和 LED 指示灯构成。

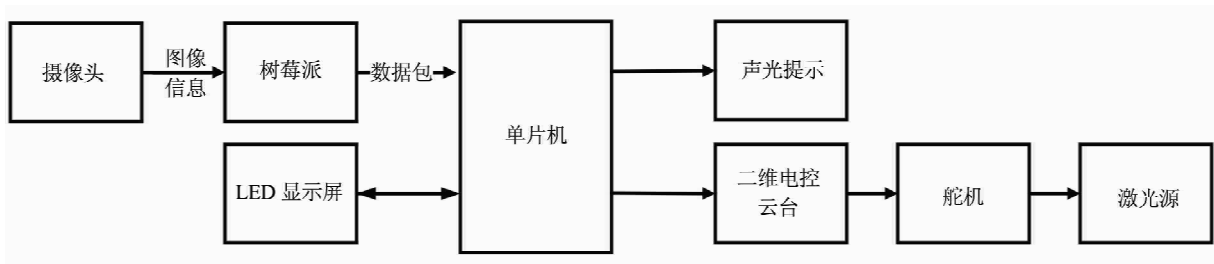


图 2 运动目标控制与自动追踪系统框图

2 系统软件算法设计

2.1 运动目标识别模块

运动目标识别模块主要包括激光识别、屏幕边线识别、胶带识别、坐标仿射^[10]变化。当接收到主

控芯片 STM32 单片机发送的控制信号后,树莓派会读取摄像头采集到的图片信息并根据需要执行的工作任务获得对应的坐标,将其得到的对应坐标返回给 STM32 单片机进行数据的处理。其主要逻辑框图如图 3 所示。

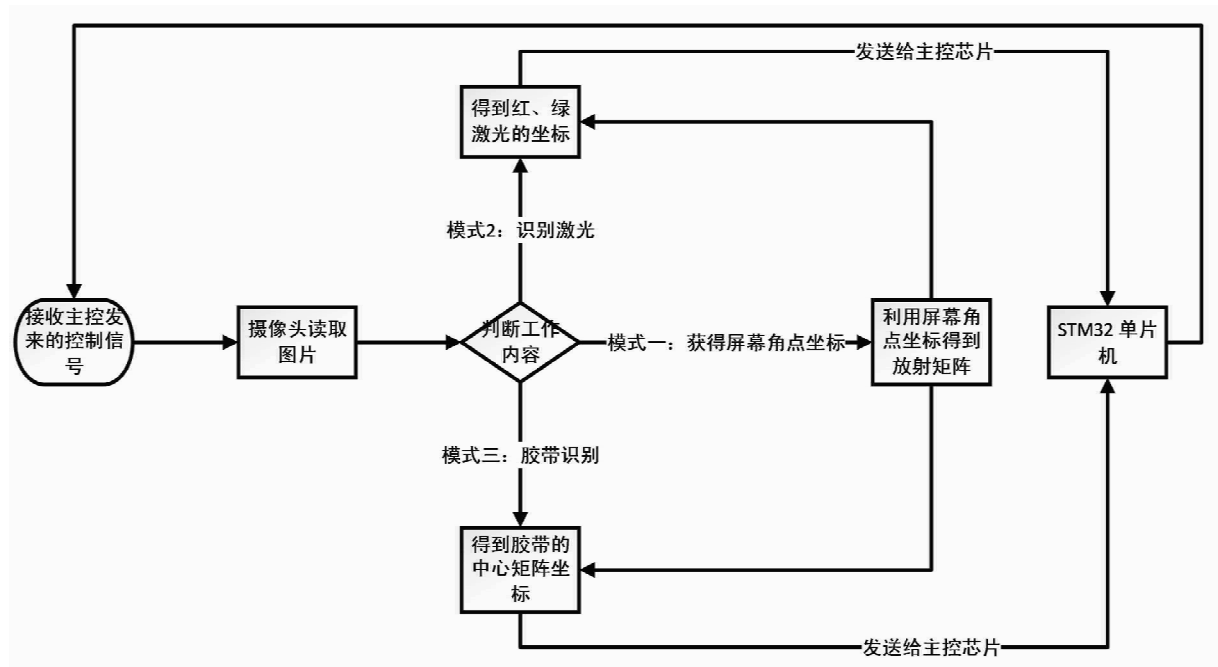


图 3 运动目标识别主要逻辑框架

1)激光识别^[12]:激光主要有红色激光和绿色激光,这里以识别红色激光为例。在摄像头读取的图像中,红色激光点主要有两个重要的特征:红色光晕和红色光斑,当两种特征都出现时即可识别成功。若激光照射到白色背景上,首先,将图像转换为 HSV 颜色空间^[13],设置红色和白色的 HSV 阈值范围,并创建对应的掩膜以分离颜色。然后,在红色掩膜中寻找和计算每个轮廓的外接圆,并排除小噪点。绘制红色激光点的实心圆,并通过按位与的操作将白色激光点与原始图像合并。最后,对激光点轮廓进行排序,选择面积最大的轮廓,若找到有效激光点轮廓,就在图像上绘制外接圆和文字,返回激光点坐标。

若激光照射到黑色胶带上,代码尝试在黑色区域内寻找激光。定义黑色和红色(红色激光产生)的 HSV 阈值,创建对应掩膜,寻找轮廓,计算外接圆,绘制实心圆,按位与操作,轮廓排序等步骤与白色背景类似。若找到有效激光点轮廓,绘制并返回其坐标。若在白色和黑色区域均未找到激光点,则返回没有找到激光的标志。

总之,通过颜色阈值、轮廓分析和几何计算,实现对图像帧中红色激光点的检测与定位功能。

2)坐标仿射变化^[14]:由于摄像机内屏幕边线受放置位置、角度的影响,得到的平面上的坐标并不平整,为此需要对图像处理得到的像素坐标进行仿射变化,使之对应屏幕上实际的坐标值。

二维欧式空间的仿射变换采用齐次坐标的形式可以表示为:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & t_x \\ a_{21} & a_{22} & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \tag{1}$$

其中, (x,y) 表示平面内某一点的初始坐标, (x',y') 则为该点经过仿射变换后的坐标,或者表示成矩阵块的形式为:

$$\mathbf{X}' = \mathbf{M}_A \mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \mathbf{X} \tag{2}$$

其中, $\mathbf{t} = (t_x, t_y)$ 为平移矢量, $\mathbf{A}$ 为 2×2 非奇异矩阵,它是坐标发生旋转、缩放以及斜切组成的合成变换的矩阵表示。为了更好地理解仿射变换,将非奇异矩阵 $\mathbf{A}$ 进行 SVD 分解:

$$\mathbf{A} = \mathbf{U} \mathbf{D} \mathbf{V}^T = (\mathbf{U} \mathbf{V}^T) (\mathbf{D} \mathbf{V}^T) = \mathbf{R}(\theta) [\mathbf{R}(-\varphi) \mathbf{D} \mathbf{R}(\varphi)] \tag{3}$$

其中, $\mathbf{R}(\theta)$ 和 $\mathbf{R}(\varphi)$ 分别为旋转 θ 和 φ 的变换矩阵, φ 规定了尺度变换的方向, $\mathbf{D}$ 为对角矩阵:

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix} \tag{4}$$

当奇异值的大小顺序固定时,奇异值分解的形式可由 $\mathbf{A}$ 唯一确定,则 $(\lambda_1, \lambda_2, \theta, \varphi)$ 与 $(a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22})$ 是唯一对应的,因而仿射变换的参数可以表示为 $(t_x, t_y, \lambda_1, \lambda_2, \theta, \varphi)$ 。

3)屏幕边线识别:首先我们将图像转换为灰度图像,应用高斯模糊和边缘检测,从图像中提取轮

廓信息,通过对轮廓进行排序和筛选,找到可能代表屏幕的候选区域。然后,对这些候选区域进行进一步的分析,只选择近似正方形的轮廓。

由于是轮廓近似得到的顶点值,所以会有误差,主要表现在:主控控制激光在细微的屏幕边缘上“走独木桥”、主控收到的坐标要依据正方形四个顶点值做仿射变换。因此,在获取这些候选区域后,本设计采取一种名为 Shi-Tomasi 角点检测^[15]的方法,来精确定位每个候选区域的顶点位置。通过提取每个候选区域的感兴趣区域(ROI),并在其中寻找角点。这些角点就是屏幕的顶点精确位置。

4) 胶带识别:首先对图像进行预处理,将其转换为灰度图像,应用高斯平滑和自适应阈值化得到胶带的准确图像。然后,利用开运算,清除图像中除了胶带区域外的细线,寻找图像中的轮廓,筛选出可能是胶带区域的候选轮廓,通过计算轮廓近似来判断其是否具有四个顶点和是否满足一定的面积条件。因为胶带的边界比较厚,有两个边界值,所以当找到两个符合条件的胶带区域,代码会计算它们的平均矩形坐标,并将这些坐标按顺时针返回给主控系统。

2.2 目标追踪算法

采用 PID 算法^[16-20]来控制云台舵机移动的角度。开始工作后,实时检测目标坐标,并与之前的位置坐标比较,使得激光云台舵机趋向指定点位。

PID 控制器由比例单元(P)、积分单元(I)和微分单元(D)构成。PID 结构原理如图 4。

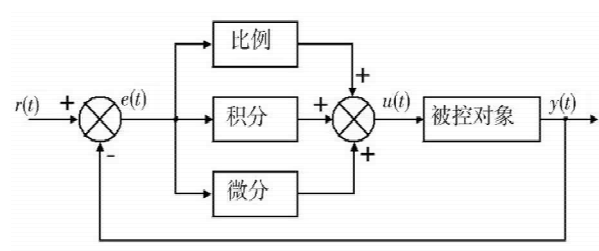


图 4 PID 控制算法原理

其中, $e(t)$ 为系统偏差, $r(t)$ 为系统设定, $y(t)$ 为系统输出, $e(t) = r(t) - y(t)$, PID 控制器对 $e(t)$ 进行运算后求和得到系统控制输出量 $u(t)$ 。

在连续控制过程中, PID 控制器的数学表达式为:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T} \int_a^b e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (5)$$

$$= K_p e(t) + K_i \int_a^b e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (5)$$

其中, K_p 、 K_i 、 K_d 分别为比例放大、积分、微分系数。

1) 比例系数 K_p : 在控制系统运行过程中, 通过将给定值与实测值之间的系统偏差 $e(t)$ 进行比例放大, 以加快系统的响应速度并促使系统偏差趋于最小化。然而, 过大的 K_p 值可能引发系统振荡, 导致不稳定, 同时增加系统的超调量, 进而降低动态性能。反之, 若 K_p 值设置过小, 虽然系统稳定性得以保持, 但可能牺牲了调节精度和响应速度。

2) 积分系数 K_i : 在控制系统中, 其主要作用是消除或减少静态误差。然而, 若 K_i 值设置过大, 系统在响应初期可能过早进入积分饱和状态, 导致显著的超调现象。反之, 若 K_i 值偏小, 系统可能无法有效消除或减少静态误差, 从而影响控制系统的调节精度。

3) 微分系数 K_d : 具有前瞻性, 能够捕捉到偏差信号的变化趋势。其作用是对系统的稳定性和响应速度进行提升, 然而, 过大的 K_d 值可能会导致系统在响应阶段过早进入制动状态, 导致调整时间延长并对系统的抗干扰性能产生不利影响。反之, 如果 K_d 值过小, 会使微分调节作用将过于微弱, 从而无法有效抑制系统偏差。

在本系统中, P、I、D 分别表示云台舵机的位置比例、位置误差和位置积分。

P: 主要是对云台舵机的当前位置的系统偏差 $e(t)$ 进行调整, 系数越大调节速度就越快, 减小误差, 但是, 如果比例过大, 将会造成舵机速度状态的突变, 从而导致云台的状态不稳定。

I: 主要是加入积分调节, 这样可以消除系统的稳态误差, 从而提高无误差度。

D: 微分调节主要反映的是云台舵机的角速度, 由于偏差变化的趋势具有可预见性, 因而可以产生超前调节, 改善系统的动态性能。

3 实验及结果分析

3.1 运动目标控制

3.1.1 复位

当执行运动目标位置复位功能时, 红色激光笔发射的红色光斑能从屏幕任意位置, 回到屏幕的坐标原点且光斑的中心点距离坐标原点的误差小于 1 cm。实验结果如表 1 所示。

表 1 复位

测试次数	屏幕上侧任意位置 误差/cm	屏幕下侧任意位置 误差/cm
1	0.1	0.2
2	0.2	0.3
3	0.1	0.1

3.1.2 运动目标控制

当执行运动目标控制系统后,红色激光笔发射的红色光斑能在 30 s 内沿屏幕四周用铅笔画的边线标识沿着顺时针方向运动一周,且运动时红色光斑中心距离边线标识的距离小于 1 cm。实验结果如表 2 所示。

表 2 运动目标控制

测试次数	30s 内移动一周 时间/s	沿屏幕边线顺时针 移动一周最大误差/cm
1	21.04	0.5
2	14.86	0.3
3	22.21	0.4

3.1.3 自定义靶纸位置控制

将 A4 纸的四周用黑色电工胶带(宽约 1.8 cm)粘贴,形成 A4 标靶,将该标靶贴在白色屏幕的指定位置或以任意角度旋转后贴在白色屏幕的任意位置。当运动目标控制系统启动后,红色激光笔发射的红色光斑能够在 30 s 内顺时针沿胶带方向运动一周,且脱离黑色胶带后的运动距离小于 5 cm。实验结果如表 3、表 4 所示。

表 3 自定的位置

测试次数	30s 内移动一周 时间/s	脱离胶带移动 距离/cm
1	24.61	3
2	23.54	4
3	23.21	2

表 4 任意角度的位置

测试次数	30s 内移动一周 时间/s	脱离胶带移动 距离/cm
1	23.04	2
2	25.86	1
3	27.01	4

3.2 追踪目标控制

3.2.1 运动目标复位追踪

当启动自动追踪系统后,该系统能控制绿色光

斑在 2 s 内成功追踪由运动目标控制系统控制的红色光斑。当追踪成功时会发出连续的声光提示,且此时红色光斑距离绿色光斑的中心距离小于 3 cm。实验结果如表 5 所示。

3.2.2 自定义靶纸位置追踪

运动目标重复 3.1.3 的动作。启动运动目标和自动追踪系统,并使用绿色激光笔发射端放置在线段的任意位置,绿色光斑将自动追踪红色光斑。系统启动后能在 2 s 内追踪成功,同时不断发出连续的声光提示,且此时红色光斑距离绿色光斑的中心距离小于 3 cm。实验结果如表 6、表 7 所示。

表 5 运动目标复位追踪

测试次数	追踪 时间/s	声光提示 (是否)	两个光斑中心 距离/cm
1	1.5	是	1.3
2	1.3	是	2.2
3	1.2	是	2.3

表 6 追踪自定的位置

测试次数	追踪 时间/s	声光提示 (是否)	两个光斑中心 距离/cm
1	1.2	是	2.3
2	0.9	是	1.5
3	1.4	是	1.9

表 7 追踪任意角度的位置

测试次数	追踪 时间/s	声光提示 (是否)	两个光斑中心 距离/cm
1	0.5	是	2.4
2	0.9	是	2.5
3	0.7	是	2.2

4 结 论

提出了一套基于 STM32 微控制单元的动态目标管理与智能跟随系统^[20]。利用摄影头与树莓派协同工作捕捉动态目标,由 STM32 微控制器调控 PID 算法实现目标的跟踪与精准定位。该系统突出小型化、快速响应及优异的实时处理能力等特性。能够高效执行目标动态监控及自适应追踪,展现出广阔的应用潜力。

参考文献

[1] 靳广在,朱锋,徐继贤. 弧形轨道目标模拟器运动控制系统设

计研究[J]. 机械与电子, 2015(1): 57—60.

[2] 谭永宏. 基于 TMS320C6701 的嵌入式智能视觉监控系统设计与实现[J]. 计算机系统应用, 2008(9): 73—76.

[3] 单琳娜. 基于运动目标的图像识别及追踪技术应用研究[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2018, 36 (6): 880—882.

[4] 梁瑞. 基于嵌入式技术的运动目标控制与自动追踪系统设计[J]. 集成电路与嵌入式系统, 2024, 24 (1): 89—93.

[5] 杨丙丽,曹佩蕾,姚玉莹. 基于树莓派的目标追踪系统的设计与实现[J]. 数字技术与应用, 2021, 39(12): 180—182.

[6] 苟小平,张万军,张峰,等. 基于 PID 控制的跑步机器人控制算法研究与分析[J]. 甘肃科技, 2021, 37 (11): 36—38.

[7] KUMAR A N, RAGLEND I J. Multi-objective control of multi-operational grid-integrated inverter for PV integration and power quality service[J]. Ain Shams Engineering Journal, 2021, 12 (3): 2859—2874.

[8] ZHI F L, WU W, XIONG D L, et al. Target tracking of snake robot with double-sine serpentine gait based on adaptive sliding mode control[J]. Actuators, 2023, 12 (1): 38.

[9] YIN T W, FU C X. Coordinated target tracking in sensor networks by maximizing mutual information[J]. International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation, 2022, 23 (7—8): 947—956.

[10] 杨晓峰,张桂林. 一种基于仿射变换模型的目标跟踪算法[J]. 计算机与数字工程, 2005(12): 30—34.

[11] 邓炯,覃筱燕,苏秋仁,等. 基于 STM32 的激光目标追踪系统设计[J]. 现代信息科技, 2023, 7(18): 69—72.

[12] 兰天莹,甘昕艳. 激光医学图像采集和识别方法研究[J]. 激光杂志, 2022, 43 (9): 119—123.

[13] 付长斐,叶宾,李会军. 基于 HSV 颜色空间的运动目标识别[J]. 控制与信息技术, 2020(2): 70—74.

[14] 赵鹏鹏,崔少辉,高敏,等. 基于仿射变换与均匀采样建模的目标跟踪[C]// 中科院长春光机所,《光学精密工程》编辑部. 2015 光学精密工程论坛论文集. 军械工程学院导弹工程系, 2015: 7.

[15] 彭晓星;罗霄;韩宝玲. 一种改进的 Shi-Tomasi 角点检测方法[J]. 计算机应用与软件, 2022, 39 (12): 241—245.

[16] FENG X, HU J. Discrete fuzzy adaptive PID control algorithm for automotive anti-lock braking system[J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2021, (prepublish): 1—10.

[17] 王征义. 基于 PID 算法的燃油汽车发动机怠速跟踪控制[J]. 机械制造与自动化, 2023, 52 (2): 197—200.

[18] 袁振洋;孔放;刘峻宇. 基于 PID 算法的智能小车电磁循迹方法研究[J]. 电子制作, 2022, 30 (1): 27—30.

[19] 束红林. 基于单片机 PID 算法的直流电机速度控制方法[J]. 电气传动自动化, 2023, 45 (3): 5—7+20.

[20] 张焕杰,易向东,张濛丹,等. 运动目标控制与自动追踪系统的设计[J]. 福建电脑, 2024, 40 (1): 109—112.

(上接第 25 页)

3 结 论

本实验采用了随机森林作为连续型数据的处理工具,对比于传统的人工处理方式不仅极大地节省了人力,更进一步地解决或者很大程度减少了人工处理方式划分连续型数据带来的噪声,极大地提高了对滑坡地质灾害的预测效果。

参考文献

[1] 李宏俊,孙瑜,焦莺莺,等. 基于模糊层次分析的四川马颈子场泥石流危险性评价[J]. 微型电脑应用, 2021, 37(12): 1—4+9.

[2] 饶运章,彭华东,张学焱,等. 滑坡概率与安全系数应用比较分析[J]. 金属矿山, 2016(3): 163—167.

[3] 阮沈勇,黄润秋. 基于 GIS 的信息量法模型在地质灾害危险

性区划中的应用[J]. 成都理工学院学报, 2001(1): 89—92.

[4] 唐尧,王立娟,石宇,等. 基于遥感技术的滑坡灾害监测及智能预警分析[J]. 国土资源信息化, 2020(4): 9—15.

[5] 胡颖,谢天,杨希. 三维激光扫描技术在滑坡监测中的应用研究[J]. 西部资源, 2020(5): 131—134.

[6] 陈曙东. 基于 Logistic 回归算法的滑坡预报模型[J]. 微处理机, 2021, 42(3): 35—38.

[7] 张抒,唐辉明,龚文平,等. 基于物理力学机制的滑坡数值预报模式:综述、挑战与机遇[J]. 地质科技通报, 2022, 41(6): 14—27.

[8] 高华喜,殷坤龙,李强. 三峡库区滑坡概率密度分布与预测研究[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2009, 28(2): 137—140.

[9] 李山有,陈欣,卢建旗,等. 基于 XGBoost 的现地地震烈度阈值实时判别模型[J/OL]. 地球科学: 1—15[2023—08—16].

[10] 周毅,丁明涛,黄涛,等. 芦山县滑坡灾害影响因素的空间分异性[J]. 中国地质调查, 2022, 9(4): 45—55.

[11] 兰剑. 2008 年 M_s8.0 汶川地震诱发滑坡灾害在映秀地区的演化特征[D]. 北京:中国地震局地质研究所, 2020.