

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2007084

## 基于 LVRT 系统的动物行为学实验系统\*

史丽娟<sup>1,3</sup>, 王斯博<sup>1,3</sup>, 赵 剑<sup>2,3</sup>, 吕 晶<sup>4,5</sup>, 贾宏博<sup>4,5</sup>

(1. 长春大学电子信息工程学院 长春 130000; 2. 长春大学计算机科学技术学院 长春 130000;  
3. 吉林省人体健康状态辨识与机能增强重点实验室 长春 130000; 4. 中国科学院苏州  
生物医学工程技术研究所 苏州 215163; 5. 中国科学技术大学生物医学  
工程学院(苏州)生命科学与医学部 苏州 215163)

**摘 要:**利用 LVRT(LabVIEW real-time)实时操作系统部署高速图像处理算法,并结合 FPGA(field programmable gate array)技术,建立一种面向动物行为学实验的高速实时检测跟踪与刺激系统,对连续帧图像做到确定性输出,实现各个不同动物行为学实验场景下的运动目标高速检测跟踪及刺激。应用实验表明,在 100 fps 采集速率下,该系统具有较好的实时性和稳定性,系统从目标检测到刺激反馈信号输出这一整个过程的执行时间稳定为 10 ms,执行时间的平均相对误差较传统系统降低了 15%,同时,在线分析完成了目标检测、运动轨迹、划分区域内小鼠行为特征分析等功能,离线分析生成运动轨迹热图,大大提升实验效率。

**关键词:**动物行为学;LabVIEW real-time;目标检测跟踪;反馈刺激;在线分析

**中图分类号:** TH79 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8060

## Experimental system of animal behavioristics based on LVRT system

Shi Lijuan<sup>1,3</sup>, Wang Sibo<sup>1,3</sup>, Zhao Jian<sup>2,3</sup>, Lyu Jing<sup>4,5</sup>, Jia Hongbo<sup>4,5</sup>

(1. School of Electronic Information Engineering, Changchun University, Changchun 130000, China; 2. School of Computer Science and Technology, Changchun University, Changchun 130000, China; 3. Jilin Provincial Key Laboratory of Human Health Status Identification and Function Enhancement, Changchun 130000, China;  
4. Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215163, China; 5. School of Biomedical Engineering (Suzhou), Division of Life Sciences and Medicine, University of Science and Technology of China, Suzhou 215163, China)

**Abstract:** The real-time operating system - LabVIEW real-time is used to deploy high-speed image processing algorithm, and combining with FPGA (field programmable gate array) technology, a high-speed real-time detection tracking and stimulation system facing to animal behavioristics experiments is established. The definitive output of continuous frame image is achieved, and the motion target high-speed detection tracking and stimulation in different animal behavioristics experiment scenarios are realized. The application experiments show that the system has good real-time and stability under the acquisition rate of 100 fps, the processing time of the whole process from target detecting to stimulus feedback signal output is 10 ms stably, the average relative error of the execution time is reduced by 15% compared with that of the traditional system. With online analysis the functions of target detection, motion track, mouse behavioral characteristic analysis in the dividing area are completed, and with offline analysis the motion track heat map is generated, which greatly improves the experiment efficiency.

**Keywords:** animal behavioristics; LabVIEW real-time; target detection and tracking; feedback stimulation; online analysis

收稿日期: 2020-11-05 Received Date: 2020-11-05

\* 基金项目: 中国科学院国家重大科研装备研制基金(ZDYZ2013-1)、中国科学院科研仪器设备研制项目(GJJSTD2019003)、国家自然科学基金青年基金(61705251)、吉林省科技厅项目(20200301054RQ, 20200601004JC, 201902011195JC)资助

## 0 引言

动物行为学实验是生物医学研究的重要手段之一<sup>[1]</sup>。早期的动物行为学实验常采用观察法,需要手工对特定实验环境下动物的各项行为指标进行记录,主观性强,费时费力,不能对试验指标进行客观判断,观察过程中还会影响动物的正常活动,从而影响实验结果的正确性。为了进行更精细的研究,Badiani 和 Minematsu 利用光电阵列记录动物的自由活动<sup>[2]</sup>。Kato<sup>[3]</sup>开发了一个计算机图像处理系统,用来量化金鱼行为;Uassilis 等开发了一个可以快速对鱼群特定行为进行分析的计算机视觉系统<sup>[4]</sup>,用该系统进行远程监控鱼群行为。庞静洁<sup>[5]</sup>利用 meanshift 算法研究视频图像序列中的鱼类运动目标跟踪和行为检测方法,对计算机视觉在水下鱼类动物机器人的研制和研究鱼类行为规律方面具有一定的实用价值。王松等<sup>[6]</sup>利用 meanshift 算法设计并实现了一种大鼠肢体运动行为学实验装置和自动分析软件,降低了动物行为学实验的劳动强度,提供客观性数据,并为脑机接口研究中脑电和行为联合分析提供了实验基础。Zurn 等<sup>[7]</sup>将小鼠的白天和黑夜颠倒,利用视频跟踪和红外光系统的方法分别记录实验数据,这些数据能够展现出小鼠的健康程度等信息。这些案例表明,图像处理法能够对动物行为进行更灵活、精细、全面的测量,目前已成为最受欢迎的行为识别技术。目前动物行为学装置的图像处理算法大多都是在 Windows 系统上部署,这是由于其具有软件丰富,生态成熟,易用性好,操作简单等特点,但由于 Windows 系统并没有为时间确定性作优化处理,在执行图像处理算法中会受到其他不相关进程的影响,造成程序执行不稳定,并且在长期执行中会产生大量的垃圾缓存,造成系统卡顿或崩溃。对于高速采集,实时分析的应用程序,Windows 系统不具备高可靠性,并且无法长时间内完成确定性的闭环控制。为解决实时测控问题,美国国家仪器公司 NI 在 LabVIEW 的基础上开发出 LabVIEW RT 软件,用于在 LabVIEW real-time 实时操作系统上部署程序<sup>[8]</sup>。

LVRT 系统具有高稳定性和时效性的特点,在该环境下运行程序能够在指定时间内精准的完成任务,让每一个事件都具备确定性,并且可以长期高效稳定的执行,应用于动物行为学实验装置中较为适合。

综上,本文设计了一种基于 LVRT 实时操作系统的动物行为学试验系统,用于动物的实时检测跟踪和反馈刺激,实验表明该系统稳定性和执行率均有较好的表现。

## 1 系统硬件设计方案与实现

### 1.1 系统硬件设计方案

如图 1 所示,本系统硬件包括嵌入式控制模块、图像处理模块、高速摄像模块和图像显示模块。其中 NI CompactRIO 9042(C-RIO)为系统的嵌入式控制模块和图像处理模块,高帧率红外相机和红外光源为系统的高速摄像模块、PC 作为系统的图像显示模块。

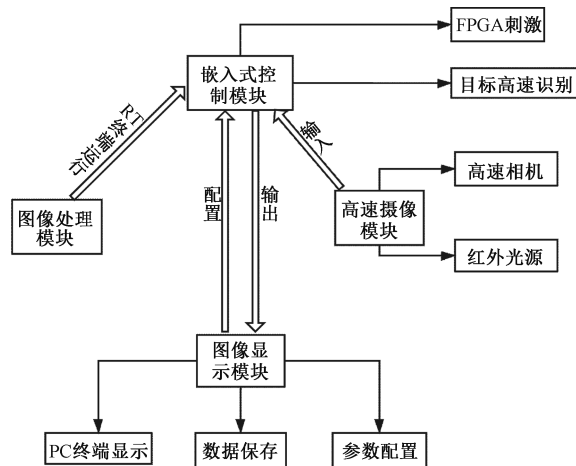


图 1 系统硬件设计结构

Fig. 1 System hardware design structure

### 1.2 系统硬件方案实现

如图 2 所示,针对小鼠快速移动和晚间活动等特征,本文选取高帧率红外相机(100 帧/s)采集图像,并补充红外光源作辅助照明,其中,采用 C-RIO 嵌入式测控系统对相机、FPGA 时序逻辑等进行控制<sup>[9]</sup>。图像处理模块在 LVRT 实时操作系统下完成,大大加快了数据处理速度。

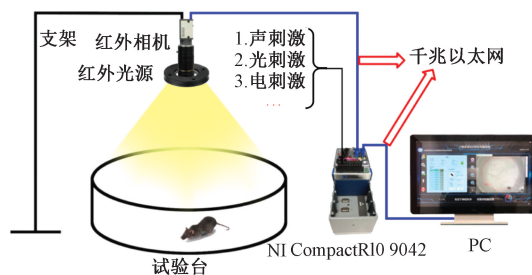


图 2 硬件系统方案实现

Fig. 2 Implementation of hardware system scheme

## 2 系统算法设计

### 2.1 静态背景提取算法设计

对原始图像进行静态背景提取是动物行为特征识别

的前提,传统的静态背景提取通过多帧累积取平均的方法建立背景模型  $B_k$ ,如式(1)所示。

$$B_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N B_i \quad (1)$$

式中: $N$ 表示初始化累积帧数, $B_i (i=1,2,\dots,N)$ 表示初始化累积的图像帧。传统方法的缺陷是提取的背景中会出现重影现象,影响后续的目标检测结果。本文提出了一种两帧图像的静态背景提取方法,可以有效解决提取背景出现重影的现象。从原始图像中手动提取两帧,如图 3(a)、(b)所示,两帧图像中的目标物体需要位于不同位置,保证目标物体没有重叠部分,接下来对这两帧图像互相做差处理,其中第  $a$  帧图像表示为  $f(x,y,a)$ ,第  $b$  帧图像表示为  $f(x,y,b)$ , $a$  帧与  $b$  帧做差分的计算公式表示为:

$$D_1(x,y,a) = \begin{cases} f(x,y,a) - f(x,y,b), & f(x,y,a) - f(x,y,b) \geq 0 \\ 0, & f(x,y,a) - f(x,y,b) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

同理得到  $D_2(x,y,b)$ , $D_1(x,y,b)$  与  $D_2(x,y,b)$  分别对应图 3(c)、(d),图 3(c)和(d)中没有被目标覆盖的前景已经被过滤掉,接下来将图 3(c)与(d)进行图像融合,融合后的图像对应图 3(e),利用公式表示为:

$$S_1 = \begin{bmatrix} 0 & B - d_1 \\ B - d_2 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $B$ 代表真实背景; $d_1$ 和 $d_2$ 代表图像中的两个目标,接下来将图 3(c)和(d)进行融合求均值处理得到图 3(f),利用公式表示为:

$$S_2 = \begin{bmatrix} B & \frac{B + d_1}{2} \\ \frac{B + d_2}{2} & B \end{bmatrix} \quad (4)$$

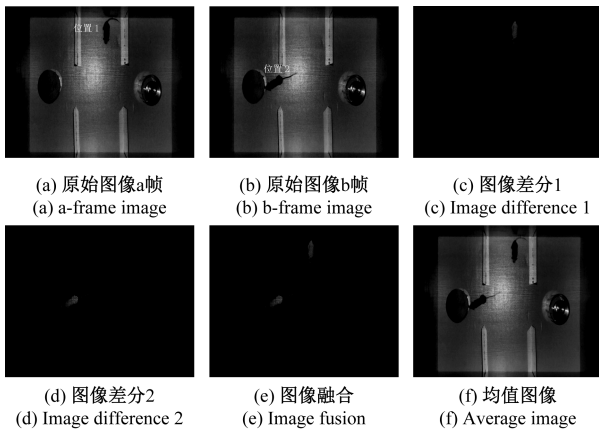


图 3 静态背景提取流程

Fig. 3 Static background extraction process

最后通过如下计算公式得到最终的静态背景图:

$$S = \frac{S_1 + 2S_2}{2} = \begin{bmatrix} B & B \\ B & B \end{bmatrix} \quad (5)$$

在动物行为学实验过程中,由于红外相机的参数、红外光源和场景等外界环境都是恒定的,实验背景不会受到外界因素干扰,所以通过该提取算法可以得到完全真实的静态背景。

## 2.2 动态目标检测跟踪算法设计

背景减除法是运动目标检测技术中的主流方法,该方法利用采集到的每一帧图像与静态背景做差分处理来检测运动目标, $f(x,y,k)$ 为当前关键帧, $b(x,y,n)$ 为静态背景图像的像素值,根据检测阈值  $T$  对差分图像进行前景与背景的分离,背景差分二值图像表示为<sup>[10]</sup>:

$$S_2(x,y,k) = \begin{cases} 1, & |f(x,y,k) - b(x,y,n)| \geq T \\ 0, & |f(x,y,k) - b(x,y,n)| < T \end{cases} \quad (6)$$

不同的静态背景会影响动态目标检测的效果,利用传统的多帧累积求平均法提取背景,会出现重影现象,通过背景减除法后,位于重影位置的目标特征信息会被减少,影响目标检测效果,而本文方法提取的静态背景,可以完全保留检测目标的特征信息。

为消除差分图像中的空洞干扰,首先采用腐蚀运算消除细小目标、孤立的点以及孤立的小区域;然后再利用膨胀处理填充目标内部的小间隙和小孔洞,强化目标的空间相关性,便于连通域的提取。

根据去除背景后的图像计算目标物的重心坐标,即, $S(x_0, y_0)$ 表示为:

$$\begin{cases} x_0 = \frac{m_{10}}{m_{00}} = \frac{\sum_{(i,j) \in S} iI(i,j)_k}{\sum_{(i,j) \in S} I(i,j)_k} = \frac{\sum_{(i,j) \in S} i}{N} \\ y_0 = \frac{m_{01}}{m_{00}} = \frac{\sum_{(i,j) \in S} jI(i,j)_k}{\sum_{(i,j) \in S} I(i,j)_k} = \frac{\sum_{(i,j) \in S} j}{N} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $N$ 表示图像中的像素个数, $I(i,j)_k$ 为 $f(x,y)_k$ 的二值图像。

得到该目标重心坐标后,实时跟踪坐标变化以重构出目标物的轨迹。利用该方法对不同场景中的运动目标进行检测跟踪,具有良好的检测跟踪效果。

## 2.3 动态目标行为反馈刺激设计

系统检测到动态目标后,提取出每一帧动态目标的位置信息,位置信息记为  $S(x_0, y_0)$ ,在显示界面中对图像标定多个感兴趣区域,记为  $C$ ,通过比较  $S$  是否在  $C$  内进行判定动态目标是否进入感兴趣区域  $C$ ,当检测到目标进入感兴趣区域后,系统会立即返回指令 `True`,反之则返回 `False`,利用该指令控制反馈刺激信号的输出,本系统采用 FPGA 对外输出反馈刺激信号,相比单片机, FPGA 有更快的执行速度,而且具有更多的管脚,可以实现多路

刺激信号输出,同时 FPGA 可以实现并行执行。系统中的 FPGA 采用 40 MHz 的基础时钟源,可以在 25 ns 完成一次单周期循环。当动态目标进入感兴趣区域, FPGA I/O 输出高电平,动态目标未进入感兴趣区域, FPGA I/O 输出低电平,对于多个感兴趣区域的目标检测和反馈刺激采用多线程模式设计,将所有的感兴趣区域整合到一起,记为  $(C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, \dots)$ , 位置信息记为  $(S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, \dots)$ , 这个设计理念与 FPGA 的设计相似,可以做到反馈刺激信号的同步输出,并且每一个感兴趣区域可以对应多路 FPGA I/O,连接多种外部刺激设备,如光刺激、声刺激、电刺激等,不同刺激互不干扰,做到完全多路并行输出,实现了单只小鼠多个区域不同部位的同步反馈刺激。

### 3 系统软件设计及算法验证

#### 3.1 系统软件设计方案

系统软件采用 LabVIEW 图形化编程语言实现,并在 LVRT 操作系统上部署图像处理算法,可以保证程序的执行效率,提高执行的稳定性,使程序运行具有确定性。具体流程如图 4 所示。

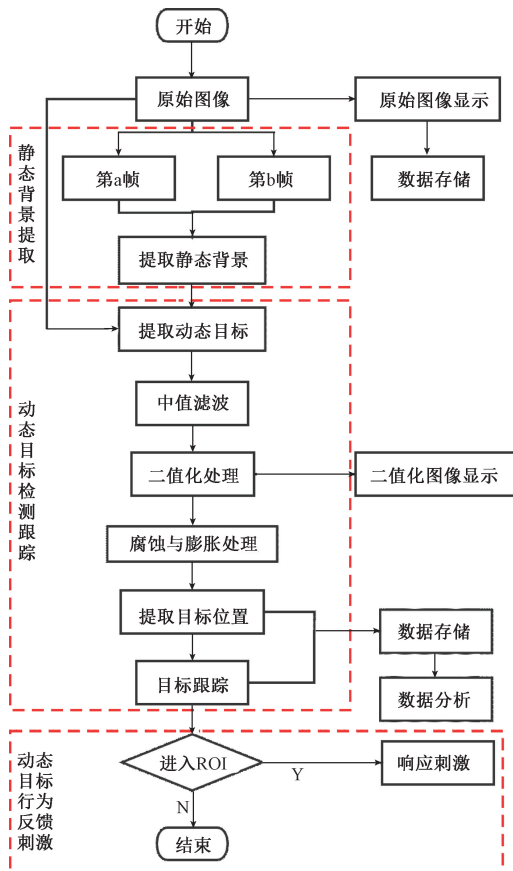


图4 系统软件流程

Fig. 4 System software flow

本系统软件需要储存原始图像、目标位置信息、感兴趣区域信息、行为信息和反馈刺激信息。目标位置信息包括小鼠实验过程中的轨迹坐标点和运动轨迹热图,轨迹坐标点由系统实时采集记录,通过绘制获得运动轨迹热图,该数据可以用来分析小鼠的运动行为;感兴趣区域信息包括区域的形状、大小和个数,用于划分小鼠的运动区域;行为信息包括小鼠在不同区域内的移动距离、移动速度和停留时间等,这些信息由系统对目标位置信息数据分析后获得,可以作为小鼠旷场实验的评价指标,分析小鼠的神经精神变化<sup>[11]</sup>;反馈刺激信息包括刺激起始时刻、刺激结束时刻和刺激时长等,利用该信息与目标位置信息和行为信息对照,深入研究小鼠受不同刺激后的学习记忆功能。

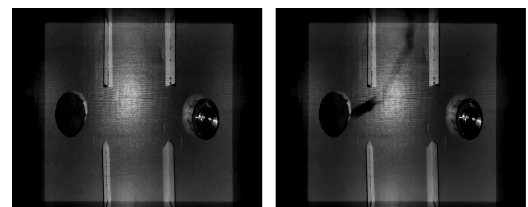
以上存储数据统一采用 TDMS 格式储存,因为该格式是一种二进制数据存储类型,适合存储海量数据,并且具有很快的存储速度,具有高采样率,可长时间存储多种不同数据,可完全满足应用要求。

#### 3.2 系统算法验证

根据上述算法在软件中实现部署后,对实验小鼠进行实际静态背景提取和运动目标检测实验。

##### 1) 静态背景提取算法验证

如图 5 所示,采用传统方法和本文方法分别对同一场景进行提取。结果显示,传统的提取背景方法(图 5(b))需要多帧图像,计算量大,速度慢,并且提取的背景会出现重影现象,影响后续的目标检测效果,而本文的静态背景提取方法(图 5(a))可以有效解决这个问题。



(a) 本文方法  
(a) This method

(b) 传统方法  
(b) Additional method

图5 静态背景提取

Fig. 5 Extracts static background

利用本文方法对不同动物行为学场景进行静态背景提取测试,图 6(a)、(b)、(c) 3 组分别为八臂迷宫场景、旷场场景和足底电极盒场景背景提取过程,每组前两张图为手动提取目标位于不同位置的两帧图像,利用本文静态背景提取算法处理这两帧图像,得到对应场景的真实静态背景,分别对应每组的第 3 张图。由图 6 可见,本文提取背景算法完全可以适用于不同的静态背景场景。

##### 2) 目标跟踪算法验证

为克服传统的多帧累积求平均法提取背景出现重影



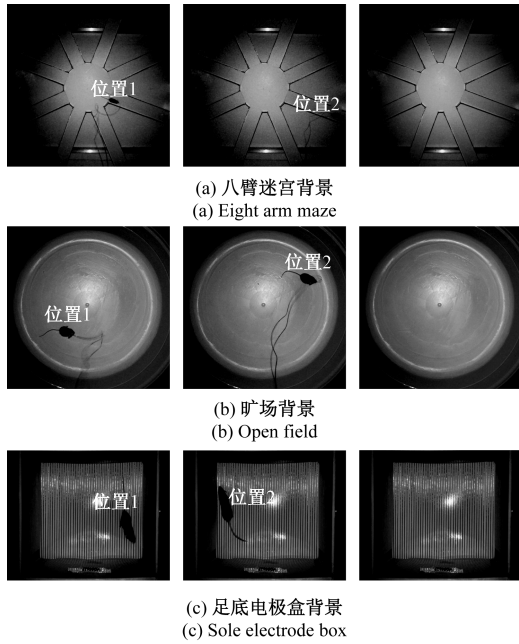


图 6 不同场景背景提取

Fig. 6 Background extraction of different scenes

现象,影响目标检测效果,采用本文设计的动态目标检测跟踪算法以验证保留检测目标的特征信息。测试结果如图 7 所示(旷场和足底电极盒每组图片从左至右分别表示:原始图、传统方法提取的静态背景、本文方法提取的静态背景、利用传统背景差分提取运动目标、利用本文背景差分提取运动目标)。

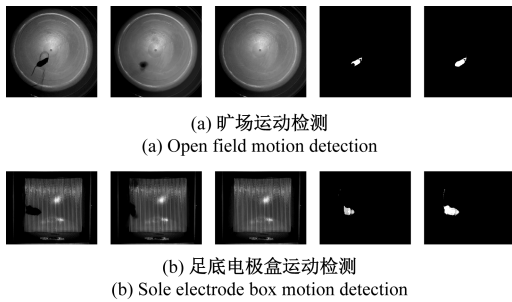


图 7 运动检测过程

Fig. 7 Motion detection process

从图 7 可以看出,本文设计的动态目标跟踪算法比传统算法提取的特征信息要多,且没有阴影,大大提升了跟踪效率。在此基础上,本文根据不同实验场景进行了测试,结果如图 8 所示,本文方法对不同场景中的运动目标具有良好的检测跟踪效果。

## 4 系统实验与分析

为验证系统的性能和可靠性,分别在三箱社交场景

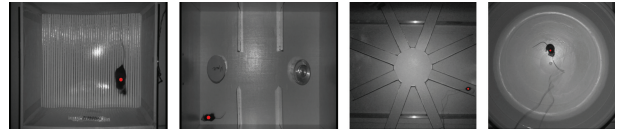


图 8 不同场景目标检测结果

Fig. 8 Target detection results in different scenes

和旷场场景中进行了实验验证。实验动物采用的 C57 black 6 实验小鼠,红外相机帧率为 100 帧/s,曝光时间 10 000  $\mu$ s。在黑暗条件下,利用高帧率红外相机对实验小鼠进行实时检测跟踪,通过系统设计的软件(如图 9 所示)进行 ROI 区域划分。当小鼠进入指定区域后,系统会快速对小鼠进行声音刺激和光刺激。



图 9 软件界面

Fig. 9 Software interface

### 4.1 系统确定性验证

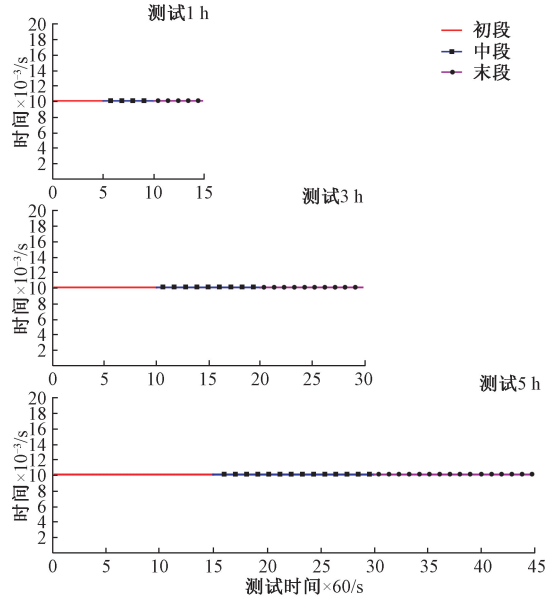
系统分别在 LVRT 系统和 Windows 系统下进行时间确定性实验,对系统程序中的图像采集部分、数据处理部分和反馈刺激输出部分进行时间监测,通过连续帧的时间差测试系统程序的执行时间,该执行时间为单个周期内数据处理部分和反馈刺激输出部分的时间总和。时间确定性实验对两组环境分别进行了 1、3 和 5 h 测试,每组中分别提取不同测试时段,1 h 测试中分别选取 0~5、20~25 和 40~45 min 段作为实验初段、中段和末段,3 h 测试中分别选取 0~10、60~70 和 120~130 min 段作为实验初段、中段和末段,5 h 测试中分别选取 0~15、100~135 和 200~215 min 段作为实验初段、中段和末段,测试统计分析、对比结果如表 1 所示,执行时间对比分析结果如图 10 所示。

如表 1、图 10(a)、(b)所示,1、3 和 5 h 三组测试中,Windows 系统下最大执行时间为 18 ms,最小执行时间为 2 ms,最大误差百分比为 80%,平均相对误差百分比分别为 14.82%、15.41% 和 15.47%,而 LVRT 环境下执行时间基本平稳,和预定的 10 ms 保持一致,究其原因是因为 Windows 系统下执行程序具有不确定性,100 帧/s 的红外相机每 10 ms 采集一张图像,采集到的图像数据会缓存到电脑内存中,程序访问图像缓存数据并做处理,

表 1 程序执行时间对比

Table 1 Comparison of program execution times

| 系统环境    | 测试时间/h | 测试阶段 | 执行时间<br>MAX/ms | 执行时间<br>Min/ms | 执行时间<br>Mean/ms | 平均<br>相对<br>误差/% |
|---------|--------|------|----------------|----------------|-----------------|------------------|
| Windows | 1      | 前段   | 17             | 3              | 12              | 14.89            |
|         |        | 中段   | 18             | 2              | 13              | 15.46            |
|         |        | 末段   | 16             | 4              | 12              | 14.12            |
|         | 3      | 前段   | 17             | 3              | 12              | 15.06            |
|         |        | 中段   | 18             | 2              | 13              | 15.93            |
|         |        | 末段   | 18             | 2              | 12              | 15.25            |
|         | 5      | 前段   | 18             | 2              | 14              | 16.35            |
|         |        | 中段   | 18             | 2              | 12              | 15.40            |
|         |        | 末段   | 17             | 3              | 12              | 14.68            |
| LVRT    | 1      | 前段   | 10             | 10             | 10              | 0                |
|         |        | 中段   | 10             | 10             | 10              | 0                |
|         |        | 末段   | 10             | 10             | 10              | 0                |
|         | 3      | 前段   | 10             | 10             | 10              | 0                |
|         |        | 中段   | 10             | 10             | 10              | 0                |
|         |        | 末段   | 10             | 10             | 10              | 0                |
|         | 5      | 前段   | 10             | 10             | 10              | 0                |
|         |        | 中段   | 10             | 10             | 10              | 0                |
|         |        | 末段   | 10             | 10             | 10              | 0                |



(b) (b) LabVIEW Real-Time系统下程序执行时间  
(b) Program execution time in LabVIEW real time system

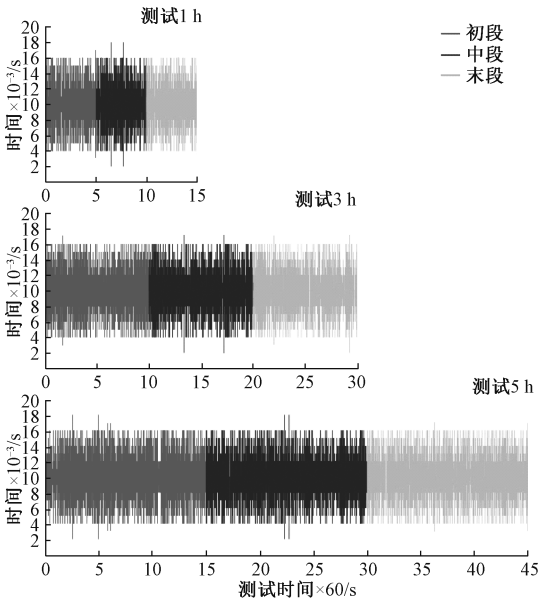
图 10 程序执行时间测试

Fig. 10 Program execution time test

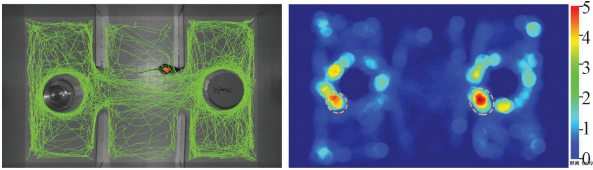
当图像处理算法在 10 ms 内没有执行完毕,第二帧图像缓存到电脑内存后,此时完成图像处理,处理时间会大于 10 ms,接下来系统执行下一帧图像的处理,由于上一帧图像数据已经在电脑内存中,此时处理时间会小于 10 ms,从而出现程序执行延时抖动现象,影响程序执行效率,在 LVRT 系统下执行程序,可以防止时间波动对执行时间的影响,提高执行效率,试验证明,在 LVRT 系统下搭载该算法比传统 Windows 系统更稳定高效,满足 100FPS 下高速稳定检测跟踪目标及反馈刺激的需求。

4.2 目标检测跟踪实验与分析

为验证本系统的检测跟踪性能,相机帧率采用 100 帧/s,分别在三箱社交、旷场 1 和旷场 2 中做了跟踪测试,测试效果如图 11 所示,其中,三箱社交实验时长为 20 min,旷场 1 实验 20 min,旷场 2 实验 7 min。实验过程中,系统会实时生成小鼠的运动轨迹,完成小鼠轨迹在线分析,如图 11(a)、(c)和(e)所示。实验结束后,系统可以自动离线分析运动轨迹数据,通过遍历小鼠在每个位置停留的次数,生成小鼠的运动轨迹热图,最后将这些轨迹原始数据保存到本地便于后续进一步分析。



(a) Windows系统下程序执行时间  
(a) Program execution time under Windows system



(a) 三箱社交实验轨迹  
(a) Three chamber social interaction test track

(b) 三箱社交实验轨迹热图  
(b) Three chamber social interaction test track heat map

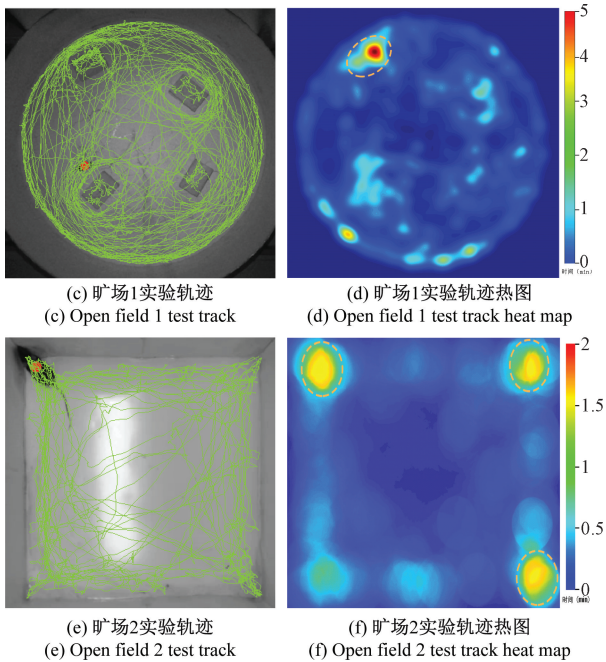


图 11 目标跟踪实验

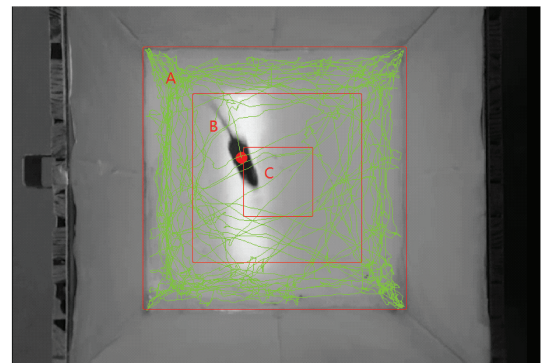
Fig. 11 Target tracking experiment

运动轨迹热图可以更直观的分析实验鼠的运动状态,探究实验鼠的活动量。图 11(b)、(d)和(f)为不同场景对应的轨迹热图,轨迹热图中颜色越偏红色就表示实验鼠在该区域停留的时间越长,颜色越偏蓝色则表示实验鼠在该区域停留的时间越短,小鼠停留时间较长的区域用虚线表示,实验过程中,轨迹跟踪稳定,热图结果与轨迹完全吻合,满足动物行为学实验中检测跟踪的需要。

#### 4.3 小鼠行为特征实验与分析

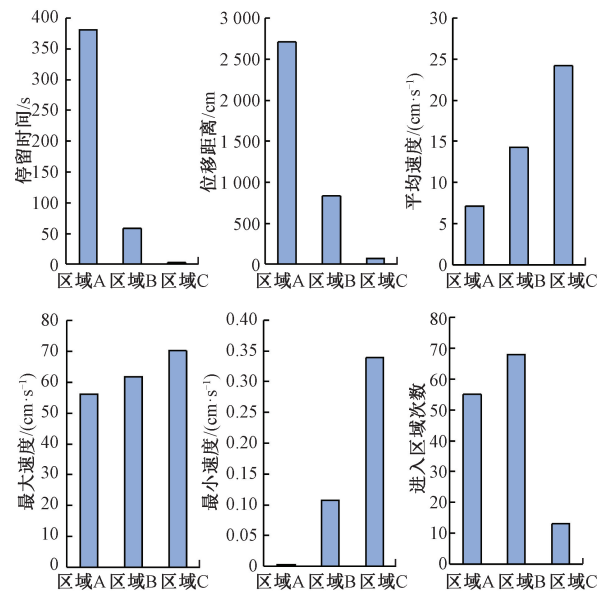
根据目标检测跟踪到的轨迹信息,系统可进一步进行 ROI 区域在线分析,如在旷场 2 实验中利用 3 区域划分法<sup>[12]</sup>,一般动物行为学实验中会将中央区域大小设定为 25%~50%旷场区域总面积<sup>[13]</sup>。本次实验,将旷场 2 分别划分 A、B、C 3 个区域,如图 12(a)所示,其中区域 C 占总面积的 7%,区域 B 占总面积的 34%,区域 A 占总面积的 59%。旷场 2 的尺寸为 40 cm(长)×40 cm(宽)×40 cm(高),本次实验,对小鼠进行在线实时检测跟踪,实验时长 7 min。实验过程中,小鼠的运动轨迹实时显示,由图 12(a)中可以看出,小鼠在区域 A 中停留时间最长,总位移最长,区域 B 次之,区域 C 中停留时间最短,总位移最短。但是仅根据图 12(a)无法评估小鼠在不同区域中的移动速度、总位移量和停留时间,所以需要小鼠的行为数据进一步分析,首先将小鼠的像素位移转换为真实位移距离,结合每一个位置的时间差就可以计算出小鼠此刻瞬时速度,每个位置的时间差由相机采样率决定,通过对比瞬时速度就可以得到小鼠在不同区域的最大速度

和最小速度,统计整个实验过程的轨迹数据,分别对 A、B、C 区域中的每一帧位移距离求和就可以计算出小鼠在不同区域中的总位移量,统计每个区域中的坐标点个数,对应相机的采样率就可以计算小鼠在每个区域的停留时间,通过总位移量和停留时间就可以计算出小鼠在不同区域内的平均移动速度,分析结果如图 12(b)所示,在该实验中,本系统可以精确提取小鼠的行为特征数据,提升实验效率,满足区域划分法下的实验鼠行为特征实验的要求。同时,利用这些数据还可以对小鼠的行为特征展开更深层次的研究<sup>[14-15]</sup>。



(a) 行为特征实验测试场景

(a) Experimental test scenarios



(b) 行为特征实验测试结果分析

(b) Analysis of experimental test results

图 12 区域划分法下小鼠行为特征实验分析

Fig. 12 Behavioral characteristics of mouse

## 5 结 论

本文利用 LVRT 实时操作系统部署高速图像处理算法,并结合 FPGA 技术,建立一种面向动物行为学实验的



高速实时检测跟踪与刺激系统。针对静态背景重影影响目标检测效果的问题,提出一种两帧图像的静态背景提取算法以得到充分的目标特征信息,同时将该图像处理算法部署在 LVRT 系统上,以实现精准时间内的目标检测、运动轨迹和划分区域内小鼠行为特征的在线分析,完成轨迹热图离线分析;经过多次实验验证,在 100 fps 采样率,系统从目标检测到刺激反馈信号输出这一整个过程的平均处理时间稳定为 10 ms,执行时间的平均相对误差较传统系统降低了 15%,做到确定性时间内的稳定输出,利用稳定输出的位置坐标在线分析小鼠的轨迹、速度和位移等多种行为学特征数据,提高动物行为学实验的准确性和实验效率。

### 参考文献

- [ 1 ] 彭羽,林赞,侯晓林,等. 亚低温治疗对脑出血模型大鼠动物行为学的影响及其机制[J]. 南方医科大学学报,2020,40(9): 1359-1364.  
PENG Y, LIN Y, HOU X L, et al. Effects and mechanisms of sub-cryogenic therapy on animal behavior in rats with cerebral hemorrhage models[J]. Journal of Southern Medical University, 2020, 40 ( 9 ): 1359-1364.
- [ 2 ] 吴宝明,卓豫. 动物行为检测技术进展及展望[J]. 中国行为医学科学,2001,10(3): 278-280.  
WU B M, ZHUO Y. Progress and prospect of animal behavior detection technology [J]. Chinese Journal of Behavioral Medicine, 2001, 10(3): 278-280.
- [ 3 ] KATO S. A quantification of goldfish behavior by an image processing system [J]. Behavioural Brain Research, 1996, 80(1-2): 51-55.
- [ 4 ] PAPADAKIS V M, PAPADAKIS I E, LAMPRIANIDOU F, et al. A computer-vision system and methodology for the analysis of fish behavior[J]. Aquacultural Engineering, 2012(46): 53-59.
- [ 5 ] 庞静洁. 基于视频的鱼类运动目标检测与跟踪方法研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2014.  
PANG J J. Research on video based fish moving target detection and tracking method [D]. Qin Huangdao: Yanshan University, 2014.
- [ 6 ] 王松,张恒义. 基于视觉的大鼠肢体运动自动分析系统[J]. 传感器与微系统,2011,30(11):102-104,107.  
WANG S, ZHANG H Y. Visual-based rat body movement automatic analysis system [J]. Sensors and Microsystems, 2011, 30(11): 102-104,107.
- [ 7 ] ZURN J B, JIANG X, MOTAI Y. Video-based rodent activity measurement using near-infrared illumination[J]. 2005 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings 2005, DOI: 10.1109/IMTC.2005.1604507.
- [ 8 ] 刘翌,周春华,邱伟. 基于 Matlab/Simulink 的新型火箭建模与仿真平台搭建[J]. 系统仿真技术,2018,14(4): 285-291.  
LIU ZH, ZHOU CH H, QIU W. A new rocket modeling and simulation platform based on Matlab/Simulink is built [J]. System Simulation Technology, 2018, 14(4): 285-291.
- [ 9 ] 张海生. FPGA 在图像处理系统设计与仿真中的应用研究[J]. 电子世界,2020(21): 155-156.  
ZHANG H SH. FPGA applied research in image processing system design and simulation, [J]. Electronic World, 2020(21): 155-156.
- [ 10 ] 李艳获,徐熙平,陈江,等. 动态特征块匹配的背景更新在运动检测的应用[J]. 仪器仪表学报,2017,38(2): 445-453.  
LI Y D, XU X P, CHEN J, et al. Application of dynamic feature block matching background update in motion detection [J]. Acta Instrumenta Sinica, 2017, 38(2): 445-453.
- [ 11 ] 郭会文,吴新宇,苏士娟,等. 移动相机下基于三维背景估计的运动目标检测[J]. 仪器仪表学报,2017,38(10): 2573-2580.  
GUO H W, WU X Y, SU SH J, et al. Moving target detection based on 3D background estimation in mobile camera [J]. Acta Instrumenta Sinica, 2017, 38(10): 2573-2580.
- [ 12 ] SEIBENHENER M L, WOOTEN M C. Use of the open field maze to measure locomotor and anxiety-like behavior in mice [J]. Journal of Visualized Experiments Jove, 2015(96), DOI:10.3791/52434.
- [ 13 ] DINA L, ANAT S, NERI K, et al. New replicable anxiety-related measures of wall vs center behavior of mice in the open field [J]. Journal of Applied Physiology, 2004, 97(1): 347-359.
- [ 14 ] ELISABET B A, HÉLIO R, MARCOS A, et al. MouBeAT: A new and open toolbox for guided analysis of behavioral tests in mice [J]. Frontiers in Behavioral Neuroscience, 2018, 12, DOI: 10.3389/fnbeh.2018.00201.
- [ 15 ] ADRIANA P, ANAMARIJA Z, BOZENA K, et al. Time matters. locomotor behavior of Lacerta viridis and Lacerta agilis in an open field maze[J]. Acta Ethologica, 2018, 21(2): 91-99.



## 作者简介



**史丽娟**, 2002 年于长春大学获得学士学位, 2009 年于长春理工大学获得硕士学位, 2016 年于长春理工大学获得博士学位。现为长春大学副教授, 主要研究方向智能控制, 康复工程。

E-mail: Shilj@ccu.edu.cn

**Shi Lijuan** received her B.Sc. degree from Changchun University in 2002, received her M.Sc. degree from Changchun Polytechnic University in 2009, received her Ph.D. degree from Changchun Polytechnic University in 2016, now she is an associate professor in Changchun University. Her main research interests include Intelligent control, rehabilitation engineering.

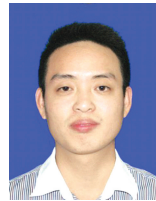


**王斯博**, 2018 年于河南工业大学获得学士学位, 现为长春大学在读硕士研究生, 主要研究方向是目标检测、图像处理等。

E-mail: wangsiibo94@163.com

**Wang Sibao** received his B.Sc. degree from Henan University of Technology in 2018, now, he is an M.Sc student in Changchun University. His main

research interest includes target detection, image processing, etc.



**吕晶** (通信作者), 分别在 2012 年和 2015 年于南通大学获得学士学位和硕士学位, 2019 年在职就读于中国科学技术大学生物医学工程学院 (苏州) 生命科学与医学部博士研究生, 现为中国科学院苏州生物医学工程技术研究所工程师, 主要研究方向是虚拟仪器技术、医疗仪器软件开发及应用。

E-mail: 539921220@qq.com

**Lyu Jing** (Corresponding author) received his B.Sc. and M.Sc. degree both from Nantong University in 2012 and 2015, In 2019, he was a Ph.D. student in the School of Biomedical Engineering (Suzhou), Division of Life Sciences and Medicine, University of Science and Technology of China. Now he is an engineer at the Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology, Chinese Academy of Sciences. His main research interests include virtual instrument technology, and development and application of medical instruments software.