

一种智能机器鼠跟踪与交互策略

王宏民¹, 王子荣^{1,2†}, 宋永博²

(1. 哈尔滨理工大学 自动化学院, 哈尔滨 150080; 2. 中国科学院自动化研究所
复杂系统管理与控制国家重点实验室, 北京 100190)

摘要: 针对一种智能机器鼠对目标生物鼠的跟踪与行为交互问题, 利用智能机器鼠的双目立体视觉系统, 对目标生物鼠进行跟踪与定位. 引入基于 Kalman 滤波的改进 Camshift 算法, 实现智能机器鼠对目标生物鼠的实时跟踪; 设计基于 SVM 的智能机器鼠认知系统, 实现系统对目标生物鼠的行为识别、行为分类和智能交互, 从而提出一种基于仿生学的智能机器鼠跟踪与交互策略. 实验结果表明, 所提出的跟踪与交互策略能够实现智能机器鼠对目标生物鼠的跟踪与智能交互, 从而证实了所提策略的可行性和有效性. 该研究可以有效地为生物学家、神经科学家和脑科学研究者等提供研究平台和辅助研究工具.

关键词: 机器人; 智能机器鼠; 仿生学; 目标跟踪; 智能交互; 双目视觉系统;

中图分类号: TP242.6

文献标志码: A

An intelligent robotic rat tracking and interaction strategy

WANG Hong-min¹, WANG Zi-rong^{1,2†}, SONG Yong-bo²

(1. School of Automation, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China; 2. Key Laboratory of Complex System and Intelligence Science, Institute of Automation of China Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: This paper mainly focuses on the tracking and interaction strategy for an intelligent robotic rat. The target rat is tracked and positioned by using the binocular vision system of the intelligent robotic rat. An improved Camshift algorithm based on Kalman filtering is introduced to realize real-time tracking and positioning of the target rat. This paper designs a cognition system of the intelligent robotic rat based on SVM to achieve behavior recognition, behavioral classification and intelligent interaction of the target rat. Accordingly, this paper proposes an intelligent robotic rat tracking and interaction strategy based on the principle of bionics. The experimental results demonstrate that the tracking and interaction strategy proposed in this paper can realize the tracking and intelligent interaction between the intelligent robotic rat and the target rat, and thus confirming the feasibility and effectiveness of the strategy. The research provides biologists, neurologists and brain scientists with a research platform and assistant research tool.

Keywords: robotics; the intelligent robotic rat; bionics; target tracking; intelligent interaction; binocular vision system

0 引言

近些年来,在机器人研究中,特别是仿生机器人的研究一直备受人们的关注.目前,仿生机器人正在向生物、医疗等方面发展,这就要求仿生机器人像真实生物一样,具备肢体、感官及脑力等综合能力,具有更高的智能化水平、更高的集成度和更优良的自主控制功能.因此,具有认知、学习、推断等能力的仿生机器人将是机器人发展的一个新阶段.

鼠类行为一直是生物学家、神经科学家和脑科

学研究者的研究重点,但由于生物鼠行为的随机性、快速性和不可控性等,使得研究屡屡受挫,他们迫切需要一种辅助工具来加速研究进度,本研究设计的智能机器鼠具有可编程、行为可再现等特点,因此可以为研究鼠类的社会交互行为提供新颖的实验方法^[1].此外,鼠类的行为和活动特点在很大方面与人类相似,因此,研究鼠类的追踪与交互问题,可以有利于于神经生理学及神经药理学研究.

收稿日期: 2017-07-11; 修回日期: 2018-01-15.

基金项目: 黑龙江省自然科学基金项目(F201310).

责任编辑: 郭戈.

作者简介: 王宏民(1962—),男,教授,博士,从事电子信息与嵌入式检测技术等研究;王子荣(1989—),男,硕士生,从事先进机器人的研究.

†通讯作者. E-mail: wangziron8@126.com.

1 智能机器鼠本体

1.1 智能机器鼠硬件结构

该智能机器鼠外形及硬件结构如图1所示,其物理尺寸为215 mm×65 mm×75 mm,与亚成年雌鼠的身体大小相似,避免了因外形原因导致其对生物鼠造成的恐惧.该智能机器鼠具有以下几个特点:1)该智能机器鼠具有15个自由度;2)该智能机器鼠各个关节的运动特点不同,因此驱动电机分为3类,直流伺服电机用于驱动腰部和轮足,舵机用于驱动头部、颈部和后腰,步进电机用于驱动前肢和前爪;3)由于该智能机器鼠具有丰富的自由度,且不同关节由不同的电机驱动,在行为实验中可以灵活地模仿生物鼠的追逐、抓刨、抬身、扭腰、攀爬、梳理等行为,能够很好地与实验室生物鼠进行行为交互.

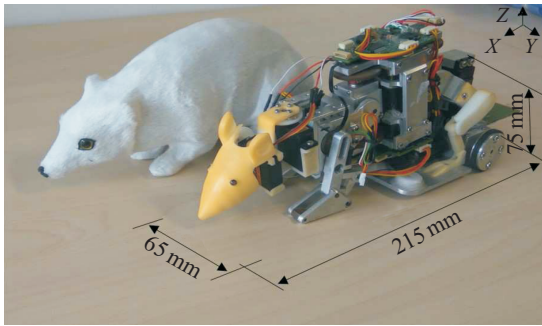


图1 智能机器鼠的外形与硬件结构

1.2 双目立体视觉系统

采用双目立体视觉系统主要有以下考虑:1)单目视觉系统无法获取目标物体的深度信息,而双目立体视觉系统可以获取物体的深度信息.2)在对运动物体(包括动物和人体形体)的测量中,图像获取是在瞬间完成的,因此双目立体视觉方法是一种更为有效的测量方法.

该智能机器鼠的双目视觉系统平行光轴结构如图2所示,利用平行光轴理论可以进行测距^[2].

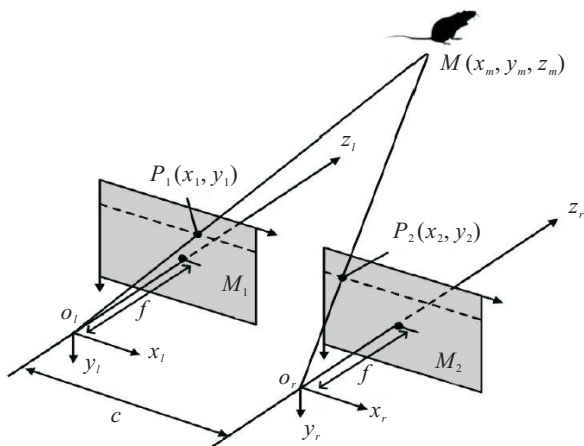


图2 智能机器鼠双目立体视觉系统

图2中: O_l 和 O_r 分别表示左、右两个摄像头的光学中心位置,即两个摄像头成像坐标系的光学原点; f 表示左右两个摄像头的焦距; c 表示基线距离; M_1 和 M_2 表示两个摄像头的成像平面,左、右两个摄像头的焦距及其他内部参数均相等,光轴与摄像机的成像平面垂直; $P_1(x_1, y_1)$ 和 $P_2(x_2, y_2)$ 表示目标物体在像平面 M_1 和 M_2 中的位置坐标.

世界坐标系以 O_l 为坐标中心,以左摄像头相机坐标系为坐标系.由相似三角形的性质,有

$$\frac{x_2 - x_1 + c}{c} = \frac{z_m - f}{z_m} = \frac{x_m - x_1}{x_m},$$

$$\frac{f}{z_m} = \frac{y_1}{y_m}. \tag{1}$$

则

$$\begin{cases} x_m = \frac{x_1 c}{x_1 - x_2}, \\ y_m = \frac{y_1 c}{x_1 - x_2}, \\ z_m = \frac{c f}{x_1 - x_2}. \end{cases} \tag{2}$$

在智能机器鼠的移动过程中,摄像头在世界坐标系中的位置是变化的,因此需要将世界坐标系转换到机器人坐标系.本文采用的方法如下:将机器人坐标系的原点定在两个摄像头的中点,其世界坐标系中的位置坐标已知,设为 $(-t_1, -t_2, -t_3)$;假设某个点在世界坐标系中的位置为 (x_w, y_w, z_w) ,则其在机器人坐标系中的位置为 $(x_w + t_1, y_w + t_2, z_w + t_3)$.

2 智能机器鼠跟踪与交互策略

2.1 跟踪策略

在进行跟踪任务之前,首先必须对该智能机器鼠的“眼”进行标定,本文采用张正友标定法^[3]进行相机标定.其次,摄像头是跟随智能机器鼠一同运动的,本文考虑了这种运动带来的影响,将采集到的图像经过OpenCV对图像进行预处理,突出有用信息、抑制无用信息,改善图像质量.在实现双目定位之前,必须使得机器鼠理解目标,即从两幅含有目标生物鼠的图像中判断目标是否存在,找出目标生物鼠的位置,然后通过立体匹配的准则^[4]匹配两幅图像中目标信息的关系.立体匹配可以获得视差图,由于对算法的实时性要求较高,选择原理简单且实时性较好的SAD立体匹配算法^[5].

SAD的计算公式为

$$C_{SAD}(x, y, d) = \sum_{(x,y) \in \omega}^n |I(x, y) - I'(x + d, y)|. \tag{3}$$

其中: $C_{SAD}(x, y, d)$ 为匹配代价, ω 为领域窗口, $I(x, y)$ 为基准图待匹配像素灰度值, d 为窗口移动位

移, $I'(x+d, y)$ 为配准图匹配像素灰度值. 匹配代价最小时对应的视差即为所求视差.

检测出目标生物鼠后, 则可以进行目标跟踪. 颜色是目标生物鼠的固有特征, 不受生物鼠运动状态的影响, 因此应用在跟踪任务中可以有好的表现. Camshift是基于颜色特征的连续自适应MeanShift算法, 基本思想是利用目标的颜色直方图模型将图像转换为颜色概率分布图, 初始化一个搜索窗的大小和位置, 并根据上一帧得到的结果自适应调整搜索窗口的位置和大小, 从而定位出当前图像中目标的中心位置. 然而, 由于缺乏有效的运动预测功能以及对目标特征的更新机制, Camshift算法容易丢失目标^[6]. Kalman滤波器是一种高效的递归性滤波器, 能够从一系列不完整的、包含噪声的测量序列中预测系统状态.

Kalman滤波器和Camshift算法的结合可以有效解决目标丢失的问题, 基于Kalman滤波的改进Camshift跟踪算法流程如图3所示.

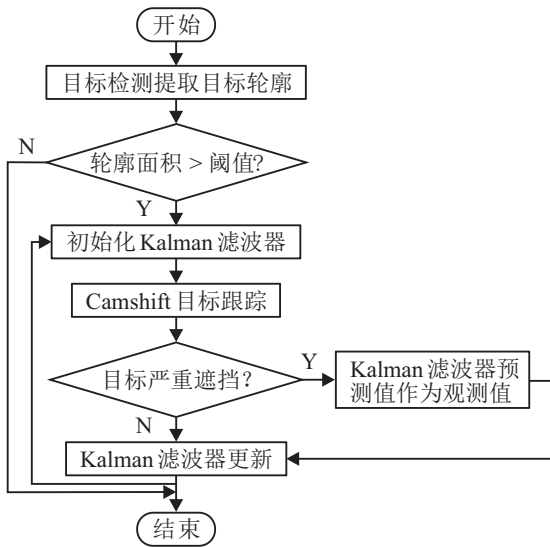


图3 基于Kalman滤波的改进Camshift跟踪算法流程

2.2 认知系统

在机器鼠与生物鼠的交互实验中, 传统人工标记的方法既耗时又考验标记者的耐心, 是一项繁琐的工作. 而且, 由于个体的差异性, 人工标记导致标记的结果存在很大的差异性. 考虑到以上的缺点, 为了自动识别和分析生物鼠的行为状态, 本文设计了一套生物鼠行为分析认知系统, 该系统的主要作用是实时分析实验生物鼠的行为状态.

实验中, 通过双目摄像头可以得到生物鼠的行为信息, 提取与大鼠行为相关的静态特征参数(体长 L 、体区 S 、体半径 R 、圆度 E 、旋转角度 θ 、椭圆率 ρ), 同时也分别提取质心 (V_{cx}, V_{cy}) 、鼻尖 (V_{nx}, V_{ny})

和尾尖 (V_{tx}, V_{ty}) 的移动速度以及旋转的角速度 ω 等动态特征参数. 这样, 特征向量就由一个 13×1 的向量 $X_1 = [L, S, R, E, \theta, \rho, V_{cx}, V_{cy}, V_{tx}, V_{ty}, V_{nx}, V_{ny}, \omega]^T$ 组成, 如图4所示.

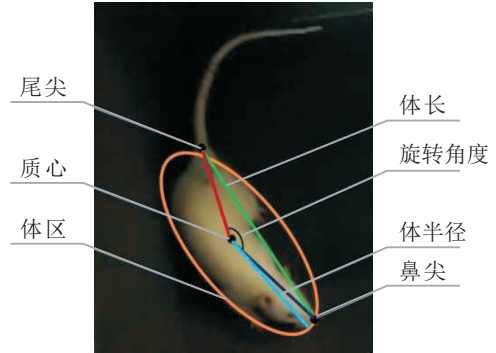


图4 生物鼠特征参数

用标记算法提取生物鼠身体轮廓 $t(x, y, t)$, 进而可以得到它的所有像素坐标, 因此它的质心可以根据以下方程计算:

$$(c_x(t), c_y(t)) = \left(\frac{M_x(t)}{S(t)}, \frac{M_y(t)}{S(t)} \right), \quad (4)$$

$$S(t) = \sum_{x,y} D(x, y, t), \quad (5)$$

$$M_x(t) = \sum_{x,y} xD(x, y, t), M_y(t) = \sum_{x,y} yD(x, y, t). \quad (6)$$

其中: $(c_x(t), c_y(t))$ 是质心, $D(x, y, t)$ 是经过处理的二值化图像, $S(t)$ 是大鼠体区像素面积. 定义尾尖为质心到尾巴的最小距离, 鼻尖为尾尖到身体轮廓的最大距离, 如下所示:

$$(t_x(t), t_y(t)) = \arg \min_{x,y} f(t(x, y, t), (c_x(t), c_y(t))), \quad (7)$$

$$(n_x(t), n_y(t)) = \arg \max_{x,y} f(t(x, y, t), (t_x(t), t_y(t))). \quad (8)$$

由式(4)、(7)和(8)可得

$$V_{cx} = \frac{\partial c_x(t)}{\partial t}, V_{cy} = \frac{\partial c_y(t)}{\partial t}; \quad (9)$$

$$V_{tx} = \frac{\partial t_x(t)}{\partial t}, V_{ty} = \frac{\partial t_y(t)}{\partial t}; \quad (10)$$

$$V_{nx} = \frac{\partial n_x(t)}{\partial t}, V_{ny} = \frac{\partial n_y(t)}{\partial t}. \quad (11)$$

体长 L 为尾尖到鼻尖的距離, 体半径 R 为质心 (V_{cx}, V_{cy}) 到身体轮廓 $t(x, y, t)$ 的最大距离, 圆度 E 为 S 和 R 的平方比例关系, θ 可以由三角形比例关系求得, 有

$$d_{(0,2)}(t) = \sqrt{(c_x(t) - t_x(t))^2 + (c_y(t) - t_y(t))^2}, \quad (12)$$

$$d_{(0,1)}(t) = \sqrt{(c_x(t) - n_x(t))^2 + (c_y(t) - n_y(t))^2}, \quad (13)$$

$$d_{(1,2)}(t) = \sqrt{(n_x(t) - t_x(t))^2 + (n_y(t) - t_y(t))^2}, \quad (14)$$

$$\theta(t) = \arccos \frac{d_{(0,1)}^2(t) + d_{(0,2)}^2(t) - d_{(1,2)}^2(t)}{2d_{(0,1)}(t)d_{(0,2)}(t)}, \quad (15)$$

$$\omega(t) = \frac{\partial \theta(t)}{\partial t}. \quad (16)$$

根据生物鼠身体轮廓 $t(x, y, t)$,能够找到一个合适的椭圆,设椭圆的长轴为 $e_b(t)$,短轴为 $e_a(t)$,则椭圆率 $\rho(t) = \frac{e_a(t)}{e_b(t)}$.

关于SVM大鼠行为分类问题,可以通过构建 N 维超平面解决非线性可分问题,为此使用了核函数的功能.在本系统中,考虑到LIBSVM^[7]所述的优点,使用了RBF(Radial basis function)核函数 $K(x, x_i) = e^{-\gamma|x-x_i|^2}$,RBF核函数有两个参数 C 和 γ .对SVM分类器的参数空间进行网格搜索,用5-fold交叉验证来选择最好的分类器,根据5-fold交叉验证,找到在训练生物鼠行为特征集上最好的参数 $C = 2$ 、 $\gamma = 0.07$.采用有监督学习的方法进行样本训练与准确率计算,经过不断训练,采用本文的特征,生物鼠行为识别的准确率可达98%以上,比起传统的手工标注并分析大鼠行为的方法,这种分类方法的准确度和效果都大大提高.

2.3 智能交互策略

在生物鼠的行为交互实验中,一个早期的研究发现,更加积极友好的同种伙伴会使大鼠本身也变得更加积极友好^[8-9].如果正常生物鼠与一只具有恐惧心理疾病的同伴进行交互,会使正常生物鼠患得恐惧心理疾病,变成心理疾病动物模型,这种类型的实验也叫做“心理应激实验”^[10].因此,可以通过控制同伴的行为状态(友好、中立、恐惧等)来改变大鼠的社会活动.本研究采用的智能机器鼠发挥同伴的作用,通过控制智能机器鼠输出相应的行为状态,进而与实验生物鼠进行智能交互.

通过长期观察,对生物鼠的3种行为状态(恐惧、中立和友好)进行了细致的研究.从机器鼠^[11]的反馈控制中获得灵感:其中一只机器鼠是掠食者并试图从当前位置 $(x(t), y(t))$ 移动到一个目标位置 (x', y') ,对移动过程中的到达角无约束,规定 t 时刻的转向角速度为

$$\omega(t) = -k \sin \left[\frac{1}{2} \theta(t) - \varphi(t) \right]. \quad (17)$$

其中: $k_1 > 0$ 是一个恒定的增益因子, $\theta(t)$ 是掠食者

相对于 X 轴的航向, $\varphi(t) = \tan^{-1} \frac{y(t) - y'}{x(t) - x'}$ 是转向角度.

类似地,可以将机器鼠接近生物鼠的过程看作是对目标质点的追踪,目标质点在世界坐标系中的 z 方向高度恒定,因此可以向 XOY 平面投影,进而通过式(17)获得机器鼠的转向角速度.定义 $v_r(t)$ 为 t 时刻生物鼠的移动速度, $v_{rb}(t)$ 为 t 时刻机器鼠的移动速度; d 为机器鼠与生物鼠之间的距离, d 可以通过双目视觉测距原理获得.每种状态下,测得生物鼠的移动速度,则机器鼠的移动速度由以下公式计算得出.

1) 生物鼠处于恐惧状态:智能机器鼠不停地追逐生物鼠并攻击它,当智能机器鼠与生物鼠之间的距离 $d \leq 0.1$ m时,智能机器鼠开始来来回回地撞击生物鼠的背部;当智能机器鼠与生物鼠之间的距离 $d > 0.1$ m时,智能机器鼠会高速追逐生物鼠.

$$v_{rb}(t) = \begin{cases} v_r(t) + k_1(d - 0.2), & d > 0.2 \text{ m}; \\ v_r(t) + 0.2, & 0.2 \text{ m} \geq d > 0.1 \text{ m}; \\ v_r(t) \pm 0.1, & d \leq 0.1 \text{ m}. \end{cases} \quad (18)$$

其中 $k_1 > 0$ 是恒定增益,给定 $k_1 = 0.8$.

2) 生物鼠处于中立状态:当 $d > 0.3$ m时,智能机器鼠会跟随生物鼠;当 $0.3 \text{ m} \geq d > 0.2 \text{ m}$ 时,智能机器鼠在生物鼠周围慢慢移动.

$$v_{rb}(t) = \begin{cases} v_r(t) + k_2(d - 0.3), & d > 0.3 \text{ m}; \\ k_3 v_r(t), & 0.3 \text{ m} \geq d > 0.2 \text{ m}; \\ 0, & d \leq 0.2 \text{ m}. \end{cases} \quad (19)$$

其中 $k_2 > 0$ 和 $k_3 > 0$ 均是恒定增益,给定 $k_2 = 0.5$, $k_3 = 0.7$.

3) 生物鼠处于友好状态:智能机器鼠会模仿生物鼠的行为,如果智能机器鼠与生物鼠之间的距离 $d \leq 0.3$ m,当生物鼠站立或梳理或旋转时,智能机器鼠也对应模仿生物鼠的行为.

$$v_{rb}(t) = \begin{cases} v_r(t) + k_4(d - 0.3), & d > 0.3 \text{ m}; \\ k_5 v_r(t), & 0.3 \text{ m} \geq d > 0.2 \text{ m}; \\ 0, & d \leq 0.2 \text{ m}. \end{cases} \quad (20)$$

其中 $k_4 > 0$ 和 $k_5 > 0$ 均是恒定增益,给定 $k_4 = 0.5$, $k_5 = 1$.

3 实验结果

3.1 跟踪与交互实验

智能机器鼠与目标生物鼠的移动速度如图5所示.开始跟踪时,因为智能机器鼠离目标生物鼠的距离较远,所以智能机器鼠会以较快的速度朝目标生物鼠移动;当智能机器鼠与目标生物鼠的距离 $d \leq 0.2$ m时,智能机器鼠开始放缓速度,此时通过大脑计

算并预测目标生物鼠的移动速度和移动方向,智能机器鼠开始学习目标生物鼠运动,这时智能机器鼠的移动速度和移动方向完全取决于目标生物鼠的移动速度和移动方向;当智能机器鼠与目标生物鼠的距离 $d \leq 0.1\text{m}$ 时,智能机器鼠开始观察目标生物鼠的行为状态,并做出交互行为。

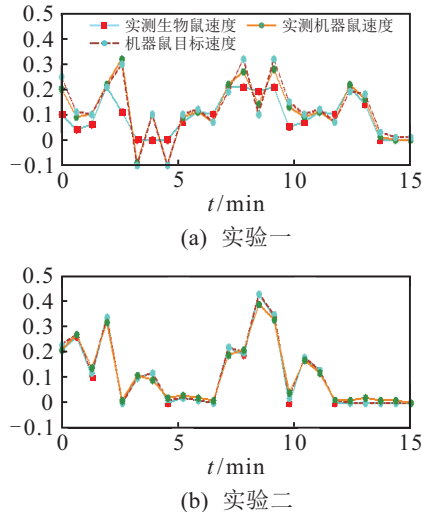


图5 交互实验中智能机器鼠与目标生物鼠的移动速度

3.2 行为识别

连续进行两次实验,共进行30 min. 在跟踪的过程中,智能机器鼠与目标生物鼠共交互了14次. 其中:认知系统识别到目标生物鼠恐惧状态6次,友好状态3次,中立状态5次. 在实验一中,智能机器鼠认知系统识别到目标生物鼠恐惧状态3次,中立状态3次,友好状态1次. 在实验二中,智能机器鼠认知系统识别到目标生物鼠恐惧状态3次,中立状态2次,友好状态2次. 认知系统行为识别结果如图6所示。



图6 认知系统行为识别结果

4 结论

本文提出了一种基于仿生学的智能机器鼠的跟踪与交互策略:采用双目立体视觉模仿真实生物鼠的眼睛,对目标生物鼠进行跟踪与定位,同时引入认知系统与交互策略,对目标生物鼠进行行为识别与分析,并控制机器鼠输出对应的行为. 通过实验结果可以看出,智能机器鼠运动轨迹的曲率与目标生物鼠运动轨迹的曲率相近,这充分说明了本文跟踪策略的有效性和控制策略的可行性;从行为识别结果可以看出,智能机器鼠认知系统可以有效识别生物鼠的3类

基本行为,并控制智能机器鼠输出对应的交互行为,这充分说明该认知系统的可行性和有效性。

参考文献(References)

- [1] Webb B. Biorobotics: Methods and applications[J]. Industrial Robot, 2002, 29(3): 287-288.
- [2] 胡天翔, 郑加强, 周宏平, 等. 基于双目视觉的树木图像测距方法[J]. 农业机械学报, 2010, 41(11): 158-162. (Hu T X, Zheng J Q, Zhou H P, et al. Measurement method of depth information of tree images based on binocular vision[J]. Trans of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(11): 158-162.)
- [3] Zhang Z. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations[C]. Proc of the 7th IEEE Int Conf on Computer Vision. Kerkyra: IEEE, 1999: 666-673.
- [4] 鞠芹, 安平, 张倩, 等. 基于多目立体匹配的深度获取方法[J]. 计算机工程, 2010, 36(14): 174-176. (Ju Q, An P, Zhang Q, et al. Depth extraction method based on multi-view stereo matching[J]. Computer Engineering, 2010, 36(14): 174-176.)
- [5] 岳陈平, 孟丽娅. 基于SAD算法的立体匹配的实现[J]. 微型机与应用, 2013, 32(6): 41-43. (Yue C P, Meng L Y. Implementation of the stereo matching based on SAD algorithm[J]. Application of Electronic Technique, 2013, 32(6): 41-43.)
- [6] 侯杰虎. 基于Kalman滤波器的视频运动目标跟踪算法研究[D]. 成都: 成都理工大学信息科学与技术学院, 2012. (Hou J H. Research on video moving target tracking based on Kalman filter[D]. Chengdu: College of Information Science & Technology, Chengdu University of Technology, 2012.)
- [7] Chang C C, Lin C J. LIBSVM: A library for support vector machines[J]. ACM Trans on Intelligent Systems and Technology, 2011, 2: 1-27.
- [8] Pellis S M, McKenna M M. Intrinsic and extrinsic influences on play fighting in rats: Effects of dominance, partner's playfulness, temperament and neonatal exposure to testosterone propionate[J]. Behavioural Brain Research, 1992, 50(1/2): 135-145.
- [9] Varlinskaya E I, Spear L P, Spear N E. Social behavior and social motivation in adolescent rats: Role of housing conditions and partner's activity physiolo[J]. Physiology & Behavior, 1999, 67(4): 475-478.
- [10] Endo Y, Shiraki K. Behavior and body temperature in rats following chronic foot shock or psychological stress exposure[J]. Physiology & Behavior, 2000, 71(3/4): 263-268.
- [11] Swain D T, Couzin I D, Leonard N E. Real-time feedback-controlled robotic fish for behavioral experiments with fish school proc[J]. Proc of the IEEE, 2012, 100(1): 150-163.