

机器鼠与生物鼠智能交互控制系统

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: 针对鼠类行为的不可控性、不可预测性和不可重现性等问题, 提出一种可控的、可预测的和可重现的智能交互控制系统. 通过控制自主设计的双目机器鼠输出不同的行为状态(恐惧、中立、友好)来刺激实验生物鼠, 研究生物鼠的回应行为. 该系统采用双目视觉算法, 可以有效获取实验鼠的三维立体信息, 结合一套高效的支持向量机图像分类处理算法, 可以准确地分析实验鼠的行为状态, 然后通过调整机器鼠的行为来改变实验鼠的行为状态, 实现智能交互. 机器鼠与生物鼠交互实验证明: 该系统可以实时捕获生物鼠的行为状态, 并且通过控制机器鼠的输出行为, 定向改变生物鼠的行为. 该系统可以为生物学家、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; 控制系统; 智能交互; 机器鼠; 双目视觉; 图像处理

中图分类号: TP 308

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2018)01-0064-09

doi: 10.11936/bjtxb2017030018

Control System for Intelligent Interactions Between a Robotic Rat and a Biological Rat

WANG Hongmin¹, WANG Zirong^{1,2}, SONG Yongbo²

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

Abstract: To address the uncontrollability, unpredictability and non reproducibility of rat's behavior, an intelligent interactive control system was proposed. Different behaviors (stressful, neutral, friendly), which aims to stimulate a laboratory rat were generated by controlling a self-designed robotic rat with binocular vision. The response of a rat to a robotic rat was studied. The three-dimensional information of rats were effectively obtained based on binocular vision system. The experimental rat's behavioral characteristics was accurately analyzed by combining with an efficient image classification processing algorithm, and the behaviors of rats were modulated by controlling the behavior of the robotic rat, so as to achieve intelligent interaction. The social interaction experiments between the laboratory rats and the robotic rat show that the system is able to capture rat's behavioral characteristics in real time and direct rat's behavior by controlling the behavior of robotic rats. The system provides biologists, neurologists and brain scientists with a research platform and an assistant research tool.

Key words: robot; control system; intelligent interaction; biorobotic rat; binocular vision; image processing

收稿日期: 2017-03-10

基金项目: 黑龙江省自然科学基金资助项目(F201310)

作者简介: 王宏民(1962—), 男, 教授, 主要从事电子信息与嵌入式检测技术方面的研究, E-mail:952889978@qq.com

近年来,仿生学和仿生机器人在研究动物行为学、动物心理学和行为生物学方面做出突出贡献,仿生机器人在研究动物行为、临床试验和开发潜在的生物算法方面提供了一套有效的工具. 出于不同的研究目的,各种哺乳动物、脊椎动物和无脊椎动物需要辅助研究工具,为了全面利用仿生机器人的优势,各种仿生机器人被开发出来,例如机器蟑螂^[1]已经成功地模拟了集体决策的过程. 蜜蜂机器人^[2]能够重现蜜蜂跳舞的过程. 机器公鸡^[3]能够自动地记录实验的视频和音频数据,检测雏鸡和机器人的位移,检测其鸣叫情况,并实时提供这些数据. 机器斑马鱼^[4-5]能够很好地与斑马鱼互动,并证实斑马鱼非常偏好与机器鱼一起表演摆尾动作等.

机器鼠是仿生机器人大家庭中的一员,模仿生物鼠的身体机构、运动原理和行为方式而设计的,使用嵌入式微控制器、传感器和机电运动部件构成的一种智能行走装置. 目前,国内外均有对机器鼠的研究,出于不同的应用价值,各种外形的机器鼠被设计出来,例如四轮的、玩具模型的和仿生的,但很少设计基于交互式的仿生机器鼠,由于其多自由度、灵活性要求高和小型化等,使得设计和加工难度都很高. 国内外对仿生机器鼠的研究均局限于走迷宫式的“四轮结构”,国际电脑鼠走迷宫竞赛^[6]每年都要举办1次,每年都有无数参赛者踊跃报名参加,展示出各种各样的机器鼠. 这些机器鼠结构小巧,移动速度快,具备学习和记忆的能力,可以完成在迷宫中前进、转弯、搜寻等行为,并且能在很短的时间找到规定的目标,这种结构的机器鼠在“搜索比赛”“智能搜索”“灾难环境探测”等有重要用途. 这种机器鼠在某种程度上符合仿生学的原理,但在生物方面由于其结构简单、自由度不多等缺点,无法模拟生物鼠的一些复杂动作,更无法与生物鼠进行交互实验.

社交交互常被作为评估人类与动物精神疾病症状的重要指标之一^[7]. 已经证明,如果正常生物鼠与一只恐惧心理疾病的同伴进行交互,会使正常生物鼠患上恐惧心理疾病,变成心理疾病动物模型,这种类型的实验叫作“心理应激实验”^[8]. 在本文中,机器鼠与生物鼠的智能交互,可以更好地研究动物的行为,发现潜在的精神疾病和心理疾病的治疗方案,以及研制潜在的疾病药物. 鼠类行为一直是生物学家、神经科学家和脑网络研究者的研究载体,但由于生物鼠行为的随机性、快速性、不可控性、不可预测性和不可复现性等,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,本实验用到

的仿生机器鼠具有丰富的自由度,能够灵活地模仿生物鼠的绝大多数行为. 因此,本研究可以为生物学家研究动物行为和临床实验提供工具,为开发潜在的生物学习算法提供实验平台.

大鼠行为学表明,大鼠不同的行为动作和活动水平可以传递不同的行为状态(友好、中立、恐惧等). 本文主要研究2个目标的社会交互,过去也有一些研究同种个体如何影响目标生物鼠的社会交互实验^[9-11],但由于各体之间的差异,真实生物鼠之间的社会交互很难控制和评估,在这种情况下,在测试不同目标生物鼠时,仿生机器鼠因可编程、可控、可配置等特征,可以充分发挥其优势.

1 机器鼠本体结构

1.1 机器鼠硬件结构

机器鼠的外形及硬件结构如图1所示,该机器鼠的物理尺寸为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. 该机器鼠有如下几个特点: 1) 该机器鼠有15个自由度,由10个电机、3个舵机驱动; 2) 由于该机器鼠各个关节的运动特点不同,因此该机器鼠的驱动电机分为3类,其中6个直流伺服电机用于驱动腰部和轮足,3个舵机用于驱动头部、颈部和后腰,4个直流微电机用于驱动前肢和前爪; 3) 由于该机器鼠具有丰富的自由度而且不同关节由不同的电机驱动,因此在机器鼠的社交互动行为实验中其可以灵活地模仿生物鼠的抬头、摆头、抓刨、抬身、扭腰、攀爬、追逐等行为,能够很好地与实验室生物鼠进行行为交互.

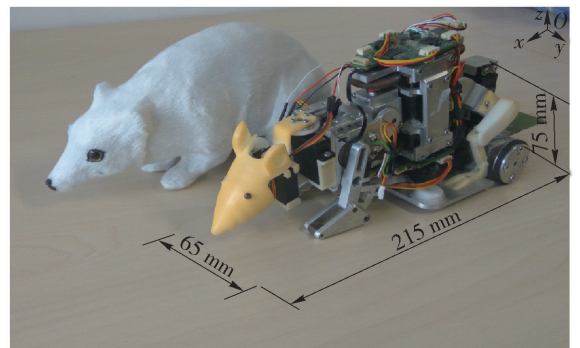


图1 机器鼠外形与硬件结构

Fig. 1 Overall dimension and hardware structure of the robotic rat

1.2 双目视觉系统

双目视觉是机器视觉的一种重要形式,是基于视差原理并利用成像设备从不同的位置获取被

测物体的2幅图像,通过计算图像对应点间的位置偏差,来获取物体三维几何信息的方法.采用双目视觉系统主要有以下考虑:1)采用传感器的方式不符合本文仿生学的研究思路,而双目视觉系统可以模仿生物鼠的眼睛去感知周围环境和物体;2)单目视觉系统无法获取物体的深度信息,而双目视觉系统可以获取物体的深度信息;3)对运动物体(包括动物和人体形体)测量中,由于图像获取是在瞬间完成的,因此立体视觉方法是一种更有效的测量方法.

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^[12].图中点 O_1 和 O_2 分别是左右2个摄像头的光学中心位置,即2个摄像头成像坐标系的光学原点, f 为左右2个摄像头的焦距, c 表示基线距离, M_1 和 M_2 为2个摄像头的成像平面,左、右2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,2个摄像头的相机坐标系的 x 轴重合, y 轴相互平行, z 轴相互平行,因此将左摄像头沿着其 x 轴方向平移一段距离 c (称为基线, baseline)后与右摄像头重合, $P_1(x_1, y_1)$ 、 $P_2(x_2, y_2)$ 分别表示目标物体在像平面 M_1 、 M_2 中的位置坐标.世界坐标系的原点 O 与左摄像头成像坐标系的光学原点 O_1 重合,世界坐标系以 O_1 为坐标中心,左摄像头相机坐标系为坐标系.由相似三角形的性质,有

$$\frac{x_2 - x_1 + c}{c} = \frac{z_m - f}{z_m} = \frac{x_m - x_1}{x_m}, \frac{f}{z_m} = \frac{y_1}{y_m} \quad (1)$$

则

$$x_m = \frac{x_1 c}{x_1 - x_2}, y_m = \frac{y_1 c}{x_1 - x_2}, z_m = \frac{cf}{x_1 - x_2} \quad (2)$$

实验之前,必须对该机器鼠的双“眼”进行标定,本文采用一种新的相机标定法进行相机标定.首先,采用张正友标定法获取摄像头的内参数和外参数^[13];其次,由于移动过程中摄像头在世界坐标系中的位置是变化的,因此获取摄像头的外参数之后需要把世界坐标系转换到机器人坐标系,方法如下:

将机器人坐标系的原点定在2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 (x_w, y_w, z_w) ,那么其在机器人坐标系中的位置为 $(x_w + t_1, y_w + t_2, z_w + t_3)$.

对双目摄像头标定完成后,一个重要的步骤是对图像进行特征提取.特征提取的目的是要获取匹

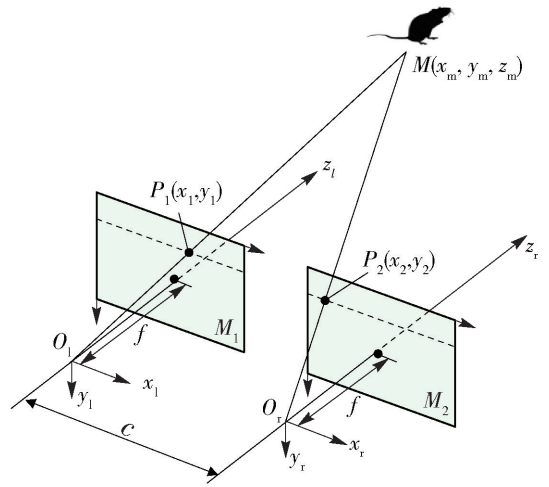


图2 机器鼠双目视觉系统

Fig. 2 Binocular vision system of the robotic rat

配赖以进行的图像特征,图像特征的性质与图像匹配的方法选择有着密切的联系.图像匹配是指将三维空间中一点 $M(x_m, y_m, z_m)$ 与左、右摄像头的成像面 M_1 和 M_2 上的像点 P_1 和 P_2 对应起来.在完成立体视觉系统的摄像机标定和图像匹配工作以后,就可以进行被测对象表面点的三维信息恢复.图3所示为双目视觉系统处理流程图.

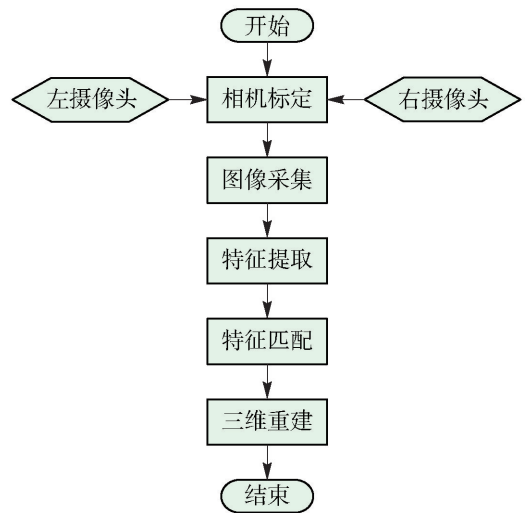


图3 双目视觉系统处理流程

Fig. 3 Processing flow chart of the binocular vision system

2 智能交互控制系统设计

2.1 系统组成

该智能交互控制系统由生物鼠、机器鼠和个人计算机三大部分组成.生物鼠是该系统必不可少的研究对象,生物鼠的行为、活动直接影响该系统可靠性、有效性.机器鼠是该系统的主体和执行体,通过

输出不同的肢体动作直接影响和改变生物鼠的行为. 个人计算机是该系统的核心,个人计算机内含有一套高效的图像分类算法,可以对生物鼠的行为进行分类和识别,从而发出命令给机器鼠,机器鼠输出对应的行为. 该系统组成框图如图4所示.

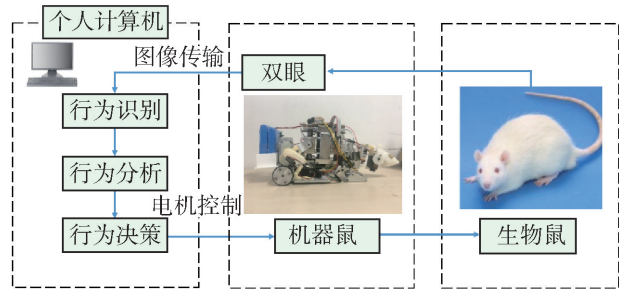


图4 系统组成框图

Fig. 4 System composition block diagram

2.2 闭环与开环控制

为实现机器鼠以可预测的方式改变生物鼠的行为状态,该控制系统采用闭环与开环控制结合的控制方式. 闭环控制下,机器鼠输出行为刺激生物鼠,系统识别生物鼠的行为状态,调整机器鼠的输出行为以回应生物鼠. 闭环的控制目标是实现机器鼠与生物鼠智能交互;开环控制下,机器鼠持续输出指定的行为状态,观察生物鼠的行为. 开环的控制目标是实现系统的可重复性. 智能交互控制系统的控制方式如图5所示.

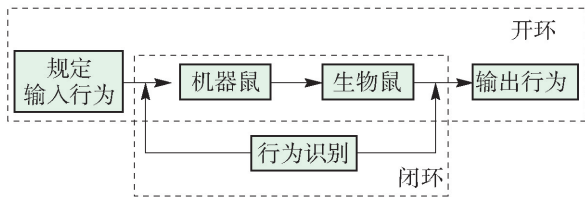


图5 智能交互控制系统的控制方式

Fig. 5 Control mode of robot-rat interaction system

2.3 控制方法

为实现系统的可控性,机器鼠的输出行为必须可控,并且机器鼠应该能够自动接近生物鼠,实现交互目的. 系统的可预测性是通过控制机器鼠的输出行为预测生物鼠的输出行为来体现的. 系统的可重复性表现为:为实现生物鼠某种行为重复出现,机器鼠必须持续输出某种行为,以达到定向改变生物鼠行为的目的.

通过长期观察,对生物鼠的3种行为状态(恐惧、中立和友好)进行了研究,每种行为状态下,机器鼠输出其中一种状态行为,预测并观察对应生物

鼠的行为. 从机器鼠^[14]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') ,移动过程中对到达角无约束,规定 t 时刻的转向角速度为

$$\omega(t) = -k \sin \left[\frac{1}{2} (\theta(t) - \psi(t)) \right] \quad (3)$$

式中: $k > 0$ 为一个恒定的增益因子; $\theta(t)$ 为掠食者相对于 x 轴的航向; $\psi(t) = \arctan \frac{y(t) - y'}{x(t) - x'}$ 为转向角度.

类似地,机器鼠在接近生物鼠过程中,可以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,进而可以通过式(3)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; $v_{rh}(t)$ 为 t 时刻机器鼠的移动速度; d 为机器鼠与生物鼠的距离, d 可以通过双目视觉测距原理获得. 每种状态下,机器鼠的移动速度可以由式(4)~(6)计算出来.

恐惧状态:机器鼠不停地追逐生物鼠并攻击它,当机器鼠与生物鼠的距离 $d \leq 0.1$ m时,机器鼠开始来回回地撞击生物鼠的背部,当机器鼠与生物鼠的距离 $d > 0.1$ m时,机器鼠会高速追逐生物鼠. 机器鼠的移动速度为

$$v_{rh}(t) = \begin{cases} v_r(t) + t_1(d - 0.2), & d > 0.2 \text{ m} \\ v_r(t) + 0.2, & 0.2 \text{ m} \geq d > 0.1 \text{ m} \\ v_r(t) \pm 0.1, & d \leq 0.1 \text{ m} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $k_1 > 0$ 为恒定增益; $v_r(t)$ 为生物鼠的移动速度. 给定 $k_1 = 0.8$,测得生物鼠的移动速度,机器鼠的移动速度就可以计算出来. 如图6(a)所示.

中立状态:当 $d > 0.3$ m时,机器鼠会跟随生物鼠;当 $0.3 \text{ m} \geq d \geq 0.2$ m时,机器鼠在生物鼠周围慢慢移动. 机器鼠的移动速度为

$$v_{rh}(t) = \begin{cases} v_r(t) + t_2(d - 0.3), & d > 0.3 \text{ m} \\ k_3 v_r(t), & 0.3 \text{ m} \geq d \geq 0.2 \text{ m} \\ 0, & d < 0.2 \text{ m} \end{cases} \quad (5)$$

式中 $k_2 > 0$ 和 $k_3 > 0$,为恒定增益,给定 $k_2 = 0.5$, $k_3 = 0.7$,测得生物鼠的移动速度,机器鼠的移动速度就可以计算出来. 如图6(b)所示.

友好状态:机器鼠会模仿生物鼠的行为,如果机器鼠与生物鼠的距离 $d \leq 0.3$ m,当生物鼠站立或梳理或旋转时,机器鼠也对应模仿生物鼠的行为. 其他情况,机器鼠仅仅保持跟随生物鼠. 机器鼠的移

动速度为

$$v_{rh}(t) = \begin{cases} v_r(t) + t_4(d - 0.3), & d > 0.3 \text{ m} \\ k_5 v_r(t), & 0.3 \text{ m} \geq d \geq 0.2 \text{ m} \\ 0, & d < 0.2 \text{ m} \end{cases} \quad (6)$$

式中 $k_4 > 0$ 和 $k_5 > 0$, 为恒定增益, 给定 $k_4 = 0.5$, $k_5 = 1$, 测得生物鼠的移动速度, 机器鼠的移动速度就可以计算出来. 如图 6(c) 所示.

在 3 种状态下, 机器鼠的移动速度由生物鼠移动速度决定, 生物鼠移动得快, 相应地机器鼠也移动得快, 生物鼠移动得慢, 机器鼠也随之移动得慢. 恐惧状态下, 机器鼠快速追逐生物鼠并攻击生物鼠, 友好状态下, 机器鼠缓慢跟随生物鼠并模仿生物鼠的行为.

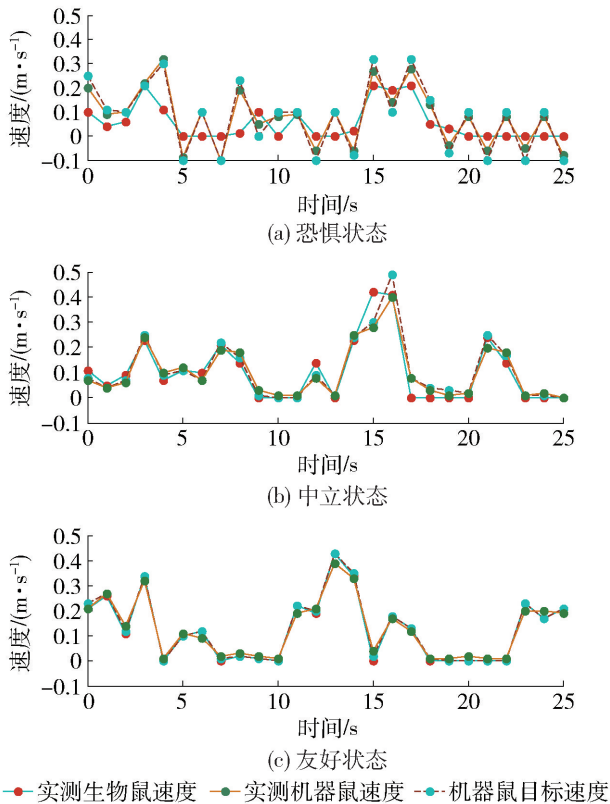


图 6 交互过程中机器鼠与生物鼠的移动速度

Fig. 6 Speed of the robotic rat and rats during interaction

2.4 智能交互

为了自动识别和分析生物鼠的行为状态, 为机器鼠设计了一套图像分类处理算法. 重点关注生物鼠的一些基本动作, 如移动、站立、旋转和梳理等. 关于移动, 可以简单地识别为质心的移动速度, 这里不做详细的讨论. 对其他行为的识别, 图像分类处理的基本算法用来提取与大鼠行为相关的静态参数 (体长 l 、体区 S 、体半径 R 、圆度 E 、旋转角度 θ 、椭圆

率 ρ) 等. 基于质心、尾点、鼻尖的瞬时位置, 分别计算出它们的运动速度和旋转角速度, 这属于运动参数. 这些特征参数作为支持向量机 (support vector machine, SVM) 进行分类的输入向量. 关于 SVM 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^[15] 所述的优点, 使用了径向基函数 (radial basis function, RBF) 核函数 $K(x, x_i) = e^{-\gamma|x-x_i|^2}$, RBF 核函数有 2 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, 找到了在训练生物鼠行为特征集上最佳参数 $C = 2$, $\gamma = 0.07$. 使用这种分类方法, 比起传统的手工标注并分析大鼠行为, 准确度和效果都大大提高.

系统获取的图像信息, 不仅反映了机器鼠与生物鼠的动态互动, 也反映了机器鼠与所处环境的动态调整. 在机器鼠与生物鼠交互的过程中, 机器鼠的主要任务是输出与生物鼠相对应的行为, 来与之交互. 系统可以识别生物鼠的位置和行为, 机器鼠根据系统识别到的生物鼠的行为来调整自己的行为, 做出相应动作. 具体来说, 图像分类处理算法获取生物鼠的运动参数 m_r (如身长、旋转角速度和运动速度), 利用 SVM 方法进行行为分类, 依靠分类得到的生物鼠的行为 b_r 来调整机器鼠的运动参数 m_{rh} . 此外, 图像处理过程也实时计算生物鼠和机器鼠的运动参数 m 和他们之间的运动关系 (如机器鼠与生物鼠之间的距离). 因此, 机器鼠能够像个体生物鼠一样适应环境. 智能交互过程如图 7 所示.

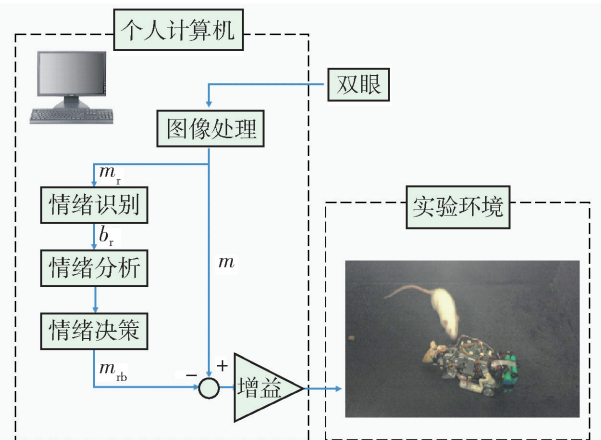


图 7 机器鼠与生物鼠的智能交互

Fig. 7 Intelligent interactions between a robotic rat and a biological rat

3 实验过程

3.1 目标生物鼠

本实验采用的生物鼠来自中国科学院神经科学研究所实验室,目标生物鼠选择9周左右的亚成年大鼠,身长在 (230 ± 5) mm,体质量在 (180 ± 5) g. 实验鼠被随机地分为3组,每组6只生物鼠,3组分别做标签:恐惧组、中立组、友好组,3组中的每只生物鼠分别与对应状态的机器鼠进行智能交互. 实验鼠的照明条件采用12 h/12 h循环照明(早上9:00开灯,晚上21:00关灯),确保实验鼠白天的活动状态. 同样,实验平台也采用相同的光照条件. 整个过程周围环境的温度为适宜温度 $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$,湿度为50%~60%.

3.2 实验步骤

该实验是在中国科学院神经科学研究所生物实验室中进行的,每次实验前,首先将机器鼠放在实验平台中心,然后将一只饲养在笼子里的生物鼠放入实验平台中,之后给机器鼠上电,实验开始15 min后,关闭机器鼠电源,将生物鼠放回饲养笼,拿出机器鼠并用湿纸巾清理实验平台.

如3.1节所述,生物鼠被分为3组(恐惧组、中立组和友好组),每组中的每只生物鼠与对应状态的机器鼠进行互动. 对于每个实验日,所有的18只生物鼠均进行实验,连续实验6 d,总共进行 $6 \times 3 \times 6 = 108$ 次实验. 为了减小不同时间段生物鼠活动的差异性,将实验顺序进行改变,从第1天到第6天的实验顺序为:恐惧→中立→友好,友好→恐惧→中立,中立→友好→恐惧,恐惧→友好→中立,友好→中立→恐惧,中立→恐惧→友好.

每次实验包括10 min的交互时间和5 min的观察时间. 如图8所示,初始的10 min称为交互阶段. 在交互阶段,每只实验鼠的位置和运动参数都被记录,这些数据用来分析它们的活动水平. 之后的5 min称为观察阶段. 在观察阶段,机器鼠保持在实验平台中心不动,每只实验鼠的位置和运动参数被记录,这些数据用来分析它们对机器鼠的偏好水平.

在交互阶段,机器鼠会随着生物鼠的运动而移动,并且随着生物鼠行为的改变而不断调整自己的输出行为. 具体地,当机器鼠输出友好行为时,观察并预测生物鼠的行为;当机器鼠输出中立行为时,观察并预测生物鼠的行为;当机器鼠输出恐惧行为时,观察并预测生物鼠的行为. 交互阶段记录的数据直接反映系统的可预测性. 在观察阶段,机器鼠持续输出某一种行为,并且不会移动位置,观察此时生物鼠的行为. 观

察阶段记录的数据直接反映系统的可重复性.

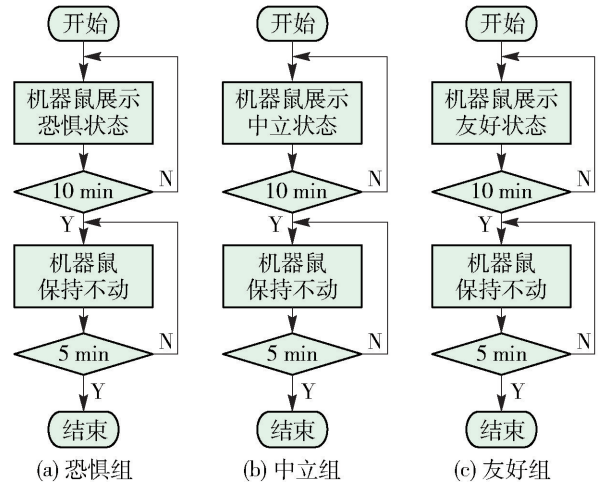


图8 3种状态下,机器鼠与生物鼠交互的实验步骤

Fig. 8 Experimental procedures for the robotic rat interacting with the rats under three controlled conditions

3.3 数据统计

通过追踪每只生物鼠的位置,可以计算它们移动的路程(l_a^r). 同样,生物鼠的运动参数 m_r 输入到支持向量机分类系统中区分出生物鼠的行为状态. 在交互阶段,记录生物鼠出现站立行为的频率(f_r^r)和梳理行为的频率(f_g^r), l_a^r 、 f_r^r 、 f_g^r 作为生物鼠行为动作和活动水平的重要指标,在观察阶段,记录生物鼠接近机器鼠的频率(f_c)和生物鼠与机器鼠的距离(d), f_c 和 d 作为生物鼠对机器鼠偏好水平的指标. 由于在交互阶段 f_c 和 d 很容易随机器鼠的位置的变动而改变,因此,这2个参数只在观察阶段记录. 至于机器鼠本身,它的移动距离也被记录. 由于只在友好状态下机器鼠才展示站立和梳理行为,因此,机器鼠的站立频率 f_r^{rb} 和梳理频率 f_g^{rb} 只在友好状态下记录.

正如之前提到的,每种行为状态下,需要做36次实验,每次实验包括10 min的交互阶段(在这个阶段记录 l_a^r 、 f_r^r 、 f_g^r 和 l_a^{rb})和5 min的观察阶段(在这个阶段记录 f_c 和 d). l_a^r 、 f_r^r 和 f_g^r 的值直接反映生物鼠的行为动作和活动水平,而生物鼠的偏好程度与 f_c 和 d 的值成比例.

用统计分析软件 IBM SPSS Statistics v23.0 对 l_a^r 、 f_r^r 、 f_g^r 、 f_c 、 d 、 l_a^{rb} 、 f_r^{rb} 、 f_g^{rb} 进行数据处理,通过计算各个参数的值,可以得到生物鼠 l_a^r 、 f_r^r 、 f_g^r 、 f_c 、 d 的平均值以及对应状态的机器鼠的 l_a^{rb} 的平均值. 通过夏皮罗-威尔克(Shapiro-Wilk)检验法证实这些平均值符合正态分布,利用单因素方差分析方法(analysis of variance, ANOVA)发现, l_a^r 、 f_r^r 、 f_g^r 、 f_c 、 d 、 l_a^{rb} 、 f_r^{rb} 、 f_g^{rb} 的值随着实验状态的变化而变化,而且

每组的 l_a^r 、 f_r^r 、 f_g^r 、 f_c 、 d 、 l_a^{rb} 和友好状态下的 f_r^r 、 f_g^{rb} 的值均服从正态分布. 以上 2 种统计分析方法, 显著水平设置为 $p \leq 0.05$. 对于行为状态变量, 由于各组之间存在显著性变化, 故采用“最小显著差”进行事后检验, 而对时间变量, 采用“Bonferroni 法”进行事后检验, 可以抵消多重比较的问题.

4 实验结果

4.1 交互过程中生物鼠与机器鼠的行为活动

如图 9(a) 所示, 在交互阶段, 不同组记录到的 l_a^r 和 l_a^{rb} 的平均值明显不同 ($F_{2,15} = 6.27$, $p \leq 0.05$), 友好状态下生物鼠 l_a^r 的平均值比其他 2 组明显大一些. 中立状态组机器鼠 l_a^{rb} 的平均值比另外 2 组的小. 事后比较发现, 恐惧状态组和中立状态组、友好状态组 l_a^r 的平均值具有显著性差异, 分别是 0.99、2.02、2.25 min^{-1} . 中立状态组、恐惧状态组和友好状态组 l_a^{rb} 的平均值分别为 1.80、2.92、2.42 min^{-1} . l_a^r 和 l_a^{rb} 的平均值随时间的变化趋势如图 9(b) 所示, 3 组不同状态下的生物鼠每天 l_a^r 的平均值也不同, 事后比较发现, 中立状态组和友好状态组生物鼠 l_a^r 的平均值随时间呈上升趋势 (中立状态组: 从 1.3 min^{-1} 到 2.27 min^{-1} , 友好状态组: 从 1.6 min^{-1} 到 2.82 min^{-1}), 而恐惧状态组生物鼠 l_a^r 的平均值随时间呈下降趋势 (从 1.45 min^{-1} 到 0.32 min^{-1}). 恐惧状态组机器鼠 l_a^{rb} 的平均值从第 1 天到第 3 天呈下降趋势 (从 3.13 min^{-1} 到 2.77 min^{-1}), 第 4 天到第 6 天呈下降趋势 (从 3.01 min^{-1} 到 2.86 min^{-1}).

如图 9(c) 所示, 和 l_a^r 的平均值类似, 友好状态下生物鼠的 f_r^r 的平均值比起其他 2 组来说明显大很多. 事后比较发现, 恐惧状态组比起中立状态组和友好状态组来说, f_r^r 的平均值下降趋势非常明显, 3 种状态下, f_r^r 的平均值随时间的变化趋势如图 9(d) 所示. 事后比较发现, 3 组不同状态下的生物鼠第 1、3、6 天的 f_r^r 的平均值具有显著性差异: 对于恐惧状态组, f_r^r 的平均值在第 1 天最高 (0.37 min^{-1}), 到第 6 天下降到最低 (0.17 min^{-1}); 对于中立状态组, f_r^r 的平均值从第 1 天到第 3 天持续下降 (从 0.42 min^{-1} 到 0.27 min^{-1}), 而到第 6 天稍微升高 (0.35 min^{-1}); 对于友好状态组, f_r^r 的平均值出现 2 次上升趋势, 从第 1 天到第 3 天呈上升趋势 (从 0.44 min^{-1} 到 0.73 min^{-1}), 从第 4 天到第 6 天呈上升趋势 (从 0.43 min^{-1} 到 1.01 min^{-1}). 对比可以发现, 友好状态机器鼠 f_r^{rb} (0.56 min^{-1}) 的平均

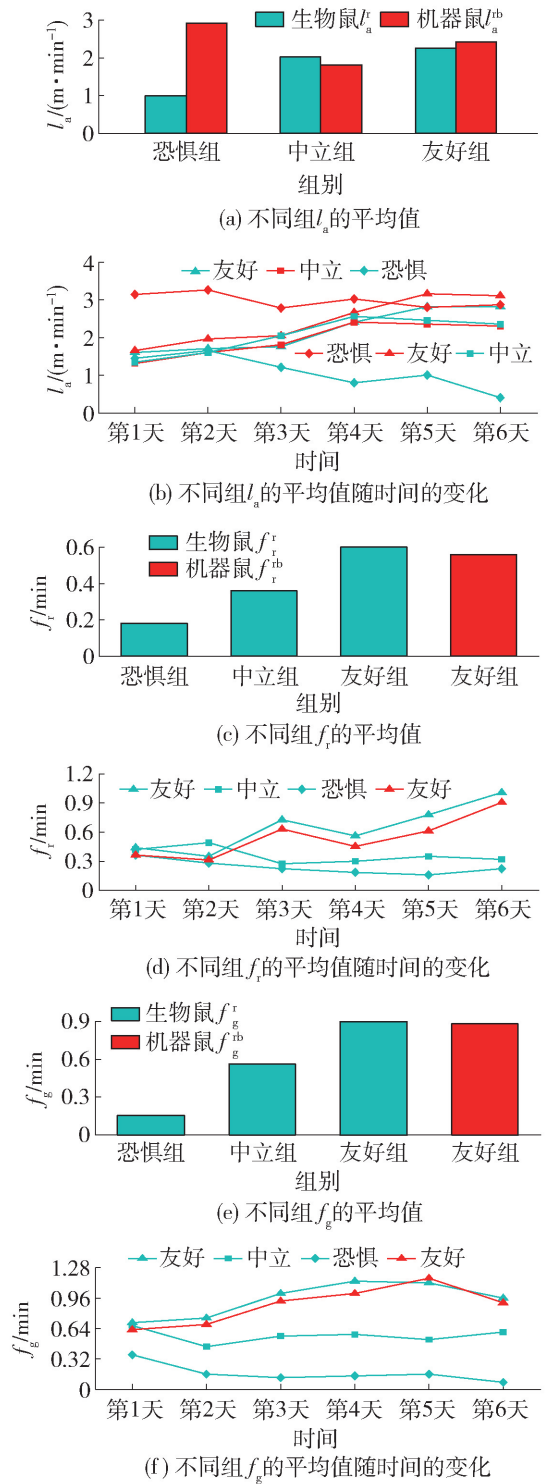


图 9 交互过程中生物鼠与机器鼠的行为参数
Fig. 9 Motion parameters for the rat-robot during interaction phase

值和生物鼠的 f_r^r (0.62 min^{-1}) 的平均值很接近.

关于参数 f_g^r 的平均值, 从图 9(e) 中可以看到一个显著的状态依赖效应 ($F_{2,15} = 10.11$, $p \leq 0.01$), 具体来说, 恐惧状态组的生物鼠的 f_g^r 的平均值较其

他2种状态下明显低很多.从图9(f)中可以看到一个显著的时间依赖效应,基于事后比较方法,恐惧状态组的 f_g^r 的平均值从第1天到第6天呈下降趋势(从 0.10 min^{-1} 到 0.07 min^{-1});中立状态组的 f_g^r 的平均值从第1天到第6天呈弱下降趋势(从 0.67 min^{-1} 到 0.60 min^{-1});友好状态组的 f_g^r 的平均值从第1天到第3天呈上升趋势(从 0.70 min^{-1} 到 1.01 min^{-1}),从第4天到第6天呈下降趋势(从 1.26 min^{-1} 到 0.30 min^{-1}).对比可以发现,友好状态的机器鼠的 f_r^{rb} (0.56 min^{-1})的平均值和生物鼠的 f_r^r (0.62 min^{-1})的平均值很接近.对比可以发现,友好状态的机器鼠的 f_g^{rb} (0.88 min^{-1})的平均值和生物鼠的 f_g^r (0.94 min^{-1})的平均值很接近.

4.2 生物鼠对机器鼠的偏好

关于记录到的机器鼠与生物鼠的距离 d 的平均值,从图10(a)可以看到一个显著的状态依赖效应($F_{2,15} = 10.11, p \leq 0.01$),事后对比发现,友好状态下参数 d 的值(0.26 m)是3种状态中最小的,比中立状态下 d 的值(0.30 m)低 0.04 m ,比恐惧状态下 d 的值(0.34 m)低 0.07 m . d 的值随时间的变化情况如图10(b)所示,从中可以看到时间的作用,基于事后比较方法,恐惧状态组 d 的平均值从第1天到第3天呈上升趋势(从 0.25 m 到 0.34 m),从第4天到第6天呈下降趋势(从 0.40 m 到 0.36 m);然而中立状态组 d 的平均值从第1天到第6天没有很大的变化;友好状态组 d 的平均值从第1天到第3天呈上升趋势(从 0.26 m 到 0.29 m),从第4天到第6天呈下降趋势(从 0.25 m 到 0.20 m).

关于记录到的生物鼠接近机器鼠的频率 f_c 的平均值,从图10(c)中可以看到一个显著的状态依赖效应($F_{2,15} = 10.36, p \leq 0.01$),事后对比发现,与 d 的平均值正好相反,友好状态下参数 f_c 的值(0.89 min^{-1})是3种状态中最大的,中立状态下 f_c 的值为 0.62 min^{-1} ,恐惧状态下 f_c 的值为 0.20 min^{-1} . f_c 的值随时间的变化情况如图10(d)所示,从中可以看到一个显著的时间依赖效应,利用事后比较方法,恐惧状态组 f_c 的平均值从第1天到第6天呈下降趋势(从 0.33 min^{-1} 到 0.13 min^{-1});中立状态组 f_c 的平均值从第1天到第3天呈上升趋势(从 0.53 min^{-1} 到 0.63 min^{-1}),从第4天到第6天呈下降趋势(从 0.64 min^{-1} 到 0.50 min^{-1});友好状态组 f_c 的平均值从第1天到第3天呈上升趋势(从 0.73 min^{-1} 到 0.80 min^{-1}),从第3天到第6天呈上升趋势(从 0.80 min^{-1} 到 1.13 min^{-1}).

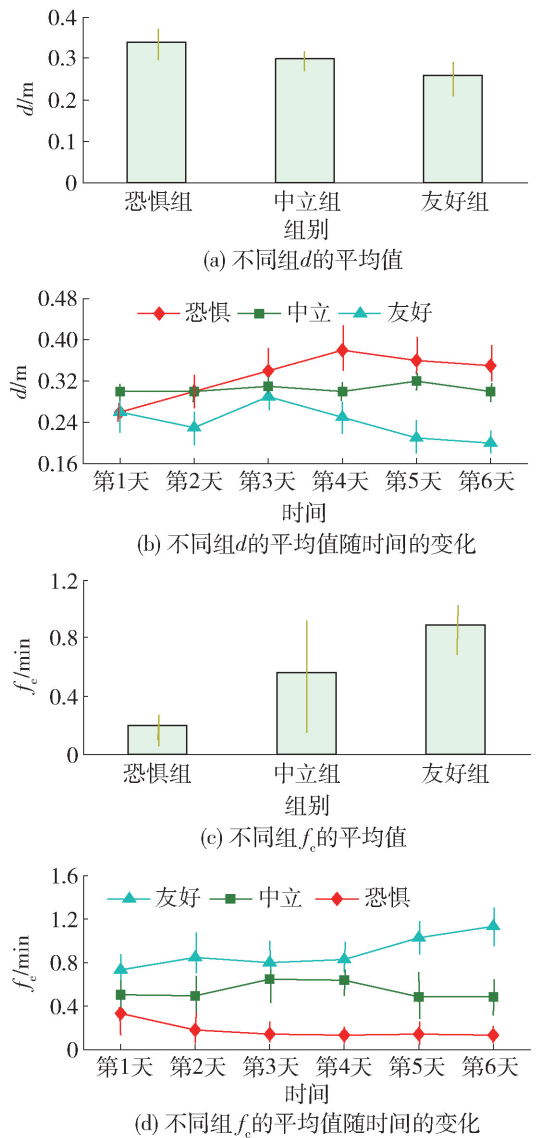


图10 观察阶段机器鼠-生物鼠的行为参数

Fig. 10 Motion parameters for the rat-robot during evaluation phase

4.3 数据分析

在机器鼠输出3种不同的行为状态中,友好状态下生物鼠的 l_a 、 f_r^r 、 f_g^r 都是最高的,这说明机器鼠表现很友好时,正如预测所料,该组生物鼠也变得很友好.一个早期的研究也发现,一个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^[16-17].因此,可以通过控制同伴的社会活动(轻微的社会活动或高度的社会活跃)来改变成年大鼠的社会活动.本研究采用的机器鼠发挥同伴的作用,引诱大鼠兴奋地玩耍,从而提高它们的活动水平.此外,最低的 d 值和最高的 f_c 值表明,机器鼠持续输出友好动作时,生物鼠也持续处于友好状态.

然而,恐惧状态下生物鼠的 l_a 、 f_r^r 、 f_g^r 都是最低

的,这说明该状态下生物鼠的活动很消极,机器鼠展示恐惧的行为,激烈地追逐和攻击生物鼠,此时,如预期所料,生物鼠表现出恐惧的行为,这种行为阻碍了生物鼠的活动水平。此外,最高的 d 值和最低的 f_c 值表明,机器鼠持续输出恐惧动作时,生物鼠也持续处于恐惧状态。

中立状态下生物鼠的 $f_a^r, f_r^r, f_g^r, f_c, d$ 的值处在以上 2 种状态之间,这说明该机器鼠输出中立行为时,也如预料,该组的生物鼠也表现出中立的行为。

中立状态下和友好状态下机器鼠的 f_a^{rb} 的曲率随时间的变化情况与相同状态下生物鼠的 f_a^r 的曲率接近;友好状态下机器鼠的 f_r^{rb} 的平均值和生物鼠的 f_r^r 的平均值很接近;友好状态下机器鼠的 f_g^{rb} 的平均值和生物鼠的 f_g^r 的平均值很接近。这也进一步说明机器鼠控制的有效性。

5 结论

1) 设计了一种机器鼠与生物鼠智能交互控制系统,它可以准确识别生物鼠的行为状态,并控制机器鼠输出 3 种(恐惧、中立和友好)不同的行为状态。

2) 在交互的过程中,机器鼠输出一种行为状态,生物鼠也按预期所料输出对应的行为;机器鼠持续输出某一种行为时,生物鼠也持续输出同种行为。

3) 该系统能够以一种可控、可预测和可重现的方式定向改变生物鼠的行为,实现了智能交互的目的,验证了系统的有效性。

参考文献:

- [1] HALLOY J, SEMPO G, CAPRARI G, et al. Social integration of robots into groups of cockroaches to control self-organized choices [J]. *Science*, 2007, 318(5853): 1155-1158.
- [2] LANDGRAF T, OERTEL M, RHIEL D, et al. A biomimetic honeybee robot for the analysis of the honeybee dance communication system [C] // International Conference on Intelligent Robots and Systems. New York: IEEE, 2010: 3097-3102.
- [3] GRIBOVSKIY A, HALLOY J, DENEUBOURG J L, et al. Towards mixed societies of chickens and robots [C] // International Conference on Intelligent Robots and Systems. New York: IEEE, 2010, 6219(1): 4722-4728.
- [4] POLVERINO G, ABAID N, KOPMAN V, et al. Zebrafish response to robotic fish: preference experiments on isolated individuals and small shoals [J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2012, 7(3): 036019.
- [5] KOPMAN V, LAUT J, POLVERINO G, et al. Closed-loop control of zebrafish response using a bioinspired

robotic-fish in a preference test [J]. *Journal of the Royal Society Interface*, 2013, 10(78): 20120540.

- [6] CHRISTIANSEN D. Announcing the amazing micro-mouse maze contest [J]. *IEEE Spectrum*, 1977, 14(5): 27.
- [7] FILE S E, SETH P. A review of 25 years of the social interaction test [J]. *European Journal of Pharmacology*, 2003, 463(1/2/3): 35-53.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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 [J]. *Physiology & Behavior*, 1999, 67(4): 475-482.
- [11] HENLEY C L, NUNEZ A A, CLEMENS L G. Hormones of choice: the neuroendocrinology of partner preference in animals [J]. *Frontiers in Neuroendocrinology*, 2011, 32(2): 146-54.
- [12] 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]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(11): 158-162. (in Chinese)
- [13] ZHANG Z. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations [C] // The Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision. New York: IEEE, 1999: 666-673.
- [14] SWAIN D T, COUZIN I D, LEONARD N E. Real-time feedback-controlled robotic fish for behavioral experiments with fish school [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2012, 100(1): 150-163.
- [15] CHANG C C, LIN C J. LIBSVM: a library for support vector machines [M/OL]. New York: ACM, 2011 [2017-01-10]. <http://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/libsvm>.
- [16] 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.
- [17] 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 [J]. *Physiology & Behavior*, 1999, 67(4): 475-482.