

# 基于 CNN-PID 的竞赛机器人赛道识别与自动驾驶

张施磊, 唐天宇, 张志明, 马国荣, 高贺惟, 余有灵

(同济大学 电子与信息工程学院, 上海 200092)

**摘 要:** 根据仿人视觉机器人竞赛项目的要求, 设计并实现基于 CNN-PID 算法的赛道识别及自动驾驶机器人系统, 将机器视觉和运动控制相互融合, 采用 CSI 接口摄像头获取图像信息, 运用卷积神经网络处理采集的数据, 使用 PID 算法进行机器人的运动控制。最终测试结果表明: 以此方案进行图像处理与运动规划的机器人从启动区开始运行, 经过若干弯道与迷彩地形, 均可正确识别赛道并正常驾驶, 最后在停止禁入区前减速、停止并击打靶标, 顺利完成基于单目视觉的智能驾驶、定点停止和击打动作的任务要求, 具有较强的稳定性与可拓展性。

**关键词:** 仿人视觉; 卷积神经网络; 图像处理与运动规划; 赛道识别; 自动驾驶

**中图分类号:** TP242.6, TP273+.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-4956(2020)09-0039-05

## Track recognition and autonomous driving for humanoid vision robot competition based on CNN-PID

ZHANG Shixiao, TANG Tianyu, ZHANG Zhiming, MA Guorong, GAO Hewei, YU Youling

(College of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** According to the requirements of the humanoid vision robot competition, track recognition and autonomous driving robot system based on CNN-PID is designed and realized by integrating machine vision with motion control. The robot system obtains image information from the CSI interface camera and adopts convolutional neural networks to process the image data and control robot motion with PID algorithm. Final test results show that the robot departs from the starting area, can correctly identify the track and drive autonomously through several curves and camouflaged terrain, and finally decelerates, stops and hits the target before stopping the forbidden area, successfully completing the task requirements of intelligent driving, fixed-point stopping and hitting based on monocular vision with strong stability and expandability.

**Key words:** humanoid vision; convolutional neural network; image processing and motion planning; track recognition; automatic driving

随着信息技术与控制理论的发展,“人工智能+机器人”已经成为现阶段国内外的研究热点之一<sup>[1]</sup>,机器人需要能模仿人类的感知行为来识别周围环境与自身状态,并进行分析和判断,采取相应的策略来完成

相应的任务。智能机器人的设计与开发,是一个典型的复杂工程问题<sup>[2]</sup>,在其方案论证、系统建模、硬件设计、算法编程、系统联调等研究实践中,由于需要综合运用电子电路技术、信号与系统、自动控制原理、计算机控制、传感检测技术、嵌入式系统、机械设计与制造、人工智能等专业知识,很难通过简单的一门课程或者若干门课程的形式实行实践教学。

在自动化及相关专业的高校本科培养体系中,学生的复杂工程问题解决能力和综合创新能力是课程教学质量的直接体现<sup>[3-4]</sup>,需要在专业理论基础的指导下依托多样化、多层次的实践方式<sup>[5-6]</sup>开展工作,服务于我国正在实施的“创新驱动发展”“中国制造 2025”“新一代人工智能发展规划”等一系列重大国家战略,

收稿日期: 2020-01-01

基金项目: 教育部高等教育司产学研协同育人项目(201802330014); 同济大学本科教学改革研究与建设项目(TJ0800104221/004); 同济大学本科交叉课程建设项目(TJ0800104239, TJ1350104085); 同济大学本科生学科竞赛项目(TJ4250145302, TJ4250145303)

作者简介: 张施磊(1998—),男,上海奉贤,硕士研究生,主要研究方向为嵌入式系统及应用。

通信作者: 张志明(1975—),男,江苏常熟,工学博士,讲师,主要研究方向为检测技术及自动化装置。

E-mail: zmzhang@tongji.edu.cn

培养多学科交叉型与复合型人才<sup>[7-8]</sup>。以工程实践和学科竞赛为背景,多学科交叉的机器人竞赛专业覆盖面广,极具趣味性和挑战性,可以在常规教学之外,进行科技创新实践教学探索和改革<sup>[9-10]</sup>,调动学生主动学习的积极性,全方位培养学生解决复杂工程问题的能力,并在竞赛实践中加以检验和提高。

## 1 任务简述

2019 年中国机器人大赛中设置仿人视觉挑战项目<sup>[11]</sup>,目的是推动机器视觉在智能机器人中的应用,与运动控制相互融合,基于单目视觉完成自主智能驾驶、定点停止和击打靶靶等挑战任务。参赛同学以此竞赛实践项目为载体,跟踪人工智能和机器人学科发展中的前沿技术,通过针对性的理论学习和实践锻炼,课内课外融合、理论实践结合,有效地提高了大学生的综合创新意识和全面解决复杂工程问题的自主实践能力。

在比赛场地中,分别设置启动区、停止(禁入)区和路障,如图 1 所示。其中启动区和停止区的图案均为黑白相间的方格;路障则是不规则特征的图案,位置随机摆放;道路是连接启动区和停止区的白色路径,黑色区域及围挡是道路的边界。机器人仅可以通过单目视觉传感器获取场地信息,自主行驶在道路上(不得驶出道路之外),并能顺利跨越路障,在停止区前停住并打击放置在终点位置上的靶标。

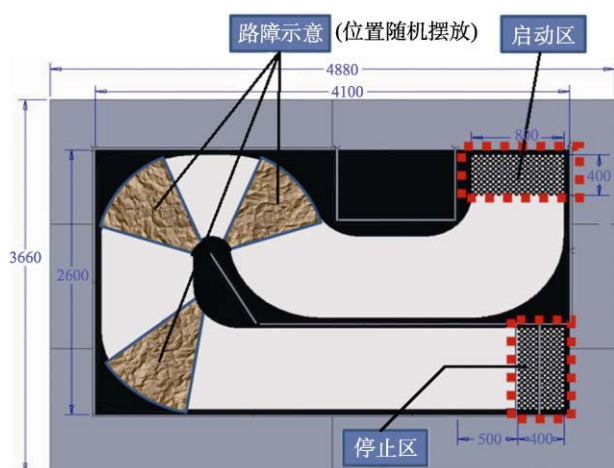


图 1 仿人视觉机器人比赛场地<sup>[11]</sup> (单位: mm)

## 2 系统设计与实现

### 2.1 系统架构

视觉感知信息处理作为机器人的主要技术手段之一<sup>[12]</sup>,也是最接近于人类感知外界环境的探测方式,其中,单目视觉通过机器人的移动获得环境中特征点的信息,适用于工作任务比较简单的情况<sup>[13]</sup>。若需要

充分利用仿人机器人的视觉系统来获取足够多的信息,图像处理与运动规划就尤其重要<sup>[12-14]</sup>,在运动过程中得到更好的决策,提高运行效率。

近年来深度学习理论和技术日趋成熟,对机器人采集的图像进行识别、分类已成为一种方便且准确的方法<sup>[13-14]</sup>,本文中的仿人视觉机器人架构如图 2 所示,基于卷积神经网络和 PID 控制算法,采用树莓派作为主控制器,通过单目摄像头采集道路与目标图像信息,使用三电机驱动的全向移动底盘进行位置移动,使用四自由度机械臂完成击打目标动作,实现机器人运动控制和挑战任务。

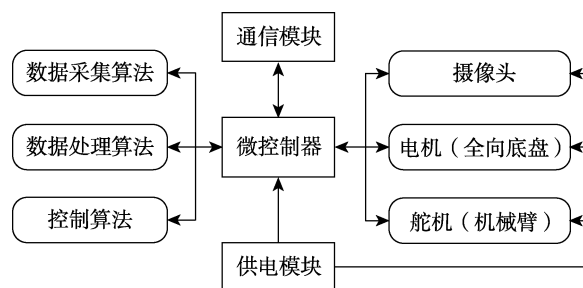


图 2 系统架构设计

### 2.2 机器人平台

仿人视觉挑战项目应满足控制器、传感器、动力模块、供电模块的安全规范,满足速度、扭矩等参数要求,并且还需要满足安全性、重量尺寸等要求。故机器人本体选用博创尚和公司的智元素-格斗机器人<sup>[15]</sup>,其外形和结构如图 3 所示,采用半人形加全向移动底盘结构,同时具备 STM32、Arduino 和树莓派 3B 等多种平台硬件,全向移动底盘、双机械臂、树莓派处理器背包等各模块相互协作形成完整的机器人系统,符合竞赛项目需求。

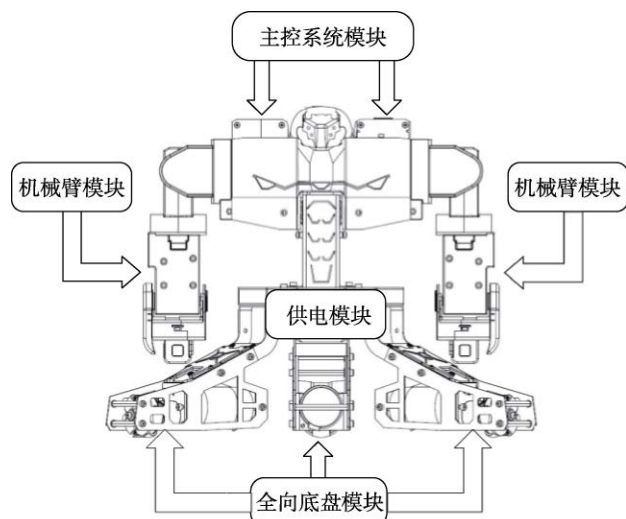


图 3 竞赛标准平台机器人

在本系统中, 树莓派在软件层面进行数据采集、数据处理、控制算法等工作, 在硬件层面与 STM32 通信、实现各种电机和舵机的驱动, 作为整个机器人系统的核心, 起到承接软硬件模块的作用。

### 2.3 数据处理及控制算法

仿人视觉挑战项目机器人先通过单目机载摄像头采集典型道路图像数据, 离线训练卷积神经网络, 识别赛道不同区域的特征分类; 在完成自动驾驶任务的过程中, 再使用训练好的卷积神经网络作为图像处理模块, 对机器人实际环境信息进行分类识别标签, 然后送入到 PID 控制器中, 驱动机器人底层电机实现移动、循迹、转弯及停止等动作。数据处理及控制算法的总体流程图如图 4 所示。用于数据处理的卷积神经网络算法和用于行驶控制的 PID 算法构成机器人本体系统控制器处理算法的核心, 在最短时间内完成规定动作并取得好的成绩。

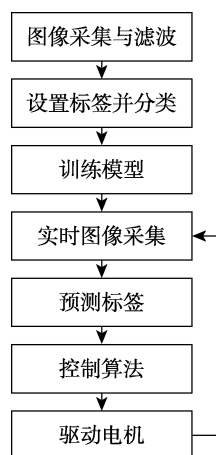


图 4 数据处理及控制算法总流程图

## 3 系统核心算法设计

在本项目研究中, 机器人的摄像头采集到赛道图像数据后, 交由卷积神经网络 CNN 模型进行赛道元素的预测, 进行初步的标签判定, 再由控制算法做进一步的机器人运动控制。

### 3.1 基于 CNN 模型的赛道元素识别

本项目中, 竞赛机器人采用卷积神经网络 CNN 模型对赛道图像进行处理, 通过数据采集、数据训练、数据预测 3 个子模块来完成道路元素的分类预测功能。标准的卷积神经网络一般由输入层、交替的卷积层和池化层的组合、全连接层和输出层构成。与普通全连接神经网络不同, 卷积神经网络由于其本身具有的参数共享机制和连接稀疏性, 可简化模型复杂度, 减少模型参数, 从而降低计算量和过拟合的风险<sup>[16]</sup>。在实现卷积神经网络模型时, 已经有很多开发平台和工具可供选择, 本文采用 Google 开发的开源框架

TensorFlow<sup>[17-18]</sup>, 建立的 CNN 模型层级结构如图 5 所示, 经过训练后的模型可以下载部署到机器人主控制器中运行。

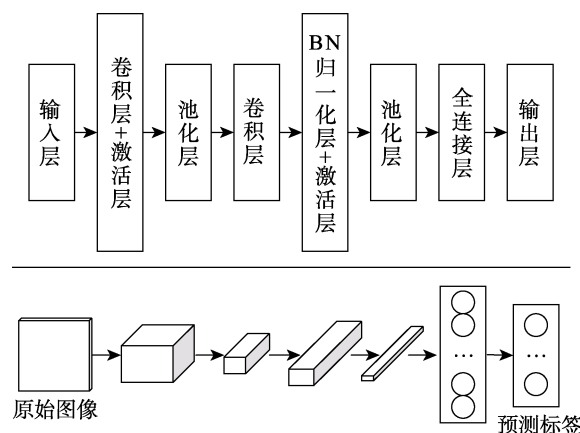


图 5 卷积神经网络模型层级结构

#### 3.1.1 数据采集

数据采集阶段需要通过键盘人为控制机器人运动, 在机器人运行时配合树莓派控制器通过单目摄像头采集大量的赛道图像数据, 获得 4 种典型类型的赛道图像, 并以标签 (“前进” “左转” “右转” “停止”) 分别标识, 经过调整图像大小与格式后存储为灰度图像集, 最后压缩为指定格式文件提供给数据训练模块进行训练。

#### 3.1.2 数据训练

数据训练阶段需要在高性能的计算机上离线运行, 从而提高训练的效率。首先读取采集到的带标签灰度图像集, 并划分成多批数据为小批量梯度下降算法 (MBGD) 做准备。在读取数据之后, 使用 TensorFlow 库函数建立卷积神经网络模型, 各层级的变量与结构设计完毕后, 设置损失 (loss) 最小化函数。一次训练过程 Session 包含一定数量的周期迭代, 每个周期中启动 CNN 模型进行 MBGD 算法, 该周期的训练完成后, 读取数据集的一部分作为预测集, 用来判断模型的准确率, 若该训练权重文件准确率高于历史权重文件则保留, 在不断迭代中选择准确率最高的权重文件进行保存, 供给数据预测模块进行实时图像的分类识别预测。

#### 3.1.3 数据预测

数据预测阶段在机器人的树莓派控制器上在线运行, 读取并保存数据训练模块中得到的权重文件后, 远程操作打开机器人摄像头, 实时获取机器人所在位置的赛道图像, 调用预测程序函数使用该权重文件进行实时计算, 预测和分类识别赛道, 得到赛道图像标签结果后, 获知机器人行进方向的信息, 交由控制器算法进一步处理。

### 3.2 基于 PID 算法的路径规划与驾驶控制

PID 控制策略是一种成熟的控制算法,其结构简单、稳定性好、可靠性高,并且易于实现<sup>[19]</sup>。虽然 PID 控制器的参数整定相当烦琐,需要很强的工程经验,但相对于其他控制算法,其编程简单、可操作性强,故选为机器人运动控制器算法。由于竞赛机器人平台没有提供控制理论数学模型,故在调试过程中,使用试凑法来确定 PID 控制器中的比例  $K_p$ 、积分  $K_i$  和微分  $K_d$  参数,根据各控制参数对系统响应的作用影响,调整参数数值,确定最后的 PID 控制参数,以获得满意的响应输出。

机器人路径规划与驾驶控制系统采用闭环负反馈控制,在采集赛道图像并经过 CNN 模型得到预测的结果后,将连续几帧历史图像的预测结果保存在内存中,进行下一步处理,控制算法的流程图如图 6 所示。若当前图像判断为“前进”标签,则再综合考虑前若干历史帧的标签,决定是否应该加速;若是“左转”或“右转”标签,则采用 OpenCV 的 ROI 操作与直方图计算得到左/右侧黑白像素比例,换算出误差,再经过 PID 控制算法调节机器人的行进速度与方向;若是“停止”标签,则逐渐减速直至机器人停止运动并实现打击靶标动作,完成击靶任务。

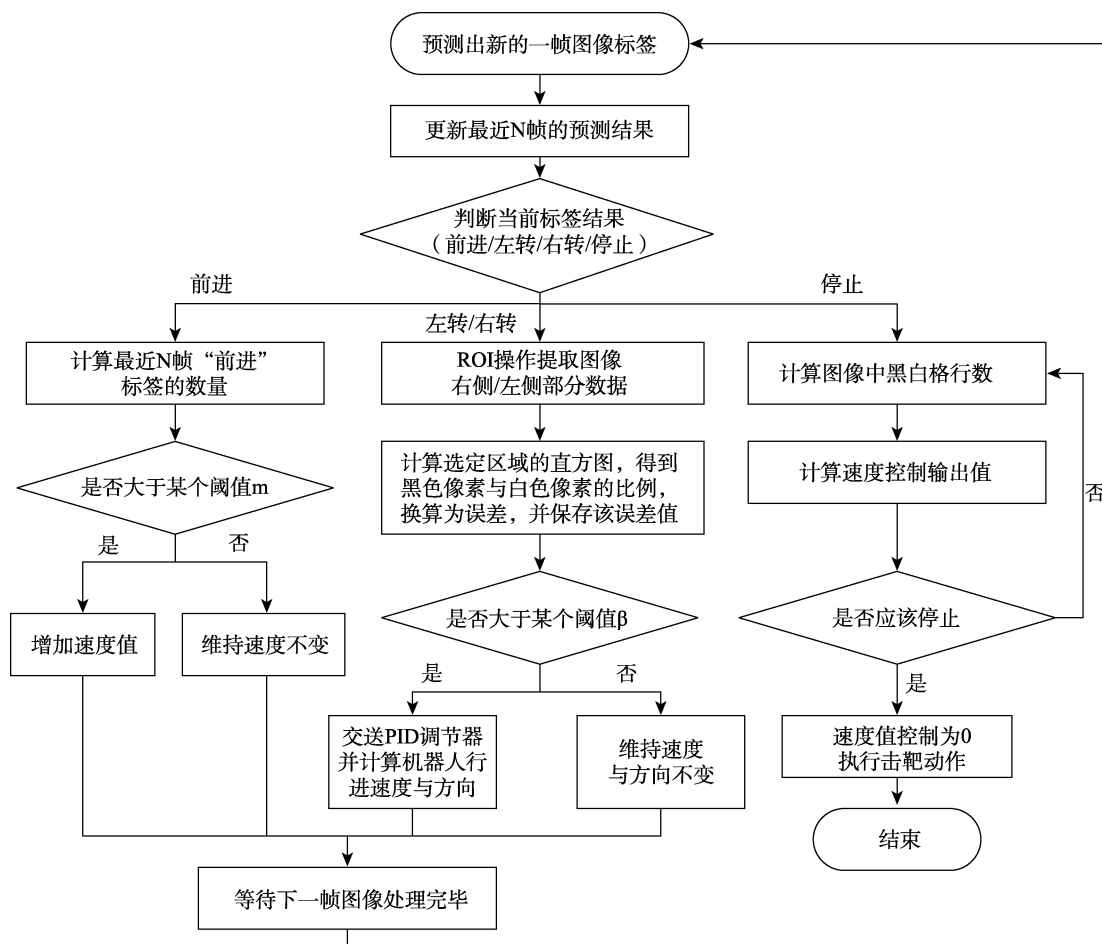


图 6 基于 PID 的路径规划与驾驶控制算法框图

由于 Python 编程逐点处理像素的效率较低,故将 PID 控制算法与数字图像处理计算函数编译为 C 共享库,再由 Python 主程序调用。处理流程简述如下:先获取图像左右两侧矩形范围内黑色像素的点数,两侧像素的累加值之差作为 PID 控制器的输入误差量,计算得到标签识别后的转向角度与速度控制量,最终输入到驱动程序中控制电机运动。

### 3.3 特殊道路元素处理

竞赛规则中提高了技术难度,在赛道中增加了迷彩路面特殊元素干扰,其在机器人运行道路的位置随

机设定,因此需要设计适应性较强的算法来对路障元素进行处理,以减小对任务过程的干扰,避免赛道信息误判。

首先在使用 TensorFlow 建立的 CNN 模型训练集中加入“路障”标签,通过神经网络初步判断出路面迷彩元素后,再使用 C 语言共享库读取摄像头左右两侧的黑色像素个数。与常规非迷彩路面不同的是,此次检测需要从两侧向中间扫描,在检测到接近白色像素时当前行扫描即停止;实测发现,与普通路面处理流程相比较,需减小扫描宽度才能得到较好的结果。



检测完成后,经过 PID 控制器运算获得自动驾驶电机运动控制参数。

路面迷彩路障处理的流程图如图 7 所示。

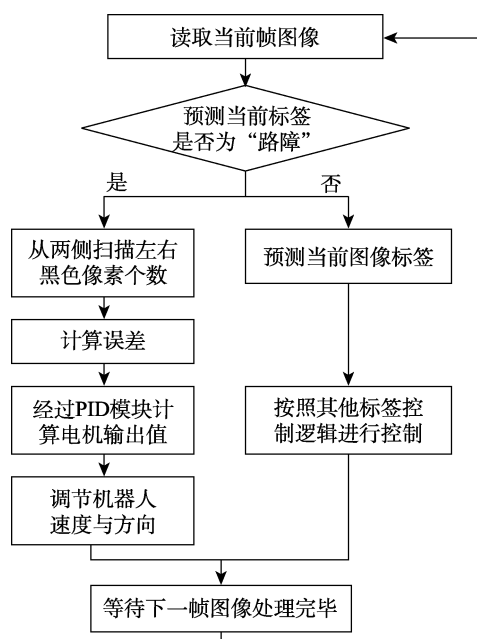


图 7 路障处理算法流程图

## 4 结果分析与讨论

实验室调试赛道按竞赛标准赛道 1:1 搭建,如图 8 所示。机器人从启动区开始,经过若干弯道与迷彩路障,均正确识别并正常自主行驶,最后在停止禁入区前减速、停止并击打靶标,顺利完成自动驾驶任务,运动过程中没有压到黑色边界部分,赛道总长约为 10 m,全程花费时间约为 10 s,调试过程中的手动秒表计时结果稳定,偏差不超过 $\pm 0.1$  s。



图 8 实验室调试赛道及机器人实物照片

仿人机器人的视觉系统是机器人获取外界环境信息的主要来源,是机器人决策的主要依据,同时也是自身行为信息的一种反馈途径。以机器人仿人视觉对抗竞赛项目为背景开展综合创新能力训练,提出基于卷积神经网络识别不同的路况条件情况并通过 PID 控

制使机器人按道路行驶的方案,并对视觉系统中的图像分类、特征识别等问题进行了研究和实现,最终实现的控制方案具有实时性高、抗干扰能力强的特点。

## 5 结语

仿人视觉机器人系统以树莓派为核心控制器,使用单目摄像头采集道路信息,通过 CNN 模型与 PID 算法进行数据处理与运动控制,对迷彩路障识别进行特殊处理,最终实现机械臂击靶动作。实机测试能够完整、高效地实现赛道识别与自动驾驶竞赛任务,具有较强的稳定性与可拓展性。该系统在应对陌生道路元素时需要重新进行数据采集与模型训练,后期可以尝试从神经网络模型结构与数据集类型的方向去优化系统,使其能够应对各种复杂道路环境,获得更好的适应性。

在参与该竞赛项目的学习与实践过程中,通过文献资料查询、控制问题凝炼、方案归纳总结以及自动化工程设计与应用,参赛本科学生的复杂问题解决能力和综合创新能力得到了有效的锻炼,对控制系统与深度学习理论有了感性的认识与体会,同时也在竞赛中也获得了较好的成绩:首次参加 2019 年中国高校智能机器人创意大赛获得视觉对抗组第四名,改进算法后参加 2019 年中国机器人大赛视觉挑战项目以明显优势获得冠军。

## 参考文献 (References)

- [1] ISLAM M J, HONG J, SATTAR J. Person-following by autonomous robots: A categorical overview[J]. International Journal of Robotics Research, 2019, 38(14): 1581-1618.
- [2] 朱海荣, 吴瑜. 基于“专业认证+新工科”的类人机器人实验室建设[J]. 实验技术与管理, 2019, 36(5): 176-180, 208.
- [3] 杨马英. 自动化专业复杂工程问题能力培养的实践[J]. 电气电子教学学报, 2019, 41(6): 18-23.
- [4] 阎群, 李擎, 崔家瑞, 等. 大学生解决复杂工程问题能力的培养[J]. 实验技术与管理, 2017, 34(11): 178-181, 186.
- [5] 朱正伟, 储开斌, 焦竹青, 等. 以解决复杂工程问题能力为导向的电子类实践育人模式[J]. 实验技术与管理, 2019, 36(7): 1-4.
- [6] 岳继光, 余有灵, 苏永清, 等. 坚持控制理论特色 注重工程能力培养[J]. 长春工业大学学报(高教研究版), 2011, 32(3): 1-3.
- [7] 曹荣敏, 吴迎年, 陈雯柏, 等. 工程认证视角下自动化专业创新实验室建设[J]. 实验室研究与探索, 2019, 38(10): 259-264.
- [8] 樊华, 李苏杰, 方曼, 等. 依托“新工科”建设 培养创新引领性人才[J]. 实验技术与管理, 2019, 36(10): 23-27.

(下转第 48 页)

自修复性能(应变力分别为0.1%和100%,时间为200 s)。可以看出在0.1%的应力下0~200 s内,  $G' > G''$ , 稀土聚合物凝胶仍保持凝胶态;而当应力增加到100%时,  $G'' > G'$ , 凝胶被破坏变为溶胶态;重复上述实验,通过减小应力至0.1%,体系则迅速自修复恢复凝胶状态。这种从凝胶到溶胶,再从溶胶修复成凝胶的过程可以连续循环多次,说明所形成的触变性凝胶是通过非键相互作用以及金属与有机配体的配位协调相互作用形成的<sup>[12]</sup>。

## 5 结语

本实验设计合成了具有良好发光性能的稀土金属聚合物凝胶材料,并通过调控Eu/Tb摩尔比得到多色发光聚合物凝胶,同时对形貌、流变性能和发光性质进行了表征。本实验涉及高分子化学、仪器分析、材料化学以及图谱分析等知识,知识面覆盖较宽,合成方法简单,材料性能表征便利。通过实验的完成可有效拓宽学生的科学视野,提高学生实验操作能力以及数据处理与分析的能力。实验过程中渗透科学思维,可全面提升学生的科学研究综合能力,为培养新时代创新型人才提供一种途径。

## 参考文献 (References)

- [1] 张震. 赛课结合的GIS实践教学模式研究[J]. 实验技术与管理, 2019, 36(10): 28-31.
- [2] YANG P P, GAI S L, LIN J. Functionalized mesoporous silica materials for controlled drug delivery[J]. Chemical Society Reviews, 2012, 41(9): 3679-3698.
- [3] KOTOVA O, BRADBERRY S J, SAVYASACHI A J, et al. Recent advances in the development of luminescent lanthanide-based supramolecular polymers and soft materials[J]. Dalton Transactions, 2018, 47(46): 16377-16387.
- [4] LUSTIG W P, MUKHERJEE S, RUDD N D, et al. Metal-organic

frameworks: Functional luminescent and photonic materials for sensing applications[J]. Chemical Society Reviews, 2017, 46: 3242-3285.

- [5] LI Y J, YU X D, YU T. Eu<sup>3+</sup> based mesoporous hybrid material with tunable multicolor emission modulated by fluoride ion: Application for selective sensing toward fluoride ion[J]. Journal of Materials Chemistry, 2017, 5: 5411-5419.
- [6] MAHAPATRA T S, SINGH H, MAITY A, et al. White-light-emitting lanthanide and lanthanide-iridium doped supramolecular gels: Modular luminescence and stimuli-responsive behavior[J]. Journal of Materials Chemistry, 2018, 6: 9756-9766.
- [7] PANG X L, LI L, WEI Y, et al. Novel luminescent lanthanide (III) hybrid materials: Fluorescence sensing of fluoride ions and N, N-dimethylformamide[J]. Dalton Transactions, 2018, 47: 11530-11538.
- [8] XU X Y, YAN B. A fluorescent wearable platform for sweat Cl<sup>-</sup> analysis and logic smart-device fabrication based on color adjustable lanthanide MOFs[J]. Journal of Materials Chemistry, 2018, 6: 1863-1869.
- [9] ZHU S Y, YAN B. Photofunctional hybrids of TiO<sub>2</sub> and titanium metal-organic frameworks for dye degradation and lanthanide ion-tuned multi-color luminescence[J]. New Journal of Chemistry, 2018, 42: 4394-4401.
- [10] LI H, LI Y J, ZHANG Z, et al. Highly selective luminescent sensing of Cu<sup>2+</sup> in aqueous solution based on a Eu (III)-centered periodic mesoporous organosilicas hybrid[J]. Materials and Design, 2019, 172: 10772.
- [11] PANG X L, YU X D, XIE D Y, et al. Tunable multicolor emissions in a monocomponent gel system by varying the solvent, temperature and fluoride anion[J]. Organic & Biomolecular Chemistry, 2016, 14: 11176-11182.
- [12] PANG X L, GE J Q, YU X D, et al. An "off-on" fluorescent naphthalimide-based sensor for anions: Application for visual F<sup>-</sup> and AcO<sup>-</sup> discrimination in a self-assembly gel[J]. New Journal of Chemistry, 2019, 43: 10554-10559.

(上接第43页)

- [9] 李锐, 刘云清. 依托机器人竞赛构建大学生创新实践教育平台[J]. 长春师范大学学报, 2019, 38(6): 153-156.
- [10] 陈巍. 基于机器人竞赛的大学生创新能力的培养模式[J]. 实验室研究与探索, 2012, 31(7): 297-300.
- [11] 中国机器人大赛技术委员会. 2019中国机器人大赛比赛规则[EB/OL]. [2019-06-11]. <http://crc.drct-cao.org.cn/index.php/race/view?id=615>.
- [12] 颜云辉, 徐靖, 陆志国, 等. 仿人服务机器人发展与研究现状[J]. 机器人, 2017, 39(4): 551-564.
- [13] 李少朋, 张涛. 深度学习在视觉SLAM中应用综述[J]. 空间控制技术与应用, 2019, 45(2): 1-10.

- [14] 张新钰, 高洪波, 赵建辉, 等. 基于深度学习的自动驾驶技术综述[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2018, 58(4): 438-444.
- [15] 北京博创尚和科技有限公司. 智元素-格斗机器人使用指导书初稿-V1.04[EB/OL]. [2019-04-11]. <http://www.uptech-robot.com>.
- [16] 李玉鑑, 张婷, 单传辉, 等. 深度学习: 卷积神经网络从入门到精通[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.
- [17] 吴茂贵, 王冬, 李涛, 等. Python深度学习: 基于TensorFlow[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.
- [18] 张州. 基于TensorFlow的Android平台实时车辆和交通标志牌检测的研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
- [19] 多尔夫, 毕晓普. 现代控制系统[M]. 12版. 谢红卫, 孙志娟, 官二玲, 译. 北京: 电子工业出版社, 2015.