

基于 FuzzyP 的多臂机器人机械臂控制系统设计

邢印强

(柳州市自动化科学研究所, 广西 柳州 545001)

摘要: 机械臂是多臂机器人的重要组成部分, 针对基于姿态识别控制及位置识别控制系统受到被控量振荡影响, 而导致机械臂运动轨迹控制不精准的问题, 提出了基于 FuzzyP 的多臂机器人机械臂控制系统设计; 基于 FuzzyP 控制系统, 找到系统控制平衡点, 设计系统硬件结构包含 3 个机械臂, 共十八个自由度, 简化关节控制器连线, 选择直流有刷电机, 采用增量型编码器, 设计 H 桥电路, 配合 74ACT244 增强驱动电路, 利用 NRF24L01 无线模块获取与处理位置信息; 使用 FuzzyP 控制器, 抑制被控量振荡, 控制连杆运动, 完成多臂机器人机械臂控制方案设计; 由实验结果可知, 该系统轨迹与预期轨迹基本一致, 较好解决多臂机器人机械臂对接精确定位要求。

关键词: FuzzyP; 多臂机器人; 机械臂; 控制

Design of Multi-arm Robot Manipulator Control System Based on FuzzyP

Xing Yinqiang

(Liuzhou Institute of Automation Science, Liuzhou 545001, China)

Abstract: The manipulator is an important part of the multi arm robot. Aiming at the problem that the control system based on attitude recognition and position recognition is affected by the oscillation of the controlled quantity, the control system of the robot arm based on Fuzzy P is proposed. Based on the fuzzy P control system, find the balance point of the system control, design the hardware structure of the system, including three mechanical arms, a total of 18 degrees of freedom, simplify the joint controller connection, select DC brush motor, use incremental encoder, design H-bridge circuit, cooperate with 74ACT244 enhanced drive circuit, use nRF24L01 wireless module to obtain and process position information. The fuzzy P controller is used to suppress the oscillation of the controlled variables and control the motion of the connecting rod. The experimental results show that the trajectory of the system is basically consistent with the expected trajectory, which can better meet the requirements of accurate positioning for the docking of multi arm robot manipulator.

Keywords: FuzzyP; multi-arm robot; manipulator; control

0 引言

多臂空间机器人工作在无过载、微重力的空间环境中, 其上部机构通常采用软细长杆结构, 是典型的柔性多体系统; 同时, 反力和力矩的移动会改变人体的姿态, 即, 存在运动和动态机械手与人体的耦合关系, 导致地面固定平台控制技术不能直接用于多空间机器人^[1]。常规控制方法是根据远端反馈信息不断地调整操作臂的位置, 因为遥控臂控制中的传输延时很大, 要使机器人到达目标位置所需的控制量最小化。以手势识别为基础, 添加了位置识别为控制手段^[2]。在此基础上, 通过换算腕部空间坐标, 得到机器人手臂末端空间位置 A 的坐标^[3]。根据运动学方程, 通过计算 A 点和各关节所需的旋转角度, 可以实现机器人手臂的运动端移动到 A 点, 此过程仅需要本地系统与远程系统之间的一次通信。机械手移动到 A 点后, 通过设定的固定动作微调操作机构, 该控制方法虽然能有效地提高机械手的控制效率, 但系统存在整体延迟问题。为了解决当前协作机器人控制系统资源匮乏、价格高、工作不稳定的

问题, 设计了一种基于 FuzzyP 的多臂机器人机械臂控制系统设计, 以满足中小型企业的控制需求。

1 系统总体结构设计

把模糊控制和模糊控制结合起来, 既有模糊控制的自适应性, 又有模糊控制精度高的特点。使用了一种模糊控制策略, 其结构见图 1。

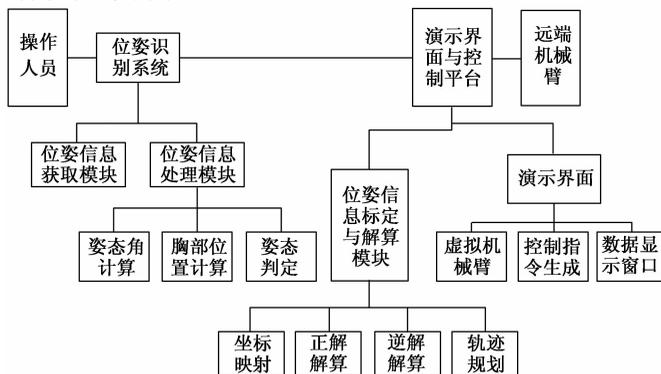


图 1 基于 FuzzyP 的机械臂控制系统整体结构

收稿日期: 2020-08-03; 修回日期: 2020-09-08。

作者简介: 邢印强(1966-), 男, 黑龙江密山人, 本科, 高级工程师, 主要从事计算机及自动化控制技术方向的研究。

引用格式: 邢印强. 基于 FuzzyP 的多臂机器人机械臂控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(3): 140-144.

如图 1 所示，控制系统整体结构包括姿态识别子系统，操作手控制演示界面，以及仿真子系统。其中，姿态识别子系统负责采集及处理姿态信息^[4]。加工模块负责姿态角、腕位的计算、姿态的确定；机械臂控制演示与仿真系统主要包括姿态信息校正、运动分析计算两部分。姿态信息标定与运动学分析计算模块主要完成人体腕位的计算，虚拟机械手端位的标定，运动学信息的求解与轨迹规划^[5]。该系统能够实现各个关节的数据显示和语音控制，机械手人机交互控制系统中基于姿态识别的各子系统之间采用串行通信方式进行通信。

设计模糊控制器时，在原 PID 控制参数的基础上，只需对参数进行额外调整^[6]。它由常规积分控制、微分控制和模糊逻辑控制构成，FuzzyP 控制器具有结构简单，设计方便等特点；通过引入模糊控制，有效地提高了系统的鲁棒性和自适应性^[7]。采用模糊控制在线调节比例系数，克服了传统 PID 控制的局限性，有效地解决了复杂时变参数及其它不利因素对系统速度与稳定性的影响^[8]。

2 硬件结构设计

基于 FuzzyP 的多臂机器人机械臂控制系统，共有 18 个自由度。每个手臂都是空间开链结构，各个关节的运动是相互独立的，各关节均设有独立的关节控制器，采用现场总线技术实现了多臂机器人的控制。该系统具有高度的开放性，便于多臂机器人与多个厂商设备的连接，并可集成扩展^[9]。全数位高速通讯的特性为主控计算机实现多关节的运动控制提供了可靠的保证，也为实现机器人三臂之间实时避碰所需的大量数据交换奠定了基础^[10]。其总线结构使联合控制器的连接大大减少，这样既能降低硬件成本，又能简化系统结构，大大提高系统连接的可靠性、操作性和可维护性。图 2 中显示系统硬件结构。

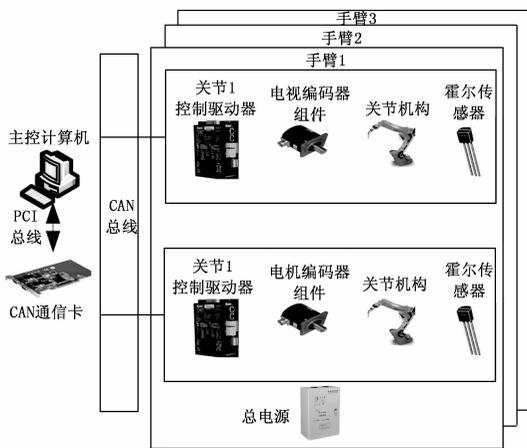


图 2 系统硬件结构

控制系统的结构图见图 2，该系统由主控计算机、CAN 主站通信卡和联合控制驱动器与 CAN 现场总线相连组成^[11]。主控制计算机和 CAN 主站通讯卡之间采用 PCI 总线连接，控制系统通过 CAN 接口电路与 CAN 总线相连。

2.1 驱动电路

机械臂的电机驱动电路是整个研究的基础，它具有良好的起动和调速性能，因此其稳定控制成为研究重点。

2.1.1 电机选型

对电机选择，有刷直流电机具有比无刷直流电机更好启动调速性能，且控制简单，价格低廉。常用于对启动、调速有较高要求的场合，如精密机床、工业机器人装配等^[12]。

2.1.2 电机位置传感器选用

对电机位置传感器选用，有增量型编码器和绝对型编码器 2 种。递增编码器是用来测量前期基点角测量位移的递增编码器。测角精度低，测角精度大，误差累积；完全编码器测量的是工作时的角度位移。小角测量不精确，大角测量没有累积误差。针对机械手转角不大的特点，确定采用增量式编码器，以减少小角度的测量误差^[13]。

2.1.3 电机控制电路设计

通过一个 H 桥电路和一个 MOSFET 功率开关装置，4 H 桥和一台电动机的横梁 H。另外，两个 IR2106S 驱动芯片作为自举式电路的驱动芯片，为上桥臂提供开关控制的两个^[14]。因为单片机的 PWM 信号输出力不足以驱动 IR2106S，需要与芯片的驱动增强电路 74ACT244 配合，才能将 PWM 信号输出增强，然后再引入到 IR2106S 的输入端。图 3 中显示驱动电路。

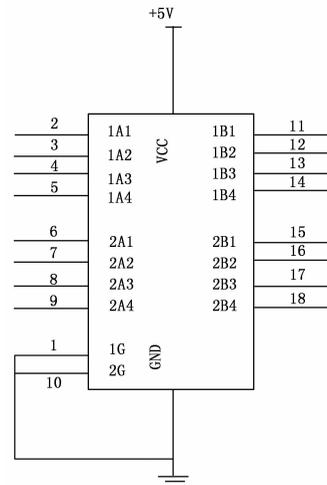


图 3 驱动电路

2.2 位姿信息获取与处理模块

多臂机器人机械手的模糊控制系统要求操作者在相机能够接受的范围内，对环境的要求较高，同时图像信号干扰会造成较大的识别误差^[15]。针对工程环境的特殊性和对耐磨性的要求，提出了一种基于模糊控制器的多臂机器人机械手控制方法。该方法使用方便，受环境影响小，可在有效范围内随时随地进行远程控制。姿态信息采集处理模块硬件结构如图 4 所示。

依据图 4 所示结构，单片计算机能够精准计算姿态角及位置，实现对各个模块的控制。通过 NRF24L01 获取操

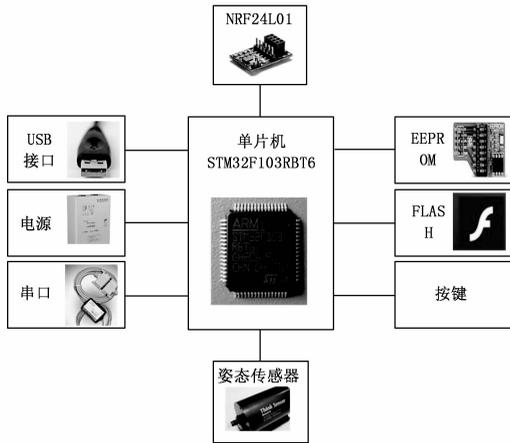


图 4 姿态信息处理模块硬件结构

作人员的运动信息，NRF24L01 能够完成与 PC 机通信的无线。求解姿态角时，人体固有的抖动噪声、随机噪声会对速度信号造成较大干扰，易引起信号误差。这个系统将姿势传感器连接到肩、肘、腕 3 个关节，通过以上方法获得关节角。采用肩坐标作为参考坐标，可根据各关节的角度信息确定手腕的位置；以此信息为粗调控制信息，确定机械手的手臂动作，确定固定姿态，完成机械手的精调。

3 软件功能设计

3.1 基于 FuzzyP 被控量振荡抑制

由于液压关节伺服系统严重的非线性和时变特性，传统的 PID 调节参数无法在线改变，很难达到理想的控制效果。结合 FuzzyP 控制的思想，可提高系统的可控性。设计 FuzzyP+PID 控制器时，在原 PID 控制参数的基础上，只需调整一个附加参数，即有死区补偿参数。它由常规积分控制、微分控制和模糊逻辑控制构成，引入模糊控制，能够提升系统鲁棒性及自适应性。

根据传统的 PID 控制经验，当比例系数较大时，静态误差减小，但很容易造成闭环系统的振荡，甚至造成闭环系统的不稳定；K 太小，系统的快速性无法满足要求。通过对比例系数的在线模糊控制调整，克服了关节位置控制系统固有的不新颖性和参数时变的影响，使系统在快速与稳定之间找到了平衡点。整体控制能消除静态误差，但响应速度较慢。微分控制可以加速控制过程，不但能够及时地响应偏差，而且能够响应偏差的变化。在抑制扰动方面，采用 4 点中心差分方法实现微分项近似算法对扰动不太敏感，参考以往和当前采样次数的偏差均值，即：

$$\bar{e}_k = (e_k + e_{k-1} + e_{k-2} + e_{k-3})/4 \quad (1)$$

公式 (1) 中： $e_k, e_{k-1}, e_{k-2}, e_{k-3}$ 分别表示 4 个采样中心点。

3.2 多臂机器人机械臂控制方案设计

该系统中的多臂机器人属于关节型机器人，关节式机器人的本质是一个连杆系统，由多个旋转关节和运动关节相连。在此基础上，建立了各关节的坐标系，并利用坐标系间的关系描述关节间的位置与姿态关系。

两个原始坐标系之间的关系可描述为规格不符齐次矩阵 A 。用 A 来表示第一个链接的构成相对于参考坐标系 $\{0\}$ ，以此来表示表示第二个链接的构成，然后用公式 (2) 来表示第二个链接的构成关系：

$$T_2 = A_1 A_2 \quad (2)$$

多臂机操作机械手从手端到参考坐标系的总位姿关系可表示为以下 3 种形式：

$$T_6 = A_1 A_2 A_3 A_4 A_5 A_6 \quad (3)$$

对单关节机械手，移除第一连杆、第一连杆、1-1 连杆和 1-1 连杆，讨建立了连杆 i 和连杆 $i-1$ 的参考坐标系分析两者之间的位姿关系。

图 5 显示了连杆坐标系的示意图。

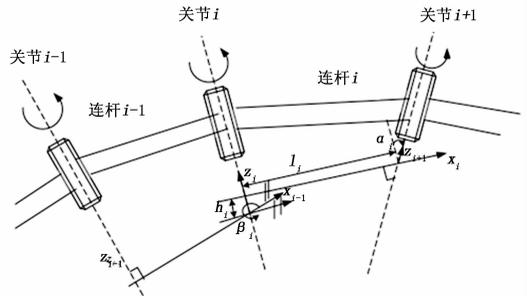


图 5 连杆坐标系示意图

从图 5 可以看出，建立坐标系 $\{i\}$ 的方法是：将关节 $i-1$ 的公法线与关节 i 的轴和关节 i 的轴的交点作为原点； z_i 轴沿关节 i 的轴向上； x_i 轴沿关节 i 和关节 $i+1$ 的轴指向关节 $i+1$ ； y_i 轴和 x_i 轴； z_i 轴遵循右手法则。 $\{i-1\}$ 和 $\{i+1\}$ 坐标系也可同样获得。在图 5 中， h_i 表示连接 $i-1$ 公法线与 z_i 轴上连杆 i 之间的距离，而 l_i 表示连接 i 轴上连接 $i+1$ 关节之间的距离； β_i 为 x_{i-1} 轴变换到 x_i 轴需绕 Z_i 轴旋转的角度； α_i 为关节 i 与关节 $i+1$ 的轴线在垂直与 α_i 的平面内的夹角。可以通过以下步骤从坐标系 $\{i-1\}$ 转换到坐标系 $\{i\}$ ：

- 1) 将坐标系 $\{i-1\}$ 绕 Z_i 轴旋转 β_i ，使得 x_{i-1} 与 x_i 位于同一直线上；
- 2) 将坐标系 $\{i-1\}$ 沿 Z_i 移动 h_i ，使得 x_{i-1} 与 x_i 位于同一高度上；
- 3) 将坐标系 $\{i-1\}$ 沿 x_i 平移 l_{i-1} ，此时坐标系 $\{i-1\}$ 原点位于 Z_i 上；
- 4) 将坐标系 $\{i-1\}$ 绕 x_i 轴旋转 α_{i-1} ，坐标系重合。

4 实验结果与分析

在基于 FuzzyP 的多臂机器人机械臂控制系统设计实验中，选取机器人运动空间内的重复点进行位置运动位置精度测量，采用 POLARIS 光学导航仪作为测量工具，图 6 为多臂机器人机械臂实验图。

将定位支架固定在多臂机器人机械臂末端，将导航仪位置作为机械臂末端测量点实际位置。

- 1) 控制机械臂，使其运动到一个合适位置，保证导航

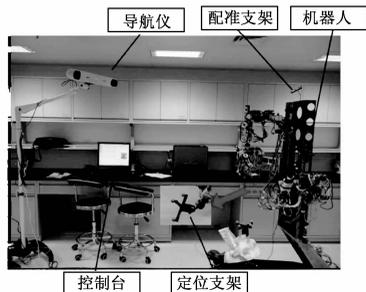


图 6 多臂机器人机械臂实验图

仪对定位支架定位在 0.01 mm 误差范围内，以此作为实验给定值，记录此时定位支架下坐标值。

2) 控制机械臂运动一段距离后，主控计算机控制机械臂回到原始位置，记录到此时位置信息后，定位导航仪下坐标值。

3) 重复上述步骤，获取多测量坐标值，并进行数据处理。

4.1 实验数据分析

演示界面的通信模块完成了界面与操作者实际操作手之间的通信。上行链路信息为腕部姿态信息，下位显示界面为真实机械手传递指令信息，演示界面为串行通信。机械手控制器接收相应关节的控制指令，给出各关节的位置信息。

该系统的驱动方式是保证每个关节相应地增加相应的度数，并以每个关节在控制指令中的位置作为变量来完成实际机械手各关节角度的变化。

为了方便实验分析，以非模态对话框作为显示窗口，如表 1 所示。

表 1 显示窗口数据

坐标显示	
末端坐标	$x-2.5; y-0; z-0$
目的坐标	$x-0; y-0; z-0$
关节角度	
关节 1	0
关节 2	0
关节 3	0
串口选择	
接收串口	COM8
发送串口	COM7
控制指令格式	#IP1500 #2P1500 #3P1500 #4P1500

显示窗口将实时显示每次机械臂末端坐标和目的坐标，保证发送的控制指令能够全部被执行。

4.2 实验结果分析

在实验对象腕部、肘部和肩部固定传感器后，移动其手臂由位置 A 到位置 B，分别使用基于姿态识别控制系统、基于位置识别控制系统和基于 FuzzyP 控制系统对机械臂运动轨迹控制精度展开对比分析，结果如图 7 所示。

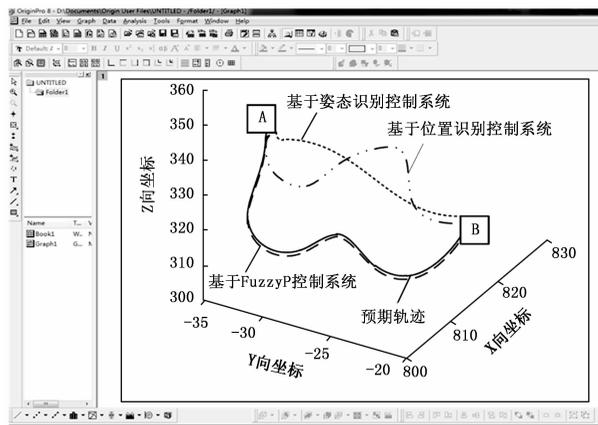


图 7 3 种系统机械臂运动轨迹控制精度对比分析

由图 7 可知：使用基于姿态识别控制系统从 A 到 B 坐标变换与预期轨迹差别较大，整个轨迹运行路线较短；基于位置识别控制系统从 A 到 B 坐标变换与预期轨迹差别较大，尤其是在坐标点为 (820, 23, 345) 时，差别最大；使用基于 FuzzyP 控制系统与预期轨迹基本一致，由此可知使用该系统机器人机械臂轨迹控制精度较高。

5 结束语

基于 FuzzyP 的多臂机器人机械臂控制系统是可行的，可以满足中小型协同机器人对机械手的控制要求，并且具有控制精确，动作灵活等优点。通过添加 H 桥电路，可以实时检测出机械手的力矩，达到力矩限制的目的，实现机械手的零力控制。该机械臂在力矩超过设定值时停止工作，避免对工作人员造成意外伤害。在此基础上，完成了机械手姿态控制及系统演示界面的开发，并在研究多臂机械手控制系统时实现了模糊控制器的功能。

该研究还有很多地方需要改进，例如还可以深入探讨机械臂各部件的三维建模方法，以提高控制精度。未来也将以这一方向为研究目标，进一步完善多臂机器人机械臂控制系统。

参考文献：

- [1] 刘嘉宇, 李通通, 余张国, 等. 多臂空间机器人操作大型目标的全身接触柔顺控制研究 [J]. 兵工学报, 2019, 40 (2): 395 - 403.
- [2] 冯 骁, 卢 山, 侯月阳, 等. 多臂空间机器人的视觉伺服与协调控制 [J]. 宇航学报, 2018, 39 (2): 206 - 215.
- [3] 王成军, 郝志伟, 郭永存, 等. 轨道式多臂铸件清理机器人的设计与分析 [J]. 铸造技术, 2019, 40 (1): 81 - 84.
- [4] 钟 君, 曹建树. 基于 Kinect V2. 0 的 6 自由度机械臂控制系统的实现 [J]. 机床与液压, 2018, 46 (9): 81 - 85.
- [5] 王 炎, 赵 京, 陈雨青. 基于三角函数的机器人手臂轨迹跟踪控制重力补偿算法 [J]. 北京工业大学学报, 2019, 8 (7): 623 - 630.
- [6] 张 娟, 李 锐, 程 威, 等. 基于机器人操作系统的机械臂辅助超声扫描系统研究 [J]. 生物医学工程研究, 2018, 37

(4): 11-16.

[7] 许 鹏, 陈友东. 三维仿真交互式双臂机器人离线编程系统设计 [J]. 计算机工程与设计, 2018, 39 (7): 2042-2047.

[8] 张 强. 核环境多关节蛇形机械臂的运动控制系统设计 [J]. 山东大学学报(工学版), 2018, 48 (6): 69-72.

[9] 钟 君, 曹建树. 基于 Kinect V2. 0 的 6 自由度机械臂控制系统的实现 [J]. 机床与液压, 2018, 46 (9): 88-92.

[10] 徐宝国, 何小杭, 魏智唯, 等. 基于运动想象脑电的机器人连续控制系统研究 [J]. 仪器仪表学报, 2018, 39 (9): 10-19.

[11] 秦国栋, 岑豫皖, 叶小华, 等. 拆解机器人负载敏感系统多臂复合动作能量回收研究 [J]. 液压与气动, 2018, 326 (10):

59-64.

[12] 孟祥冬, 何玉庆, 韩建达. 接触作业型飞行机械臂系统的力/位置混合控制 [J]. 机器人, 2020, 42 (2): 167-178.

[13] 谢宇坤, 吴青聪, 陈 柏, 等. 基于单目视觉的移动机械臂抓取作业方法研究 [J]. 机电工程, 2019, 36 (1): 77-82.

[14] 王登峰, 王丽娟, 徐 敏. 关节一体化机器人动力学建模与伺服系统控制 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2018 (8): 112-117.

[15] 张博文, 黄攀峰, 刘正雄. 基于 Kinect 的七自由度空间机械臂体感控制方法 [J]. 载人航天, 2019, 25 (1): 85-91.

(上接第 128 页)

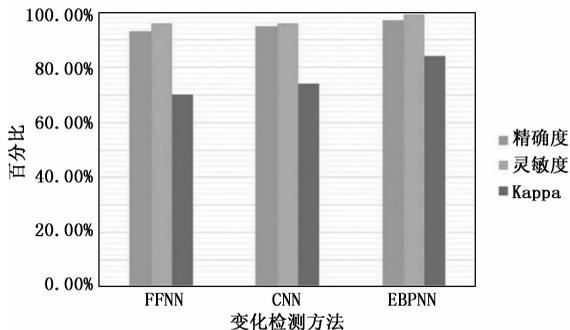


图 14 不同变化检测方法的定量比较

与现有的 FFNN 和 CNN 方法相比, 本文所提出方法在准确度、KAPPA 和灵敏度都得到了提高。CNN 的准确度为 95%, FFNN 的准确度为 93%, 而本文所提出的方法, EBPNN 的准确度提高到了 97%。因此, 本文提出的 EBPNN 方法在精度上有了一定的提高。在对比现有方法 CNN 和 FFNN 时, 所提出的 EBPNN 方法的 KAPPA 系数为 0.8403, 虚检率为 0.0234, 漏检率为 0.0135。通过有效的特征提取和 EBPNN 分类器, 可提高变化检测中的精度问题。

6 结束语

为了更好地实现遥感图像的分类和检测变化, 本文提出了一种 EBPNN 分类器。在该方法中, 将区域划分为植被、水域和城区等不同的区域, 识别每个类的变换并对变化进行分析。使用 AMF 预处理技术来消除图像的噪声。在此基础上完成了 Tamura 特征和 Law 掩模特征的提取, 最后利用具有变化检测的 EBPNN 分类器算法进行分类。与现有的 FFNN 和 CNN 分类技术相比, 利用 EBPNN 进行分类可以有效地检测出图像中的变化且具有更好的性能结果。

参考文献:

[1] 彭晏飞, 宋晓男, 武 宏, 等. 结合深度学习与相关反馈的遥感图像检索 [J]. 中国图象图形学报, 2019, 24 (3): 420-434.

[2] 王 超, 张雪红, 石爱业, 等. 结合阴影补偿的对象级高分辨率遥感影像多尺度变化检测 [J]. 通信学报, 2018, 39 (9): 159-167.

[3] 王峰萍, 王卫星, 高 婷, 等. 基于离散小波变换和邻域模糊 C 均值的变化检测方法 [J]. 西北工业大学学报, 2018, 36 (3): 426-431.

[4] 牟多铎, 刘 磊. ELM 与 SVM 在高光谱遥感图像监督分类中的比较研究 [J]. 遥感技术与应用, 2019, 34 (1): 115-124.

[5] 刘 晨, 郑恩让, 张 桐. 基于最优区域生成的深度多尺度融合遥感飞机检测方法 [J]. 科学技术与工程, 2019, 19 (30): 258-262.

[6] 李 骥, 肖雷鸣, 王 威. 双稀疏表示的遥感图像变化检测 [J]. 小型微型计算机系统, 2018, 39 (3): 596-599.

[7] 杨彦荣, 宋荣杰, 胡国强, 等. 基于随机森林和纹理特征的苹果园遥感提取 [J]. 现代电子技术, 2020, 43 (3): 40-44.

[8] 眭海刚, 冯文卿, 李文卓, 等. 多时相遥感影像变化检测方法综述 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43 (12): 1885-1898.

[9] Zhang Ce, Pan Xin, Li Huapeng, et al. A hybrid MLP-CNN classifier for very fine resolution remotely sensed image classification [J]. Photogrammetry and Remote Sensing, 2018, 140 (4): 133-144.

[10] 杨 康, 卫 敏, 孙 磊. 基于 FPGA 的自适应阈值边缘检测系统设计 [J]. 传感器与微系统, 2019, 38 (12): 96-99.

[11] 高 源, 宋 辉, 张志佳. 基于 Tamura 特征的虹膜结构密度计算方法 [J]. 计算机技术与发展, 2016, 26 (3): 36-39.

[12] 陈 浩. 图像经典边缘检测算子的研究与比较 [J]. 电脑编程技巧与维护, 2019 (12): 150-152.

[13] 张 晗, 钱育蓉, 王跃飞, 等. 基于图像边缘增强与弱化的边缘检测 [J]. 计算机工程与设计, 2019, 40 (11): 3106-3110.

[14] Maryam Imani, Hassan Ghassemian. Residential load forecasting using wavelet and collaborative representation transforms [J]. Applied Energy, 2019, 253 (1): 113-128.

[15] Nevrez Imamoglu, Pascual Martinez - Gómez, Ryuhei Hamaguchi, et al. Exploring Recurrent and Feedback CNNs for Multi-Spectral Satellite Image Classification [J]. Procedia Computer Science, 2018, 140 (1): 162-169

[16] 张 康, 黑保琴, 周 壮, 等. 变异系数降维的 CNN 高光谱遥感图像分类 [J]. 遥感学报, 2018, 22 (1): 87-96.