

FMCW毫米波雷达跌倒检测算法研究

许向阳, 张俊强, 沈月健, 李 猛

(河北科技大学信息科学与工程学院, 河北 石家庄 050091)

✉Xxy@hebust.edu.cn; 1847159171@qq.com; 1810001311@qq.com; 2465814027@qq.com



摘要: 跌倒所带来的伤害威胁着老年人的生命安全, 为实时监控造成人体严重损伤的跌倒行为, 为减轻子女、养老机构等人员在养老看护方面的压力, 对调频连续波(Frequency Modulated Continuous Wave, FMCW)毫米波雷达的跌倒检测算法进行研究, 在跌倒检测方面, 通过对雷达信号进行预处理, 得到距离-速度和多普勒两种特征图像, 并使用帧差法去除静态物体干扰, 为充分提取距离-速度图像和多普勒图像的特征, 提出一种双流融合特征提取网络算法。实验结果表明, 所提双流融合特征提取网络算法较其他网络算法, 出现误报、漏报情况的概率大大减小, 检测准确率高达98.75%, 并且系统的整体网络结构简单, 在当前环境下具有较大的实用价值。

关键词: 毫米波雷达; 人工智能算法; 双流融合; 跌倒检测

中图分类号: TP183 **文献标识码:** A

Research on Fall Detection Algorithm of FMCW Millimeter Wave Radar

XU Xiangyang, ZHANG Junqiang, SHEN Yuejian, LI Meng

(School of Information Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050091, China)

✉Xxy@hebust.edu.cn; 1847159171@qq.com; 1810001311@qq.com; 2465814027@qq.com

Abstract: Injuries caused by falls threaten the lives of the elderly. In order to monitor fall behavior that causes serious human injury in real time and reduce the pressure on their children, elderly care institutions, and other personnel in elderly care, this paper proposes to study the fall detection algorithm of FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave) millimeter wave radar. In terms of fall detection, two feature images, range-velocity and Doppler, are obtained by preprocessing the radar signal, and frame difference method is used to remove static object interference. This paper proposes a two-stream fusion feature extraction network algorithm to fully extract features of range-velocity images and Doppler images. The experimental results show that the proposed two-stream fusion feature extraction network algorithm significantly reduces the probability of false positives and false negatives compared to other network algorithms, with a detection accuracy of 98.75%. Moreover, the overall network structure of the system is simple, and it has great practical value in the current environment.

Keywords: millimeter wave radar; artificial intelligence algorithm; two-stream fusion; fall detection

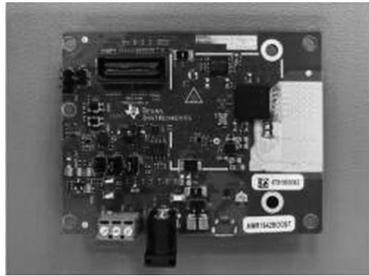
1 引言(Introduction)

据2021年11月公布的全国第七次人口普查结果统计, 我国老年人口达到2.6亿, 每年约有4 000多万起居家老人发生意外摔倒的事件^[1]。在很多案例中, 没有及时发现老人跌倒往往是导致老人错过最佳救治时间的主要原因, 特别是对养老机构等场所来说, 如何在第一时间发现老人跌倒并对其进行及时救治, 成为考验养老机构运营和管理能力的重要指标。

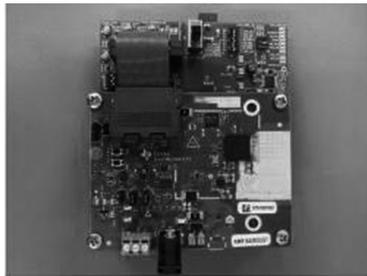
由于毫米波雷达具有良好的安全性和稳定性, 所以近年来出现了很多基于毫米波雷达的跌倒检测算法, 但现有的基于FMCW雷达信号的人体姿势感知算法存在对多维信息的利用不够充分、未考虑到实际环境的复杂性对系统性能的影响、功能比较单一、系统操作烦琐等问题^[2]。为解决以上问题, 本文提出一种双流融合特征提取算法对融合特征进行提取, 通过实验验证, 算法的准确率很高, 效果显著。

2 毫米波雷达平台(Millimeter wave radar platform)

本系统中的毫米波雷达平台采用TI公司的AWR1642BOOST毫米波雷达和DCA1000EVM高速数据采集板,通过60引脚Samtec连接线组成,AWR1642与毫米波雷达平台如图1所示。



(a)AWR1642



(b)毫米波雷达平台

图1 AWR1642与毫米波雷达平台

Fig.1 AWR1642 and millimeter wave radar platform
AWR1642硬件的具体参数见表1。

表1 AWR1642硬件参数

Tab.1 AWR1642 hardware parameters

硬件参数	值
工作频率/GHz	77—81
最大探测距离/m	15
距离分辨率/cm	4
方位角/°	±70
仰角/°	±40
工作电压/V	5

DCA1000EVM为来自TIAWR1642雷达传感器两通道和四通道的低压差分信号流量提供数据实时捕获和传输功能。雷达数据可以通过1 Gbps以太网实时传输到上位机,实现数据的捕获与存储,然后可以将其传递给所选的应用进行数据处理和算法开发。

毫米波雷达的ADC原始数据采集流程如图2所示。由图2可知,PC电脑端与AWR1642开发板之间的USB负责程序下载和实现虚拟串口功能;PC端和DCA1000EVM数据采集板之间的USB接口负责控制信号的传输通信。AWR1642BOOST毫米波雷达接收到回波信息后,通过混频器得到中频信号,ADC分别对四路信号进行采样并存储到ADC缓存中,然后ADC数据通过LVDS接口经DCA1000EVM通过以太网传输达

到PC端进行处理。

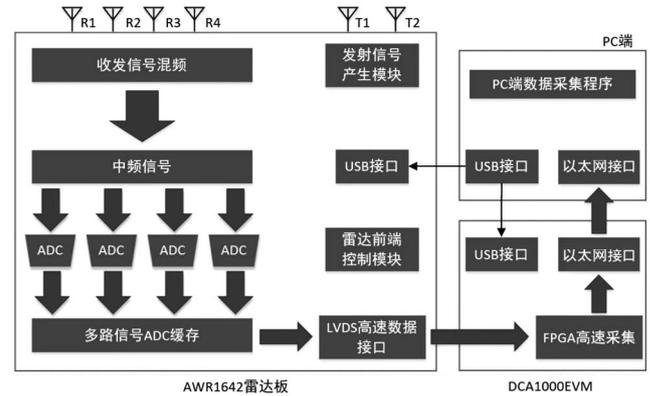


图2 毫米波雷达平台数据采集流程

Fig.2 Data acquisition process of millimeter wave radar platform

3 数据集(Data set)

本系统训练的算法可完成对无人、有人静止、行走、跌倒、挥手五类人体状态的识别^[3-5],旨在识别人体动作类别,不需要识别动作的具体方向,因此只需要处理毫米波雷达的距离维和速度维信息。算法阶段主要分为雷达信号采集与处理、信号特征提取、基于深度学习的算法实现。

3.1 数据采集

FMCW雷达中频信号以64帧为采集单位进行采集,每帧数据内有128个扫频,每个扫频具有64个采样点。最大探测距离为5 m,距离分辨率为9 cm,最大探测速度为3 m/s,速度分辨率为0.12 m/s,雷达采集数据的具体参数见表2。

表2 雷达采集数据的具体参数

Tab.2 Specific parameters of radar acquisition data

雷达参数	值
采样率/ksps	8 000
开始频率/GHz	77.00
调频斜率/(MHz/μs)	60.01
ADC采样数/个	256
带宽/MHz	3 600.72
每帧Chirp数/条	128
接收天线增益/dB	30
周期/ms	40

实验人员在毫米波雷达斜下方1—3 m进行数据采集,为防止过拟合问题的发生,实验人员必须在不同的位置做动作,本项目共采集300次无人、300次静止、300次行走、300次跌倒、300次挥手,共计1 500条数据。

3.2 数据预处理

通过调频连续波雷达采集动作的回波数据并进行预处理得到距离-速度图,然后将目标所在的距离门信号相干叠加后进行短时傅里叶变换,得到微多普勒时频谱图像。

3.2.1 距离-速度图

距离-速度图的构建过程如图3所示,第一次快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)是在快时间域对雷达信

号的频率进行估计,第二次FFT是在第一次FFT的基础上在慢时间域对雷达信号的多普勒进行估计,最终得到雷达信号一帧的距离-速度图。

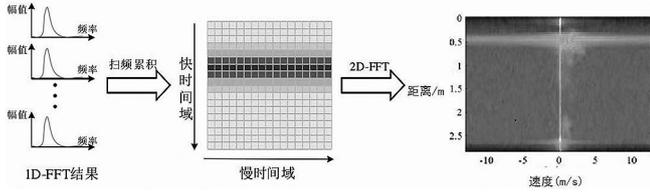


图3 距离-速度图构建原理

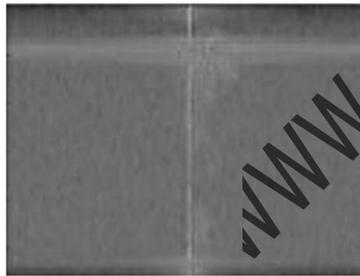
Fig.3 Diagram of range-velocity construction principle

去除距离-速度图中的静态目标干扰,使用帧差法对距离-速度图进行去静态目标处理。如公式(1),将若干帧数据进行累积并求得均值 X_{bk} 作为背景帧,然后将 X_{bk} 带入公式(2)得到去除静态目标干扰后的距离-速度图,图4(a)为未进行去除静态目标的距离-速度图,图4(b)为去除静态目标干扰后的距离-速度图;本研究针对每个动作采集64帧雷达数据,以步长为3帧在64帧数据中得到16帧数据,即每个动作可得到16张距离-速度图。

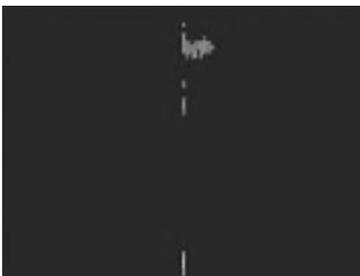
$$X_{bk} = \frac{1}{s} \sum_{k=1}^s \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_k^{(i,j)} \quad (1)$$

$$X'_{bk} \left(x_{bk}^{(r,d)} \right) = \begin{cases} \sum_{d=1}^n \left[\sum_{d=1}^{m/2} x_{bk}^{(r,d)} + \sum_{d=m/2+2}^m x_{bk}^{(r,d)} \right], & d \neq \frac{m}{2} + 1 \\ \sum_{r=1}^m x_{bk}^{(r,d)}, & d = \frac{m}{2} + 1 \end{cases} \quad (2)$$

其中, X_{bk} 为若干帧数据雷达后求均值得到的背景帧, s 表示距离-速度图中背景帧的累积个数, m 和 n 分别是距离-速度图的距离轴和速度轴的像素总数。



(a)静态目标未去除



(b)帧差法去除静态目标后

图4 帧差法去除静态干扰对比效果

Fig.4 Comparison effect of frame difference method for removing static interference

3.2.2 多普勒-时间图

当人在毫米波雷达前做不同动作时,会造成雷达回波信

号的频率发生变化,例如当人行走和跌倒时,由于人在跌倒时的瞬时速度远大于正常行走速度,因此当人跌倒时会使雷达回波信号产生短暂的频率升高。构建多普勒-时间图(多普勒频率图),可以通过人体动作的频率变化检测该目标的动作类别,这也是目前最常用的人体动作识别输入数据。多普勒频率图可以从距离-时间图中提取人体运动的多普勒偏移值得到,用来描述某一帧人体运动的速度信息。通过累积 N_{fra} 帧雷达数据对多普勒-时间图进行构建,如图5所示,在多普勒偏移值的提取过程中进行了背景噪声去除动态干扰抑制处理。

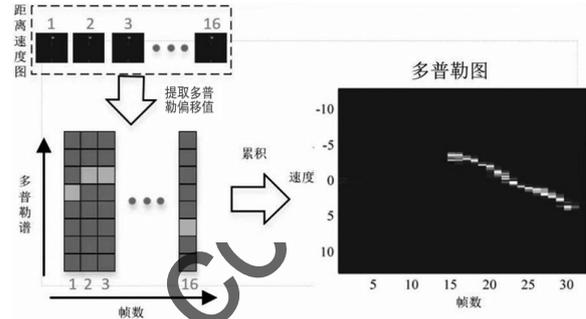


图5 多普勒图构建原理

Fig.5 Diagram of Doppler construction principle

本文采集的多普勒频率图如图6所示,图6(a)一图6(b)分别表示无人、静止、行走、跌倒、挥手动作的频率图。

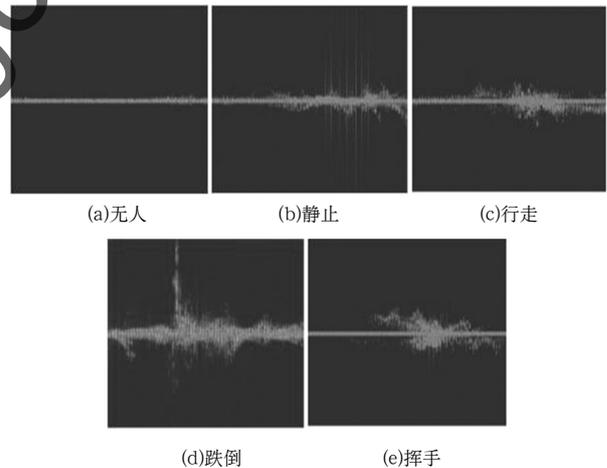


图6 五种动作的多普勒图

Fig.6 Doppler diagram of five actions

4 跌倒检测算法实现(Implementation of fall detection algorithm)

本文的跌倒检测和人体动作识别需要使用深度学习算法实现,使用本研究提出的双流融合神经网络识别跌倒、挥手、无人、静止、行走五类动作^[6-7],获得距离-时间图和多普勒频率图两种参数的图像。本文提出的双流融合神经网络主要包括四个部分:①设计残差网络(Residual Networks, ResNet)对多普勒频率图进行特征提取;②对距离-时间图设计CNN-LSTM网络进行特征提取;③将多普勒频率图和距离-时间图提取到的特征进行融合,并使用长短期记忆网络

(Long Short-Term Memory, LSTM)提取融合特征的时序信息；④添加两个全连接层网络进行特征分类。

双流融合神经网络的实现流程如图7所示。

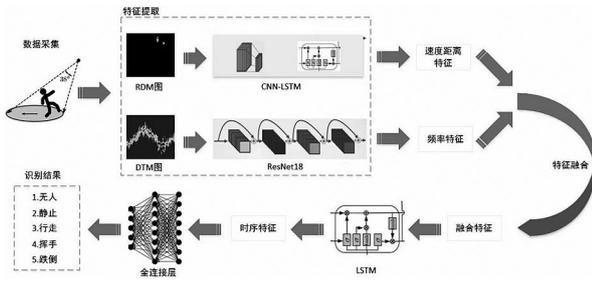


图7 双流融合神经网络结构

Fig.7 Two-stream fusion neural network structure

4.1 多普勒频率图特征提取

为充分提取多普勒频率图的特征信息，使用ResNet18神经网络对图像进行特征提取，整个网络包括1个卷积层和5个残差层即1个全连接层。将多普勒频率图输入ResNet18网络中，最终在全连接层得到1 000×1维的多普勒特征向量。

4.2 距离-速度图特征提取

为充分对距离-时间图的特征信息和时序信息进行提取，本算法使用CNN-LSTM网络，利用CNN对每帧图像的特征信息进行提取，利用LSTM对每个动作帧之间的时序信息进行提取。将16帧距离-时间图经过3层3×3卷积后，在经过两次全连接层后，得到16帧1 000×1维的距离-时间图特征向量，在经过LSTM网络后得到1 000×1的特征向量。

4.3 特征融合时序信息提取

将多普勒频率图和距离时间图生成的两组1 000×1维度特征，并联组成总长度为1 000的融合特征。在生成的融合特征中，每组特征中包含雷达回波信号中的人体运动的距离、速度和多普勒具有时序上的联系。本系统使用LSTM网络进行特征提取，将融合后的特征输入LSTM单元。其中，当前细胞状态存储了其前几步的人体运动信息，并且决定了此时的输出，由此保留了融合特征的时序信息，生成最终的时序特征向量，具体处理过程如图8所示。

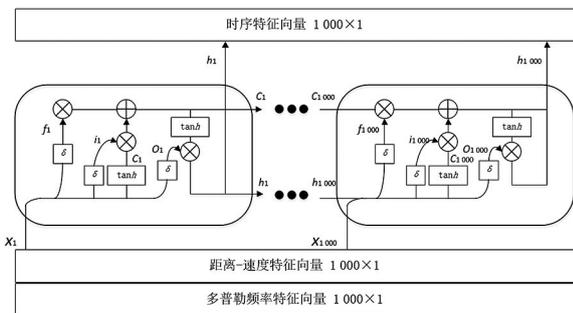


图8 融合特征处理过程

Fig.8 Fusion feature processing process

5 实验结果(Experimental result)

对二维参数数据集进行预处理后，得到的距离-速度图和多普勒图的质量有一定的提升，为了验证预处理后的效果，

分别对处理前和处理后的数据集利用本文提出的双流融合卷积神经网络进行实验，对模型每隔500步迭代保存，并进行测试验证，验证数据集的准确率曲线如图9所示。

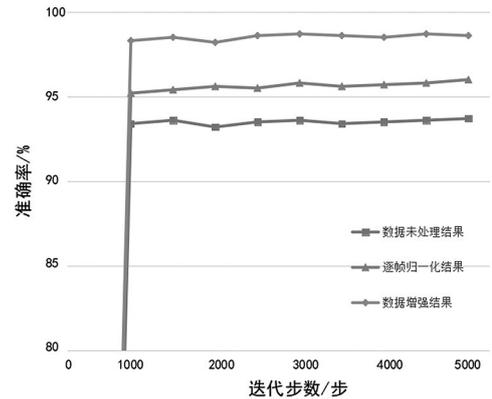


图9 数据集预处理前后准确率对比

Fig.9 Comparison of accuracy before and after dataset preprocessing

为了验证本文提出的人体跌倒检测识别方法的可行性，选取元志安等^[8]提出的基于距离-速度图识别的RDSNet神经网络，孙济舟等^[9]使用5层CNN网络对老人雷达点云进行分类，以及王智等^[10]利用ROS平台设计并实现的基于激光雷达的室内跌倒检测系统，分别在速度、准确率、防误触方面与本文提出的方法进行对比分析，详细结果见表3。

表3 不同算法模型对比分析

Tab.3 Comparative analysis of different algorithm models

模型	本系统算法	文献[8]算法	文献[9]算法	文献[10]算法
准确率/%	98.75	96.67	95.40	90.87
速度/ms	55	50	58	43
防误触	有	无	无	无

从表3中的数据看出，虽然本系统算法在速度上略快于文献[8]和文献[10]提出的算法，但是在准确率和防误触方面明显优于其他文献的算法，准确率高达98.75%，较其他网络算法出现误报、漏报的概率大大减小。

6 结论(Conclusion)

本文提出了一种双流融合特征网络提取算法，对多普勒频率图用ResNet进行特征提取，然后对距离-时间图设计CNN-LSTM进行特征提取，将提取到的两种特征进行融合，并对融合特征的时序信息使用LSTM提取，添加2个全连接层和1个输出层进行特征分类，最后通过大量的硬件和软件实验测试，结果表明所提算法准确率高达98.75%。未来，研究人员将采集更加丰富的数据集，进一步对算法进行评价，并加以改进。

参考文献(References)

[1] 王金营,李天然,张国庭.新时代中国人口发展:现状、特征、影响和挑战[J].晋阳学刊,2023(02):29-43.
 [2] 王勇,王沙沙,田增山,等.基于FMCW雷达的双流融合神经网络手势识别方法[J].电子学报,2019,47(07):1408-1415.

[3] 侯春萍,蒋天丽,郎玥,等.基于卷积神经网络的雷达人体动作与身份多任务识别[J].激光与光电子学进展,2020,57(02):121-129.

[4] 田增山,杨立坤,付长友,等.基于多天线FMCW雷达的人体行为识别方法[J].重庆邮电大学学报(自然科学版),2020,32(05):779-787.

[5] 蒋留兵,潘波,吴岷洋,等.基于FT_SSIM和ICAGA_CNN在小样本场景下雷达动作识别方法研究[J].计算机应用研究,2022,39(04):1105-1110.

[6] NGUYEN L. SAR imaging technique for reduction of sidelobes and noise[C]// Radar Sensor Technology XIII. International Society for Optics and Photonics.Bellingham, WA: SPIE, 2009:7308.

[7] 蒋留兵,魏光萌,车俐.基于字典学习的77GHz雷达人体动作识别[J].科学技术与工程,2020,20(06):2317-2324.

[8] 元志安,周笑宇,刘心薄,等.基于RDSNet的毫米波雷达人体跌倒检测方法[J].雷达学报,2021,10(04):656-664.

[9] 孙济舟,于大泳.基于毫米波雷达的跌倒方式实时检测方法研究[J].软件导刊,2022,21(02):101-108.

[10] 王智,王伟林,黄先栋.基于激光雷达的室内跌倒检测系统设计与实践[J].电声技术,2021,45(11):51-54.

作者简介:

许向阳(1967-),男,硕士,副教授.研究领域:IP网络,多媒体通信,网络安全,卫星通信.

张俊强(1997-),男,硕士生.研究领域:卫星通信网络研究.

沈月健(1997-),男,硕士生.研究领域:人工智能及雷达信号处理.

李猛(1998-),男,硕士生.研究领域:复杂网络及数据挖掘.

(上接第23页)

(8)生成shape文件,执行shapeclustering -F font_properties -U unicharset -O langyp.unicharset langyp.figen.exp0.tr命令.

(9)生成聚集字符特征文件,执行mftraining -F font_properties -U unicharset -O命令.

(10)生成字符正常化特征文件,执行cntraining langyp.figen.exp0.tr命令.

(11)合并训练文件,执行combine_tessdatafigen命令.

完成训练后,将字库拷贝放入工程项目doc/fonts目录下,当表格单元格分割完毕后,需要对单元格内的字符信息进行识别,由于需要对识别后的信息再填充进新的数字表格中,因此对单元格的左上角坐标进行标记,调用训练的字典将字符识别完毕后存入对应的空表格内.

5 实验结果分析(Analysis of results)

本文对样本表格在原生Tesseract-OCR、未进行掩膜实验、腾讯OCR和掩膜实验进行识别实验对比,结果详见表1.

表1 实验结果对比

Tab.1 Comparison of experimental results

序号	技术	所需时间/s	识别准确率/%
1	Tesseract-OCR	—	36
2	未进行掩膜实验	13.17	92
3	腾讯OCR	8.24	95
4	掩膜实验	6.88	96

实验硬件环境:CPU为第九代英特尔酷睿i7处理器,显卡为NVIDIA GeForce GTX 1650,内存为16 GB.软件环境:python 3.6.8, Windows 10 64位操作系统.实验证明,原生Tesseract-OCR识别字符准确率很低,难以达到识别精确度的标准;腾讯OCR比未进行掩膜实验的识别速度快且精度也高,但是该OCR引擎不能对参数进行设置,只能对整张表格进行识别;而掩膜实验识别所需时间比未掩膜实验少一半且比腾讯OCR快1.36 s,识别准确率也提高了1%.

6 结论(Conclusion)

本文利用形态学检测原理及Tesseract-OCR字符识别技术,结合角点检测方法实现对原料手写表格的识别,描述了

对图像预处理的过程,以及动态掩膜及单元格分割与字库训练步骤.将本文所提手写表格识别系统与市场主流腾讯OCR技术进行对比实验,证明本文所提系统对原料表格识别速度更快、准确率更高,同时该识别系统可以部署到企业的所有上位机中,能很好地运用到企业的实际生产过程中,降低生产成本、提高工作效率和实现数据的二次利用率.

参考文献(References)

[1] 易露霞,吴非,徐斯旻.企业数字化转型的业绩驱动效应研究[J].证券市场导报,2021(08):15-25,69.

[2] 马志远,余粟.基于Faster-RCNN网络的表格检测算法研究[J].智能计算机与应用,2020,12(10):24-27,31.

[3] 毛尚伟,张志清,汤槟,等.基于Transfer-crf神经网络的电子表格智能识别算法[J].重庆理工大学学报,2019,33(10):155-160.

[4] 潘炜,刘丰威.基于深度学习的表格类型工单识别设计与实现[J].数字技术与应用,2020,38(07):150-152.

[5] 王泽强,陈义明.一种基于YOLOv3和数学形态学的表格检测方法[J].电脑知识与技术,2021,17(02):14-16.

[6] MA Y W, WANG B, HU H T. Hybrid model for Chinese character recognition based on Tesseract-OCR[J]. International Journal of Internet Protocol Technology, 2020, 13(2):102-108.

[7] 谢勤岚.图像降噪的自适应高斯平滑滤波器[J].计算机工程与应用,2009,45(16):182-184.

[8] 李了了,邓善熙,丁兴号.基于大津法的图像分块二值化算法[J].微计算机信息,2005(14):76-77.

[9] 罗朝阳,张鹏超,姚晋晋,等.一种基于形态学的边缘检测算法[J].计算机应用与软件,2020,37(02):177-181,247.

[10] 张从鹏,魏学光.基于Harris角点的矩形检测[J].光学精密工程,2014,22(08):2259-2266.

[11] 张婷婷.基于Tesseract_OCR文字识别系统的研究[D].南京:南京邮电大学,2020.

作者简介:

方浩东(1997-),男,硕士生.研究领域:数字化及自动化.

鲍敏(1977-),男,博士,副教授.研究领域:智能制造,生产过程数据分析.