

# 面向计算机辅助舌诊关键问题的解决方案综述



张丽倩<sup>1</sup> 李孟航<sup>1</sup> 高珊珊<sup>1,2,3</sup> 张彩明<sup>2,4,5</sup>

1 山东财经大学计算机科学与技术学院 济南 250014

2 山东省数字媒体技术重点实验室 济南 250014

3 山东省中美数字媒体国际合作研究中心 济南 250014

4 山东大学软件学院 济南 250101

5 山东省未来智能计算协同创新中心 山东烟台 264025

(819334791@qq.com)

**摘要** 舌诊是“望、闻、问、切”四诊中的重要内容之一,也是我国中医诊法的一大特色。中医医师需要通过肉眼观察进行临床诊断,这使得传统舌诊具有主观依赖性强、缺乏量化的缺点。随着智慧医疗的发展,研究人员着重研究如何借助计算机进行舌象的辅助诊断,实现智能舌诊,进而实现智慧中医。近年来,智能舌诊的相关研究逐渐成为热点。为了辅助该领域的研究学者对计算机辅助舌诊进行更深入的探索,文中对其进行了系统、全面的综述。首先介绍了中医舌象计算机辅助诊断的具体流程;其次,在广泛调研现有文献、最新成果及已有应用的基础上,分别对计算机辅助舌诊不同步骤的主流方法进行了分类讨论,归纳总结了基本思想和优缺点;然而列举了部分目前已研发出的舌象分析系统,设计并实现了一个较为完备的计算机辅助舌诊系统;最后总结全文并展望了未来可能的发展方向。

**关键词:** 辅助舌诊;舌体分割;特征提取;苔质分离;舌象分析系统

**中图分类号** TP391

## Summary of Computer-assisted Tongue Diagnosis Solutions for Key Problems

ZHANG Li-qian<sup>1</sup>, LI Meng-hang<sup>1</sup>, GAO Shan-shan<sup>1,2,3</sup> and ZHANG Cai-ming<sup>2,4,5</sup>

1 School of Computer Science and Technology, Shandong University of Finance and Economics, Jinan 250014, China

2 Shandong Provincial Key Laboratory of Digital Media Technology, Jinan 250014, China

3 Shandong China-U. S. Digital Media International Cooperation Research Center, Jinan 250014, China

4 School of Software, Shandong University, Jinan 250101, China

5 Shandong Province Future Intelligent Computing Collaborative Innovation Center, Yantai, Shandong 264025, China

**Abstract** Tongue diagnosis is one of the important contents of the four diagnostic methods of “looking, listening, asking and feeling the pulse”, and it is also a major feature of TCM (traditional Chinese medicine) diagnosis. TCM physicians need to make clinical diagnosis through visual observation, which makes traditional tongue diagnosis have the disadvantages of strong subjective dependence and lack of quantification. With the development of Wise Information Technology of 120 (WIT 120), researchers have focused on how to use computers to assist in the diagnosis of tongue images, realize intelligent tongue diagnosis, and then realize smart Chinese medicine. In recent years, the intelligent tongue diagnosis and its relevant research have become more and more popular. In order to assist researchers in this field to explore computer-aided tongue diagnosis in a more in-depth manner, this paper systematically and comprehensively reviewed them. Firstly, the specific process of computer-aided diagnosis of tongue image of traditional Chinese medicine is introduced. Secondly, based on the extensive study on the existing literature, the latest achievements and existing applications, this paper classifies and discusses different steps of computer-aided tongue diagnosis in mainstream methods, and summarizes the basic ideas, advantages and disadvantages of these methods. Then a relatively complete Com-

到稿日期:2020-08-31 返修日期:2020-11-07 本文已加入开放科学计划(OSID),请扫描上方二维码获取补充信息。

基金项目: NSFC-浙江两化融合联合基金(U1909210, U1609218); 国家自然科学基金(61772309, 61902217); 山东省重点研发计划(2017GGX10109, 2019GGX101007); 山东省省属优青项目(ZR2018JL022); 山东省高等学校青创人才引育计划

This work was supported by the NSFC-Zhejiang Joint Fund of the Integration of Informatization and Industrialization(U1909210, U1609218), National Natural Science Foundation of China(61772309, 61902217), Key Research and Development Project of Shandong Province(2017GGX10109, 2019GGX101007), Shandong Provincial University Excellent Young Talents Joint Fund(ZR2018JL022) and Introduction and Education Plan of Young Creative Talents in Colleges and Universities of Shandong Province.

通信作者:高珊珊(gsszxy@aliyun.com)

puter-aided tongue diagnosis system is designed and implemented after enumerating some tongue image analysis systems that have been developed so far. Finally, this paper summarizes and prospects the possible development direction in the future.

**Keywords** Assisted tongue diagnosis, Tongue segmentation, Feature extraction, Tongue coating and body separation, Tongue analysis system

## 1 引言

舌诊是中医上通过观察舌体、舌质、舌苔、舌下络脉等舌象特征来判断人体健康状况的一种方法,是中医临床诊断过程中的主要依据之一。舌的变化能快速地反映出人体机能的变化,脏腑的虚与实、气血的盛与衰、湿邪之气的侵袭程度都可以较为直观地从舌象中观察出来。但是,传统的舌诊非常依赖于中医医师的知识水平和诊断技能,具有很强的主观依赖性。另外,舌诊医师只是通过纯粹的文字叙述来记录病症,而珍贵的诊断经验和舌象资料难以得到精确的记录和保存,这极大地影响了中医医师之间的学术交流,也阻碍了中医理论的传承和发展。

随着现代科学技术的飞速发展,有学者将现代计算机技术与传统中医理论相结合,实现了计算机辅助舌诊。计算机辅助舌诊通过采集数字化的舌体部位图像,经过计算机图像处理技术将舌体分割出来,自动识别舌象特征并提供描述特征的客观指标,同时建立中医舌诊理论数据库对舌象进行综合判读,给出病理特征的描述及诊断。计算机辅助舌诊是排除了环境、人为干扰等条件差异的标准化舌象观察及诊断分析,减少了传统舌诊的主观性,同时提高了舌诊的临床应用价值,使其更加科学化、客观化、具体化。

为了对计算机辅助舌诊的发展和研究有更全面的认识,为后续的研究和应用提供更有价值的参考,本文针对计算机辅助中医进行舌象诊断的流程中各步骤用到的主流方法进行了综述。本文第2节简要介绍了计算机辅助舌诊的基本流程;第3节和第4节具体介绍了数字舌图预处理方法和舌象特征提取方法;第5节列举并比较了目前已研发的舌象分析系统,展示了课题组实现的计算机辅助舌诊系统;最后总结并展望了未来可能的发展方向。

## 2 计算机辅助舌诊的流程

计算机辅助舌诊的首要步骤是采集舌象。一般需要在密闭、光照稳定且固定的采集环境下,利用手机、数码相机等设备拍摄舌部图像。在开放环境下拍摄舌部图像易受光源色温、光线强弱、拍摄角度等不确定性因素的影响,导致了图像中舌体区域的颜色失真、面积过小等。北京工业大学信号与信息处理研究室研制的舌象分析仪<sup>[1]</sup>,就是由基于数码相机的舌像采集设备、固定的光源和固定的舌体拍摄位置组成的,在密闭空间中使用。由于采集的舌图像通常包含牙齿、嘴唇、脸部等冗余背景,对后期计算机自动分析的影响极大,因此计算机辅助舌诊的第一步,也是最关键的一步,就是去除干扰背景,将可分析的舌像分割出来;然后在分割舌体的基础上,分离舌质与舌苔并进行特征的识别提取,以便更准确地识别提取舌质与苔质的颜色、纹理和形态等特征;最后根据提取的舌体特征进行综合分析,得到舌象特征与病症之间的映射关系,

获得最终的诊断结论。具体流程如图1所示。

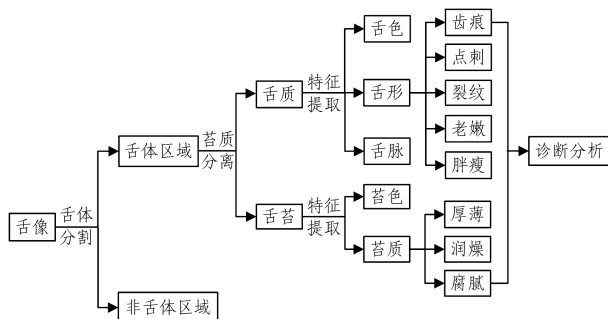


图1 计算机辅助舌诊的流程图

Fig. 1 Flowchart of computer-assisted tongue diagnosis

## 3 数字舌图的预处理

数字舌图的预处理利用图像分割方法对采集的舌像进行目标舌体与背景的分割,并分别提取舌质和苔质以便后续识别分析舌体部位的特征,包含舌体分割和苔质分离两部分。

### 3.1 舌体分割

如上文所述,在进行舌象分析时,嘴唇或脸部等背景区域容易降低计算机分析处理图像的速度和效率,因此首先需要分割舌体,除去干扰背景,提取出单独完整的舌体区域。舌体分割质量会直接影响后续对舌质和舌苔的颜色、纹理等特征的分析。因此,舌体部位的分割对计算机辅助舌诊具有非常重要的意义。

#### 3.1.1 基于传统图像处理技术的舌体分割方法

20世纪80年代中期,研究人员就已经开始采用计算机图像处理和识别技术对中医舌诊进行客观化的研究<sup>[2]</sup>,关于舌体分割的研究常聚焦于基于图像特征和基于可变模型的分割方法。

##### (1) 基于图像特征的分割方法

基于图像特征的舌体分割方法是利用图像像素值特征实现的,即像素相似性。通常利用图像的颜色信息与边缘特征进行分割。

Du等<sup>[3]</sup>基于HSI颜色空间中的色调和亮度信息初步分割舌体,然后标记最大连通区域并结合形态学方法获得较为精确的舌体区域。Zhu等<sup>[4]</sup>利用多目标贪心规则将HSI颜色模型和空间信息相融合进行分割。文献<sup>[5]</sup>根据阈值函数在HSV颜色空间中提取颜色特征后,结合 $L * a * b$ 颜色空间中的亮度信息得到完整的舌体轮廓,其结果如图2(a)所示。该算法适用于大多数舌色和形状模糊的舌图像。

在LUV颜色空间,Wang等<sup>[6]</sup>利用区域颜色相似性对过分割的图像使用区域合并,根据舌体匹配模板提取舌体。该方法在舌像输入前需要人工标记有无下唇。在YCbCr颜色空间,Ma等<sup>[7]</sup>先使用均值移动法初分割舌体,然后用区域生长法获得完整的舌体区域。

最大类间方差法在亮度范围内自动设定阈值进行舌像分割,是常用的分割方法。Wu 等<sup>[8]</sup>使用最大类间方差法提取出舌体较亮的部分,并利用粗糙度去除非舌体区域,最后使用形态学来分割舌体。

边缘是图像局部强度变化最明显的地方,也是图像分割所依赖的重要特征之一。Zhi 等<sup>[9]</sup>在人工植入边缘种子点的基础上,利用 B 样条方法定义拟合函数使方差最小化,从而得到舌体轮廓。文献<sup>[10]</sup>提出了一种基于区域和边缘融合的鲁棒性舌体分割方法。该算法将舌象的兴趣区域(Region of Interest, ROI)作为输入,使用改进后的最大相似度区域合并方法得到初始舌体轮廓,采用基于边缘的快速行进法计算得到最终的舌体轮廓。该方法具有较高的精确度与鲁棒性。

为了增强舌体边缘,常使用图像滤波进行预处理。文献<sup>[11]</sup>首先采用直方图均衡化、最大值和最小值滤波等对图像进行预处理,然后过分割舌体并结合区域合并,从而实现舌像分割。Huang 等<sup>[12]</sup>通过均值偏移平滑边缘,使用最大类间方差法对图像分类后进行区域合并,从而提取舌体。最近,文献<sup>[13]</sup>提出了基于颜色构造块并使用稀疏表示计算像素概率提取舌体的方法。该方法首先利用训练图像的预选局部块(基于相似度进行预选)构造字典,然后通过块稀疏表示和概率计算,生成测试图像的舌概率图,最终的硬分割结果由最大后验概率(Maximum a Posteriori probability, MAP)规则和形态学处理得到。实验结果表明,该方法能显著提高分割精度和鲁棒性。

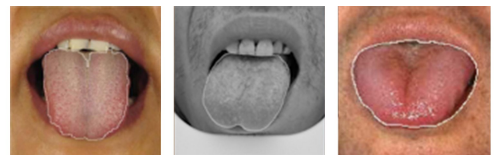
## (2) 基于可变模型的分割方法

给定一个初始轮廓曲线,动态轮廓模型(Snakes 模型)在内外力的共同作用下将初始轮廓曲线朝着真实目标轮廓处演化。该模型结合了图像的高层特征和低层特征,在生物医学图像分割中被广泛使用,其在稳定性、精确度等方面均优于基于图像特征的分割方法。

基于几何曲线演化的活动轮廓模型(Active Contour Model, ACM)的分割方法主要研究初始轮廓的获取和曲线演化。文献<sup>[14]</sup>根据舌体颜色、位置等先验知识在图像中找到一条分割曲线,在利用分割曲线进行颜色对消后通过形态学滤波恢复一个近似的轮廓,最后应用 Snakes 方法得到清晰的舌体轮廓。Pang 等<sup>[15-16]</sup>深入研究了一种双椭圆形变模型(Bi-Elliptical Deformable Contour)进行舌体分割。该模型结合了椭圆形变轮廓模型与活动轮廓模型,在能量公式中引入了模板力来代替传统的内力项,从而比传统的变形模板和活动轮廓更为稳定、准确。文献<sup>[17]</sup>基于舌体位置、颜色、舌根和唇之间的黑色区域等先验信息,结合最大类间方差法选取最优阈值来检测舌体初始边缘,在梯度矢量流模型 GVF Snakes(Gradient Vector Flow Snakes, GVF-Snakes)中引入彩色梯度信息来获得精确轮廓。Fu 等<sup>[18]</sup>采用径向边缘检测到舌体初始轮廓,利用色彩对消除嘴唇等冗余背景后,利用 Snakes 模型提取舌体。文献<sup>[19-21]</sup>利用单层或双层结构的 Polar 边缘检测器初始化活动轮廓模型或 Snakes 轮廓线,然后利用 Snakes 模型修正舌体的粗边缘。Guo 等<sup>[22]</sup>首先运用最大类间方差法、形态学处理等方法提取舌体初始边界,再应用自适应 Snake 主动轮廓模型获得精确的舌体边界,结果如图 2(b)所示。Zhu 等<sup>[23]</sup>采用优化的细菌觅食算法,chromatic

空间和 HSV 空间得到准确的舌体边缘。根据舌体对称性提取关键边缘点并生成 B 样条曲线,最后采用 Snakes 模型得到最终的舌体区域。文献<sup>[24]</sup>提出了基于力场活动轮廓的模型分割舌像。根据点之间的相互力以及力的平衡关系变形舌体轮廓,反复进行上采样,直到将舌像放大到原始尺寸。

分水岭分割是一种基于拓扑理论的数学形态学的分割方法,常用于获取 Snakes 模型的初始轮廓,极大地提高了 Snakes 的收敛速度与精度<sup>[25-29]</sup>。其中,Ning 等<sup>[27]</sup>利用分水岭算法将舌像划分成多个细小的区域,通过最大相似度的区域合并及舌体标记粗略提取舌体后,采用 Snakes 算法对区域融合结果进行细化,结果如图 2(c)所示。Shi 等<sup>[28]</sup>将舌体分为上二值部分和下原始舌像,并结合分水岭方法和梯度矢量流收敛舌体边缘。针对该方法在冗余背景去除以及参数选择方面的不足,文献<sup>[29]</sup>做了进一步的改进,在初始化活动轮廓模型之前对舌体区域进行显著性检测,然后将舌体区域初始化为上二值部分和下水平集函数,最后采用双重量流(Double Geo-vector Flow, DGF)检测舌体边缘并分割舌体区域。



(a) Li 等的方法 (b) Guo 等的方法 (c) Ning 等的方法

图 2 几种基于传统方法的舌体分割效果图

Fig. 2 Tongue image segmentation results of traditional methods

## 3.1.2 基于机器学习的舌体分割方法

基于机器学习的图像分割算法可以获取更多图像特征,在性能和分割效果上都有了很大的提升。近年来,研究者将传统中医理论与机器学习知识相结合,不仅为计算机辅助舌诊提供了新的思路,还提高了疾病诊断的现代化、自动化。常用的机器学习方法有支持向量机(Support Vector Machine, SVM)、AdaBoost、分类器、聚类等等。

Liu 等<sup>[30]</sup>利用高光谱舌象数据的光谱和空间信息,基于高光谱图像引入支持向量机分类并分割舌体。该方法需要舌象在不同光谱下的多幅图像,对硬件的要求很高。

文献<sup>[31]</sup>基于查找表 LUT(Look-Up-Table)的 AdaBoost 算法,利用级联式舌检测器定位人脸图像中的舌体区域,然后通过极坐标边缘检测器与活动轮廓模型分割最终舌体。Li 等<sup>[32]</sup>采用级联增强分类器快速检测目标的方法训练了级联分类器模型,并利用 Trimap 作为基于学习的数字匹配(Learning Based Digital Matting, LBDM)算法的输入,从而获得完整舌体。该方法的稳定性高,但是当舌体受到严重对称光照时,可能无法取得理想的分割效果。

聚类算法是一种典型的无监督算法,根据样本间的相似性程度进行分类归纳。Li 等<sup>[33]</sup>利用模糊集和粗糙集理论,通过哈夫聚簇实现了舌体分割。文献<sup>[34]</sup>根据颜色和空间的相似性,使用均值移动算法将舌像划分为多个聚类,使用基于主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)的方法来检测含有舌的图像簇,并结合张量投票法从舌像簇中提取舌体轮廓。Zhu 等<sup>[35]</sup>利用色调、亮度和空间信息设计了一种改进的滑降算法,以此创建了加权图,并利用随机游走算法进行聚

类,最后使用数学形态学算子细化以实现舌像分割。Xie等<sup>[36]</sup>利用灰度积分投影对舌图像进行预处理,根据特征向量使用基于核函数的模糊聚类(Kernel Fuzzy-C-Means)算法聚类像素,最后根据邻域连接理论提取舌体。

基于图像特征的方法需要多个预处理步骤,如舌体矫正、噪声滤除等,而深度学习方法能够从原始数据中训练特征模型以提取有利的参数,将简单的低层次信息抽象为高层次的特征,从而实现对数据的抽象表达<sup>[37]</sup>。深度学习方法因为优异的特征学习和表示能力,能够更好地进行自动化分割,提高了分割的速度和鲁棒性。

Li等<sup>[38]</sup>在采用卷积神经网络(Convolutional Neural Network, CNN)分割舌像前,使用限制对比度自适应直方图均衡化进行预处理来增强舌体边缘。文献<sup>[39]</sup>使用基于 SegNet 的自动舌形图像分割方法,在训练网络前滤除亮度过高或者过低的舌像。Xue等<sup>[40]</sup>利用全卷积神经网络(Fully Convolutional Networks, FCN)实现舌体分割的自动化,并通过实验对比了 LBM, FCN-8s, Deeplabv3 和 Deeplabv3-LBM 这 4 种

方法的平均精度和速度。文献<sup>[41]</sup>提出了一种基于残差网络(Residual Network, ResNet)的端到端深度模型(DeepTongue)来精确分割舌体,使用 DeepTongue 进行舌体分割的流程如图 3 所示。该方法采用前向网络进行分割,不受图像亮度和图像大小的限制,极大地提高了分割的精度和速度,其分割结果如图 4(a)所示。文献<sup>[42]</sup>使用多任务的 TongueNet 学习架构实现舌体的精确分割,分割效果如图 4(b)所示。该方法使用空洞残差卷积网络提取多尺度特征并联合学习舌体定位和分割,不需要进行图像的预处理。Wei等<sup>[43]</sup>构造了多任务级联 CNN 模型用于舌部检测和分割,与其他基于深度学习的舌体分割方法相比,该方法提高了分割效率且精度损失小,分割结果如图 4(c)所示。文献<sup>[44]</sup>利用 ResNet 残差网络进行舌体区域的定位与识别,并在此基础上搭建了高分辨率网络以提取舌体。该模型解决了样本分类的弊端,但是模型参数冗余,需要进行进一步优化。Li等<sup>[45]</sup>采用 FCN-16s 模型分割舌体,设计了一种单像素损失函数来指导模型学习区域像素间的关联性,提高了舌体分割的精度。

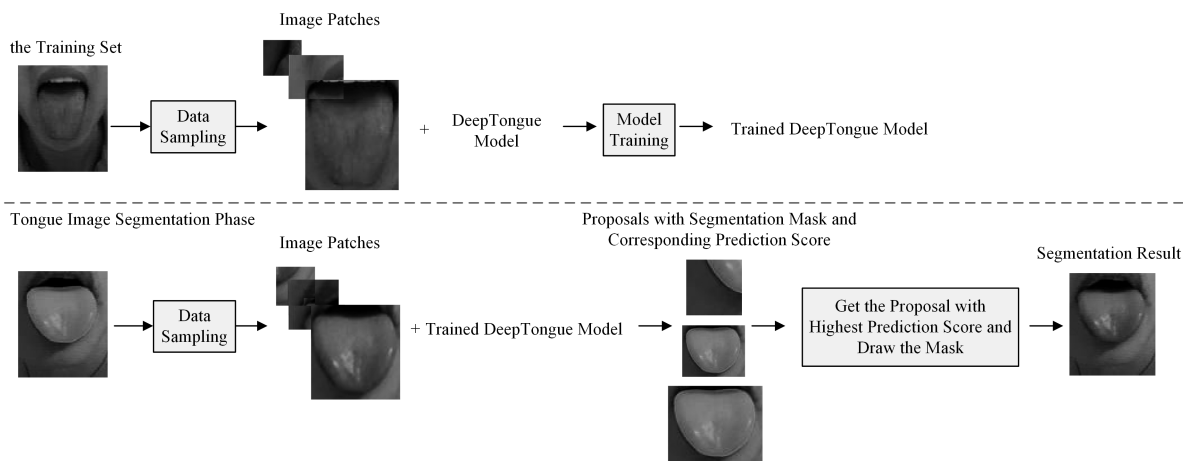


图 3 文献<sup>[41]</sup>中的方法的流程图

Fig. 3 Framework of method proposed in reference <sup>[41]</sup>

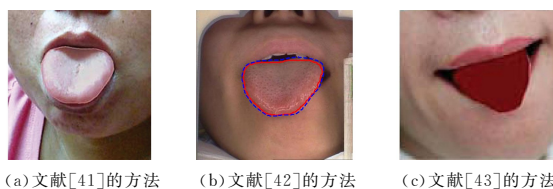


图 4 几种基于机器学习方法的舌体分割效果图

Fig. 4 Tongue image segmentation results of methods based on machine learning

### 3.1.3 舌体分割方法总结

基于传统图像处理技术的舌体分割方法一般利用图像像素值特征或者基于可变模型等特定算法来实现舌体轮廓的提取。应用传统算法分割舌像的前提是在密闭的空间中采集舌体,这在一定程度上限制了算法的鲁棒性;其次,当舌体与嘴唇的差异较小时,分割精度会降低;另外,这些算法容易受到冗余背景区域的干扰,大多需要人工的参与,对自动化的影响较大。因此,目前传统算法的分割性能还未能很好地满足临床应用的要求。

机器学习已经被广泛应用于医疗领域,在疾病诊断中发挥着重要作用<sup>[46]</sup>。将机器学习引入计算机辅助舌诊中,打破

了传统方法需要人工参与的弊端,实现了舌像分割的全自动化。基于深度学习的算法中,SegNet 等语义分割网络易受边缘噪声的影响,导致边缘分割不够平滑,分割效果差;Mask-RCNN 等实例分割网络会出现欠分割的情况,分割出了小于真实舌体的区域;训练集样本、尺寸和数据量不同等问题也会影响分割的精度。在未来的研究中可以通过改进网络的结构和训练的策略提升分割效果。基于机器学习的方法可以在开放式环境下采集舌像,不受舌体各异性、光照等条件的影响,也不需要太多的预处理;而基于深度学习的方法能够实现端到端的舌体分割,在很大程度上简化了传统分割方法的繁琐步骤,并且运行速度更快,精确度更高,鲁棒性更好。

我们选取了本文综述中几种基于机器学习的舌体分割方法,对其进行评估参数平均交并比 mIoU (Mean Intersection over Union) 的对比,如表 1 所列。其中 DeepTongue<sup>[41]</sup> 和 TongueNet<sup>[42]</sup> 网络结构所使用的数据集 1 来源于 BioHit 发布的分辨率为  $768 \times 576$  的 300 张舌象原图;高分辨率网络<sup>[44]</sup>、语义分割网络 SegNet、实例分割网络 Mask-RCNN 所使用的数据集 2 是由工业相机采集得到的分辨率为  $2300 \times 1944$  的 2368 张舌象原图。由表 1 可知,在数据集 1 上,采用

TongueNet<sup>[42]</sup>网络分割舌体的精确度更高,效果更好。在数据集2上,高分辨率网络的分割精度明显优于其他两种网络。

表1 几种基于机器学习的舌体分割方法 *mIoU* 的对比

Table 1 *mIoU* scores of several methods based on machine learning

数据集	方法	<i>mIoU</i> /%
数据集1	DeepTongue <sup>[40]</sup>	94.17
	TongueNet <sup>[41]</sup>	97.74
数据集2	语义分割 SegNet	93.00
	实例分割 Mask-RCNN	94.50
	高分辨率网络 <sup>[43]</sup>	98.20

### 3.2 苔质分离

一般情况下,舌质位于舌体周围,舌苔位于舌体中间部分。中医舌诊中的望诊讲究对舌体进行整体观察,但是计算机技术并不能像人脑那样自动完成对整个舌体的观察,因此需要先将舌质和舌苔分开,然后再分别进行特征的识别,图5给出了苔质分离的结果。舌质的颜色主要分为淡白色、红色、红绛色、绛紫色、青紫色等,舌苔主要分为白色、黄色、灰色、黑色,因此颜色成为了分辨舌质和舌苔的最明显的特征。



图5 苔质分离效果

Fig. 5 Results of separating tongue coating and proper

由于舌体表面液体的反射光会影响后续的苔质分离, Hsu 等<sup>[47]</sup>和 Han<sup>[48]</sup>首先预处理舌像,去除舌体中的反光点和阴影。Hsu 等<sup>[47]</sup>根据舌苔在 HSI 颜色模型中的主色调、饱和度和亮度均高于舌体的特性,分离出舌质和苔质。文献<sup>[48]</sup>使用了基于多色彩通道的动态阈值算法来分离苔质,在不同的颜色空间中利用最大类间方差法,通过融合不同颜色通道的阈值分割舌像得到最终的舌质和舌苔图像,如图5所示。文献<sup>[1,49]</sup>都将图像转换到不同的颜色空间并做直方图均衡化处理,以增大图像的动态范围,增强图像的对比度和色调。Xie<sup>[1]</sup>在 HSV 颜色空间对饱和度通道进行直方图均衡化,分离出舌质、苔质。Han 等<sup>[49]</sup>在 CIELAB 颜色空间结合直方图均衡化和伽马校正来增强苔质的对比度,然后利用 *K* 均值聚类分离苔质,对于无苔或者极薄苔,采用该方法可能会出现过分割现象。

由上述文献可知,苔质分离方法大多通过转换颜色空间来区分舌质和舌苔,通过设置阈值或使用聚类法将二者分离。目前该类算法已经较为成熟,可满足计算机辅助中医舌诊的应用分析。但这些算法对于极薄苔、裂纹等特征舌的适应性较差,当舌苔分布不均匀、不连续时,算法的识别准确率下降,从而不利于计算机进行后续分析。

## 4 舌象特征的提取

舌象特征是中医舌诊辨证论治的重要依据,舌体包括舌质、舌苔以及舌下络脉。舌质,即舌体的肌肉和络脉组织,望舌质主要是望舌色和舌形;舌苔是舌质上一层薄白而润的苔

状物,望舌苔主要是望苔色和苔质;舌下络脉是位于舌下舌系带两侧纵行的大络脉,望舌下络脉主要是望其长度、形态、色泽及粗细等。将传统中医舌诊医师的主观化、经验化的诊断转变为客观化、量化的舌象特征是计算机辅助舌诊的核心。本节主要从舌色、舌形、舌下络脉、苔色、苔质和舌象等6个方面进行特征提取的综述。

### 4.1 对舌色特征的提取

舌色即舌质的颜色,反映了人体内五脏六腑的变化,是中医舌诊的重要特征之一。正常健康的舌色为淡红色,临床常见的病理舌色主要有淡白色、红色、绛紫色、青紫色等。舌色的分类和识别的方法可以分为:基于颜色特征的舌色分类方法和基于机器学习的舌色分类方法。

高光谱舌象的光谱范围覆盖整个可见波长,能提供比可见光更多的颜色信息。2008年 Li 等<sup>[50]</sup>研制出了一种高光谱舌象仪,对高光谱图像数据进行归一化处理,使用光谱角度映射(Spectral Angle Mapper, SAM)算法对舌色进行识别分类,识别效果如图6所示。其中,图6(b)给出了舌色识别后舌体表面不同颜色的分布情况。



图6 舌色识别效果图

Fig. 6 Tongue color recognition renderings

颜色特征是舌色分析的最基础特征,不同舌色之间的界限非常模糊,很难明确地区分。针对此问题,文献<sup>[51]</sup>通过比较舌质与舌苔周围的颜色像素数来判断相邻舌苔区域与舌质区域之间的重叠颜色,并通过比较舌像内部像素的饱和度和亮度对舌色进行分类。

对舌色进行分类,常用到机器学习的方法。Liu 等<sup>[52]</sup>通过充分的实验分析了基于支持向量机分类舌色、苔色的7种方法: LIBSVM, BSVM, DAG-LIBSVM, DAG-BSVM, IMP-LIBSVM, IMP-BSVM 和 M-ary Classification。当训练样本数目较少时, DAG-SVM 的识别速度较快,正确率较高;当训练样本数目较大时,选用 IMP-SVM 较为合适。Han 等<sup>[48]</sup>使用改进的 FCM 聚类算法,通过在目标函数中引入新的罚值来加强类与类之间的可分性度量。该算法得到的舌象代表色已应用到舌象颜色校正色卡的设计中,使用色卡进一步消减颜色校正后的舌像与真实舌象之间的偏差,从而提高还原真实舌象颜色的能力。Wang 等<sup>[53]</sup>在基于单类支持向量机的新型色域描述子的基础上,为舌体前景像素的色差分配颜色标签并计算比率,该方法能够准确地描述舌像的主要颜色成分,可以用于进一步的疾病诊断。

舌色的分类提取方法一般通过选取颜色信息,采用量化、支持向量机、聚类等方法来进行舌色特征匹配。目前,舌色识别分析技术虽然取得了一些进展,但是利用数码相机等工具采集舌像时可能会因外界影响产生一定的失真;真实舌象与电脑屏幕显示的舌象也可能存在误差;对舌色的判断仍旧缺

乏统一的定量性的标准。此外,舌体颜色的范围十分广泛,因此对舌色的研究分析仍存在一定的困难。

#### 4.2 对舌形特征的提取

舌形大体分为齿痕、点刺、裂纹、老嫩和胖瘦 5 种,不同的舌形特征对应的病症也不同。若舌质淡白而嫩,舌体比正常稍大,苔质薄白,则为气虚;若舌质淡白,舌体正常或稍微萎缩,苔质薄白且稍干,则为血虚。

舌体形状一般为椭圆形,然而舌体形状会随着人体病理的生成而改变。许多临床报告<sup>[54-55]</sup>已经将特定的舌体形状与临床医学疾病联系起来。例如,舌体形状呈圆形可能与胃炎有关,呈矩形则可能预示着冠心病或高血压<sup>[56]</sup>。Huang 等<sup>[56]</sup>使用长度、区域和角度等几何特征,结合层次分析法和模糊融合框架对椭圆形、方形等 7 种舌形进行分类。

##### 4.2.1 对齿痕特征的提取

齿痕舌指舌体的边缘形状类似于牙齿痕迹的异常舌形,如图 7(a)所示。齿痕多由人体器官功能失调使舌体胖大从而受到牙齿的压迫所致。中医舌诊中认为齿痕舌主脾虚和湿盛,若舌体淡白湿润有齿痕,则属寒湿壅盛。研究学者通常根据舌体边缘的凹凸性来识别齿痕。



图 7 不同舌形特征图

Fig. 7 Different tongue shape features

Li 等<sup>[57]</sup>基于精确勾勒出的舌体边缘,使用曲率和梯度对齿痕进行了标记。该算法与中医专家的判断相比,正确率为 98%。文献<sup>[58]</sup>利用 Graham 算法构造边缘点的凸包,其与舌体边缘图像做差得到齿痕的凹区域,最后使用阈值法定位齿痕。Shao 等<sup>[59]</sup>结合舌边界凹面的长宽度、深度和亮度变化,使用并基于阈值判断其是否为齿痕舌。Zhu 等<sup>[60]</sup>通过边缘深度序列构造了边缘深度曲线图,使用道格拉斯-普克法构造了形态曲线图,曲线波峰即为齿痕凹点。该方法在提取出齿痕个数的同时,还得到了齿痕的深度,更加客观地表达了齿痕舌的严重程度。

##### 4.2.2 对点刺特征的提取

点刺舌指舌上有很多像草莓果实一样的红刺群凸出舌面,高起如刺,摸之棘手,如图 7(b)所示。点刺舌多主邪热炽盛、热入营血,其颜色的不同也反映了气血的盛衰和疾病的程度。目前对点刺舌的研究较少,由于点刺在舌象中的形态较小且与舌体颜色相近,在舌图像的识别提取过程中有一定的困难。

Wang 等<sup>[61]</sup>采用 SimpleBlobDetector 斑点检测算法检测

点刺和瘀点后,提取特征值用于支持向量机的识别;根据颜色特征使用 K-均值聚类(K-Means)算法判断目标斑点,最后结合基于颜色空间距离的判别函数和点刺(瘀点)的检测结果提取点刺和瘀点。

##### 4.2.3 对裂纹特征的提取

裂纹舌指舌体表面出现纵横交错、长短不一的裂沟,如图 7(c)所示。裂纹舌多主热证,健康人的舌体背部也可能会有裂纹,相比而言,病理性的舌裂纹图像比较杂乱,舌裂纹面积也相对较大。由于裂纹是舌体表面明显的裂沟,通常通过给灰度和梯度设置阈值来判定裂纹。

Yang 等<sup>[62]</sup>首先通过核假彩色变换增强裂纹区域,又结合 RGB 颜色空间和间隔梯度法输出梯度图像,使用滞后阈值算法得到裂纹二值图像后,手动去除周围的非裂纹区域。文献<sup>[63]</sup>根据舌裂纹的纹理特征重定义传统的局部二值模式(Local Binary Pattern, LBP)分类方法,又结合最大类间方差法得到舌裂纹的二值图像。该方法不需要预先提取出舌体区域,且能够完整、精确地分割出细小、不规则的裂纹。Zhang 等<sup>[64]</sup>提出了一种适用于检测不同宽度舌裂纹的水流法。其利用水流特点,模拟水在地形中的流动得到地形图,通过计算图中聚集的水分子检测舌裂纹。该方法从裂纹的数目、长宽度和深度等方面量化了舌裂纹的严重程度。

Chang 等<sup>[65]</sup>在 ResNet50 网络结构上应用文献<sup>[66]</sup>提出的梯度加权类激活映射(Gradient-weighted Class Activation Mapping, Grad-CAM)训练测试舌像,检测并定位裂纹,但在面部或其他部位的一些裂纹也被同时定位,因此需要进一步调整参数来提高定位的准确性。

##### 4.2.4 对老嫩特征的提取

老嫩舌是根据舌质的纹理分成的老舌或者嫩舌。舌质纹理粗糙,形色苍老坚敛为老舌;舌质纹理细腻,形色浮胖娇嫩为嫩舌,如图 7(d)所示。老舌多见于主热证、实证;嫩舌则多见于主寒证、虚证。由于老嫩舌与舌色及纹理有关,因此多利用颜色或者纹理来对老嫩舌进行识别。

文献<sup>[67]</sup>通过计算一维分形维数、粗糙度、游程长度矩阵、灰度差分矩阵、灰度共生矩阵等纹理特征和颜色特征,采用最优线性融合方法和 AdaBoost 融合方法,设计并对比了 K 近邻分类器、贝叶斯分类器和线性分类器来识别老嫩舌。实验结果证明,基于 K 近邻分类器的 AdaBoost 融合方法的性能最好,准确率达到了 90.34%。

##### 4.2.5 对胖瘦特征的提取

胖瘦舌分为胖大舌和瘦薄舌。胖大舌的舌体肿胀,色淡而嫩,多主水湿内停,如图 7(e)所示;瘦薄舌多主气血两虚,阴虚火旺,如图 7(f)所示。传统的中医通过肉眼与正常舌进行对比来诊断是否为胖瘦舌,对于胖瘦舌和正常舌的判断没有一个统一的定量性的标准。目前对于胖瘦舌的研究较少,一般通过研究舌尖轮廓形状、舌体长度与宽度的比例来识别舌体的胖瘦。

瘦薄舌的舌尖比较尖锐,胖大舌的舌尖更为圆钝。Wei 等<sup>[68]</sup>根据此轮廓特征分析舌体胖瘦。首先绘制舌体的最小外接矩形,计算舌体的长宽比并使用最小二乘法对曲线进行拟合,然后计算胖瘦指数来区分胖舌、正常舌和瘦舌。有学者

将神经网络应用到胖瘦舌的自动分类中,如 Zhang 等<sup>[69]</sup>构造了 BP 神经网络,通过对胖舌、瘦舌和适中舌 3 类舌体样本的训练和测试来自动分类胖瘦舌,其具有较高的准确率。

#### 4.2.6 舌形特征提取方法总结

我们通过综述舌形特征提取发现,目前针对这一部分的研究文献相对较少,而且在时间上也比较分散。一方面,由于中医的客观局限性以及数字化程度的限制,使得对新方法或技术有效性的验证较为困难。另一方面,尚缺乏大量的舌体样本。在今后的计算机辅助舌诊研究中,可以进一步将舌形特征综合起来,进行特征融合的研究,以提高诊断效率及水平,为计算机辅助舌诊的科学化发展提供更加广阔的空间。

#### 4.3 对舌下络脉特征的提取

舌下络脉是位于舌下舌系带两侧纵行的大络脉,正常的络脉颜色多为淡紫色,无怒张、无弯曲、不增粗且排列有序。观察舌下络脉主要是观察络脉的长宽、支干分支数、充实度、色泽等。若舌下络脉暗红或怒张,属气滞血瘀;若舌下络脉呈紫色且粗长曲张,属热壅血瘀。目前对舌下络脉的研究甚少,当人体出现疾病时,舌下络脉的状态有时会在舌体发生变化之前改变,因此中医舌诊中望舌下络脉也是诊断病症的重要依据之一。研究者通常在获取舌背区域的基础上利用颜色特征进行聚类来获取舌下络脉。

Sun 等<sup>[70]</sup>在  $L * a * b *$  颜色空间下使用 K-均值聚类(K-Means)提取舌下络脉,使用矩阵扫描法绘制络脉的外接矩形并计算参数,然后结合络脉的平均 RGB 值及平均 HSV 值判断色泽。

Yan<sup>[71]</sup>根据舌下络脉与周围舌质颜色对比度的不同,提出了不同情况下的舌脉分类提取。若对比度较大,则使用 HSI 模型定位舌脉位置,通过人工选择种子点,根据先验知识使用像素聚类区域生长法获取舌脉轮廓;若对比度较小,则在 CIEYxy 颜色空间结合贝叶斯决策论与自适应舌下络脉轮廓提取法提取舌脉轮廓,舌脉提取结果如图 8 所示。文献<sup>[71]</sup>还构建了舌脉颜色模型,并基于该模型采用改进的动态局部 K 近邻分类器对舌脉颜色进行分类。

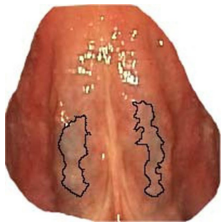


图 8 舌下络脉的提取效果图

Fig. 8 Results of sublingual collaterals extraction

采集舌下络脉时,需要患者将舌体向后翻转,露出舌背。这样的伸舌动作在拍摄时难度较大,存在诸多不稳定的因素,如舌体容易发生颤动、拍摄角度及位置不准确等。另外,舌背图像的各异性与非舌下静脉部分的干扰同样加大了提取舌下络脉的难度。但是,舌下络脉是中医舌诊中诊断病症的重要依据之一,深入分析研究舌下络脉对于计算机辅助舌诊的意义不容忽视。

#### 4.4 对苔色特征的提取

苔色为苔质的颜色,主要分为白苔、黄苔、灰苔和黑苔。

正常的舌苔薄白而润,位于舌中和舌体根部;黄苔多见于脏腑里热或温病气分有热;灰黑苔多见于寒温证。由于舌色、苔色之间没有明显的分界,因此很多研究将两种特征一并处理<sup>[53,72]</sup>。

Zhang 等<sup>[72]</sup>首先根据自适应阈值算法获得舌质、舌苔位置,然后通过像素点的二值化图像统计不同颜色像素点的数量,数量最多的像素点的颜色即为舌质或舌苔颜色。该方法能够基本实现对舌色、苔色的正确分类。

2019 年 1 月,国际标准化组织(ISO)发布了中医舌诊仪舌色与苔色获取与表示方法的国际标准 ISO20498-5,该标准由上海中医药大学上海市健康辨识与评估重点实验室王忆勤教授团队主导制定。此次发布的 ISO20498-5 提供了一种规范化的舌象颜色数字化表示方法。该方法仅客观地表示舌色、苔色的颜色属性,与临床诊断结果无关,且不受限于采集设备,解决了数据无法互通的问题。

#### 4.5 对苔质特征的提取

苔质主要分为厚薄、润燥和腐腻,不同的苔质特征所反映的病邪不同,多种苔质特征的组合所反映出的病邪也不甚相同。若舌苔薄白而润,舌质为淡红色,则为健康之人感受风寒;若舌苔薄而粘滑,舌质为淡白色,则为脾胃虚弱。

##### 4.5.1 对厚薄特征的提取

正常人的舌苔为薄白苔,透过舌苔可以看到底层淡红色的舌质。当人体脏腑功能失调时,苔质的厚薄就会发生变化。若透过舌苔能够见到舌体则为薄苔,反之则为厚苔。当薄苔增厚时,多为邪盛病进;当厚苔变薄时,多为正胜邪却病退,因此舌苔厚薄在一定程度上反映了人体的健康状态。

颜色特征仍然是区分苔色最为直观的特征。Chiu<sup>[51]</sup>提出了一种厚度指数,即利用舌图像在 HSL 模型中色调、饱和度和亮度的绝对差值与其加权值的乘积来区分薄舌苔、稍厚的薄舌苔和厚舌苔。Bai 等<sup>[73]</sup>在 RGB 空间结合了最大类间方差方法与分裂合并法,并使用阈值提取厚薄苔。该方法提供了厚、薄苔面积的定量比,但是较依赖于选择合适的阈值。

小波是在苔厚薄分类中用得较多的一种技术。Tang<sup>[74]</sup>利用 Gabor 小波滤波器提取了参数特征,并使用了多元线性回归对舌苔的厚薄进行了分类。文献<sup>[75]</sup>首先采用 Daubechies2 正交小波分解舌像并计算细节图的平均值和方差,然后利用灰度共生矩阵和 Relief 方法选择强分类特征,最后使用支持向量机分类器判断舌苔厚薄。

##### 4.5.2 对润燥特征的提取

舌苔的润燥反映了人体内水分盈亏的状况,若舌苔表面有过多水分,湿滑可见,则为润苔;反之,苔面干燥,望之枯涸,则为燥苔。

Xie<sup>[1]</sup>使用二分光反射模型和亮度梯度区分黏液与正常水膜形成的亮斑区域,计算亮斑区域与舌苔面积之比、亮斑区域的平均亮度与舌像最大亮度之比,得出润燥系数,最后根据分类参考值判断舌苔的润燥程度。

##### 4.5.3 对腐腻特征的提取

舌苔的腐腻反映了人体内湿热的程度。苔质疏松,颗粒大如豆腐渣厚积在舌体的边缘和中心,刮之易去为腐苔,主热证;苔质细密且颗粒小,如滑腻的绒毛覆盖在舌体表面,中

心厚而边缘薄,刮之不去为腻苔,多为湿浊内盛。纹理是分析腐腻最常用的特征。

腐腻舌苔表面油滑且分布均匀,颜色一般为白色和黄色。Chiu<sup>[51]</sup>采用灰度共生矩阵特征,通过计算ASM能量、对比度、相关性、方差和熵等特征值来验证腐腻舌。Wei等<sup>[76]</sup>将舌苔分块之后结合改进的子空间法和改进的Tamura纹理粗糙度对其进行分类,又根据投影长度、可信度和粗糙度确定块的所属类别,最后通过腐腻指数表达舌苔的腐腻程度。该方法所得结果与医生的判断大体一致。Qu等<sup>[77]</sup>对舌图像进行Gabor小波变换后,结合原舌像的二值图像去除边缘检测效应。通过提取均值和标准差作为腐腻特征并做归一化处理得到纹理特征矩阵。

#### 4.5.4 苔质特征提取方法总结

通过对舌苔特征提取的分析发现,目前对这方面的研究同样较少。现有的研究特征较为单一,只提出了几种比较常见的舌苔特征。今后可以扩大研究范围,增加舌苔特征种类,如舌苔的剥落和消长、有根苔与无根苔、全苔与偏苔等。由于缺乏大量地舌苔样本图像,对于舌苔的研究仍有一定的困难。特别是机器学习方法,一般依靠大量的学习样本,在今后的研究中可以关注基于小样本的学习方法。

#### 4.6 舌象多特征的识别提取及诊断

中医舌诊中的望诊讲究通过对舌体进行整体观察来判断病症,然而计算机不能像人眼那样通过观察舌体就能进行特征的统一判断。中医舌象特征同病人症候的关系是一个多参数的复合,仅凭单个特征就做出病理诊断会产生误差。因此,应将舌象的多个特征相融合再对病人症候进行综合诊断。全面掌握舌象信息,提高舌诊特征的综合化,对于计算机辅助舌诊具有重要意义。

文献<sup>[78]</sup>利用基于区域的分层方法来识别舌体的水腻、裂纹、齿痕、点刺等特征。在HSI颜色空间中,根据饱和度和亮度的高低、色调范围分别识别舌质、舌苔;通过计算像素亮度的均值和标准差来判定水腻,计算灰度图中水平线和垂直线的平均值和变量识别裂纹;根据RGB颜色空间中G通道的像素值和阈值识别齿痕和点刺。

提取舌象多特征时常用到机器学习方法。Pang等<sup>[79]</sup>分别训练测试了基于纹理、色彩和组合特征的贝叶斯网络分类器,并对13种常见疾病进行了诊断。Gao等<sup>[80]</sup>使用支持向量机和联合贝叶斯网络分别建立定量特征和病症之间的映射关系,使用包含色彩和纹理在内的32个特征分别构建分类器,实现对脑梗死、胰腺炎、上呼吸道感染、糖尿病、冠心病等5种疾病的分类。实验结果证明,支持向量机的分类准确率为86.6%,高于联合贝叶斯分类器15%左右。Tang等<sup>[81]</sup>利用深度卷积神经网络实现多标签舌像的分类与识别。其采用迁移学习策略同时进行舌色、苔色、裂纹和齿痕的联合训练,将浅层特征图输入区域生成网络后,又送入子网络以进一步提取舌象的深层特征,学习网络的结构如图9所示。Li等<sup>[45]</sup>通过舌体分割模型学习到的知识进行参数迁移学习,并进行参数初始化。首先融合空间转换网络和VGG16模型,识别舌体的胖瘦、齿痕等几何特征;然后,将VGG16模型与深度纹理编码网络相结合,识别舌体的裂纹、腐腻、厚薄等纹理特征。其通过实验验证了空间转换层对提高模型空间不变性的

有效性,LREL的无序编码对舌象纹理语义表示的有效性,以及迁移学习的知识使模型更快更平稳地收敛。

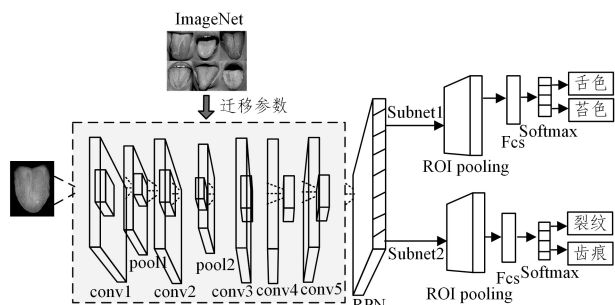


图9 文献<sup>[81]</sup>中的多任务联合学习网络结构图

Fig. 9 Structure diagram of multi-task joint learning network in literature <sup>[81]</sup>

综合上述文献可知,目前针对舌象多特征的研究大多融合了舌体的颜色信息与纹理信息,使用传统方法或者分类器方法进行融合判断。在下一步的研究中,可以结合舌体的其他信息进行多种特征的融合提取,并且可以尝试采用深度学习的方法进行端到端的识别提取和诊断。

我们选取了本文综述中的几种方法进行舌体齿痕、点刺、裂纹、厚薄、水腻和腐腻等特征的识别及提取准确率的比较,结果如表2所列。可以发现,文献<sup>[58]</sup>使用曲率和梯度来识别齿痕的准确率最高,明显优于采用像素值及阈值法判断齿痕的方法;其次使用支持向量机的方法<sup>[61]</sup>进行点刺特征的识别的效果也较好。但是,对于舌体厚薄、水腻、腐腻等特征识别的研究相对较少,在今后的研究中可以进一步加以关注。

表2 几种方法的特征识别及提取的准确率对比

Table 2 Comparison of feature recognition and extracting accuracy of several methods

特征	方法	准确率/%
识别齿痕	像素值和阈值 <sup>[75]</sup>	68.20
	曲率和梯度 <sup>[65]</sup>	98.00
提取齿痕	道格拉斯-普克法 <sup>[57]</sup>	80.00
识别点刺	像素值和阈值 <sup>[75]</sup>	60.20
	支持向量机 SVM <sup>[58]</sup>	97.40
提取点刺	支持向量机 SVM <sup>[58]</sup>	89.90
识别裂纹	ResNet50 <sup>[62]</sup>	70.00
	水流法 <sup>[61]</sup>	72.06
	平均值与变量 <sup>[75]</sup>	80.00
提取裂纹	滞后阈值算法 <sup>[59]</sup>	82.00
分类厚薄	支持向量机 SVM <sup>[72]</sup>	84.50
识别水腻	像素亮度均值与标准差 <sup>[75]</sup>	89.60
识别腐腻	纹理特征矩阵 <sup>[74]</sup>	91.00

## 5 计算机辅助舌诊系统的研究与实现

### 5.1 舌象分析系统综述

舌象分析系统是集舌象采集、分析于一体的系统,即舌诊仪,其主要功能是在特定光源条件下采集舌像并提取舌象特征进行分析。舌诊仪主要有以下3个用途:通过分析舌象特征判断人体的健康状况;通过分析前后舌像的变化对诊疗效果进行评价;通过研究某种疾病所对应的舌象特征,来寻求此类病人舌象的共同特征。经过多年的研究发展,舌诊仪型号规格众多,配置的硬件设备各异,用于舌象特征处理的软件也多种多样,但未能形成统一的标准。其次,针对舌象特征的分区的

研究较少。因此,舌诊仪的客观化发展仍有较大的研究潜力。

目前,国内的一些机构和院校已经研制出了较为完整的舌象分析系统,这些系统已被应用于临床科研、医疗机构等领域。表3列出了部分目前所研发的舌象分析系统,并基于每个系统的特点、优势及适用范围进行了对比。其中,中医舌诊AI开放平台(由安徽中医药大学与合肥云诊信息科技有限公司联合研发)支持自然光照、不同手机拍摄的舌象照片,能够识别舌色、舌形、苔色、苔质、津液、舌下络脉等30种舌象特征,可于20s内获取舌象检测结果,再结合智能问诊与健康大数据,对44种中医健康状态进行了辨识,提供了一人一案的个性化调理方案。所有检测数据在云端加密存储,同时实现

了舌象变化趋势的动态分析。综合表3可知,中医舌诊AI开放平台综合了舌象采集、舌象诊断、操作界面及系统优势等,与其他传统舌诊仪器相比更胜一筹,是目前较为完备的计算机辅助舌诊系统。表3的最后一列则是笔者所在课题组(省重点研发课题:中医舌象计算机辅助诊断中关键技术研究及系统实现)自行设计并实现的一个简单的计算机辅助舌诊原型系统。本课题组通过研究归纳总结了自2000年以来的计算机辅助舌诊主流方法,提出了部分关键步骤相关的新算法和新技术,设计并实现了该计算机辅助舌诊原型系统,以验证新算法的有效性,为后续可以真正投入使用奠定了基础。下文将具体介绍本系统的实现及其使用。

表3 若干舌象分析系统的汇总

Table 3 Summary of several tongue analysis systems

系统名称	研发单位	采集部位	识别类型	运作平台	界面	优势	采集条件	适用范围
中国中医舌诊AI开放平台	安徽中医药大学 & 合肥云诊信息科技有限公司	舌面、舌背	(6类35种)舌色、苔色、舌形、苔质、津液、舌下络脉	手机端	操作简单、图像清晰	特征全面与量化分析、在线咨询、舌象动态分析、个性化调理方案等	适用于不同光照和设备	个人、医疗机构、教学研究、医生辅助等
中医舌诊图像分析系统ZMT-1AB	上海中医药大学	舌面	(4类25种)舌色、苔色、舌形、苔质	舌诊仪	操作简单、图像清晰	识别苔少、苔无、苔剥等	特定光源	医疗机构、教学科研、中医辨证参考等
XM-SX-III 中医舌诊仪(中医舌象智能辅助诊断系统)	上海欣曼科教设备有限公司	舌面	舌色、苔色、舌形、苔质	舌诊仪	操作简单、图像清晰	初诊、复诊分离,多关键字查询统计,饮食及用药建议等	特定光源	教学科研、医生辅助等
TDA-1型舌诊仪	上海中医药大学	舌面	舌色、苔色	舌诊仪	操作简捷	分析舌色、苔色在CIELAB色空间中 $L^*a^*b^*$ 值分布(无诊断)	无需特定光源	临床舌象分析及应用
WZX 中医舌色分析系统	上海中医药大学	舌面	舌色	电脑端	复杂,不易操作	提取舌色(无诊断)	特定光源	中医辨证参考等
ZBOX-1型舌脉象数字化分析仪	上海中医药大学基础医学院	舌面	舌色、苔色、舌形、苔质	舌脉分析仪	—	描述慢性肾衰竭患者各证型舌象特征	局部暗箱	临床科研、远程医疗等
BD-SZ 便携式四诊合参辅助诊疗仪	北京中医药大学	舌面、脉搏	舌体、脉搏	电脑端	—	集合了脉诊、舌诊、闻诊、问诊(无诊断)	特定光源	中医辨证参考等
DS01-A型舌面脉体质辨识系统	上海道生医疗科技有限公司	舌面、脉搏、面部	舌体、面色、脉搏	体质辨识仪	操作简捷	集合了舌象、脉象、面色的体质辨识系统	特定光源	中医临床与科研等
中医舌诊仪	山东普瑞森医疗设备有限公司	舌面	舌色、苔色、舌形状、舌态	舌诊仪	导航指引、用户交互友好	根据需求灵活增减功能块	特定光源	医疗机构、中医辨证参考等
舌象分析仪	上海胜健教学设备有限公司	舌面	(4类25种)舌色、苔色、舌形、苔质	舌象仪	操作简捷	外形小巧,便于携带和搬运	特定光源	医疗机构等
健康说-叮咛体检	—	舌面	体质辨识	Android	操作简单	体质分析	无需特定光源	个人
计算机舌诊系统 <sup>[82]</sup>	南京邮电大学	舌面	舌色、苔色、舌形、苔质	电脑端	操作简捷	实现了几类疾病的临床诊断	封闭暗室	医疗机构
Android舌诊系统 <sup>[83]</sup>	复旦大学	舌面	舌色、苔色、苔质、舌形	Android	操作简捷	运动、饮食等建议	无需特定光源	个人
基于AI的舌象面象辅助诊疗系统 <sup>[84]</sup>	成都中医药大学	舌面、面部	舌色、苔色、苔质、舌形	手机、电脑端	操作便捷	用户健康的动态监管,包含健康面诊指标以及多方面调理建议的健康报告	无需特定光源	家庭环境、办公场所、社区等多种场合
计算机辅助舌诊系统	山东财经大学	舌面	舌色、苔色、苔质、舌形	电脑端	操作简捷、图像清晰	包含病理诊断、日常调理饮食建议的诊断报告	无需特定光源	个人、家庭环境、办公场所

## 5.2 计算机辅助舌诊系统实现

实验环境及主要配置参数如下:Windows 7操作系统, Intel Core i5-9400F处理器, GPU为NVIDIA RTX 2080,数据库为Microsoft SQL Sever,开发工具为Visual C++ .Net。实验中舌象分割所需的数据集共有550张舌体图像,一部分来源于Github的开源数据集,共300张舌图;另一部分是由课题合作单位中医药大学老师提供的,共250张舌图。数据

集中的图像尺寸大小不同,形状各异,拍摄角度及位置不固定,但都包含完整的舌体,适用于本文实验。为了增强模型的泛化性能,防止模型发生过拟合,我们对舌体图像进行翻转、随机裁剪、旋转等操作来进行数据集的扩充,最后得到1000张图像,其中训练集有600张图像,测试集和验证集各有200张图像。系统首先对舌像进行预处理,将舌体完整地分割出来,进而分离舌质和苔质,为提取舌象特征做铺垫。在舌象特

征提取阶段,系统对舌色和苔色进行识别,并提取舌质、舌苔的主要特征,最后在主界面输出分割后的舌体图像并显示所提取的舌象特征。在综合所得特征和个人信息后,系统可生成个人舌体特征总结报告。计算机辅助舌诊系统的流程如图 10 所示。

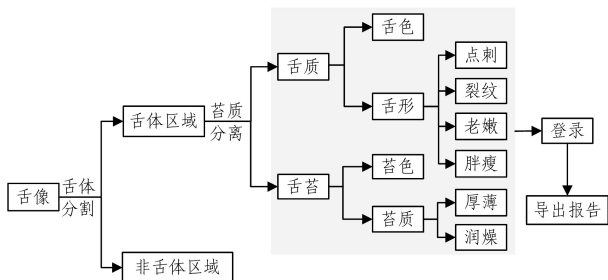


图 10 计算机辅助舌诊系统的流程图

Fig. 10 Flowchart of computer-aided tongue diagnosis system

本系统能够识别 6 种舌色特征,分别为青紫、淡紫、淡白、淡红、红、绛;能够识别 5 种苔色特征,分别为灰黑、黄、淡黄、白、薄白;能够识别 4 种舌质特征,分别为点刺、裂纹、老嫩和胖瘦;能够识别两种舌苔特征,分别为厚薄和润燥。

该系统使用基于边缘约束的对称性水平集舌体分割算法将舌体完整地分割出来,算法结合最新的卷积神经网络获得了舌体图像的边缘概率输入,考虑到舌体本身的形状特点,优化了水平集的初始化,并在演化模型中加入了对称性检测约束项,实现了舌体的精确、自动分割。其分割效果如图 11 所示。该方法适合大多数现实状况下的自动舌体分割,对舌体表面的光斑噪声不敏感,且分割准确度高。

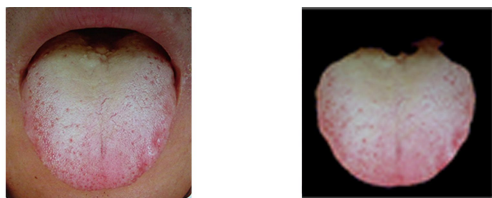


图 11 分割效果图

Fig. 11 Result of tongue image segmentation

该系统采用基于色度坐标的方法进行舌色和苔色的识别。在舌质特征识别阶段,其利用角点检测识别点刺舌,通过计算灰度图中的最大灰度分布值判断裂纹舌,根据灰度图中的对比度区分老嫩舌,通过计算舌体像素数与面积的比例区分胖大舌、瘦薄舌和正常舌;在舌苔特征提取阶段,使用 HSV 颜色空间,根据平均值和亮度的高低识别厚薄和润燥。通过对舌象特征的综合分析,系统能够对舌象进行病理诊断,系统可识别的部分舌象特征及对应病症如表 4 所列。基于上述舌像图与表 4 所列的舌象特征及对应病症关系,我们可得出表 5 所列的特征诊断结果。由结果可知,该舌象所属病理诊断为胃热巧盛,损伤津液;且湿热,痰浊未化,邪入半表,肝胆湿热。

### 5.2.1 系统使用示例

该系统能够完成对传统舌诊中舌色、舌形、纹理等特征的分类诊断,客观实现了中医舌诊分析诊断的数字化。图 12、图 13 为系统主界面及部分子界面的截图,以图中舌像为例,

下文详细介绍计算机辅助舌诊系统的使用过程。

表 4 部分舌象特征及对应病症

Table 4 Tongue features and corresponding symptoms

序号	舌象特征	病理诊断
1	黑舌	伤寒病
2	黄苔、薄苔	脾热
3	赤红舌、点刺舌	肝火旺
4	黄苔、燥苔	胃热巧盛,损伤津液
5	白苔、厚苔	寒邪入胃
6	黑苔、厚苔、燥苔	胃火旺
7	黑苔、厚苔、燥苔	脾胃虚寒
8	青紫舌、光滑舌、白苔	瘀血症
9	淡紫舌、嫩舌、光滑舌	内寒症
10	淡红舌、黄黑苔、厚苔	痰湿郁热;脾胃湿热蕴结
11	淡红舌、光滑舌、润苔	气血俱虚
12	红紫舌、白苔、厚苔	气血俱虚
13	深红舌、黄苔、光滑舌	阴虚里热兼痰湿
14	淡白舌、黄苔、燥苔	气津双亏,浮热伤扰
15	青紫舌、黄苔、燥苔	阴血耗损,虚火内积
16	暗红舌、黑苔、光滑舌	虚寒之极,虚阳上越
17	淡红舌、点刺舌、薄白苔、燥苔	阴虚寒极,津液不布
18	红舌、老舌、白苔、润苔	里热夹湿
19	淡白舌、胖舌、嫩舌、白苔、润苔	外感风寒表证
20	红舌、老舌、黄苔、厚苔、燥苔	邪热炎盛,热在上焦;津液不足
21	红舌、老舌、薄苔、燥苔	热入营血;湿热蕴于血分;心火亢盛
22	淡红舌、点刺舌、厚苔	湿热,痰浊未化;邪入半表;肝胆湿热

表 5 特征诊断结果

Table 5 Feature diagnosis result

部位	症状
舌色	淡红舌
舌质	点刺舌
	老嫩
	裂纹
	胖瘦
苔色	正常
苔质	黄白苔
	厚薄
	厚苔
	润燥
	燥糙苔

(1)打开计算机辅助舌诊系统,点击“打开图片”按钮,选择一张舌体图像上传到系统中。点击“分割舌体”按钮,系统就会自动生成舌体分割后的图像,舌体的背景区域为黑色。

(2)进行舌体分割后,对舌像进行特征的识别。分别点击“舌色、苔色、点刺、老嫩、裂纹、胖瘦、厚薄、润燥(顺序随机,不分前后)”,系统自动识别所上传的舌像,在各对应的舌体特征后的显示框中分别显示识别结果。点击“病症诊断”,即显示识别结果的对应病症,如图 12 所示。

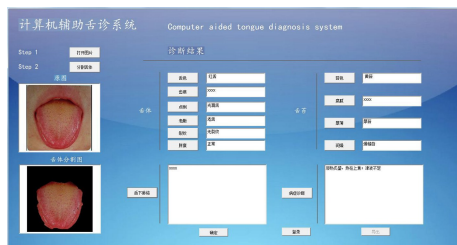


图 12 平台主界面图

Fig. 12 Main interface

(3)点击“登录”按钮后,会弹出一个对话框。在对话框中填写“姓名、年龄、性别和病史”4 种信息,并点击“确定”按钮即登录成功,如图 13(a)所示。

(4)点击“导出”按钮,弹出一个“诊断报告.doc生成成功!”对话框,如图13(b)所示。诊断报告会在系统文件目录下自动生成,如图14所示。该诊断报告除了包括登录对话框中所填写的信息外,还有系统中显示的原舌像和分割后的舌像图、对舌体各个特征的识别结果、病症诊断与治疗建议等。



(a)





(b)

图13 平台部分界面图

Fig. 13 Sub-interface diagram of system

病人姓名	病人年龄	病人性别
周一	20	男

一、检验结果

(图一) (图二)

	部位	症状
舌质	舌色	红舌
	齿痕	
	点刺	光滑舌
	老嫩	老舌
	裂纹	无裂纹
	胖瘦	正常
舌苔	苔色	黄苔
	腐腻	
	厚薄	厚苔
	润燥	燥糙苔
舌下络脉		

二、病症诊断  
邪热炙盛, 热在上焦; 津液不足

三、治疗建议  
日常调理可用赤小豆和栀子, 赤小豆解毒利尿, 栀子清热; 还应多吃蔬菜、水果, 少吃烧烤、辛辣、油炸食物等。

图14 诊断报告界面图

Fig. 14 Diagnostic report interface

### 5.2.2 系统开发总结

我们设计的计算机辅助舌诊系统完成了舌体颜色及纹理特征的自动识别,实现了中医舌诊客观化的研究,但仍有部分功能未能完成,如腐腻、裂纹与舌下络脉等特征的识别。后续

可扩充舌像数据集,将前沿的机器学习方法应用于计算机辅助舌诊系统的研究,一方面可完善系统功能,另一方面提高系统分割及特征识别的准确率。其次,系统对于舌体特征的量化研究有所欠缺,且仅涉及了部分易诊断病症的辅助诊断,还需丰富舌象特征及对应的病理诊断数据库。进一步完善计算机辅助舌诊系统是我们下一步探索的重点。

**结束语** 本文综述了自2000年以来计算机辅助舌诊研究的发展历程,并介绍了课题组实现的计算机辅助舌诊系统。目前,使用计算机进行辅助舌诊的研究虽然取得了一定的进展,但还有很多方面需要进一步探索。

(1)舌象数据库需要进一步扩充。典型样本的数量少,缺乏大量的高质量样本,这在一定程度上限制了计算机辅助舌诊的研究。

(2)动态舌象的分析需要进一步探索。舌体的颤动及伸出的幅度等动态信息也具有临床诊断的意义,可以利用基于机器学习的静态舌像分割方法延伸动态舌体的分割方法。

(3)舌象特征的种类需要进一步增多。舌神的枯荣,舌态的萎软、强硬、歪斜等都是中医舌诊中望诊的重要内容,但是目前针对这些特征的研究甚少。

总而言之,截至目前计算机辅助舌诊已展现出了良好的效果和巨大的潜能。凭借科研人员的不懈努力、计算机技术与医疗领域的不断融合,计算机辅助舌诊终会实现舌诊的科学化、客观化、具体化。

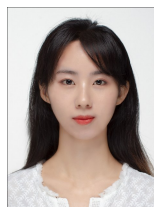
### 参考文献

- [1] XIE T. A new approach to the tongue-image segmentation and moirening analysis based on image processing[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2017.
- [2] SUN L Y, CHENG Z, GAO F S, et al. Discussion on the objective research of tongue diagnosis using computer image recognition technology[J]. Journal of Anhui College of Traditional Chinese Medicine, 1986, 5(4): 5-7.
- [3] DU J Q, LU Y S, ZHU M F, et al. A novel algorithm of color tongue image segmentation based on HSI[C]// Proceedings of International Conference on Biomedical Engineering & Informatics. Sanya: IEEE Computer Society Press, 2008: 733-737.
- [4] ZHU M F, DU J Q, ZHANG K, et al. A Novel approach for tongue image extraction based on combination of color and space information[C]// Proceedings of International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering. Beijing: IEEE Computer Society Press, 2009.
- [5] LI C, WANG D Y, LIU Y Q, et al. A novel automatic tongue image segmentation algorithm; color enhancement method based on  $L^*a^*b^*$  color space[C]// Proceedings of International Conference on Bioinformatics and Biomedicine. Washington: IEEE Computer Society Press, 2015: 990-993.
- [6] WANG Y Z, YANG J, ZHOU Y, et al. Automatic tongue area extraction in tongue images[J]. Computer Simulation, 2005, 22(2): 232-235.
- [7] MA C, TANG Z D, TANG L. Application of image segmentation technique in tongue diagnosis[J]. Computer Simulation, 2008, 25(2): 215-218.

- [8] WY W J, MA L Z, XIAO X Z. Method of tongue image segmentation based on luminance and roughness information[J]. *Journal of System Simulation*, 2006, 18(S1): 374-376, 379.
- [9] ZHI L, YAN J Q, ZHOU T, et al. Tongue shape detection based on B-spline[C]// *Proceedings of International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, Dalian: IEEE Computer Society Press, 2006: 3829-3832.
- [10] WU K, ZHANG D. Robust tongue segmentation by fusing region-based and edge-based approaches[J]. *Expert Systems with Applications*, 2015, 42(21): 8027-8038.
- [11] KIM K H, DO J H, RYU H, et al. Tongue diagnosis method for extraction of effective region and classification of tongue coating [C]// *Proceedings of Image Processing Theory, Tools and Applications*. Sousse: IEEE Computer Society Press, 2008.
- [12] HUANG Z P, HUANG Y S, YI F L, et al. An automatic tongue segmentation algorithm based on OTSU and region growing[J]. *LiShiZhen Medicine and Materia Medica Research*, 2017, 28(12): 3062-3064.
- [13] LIU W X, ZHOU C E, LI Z Y, et al. Patch-driven tongue image segmentation using sparse representation [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 41372-41383.
- [14] WANG Y Q, WEI B G, CAI Y H, et al. A knowledge-based arithmetic for automatic tongue segmentation[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2004, 32(3): 489-491.
- [15] PANG B, WANG K, ZHANG D, et al. On automated tongue image segmentation in Chinese medicine[C]// *Proceedings of International Conference on Pattern Recognition*. Quebec: IEEE Computer Society Press, 2002.
- [16] PANG B, ZHANG D, WANG K. The bielliptical deformable contour and its application to automated tongue segmentation in Chinese medicine[J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2005, 24(8): 946-956.
- [17] YU S Y, YANG J, WANG Y G. Color active contour models based tongue segmentation in traditional Chinese medicine[C]// *Proceedings of International Conference on Bioinformatics & Biomedical Engineering*. Wuhan: IEEE Computer Society Press, 2007: 1081-1084.
- [18] FU Z C, LI X Q, LI F F. Tongue image segmentation based on Snake model[J]. *Journal of Image And Graphics*, 2009, 14(4): 688-693.
- [19] ZUO W, WANG K, ZHANG D, et al. Combination of polar edge detection and active contour model for automated tongue segmentation[C]// *Proceedings of International Conference on Image and Graphics*. Hong Kong: IEEE Computer Society Press, 2005.
- [20] ZHANG H, ZUO W, WANG K, et al. A snake-based approach to automated segmentation of tongue image using polar edge detector[J]. *International Journal of Imaging Systems and Technology*, 2006, 16(4): 103-112.
- [21] QIN W X, LI B, YUE X Q. A hybrid tongue image segmentation algorithm based on initialization of Snake contours[J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2010, 40(8): 807-811.
- [22] GUO J, YANG Y, WU Q, et al. Adaptive active contour model based automatic tongue image segmentation[C]// *Proceedings of International Congress on Image and Signal Processing, BioMedical Engineering and Informatics*. Datong: IEEE Computer Society Press, 2016: 1386-1390.
- [23] ZHU F, DAI P W, PAN B, et al. Tongue segmentation algorithm based on improved bacteria foraging optimization algorithm[J]. *Journal of Graphics*, 2019, 40(1): 70-77.
- [24] YAN J J, XU Z, GUO R, et al. Research on tongue image segmentation based on active contour model of force field[J]. *Chinese Journal of Traditional Chinese Medicine*, 2019, 34(8): 3725-3727.
- [25] WU J, ZHANG Y H, BAI J. Tongue Area Extraction in Tongue Diagnosis of Traditional Chinese Medicine[C]// *Proceedings of International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society*. Shanghai: IEEE Computer Society Press, 2005: 4955-4957.
- [26] WU J, ZHANG Y H, BAI J, et al. Tongue contour image extraction using a watershed transform and an active contour model [J]. *Journal of Tsinghua University (Natural Science edition)*, 2008, 48(6): 1040-1043.
- [27] NING J, ZHANG D, WU C, et al. Automatic tongue image segmentation based on gradient vector flow and region merging[J]. *Neural Computing and Applications*, 2012, 21(8): 1819-1826.
- [28] SHI M J, LI G Z, LI F F. C2G2FSnake: automatic tongue image segmentation utilizing prior knowledge[J]. *SCIENCE CHINA Information Sciences(English Edition)*, 2013(9): 150-163.
- [29] SHI M J, LI G Z, LI F F, et al. Computerized tongue image segmentation via the double geovector flow[J]. *Chinese Medicine*, 2014, 9(7).
- [30] LIU Z, YAN J Q, ZHANG D, et al. Automated tongue segmentation in hyperspectral images for medicine[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(34): 8328-8334.
- [31] FU Z C, LI W, LI X Q, et al. Automatic tongue location and segmentation[C]// *Proceedings of International Conference on Audio, Language & Image Processing*. Shanghai: IEEE Computer Society Press, 2008: 1050-1055.
- [32] LI X Q, LI J D, WANG D. Automatic Tongue Image Segmentation Based on Histogram Projection and Matting[C]// *Proceedings of International Conference on Bioinformatics and Biomedicine*. Belfast: IEEE Computer Society Press, 2014: 76-81.
- [33] LI J P, PAN B C, WEI Y K. Tongue Image Segmentation Based on Fuzzy Rough Sets[C]// *Proceedings of International Conference on Environmental Science and Information Application Technology*. Wuhan: IEEE Computer Society Press, 2009: 367-369.
- [34] KANAWONG R, XU W T, XU D, et al. An automatic tongue detection and segmentation framework for computer-aided tongue image analysis[J]. *International Journal of Functional Informatics & Personalised Medicine*, 2012, 4(1): 56-68.
- [35] ZHU M F, DU J Q, DING C H, et al. Improved Fast Random

- Walk Tongue Image Extraction Algorithm[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2015, 27(4): 633-639.
- [36] XIE T, XIA C M, CHEN F F, et al. A method of tongue image segmentation based on kernel FCM[C]// *Proceedings of International Congress on Image and Signal Processing, BioMedical Engineering and Informatics*. Datong: IEEE Computer Society Press, 2017: 319-324.
- [37] FU W B, SUN T, LANG J, et al. Review of Principle and Application of Deep Learning[J]. *Computer Science*, 2018, 45(S1): 11-15, 40.
- [38] LI J, XU B, BAN X, et al. A Tongue Image Segmentation Method Based on Enhanced HSV Convolutional Neural Network [C]// *Proceedings of International Conference on Cooperative Design, Visualization and Engineering*. Mallorca: IEEE Computer Society Press, 2017: 252-260.
- [39] QU P L, ZHANG H, ZHUO L, et al. Automatic Tongue Image Segmentation for Traditional Chinese Medicine Using Deep Neural Network[J]. Springer, 2017, 10361: 247-259.
- [40] XUE Y S, LI X Q, WU P, et al. Automated Tongue Segmentation in Chinese Medicine Based on Deep Learning[C]// *Proceedings of International Conference on Neural Information Processing*. Siem Reap: IEEE Computer Society Press, 2018: 542-553.
- [41] LIN B Q, QU Y Y, XIE J W, et al. Deeptongue: tongue segmentation via resnet[C]// *Proceedings of International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*. Calgary: IEEE Computer Society Press, 2018: 1035-1039.
- [42] ZHOU C, FAN H, LI Z. TongueNet: Accurate Localization and Segmentation for Tongue Images using Deep Neural Networks [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 148779-148789.
- [43] WEI Y, LIU C S. Cascaded CNN for Real-time Tongue Segmentation Based on Key Points Localization[C]// *Proceedings of International Conference on Big Data Analytics*. Suzhou: IEEE Press, 2019: 303-307.
- [44] MA L X, YANG H, SONG T T, et al. Research on tongue image segmentation algorithm of tongue image based on high resolution feature[J]. *Computer Engineering*, 2020, 46(10): 248-252.
- [45] LI Y T, LUO Y S, ZHU Z M. Tongue Image Analysis in Traditional Chinese Medicine Based on Deep Learning[J]. *Computer Science* 2020, 47(11): 148-158.
- [46] ZHANG X H, SHI Q L, WANG B, et al. Review of Machine Learning Algorithms in Traditional Chinese Medicine[J]. *Computer Science*, 2018, 45(S2): 32-36.
- [47] HSU Y C, CHEN Y C, LO L C, et al. Automatic tongue feature extraction[C]// *Proceedings of International Computer Symposium*. Tainan: IEEE Computer Society Press, 2010: 936-941.
- [48] HAN F. Tongue color space analysis and color feature study [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [49] HAN L B, HU G Q, ZHANG X F, et al. Separation method of tongue coating and body of tongue image based on histogram equalization and gamma correction and K-means clustering[J]. *Beijing Biomedical Engineering*, 2019, 38(1): 1-6.
- [50] LI Q, LIU Z. Tongue color analysis and discrimination based on hyperspectral images [J]. *Computerized Medical Imaging and Graphics; the Official Journal of the Computerized Medical Imaging Society*, 2009, 33(3): 217-221.
- [51] CHIU C C. A novel approach based on computerized image analysis for traditional Chinese medical diagnosis of the tongue[J]. *Computer Methods & Programs in Biomedicine*, 2000, 61(2): 77-89.
- [52] LIU Y W, ZHANG X F, SHEN L S, et al. Comparisons for Multi-Class Support Vector Machine on Tongue Color Recognition of Traditional Chinese Medicine[J]. *Beijing Biomedical Engineering*, 2009, 28(3): 253-258.
- [53] WANG X Z, ZHANG B, YANG Z M, et al. Statistical Analysis of Tongue Images for Feature Extraction and Diagnostics[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2013, 22(12): 5336-5347.
- [54] SUN L Y, XIE H C, GAO F S, et al. Discussion on the objective research of tongue diagnosis using computer image recognition technology[J]. *Journal of Anhui Traditional Chinese Medical College*, 1986, 5(4): 5-7.
- [55] LIU M A, XU J P, ZHAO Y, et al. The clinical research of glososcopy of acute cerebrovascular disease[J]. *Journal of Emergency in Traditional Chinese Medicine*, 2008, 17(11): 1552-1554.
- [56] HHUANG B, WU J S, ZHANG D, et al. Tongue shape classification by geometric features[J]. *Information Sciences*, 2010, 180(2): 312-324.
- [57] LI W S, YAO J F, SONG H. The recognition of the teeth marks of tongue based on the improved level set in TCM[C]// *Proceedings of International Congress on Image and Signal Processing*. Yantai: IEEE Computer Society Press, 2010: 2700-2704.
- [58] LI H H, ZHANG X F, HU G Q, et al. The improvement of the tooth-marked recognition method on the tongue images[C]// *Proceedings of International Conference on Complex Medical Engineering*. Beijing: IEEE Computer Society Press, 2013: 412-415.
- [59] SHAO Q, LI X Q, FU Z C. Recognition of Teeth-Marked Tongue Based on Gradient of Concave Region[C]// *Proceedings of International Conference on Audio, Language and Image Processing*. Shanghai: IEEE Computer Society Press, 2014: 968-972.
- [60] ZHU M L M, LU P, XIA C M, et al. Research on Douglas-Peucker Method in Feature Extraction from 55 Cases of Tooth-Marked Tongue Images[J]. *Chinese Archives of Traditional Chinese Medicine*, 2014, 32(9): 2138-2140.
- [61] WANG S, LIU K H, WANG L T. Tongue spots and petechiae recognition and extraction in tongue diagnosis images[J]. *Computer Engineering & Science*, 2017, 39(6): 1126-1132.
- [62] YAN Z, ZHANG D P, LI T N M. Kernel False-Colour Transformation and Line Extraction for Fissured Tongue Image[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2010, 22(5): 771-776.
- [63] QIN H S, HUANG Z C, ZHAO Y Q, et al. New MLBP-Otsu method and its application in tongue crack image segmentation

- [J]. Computer Engineering and Applications, 2014, 50(23): 151-155.
- [64] ZHANG H K, HU Y Y, LI X, et al. Computer Identification and Quantification of Fissured Tongue Diagnosis[C]// Proceedings of International Conference on Bioinformatics & Biomedicine. Madrid: IEEE Computer Society Press, 2018: 1953-1958.
- [65] CHANG W H, CHU H T, CHANG H H. Tongue Fissure Visualization with Deep Learning[C]// Proceedings of Conference on Technologies and Applications of Artificial Intelligence. Tainchung: IEEE Computer Society Press, 2018: 14-17.
- [66] SELVARAJU R R, COGSWELL M, DAS A, et al. Grad-CAM: Visual Explanations from Deep Networks via Gradient-Based Localization[C]// Proceedings of International Conference on Computer Vision. Venice: IEEE Computer Society Press, 2018: 14-17.
- [67] CAO M L, ZHANG X F, SHEN L S. Application Survey of Information Combination in the Toughness and Tenderness of Tongue Manifestation Recognition[J]. Beijing Biomedical Engineering, 2006, 25(6): 644-648.
- [68] WEI B G, SHEN L S. Automatic Analysis for Plumpness and Slenderness of Tongue[J]. Computer Engineering, 2004, 30(11): 25-26, 68.
- [69] ZHANG K, ZHANG H L, JIN S, et al. Analysis plumpness and slenderness of tongue based on the neural net[J]. Chinese Journal of Traditional Chinese Medicine, 2014, 29(10): 3111-3114.
- [70] SUN D P, WU J, ZHANG Y H, et al. Automatic Sublingual Venae Extraction Method Based on Clustering[J]. Chinese Journal of Biomedical Engineering, 2008, 27(2): 265-269.
- [71] YAN Z F. Feature Acquisition and Analysis of Sublingual Vein for Tongue Diagnosis in Traditional Chinese Medicine[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [72] ZHANG Q. A new tongue diagnosis method based on adaptive outline extraction and multiple features synthesis[D]. Shanghai: Fudan University, 2014.
- [73] BAI L Y, SHI Y, WU J, et al. Automatic extraction of tongue coatings from digital images: A traditional Chinese medicine diagnostic tool[J]. Tsinghua Science and Technology, 2009, 14(2): 170-175.
- [74] TANG R S. Classification of the thickness of tongue coating using 2D-Gabor wavelet[C]// Proceedings of Heilongjiang Computer Society Academic Exchange Annual Meeting. 2007: 262-266.
- [75] LIU B, HU G Q, ZHANG X F, et al. An improved automatic description method of tongue coating thickness in Chinese medicine[J]. Beijing Biomedical Engineering, 2018, 37(2): 157-163.
- [76] WEI B G, SHEN L S, CAI Y H, et al. Research on Curdy and Greasy Tongue Fur Analysis for Traditional Chinese Medicine [J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(12A): 2083-2086.
- [77] QU T T, XIA C M, WANG Y Q, et al. Recognition of greasy or curdy tongue coating based on gabor wavelet transformation [J]. Computer Applications and Software, 2016, 33(10): 162-166.
- [78] HUANG C W, CHEN Y J, YEN T T, et al. Region-based hierarchical tongue feature extraction[C]// Proceedings of International Conference on Machine Learning and Cybernetics. Lanzhou: IEEE Computer Society Press, 2014: 867-870.
- [79] PANG B, ZHANG D, LI N, et al. Computerized tongue diagnosis based on Bayesian networks[J]. Transactions on Biomedical Engineering, 2004, 51(10): 1803-1810.
- [80] GAO Z, PO L M, JIANG W, et al. A Novel Computerized Method Based on Support Vector Machine for Tongue Diagnosis [C]// Proceedings of International IEEE Conference on Signal-Image Technologies and Internet-Based System. Shanghai: IEEE Computer Society Press, 2007: 797-802.
- [81] TANG Y P, WANG L R, HE X, et al. Classification of tongue image based on multi-task deep convolutional Neural Network [J]. Computer Science, 2018, 45(12): 255-261.
- [82] GAO Z, CUI M, LU G. A Novel Computerized System for Tongue Diagnosis[C]// Proceedings of International Seminar on Future Information Technology and Management Engineering. Loughborough: IEEE Computer Society Press, 2008: 364-367.
- [83] ZHANG Q, SHANG H L, ZHU J J, et al. A new tongue diagnosis application on Android platform[C]// Proceedings of International Conference on Bioinformatics & Biomedicine. Shanghai: IEEE Computer Society Press, 2014: 324-327.
- [84] SONG H B, WEN C B, CHENG X E. The construction of the auxiliary diagnosis and treatment system of tongue image and face image of traditional Chinese medicine based on AI[J]. Lishi-zhen Medicine and Materia Medica Research, 2020, 31(2): 502-505.



**ZHANG Li-qian**, born in 1995, post-graduate, is a member of China Computer Federation. Her main research interests include image identification and so on.



**GAO Shan-shan**, born in 1980, Ph. D., professor, Ph. D supervisor, is a member of China Computer Federation. Her main research interests include Computer graphics, image processing, intelligent information processing and visualization.