

面向医学图像分割的直线截距直方图倒数交叉熵方法

吴诗嫻 吴一全 周建江 龙云淋

(南京航空航天大学电子信息工程学院, 南京, 210016)

摘要: 为了进一步提高医学图像分割的速度和准确度, 为临床诊断和辅助治疗提供更为充分有效的依据, 本文提出了一种基于直线截距直方图的倒数交叉熵图像阈值分割方法。首先定义了直线截距直方图; 然后根据医学图像的二维信息, 建立该图像的直线截距直方图; 最后, 推导出基于该直方图的倒数交叉熵阈值选取准则, 并以此对医学图像进行分割。实验结果表明, 与基于混沌小生境粒子群优化 (Niche chaotic mutation particle swarm optimization, NCPSO) 的二维倒数熵法、基于分解的二维指数灰度熵法、基于斜分的二维对称交叉熵法及基于粒子群优化 (Particle swarm optimization, PSO) 的二维 Tsallis 交叉熵法相比, 本文方法分割后的图像中目标区域完整准确, 边缘细节清晰丰富, 且所需运行时间大幅减少, 是医学影像研究中可选择的一种快速有效的图像分割方法。

关键词: 医学图像分割; 阈值选取; 直线截距直方图; 倒数交叉熵

中图分类号: R445; TP391.41 **文献标志码:** A

Segmentation Method Based on Line Intercept Histogram Reciprocal Cross Entropy for Medical Image

Wu Shihua, Wu Yiquan, Zhou Jianjiang, Long Yunlin

(College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: To improve the efficiency and accuracy of medical image segmentation and provide more fully effective basis for clinical diagnosis and adjunctive therapy, a medical image segmentation method based on line intercept histogram reciprocal cross entropy is proposed. Firstly, the line intercept histogram is defined. Then, the line intercept histogram of the medical image is built considering its two-dimensional information. Finally, the reciprocal cross entropy criterion for threshold selection based on the line intercept histogram is derived, according to which, the medical image is segmented. A large number of experimental results show that, compared with other methods, including two-dimensional reciprocal entropy method based on niche chaos particle swarm optimization (NCPSO), two-dimensional exponent gray entropy method based on decomposition, symmetric cross entropy method based on two-dimensional histogram oblique segmentation, two-dimensional Tsallis cross entropy method based on particle swarm optimization (PSO) and so on, the proposed method has superior image segmentation performance. In its segmentation result, object region is complete and accurate, and the edge details are clear and richer. Moreover, the running time is greatly reduced. It is a fast and effective new segmentation method which

can be used in medical image research.

Key words: medical image segmentation; threshold selection; line intercept histogram; reciprocal cross entropy

引 言

随着 X 射线、计算机断层扫描成像(Computed tomography, CT)、磁共振成像(Magnetic resonance imaging, MRI)以及磁共振血管造影(Magnetic resonance angiography, MRA)等技术的不断发展,医学影像在现代临床诊断和医学研究领域中的应用价值也日益重要^[1-3]。医学图像数据源丰富且数量庞大,使得对医学图像自动处理和分析的需求愈加迫切。医学图像分割作为其中的关键技术之一,通常是指以血管、组织、器官的图像作为处理对象,分离图像中的感兴趣区域与背景,也是进一步进行医学图像分类和识别的前提与基础。对医学图像分割后可以很方便地提取出图像特征,对三维可视化、三维定位、组织定量分析和计算机辅助诊断具有重要的实际意义^[4]。

阈值分割法作为一种常用的图像分割方法,具有计算简单、快速有效和易于实现的优点^[5]。其核心问题在于依据特定直方图和准则选取最佳阈值。目前,在已提出的众多阈值选取方法中,文献[6]提出的一维最大熵法因实现简单而成为最受关注的方法之一。文献[7-8]将其推广到二维,提高了算法的抗噪性,但计算复杂性大幅增加。随后,文献[9-10]先后提出最小交叉熵阈值选取准则,能较为准确地描述分割前后图像之间的差异程度,分割效果较好,成为研究热点^[11-16]。然而,现有的最小交叉熵阈值选取准则因涉及了对数运算而存在无定义值和零值的缺陷,且对数运算所需时间略长,方法的运行速度有待进一步提升。鉴于此,文献[17]用指数形式的定义取代了原本基于对数的信息熵定义,推导出最大指数熵阈值选取公式。文献[18]在指数熵的基础上提出了一维和二维指数交叉熵阈值选取方法,使分割结果更准确。文献[19]定义了倒数熵,并提出了最大倒数熵阈值选取方法,该方法解决了最大熵存在的问题,其简单的除法运算相对数、指数等运算,在实际处理时更加简单快速。在此基础上,二维最小倒数交叉熵阈值选取方法也被提出^[20],获得了更好的分割结果。但对于倒数交叉熵,二维熵的引入虽然大大提升了算法性能,但由于考虑了图像的二维信息,计算复杂度大幅增加,算法速度受到限制。

基于上述分析,为了满足医学研究和临床诊断过程中快速性和准确性的要求,本文提出了基于直线截距直方图的倒数交叉熵医学图像分割方法。该方法利用原始图像像素点的灰度级和邻域平均灰度级二维信息,建立图像的一维直线截距直方图,并推导出了基于该直方图的倒数灰度熵阈值选取准则,以此求取最佳分割阈值,对医学图像进行分割。针对大量医学图像进行实验,与基于混沌小生境粒子群优化(Niche chaotic mutation particle swarm optimization, NCPSO)的二维倒数熵法、基于分解的二维指数灰度熵法^[21]、基于斜分的二维对称交叉熵法^[22]及基于粒子群优化(Particle swarm optimization, PSO)的二维 Tsallis 交叉熵法^[23]进行了对比,并给出了相应的评价。

1 直线截距直方图

1.1 直方图及其区域划分方式

基于直方图区域划分的阈值选取准则作为阈值分割的研究热点,直方图的选择及其划分显得尤为关键。一维灰度级直方图仅反映图像的灰度分布信息。二维直方图通常是在一维直方图的基础上增加了邻域平均灰度级信息,该直方图同时考虑了图像的灰度分布和像素的空间关系,是图像阈值分割最常用的依据。

二维直方图划分方式主要分为直分法和斜分法,如图 1 所示。图中 $f(m, n)$ 和 $g(m, n)$ 分别表示灰

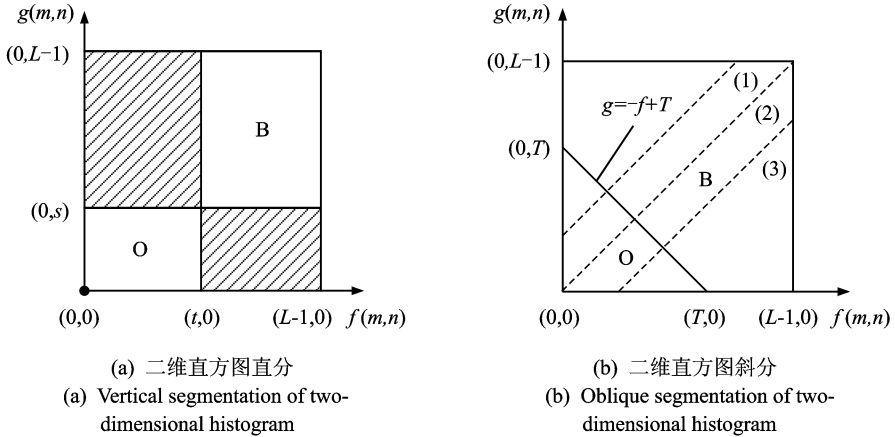


图 1 二维直方图直分与斜分

Fig. 1 Vertical and oblique segmentation of two-dimensional histogram

度级和邻域平均灰度级。

传统的直分法,如图 1(a)所示,是在假设边缘和噪声区域(图中阴影部分)的概率分布忽略不计的前提下,通过 $f=t$ 和 $g=s$ 两条分别平行于纵轴和横轴的直线,将图像分为目标(O)和背景(B)两个区域,其中 t 为灰度级阈值, s 为邻域平均灰度级阈值。二维直方图直分阈值选取方法的关键就是根据某种准则,确定阈值 t 和 s ,使得划分后的两区域为目标和背景的最优表示。

为了避免这种假设造成的不利影响,二维直方图斜分法被提出,如图 1(b)所示。该方法认为目标和背景像素应该分布在直方图对角线(虚线(2))附近,利用一条垂直于对角线且斜率为-1的直线将图像分为目标(O)和背景(B)两个区域。斜分法只需确定一个阈值,即该阈值直线的截距 T ,因此,与直分法相比,搜索空间缩小,计算量降低。利用该直方图划分方式,可有效提高图像阈值分割的准确性,但阈值选取过程中仍需遍历二维直方图,运行速度受限。

1.2 直线截距直方图的建立

从上述分析可知,利用斜分法对二维直方图进行分割时,该阈值直线可由该直线的截距唯一确定,即求最佳阈值的实质就是在阈值选取准则和直线截距直方图的基础上求解最佳截距阈值,则可将二维直方图区域向对角线方向做投影,建立直线截距直方图。以此可将二维直方图转化为一维,进一步缩小斜分法的阈值搜索空间。

若以 $f(m,n)+g(m,n)=k$ 表示二维直方图中与主对角线垂直且截距为 k 的直线,则在图像的二维直方图中共有 $2L-1$ 条这样的直线。设 $f(m,n)+g(m,n)=F(m,n)$,则 $F(m,n)$ 可以看作一幅大小为 $M \times N$ 、灰度级数为 $2L-1$ 的灰度-邻域平均灰度图像。据此,可以建立图像的直线截距直方图。现以一幅含噪的医学图像(如图 2(a)所示)为例,给出建立该医学图像直线截距直方图的具体步骤:首先,将原始图像灰度化转化成其灰度图像(图 2(b));再根据灰度图像求各个像素点的邻域平均灰度级,得到原始图像的邻域平均灰度图像;然后,分别将灰度图像与其邻域平均灰度图像求和,得到灰度-邻域平均灰度图像,最后对此灰度-邻域平均灰度图像进行灰度直方图统计,即可得到图像的直线截距直方图(图 2(c))。

2 基于直线截距直方图的倒数交叉熵阈值选取

设一幅大小 $M \times N$ 的医学图像中像素 (m,n) 的灰度级为 $f(m,n)$,其邻域平均灰度级为 $g(m,n)$,

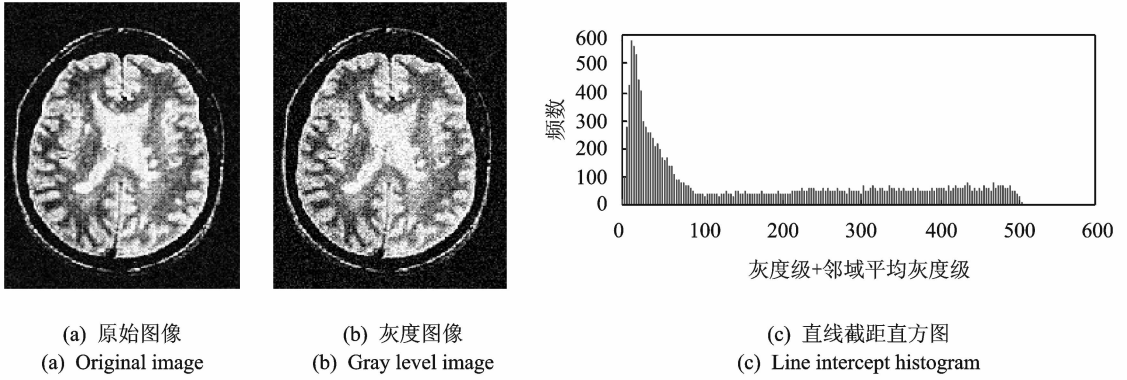


图2 含噪医学图像及其直线截距直方图

Fig. 2 Noisy medical image and its line intercept histogram

$h(k)$ 为该图像中满足 $F(m,n) = f(m,n) + g(m,n) = k$ 的像素点频数,其对应的频率为

$$p_k = \sum_{i+j=k} p_{ij} = \frac{h(k)}{M \cdot N} \quad k=0,1,\dots,2L-2 \quad (1)$$

式中: i 为该医学图像中像素 (m,n) 的灰度级; j 为其邻域平均灰度级,且 $\sum_{k=0}^{2L-2} p_k = 1$ 。现以阈值 t' 将该医学图像 $\Omega_T = \{(m,n) | F(m,n) = 0,1,\dots,2L-2\}$ 分为目标类 $\Omega_o = \{(m,n) | F(m,n) = 0,1,\dots,t'\}$ 和背景类 $\Omega_b = \{(m,n) | F(m,n) = t'+1,t'+2,\dots,2L-2\}$ 。

设 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_N\}$ 和 $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_N\}$ 为满足条件 $p_i \geq 0, q_i \geq 0, \sum_{i=1}^N p_i = \sum_{i=1}^N q_i = 1$ 的两个分布,则 P 和 Q 之间的倒数交叉熵定义为

$$E(P,Q) = 1 - 2 \sum_{i=1}^N p_i \frac{1}{1 + \frac{p_i}{q_i}} \quad (2)$$

易证 $E(P,Q) \in [0,1), E(P,Q) = 0$ 的充要条件为 $p_i = q_i, i=1,2,\dots,N$ 。

其中背景 Ω_b 的先验概率 $\omega_b(t')$ 和灰度均值 $\mu_b(t')$ 分别为 $\omega_b(t') = \sum_{i=0}^{t'} p(i), \mu_b(t') = \frac{\sum_{i=0}^{t'} p(i) i}{\omega_b(t')}$; 而目

标 Ω_o 的先验概率 $\omega_o(t')$ 和灰度均值 $\mu_o(t')$ 则分别为 $\omega_o(t') = \sum_{i=t'+1}^{2L-2} p(i), \mu_o(t') = \frac{\sum_{i=t'+1}^{2L-2} p(i) i}{\omega_o(t')}$ 。整幅医学图

像的灰度级均值 $\mu_T = \frac{1}{M \cdot N} \sum_{(x,y) \in \Omega_T} F(x,y) = \sum_{i=0}^{2L-2} p(i) i$, 即 $\mu_T = \sum_{i=0}^{t'} p(i) i + \sum_{i=t'+1}^{2L-2} p(i) i = \omega_b(t') \cdot \mu_b(t') + \omega_o(t') \cdot \mu_o(t')$, 而灰度级总和为 $\sum_{(x,y) \in \Omega_T} F(x,y) = M \cdot N \cdot \mu_T$ 。

$$\text{令 } p_{m,n} = \frac{F(m,n)}{\sum_{(x,y) \in \Omega_T} F(x,y)} = \frac{F(m,n)}{M \cdot N \cdot \mu_T},$$

$$q_{m,n} = \begin{cases} \frac{\mu_b(t')}{\sum_{(x,y) \in \Omega_T} F(x,y)} = \frac{\mu_b(t')}{M \cdot N \cdot \mu_T} & (m,n) \in \Omega_b \\ \frac{\mu_o(t')}{\sum_{(x,y) \in \Omega_T} F(x,y)} = \frac{\mu_o(t')}{M \cdot N \cdot \mu_T} & (m,n) \in \Omega_o \end{cases}$$

可见, $p_{m,n} \geq 0, q_{m,n} \geq 0, \sum_{(m,n) \in \Omega_T} p_{m,n} = 1,$

且

$$\sum_{(m,n) \in \Omega_T} q_{m,n} = \sum_{(m,n) \in \Omega_b} \frac{\mu_b(t')}{\sum_{(x,y) \in \Omega_T} F(x,y)} + \sum_{(m,n) \in \Omega_o} \frac{\mu_o(t')}{\sum_{(x,y) \in \Omega_T} F(x,y)} = \frac{1}{\mu_T} \left[\left(\sum_{i=0}^{t'} p(i) \right) \mu_b(t') + \left(\sum_{i=t'+1}^{2L-2} p(i) \right) \mu_o(t') \right] = \frac{1}{\mu_T} [\omega_b(t') \cdot \mu_b(t') + \omega_o(t') \cdot \mu_o(t')] = 1$$

因此 $P = \{p_{m,n}\}$ 和 $Q = \{q_{m,n}\}$ 满足上述倒数交叉熵的定义中对两个分布的要求, 据此得到 P, Q 间的基于直线截距直方图的倒数交叉熵为

$$E(P, Q) = 1 - 2 \sum_{(m,n) \in \Omega_T} p_{m,n} \frac{1}{1 + \frac{p_{m,n}}{q_{m,n}}} = 1 - 2 \left[\sum_{(m,n) \in \Omega_b} \frac{F(m,n)}{M \cdot N \cdot \mu_T} \frac{1}{1 + \frac{F(m,n)/(M \cdot N \cdot \mu_T)}{\mu_b(t')/(M \cdot N \cdot \mu_T)}} + \sum_{(m,n) \in \Omega_o} \frac{F(m,n)}{M \cdot N \cdot \mu_T} \frac{1}{1 + \frac{F(m,n)/(M \cdot N \cdot \mu_T)}{\mu_o(t')/(M \cdot N \cdot \mu_T)}} \right] = 1 - \frac{2}{M \cdot N \cdot \mu_T} \left[\sum_{i=0}^{t'} M \cdot N \cdot p(i) i \frac{1}{1 + \frac{i}{\mu_b(t')}} + \sum_{i=t'+1}^{2L-2} M \cdot N \cdot p(i) i \frac{1}{1 + \frac{i}{\mu_o(t')}} \right] = 1 - \frac{2}{\mu_T} \left[\sum_{i=0}^{t'} p(i) i \frac{1}{1 + \frac{i}{\mu_b(t')}} + \sum_{i=t'+1}^{2L-2} p(i) i \frac{1}{1 + \frac{i}{\mu_o(t')}} \right] \quad (3)$$

对于给定的某幅医学图像, 上式中的 μ_T 为大于零的定值。倒数交叉熵可视为倒数熵定义下的 Kullback 距离, 反映了 P, Q 间基于倒数熵的平均信息量偏差, 可以用来表示分割前后图像间的误差大小, 因此, 当倒数交叉熵 $E(P, Q)$ 取得最小值时, 所对应的 t' 为最佳阈值, 即取最大值。因此, 基于直线截距直方图的倒数交叉熵阈值选取准则函数可记为

$$\eta(t') = \sum_{i=0}^{t'} p(i) i \frac{1}{1 + \frac{i}{\mu_b(t')}} + \sum_{i=t'+1}^{2L-2} p(i) i \frac{1}{1 + \frac{i}{\mu_o(t')}} \quad (4)$$

最佳阈值 t^* 为

$$t^* = \operatorname{argmax}_{0 \leq t' \leq 2L-2} \{\eta(t')\} \quad (5)$$

最后可根据下式对医学图像进行阈值分割

$$f'(m,n) = \begin{cases} 0 & F(m,n) \leq t^* \\ L-1 & F(m,n) > t^* \end{cases} \quad (6)$$

3 实验结果与分析

实验在 Intel(R) Core(TM) i5 CPU 2.0 GHz, 内存为 4 GB, Matlab R2013a 环境中得到。利用本文提出的基于直线截距直方图的倒数交叉熵阈值选取方法对大量医学图像进行了分割实验, 并与基于 NCPSO 的二维倒数熵法、基于分解的二维指数灰度熵法、基于斜分的二维对称交叉熵法和基于 PSO 的二维 Tsallis 交叉熵法进行比较。实验结果如图 3~6 所示。其中图 3(a)~6(a)为原始图像, 图 3(b)~6(f)为不同方法分割结果。表 1, 2 相应地列出了上述 5 种分割方法的最佳阈值和运行时间。

由图 3~4 结果可见, 基于 NCPSO 的二维倒数熵法、基于 PSO 的二维 Tsallis 交叉熵法均存在严重的欠分割现象, 大量目标信息被背景湮没, 分割效果较差, 例如图 3(b, e)和图 4(b, e), 血管和组织的形状基本无法辨识; 基于分解的二维指数灰度熵法在一定程度上有所改善, 但分割效果仍不理想, 如图 4(c)中的毛细血管区域趋于粗放, 其存在的过分割现象导致分割结果中目标区域模糊、不准确; 相比之下, 基于斜分的二维对称交叉熵法能得到较好的分割结果, 但丢失部分细小组织的信息, 如图 4(d)下部

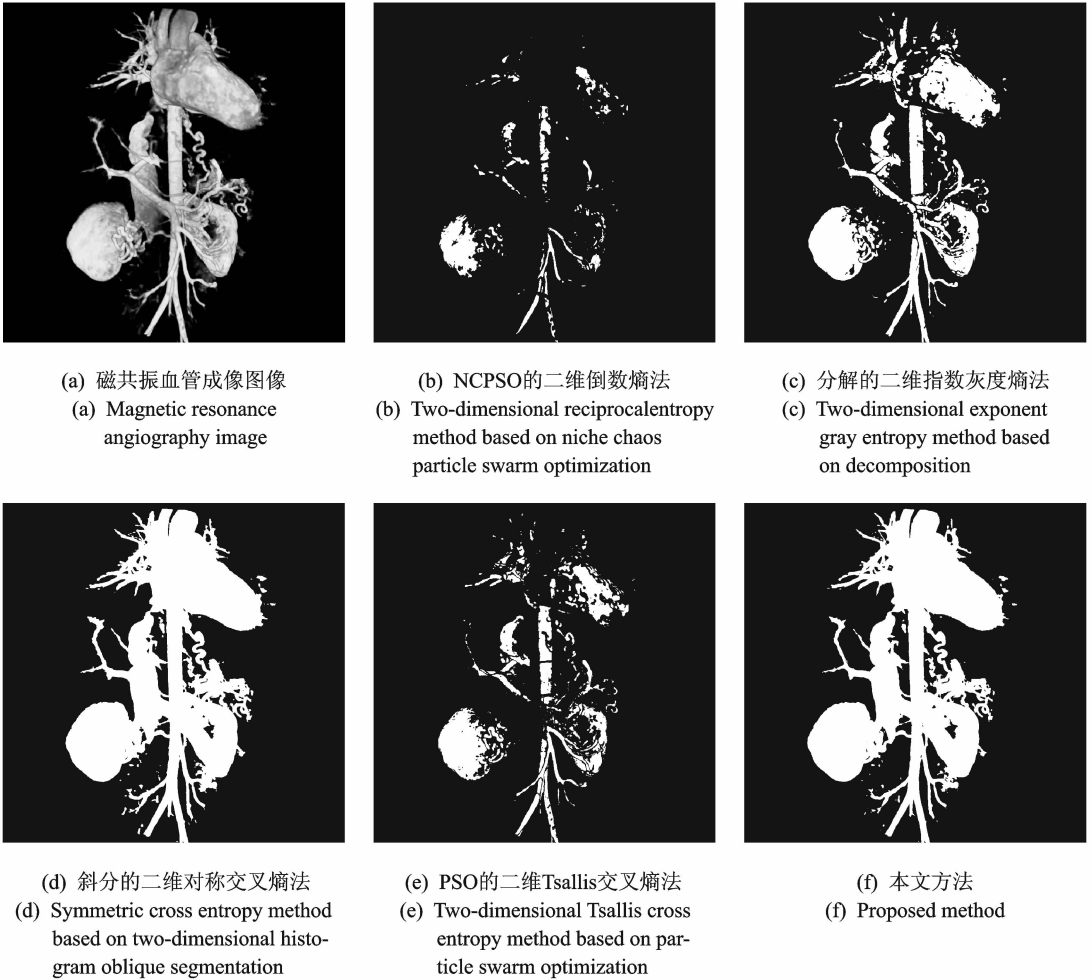


图3 磁共振血管成像图像及其分割结果

Fig. 3 Magnetic resonance angiography image and its segmentation results

某些视网膜毛细血管的分叉处混合在一起,细节不清晰甚至丢失,不利于后续组织的分析与识别,而本文方法在保持目标准确完整的同时,能更好地保留其纹理和细节特征。图5是泡状鼻甲图像及其分割结果,从图5中可以看出,基于PSO的二维Tsallis交叉熵法将鼻甲外围结构误认为目标,而忽略了鼻甲内部组织,不能得到令人满意的分割结果;基于NCP SO的二维倒数熵法和基于分解的二维指数灰度熵法对图像左半部分割不准确,例如如图5(b,c)的左部含有大量阴影,湮没了部分的目标信息;而本文方法则能较为准确地提取目标的边界形状,内部的结构轮廓均清晰可辨,与斜分的二维对称交叉熵法相比,边缘和细节特征更为准确丰富。如图6的肺部图像及其分割结果所示,基于NCP SO的二维倒数熵法、基于分解的二维指数灰度熵法和基于PSO的二维Tsallis交叉熵法的分割结果含有较多的虚警目标,影响肺部健康状态的诊断结果;基于斜分的二维对称交叉熵法降低了虚警率,但是外围轮廓以及内部气孔区域轮廓模糊不清、不够准确,例如,图6(d)中,肺部内部的气孔尺寸均偏小,部分气孔甚至未被分割出来;本文方法在完整清晰地分割出肺部外边界的同时,能准确地保留肺部内气孔的边界形状。

综上所述,基于斜分的对称交叉熵法虽然也能得到较好的分割结果,但本文提出的基于直线截距直

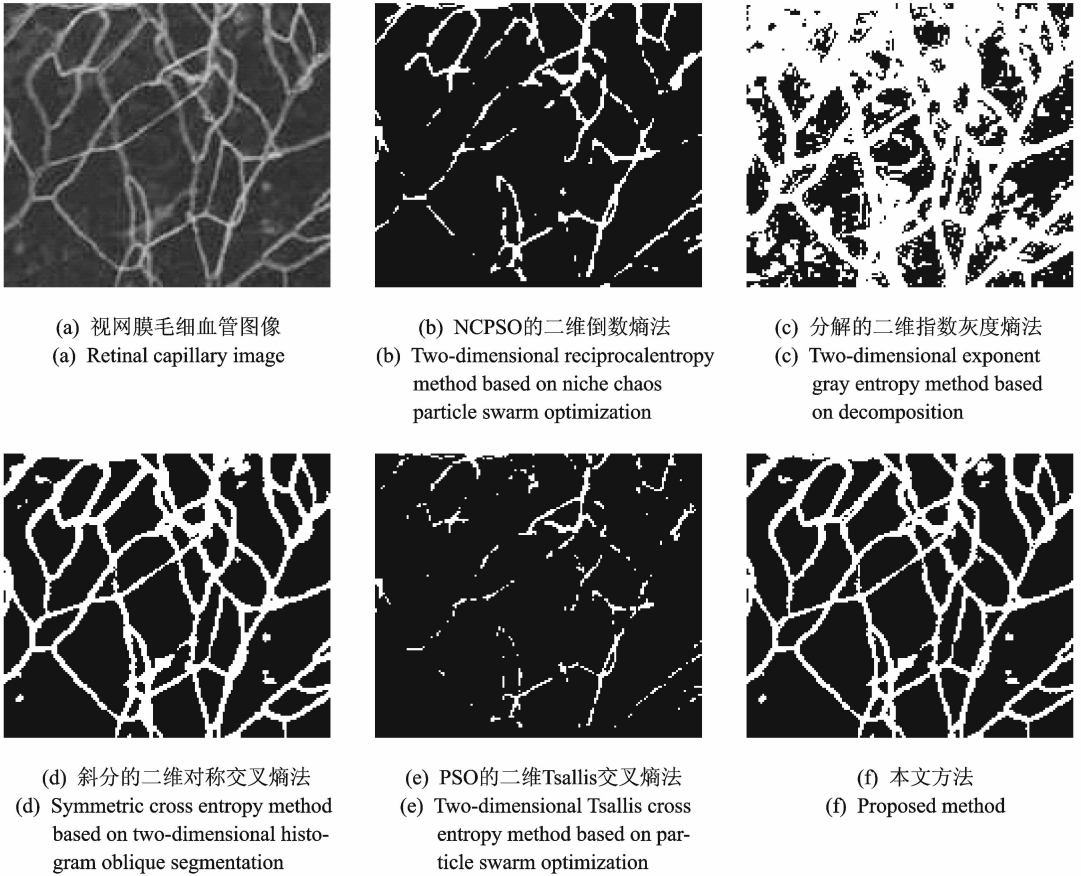


图4 视网膜毛细血管图像及其分割结果

Fig. 4 Retinal capillary image and its segmentation results

方图的倒数交叉熵医学图像分割方法所得目标区域更准确,边界轮廓更清晰,细节更丰富,且具有较优的稳定性。

表1和表2分别为5种分割方法所得最佳阈值及所需运行时间对比。基于NCP SO的二维倒数熵法、基于分解的指数灰度熵法和基于PSO的二维Tsallis交叉熵法是建立于直方图直分的基础上,最佳阈值的范围为(0,255)。而基于斜分的对称交叉熵法和本文方法是建立于直方图斜分和直线截距直方图的基础上,最佳阈值的范围为(0,510)。从之前对分割结果的分析可知,基于斜分的对称交叉熵法和本文方法的分割结果最为准确,这是由于对称交叉熵基于Kullback距离,以对数计算方式衡量分割后各类区域的均值和原始灰度图像之间的差异,倒数交叉熵以倒数计算的方式衡量,两者都采用了基于分割前后图像之间某种距离的衡量方式,使得这两类分割准则分割后的结果更为准确。从表1可以看出其分割阈值比较接近,说明Kullback距离和倒数距离具有某种相似性。

从表2可以看出,本文所提出的基于直线截距直方图的倒数交叉熵图像分割方法与其他4种方法相比,运行时间最短,与分割结果也较优的基于斜分的对称交叉熵法相比,仅为其1%左右。这主要由于本文方法避免了对数运算,在阈值搜索过程中更加快速,并且所采用的是在原灰度图像和邻域平均灰度图像求和的基础上建立起来的一维直方图,虽然建立截距直方图同样需要遍历图像中所有像素点的

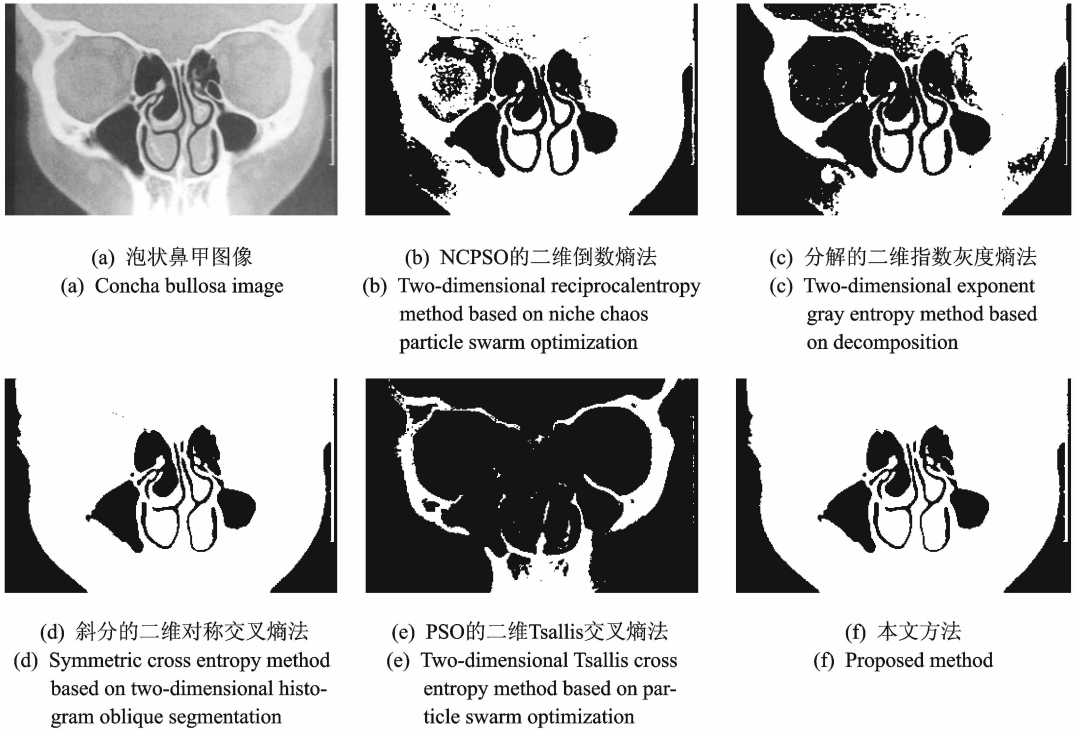


图5 泡状鼻甲图像及其分割结果

Fig. 5 Concha bullosa image and its segmentation results

表1 5种方法的最佳阈值比较

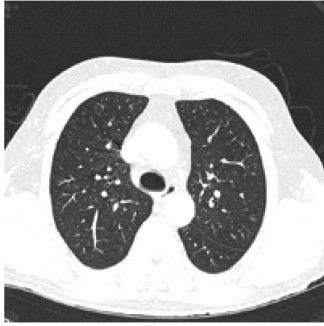
Table 1 Comparison of five methods in optimal thresholds

阈值分割方法	磁共振血管成像图像	视网膜毛细血管图像	泡状鼻甲图像	肺部图像
NCPSO的倒数熵法	(218,218)	(122,116)	(230,116)	(253,110)
分解的指数灰度熵法	(177,175)	(63,65)	(176,175)	(94,98)
斜分的对称交叉熵法	60	167	252	258
PSO的Tsallis交叉熵法	(199,216)	(148,115)	(216,188)	(232,247)
本文方法	87	178	196	268

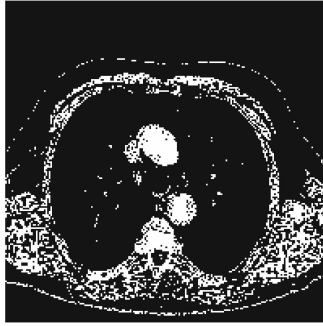
表2 5种方法的运行时间比较

Table 2 Comparison of five methods in running time

阈值分割方法	磁共振血管成像图像	视网膜毛细血管图像	泡状鼻甲图像	肺部图像
NCPSO的倒数熵法	2.419 5	0.767 5	0.785 0	1.295 5
分解的指数灰度熵法	0.203 4	0.021 4	0.040 5	0.038 1
斜分的对称交叉熵法	5.649 3	0.261 3	0.472 5	0.513 3
PSO的Tsallis交叉熵法	13.575 0	13.512 7	10.109 2	14.736 5
本文方法	0.053 6	0.014 3	0.017 1	0.034 6



(a) 肺部图像
(a) Lung image



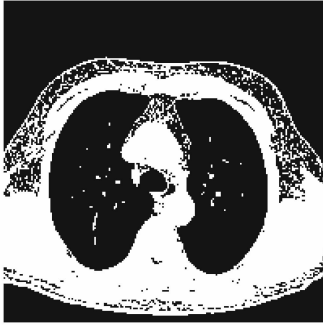
(b) NCP SO 的二维倒数熵法
(b) Two-dimensional reciprocal entropy method based on niche chaos particle swarm optimization



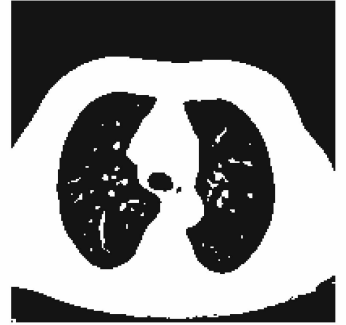
(c) 分解的二维指数灰度熵法
(c) Two-dimensional exponent gray entropy method based on decomposition



(d) 斜分的二维对称交叉熵法
(d) Symmetric cross entropy method based on two-dimensional histogram oblique segmentation



(e) PSO 的二维 Tsallis 交叉熵法
(e) Two-dimensional Tsallis cross entropy method based on particle swarm optimization



(f) 本文方法
(f) Proposed method

图 6 肺部图像及其分割结果

Fig. 6 Lung image and its segmentation results

二维信息,但建立直线截距直方图只需对长度为 L 的一维数组操作,而建立二维直方图则需要对 $L \times L$ 二维数组进行操作,因此本文方法在考虑图像二维信息的同时,缩小了运算空间,减小了运算量,大幅提高了运行速度。本文方法在保证分割效果的同时,大大减少了方法所需的运行时间。

4 结束语

本文提出的基于直线截距直方图的倒数交叉熵医学图像分割方法,在考虑医学图像像素灰度级一邻域平均灰度级这二维信息的同时,通过建立直线截距直方图将其转化为一维信息,并由倒数交叉熵作为图像的阈值选取准则函数,将倒数运算代替对数运算,弥补了最大熵零点处无意义的缺陷。实验结果表明,本文方法在分割效果上优于基于 NCP SO 的二维倒数熵法、基于分解的二维指数灰度熵法、基于斜分的二维对称交叉熵法和基于 PSO 的二维 Tsallis 交叉熵法,运行时间约为基于斜分的对称交叉熵法的 1%。本文提出的方法具有很强的稳定性和实用性,已应用于临床诊断和医学研究中的医学图像分

割,取得了极佳的分割效果。

参考文献:

- [1] 文乔农,万遂人. WBCT与变分正则化方法的医学图像去噪[J]. 数据采集与处理, 2011, 26(4): 390-394.
Wen Qiaonong Wan Sui ren. WBCT and variational regularization method for medical image denoising[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2011, 26(4): 390-394.
- [2] Gigengack F, Ruthotto L, Burger M, et al. Motion correction in dual gated cardiac PET using mass-preserving image registration[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2012, 31(3): 698-712.
- [3] Chen X, Udupa J K, Bagci U, et al. Medical image segmentation by combining graph cuts and oriented active appearance models[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 21(4): 2035-2046.
- [4] 李积英,党建武,王阳萍. 融合量子克隆进化与二维 Tsallis 熵的医学图像分割算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2014, 26(3): 465-471.
Li Jiying, Dang Jianwu, Wang Yangping. Medical image segmentation based on quantum clonal evolution and two-dimensional Tsallis entropy[J]. Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics, 2014, 26(3): 465-471.
- [5] 吴一全,朱兆达. 图像处理中阈值选取方法 30 年(1962-1992)的进展(二)[J]. 数据采集与处理, 1993, 8(4): 268-282.
Wu Yiquan, Zhu Zhaoda. 30 years (1962-1992) of the developments in threshold selection methods in image processing (2) [J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 1993, 8(4): 268-282.
- [6] Kapur J N, Sahoo P K, Wong A K C. A new method for gray-level picture thresholding using the entropy of histogram[J]. Computer Vision, Graphics and Image Processing, 1985, 29(1): 273-285.
- [7] Abutaleb A S. Automatic thresholding of gray-level picture using two-dimensional entropies[J]. Pattern Recognition, 1989, 47(1): 22-32.
- [8] Brink A D. Thresholding of digital image using two-dimensional entropies[J]. Pattern Recognition, 1992, 25(8): 803-808.
- [9] Li C H, Lee C K. Minimum cross entropy thresholding[J]. Pattern Recognition, 1993, 26(4): 617-625.
- [10] Brink A D, Pendock N E. Minimum cross-entropy threshold selection[J]. Pattern Recognition, 1996, 29(1): 179-189.
- [11] Pal N R. On minimum cross-entropy thresholding[J]. Pattern Recognition, 1996, 29(4): 575-580.
- [12] Li C H, Tam P K S. An iterative algorithm for minimum cross entropy thresholding[J]. Pattern Recognition Letters, 1998, 19(8): 771-776.
- [13] 乔韡韡,吴成茂. 二维最大类间交叉熵阈值分割法[J]. 西北大学学报:自然科学版, 2008, 38(3): 374-378.
Qiao Weiwei, Wu Chengmao. Two-dimensional thresholding segmentation method based on maximum inter-class cross entropy[J]. Journal of Northwest University: Natural Science Edition, 2008, 38(3): 374-378.
- [14] 赵勇,方宗德,庞辉,等. 基于量子粒子群优化算法的最小交叉熵多阈值图像分割[J]. 计算机应用研究, 2008, 25(4): 1097-1099.
Zhao Yong, Fang Zongde, Pang Hui, et al. Multilevel minimum cross entropy threshold selection based on quantum particle swarm optimization[J]. Application Research of Computers, 2008, 25(4): 1097-1099.
- [15] 雷博,范久伦. 灰度图像的二维交叉熵阈值分割法[J]. 光子学报, 2009, 38(6): 1572-1576.
Lei Bo, Fan Jiulun. Two-dimensional cross-entropy thresholding segmentation method for gray-level images[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(6): 1572-1576.
- [16] 吴一全,张晓杰,吴诗嫻. 基于混沌弹性粒子群优化与基于分解的二维交叉熵阈值分割[J]. 上海交通大学学报, 2011, 45(3): 301-307.
Wu Yiquan, Zhang Xiaojie, Wu Shihua. Two-dimensional cross entropy thresholding based on chaotic resilient particle swarm optimization or decomposition[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2011, 45(3): 301-307.
- [17] Pal S K, Pal N R. Entropic thresholding[J]. Signal Processing, 1989, 16(2): 97-108.
- [18] 张晓杰,吴一全,吴诗嫻. 基于分解的二维指数交叉熵图像阈值分割[J]. 信号处理, 2011, 27(4): 546-551.
Zhang Xiaojie, Wu Yiquan, Wu Shihua. Two-dimensional exponential cross entropy image thresholding based on decomposition[J]. Signal Processing, 2011, 27(4): 546-551.
- [19] 吴一全,占必超. 基于混沌粒子群优化的倒数熵阈值选取方法[J]. 信号处理, 2010, 26(7): 1044-1049.
Wu Yiquan, Zhan Bichao. Thresholding based on reciprocal entropy and chaotic particle swarm optimization[J]. Signal Pro-

cessing, 2010, 26(7):1044-1049.

- [20] 纪守新, 吴一全, 占必超. 基于二维对称交叉熵的红外图像阈值分割[J]. 光电子·激光, 2010, 21(12):1871-1876.
Ji Shouxin, Wu Yiquan, Zhan Bichao. Threshold segmenation method for infrared images based on 2-D symmetric cross-entropy[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2010, 21(12):1871-1876.
- [21] 唐英干, 邸秋艳, 赵立兴, 等. 基于二维最小 Tsallis 交叉熵的图像阈值分割方法[J]. 物理学报, 2009, 58(1):9-15.
Tang Yinggan, Di Qiuyan, Zhao Lixing, et al. Image thresholding segmentation based on two-dimensional minimum Tsallis cross entropy[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(1):9-15.
- [22] 吴一全, 占必超. 基于混沌粒子群优化的倒数熵阈值选取方法[J]. 信号处理, 2010, 26(7):1044-1049.
Wu Yiquan, Zhan Bichao. Thresholding based on reciprocal entropy and chaotic particle swarm optimization[J]. Signal Processing, 2010, 26(7):1044-1049.
- [23] 吴诗嫻, 张晓杰, 吴一全. 基于分解的二维指数灰度熵图像阈值分割[J]. 中国体视学与图像分析, 2010, 15(4):351-358.
Wu Shihua, Zhang Xiaojie, Wu Yiquan. Two-dimensional exponential gray entropy image thresholding based on decomposition[J]. Chinese Journal of Stereology and Image Analysis, 2010, 15(4):351-358.

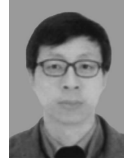
作者简介:



吴诗嫻 (1992-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 图像处理, E-mail: wshimage @ 163.com。



吴一全 (1963-), 男, 教授、博士生导师, 研究方向: 图像处理与识别、目标检测与跟踪、视频压缩与传输、生物特征识别与数字水印、智能信息处理、计算机视觉与图像测量。



周建江 (1962-), 男, 教授、博士生导师, 研究方向: 雷达目标特性分析、特征控制与目标识别、机载电子信息系统和 DSP 技术等。



龙云淋 (1992-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 图像处理。

