

基于模糊距离的自适应阈值分割算法

贾天奇¹, 张冲², 郑姣², 郭希娟²

(1. 燕山大学 体育学院, 河北 秦皇岛 066004; 2. 燕山大学 信息科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 针对已往阈值分割算法对灰度图像的处理只利用其灰度属性, 未考虑像素的空间位置关系, 致使分割结果不连续以及不准确的问题, 提出了一个新的自适应阈值分割算法。该方法通过结合像素空间几何距离与灰度值关系, 运用模糊理论处理不确定因素的优势, 充分利用分类集合内数据的聚集程度和分类集合间的间距的影响, 保证了图像分割结果的准确性; 借助分类集合的均值和方差, 设计了新的最佳阈值判别标准。同已有阈值分割算法相比, 该算法具有较好的稳定性和鲁棒性, 对于灰度直方图呈单峰的多数图像能得到较好的分割效果。

关键词: 模糊距离; 阈值分割; 空间几何; 自适应阈值; 隶属度函数

中图分类号: TP391 **文献标识:** A **文章编号:** 1000-7024 (2014) 03-0857-04

Adaptive thresholding segmentation algorithm based on fuzzy distances

JIA Tian-qi¹, ZHANG Chong², ZHENG Jiao², GUO Xi-juan²

(1. College of Physical Education, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;

2. College of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: Aiming at solving the problems that most thresholding segmentation algorithms for grayscale image processing only take the gray-scale property into consideration without investigating the spatial relationship of the pixels, which lead to discontinuous and inaccurate of the segmentation results, an novel automatic thresholding algorithm based on the fuzzy theory is proposed. The new method, which utilizes the advantages of combination of spatial geometry distances and gray-scale property and considers the distances of between-class and within-class, ensures the accuracy and continuity of the image segmentation. Furthermore, a new criterion for threshold selection is also proposed with the mean and variance of different classes in mind. Experimental results demonstrate that the method has good stability and robustness compared with other recent proposed methods in processing vagueness images with unimodal histograms distributions.

Key words: fuzzy distance; thresholding segmentation; spatial geometry; adaptive threshold; membership function

0 引言

图像分割是计算机视觉低层次视觉中的一个重要研究内容, 它是图像分析、图像理解和图像的编码的基础和前提。基本的图像阈值分割利用阈值将图像像素分为两类, 一类是灰度水平值较低, 小于该阈值的像素, 称为背景类; 另一类则灰度水平值较高, 大于该阈值的像素, 称为前景类^[1]。在图像理解和计算机视觉中, 图像因为受到各种因素的影响, 带有一定的不确定性, 而模糊理论对于处理这些不确定性的事件具有一定优势, 因此基于模糊系统理论的图像分割技术得到了广泛应用^[2]。

迄今为止, 基于模糊系统理论的图像分割领域已经取得了一些进展, 但仍存在很多不足。T. Chaira 提出了利用理想图像和实际图像的模糊距离, 来获得最优值的算法 (Fdm)^[3], 以及 Prasanna K Sahoo 提出了将对应于目标模糊集合和背景模糊集合的二维熵最大时的阈值作为最优的分割阈值的算法^[4]。它们都能得到较好的结果, 但这些算法定义的模糊距离多涉及指数运算。而 GUO Xijuan 提出的 ITA_IGFSD 算法^[5], 仅仅通过像素灰度信息设计隶属度函数。它虽然计算简单, 但是忽略了影响像素分类的空间位置关系这一相似性度量。另外, 以往多数阈值分割算法对灰度呈单峰分布或者灰度值较低的图像无法进行正确的

收稿日期: 2013-04-26; 修订日期: 2013-07-18

基金项目: 河北省自然科学基金项目 (F2012203066); 秦皇岛市科学技术研究与发展计划基金项目 (201302A222)

作者简介: 贾天奇 (1963-), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 硕士, 教授, 研究方向为体育与健康、计算机模拟仿真; 张冲 (1987-), 女, 河北辛集人, 硕士研究生, 研究方向为计算机图像处理; 郑姣 (1986-), 女, 河北廊坊人, 硕士, 研究方向为计算机图像处理; 郭希娟 (1959-), 女, 吉林舒兰人, 博士, 教授, CCF 会员, 研究方向为计算机机器人、机器人仿真。E-mail: 402852713@qq.com

分割^[6,7]；并且对于灰度图像的处理仅利用了图像像素的灰度值属性，而未考虑影响像素分类的其它相似性度量^[8,9]，往往使得分割结果不是很理想。

本文提出了一种兼顾速度和准确性的阈值分割算法。该算法结合灰度值与空间几何距离来设计隶属度函数，另外，充分考虑分类集合数据间距的影响，设计了新的模糊距离评判标准。实验证明，本文的模糊阈值分割算法同 ITA_IGFSD^[2,7]算法和 Fdm^[8]算法相比，具有较好的分割效果。

1 阈值分割算法

1.1 图像预处理及初始化计算

为了避免噪声的影响，首先利用高斯滤波对图像做平滑处理，再利用 Roberts 交叉梯度算子^[10]获取梯度图像。

假定初始阈值 t ，将整个梯度图像分为两类，像素灰度值小于等于 t 的一类我们称作背景类，大于 t 的一类称为前景类。

首先在得到的灰度直方图的基础上分别计算出背景类和前景类的平均值和方差；然后计算图像中灰度值为 t 的所有像素的平均位置。如果图像中不存在灰度值为 t 的像素点，则在 $[1, 255]$ 范围内找出图像中最接近阈值 t 的灰度值来代替。

1.2 模糊隶属度函数设计

我们把灰度等级为 L ，大小为 $M \times N$ 的图像看作一模糊集合，即 $X = \{f_{ij}, \mu(f_{ij})\}$ ， $\forall f_{ij} \in X$ ；其中 f_{ij} 为图像位于 (i, j) 的像素的灰度值， $\mu(i, j)$ 为图像位于 (i, j) 的像素的隶属度且 $0 \leq \mu(i, j) \leq 1$ 。

首先，当设计模糊隶属度函数时，由于大多数的阈值分割算法仅考虑灰度图像像素的灰度属性，而忽略了像素的空间位置关系，致使分割结果不连续，所以将像素的空间位置关系引入了隶属度函数的设计中。

其次，对于每个像素的隶属度函数的计算形式，要根据其灰度值与背景类均值和前景类均值的靠近程度来选择，而不仅仅考虑像素灰度值属性与假定阈值 t 的大小关系。

文献[5]中将一个像素和最小灰度值之间的距离作为隶属度函数的核心部分。假设两个像素的灰度值分别为 a 、 b 并且都小于给定的阈值。如果 a 的隶属度比 b 的隶属度小，则 a 的灰度级比 b 的灰度级小，但事实上像素点的灰度级越小，则像素属于背景类的可能性就越大并且隶属度也更大。

所以，当像素的灰度值靠近背景类均值，则利用最大灰度值和像素间的距离来计算像素的隶属度；当像素的灰度值靠近前景类均值时，利用像素和最小灰度值间的距离计算像素的隶属度。

再次，文献[11]利用方差来衡量分类系统内部数据的稳定性，故将方差引入隶属度函数，利用方差衡量阈值 t

的选择的稳定性和均匀性。

最后，前景类均值和背景类均值的乘积，在一定程度上反映了两类间距的大小，若两个均值相差较小，二者的乘积则较大；若相差较大，则乘积就较小，显然，当阈值 t 正好为最佳阈值，分类的前景类均值和背景类均值差距会最大，二者的乘积也会最小，因此将分类的背景类均值和前景类均值的乘积引入隶属度函数的设计中。

隶属度函数：根据像素灰度值分别与背景类和前景类的靠近程度来确定隶属度函数的计算形式，并引入空间几何距离、方差及均值的乘积，充分考虑空间关系和灰度值二者的统一，使得分割效果更准确。其计算形式如下

$$\mu(f_{ij}) = \frac{(f_{\max} - f_{ij})}{(f_{\max} - f_{\min}) * (1 + e_0 + e_1 + \mu_0 * \mu_1)} * (1 - \frac{d}{d_{\max}}) \quad (1)$$

$$\text{当 } |f_{ij} - \mu_0| \leq |f_{ij} - \mu_1|$$

$$\mu(f_{ij}) = \frac{(f_{ij} - f_{\min})}{(f_{\max} - f_{\min}) * (1 + e_0 + e_1 + \mu_0 * \mu_1)} * (1 - \frac{d}{d_{\max}}) \quad (2)$$

$$\text{当 } |f_{ij} - \mu_0| > |f_{ij} - \mu_1|$$

$$d = \sqrt{(x_i - \text{averager}(t))^2 + (y_i - \text{averager}(t))^2} \quad (3)$$

式中： $\text{averager}(t)$ ， $\text{averager}(t)$ ——给定阈值 t 的平均位置。 D ——当前像素点到给定阈值 t 的平均位置的空间距离； d_{\max} ——所有像素点到给定阈值 t 的平均位置的最大距离； f_{\max} ， f_{\min} ——图像中的最大灰度值与最小灰度值； μ_0 ， μ_1 ——假定阈值 t 计算的背景类和前景类的均值； $\mu(f_{ij})$ ——图像像素灰度值为 f_{ij} 的隶属度，且 $0 \leq \mu(f_{ij}) \leq 1$ 。

1.3 算法分割准则设计

将一幅图像利用先前步骤中设计的隶属度函数模糊化为一个模糊集合 X ，给定阈值 t ，把模糊集合 X 分为两个子模糊集，记作 A 、 B ，分别对应于图像的前景类和背景类。

在衡量背景类和前景类是否分割明确时，要保证两个方面，其一是分类集合内数据间距较小，其二是分类集合间数据间距大。首先提出的是更能评判一个分类系统内部的稳定性，反映该类聚集程度的方差；其次，利用背景类均值和前景类均值之差来反映分类集合间数据间距；故本文定义的分割准则计算形式如下

$$mr(A) = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} \mu_i}{n} \quad (4)$$

$$vr(A) = \sum_{i=0}^n (\mu_i - mr(A))^2 * \frac{\mu_i}{\sum_{i=0}^n \mu_i} \quad (5)$$

则定义模糊集合 A 和 B 间的距离为

$$d(A, B) = \frac{|mr(A) - mr(B)|}{1 + vr(A) + vr(B)} \quad (6)$$

式中： $mr(A)$ ——类 A 中数据隶属度的均值，分子为前景

类均值和背景类均值之差, 差越大, 则前景和背景类分割数据差异越大; $var(A)$ ——方差, 更能体现分类集合内数据的聚集程度, 越小表示集合 A 中数据相似性越大, 分类越准确, 反之越大则错分数据越多。

因此 $d(A, B)$ 能反映 A 和 B 集合的分割效果, $d(A, B)$ 越大, 表示两个类的类间距越大, 距离值越大, 说明构成图像的两类差别越大, 当部分目标误分为背景或者部分背景误分为目标都会导致两类差别变小, 因此使两个集合距离最大就意味着错分的概率最小。所以选择出距离 $d(A, B)$ 最大时所对应的阈值 T 则为最优阈值, 定义如下

$$T = \arg \max_{t \in \{0, 1, \dots, L-1\}} (d_t) \quad (7)$$

式中: t ——给定的阈值, L ——图像的最大像素值。

根据 ITA_IGFSD^[1], 首先, 将上一步中得到的 t 作为阈值, 分割原图像的梯度图像; 其次, 获得二值图像, 遍历此二值图像和原图像, 记录边缘二值图像中灰度值大于阈值的像素的坐标; 再次, 获得原图像相应坐标的像素值并求和, 同时统计像素个数, 求取平均值, 则此平均值即为原图像的最优分割阈值。

1.4 算法描述

L 是图像中像素的最大灰度值; dis 记录当前模糊距离; $dmax$ 记录最终的模糊距离; $max-t$ 记录对应模糊距离为 $dmax$ 时的阈值。

(1) 初始阈值 $t=0$, 当 $dmax$ 达到最大时, 停止循环, 记录模糊距离最大时对应的阈值 t ;

(2) 重复步骤(3)~(7)到最大循环次数 L ;

(3) 利用阈值 t 将图像分为两类, 前景类和背景类;

(4) 分别计算背景类和前景类的均值和方差, 以及图像中灰度值等于阈值 t 的像素的平均位置;

(5) 利用式(1)和式(2)计算出图像中对应阈值 t 像素的隶属度;

(6) 利用式(6)计算 dis 并且记录当前阈值 t ;

(7) 比较 dis 和 $dmax$, 如果 $dis \geq dmax$, 则 $dmax = dis$, $max-t = t$, $t = t + 1$; 否则 $t = t + 1$ 。

2 实验分析与结果

本文的分割质量由文献[12]的误分率(ME)来进行评价, 它反映的是背景类像素误分为前景类和前景类像素误分为背景类的程度。对于单阈值的图像分割, 仅将图像分为两类, 则 ME 可以简化为

$$ME = 1 - \frac{|B_G \cap B_T| + |F_G \cap F_T|}{|B_G| + |F_G|} \quad (8)$$

式中: B_G 、 F_G ——对应 groundtruth 图像的背景类和前景类的像素集合, Ground truth 图是人工的选择阈值分割图, 其分割阈值较为理想; B_T 、 F_T ——分割图像的背景类和前景类的像素集合; $|\cdot|$ ——像素的个数; ME 的范围为 $(0, 1)$, 它的值越小, 说明误分率越低, 分割质量越高。

实验是在 Visual Studio 2008 环境下, 在 Core Duo CPU 2.93GHz CPU 和 2G 内存的微处理器上进行的, 为了验证本文的模糊阈值分割算法的有效性, 对多幅图像进行了处理, 并将本文提出的算法(New)与 ITA_IGFSD^[1] 算法和 Fdm^[3] 算法进行了比较分析, 均得到了较满意的效果, 分割结果如图 1、图 2、图 3 所示, 其中, 图 1(a)~图 3(a)为 BMP 图像。所有原始图像的大小为 256X256。图 1(b)~图 3(b)为现实世界的真实图。



图 1 图像 1 阈值分割结果

统计每个算法的运行时间, 误分率, 得到 3 个阈值分割算法的实验结果对比表, 见表 1, 表 2, 表 3。

从图 1~图 3 的灰度直方图(c)可以看出, 他们的共同点是图像的灰度值较低, 分布比较狭窄, 呈单峰。将 3 种分割算法得到的分割效果图与真实图像(b)比较可以得出: 图 1 中 ITA_IGFSD 算法的分割阈值过高, Fdm 算法较 New 算法只是在图像的部分细节上没有分割出来, 基本保持了图像基本的轮廓信息; 图 2 中 3 种算法均能进行分割, Fdm 算法将图像的基本轮廓分割的较好, 但运行效率不高; ITA_IGFSD 算法分割阈值又过高了, 局部细节表现的过多较 New 算法; New 算法细节表现上较好, 并能保持图像的基本轮廓; 图 3 中 3 种算法均能进行分割, ITA_IGFSD

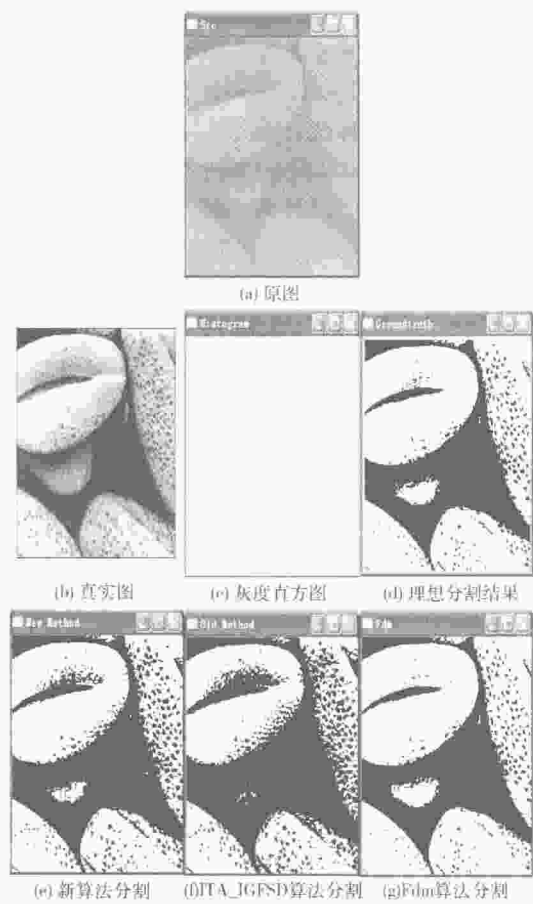


图2 图像2 阈值分割结果

算法与 New 算法具有相近的分割结果，但 New 算法在细节轮廓分割较清晰；Fdm 算法分割阈值过低，导致图像细节无法表现。

表1 图1 的阈值分割算法实验对比

阈值方法	分割阈值	ME	运行时间
New	17	0.0019	134.4478
ITA_IGFSD	87	0.1421	1379.2121
Fdm	43	0.0130	5075.6805

表2 图2 的阈值分割算法实验对比

阈值方法	分割阈值	ME	运行时间
New	110	0.0578	2026.3416
ITA_IGFSD	112	0.1103	266.0886
Fdm	107	0.0216	5009.8080

表3 图3 的阈值分割算法实验对比表

阈值方法	分割阈值	ME	运行时间
New	119	0.0817	1489.7605
ITA_IGFSD	110	0.1179	274.4063
Fdm	85	0.1720	5058.090



图3 图像3 阈值分割结果

综上，通过比较实验图像效果可以看出本文的方法的结果更接近真实图像；通过比较 3 种算法的实验结果数据证明我们的算法获得了较低的误分率以及较高的运行效率。

3 结束语

本文综合运用空间几何距离和图像像素的灰度值信息，并结合分类集合间数据的均值和方差定义了新的模糊距离，提出了一种基于模糊距离的自适应阈值分割算法。

设计隶属度函数时，首先，像素的空间位置关系的引入保证了分割结果的连续性；其次，根据其灰度值与背景类均值和前景类均值的靠近度的关系来选择每个像素的隶属度计算函数的形式，使隶属度计算更加准确；再次，方差可以衡量分类系统内部数据的稳定与否，而且前景类均值和背景类均值的乘积，在一定程度上反映了两类间距的大小；综上这些能够保证阈值分割的准确性。

模糊距离的定义量化的反映了类间距和类内间距，回避了以往模糊距离涉及的过多的指数运算。实验证明，本文的算法对于模糊不清，灰度分布几近呈单峰的多数图像，均能在保持图像的局部细节同时，分割出基本的轮廓，分割结果清晰准确。

(下转第 922 页)

- and Science, 2010, 32 (8): 60-63 (in Chinese). [邹北骝, 阮鹏, 向遥. 一种精确匹配的全景图自动拼接算法 [J]. 计算机工程与科学, 2010, 32 (8): 60-63.]
- [8] FANG Xianyong, ZHANG Mingmin, PAN Zhigeng, et al. A new method of manifold mosaic for large displacement images [J]. Journal of Computer Science and Technology, 2006, 21 (2): 218-223.
- [9] WANG Yongming, WANG Guijin. Image local invariant features and description [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010 (in Chinese). [王永明, 王贵锦. 图像局部不变性特征与描述 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.]
- [10] ZHU Licheng, YAO Minghai. Object matching algorithm based on SIFT and identification [J]. Mechanical and Electrical Engineering, 2009, 26 (4): 73-75 (in Chinese). [朱利成, 姚明海. 基于 SIFT 算法的目标匹配和识别 [J]. 机电工程, 2009, 26 (4): 73-75.]
- [11] LIN Lujun, SUN Lingling, LI Xungen, et al. An improved template matching based microscopic cell image mosaic algorithm [J]. computer software and application, 2010, 27 (1): 108-110 (in Chinese). [林陆军, 孙玲玲, 李训根, 等. 一种改进的基于模板匹配的显微细胞图像拼接算法 [J]. 计算机应用与软件, 2010, 27 (1): 108-110.]
- (上接第 860 页)
- ### 参考文献:
- [1] LI Min, LIU BO. Research and implementation of new image segmentation method [J]. JCIT, 2012, 7 (8): 110-119.
- [2] CHEN Zhigang, LI Limiao, GUI Jingsong. Fuzzy theory for the P2P subject trust evaluation model [J]. IJACT, 2012, 4 (8): 67-74.
- [3] Chaira T, Ray A K. Segmentation using fuzzy divergence [J]. Pattern Recognition Letters, 2003, 24 (12): 1837-1844.
- [4] Sahoo P K, Arora Gurdial. Image thresholding using two-dimensional tsallis-havrda-charvat entropy [J]. Pattern Recognition Letters, 2006, 27 (6): 520-528.
- [5] GUO Xijuan, ZHANG Huanhuan, CHANG Zheng. Image thresholding algorithm based on image gradient and fuzzy set distance [J]. ICIC Express Letters, 2010, 3 (4): 1059-1063.
- [6] LIU Ping, CHEN Bin, RUAN Bo. Image thresholding segmentation based on edge information [J]. Computer Application, 2004, 24 (9): 28-30 (in Chinese). [刘平, 陈斌, 阮波. 基于边缘信息的图像阈值化分割方法 [J]. 计算机应用, 2004, 24 (9): 28-30.]
- [7] LIU Suofan. Research on algorithms for image segmentation based on fuzzy theory [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2008 (in Chinese). [刘锁兰. 基于模糊理论的图像分割区域法研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2008.]
- [8] Wang J H, Liang W, Wang C, et al. Study on image threshold segmentation based upon improved fuzzy entropy [J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2008, 19 (6): 828-831.
- [9] ZHAO Weizhou, SONG Jianshe. Study on the image segmentation thresholding algorithm based on fuzzy sets [J]. Microelectronics & Computer, 2006, 23 (5): 118-120 (in Chinese). [赵伟舟, 宋建社. 基于模糊集的图像阈值分割算法研究 [J]. 微电子学与计算机, 2006, 23 (5): 118-120.]
- [10] Castleman, Kenneth R. Digital image processing [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008 (in Chinese). [冈萨雷斯, 伍兹. 数字图像处理 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.]
- [11] Xu X, Xu S, Jin L, et al. Characteristic analysis of Otsu threshold and its applications [J]. Pattern Recognition Letters, 2011, 32 (7): 956-961.
- [12] Nakib A, Oulbadj H, Siarry P. Image histogram thresholding based on multiobjective optimization [J]. Signal Processing, 2007, 87 (11): 2516-2534.