

文章编号 1004-924X(2018)06-1542-09

非监督层次化模糊相关的人体红外图像分割

尹诗白^{1*}, 孔垂涵¹, 王一斌²

(1. 西南财经大学 经济信息工程学院, 四川 成都 611130;

2. 四川师范大学 工学院, 四川 成都 610101)

摘要:针对当前多级模糊熵算法在分割人体红外图像时,存在划分数需人工指定,全局划分导致熵的信息度量精度受背景干扰,分割精度不高等问题,提出了非监督层次化模糊相关分割。首先采用熵率法将图像划分为若干超像素,确保区域一致性,提高后续处理效率;随后,用准确度量划分适当性的模糊相关来描述图像,构建模糊相关图割 2-划分算子,提高层次化分割中单步分割的精度。2-划分算子的核心思想是利用提出的递推计算策略,快速搜索最大模糊相关时目标和背景的划分概率,并用其来设置图割的数据项,实施超像素的模糊相关图割 2-划分。最后将 2-划分算子与自顶向下的非监督层次化分割策略相结合,迭代地对目标超像素区域实施 2-划分,自适应确定划分数,获得人体目标。实验结果表明:较常用算法,该算法不但能自动确定划分数,而且分割精度还提高了约 18%,运行时间约为 3.8 s,能有效用于人体红外图像分割的工程实践中。

关键词:机器视觉;红外图像分割;超像素;模糊相关

中图分类号:TP391.4;TN216 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20182606.1542

Unsupervised hierarchical human target infrared image segmentation through fuzzy correlation

YIN Shi-bai^{1*}, KONG Chui-han¹, WANG Yi-bin²

(1. College of Economic Information Engineering, Southwestern University of Finance and Economics, Chengdu 611130, China;

2. College of Engineering, Sichuan Normal University, Chengdu 610101, China)

* Corresponding author, E-mail: shibaiyin@swufe.edu.cn

Abstract: The multilevel fuzzy entropy has been adopted as a segmentation method for the human target infrared image. However, it has some problems that the partition number needs to be designated manually, and the global partition manner result in the accuracy of entropy measurement being influenced by background interference and the precision of segmentation being reduced. To address these problems, an unsupervised hierarchical segmentation based on fuzzy correlation strategy was proposed. To ensure the region homogeneity and improve efficiency, the entropy rate method was adopted to segment image into a group of superpixels. Then, the 2-partition segmentation operator through

收稿日期:2017-11-09;**修订日期:**2017-12-11.

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(No. 61502396);西南财经大学中央高校基本科研业务费青年教师成长项目(No. JBK1801076);西南财经大学中央高校基本科研业务费专项资金项目(No. JBK150503);四川省教育厅一般项目资助(No. 18ZB0484);四川师范大学自制仪器设备项目(No. ZZYQ2017001);陕西省科技厅工业公关项目(No. 2016GY-088);互联网金融创新及监管四川省协同创新中心资助

fuzzy correlation was built for improving precision of single step, since the fuzzy correlation can measure the appropriate partition well. The core idea of 2-partition segmentation operator was to utilize an iterative scheme to improve computational efficiency in fuzzy correlation evaluation. Then the probabilities of fuzzy events obtained by maximizing fuzzy correlation were used to define the data terms of graph cut. Finally, the 2-partition segmentation operator was combined with top-down hierarchical segmentation structure. By segmenting the superpixels of object regions by 2-partition segmentation operator iteratively, the partition number could be assigned and human target was achieved in this adaptive approach. The experiment results demonstrate that the proposed method can not only decide the partition number automatically, but can also improve the accuracy by 18% comparing with that of the existing methods and the running time is about 3.8 s. It can be used in engineering practice of human target infrared image segmentation.

Key words: machine vision; infrared image segmentation; superpixel; fuzzy correlation

1 引言

红外图像利用物体的红外辐射成像,具有全天候可探测隐蔽目标的特点,被广泛用于海上侦察,森林防火,野生动物识别等安全监控领域^[1]。其中复杂背景下的人体红外目标识别也是红外图像在安全监控的具体应用。然而,由于监控拍摄区域面广,红外成像具有人体目标较小,对比度低的特点,且因人体目标与周围环境存在热交换,导致目标灰度分布与背景灰度分布交叉,边界模糊^[2]。这些不确定及模糊的信息为人体红外目标分割带来了挑战。

目前,存在的模糊信息熵阈值分割法,如 Renyi 熵^[3],模糊划分熵^[4]等,利用熵作为不确定及模糊信息的有效度量方式,较好地实施目标和背景软划分。基本思想是将阈值获取的过程,看作搜索图像最大模糊熵时,模糊熵隶属度函数最优参数的过程。但这种阈值分割法存在计算量较大,没有考虑像素的空间相关性,分割结果存在孤立噪声的问题。因此递推加速算法及图割优化策略纷纷提出,如 Bena^[5]和 Tang^[6]等人分别提出了针对梯形隶属度函数和S形隶属度函数的模糊熵递推计算,有效地去除模糊熵的冗余计算,提高了算法效率。在此基础上,Zhan 等人进一步利用图割来优化最大模糊熵的分割结果,去除孤立噪声^[7]。虽然改进的模糊熵方法能有效地分割模糊信息的图像,但针对人体红外图像而言,它还具有对比度低,背景复杂,人体目标较小的特点,直接实施模糊熵分割,人体目标信息会被背景冲淡,信

息熵无法有效度量。为此,尹等人提出了局部信息熵分割策略,人为将图像划分成多个区域,对红外目标存在的区域进行局部分割,最后利用图割优化结果^[8]。Yin 等人提出了多级模糊划分熵图割策略,在预设划分数后,将图像像素划分为指定个数的类,并将灰度级较高的区域作为目标区域,再实施图割优化^[9]。此外,Yuan 提出的多区域图割算法^[10],Barisione 提出的监督马尔科夫随机场分割算法^[11]等,均能有效用于红外图像分割,获得更平滑的分割结果。然而这些方法需要人为预设区域的划分数,且全局划分易导致熵的信息度量精度对复杂背景噪声敏感,分割结果存在人体目标丢失或不完整的情况。

为了更好地分割人体红外目标,可采用精度更高的信息度量准则及层次化自顶向下非监督分割策略。分形学理论中的模糊相关能较好地描述图像,具有更高的信息度量精度,例如 Tang 等人就将模糊相关与模糊划分方法相结合,提出最大模糊相关分割方法,实验表明它较模糊熵的分割精度更高^[12]。该方法的实质是将存在的最大模糊熵模型替换为信息度量精度更高的最大模糊相关模型,搜索使模糊相关最大的隶属度函数最优参数。因此它同样具有计算量大,阈值分割结果存在孤立噪声的问题。受此启发,本文提出了面向人体红外图像的层次化模糊相关分割方法。考虑到人体红外目标具有较高的灰度级,算法首先利用熵率法将图像划分为若干超像素,以确保区域一致性,提高后续处理的效率;随后将信息度量精度更高的模糊相关与考虑空间相关性的图割相结合,利用最大模糊相关时,集合划分概率来设置

图割的数据项,构建模糊相关性图割 2-划分算子,去除孤立噪声,提高层次化分割中单步分割精度。同时,为了确保单步分割的效率,本文针对模糊相关模型提出了新的递推策略,去除冗余计算。最后,提出了非监督层次化分割策略。利用构建的 2-划分算子,迭代对目标区域实施自顶向下自适应的分割,直到获得人体目标。

2 基本思路

存在的全局多级模糊划分熵算法需预先设置划分分数,不能实现非监督分割。为此,本文提出了非监督层次化模糊相关算法。整个层次化分割流程图及分割过程如图 1 所示。考虑到算法的效率,首先使用熵率的超像素分割算法,将初始图像像素划分为若干超像素;随后我们利用递推算法快速地计算最大模糊相关,并与图割结合构建模糊相关图割 2-划分算子,自顶向下迭代地对目标区域实施分割。

每次分割后选择灰度均值较高的目标区域进一步实施 2-划分,并采用 F 指标^[13]来控制算法停止,其定义如下:

$$F = \sqrt{n} \sum_{i=1}^n \frac{e_i^2}{\sqrt{A_i}}, \quad (1)$$

式中: n 是图像分割后连通区域的数目; A_i 是第 n 个区域中像素个数; e_i 是区域 i 中原图和分割图之间每个像素灰度向量的欧氏距离。 F 乘以缩放因子 10^{-3} , F 值越小分割质量越好。假设进一步的分割将降低 F 指标值,当两次分割结果的 F 值变化小于阈值或 F 值增加时算法停止。

3 非监督层次化模糊相关的人体红外图像分割

3.1 人体红外图像的熵率超像素分割

首先将采用熵率来实施超像素预分割,该方法不但避免了超像素形状不规则,跨越多个对象的问题,还能较好的保留目标边界^[14]。基本思想是将超像素分割看成相同性质像素的聚类,由拓扑思想提出的聚类目标函数如下:

$$\max \mathbf{T}(\mathbf{e}) + \varphi \mathbf{H}(\mathbf{e}), \quad (2)$$

式中: $\mathbf{T}(\mathbf{e})$ 表示图上随机游动的熵率项, $\mathbf{H}(\mathbf{e})$ 表

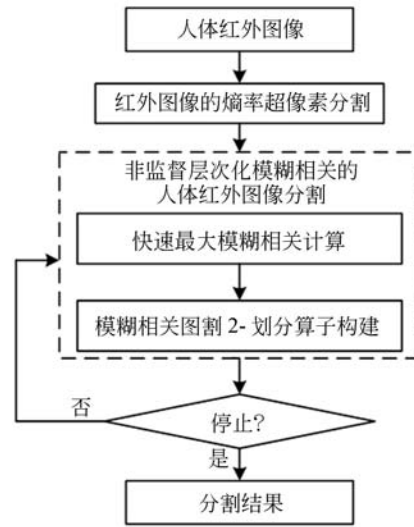


图 1 算法流程图

Fig. 1 Flow chart of algorithm

示聚类分布的平衡项, \mathbf{e} 是选择的边集, $\varphi \geq 0$ 是平衡系数。

函数中 $\mathbf{T}(\mathbf{e})$ 项,确保了图像在可感知的边界上进行划分,所得超像素仅在单一的目标上进行交叠,紧凑度强,区域一致性好。而 $\mathbf{H}(\mathbf{e})$ 项使得超像素的形状规则,尺寸类似,有效地减少了不平衡超像素的数目。两者结合的目标函数最优化确保了超像素具有较优的属性。

3.2 非监督层次化模糊相关的人体红外图像分割

3.2.1 快速最大模糊相关计算

为了提高信息度量精度,本文采用模糊相关来描述人体红外图像^[12],并实施最大模糊相关 2-划分,本文提出了对应的递推模糊相关计算策略,可去除冗余计算提高效率。

图像的总模糊相关选用常用的 s 函数,及其反函数 $Z=1-S$ 来描述, S 和 Z 函数分别为划分人体红外图像目标和背景模糊集合 M_o, M_b 的隶属度函数,其中 S 函数的公式如下:

$$S(x, r, s, t) = \begin{cases} 1 & x \leq r \\ 1 - \frac{(x-r)^2}{(t-r)(s-r)} & r < x \leq s \\ \frac{(x-t)^2}{(t-r)(t-s)} & s < x \leq t \\ 0 & x > t \end{cases}, \quad (3)$$

式中: x 为 S 函数自变量, r, s, t 为 S 函数的形状参数。

目标和背景集合 M_o 和 M_b 的概率 p_o, p_b 定义为:

$$\begin{cases} p_o = \sum_{k=0}^{255} h(k) S(k) \\ p_b = \sum_{k=0}^{255} h(k) Z(k) \end{cases}, \quad (4)$$

式中: $h(\cdot)$ 为归一化直方图函数,它定义了灰度级出现概率 $k(0 \leq k \leq 255)$, $S(k)$ 为划分目标集合的隶属度函数, $Z(k)$ 为划分背景集合隶属度函数。

根据分形理论,概率分布的相关定义为:

$$C(A) = -\ln\left(\sum_{i \geq 0} p_i^2\right), \quad (5)$$

式中: A 为可数随机变量的集合 $A = \{y_0, y_1, \dots, y_n\}$, p_i 为集合中任一元素 y_i 的概率,而 $C(A)$ 为集合 A 的模糊相关。

由模糊相关的定义,目标和背景集合 M_o 和 M_b 的模糊相关 C_o 和 C_b 分别为:

$$\begin{cases} C_o = -\ln\left[\sum_{k=0}^{255} \left(\frac{h(k) S(k)}{p_o}\right)^2\right] \\ C_b = -\ln\left[\sum_{k=0}^{255} \left(\frac{h(k) Z(k)}{p_b}\right)^2\right] \end{cases}, \quad (6)$$

式中 p_o 和 p_b 为目标和背景集合 M_o 和 M_b 的划分概率。

故 C_o 和 C_b 相加的总模糊相关为:

$$C(r, s, t) = -\ln\left[\sum_{k=0}^{255} \left(\frac{h(k) S(k)}{p_o}\right)^2\right] - \ln\left[\sum_{k=0}^{255} \left(\frac{h(k) Z(k)}{p_b}\right)^2\right]. \quad (7)$$

使 $C(r, s, t)$ 最大时的参数组合 (r, s, t) 决定了图像的最优划分结果,搜索变化范围为 $(0, 1, 2)$ 到 $(253, 254, 255)$,在确保精度的前提下,提出了快速递推的模糊相关计算来提高穷举法搜索效率。

首先,由 $Z(k) = 1 - S(k)$,得 $p_b = 1 - p_o$ 。公式(7)可改写为:

$$C(r, s, t) = -\ln\left[\sum_{k=0}^{255} \left(\frac{h(k) S(k)}{p_o}\right)^2\right] - \ln\left[\sum_{k=0}^{255} \left(\frac{h(k) (1 - S(k))}{(1 - p_o)}\right)^2\right]. \quad (8)$$

经过整理可进一步表示为:

$$C(r, s, t) = -\ln(R_b R_o) + 2\ln(p_o(1 - p_o)), \quad (9)$$

$$\begin{cases} R_o = \sum_{k=0}^{255} ((h(k) S(k))^2) \\ R_b = \sum_{k=0}^{255} ((h(k) (1 - S(k)))^2) \end{cases}, \quad (10)$$

计算 $C(r, s, t)$,需高效计算 R_b, R_o, P_o 。由于文献[9]给出了 p_o 的递推计算,接下来重点讨论 R_o 和 R_b 的递推计算策略。首先将公式(3)和公式(4)代入公式(10),则 R_o 和 R_b 扩展为:

$$R_o = \frac{1}{((t-r)(t-s))^2} \sum_{k=s+1}^t (k-r)^4 h^2(k) + \frac{1}{((t-r)(s-r))^2} \sum_{k=r+1}^s (k-r)^4 h^2(k) - \frac{2}{((t-r)(s-r))} \sum_{k=r+1}^s (k-r)^2 h^2(k) + \sum_{k=0}^s h(k)^2, \quad (11)$$

$$R_b = \frac{1}{((t-r)(s-r))^2} \sum_{k=r+1}^s (k-r)^4 h^2(k) + \frac{1}{((t-r)(t-s))^2} \sum_{k=s+1}^t (k-r)^4 h^2(k) - \frac{2}{((t-r)(t-s))} \sum_{k=s+1}^t (k-r)^2 h(k)^2 + \sum_{k=s+1}^{255} h^2(k). \quad (12)$$

可见,公式(11)和公式(12)包含以下求和项,令:

$$\begin{cases} E(y, z) = \sum_{k=y+1}^z (k-z)^4 h(k)^2 \\ F(y, z) = \sum_{k=y+1}^z (k-y)^4 h(k)^2 \\ G(y, z) = \sum_{k=y+1}^z (k-y)^2 h(k)^2, \\ H(y, z) = \sum_{k=y+1}^z (k-z)^2 h(k)^2 \\ I(y, z) = \sum_{k=y}^z h(k)^2 \end{cases}$$

其中 y, z 为上述求和函数的形参,根据上述函数的形式,公式(11)和(12)可改写为:

$$R_o = \frac{E(s, t)}{((t-r)(t-s))^2} + \frac{F(r, s)}{((t-r)(s-r))^2} - \frac{2G(r, s)}{((t-r)(s-r))} + I(0, s), \quad (13)$$

$$R_b = \frac{F(r, s)}{((t-r)(s-r))^2} + \frac{E(s, t)}{((t-r)(t-s))^2} - \frac{2H(s, t)}{((t-r)(t-s))} + I(s+1, 255). \quad (14)$$

假设 $E(y, z)$ 其值随 y 变化, 其计算如下:

$$\begin{aligned} E(y, z) &= \sum_{k=y+1}^z (k-z)^4 h^2(k) = \sum_{k=(y+1)+1}^z (k-y-1-z)^4 h(k)^2 + (y+1-z)^4 h(y+1)^2 = \\ &E(y+1, z) + (y+1-z)^4 h(y+1)^2, \end{aligned} \quad (15)$$

则 $E(y, z)$ 的递推形式为:

$$\begin{cases} E(y, z) = E(y+1, z) + (y+1-z)^4 h^2(y+1) \\ E(z-1, z) = 0, y=0, \dots, z-1 \end{cases} \quad (16)$$

当 y 固定时, $F(y, z)$ 值随 z 变换, 递推计算过程为:

$$\begin{aligned} F(y, z) &= \sum_{k=y+1}^z (k-y)^4 h^2(k) = \\ &\sum_{k=y+1}^{z-1} (k-y)^4 h^2(k) + (z-y)^4 h^2(z) = \\ &F(y, z-1) + (z-y)^4 h^2(z), \end{aligned} \quad (17)$$

由此可知, 其递推形式为:

$$\begin{cases} F(y, z) = F(y, z-1) + (z-y)^4 h^2(z) \\ F(y, y+1) = h^2(y+1), z=y+2, \dots, 255 \end{cases} \quad (18)$$

$H(y, z)$ 与 $E(y, z)$ 的差异仅为 $(k-z)$ 的指数项, 由 $E(y, z)$ 的递推形式可得 $H(y, z)$ 的递推形式:

$$\begin{cases} H(y, z) = H(y+1, z) + (y+1-z)^2 h(y+1)^2 \\ H(z-1, z) = 0, y=0, \dots, z-1 \end{cases} \quad (19)$$

同样, 由 $F(y, z)$ 可知 $G(y, z)$ 的递推形式为:

$$\begin{cases} G(y, z) = G(y, z-1) + (z-y)^2 h(z)^2 \\ G(y, y+1) = h(y+1)^2, z=y+2, \dots, 255 \end{cases} \quad (20)$$

最后, $I(y, z)$ 的递推形式为:

$$I(y, z) = \sum_{k=y}^z h(k)^2 = I(y, z-1) + h(z)^2. \quad (21)$$

至此, 公式(11)和(12)的所有求和项均可使用上述递推过程得出, 保留各求和项的瞬间递推值, 用于公式(9)在 $0 \leq r < s < t \leq 255$ 范围内的穷举搜索, 可大幅度降低冗余计算, 递推算法的伪代码见算法 1。

算法 1: 快速最大模糊相关计算

输入: 人体红外图像

输出: $E(y, z) F(y, z) G(y, z) H(y, z) I(y, z)$ 的递推值

1. 初始化: $E(y, z) \leftarrow 0, F(y, z) \leftarrow 0, G(y, z) \leftarrow 0, H(y, z) \leftarrow 0, I(y, z) \leftarrow 0, 0 \leq y \leq 255, 0 \leq z \leq 255$
2. 计算人体红外图像的直方图 $h(k), 0 \leq k \leq 255$
3. for $z=1:255$
4. for $y=z-1:0$
5. $E(y, z) = E(y+1, z) + (y+1-z)^4 h(y+1)^2$
6. $H(y, z) = H(y+1, z) + (y+1-z)^2 h(y+1)^2$
7. for $y=0:254$
8. for $z=y+1:255$
9. $F(y, z) = F(y, z-1) + (z-y)^4 h(z)^2$
10. $G(y, z) = G(y, z-1) + (z-y)^2 h(z)^2$
11. $I(y, z) = I(y, z-1) + h(z)^2$

3.2.2 模糊相关图割 2-划分算子构建

为了考虑人体红外图像的空间相关性, 采用文献[9]中图割优化思想, 利用图像最大模糊相关时, 目标和背景的划分概率设计图割 2-划分算子。在图割中, 假设超像素为图的节点, 背景和目 标分别为图中的源点和汇点, 图割模型中各节点与源汇点相连的边权重, 即图割的数据项 E_{data} 用 3.2.1 节中目标和背景集合的划分概率来设置:

$$\begin{cases} E_{\text{data}}(l_R = "o") = -\log \sum_{k=0}^{255} h_R(k) S(k) \\ E_{\text{data}}(l_R = "d") = -\log \sum_{k=0}^{255} h_R(k) Z(k) \end{cases}, \quad (22)$$

式中: l_R 为超像素 R 的标签, $h_R(k)$ 为超像素 R 中像素的归一化直方图。

节点间相连的边权重, 即图割平滑项 E_{smooth} 用文献[15]中定义:

$$E_{\text{smooth}} = \exp\left(-\frac{(I_m - I_n)^2}{2\sigma^2}\right) \times 10^{\frac{(I_{\max} - I_{\min})}{2}\alpha}, \quad (23)$$

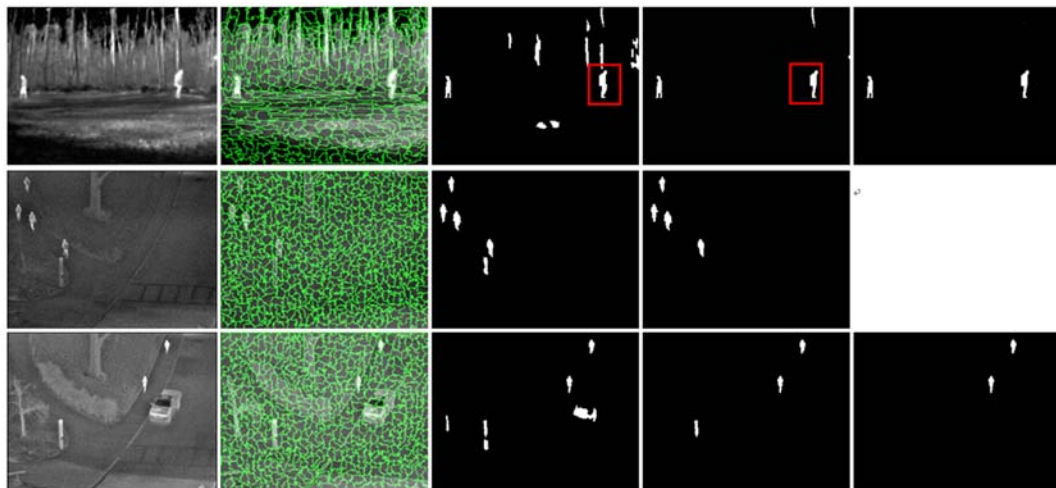
式中: I_m 和 I_n 是相邻超像素 m 和 n 的灰度均值, I_{\max} 和 I_{\min} 分别为当前标号的超像素中灰度均值的最大最小值。 σ 为归一化因子, 调节式中相邻超像素灰度值在高低对比度的差异, 默认值 0.9。参数 α 为调节参数, 默认值 13。设置图割后, 用最大流最小割算法^[16]将超像素分为源点和汇点两类。

4 实验结果与分析

算法在 2.9 GHz CPU, 8 G 内存的计算机, Matlab 2015b 的环境下运行。从 IEEE OTCBVS Benchmark Dataset 标准红外数据库选取 150 幅大小 320×240 的人体红外图像进行测试。对比算法选取 Yin 提出的多级模糊熵图割算法^[9], Yuan 提出的多区域图割算法^[10], Barisione 提出的监督马尔科夫随机场分割算法^[11], 本文算法中, 熵率法及比较算法的参数同文献默认设置。

本文选取了 3 幅背景为树林, 街道的人体红外图像, 展示本算法的层次化分割结果, 如图 2 所示(彩图见期刊电子版)。由于红外图像中, 人体目标具有较高的灰度值, 背景干扰在层次化分割过程中不断去除, 目标的轮廓逐渐凸显并修正, 如图 2(c) 列第一张图中红框标出人体目标, 在第二次分割时, 图 2(d) 列第一张图的部分目标超像素被划分为背景。分割停止时, 各图像划分次数从上到下为 4, 3, 4。

将本算法与已有的分割算法相比较, 由于这类算法需要预先指定划分数, 为公平起见, 对于上述测试图像, 分别选取本文算法自动确定的划分数 4, 3, 4 来实施分割, 并保留灰度均值最高的目标区域, 将其余区域设为黑色背景。结果如图 3 所示(彩图见期刊电子版), 从中可见, Yin 的模糊熵图割算法虽能分割出人体目标, 但由于算法依赖于熵的信息度量方式及全局分割策略, 导致误分, 如图 3(c) 列第三张图中红框所示的汽车被误分为目标, 且远处的人体目标被误分为背景。而 Yuan 算法中, 图割数据项的设置由硬划分的灰度概率决定, 并不能根据各像素的模糊灰度差异而自适应的改变, 结果存在轮廓变形, 背景误分的问题, 如图 3(d) 列中第二张图红框所示, 人体目标较真实结果更大, 第三张图中红框所示汽车被误分为目标。Barisione 提出的监督马尔科夫随机场分割, 因全局的划分方式, 同样存在目标丢失的问题, 如图 3(e) 中第 2, 3 张图的红框内丢失了应有的人体目标。而本文算法受背景和噪声干扰较小, 分割结果更清晰, 识别度更高。



(a) 输入图 (b) 超像素结果 (c) 第一次分割结果 (d) 第二次分割结果 (e) 第三次分割结果
(a) Input images (b) Superpixels (c) First segmentation (d) Second segmentation (e) third segmentation

图 2 层次化分割过程

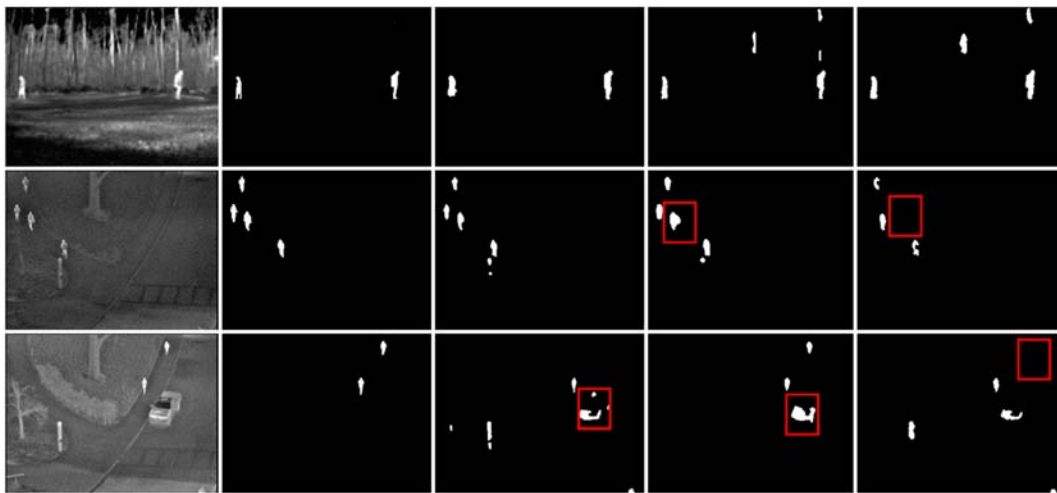
Fig. 2 Hierarchical segmentation process

为了对算法分割效果进行量化分析, 选用 F 指标, 峰值信噪比 (P_{SNR}), 区域对比度 (D) 进行分割质量评价。其中 P_{SNR} 是基于误差敏感的图像分割质量评价标准, P_{SNR} 越大分割精度越高, 定义

如下:

$$P_{SNR} = 20 \log \left(\frac{255}{E_{MS}} \right) \times 0.01, \quad (24)$$

式中: E_{MS} 是分割前后人体红外图像的灰度均方



(a) 输入图 (b) 本算法结果 (c) Yin 算法结果 (d) Yuan 算法结果 (e) Barisione 结果
 (a) Input images (b) Our results (c) Yin's results (d) Yuan's results (e) Barisione's results

图 3 不同算法结果对比

Fig. 3 Comparison with existing methods

误差,计算公式如下:

$$E_{MS} = \sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \frac{(B(i,j) - \hat{B}(i,j))^2}{N}}, \quad (25)$$

式中: $B(i, j)$ 和 $\hat{B}(i, j)$ 分别为红外图像分割前后坐标 (i, j) 对应的像素灰度值, N 为红外图像的像素总数。

表 1 不同算法 F, P_{SNR} 和 D 结果对比

Tab. 1 Comparison of F, P_{SNR} and D by different algorithms

方法	图 1			图 2			图 3		
	F	P_{SNR}	D	F	P_{SNR}	D	F	P_{SNR}	D
Yuan's	0.341	0.520	0.470	0.227	0.576	0.401	0.242	0.535	0.408
Yin's	0.297	0.566	0.514	0.210	0.581	0.413	0.228	0.559	0.434
Barisione's	0.327	0.543	0.491	0.193	0.596	0.428	0.238	0.540	0.415
本文	0.289	0.579	0.557	0.181	0.601	0.446	0.217	0.564	0.456

区域对比度(D)为分割的目标和背景灰度差异,差异越大表明分割效果越好,其定义为:

$$D = \frac{|F_o - F_b|}{F_o + F_b}, \quad (26)$$

式中 F_o 和 F_b 为目标和背景区域的平均灰度。

图 3(a)列从上到下 3 幅图对应的 F, P_{SNR} 和 D 统计结果如表 1 所示,本文算法具有最优指标值。

为进一步验证算法的稳健性,算法对 150 幅人体红外图像进行测试,平均 F, P_{SNR} 和 D 值如图 4 所示,本文算法的 F 最低, P_{SNR} 和 D 值最高,分割质量最好,分别为 0.210, 0.609, 0.554。以 F 指标值为例,本文算法相比于 Yuan 算法降低了 25%,较 Yin 算法降低了 20%,较 Barisione 算

法降低了 18%,算法的精度较已有算法至少提高了约 18%。

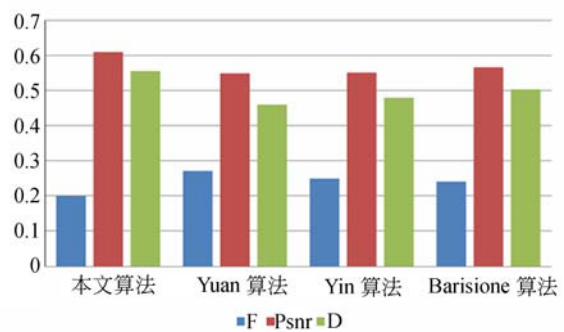


图 4 不同算法量化指标对比

Fig. 4 Comparison of quantitative indicators with existing methods

图 5 所示显示了各算法处理 150 幅测试图像的运行时间,其中本文算法采用递推策略及未采用递推策略的运行时间均显示图中,可见采用递推策略后,本文算法的运行效率提高了近 87%,但本文算法因多次实施 2-划分算子进行层次化分割,运行时间较 Yin 提出的全局模糊熵图割算法更长,约为 3.8 s,其中超像素分割约为 1.2 s,层次化分割约为 2.6 s。而 Yuan 算法约 5.3 s, Barisione 算法约 6.4 s,本文算法运行时间较存在算法提高了 27%。

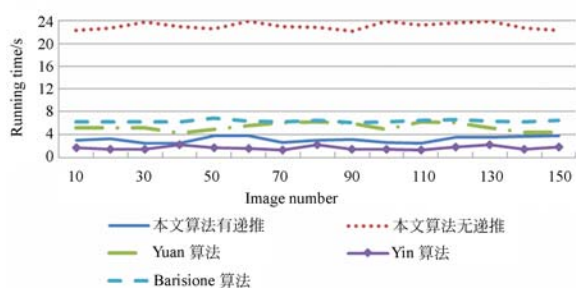


图 5 不同算法运行时间对比

Fig. 5 Comparison of running time with existing methods

此外,本文还将算法进一步应用于海面红外船只分割,红外飞机分割,草丛中红外物体分割等,实验表明针对大部分红外热目标,算法均能获得

得较好地分割结果,但是对于图像对比度较低的海面船只图像,由于船上的细小桅杆易受复杂海面背景的影响,在分割前实施图像增强算法,调节图像对比度,能获得较好的分割结果。

5 结 论

针对已有多级模糊熵分割算法存在的模糊划分分数需预先设定,全局划分方式影响熵的度量准确度,分割精度不高等问题,提出了非监督层次化模糊相关算法。对于最大模糊相关搜索,提出了针对 S 隶属度函数模糊相关模型的快速递推算法,解决了已有的模糊熵递推计算策略无法适用的问题,有效消除穷举搜索时模糊相关的冗余计算,确保算子实施的高效性。最后,利用自顶向下的非监督层次化分割策略,迭代实施 2-划分算子,直到算法收敛为止。与常用的模糊熵图割,多区域图割算法相比较,在相同划分数的情况下,本文算法的分割精度提高了近 18%,运行时间约为 3.8 s。可用于人体红外图像分割的工程实践。下一步将研究如何将算法应用于彩色图像分割,以便更好地拓展非监督层次化模糊相关分割的应用范围。

参考文献:

- [1] 赵云峰,李夜金,张寅,等. 海洋背景下运动目标的天基红外探测场景生成系统[J]. 光学精密工程, 2017, 25(4): 1019-1025.
ZHAO Y F, LI Y J, ZHANG Y, *et al.*. A space-based infrared detection scene generation system for moving objects with sea background[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(4): 1019-1025. (in Chinese)
- [2] 杨会玲,吴玉宏,孙慧婷,等. 基于杂波抑制的海平线红外弱小目标检测[J]. 液晶与显示, 2017, 32(4): 317-324.
YANG H L, WU Y H, SUN H T, *et al.*. Small dim infrared target detection of horizon region based on clutter rejection[J]. *Liquid Crystals and Displays*, 2017, 32(4): 317-324. (in Chinese)
- [3] NIE F, ZHANG P, LI J, *et al.*. An Image Segmentation Method Based on Renyi Relative Entropy and Gaussian Distribution[J]. *Recent Patents on*
Computer Science, 2017, 10(2): 122-130.
- [4] DENG H, SUN X, LIU M, *et al.*. Entropy-based window selection for detecting dim and small infrared targets[J]. *Pattern Recognition*, 2017, 61(2017): 66-77.
- [5] BENABDELKADER S, BOULEMDEN M. Recursive algorithm based on fuzzy 2-partition entropy for 2-level image thresholding[J]. *Pattern Recognition*, 2005, 38(8): 1289-1294.
- [6] TANG Y G, MU W, ZHANG Y, *et al.*. A fast recursive algorithm based on fuzzy 2-partition entropy approach for threshold selection[J]. *Neurocomputing*, 2011, 74(17): 3072-3078.
- [7] ZHAN Y, PAN H, XIE X, *et al.*. Graph entropy-based clustering algorithm in medical brain image database[J]. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2016, 31(2): 1029-1039.
- [8] 尹诗白,王一斌,邓箴. 基于快速递推模糊 2-划分熵图割的红外图像分割[J]. 光学精密工程, 2016,

- 24(3): 668-680.
- YIN S B, WANG Y B, DENG Z. Infrared image segmentation based on graph cut of fast recursive fuzzy 2-partition entropy[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(3): 668-680. (in Chinese)
- [9] YIN S B, ZHAO X M, WANG W X, *et al.*. Efficient multilevel image segmentation through fuzzy entropy maximization and graph cut optimization[J]. *Pattern Recognition*, 2014, 47(9): 2894-2907.
- [10] YUAN J, BAE E, TAI X C. A study on continuous max-flow and min-cut approaches. Proceedings of the 27th Conference on the Computer Vision and Pattern Recognition, California, USA: CVPR, 2010: 2217-2224.
- [11] BARISIONE F, SOLARNA D, DE GIORGI A, *et al.*. Supervised classification of thermal infrared hyperspectral images through Bayesian, Markovian, and region-based approaches. Proceedings of the 36th Conference on Geoscience and Remote Sensing Symposium, Beijing, P. R. China: IGARSS, 2016: 937-940.
- [12] TANG Y G, MU W W, ZHAO L X, *et al.*. An image segmentation method based on maximizing fuzzy correlation and its fast recursive algorithm [J]. *Computers & Electrical Engineering*, 2014, 40(3): 833-843.
- [13] LIU J and YANG Y H. Multiresolution color image segmentation[J]. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 1994, 16(7): 689-700.
- [14] LIU M Y, TUZEL O, RAMALINGAM S, *et al.*. Entropy rate superpixel segmentation. Proceedings of 28th Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Colorado, USA: CVPR, 2011: 2097-2104.
- [15] BOYKOV Y and KOLMOGOROV V. An experimental comparison of min-cut/max-flow algorithms for energy minimization in vision[J]. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 2004, 26(9): 1124-1137.
- [16] AJANTHAN T, HARTLEY R, SALZMANN M. Memory Efficient Max Flow for Multi-label Submodular MRFs. Proceedings of the 33th Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Las Vegas, USA: CVPR, 2016: 5867-5876.

作者简介:



尹诗白(1984—),女,湖北潜江人,博士,副教授,2006年和2009年分别于西安工业大学获得学士和硕士学位,2013年于长安大学获得博士学位,主要从事图像处理,机器视觉方面的研究。E-mail: shibai.yin@gmail.com



王一斌(1982—),男,河南人,讲师,分别于2006年、2009年、2016年在西北工业大学获得学士、硕士、博士学位,主要从事模式识别和机器视觉方面的研究。E-mail: yibeen.wong@gmail.com