

文章编号: 1001 - 9014 (2010) 01 - 0063 - 06

采用粒子群优化粒子滤波的红外目标提取算法

周 越¹, 毛晓楠²

(1. 上海交通大学 模式识别与图像处理研究所, 上海 200240;

2. 上海航天控制工程研究所, 上海 200233)

摘要:提出了一种新的基于粒子群优化粒子滤波 (PSOPF) 的红外目标提取算法, 将红外目标提取阈值的计算问题看作系统状态估计问题. 在粒子滤波的框架下, 建立了关于灰度一方差加权信息熵和像素点灰度值的阈值状态空间, 建立了基于粒子群优化算法思想的系统状态转移模型, 建立了基于红外目标提取效果评价函数的系统观测模型, 它有效综合了红外图像中灰度、信息熵、梯度、像素点的空间位置等信息. 最后, 以粒子的加权平均估计目标提取的阈值. 实验结果表明, 该方法有效且稳健的.

关键词:粒子滤波; 粒子群优化; 目标提取; 灰度一方差加权信息熵

中图分类号: TP391. 4 **文献标识码:** A

INFRARED TARGET EXTRACTION ALGORITHM BY USING PARTICLE SWARM OPTIMIZATION PARTICLE FILTER

ZHOU Yue¹, MAO Xiao-Nan²

(1. Institute of Pattern Recognition and Image Processing, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

2. Control Engineering Institute of SAST, Shanghai 200233, China)

Abstract: A novel infrared target extraction algorithm based on particle swarm optimization particle filter (PSOPF) was proposed. The problem of infrared target extraction was analyzed and solved in the view of state estimation. In the framework of particle filter, the threshold state space on the gray-variance weighted information entropy and the gray value of each pixel was established. Particle swarm optimization was introduced to construct the state transition model. The observation model based on extraction results evaluation function was constructed, which integrated gray, entropy, gradient and spatial distribution of pixels. Finally, the weighted average of all the particles was used as target extraction threshold. The experiment results prove that the proposed algorithm is effective and robust.

Key words: particle filter; particle swarm optimization; target extraction; gray-variance weighted information entropy

引言

红外成像系统已被广泛用于精确制导、目标探测、光学遥感等领域, 但红外图像的信噪比较低, 因此红外目标提取技术一直是该领域的活跃课题. 目前已有多种红外目标提取算法, 如基于阈值^[1,2]、形态学^[3]和特征空间分析^[4]等方法. 基于阈值的方法因为实现简单 (不需输入参数和监督)、计算量小和性能较稳定等优点而被广泛采用, 此类方法也从一维阈值发展到了多维阈值, 如二维最大熵法^[2]、基于三维直方图图像分割方法^[5]等. 有学者提出在 Otsu 方法的基础上, 采用粒子群优化方法确定阈

值^[1,2], 取得了良好的效果, 但粒子群方法也存在粒子运动速度难以确定, 有时会陷入局部最优等缺陷^[6,7].

粒子滤波以蒙特卡洛随机模拟理论为基础, 用一组加权随机样本 (称为粒子) 近似表示系统状态的后验分布, 新的状态分布通过贝叶斯递推估计得到. 它是解决非线性、非高斯条件下状态估计问题的有力工具, 但也存在“样贫”、计算效率低等问题^[8,9]. 粒子群优化^[6]是由 Kennedy 和 Eberhart 等于 1995 年提出的模拟群体智能行为的优化算法. 粒子群优化算法与粒子滤波方法具有内在联系, 有学者提出了粒子群优化粒子滤波算法, 用以改善样本分

收稿日期: 2009 - 02 - 21, 修回日期: 2009 - 12 - 06

基金项目: 国家自然科学基金 (60772097); 航空科学基金

作者简介: 周 越 (1969 -), 男, 江苏常州人, 副教授, 从事图像处理理论和方法的研究, EMail: zhouyue@sjtu.edu.cn

Received date: 2009 - 02 - 21, revised date: 2009 - 12 - 06

布,加速粒子集的收敛,提高粒子滤波性能^[7]。

本文着重研究了四个问题:第一,将阈值计算看作非线性、非高斯条件下的状态估计问题,并在粒子滤波框架下求解;第二,以灰度一方差加权信息熵和像素点灰度值作为判定是否为目标像素点的依据,建立相应的状态空间;第三,建立基于粒子群优化算法思想的系统状态转移模型,以解决“样贫”问题;第四,在建立粒子滤波的测量模型时,提出了度量红外目标提取有效性的评价函数,并以此计算粒子的权值。

1 基于粒子群优化粒子滤波的红外目标提取算法

假设在目标提取之前,跟踪算法已确定了目标所在区域 R_T 。为度量目标提取的效果,需要根据目标的大小,将 R_T 分为若干个矩形子区域,使得子区域大小与目标相适应。设 S_{bkg} 为所有背景点的集合, S_{obj} 为所有目标像素点的集合,且满足 $S_{bkg} \cap S_{obj} = \emptyset$, $S_{bkg} \cup S_{obj} = R_T$ 。目标提取是使集合 S_{obj} 最佳或近似最佳的逼近实际构成目标的像素点集合。

1.1 状态空间的建立

首先定义两个基准值,目标区域 R_T 的灰度方差加权信息熵平均值和未知点集 S_U 的平均灰度值:

$$\bar{E} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K E_i, \quad (1)$$

其中, K 是 R_T 中子区域的数目;

$$\bar{G}_U = \frac{1}{N_U} \sum_{i=1}^{N_U} s_i, \quad (2)$$

其中, N_U 为 S_U 的大小, s_i 为 S_U 中第 i 个点的灰度值;

$$E_i = G_i \cdot H_i, \quad (3)$$

其中, G_i 是第 i 个子区域的平均灰度值, H_i 是第 i 个子区域的方差加权信息熵^[10]。

定义状态向量 $\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$,并以 $T_E = x_1 \bar{E}$, $T_G = x_2 \bar{G}_U$ 为阈值对 S_U 中的点进行划分,即对于 S_U 中的每个像素点,其所在区域的灰度一方差加权信息熵和该点的灰度值均超过对应的阈值 T_E 和 T_G ,即判定为目标像素点。对 T_E 和 T_G 的估计,可以转化为对

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \text{ 的估计,其中 } 0 < x_1 < \frac{\max_{i=1,2,\dots,K} \{E_i\}}{\bar{E}}, 0 < x_2 < \frac{\max_{i=1,2,\dots,N_U} \{s_i\}}{\bar{G}_U}, \text{ 这样可以有效地缩小粒子采样的区间}$$

范围,从而使有限的粒子能够更好地模拟 \mathbf{x} 的分布。

1.2 状态转移模型

状态转移模型近似描述了状态变量的进化规律。常用的状态转移模型有随机漂移模型、二阶自回归模型和匀速运动模型等^[9],这里采用基于粒子群优化算法思想的状态转移模型。初始条件下,由于

的分布情况未知,故分别从 $\left[0, \frac{\max_{i=1,2,\dots,K} \{E_i\}}{\bar{E}}\right]$, $\left[0, \frac{\max_{i=1,2,\dots,N_U} \{s_i\}}{\bar{G}_U}\right]$ 两个区间均匀抽取 N 个随机数,组

成初始粒子集,所有粒子的权重均设为 $w_0^{(i)} = \frac{1}{N}$ 。

在粒子群优化粒子滤波算法第 k 次迭代后,局部极值 $L^{(k)}$ 和全局极值 $G^{(k)}$ 的定义如下:

$$L^{(k)} = \underset{i}{\operatorname{argmax}} \{w_k^{(1)}, \dots, w_k^{(i)}, \dots, w_k^{(N)}\}, \quad k = 1, 2, \dots \quad (4)$$

$$G^{(k)} = \underset{L}{\operatorname{argmax}} \{w_k^{(1)}, \dots, w_k^{(i)}, \dots, w_k^{(N)}, w_G^{(k-1)}\}, \quad k = 1, 2, \dots \quad (5)$$

其中, $w_k^{(i)}$ 为第 k 次迭代中第 i 个粒子的权重, $w_G^{(k-1)}$ 为第 $k-1$ 次迭代得到的全局极值 $G^{(k-1)}$ 放在第 k 次迭代得到的粒子集中考察得到的权值。在第 1次迭代中采用随机漂移模型,之后的迭代中采用基于粒子群优化算法思想的状态转移模型。定义状态转移方程为

$$\begin{cases} x_1^{(i)} = x_1^{(i)} + U_{11} & k = 1 \\ x_k^{(i)} = x_k^{(i)} + (G^{(k-1)} - x_{k-1}^{(i)}) \cdot U_{k1} + (L^{(k-1)} - x_{k-1}^{(i)}) \cdot U_{k2} & k \geq 2 \end{cases}, \quad (6)$$

其中, U_1, U_{k1}, U_{k2} 是二维零均值高斯噪声, $i = 1, 2, \dots, N$ 。第 k 次迭代的粒子集 S_k 以及对应的全局和局部极值可以依据式 (7)生成第 $k+1$ 次迭代的粒子集 S_{k+1} 。

1.3 观测模型

建立观测模型的目的是评价其目标提取效果,从而得到阈值样本的权值。

1.3.1 评价参数

基于红外目标的视觉信息,计算目标的平均灰度、目标所在区域的灰度一方差加权信息熵、边缘梯度均值、目标像素点聚合度和目标像素点数五个参数,并以这五个参数构造评价函数,以此得到阈值样本的权值。

· 目标平均灰度

$$\bar{G}_k^{(i)} = \frac{1}{N_k^{(i)}} \sum_{j=1}^{N_k^{(i)}} s_j, \quad (7)$$

其中, $N_k^{(i)}$ 为依据第 k 次迭代的第 i 个粒子 $\begin{pmatrix} (i) \\ 1, k, \end{pmatrix} = [\begin{pmatrix} (i) \\ 1, k, \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} (i) \\ 2, k \end{pmatrix}]^T$ 提取到的目标像素点集合 $S_k^{(i)}$ 的大小.

· 目标平均灰度一方差加权信息熵

采用“灰度一方差加权信息熵”度量目标提取的效果. 同时, 定义高斯核函数, 以削弱边缘区域出现的亮斑区域带来的影响. 高斯核函数如下:

$$(d_{ij}) = \frac{1}{\sqrt{2}} e^{-\frac{d^2}{2}}, \quad (8)$$

R_T 中的每一个像素点 (i, j) 与 (d_{ij}) 一一对应, 其中 d 为像素点距离 R_T 中心点的距离; 由 R_T 的行数 H_{R_T} 和列数 W_{R_T} 决定, 这里取 $\sqrt{H_{R_T} W_{R_T}} = 10$. 对于由第 k 次迭代的第 i 个粒子 $\begin{pmatrix} (i) \\ 1, k, \end{pmatrix} = [\begin{pmatrix} (i) \\ 1, k, \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} (i) \\ 2, k \end{pmatrix}]^T$ 得到的目标像素点集合 $S_k^{(i)}$, 目标平均灰度一方差加权信息熵定义为:

$$\bar{E}_k^{(i)} = \frac{1}{N_k^{(i)}} \sum_{j=1}^{N_k^{(i)}} (d_j) \cdot E_j, \quad (9)$$

其中, d_j 为集合 $S_k^{(i)}$ 中第 j 个像素点距离 R_T 中心的距离, E_j 为第 j 个像素点所在子区域的灰度一方差加权信息熵值. 对 $\{ \bar{E}_k^{(i)} \}_{i=1, 2, \dots, N}$ 需做归一化处理.

· 边缘梯度均值

采用 Sobel 算子计算水平和垂直方向的梯度值, 以梯度向量的模做为该点的梯度值. 边缘梯度均值的定义为:

$$\overline{Grad}_k^{(i)} = \frac{1}{N_{Ek}^{(i)}} \sum_{j=1}^{N_{Ek}^{(i)}} \sqrt{g_{1,j}^2 + g_{2,j}^2}, \quad (10)$$

其中, $N_{Ek}^{(i)}$ 是集合 $SE_k^{(i)}$ 像素点的个数, $g_{1,j}$ 和 $g_{2,j}$ 分别是 $SE_k^{(i)}$ 中第 j 个边缘点处水平和垂直方向的梯度值. 对 $\{ \overline{Grad}_k^{(i)} \}_{i=1, 2, \dots, N}$ 需做归一化处理.

· 目标像素点聚合度

对于依据第 k 次迭代的第 i 个粒子 $\begin{pmatrix} (i) \\ 1, k, \end{pmatrix} = [\begin{pmatrix} (i) \\ 1, k, \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} (i) \\ 2, k \end{pmatrix}]^T$ 得到的目标像素点集合 $S_k^{(i)}$, 求出其重心 $O_k^{(i)}$, 将 $S_k^{(i)}$ 中所有像素点与 $O_k^{(i)}$ 距离的均值度量目标像素点聚合程度

$$\overline{Con}_k^{(i)} = \frac{1}{N_k^{(i)}} \sum_{j=1}^{N_k^{(i)}} P_{j,k}^{(i)} - O_k^{(i)}. \quad (11)$$

· 目标像素点数: 目标像素点数即集合 $S_k^{(i)}$ 的大小.

1.3.2 构造评价函数

以上五个参数与目标提取效果密切相关. 一般地, 目标平均灰度、目标平均灰度一方差加权信息熵

和边缘梯度均值这三个参数越大, 提取效果越好. 此外, 以目标像素点个数作为约束条件, 可以更稳健地评价目标提取效果. 设在第 k 次迭代得到的粒子集为 $\{ \begin{pmatrix} (i) \\ k, \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} (2) \\ k, \end{pmatrix}, \dots, \begin{pmatrix} (N) \\ k, \end{pmatrix} \}$, 得到的目标像素点集合为 $\{ S_k^{(1)}, S_k^{(2)}, \dots, S_k^{(N)}, \}$, 这些集合的像素数组成的向量为 $\begin{pmatrix} k \\ k \end{pmatrix} = [N_k^{(1)}, N_k^{(2)}, \dots, N_k^{(N)},]^T$, 求得向量 $\begin{pmatrix} k \\ k \end{pmatrix}$ 中所有元素的均值 \bar{m}_k 和标准差 v_k , 并对 $\begin{pmatrix} k \\ k \end{pmatrix}$ 进行标准化:

$$\tilde{\begin{pmatrix} k \\ k \end{pmatrix}}(i) = \frac{\begin{pmatrix} k \\ k \end{pmatrix}(i) - \bar{m}_k}{v_k}. \quad (12)$$

利用高斯函数 $\phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2}} e^{-\frac{x^2}{2}}$ 计算似然值 $\begin{pmatrix} k \\ k \end{pmatrix}(i) = \phi(\tilde{\begin{pmatrix} k \\ k \end{pmatrix}}(i))$, 以降低在第 k 次迭代得到的像素数过多或者过少粒子的权值. 同样, 对于第 k 次迭代得到的目标像素点聚合度 $\{ \overline{Con}_k^{(i)} \}_{i=1, 2, \dots, N}$, 可以求得对应的似然值 $\{ \begin{pmatrix} k \\ k \end{pmatrix}(i) \}_{i=1, 2, \dots, N}$.

综上, 得到评价函数如下:

$$\begin{cases} V_k^{(i)} = \begin{pmatrix} (i) \\ 1, k, \end{pmatrix} \cdot \exp(\begin{pmatrix} (i) \\ 1, k, \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} (i) \\ 2, k \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} (i) \\ 3, k \end{pmatrix}) \\ \begin{pmatrix} (i) \\ 1, k, \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (i) \\ k \end{pmatrix} \cdot \bar{G}_k^{(i)} \\ \begin{pmatrix} (i) \\ 2, k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (i) \\ k \end{pmatrix} \cdot \bar{E}_k^{(i)} \\ \begin{pmatrix} (i) \\ 3, k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (i) \\ k \end{pmatrix} \cdot \overline{Grad}_k^{(i)} \\ \begin{pmatrix} (i) \\ 4, k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (i) \\ k \end{pmatrix} \cdot \overline{Con}_k^{(i)} \end{cases}, \quad (13)$$

其中, $\begin{pmatrix} (i) \\ 1, k, \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} (i) \\ 2, k, \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} (i) \\ 3, k, \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} (i) \\ 4, k \end{pmatrix}$ 分别为以似然值 $\begin{pmatrix} (i) \\ k \end{pmatrix}$ 约束的目标平均灰度、目标平均灰度一方差加权信息熵、边缘梯度均值、目标像素点聚合度.

对于第 k 次迭代得到的 N 个粒子 $\begin{pmatrix} k \\ k \end{pmatrix} = \{ \begin{pmatrix} (i) \\ k \end{pmatrix}, w_k^{(i)} \}_{i=1, N}$, 其权值 $w_k^{(i)}$ 计算方法如下:

$$w_k^{(i)} = \frac{V_k^{(i)}}{\sum_{i=1}^N V_k^{(i)}}. \quad (14)$$

第 k 次迭代得到的阈值估计值可由粒子集的加权平均值得到

$$\tilde{\begin{pmatrix} k \\ k \end{pmatrix}} = \sum_{i=1}^N \begin{pmatrix} (i) \\ k \end{pmatrix} g w_k^{(i)}. \quad (15)$$

实验结果表明, 评价函数是有效的. 图 1 中给出了两组实验结果 (a1) ~ (a4) 和 (b1) ~ (b4), 分别为根据不同阈值得到的提取结果. 每幅图中均有 3 个灰度级, 最高灰度级像素点的集合为最终的目标提取结果, 其余灰度级的像素点集合组成背景. 显然, (a1) ~ (a4) 中 (a1) 的提取效果最佳, (b1) ~ (b4) 中 (b1) 的提取效果最佳. 由式 (13) 计算目标提取评价函数值, 得到的结果如表 1 所列. 在实验中采用的粒子数 $N = 15$, 表 1 中数据验证了评价函数的有效性.

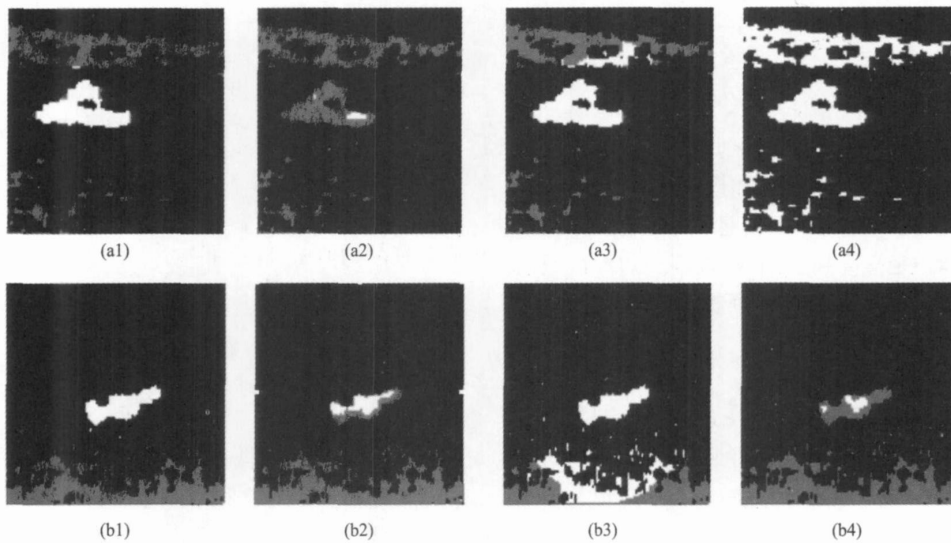
图 1 不同阈值对应的提取结果 (粒子数 $N = 15$)Fig 1 The extracting results with different thresholds (number of particles $N = 15$)

表 1 评价函数计算结果

Table 1 The results of the evaluation function

	V (权值) (像素数)		G (聚合度) (平均灰度)		$Grad$ (梯度)	E (信息熵)
a-1	1. 7158	0. 3989	0. 3986	0. 8681	0. 2754	0. 6923
a-2	0. 4177	0. 1940	0. 2138	1. 0000	1. 0000	1. 0000
a-3	1. 2315	0. 3631	0. 3372	0. 8475	0. 2655	0. 5496
a-4	0. 0001	0. 0029	0. 0041	0. 8096	0. 2457	0. 2775
b-1	1. 5344	0. 3811	0. 3989	0. 8656	0. 2918	0. 6508
b-2	1. 3663	0. 3536	0. 3785	0. 9282	0. 6561	0. 7682
b-3	0. 0014	0. 0058	0. 0237	0. 7887	0. 1874	0. 2641
b-4	0. 8956	0. 2689	0. 3281	0. 9948	0. 8429	0. 9145

1.4 基于粒子群优化粒子滤波的红外目标提取算法

算法的基本步骤为:粒子集初始化、状态转移、样本权值计算和重采样. 粒子滤波迭代收敛的条件设置设定为:第 $k+1$ 次与第 k 次迭代得到的状态估计值满足 $\tilde{x}_{k+1} - \tilde{x}_k < \epsilon$, 这里 $\epsilon = 0.1$; 显然, 越小, 迭代次数越多, 取 $\epsilon = 0.1$, 即可以得到较为理想的结果.

1. 构建初始粒子集. 在二维状态空间中, 在

$0 < x_1 < \frac{\max_{i=1,2,\dots,K} \{E_i\}}{E}$, $0 < x_2 < \frac{\max_{i=1,2,\dots,N_U} \{s_i\}}{G_U}$ 范围内, 产生均匀分布的 N 个随机向量, 做为初始粒子集

$$x_0 = \{x_0^{(i)}, w_0^{(i)}\}_{i=1,2,\dots,N}, w_0^{(i)} = \frac{1}{N}, \text{ 并令 } k = 1.$$

2 粒子状态转移. 由式 (7) 生成第 k 次迭代的粒子集 $x_k = \{x_k^{(i)}, w_k^{(i)}\}_{i=1:N}$.

3 对于 $i = 1:N$, 计算由阈值 $\tau_k^{(i)} = [\tau_{k,1}^{(i)}, \tau_{k,2}^{(i)}]^T$ 得到的目标提取的二值图, 由式 (15) 计算对应的权值 $w_k^{(i)}$, 同时由式 (5)、(6) 更新局部极值和全局极值.

4. 由式 (16) 计算第 k 次迭代阈值估计值 $\tilde{\tau}_k$, 若满足 $\tilde{\tau}_{k+1} - \tilde{\tau}_k < \epsilon$, 迭代结束, 以 $\tilde{\tau}_k$ 作为阈值的估计; 否则进行粒子集的重采样^[9], 并转 2.

2 实验结果与分析

本文中所有实验都是基于 Pentium 2.40GHz 的 PC 机上采用 VC++6.0 平台设计实现的. 实验采用信噪比不同的 5 幅红外图像, 如图 2(a)~(e) 所示.

图 2 中 (a)、(b) 和 (c) 图的信噪比较高, 使用本文算法取得了较好的效果, 将 2D 最大类间方差法应用于 (c), 2D 最大熵阈值方法应用于 (a)、(b) 也取得了较好的效果. 对于 (d)、(e) 两幅信噪比较低的图像来说, 2D 最大类间方差法和 2D 最大熵阈值方法效果并不理想, 使用本文提出的方法, 仍旧可以得到较好的效果.

在运算量上, 传统的 2D-Otsu 方法寻优的代价很大, 需要全局穷尽搜索, 进行 256×256 次计算, 文献 [2] 采用 PSO 方法进行寻优, 粒子群规模为 15, 迭代 11 次就可以收敛到全局最优, 总共运行熵函数 165 次. 在本算法中, 取粒子数为 15, 一般迭代 3 次即可满足收敛条件, 总共需要计算 45 次评价函数

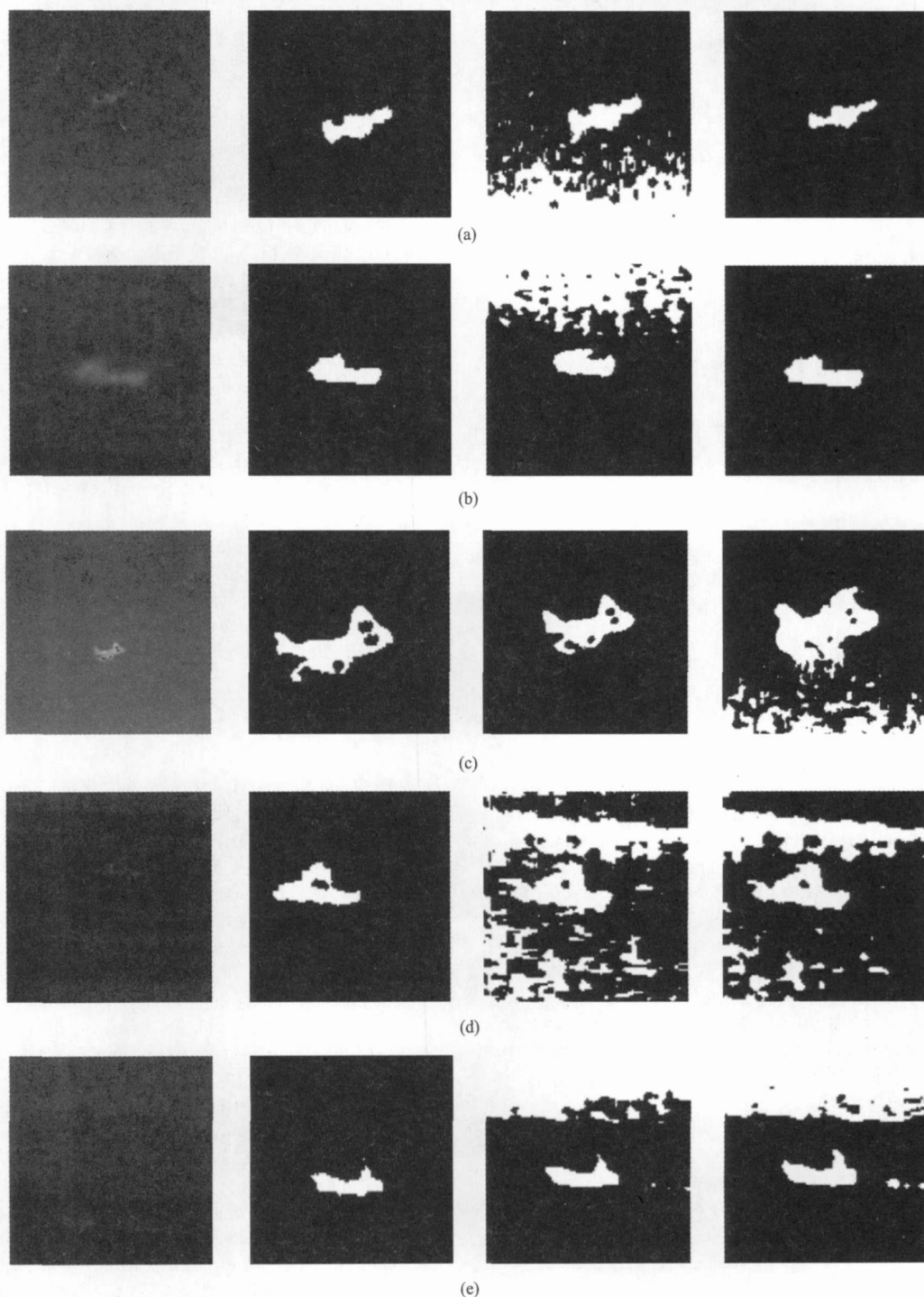


图 2 3种目标提取算法的提取效果比较,自左至右依次为原始图像、本文算法、2D最大类间方差法、2D最大熵阈值方法
 Fig 2 The comparison of 3 target extraction algorithms, the original image, our algorithm, 2D-Otsu, 2D-maximum entropy method from left to right

值,评价函数中的参数均可以在一次图像像素点遍历中完成计算.

3 结论

本文致力于解决低信噪比红外图像目标提取问

题,较已有的基于阈值的红外目标提取方法主要有两方面改进.首先,根据红外成像特点,有效综合了图像灰度、信息熵、梯度、像素点的空间位置等信息,与传统的 2D-Otsu方法相比,算法的稳健性显著提高.其次,以融合了粒子群优化思想的粒子滤波方法

计算阈值,与基于粒子群优化算法相比,减少了计算量.实验证明了本算法的有效性.

REFERENCES

- [1] ZHANG Tian-Xu, ZHAO Guang-Zhou, WANG Fei, *et al* Fast recursive algorithm for infrared ship image segmentation [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (张天序,赵广州,王飞,等.一种快速递归红外舰船图像分割新算法.红外与毫米波学报), 2006, 25(4): 295—300.
- [2] DU Feng, SHI Wen-KANG, DENG Yong, *et al* Fast infrared image segmentation method [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (杜峰,施文康,邓勇,等.一种快速红外图像分割方法.红外与毫米波学报), 2005, 24(3): 370—373.
- [3] SUN Wei, XIA Liang-Zheng Infrared target segmentation algorithm based on morphological method [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (孙伟,夏良正.一种基于形态学的红外目标提取方法.红外与毫米波学报), 2004, 23(3): 233—236.
- [4] TAO Wen-bing, JIN Hai Ship infrared object segmentation based on mean shift filtering and graph special clustering [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (陶文兵,金海.基于均值漂移滤波及谱分类的海面舰船红外目标分割.红外与毫米波学报), 2007, 26(1): 61—64.
- [5] REN Ji-jun, HE Ming-yi Level set method of image segmentation based on improved C-V model of 3-D histogram [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (任继军,何明一.一种基于三维直方图的改进 C-V 模型水平集图像分割方法.红外与毫米波学报), 2008, 27(1): 72—76.
- [6] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization [J]. *Neural Networks*, 1995, Proceedings, IEEE International Conference on Volume 4, 27 Nov. - 1 Dec 1995 Page(s): 1942—1948.
- [7] FANG Zheng, TONG Guo-Feng, XU Xin-He Particle swarm optimized particle filter [J]. *J. Control and Decision* (方正,佟国峰,徐心和.粒子群优化粒子滤波方法.控制与决策), 2007, 22(3): 273—277.
- [8] Isard M., Blake A. CONDENSATION—Conditional density propagation for visual tracking [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1998, 29(1): 5—28.
- [9] Cheng Jian Research on Visual Tracking Algorithms Based on Particle Filtering and Their Applications in Infrared Imaging Guidance [D]. Shanghai: Shanghai JiaoTong University, 2006 (程建.基于粒子滤波的视觉跟踪算法研究及其在红外成像制导中的应用.上海:上海交通大学), 2006: 31—32.
- [10] Lei Yang, Jie Yang, Ningsong Peng, *et al* Weighted Information Entropy: A Method for Estimating the Complex Degree of Infrared Images' Backgrounds [C]. *International Conference of Image Analysis and Recognition 2005 (ICIAR 2005)*. Lecture Notes in Computer Science 3656, 215—222.
- (上接 9 页)
- Radiation effects on photonic imagers—A historical perspective [J]. *IEEE Trans Nucl Sci* 2003, 50: 671—688.
- [2] HU Xin-Wen, ZHAO Jun, LU Hui-Qing, *et al* Gamma irradiation on room temperature short-wavelength HgCdTe photovoltaic device studied by admittance spectroscopy [J]. *Acta Physica Sinica* (胡新文,赵军,陆慧庆,等.辐照室温短波 HgCdTe 光伏器件的导纳谱研究.物理学报), 1999, 48(6): 1107—1112.
- [3] LIAO Yi, WANG Jian-Xin, ZHANG Qin-Yao Gamma radiation effects on MW IR HgCdTe FPA device [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics* (廖毅,王建新,张勤耀.中波红外焦平面阵列探测器辐照效应.量子电子学报), 2007, 24(1): 110—113.
- [4] Gopal V, Gupta S, Bhan R K, *et al* Modeling of dark characteristics of mercury cadmium telluride n^+p junctions [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2003, 44: 143—152.
- [5] Nguyen T H, Musca C A, Dell J M, *et al* The effects of vacuum baking on the I—V characteristics of LW IR HgCdTe photodiodes [J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5274: 433—441.
- [6] SUN Tao, CHEN Xin-Guo, HU Xiao-Ning, *et al* Low-frequency noise of $Hg_{1-x}Cd_xTe$ long-wavelength photovoltaic detector [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (孙涛,陈兴国,胡晓宁,等. $Hg_{1-x}Cd_xTe$ 长波光伏探测器的低频噪声研究.红外与毫米波学报), 2005, 24(4): 273—276.
- [7] ZHANG Xin-Chang, ZHANG Qin-Yao, XU Zhen, *et al* A study of interface electrical characteristics for CdTe/ZnS passivation films [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (张新昌,张勤耀,徐震,等. CdTe/ZnS 复合钝化膜的界面电学特性研究.红外与毫米波学报), 1996, 15(6): 417—422.
- [8] Willardson R K, Beer A C. *Semiconductors and Semimetals Vol 18* [M]. New York: Academic Press, 1981, 201.
- [9] Nemirovsky Y, Unikovsky A. Tunneling and 1/f noise currents in HgCdTe photodiodes [J]. *J. Vac Sci Technol B*, 1992, 10(40): 1602—1610.
- [10] Rais M H, Musca C A, Antoszewski J, *et al* Characterisation of dark current in novel $Hg_{1-x}Cd_xTe$ mid-wavelength infrared photovoltaic detectors based on non-p junctions formed by plasma-induced type conversion [J]. *J. Crystal Growth*, 2000, 214/215: 1106—1110.
- [11] QUAN Z J, LI Z F, HU W D, *et al* Parameter determination from resistance-voltage curve for long-wavelength HgCdTe photodiode [J]. *Journal of Applied Physics* 2006, 100: 084503.
- [12] QIAO Hui, ZHOU Wen-Hong, YE Zhen-Hua, *et al* study on variable-area hydrogenation of HgCdTe photovoltaic detectors [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (乔辉,周文洪,叶振华,等.碲镉汞光伏型探测器的变面积氢化研究.红外与毫米波学报), 2008, 27(6): 425—428.
- [13] CHU Jun-Hao *Narrow bandgap semiconductor physics* [M]. Beijing: Science Press (褚君浩.窄禁带半导体物理学.北京:科学出版社) 2005, 458.
- [14] CAO Jian-Zhong *Radiation effects of semiconductor materials* [M]. Beijing: Science Press (曹建中.半导体材料的辐射效应.北京:科学出版社), 1993, 66.