

# 基于完备格的重构滤波器在红外图像目标检测中的应用

胡 欣 唐 硕

(西北工业大学航天学院, 西安 710072)

**摘 要** 对红外图像中的目标进行检测和跟踪是精确制导武器中非常困难的也是急需解决的难点之一, 针对红外图像的特点, 提出了一种新的用于红外图像序列弱小目标检测和跟踪的处理方法, 并首先探讨了完备格下的图像连通性, 其重构滤波器具有简化图像, 并能保证轮廓完整的特性。该新方法包括帧内处理和帧间处理, 其中帧内处理使用灰度级重构 tophat 滤波器实现背景去除和图像简化, 再结合目标的灰度、形状、面积信息完成图像分割; 帧间处理使用目标的空间、时间运动信息实现序列的目标检测和跟踪。仿真实验结果表明, 这种方法在检测和跟踪红外图像中的弱小目标时, 具有有效性和鲁棒性。

**关键词** 红外目标 连通算子 完备格 重构滤波器 检测跟踪

中图法分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2008)01-0095-05

## Target Detection Using Filter by Reconstruction on Complete Lattices in Infrared Image

HU Xin, TANG Shuo

(College of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

**Abstract** Target detection and tracking in infrared image is hard and need to urgently resolve. A novel processing method for dim target detection and tracking in infrared image is proposed. Morphological filters by reconstruction on complete lattices have the fundamental property of simplifying the image while preserving contours. In infrared image, background and clutter can be extracted using reconstruction tophat operator. The proposed method includes intraframe and interframe. Intraframe processing uses reconstruction tophat operator to detect target combining with target grayscale, shape and area information. Interframe processing uses spatial and temporal criteria to track target. The experimental results show that the proposed method is efficient and robust to detect and track dim target in infrared images.

**Keywords** infrared target, connected operators, complete lattices, reconstruction filter, detect and track

## 1 引言

现代战争是以精确制导武器为核心的信息化、高技术战争, 红外成像制导具有灵敏度高、导引精度高、抗干扰能力强、隐蔽性好、可实现“发射后不管”、准全天候工作的特点, 已成为当今精确制导技术发展和研究的方向, 尤其是红外图像目标检测和跟踪更是目前研究的热点, 但由于前视红外 (forward

looking infrared, FLIR) 图像的信噪比低、目标边缘模糊、纹理信息少, 以至于难以提取出明显的特征和建立合适的目标运动模型, 从而使得从 FLIR 图像中检测和跟踪弱小目标成为非常困难的任务<sup>[1]</sup>。本文的目的就是为了克服以上的困难, 使用形态重构滤波器来建立鲁棒性和通用性强的算法, 以实现红外图像的目标检测和跟踪。

本文主要研究在完备格理论下, 使用重构滤波器结合目标运动特性来实现红外图像序列目标的检

收稿日期: 2006-05-08 改回日期: 2006-09-14

第一作者简介: 胡欣 (1975~), 女, 西北工业大学博士研究生。主要从事红外图像分割、目标检测和跟踪等的研究。Email: hu\_huxin@sina.com

测和跟踪。主要工作是通过完备格理论下的连通性和重构滤波器的分析,提出了一种使用帧内处理和帧间处理的目标检测和跟踪的处理方法,其中帧内处理中使用重构滤波器来进行图像简化和目标提取,并结合阈值处理、边界准则和面积准则实现图像分割;帧间处理是使用时间方向上的形态膨胀来去除随机出现的噪声,以检测出具有运动连续的真实目标。通过计算机仿真的结果表明,本文提出的方法能够检测和跟踪目标,具有有效性和鲁棒性。

## 2 完备格下的连通性

重构滤波器是属于连通算子范畴,常用在目标识别、噪声抑制和图像分割中<sup>[2,3]</sup>。连通算子是一类对图像平原实行准则运算的算子<sup>[4]</sup>(平原是指图像中有相同灰度级的连通区域),由于连通算子仅作用在平原上,因此具有删除、强化或减弱边界,同时不会移动或生成新边界的特性,在图像处理中用其能够达到简化图像,并保证轮廓完整的目的。图像的连通性是讨论连通算子和连通区域的基础,也是图像处理和分析中的重要概念<sup>[5]</sup>。

### 2.1 完备格

在集合论与格论中,若非空集合  $L$  中存在偏序关系“ $\leq$ ”(如果  $A, B \in L$ , 则意味着存在关系  $A \leq B$  或  $B \leq A$  或  $A$  与  $B$  没有可比性),且若这种偏序关系满足自反、反对称和传递性,则称  $(L, \leq)$  为偏序集。若在偏序集  $(L, \leq)$  中,任意族  $M$  都存在下确界  $\wedge M$  和上确界  $\vee M$ , 则称此偏序集为完备格。若集合的偏序关系是全序关系(也就是,如果  $A, B \in L$  意味着必然存在关系  $A \leq B$  或  $B \leq A$ )<sup>[6]</sup>, 则称完备格  $(L, \leq)$  是完备链。设完备格  $L$  中存在子集  $S$ , 若  $L$  中每个元素都是  $S$  中元素的上确界,则称  $S$  为  $L$  中的 sup 生成族,称  $S$  的元素为 sup 生成元。例如,集合  $E$  的幂集  $P(E)$  是完备格,由于幂集  $P(E)$  中的每个集合都能够由点集  $E$  中的某些元素的上确界得到,则点集  $E$  称为  $P(E)$  中的 sup 生成族<sup>[7]</sup>。

在完备格  $L$  中,连通类是格中的族  $c$ , 其满足 (1)  $0 \in c$  ( $0$  是格中的最小元); (2)  $S \subseteq c$ ; (3) 在  $c$  上的族  $\{C_\alpha: \alpha \in Z\}$ , 若  $\{\wedge C_\alpha \neq 0\}$ , 则  $\{\vee C_\alpha \in c\}$ 。图像的连通性由连通类定义,若连通类的元素是连通的,则称为连通成分  $C \in c$ 。

### 2.2 基于完备格的图像数学模型

一般认为,数字图像  $I$  可以看作是一个从离散

平面  $Z^2$  的有限矩形子集  $E$  到灰度级离散集合  $\{0, 1, \dots, K\}$  ( $K$  对应灰度图像的最大灰度值)的函数或映射。特别地,二值图像  $I$  可看作灰度级离散值仅取 0 或 1,通常将值为 1 的像素的集合作为二值图像的模式,因此在完备格理论下,推出 3 个以下与本文有关的图像的数学模型<sup>[4]</sup>。

(1) 由集合  $E$  的所有子集的集合( $E$  的幂集)组成集合  $L = P(E)$ , 且将子集间的包含关系作为幂集  $P(E)$  上的偏序关系,下确界和上确界分别由集合间的交和并得到,因此  $(P(E), \subseteq)$  是一个完备格,且这个格可作为定义在  $E$  上的二值图像的数学模型;

(2) 扩展实数集合  $\bar{R} = R \cup \{-\infty, \infty\}$  和扩展整数集合  $Z = Z \cup \{-\infty, \infty\}$  及其任何闭子区间,当使用数的排序作为偏序关系,则可以组成完备链  $L$ , 其中上确界和下确界是数的上确界和下确界,且这些链可以作为与图像对应的灰度值的模型;

(3) 从集合  $E$  到格  $L$  的所有函数的集合  $Fun(E, L)$  组成完备格,并满足偏序关系  $f \leq g \Leftrightarrow f(v) \leq_L g(v), \forall v \in E, f, g \in Fun(E, L)$ , 其中  $\leq_L$  是  $L$  上的偏序关系。上确界和下确界为  $(\vee f_\alpha)(v) = \vee f_\alpha(v), (\wedge f_\alpha)(v) = \wedge f_\alpha(v), \alpha \in Z \forall v \in E$  即逐点求取上确界和下确界,等式中右边是在  $L$  中求上确界和下确界(上确界  $\vee$  或下确界  $\wedge$  表示逐点比较求取最大值或最小值)。当  $L$  是链,且取  $L = \{0, 1, \dots, K\}$  时,则这个格可表示定义在  $E$  上灰度离散图像的数学模型(其他类型图像,例如多光谱图像、视频图像等,可以通过适当选取格  $L$  建模)<sup>[2]</sup>。

### 2.3 完备格下的连通性

取  $x$  是任意 sup 生成元,连通开定义为从集合  $A$  中抽取由  $x$  标识的连通成分,即

$$\nu_x(A) = \vee \{C \in c \mid x \leq C \leq A\}, A \in L, \forall x \in S$$

标识不仅限于 sup 生成元,若将其推广到任意标识,则连通开可扩展到重构运算,假设元素  $N \in L$  为标识,则可从  $N$  中对  $A \in L$  进行重构运算:  $\rho(A \mid N) = \vee_{x \leq N} \nu_x(A)$ 。灰度级重构运算  $\rho: Fun(E, L) \times Fun(E, L) \rightarrow Fun(E, L)$  的函数  $\rho(f \mid g)(v) = \vee \{t \in L \mid v \in \rho(X_t(f) \mid X_t(g))\}, v \in E$ , 其中  $X_t: Fun(E, L) \rightarrow P(E)$  是阈值分解运算:  $X_t(f) = \{v \in E \mid f(v) \geq t\}$ <sup>[6]</sup>。

由于  $\rho(f \mid \cdot)$  是  $Fun(E, L)$  的非递增运算<sup>[1]</sup>, 则有  $\rho(f \mid \cdot) \leq f$ , 重构 tophat 运算定义为  $\rho_{\text{tophat}}(f) = f - \rho(f \mid \cdot) \geq 0$ 。图 1 是 1 维的灰度级重构和重构 tophat 运算结果。若选取掩模图像  $f$  与结构元素  $B$

的腐蚀结果作为标识图像  $g = f \ominus B$ , 则重构 tophat 运算定义为  $\rho_{\text{tophat}}(f) = f - \rho(f|f \ominus B)$  (如图 1(c) 所示), 由该图可见, 该运算可实现峰值部分的提取。

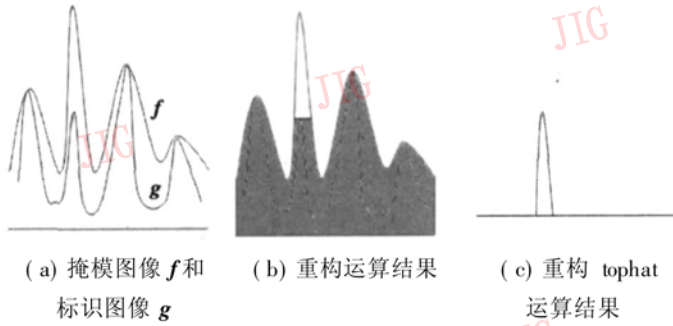
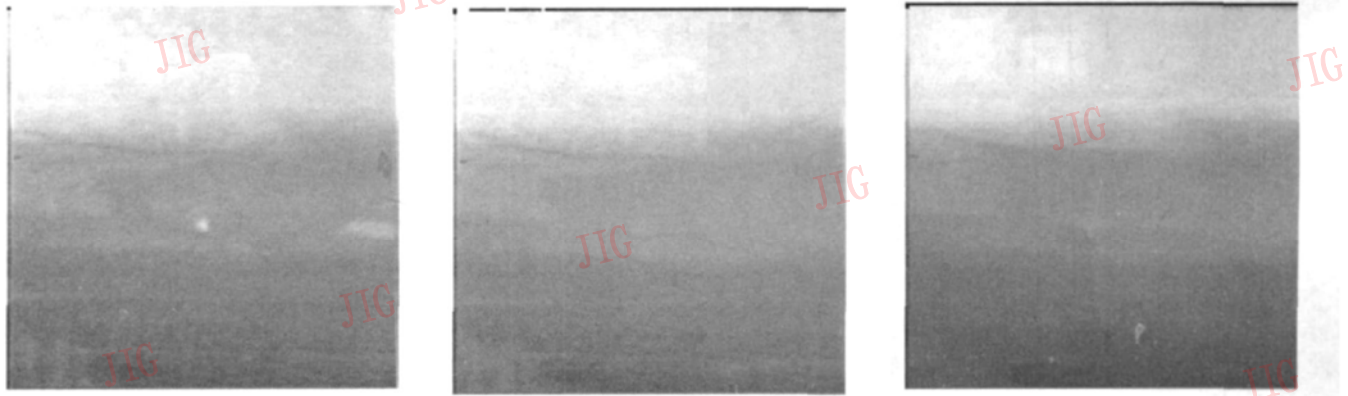


图 1 1 维的重构运算过程

Fig 1 Grayscale reconstruction

### 3 灰度级重构滤波器的应用

本文提出的红外图像处理方法分帧内处理和帧



(a) FLIR 图像

(b) 重构运算结果

(c) 形态开运算结果

图 2 背景提取结果

Fig 2 Background extract

#### 3.1.2 目标提取和图像增强

运用重构 tophat 运算可得到图像的峰值部分 (目标) 见图 3(b), 经过对比度调整后的图像增强结果见图 3(c)。由仿真结果可见, 使用重构 tophat 运算可达到简化图像、分割出目标同时保持图像边缘信息的目的。表 1 给出了重构 tophat 运算后的图像与原始图像信噪比的比较, 表 1 中数据更好地说明了重构 tophat 运算对噪声的抑制作用。

#### 3.1.3 阈值处理

为了更好地检测出真实目标, 本步骤使用阈值处理得到二值化图像。由于杂波背景的多变性, 使得目标的灰度特征在整个序列上变化比较大, 因此

间处理两部分。选取实验用的 FLIR 图像的长度为 100 帧, 每帧大小为  $128 \times 128 \text{ pixels}$ , 图像灰度级是 0~255, 实验采用 Matlab 7.0.4 软件平台实现。

#### 3.1 帧内处理

帧内处理的主要目的是简化图像、分割出目标提高图像信噪比, 以有利于进行帧间处理。

##### 3.1.1 背景提取

因 FLIR 图像中的目标一般处于灰度级较高部分, 代表图像灰度的峰值, 故此可利用重构运算去掉所有比结构元素  $B$  小的目标, 首先得到去除目标的背景图像<sup>[1]</sup>。针对红外图像中的弱小目标, 选择  $10 \times 10$  大小的方形结构元素进行重构开运算, 就可以达到去除目标, 提取背景的目的。图 2 给出了利用重构运算和一般形态开运算进行背景提取的结果比较, 图 2(b) 是重构运算结果, 图 2(c) 是形态开运算结果, 两者相比较, 重构运算更加真实地提取出了原图的背景, 而形态开运算结果则与原图偏离较大。

表 1 图像处理结果信噪比比较

Tab 1 The SNR Comparison of processing results

帧数	信噪比 (dB)			
	4	34	64	94
原始图像	0.78267	1.0636	2.1164	2.1799
重构 tophat	9.7218	10.265	7.6244	8.2078

使用单一的阈值不可能在整个序列上都适用。由于经过滤波后的背景噪声可近似看作是高斯白噪声, 因此可选取自适应变化的动态阈值

$$T(i) = \text{mean}(i) + \lambda \times \text{var}(i)$$

其中,  $\text{mean}(i)$ 、 $\text{var}(i)$  和  $\lambda$  分别代表第  $i$  帧图像的灰度均值、方差和权值, 权值的取值范围一般是 3~10

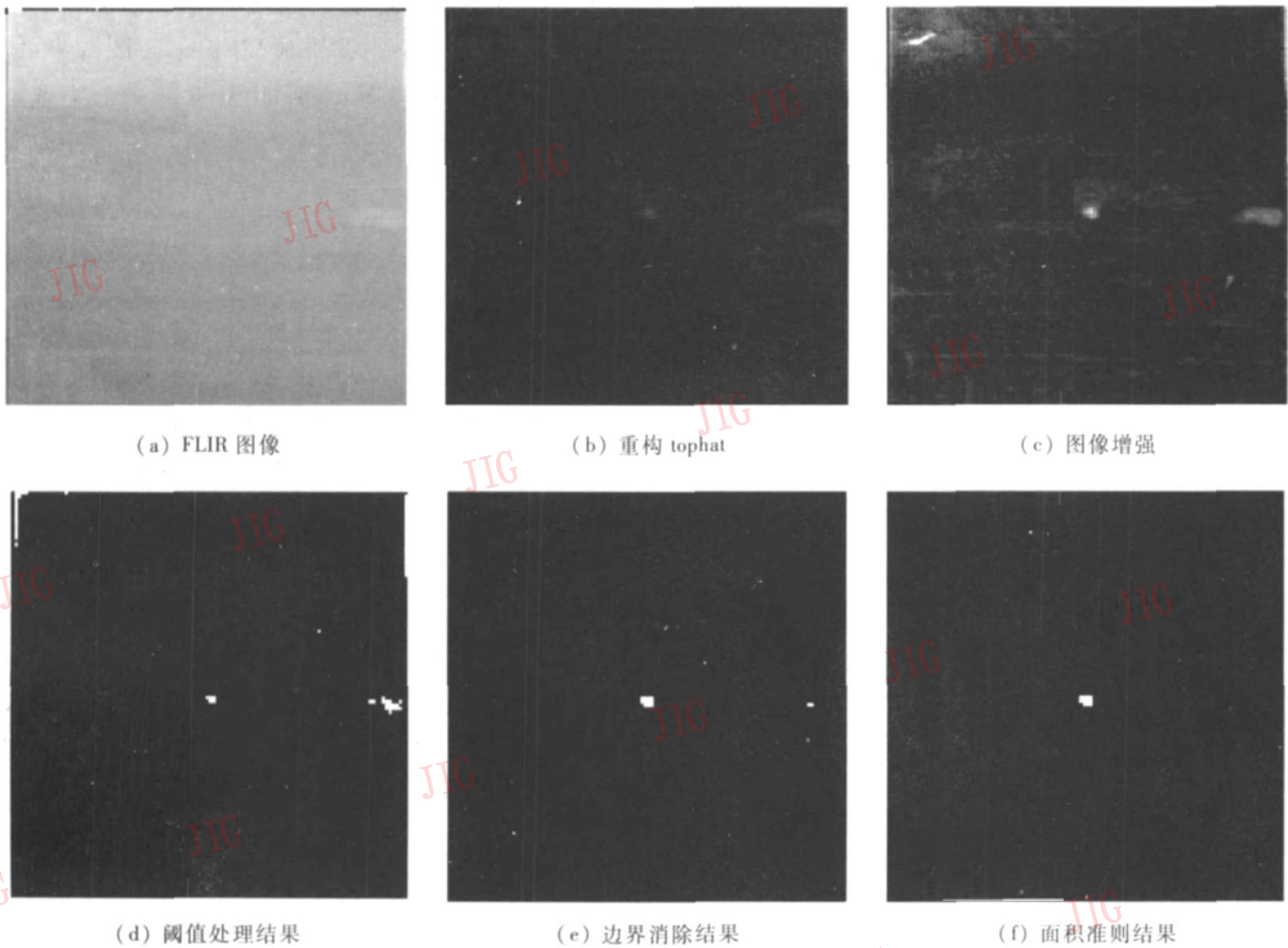


图 3 帧内处理

Fig. 3 Intraframe process

经过多次实验, 本文选取权值为 6。图 3(d) 给出阈值处理的结果, 由该图可见, 虽然已很好地提取出了目标, 但虚假目标也同时存在。

### 3.1.4 边界消除准则和面积准则

为了消除虚假目标, 可使用面积准则和边界消除准则。由于图像边界处灰度发生骤变, 致使情况比较混乱<sup>[3]</sup>。消除虚假目标时, 可首先引入边界消除原则, 即认为在实际情况下, 目标不会出现在边界, 且离边界有一定距离。这与实际情况是没有矛盾的, 帧内处理的边界消除结果见图 3(e); 然后引入面积准则, 即弱小目标在红外图像中的面积不得小于  $r$  个像素, 因为这样才可以去除噪声引起的尖脉冲和随机出现的小杂波, 面积准则处理结果见图 3(f)。

### 3.2 帧间处理

帧间处理的目的是为了在红外图像序列中实现目标的检测和跟踪。由于帧内处理后, 图像虽然去除了大部分噪声, 但仍有可能存留着虚假噪声, 因此要加以虑除。在序列图像中, 由于可认为目标的运

动是连续的, 因此按照目标在时间上的运动相关性即可达到检测和跟踪目标的目的, 而具有运动连续性的目标即认为是真实目标。

假设在第  $i$  帧中的目标出现在点  $(x, y)$  处, 由于该目标在第  $i+1$  帧中必然会在该点的一个小邻域内出现, 因此利用时间方向上的形态膨胀, 就可使得目标在第  $i$  帧和第  $i+1$  帧经过形态膨胀运算后, 其具有时间重叠的部分即可认为是运动轨迹连续的真实目标; 但由于噪声分布的随机性, 致使在连续多帧的图像中的噪声块没有出现这种重叠, 这样就可以区分出目标与假目标<sup>[1]</sup>。

帧间处理中要选择合适的结构元素进行形态膨胀运算, 为了提高检测概率, 需要对  $m$  帧图像进行关联, 本文选择  $m=4$ 。特别地, 由于在初始处理阶段, 通过帧间处理能够实现自动目标检测, 因此在第 4 帧系统会自动捕获目标。

图 4 给出了使用  $m$  帧图像进行帧内和帧间处理后的目标检测和跟踪的结果, 处理中选择半径为 5 的圆形结构元素。仿真结果表明, 使用本文提出

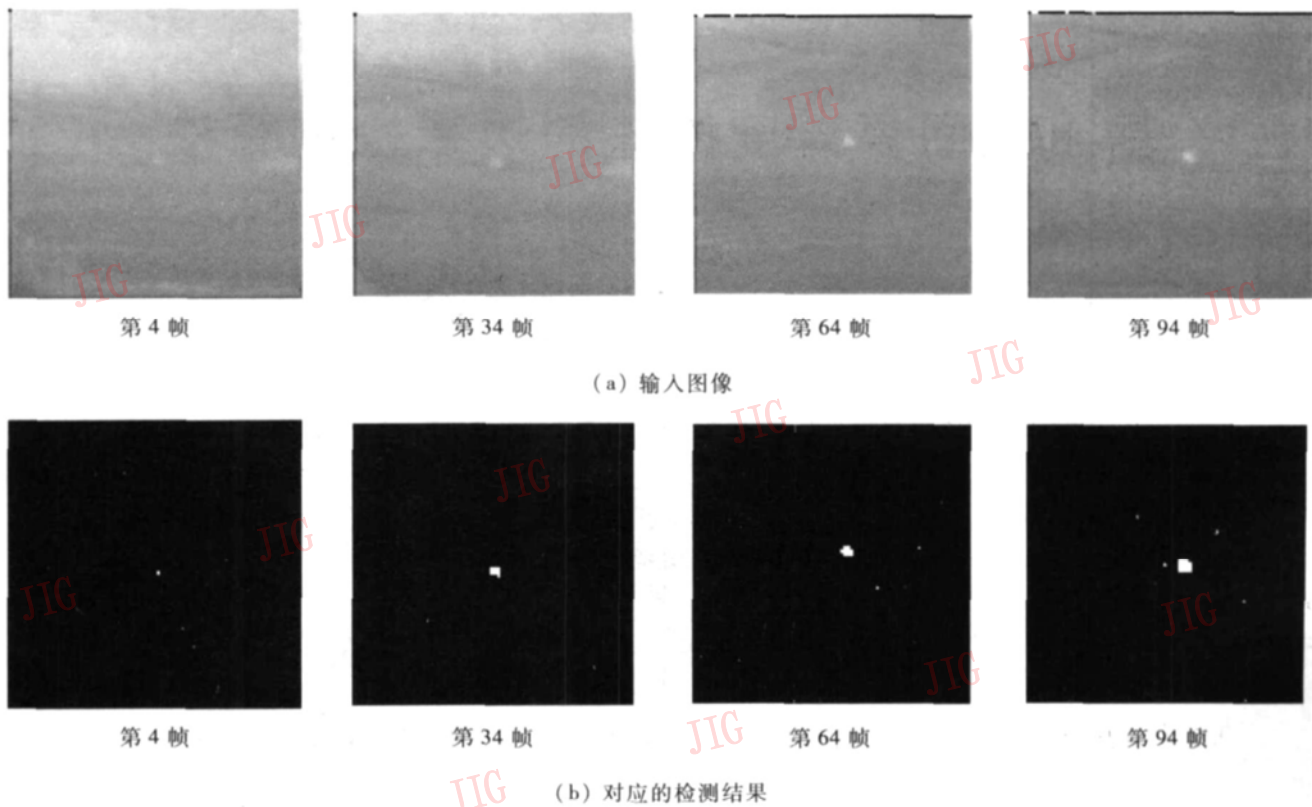


图 4 红外目标检测与跟踪结果

Fig. 4 Result of FLIR target detection and tracking

的方法可以有效检测和跟踪红外图像序列中的弱小目标。图 4 为实验中每隔 30 帧的检测结果。

## 4 结 论

本文首先在完备格理论下, 深入地讨论了灰度图像的连通性和灰度图像的重构运算; 然后分析了重构运算具有的能够强化或减弱边界, 且不会产生新的边界或移动边界的特性; 最后本文利用重构 *tophat* 滤波器, 提出了一种在红外图像序列中进行目标检测和跟踪的新方法, 该方法分为帧内和帧间处理两步来对序列的 *FLIR* 图像中的弱小目标进行了检测, 仿真结果表明, 本文提出的处理方法具有有效性和鲁棒性, 也证实了重构 *tophat* 滤波器是有效的图像去噪滤波器。

### 参考文献 (References)

- 1 Braga-Neto Ulises de Mendonca Automatic target detection and tracking in forward-looking infrared image sequences using morphological connected operators[ J]. Journal of Electronic Imaging 2004 13 (4): 802~ 813
- 2 Salmbier P, Serra J Flat zones filtering connected operators and filters by reconstruction[ J]. IEEE Transactions on Image Processing 1995 4(8): 1153~ 1160
- 3 Ren Huo-rong Zhang Ping Wang Jia-li A Method for small target detection based on energy accumulation and morphological opening by reconstruction in infrared image sequences[ J]. Infrared Technology 2003 25(6): 28~ 31 [任获荣, 张平, 王家礼. 基于能量积累和形态重构开的红外图像序列小目标检测方法[ J]. 红外技术, 2003 25(6): 28~ 31.]
- 4 Heijnans H J A M. Connected morphological operators for binary images[ J]. Computer Vision and Image Understanding 1999 73(1): 99~ 120
- 5 Braga-Neto Ulises de Mendonca John Goutsias Connectivity on complete lattices New results[ J]. Computer Vision and Image Understanding 2002 85(1): 22~ 53
- 6 Braga-Neto Ulises de Mendonca Connectivity in Image Processing and Analysis Theory, Multiscale Extensions and Applications[ Ph. D. dissertation][ D]. Baltimore Maryland, USA: The Johns Hopkins University, 2001.
- 7 Braga-Neto Ulises de Mendonca John Goutsias Grayscale level connectivity: Theory and applications[ J]. IEEE Transactions on Image Processing 2004 13(12): 1567~ 1580