

文章编号:1004-4213(2011)09-1423-5

采用视觉细胞响应模型的小目标复杂背景抑制

秦翰林^a, 韦桂锋^a, 周慧鑫^a, 赖睿^b, 刘上乾^a

(西安电子科技大学 a. 技术物理学院; b. 微电子学院, 西安 710071)

摘 要: 为了提高地面和云层等红外复杂背景下弱小目标的检测性能, 提出了一种基于视觉细胞响应模型的红外弱小目标背景抑制新方法. 首先利用简单细胞的感受野计算模型将原始图像采用 Gabor 函数卷积获得相同大小的两幅图像; 然后采用设计的复杂细胞响应的非线性汇聚策略函数对获得的两幅图像进行融合处理, 从而将红外图像中弱小目标和背景杂波分离, 达到抑制背景的目的; 最后采用自适应阈值分割技术得到目标点, 实现了对红外弱小目标的检测跟踪. 实验结果显示, 与去局部均值和最大中值滤波两种滤波方法相比较, 该方法能有效地检测出信杂比较低的弱小目标信号.

关键词: 目标检测; 背景抑制; 视觉感知模型; 细胞响应模型

中图分类号: TP391.4

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20114009.1423

0 引言

复杂背景条件下红外弱小运动目标检测是监视告警、精确制导和光电火控系统的关键技术之一, 已经成为国内外的研究热点. 典型的复杂红外背景包括: 强起伏云层、地面路网和地势起伏以及低空地面和天空混合背景等. 为解决这些复杂背景对目标检测性能的影响, 人们提出了包括时域滤波^[1]、空域滤波^[2-6]、小波域滤波^[7-8]、统计学习理论^[9]和偏微分方程^[10]等方法来抑制复杂背景. 这些方法在滤波性能、背景杂波自适应性和可实现性方面各有千秋, 其中的去局部均值滤波^[1]和最大中值滤波^[5]在可实现性方面具有一定的优势, 在很多场合得到了实际的应用. 但是, 当背景的局部结构化特征比较强的时候, 比如云层、道路的强边缘, 这类滤波方法就不能很好地平滑边缘, 即不能有效地进行背景抑制, 从而导致检测概率的降低、虚警率增大.

基于此, 本文提出了一种新的视觉细胞响应模型来解决红外图像弱小目标背景抑制任务. 该方法能适应不同信杂比、对比度、边缘、几何和纹理信息的复杂背景, 增强其突变部分, 即目标信号. 通过真实和模拟的红外图像序列抑制结果验证了该方法的有效性, 并与去局部均值(Local Means Remove, LMR)和最大中值(Max Median, MMed)滤波方法

作了定性的对比和定量分析.

1 基于细胞响应模型的红外弱小目标背景抑制

背景抑制作为检测和跟踪的基础, 主要是指从图像序列中抑制背景并保留和增强目标灰度的过程. 只有及时地在将背景灰度信息抑制的同时增强目标灰度信息, 才能保证后续检测和跟踪等处理环节顺利展开. 由于导弹逼近告警系统对目标的检测跟踪主要是由弱小点源目标到面目标的检测跟踪过程, 所以如果在弱小目标阶段能准确地检测出目标, 然后牢牢地锁定并检测跟踪, 则后续的面目标和大目标的检测跟踪就可以省去背景抑制这一过程而只进行跟踪. 因此, 弱小目标背景抑制性能的好坏将直接决定导弹逼近告警系统的有效作用距离及设备的复杂程度, 它在导弹逼近告警系统中发挥着举足轻重的作用.

通过对红外成像场景内容的分析, 红外弱小目标辐射强度与周围复杂自然背景的辐射强度无关, 目标的强度在整幅图像中即使不是最强的, 但与其所处的局部背景间的强度差异较明显, 而且一般高于局部背景的辐射强度; 另一方面, 强度较高的非目标背景图像通常与周围背景间无明显强度差异. 由此可知, 目标和背景杂波信息在空间频率和方向上

基金项目: 国家自然科学基金(No. 60902080)、中央高校基本科研业务费专项资金(No. 72005623, No. 72104810)和教育部科学技术研究重点项目(No. 108114)和资助

第一作者: 秦翰林(1982-), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为光电成像及其图像处理. Email: hlqin@mail.xidian.edu.cn

收稿日期: 2011-03-15; **修回日期:** 2011-05-06

存在不同的分布. 因此, 可利用生物视觉感知中复杂细胞响应模型对输入图像的频率和方向进行选择, 最终完成对复杂背景的抑制.

1.1 细胞响应模型

在生物视觉感知中, 复杂细胞响应模型输入连接的非线性汇聚策略是复杂细胞感受野生成的关键因素. 复杂细胞的汇聚是一个非线性过程, 显著区别于简单细胞的线性叠加过程, 然而对于有关汇聚的具体操作和计算模型却有着多种不同的观点. 其中一种计算模型将复杂细胞的响应表示为两个简单细胞^[11], 即细胞的最优响应是两个具有相同朝向和频率, 相位相差 $\pi/2$ (90°) 的响应的平方和. 这主要是因为当具有一定朝向和宽度的条形刺激出现在简单细胞感受野内某个特定位置时, 细胞的响应最强; 当刺激偏离该朝向或者位置时, 响应急剧降低, 甚至消失, 也就是说, 简单细胞对视觉刺激模式呈现方向、位置和空间频率的选择性. 因此, Daugman 提出用 Gabor 函数来模拟简单细胞的感受野结构^[12-14], Gabor 函数定义为高斯包络函数和余弦谐波函数的乘积, 空间域的 Gabor 函数定义如式(1)

$$g(x, y) = \cos(2\pi v \sqrt{x^2 + y^2}) \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \cdot \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

在简单细胞用 Gabor 函数表示的基础上, 非线性性汇聚的计算模型数学表述如式(2)

$$C'(I) = \varphi[C_1(I), C_2(I)] = \varphi\left\{\left[\sum_{(x,y)} g_1(x, y) \cdot I(x, y)\right]^2, \left[\sum_{(x,y)} g_2(x, y) \cdot I(x, y)\right]^2\right\} \quad (2)$$

式中, φ 为定义的非线性策略函数, g_1 和 g_2 是相位相差 $\pi/2$ 的两个 Gabor 函数, 即两个感受野方向正交的简单细胞, $I(x, y)$ 为待处理的红外图像.

在一般复杂细胞响应模型^[15-16]中, 式(2)表示为两个线性操作的平方和, 即

$$C'(I) = \varphi[C_1(I), C_2(I)] = C_1(I) + C_2(I) = \left[\sum_{(x,y)} g_1(x, y) I(x, y)\right]^2 + \left[\sum_{(x,y)} g_2(x, y) \cdot I(x, y)\right]^2 \quad (3)$$

因此, 式(3)也称为“能量模型”, 如图 1.

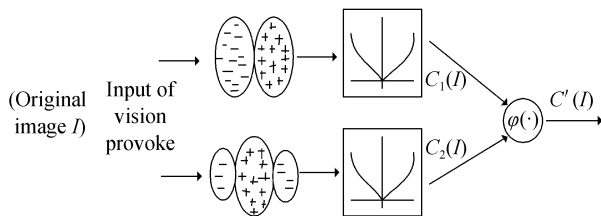


图 1 复杂细胞响应模型

Fig. 1 Model of the complex cell response

1.2 基于改进的细胞响应模型小目标背景抑制

为了检测出包含在复杂背景中的弱小目标信号, 在此处, 图 1 中的输入视觉刺激被设定为待处理的包含弱小目标的红外图像. 区别于以往方法运用背景抑制算子对一帧图像或投影空间进行抑制, 同时也不是简单的相加运算, 而是将抑制算子应用于细胞响应能量模型分解后子块构成的两幅图像 $C(I)$, 采用为保留目标信号而设计的新的非线性汇聚策略函数 φ 进行背景抑制, 形式如式(4).

$$C'(I) = \varphi[C_1(I), C_2(I)] = [C(I) - \hat{m}]^T \cdot R^{-1}[C(I) - \hat{m}] \quad (4)$$

式中, $C'(I)$ 为经过背景抑制后的 $M \times N$ 大小目标图像, $C(I) = \begin{pmatrix} C_1(I) \\ C_2(I) \end{pmatrix}$ 为原始图像经过细胞响应能量模型分解后形成的 $M \times N \times 2$ 多值图像, $M \times N$ 表示单幅图像的尺寸, $\hat{m} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 C(I)_i$ 为样本均值向量, $R = \sum_{i=1}^2 [C(I)_i - \hat{m}][C(I)_i - \hat{m}]^T$ 为图像的样本协方差矩阵.

通过计算式(4)所设计的新的非线性汇聚策略函数结果来寻找在两组红外图像中是否存在弱小目标信号. 如果细胞响应能量模型中有弱小目标信号, 那么其对应的能量也会很小, 并且与协方差矩阵 R 的小特征值相对应, 而特征值越小, $C'(I)$ 则越大, $C'(I)$ 中目标图像的弱小目标信息就越明显. 这就是非线性汇聚策略能够有效地将细胞响应能量模型分解后构成的多值图像中相应的弱小目标信号检测出来的原因所在.

本文提出的基于视觉细胞响应模型 (Vision Cell Response Model, VCRM) 方法步骤为:

1) 首先对原始红外图像采用两个相位相差 $\pi/2$ 的 Gabor 函数实现原始图像分解获得 $C_1(I)$ 和 $C_2(I)$, 如式(5)

$$C_p(I)(m) = I(m) * g_p(m) \quad (5)$$

式中, $p=1, 2$.

2) 然后将分解后形成的不同简单细胞响应下的目标和背景图像排列成多值图像如式(6), $C(I)$ 的维数为 $M \times N \times 2$.

$$C(I) = \begin{pmatrix} C_1(I) \\ C_2(I) \end{pmatrix} \quad (6)$$

3) 利用设计的新的非线性汇聚策略函数 (如式(4)) 进行处理, 具体实现为: 首先计算 $C(I)$ 中两个 $M \times N$ 大小的图像的均值 $\hat{m}(p)$, 其中 $p=1, 2$, 获得中间参量 $A = C(I) - \hat{m}$; 其次, 计算 $C(I)$ 的协方

差矩阵 \mathbf{R} , 形成 2×2 大小的矩阵; 然后计算中间变量 $te(p) = A(i, j, p)$, 此时可得 $C'(I)(i, j) = te(inv(R))te'$, inv 为矩阵求逆操作; 最后遍历整个 $M \times N$ 个像素, 计算结果即为抑制大量杂波背景后的仅包含目标信息的图像。

2 实验结果与分析

程序在配置酷睿 2 代 2.66 GHz 和 2 GB 内存的 PC 机平台上完成仿真实验程序的调试, 编程环境为 Matlab 7.1. 本文给出了两组采用细胞响应模

型进行弱小目标背景抑制的实例. 测试对象为 128×128 大小的红外图像. 图 2(a) 和 (b) 分别为两组序列中的两帧原图; 图 2(c) 和 (d) 为采用 LMR 方法^[1] 的处理结果, 图 2(e) 和 (f) 为采用 MMed 方法^[5] 的处理结果; 图 2(g) 和 (h) 为本文方法的处理效果. 处理前后评价参量^[17] 数值如表 1, 其中 SCR_{in} 和 CR_{in} 分别表示输入信杂比和对比度, $ISCR$ 和 ICR 分别为信杂比增益和对比度增益, EST 为运算时间, 单位为秒。

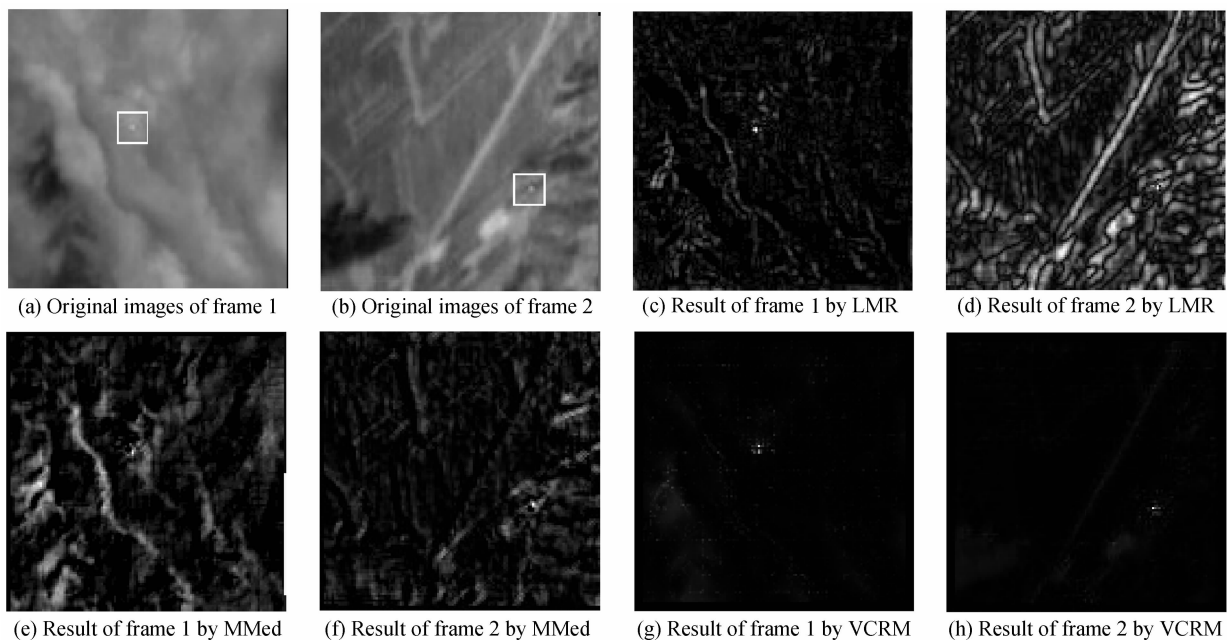


图 2 LMR、MMed 方法和本文方法的性能比较

Fig. 2 Performance comparison the proposed method with LMR and MMed

表 1 不同方法性能比较

Table 1 Performance comparison of different methods

Original information		LMR					MMed				VCRM			
Index	SCR_{in}	CR_{in}	ISCR	ICR	BSF	EST	ISCR	ICR	BSF	EST	ISCR	ICR	BSF	EST
Frame 1	1.41	2.66	2.14	8.41	5.92	0.36	1.89	8.83	5.95	0.36	3.64	12.43	5.99	0.27
Frame 2	0.96	5.51	2.10	4.32	2.94	0.36	1.94	6.63	3.48	0.34	4.30	13.72	4.75	0.27

由结果可以看出, 原始图像中目标仅占一个或几个像元, 呈现为点状, 无形状与结构特征, 且强度较弱, 特别是图 2(a) 和 (b) 中的目标更是被强烈的结构化路网和起伏云层干扰. 采用 LMR 方法处理后, 目标虽然被增强, 但同时背景也被增强, 而没有被较好地抑制; 采用 MMed 方法处理后, 目标被增强, 大面积的背景也被抑制, 但同时云层边缘、地面路网边缘也得到加强; 这样必然会影响后续的检测、跟踪和告警等处理环节。

而采用 VCRM 方法处理后, 在很好地保存并增强弱小目标信号的同时较好地抑制了结构化背景. 特别对目标受到大面积云层和地面路网干扰的情况, 与 LMR 和 MMed 方法结果相比较, 该方法不但

剔除了云层和地面内部高亮区域, 而且能较好地平滑掉云层、地形和地面路网的强边缘。

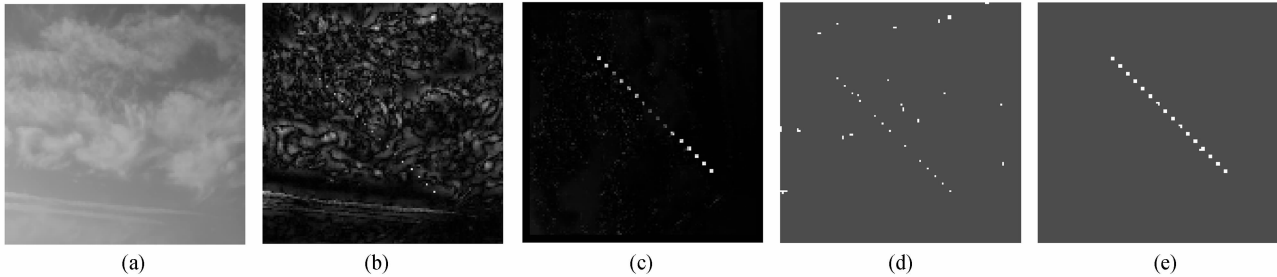
传统 LMR、MMed 和 VCRM 方法运算性能如表 1. 信杂比增益达 3 倍以上, 对比度增益达 12 倍以上, 背景抑制因子达 4 倍以上, 使得图像整体信杂比和对比度得到了很大改善。

此外, 与 LMR 和 MMed 方法处理单帧图像的时间相比, 本文方法所需时间较小, 同时所提方法在采用 Gabor 函数实现原始图像分解阶段还可并行操作, 从而为本文方法的软硬件实现提供了便利, 如表 1. 这也正是基于视觉感知模型方法的优越之处。

为了进一步验证方法的稳定性和对复杂环境的适应能力, 用单帧处理效果较好的 MMed 和 VCRM

方法进行比较. 图 3(b)和(c)分别为 MMed 和 VCRM 方法结果对序列图像背景抑制效果在时间轴上的投影; 图 3(d)和(e)分别是对图 3(b)和(c)进行自适应阈值分割的结果. 实验结果显示, MMed 方法仍然包含许多高、亮杂波区域和纹理边缘以及其它残留的杂波, 而 VCRM 法将云层背景的边缘、纹理和高亮区域均很好的剔除. 实验结果验证了

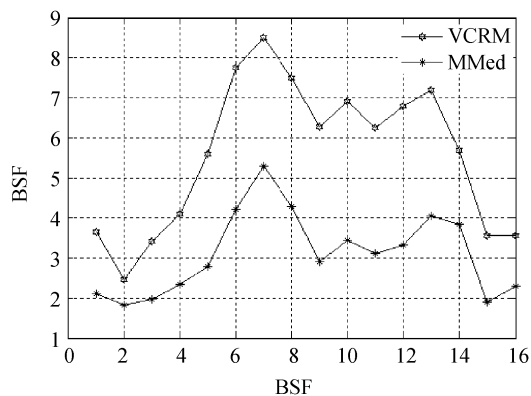
VCRM 方法在抑制背景的同时保留并增强弱小目标的能力比 MMed 方法要好. 同时针对云层背景, 采用 ISCR 和 BSF 两个指标从定量地角度对 MMed 和 VCRM 两种方法的背景抑制效果进行比较. 图 4 给出了 MMed 和 VCRM 方法在处理序列图像时具体每帧的参量数值的比较, 从结果可以明显看出, 所提的 VCRM 方法的量化指标均高于 MMed 方法.



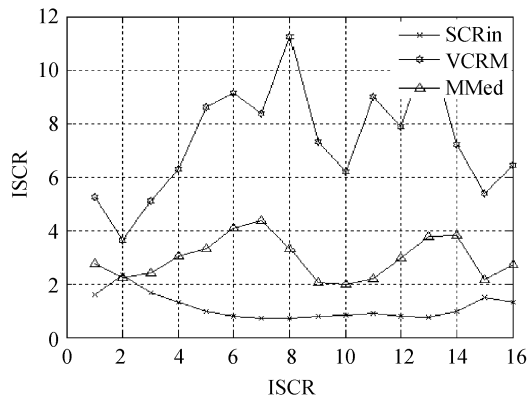
(a) The 3rd frame of the image sequence; (b) The projection of all the MMed's filtered results on a time coordinate for image sequence; (c) The projection of all the VCRM's filtered results on a time coordinate for image sequence; (d) Segmented result of (b); (e) Segmented result of (d)

图 3 MMed 和本文方法性能比较

Fig. 3 Performance comparison the proposed method with MMed



(a) BSF with respect of frame number of image sequence



(b) ISCR with respect of frame number of image sequence

图 4 图像序列比较分析

Fig. 4 Experimental comparative analysis of image sequence

3 结论

本文提出的基于生物视觉细胞响应计算模型的红外弱小目标背景抑制方法, 利用生物视觉感知模型的非线性汇聚策略实现背景抑制, 最终实现对目标的检测. 实验结果表明, 本文方法能取得比其它方

法更好的结果, 在有效抑制图像中背景杂波细节和纹理的同时, 更大限度地保持和增强了目标信息, 在视觉效果和客观衡量指标两方面都取得了更优的效果.

参考文献

- [1] CHEN J Y, REED I S. A detection algorithm for optical targets in clutter[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1987, **23**(1): 46-59.
- [2] LI Hong, WEI Yan-tao, LI Luo-qing. Infrared moving target detection and tracking based on tensor locality preserving projection[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2010, **53**(2): 77-83.
- [3] QIN Han-lin, ZHOU Hui-xin, LIU Shang-qian. Dim and small target background suppression using bilateral filtering[J]. *High Power Laser and Particl E Beams*, 2009, **21**(1): 25-28.
秦翰林, 周慧鑫, 刘上乾. 基于双边滤波的弱小目标背景抑制[J]. *强激光与粒子束*, 2009, **21**(1): 25-28.
- [4] GUO J F, CHEN G L. Analysis of selection of structural element in mathematical morphology with application to infrared point target detection[C]. *SPIE*, 2007, **6835**: 683 50P-1-683 50P-8.
- [5] DESHPANDE S D, ER M H, VENKATESWARLU R, et al. Max-mean and max-median filters for detection of small targets[C]. *SPIE*, 1999, **3809**: 71-83.
- [6] YILMAZ A, SHAFIQUE K, SHAH M. target tracking in airborne forward looking infrared imagery[J]. *Imaging Vision Computing*, 2003, **21**(7): 623-635.
- [7] DAVIDSON G, GRIFFITHS H D. Wavelet detection scheme for small target in sea clutter[J]. *IEEE Electronics Letters*, 2002, **38**(19): 1128-1130.
- [8] YANG L, YANG J, YANG K. Adaptive detection for infrared small target under sea - sky complex background[J]. *Electronics Letters*, 2004, **40**(17): 1083-1085.
- [9] WANG P, TIAN J W, GAO C Q. Infrared small target detection using directional high-pass filters based on LS-SVM[J]. *Electronics Letters*, 2009, **45**(3): 156-158.
- [10] ZHANG Bi-yin, ZHANG Tian-xu, CAO Zhi-guo, et al. Fast

- new small target detection algorithm based on a modified partial differential equation in infrared clutter [J]. *SPIE Optical Engineering*, 2007, **46**(10): 106401-1-6.
- [11] HINTON G E. Learning multiple layers of representation [J]. *Trends in Cognitive Sciences*, 2007, **11**(10): 428-434.
- [12] GINGACH D L. Mapping receptive fields in primary visual cortex[J]. *Journal of Physiology*, 2004, **58**(3): 717-728.
- [13] DEAN T, CARROLL G, WASHINGTON R. On the prospects for building a working model of the visual cortex [C]. *Proceedings of AAAI*, 2007: 1597-1600.
- [14] SERRE T, OLIVA A, POGGIO T. A feed forward architecture accounts for rapid categorization [C]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2007, **104**(15): 6424-6429.
- [15] SAKAI K, TANAKA S. Spatial pooling in the second-order spatial structure of cortical complex cells [J]. *Vision Research*, 2000, **40**(7): 855-871.
- [16] 罗四维. 视觉信息认知计算理论[M]. 北京:科学出版社, 2010:25-26.
- [17] QIN Han-lin, LIU Shang-qian, ZHOU Hui-xin *et al.* Background suppression for dim small target with Gabor kernel non-local means [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **38**(4): 737-741.
秦翰林, 刘上乾, 周慧鑫, 等. 采用 Gabor 核非局部均值的弱小目标背景抑制[J]. *红外与激光工程*, 2009, **38**(4): 737-741.

Vision Cell Response Model for Small Target Complex Background Suppression

QIN Han-lin^a, Wei Gui-feng^a, ZHOU Hui-xin^a, LAI Rui^b, LIU Shang-qian^a

(a. *School of Technical Physics*; b. *School of Microelectronics, Xidian University, Xi'an 710071, China*)

Abstract: To improve detection performance for weak and small targets signal in complex infrared background, such as the ground and the cloud, a dim and small target background suppression method is presented based on vision cell response model was presented. Firstly, according to simple cell receptive field model, original infrared image is decomposed to two images with different Gabor functions using convolution. And then, the function of nonlinear convergence of complex cell response is used to fusion two images obtained for separation small target with background clutter in infrared image. Finally, target image is obtained by using classical adaptive thresholding method. Several groups of experimental results demonstrate that the proposed method can segment the infrared target image effectively, compared with several classical infrared dim and small target background suppression methods, such as local means remove and max median filter methods.

Key words: Target detection; Background suppression; Vision sensing model; Cell response model