

红外图像强固定模式显著性噪声抑制*

孙晓亮^{1,2}, 朱遵尚^{1,2}, 尚洋^{1,2}, 张小虎^{1,2}

(1. 国防科技大学 航天科学与工程学院, 湖南 长沙 410073;
2. 图像测量与视觉导航湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410073)

摘要:针对红外成像设备对天远距离观测中得到的小目标、强固定模式噪声这一类典型数据,提出基于显著性的红外图像强固定模式噪声抑制算法。对此类图像数据进行特性分析,指出图像中目标区域相对于背景固定模式噪声区域是显著的,利用显著性检测算法分离出图像中目标区域及背景,对不同区域分别采取不同处理,仅基于单幅图像信息实现强固定模式噪声的有效抑制。通过大量小目标、强固定模式噪声红外图像对算法性能进行测试。结果表明,本算法能够准确提取出图像中目标区域,实现图像中强固定模式噪声的有效抑制。

关键词:图像增强;噪声抑制;红外焦平面阵列;固定模式噪声;视觉注意力机制

中图分类号:TP391 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2014)03-0041-05

Suppressing IR image noise saliently with the heavy fixed pattern

SUN Xiaoliang^{1,2}, ZHU Zunshang^{1,2}, SHANG Yang^{1,2}, ZHANG Xiaohu^{1,2}

(1. College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
2. Hunan Provincial Key Laboratory of Image measurement and Vision Navigation, Changsha 410073, China)

Abstract: A saliency based heavy fixed pattern noise suppression algorithm for IR image which is captured by infrared focal-plane-array sensors in remote observation is proposed. The properties of the typical IR images characterized with small targets and heavy fixed pattern noise were analyzed, and it was found that the target regions are more salient than the background for observer in IR image. Using the saliency detection algorithm to detect target regions, the proposed algorithm processes different regions separately and suppresses the heavy fixed pattern noise effectively. Experiments indicate that our algorithm can detect the target regions accurately and suppress the heavy fixed pattern noise effectively.

Key words: image enhancement; noise suppression; infrared focal-plane-array; fixed pattern noise; visual attention mechanism

当前,在对天远距离观测中,大多数的红外成像系统使用红外焦平面阵列,由于制作工艺等原因,不同探测单元对相同输入的输出响应存在一定的差异,在空间产生非均匀性,在红外图像中表现为固定模式噪声。非均匀性与成像增益存在正相关的关系。在对天远距离弱小目标观测中,为了提升对弱小目标的发现能力,需将成像增益调高,这时加剧了非均匀性,产生强固定模式噪声,严重影响对红外图像的观测及对目标的提取、跟踪等应用。固定模式噪声随着时间和环境的变化而缓慢变化,自适应地抑制固定模式噪声是一项极富挑战的研究课题。

已有非均匀性校正方法主要分为两大类:基于参考辐射源的校正技术及基于场景的校正技术。基于参考辐射源的校正技术在使用前需要采

用标准黑体对探测器阵列单元进行标定,获得非均匀参数,抑制固定模式噪声,这种方法需要对探测器进行周期性重复标定以消除参数漂移的问题,这无疑增加了系统的复杂度,降低了系统的可靠性及响应速度。传统基于场景的非均匀性校正算法以空域、时域算法为主,主要运用滤波的思想用周围像素点的像素值来估计当前像素值。Scribner等^[1]基于人眼视觉神经机理的研究成果,提出自适应时域高通滤波非均匀性校正算法,运算简单,易于硬件实现,对低频非均匀能够实现较好地校正,但是当目标静止时存在目标退化及“鬼影”问题;Narendra等^[2]提出基于恒定统计量的非均匀校正算法,但该方法对变化较大的场景的校正效果不佳,存在“鬼影”现象;Torres等^[3]利用递归最小二乘法(Recursive Least Square

* 收稿日期:2013-08-27

基金项目:国家重点基础研究发展计划资助项目(973计划)(2013CB733100)

作者简介:孙晓亮(1989—),男,安徽亳州人,博士研究生,E-mail:alexander_sxl@nudt.edu.cn;

尚洋(通信作者),男,副研究员,博士,E-mail:shangyang1977@163.com

adaptive filter, RLS) 进行非均匀性校正, 该算法基于简单的参数估计理论, 算法复杂度低, 对固定模式噪声有一定的抑制作用, 但对强固定模式噪声抑制能力较弱; Martin 等^[4] 提出了一种利用统计递归滤波器的非均匀校正算法, 该算法把非均匀性主要归结于加性误差, 算法复杂度较高; 文献 [5-6, 10-12] 中运用卡尔曼滤波器进行非均匀校正, 此类算法非均匀性校正性能与滤波器时间块内场景信息量成正比, 算法复杂度较高, 计算量较大。

视觉注意力机制是人类视觉系统的重要特性, 在视觉信息的感知、处理过程中发挥重要作用。本文以对天远距离弱小目标观测中的强固定模式噪声红外图像为研究对象, 通过分析此类图像的特点, 结合视觉注意力计算模型, 提出一种仅利用单幅图像信息的基于显著性的红外图像强固定模式噪声抑制方法, 不同于已有处理算法, 本算法不估计非均匀参数, 而是通过显著性检测将图像中目标与背景噪声区分开来, 分别进行处理, 实现强固定模式噪声抑制的同时很好地保持目标区域信息。

1 小目标、强固定模式噪声红外图像特性分析

在基于红外成像设备的对天远距离弱小目标观测中, 为提高对弱小目标的捕捉能力, 需要调高探测单元的响应增益, 这就增强了红外图像中固定模式噪声, 形成小目标、强固定模式噪声红外图像, 图 1 给出了部分具有典型特性的示例图像。

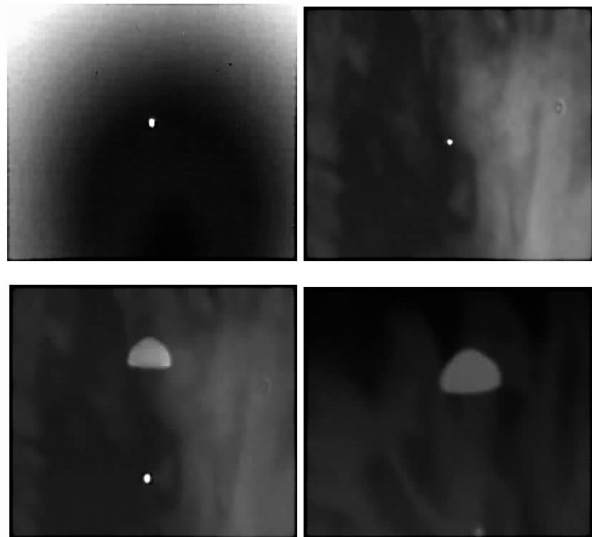


图 1 小目标、强固定模式噪声红外图像

Fig. 1 IR images characterized with small objects and strong fixed pattern noise

固定模式噪声严重影响图像质量, 给观测、目标提取、目标跟踪等带来了困难, 尤其是在对天远距离小目标观测中, 有时甚至会出现目标淹没在背景噪声中的情况。

本文对大量小目标、强固定模式噪声的红外图像进行了分析, 发现此类图像具有以下特性:

1) 图像场景简单。在对天远距离小目标的观测中, 目标距离成像设备较远, 且目标所处环境相对较为单一, 如天空背景, 使得在所采集到的红外图像中场景信息简单, 图像场中包含的信息主要为非均匀信息及目标信息。

2) 目标区域显著。对天远距离小目标的观测中, 需要调高探测单元增益, 进一步增强固定模式噪声, 在所得具体图像中, 强固定模式噪声往往体现为连续变化的大面积“斑块”。相比之下, 由于是远距离成像, 目标所成像往往较小, 多数情况下为一亮点, 在整幅图像中占据较小的区域, 相比于大面积连续变化的固定模式噪声, 目标成像区域不具有连续变化的特性, 对于人眼观测来说, 可以轻易地将目标区域与噪声区域分开, 即目标区域相比于固定模式噪声区域是显著的。

3) 目标运动形式多样。小目标、强固定模式噪声红外图像目标的运动形式不一, 在有的图像中目标位置相对固定, 而在有的图像中则在成像的视场中不停地运动, 位置不断变化。

2 小目标、强固定模式噪声红外图像显著性分析

上一节对对天观测中小目标、强固定模式噪声红外图像的特性进行了分析, 明确了在所成图像中, 目标区域相比于固定模式噪声区域是显著的。当人眼在感知一幅小目标、强固定模式噪声红外图像时, 人眼可以非常轻松地定位图像中目标区域, 将之与噪声区域分开, 即图像中目标区域对于人类系统来说是显著的。在人类视觉系统的自底向上的数据驱动的视觉注意力机制建模中, 认为图像中由显著模式及非显著模式组成, 对于非显著模式可以建模成平凡、一致或者重复出现的模式, 考虑小目标、强固定模式噪声红外图像, 图像中主要包含固定模式噪声信息及目标信息, 固定模式噪声往往为大面积连续变化的“斑块”, 而目标区域相比于固定模式噪声区域是奇异的, 目标区域与固定模式噪声区域分别对应图像中显著模式与非显著模式, 即在小目标、强固定模式噪声红外图像中, 相比于背景区域, 目标区域对于人类视觉系统来说是显著的。

这里采用基于频-空域的显著性检测算法(Frequency-Spatial Saliency detection with optimal scale, FSS(o))^[8]对小目标、强固定模式噪声图像进行显著性分析。图2给出了部分实验结果,第一、三行给出了原始图像数据,第二、四行给出了对应的FSS(o)算法得到的显著性分析结果,文中第三部分将给出显著性分析算法的具体实现细节,如对第一幅原始数据,图像中目标区域为亮点目标,图像中固定模式噪声区域占据图像中大面积区域,且变化平缓,相比之下,目标区域对于人类视觉系统应具有更高的显著性。显著性检测结果显示,图像中目标区域是最为显著的部分。对小目标、强固定模式噪声红外图像的显著性分析结果验证了前面对此类红外图像特性的分析,在图像中,目标区域相比于噪声区域是奇异的,对于人类视觉系统来说是显著的,通过显著性检测算法可以实现目标区域的突出,将其与噪声区域分开,如图2中亮点目标、降落伞等。

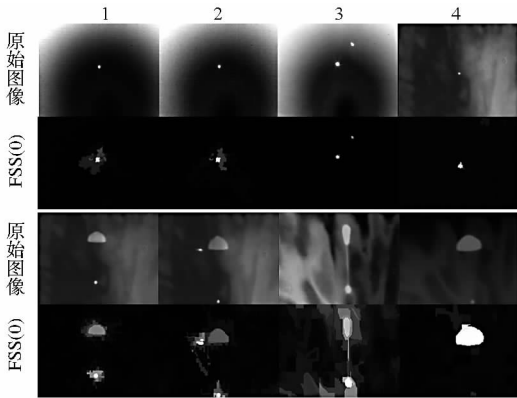


图2 小目标、强固定模式噪声红外图像显著性分析
Fig. 2 Saliency analysis of images characterized with small objects and strong fixed pattern noise

3 基于显著性的强固定模式噪声抑制

本文对对天观测中小目标、强固定模式噪声红外图像的特性进行了分析,明确了图像中目标区域相对于噪声区域是显著的。在第二节中对此类红外图像进行了显著性分析,实验结果验证了小目标、强固定模式噪声红外图像中目标区域对于人类视觉系统是显著的论断。本文仅基于单幅图像信息提出一种基于显著性的红外图像强固定模式噪声抑制方法,从显著性检测结果出发,将图像中目标区域与噪声区域分离,分别对其处理,实现强固定模式噪声的抑制,改善小目标、强固定模式噪声红外图像的质量。

3.1 显著性检测

对于对天观测中小目标、强固定模式噪声红

外图像的显著性分析,本文采用FSS(o)算法^[8]。

FSS(o)算法首先采用Felzenszwalb和Huttenlocher的基于图的分割方法^[7]对图像进行分割处理,将图像中每个像素点视为一个独立区域,根据式(1)进行区域之间分割边界存在与否判断。

$$D(C_1, C_2) = \begin{cases} true & \text{if } Dif(C_1, C_2) > MInt(C_1, C_2) \\ false & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中 $MInt(C_1, C_2)$ 为区域间最小差异阈值, $Dif(C_1, C_2)$ 为连接两区域中节点的边中最小权值,定义若区域 C_1, C_2 之间没有连接的边,则 $Dif(C_1, C_2) = \infty$,迭代处理进行区域合并,得到最终的分割结果,记 r_k 为图像中第 k 个区域。

频域图像显著性分析,通过合适尺度的高斯核函数对频域幅值谱进行卷积实现图像显著性初始分析^[9]。

红外图像采用真彩色格式传输时,由于受到信道噪声等因素的影响,使得三通道值存在一定差异,超复数傅里叶变换将三通道作为一个整体进行考虑,能够有效抑制噪声,同时超复数傅里叶变换能够方便地引入时序信息,为以后算法推广到序列图像处理提供了坚实基础。因此本算法中采用超复数傅里叶变换作为频域分析工具,进行显著性分析。超复数定义为

$$f(n, m) = w_1 f_1 + w_2 f_2 i + w_3 f_3 j + w_4 f_4 k \quad (2)$$

其中 w_1, w_2, w_3, w_4 为相应权重, f_1, f_2, f_3, f_4 为待整合特征图。对于输入图像 $I(x, y)$,本文采用对色空间对图像进行表示,并将其作为特征进行超复数傅里叶变换得

$$F_H(u, v) = \|F_H(u, v)\| e^{i\phi(u, v)} \quad (3)$$

记所得幅值谱 $A(u, v)$,采用一定尺度的高斯核函数与其进行卷积操作得 $\Lambda(u, v)$,接下来采用超复数傅里叶逆变换得到频域显著性分析结果 $SaliencyMap_{F_H}$ 。

最后通过融合图像空域区域信息与频域显著性分析结果得到最终区域级显著性分析结果 $SaliencyMap$,如式(4)所示:

$$SaliencyMap(i, j) = (C_k \sum_{(i, j) \in r_k} SaliencyMap_{F_H}(i, j)) / Count(r_k) \quad (4)$$

式中 $Count(r_k)$ 为区域 r_k 中包含的像素点个数, $SaliencyMap(i, j)$ 为像素点 (i, j) 最终的显著性值, C_k 为一常数。

3.2 基于显著性的强固定模式噪声抑制

有上述分析知,图像中目标区域相比于噪声区域是显著的,在通过显著性分析得到的显著性分布图 *SaliencyMap* 中,目标区域被突显出来。下面对显著性分布图进行简单的阈值分割,提取出图像中目标区域

$$Seg(i, j) = \begin{cases} 1, & SaliencyMap(i, j) \geq Threshold \\ 0, & SaliencyMap(i, j) < Threshold \end{cases} \quad (5)$$

式中 *Seg* 为阈值分割所得二值化图像, *Threshold* 为分割阈值。

完成图像中目标区域的提取后,分别对目标区域及噪声区域给予不同的处理。对于目标区域在前面分析中已指出,在此类图像中,由于是远距离红外设备成像,图像中目标对应区域信息较为简单,没有包含过多细节信息,本方法对目标区域信息进行保持;对于噪声区域,采用显著性加权的非线性灰度级映射算法对固定模式噪声进行抑制,如式(6):

$$i' = \begin{cases} i, & \text{if } Seg(i, j) = 1 \\ SaliencyMap(i, j) \frac{i^2}{(L-1)}, & \text{if } Seg(i, j) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

其中 *i* 为像素点原灰度值, *i'* 为变换后像素点灰度值, *L* 为图像灰度级数。为消除分区域处理带来的边界效应,本方法对边界处像素点进行平滑处理,使得边缘处平滑过渡,消除边界效应。

4 实验结果与分析

本文以一段返回舱红外视频数据为测试数据,分别采用 RLS^[3] 及本文提出算法进行处理,选取其中三帧图像数据,如图 3 所示。

RLS 算法需要利用多帧图像信息实现非均匀参数的估计,进而实现非均匀性校正,正如引言中所做分析,RLS 对较强固定模式噪声处理效果不佳,不能有效消除。本文提出算法仅基于单幅图像信息,有效消除了图像中固定模式噪声,同时很好地保留了图像中目标信息,取得了较优的处理效果。

另外本文选取了大量对天观测中小目标、强固定模式噪声红外图像数据进行测试,图 4 中给出了 8 幅典型的小目标、强固定模式噪声红外图像的实验结果,包含单目标、多目标等情况,基本代表了小目标、强固定模式噪声红外图像的基本情况。

处理结果显示,针对给出的 8 幅实验数据,本

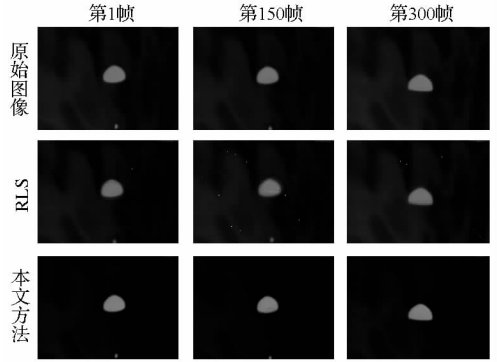


图 3 本文算法与 RLS^[3] 算法对比
Fig. 3 Comparison between the RLS^[3] algorithm and the proposed algorithm

文提出方法仅从单幅图像信息出发取得了较好的效果,有效抑制了红外图像中强固定模式噪声,同时保持了目标区域信息,显著改善了红外图像的视觉质量,验证了本方法的有效性。

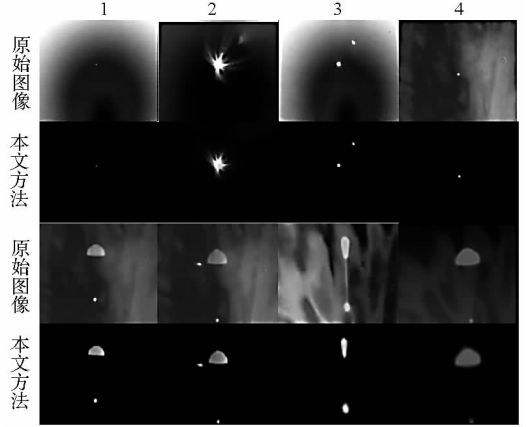


图 4 算法测试实验结果
Fig. 4 Experiment results of the proposed algorithm

实施过程中,基于显著性分布图采用简单阈值分割提取目标区域环节中阈值的选择至关重要,直接关系到目标区域提取的准确与否。本文采用的显著性分析算法为文献[8]提出的 FSS(o),该算法对图像中每个区域赋予一个显著性值,显著性值的大小对应区域的显著程度,最显著区域具有最高的显著性值。操作过程中,对图像中各区域的显著性值按照从高到低进行排序,依据待处理红外图像中目标区域个数选取第几个显著性值为分割阈值,比如图像中含有三个目标区域,则选择第三个显著性值作为分割阈值进行目标区域提取。

5 结论

本文对红外图像非均匀性抑制问题进行了探索,重点研究了对天观测中小目标、强固定模式噪声红外图像中强固定模式噪声的抑制问题。首

先综述了已有技术中存在的不足,接下来本文对此类红外图像的特性进行了分析,指出图像中目标区域相对于噪声区域对于人类视觉系统来说是显著的,结合已有的人类视觉系统视觉注意力机制的研究成果,提出一种仅利用单幅图像信息的基于显著性的红外图像强固定模式噪声抑制方法,本算法没有对非均匀参数进行估计,而是提取出图像中目标区域及噪声区域,分别进行处理,实现强固定模式噪声的抑制。本文选取了多幅典型数据进行了实验测试并与已有算法进行了对比实验,实验结果显示本算法能有效抑制图像中固定模式噪声,并保持目标区域信息,有效改善了图像的质量,为观测、目标提取、目标跟踪等应用奠定了很好的基础,同时所提出算法原理简单、复杂度较低。

本方法基于图像显著性分析结果进行相关处理,显著性分析结果准确与否直接关系到最终的处理结果的好坏,若图像中目标区域信息较为简单,不包含较多细节信息,可取得较好地处理结果,如图4中第1列及第4列,若目标区域包含较多细节信息,如图4中第2列上图飞行目标喷出的气流、第3列下图中降落伞与返回舱之间的连接线等,在进行显著性分析时,这些信息被忽略了,以致在最终的处理结果中同样被忽略,这一点值得进一步探索与研究。

参考文献 (References)

- [1] Scribner D A, Sarkady K A, Krueer M R, et al. Adaptive nonuniformity correction for IR focal-plane arrays using neural networks [C]. Proceedings of SPIE (Infrared Sensors: Detectors, Electronics, and Signal Processing), 1991, 1541: 100 - 109.
- [2] Narendra P M. Reference-free nonuniformity compensation for IR imaging arrays [C]. Proceedings of SPIE (Smart Sensors II), 1980, 252: 10 - 17.
- [3] Torrs F, Torres S N, Martin C S. A recursive least square adaptive filter for nonuniformity correction of infrared image sequences [C]. Progress in Pattern Recognition, Image Analysis and Applications, 2005, 3773: 540 - 546.
- [4] Martin C S, Torres S, Pezoa J E. Statistical recursive filtering for offset nonuniformity estimation in infrade focal-plane-array sensors [J]. Infrared Physics & Technology, 2008, 51 (6): 564 - 571.
- [5] Pezoa J E, Hayat M M, Torres S N, et al. Multimodel Kalman filtering for adaptive nonuniformity correction in infrared sensors [J]. Journal of the Optical Society of America A, 2006, 23 (6): 1282 - 1291.
- [6] Averbuch A, Liron G, Bobrovsky B Z. Scene based non-uniformity correction in thermal images using Kalman filter [J]. Image and Vision Computing, 2007, 25 (6): 833 - 851.
- [7] Felzenszwalb P F, Huttenlocher D P. Efficient graph-based image segmentation [J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 59 (2): 167 - 181.
- [8] 孙晓亮. 显著性检测及其在图像处理中的应用研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012.
SUN Xiaoliang. Researcher on saliency detection and its applications in image processing [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012. (in Chinese)
- [9] Li J, Levine M D, An X J, et al. Visual saliency based on scale space analysis in the frequency domain [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2012, 35 (4): 996 - 1010.
- [10] Torres S N, Hayat M M, Armstrong, et al. Kalman filtering for adaptive nonuniformity correction in infrared focal-plane arrays [J]. Journal of the Optical Society of America A, 2003, 20 (3): 470 - 480.
- [11] Zhou H X, Qin H L, Jian Y B, et al. Improved Kalman-filter nonuniformity correction algorithm for infrared focal plane arrays [J]. Infrared Physics & Technology, 2008, 51 (6): 528 - 531.
- [12] Zhou H X, Qin H L, Bai L P, et al. Nonuniformity correction algorithm with nonlinear model for infrared focal plane arrays [J]. Infrared Physics & Technology, 2010, 53 (1): 10 - 16.