

文章编号:1001-9014(2006)05-0377-05

一种红外大视场环境下的多小目标实时检测方法

杨磊¹, 杨杰¹, 凌建国¹, 车国锋², 于振红²

(1. 上海交通大学 图像处理与模式识别研究所, 上海 200240;

2. 中国航天科工集团公司二院 目标与环境光学特征国防科技重点实验室, 北京 100854)

摘要: 为了实现大视场条件下的多小目标实时检测, 提出并实现了一种对原始图像先在“粗”尺度下做小目标存在区域的估计和分割, 再在这些区域内做多小目标对象的检测 and 处理的“由粗到精”的红外小目标两阶段分块检测方法, 实践证明了本算法的有效性。

关键词: 信息处理技术; 多小目标检测; 红外大视场; 图像能量矩阵

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A

REAL-TIME METHOD FOR DETECTING MULTI-SMALL TARGETS IN INFRARED LARGE SIGHT FIELD

YANG Lei¹, YANG Jie¹, LING Jian-Guo¹, CHE Guo-Feng², YU Zhen-Hong²

(1. Inst. of Image Processing and Pattern Recognition, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. National Key Lab. of Optical Feature of Targets and Environ., Inst. of the Second Acad., CASIC, Beijing 100854, China)

Abstract: In order to detect multi-small targets in infrared large sight field, a new method that includes “rough” phase and “precise” phase was presented here. In the “rough” phase, the rough region of small targets can be primarily obtained in large scale. Then, the small targets will be precisely detected and segmented in the “precise” phase. Experimental results show the effectiveness of our method.

Key words: information processing technology; multi-small targets detection; infrared large sight field; energy matrix of an image

引言

伴随着红外成像技术的发展和运用, 如何尽可能的增大目标检测视场, 提高目标检测距离成为了各国研究人员都非常关注的问题. 由于视场越大, 干扰因素就越多, 系统的实时检测性能也就会受到影响; 距离越远, 目标的成像面积就会越小, 检测难度也就会随之增大. 显然, 研究一类红外大视场条件下的多运动小目标的快速而准确的检测方法成为了一项既富挑战性, 又有实际意义的工作.

图像形态学滤波是一类有效的小目标检测方法^[1,2], 此类方法由于需得到关于小目标尺寸的先验知识, 所以应用范围受到了限制. 杨等提出了一种被称为自适应 Butterworth 高通滤波的复杂背景下小目标检测方法^[3], 并又在文[4]中实现了检测阈值

的自适应整定. 该类方法能有效的适应复杂背景(如海杂波等)的变化, 但由于其需进行频域变换, 所以它很难满足大视场环境下目标检测的实时性要求. 彭等在文[5]中提到了一类基于 5×5 空域高通模板滤波的小目标增强分割方法. 这种方法不仅思路简单, 而且极易在微处理器件(如 DSP、FPGA)上并行实现, 所以在红外小目标实时检测中得到了广泛的应用.

以上回顾了一些常见的红外小目标检测方法, 但这些算法都不是为我们所要完成的大视场条件下的多运动小目标检测任务设计的. 由于视场太大, 即便是一些非常高效的空域滤波方法对于我们所要讨论的问题也是相形见绌. 为了满足系统处理时间的要求, 本文提出了一套“由粗到精”的红外小目标检测方法. 实践证明这是一种实用和高效的红外大视

收稿日期: 2005-12-25, 修回日期: 2006-06-20

基金项目: 航天二院对外协作项目基金、航空科学基金(04F57004)

作者简介: 杨磊(1977-), 男, 江西上高人, 博士研究生, 主要研究方向为模式识别、图像处理及控制理论等.

Received date: 2005-12-25, revised date: 2006-06-20

场中的多小目标检测方法.

1 红外大视场环境下的多小目标实时检测

我们从本检测系统的实际情况出发,提出并实现了一种先在“粗”尺度下做小目标存在区域的估计和分割,再在这些区域内做小目标对象的检测和处理的“由粗到精”的红外小目标两阶段分块检测方法,取得了良好的目标检测效果.接下来,我们将就本系统的基本构成和算法流程分别进行论述.

1.1 检测系统的基本构成

本系统成像器件采用 288 像元的红外射线探测器.通过在一个以 2 秒/周匀速转动的旋转机构上安装相互连接、具有不同视角的 6 块棱镜,可得到一个像素值为 1728 (行) × 7168 (列) (即 288 (行) × 6 (条带) × 7168 (列)) 的红外大视场 (此处每块棱镜所成图像对应大视场中的一个“条带 (Strip)”). 将此视场的实时图像数据被按行方向平均分配到 4 块 DSP 中,则每块 DSP 上分别对象素值为 288 (行) × 6 (条带) × 1792 (列) 的大视场数据实施目标检测.将这 4 块 DSP 处理得到的各个目标的相关信息传送到其它处理器件中,由此即可实现对多小目标的航迹跟踪、威胁程度判定及目标识别等工作 (此部分工作不属本文内容).由于上述 6 个条带的图像数据随着棱镜旋转陆续进入每块 DSP 中,且各条带数据是彼此独立的,所以它们各自的处理方法完全一样.于是,我们所面对的多目标实时检测问题即被简化为如何在 $\frac{2}{6}$ 秒内完成每块 DSP 上像素值为 288 (行) × 1792 (列) 的大视场中的多小目标检测问题了.

1.2 红外大视场环境下的多小目标实时检测算法

一般来说,目标区域的红外辐射都大于背景和

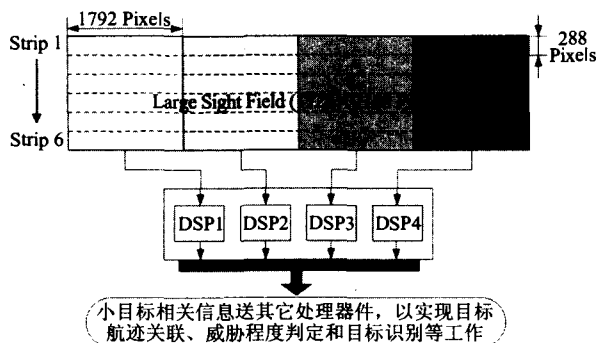


图 1 红外大视场条件下多小目标检测系统结构示意图
Fig. 1 Block diagram of small multi-targets detection system in infrared large sight field

噪声的红外辐射.根据这个常识,在此我们首先给出如下关于红外图像中各象素点的能量值、分块图像及其图像能量矩阵的定义.

定义 1. 红外图像中某象素点的能量值即为该象素点的灰度值.

定义 2. 红外图像的分块图像是指将原始红外图像在行和列方向按一定比例均匀划分,且在相邻图像块间做搭接处理 (以防出现目标可能被分割到相邻两块或几块而漏检的情形) 形成的块图像.

定义 3. 红外图像的分块图像能量矩阵是指对由定义 2 得到的各分块图像求取其中灰度值的和,并将和值按各分块图像对应的空间位置排列得到的矩阵.

定义 2 和 3 给出了一种可在“粗”尺度上对原始红外图像进行区域描述的办法.对于我们所讨论的某一条带大小为 288 (行) × 1792 (列) 的红外大视场图像,考虑到算法计算量的限制,我们可对原始图像做如下分块处理:设 $F(i, j)$ 是象素值为 288 × 1792 的原始红外图像上象素点 (i, j) 处的能量值.可将此图像划分为 10 × 48 个象素值为 36 × 53 的分块图像 (注意:行方向左右各搭接 16 个象素,列方向上下各搭接 8 个象素),分块图像的划分方法如图 2 所示.于是,由定义 3 得到的 10 × 48 维分块图像能量矩阵 E 中元素 $E_{m,n}$ 的计算公式可写为:

$$E_{m,n} = \sum_{h=1}^{20} \sum_{l=1}^{21} F(28(m-1)+h+8, 37(n-1)+l+16) + \sum_{x=0}^1 \sum_{l=1}^8 \sum_{l=1}^{21} F(28(m+x-1)+h, 37(n-1)+l+16) + \sum_{y=0}^1 \sum_{l=1}^{20} \sum_{l=1}^{16} F(28(m-1)+h+8, 37(n+y-1)+l) + \sum_{x=0}^1 \sum_{y=0}^1 \sum_{l=1}^8 \sum_{l=1}^{16} F(28(m+x-1)+h, 37(n-1)+l), \tag{1}$$

式(1)实现了某一条带上红外大视场实时图像与一个低维能量矩阵之间的对应关系.接下来,我们将对目标检测算法的具体流程做出陈述.

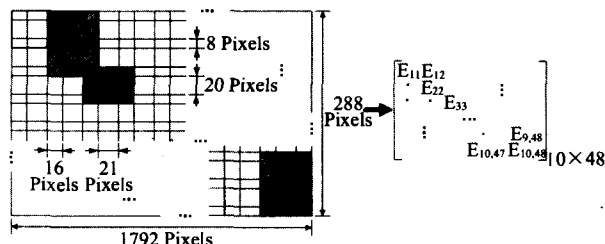


图 2 分块图像的划分方法及对应的分块图像能量矩阵
Fig. 2 The method for image segmentation and the corresponding energy matrix of the segmented image

Step1: 检测过程的初始化. 将第 1 帧实时图像的 6 个条带数据分别读入 4 块 DSP 中(如图 1 所示)可得到所谓“原始背景图像”. 将这些背景图像数据保留到硬件系统的外存中,可实现对外存空间中背景图像的初始化. 同时,设在本检测系统投入运行时,场景中无目标出现,则我们通过式(1)可依次求取这 6 个条带各自的分块图像能量矩阵. 为了便于区分,我们称这些矩阵为后一帧实时图像对应的能量初值矩阵,依此类推. 例如,将系统开始运行时第 1 帧实时图像 6 条带的背景图像和对应的 6 个分块图像能量矩阵保存下来,即得第 2 帧处理时所需的实时背景图像 $B_i(2)$, ($i=1,2,\dots,6$, 即条带号和分块图像能量初值矩阵 $C_i(2)$).

Step2: 求取实时图像的能量新值矩阵. 不失一般性,设检测系统已运行至第 k 帧,且设此时某块 DSP 读取的是该帧第 i ($i=1,2,\dots,6$) 条带的实时图像数据,记为 $X_i(k)$. 由式(1)可求得这些实时图像数据的分块图像能量矩阵,我们称该矩阵为此条带在该帧的能量新值矩阵,简记做 $N_i(k)$. 接下来,我们将仅就此 DSP 中该条带(其像素值为 288(行) \times 1792(列))的实时多目标检测问题展开讨论. 对于其它 DSP 及各帧和条带的情况,处理方法完全一样.

Step3: 求取第 i 条带对应的能量差值矩阵. 在系统实际运行中,前后帧相同位置上的背景一般是变化很小的,所以其对应的能量矩阵元素值的变化也有限. 但当具备一定信杂比的运动小目标在该条带的某些位置出现时,能量新值矩阵中该位置对应的元素值就会发生较大的提升. 所以,通过对前后帧间能量矩阵值变化情况的判定,就可以估计得到目标存在的可能区域. 我们将上一步中求得的第 i 条带的能量新值矩阵与存储空间中此条带的能量初值矩阵做差,可得此帧中此条带的能量差值矩阵 $A_i(k)$, 即 $A_i(k) = N_i(k) - C_i(k)$.

Step4: 能量差值矩阵元素值调整. 在实际场景中,随着检测系统运行时间的增加以及阳光强度、雨雪等因素影响,会导致整个背景的灰度强度发生缓慢的变化. 为了跟踪背景灰度强度的这种变化趋势,考虑到小目标能量对于整个检测视场能量的影响毕竟是很小的,所以可求取第 k 帧中第 i 条带分块图像能量差值矩阵 $A_i(k)$ 中每一行元素(能量值)的平均值,将其作为能量差值矩阵中每行元素值的修正项,即对元素值做如下调整:

$$A'_{i,m,n}(k) = A_{i,m,n}(k) - \frac{1}{48} \sum_{n=1}^{48} A_{i,m,n}(k) \quad (2)$$

上式中下标“ m,n ”分别为分块图像矩阵中各图像块对应的行、列坐标值(以下同). 实践证明式(2)能非常稳健的跟踪大视场整体灰度的变化.

Step5: 获取可能存在小目标的分块图像区域. 对经 Step4 修正的能量差值矩阵 $A'_i(k)$ 中各元素实施二值化处理可得可能存在小目标区域的二值矩阵 $T_i(k)$, 其中各元素值为

$$T_{i,m,n}(k) = \begin{cases} 1, & A'_{i,m,n}(k) \geq \lambda_1 \\ 0, & A'_{i,m,n}(k) < \lambda_1 \end{cases} \quad (3)$$

式中, λ_1 为根据满足一定信杂比原则确定的分块图像能量增加阈值.

Step6: 可能存在小目标的相邻图像块合并. 为了简化检测过程,查找二值矩阵 $T_i(k)$ 中的“1”元素,并将其所对应的分块图像块标记为可能含有目标的图像块. 此外,还需对二值矩阵 $T_i(k)$ 中左右或上下相邻元素为“1”的部分所对应的两个或多个图像块实施合并,如此可得含有目标的扩充图像块,这样处理可以避免同一个小目标被重复分割到相邻的图像块中.

Step7: 获得差分图像块. 将 Step6 得到的可能含有目标的图像块或扩充图像块位置的实时图像数据与硬件系统外存中的该位置的背景图像数据相减,即可得到减除了复杂背景和干扰的差分图像块. 由此,红外图像中小目标的信杂比可得到大幅度的提升.

Step8: 基于局部能量阈值的多小目标检测及相关参数获取. 我们定义图像块中某像素区域的局部能量值为以该像素点为中心的 3×3 窗口(即 8 邻域)内各像素灰度值之和. 由此,我们在上一步得到的各差分图像块中,可由 3×3 滑窗求取各像素点区域的局部能量值. 将这些局部能量值与一个我们根据先验知识得到的目标区域局部能量阈值 λ_2 比较,即可得:

小目标像素点集合 $S = \{ \text{小目标像素点坐标} \mid \text{差分图像块中某像素点处局部能量值} \geq \lambda_2 \}$

反复在小目标像素点集合 S 中遍历相互连接的像素点,并逐步删除集合中已经处理过的像素点,可实现对具有不同像素数量的红外小目标对象的区域生长和分割. 由此过程可得到各小目标对象的像素数量和几何中心坐标等相关参数值.

Step9: 能量初值矩阵元素值更新及外存中背景图像更新. 在实际的检测过程中,有限数量的小目标

对于大视场环境的影响是很小的. 为了反映红外背景图像的最新情形以使目标检测过程得以继续, 我们需对作为描述“粗”尺度实时背景图像特征的能量初值矩阵元素值和硬件系统外存中的实时背景图像数据进行更新, 更新策略为:

a) 对第 k 帧中第 i 条带在 Step5 中被标记为可能存在小目标的分块图像区域, 其对应的能量初值矩阵元素值和在外存中对应的实时背景图像块数据将保留以供第 $k + 1$ 帧使用. 其目的为最大限度的保存小目标所处背景的信息.

b) 对于未检测到可能存在目标的分块图像区域, 其第 $k + 1$ 帧中对应的能量初值矩阵元素值将由其第 k 帧求得的能量新值矩阵元素值替换; 外存中对应的实时背景图像将由第 k 帧获得的实时图像数据进行覆盖. 这样操作可以实现对背景信息的更新.

以上调整策略可表示为:

$$\begin{cases} C_{i,m,n}(k+1) = C_{i,m,n}(k); B_{i,m,n}(k+1) = B_{i,m,n}(k), T_{i,m,n}(k) = 1 \\ C_{i,m,n}(k+1) = N_{i,m,n}(k); B_{i,m,n}(k+1) = X_{i,m,n}(k), T_{i,m,n}(k) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

Step10: $k = k + 1$, 算法返回第 2 步循环执行.

2 实验结果

由于篇幅所限, 图 3 为我们的成像器件所采大视场实时图像行方向的一半的实例, 其像素值为 1728(行) \times 3584(列) (即 288(行) \times 6(条带) \times 7168/2(列)). 在此我们通过如图 4 的检测实例来说明本文所提方法的有效性. 这里我们仅截取检测系统发现小目标对象的某块 DSP 中某条带行方向的一半加以说明, 即所截取的图像大小为 288(行) \times 896(列) (即 288(行) \times 1792/2(列)). 我们选取上述 Step5 中图像能量增加阈值 $\lambda_1 = 800$ 、Step8 中目标区域局部能量阈值 $\lambda_2 = 120$ 来实施目标检测. 注意, 由于实际系统中红外线列探测器各像元特性的细微差别, 造成所获取的图像具有明显的行条纹 (如图 3、4 所示), 但由于帧间各对应像元的非均匀性变化不大, 且我们的检测方法基于实时图像与背景图像间的差值 (包括能量差值矩阵和差分图像块), 这就实现了帧间各像元非均匀性的对消, 从而保证了本方法具有探测器像元非均匀性自适应能力. 实验数据表明, 我们的检测算法可以在大视场环境中实现有效的多小目标检测 (如图 4). 此外, 在对 DSP 程序仔细分解和优化后, 可将程序每次循环中两个主要耗时部分的运算时间测算如下: (1) 求取一次某条带的分块图像能量矩阵 (Step2, 实际运行

中每帧求取一次) 需耗时约 4 兆时钟; (2) 在一个 36 \times 53 像素的差分图像块中, 由 3 \times 3 滑窗求取各像素点区域的局部能量值并遍历获取一个目标点位置及相关参数 (Step8), 需耗时约 0.5 兆时钟. 显然, 对于每块具有 100 兆时钟的 DSP 来说, 保证每个条带在 $\frac{2}{6}$ 秒 (即约 33 兆时钟) 内完成一定数量的多目标检测的技术指标是很容易得到满足的.

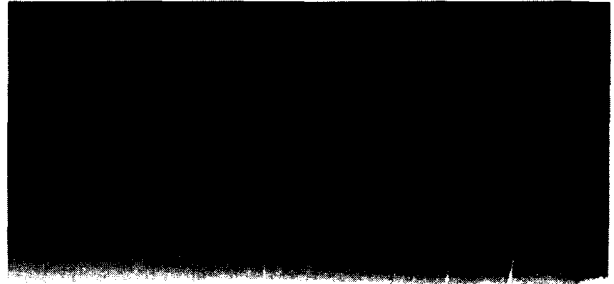


图 3 像素值为 1728(行) \times 3584(列) 的红外大视场示例 (原图已被缩放数倍)
Fig. 3 An illustration of infrared large sight field with 1728 (row) \times 3584 (column) pixels

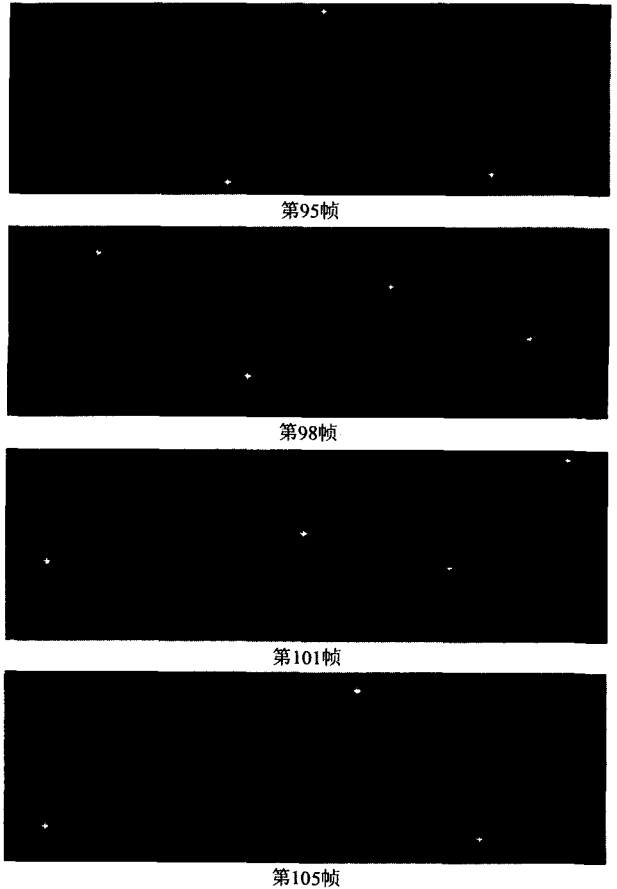


图 4 真实场景中多红外小目标检测实例 (只取某 DSP 某条带行方向的一半)
Fig. 4 An illustration of small multi-targets detection in real world

3 总结与展望

大视场环境下多小目标的实时检测是红外小目标检测领域中一个极富挑战性意义的课题. 显然, 视场的增大与算法的实时性是一对不易调和的矛盾, 所以迄今为止, 在该领域还未见具有代表性的算法出现. 本文提出了一种“由粗到精”的红外小目标实时检测方法, 实现了在一个大小为 1728(行) × 7168(列)的大视场中, 由 4 块 DSP 组成的多小目标实时检测系统. 实践证明了本算法的有效性. 当然, 如果能在实时图像数据获取后就由形态学算子对这些原始数据作一下预处理(可由 FPGA 硬件实现), 再由本文所述方法实施小目标检测, 则检测算法的有效性还可得到较大程度的提高.

REFERENCES

- [1] Victor T T, Tamar P. Morphology-based algorithm for point target detection in infrared backgrounds [J]. *Signal and Data Processing of Small Targets*, 1993, pp. 2—11
- [2] 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分割方法. *红外与毫米波学报*), 2004, 23(3): 233—236.
- [3] Yang L, Yang J, Yang K. Adaptive detection for infrared small target under sea-sky complex background [J]. *Electron. Lett.*, 2004, 40(17): 1803—1805.
- [4] YANG Lei, YANG Jie, ZHENG Zhong-Long. Detecting infrared small target based on adaptive local energy threshold under sea-sky complex backgrounds [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (杨磊, 杨杰, 郑忠龙. 海空复杂背景中基于自适应局部能量阈值的红外小目标检测. *红外与毫米波学报*), 2006, 25(1): 41—45.
- [5] Peng Jia-Xiong, Zhou Wen-Lin. Infrared background suppression for segmenting and detecting small target [J]. *Acta Electronica Sinica* (彭嘉雄, 周文琳. 红外背景抑制与小目标分割检测. *电子学报*), 1999, 27(12): 47—51.

2007 年《红外与毫米波学报》征订启事

《红外与毫米波学报》是国内外与毫米波科技领域唯一的学报类刊物, 着重反映红外与毫米波领域的新概念、新成果、新进展, 是中国与国际红外与毫米波学界交流最新研究成果的平台. 其宗旨是努力做到发扬科学民主、提倡学术讨论、活跃学术思想、促进国内外同行间的学术交流、促进红外与毫米波科学技术的不断发展.

《红外与毫米波学报》主要报导红外与毫米波领域的最新研究成果和技术进展, 主要刊登在红外物理、凝聚态光学性质、低能激发过程、飞秒光谱学、非线性光学、红外光电子学、红外与毫米波领域的元器件、系统及应用、智能信息和人工神经网络等方面有创新的研究论文、研究简报. 读者对象为国内外红外与毫米波领域的科研人员、工程技术人员及高等院校师生、研究生等.

《红外与毫米波学报》为《SCI》、《EI》、《CA》、《SA/INSPEC》、《AJ》等国际著名检索体系收录. 为“中国自然科学核心期刊”、“中国科技核心期刊”.

本刊由中国科学院上海技术物理研究所和中国光学学会共同主办, 中国科学出版社出版, 为中、英文混排双月刊, 大 16 开本, 80 页, 定价: 10 元/期. 国内外公开发行, 全国各地邮局均有订阅, 邮发代号: 4-335 如中国光学学会会员向本刊编辑部订阅, 可享受九折优惠.

地址: 上海市玉田路 500 号《红外与毫米波学报》编辑部 邮政编码: 200083
 电话: 021-65420850 * 73206 FAX: 021-55393960 EMAIL: jimw@mail.sitp.ac.cn