

基于决策级融合的RX高光谱影像异常检测算法

徐钰明¹, 于平², 郭宝峰¹, 刘锋春¹

(1.杭州电子科技大学 自动化学院, 浙江 杭州 310018;

2.中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 对高光谱影像的RX异常检测算法进行了研究。针对RX算法中对高维数据局部背景协方差矩阵估计存在较大误差的局限性, 提出一种基于决策级融合的RX算子高光谱影像异常目标检测算法。首先, 对同一场景下的可见近红外数据和短波红外数据分别运用经典的RX算子进行异常检测, 得到初步异常检测的目标判决。在此基础上, 利用传感器获取信息的冗余性和互补性特性, 结合基于规则的决策级融合方法, 得到最终的RX异常检测判决结果。在实测高光谱数据上进行了实验仿真, 验证了本算法的有效性。

关键词: 高光谱影像; 异常检测; RX算法; 决策级融合

中图分类号: TP751.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2013)06-0339-06

A RX Anomaly Detection Algorithm for Hyperspectral Image Based on Decision-level Fusion Method

XU Yu-ming¹, YU Ping², GUO Bao-feng¹, LIU Feng-cun¹

(1. *Institution of Information and Control, School of Automation, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China;*

2. *Changchun Institution of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

Abstract: In this paper, an anomaly detection method based on RX algorithm for hyperspectral image is studied. Aiming at the error of estimating the local background covariance matrix for the RX algorithm, an anomaly detection algorithm based on decision-level fusion is proposed for hyperspectral RX detectors. Firstly, we apply the RX algorithm to calculate the preliminary result of anomaly detection for hyperspectral image on visible/near-infrared bands and short-wave infrared bands respectively. On this basis, considering the information redundancy and complementary characteristics of different sensors, we construct a decision-level fusion method to refine the result of the previous RX anomaly detection. The experimental results based on a real data set show that the proposed method achieves satisfactory improvement.

Key words: hyperspectral image, anomaly detection, RX detector, decision-level fusion

0 引言

高光谱遥感影像将传统的空间图像维信息与反映地物辐射特性的光谱维信息有机地融为一体, 具有很高的光谱分辨率, 为地物精细目标检测提供了良好的条件^[1-4]。通常目标检测算法需要运用一定程度的场景先验知识, 包括专家知识、光谱曲线等先验影像信息。然而在实际运用中, 这些先验知识很难获取。并且目前仍缺乏有效的光谱反演算法, 光

谱曲线库也有待完善^[5-7], 因此无需先验知识的异常检测算法, 在遥感影像应用领域具有非常重要的意义。

异常检测算法将高光谱图像中的小目标视为一定分布条件下的奇异点, 通过特定处理使变换后数据中的目标点突出, 进而自动检测出异常目标^[8-9]。其中最具代表性的方法就是Reed和Yu提出的RX方法。它假设局部背景服从多元正态分布, 通过估计局部背景的协方差矩阵来描述背景模型^[10]。类似算法还有UTD算法^[11], 该算法把RX算法中的匹

收稿日期: 2013-02-26; 修订日期: 2013-04-02.

作者简介: 徐钰明(1987-), 男, 硕士研究生, 研究方向为高光谱图像目标检测算法、图像处理与计算机视觉。

通讯作者: 郭宝峰(1973-), 男, 研究员, 研究方向为模式识别等, gbf@hdu.edu.cn.

基金项目: 国防基础科研计划, 教育部留学回国人员启动基金。

配信号由量测信号替换为均匀向量。Chang 等人在经典 **RX** 算法的基础上提出了很多改进算法,例如采用相关系数矩阵等方法来描述背景模型,进而得到改进的检测算子,它们主要包括有 **CRXD**、**NRXD** 等^[12]。

实际应用中直接运用 **RX** 检测算子,进行高分辨率影像异常目标检测时,往往检测效果不佳,会产生很多虚警区域。局部背景中用于估计协方差矩阵的样本个数不足、样本的非单一性以及易受到异常数据的“污染”等因素都会严重影响背景协方差矩阵的估计,使得估计的协方差矩阵不能够准确描述背景模型,从而导致 **RX** 算法的检测性能下降^[13]。

为了解决上述问题,本文提出了一种基于决策级融合的 **RX** 高光谱影像异常检测算法,并利用真实高光谱数据进行了实验仿真,来验证该算法的有效性。

1 **RX** 异常检测算法

对于像元个数为 N 、图像维数为 B 的高分辨率影像数据,假设观测像元表示一个维数为 B 的光谱矢量 x , 其中 $x = [x_1, x_2, \dots, x_B]$, 则相应的二值目标检测假设模型如下:

$$\begin{aligned} H_0: x(n) &= x^0(n) \\ H_1: x(n) &= x^0(n) + t \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $x^0(n)$ 代表非目标背景像元; t 代表目标像元; H_0 表示为背景杂波的假设; H_1 表示含有目标的假设。

在二值统计模型基础上,采用广义似然比检验方法可以推演得出 **RX** 检测算子,其表达式为:

$$\delta_{\text{RXD}}(x) = (x - \mu)^T C^{-1} (x - \mu) \quad (2)$$

$$\begin{cases} \geq \eta & H_1 \text{成立} \\ < \eta & H_0 \text{成立} \end{cases}$$

式中: η 为算子的判定阈值; μ 为背景均值向量的估计值; C 为背景样本的协方差矩阵的估计值。

公式(2)即为经典 **RX** 算子,与常用的马氏距离有着相同表达形式。本质上, **RX** 可以看作主成分分析(**PCA**)的逆过程。经过 **PCA** 变换之后,可以得到原始数据信息分布的主要方向,即协方差矩阵 C 的几个最大特征值所对应的特征向量。或者说, **PCA** 把绝大部分有意义的图像信息从原始图像特征空间压缩到了以少数几个互不相关的主分量为基底的空间上。显然,某些在图像中出现的概率非常低的目标将不包含在这些主分量中,相反地它们却经常出现在协方差矩阵 C 的小特征值对应的特征向量方向上。所以对于影像中的异常目标而言,其特

征值越小,相应的 $(x - \mu)^T C^{-1} (x - \mu)$ 的值就越大,这正是 **RX** 算法能有效地应用于异常目标检测的原因所在^[14]。

从以上算法原理分析中可以发现,经典的 **RX** 检测算法属于异常能量的检测方法的一种,假如待检目标偏离背景统计分布的程度越大,则越可能被判定为异常目标。然而在实际应用中直接运用 **RX** 检测算子,进行高分辨率影像异常目标检测时,往往检测效果不佳,会产生很多虚警区域。针对这些问题,本文将利用传感器的冗余性和互补性特性,提出一种基于规则的决策级融合方法,结合 **RX** 算法,完成高光谱异常目标检测任务。

2 基于规则的决策级融合方法

数据融合技术是现代遥感影像分析的核心技术之一,由于单一的传感器的信息并不能全面的反应地物特性,因此有必要在地物识别等算法运用之前,对高光谱影像进行数据融合。数据融合方法按照融合层次的不同,可以划分为像素级融合、特征级融合、决策级融合3个层次。像素级融合是最低层次的数据融合,运算较为简单。由于没有进行特征提取,所以像素级融合能够保留尽可能多和准确的空间和光谱信息。但是由于直接利用原始数据,并没有考虑图像相邻像素间的相关信息,像素级融合往往会有抗干扰能力差、信息利用效率低、计算量大等局限性,影响了该方法的进一步应用处理。在数据融合的3个层次中,决策级融合的层次最高,它可以直接对完全不同类型的遥感器或者来自不同环境区域的感知信息形成局部决策并进行最后分析,以得出最终的决策。与其它数据融合方法相比,决策级融合具有灵活性高,通信量小,抗干扰能力强的优点。

在此基础上,本文提出了一种基于规则的决策级融合方法。基于规则的决策级融合方法,从数据融合原理出发,利用不同遥感仪影像间的互补信息以及冗余信息,建立决策规则。图1显示了冗余信息与互补信息在不同遥感仪间的一种关系。

本文提出的方法首先对可见近红外和短波红外图像进行图像配准、影像滤波等预处理。接着对配准后的短波红外影像与可见近红外影像分别进行 **RX** 异常检测处理,获取一个初步决策,得到两幅检测的二值图像。之后,选择相同的虚警率作为初步决策的融合标准,根据专家判定区域,划分目标区域与背景区域,进行规则融合准备。图2为一个专家判定区域(根据先验知识,例如纹理一致性、辐射强度特点,该区域可由针对该应用的特定纹理

分析、聚类算法自动检测出来;或者由专家进行判别得到,目的是设置一个适用于对块区域进行目标检测分析的大致范围),白色区域为目标区域,记为 $area1$,黑色区域为背景区域,记为 $area2$;接着在目标区域进行“或”逻辑,在背景区域进行“与”逻辑。“与”和“或”具体操作与不同遥感仪之间的互补和冗余密切相关,是反映多传感器信息融合的算术逻辑描述。总的目标是在去除部分冗余信息的同时,要突出并体现两组传感器异物检测的信息互补性。

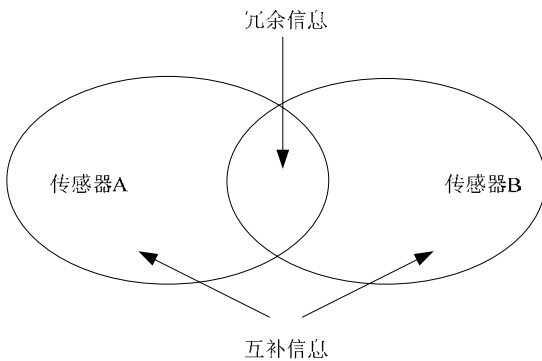


图 1 传感器信息构成

Fig.1 The information structure for two sensors



图 2 先验信息区域

Fig.2 The area of prior knowledge

本文算法伪代码如下:

1) $data_1 = \text{pre_processing}(data_1)$, $data_2 = \text{pre_processing}(data_2)$, 对场景影像进行预处理。

2) 对可见近红外与短波红外场景影像进行 RX 检测目标检测,得到初步异常检测判决结果: $out_1 = \text{RX}(data_1, XJ)$ 与 $out_2 = \text{RX}(data_2, XJ)$ 。

3) 在融合中心进行规则融合, $\text{fusion}(x, y) = out_1^{area1}(x, y) \& out_2^{area1}(x, y)$, $\text{fusion}(x, y) = out_1^{area2}(x, y) \& out_2^{area2}(x, y)$ 得到融合结果。式中: $data_1$ 、 $data_2$ 分别为 80 波段可见近红外数据以及 75 波段短波红外数据; pre_processing 为影像配准与预处理函数; XJ 表示虚警率,作为连接两组初步判决的桥梁; out_1 、 out_2 分别为可见近红外、短波红外数据的 RX 异常检测后的初步目标判决结果; $out_1^{area1}(x, y)$ 和 $out_2^{area1}(x, y)$ 分别表示目标区域可见近红外和短波红外 RX 检测后的二值图像, $out_1^{area2}(x, y)$ 和 $out_2^{area2}(x, y)$ 分别表示背景区域可见近红外和短波

红外 RX 检测后的二值影像, $\text{fusion}(x, y)$ 为融合中心判决结果。图 3 是本算法的总体流程图。

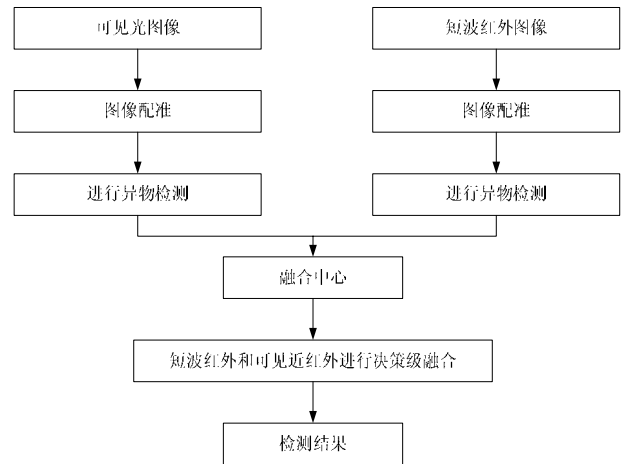


图 3 本算法总体流程图

Fig.3 Diagram of the proposed algorithm

3 实验结果与分析

实验中采用的是一组实测高光谱数据,对场景数据进行图像配准、波段融合之后,该组数据为 226×502 像素,具有 3 种描述方式,分别是 80 波段的可见近红外光谱数据,75 波段的短波红外数据,以及 155 波段的像素级融合数据(本文的像素级融合数据,是由配准好的 80 波段的可见近红外光谱数据以及 75 波段的短波红外数据经过波段融合和归一化处理后得到)。图 4(a)是第 30 波段的可见近红外灰度图,图 4(b)是第 30 波段的短波红外灰度图。

实验场景包括了以大量植被(柳树林和收割后的玉米地)为大背景下的 1 辆厢式货车、2 辆半挂车。场景中包含有 10 个涂有伪装漆料的两类靶标(分别涂敷成绿色的材质 A、材质 B),它们分别上下放置。

对经配准好的可见近红外和短波红外数据进行 RX 异常检测后,以相同虚警率作为进行决策级融合的关系判决条件。实验中设置了 2% 的虚警率值,经过调节 RX 检测算子的阈值,得到 RX 异常目标检测的初步判决结果。图 5(a)和图 5(b)分别为在相同虚警率下可见近红外和短波红外 RX 异物检测结果的二值图。表 1 为虚警率取 2% 时,可见近红外与短波红外影像 RX 检测结果统计对照表。从图 5 中,可以初步发现:可见近红外和短波红外的检测结果中具有一定程度的冗余信息。这表现在两个检测结果图中,目标区域有很多重叠的区域。同时可以看到,在相同虚警率条件下,可见近红外的 RX 异物检测性能要比短波红外异物检测效果要好,显示在这个应用中,可见近红外传感器和短波红外传

传感器会获得不同的判决信息。

表1 虚警率取为2%下RX检测统计对照表

Table 1 List of detection results with the false alarm rate 2%				
	虚警率	虚警个数	检出个数	检测率
可见近红外	2%	2266	4184	80.28%
短波红外	2%	2262	3714	71.26%

为了进一步观察信息融合的必要性,对80波段可见近红外数据以及75波段短波红外的初步RX检测结果图进过叠加对比分析。首先可以发现这两组检测结果确实存在显著的互补区域。图6(a)和图6(b)分别是在目标区域、可见近红外检测结果对短波红外的互补区域以及短波红外检测结果对可见近红外的互补区域(像素标明为255的区域,即白色部分)。可以看出可见近红外和短波红外除了冗余信息外,还具有互补信息,这为本规则算法提供了依据。

在此基础上,结合RX算子的初步判决结果以及以上实验分析,根据基于规则的决策级融合方法,

对以上实验结果在融合中心完成决策级数据融合,得到最终判决结果,并与该场景的三组数据的RX检测结果进行比较。图7(a)、7(b)分别是可见近红外、短波红外RX异常检测结果,图7(c)、图7(d)分别是像素级融合RX检测结果以及本文方法的RX检测结果。表2是对应检测方法的实验结果统计对照表。为便于比较算法的优越性,实验都是控制在一个相同虚警率(0.47%)下,然后选择门限完成对各类数据的异物目标自动检测。

对比表1和表2可以看到,经过基于规则的决策级融合,目标检测率从80波段可见近红外以及75波段短波红外的80.28%、71.26%提升至融合后的86.91%,决策级融合后的虚警率大大降低,降低为0.47%。从以上实验结果可以发现,在相同虚警率(0.47%)下,简单的像素级融合在一定条件下并不能有效的利用两组数据(可见近红外和短波红

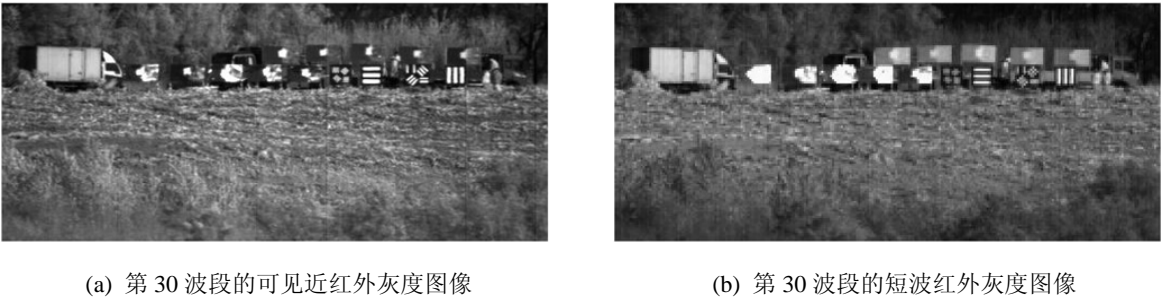


图4 实测高光谱数据示意图(灰度图像表示) Fig.4 Illustration of hyperspectral data set (Gray level)

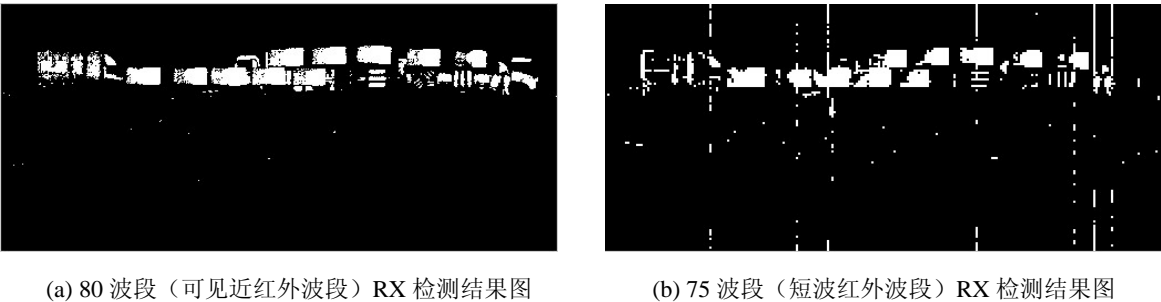


图5 RX算法初步判决结果 Fig.5 Preliminary results of RX algorithm

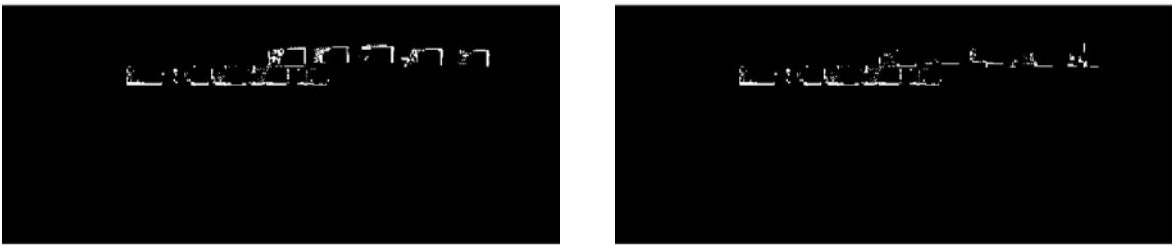


图6 初步判决结果的互补区域 Fig.6 Complementary areas of the preliminary decisions

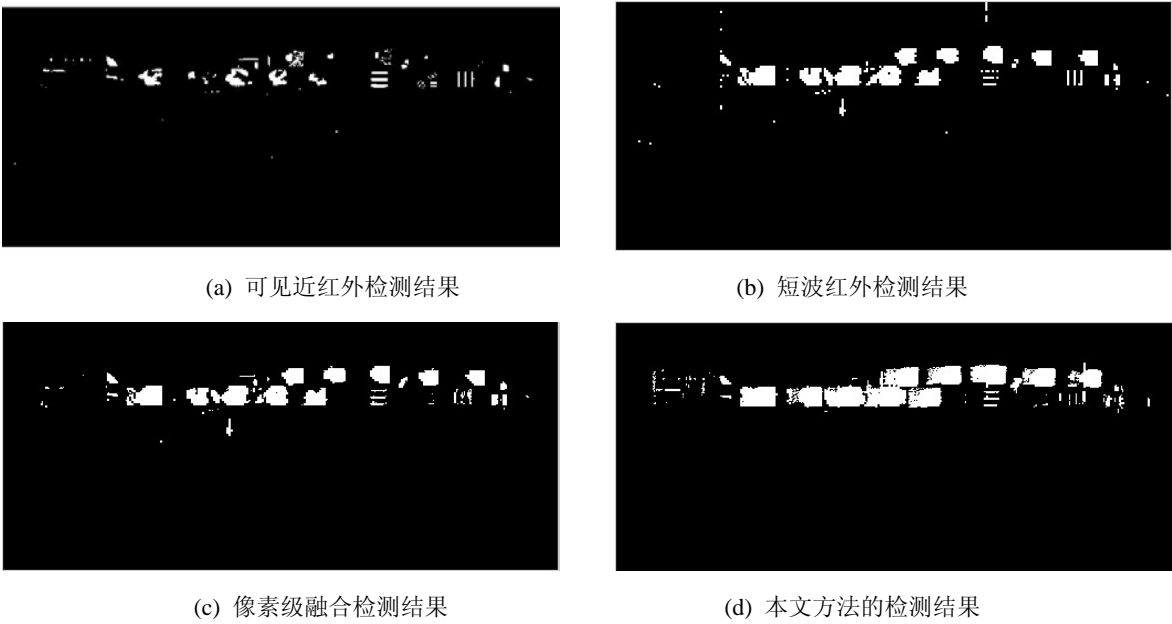


图 7 虚警率 0.47% 下 RX 检测结果 Fig.7 RX detection results with the false alarm rate 0.47%

外数据) 的互补信息。在实验中, 像素级融合的检测率比 75 波段短波红外的检测率还低 (53.06%对 53.59%)。在本实验中, 这主要是因为短波红外数据中存在一些异常数据 (由于红外传感器的条带成像局限性造成), 这会影响背景协方差矩阵的估计, 不能发挥像素级融合的效能。相比像素级融合以及 80 波段可见近红外、75 波段短波红外的检测结果, 本文提出的算法能够有效的利用两组数据的冗余以及互补信息。一方面用短波红外和可见近红外数据进行相互修正, 另一方面利用了信息互补性, 最终提高了目标检测率。对比表 2 的信息融合效果, 从另外一方面, 也说明了决策级影像融合具有较高的容错率, 并且具有较强的抗干扰能力。

表 2 实验结果统计对照表

Table 2 List of experimental results				
	虚警率/%	虚警 个数	检出 个数	检测率/%
可见近红外	0.47	510	846	15.93
短波红外	0.47	510	2846	53.59
像素级融合	0.47	510	2818	53.06
决策级融合	0.47	510	4616	86.91

从以上两组实验结果可以看出, 本算法对短波红外和可见近红外 RX 异常检测初步判决结果, 进行决策规则融合后, 有效地降低了单组检测结果的虚警率, 同时提高了目标的检测率, 得到了良好的

检测性能。

4 结论

针对地物先验知识很难获取的问题, 本文进行了基于 RX 算子的高光谱影像异常目标检测算法的研究。介绍了 RX 算法的原理以及设计流程, 针对 RX 异常目标检测存在虚警率偏高的问题, 提出了基于决策级融合的目标检测方法, 该方法首先通过可见近红外和短波红外图像的配准, 然后在相同虚警率条件下对短波红外和可见近红外影像进行异物检测, 获取初步 RX 异常检测判决, 最后在融合中心进行决策级融合, 得到最终的检测结果。

在 RX 算法基础上, 近些年来也提出了很多类似的改进异常检测算法, 如: UTD、CRXD、NRXD 等。这些算法大多都集中于利用光谱域信息, 往往没有去考虑利用空间域影像的互补信息, 这会间接影响它们的最终检测性能。本文提出的决策级融合算法把空间信息涵盖进去, 因此对上述这些异常检测算法, 该融合算法同样也会具有一定应用潜力。需要注意的是, 本算法所研究的场景目标是块状区域, 因此设计出的融合规则具体适用于块状区域目标检测。同时专家判定区域考虑了纹理分析、灰度聚类与人为设置等多种方法, 后期可以通过运用一次效果较好的异常检测结果来代替这一区域的获取。

运用实测的高光谱影像数据, 对本文提出的算法进行仿真实验。实验结果表明, 本算法具有较高的容错率, 并且具有较强的抗干扰能力, 能够保证

在低虚警率的同时, 获得较高的目标识别率。本文提出的基于RX算子的高光谱影像异常目标检测算法, 参数设置简单, 取得了较好的检测效果, 弥补了RX算法中局部背景协方差矩阵估计的局限性。

参考文献:

- [1] 宗靖国, 张建奇, 秦翰林, 等. 基于非子采样金字塔变换的高光谱图像异常检测[J]. 红外技术, 2011, **33**(1): 56-60.
- [2] Fowler J E, Du Q. Hyperspectral image compression using JPEG2000 and principal component analysis[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2007, **2**(4): 201-205.
- [3] Matteoli S, Diani M, Corsini G. A tutorial overview of anomaly detection in hyperspectral images[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2010, **25**(7): 5-28.
- [4] Tillo T, Penna B, Magli E, et al. Hyperspectral image compression employing a model of anomalous pixels [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2007, **4**(4): 664-668.
- [5] Echès O, Dobigeon N, Tourneret J. Y. Enhancing hyperspectral image unmixing with spatial correlations[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, **49**(11): 4239-4247.
- [6] Stein D W J, Beaven S G, Hoff L E, et al. Anomaly detection from hyperspectral imagery[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing Magazine*, 2002, **19**: 58-69.
- [7] Kwon H, Der S Z, Nasrabadi N M. Adaptive anomaly detection using subspace separation for hyperspectral imagery[J]. *Optical Engineering*, 2003, **42**(11): 3342-3351.
- [8] Ma L, Crawford M M, Tian J. Anomaly detection for hyperspectral images based on robust locally linear embedding[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2010, **31**(6): 753-762.
- [9] Molero J M, Paz A, Plaza A, et al. Fast anomaly detection in hyperspectral images with RX method on heterogeneous clusters[J]. *The Journal of Supercomputing*, 2011, **58**(3): 411-419.
- [10] Reed I. S, Yu X. Adaptive multiple-band CFAR detection of an optical pattern with unknown spectral distribution[J]. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 1990, **38**(10): 1760-1770.
- [11] Manolakis D, Shaw G. Detection algorithms for hyperspectral imaging application[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing Magazine*, 2002, **19**(1): 29-43.
- [12] Chang C I, Chiang S S, Ginsberg I W. Anomaly Detection in Hyperspectral Imagery[C]//*Proc. of SPIE on Geo-Spatial Image and Data Exploitation II*, 2001, **43**(3): 43-50.
- [13] 王斯博, 杨春玲. 基于RX算法的高光谱红外弱小目标检测[J]. 红外技术, 2010, **32**(4): 204-208.
- [14] 郑兰芬, 张兵, 童庆禧. 高光谱遥感原理技术与应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.

(上接第333页)

通过仿真实验证明, 简单场景仿真图像的刷新帧频达60 Hz以上, 复杂场景仿真图像刷新帧频也在20 Hz以上, 仿真图像具有一定的红外特征, 与实际场景基本相似, 能在人眼接受的程度上达到实时仿真任务需求。若要进一步提高仿真图像的逼真度, 需在场景几何模型构建时更加细化, 同时需考虑场景温度场分布梯度模型, 以使仿真图像的细节更加突出^[13]。

参考文献:

- [1] Vega Programmer's Guide Version 3.7 for Windows NT and Windows 2000[Z]. MultiGen Paradigm Inc., 2001.
- [2] Jean L, Thierry C, Nicolas D, et al. Simulation of active and passive infrared images using the SE-WORKBENCH[C]//*Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XVIII, Proc of SPIE*, 2007, **6543**: 1-15.
- [3] Nelsson C, Hermansson P, Nyberg S, et al. Optical signature modeling at FOI[C]//*Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications III, Proc. of SPIE*, 2006, **6395**(8): 1-12.
- [4] 李红宁. 数字化三维红外外场景成像建模和实现技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2010.
- [5] Garbo D L, Olson E M. Real-time three dimensional infrared scene generation utilizing commercially available hardware[C]//*Proc of SPIE*, 1996, **2741**: 166-178.
- [6] 王章野, 江照意, 鲍虎军. 基于量子光学的红外成像光照模型[J]. 计算机学报, 2002, **25**(9): 897-903.
- [7] 李宏宁, 白廷柱, 曹峰梅, 等. 用于场景仿真的红外成像模型及其有效性分析[J]. 红外与毫米波学报, 2010, **29**(1): 57-61.
- [8] 张建奇, 王晓蕊. 光电成像系统建模及性能评估理论[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2010: 97-148.
- [9] 路远, 吴丹. 地表红外辐射建模研究[J]. 红外技术, 2008, **30**(2): 75-78.
- [10] 陈珊, 孙继银. 自然地表红外成像仿真模型[J]. 红外技术, 2008, **30**(9): 537-542.
- [11] 王章野, 陆燕青, 彭群生. 基于气象学和传热学的城市建筑物红外成像模型[J]. 系统仿真学报, 2009, **12**(5): 517-523.
- [12] Sillion F X, Peuch C. *Radiosity and Global Illumination*[M]. San Francisco: Morgan Kauf- man Publishers Inc, 1994.
- [13] 陆艳青, 王章野, 董雁冰. 城市建筑物红外特性四季变化及其成像研究[J]. 红外与毫米波学报, 2002, **21**(5): 377-381.