基于可见光光谱图像的红外多光谱图像仿真生成

许 洪,王向军,刘 峰,张召才

(天津大学 精密仪器与光电子工程学院 精密测试技术与仪器国家重点实验室,天津 300072)

摘 要:阐述了红外多光谱图像仿真技术的意义和原理,研究了一种红外多光谱图像的仿真生成 方法。提出了一种基于可见光/近红外波段多光谱、超光谱图像数据的地面场景建模方法,以及无监督 分类方法和有监督分类方法相结合的地物像元分类、匹配、标记的策略,可以高效地解决像元地物自 动匹配标记的问题。利用 RGB 彩色图像验证了这一方法,在将图像分割后为每类像元赋予相应的红 外发射率数值,生成了4个红外波段的多光谱仿真图像,验证了该方法的可行性,指出了多光谱、超光 谱图像数据在仿真应用中的各自特点。从仿真结果可以看出:不同波段图像中目标和背景之间呈现不 同的特征。该方法可以生成空间形貌和辐射特征接近真实环境的红外多光谱仿真图像,对长波红外波 段的多光谱成像探测仪器的研制和目标、背景光谱特征分析与探测算法的研究具有一定意义。

关键词:红外多光谱图像仿真; 多光谱图像; 超光谱图像; 无监督分类; 有监督分类 中图分类号:TN21;TP7 文献标识码:A 文章编号:1007-2276(2009)02-0200-05

Infrared multispectral image simulation based on spectral images in visible bands

XU Hong, WANG Xiang-jun, LIU Feng, ZHANG Zhao-cai

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, College of Precision Instrument and Optoelectronic Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: A kind of infrared multispectral image simulation method was researched after introducing the significance and principle of infrared multispectral image simulation. An infrared multispectral ground scene modeling technology was proposed based on multispectral or hyperspectral images data in VIS/NIR band. A combined strategy of unsupervised and supervised classification was put forward to efficiently solve the automatching and marking of pixels. The method was verified by RGB images. Simulational images in four LWIR bands were generated after pixels segmentation and infrared emissivity assignment. The respective characteristics of multispectral and hyperspectral image data in pixels classification and matching were pointed out. Simulational results show the difference between targets and backgrounds. Using this method, infrared multispectral simulation images can be generated with geometrical topography and radiative characteristics highly similar to real natural environments, which are valuable to development of LWIR multispectral imaging spectrometers, the spectral signature analysis of targets and backgrounds as well as the development of detection algorithms.

收稿日期:2008-09-25; 修订日期:2008-11-01

基金项目:国防重点预研基金项目

导师简介:王向军(1955-),男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士生导师,主要从事精密测试技术及仪器、光电探测技术、影像与视觉测量 方面的研究。Email:xdocuxjw@vip.163.com

作者简介:许洪(1975-),男,北京人,博士生,主要从事红外多光谱探测技术的研究。Email: xuhongpost@163.com

Key words: Infrared multispectral image simulation; Multispectral image; Hyperspectral image; Unsupervised classification; Supervised classification

0 引 言

近年来,长波红外(8~14 µm)波段的多光谱、超 光谱成像探测技术已经逐渐成为一种新的性能优异 的目标光电探测技术手段,在真伪目标识别、背景抑 制、化学物质检测等领域表现出了优异的性能。

然而,由于技术原因,长波红外波段的多光谱、超 光谱成像遥感器及探测系统的研制门槛较高,基本上 被发达国家所掌握,现有设备很少,且多为项目专用 设备,例如 SEBASS、TIRIS、AHI 等成像光谱仪系统。 相比较而言,可见光/近红外波段的超光谱成像光谱 仪技术发展成熟,目前在运行的星载、机载成像光谱 仪有 MODIS、AVIRIS、Hyperion 等,可以方便地获取 大量可见光/近红外波段的超光谱图像数据。

长波红外波段的多光谱、超光谱成像探测仪器的 研制和目标背景光谱特征分析与探测算法的研究需要 大量仿真、半仿真试验环境,由于红外波段多光谱、超 光谱成像光谱仪器的缺乏,难以获取足够的真实数据 来建立仿真环境,如何得到近似真实场景的多光谱仿 真图像,是迫切需要解决的问题。目前,国外的研究机 构已经开展了这方面的研究,并取得了一定成果[1-2]。

由于可见光波段的光谱图像数据容易获取,能否 有效地融合这些可见光波段的光谱图像数据,用于长 波红外波段的多光谱图像仿真环境的生成,是一个值 得研究的问题。由此,提出了一种基于可见光波段的 光谱图像数据的背景生成和地物标记的复杂地面背 景红外多光谱图像仿真生成方法。

1 红外多光谱图像仿真生成原理

红外场景的仿真生成是一个复杂的过程,需要经 过目标、背景建模构形、分布温度场计算、材质标记和 热发射率参数赋值、大气传输与辐射影响等一系列过 程,其流程如图1所示[3-4]。

场景的红外多光谱仿真辐射亮度可用下式表示:

$$L(\lambda_i \sim \lambda_{i+1}) \int_{\lambda_i}^{\lambda_{i+1}} L(\lambda) d\lambda$$
 (1)

 $L(\lambda)$ 就是仿真场景的光谱辐射亮度,由于在长波





红外波段,太阳的辐射能量很小,且对绝大多数物质, 其长波红外波段的发射率很高,因此,不考虑地表反 射,地表至传感器的光谱辐射亮度为:

 $L(\lambda) = L_{\rm B}(\lambda, T_{\rm sur}) \cdot \varepsilon(\lambda) \cdot \tau(\lambda) + [1 - \tau(\lambda)] \cdot L_{\rm B}(\lambda, T_{\rm sir}) \quad (2)$ 式中:右边第一项为地表辐射经大气衰减后到达传感 器的光谱辐射亮度;第二项为大气的自身辐射作用影 响; $\epsilon(\lambda)$ 为地表材质的热辐射发射率; $\tau(\lambda)$ 为大气的光 谱透过率;L_n(λ,T)为温度为T的黑体光谱辐射亮度:

$$L_{\rm B}(\lambda,T) = \frac{c_1}{\pi \cdot \lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp[c_2/(\lambda \cdot T)] - 1}$$
(3)

式中: c_1 、 c_2 分别为第一和第二辐射常数。将 $L(\lambda)$ 在波 长 $\lambda_i \sim \lambda_{i+1}$ 间积分,得到该波段的积分辐射亮度 $L(\lambda_i \sim$ $\lambda_{i+1})_{\circ}$

2 基于可见光波段光谱图像的地面背景建模 及材质标记

2.1 基本原理

复杂地面背景建模构形是红外图像仿真过程的 第一步,也是非常复杂的一个环节,直接决定了能否 产生近似真实自然环境的仿真图像。目前,已知的地 面背景生成技术按建模数据来源区分,可以分为真实 建模和随机生成建模;按动态显示的需要可以分为三 维背景建模技术和二维图像背景生成技术。复杂背景 的随机生成建模技术并不生成某处真实背景的模型, 而是产生一个近似自然环境背景的仿真模型,主要有

概率统计生成技术和分形生成技术两种。目前,地面 背景的真实建模技术主要是根据地面环境的数字高 程模型(DEM)来实际生成某处场景的三维模型^[5];另 外一种真实背景建模技术是通过对场景的可见光波 段的灰度图像进行分割,得到不同地物的几何轮廓分 布,作为下一步计算的背景模型^[6]。

以上提到的地面背景建模技术,其缺陷是复杂背 景的几何建模与地表材质标记及热发射率等参数赋 值过程的脱节,往往需要人工参与赋值,工作量大、效 率低。基于灰度图像分割的背景生成技术是一种常用 的二维场景建模技术,可以高效地生成较为逼真的红 外背景模型,但是该方法仅利用图像的灰度信息对地 物进行概率统计分类,很难准确区分复杂的地物。

成像光谱仪是新一代光电成像仪器,获取的多光 谱、超光谱图像数据可以同时记录场景的空间几何信 息和每个像元对应地物的光谱信息,实现了图谱合 一。目前,工作于可见光/近红外波段的机载、星载成 像光谱仪有几十台,此外还有许多其他方式工作的光 谱成像系统,可以提供从十几至上百波段的不同光谱 分辨率的光谱图像数据。这种光谱图像的空间信息直 接构成了地面背景的空间几何模型,而每个像元的光 谱信息则可以通过和已知光谱数据库进行分析比对, 判断其所属材质类别,实现材质标记,这样就可以跨 越几何建模和地物标记之间的鸿沟。同一物质的可见 光波段反射率和红外波段发射率都是其特有的属性, 通过可见光波段反射率将材质标记后,在光谱数据库 完备的情况下,可以直接赋予其红外波段发射率,图2 (a)、(b) 给出了取自美国喷气推进实验室 (JPL)的 ASTER 光谱数据库的 4 种物质的可见光波段反射率 和红外波段的发射率曲线。



光谱分辨率的高低决定了利用光谱数据判别材 质所属类别的准确性和多样性,光谱分辨率越高,则 可利用的信息越多,可判别的类别越多,判别越准确, 但是当背景包括几种确定的地物时,使用少数几个特 征波段或特征波段的组合就足够判别出每种类别,此 时低光谱分辨率的多光谱图像也可以利用。

2.2 基于光谱数据的材质匹配和标记

利用光谱数据实现准确、高效的自动材质匹配和标 记是场景建模过程的关键,需要有相应的数据资源和软 件算法。首先,需要一个种类齐全、涵盖可见光波段的分 辨率和红外波段发射率的完备的光谱数据库,对于岩 石、矿物等物质来说,其构成稳定,光谱特性变化不大, 对于植物、土壤等物质,其成分随季节、气候变化显著, 光谱性质变化明显,对这些物质要记录其在不同条件下 的反射率和发射率数据。其次,要有省时、高效的光谱匹 配识别算法,方便地实现材质自动匹配和标记。

由于引入了先验光谱数据库,该问题在信息处 理、模式识别领域属于有监督的分类问题,目前,针对 超光谱数据的有监督分类算法主要有:基于相关/匹 配滤波器的分类、特征提取后利用传统方法进行的分 类、利用正交子空间投影来进行的分类、数据融合分 类等,这些方法各有特点,繁简不一,有简单的,如光 谱角度匹配(SAM)算法;也有复杂的,如正交子空间 投影分类方法,需要在实践中加以选择。相对于有监 督分类问题的是无监督分类问题,即不考虑先验光谱 数据库,而是对超光谱图像中的所有像元光谱数据直 接进行分类,主要方法有:K-均值聚类法、ISODATA 聚类法和神经网络分类法等。

如果直接用每个像元的光谱数据与光谱数据库 中的所有种类物质的光谱数据进行比对,计算量十分 庞大,因此,必须采取适当的方法来简化这个过程,这 里提出一种简化的处理策略:首先,对整幅图像进行 无监督分类处理,可以将光谱坐标空间中的每个像元 聚集区的中心处光谱数据作为聚类中心初始值,采用 K-均值聚类等方法对所有像元进行分类处理;然后 将每类的光谱数据中心值与先验光谱数据库中的物 质光谱数据进行有监督的匹配分类,确定这一类像元 所属物质类别。由于一幅超光谱图像中包含的物质种 类往往远少于光谱数据库中的物质种类,所以,这个 方法可以大大减少处理时间,从而可以高效地实现物 质自动匹配和自动标记,该方法的流程参见图3。

band and emissivity curves in LWIR



图 3 基于非监督聚类和有监督聚类的地物标记、参数赋值流程图 Fig.3 Flow chart of ground objects labelling and parameters assignment by unsupervised and supervised classification methods

3 红外多光谱图像仿真实验

由于可见/近红外波段的超光谱图像数据不易获得,文中采用彩色图像作为红外多光谱图像仿真的数据源,彩色图像包含 RGB 3 通道的强度值,实际上是一种3 波段的多光谱图像,对于场景构成相对简单、 地物色彩差异明显的情况,利用彩色图像进行地物分 类和标记,同样能够取得较好效果。

图 4 为取自 Fort Carson 图像数据库的一幅图像 和一段视频中的图像,存储格式为 bmp,每个像元包 括红、绿、蓝 3 坐标值。图 4(a)是取自某段视频的一幅 图像,图中包括沙地、车体、天空 3 种背景,三者的颜 色差异非常明显,完全可以利用 RGB 坐标值分开。采 用 K-均值聚类法将图像分割为天空、沙漠、车体 3 部 分。由于尚未建立完善的先验光谱数据库,直接将取 自 ASTER 光谱数据库的沙子、黑色喷漆等近似物质 的红外光谱发射率数据赋予沙地和车体,为了方便起 见,将天空视为灰体处理。



图 4 两幅自然背景的 RGB 彩色图像 Fig.4 Two RGB images of natural scenes

在红外图像仿真中,对每个像元地物除了光谱发 射率的赋值外,还需要对地物进行温度赋值,才能满 足辐射亮度计算公式的需要。要得到真实的辐射亮度 值,需要记录场景地物的真实温度,这样做难度非常 大,在绝大多数仿真中,往往通过解算地物表面一维 瞬态传热模型,根据所设气象条件和地物热物性参数, 得到其表面温度。为了简化起见,直接赋予地物近似温 度,车体为45℃,沙漠地表为35℃,天空为25℃。

为了考虑大气传输的影响,使用 Lowtran7 大气传 输计算软件计算大气传输透过率。大气透过率计算过程 中,主要参数设置为:1976 美国标准大气模式、气溶胶为 乡村模式、能见度为 23 km、水平观测模式、观测距离为 1 km,计算得到的大气透过率曲线如图 5 所示。



Fig.5 Transmitance curve in LWIR

最后,结合上述处理过程的结果,分别作出 8~ 9 μm、9~10 μm、10~11 μm、11~12 μm 4 个波段的红 外仿真图像,如图 6 所示,可以看出:在不同的波段车 体目标和沙漠背景之间的对比度是不同的。





在取自 Fort Carson 数据库的草地战车 RGB 图像 中,主要包含干草、土壤、车体、天空等物。由于干草、土 壤、战车履带等物的颜色近似,在 RGB 3 个波段进行 分类,并不能准确将其分开,这也体现了多光谱分类不 如超光谱分类的地方。为了保存战车特征,对战车进行 了局部阈值分割,分离出履带部分。分别将干草、土壤、 橄榄绿喷漆和氧化钢板的光谱发射率数据赋予各类像 元,并假设草地、土壤温度为 20 °C、车体表面温度为 30 °C、车体履带温度为 50 °C、天空温度为 10 °C,首先 做出 8~12 μm 的全波段红外仿真图像,如图 7(a)所示。

图 7(b)为同样取自 Fort Carson 图像数据库的该 场景的实拍热红外图像。可以看出:虽然不能准确分 割土壤和干草区,但生成的仿真图像具有近似自然环 境分布的特点,基本可以满足红外仿真应用需要。分析 仿真图像与实拍图像之间的差异,主要有以下原因:(1) 光谱波段信息较少,不足以将不同地物准确区分;(2) 温度选取与真实环境温度存在差异;(3)所选取地物发 射率与真实地物发射率有所不同。随着以上环节的改 善,可以进一步提高仿真图像的准确度。



图 7 LWIR 波段红外仿真图像和取自 Fort Carson 数据库的红外实拍图像

Fig.7 LWIR simulation image and the real IR image in the Fort Carson image database

利用同样的方法作出 4 个窄波段的红外仿真图像, 如图 8 所示。在成像探测技术中,通常使用信杂比系数 (SCR)来评价图像中的目标背景差异,信杂比系数是目 标强度值与背景平均强度值之比。在本次的红外多光谱 仿真实验中,在 9~10 μm 波段仿真图中,车体和履带相 对于背景具有最大的信杂比,同时不同背景间具有明显 差异;在 11~12 μm 波段图中,车体和履带相对于平均



图 8 草地中的战车场景的 4 个波段图像

Fig.8 Four bands simulation images of dry grass scene with a tank

背景的信杂比最小,但是在这个波段,背景间的差异最 小接近1。这样,就有可能利用红外多光谱仿真图像来 确定有利于目标探测的特征波段。

4 结 论

提出了一种利用可见光波段的多光谱、超光谱图像 数据,生成长波红外波段的多光谱仿真图像的方法,同 时给出了一套像元自动匹配、标记的策略。经过仿真试 验,可以得到如下结论:(1)利用可见光波段的光谱数 据将像元分类,建立场景模型,生成长波红外波段的多 光谱仿真图像的方法是可行的;(2)要得到具有精确地 物分割的红外仿真图像,需要建立完备的先验光谱数据 库及足够高的光谱分辨率的图像数据;(3)在不同波段 的红外光谱图像中,目标和背景呈现不同的特征,需要 在红外多光谱仿真图像中正确体现这一点。

参考文献:

- KWAN Yit -Tsi,STEVEN Sawtelle, BERNSTEIN Uri, et al. A simulation for hyperspectral thermal IR imaging sensors [C]// Proceedings of SPIE, Algorithms and Technologies for Multispectral,Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery XIV, 2008,6966:69661N
- [2] PEREIRA W, LESS D, RODRIQUEZ L, et al. Hyperspectral extensions in the MuSES signature code [C]//Proceedings of SPIE, Modeling and Simulation for Military Operations III, 2008,6965:69650B-1-8.
- [3] Ben-Yosef N, RAHAT B, FEIQIN G. Simulation of IR images of natural backgrounds[J]. Applied Optics,1983,22(1):190-193.
- [4] TAN He-ping, XIA Xin-lin, LIU Lin-hua, et al. Numerical coputation of infrared radiative characteristics and trans mission -computational radiology [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press(谈和平,夏新林,刘林华,等.红外辐射特 性与传输的数值计算一计算热辐射学.哈尔滨:哈尔滨工业 大学出版社),2006.
- [5] HAN Yu-ge, LIU Rong-hui, XUAN Yi-min. Infrared image simulation of complex terrain background [J].Journal of Nanjing University of Science and Technology(韩玉阁, 刘荣 辉, 宣益民.复杂地面背景红外热像模拟.南京理工大学学报), 2007,31(4):487-490.
- [6] SHAO Xiao-peng, YANG Wei, ZHANG Jian-qi. Approach to generate IR images of natural background [J].Infrared and Laser Engineering(邵晓鹏,杨威,张建奇.自然地面背景红 外图像生成方法研究.红外与激光工程),2000,29(3):11-14.