

文章编号 1004-924X(2017)01-0255-08

基于吉林一号遥感图像的星载目标快速识别系统

徐 伟^{1*}, 陈彦彤^{1,2}, 朴永杰¹, 王绍举¹

- (1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:针对传统遥感图像地面目标识别系统图像获取周期长,信息实时性差等问题,设计星载目标快速识别系统,用于卫星在轨快速识别,提出改进的基于快速视网膜关键点(FREAK)的特征匹配识别算法,解决遥感图像数据量大、背景复杂的问题。介绍了星载目标快速识别系统的工作原理,提出简化的 FREAK 特征提取模型,将原有算法的七层模型减少为四层,用于快速提取出遥感图像中目标特征;利用二进制量化空间将高维特征数据量化为二维数据,提高算法的准确度;最后通过匹配,快速识别出遥感目标。实验结果表明,识别算法的准确度平均提高 2.3%,识别用时缩短约 27.8%,满足遥感卫星在轨目标快速识别的要求。

关键词:吉林一号卫星;目标识别;FREAK 特征;二进制量化

中图分类号:TP753 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172501.0255

Target fast matching recognition of on-board system based on Jilin-1 satellite image

XU Wei^{1*}, CHEN Yan-tong^{1,2}, PIAO Yong-jie¹, WANG Shao-ju¹

- (1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
 2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*
- * *Corresponding author, E-mail: xwciomp@126.com*

Abstract: Aiming at problems such as long cycle and insufficient real time information in traditional remote sensing ground target image recognition system, an on-board target fast matching recognition platform is designed for fast on-orbit satellite recognition, and an improved feature matching recognition algorithm based on fast retinal key points (FREAK) is proposed to solve the problems of complex backgrounds and large amount of data in remote sensing image. First, we introduce the principle of on-board target recognition system and propose the simplified FREAK feature extraction model, and then we reduce the model of original algorithm from seven floors to four to quickly extract target features in remote sensing image. And then the high-dimensional feature data is quantified into two-dimensional data using binary quantization space, thus improving the accuracy of the algorithm; finally, the remote targets are recognized quickly by matching. The experimental results show that the matching accuracy can be increased by 2.3%, and matching time can be reduced by 27.8%. It can meet the requirements of quick identification of remote sensing satellite on-orbit targets.

Key words: Jilin No. 1 Satellite; target recognition; FREAK feature; binary quantization

收稿日期:2016-04-08;修订日期:2016-06-01.

基金项目:国家 863 计划基金资助项目(No. 2012AA121502)

1 引言

航天光学遥感技术能够快速、准确地获取大量动态的对地观测数据。这些数据无论在民用方面还是在军用方面都发挥着非常重要的作用。在民用方面,遥感技术可用于资源调查、土地规划、环境监测、防灾减灾等多个方面,为国民经济的发展做出了重大贡献。在军事应用领域,遥感卫星可用于战略侦察、军事测绘、海洋监测等,为国防建设提供依靠和支撑^[1]。

星载图像处理单元是新型遥感卫星的重要组成部分之一,其主要功能是在星上对遥感图像进行处理,在轨自主提取需要的目标信息。目前我国现有遥感卫星的星上处理能力较弱,仅能完成图像预处理、压缩等功能,遥感图像目标识别等工作主要在地面进行。受卫星数传能力、地面站分布的影响,及卫星轨道、地面站资源分配的限制,图像的获取流程复杂,遥感图像数据从获取到地面站接收的周期大约在 1 天左右,失去了遥感信息的实效性^[2]。然而,国外的光学遥感卫星,如美国 NEMO、法国 Pleiades、德国 BID 等卫星早已实现在轨目标检测与识别功能,并通过中继卫星或数传系统将观测结果和目标信息实时地传送到战场及用户手中。由此看出,我国遥感卫星在轨信息处理技术与国外发达国家之间存在 10~15 年的差距^[3]。为缩短与国外的技术差距,使我国遥感卫星具备在轨目标识别的能力,寻求高效、自主、创新的遥感图像在轨信息处理技术刻不容缓。

在轨目标识别需要卫星由星上图像处理单元在轨完成目标的特征提取优化与匹配识别等一系列过程,并同时保持较高的准确性和快速性。传统的目标识别方法通常采用提取全局不变特征的方法,需要经过特征分割及对目标的全局信息建模,来识别目标,如矩不变量^[4]、基于变换域的不变量^[5]等,但这类方法对图像中的噪声和目标遮挡较为敏感,由于遥感图像存在背景复杂及数据量大等特点,所以并不适用于遥感图像目标识别。而基于局部不变特征的方法^[6-7]是利用图像中目标的局部不变量进行建模,能有效解决背景噪声和遮挡等问题,应用范围也越来越广泛。其中,快速视网膜关键点特征提取算法(Fast Retina Keypoints, FREAK)^[8]采用二进制的特征描述

符,大幅降低了特征匹配时间,但在灰度阈值量化形成二进制值的过程中,会因为遥感图像背景复杂,而出现大量的量化误差,且面对大数据量的遥感图像,仍然不能满足快速性需求。

本文主要针对传统遥感图像地面目标识别系统的图像获取周期长、信息处理不及时等问题,设计了星载目标快速识别系统,并提出基于改进 FREAK 算法的快速目标匹配识别方法,并将其应用于该目标识别系统,以解决遥感图像数据量大、背景复杂的问题。力图依靠在轨自主处理,最大限度地减少地面干预,提高遥感信息的时效性。最后,利用吉林一号卫星下传的遥感图像模拟卫星在轨实时拍摄,快速识别遥感目标,并解析系统输出的数据。

2 系统简介

星载目标快速识别系统是根据吉林一号光学 A 星的在轨需求所设计的,如图 1 所示,其硬件平台选用 TI 公司的宇航级 SMV320C6727B DSP 作为主要运算单元,处理能力为 1.5GFlops,选用 Xilinx 公司 V5FX70T FPGA 作为协处理器完成可并行计算的高密度运算以及接口逻辑,降低了对 DSP 的运算需求,从而降低系统的工作频率及功耗。另外,以高速串行差分驱动器 TLK2711 作为遥感图像输入接口单元,配合图像缓存器单元 SDRAM 等完成在轨硬件平台的搭建。



图 1 星载目标识别系统

Fig. 1 On-board target recognition system

遥感图像数据首先通过高速串行接口输入到 FPGA 中,FPGA 负责完成遥感图像的预处理及整体系统控制,并将预处理后的图像输入到图像

处理单元 DSP 中进行目标识别,然后 DSP 将识别后的信息数据回传至 FPGA 中,并经过 CAN 总线发送到测控系统,最后测控系统及时将识别数据下传至地面接收站。星上硬件系统的电子学接口框图如图 2 所示。

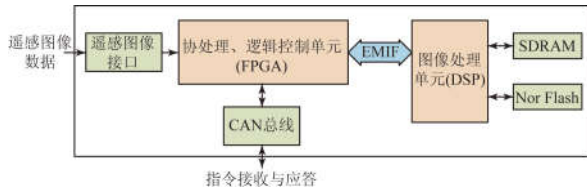


图 2 星上硬件接口框图

Fig. 2 Block diagram of hardware interface

3 改进 FREAK 算法的目标匹配识别

3.1 改进的 FREAK 特征提取算法

由于遥感图像数据量巨大,处理时间较长,影响了信息的时效性。FREAK 描述符生成的是由 0 和 1 组成的二进制描述符,其采用汉明距离计算描述符之间的关系,即异或操作。与 SIFT (Scale Invariant Feature Transform)^[9] 或者 SURF (Speeded Up Robust Features)^[10] 等计算欧式距离的匹配方法相比,二进制描述符的异或操作大大提升了计算速度。

FREAK 算法是一种模拟人类视网膜成像原理的特征描述符。人类视觉形成过程为:首先是光的刺激在视网膜上以“点阵”的形式使视神经细胞兴奋,然后视神经将“点阵”信息以串行的方式传递至视网膜外侧膝状体上进行解码,在膝状体上分布着中央视觉细胞与周缘视觉细胞,它们分别提取信息的细节特征和轮廓特征,最后由中枢神经向相应高级分工区域传递,通过在不同皮质区域对信息进行整合,来对视觉信息产生完整认知。

根据人眼视网膜的成像原理,FREAK 描述算法构建了快速视网膜关键点采样模型,以模仿中央视觉细胞与周缘视觉细胞的关系。该模型由 7 层同心圆环构成,如图 3 所示,每层圆环均有 6 个采样点,a)离中心特征点越近,采样点的分布就越密集,通过重复采样的方式可提取更多的细节特征;b)离中心特征点越远,采样点的分布就越稀疏,可用于提取更多的轮廓特征。

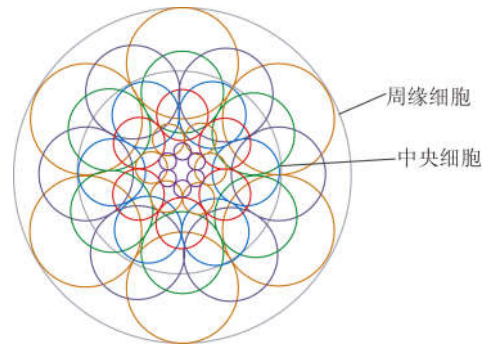


图 3 FREAK 描述符采样模型

Fig. 3 FREAK sampling model

针对遥感图像数据量大的特点,对 FREAK 算法的特征描述模型做了进一步简化。考虑到目标匹配识别过程中,主要关注的是目标的角点、边缘等轮廓特征,而目标的纹理等细节特征的缺失不会给识别结果带来重大的影响。所以本文根据人眼视网膜的成像原理,重新调整了 FREAK 描述符的采样点分配比例模型,如图 4 所示,将原有描述符的 7 层同心圆环采样模型调整为 4 层,这种做法虽然降低了采样点数目,但特征描述时间也相应缩短,而且减少了特征匹配时的误匹配现象。

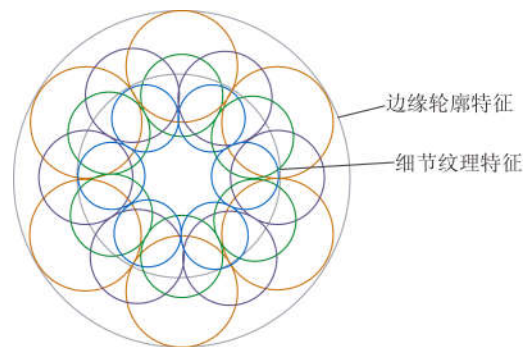


图 4 调整后的 FREAK 描述符采样模型

Fig. 4 Brief FREAK sampling model

FREAK 算子自身的圆形对称采样结构使其对于旋转具有不变性,采样位置和半径随着尺度变化使其又具备尺度不变性,而由灰度强度对比生成描述子使其对光照具有不变性。所以理论上简化的 FREAK 算子对于各种变换和噪声均具有稳健性的局部不变特征描述符。

FREAK 描述符是通过将采样点灰度值的级联比较而形成的二进制值,如式(1)、(2)所示:

$$\|F\| = \sum_{0 \leq a \leq k} 2^a J(S_a), \quad (1)$$

$$J(S_a) = \begin{cases} 1, & I(S_a^{r1}) - I(S_a^{r2}) > 0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}, \quad (2)$$

其中： $\|F\|$ 表示二进制 FREAK 描述符的十进制值， S_a 表示采样点的位置， $I(S_a)$ 表示当前采样点的灰度值。但在实际应用过程中，灰度值的量化会因为遥感图像复杂的背景及灰度值分布的不均匀，而出现大量的量化误差，从而产生误识别。所以，本文引入了文献[11]所提出的基于标记的二进制数据量化方法，量化遥感图像特征数据。

首先，建立二进制数据空间，可以将二维数据集 $\{a, b, c, d, e, f\}$ 以点的形式在坐标轴上表示，将平面划分为不同的区域，把数据集以区域代码的形式表示出来，如图 5 所示。

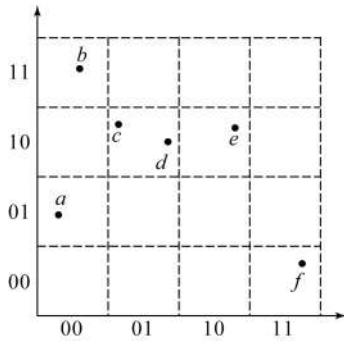


图 5 二进制数据量化空间
Fig. 5 Binary data quantification space

然后，通过二进制数据空间，将数据集以二进制的形式表示出来，如表 1 所示。

表 1 标记后的数据集
Tab. 1 Signed data collection

	Original data	Mark value
a	0.1 0.4	00 01
b	0.2 0.9	00 11
c	0.3 0.7	01 10
d	0.4 0.6	01 10
e	0.7 0.7	10 10
f	0.9 0.2	11 00

二进制数组将数据空间划分为 16 个数据子空间，根据二进制数据空间，原始数据被量化为二进制数组的形式，但会出现不同数据对应同一标记的情况，如表 1 中： $c(0.3, 0.7)$ ， $d(0.4, 0.6)$ ，对应同一标记 0110。但根据二进制数据空间，不同

数据对应同一标记的概率 P 为：

$$P = (1/2^n)^D, \quad (3)$$

其中： n 为二进制数据空间的比特个数； D 为数据的向量维数。在实际应用中，由于遥感图像特征的维数高，这种情况发生的概率较小，并不会影响最终的匹配识别结果。通过训练提取特征点的高维度信息，从而生成强区分度的特征向量。实验证明当特征向量维数 N 为 512 时，特征的区分度最强，且区分度不会随着维数的进一步增加而增强。

3.2 特征匹配及识别

本文采用最邻近距离比值法对目标特征进行匹配识别，通过计算目标图像上的特征向量与待识别图像上的所有特征向量的距离，比较其中最邻近特征与次邻近特征的距离，来判断局部特征是否匹配，如式(4)所示：

$$\begin{cases} \frac{D_{\min}}{D_{r\min}} < t, & \text{特征匹配} \\ \frac{D_{\min}}{D_{r\min}} > t, & \text{特征不匹配} \end{cases}, \quad (4)$$

式中： D_{\min} 为待匹配特征的最邻近距离， $D_{r\min}$ 为次邻近距离，当比值小于阈值 t 时认为特征是匹配的，通过实验发现阈值设定为 0.4 时，可以排除 90% 的干扰特征，而误删除率仅为 5%。

由于 FREAK 描述符生成的是二进制的特征向量，所以在判断特征距离时，可以通过异或运算计算向量间的汉明距离，假设 FREAK 描述符的两个特征向量分别为 F_1 、 F_2 ，其中：

$$F_1 = m_1 m_2 \cdots m_{512}, \quad (5)$$

$$F_2 = n_1 n_2 \cdots n_{512}. \quad (6)$$

则 F_1 、 F_2 的汉明距离为：

$$HM_distance = F_1 \oplus F_2. \quad (7)$$

然后通过确定汉明距离的阈值，判断特征向量是否匹配，最终在待识别图像中框选出匹配点数目最多的位置，即为所识别到的目标。

4 实验结果及分析

为了验证算法的效率，实验在星载目标快速识别系统中实现，通过对比本文算法和 FREAK 算法，做了两组实验：(1)特征匹配准确度对比实验；(2)特征匹配识别时间对比实验。实验中选用吉林一号卫星和 DigitalGlobe 公司的高分辨遥感影像数据库中的 150 幅图像进行算法验证，其中

包含吉林一号卫星光学 A 星拍摄的像元分辨率为 0.72 m 的图像 50 幅,以图 6 (a) 为例; QuickBird 卫星拍摄的像元分辨率为 0.61 m 的

图像 50 幅,以图 6(b) 为例; WorldView-2 卫星拍摄的像元分辨率为 0.5 m 的图像 50 幅,以图 6 (c) 为例。

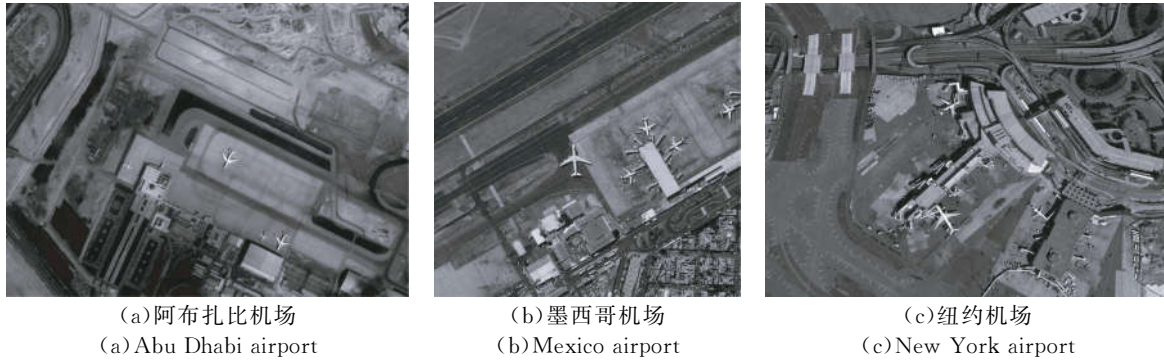


图 6 地面实验选用的遥感图像
Fig. 6 Satellite images for ground experiments

4.1 特征匹配准确度对比实验

遥感图像目标匹配识别的关键因素是匹配识别的精确程度,实验中分别使用两种算法对 3 幅

遥感图像分别进行飞机目标的匹配识别,识别结果如图 7~9 所示。

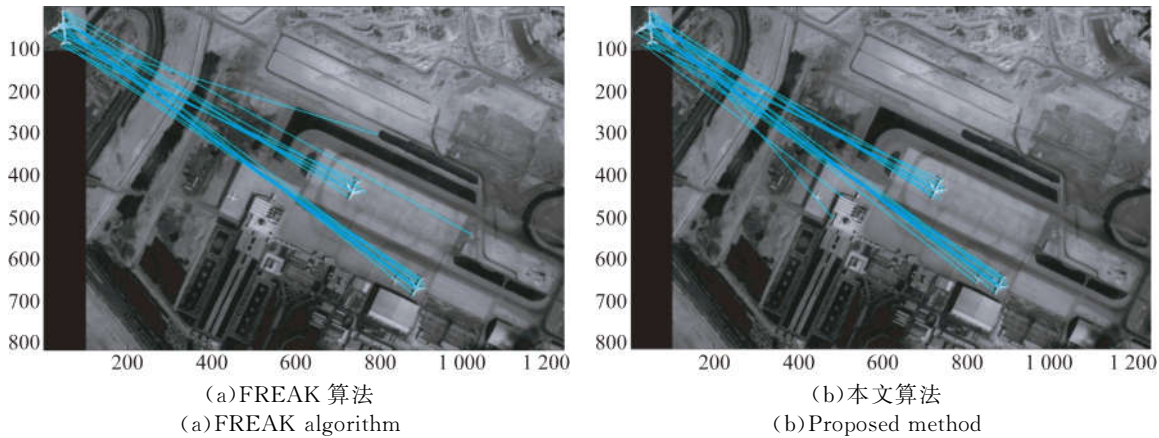


图 7 阿布扎比机场识别结果
Fig. 7 Recognition results of Abu Dhabi airport

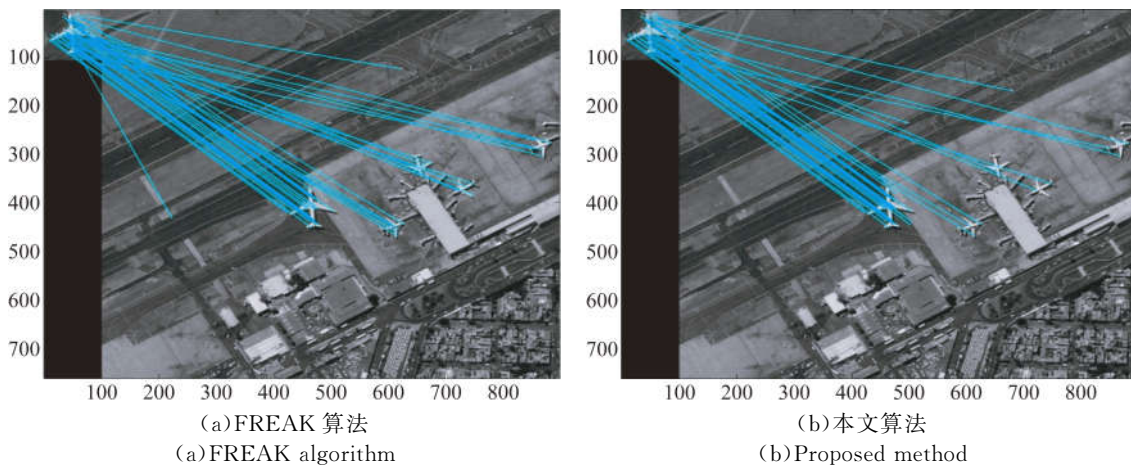


图 8 墨西哥机场识别结果
Fig. 8 Recognition results of Mexico airport

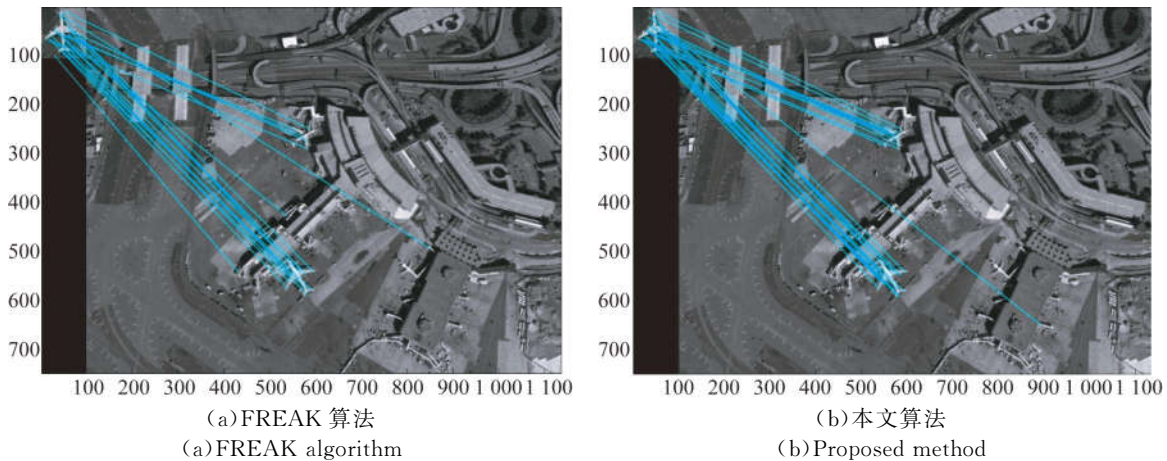


图 9 纽约机场识别结果

Fig.9 Recognition results of New York airport

从实验结果可以看出,本文算法与 FREAK 算法的识别准确度基本相同,虽然本文简化了 FREAK 特征描述方法,但由于其通过二进制数

据量化空间,得到了更加精确的特征值,从而提高了匹配的正确率,结果优于 FREAK 算法。表 2 为两种算法匹配识别正确率的统计结果。

表 2 两种算法匹配正确率统计

Tab.2 Matching accuracy of two algorithms

方法	图 6(a)			图 6(b)			图 6(c)		
	总数	正确数	正确率/%	总数	正确数	正确率/%	总数	正确数	正确率/%
FREAK	35	31	88.6	72	58	80.6	44	36	81.8
本文	43	39	90.7	84	69	82.1	54	46	85.2

4.2 特征匹配识别时间对比实验

在匹配识别时间的对比实验中,利用 CCS 中 DSP 定时器的计时程序,分别比较本文算法与 FREAK 算法在不同遥感图像上的耗时,最终得到每种算法的总耗时,为了更好地说明本文算法的快速性,实验中加入了 SIFT 算法的运行时间作为对比,如表 3 所示。

表 3 特征提取算法耗时比较

Tab.3 Comparison of feature detection times (ms)

方法	运行时间		
	图 6(a)	图 6(b)	图 6(c)
SIFT	1 229	3 869	4 950
FREAK	397	598	842
本文方法	323	467	636

从表 3 可以看出,SIFT 算法耗时最长,主要原因是其采用了尺度空间理论,故加大了算法的计算量,导致这种算法并不适合大数据量的遥感图像处理,而本文算法由于简化了特征描述模型,减少了计算复杂度,故总体用时最短。

5 基于吉林一号卫星的图像仿真实验

2015 年 10 月 7 日,吉林一号卫星成功发射,其中吉林一号光学 A 星是我国自主研发的高分辨率对地观测光学成像卫星,地面像元分辨率为全色 0.72 m、多光谱 2.88 m,拍摄的遥感图像如图 10 所示。



(a)阿联酋 阿布扎比机场
(a)Arab Emirates Abu Dhabi airport



(b)墨西哥 巴拉斯机场
(b)Mexico Blas airport



(c)美国 菲尼克斯
(c)America Phoenix



(d)阿联酋 阿布扎比 亚斯岛
(d)Arab Emirates Abu Dhabi Yas

图 10 吉林一号光学 A 星拍摄的遥感图像
Fig. 10 Images captured by Jilin-1 satellite

星载目标快速识别系统根据吉林一号光学 A 星下传的原始遥感图像,模拟卫星在轨实时拍摄过程,快速识别遥感目标,并输出识别后的遥感信息数据,解析后的识别结果如表 4 所示。其中,目标所在区域的地球坐标是根据每一帧遥感图像所携带的 GPS 数据、侧摆角等信息,经坐标变换计算出来的。

表 4 吉林一号卫星拍摄图像识别结果解析

Tab. 4 Resolve results of Jilin-1 satellite recognition

图像	目标类型(代号)	识别数量(实际)	图像相对位置	地球坐标
图 10(a)	飞机(01)	12(14)	35742 行;1068 列	东经 54°38' 北纬 24°25'
图 10(b)	飞机(01)	15(18)	87691 行;6953 列	西经 98°57' 北纬 19°36'
图 10(c)	飞机(01)	18(21)	7459 行; 13251 列	西经 112°05' 北纬 33°03'
图 10(d)	舰船(02)	6(9)	100791 行; 385 列	东经 54°23' 北纬 24°27'

根据表 4 的解析结果有,星载目标快速识别系统可准确识别目标的类型,但识别的目标数量少于实际数量,主要原因在于其采用基于局部不变特征的方法进行识别,该方法对遥感图像中微小目标的特征提取效果较差,不能匹配识别出目标,但好的一面是本文的目标误识别概率也较小。对于目标地球坐标的解析基本准确,满足实际需求。

6 结 论

本文围绕星载目标快速识别系统展开研究,主要介绍了识别系统的工作原理及基于吉林一号卫星光学 A 星遥感图像的地面实验。提出了基于遥感图像的改进 FREAK 特征匹配识别算法,通过简化 FREAK 特征提取模型,快速提取出遥感目标的特征,以解决遥感图像数据量大的问题;然后利用二进制量化空间,将高维度的目标特征量化为二进制数据,用于提高复杂背景下遥感图像的匹配识别精度。实验结果表明,本文提出的基于航天遥感图像的目标匹配识别算法的准确度平均提高了约 2.3%,识别用时缩短了约 27.8%,且地面实验识别效果良好,为我国后续发展智能化卫星奠定了坚实的基础。

参考文献:

- [1] 徐伟,朴永杰. 从 Pleiades 剖析新一代高性能小卫星技术发展[J]. 中国光学,2013,6(1):9-19.
XU W, PIAO Y J. Analysis of new generation high-performance small satellite technology based on the Pleiades [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(1):9-19. (in Chinese)
- [2] 陈彦彤,王绍举. 高分辨遥感图像目标识别技术综述[J]. 中国光学,2014,7(37):17-23.
CHEN Y T, WANG SH J. Review of target recognition technology for high resolution remote sensing image [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(37):17-23. (in Chinese)
- [3] BRIESS K, JAHN H. Fire recognition potential of the Bi-spectral Infrared Detection (BID) satellite [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(4):865-872.
- [4] TILO B, DIMA D. Correspondence, matching and recognition [J]. *IEEE Trans. on International Journal of Computer Vision*, 2015, 113(3):161-162.
- [5] 赵立荣,朱玮,曹永刚,等. 改进的加速鲁棒特征算法在特征匹配中的应用[J]. 光学精密工程,2013,21(12):3263-3271.
ZHAO L R, ZHU W, CAO Y G, et al.. Application of improved SURF algorithm to feature matching [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(12):3263-3271. (in Chinese)
- [6] KORMAN S, REICHMAN D. FAsT-Match: fast affine template matching[C]. *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2013:2331-2338.
- [7] 邵振峰,陈敏. 尺度旋转以及亮度稳健的高分辨率影像直线特征匹配[J]. 光学精密工程,2013,21(3):790-798.
SHAO ZH F, CHEN M. Line-based matching for high-resolution images with robustness for scale, rotation and illumination [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(3):790-798. (in Chinese)
- [8] ALAHI A, POLYTECH E FREAK: Fast retina keypoints [C]. in *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2012:510-517.
- [9] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(2):91-110.
- [10] BAY H, ESS A, TUYTELAARS T. SURF: Speeded up robust features [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2008, 110(3):346-359.
- [11] LEE H, CHANG J. Signature-based hybrid spill-tree for indexing high-dimensional data [C]. in *Proceedings of the 9th International Conference on Computer and Information Technology*, 2009: 287-292.

作者简介:



徐伟(1981—),男,黑龙江大庆人,博士,研究员,2003年于吉林大学获得学士学位,2008年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事星载一体化卫星技术及高可靠一体化航天电子学系统等方面的研究。E-mail: xwciomp@126.com



陈彦彤(1989—),男,辽宁沈阳人,博士研究生,2012年于吉林大学获得学士学位,主要从事模式识别及遥感图像处理方面的研究。E-mail: chenyantong1@yeah.net