

一种基于光学测量的航天器结构分析方法

滕书华^{1,2}, 鲁敏¹, 马燕新¹, 杨阿锋¹, 张军¹

(1. 国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073; 2. 66165 部队, 河北 保定 071000)

摘要: 对空间目标进行形态结构分析, 对于航天器空间操作和空间攻防等空间任务具有重要意义。探索了一种空间目标结构分析方法。首先利用最小曲率准则和最短分割线准则, 并结合目标骨架, 构建了一种新的形状分解的方法; 在此基础上, 将小波矩特征引入到卫星部件形状分析中, 并利用粗糙集约简算法选择有效的小波矩特征; 最后利用支持向量机构造了多尺度形状识别器, 结合目标先验信息实现对空间目标结构的分析。仿真实验结果表明了所提方法的有效性。

关键词: 空间目标; 形状分解; 小波矩; 粗糙集; 多尺度特征

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)11-3317-07

A new method of optical measurement-based spacecraft structure analysis

Teng Shuhua^{1,2}, Lu Min¹, Ma Yanxin¹, Yang Afeng¹, Zhang Jun¹

(1. Institution of Electronic Science and Technology, Nation University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
2. Department 66165, Baoding 071000, China)

Abstract: Morphological structure analysis of space target is significant for space missions, such as space defense, space operations, et al. A space object structure analysis method was presented. First, a shape decomposition method was constructed by combining the minimum components criterion, the shortest internal length criterion and target skeleton. Based on which, the wavelet-moment was introduced into the analysis of satellite components, and the effective features were selected by the rough set reduction algorithm. At last, a multi-scale shape recognizer was presented by support vector machine, and thus the structure of space target was analyzed. Experiments on simulation data show that the proposed algorithm is efficient.

Key words: space target; shape decomposition; wavelet-moment; rough set; multi-scale feature

收稿日期: 2015-03-18; 修订日期: 2015-04-21

基金项目: 国家自然科学基金(61471371); 湖南省自然科学基金(2015jj3022); 中国博士后科学基金(2012M512168)

作者简介: 滕书华(1979-), 男, 博士后, 主要从事空间目标智能信息处理、数据挖掘及其应用方面的研究。

Email: tengshuhua1979@sohu.com

0 引言

随着我国空间目标探测手段的丰富,使笔者获得了海量的、多样化的光学测量数据。这就要求我们必须对各种光学测量数据进行分析,结合我国在轨航天器先验信息,研究基于光学测量的典型在轨航天器形态监测数据处理技术。通过对识别和分析方法的理论研究和实验分析,利用光学测量的各类数据,深入研究典型航天器特性数据的特征提取、分类识别、结构分析和融合识别等技术,为后续在轨航天器特性数据库的建设提供技术基础,对充分发挥设备的最优作用具有重大现实意义,也将为我国故障卫星抢救、航天器碰撞预警与规避、航天器空间操作和空间攻防等任务提供重要的数据和技术支持^[1-2]。

由于监测手段的限制和对外层空间物体各种特性认识不够深入^[3],并且利用特性测量数据对航天器形状、尺寸和姿态等特性及其用途的分析研究成果比较敏感,国外空间目标监测公开文献较少。从少量公开文献看^[4],美俄等航天强国对空间目标的特性分析方法已在各种任务中有所应用^[5],如天基可视计划、天基空间监视系统、轨道 SK 成像系统、空间跟踪与监视系统等,目前正在不断的研究完善,仍是航天领域的前沿性课题。

卫星形状是表征卫星类别的重要特征,是卫星识别的重要依据。对于不同卫星,最主要的结构部件如天线、太阳能电池板、传感器、仪器舱等都是必然存在的,不同部件具有特定的外形,如太阳能电池帆板通常为矩形、光学设备通常为圆柱形,等等。目前,对于光学测量的空间目标结构分析方法,还未有公开文献。因此文中对光学测量的航天器结构分析方法进行了有益的尝试:通过利用卫星部件的形状识别结果,并结合目标先验信息来分析航天器结构部件,为有效地进行空间目标姿态估计与识别奠定基础。

1 形状分解

形状分解是空间目标结构分析的基础。通过形状分解,可以将空间目标分解成多个部件,然后通过对部件形状的识别和分析,即可达到结构分析的目的。

很多认知学和心理学的研究表明人的视觉系统总是倾向于将目标分解为几个简单的部分,然后基

于他们之间的关系来识别、理解目标。根据认知学的研究,人们发现了一些在大多数情况下成立的分割准则,主要有:(1)最小曲率准则^[6],即人眼一般沿着形状上的负的曲率极小值点分割物体;(2)最短分割线准则^[7],即人眼总是试图沿着最短的分割线来分解物体,其中分割线又必须满足几个条件:一是长度较短,二是分割线是连续的直线段,三是分割线必须与相应轴线相交。最小曲率准则仅仅指出了边界上哪些点为分割点,并没有指出如何构成分割线,而最短分割线刚好给出了依据。形状骨架与轮廓包含了形状的大量全局与局部特征,为形状分解提供了重要信息。因此文中将以上两个准则和目标骨架相结合,构建一种新的形状分解方法,分解流程如图 1 所示。

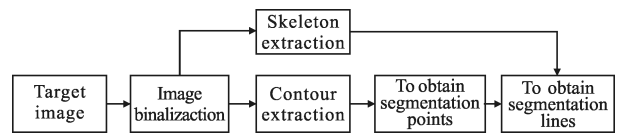


图 1 形状分解流程图

Fig.1 Flow chart of shape decomposition

首先将空间目标图像二值化并提取其轮廓、骨架,然后计算轮廓上每一点的曲率并记录得到负的曲率极小值点即分割点,之后选择距离最小且位于骨架两侧的两个分割点的连线作为分割线。其中曲率的计算方法如下:

曲率是斜率角 θ 关于弦长 l 的变化率,它描述了轮廓上近邻点轮廓方向变化情况。曲率 K 的表达式为:

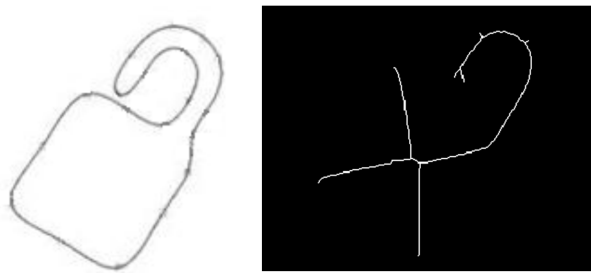
$$K = \frac{d\theta}{dl} \quad (1)$$

对于数字图像,若点 P_i 及其邻点 P_{i-1} 的斜率角分别为 θ_i, θ_{i-1} ,则 P_i 点处的曲率为:

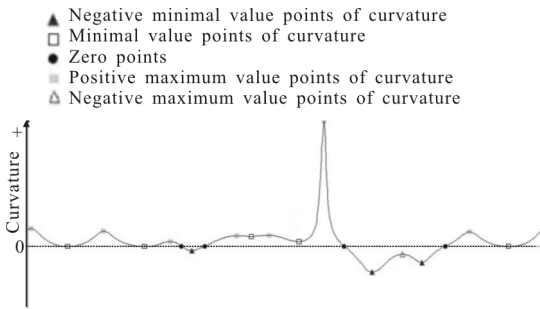
$$K_i = \theta_i - \theta_{i-1} \quad (2)$$

式中:斜率角 $\theta_i = \arctan\left(\frac{y_i - y_{i-1}}{x_i - x_{i-1}}\right)$, (x_i, y_i) 及 (x_{i-1}, y_{i-1}) 为 P_i 点及 P_{i-1} 点的坐标。形状分解过程如图 2 所示。

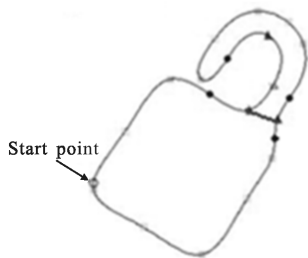
图 3 和图 4 给出了利用文中方法对哈勃天文望远镜模型图像和海事卫星仿真图像的形状分解结果,图中不同符号代表了不同的卫星部件。从实验结果可知文中的形状分解方法对于空间目标的模型图像和仿真图像得到了比较理想的分解结果,与人的主观认知基本一致。



(a) 目标轮廓 (b) 目标骨架
(a) Outline of object (b) Skeleton of object



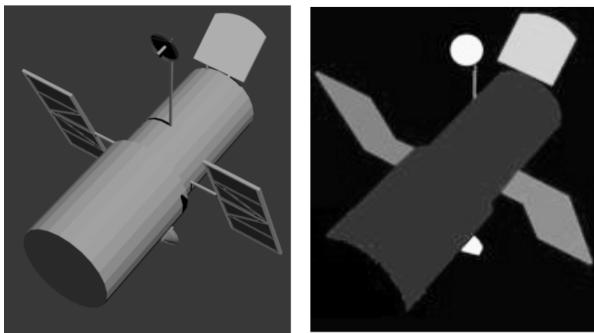
(c) 目标轮廓点的曲率分布
(c) Curvature distribution of object contour points



(d) 目标轮廓及分割点、分割线
(d) Object contour and segmentation points, segmentation line

图 2 形状分解示例

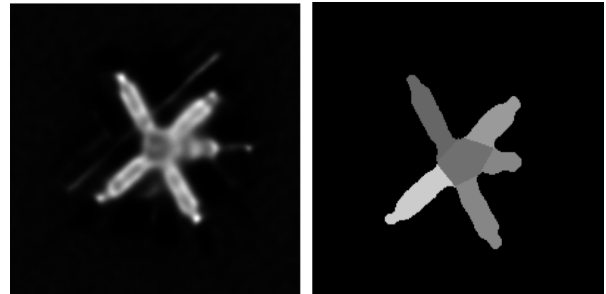
Fig.2 Example of shape decomposition



(a) 哈勃望远镜模型图像 (b) 哈勃望远镜模型图像形状分解
(a) Harbert telescope model image (b) Decomposition result

图 3 哈勃望远镜模型图像分解结果

Fig.3 Decomposition results of Harbert telescope model image



(a) 海事卫星模型图像 (b) 海事卫星模型图像形状分解
(a) Maritime satellite image (b) Decomposition result

图 4 海事卫星图像分解结果

Fig.4 Decomposition results of maritime satellite image

2 形状识别与结构分析

在提取到航天器各个部件后,需要对每个部件进行形状识别,在此基础上完成航天器的结构分析。下面分别就形状识别和结构分析方法展开讨论。

2.1 形状识别

卫星的几何形状由于具有平移、缩放和旋转不变等特点,代表了卫星的本质特征。因此在卫星结构分析中,几何形状的分析 and 识别具有十分重要的意义。卫星图像需要提取图像特征来描述目标的形状信息。目前使用较为广泛的图像特征主要包括图像傅里叶轮廓描述子、形状上下文轮廓描述子、Hu 矩、Zernike 矩、小波矩等。其中:傅里叶轮廓描述子、形状上下文轮廓描述子反映的是目标轮廓特征,对轮廓细节较为敏感,容易造成误判;Hu 矩、Zernike 矩、小波矩反映的是目标的全局区域特征,普遍具有较好的不变性,但是 Hu 矩的阶数较低且唯一,不能构造高阶不变矩;Zernike 矩能够构造任意的高阶不变矩,但是计算量偏大;小波矩^[9]分别结合小波多尺度分析与不变矩的优点,既可以计算卫星的区域特征,还可以计算卫星的结构特征;既可以分析形状的局部特征又能保持不变性的特点。针对输入的航天器部件图像背景单一、细节较少的情况,文中选取具有良好不变性的小波矩特征来描述卫星部件形状。

图 5 给出了小波不变矩 108 维特征(尺度因子 $m=1,2,3$, 角度分量中的 $q=1,2,3,4$, 位移因子 $n=1,2,\dots,2^{m+1}$)对四种典型形状(矩形、椭圆、圆形和三角形)的可区分性图示。纵坐标为归一化后的小波不变矩特征值,横坐标为 108 维特征。从图中可以看出,

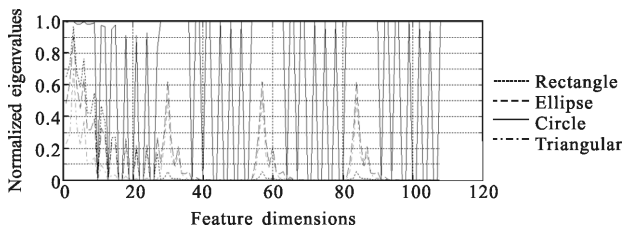


图 5 小波不变矩特征可分性比较

Fig.5 Separability comparison of wavelet moment invariant feature

对于不同的形状,小波不变矩的区分性较好,但也存在一定问题,如对于很多特征,四种形状的特征值都为 0,且有部分特征在四种形状上的特征值比较相似,无益于后期的形状识别。因此有必要对小波矩特征进行处理,选择出更有效的特征进行形状识别。

随着卫星图像信息提取的要求越来越高,对图像描述方法的要求也更高。考虑到小波不变矩特征维数较高,冗余度大,复杂度较高,无法快速高效的描述形状特征。因而文中将粗糙集约简算法与小波矩特征相结合,利用粗糙集约简算法^[9]选择有效的小波矩特征来实现快速高效的形状描述。对约简后的特征类内相似性和类间距离都比较大,可作为有效的特征进行形状识别。

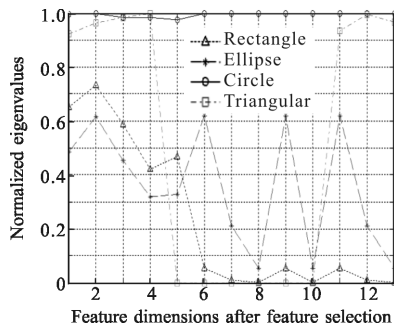


图 6 约简后小波不变矩特征类间可区分性

Fig.6 Separability of wavelet moment invariant features after the reduction

在提取和选择有效的小波矩特征之后,下面利用识别算法对航天器部件形状进行识别。对空间目标进行识别时,图像尺度差别较大,且出于成像条件限制,目标在小尺度和大尺度图像中细节表现差异很大,不能简单的看做仿射变换,因此,单尺度的识别系统很难得到较高的识别效率。一种有效的提升识别率方法就是将目标图像分为多个尺度分别进行识别。此外,考虑到支持向量机(SVM)具有较好的泛

化能力、非线性处理能力和高维处理能力,因而此节基于 SVM 提出一种多尺度形状识别器,如图 7 所示。

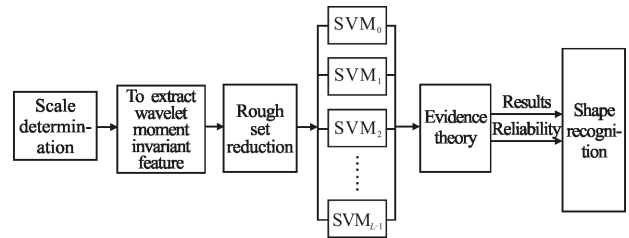


图 7 多尺度识别器框图

Fig.7 Multi-scale recognition diagram

首先输入全部训练集图像,按面积大小分为 L 个尺度,每个尺度对应于一个 SVM,对每个尺度的 SVM 分别训练,并记录训练集识别率。对每个尺度的识别结果输入到 DS 证据理论,得出最终识别结果。

2.2 结构分析

为了实现对目标的结构分析,将目标已有先验知识引入结构分析中。空间目标由于其姿态时常发生变化,为此选取对目标旋转、尺度以及轴视点变化不敏感的几何特征(面积比 AR 和部件最小外接矩形的长宽比 GR)作为航天器先验知识。

面积比 AR 定义为: $AR = \frac{S_1}{S_2}$, 其中 S_1 和 S_2 分别为待识别部件区域包含的像素数和整个目标区域包含的像素数。

部件最小外接矩形的长宽比 GR 定义为: $GR = \frac{L}{W}$, 其中 L 、 W 分别为待识别部件最小外接矩形的长度和宽度。

通过多尺度形状识别结果和目标已有先验知识的结合,利用 SVM 对航天器部件进行判别,实现对目标结构的分析,进而预测卫星部件,流程图如图 8 所示。

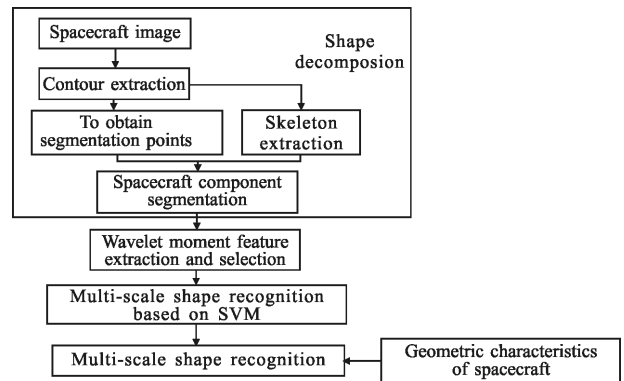


图 8 航天器结构分析流程图

Fig.8 Flow chart of spacecraft structure analysis

至此,笔者给出航天器结构分析的步骤如下:

(1) 输入空间目标光学图像;(2) 对目标图像二值化处理;(3) 提取目标图像的骨架;(4) 通过形状分解对目标结构分块;(5) 提取分割后局部图像轮廓;(6) 计算局部图像的小波矩特征,并利用粗糙集约简算法对小波矩特征约简,得到局部图像的形状特征向量;(7) 利用多尺度形状识别器对局部图像进行形状判别分析;(8) 将形状识别结果和先验知识输入 SVM 进行部件判别,实现对航天器结构分析。

3 实验结果

为验证形状识别算法的有效性,对三组不同卫星图像进行了实验:一组针对卫星模型图像,一组针对卫星仿真,另一组针对加噪卫星图像。图 9、图 10 和图 11 分别给出了三类卫星图像的部件分割过程与形状识别结果,得到的识别结果通过标记白色的形状框在图中给出。从实验结果可以看出,文中的形状识别方法符合人类视觉习惯,对三种类型的卫星图像是有效的,对噪声具有一定的鲁棒性(如图 11 所示)。由于文中仅限于对四种形状进行分析,对于其它形状则不能正确识别,如图 10 所示,分割出来的海事卫星中心投影应是五边形,但最终形状被判别为与其最相似的矩形。

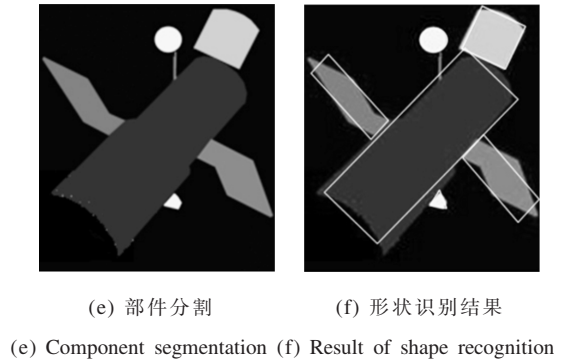
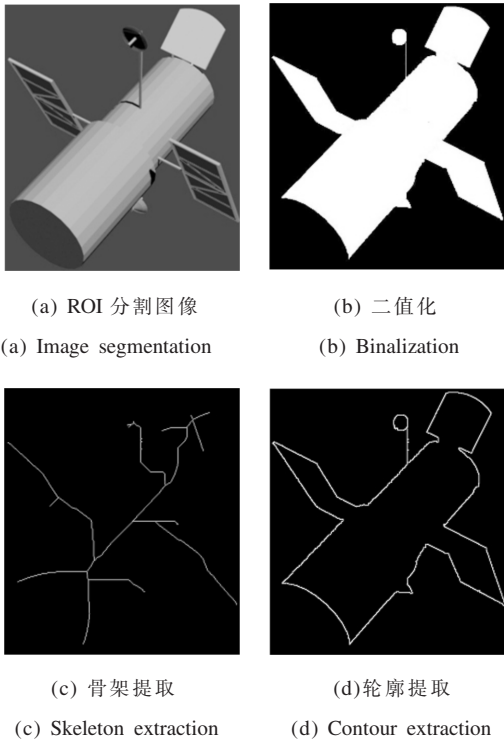


图 9 哈勃卫星图像结构分析

Fig.9 Structure analysis of Harbert satellite image

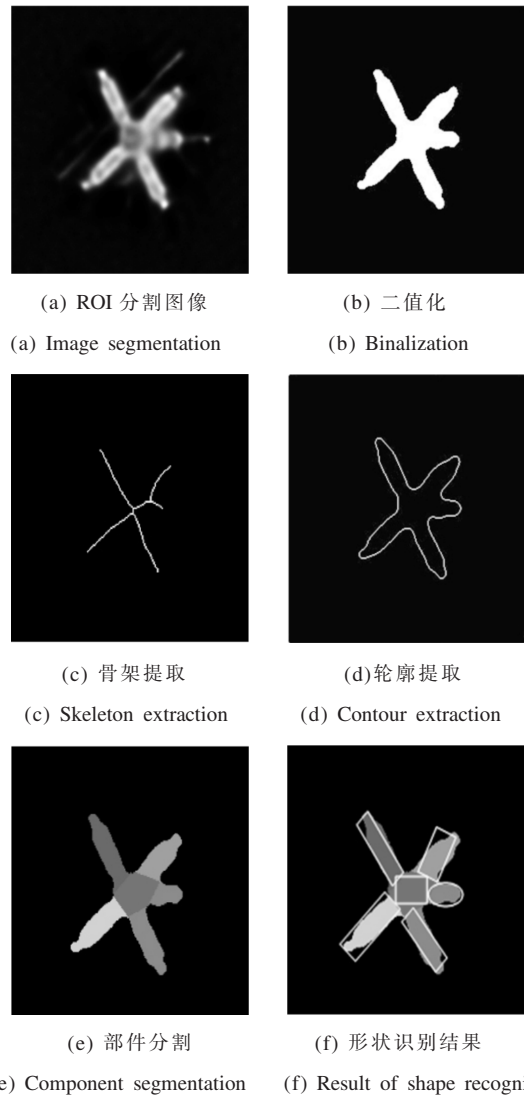


图 10 海事卫星图像结构分析

Fig.10 Structure analysis of maritime satellite

STK 是美国 AGI 公司出品的卫星仿真工具包,可根据真实的星历信息计算各天体的位置和实际的光照,还提供了很多天体表面纹理信息和航天器模型,因

而可以对空间视景进行模拟。在航天器部件分割与形状识别基础上,从 STK 模型库中选取了带有太阳能帆板的 5 类有代表性的航天器模型进行结构分析,分别是:大型空间结构、普通卫星、大型卫星、特殊结构卫星、空间碎片。视频流中,目标仅绕光轴旋转,目标与观测点的相对距离由远及近再变远,在图像中表现为目标由小及大再变小的过程。每段视频以 8 帧/s 的采样率截取 500 幅图像作为原始数据。从采样得到的每类图像中随机选取 30% 作为训练样本,其余作为测试样本,对目标的主体和太阳能电池帆板进行判别。最终对太阳能电池帆板识别率为 82%,对航天器主体的正确识别率为 88%。从实验结果可以看出,文中的结构分析算法能够辅助人工进行结构分析。

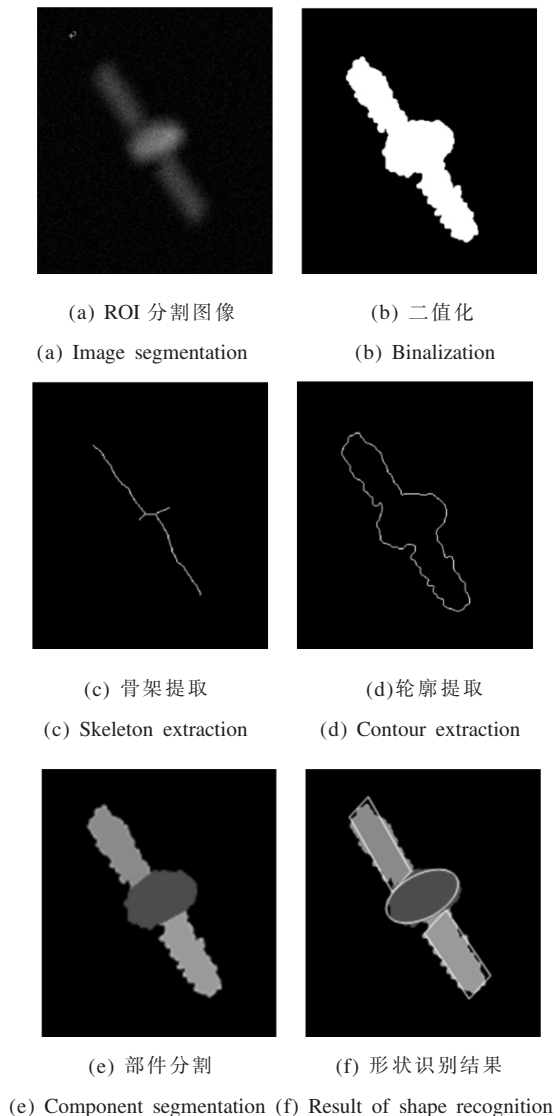


图 11 加噪卫星图像结构分析

Fig.11 Structure analysis of noise satellite images

需指出的是,以上实验结果是对姿态较为理想且清晰度较高的光学图像进行的,但对于形状复杂或存在自遮挡的卫星图像(如图 11),卫星部件正确识别率不高,此时可考虑主被动复合探测识别,如将激光雷达和可见光 CCD 进行复合探测,结合航天器部件的光谱材质信息和反映目标几何形状的三维点云信息,对卫星关键部件进行预测,进一步提高部件识别正确率,以更好辅助人工判别分析。

4 结论

文中针对目前光学测量航天器结构分析方法的空白,提出了一种有效的空间目标结构分析方法。首先,基于最小曲率准则、最短分割线准则和目标骨架,构建了一种对噪声具有较好鲁棒性的形状分解方法,分解结果符合人类视觉习惯;其次,将小波矩和粗糙集理论结合起来快速提取卫星部件形状特征,能够对卫星部件形状进行有效描述;在此基础上提出了基于 SVM 的多尺度形状识别器,实现了对空间目标部件形状的有效识别;最后利用部件形状识别结果,结合目标已有先验知识实现了对航天器结构的预测分析。通过仿真实验验证表明,文中方法能够对光学测量航天器主要组成部件等进行理解与分析,为实现空间目标姿态估计与识别奠定了基础,对于航天器空间操作等空间任务具有重要意义。

参考文献:

- [1] Zhang Jingxu. Progress in foreign ground-based optoelectronic detecting system for space target detection[J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2009, 2(1): 10-16. (in Chinese)
张景旭. 国外地基光电系统空间目标探测的进展[J]. *中国光学与应用光学*, 2009, 2(1): 10-16.
- [2] Du X, Liang B, Xu W, et al. Pose measurement of large non-cooperative satellite based on collaborative cameras[J]. *Acta Astronautica*, 2011, 68(11-12): 2047-2065.
- [3] Zhang Jihua, Fan Ruyun, Zhao Ning, et al. Electro-optic system detection ability to space-object in strong background [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(1): 212-216. (in Chinese)
张己化, 范如玉, 赵宁, 等. 强背景下光电系统空间目标探测能力[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(1): 212-216.
- [4] Cao Xiuyun, Li Hui. Development of US space surveillance system[J]. *Aerospace China*, 2011(2): 31-35. (in Chinese)

- 曹秀云, 李辉. 美国空间监视系统发展的进展 [J]. 中国航天, 2011(2): 31-35.
- [5] Liang Bin, Du Xiaodong, Li Cheng, et al. Advances in space robot on-orbit servicing for non-cooperative spacecraft [J]. *Robot*, 2012, 34(2): 242-256. (in Chinese)
- 梁斌, 杜晓东, 李成. 等. 空间机器人非合作航天器在轨服务研究进展[J]. 机器人, 2012, 34(2): 242-256.
- [6] Donald M S, Hoffman D. Saliency of visual parts [J]. *Cognition*, 1997, 63(1): 29-78.
- [7] Manish Singh, G D Seyranian, Donald Hoffman. Parsing silhouettes: the short-cut rule [J]. *Perception & Psychophysics*, 1999, 61: 636-660.
- [8] Huang Yingqing, Zhao Kai, Jiang Xiaoyu, et al. Study on recognition for armored vehicle based on wavelet moment and SVM [J]. *Journal of Armored Force Engineering Institute*, 2012, 26(3): 61-64. (in Chinese)
- 黄应清, 赵锴, 蒋晓瑜, 等. 基于小波矩和支持向量机的装甲车辆识别研究 [J]. 装甲兵工程学院学报, 2012, 26(3): 61-64.
- [9] Teng Shuhua, Lu Min, Yang Afeng, et al. Efficient attribute reduction from the viewpoint of discernibility [J]. *Information Sciences*, 2016, 326: 297-314.