

## 改进仿射尺度不变特征变换算法的图像配准

范雪婷<sup>1,2\*</sup>, 张磊<sup>3</sup>, 赵朝贺<sup>1,2</sup>

(1. 中国矿业大学 环境与测绘学院, 江苏 徐州 221116; 2. 国土环境与灾害监测国家测绘地理信息局重点实验室, 江苏 徐州 221116;  
3. 山东中煤物探测量总公司, 山东 泰安 271021)  
(\* 通信作者电子邮箱 zhaohcunt@163.com)

**摘要:**为了更好地处理匹配效率、重复纹理匹配和仿射不变性匹配等问题,对完全仿射不变特征变换(ASIFT)算法进行两方面改进。匹配框架中特征提取的改进提高了 ASIFT 算法的匹配效率;利用优化随机采样算法(ORSA)结合以单应矩阵为几何线性约束模型的随机抽样一致性(RANSAC)改进匹配算法,提高了匹配精度和重复纹理结构的适应能力。实验结果表明,提出的改进算法能较好地匹配高度相似纹理,计算量小,计算速度快且精度高。

**关键词:**图像配准;仿射尺度不变特征变换算法;单应矩阵;重复纹理匹配

**中图分类号:** P237 **文献标志码:** A

### Improved ASIFT algorithm for image registration

FAN Xueting<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Lei<sup>3</sup>, ZHAO Chaohe<sup>1,2</sup>

(1. School of Environment Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu 221116, China;  
2. Key Laboratory of Land Environment and Disaster Monitoring,  
National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation, Xuzhou Jiangsu 221116, China;  
3. Shandong Coal Geophysical Survey Corporation, Tai'an Shandong 271021, China)

**Abstract:** Image registration is a well researched topic of computer vision. To deal with matching efficiency, repetitive pattern matching and affine invariant matching better, two improvements over the state-of-the-art Affine-Scale Invariant Feature Transform (ASIFT) algorithm were presented. The feature extraction of matching frame was developed to improve the matching efficiency of the ASIFT algorithm. The second increased the accuracy of matching and the adaptive capacity of repetitive patterns through the use of improved matching algorithm by combining Optimized Random Sample Consensus (ORSA) with Random Sample Consensus (RANSAC) algorithm based on geometric linear constraint model with homography matrix. The experimental results show that the proposed method is able to well match highly repetitive patterns and has smaller calculation, faster speed and higher accuracy as well.

**Key words:** image registration; Affine-Scale Invariant Feature Transform (ASIFT) algorithm; homography matrix; repetitive pattern matching

## 0 引言

图像配准是同一场景的两幅或多幅图像在空间上的对准,广泛应用在导航、地图与地形匹配、生物特征识别、文字识别、医学影像分析、计算机视觉等领域<sup>[1]</sup>。近年来,Lowe 提出的尺度不变特征变换(Scale Invariant Feature Transform, SIFT)<sup>[2]</sup>特征匹配算法已广泛应用于匹配研究领域,其主要思想是通过建立高斯金字塔和高斯差(Difference of Gaussians, DOG)金字塔进行极值检测,提取出尺度、位置和旋转不变量,并采用 128 维向量进行描述,最后按照向量之间的欧氏距离判断是否为匹配点。由于使用高维向量进行描述,SIFT 算法可以检测并匹配仿射变换接近 15°的特征点。

Morel 等<sup>[3]</sup>提出的仿射尺度不变特征变换(Affine-Scale Invariant Feature Transform, ASIFT)算法通过模拟相机视角的变化得到所有可能仿射变换的图像,然后利用 SIFT 特征进行匹配,从而实现完全仿射不变性。为了更好地适应仿射变形,

人们提出或改进各种各样的算法,比如主成分不变特征变换(Principle Component Analysis-Scale Invariant Feature Transform, PCA-SIFT)<sup>[4-5]</sup>、海森仿射不变(Hessian Affine)<sup>[6]</sup>、Harris<sup>[7-8]</sup>、最大稳定极值区域(Maximally Stable Extreme Region, MSER)<sup>[9-10]</sup>等。文献[3]通过各种实验对几种有代表性的局部特征算法进行了综合评价,结论表明:ASIFT 算法鲁棒性、稳定性和适应性最好。但也存在运算速度慢、重复特征图像错误匹配点较多等问题。

本文就特征匹配框架和匹配算法两方面对 ASIFT 算法进行改进,结果表明,改进后算法的鲁棒性、重复纹理结构影像的适应性得到增强,匹配效率和精度均有所提高。

## 1 ASIFT 改进算法

### 1.1 特征匹配框架改进

特征匹配框架主要包括特征提取、特征描述和特征匹配三个部分,其中第一步是整个匹配框架的基础,特征提取好坏

**收稿日期:** 2013-11-13; **修回日期:** 2013-12-28。 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(41001312);江苏省测绘科研项目(JSCHKY201311);国土环境与灾害监测国家测绘地理信息局重点实验室开放基金资助项目(LEDMD2012B07)。

**作者简介:** 范雪婷(1988-),女,吉林磐石人,硕士研究生,主要研究方向:遥感数据处理、影像匹配; 张磊(1987-),男,山东泰安人,硕士,主要研究方向:航空摄影测量、影像匹配; 赵朝贺(1989-),男,安徽宿州人,硕士研究生,主要研究方向:航空摄影测量、变化检测。

直接影响匹配的性能。但是目前还没有一种特征提取算法具有完全的仿射不变性,当匹配影像间拍摄视角逐渐变大时,提取的相同特征点数量会大幅减少。

ASIFT算法通过模拟影像间可能的仿射变换(水平角( $\varphi$ )和竖直角( $\theta$ )),而使得SIFT算法具有全仿射不变性。对参考影像和输入影像分别取可能的相对倾斜 $t = 1, a, a^2, \dots, a^n$  ( $a = \sqrt{2}, n$ 取值由实验得到),然后对每个倾斜分别模拟旋转角度 $0^\circ, \Delta\Phi, 2\Delta\Phi, \dots$ 时的转换影像,并在所有模拟影像上提取SIFT特征点、构造描述向量。当 $n = 5$ 时,每幅影像需要模拟27幅影像,提取的特征点达到几万个甚至更多,并且ASIFT算法匹配时对于每一个特征点都需要在其他影像上提取的所有特征点中寻找匹配点对。因此,当 $n = 5$ 时,ASIFT算法的计算量是SIFT算法的 $27^2$ 倍,如果只是模拟输入影像相对于参考影像的仿射变换,ASIFT算法的复杂度是SIFT算法的27倍,这样无疑降低了匹配效率且需要很大的存储空间来存储特征信息,给特征匹配带来了很大的负担。

根据以上分析,本文对ASIFT算法的匹配框架作出改进,具体算法如下:

1) 在参考影像中提取SIFT特征点并构造描述向量。

2) 对于输入影像,对每一个倾斜 $t_i$ 分别模拟可能的水平角 $\Phi_i$  ( $i \in [0, [2.5t]]$ ),提取SIFT特征点和构造描述向量,并与参考影像中的特征点匹配。为了增加匹配效率,本文采用 $k$ -D树进行搜索,计算最近欧氏距离 $U_{NN}$ ,如果 $U_{NN} < 0.3$ ,计算最近邻距离比值 $U_{NN}/U_{SCN}$ ,否则直接舍去模拟倾斜影像的特征点。如果 $0.5 < U_{NN}/U_{SCN} < 1.0$ ,将此匹配点对归入A类匹配点集,否则归入B类匹配点集。A类和B类统称为初始匹配点集。

3) 对于初始匹配点集,剔除重复匹配和一对多、多对一匹配,经过处理,剩余的匹配点对再利用本文的匹配提纯方法剔除错误匹配点对。

4) 如果剩余的匹配点对大于3对,利用最小二乘拟合(Least Squares Method, LSM)求出投影变换参数即单应矩阵( $a_{11}, a_{12}, a_{13}, a_{21}, a_{22}, a_{23}, a_{31}, a_{32}, a_{33}$ ),利用匹配点对之间的均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)来估计匹配的精度。

$$RMSE = \sqrt{\left( \sum_{i=1}^N (e_{1,x}^2 + e_{1,y}^2) \right) / N}$$

其中:

$$e_{1,x} = x_{i,ref} - (a_{11}x_{i,inp} + a_{12}y_{i,inp} + a_{13}) / (a_{31}x_{i,inp} + a_{32}y_{i,inp} + a_{33})$$

$$e_{1,y} = y_{i,ref} - (a_{21}x_{i,inp} + a_{22}y_{i,inp} + a_{23}) / (a_{31}x_{i,inp} + a_{32}y_{i,inp} + a_{33})$$

( $x_{ref}, y_{ref}$ )为参考影像中特征点坐标, ( $x_{inp}, y_{inp}$ )为输入影像中对应同名特征点的坐标,  $N$ 为初始匹配点集的数目。

5) 若RMSE小于给定的阈值 $T_{RMES}$ ,匹配成功,算法结束;否则,模拟下一个倾斜,重复步骤4)、5),直到RMSE满足要求,或者所有可能的倾斜都模拟完毕。

## 1.2 匹配算法改进

ASIFT算法利用ORSA算法<sup>[11]</sup>剔除初始匹配点集的错误匹配点对。RANSAC算法利用随机抽样得到匹配点坐标,

估计影像间的基本矩阵作为几何约束模型来剔除外点。记 $p_i$ 和 $p_i'$ 为一匹配点对,  $p = (x_i, y_i, 1)^T$ 为 $p_i$ 在参考影像中的坐标,  $p' = (x_i', y_i', 1)^T$ 为 $p_i'$ 在输入影像中的坐标,  $i = 1, 2, 3, \dots, N$ ,  $N$ 为影像匹配点对数。利用基本矩阵可以得到匹配点对在参考影像和输入影像中的同名核线,  $p_i$ 和在参考影像和输入影像中的同名核线分别为:

$$l_i' = Fp_i$$

$$l_i = F^T p_i'$$

其中: $F$ 为影像间的基本矩阵,  $F^T$ 为基本矩阵的转置矩阵。

计算输入影像中匹配点到相应核线 $l_i$ 的距离 $d(p_i', l_i)$ ,若小于给定的阈值 $t_d$ ,匹配点对( $p_i, p_i'$ )视为内点;否则视为外点。

核线约束为一维约束,当错误匹配点对距相应的核线较近时,会将错误匹配点对视为内点处理,如图1所示,白色十字丝和矩形框代表的错误匹配点对被当作内点处理。当图像中存在大量重复纹理结构时,由于特征区域结构相似,初始匹配中容易出现错误匹配点对。为了解决这个问题,本文在ORSA算法的基础上,利用以单应矩阵作为几何线性约束模型的RANSAC算法进一步剔除剩余匹配中可能的错误匹配。

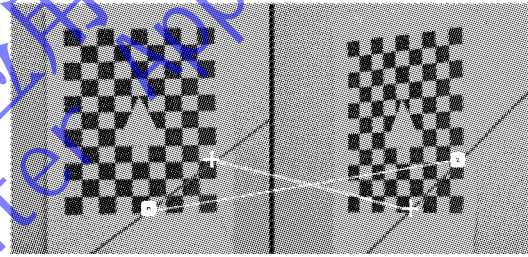


图1 错误的核线匹配

单应矩阵 $H$ 及其逆矩阵可以实现两个像平面图像点之间的一一变换<sup>[12]</sup>,估计单应矩阵至少需要4对匹配点对,本文使用的是直接线性变换(direct linear transformation)算法,即:

$$p_i = H^{-1} p_i'$$

$$p_i' = H p_i$$

以参考影像中匹配点到由单应矩阵计算得到投影点的距离 $d(p_i, H^{-1} p_i')$ 作为判断是否为内点的依据,如果欧氏距离 $d(p_i, H^{-1} p_i')$ 小于给定的阈值 $t_d$ ,视为内点。

以单应矩阵为几何线性约束模型的RANSAC算法的具体步骤为:

1) 在已经获得的初始匹配点集( $p \leftrightarrow p'$ )中,随机选择 $N$  ( $N \geq 4$ )对匹配点对,估计单应矩阵 $H$ 。

2) 在匹配点对集中寻找所有符合欧氏距离 $d(p_i, H^{-1} p_i') < t_d$ 条件的点对,视为内点,并记录满足 $H$ 约束的内点数量。

3) 重复使用1)和2)两个步骤 $K$ 次,记录每一次的内点数量。若内点数量大于事先给定阈值则保留 $H$ ;否则舍弃。

4) 选取对应内点数最大的 $H$ ,并且把满足 $H$ 约束的内点作为正确的匹配点对,剔除不符合条件 $d(p_i, H^{-1} p_i') < t_d$ 的点对。

大量实验表明:当初始匹配点集中错误匹配率太大时,RANSAC算法将失效;当错误匹配率达到90%时ORSA算法可以剔除大部分错误匹配点对,由于ORSA算法利用核线约



束来剔除错误匹配点对,提纯后的剩余匹配点对可能存在错配。因此,本文结合 ORSA 和 RANSAC 两种匹配算法的优势,首先利用 ORSA 迭代算法剔除初始匹配点集中大部分的错误匹配点对,提高初始匹配点集的正确率;然后再利用以单应矩阵为几何线性约束模型的 RANSAC 算法来剔除剩余的错误匹配。由于 ASIFT 算法得到的特征点数量较大,其初始匹配点集的数量会相当多,故舍弃  $B$  类匹配点集,只保留最近欧氏距离小于 0.3 且最近邻欧氏距离比值小于 0.5 的匹配点对构成的初始匹配点集。

## 2 实验结果及分析

为了验证改进 ASIFT 算法相对于 ASIFT 算法的优越性,本文采用两组实验数据进行验证。实验一主要验证改进算法对于具有大量重复纹理图像的适应能力;实验二验证改进算法的匹配精度和效率。实验硬件环境:VS2008,系统 Windows XP SP 3, CPU E5504, 2.00 GHz, 内存 2.43 GB。

### 2.1 重复纹理适应能力

实验采用具有大量重复纹理结构的某教学楼侧面图像,大小为  $512 \times 384$  像素。图 2 为分别利用 ASIFT 算法和改进 ASIFT 算法的匹配结果,分析结果见表 1 所示。

由图 2 及表 1 知,对含有大量重复纹理结构图像,本文提出的改进 ASIFT 算法可以较大程度地去除错误匹配点,提高匹配的正确率,从而实现高精度配准。

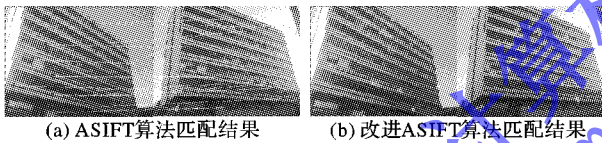


图2 重复纹理匹配结果

表1 匹配数据比较

算法	匹配点对数	正确匹配点对数	匹配正确率/%
ASIFT 算法	17	7	41
改进 ASIFT 算法	13	13	100

### 2.2 特征匹配效率和精度

#### 2.2.1 Graffiti 组图像序列

图 3 所示的 Graffiti 组图像序列含有丰富的结构和纹理信息,影像大小  $800 \times 640$  像素,拍摄视角从分别为  $0^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $40^\circ$ 、 $50^\circ$ 、 $60^\circ$ 。

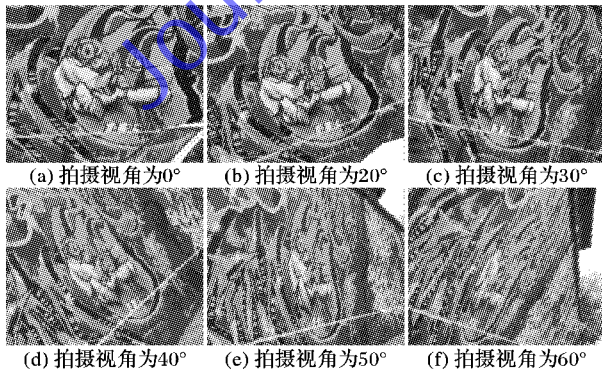


图3 Graffiti 组图像序列

Graffiti 组图像序列中第一幅分别与其他图像进行匹配,结果如图 4 所示,其中:左边为 ASIFT 算法匹配结果,右边为

改进 ASIFT 算法匹配结果。限于篇幅,本文只列出 Graffiti 组图像的第 1 幅分别与第 2 幅、第 5 幅的配准结果。

Graffiti 组图像序列匹配实验中, Graffiti1 与 Graffiti2、Graffiti1 与 Graffiti3 图像匹配只在原始图像上提取特征点并匹配即可,而对 Graffiti1 与 Graffiti4、Graffiti1 与 Graffiti5 和 Graffiti1 与 Graffiti6 图像改进 ASIFT 算法分别模拟了 2、4 和 5 个倾斜,即分别模拟了 5、17 和 27 张影像,对于视点变形较小的影像避免了不必要的计算,提高了 ASIFT 算法的实时性。

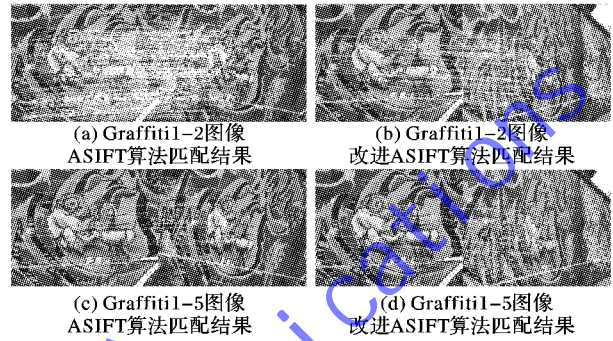


图4 Graffiti 图像匹配结果

实验中采用本文给出的均方差误差作为衡量匹配精度的指标,由表 2 两种算法配准结果比较,可看出改进 ASIFT 算法在计算效率和匹配精度上有一定提高。虽然改进算法得到的匹配点对数较少,对于图像配准技术而言匹配点数已足够,而且改进算法得到的较高精度匹配点对个数相对较多。

表2 Graffiti 图像序列匹配结果比较

实验数据	ASIFT 算法			改进 ASIFT 算法			匹配时间/s
	匹配点对数	匹配正确率/%	配准精度/Pixel	匹配点对数	匹配正确率/%	配准精度/Pixel	
Graffiti1-2	638	75	2.92	34	193	100	0.60
Graffiti1-3	534	50	1.37	36	35	83	1.22
Graffiti1-4	294	70	1.72	38	39	95	0.30
Graffiti1-5	158	62	1.96	37	42	72	1.26
Graffiti1-6	105	7	2.72	40	19	70	2.60

#### 2.2.2 Wall 组图像序列

图 5 所示的 Wall 组图像序列具有高度相似重复纹理特征,影像大小  $960 \times 670$  像素,拍摄视角分别为  $0^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $40^\circ$ 、 $50^\circ$ 、 $60^\circ$ 。

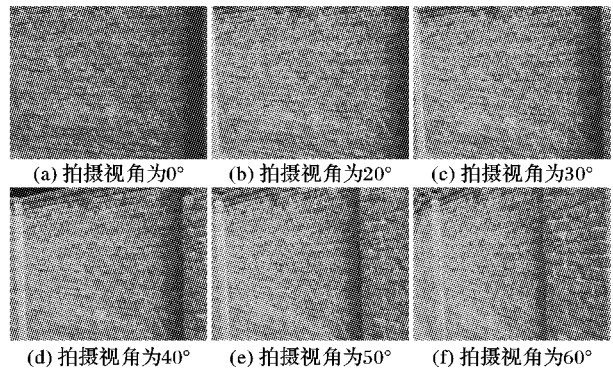
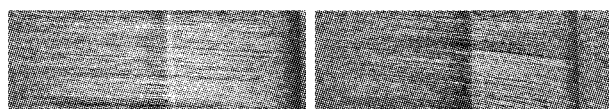


图5 Wall 组图像序列

Wall 组图像序列中第一幅图像分别与其他图像进行匹配,配准结果如图 6 所示。图中白色直线连接的匹配点对为利用本文改进算法得到的最终匹配点对,黑色直线连接的匹

配点对为 ORSA 算法剔除错误匹配后的匹配点集利用以单应矩阵为几何线性约束模型的 RANSAC 算法进一步剔除的错误匹配。由于篇幅限制,本文只列出利用改进 ASIFT 算法的 Wall 组图像第 1 幅分别与第 2 幅、第 5 幅的匹配结果。

采用 ASIFT 算法和改进 ASIFT 算法匹配比较结果如表 3 示。由此可知,相比 ASIFT 算法,改进 ASIFT 算法在高度相似重复纹理特征图像匹配中,匹配精度、适应能力和鲁棒性等方面性能更好。



(a) Wall1-2图像  
改进ASIFT算法匹配结果

(b) Wall1-5图像  
改进ASIFT算法匹配结果

图6 Wall 图像匹配结果

表3 Wall 图像序列匹配结果数据比较

实验影像	ASIFT 算法		改进 ASIFT 算法	
	剔除错配后的 剩余匹配点数	配准 精度/Pixel	剔除错配后的 剩余匹配点数	配准 精度/Pixel
Wall1-2	1 044	2.42	950	1.23
Wall1-3	556	1.60	338	0.38
Wall1-4	249	1.73	136	0.72
Wall1-5	328	1.92	118	0.68
Wall1-6	53	3.50	15	1.89

### 3 结语

本文对 ASIFT 匹配框架进行了改进,使得 ASIFT 算法的计算量随影像间视点变换大小而不同,计算复杂度也随影像变形的大小而变化;利用 ORSA 迭代算法结合以单应矩阵为几何线性约束模型的 RANSAC 算法来剔除错误匹配点。实验结果分析表明,改进后 ASIFT 算法减少了计算量、计算时间,提高了匹配精度,且更适用于大尺度、高度相似重复纹理特征的图像配准。

#### 参考文献:

- [1] ZITOVÁ B, FLUSSER J. Image registration methods: a survey [J]. *Image and Vision Computing*, 2003, 21(11): 977-1000.
- [2] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(2): 91-110.
- [3] MOREL J M, YU G. ASIFT: a new framework for fully affine invariant image comparison [J]. *SIAM Journal on Imaging Sciences*, 2009, 2(2): 438-469.
- [4] KE Y, SUKTHANKAR R. PCA-SIFT: a more distinctive representation for local image descriptors [C]// *Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2004, 2: 506-513.
- [5] MA L, HAN X. Application of PCA method in SIFT matching algorithms [J]. *Video Engineering*, 2012, 36(1): 129-132. (马莉, 韩燮. 主成分分析法(PCA)在 SIFT 匹配算法中的应用[J]. *电视技术*, 2012, 36(1): 129-132.)
- [6] MIKOLAJCZYK K, SCHMID C. Scale & affine invariant interest point detectors [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(1): 63-86.
- [7] ZHANG Y, YU J, SUN J, *et al.* Research on corner matching method based on Harris [J]. *Computer and Modernization*, 2011(11): 78-81. (张勇, 余建平, 孙军伟, 等. 基于 Harris 的角点匹配算法研究[J]. *计算机与现代化*, 2011(11): 78-81.)
- [8] ZHANG B, WANG T, LI K, *et al.* Improved algorithm of Harris feature point matching [J]. *Computer Systems and Applications*, 2013, 22(7): 100-103. (张波, 王天召, 李科, 等. 一种改进的 Harris 特征点匹配算法[J]. *计算机系统应用*, 2013, 22(7): 100-103.)
- [9] MATAS J, CHUM O, URBAN M, *et al.* Robust wide-baseline stereo from maximally stable extremal regions [J]. *Image and Vision Computing*, 2004, 22(10): 761-767.
- [10] MO H, WANG Z. A feature detection method combined MSER and SIFT [J]. *Journal of Donghua University: Natural Science Edition*, 2011, 37(5): 624-628. (莫会宇, 王祝萍. 一种结合 MSER 和 SIFT 算子的特征检测方法[J]. *东华大学学报: 自然科学版*, 2011, 37(5): 624-628.)
- [11] MOISAN L, STIVAL B. A probabilistic criterion to detect rigid point matches between two images and estimate the fundamental matrix [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 57(3): 201-218.
- [12] ZHANG Y, WENG L, ZHANG J, *et al.* Homography of UAV downward-looking ground images [J]. *Application Research of Computers*, 2011, 28(2): 749-752. (张宇, 翁璐斌, 张吉祥, 等. 无人机下视地面图像的单应约束[J]. *计算机应用研究*, 2011, 28(2): 749-752.)
- [8] SADEGHI L, SAMAVATI F F. Smooth reverse Loop and Catmull-Clark subdivision [J]. *Graphical Models*, 2011, 73(5): 202-217.
- [9] JI X, GONG G. Semi-orthogonal B-spline wavelets and its application to curve and surface fairing [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 42(9): 54-59. (纪小刚, 龚光容. 半正交 B 样条小波及其在曲线曲面光顺中的应用[J]. *机械工程学报*, 2006, 42(9): 54-59.)
- [10] JI X, GONG G. Curve fairing with arbitrary number of control vertices by semi-orthogonal B-spline wavelets [J]. *Journal of Engineering Graphics*, 2006, 27(2): 90-95. (纪小刚, 龚光容. 基于半正交 B 样条小波的任意控制顶点曲线光顺研究[J]. *工程图*
- [11] JI X, GONG G. Arbitrary resolution fairing of quasi-uniform cubic B-spline curve [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2009, 28(11): 1477-1481. (纪小刚, 龚光容. 准均匀三次 B 样条曲线的任意分辨率光顺[J]. *机械科学与技术*, 2009, 28(11): 1477-1481.)
- [12] JI X, GONG G. A simple algorithm for B-spline wavelets decomposition and reconstruction based on geometrical meanings [J]. *Journal of Machine Design*, 2009, 26(2): 16-19. (纪小刚, 龚光容. 一种基于几何含义的 B 样条小波分解重构简易算法[J]. *机械设计*, 2009, 26(2): 16-19.)

(上接第 1426 页)