

火星探测无人机快速景象匹配算法

姚克明^{1,2} 刘燕斌³ 陆宇平³ 芮挺⁴

(1. 南京航空航天大学自动化学院, 南京, 210016; 2. 江苏技术师范学院电气信息工程学院, 常州, 213001;
3. 南京航空航天大学航天学院, 南京, 210016; 4. 中国人民解放军理工大学工程兵工程学院, 南京, 210007)

摘要:针对火星无人机探测飞行过程的特点及其机载计算机的局限性,在充分研究了矩阵奇异值向量性质特点的基础上,对奇异值向量进行主分量分析,提出了一种应用于火星无人机平飞段的基于奇异值分解的分层快速景象匹配算法,并给出了与之相应的机载特征数据存储方法。与相关算法的对比性实验表明,本文提出的算法具有准确,稳定,且速度更快,数据量更小的优点。通过仅在飞行末段,将本文算法切换成现有的基于 SIFT 算子的匹配算法,能在实现火星无人机全程快速景象匹配的同时,有效降低对其机载计算机综合性能的要求。

关键词:无人机;火星探测;景象匹配;奇异值分解;特征提取

中图分类号:V448.22 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-2615(2011)06-0810-06

Fast Scene Matching for Exploration Unmanned Aerial Vehicle on Mars

Yao Keming^{1,2}, Liu Yanbin³, Lu Yuping³, Rui Ting⁴

(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China;
2. College of Electric and Information Engineering, Jiangsu Teachers University of Technology,
Changzhou, 213001, China;
3. College of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China;
4. Engineering Institute of Corps of Engineers, PLA University of Science & Technology, Nanjing, 210007, China)

Abstract: Mars unmanned aerial vehicles (UAV) are one of the development directions of future deep space exploration. Through describing the characteristics of Mars UAV exploration flight and the limitations of its on-board computers, and on the base of full study of the nature of singular value feature vector, the principal components of singular value feature vector are analyzed. Then, a stratified fast image matching method based on singular value decomposition and its on-board data storage mode are proposed for level flight segment of Mars UAV. Simulation compared with other correlation methods show that the method is more feasible. Using the SIFT operator-based matching algorithm at the end of the flight, switching between the two methods can reduce general performance requirements of its on-board computer, while achieving fast image matching for the whole Mars UAV exploration flight.

Key words: unmanned aerial vehicle; Mars exploration; scene matching; singular value decomposition; feature extraction

火星探测无人机具有以往火星探测器都不具备的优点^[1-3],是未来深空探测的发展方向之一。

目前,包括美国在内的许多军事强国都在密切

跟踪火星探测飞行器的关键技术^[3-4],而国内对于火星无人机的研究几乎处于空白。

由于地球和火星之间的通讯延时在 10 min 左

基金项目:航空科学基金(2008ZA52010)资助项目;高等学校博士学科点专项科研基金(20093218120035)资助项目;南京航空航天大学基本科研业务费专项科研(NS2010213)资助项目。

收稿日期:2010-12-20;**修订日期:**2011-03-22

通讯作者:姚克明,男,博士,讲师,1978年生,E-mail:ykm-1997@163.com。

右,且火星上没有导航卫星,因此研究火星无人机的景象匹配算法使之能用于自主导航是非常必要的^[1]。由于火星无人机是被折叠起来放在载舱内从地球上发射的^[5],所以体积很小,装载能力也很小,其机载计算机存储和计算能力非常有限^[1,5]。火星无人机在火星表面大气层按照设定的路线进行平飞,在抵达重点探测目标区后,对重点目标区进行折回往返飞行,最后在燃料耗尽的情况下,滑翔撞向该区域内的火星表面上的既定目标。火星无人机在平飞到撞向火星表面的整个过程中进行科学探测^[6]。因此,匹配算法更注重快速性、低数据存储量、精准性和鲁棒稳定性的平衡,而不像以往研究地球飞行器匹配算法时候,相对过多地注重精准性,同时根据探测飞行和景象匹配技术的特点,可以将该景象匹配过程分为平飞段匹配和末段匹配。

景象匹配的方法有很多,但主要集中在基于灰度和基于特征两大类(其他方法的研究和应用相对较少)。基于灰度的匹配方法由于受到噪声和光照影响比较大,其鲁棒性比较差,现在已经很少用。基于图像特征的匹配方法(如不变矩、奇异值分解、主分量分析、边缘、角点等)是目前研究和应用得最多的,也取得了很多的成果。

矩阵奇异值向量由于具有优良的性质和较小的计算量,近年来作为一种图像特征提取方法得到了广泛的应用,如在人脸识别,水印,图像匹配和图像压缩等领域^[7-9]。但是这些通常是建立在对相关图像矩阵的奇异值向量的直接应用,或者是对奇异值向量做简单的截断后直接应用的基础上的,并没有充分利用其优点。

由于图像角点具有较好的鲁棒性,以此为特征的匹配方法研究成为近年来图像匹配领域研究的一个热点。其中比较经典的角点检测算子有Moravec, Harris, SUSAN, CSS, SIFT^[10]等。由于基于SIFT算子特征的匹配性能最优异,所以目前其最流行,但是其计算量和数据存储量都很大。

本文针对火星无人机的探测飞行过程特点和机载计算机的局限性,在充分研究了矩阵奇异值向量的性质特点的基础上,对奇异值向量进行主分量分析,提出了一种火星无人机平飞段的基于奇异值分解的分层快速景象匹配算法和与之相应的机载特征数据存储方法。最后,本文将现有的基于SIFT算子的匹配算法运用于探测过程的末端匹配,使之与本文提出的算法切换使用,与相关算法的对比性实验表明,本文提出方法具有准确、稳定、且速度更快,数据存储量更小的优点。两种方法的切换应用

能在实现火星无人机全程快速景象匹配的同时,有效降低对其机载计算机综合性能的要求。

1 奇异值分解定义及其性质

定义 1^[7] 若 $A \in \mathbf{R}^{m \times n}$, 则存在正交矩阵: $U = [u_1, u_2, \dots, u_m] \in \mathbf{R}^{m \times m}$, $V = [v_1, v_2, \dots, v_n] \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 使得

$$A = U \Sigma V^T \quad (1)$$

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \Sigma_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

式中: $\Sigma_1 = U A V = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_r)$, 其对角元素按照从大到小的顺序

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_r > 0, r = \text{rank}(A)$$

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_r > \sigma_{r+1} = \dots = \sigma_T = 0$$

式中: $T = \min(m, n)$, $\sigma_i (i = 1, 2, \dots, T)$ 是矩阵 A 的奇异值, u_i, v_i 分别为相应奇异值 σ_i 的左右奇异向量。

从代数的角度说,一幅灰度图实际上就是一个矩阵。以上定义得到的矩阵奇异值具有以下优良的性质。

引理 1^[7-8] 假设对图像矩阵 $A \in \mathbf{R}^{m \times n}$ 灰度放大或缩小后图像矩阵为 B , 则有

$$B = \beta A (\beta > 0, \beta \in \mathbf{R})$$

$$B = \beta A = U(\beta \Sigma)V^T \quad (2)$$

对式(2)得到的奇异值进行归一化或标准化处理后,图像矩阵在比例放大前或后,相对奇异值保持不变。从这个意义上说,奇异值具有比例不变性。

引理 2^[7-8] 假设 $A, B \in \mathbf{R}^{m \times n}$ 是 A 旋转任意角度后的图像矩阵,那么总存在一个正交阵 $Q \in \mathbf{R}^{m \times n}$, 使得

$$B = QA \quad (3)$$

因此,有

$$B = QA = QU \Sigma V^T = P \Sigma V^T$$

$$PP^T = QUU^T Q^T = I \in \mathbf{R}^{m \times n}$$

所以, B 和 A 有相同的非零奇异值。式(3)说明了矩阵奇异值具有旋转不变性,文献[7]中证明了图像矩阵在发生镜像、平移这两种几何变化时,图像矩阵的奇异值不变。

引理 3^[7] 假设 $A, B \in \mathbf{R}^{m \times n}$ 是一扰动矩阵,那么附加了各种噪声和干扰的图像矩阵为 $(A+B) \in \mathbf{R}^{m \times n}$ 。设 $(A+B)$ 的奇异值为, $\tau_1 \geq \dots \geq \tau_i \geq \dots \geq \tau_p$ ($T = \min(m, n)$), 则有

$$|\tau_i - \sigma_i| \leq \|(A+B) - A\|_2 = \|B\|_2 \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^p [\tau_j - \sigma_j]^2 \leq \|B\|_F^2 \quad (5)$$

式(4)说明了任何一个奇异值变化的绝对值小于于图

像干扰矩阵的谱范数。式(5)说明了奇异值的变化平方和小于图像干扰矩阵的 F 范数,即干扰矩阵各元素的平方和。因此,当外界的干扰不大时,图像矩阵的奇异值的变化很小,具有较高的鲁棒性。

引理 4^[8] 设 $A, B \in R^{m \times n}$, A 的秩为 $r, 0 < k < r$ 且 k 为整数。由定理 1 可知,矩阵 A 的非零奇异值

向量为 $(\sigma_1, \dots, \sigma_r)$ 。设 $A_k = \sum_{i=1}^k \sigma_i u_i v_i^T$, 则有

$$\|A\|_2 = \sigma_1 \tag{6}$$

$$\|A\|_F = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_r^2} \tag{7}$$

$$\min_{\text{rank}(B)=k} \|A - B\|_2 = \|A - A_k\|_2 = \sigma_{k+1} \tag{8}$$

$$\min_{\text{rank}(B)=k} \|A - B\|_F = \|A - A_k\|_F = \sqrt{\sum_{i=k+1}^r \sigma_i^2} \tag{9}$$

式(6,7)进一步说明了奇异值向量代表了一个矩阵的本质特征,而在这一组奇异值向量中 σ_1 起到关键性作用。 σ_1 变化比较大时说明矩阵也发生了比较大的变化。式(8,9)分别叫做 A 的 k 秩下的谱范数最佳逼近和 Frobenius 范数最佳逼近,这两个公式分别给出了在此度量下的逼近质量。下面给出图例(图 1~5)。

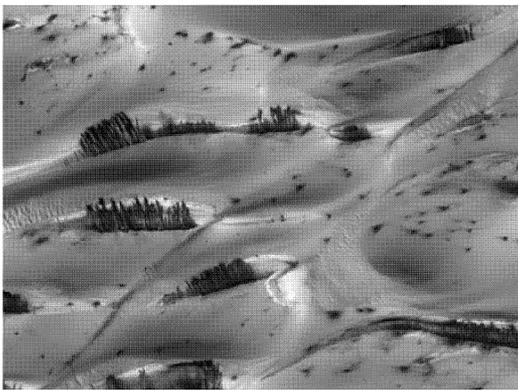


图 1 火星地貌图

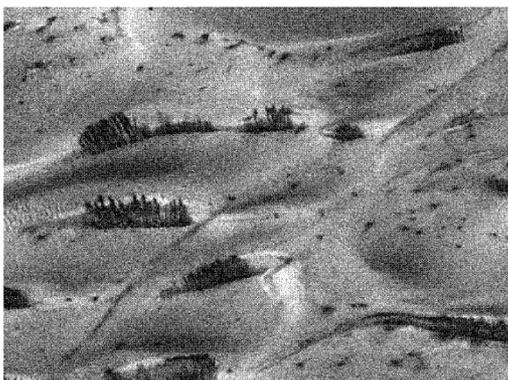


图 2 加噪声后的火星地貌图

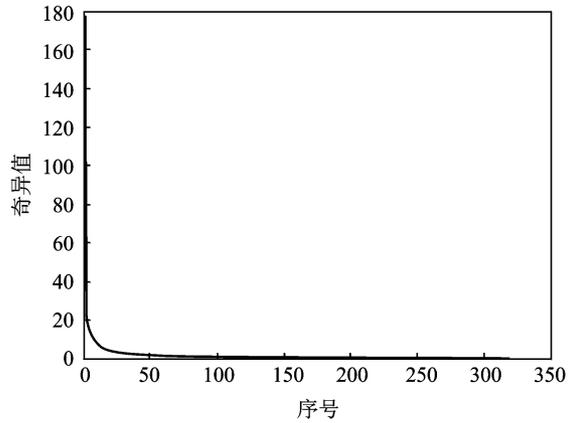


图 3 图 2 的奇异值曲线

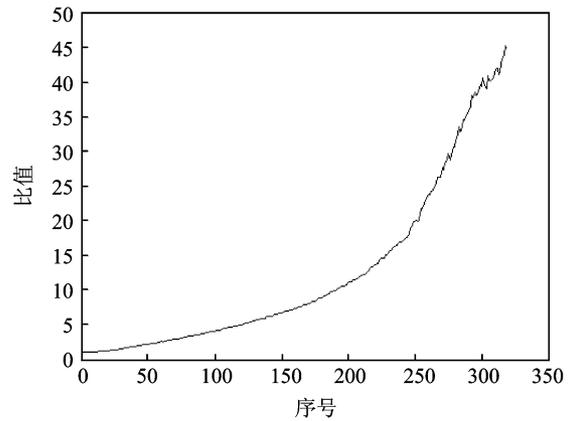


图 4 图 2 和图 1 的奇异值比值曲线

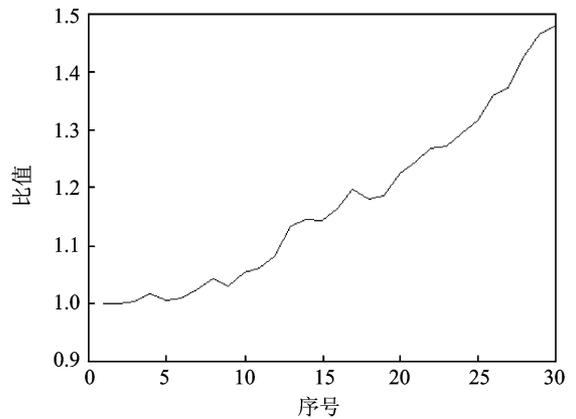


图 5 图 2 和图 1 的前 30 个奇异值比值曲线

从上面的分析图可以看出,奇异值向量差异化比较大,靠前的奇异值相对稳定些,尤其是第一个最稳定也最大。从图 4,5 中看出,图 1 的奇异值从第 20 个往后受噪声的影响明显加大。靠后的奇异值变化比较大,是因为这些奇异值本身很小,且代表的也是图像很细微的细节,或者本身就是噪声形成的。

这里,可以将矩阵奇异值向量中每个元素看成是该向量在 Frobenius 范数意义(不同于传统主分

量分析的定义)下的一个分量,在向量中靠前的元素是其主分量,而由于 σ_1 最稳定,在向量中所占的比重最大,对图像矩阵的影响也最大,是向量的第一主分量。

由上面的分析可知图像矩阵奇异值向量的主分量对噪声或干扰不敏感。由式(2)可知,图像矩阵提高或降低一定比例的灰度值后,其经过标准化的奇异值向量保持不变。因此图像矩阵标准化后的奇异值向量的主分量对光照不敏感。

特别的,对于式(8,9),当 $k=1$ 时,有

$$\min_{\text{rank}(B)=1} \|A - B\|_2 = \|A - A_1\|_2 = \sigma_2 \quad (10)$$

$$\min_{\text{rank}(B)=1} \|A - B\|_F = \|A - A_1\|_F = \sqrt{\sum_{i=2}^r \sigma_i^2} \quad (11)$$

式(10,11)揭示了在只取奇异值向量的第一主分量的情况下,也就是1秩的情况下, A 的谱范数最佳逼近和Frobenius范数最佳逼近和逼近质量。式(6,10,11)赋予了 σ_1 对于一个图像矩阵特别重要的意义,使之可以成为分层匹配中粗匹配阶段的特征标准。这样既实现了算法的快速性,也实现了对第一主分量的加权作用。在最终的精匹配阶段,可以用向量的前 k 个主分量来作为最终的匹配特征标准。这样可以进一步加快计算速度,同时提高了算法的抗干扰能力。

2 平飞段匹配算法的实现

为了进一步增强匹配的鲁棒性,将实时图和待匹配位置图像的奇异值向量做如下标准化处理。

设实时图奇异值向量中第 i 个元素为 σ_i ,基准图上每一个待匹配位置上,与实时图矩阵相同大小的图像矩阵的奇异值向量的第 i 个奇异值为 σ'_i 。令 $\lambda_i = \frac{\sigma_i}{\sigma'_i}$,这样实时图奇异值向量在该位置上的规范化后的向量就变成 $(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_r)$,而基准图上相应位置同大小的奇异值向量就被规范化为一个元素全为1的向量。对这两个向量相似度的判断,就决定了实时图和该位置匹配程度。

进行这样的规范化操作有两个好处:既实现了式(2)的比例不变性和图像的奇异值向量对光照不敏感性,又避免了奇异值向量中前几个奇异值“过大”而后面的奇异值几乎不能发挥作用。

设实时图大小为 $w \times w$, w 为奇数,本算法的匹配约束选用鲁棒性比较好的 Hausdorff 距离,匹

配算法的具体实现步骤如下:

(1)取以实时图中心点为中心,分别取大小为 $5 \times 5, 7 \times 7, 9 \times 9, \dots, w \times w$ 的小模板,对这些小模板分别做奇异值分解。

(2)对待匹配位置上图像取上述的小模板,并对其分别作奇异值分解。

(3)对上述 $w \times w$ 的模板的奇异值向量中的前 k 个奇异值做上述的标准化处理。对其余小模板的第1个奇异值做上述标准化处理。

(4)每层的每个位置只需计算该层的 $\lambda_1 - 1$ 的绝对值,设置一定的阈值,小于该阈值的,将作为下一层的候选匹配点予以保留。以此类推,直至最后一层粗选结束。

(5)取实时图奇异值向量的前 k 个主分量作为特征标准,利用 Hausdorff 距离在上面的候选位置中确定最佳匹配位置。

3 仿真实验

由于火星航拍图片比较少,本算法仿真实验图片取自一幅真实的火星图(图中树木状的特征是由火星火山喷发形成的)和一幅模拟火星山峦地貌特征的图片。在原图将灰度范围由 $0 \sim 255$ 调整为 $0 \sim 1$ 的区间,然后分别采用 imnoise 函数添加方差为0.01的噪声。实验中 k 取20, w 取63,实时图取自加噪声前的图像。将本文算法记为算法1,采用各个模板的整个奇异值向量和本文匹配策略相结合的算法记为算法2,直接用整个奇异值向量而不用任何匹配策略的算法记为算法3。本文算法实验结果见图6和图7,本文还对具有代表性的 SIFT 匹配算法进行了仿真。4个算法对这两个实验对象的实验结果对比,见表1~4(匹配位置和时间单位分别是像素和秒)。

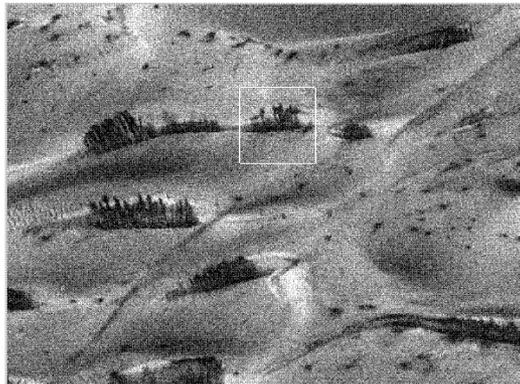


图6 实验1的仿真结果

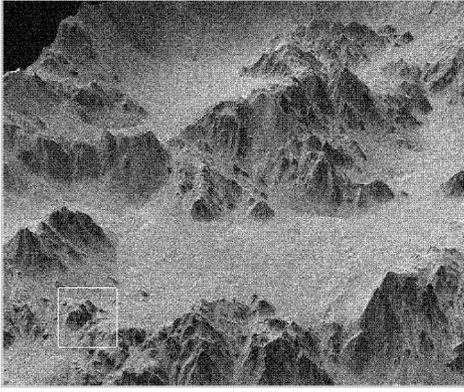


图 7 实验 2 的仿真结果

表 1 实验对象 1 仿真结果

参数	算法 1	算法 2	算法 3	SIFT 匹配算法
实际位置/像素	(71,197)	(71,197)	(71,197)	
匹配位置/像素	(71,197)	(71,197)	(114,253)	
匹配时间/s	3.834	8.453	240	18.86

表 2 实验对象 2 仿真结果

参数	算法 1	算法 2	算法 3	SIFT 匹配算法
实际位置/像素	(312,61)	(312,61)	(312,61)	
匹配位置/像素	(312,61)	(312,61)	(300,133)	
匹配时间/s	6.325	12.831	376	31.453

表 3 本实验算法 1 的参数

各级模板大小/像素	阈值大小	各层粗匹配结束后剩余位置数	
		实验 1	实验 2
5×5	0.065	1 384	1 135
7×7	0.04	392	305
9×9	0.03	142	53
11×11	0.03	17	10
15×15	0.03	2	4
63×63	0.01	2	1

表 4 本实验算法 2 的参数

各级模板大小/像素	阈值大小	各层粗匹配结束后剩余位置数	
		实验 1	实验 2
5×5	0.07	1 879	1 975
7×7	0.05	651	654
9×9	0.03	209	104
11×11	0.03	22	16
15×15	0.03	2	5
63×63			

由表 1~4 中可知,算法 3 相当耗时且完全失效,不能完成匹配。这是因为加噪声对图像的奇异值向量靠后面的分量影响比较大。算法 1,算法 2 和 SIFT 匹配算法都能正确匹配,但是算法 1 和后两种算法相比速度明显快得多。本实验所用计算机配置为:CPU AMD 4200+, 2.11GHz, 内存为 896MB, 无独立显卡, windowsxp 操作系统, 仿真工具采用 matlab6.5。上述仿真时间包含对基准图各待匹配位置参数计算的时间。算法中阈值的选取比较重要,过大会使速度变慢,过小,可能会导致在粗匹配阶段正确的匹配点被“淘汰”。在选择匹配位置时应选择特征区别明显的位置作为匹配位置。算法 2 中的阈值相对大点,是因为算法 2 采用了整个奇异值向量,其靠后分量受噪声影响较大。

4 数据存储方法与数据量分析

针对本文提出的算法,机载计算机中基准图待匹配区域中每个待匹配位置可以采用下面的方式(见表 5)存储该位置的相关参数,需要时直接读取相关参数,以减少数据存储量和计算时间。

表 5 算法 1 的机载数据存储模式

q_1	...	q_{t-1}	σ_1	...	σ_k
-------	-----	-----------	------------	-----	------------

q_1 表示该位置图像的第 1 层模板奇异值向量的第 1 个奇异值。以此类推, q_{t-1} 则表示第 $t-1$ 层奇异值向量的第 1 个奇异值, t 表示模板的层数。 σ_1 到 σ_k 表示该位置图像的奇异值向量的前 k 个奇异值。所以该位置所需存储的参数个数为 $k+t-1$, 计算出基准图中每个位置表 5 所示的向量的值,并按顺序排列存储。这样,待匹配完成后,根据序号可以确定在基准图中的匹配位置,也就知道了无人机所在火星经纬度(在相关火星数字地图做好的情况下)。

由 2~4 节的分析可知,本文算法的计算量和数据存储量都非常小,比算法 2 小很多,同时算法的鲁棒性和准确性能得到一定的保证。

与 SIFT 匹配算法相比,本文算法的计算量和数据存储量的优势非常明显。基于 SIFT 算子的方法对于每个角点采用 128 维的向量来描述,每幅图需要提取大量角点,提取过程是基于高斯尺度空间的,中间还涉及到大量高斯函数卷积计算。整个匹配算法中涉及多个参数以及对高维数据的匹配判别,计算量和数据量都比较庞大^[10]。而本文算法,以本文仿真为例,每幅实时图需要计算出 $20+6-1=25$ 个数据(6 个阈值是对整个匹配过程通用,可

事先设定好),奇异值分解的计算量也非常小。

5 末段匹配算法

平飞段,本文算法在保证准确匹配的前提下,比基于 SIFT 的匹配算法有非常大的速度和低数据量的优势。但是在末段,由于拍摄视角变化比较大,本文算法将失效。由于末段主要是确定重点探测区域后,在此区域内寻找无人机最后撞击的目标,无人机在该区域亦执行往返飞行或盘旋,留给机载计算机的计算时间也相对较长,所以在末段采用基于 SIFT 的匹配算法比较合适,其对视角和旋转具有较高的稳定性。图 8 给出了采用该匹配算法的仿真结果。

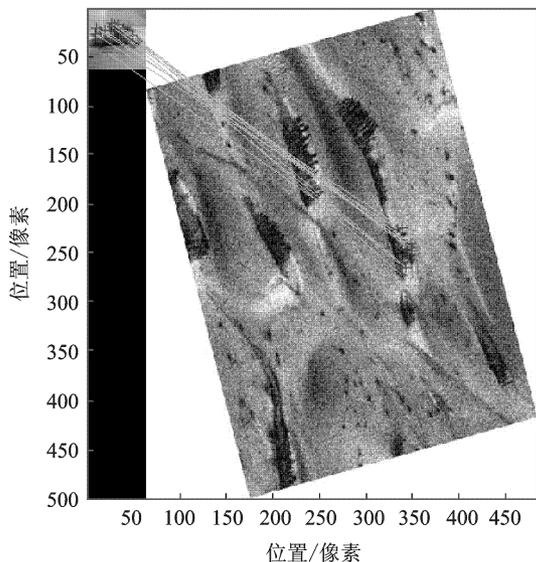


图 8 SIFT 的仿真结果

6 结束语

本文提出的火星无人机平飞段匹配算法具有准确、稳定且速度更快和数据量更小的优点。通过仅在飞行末段,将本文算法切换成现有的基于 SIFT 算子的匹配算法,能在实现火星无人机全程

快速景象匹配的同时,有效降低对其机载计算机综合性能的要求。由于单纯的景象匹配算法受到飞行路线中可选景象匹配位置数和质量的影响相对较大,在实际应用中,可以考虑采用基于惯性导航与景象匹配的组合导航方法来实现未来火星无人机的自主导航。

参考文献:

- [1] 李爽,彭玉明,陆宇平. 火星 EDL 导航、制导与控制技术综述与展望[J]. 宇航学报,2010,31(3):621-627.
- [2] Koji S, Akira O, Kozo F. Multi-objective six sigma approach applied to robust airfoil design for mars airplane[R]. AIAA 2007-1966, 2007.
- [3] Nelson B, Allwyn S, Richard C. Mars exploration airplane: design, construction, and flight testing of a stability, control, and performance demonstrator [R]. AIAA 2007-2723, 2007.
- [4] Marwaha M, Valasek J. Fault tolerant control allocation for mars entry vehicle-using adaptive control [R]. AIAA 2008-7351, 2008.
- [5] Reuben R R, John R O, Robert D B, et al. Flight system options for a long-duration mars airplane[J]. AIAA 2004-6568, 2004.
- [6] 姚克明,王小兰,刘燕斌,等. 火星探测无人机任务规划与建模分析[J]. 空间科学学报,2012,32(1):16-19.
- [7] 张贤达. 矩阵分析和应用[M]. 北京:清华大学出版社,2005:344-357.
- [8] Gun Junying, Zhang Youwei. A study of singular value decomposition of face image-matrix[C]//IEEE Inf, Conf, Neural Networks & Signal Processing. Naging, China: IEEE, 2003:14-17.
- [9] 芮挺. 打击效果评估相关技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学自动化学院,2004.
- [10] Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. International Journal of Computer Vision, 2004,60(2):91-110.