

文章编号: 1001-0920(2011)08-1175-06

## 基于 CenSurE 特征的 SAR/INS 组合导航景象匹配算法

许允喜<sup>1,2</sup>, 陈 方<sup>1,3</sup>

(1. 湖州师范学院 信息与工程学院, 浙江 湖州 313000; 2. 浙江大学 信息与电子工程系, 杭州 310027; 3. 南京航空航天大学 导航研究中心, 南京 210016)

**摘要:** 在 SAR/INS 组合导航系统中, 所获取的 SAR 图像可能存在严重的斑点噪声和几何变形, 对此, 提出一种基于 CenSurE 特征的 SAR/INS 组合导航用景象匹配算法. 该算法针对惯性组合导航的工作特点进行设计. 首先提取 CenSurE 特征和垂直的 SURF 描述符, 利用夹角余弦相似度量方法进行特征匹配; 然后, 采用分组一致采样算法和最小二乘精确匹配算法获取高精度的航向和位置偏差信息. 景象匹配性能评价实验表明, 在匹配适应性、匹配速度、精度和鲁棒性等方面, CenSurE 特征都很优越, 可以满足 SAR/INS 景象匹配导航系统匹配修正的高性能要求.

**关键词:** 惯性组合导航系统; CenSurE; 图像匹配; 局部特征

**中图分类号:** TP391.41

**文献标识码:** A

## Scene matching algorithm based on CenSurE for SAR/INS integrated navigation system

XU Yun-xi<sup>1,2</sup>, CHEN Fang<sup>1,3</sup>

(1. Institute of Information and Engineering, Huzhou Teachers College, Huzhou 313000, China; 2. Department of Information Science and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 3. Navigation Research Center, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China. Correspondent: XU Yun-xi, E-mail: xuyunxi@hutc.zj.cn)

**Abstract:** In the SAR/INS integrated navigation system, SAR images have a serious distortion and serious speckle noises. Therefore, this paper presents the image matching algorithm of SAR/INS integrated navigation system based on CenSurE. The process of the image matching algorithm is designed especially for the inertial integrated navigation. Firstly, CenSurE features and upright SURF descriptor are extracted. And the features are matched by using cosine similarity measure. Finally, the GroupSAC algorithm and the least square algorithm are used to get the high accurate aircraft position and course deviation. Performance evaluation experiments for scene matching show that, CenSurE detector is superior in matching adaptability, speed, accuracy and robustness, which can meet the high performance needs for matching navigation in the SAR/INS integrated navigation system.

**Key words:** inertial integrated navigation system; CenSurE; image matching; local feature

### 1 引 言

目前很多飞行器都采用光学图像匹配来提高自主导航的精度, 但光学传感器容易受到物候天象与光照条件的影响, 因而工作效率受到一定的限制. 合成孔径雷达 (SAR) 是一种主动式微波成像传感器, 不仅可以获得类似于光学图像的高分辨率地面目标图像, 而且具有全天时、全天候工作的特点, 因此 SAR 已成为飞行器导航的重要传感器之一. SAR 在飞行器组合自主导航系统中的应用是当前国际上一个重要的研

究领域, SAR/INS 组合导航系统有可能成为下一代飞行器最为合适而优选的自主导航系统. 与其他相干成像系统类似, SAR 也存在其固有的缺点, 如强斑点噪声和低信噪比等. 因此, 在选择合适的图像匹配算法以满足 SAR/INS 组合导航系统的特殊要求方面仍有待于探索.

国内外学者在 SAR 图像匹配算法上开展了大量的研究工作, 并取得了一定的成果<sup>[1-2]</sup>, 其中基于部分 Hausdorff 距离 (PHD) 的边缘特征景象匹配算法得到

收稿日期: 2010-05-04; 修回日期: 2010-06-25.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60872057); 浙江省自然科学基金项目(R1090244, Y1101237, Y1110944).

作者简介: 许允喜(1978-), 男, 讲师, 博士生, 从事图像处理、计算机视觉等研究; 陈方(1987-), 女, 助教, 硕士, 从事景象匹配辅助导航、智能图像处理的研究.

了广泛研究<sup>[1-3]</sup>. 但基于边缘特征的景象匹配算法只在图像边缘特征明显、低噪声和低信噪比下较为有效, 即算法的适应性较差; 而且算法的运行时间较长, 抗几何变形性能也较差.

近年来, 在计算机视觉领域, 基于局部特征描述符的方法在目标识别等方面取得了显著进展, 其中 David<sup>[4-5]</sup>提出的一种局部特征描述子——SIFT (scale-invariant feature transform) 广泛应用于全景图拼接<sup>[6]</sup>和机器人导航<sup>[7]</sup>等领域, 它包含了高斯差分 (DOG) 检测子 (SIFT 特征) 和 SIFT 描述子. 文献 [8] 提出了基于 SIFT 特征的导航用景象匹配算法, 较好地解决了旋转缩放和视点变化引起的图像变形等问题. 针对 SIFT 较高的计算复杂度, Bay 等人<sup>[9]</sup>提出了 SURF (speeded-up robust features) 算子, 其包含了 SURF 特征和 SURF 描述符. SURF 特征检测子和描述子采用积分图像, 使计算速度大大提高. SURF 检测子比 SIFT 的 DOG 检测子重复率更高, SURF 描述子比 SIFT 描述子更独特, 因而 SURF 算子广泛应用于目标检测<sup>[10-11]</sup>、视图匹配<sup>[12-13]</sup>以及图像检索<sup>[14]</sup>等领域.

CenSurE<sup>[15]</sup>是 Agrawal 于 2008 年提出的一种新的局部特征, 具有较高的稳定性, 计算效率很高, 计算速度是 SURF 特征的 1/3. 因为其在所有尺度和像素上计算滤波器响应, 所以 CenSurE 的精度很高. 同时, 设计了简单的双层滤波器来近似高斯拉普拉斯, 获得了较高的重复率. 文献 [15] 评价了 CenSurE 在视觉里程计上的应用, 其性能超过了目前所有的局部特征, 已应用于户外机器人导航和地图生成等领域<sup>[16-18]</sup>.

对于 SAR 景象匹配问题, 参考图和实测图存在复杂的几何畸变和强斑点噪声, 因为 CenSurE 的滤波方法比 SIFT 和 SURF 更能抵制噪声, 所以使用 CenSurE 可以得到更多稳定的局部特征点. 本文提出一种基于 CenSurE 的导航用高精度鲁棒的景象匹配算法, 针对惯性组合导航的工作特点进行设计. 首先提取 CenSurE 特征; 然后计算特征点的垂直 SURF 描述符, 利用夹角余弦距离相似度计量方法进行特征匹配, 并采用分组一致采样算法 (GroupSAC) 和最小二乘精确匹配算法获取高精度的航向和位置偏差信息; 最后, 建立了景象匹配性能评价实验, 对 CenSurE, SIFT 和 SURF 这 3 种局部特征进行了分析对比. 景象匹配性能评价实验表明, CenSurE 特征在匹配适应性、匹配速度、匹配精度以及抗噪声等方面均优于 SURF 和 SIFT 特征.

## 2 SAR/INS 组合导航中基于 CenSurE 的景象匹配算法

### 2.1 惯性组合导航系统中的图像几何畸变模型

惯性组合导航系统中景象匹配过程需要结合惯

性导航系统信息和气压高度表信息来获得当地的数字地图, 而且在进行景象匹配前, 需要利用惯性导航系统和气压高度表测量信息对实测图进行预处理, 这两套系统具有测量误差. 通常的惯性/景象匹配组合导航系统中, 因为惯性陀螺仪对俯仰和横滚角度的估计不存在积累误差, 该误差极小, 可通过图像校正技术对图像进行预处理, 所以不用考虑俯仰和横滚误差.

设惯性导航航向漂移误差为  $\theta$ , 位置误差为  $(t_x, t_y)$ , 由无线电气压高度表的测量误差造成的实测图和参考图之间的尺度变化为  $c$ , 则有如下关系:

$$\begin{bmatrix} x_{a_i} \\ y_{a_i} \end{bmatrix} = c \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{b_i} \\ y_{b_i} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix}. \quad (1)$$

其中:  $(x_{b_i}, y_{b_i})$  和  $(x_{a_i}, y_{a_i})$  分别为实测图的特征点  $b_i$  及其参考图对应的特征点  $a_i$  在二维图像平面上的坐标. 景象匹配即是利用该模型修正组合导航系统的航向误差  $\theta$  和位置误差  $(t_x, t_y)$ .

### 2.2 SAR 图像斑点噪声模型

SAR 图像会产生相干斑点噪声. 斑点噪声的存在使 SAR 图像灰度分辨率与解译性明显变差, 同时也降低了图像的空间分辨率, 隐藏了图像的精微结构, 严重地影响了 SAR 图像的特征提取.

对于  $L$  视 SAR 强度图像, 图像强度与后向散射系数的关系可由如下乘性模型<sup>[19]</sup>表示:

$$Y = F \times X,$$

其中:  $X$  为目标的后向散射系数;  $F$  为斑点噪声模型, 且服从 Gamma 分布, 其均值为 1, 方差为  $1/L$ . 其概率密度函数为

$$p(F) = \frac{L^L F^{L-1} e^{-LF}}{\Gamma(L)}, \quad F > 0. \quad (2)$$

其中  $\Gamma(\cdot)$  是 Gamma 函数,  $L$  越小, 噪声越大.

### 2.3 CenSurE 特征

CenSurE 特征检测子的提取由 3 个步骤组成: 1) 利用积分图像计算双层高斯拉普拉斯滤波器响应; 2) 采用非极大值抑制检测局部极大值; 3) 滤除分布在边缘或线上的不稳定特征点.

Agrawal 等人<sup>[15]</sup>提出了两种 CenSurE 特征检测子近似双层高斯拉普拉斯, 这两种检测子分别使用两种中心环绕的哈尔小波, 即: 盒和八边形滤波器, 分别称为 CenSurE-DOB 和 CenSurE-OCT 滤波器, 如图 1

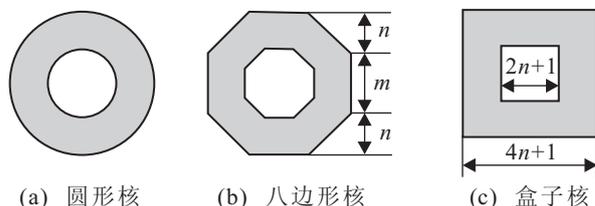


图 1 近似的双层 LOG 滤波器

所示. 其中 CenSurE-OCT 滤波器更对称, 更接近于差分圆形滤波器.

设 CenSurE-DOB 滤波器的内核尺寸为  $(2n+1) \times (2n+1)$ , 外核尺寸为  $(4n+1) \times (4n+1)$ . 设  $I_n$  为内核权重系数,  $O_n$  为外核权重系数. 卷积通过相乘和相加实现, 即外核和内核首先乘以权重系数, 然后相减. 为了使这种滤波器的 DC 响应为 0, 权重系数需满足下式:

$$O_n(4n+1)^2 = I_n(2n+1)^2. \quad (3)$$

对尺度也需要进行归一化, 即

$$I_n(2n+1)^2 = I_{n+1}(2(n+1)+1)^2. \quad (4)$$

CenSurE-OCT 使用了 7 个尺度,  $s = [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]$ . 7 个尺度的 CenSurE-OCT 滤波器尺寸如表 1 所示.

表 1 7 个尺度的 CenSurE-OCT 滤波器内外核的尺寸

尺度	$s$						
	1	2	3	4	5	6	7
内核( $m, n$ )	(3, 0)	(3, 1)	(3, 2)	(5, 2)	(5, 3)	(5, 4)	(5, 5)
外核( $m, n$ )	(5, 2)	(5, 3)	(7, 3)	(9, 4)	(9, 7)	(13, 7)	(15, 10)

CenSurE-DOB 滤波器可利用积分图像高效计算, 一个矩形区域的图像强度之和只需要进行 3 次加法运算, 且计算时间与区域大小无关. 对于 CenSurE-OCT 滤波器, 还需要利用两个倾斜的积分图像来构建梯形区域, 其运算时间高于 CenSurE-DOB 滤波器.

7 个尺度的滤波器在图像的每个像素上进行计算. 将尺度空间的每个点与本尺度的相邻位置以及相邻尺度的对应位置共 26 个邻域逐个进行比较, 通过非极大值抑制得到局部极值点. 弱的响应被滤除, 因为这些特征是不稳定的. 最后, 用尺度适应的 Harris 方法计算主曲率的比率以去除位于边缘或线上的不稳定特征点, 即

$$H = \begin{bmatrix} \sum L_x^2 & \sum L_x L_y \\ \sum L_x L_y & \sum L_y^2 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

其中:  $L$  为滤波器响应函数,  $L_x$  和  $L_y$  是沿  $x$  和  $y$  的偏导. 该计算在与特征点尺度成正比的窗口内进行, 窗口的长度即为该尺度特征点滤波器外盒的长度. 比率的阈值设为 10.

## 2.4 垂直的 SURF 描述子

因惯性组合导航的航向偏差角度不大, 而垂直的 SURF 描述符在小旋转角度下更加鲁棒且计算速度更快<sup>[9]</sup>, 故本文采用该描述符. 首先以 CenSurE 特征点为中心取  $20s \times 20s$  ( $s$  为特征点的尺度) 的邻域, 将该窗口区域分成  $4 \times 4$  的子区域. 在每个子区域内, 计算  $5s \times 5s$  范围内的哈尔小波响应, 采样步长为  $s$ ,

$x$  和  $y$  方向的哈尔小波如图 2 所示.

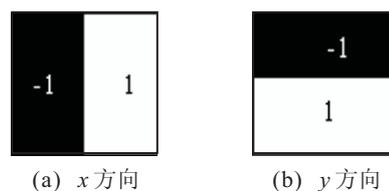


图 2 哈尔小波滤波器

将水平和垂直方向的小波响应分别记作  $d_x$  和  $d_y$ , 并赋予响应值以高斯权重系数; 然后将每个子区域内的响应值和响应绝对值相加, 并用四维描述向量  $V = (\sum d_x, \sum d_y, \sum |d_x|, \sum |d_y|)$  表示子区域, 于是, 每个特征点的描述符即为一个 64 维向量; 最后将特征点描述符向量归一化, 去除光照影响.

## 2.5 特征匹配算法

特征匹配依赖于匹配策略, 常用的方法有: 基于阈值的匹配, 基于最近邻距离的匹配, 基于最近邻距离与次近邻距离比率的匹配等. 基于最近邻距离与次近邻距离比率的匹配方法错误率最低, 故本文采用该匹配方法. 传统的局部特征匹配算法都以欧氏距离作为描述符之间的相似度量. 文献 [20] 指出, 对于高维数据, 余弦相似度量性能比欧氏距离更优越. 因此本文利用余弦相似度量进行特征点匹配.

## 2.6 分组一致采样算法 (GroupSAC)

最近, 文献 [21] 提出了分组一致采样算法, 这是一种高效的一致采样算法, 其计算效率高于 RANSAC 算法. 该算法假定: 在许多点匹配的计算机视觉应用场合中, 存在数据分组, 其中, 某些分组数据具有较高比率的内点, 某些具有较低比率的内点. 利用该算法首先要对数据进行分组.

文献 [22] 指出, 点匹配的信息 (最近邻与次近邻距离之比和最近邻距离) 可以作为先导信息. 首先根据最近邻与次近邻距离之比的大小进行排序, 较小的 50% 数据集合设为  $U$ ; 然后, 根据最近邻距离的大小进行排序, 较小的 50% 数据集合设为  $V$ ; 最后将位于  $U$  和  $V$  的数据集分为一组  $A$ , 其他的为另一组  $B$ , 显然,  $A$  组数据比  $B$  组数据具有更高比率的内点.

本文利用分组一致采样的原理, 算法流程如下:

- 1) ① 在  $A$  组随机采样 2 对匹配点.
- ② 利用式 (2) 计算得到导航参数.
- ③ 利用 ② 得到的导航参数计算得到内点.
- ④ 对内点进行最小二乘精确匹配算法<sup>[3]</sup>以获取高精度的导航参数.
- ⑤ 利用 ④ 得到的导航参数计算所有内点的平均误差, 如果该误差达到预定精度, 则退出. 如果达到  $A$  组的最大迭代次数, 则转 ②; 否则, 转 ①.

2) 在  $B$  组采用 2 对匹配点, 重复 1) 的计算.

3) 在  $A$  和  $B$  组中各采样 1 对匹配点, 重复 1) 的计算.

## 2.7 基于 CenSurE 的 SAR/INS 组合导航的图像匹配算法

针对 SAR/INS 组合导航的工作特点, 对 CenSurE 特征进行如下优化设计:

1) 在 SAR/INS 惯性组合导航系统中去掉 CenSurE 特征检测子的第 3 个步骤. 在景象匹配中, 有些匹配区域位于边缘或线上的 CenSurE 特征点较多, 滤除这些特征点将影响景象匹配的精度, 有时甚至会导致匹配失败. 部分位于边缘或线上的不稳定、定位不精确的特征点可以通过 GroupSAC 算法滤除.

2) 本文算法采用 CenSurE-DOB 滤波器, 主要基于以下 3 点考虑: ① 虽然 CenSurE-DOB 抗旋转能力较 CenSurE-OCT 弱 (特别在  $45^\circ$  旋转下<sup>[15]</sup>), 但惯性导航的航向漂移误差  $\theta$  较小, 一般不超过  $10^\circ$ , 在该条件下二者之间的抗旋转性能相差无几; ② CenSurE-DOB 滤波器的计算效率比 CenSurE-OCT 快很多, 一般在 1.5 倍以上<sup>[15]</sup>; ③ 从 2.3 节可以看出, CenSurE-OCT 滤波器的核尺寸比 CenSurE-DOB 滤波器大很多, 景象匹配的 SAR 图像都是高空获取的, 图像的小结构物体较多, 因此在该条件下, 采用 CenSurE-DOB 滤波器获取的特征点更多.

3) 由文献 [23] 的实验可知, 子像素内插可以获得更高的匹配精度和稳定性, 所以本文对 CenSurE 检测子也采用了该方法以获取更高精度的特征点定位. 该方法采用尺度空间函数的二次项泰勒展开, 即

$$D(x) = D + \frac{\partial D^T}{\partial x} x + \frac{1}{2} x^T \frac{\partial^2 D}{\partial x^2} x. \quad (6)$$

对  $x$  求偏导, 使  $\frac{\partial D(x)}{\partial x} = 0$ , 得到极值点  $\hat{x}$  为

$$\hat{x} = -\frac{\partial^2 D^{-1}}{\partial x^2} \frac{\partial D}{\partial x}. \quad (7)$$

最后, 采样点的位置加上  $\hat{x}$  便可得到极值点定位的内插值.

4) 在垂直 SURF 描述符中, 对  $dx$  和  $dy$  进行高斯加权的高斯函数方差为  $3.3 s$ . 本文将方差加大为  $5 s$ . 因为在 SAR/INS 组合导航系统中, 匹配之前应根据惯性陀螺仪和气压高度表进行图像校正, 校正后的实测图和参考图之间几何畸变较小, 所以加大高斯加权函数的方差可增加描述符的独特性, 但又不会降低其鲁棒性.

SAR/INS 组合导航系统框图如图 3 所示.

本文针对惯性/景象匹配组合导航系统的实际应用情况, 给出了用于组合导航系统的基于 CenSurE 特

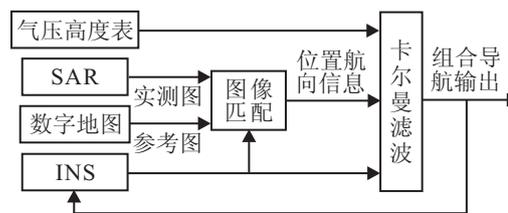


图 3 SAR/INS 组合导航系统

征的图像匹配算法. 具体实现步骤如下:

1) 飞行器进入匹配区域, 利用机载合成孔径雷达获得一幅实测图  $A$ ;

2) 利用此时惯性导航的定位信息并结合预估的惯性导航误差, 获取机载计算机内 SAR 图像的一部分, 即参考图  $B$ ;

3) 计算实测图  $A$  和参考图  $B$  的 CenSurE 特征;

4) 计算实测图  $A$  和参考图  $B$  的垂直 SURF 描述符;

5) 利用本文的特征匹配算法获得实测图  $A$  和参考图  $B$  的匹配特征点对;

6) 利用 2.6 节的算法获取高精度的航向和位置偏差信息以修正此时惯性导航的位置信息和航向信息;

7) 至此, 一次匹配完成, 若航迹未完, 则继续从步 1) 开始匹配.

## 3 景象匹配性能评价实验

本文采用统计实验方法对景象匹配算法进行性能评估, 对仿真匹配算法的实测图影像数据进行大量的匹配实验, 在此基础上对实验数据进行分析, 从而得出匹配算法性能的统计结果. 景象匹配算法的性能指标主要有: 匹配精度、匹配概率、处理速度和抗斑点噪声性能. 本文对各种性能进行了详细实验和评价. 本文实验中采用的图像是 SAR 强度图像, 实际的 SAR 图像可从美国 Sandia 实验室或其他图像数据库下载得到. 文献 [8] 指出, 基于 SIFT 的景象匹配算法在同源图像匹配性能上远远优于基于部分 Huasdorff 距离的景象匹配算法, 因此本文不再与后者进行对比.

### 3.1 匹配适应性分析

正确匹配的特征点对数目反映了算法对图像的适应性, 也直接影响图像匹配的精度. 由式 (1) 可知, 当正确匹配的特征点对数目小于 2 时, 会导致图像匹配失败. 定义匹配失败率为

$$1 - \text{precision} = \frac{\#\text{false matches}}{\#\text{correct matches} + \#\text{false matches}}. \quad (8)$$

为了验证算法的适应性, 首先控制最近邻距离与

次近邻距离的比率  $t$ , 使特征匹配失败率 ( $1 - \text{precision}$ ) 在 10% 左右; 然后用 GroupSAC 算法去除误匹配点, 并统计正确匹配的特征点对数目. 本文对 1000 幅不同区域的 SAR 图像进行匹配实验. 统计结果表明: CenSurE 的正确匹配特征点数目多于 SURF, SURF 的正确匹配特征点数目多于 SIFT; CenSurE 特征算法的匹配失败率为 0.1%, SURF 特征算法的匹配失败率为 0.2%, 而 SIFT 特征算法的匹配失败率为 1.2%. 受篇幅所限, 本文只列举了一组 SAR 图像特征匹配对比图, 如图 4 所示. 实验条件为: 尺度倍数为 1.1, 旋转  $2^\circ$ , 斑点噪声方差为 0.2. 设位置估计误差  $\text{error} = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$ ,  $\Delta x$  和  $\Delta y$  分别为  $x, y$  轴上的位置偏差; 匹配点位置误差在 0.2 像素内, 旋转角度误差在  $0.1^\circ$  内, 尺度误差在 0.01 内.

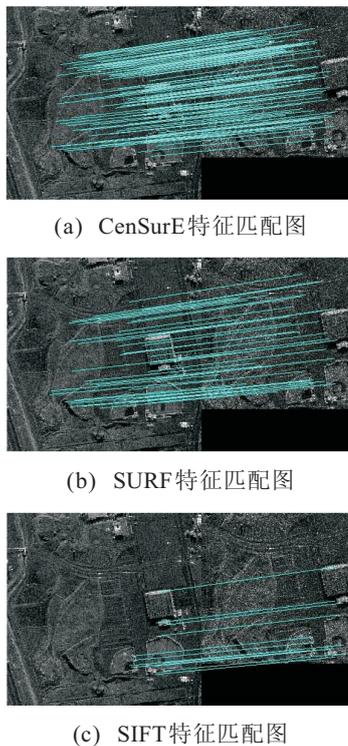


图 4 同一区域的 SAR 图像特征匹配对比图

### 3.2 抗噪声性能分析

SAR 的模拟图像是用真实 SAR 图像通过乘以模拟且空间不相关的斑点噪声来生成斑点噪声图像. 实验中对 50 幅 SAR 图像进行了抗斑点噪声性能测试, 统计结果表明, CenSurE 的抗斑点噪声性能最强, SURF 特征次之, SIFT 特征最差.

表 2 给出了基于噪声影响的图像匹配结果. 由表 2 可以看出, CenSurE 的抗噪声能力较强, 即使在高斑点噪声  $n = 0.6$  时, 算法也能获得较精确的导航数据, 最大平移误差约为 0.5 像素.

表 2 基于噪声影响的图像匹配结果

旋转/ $^\circ$	尺度/倍	正确 匹配点	噪声 水平 $n$	匹配结果		
				匹配点	旋转/ $^\circ$	尺度/倍
3	1.1	64, 74	0.1	64.0, 74.1	3.0	1.10
			0.2	63.9, 74.1	2.9	1.11
			0.3	64.2, 73.7	3.1	1.10
			0.4	64.1, 74.1	3.3	1.10
			0.5	63.7, 74.1	2.8	1.11
			0.6	63.5, 73.7	3.5	1.11

### 3.3 匹配精度分析

为了验证本文提出的基于 CenSurE 特征的景象匹配算法的计算精度, 对 50 幅 SAR 图像进行了算法匹配精度测试, 并与 SURF 和 SIFT 特征进行了对比. 图 5 给出了一组实验数据, 实验条件为: 实测图尺度为 1.1, 噪声方差为 0.2, 航向偏差依次为 0, 1, 3, 5, 8. 由于斑点噪声的产生和 GroupSAC 算法存在一定的随机性, 每个实验结果均为运行 20 次的平均值. 位置估计误差  $\text{error} = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$ , 单位为像素; 航向估计误差单位为  $^\circ$ .

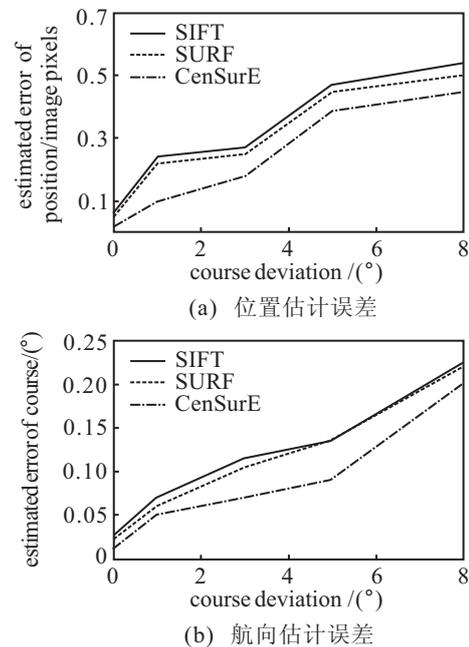


图 5 3 种特征的景象匹配算法计算误差对比

由图 5 可见, CenSurE 比 SIFT 和 SURF 的特征计算精度更高, SIFT 和 SURF 的计算精度相当; 在旋转角度为  $8^\circ$  时, CenSurE 算法几乎不受影响, 最大平移误差约为 0.45 像素, 且旋转角度误差非常小, 约为  $0.2^\circ$ .

### 3.4 实时性分析

本文运用 VC++6.0 工具进行算法的实时性测试, 算法在主频为 Pentium 2.8 GHz, 内存为 512 M 的 PC 机上运行. 对 500 幅参考图为  $320 \times 320$  像素、实测

图为  $250 \times 250$  像素的图像进行了测试, CenSurE 特征算法的整个计算时间约为 0.1 s, SURF 特征算法约为 0.2 s, SIFT 特征算法约为 0.3 s, 完全满足惯性组合导航的实时性要求<sup>[1-2]</sup>. 其中 CenSurE 特征算法的计算效率最高, 实时性能最优. 三者都比基于部分 Hausdorff 距离的边缘特征匹配算法快很多<sup>[3]</sup>.

SAR/INS 组合导航系统一般利用卡尔曼滤波器进行组合滤波, 如果景象匹配时间太长, 则会导致滤波精度不高甚至发散. 景象匹配时间一般应在 1 s 以内, 而传统的基于部分 Hausdorff 距离的边缘特征匹配算法计算时间都为 1 s 以上, 其滤波精度较低, 需采用特殊的滤波算法. 本文算法的计算时间仅为 0.1 s, 滤波精度很高.

表 3 列出了整个基于 CenSurE 的景象匹配算法各部分的计算时间. 从中可以看出, GroupSAC 算法比传统的 RANSAC 算法要快很多.

表 3 基于 CenSurE 的景象匹配算法各部分的计算时间

算法各部分	CenSurE 检测子	SURF 垂直描述子	特征 匹配	GroupSAC	RANSAC
计算时间/ms	22	42	25	7	13

### 3.5 性能总结

通过以上实验, 对算法的综合性能分析和总结如下:

1) CenSurE 的正确匹配特征点数目多于 SURF, SURF 的正确匹配特征点数目多于 SIFT; CenSurE 特征算法的匹配失败率为 0.1%, SURF 特征算法的匹配失败率为 0.2%, 而 SIFT 特征算法的匹配失败率为 1.2%.

2) CenSurE 特征能很好地满足导航系统准确性和鲁棒性的要求, 在斑点噪声、旋转角度和尺度变化并存的情况下, 定位精度在 0.6 个像素以内, 旋转角度误差在  $0.5^\circ$  以内, 尺度误差在 0.02 以内; 其性能优于 SURF 和 SIFT 特征.

3) CenSurE 特征算法图像匹配定位时间约为 0.1 s, 计算效率高于 SURF 和 SIFT, 完全满足惯性组合导航的实时性要求.

## 4 结 论

为了适应 SAR 图像的几何畸变影响和高斑点噪声, 本文给出了一种高精度鲁棒的基于 CenSurE 特征的景象匹配算法. 实验分析表明, 本文算法能在 SAR 图像受到严重斑点噪声影响下得到精确的匹配结果, 且运算速度很快, 其匹配性能优于 SIFT 和 SURF 特征. 下一步的工作是对基于局部特征描述子与全局特征融合的景象匹配算法进行研究, 克服单个算法的局限性, 进一步提高匹配适应性.

## 参考文献(References)

- [1] 冷雪飞, 刘建业, 熊智, 等. 加权 Hausdorff 距离算法在 SAR/INS 景象匹配中的应用[J]. 控制与决策, 2006, 21(1): 42-45.  
(Leng X F, Liu J Y, Xiong Z, et al. Application of weighted hausdorff distance algorithm in SAR/INS scene matching[J]. Control and Decision, 2006, 21(1): 42-45.)
- [2] 刘建业, 冷雪飞, 熊智, 等. 惯性组合导航系统的实时多级景象匹配算法[J]. 航空学报, 2007, 28(6): 1401-1407.  
(Liu J Y, Leng X F, Xiong Z, et al. Real-time multi-level scene matching algorithm for inertial integrated navigation system[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28(6): 1401-1407.)
- [3] 熊智, 刘建业, 曾庆化, 等. 景象匹配辅助导航系统中的图像匹配算法研究[J]. 中国图像图形学报, 2004, 9(1): 29-34.  
(Xiong Z, Liu J Y, Zeng Q H, et al. The study of image matching algorithm for scene matching aided navigation system[J]. J of Image and Graphics, 2004, 9(1): 29-34.)
- [4] David G Lowe. Object recognition from local scale-invariant features[C]. Int Conf on Computer Vision. Corfu, 1999: 1150-1157.
- [5] David G Lowe. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. Int J of Computer Vision, 2004, 60(2): 91-110.
- [6] Matthew Brown, David G Lowe. Automatic panoramic image stitching using invariant features[J]. Int J of Computer Vision, 2007, 74(1): 59-73.
- [7] Stephen S, Lowe D G, Little J. Vision-based global localization and mapping for mobile robots[J]. IEEE Trans on Robotics, 2005, 21(3): 364-375.
- [8] 陈方, 熊智, 许允喜, 等. 惯性组合导航系统中的快速景象匹配算法研究[J]. 宇航学报, 2009, 30(6): 2308-2316.  
(Chen F, Xiong Z, Xu Y X, et al. Research on the fast scene matching algorithm in the inertial integrated navigation system[J]. J of Astronautics, 2009, 30(6): 2308-2316.)
- [9] Bay H, Tuytelaars T, Van Gool L. SURF: Speeded up robust features[C]. Proc of 10th European Conf on Computer Vision. Graz, 2006: 404-417.
- [10] Donghoon Kim, Rozenn Dahyot. Face components detection using SURF descriptors and SVMs[C]. Int Machine Vision and Image Processing Conf. Portrush, 2008: 51-56.
- [11] David Gossow, Johannes Pellenz, Dietrich Paulus. Danger sign detection using color histograms and SURF matching[C]. IEEE Int Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics. Sendai, 2008: 13-18.

(下转第1186页)