

一种基于ORB的快速大视角图像匹配算法

曾庆化^{1,2†}, 陈 艳¹, 王云舒^{1,2}, 刘建业^{1,2}, 刘 昇³

(1. 南京航空航天大学自动化学院, 南京 211106; 2. 卫星通信与导航协同创新中心, 南京 211106;
3. 中航工业洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471009)

摘 要: 针对 ASIFT 算法抗大视角变换能力较好, 但运算效率低的缺点, 提出一种基于 ORB 的快速大视角图像匹配算法. 该算法结合透视变换模型和 ORB 算法对 ASIFT 中的仿射变换模型和 SIFT 算法进行优化, 在粗匹配算法获得单应性矩阵的基础上进行精匹配, 有效减少了模拟次数, 并提高了算法运算效率. 实验结果表明, 所提出算法具备抗视角变换能力, 计算速度比 ASIFT 算法提高 10 倍, 实时性强, 工程使用价值高.

关键词: ORB; 大视角; 透视变换; 仿射不变

中图分类号: TP391.4 **文献标志码:** A

A fast matching method for large viewpoint changes images based on ORB algorithm

ZENG Qing-hua^{1,2†}, CHEN Yan¹, WANG Yun-shu^{1,2}, LIU Jian-ye^{1,2}, LIU Sheng³

(1. College of Automation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China; 2. Collaborative Innovation Center for Satellite Communication and Navigation, Nanjing 211106, China; 3. AVIC Luoyang Electro-Optical Equipment Research Institute, Luoyang 471009, China)

Abstract: For the problem that the affine scale invariant feature transform(ASIFT) algorithm does well in large viewing image matching but has low computing efficiency, a fast large viewing image matching method based on the oriented FAST and rotated BRIEF(ORB) algorithm is proposed. The improved algorithm combines the perspective transformation model and ORB algorithm to optimize the affine transformation model and SIFT algorithm in the ASIFT algorithm. The refined matching is performed with the homography matrix based on coarse matching, which can reduce the number of simulation and improve the efficiency of the algorithm. The experimental results show that the proposed algorithm has the ability to resist the angle of view, and is 10 times faster than the ASIFT algorithm. Also, it has strong real-time performance and high engineering application value.

Keywords: ORB; large viewing; perspective transformation; affine transformation

0 引 言

图像匹配作为数字图像处理技术的重要组成部分, 已广泛应用于机器人自主行驶^[1]、目标跟踪与识别^[2-3]和视觉导航^[4-5]等领域. 基于特征的图像匹配算法是当前图像匹配技术的主流方向. Lowe^[6]提出了 SIFT(scale invariant feature transform)算法. Bay 等^[7]将特征描述算子的维度降低到 64 维, 提出了 SURF(speeded up robust features)算子, 提高了匹配效率. Rublee 等^[8]提出了 ORB(oriented FAST and rotated BRIEF)算法, 在计算速度上 ORB 算法是 SIFT 算法的 100 倍, 是 SURF 算法的 10 倍.

虽然 ORB 算法计算速度较快, 能抵抗旋转变换, 但其抗视角变换能力较差. 鉴于此, Morel 等^[9]提出了 ASIFT(Affine-SIFT)算法, 该算法利用仿射采样的方式模拟视角变形, 使算法具备抗视角变换能力. Cai 等^[10]在 ASIFT 算法的基础上, 利用透视变换模型替代仿射变换模型, 提出了 PSIFT(Perspective-SIFT)算法, 提高了匹配准确性. 虽然 ASIFT 算法和 PSIFT 算法具备良好的抗旋转、尺度、视角变换能力, 但其运算速度较慢. 在 ASIFT 算法的基础上, ASURF^[11](Affine-SURF)算法、AORB^[12](Affine-ORB)算法、AFREAK 算法^[13](Affine-FREAK)分别利用 SURF、

收稿日期: 2016-11-30; 修回日期: 2017-07-21.

基金项目: 陆军装备部十三五预研项目(30102080101); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2017209); 航空科学基金项目(20165852052).

作者简介: 曾庆化(1979-), 男, 教授, 博士, 从事惯性导航/图像/卫星及其组合导航技术等研究; 陈艳(1993-), 女, 硕士生, 从事图像处理与组合导航的研究.

†通讯作者. E-mail: zengqh@nuaa.edu.cn

ORB、FREAK算法替代SIFT算法,有效地提高了算法的运算速度。

本文提出一种新的大视角图像匹配算法——PORB(Perspective-ORB)算法,该算法借鉴ASIFT算法的思想,建立透视变换模型,使用ORB算法替换SIFT算法。由于PORB算法采用穷举采样的方法进行图像的模拟,计算效率不高。针对该情况,对PORB算法进行优化,实现了快速PORB算法。算法对目标图像进行透视变换模拟,获得少量正确匹配点对,继而求得目标图像与基准图像间的单应性矩阵,利用单应性矩阵再一次消除变形,完成匹配。实验表明,所提出算法不仅继承了ORB算法的优势,还具备抗视角变换能力,提高匹配正确率,提高算法运行速度,有利于工程推广应用。

1 ORB算法原理

ORB算法是基于FAST^[14]算法和BRIEF^[15]算法的改进算法,继承了这两种算法的优点,拥有高效的计算效率。BRIEF特征不具备抗旋转变换能力,为了使ORB特征具备旋转不变性,算法分别对FAST算法和BRIEF算法进行了改进。

1.1 特征点检测

ORB算法利用改进FAST算法进行特征点检测;FAST算法具有计算量小、可靠性高等优点,但无法获取特征描述所需的方向信息。因此,ORB算子采用灰度矩心法提供特征点主方向信息。

灰度矩心法假设特征点的灰度与邻域质心之间存在一个偏移,这个向量可用于表示一个方向。对于任意一个角点,定义特征点区域的灰度矩为

$$m_{pq} = \sum_{x,y} x^p y^q I(x,y), \quad (1)$$

其中 $I(x,y)$ 为点 (x,y) 处的灰度值。灰度矩心为

$$C = \left(\frac{m_{10}}{m_{00}}, \frac{m_{01}}{m_{00}} \right). \quad (2)$$

其中

$$m_{10} = \sum_{x,y} xI(x,y), \quad m_{01} = \sum_{x,y} yI(x,y),$$

$$m_{00} = \sum_{x,y} I(x,y).$$

特征点与邻域质心的夹角定义为ORB特征点的方向,有

$$\theta = \arctan(m_{01}, m_{10}). \quad (3)$$

为了提高该方法的旋转不变性,取特征点为圆心半径为 r 的圆形区域为特征点的邻域,上述点 (x,y) 均在圆形区域内。

1.2 特征点描述

ORB算法利用改进BRIEF算法进行特征点描述。BRIEF算法速度快,但对噪声敏感,不具备旋转不变性。为了加强算法的抗噪声能力,ORB算法根据高斯分布,在特征点周围 31×31 像素邻域内随机选取 5×5 的子窗口,对窗口进行RBF平滑处理获得其灰度积分,用窗口灰度积分的比较代替点对像素值的比较。为了使描述子具备旋转不变性,ORB算子将特征点的主方向应用于BRIEF。

BRIEF中点对灰度的比较值又称作binary test值,定义为

$$\tau(p; x, y) = \begin{cases} 1, & p(x) < p(y); \\ 0, & p(x) \geq p(y). \end{cases} \quad (4)$$

其中 $p(x)$ 为平滑后点 x 处的像素灰度值。在特征点邻域内取 n 个点对,BRIEF描述子可表示为

$$f_n(p) = \sum_{1 \leq i \leq n} 2^{i-1} \tau(p; x_i, y_i). \quad (5)$$

ORB算法将所有点对进行旋转,在算法实现时,定义所有点对为 $2 \times 2n$ 的矩阵,有

$$S = \begin{bmatrix} x_1 & \cdots & x_{2n} \\ y_1 & \cdots & y_{2n} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

其中每一列 $(x,y)^T$ 为点对中某一点在图像中的位置。定义特征点的主方向为 θ ,其旋转矩阵为 R_θ ,则旋转后的特征点对矩阵为

$$S_\theta = R_\theta S. \quad (7)$$

ORB算子的描述符为

$$g_n(p, \theta) = f_n(p) | (x_i, y_i) \in S_\theta. \quad (8)$$

不同特征点的BRIEF描述子具有较大的差异性,不容易误配。而经过旋转处理后的描述子各成分间的相关性较大,容易出现误匹配的现象。因此,ORB算子利用贪婪搜索,找到 n 个像素块对使其相关性最低,并构成描述符。

1.3 特征点匹配

因为ORB描述符为二进制形式,匹配时需要用汉明距离(Hamming distance)进行相似性度量,并利用最近/次近原则进行判断。汉明距离体现了两个二进制字符串的相关程度,当两个关键点之间的最短和次最短汉明距离比例小于0.5时,认为这两个特征点匹配成功。

2 PORB算法的提出

借鉴ASIFT思想,根据透视变换模型,提出一种PORB算法,采用穷举采样的方法进行图像模拟,对

基准图像和所有模拟图像进行特征检测与描述,进而完成匹配。

2.1 PORB 算法透视变换模型搭建

ASIFT 算法采用仿射变换模型进行视角模拟。虽然 ASIFT 能成功地应用在一些情况中,但是仿射变换往往不适合描述三维场景到二维图像的映射,而透视变换模型能够更准确地反映相机角度变化时成像间的关系^[10]。因此,本文采用透视变换模型代替仿射变换模型进行视角变换的模拟。

假设物体平面位于世界坐标系平面的中心,由相机成像原理可知,图 a 上某一点 p 在世界坐标系和图像坐标系中的位置存在如下关系:

$$\begin{bmatrix} u_p^a \\ v_p^a \\ 1 \end{bmatrix} = s^a K_{3 \times 3} [r_1^a \quad r_2^a \quad T_{3 \times 1}^a] \begin{bmatrix} x_p^w \\ y_p^w \\ 1 \end{bmatrix} = s^a H_{3 \times 3} \begin{bmatrix} x_p^w \\ y_p^w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中: s^a 为尺度因子; $K_{3 \times 3}$ 为相机内参,通过相机标定获得; r_1^a 和 r_2^a 为相机外参旋转矩阵 R^a 的前两列; $T_{3 \times 1}^a$ 为相机外参平移矩阵; $H_{3 \times 3}$ 为单应性矩阵,描述了从物体平面到图像平面的映射,同时表征了这两个平面的相对位置和摄像机投影矩阵。通过改变单应性矩阵中的相机外参便能搭建透视变换模型,模拟相机在不同角度下拍摄的图像。下面将在球坐标系下建立透视变换模型。

相机初始位置位于世界坐标系 Z_w 轴上,相机光轴 Z_w 垂直于 $X_w O Y_w$ 平面,物体中心位于世界坐标系原点。如图 1 所示,设相机光轴 Z_c 在 $X_w O Z_w$ 平面的投影与 Z_w 的夹角为 θ ,相机光轴 Z_c 与 $X_w O Z_w$ 平面的夹角为 φ ,相机绕光轴 Z_c 的旋转角度为 γ ,则相机坐标系相对于世界坐标系的平移矩阵可以用相机在世界坐标系下的坐标表示为

$$T_c^w = [r \cos \varphi \sin \theta \quad r \sin \varphi \quad r \cos \varphi \cos \theta]^T, \quad (10)$$

其中 r 为相机到世界坐标系原点的距离。

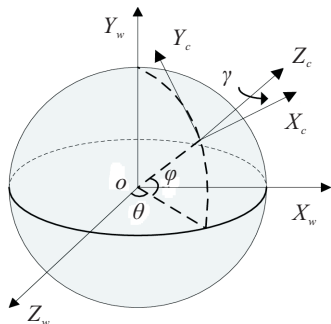


图 1 相机位置模拟示意图

由于相机光轴始终指向世界坐标系原点,相机坐标系相对于世界坐标系的旋转矩阵可以表示为

$$R_c^w = R_z(\gamma) R_Y(\theta) R_X(\varphi) = \begin{bmatrix} C_\gamma C_\theta & S_\gamma C_\varphi - C_\gamma S_\theta S_\varphi & -S_\gamma S_\varphi + C_\gamma S_\theta C_\varphi \\ -S_\gamma C_\theta & C_\gamma C_\varphi + S_\gamma S_\theta S_\varphi & -C_\gamma S_\varphi - S_\gamma S_\theta C_\varphi \\ S_\theta & C_\theta S_\varphi & -C_\theta C_\varphi \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中: $R_z(\gamma)$ 为绕 Z 轴逆时针旋转 γ 角, C_γ 和 S_γ 为 $\cos \gamma$ 和 $\sin \gamma$, 其他类似。将式 (10) 和 (11) 代入 (9), 即可得到透视变换模型。

2.2 PORB 算法实现步骤

由于 PORB 算法与 ASIFT 算法采用的变换模型不同,本文中透视变换模型参数的采样也有所区别。借鉴 ASIFT 算法,透视变换模型中角 φ 的余角所对应的斜率 t 通过降采样实现, t 的取值分别为 $\{1, \sqrt{2}, 2, 2\sqrt{2}, 4\}$, $\varphi = 90^\circ - \arccos(1/t)$ 。角 θ 和 γ 的取值一致,为 $\{0, b/t, \dots, kb/t\}$, 其中 b 取 72° , 且 $\theta \in [0, \pi)$, $\gamma \in [0, \pi)$ 。

PORB 算法主要实现步骤如下。

Step 1: 根据透视变换模型参数采样值,对目标图像进行透视变换,得到模拟图像集。

Step 2: 对所有模拟图像和基准图像进行 ORB 特征提取与描述。

Step 3: 根据 Step 2 中的结果,逐个对模拟图像和基准图像进行特征匹配。匹配时,根据最近次临近原则,采用最小汉明距离度量特征点间的相似性。

3 基于单应性矩阵的快速 PORB 算法

PORB 算法在图像模拟时采用穷举采样的方式,运算效率不高。为此,进一步提出快速 PORB 算法,即对模拟图像和基准图像进行粗匹配,利用部分正确匹配点对计算出两幅图像间的单应性矩阵,再根据该单应性矩阵进一步进行视角变换,消除变形,最后利用 ORB 算法完成精匹配。快速 PORB 算法的粗匹配过程使用参数采样方式模拟视角变换,削弱了待匹配图像间的视角变形,采样间隔的选取直接影响了粗匹配削弱视角变形的能力。精匹配过程采用粗匹配结果求解单应性矩阵,相比于参数采样获得的透视变换矩阵能更精确地描述基准图像和目标图像坐标间的对应关系,进一步削弱视角变形影响。同时,快速 PORB 算法能有效减少模拟视角变换的次数,加快算法运算效率。

一个单应性矩阵有 8 个自由元素,一般将右下角的元素置为 1 进行归一化^[16]。理论上,当有 8 个正

确匹配点对时,可使用RANSAC算法计算单应性矩阵.为使单应性矩阵更为准确,当某一幅模拟图 S_i 与基准图像的正确匹配点对达到 N 对($N \geq 8$)以上时,终止粗匹配.快速PORB算法将粗匹配中所有匹配点对都用于计算单应性矩阵,使匹配利用率高,获得的单应性矩阵更精确.若基准图像与模拟图像逐一匹配完成后,未能获得足够多的正确匹配点对,则算法失效.

快速PORB算法工作流程如图2所示,主要步骤如下.

Step 1: 根据透视变换模型参数采样值,对目标图像进行透视变换,得到模拟图像.

Step 2: 对模拟图像和基准图像进行ORB特征提取与描述,并进行粗匹配.匹配时,根据最近次临近原则,采用最小汉明距离度量特征点间的相似性.

Step 3: 当单幅正确匹配点对达到 N 对,停止粗匹配,否则,回到步骤Step1,根据采样值执行Step1和Step2.

Step 4: 若采样结束后,未能获得足够多的正确匹配点对,则算法失效,退出算法.根据所有已知匹配点对,利用RANSAC算法获取单应性矩阵,并对目标图像进行重采样.

Step 5: 对重采样图像和基准图像进行ORB特征提取与描述,完成精匹配,并在基准图像和目标图像中展现出结果.

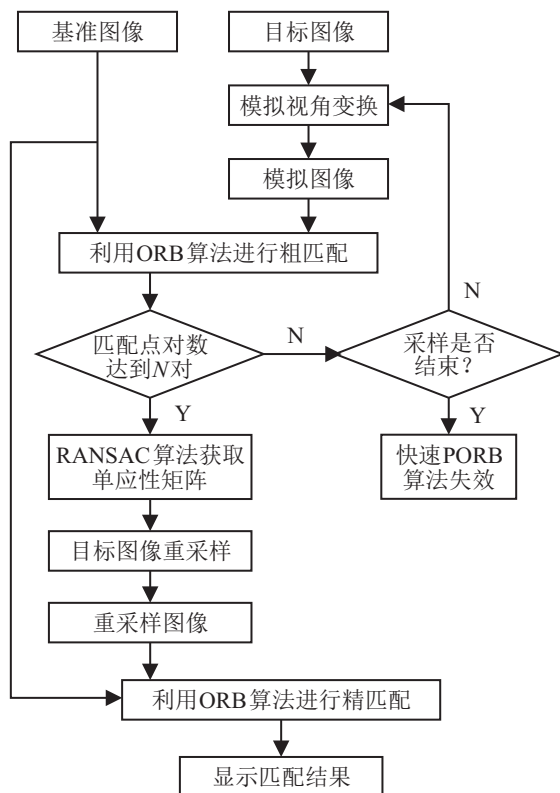


图2 快速PORB算法工作流程

4 实验分析

本文采用Mikolajczyk标准数据集和Morel Yu数据集中存在视角变化的图像作为测试数据,分别从匹配特征点对数目、匹配正确率和计算耗时3个方向进行性能对比实验.测试数据的详细说明如表1所示,其中经纬度的定义^[9]与ASIFT算法一致.根据表1, Graffiti组数据在真实户外环境下进行拍摄,图像灰度变化较为丰富,从7个不同的视点进行拍摄,仅存在纬度变化,没有提供具体的拍摄角度,保证视角变形逐步增大,最接近一般情况下的拍摄图像; Magazine-zoomx4、 painting-zoomx1 和 painting-zoomx10组数据拍摄单一物体,灰度变化有限,均在固定尺度变化下,仅改变纬度进行拍摄,提供具体的纬度角度值; Magazine-t2组数据同样拍摄单一物体,灰度变化有限,在固定的纬度变化下,仅改变经度进行拍摄,提供具体的经度角度值.测试数据全面覆盖视角变形情况,因此实验具有典型性.

表1 测试数据参数说明

数据集	数据	变换类型及参数	幅数
Mikolajczyk 数据集	Graffiti	视点变化 [0, 20, 30, 40, 50, 60]	6
	magazine-zoomx4	尺度+纬度变化 [0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80]	9
Morel Yu 数据集	magazine-t2	纬度固定角度+经度变化 [0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90]	10
	painting-zoomx1	尺度+纬度变化 [0, 45, 65, 75, 80]	5
	painting-zoomx10	尺度+纬度变化 [0, 45, 65, 75, 80]	5

本文实验测试的环境为: Intel Core i3, CPU 2.93 GHz, 内存 4.0 GB. 快速PORB算法在基于OpenCV2.4.9的VS2010中实现; ASIFT算法和PORB算法均在VS2010中实现; ASIFT算法采用OpenMP技术进行了并行加速; SIFT算法和ORB算法直接调用OpenCV2.4.9中的函数实现.

4.1 阈值 N 选取实验

本文研究的是快速大视角图像匹配算法,要求算法具有较好的匹配效果和匹配速度,因此阈值 N 的选取要同时考虑这两种因素.采用单位时间内的正确匹配点数作为阈值 N 选取的评价指标,分别选取 N 的值为10、20、30、40和50进行实验,实验结果显示的是每组测试数据的平均评价指标随着 N 的变化情况,如图3所示.

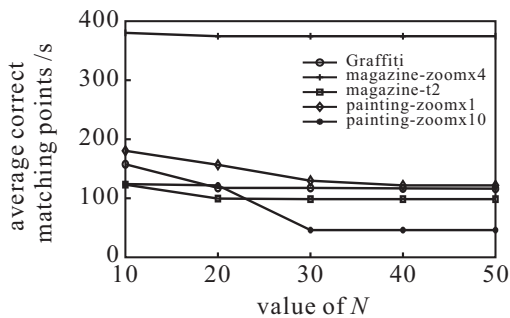


图3 阈值N选取实验结果

由图3可见,随着阈值N取值的变大,单位时间内的正确匹配点数逐渐变少并趋向于不变.可知阈值N较小时,随着N的增大,粗匹配阶段匹配次数变多,运算耗时变长,而正确匹配点数变化幅度小,因此随着阈值N的变大,每秒匹配正确点数指标逐渐变小.当阈值N达到一定值时,粗匹配阶段的匹配正确点数远大于阈值N,N值变化不再影响每秒正确匹配点数,因此图3指标逐渐趋于不变.参考图3,并考虑较高的匹配效率,以下实验阈值N均选用10.

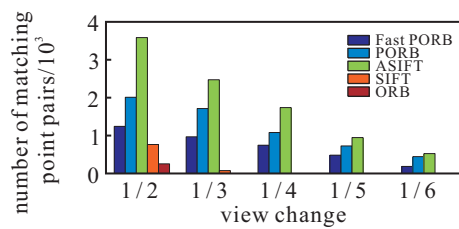
4.2 匹配点对数目对比实验

采用匹配特征点对数目作为图像匹配算法的评价指标之一,对SIFT、ORB、ASIFT、PORB和快速PORB算法进行对比实验,实验结果如图4所示.

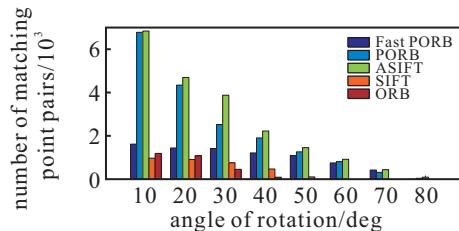
由图4可见:经纬度角度变化较小时,5种算法均可取得较多的匹配点对数;当经纬度角度变化较大时,ASIFT算法、PORB算法和快速PORB算法具有较好的匹配效果,SIFT算法和ORB算法失效.

由图4(a)、图4(b)、图4(d)、图4(e)可见,当图像只存在纬度变化时,ASIFT算法获取的特征匹配点对最多,PORB算法次之,快速PORB算法较少.虽然快速PORB算法获取的特征点对在3种算法中最少,但其数目足够多,满足图像匹配应用,因此快速PORB算法具有较好的抗视角变换能力.

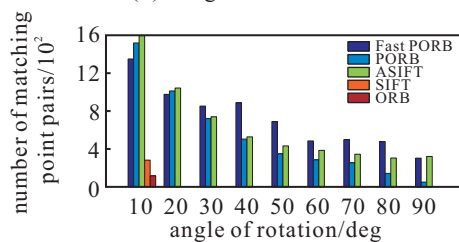
如图4(c)所示,当图像存在固定纬度变化,改变经度时,快速PORB算法获得的匹配点对数目与ASIFT算法和PORB算法相似,甚至在经度角度很大的情况下,快速PORB算法可以获取更多的匹配点对数目.该组数据同时存在经纬度变化,对模拟图像的要求更高. ASIFT算法和PORB算法通过采样的方式得到模拟图像,该模拟图像较实际拍摄图像存在一定误差.而快速PORB算法利用RANSAC算法直接获取基准图像与目标图像间的单应性矩阵,剔除错误匹配数据,获取的重采样图像更接近真实拍摄图像.因此,当同时存在经纬度变化时,快速PORB算法能够获得更多的匹配点对.



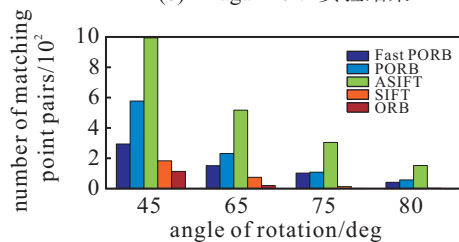
(a) Graffiti实验结果



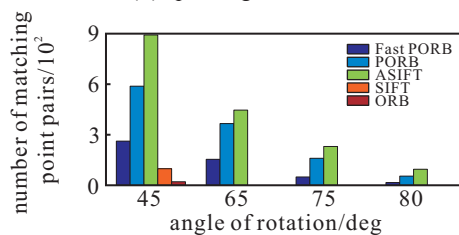
(b) magazine-zoomx4实验结果



(c) magazine-t2实验结果



(d) painting-zoomx1实验结果



(e) painting-zoomx10实验结果

图4 匹配点对数目对比实验结果

4.3 匹配正确率对比实验

SIFT算法和ORB算法在视角变换较大的情况下失效,而本节实验主要针对大视角图像的匹配结果进行对比分析,因此只对快速PORB算法、PORB算法和ASIFT算法进行视角变换匹配正确率对比实验.

匹配正确率定义为匹配正确点对数目与总匹配点对数目的比,本文统一采用RANSAC算法获取正确匹配点对.实验中,RANSAC算法直接从OpenCV2.4.9中调用,设置阈值为2,置信度为0.99.实验结果如图5所示,其中主坐标轴对应柱状图,次坐

标轴对应折线图。

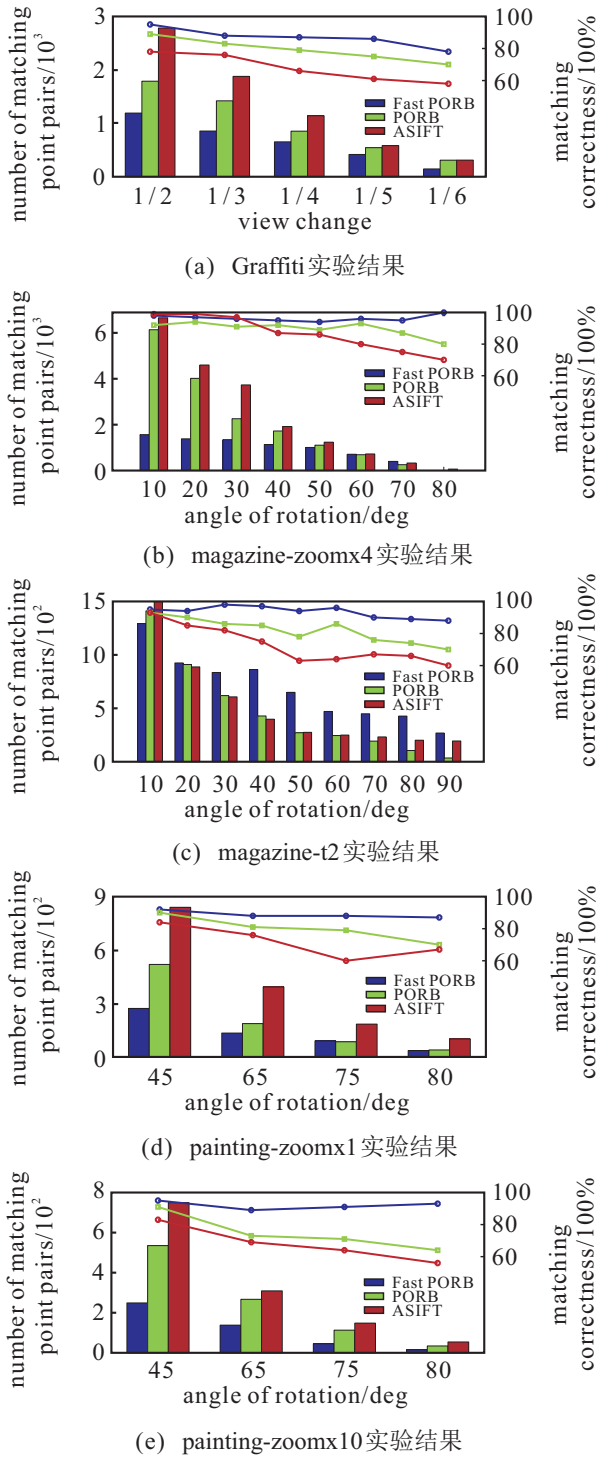


图5 匹配正确率对比实验结果

由图5可见,快速PORB算法的匹配正确率最高, PORB次之, ASIFT最低. 当经纬度角度变化较大时, 快速PORB算法的匹配正确率均在80%以上, PORB算法在60%以上, ASIFT算法在50%以上.

同时, 由图5还可以看出, 在经纬度角度变化不超过80°时, 快速PORB算法获取的正确匹配点对数目足够多, 且当经纬度角度逐步变化时, 相对ASIFT算法和PORB算法, 快速PORB算法获取的正确匹配点对数目变化较为平稳. 该结果再一次验证了快速

PORB算法具有较好的抗视角变换能力.

图6给出了每组实验数据中经纬度角度变化最大的匹配示例, 其中白色连线表示匹配正确, 正确匹配点对数分别为145、30、268、41和22. 实验结果再一次表明, 在视角变换较大的情况下, 快速PORB算法能够有效地获取正确匹配点对, 具备抗视角变换能力.

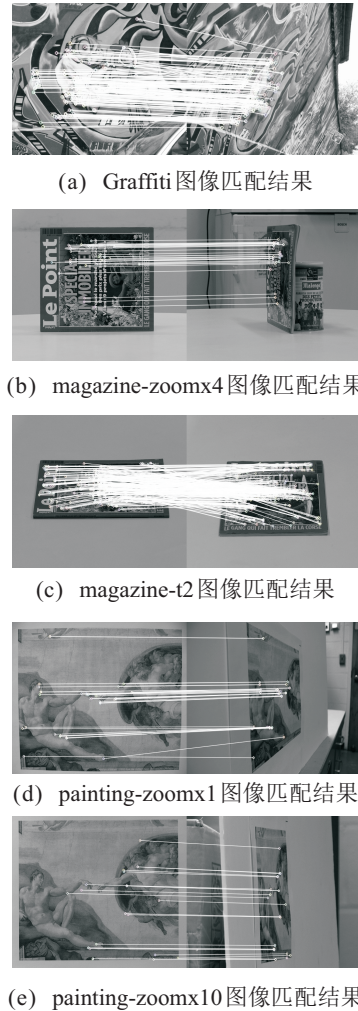


图6 经纬度角度变化最大时快速PORB算法匹配结果

4.4 计算速度对比实验分析

本组实验基于计算速度对快速PORB算法、PORB算法和ASIFT算法进行对比实验. 为满足客观性, 实验结果是每组数据的平均计算耗时, 如图7所示.

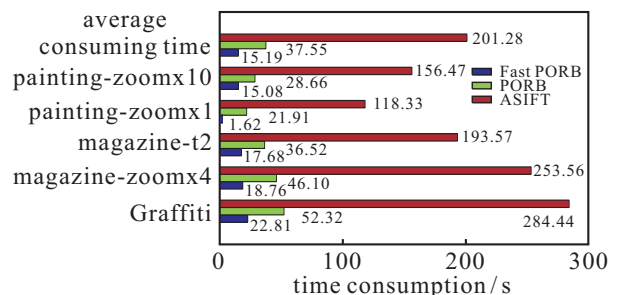


图7 计算耗时实验结果对比

图7中平均计算耗时表示的是5组测试数据的平均计算耗时.由图7可见,快速PORB算法的平均计算耗时小于ASIFT算法的十分之一,小于PORB算法的二分之一.快速PORB算法的计算速度是ASIFT算法的10倍以上,是PORB算法的2倍以上.这主要是因为快速PORB算法通过粗匹配和精匹配两个过程,减少了模拟视角变换的次数,相对ASIFT算法和PORB算法模拟变换次数少,且ORB算法较SIFT算法计算效率更高.理论上讲,ASIFT算法的模拟变换次数(2000量级)大于PORB算法(400量级),PORB算法的模拟变换次数大于等于快速PORB算法(小于100量级).由于ASIFT算法采用OpenMP加速,快速PORB算法采用RANSAC算法求解单应性矩阵耗时等因素,上述变换次数有参考性,但与真实计算耗时不是完全的正比关系.通过以上实验分析可知,相对于ASIFT算法和PORB算法,快速PORB算法的实时性更好,计算效率高.

5 结论

针对ASIFT算法计算速度低的问题,本文提出了一种快速PORB算法.该算法在采样得到模拟图像进行粗匹配的基础上,利用RANSAC方法剔除粗匹配阶段的错误匹配点,得到单应性矩阵,进一步消除视角变形,实现精匹配.通过与ASIFT算法和PORB算法进行对比,验证了快速PORB算法的优越性,当存在经纬度变化时快速PORB算法的优势更明显,在保证抗视角变换能力和匹配效果的同时,有效提升了算法效率.快速大视角图像匹配算法的研究,对于载体的导航定位与目标跟踪具有应用参考价值.

参考文献(References)

- [1] Warrant E, Dacke M. Visual navigation in nocturnal insects[J]. *Physiology*, 2016, 31(3): 182-192.
- [2] Jia K, Chan T H, Zeng Z, et al. ROML: A robust feature correspondence approach for matching objects in a set of images[J]. *Int J of Computer Vision*, 2016, 117(2): 173-197.
- [3] 陈振学, 贺超, 刘成云. 基于局部特征与全局特征的图像显著性目标检测[J]. *控制与决策*, 2016, 31(10): 1899-1902.
(Chen Z X, He C, Liu C Y. Image saliency target detection based on global features and local features[J]. *Control and Decision*, 2016, 31(10): 1899-1902.)
- [4] Lu Y, Song D. Visual navigation using heterogeneous landmarks and unsupervised geometric constraints[J]. *IEEE Trans on Robotics*, 2015, 31(3): 1-14.
- [5] 许允喜, 陈方. 基于CenSurE特征的SAR/INS组合导航景象匹配算法[J]. *控制与决策*, 2011, 26(8): 1175-1180.
(Xu Y X, Chen F. Scene matching algorithm based on CenSurE for SAR/INS integrated navigation system[J]. *Control and Decision*, 2011, 26(8): 1175-1180.)
- [6] Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. *Int J of computer vision*, 2004, 60(2): 91-110.
- [7] Bay H, Ess A, Tuytelaars T, et al. Speeded-up robust features (SURF)[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2008, 110(3): 346-359.
- [8] Rublee E, Rabaud V, Konolige K, et al. ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF[C]. *Int Conf on Computer Vision*. Barcelona: IEEE, 2011: 2564-2571.
- [9] Morel J M, Yu G. ASIFT: A new framework for fully affine invariant image comparison[J]. *Siam J on Imaging Sciences*, 2009, 2(2): 438-469.
- [10] Cai G R, Jodoin P M, Li S Z, et al. Perspective-SIFT: An efficient tool for low-altitude remote sensing image registration[J]. *Signal Processing*, 2013, 93(11): 3088-3110.
- [11] 苏可心, 韩广良, 孙海江. 基于SURF的抗视角变换图像匹配算法[J]. *液晶与显示*, 2013, 28(4): 626-632.
(Su K X, Han G L, Sun H J. Anti-viewpoint changing image matching algorithm based on SURF[J]. *Chinese J of Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(4): 626-632.)
- [12] 侯毅, 周石琳, 雷琳, 等. 基于ORB的快速完全仿射不变图像匹配[J]. *计算机工程与科学*, 2014, 36(2): 303-310.
(Hou Y, Zhou S L, Lei L, et al. Fast fully affine invariant image matching based on ORB[J]. *Computer Engineering and Science*, 2014, 36(2): 303-310.)
- [13] 付偲, 邓丽, 卢根, 等. 基于快速视网膜关键点算法改进的图像匹配方法[J]. *计算机工程与应用*, 2016, 52(19): 208-212.
(Fu C, Deng L, Lu G, et al. Improved image matching based on fast retina keypoint algorithm[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2016, 52(19): 208-212.)
- [14] Rosten E, Drummond T. Machine learning for high-speed corner detection[C]. *Computer Vision-ECCV 2006*. Berlin: Springer Heidelberg, 2006: 430-443.
- [15] Calonder M, Lepetit V, Strecha C, et al. BRIEF: Binary robust independent elementary features[C]. *Computer Vision-ECCV 2010 European Conf on Computer Vision*. Heraklion, 2010: 778-792.
- [16] 王淑霞, 周波. 一种基于RANSAC算法的单应矩阵估计方法[J]. *科学中国人*, 2015, 23: 18.
(Wang S X, Zhou B. A homography matrix estimation method based on RANSAC[J]. *Scientific Chinese*, 2015, 23: 18.)

(责任编辑: 郑晓蕾)