

中图法分类号: TP391 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2011)01-0084-06

论文索引信息: 何周灿, 王庆, 杨恒. 图像特征匹配中一种高效的鲁棒估计算法[J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(1): 84-89

图像特征匹配中一种高效的鲁棒估计算法

何周灿, 王庆, 杨恒

(西北工业大学计算机学院, 西安 710072)

摘要: 在图像特征匹配过程中, 误匹配不可避免。提出一种新的基于拓扑约束(顺序约束和仿射不变约束)的外点去除算法, 用于快速去除图像粗匹配结果中的误配点。该算法对随机采样集进行拓扑过滤, 只对满足拓扑约束的采样集进行计算。实验表明, 该算法相比于传统的鲁棒估计算法 RANSAC 和改进的 PROSAC 算法, 大大提高了计算效率并保持很高的计算精度, 有助于提升图像匹配性能及 3 维重建的精度和鲁棒性。

关键词: 图像匹配; 外点; 顺序约束; 仿射不变约束; 拓扑约束

An effective robust estimation algorithm for image correspondence

He Zhoucan, Wang Qing, Yang Heng

(School of Computer Science and Engineering Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072 China)

Abstract: Outliers are inevitable in image matching process. To address this issue, a novel topology constraint based outlier rejection algorithm is proposed to efficiently remove the mismatches between images after coarse matching. By using the topology constraint to filter the sample sets, the proposed algorithm calculates the transformation between images based on the sample set which fully satisfies the topology constraints. Experimental results demonstrate that the proposed algorithm can significantly reduce the computational complexity, while keeping the accuracy compared to the traditional RANSAC and improved PROSAC algorithms. Therefore, the proposed method can effectively and efficiently improve the performance of image matching, and furthermore benefits the application of 3D scene reconstruction in both accuracy and robustness.

Keywords: image matching; outliers; order constraint; affine invariant constraint; topology constraint

0 引言

基于局部特征的图像匹配是 3 维重建^[1-2]、图像检索^[3]、全场景拼接^[4]等应用的基础。在图像特征点匹配过程中, 外点现象不可避免^[5]。因此, 对于如场景拼接、3 维重建等需要进行高精度图像特征匹配的场合, 在完成图像特征粗匹配之后, 有必要去除粗匹配结果中的外点, 以获取精确的图像拼接

或 3 维重建结果。使用 SIFT^[6] 算法提取局部不变特征, 然后对图像特征集进行匹配。已有的高维搜索算法如 BBF^[7]、iDistance^[8]、iSVD^[9]、DBH^[10] 等能很好克服“维度灾难”, 较快的进行高维特征匹配。相比之下, DBH 能较好适应 SIFT 特征分布, 具有较高的 KNN 搜索精度, 因此采用 DBH 算法获取图像特征粗配结果。

RANSAC^[11] 是一种广泛使用的鲁棒估计算法, 它随机选择一定数目的匹配点(采样集)来估算几

收稿日期: 2009-07-28; 修回日期: 2009-09-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(60873085); 国家高技术研究发展计划(863)项目(2007AA01Z314); 西北工业大学研究生创业种子基金项目(Z200963)。

第一作者简介: 何周灿(1984—), 男。西北工业大学计算机应用技术专业硕士研究生, 主要研究方向为基于图像的建模与渲染。E-mail: hezhoucan@163.com。

何模型,并计算该几何模型的支持集,迭代该过程直到能以很高的概率确保所有采样集中至少有一个是完全正确的,最后选择拥有最大支持集的几何模型作为最优结果。MLESC^[12]改进了 RANSAC 模型,选择具有最大指数似然估计值的模型而不是最多内点数的模型作为最终解,可以获得稍微精确的结果,但时间代价过高。一种改进的思路^[13]是利用预先估算的单个匹配点是正确匹配的概率来指导 MLESC 的采样过程,以提高计算效率。PROSAC^[14]是对 RANSAC 的另一种改进,它首先生成一个具有较高匹配概率的子集,从子集中而不是从整个匹配集中进行采样计算,PROSAC 保持了计算精度并能有效提高计算效率。

从已有算法^[5,13]可以看出,一个有效的指导性采样策略可以显著地改善鲁棒估计算法的计算效率。充分挖掘匹配点之间潜在的几何信息,提出一种有效的拓扑约束模型,对随机采样序列进行过滤,只对满足约束的采样集进行计算,大大减少了迭代次数,快速有效地去除图像粗匹配中的外点,提高了计算效率。

1 算法描述

一般说来,外点的去除必须依据相应的几何模型^[14],如极线几何、平面单应几何等。极线几何的求解一般需要 7 对或者 8 对匹配点,计算相对复杂,而平面单应几何只需要 4 对点,因此用平面单应几何作为鲁棒估计算法的基础模型,去除特征粗匹配中的误配点。

1.1 拓扑约束的构建

事实上,匹配点之间除了极线约束、单应约束之外,还存在别的几何约束,如匹配点对之间在两幅图像上拓扑顺序需保持一致,它们之间构成的多边形面积之比需满足仿射不变约束等^[14]。本文利用匹配点间存在的几何信息,提出顺序约束和仿射不变约束模型,进行平面单应矩阵的鲁棒估计。

顺序约束:对于一个采样集 $S, X = \{a, b, c, d\}$ 表示第一幅视图上点, $Y = \{A, B, C, D\}$ 表示第二幅视图上与 X 对应的匹配点。如果 S 所包含的 4 对匹配点都是正确的,那么这 4 对点在两幅视图上一定有相同的拓扑顺序,如图 1(a)所示。以点 $A(a)$ 为参考点,点的拓扑顺序可表示为 $A(a) \rightarrow B(b) \rightarrow C(c) \rightarrow D(d)$ 。反之,如果匹配点的拓扑顺序不一

致,该采样集一定存在误配点,将被丢弃而不进行后续计算,如图 1(b)。

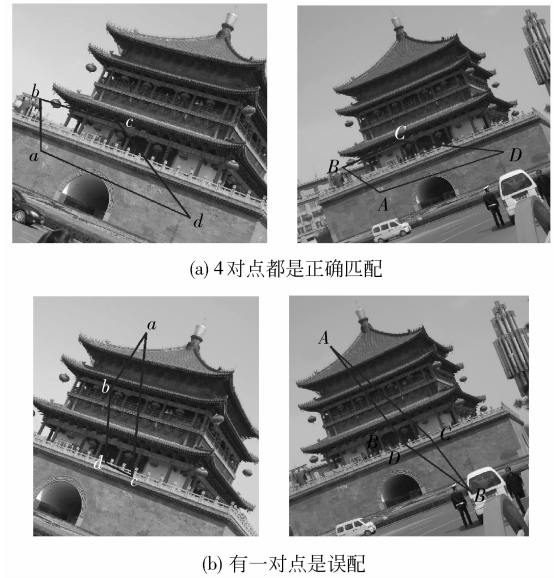


图 1 正配和误配情形下,点对之间的拓扑顺序
Fig. 1 The points order relationship under correct and wrong matching occasions

顺序约束可以通过以下方式准确描述。一般的,假设采样集中任意 3 点在图像上不共线。首先,用第一幅视图上的两个点 $r, s \in X$ 构造一条射线 rs ,使另外两个点 $p, q \in X$ 满足

$$\text{sgn}((r \times s) \cdot p) + \text{sgn}((r \times s) \cdot q) = 0$$

即 p, q 分别位于射线的两边。

为 X 和 Y 分别构造顺序约束函数,

$$g(X) = \text{sgn}((r \times s) \cdot t) + \text{sgn}((r \times s) \cdot p) \times 2 \quad (1)$$

$$f(Y) = \text{sgn}((r' \times s') \cdot t') + \text{sgn}((r' \times s') \cdot p') \times 2 \quad (2)$$

其中, $r', s', t', p' \in Y$ 是 $r, s, p, q \in X$ 对应的匹配点。

那么对于采样集 S , 它的顺序约束函数为

$$H(S) = g(X) - f(Y) \quad (3)$$

显然,如果 $H(S) = 0$, 则采样集 S 满足顺序约束,该采样集将被进一步处理,否则被丢弃。

仿射不变约束:理论上顺序约束是一个较弱的约束,仍然存在这样的可能,一个采样集中存在误配点,但它同样满足顺序约束,如图 2 所示。一般情况下,图像之间的变换限于平移、旋转、缩放和仿射变换,而仿射不变量将会在仿变和相似变换下保持不变。在仿射变换下,多边形面积比具有仿射不变性^[14]。因此在顺序约束的基础上,提出一个约束力

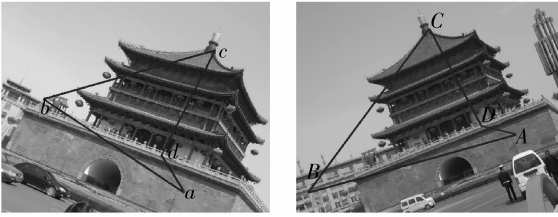


图 2 顺序约束下仍存在误配点的采样集($b-B$ 是误配)
Fig.2 The sample with wrong matches under order constraint

更强的仿射不变约束。显然,对于采样集 S 中的 4 对匹配点,将构成 4 个对应的三角形,这些对应三角形的面积和它们的总面积之比,将形成维数为 4 的向量,

$$\mathbf{P} = [S_1/S_{\text{sum}}, S_2/S_{\text{sum}}, S_3/S_{\text{sum}}, S_4/S_{\text{sum}}]^T \quad (4)$$

$$\mathbf{Q} = [S'_1/S'_{\text{sum}}, S'_2/S'_{\text{sum}}, S'_3/S'_{\text{sum}}, S'_4/S'_{\text{sum}}]^T \quad (5)$$

其中 $S_i, i=0,1,2,3$ 和 $S_{\text{sum}} = \sum_{i=1}^4 S_i$ 表示第一幅视图上的各三角形面积及其总面积, $S'_i, i=0,1,2,3$ 及 S'_{sum} 表示在第 2 幅视图上对应的三角形面积和总面积。显然,如果采样集 S 中没有误配点,那么向量 \mathbf{P} 与 \mathbf{Q} 将十分近似。我们用欧氏距离来度量仿射不变量的相似程度,在比较之前, \mathbf{P} 与 \mathbf{Q} 将首先被归一化。 \mathbf{P} 与 \mathbf{Q} 间的欧氏距离需满足

$$\text{dist}(\mathbf{P}, \mathbf{Q}) \leq \varepsilon \quad (6)$$

为了获得尽可能精确的结果,阈值 ε 被设置为一个很小的值 0.05。

1.2 拓扑约束的有效性分析

拓扑约束是否有效,取决于在满足拓扑约束的条件下,一个采样集中的所有匹配点是正配的概率 $p(r_4 | \text{top})$,拓扑约束的重要定义请参考表 1。

表 1 关于拓扑约束的重要定义
Tab.1 The important definitions

N :	两幅视图的粗匹配数目。
S :	从 N 对匹配中随机选取 4 对匹配点构成的采样集。
n_{in} :	根据某个采样集计算出的内点数目。
p_{in} :	一对匹配点是正配的概率,显然 $p_{\text{in}} = n_{\text{in}}/N$ 。
p_{out} :	一对匹配点是误配的概率,显然 $p_{\text{out}} = 1 - p_{\text{in}}$ 。
$p(r_i)$:	一个采样集中包含 $i(i=0, \dots, 4)$ 对正配的概率。
$p(r_{\text{pos}} \text{out})$:	在已知匹配点是误配的条件下,误配点处于指定区域的条件概率。
$p(\text{top})$:	一个采样集满足拓扑约束的概率。
$p(\text{top} r_i)$:	在已知包含 $i(i=0, \dots, 4)$ 对正配的条件下,一个采样集满足拓扑约束的条件概率。
$p(r_4 \text{top})$:	在已知满足拓扑约束的条件下,采样集不包含任何误配点的条件概率。

根据 Bayes 定律

$$p(r_4 | \text{top}) = \frac{p(\text{top} | r_4) * p(r_4)}{p(\text{top})} = \frac{p(\text{top} | r_4) * p(r_4)}{\sum_{i=0}^4 p(\text{top} | r_i) * p(r_i)} \quad (7)$$

由于 $p(r_i) = C_4^i * (p_{\text{in}})^i * (p_{\text{out}})^{4-i}, i=0, \dots, 4$, 问题的关键是计算条件概率 $p(\text{top} | r_i), i=0, \dots, 4$ 。结合图 3(a) 表示第 1 幅视图上的点,图(b)~(f) 表示在第 2 幅视图上,分别有 0~4 个错配点的情形,用下划线标注,我们考虑如下 5 种不同的情形。

1) 当 $i=4$ (见图 3(b)), 4 对匹配点都是内点,显然, $p(\text{top} | r_4) = 1$ 。

2) 当 $i=3$ (见图 3(c)), 在拓扑约束下,唯一的误配点的位置已经被其他 3 个点固定在某个确定的区域,因此, $p(\text{top} | r_3) = p(r_{\text{pos}} | \text{out})$ 。

3) 当 $i=2$ (见图 3(d)), 假设前两个点是正配点。显然,在顺序约束下,第 3 个点 C 至少位于射线 AB 的右边,正如 c 位于 ab 的右边一样,但点 C 的确切位置无法确定,因此,这里保守估计点 C 满足顺序约束的概率为 0.5。当 C 被固定后,在拓扑约束下,点 D 的位置就被确定在一个固定的区域,从而, $p(\text{top} | r_2) = 0.5p(r_{\text{pos}} | \text{out})$ 。

4) 当 $i=1$ (见图 3(e)), 一般的,假设第一对匹配点是正配点。由于其他点的位置不确定,第 2 个匹配点 B 位置不受顺序约束和拓扑约束制约,可以位于第 2 幅图像的除正配点位置以外的任何位置。但当 B 被确定以后,处理方式和 $i=2$ 时类似,于是, $p(\text{top} | r_1) = 0.5 * p(r_{\text{pos}} | \text{out})$ 。

5) 当 $i=0$ (见图 3(f)), 前两对匹配点由于不受拓扑约束的制约,可以位于第 2 幅图像上除正配点位置以外的任何位置,但第 3、第 4 个匹配点分别

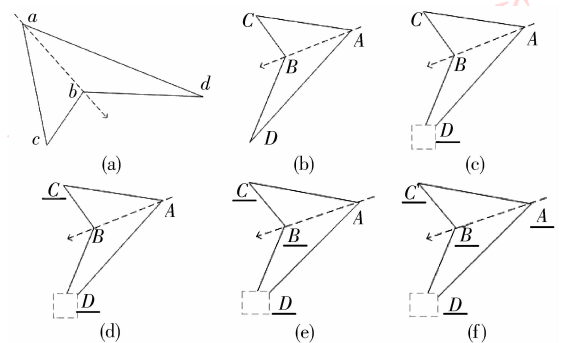


图 3 满足拓扑约束的 5 种不同情形

Fig. 3 Five different occasions under topological constraint

受顺序和拓扑约束的制约,处理方式和 $i = 2$ 时类似,于是, $p(top|r_0) = 0.5 * p(r_pos|out)$ 。

事实上,一个误配点可以随机分布在除正配点位置以外的任何区域,即误配点的位置分布满足均匀分布。显然,对于一幅大小为 $x \times y$ 的图像,误配点被确定在一个大小为 $u \times v$ 的区域的概率为 $p(r_pos|out) = (u \times v)/(x \times y)$ 。为了获取精确结果, $p(r_pos|out)$ 被设为 0.05。至此,在拓扑约束下,一个采样集不含误配的概率 $p(r_4|top)$ 可以顺利求解。假如两幅视图粗配结果包含一半外点,在拓扑约束下,一个采样集不含误配的概率 $p(r_4|top)$ 为 0.52, 远远高于 RANSAC 算法中一个随机采样集不含误配的概率值 0.0625。

1.3 拓扑约束鲁棒估计迭代终止条件及算法流程

这里我们分析拓扑约束鲁棒估计迭代算法的终止条件,并给出完整的算法描述。

至少有一个采样集不含误配点的概率 μ : 对于采样集 S , 在拓扑约束下仍然含有错配的概率为 $\gamma = 1 - p(r_4|top)$, 经过 t 次迭代计算之后, 仍然没有得到正确采样集的概率为 $\eta = \gamma^t$ 。显然, t 次迭代计算之后, 如果满足 $\eta < \varepsilon$, 迭代过程即可结束。这里为了尽可能获得精确的结果, ε 被设置为一个精确的值 10^{-6} 。

最小匹配数目 n_{min} : 存在这样的可能, 某些匹配点在误差范围内可能成为某个错误的估计模型的内点^[5]。假设一对匹配点支持某个错误模型的概率为 θ , 那么 i 个点支持某错误模型的概率服从二项分布

$$P_N^R(i) = C_{N-4}^{i-4} \theta^{i-4} (1 - \theta)^{N-i+4} \quad i > 4 \quad (8)$$

对于含有 N 对匹配的两幅视图, 它的最小匹配数目需满足 $n_{min} = \min \{m; \sum_{i=m}^N P_N^R(i) < \psi\}$, 一般的 $\psi = 0.01$, θ 被设为 0.05。无论采用何种鲁棒估计算法, 计算得到的内点数目至少为 n_{min} 。

拓扑约束鲁棒估计算法如下:

$$\varepsilon: = 10^{-6}, t: = 0, \gamma: = 1, \eta: = 1$$

While $\eta > \varepsilon$

 随机选择 4 对匹配点。

 if 所选的 4 对匹配点不满足拓扑约束

 continue;

 end if

$t = t + 1$

 计算内点数目 n_m , 并根据式(7)计算 $p(r_4|top)$
 以及在拓扑约束下的错配概率 $\gamma' = 1 - p(r_4|top)$

 if $\gamma' < \gamma$

$\gamma = \gamma'$

 end if

$\eta = \gamma^t$

End while

1.4 拓扑约束的局限性

由于拓扑约束算法是基于平面单应约束而建立起来, 因此, 对于单应几何失效的情况(如深度不连续且视角变换很大), 拓扑约束条件将变得很苛刻, 会把一些正确采样集误判为错误采样集。另外, 拓扑约束由于采用仿射不变量作为约束条件, 因此, 它无法处理射影变换的情形。

2 实验结果

为了证明拓扑约束算法的有效性, 我们实现了 RANSAC 和 PROSAC 算法, 并将提出的拓扑约束算法和这两种经典算法的性能进行对比分析, 最后我们将提出的算法应用于 3 维重建系统, 以进一步验证算法的可用性。实验的硬件环境为: Intel (R) Celeron (R) 2.66 GHz, 512 MB 内存, 实验平台为 VC6.0 Debug。由于所有算法均涉及随机采样, 因此每一组实验都运行 100 次, 我们记录平均实验结果。

大尺度视点变换和仿射变换的图像数据: 本组实验数据存在大尺度的视点变换, 同时存在重复结构和遮挡等干扰, 粗匹配结果中的内点比率非常小, 实验数据和结果见图 4 和表 2。我们统计 3 种算法计算的平均迭代次数、时间开销和最终得到的内点数目。实验结果表明, 拓扑约束算法在保持计算精度的同时, 大大节省了时间开销, 计算效率提高近 10 倍。

具有旋转缩放及光照变换的图像数据: 在这一组实验中, 我们选择标准的实验数据, 如旋转、缩放、光照变化等, 以进一步验证拓扑约束算法效果, 实验数据和结果见图 5 和表 3。这一组图像内点比例较大, RANSAC 和 PROSAC 算法通过少量次数的迭代便能获得最优估计, 但拓扑约束仍然能获得两倍以上的时间增益, 同时获得与 RANSAC 和 PROSAC 相当的内点数。

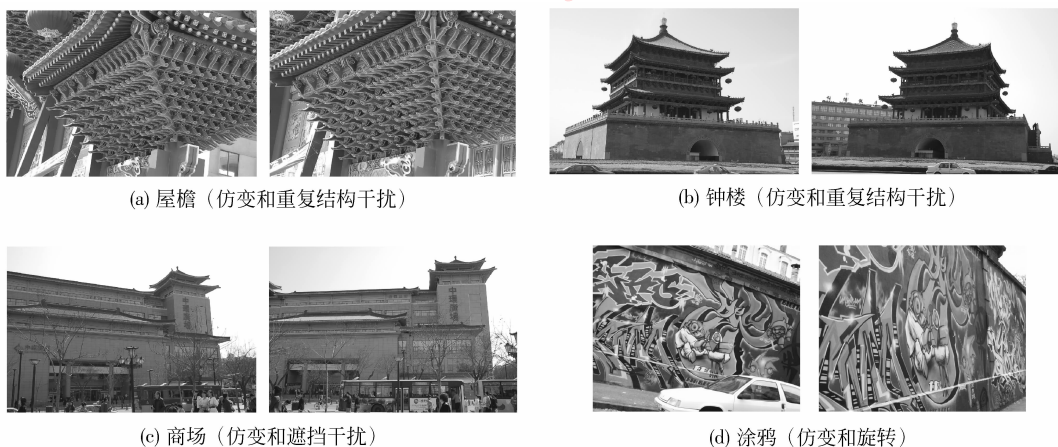


图 4 部分具有挑战性的实验数据

Fig. 4 Some challenging data



图 5 具有缩放、旋转、光照变换的图像数据

Fig. 5 Some data with rotation, scale and light changes

表 2 关于大尺度仿变数据,3 种算法的时间开销、迭代次数和内点数比较

Tab. 2 The comparisons of time cost, iteration times and num of inliers

	屋檐			钟楼			商场			涂鸦		
	time/ms	#iter	n_{in}	time/ms	#iter	n_{in}	time/ms	#iter	n_{in}	time/ms	#iter	n_{in}
RANSAC	422	432	284	235	932	44	1 510	5 556	34	334	1 625	25
PROSAC	406	395	285	212	846	45	1 138	4 167	35	296	1 464	26
本文算法	59	42	280	22	39	44	107	90	33	36	17	25

表 3 关于图 5 数据,3 种算法的时间开销、迭代次数和内点数比较

Tab. 3 The comparisons of time cost, iteration times and num of inliers about the data in Fig. 5

	Bell tower (旋转)			Bell tower (尺度)			Car (光照)			Boat (尺度和旋转)		
	time/ms	#iter	n_{in}	time/ms	#iter	n_{in}	time/ms	#iter	n_{in}	time/ms	#iter	n_{in}
RANSAC	64	168	129	17	41	118	7	36	46	10	42	60
PROSAC	47	117	135	14	39	118	7	36	46	9	42	60
本文算法	12	16	128	6	6	118	2	5	46	4	6	60

西安钟鼓楼的重建结果:为进一步验证算法的可用性,我们用数码相机采集了西安标志性建筑钟鼓楼和鼓楼的部分数据,并采用 SIFT^[6] 算法提取特征,然后用 DBH^[10] 算进行特征粗匹配,接着用提出的拓扑约束估计算法去除误配点,最后采用文献[15]的方法进行 3 维重建,结果见图 6。

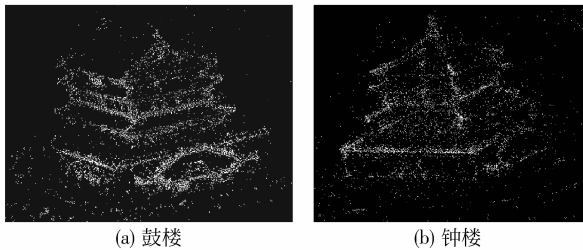


图 6 西安鼓楼和钟楼的 3 维重建结果

Fig.6 The 3D results of Drum tower and bell tower

3 结 论

提出一种新的基于拓扑约束的鲁棒估计算法,可以高效地去除图像特征匹配的外点。实验结果表明,拓扑约束能有效过滤采样集中的错误匹配,有效提高计算效率。在后续工作中,我们将把该算法应用到基于海量宽基线图像的 3 维场景重建及图像检索等大规模应用中。

参考文献 (References)

- [1] Snavely N, Seitz S M, Szeliski R. Photo tourism: exploring photo collections in 3D [J]. ACM Trans. Graph, 2006, 25(3): 835-846.
- [2] Yao J, Cham W K. Robust multi-view feature matching from multiple unordered views [J]. Pattern Recognition, 2007, 40: 3081-3099.
- [3] Wang Gang, Forsyth David. Object image retrieval by exploiting online knowledge resources [C] // CVPR, Alaska, USA: IEEE Computer Society Press, 2008:1-8.
- [4] James H, Alexei A Efron. Scene completion using millions of photographs [J]. ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH), 2007, 26(3): 87-94.
- [5] Chum O, Matas J. Matching with PROSAC-Progressive Sample Consensus [C] // CVPR, San Diego, USA: IEEE Computer Society Press, 2005: 220 - 226 .
- [6] Lowe D. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60 (2) : 91-110.
- [7] Jeffrey S Beis, David G Lowe. Shape indexing using approximate nearest-neighbor search in high-dimensional spaces [C] // CVPR, San Juan, Puerto Rico: IEEE Computer Society Press, 1997: 1000-1006.
- [8] Jagadish H V, Beng Chin Ooi, Tan Kian-Lee, et al. iDistance: an adaptive B + 2tree based indexing method for nearest neighbor search [J]. ACM Transactions on Data Base Systems, 2005: 364-397.
- [9] Yang Heng, Wang Qing, He Zhoucan. Indexing sub-vector distance for high-dimensional feature matching [C] // BMVC, London, UK: BMVA Press, 2008: 1201-1210.
- [10] He Zhoucan, Wang Qing. A fast and effective dichotomy based hash algorithm for image matching [C] // Lecture Notes in Computer Science, Las Vegas, Nevada, USA: Springer Press, 2008: 328-337.
- [11] Fischler M, Bolles R. Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography [C] // ACM, New York, USA: ACM Press, 1981, (24)6:381-395.
- [12] Hartley R, Zisserman A. Multiple View Geometry in Computer Vision [M]. Cambridge University, Cambridge, 2nd edition, 2003.
- [13] Torr P H S, Zisserman A. MLESAC: A new robust estimator with application to estimating image geometry [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2000, 78(1): 138-156.
- [14] Tordoff B, Murray D. Guided sampling and consensus for motion estimation. In ECCV, Copenhagen, Denmark: Springer Press, 2002: 82-96.
- [15] Pollefeys M, Gool L Van, Vergauwen M, et al. Visual modeling with a hand-held camera [J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 59(3): 207-232.