

基于隔离子采样的鲁棒图模型点匹配算法^{*}

王雯, 王庆

(西北工业大学 计算机学院, 西安 710129)

摘要: 为解决概率图模型匹配算法对模板点集中的外点敏感的问题, 对隔离子进行了采样, 并推导出采样次数和模板点集中的外点比例关系, 以保证隔离子中的点能最大概率地为内点, 使得推理算法中每个点的信息能得到传递。另外, 算法中的互匹配解决了传统图模型匹配算法中多对一问题。实验证明, 算法相对于原先的 JT 算法具有很高的鲁棒性和正确率。

关键词: 点匹配; 概率图模型; 连接树; 隔离子采样

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2009)12-4797-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2009.12.113

Graphical model for point pattern matching based on sampling of separator

WANG Wen, WANG Qing

(School of Computer Science & Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

Abstract: The graphical model for point pattern matching in JT algorithm is proved sensitive to the outliers in template point-set recently. To efficiently solve the problem, this paper sampled on the point in the separator, and derived the relationship between the times of the sampling and the ratio of the outliers. So that the message on each point could be delivered in the inference, and achieved finally the global MAP. Experimental results show that the approach improves the accuracy and is more robust than current methods.

Key words: point pattern matching; graphical model; junction tree; sampling of separator

0 引言

两视图间的特征点集合匹配是计算机视觉中的一个基本问题, 在立体匹配、基于模型的物体识别、全景合成等有广泛的应用。图像匹配的一般过程是先提取两幅待匹配图像的特征, 再对两个特征集合进行匹配。笔者主要关注匹配阶段的算法。匹配就是寻找一个点集到另一个点集的对应或映射关系。但在实际情况中, 由于噪声、非线性形变等原因的存在, 点集间往往不能得到完全正确的匹配关系, 在本文中遵循极力消除误匹配的原则。

在各种匹配算法中一类很重要的方法是基于树的搜索和回溯, 该类方法最早由 Ullman^[1] 提出, 本质上是一个处理树的分支和边界的算法, 待匹配点一直回溯直到满足了约束条件, 也就是找到了局部匹配点。最近在利用树搜索方面的贡献是 Berreti^[2] 和 Kittler^[3] 关于 A* 算法的研究, 该方法利用匹配的计算代价估计作启发式搜索。目前, 由 Lowe 提出的 SIFT 特征描述子和 BBF (best bin first) 搜索算法^[4] 在图像特征匹配方面得到广泛的应用。BBF 算法是高维向量空间的近似最近邻搜索, 它是经典 $k-d$ 树的改进, 通过选择方差最大维作为关键维来划分数据节点, 在关键维上比较数据, 再递归划分直至得到匹配点, 其本质是二叉搜索树, 能较好地解决高维数据的搜索问题, 因而被广泛地应用于图像特征匹配。其他典型的匹配

方法还有以概率松弛标记法 (probabilistic relaxation labeling, PRL) 为代表的连续性最优化 (continuous optimization) 方法^[5]、基于谱的方法^[6] 和其他方法^[7,8]。

用概率图模型去求解图像点集的匹配关系是一种新的思路, 因为没有仅仅依赖于图像的特征向量这样的一元信息。该模型是一种基于全局最优化和最大后验概率准则的方法, 结合了概率论和图论的优点, 联合概率分布保证了整个系统的一致性, 图形结构提供了计算的直观性、高效性。但由于其 NP 难的复杂度, 没有得到广泛的应用。2004 年 Caetano 等人^[9,10] 证明了利用稀疏的图模型和在无噪情况下利用全连接的图模型能得到相同结果, 提出了一种建立在马尔可夫随机场 (MRF) 上的简化模型 (junction tree, JT 算法), 其迭代次数仅与最大簇的个数呈线性关系, 使复杂度降到了 $O(TS^d)$ (T 为模板图像特征点数, S 为 T 的对应图像特征点数), 运行时间在多项式时间内。经实验证明, 概率图模型能达到全局最优, 并且在图像规模增大的非精确匹配情况下完全可以替换 PRL。但概率图模型在做点集匹配时受模板外点的影响仍然比较大。2007 年 Zhao Xuan 等人^[11] 分析了隔离子在该模型中的作用, 指出隔离子的正确选择能提高系统的鲁棒性, 并提出在建立连接树过程中动态选择具有联合分布概率最大的三个点作为隔离子, 以保证隔离子的选择具有一定的准确性, 这样就使得模型在待匹配图存在一定比率噪声点情况时也能保证匹配的正确率。最近,

收稿日期: 2009-03-26; **修回日期:** 2009-04-28 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (60873085); 国家“863”计划资助项目 (2007AA01Z314)

作者简介: 王雯 (1986-), 女, 湖北洪湖人, 硕士研究生, 主要研究方向为图像处理、计算机视觉 (viviwangwen@yahoo.cn); 王庆 (1969-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为图像处理、计算机视觉、模式识别。

文献 [12] 将链式连接树改为环形, 相应的传播过程是一个要经过数次迭代的循环置信传播, 并证明同样能达到全局最佳。该模型的优点是最大簇包含的点数要少于为链式结构连接树的最大簇点数。

在 JT 算法中, 当隔离子全为外点 (outlier) 时, 每个特征点的信息得不到有效传递, 会使得算法得不到全局最优解而导致失败, 具体证明参见文献 [11], 可见隔离子中点的选择不能完全随机。本文针对匹配点中存在一定比例外点的情况, 结合文献 [11] 的算法的初始化方法, 由外点初始的比例推导出隔离子采样次数上限, 以最大后验概率对隔离子的采样进行筛选。实验证明, 这种筛选方法能很好地解决待匹配图存在外点时的匹配问题。

1 概率图模型求解点匹配问题

1.1 点匹配问题描述

假设在 $R^n (n \in N)$ 中有两个点集, 模板点集 T 和场景点集 S , 各自的势为 T 和 S , 其中 S 中包含 T 经过等距变换 (主要是旋转平移) 后的点集 T' 。点匹配的目标是通过最大化某种相似性度量, 找到这个变换后的点集 T' 和一个对应 $f: T \rightarrow S$, 这里限定 f 是一一对应的关系。相应地, T 为定义域, S 为值域。定义 y_{ij}^d 为定义域中第 i 个点和第 j 个点的欧氏距离。

当两组点集间的变换为等距变换时, 在某种排列下它们必定会有相同的欧氏距离矩阵。这样, 问题就转换为在所有排列情况下, 比较两个域的欧氏距离矩阵, 即, 找到 f 使得下式最小:

$$U_T(f) = \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^T D(y_{ij}^d, y_{f(i)f(j)}^c) \tag{1}$$

这里, $D(\cdot, \cdot)$ 是变量间的不相似程度的度量。找到正确的排列是个 NP 难问题。

1.2 问题求解

概率图模型算法将点匹配问题作为图模型中的 MAP (最大后验概率) 问题来求解。假设定义域 T 中的每个点都是随机变量 X_i, X_i 的一个实现值 x_k 对应的是定义域某点和值域某点的映射。在这个意义下, 可定义一个联合分布, 使得式 (1) 最小化变为一个联合实现的概率最大化的问题。另外, 根据图模型的 Hammersley-Clifford 理论, 任何由图表示的严格条件独立的非负概率分布都能由一组点集势函数的连乘表示^[12]。Caetano^[10] 在全连接图上以边上的权值 (欧氏距离矩阵) 作势函数建立马尔可夫随机场, 再据 Hammersley-Clifford 理论, 有式 (2):

$$p(X = x) = (1/Z) \prod_{(i,j)} \Psi_{ij}(X_i = x_i, X_j = x_j) = (1/Z) \exp(- \sum_{(i,j)} V_{(i,j)}(X_i = x_i, X_j = x_j)) \tag{2}$$

其中: $V_{(i,j)}(X_i = x_i, X_j = x_j) = - \log \Psi_{ij}(x_i, x_j)$, $\Psi_{ij}(x_i = x, x_j = x_j)$ 是 x_i 和 x_j 构成的势函数; Z 是全局归一化常量。为与式 (1) 相关联, 需要定义一个合适的势函数。此处定义

$$V_{(i,j)}(X_i = x_i, X_j = x_j) = V_{(i,j)}(d_i \mapsto c_{f(i)}, d_j \mapsto c_{f(j)}) = D(y_{ij}^d, y_{f(i)f(j)}^c) \tag{3}$$

则有

$$p(f) = (1/Z) \exp(- \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^T D(y_{ij}^d, y_{f(i)f(j)}^c)) \propto \exp(- U_T(f)) \tag{4}$$

则最大化 $p(f)$ 也就是最小化式 (1)。为了降低在全连接图中取值接近 $(- U_T(f))$ 的代价, Caetano 证明利用全连接图点对

的某个子集可以达到同样的效果, 这个子集就是 k -树 (junction tree) 模型。如图 1 所示, 图中 x_1, x_2, x_3 三点是全连接, 三点集合在推理算法中被称为隔离子 (隔离子内的点数决定了 k 的大小, 此处为 3-树模型, 在本文中 k 取 3), 这三点与其他所有单个点构成多四个点的全连接图, 这样的四点集合在推理算法中被称为簇 (clique)。

有了 k -树模型, Hugin^[13] 推理算法可用来求解匹配中的最大后验概率问题, 也就是使随机变量的联合实现概率最大的问题。具体算法参见文献 [14]。

2 算法改进

2.1 隔离子的选取

当模板点集不存在外点时, Caetano 的点匹配算法效果显著, 甚至能处理场景点集中包含几倍于匹配点的外点的情况。但在某些情况下, 如应用到小范围的图像匹配上, 作为模板点集的图像中可能会存在与场景图像对应不到的特征点, 这些点在算法中有时可能会严重影响匹配结果。

在文献 [11] 中详细证明了当隔离子中的点为外点时, 推理算法中每个点的信息不能得到传递, 最终得不到全局信息, 将导致算法失败的原因。事实上, 在 Hugin 推理算法中, 隔离子中的点都是随机从模板点集中选取的。假设每次随机采的 3 个点 ($k=3$) 为一个样本, 则只要采样次数 N 足够大, 以保证由 k 个点组成的随机样本中至少有一次没有外点的概率为 p , 通常 p 的取值为 0.99。假定 w 是任意选择的数据点为内点的概率, 那么 $\epsilon = 1 - w$ 是其为外点的概率。那么至少需要 N 次选择 (每次 k 个点)。其中 $(1 - w^k)^N = 1 - p$, 从而有

$$N = \log(1 - p) / \log(1 - (1 - \epsilon)^k) \tag{5}$$

表 1 给出了当 $p = 0.99$ 时需要采样的次数 N 的取值表。在这里, 模板点集中外点所占的比例 ϵ 是未知的, 但是能估计到 ϵ 的初始上限。本文采用 2-树模型从 $T \sim S$ 作初始匹配, 然后再从 $S \sim T$ 作一次互匹配, 场景点集中的隔离子从 S 中初始匹配的对点中选择。选取那些在双向匹配中都能保留下来的点对作为待定的正确匹配对, 并据此计算初始的 ϵ 。由于外点在隔离子中的存在对结果有时影响会很明显, 导致互匹配中能保留下来的匹配点对较少, 因此将初始互匹配得到的 ϵ 作为外点的上限比例, 并由此计算采样次数 N 的上限。

表 1 保证至少有一次没有外点的概率是 $p = 0.99$ 时所需的采样数 N

样本大小	外点 ϵ 的比例/%					
k	5	10	20	25	30	40
2	2	3	5	6	7	11
3	3	4	7	9	11	19

当采样次数较大时, 每次采样都进行推理显然是很耗费时间的, 本文直接比较推理第一步所得的第一个簇的联合概率的峰值, 选择使峰值最大的隔离子采样, 这样才最有可能选择到均为内点 (inlier) 的隔离子。采用的算法步骤如下:

- a) 用 2-树模型在两图间作互匹配, 能双向匹配的点对作为待定的正确匹配对, 并据此计算初始的 ϵ 。
- b) 将 ϵ 带入式 (5) 算得隔离子的采样次数 N, k 取 3。
- c) 隔离子采样, 采用 3-树模型, 计算第一个簇的联合概率峰值, 这样每次采样能得到一个相应的概率峰值, 采样 N 次, 得到 N 个概率峰值。

d) 从 N 个概率峰值中选择最大的峰值,即选择使得联合概率峰值最大的采样,并进行推理算法。

e) 推理结束后再从 $S \sim T$ 作一次匹配。

3 实验结果与分析

本文实验中研究的点有两种形式:a) 在空白图中随机采样而得到的合成数据;b) 在真实图片上提取部分特征点得到的点数据。

3.1 合成数据

首先在 256×256 的空白图 G 上随机采 10 个点作为模板点集,然后将这些点的坐标等距变换于同样大小的图 T 上,作为场景点集,并在图 T 上加入 10 个点的随机噪声。为检验本文算法,笔者在图 G 中随机加入从 1 ~ 15 个噪声点。

图 2 和 3 是当 G 图中含 3 个外点 (*) 时的一次实验情况,图中 * 和 + 分别是 G 图中随机加入的外点和待匹配点; Δ 和 \circ 分别是 T 中对应匹配点和加入的外点,外点数为 10。图 2 中的虚线是正确的匹配;图 3 是用本文算法得到的匹配结果,可以看到结果实线已将虚线覆盖,得到了正确的匹配。

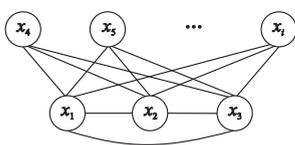


图1 一个典型的3-树模型

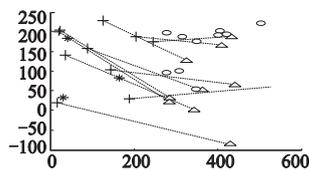


图2 G图含3个外点时的匹配关系

为更好地验证本文算法的鲁棒性,本文算法与 Caetano 的 JT^[14] 算法进行了比较,见图 4,其中横坐标代表外点的个数,纵坐标是正确匹配率,每个匹配率是通过 100 组实验平均得来的。可以看到,随着外点的增加,本文算法的正确匹配率始终高于 JT 算法,且更加稳定。

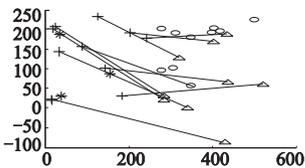


图3 用本文算法得到的匹配结果

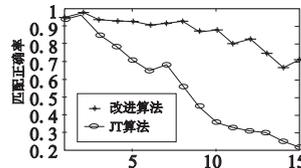


图4 两种算法结果比较

3.2 图片数据

本文测试图片来自 CMU 的图片数据库 <http://vasc.ri.cmu.edu/~idb/html/motion/hotel/index.html>, 选择的是两幅 toy house 的图片,如图 5 所示。真实图片中的特征点是人工提取的,主要目的是检验匹配算法。图 5 中,(a) 有 12 个特征点。其中 10 个能在 (b) 中找到匹配,另外有 2 个点在 (b) 中找不到对应点。从图 5(b) 中可以看到,用本文算法作匹配,2 个外点(圆圈的中心)由于最后互匹配的步骤均没有被匹配。



图5 两种算法在真实图片上的匹配结果

4 结束语

针对实际应用中模板点集经常存在外点的情况,本文对

JT 算法进行了改进,以使推理中信息能够传递从而得到全局的 MAP,同时利用互匹配去除了外点对应的匹配关系,提高了结果的正确匹配率。实验证明,本文算法提高了匹配的鲁棒性和正确性。

JT 算法的出发点是利用相邻特征点的边这样的二元信息作为特征,有别于以往的匹配算法仅利用局部特征描述子这样的一元信息进行匹配的做法,这就克服了局部描述子不能表达图像的结构信息的问题。但是,如何缩短它的运算时间以及如何在不同尺度和仿射条件下进行匹配,都是进一步研究的方向。

参考文献:

- [1] ULLMAN J. An algorithm for subgraph isomorphism[J]. Journal of the ACM, 1976, 23(1): 31-42.
- [2] BERRETI S, BIMBO A D, VICARIO E. Efficient matching and indexing of graph models in content-based retrieval[J]. IEEE Trans on PAMI, 2001, 23(10): 1089-1105.
- [3] GREGORY L, KITTLER J. Using graph search techniques for contextual color retrieval[C]//Proc of International Workshops SSPR & SPR. London, UK: Springer-Verlag, 2002:186-194.
- [4] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91-110.
- [5] HANCOCK ER, WILSON R C. Graph-based methods for vision: a yorkist manifesto [C]//Proc of International Workshops SSPR & SPR. London, UK: Springer-Verlag, 2002:31-46.
- [6] CARCASSONI M, HANCOCK ER. Spectral correspondence for point pattern matching [J]. Pattern Recognition, 2003, 36(1): 193-204.
- [7] GOLD S, RANGARAJAN A. Graduated assignment algorithm for graph matching[J]. IEEE Trans on PAMI, 1996, 18:377-388.
- [8] AKUTSU T, KANAYA K, OHYAMA A, et al. Point matching under nonuniform distortions[J]. Discrete Appl Math, 2003, 127(1): 5-21.
- [9] CAETANO T S, CAELLI T, BARONE D A C. A comparison of junction tree and relaxation algorithms for point matching using different distance metrics [C]//Proc of the 17th International Conference on Pattern Recognition. Cambridge UK: IEEE, 2004:124-127.
- [10] CAETANO T S, CAELLI T, SCHUURMANS D, et al. Graphical models and point pattern matching [J]. IEEE Trans on PAMI, 2006, 28(10): 1646-1663.
- [11] ZHAO Xuan, WANG Sheng-jin, DING Xiao-qing. A dynamic generating graphical model for point-sets matching [J]. Applied Mathematics and Computation, 2007, 185(2): 1109-1119.
- [12] MCAULEY J J, CAETANO T S, BARBOSA M S. Graph rigidity, cyclic belief propagation and point pattern matching[J]. IEEE Trans on PAMI, 2008, 30(11): 2047-2054.
- [13] LAURITZEN S L. Graphical models[M]. New York: Oxford University Press, 1996:298
- [14] CAETANO T S. Graphical models and point set matching[D]. Porto Alegre: Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul, 2004.
- [15] WAINWRIGHT M J. Stochastic processes on graphs with cycles: geometric and variational approaches [D]. Cambridge: Massachusetts Inst of Technology, 2002.