

基于 Delaunay 三角化和谱方法的 非精确点模式匹配算法

张昌芳 杨宏文 胡卫东 郁文贤

(国防科学技术大学 ATR 重点实验室,长沙 410073)

摘要 当两个要匹配的点模式不同构时,以谱方法为基础的点模式匹配算法性能较差。为了提高谱方法对非同构点模式的匹配性能,将 Delaunay 三角化过程与谱方法结合起来,提出了一种新的非精确点模式匹配算法。该算法为了缩小非对应点的影响范围,在 Delaunay 三角化的基础上定义点模式的局部结构,并通过在局部结构层次上应用谱方法找出最相似的局部结构对,然后以此为指导对两个点模式内剩下的点进行匹配。仿真实验结果表明,该算法优于现有的以谱方法为基础的点模式匹配算法。

关键词 Delaunay 三角化 谱方法 局部结构 点模式匹配

中图法分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2009)07-1386-06

Inexact Point Pattern Matching Algorithm Based on Delaunay Triangularization and Spectral Method

ZHANG Chang-fang, YANG Hong-wen, HU Wei-dong, Yu Wen-xian

(ATR Key Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

Abstract The point pattern matching algorithm based on the spectral method performs poorly when the two point patterns to be matched are not isomorphic. To improve the matching performance of the spectral method for non-isomorphic point patterns, it is combined with Delaunay triangularization process and a new inexact point pattern matching algorithm is proposed. The algorithm defines the point patterns' local structures based on Delaunay triangularization to reduce the influenced area of the points that are in one point pattern and have no correspondent in the other. The local structures from the two point pattern are matched with each other using the spectral method. After the most similar local structure pair is found it is used to guide the matching of the remaining points within the two point patterns. Simulation experiments show that the proposed algorithm is superior to the existing point pattern matching algorithms which are based on the spectral method.

Keywords Delaunay triangularization, spectral method, local structure, point pattern matching

1 引言

谱方法是一类利用邻接矩阵或者与其密切相关的 Laplacian 矩阵的特征值和特征矢量来刻画图的全局结构的方法^[1]。近年来,利用谱方法来解决对

应性匹配问题引起了人们的广泛关注^[1-6]。水面或者地面上的阵群目标可看作平面上的点模式,而后者可以用一种特殊的图——完全连接图来表示,因此,也可以利用谱方法来解决阵群目标数据关联中的子目标对应性匹配问题。

谱方法的显著优点是计算量小,但由于它是一

基金项目:“十一五”国防预研基金项目(513060302)

收稿日期:2007-12-10;改回日期:2008-04-07

第一作者简介:张昌芳(1981~),女,国防科学技术大学信息与通信工程专业博士研究生。主要研究方向为阵群目标分析、数据融合等。E-mail: zcf0731@163.com

种精确图匹配算法,因此,当要匹配的两个图结构差别较大时性能较差。针对该问题,Luo 等人通过将概率方法与之结合而提高了其对图大小和结构差别的鲁棒性^[2]。由于该方法是迭代的,它相对较慢而且对初始值比较敏感。在非迭代方法方面,对于两个大小不同的点模式 P 和 \hat{P} (不妨设 $|P| > |\hat{P}|$), Carcassoni 等人通过舍弃 P 的模式矩阵最后的 $|P| - |\hat{P}|$ 行和列来实现模式矩阵维数的一致性^[4]。Tang 等人则保留前 $|\hat{P}| - 1$ 个和最后一个特征矢量^[5],而截去其余的特征矢量。Caelli 等人将 P 投影到由它的前 $|\hat{P}|$ 个特征矢量张成的特征空间中^[6],在对特征矢量进行了归一化处理之后,节点在特征空间中的投影的相对角度对点模式的大小差别具有较强的鲁棒性。但是,由于谱特征是对图全局结构的一种描述,以上 4 种方法都不能消除非对应点(在另一个点模式中无对应点的点)对全局结构的作用,从而导致在非对应点较多时匹配性能较差。

如果要匹配的两个点模式内存在非对应点,则将这样的点模式匹配问题称为非精确点模式匹配,它实质上是一种子集同构问题,即在两个要匹配的点模式中找出最大的公共子集,并确定两个公共子集中元素的对应关系。要减小点模式内的非对应点对其全局结构的影响,需要对要匹配的点模式进行有效的划分。

点模式的划分就是对点模式内的点进行分组,每组代表一个局部结构,不同局部结构之间可以存在部分重叠,但不完全重叠。点模式的划分有多种方式,相应地,局部结构的定义也有多种。例如,文献[7]中以某个点为参考点定义的局部结构由该点及其 K 个近邻点组成;而文献[8]中则借助图的概念(如星状图)来定义局部结构,与所考虑点之间的距离在预设门限 T_d 以内的所有点都看作其近邻点。这两种局部结构受参数 K 或者 T_d 的影响较大,而且在噪声情况下稳定性较差。Tuceryan 等人指出,与其他的 2 维邻域图相比,Delaunay 图对噪声有最优鲁棒性^[9]。而且,在 Delaunay 图中添加一个新的点时,它只影响外接圆包含该点的三角形。这说明非对应点只在局部影响 Delaunay 图。因此,学者开始采用 Delaunay 图作为图结构来解决点模式匹配问题。Wilson 等人采用迭代重组的 Delaunay 图对要匹配的数据进行动态表示^[10],目的是通过可重构的匹配过程提高两个要匹配关系结构的拓扑一致性。

Deng 等人则利用 Delaunay 图来为每个点定义领域^[11],并利用该领域来找出可能的配准边。并使用以配准边为指导的三角匹配过程计算两个指纹之间的全局匹配度量。但他们都没有将 Delaunay 图同谱方法结合起来。

受到上述工作的启发,文中将 Delaunay 三角化同谱方法结合起来,提出了一种新的非精确点模式匹配方法。它充分利用了这样的事实:在不受非对应点影响的情况下,以对应点为参考点的局部结构是完全同构的。该算法首先对要匹配的点模式进行划分,确定以其中各点为参考点的局部结构,再对所有的局部结构对进行匹配,找出最相似的局部结构对,并以之为指导对剩下的点进行匹配。

2 Delaunay 图

通过 Delaunay 三角化过程,每个点模式(大小不小于 3)都可以表示成一个特殊的连接图(称为 Delaunay 图),其中每个节点代表点模式中的一个点,而每条边与点模式中的两个点相连。Delaunay 三角化具有这样的特性^[11]:(1)一个由 N 个点组成的非退化集合的 Delaunay 三角化是唯一的,而且可以在 $O(N \log N)$ 时间内有效地计算,产生 $O(N)$ 个三角形;(2)缺失或者虚假的点只在局部影响 Delaunay 图;(3)所获得的三角形是非“瘦”的(skinny)。

将点模式 P 的 Delaunay 图定义为

$$D_p = \{P, E, A\} \quad (1)$$

式中, P, E, A 依次表示由 D_p 中的节点、边和边的属性组成的集合。

3 谱方法

典型的谱方法包括以下几个主要环节:表示矩阵的构造、表示矩阵的特征分解、特征矢量的符号校正、模式矩阵的计算、匹配度量的计算以及匹配判决。具体地讲,假设 P 和 \hat{P} 是要匹配的两个点模式,其中 $P = \{p_i\}_{i=1}^{|P|}$, p_i 表示 P 内第 i 个点的位置矢量,则点模式 P 的表示矩阵为

$$R = [r_{ij}] \quad (2)$$

式中

$$r_{ij} = \exp(-\|p_i - p_j\| / 2\sigma^2) \quad (3)$$

为点 p_i 和点 p_j 之间欧氏距离的高斯加权值,其中 σ

为可调参数。

构建了表示矩阵 R 以后,下一步就是对该矩阵进行特征分解

$$R = VAV^T \quad (4)$$

式中, A 为由特征值组成的对角矩阵,

$$A = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N) \quad \lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_N \quad (5)$$

V 为特征矢量矩阵,其列矢量为与特征值对应的特征矢量,即

$$V = [v_1, v_2, \dots, v_N] \quad (6)$$

同样可以对点模式 \hat{P} 的表示矩阵 \hat{R} 进行特征分解

$$\hat{R} = \hat{V}\hat{A}\hat{V}^T \quad (7)$$

由于根据矩阵的特征分解所得到的特征矢量具有 180° 的方向模糊性,因此,在计算模式矩阵之前,必须先对特征矢量的符号进行校正,以使得两个模式矩阵中对应特征矢量的符号尽可能地一致^[5-6]。

为了充分利用表示矩阵的特征分解提供的所有信息^[1],采用以特征值加权的特征矢量为列矢量的矩阵

$$M = [\sqrt{|\lambda_1|} v_1, \sqrt{|\lambda_2|} v_2, \dots, \sqrt{|\lambda_N|} v_N] \quad (8)$$

来表示点模式 P 的模式矩阵。类似地,可以得到点模式 \hat{P} 的模式矩阵 \hat{M} 。

模式矩阵 M 的第 i 个行矢量 M_i 与点模式 P 内的第 i 个点 p_i 对应,它表示 p_i 在各个模式矢量上的分布情况^[4]。类似地,模式矩阵 \hat{M} 的第 j 个行矢量 \hat{M}_j 与点模式 \hat{P} 中的第 j 个点 \hat{p}_j 对应。因此,点模式 P 和 \hat{P} 内点的对应性匹配转换为模式矩阵 M 和 \hat{M} 的行矢量之间的配对问题。

为使得行矢量 M_i 和行矢量 \hat{M}_j 的匹配度量不受各自长度的影响,文中将两者的匹配度量定义为它们夹角的余弦,即点 p_i 和点 \hat{p}_j 之间的匹配度量为

$$s_{ij} = \frac{M_i \cdot \hat{M}_j}{|M_i| |\hat{M}_j|} \quad i, j = 1, 2, \dots, N \quad (9)$$

由所有的匹配度量组成匹配度量矩阵 S ,在 S 上进行 2 维分配判决即可得到点模式 P 和 \hat{P} 的对应性匹配关系。

如果点模式 P 和 \hat{P} 的大小不等(不妨设 $|P| = N, |\hat{P}| = N$ 且 $N > \hat{N}$),则通过保留 V 的前 $|\hat{P}|$ 个特征矢量而截去其余的来实现维数的一致性,这样截取后的模式矩阵中保留了更多全局信息,从而对点模式内点的位置噪声具有更强的鲁棒性。

4 非精确点模式匹配算法

本文提出的非精确点模式匹配算法主要思想是:(1)点模式的局部匹配与全局校验是交叉进行的。在非精确点模式匹配过程中,非对应点的存在使得精确匹配过程只能在要匹配的点模式的局部结构上实现,而局部匹配结果有时并不满足全局一致性约束,因此,该算法利用全局匹配结果对局部匹配结果进行校验,只有满足全局一致性约束的局部匹配点对才能添加到全局匹配集合中。(2)在整个匹配过程中,一旦有点对满足全局一致性约束并添加进全局匹配结果中,则将其从各自的点模式中移除,即要匹配的点模式和全局匹配结果都是动态更新的。(3)在确定对应点匹配关系的同时筛选出了两个点模式中的非对应点。

4.1 局部结构的定义

作为一种全局匹配方法,谱方法对非对应点不具有鲁棒性。若采用谱方法对局部结构进行匹配,则应该尽可能地缩小非对应点的影响范围。由第 2 部分的分析可知,非对应点对 Delaunay 图只有局部的影响,因此,将点模式 P 中以点 p_i 为参考点的局部结构 L_i 定义为由点 p_i 和 D_p 中那些与 p_i 直接相连的点组成的集合^[10],即

$$L_i = p_i \cup \{p_j | (p_i, p_j) \in E\} \quad (10)$$

式中, $p_i, p_j \in P, i, j = 1, 2, \dots, N$ 。

当 P 中点数较少时,有可能会出现在 $\{L_i\}_{i=1}^N$ 中所有局部结构中点的个数都等于 N 的情况。这时全部非对应点都包含在所有局部结构中,因此, Delaunay 三角化并没有改变非对应点的影响范围,这种情况称点模式 P 不可 Delaunay 三角化。如果 P 和 \hat{P} 都不可 Delaunay 三角化,则不再定义二者的局部结构,而直接采用谱方法对整体点模式 P 和 \hat{P} 进行匹配。

4.2 局部结构的匹配

假设通过局部结构分解得到两个局部结构 L 和 \hat{L} ,而且已经通过谱方法得到了 L 和 \hat{L} 的模式矩阵 M^L 和 $M^{\hat{L}}$,由于 L (或者 \hat{L}) 中的第 i 个点与 M^L (或者 $M^{\hat{L}}$) 的第 i 个行矢量对应^[4],因此, L 和 \hat{L} 中点的对应性匹配过程可以通过 M^L 和 $M^{\hat{L}}$ 的行矢量之间的配对来实现。将 L 中的点 p_i 与 \hat{L} 中的点 \hat{p}_j 之间的匹配度量 s_{ij}^L 定义为

$$s_{ij}^p = \frac{\mathbf{M}_i^L \cdot \mathbf{M}_j^{\hat{L}}}{|\mathbf{M}_i^L| |\mathbf{M}_j^{\hat{L}}|} \quad (11)$$

式中, \mathbf{M}_i^L 和 $\mathbf{M}_j^{\hat{L}}$ 分别为矩阵 \mathbf{M}^L 的第 i 个行矢量和 $\mathbf{M}^{\hat{L}}$ 的第 j 个行矢量, “ \cdot ” 为内积操作符, s_{ij}^p 中的上标 “ p ” 代表该度量为局部结构中点与点之间的匹配度量。

\mathbf{L} 和 $\hat{\mathbf{L}}$ 中所有点对的匹配度量组成矩阵 \mathbf{S}^p , 在 \mathbf{S}^p 上进行 2 维分配可得 \mathbf{L} 和 $\hat{\mathbf{L}}$ 中点的对应关系集合 \mathbf{C}^{S^p} 。局部结构 \mathbf{L} 和 $\hat{\mathbf{L}}$ 的整体匹配度量 s^w 为 \mathbf{C}^{S^p} 中所有点对匹配度量的平均值, 即

$$s^w = \frac{1}{|\mathbf{C}^{S^p}|} \sum_{(p_u, \hat{p}_v) \in \mathbf{C}^{S^p}} s_{uv}^p \quad (12)$$

式中, s^w 中的上标 “ w ” 表示该度量为局部结构 \mathbf{L} 和 $\hat{\mathbf{L}}$ 之间整体匹配程度的一种度量。为了考虑各个局部结构对中匹配上的点在所有参与匹配的点中所占的比例, 定义局部结构 \mathbf{L} 和 $\hat{\mathbf{L}}$ 的匹配因子

$$F = \frac{2|\mathbf{C}^{S^p}|}{|\mathbf{L}| |\hat{\mathbf{L}}|} \quad (13)$$

采用该因子对 s^w 进行加权, 得到 \mathbf{L} 和 $\hat{\mathbf{L}}$ 的综合匹配度量

$$s_r^w = F s^w \quad (14)$$

4.3 局部匹配结果的校验

假设当前的全局匹配集合 \mathbf{G} 中元素个数为 N_G 。由局部匹配集合 \mathbf{C}^{S^p} 中的点对 $(p_u, \hat{p}_v) \in \mathbf{C}^{S^p}$ 和 \mathbf{G} 构成集合

$$\mathbf{A} = \mathbf{G} \cup (p_u, \hat{p}_v) \quad (15)$$

利用谱方法计算 \mathbf{A} 中点对的匹配度量矩阵 \mathbf{S}^A , 根据 \mathbf{S}^A 可以得到匹配集合 \mathbf{G}^{S^A} , 如果

$$\mathbf{G}^{S^A} \cap (p_u, \hat{p}_v) = (p_u, \hat{p}_v) \quad (16)$$

成立, 则表明点对 (p_u, \hat{p}_v) 满足全局一致性约束, 式中, “ \cap ” 为求集合交集的操作符。

如果 (p_u, \hat{p}_v) 满足全局一致性约束, 则将其添加到 \mathbf{G} 中, 并将这两个点分别从各自的点模式内移除。

4.4 算法的主要步骤

整个非精确点模式匹配算法的主要步骤包括:

(1) 将全局匹配集合 \mathbf{G} 设为空集, 并令 $\mathbf{P}_0 = \mathbf{P}$, $\hat{\mathbf{P}}_0 = \hat{\mathbf{P}}$, 通过 Delaunay 三角化分别定义点模式 \mathbf{P}_0 和 $\hat{\mathbf{P}}_0$ 的局部结构集合 $\{\mathbf{L}_{0i}\}_{i=1}^{|\mathbf{P}_0|}$ 和 $\{\hat{\mathbf{L}}_{0j}\}_{j=1}^{|\hat{\mathbf{P}}_0|}$ 。其中 \mathbf{P}_0 和 $\hat{\mathbf{P}}_0$ 、 \mathbf{P} 和 $\hat{\mathbf{P}}$ 分别表示初始要匹配的点模式对、当前要匹配的点模式对, 即 \mathbf{P} 是由 \mathbf{P}_0 中未匹配上的

点所组成的集合, 类似地, 集合 $\hat{\mathbf{P}}$ 由 $\hat{\mathbf{P}}_0$ 中未匹配上的点组成。

(2) 如果 \mathbf{P} 或 (和) $\hat{\mathbf{P}}$ 可 Delaunay 三角化, 则通过 Delaunay 图定义 \mathbf{P} 和 $\hat{\mathbf{P}}$ 的局部结构集合 $\{\mathbf{L}_i\}_{i=1}^N$ 和 $\{\hat{\mathbf{L}}_j\}_{j=1}^{\hat{N}}$ 并转向步骤(3); 否则, 直接采用谱方法对点模式 \mathbf{P} 和 $\hat{\mathbf{P}}$ 进行匹配, 然后结束整个匹配过程。

(3) 计算所有局部结构对 $(\mathbf{L}_i, \hat{\mathbf{L}}_j)$ 的对应关系集合 $\mathbf{C}^{S^{ij}}$ 和综合匹配度量矩阵 $s_r^{w,ij}$, 其中 $i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, \hat{N}$ 。记

$$(i^*, j^*) = \arg \max_{i,j} s_r^{w,ij} \quad (17)$$

则局部结构对 $(\mathbf{L}_{i^*}, \hat{\mathbf{L}}_{j^*})$ 是最相似的。如果全局匹配结果 \mathbf{G} 为空, 则直接将对应关系集合 $\mathbf{C}^{S^{i^*j^*}}$ 添加到 \mathbf{G} 中, 并将匹配上的局部结构分别从 \mathbf{P} 和 $\hat{\mathbf{P}}$ 中移除, 然后转向步骤(5); 否则, 利用全局匹配集合 \mathbf{G} 对 $\mathbf{C}^{S^{i^*j^*}}$ 中的元素一一进行校验。如果有点对满足全局一致性约束, 则直接将该点对添加进全局匹配集合中, 并将该点对从各自的点模式中移除, 得到更新后的 \mathbf{P} 和 $\hat{\mathbf{P}}$, 然后转向步骤(5); 如果没有任何点对通过检验, 则转向步骤(4)。

(4) 定义局部匹配集合 \mathbf{Q} 并将其设为空集, 设 $g_l = (p_{s_l}, \hat{p}_{t_l}) (l = 1, 2, \dots, N_G)$ 为 \mathbf{G} 中的某个元素, 则根据 p_{s_l} 和 \hat{p}_{t_l} 的邻域确定的候选匹配点模式对为

$$\mathbf{P}^l = \mathbf{P} \cap \mathbf{S}_{0s_l} \quad (18)$$

和

$$\hat{\mathbf{P}}^l = \hat{\mathbf{P}} \cap \hat{\mathbf{S}}_{0t_l} \quad (19)$$

利用 \mathbf{G} 对 \mathbf{P}^l 和 $\hat{\mathbf{P}}^l$ 中的元素组合一一进行校验。如果有点对满足全局一致性约束, 则直接将该点对添加进 \mathbf{Q} 中。如果所有 \mathbf{P}^l 和 $\hat{\mathbf{P}}^l (l = 1, 2, \dots, N_G)$ 中的元素组合都检验之后 \mathbf{Q} 不为空, 则将 \mathbf{Q} 添加到全局匹配集合 \mathbf{G} 中, 并将 \mathbf{Q} 中的点对分别从 \mathbf{P} 和 $\hat{\mathbf{P}}$ 移除, 转向步骤(5); 否则, 将 \mathbf{P} 和 $\hat{\mathbf{P}}$ 中的点都划为非对应点, 整个匹配过程结束。

(5) 如果点模式 \mathbf{P} 和 $\hat{\mathbf{P}}$ 的大小都不小 3, 则转向步骤(2); 否则, 采用 \mathbf{G} 对 \mathbf{P} 和 $\hat{\mathbf{P}}$ 中的元素组合一一进行校验。如果有点对满足全局一致性约束, 则直接将该点对添加进 \mathbf{G} 中, 并分别将该点对从 \mathbf{P} 和 $\hat{\mathbf{P}}$ 中移除。待所有的点对都检验完毕, 如果 \mathbf{P} 和 (或) $\hat{\mathbf{P}}$ 为空, 则整个匹配过程结束; 否则, 将 \mathbf{P} 和 (或) $\hat{\mathbf{P}}$ 中的点都划为非对应点, 然后结束整个匹配过程。

5 仿真实验

下面通过两个仿真实验分别验证文中给出的非精确点模式匹配算法在不同情况下的性能,并将之与文献[4]~[6]中的匹配算法进行了对比分析。两个实验中均采用随机点模式。点模式内每个点的检测概率都为 P_d 。观测到的每个点的位置受到高斯噪声的影响,其均值为零,标准差为随机点模式内任意两点之间最小距离平均值 \bar{d}_{min} 的 f 倍。通过 10^4 次蒙特卡罗仿真得到算法在不同情况下的正确匹配率 P_c 。

5.1 不同检测概率情况下的性能对比

对如下 4 种算法在不同检测概率下的性能进行对比分析:截断模式矩阵的谱方法 1(TMSM1)^[4]、截断模式矩阵的谱方法 2(TMSM2)^[5]、特征子空间投影聚类法(EPC)^[6]以及文中提出的算法(IEPPM)。实验中参数设置相同,其中随机点模式的大小 s 为 10。图 1 给出了检测概率 P_d 为 0.95 时四种算法的正确匹配率 P_c 随噪声水平因子 f 的变化曲线。图 2 给出了检测概率为 0.90 时的对比情况。可以观察到,在两种检测概率情况下,4 类算法的性能都随着噪声水平的增加而降低,与其他 3 种算法相比,本文提出的算法的正确匹配率最高。

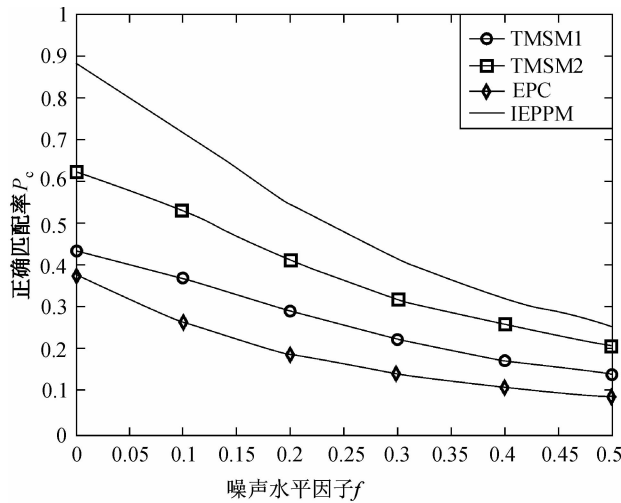


图 1 $P_d = 0.95$ 时 4 类算法的正确匹配率 P_c 随噪声水平因子 f 的变化曲线

Fig. 1 The four algorithms' correct matching rate P_c plots varying with the noise level factor f when $P_d = 0.95$

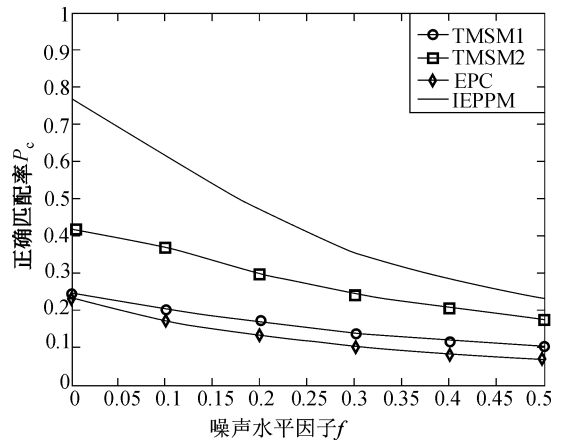


图 2 $P_d = 0.90$ 时 4 类算法的正确匹配率 P_c 随噪声水平因子 f 的变化曲线

Fig. 2 The four algorithms' correct matching rate P_c plots varying with the noise level factor f when $P_d = 0.90$

5.2 不同点模式大小情况下的性能对比

对上述 4 种算法在不同点模式大小情况下的性能进行对比分析。实验中参数设置为 $P_d = 0.95$, $f = 0.1$ 。图 3 给出了 4 类算法的正确匹配率 P_c 随点模式大小 s 的变化曲线。从图中可以看出,随着点模式内点的数量的增加,TMSM1、TMSM2 和 EPC 3 种算法的正确匹配率都逐渐下降,而 IEPPM 算法的正确匹配率则不断提高,这表明,点模式内的点越多,IEPPM 算法的优越性越明显。

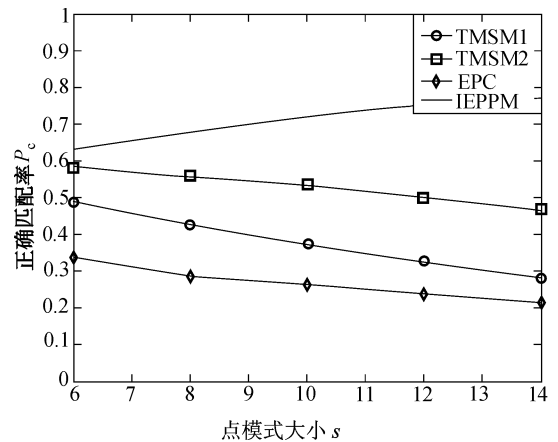


图 3 $P_d = 0.95, f = 0.1$ 时 4 类算法的正确匹配率 P_c 随点模式大小 s 的变化曲线

Fig. 3 The four algorithms' correct matching rate P_c plots varying with the size of the point pattern s when $P_d = 0.95$ and $f = 0.1$

6 结 论

针对要匹配的两个点模式中存在较大比例的非对应点这种非精确点模式匹配问题,提出了一种新的匹配算法。该算法首先通过 Delaunay 三角化过程定义了点模式的局部结构,然后采用谱方法对这些局部结构进行匹配,并利用最相似的局部结构对的匹配结果来指导剩余点的匹配。借助局部结构的定义,该方法大大缩小了要匹配点模式中非对应点的影响范围,为谱方法的应用奠定了基础,从而保证了算法具有良好的匹配性能。

由于非精确点模式匹配问题在阵群目标数据关联等领域内非常普遍,而后者又是战场态势分析和估计的基础,因此,文中提出的算法具有十分重要的应用价值。

参考文献 (References)

- 1 Wilson R C, Hancock E R, Luo B. Pattern vectors from algebraic graph theory [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005, **27**(7): 1112-1124.
- 2 Luo B, Hancock E R. Structural graph matching using the EM algorithm and singular value decomposition [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2001, **23**(10): 1120-1136.
- 3 Umeyama S. An eigen decomposition approach to weighted graph matching problems [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1988, **10**(5): 695-703.
- 4 Carcassoni M, Hancock E R. Spectral correspondence for point pattern matching [J]. Pattern Recognition, 2003, **36**(1): 193-204.
- 5 Tang J, Dong L, Wang N, *et al.* A Laplacian spectral method for stereo correspondence [J]. Pattern Recognition Letters, 2007, **28**(12): 1391-1399.
- 6 Caelli T, Kosinov S. An eigenspace projection clustering method for inexact graph matching [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2004, **26**(4): 515-519.
- 7 Jiang X, Yau W Y. Fingerprint minutiae matching based on the local and global structures [A]. In: Proceedings of 15th International Conference on Pattern Recognition [C], Barcelona, Spain, 2000: 1038-1041.
- 8 Ratha N K, Pandit V D, Bolle R M, *et al.* Robust fingerprint authentication using local structural similarity [A]. In: Proceedings of 5th IEEE Workshop on Applications of Computer Vision [C], Palm Springs, CA, USA, 2000: 29-34.
- 9 Tuceryan M, Chorzempa T. Relative sensitivity of a family of closest point graphs in computer vision applications [J]. Pattern Recognition, 1991, **24**(5): 361-373.
- 10 Wilson R C, Cross A D J, Hancock E R. Structural matching with active triangulations [J]. Computer Vision and Image Understanding, 1998, **72**(1): 21-38.
- 11 Deng H, Huo Q. Minutiae matching based fingerprint verification using Delaunay triangulation and aligned-edge-guided triangle matching [M]. Audio-and Video-Based Biometric Person Authentication, 2005, LNCS **3546**: 270-278.