

DT-PTV 离散相伪矢量的概率择优式剔除算法

张洋, 王元, 王大伟

(西安交通大学生态环境与现代农业工程中心, 710049, 西安)

摘要: 提出一种基于三角嵌铺的粒子追踪测速(DT-PTV)算法的剔除离散相伪矢量新方法——概率择优式剔除法, 引入了剔除冗余匹配的计算模块和扩大匹配信息量的“反算”概念, 基于 DT-PTV 的“DT 三角-粒子双层匹配”特性以及上述模块的多种组合, 总结出适用于离散相流场的去伪多途径运算. 通过对若干自定义流场进行多途径去伪并比较匹配准确率后得出, DT 三角层面的信息最大化积累至粒子层面的最优选择是适用于 DT-PTV 离散流场测速的最有效去伪途径, 在随机粒子场较低空间率(187.215)时用“三角层面有反算但无模块运算+粒子层面择优”途径计算, 仍然能保持 92%左右的匹配准确率, 故将此途径命名为概率择优式剔除法. 利用 DT-PTV 结合概率择优式剔除进行大气边界层风洞中的跃移层测速以及单颗跃移轨迹的提取, 结果良好.

关键词: DT-PTV; 伪矢量剔除; 多途径运算; 跃移层测速

中图分类号: O359; X169 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)05-0119-05

Elimination of Discrete Phase Outliers in DT-PTV by Preferential Probability

ZHANG Yang, WANG Yuan, WANG Dawei

(Center of Environment & Modern Agriculture Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A new method called elimination by preferential probability (EPP) to remove discrete phase outliers in Delaunay tessellation-particle tracking velocimetry(DT-PTV) was proposed. In the present method, the modules to eliminate redundant matches and the inverse calculation to enlarge matching information were adopted and a multiple-way in outliers elimination used in discrete phase flow field was developed on the basis of the double-layer matching pattern in DT-PTV and the combination modes of modules and inverse calculation. From the application in self-defined flow fields and comparison of accuracy rate, matching information maximizing in DT triangle level followed by most-suitable-matches selection in particle level is an optimum way of outlier elimination in discrete phase with an accuracy rate of about 92% in a low spatial rate (187.215). In addition, the DT-PTV combined with EPP was used for velocity measurement of sand phase in saltation layer of wind-sand flow, and the results of single-grain paths abstracted can meet the requirement.

Keywords: DT-PTV; outlier elimination; multiple-way calculation; velocimetry in saltation layer

粒子图像测速(PIV)技术是当代实验流体力学发展的一个里程碑. 作为粒子匹配依据的图形结构是多种面向 PIV 技术算法的核心和主要区别点.

Delaunay 网格是将平面离散点进行三角形联结的非结构类网格^[1-2], 将其引入 PTV 算法以后, 图形结构由粒子分布变成德洛内嵌铺三角(DT)分布. 较之

传统 PTV 算法,DT-PTV 具备更多优点^[3].

检测和删除伪矢量是 PIV 后处理的首要环节.一直以来,对 PIV 数据中伪矢量检测的方法较少且应用有限.DT 网格法和手工法不适用于离散相去伪^[1].中值滤波^[4]会同时抹除一部分真矢量,且和统计法^[5]一样没有考虑流场的具体结构^[1].本文从 DT-PTV 的“三角-粒子双层匹配”结构、DT 网格一点分属多个三角的基本特性出发,运用反算原理和若干运算模块的有机组合,提出了适用于 DT-PTV.算法的多途径去伪方法,并通过自定义标准图像试验分析得到最优去伪途径.最后将其应用于沙床面跃移层速度场的测量中,提取了颗粒的运动轨迹.

1 基本原理

1.1 三角嵌铺 DT

在 DT 网格中,DT 三角形外接圆圆心即为 Voronoi 多边形顶点,且每个 Voronoi 多边形只包含一个粒子(见图 1),此准则确保了 DT 网格划分的惟一性,即在所有粒子进行微小位移的前提下,前后图像 DT 网格不会发生突变,这是利用 DT 进行 PTV 测速的理论前提,DT 的第 2 个优点“几乎不产生内角过小三角形”能够保证绝大部分三角配对计算的精度^[3].

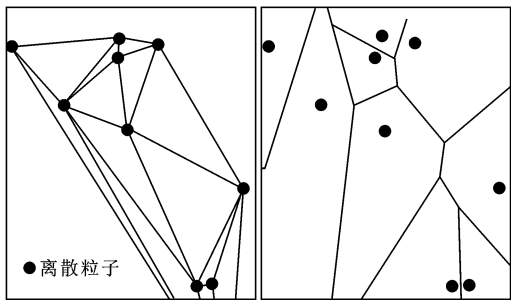


图 1 DT 三角与 Voronoi 多边形

1.2 DT-PTV 算法

图 2 显示相隔微小时间的 2 帧图像, T_i 为第 1 帧图像中任一三角形,其质心坐标为 (X_c, Y_c) .以下为构成 T_i 的 3 个顶点寻找配对粒子.

第 1 步,确定察问域半径 R . R 为粒子可能最大位移的像素长度.

第 2 步,找出候选配对三角形.在第 2 帧图像中以 (X_c, Y_c) 为圆心、 R 为半径画出察问域,编号 1~4 的三角形的质心在此察问域之内,从而成为候选三角形,记为 T_{ij} ($j=1,2,3,4$).

第 3 步,依次计算表征 T_i 和候选三角形相似程

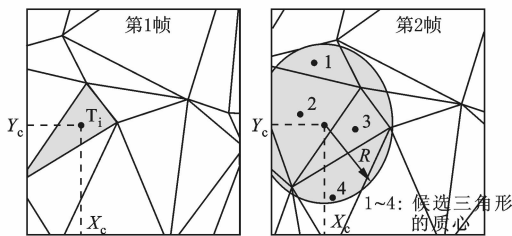


图 2 DT-PTV 算法原理

度的互相关系数

$$C_{ij} = \frac{S(T_i \cap T_{ij})}{(S(T_i)S(T_{ij}))^{1/2}} \quad (j = 1, 2, 3, 4) \quad (1)$$

式中: S 代表面积运算符; $\cap$ 确定 2 个三角形的重叠区域.本文采用了区别于文献[3]的重叠区域面积计算方法:对所有三角形内域赋 1,外域赋 0,再对计算相关的 2 个三角形进行“与”运算,则“1”像素个数即为交叠区域面积.经计算,此方法的计算效率比文献[3]提高了 25%左右.

第 4 步,选择最大 C_{ij} 对应的三角形(并满足 C_{ij} 阈值以及对应的惟一性),并以对应边长由大到小的顺序来匹配构成 2 个三角形的 3 对粒子.这样处理在 DT 网格前后无巨大突变以及粒子浓度适中的前提下是合理的^[3].接着对图 2 中第 1 帧图像的所有三角形重复第 1 到第 4 步计算,直至全部匹配完成.

1.3 适用于 DT-PTV 的伪矢量剔除

伪矢量一般不可避免,其生成原因包括低图像摄取质量以及算法缺陷,前者主要是因为粒子图像噪声和试验参数(粒子密度、形状等)的选取等因素的影响^[1].在算法方面,考虑到 DT 网络“一点同属多个三角”的基本特性,其初步计算结果表现为可能包括伪矢量在内的冗余矢量簇(见图 3),但产生冗余的原因也是剔除冗余的契机.考虑到 DT 网格按时间变化稳定,冗余矢量簇是可能的伪矢量和高频复现的真矢量的组合,故对有分歧的冗余矢量簇进行删除或者从数量概率的角度择优选取都是合

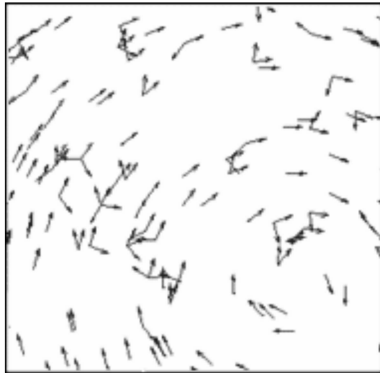


图 3 冗余矢量簇

理的.

引入运算模块(函数),包括最优选择模块(f_1)和清除模块(f_2). 对一个存在冗余(一对多和多对一)的匹配序列, f_1 运算的结果是保留出现频率最高的配对,而 f_2 则删除一切分歧性的结果(见图 4).

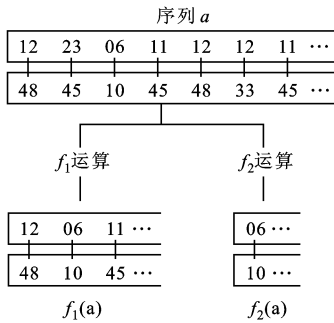


图 4 模块运算实例

由于 DT-PTV 运算存在 2 个层面的匹配序列,即三角匹配序列和粒子匹配序列,因此按照本文第 1.2 节中第 1、第 2 步所得到的三角匹配序列将不会出现一对多或者相同匹配重复出现的情况, f_1 失去效用,故引入反算概念:记第 1 步和第 2 步所得三角匹配序列为 A_B ,然后以第 2 帧图像为基础,重复第 1 步、第 2 步计算,得到三角匹配序列 B_A . 交换 B_A 行(或列),使其匹配形式为第 1 帧至第 2 帧,记为 A'_B . 合并 A_B 和 A'_B (合并符号为 $\cup$,下同),得到一对多和多对一均可能存在的新匹配 A . A 蕴涵着可能性的累积, f_1 和 f_2 对其均可运用. 更重要的是, A 肯定了 2 帧图像的同地位. A_B 和 A'_B 也可先分别进行计算再合并. 对于粒子匹配序列直接进行 f_2 运算,这遵循了“多个三角共同决定一个粒子匹配关系”特性. 经计算验证,在高浓度(低空间率, $P_3 \leq 262.144$)的流场,只采用 f_1 模块运算或不采用模块

运算所得结果中会出现大量的分歧矢量,准确率不到 75%.

是否“反算”以及模块处理多样性决定了三角匹配序列计算的多途径. 设最终三角匹配序列为 C_m ,表 1 列出 6 种处理途径.

表 1 三角层面匹配运算的 6 种途径

处理途径编号	处理途径 计算表达式	解释
W1	$C_m = f_2(A_B)$	无反算/清除
W2	$C_m = A_B$	无反算/无动作
W3	$C_m = A$	有反算/合并后无动作
W4	$C_m = f_2(f_2(A_B) \cup f_2(A'_B))$	有反算/各自清除 后合并再清除
W5	$C_m = f_1(A)$	有反算/合并后最优选择
W6	$C_m = f_2(A)$	有反算/合并后清除

2 试验及分析

2.1 试验流场

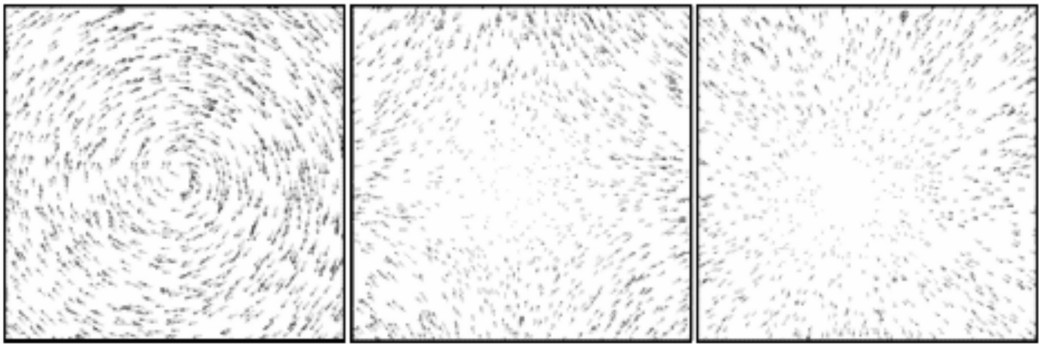
3 种自定义流场如图 5 所示,粒子随机分布,每种运动计算 4 种浓度,用平均空间率 P_v (单个粒子所占像素的平均数量)表示. 为了更加接近真实情况,均添加了数量等于 5% 图像颗粒总数的随机分布的噪声点. 3 种流场中三角层面的计算均采用表 1 的 6 种途径,而粒子层面的计算采用最优选择模块 f_1 .

2.2 试验结果及分析

图 6 为 DT-PTV 通过 6 条途径计算的自定义流场粒子匹配准确率 $\eta_{wi}(i=1 \sim 6)$. 3 种运动的计算结果反映出如下 6 个匹配准确率的优劣关系

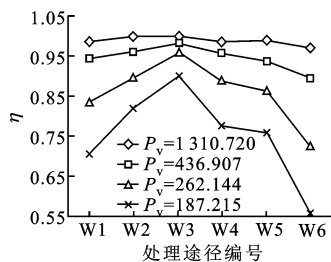
$$\eta_{w1} > \eta_{w2} > \eta_{w3} \approx \eta_{w4} > \eta_{w5} > \eta_{w6}$$

在较低空间率($P_v=187.215$)时通过途径 W3

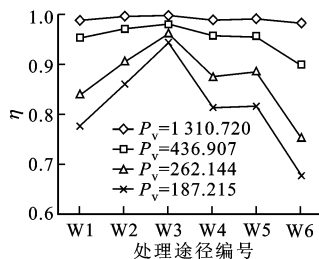


(a)等位移(5 像素)旋转运动 (b)位移(最大 5 像素)径向渐大双曲运动 (c)位移(最大 5 像素)径向渐大爆炸运动

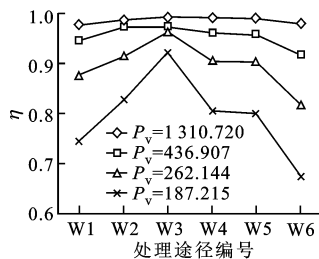
图 5 自定义流场



(a) 旋转运动



(b) 双曲运动



(c) 爆炸运动

图6 自定义流场粒子对匹配准确率

计算的匹配准确率仍然能保持 92% 左右,而途径 W6 的准确率随空间率下降衰减最为严重,最后不足 70%。通过全盘比较总结出 2 点:有反算优于无反算;三角层面匹配关系无动作优于有动作。

反算的结果是将三角层面匹配关系信息量扩大了近一倍,由于 DT 网格变化微小,因此扩大的信息量中对正确匹配关系的重复(经过 f_1 运算表现为对正确匹配存活率加强)明显多于新错误匹配关系的出现(经过 f_1 运算表现为对正确匹配抵消)。对三角层面匹配关系的动作(路径 W1、W4、W5、W6)均造成三角层面信息量萎缩,故对于 DT-PTV,应扩充三角层面匹配信息量并在粒子层面进行最优化选择,这与“一点分属多个三角”特性契合。将途径 W3 命名为概率择优式剔除法(简称 EPP)。

3 实际应用

3.1 试验内容

利用高速相机对大气边界层内沙床面跃移层沙

粒运动进行连续二维图像采集^[6],采用 DT-PTV 算法计算粒子匹配并采用 EPP 方法剔除伪矢量,在历时 75 ms 内采集了共 150 帧连续图像,并以此进行单颗轨迹的提取。

3.2 小内角三角形剔除

如图 7 所示,平坦沙床面会因点排列过平而出现小内角三角形,使得相关系数的计算存在较大误差。若增补若干离散点(在两帧时间间隔内行进的距离为算法察问域半径大小),如图 7 中的 P 点,则可有效剔除小内角三角形,与其相关的“矢量”也可直接删除而不影响计算结果。

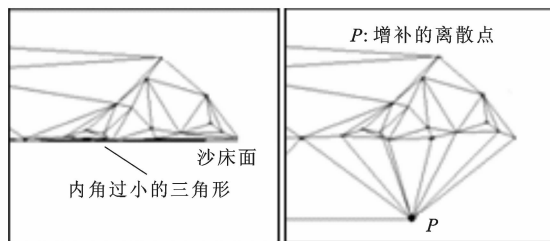
(a) 增补点 P 之前的 DT 网格(b) 增补点 P 之后的 DT 网格

图7 增补点消除小内角三角形

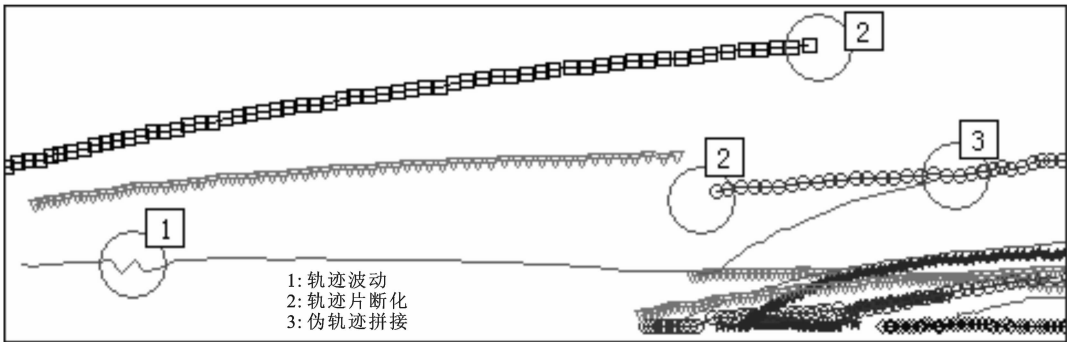
3.3 结果及分析

图 8 显示跃移层中的长度为 50~88 个单位颗粒的单颗轨迹。由图 8 可以看出,提取结果基本良好。流场左下区粒子浓度较大,颗粒的轨迹长度普遍小于 50 个单位颗粒,故无显示。提取轨迹中的轨迹波动(图 8a 中标号 1)和轨迹片段化(图 8a 中标号 2)分别由孤立点和轨迹点漏拍引起,可通过改进图像采集手段和图像前处理方法来避免。对于伪轨迹拼接(图 8a 中标号 3),由于算法无法反映沙粒真实物理碰撞和未来走向,则应舍弃。

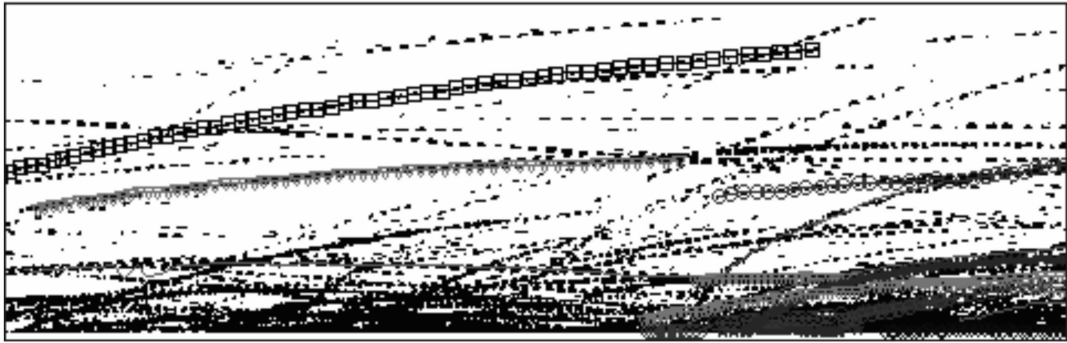
4 结论

(1)在 DT-PTV 三角层面互相关系数的计算中,用二值化的“与”算法代替多边形面积法来计算 DT-PTU 三角层面互相关系数,计算效率约是传统算法的 1.25 倍。

(2)建立起适用于离散相 DT-PTV 测速的多途径去伪并确定了最佳去伪途径:三角层面的信息最大积累(反算)至粒子层面的最优选择。对较低空间率($P_v = 187.215$)的随机分布粒子场,进行 DT-PTV 计算匹配并用 EPP 方法去伪,能得到 92% 左右的匹配准确率。



(a)提取的轨迹



(b)真实轨迹

图 8 提取轨迹以及与真实轨迹对比

(3)在对风洞中风沙两相流床面跃移层测速和单轨迹提取时,用自定义底层循环行进(达到图像最右端后自动返回最左端)点有效解决了小内角三角形问题.分析了单轨迹中典型问题并给出建议:提高图像采集手段可提高所获图像的信噪比,并相应降低了轨迹片断化的可能性,对自行拼接而形成的伪轨迹应直接予以删除.

参考文献:

[1] 阮晓东, 吴锋, 杨化勇, 等. 一种自动检测 PIV 数据中误矢量的算法[J]. 机械工程学报, 2004, 40(7): 89-92.
RUAN Xiaodong, WU Feng, YANG Huayong, et al. Algorithm for automatically detecting spurious vectors in PIV data [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(7): 89-92.

[2] SONG Xiangqun, YAMAMOTO F, IGUCHI M, et al. A new cross correlation algorithm for PIV based on

Delaunay tessellation [J]. Journal of the Flow Visualization Society of Japan, 1992, 1(2): 19-22.

[3] SONG Xiangqun, YAMAMOTO F, IGUCHI M, et al. A new tracking algorithm of PIV and removal of spurious vectors using Delaunay tessellation [J]. Exp Fluids, 1999, 26(4): 371-380.

[4] ASTOLA J, HAAVISTO P, NEUVO Y. Vector median filters [J]. Proc IEEE, 1990, 78(4): 678-689.

[5] WESTERWEEL J. Efficient detection of spurious vectors in particle image velocimetry data [J]. Exp Fluids, 1994, 16(3/4): 236-247.

[6] WANG Dawei, WANG Yuan, YANG Bin, et al. Statistical analysis of sand grain/bed collision process recorded by high-speed digital camera [J]. Sedimentology, 2008, 55(2): 461-470.

(编辑 王焕雪)