

文章编号:0559-9350(2017)03-0367-06

表面流场的 PyrLK“角点-质心”法在复杂流场中的应用

涂 洋^{1,2}, 曹文洪^{1,2}, 刘春晶^{1,2}, 王向东^{1,2}

(1. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100048;

2. 水利部水沙科学与江河治理重点实验室, 北京 100048)

摘要: 粒子匹配方法是准确获取表面流场的关键。本文详细阐述了新近提出的基于光流算法 PyrLK“角点-质心”法的基本原理及具体实现过程, 采用该方法对弯道水槽中较复杂的表面流场进行计算, 并与目前较为先进的匹配几率法进行了对比。结果表明, 对于本文所示的复杂流场, 匹配几率法计算结果很大程度上依赖于对运动矢量允许偏差等参数的选取, 且还会出现由于提取到非示踪粒子的质心并使其参与计算而产生的误匹配; 而 PyrLK“角点-质心”法只与运动图像特征信息相关, 无示踪粒子特定匹配规则的假定, 在复杂流场中能较好地实现粒子的跟踪与匹配。与匹配几率法相比, PyrLK“角点-质心”法对于复杂表面流场计算具有更好的适应性。

关键词: 表面流场; 复杂流场; 金字塔光流法; 匹配几率法; PTV

中图分类号: TV148

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20160962

1 研究背景

粒子跟踪测速技术 PTV (Particle Track Velocimetry) 作为一种无接触式的表面流场测量方法, 具有对流场无扰动、可实现全流场瞬态测量以及测量结果准确直观的优点, 目前在水力学及河流动力学的研究中已得到广泛应用。PTV 主要包括粒子识别与粒子匹配两部分, 其中粒子匹配方法是该技术的关键。绝大部分的 PTV 匹配方法, 需要假定示踪粒子的匹配规则以建立粒子匹配计算模型, 并以图像分割后所提取出示踪粒子的质心作为计算模型的输入。在这种处理方式的基础上, 国内外学者提出了相应的计算模型: 单独对单个粒子配对的最近邻法; 结合附近粒子对单个粒子进行匹配的匹配几率法^[1]; 对群体粒子整体匹配进行研究的算法^[2]等。总体来说, 这些算法的匹配结果受计算模型中匹配规则假设条件的影响较大, 难以找到一种通用的匹配规则假定来满足所有的表面流场计算。如最近邻法假定粒子运动的位移要小于该粒子与周围其他粒子的距离; 匹配几率法则假定在一定范围内各示踪粒子的运动方向基本一致。这些假设在有些流场中并不符合真实情况, 尤其是复杂流场。胡涛^[3]曾用计算机模拟生成了波浪流场以及漩涡流场, 并将这几类匹配算法应用在这种模拟流场中进行对比, 对比结果显示匹配几率法在该流场中的匹配结果均优于其他方法。但此对比结果是基于计算机生成的理论图像, 所生成的理论流场运动趋势仍比较一致, 示踪粒子之间的运动矢量差异并不大。

光流是空间运动物体在成像平面上像素运动的瞬时速度, 光流法通过确定图像序列中像素强度数据的时域变化、空域变化和相邻帧之间的相关性来确定图像序列中像素位移情况, 从而获得相邻帧之间目标运动矢量, 也可根据光流值对目标进行跟踪。光流法不需要假设图像中运动目标的匹配

收稿日期: 2016-09-11; 网络出版日期: 2016-12-27

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20161227.1124.005.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(11472310); 国家科技支撑计划课题(2013BAB12B01); 国家国际科技合作专项(2015DFR70980)

作者简介: 涂洋(1986-), 女, 黑龙江齐齐哈尔人, 博士生, 主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail: tyiwhr@126.com

通讯作者: 曹文洪(1963-), 男, 黑龙江黑河人, 教授级高级工程师, 主要从事江河治理与水土保持研究。E-mail: erosion@iwhr.com

规则，只根据图像像素信息变化来确定运动信息。涂洋等基于光流理论中 PyrLK 法提出了一种名为 PyrLK“角点-质心”法的表面流场计算方法，介绍了采用 Opencv 平台实现该方法的计算机程序，同时在较简单的顺直流程中初步实现了表面流场计算^[4]。

本文进一步详细介绍了 PyrLK“角点-质心”法的具体原理及算法实现过程，并开展了弯道水槽水流试验，采用 PyrLK“角点-质心”法计算了表面流场，并将计算结果与匹配几率法进行了对比，进一步深入研究 PyrLK“角点-质心”法的特点及对复杂流场的适用性。

2 PyrLK“角点-质心”法的实现原理

在光流算法中，基于梯度的光流法应用最为广泛，并分为稠密光流计算与稀疏光流计算。稠密光流，如 Horn-Schunck 方法，需计算每一个像素点的光流，计算量大、耗时长，多用于理论研究^[5]；而实际处理图像中多使用只计算角点的光流的稀疏光流法，如 Lucas-Kanade 方法(L-K 法)^[6]、金字塔 Pyramid Lucas-Kanade 方法(PyrLK 法)等^[7]。PyrLK“角点-质心”法是以 PyrLK 法作为基础，因该方法在一定程度上解决了其他光流算法中物体运动距离不易过大的问题^[5]；且在当采用随意剪裁的纸片作为示踪粒子时，这种示踪粒子的角点信息丰富，更有利于 PyrLK 法的实现。

2.1 PyrLK 法对示踪粒子角点的跟踪 PyrLK 法属于稀疏光流法，稀疏光流只针对兴趣点及兴趣点周围的小窗口局部信息进行计算，计算结果称为角点光流。因此，在实现 PyrLK 法跟踪计算之前，首先需提取图像中的角点。本文选用 Shi-Tomasi 的方法进行角点提取^[8]，并通过程序限制提取角点总数与角点之间间距来减少无用角点。该方法所提取的角点基本位于示踪粒子边缘。

PyrLK 法是在传统的 L-K 方法的基础上实现的，L-K 法有三个基本假定^[5]：亮度恒定；运动为“小运动”；空间一致性。由于传统的 L-K 法只有在小位移的条件下才满足灰度连续性的假设，当有大位移时，角点会移出窗口造成计算失败。为了使光流法同样适用于快速移动的目标，Bouguet 在 L-K 算法的基础上进行金字塔分层迭代以计算光流^[7]。首先将相邻两帧图像分别进行金字塔式的分层（见图 1^[5]），最底层为原始图像，分辨率最高，最高层图像分辨率最低。上一层图像由下一层的图像通过低通滤波的方式获得，以防止图像失真。建立好图像金字塔后，对每一层的前后两帧图像进行传统 L-K 计算， L 层计算结果作为 $L-1$ 层的光流计算的初值，再对 $L-1$ 层继续使用 L-K 计算光流，直到最后一层。这样的处理方式可以看出，在计算一个大的光流时，每一层的光流都是一个很小的值，这样就可以用一个小窗口来处理大的像素平移^[5]。金字塔建立的层数越多，可跟踪的角点的光流值就可以越大，因此可初步估计图像中光流值的大小来选择金字塔层数。

2.2 由角点跟踪转化为质心匹配 PyrLK 法得到的是角点光流，实现了对运动的角点跟踪。由于示踪粒子各角点位置处在流场中的流速不完全相同，故示踪粒子在平移的运动过程中还可能会发生旋转，如图 2 所示，因此直接采用 PyrLK 法计算得到的角点光流作为示踪粒子的运动结果并不能表示示踪粒子的实际运动，须在实现示踪粒子角点匹配跟踪后进一步提取示踪粒子的质心进行匹配。

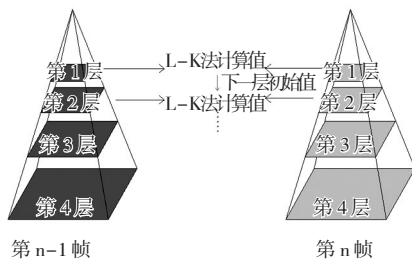
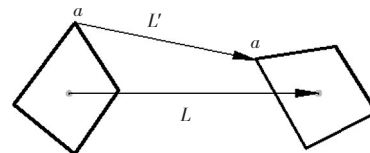


图 1 PyrLK 法高斯金字塔模型



注： L 为示踪粒子运动的实际距离， L' 为示踪粒子角点运动距离

图 2 示踪粒子运动

对于角点跟踪向质心匹配的转化，本研究采用的具体方法如下：通过观察分割后的图像直到凸显所有示踪粒子来确定合理的阈值，进而对图像进行二值化分割处理，分割、凸显出图像中包含示

踪粒子在内的实体轮廓；提取出各个实体轮廓的几何图形之后，需要针对每一个示踪粒子的角点判断其与各个实体轮廓之间的位置关系，以确定各个角点从属的示踪粒子轮廓，最后运用几何矩算法得到从属示踪粒子轮廓的质心，进而实现示踪粒子的质心匹配。

判断各个角点从属的示踪粒子轮廓是本文算法的关键，具体实现算法流程如图3所示：针对每一个角点，循环判断图像中各个实体轮廓与该角点之间的位置关系；当角点在轮廓内或轮廓上时，可直接确定此角点与该轮廓是从属关系，进而计算出轮廓质心以实现角点对应示踪粒子质心位置的确定；当角点在轮廓外时（这是由于二值化处理和轮廓提取算法的误差可能导致提取示踪粒子轮廓的误差，致使角点位于其从属示踪粒子轮廓之外），这种情况下可寻找出距离角点最近的轮廓，并认为该轮廓即是角点从属的示踪粒子的轮廓。在采用PyrLK“角点-质心”法时，一个示踪粒子可能会有多个角点被跟踪，但因其从属于同一个示踪粒子的轮廓，因此任意一个示踪粒子的多个角点都只会对应该粒子的同一个质心。

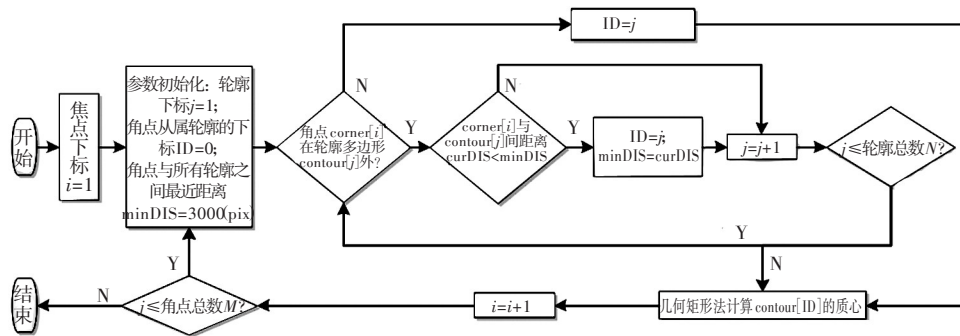


图3 PyrLK“角点-质心”法流程

3 复杂流场中的应用

研究在中国水利水电科学研究院大兴实验基地开展了弯道水槽实验，并对所拍摄图片进行分析计算。实验采用的摄像设备为DH-IPC-HF3300P-P型号网络枪型摄像头，像素数为1920×1080。示踪粒子为随机剪裁的白纸，示踪粒子大小为3 cm×3 cm左右。图像均采用张正友标定法^[9]进行摄像机标定与图像校正后的图片。为了进一步增加流场的复杂性，在弯道水槽中放置了障碍物，使得水流在纵向流动过程中又同时伴随着剧烈的横向摆动，流场情况复杂，各示踪粒子运动矢量差异较大。图4是复杂流场下的前后两帧图片，图5是通过实际观察每个示踪粒子的运动轨迹，并用计算机计算显示出各示踪粒子的质心，再将具有匹配关系的粒子的质心进行连线，从而得到每个示踪粒子实际位移情况图。

针对复杂流场的位移情况，选用了4层金字塔进行计算，计算窗口为7×7(pix)角点总数限定为500个，角点之间间距最大为15(pix)。由于图像中存在光线变化、噪声以及流场外的杂物等情况，这些情况会产生一些错误流速矢量。错误矢量的删除一般通过人工判断以及自动判断两种方式^[10]。本文将自动判断方式中根据设定的最大最小流速值进行判断的方法加入到整个计算过程中，解决了错误矢量删除问题。设置的示踪粒子运动位移区间为[0~50] pix。图像分割阈值为110。图6为PyrLK“角点-质心”法所计算出的示踪粒子位移矢量图，部分速度计算结果见表1。

通过图6与图5的结果对比可以看出，该算法在复杂流场中计算结果较好，示踪粒子的匹配结果均正确。表明该算法对流场运动类型并不敏感，即可用于简单流场计算，也可用于各示踪粒子运动矢量差异较大的复杂流场计算。在分析计算中，也存在个别一些错误的跟踪结果以及跟踪失败，主要有以下情况：(1)上文提到的光照变化和图像噪声问题，使一些实际静止的图像区域角点处出现了光流，并且光流对应的前后两帧图像中角点查找到不同的所属轮廓；(2)识别出的角点在前后两帧图像中发生了较大的变化，导致PyrLK法对角点跟踪错误或跟踪失败(图6的正方形标识)。但总体来



(a) 复杂流场前一帧图像



(b) 复杂流场后一帧图像

图4 复杂流场图像



图5 复杂流场中示踪粒子实际位移图



图6 PyrLK“角点-质心”法在复杂流场下匹配结果

表1 PyrLK“角点-质心”法在复杂流场下的示踪粒子部分运动速度计算结果

x 向坐标	y 向坐标	x 向位移	y 向位移	x 向坐标	y 向坐标	x 向位移	y 向位移
1215.70	511.10	13.056	0.768	955.21	738.62	20.736	-3.072
1019.61	626.64	13.824	-2.304	1162.65	330.83	26.112	4.608
1051.60	597.03	15.36	13.056	1246.76	557.60	13.824	-2.304
1236.00	519.58	14.592	5.376	574.77	383.44	37.632	-1.536
596.50	371.23	36.864	-3.84	1267.04	338.32	30.72	5.376
1133.49	372.90	29.184	3.072	1367.40	381.82	34.56	8.448
1159.85	488.59	26.112	12.288	1384.71	398.25	39.168	8.448
1037.48	737.74	26.112	0.768	592.27	346.27	36.864	-5.376
1117.38	661.11	31.488	13.056	1311.99	699.73	32.256	-6.912
1181.80	566.76	16.128	29.952	1502.51	506.72	26.88	20.736

注：1.表中单位均为像素；2.计算结果坐标系方向见图6左上方，图片左上角为坐标系原点

说，这些情况导致的错误矢量数量较少，并且多发生在非示踪粒子的部分，在对结果进行自动判断后很容易通过设定的规则将其自动剔除或手动剔除。

4 PyrLK“角点-质心”法与匹配几率法对比

匹配几率法具有运算速度快、匹配精度高的优点，是PTV以往算法中无论在简单流场还是复杂流场下匹配效果较优的一种^[3]，本文根据实际流场情况选择该方法与PyrLK“角点-质心”法进行对比，进一步分析PyrLK“角点-质心”法的特点。匹配几率法的计算模型有三个假定^[3]：所有示踪粒子在两帧图像内的位移小于一个确定值；粒子邻域范围内的其他示踪粒子速度矢量基本相同；邻域内粒子矢量之差的模在一个较小的误差内。基于假设条件，该匹配算法包含了粒子运动最大位移、相似运动轨迹范围、运动矢量允许偏差及计算过程所需的迭代系数共5个参数。由基本假设条件可看出，匹配几率法适用于示踪粒子运动矢量基本一致的流场，而在水面流向复杂的流场中假设条件则失去合理性，同时该方法三种假设情况的临界值较难选取。

针对实验特点，本文首先对图像进行二值化分割处理，然后进行图像中分割出的实体轮廓提取

以及各轮廓质心位置的计算，最后采用PTV匹配几率法进行质心匹配。为便于对比，仍选用图4所示的两帧图像进行分析。选择不同的参数进行计算，见表2。选择方法是根据对图像的大致判断，初步选择A组参数，再以A组参数为基准，进行其中两个参数的灵敏度分析，得到匹配效果较理想的B组参数。

表2 匹配几率法计算参数

	最大位移	相似运动轨迹范围	运动矢量允许偏差	迭代系数 a	迭代系数 b
A组	50	160	5	0.3	3
B组	50	160	13	0.3	3

注：其中数字单位均为像素

图7是复杂流场下采用A组参数和B组参数运用匹配几率法的匹配结果。图7的匹配结果显示，除了未得到匹配的示踪粒子外，该方法在复杂流场下出现了错误匹配(见图7的箭头所示)。

对比图7可知运动矢量允许偏差参数对匹配几率法的影响，该参数的影响在复杂流场中的体现的更为明显。当复杂流场中各示踪粒子运动矢量偏差较大时，该参数如果设置得过小则会导致多数粒子不能匹配成功(见图7(a)中未匹配粒子)。此外在复杂流场下，也很难选出合适的相似运动轨迹范围参数以及运动矢量允许偏差参数，这两个参数选择的不够合理则会导致粒子跟踪匹配错误(见图7中箭头所指部分)。以上分析可见匹配几率法对相似运动轨迹范围参数的选择较为敏感，匹配结果受匹配模型的影响较大，而现实流场的一系列图像中示踪粒子分布密度和速度方向不断在变化，若要得到这一系列图像较好的匹配结果则需要采用不断变化的计算参数，采用单一参数进行图像批量自动化处理，则难以获得完全正确的结果。而PyrLK“角点-质心”法基于光流理论，计算结果不依赖于匹配规则的假定，只与图像像素信息相关。因此，从图6与图7对比结果可看出，PyrLK“角点-质心”法在复杂流场下对示踪粒子的匹配均优于匹配几率法。

图7中的椭圆标识显示的是非示踪粒子质心在计算模型中参与计算而导致的误匹配现象，主要原因是在图像分割过程中除示踪粒子外也分割出了图像中的其他部分，与示踪粒子一起被提取了质心并参与了计算，从图7中的椭圆标识可看出，这种误匹配数量在有些图像中是大量存在的。相比而言，PyrLK“角点-质心”法只允许存在匹配关系的示踪粒子的质心参与计算，这种匹配方式可以避免采用PTV匹配几率法时出现上述的误匹配情况，能够有效提高了计算结果的有效性。

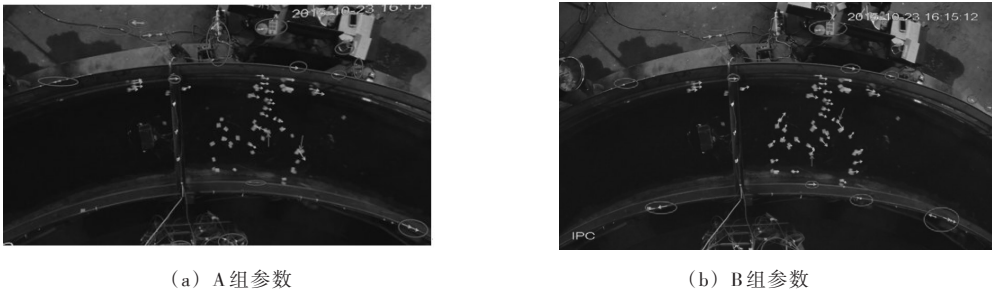


图7 复杂流场下匹配几率法计算结果

5 结论及展望

PyrLK“角点-质心”法采用Shi-Tomasi法提取示踪粒子角点，以PyrLK法实现对角点跟踪，进而实现示踪粒子质心匹配，这种计算方法不依赖于对匹配规则的假定，对流场表面运动的一致性要求较低，在复杂流场的表面流场计算中同样适用，其在复杂流场下的匹配效果也优于匹配几率法。此外，先锁定粒子匹配关系再提取质心进行匹配的处理方法，可避免以往方法中先提取质心再进行匹配而产生大量的误匹配，具有一定的优势。

由于假设条件和计算原理的限制，使PyrLK“角点-质心”法仍存在一些值得注意的地方。PyrLK“角点-质心”法对图像像素信息变化敏感，角点在前两帧图像中如果发生较大变化会导致此示踪粒子不能

得到匹配或错误匹配;此外,光照强度、图像噪声等问题也同样会产生一些错误匹配。可见保持良好与稳定的光照强度以及提高图像质量有利于PyrLK“角点-质心”法在PTV技术中计算出更准确的结果。

参 考 文 献:

- [1] BAEK S J, LEE S J . A new two-frame particle tracking algorithm using match probability[J] . Experiments in Fluids, 1996, 22(1): 23-32 .
- [2] 宋松和, 李荫藩 . 二维无结构三角形网格的高分辨率大粒子有限体积方法[J] . 数值计算与计算机应用, 1997, 18(1): 46-52 .
- [3] 胡涛 . PTV 匹配算法的对比分析[D] . 北京: 清华大学, 2010 .
- [4] 涂洋, 刘春晶, 曹文洪, 等 . 基于 OpenCV 实现金字塔光流法对表面流场的计算[J] . 中国水利水电科学研究院学报, 2016, 14(3): 224-228 .
- [5] BRADSKI G, KAEHLER A . Learning OpenCV: Computer vision with the OpenCV library[M] . O'Reilly Media, Inc . , 2008 .
- [6] LUCAS B D, KANADE T . An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision[C]// International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI) . 1981 .
- [7] BOUGUET J Y . Pyramidal implementation of the Lucas Kanade feature tracker description of the algorithm[J] . Intel Corporation, 2001(5): 1-10 .
- [8] SHI J, TOMASI C . Good Features to Track[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition . 1994 .
- [9] ZHANG Z . A Flexible New Technique for Camera Calibration[C]//IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence . 1998 .
- [10] 禹明忠 . PTV 技术和颗粒三维运动规律的研究[D] . 北京: 清华大学, 2002 .

Application of PyrLK “corner-mass center” method for surface flow field calculation in the complex flow field

TU Yang^{1, 2}, CAO Wenhong^{1, 2}, LIU Chunjing^{1, 2}, WANG Xiangdong^{1, 2}

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin,
China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China;

2. Key Laboratory of Hydraulic and Sediment Science and River Harnessing of the Ministry
of Water Resources, Beijing 100048, China)

Abstract: The method of particles matching is the key to obtain surface flow field value accurately. This paper expounds in detail on principle and realization course of the newly proposed PyrLK “corner-mass center” method based on the optical flow algorithm. Using the PyrLK “corner-mass center” method, the complex surface flow field in the bend channel is calculated, and compared with the advanced method at present called matching probability method. The results indicate that, for the complex flow field shown in this paper, the calculation results of the matching probability method rely on the parameters selected to a large extent such as motion vector permissible variations, and generate the error matching which occurs in implementation process of previous PTV technology owing to mass centers of some non-tracer particles are extracted and used to calculation, because there will be extracted to the center of mass and make them participate in the calculation of tracer particles and the error matching. While the PyrLK “corner-mass center” method only related to image information features and does not rely on the assumption of tracer particle match rule, it can be better in realizing the tracking and matching of tracer particles in the complex flow. Compared with the matching probability method, this method has a better adaptability in the calculation of complex flow field where the tracer particles have large differences in the displacement vector.

Keywords: surface flow field; complex flow field; Pyramid LK optical flow method; the matching probability method; PTV

(责任编辑: 李福田)