

A Modified Optical Flow Algorithm Based on Bilateral-Filter and Multi-Scale Analysis for PIV Image Processing*

Baocheng Shi¹, Jinjia Wei^{1#}, Mingjun Pang²

¹State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an

²School of Mechanical Engineering, Changzhou University, Changzhou

Email: shibaoch@126.com, #jjwei@mail.xjtu.edu.cn

Received: Mar. 18th, 2013; revised: Apr. 1st, 2013; accepted: Apr. 21st, 2013

Copyright © 2013 Baocheng Shi et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: PIV post-processing techniques have a great influence on the success of flow field measurement and have aroused the researchers' wide concern. The traditional correlation algorithms have their congenital defects. In the present study, a modified optical flow algorithm is proposed to overcome these deficiencies based on bilateral-filter and multi-resolution analysis for PIV image processing. The algorithm is designed on the basis of the principle of multilayer segments, in which the isotropic diffusion method is employed to calculate the low-resolution layer of the image and the nonlinear filtering method is used to process the high-resolution layer. This new algorithm can reduce image noise effectively and maintain the details of the image boundary. The algorithm is applied to images of actual up-channel flow, and the results also confirmed that the algorithm proposed in the present study has good performance and reliability for post-processing PIV images.

Keywords: Optical Flow Algorithm; PIV; Multi-Resolution Analysis

一种基于多尺度分析和非线性滤波的光流算法*

史宝成¹, 魏进家^{1#}, 庞明军²

¹西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 西安

²常州大学机械工程学院, 常州

Email: shibaoch@126.com, #jjwei@mail.xjtu.edu.cn

收稿日期: 2013年3月18日; 修回日期: 2013年4月1日; 录用日期: 2013年4月21日

摘要: PIV 后处理技术对于 PIV 流场实验测量的结果有着重要的影响而成为研究热点。传统的互相关算法有着许多先天缺陷, 本文提出的基于多尺度分析和非线性滤波的修正光流算法能够克服这些的缺陷, 该算法以多层细化理论为基础, 对低分辨率序列采用同性扩散算法, 而高分辨率序列采用非线性扩散方法。同时, 该算法被应用到实际测量的二维向上槽道流 PIV 图像中, 结果表明该算法对于 PIV 图像的后处理具有良好的性能和可靠性。

关键词: 光流算法; PIV; 多尺度分析

1. 引言

PIV 计算最常用的方法为基于图像相关匹配的方

法, 但基于相关方法的 PIV 算法本身存在一些先天的缺陷, 例如: 前后时间内邻域里的粒子出现丢失或出现未知新粒子时相关计算结果的峰值不一定对应真实的运动位移; 基于相关法得到的运动矢量只是概率

*基金项目: 国家自然科学基金资助项目(NO. 51225601)。

#通讯作者。

上的最大可能位移；粒子运动的速度很慢时采用较大的窗口进行相关搜索会出现多峰值的现象。对于 PTV 也存在类似的问题。近年来基于光流的 PIV 计算受到人们越来越多的关注^[1-3]，由于光流方法是将整个运动矢量场作为一个整体连续函数进行计算，所以从理论上讲可以克服上面所提到的问题。

自 1981 年 Horn 和 Schunck 建立光流方程^[4]，掀起光流算法研究的热潮后，人们经过大量的研究，基于不同的理论基础提出了各种不同的光流计算方法，算法性能各有不同。在经典 HS 方法中，图像中两点间的灰度变化被假定为线性的，而实际上灰度变化是非线性的。针对灰度估计不准确造成的偏差问题，桂本焯等^[5]提出了一种改进 HS 算法，得到较好的计算结果，并能明显减少光流计算的迭代次数。对于算法的跟踪定位问题，杨叶梅^[6]将基于梯度的 Horn-Schunck 光流算法与最大类间方差的图像分割法相结合，提出一种高斯金字塔的改进光流法。张杨等^[7]提出了一种基于粒子预测和光流匹配相结合的目标跟踪算法。为了提高低分辨率图像之间的位移估计精度，韩军和张东^[8]提出了全局运动的多分辨率光流估计算法；张泽旭等^[9]通过最小 RMSE 测度的多尺度微分光流算法使计算精度最少提高了 2.6%。卢宇等^[10]提出了一种基于背景配准的光流计算方法。该方法具有背景配准步骤的光流检测法较其他传统的光流算法相比，在精度方面具有较为明显的优越性。

总之，光流技术发展到现在已经取得了丰硕的成果^[11-14]，但是同时也还存在一些不足，如：基于梯度的 Horn-Schunck(Horn and Schunck, 1981)全局平滑法^[4]、Lucas-Kanade(Lucas and Kanade, 1981)局部平滑法^[15]和 Nagel(Nagel and Enkelmann, 1986)的有向平滑法^[16]。这些方法虽然能得到一个致密的光流场，但是这种微分法必须建立在雄厚的数学理论上，计算量大，并且对噪声比较敏感。因此，本文在前人研究的基础上提出了一种新的光流算法基于多尺度分析，该算法采用多层细分的原则，对于图像低分辨率层采用各相同性扩散方法，对于高分辨率层采用非线性滤波的方法，该方法继承了非线性扩散在图像噪声抑制和保持图像的边界细节方面的优势。

2. 基于非线性滤波和多尺度分析的修正光流算法(MOFBM)

2.1. MOFBM 算法基础

2.1.1. 非线性扩散

非线性扩散过程可以通过非线性滤波来实现，在图像处理中两者在大多数情况下是等效的^[17]。如果只考虑实际计算中的离散情况，光流计算中的扩散部分可以表示为 $\Delta \mathbf{V} \cong \langle \mathbf{V} \rangle - \mathbf{V}$ 。局部平滑算子 $\langle \cdot \rangle$ 可以看作一非线性滤波，因此光流场的非线性扩散方程可写成

$$\partial_t \mathbf{V} = \langle \mathbf{V} \rangle - \mathbf{V} - R(\mathbf{V}) \quad (1)$$

从方程(1)可以看出，如果基于(1)式来完成光流计算，可以避免扩散张量的设计，而改为设计非线性滤波器 $\langle \cdot \rangle$ ，这样就可以避免光流场局部结构张量的计算。本文引入一种针对光流计算的改进型的矢量非线性滤波器^[18]Bilateral-Filter。它同时考虑了图像局部像素几何关系和像素灰度差异，该滤波器计算和设计相对简单，可以在有效抑制图像噪声的同时较好地保持图像的边界细节。

2.1.2. 多尺度分析

多尺度分解方法是基于多分辨率分析的思想将图像分解成不同的分辨率级别，随着级别的增加，分辨率依次递减，整个结构呈金字塔型^[19,20]。在多尺度表示下的光流计算，在较低分辨率的尺度上迭代收敛的速度相当快，其计算所得到的值可以作为更高分辨率的尺度的运算初始值。多尺度方法能够给出比传统的单分辨率方法更好的结果，特别是在流速相对较大，且灰度变化较小的情况下更是如此。

2.1.3. 最优速度因子

利用高斯金字塔分解方法，将两个相邻时刻的图像 $f_1(x, y)$ 和 $f_2(x, y)$ 分别分解成不同尺度的图像层，用 $f_1^l(x, y)$ 和 $f_2^l(x, y)$ 表示。选择不同的映射因子 $\beta(1, \sqrt{2}, 2, \sqrt{5}, 3, \sqrt{10})$ ，将第 $l(l \neq 0)$ 分辨率层的流速 u_l 映射到第 $l-1$ 层，得到第 $l-1$ 层的流速 $u_{l-1} = \beta \cdot u_l$ 。基于 u_{l-1} 和 $E_1^{l-1}(x, y)$ 可以得到该层次上对 $t = 2$ 时刻图像的估计 $\hat{f}_2^{l-1}(x, y)$ ，根据 RMSE 误差公式，则得到第 $l-1$ 层关于图像 f_2 的 RMSE

$$RMSE_{\beta}^{l-1} = \sqrt{\frac{\sum_{x,y} (f_2^{l-1}(x, y) - \hat{f}_2^{l-1}(x, y, \beta))^2}{M \times N}} \quad (2)$$

由公式可以看出，不同 β 值的 RMSE 是不一样的，

RMSE整体上反映了估计图像与真实图像之间的接近程度，因而可以作为衡量映射因子的很好的测度，最小的RMSE反映了估计图像对真实图像的最佳逼近，此时，对应着最佳的映射因子。

2.2. 算法的实现

假设原始图像被分成 N 个不同的图像系列 $I^{(n)}(x,t)$ ，($I^{(0)}(x,t)$ 为原始图像)。在改进算法中，对于低分辨率图像序列采用各相同性扩散方法^[21] $D(V, \xi, \zeta)$ ；而对于高分辨率图像序列，选用非线性滤波公式^[17] $D(V, \xi, \zeta)$ 。 D 和 R 随尺度变化更新。算法的计算过程能用以下流程图表示(图 1~3)。

3. 算法验证

3.1. PIV 图像的实验获取

获取 PIV 图像的实验装置^[22]如图 4 所示。实验时，贮存在水箱中的自来水由一个不锈钢离心泵增压后、流经质量流量计、沉降室、二维槽道、扩散段、阀和管道后，回到水箱。为了破坏大尺度的湍流结构、稳定槽道入口处的流动，在沉降室内设有一个多孔管和一个过滤器。而且在槽道的出口处设有一个扩散器。扩散器的设置可以稳定槽道出口处的尾流，实验过程

中，排气阀始终保持常开状态。测试槽道、沉降室和扩散器均由有机玻璃制成。PIV 测试位置距气泡发生器约 1500 mm。图 4 还展示了 PIV 测量系统和坐标设置， x 、 y 和 z 轴分别对应主流方向、壁面法向和翼展

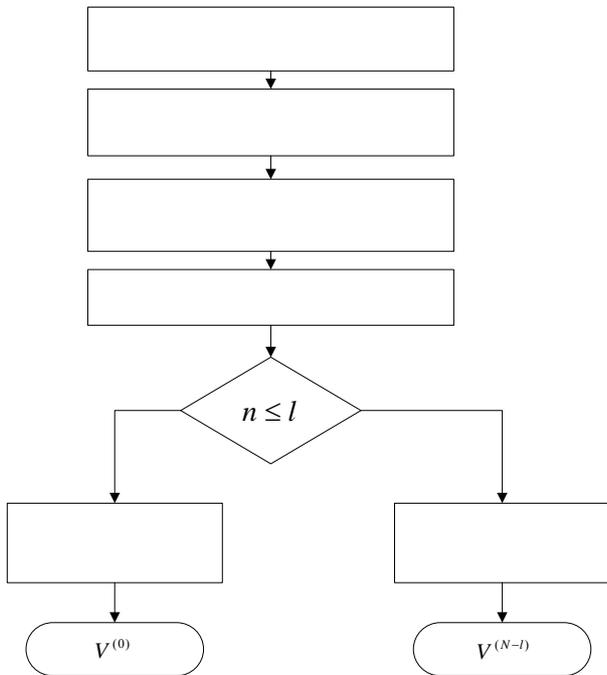


Figure 1. Flowchart of the MOFBM algorithm
图 1. MOFBM 算法流程图

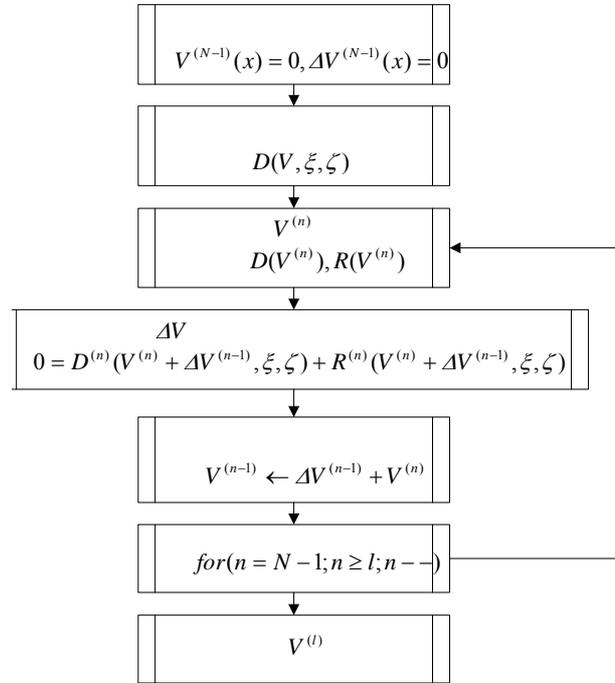


Figure 2. Flowchart of the isotropic optical flow algorithm
图 2. 同性光流算法流程图

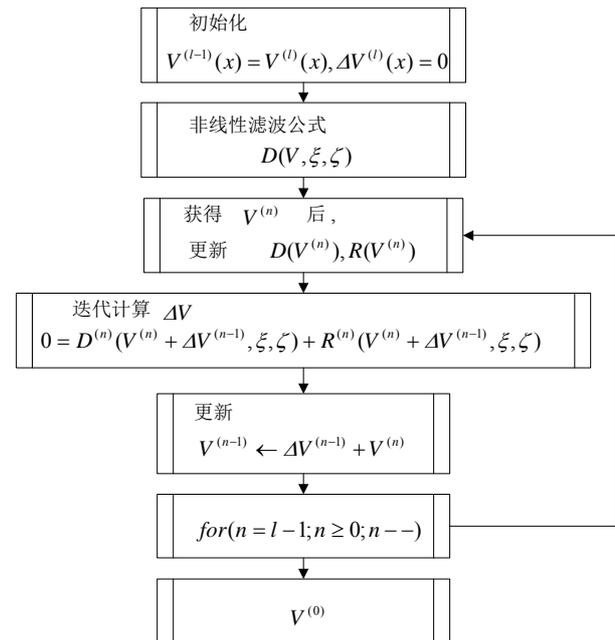


Figure 3. Flowchart of the nonlinear diffusion optical flow algorithm
图 3. 非线性光流算法流程图

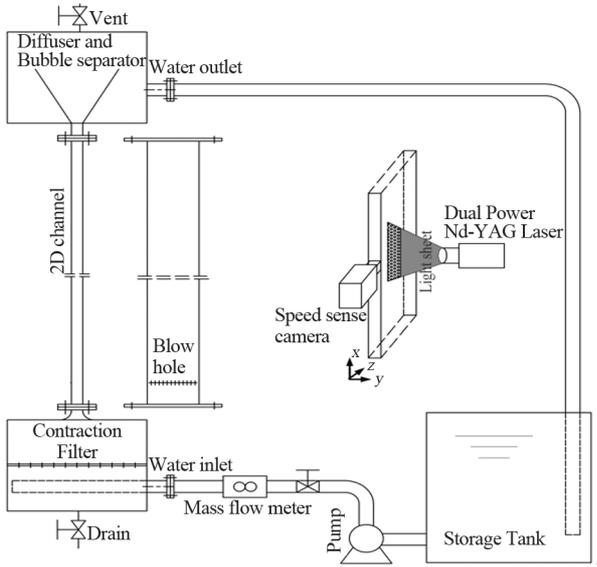
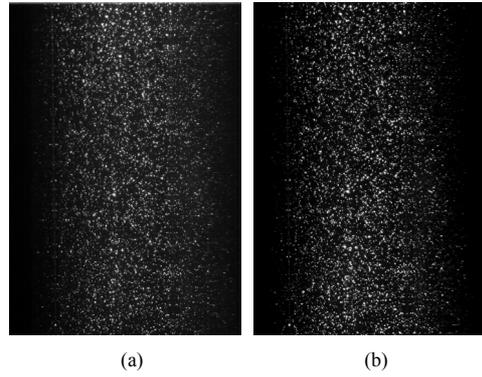


Figure 4. Experimental apparatus used for PIV images
图 4. 用来获取 PIV 图像的实验装置

方向。测量时，片光与壁面法向平行(y 方向)，PIV 相机镜头轴线与展向平行(z 方向)，二者始终保持为垂直状态。为了保证流动为二维平面流动，不受展向壁面的影响，将测量平面选在展向上的中间位置。PIV 系统购自丹麦丹迪动态公司(Dantec Dynamics A/S)，主要由激光器、高速相机、片光源、同步器、时间触发器、电源、图像处理软件和图像采集控制计算机组成。测量时，同步器同时与激光器、高速相机和控制计算机连接，并产生脉冲协调高速相机和激光器的同步工作。示踪粒子选用 20 μm 的尼龙颗粒。

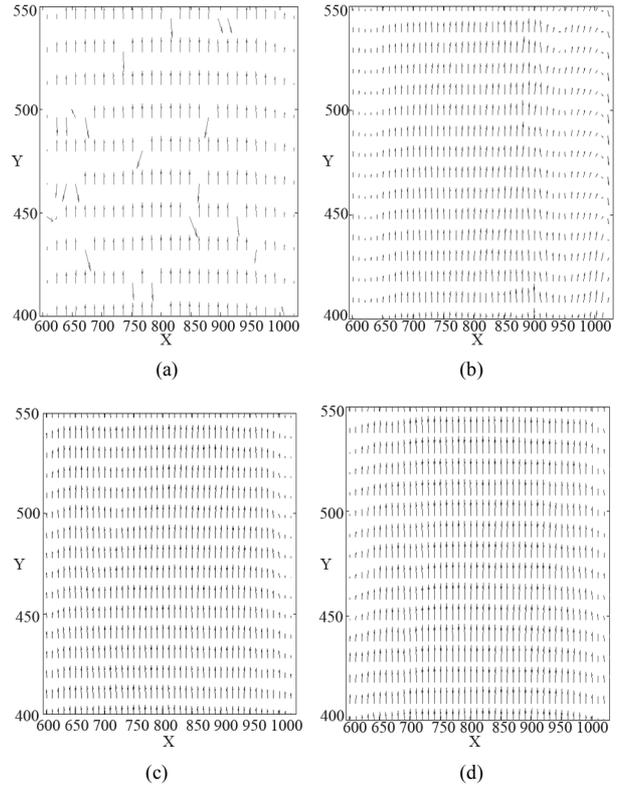
3.2. PIV 图像的处理结果

本文提出的 MOFBM 算法通过上面提到实验 PIV 来检测。为了实现多尺度计算，原始图像被分解为 60 个 $0 \leq l \leq 59$ 尺度级的图像，尺度因子为 $\kappa = 0.95$ ，参数时旨示不同分辨率级， $I^{(0)}(x, t)$ 与 $I^{(59)}(x, t)$ 分别表示原始与最低分辨率图像序列。初始结果计算针对的分辨率级为： $8 \leq l \leq 59$ ；基于非线性滤波的结果更新都针对 $0 \leq l \leq 7$ 。Bilateral-Filter 计算时的参数 $k = 1.8, k_p = 0.85$ 。图 5 为两帧连续时刻的粒子图像。图 6 显示了几种经典算法与本文提出的 MOPFM 算法计算结果的比较，互相关算法的查询窗口选用 32×32 ，其他光流算法的计算密度为 10 pixel。从图中可以看出 FFT 算法存在较多伪矢量，如果查询窗口继续选小，伪矢量会更多，而 MOFBM 能有效的剔除伪矢量，



(a) 第一帧图像, (b)第二帧图像。

Figure 5. The PIV source images for up-channel flow
图 5. 实验获得的连续两帧 PIV 原始图像



(a) 速度矢量场-FFT, (b) 速度矢量场-MHS, (c) 速度矢量场-Brox(2D), (d) 速度矢量场-MOPFM。

Figure 6. Comparison of several classic algorithms and the MOPFM algorithm
图 6. 几种经典算法与 MOPFM 算法的比较

得到了较满意的结果。MOFBM 算法在精度上要优于传统的互相关算法和 MHS 法^[15]。我们还可以看出 MOFBM 算法与 Brox (2D)算法^[23]在精度上非常接近，但由于非线性滤波的引入使得 MOFBM 算法的光流方程更简单，最优速度因子的引入使得计算需要更少的迭代，因此，在相同精度 ($\varepsilon < 0.0001$) 要求下计算时

间比 Brox (2D)算法可以缩 30%~40%。Brox (2D)需要 14 次迭代和 922 s, 而 MOFBM 法仅需要 10 次迭代和 708 s。结果表明该算法对于 PIV 图像的处理具有较好的性能和可靠性。

4. 结论

1) 本文简述了光流算法在 PIV 后处理中的发展过程, 介绍了非线性滤波与多尺度分析光流算法的基本原理及计算步骤, 并详细讨论了算法中最有因子获取, 非线性函数构造等。

2) 设计和开展获取 PIV 粒子图像的实验, 并将本文提出的基于非线性滤波和多尺度分析的修正光流算法(MOFBM)应用于计算实际的 PIV 速度场, 结果表明该算法具有良好的性能和可靠性, 例如: 获得致密的光流场, 有效的移除伪矢量, 相对于其它传统的光流算法有更高的计算效率。

参考文献 (References)

- [1] E. Lauze, P. Kornprobst and E.Mémim. A Coarse to fine multi-scale approach for linear least squares optical flow estimation. Proceedings of the British Machine Vision Conference, Kingston University, 2004, 9: 767-776.
- [2] E. Trucco, T. Tommasini and V. Roberto. Near-recursive optical flow from weighted image differences. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, 2005, 35(1): 1083-4419.
- [3] Y. Q. Zhao, Q. Pan and H. C. Zhang. Material classification based on multi-band polarimetric images fusion. SPIE Proceedings, Polarization: Measurement, Analysis, and Remote Sensing VII, Orlando, 15 April 2006, 6240: 58-65.
- [4] B. K. Horn, B. Schunck. Determining optical flow. Artificial Intelligence, 1981, 7: 185-203.
- [5] 桂本焯, 钱徽, 朱森良等. 一种优化梯度计算的改进 HS 光流算法[J]. 中国图象图形学报, 2005, 10(8): 1052-1058.
- [6] 杨叶梅. 基于改进光流法的运动目标检测[J]. 计算机与数字工程, 2011, 39(9): 108-110, 160.
- [7] 张杨, 叶舒帆, 高立群等. 基于粒子预测和光流匹配的目标跟踪算法[J]. 计算机光盘软件与应用, 2010, 8: 47-49.
- [8] 韩军, 张东. 全局运动多分辨率光流估计算法的改进与实现[J]. 西安工业大学学报, 2011, 31(2): 115-119.
- [9] 张泽旭, 李金宗, 李冬冬等. 基于最小 RMSE 测度的多尺度微分光流算法[J]. 模式识别与人工智能, 2004, 17(3): 299-305.
- [10] 卢宇, 祝豪, 吴钦章等. 一种基于背景配准的光流场算法[J]. 半导体光电, 2008, 29(1): 126-130.
- [11] J. L. Shi, S. Q. Bai and J. W. Si. Analysis and research of cloud motion based on CLG optical flow. Computer Technology and Development, 2011, 21(12): 135-138.
- [12] Y. Dong, H. Chen and B. Zhao. Robust estimation of optical flow based on linear brightness model. Journal of Computer Applications, 2008, 28(1): 216-219.
- [13] A. Bruhn, J. Weickert. Lucas-Kanade meets Horn-Schunck: Combining local and global optical flow methods. International Journal of Computer Vision, 2005, 61(3): 211-231.
- [14] T. F. Chan, L. A. Vese. Active contours without edges. IEEE Transactions on Image Processing, 2011, 10(2): 266-277.
- [15] B. D. Lucas, T. Kanade. An iterative image registration technique with an application to stereo vision. Proceedings of DARPA Image Understanding Workshop, Pittsburgh, 24-28 August 1981: 121-130.
- [16] H. H. Nagel, W. Enkelmann. An Investigation of smoothness constraints for the estimation of displacement vector field from image sequences. IEEE Transaction on Pattern Analyze and Machine Intelligence, 1986, 8(5): 565-593.
- [17] C. Tomasi, R. Manduchi. Bilateral Filtering for Gray and Color images. Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, Bombay, 4-7 January 1998: 839-846.
- [18] M. Sonka, V. Hkwac and R. Boyle. Image Processing Analysis, and Machine Vision. Beijing: TsingHua University Press, 2011.
- [19] H. D. Li, J. L. Liu and W. K. Gu. A Fast and Efficient DPIP Algorithm Using IAFM Models. Journal of Image and Graphics, 1999, 4(3): 193-197.
- [20] Y. M. Yang. Comparison of Nonlinear Equations' Solutions in Mechanics and Their Modification. JF World Sci-Tech R & D, 2011, 33(3): 376-379.
- [21] T. Brox, A. Bruhn, N. Papenberg and J. Weickert. High accuracy optic flow theory for warping. In: T. pajdla and J. matas, Eds., Computer Vision-ECCV 2004, Prague, 2004, 3024: 26-36.
- [22] M. J. Pang. Study on Mechanisms of phase profile and turbulence modulation by microbubbles in vertical upward channel. Xi'an Jiaotong University for the Degree of Doctor of Engineering Science, 2011: 94-98.
- [23] D. Barash, D. Comaniciu. A common framework for nonlinear diffusion, adaptive smoothing, bilateral filtering and mean shift. Image and Video Computing, 2003, 22 (1): 73-81.