

引用格式:郑佳,王洪雁,裴炳南.基于物理学的改善粒子图像测速稳健光流方法研究[J].电光与控制,2018,25(10):62-67. ZHENG J, WANG H Y, PEI B N. On an improved physics-based optical flow method to enhance the robustness of particle image velocimetry[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(10):62-67.

基于物理学的改善粒子图像测速稳健光流方法研究

郑佳, 王洪雁, 裴炳南

(大连大学辽宁省北斗高精度位置服务技术工程实验室, 辽宁 大连 116622)

摘要:针对可视化流动图像边缘扩散及噪声和异常点影响使得光流计算稳健性较差的问题,提出一种基于物理学的稳健光流计算方法以改善光流计算稳健性。所提算法在基于物理学光流方法中引入各向异性滤波器以增强边缘光流稳健性,并增加惩罚因子以减少噪声及异常点对光流计算的影响,而后基于变分方法极小化光流能量函数以求解欧拉-拉格朗日方程,最后通过迭代方法求得速度场。仿真结果表明,与传统的Lucas-Kanade, Horn-Schunck, 金字塔Lucas-Kanade以及基于物理的光流计算方法相比,所提算法可显著减少边缘和角落区域光流扩散,改善针对噪声及异常点的稳健性,从而得到具有较好稳健性的速度场。

关键词:图像处理; 稳健性; 各向异性滤波器; 惩罚因子; 基于物理学的光流计算; 粒子图像测速

中图分类号: TN911.23 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2018.10.013

On an Improved Physics-Based Optical Flow Method to Enhance the Robustness of Particle Image Velocimetry

ZHENG Jia, WANG Hong-yan, PEI Bing-nan

(Liaoning Engineering Laboratory of BeiDou High-precision Location Service, Dalian University, Dalian 116622, China)

Abstract: Focusing on the issue that the computation of the optical flow has a weak robustness to the edge diffusion, noise and outliers of the visible flow image, an improved approach of physics-based optical flow computation is developed to enhance the robustness of the optical flow computation. The proposed algorithm introduces the anisotropic filter into the method of the physics-based optical flow to improve the robustness of edge optical flow, and integrates the penalty factor into this approach to reduce the effect of noise and outliers on the optical flow computation. Then, the energy function of optical flow is minimized by using variation principle to solve the Euler Lagrange equation. Finally, the velocity field is obtained by exploiting the iterative method. Simulation results show that, compared with the traditional Lucas-Kanade, Horn-Schunck, Pyramid Lucas-Kanade, and the physics-based optical flow computational methods, the proposed algorithm can significantly reduce the diffusion of optical flow on edges and in corners, improve the robustness to noise and outliers, and thus obtain a velocity field with higher robustness.

Key words: image processing; robustness; anisotropic filter; penalty factor; physics-based optical flow; particle image velocimetry

0 引言

流体力学及空气动力学研究中流体速度场测量对于了解复杂流体具有重大意义。流体运动是一种典型

的非刚性运动,其计算须基于图像处理技术。可通过对运动图像序列分析获得局部流体运动矢量大小、方向及分布情况,进而获取诸如粘性及涡流场分布等物理特性^[1]。通常情况下,由于运动物体透明或不易通过光学设备观测,需将可见粒子置入被测物,以通过估计粒子运动矢量间接获得流体运动特征,此即谓粒子图像测速^[2](Particle Image Velocimetry, PIV)。

常见光流计算方法,如变分光流方法的分辨率可达到亚像素级,同时,假设流体连续时空变化特性与光流方程中图像序列局部时空可微本质相同,因而,基于

收稿日期:2017-11-10

基金项目:国家自然科学基金(61301258, 61271379);中国博士后科学基金(2016M590218)

作者简介:郑佳(1990—),男,河南南阳人,硕士生,研究方向为无人机控制、机器视觉。

光流的 PIV 得到了广泛的关注。

马鹏飞等提出基于 Lucas-Kanade (LK) 局部光流的 PIV 估计方法^[3], 此算法计算复杂度低, 稳健性较好, 然而光流场边界较为模糊, 边缘像素点光流估计较差, 从而所得光流场较为稀疏; 针对此问题, 孙立志等提出基于金字塔 LK 的多尺度光流算法以计算 PIV^[4], 所提算法可解决在运动目标速度过大、相邻帧连续性不强时的光流计算问题, 所得光流精度高于 LK 算法, 然而得到的光流场仍较为稀疏; 为此, 黄湛等提出基于 Horn-Schunck (HS) 的 PIV 计算方法^[5], 此算法可得稠密光流场, 然而边界容易模糊, 计算复杂度高, 且稳健性较差; 为进一步改善光流估计精度, 余学敏等使用全局与局部结合的方法, 获得了更高的光流估计精度^[6], 然而此方法所得光流在边缘地区稳健性较差; 为改善光流估计稳健性, 文献[7]在局部与全局结合的基础上加入各向异性滤波器以减少边缘光流扩散, 但是此方法对噪声及异常点的稳健性较差; 文献[8]在全局与局部结合的基础上加入惩罚项, 以增强对噪声和异常点的稳健性; 文献[9]基于物理学的光流方法从可视化图像获取高分辨速度场, 然而由于边缘区域光流扩散及噪声和异常点的影响, 光流稳健性较差。针对上述问题, 本文提出一种基于物理学的稳健光流计算方法以改善光流计算稳健性。在基于物理学的光流方法中引入各向异性滤波器以增强边缘光流的稳健性, 增加惩罚因子以减少噪声及异常点对光流计算的影响, 而后基于变分方法极小化光流能量函数以求解欧拉-拉格朗日方程, 最后通过迭代方法求得速度场。

1 经典光流法

1.1 光流约束方程

在相邻图像时间间隔和图像灰度变化均很小的假设下, HORN 等提出如下灰度光流计算思想: 物体运动会引起与之对应像素亮度连续变化, 从而形成连续变化光流场^[5], 其数学模型如下。

设图像中一点 (x, y) 在 t 时刻的亮度为 $I(x, y, t)$, 在 Δt 时刻亮度为 $I(x + \Delta x, y + \Delta y, t + \Delta t)$, 当 Δt 无穷小时可认为亮度不变, 则可得

$$I(x, y, t) = I(x + \Delta x, y + \Delta y, t + \Delta t) \quad (1)$$

对上式泰勒级数展开, 当 $\Delta t \rightarrow 0$ 可得

$$\frac{\partial I}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial I}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial I}{\partial t} \Delta t = 0 \quad (2)$$

将 $\frac{\partial I}{\partial x}, \frac{\partial I}{\partial y}, \frac{\partial I}{\partial t}$ 改写为 I_x, I_y, I_t , 并令 $\frac{\Delta x}{\Delta t} = u, \frac{\Delta y}{\Delta t} = v$, 则上式可以变形为

$$I_x u + I_y v + I_t = 0 \quad (3)$$

式中, u, v 表示速度矢量的二维分量。由此可得光流

计算基本等式。需要注意的是, 式(3)中有两个未知参数, 因而此问题无法求解。为获取两个速度场参数的估计, HORN 等提出了基于全局约束的方法, 而 KANADE 等则提出基于局部约束的方法。

1.2 Lucas-Kanade 光流法

此方法核心思想如下: 假设像素 a 与相邻区域内所有像素光流矢量相同, 对区域内像素赋予不同权重, 则光流计算可等价于最小化如下能量函数^[10], 即

$$E = \sum_{x \in \Omega} W^2(x) [\nabla I(x, t)v + I_t(x, t)]^2 \quad (4)$$

式中: Ω 表示以 a 点为中心的小区域; ∇ 表示梯度算子; $W(x)$ 为窗函数, 表示区域中像素 $m_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 的权重, 离 a 点越近, 权重越高。上式可等价于如下最小二乘形式, 即

$$A^2 W^2 A p = A^T W^2 b \quad (5)$$

式中,

$$\begin{cases} A = (\nabla I(x_1), \nabla I(x_2), \dots, \nabla I(x_n)) \\ W = \text{diag}(W(x_1), W(x_2), \dots, W(x_n)) \\ b = -(I_t(x_1), I_t(x_2), \dots, I_t(x_n))^T \end{cases} \quad (6)$$

$\text{diag}(\cdot)$ 为对角阵。由式(5)可得

$$p = (A^T W^2 A)^{-1} A^T W^2 b \quad (7)$$

LK 方法可得到稀疏光流场, 相对于下述 HS 算法, 计算复杂度低, 然而稳健性较差^[3]。

1.3 Horn-Schunck 光流法

HORN 等提出的约束条件则是极小化平滑约束项^[11] E_s , 即

$$E_s = \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy \quad (8)$$

而基于光流基本等式可得光流误差 E_c 为

$$E_c = (I_x u + I_y v + I_t)^2 dx dy \quad (9)$$

基于上述两个约束条件可知, 光流矢量可通过如下最小化问题获得, 即

$$E = \{ (I_x u + I_y v + I_t)^2 + \lambda (\|\nabla u\|^2 + \|\nabla v\|^2) \} dx dy \quad (10)$$

式中: $\|\nabla u\|^2 = \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2$; $\|\nabla v\|^2 = \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2$ 。

此问题可通过基于梯度的方法进行求解, 从而降低计算复杂度, 且可得到高精度像素瞬时位置速度及稠密光流, 然而, 此方法分辨率较低, 边缘光流易扩散, 且稳健性较差^[5]。

2 基于物理的光流法

针对上述算法分辨率较低的问题, 文献[9]提出一种基于物理学的高分辨率光流计算方法。此算法详细地给出了光流的物理意义, 即光流与可视化图像中流体或者颗粒的速度成正比^[12]。此外, 在图像坐标系中, 物体空间坐标系可通过透视投影变换来表述, 所有

这些情况下的投影运动方程可用基于物理的光流方程表述^[9]为

$$\frac{\partial \mathbf{g}}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{g}\mathbf{p}) = f \quad (11)$$

式中: $\mathbf{p} = (u, v)$ 代表光流速度; \mathbf{g} 表示归一化图像强度; f 中包含忽略一阶近似的扩散和边界条件, $f(x_1, x_2, \mathbf{g}) = \lambda_1^2 D_1 \nabla^2 \mathbf{g} + D_1 c \mathbf{B} + c \mathbf{n} \cdot (\psi \mathbf{U})|_{\Gamma_1}^{\Gamma_2}$, ∇^2 为拉普拉斯算子, D_1 是扩散系数, c 代表粒子散射系数, $\mathbf{B} = -\mathbf{n} \cdot \nabla \Psi|_{\Gamma_1}^{\Gamma_2} - \nabla_{12} \cdot (\Psi|_{\Gamma_1} \nabla_{12} \Gamma_2 + \Psi|_{\Gamma_2} \nabla_{12} \Gamma_1)$ 表示边界项, $\mathbf{n} \cdot (\psi \mathbf{U})|_{\Gamma_1}^{\Gamma_2}$ 表示零磁通条件, ψ 代表纯量密度, 通常情况下, 当 ψ 为常量时, $\mathbf{n} \cdot \nabla \Psi|_{\Gamma_1}^{\Gamma_2}$ 项可被忽略, $\nabla_{12} = (\partial/\partial x_1, \partial/\partial x_2)$ 表示投影在平面 (x_1, x_2) 上的梯度算子, Γ_1 和 Γ_2 的取值与 x_1, x_2 相关, λ_1 表示拉格朗日乘子^[9,12]。

当 $\mathbf{g} \cdot \nabla \cdot \mathbf{p} = 0$ 及 $f = 0$ 时, 基于物理学的光流方程可以简化为基于 HS 光流算法的亮度约束方程^[9], 即

$$E(u, v) = \int_{\Omega} (E_1)^2 dx_1 dx_2 + \lambda \int_{\Omega} (\|\nabla u\|^2 + \|\nabla v\|^2) dx_1 dx_2 \quad (12)$$

式中: $E_1 = \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{g}\mathbf{p}) - f$; λ 是拉格朗日乘子; Ω 代表图片中的一个小区域。

极小化式(12)可得欧拉-拉格朗日方程^[9]为

$$\mathbf{g} \nabla \left[\frac{\partial \mathbf{g}}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{g}\mathbf{p}) - f \right] + \lambda \nabla^2 \mathbf{p} = 0 \quad (13)$$

式(13)可通过标准有限差分方法来进行光流求解。基于物理学的光流计算方法, 可以得到较 HS 方法更高分辨率的光流。然而, 由于基于物理光流方法光流在边缘地区易扩散, 且易受噪声和异常点影响, 光流整体稳健性较差^[9]。

3 基于物理学的稳健光流算法

为了减少角落和边缘光流扩散对光流计算的影响, 文献[7]提出各向异性扩散的光流计算方法, 并给出了扩散系数方程。此方法可减少光流在边缘的传播, 增强边缘光流稳健性。所提的两个扩散系数方程可表示为

$$D(\|\nabla \mathbf{I}\|) = 1 / \left(1 + \left(\frac{\|\nabla \mathbf{I}\|}{K} \right)^2 \right) \quad (14)$$

$$D(\|\nabla \mathbf{I}\|) = e^{-\left(\frac{\|\nabla \mathbf{I}\|}{K}\right)^2} \quad (15)$$

其中, 式(14)更适用于高对比度情况下的稳健光流求解, 式(15)更适用于较宽区域的稳健光流求解^[13]。

常量 K 控制边缘的敏感度, 通常由实验确定其数值。为了能够兼顾对比度和区域大小对光流计算的影响, 求得稳健性更高的光流, 本文采用扩散系数方程^[7]为

$$D(\|\nabla \mathbf{I}\|) = e^{-\alpha \|\nabla \mathbf{I}\|^\beta} \quad (16)$$

基于式(16), 光流能量函数式(12)可改写为

$$E(u, v) = \int_{\Omega} (E_1)^2 dx_1 dx_2 + \lambda \int_{\Omega} E_2 dx_1 dx_2 \quad (17)$$

式中, $E_2 = \|\mathbf{D} \nabla u\|^2 + \|\mathbf{D} \nabla v\|^2$ 。

通过极小化式(17)可求得边缘稳健性较好的光流, 然而由于噪声和异常点的存在, 光流计算的整体稳健性不是很高。为了减少噪声和异常点对光流计算的影响, 增强光流整体稳健性, 在式(17)中加入二次项 $\beta_2^2(u^2 + v^2)$ 作为惩罚项^[8], 当噪声和异常点大时, 可减小光流计算误差, 增强整体光流计算稳健性。

加入惩罚项, 式(17)可改写为

$$E(u, v) = \int_{\Omega} [(E_1)^2 + E_3] dx_1 dx_2 + \lambda \int_{\Omega} E_2 dx_1 dx_2 \quad (18)$$

式中, $E_3 = \beta_2^2(u^2 + v^2)$, β_2 是一个小的正常数。

根据变分原理将 $E(u, v)$ 最小化, 可得欧拉-拉格朗日方程^[14]为

$$\begin{cases} L_u - \frac{\partial L_u}{\partial x} - \frac{\partial L_u}{\partial y} = 0 \\ L_v - \frac{\partial L_v}{\partial x} - \frac{\partial L_v}{\partial y} = 0 \end{cases} \quad (19)$$

式中:

$$L = L(u, v, u_x, u_y, v_x, v_y) = (E_1)^2 + E_3 + \lambda E_2; \quad (20)$$

$$\begin{cases} L_u = 2E_1 \cdot \frac{\partial \nabla \cdot (\mathbf{g}\mathbf{p})}{\partial u} - 2\beta_2^2 u \\ \frac{\partial L_u}{\partial x} + \frac{\partial L_u}{\partial y} = 2\lambda D^2 \nabla^2 u \end{cases} \quad (21)$$

将式(20)及式(21)代入式(19)可化简为

$$\begin{cases} E_1 \cdot \frac{\partial \nabla \cdot (\mathbf{g}\mathbf{p})}{\partial u} - \beta_2^2 u - \lambda D^2 \nabla^2 u = 0 \\ E_2 \cdot \frac{\partial \nabla \cdot (\mathbf{g}\mathbf{p})}{\partial v} - \beta_2^2 v - \lambda D^2 \nabla^2 v = 0 \end{cases} \quad (22)$$

式中, $\nabla \cdot (\mathbf{g}\mathbf{p}) = \mathbf{g} \nabla \cdot \mathbf{p} + \mathbf{p} \cdot \nabla \mathbf{g}$, 可用某点与其周围速度平均值之差近似表示, 即

$$\begin{cases} \nabla^2 u = u^{n+1} - \bar{u}^n \\ \nabla^2 v = v^{n+1} - \bar{v}^n \end{cases} \quad (23)$$

结合式(23), 式(18)可重新表示为

$$\begin{cases} E_4 \cdot g_x - \beta_2 u - \lambda D^2 (u^{n+1} - \bar{u}^n) = 0 \\ E_4 \cdot g_y - \beta_2 v - \lambda D^2 (v^{n+1} - \bar{v}^n) = 0 \end{cases} \quad (24)$$

式中, $E_4 = g_x + u g_x + v g_y + g u_x + g v_y - f$ 。

对式(24)整理可得

$$\begin{cases} (\lambda D^2 + g_x^2 - \beta_2^2) u^{n+1} + A_1 - A_2 = 0 \\ (\lambda D^2 + g_y^2 - \beta_2^2) v^{n+1} + A_3 - A_4 = 0 \end{cases} \quad (25)$$

式中,

$$\begin{cases} A_1 = v^{n+1} \cdot g_x g_y + g_x g_z + g g_x u_x + g g_x v_y \\ A_2 = f \cdot g_x + \lambda D^2 \bar{u}^n \\ A_3 = u^{n+1} \cdot g_x g_y + g_x g_y + g g_y u_x + g g_y v_y \\ A_4 = f \cdot g_y + \lambda D^2 \bar{v}^n \end{cases} \quad (26)$$

求解式(25)得 u^{n+1} 和 v^{n+1} 为

$$\begin{cases} u^{n+1} = \frac{(\lambda D^2 - \beta_2^2) \cdot B_1 - \lambda D^2 (\bar{u}^n g_x^2 - \bar{v}^n g_x g_y)}{(\lambda D^2 - \beta_2^2) [(\lambda D^2 - \beta_2^2)^2 + g_x^2 + g_y^2]} \\ v^{n+1} = \frac{(\lambda D^2 - \beta_2^2) \cdot B_2 - \lambda D^2 (\bar{v}^n g_x^2 - \bar{u}^n g_x g_y)}{(\lambda D^2 - \beta_2^2) [(\lambda D^2 - \beta_2^2)^2 + g_x^2 + g_y^2]} \end{cases} \quad (27)$$

式中,

$$\begin{cases} B_1 = g_x (g_x + g \cdot \bar{u}_x^n + g \cdot \bar{v}_y^n - f) - \lambda D^2 \bar{u}^n \\ B_2 = g_y (g_x + g \cdot \bar{u}_x^n + g \cdot \bar{v}_y^n - f) - \lambda D^2 \bar{v}^n \end{cases} \quad (28)$$

至此,可得基于物理的稳健光流计算方法。此方法可具体描述如下。

- 1) 读取连续两帧粒子图像,对其滤波以减小噪声,并初始化所需参数。
- 2) 使用 sobel 算子对滤波后图像求 x 方向、 y 方向导数;利用两帧中对应像素相减方式求 t 方向导数。
- 3) 采用九点差分格式计算 u, v 均值^[15]。
- 4) 计算求解点灰度梯度,设定速度平滑权重系数(设为 1),初始速度设为 0。
- 5) 根据式(26),基于 Gauss-Seidel 方法迭代求解^[16]。
- 6) 若相邻两次迭代光流之差小于给定阈值,或迭代次数超过给定值,则终止迭代。

4 实验仿真及分析

通过与经典 HS, LK 光流算法以及金字塔 LK 光流算法和基于物理的光流算法进行对比,验证所提基于物理的稳健算法针对所得光流密度及边缘光流扩散效果的有效性。仿真参数设置如下:各向异性滤波器相关参数 $\alpha = 5, \beta_1 = 0.8$, 惩罚函数相关参数 $\beta_2 = 0.02$, 迭代误差 $\varepsilon = 1 \times 10^{-3}$, 迭代次数 $n = 200$ 。

实验仿真采用如下所示 sobel 模板:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}$ 。 u, v 均值算式为

$$\begin{cases} \bar{u}_{i,j,k} = \frac{1}{6} C_1 + \frac{1}{12} C_2 \\ \bar{v}_{i,j,k} = \frac{1}{6} C_3 + \frac{1}{12} C_4 \end{cases} \quad (29)$$

式中,

$$\begin{cases} C_1 = \bar{u}_{i,j-1,k} + \bar{u}_{i-1,j,k} + \bar{u}_{i,j+1,k} + \bar{u}_{i+1,j,k} \\ C_2 = \bar{u}_{i-1,j-1,k} + \bar{u}_{i-1,j+1,k} + \bar{u}_{i+1,j+1,k} + \bar{u}_{i+1,j-1,k} \\ C_3 = \bar{v}_{i,j-1,k} + \bar{v}_{i-1,j,k} + \bar{v}_{i,j+1,k} + \bar{v}_{i+1,j,k} \\ C_4 = \bar{v}_{i-1,j-1,k} + \bar{v}_{i-1,j+1,k} + \bar{v}_{i+1,j+1,k} + \bar{v}_{i+1,j-1,k} \end{cases} \quad (30)$$

实验 1 图 1 所示为等流速状态下两帧连续的粒子图像,以下算法皆基于此计算光流。图 2 所示为 LK 光流算法、HS 光流算法、基于金字塔 LK 光流算法以及基于物理算法得到的光流图像。由图 2 可知,与 HS 光流算法相比, LK 光流算法得到的光流稀疏, 稳健性较好。HS 光流算法虽可得稠密光流, 但稳健性差。较 HS 光流算法和 LK 光流算法, 基于金字塔 LK 光流算法所得光流精度较高, 稳健性较强, 但光流较稀疏。此 3 种光流算法所得光流分辨率较低。基于物理光流算法可得高分辨光流, 但边缘易扩散, 且易受噪声和异常点影响, 光流较稀疏, 稳健性较差。

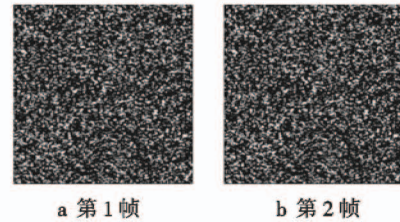


图 1 原始图像

Fig. 1 Original images

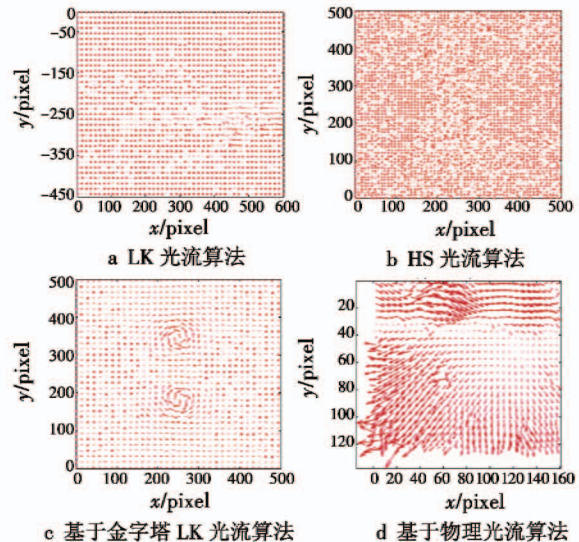


图 2 基于物理光流算法与经典光流算法所得光流对比

Fig. 2 Optical flows based on physical and classical optical flow algorithm

实验 2 图 3 分别为基于物理光流算法及加入惩罚因子后基于物理光流算法所得光流图像, 惩罚因子中 $\beta_2 = 0.02$ 。由图 3 可知, 在基于物理光流算法基础上加入

惩罚因子后对噪声和异常点的稳健性较好,但由于光流在边缘地区易扩散,所得光流较为稀疏。

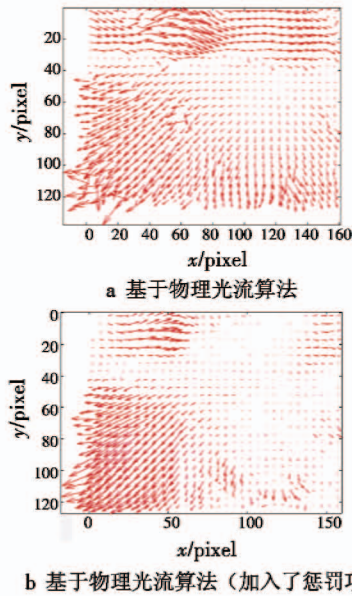


图 3 惩罚因子对基于物理光流算法的影响
Fig. 3 Effect of penalty factor on physical optical flow algorithm

实验 3 图 4 依次是基于物理光流算法和基于物理的加入各向异性扩散后的光流算法得到的光流图像,其中,扩散系数方程参数 $\alpha = 5, \beta = 0.8$ 。由图 4 可得,后者可显著降低光流在边缘地区的扩散,光流较为稠密,但由于噪声和异常点影响,光流稳健性较差。

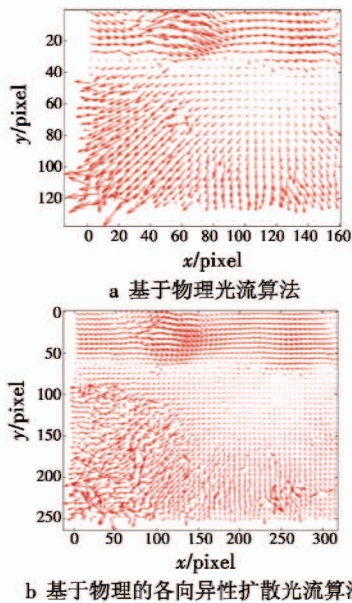


图 4 各向异性扩散对基于物理光流算法的影响
Fig. 4 Effect of anisotropic diffusion on physical optical flow algorithm

实验 4 图 5 是使用基于物理光流算法和基于物理的稳健光流算法得到的光流图像,其中, $\alpha = 5, \beta_1 =$

$0.8, \beta_2 = 0.02$ 。由图 5 可得,基于物理的稳健光流算法可明显减少边缘光流扩散,且显著降低噪声和异常点对光流计算的影响,得到较稠密光流,从而可改善光流计算的稳健性。

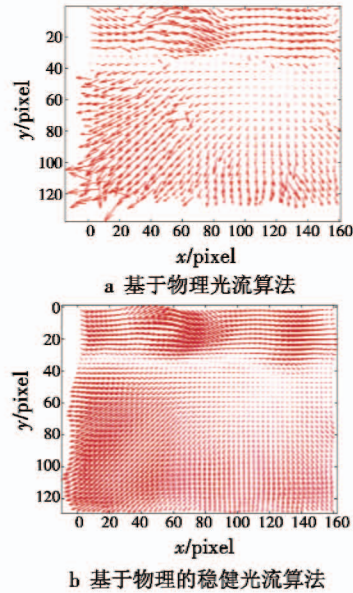


图 5 基于物理光流算法和基于物理的稳健光流算法对比
Fig. 5 Contrast between physics-based and robust physics-based algorithms

综上所述,与 LK,HS,基于金字塔 LK 以及基于物理光流算法相比,本文所提的引入各向异性滤波器及惩罚因子的基于物理的稳健光流算法可增强光流计算对噪声和异常点的稳健性,同时明显减少边缘地区光流扩散,进而得到稠密的光流,从而可显著改善光流计算的稳健性。

5 结束语

针对可视化流动图像边缘易扩散和噪声点及异常点的影响使得光流计算稳健性较差的问题,本文提出一种基于物理学的稳健光流算法以改善光流计算的稳健性。所提算法在基于物理光流算法中引入各向异性滤波器以增强边缘光流的稳健性,增加惩罚因子以减少噪声及异常点对光流计算的影响。而后基于变分方法极小化光流能量函数求解欧拉-拉格朗日方程,最后通过迭代方法求得速度场。仿真结果表明,与传统的 LK,HS,基于金字塔 LK 以及基于物理光流算法相比,所提算法可显著减少边缘和角落区域的光流扩散,改善针对噪声及异常点的稳健性,从而得到具有较好稳健性的速度场。

参考文献

[1] 全红艳,王长波. 一种流体运动矢量计算的有效方法

- [J]. 计算机学报, 2013, 36(9):1889-1897.
- [2] 张桂夫, 王鲁海, 朱雨建, 等. 基于 PIV 测量的涡轮流量计响应分析[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(10):2381-2387.
- [3] 马鹏飞, 杨金孝. 基于光流法的粒子图像测速[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(32):8583-8587.
- [4] 孙立志. 基于多尺度的光流算法在 PIV 中的应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- [5] 黄湛, 王宏伟, 张妍, 等. 基于粒子图像的光流流场全局速度测量[C]//中国空气动力学学会测控技术专委会四次学术交流会, 2013:1-6.
- [6] 余学敏, 王大鹏, 沈建冰. 基于全局和局部平滑的高精度光流估计方法[J]. 新型工业化, 2012(11):57-64.
- [7] DRULEA M, NEDEVSCHI S. Total variation regularization of local-global optical flow[C]//International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, 2011:318-323.
- [8] KUMAR P, KUMAR S, BALASUBRAMANIAN R. A fractional order total variation model for the estimation of optical flow[C]//Computer Vision, Pattern Recognition, Image Processing and Graphics, IEEE, 2016:1-4.
- [9] LIU T, SHEN L. Fluid flow and optical flow[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2008, 614:253-291.
- [10] 张忠义. 基于改进 LK 光流的目标跟踪算法研究[J]. 信息技术, 2015(10):127-130.
- [11] BOBROW D G. "Determining optical flow": a retrospective[M]. Cambridge: MIT Press, 1994:81-87.
- [12] WANG B, CAI Z M, SHEN L X, et al. An analysis of physics-based optical flow[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2015, 276:62-80.
- [13] PERONA P, MALIK J. Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 12(7):629-639.
- [14] 张建明, 钱东海. 一种局部和全局相结合的光流计算方法[J]. 计算机工程与科学, 2005, 27(5):33-35.
- [15] 赵雪菲, 么焕民. Laplace 方程九点差分格式的构造及其误差估计[J]. 哈尔滨师范大学自然科学学报, 2011, 27(4):6-9.
- [16] 曾凯, 陈至坤, PARANJAPPE R, 等. 基于 HS 光流法机器人避障策略优化[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(17):85-89.

下 期 要 目

基于二维超混沌与三维混沌复合的图像加密算法
 基于正则化参数自适应估计的运动目标提取
 基于 Dubins 路径的 A* 算法的多无人机路径规划
 高功率高重频中红外激光器
 模拟退火算法的共享孔径多波束形成
 改善 MIMO-STAP 检测性能的收发联合优化方法
 多普勒效应在 GPS 诱骗识别领域的应用研究
 结合 Kalman 滤波的时空上下文目标跟踪算法

光电稳定平台线性自抗扰控制器设计
 基于九宫格与威力场的态势显示与辅助决策方法
 运输机重装空投模型及控制若干问题综述
 ADRC 在光通信 APT 系统下的扰动分析及参数整定
 考虑传输衰减的航空数据总线误码率研究
 弹载雷达导引头测高回波模型仿真研究
 基于诱骗策略的无人机协同航迹规划
 计及航迹规划的四旋翼飞行器轨迹跟踪控制