

文章编号 1004-924X(2011)05-1159-06

## 改进的光流运动图像分析方法及其应用

屠大维\*, 江济良

(上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200072)

**摘要:**针对传统光流运动图像分析方法运动估计精度低且易受各种干扰等缺点,提出一种基于梯度阈值的五置信点约束的改进光流算法。该方法采用五置信点加权法处理像素时间和空间梯度值,减小了单个像素受噪声的影响。对基本光流约束方程进行了梯度阈值处理,剔除了光流场中不利于运动估计的干扰数据,提高了运动图像的运动估计精度。实验分别采用传统算法和改进算法对全局和局部运动场景的视频图像序列进行光流计算,结果表明,该改进光流算法运动估计精度高、抗干扰性强,能准确地反映场景全局运动及场景中的局部运动,比传统的光流算法具有更好的鲁棒性和收敛性,且运算时间缩短了 1/3。该光流算法在行车环境传感、交通流分析中具有潜在的应用价值。

**关键词:**光流;图像分析;运动分析;置信点;梯度阈值

**中图分类号:**TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111905.1159

### Improved algorithm for motion image analysis based on optical flow and its application

TU Da-wei\*, JIANG Ji-liang

(School of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

\* Corresponding author, E-mail: tdwshu@staff.shu.edu.cn

**Abstract:** For the problems of low motion estimation accuracy and easy to be affected by various interferences such as object surface structure change, background light disturbance etc, when solving the basic optical flow constraint equation with the traditional algorithm, an improved optical flow algorithm with five-confidence-point restraint based on gradient threshold has been put forward in this paper. The five-confidence-point weighted method was applied to calculate the time and space gradient value of each image pixel, reducing noise effect on it, and gradient and gradient threshold was adopted to process the basic optical flow constraint equation, so that the interference data which will disturb the motion estimation in the optical flow field were eliminated, and the motion estimation accuracy of motion image was improved. The experiments have been carried out by the traditional algorithm and the improved one respectively for global and local movements. The contrastive analysis shows that this improved optical flow algorithm, which can figure both scene global motion and local motion in the scene, has the advantages of not only a high accuracy of motion estimation and a strong anti-interference, but also a better robustness and convergence compared with the traditional one, as well as one-third of computation time shortened. It can be expected that this algorithm will be of potential ap-

收稿日期:2010-07-01;修订日期:2010-10-26.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60774102;No. 51075252);上海大学研究生创新基金资助项目(No. SHUCX102206)

plication in driving environment sensing and traffic flow analysis.

**Key words:** optical flow; image analysis; motion analysis; confidence-point; gradient threshold

## 1 引言

运动分析<sup>[1]</sup>有极其广泛的应用前景,如视觉导航、机器人装配、运动目标跟踪、医学诊断、气象预测等,因此,运动分析目前仍是计算机视觉最为活跃的研究方向之一。运动图像分析方法可归结为三类:图像灰度匹配法、特征匹配法和光流法。图像灰度匹配法<sup>[2-3]</sup>比较简单,但运行速度比较慢。特征方法<sup>[4-6]</sup>优点在于抗噪性能好,适用于长时间大运动量的处理,但特征提取和对应关系的建立有时候较为困难。光流法<sup>[7]</sup>优点在于光流不仅包含了被观察物体的运动信息,而且携带着有关景物三维结构的丰富信息。因此,光流法在运动图像分析上扮演着重要角色。

所谓光流是指图像中模式运动的速度,它是一种二维瞬时速度场,其中的二维速度矢量是场景中可见点的三维速度矢量在成像面上的投影。光流被广泛用于目标分割、识别、跟踪、机器人导航以及形状信息恢复等重要领域<sup>[8]</sup>。

针对传统的光流运动图像分析方法精度较低且存在各种干扰等缺点,本文提出了一种基于梯度阈值的五置信点约束的改进光流算法,该算法有效剔除了不利于运动估计的干扰数据,采用置信点和加权法处理光流梯度,使算法的鲁棒性好,效率高,极大提高了运动图像的估计精度。

## 2 改进的光流运动图像分析方法

光流计算最初是由美国学者 Horn 和 Schunck 于 1981 年提出,Horn 等人根据图像灰度守恒原理推导出基本光流约束方程<sup>[9]</sup>:

$$I_x u + I_y v + I_t = 0, \quad (1)$$

其中  $I_x, I_y$  为图像灰度的空间梯度,  $I_t$  为图像灰度随时间的变化率,  $u$  和  $v$  分别为光流沿  $x$  和  $y$  方向的 2 个分量。

### 2.1 运动图像中噪声点干扰处理

由基本光流约束方程(1)求得梯度方向的光

流速度  $v = \frac{I_t}{\sqrt{I_x^2 + I_y^2}}$ , 设定一个阈值  $T$ , 若  $v(x, y)$

$> T$ , 则像素点  $(x, y)$  是前景, 反之是背景。在实际环境下, 运动图像中通常存在的噪声点干扰, 比如干扰白点或野值(异常值)都会使像素点的灰度梯度发生突变, 使得运动图像中背景的光流速度变化呈现不均匀性。设定阈值  $T_1, T_2 (T_1 < T_2)$ , 若  $T_1 < |I_x|, |I_y|, |I_t| < T_2$ , 则保留所求的像素点的梯度值, 否则  $I_x = I_y = I_t = 0$ , 这样就可以消除运动图像中的噪声点干扰。其中  $T_1$  和  $T_2$  由经验来定, 但它们对结果的影响却至关重要, 并需要随着实验条件的改变而加以调整。

### 2.2 五置信点加权法求取光流梯度

运动图像的光流梯度一般采用一阶微分的方法<sup>[10]</sup>计算, 但是这种方法存在很大的误差而导致运动估计精度不高, 后来有了更多采用各种梯度算子的改进算法<sup>[11-12]</sup>用于计算图像的光流梯度, 但是运动估计精度仍然不能满足某些特定场合的要求。本文提出一种五置信点加权法求取光流梯度。按照图 1 所示的五置信点窗口选取包括当前像素点在内的 5 个像素点, 采用下述方法处理它们的灰度梯度得到五置信点的灰度梯度。

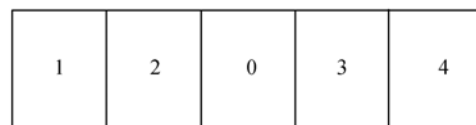


图 1 五置信点窗口

Fig. 1 Five-confidence-point window

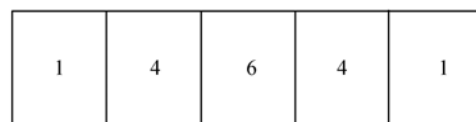


图 2 离散高斯卷积核

Fig. 2 Discrete Gaussian convolution core

采用如图 2 所示的离散高斯卷积核对得到的五置信点进行加权计算。设当前像素点的时空微分为  $I_{x0}, I_{y0}, I_{t0}$ , 选出的 4 个置信点的时空微分为  $I_{xi}, I_{yi}, I_{ti} (1 \leq i \leq 4)$ , 采用如图 2 所示的离散高斯卷积核  $W: (1, 4, 6, 4, 1)/16$  来进行局部平滑。那么当前像素点在  $x, y$  方向以及对时间的偏导数的加权可表示为:

$$\begin{cases} W * I_x = (6 I_{x0} + I_{x1} + 4 I_{x2} + 4 I_{x3} + I_{x4})/16 \\ W * I_y = (6 I_{y0} + I_{y1} + 4 I_{y2} + 4 I_{y3} + I_{y4})/16, \\ W * I_t = (6 I_{t0} + I_{t1} + 4 I_{t2} + 4 I_{t3} + I_{t4})/16 \end{cases}$$

其中, \* 代表卷积。经过上述局部平滑的时空梯度就可以用于光流计算。

### 2.3 基于梯度阈值的五置信点约束的改进光流算法

在复杂背景中的运动目标,由于背景和运动目标在灰度场上的灰阶差别不是很大,在运动目标区域的轮廓处常处于一种模糊的状态。由于运动图像中光流场分布的不连续性,基本光流约束方程需满足的强度不变假设往往不能成立,而图像中违反强度不变假设处的光流场分布是不可靠的。基本光流约束方程只有在图像灰度梯度值较大的地方才近似成立,因此使用经典的 Horn-Schunck 光流算法计算运动目标轮廓处的光流是不准确的。为了增强算法的稳定性和准确性,本文仅在梯度值较大的点处才使用亮度恒常性约束,而在梯度值较小的点处只使用全局平滑性约束。定义如下的门函数<sup>[13]</sup>:

$$\bar{\omega}(x, y) = \begin{cases} 0 & I_x^2 + I_y^2 < T \\ 1 & I_x^2 + I_y^2 \geq T \end{cases}, \quad (2)$$

其中  $T$  为阈值。此时, Horn-Schunck 光流场的计算公式为:

$$E = \iint [\bar{\omega}(x, y)(I_x u + I_y v + I_t)^2 + \lambda(\|\nabla u\|^2 + \|\nabla v\|^2)] dx dy, \quad (3)$$

其中,  $\nabla u = (\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y})^T, \nabla v = (\frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y})^T, \lambda$  是拉格朗日常数。我们可以对  $E$  求最小值来得出  $u, v$  的值。能量函数  $E$  关于  $u, v$  的微分为:

$$\frac{\partial E}{\partial u} = 2\bar{\omega}(I_x \cdot u + I_y \cdot v + I_t) \cdot I_x + 2\lambda(u - \bar{u}), \quad (4)$$

$$\frac{\partial E}{\partial v} = 2\bar{\omega}(I_x \cdot u + I_y \cdot v + I_t) \cdot I_y + 2\lambda(v - \bar{v}), \quad (5)$$

其中,  $\bar{u}$  和  $\bar{v}$  是当前像素点光流速度加权平均值。窗口函数  $W(m)$  为如图 3 所示的卷积核, 当前像素点对应与窗口的中心值 4。

1	2	1
2	4	2
1	2	1

图 3 窗口函数  
Fig. 3 Window function

设当前像素点的光流速度为  $u_0, v_0$ , 选出的八邻域内的像素点的光流速度为  $u_i, v_i (1 \leq i \leq 8)$ 。采用如图 3 所示的窗口函数  $W(m)$  来进行加权处理, 那么当前像素点在  $x, y$  方向的光流速度的加权平均速度可表示为:

$$\bar{u} = (4u_0 + u_1 + 2u_2 + u_3 + 2u_4 + 2u_5 + u_6 + 2u_7 + u_8)/16,$$

$$\bar{v} = (4v_0 + v_1 + 2v_2 + v_3 + 2v_4 + 2v_5 + v_6 + 2v_7 + v_8)/16.$$

当式(4)和式(5)均为零时, 能量函数  $E$  就得到最小值, 联立式(4)和式(5)均为零的 2 个等式, 求解  $u$  和  $v$ , 整理后其直接结果是一个松弛迭代方程:

$$u^{k+1} = \bar{u}^k - \frac{I_x \cdot \bar{u}^k + I_y \cdot \bar{v}^k + I_t}{\lambda + (I_x^2 + I_y^2)\bar{\omega}} \cdot I_x \bar{\omega}, \quad (6)$$

$$v^{k+1} = \bar{v}^k - \frac{I_x \cdot \bar{u}^k + I_y \cdot \bar{v}^k + I_t}{\lambda + (I_x^2 + I_y^2)\bar{\omega}} \cdot I_y \bar{\omega}, \quad (7)$$

其中,  $k$  是循环数;  $u^0$  和  $v^0$  是光流的初始估计值, 可取  $u^0 = v^0 = 0$ ; 参数  $\lambda$  可根据计算光流时空梯度的精度而定, 精度高时可取较大的值, 否则取较小的值。对全部  $(x, y)$  值, 当迭代运算结果满足事先给定的估计容差  $\epsilon_1$  和  $\epsilon_2$  或超过预先给定的最大迭代次数  $k_{max}$  时, 迭代计算结束, 即:

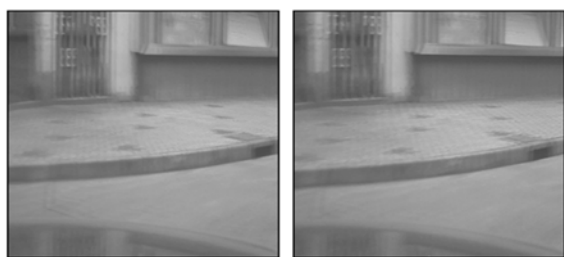
$$|u^{(n)} - u^{(n-1)}| \leq \epsilon_1 \quad |v^{(n)} - v^{(n-1)}| \leq \epsilon_2 \quad \text{或} \quad k > k_{max}.$$

### 3 实验及结果分析

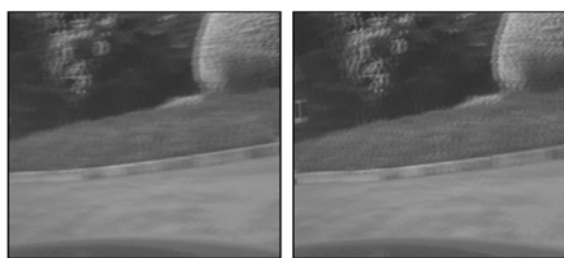
为验证这一改进光流算法的有效性, 作者进行了一系列实验。图 4 为几种运动情况下的视频

图像序列中的某几帧图像, 图像大小为  $640 \times 480$ 。其中, 图 4 中(a)和(b)为摄像机固定在汽车驾驶室内车辆左转弯时所获取的连续两帧图像;

图 4 中(c)和(d)为摄像机固定在汽车驾驶室内车辆右转弯时所获取的连续两帧图像;



(a) 第 145 帧 (a) Frame 145 (b) 第 146 帧 (b) Frame 146



(c) 第 79 帧 (c) Frame 79 (d) 第 80 帧 (d) Frame 80



(e) 第 55 帧 (e) Frame 55 (f) 第 56 帧 (f) Frame 56



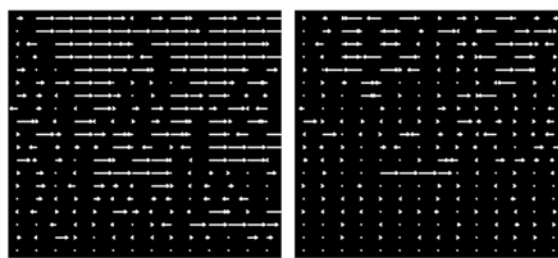
(g) 第 8 帧 (g) Frame 8 (h) 第 9 帧 (h) Frame 9

图 4 序列图像

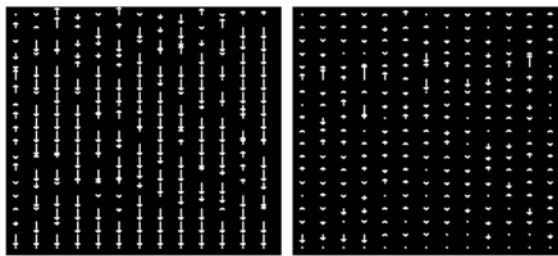
Fig. 4 Sequence image frames



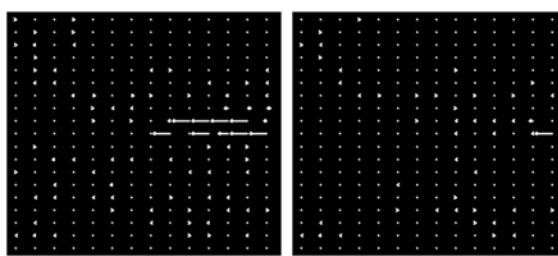
(a) 第 145 与 146 帧光流 (a) Optical flow 145 & 146 (b) 第 145 与 146 帧光流 (b) Optical flow 145 & 146



(c) 第 79 与 80 帧光流 (c) Optical flow 79 & 80 (d) 第 79 与 80 帧光流 (d) Optical flow 79 & 80



(e) 第 55 与 56 帧光流 (e) Optical flow 55 & 56 (f) 第 55 与 56 帧光流 (f) Optical flow 55 & 56



(g) 第 8 与 9 帧光流 (g) Optical flow 8 & 9 (h) 第 8 与 9 帧光流 (h) Optical flow 8 & 9

图 5 光流矢量图

Fig. 5 Optical flow vector diagram

取的连续两帧图像;图4中(g)和(h)为摄像机固定在路面所获取的公路上运动车辆的连续两帧图像。

实验中各参数取值为: $T=128$ , $\lambda=120$ , $k=30$ ; $u^0=0$ , $v^0=0$ ; $\epsilon_1=0.03$ , $\epsilon_2=0.03$ 。采用前面所述的改进光流算法和传统 Horn-Schunck 光流算法分别对各组序列图像进行运动估计,并将所求得的光流速度放大50倍,每隔25行45列显示一个,得到实验结果如图5所示。图5为与图4对应的光流矢量图。其中,图5(a)、(c)、(e)、(g)是采用改进的光流算法计算得到的光流矢量图,图5(b)、(d)、(f)、(h)是采用传统光流算法计算得到的光流矢量图。

由图5(a)发现,汽车右转弯时的水平光流速度方向总体趋势向左;由图5(c)发现,汽车左转弯时的水平光流速度方向总体趋势向右,而图5(b)、(d)难以看出水平光流速度的总体趋势特征;分析图5(e)发现汽车前行时的全局运动的垂直光流速度方向总体趋势向下,而图5(f)难以看出此特征;分析图5(g)发现汽车的运动产生水平光流速度,其方向与汽车运动的分析一致,而图5(h)水平光流速度不明显。显而易见,改进的光流算法计算得到的光流矢量较明显、较准确地反映了视频图像序列中场景及场景中物体的运动。

#### 参考文献:

- [1] 王晓卫,宁国.一种改进的基于光流的运动目标的检测算法[J].武汉大学学报·信息科学版,2003,28(3):351-353.  
WANG X W, NING G. Modified object tracking algorithm based on optical flow [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2003, 28(3):351-353. (in Chinese)
- [2] 邓志燕,陈焯坤.利用外极线约束的图像匹配新算法[J].工程图学学报,2009(5):104-107.  
DENG ZH Y, CHEN ZH K. An Image matching algorithm based on epipolar line restriction [J]. *Journal of Engineering Graphics*, 2009(5):104-107. (in Chinese)
- [3] 杨小冈,曹菲,缪栋,等.基于相似度比较的图像灰度匹配算法研究[J].系统工程与电子技术,2005,27(5):918-921.  
YANG X G, CAO F, MIAO D, et al.. Study on

相比传统 Horn-Schunck 光流算法而言,改进光流算法运算量没有增加,但运动估计效率高,收敛快,平均计算时间为3.8s,仅为传统算法5.6s的2/3。该算法对于复杂背景下灰度变化小、运动速度慢的运动估计也具有较高精度和稳定性。

## 4 结 论

本文提出了一种基于梯度阈值的五置信点约束的改进光流算法对运动模型参数进行估计。首先针对实际环境中存在的干扰,通过设定梯度阈值,有效地剔除了光流场中不利于运动估算的干扰数据;然后采用五置信点加权法处理光流梯度,减小了单个像素点受噪声的影响,增强了光流梯度的置信度;最后通过对光流场计算公式设定门函数,改变不同光流梯度区间光流场的约束条件。改进后的算法与 Horn-Schunck 光流算法相比,计算量并没有增加,但是运动图像估算精度高,收敛快,运算时间缩短了1/3。该算法对于复杂背景情况的光流估计也具有较高精度和鲁棒性。本文实验证明:该算法切实、有效,在行车环境传感、交通流分析中具有潜在的应用价值。

- the image grayscale matching algorithm based on similarity measures[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2005,27(5):918-921. (in Chinese)
- [4] 王会峰,刘上乾,汪大宝,等.基于序列图像特征配准的摄像机旋转补偿算法[J].光学精密工程,2008,16(7):1330-1334.  
WANG H F, LIU SH Q, WANG D B, et al.. Video camera rotation compensation algorithm based on feature matching of sequence image frames [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(7):1330-1334. (in Chinese)
- [5] 李玲玲,李翠华,曾晓明,等.基于 Harris-Affine 和 SIFT 特征匹配的图像自动配准[J].华中科技大学学报,2008,36(8):13-16.  
LI L L, LI C H, ZENG X M, et al.. An automatic image registration method based on SIFT and Harris-Affine features matching [J]. *Huazhong Univ. of Sci. & Tech.*, 2008,36(8):13-16. (in Chinese)
- [6] 姜永林,屈楨深,王常虹.基于纹理及统计特征的视频背景提取[J].光学精密工程,2008,16(1):172-177.

- JIANG Y L, QU Z S, WANG C H. Video background extraction based on textural and statistical features[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(1): 172-177. (in Chinese)
- [7] 孙辉, 赵红颖, 熊经武, 等. 基于光流模型的图像运动估计方法[J]. *光学精密工程*, 2002, 10(5): 443-447.
- SUN H, ZHAO H Y, XIONG J W, *et al.*. Method of estimating image motion based on the optical flow model [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(5): 443-447. (in Chinese)
- [8] 陶陵. 基于光流技术的图像信息获取[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
- TAO L. *Gaining Image Information based on optical flow technology*[D]. Wuhan: Huazhong University, 2005. (in Chinese)
- [9] TEKALP A M. *Digital Video Processing* [M]. Indiana: Prentice Hall PTR, 1995.
- [10] BERTHOLD K, HORN P, BRIAN G. Direct methods for recovering motion [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1988(2): 51 - 76.
- [11] TIMONER S J, FREEMAN D M. Multi-image gradient-based algorithms for motion estimation [J]. *Opt. Eng.*, 2001, 40(9): 2003-2016.
- [12] 黄士科, 陶琳, 张天序. 一种改进的基于光流的运动目标检测方法[J]. *华中科技大学学报*, 2005, 33(5): 39-41.
- HUANG SH K, TAO L, ZHANG T X. An improved algorithm of moving object detection based on optical flow [J]. *Huazhong Univ. of Sci. & Tech*, 2005, 33(5): 39-41. (in Chinese)
- [13] 邓辉斌, 熊邦书, 欧巧凤. 基于隔帧差分区域光流法的运动目标检测[J]. *光电技术应用*, 2009, 30(2): 300-304.
- DENG H B, XIONG B SH, OU Q F. Moving targets detection based on regional optical flow of discontinuous frame [J]. *Semiconductor optoelectronics*, 2009, 30(2): 300-304.

#### 作者简介:



屠大维(1965—),男,浙江诸暨人,教授,博士生导师,1987年、1989年、1993年于浙江大学分别获得学士、硕士、博士学位,现为上海大学机电工程与自动化学院执行院长,主要研究方向为机器视觉及伺服控制、光机电一体化智能机械及仪器、人机智能系统等。E-mail: tdwshu@staff.shu.edu.cn



江济良(1985—),男,湖北黄冈人,硕士研究生,2009年于三峡大学获得学士学位,主要研究方向为数字图像处理、机器视觉、人机智能等。E-mail: jiangjiliang@shu.edu.cn