

一种改进的全局光流估计方法

齐蕴光¹ 安 钢¹ 曹艳华²

(装甲兵工程学院机械工程系 北京 100072)¹ (装甲兵工程学院技术保障系 北京 100072)²

摘 要 基于光流基本约束和平滑性约束条件的 Horn-Schunck 光流场估计算法是图像运动估计的重要方法。但是,该方法存在在梯度值较小处运动参数估计不准确的问题;同时,现有的改进方法由于涉及到可调参数的人工选取,并在阈值设置过高时容易在运动目标区域产生空洞,限制了光流法的应用。对光流基本约束项的权函数加以改进,给出了两种改进的光流估计算法。实验结果表明,改进算法能够在权函数阈值设置过高时降低对可靠光流的抑制,提高了算法的自适应性,为运动目标检测跟踪提供了有力条件。

关键词 光流场,全局平滑约束,权函数,自适应,运动估计

中图分类号 TP391.41 **文献标识码** A

Improved Method of Global Optical Flow Estimation

QI Yun-guang¹ AN Gang¹ CAO Yan-hua²

(Department of Mechanical Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China)¹

(Department of Technical Support Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China)²

Abstract The optical flow estimation algorithm based on the optical flow constraint and smoothness constraint presented by Horn and Schunck is one of the important algorithms of the image motion estimation. The algorithm cannot acquire accuracy motion parameter estimation at low-gradient points. At the same time, the present improved methods required artificial selected parameters and when the threshold value was set too high the object area would be unperfected. Two optical flow estimation methods were presented by modifying the optical flow basic constraint weighted function. Experiment results show that the improved methods can depress the repression of reliable optical flow when the threshold value was set too high and improve the self-adaptive ability what lays a good foundation for moving object detection and tracking.

Keywords Optical flow field, Global smoothness constraint, Weighted function, Self-adaptive, Motion estimation

为光流基本等式引入适当的约束条件形成可行的估计算法,从而获得光流场的估计,是光流算法的核心问题。按构造约束的性质,光流法一般可分为全局约束法和局部约束法。全局约束法可以获得致密的光流场,有利于进行目标检测、跟踪。Horn-Schunck 方法^[1]是典型的全局约束方法,但是整体平滑约束条件在亮度发生突变处、运动的不连续处以及物体边界处易产生过平滑,使其性能受到很大影响。

基于运动物体边缘光流矢量并不平滑的事实, Nagel 提出“有向平滑”概念,即平滑约束仅加在亮度变化不大的方向上^[2]。沿着平滑约束局部化的思路并纳入对全局优化的加权考虑, Fogel 提出平滑约束的分级计算和自适应加权有向平滑约束^[3]。Hildreth 等人提出沿由亮度确定的物体轮廓方向加以平滑约束,引导算法研究向轮廓特征提取的方向发展,但灰度的边缘不一定是运动的边缘^[4]。傅洁、吴立德提出基于区域的平滑性约束,并借助多尺度技术进行区域的提取^[5]。

基于“只有在图像梯度灰度较大处光流基本方程才近似成立”的论断,文献^[5]提出了使用权函数使得仅在梯度值较大处使用光流约束的方法,但该方法存在阈值需要人工设定,

且设置过大时容易造成目标区域受损的问题。对此提出了两种新的光流约束权函数改进方法以提高算法的精确性和自适应性,满足实际应用需求。

1 光流法的基本概念

1.1 光流基本方程

1981 年, Horn 和 Schunck 在亮度守恒的假设条件下,提出了光流法的基本方程。设图像上点 (x, y) 在时刻 t 的灰度为 $I(x, y, t)$, 经过间隔 dt 后对应点灰度为 $I(x+dx, y+dy, t+dt)$, 当 $dt \rightarrow 0$ 时认为灰度不变, 有等式(1)成立:

$$I(x, y, t) = I(x+dx, y+dy, t+dt) \quad (1)$$

式(1)为非线性方程, 将 $I(x+dx, y+dy, t+dt)$ 进行一阶 Taylor 级数展开, 忽略二阶 ϵ 无穷小项, 得到:

$$I_x u + I_y v + I_t = 0 \quad (2)$$

式中, $I_x = \partial I / \partial x$, $I_y = \partial I / \partial y$, $I_t = \partial I / \partial t$ 分别表示图像像素灰度沿 x, y, t 方向的梯度, 则 $(I_x, I_y) = (\partial I / \partial x, \partial I / \partial y)$ 表示图像的空域梯度场, $I_t = \partial I / \partial t$ 表示图像序列的时域梯度。 $u(x, y)$ 、 $v(x, y)$ 分别表示光流在点 (x, y) 的水平方向和垂直方向的速度。

齐蕴光(1983—),男,博士生,主要研究方向为电子稳像、运动目标检测与跟踪技术, E-mail: qiyunguang@126.com; 安 钢(1946—),男,硕士,教授,主要研究方向为信号分析处理技术; 曹艳华(1983—),男,博士生,主要研究方向为信号分析处理技术。

度分量, $(u, v) = (dx/dt, dy/dt)$ 为该点的光流。

式(2)即为光流约束基本方程, 其物理意义为: 灰度对时间的变化率等于灰度的空间梯度与光流速度的点积。

1.2 孔径问题

由式(1)可知, 光流基本方程定义了一条约束直线, 直线上的任何一点 (u, v) 均满足基本等式, 如图 1 所示。

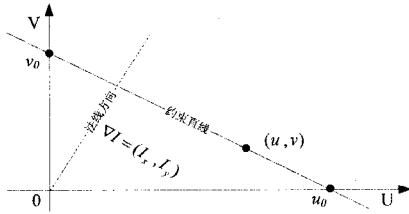


图 1 光流基本等式确定的约束线

由式(2)可知, 光流约束方程包含 u 和 v 两个未知量, 仅利用基本方程不能唯一确定 u 和 v 的值, 只能确定沿着梯度方向的法向流, 这就是光流方程的孔径问题。

2 Horn-Schunck 方法

Horn-Schunck 方法将基本等式和光流场全局平滑约束联合在一起求解光流, 得到了一个稠密的光流场, 是典型的全局约束方法。Horn 和 Schunck 提出了全局平滑约束假设, 该假设认为: 在大多情况下物体的运动速度是局部光滑的或随着位置的改变而缓慢变化的, 各相邻点具有相同或相近的运动速度。根据该假设可知光流速度的空间变化率为零, 即:

$$\begin{cases} (\nabla u)^2 = (\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y})^2 = 0 \\ (\nabla v)^2 = (\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y})^2 = 0 \end{cases} \quad (3)$$

全局平滑约束可用光流矢量场梯度模的平方和 $(\|\nabla u\|^2 + \|\nabla v\|^2)$ 进行测度, 定义全局平滑约束因子 e_s^2 为:

$$e_s^2 = \|\nabla u\|^2 + \|\nabla v\|^2 = \sum_x \sum_y (u_x^2 + u_y^2 + v_x^2 + v_y^2) \quad (4)$$

光流基本方程约束要求光流场偏离基本等式的误差最小, 定义光流约束因子:

$$e_c^2 = \sum_x \sum_y (I_x u + I_y v + I_t)^2 \quad (5)$$

将上述两个条件联立求解, 得到:

$$\min\{\sum_x \sum_y \{(I_x u + I_y v + I_t)^2 + \lambda[(\nabla u)^2 + (\nabla v)^2]\}\} \quad (6)$$

式中, λ 是调和两类因子 e_s^2 和 e_c^2 的权参数, 反映了对图像数据及约束条件的可信度。 λ 的取值主要考虑图像的噪声情况: 当噪声较强时, 需要更多地依赖光流约束条件, 令 λ 值较大; 反之当图像数据信噪比较高时, 则偏离基本等式的误差 e_c^2 就应当更为重视, 令 λ 取较小值。

泛函的极值问题可通过将变分方法转化成微分方程组求解, 用松弛迭代方程进行迭代, 得到:

$$\begin{cases} u^{(n+1)} = \bar{u}^{(n)} - \frac{I_x [I_x \bar{u}^{(n)} + I_y \bar{v}^{(n)} + I_t]}{\lambda + I_x^2 + I_y^2} \\ v^{(n+1)} = \bar{v}^{(n)} - \frac{I_y [I_x \bar{u}^{(n)} + I_y \bar{v}^{(n)} + I_t]}{\lambda + I_x^2 + I_y^2} \end{cases} \quad (7)$$

式中, n 是循环数, $u^{(0)}$ 和 $v^{(0)}$ 是光流的初始估计值, 可以取为零; $\bar{u}^{(n)}$ 和 $\bar{v}^{(n)}$ 是邻域平均值, 可以设定当相邻两次迭代计算结果的距离小于预定的公差值时迭代结束。常用的迭代结束判决条件有最大绝对差、最大角误差等。实际可能遇到终止条件不能满足的情况, 需要预先设定最大迭代次数 n_{max} 来强行终止迭代。

Horn 和 Schunck 在整个图像上加上平滑约束条件, 这样会带来两个负面效应:

1) 光流约束在图像的某些区域, 如梯度值较低处, 是不成立的, 容易导致不可靠光流的产生。

2) 平滑约束条件并不适用于垂直边界的方向上, 容易导致区域的过度平滑。

本文的工作是对亮度守恒约束条件的权函数加以改进, 从而提高光流估计的精确性和自适应性。

3 Horn-Schunck 方法的改进

3.1 文献改进方法

Verri 和 Poggio^[7] 指出: 光流基本方程在一般场合下并不成立, 只有在图像梯度灰度较大处才近似成立。为了增强算法的稳定性和准确性, 仅在梯度较大的点处使用亮度守恒约束, 而在梯度较小的点处使用平滑性约束。文献[6]定义光流约束权函数为 $\epsilon(x, y)$, 设梯度阈值为 T , 令 $\epsilon(x, y)$ 在梯度较大时值为 1, 在梯度较小时为 0:

$$\epsilon(x, y) = \begin{cases} 1, & I_x^2 + I_y^2 > T \\ 0, & I_x^2 + I_y^2 \leq T \end{cases} \quad (8)$$

这样, 光流最小化方程可以写为如下形式:

$$\min\{\sum_x \sum_y \{\epsilon(I_x u + I_y v + I_t)^2 + \lambda[(\nabla u)^2 + (\nabla v)^2]\}\} \quad (9)$$

该方法通过设定阈值对梯度值可靠性进行判断, 在一定程度上抑制了梯度值小的点处不可靠光流的产生。但是阈值需要人为设定, 阈值设置过低, 则不能达到抑制噪声光流产生的目的; 设置过高则会导致空洞的产生, 限制了该方法走向实际应用。

3.2 本文改进方法

(1) 改进方法一: 为了减少梯度阈值设定不合理对光流计算结果带来的影响, 令小于梯度阈值的点处权值依据梯度值大小线性变化而非置为 0, 从而降低阈值设置过高导致的目标区域光流场受损的情况发生。对权函数进行改进, 定义权函数:

$$\epsilon'(x, y) = \begin{cases} 1, & I_x^2 + I_y^2 > T \\ \frac{I_x^2 + I_y^2}{T}, & I_x^2 + I_y^2 \leq T \end{cases} \quad (10)$$

(2) 改进方法二: 为了保留与阈值接近的点的的光流, 进一步抑制梯度值较小处不可靠光流的产生, 将权函数定义为:

$$\epsilon'(x, y) = \begin{cases} 1, & I_x^2 + I_y^2 > T \\ (\frac{I_x^2 + I_y^2}{T})^2, & I_x^2 + I_y^2 \leq T \end{cases} \quad (11)$$

4 实验分析

图 2 为红外图像序列的连续两帧图像, 图中有一辆正在行驶的坦克车辆, 图像大小为 300×270 , 帧速为 24 帧/秒。

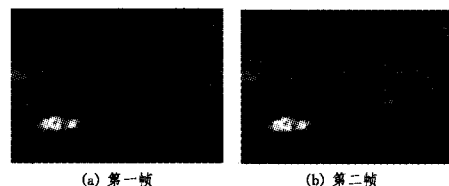


图 2 连续两帧红外图像

虽然红外图像的信噪比较低, 但是物体之间的热交换是一个相对缓慢的过程, 在序列图像的相邻两帧时间内没有变

化,同时背景杂波具有较强的相关性,导致图像背景具有较大的相似性。红外序列图像的这个性质为应用光流方法所需的亮度守恒和平滑性守恒条件提供了保证。因此选择红外序列图像来验证改进算法对不同梯度阈值设定的自适应能力及对噪声光流的抑制能力。

4.1 Horn-Schunck 方法计算结果

图3为利用 Horn-Schunck 方法计算上述红外图像序列得到的光流场的分布以及光流场的灰度图。从图中可以观察到,除了得到运动坦克的光流外,由于受到红外噪声影响,背景中产生了大量的噪声光流,对运动目标的检测带来了不利影响。

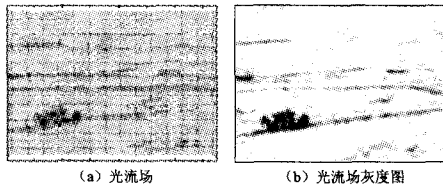


图3 Horn-Schunck 方法得到的光流场及灰度图

4.2 改进方法计算结果

利用上述3种改进方法计算图2红外图像序列的光流场,平滑系数 λ 设为100,迭代次数设为100,将阈值 T 依次设为平均梯度强度的1倍、5倍、10倍和20倍,考察不同阈值设定对改进方法得到的光流场计算结果的影响。

图4中(a)、(b)、(c)分别为利用3种加权方法在不同阈值下得到的光流场灰度图。

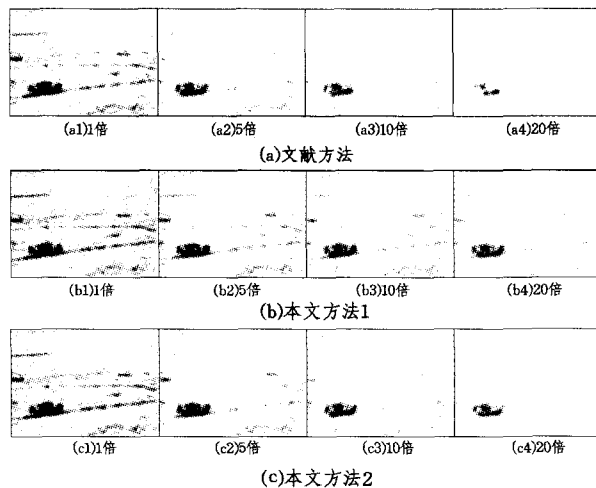


图4 3种改进方法对比

4.3 结果分析

1)文献方法:从图4(a)中可以看出,随着阈值的增大,在抑制噪声光流产生的同时,目标区域的光流值也受到了一定程度的削弱。当阈值设为平均梯度强度的5倍时,得到的光流场为较为理想的结果,见图4(a2)。但是当阈值设为更大值时,目标区域产生了空洞,且随着阈值的增大,空洞不断增加,不利于进行目标检测。

2)第一种改进方法:对比4(a),从图4(b)中可以看出,背景噪声光流也得到了相当大程度的抑制,虽然抑制能力没有文献方法强,但随着阈值的增大,灰度图中的目标区域受损的情况得到了改善。当阈值设为平均梯度强度的20倍时,目标区域仍然较为完整。

3)第二种改进方法:对比上述两种方法,可知该方法是两种方法的一种折中,对梯度强度小于阈值的点的抑制及保存目标区域完整性的能力介于上述两种方法之间。从图4(c)中可以看出,当阈值设为平均梯度强度的10倍时,目标区域仍然较为完整,同时背景光流噪声得到了很好的抑制。

4.4 目标检测

灰度化后的光流图像中,灰度较大的像素表示光流较大的点,即运动速度大的点;灰度较小的像素表示光流较小的点,即运动目标速度较小的点。可以根据灰度值的大小实现对运动目标的检测。利用第二种改进方法,将阈值设为平均梯度强度的10倍得到光流场,对运动目标进行检测提取。按照如下步骤进行:

1)对光流场进行灰度化处理得到反映图像各像素点运动速度大小的灰度图像(见图4(c3));

2)对处理后的图像采用阈值分割技术得到二值图像(见图5(a));

3)由于图像中不可避免地产生噪声点以及“空洞”,选用适当的结构元素对二值图像进行形态学开运算处理(见图5(b))和闭运算处理(见图5(c));

4)在图像序列中标记出识别的运动目标(见图5(d))。

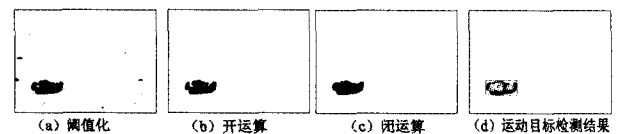


图5 运动目标检测过程

结束语 由于改进了权函数的计算方法,当梯度阈值较高时,在抑制背景噪声光流产生的同时,一定程度上保留了目标区域梯度值较小处的光流,减少了空洞的产生,有利于对光流灰度图进行处理从而分割出运动目标区域。利用本文权函数的改进方法,可以将梯度阈值设置为较高值,从而降低由于阈值设置过低造成的不可靠光流的发生,同时避免梯度阈值设置为较高值时空洞的产生,能减少人为地设置参数的情况,提高算法的自适应性。

参考文献

- [1] Horn B, Schunck B. Determining optical flow[J]. Artificial Intelligence, 1981, 17: 185-203
- [2] Nagel H H, Enkelman W. An Investigation of Smoothness Constraints for the Estimation of Displacement Vector Field from Image Sequences[C]// IEEE Trans. Pattern Analyze and Machine Intelligence. 1986, 8: 565-593
- [3] Foel S V. Estimation of velocity vector fields from time varying image sequences [J]. CVGIP; Image-Understanding, 1991, 53: 253-287
- [4] Hildreth E C. The Measurement of Visual Motion[M]. MIT Press, 1984
- [5] 傅杰, 吴立德. 计算机视觉中运动分析的连续处理方法综述[J]. 模式识别与人工智能, 1991, 4(1): 91-99
- [6] 傅杰, 吴立德. 综合图像分割与光流计算的连续处理方法[J]. 计算机学报, 1993, 16(7): 541-547
- [7] Verri A, Poggio T. Motion field and optical flow, Qualitative properties [J]. IEEE Trans. Patt. Anal. Mach. Intel., 1989, 05 (11): 490-498