

文章编号 1004-924X(2002)05-0443-05

基于光流模型的图像运动估计方法

孙 辉,赵红颖,熊经武,金 宏

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130022)

摘要:运动图像序列参数估计是电子稳像的关键技术之一。安装在运动载体上的摄像机采集图像时,由于载体姿态变化产生不平稳运动,这种不平稳运动将影响摄像系统的成像质量。电子稳像的目的就是通过计算运动参数并校正图像,以保证处理后的图像序列达到稳定效果。光流模型是处理运动图像的有效方法,本文介绍了用光流模型计算运动图像参数的基本原理和步骤。根据图像像素强度守恒原理,建立光流约束方程,计算运动参数,最后结合实例计算两帧样本图像之间水平和垂直位移量,并绘制光流矢量图。

关键词:光流;运动图像;迭代;收敛

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A

1 引言

根据动态图像或时变图像序列的分析,来确定客观物体与观察者之间的相对运动参数,是当前计算机视觉研究领域中的热门课题^[1]。运动图像分析涉及到图像处理、图像分析、人工智能与模式识别、计算机视觉等研究领域,在工业生产、医疗卫生、国防等应用领域得到了广泛应用,具有重要的现实意义。

运动图像是客观物体在运动过程中在观察着的观测平面上(传感器)成像的结果,从观察者角度来看,运动在本质上是几何变化,而几何变化表现在图像像素强度的变化。从研究图像像素强度出发,进行运动图像的定量分析,计算图像的运动参数,包括平移、旋转以及更加复杂的可用仿射变换或透视变换描述的运动参数,是电子稳像、运动预测、目标定位等应用领域的关键技术之一。近几年来,国内外专家学者提出许多行之有效的处理方法,如通过图像帧间运动计算运动参数的线搜索方法^[2]、基于边缘图像匹配方法^[3]、采用相位相关估计全局运动参数^[4]及2.5维运动估计^[5]等。

本文介绍一种基于光流模型的运动图像估计

方法,其基本思想是将运动图像函数 $f(x, y, t)$ 作为基本函数,根据图像强度守恒原理建立光流约束方程,通过求解光流约束方程,计算运动参数。实验结果表明,该方法具有计算精度高、易于实现等优点,有一定的实用价值。

2 光流约束方程

光流(optical flow, image flow)是空间运动物体的被观测表面上的像素点运动的瞬时速度场,包含了物体与成像传感器系统之间相对运动的关系^[1]。光流研究是计算机运动视觉的一个重要部分,是利用运动图像序列中的强度数据的时域变化和相关性,确定图像像素位置的运动情况。

根据人或动物(传感器)视觉感知原理,客观物体在空间上一般是相对连续运动的,在运动过程中,投射到视网膜平面(传感器平面)上的图像实际上也是连续变化的。因此,我们可以假设运动图像函数 $f(x, y, t)$ 是关于变量 x 、 y 和 t 的连续函数。设物体成像点在时刻 t ,位置 (x, y) 的强度值 $f(x, y, t)$ 。如果用 $u(x, y)$ 和 $v(x, y)$ 表示图像在该点的水平和垂直速度分量,则在时刻 $t + dt$ 图像点从 (x, y) 移动到位置 $(x + dx, y + dy)$,强度值 $f(x + dx, y + dy, t + dt)$,其中 dx

$= u dt, dy = v dt$ 分别表示水平和垂直方向上的位移。根据霍恩 舒恩克 (Horn Schunk) 提出的运动物体 2-D 时空模型, 图像像素强度守恒, 对于同一个目标点来说, 可以认为在时刻 $t + dt$ 、图像点 $(x + dx, y + dy)$ 的强度 $f(x + dx, y + dy, t + dt)$ 应当与在时刻 t 、图像点 (x, y) 的强度 $f(x, y, t)$ 相等, 即:

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

根据函数 $f(x, y, t)$ 中变量 x, y 和 t 的连续性, 可将上式右边在 (x, y, t) 作泰勒 (Taylor) 级数展开, 略去高阶项并同时除以 dt 可得到:

$$\frac{\partial f}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial f}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial f}{\partial t} = 0, \quad (2)$$

上式就是基本的光流约束方程 (optical \ image flow constraint equation), 它反映了运动图像时间梯度与空间梯度之间的时空微分关系, 表示图像强度对时间变化率等于强度的空间变化率与运动速度的乘积。

记

$$E_x = \frac{\partial f}{\partial x}, E_y = \frac{\partial f}{\partial y}, E_t = \frac{\partial f}{\partial t}$$

代入(2)式可得到光流约束方程的另一种形式:

$$E_x u + E_y v + E_t = 0, \quad (3)$$

在实际应用中, 图像中的强度变化可能出现不连续性^[6], 光流约束方程在图像强度存在突变区域时也是成立的, 其适用性可归纳为如下两点:

(1) 在图像中可以有突变形式的不连续存在, 例如, 由于背景或物体之间的过渡所造成的速度场不连续体现在图像边缘强度值突变, 此时, 只要在不连续区域周围图像强度均匀变化, 光流约束方程依然成立。

(2) 图像平面上每一点的变化应该完全是由图像中客观物体与观察者 (传感器) 间相对运动引起的, 而不是由于某一点的反射性质发生变化带来的影响, 同时还必须排除图像点具有各自独立运动或由于其它物体的遮掩引起的强度变化这种情况。

3 光流约束方程求解

光流约束方程求解就是计算两个未知速度分

量 u 和 v 。根据(3)式, 未知量 u 和 v 被约束在解空间的一条直线上, 所有直线上的点均为光流约束方程的解。由于只有一个方程还不能唯一确定 u 和 v 两个未知量, 所以必须附加新的约束条件。

在许多情况下观察物体的速度矢量是局部平滑的, u 和 v 随着像素点 (x, y) 的改变而缓慢变化, 在局部区域变化足够小。特别地, 在目标作无变形刚体运动时, 相邻像素点具有相同的运动速度, 此时在局部区域速度的空间变化率为零。

令 u_{avg} 和 v_{avg} 分别表示速度分量 u 邻域和 v 邻域中的平均值, 根据上述分析, 下式成立:

$$C^2 = (u - u_{avg})^2 + (v - v_{avg})^2 = 0, \quad (4)$$

显然, (4) 式反映了运动物体的局部平滑特性, 可以作为另一个约束条件。

在两个约束条件中, 光流约束方程反映了速度之间的相对关系, 局部平滑约束条件反映了速度变化率应满足的必要条件。

结合两个约束条件, 对全部像素点 (x, y) , 建立如下极小化方程:

$$(u, v) = (E_x u + E_y v + E_t)^2 + C^2, \quad (5)$$

其中, (u, v) 是极小化问题的总误差, 是附加约束的拉格朗日乘子。

为使(5)式中 (u, v) 最小, 可将 u 和 v 分别对 u 和 v 求导并取导数为零, 即

$$\frac{\partial}{\partial u} = 0, \frac{\partial}{\partial v} = 0$$

于是得到:

$$(E_x^2 + C^2) u + E_x E_y v = -2 u_{avg} - E_x E_t, \quad (6a)$$

$$(E_y^2 + C^2) v + E_x E_y u = -2 v_{avg} - E_y E_t, \quad (6b)$$

由(6)式可以导出:

$$u = u_{avg} - \frac{E_x (E_x u_{avg} + E_y v_{avg} + E_t)}{E_x^2 + E_y^2 + C^2}, \quad (7a)$$

$$v = v_{avg} - \frac{E_y (E_x u_{avg} + E_y v_{avg} + E_t)}{E_x^2 + E_y^2 + C^2}, \quad (7b)$$

式(7)提供了用迭代法求解 u 和 v 的基础。一般地, 常用如下松弛迭代方程求解:

$$u^{(n+1)} = u^{(n)} - \frac{E_x (E_x u^{(n)} + E_y v^{(n)} + E_t)}{E_x^2 + E_y^2 + C^2}, \quad u^{(0)} = 0, \quad (8a)$$

$$v^{(n+1)} = v^{(n)} - \frac{E_y(E_x u^{(n)} + E_y v^{(n)} + E_t)}{2 + E_x^2 + E_y^2}$$

$$v^{(0)} = 0, \quad (8b)$$

在实际求解时,需要计算图像强度在空间和时间的偏导数 E_x 、 E_y 和 E_t 。如果 $f_{i,j,k}$ 表示图像在 (x, y, t) 点的强度 $f(x, y, t)$, $f_{i,j,k+1}$ 表示图像在 $(x, y, t + dt)$ 点的强度 $f(x, y, t + dt)$, 那么 E_x 、 E_y 和 E_t 可分别近似计算如下:

$$E_x = \frac{1}{4} (f_{i+1,j,k} + f_{i+1,j+1,k} + f_{i+1,j,k+1} + f_{i+1,j+1,k+1} - f_{i,j,k} - f_{i,j+1,k} - f_{i,j,k+1} - f_{i,j+1,k+1}), \quad (9a)$$

$$E_y = \frac{1}{4} (f_{i,j+1,k} + f_{i+1,j+1,k} + f_{i,j+1,k+1} + f_{i+1,j+1,k+1} - f_{i,j,k} - f_{i+1,j,k} - f_{i,j,k+1} - f_{i+1,j,k+1}), \quad (9b)$$

$$E_t = \frac{1}{4} (f_{i,j,k+1} + f_{i+1,j,k+1} + f_{i,j+1,k+1} + f_{i+1,j+1,k+1} - f_{i,j,k} - f_{i+1,j,k} - f_{i,j+1,k} - f_{i+1,j+1,k}). \quad (9c)$$

对全部 x, y 值,当迭代运算结果满足事先给定的估计容差 ϵ_1 和 ϵ_2 时,迭代计算结束,即

$$|u^{(n)} - u^{(n-1)}| \leq \epsilon_1, \quad (10a)$$

$$|v^{(n)} - v^{(n-1)}| \leq \epsilon_2. \quad (10b)$$

4 实验结果与分析

根据前文所述方法,我们选取了运动图像序列中的连续两帧图像进行了算法测试,样本图像尺寸 352×288 、256 级黑白强度,如图 1、图 2 所示。在实际应用中,可通过改进算法,调整迭代参数等手段,避免迭代发散并提高收敛速度,一致逼近目标值。基本步骤如下:

- 1) 初始化:迭代次数 $n = 1, \epsilon_1 = 1, u^{(n-1)} = v^{(n-1)} = 0$ 。
- 2) 根据公式(9) 计算图像强度偏导数 E_x 、 E_y 和 E_t 。
- 3) 根据公式(8) 计算 $u^{(n)}$ 和 $v^{(n)}$ 。
- 4) 判断是否满足容差条件(10), 如果满足, 迭代结束, $u^{(n)}$ 和 $v^{(n)}$ 即是所求目标值。
- 5) 判断是否满足 n 最大迭代次数, 如果满足, 迭代结束, $u^{(n)}$ 和 $v^{(n)}$ 即是所求目标值; 否则迭代次数 $n \leftarrow n + 1$, 转 3)。



图 1 第一帧图像
Fig. 1 The first image.



图 2 第二帧图像
Fig. 2 The second image.

本文方法由 Microsoft Visual C++ 6.0 开发语言实现。在 Pentium 4、主频 1.7 GHz 硬件环境下进行算法测试。样本图像测试结果:水平位移 $dx = 3$, 垂直位移 $dy = 4$, 迭代次数 $n = 8$, 运算时间 10ms。

图 3 显示了光流矢量图,从图中可以看出,光流真实反映了图像像素强度变化情况,在图像像素强度变化较大的区域光流较大,强度变化较小的区域光流也较小。

通过分析光流约束方程的求解过程,可知光流法在算法的实现上具有较大的灵活性,主要表现在以下两个方面:

- 1) 通过调整 ϵ 值可以控制计算精度和迭代收敛速度。当 ϵ 较大时,计算精度较高,收敛速度下降;反之 ϵ 较小时,计算精度较低,收敛速度提高。在实际计算时,应根据图像噪声情况选择适当

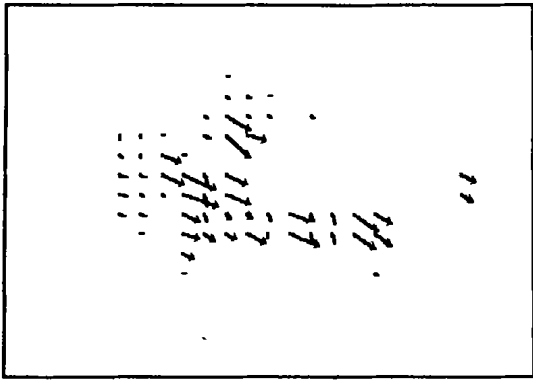


图 3 光流矢量图

Fig. 3 Motion vectors of the optical flow.

的值,以期达到最佳迭代效果。

2) 对无变形刚体来说,运动参数适用于整个图像,如果将图像分成若干子块,则每个子块图像都具有相同的运动参数;反之,如果计算每个子块

图像的运动参数,则各运动参数应相同。我们只选择图像中部分子块取代整个图像计算运动参数,可以减少计算量,提高精度。

实验结果表明,用光流法计算运动图像参数具有计算精度高、算法简单、控制灵活及易于实现等优点,有一定的实用价值。

5 结束语

光流法有较完善的理论基础,也有广阔的应用前景。采用光流法不仅可以处理本文介绍的运动图像平移问题,而且能够计算旋转以及可以用仿射变换或透视变换描述的更加复杂的运动。另外,如何通过改进算法,提高收敛速度,满足实时要求,也是目前需要解决的问题。我们将在今后工作中作进一步探讨。

参考文献:

- [1] 郑南宁. 计算机视觉与模式识别[M]. 北京:国防工业出版社,1998.
- [2] 祁卫. 用于图像帧主运动估计的快速搜索方法[M]. 小型微型计算机系统,2000,21(10):1003-1005.
- [3] Parl K. An Adaptive Motion Decision System for Digital Image Stabilizer Based on Edge Pattern Matching[J]. *IEEE Transaction Consumer Electronics*. 1992,38(3):607-616.
- [4] Hill L, Vlachos T. On the Estimation of Global Motion Using Phase Correlation for Broadcast Application[J]. *IEE* 1999, 465:732-725.
- [5] Jin S, Zhu Zhigang, Xu Guangyou. Digital Video Sequence Stabilization Based on 2.5D Motion Estimation and Inertial Motion Filtering[J]. *Real-Time Imaging*, 2001,7(4):357-365.
- [6] 章毓晋. 图像理解与计算机视觉[M]. 北京:清华大学出版社,2000.

Method of estimating image motion based on the optical flow model

SUN Hui, ZHAO Hong-ying, XIONG Jing-wu, JIN Hong

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China)

Abstract: It is one of the important technologies in electronic stabilizing images to estimate the sequence of image motion. A camera mounted on a moving vehicle collects a sequence of images. We consider a vehicle's motion to be non-smooth when impulsion or high-frequency changes occur, the non-smooth motion will perturb the sequence of images obtained by the camera. The goal of electronic stabilizing images is to estimate the motion quantities, and correct the sequence of images, so that they are approximately the same as the images that would have been obtained if the motion of the vehicle had been smooth. Using the optical

flow model to process the image motion is a good method. This paper presents the basic theory and approach to calculating image motion by using the optical flow model. It shows how to derive the optical flow constraint equation, and how to use it to estimate motion quantities. Finally, It gives the vertical and horizontal displacement between the consecutive two frames and the map of optical flow vectors.

Key words: optical flow; image motion; iteration; convergence

作者简介:孙 辉(1963 -)男,吉林柳河人,1985年毕业于吉林大学计算数学专业,理学学士,多年从事计算机软件设计与开发工作,主要研究领域计算机网络通信、数字图像处理与分析、计算机视觉与模式识别、小波理论与应用等,近年来发表文章二十余篇。

征订启示

愿《液晶与显示》成为您的良师益友 欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登产品信息

《液晶与显示》是中国科学院长春光学精密机械与物理研究所和中国光学光电子行业协会液晶专业分会及石家庄实力克液晶材料有限公司联合主办的专业性学术期刊。

《液晶与显示》以研究报告、研究快报、综合评述和产品信息等栏目集中报道国内外液晶学科和显示领域中最新理论研究、科研成果和新技术,及时反映国内外本学科领域及产业信息动态。《液晶与显示》被英国《科学文摘》(SA)、美国《化学文摘》(CA)、俄罗斯《文摘杂志》(P)和《中国物理文摘》等国内外著名检索刊物和文献数据库摘引和收录。《液晶与显示》已入编“中国科学核心期刊全文数据库”、“中国学术期刊(光盘版)”和“中国期刊网”(《液晶与显示》网址: <http://yjys.Chinajournal.net.cn>),及“万方数据资源系统(ChinaInfo)”(《液晶与显示》网址: <http://www.Chinainfo.gov.cn/periodical/yjyxs/index.htm>),向国内外读者提供网络信息。

《液晶与显示》以创新性、综合性、实用性为办刊特色,内容丰富,信息量大,涵盖面广,可读性强。既是启迪科技人员开拓创新思路的参考期刊,又是从事液晶和显示技术研究的广大科技人员、大专院校师生及相关领域的科技工作者进行学术交流的良好园地,也是图书、情报等部门必不可少的信息来源。《液晶与显示》热忱欢迎广大作者、读者广为利用,踊跃投稿,将您的科技创新、产品信息、企业风貌通过这一窗口展示出来。

《液晶与显示》为双月刊,16开本,80页,国内定价34.00元,国内外公开发行。邮发代号,国内:12-203;国外:4868Q。同时,《液晶与显示》编辑部将竭诚为广大读者服务,随时办理破年、破季订阅。

单 位: 中科院长春光学精密机械与物理研究所
《液晶与显示》编辑部
邮 编: 130021

地 址: 吉林省长春市工农大路 61 号
电 话: (0431)5684692 转 2534
E-mail: yjxs@ciomp.ac.cn