

# 基于全自动生长分割的梯度彩色光流场计算

廖 彬<sup>1,2</sup> 杜明辉<sup>1</sup> 胡金龙<sup>3</sup>

(华南理工大学电子与信息学院 广州 510640)<sup>1</sup> (华南农业大学理学院数学系 广州 510640)<sup>2</sup>  
(华南理工大学信息网络工程研究中心 广州 510640)<sup>3</sup>

**摘 要** 形变物体边界的准确定位是光流估计的难点之一,仅依靠改进光流算法收效甚微。提出了全自动生长分割法,以准确提取形变运动物体,从而将视频分割结果与梯度彩色光流算法相结合来提高光流法对形变物体的检测准确度。

**关键词** 光流,生长分割,图像梯度场,彩色图像

**中图分类号** TP391.41 **文献标识码** A

## Gradient Field Optical Flow Estimation for Color Image Sequences Based on Automatic Growcut

LIAO Bin<sup>1,2</sup> DU Ming-hui<sup>1</sup> HU Jin-long<sup>3</sup>

(School of Electronic and Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)<sup>1</sup>

(Mathematics Department, South China Agriculture University, Guangzhou 510640, China)<sup>2</sup>

(Network Engineering and Research Center, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)<sup>3</sup>

**Abstract** Detecting the boundaries of deformation objects is one of the difficulties of optical flow estimation and it is hard to solve only using improved optical flow algorithms. Gradient field optical flow estimation for color image sequences based on automatic growcut was presented. It combined the segmented information with gradient field optical flow estimation to improve the detection accuracy for deformation objects.

**Keywords** Optical flow, Growcut, Gradient field, Color images

## 1 引言

运动图像分析是计算机视觉中的一项重要任务,其中的关键技术之一就是光流计算。通过光流场的计算,可以找到三维运动物体在二维图像平面上的投影,从而获得三维运动的特性描述。

1981年, Horn 和 Schunck (HS) 首次提出了计算光流场的基本等式<sup>[1]</sup>, 该等式是建立在图像亮度常数模型 (Brightness Constancy Model, BCM) 基础上的。在此之后, 又提出了许多光流计算方法。这些方法大致可以分成如下两类<sup>[2]</sup>: 一类是对光流方程进行正则化计算, 另一类是对光流方程添加多约束从而求解光流场。在第一类的光流方程正规化方法中, 由于光流场估计是作为 Hadamard 状态的病态方程来考虑的, 因此通过最小化加权了的平滑约束项来求取光流场。HS 法是此类方法的代表。此类方法的优点在于能提供运动物体内部与边界上密度达到 100% 的光流场。而当运动物体出现遮挡时, 在运动物体边界上, 会出现不连续的光流场, 且此种不连续性会蔓延至运动物体内部。在基于多约束的光流求解法中, 将一种或几种静态量同时应用于标准光流亮度约束方程中, 通过解图像上每点的过定方程组求得光流场。多约束条件方法的优点在于试图通过增加约束条件的处理将标

准光流方程转变为非奇异方程组求解。然而此类方法仍然无法在移动物体边缘上获得精确的光流。

由于彩色图像相对于灰度图像可提供更丰富的光学信息, 因此采用彩色图像序列进行光流场计算, 能够有效克服孔径问题。Ohta 首先提出了基于色彩灰度不变的计算模型。Golland 针对不同运动情况进行了基于色彩不变性的计算与实验分析<sup>[3]</sup>。Arshad 提出利用移动机器人测量的距离信息进行光流场计算<sup>[4]</sup>。

在现阶段, 单纯依靠光流法对形变物体的边界进行精确定位, 效果并不理想, 因此可以结合视频对象分割技术提高形变物体的光流场边界检测。

本文首先采用基于梯度场的彩色图像序列光流场算法得到图像的光流场, 接着使用全自动的生长分割法提取运动对象精确轮廓, 将相对运动的形变物体与背景相分离, 从而得到正确的运动物体的光流场边界, 提高了光流场检测的准确度。

## 2 基于梯度场的彩色图像序列光流场计算

在实际环境中, 亮度不变的这种假设往往不成立, 因此需要采用修正的光流定义反映速度场。这里采用我们提出的一种新方法: 基于梯度场的彩色图像序列光流场算法。在通用动态图像模型 (GDIM) 中<sup>[5]</sup>, 原先的二维运动场向量  $(u, v)$  被

到稿日期: 2010-06-03 返修日期: 2010-09-28 本文受国家自然科学基金(U0735004), 国家科技支撑计划(2008BAH37B08)资助。

廖 彬(1980—), 女, 博士生, 讲师, 主要研究方向为数字视频分析、数字视频处理, E-mail: liaobin\_lb@sohu.com; 杜明辉(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为图像处理、生物医学、数字通信; 胡金龙(1977—), 男, 讲师, 主要研究方向为移动多媒体、计算机网络。

扩展成为三维运动场向量 $(u, v, \delta E)$ , 其中的 $\delta E$ 表示图像序列的辐射度变化, 据此得到亮度守恒约束方程:

$$E(r+\delta r)=M(r)E(r)+C(r) \quad (1)$$

式中,  $M(r)$ 和 $C(r)$ 分别为亮度变化场的数乘和偏移量,  $r=(x, y, t)^T$ 表示 $t$ 时刻图像平面上坐标为 $(x, y)$ 的点。将式(1)进行泰勒级数展开, 可得到基于GDIM的扩展光流模型:

$$E_x(r)u(r)+E_y(r)v(r)+E_t(r)-M(r)E(r)-C(r)=0 \quad (2)$$

将式(2)推广到彩色图像模型YUV上, 得到方程组:

$$\begin{cases} \frac{\partial Y}{\partial x}u + \frac{\partial Y}{\partial y}v + \frac{\partial Y}{\partial t} - MY - C = 0 \\ \frac{\partial U}{\partial x}u + \frac{\partial U}{\partial y}v + \frac{\partial U}{\partial t} - MU - C = 0 \\ \frac{\partial V}{\partial x}u + \frac{\partial V}{\partial y}v + \frac{\partial V}{\partial t} - MV - C = 0 \end{cases} \quad (3)$$

在实际处理时, 如果能使用对光照变化较不敏感的量来计算光流场, 计算结果将更为准确。考虑到图像的梯度场对光照变化的敏感性与图像亮度场的变化相比较小, 将式(3)转化为:

$$\nabla E_x(r)u(r) + \nabla E_y(r)v(r) + \nabla E_t(r) - M(r)\nabla E(r) - C(r) = 0 \quad (4)$$

式中,  $\nabla$ 表示梯度算子。由于式(4)是矢量方程, 为了便于计算机计算, 将式(4)改写为如下形式:

$$\begin{cases} \nabla_x E_x(r)u(r) + \nabla_y E_y(r)v(r) + \nabla_x E_t(r) - M(r)\nabla_x E(r) - C(r) = 0 \\ \nabla_y E_x(r)u(r) + \nabla_x E_y(r)v(r) + \nabla_y E_t(r) - M(r)\nabla_y E(r) - C(r) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $\nabla_x, \nabla_y$ 分别表示在 $x, y$ 方向上对图像求梯度。将式(5)应用于式(4), 可以得到基于彩色梯度场GDIM模型的光流场计算模型:

$$\sum_W \begin{cases} \nabla_x Y_x u + \nabla_x Y_y v + \nabla_x Y_t - M \nabla_x Y - C = 0 \\ \nabla_y Y_x u + \nabla_y Y_y v + \nabla_y Y_t - M \nabla_y Y - C = 0 \\ \nabla_x U_x u + \nabla_x U_y v + \nabla_x U_t - M \nabla_x U - C = 0 \\ \nabla_y U_x u + \nabla_y U_y v + \nabla_y U_t - M \nabla_y U - C = 0 \\ \nabla_x V_x u + \nabla_x V_y v + \nabla_x V_t - M \nabla_x V - C = 0 \\ \nabla_y V_x u + \nabla_y V_y v + \nabla_y V_t - M \nabla_y V - C = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $W$ 为一个小的空间邻域。

基于梯度场的彩色图像序列光流场由于采用GDIM模型将图像的几何变换与辐射度变化引入了光流方程, 同时用于计算的梯度场本身可以为运动估计提供方向约束信息, 因此本算法能在形变运动、旋转运动、光照改变等条件下, 获得较精确且连续一致的光流场。部分试验效果如图1所示。

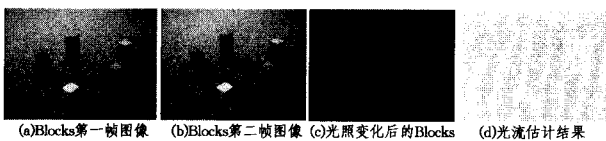


图1 光照环境变化下的旋转运动对比及光流估计结果

图1(a)、(b)分别为新西兰 Otago 大学的 Blocks 彩色图像序列的第一帧与第二帧。在该图像序列中, 有4种不同的颜色块静止放置于地面上。摄像机相对于图像块做微小旋转运动。实验序列的图像分辨率为 $282 \times 376$ , 图像对的帧间最大位移为1.04像素。图1(c)为采用式(7)来模拟光照变化后

的效果图。

$$I'(x, y, t) = I(x, y, t) \cdot \cos(\omega t) \quad (7)$$

式中,  $I(x, y, t)$ 与 $I'(x, y, t)$ 分别表示原图像序列与模拟光照变化后的图像序列。本试验中的 $\omega$ 取值0.5,  $t$ 取值2。

采用基于梯度场的彩色图像序列光流场算法对图1(a)与图1(c)组成的图像对计算得到的光流场如图1(d)所示。详细的分析与实验结果另文介绍, 此处不做进一步讲解。

对形变运动物体的光流场检测, 通常存在着边界定位不准确、背景与前景相对运动引起边界融合、形变物体边界的光流矢量误差偏大等问题, 仅通过改进光流算法效果不显著。对此, 我们考虑结合运动对象分割技术以精确定位形变物体边界, 从而合理调整形变物体的光流场轮廓, 得到更真实的运动矢量。

### 3 视频对象分割

视频分割的目的是将景物中的对象与背景相分离。视频分割通常同时利用视频图像在空间和时间轴上的信息进行分割。静止图像的分割算法并不能直接应用于高效的视频分割, 但是视频分割算法可以借鉴图像分割算法。

#### 3.1 视频分割算法简介

关于视频分割的分类很多, 并没有统一的标准。Meier将视频分割分为4类<sup>[6]</sup>: 3-D分割、基于运动信息的分割、时空域分割、联合运动估计与分割。按照视频运动分割所采取的策略算法可将其主要分为基于光流的分割<sup>[7]</sup>; 基于变化区域检测的分割方法; 基于空时融合的分割方法; 基于统计的分割方法; 基于网格(mesh)模型的分割方法; 基于Snake模型的分割方法以及其他类型的视频分割方法。

按照人工参与的情况, 可将视频分割方法分为自动分割方式和半自动方式。自动分割难度大, 分割效果随图像和视频的内容复杂程度变化很大, 一般是面向特定应用, 可完成实时处理任务, 如车辆检测系统、大厅监测系统、可视电话和电视会议等等; 半自动分割方式则适用于复杂场景下对象的分割, 虽然分割质量较好, 但不具有实时性。

当前, 新颖且被大量采用的空时分割技术充分利用了图像序列中的时域、空域信息, 同时兼顾了运动信息与空域信息, 因此容易克服单纯的基于运动分割中的过度分割、噪声敏感性以及不够精确等问题。视频图像的空间属性主要为亮度、颜色、纹理、变换的特征或统计的特征等。视频图像的时间属性主要为帧间差、光流场或运动矢量等, 由这些时间属性可以得到帧间变化区域以及运动方向和幅度。

空间分割方法虽然可以从图像中得到物体的精确边缘, 但由于会将静止物体进行错误的分割, 因此最后需要将误分割的区域合并, 从而存在着较大的盲目性。而单纯依赖时间分割方法通常无法得到目标的精确边缘。对此, 空时分割算法利用空域信息对时域分割结果进行修正和改善, 能得到更好的分割效果。

#### 3.2 自动生长分割法

生长分割法来源于区域生成法。传统的区域生成法从各区域的种子点开始, 在各个方向上向外扩展以生成子区域。重复这一过程, 直至没有可接受的临近点。

##### 3.2.1 基本方法

Vladimir 与 Vadim 提出了基于细胞自动生长的交互式

多标记图像分割法<sup>[8]</sup>。在该方法中,自动生长的细胞是一个三重集合  $A=(S, N, \delta)$ 。其中  $S$  是非空状态集,  $N$  为邻域系统,  $\delta: S^N \rightarrow S$  是局部过渡函数,该函数可根据细胞邻域的第  $t$  次迭代状态值确定该细胞第  $t+1$  次迭代时的状态。常用的邻域系统为范纽曼(von Neumann)邻域或莫尔(Moore)邻域。细胞状态  $S_p$  以三重集合  $(l_p, \theta_p, \vec{C}_p)$  表示,其中  $l_p$  为细胞的标记,  $\theta_p$  为细胞的强度,  $\vec{C}_p$  为细胞的特征矢量。

对于单目数字图像,可将其视为二维矩阵,因此细胞集  $P$  与图像的二维矩阵相对应。在细胞自动生长法开始迭代时,可将细胞的初始状态按式(8)设定:

$$l_p = 0, \theta_p = 0, \vec{C}_p = RGB_p \quad (8)$$

式中,  $RGB_p$  为像素  $p$  在 RGB 空间上的三维矢量。细胞状态的自动进化过程如图 2 所示。

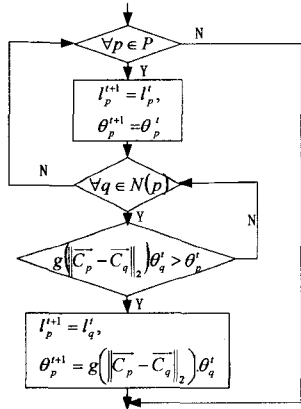


图 2 自动进化流程

图 2 中的函数  $g$  采用式(9)的形式:

$$g(x) = 1 - \frac{x}{\max \|\vec{C}\|_2} \quad (9)$$

在此细胞自动生长法中,所选种子的正确程度会极大地影响分割结果。Vladimir 与 Vadim 采用人工标定前景与背景种子的方法完成初始集的构建。通过实验发现,前景与背景的初始种子越趋近视频对象的内外边缘,分割结果的正确度越高。

### 3.2.2 生长种子的自动选取

为了能够实现自动的生长分割法,需要自动获得合理的种子集。从反映视频时空变化的光流约束方程中可以发现,当图像间存在空间梯度时,物体的运动可以从图像序列的时间梯度上体现出来。由此,可以对具有一定时间间隔的两帧图像进行相当于求时间梯度的差分运算,根据差分结果确定目标的运动范围。其后,将帧差图像与梯度图像相结合,能够获得前景的大致轮廓。获取前景与背景的生长种子的过程如图 3 所示。

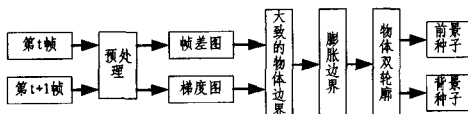


图 3 生长种子的自动选取

#### (1) 帧差图

在进行种子选取前,需要对参与计算的第  $t$  帧、第  $t+1$  帧图像进行滤波,以去除噪声。在实际计算中,对背景静止的视频,可以直接进行差分运算。对诸如平移、旋转、缩放等不同

运动方式组合造成的背景运动,可以使用第 2 节介绍的光流法求出全图的运动矢量,对整个图像进行全局运动的估计和补偿。通过全局运动补偿,运动背景问题就转化为静止背景问题。

将经过预处理的连续两幅灰度化图像直接相减,取差值的绝对值可以获得帧差图  $D$ ,式(10)描述了此过程。

$$D(p) = |I_t(p) - I_{t+1}(p)|, \forall p \in I \quad (10)$$

结果如图 4(c)所示。图 4(a)、(b)分别为标准视频序列 hall\_monitor 的第 45、46 帧。

#### (2) 梯度图

为了得到对象的单像素宽度的精确边缘,我们采用 Canny 算法获取梯度图。Canny 算法是所谓“最优边缘检测”的一种,它可以得到单像素宽度边缘。主要计算步骤为:①高斯平滑滤波;②求取梯度,包括幅值和方向角;③非极大值抑制;④双阈值处理。在实际处理时,可以借助已有的帧差图结果,将其限定在特定的区域求解梯度图以提高效率。结果如图 4(d)所示。

#### (3) 物体双轮廓

将帧差图与梯度图相结合,以帧差图为主,借助梯度图,闭合帧差图中的主要轮廓线,此时可获得大致的物体轮廓。然而此轮廓是粗糙的,可能包括视频对象的部分内部线条。为了获得沿视频对象轮廓分布的前景种子与背景种子,对物体的大致轮廓进行膨胀处理,继而将膨胀轮廓线与原物体轮廓相减,可获得物体的内、外两条闭合的主轮廓。将内、外两条轮廓线分别向内部、外部扩展,即可获得用于自动生长分割法的前景种子集与背景种子集。结果如图 4(e)所示。图 4(f)显示了由图 4(e)获得的种子进行生长分割的结果。如图 4(e)所示,沿物体的大致边界构造的前景、背景种子,能使自动生长分割法的分割结果达到半自动分割的效果。

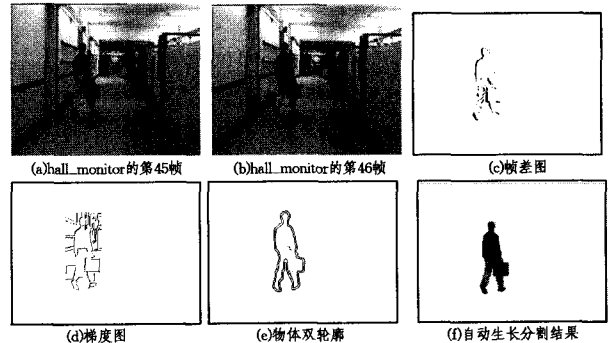


图 4 自动生长分割法效果图

## 4 试验结果

用本文提出的方法对不同特点的图像序列做了大量的测试,下面列出一个具体的例子。

本试验使用 vipmen 视频序列。该视频序列中,摄像机静止不动,景物中有人的走动。在人物的行进过程中,有手臂的前后摆动,腿部的抬起、落地,转身等大幅度的形变运动,以较好地测试光流算法对形变运动的适应性。

图 5(a)、(b)是用于检测光流场的 vipmen 视频序列的第 250 帧与 251 帧。在该测试图像中,人物背对观察者行走。在行进过程中,人物转动了左肩膀,同时头部有摆动,左腿前

(下转第 300 页)

rence on Sensor Networks, Ubiquitous, and Trustworthy Computing, 2008;1-9

- [4] 信息物理系统:从感知网到感控网[EB/OL]. [http://sns.cio360.net/b/6\\_210330\\_3738.html](http://sns.cio360.net/b/6_210330_3738.html), 2010-02-26
- [5] Cyber-Physical Systems Executive Summary[EB/OL]. <http://varma.ece.cmu.edu/summit/CPS-Executive-Summary.pdf>, 2008-3-06
- [6] Koubaa A, Andersson B. A Vision of Cyber-Physical Internet [C]//Proceedings of the 8th International Workshop on Real-Time Networks(RTN'09). 2009
- [7] Ying Tan, Goddard S, Perez L C. A Prototype Architecture for Cyber-Physical Systems[J]. ACM SIGBED Review, 2008, 5(1): 26
- [8] Wang Yun-bo, Vuran Mehmet C, Goddard S. Cyber-Physical Systems in Industrial Process Control[J]. ACM SIGBED Review, 2008, 5(1): 12
- [9] Woonchul K. Adaptive Real-Time Data Management for Cyber-Physical Systems[D]. Virginia: University of Virginia, 2009
- [10] Lee E A. Cyber Physical Systems; Design Challenges[C]//2008 11th IEEE International Symposium on Object Oriented Real-

Time Distributed Computing(ISORC), 2008;363-369

- [11] Lui S, Meseguer J. Design of Complex Cyber Physical Systems with Formalized Architectural Patterns[J]. Software-Intensive Systems and New Computing Paradigms; Challenges and Visions, 2008, 5380: 92-100
- [12] Richard W, Parmer G. A Software Architecture for Next-Generation Cyber-Physical Systems[EB/OL]. <http://varma.ece.cmu.edu/cps/Position-Papers/richard-west.pdf>, 2010-05
- [13] Tarbk A. Towards an Architecture for Distributed Cyber-Physical Systems[EB/OL]. <http://varma.ece.cmu.edu/cps/Position-Papers/abdelzaher.pdf>, 2010-05
- [14] Clifford N. Challenges in Security for Cyber-Physical Systems[EB/OL]. <http://cimic.rutgers.edu/positionPapers/CPS-Neuman.pdf>, 2010-05
- [15] Eidson J C, Lee E A, Matic S, et al. Time-Centric Models for Designing Embedded Cyberphysical Systems[EB/OL]. <http://www.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/2009/EECS-2009-135.pdf>, 2009-09
- [16] Report; Cyber-Physical Systems Summit[EB/OL]. [http://varma.ece.cmu.edu/summit/CPS\\_Summit\\_Report.pdf](http://varma.ece.cmu.edu/summit/CPS_Summit_Report.pdf), 2010-05

(上接第 274 页)

倾,两腿之间跨度变大,且右腿与地面距离更为接近,最终整个身体的背部、腿部形成的人物轮廓整体前移。

在视频对象分割时,人物上身的衣服颜色与背景中的墙壁较为接近,在人物的行进过程中,墙壁的告示板下方的白色纸张逐渐显现。人物的裤子、鞋子与地板上的人影存在着一定程度的相似,因此该测试图像能较好地检验视频分割算法的准确度。

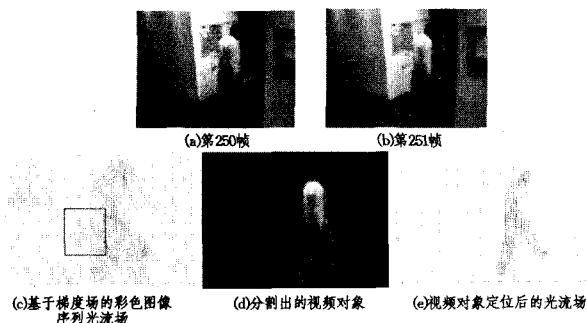


图5 测试结果

在图 5(c)中红色框标出的部分,是相近背景与前景的相对运动而引起的明显的形变物体边界融合。由此可见,尽管光流场能够检测出形变物体的运动,但无法准确定位形变物体的边界。在使用自动生长分割视频对象后,能准确提取出运动物体的运动信息。图 5(e)显示了采用分割结果后准确定位的形变物体以及形变物体内部的光流矢量。通过实验证明,将梯度彩色光流法与视频分割相结合,能够成功解决形变物体光流场边界不准确的问题。

**结束语** 本文提出了基于自动生长分割的彩色光流场算法,通过自动选取沿物体闭合外轮廓的背景种子集与前景种子集,进行基于时空的生长分割,接着将此分割结果应用于采用梯度彩色光流法得到的光流场,进行形变物体的精确定位,从而能够得到形变物体的准确边界以及形变物体内部的光流矢量,提高了光流法对形变物体的计算准确度。通过实验证

明了本文算法的有效性。

然而在实验中也发现,生长分割法一旦将某像素划入一定的集合后,便不再对该像素的归属进行验证与调整,因此只要有极少量的错误种子就会引起较大范围的分割错误。对此,需要改进现有的生长分割法。同时,在完成了前景与背景的正确分离后,如果采用背景的光流场进行图像的全局运动校正,将此过程与光流场求解融合为一个迭代的过程,将能更精确地提取视频对象并获得视频对象的运动特性。对这些问题的分析将在后续的研究中进行。

## 参考文献

- [1] Horn B, Schunck B. Determining optical flow [J]. Artificial Intelligence, 1981, 16(1-3): 185-203
- [2] Bimbo A D, Nesi P, Sanz J L C. Optical Flow Computation Using Extended Constraints [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1996, 5(5): 720-739
- [3] Golland P, Bruckstein A M. Motion from color [J]. Computer Vision and Image Understanding, 1997, 68(3): 346-362
- [4] Jamal A, Venkatesh K S. A New Color Based Optical Flow Algorithm for Environment Mapping Using a Mobile Robot[A]//22nd IEEE International Symposium on Intelligent Control Part of IEEE Multi-conference on Systems and Control[C]. Singapore, October 2007: 567-572
- [5] Negahdaripour S, Yu C H. A generalized brightness change model for computing optical flow[A]//Proceedings International Conference on Computer Vision[C]. Berlin, Germany, May 1993: 2-11
- [6] Thomas M. Segmentation for video object plane extraction and reduction of coding artifacts[R]. Dept. of Electrical and Electronic Engineering, The University of Western Australia, 1998
- [7] 雷震, 吴玲达, 李东. 基于局部微分光流的运动对象分割[J]. 计算机科学, 2009, 36(6): 276-278
- [8] Vezhnevets V, Konouchine V. 'GrowCut'-interactive multi-label n-d image segmentation by cellular automata[C]//Proceedings of the Graphicon'2005. 2005