

Journal of Image  
and Graphics

# 中国图象图形学报



ISSN1006-8961  
CN11-3758/TB

2012 7  
Vol.17 No.

中国科学院遥感应用研究所  
中国图象图形学学会主办  
北京应用物理与计算数学研究所

# 中国图象图形学报

Zhongguo Tuxiang Tuxing Xuebao

2012年7月 第17卷 第7期(总第195期)

## 目次

### 综述

中国多媒体技术研究: 2011 ..... 史元春, 徐光祐, 高原(741)

### 图像处理和编码

图像引导滤波的局部多尺度 Retinex 算法 ..... 方帅, 杨静荣, 曹洋, 武鹏飞, 饶瑞中(748)

基于第一主成分方向稳定性的图像零水印 ..... 付剑晶, 王珂(756)

小波变换估计非线性扩散最优停止时间 ..... 蒋平, 张建州(770)

### 图像分析和识别

改进的 Beamlet 与 Canny 相结合提取复杂图像线特征 ..... 曾接贤, 周沥沥, 符祥(775)

动静态信息融合及动态贝叶斯网络的步态识别 ..... 杨旗, 薛定宇(783)

融合音频单词与视觉特征的成人视频检测 ..... 刘毅志, 唐胜, 王向东, 林守勋, 张勇东(791)

基于平面区域跟踪的目标位姿参数自动测量 ..... 回丙伟, 文贡坚, 赵竹新, 钟金荣(798)

3 维图像中边界曲面的分类追踪及抽取 ..... 丁德福, 程柳航, 王利生(806)

局部时空域模型的核密度估计目标检测方法 ..... 王兴宝, 刘纯平, 费兰英, 王朝晖, 季怡(813)

基于相位谱和调谐幅度谱的显著性检测方法 ..... 李崇飞, 高颖慧, 卢凯, 曲智国(821)

### 图像理解和计算机视觉

“目标-场景”语境关联的生成图模型分析 ..... 谢昭, 李姍琦, 高隼(828)

融合上下文信息的场景结构恢复 ..... 武晖, 于昕, 隋尧, 张利(839)

带有局部控制因子的图割光流估计 ..... 路子赟, 唐土生, 高隼, 沈琳, 刘伟(846)

改进的 Harris 亚像素角点快速定位 ..... 何海清, 黄声享(853)

**计算机图形学**

应用最小生成树实现点云分割 ..... 孙金虎, 周来水, 安鲁陵(858)

**医学图像处理**

病毒进化的离散差分进化超声图像特征选择 ..... 张巧荣, 朱长明, 倪军, 刘海波(866)

分水岭优化的 Snake 模型肝脏图像分割 ..... 兰红, 张璐(873)

**遥感图像处理**

Normalized Cut 与分水岭变换在高光谱影像混合像元端元提取中的应用 ..... 许菡, 李小娟(880)

改进非局部均值滤波的 SAR 图像降噪方法 ..... 郑永恒, 程建, 曹宗杰(886)

~~~~~  
第四届国际遥感考古会议 ..... (892)

**中国图象图形学报**

刊名题字: 宋 健

月刊(1996 年创刊)

第 17 卷 第 7 期

2012 年 7 月 16 日出版

**主管单位** 中国科学院

**主 办** 中国科学院遥感应用研究所  
中国图象图形学学会  
北京应用物理与计算数学研究所

**主 编** 李小文

**编辑出版** 《中国图象图形学报》编辑出版委员会  
北京 9718 信箱 邮编 100101  
电子信箱:jig@irsa.ac.cn  
电话:010-64807995 010-82614429  
网 址:www.cjig.cn

**印刷装订** 北京北林印刷厂

**广告经营许可证** 京朝工商广字第 0346 号

**总 发 行** 北京报刊发行局

**订 购** 全国各地邮局

**国外发行** 中国国际图书贸易总公司  
(中国国际书店)  
(北京 399 信箱 邮编 100044)

**Superintended by** Chinese Academy of Sciences

**Sponsored by** Institute of Remote Sensing Application,  
CAS China Society of Image and Graphics  
Institute of Applied Physics and Computational  
Mathematics

**Chief editor** LI Xiaowen

**Editor, Publisher** Editorial and Publishing Board  
of Journal of Image and Graphics  
(P. O. Box 9718, Beijing 100101, China)  
E-mail:jig@irsa.ac.cn

**Distributed by** Beijing Bureau for Distribution of Newspapers  
and Journals

**Domestic** All Local Post Offices in China

**Foreign** China International Book Trading Corporation  
(P. O. Box 399, Beijing 100044, China)

**Printed by** Beijing Beilin Printing House

ISSN 1006-8961 CN11-3758/TB CODE ZTTFXZ 国内邮发代号: 82-831 国外发行代号: M1406 国内定价: 45.00 元

# Journal of Image and Graphics

( Monthly , Started in 1996 )

Vol. 17 No. 7 July 2012

## Contents

### Review

Researches on multimedia technology in China, 2011 ..... Shi Yuanchun, Xu Guangyou, Gao Yuan (741)

### Image Processing and Coding

Local multi-scale Retinex algorithm based on guided image filtering  
..... Fang Shuai, Yang Jingrong, Cao Yang, Wu Pengfei, Rao Ruizhong (748)

Image zero-watermark based on direction stability of first principal component vector ..... Fu Jianjing, Wang Ke (756)

Stopping-time estimation for anisotropic diffusion using discrete wavelet transform ..... Jiang Ping, Zhang Jianzhou (770)

### Image Analysis and Recognition

Complex image line feature extraction based on improved Beamlet transform and the Canny operator  
..... Zeng Jiexian, Zhou Lili, Fu Xiang (775)

Gait recognition based on dynamic & static information fusion and dynamic bayesian network ..... Yang Qi, Xue Dingyu (783)

Fusing audio-words with visual features for adult video detection  
..... Liu Yizhi, Tang Sheng, Wang Xiangdong, Lin Shouxun, Zhang Yongdong (791)

Automatic measurement for an object's position and attitude via tracking planar regions  
..... Hui Bingwei, Wen Gongjian, Zhao Zhuxin, Zhong Jinrong (798)

Detection and extraction of boundary surface patches within 3D images ..... Ding Defu, Cheng Liuhang, Wang Lisheng (806)

Foreground object detection method using kernel density estimation of a local spatio-temporal model  
..... Wang Xingbao, Liu Chunping, Fei Lanying, Wang Zhaohui, Ji Yi (813)

Saliency detection method based on phase spectrum and amplitude spectrum tuning  
..... Li Chongfei, Gao Yinghui, Lu Kai, Qu Zhiguo (821)

### Image Understanding and Computer Vision

"Object-Scene" contextual associated generative graph model analysis ..... Xie Zhao, Li Shanqi, Gao Jun (828)

Structure recovery algorithm using contextual information ..... Wu Hui, Yu Xin, Sui Yao, Zhang Li (839)

Graph cut optical flow estimation with a local control factor ..... Lu Ziyun, Tang Tusheng, Gao Jun, Shen Lin, Liu Wei (846)

Improved algorithm for Harris rapid sub-pixel corners detection ..... He Haiqing, Huang Shengxiang (853)

### Computer Graphics

Research on point cloud segmentation using a minimum spanning tree ..... Sun Jinhu, Zhou Laishui, An Luling (858)

### Medical Image Processing

Virus-evolutionary discrete differential evolution algorithm for feature selection of cervical lymph nodes in ultrasound images  
..... Zhang Qiaorong, Zhu Changming, Ni Jun, Liu Haibo (866)

Liver image segmentation algorithm based on the Snake model And optimized by watershed transformation  
..... Lan Hong, Zhang Lu (873)

### Remote Sensing Image Processing

Endmember extraction for hyperspectral image based on normalized cut and watershed transformation  
..... Xu Han, Li Xiaojuan (880)

SAR image denoising via improved non-local means filter ..... Zheng Yongheng, Cheng Jian, Cao Zongjie (886)

中图法分类号: TP391.4 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2012)07-0846-07

论文引用格式: 路子赞, 唐土生, 高隽, 沈琳, 刘伟. 带有局部控制因子的图割光流估计[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(7): 846-852.

## 带有局部控制因子的图割光流估计

路子赞<sup>1,2</sup>, 唐土生<sup>3</sup>, 高隽<sup>1</sup>, 沈琳<sup>2</sup>, 刘伟<sup>2</sup>

1. 合肥工业大学计算机与信息学院, 合肥 230009;
2. 江苏技术师范学院电气信息工程学院, 常州 213001;
3. 常州工学院计算机信息工程学院, 常州 213002

**摘要:** 提出一种带有局部空间项控制因子的图割光流估计算法, 能判断和处理光流场的平移遮挡现象。文中分析了平移遮挡的形成机理, 构造了遮挡判别公式, 基于本次的正向和反向光流场, 依靠遮挡判别结果调节局部空间项控制因子, 建立下次的能量泛函, 加强背景区域对遮挡区域的平滑作用, 隔绝运动区域对遮挡区域的平滑作用, 从而构造出新结构的网络流图。另外, 该算法被证明可以阻断遮挡误判在各次图割优化过程间的传递, 从而使逐次 $\alpha$ -扩散移动图割光流算法具有自适应处理遮挡的能力。通过与 Ground-truth 光流场的实验对比, 表明该算法能较好地判断与处理遮挡导致的光流场无效区域。

**关键词:** 光流估计; 平移遮挡; 局部空间项控制因子; 逐次 $\alpha$ -扩散移动图割; 帧序

### Graph cut optical flow estimation with a local control factor

Lu Ziyun<sup>1,2</sup>, Tang Tusheng<sup>3</sup>, Gao Jun<sup>1</sup>, Shen Lin<sup>2</sup>, Liu Wei<sup>2</sup>

1. School of Computer and Information, Hefei University of Technology Hefei 230009, China;
2. Jiangsu Teachers University of Technology Changzhou 213001, China;
3. Changzhou Institute of Technology Changzhou 213002, China

**Abstract:** In this paper, we propose to use the Graph Cut optical flow estimation with a local space term controlling factor to detect and process the translational occlusion in the optical flow field. The occluding mechanism is firstly analyzed, and the discriminating formula for occlusion is constructed. Based on this time of forward and backward optical flow fields, the next the energy functional is established to control the smoothing direction by adjusting the local space term controlling factor, and the network flow graph is reconstructed. In addition, we show that this algorithm could interrupt the transition of misjudging occlusions between interating. Furthermore, it makes the Graph Cut optical flow estimation deal self-adaptively with these occlusions. The experiments show that this algorithm could detect and process invalid region in the optical flow field caused by occlusion.

**Key words:** optical flow estimation; translational occlusion; local space term controlling factor; successive  $\alpha$ -expansion move graph cut; frame order

收稿日期: 2011-07-02; 修回日期: 2012-02-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(60875012); 教育部博士点基金项目(2009111110015); 江苏技术师范学院青年科研基金项目(KYY08042)

第一作者简介: 路子赞(1972—), 男, 讲师, 合肥工业大学计算机应用技术专业在读博士研究生, 主要研究方向为计算机视觉、人工智能、优化算法等。E-mail: luziyuncz@163.com

## 0 引言

光流场估计是计算机运动视觉中一项重要的应用基础研究。在图像的运动边界处经常会发生遮挡现象,尤其在大位移情况下,遮挡面积较大,所以,如何进行遮挡判断与处理是大位移光流估计<sup>[1]</sup>技术必须要解决的问题。常见的基于变分技术的光流场,运动边界不同程度上存在模糊性,影响遮挡判断与处理的效果。而基于图割技术的光流场,运动边界清晰,基于该特性,本文提出了局部控制能量泛函空间项的图割光流估计法,以判断与处理遮挡现象。

基于变分技术的光流估计法的基础是构造连续能量泛函,然后,将泛函极值问题转化为解偏微分方程问题<sup>[2]</sup>,接着可采用有限差分法获得光流的数值迭代解,迭代过程表现为将光流值从梯度大的区域向梯度小的区域进行各向扩散,最后,收敛到一个可以接受的最优解。因为扩散,光流场的运动边界总存在模糊现象,不利于准确描述遮挡区域。各向异性扩散起源于 Nagel<sup>[3]</sup>提出的方向平滑技术,使得扩散沿着灰度梯度方向的法线方向进行,以保护运动边界,同时也为遮挡判断和处理打下了技术基础。基于高斯金字塔分层技术的粗-精分层 HS 估计策略<sup>[4-5]</sup>较好地用变分法解决了大位移光流估计问题,但遮挡问题未被考虑。为了在变分的框架下解决遮挡问题,Ince 等人提出了遮挡意识的光流估计<sup>[6]</sup>,构造的连续能量泛函正则化正反帧序的几何约束、各向异性扩散的边界保护约束、遮挡区域面积约束,通过变分法来同时实现光流估计、边界保护、遮挡判断和处理。但受制于扩散机制,边界的模糊性依然比较明显,影响光流场的精度。

图割光流估计法的本质是搜索使离散能量泛函最小的光流场<sup>[7-9]</sup>。与连续能量泛函类似,离散能量泛函也需要正则化光流约束项和空间约束项,但光流约束项由光流约束方程改为光流导致的光强差,空间约束项由平滑约束改为相邻光流的不平滑代价。理论上说,图割光流估计法能处理大位移光流,运动边界保护性好,但光流场的平滑渐变性较差,尤其遮挡的判断和处理比较麻烦。为了克服遮挡区域内的无效光流,Kolmogorov 等人在图割算法的能量泛函中加入遮挡项<sup>[10]</sup>,基于匹配唯一性特征构造遮挡代价,将遮挡也作为一种标号进行处理,但

该算法只有遮挡判断而没有遮挡处理过程。文献[11]定义了基于多帧的遮挡顺序约束,在离散能量泛函中除了遮挡项外又增加了顺序项,使任意两个连续图像帧维持遮挡顺序约束。构造的图使每个像素用两个节点表示3种取值状态,则所要解决的是多路割问题。总之,当前图割光流场的遮挡判断与处理方法,能量泛函的图表示复杂,实现起来困难。

空间项具有控制图割光流场平滑性的能力,本文借鉴了文献[6]的思路,提出带有局部空间项控制因子的图割优化算法,控制方向平滑性来处理遮挡。主要特点是在逐次图割过程中同步进行遮挡判断,构造判断结果驱动的控制因子,嵌入空间项函数,从而在图割优化过程中,局部地控制平滑作用,以达到兼顾处理遮挡区域和平滑渐变区域的目的。

## 1 图割光流估计

图割光流估计可以归为如下离散能量泛函的最优化问题:

$$\min E(f) = \sum_{p \in \Omega} D_p(f_p) + \sum_{\substack{|p,q| \in N \\ p,q \in \Omega}} V_{pq}(f_p, f_q) \quad (1)$$

式中,标号  $f_p = [u_p, v_p]^T$ ,  $f_q = [u_q, v_q]^T$ ,  $p, q \in \Omega$ , 表示像素点  $p, q$  处的光流,图像域  $\Omega \subset \mathbf{R}^2$ , 邻域集合  $N$ 。数据项  $D_p(f_p)$  表示在像素点  $p$  处标号  $f_p$  的合适度,用光流导致的两点之间的灰度差表示,即

$$D_p(f_p) = [I_2(\mathbf{X}_p + f_p) - I_1(\mathbf{X}_p)]^2 \quad (2)$$

空间项  $V_{pq}(f_p, f_q)$  表示对相邻标号差异  $\|f_p - f_q\|$  的惩罚值或代价,一般为截顶线性函数

$$V_{pq}(f_p, f_q) = \min\{K\|f_p - f_q\|, M\} \quad (3)$$

图割光流估计就是搜索最优标号场—光流场  $f^C = [\hat{f}_1, \hat{f}_2, \dots, \hat{f}_n] \in \mathbf{R}^n$  使能量泛函最小,式中,  $n$  是像素数目。

图割算法是一种基于图论的组合优化算法,其思想是将离散能量泛函用网络流图  $G(\mathbf{V}, \mathbf{E})$  表示,  $\mathbf{V}$  表示顶点集,每个像素点对应一个顶点,另外还包含2个端点—源点  $S$  和汇点  $T$ ,  $\mathbf{E}$  表示边集,包括连接端点与顶点的边,连接相邻顶点的边,以及辅助边,每条边赋予一个非负实数的权,表示该边的容量,这样,能量泛函中所有可能的数据项和空间项可以用边表示。若  $\exists e \subset \mathbf{E}$ , 使  $G(\mathbf{V}, \mathbf{E} - e)$  的  $S$  和  $T$  不连通,而  $\forall e' \subset e$ , 使  $G(\mathbf{V}, \mathbf{E} - e')$  的  $S$  和  $T$  连通,则称  $e$  为割集,简称割,割集中各边容量之和称

为割容量。一个割集对应一个可行标号场  $f$ , 根据 Ford-Fulkerson 的最大流-最小割定理<sup>[12]</sup>, 一个网络流的最大流量等于其最小割容量, 采用最大流寻找算法, 就能找出网络流图的最小割, 从而获得对应的最优标号场  $f^C$ 。常见的  $\alpha$ -扩散移动图割算法(以下简称常规图割算法), 其能量泛函的 1 维网络流图结构单元(1 对相邻像素点)如图 1 所示, 数据项用源点到像素点、像素点到汇点的视差边  $t_p^\alpha, t_q^\alpha$  的容量表示, 空间项用像素点间、辅助点到汇点的光滑边  $e_{pq}, e_{pa}, e_{aq}, t_a^\alpha$  的容量表示。其中,  $\alpha$  是新标号,  $f_p, f_q$  是原标号。这样, 找出源点到汇点的最小割集, 就是所求的最优解。对于多运动模式光流, 可以采用逐次的  $\alpha$ -扩散移动图割算法<sup>[13]</sup> 来实现多标号优化, 算法描述如下:

- 1) 初始化标号场  $f = f_{or}$ , 标号空间  $L$ ;
- 2) 任取  $\alpha \in L, L = L - \{\alpha\}$ ;
- 3) 对  $f$  应用  $\alpha$ -扩散移动图割算法, 每个像素上的光流值进行 2 元选择, 或保持原标号不变, 或采用新标号  $\alpha$  取代原标号, 使能量泛函最小;
- 4) 获得的新标号场  $f^C, f = f^C$ ;
- 5) 标号空间  $L$  内所有标号是否遍历, 是, 转到步骤 6); 否, 转到步骤 2);
- 6) 结束。

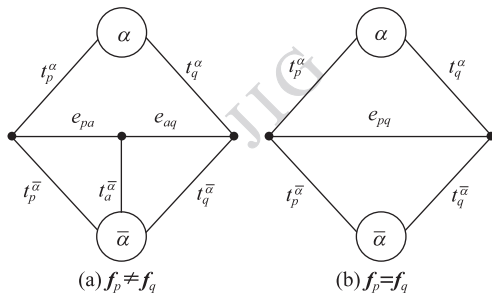


图 1 常规图割算法的 1 维图结构单元  
Fig. 1 1D graph unit of routine Graph Cut

## 2 遮挡判断与处理

光流场在运动边界处会出现平移遮挡现象, 即前一帧图像中某些背景像点被目标遮挡, 不会出现在后一帧图像中, 如图 2(a) 前帧中的 A 区和图 2(b) 前帧中的 B 区。尤其在在大位移运动情况下, 被遮挡面积较大, 不可忽略。为了使遮挡区域具有可靠性高的光流值, 就要分析一下被遮挡区域光流值的可靠性: 被遮挡区域真实的光流不可能获得, 可以

获取的是两个推测值, 一是取运动目标区域的光流, 二是取周围背景区域的光流。前者的可靠性明显不如后者, 因为若被遮挡区域与覆盖目标区域的光流一样, 则该区域的点不会被覆盖。所以, 应该使被遮挡区域的光流值受被周围背景区域的影响, 而不受遮挡目标光流的影响, 结果才是比较可靠的。图 2 表示两种帧序对应的目标运动情况, 阴影是被遮挡区域。

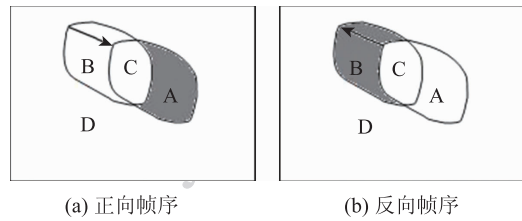


图 2 遮挡区域分析  
Fig. 2 Analysis for occluded region

假设,  $F(x, y, 1), F(x, y, 2)$  分别表示像点坐标  $(x, y)$  处的横向、纵向光流分量。当采用正向帧序, 获得的是前帧上的正向光流场  $F_1(x, y)$ , 当采用反向帧序, 获得的是后帧上的反向光流场  $F_2(x, y)$ 。正向帧序时, 前帧图像 A 区中的点在后帧图像上没有正确匹配点, 而在反向帧序中, 后帧图像 A 区中的点在前帧图像上有正确匹配点; 同理, 反向帧序时, 前帧图像 B 区中的点在后帧图像上没有正确匹配点, 而在正向帧序中, 后帧图像 B 区中的点在前帧图像上有正确匹配点; 其余区域的点, 两种帧序时, 前帧在后帧都有正确匹配点。所以, 可以采用如下策略判断两种帧序光流场的各个区域:

$$1) \text{ 若 } -F_2(x + F_1(x, y, 1), y + F_1(x, y, 2)) \neq F_1(x, y) - F_1(x + F_2(x, y, 1), y + F_2(x, y, 2)) = F_2(x, y) \quad (4)$$

则点  $(x, y)$  属于 A 区被遮挡点(正向帧序);

$$2) \text{ 若 } -F_2(x + F_1(x, y, 1), y + F_1(x, y, 2)) = F_1(x, y) - F_1(x + F_2(x, y, 1), y + F_2(x, y, 2)) \neq F_2(x, y) \quad (5)$$

则点  $(x, y)$  属于 B 区被遮挡点(反向帧序);

$$3) \text{ 若 } -F_2(x + F_1(x, y, 1), y + F_1(x, y, 2)) = F_1(x, y) - F_1(x + F_2(x, y, 1), y + F_2(x, y, 2)) = F_2(x, y) \quad (6)$$

则点  $(x, y)$  属于 C、D 区非遮挡点(两种帧序)。

对于正向光流场, 只要判断出被遮挡区就可以了, 其他区域都是非遮挡区, 都能获得正确的正向光

流值,为了提高遮挡判断的鲁棒性,公式可采用不等式形式,即“ $\neq$ ”用“ $>$ ”,“ $=$ ”用“ $<$ ”代替,如式(4)可转化为

$$\begin{cases} -F_2(x + F_1(x, y, 1), y + F_1(x, y, 2)) - \\ F_1(x, y) > T_1 \\ -F_1(x + F_2(x, y, 1), y + F_2(x, y, 2)) - \\ F_2(x, y) < T_2 \end{cases} \quad (7)$$

### 3 局部控制的图割光流估计

#### 3.1 局部控制的空间项

为了用图割优化算法获取光流在遮挡区域具有可靠性高的取值,就必须控制周边区域各个方向上对遮挡区域光流的影响性,即要使算法具有方向平滑性。空间项表示相邻点的不平滑代价,也表示该点标号与相邻点标号不相等的惩罚,常规空间项在各处的惩罚斜率都是同等的。在空间项函数中加入乘性局部控制因子  $T_{pq}$ , 则

$$S_{pq}(f_p, f_q) = T_{pq} \cdot V_{pq}(f_p, f_q) \quad (8)$$

当这个因子受制于各处的外部条件时,则各处的不平滑代价就可以被控制,也就控制了平滑的方向性。在图2(a)中,A区与C区之间存在运动边界,B区和D区之间存在运动边界,但前者是被遮挡区与非遮挡区的边界,而后者是非遮挡区之间的边界。空间项应隔绝C区对A区的平滑作用,而加大D区和A区之间和A区内部不平滑的代价,即在C区和A区的交界点对,设置  $T_{pq} = 0$ ; 在D区与A区的交界点对和A区内部,设置  $T_{pq} = m > 1$ ; 在其余点对,设置  $T_{pq} = 1$ 。

$$T_{pq} = \begin{cases} 0 & p \in A, q \in C \text{ or} \\ & p \in C, q \in A \\ m & p \in A, q \in D \text{ or} \\ & p \in D, q \in A \text{ or} \\ & p \in A, q \in A \\ 1 & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

但问题是,如何区分C区与A区的边界和D区与A区的边界。我们可以进一步分析:C区与A区的边界被包含在目标反向光流区域的内部,交界点对的光流相同,而D区与A区的边界是反向光流场的运动边界,交界点对的光流相异。根据上述遮挡判断策略,可以构造局部控制因子  $T_{pq}$ , 当采用逐次  $\alpha$ -扩散移动图割算法,可以用第  $k$  代的光流场  $F_1^k$  和

$F_2^k$ , 来判断第  $k+1$  次光流场  $F_1^{k+1}$  和  $F_2^{k+1}$ , 则局部控制因子表达式为

$$T_{pq}^{k+1} = \begin{cases} 0 & \begin{cases} \| -F_2^k(X_p + F_1^k(X_p)) - F_1^k(X_p) \| > T_1 \\ \| -F_1^k(X_p + F_2^k(X_p)) - F_2^k(X_p) \| < T_2 \\ \| -F_2^k(X_q + F_1^k(X_q)) - F_1^k(X_q) \| < T_2 \\ \| -F_1^k(X_q + F_2^k(X_q)) - F_2^k(X_q) \| < T_2 \\ \| F_2^k(X_p) - F_2^k(X_q) \| < T_3 \end{cases} \\ \text{or} \\ \| -F_2^k(X_p + F_1^k(X_p)) - F_1^k(X_p) \| < T_2 \\ \| -F_1^k(X_p + F_2^k(X_p)) - F_2^k(X_p) \| < T_2 \\ \| -F_2^k(X_q + F_1^k(X_q)) - F_1^k(X_q) \| > T_1 \\ \| -F_1^k(X_q + F_2^k(X_q)) - F_2^k(X_q) \| < T_2 \\ \| F_2^k(X_p) - F_2^k(X_q) \| < T_3 \\ m & \begin{cases} \| -F_2^k(X_p + F_1^k(X_p)) - F_1^k(X_p) \| > T_1 \\ \| -F_1^k(X_p + F_2^k(X_p)) - F_2^k(X_p) \| < T_2 \\ \| -F_2^k(X_q + F_1^k(X_q)) - F_1^k(X_q) \| < T_2 \\ \| -F_1^k(X_q + F_2^k(X_q)) - F_2^k(X_q) \| < T_2 \\ \| F_2^k(X_p) - F_2^k(X_q) \| > T_4 \end{cases} \\ \text{or} \\ \| -F_2^k(X_p + F_1^k(X_p)) - F_1^k(X_p) \| < T_2 \\ \| -F_1^k(X_p + F_2^k(X_p)) - F_2^k(X_p) \| < T_2 \\ \| -F_2^k(X_q + F_1^k(X_q)) - F_1^k(X_q) \| > T_1 \\ \| -F_1^k(X_q + F_2^k(X_q)) - F_2^k(X_q) \| < T_2 \\ \| F_2^k(X_p) - F_2^k(X_q) \| > T_4 \\ \text{or} \\ \| -F_2^k(X_p + F_1^k(X_p)) - F_1^k(X_p) \| > T_1 \\ \| -F_1^k(X_p + F_2^k(X_p)) - F_2^k(X_p) \| < T_2 \\ \| -F_2^k(X_q + F_1^k(X_q)) - F_1^k(X_q) \| > T_1 \\ \| -F_1^k(X_q + F_2^k(X_q)) - F_2^k(X_q) \| < T_2 \\ 1 & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

根据实验经验,本文设定  $T_1, T_4 \in [4, 6]$ ,  $T_2, T_3 \in [0, 2]$ 。

#### 3.2 能量泛函与图结构

图割光流场的平滑性与不平滑代价有关:不平滑代价设置的较小,则平滑渐变区域过渡得较为细腻,但抗噪能力降低,光流一致区域显得破碎;设置的较大,则光流渐变区域过渡得较为粗糙,而光流一

致区域显得完整。所以,一般采用线性函数或截顶线性函数的空间项<sup>[14]</sup>,以保证同时应对平滑渐变光流场和一致光流场。将式(3)的线性截顶空间项函数改为非线性形式

$$V_{pq}(f_p, f_q) = M \cdot \frac{1 - e^{-A \|f_p - f_q\|}}{1 + e^{-A \|f_p - f_q\|}} \quad (11)$$

式中,  $M > 0, A > 0, M$  是上限,  $A$  决定了上升段的斜率,图 5(c) 为式(3)与式(11)的函数图形,它们平滑效果相似,但后者由于连续可微,不但适合于刚体光流也适合于非刚体光流,并且可以证明其满足子模性<sup>[15]</sup>,这是  $\alpha$ -扩散移动图割算法收敛的必要条件。所以,定义带有局部控制因子的能量泛函

$$E^k(f) = \sum_{p \in \Omega} D_p^k(f_p) + \sum_{\substack{(p,q) \in \mathbf{N} \\ p,q \in \Omega}} T_{pq}^k \cdot V_{pq}^k(f_p, f_q) \quad (12)$$

式中,  $k$  表示优化次数。每做 1 次  $\alpha$ -扩散移动图割优化,就把标号空间内的 1 个标号扩散进光流场,所以标号空间的容量就是  $k$  所取的最大值。在图 1 所示的图结构上进行删减,就获得局部控制  $\alpha$ -扩散移动图割算法(以下简称局部控制图割算法)的图结构(图 3),其中,图 3(a)(b)是原有结构,图 3(c)表示光滑边被剔除的结构。

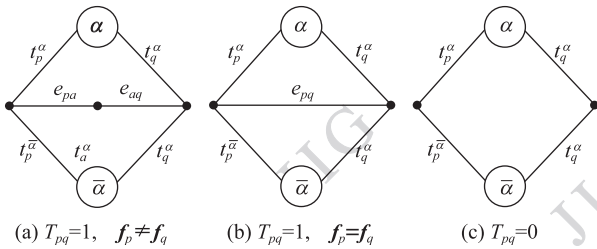


图 3 局部控制图割算法的 1 维图结构单元

Fig. 3 1D graph unit of Graph Cut with local control factor

### 3.3 算法流程

局部控制图割算法是图割算法的空间项局部加权的特例,通过空间项加权控制局部的平滑性来达到各种处理目的。比如在光流场的遮挡处理中,通过遮挡判断结果,控制存在遮挡的边界光流是与运动目标光流平滑还是与背景光流平滑。图 4 是局部控制  $\alpha$ -扩散移动图割光流估计算法的流程图。

定义  $f$  为初始标号场,  $f$  经过局部控制的  $\alpha$ -扩散移动图割优化后获得标号场  $f^\alpha$ 。

定理 若  $f_p \neq f_q, (p, q) \in \mathbf{N}, T_{pq} = 0$  或  $T_{pq} > 1$ , 则  $\exists \alpha \in \mathbf{R}^2$ , 使  $\bar{f}_p^\alpha = \bar{f}_q^\alpha = \alpha$ 。

证明:

$$\text{令 } \bar{P}_\alpha = \{p \mid \bar{f}_p^\alpha = \alpha\}$$

$$\text{则 } \bar{f}_p^\alpha = \begin{cases} \alpha & p \in \bar{P}_\alpha \\ f_p & p \notin \bar{P}_\alpha \end{cases}$$

$$\therefore \bar{f}_p^\alpha = \bar{f}_q^\alpha \text{ 只存在 1 种状况 } \bar{f}_p^\alpha = \bar{f}_q^\alpha = \alpha$$

$\therefore$  局部控制  $\alpha$ -扩散移动图割优化的能量泛函

$$E(f) = \sum_{p \in \Omega} D_p(f_p) + \sum_{\substack{(p,q) \in \mathbf{N} \\ p,q \in \Omega}} T_{pq} \cdot V_{pq}(f_p, f_q)$$

又: 当  $f_p \neq f_q, (p, q) \in \mathbf{N}$  时,  $T_{pq} = 0$  或  $T_{pq} > 1$

$\therefore$  当  $\exists \alpha \in \mathbf{R}^2$ , 使得

$$\min \{D_p(\alpha) + D_q(\alpha), D_p(\alpha) + D_q(f_q) + T_{pq} \cdot V_{pq}(\alpha, f_q), D_p(f_p) + D_q(\alpha) + T_{pq} \cdot V_{pq}(f_p, \alpha), D_p(f_p) + D_q(f_q) + T_{pq} \cdot V_{pq}(f_p, f_q)\} = D_p(\alpha) + D_q(\alpha), \text{ 则根据最小割原理,使 } \bar{f}_p^\alpha = \bar{f}_q^\alpha = \alpha。$$

该定理说明,在逐次的局部控制图割算法中,当本次图割后获得的相邻标号相异,如果新标号使得数据项足够小,则下次图割后的该相邻标号仍然是相同的,即下次图割可以修改前一代图割误判的运动边界。非运动边界区域,即  $f_p = f_q, (p, q) \in \mathbf{N}$  的区域,由于  $T_{pq} = 1$ ,效果等同于常规图割算法。

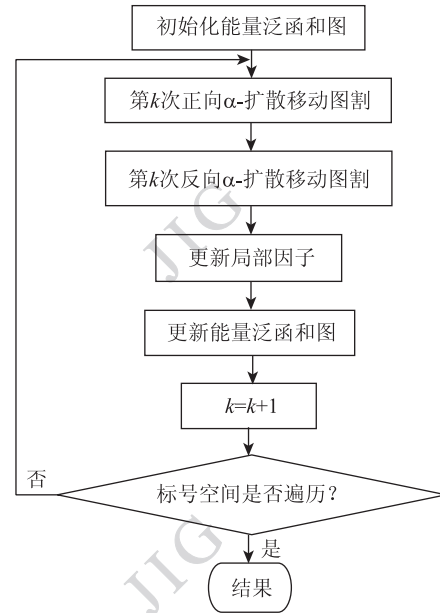


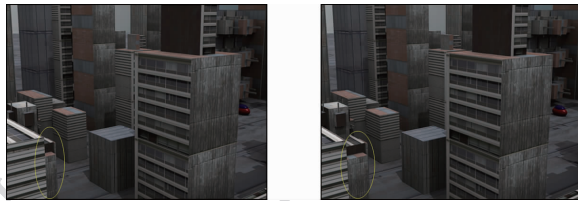
图 4 算法流程图

Fig. 4 Flow chart of algorithm

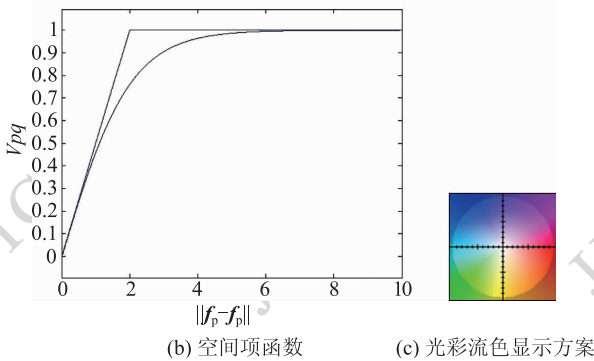
## 4 实验及分析

实验素材采用 Middlebury 光流测试库<sup>[16]</sup>中的“Urban”2 帧序列,如图 5(a)所示,其中存在大位移

光流和遮挡。为了使遮挡明显起见,如图 5(a)中黄圈所示,本文考查反向光流场。为了比较精度,本文考查正向光流场。图 5(c)是光流场彩色显示方案<sup>[16]</sup>,其思想是将 2 维光流向量映射到 HSI 色彩空间的某个横截平面上,使光流向量与 2 维颜色向量一一对应,而 RGB 与 HSI 可以方便地相互转换<sup>[17]</sup>。



(a) Urban 序列



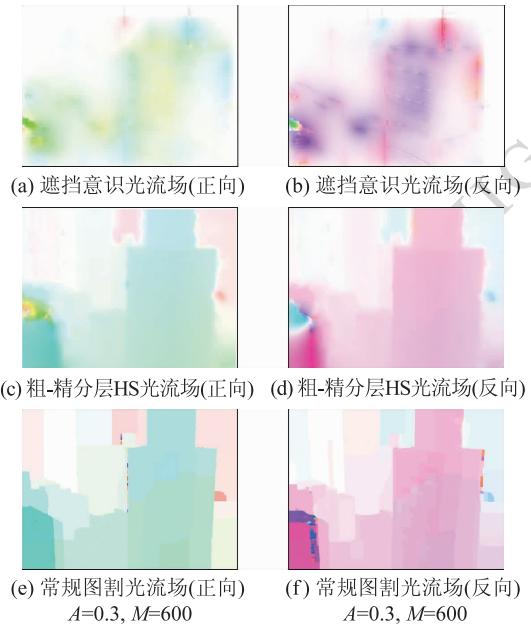
(b) 空间项函数 (c) 光彩色显示方案

图 5 测试序列

Fig. 5 Sequences for test

图 6 分别展示了遮挡意识光流场、粗-精分层 HS 光流场、常规图割光流场的正反向情况。遮挡意识光流场的运动边界模糊不清,见图 6(a)(b);粗-精分层 HS 法可以进行大位移光流估计,但运动边界也较模糊,见图 6(c)(d);只要有合适的惩罚斜率,常规图割光流场有较好的平滑性,可进行大位移光流估计、运动边界清晰,但当存在遮挡区域时,由于匹配不确定导致该区域光流无效,见图 6(e)(f)。

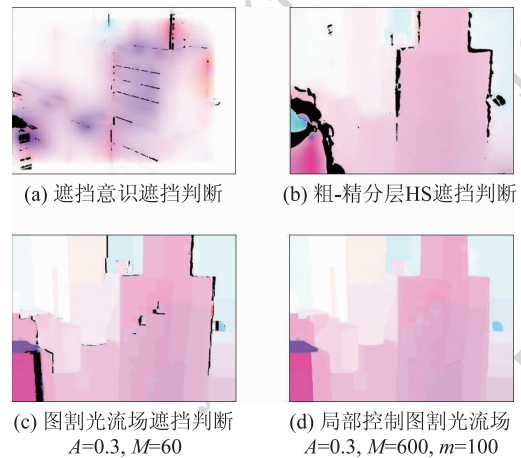
图 7(a)–(c)展示了上述 3 种光流场的遮挡判断效果,前 2 种光流场由于边界模糊,基于正反向光流场判断遮挡效果差,而图割光流场的遮挡判断效果最佳;图 7(d)是反向的局部控制图割光流场,加强图 7(c)中的黑色遮挡区域和背景区域的平滑作用,解决了光流无效区域问题。另外,从图 7(c)可以看出,本文算法具有一定的鲁棒性,噪声导致平滑区域内部出现遮挡点,明显不符合实际,但在该处施以控制方向的平滑,结果依然是平滑区域。反向光流场的遮挡区域明显,但正向光流场有 Ground-truth,所以,依然以正向光流场来比较误差指标。



(a) 遮挡意识光流场(正向) (b) 遮挡意识光流场(反向)  
 (c) 粗-精分层HS光流场(正向) (d) 粗-精分层HS光流场(反向)  
 (e) 常规图割光流场(正向) (f) 常规图割光流场(反向)  
 $A=0.3, M=600$   $A=0.3, M=600$

图 6 3 种光流场

Fig. 6 Three kinds of optical flow fields

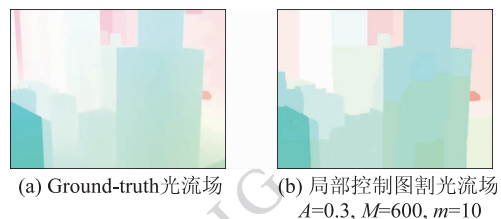


(a) 遮挡意识遮挡判断 (b) 粗-精分层HS遮挡判断  
 (c) 图割光流场遮挡判断 (d) 局部控制图割光流场  
 $A=0.3, M=60$   $A=0.3, M=600, m=100$

图 7 反向光流场的遮挡判断与处理效果

Fig. 7 Detecting and processing occlusion for backward optical flow field

图 8(a)(b)显示了正向的 Ground-truth 光流场和局部控制图割光流场,结果表明后者比前 3 种光流场更接近前者。



(a) Ground-truth 光流场 (b) 局部控制图割光流场  
 $A=0.3, M=600, m=10$

图 8 正向光流场比较

Fig. 8 Comparison of forward optical flow field

表 1 是平均终点误差 (Average Endpoint Error) 和平均角误差 (Average Angle Error)<sup>[16]</sup> 的指标对比。平均终点误差定义为光流向量  $[u_1, v_1]^T$  与 Ground-truth 光流向量  $[u_0, v_0]^T$  间的平均绝对误差

$$AEE = \frac{\sum_{p \in \Omega} \sqrt{(u_{p1} - u_{p0})^2 + (v_{p1} - v_{p0})^2}}{\sum_{p \in \Omega} 1} \quad (13)$$

平均角误差是扩展的 3 维光流向量  $OP_1 = (u_{p1}, v_{p1}, 1)^T$  和  $OP_0 = (u_{p0}, v_{p0}, 1)^T$  之间的角度, 通常用归一化的向量计算点积, 然后再经过反余弦运算获得

$$AAE = \frac{\sum_{p \in \Omega} \arccos\left(\frac{OP_1^T \cdot OP_0}{\|OP_1\| \cdot \|OP_0\|}\right)}{\sum_{p \in \Omega} 1} \quad (14)$$

本文实验均采用整数标号空间  $L = \{(t_x, t_y) |$

$$t_x, t_y \in [-20, 20]\} \subset Z^2.$$

表 1 光流场误差指标对比

Table 1 Comparison of error indicator

| 误差指标   | 粗-精<br>分层 HS | 遮挡意识 | 常规<br>图割 | 局部控制<br>图割 |
|--------|--------------|------|----------|------------|
| 平均终点误差 | 0.53         | 0.72 | 0.38     | 0.32       |
| 平均角误差  | 6.09         | 8.29 | 4.68     | 4.16       |

## 5 结 论

本文提出了一种带有局部控制因子的逐次  $\alpha$ -扩散移动图割光流估计算法。在每一次图割优化后, 进行遮挡判断, 依据判断出的被遮挡点和非遮挡点, 构造局部控制因子, 嵌入空间项, 实现对下一次图割优化的平滑控制。该图割光流算法判断、处理遮挡简单, 实验结果证明了其有效性。

### 参考文献 (References)

- [ 1 ] Brox T, Malik J. Large displacement optical flow: descriptor matching in variational motion estimation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 33(3): 500-513.
- [ 2 ] Wang D K, Hou Y Q, Peng J Y. Image processing by partial differential equation method, Beijing: Science Press, 2008: 45-48. [王大凯, 侯榆青, 彭进业. 图像处理的偏微分方程方法[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 45-48.]
- [ 3 ] Nagel H H. Constraints for the estimation of displacement vector

fields from image sequences [ C ] // Proceedings of the 8th International Joint Conference on Artificial Intelligence. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers Inc, 1983, 2(3): 945-951.

- [ 4 ] Anandan P. A computational framework and an algorithm for the measurement of visual motion [ J ]. International Journal of Computer Vision, 1989, 2(3): 283-310.
- [ 5 ] Papenberg N, Bruhn A, Brox T, et al. Highly accurate optic flow computation with theoretically justified warping [ J ]. International Journal of Computer Vision, 2006, 67(2): 141-158.
- [ 6 ] Ince S, Konrad J. Occlusion-Aware Optical Flow Estimation [ J ]. IEEE Transactions on Image Processing, 2008, 17(8): 1443-1451.
- [ 7 ] Lempitsky V, Roth S, Rother C. Fusion flow: discrete-continuous optimization for optical flow estimation [ C ] // Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. New York, NY: IEEE Comput Soc, 2008: 1-8.
- [ 8 ] Wang Z, Chang F L. Two-level stereo matching algorithm based on the Graph Cuts of the network [ J ]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2007, 20(1): 64-68. [王哲, 常发亮. 基于网络最小割的分层立体视觉匹配方法. 模式识别与人工智能 [ J ]. 2007, 20(1): 64-68.]
- [ 9 ] Wang N, Fan Y Z, Bao W X, et al. An images matching algorithm based on graph cuts [ J ]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(2): 232-236. [王年, 范益政, 鲍文霞, 等. 基于图割的图像匹配算法 [ J ]. 电子学报, 2006, 34(2): 232-236.]
- [ 10 ] Kolmogorov V, Zabih R. Computing visual correspondence with occlusions using graph cuts [ C ] // Proceedings of the 8th IEEE International Conference on Computer Vision. New York, NY: IEEE Comput Soc., 2001, 2(1): 508-515.
- [ 11 ] Xiao J J, Shah M. Motion layer extraction in the presence of occlusion using Graph Cuts [ J ]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005, 27(10): 1644-1659.
- [ 12 ] Boykov Y, Kolmogorov V. An experimental comparison of Min-Cut/Max-Flow algorithms for energy minimization in vision [ J ]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2004, 26(9): 1124-1137.
- [ 13 ] Boykov Y, Veksler O, Zabih R. Fast approximate energy minimization via Graph Cuts [ J ]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2001, 23(11): 1222-1239.
- [ 14 ] Veksler O, Zabih R. Efficient graph-based energy minimization methods in computer vision [ D ]. Ithaca, NJ, USA: Cornell University, 1999.
- [ 15 ] Kolmogorov V, Zabih R. What energy functions can be minimized via Graph Cuts [ J ]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2004, 26(2): 147-159.
- [ 16 ] Baker S, Scharstein D, Lewis J P, et al. A database and evaluation methodology for optical flow [ J ]. International Journal of Computer Vision, 2011, 92(1): 1-31.
- [ 17 ] Zhang Y J. Image Engineering ( I ) · Image Processing [ M ]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 169-170. [章毓晋. 图像工程 (上册) · 图像处理 [ M ]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2006: 169-170.]