

一种基于确信度的双向视频分割方法^{*}

严超⁺, 马利庄, 沈洋

(上海交通大学 计算机科学与工程系, 上海 200240)

Bi-Directional Video Segmentation Algorithm Based on Reliability

YAN Chao⁺, MA Li-Zhuang, SHEN Yang

(Department of Computer Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

+ Corresponding author: E-mail: yzyanchao@hotmail.com

Yan C, Ma LZ, Shen Y. Bi-Directional video segmentation algorithm based on reliability. *Journal of Software*, 2009,20(Suppl.):221-230. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/09026.htm>

Abstract: In this paper, an algorithm to segment foreground object from a video clip is proposed. The reliability model, which calculated from the local color pattern information, is presented. Firstly, pre-process all the frames of the video clip with the watershed algorithm; then, apply graph-cut on the key frames. Secondly, the reliability model is been computed by bi-directional procedure. Through the positive procedure, the reliability is set. Next, a small portion of the reliabilities is corrected through a reverse procedure assisted by a certain optical flow algorithm. At last, segment the video on the authority of the reliability of each frame. When dealing with the video which has similar foreground and background color, the reliability model shows a good segment result. And bi-directional procedure provides a way to improve segmentation of the occluded object in the video.

Key words: video segmentation; reliability model; bi-directional procedure; watershed; graph-cut; optical flow

摘要: 提出了一种将前景物体从一个视频序列中分割出来的方法.提出了确信度模型,该模型由局部颜色配置信息求得.该算法首先对视频所有帧做了分水岭预处理,然后对关键帧做了图分割处理.接下来经由双向过程计算确信度.具体为先通过正向过程计算确信度,再通过逆向过程并辅以光流算法对小部分确信度进行修正,最后根据确信度进行前背景标注.该确信度模型对前背景较为相似的视频有良好的分割效果,并且由于通过双向过程进行分割,对视频中部分遮挡物体的分割也有不错的改善.

关键词: 视频分割;确信度模型;双向过程;分水岭;图分割;光流

本文主要研究将指定的前景物体从一个视频序列中高效提取出来,也就是视频的分割问题.视频分割在图像处理 and 计算机视觉领域是一个被广泛研究的热点课题.视频分割算法在视频编辑领域有广泛的应用. Photoshop 是著名的图像处理软件,可以用简单的操作实现复杂的效果.举例来说,可以将个人的照片中的自己

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60873136 (国家自然科学基金); the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.2009AA01Z334 (国家高技术研究发展计划(863)); the National Research Program of China under Grant No.2006CB303105 (国家重点基础研究计划(973)); the Program of the Shanghai Municipal Science and Technology Commission of China under Grant No.07dz15007 (上海市科委项目)

Received 2009-05-15; Accepted 2009-08-20

分割出来,再融合至一张金字塔的照片,仿佛自己也去埃及旅游过了一样.因此,如果有一系列操作简单的、自动化的视频处理算法,未来也可以有一个 *Videoshop* 这样的视频处理软件,可以方便地将视频中的自己提取出来,再用于其他一些应用,比如说融合至另一段视频.或者说,如果视频中有不想要的部分,先分割出来将其去掉,再使用适当的修补算法填补空洞等.通过以上这些步骤,甚至可以使某些电影素材得以重用,将需要重用的部分从视频中分割出来,以后可以重用至其他电影中.这样可以节约电影制作的成本.

本文提出了一种较为简捷的分割方法,通过基于确信度的双向过程来分割视频.详细过程将在第 2 节介绍.本文的第 1 节介绍相关工作.第 3 节给出实验以及实验结果.第 4 节是对本文的总结.

1 相关工作

近年来,学术界对图像及视频分割做了大量的研究.其中有现在经常作为预处理步骤使用的分水岭算法^[1].该算法将图像中相邻的颜色几乎一致的像素汇聚到一起,形成一个个的小区块.国内对分水岭的改进有文献[2].该文献利用形态学算子得到梯度图像,然后利用形态学混合开闭重构算子进行梯度修正,去除了易造成过分割的区域细节和噪声,接着采用基于标记的分水岭算法进行分割,改善了过分割现象.

光流法^[3,4]通过比较两幅图像来计算图像中像素的移动速度.一般为,根据图像序列中的像素强度数据的时域变化和相关性来确定各自像素位置的“运动”.通过像素强度在 x, y 和时间方向上的变化,可以列出一个方程,再给出一定的假定,即可计算出像素的移动速度.国内对光流算法的改进有文献[5].该文献通过引入前向-后向光流方程,计算其 Hessian 矩阵,把 Hessian 矩阵条件数的倒数作为 Lucas-Kanade 光流法的加权阵,可有效消除局部邻域中不可靠的约束点,同时提高基本约束方程解的稳定性.

图分割(graph cut)算法^[6]是目前图像和视频分割的主流算法.该分割方法的主要依据是相似性以及不连续性.具体来说,它首先将图像抽象成图;其次,将要求用户提供前景和背景的种子点;接下来,计算图的每个节点的能量值,能量值有两项:数据项和平滑项.数据项由该节点与种子点的相似度所决定,平滑项则由相邻节点间的不连续度来决定.最后,用最小割的方法将图分割开来.该方法有许多应用,比如,文献[7]就是对这个方法做了一些预处理及后续处理工作而编写而成的一个快速抠图软件.再如,文献[8,9]就是将这个算法拓展至三维领域的视频分割算法.文献[10-14]都是对图分割算法的一些改进或拓展方法.国内对图分割算法的研究有文献[15].该文献提出一种带边界匹配的基于 Graph Cut 的快速纹理合成算法,并通过构建一个“优选位移”集合,极大地提高了合成速度.

文献[8]是将文献[6]在视频领域的拓展.文献[8]首先将视频帧加上时间表示成一个立方体,用户可以简单地在这个立方体上粗略地画上几笔,标记前景区域和背景区域.接下来,应用 Mean Shift 算法^[16,17]将帧与帧之间相似的颜色聚合到一起形成,一个三维的小区块,然后以这些小区块为节点,应用图分割算法进行分割.但是这种方法在处理前、背景相似的情况时,分割效果不理想.文献[9]提出了一种三维图分割算法,以分割好的一前一后两个关键帧为种子,加上中间待分割的一帧,3 帧组成一张三维图,对这张图用三维图分割算法做预分割,再逐帧观察,对分割不理想之处再做局部二维图分割.这种算法由于是全局构建图,当前背景有相似的颜色,即使这些相似颜色的区块相隔较远,也有分错的可能性.国内在视频分割领域的研究有文献[18].该文献提出了一种基于高斯混合模型(GMM)的视频对象分割算法.首先进行特征提取,然后通过分割投影进行模型选择及期望最大化(EM)算法的参数初始化并估计参数,最后对特征矢量进行聚类分割.

文献[19]对图分割算法在前景与背景相似的情况下分割不理想这一点作了一些改进.作者针对数据项提出了局部颜色配置模型,针对平滑项提出了边轮廓模型.局部颜色配置模型将节点与其周围点的颜色结合起来考虑,即使前景、背景有相似的颜色,但是它们的局部颜色配置模型在大部分情况下仍是可以区分的.局部颜色配置模型的思想被用于确信度的计算中,第 2 节将会详细加以介绍.

2 算 法

2.1 整体流程简介

算法的整体流程如图 1 所示,共分 6 步,具体为:

1. 对于待处理的视频 V 中的所有帧,即 $\{F_1, F_2, \dots, F_{n-1}, F_n\}$,对每一帧都做分水岭^[1]处理,将帧中颜色相似的相邻像素聚成 1 块,最后将帧分成数量不一的小区块 $\{\{R_{11}, R_{12}, \dots, R_{1m1}\}, \dots, \{R_{n1}, R_{n2}, \dots, R_{nmm}\}\}$.
2. 选取关键帧,比如 F_1 和 F_n ,使用图分割算法^[7]中的能量公式(1)对其进行分割.关键帧的小区块划分为前景或者背景,并设定每个小区块的确信度(本文中用 $Reli$ 表示),确信度将在第 2.2 节详细介绍.
3. 正向过程.从第 2 帧 F_2 开始,由前一帧的确信度计算这一帧的每一个小区块的确信度,这个过程一直持续到倒数第 2 帧 F_{n-1} 结束.具体计算方法将在第 2.3 节详细介绍.
4. 光流.为解决正向过程中不能解决的部分遮挡问题,我们采用光流算法计算出需要修正确信度的小区块,然后采用逆向过程修正其确信度.具体计算方法将在第 2.3 节详细介绍.
5. 逆向过程.从倒数第 2 帧 F_{n-1} 开始,由后一帧的确信度修正这一帧的每一个小区块的确信度,这个过程一直持续到第 2 帧 F_2 结束.具体计算方法将在第 2.3 节详细介绍.
6. 根据每一帧中每个小区块的确信度,将这个小区块划分为前景或者背景,完成分割.

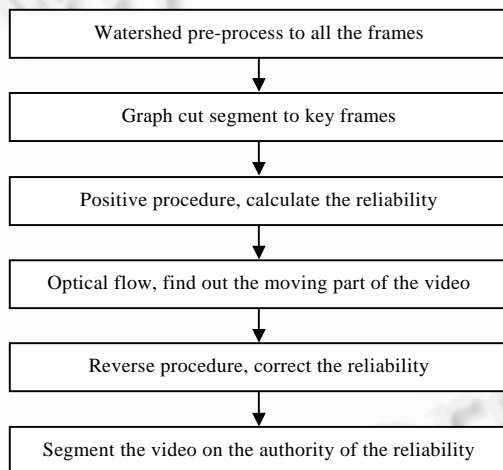


Fig.1 Overall process of the algorithm

图 1 算法的整体流程

需要说明的是,视频 V 应该是一个镜头没有切换的、相邻帧之间只有微小变化的视频.如果不是,则可以将 V 分成符合上述条件的几个视频片段,在每个视频片段上应用本文提出的算法进行分割.

2.2 确信度

确信度是为每个分水岭小区块设定的一个值,这个值的范围为 $[0,1]$,值越大,表示这个小区块属于前景的概率越大;而值越小,表示这个小区块属于背景的概率越大.关键帧中小区块的确信度设定为

$$\begin{cases} Reli(R) = 1, & \text{if } R \text{ is foreground} \\ Reli(R) = 0, & \text{if } R \text{ is background} \end{cases} \quad (1)$$

一般帧中小区块的确信度在正向过程中由前一帧的确信度求得,逆向过程中由后一帧的确信度求得.确信度的计算依赖于小区块间的颜色距离值 $CD(\text{color distance})$.

2.2.1 颜色距离值

一般地,两个小区块之间的颜色距离值定义为

$$CD(R_1, n_1, R_2, n_2) = \|C(R_1, n_1) - C(R_2, n_2)\| \quad (2)$$

式(2)中, $C(R, n)$ 表示帧 n 中 R 区域的颜色值.这个公式是 R_1, R_2 区域的 L2-Norm 颜色差异值.

当前景、背景中含有颜色相似的区域时,式(2)的效果可能不太好.文献[19]中提出了局部颜色配置模型(local color pattern model)来改进这个问题的效果.我们借鉴该文献中的思想,应用于本方法中.

如图 2 所示,这一帧图像中有两块灰色区域,我们认为左边的灰色方块是前景.如果按照一般的分割方法,将灰色作为前景种子,那么右边较浅的灰色方块由于与种子颜色相近,也可能被错误地划分为前景.但是,若将周围的颜色一起纳入考虑,左边的灰色区域周围是白色,而右边的灰色区域周围是黑色,可以被轻松地区别开来.



Fig.2 How to differentiate the two similar grey color

图 2 如何区分相似的灰色

我们对式(2)进行修改,将小区块的邻居区域的颜色也纳入考虑:

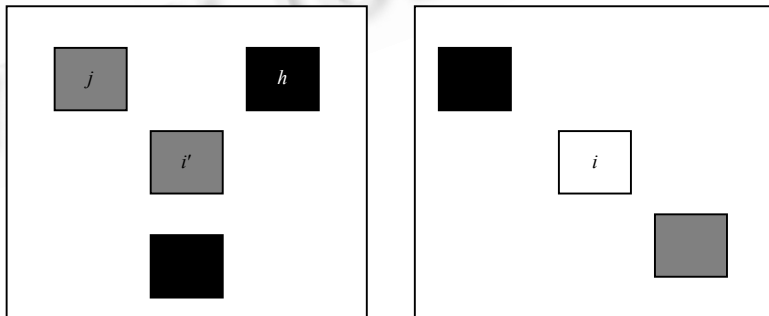
$$CD(R_1, n_1, R_2, n_2) = (1 - \alpha) \|C(R_1, n_1) - C(R_2, n_2)\| + \alpha \|C(N(R_1, n_1)) - C(N(R_2, n_2))\| \quad (3)$$

其中, $N(R, n)$ 表示帧 n 中区域 R 的邻居区域,这个邻居区域的选取由第 2.2.2 节中的 $K(i)$ 来确定; α 是一个用来平衡公式中两项的参数, α 可以取[0,0.5]范围内的值,在本文的实验中, $\alpha=0.3$.

2.2.2 一般帧中确信度的计算

以正向过程为例,逆向过程与正向过程相比只是方向不同,计算方法完全相同.如图 3 所示,图 3(a)是帧 $Frame_{n-1}$ 的分水岭小区块,并且已经设定了确信度.图中,灰色区块表示前景区块,黑色区块表示背景区块.图 3(b)是 $Frame_n$ 的分水岭小区块,区块 i 的确信度是待求的.考虑到相邻帧之间只有微小的差异,我们假定区块 i 在 $Frame_{n-1}$ 中的对应区块应该在区块 i 的中心位置在 $Frame_{n-1}$ 中对应的位置,即区块 i' 的附近,我们假定这个范围为矩形 $K(i)$. $K(i)$ 的中心为区块 i 的中心, $K(i)$ 的边长由视频 V 的运动激烈程度而定,所有中心在 $K(i)$ 范围内的区块都视为区块 i 的邻居,也就是说属于 $N(i, n-1)$.本文中, $K(i)$ 的边长设为 20 个像素, j 和 h 都在 i 的 $K(i)$ 范围内,其中 j 是标记为前景的区块中与 i 颜色距离值最小的, h 是标记为背景的区块中与 i 颜色距离值最小的.即

$$\begin{cases} j = \arg \min_x (CD(R_x, n-1, R_i, n)), & x \in K(i) \text{ and } x \in foreground \\ h = \arg \min_x (CD(R_x, n-1, R_i, n)), & x \in K(i) \text{ and } x \in background \end{cases} \quad (4)$$



(a) $Frame_{n-1}$

(b) $Frame_n$

Fig.3 Some watershed region of $Frame_{n-1}$ and $Frame_n$

图 3 部分 $Frame_{n-1}$ 和 $Frame_n$ 的分水岭小区块

接下来我们计算区块 i 的确信度.确信度计算的原则为,如果区域 i 与属于前景的区域 j 间的颜色距离值比较小,而且区域 j 的确信度较高(如果 j 是背景区域,那么这里应该是确信度较低,因为确信度越接近 0,我们越确信它是背景),区域 i 是前景的可能性就大,应该给它赋一个较大的确信度.

将 j 与 i 的颜色距离值记为 fcd (foreground color distance),将 h 与 i 的颜色距离值记为 bcd (background color distance),定义下面两个变量:

$$\begin{cases} A = \frac{fcd}{Reli(R_j)} \\ B = \frac{bcd}{1 - Reli(R_h)} \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中, A, B 用区块 j 和 h 的确信度对颜色距离值做了处理.处理的原则是,如果确信度高,则认为 i 属于这个集合是有较大可能性的,对颜色距离值几乎不做处理;如果确信度接近 0.5,则认为 i 属于这个集合是不太可能的,因此对颜色距离值依照确信度做一个惩罚,将它最大放大至原先的 2 倍.

可以看出,当比较确信 j 是前景时, $Reli(R_j)$ 接近于 1, A 几乎等于 fcd ;而当不太确信 j 是前景时, $Reli(R_j)$ 接近于 0.5, 这样 A 几乎等于 2 倍的 fcd . B 与 A 类似,不同之处在于 $Reli(R_h)$ 始终小于 0.5, 所以用 $1 - Reli(R_h)$ 作为分母来计算 B , 使 B 的取值范围与 A 相同.

R_i 的确信度在 $[0, 1]$ 范围内, 并且要满足如下分布:

$$\begin{cases} 0 \leq Reli(R_i) < 0.5, & A > B \\ Reli(R_i) = 0.5, & A = B \\ 0.5 < Reli(R_i) \leq 1, & A < B \end{cases} \quad (6)$$

最后,我们采用式(7)来计算 i 的确信度:

$$Reli(R_i) = \frac{B}{A + B} \quad (7)$$

2.3 正向过程、光流与逆向过程

正向过程.从关键帧 F_1 的下一帧 F_2 开始,由前一帧的确信度计算这一帧的每一个小区块的确信度,接下来按照确信度对每一个小区块进行前景、背景标记.标记方法为

$$\begin{cases} \text{if } Reli(R) \geq 0.5, & \text{then } R \in \text{foreground} \\ \text{if } Reli(R) < 0.5, & \text{then } R \in \text{background} \end{cases} \quad (8)$$

标记完一帧后,再对下一帧做处理.这个过程一直持续到关键帧 F_n 的前一帧 F_{n-1} 结束.这样,视频序列中的每一帧的每一个小区块都被标记完成.但是,考虑如图 4 所示的情况: $n-1$ 帧中没有灰色方块, n 帧中出现了一半, $n+1$ 帧中完全显示了出来.如果仅有正向过程,那么由于第 $n-1$ 帧中没有灰色方块的种子信息,第 n 帧中的灰色方块将可能被标记错误,而这个错误将在第 $n+1$ 帧中被积累下去.而如果将视频序列反过来看,由于第 $n+1$ 帧中包含了灰色方块的种子信息,那么这个部分遮挡问题就不存在了,于是我们提出了逆向过程来修正正向过程中可能出现的错误.

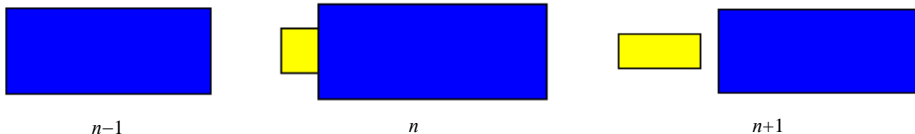


Fig.4 An example for occlusion object

图 4 部分遮挡物体的例子

但是,在逆向过程中,全部重新计算每一个小区域的确信度代价过大.逆向过程是为了解决部分遮挡问题才存在的,而部分遮挡情况只出现在视频中运动的区域,静止的区域是不需要进行修正的.我们采用 LK 光流算法^[3]来计算出视频中某一帧相对于其前一帧,其中哪些小区域是运动的,而这些运动的小区域就是而后在逆向

过程中需要进行确信度修正的部分.

如图 5 所示,图 5(a)和图 5(b)是视频序列中相邻的两帧,图 5(c)是图 5(b)中运动部分和静止部分的一个示意图.其中,白色区域代表静止部分,而黑色部分代表运动部分.两块连成一片的大片黑色是天空,在分水岭中被分别聚成一块,虽然它们面积很大,但在处理中,只算两块小区域.因此可以看出,经过 LK 光流算法处理后,逆向过程中需要进行修正的小区块数目大为减少.详细数据见表 1.而图 5(b)中人露出的牙齿部分由于与天空颜色接近,在正向过程中可能被误分至背景部分,属于部分遮挡问题.从图 5(c)中可以看出,它被划分到了需要运动部分中,将在后续步骤中被修正.

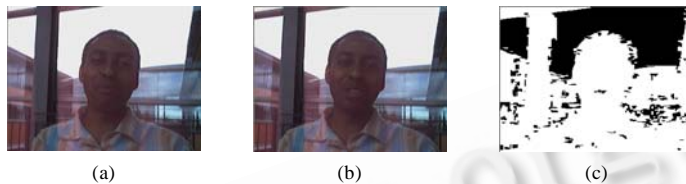


Fig.5 Moving part and still part

图 5 运动的部分和静止的部分

Table 1 A contrast of the number of total regions and moving regions

表 1 运动区块和总区块个数对比

视频	所选帧	总区块个数	运动的区块个数
靠窗的黑人	104	4 522	280
靠门的白人	80	6 739	355
小动物	8	11 814	379

逆向过程:从 F_{n-1} 开始,由后一帧的确信度修正这一帧中属于运动部分的小区块的确信度,确信度的计算与正向过程类似.一帧处理完后,必须对确信度和标记结果进行修正,具体见表 2.

Table 2 Correction of Reliability

表 2 修正确信度

正向过程确信度 $Reli_1$	逆向过程确信度 $Reli_2$	修正后的确信度
$Reli_1 \geq 0.5$	$Reli_2 \geq 0.5$	$\text{Max}(Reli_1, Reli_2)$
$Reli_1 < 0.5$	$Reli_2 < 0.5$	$\text{Min}(Reli_1, Reli_2)$
$Reli_1 \geq 0.5$	$Reli_2 < 0.5$	$Reli_1 \geq (1 - Reli_2)$, 取 $Reli_1$; $Reli_1 < (1 - Reli_2)$, 取 $Reli_2$
$Reli_1 < 0.5$	$Reli_2 \geq 0.5$	$Reli_1 < (1 - Reli_2)$, 取 $Reli_1$; $Reli_1 \geq (1 - Reli_2)$, 取 $Reli_2$

根据修正的确信度,对这一帧的小区块标注前景和背景.然后对前一帧进行处理,这个过程一直持续到 F_2 结束.逆向过程处理结束后,根据最终的确信度,用式(8)对前景和背景进行最后的标注.这样,整个视频序列就分割完成了.

3 实验及结果

我们做了一些实验来验证我们的算法.实验的部分测试视频取自微软研究院的一个测试库(<http://research.microsoft.com/en-us/projects/i2i/data.aspx>).图 6 是测试双向分割的实验.第 1 行的 3 幅图像是视频中的原始帧图像.第 2 行的 3 幅图像是仅采用正向分割所得出的结果,图 6(a')~图 6(c')分别是图 6(a)~图 6(c)的分割结果,其中,图 6(a')和图 6(c')为关键帧.第 3 行的 3 幅图像是采用双向分割所得出的结果,图 6(a'')~图 6(c'')分别是图 6(a)~图 6(c)的分割结果,其中,图 6(a'')和图 6(c'')为关键帧.

图 6(a)中人的手挡住了身后的黑板和左肩的部分衬衫,如果仅采用正向过程进行分割,那么图 6(b)中的左肩上的衬衫部分由于颜色与图 6(a)中的黑板部分颜色同属于白色,因而可能会被错误地分割至背景部分.图 6(b')证实了上述推理.另外,人的左脸处也有部分分割错误.采用本文提出的双向分割算法,分割结果分别显示在第 3 行的图 6(a'')~图 6(c'').从图 6(b'')可以看出,左肩上的衬衫被正确地分割了出来,左脸的分割效果也有所

改善.但是,可以发现,在图 6(b'')中,人的指尖存在小部分分割错误之处,这主要是由于人的指尖处由于反光而呈现出亮白色,与黑板的颜色相似造成的.

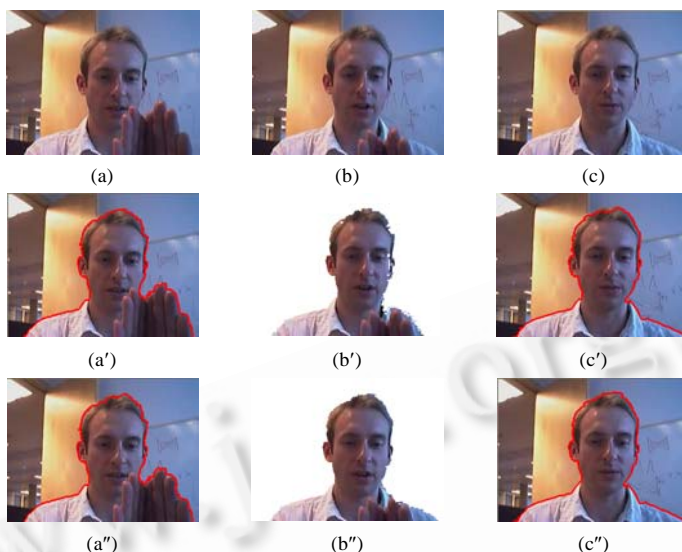


Fig.6 An experiment for bi-directional segment, $\alpha=0.3$

图 6 测试双向分割的实验, $\alpha=0.3$

图 7 是测试局部颜色模型的实验.其中,图 7(a)~图 7(c)是视频中的 3 帧图像.图 7(a')和图 7(f')分别是图 7(a)和图 7(c)作为关键帧分割的结果,图 7(b')~图 7(e')分别是对中间帧图 7(b)取不同 α 值进行分割的结果.图 7(b')中 $\alpha=0$,图 7(c')中 $\alpha=0.1$,图 7(d')中 $\alpha=0.2$,图 7(e')中 $\alpha=0.3$.从结果来看,图 7(b')没有采用局部颜色模型,衣领处有多处分割错误.而图 7(c')~图 7(e')分割效果有不同程度的改善,其中图 7(e')的效果最好.相对于 $\alpha=0$,图 7(e')中衣领处的分割效果有较大改善.这证明了本算法在前景、背景颜色较接近时也能得出正确的分割结果.但是,前景边缘处的分割有锯齿效果.



Fig.7 An experiment for local color pattern

图 7 测试局部颜色模型的实验

图 8 给出了更多的分割结果,图 8(a)和图 8(b)分别是原视频帧,图 8(a')和图 8(b')是分割结果.图 8(a')中的人的左耳处分割得不太好,而右耳就分割得比较完美.主要原因还是在于左耳处的颜色与周围颜色比较相似,即使将周围的颜色考虑进去,也不能完全解决问题,仍然有小部分出错.值得注意的是,图 8(a)中人的衬衫与左上角电灯的颜色是很相近的,但是,由于本文的确信度是由局部信息得出的,这两者都在对方的搜索范围以外,所以人的衬衫与电灯不会有相互影响而导致某一方分割错误.这就避免了文献[9]中图 6 的问题,由于肩章和背景的红旗颜色相近而导致肩章分割错误.图 8(b')总体分割得不错,但是边缘处的锯齿现象仍然明显.分割结果的正确度见表 3,算法中各个部分的耗时见表 4.



Fig.8 More segment result
图 8 更多的分割结果

Table 3 Segment accuracy
表 3 分割的正确度

视频	α	正确度 (%)
靠窗的黑人	0.1	93
	0.2	96
	0.3	98
靠门的白人	0.1	91
	0.2	93
	0.3	96
小动物	0.1	90
	0.2	92
	0.3	94

Table 4 Processing time of each module

表 4 各模块耗时

视频	大小	关键帧	分水岭 (min)	正向过程 (min)	逆向过程
靠窗的黑人	320×240×80	9	1	6	47 秒
靠门的白人	320×240×80	9	1	8	1 分钟
小动物	480×320×80	9	2	11	1 分 30 秒

4 总 结

本文提出了一种基于确信度的双向分割算法.该算法通过对帧进行分水岭预分割,而后通过一个双向过程计算帧中每个分水岭小区域的确信度,最后根据确信度来完成分割.本文主要的创新点在于,提出了确信度模型,并将文献[19]中的局部颜色配置模型思想整合到确信度模型中,改善了在前景、背景颜色较接近时的分割效果.双向分割的思想也为正确分割部分遮挡物体提供了思路.在将来的研究目标上,我们继续完善我们的算法,提升其运行速度,并加入一系列交互式操作,以方便用户.针对前景边缘处的锯齿效果,我们考虑加入 **Matting** 算法来对前景的边缘作一些修正.

References:

- [1] Vincent L, Soille P. Watersheds in digital spaces: An efficient algorithm based on immersion simulations. *IEEE Trans. on PAMI*, 1991,13(6):583–598.
- [2] Lu ZN, Qiang ZX. Watershed segmentation based on gradient modification and region merging. *Computer Engineering and Design*, 2009,30(8):2075–2077 (in Chinese with English abstract).
- [3] Lucas BD, Kanade T. An iterative image registration technique with an application to stereo vision. In: *Proc. of the 7th Int'l Joint Conf. on Artificial Intelligence*. Vancouver, 1981. 674–679.
- [4] Horn BKP, Schunck BG. Determining optical flow. *Artificial Intelligence*, 1981,17:185–203.
- [5] Yang GL, Wang ZL, Mu ST, Xie L, Liu JW. An improved optical flow algorithm. *Computer Engineering*, 2006,32(15):187–189 (in Chinese with English abstract).
- [6] Boykov YY, Jolly MP. Interactive graph cuts for optimal boundary & region segmentation of objects in N-D images. In: *Proc. of the 8th Int'l Conf. on Computer Vision (ICCV 2001)*, Vol.1. 2001. 105–102.
- [7] Li Y, Sun J, Tang CK, Shum HY. Lazy Snapping. In: *Proc. of the ACM SIGGRAPH*. 2004. 303–308.
- [8] Wang J, Bhat P, Colburn RA, Agrawala M, Cohen MF. Interactive video cutout. In: *Proc. of the ACM SIGGRAPH*. Los Angeles, 2005.
- [9] Li Y, Sun J, Shum HY. Video object cut and paste. *ACM Trans. on Graphics (TOG)*, 2005,24(3).
- [10] Kolmogorov V, Zabih R. What energy functions can be minimized via graph cuts? In: *Proc. of the ECCV*. 2002.
- [11] Boykov Y, Veksler O, Zabih R. Fast approximate energy minimization via graph cuts. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2001,23(11):1222–1239.
- [12] Rother C, Kolmogorov V, Blake A. “GrabCut”—Interactive foreground extraction using iterated graph cuts. In: *Proc. of the ACM SIGGRAPH 2004*. 2004. 309–314.
- [13] Boykov Y, Kolmogorov V. An experimental comparison of min-cut/max-flow algorithms for energy minimization in vision. *IEEE Trans. on PAMI*, 2004,26:1124–1137.
- [14] Sun J, Zhang WW, Tang XO, Shum HY. Background cut. In: *Proc. of the ECCV 2006*. 2006.
- [15] Zou K, Han GQ, Li W, Zhang XY. An efficient method of texture synthesis based on graph cuts. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2008,20(5):652–658 (in Chinese with English abstract).
- [16] Comaniciu D, Meer P. Mean shift: A robust approach toward feature space analysis. *IEEE Trans. on PAMI*, 2002,24(5):603–619 (in Chinese with English abstract).
- [17] DeMenthon D, Megret R. Spatio-Temporal segmentation of video by hierarchical mean shift analysis. Technical Report, LAMP-TR-090, CAR-TR- 978, CS-TR-4388, UMIACS-TR-2002-68, University of Maryland, 2002.

- [18] Li XH, Zhang TY, Zhou YT, Shen XD. Video object segmentation based on Gaussian mixture mode. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006,40(6):724-728 (in Chinese with English abstract).
- [19] Cui JY, Yang Q, Wen F, Wu QY, Zhang CS, van Gool L, Tang XO. Transductive object cutout. In: Proc. of the CVPR 2008. 2008.

附中文参考文献:

- [2] 卢中宁,强赞霞.基于梯度修正和区域合并的分水岭分割算法.计算机工程与设计,2009,30(8):2075-2077.
- [5] 杨国亮,王志良,牟世堂,谢仑,刘冀伟.一种改进的光流算法.计算机工程,2006,32(15):187-189.
- [15] 邹昆,韩国强,李闻,张潇元.基于 Graph Cut 的快速纹理合成算法.计算机辅助设计与图形学学报,2008,20(5):652-658.
- [18] 李小和,张太镒,周亚同,沈晓东.基于高斯混合模型的视频对象分割算法.西安交通大学学报,2006,40(6):724-728.



严超(1984—),男,江苏扬州人,硕士生,主要研究领域为图像及视频处理.



沈洋(1975—),男,博士生,主要研究领域为图像及视频处理.



马利庄(1963—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域计算机图形图像,数字多媒体.