

基于超像素联接权模型的视频分割算法

孙 焘 陈康睿

(大连理工大学创新实验学院 大连 116024)

摘 要 视频图像分割是图像处理领域的一个热门问题。在传统分割算法的基础上,提出了一种新的无监督的视频分割算法。该算法采用超像素对运动前景进行表示,定义联接权概念来描述超像素属于同一物体的可能性,并利用当前帧的静态特征与前后帧的关联特征进行联接权计算。为优化超像素间匹配关系的搜索,算法引入了超像素颜色特征匹配约束与运动关联性匹配约束的机制。分别在简单场景和复杂场景进行了视频分割实验,简单场景下,算法保证了较高的召回率与稳定的准确率;复杂场景下,算法完成了人群中单个人的切分。大量实验结果表明,该算法能够实现视频图像的分割,并且能有效解决过分割问题。

关键词 视频分割,超像素,运动约束,过分割

中图分类号 TP391.4 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.2.063

Video Segmentation Algorithm Based on Join Weight of Superpixels

SUN Tao CHEN Kang-rui

(School of Innovation and Experiment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract Video segmentation is a hot issue in the field of image processing. Based on traditional segmentation algorithms, a new unsupervised video segmentation algorithm was proposed. This algorithm represents the moving foreground with superpixel algorithm, defines the join weight of superpixels as the possibility from the same object, and calculates the join weight with static features from current frame associated with the relevance feature between frames. In order to optimize the search of relevance match between superpixels from different frames, the algorithm introduces superpixel color feature constraint and movement constraint. The experiment contains two aspects, and the algorithm ensures higher recall rate and stable precision rate in the simple scenario and completes single person segmentation from the crowd in the complex scenes. Large numbers of experiments show that the proposed algorithm can realize video image segmentation, and effectively solve the problem of over-segmentation.

Keywords Video segmentation, Superpixel, Motion constraint, Over segmentation

1 引言

图像分割是指将数字图像划分为若干有实际意义的区域的过程,是计算机视觉方向的基础问题之一。随着互联网、多媒体技术的发展,基于视频序列的图像分割开始兴起,并且在视频编码、机器人视觉与内容分析等方面发挥了非常重要的作用。

目前,视频分割算法有多种,其中物体分割近年来成为了研究热点^[1-3]。这类算法通过引入对象假设,实现对物体的独立分割,在一定程度上解决了传统算法过分割的问题。然而,包括物体分割在内的传统算法主要关注图像中的颜色、纹理、运动等低级属性,对物体的空间运动特征以及多物体间的关联性分析却较少^[4]。超像素分割是图像领域常用的预处理方式,可以简化图像的表达形式,提高后续图像分析的计算效率,被广泛用于图像分割、人脸识别、视频跟踪等领域。

本文基于传统视频分割算法与超像素算法,利用物体的空间关联性信息,提出了一种新的无监督视频分割算法。算

法首先对视频图像进行预处理,将运动前景分割为若干超像素,并定义联接权用以表示不同超像素属于同一物体的可能性。联接权计算基于当前帧的静态特征与前后帧的关联特征两方面。计算过程中,需搜索前后帧间超像素的匹配关系,为提高效率,算法引入超像素的颜色特征和物体的运动关联性信息,对搜索空间加以约束。

本文的主要贡献是在无先验知识条件下,建立联接权模型,结合当前帧的静态特征与前后帧的关联特征进行计算,并在实验数据集上验证了算法的有效性。本文第 2 节介绍视频图像分割的研究现状及文中使用的预处理算法;第 3 节指出研究目标,详细阐述了算法模型和计算过程;第 4 节给出实验结果与分析;最后进行总结并且对未来的工作进行了规划。

2 相关工作

2.1 视频图像分割

近年来,随着多媒体技术的发展,视频图像分割问题成为了图像分割的热点问题之一。

到稿日期:2014-12-22 返修日期:2015-06-21

孙 焘(1975-),男,博士,副教授,主要研究方向为数据挖掘、图像处理,E-mail:dlutst@dlut.edu.cn;陈康睿(1991-),男,硕士,主要研究方向为图像处理。

国内外学者从不同角度对视频分割问题提出了大量的算法。其分类比较复杂,没有统一的标准。其中,按照是否需要人工参与,可分为自动分割与半自动分割;按照是否需要先验信息,可分为无监督分割与有监督分割。本文主要关注的是无监督的自动视频分割算法。

在视频分割算法中,物体分割算法由于具有较好的效果,获得了越来越多的关注。文献[1]中,首先提出使用物体概念取代过去的分割算法中使用的模糊概念,并给出了无监督的物质度计算方法,对视频分割问题进行了重新定义。Lee 等人则在文献[2]中提出了度量视频区域是否包含运动物体的区域分概念,与文献[1]中静态的物质度分结合起来,对视频图像中可能的物体区域进行打分排序,以此来发现视频图像中的重要物体(key-segments),该算法有较好的效果。文献[3]在文献[2]的基础上,将区域选择问题表述为加权图寻找约束条件下的最大加权派系问题,对视频分割结果进行了优化。

2.2 背景减除

背景减除法是比较常用的运动目标检测算法,分为背景建模及背景差分两步,目前较为流行的背景建模算法有:码本^[6]、混合高斯^[7]、Vibe^[8]等。

码本算法通过对像素点的时间序列模型进行学习,获得码本,结合图像序列中前景点、背景点的分布特性,获得背景码字,根据背景码字构造出背景。该算法可以较好地处理阴影和空洞的问题,抗干扰能力较强,但是内存消耗较大。

混合高斯算法通过记录各个像素点在不同时间点的值,构建混合高斯模型,这种背景模型在实际场景中有较好的效果。但是其计算代价较大,并且对于背景的频繁变换,模型适应能力较差。

Vibe 算法通过随机更新策略调整背景模型。相比其他背景建模算法,Vibe 运行速度快,并且可以较好地适应各种不同场景,效果显著。本文使用的是 Vibe 算法。

2.3 超像素分割

超像素分割又称低层分割,是把空间位置接近、属性相似的像素点聚合在一起,以提升图像分析的计算效率。通常不考虑图像的语义信息,可以看作是对图像的聚类过程。

本文采用的超像素分割算法是简单线性迭代聚类算法^[9](Simple Linear Iterative Clustering, SLIC)。该算法是对图像中的像素进行 k-means 聚类,聚类过程中,在计算不同像素距离时,综合考虑颜色维度距离与空间维度距离。

相较于 GS04、NC05、TP09、QS09、GC10 等其他超像素分割算法,SLIC 在误切分率上相近,但是在运算速度方面有较大的优势,SLIC 算法的时间复杂度为 $O(nki)$,其中 k 为簇个数, n 为像素点个数, i 为迭代截止次数。

3 视频分割算法

本文目标是无监督地从原始视频图像中分割出运动物体。由于原始视频图像同时包含静态背景和待切分的运动物体,算法对图像进行背景减除。算法流程如图 1 所示。

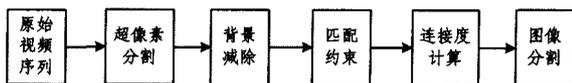


图 1 算法流程

3.1 联接权模型

对原始视频图像进行背景减除后,得到被分割为若干孤

立局部的前景图像。使用 SLIC 算法对前景进行超像素预分割,得

$$I_T = \{c_1^T, \dots, c_k^T\}, M_T \in R^{k \times k} \quad (1)$$

$$c_i^T = \{points, center, color\}$$

式中, I_T 为 T 时刻前景图像的超像素分割结果, k 为 I_T 中元素个数。对 $i=1, \dots, k, c_i^T$ 表示超像素, $points$ 为 c_i^T 包含的像素点集合, $center$ 为 $points$ 的几何中心, $color$ 为 $points$ 的颜色特征。 M_T 为 I_T 上的邻接矩阵, $M_T(i, j)$ 取值 1、0 表示 c_i^T, c_j^T 对应的超像素在前景图像中是否位置相邻。

若 t 时刻的超像素 c_m^t 与 T 时刻的超像素 c_p^T 对应同一物体的同一部分,则称 c_m^t 与 c_p^T 是“匹配”的。令 $Z(c_m^t, c_p^T)$ 表示 c_m^t, c_p^T 匹配的概率,度量 c_m^t 与 c_p^T 匹配的可能性,满足 $\sum_{c_i^t \in I_t} Z(c_m^t, c_p^T) = 1$ 。令 $W(c_m^t, c_p^T; c_n^t, c_q^T)$ 表示联合匹配概率,度量 c_m^t 与 c_p^T, c_n^t 与 c_q^T 同时匹配的可能性,满足 $\sum_{c_i^t \in I_t} \sum_{c_j^t \in I_t} W(c_i^t, c_j^T; c_k^t, c_l^T) = 1$ 。

令 $J(I_t, I_T) = \{(c_i^t, c_j^T) | c_i^t \in I_t, c_j^T \in I_T\}$ 表示 I_t, I_T 间可能匹配的全集。

若 T 时刻超像素 c_p^T 与 c_q^T 属于同一运动物体,则称 c_p^T 与 c_q^T “联接”。令 $L(c_p^T, c_q^T)$ 表示 c_p^T, c_q^T 的联接权,用于度量 c_p^T, c_q^T 属于同一运动物体的可能性。

使用 SLIC 处理后的图像由若干超像素组成,联接权对超像素的物体关联性进行了表示。通过联接权的计算,可以完成对超像素的聚合,将运动物体从图像中分割出来。

3.2 联接权算法

对于联接权的计算,根据物体在前后帧间的空间关联性,综合当前帧静态特征与前后帧关联特征两方面进行。

(1)静态特征。根据经验假设,当前帧图像 I_T 中位置相邻的超像素属于同一物体的概率较大,因此 $L(c_p^T, c_q^T)$ 算法考虑 I_T 上邻接矩阵 M_T 方面的因素。

(2)关联特征。对于任意 $t(t < T)$ 时刻图像 I_t 中属于同一物体的超像素 c_m^t 与 c_n^t 与当前帧 I_T 中超像素 c_p^T 和 c_q^T ,若 c_m^t 与 c_p^T, c_n^t 与 c_q^T 属于同一物体同一部分,则 c_p^T 和 c_q^T 应属于同一物体。因此, I_T 中超像素联接关系与 I_t 中超像素联接关系相关。算法通过联合匹配概率建立 I_t, I_T 的关联性,将 I_t 联接权结果加入运算。为简化计算,仅考虑 I_{T-1} 对 I_T 的影响,得

$$L(c_p^T, c_q^T) = \sum_{c_m^{T-1} \in I_{T-1}} \sum_{c_n^{T-1} \in I_{T-1}} L(c_m^{T-1}, c_n^{T-1}) * W(c_m^{T-1}, c_p^T; c_n^{T-1}, c_q^T) * \beta + M_T(p, q) * \alpha \quad (2)$$

式中, L 结果由两部分组成, M_T 是当前帧的静态特征,是 I_T 对 L 的初始影响;另一部分是 I_{T-1} 对 L 初始化结果的修正,是前后帧的关联特征。 α, β 为预给定常量,表示 I_{T-1} 和 I_T 对 L 的影响权重。

3.3 匹配约束

计算式(2)中联合匹配概率 $W(c_m^t, c_p^T; c_n^t, c_q^T)$ 时,算法需在匹配空间 $J(I_t, I_T)$ 中搜索可能的匹配。由于 $J(I_t, I_T)$ 空间较大,完全搜索的时间、空间代价较高,且并非所有元素均为合法匹配,因此算法引入匹配约束,从颜色约束、运动约束两个方面限制匹配。

表1 算法伪代码

(1)颜色约束。对于 $J(I_t, I_T)$ 中的元素 (c_m^t, c_p^T) ,若 c_m^t, c_p^T 的颜色特征差异较大,则显然不可能匹配,应从 $J(I_t, I_T)$ 中删除。

$$J'(I_t, I_T; \theta) = \{(c_m^t, c_p^T) | (c_m^t, c_p^T) \in J(I_t, I_T) \cap \|c_m^t - c_p^T\| < \theta\} \quad (3)$$

式中, θ 为颜色阈值, $J'(I_t, I_T; \theta)$ 为 $J(I_t, I_T)$ 颜色约束所得结果。

(2)运动约束。对于 $J'(I_t, I_T; \theta)$ 中的元素 $(c_m^t, c_p^T), (c_n^t, c_q^T)$,若同时匹配,则 $(c_m^t, c_p^T), (c_n^t, c_q^T)$ 应有相似的运动变换。算法引入式(4)中函数 $Tr: J' \rightarrow R^2$,并对 $J'(I_t, I_T; \theta)$ 的 Tr 函数值进行层次聚类。设 $\{H_1 \dots H_s\}$ 为聚类结果,满足 $\bigcup_i H_i = J'(I_t, I_T; \theta), H_i \cap H_j = \emptyset$ 。 H_i 中元素有相近的 Tr 函数值,运动变换相似,满足运动约束。

$$\begin{cases} Tr(c_m^t, c_p^T) = c_p^T \cdot center - c_m^t \cdot center \\ (c_m^t, c_p^T) \in J'(I_t, I_T; \theta) \end{cases} \quad (4)$$

联合匹配概率 $W(c_m^t, c_p^T; c_n^t, c_q^T)$ 的计算如式(5)所示。算法假设若 $(c_m^t, c_p^T), (c_n^t, c_q^T)$ 来自同一 H_i ,则 $(c_m^t, c_p^T), (c_n^t, c_q^T)$ 匹配独立,可将联合匹配概率拆分为两个独立匹配概率的乘积,否则联合匹配概率为0。为保证 $\sum_{c_i^t, c_j^T} W(c_i^t, c_j^T; c_i^t, c_j^T) = 1$,需进行归一化。

$$\begin{cases} W'(u; v) = \begin{cases} Z(u) * Z(v), & \text{if } \exists H_i, u \in H_i \cap v \in H_i \\ 0, & \text{others} \end{cases} \\ W(u; v) = W'(u; v) / \sum_{c_i^t, c_j^T} W'(c_i^t, c_j^T; c_i^t, c_j^T) \\ u = (c_m^t, c_p^T), v = (c_n^t, c_q^T) \end{cases} \quad (5)$$

匹配概率 $W(c_m^t, c_p^T)$ 的计算基于匹配约束结果 H_i 。考虑 t, T 时刻图像 I_t, I_T ,若超像素 c_m^t 与 c_p^T 匹配,则 c_m^t 与 c_p^T 的邻域也应匹配。因此假设超像素匹配概率与匹配约束后超像素邻域面积相关,且面积越大,超像素匹配概率越大。如式(6)所示,算法通过累加 c_m^t 在 I_t 中邻域的像素个数 $W'(c_m^t, c_p^T)$,对 c_m^t, c_p^T 建立匹配关系的可能进行度量。 M_t^t 为 I_t 的邻接矩阵, $W(c_m^t, c_p^T)$ 为归一化后的匹配概率,满足 $\sum_{c_i^t} W(c_i^t, c_p^T) = 1$ 。

$$\begin{cases} I_t = \{c_a^t | (c_a^t, c_b^T) \in H_i\} \\ Z'(c_m^t, c_p^T) = \sum_{M_t^t(m, i) = 1} \text{size}(c_i^t \cdot \text{points}) \\ Z(c_m^t, c_p^T) = Z'(c_m^t, c_p^T) / \sum_{c_i^t} Z'(c_i^t, c_p^T) \end{cases} \quad (6)$$

3.4 伪代码

本算法的伪代码如表1所列。算法1为联接权算法,第1行定义了联接权矩阵 L_t 与联合匹配概率矩阵 W ,第4行中 M_t 为 I_T 上的邻接矩阵,算法在 $t=1$ 时仅根据 I_t 的邻接关系对 L_t 进行计算,其他情况下利用式(2)计算 L_t 。算法2为联合匹配概率算法,第1-2行定义了联合匹配概率矩阵 W 与匹配概率矩阵 Z ,第3行定义了匹配空间 J ,第5-8行是基于颜色约束的匹配空间计算,第9行是运动约束的匹配空间聚类,第13行中 M^t 为 I_{t-1} 上的邻接矩阵,算法的第12、17行则对应式(6),算法的第21、26行则对应式(5)。

算法1 联接权算法 CalcuLink

```

输入:  $I_{t-1} = \{c_1, c_2, \dots, c_a\}, I_t = \{c_1, c_2, \dots, c_b\}$ 
输出:  $L_t$ 
1. Let  $L_t$  be a  $a \times a$  matrix
2. Let  $W$  be a  $(a \times b) \times (a \times b)$  matrix
3. for  $i=1$  to  $b, j=1$  to  $b$  do
4.    $L_t(i, j) = M_t(i, j)$ 
5. end for
6. if  $t > 1$  then
7.    $W = \text{CalcuMatch}(I_{t-1}, I_t)$ 
8.   for  $p=1$  to  $b, q=1$  to  $b$  do
9.     for  $m=1$  to  $a, n=1$  to  $a$  do
10.       $L_t(p, q) = L_t(p, q) * \alpha + L_{t-1}(m, q) * W(m, n, p, q) * \beta$ 
11.    end for
12.  end for
13. end if

```

算法2 联合匹配概率算法 CalcuMatch

```

输入:  $I_{t-1} = \{c_1, c_2, \dots, c_a\}, I_t = \{c_1, c_2, \dots, c_b\}$ 
输出:  $W$ 
1. Let  $W, W'$  be two  $(a \times b) \times (a \times b)$  matrices
2. Let  $Z, Z'$  be two  $(a \times b)$  matrices
3. Let  $J$  be a list of tuple(x, y)
4. Let  $H_1 \dots H_s$  be s lists of tuple(x, y)
5. for  $i=1$  to  $a, j=1$  to  $b$  do
6.   if  $\|I_{t-1}(i) \cdot \text{color} - I_t(j) \cdot \text{color}\| < \theta$  then
7.      $J = J \cup \{(I_{t-1}(i), I_t(j))\}$ 
8.   end if
9. end for
10.  $\{H_1 \dots H_s\} = \text{Cluster } J \text{ by } Tr$ 
11. for  $r=1$  to  $s$  do
12.   for (x, y) in  $H_r$  do
13.      $Z'(x, y) = \sum_{M^r(x, j) = 1} \text{size}(I_{t-1}(j) \cdot \text{points})$ 
14.   end for
15. end for
16. for  $i=1$  to  $m, j=1$  to  $n$  do
17.    $Z(i, j) = Z'(i, j) / \sum_{i=1}^m Z'(i, j)$ 
18. end for
19. for  $i=1$  to  $s$  do
20.   for (a, b) in  $H_i, (c, d)$  in  $H_i$  do
21.      $W'(a, b, c, d) = Z(a, c) * Z(b, d)$ 
22.   end for
23. end for
24. for  $m=1$  to  $a, n=1$  to  $a$  do
25.   for  $p=1$  to  $b, q=1$  to  $b$  do
26.      $W(m, n, p, q) = W'(m, n, p, q) / \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^a W'(i, j, p, q)$ 
27.   end for
28. end for

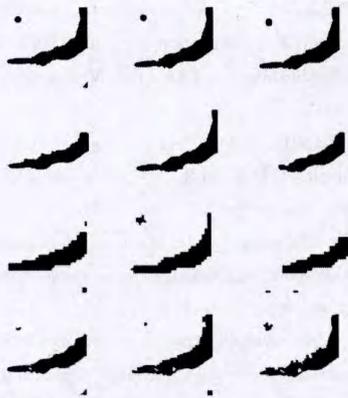
```

4 实验

4.1 简单场景分割

为验证算法对视频分割的有效性,首先在简单场景进行实验。实验使用的数据来自文献[1]的Tennis和Stefan视频序列(二者都是单运动物体视频序列)。图2和图3给出了本文算法以及文献[11, 12]算法的部分分割结果,图中白色部分表示背景,黑色部分表示运动物体。

图4和图5给出了Tennis和Stefan分割结果的准确率(Precision)、召回率(Recall)和F值(F-measure)曲线。其中,准确率等于算法正确分割的前景像素数目除以算法分割出的前景像素数目,召回率等于算法正确分割的前景像素数目除以标注结果中的前景像素数目, $F \text{ 值} = 2 * \text{Precision} * \text{Recall} / (\text{Precision} + \text{Recall})$ 。



第一行为视频序列第3帧、第5帧、第7帧的标注结果,第二行为对应帧使用文献[12]算法分割后结果,第三行为对应帧使用文献[11]算法分割后结果,第四行为对应帧使用本文算法分割后结果

图2 Tennis视频序列分割结果



第一行为视频序列第17帧、第27帧、第37帧的标注结果,第二行为对应帧使用文献[12]算法分割后结果,第三行为对应帧使用文献[11]算法分割后结果,第四行为对应帧使用本文算法分割后结果

图3 Stefan视频序列分割结果

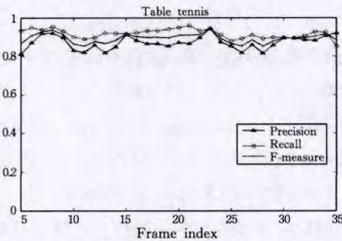


图4 Tennis视频序列分割结果准确率、召回率、F值曲线图

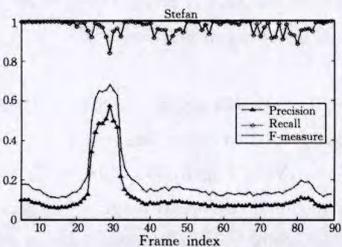


图5 Stefan视频序列分割结果准确率、召回率、F值曲线图

表2给出了本文算法和文献[11,12]算法的分割结果比较。本文算法在Tennis上,相较文献[11,12]算法,准确率接近,召回率、F值有明显提升;在Stefan上,较文献[11]召回率

有提升准确率、F值有提高。召回率的提升,是由于本文算法使用超像素对运动前景进行表示,并引入前后帧间超像素的关联特征,避免了空洞问题,增强了分割物体的完整性。

表2 文中算法与文献[11,12]算法的分割结果比较

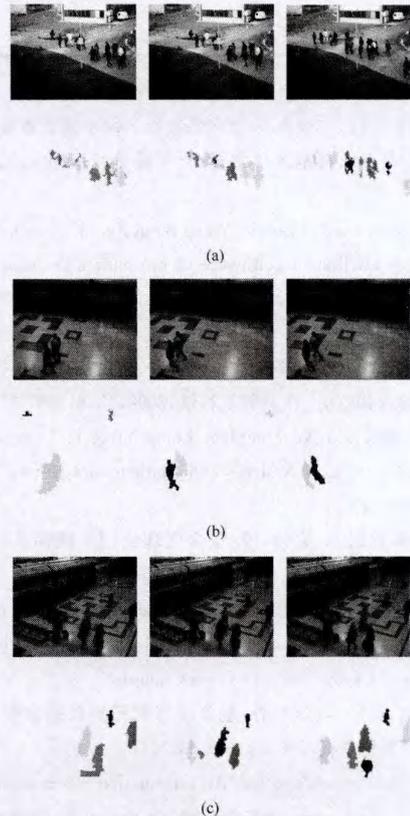
	算法	Precision	Recall	F-measure
Tennis	本文算法	0.87	0.92	0.89
	文献[11]	0.91	0.67	0.75
	文献[12]	0.79	0.69	0.72
Stefan	本文算法	0.12	0.97	0.20
	文献[11]	0.39	0.97	0.49
	文献[12]	0.06	0.96	0.11

图3中,本文算法及文献[11]算法分割结果同标注结果相比差距较大;图5中,Stefan分割结果曲线在25至30帧波动明显。观察Stefan后发现,Stefan中其他帧同25至30帧相比,背景运动明显,背景减除效果较差,分割结果同标注结果相比有差距。Tennis中图像背景相对静止,背景减除效果较好,所以图2中分割结果同标注数据接近,图4中分割曲线稳定。由于使用背景减除进行预处理,图像背景运动情况对本文算法有一定影响。

实验结果表明,简单场景下,本文算法的视频分割结果有较高的召回率,准确率与F值则受背景运动的影响,在背景相对静止时较好。

4.2 复杂场景视频分割

复杂场景下的多运动物体视频分割是本文算法的研究重点。为了验证算法效果,在数据集^[13]上进行了实验。图5中展示了部分视频分割效果,对于分割出的不同物体,使用了不同的颜色进行标注。



上方为原始图像,下方为视频分割结果

图5 数据集^[13]部分分割结果

图5中,原始图像内部分人位置较为紧密,聚合在一起,仅依靠当前帧图像信息无法分割开。但聚合在一起的多人在行进过程中可能出现过分离,算法引入之前帧信息,可以将部分人分割开,有效提升了分割效果。

实验结果表明,复杂场景下,本文算法由于综合了当前帧的静态特征与前后帧的关联特征,不仅能准确地提取出前景,而且可以较好地将运动物体分割开。

结束语 本文将传统的物体分割算法同超像素分割算法结合在一起,通过对运动物体的空间关联性进行分析,提出了一种新的视频分割算法。算法使用超像素对运动前景进行表示,将视频分割转换为超像素的联接概率分析问题,并且给出了具体的求解方式。实验结果表明,文中算法在简单场景与复杂场景下均有良好的视频分割效果,较为准确地完成了运动物体的分割。今后研究工作的重点是完善运动变换特征,建立完备的运动模型,更好地建立超像素的运动关联性。

参 考 文 献

- [1] Vicente S, Rother C, Kolmogorov V. Object cosegmentation[C]//2011 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). IEEE, 2011; 2217-2224
 - [2] Lee Y J, Kim J, Grauman K. Key-segments for video object segmentation[C]//2011 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). IEEE, 2011; 1995-2002
 - [3] Liu Y. A video object segmentation algorithm based on region selection[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(6): 211-217 (in Chinese)
刘毅. 一种基于区域选择的视频对象分割算法[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(6): 211-217
 - [4] Trichet R, Nevatia R. Video segmentation and feature co-occurrences for activity classification[C]//2014 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV). IEEE, 2014; 385-392
 - [5] Sun D, Roth S, Black M J. Secrets of optical flow estimation and their principles[C]//2010 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). IEEE, 2010; 2432-2439
 - [6] Kim K, Chalidabhongse T H, Harwood D, et al. Real-time foreground-background segmentation using codebook model[J]. Real-time imaging, 2005, 11(3): 172-185
 - [7] Zivkovic Z. Improved adaptive Gaussian mixture model for background subtraction[C]//Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition, 2004 (ICPR 2004). IEEE, 2004, 2: 28-31
 - [8] Barnich O, Van Droogenbroeck M. ViBe: A universal background subtraction algorithm for video sequences[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2011, 20(6): 1709-1724
 - [9] Achanta R, Shaji A, Smith K, et al. SLIC superpixels compared to state-of-the-art superpixel methods[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2012, 34(11): 2274-2282
 - [10] <http://www.sfu.ca/~ibajic/datasets.html>
 - [11] Chen Y M, Bajic I V, Saeedi P. Moving region segmentation from compressed video using global motion estimation and Markov random fields[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2011, 13(3): 421-431
 - [12] Zeng W, Du J, Gao W, et al. Robust moving object segmentation on H. 264/AVC compressed video using the block-based MRF model[J]. Real-Time Imaging, 2005, 11(4): 290-299
 - [13] <http://sida.rdg.ac.uk/pub>
-
- (上接第276页)
- 连钢,程媛媛,吴根秀. 一致完备决策系统中属性重要性定义的改进[J]. 江西师范大学学报(自然科学版), 2008, 32(3): 326-329
 - [4] Zhao Nai-gang, Li De-yu, Wang Su-ge, et al. New measure method for attribute significance in incomplete decision table and its application[J]. Computer Science, 2008, 35(8): 251-254 (in Chinese)
赵乃刚,李德玉,王素格,等. 一种新的不完备决策表中属性重要性度量及其应用[J]. 计算机科学, 2008, 35(8): 251-254
 - [5] Zhang Wen-xiu, Xu Zong-ben, Liang Yi, et al. Inclusion Degree Theory[J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 1996, 10(4): 1-9 (in Chinese)
张文修,徐宗本,梁怡,等. 包含度理论[J]. 模糊系统与数学, 1996, 10(4): 1-9
 - [6] Liang Ji-ye, Xu Zong-ben, Li Yue-xiang. Inclusion degree and measures of rough set data analysis[J]. Chinese Journal of Computers, 2001, 24(5): 544-647 (in Chinese)
梁吉业,徐宗本,李月香. 包含度与粗糙集数据分析中的度量[J]. 计算机学报, 2001, 24(5): 544-647
 - [7] Miao Duo-qian, Wang Jue. An information representation of the concepts and operations in rough set theory[J]. Journal of Software, 1999, 10(2): 113-116 (in Chinese)
苗夺谦,王珏. 粗糙集理论中概念与运算的信息表示[J]. 软件学报, 1999, 10(2): 113-116
 - [8] Liu Cai-hui, Miao Duo-qian, Yue Xiao-dong, et al. Measures of uncertainty of knowledge and their relationships[J]. Computer Science, 2014, 41(3): 66-69 (in Chinese)
刘财辉,苗夺谦,岳晓冬,等. 知识不确定性度量及其关系研究[J]. 计算机科学, 2014, 41(3): 66-69
 - [9] Miao Duo-qian, Hu Gui-rong. A heuristic algorithm for Reduction of knowledge [J]. Journal of Computer Research and Development, 1999, 36(6): 681-684 (in Chinese)
苗夺谦,胡桂荣. 知识约简的一种启发式算法[J]. 计算机研究与发展, 1999, 36(6): 681-684
 - [10] Wang Guo-yin, He Xiao. A Self-Learning model under uncertain condition[J]. Journal of Software, 2003, 14(6): 1096-1102 (in Chinese)
王国胤,何晓. 一种不确定性条件下的自主式知识学习模型[J]. 软件学报, 2003, 14(6): 1096-1102
 - [11] Wang Li-juan, Yang Jing-yu, Wu Chen, et al. Application of dependency relation in expanded rough set models [J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science), 2012, 26(2): 175-180 (in Chinese)
王丽娟,杨静宇,吴陈,等. 扩展粗糙集模型中依赖关系及应用[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2012, 26(2): 175-180