

一种基于拓扑约束的多核跟踪算法

苏 娟,王百合,刘代志

(第二炮兵工程大学,陕西西安 710025)

摘 要: 针对视觉跟踪中常见的目标部分遮挡和尺度变化问题,提出了一种基于拓扑约束的多核跟踪算法.首先,提取满足空间分布的位于目标与背景所在边界的 Harris 角点作为多核跟踪器的中心,然后,采用拓扑约束对多个跟踪结果进行优化,选取跟踪性能好的核跟踪器,构造仿射变换模型,进而得到最终跟踪结果和目标尺度变化信息.实验结果表明,本文算法能对目标进行准确跟踪,并能有效地处理目标的部分遮挡和尺度变化问题.

关键词: 多核跟踪; 拓扑约束; 部分遮挡; 尺度变化

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2015)02-0353-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.02.022

A Multi-Kernel Tracking Algorithm Based on Topology Constraint

SU Juan, WANG Bai-he, LIU Dai-zhi

(The Second Artillery Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710025, China)

Abstract: A multi-kernel tracking algorithm based on topology constraint is proposed in the mean-shift framework, in order to overcome problems caused by partial occlusion and scale change in the visual target tracking. Firstly, Harris corners located in the boundary area and satisfying certain space distribution rules are selected as centers of multiple independent kernel-based trackers. Secondly, topology constraint is used to optimize multiple tracking results, and those trackers with better performance are selected to construct the affine transform model between consecutive frames, through which the final tracking result and scale factors are generated. Experimental results demonstrate that, the proposed algorithm can track target accurately in the cases of partial occlusion and scale change.

Key words: multi-kernel tracking; topology constraint; partial occlusion; scale change

1 引言

视觉跟踪是当前计算机视觉领域的研究热点,在智能视频监控和精导武器导航等民用和军用领域都有着重要应用.核跟踪(又称均值漂移跟踪)算法由于其简单易用和实时性好的特点,一经问世就成为视觉跟踪领域的重要方法^[1~4].

遮挡问题是视觉目标跟踪中的常见难题.原始的均值漂移算法将目标视为整体,采用核直方图对目标进行建模,由于直方图模型丢掉了空间信息,当产生部分遮挡时不能对目标进行准确的定位.为了融入空间信息,并同时能够处理遮挡情况,近年来国内外学者对原始核跟踪方法进行了改进,提出了多种多核跟踪算法,其主要思路是将目标进行分块处理,然后对分块跟踪结果进行组合^[5~7].上述文献采用了不同的目标分块方法,但都只是对目标区域进行分块,没有考虑目标所处的背景区域信息,并且,最佳的核的数目和位置只能根据具体目标和实际场景进行选择,缺乏统一的理论依据.

尺度变化是视觉目标跟踪中的又一个常见难题.随

着摄像机平台与目标之间相对位置的变化,目标会产生尺度上的变化,因此要求目标模板自动更新时能够包含目标的尺度变化信息.Comanicu^[1]提出在三种不同的尺度下分别计算目标与候选目标的 Bhattacharyya 系数,以相似性度量最大的尺度和目标原始尺度的线性加权作为目标的新尺度.当目标逐渐增大时,基于 Bhattacharyya 系数的相似性度量经常会在较小的跟踪窗口中达到局部最大,核窗宽很难被扩大.Collins^[2]结合尺度空间理论对均值漂移跟踪算法进行了改进,在迭代过程中,需要目标的位置和尺度交错收敛,不但在很大程度上增加了该方法的复杂度,而且在背景比较复杂的条件下,交错收敛往往很难满足^[3].文献[8,9]在均值漂移跟踪的基础上,通过在相邻帧跟踪框内进行特征点匹配,获得目标尺度变化信息,该类算法的应用前提是跟踪定位结果要比较准确,而且当目标区域较小时,难以对特征点进行准确描述.

为了在跟踪过程中引进目标的空间信息,在处理目标部分遮挡的同时获得目标的尺度变化信息,本文在均值漂移算法的框架下,提出了一种基于拓扑约束的多

核跟踪算法.与先跟踪后特征点匹配的方法不同的是,本文算法将特征点匹配融入跟踪算法中,用特征点匹配结果进行跟踪结果优化,同时实现目标跟踪与尺度更新.算法框图如图 1 所示.

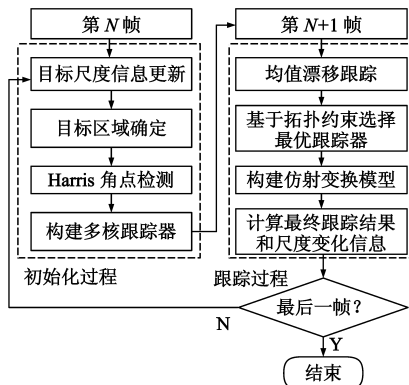


图1 本文算法框图

2 算法

2.1 均值漂移跟踪

在均值漂移跟踪的框架下,目标模型和候选目标模型分别表示如下:

$$\hat{q}_u = C \sum_{i=1}^n k(\|x_i^* - y\|^2) \delta[b(x_i^*) - u] \quad (1)$$

$$\hat{p}_u(y) = C_h \sum_{i=1}^{n_h} k\left(\left\|\frac{y - x_i}{h}\right\|^2\right) \delta[b(x_i) - u] \quad (2)$$

其中 x_i^* 表示目标区域内的像素, x_i 表示中心为 y 的候选目标区域内的像素, k 表示空间加权的核函数, $b(x_i)$ 为位置 x_i 处的像素对应的直方图区间.核跟踪算法中常采用灰度直方图构建目标模型,但灰度直方图易受图像噪声或灰度变化的影响,而梯度方向直方图(Histogram of Gradients, HOG)具有对灰度变化不敏感的特点,可以获得更鲁棒的目标描述,尤其是当跟踪目标的结构和梯度信息比较丰富时.因此,本文选用基于灰度和 HOG 特征的联合直方图对目标进行描述.

在计算 HOG 特征时,本文将 $(0, 2\pi)$ 均分为 8 个区间,区间的起始划分位置避开了水平和垂直等方向,如图 2 所示.由经验可知,典型人造目标(如建筑物)具有大量的水平边缘和垂直边缘,如果以水平和垂直方向作为角度区间划分的边界,则目标对应的梯度方向在归入角度区间时将存在较大的不确定性,对目标的旋转变换不具备鲁棒性.

采用 Bhattacharyya 系数作为度量目标区域和候选目标区域两个特征向量相似性的测度,即:

$$\hat{\rho}(y) = \sum_{u=1}^m \sqrt{\hat{p}_u(y) \hat{q}_u} \quad (3)$$

目标定位就是在每一帧中寻找使 $\hat{\rho}(y)$ 最大的候选目标

区域的中心位置 y ,采用以下迭代过程实现^[1]:

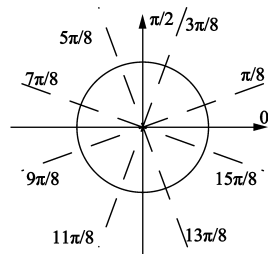


图2 角度区间划分方法

$$\hat{y}_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n_h} x_i \omega_i g\left(\left\|\frac{\hat{y}_0 - x_i}{h}\right\|^2\right)}{\sum_{i=1}^{n_h} \omega_i g\left(\left\|\frac{\hat{y}_0 - x_i}{h}\right\|^2\right)} \quad (4)$$

其中 $g(x) = -k'(x)$, \hat{y}_0 表示当前跟踪窗口的中心位置, ω_i 表示像素 x_i 的权重

$$\omega_i = \sum_{u=1}^m \sqrt{\frac{\hat{q}_u}{\hat{p}_u(\hat{y}_0)}} \delta[b(x_i) - u] \quad (5)$$

2.2 核中心的选取

本文采用了 5 个核跟踪器构建多核跟踪器,包括 1 个中心核跟踪器和 4 个边界核跟踪器.中心核跟踪器的中心位置为初始选定的待跟踪目标区域中心(起始帧的目标区域由人工给定,非起始帧的目标区域通过跟踪上一帧图像得到),边界核跟踪器的中心位置通过 Harris 角点检测获得.角点是图像中灰度变化剧烈的点,目标与背景的边界处通常存在大量角点.采用这些处于目标与背景相接位置的核跟踪器,构建的核直方图既包含了目标信息,又包含了比较稳定的背景信息,能够提高目标模型的可鉴别性.

在初始选定的目标区域内进行 Harris 角点检测.用集合 $C = \{c_i, CRF_i\}$ 表示检测得到的 Harris 角点,其中 c_i 表示角点坐标, CRF_i 表示对应的角点响应函数值.在此基础上,采用以下准则对 Harris 角点集进行筛选,从而选取出边界核跟踪器中心:

(a) 信息测度

为边界核的选取构建如下的信息测度:

$$Measure_info = difference + entropy + CRF \quad (6)$$

其中 $difference$ 表示候选边界核区域与中心核区域的 Bhattacharyya 系数差,用于表征边界核与中心核的信息差异程度; $entropy$ 表示候选边界核区域的局部熵,用于表征像素灰度分布的无序程度; CRF 用于表征边界核中心点的像素灰度变化程度. $Measure_info$ 值越大,表示候选边界核区域所包含的信息越丰富.按照 $Measure_info$ 值从大到小的顺序从集合 C 中依次选取的 Harris 角点.

(b) 距离条件

在选取出的特征点集中,每两点之间的距离必须大于预设阈值 $dist_thresh$ (本文将其设为目标区域较短边长的一半),使选取出的 Harris 角点满足一定空间分布,且彼此间目标区域的重叠度较低。

(c) 角度条件

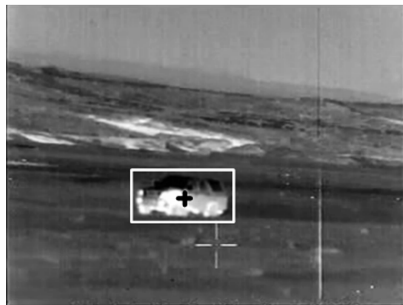
在选取出的特征点集中,每三点不能共线,该条件通过设置三点所连折线的夹角必须小于预设阈值 $angle_thresh$ 实现(本文将其预设为 170°)。因为本文的拓扑约束是以各个核中心建立的三角形结构为基础的,而共线的三点不能构成正常意义下的三角形。

根据以上选取准则,选取四个 Harris 角点作为最优的边界核中心,和中心核跟踪器一起,构成五个核跟踪器,各个核跟踪器的目标区域与初始选定的目标区

域具有相同的尺寸。

图 3 以一幅红外图像为例,给出了多核跟踪器中心的选取过程与结果,(a)图中白色方框为初始给定的目标区域,黑色十字为中心核跟踪器的中心;(b)图中灰色十字为初始目标区域内检测得到的 Harris 角点;(c)图四周的白色十字为按照上文选取准则得到的四个边界核中心,左上的白色方框为其中一个边界核跟踪器的初始目标区域。

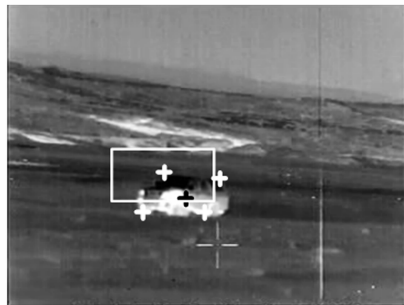
在这种核中心选取方案中,每个边界核跟踪器的目标区域由待跟踪目标的部分前景区域和背景区域组成,与中心核跟踪器存在较大的信息差异;并且,该方案简单可行,通用性好,只要求目标区域能够提取出足够的角点即可,适用于各种不同类型的目标跟踪的情形。



(a) 中心核与目标区域



(b) Harris角点



(c) 边界核与目标区域

图3 多核跟踪器中心的选取

2.3 拓扑约束

在确定 5 个核跟踪器的基础上,每个核跟踪器独立对各自的目标区域进行跟踪。采用拓扑约束对跟踪结果进行优化和组合,挑选出跟踪性能较好的核跟踪器,用于获取最终跟踪结果和确定目标尺度变化信息。如图 4 所示,假设点 $A、B、C、D$ 为当前帧四个核跟踪器的初始目标中心,点 $A'、B'、C'、D'$ 分别表示在下一帧中的跟踪结果。以 $A、B、C$ 为例,如果这三个核跟踪器跟踪完全准确,那么 $\triangle ABC$ 相似于 $\triangle A'B'C'$,其内角满足 $\theta_1 = \theta'_1, \theta_2 = \theta'_2, \theta_3 = \theta'_3$,并且三角形各个对应边长近似满足

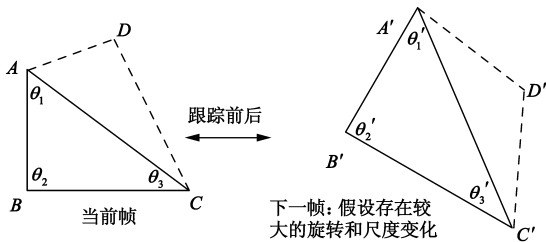


图4 拓扑约束示意图

$$\frac{AB}{A'B'} = \frac{AC}{A'C'} = \frac{BC}{B'C'}$$

因此,本文提出如下的拓扑约束方法:

首先,分别以这些核跟踪器在当前帧中的初始目标中心和下一帧中的跟踪结果为顶点,构建对应的三角形,穷举列出所有的三角形对。

然后,遍历所有的三角形对,按照以下规则寻找最相似三角形对:

(1)以三角形对的对应内角差值和为相似性测度。计算每个三角形对的内角差值和,选取内角差值和小于某一给定阈值的三角形对。

(2)以三角形对的对应边长比差值和为相似性测度。计算每个三角形对的对应边长之比,选取两两差值和最小的三角形对。

采用以上方法,选取最相似三角形对,其对应的核跟踪器即为跟踪性能最优的跟踪器。三个核中心构成了稳定可靠的三角形拓扑结构,使得目标区域的结构信息在相邻两帧间得以保持。当目标发生部分遮挡时,相应位置处的跟踪器失效,但其余跟踪器仍能给出比较稳定可靠的跟踪结果。三角形的拓扑结构原理简单,可以避免繁琐的计算,提高跟踪算法的实时处理性能。

2.4 目标信息更新

待跟踪的相邻两帧图像之间可能存在平移、旋转和非各向同性缩放等变换,可用如下的仿射变换进行

描述:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中 (x, y) 和 (x', y') 分别表示前后帧图像中对应的像素点的坐标,仿射变换模型中6个参数的求解需要利用3组对应的像素点。

利用保留的三个最优核跟踪器的初始中心和跟踪结果(即最相似三角形对的三对顶点)构建仿射变换模型,即求解式(7)中仿射变换矩阵的6个未知系数.在此基础上构造行和列方向上的单位向量,提取目标在两个方向上的尺度变化因子 s_x 和 s_y .根据下式对跟踪窗口的尺寸进行更新:

$$\begin{cases} H_{\text{new}} = s_y \cdot H \\ W_{\text{new}} = s_x \cdot W \end{cases} \quad (8)$$

其中 H 和 W 分别为跟踪窗口的高和宽。

获得两帧图像之间的仿射变换模型以后,对中心核跟踪器的初始目标中心进行仿射变换,得到最终的跟踪结果.如果在某帧跟踪时,因为多数跟踪器失效而无法通过拓扑约束获得相似三角形,则以其中Bhattacharyya系数最大的单核跟踪结果为准,根据其初始中心与中心核初始中心的几何关系,推算出该帧的最终跟踪结果,而跟踪窗口尺寸在该帧不进行更新。

由以上原理可以看出,拓扑约束为求解相邻帧图像间的仿射变换模型提供了同名点,该同名点是通过均值漂移跟踪获取的,与常用的分别对两帧图像进行特征点提取和匹配的方法相比,不失为一种同名点获取的新途径。

3 实验结果与分析

本文实验将对算法处理目标部分遮挡情况和目标尺度变化情况的性能进行验证。

图5实验采用的视频为车载摄像机拍摄的运动汽



图5 Truck序列部分视频帧的跟踪结果

车视频序列,其中目标车辆严重时被遮挡面积达一半左右.图5给出了部分视频帧上的跟踪结果,图中白色方框表示本文算法的跟踪结果,黑色方框表示标准核跟踪算法的跟踪结果.图6给出了相应的跟踪位置误差曲线.可以看出,本文算法在遮挡时能够准确地跟踪到目标,而标准的核跟踪算法则存在较大的跟踪误差.随着遮挡的加剧,标准的核跟踪算法的误差曲线急剧上升,而本文算法的误差仍然保持平稳,体现了本文算法鲁棒稳定的跟踪性能。

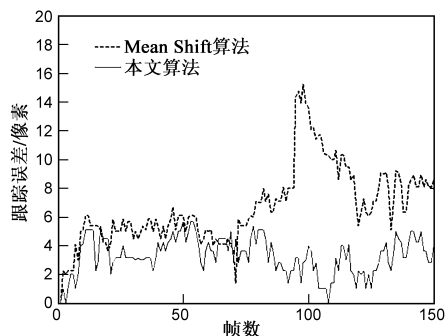


图6 Truck序列的跟踪误差曲线

图7实验采用的视频为使用固定红外成像仪拍摄的运动车辆图像序列,随着摄像机与目标距离的缩短,目标在图像中的尺寸越来越大.图中白色方框表示本文算法的跟踪结果,黑色方框表示Adam提出的分段跟踪算法^[5]的跟踪结果,分段跟踪算法采用了Comaniciu提出的尺度更新方法.图8给出了相应的跟踪误差曲线.可以看出,当目标的尺度变化较小时,两种算法均能准确地跟踪到目标,分段跟踪算法在部分帧上能取得更好的跟踪结果.但是,在第120帧以后,目标尺寸变得越来越大,汽车尾气也对目标外形产生较大影响,使得分段跟踪算法逐渐产生漂移,造成跟踪失败.与此同时,本文算法可以为相邻帧建立准确的仿射变换模型,

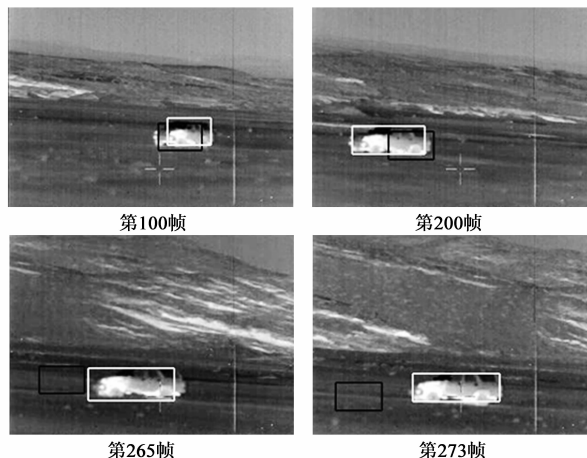


图7 Car序列部分视频帧的跟踪结果

获得并更新相应的尺度变化信息,使得目标的跟踪窗口随之变大,与目标尺度变化情况非常吻合。

在 Intel Pentium 2.66GHz 处理器,2GB 内存的硬件配置下,采用 Matlab7.1 的编程环境,序列的平均运行时间约为 10 帧/s,能够满足一般的应用场合.在对实时性要求更高的应用场合,还可采用并行计算减少算法的运行时间。

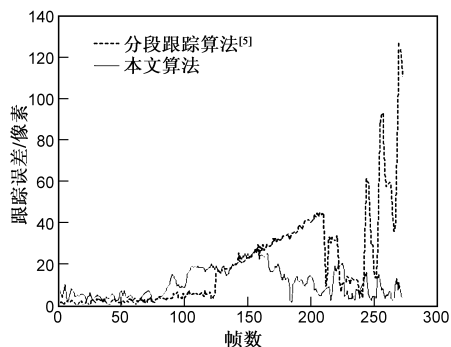


图8 Car序列上的跟踪误差曲线

4 结束语

本文针对视觉目标跟踪中目标部分遮挡和尺度变化对跟踪精度影响较大的问题,提出了一种基于拓扑约束的多核跟踪算法.该算法充分利用目标所处的前景区域信息和背景区域信息来构建目标模型,提高了目标模型的可鉴别性.在此基础上,使用拓扑约束对多个独立的核跟踪器的跟踪结果进行检验,利用满足拓扑约束的核跟踪器构造仿射变换模型,从而得到最终的跟踪结果和目标的尺度变化信息.实验结果表明,本文算法对存在部分遮挡和尺度变化的目标跟踪具有较好的准确性与鲁棒性,适用于不同场景不同目标的目标跟踪场合,具有计算复杂度低,实用性强的特点。

本文算法的局限性在于,当待跟踪目标的尺寸太小时(例如目标区域包含像素数目小于 100),算法性能未见显著提高,这是因为在太小的目标区域里提取出的 Harris 角点不足以构成跟踪前后稳定的拓扑结构.未来工作的重点在于研究对目标尺寸具有更好适应性的核中心自动选取方法,以适应于更多应用场合。

参考文献

- [1] Comaniciu D, Ramesh V, Meer P. Kernel-based object tracking [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(5): 564 – 577.
- [2] Collins R T. Mean-shift blob tracking through scale space [A]. Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C]. Madison, Wisconsin, USA: IEEE, 2003. 234 – 240.
- [3] Yilmaz A. Object tracking by asymmetric kernel mean shift with automatic scale and orientation selection [A]. Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C]. Minneapolis, USA: IEEE, 2007. 1 – 6.
- [4] Shen C H, Kim J and Wang H Z. Generalized kernel-based visual tracking [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2010, 20(1): 119 – 130.
- [5] Adam A, Rivlin E, Shimshoni I. Robust fragments-based tracking using the integral histogram [A]. Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C]. New York, USA: IEEE, 2006. 798 – 805.
- [6] Jeyakar J, Babu R V, Ramakrishnan K R. Robust object tracking using local kernels and background information [A]. Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing [C]. San Antonio, USA: IEEE, 2007. 49 – 52.
- [7] Wang F L, Yu S Y, Yang J. Robust and efficient fragments-based tracking using mean shift [J]. International Journal of Electronics and Communications, 2010, 64(7): 614 – 623.
- [8] Zhao Fangzhou, Li Junshan, Zhu Yinghong, Wei yang. Invariant feature matching based adaptive bandwidth mean shift and its application to infrared object tracking [A]. Proceedings of IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology [C]. Chengdu, USA: IEEE, 2010. 37 – 40.

作者简介



苏 娟 女, 1973 年生于四川蓬溪. 第二炮兵工程大学副教授. 研究方向为遥感图像处理、模式识别.

E-mail: suj04@mails.tsinghua.edu.cn