

## 改进的基于弦切变换的目标检测方法

何 莲<sup>1,2</sup>, 蔡敬菊<sup>1</sup>, 张启衡<sup>1</sup>

(1. 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘 要:** 在计算机视觉中形状是目标识别和检测的重要特征, 针对目前许多基于形状特征的检测方法信息不够丰富, 容易受边缘缺损变形等方面的影响, 不具有局部特性, 尤其是在许多复杂环境下很难实现对目标的正确检测等不足, 提出了一种基于弦切变换理论在有限的目标边缘点信息基础上提取几何形状特征及相应的目标检测方法。该特征具有平移、旋转以及缩放不变性, 基于此特征进行的目标检测能有效的得到目标的中心位置以及相关的二维运动参数, 即使在一些复杂环境以及目标边缘部分失真或缺损的情况下也具有一定的鲁棒性。但由于边缘本身容易受到图像质量、对比度以及量化误差等影响, 从而影响算法的精度。因此, 文中通过融合丰富的灰度信息, 使表征目标的特征更加丰富和完善, 在形状和灰度的共同约束下提高检测的正确率和精确性。通过对多组图像序列进行仿真实验, 结果表明了算法的有效性, 及其在准确性和精确性上的提高, 改进后待测目标与模板之间的匹配率可达 90% 以上。

**关键词:** 弦切变换; 几何特征; 特征匹配; 参数估计; 目标检测

**中图分类号:** TP317.4      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1007-2276(2012)01-0239-09

## Improved method of object detection based on chord-tangent transformation

He Lian<sup>1,2</sup>, Cai Jingju<sup>1</sup>, Zhang Qiheng<sup>1</sup>

(1. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;

2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Shape is a kind of important feature to detect or recognize objects in computer vision. However, some disadvantages still exist in many methods based on shape feature at present, such as having no abundant information, easily affected by the default and distortion of edge, or having no local property. Especially, it is very difficult to detect object correctly under some complicated environments. In order to overcome these defects, a kind of shape feature extracted by using the chord-tangent transformation and corresponding algorithm of target detection was presented in this paper, which was obtained according to the finite edge point. This geometric feature had the invariant character of translation, rotation and scale. Some important parameters about movement including the location of object could be obtained through this method, even under some complicated environments. However,

收稿日期: 2011-05-16; 修订日期: 2011-06-20

基金项目: 国家 863 计划(2002AA2Z9999, 2004AA99)

作者简介: 何莲(1983-), 女, 博士生, 主要从事基于几何形状特征的目标检测与跟踪等工作。Email: helian416@gmail.com

导师简介: 张启衡(1950-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光电探测、目标跟踪等方面的研究工作。Email: qhzhang@ioe.ac.cn

because the edge extraction is usually affected by the quality of image, contrast between the object and background and quantized error, the precision can be decreased. Therefore, some gray information was added to the feature in order to improve the algorithm. Finally, experimental results indicate the effectivity of the algorithm. The matching rate between the object and model can be extended to more than 90% after improving.

**Key words:** chord-tangent transformation; geometric feature; feature matching; parameter evaluation; object detection

## 0 引言

在复杂环境或噪声影响的情况下,对二维目标的检测和识别在工业应用等许多领域发挥着越来越重要的作用,因此,对鲁棒的目标检测和识别算法的研究具有重要意义和使用价值。在计算机视觉和模式识别中,形状是目标识别和检测的重要特征,而刚体运动目标的形状变化比非刚体运动目标小得多,因此基于形状特征检测刚体运动目标是比较可靠的,对于扩展目标,其边缘或轮廓信息可以较好地反应目标的形状特征。目前,基于目标边缘表征形状特征并将其应用于目标检测和识别中的方法已有很多,如 Hausdorff 距离<sup>[1]</sup>、GHT<sup>[2-3]</sup>、傅里叶描绘子<sup>[4]</sup>、基于弦变换提取的几何特征<sup>[5]</sup>、HYPER<sup>[6]</sup>等等,但这些方法或者是信息不够丰富、容易受边缘缺损变形等方面影响;或者是受到特征全局性影响,而对于光照、遮挡或在复杂环境中边缘粘连等引起的部分形状失真的情况无能为力。因此,有必要在有限的轮廓信息基础上提取出一种能更全面反应目标形状的特征并且对形状特征进行准确描述。文中使用弦切变换(CTT)提取的几何形状特征能够同时将目标边缘点信息与它们连接形成的弦信息结合起来,得到的一种更高层意义上的几何特征,该特征含有更丰富的与几何形状相关的信息,并且同时具有平移、旋转以及缩放不变性。另外,弦切变换进行特征匹配的过程实际是一个对运动参数估计的过程,最后得到的结果是最佳的估计参数组,其中有匹配目标所在的中心点位置、目标相对于模板的旋转角度和缩放尺度,即使在复杂背景中或部分轮廓失真的情况下这种方法也是有效的。但是在实际情况中,由于外界环境或者设备的原因使得输出图像的质量各有不同,同时边缘轮廓的提取也存在一定的误差,因此最后

得到的目标边缘并非理想的目标形状,那么弦切变换算法估计得到的运动参数的精度也会受到影响,有时甚至出现错误。为了克服算法信息来源的单一性,在弦切变换的基础上结合一定的灰度信息可以更有效选择较高精度的最佳估计参数。

## 1 弦切变换

弦切变换(CTT)<sup>[7]</sup>是基于目标轮廓信息提取出的更高层意义上的形状特征,与 GHT 具有一些相似之处,两种方法都会利用目标边缘点的切线信息。然而实际上这些目标轮廓的边缘点与它们形成的弦之间存在着密切的关系,CTT 就利用了这种关系,同时将目标边缘点同它们连接形成的弦结合起来,得到一种具有平移、旋转和缩放不变性的形状特征,由于弦本身可以反映出目标的一些相似性变化,因此通过弦的信息可以得到目标的变化参数,这正是 CTT 优于 GHT 的地方。CTT 的主要侧重点包括两个方面:(1) 特征提取,目标的每两个边缘点的切线和它们连接而成的相交弦可以形成一个虚拟三角形,由这个三角形的两个内角作为索引将对应弦的信息(比如弦长、弦的倾斜角,弦中心点到目标中心的位移等)存放在表格中,遍历完所有边缘点对并存入满足一定长度要求的弦信息后即可得到描述目标形状的特征,以虚拟三角形的内角为索引存入了目标弦信息的表格;(2) 形状匹配(参数估计),此阶段的基本思路与 GHT 很相似,同样是对参数空间进行投票,取最多票数对应的参数为估计值,由于计算方法不同,参数空间不再是目标中心点坐标的二维参数,而是包括了旋转角度和缩放尺度信息的四维参数空间,并且 CTT 比 GHT 有更好的聚集效果。因为 CTT 直接解决了旋转、平移和缩放等问题,因此比 GHT 准确、有效得多。

### 1.1 提取形状特征

首先, 需要对目标的灰度图像进行各种预处理, 尽量提取出准确、完整的目标边缘。目前, 边缘提取的方法已有很多, 例如主动轮廓法<sup>[8-9]</sup>、基于形态学<sup>[10]</sup>或边缘局部算子<sup>[11]</sup> (Sobel、Canny<sup>[12]</sup>以及 Prewitt 等算子)的方法等。文中采用一种基于非线性双边滤波的多级边缘检测方法<sup>[13-14]</sup>, 因为非线性双边滤波可以在平滑图像的同时锐化边缘并维持边缘的固定位置, 因此可以得到更加重要、连续和准确的边缘, 抑制纹理和噪声带来的干扰, 继而提取出目标的形状特征。

目标物体的边缘点通常是有限的, 并且各边缘点的切率可以先验得到。随机选取一对边缘点, 它们的切线相交并与连接两点形成的弦构成一个虚拟三角形 (如图 1 所示), 可以计算出关于这条弦的所有信息。由相似三角形定理可知, 在发生相似变换 (旋转、缩放、平移等) 时其内部的角度不变。因此, 可以此内角对 $(\delta_1, \delta_2)$ 为索引存入对应边缘点的相交弦信息, 如此遍历所有目标边缘点形成的相交弦后即可得到与该目标形状对应的弦切特征表, 即目标的几何形状特征。图 1 中的参数分别定义为:  $\beta$  表示弦的倾斜角度,  $\beta \in [0, 2\pi]$ ;  $\tau_1$  表示第一个边缘点 (弦的一个端点) 的切线方向角,  $\tau_1 \in [0, \pi]$ ;  $\tau_2$  表示第二个切点 (弦的另一个端点) 的切线方向角,  $\tau_2 \in [0, \pi]$ ;  $\alpha_1 = (\beta - \tau_1) \bmod (\pi)$  和  $\alpha_2 = (\beta - \tau_2) \bmod (\pi)$  为中间变量。如果  $\alpha_1 < \alpha_2$ , 则  $\delta_1 = \alpha_1$ , 否则  $\delta_1 = \alpha_2$ ;  $\delta_2 = (\tau_1 - \tau_2) \bmod (\pi)$ , 由此得到边缘点对应的虚拟三角形内角 $(\delta_1, \delta_2)$ 。

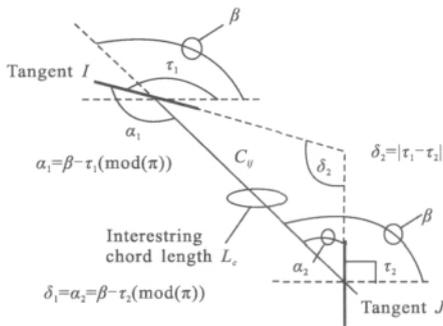


图 1 弦切变换的几何解释

Fig.1 Geometric interpretation of the chord-tangent transformation

假设一个平面目标, 其边缘由  $N$  个边缘点描述, 那么这  $N$  个边缘点能构成  $N(N-1)/2$  个边缘点对, 因此连接这些点对可形成  $N(N-1)/2$  条弦, 对于每对边缘点, 都能计算出两个内角以及对应弦的相关信息:

弦长  $L$ 、弦角  $\beta \in [0, 2\pi]$ 、 $t_x$  即弦中点到目标中心的  $x$  方向位移、 $t_y$  即弦中点到目标中心的  $y$  方向位移, 如图 2 所示。将目标轮廓的所有点弦信息都记录于表格中后, 此表将作为目标的形状特征用于后面的目标检测。但在实际应用中并非将所有的弦都记录下来, 而仅仅记录那些满足长度要求的弦。

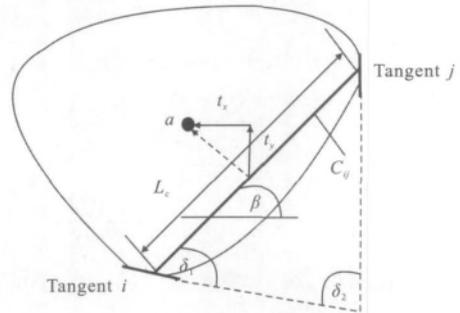


图 2 任意边缘的弦切变化几何图

Fig.2 Geometry of the chord-tangent transform shown for an arbitrary boundary

### 1.2 参数估计

得到需检测的模板目标形状的弦切表后, 利用此表在待处理图像帧中寻找与模板形状相似或相同的目标, 图中的目标可能是模板目标经过二维相似变换 (如平移、旋转、尺度变换) 后的状态。目标检测过程大致如下。

(1) 将图像进行目标轮廓提取后得到最终的边缘图像。根据算法理论, 可以在整幅图像中进行搜索, 但在实际应用中, 为了减少计算量, 一般以前一帧估计的目标中心点为中心, 确定一定大小的搜索区域, 两者本质相同。

(2) 遍历所有边缘点相连形成的相交弦, 计算与其对应的虚拟内角对 $(\delta_1, \delta_2)$ 和弦的相关信息, 并以此角对为索引在模板目标的弦切特征表中找出对应的所有模板弦的信息, 当然前提是索引对应的位置有对应弦, 因为可能模板中根本没有对应的索引位置;

(3) 结合提取出的模板弦信息及当前处理的图像弦的信息, 然后根据公式(1)~(4)求出对应的参数估计值, 并在参数空间中的对应位置处累加 1, 如此遍历待测图像中的所有相交弦。最后在参数空间中会有一个累加峰值的位置, 该位置处对应的参数值就是匹配得到的最佳参数估计值。另外, 在实际应用中, 参数空间是一个离散化的四维空间 $[\kappa_n, \theta_n, x_c, y_c]$ , 其中,  $\kappa_n$  是缩放参数  $\kappa$  量化后的离散值,  $\theta_n$  是目

标旋转角度  $\theta$  量化后的离散值, 而  $(x_c, y_c)$  则是估计的目标中心点坐标。

为了更好地理解算法过程, 首先给出了一些变量的定义:  $C_i(\delta_1, \delta_2)$  是模板中的弦、 $C_j(\delta_1, \delta_2)$  是图像中的弦、 $a(j)$  表示第  $j$  条弦的角度、 $l(j)$  表示第  $j$  条弦的长度;  $t_x(j)$  表示第  $j$  条弦的中点到模板中心的  $x$  方向位移、 $t_y(j)$  表示第  $j$  条弦的中点到模板中心的  $y$  方向位移以及  $(x_m, y_m)$  是图像中当前弦的中点。基于这些变量, 可以求得各参数的估计值如下:

$$\kappa = \frac{l(C_j(\delta_1, \delta_2))}{l(C_i(\delta_1, \delta_2))} \quad (1)$$

$$\theta = a(C_j(\delta_1, \delta_2)) - a(C_i(\delta_1, \delta_2)) \quad (2)$$

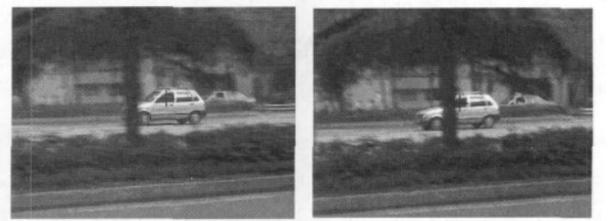
$$x_c = x_m + \kappa(t_x(C_j(\delta_1, \delta_2)) \cos \theta - t_y(C_j(\delta_1, \delta_2)) \sin \theta) \quad (3)$$

$$y_c = y_m + \kappa(t_x(C_j(\delta_1, \delta_2)) \sin \theta + t_y(C_j(\delta_1, \delta_2)) \cos \theta) \quad (4)$$

式中:  $\kappa$  是模板目标的缩放尺度;  $\theta$  是模板目标的旋转角度;  $(x_c, y_c)$  是图像中预测的目标中心位置。参数空间可以用一个四维的矩阵来表示, 其中每一维分别代表 4 个参数的量化信息。一般对整幅图像中的边缘点形成的弦都进行上述的处理后得到相应的参数估计值, 并在矩阵中进行累加, 最终会有累加峰值出现, 如果该峰值高于规定的阈值, 那么就说明找到了与模板形状匹配的目标, 峰值位置对应的参数值即为最佳的参数估计值。

该方法对于旋转、缩放和平移等变化有很好的鲁棒性, 并且对于边缘部分缺损或遮挡等情况也有一定的适应性。图 3 给出了一组对复杂背景下的汽车图像序列进行仿真实验的检测结果, 模板选取小车的前车窗 (如图 4 所示) 作为需要检测的几何目标, 它具有接近梯形的几何特征。其中, 图 3(a) 中车窗还未被树干遮挡, 形状完好; 图 3(b) 中车窗已有三分之一被遮挡了, 此时车窗形状有所破坏, 但因为大部分形状信息仍然存在, 因此算法还能检测出目标, 然而在随后的几帧中车窗被树干遮挡, 目标形状信息大部分丢失甚至完全消失时, 算法没有找到匹配的目标, 这种情况下算法仍会在搜索范围内不断搜索, 当小车驶过树干于车窗再次出现时, 便立刻锁定住了目标, 如图 3(c)、(d) 所示。表 1 列出了参数估计结果。

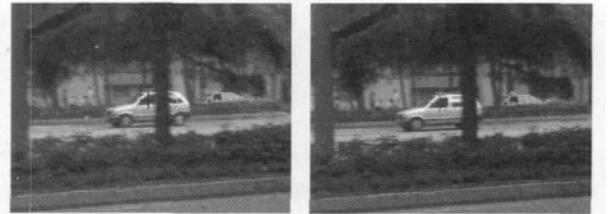
这组实验结果说明了文中方法对形状特征识别的有效性, 即使在复杂环境下出现了小部分的失真, 只要目标的大体形状特征存在, 算法仍然有效。除此



(a) 第 35 帧的检测结果

(b) 第 38 帧的检测结果

(a) Detected result in 35th frame (b) Detected result in 38th frame



(c) 第 41 帧的检测结果

(d) 第 43 帧的检测结果

(c) Detected result in 41th frame (d) Detected result in 43th frame

图 3 复杂条件下对小车车窗的检测结果

Fig.3 Feature detection result of a window of car in the complex condition

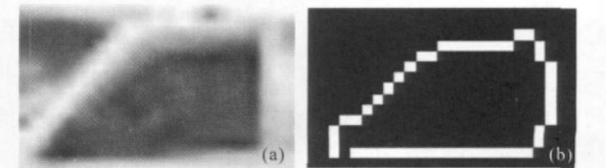


图 4 车窗模板及目标边缘

Fig.4 Original model and the edge of window

表 1 图 3 的匹配参数估计结果

Tab.1 Estimative parameters for object in Fig.3

Estimative center	$\kappa$	$\theta/(^\circ)$
(107, 175)	1	0
(110, 168)	0.9	-5
(112, 158)	1	0
(115, 147)	1	0

以外, 算法还可以同时对多个形状特征进行检测。图 5 中则分别选取了汽车的前后窗和车轮 4 个部分作为模板目标, 同时对这 4 个特征进行检测但在这组图像序列中, 由于汽车行驶的方向造成视角变化, 因此序列图中的目标不再是保持二维空间的变化, 而存在了一定程度的仿射变换, 同时光照也有变化, 所以在实验中, 当目标形状变化到一定程度而不更新模板时, 检测结果的精确度会随之降低, 出现不稳定的现象。这也表现出该方法的不足之处, 即不具有空

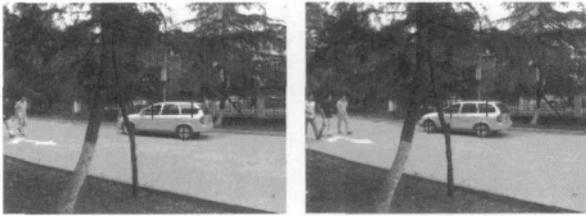
间变换的鲁棒性。



(a) 第 10 帧的检测结果

(b) 第 27 帧的检测结果

(a) Detected result in 10th frame (b) Detected result in 27th frame



(c) 第 34 帧的检测结果

(d) 第 43 帧的检测结果

(c) Detected result in 34th frame (d) Detected result in 43th frame

图 5 复杂条件下小车多个几何特征检测结果

Fig.5 Multi-geometric feature detection result of a car in the complex condition

虽然算法在这种对比度较好、边缘比较清晰并且能比较准确的反映出目标形状的情况下,能检测出目标并且估计出较为准确的参数,但是当图像质量下降,边缘出现较大的失真时就会明显影响估计参数的精度,得到的匹配目标中心点位置也会有明显偏差,从而影响检测的整体效果和后续的其他处理,比如姿态解算等。所以,有必要提高检测的精确度,增强算法的鲁棒性。通常情况下,目标的边缘轮廓足以表征其形状特征,然而在复杂的场景中往往存在许多非同类目标的边缘轮廓表现出相同的形状特征,但它们却有着本质上的区别,从灰度纹理等特征能够轻易辨别出来。因此,对于一些较为复杂的情况,仅仅依靠边缘轮廓提供的几何形状信息已不足以检测特定的目标,此时可以结合一些其他的信息,比如灰度,使表征目标的特征更加丰富和完善,在形状和灰度的共同约束下得到更准确的目标定位和运动参数的估计值。下面一节将着重介绍如何在 CTT 的基础上结合灰度信息来提高检测的准确度。

## 2 灰度特征在基于弦切变换的目标检测中的应用

基于灰度的图像匹配方法<sup>[15]</sup>是图像匹配中常用

的方法,此类方法简单,并且有通用的数学模型对匹配进行误差估计、相似程度判断等。但单独使用相关匹配则不适应存在旋转、缩放情况的匹配对象,在实际应用中有很大的局限性。因此,文中在弦切变换检测结果的基础上结合灰度的相关匹配,发挥两者的优势。

### 2.1 相关匹配

直接基于灰度的图像相关匹配算法有很多,比如 MAD 算法、归一化积相关算法(NCC)、序贯相似性检测法(SSDA)、PFC 算法等等。文中采用最简单的 MAD 算法,即平均绝对差算法。设搜索图  $S$  为  $M \times M$ ,模板图  $T$  为  $N \times N$ ,则 MAD 算法可定义为:

$$d(x, y) = \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} |S(i+x, j+y) - T(i, j)| \quad (5)$$

式中: $d(x, y)$ 为相似性度量函数在偏移量为 $(x, y)$ 时的匹配度量值。当 $d(x, y)$ 取值最小时,认为 $(x, y)$ 是最佳匹配位置。

### 2.2 改进的参数估计过程

在实际环境中,目标在不断的发生着平移、旋转和大小的变化,同时也会伴随着光照、目标粘连和遮挡等等实际环境的变化。因此,直接利用基于灰度的相关匹配在待测图像中找到与模板区域相似的部分是比较困难的。但如果已知图像中目标相对于模板变化的参数后,则可以根据这些参数值找到模板中每个像素点在待测图像中的对应点,然后基于模板的像素点集和图像中的对应像素点集,得到与参数对应的平均绝对差(MAD)。基于这样的思路可以将原来寻找参数空间中最大投票数对应的参数组作为最佳估计参数的策略做如下修改:(1) 基于弦切变换得到参数空间中的累加值;(2) 选取那些票数在累加阈值(一般可按目标交叉弦总数的一定比例选取)之上的对应参数组作为后备参数  $[\kappa_k, \theta_k, x_{ck}, y_{ck}]_{k=1, 2, \dots, sum}$  ( $sum$  为后备参数组的个数);(3) 分别根据这些后备参数得到与模板像素点对应的图像像素,并计算出参数组对应的平均绝对差  $d(para_k)_{k=1, 2, \dots, sum}$ ;(4) 将后备参数组中平均绝对差值最小并且小于预先设定阈值的对应参数组作为最佳估计参数  $[\kappa_{opt}, \theta_{opt}, x_{copt}, y_{copt}]$ 。两种方法的结合能很好的弥补彼此的缺点,提高检测结果的精确度。

设模板  $G$  大小为  $m \times n$ , 图像  $I$  大小为  $M \times N$ ,  $g(xm_i, ym_i)$  为模板中的像素点  $(xm_i, ym_i)$  的灰度值,

$I(x_i, y_i)$  为图像中像素点  $(x_i, y_i)$  的灰度值,  $(mx, my)$  为模板目标的中心点位置 ( $mx \in (0, m), my \in (0, n)$ )。  $para_k = \{k_k, \theta_k, cx_k, cy_k\}, k=1, 2, \dots, sum$  为候选参数组, 其中分别为缩放尺度、旋转角度、目标中心点  $x$  坐标、目标中心点  $y$  坐标。根据参数  $para$ , 模板中每个像素点可以在图像中找到对应的点, 它们的关系如下:

$$x_{ik} = k_k \cdot (xm_i \cdot \cos(\theta_k) - ym_i \cdot \sin(\theta_k)) + dx_k \quad (6)$$

$$y_{ik} = k_k \cdot (xm_i \cdot \sin(\theta_k) + ym_i \cdot \cos(\theta_k)) + dy_k \quad (7)$$

其中,

$$dx_k = x_{ck} - k_k \cdot (mx \cdot \cos(\theta_k) - my \cdot \sin(\theta_k)) \quad (8)$$

$$dy_k = y_{ck} - k_k \cdot (mx \cdot \sin(\theta_k) + my \cdot \cos(\theta_k)) \quad (9)$$

分别为  $x$  和  $y$  方向的平移量。由模板中像素点  $(xm_i, ym_i)_{i=0,1 \dots mxn}$  与图像中的对应点  $(x_{ik}, y_{ik})_{i=0,1 \dots mxn}$  得到两组像素点集之间的平均绝对差为:

$$d(para_k) = \frac{1}{m \times n} \sum_{i=1}^{m \times n} |I(x_{ik}, y_{ik}) - g(xm_i, ym_i)| \quad (10)$$

则最佳参数组为:

$para\_opt = \underset{k=1}{\operatorname{argmin}} d(para_k), d(para\_opt) > thr$ , 其中  $thr$  为提前设定好的阈值。

### 3 算法的可靠性分析

该算法的有效性主要受到来自以下 3 方面的误差影响: (1) 弦端点定位以及倾斜角度的离散化; (2) 边缘点的梯度方向角的测量误差; (3) 图像质量及噪声的影响。文中主要对前两方面的误差影响进行分析。

#### 3.1 离散化误差

根据离散过程, 假设已知边缘点在半径为  $\phi_p$  的圆内, 如果考虑误差最大的情况, 则长为  $L_c$  的弦可能存在的角度误差为  $\phi_a$ , 如公式(10)所示。而此时弦长的误差在  $2\phi_p$  的范围内, 所以弦长比率(即尺度变化参数  $\kappa$ )的测量误差应该是  $\phi_r$ , 由公式(11)可以看出, 误差随着弦长的减小而增大, 这说明在匹配阶段的参数估计时只有足够长度的弦才能被使用。因为弦切表中信息的冗余, 因此忽略一些不满足长度要求的弦是不会发生信息丢失的。

$$\phi_a = \arctan\left(\frac{2\phi_p}{\sqrt{L_c^2 - 4\phi_p^2}}\right), L_c > 2\phi_p \quad (11)$$

$$\phi_r = 2\phi_p / L_c \quad (12)$$

#### 3.2 边缘梯度方向角的测量误差

一般边缘梯度方向角的测量误差会随着图像质

量变化, 因此文中只是进行一种实验性的说明。通过将模板中满足一定长度要求的模板弦按估计得到的参数值计算, 在待测图像中得到对应弦, 然后计算出两条弦对应端点的梯度方向角度的差值, 并将这个差值与估计得到的旋转角度相减, 得到一个边缘梯度方向角的测量误差值, 同时将其存放在角度误差的直方图中。将模板中所有弦都进行这样的检验以后, 最终可以得到一个离散的角度测量误差概率分布函数(PDF)。为了直观说明, 实验用一个正方形模板(图 6(a))对两个不同程度变化的目标进行匹配的结果, 如图 7 所示。其中目标 1(图 6(b))是将正方形在平面顺时针旋转  $20^\circ$ , 目标 2(图 6(c))是一个矩形, 是模板正方形绕中心点在空间向内旋转  $40^\circ$  后映射到平面形成的。

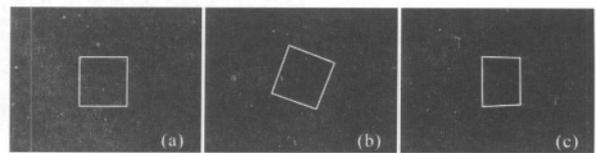


图 6 正方形模板及变形后的两个目标

Fig.6 Original square and two distorted objects

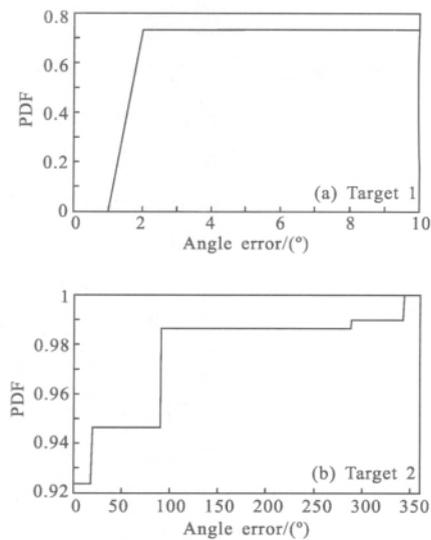


图 7 使用  $3 \times 3$  的 Prewitt 算子对目标 1 和目标 2 测量边缘梯度方向角度产生的角度误差的概率分布函数

Fig.7 Probability distribution function of angular error in gradient measurement using a  $3 \times 3$  Prewitt operator

由图 7 可以看出, 对于目标 1, 75% 的边缘点的角度测量误差都在  $3^\circ$  以内, 而目标 2 中有 92% 的边缘点的角度误差都为  $0^\circ$ 。由此可见由边缘点梯度方

向角测量得到的误差对算法的影响并不大。但角度测量误差的概率分布函数为算法实际应用时角度的量化步长提供了依据。

### 4 实验结果与分析

#### 4.1 检测效果的衡量指标

文中使用了两个指标对检测效果进行衡量。一个是对检测精度的估计,即目标的实际质心与估计的质心之间的距离  $d$ 。

$$d = \sqrt{(x_{cen} - x_{opt})^2 + (y_{cen} - y_{opt})^2} \quad (13)$$

式中:  $(x_{cen}, y_{cen})$  是目标的理论质心坐标;  $(x_{opt}, y_{opt})$  是估计的最佳目标质心坐标。但是,只有在整个过程中目标均独立在图像中,且不与其他目标有粘连或遮挡等情况下才可用。因此,对于目标边缘无法与其他目标进行分离的情况,应采用边缘匹配率  $\gamma$ ,即:

$$\gamma = \frac{count}{sum} \times 100\% \quad (13)$$

其中,  $sum$  是模板目标的边缘点总数,而模板目标的每个边缘点在图像中的对应坐标位置可以利用公式(6)和公式(7)计算得到,如果图像中这些位置处存在一个连通目标的边缘点与之对应,则表明这些模板目标的边缘点匹配成功,最后成功匹配的边缘点总数为  $count$ ,因此,  $\gamma$  可以表示模板目标边缘与检测的目标边缘之间的一个匹配比率。一定程度上可以说明估计参数的正确性,即检测效果的优良。

#### 4.2 实验结果分析

用一组监控图像序列进行仿真实验。首先选择卡车头部的一块矩形暗区域作为模板目标进行检测,模板目标的边缘近似矩形。然后对结果进行分析,并与直接使用弦切变换检测的结果进行比较,如图 8 和图 9 所示。图 8(a)为模板目标的轮廓形状和灰度模板,图 8(b1)~8(b8)是在结合灰度信息后(即改进后)的检测结果,其中估计的目标质心位置用十字标记。图 9(a)为算法改进后连续 210 帧的检测精度,其平均偏差不到 1 个像素,最大的偏差不超过 2 个像素,而图 9(b)为算法改进前的检测精度,其中第 70 和 76 帧的偏差值远远超过 5 个像素,表明此时检测的结果是不正确的。图 9(c)是改进后对连续 210 帧序列图进行检测的匹配情况,而图 9(d)则是改进前的匹配情况。经过计算可知结合灰度信息后,

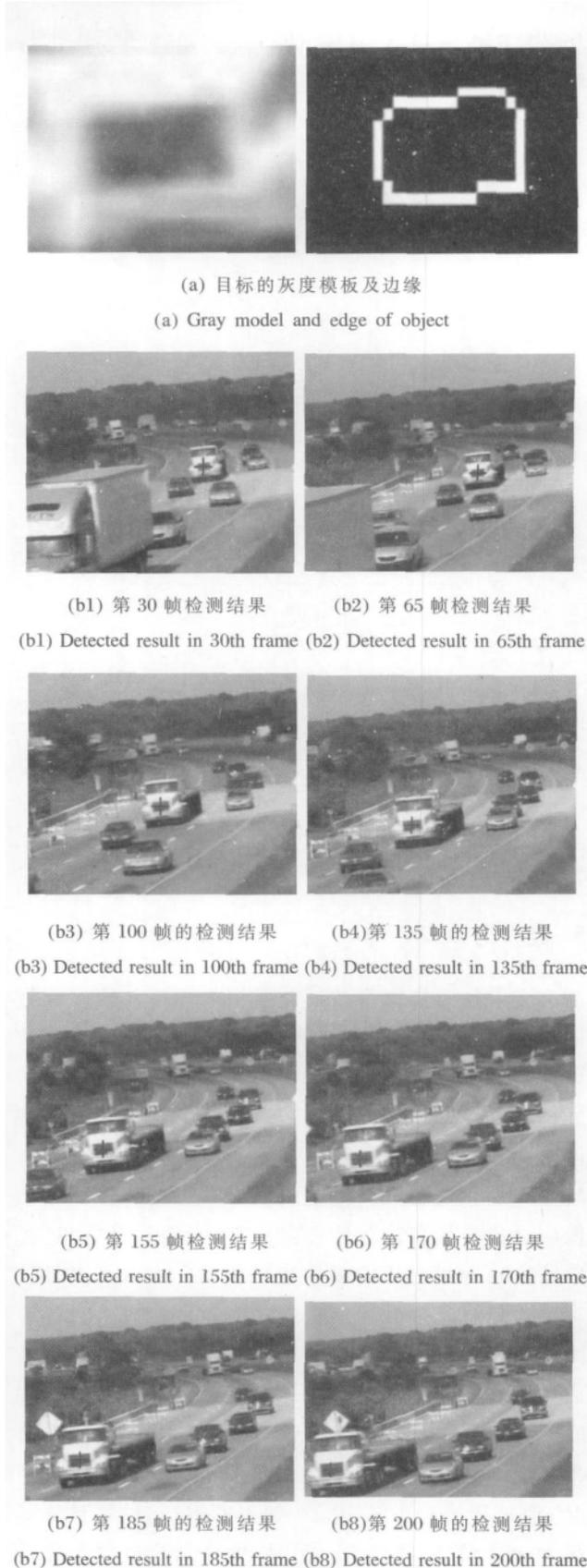


图 8 卡车头部矩形暗目标及检测结果

Fig.8 Detection results of dark target in the head of car

其平均匹配率可达 93%，而直接利用弦切变换进行检测的平均匹配率为 88% 左右。

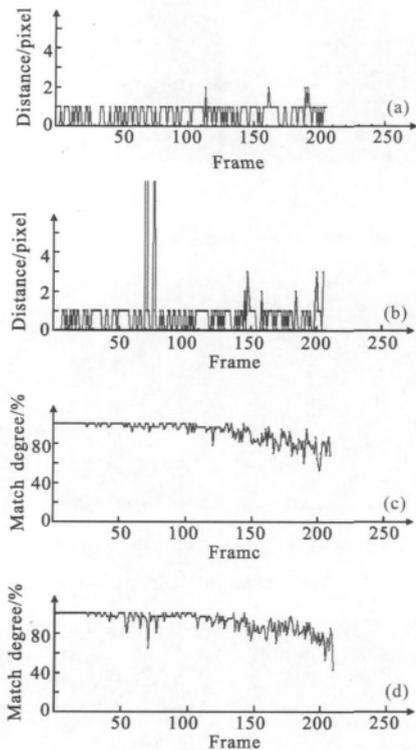


图 9 对卡车头部的矩形暗目标的检测结果与分析

Fig.9 Analyses of dark target detection result in the head of car

## 5 结论

文中将弦切变换的特征应用于二维几何形状目标的检测中,通过实验说明了该方法的有效性,并对算法进行了详细的误差及可靠性分析,同时对算法进行了改进,结合了丰富的灰度特征,提高了检测的正确率和精确性。这种方法是基于边缘点信息提取出更高层次的几何形状特征,并以此为依据在图像中寻找与模板形状特征最相似的目标,同时还可以输出目标相对于模板的旋转角度、缩放尺度等运动参数信息,并且即使在一些复杂环境以及目标边缘部分失真或缺损的情况下也具有一定的鲁棒性。加入丰富的灰度信息后,一定程度上弥补了边缘提取效果对算法的影响,从而减小了一些由边缘自身带来的误差所造成的检测失败和精度误差增大的情况。但是算法对边缘交叉弦的不断遍历,使得计算量很大,影响算法的效率。另外,文中所用到的灰度信息也会受到光照变化等方面的影响,因此限制了算法的适应环境,但是根据这种思想,可以以弦切变换

为引导,给出满足一定条件的候选参数,然后使用一些更高层次的目标特征(例如特征子空间等)筛选出最精确结果。目前,计算量大、耗时长是该方法需要改进的一个重要方面。

## 参考文献:

- [1] Dong-Gyu Sim, Oh-Kyu Kwon, Rae-Hong Park. Object matching algorithms using robust Hausdorff distance measures [J]. *IEEE Transaction on Image Processing*, 1999, 8 (3): 425-429.
- [2] Ballard D H. Generalizing the Hough transform to detect arbitrary shapes [J]. *Pattern Recognition*, 1981, 13: 111-122.
- [3] Ye Zhouhai, Chen Fumin. An improving generalized Hough transform[J]. *Microcomputer Applications*, 2006, 22(6): 23-25. (in Chinese)  
叶州海, 陈福民. 一种广义霍夫变换的改进 [J]. 微型电脑应用, 2006. 22(6): 23-25.
- [4] Zahn C T, Roskies R Z. Fourier descriptors for plane closed curves[J]. *IEEE Trans on Computers*, 1972, 21: 269-281.
- [5] Selvage J E, Chenoweth D L, Gold V E. Geometric feature extraction using the chord transformation [C]//Proceedings of Aerospace Applications Conference, 1996, 4: 399-405.
- [6] Ayache N, Faugeras O D. HYPER: A new approach for the recognition and positioning of two-dimensional objects [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, 8: 44-54.
- [7] Dufresne T E, Dhawan A P. Chord-tangent transformation for object recognition [J]. *Pattern Recognition*, 1995, 28: 1321-1332.
- [8] Kass M, Witkin A, Terzopoulos D. Snake: Active contour models[J]. *International Journal of Computer Vision*, 1987, 1(4): 321-331.
- [9] Xu C, Prince J L. Snake, shapes, and gradient vector flow [J]. *IEEE Transaction on Image Processing*, 1998, 7 (1): 359-369.
- [10] Evans A N, Liu X U. A morphological gradient approach to color edge detection [J]. *Image Processing*, 2006, 15 (6): 1454-1463.
- [11] Xia Liangzheng, Li Jiuxian. Digital Image Processing [M]. Nanjing: Southwast University Press, 2005. (in Chinese)  
夏良正, 李久贤. 数字图像处理 [M]. 南京: 东南大学出版社, 2005.
- [12] Canny J. A computational approach to edge detection [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine*

- Intelligence*, 1986, 8(6): 679-698.
- [13] Wu Y Y, Liu Q. Novel object contour extraction: multi-scale edge detection based on bilateral filtering [J]. *Application Research of Computers*, 2002, 24: 396-398. (in chinese)  
吴莹莹, 刘桥. 新颖的物体轮廓提取: 基于双边滤波的多级边缘检测[J]. 计算机应用研究, 2002, 24(12): 396-398.
- [14] Tomasi C, Manduchi R. Bilateral filtering for gray and color images [C]//Proc of the 6th International Conference on Computer Vision, 1998: 839-846.
- [15] Liu Jinfeng. Study on fast omage template matching algorithm [D]. Changsha: Central South University of China, 2007, 5. (in Chinese)  
刘锦峰. 图像模板匹配快速算法研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2007.

## 《红外与激光工程》中英文摘要编写要求及范例

### 编写要求

- 1 中文摘要 200~300 字, 包括目的、方法、结果、结论四要素, 着重反映该文的创新点; 英文摘要 150~300 个单词, 主要内容与中文摘要对应;
- 2 摘要的第一句话切不可与题目重复; 英文题目的第一个字不得用 The, An, A;
- 3 摘要一律用第三人称, 应采用“介绍了...”, “对...进行了研究”, 不必使用“本文”“作者”等作为主语;
- 4 结构严谨, 语义确切, 不分段落; 英文尽量用短句子, 避免复合句, 用过去时态叙述作者工作, 用现在时态叙述作者结论;
- 5 摘要不标注图、表、公式和参考文献的序号;
- 6 删繁从简, 尽量简化措辞, 如用 at 250 °C, 不用 at a temperature of 250 °C;
- 7 采用规范化的名词术语, 尽量用工程领域的通用标准;
- 8 采用国家颁布的法定计量单位。

### 范 例

**摘 要:** 空间目标的红外辐射特性是对空间目标进行探测与识别的重要依据。首先分析了空间目标与外界环境的热交换关系, 确定了目标表面的边界条件, 推导出边界单元的有限差分形式, 针对空间目标的遮挡问题, 开展了判断方法的讨论, 为准确计算目标的表面温度场奠定了基础。其次利用有限差分法求解其导热微分方程, 获得了目标表面温度场分布特性; 将总红外辐射分解为自发辐射和反射辐射两部分, 分别给出了计算自发辐射强度和反射辐射强度的计算式。最后以某空间目标为例, 利用数值方法计算表面温度场, 并在此基础上计算了红外辐射强度的空间分布, 对计算结果进行了分析。

**Abstract:** The infrared radiation characteristic is the important basis for detection and identification of space target. Firstly, the relationship of heat exchange of space target with the external environment was analyzed, the boundary conditions of target surface was determined, the finite difference equations of boundary units were derived, and the judging method was discussed for the problem of occlusion of space target, which laid the foundation for calculating the surface temperature field of the target exactly. Secondly, the finite difference method (FDM) was used to solve the heat conduction differential equations, the distribution characteristic of surface temperature field was obtained. The total infrared radiation was divided into the spontaneous emission and the reflection radiation, and the formulas for spontaneous and reflection radiant intensity were given respectively. Taking one space target as an example, the numerical method was used to calculate surface temperature field, the distribution of infrared radiation intensity was calculated, and the calculation results were analyzed finally.