基于梯度相位和显著性约束的 Hausdorff 距离模板匹配方法

李志军[1],刘松林[2],牛照东[2],陈曾平[2]

(1. 国防科技大学 航天科学与工程学院,湖南 长沙 410073;
2. 国防科技大学 自动目标识别重点实验室,湖南 长沙 410073)

摘 要: 针对复杂背景下形状不规则、高度较低的平面目标自动识别问题,提出了一种基于 Hausdorff 距离的模板匹配方法。在完成平面目标前视模板制备后,文中首先定义了基于边缘位置、梯度相位和边缘点显著性约束的相似性度量方法,模板与实时图中对应两个边缘点位置越近、梯度相位差越小及实时图边缘点越显著,这两点的匹配就越好;然后融合三种度量结果,设计了一种基于边缘相位和显著性约束的 Hausdorff 距离模板匹配方法,实现了平面目标轮廓的准确匹配。实测数据处理结果表明,该方法能够实现复杂地面场景中任意形状的平面目标轮廓的匹配定位,并且定位精度高、鲁棒性好、适用范围广。

关键词: 模板匹配; Hausdorff 距离; 梯度相位; 显著性

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)02-0775-06

Hausdorff distance template matching method based on gradient phase and significance constraints

Li Zhijun[1], Liu Songlin[2], Niu Zhaodong[2], Chen Zengping[2]

(1. College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
2. ATR Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Aiming at the problem of automatic recognition of irregular shaped and lower height plane targets under the complex background, a template matching method based on Hausdorff distance was proposed. After the forward looking template of plane target was prepared, a similarity measurement method was defined based on edge position, gradient phase and edge point significance constraints firstly. When the positions of two edge points in template and real-time image were close, the gradient phase difference was small and the edge point in real-time image was significant, the two points were matched to each other; then a kind of Phase and Confidence Restrict Hausdorff Distance (PCR-HD) template matching method was designed through the fusion of above three metrics, which achieved the exact matching of plane target contour. The processing results of measured data show that, the proposed algorithm can realize contour matching and recognition of plane target with arbitrary shape under complex ground scene, and has high location accuracy, good robustness and wide application range.

Key words: template matching Hausdorff distance; gradient phase; significance

收稿日期: 2014-06-11; **修订日期:** 2014-07-19

作者简介: 李志军(1982-),男,讲师,博士,主要从事红外目标检测与识别等方面的研究。Email: lzj19821202@sina.com

导师简介: 陈曾平(1967-),男,教授,博士生导师,博士,主要从事雷达信号处理、目标识别等研究。

通讯作者: 刘松林(1986-),博士,主要从事红外目标建模与自动识别等方面的研究。Email: xdnust@163.com

0 引 言

红外图像自动目标识别广泛采用基于模板匹配的方法[1-2],但现有研究主要针对具有一定高度的立体建筑物,这类目标在视场中有明显的直线特征,直线轮廓蕴含了目标丰富的形状结构信息, 具有较强的区分目标与背景能力,抗干扰能力强,并且容易设计快速的匹配算法。

文中主要研究平面目标,此类目标高度低、形状不规则, 在前视视场中形状轮廓不具有明显可描述的特征。但平面目标同样是重要的识别对象,如机场跑道、交通主干线等,另外,弯曲的河流或桥梁、城区道路拐点和交叉口以及广场等也可以在真实目标不易识别时做相关定位使用。文中仍然采取模板匹配技术完成自动目标识别任务。其中基准模板包含了识别所需要的目标形状轮廓特征,参考文献[3]基于多源保障数据融合的思想很好地完成了平面目标前视模板制备的任务,在此不再赘述。

平面目标形状不规则, 无法使用先验知识描述其特征进行自动识别。由于地面场景非常复杂,感兴趣平面目标的红外辐射特性与背景地物相似, 目标轮廓边缘常常出现对比度弱、SNR 低、灰度级交叉干扰等情况,导致目标的边缘轮廓常常难以完整提取,对后续轮廓匹配算法的适应性提出了严格的要求。现有的边缘轮廓匹配算法主要包括基于灰度相关[4-5]、Hausdorff 距离 (Hausdorff Distance, HD)[6-8]、Chamfer 匹配[9-10]、Olson[11]和基于相位的 Hausdorff 距离(Phase-based Hausdorff Distance, PBHD)[1]等方法。这些方法在简单背景下具有良好的模板匹配性能, 但是难以实现复杂场景下前视红外地面平面目标的匹配定位。

为此,文中提出了一种综合利用边缘点位置、梯度相位和显著性来计算模板与实时图像边缘相似性程度的 HD 距离方法, 提高模板匹配算法对边缘点属性的鉴别能力, 实现复杂场景中边缘模板相似性度量的准确计算。文中称该方法为基于边缘相位和显著性约束的 Hausdorff 距离算法(PCR-HD)。

1 相似性度量

在图像中提取地物轮廓特征后, 通过计算目标模板与图像中局部区域轮廓的形状相似性程度来确定目标的位置,实现模板匹配相似性度量。文中从边缘位置、梯度相位差异性和显著性三方面着手,计算模板与实时图像边缘点的相似性程度。令 $\boldsymbol{A}=\{a_1,\cdots,a_K\}$是目标模板的边缘点集合,其中边缘 $a_k(1\leqslant k\leqslant K)$的位置是$(x_{ak},y_{ak})$、梯度相位是 ω_{ak};$\boldsymbol{B}=\{b_1,\cdots,b_L\}$是实时图像局部区域轮廓的边缘点集合,其中 $b_l(1\leqslant l\leqslant L)$的位置为$(x_{bl},y_{bl})$、梯度相位为 ω_{bl}、边缘点显著性系数为 η_{bl}。

1.1 位置约束

采用欧氏距离作为边缘点位置的差异性度量。点 a_k 与点 b_l 的欧氏距离计算式如下:

$$dD_{kl}=\sqrt{(x_{ak}-x_{bl})^2+(y_{ak}-y_{bl})^2} \tag{1}$$

当 a_k 和 b_l 是对应的边缘点时,dD_{kl}取值较小,理想情况下点 a_k 和点 b_l 重合,dD_{kl}的取值应该为 0;若非对应点,则 dD_{kl}的取值较大。基于此,边缘点基于位置差异性的相似性度量可定义为:

$$P_{loc}(a_k,b_l)=\exp\left\{-\frac{dD_{kl}^2}{\sigma_{loc}^2}\right\} \tag{2}$$

$P_{loc}(a_k,b_l)$是利用边缘位置差异得到的 a_k 和 b_l 的相似性,σ_{loc} 是边缘位置的不确定性参数, 它的取值越小,对边缘位置差异的容忍度越低。σ_{loc} 的取值范围在[1,3]内时,对大量实测数据都有较好的处理结果。当边缘点 a_k 和 b_l 是对应点时,dD_{kl}取值趋于 0,$P_{loc}(a_k,b_l)$趋于 1;当它们不是对应点时,dD_{kl} 取值较大,$P_{loc}(a_k,b_l)$趋于 0。

1.2 梯度相位约束

边缘点 a_k 与 b_l 的相位差异计算式为:

$$d\omega_{kl}=\omega_{bl}-\omega_{ak} \tag{3}$$

式中:ω_{ak} 为模板制备提供的边缘点 a_k 的梯度相位,可通过对二值模板进行高精度提取获得;ω_{bl} 为实时图像边缘点 b_l 的梯度相位。参考文献[1]证明在噪声干扰下实时图像检测到的边缘点 b_l 的梯度相位 ω_{bl} 是真实相位的近似无偏估计,服从正态分布。

理想情况下, 模板边缘点 a_k 与实时图像边缘点 b_l 在梯度相位上完全吻合,即有 $\omega_{bl}=\omega_{ak}$,此时 $d\omega_{kl}=0$,在进行基于梯度相位约束的相似性度量时赋予最大权值 1。当 $d\omega_{kl}=\pi/3$ 时,a_k 和 b_l 的梯度相位的差异达到文中定义的下限,在进行相似性度量时权值为 0。文中设计了以下概率密度函数计算任意 $d\omega$ 取值下的基于梯度相位约束的相似性度量加权值:

$$P_{pha}(a_k,b_l)=\begin{cases}\left(\dfrac{u(d\omega_{kl})-u(\pi/3)}{u(0)-u(\pi/3)}\right)^2, & |d\omega_{kl}|\leqslant\dfrac{\pi}{3}\\ 0, & |d\omega_{kl}|\leqslant\dfrac{\pi}{3}\end{cases}\tag{4}$$

式中:P_{pha} (a_k,b_l) 为利用边缘梯度相位差异得到的 a_k 与 b_l 相似性;$u(\cdot)$是标准正态分布。

1.3 边缘点显著性标记

将实时图像通过边缘检测得到的边缘集合记为 $\boldsymbol{C}=\{C_1,C_2,\cdots,C_N\}$,其中 N 为提取的边缘数目。对于每条边缘 C_K,其属性结构为 $C_K=\{\boldsymbol{P}^F,l\}$,其中 l 为该边缘的长度,表示像素数目,$\boldsymbol{P}_i^F=\{co,ta,gr,dir,con,res,mea\}$表示第 i 个边缘点的属性,依次为该点的坐标、切线方向、梯度幅度、梯度方向、点两侧的灰度对比度、点邻域的野点抑制值和该点的显著性系数值。

(1) 切线方向

对于某条边缘上的像素点(x_i,y_i),通常其斜率的计算公式如下:

$$sl=(y_{i+1}-y_i)/(x_{i+1}-x_i)\tag{5}$$

但是,由于图像噪声的影响,边缘点位置可能发生改变,利用上式计算的斜率跳动较大。文中采用边缘点两侧的多点进行直线拟合计算斜率,首先找到该点两侧各两个边缘点,形成五点拟合坐标集合$\{(x_{i-2},y_{i-2}),\cdots,(x_{i+2},y_{i+2})\}$;然后对这五个坐标点进行直线拟合,得到直线的斜率记为边缘点的斜率 sl;最后计算该边缘像素点的切线方向 ta。

$$ta=\arctan(sl)\tag{6}$$

(2) 梯度幅度和方向

由于图像具有离散特性,其梯度值不能完全由 2×2 邻域的有限差分确定,并且由于 2×2 邻域面积太小,计算梯度时很容易受到噪声干扰。通过对前视红外图像进行分析,图像中感兴趣的目标一般都会大于 10×10 像素的尺度,因此采用较大的模板计算梯度幅值成为可能。文中采用二维高斯函数的偏导数构造滤波器计算梯度,从而更好地反映前视红外地面目标轮廓边缘的梯度。

可构造方向的高斯滤波器如下[12]:

$$\boldsymbol{G}(x,y)=\frac{x}{\pi\sigma^2}\exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}\right)\tag{7}$$

若取定σ后得到 x 方向梯度幅值检测算子为 $\boldsymbol{g}_x$,则 y 方向检测算子 $\boldsymbol{g}_y=\boldsymbol{g}'_x$。将实时图像与梯度幅值检测算子进行卷积,可得到 x 和 y 方向梯度幅值 $\boldsymbol{f}_x$ 和 $\boldsymbol{f}_y$,即:

$$\boldsymbol{f}_x=\boldsymbol{f}*\boldsymbol{g}_x,\boldsymbol{f}_y=\boldsymbol{f}*\boldsymbol{g}_y\tag{8}$$

于是可求得每个像素点(i,j)的梯度幅值 $\boldsymbol{G}(i,j)$和梯度方向 $\boldsymbol{\theta}(i,j)$:

$$gr=\boldsymbol{G}(i,j)=\sqrt{\boldsymbol{f}_x^2(i,j)+\boldsymbol{f}_y^2(i,j)}\tag{9}$$

$$dir=\boldsymbol{\theta}(i,j)=\arctan\left(\frac{\boldsymbol{f}_y(i,j)}{\boldsymbol{f}_x(i,j)}\right)\tag{10}$$

(3) 两侧的灰度对比度

如图 1 所示,L 为通过某像素点 o 的边缘,sl 为曲线 L 在点 o 处的切线,sl^{T} 为曲线 L 在点 o 处的法线,与 sl 垂直。在点 o 处以为 sl 分界线分别做一个 3×5 大小的矩形区域 1 和 2。统计区域 1 和区域 2 中的灰度均值情况,比较其差异可得像素点 o 两侧的灰度对比度:

$$con=mean[\underset{(i,j)\in A}{f}(i,j)]-mean[\underset{(i,j)\in B}{f}(i,j)]\tag{11}$$

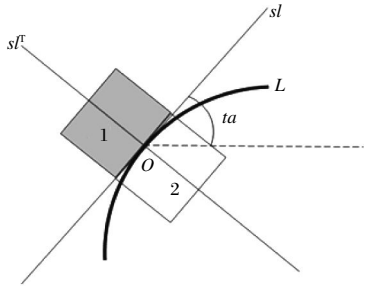


图 1 切线两侧灰度对比度示意图

Fig.1 Diagram of gray contrast on both sides of tangent

(4) 邻域的野点抑制值

文中针对的地面平面目标在前视红外图像中一般都会大于 10×10 个像素。因此,若检测的边缘点为目标的真实边界,则除了该边缘之外,边缘点附近一般不会再出现其他的长边缘,即附近其他的边缘点越多、边缘长度越长,则该边缘点本身为目标真实边界的可能性就越低。文中把边缘点附近的与其不相连的其他边缘点称为野点,把野点对该点显著性的抑制作用称为邻域野点抑制。如图 2 所示。

为了描述邻域野点抑制环境,构造一个中心环境高斯差分函数来实现抑制值的距离加权表示:

$$DoG(x,y)=(1/2\pi\sigma_1^2)\exp(-(x^2+y^2)/(2\sigma_1^2))-(1/2\pi\sigma_2^2)\exp(-(x^2+y^2)/(2\sigma_2^2))\tag{12}$$

其中,σ_1 和 σ_2 为两个高斯函数的标准均方差,它们分别决定外周区和中心区的面积,此处取 $\sigma_1=4\sigma_2$。对距离加权值进行归一化处理,得到邻域野点

抑制的距离加权函数 W_d,如图 3 所示。

$$W_d(x,y)=\frac{1}{\| DoG(x,y) \|_1}N(DoG(x,y)) \tag{13}$$

式中:$\|\cdot\|_1$ 表示 L_1 范数;函数 $N(\cdot)$保证加权作用在一定范围内的抑制区域。

$$N(t)=\begin{cases} t & t>0 \\ 0 & else \end{cases} \tag{14}$$

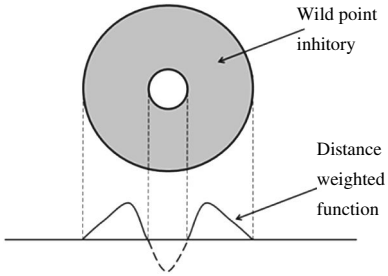


图 2 野点抑制距离加权函数

Fig.2 Distance weighted function of wild point inhibition

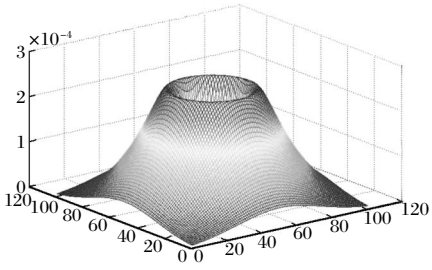


图 3 W_d 系数模扳

Fig.3 W_d Coefficient template

边缘像素点(x_i,y_i)的邻域野点抑制值计算式如下:

$$res=f(x_i,y_i)*W_d(x_i,y_i) \tag{15}$$

式中:* 表示卷积操作;f 为边缘图像中除去点(x_i,y_i)所在边缘剩下的边缘图像。

(5) 显著性系数

分析可知,满足下列条件的边缘点可以认为是比较显著的:(1)该点的梯度幅度较大;(2)该点的梯度方向与切线方向垂直;(3)两侧的灰度对比度较大;(4)邻域内的野点较少;(5)该点所在的边缘长度较长。为此,定义实时图像中每个边缘点的显著性系数计算公式如下:

$$\begin{aligned} mea=&w_1[1-\exp(-\frac{gr}{2\tau_1\sigma_1^2})]\cdot|\sin(ta-dir)|+\\ &w_2[1-\exp(-\frac{con}{2\tau_2\sigma_2^2})]+w_3\exp(-\frac{res}{2\tau_3\sigma_3^2})+\\ &w_4[1-\exp(-\frac{l}{2\tau_4\sigma_4^2})] \end{aligned} \tag{16}$$

式中:w_1、w_2、w_3、w_4 分别为各特征分量对应的权重因子,$w_1+w_2+w_3+w_4=1$;σ_1、σ_2、σ_3、σ_4 分别为对应的控制显著性值随各分量变化快慢的量;$\tau_1,\tau_2,\tau_3,\tau_4$ 分别为各分量的归一化系数。一般取 $w_1=w_2=w_3=w_4=0.25$,$\sigma_1=\sigma_2=\sigma_3=\sigma_4=0.5$。

1.4 综合相似性度量

在进行模板相似性度量时,还需考虑对应边缘点的显著性。综合公式(2)、公式(4)和边缘点的显著性,文中提出的最终相似性度量为:

$$P(a_k,b_l)=P_{loc}(a_k,b_l)\cdot P_{phd}(a_k,b_l)\cdot\eta_{bl} \tag{17}$$

其中,η_{bl} 是采用公式(16)计算的对应边缘点的显著性系数,有 $\eta_{bl}=mea$。

公式(17)表明:相似性度量值 $P(a_k,b_l)$取值范围为[0,1),当边缘点 a_k 与 b_l 位置越接近、相位相差越小,并且 b_l 点的显著性系数越大时,两点的相似性度量值越大。因此,综合考虑边缘点的位置、梯度相位和显著性,能够大大增强平面目标匹配算法的鲁棒性。

2 PCR-HD 度量

为了克服形状缺失导致错误匹配的问题,Hutrenlocher 等人[6]提出部分 Hausdorff 距离(PHD);不久 Dubuisson 等人[13]又提出了平均 Hausdorff 距离;为获得更加准确的匹配结果,Sim 等人[14]又提出一种改进的 Hausdorff 距离 (LTS-HD),即对部分 Hausdorff 距离求和再平均,具有较好的鲁棒性。鉴于此,文中提出了一种采用部分 Hausdorff 距离与平均 Hausdorff 距离相结合,并基于边缘相位和显著性约束的 Hausdorff 距离方法(PCR-HD)。定义为:

$$h_{\text{PCR-HD}}(\boldsymbol{A},\boldsymbol{B})=\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}P'(a_k,b_l) \tag{18}$$

其中,$P'(a_k,b_l)$为点集 $\boldsymbol{A}$ 到点集 $\boldsymbol{B}$ 的相似性度量值 $P(a_k,b_l)$由大到小的排序;$N=\lfloor\tau\times K\rfloor$,$\lfloor\cdot\rfloor$表示向下取整,$\tau\in(0,1)$。该方法采取对部分 HD 距离求平均,避免了由于噪声干扰或遮挡而产生的加权,在存在遮挡或 SNR 低而产生的轮廓缺失的情况下也可得到较好匹配效果,τ 的取值范围一般为 0.8~0.9。

实时图像中检测到的目标轮廓往往存在缺损和外点干扰,而通过制备的目标模板能够得到完整的边缘点集合,因此单向的 $h_{\text{PCR-HD}}(\boldsymbol{A},\boldsymbol{B})$可以较好地度

量目标模板与实时图像边缘轮廓的相似程度。基于此，文中对平面目标边缘轮廓模板进行模板匹配相似性度量的具体步骤如下：

(1)制备目标模板边缘轮廓集合。对模板进行处理，得到模板的边缘点集合 $\boldsymbol{A}=\{a_1,\cdots,a_K\}$，包括每个边缘点的位置和梯度相位；

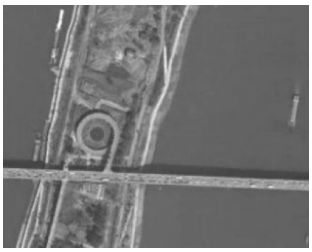
(2)实时图像边缘检测。采用 Canny 算子对实时图像进行边缘检测，得到实时图像的边缘点集合 $\boldsymbol{B}=\{b_1,\cdots,b_L\}$，包括每个边缘点的位置、梯度相位和显著性系数；

(3)模板匹配相似性度量。采用公式(2)、(4)、(17)和(18)计算单向 PCR-HD 相似性度量 $h_{\mathrm{PCR-HD}}(\boldsymbol{A},\boldsymbol{B})$；

(4)确认目标识别位置。遍历实时图像，计算所有位置处目标模板与实时图像局部轮廓形状的相似性度量值，获得匹配相关峰矩阵，并把相关峰的最大值坐标点作为目标识别位置。

3 实验结果及分析

为了验证文中算法的有效性，采用实拍数据进行性能测试，相关算法采用 Matlab 7.7.0 编程实现，测试所用计算机配置为 2.5 GHz CPU、2.0 GB 内存。图 4 为 PBHD[1]、Chamfer[9-10]、Olson[11]和文中方法对复杂场景下地面平面地物红外图像的模板匹配识别结果。图 4(a)为实时图像，从中可以看出地面场景比较复杂，地物背景轮廓边缘密集分布，杂波干扰严重；图 4(b)为与实时图像中建筑物顶部对应的目标形状和边缘轮廓模板；图 4(c)为采用文中 PCR-HD 方法对实时图像进行模板匹配的识别结果。图 4(d)、(e)、(f) 分别为 PBHD、Chamfer 匹配和 Olson 方法的匹配识别结果。从图中可以看出，文中 PCR-HD 方法能够得到正确的目标位置，而 PBHD、Chamfer 和 Olson 方法的匹配结果错误。

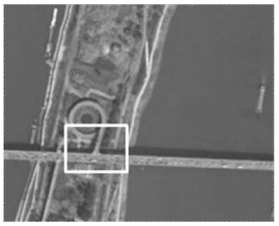


(a) 实时图像

(a) Real-time image

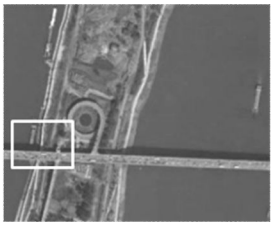
(b) 建筑物顶部模板

(b) Template of building top



(c) PCR-HD 匹配识别结果

(c) Matching result of PCR-HD



(d) PBHD 匹配识别结果

(d) Matching result of PBHD

(e) Chamfer 匹配识别结果

(e) Matching result of Chamfer

(f) Olson 匹配识别结果

(f) Matching result of Olson

图 4 四种方法对平面目标的处理结果

Fig.4 Matching results of four methods

4 结 论

针对复杂地面场景中形状不规则的平面目标轮廓模板匹配问题，提出了一种结合边缘位置、梯度相位和显著性约束的轮廓匹配相似性度量 PCR-HD 方法，综合考虑模板边缘点与实时图像边缘点的位置差异、梯度相位差异，以及实时图像中边缘点的显著性，实现平面目标的正确识别。在目标 SNR 大于 1、目标尺度大于 10×10 像素的情况下，对不同目标、不同时刻拍摄的数万帧图像进行测试统计，正确识别率高于 90%，测试结果充分说明了文中提出的 PCR-HD 方法能够实现复杂地面场景、低 SNR 的平面目标正确匹配定位。

参考文献：

[1] Niu Zhaodong. Research on key technology of ground target matching recognition in FLIR terminal guidance of cruise missile [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010. (in Chinese)

[2] Wang Guogang, Shi Zelin. Hausdorff distance based on Riemannian metric and its application in image matching[J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2011, 40(2): 365-369. (in Chinese)

[3] Liu Songlin, Li Zhijun, Niu Zhaodong, et al. Forward

looking template preparation of flat target based on multi-sources data fusion [J]. ***Laser & Infrared***, 2013. 43 (2): 217-220. (in Chinese)

[4] Barbara Zitová, Jan Flusser. Image registration methods: a survey [J]. ***Image and Vision Computing***, 2003, 21 (11): 977-1000.

[5] Bai Lianfa, Han Jing, Zhang Yi, et al. Registration algorithm of infrared and visible images based on improved gradient normalized mutual information and particle swarm optimization [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2012, 41 (1): 248-254. (in Chinese)

[6] Daniel P Huttenlocher, Gregory A Klanderman, William J Rucklidge. Comparing images using the Hausdorff distance [J]. ***IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence***, 1993, 15(9): 850-863.

[7] José Paumard. Robust comparison of binary images [J]. ***Pattern Recognition Letters***, 1997, 18(10): 1057-1063.

[8] Yang Bing, Liu Yongcai, Tian Jinwen, et al. Image matching based on new weighted Hausdorff distance [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2007, 36(5): 751-753. (in Chinese)

[9] Barrow H G, Tenenbaum J M, Bolles R C, et al. Parametric correspondence and chamfer matching: two new techniques for image matching [C]//International Joint Conference on Artificial Intelligence, 1977: 659-663.

[10] Tai-Hoon Cho. Improved chamfer matching using interpolated chamfer distance and subpixel search [J]. ***Lecture Notes in Computer Science***, 2007, 4522: 671-678.

[11] Clark F Olson, Daniel P Huttenlocher. Automatic target recognition by matching oriented edge pixels [J]. ***IEEE Transactions on Image Processing***, 1997, 6(1): 103-113.

[12] Pan Xiaying. Research on the techniques of image edge detection [D]. Xi′an: Xi′an University of Science and Technology, 2011.

[13] Dubuission M P, Jain A K. A modified Hausdorff distance for object matching[C]//Proceedings of the 12th International Conference on Pattern Recognition, IEEE Computer Society, 1994: 566-568.

[14] Sim D G, Kwon O K, Park R H. Object matching algorithm using robust Hausdorff distance measures [J]. ***IEEE Transactions on Image Processing***, 1999, 8(2): 425-429.