

一种基于 Hough 变换的损伤检测方法

高绪伟 陈果 李允

(南京航空航天大学民航学院 南京 210016)

(kainan1984@163.com)

摘要 针对香烟条包端面透明纸损伤的实时、在线图像检测问题,提出一种基于 Hough 变换的损伤检测方法.根据香烟条包端面透明纸的损伤特点,利用 Hough 变换原理构造了一个损伤判别准则,并根据该准则值的大小来实现损伤的在线检测.构建了图像检测系统,利用实际采集的香烟条包端面透明纸损伤图像对该方法进行了分析和验证,结果表明,其可以有效地检测香烟条包端面透明纸出现的异常现象.

关键词 质量检验;包装检测;图像处理;Hough 变换

中图分类号 TP391

A Hough Transform Based Method for the Damage Detection

Gao Xuwei Chen Guo Li Yun

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

Abstract A damage criterion is proposed according to the characteristics of cigarette packing face cellophane, then a Hough transform based real-time damage detection method is introduced. In addition, a prototype system of damage detection is setup, and experiments demonstrate the effectiveness of our proposed method.

Key words quality inspection; packing detection; image processing; Hough transform

目前国内各大烟草制造企业的包装都是在高速流水线上进行.在香烟包装过程中,经常出现烟包透明纸起皱、变形、裂口、破损等现象,该类异常现象在香烟包装质量问题中占有一定的比例,严重影响了烟包生产的质量,因此对于香烟透明纸包装过程中出现的上述现象进行检测是至关重要的.传统的香烟包装质量检测的方法是利用光纤传感器或位移传感器对香烟条包进行检测,但只能对烟包的特定部位进行检测,且无法有效地检测出烟包透明纸起皱、变形、裂口、破损等现象.采用图像检测技术^[1]可对图像特征进行识别,该项技术近年来得到了迅速发展和应用.

在计算机视觉领域,对直线或线段的检测是一个非常重要的过程,它是模式识别等工作中的一类典型的任务.很多物体具有直线轮廓,检测并定位这些直线轮廓从而定位目标,可以为进一步进行目标

识别和分析提供条件.Hough 变换是最常用的直线检测方法之一^[2],其优点在于算法稳定、抗噪性能好,但缺点是计算量和存储空间太大^[3].长期以来,研究人员采用了各种手段对 Hough 变换检测方法进行改进^[4-6].

本文通过构建实际的香烟条包端面图像检测系统,分析图像损伤特征,利用 Hough 变换原理构造了一个损伤判别准则,并通过实际采集的图像进行了分析和验证.

1 图像检测系统及损伤特征分析

1.1 图像检测系统

图像检测系统如图 1 所示,其硬件组成主要包括 6 台工业 CCD 相机,1 套 LED 照明系统,1 套图像采集卡,1 台工控机,1 套 PLC 电控系统,1 套光

收稿日期:2008-04-19;修回日期:2008-05-29.高绪伟,男,1984年生,硕士研究生,主要研究方向为图像处理与模式识别.陈果,男,1972年生,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为航空发动机状态监测与故障诊断、图像处理与模式识别等.李允,女,1983年生,硕士研究生,主要研究方向为图像处理与模式识别.

纤传感器,1套反射式光电管和1套高速气阀击打装置.软件采用自主开发的香烟条包外观图像检测系统软件.下面对图像检测系统的工作流程进行详细描述.

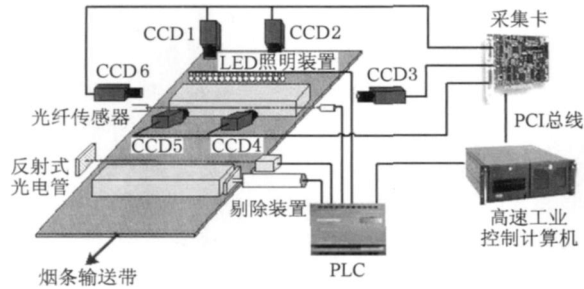


图1 图像检测系统原理图

当香烟条包到达拍照位置后,触发光纤传感器;传感器发出触发信号传到图像采集卡;图像采集卡收到触发信号后,发送采集信号到CCD;CCD收到该信号后立即采集图像;之后图像采集卡从相机获取数据,再将数据送至工控机缓存.在工控机中调用自主开发的图像处理软件进行图像处理,若图像合

格,进行下一次检测;否则,产生剔除信号,进行下一次检测.剔除信号经过一定延时后通过工控机串口到达PLC,PLC收到剔除信号后,等待反射式光电管发出烟条到位信号.这2个信号都收到后便发出剔烟信号到高速气阀,高速气阀收到剔烟信号后,控制气缸推杆动作,将不合格香烟条包从输送带上推出.

本文系统采用LED光源进行低角度照明(暗场照明):低角度的条形光源(与水平线之间为 $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$)能够映射出表面的轮廓和去除色差,适合于做边缘检测和损伤突出.该方式对透明纸的褶皱敏感,物体成像较清晰.

1.2 图像特征分析

表1所示为实际采集的香烟条包端面透明纸典型图像,包括正常、局部损伤、完全损伤及封口倾斜图像各8幅.经过对端面透明纸所出现的起皱、变形、裂口、破损等异常现象的观察,以及与端面透明纸包装合格的香烟条包图像的对比分析,发现如下特征:

表1 各类典型图像

透明纸图像类型	样本编号							
	1	2	3	4	5	6	7	8
正常图像								
局部破损								
完全破损								
封口倾斜								

1) 香烟条包透明纸端面损伤图像主要是检测端面透明纸折叠且粘合的直线部分是否存在缺损.由于其折线的角度一般为 45° 左右,所以可以通过截取香烟条包透明纸端面的4个角作为检测对象,其中 45° 折线检测是关键.

2) 由于相机曝光时间的差异,导致所采集的图像亮度和对比度均难达到很好的一致性,且图像还存在明暗不均匀以及部分反光现象.因此,如果对图像直接进行阈值分割和二值化处理,通过统计目标像素数目来检测直线是否存在,则检测结果非常不稳定,准确率很低.

3) 由于传送带的振动和速度的不均匀,导致图像中所选取的检测区域出现一定程度的变化,因此

对检测结果将带来较为严重的影响.

4) 处理速度要求实时.由于在实际生产线上的香烟检测速度很高,通常为5条/s,所以要求损伤识别的速度很快.

由此可见,香烟条包端面的图像检测难度非常大,不仅要求精度高,而且要求检测速度极快,传统的方法往往难于满足要求.为此,需要研究在精度、速度和稳定性方面均满足实际生产需要的新的检测方法.针对香烟条包端面透明纸损伤关键在于透明纸直线检测的特点,本文利用Hough变换原理构造了一个损伤判别准则,并根据该准则来实现损伤的在线检测.

2 基于 Hough 变换的香烟端面透明纸检测方法

2.1 Hough 变换算法

Hough 变换是图像识别的基本方法之一,其主要优点就是检测几何形状的能力较少地受到其中间断点的干扰,且不需要预先组合或连接边缘点. Hough 变换应用广泛,最基本的 Hough 变换是从灰度图像中检测直线.传统 Hough 变换算法的基本思想是点、线的对偶性,即对原始图像中的曲线进行某种坐标空间的变换,将其变换成参数空间的一个点.利用这个性质,可以把图像空间中检测曲线的问题转变成寻找参数空间中峰值点的问题.

设参数 (ρ, θ) 决定二维坐标平面中的任意一条直线,其中 ρ 表示坐标原点到直线的距离, θ 表示直线的垂线与 X 轴的夹角,直线上的任意点 (x, y) 满足

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (1)$$

图像空间中的每条直线对应一个参数 (ρ, θ) 的累加器,记作 $M(\rho, \theta)$.在二值边缘图像中,直线上的每个满足式(1)的点 (x, y) 使得累加器 $M(\rho, \theta)$ 的值加 1.可见, $M(\rho, \theta)$ 就是由 (ρ, θ) 决定的直线点的数目.当 $M(\rho, \theta)$ 的值大于规定阈值 L 时,则认为此 (ρ, θ) 决定的直线就是检测目标.

Hough 变换算法检测直线的经典计算步骤如下^[7]:

Step1. 初始化一个变化域 (ρ, θ) 空间的数组. ρ 方向上的量化数目为图像对角线方向像素数, θ 方向上的量化数目为 90(角度从 $0^\circ \sim 180^\circ$, 每格 2°).

Step2. 顺序搜索图中所有黑点,对每一个黑点,在变换域对应累加器上加 1.

Step3. 求出变换域中的最大值并记录.

Step4. 将最大值点及其附近的点清零.

Step5. 画出这些直线.

Hough 变换的优点在于其抗噪声能力强,且不受图像中直线走势的影响,但 Hough 变换的精确度和运算复杂度存在着矛盾,而且对存储空间的要求比较大.参数空间量化得越精细,算法的精度越高,所需的存储空间和运算量也越大.

2.2 基于 Hough 变换的检测方法原理

针对香烟条包端面的透明纸图像特征,本文引入 Hough 变换,构造了一个损伤判别准则,根据该准则值大小来实现损伤的在线检测,步骤如下:

Step1. 选定图像的计算矩形区域 (c, r) .

Step2. 根据香烟条包端面的透明纸图像特征,考虑到香烟条包端面透明纸 4 个角的对折线一般为 45° 左右,可取 $45^\circ - \alpha$, $45^\circ + \alpha$ 和 $135^\circ - \alpha$, $135^\circ + \alpha$. 其中,前者为对角线左上和右下方向,后者为对角线左下和右上方向, α 为直线浮动的最大角度,本文取 $\alpha = 5^\circ$; 在实验中, α 变化的范围控制为小于等于矩形 (c, r) 的对角线长度.

Step3. 根据式(1)计算出对应的参数 (ρ, θ) 的累加器 $M(\rho, \theta)$ 值,将 $M(\rho, \theta)$ 值存入一个二维累加器.累加器如下: 设 c, r 分别为矩形区域 (c, r) 的高和宽, $L \times L$ 的二维动态数组作为二维累加器,其中 $L = \sqrt{c^2 + r^2}$; 累加器中的 $M(\rho, \theta)$ 的最大值 $M_{\max}(\rho, \theta)$ 对应着对角线上的折线.但是由于一些离散的点和一些相距较远的点都可能被认为是一条直线(可能没有透明纸情况),我们将 $M_{\max}(\rho, \theta)$ 除以对角线的长度进行归一化

$$\hat{M}_{\max}(\rho, \theta) = M_{\max}(\rho, \theta) / \sqrt{c^2 + r^2} \quad (2)$$

显然, $\hat{M}_{\max}(\rho, \theta)$ 值越大,表明香烟条包端面透明纸的 45 折线越明显;当透明纸出现损伤时, $\hat{M}_{\max}(\rho, \theta)$ 的值将变得更小.

Step4. 当图像二值化后,矩形 (c, r) 会出现一大片目标对象,此时通常为透明纸缺失的情况.然而, 45° 方向直线却有很多,而且 $M_{\max}(\rho, \theta)$ 的值也很大,此时 $M(\rho, \theta)$ 的前几个最大值往往比较接近.当透明纸折线非常明显时,在理想情况下, $M(\rho, \theta)$ 的最大值与第二大值相差必定很悬殊,考虑到实际情况的偏差,在累加器中找出 $M(\rho, \theta)$ 的第四大值 $M_{\max 4}(\rho, \theta)$, 将最大值 $M_{\max}(\rho, \theta)$ 和第四大值 $M_{\max 4}(\rho, \theta)$ 进行比较,如果相差悬殊,则表明折线正常;否则,表明折线出现破损.

下面验证为什么选用第四大值 $M_{\max 4}(\rho, \theta)$. 首先将 $M(\rho, \theta)$ 的值归一化到 $[0, 1]$ 范围内,将 $M(\rho, \theta)$ 按降序排列,得到序列 $M_{\max 1}(\rho, \theta), M_{\max 2}(\rho, \theta), \dots, M_{\max N}(\rho, \theta)$, N 为 $M(\rho, \theta)$ 最大值个数,本文取为 20. 按如上要求,随机抽出 10 幅正常图像样本和 10 幅异常图像样本,分别求出 $M_{\max ij}(\rho, \theta)$ ($i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, 10$), 然后得到平均值序列,即 $\bar{M}_{\max 1}(\rho, \theta), \bar{M}_{\max 2}(\rho, \theta), \dots, \bar{M}_{\max N}(\rho, \theta)$, 其中 $\bar{M}_{\max i}(\rho, \theta) = \frac{1}{10} \sum_{j=1}^{10} M_{\max ij}(\rho, \theta)$ ($i = 1, 2, \dots, N$); 其结果如图 2 所示.从图 2a 中可以看出,由于正常图像折线明显且完整,因此最大值与第二大值在理论上相差很大;但是因为透明纸折线在图像中通常表现为一定宽度的折线,约 3 个左右的像素,前 3 个最大值相差较小,而从第 4 个之后相差较大;而从图 2b 中可以看出,异常图像的 $\bar{M}_{\max i}(\rho, \theta)$ 值整体相差不大,故本文选取第四大值 $M_{\max 4}(\rho, \theta)$ 与第一最大值的差来构造判别准则.通过该准则能够有效地识别出图像折线的损伤情况.

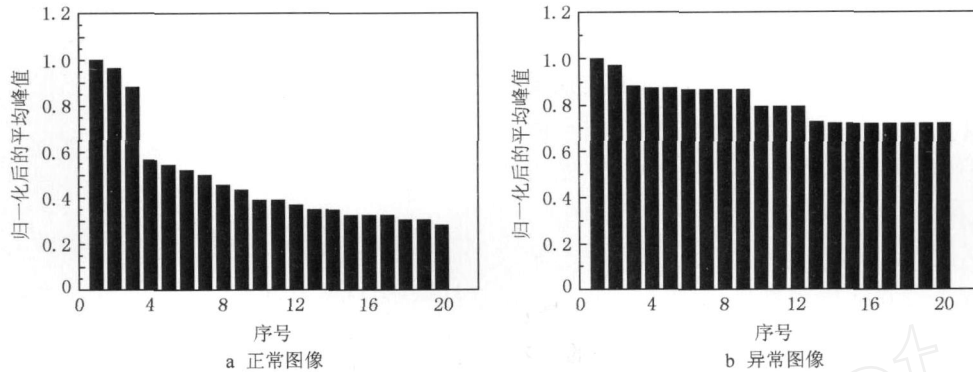


图2 透明纸图像的折线归一化后的峰值分布直方图

定义

$$\hat{M}_{\max 4}(\cdot, \cdot) = [M_{\max}(\cdot, \cdot) - M_{\max 4}(\cdot, \cdot)] / M_{\max}(\cdot, \cdot) \quad (3)$$

显然,若 $\hat{M}_{\max 4}(\cdot, \cdot)$ 值很小,表明透明纸折线出现损伤.

Step5. 根据式(2),(3)可知, $\hat{M}_{\max}(\cdot, \cdot)$ 和 $\hat{M}_{\max 4}(\cdot, \cdot)$ 的值越小,越可能为异常图像,因此可以定义折线损伤特征量 D ,即

$$D = \hat{M}_{\max}(\cdot, \cdot) \times \hat{M}_{\max 4}(\cdot, \cdot) \times 10000.$$

由于 $\hat{M}_{\max}(\cdot, \cdot)$ 和 $\hat{M}_{\max 4}(\cdot, \cdot)$ 的乘积为小数,为了便于观察分析,将该值乘以 10000.

3 实验及结果分析

3.1 图像损伤识别

为了测试本文方法的准确率,选取表 1 所示的 8 幅香烟条包端面透明纸合格原始图像,8 幅局部破损原始图像,8 幅完全破损原始图像和 8 幅封口倾斜原始图像,利用本文方法对样本图像进行检测.统计后得到实验结果如表 2~5 所示.经过计算,本文方法平均耗时 16.7599 ms,满足了现场的实时检测.

表2 合格透明纸原始图像检测结果

样本编号	折线损伤特征量 D	CPU 时间/ms
样本 1	4910	14.596
样本 2	4319	17.356
样本 3	5724	17.181
样本 4	4221	14.923
样本 5	3390	16.031
样本 6	3046	16.476
样本 7	2923	15.507
样本 8	3942	15.457

表3 局部破损透明纸原始图像检测结果

样本编号	折线损伤特征量 D	CPU 时间/ms
样本 1	606	17.919
样本 2	409	17.376
样本 3	199	15.194
样本 4	403	16.103
样本 5	589	16.873
样本 6	746	15.650
样本 7	694	16.655
样本 8	807	18.663

表4 完全破损透明纸原始图像检测结果

样本编号	折线损伤特征量 D	CPU 时间/ms
样本 1	409	15.908
样本 2	199	17.054
样本 3	202	16.982
样本 4	597	19.934
样本 5	606	17.244
样本 6	398	18.038
样本 7	196	18.785
样本 8	202	16.333

表5 封口倾斜透明纸原始图像检测结果

样本编号	折线损伤特征量 D	CPU 时间/ms
样本 1	980	16.823
样本 2	1067	15.956
样本 3	847	16.328
样本 4	953	18.234
样本 5	601	18.424
样本 6	286	17.836
样本 7	830	16.665
样本 8	441	16.328

经过计算,合格透明纸图像的 D 的均值为 4059.4,标准方差为 953.8;局部破损透明纸图像的 D 的均值为 556.6,标准方差为 205.1;完全破损图像的 D 的均值为 351.1,标准方差为 178.3;封口倾斜的透明纸图像的 D 的均值为 750.6,标准方差为 278.6.可以看出,合格图像的 D 值不会低于 2000,异常图像的 D 值不会高于 2000,并且在 2000 左右没有值,因此选择 2000 作为判别图像正确和错误的阈值.

为了更直观地表示,我们将合格、局部破损、完全破损和封口倾斜透明纸 4 种不同图像的折线损伤特征量 D 值用直方图表示,如图 3 所示.可以看出,合格图像归一化直线最大值与异常图像归一化直线最大值相差很大,这样保证以较高的识别率检测出异常图像.

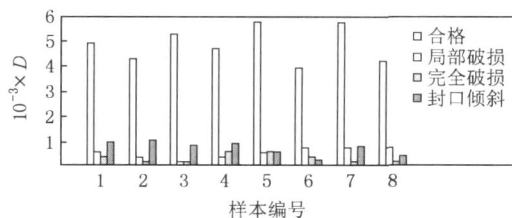


图 3 3 种不同损伤图像的 D 值比较

3.2 噪声影响分析

为了进一步验证本文方法的稳健性,对 8 幅合格原始图像、8 幅局部破损透明纸原始图像、8 幅完全破损透明纸原始图像和 8 幅封口倾斜透明纸原始图像分别加高斯白噪声 $N(\mu, \sigma^2)$. μ 均取 0, σ^2 分别取 0.00001, 0.00005, 0.0001, 0.0005, 0.001, 0.005, 0.01, 0.02, 0.025 和 0.05,得到的 D 值分别如表 6~9 所示,其中加各种高斯噪声的原始图像分别只列出样本 1 的图像.

表 6 加高斯噪声的合格透明纸图像及其 D 值

	噪声 σ^2									
	0.00001	0.00005	0.0001	0.0005	0.001	0.005	0.01	0.02	0.025	0.05
原始图像										
样本 1	4910	4910	4714	4517	4517	3535	2946	3731	2553	3142
样本 2	4319	4515	4515	4712	4319	3798	3337	2552	3337	2356
样本 3	5343	5534	5343	5343	5152	4770	4579	4961	3816	4198
样本 4	4221	4221	3798	3798	3587	3165	2743	2110	1899	1477
样本 5	3390	3412	3390	3535	3018	3535	3731	2865	2954	3353
样本 6	3046	3046	3128	3128	3211	2986	2743	2532	2303	2245
样本 7	2923	2923	3048	3245	2873	2794	2645	2353	2157	1922
样本 8	3942	3746	3942	3746	3353	3746	3157	2764	2960	3353

表 7 加高斯噪声的局部破损透明纸图像及其 D 值

	噪声 σ^2									
	0.00001	0.00005	0.0001	0.0005	0.001	0.005	0.01	0.02	0.025	0.05
原始图像										
样本 1	606	606	202	202	606	404	1010	808	404	606
样本 2	409	409	409	409	409	409	409	614	614	614
样本 3	199	398	199	597	398	597	398	597	597	796
样本 4	605	403	605	403	403	807	403	605	403	807
样本 5	589	589	392	785	589	589	785	392	589	982
样本 6	746	746	373	659	845	746	943	373	943	1218
样本 7	694	694	463	926	926	694	463	694	926	1157
样本 8	807	807	403	605	403	807	605	1009	605	1211

表 8 加高斯噪声的完全破损透明纸图像及其 D 值

	噪声 σ^2									
	0.00001	0.00005	0.0001	0.0005	0.001	0.005	0.01	0.02	0.025	0.05
原始图像										
样本 1	409	409	409	409	204	819	1024	614	614	1024
样本 2	199	199	199	398	398	398	398	597	597	796
样本 3	202	202	202	404	404	606	606	808	1010	808
样本 4	597	597	796	995	796	796	796	995	995	995
样本 5	606	404	404	404	808	808	1212	808	808	1010
样本 6	398	398	199	199	398	597	398	597	597	796
样本 7	196	196	196	392	392	392	589	392	589	589
样本 8	202	202	404	606	404	606	404	1010	808	808

表 9 加高斯噪声的封口倾斜透明纸图像及其 D 值

	噪声 σ^2									
	0.00001	0.00005	0.0001	0.0005	0.001	0.005	0.01	0.02	0.025	0.05
原始图像										
样本 1	980	980	980	980	490	1370	1225	1225	1225	1370
样本 2	1067	1067	785	1067	534	1067	785	1067	1601	1601
样本 3	847	847	424	635	635	959	959	1271	1694	1271
样本 4	953	953	953	714	477	714	1191	714	1429	1429
样本 5	601	601	401	401	802	802	1203	802	802	1003
样本 6	286	286	143	286	429	143	429	572	572	715
样本 7	830	830	415	830	830	1038	830	1038	1660	1660
样本 8	441	441	441	221	662	441	662	1003	882	1003

为了更直观地表示,将加不同高斯噪声的合格、不合格透明纸图像的 D 值用点图表示,如图 4 所示。从图 4 中可以看出,加高斯噪声的合格透明纸图像的 D 值大多数大于 2000,经过计算其均值为 3505.4,标准方差为 910.6,正确识别率为 77/80 =

0.9625;而局部破损、完全破损、封口倾斜透明纸图像的 D 值全部小于 2000,经过计算局部破损透明纸图像的 D 的均值为 614.4,标准方差为 230.7,完全破损透明纸图像折线的 D 的均值为 550.5,标准方差为 265.4,封口倾斜透明纸图像的 D 的均值为 849.7,标准方差为 372,异常图像识别率为 100%。计算结果表明,本文方法在干扰性特别强的情况下,检测图像仍然可以保证有较高的识别率。

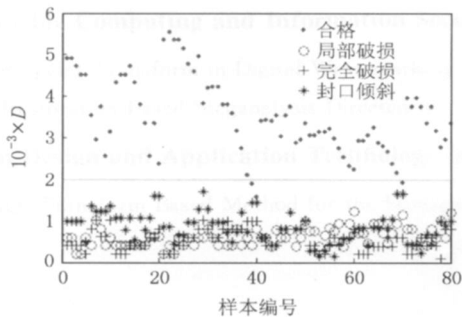


图 4 不同高斯噪声下透明纸图像的 D 值分布点图

4 结 论

香烟条包端面透明纸是香烟条包包装检测的重要环节,但透明纸的图像灰度特征的变化给图像的检测带来困难。本文利用香烟条包端面透明纸图像特征,提出了一种基于 Hough 变换的香烟条包端面

透明纸损伤检测新方法,构造了透明纸图像的折线损伤特征量 D 。本文通过构建实验平台,对折线损伤特征量 D 的检测精度、速度和稳健性进行了检验和分析。结果表明,本文方法检测速度快、准确度高,能够满足香烟生产线实时检测的需求。

参 考 文 献

- [1] Zhang Chunyu, Lu Linji. Image detection for abnormal packaging of cigarette carton cellophane (cellophane losing incompletely or completely) [J]. *Microcomputer Applications*, 2004, 20(10): 57-59 (in Chinese)
(张春昱, 路林吉. 香烟盒透明纸包装异常(透明纸没有或不完整)的图像检测[J]. *微型电脑应用*, 2004, 20(10): 57-59)
- [2] Illingworth J, Kittler J. A survey of the Hough transform [J]. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 1988, 44(1): 87-107
- [3] Brucker P, Drexl A, Möhring R, *et al.* Resource-constrained project scheduling: notation, classification, models, and methods [J]. *European Journal of Operational Research*, 1999, 112(1): 3-41
- [4] Kesidis A L, Papamarkos N. On the inverse Hough transform [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1999, 21(12): 1329-1343
- [5] Nagata N, Maruyama T. Real-time detection of line segments using the line Hough transforms [C] // *Proceedings of International Conference on Field-Programmable Technology*, Piscataway, 2004: 89-96
- [6] Pan Y, Li K Q, Hamdi M. An improved constant-time algorithm for computing the radon and Hough transforms on a reconfigurable mesh [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics—Part A*, 1999, 29(4): 417-421
- [7] He Bin, Ma Tianyu, Wang Yunjian, *et al.* *Visual C++ digital image process* [M]. Beijing: People's Post & Telecommunications Publishing House, 2001: 426-434 (in Chinese)
(何斌, 马天予, 王运坚, 等. *Visual C++ 数字图像处理* [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2001: 426-434)
- [3] Mehrabi M A, Faez K, Bayesteh A R. Image steganalysis based on statistical moments of wavelet subband histograms in different frequencies and support vector machine [C] // *Proceedings of IEEE the 3rd International Conference on Natural Computation*, Haikou, 2007: 24-27
- [4] Liu Q Z, Sung A H, Ribeiro B, *et al.* Image complexity and feature mining for steganalysis of least significant bit matching steganography [J]. *Information Sciences*, 2008, 178(1): 21-36
- [5] Liu Q Z, Sung A H, Chen Z X, *et al.* Feature mining and pattern classification for steganalysis of LSB matching steganography in grayscale images [J]. *Pattern Recognition*, 2008, 41(1): 56-66
- [6] Fridrich J, Goljan M, Hoge D. Steganalysis of JPEG images: breaking the F5 algorithm [M] // *Lecture Notes in Computer Science*. Heidelberg: Springer, 2003, 2578: 310-323
- [7] Ker A D. Steganalysis of LSB matching in grayscale images [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2005, 12(6): 441-444
- [8] Gonzalez R C, Woods R E. *Digital image processing* [M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003: 175-183 (in Chinese)
(Gonzalez R C, Woods R E. *数字图像处理* [M]. 第2版. 阮秋琦, 阮宇智, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2003: 175-183)
- [9] Bian Zhaoqi, Zhang Xuegong. *Pattern recognition* [M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2000: 87-90 (in Chinese)
(边肇祺, 张学工. *模式识别* [M]. 第2版. 北京: 清华大学出版社, 2000: 87-90)
- [10] University of Washington. CBIR image database [OL]. (2005-12-10) [2008-03-14]. <http://www.cs.washington.edu/research/imagetdatabase/roundtruth/>

(上接第 267 页)