

中图法分类号: TP23 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2016)12-1644-08

论文引用格式: Dai R, Xiao C Y. Stacked paper counting with image frequency spectrum analysis and correlation measurement[J]. Journal of Image and Graphics, 2016, 21(12): 1644-1651. [戴嵘, 肖昌炎. 图像频域分析与相关性度量相结合的叠层纸张数量检测[J]. 中国图象图形学报, 2016, 21(12): 1644-1651.] [DOI:10.11834/jig.20161209]

图像频域分析与相关性度量相结合的 叠层纸张数量检测

戴嵘, 肖昌炎

湖南大学电气与信息工程学院, 长沙 410082

摘要: **目的** 纸张等薄片产品的批量计数在工业领域具有广泛应用, 为此针对超薄叠层纸张机器视觉数量检测难题, 提出一种全局周期约束与局部模式相关性度量相结合的鲁棒图像计数算法。**方法** 首先, 沿层高方向提取1维图像剖面, 利用频域梳状滤波器去噪, 保留有用周期信号, 借助波峰找寻算法确定候选纸张位置; 然后, 构造优化波峰模板, 提出一种改进非零均值互相关(NCC)函数与原信号进行局部匹配。基于改进NCC函数的相关系数计算, 能有效消除毛边、排列不齐、厚度和间隙变化等因素造成的虚检; 最后, 利用沿纸张方向的波形相似性和共线性, 进一步消除干扰, 根据不同剖面计数结果进行统计优化, 输出最终测量数据。**结果** 针对多种类不同厚度的叠层纸张同时采用多种传统算法进行比较, 本文算法对于影响纸张计数的常见干扰具有很强的抑制能力, 其漏检率与误检率都显著低于其他传统算法。经统计, 长期测量误差低于0.01%。**结论** 本文算法对单张厚度大于0.08 mm以上的纸张叠层有很高的检测精度且实时性强, 适合自动化在线测量。

关键词: 纸张计数; 梳状滤波器; 模板匹配; 机器视觉

Stacked paper counting with image frequency spectrum analysis and correlation measurement

Dai Rong, Xiao Changyan

College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China

Abstract: **Objective** Batch counting of thin sheet products such as paper has been widely applied in the industrial field. To solve the problem of machine vision quantity measurement for very thin paper stacks, a robust image counting algorithm based on global period constraint and local pattern correlation is presented. **Method** 1D profiles were extracted along the direction of stack height, and then denoised with Fourier spectrum analysis and a comb filter to preserve the useful period signal. Each candidate paper was located using a traditional peak finding algorithm. An optimal peak template was constructed, and an improved function of normalized cross-correlation was presented to calculate the correlation coefficient between the former template and the original signal by local matching. This approach helped reduce false detection from complex factors such as rugged edge, varying thickness and gap, and irregular arrangement. The collinear property and similar shape of signal wave were utilized to further suppress clutter, and the ultimate measure was obtained from optimal statistics

收稿日期: 2016-03-26; 修回日期: 2016-08-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(61571184); 湖南省自然科学常德联合基金项目(612JJ9019)

第一作者简介: 戴嵘(1989—), 男, 湖南大学电气与信息工程学院控制科学与工程专业硕士研究生, 主要研究方向为机器视觉图像处理。E-mail: 232275164@qq.com

Supported by: National Natural Science Foundation of China(61571184)

of different profile counts. **Result** For comparison, the proposed method and several traditional algorithms were used together in counting experiments with different types of paper sheets with thickness varying from 0.08 mm to 0.23 mm. Our algorithm was verified to eliminate interference more effectively than other methods, and the missing and false alarm rates appeared comparatively low. **Conclusion** Our algorithm can achieve very high detection accuracy for paper sheets with thickness of more than 0.08 mm and has good real-time performance, which makes it suitable for in-line industrial applications with high accuracy requirement.

Key words: sheet counting; spectrum analysis; template matching; computer vision

0 引言

在工业制造领域,经常需要对批量产品进行数量统计。其中,以纸张、太阳能晶片^[1]、PCB 电路板^[2]、板材等为代表的薄片产品,因其特殊几何形状和堆放方式,要实现精确数量检测尤为困难。就纸张类产品计数而言,直接人工数纸和传统测厚、称重等物理测量方法一般误差较大、效率低下。而基于气动吸盘的机械数纸方法,则可能造成纸张破损^[3]。由于具有实时成像、非接触无损测量等优点,以及近些年工业相机、镜头和光源等硬件性能大幅提升和价格持续降低,机器视觉方法在生产实践中得到了越来越广泛的应用。但是,包装纸张类产品种类繁多,不同产品叠层端面成像效果差异较大,如厚度不相同、光照不均匀、排列不整齐、纸张端面磨损以及纸张间贴粘等现象,都加大了纸张精准计数的难度。

国内外针对机器视觉叠层纸张计数方法的研究已逾 20 年,但多数文献以专利形式出现^[4-7]。早期计数仪器常采用基于图像一维剖面信号分析的检测算法。例如, Bittar 等人^[4]和 Auboussier 等人^[5]都是利用信号中波峰(真实纸张位置)和波谷(纸张间缝隙)之间的相互关系来确定纸张数量。该类算法简单快速,但抗干扰性能较差。

随着计算机性能提高和研究的深入,近年来各种新型计数算法相继出现。Chen 等人^[8]将多尺度脊度算子与 Bi-Gaussian 核滤波器结合定义一种新的波峰强度似然函数,有效改善了粘连波峰检测难题。Harba 等人^[6]结合 1 维频域滤波和模板匹配的方法来确定纸张位置,但该算法只适合均匀排列的叠层,对纸张厚度和间隙变化敏感。另一类算法属于 2 维图像线检测范畴,直接检测图像中纸张边缘

条纹。杨硕等人^[9]在快速直线段检测算法(LSD)中引入单向梯度算子,并将其应用于纸张检测中。该算法可以在线性时间内得到亚像素级精度的检测效果。Petker 等人^[7,10]在预处理中采用 2 维小波变换可以很好地消除钝切刀造成纸张端面不平整的影响,然后利用形态学操作获取良好的二值化端面图像。然而这些算法大多缺乏全局性周期约束,对毛边、错位等局部异常容易造成漏检。

针对现有方法的不足,本文将纸张端面图像沿叠层方向的灰度周期变化和沿纸张方向的线性形状约束结合,同时考虑复杂因素造成的局部波形变化,提出一种信号频谱分析、相关度测量和统计优化相结合的叠层纸张图像数量检测方法。

1 数据与检测难题

采用工业相机、高倍显微镜头和 LED 光源组成的成像系统对垂直堆积纸张叠层端面进行成像^[9]。图 1(a)为 0.08 mm 厚度纸张叠层图像示例,可以看出图像主要由沿水平叠层方向周期重复的竖直细条纹组成,各条纹对应潜在的纸张边缘。然而,受光照不均,产品摆放不齐,端面厚度变化等复杂因素影响,纸张端面条纹会呈现不同程度的局部模糊、断裂和遮挡,同时噪声和异物干扰也给纸张图像识别造成很大困难。

为更好了解纸张检测的复杂性,通过大量观察和统计,归纳典型纸张端面条纹异常和局部形变如图 1(b)。根据其成因不同,大致可分为以下 4 类:

1) 纸张质量改变,如图 1(b)中 A—E 标记。其中,不规则形变(A)一般源自长期堆积弯曲;毛刺(B)是在纸张产品被切割过程中,切口不光滑形成的;纸品长时间存放受潮,或者经过多次使用摩擦就会形成毛边(C);同时,纸品使用过程中可能沾染污

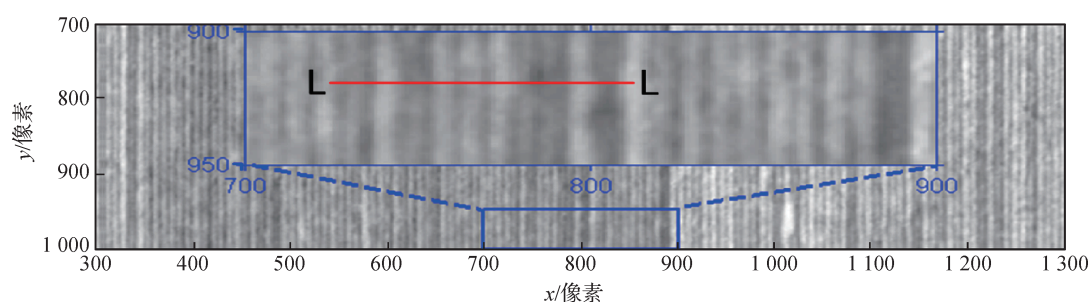
渍(D);而黏连问题(E)主要来自紧邻纸张的毛刺或者小毛边。

2) 叠层排列问题,如图1(b) F—H。由于纸张柔软且厚度较薄,纸张间的摩擦力太大,导致排放时纸张叠层端面不易处于同一平面。这样就会容易造成端面不齐(F)的情况,有时甚至会出现单张纸张被夹在旁边的两张纸张之间的缝隙处,这种夹层(G)现象较难检测。同时叠层纸张没有完全压紧或

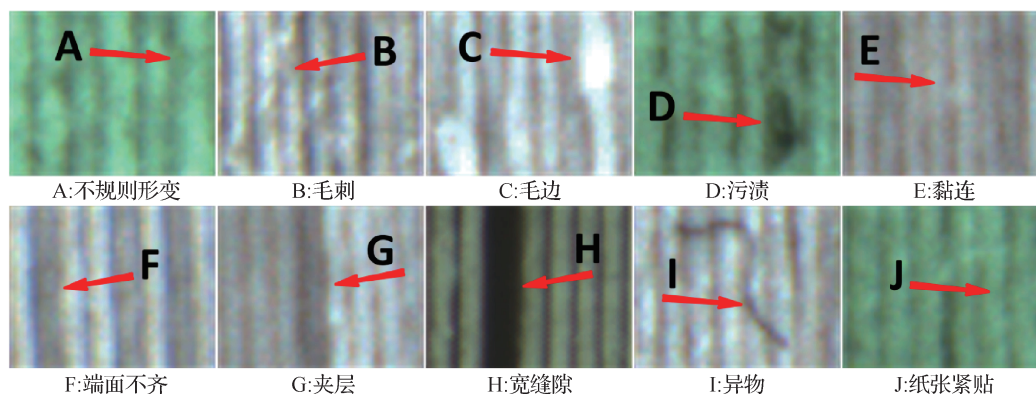
者旧纸张各部分厚度不均还会导致叠层端面可能出现宽缝隙(H)。

3) 异物干扰,如图1(b)I。纸张测量时,空气中的灰尘有时会吸附在纸张叠层端面上,此时成像时就会出现异物。

4) 成像误差,图1(b)J。此现象主要由于相机分辨率不足,导致成像时会出现两张纸张紧贴在一起,其表现为图像中两张纸张的缝隙不明显。



(a) 纸张叠层图像(叠加虚框为局部放大图, 红线L—L标记1D剖面位置)



(b) 局部异常:A—J标记不同种类局部异常

图1 纸张叠层图像与局部异常

Fig. 1 Image of stacked paper and local abnormalities ((a) image of stacked paper; (b) local abnormalities)

2 纸张检测算法

针对实际叠层纸张图像条纹识别和数量检测的难题,首先提出一种融全局性周期模式检测和局部形状优化匹配相结合的1维波峰检测算法,接着利用沿纸张方向的共线性净化2维脊线图形成高质量线条纹从而提高纸张识别精度。

完整的算法流程图如图2所示,主要分为4个步骤:

1) 预处理。取纸张叠层端面图像矩阵 $S(x, y)$ 中的第 y_0 层剖面信号 $S(x, y_0)$ 进行梳状滤波,得到滤波后信号 $F(x, y_0)$ 。

2) 相关性度量及峰值检测。从梳状滤波后信号 $F(x, y_0)$ 中提取最优纸张模板 $T_0(x)$, 与原信号 $S(x, y_0)$ 卷积求得局部相关性系数 $RC(x, y_0)$ 。同时,采用传统波峰检测算法^[11], 标记 $F(x, y_0)$ 中候选纸张位置 P_i 。

3) 融合校正。结合上述 $RC(x, y_0)$ 信息,对 P_i 进一步甄别,筛选出真正的纸张波峰点。基本原理是对 $RC(x, y_0)$ 再求一次相关系数,剔除 P_i 集合中响应较弱的点。然后判断矩阵图像每层剖面是否遍历完成,若未完成,则返回第1)步执行下一剖面数据处理。

4) 结果优化。所有剖面遍历完成后,获得2维脊线图矩阵 $f(x, y)$ 。然后利用沿纸张方向的共线

性纯化2维脊线图,最后利用垂直截线统计的方法获得最终纸张数量。

2.1 预处理

预处理目的是滤除原信号上叠加的干扰和无用信息,如异物遮挡等。受 Harba 等人^[6]启发,引入仅

保留高能量谐波分量的梳状滤波器。以图3(b)1维原信号 $S(x, y_0)$ 为例,对应图1中L—L剖面。进行傅里叶变换后,得到图3(a)所示幅度谱。可以看出,基波 h_0 和1、2次谐波 h_1 、 h_2 占据了信号绝大部分能量,呈现明显的局部峰值。

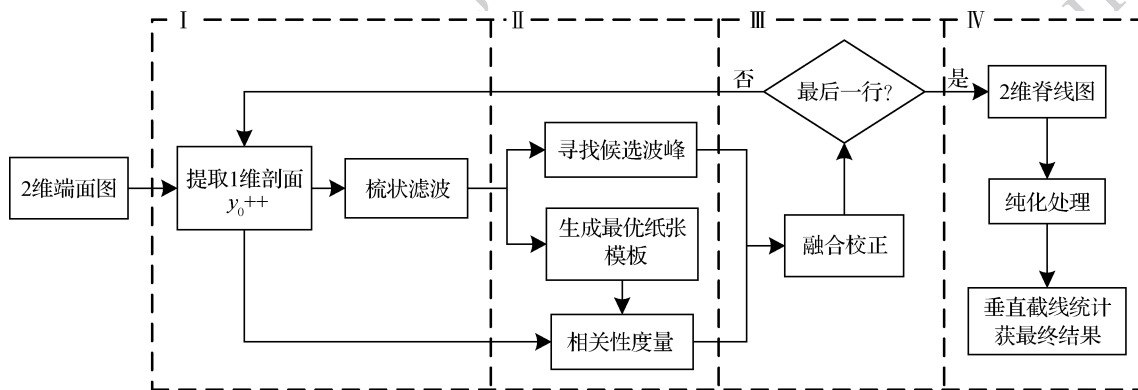


图2 算法流程图

Fig. 2 Flowchart of algorithm

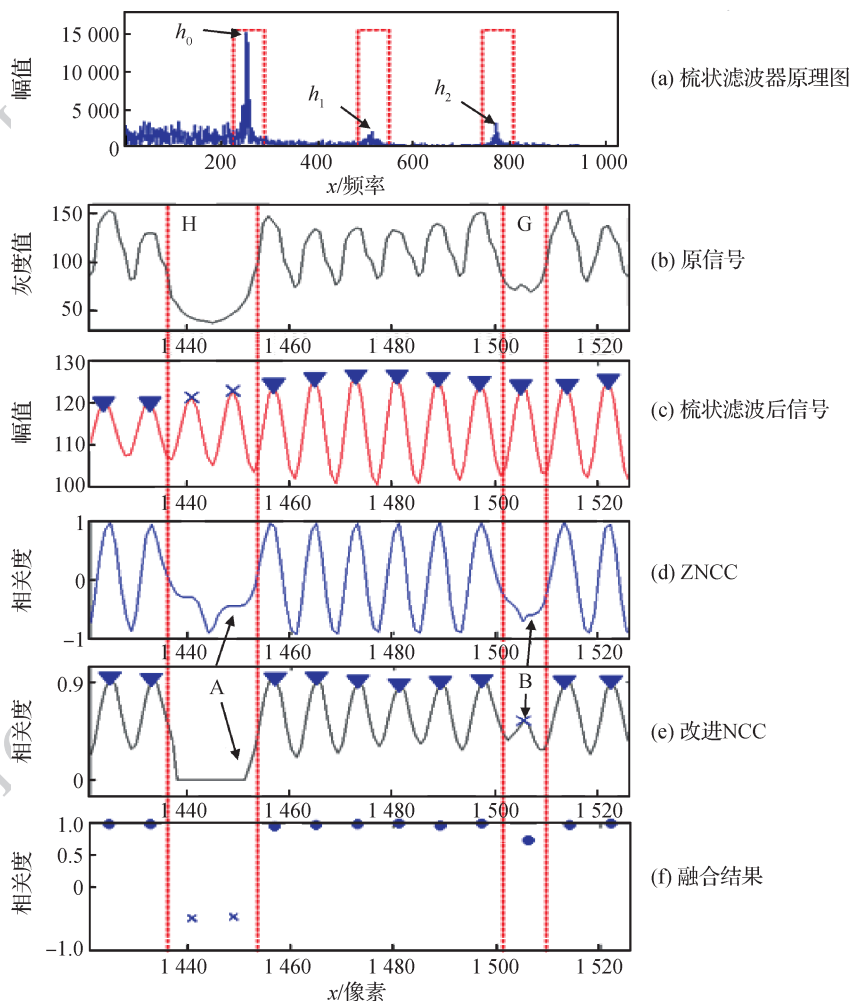


图3 1维剖面信号检测

Fig. 3 Detection along an 1D profile ((a) principle of the comb filter; (b) source signal; (c) signal processed by the comb filter; (d) result of ZNCC; (e) result of improved NCC; (f) fused result)

选择 $b_p = 8$ Hz 宽度 (此时原信号采样频率为 2 048 Hz) 的矩形窗 (如图 3(a) 中虚框所示) 对各谐波进行保留, 同时剔除其他干扰信号, 该方法称为梳状滤波器。即

$$\hat{F}(n, y_0) = \begin{cases} \hat{S}(n, y_0) & \min \{ |n - h_i| \} \leq b_p \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\hat{S}(n, y_0)$ 和 $\hat{F}(n, y_0)$ 分别代表 $S(x, y_0)$ 和 $F(x, y_0)$ 的傅里叶变换的频域表示, h_i 取值 $\{0, 1, 2, \dots, i, \dots\}$, 其中 h_0 为基波频率, h_i 为第 i 次谐波频率。滤波后的信号 $F(x, y_0)$ 如图 3(c), 可以看出不同强度的纸张波峰均被有效保留, 尤其 G 区间内的极弱信号 (对应纸张夹层) 被明显增强。借助传统波峰检测算法^[11], 很容易定位各纸张位置, 如图 3(c) 三角形标记。梳状滤波器本质上属于全局性匹配算法, 即将谐波周期信号与原信号进行匹配。其优点在于可以检测出信号中隐含的周期模式。然而, 这种全局性周期假设没有考虑到某些局部异常, 对 H 区间所示纸张间隙加宽情况出现了虚检 (如 × 标号所示)。

2.2 模板优化与相关性度量

如 2.1 节所述, 全局性频谱分析无法满足局部异常检测需求。作为弥补, 借鉴多尺度波峰检测原理^[8], 提出一种优化模板匹配的局部相关性度量方法。首先, 从梳状滤波后信号中选择一定数量的波峰合成优化模板; 然后, 引入互相关系数定义, 借助相关系数法求取优化模板与原剖面信号的局部相关性测度。具体算法如下:

1) 模板优化。对 1 维剖面信号而言, 模板可定义为各纸张边缘波峰的平均形状。采用梳状滤波后的信号 $F(x, y_0)$, 选择峰值大于一定阈值的波峰作为候选模板。各候选模板 $T_i(x)$ 提取, 以图 3(c) 中各峰值点为中心, 宽度取为图 3(a) 中基波频率 h_0 的倒数。设模板总数为 N , 求取各模板间相关系数和 SR_i , 即

$$SR_i = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1, j \neq i}^N T_i(x) \otimes T_j(x) \quad (2)$$

式中, $\otimes$ 为归一化相关系数 (ZNCC) 算子^[12]。选择 $\max_i (SR_i)$ 最大值对应的 $T_i(x)$ 作为优化模板, 记作 $T_o(x)$ 。

2) 相关性度量。传统多尺度脊度检测算子, 如

文献[8, 13-14], 一般采用二阶高斯核与信号进行卷积, 从而获取某种局部脊度似然强度。该方法实际测量的是差分滤波器核中心区域与邻域背景间局部对比度。在图像模板匹配领域常用的零均值互相关 (ZNCC)^[12] 本质上是上述脊度检测算子的通用形式, 其公式为

$$\gamma(x) = \frac{\sum_{x'} (T'(x') \times I'(x + x'))}{\sqrt{\sum_{x'} T'^2(x') \times \sum_{x'} I'^2(x + x')}} \quad (3)$$

式中, $T'(x') = T(x') - \left(\frac{1}{w}\right) \sum_{x''} T(x'')$ 与 $I'(x') = I(x + x') - \left(\frac{1}{w}\right) \sum_{x''} I(x'')$ 分别对应模板 $T(x)$ 和待匹配信号 $I(x)$ 均值归零后结果。虽然 ZNCC 算子在图像和信号匹配领域得到广泛应用, 但却不满足本文中的波形相关性度量的需求。主要存在以下两个问题:

1) 弱信号负相关。图 4(a) 所示信号为弱波峰信号 (对应于图 3(b) 中 G 信号), 它与理想模板的相关性度量应该取正值。但是该信号均值高于波峰, 均值归零后图 4(a)(b) 两信号对应波峰位置的数值符号相异, 代入式 (3) 求互相关将得到不期望的负值强响应, 如图 3(d) 中 B 所示。

2) 阶梯边虚检。由于 ZNCC 算子的均值归零处理, 所求得的互相关度量实际对应模板正值区间与负值区间卷积的差值。这样, 图 3(d) 中 A 所示的非对称阶梯边也会引起很强的响应。此类问题已在血管图像检测文献中获得广泛共识^[15]。

针对上述问题, 定义一种改进的非零均值互相关 (NCC) 函数。首先通过去除预置的均值归零操作消除弱信号负相关的问题, 即采用非归零的 NCC 算子代替 ZNCC 算子。由于波峰模板信号短小且变化单一, 可以不考虑背景漂移影响。对标准波峰信

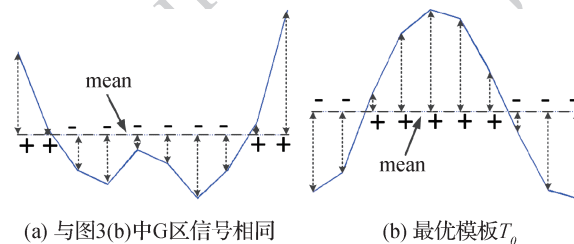


图 4 均值归零示意图

Fig. 4 Illustrate the removal of mean values ((a) the same signal as the G signal in figure 3(b); (b) optimal template)

号而言,非归零的 NCC 算子与 ZNCC 算子的相关性度量结果类似,参见图 3(d)(e)。接着,为进一步削弱阶梯边响应,对传统 NCC 算子的分子项设置阈值抑制。得到改进后的 NCC 公式为

$$RC(x) = \frac{f^*(x)}{\sqrt{\sum_{x'} T'(x')^2 \times \sum_{x'} I(x+x')^2}} \quad (4)$$

$$f^*(x) = \begin{cases} f(x) & \text{其他} \\ 0 & f(x) < t \end{cases} \quad (5)$$

$$f(x) = \sum_{x'} (T'(x') \times I(x+x')) \quad (6)$$

$$T'(x') = \frac{T(x') - \min(T(x'))}{\sum_{x''} (x'')} \quad (7)$$

式中, $T(x)$ 代表模板, $I(x)$ 为待匹配信号。此处, $f^*(x)$ 代替 $f(x)$ 可以有效消除阶梯边的残余效应。

作为比较,图 3(e) 给出本文改进后 NCC 相关度量结果,阈值参数 t 根据经验取为所有候选峰值点 P_i 的 0.5 倍均值。对照图 3(d) 中 ZNCC 结果不难发现,改进后 NCC 曲线中 B 标记的弱信号响应更明显,而 A 标记的阶梯边响应被有效消除。同时,其他标准纸张波峰的相关性测量保持一致。然而,改进后的 NCC 算子仍属于局部匹配算法,对于 G 区间内这种叠层错位引起的灰度下降仍然响应较低,造成漏检(如 × 标记波峰)。

2.3 融合校正与后处理计数

由以上两节内容可知,梳状滤波器与改进 NCC 算法均无法独立满足精确纸张波峰检测需求。本文综合两者优点,提出一种融合方法。从图 3(c)(e) 可以看出,真实波峰附近两种检测响应都有很高的形状相似性。基于此,仅对梳状滤波后候选纸张位置点 P_i 再次求取两者相关系数 $RC_f(P_i)$, 得到融合后相关响应如图 3(f) 所示。其计算公式为

$$RC_f(P_i) = F(P_i + x') \otimes RC(P_i + x') \quad (8)$$

式中, x' 代表以零为中心,宽度为图 3(a) 中基波频率 h_0 的倒数的自然数序列,符号 $\otimes$ 代表 ZNCC 算子运算。即以候选波峰 P_i 的位置为中心,在滤波后信号 $F(x, y_0)$ 与相关系数 $RC(x, y_0)$ 中分别取平均纸张宽度的信号,利用 ZNCC 算子测它们之间的互相关系数 $RC_f(P_i)$ 。通常,ZNCC 相关系数值在 0.8 以上为高度相关,0.5 ~ 0.8 之间为显著相关,0 以下为负相关。如图 3(f) 所示, H 区间内的信号处于高度负相关的范围类,而 G 区间信号处于显著相关与高度相关之间。综合考虑计数稳定性与精确性,保

留 $RC_f(P_i) > 0.5$ 峰值点,得到最终检测结果如图 3(f) 中圆点所示。显然,融合方法充分综合了全局频谱分析和局部模板匹配算法的优势,在提高准确率的同时有效降低了虚检。

2.4 脊线图生成与统计计数

将原图各剖面波峰检测结果 $f(x, y_0)$ 汇集得到 2D 脊线图 $f(x, y)$ 。受异物、毛边、污渍等影响,各脊线常常会生成粘连毛刺或出现短距离间断。为减少计数误差,先采用数字形态学算子对脊线图分权点进行删除,借助面积开运算移除干扰;较短间隔用线结构闭运算填充。净化后的脊线图仍然存在潜在干扰,抛弃单独检测各纸张端面的传统做法,采用一种截线统计计数法。如图 5 所示,以一定间隔抽取 n 条截线,分别统计各截线点数。然后计算所截行计数结果中出现频率最高的数(即众数),此众数值就是最终的纸张计数结果。经验证,该方法不但能有效滤除随机干扰且计算效率高。

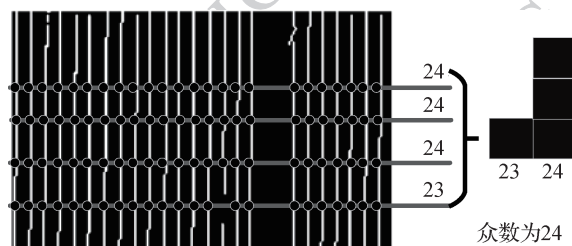


图5 截线统计法

Fig. 5 Statistical counting along intercepts

3 实验与分析

为验证算法性能,选择经典 Canny 边缘检测算法^[16]和文献[9]中 LSD 线检测算子进行对比。根据纸张图像实际情况,对原 Canny 算法进行部分改进:仅考虑单边梯度,防止同一纸张产生多重响应;迟滞阈值取零,以获得尽可能多的线检测输出。从图 6(a) 可以看出,对于挑选出的 10 种典型问题纸张,采用零阈值 Canny 算子存在大量噪声引起误检的同时,漏检也很严重。而对于图 6(b) 中 LSD 算法结果误检率有所下降,但漏检更加严重,仅部分正常纸张边缘被完整检测。同时,对于本文算法融合前的中间结果,梳状滤波(图 6(c))与改进 NCC(图 6(d)),该两种方法由于自身原理的局限性同样无法达到期望效果。其中,如图 6(c)(d) 箭头标

记所示,梳状滤波对于局部周期异常极易形成误检,而改进 NCC 算法对于弱隐含模态信号易形成漏检。最后,如本文算法的检测结果图 6(e) 所示,由于引入了全局性周期假设和先验形状约束,误检率和漏检率大大降低,故图 6(e) 中几乎所有纸张边缘都被

正确检测。

另外,以此算法为基础开发了纸张计数仪器,分别针对 0.08 mm、0.1 mm、0.11 mm、0.23 mm 厚度的不同烟标叠层进行了批量在线检测。经统计测量误差小于 0.01%,且不同厚度叠层切换无需调整参数。

从做到右分别对应十种典型纸张端面(参见图1b)图中粗箭头指向物检区,细箭头指向漏检区

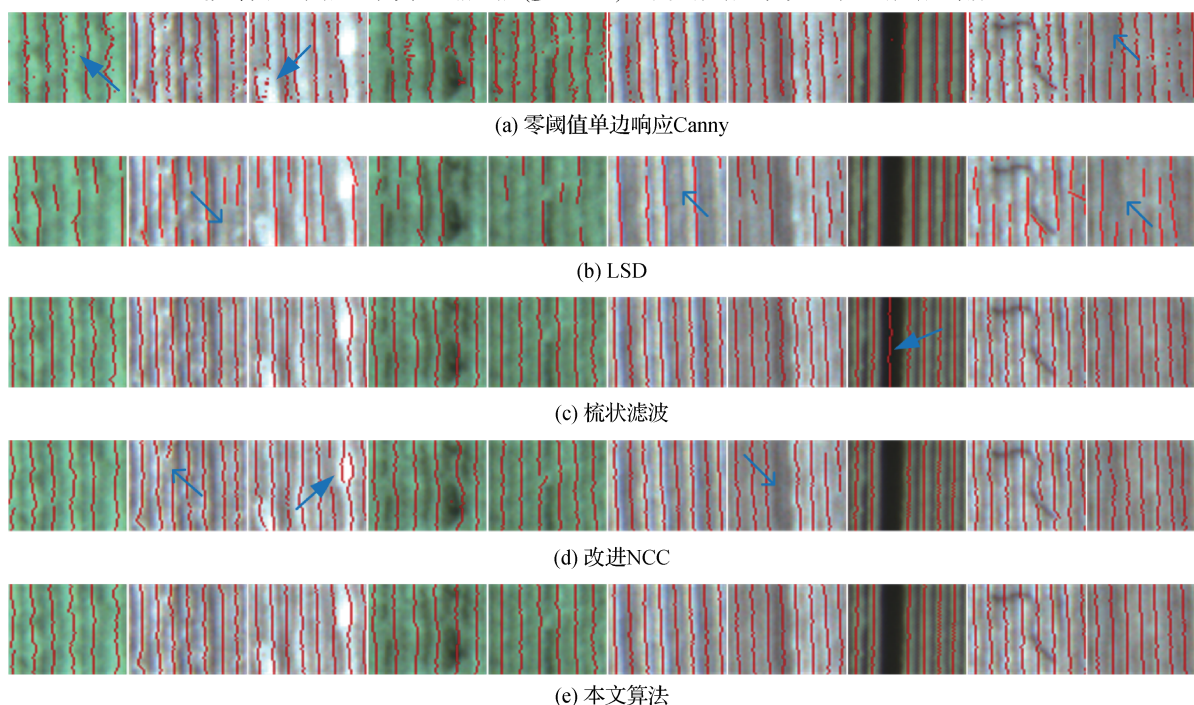


图6 脊线图对比

Fig. 6 Comparison using the ridge-line images ((a) Canny of zero threshold and one-side response; (b) LSD; (c) comb filter; (d) improved NCC; (e) our algorithm)

4 结 论

针对叠层纸张机器视觉数量检测难题,提出一种全局周期约束与局部模式相关性度量相结合的鲁棒图像计数算法。基本思想是利用被测对象先验知识提高弱信号检出率,同时融合形状相似性测量以适应局部形变。实验结果证明,本文算法对于影响纸张计数的常见干扰具有很强的抑制能力。由于本文算法抗干扰性较强,故仅对垂直于纸张端面的局部区域进行处理,所以其实时性也很好,已在纸张检测仪器中得到了应用。

参考文献 (References)

[1] Fang C, Tan W, Du J H. Solar energy wafer counting based on

- textural property [J]. Information and Electronic Engineering, 2011, 9(2): 185-189. [方超, 谭伟, 杜建洪. 基于纹理特征的太阳能晶片计数研究[J]. 信息与电子工程, 2011, 9(2): 185-189.] [DOI: 10.3969/j.issn.1672-2892.2011.02.012]
- [2] Wu P H, Kuo C H. A counting algorithm and application of image-based printed circuit boards [J]. Tamkang Journal of Science and Engineering, 2009, 12(4): 471-479. [DOI: 10.6180/jase.2009.12.4.11]
- [3] Uchida I, Hirata A. Suction head in a paper sheet counting machine; US, 4262896 [P]. 1981-04-21.
- [4] Bittar B, Perdoux D. Device for counting products stacked side-by-side; US, 5686729 [P]. 1997-11-11.
- [5] Auboussier E, Berthe B, Fumey T. Device for counting stacked products; US, 7045765 [P]. 2006-05-16.
- [6] Harba R, Berthe B, Perdoux D, et al. Card-counting device; WIPO, WO/2008/145859 [P]. 2008-12-04.
- [7] Petker D, Lohweg V, Gillich E, et al. Method and system for touchless counting of stacked substrates, especially bundled banknotes; US, 9042632 [P]. 2015-05-26.

- [8] Chen T J, Wang Y N, Xiao C Y. An apparatus and method for real-time stacked sheets counting with line-scan cameras [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2015, 64(7): 1876-1884. [DOI: 10.1109/TIM.2014.2366977]
- [9] Yang S, Peng S, Xiao C Y. a fast straight-line growth algorithm for analysing and counting stacked-paper images [J]. Computer Applications and Software, 2015, 32(9): 188-191. [杨硕, 彭双, 肖昌炎. 用于叠层纸张图像分析计数的快速直线增长算法 [J]. 计算机应用与软件, 2015, 32(9): 188-191.] [DOI: 10.3969/j.issn.1000-386x.2015.09.045]
- [10] Petker D, Lohweg V, Gillich E, et al. Real-time wavelet-based inline banknote-in-bundle counting for cut-and-bundle machines [C] // Proceedings of SPIE 7877, Image Processing: Machine Vision Applications IV. San Francisco Airport, California, USA: SPIE, 2011; #787703. [DOI: 10.1117/12.872357]
- [11] Yang C, He Z Y, Yu W C. Comparison of public peak detection algorithms for MALDI mass spectrometry data analysis [J]. BMC Bioinformatics, 2009, 10(1): 4. [DOI: 10.1186/1471-2105-10-4]
- [12] Di S L, Mattoccia S, Tombari F. An algorithm for efficient and exhaustive template matching [C] // Proceedings of International Conference on Image Analysis and Recognition. Berlin Heidelberg: Springer, 2004: 408-415. [DOI: 10.1007/978-3-540-30125-7_51]
- [13] Liutkus A. Scale-space peak picking [D]. Villers-lès-Nancy, France: Inria Nancy-Grand Est, 2015.
- [14] Du P, Kibbe W A, Lin S M. Improved peak detection in mass spectrum by incorporating continuous wavelet transform-based pattern matching [J]. Bioinformatics, 2006, 22(17): 2059-2065. [DOI: 10.1093/bioinformatics/btl355]
- [15] Koller T M, Gerig G, Szekely G, et al. Multiscale detection of curvilinear structures in 2-D and 3-D image data [C] // Proceedings of the Fifth International Conference on Computer Vision. Cambridge, MA, USA: IEEE, 1995: 864-869. [DOI: 10.1109/ICCV.1995.466846]
- [16] Canny J. A computational approach to edge detection [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, PAMI-8(6): 679-698. [DOI: 10.1109/TPAMI.1986.4767851]