

皮棉杂质透射检测及成像目标增强方法

郑东耀^{1)†} 丁天怀²⁾

¹⁾清华大学深圳研究生院, 深圳 510000)

²⁾清华大学精密仪器与机械学系, 北京 100084)

(2004 年 11 月 8 日收到, 2004 年 12 月 13 日收到修改稿)

由于皮棉中白色或无色的杂质与皮棉反射特性相似, 现有的光谱反射成像检测方法具有一定的局限性. 对皮棉杂质的光透射成像检测方法进行深入研究. 在分析杂质及棉纤维透射特性基础上, 建立了光透射成像机理模型. 研究了光透射成像系统中光源种类、光源能量、棉层厚度及皮棉运动速度对成像目标的影响. 根据棉层中透射光子的传播特性, 提出利用高速 CCD 俘获非漫射光子及统计滤波处理方法以增强成像目标, 并分析了高速 CCD 曝光时间与成像目标清晰度的量化关系. 结果表明, 所提出的光透射检测及成像目标增强方法, 可获得清晰的目标图像特征. 检测结果与实际相符, 此方法不仅为检测皮棉中各种白色或无色杂质提供一种有效途径, 而且还可推广到红外及其他波段的成像系统中, 对于微弱目标的透射成像检测提供一种新的思路.

关键词: 皮棉杂质, 透射成像, 准直线光子, 目标增强, 统计滤波

PACC: 0760, 0670E

1. 引 言

当皮棉中混入白色或无色的纤维状杂质, 会导致后续的纺织中布料疵点增多, 染色不均匀, 成为棉纺企业面临的棘手难题^[1, 2]. 最近几年, 利用多波段光谱反射检测方法虽取得一定进展, 但直接应用于杂质检测具有一定的局限性. 由于白色或无色的杂质与皮棉反射特性相似, 光谱反射成像方法效果有限. 如 Tantaswadi 等人在可见光成像中利用棉花与杂质细微色泽差别检测皮棉杂质^[3-6], 对无色或白色杂质效果不明显. Ajay Pai 等人使用 x 射线对皮棉断层扫描来分析棉花密度不同的杂质^[7], 此方法由于成本较高而难以推广. 王汝笠在紫外波段检测棉花中的尼龙杂质^[8], 对部分尼龙杂质虽有一定的检测效果, 但对其他大部分杂质效果不佳. 特别是对于与棉纤维颜色相同的细微杂质(如白头发丝、白羊毛等)基本检测不出来.

本文对检测皮棉杂质的光透射成像方法进行深入研究. 建立了光透射成像机理模型, 研究了光透射成像系统中光源种类、光源能量、棉层厚度及皮棉运动速度对成像目标的影响. 为进一步增强成像目标, 提出

利用高速 CCD 俘获非漫射光子及统计滤波处理方法. 结果表明该成像方法可获得更清晰的杂质特征图像, 为在线检测皮棉中白色或无色杂质提供一种有效途径, 而且还可以推广到其他波段成像检测中.

2. 光透射成像机理分析

当光束透射棉层时, 皮棉中的杂质对光束既有吸收又有散射, 两者同时存在. 成像系统中, 被 CCD 接收到的光子有两种: 准直线传播光子与漫射光子. 准直线传播光子是几乎以直线路径穿透材料的光子, 而漫射光子是经多次散射后, 其传播路径远大于散射体线度的光子^[9]. 准直线传播光子对杂质透射成像起主要作用. 而漫射光子经多次散射后其初始信息方向已完全丢失, 因此漫射光子将会导致杂质图像的畸变, 由此只考虑准直线传播光子在透射成像中作用.

假定棉层介质中存在两种杂质, 其消光系数分别为 μ_1 和 μ_2 , 杂质平均厚度分别为 l_1 和 l_2 , 皮棉的厚度及消光系数分别为 l_c 和 μ_c . 入射光源初始能量为 E_s , 由于光束穿透材料后其能量呈指数级

[†]E-mail: jdy02@mails.tsinghua.edu.cn

衰减,则光束透射皮棉中杂质后,其出射光能 E_1 和 E_2 分别为

$$E_1 = E_s \cdot e^{-\mu_1 l_1} \cdot e^{-\mu_c(l_c-l_1)}, \quad (1)$$

$$E_2 = E_s \cdot e^{-\mu_2 l_2} \cdot e^{-\mu_c(l_c-l_2)}. \quad (2)$$

而光束未经过杂质直接透射皮棉的出射光能量 E_c 为

$$E_c = E_s \cdot e^{-\mu_c l_c}. \quad (3)$$

一般情况下,皮棉内部松散,较杂质密度小,则杂质消光系数大于皮棉,即满足 $\mu_1 \geq \mu_c$, $\mu_2 \geq \mu_c$,因此杂质与皮棉的出射光能差为

$$\begin{aligned} \Delta E_1 &= E_c - E_1 \\ &= E_s(e^{-\mu_c l_c} - e^{-\mu_1 l_1} \cdot e^{-\mu_c(l_c-l_1)}), \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \Delta E_2 &= E_c - E_2 \\ &= E_s(e^{-\mu_c l_c} - e^{-\mu_2 l_2} \cdot e^{-\mu_c(l_c-l_2)}). \end{aligned} \quad (5)$$

透射成像中,令 H 为成像系统传递函数,CCD 成像系统将接收到的光能 E 转换为灰度值 g ,

$$g = H(E). \quad (6)$$

根据成像系统叠加性和平移不变性,两种杂质与皮棉的灰度差分别表示为

$$\begin{aligned} \Delta g_1 &= H(E_c) - H(E_1) \\ &= H(E_c - E_1) = H(\Delta E_1), \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \Delta g_2 &= H(E_c) - H(E_2) \\ &= H(E_c - E_2) = H(\Delta E_2). \end{aligned} \quad (8)$$

将(4)(5)式,分别代入上式,可得到杂质/皮棉成像灰度差与杂质消光系数的关系

$$\Delta g_1 = H(E_s(e^{-\mu_c l_c} - e^{-\mu_1 l_1} \cdot e^{-\mu_c(l_c-l_1)})), \quad (9)$$

$$\Delta g_2 = H(E_s(e^{-\mu_c l_c} - e^{-\mu_2 l_2} \cdot e^{-\mu_c(l_c-l_2)})). \quad (10)$$

由此,成像系统将棉花与杂质的透射特性差别转化为图像灰度差别,而且,杂质之间的灰度差别也可由杂质透射特性差别转化而来,可表示为

$$\begin{aligned} \Delta g_{1-2} &= H(E_s(|e^{-\mu_1 l_1} \cdot e^{-\mu_c(l_c-l_1)} \\ &\quad - e^{-\mu_2 l_2} \cdot e^{-\mu_c(l_c-l_2)}|)). \end{aligned} \quad (11)$$

可见,即使皮棉与杂质反射率相近,但透射特性不同而表现为材料的消光系数差别,利用透射成像方法,可将其透射特性差别转化为图像灰度的差别。

3. 影响透射成像效果的若干因素

3.1. 透射光源对透射效果的影响

为定量描述透射效果,我们建立目标清晰度的概念表示透射图像中皮棉与杂质灰度差别程度。透

射图像中所有像素灰度值的方差(或标准差)与图像清晰度满足单调关系^[10],而图像清晰度可作为目标清晰度的评估标准。对于一幅 $M \times N$ 像素的图像,定义 $X(i, j)$ 为图像中单个像素的灰度值, σ^2 为图像灰度值的方差,则目标清晰度的评估函数

$$\sigma^2 = \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} [X(i, j) - \overline{X(i, j)}]^2, \quad (12)$$

其中 $\overline{X(i, j)}$ 为图像灰度平均值。在其他成像参数一致的情况下选择不同波段的光源,透射 10mm 的棉层厚度,观察透射图像中杂质与棉纤维的灰度差,结果如表 1 所示。

表 1 光源种类与目标清晰度的关系

光源种类	目标清晰度(方差 σ^2)
超亮白光二极管阵列	87.3
405nm 发光二极管阵列	49.7
470nm 发光二极管阵列	45.2
520nm 发光二极管阵列	34.7
580nm 发光二极管阵列	23.1
630nm 发光二极管阵列	20.8
850nm 发光二极管阵列	19.2
940nm 发光二极管阵列	17.8

结果表明,利用超亮白光二极管阵列作为透射光源可获得最大目标清晰度值。原因在于皮棉纤维之间分布着尺寸千差万别的空隙,需要不同波段的光束透射以达到较好的检测效果。不同波段光束在棉层介质中提供的准直线光子数量不同,而纯正的白光包含了多种波段光谱,是多波段透射光源的叠加,可透射各种尺寸不均的纤维空隙,而此时准直线光子的绝对数量是最多的,因而具有较好的透射效果。

此外,我们分析了目标清晰度与光源波长的关系,波长越短则光束透射能力越强,准直线光子比例增大,漫射光子减少,透射效果越好,如图 1 所示。

利用最小二乘法对图 1 曲线进行拟合,得到目标清晰度与波长的函数关系,

$$\begin{aligned} f(\lambda) &= 0.011\lambda^6 + 0.017\lambda^5 - 0.021\lambda^4 - 0.003\lambda^3 \\ &\quad + 0.005\lambda^2 - 0.1025\lambda^1 + 9.137. \end{aligned} \quad (13)$$

由于成本问题无法使用波长极短的光源,实际应用中把超亮白光二极管阵列作为透射光源。

3.2. 光照能量对透射效果的影响

为定量描述目标清晰度与光照能量的关系,利

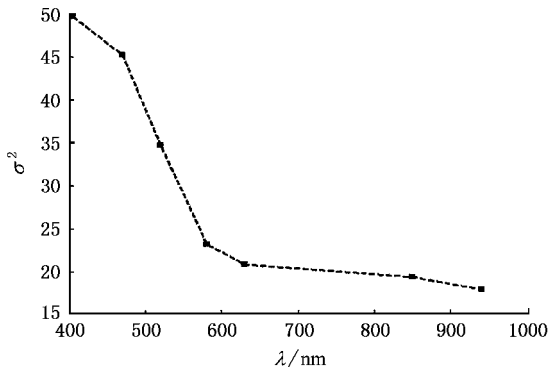


图 1 目标清晰度与光源波长的关系

用光源直接照射 A4 白纸获取图像,其平均灰度作为亮度的度量^[11],定义光照能量系数($E \in [0, 1]$)为

$$E = \frac{\sum(X(i, j))}{255}. \quad (14)$$

实验中,选用白光二极管阵列透射皮棉杂质,逐步提高光照能量,结果如图 2 所示.

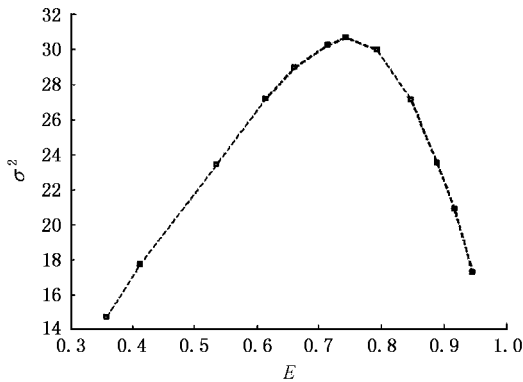


图 2 目标清晰度与光照能量的关系

可见,目标清晰度值随光照能量的增加平滑而缓慢上升,到达极限值后,目标清晰度随光照能量的增加而迅速下降.这是由于当光照能量上升时,准直线光子、蛇行光子两种透射光子数目增加,皮棉杂质透射较清晰,但同时漫射光子数目也在增加,以致当透射光能量达到一定强度时,漫射光子数目增长远超过其他光子增长,而且由于透射光能太强使 CCD 饱和,又降低了透射成像效果.

利用两个曲率不同的半抛物线对图 2 曲线进行拟合,如下式表示:

$$f(e) = \begin{cases} -29.507 \cdot E^2 + 73.188 \cdot E - 7.051 & E \leq 0.74, \\ -15.306 \cdot E^2 + 19.438 \cdot E - 2.953 & E > 0.74. \end{cases} \quad (15)$$

3.3. 棉层厚度对透射效果的影响

为定量描述棉层厚度与透射效果的关系,使用白光二极管面阵光源,光照能量固定,不改变杂质原始位置,逐步增加棉层厚度,实验结果如图 3 所示.

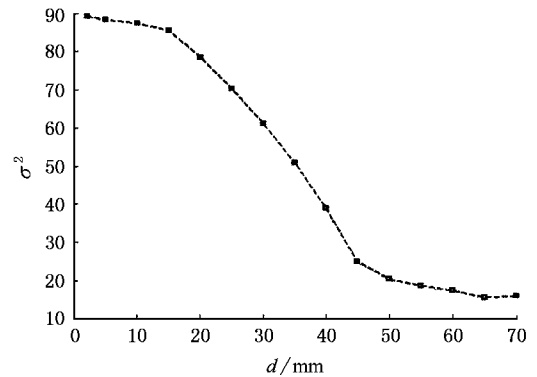


图 3 目标清晰度与棉层厚度的关系

可见,随着棉层的加厚,光子在介质中传播距离增加,则出射的准直线光子减少,因而目标清晰度降低.然而在棉层较薄范围内($d \leq 15\text{mm}$),准直线光子所占比例较大,目标清晰度随棉层增厚的变化较小,当超过一定厚度时漫射光子数量随棉层加厚的增加较快,目标清晰度降低较快.但在棉层较厚范围内($d \geq 45\text{mm}$),漫射光子数此时比例较大,但所占比例增长不快,则目标清晰度随棉层增厚而降低缓慢.利用最小二乘法对图 3 曲线进行拟合,可得到目标清晰度与棉层厚度的关系:

$$f(d) = 0.015d^6 - 0.231d^5 + 2.48d^4 - 17.64d^3 + 76.69d^2 - 177.30d + 245.46. \quad (16)$$

3.4. 皮棉传送速度对透射效果影响

我们同样使用白光二极管面阵光源,光照能量固定,棉层厚度为 10mm,获取同一目标在不同速度下的图像信息,研究皮棉运动速度与目标清晰度的关系.为获取运动物体的清晰图像,将 CCD 相机电子快门设定为 10^{-4}s ,采用变频调速系统控制皮棉匀速运动,其速度范围在 0—10m/s 可调,结果如图 4 所示.

可见,目标清晰度随速度的增加而降低.但在一定的低速范围内($v \leq 4\text{m/s}$),由于使用高速电子快门,其速度变化对透射效果影响不大.当速度 $v \geq 5\text{m/s}$ 时,皮棉运动速度越高,杂质目标越模糊.我们同样利用最小二乘法对图 4 曲线进行拟合,可得到

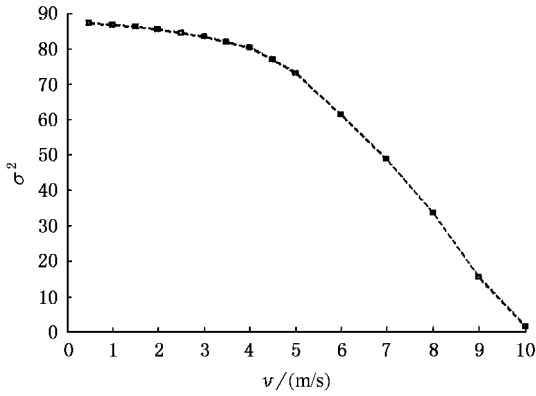


图4 目标清晰度与皮棉运动速度的关系

目标清晰度与皮棉运动速度的关系

$$f(v) = -0.043v^8 + 0.18v^7 - 0.53v^6 + 1.5v^5 - 1.76v^4 + 1.85v^3 - 1.24v^2 + 0.47v - 0.07. \quad (17)$$

皮棉高速运动会导致图像模糊,使细微目标(如头发丝)特征不明显,影响细小杂质的检测。针对这一问题,我们采用快速像素差分算法对模糊图像进行处理。其基本思想是:通过分析图像的模糊机理可知,在某一曝光时间内,模糊图像的像素灰度值是在视场中多个像素灰度值的叠加,也就是说,模糊图像是在曝光时间内由连续若干个静态图像叠加而成的。根据物体运动速度和成像系统参数,计算曝光时间内视场中像素的移动个数,通过多个模糊图像的像素灰度值推算出静态图像的像素灰度值。即由图像中每一个叠加的像素灰度值分离出单个像素灰度值,然后由单个像素灰度值恢复清晰图像。经过差分像素法的去模糊处理,在现场 5m/s 的速度下,在线获取的图像比较清晰,可满足后续图像处理的要求。

4. 透射成像目标增强方法

4.1. 准直线光子统计滤波提取

透射成像中,准直线光子与漫射光子的特征表现有区别。在直流光源照射下,漫射光子总是出现在高频率空间中,而准直线光子总是出现在低频率空间中。利用高速 CCD 瞬间俘获的 N 幅序列图像中,准直线光子和蛇行光子使 N 幅图像的对应该像素点灰度变化平缓,而漫射光子使像素点灰度变化剧烈。因此,利用概率统计方法,建立统计滤波器筛选像素点,弱化高频光子成像,强化低频光子成像。

使用直流光源获取的 N 幅透射图像中,图像中对应该像素点灰度值的波动应很小,但由于棉层中漫射光子的复杂作用,使灰度值的变化波动较大。利用高速 CCD 可以俘获到灰度值变化规律。为此提出统计滤波器获取低频光子的方法。

对于每次获取的 N 幅图像中,存在 N 个对应像素点灰度值 g_1, g_2, \dots, g_N ,利用统计滤波器在灰度 $g \pm \Delta g$ 范围内对其筛选,

$$\{g_i\} = P_{\max(g \pm \Delta g)}(g_1, g_2, \dots, g_N), \quad (18)$$

$P_{\max(g \pm \Delta g)}$ 为滤波函数,即求其最大概率的灰度值集合 $g \pm \Delta g$ 为定义的窗口宽度。通过对像素灰度值的统计滤波,得到最大概率的灰度值集合 $\{g_i\}$,若这样的灰度值有 M 个,求其均值:

$$g = \frac{1}{M} \times \sum_{i=1}^M g_i, \quad (19)$$

g 即为所求的新灰度值,利用新灰度值组合可以获得目标增强的图像。

同时,为降低皮棉厚度不均匀性对目标检测的影响,我们采用区域自适应阈值分割方法,其原理是将图像分成若干个小区域,分别对每个小区域根据其灰度特性设定自适应阈值进行图像分割。由于区域较小,在小区域内的背景可认为是均匀的,分割的结果将会更加准确。具体方法如下:

1) 将整幅图像分成 $X \times Y$ 个小区域,区域大小为 $m \times n$ 。计算每个区域中各点灰度 h_{ij} 的平均值 S_h 。

$$S_h = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n h_{ij}. \quad (20)$$

2) 将 S_h 乘以一个调整系数 K 作为此区域的分割阈值 $\theta: \theta = K \times S_h$,此时阈值会随着区域内灰度平均值的变化而改变。

3) 使用阈值 θ 对此区域进行分割。

4) 将 $X \times Y$ 个小区域的分割结果整合为一幅完整的图像。

为说明上述方法的有效性,我们选择与棉花外观特征相近的杂质,包括纸片、尼龙、编织袋、黄麻、白头发等放置在棉花表面。利用超亮白光二极管面阵做光源,棉层厚度 15mm,采用曝光时间(10^{-5} s)的高速 CCD 相机获取图像。另外,统计滤波算法中设定 $N = 15, \Delta g = 5$ 。实验结果如图 5 所示:图 5(a)为反射成像方法获取图像,杂质特征不明显,视觉很难识别。图 5(b)为透射成像方法获取的图像(统计滤波器处理前),杂质特征具有一定程度表现,说明成像效果要好于反射成像。但由于未经过统计滤波器

处理,部分杂质特征不明显.图 5(c)所示的图像是在透射成像的基础上,进行统计滤波处理的结果.此时杂质特征明显且图像清晰,表明采用此成像目标

增强方法的有效性.图 5(d)为采用 5×5 窗口局部阈值的二值化处理结果,然后利用形态学种子填充法提取清晰、连续的杂质目标.

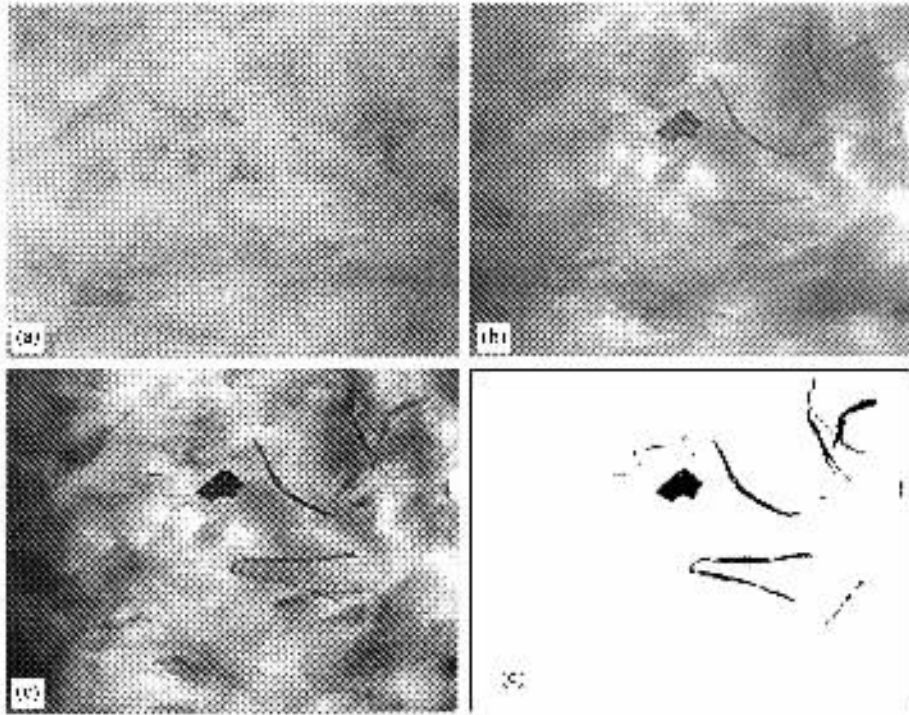


图 5 透射成像及图像处理结果

4.2. CCD 曝光时间对目标清晰度的影响

由于光子在棉层中高速传播,其传播时间极短,因此 CCD 设置不同的曝光时间对准直线光子信息提取效果不一样.同样使用上述成像目标增强方法,而其他参数不变,将 CCD 设置在不同的曝光时间,观察透射成像效果与曝光时间的关系如图 6 所示.

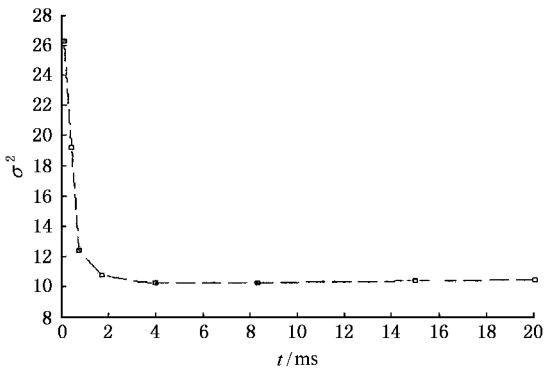


图 6 目标清晰度与 CCD 曝光时间的关系

2ms),准直线光子透射成像的增强效果才明显.在 $t \leq 2\text{ms}$ 内,曝光时间越短,成像目标增强效果越明显.当曝光时间超过 $t > 2\text{ms}$ 时,CCD 无法来得及感应透射光子形成的灰度变化,透射效果基本上没有改变.图 4 的曲线可以用分段函数拟合,表示如下:

$$f(t) = \begin{cases} 39.662t^3 - 75.838t^2 + 14.273t + 25.864 & t \leq 2\text{ms} \\ 10.2 & t > 2\text{ms} \end{cases} \quad (21)$$

5. 结 论

本文对皮棉杂质的光透射检测及成像目标增强方法进行研究,得出以下结论.

1. 由于现有的光谱反射成像检测具有一定的局限性,提出了利用透射方法检测皮棉中白色或无色杂质新方法.通过分析棉层介质光束传播特性及杂质透射特性,建立了光透射成像机理模型,确立了杂质透射特性与目标灰度特征的函数关系,将杂质透射特性差别转化为图像灰度特征差别.

2. 研究了光透射成像系统中光源种类、光源能

从图 6 可见,只有在极短的曝光时间内($t \leq$

量、棉层厚度及皮棉传送速度对透射成像目标清晰度的影响,并对实验结论做了理论分析。

3. 根据透射光子的特征表现,提出利用高速 CCD 俘获非漫射光子及滤波处理的成像目标增强方法,设计统计滤波处理算法,筛选非漫射光子并强化其成像功能,进一步研究了曝光时间对此方法应用效果的影响。另外,为降低棉层不均匀对杂质检

测的影响,采用区域自适应阈值分割方法提取复杂背景中的目标。

此方法不仅为检测皮棉中各种白色或无色杂质提供一种有效途径,而且该实验结论还可推广到红外及其他波段的成像应用中,对于微弱目标的透射成像检测提供一种新的思路,特别是对隐藏在强散射介质中细微目标检测具有一定的应用价值。

-
- [1] United States Department of Agriculture 1999 *Agriculture Marketing Services-the Classification of Cotton* (Washington Academic) p92
- [2] Strolz H M 2000 *ITMF Cotton Contamination Survey 1999* Cotton Confin Texas USA. **2** 63
- [3] Tantaswadi P , Vilainatre J and Tamaree N 2001 *Computers and Industrial Engineering* **37** 352
- [4] KANG TAE JIN , KIM SOO CHANG 2002. *Textile Res . J .* **23** 124
- [5] XU B , Fang C and Huang R 2002 *Textile Res . J .* **67** 881
- [6] Veit D , Hornes I and Bergmann J 1999 *Journal of Clothing Sci . Tech .* **12** 866
- [7] Pal Ajay , Sari Sarraf Hamed 2002 *37th IAS Annual Meeting Industry Applications Conference* **3** 420
- [8] Wang R L and Li Z Y 1997 *Chinese Patent* 97106293. 5 (in Chinese) 王汝笠、李正宇 1997 中国专利 97106293. 5]
- [9] Chen N G 1999 PH. D. dissertation (Beijing : Tsinghua University) 12—14 (in Chinese) 陈南光 1999 博士学位论文(北京 :清华大学)第 12—14 页]
- [10] Bai L F , Xu Y X and Yu S 1999 *Transaction of Instrument and Meter* **20** 32 (in Chinese) [白立芬、徐毓娴、于 水 1999 仪器仪表学报 **20** 32]
- [11] Huang C W 2002 PH. D. dissertation (Beijing : Tsinghua University) 101—103 (in Chinese) 黄成伟 2002 博士学位论文(北京 :清华大学)第 101—103 页]

A method for transmitted detection of lint trash and imaging target enhancement

Jia Dong-Yao¹⁾ Ding Tian-Huai²⁾

¹⁾ *Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen 510000, China*

²⁾ *Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China*

(Received 8 November 2004 ; revised manuscript received 13 December 2004)

Abstract

Present methods using spectral reflected imaging for detection of lint trash suffer from some fundamental limitation because the trash almost has the same reflected characteristic as the lint. To effectively detect the trash in lint, a method using transmitted imaging technique was proposed and the experimental phenomenon was analyzed in detail. The transmitted imaging model was constructed based on analyzing the trash and lint absorption characteristics. And the impacts on imaging target by the type and energy of light source as well as thickness and velocity of lint movement were also discussed. After analyzing the transmitted photo propagation characteristic, a method of capturing non-diffuse photo using high-speed CCD and statistic filtering processing was developed for enhancement of the imaging target. Furthermore, the relation between the exposure time of high-speed CCD and the target distinctness was determined. The result indicated that the method is effective to acquire a distinct target image using the transmitted imaging detection and imaging target enhancement. And the image is consistent with the actual target. This method not only can provide an effective way to detect the white and colorless trash in cotton, but also can be applied to other imaging system such as the infrared and other band spectral imaging. It is believed that this weak target transmitted imaging system is an effective way to detect weak target.

Keywords : lint trash, transmitted imaging, quasi-line photon, object enhancement, statistic filtering

PACC : 0760, 0670E