

一种改进的运动模糊图像参数准确估计方法

胡发焕^{1,2}, 刘国平^{1†}, 胡蓉华¹, 董增文¹

(1. 南昌大学 机电工程学院, 南昌 330031; 2. 江西理工大学 机电工程学院, 江西 赣州 341000)

摘 要: 模糊角度(方向)和模糊长度是对运动模糊图像进行恢复处理的两个关键参数. 针对通过运动模糊图像频谱图像的中心亮条纹获得模糊角度存在角度检测精度不高、角度检测范围受限制等缺陷, 在分析 Radon 变换的数学原理和十字亮纹形成原因及其造成干扰的基础上, 根据频谱图像的特点, 提出采用模糊频谱图像的暗条纹获得运动模糊角度的方法: 在获得频谱图像暗条纹的二值图像后, 通过骨架化变换, 缩小暗条纹宽度, 再经过 Radon 变换获得模糊角度和模糊长度. 实验结果表明, 所提出的方法能避开频谱图像中十字亮线的干扰, 提高模糊角度检测精度和稳定度, 扩大角度检测范围, 模糊角度的检测误差小于 0.5° , 角度检测范围达 $0^\circ \sim 180^\circ$, 优于传统算法的效果

关键词: 图像处理; 运动模糊参数; 点扩散函数; Radon 变换; 骨架化; 图像退化

中图分类号: TP391

文献标志码: A

Improved approach to motion blur parameters identification

HU Fa-huan^{1,2}, LIU Guo-ping^{1†}, HU Rong-hua¹, DONG Zeng-wen¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

Abstract: The blur direction and blur length are two key parameters to recover motion-blurred images. In view of the defects that low precision and the limitation of angle range in the method of detecting center bright stripe of Fourier spectra image. Based on the analysis of the mathematical principle of Radon transformation and the causes of cross-shaped bright line and its interference, according to the characteristics of spectral images, the improved approach of using the dark line of Fourier spectra image to identify blur direction is proposed. After the binary image of Fourier spectra image is got, the skeletonisation of mathematical morphology is employed to make the width of dark line narrowed, then the Radon transform is employed to get the blur direction and blur length. The experiment results show that the proposed method can avoid the disturbance of cross-shaped bright line, and improve the precision and stability of the blur direction detection and enlarge the range of angle detection. The detection error of blur angle is less than 0.5, the range of blur angle detection is $0^\circ \sim 180^\circ$, it works better than traditional algorithms.

Keywords: mage processing; motion blur parameter; point spread function; Radon transform; skeletonization; deteriorated image

0 引 言

运动模糊图像是在成像过程中, 采集设备与被采物体之间存在相对运动而造成的, 它是一种常见的图像降质现象. 运动模糊图像是原始图像在运动方向上某个邻域内像素进行平均然后乘以曝光时间, 是被摄物体在不同时刻的多个影像叠加而成的^[1]. 在摄像期间, 物体运动速度越快, 其曝光时间越长, 邻域平均的范围越大, 图像越模糊, 反之亦然. 通常物体

作变速、非直线运动时可以分解为各段的匀速直线运动, 因此, 研究匀速直线运动生成的模糊图像的复原方法具有代表性和普遍意义. 经典的模糊图像复原方法都是以退化图像的点扩散函数(Point spread function, PSF)为基础的, 其核心问题是对 PSF 函数参数的估算, 匀速直线运动模糊图像的 PSF 有两个重要参数, 即模糊方向和模糊长度^[2], 得到两参数后可以采用先验模糊辨识法进行图像复原, 因此获得模糊图

收稿日期: 2017-07-21; 修回日期: 2017-11-18.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71361014).

责任编辑: 方勇纯.

作者简介: 胡发焕(1975—), 男, 讲师, 博士生, 从事机器视觉及嵌入式系统的研究; 刘国平(1964—), 男, 教授, 博士, 从事智能机器人与视觉等研究.

†通讯作者. E-mail: hufahuan@163.com

像的PSF参数是模糊图像复原的关键一环。

对于模糊图像复原的方法有很多,专家学者都作了相应的研究. Moghaddam等^[3]采用曲线拟合的方法建立了模糊角度与条纹之间的关系,但涉及的参数多,条件复杂,并且其适用范围较小(一般在 $0^\circ \sim 60^\circ$ 之间); Lokhande等^[4]通过分析模糊图像的频谱特性,采用Hough变换,通过频谱条纹估计模糊运动方向,但因Hough变换的模糊特征不明显且易受到噪声干扰,故得到的模糊方向误差较大且不稳定; Moghaddam等^[5]提出了对模糊图像频谱的明暗条纹识别,利用Radon变换,通过检测中心亮条纹的倾角得到运动模糊图像的运动方向,该方法取得了较好的效果,但在实际应用过程中存在十字亮条纹的干扰,对运动模糊方向的鉴别产生严重影响. 针对十字亮线对运动方向判别的影响,很多学者对Radon变换方法进行了改进. 乐翔等^[6]采用先检测像频谱图像十字亮线的宽度,再利用分块的方法除去十字亮线,这种方法虽取得了一定的效果,但在模糊尺度较小(小于10个像素)和运动方向在 0° 和 90° 附近时,频谱图像的中心亮纹与十字亮线在位置上很接近,使其检测结果误差很大; 王林等^[7]利用PC边沿检测与频谱分块相结合的方法进行模糊方向判别,该方法虽然取得了较好的效果,但存在运算量大的缺点,同时因为该方法是利用频谱图像的中心亮条纹进行方向检测,也存在文献[6]的缺点. 针对利用频谱图像的中心亮条纹检测模糊角度的缺陷,本文采用检测频谱图像的暗条纹,并进行骨架化转变,再通过Radon变换获取运动模糊角度和模糊长度,达到提高检测精度、稳定性和扩大角度检测范围的目标。

1 运动模糊图像频谱特性分析

对于线性位移不变运动模糊图像,退化图像模型可表示为

$$g(x, y) = f(x, y) \oplus h(x, y) + n(x, y). \quad (1)$$

其中: $g(x, y)$ 为退化图像; $f(x, y)$ 为原始图像; $h(x, y)$ 为PSF函数; \oplus 表示二维卷积运算; $n(x, y)$ 为加性噪声,为了便于分析,本文在以下的分析中均假设噪声 $n(x, y) = 0$. 根据卷积定理,当噪声为0时,式(1)的傅立叶变换(即它的频域)为

$$G(u, v) = F(u, v) \cdot H(u, v). \quad (2)$$

其中 $G(u, v)$ 、 $F(u, v)$ 和 $H(u, v)$ 分别为 $g(x, y)$ 、 $f(x, y)$ 和 $h(x, y)$ 的傅里叶变换. 在匀速直线运动造成的图像退化中, PFS可表示为

$$h(x, y) = \begin{cases} 1/L, & 0 \leq x \leq L \cos \theta, 0 \leq y \leq L \sin \theta; \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (3)$$

其中: L 为运动模糊长度^[8], θ 为运动模糊方向,在曝光时间 T 内像素点在 x 和 y 两轴上的位移分别为 a 和 b ,即 $a = L \cos \theta, b = L \sin \theta, \tan \theta = b/a$. 则可得退化图像PSF的傅里叶变换为

$$\begin{aligned} H(u, v) &= \iint h(x, y) e^{-j2\pi(ux+vy)} dx dy = \\ &= \iint \frac{1}{L} e^{-j2\pi(ux+vy)} dx dy = \\ &= \int_0^T e^{-j2\pi[ux(t)+vy(t)]} dt = \\ &= T \frac{\sin(\pi(ua + vb))}{\pi(ua + vb)} e^{-j\pi(ua+vb)}. \end{aligned}$$

因为在实际运算时为二维离散运算,假设图像的大小为 $M \times N$,则有

$$H(u, v) = T \frac{\sin(\pi(ua/N + vb/M))}{\pi(ua/N + vb/M)} e^{-j\pi(\frac{ua}{N} + \frac{vb}{M})}. \quad (4)$$

其中: u 取值范围是 $0 \sim N - 1$, v 取值范围是 $0 \sim M - 1$. 将式(4)代入(2),可得

$$\begin{aligned} |G(u, v)| &= |F(u, v)| \cdot |H(u, v)| = \\ &= |F(u, v)| \cdot \left| T \frac{\sin(\pi(ua/N + vb/M))}{\pi(ua/N + vb/M)} \right|. \end{aligned} \quad (5)$$

由式(5)可知,运动模糊图像的频谱具有辛格函数的性质,根据正弦函数的主要极限 $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin x}{x} = 1$ 可知,在 $ua/N + vb/M = 0$ 时频谱图像取最大值,而当 $ua/N + vb/M = k$ (k 为非0整数)时为最小值0,因此其频谱图像是中心为亮条带,左右两侧是周期性的等距明暗条纹,且明暗条纹为平行的直线,即 $ua/N + vb/M = 0$,设其倾角为 β ,则有

$$\tan \beta = -Ma/Nb. \quad (6)$$

本文的模糊图像取 $M = N$,则 $\tan \beta = -a/b$,而退化图像的模糊运动方向 θ 有 $\tan \theta = b/a$,因此频谱图像明暗条纹的倾角方向 β 与运动模糊方向 θ 的关系为

$$\tan \theta = \tan(\beta - \pi/2), \quad (7)$$

即两者为相互垂直的关系. 由式(7)可知,通过频谱图的明暗条纹倾角可以得到退化图像的模糊方向. 图1为模糊尺度 $L = 20$,运动方向 $\theta = 15^\circ$ 的运动模糊图像和相应的频谱图. 从其频谱图可见中心为亮带,左右两侧为周期性的明暗条纹,倾角为 105° .

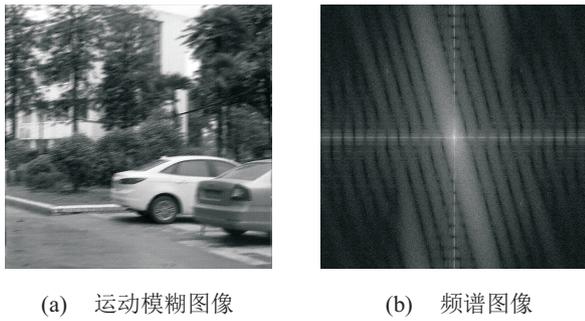


图 1 运动模糊图像及其频谱图

2 匀速直线运动模糊图像参数估计

由式(7)可知,运动模糊图像频谱图的明暗条纹倾角可以反映模糊方向,因此获得频谱图中明暗条纹的倾角 β ,即可以求出运动方向角 θ .要检测明暗条纹 β ,目前的方法主要有 Hough 变换^[9]和 Radon 变换^[10].其中: Hough 变换需要多个候选点进行直线拟合,选择合适的候选点比较困难,有时会错选;而 Radon 变换能够有效地检测图像中的直线角度而无需选择候选点,因此本文采用 Radon 变换检测明暗条纹直线的角度.

2.1 Radon 变换原理和运动方向估计

Radon 变换可以在任意维空间进行^[11],在二维空间中函数 $f(x, y)$ 的 Radon 变换定义为

$$R(\theta, \rho) = \iint_S f(x, y) \delta(\rho - x \cos \theta - y \sin \theta) dx dy. \quad (8)$$

其中: S 为 $f(x, y)$ 所在的区域, θ 为直线的倾角, ρ 为原点到直线的距离, δ 为冲激函数.式(8)表示了函数 $f(x, y)$ 在一条直线上的投影,即 $f(x, y)$ 沿该直线的积分.该直线的方程式为 $\rho = x \cos \theta + y \sin \theta$,它的截距是 $\rho / \sin \theta$,斜率是 $\tan(\theta + \pi/2)$.

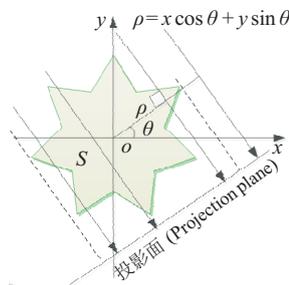


图 2 Radon 变换定义示意图

图 2 直观地表示了 Radon 变换的意义.从图 2 中可以看出,当 θ 一定时, ρ 取不同的值,则可以得到 θ 方向的投影积分;再改变 θ 的值,则可以得到该图像在不同方向的投影积分.当取遍所有的 θ 和 ρ 时,即得到关于 $\theta\rho$ 的二维图像.因此, Radon 变换的意义是把关于 xy 的二维平面图像变换成关于 $\theta\rho$ 的二维平面

图像, $\theta\rho$ 图像上的每一点都对应 xy 图像上的一条直线.因此,在 xy 图像上的高亮度直线就对应 $\theta\rho$ 图像上的一个亮点;反之, xy 图像上的低亮度直线就对应 $\theta\rho$ 图像上的一个暗点; Radon 变换实现了将 xy 平面图像中关于对直线灰度的检测转化成 $\theta\rho$ 平面图像中对点的灰度检测.

对某图像作 $0^\circ \sim 180^\circ$ 的 Radon 变换便得到一个二维矩阵,每列是图像在某个角度 θ 对应不同 ρ 的直线投影值.从图 1(b)的频谱特征图可知,运动模糊图像的频谱图会出现以原点为中心的平行条纹,条纹在中间且最亮,在对应的 Radon 变换域中,相应角度对应点的灰度为最大值,这个角度即为平行条纹的倾角 β ,而 $\beta - \pi/2$ 是运动模糊角度.因此将模糊图像的频谱图进行 Radon 变换后,通过检查中心亮条纹的倾角可以得到模糊图像的运动方向.

2.2 实际运动模糊图像频谱图中的问题及解决方法比较

由图 1(b)的频谱特征图可知,在图中除有倾角为 β 的中心亮条纹外,还有一组位于图像中心的十字亮线,这个亮线的存在使得利用 Radon 变换后,根据最亮线来确定模糊角度时,得到的结果可能会是 0° 或 90° ,显然这个结果是错误的.由式(1)的分析可知,模糊图像是由原始图像 $f(x, y)$ 与核函数 $h(x, y)$ 卷积得到的,若两者是完全卷积,则由理论分析^[12]可得,卷积后的图像比原始图像的宽和高分别增大 $L \cos \theta$ 和 $L \sin \theta$ (L 为模糊长度, θ 为模糊方向).然而,实际的相机成像尺寸是固定的,因此在边缘会形成边缘截距,也就是在边缘附近破坏了原有的卷积关系,使得在经中心化的频谱图像中出现了十字亮线.通过分析十字亮线出现的原因可知,在模糊图像的频谱图中出现十字亮线是不可避免的,且会对模糊方向的检测产生干扰.

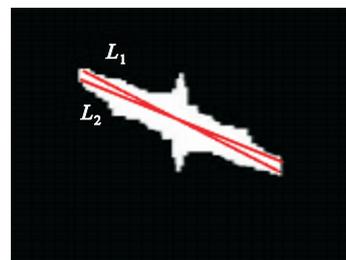


图 3 文献[13]处理结果

针对频谱图像中十字亮线对模糊方向估计的干扰,文献[13]采取了形态学滤波方法,通过腐蚀的方式消除十字亮线后,再通过检测中心亮条纹的倾角来获得模糊方向,这种方法虽然可以消除十字亮线,

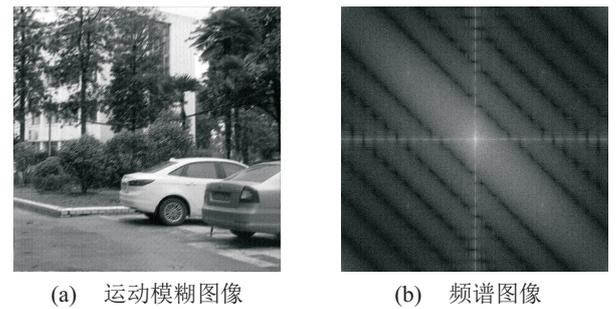
但它存在两个缺陷:1) 模糊长度的限制,当模糊图像的边缘截距较明显时,十字亮线会更宽,用这种方法就难以消除十字亮线;2) 检查误差较大. 图3为文献[13]方法得到的结果,它通过中心亮条纹的倾角获得模糊角度,但因亮条纹较宽,图3中的 L_1 和 L_2 均满足亮度检测条件,显然 L_1 与 L_2 的倾角不同,因此用这种方法得到的误差较大. 文献[6]采取了频谱分块方法先获得十字亮线的宽度,再取频谱图像的1/4块或1/16块并除去十字亮线作为检测区域,这样用于检测的区域没有十字亮线,然后在检测区域利用Radon变换获取最亮条纹的倾角来估计运动角度. 这种方法虽然避开了十字亮线的干扰,但也有两个缺陷:1) 当运动角度在 0° 或 90° 附近时,代表模糊方向的中心亮条纹与十字亮线位置上非常接近,两者很难区分,使得运动角度接近 0° 或 90° 时,误差较大;2) 与文献[13]一样,因为中心亮条纹较宽,故得到的角度误差较大. 因此,通过除去十字亮线再检测中心亮条纹倾角的方法,在检测角度范围和检测误差两方面具有其局限性.

2.3 改进的运动模糊方向估计

通过Radon变换获取运动模糊方向,传统的方法是通过检测模糊频谱图像的中心亮条纹倾角来获得模糊方向,虽然可以通过多种方法避开十字亮线的干扰,但存在角度检测范围限制和误差较大等缺陷. 为了克服上述方法的缺陷,本文利用频谱图像中暗条纹比亮条纹窄,同时明暗条纹又是平行排列的特点,采用不检测中心亮条纹,而通过检测暗条纹的倾角获得模糊方向的方法,以避免十字亮线干扰造成检测角度范围限制的缺陷;将处理后的图像进行骨架化处理,再进行Radon变换获得运动模糊方向,以克服检测误差加大的缺陷.

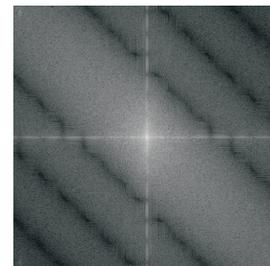
图4(a)是大小为 1024×1024 ,模糊尺度 $L = 10$,模糊角度 $\theta = 45^\circ$ 的模糊图像,图4(b)为其频谱图像. 从频谱图可以明显地看出,对于有干扰的十字亮线和代表运动方向的明暗相间条纹,亮条纹宽度远大于暗条纹的宽度且亮条纹和暗条纹是平行的,因此本文采用检测暗条纹的倾角来获得运动模糊方向. 其具体方法如下:

1) 将频谱图像分块. 按图5的方式选取频谱图像的中央块 A_1 为检测图像,从频谱图可以得出,明暗条纹的对比度在图像的中央部分大,靠近边沿的区域小,因此,选取中央区域为检测图像块,不仅加大了检测的稳定性,而且计算量只有原来的1/4. 图4(b)频谱图像分块后的中央检测图像见图4(c).



(a) 运动模糊图像

(b) 频谱图像



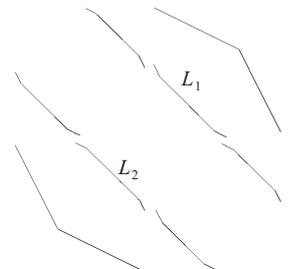
(c) 分块后的检测图像



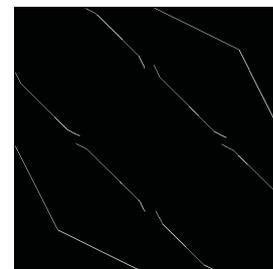
(d) 二值检测图像



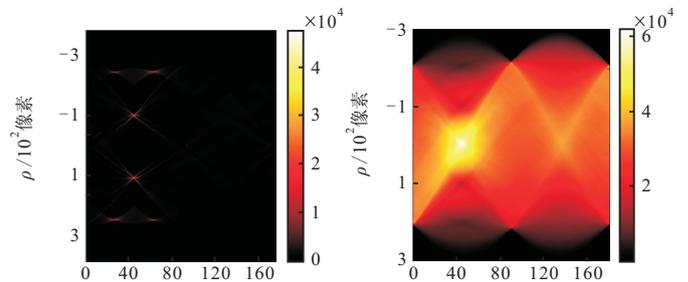
(e) 处理后的二值图像



(f) 骨架化后图像



(g) 反色处理后的图像



(h) Radon 变换后图像

(i) 亮条纹 Radon 变换图

图4 运动模糊图像及变换

2) 将分块后的图像进行灰度形态学闭运算处理,即先进行灰度形态学膨胀,然后再进行腐灰度形态学蚀处理. 进行灰度形态学闭运算处理的作用是使对比度增大,以便于后续处理.

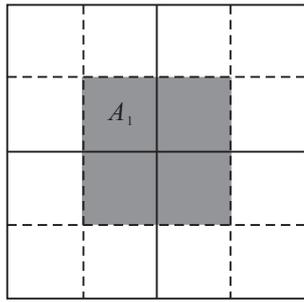


图 5 频谱图像分块

3) 转换成二值图像, 并进行二值形态学处理. 对灰度形态学闭运算处理后的检测图像进行自适应灰度阈值变换, 将灰度图像转变成二值图像, 转换后的二值图像见图 4(d). 从图 4(d) 中可以看出, 得到的二值图像有两条暗条纹, 但边缘有毛刺, 同时在左下角和右上角的黑块中有白色点, 即整个图像有明显的干扰噪声点. 为消除二值图像的噪声干扰点, 将二值图像进行二值形态学开运算处理, 处理后的图像见图 4(e), 它去除了原来图像的毛刺和干扰点, 中间的两条暗条纹很清晰地反映了运动模糊方向, 但它的宽度较宽, 若进行 Radon 变换可以获得运动模糊方向, 但是同样存在如文献 [6] 和文献 [13] 一样误差大的缺陷.

4) 骨架化变换. 为了克服因检测条纹偏宽导致模糊方向检测误差偏大的缺陷, 需对图 4(e) 的二值图像进行骨架化变换, 骨架化变换用于描述物体的几何形状和拓扑结构, 是一个重要的图像描绘算子^[14-15]. 对感兴趣的目标进行目标骨架化有助于突出目标的形状特点, 并减少冗余信息量. 本文通过骨架化变换可以减少黑条纹的宽度, 同时又保留了其倾角信息. 其基本原理是: 当黑色面积较大时, 通过从边缘开始对黑色部分进行细化, 用一条线代替一个面, 达到保留目标形状信息, 同时删除冗余信息的目的. 骨架化变换的步骤如下:

i) 参数设置. 设在一个 3×3 的区域内, 中心点像素为 P_c , 以其正上方像素点为起点, 依次为 P_1, P_2, \dots, P_8 , 具体位置见图 6. 当区域内的某二值像素点为黑色时, 用 0 表示; 当其为白色时, 用 1 表示. 若 $P_4 = 0$, 则第 4 个像素点表示为黑色. $NZ(P_c)$ 表示 P_c 的 8 个邻域像素中值为 0 的像素个数, $Z0(P_x)$ 表示以 P_x 为中心点, 邻域像素按逆时针方向旋转时, 像素值由 1 变为 0 的变化次数.

ii) 在 3×3 的区域内, 如果 $P_c = 0$, 且满足下列 4 个条件, 则可以删除 P_c 点, 即

- a) $2 \leq NZ(P_c) \leq 6$;
- b) $Z0(P_c) = 1$;
- c) $P_1 + P_3 + P_7 \geq 1$ 或 $Z0(P_1) \neq 1$;

d) $P_1 + P_3 + P_5 \geq 1$ 或 $Z0(P_3) \neq 1$.

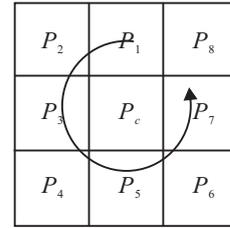


图 6 骨架化描绘算子

iii) 通过步骤 ii) 实现了二值图像的骨架化变换, 骨架化变换后再进行态度开运算, 以去除骨架图形边缘的毛刺, 除去毛刺后的图像见图 4(f). 由图 4(f) 可知, 骨架化后的图像由 6 条暗线组成, 其中 L_1 和 L_2 为原图像中心的两条暗条纹, 它们的倾角反映了运动模糊方向, 且其线条宽度是一个像素.

5) Radon 变换和运动模糊方向检测. 由图 4(f) 可知, 暗线通过 Radon 变换后能反应运动模糊方向, 但 Radon 变换容易检测亮线的方向, 所以将图 4(f) 的二值图像进行反色处理, 得到图 4(g), 线条变成了白色, 背景则变为黑色. 最后将图 4(g) 进行 Radon 变换, Radon 变换后的图像见图 4(h). 从图 4(h) 可以很明显的看出, 有 6 个红色亮点, 分别对应骨架化变换后的 6 条直线, 其中位于图像中部, 即距离 ρ 最小的两个点是对应图 4(f) 的 L_1 和 L_2 , 它们对应的角度均为 45° . 因此 Radon 变换后距离 ρ 最小的两个检测点是有效检测点, 这个点对应角度的均值为模糊方向值.

为进行比较, 图 4(i) 为采用文献 [13] 的检测中心亮条纹方法的效果, 与采用本文方法的图 4(h) 比较可以看出, 图 4(i) 中的最亮部分面积明显偏大, 其对应的角度约在 $43^\circ \sim 47^\circ$ 之间, 难以精确检测, 且只有 1 个检测点, 使检测误差偏大; 而采用本文方法的图 4(h) 的检测点面积很小, 可以精确检测对应的角度, 且有两个检测点, 通过对两个点求平均值可以减小误差, 使检测精确度和稳定度更高, 因此本文的优点很明显.

2.4 运动模糊长度估计

得到模糊方向后, 由式 (5) 可知, 当 $ua/N + vb/M = k$ (k 为非 0 整数) 时为最小值, 得到暗条纹, 将频谱图像反向旋转模糊角度后, 使频谱图像的暗条纹与水平方向垂直, 求解 $H(u) = 0$ 可以得到模糊长度, 具体算法为

$$L = N/d. \tag{9}$$

其中: L 为模糊长度, d 为频谱图像暗条纹间的距离, N 为频谱图像宽度, 它们的单位均为像素个数. 本文的 d 是通过求频谱图像骨架化后的两条中心暗条纹

间的距离(即 $k = \pm 1$ 时两暗条纹的距离)得到的运动模糊长度,此时两暗条纹的距离为 $2d$,骨架化后暗条纹宽度是一个像素,因此提高了模糊长度的检测精度.由此可见,模糊长度的估计是建立在模糊方向的基础上,因此模糊方向的精确估算很关键,它的结果会影响模糊长度的估算.

3 实验结果与分析

为测试本文算法的效果,选择图4(a)为测试图像,运动模糊角度从 $0^\circ \sim 180^\circ$ 每 15° 取一个测试角度,模糊长度 L 分别设为 10、20 和 30,并将本文方法与文献[13]采用的检测中心亮条纹方法进行比较.实验具体步骤见图7.

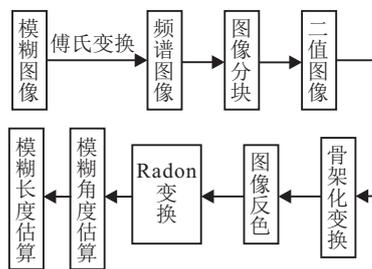


图7 实验步骤框图

全部实验结果见表1和表2,两种算法结果的比较见表3.

表1 图4(a)运动模糊图像的模糊角度检测结果

实际角度	$L = 10$	$L = 20$	$L = 30$
	本文/亮纹	本文/亮纹	本文/亮纹
0°	179.8/186	179.9/187	180/187
15°	14.9/18	15.1/13	15/13
30°	30.2/33	30/28	30/31
45°	45/43	45/46	45/46
60°	60.2/58	60/62	60/61
75°	74.8/78	75/73	75/74
90°	89.7/86	90.1/93	90/93
105°	104.8/108	104.8/103	105/103
120°	120.1/118	120/122	120/121
135°	134.8/133	135/136	135/136
150°	150.2/147	150/152	150/151
165°	164.7/168	165/163	165/164

表2 图4(a)运动模糊图像的模糊长度检测结果

实际角度	$L = 10$	$L = 20$	$L = 30$
	本文/亮纹	本文/亮纹	本文/亮纹
0°	9.8/6.9	20.2/17.5	30/27.9
15°	10.2/7.2	20.1/17.7	30/13
30°	10.2/13	20.2/28	30/31.9
45°	9.9/12.1	20/21.5	30/30.9
60°	10.2/7.5	20.2/17.9	30/28.5
75°	10.3/7.4	20.2/7.6	30/32
90°	9.8/6.8	20.1/22.2	30.1/27.9
105°	10.2/12.7	20.1/22.2	30/28.2
120°	9.8/7.6	19.9/17.9	30/28.8
135°	9.8/8.2	20/18.4	30/31
150°	10.2/7.8	20/18.1	30/31.5
165°	9.7/7.2	19.8/18.8	30/28.4

表3 两种算法效果的比较

	模糊角度误差/($^\circ$)		模糊长度误差/像素	
	平均误差	最大误差	平均误差	最大误差
本文	± 0.13	± 0.2	± 0.2	± 0.3
亮纹	± 2.1	± 4	± 2.3	± 2.8

表1和表2中的“本文/亮纹”分别表示本文采用的方法和检测中心亮纹的方法.从实验结果可以得出,中心亮纹方法的角度平均误差达 $\pm 2.1^\circ$,长度平均误差达 ± 2.3 ;当模糊长度较小($L = 10$)时,频谱图像的中心条纹变宽,使得检测误差偏大,尤其模糊角度在 0° (15° 、 165°) 和 90° (57° 、 105°) 附近时误差更明显,最大角度误差达 $\pm 4^\circ$,长度误差为 ± 2.8 .这是采用检测中心亮条纹的方式,当模糊角度在 0° 和 90° 附近时,十字亮线对中心亮纹检测会产生更大干扰,因此检测误差进一步扩大.而本文的角度平均误差为 $\pm 0.13^\circ$,最大误差为 $\pm 0.2^\circ$,模糊长度平均误差为 ± 0.2 ,最大也为 ± 0.3 ,明显小于中心亮纹方法.这是因为本文采用检测暗条纹的方法,中心亮条纹和十字亮线对它没有影响,因此检测的稳定性优于中心亮纹方法;同时,本文对暗线进行骨架化变换,将暗线细化,使模糊角度和长度的检测精度得到极大地提高,图8(a)和图8(b)分别为模糊长度 $L = 10$,模糊角度为 0° 和 90° 时骨架化后的图像.从图8可以看出,在模糊角度为 0° 和 90° 时,本文的效果不会受到影响,且本文是检测多条暗线的倾角,通过它们的平均值获得最终的模糊方向,使检测的结果得到进一步提高,同时检测的稳定性也得到提高.表2的模糊长度检测结果表明,模糊长度的检测结果受模糊角度结果的影响很大,在模糊长度较小和模糊角度在 0° 和 90° 附近时,本文的优势更明显.因此,从实验结果可以得出,本文算法的检测精度和稳定性均优于检测中心亮纹的方法.

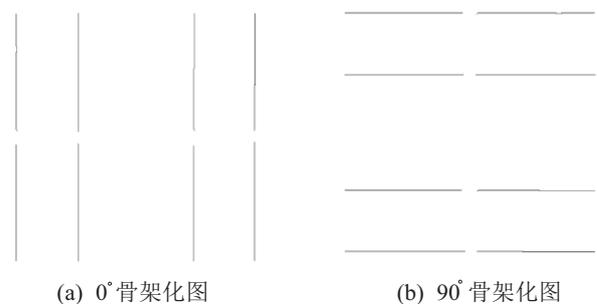


图8 模糊角度为 0° 和 90° 的骨架化图像

4 结论

运动模糊参数的估计是运动模糊图像复原的重要步骤.本文研究了通过分析检测频谱图像中心亮条纹的倾角获得运动模糊角度方法的缺陷,根据频

谱图像的特点,提出了检测频谱图像的暗条纹倾角获得运动模糊角度的方法,避免了十字亮线的干扰,扩大了角度检测范围,在 0° 和 90° 时其检测效果不受影响;为提高检测精度,在获得频谱图像暗条纹的二值图像后,经过骨架化变换后再进行Radon变换,使检测精度和稳定度比采用检测中心亮条纹的方法有很大的提高;在获得运动模糊角度后,将频谱图像反转模糊角度,获得运动模糊长度,因模糊长度的检测依赖于模糊角度的结果,本文获得的运动模糊角度和模糊长度比传统检测方法在检测的精度、检测的稳定性和检测范围上均有很大提高。

参考文献(References)

- [1] 段江永, 孟高峰, 向世明, 等. 边缘区域约束引导的运动模糊图像复原[J]. 计算机辅助设计与图形图像学报, 2012, 24(8): 1038-1046.
(Duan J Y, Meng G F, Xiang S M, et al. Restoring motion blurred images based on edge region constraints[J]. J of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2012, 24(8): 1038-1046.)
- [2] 郭红伟, 付波, 田益民. 实拍运动模糊图像的退化参数估计与复原[J]. 激光与红外, 2013, 43(5): 559-564.
(Guo H W, Fu B, Tian Y M. Deterioration parameter estimation and restoration of photographic motion-blurred image[J]. Laser & Infrared, 2013, 43(5): 559-564.)
- [3] Moghaddam M E, Jamzad M. Finding point spread function of motion blur using radon transform and modeling the motion length[C]. The 4th IEEE Int Symposium on Signal Processing and Information Technology. Rome: IEEE, 2004: 314-317.
- [4] Lokhande R, Arya K V, Gupta P. Identification of parameters and restoration of motion blurred image[C]. Proc of the 2006 ACM Symposium on Applied Computing. Dijon: Association for Computing Machinery, 2006: 130-135.
- [5] Moghaddam M E, Jamzad M, Mahini H R. Motion blur identification in noisy image using feed-forward back propagation neural network[C]. Lecture Note in Computer Science. Xi'an: Springer, 2006: 369-376.
- [6] 乐翔, 程建, 李民. 一种改进的基于Radon变换的运动模糊图像参数估计方法[J]. 红外与激光工程, 2011, 5(5): 963-969.
(Le X, Cheng J, Li M. Improved approach to motion blur identification based on Radon transform[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 5(5): 963-969.)
- [7] 王琳, 师雪艳, 张少辉, 等. 基于Radon变换的遥感图像运动模糊参数精确估计[J]. 计算机应用研究, 2015, 32(12): 3798-3809.
(Wang L, Shi X Y, Zhang S H, et al. Accurate estimation of remote sensing image motion blur parameters based on Radon transform[J]. Application Research of Computers, 2015, 32(12): 3798-3809.)
- [8] 李海森, 张艳宁, 姚睿, 等. 基于主成分分析的直线运动模糊参数估计[J]. 光学精密工程, 2013, 21(10): 2656-2663.
(Li H S, Zhang Y N, Yao R, et al. Parameter estimation of liner motion blur based on principal component analysis[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(10): 2656-2663.)
- [9] Moghaddam M E, Jamzad M. Motion blur identification in noisy image using mathematical model and statistical measures[J]. Pattern Recogniti, 2007, 40(7): 1946-1957.
- [10] 廖永忠, 蔡自兴, 何湘华. 基于Radon变换的运动模糊图像恢复[J]. 计算机应用, 2014, 34(7): 2005-2009.
(Lao Y Z, Cai Z X, He X H. Motion blurred image blind restoration based on Radon transform[J]. J of Computer Applications, 2014, 34(7): 2005-2009.)
- [11] 宋瑞霞, 王俊, 王小春, 等. V-系统与Radon变换相结合的纹理分类算法[J]. 计算机辅助设计与图形图像学报, 2015, 27(5): 907-914.
(Song R X, Wang J, Wang X C, et al. Novel algorithm for image texture classification combined the V-system with radon transform[J]. J of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2015, 27(5): 907-914.)
- [12] 加春燕, 崔丽. 基于频谱边缘检测和Radon变换估计运动模糊图像的方向[J]. 图学学报, 2016, 37(3): 434-438.
(Jia C Y, Cui L. Direction estimation of motion blurred images based on edge detection of spectrum and radon transform[J]. J of Graphics, 2016, 37(3): 434-438.)
- [13] 胡硕, 张旭光, 吴娜. 基于Radon变换的运动模糊方向估计的改进方法[J]. 高技术通讯, 2015, 25(8/9): 822-828.
(Hu S, Zhang X G, Wu N. Improved direction estimation of motion blurred images based on radon transform[J]. Chinese High Technology Letters, 2015, 25(8/9): 822-828.)
- [14] 刘超, 穆平安, 戴曙光. 基于颗粒分析和骨架化的车道线检测方法[J]. 计算机应用与软件, 2014, 31(4): 320-323.
(Liu C, Mu P A, Dai S G. Lane detection method based on particle analysis and skeletonisation[J]. Computer Applications and Software, 2014, 31(4): 320-323.)
- [15] Beristain A, Grana M. Pruning algorithm for voronoi skeletons[J]. Electronics Letters, 2010, 46(1): 39-41.