

基于矢量加权线检测算子的虹膜环状线条检测^{*}

苑玮琦¹, 张 波^{1,2}, 常 乐¹, 刘笑楠¹

(1. 沈阳工业大学视觉检测技术研究所 沈阳 110870; 2. 沈阳化工大学计算机科学与技术学院 沈阳 110142)

摘 要:由于虹膜环状线条与背景相比信号强度比较弱,且背景图像纹理异常丰富,环状线条灰度不完全连续,在灰度图像上直接用边缘检测算子进行虹膜环状线条检测时,会丢失很多有效信息,误检率及漏检率较高,为了解决这个问题,在对虹膜环状线条特征进行分析的基础上,设计了一种适用于虹膜环状线条检测的矢量加权线检测算子。首先由于环状线条在虹膜上的位置比较固定,选取虹膜环状区域左右两部分区域作为感兴趣区域;其次,设计矢量加权线检测算子,依据优势信号出现在不同通道的随机性自适应的进行加权,由此将矢量图像转变为边缘信息最为突出的单通道图像,再根据环状线条的线特征分布特点设计线检测矩阵,对预处理后的感兴趣(ROI)区域进行检测;最后在二值化图像上根据环状线条的形状设计区域形状因子排除非环状线条,实现环状线条的检测。该方法在图库中人工标定的1921条环状线条的检测正确检出率达到91.78%。实验结果表明,本方法与经典的边缘检测算子相比,更适用于虹膜环状线条的检测。

关键词:虹膜环状线条;矢量图像;线检测;区域形状因子

中图分类号: TP391.41 TH786 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Iris annular line detection based on vector weighted detection operator

Yuan Weiqi¹, Zhang Bo^{1,2}, Chang Le¹, Liu Xiaonan¹

(1. Visual Inspection Institute, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;

2. School of Computer Science and Technology, Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang 110142, China)

Abstract: Iris annular line detection in the gray image directly with the edge detection operator will lost a lot of useful information, and false rate and missing rate is high, due to the signal intensity of iris annular line is weak compared with the background and the background image texture is very rich and the gray value of the annular line is not completely continuous. Thus, an iris annular line detection method is presented in this paper on the basis of analyzing the features of the iris annular lines. Firstly, the two part of the annular areas are selected as the region of interest due to the annular line position is fixed in the iris image; Secondly, the vector weighted line detection operator is designed to transform the random nature of the dominant signal into the adaptive weighted value, and the vector image is transformed into the single channel image with the most prominent edge information. Afterwards, the line detection matrix is designed to detect ROI according to the line characteristic distribution of annular line. Finally, non-annular lines are eliminated by shape factors of the binary images and the annular lines are detected. The method is used to detect 1921 lines that were artificially marked in our gallery, and the detection accuracy is up to 91.78%. The experimental results show the proposed method is suitable for detecting the iris annular lines from the visible iris images compared classic edge operators.

Keywords: iris annular line; vector image; line detection; region shape factor

1 引 言

虹膜作为常见的生物特征识别特征之一,对于虹膜

纹理特征提取是核心所在,目前已经提出了很多种方法^[1-7],其中,作为虹膜纹理特征提取的一个新思路,提取虹膜纹理中特定形状的纹理,近年来已经有一些学者致力于这方面的研究,通过对特定形状纹理的检测,可以作

为生物特征识别的参数、可以辅助评价人体健康状况,还可以作为物证辨识的特征。虹膜特定形状的纹理主要指的是以下4类:坑洞、色素斑、裂缝、环状线条,坑洞与色素斑被称为块状纹理,裂缝与环状线条被称为线状纹理^[8]。

目前对于这类纹理特征的提取,主要有以下几类:1) 针对于整个块状纹理的提取^[8-10]:如文献[8]提出的基于离散余弦变换得到支持向量机(support vector machine, SVM)的训练参数,然后利用边缘形状因子确定块状纹理边缘来判断是否存在块状纹理,文献[9]提出的基于组合窗口的方法以及文献[10]提出的基于分支限界(branch and bound, BAB)策略与SVM的方法;2) 针对具体的坑洞与色素斑的提取^[11-12],文献[11]提出的基于线性模板和模糊规则的方法实现了对坑洞的提取,文献[12]提出的基于双线性模板和分块策略的方法实现了对色素斑的提取;3) 针对于线状纹理,即虹膜裂缝的提取^[13],文献[13]提出了基于灰度差分与脊线检测算子的方法。另外,还有学者将虹膜宏观纹理检测的方法做了具体的应用^[14-18]。

而对于环状线条的提取,主要有申波提出的基于Canny算子及曲率的方法^[19]以及何莹提出的基于Canny算子与共线几何(conformal geometric algebra, CGA)的方法^[20]。上述两种方法都是先定位虹膜区域,进行灰度化,然后采用Canny算子进行边缘检测,得到包含有环状线条在内的多种边缘特征,再依据各自的识别方法在检测出来的边缘内依据环状线条的形状进行识别。文献[19]的方法是依据线条与虹膜外边缘的同心性计算曲率识别的,而文献[20]的方法是在归一化展开图像上采用CGA的方法找到水平共线的点,识别环状线条,这是因为在归一化展开图像上,环状线条呈水平方向分布。然而,现有的方法存在如下问题:1) 在预处理方面,两位学者均是采用先定位虹膜内外边缘再归一化展开成矩形这种方法。整个虹膜区域纹理异常丰富,不单单包含有虹膜自身的纹理,还包含有由于虹膜内外边缘以圆为近似方法定位而带来的眼睑、睫毛、光斑等干扰,这些纹理及干扰因素都会作为边缘在Canny算子检测后检测出来,这些边缘与环状线条均具备同样的形状特征,较难在备选边缘中识别环状线条,另一方面由于把环状区域展开成矩形区域时采用了插值方法,环状线条大多位于靠近虹膜外边缘处,会减少环状线条的信号能量,不利于环状线条的检测。2) 由于检测方法采用的是灰度图像的边缘检测方法,在由彩色图像向灰度图像转换的过程中会丢失一部分信息。由于彩色图像灰度化是使用固定的三分量加权值得到的,而环状线条信号

强度的优势性并不出现在固定的通道中,在灰度化图像的过程中,会把信号强度贡献较大的分量削弱,信号强度进一步降低。3) 检测的效果依赖边缘检测算子的性能。由于环状线条具备一定的宽度,属于脊线边缘,而Canny算子比较适合阶跃边缘的检测,则在有的虹膜环状线条区域会检出双边缘,另外,Canny算子为无方向算子,但在感兴趣区域(region of interest, ROI)图像上,环状线条表现出一定的方向性,由于背景区域灰度分布不均,所以Canny算子检测后的边缘异常丰富,较难判断出环状线条的边界点。

基于上述原因,本文提出了一种新的在定位虹膜环状线条检测的感兴趣区域的基础上使用矢量加权线检测算子进行环状线条检测的检测方法。首先,由于环状线条生理特性决定的在虹膜图像上出现的位置相对固定,选取包含有环状线条的目标检测区域,在选取感兴趣区域时,尽可能的去除掉干扰项;其次,设计合适的矢量加权线检测算子对环状线条感兴趣区域进行检测,在各分量加权时,自适应的加大信号强度最优的那个通道的权值,使得得到边缘信息最为突出的单通道图像;最后,根据提取出来的边缘进行识别,依据环状线条的长度形状等特征定义形状因子筛选符合要求的边缘,去掉不符合标准的边缘,检测出环状线条。

2 虹膜图像预处理

2.1 虹膜图像的获取

本文方法是建立在可见光彩色虹膜图像上的,图像的获取是通过手持式HM9918虹膜仪,在人眼自然张开的情况下采用可见光光源采集的。图像的分辨率为800×600,采集的图像库中包含各种特征的彩色虹膜图像。如图1(a)所示为采集图像的设备,图1(b)所示为图像库中的存在环状线条的虹膜图像,箭头所示为两条环状线条。



(a) 采集图像的虹膜仪
(a) Capturing image instrument

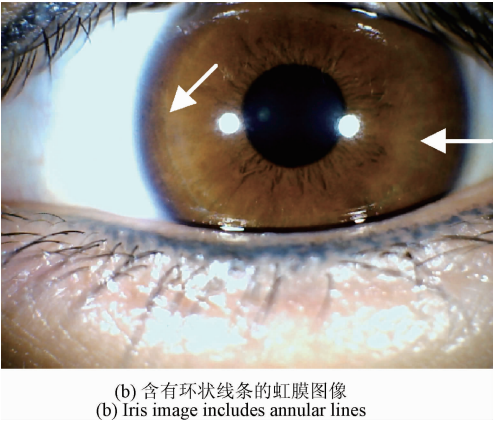


图 1 图库中的虹膜图像
Fig. 1 The iris images in the image lib

2.2 虹膜环状线条 ROI 区域定位

由于图库中的图像是在人眼自然张开状态下采集的,上下眼睑会对部分虹膜遮挡,如图 1(b)所示。由于其生理特性,虹膜环状线条的位置均出现在卷缩轮外,靠近虹膜外边缘区域的虹膜环状区域上,与虹膜内外边缘大致上呈现同心环状,虹膜图像中如果存在环状线条,则环状线条必出现如图 2(a)所示区域。所以选取包含有环状线条特征的感兴趣区域 (ROI) 的位置如图 2(a)所示。即在卷缩轮外与接近虹膜外边缘之间的虹膜区域内对称选取的以 3 点及 9 点方向为中心的左右矩形区域。

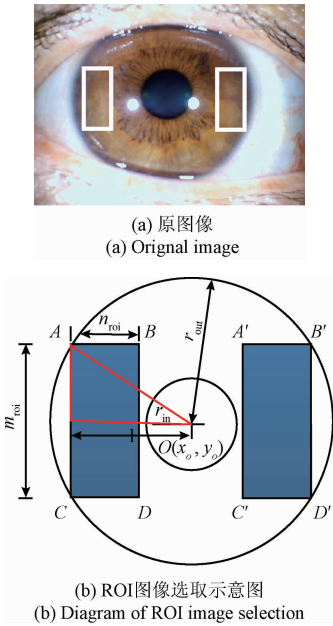


图 2 虹膜图像预处理
Fig. 2 Preprocessing of iris image

具体方法如下:首先设瞳孔圆心坐标 $o(x_o, y_o)$, 虹膜外边缘到瞳孔圆心的半径为 r_{out} , ROI 区域尺寸为

$m_{roi} \times n_{roi}$, 左 ROI 区域的 4 个顶点为 A, B, C, D , 且 A, C 两点为虹膜外边缘上的点, 右 ROI 区域的选取方法与左 ROI 区域以瞳孔圆心为对称选取, 4 个顶点为 A', B', C', D' , 下面以左 ROI 为例, 阐述选取方法, 即找到 A, B, C, D 四点的坐标。设 A, B, C, D 各点坐标为 $A(x_a, y_a), B(x_b, y_b), C(x_c, y_c), D(x_d, y_d)$, 各参数说明如图 2(b)所示。则 A, B, C, D 点坐标按式 (1) ~ (4) 得到。

$$x_a = x_c = x_o - \sqrt{r_{out}^2 - (m_{roi}/2)^2} \quad (1)$$

$$x_b = x_d = x_a + n_{roi} \quad (2)$$

$$y_a = y_b = y_o - m_{roi}/2 \quad (3)$$

$$y_c = y_d = y_o + m_{roi}/2 \quad (4)$$

式中: x_o, y_o, r_{out} 通过文献 [19] 的方法得到, 下面需要确定 m_{roi} 以及 n_{roi} 的值, 即 ROI 区域尺寸的确定。

ROI 尺寸的选取不能过大也不能过小, 过大会造成包含在 ROI 内的干扰因素过多, 误检率升高; 而如果过小, 会造成环状线条的丢失, 造成漏检。理想的 ROI 区域尺寸是包含且仅包含有环状线条区域。由于图库中的图像尺寸是固定的, 为 800×600 , 通过对图库中大量图像的测定, 瞳孔半径大约在 60 个像素, 虹膜外边缘半径大约为 260 个像素, 则虹膜环状区域的半径大约在 200 个像素, 以左 ROI 为例, 最左边的环状线条距离虹膜外边缘最小的距离最小为 10 个像素, 最右边的环状线条距离虹膜外边缘最左端最大情况下为 90 个像素, 所以选取的 ROI 区域宽度为 80, 即 $n_{roi} = 80$ 。而 ROI 区域的长度, 即 m_{roi} 的值也不是越大越好, 应满足 $r_{out} - \sqrt{r_{out}^2 - (m_{roi}/2)^2} < 10$, 即 ROI 区域尺寸的最左边界距离虹膜外边缘应该小于 10 个像素, 如果 m_{roi} 值过大, 则左 ROI 区域的左边界距离虹膜外边缘过远, 会造成在这一位置的环状线条的漏检, 经过实验验证, 选取 $m_{roi} = 128$ 。于是 ROI 区域的尺寸的确定为 128×80 。对图库中的选取的 ROI 区域尺寸进行本文算法的实验验证, 能够保证不漏检, 且误检率最低。根据上述方法得到的 ROI 图像如图 3 所示。

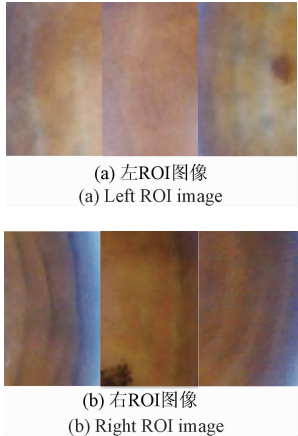


图 3 采用上述方法定位后的部分 ROI 区域图像
Fig. 3 Parts of the iris images used above method

3 基于矢量加权线检测算子的虹膜环状线条检测方法

3.1 环状线条特征分析

环状线条在虹膜中表现为环绕瞳孔呈同心圆的凹沟,颜色深浅不一,但多为浅白色,其数目不确定,呈连续的或非连续的环形,边缘有的清晰有的不清晰。如图4所示。矩形框内即为环状线条,将其放大可见环状线条如图4(b)所示,箭头所示为两条环状线条。通过对图库中大量样本的测量,对其特征描述如下:1)具备一定的宽度和长度,宽度在4~11个像素之间,长度不定,有的连续有的不连续;2)位置分布在虹膜卷缩轮外出现在近巩膜的区域,由于人眼自然张开状态,大部出现在虹膜左右环状区域;3)形状大致上呈与虹膜内外边缘同心环形线状分布,但不是完全规则的环形线,在预处理后的图上近似于垂直方向;4)边缘有的清晰,有的不清晰,并且灰度分布在环状线条中心部位达到极值。

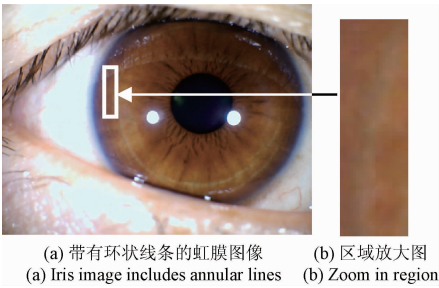


图4 虹膜环状线条及放大区域

Fig. 4 Iris images including annular lines and zoom in region

在整个虹膜图像上,环状线条与周围背景区域的灰度差并不大,信号强度较弱,容易淹没在背景中,以图4(a)为例,在整幅图像上的环状线条灰度分布如图5所示。由图5可知,与这些背景相比,在整幅虹膜图像上环状线条信号强度非常不明显。

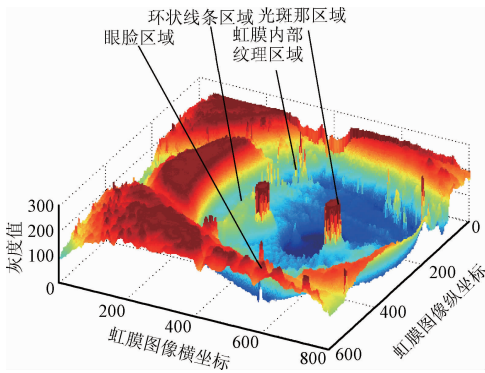
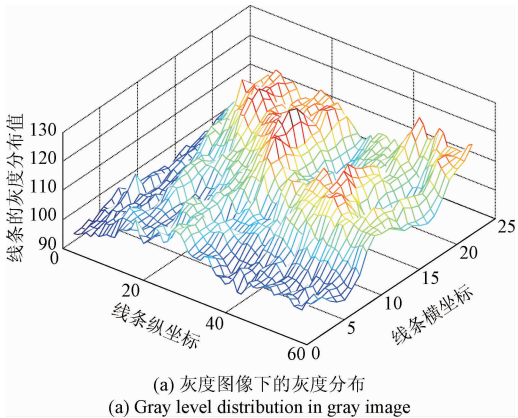


图5 虹膜图像灰度分布三维图

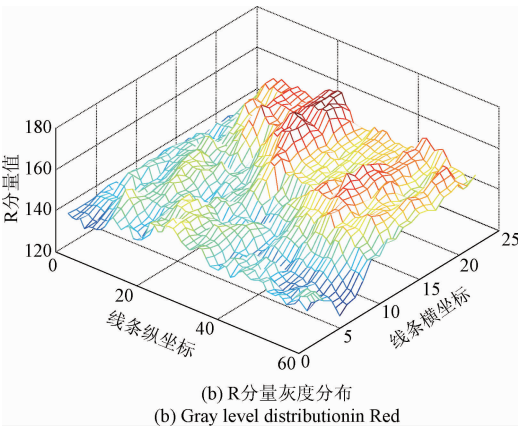
Fig. 5 Three dimensional gray distribution of iris image

对单条环状线条进行分析可知,环状线条颜色上比背景区域浅,通过环状线条对各颜色空间上的表现,发现环状线条在RGB空间上各颜色分量环状线条区域灰度值高于背景区域,但极值出现在哪个分量上不固定,如图6所示。图6(a)为灰度图像下环状线条灰度分布三维图,图6(b)~(d)分别为R、G、B分量下分布图,可见在灰度图像上线条的分布没有在B分量分布下明显。但通过对图库中大量样本的观测,环状线条尽管宽度与灰度变化不同,但在截面上分布符合高斯分布的特点,但这种在分量下的优势出现在哪个通道具备随机性。



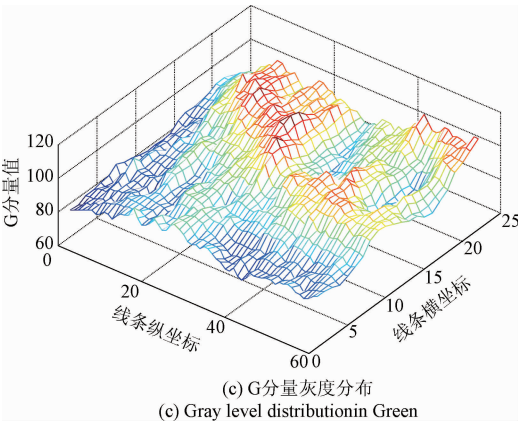
(a) 灰度图像下的灰度分布

(a) Gray level distribution in gray image



(b) R分量灰度分布

(b) Gray level distribution in Red



(c) G分量灰度分布

(c) Gray level distribution in Green

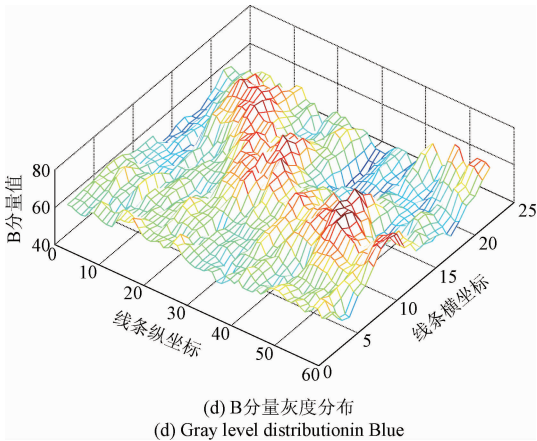


图 6 图 4(b)在灰度及各分量图像上灰度分布三维图
Fig. 6 Three dimensional gray distribution of iris annular line image in gray and RGB components of Fig. 4(b)

虹膜环状线条在宏观区域具备连续的线性的特点,在 y 方向上截取图 4(b)的几个截面,进行灰度分析,结果如图 7 所示。

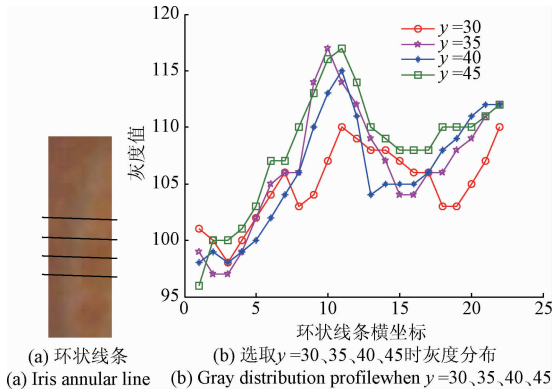


图 7 环状线条在不同截面上的灰度分布剖面图
Fig. 7 Gray distribution profile of annular lines on different cross sections

图 7(a)所示为随机选取的一条环状线条,在 y 方向上每隔 5 个像素对其截面方向,即图中所示横线所示方向做灰度分布分析,结果如图 7(b)所示,灰度变化最剧烈的地方均位于横坐标为 5~12 的地方,在 y 方向上呈现连续的线性的特征。总之,环状线条的灰度分布在 y 方向上一定的剖面上符合高斯分布的脊线特征,而本身在 y 方向上整体又呈现线状特征,适用于线检测的特征。

根据上文分析,在矢量空间环状线条均具备脊线分布特点,但是最小的响应值却出现在不同的通道中。这种所在通道的随机性会对环状线条检测的准确性造成影响,将矢量图像进行灰度化再进行线检测,会丢失许多有用信息,因此,本文在矢量图像中实现对环状线条的检测。

3.2 矢量加权线检测算子

经典的边缘检测算子已经提出了很多,但是在一些实际应用中,对于特定目标的分析,设计适用于显著特征的算子也是必要的。由此定义如下的矢量加权线检测算子。该算子由两部分构成:1)需要自适应的求出矢量图像的各分量加权值得到单通道图像;2)需要设计专门用来检测线的线检测算子。

3.2.1 自适应加权转换得到单通道图像

传统的将 RGB 彩色图像转换为灰度图像的过程中,各分量的系数为 0.299(R)、0.587(G)以及 0.114(B),而灰度值的大小即为 $Red \times 0.299 + Green \times 0.587 + Blue \times 0.114$,即各分量 n_1, n_2, n_3 加权值为 0.299、0.587 以及 0.114。而在实际图像中,由于环状线条的信号优势出现在哪个分量上是随机的,如果采取固定的各分量的加权值会丢失一部分信息,则本文方法需要自适应的得到各分量的加权值,使得优势信号出现的通道权值最大,此时将得到的边缘最为突出,有利于进一步的检测需求。而对于不同的图像,权值都不相同,需要针对不同的同像自适应的得到这些权值,根据文献[20]的方法,设计特征矩阵 A ,矩阵维数为 3×3 。通过求解矩阵 A 最大特征值以及该特征值所对应的特征向量来求得 n_1, n_2, n_3 的值。

具体方法如下:设有矢量图像为 $C(x, y)$,图像中的各分量为 $C(x, y) = [C_1(x, y), C_2(x, y), C_3(x, y)]$,另

设 $A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}$,矩阵 A 中的各系数按照式(5)

~(10)得到。

$$a_{11} = \iint \left[\left(\frac{\partial C_1}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial C_1}{\partial y} \right)^2 \right] ds \quad (5)$$

$$a_{12} = a_{21} = \iint \left(\frac{\partial C_1}{\partial x} \frac{\partial C_2}{\partial x} + \frac{\partial C_1}{\partial y} \frac{\partial C_2}{\partial y} \right) ds \quad (6)$$

$$a_{22} = \iint \left[\left(\frac{\partial C_2}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial C_2}{\partial y} \right)^2 \right] ds \quad (7)$$

$$a_{13} = a_{31} = \iint \left(\frac{\partial C_1}{\partial x} \frac{\partial C_3}{\partial x} + \frac{\partial C_1}{\partial y} \frac{\partial C_3}{\partial y} \right) ds \quad (8)$$

$$a_{33} = \iint \left[\left(\frac{\partial C_3}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial C_3}{\partial y} \right)^2 \right] ds \quad (9)$$

$$a_{23} = a_{32} = \iint \left(\frac{\partial C_3}{\partial x} \frac{\partial C_2}{\partial x} + \frac{\partial C_3}{\partial y} \frac{\partial C_2}{\partial y} \right) ds \quad (10)$$

设 $[n_1, n_2, n_3]$ 为矩阵 A 的最大特征值所对应的特征向量,先求出矩阵 A 最大特征值,再求出对应的特征向量,由此得到 n_1, n_2, n_3 的值,以此作为多通道图像向单通道图像转换的加权值。即: $C_d(x, y) = n_1 C_1(x, y) + n_2 C_2(x, y) + n_3 C_3(x, y)$,式中 $C_d(x, y)$ 为自适应加权之后得到的单通道图像。

经过自适应加权得到的单通道图像与固定灰度图像

转换加权值的方法得到的灰度图像结果如图 8(f) 所示,可见在自适应加权处理后的图像边缘特征较为突出。在采用上述加权处理后的单通道图像与加权处理后的单通道图像用 Canny 算子在同样的阈值 $[0.01,0.05,4]$ 下进行检测,结果如图 8 所示。

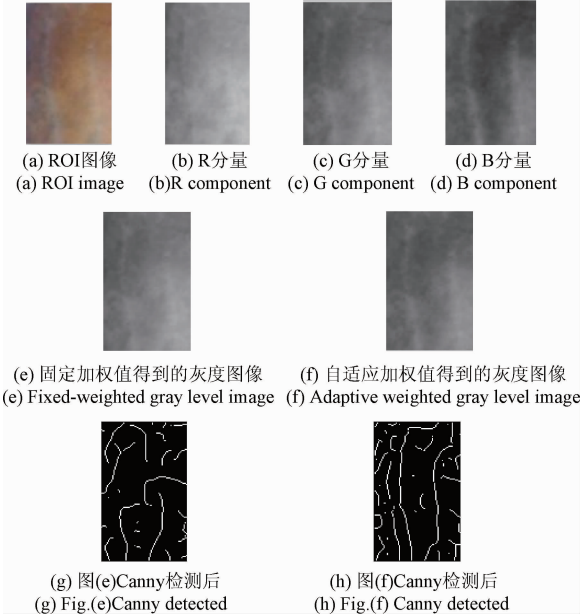


图 8 自适应加权方法采用 Canny 算子检测结果
Fig.8 Detection results with adaptive weighting method used Canny operator

经过自适应加权转换之后的虹膜图像,采用 Canny 算子之后比灰度图像具备较好的边缘连续性,但是由于环状线条在 ROI 区域具备一定的方向性和脊线特征,Canny 边缘检测后并不完全合适。所以设计专门适用于线检测的算子。

3.2.2 线检测算子

设线检测算子为 P , P 为维数为 $m \times n$ 的矩阵,且 m 、 n 为奇数,设线检测矩阵 P 方向为垂直方向,则各分量分布如图 9 所示。

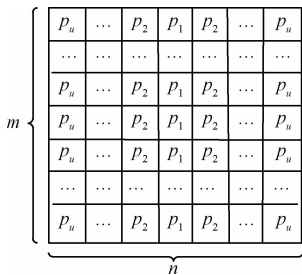


图 9 P 矩阵各分量分布情况

Fig.9 The distribution of each component of the matrix P

其中,在行方向上, $p_1 > p_2 > p_3 > \dots > p_\mu$, 且以 p_1 为最大值两侧对称分布,各分量值按照式(11)的数学表达式等距采样生成。

$$p_{\mu-i} = e^{-(y_i-\mu)^2/2\sigma^2} \quad (11)$$

式中: p_i 为当 $i \in [1, \mu]$ 时的函数值,为了适应不同方向走向的线,可以设计转向矩阵为 $\begin{bmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi \\ \sin\varphi & \cos\varphi \end{bmatrix}$, φ 为转向角度。

p_i 中的 μ 与 σ 按照下述规则取值。 μ 的取值为算子的中心位置,即极值点出现的位置,所以 $\mu = (n+1)/2$; 而 σ 的取值大小决定了生成系数的权值。在定长算子中, σ 越大,算子各分量的系数权值越小, σ 越小,生成的算子系数权值越大。当 $\sigma < 0.1$ 时,系数基本上变成脉冲函数,当 $\sigma > 10$ 时,系数分布在 0 周围。根据正态分布的面积比例,在横轴区间 $(\mu - 2.58\sigma, \mu + 2.58\sigma)$ 内的面积为 99.73%, 即 3σ 原则。即 $n = (\mu + 2.58\sigma) - (\mu - 2.58\sigma)$, 所以 $\sigma = n/(2 \times 2.58)$ 。此时 p_i 各分量分布在行方向上实现正态分布,接近于环状线条截面灰度分布特点。

如果用上述线检测算子在图 10(b) 和(d) 上采用同样的阈值 $[m, n, T] = [11, 11, 0.04]$ 进行检测,则检测结果如图 10 所示。

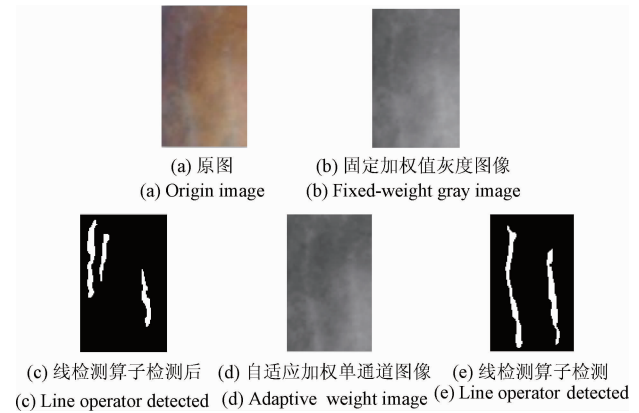


图 10 线检测算子在固定加权值与自适应加权图像上的检测结果

Fig.10 The detection results of the linear detection operator on the fixed weighted image and the adaptive weighted image

由图 10 分析可知,在采用线检测算子在灰度图像上与自适应加权的图像上进行检测,可见线检测算子在得到边缘细节更为突出的图像,图 10(e) 上能够更好地检测出线的特征。

3.3 虹膜环状线条检测算法

1) 预处理

在虹膜图像上选取左右两部分区域作为 ROI 区域,既要包含有环状线条又要尽可能的去掉干扰。

2) 矢量加权线检测算子检测

采用上述定义的算子与图像采用式(12)的方法进行运算。

$$G(x,y) = \omega \cdot C(x,y) * P = (n_1 C_1(x,y) + n_2 C_2(x,y) + n_3 C_3(x,y)) * P \quad (12)$$

式中: $G(x,y)$ 为检测后的图像, $C(x,y)$ 为 ROI 图像, ω 为矢量加权线检测算子中的特征矩阵 A 的最大特征值所对应的特征向量, P 为矢量加权线检测算子中的线检测矩阵。

为了后续方便阈值选取,将得到的结果按照式(13)进行处理,即运算后为负值的,将其置为0,大于0的进行取整,由此得到图像 $G'(x,y)$ 。

$$G'(x,y) = \begin{cases} 0, & G(x,y) < 0 \\ |G(x,y)|, & G(x,y) > 0 \end{cases} \quad (13)$$

3) 分割

选取二值化阈值 T ,如果阈值过小,会使得检测出来的噪声比较多,而如果阈值过大,会造成漏检与特征断裂的情况。能尽可能地在保证线条完整的情况下尽可能地减少噪声,便于后续的识别。

4) 识别

上述方法检测出来的特征中,还包括有一些非环状线条特征,根据先验知识,根据环状线条的长度宽度形状等定义形状因子来识别环状线条。各参数说明如图 11 所示。

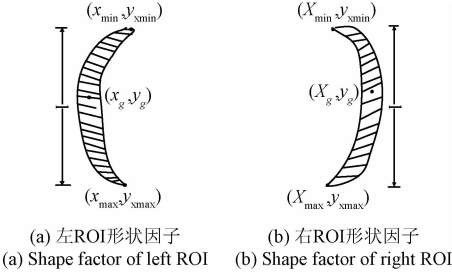


图 11 形状因子示意图
Fig. 11 Diagram of shape factor

图 11 中, x_{min}, x_{max} 为区域中最上端与最下端的行坐标, y_{min} 与 y_{max} 为此时的列坐标, y_{imin}, y_{imax} 为当 $x = i$ 时的最左端与最右端列坐标, (x_g, y_g) 为区域质心点坐标。定义形状因子 $F = \{dir, l, w, area, \kappa, \lambda\}$, 式中 dir 为环状线条区域方向,即左 ROI 区域或者右 ROI, l 为环状区域长度, w 为环状区域宽度, κ 为长宽比, $area$ 为环状区域面积, λ 为弧形度。各分量含义如式(14)~(19)所示。

$$dir = \begin{cases} 1, & \text{左 ROI} \\ 0, & \text{右 ROI} \end{cases} \quad (14)$$

$$l = x_{max} - x_{min} \quad (15)$$

$$w = \max_{i=1}^l (y_{imax} - y_{imin}) \quad (16)$$

$$area = \sum_{i=1}^{x_{max}} \sum_{j=1}^{y_{max}} f(i,j) \quad (17)$$

$$\kappa = \frac{l}{w} \quad (18)$$

$$\lambda = \frac{y_{max} + y_{min}}{2y_g} \quad (19)$$

经过上述 4 个步骤对虹膜图像的处理,实现环状线条的检测,这一过程及结果如图 12 所示。图 12(b)从左到右依次为预处理后的左 ROI 图、左 ROI 图经过矢量加权线检测算子检测后的结果、左 ROI 图的值化图、左 ROI 图经过区域形状因子筛选后的识别图;图 12(c)从左到右依次为预处理后的左 ROI 图、右 ROI 图经过矢量加权线检测算子检测后的结果、右 ROI 图的值化图、右 ROI 图经过区域形状因子筛选后的识别图。

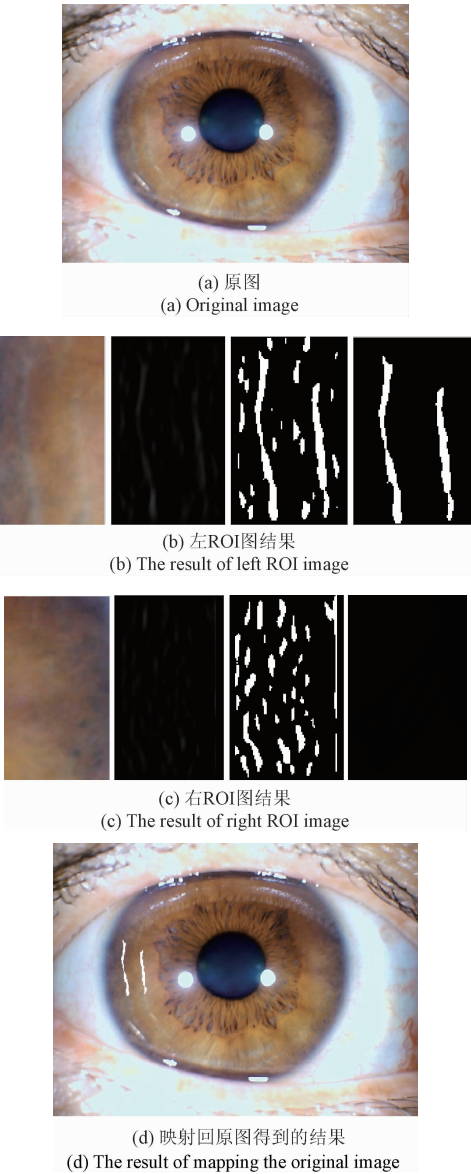


图 12 本文算法检测流程结果
Fig. 12 The results of this proposed algorithm flow

3.4 参数选择说明

3.4.1 线检测算子的尺寸

为了提高检测速度,本文设计的线检测算子为定长算子,则其长度为 m 、宽度为 n 。算子的长度与宽度与检测对象具有较大关系。

n 的大小决定了在检测后像素的分布密度。设被检测的对象的宽度为 w_a ,则当 $w_a \leq n$ 时,卷积二值化后被检测对象灰度值有变化的区域全部为目标区域;当 $w_a > n$,则卷积后会出现双侧峰值,而中间部分出现低谷,如图 13 所示。图 13 中按照算子宽度 n 为 11 时选取线条宽度为 5~17 个像素进行检测,可见,当通过 $w_a \leq n$ 时,二值化后的线条区域全部检测出来,而当 $w_a > n$ 时,则出现双侧线条。通过 3.1 节的分析,环状线条的先验知识可知环状线条的宽度 w_a 最大值为 11,所以 $n \geq w_a$,即为 11。

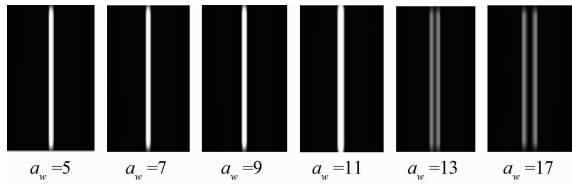


图 13 当被检测的线条宽度不同时与算子宽度 n 的关系

Fig. 13 The relation of operator width n and detected line width when detected line width is different

m 的值决定了在 y 方向上连续的数量,由于环状线条具备一定的曲度,并不是完全符合直线状,所以如果 m 值过大,则在 y 方向上过度检测,会造成过检测的结果,而如果 m 值过小,则会出现断裂的情况,选取图库中 ROI 图像进行实验如图 14 所示,当 $m = 5, 9, 11, 15, 17$ 时,以同样的二值化阈值($T = 0.04$)得到如下结果。可见,当 $m = 5$ 时,线条断裂的比较严重,不利于后续的筛选,而当 $m > 15$ 时,会造成过多的干扰,根据图库中图像的分辨率以及环状线条的曲度以及尺寸大小,选取 $m = 11$ 。

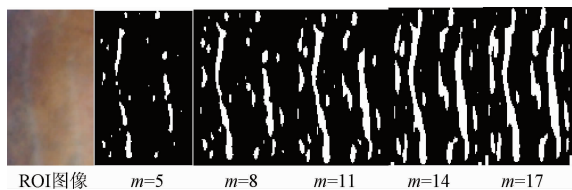


图 14 算子长度 m 与检测对象的关系

Fig. 14 The relation of operator length m and detected line length

采用上述阈值构建的线检测矩阵为如图 15 所示。

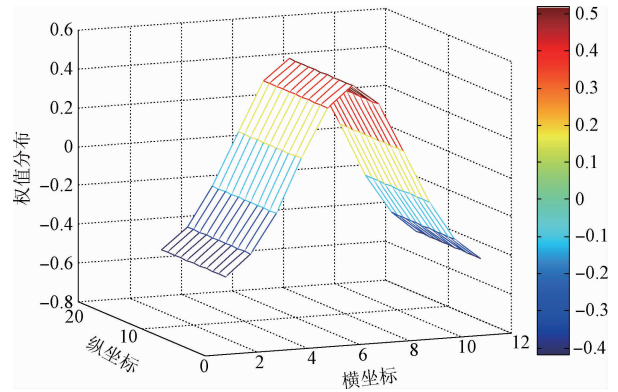


图 15 线检测矩阵 P 各分量值分布图

Fig. 15 Each component distribution of matrix P

3.4.2 二值化分割阈值 T

二值化的分割阈值 T 对于分割结果具有较大影响,它与线检测算子中的 σ 也有一定的关系,当 σ 越大时,则线检测矩阵权值分布过于平缓,则卷积后的信号强度越弱,可区分性越小,则分割阈值也越小,反之。通过上文的分析,由于定长算子中 σ 值是固定的,所以选取二值化阈值 T 比较重要。当 T 较小时,会有更多的区域满足条件,从而使检测结果中出现过多的误判情况,增加后续检测步骤的负担;反之,而当阈值较大时,则会造成遗漏,导致漏检。为了检测 T 选取不同情况时对检测的影响,在 ROI 图像中选取了 100 幅图像,这些图像中包含有共计 256 条环状线条特征,分别选取 $T = 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06, 0.07$ 时,其漏检与误检情况如图 16 所示。

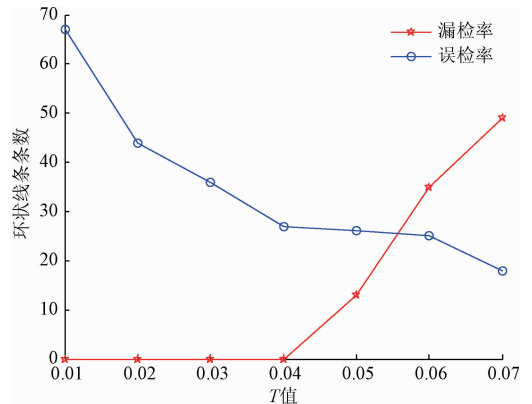


图 16 T 取值为 0.01~0.07 时的误检率与漏检率

Fig. 16 False detecting rate and omission rate when T values are from 0.01 to 0.07

如图 16 可知, T 的最佳取值为 0.05~0.06,然而,误检中虽然有非环状纹理被检出,但可以通过后续的判别方法排除,最终得到正确的结果;而漏检则会导致环状线条纹理的遗漏,无法在下一步中检出,从而对检测造成比误检更严重的影响,所以要保证在无漏检的情况下误检

率最低。综上,取得 $T = 0.04$ 。

3.4.3 区域形状因子的确定

通过大量的实验以及对图库中大量图像的观测,将区域形状因子满足式(20)与(21)所示约束条件的边缘区域作为环状线条的边缘区域。

$$F_l = \{1, l > 20, 4 < w < 11, area > 80, \kappa > 5, \lambda < 0.9\} \tag{20}$$

$$F_r = \{0, l > 20, 4 < w < 11, area > 80, \kappa > 5, \lambda > 1/0.9\} \tag{21}$$

在式(20)与(21)约束条件中,弧线因子 F 中的 6 个参数分别对区域进行限定,可将其他干扰纹理的区域及噪声排除在外,从而识别出环状线条的区域。其中, $dir = 1$ 表示当前为左 ROI 区域,如图 17(a)所示, $dir = 0$ 表示当前为对右 ROI 区域的检测,如图 17(e)所示;经过本文方法检测后得到的图像如图 17(b)(f)所示; $l > 20, 4 < w < 11, area > 80$ 限定了区域的最小长度、宽度范围以及面积,该条件将一些长度宽度不符合要求的以及面积小的噪声点引起的微小边缘排除,如图 17(c)、(g)所示; $\kappa > 5$ 可以将长宽比不符合要求的噪声去掉,如图 17(d)所示,矩形框内的区域去除掉; $\lambda < 0.9$ 限定了区域的弧度特性,去掉不是与瞳孔同心环方向的弧线,如图 17(h)所示。

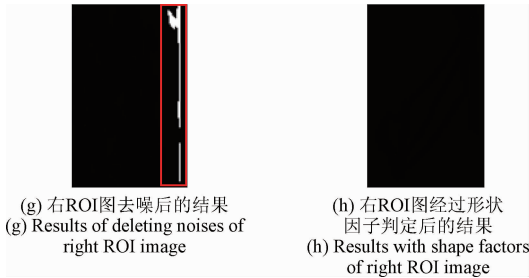


图 17 形状因子识别示意图
Fig. 17 The results of shape factor

4 实验与结果分析

4.1 算法有效性检测实验

在 SUT 可见光虹膜图库中采用本文方法得到的部分图像检测结果图如图 18 所示。

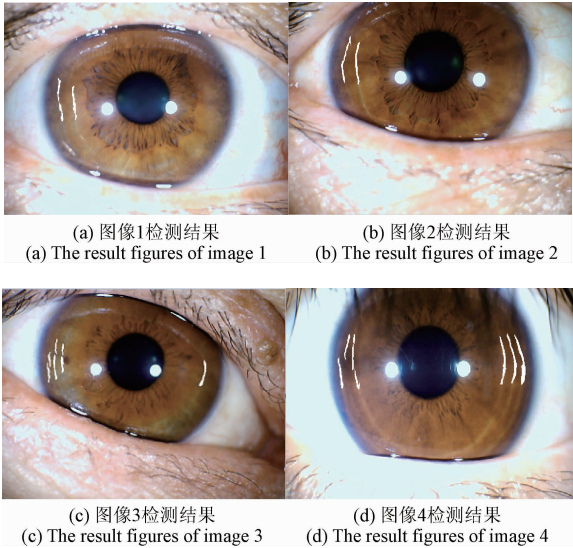
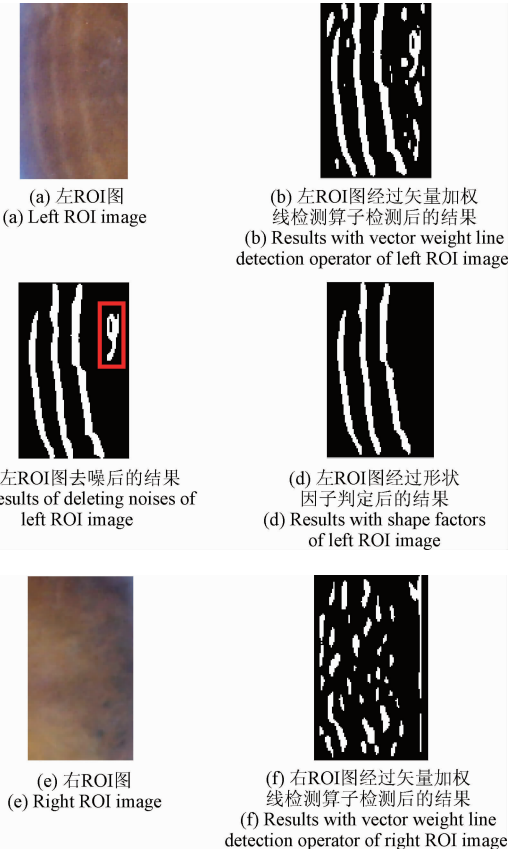


图 18 图库中部分图像检测结果
Fig. 18 Part of the detection results of the image lib

为了进一步验证算法的有效性,在图库中选取质量较好的 1 000 张图像建立用于测试的分类虹膜图库,采用投票统计的方式,以少数服从多数为准则,建立了包含有环状线条以及不含有环状线条的图库,并对环状线条的个数和位置采用统计的方法进行人工标定。

这样建立的虹膜图库,包含有环状线条的图像 476 幅,不包含有环状线条的图像 524 幅。其中 131 幅图像在定位瞳孔时出现失败,经过预处理后的 ROI 图像共计 1 738 幅,需要说明的是,环状线条并不一定同时出现在虹膜左右区域,所以在包含有环状线条的图像上经过预处理得到的 ROI 图像并不全部包含有环状线条,这样得到 ROI 图像中包含有环状线条的 812 幅,不包含有环状线条的 926 幅。在包含有环状线条的 ROI 图像上进行人



工标定,连续完整的环状线条计为1条,如果断裂,则分别记为两条。采用此种方式在812幅ROI图像中标定环状线条共计1921条。

采用上述方法对图库中ROI图像进行测试,检测结

果如表1所示。部分检测结果如图19所示,其中图19(a)、(c)、(e)、(g)为左ROI图像,图19(b)、(d)、(f)、(h)为其检测结果,图19(i)、(k)、(m)、(o)为右ROI图像,图19(j)、(l)、(n)、(p)为其检测结果。

表1 本文算法检测结果
Table 1 the result of the proposed method

环状线条数量	正确检测到的数量	漏检数量	误检数量	正确检出率/%	漏检率/%	误检率/%
1 921	1 763	158	376	91.78	8.22	19.57

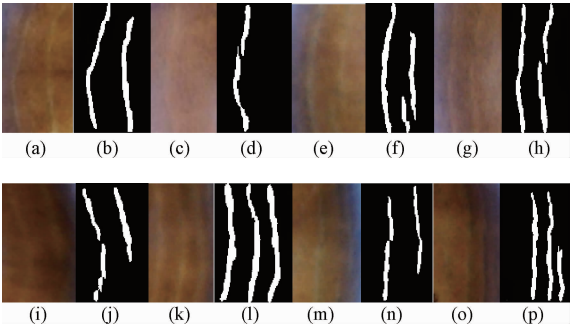


图19 部分ROI图像及其检测结果
Fig. 19 part of ROI and results

漏检的主要原因是环状线条覆盖有虹膜老年环等外部特征,无法进一步区分;误检的主要原因是:在定位时瞳孔定位不够准确,有部分虹膜外边缘包含在内,经过检测后会呈现和环状线条一样的特征,无法通过区域形状因子排除。

4.2 相关算法对比实验

4.2.1 与文献[19-20]方法对比

将本文方法与文献[19-20]的方法进行对比,结果如图20所示。

可见,采用文献[19]的方法得到的检测结果,检出的线条比较短,这是由于在采用Canny算子检测时,部分环状线条信号比较弱,没有检测出来,误检的部分是由于检测出的边缘符合曲率同心性判别条件而无法排除;文献[20]的方法中,是在归一化展开的矩形图像上识别边缘特征,则在展开图上寻找水平方向的线,在归一化时,眼睑部分与虹膜外边缘在归一化均在水平方向上,在识别时也无法排除。本文算法检测的线条比较连续,且无误检的发生。

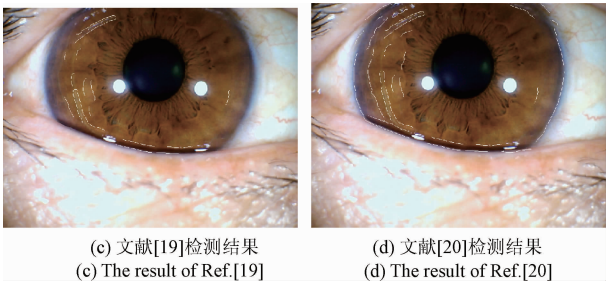
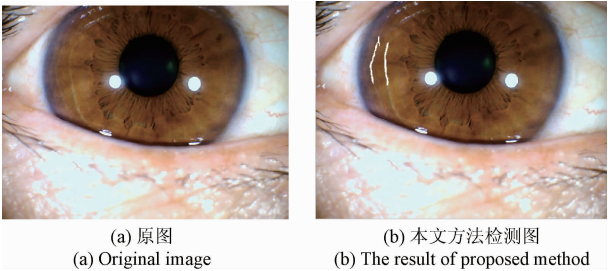


图20 本文方法与文献[19-20]方法比较
Fig. 20 Comparison between proposed method and Ref. [19-20] method

4.2.2 矢量加权线检测算子与Canny算子检测虹膜环状线条的比较

为了进一步的说明本文设计的矢量加权线检测算子检测虹膜环状线条的有效性,在ROI区域内就边缘算子检测性能的优越性做进一步的对比实验,为了客观比较,在采用Canny算子的时候,选取各种合适的阈值进行边缘提取,Canny算子中, σ 的值的大小代表了高斯滤波器的方差, σ 越大,则对于精细边缘的提取能力越弱, σ 越小,对弱信号的检测更为敏感, T_1 、 T_2 为在选取边缘时代表的二值化阈值, T_1 为低阈值, T_2 为高阈值,通常选取 $T_1 = 0.4T_2$,现选取Canny算子中的参数 σ 值相同, T_1 、 T_2 值不同的情况下以及 T_1 、 T_2 值相同, σ 值不同时做对比实验。分别选取 $[\sigma, T_1, T_2]$ 分别为 $[3, 0.016, 0.026]$ 、 $[3, 0.016, 0.04]$ 以及 $[5, 0.016, 0.04]$ 时,检测结果如图21所示。其中,图21(a)、(f)为ROI图,图21(b)、(g)为采用阈值为 $[3, 0.016, 0.026]$ 的检测结果,图21(c)、(h)为 $[3, 0.016, 0.04]$ 的检测结果,图21(d)、(i)为 $[5, 0.016, 0.04]$ 的检测结果,图21(e)、(j)为本文算法的检测结果。在图21(b)与(g)中可见,矩形框内的线呈现出双边缘特性,且不完整;图21(c)和(d)中矩形框内的边缘断裂了,不利于进一步的识别;图21(h)中环状线条检测出现过连接现象;图21(i)中环状线条没有检测到。图21(e)与(j)为本文算法的检测结果,可见,线条的连续性完好,且区域内能保持较好的线状特点,以便于后续的识别。

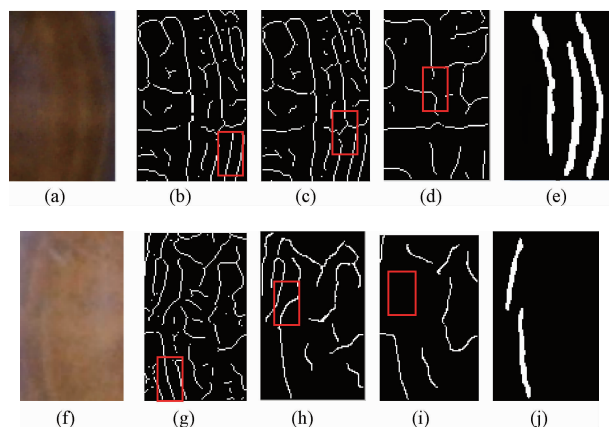


图21 本文算法与采用Canny算子且Canny算子在不同参数下的检测结果

Fig. 21 The results with proposed method and with Canny operator and Canny operator in different parameters

产生上述结果的主要原因:1)由于环状线条在本文预处理后选取的ROI区域内具备一定的方向性,而Canny算子为无方向算子;2)环状线条具备一定的宽度的线状特征,而Canny算子适合阶跃性边缘的检测;3)环状线条与背景相比信号强度较弱,而Canny算子对弱信号比较敏感,会把ROI区域内背景中的一些边缘也检测出来。

5 结 论

针对虹膜环状线条由于信号强度比较弱,采用灰度图像下的边缘检测方法较难检测出来的问题,本文设计了适用于虹膜环状线条检测的矢量加权线检测算子,提高了检测系统的鲁棒性,通过实验分析发现能够有效地降低误检率与漏检率。得到如下结论:

1)根据虹膜环状线条的生理特性,提出了一种新的ROI区域选取方法,能够有效地去掉干扰,有利于进一步的线条识别。

2)由于环状线条在矢量图像上信号优势出现在不同的通道上,且具备一定宽度的脊线特征,所以设计了矢量加权线检测算子:通过设计特征矩阵,求得特征矩阵最大特征值所对应的特征向量来作为矢量加权的个分量值,能够自适应地得到边缘特征最为显著的亮度值;再设计线检测矩阵,根据环状线条的线特性设计线检测算子检测,检测出环状线条。

3)本文的方法对于虹膜环状线条检测的方法提供了一种新思路,但本文的方法也存在一定的不足:一方面,在预处理阶段,当图像发生定位错误时,无法有效的检测环状线条;另一方面,由于本文图库是在人眼自然张开状态下采集到的,所以选取的ROI图像是环状线条的一部分。

4)提出下一步的工作设想:在预处理阶段更能准确的定位以及选取ROI区域,在特征检测阶段如何在整幅虹膜

图像上完整的找到环状线条是接下来的主要研究内容。

参考文献

- [1] BOWYER K W, HOLLINGSWORTH K P, FLYNN P J. A survey of iris biometrics research: 2008-2010 [C]. Handbook of Iris Recognition, 2013: 15-54.
- [2] DAUGMAN J. How iris recognition works [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2004, 14(1): 21-30.
- [3] BOLES W, BOASHASH B. A human identification technique using images of the iris and wavelet transform [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1998, 46(4): 1185-1188.
- [4] WILDES R P. Iris recognition: An emerging biometric technology [J]. Proceedings of the IEEE, 1997, 85(9): 1348-1363.
- [5] 李欢利, 郭立红, 王心醉. 基于加权Gabor滤波器的虹膜识别 [J]. 吉林大学学报: 工学版, 2014, 44(1): 196-202.
LI H L, GUO L H, WANG X Z, et al. Iris recognition based on weighted Gabor filter [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2014, 44(1): 196-202.
- [6] 苑玮琦, 赵彦明, 张志佳. 基于纹理分布特征的虹膜识别算法 [J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(2): 365-370.
YUAN W Q, ZHAO Y M, ZHANG ZH J. Iris recognition algorithm based on texture distribution feature [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument. 2010, 31(2): 365-370.
- [7] 苑玮琦, 刘博. 基于空域与频域稳定特征融合的离焦虹膜识别 [J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(10): 2300-2308.
YUAN W Q, LIU B. Defocused iris recognition based on stable feature fusion in spatial and frequency domain [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(10): 2300-2308.
- [8] 苑玮琦, 刘笑楠, 孙晓等. 一种虹膜图像块状纹理检测算法 [J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(5): 1093-1100.
YUAN W Q, LIU X N, SUN X, et al. Iris image plaque-like texture detection algorithm [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(5): 1093-1100.
- [9] 刘笑楠, 苑玮琦, 张波. 基于组合窗口搜索的虹膜块状纹理检测 [J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(8): 1900-1906.
LIU X N, YUAN W Q, ZHANG B. Iris plaque-like texture detection based on combined window searching [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(8): 1900-1906.
- [10] 朱立军, 苑玮琦. 基于BAB策略与SVM的虹膜块状纹理检测 [J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(11): 2438-2444.
ZHU L J, YUAN W Q. Iris image lump-like texture detection based on BAB strategy and SVM [J]. Chinese

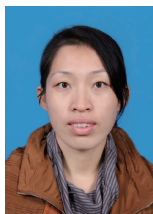
- Journal of Scientific Instrument, 2016, 37 (11): 2438-2444.
- [11] 苑玮琦,朱立军. 基于线性模板和模糊规则的虹膜坑洞纹理检测[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36 (6): 1363-1371.
YUAN W Q, ZHU L J. Iris crypt texture detection based on linear template and fuzzy rules. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36 (6): 1363-1371.
- [12] 朱立军,苑玮琦. 基于双线性模板和分块策略的虹膜色素斑检测[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36 (12): 2714-2721.
ZHU L J, YUAN W Q. Iris pigmented spot detection based on bilinear templates and block partitioning strategy[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36 (12): 2714-2721.
- [13] 苑玮琦,张波,刘笑楠. 基于灰度差分 and 脊线检测算子的虹膜裂缝检测[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37 (10): 2290-2299.
YUAN W Q, ZHANG B, LIU X N. Iris cracks detection based on gray level difference and ridge line detection operator[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37 (10): 2290-2299.
- [14] SHEN F, FLYNN P J. Are iris crypts useful in identity recognition[C]. IEEE Sixth International Conference on Biometrics: Theory, Applications and Systems (BTAS), 2013: 1-6.
- [15] HOSSEINI M S, ARAABIBN, SOLTANIAN-ZADEH H. Pigment melanin: Pattern for iris recognition[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2010, 59 (4): 792-804.
- [16] SUNDER M S, ROSS A. Iris image retrieval based on macro-features[C]. 20th IEEE International Conference on Pattern Recognition (ICPR), 2010: 1318-1321.
- [17] SHEN F, FLYNN P J. Iris matching by crypts and anticrypts[C]. IEEE Conference on Technologies for Homeland Security (HST), 2012: 208-213.
- [18] 黄静,苑玮琦. 自仿射拟合的虹膜纹理分割及粗分类[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36 (4): 758-767.
HUANG J, YUAN W Q. Self-affine fitting based iris texture segmentation and coarse classification [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36 (4): 758-767.
- [19] 申波. 虹膜病理特征提取研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2007.
SHEN B. Reserch on iris pathological feature extraction [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.
- [20] 何莹. 虹膜图像内容表达与分析方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2014.
HE Y. Research on expression and analysis of iris image content [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [21] 苑玮琦,林忠华,徐露. 一种基于人眼结构特征的新颖虹膜定位算法[J]. 光电工程, 2007, 34 (1): 112-116, 125.
YUAN W Q, LIN ZH H, XU L. Novel iris location algorithm based on the structure of human eyes[J]. Opto-Electronic Engineering, 2007, 34 (1): 112-116, 125.
- [22] 朗方年,周激流. 四元数与彩色图像边缘检测[J]. 计算机科学, 2007, 34 (11): 212-216.
LANG F N, ZHOU J L, et al. Quaternion and color image edgedetection [J]. Computer Science, 2007, 34 (11): 212-216.
- [23] 邢燕. 四元数及其在图形图像处理中的应用研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2009.
XING Y. Research on quaternion and its applications in graphics and image processing [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2009.
- [24] 常乐,苑玮琦. 角膜老年环检测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36 (10): 2312-2320.
CHANG L, YUAN W Q. Research on corneal arcus detection method [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument. 2015, 36 (10): 2312-2320.
- [25] CHAUDHURI S, CHATTERJEE S, KATE N. Detection of blood vessels in retinal images using two-dimensional matched filters [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 1989, 8 (3): 263 - 269.

作者简介



苑玮琦, 1982 年于湖南大学获得学士学位, 分别在 1988 年和 1997 年于东北大学获得硕士学位和博士学位, 现为沈阳工业大学教授、博士生导师, 主要研究方向为机器视觉检测和生物特征识别。
E-mail: yua60n@126.com

Yuan Weiqi received his B. Sc. degree in 1982 from Hunan University, and received his M. Sc. and Ph. D. degrees both from Northeastern University in 1988 and 1997, respectively. Now he is a professor and doctoral supervisor in Shenyang University of Technology. His main research interests include machine vision detection and biometric identification.



张波, 2002 年于辽宁师范大学获得学士学位, 2008 年于兰州交通大学获得硕士学位, 现为沈阳化工大学讲师、沈阳工业大学博士研究生, 主要研究方向为机器视觉检测和图像识别。
E-mail: zber@163.com

Zhang Bo received her B. Sc. degree in 2002 from Liaoning Normal University, and received her M. Sc. degree in 2008 from Lanzhou Jiaotong University. Now she is a lecturer in Shenyang University of Chemical and also a Ph. D. candidate in Shenyang University of Technology. Her main research interests include machine vision detection and image identification.