

基于结构检测模型的白内障连续 环形撕囊边界检测方法

刘卫朋¹, 韩 达^{1,2}, 李 桢², 边桂彬²

(1. 河北工业大学 人工智能与数据科学学院, 天津 300130;

2. 中国科学院自动化研究所 复杂系统管理与控制国家重点实验室, 北京 100190)

摘要: 针对临床白内障手术面临的连续环形撕囊术中边界自动提取的问题, 提出了一种具有高计算效率和良好鲁棒性的新颖检测方案来提取撕囊边界信息; 首先, 应用包括一般直方图均衡化和自适应直方图均衡化在内的预处理程序来增强输入图像的对比度; 然后, 建立了一种结构检测模型来检测低对比度条件下细小的撕囊边界信息; 在这之后, 应用局部阈值和后处理来消除干扰像素; 最后, 经过数据集对提出的方法进行验证; 实验结果表明, 所提方法具有优异检测性能并取得了 F 测度为 0.915 的结果; 证明了该方法可以检测出白内障手术连续环形撕囊边界, 并具有较高的计算能力和精确度。

关键词: 图像处理; 边界检测; 白内障手术; 机器人手术

Boundary Extraction for Capsulorhexis of Cataract Surgery Using Structure Detection Model

Liu Weipeng¹, Han Da^{1,2}, Li Zhen², Bian Guibin²

(1. School of Artificial Intelligence and Data Science, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;

2. State Key Laboratory of Management and Control of Complex Systems, Institute of Automation,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Main goal of this paper is to address various challenges towards clinical ophthalmology in the context of automatic boundary extraction in continuous curvilinear capsulorhexis of cataract surgery via structure detection model. A novel extraction scheme with high computational efficiency and robustness is proposed to extract the boundary information. Firstly, pre-processing procedure is applied that includes general histogram equalization and contrast limited adaptive histogram equalization was utilized to enhance the contrast of the surgery images. Then, a proposed structure detection model is established to detect the tiny boundary with low contrast. After that, local threshold and post process are applied to remove disturbance. Finally, the proposed method has been verified through the data sets. Experimental results show that the proposed method could extract the boundary of capsulorhexis and gets the result of F-measure=0.915, which outperform other schemes, and achieve high computational ability and accuracy.

Keywords: image processing; boundary detection; cataract surgery; robotic surgery

0 引言

白内障是全球首位致盲性眼病。它会使视力下降, 甚至导致失明。白内障是由眼组织中的晶状体蛋白质变性而发生浑浊引起的症状。根据白内障产生和发展的不同区域, 可将其分为三类: 核性白内障, 皮质性白内障和后囊膜下白内障^[1-4]。在所有的白内障中, 老年性白内障是较为常见的眼科疾病, 占视力致盲问题的 25%~50%。白内障已成为人们生存质量的重大威胁, 其危害程度紧随肿瘤和心血

管疾病。随着社会老龄化程度加重, 白内障发病率逐年增长, 如果这些白内障患者无法及时接受适当治疗, 会造成视力下降、病人的生活质量下降, 此外会继发青光眼, 造成不可逆的视神经损伤, 还能引起过敏性炎症。世界卫生组织 (WHO) 公布的统计数据表明, 每年有超过 1 500 万的白内障致盲者。此外, 仅在中国和印度就发现了因为白内障致盲^[5-7]的人数为 1 800 万。

白内障手术是用人工晶体替换患病晶状体的过程。首先, 眼科医生使用专用手术器械对眼球制作切口。下一个步骤是连续环形撕囊操作, 这一步骤在整个手术中起着至关重要的作用。第三, 对眼球进行水分离操作, 该步骤旨在分离眼睛的组织和组织液。第四步是超声乳化, 它会破碎病变晶状体。之后, 进行去核操作, 在此步骤中将清除所有残留物。下一个操作是注射粘弹剂, 这一部分的目的是方便人工晶状体的植入。在植入了人工晶状体并调整位置之后, 需要清洁眼球内的辅助药剂和其他处理后, 手术

收稿日期: 2020-01-04; 修回日期: 2020-03-25。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB1302704); 国家自然科学基金项目(U1713220); 北京市科委项目(Z191100002019013); 中科院青年创新促进会项目(2018165)。

作者简介: 刘卫朋(1979-), 男, 博士, 主要从事机器视觉、人工智能、深度学习等方向的研究。

通讯作者: 李 桢(1989-), 女, 河南内黄人, 博士, 主要从事手术机器人及图像处理方向的研究。

结束。图 1 中展示了白内障手术的标志性步骤。

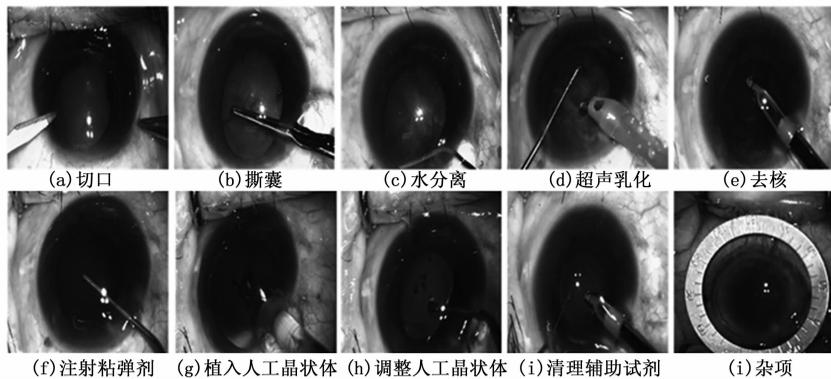


图 1 白内障手术的主要步骤

近年来, 手术机器人成为高端医疗装备的重要研究方向。高难度的手术可分解为医生的一般手术操作及机器人的复杂精细操作, 关键手术步骤由机器人辅助完成, 医生的手术操作难度明显降低, 手术精细度、安全性显著提高。外科医生和研究人员从飞速发展的计算机视觉和医学影像处理技术中受益良多^[8]。探索并测试了关于自主心脏手术机器人的理论。此外, 在白内障手术中探索撕囊术的边界提取^[9]以实现机器人手术^[10]。研究了用于白内障手术机器人机械臂虚拟约束的算法^[11]。则通过深度学习方法实现了针对白内障手术视频高速分割。

为了实现机器人辅助白内障手术操作, 需要术中实时提取连续环形撕囊的边界, 为机器人运动控制提供虚拟约束。如图 2 (a) (d) 所示, 提取工作的主要挑战在于边界与周围环境的对比度低。图 2 列出了几个典型的图像, 它们代表了手术期间发生的不同类型的干扰。第一种类型的干扰是由进行手术时的灯光反射引起的, 如图 2 (b) 所示。第二类干扰是由于撕囊过程中操作不准确而导致边界部分缺失, 如图 2 (c) 所示。

第三类干扰是手术过程中由于气体混入而产生的气泡干扰, 如图 2 (e) 所示。这 3 种不同类型的干扰增加了检测边界的难度。此外, 肉眼不易识别的边界和眼球内组织等很容易导致错误检测, 如图 2 (f) 所示。

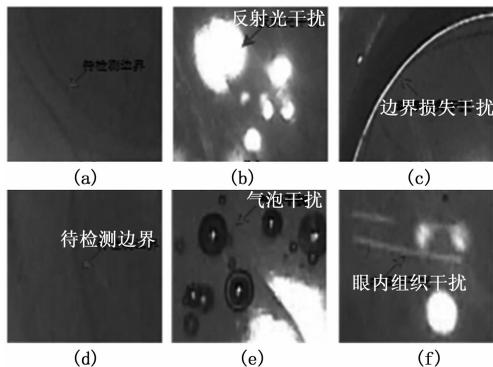


图 2 撕囊边界检测面临的主要挑战

的低对比度, 本研究绘制了图像的灰度值图表, 以说明将边界检测方法应用于白内障手术的撕囊边界检测时所面临的挑战, 如图 3。

从图像直观得出, 研究的目标边界与周围图像对比度较低, 不易于直观感受。这就给执行白内障手术的医生提供了巨大的挑战。而像素灰度折线图则显示待检测像素值与周围 20 像素内像素差值较小, 同样不利于机器视觉的检测和提取。

为了克服上述挑战, 本研究提出了特定的解决方法。首先, 预处理可以显著提高输入图像的对比度。接下来, 提出了一种结构检测模型来检测连续环形撕囊边界。最后, 本研究应用的局部阈值和后处理能够消除干

扰和噪声而不会影响边界像素。

本文的主要贡献归纳如下:

1) 结合了预处理和结构检测模型的提取方案能够在低对比度的情况下检测出更精细的晶状体前囊撕取边界。

2) 利用局部阈值和后期处理能够检测并消除小的干扰, 而不会同时影响边界像素。

3) 该方案的鲁棒性由 3 种不同干扰下的满意结果所证实。

4) 对所提方案的和已建立的检测方案进行比较和评估。

本文的其余部分安排如下。第 1 章具体解释了具有准确性和鲁棒性撕囊边界的结构检测模型和边界提取方案。第 2 章介绍了一系列手术图像的实验结果和评估。最后, 结论和讨论将在第 3 章中进行。

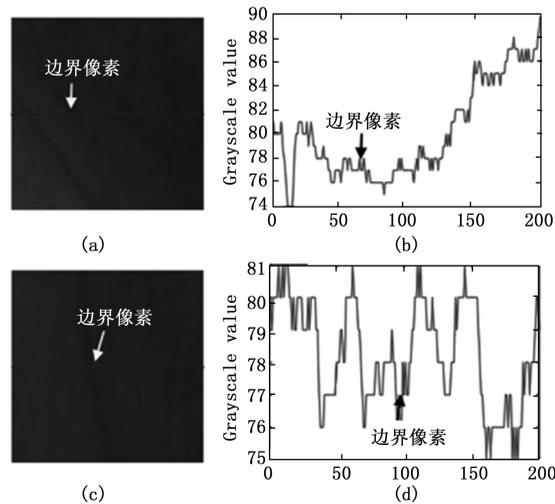


图 3 边界像素与周围像素灰度值对比

1 算法的阐述

提出的算法包括预处理、结构检测模型、局部阈值和后处理。首先, 实施预处理以增加图像的对比度并使其便于应用模型。然后, 建立结构检测模型以检测白内障手术图像中撕囊边界。接下来, 在检测到细节之后进行局部阈

为了更直观地反映目标边界像素与图像周围背景之间

值清除其中的干扰像素。最后，后处理可以消除干扰并获得囊膜的边界。算法的框架如图 4 所示。

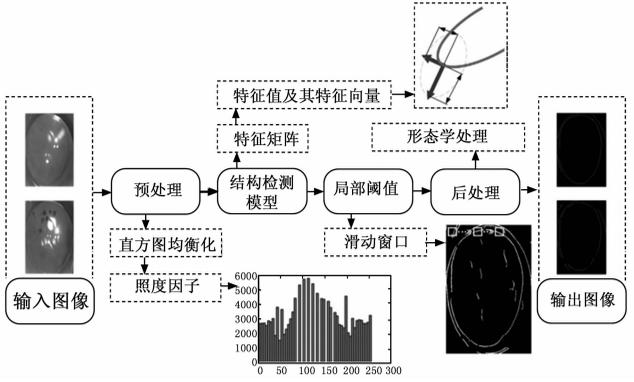


图 4 边界检测流程图

2 算法的阐述

2.1 预处理

预处理过程的工作流程描述如下：将小波变换分解应用于原始图像，并获得 4 个分别称为低-低，低-高，高-低和高-高的子带图像。我们需要处理的照明因子仅存在于低-低子带图像中，并且可以通过奇异值分解来处理。借助此属性，原始图像可以同时通过一般直方图均衡和自适应直方图均衡进行处理^[12]。通过应用逆离散小波变换，可以将两个分离通道的图像重建为具有高对比度的最终图像。

图 5 列出了输入图像和相应的响应图像的灰度直方图和三维等高线图，以说明预处理的有效性。

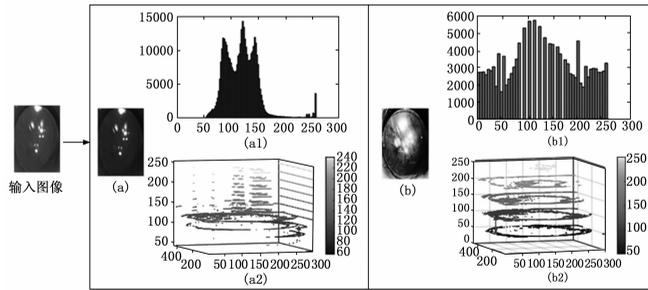


图 5 预处理前后效果对比

2.2 结构检测模型

在本节中，将建立边界检测模型以检测撕裂边界。

首先对输入图像与高斯滤波器进行卷积，以便对其进行平滑处理。

$$I_{xx} = I * G_{\sigma xx}(x, y) \quad (1)$$

$$I_{yy} = I * G_{\sigma yy}(x, y) \quad (2)$$

$$I_{xy} = I * G_{\sigma xy}(x, y) = I_{yx} \quad (3)$$

其中： $G_{\sigma xx}(x, y)$ 代表高斯函数 $G_{\sigma}(x, y)$ 在 x 轴的二阶偏导数， $G_{\sigma yy}(x, y)$ 代表高斯函数 $G_{\sigma}(x, y)$ 在 y 轴的二阶偏导数， $G_{\sigma xy}(x, y)$ 代表高斯函数 $G_{\sigma}(x, y)$ 在 x 轴和 y 轴的二阶偏导数。 σ 代表高斯函数 $G_{\sigma}(x, y)$ 的尺度。

定义二阶特征矩阵如下：

$$H = \begin{pmatrix} I_{xx} & I_{xy} \\ I_{yx} & I_{yy} \end{pmatrix} \quad (4)$$

建立矩阵后，结构检测模型的原理可以描述如下：二阶偏导数表示二维图像中导数的变化情况；矩阵的两个特征值表示图像在两个特征向量指示的方向上的各向异性。如果使用特征向量和特征值构成椭圆，则椭圆可以表示某一点处的各向异性变化。结构越线性，各向异性越强。显然，圆具有最强的各向同性。如图 6 所示。

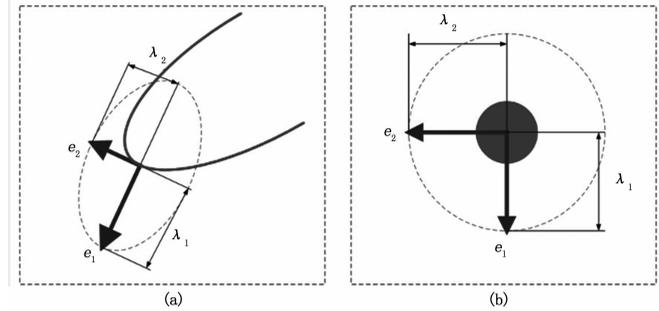


图 6 特征值和特征向量及对应点在图像中结构

特征矩阵的特征值可以更好地描述线状结构信息。根据该特性，高斯二阶偏导数的目标边界及其响应相对较大，而在均匀的背景中是均匀的，因此响应较小。我们使用 $e1$ 和 $e2$ 表示矩阵特征值的特征值， λ_1 和 λ_2 作为对应的两个特征值，并假定 $|\lambda_1| < |\lambda_2|$ ，然后定义两个变量，分别命名为 R_b 和 S ，如下所示：

$$R_b = \lambda_1 / \lambda_2 \quad (5)$$

$$S = \sqrt{\lambda_1^2 + \lambda_2^2} \quad (6)$$

图像中的像素是否为边界像素可以通过 R_b 和 S 判定识别。根据上面讨论的信息，我们得出结论：只有当检测到干扰像素时， R_b 就能得到一个较大的值；如果 $\lambda_1 = 0$ 或者 λ_1 非常小，此时 R_b 的值接近 0。但是，当检测到是背景像素而非边界像素时， S 就会得到一个较小的值。考虑到特征矩阵的特性，不同的特征值将对应不同的检测结果。结合假设条件 $|\lambda_1| < |\lambda_2|$ ，我们列出了其特征值的三中不同情况，如图 7 所示。

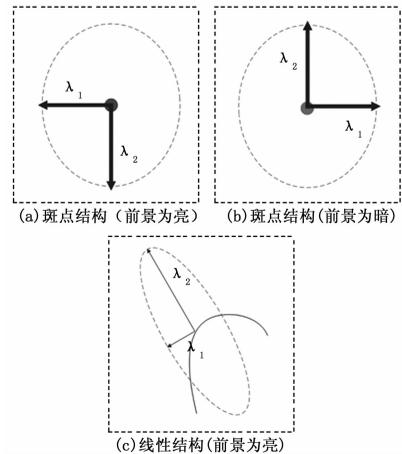


图 7 不同特征值及其在图像中对应的不同结构

结构检测模型的传递函数定义如下:

$$H = \begin{cases} 0, \lambda_2 > 0 \\ \exp(- (R_b^2 / 2\beta^2) (1 - \exp(- (S^2 / 2c^2)))) \\ \text{others} \end{cases} \quad (7)$$

基于以上讨论的特性, 结构检测模型能够检测边界像素, 而与周围背景无关。预处理后的输入图像及其对气泡和反射光的响应如图 8 所示。

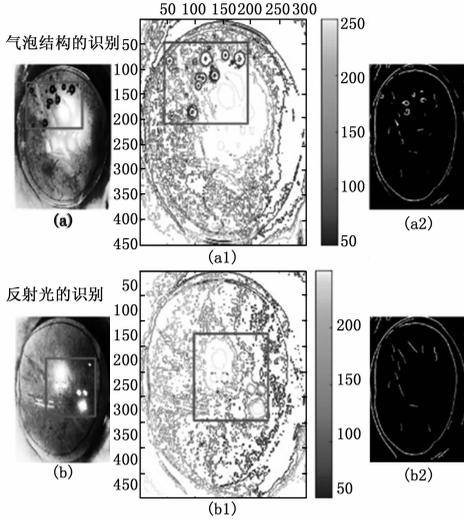


图 8 线状结构和块状结构的识别

2.3 局部阈值处理

在本节中应用局部阈值以消除在先前过程中错误检测到的干扰。由于存在细小的血管和低对比度区域, 我们可能会错误地将边界像素检测为非边界像素。

为了正确区分边界像素, 通过使用滑动子窗口从应用模型后的图像中分割像素来应用局部阈值。阈值设定如下:

$$Th(x, y) = m(x, y) + k \cdot v(x, y) \quad (8)$$

$m(x, y)$ 和 $v(x, y)$ 在式 (8) 中分别是滑动子图像的均值和标准差。滑动子窗口的大小可以自由选择, 这里我们使用 9×9 ; 同时, k 是一个预定的常数, 当 k 设置为 1 时将获得最佳响应结果。

当在结构检测模型的响应图像上应用局部阈值时, 其对应的算法为:

$$B(x, y) = \begin{cases} 1, R(x, y) > Th(x, y) \\ 0, \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

在上述过程中, 原始图像被转换为二值图像。在逐像素比较之后, 如果满足限定条件 $R(x, y) > Th(x, y)$, 则将像素标记为白色, 反之将其标记为黑色。在此过程的步骤之后, 大多数干扰像素已被消除。

3 种典型类型的干扰和输入图像的结果在图 9 中列出, 可以得出结论, 局部阈值消除了部分内部干扰。

2.4 后处理

采用后处理的目的在于去除一些非边界像素并得到结果。这一过程尽可能需要消除干扰, 并同时保留边界像素。首先, 应用连接操作来连接分离的干扰像素。然后, 使用

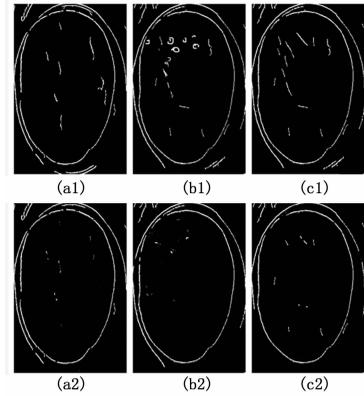


图 9 局部阈值应用前后对比

收缩操作来使连接的干扰细化。最后, 进行清除操作以获得最终结果。工作原理如图 10 所示, 白色和灰色边框中的图像部分被放大以显示该算法工作过程, 对应解释连接、细化和清除 3 种操作。首先, 连接操作可以将单独的干扰连接成连接的干扰, 这可以方便地处理。处理过程如下:

$$X_k = (X_k \oplus B) \cap A; k = 1, 2, 3 \dots \quad (10)$$

式 (10) 表示找到集合中的单独元素并使它们连接。 X_0 是一个数组 $\{1\}$, 每个连接的元素

中都包含元素 1, 而非连接元素都均为元素 0。接下来, 收缩操作可以减小干扰, 并易于实施清除操作。定义如下:

$$A \otimes \{B\} = ((\dots ((A \otimes B^1) \otimes B^2) \dots)) \otimes B^n, \quad \{B\} = \{B^1, B^2, \dots B^n\} \quad (11)$$

式 (11) 用于细化 A ; 它代表结构元素序列的细化。最后, 清除操作适于清除干扰。处理如下:

$$X = I - R^D(F) \quad (12)$$

其中: X 等于输入图像 I , 但所有对象的非接触像素都已清除。

3 实验结果与分析

3.1 数据集和相关参数设定

实验数据来自手术的实时视频。为了验证所提出方法的性能, 将手术视频处理为单个图像。最终获得了不同的连续环形撕囊术的图像并进行了测试, 以验证所提出的方法。

在进行对比实验之前, 必须正确地选择一些关键参数。该方法有多个参数, 实验表明, 其中只有 3 个参数对算法的检测提取性能有重大影响。它们分别是: 尺度大小 σ , 阈值系数 k 和滑动窗口的大小 $N \times N$ 。

针对不同的尺度 σ 进行测试, 以选择其理想参数。根据实验, 如果 σ 设置得太小, 边界将无法很好地提取并且容易丢失; 相反, 如果 σ 设置得太大, 一些干扰将被误检边界像素。

滑动子图像的大小也会影响检测结果。子图像的值设定过小会增加处理时间, 从而增加系统负担; 子图像尺寸值设定过大会导致不精确的检测结果。

阈值系数 k 对局部阈值的过程有影响, 从而影响检测结

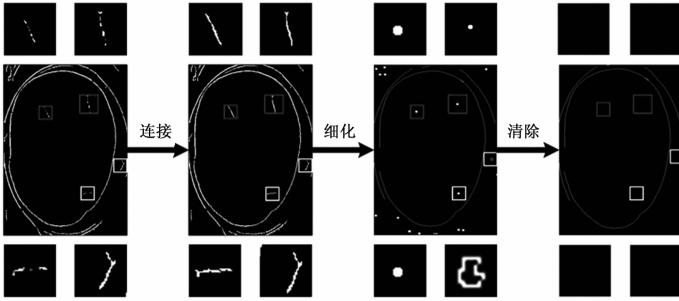


图 10 后处理各操作及原理

果。如果 k 的值太小，将导致阈值过小，并错误地将背景像素识别为边界像素；相反，如果将该值设置得太大，则会产生宽松的阈值，并且会丢失一些真实的边界像素。

在图 11 中，横坐标表示 3 种不同干扰情况下的测试情况，以纵坐标表示测试 20 张图像时，能够检测出 80% 边界的数量。根据图 11 (a) 的直方图可得尺度大小取 $\sigma = 1$ 将收到满意的结果。从图 11 (b) 所示直方图得出的结论是子图像的大小取 9×9 将收到最佳响应。如图 11 (c) 所示，在 3 种情况下，阈值系数取 $k = 1$ 性能良好且稳定。

3.2 定性评估

将结构检测方案与一些代表性的边界检测方案进行了比较，以证明其有效性。分别在给定的图像数据集中使用 Canny^[12]，Roberts^[13] 和 Tensor Voting^[14]。

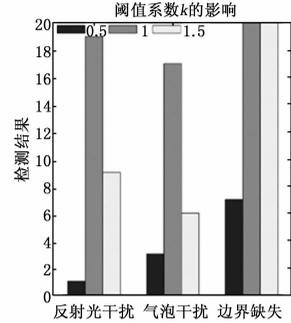
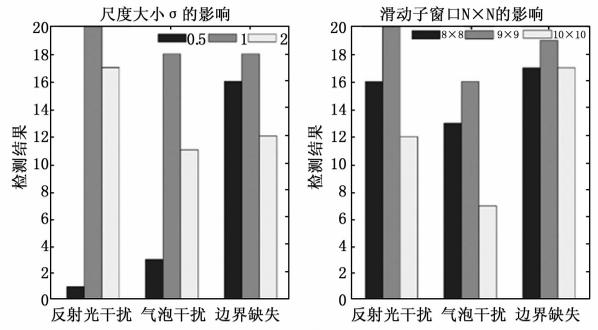


图 11 关键参数的设定对检测过程的影响

Canny 算子很容易在白内障图像中检测到错误的检测结果。其在图 12 (b1) (b2) (b3) 中的结果表明，尽管这一方法检测到边界，但同时保留了很多干扰。

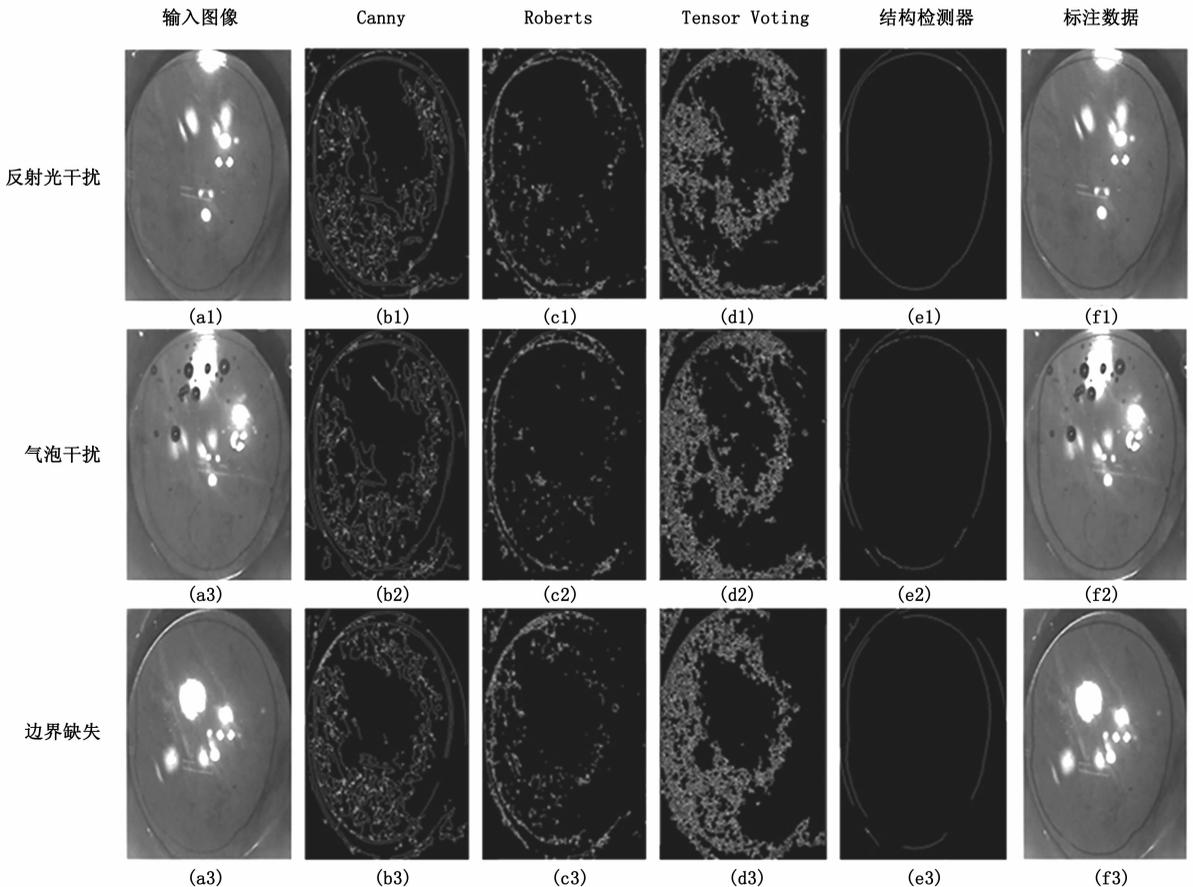


图 12 不同方法所得结果及人工标注数据

从图 12 (c1) (c2) (c3) 得出结论, Roberts 检测子的表现并不令人满意。它的算法是依靠在对角线方向上两个相邻像素之间的差异近似边缘幅度以检测边缘。与 Canny 检测器的结果相比, 检测到的干扰减少了许多, 但是检测到的边界也会同时减少。

图 12 (d1) (d2) (d3) 中的结果表明, Tensor Voting 不适用于此处。它在边界检测领域, 尤其是在低对比度图像中, 具有独特的检测优势。其原理是通过球张量和棒状张量不断迭代检测边界和缺失曲线。如图中所见, 它确实检测到了 Canny 和 Roberts 都检测不到的边界像素, 但由于其对干扰的响应敏感特性, 使得其将粘弹剂和眼内组织也识别为边界。

图 12 (e1) (e2) (e3) 展示了结构检测模型的检测结果, 可以得出, 这一方案的性能优于 Canny 算子, Roberts 检测子和 Tensor Voting 三种方法。如图 12 所示, Canny 可以很好地检测边界, 但是容易导致错误检测。Roberts 的倾斜检测功能使它容易将边界附近的干扰像素识别为目标像素, 从而增加了误报率。辅助药物和眼内组织对张量投票的迭代过程具有不可逆的影响, 从而检测了较多干扰。

3.3 定量评估

除去定性评估之外, 实验还进行了定量评估, 以将所提出的方法与上述 3 种代表性方法进行比较。在这项研究中, 列出了 3 个性能指标, 包括精确度 (Pr), 召回率 (Re) 和 F 测度 (Fm), 其定义如下:

$$Pr = \frac{TP}{TP + FP} \quad (13)$$

$$Re = \frac{TP}{TP + FN} \quad (14)$$

$$Fm = 2 \times \frac{Pr \times Re}{Pr + Re} \quad (15)$$

其中: TP , FP 和 FN 分别代表真阳性, 假阳性和假阴性。 Fm 可以评估这些方法的整体性能。

根据计算的指标, 结果记录在图 13 中。如图所示, 该方法的精确度/召回率曲线高于 Canny 检测器, Roberts 检测器和 Tensor Voting 方法, 证明了该方法的准确性和高计算效率。

实验同时记录了每种方法的运行时间, 以证明该方法具有较高的计算效率。表 1 汇总了所有这些方法对尺寸为 300×450 像素的测试图像的平均处理时间, 以进行比较。从表 1 可以得出结论, 该方法具有较高的计算效率。

表 1 不同方法耗时记录

检测方案	耗时/ms
Canny 算子	37
Roberts 检测子	43
Tensor Voting	84
结构检测方法	32

4 结果及讨论

本次研究提出了一种新的边界提取方案, 用于白内障

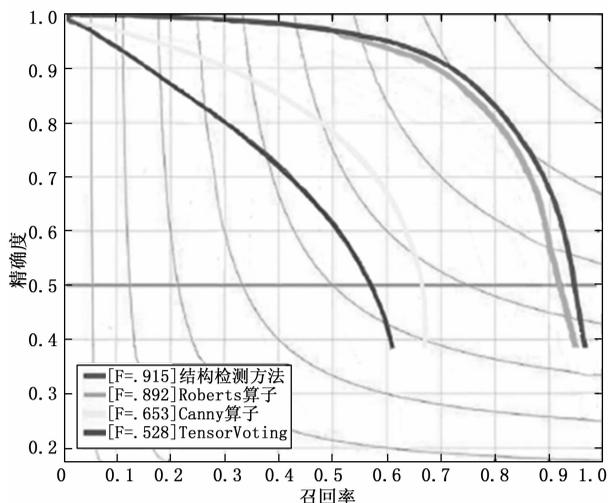


图 13 不同方法所得结果定量对比

图像中的连续环形撕囊边界检测, 并已通过从医院收集的数据集验证了其性能。所提出的模型可以提取连续环形撕囊的边界, 该边界是在结构检测模型之后计算出来的, 可以通过局部阈值和后处理来消除干扰。

实验结果表明, 在评价白内障连续环形撕囊边界方面, 该方案比传统的 Canny 算子, Roberts 检测子和 Tensor Voting 具有更好的检测判别能力。通过应用结构检测模型方案, 即使在低对比度条件或不同类型的干扰情况下, 也可以提取连续环形撕囊的边界。

连续曲线撕囊的边界可以为白内障手术机器人提供必要的反馈信息。我们的工作可以增加对手术机器人虚拟固定装置的约束。实验结果表明, 该方案鲁棒性良好, F 测度取得了 0.915 的结果。将图像处理的结果用作机器人运动控制的虚拟约束, 可以使机器人操作更加安全, 提高了操作的精度。

5 结束语

本文研究了白内障连续环形撕囊边界的提取方案, 并且实现了在白内障手术视频中提取连续环形撕囊边界这一目的。经过实验验证, 所提方法具有良好的可行性和效果, 与多种图像处理方案对比表明, 在提取的精确度和准确度上有大幅提升, 能够为手术医师或机器人辅助手术操作提供良好的约束信息, 提升手术的安全性和精准度。

参考文献:

[1] Khanna R, Pujari S, Sangwan V. Cataract surgery in developing countries [J]. Current opinion in ophthalmology, 2011, 22 (1): 10-14.

[2] Lamoureux E L, Fenwick E, Pesudovs K, Tan D. The impact of cataract surgery on quality of life [J]. Current opinion in ophthalmology, 2011, 22 (1): 19-27.

[3] Niemeijer M, Van Ginneken B, Staal J, et al. Automatic detection of red lesions in digital color fundus photographs [J]. IEEE

Transactions on medical imaging, 2005, 24 (5): 584 - 592.

[4] Chaudhuri S, Chatterjee S, Katz N, et al. Detection of blood vessels in retinal images using two-dimensional matched filters [J]. IEEE Transactions on medical imaging, 1989, 8 (3): 263 - 269.

[5] Tan C S H. Cost effectiveness of phacoemulsification in developing countries [J]. Eye, 2010, 24 (12): 1827.

[6] Harini V, Bhanumathi V. Automatic cataract classification system [A]. International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP) [C]. 2016, 0815 - 0819.

[7] Niya C P, Jayakumar T V June. Analysis of different automatic cataract detection and classification methods [A]. IEEE International Advance Computing Conference (IACC) [C]. 2015, 696 - 700.

[8] Sharifi M, Salarieh H, Behzadipour S, et al. Beating-heart robotic surgery using bilateral impedance control: Theory and experiments [J]. Biomedical Signal Processing and Control, 2018, 45: 256 - 266.

[9] Shen X, Zhou J, Hamam A, et al. Haptic-enabled telementoring surgery simulation [J]. IEEE MultiMedia, 2008, 15 (1): 64 - 76.

[10] Liu W, Su Y, Wu W, et al. An operating smooth man-machine collaboration method for cataract capsulorhexis using virtual fixture [J]. Future Generation Computer Systems, 2018, 98: 522 - 529.

[11] Zang D, Bian G B, Wang Y, et al. An Extremely Fast and Precise Convolutional Neural Network for Recognition and Localization of Cataract Surgical Tools [A]. 22nd International Conference on Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention (MICCAI) [C]. 2019, 55 - 64.

[12] Rong W, Li Z, Zhang W, et al. An improved CANNY edge detection algorithm [A]. IEEE International Conference on Mechatronics and Automation [C]. 2014, 577 - 582.

[13] Shrivakshan G T, Chandrasekar C. A comparison of various edge detection techniques used in image processing [J]. International Journal of Computer Science Issues (IJCSI) 2012, 9 (5): 269.

[14] Guan H, Li J, Yu Y, et al. Iterative tensor voting for pavement crack extraction using mobile laser scanning data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 53 (3): 1527 - 1537.

(上接第 45 页)

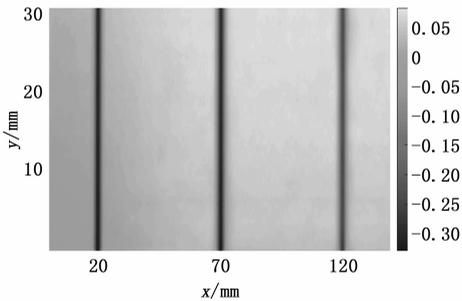


图 14 裂纹检测图像强度图 (编码器脉冲采样)

采用数据采集卡内部晶振时钟作为数据采集卡采集数据的触发时钟得到的强度图如图 15 所示, 成像结果的裂纹位置与空间实际裂纹位置有一个明显的偏移, 因而无法准确判断损伤部位的位置信息。

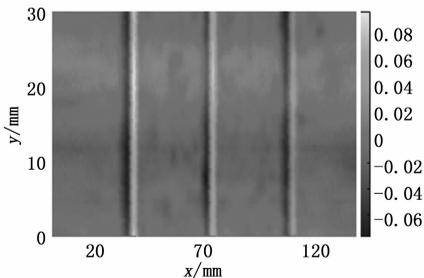


图 15 裂纹检测图像强度图 (采集卡内部时钟采样)

5 结束语

本文利用编码器配合位移台, 基于涡流检测原理, 实现了对不锈钢板的二维平面连续扫查。通过对电机连续运动过程中编码器的输出脉冲与晶振时钟脉冲进行研究,

并分别将其作为数据采集卡采集数据的触发时钟, 设计了电涡流检测二维连续同步扫查系统。通过对不同触发时钟得到的实验结果与实际不锈钢板进行比较, 证明了采用编码器脉冲作为数据采集卡采集数据的触发时钟的可行性。

参考文献:

[1] 林俊明. 电磁无损检测技术的发展与新成果 [J]. 工程与试验, 2011, 51 (1): 1 - 5.

[2] 刘康, 彭乐锋, 刘继. 涡流检伤信号高速实时采集系统的研究 [J]. 微处理机, 2017, 38 (6): 86 - 89.

[3] 王建中, 杨璐. 高速实时系统数据采集与传输 [J]. 计算机科学, 2016, 43 (S2): 604 - 606.

[4] 何南南. 图像质量评价方法的研究 [D]. 北京: 北京印刷学院, 2019.

[5] Heuer H, Schulze M H. Eddy current testing of carbon fiber materials by high resolution directional-sensors [A]. Proceedings of Smart Materials & Structures NDT in Aero Space [C]. Canada, 2011.

[6] 易志强, 韩宾, 江虹, 等. 基于 FPGA 的多通道同步实时高速数据采集系统设计 [J]. 电子技术应用, 2019, 45 (6): 70 - 74.

[7] 王欣, 展慧. 基于 Lab VIEW 的通信原理实验平台设计和教学体系研讨 [J]. 教育现代化, 2019 (96): 1 - 2.

[8] 马玲芝, 李鸿. 基于国产 FPGA 的增量式光电编码器测速电路研究 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (1): 233 - 236.

[9] Zhao C, Wan Q, Lu X, et al. Automatic real time adjustment of pulse signal of incremental photoelectric encoder [J]. Optical Review, 2017, 24 (6): 686 - 692.

[10] 纳杰斯, 丁明惠. 基于 LabVIEW 的通用且可定制的数据采集处理软件设计 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (11): 158 - 161.