

基于 OpenCV 和改进 Canny 算子的路面裂缝检测

徐 欢, 李振璧, 姜媛媛, 黄剑波

(安徽理工大学 电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232001)

摘 要: 在路面裂缝检测中, 检测的实时性和准确性同样重要, 利用 CCD 摄像机采集到的视频图像, 提出一种基于 OpenCV 开源平台及改进 Canny 算子的路面裂缝检测技术。通过对 Canny 算子的分析与研究, 找到其存在的缺陷, 利用形态学滤波对原有的滤波方式进行改进, 使用 Ostu 算法实现双阈值的自适应获取。实验结果表明, 改进后的 Canny 算子对路面裂缝检测时, 保证了检测的实时性, 且提高了检测的精度。

关键词: OpenCV; Canny 算子; 路面裂缝检测; 形态学滤波; Ostu 算法

中图法分类号: TP391.41 **文献标识号:** A **文章编号:** 1000-7024 (2014) 12-4254-05

Pavement crack detection based on OpenCV and improved Canny operator

XU Huan, LI Zhen-bi, JIANG Yuan-yuan, HUANG Jian-bo

(College of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: In the pavement crack detection, the real-time and accuracy of detection are both important, by using video images taken by the CCD camera, a kind of pavement crack detection technique based on OpenCV open source platforms and the improved Canny edge detection operator was put forward. By analyzing the Canny operator, its shortcomings were found out. The original filter was improved by using the adaptive morphological filtering, and the Ostu algorithm was used to achieve the dual threshold gain. The experimental results show that the improved Canny operator on the pavement crack detection not only guarantees the real-time detection, but improves the detection accuracy.

Key words: OpenCV; Canny operator; pavement crack detection; morphological filtering; Ostu algorithm

0 引 言

早期人工进行检测的方式无法保证人员、财产的安全, 而且大量空耗时间、人力、物力。通过计算机视觉和图像处理技术, 准确、高效地检测出路面裂缝已成为当前研究的重点和热点。

目前, 大部分基于计算机视觉的路面裂缝检测方法无法同时满足实时性和精确性的要求。由于路面本身纹理及光照、阴影等外在干扰使得路面图像包含大量噪声, 导致了路面裂纹检测变得十分复杂。现在常用的路面裂纹检测方法有基于连通域相关^[2]、边缘检测^[3,4]和自适应阈值分割^[5]等。

文献 [6] 在对路面破损图像处理的边缘检测方法的研究中提出了基于形态学和 Sobel 算子的路面破损判别算法。本文在此基础上, 利用安装在汽车前端的 CCD 摄像机得到

视频图像, 使用 OpenCV 函数库, 通过对 OpenCV 中的 Canny 边缘检测算法的改进, 实现实时、准确的路面裂缝检测。

1 Canny 算子和 OpenCV 平台

19 世纪 80 年代由 John Canny 提出的 Canny 算子是一种基于最优化准则的边缘检测算子。Canny 算子因其严格的评价标准、良好的抗干扰能力以及较高的检测精度被广泛应用于图像边缘检测^[7]。OpenCV (open source computer vision library) 是由一系列 C 函数和少量 C++ 构成的开源计算机视觉库, 实现了在图像处理和计算机视觉方面的诸多算法, 其中就包括 Canny 算子。它的设计目标是执行速度快, 主要关注实时应用, 能够充分发挥多核处理器的优势, 涵盖了如医学成像、特征检测、运动识别与跟踪、机器人和 3D 重建等计算机视觉应用领域^[8]。

收稿日期: 2013-12-03; 修订日期: 2014-02-15

基金项目: 安徽省高校省级自然科学基金项目 (KJ2012B062)

作者简介: 徐欢 (1989-), 男, 安徽桐城人, 硕士研究生, 研究方向为图像识别、图像处理; 李振璧 (1959-), 男, 山东济宁人, 硕士, 教授, 研究方向为计算机视觉、控制理论等; 姜媛媛 (1982-), 女, 安徽阜阳人, 硕士, 副教授, 研究方向为模式识别、智能诊断及故障预测; 黄剑波 (1990-), 男, 安徽合肥人, 硕士研究生, 研究方向为物联网技术。E-mail: xuhuan_009@163.com

2 基于 OpenCV 函数库的路面裂缝检测

针对路面图像的复杂性, 本文结合 OpenCV 及其函数库的优点, 分步实现了路面裂缝检测, 其主要包括以下步骤:

(1) 视频图像的采集: 当 CCD 摄像机作为输入设备时, 可以通过一种便捷的方式来处理实时读入的视频流, 即 OpenCV 中的函数 `cvCreateCameraCapture (int index)`, 可以通过 `index` 的参数确定要使用的摄像机, 当只有一个摄像机时, 参数取 0。如果读入成功, 将返回一个指向已经初始化的 `cvCapture` 结构的指针, 随后就可以读入视频帧。

(2) 获取视频中的图像序列帧: 创建一个有效 `cvCapture` 结构之后, 就可以开始读视频帧。本文利用 `cvQueryFrame (cvCapture * capture)` 函数, 该函数以 `cvCapture *` 指针为参数, 帧读入成功时返回 (1), 否则读入 0。然后将视频帧复制到一个由 OpenCV 管理的内存空间。

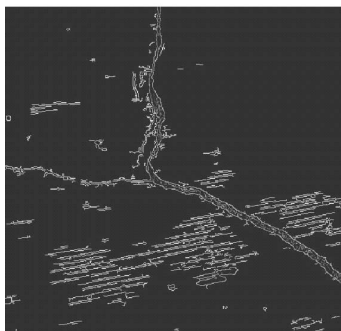
(3) 对视频图像序列帧灰度化: 为了使方案满足实时性的要求, 提高图像处理速度, 对其预处理的是灰度化处理, 使之成为 8 位的灰度图像, 以此来减少处理路面图像的数据量^[9]。这个转换过程可以用 OpenCV 中的函数 `cvCvtColor ()` 函数来实现。

(4) 路面图像裂缝检测: 本文通过 Canny 算子对路面裂缝进行检测, 利用 OpenCV 中的 `CVCanny ()` 函数。函数采用 Canny 算子发现输入图像的边缘而且在输出图像中标识这些边缘。

将上述流程通过 OpenCV2.4 进行实现, 实验结果如图 1 所示。



(a) 视频提取出的路面裂缝图像



(b) 边缘提取后的路面裂缝图像

图 1 路面裂缝检测实验结果

由图 1 (b) 可以看出, 虽然 Canny 边缘检测算子可以很好地检测出路面裂缝的边缘, 但是, 也包含大量的虚假边缘。

下文将对 Canny 边缘检测算子的原理进行分析与研究, 找出 Canny 边缘检测算子存在的问题, 以期找出解决问题的方法。

3 Canny 算子的原理与缺陷

Canny 边缘检测算子首先通过高斯滤波函数对图像进行滤波去噪, 然后对去噪后的图像进行梯度幅值计算, 之后进行梯度幅值方向上非极大值抑制, 最后通过双阈值处理实现边缘点检测及边缘连接。

3.1 Canny 边缘检测算子实现原理

(1) 图像的高斯平滑滤波

以二维高斯函数构建滤波器, 通过滤波模板与原图像的卷积可实现平滑图像。二维高斯函数表达式为

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

其梯度矢量为

$$\nabla G = \begin{bmatrix} \partial G / \partial x \\ \partial G / \partial y \end{bmatrix} \quad (2)$$

为得到更高的处理速度, 如下式将 ∇G 中的两个滤波卷积模板进行分解后, 得到了两个更为简单的一维行列滤波器, 从而实现了提高速度的目的

$$\frac{\partial G}{\partial x} = kxe^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}e^{-\frac{y^2}{2\sigma^2}} = h_1(x)h_2(y) \quad (3)$$

$$\frac{\partial G}{\partial y} = kye^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}e^{-\frac{y^2}{2\sigma^2}} = h_1(y)h_2(x) \quad (4)$$

式中: k 为常数。 σ 为方差, 人为设置的平滑参数, 控制图像平滑的程度。

(2) 梯度幅值和方向的计算

为得到高斯平滑滤波后图像的梯度方向和幅值, Canny 边缘检测算子利用邻域一阶偏导的有限差分来进行计算。图像 $I(i, j)$ 在 x 方向的偏导数为 $P(i, j)$, 在 y 方向上的偏导数为 $Q(i, j)$

$$P(i, j) = \frac{I[i, j+1] - I[i, j] + I[i+1, j+1] - I[i+1, j]}{2} \quad (5)$$

$$Q(i, j) = \frac{I[i, j] - I[i+1, j] + I[i, j+1] - I[i+1, j+1]}{2} \quad (6)$$

则图像每个像素点的梯度幅值 M 、方向 θ 为

$$M(i, j) = \sqrt{P(i, j)^2 + Q(i, j)^2} \quad (7)$$

$$\theta(i, j) = \arctan(Q(i, j)/P(i, j)) \quad (8)$$

(3) 图像进行梯度方向上的非极大值抑制

为了得到精准而细化的图像边缘, 在对图像梯度方向和幅值进行计算之后, 还必须对图像结果进行非极大值抑

制。其具体过程是：遍历图像，利用计算得到的图像梯度幅值和方向，通过梯度方向上像素幅值的比较来判断是否为边缘点；若某一像素点的幅值小于梯度方向上两个像素幅值中的任一个，则表示这一像素点不是边缘点，将该点的幅值设置为 0；反之则表示图像中这一像素点为可能的边缘点。

(4) 阈值检测和连接边缘

图像经过非极大值抑制后，将梯度值不为零的点连接成边缘，则边缘检测的结果必然会有大量的虚假边缘。Canny 算法会对图像进行双阈值处理来消除虚假边缘以及连接断续边缘。具体方法是：选择高低两个阈值，作用于非极大值抑制图像，利用高阈值得到的图像虽然有较少的假边缘，但是存在有较多的间断；同时通过低阈值得到的图像有着较为全面的边缘信息，但是存在的虚假边缘也较多。因此，利用高、低阈值分别处理过的两幅图，在高阈值处理过的图像中把图像可能的边缘连成轮廓，当遇到轮廓的断点时，在低阈值图像对应位置的 8 邻域内寻找边缘点，并将找到的点集成到高阈值图像的边缘上。如此重复，直到得到较为连续的边缘。

3.2 Canny 边缘检测算子存在的缺陷

由上述算法流程可知，平滑滤波方差、高低阈值这 3 个人工设定的参数是图像提取的关键。在图像的平滑过程中， σ 设置过大会使通频带较窄，在避免假边缘出现的同时也会丢失有用的边缘信息； σ 过小虽然保留了图像的更多细节，但对噪声的抑制下降，容易出现假边缘。最后一步的双阈值处理也存在同样的问题，阈值设置过高，会造成边缘断裂、不连续；阈值过低会，导致边缘出现较多的伪边缘。因此，传统的 Canny 算法不具备适应性和实时性，在图像处理的应用中存在较大的局限性。

4 Canny 边缘检测算子的改进

通过上文对 Canny 边缘检测算子的原理和缺陷进行分析，结合路面裂缝图像的特点，下文对 Canny 算子进行了可行、高效的改进。在图像去噪方面使用多尺度形态学滤波代替原有高斯滤波；在高、低阈值获取方面，抛弃传统的人工设置，通过 Otsu 算法，实现双阈值的自适应获取。

4.1 多尺度灰度形态学滤波

形态学中的开运算是先腐蚀，后膨胀处理^[10]。开运算可以断开狭窄的间断和消除细突出物。闭运算是先膨胀，后腐蚀处理，能消除狭窄的间断和长细的鸿沟，消除小的孔洞，并填补轮廓线的裂痕。开、闭操作都可使图像的轮廓变得光滑。膨胀和腐蚀是形态学处理的基础，设 $F(m,n)$ 代表输入图像，其中 (m,n) 为图像上的像素坐标。 $B(s,t)$ 为结构元素集合。图像的膨胀和腐蚀定义如下：

F 被 B 膨胀

$$(F \oplus B)(m,n) = \max\{F(m+s,n+t) + B(s,t)\} \quad (9)$$

F 被 B 腐蚀

$$(F \ominus B)(m,n) = \min\{F(m+s,n+t) - B(s,t)\} \quad (10)$$

灰度开运算和闭运算

$$F \circ B = (F \ominus B) \oplus B \quad (11)$$

$$F \bullet B = (F \oplus B) \ominus B \quad (12)$$

则多尺度灰度形态学滤波运算公式如下

$$K_i = (((F \circ B_i) \bullet B_i) \circ B_i) \bullet B_i \dots \quad (13)$$

式中： K_i ——滤波后的图像， i ——结构元素 B 的半径， $i = 1, 2, \dots, n$ 。

经过多尺度形态学滤波之后，图像取得了良好的平滑降噪效果，同时保留了更多的图像边缘细节。

4.2 Otsu 方法自适应设定阈值

最大类间方差法（Otsu 算法）是一种在类间方差最大的情况下，自适应确定阈值的方法^[11]。其基本思想是把图像像素分为背景和目标两类，通过搜索、计算类间方差最大值，得到最优阈值^[12]。最大类间方差法因其计算简单、适应性强的特点，成为目前广泛使用的阈值自动选取方法。

将非极大值抑制后的图像像素分为三类，梯度幅值分为 l 级： H_0 为非边缘像素， H_1 为可能的边缘点像素， H_2 为边缘点像素。设 N 为图像的像素总数，梯度幅值为 i 的像素数量为 n_i ，占整个图像比率为 P_i 为

$$P_i = \frac{n_i}{N}, i = 0, 2, \dots, l-1 \quad (14)$$

令 H_0 包含模级 $[0, \dots, k]$ 的像素， H_1 包含模级 $[k+1, \dots, m]$ 的像素， H_2 包含模级 $[m+1, \dots, l-1]$ 的像素。

设 E 为总像素的梯度幅值期望值，对应 H_0 、 H_1 、 H_2 的梯度幅值期望值为 $e_0(k)$ 、 $e_1(k,m)$ 、 $e_3(m)$ ，则

$$E = \sum_{i=0}^{l-1} iP_i \quad (15)$$

$$\begin{cases} e_0(k) = \frac{\sum_{i=0}^k i \cdot P_i}{\sum_{i=0}^k P_i} \\ e_1(k,m) = \frac{\sum_{i=k+1}^m i \cdot P_i}{\sum_{i=k+1}^m P_i} \\ e_2(m) = \frac{\sum_{i=m+1}^{l-1} i \cdot P_i}{\sum_{i=m+1}^{l-1} P_i} \end{cases} \quad (16)$$

定义 $P(k)$ 、 $P(k,m)$ 、 $P(m)$ 为

$$P(k) = \sum_{i=0}^k P_i; P(k,m) = \sum_{i=k+1}^m P_i; P(m) = \sum_{i=m+1}^{l-1} P_i \quad (17)$$

则评价函数为

$$\sigma^2(k, m) = [e_0(k) - E]^2 \cdot P(k) + [e_1(k, m) - E]^2 \cdot P(k, m) + [e_2(m) - E]^2 \cdot P(m) \quad (18)$$

设所需的两个最佳阈值为: k^* 和 m^* , 它们是使 $\sigma^2(k, m)$ 最大的值。我们用下式寻找最佳阈值^[13]

$$\sigma^2(k^*, m^*) = \max_{0 < k < m < I-1} \sigma^2(k, m) \quad (19)$$

所求的 k^* 、 m^* 分别为 H_0 、 H_1 、 H_2 区间的分界点, 即为 Canny 算法的低阈值和高阈值。

5 实验结果及分析

为评价上述算法的性能, 本文采用的实验平台为 AMD A6 2.7 G 四核处理器, 4 G 内存, 2 G 显存的计算机, 在 OpenCV2.4+VS2010 开发环境下进行编程实现。对上文中的裂缝图像进行检测, 得到的实验结果如图 2 所示。



图 2 Canny 算子改进后的检测结果

本文对其他一些实际采集到的路面裂缝图像也进行了检测, 其检测结果如图 3 所示。

图 1 (a) 中路面纹理明显, 图 3 (a)-1 中光照、阴影干扰较强且裂缝信息微弱, 图 3 (b)-1 中裂缝较为复杂, 由实验结果可以看出, 改进的 Canny 边缘检测算子较之于传统的 Canny 算子有着明显的优势, 有效的去除了虚假边缘, 同时保留了必要的边缘细节。

利用峰值信噪比 (PSNR) 对实验结果进行客观评价, 可以更加明确本文改进 Canny 算子的优势。PSNR 定义如下

$$PSNR = 10 \lg \frac{M \cdot N \cdot 255^2}{\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} (f(i, j) - y(i, j))^2} \quad (20)$$

式中: $f(i, j)$ 和 $y(i, j)$ ——参考图像和经过处理后的图像像素灰度值, M 和 N ——图像的长宽像素。

对采集到的图 1 (a) 经过 Canny 算子、文献 [6] 以及本文改进 Canny 算子处理后, 其结果的性能比较见表 1。

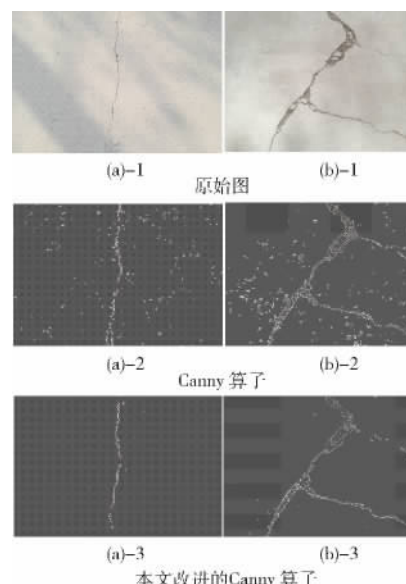


图 3 改进的 Canny 算子与传统的算子结果比较

表 1 性能比较

	Canny 算子的 处理结果	文献 [6] 的 处理结果	本文改进 Canny 算子的处理结果
PSNR	20.208	24.381	30.745

综上所述, 无论是从视觉效果, 还是从客观评价来看, 利用本文算子对路面裂缝图像检测时, 能够在确保检测实时性的同时兼顾检测的精度。

6 结束语

本文提出了一种基于 OpenCV 及改进的 Canny 算子的路面裂缝检测技术。通过图像的边缘信息实现路面裂缝的检测, 并且在边缘检测时, 利用多尺度形态学和 Ostu 法对传统的 Canny 边缘检测算子进行改进, 实现了实时、准确的路面裂缝检测, 解决了路面裂缝检测时实时性和精确性无法同时满足的问题, 为后续道路监控和路面裂缝检测奠定了基础。

参考文献:

- [1] SUN Zhaoyun, WEN Shiwen, DUAN Zongtao. Research of asphalt pavement surface cracks image processing system based on DSP [J]. Computer Engineering and Design, 2010, 39 (7): 1481-1483 (in Chinese). [孙朝云, 温世文, 段宗涛. 基于 DSP 的沥青路面裂缝图像处理系统研究 [J]. 计算机工程与设计, 2010, 39 (7): 1481-1483.]
- [2] LIU Fanfan, XU Guo'ai. Cracking automatic extraction of pavement based on connected domain correlating and Hough transform [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2009, 32 (2): 24-28 (in Chinese). [刘凡

- 凡, 徐国爱. 基于连通域相关机 Hough 变换的公路裂缝提取 [J]. 北京邮电大学学报, 2009, 32 (2): 24-28.]
- [3] LI Gang, HE Yuyao. Edge detection for road crack image with multi-direction morphological structuring elements [J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46 (1): 224-226 (in Chinese). [李刚, 贺昱曜. 多方位结构元素路面裂缝图像边缘检测算法 [J]. 计算机工程与应用, 2010, 46 (1): 224-226.]
- [4] LIU Yue, LI Yibing, XIE Hong. Edge detection based on 2D rosin threshold method in road crack images [J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26 (3): 70-76 (in Chinese). [刘悦, 李一兵, 谢红. 基于二维 Rosin 阈值方法的道路裂纹边缘检测 [J]. 中国公路学报, 2013, 26 (3): 70-76.]
- [5] XU Wei, TANG Zhenmin, LV Jianyong. Pavement crack detection based on image saliency [J]. Journal of Image and Graphics, 2013, 18 (1): 69-77 (in Chinese). [徐威, 唐振民, 吕建勇. 基于图像显著性的路面裂缝检测 [J]. 中国图象图形学报, 2013, 18 (1): 69-77.]
- [6] LI Li, SUN Lijun, CHEN Zhang. An edge detection method designed for pavement distress images [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2011, 39 (5): 688-692 (in Chinese). [李莉, 孙立军, 陈长. 适于路面破损图像处理的边缘检测方法 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2011, 39 (5): 688-692.]
- [7] LIU Chao, ZHOU Jiliu, HE Kun. Adaptive edge-detection method based on Canny algorithm [J]. Computer Engineering and Design, 2010, 31 (8): 4036-4038 (in Chinese). [刘超, 周激流, 何坤. 基于 Canny 算法的自适应边缘检测方法 [J]. 计算机工程与设计, 2010, 31 (8): 4036-4038.]
- [8] YU Shiqi, LIU Ruizhen. Learning OpenCV (Chinese version) [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009 (in Chinese). [于仕琪, 刘瑞祯. 学习 OpenCV (中文版) [M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.]
- [9] HUANG Kai, YU Xuecai. Research on railway automatic recognition by OpenCV [J]. Computer Engineering and Design, 2013, 34 (2): 574-578 (in Chinese). [黄凯, 余学才. 基于 OpenCV 的铁路轨自动识别研究 [J]. 计算机工程与设计, 2013, 34 (2): 574-578.]
- [10] MA Changxia, ZHAO Chunxia. Pavement cracks detection based on NSCT and morphology [J]. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics, 2009, 21 (12): 1761-1767 (in Chinese). [马常霞, 赵春霞. 结合 NSCT 和图像形态学的路面裂缝检测 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2009, 21 (12): 1761-1767.]
- [11] FENG Bin, WANG Zhang, SUN Jun. Image threshold segmentation with Ostu based on quantum-behaved particle [J]. Computer Engineering and Design, 2008, 29 (13): 3429-3431 (in Chinese). [冯斌, 王璋, 孙俊. 基于量子粒子群算法的 Ostu 图像阈值分割 [J]. 计算机工程与设计, 2008, 29 (13): 3429-3431.]
- [12] WANG Jigang, CHEN Jiaxin. Canny medical image edge detection algorithm based on improved filter [J]. Computer Measurement & Control, 2013, 21 (6): 1571-1579 (in Chinese). [王纪刚, 陈家新. 基于改进滤波的 Canny 医学图像边缘检测算法 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (6): 1571-1579.]
- [13] Rafael C Gonzalez. Digital image processing [M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007: 463-491.