

计算机视觉基础

章毓晋

清华计算机图书·译丛

Foundations of Computer Vision

计算机视觉基础

本书介绍计算机视觉的基础内容，比较侧重计算几何和目标检测方面。本书对图像网格的构建和叠加、德劳内三角剖分和沃罗诺伊镶嵌、多边形拼贴、图像拓扑等都有比较全面深入的介绍，并对图像结构给出了直观可视的描述。书中提供了大量相应的Matlab程序，可结合原理学习进行实验，以进一步加深理解并解决实际问题。

本书可作为信号与信息处理、通信与信息系统、电子与通信工程、模式识别与智能系统、计算机科学等学科大学高年级本科生或研究生专业课教材和教学参考书，还可供涉及图像和机器视觉技术的应用行业（如生物医学、电视广播、工业自动化、文档识别、机器人、电子医疗设备、遥感测绘、增强现实、智能交通和军事侦察等）的科技工作者和从业者参考和自学。

课件下载·样书申请



书圈

清华社官方微信信号



扫 我 有 惊 喜



定价：98.00元

清华计算机图书·译丛

计算机视觉基础

清华大学出版社



Springer

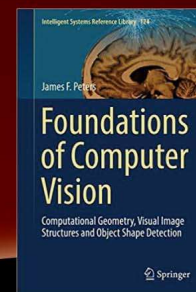
清华计算机图书·译丛

Foundations of Computer Vision

计算机视觉基础

[加] 詹姆斯·彼得斯 (James F. Peters) 著

章毓晋 译



清华大学出版社



第5章 边缘、线、角点、高斯核与沃罗诺伊网格

本章重点介绍数字图像中边缘、线和角点的检测

本章还介绍许多非线性滤波方法

一种方法是非线性方法的前提是该方法的输出与输入不直接成正比

还借助图像角点重新审视数字图像上的沃罗诺伊网格，并继续讨论图像几何内容



5.1 线性函数

设 a 是标量，且 $a \in \mathbb{R}$ 。

函数（映射） $f: X \rightarrow Y$ 是线性函数

相加性：对于 $a, b \in X$, $f(a + b) = f(a) + f(b)$

一致性：对于 $a, b \in X$, $f(ab) = af(b)$

非线性函数是具有非线性输出的函数（非线性函数不满足线性函数的相加性和一致性）

非线性函数的绘图是曲线



5.1 线性函数

高斯核

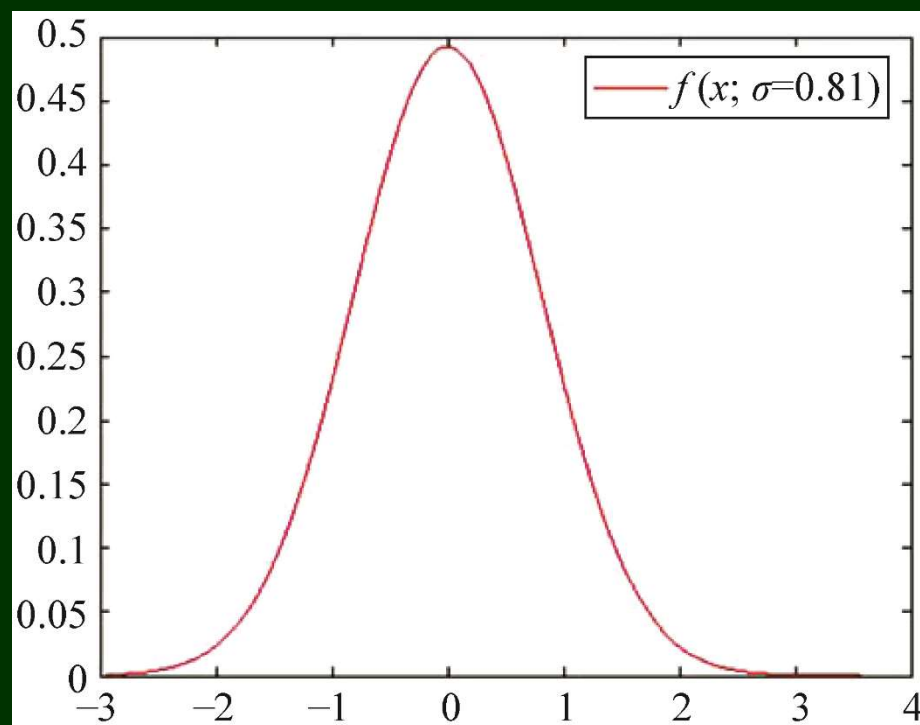
高斯核函数

$$f(x; \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right]$$

x 是空间参数

σ 是尺度参数

高斯核图





5.1 线性函数

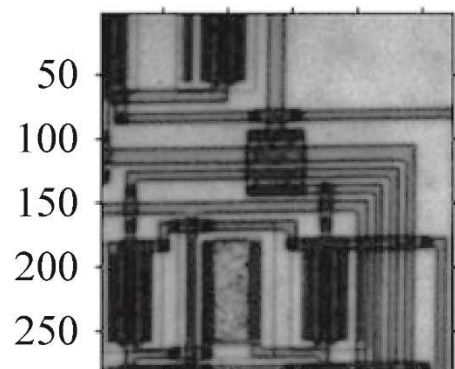
图像中的角点提供了沃罗诺伊网格生成器的良好来源。源自角点的沃罗诺伊网格提供了对图像的分割
网格多边形提供了完成如下工作的手段：

- (1) 图像分割：沃罗诺伊网格提供了一种将图像划分为非交叉凸多边形的直接方法，便于图像和场景分析以及图像理解
- (2) 目标识别：目标角点确定了可识别和比较的、独特（可识别）的凸子网格
- (3) 模式识别：基于角点的凸面图像子网格的排列构成了可以被识别和比较的图像图案



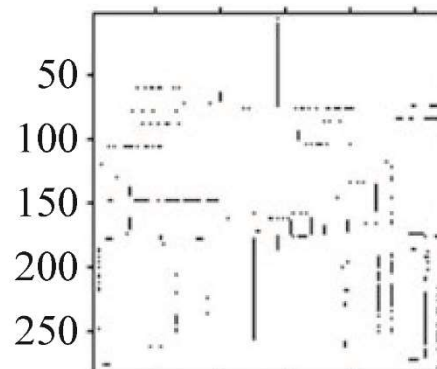
5.2 边缘检测

Circuit.tif



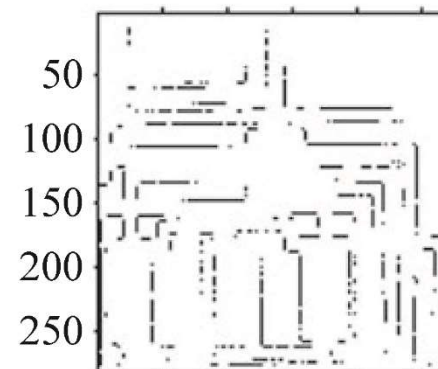
50 100 150 200 250

罗伯特滤波器



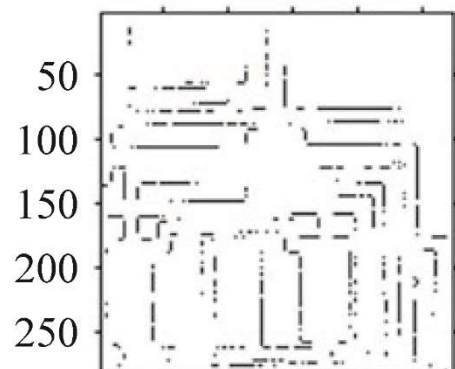
50 100 150 200 250

蒲瑞维特滤波器



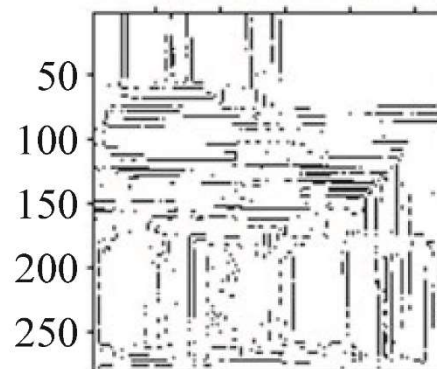
50 100 150 200 250

索贝尔滤波器



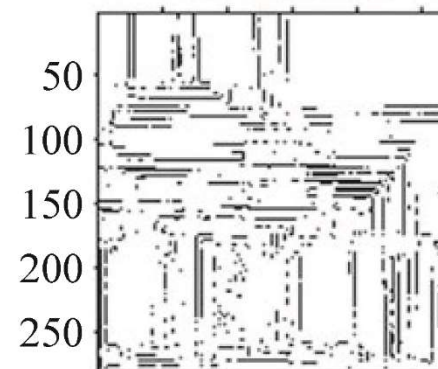
50 100 150 200 250

拉普拉斯滤波器



50 100 150 200 250

零交叉滤波器



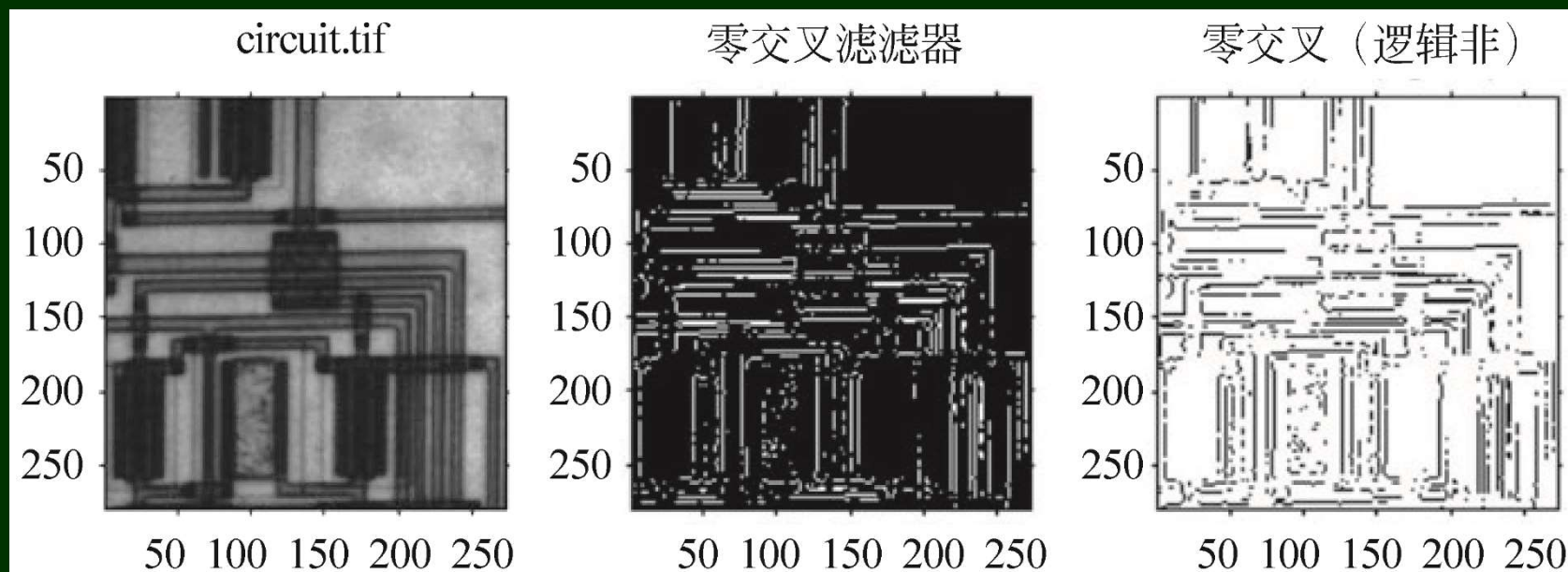
50 100 150 200 250



5.1 线性函数

Matlab有一个逻辑非运算符logical not

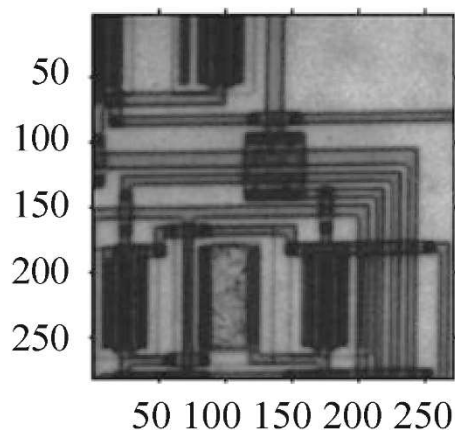
列表5.3中的方法可用于将每个滤波图像的外观从黑色背景上的白色边缘反转到白色背景上的黑色边缘



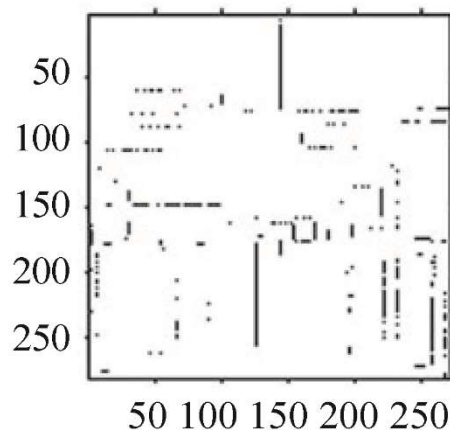


5.3 双精度拉普拉斯滤波器

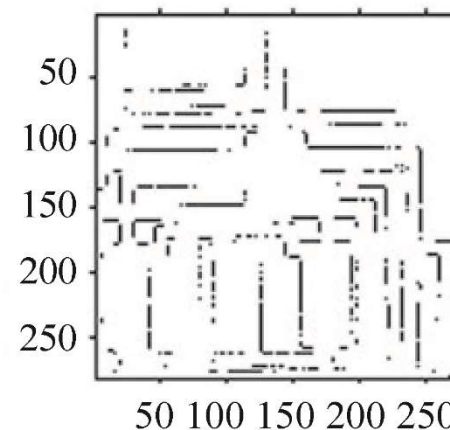
circuit.tif



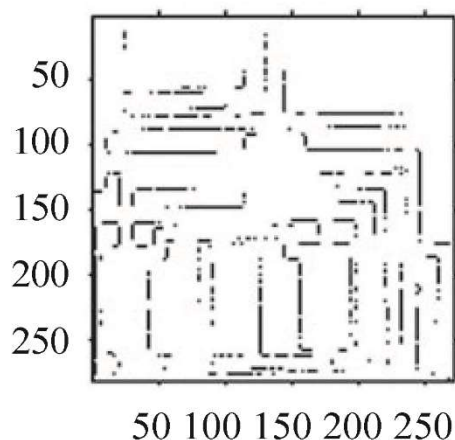
罗伯特滤波器



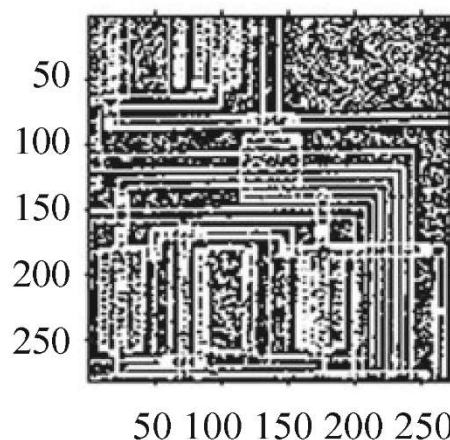
蒲瑞维特滤波器



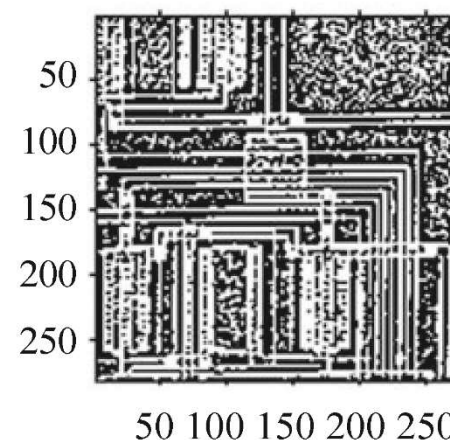
索贝尔滤波器



浮点拉普拉斯



低噪声拉普斯-高斯滤波器





5.4 增强数字图像边缘

作为图像增强步骤的边缘锐化常使用二阶拉普拉斯滤波器

对于图像 g 中的像素 $g(x, y)$ ，拉普拉斯滤波器的非离散形式 $\nabla^2 g(x, y)$ 由下式定义：

$$\nabla^2 g(x, y) = \frac{\partial^2 g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 g}{\partial y^2}$$

拉普拉斯滤波器的离散形式 $\nabla^2 g(x, y)$

$$\nabla^2 g(x, y) = f(x+1, y) + f(x-1, y) - f(x, y) + f(x, y+1) + f(x, y-1)$$

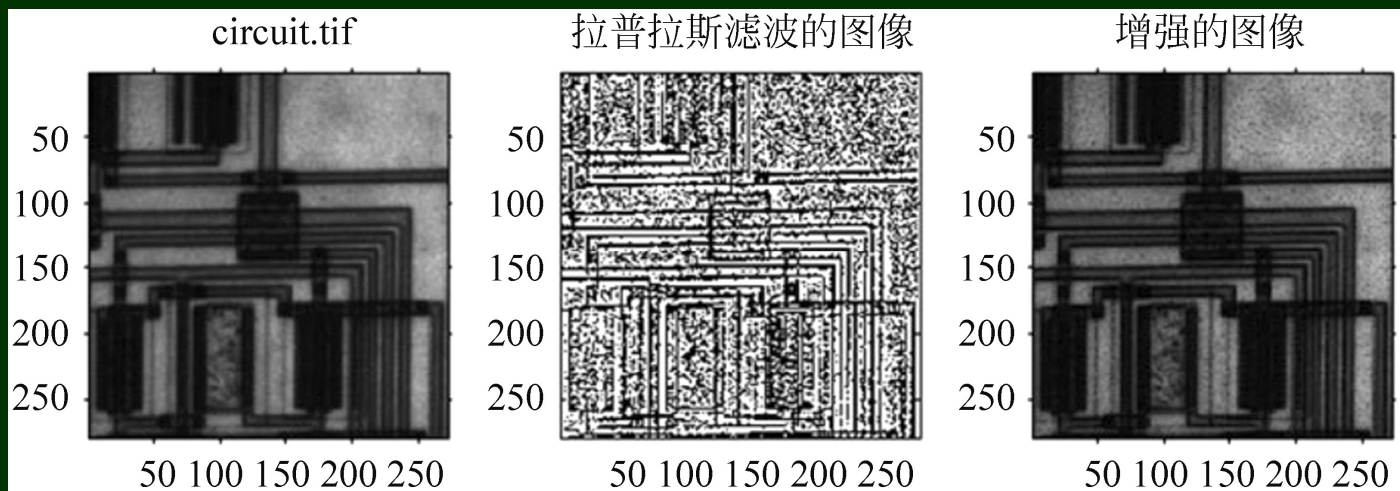


5.4 增强数字图像边缘

用于增强图像的二阶导数的基本方法是从原始图像中减去滤波图像

$$g(x, y) = g(x, y) - \nabla^2 g(x, y)$$

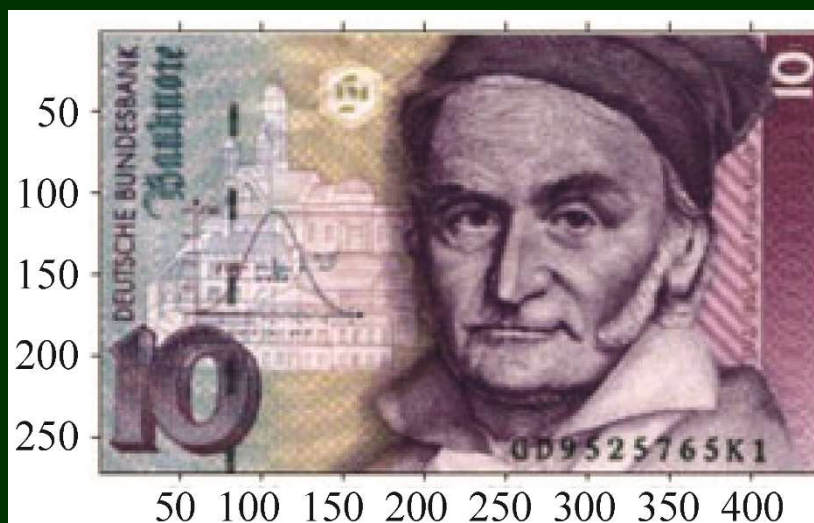
下图中，形状参数 $a = 1$ （高发生率的边缘）



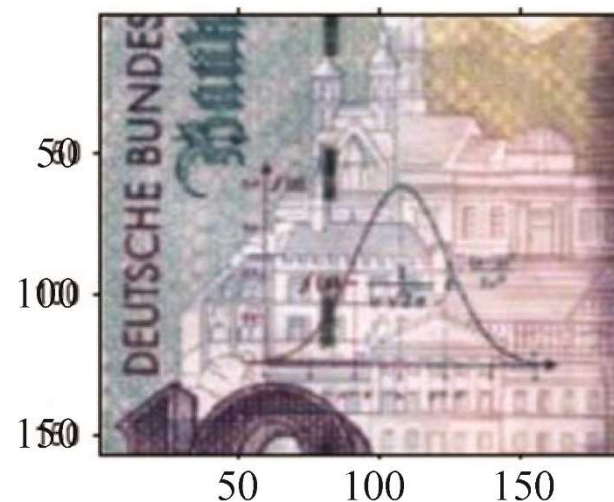


5.5 高斯核

以高斯命名的核（或正态分布）函数
具有正态分布的一组样本值的绘图具有钟形曲线
（也称为围绕中间值的正态曲线）



(a) 10马克纸币



(b) 裁剪的10马克纸币



5.5 高斯核

两种形式的高斯核

1-D高斯核

$$f(x; \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-0)^2}{2\sigma^2}\right] = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right]$$

2-D高斯核

$$f(x, y; \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-0)^2 + (y-0)^2}{2\sigma^2}\right] = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right]$$



5.6 高斯滤波器

2-D高斯（平滑）滤波器函数 $G(x, y; s)$

$$G(x, y; \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right] \quad (\text{滤波值})$$

$$G(x, y; \sigma) = \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right] \quad (\text{简化的滤波值})$$

位于图像中一个像素 (x, y) 的像素强度

$$\text{Img}(x, y) := G(x, y; \sigma) \quad (G(x, y; \sigma) \text{ 替换像素强度 } \text{Img}(x, y))$$



5.6 高斯滤波器

标准差 σ 与高斯滤波器工作的邻域尺寸成比例



(a) 用 5×5 子图像平滑图像, $\sigma = 2$ (b) 用 3×3 子图像平滑图像, $\sigma = 1.2$ (c) 用 2×2 子图像平滑图像, $\sigma = 0.8$

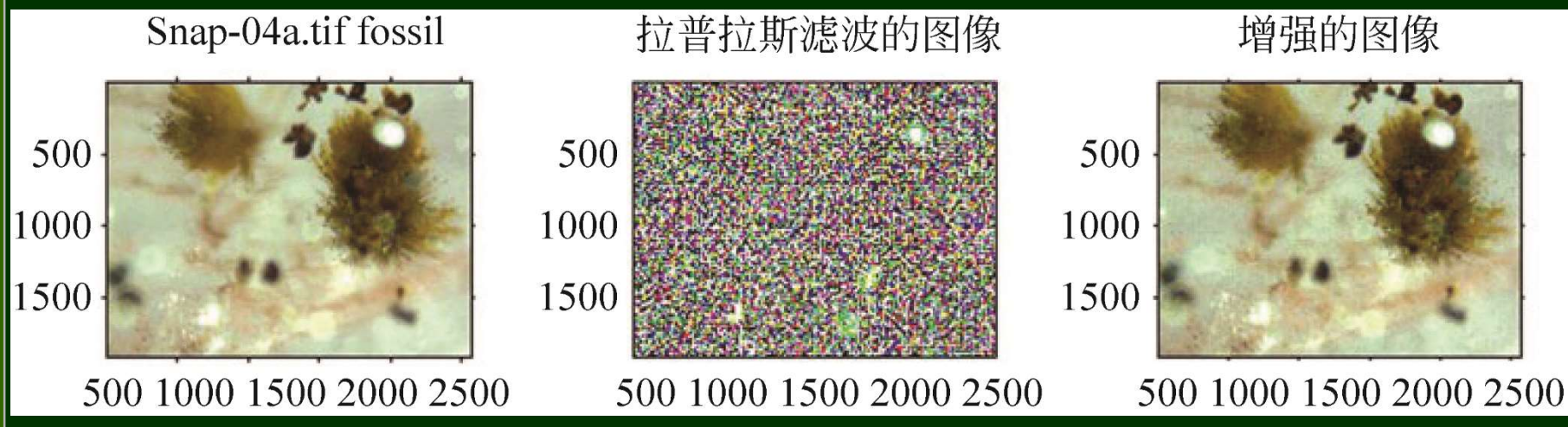


5.7 高斯滤波器核图像恢复

平滑和模糊正方形子图像中的高斯滤波

为实验图像恢复和高斯滤波，尝试附录A.5.5小节中列表A.27的程序

下图中，形状参数 $\alpha = 1$ （高发生率的边缘）

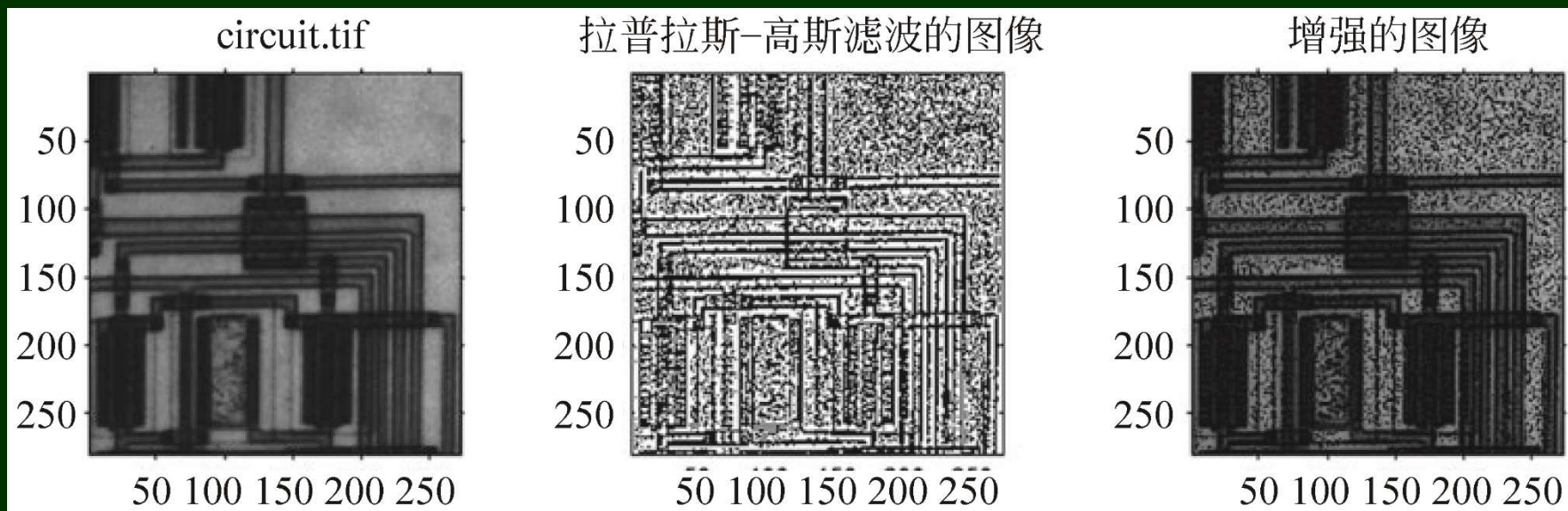




5.8 高斯-拉普拉斯滤波器图像恢复

对简单的二阶拉普拉斯滤波器的一种替代方案是
高斯滤波器的二阶拉普拉斯算子

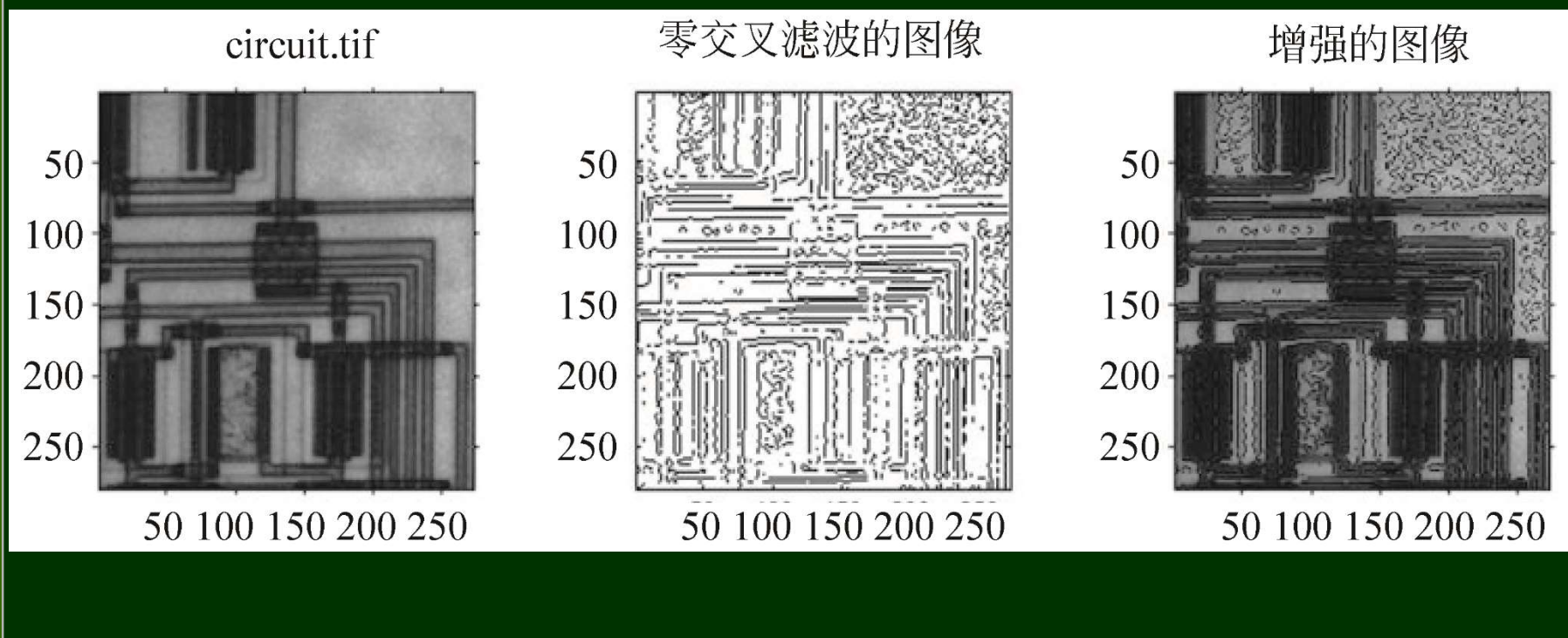
消除二阶拉普拉斯图像增强的椒-盐效应





5.9 零交叉边缘滤波器图像增强

零交叉滤波是有效的二阶滤波器图像增强方法
使用列表5.8进行拉普拉斯图像增强





5.9 零交叉边缘滤波器图像增强

将边缘检测视为对样本值的函数拟合

g 在点 (x, y) 处的方向导数是根据方向角 α 来定义的

$$g_{\alpha}'(x, y) = \frac{\partial g}{\partial x} \sin \alpha + \frac{\partial g}{\partial y} \cos \alpha$$

g 在点 (x, y) 处的二阶方向导数是:

$$g_{\alpha}''(x, y) = \frac{\partial^2 g}{\partial x^2} \sin^2 \alpha + \frac{2\partial^2 g}{\partial x \partial y} \sin \alpha \cos \alpha + \frac{\partial^2 g}{\partial y^2} \cos^2 \alpha$$



5.9 零交叉边缘滤波器图像增强

假设 g 是 x 和 y 的三次多项式，则 g 的梯度和梯度方向可以用估计 g 的值的邻域中心处的 α 来估计

在 g 的 $n \times n$ 邻域中， $g(x, y)$ 的值根据如下形式的线性组合的立方来计算：

$$g(x, y) = k_1 + k_2x + k_3y + k_4x^2 + \cdots + k_{10}y^3$$

角度 α 被定义为：

$$\sin \alpha = \frac{k_2}{\sqrt{k_2^2 + k_3^2}}$$

$$\cos \alpha = \frac{k_3}{\sqrt{k_2^2 + k_3^2}}$$



5.9 零交叉边缘滤波器图像增强

$g(x, y)$ 在方向 α 上的二阶导数可被近似为:

$$g_{\alpha}''(x, y) = 6 \left[k_7 \sin^3 \alpha + k_8 \sin^2 \alpha + k_9 \sin \alpha \cos^2 \alpha + k_{10} \cos^3 \alpha \right] \rho \\ 2 \left[k_4 \sin^2 \alpha + k_5 \sin \alpha \cos \alpha + k_6 \cos^2 \alpha \right]$$

二阶和一阶导数的变化是一个零交叉指标:

如果对于某些 ρ , $|\rho| < \rho_0$, 其中 ρ_0 略小于像素的边长, 并且 $g_{\alpha}''(\rho) < 0$ or $g_{\alpha}''(\rho) = 0$ and $g_{\alpha}'(\rho) \neq 0$

则已经找到估计的二阶导数的负斜率过零点, 并且目标邻域像素被标记为边缘像素



5.10 各向异性与各向同性边缘检测

各向同性边缘检测（与方向无关）以牺牲边缘平滑为代价提供简单性和均匀性

将图像与高斯核卷积以实现边缘的高斯平滑

$t \in [0, \infty]$, 连续尺度 $t \geq 0$

$$G(x, y; t) = \frac{1}{2\pi t} \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{2t}\right]$$

$$I(x, y; t) = I_0(x, y) * G(x, y; t)$$

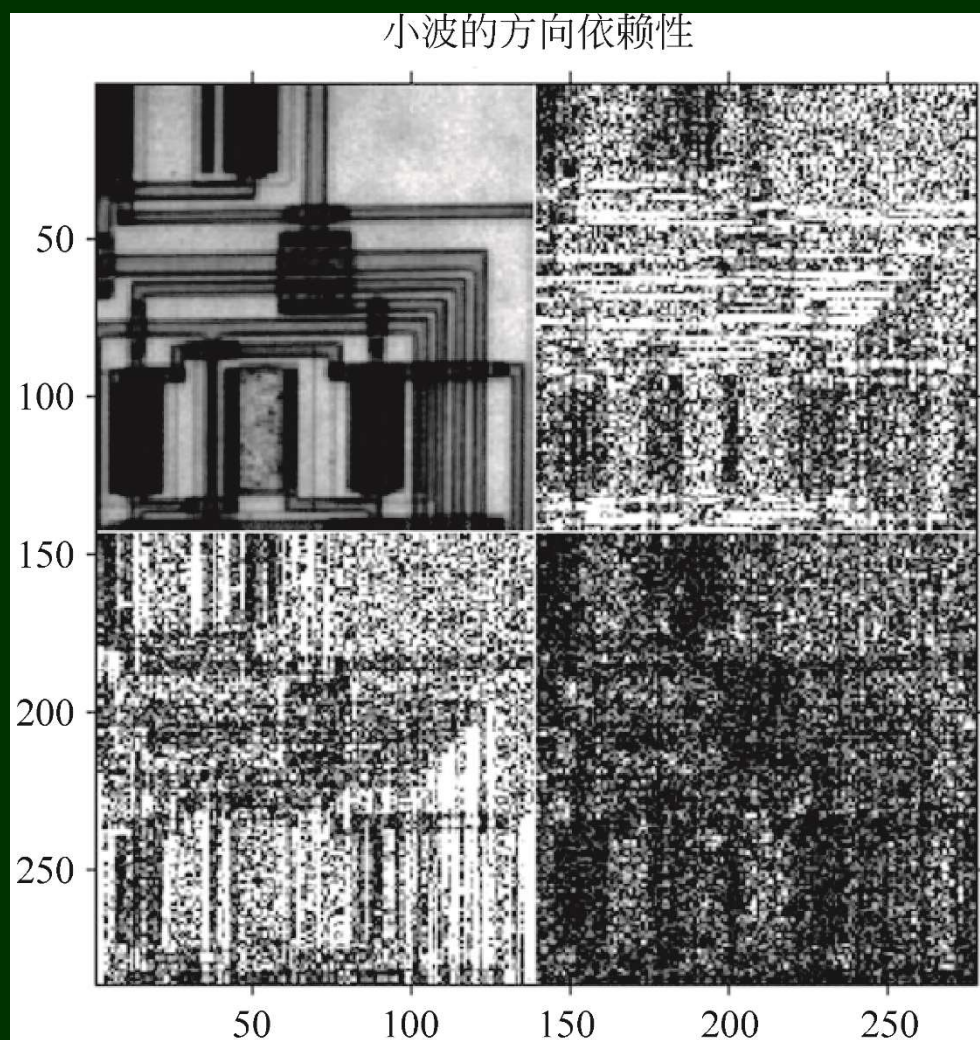
仅对 x 和 y 执行卷积，小于 \sqrt{t} 的图像细节将从图像中删除



5.10 各向异性与各向同性边缘检测

各向异性扩散
是对各向同性边缘
检测的替代方案

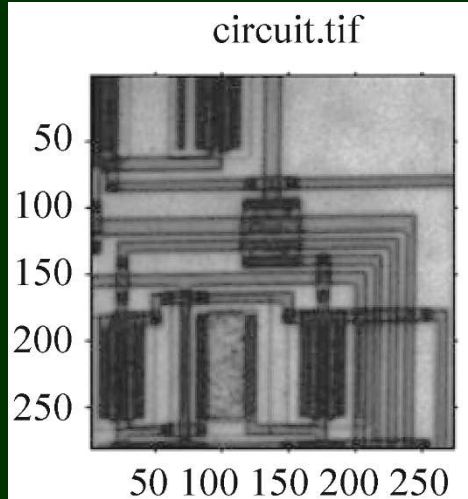
边缘检测的各
向异性方法是方向
相关的。例如，使
用小波检测边缘



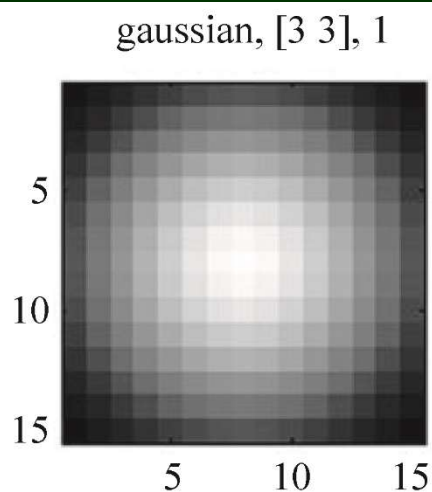
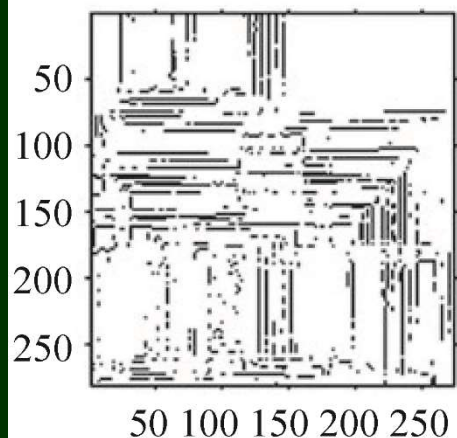


5.11 在数字图像中检测边缘和线

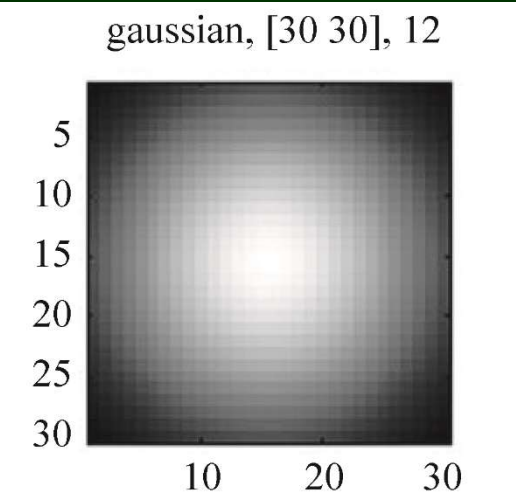
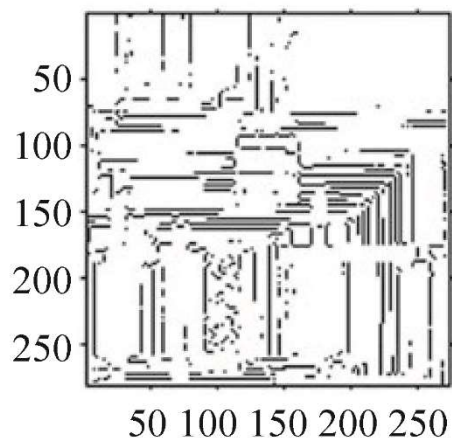
坎尼边缘检测



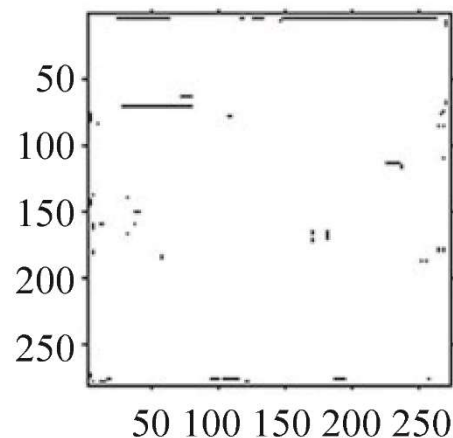
高斯-拉普拉斯滤波器



坎尼滤波器



高斯-拉普拉斯平滑的滤波器



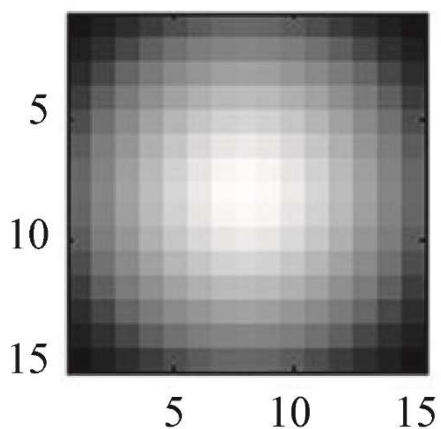


5.11 在数字图像中检测边缘和线

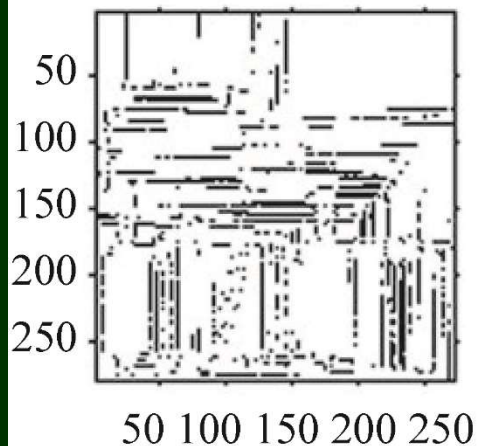
坎尼边缘检测

$\sigma=1.5$

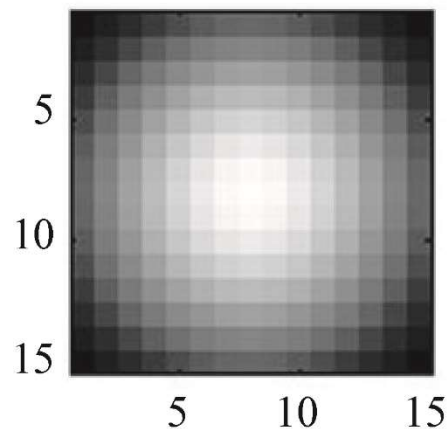
$g0=\text{gaussian}, [3\ 3], 1.5$



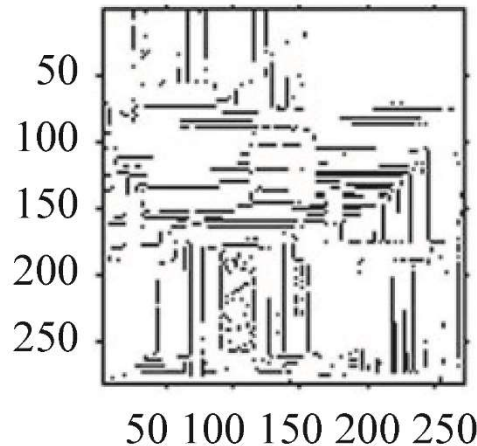
高斯-拉普拉斯滤波器图像g



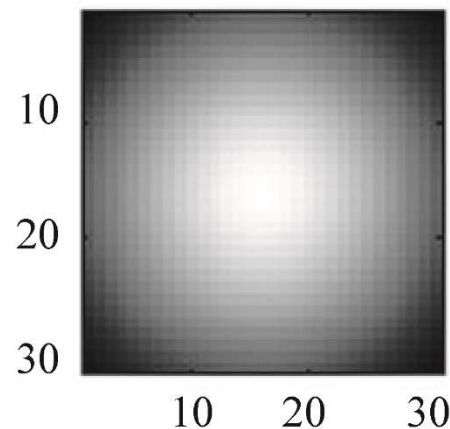
$g1=\text{gaussian}, [15\ 15], 7.5$



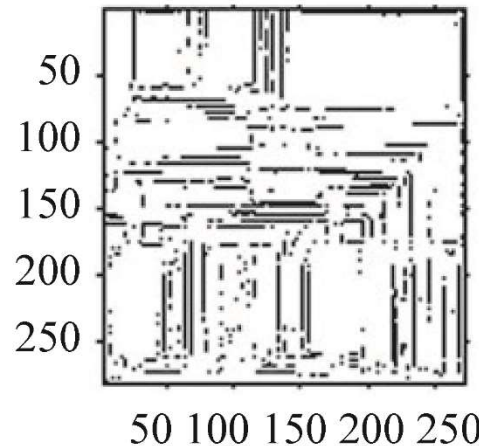
坎尼滤波器图像g



$g2=\text{gaussian}, [31\ 31], 15.5$



坎尼滤波器图像g0



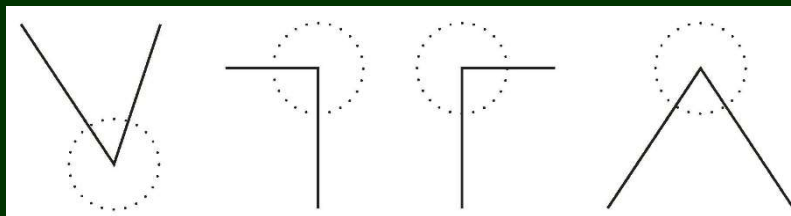


5.12 检测图像角点

角点被定义为边缘的交点（即，在该目标像素的邻域中存在两个主要且不同的边缘方向）

兴趣点是孤立点，它是局部最大或最小强度点（尖峰），线末端或曲线上的点

如果仅检测角点，则检测到的点将包括兴趣点。接下来有必要进行后处理以隔离真实角点（与兴趣点分开）

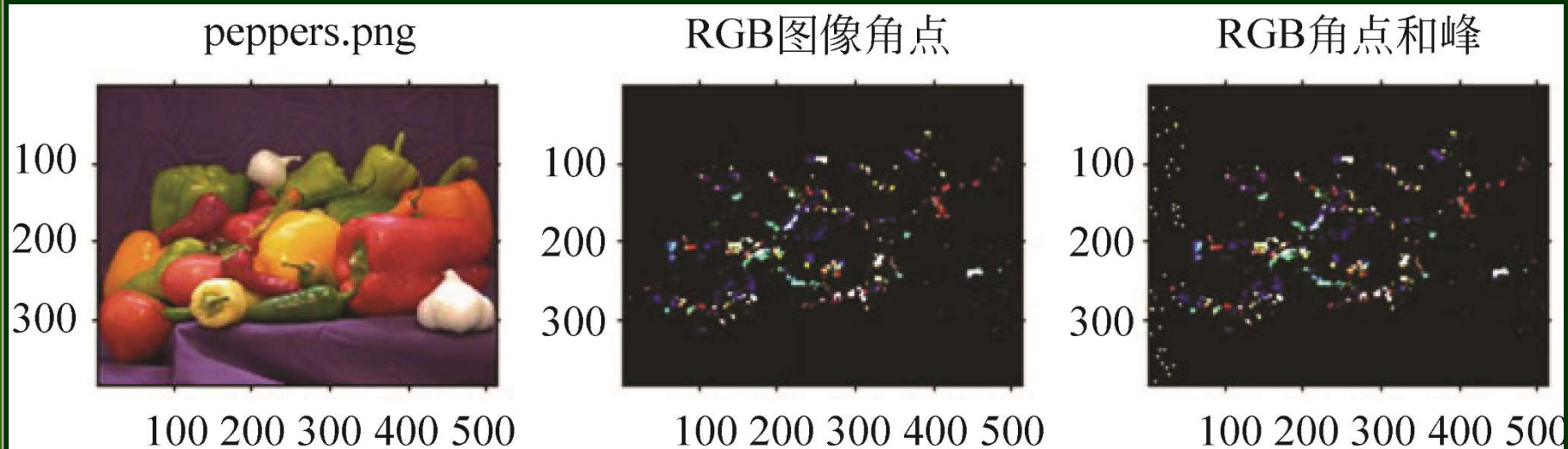




5.12 检测图像角点

彩色图像中检测出来的角点和峰

对于彩色图像peppers.png，名为cornerness.m的Matlab程序应该产生类似于下图中三幅图像的输





5.13 基于图像角点的沃罗诺伊网格重访

借助凸多边形用沃罗诺伊平铺（覆盖）数字图像称为沃罗诺伊镶嵌

这与2-D镶嵌的概念不同，2-D镶嵌是借助正多边形对平面区域的拼贴

正多边形是一个 n 边多边形，其边长都是相同的
相比之下，沃罗诺伊平铺中的多边形通常不规则
沃罗诺伊网格中的凸多边形称为沃罗诺伊区域



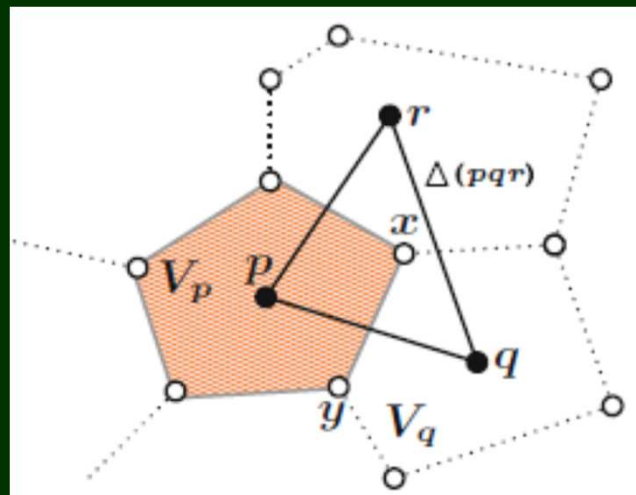
5.13 基于图像角点的沃罗诺伊网格重访

设 $S \subset E$ ，一个有限维的赋范线性空间。 S 的元素被称为网点，以区别于 E 中的其他点

令 $p \in S$ 。一个 $p \in S$ 的沃罗诺伊区域（记为 V_p ）

定义为
$$V_p = \left\{ x \in E : \|x - p\| \leq \min_{q \in S, q \neq p} \|x - q\| \right\}$$

沃罗诺伊区域 V_p 被描绘为有限多个封闭半平面的交集





5.13 基于图像角点的沃罗诺伊网格重访

引理5.1 凸集的交集是凸的

引理5.2 点的沃罗诺伊区域是闭合半平面的交点，并且每个区域是一个凸多边形

从应用的角度来看，沃罗诺伊网格划分数值图像
通过选择图像中的角点作为一组网点，网点 p 的
每个沃罗诺伊区域具有该区域中的所有点最接近 p 而
不是图像中任何其他角点的属性



5.14 构建基于角点的沃罗诺伊网格的步骤

- (1) 选择数字图像 I_m
- (2) 选择要在 I_m 中检测的角点数的上限 n
- (3) 在 I_m 中找到最多 n 个角点。找到的角点构成一组网点
- (4) 显示 I_m 中的角点。该显示提供了下一步的句柄
- (5) 找到每个网点的沃罗诺伊区域。该步骤在 I_m 上构造出沃罗诺伊网格



5.15 网格生成器集合中的极端图像角点

- (1) $im :=$ 灰度图像
- (2) $[m, n] :=$ 图像 im 的尺寸; %在Matlab中使用尺寸 $[im]$
- (3) 设 $C :=$ 图像内部角点的集合
- (4) 设 fc 为图像外部角点的坐标
- (5) 设 $Cim := [C; fc]$; % Cim 包含所有 im 中角点的坐标
- (6) 将 Cim 叠加在图像 im 上



5.15 网格生成器集合中的极端图像角点

叠加角点到全尺寸和剪裁图像上



(a) 全尺寸彩色图像上的角点



(b) 裁剪彩色图像上的角点



5.16 具有极端角点图像上的沃罗诺伊网格

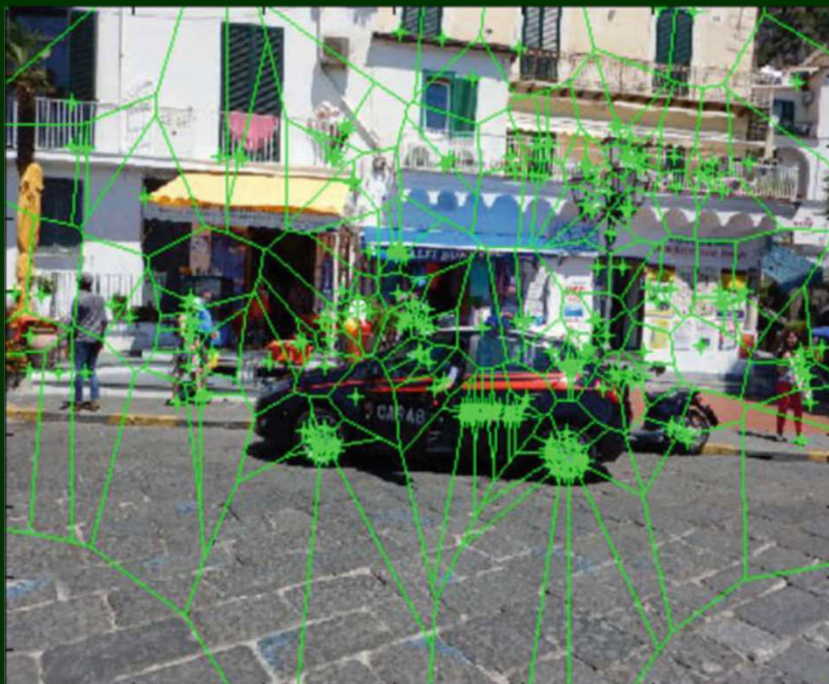
要使用包含极端图像角点的网点集将沃罗诺伊网格叠加在图像上

- (1) 使用Cim从图像角点方法的步骤(5)开始
- (2) 设 $X := \text{Cim}(:, 1)$, 图像角点的 x -坐标
- (3) 设 $Y := \text{Cim}(:, 2)$, 图像角点的 y -坐标
- (4) 设 $[vx, vy] := \text{voronoi}(X, Y)$, 图像角点的坐标
- (5) 将得到的沃罗诺伊网格叠加在图像im上

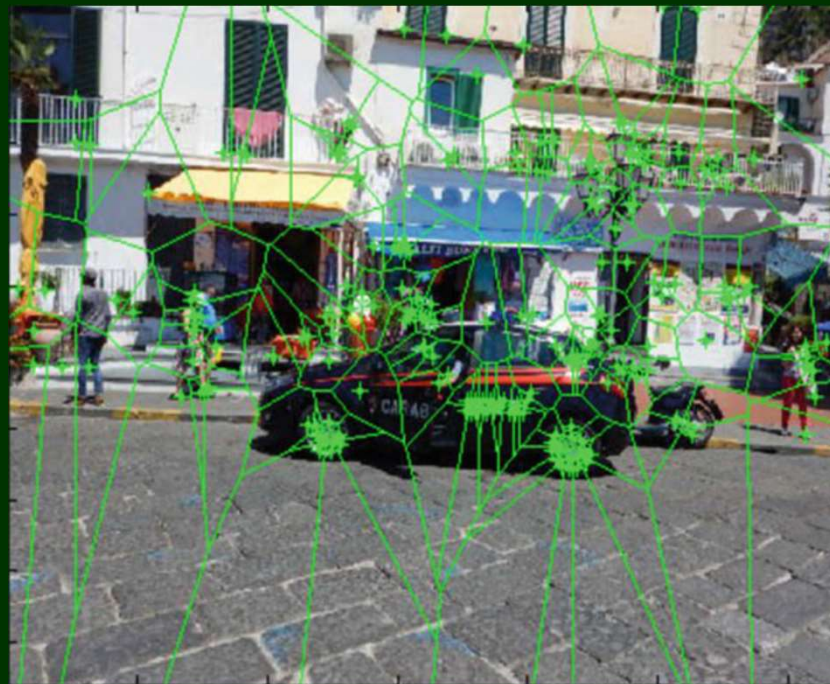


5.16 具有极端角点图像上的沃罗诺伊网格

具有极端角点图像
上的沃罗诺伊网格



不具有极端角点的图
像上的沃罗诺伊网格





5.17 孤立图像边缘的图像梯度方法

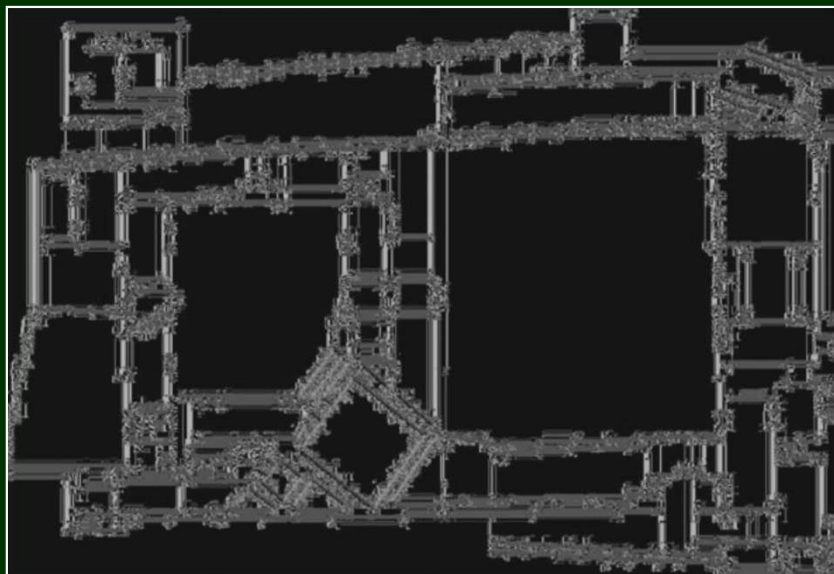
为获得基于图像角点的分割网格，需要先隔离图像边缘。基本方法是将对图像角点的搜索限制在围绕图像角点的图像区域中、属于图像边缘而没有噪声

- (1) 计算在 x 方向和 y 方向上的图像梯度(G_x, G_y)
- (2) 对每个图像梯度矢量计算梯度幅度
- (3) 设magnitudes := 梯度幅度数组
- (4) 将黑色区域包围的白色边缘转换为白色区域包围的黑色边缘

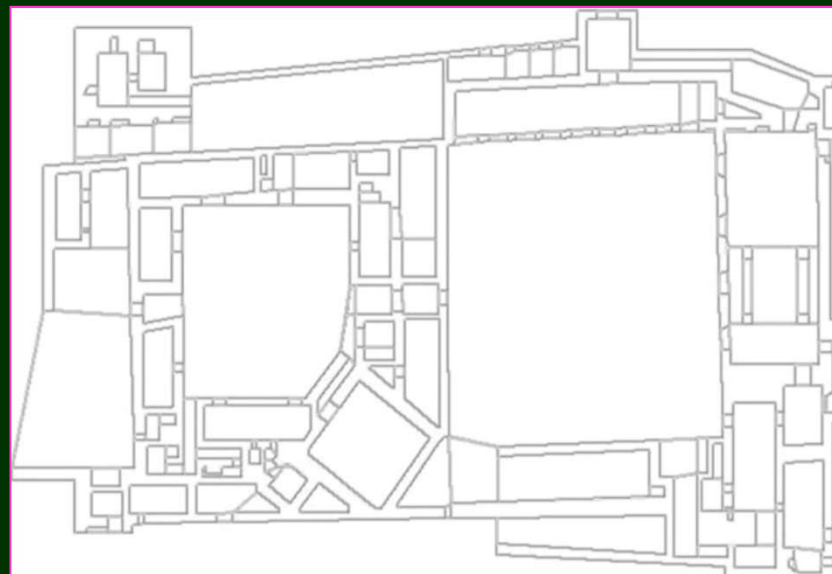


5.17 孤立图像边缘的图像梯度方法

使用图像梯度幅度细化边缘



边缘

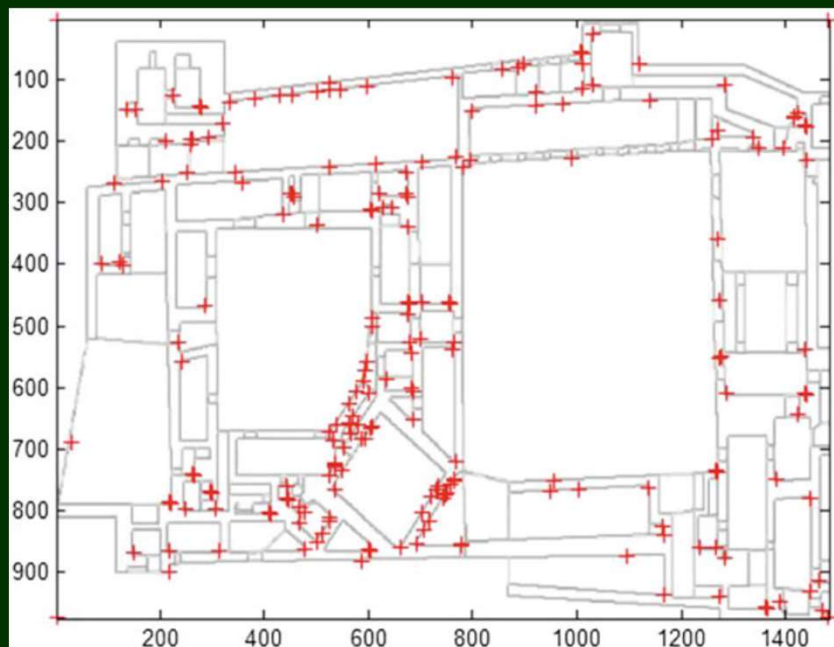


细化结果

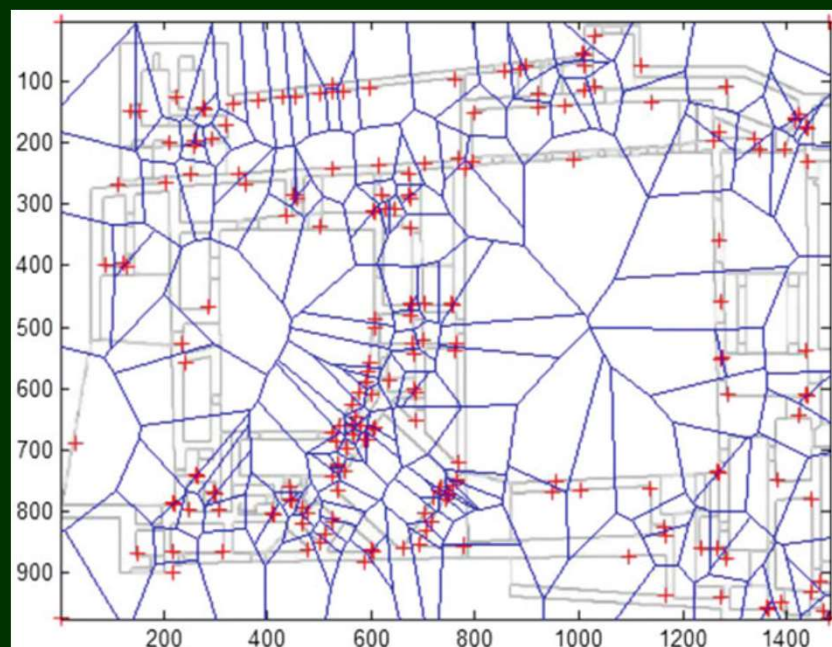


5.18 角点、边缘和沃罗诺伊网格

从细化边缘图出发



图像角点



沃罗诺伊网格



译者（章毓晋）联系信息

- ✎ 通信地址：北京清华大学电子工程系
- ✎ 邮政编码：100084
- ✎ 办公地址：清华大学罗姆楼，6层305室
- ✎ 办公电话：(010) 62798540
- ✎ 传真号码：(010) 62770317
- ✎ 电子邮件：zhang-yj@tsinghua.edu.cn
- ✎ 个人主页：oa.ee.tsinghua.edu.cn/~zhangyujin/
(下载更新的讲稿和教材修改表)