



计算机视觉

董秋雷
模式识别实验室
中国科学院自动化研究所

National Laboratory of Pattern Recognition

Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences



模式识别国家重点实验室

中国科学院自动化研究所

图像底层特征提取

National Laboratory of Pattern Recognition

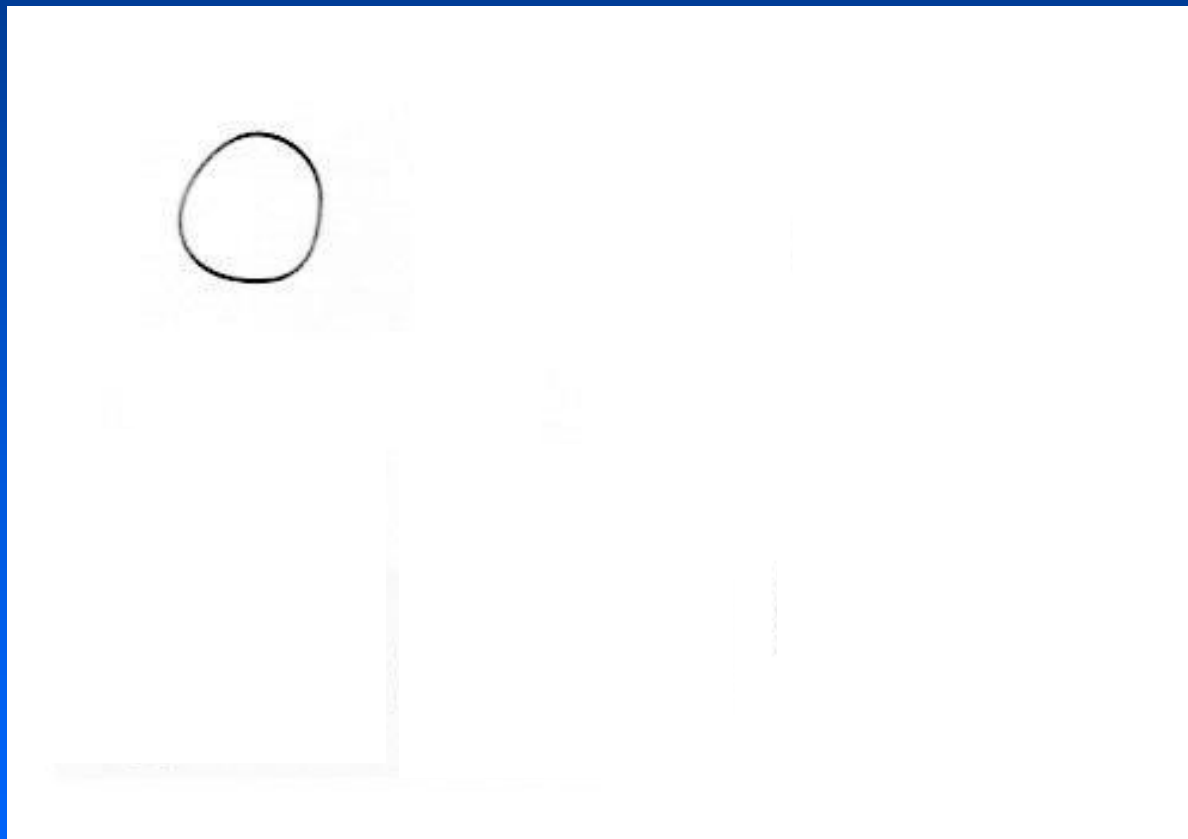
Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences



模式识别国家重点实验室

中国科学院自动化研究所

看看这是什么？



National Laboratory of Pattern Recognition

Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences



模式识别国家重点实验室

中国科学院自动化研究所

看看这是谁？



National Laboratory of Pattern Recognition

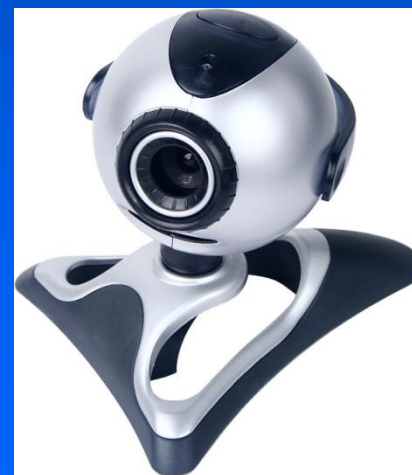
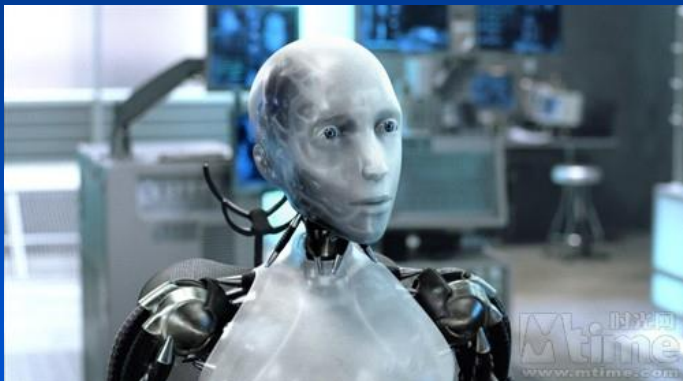
Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences



模式识别国家重点实验室

中国科学院自动化研究所

计算机的“眼睛”在哪？



National Laboratory of Pattern Recognition

Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences

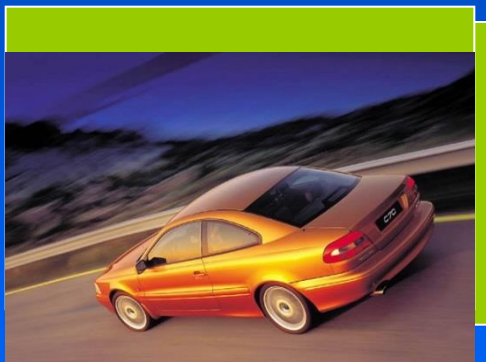


模式识别国家重点实验室

中国科学院自动化研究所

图像底层特征提取是计算机视觉的基本步骤

- 1: 边缘和轮廓能反映图像内容;
- 2: 如果能对边缘和关键点可靠提取的话, 很多视觉问题就基本上得到了解决



像素灰度值矩阵

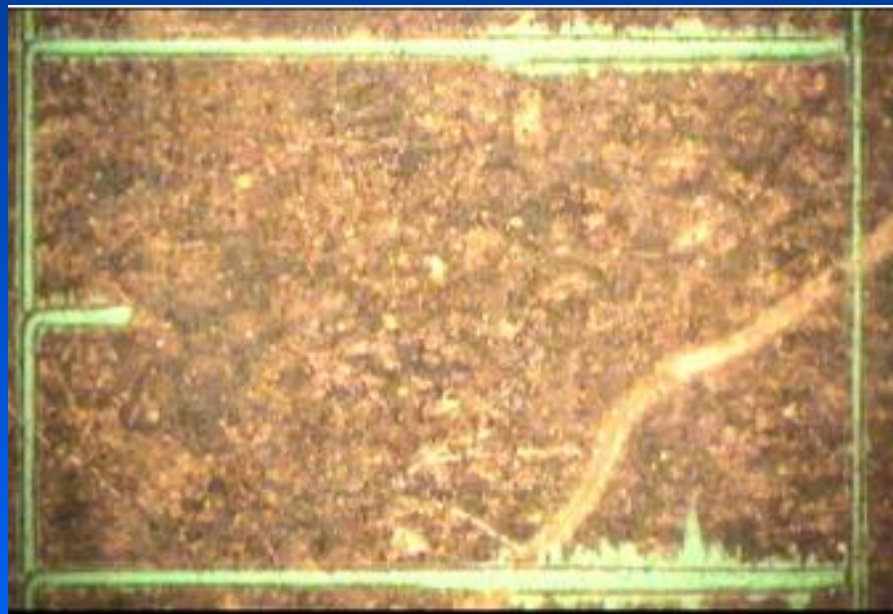
物体的属性:

类别, 数量, 形状, 三维信息, 颜色, 纹理...

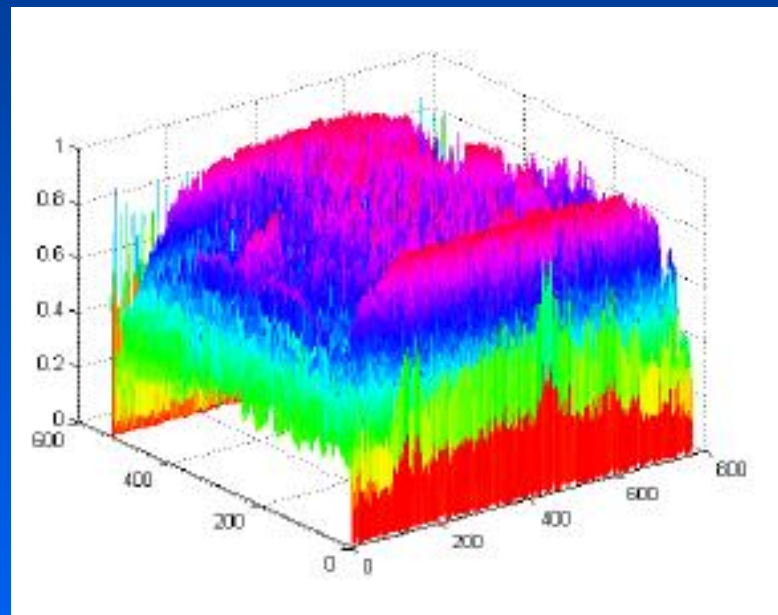
物体的状态:

位置, 距离, 姿态, 运动参数, 行为类型...

灰度图像



真实的图像



图像数据的表示

National Laboratory of Pattern Recognition

Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences



模式识别国家重点实验室

中国科学院自动化研究所

边缘的物理意义

- 图像边缘的产生

物体的边界、表面方向的变化、不同的颜色、光照明暗的变化

物体的边界

表面方向变化



边缘提取

- 边缘的定义 (WHAT)
- 提取边缘的意义 (WHY)
- 提取边缘的方法 (HOW)
 - 使用微分滤波器提取边缘
 - 一阶微分滤波器：梯度算子
 - 二阶微分滤波器：LoG
 - Canny算子



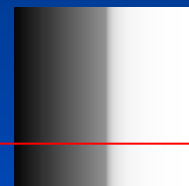
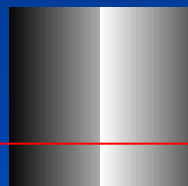
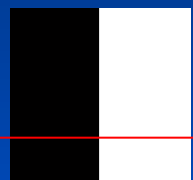
边缘的定义

- 定义：

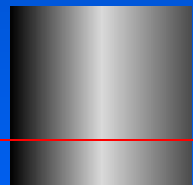
- “边缘是图像中亮度突然变化的区域。”
- “图像灰度构成的曲面上的陡峭区域。”
- “像素灰度存在阶跃变化或屋脊状变化的像素的集合。”



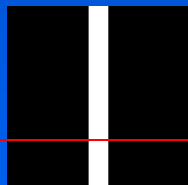
灰度图像中边缘的类型



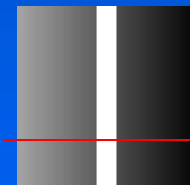
阶梯状边缘



屋脊状边缘



线条状边缘



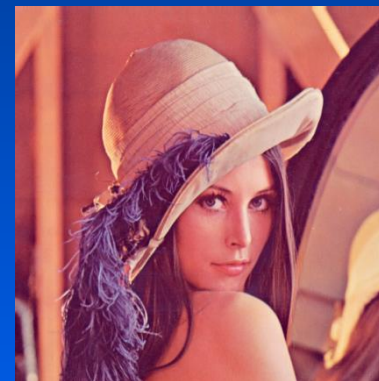
为什么要提取边缘？

- 边缘是最基本的图像特征之一：
 - 可以表达物体的特征
 - 边缘特征对于图像的变化不敏感
 - 几何变化，灰度变化，光照方向变化
 - 可以为物体检测提供有用的信息
 - 是一种典型的图像预处理过程



如何提取边缘？（灰度图象）

- 灰度图象边缘提取，主要的思想：
 - 抑制噪声（低通滤波、平滑、去噪、模糊）
 - 边缘特征增强（高通滤波、锐化）
 - 边缘定位

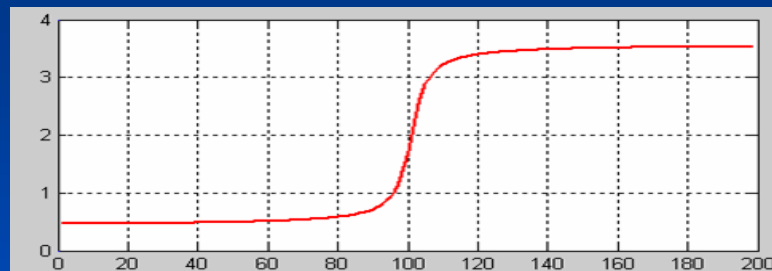
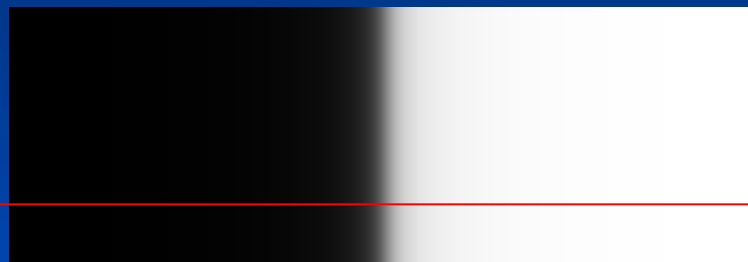


图像微分算子

- 一阶微分算子（梯度算子） Prewitt, Sobel
 - 检测最大值
- 二阶微分算子（Laplacian）
 - 检测过零点



微分算子检测边缘：一维信号



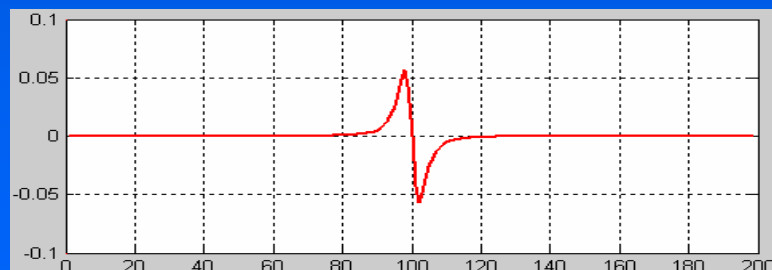
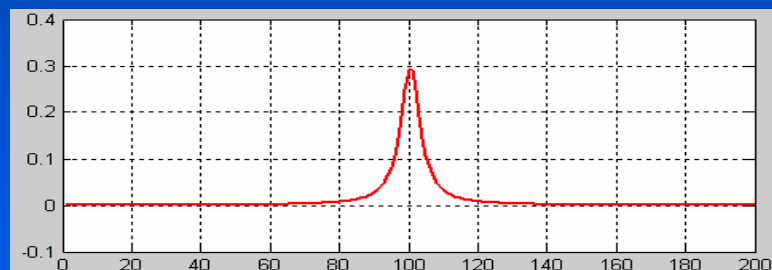
一阶导数的极大值点：

$$Edge = \{x \mid x = \arg \max(f'(x))\}$$

二阶导数的过零点：

$$Edge = \{x \mid f''(x) = 0, \text{ zero crossings}\}$$

注意：仅仅等于0不够，常数函数也为0，必须存在符号改变



微分算子检测边缘：二维信号

一阶导数的极大值点：

$$Edge = \{p = (x, y) \mid p = \arg(\max(|\nabla I(p)|))\}$$

其中，图像梯度向量： $\nabla I(x, y) = (\frac{\partial I}{\partial x}, \frac{\partial I}{\partial y})$

梯度幅值表示边缘的强弱

梯度方向代表灰度变化最快的方向

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

$$\Phi(x, y) = \arctan(\frac{\partial I}{\partial y} / \frac{\partial I}{\partial x})$$



微分算子检测边缘：二维信号

二阶导数的过零点：

$$Edge = \{p = (x, y) \mid \Delta I(p) = 0, \text{zero crossing}\}$$

拉普拉斯算子：

$$\Delta I = \nabla^2 I = \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 I}{\partial y^2}$$



在数字图像上计算梯度

- 一维的情况:

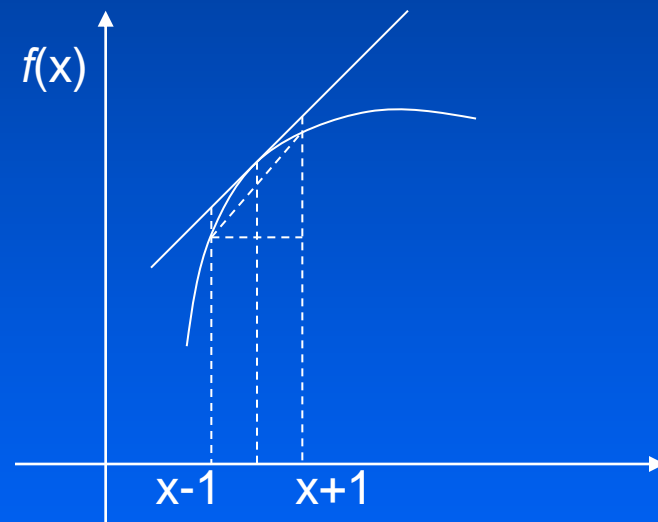
$$f'(x) = \frac{df}{dx} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x}$$

对于离散的数字信号，可以使用差分近似：

$$f'(x) \approx \frac{f(x+1) - f(x-1)}{2}$$

相当于与如下模版进行卷积运算：

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times 0.5$$



在数字图像上计算梯度

- 使用差分运算在数值上近似一阶微分运算

$$\frac{\partial I}{\partial x} \approx \frac{I(x+1, y) - I(x-1, y)}{2}$$

↔ 竖直边缘

-1	0	1
----	---	---

× 0.5

$$\frac{\partial I}{\partial y} \approx \frac{I(x, y+1) - I(x, y-1)}{2}$$

↔ 水平边缘

-1
0
1

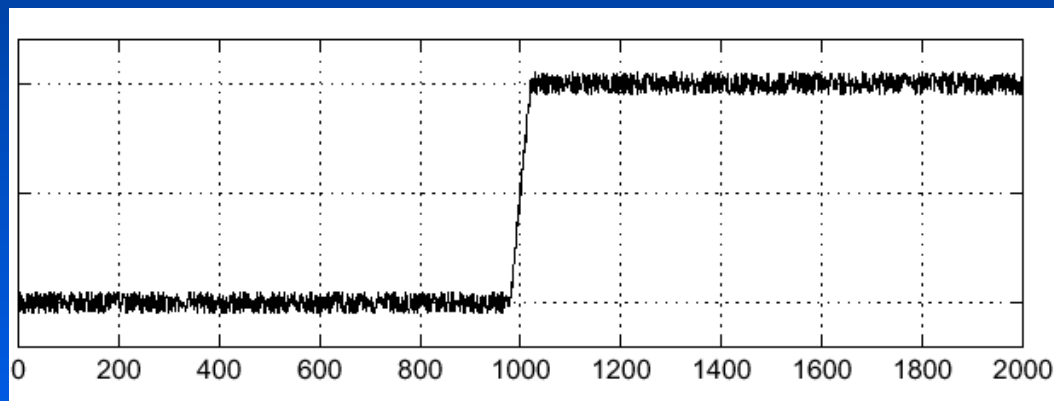
× 0.5

$$\nabla I(x, y) = \left(\frac{\partial I}{\partial x}, \frac{\partial I}{\partial y} \right)$$

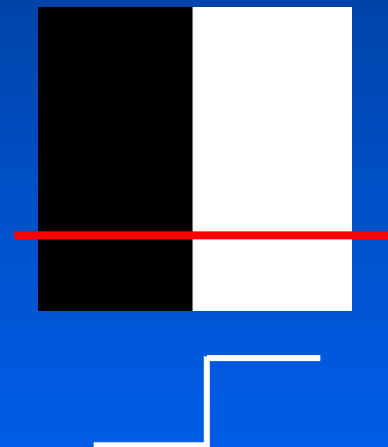
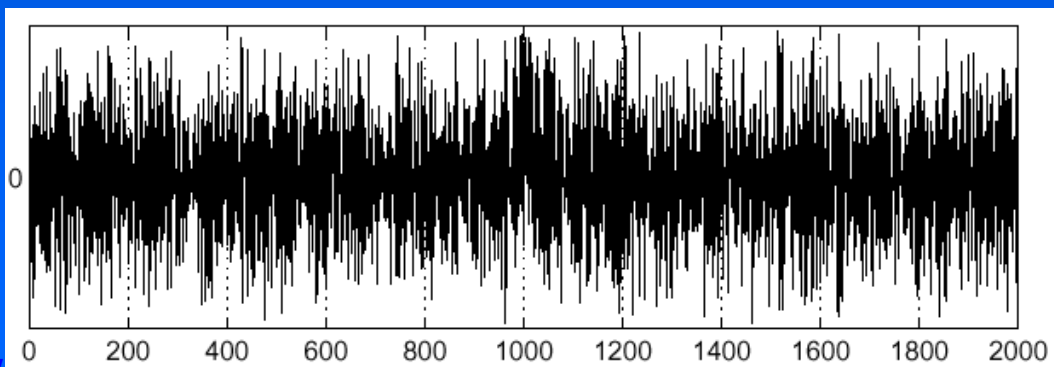
噪声的影响：一维信号的例子

- 从图像中取出某行像素值：

$$f(x)$$



$$\frac{d}{dx}f(x)$$



边缘在哪里？

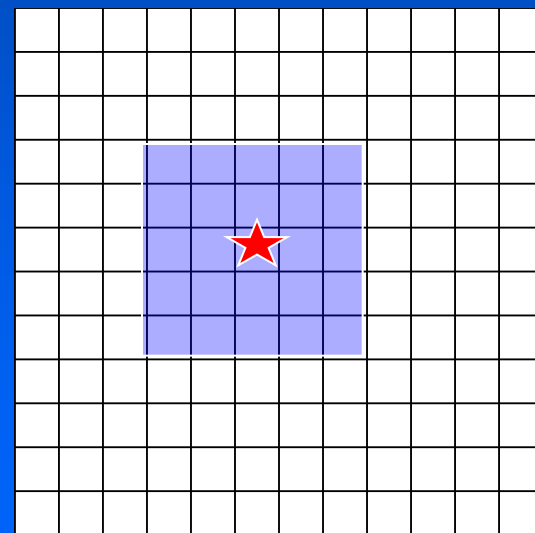
补充知识：卷积运算

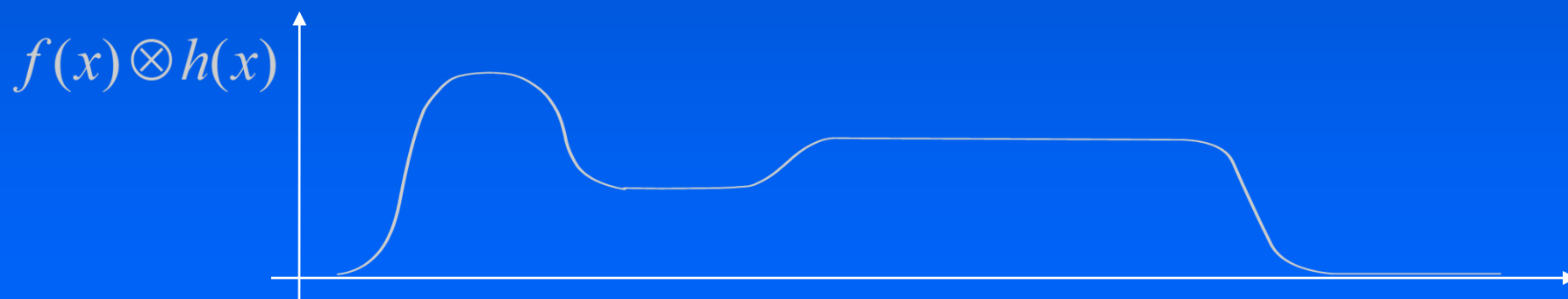
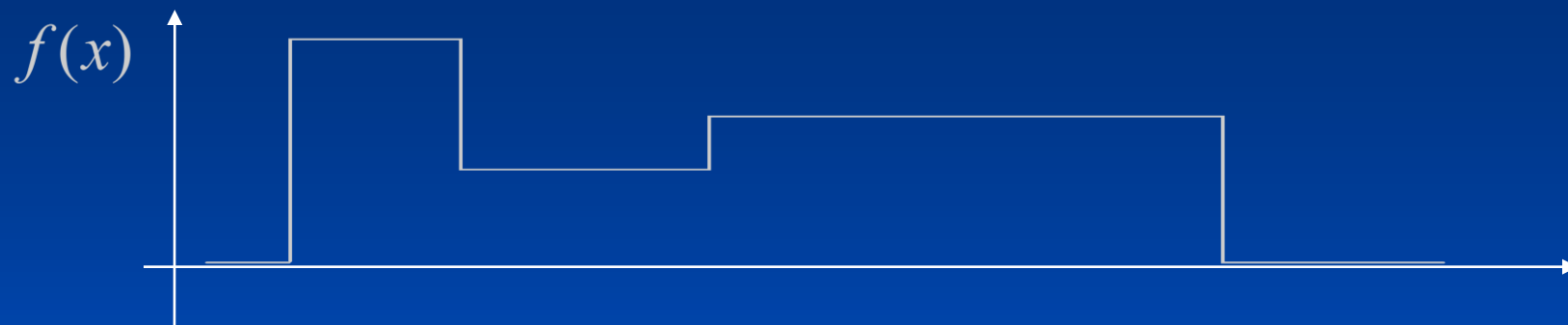
- 图像（二维数字信号的卷积运算）

$$G(x, y) * I(x, y) = \sum_{u=-M}^M \sum_{v=-N}^N G(u, v) I(x-u, y-v)$$

关于 $G(u, v)$

- 尺寸为 $(2M+1) \times (2N+1)$ 的模版
- 是对连续卷积核函数的数字采样近似
- 不同模版形式决定了卷积的不同功能
--滤波、增强、匹配.....





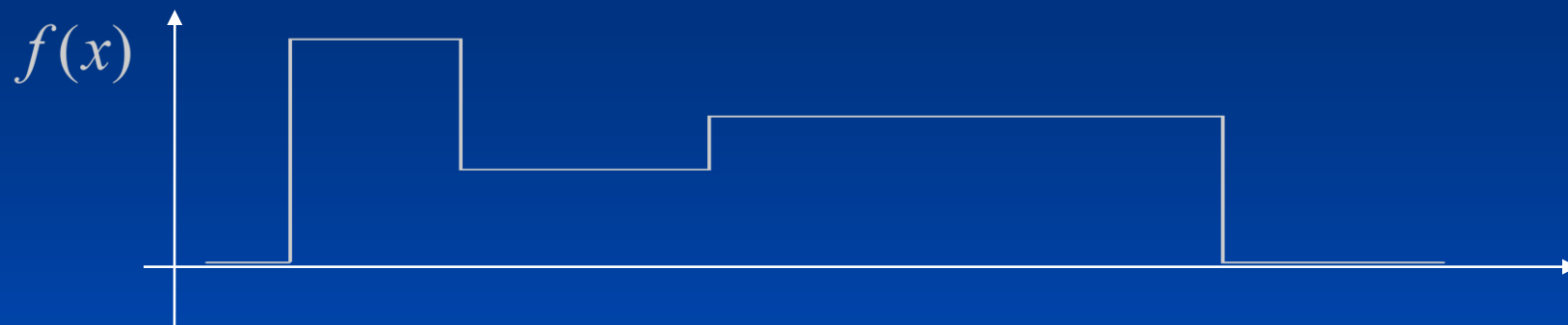
National Laboratory of Pattern Recognition

Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences



模式识别国家重点实验室

中国科学院自动化研究所



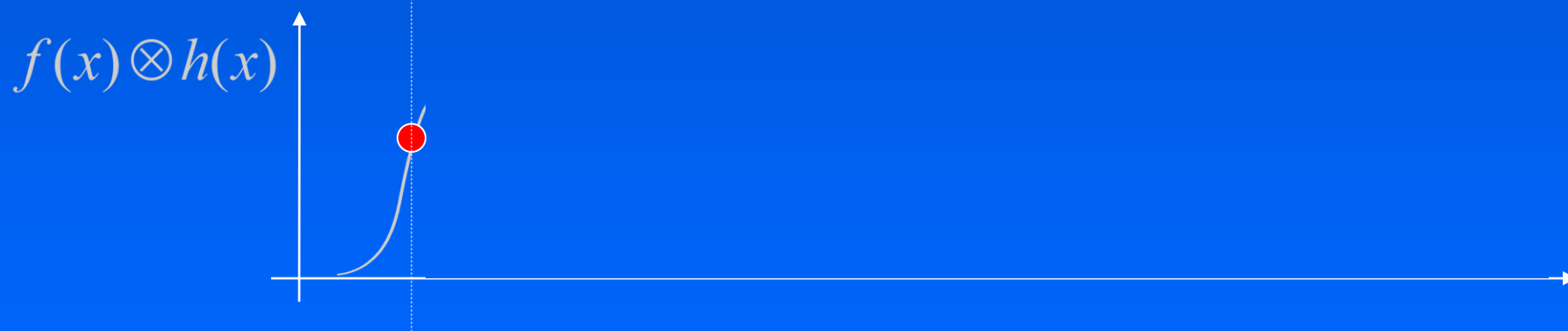
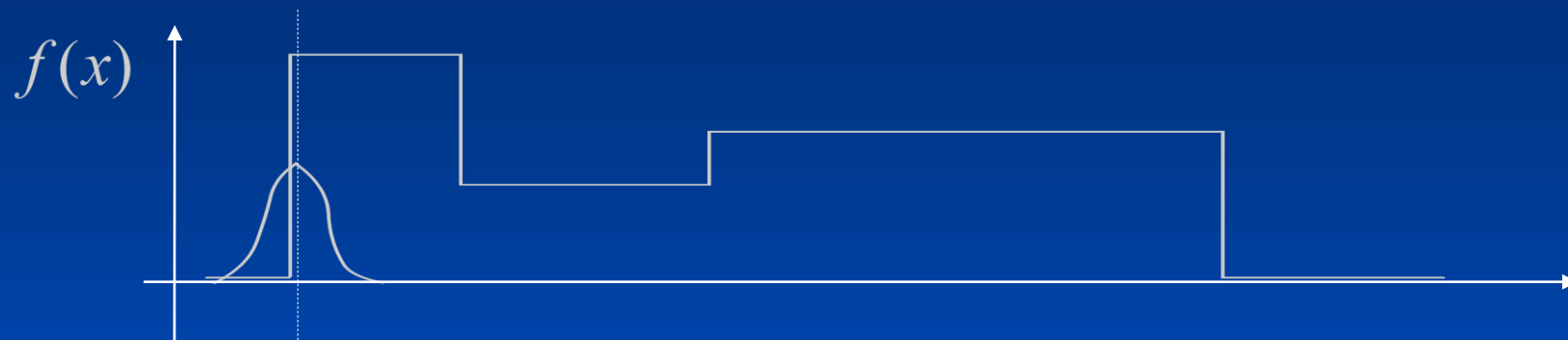
National Laboratory of Pattern Recognition

Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences



模式识别国家重点实验室

中国科学院自动化研究所



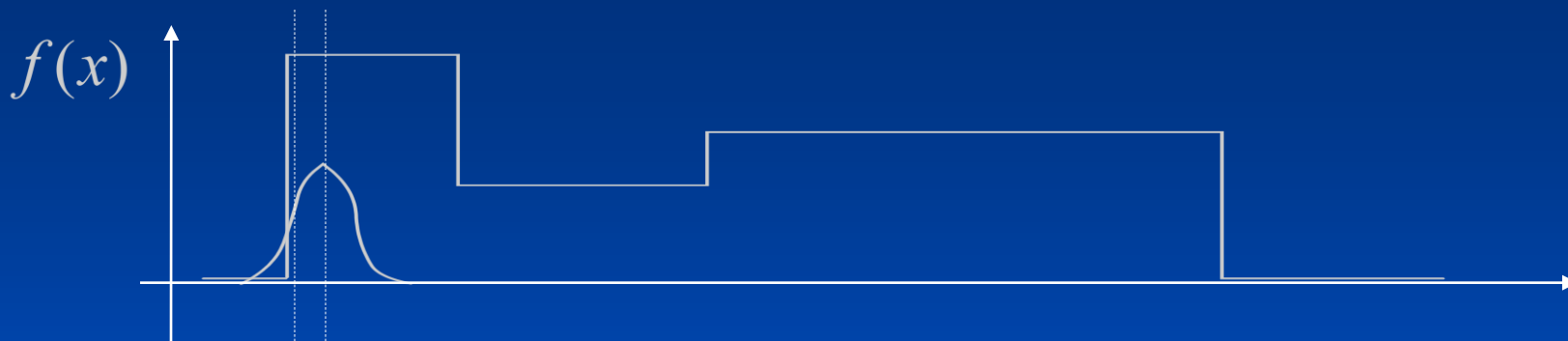
National Laboratory of Pattern Recognition

Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences



模式识别国家重点实验室

中国科学院自动化研究所



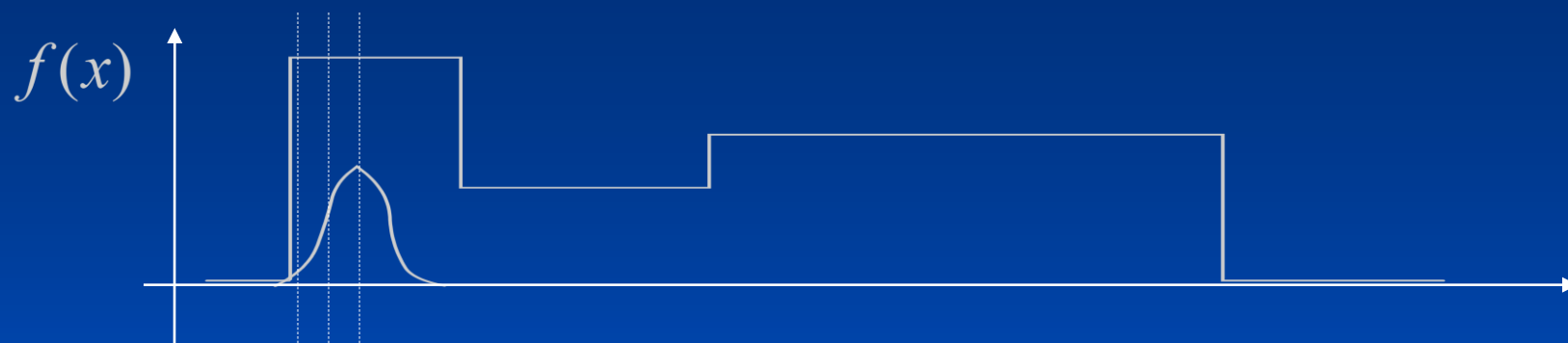
National Laboratory of Pattern Recognition

Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences



模式识别国家重点实验室

中国科学院自动化研究所



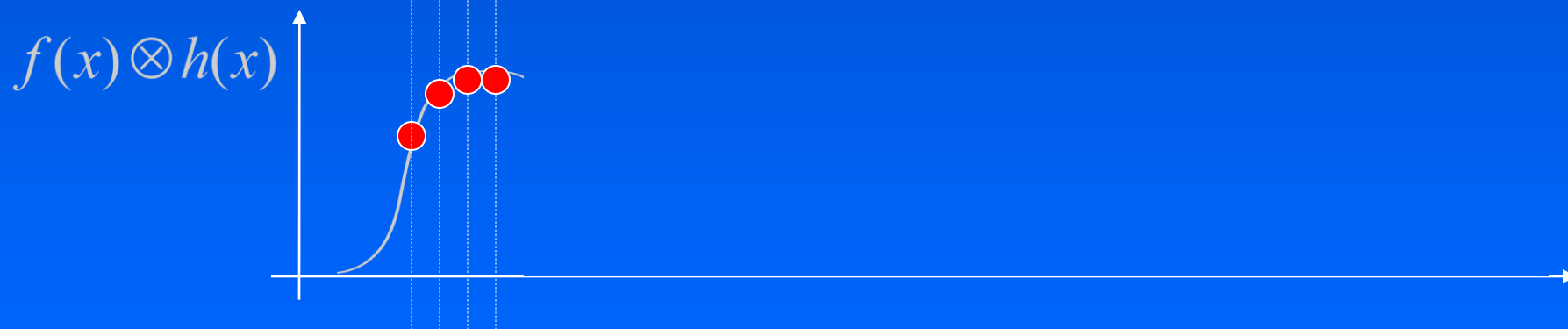
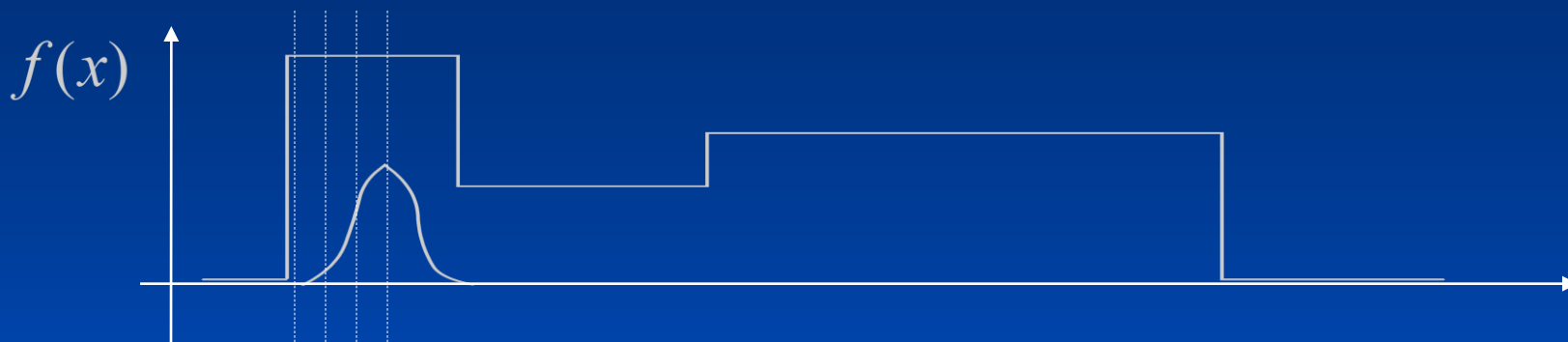
National Laboratory of Pattern Recognition

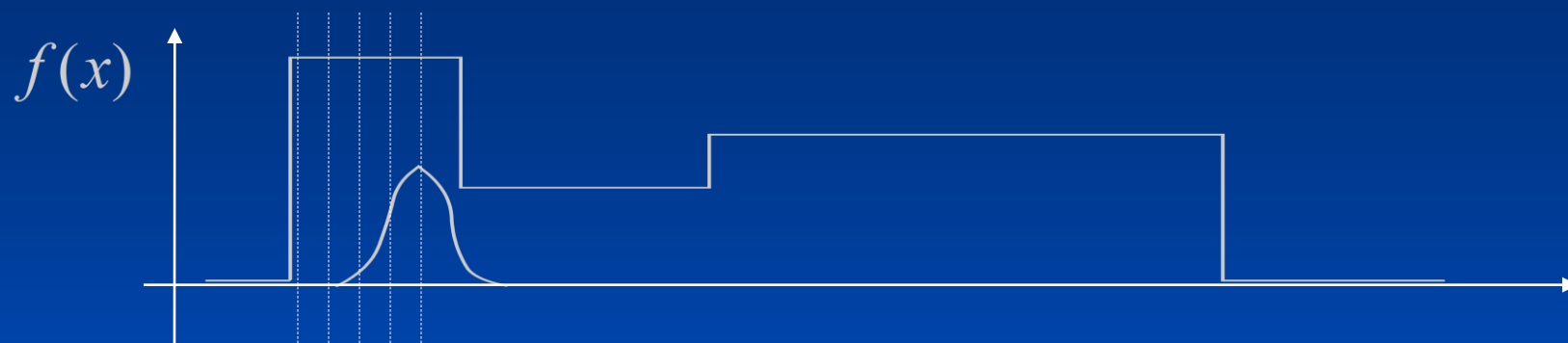
Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences



模式识别国家重点实验室

中国科学院自动化研究所





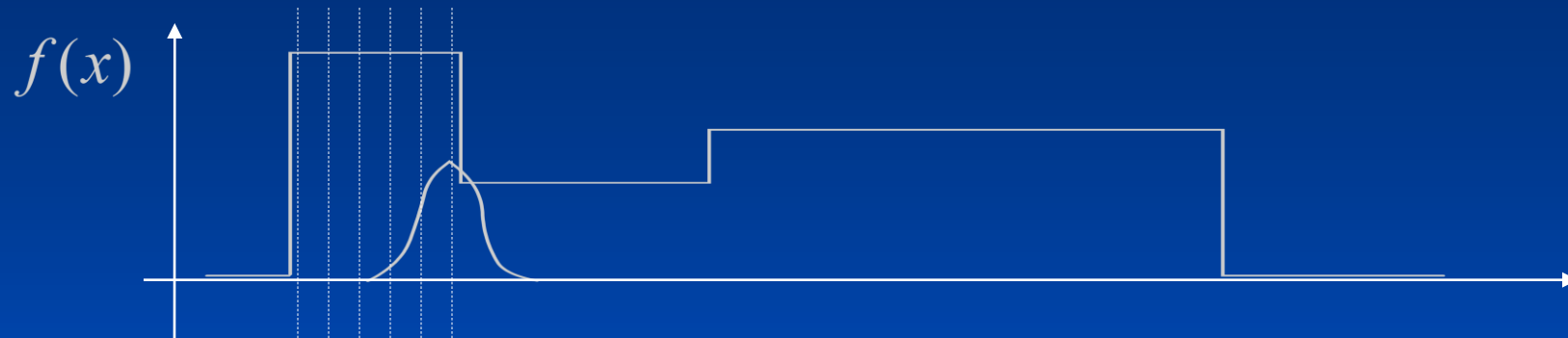
National Laboratory of Pattern Recognition

Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences



模式识别国家重点实验室

中国科学院自动化研究所



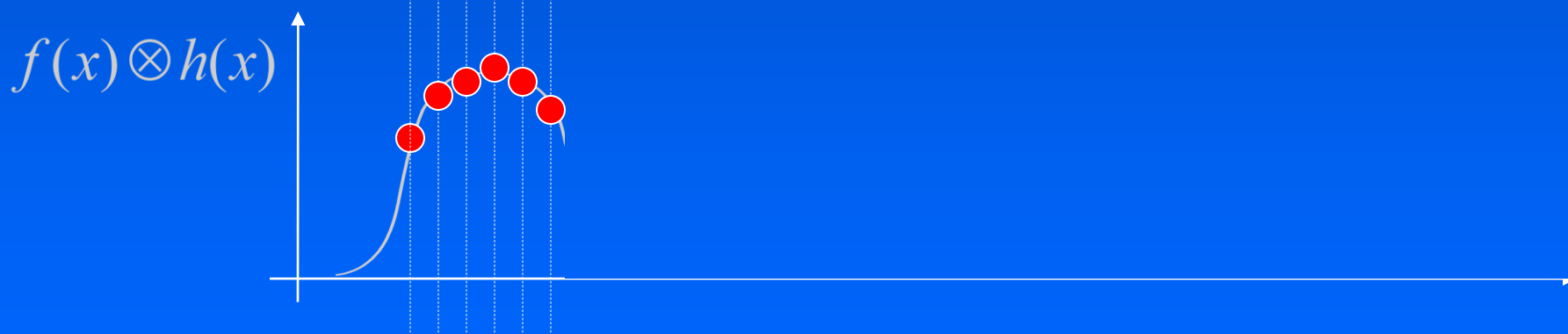
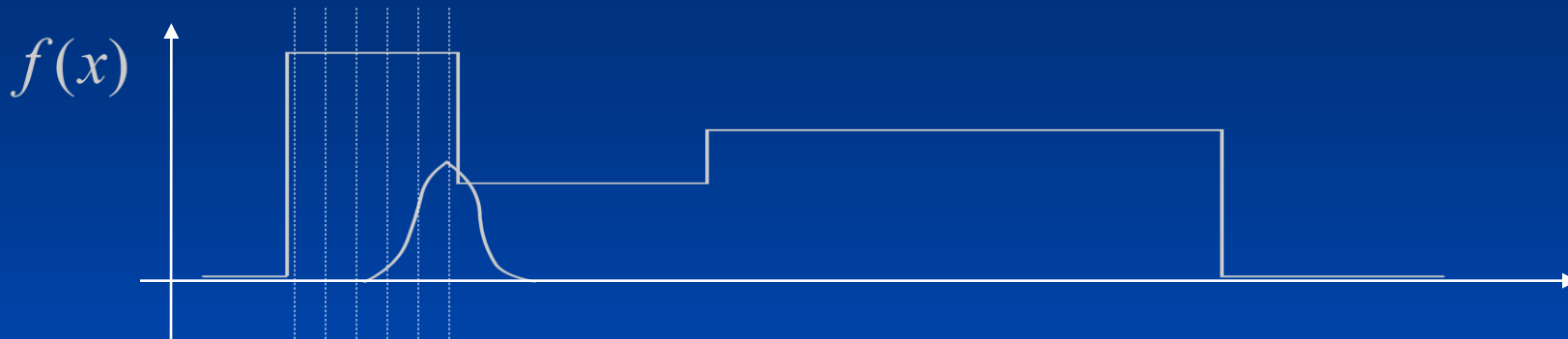
National Laboratory of Pattern Recognition

Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences



模式识别国家重点实验室

中国科学院自动化研究所



National Laboratory of Pattern Recognition

Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences



模式识别国家重点实验室

中国科学院自动化研究所

解决方法之一，首先进行滤波

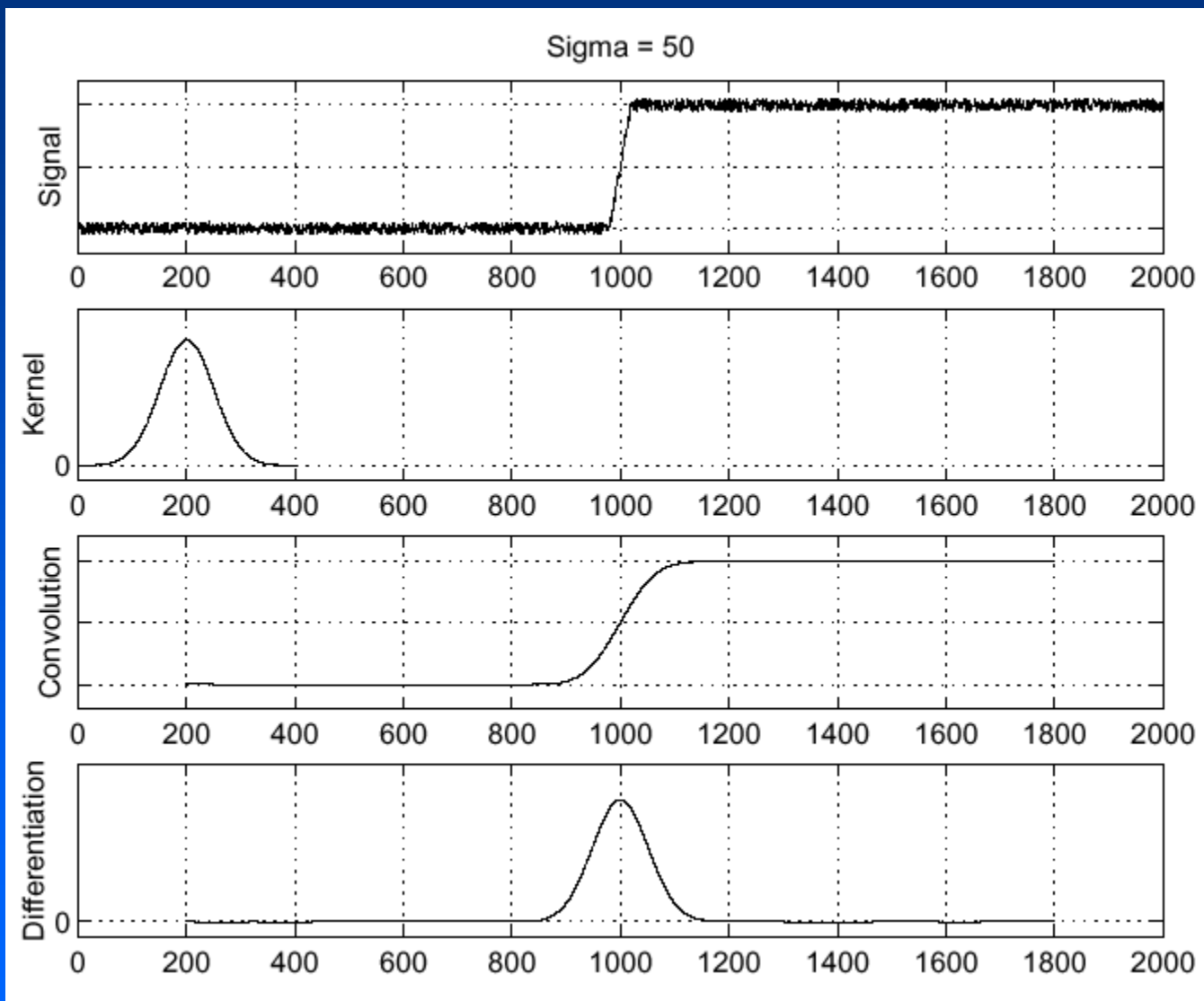
f

h

$h \star f$

$\frac{\partial}{\partial x}(h \star f)$

峰值为边缘的位置



利用卷积运算的性质:

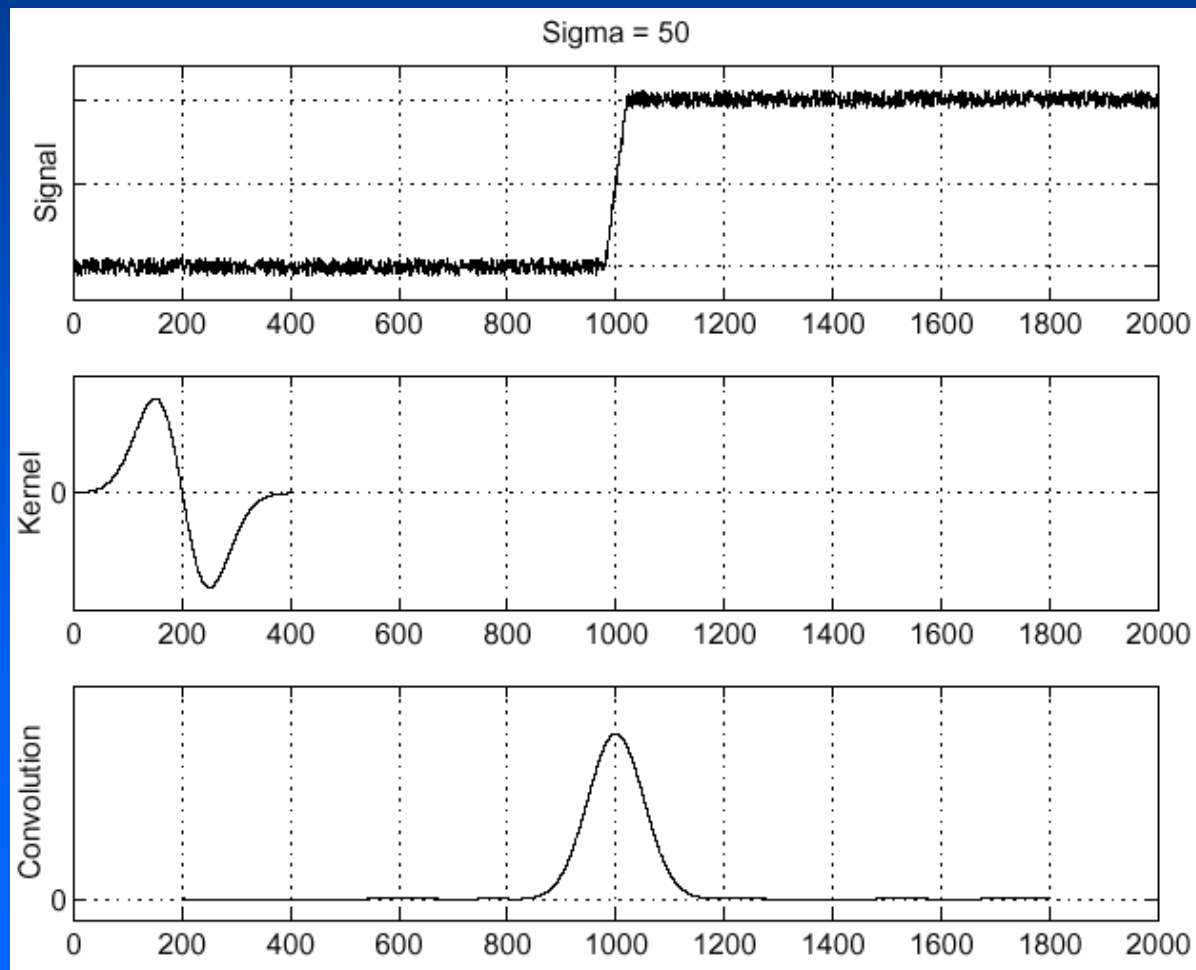
$$\frac{\partial}{\partial x}(h \star f) = (\frac{\partial}{\partial x}h) \star f$$

f

$\frac{\partial}{\partial x}h$

$(\frac{\partial}{\partial x}h) \star f$

峰值为边缘的位置



图像梯度算子的近似

- Sobel算子
- Prewitt算子
- Roberts算子



Prewitt算子

- Prewitt算子，近似一阶微分
- 卷积模版：去噪 + 增强边缘

-1	0	1
-1	0	1
-1	0	1

计算均值，
平滑噪声

检测竖直边缘

-1	-1	-1
0	0	0
1	1	1

检测水
平边缘

计算均值，
平滑噪声



Sobel算子

- Sobel算子，近似一阶微分
- 去噪 + 增强边缘，给四邻域更大的权重

-1	0	1
-2	0	2
-1	0	1

计算均值，
平滑噪声

检测竖直边缘

-1	-2	-1
0	0	0
1	2	1

检测水平边缘

计算均值，
平滑噪声



常见的梯度算子

 Δ_1 $\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$ Δ_2 $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$

(a)

 Δ_1 $\begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ Δ_2 $\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$

(b)

 Δ_1 $\begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ Δ_2 $\begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}$

(c)

 Δ_1 $\begin{bmatrix} -3 & -1 & 1 & 3 \\ -3 & -1 & 1 & 3 \\ -3 & -1 & 1 & 3 \\ -3 & -1 & 1 & 3 \end{bmatrix}$ Δ_2 $\begin{bmatrix} 3 & 3 & 3 & 3 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 \\ -3 & -3 & -3 & -3 \end{bmatrix}$

(d)

(a): Roberts算子

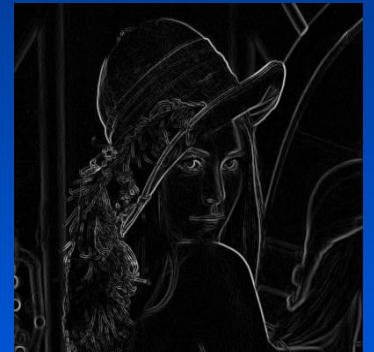
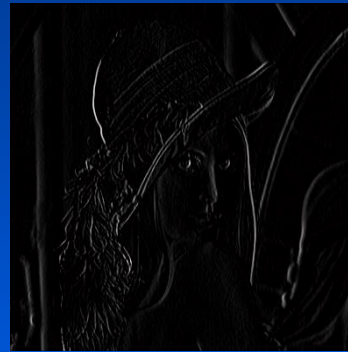
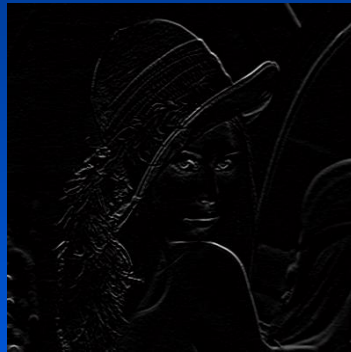
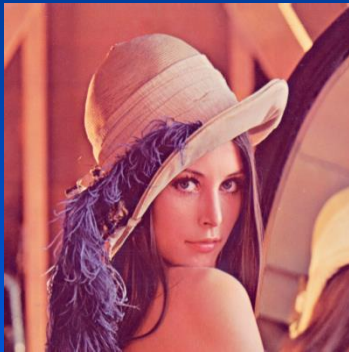
(c): Sobel 算子

(b): 3x3 Prewitt算子

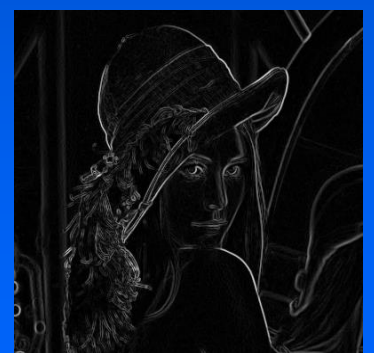
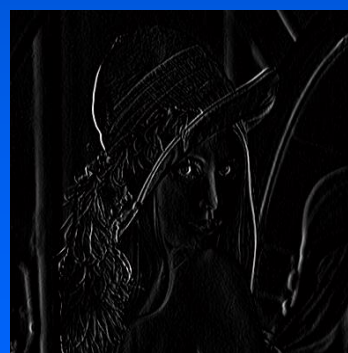
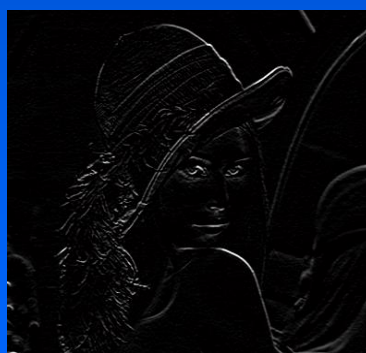
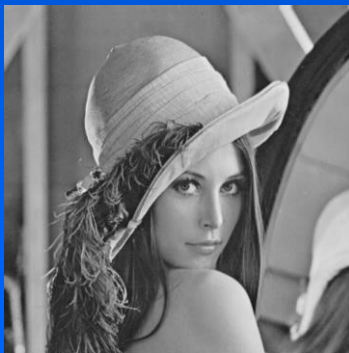
(d): 4x4 Prewitt算子

Sobel, Prewitt 边缘提取例子

Prewitt



Sobel



在数字图像上计算二阶微分

- 拉普拉斯算子 $\Delta I = \nabla^2 I = \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 I}{\partial y^2}$
- 拉普拉斯算子的数字近似
 - 3*3卷积模版

0	-1	0
-1	4	-1
0	-1	0

-1	-1	-1
-1	8	-1
-1	-1	-1



拉普拉斯算子的特点

- 拉普拉斯算子的运算结果是标量
 - 只有幅值，只使用一个模版便可计算得到
 - 方向属性丢失
- 实际中几乎不单独使用拉普拉斯算子：
 - 二次求导数，对噪声非常敏感
 - 通常配合滤波器同时使用



Laplacian of Gaussian (LoG)

- 首先用Gauss函数对图像进行平滑，抑制噪声
- 然后对经过平滑的图像使用Laplacian算子
- 利用卷积的性质LoG算子等效于：

Gaussian平滑 + Laplacian 二阶微分

$$\nabla^2 (G(x, y) * I(x, y)) = (\nabla^2 G(x, y)) * I(x, y)$$



高斯拉普拉斯

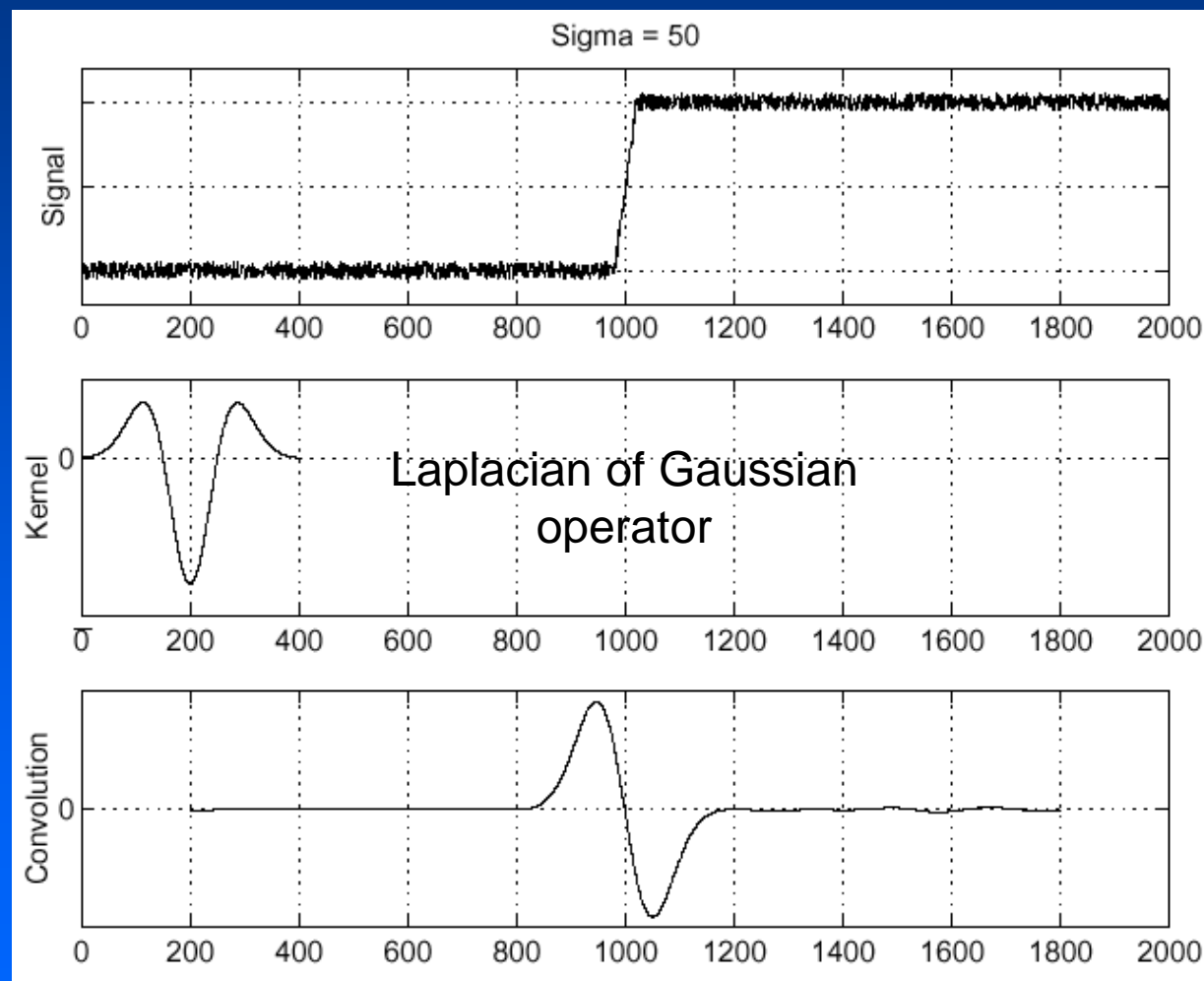
$$\frac{\partial^2}{\partial x^2}(h \star f)$$

f

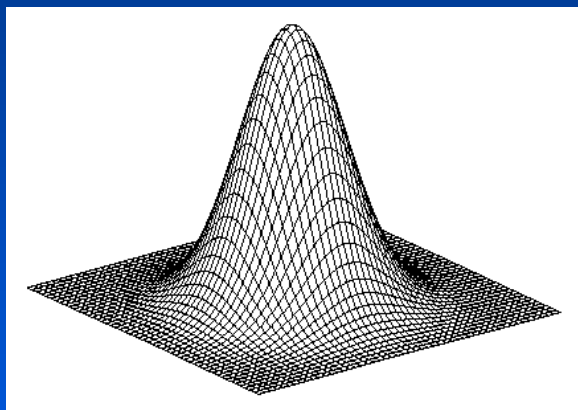
$$\frac{\partial^2}{\partial x^2}h$$

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2}h\right) \star f$$

过零点为边缘的位置

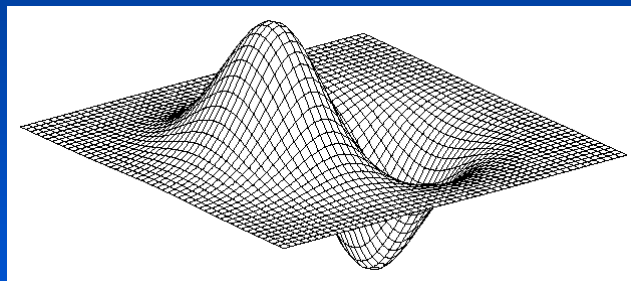


二维边缘微分滤波器



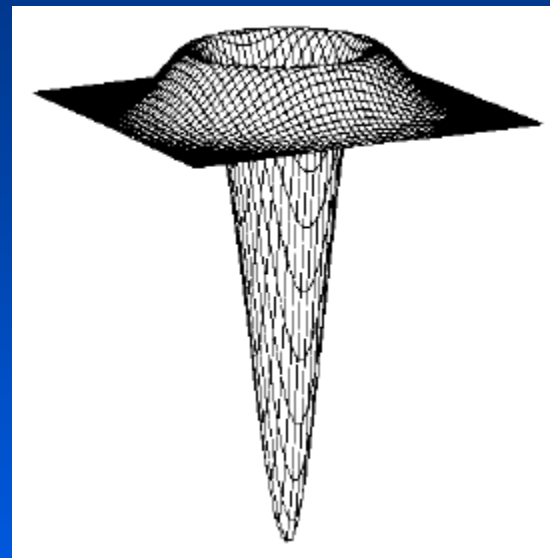
高斯

$$h_{\sigma}(u, v) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{u^2+v^2}{2\sigma^2}}$$



高斯的导数

$$\frac{\partial}{\partial x} h_{\sigma}(u, v)$$

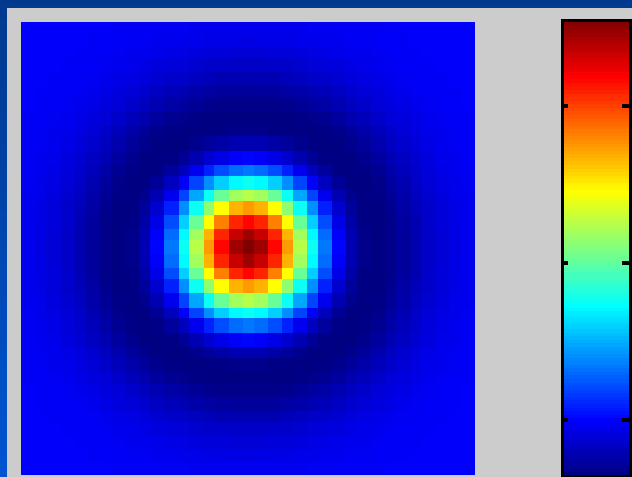
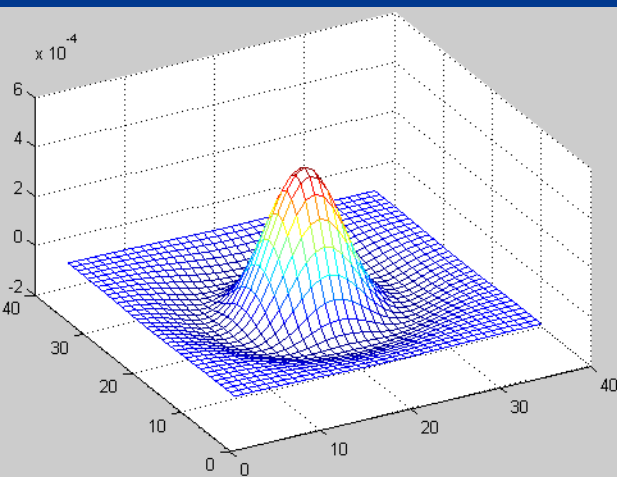


高斯拉普拉斯

$$\nabla^2 h_{\sigma}(u, v)$$

LoG算子:
$$\nabla^2 G(x, y) = - \left[\frac{x^2 + y^2 - \sigma^2}{\sigma^4} \right] e^{-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}}$$

在数字图像上实现LoG



0	0	-1	0	0
0	-1	-2	-1	0
-1	-2	16	-2	-1
0	-1	-2	-1	0
0	0	-1	0	0

- LoG 因其形状，也称为Mexican hat
- 求和为0，即对平坦图像区域的响应为0
- 一个近似的卷积模版：体现主要的形状

$$\iint \nabla^2 G(x, y) dx dy = 0$$



LoG: 例子



(a)



(b)



(c)

- (a) Lenna Image
- (b) Gaussian模版卷积 (15×15)
- (c) Laplacian模版卷积 (3×3)

分两步实现LoG，可以提供
更大的灵活性更小的模版尺寸

LoG: 例子



(d)



(e)



(f)

(d) 将(c)中大于0的像素置1，其余置0

(e) 在二值图像 (d) 上检测边缘，使用形态学膨胀方法

(f) 结果显示

几个特点：

(1) 正确检测到的边缘：单像素宽度，定位准确

(2) 形成许多封闭的轮廓（spaghetti，意大利面条），这是一个主要的问题

(3) 需要更加复杂的算法检测过零点

National Laboratory of Pattern Recognition

Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences



模式识别国家重点实验室

中国科学院自动化研究所

二维卷积的加速计算

- 一些二维模版函数可以表示为两个模版的乘积形式
- 如二维高斯模版:

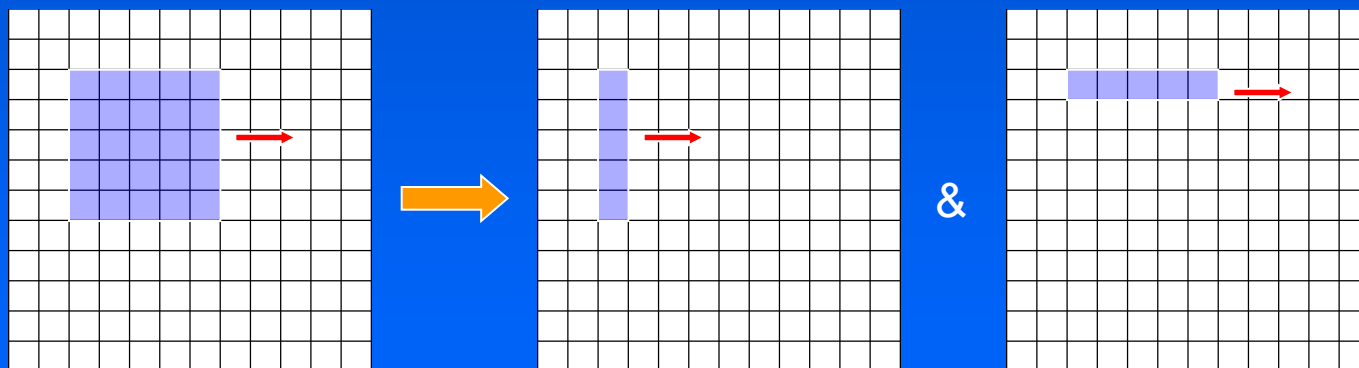
$$g(x, y) = e^{-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}} = e^{\frac{-x^2}{2\sigma^2}} e^{\frac{-y^2}{2\sigma^2}}$$



二维卷积的加速计算

$$g(x, y) * I(x, y) = \sum_{p=-m}^m \sum_{q=-m}^m g(p, q) I(x-p, y-q)$$

$$g(x, y) * I(x, y) = \sum_{p=-m}^m e^{\frac{-p^2}{2\sigma^2}} \left[\sum_{q=-m}^m e^{\frac{-q^2}{2\sigma^2}} I(x-p, y-q) \right]$$



图像尺寸：N×N，
原二维模版：M×M
则计算量（乘法加
法次数）：

$$\begin{aligned} &M \times M \times N \times N \\ &\quad \rightarrow \\ &2 \times M \times N \times N \end{aligned}$$