



第九章：图像特征表达

中国科学技术大学
电子工程与信息科学系



图像表达

- 基于全局特征的图像表达
- 基于局部特征的图像表达
 - 简单的局部视觉特征
 - 基于关键点检测的局部视觉特征
 - ✓ 图像表达基本框架
 - ✓ 局部视觉特征描述
 - ✓ 特征编码与聚合



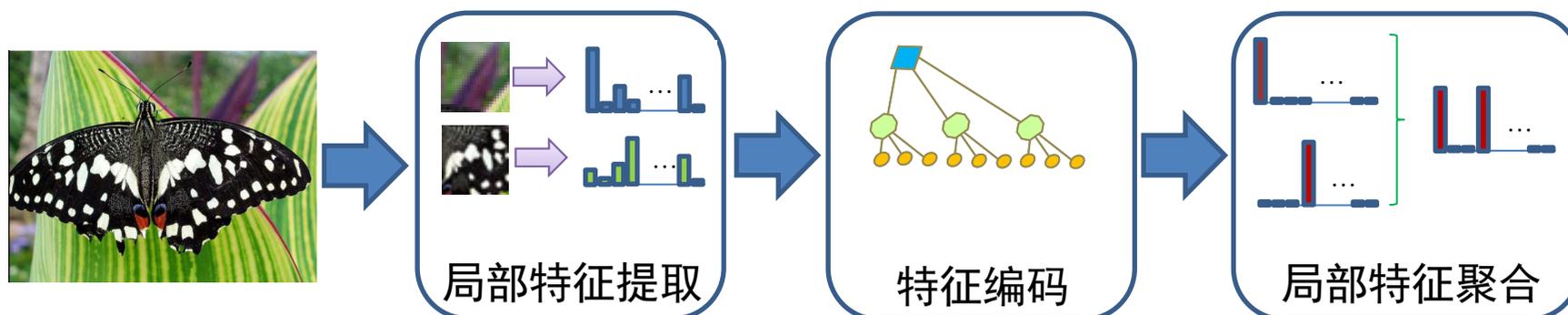
基于局部特征的图像表达

- 基于局部特征的图像表达基本框架
- 局部视觉特征描述
 - 局部关键点检测
 - ✓ 角点检测: Harris
 - ✓ 块检测: DoG, MSER
 - 局部区域描述
 - ✓ SIFT
 - ✓ LIOP
- 特征编码与聚合
 - Fisher Vector
 - 词袋模型(BOW)
 - VLAD
 - 乘积量化(PQ)



基于局部特征的图像表达基本框架

- 在图像分析中，许多问题可归结为图像间的比较
- 局部视觉特征对视觉内容有良好的区分性和表达力
 - 区分性：可辨别类间差异
 - 表达力：可包容类内差异
 - 相似视觉内容的视觉特征向量距离小，不同视觉内容的视觉特征向量距离大
- 特征聚合
 - 局部视觉特征维度高，且不同图像中包含的视觉特征数量不同
 - 有必要对一副图像中的局部特征进行量化（编码）和聚合，生成一个固定长度的矢量表达





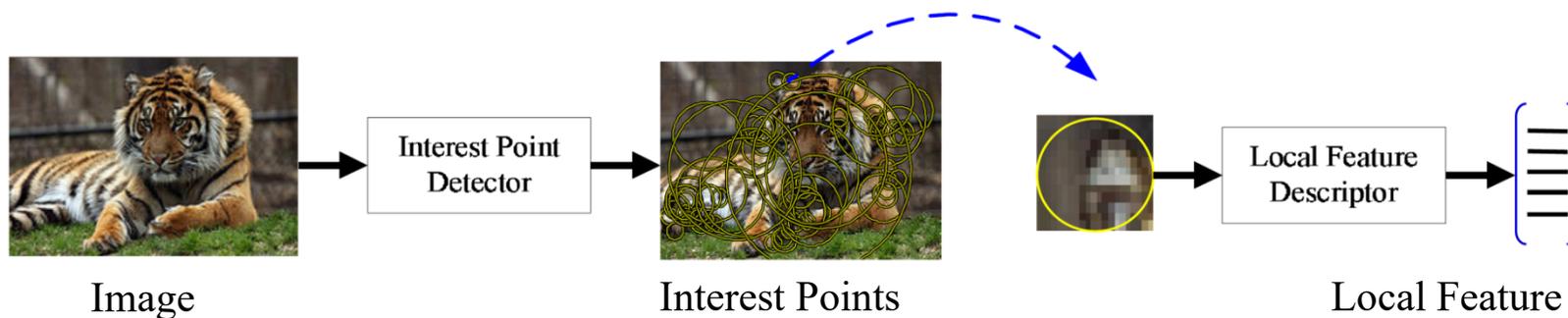
局部视觉特征

□ 视觉特征的不变性 (invariance)

- 以不变应万变：图像在**像素空间**发生了**亮度变换**或**几何变换**，但是在**特征空间**没有变化，或变化很小
- 常见的不变性
 - ✓ 亮度不变性，平移不变性，旋转不变性，尺度（缩放）不变性

□ 局部视觉特征提取

- 局部关键点检测
 - ✓ 确定关键点的**位置**和对应局部区域的**大小**
- 局部区域描述
 - ✓ 将图像局部区域**像素信号**变换为固定维度的**特征向量**





局部特征性质

- 可重复性 (Repeatability)
 - 图像经过变换后，对应的局部特征仍然存在

- 显著性 (Saliency)
 - 每个局部特征都对应一个有区别性的描述

- 紧凑性和高效性 (Compactness and efficiency)
 - 特征数目远少于图像像素数

- 局部性 (Locality)
 - 每个特征对应着一个相对较小的图像区域;
 - 对于混乱背景和遮挡具有鲁棒性



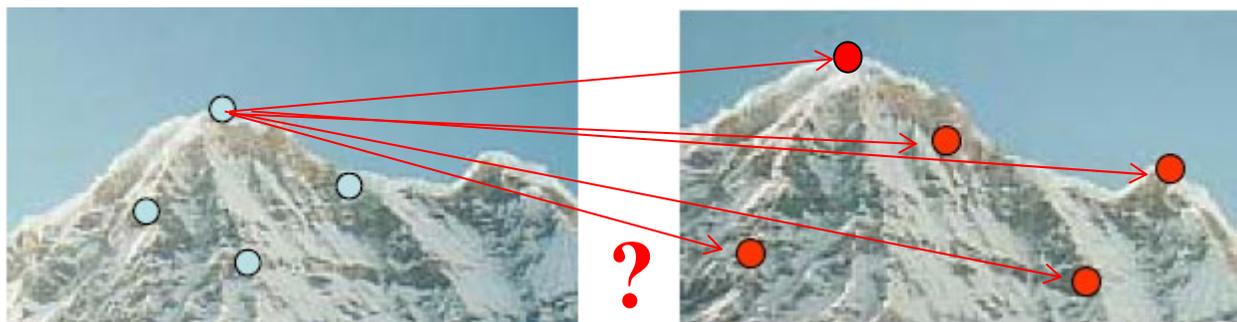
目标: 关键点检测的可重复性

- 对每副图像，局部关键点检测独立进行
 - 类似“管中窥豹”
- 基本要求
 - 在两副相关图像中能够独立地检测到若干**相同**的关键点
 - 如果关键点检测没有重复性保证，则不可能完成后续的匹配

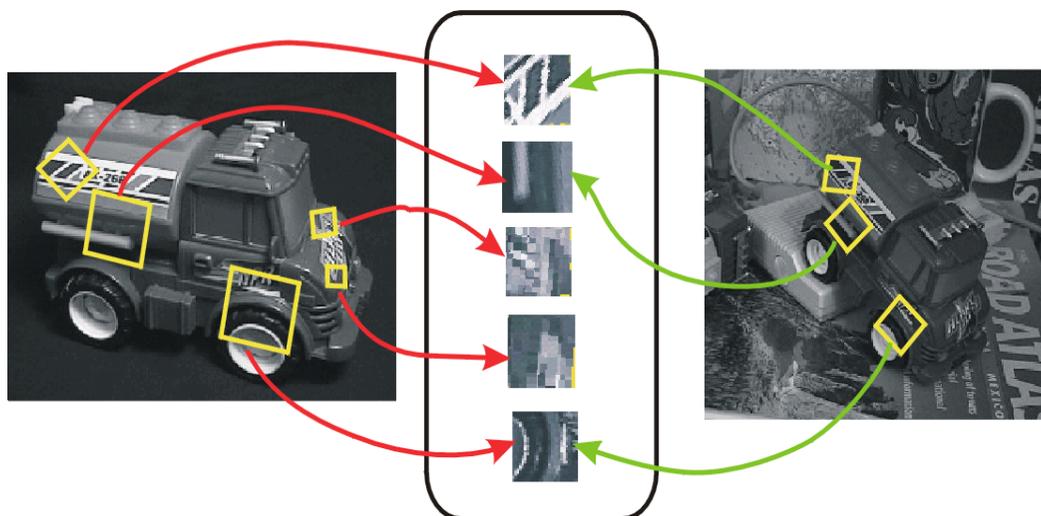


目标: 描述子的可区分性

- 可靠地确定兴趣点之间的对应关系

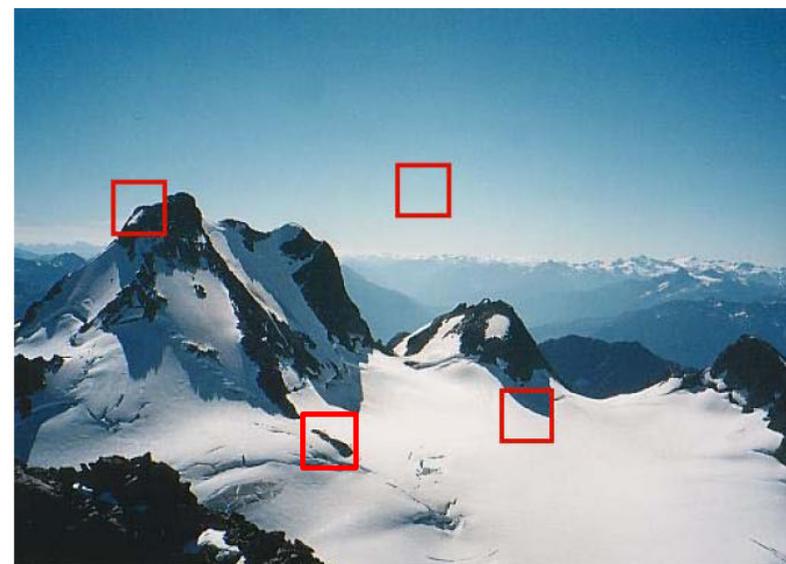
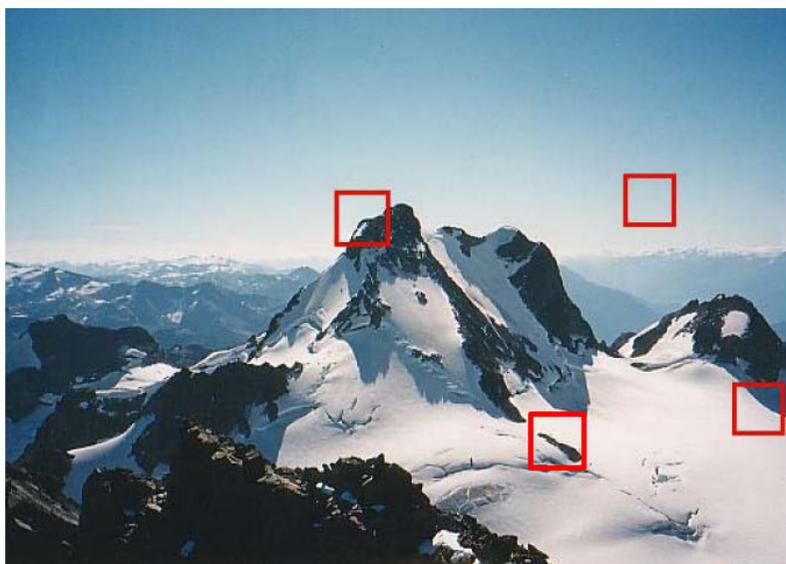


- 对于两个视角，描述子必须具有对几何和光照变化的不变性



局部视觉特征

- 在图像中寻找哪些与众不同的点/区域？
 - 目标：在图像之间建立明确的、无二义性的匹配
 - 如何定义这种“与众不同”？



平滑区域
(×)



边缘
(×)



角点
(✓)



块(blob)
(✓)





基于局部特征的图像表达

- 图像表达基本框架
- 局部视觉特征描述
 - 局部关键点检测
 - ✓ 角点检测: Harris
 - ✓ 块检测: LoG, DoG, MSER
 - 局部区域描述
 - ✓ SIFT
- 特征编码与聚合
 - Fisher Vector
 - Bow
 - VLAD
 - PQ



局部视觉特征描述

□ 局部关键点检测

■ 角点检测

✓ Harris 角点检测子

■ 块检测

✓ 拉普拉斯-高斯 (LoG) 检测子

✓ 高斯差分(DoG) 检测子

✓ MSER 检测子

□ 局部区域描述

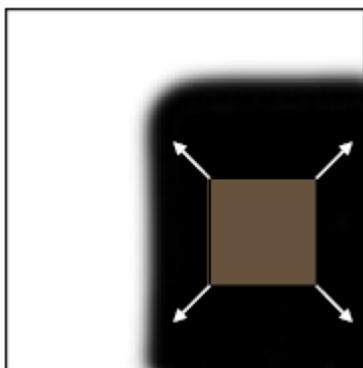
■ SIFT

■ LIOP

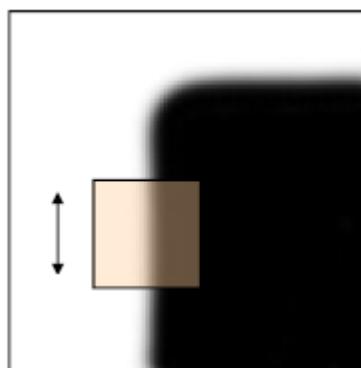


关键点检测：角点

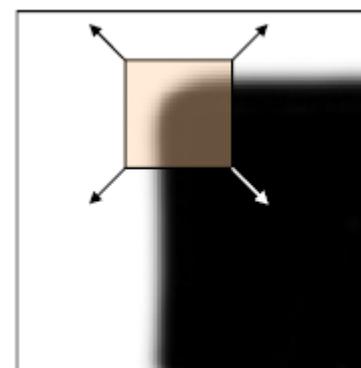
- 通过查看一个小窗口，即可简单的识别角点
 - “管中窥豹”
- 在角点上，向任何一个方向移动窗口，都会产生灰度的较大变化



“平坦”区域：
任意方向灰度
均无变化



“边缘”：沿边
缘方向，灰度无
变化



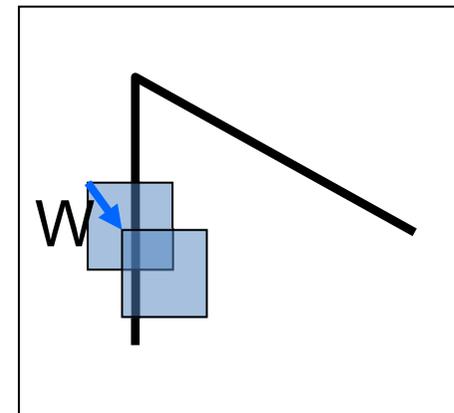
“角点”：所有
方向上，灰度均
有较大变化



Harris 角点检测

- 考虑一个滑窗 W ，平移量为 (u, v)
 - 滑动前后，滑窗 W 中的像素灰度如何变化？
 - 比较滑窗内对应像素灰度，计算平方差之和

$$E(u, v) = \sum_{(x, y) \in W} [I(x + u, y + v) - I(x, y)]^2$$



- 对 I 关于 x 、 y 做泰勒展开：

$$I(x + u, y + v) = I(x, y) + \frac{\partial I}{\partial x}u + \frac{\partial I}{\partial y}v + \text{higher order terms}$$

- 如果滑窗平移量 (u, v) 足够小，则可去掉高阶项：

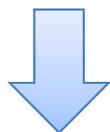
$$\begin{aligned} I(x + u, y + v) &\approx I(x, y) + \frac{\partial I}{\partial x}u + \frac{\partial I}{\partial y}v \\ &\approx I(x, y) + [I_x \ I_y] \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \end{aligned}$$



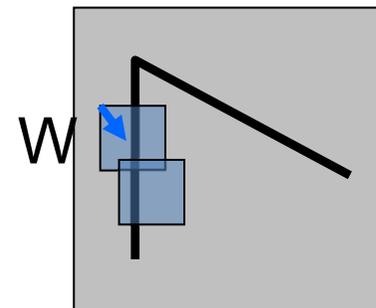
Harris 角点检测

$$E(u, v) = \sum_{(x, y) \in W} [I(x + u, y + v) - I(x, y)]^2$$

$$I(x + u, y + v) \approx I(x, y) + [I_x \ I_y] \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}$$



$$\begin{aligned} E(u, v) &= \sum_{(x, y) \in W} [I(x + u, y + v) - I(x, y)]^2 \\ &\approx \sum_{(x, y) \in W} [I(x, y) + [I_x \ I_y] \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} - I(x, y)]^2 \\ &\approx \sum_{(x, y) \in W} \left[[I_x \ I_y] \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \right]^2 \end{aligned}$$

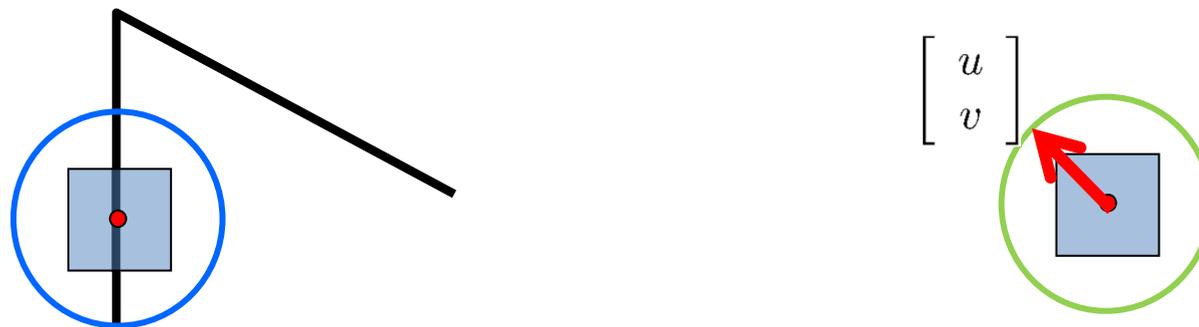




Harris 角点检测

□ 上式可重写为：

$$E(u, v) = [u \quad v] \sum_{(x,y) \in W} \begin{bmatrix} I_x^2 & I_x I_y \\ I_y I_x & I_y^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = [u \quad v] \mathbf{M} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}$$



□ 对于上方的例子

- 可以将蓝色滑窗的中心移到移到绿色单位圆上的任意位置
- 朝那个方向 $[u \quad v]$ 移动，会得到**最大**和**最小**的 E 值呢？
 - ✓ 可通过对矩阵 \mathbf{M} 的特征向量，得到这两个方向



回顾：特征向量、特征值

- 对于矩阵 \mathbf{A} ，其特征向量为 \mathbf{x} ，当其满足：

$$\mathbf{Ax} = \lambda\mathbf{x}$$

标量 λ 为特征向量 \mathbf{x} 所对应的特征值

- 特征值可通解如下方程得到： $\det(\mathbf{A} - \lambda\mathbf{I}) = 0$

- 在上页PPT上，我们的 $\mathbf{A} = \mathbf{M}$ 是一个 2×2 的矩阵，因此可得

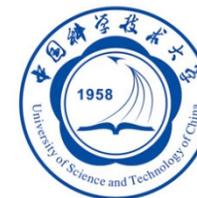
$$\det \begin{pmatrix} m_{11} - \lambda & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} - \lambda \end{pmatrix} = 0$$

其解为：

$$\lambda_{\pm} = \frac{1}{2} \left[(m_{11} + m_{22}) \pm \sqrt{4m_{12}m_{21} + (m_{11} - m_{22})^2} \right]$$

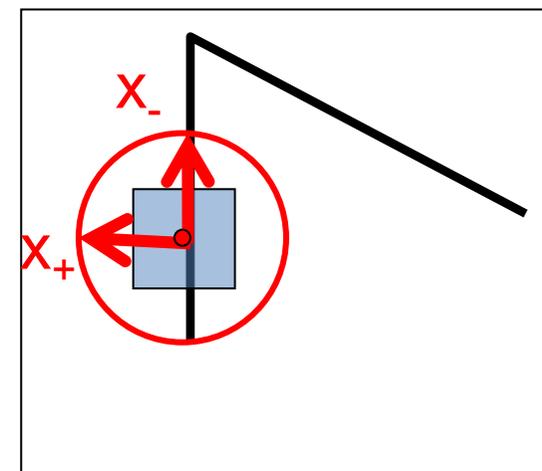
- 一旦得到特征值 λ ，可以通过解如下方程得到特征向量 \mathbf{x}

$$\begin{bmatrix} m_{11} - \lambda & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} - \lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = 0$$



Harris 角点检测

$$E(u, v) = [u \ v] \underbrace{\sum_{(x,y) \in W} \begin{bmatrix} I_x^2 & I_x I_y \\ I_y I_x & I_y^2 \end{bmatrix}}_M \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}$$



□ 矩阵M 的特征值和特征向量

- Define shifts with the largest and smallest change (E value)

- x_+ = direction of largest increase in E.

$$Mx_+ = \lambda_+ x_+$$

- λ_+ = amount of increase in direction x_+

- λ_- = direction of smallest increase in E.

$$Mx_- = \lambda_- x_-$$

- x_- = amount of increase in direction x_+



Harris 角点检测

□ 滑窗中的灰度变化：特征值分析

- λ_{\min} , λ_{\max} : 对称矩阵M的特征值
- 如果尝试所有可能的平移方向向量 \mathbf{n} ，那么产生最大灰度变化值 $E(\mathbf{n})$ 为 λ_{\max}

$$E(u, v) \cong [u, v] M \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}$$

$$M\mathbf{x}_{\max} = \lambda_{\max}\mathbf{x}_{\max}; M\mathbf{x}_{\min} = \lambda_{\min}\mathbf{x}_{\min}; \mathbf{x}_{\max}^T\mathbf{x}_{\min}=0$$

$$\text{定义 } \mathbf{n} = [u, v]^T = a\mathbf{x}_{\max} + b\mathbf{x}_{\min}, \text{ with } a^2 + b^2 = 1$$

$$\text{于是, } E(\mathbf{n}) = \mathbf{n}^T M \mathbf{n}$$

$$\begin{aligned} &= (a\mathbf{x}_{\max} + b\mathbf{x}_{\min})^T M (a\mathbf{x}_{\max} + b\mathbf{x}_{\min}) \\ &= (a\mathbf{x}_{\max} + b\mathbf{x}_{\min})^T (a\lambda_{\max}\mathbf{x}_{\max} + b\lambda_{\min}\mathbf{x}_{\min}) \\ &= a^2\lambda_{\max} + b^2\lambda_{\min} \\ &= a^2\lambda_{\max} + (1 - a^2)\lambda_{\min} \end{aligned}$$

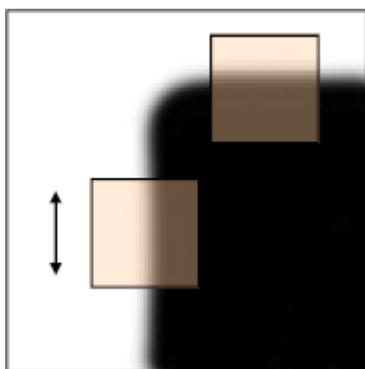
$$\text{因此, } E_{\max} = \lambda_{\max}, \text{ with } a = 1 \text{ and } \mathbf{n} = [u, v]^T = \mathbf{x}_{\max};$$

$$E_{\min} = \lambda_{\min}, \text{ with } a = 0 \text{ and } \mathbf{n} = [u, v]^T = \mathbf{x}_{\min}.$$



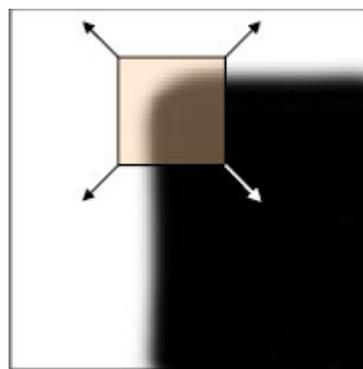
角点响应函数

□ 定性分析矩阵对称矩阵M的特征值



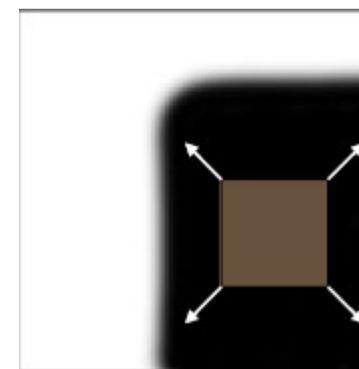
边缘:

$$\lambda_1 \gg \lambda_2$$
$$\lambda_2 \gg \lambda_1$$



角点:

$$\lambda_1 \text{ 和 } \lambda_2 \text{ 均较大,}$$
$$\lambda_1 \sim \lambda_2;$$



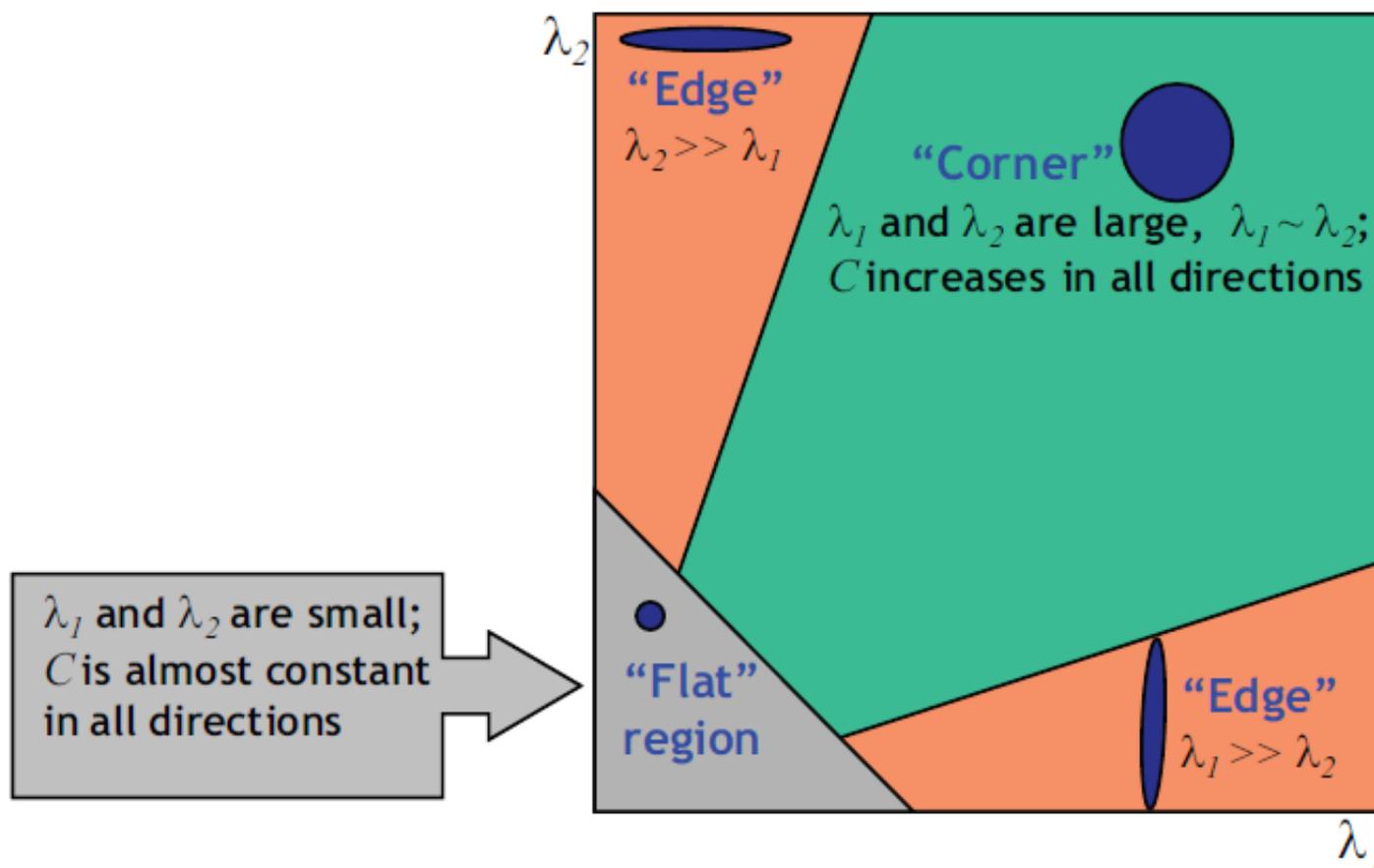
平滑区域:

$$\lambda_1 \text{ 和 } \lambda_2 \text{ 均较小;}$$



角点响应函数

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \sum_{(x,y) \in W} I_x^2 & \sum_{(x,y) \in W} I_x I_y \\ \sum_{(x,y) \in W} I_y I_x & \sum_{(x,y) \in W} I_y^2 \end{bmatrix} = \mathbf{R}^{-1} \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix} \mathbf{R}$$





角点响应函数

- 对每个图像窗，计算 M 矩阵，基于其特征值，定义角点响应函数 R ：

$$R(x, y) = \lambda_1 \lambda_2 - \alpha (\lambda_1 + \lambda_2)^2$$

$$\det(\mathbf{C}) = \lambda_1 \lambda_2$$

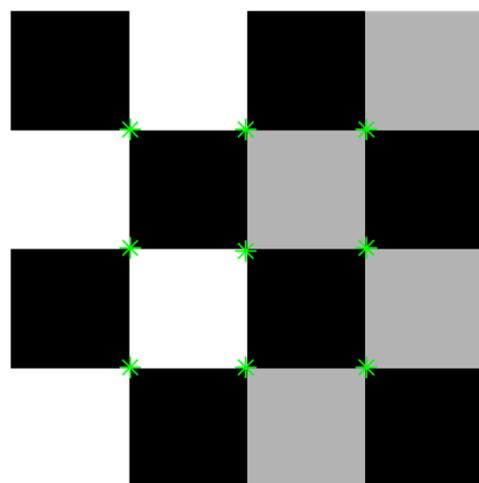
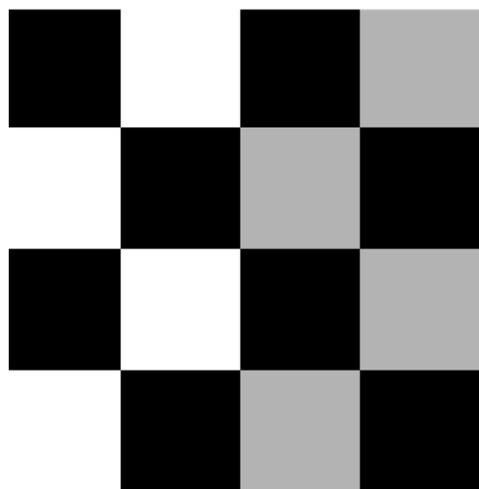
$$\text{trace}(\mathbf{C}) = \lambda_1 + \lambda_2$$

- 找到角点响应较大的值所对应的图像位置点：

$$R > \text{threshold}$$

- 取 R 的局部极大值点，例如 进行非最大抑制

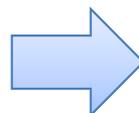
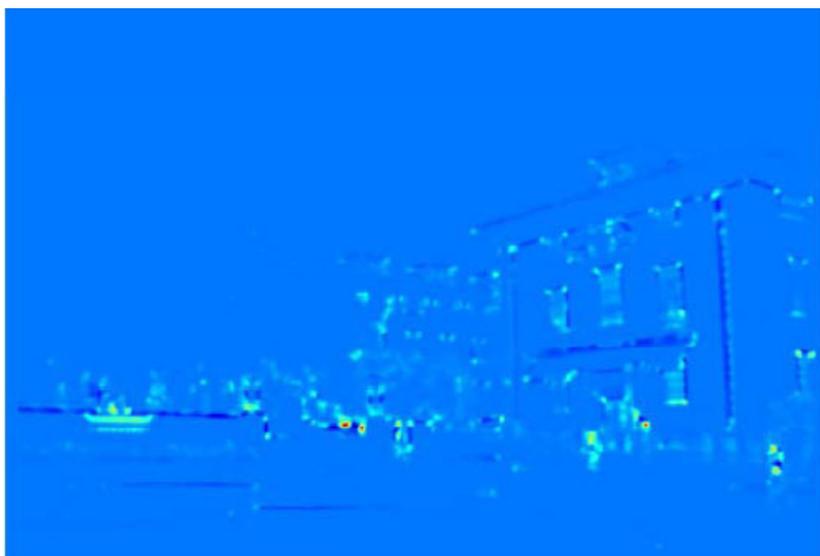
Harris角点检测示例





Harris角点检测示例角点响应图

角点响应图 R

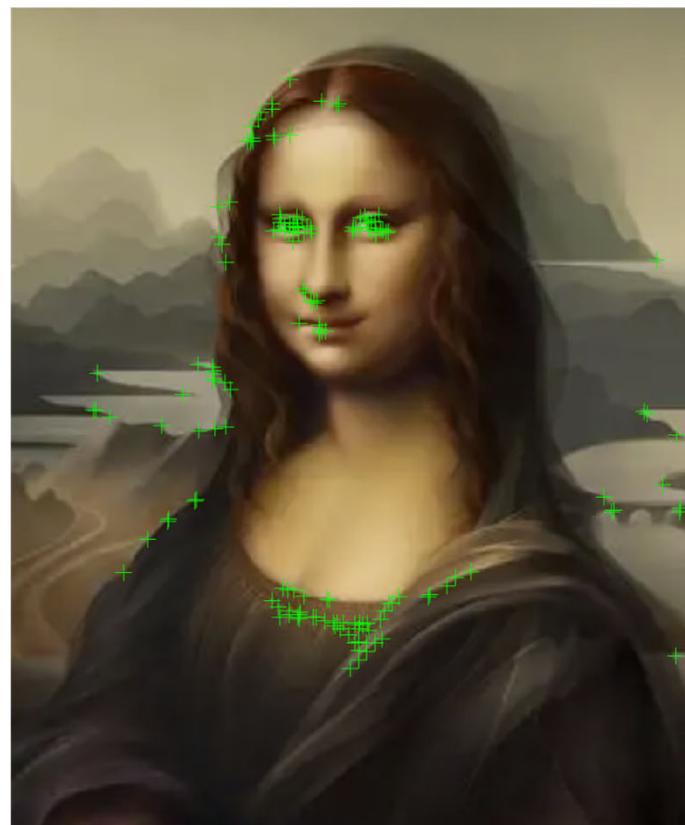
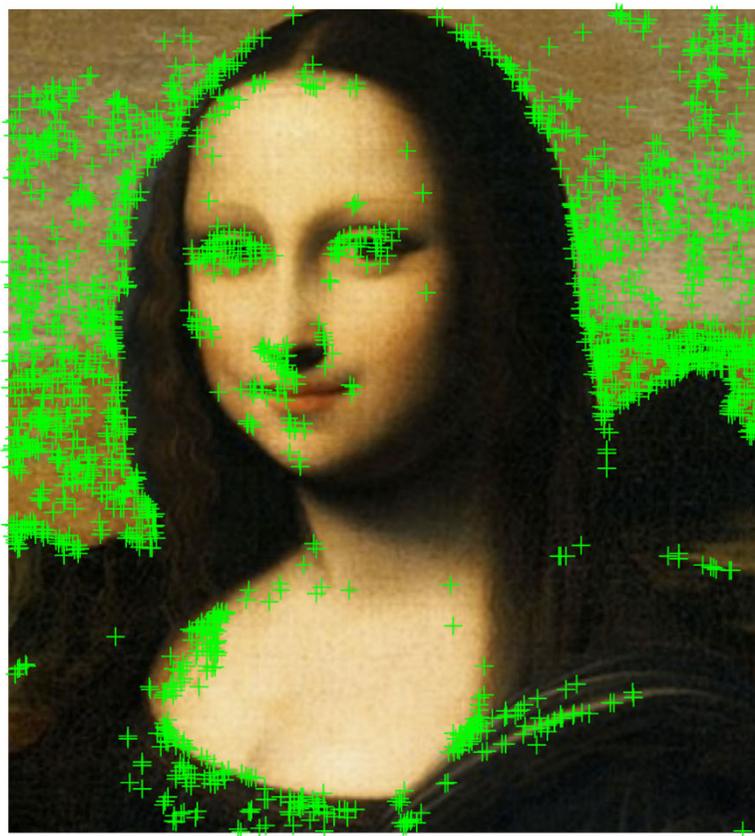


对 R 进行门限处理, 取极大值





对两张图像独立进行检测处理





Harris 角点检测子的性质

旋转不变?

■ Yes

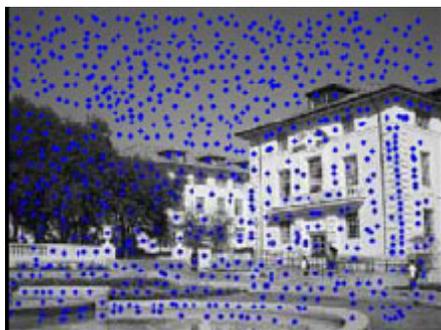
$$M = X \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix} X^T$$

尺度不变?

■ No



校正窗口尺度函数



Window scale = 10



Window scale = 15



Window scale = 30

Harris 检测算子检测到的特征点 取决于所选的窗的大小.



局部视觉特征描述

□ 局部关键点检测

■ 角点检测

- ✓ Harris 角点检测子

■ 块检测

- ✓ 拉普拉斯-高斯 (LoG) 检测子
- ✓ 高斯差分(DoG) 检测子
- ✓ MSER 检测子

□ 局部区域描述

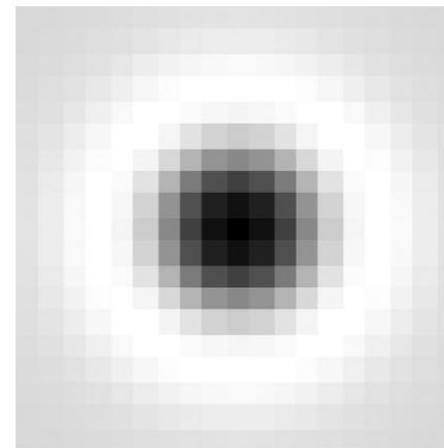
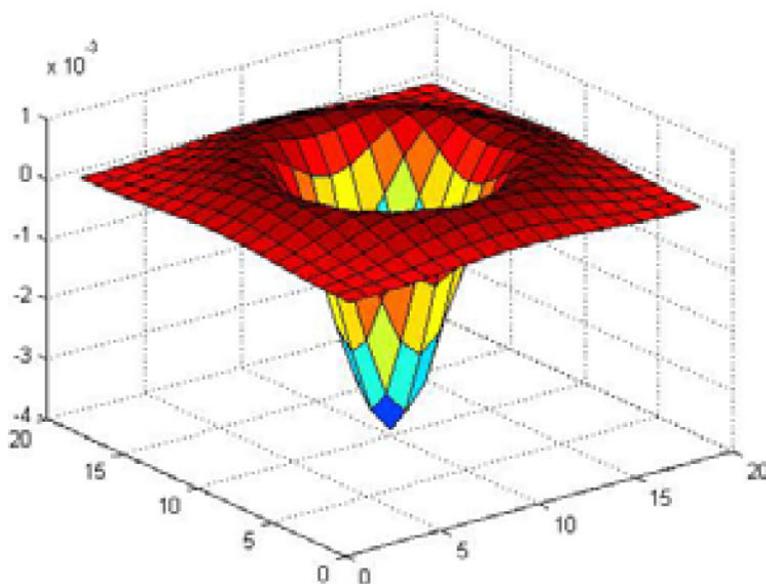
■ SIFT

■ LIOP



Laplacian-of-Gaussian (LoG)

- 2D的圆周对称操作子，用于块(blob)检测
 - LoG: “*blob*” detector



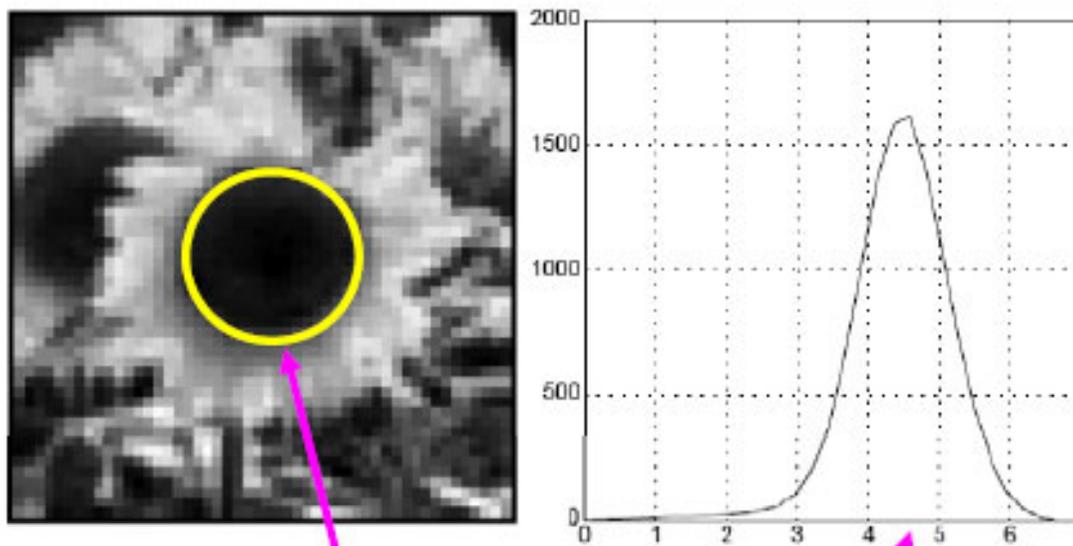
$$LoG = \nabla^2 G_\sigma(x, y) = \frac{\partial^2}{\partial x^2} G_\sigma(x, y) + \frac{\partial^2}{\partial y^2} G_\sigma(x, y)$$

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

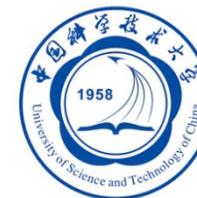


对于图像中的一个给定点:

- 特征尺度 (characteristic scale)
 - Laplacian 响应的极值所对应的尺度

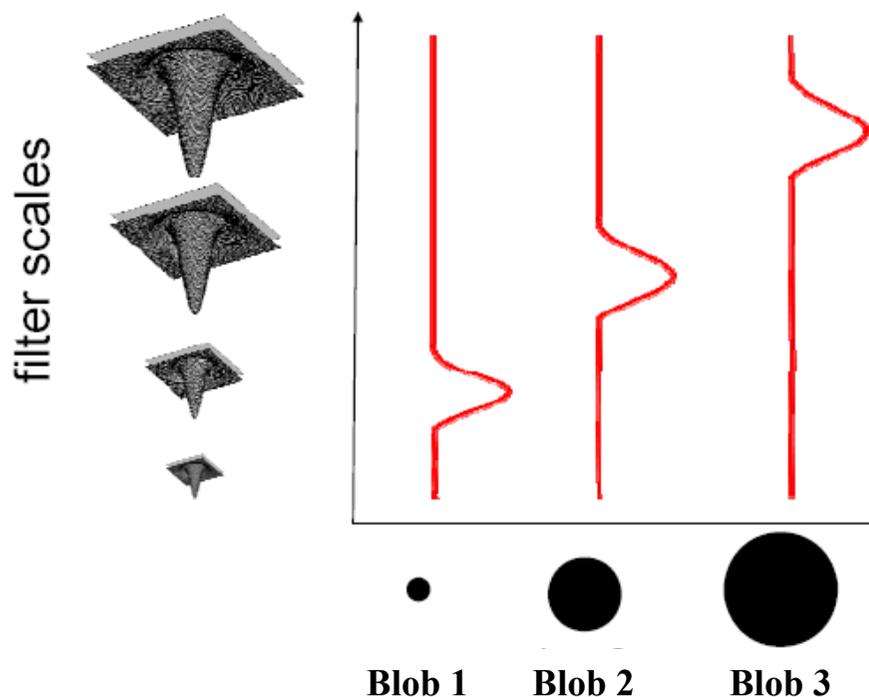


characteristic scale



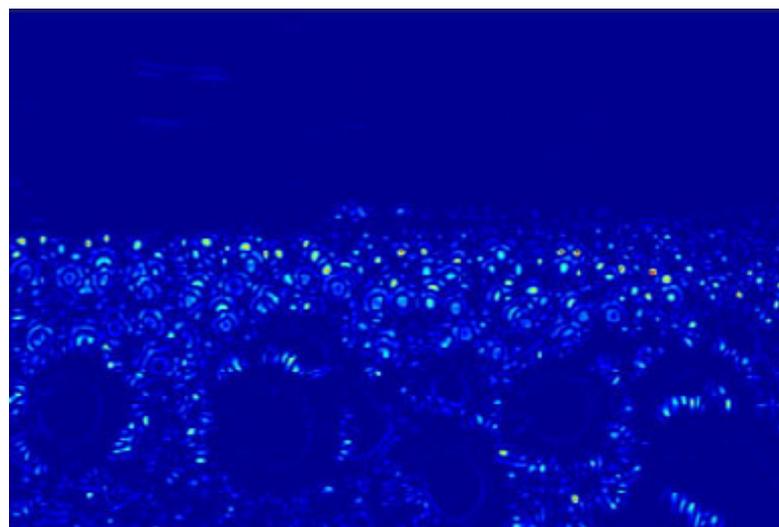
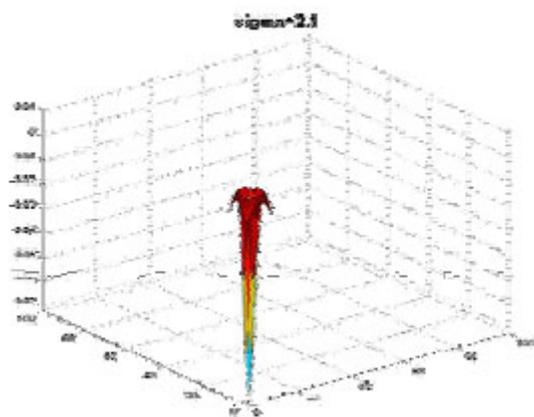
Laplacian-of-Gaussian (LoG)

- Laplacian-of-Gaussian = “blob” detector
 - 给定图像块（patch），遍历枚举不同尺寸LoG的滤波器，将每个滤波器与图像块相卷积
 - 根据卷积响应的极大/极小值，确定适合当前图像块的LoG的滤波器，该滤波器的尺寸即定义了图像的尺度

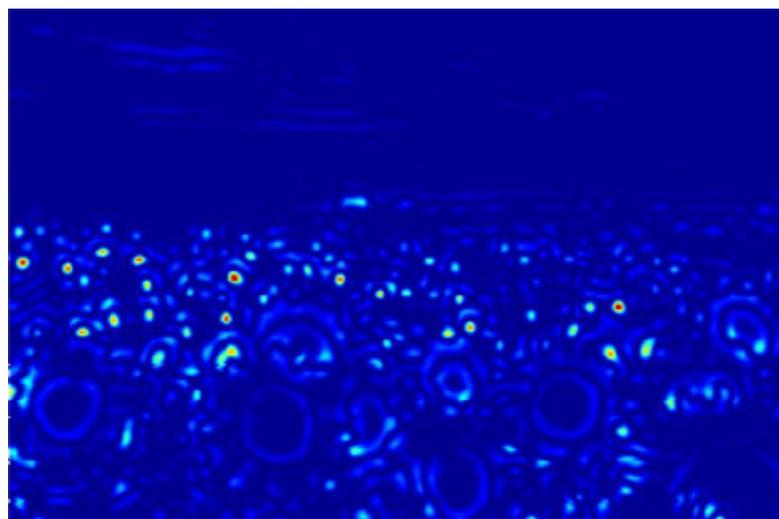
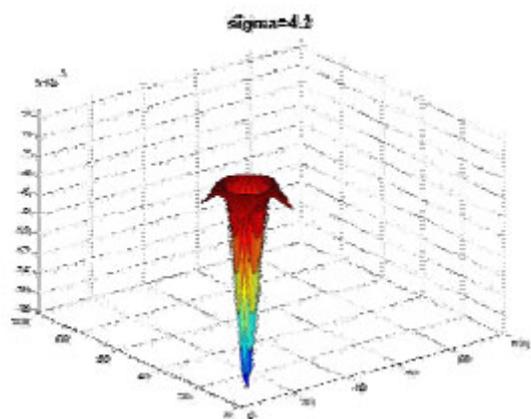


$$\nabla^2 g = \frac{\partial^2 g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 g}{\partial y^2}$$

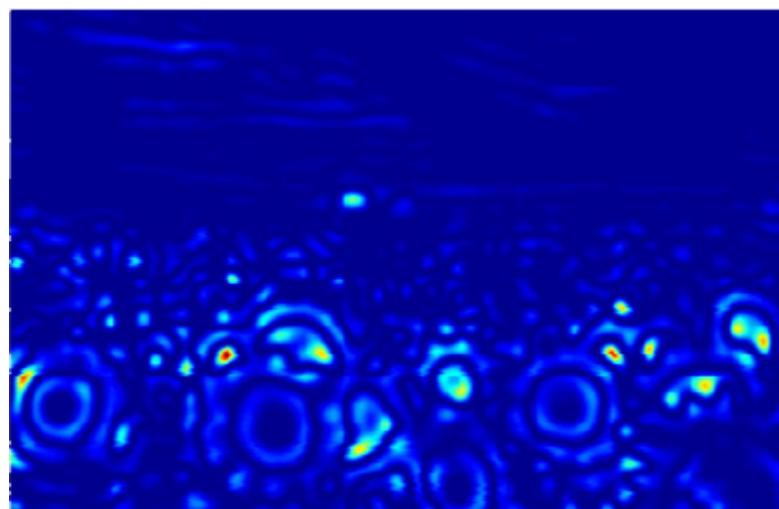
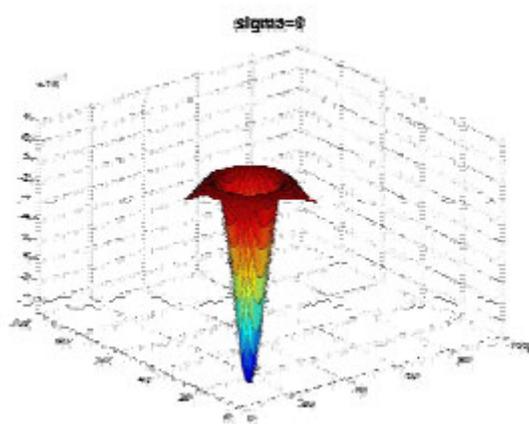
LoG响应示意图-1



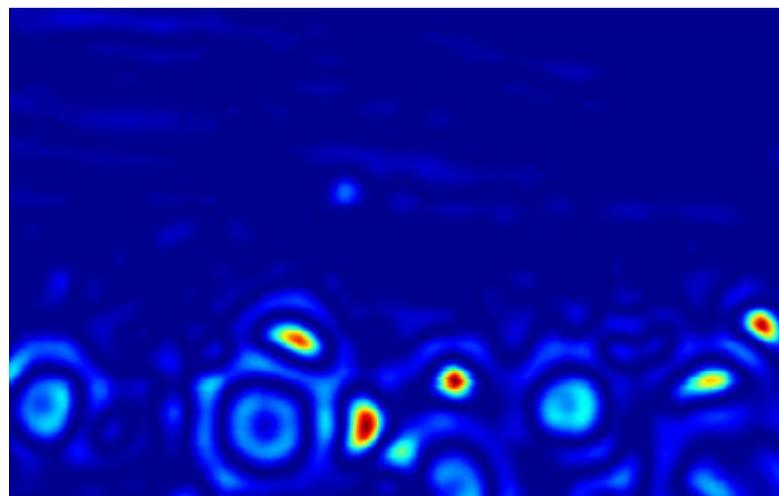
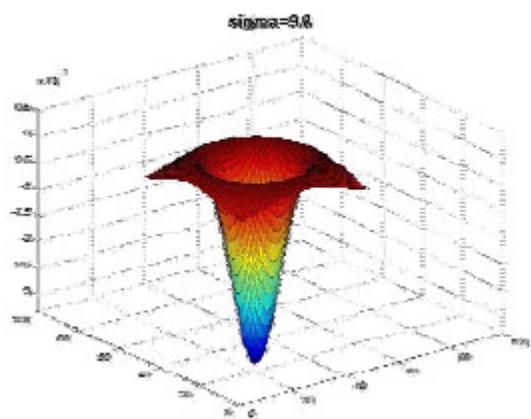
LoG响应示意图-2



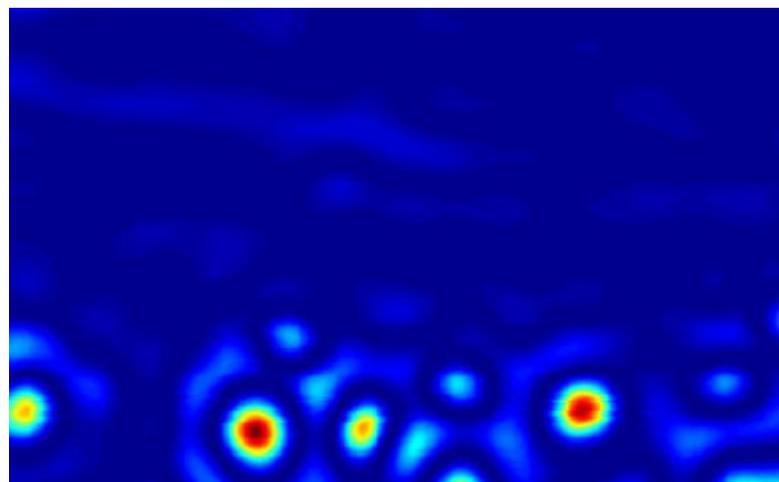
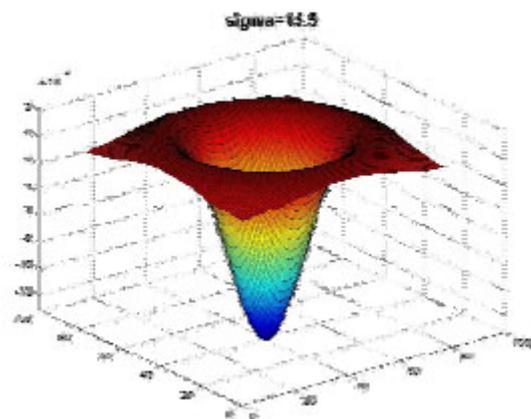
LoG响应示意图-3



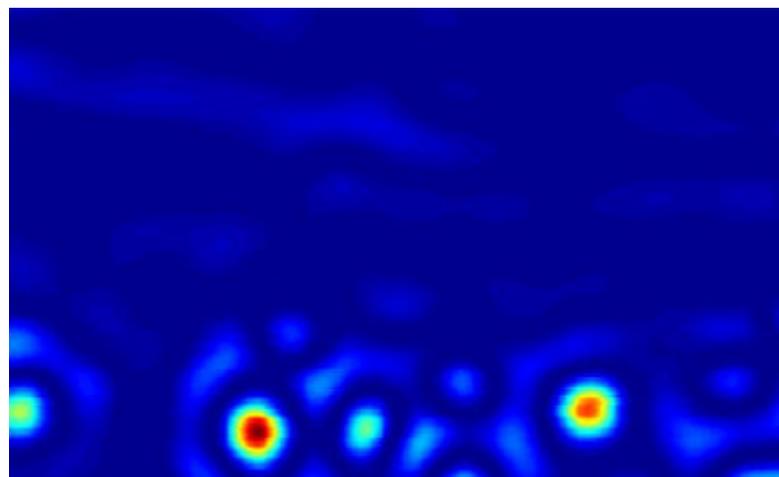
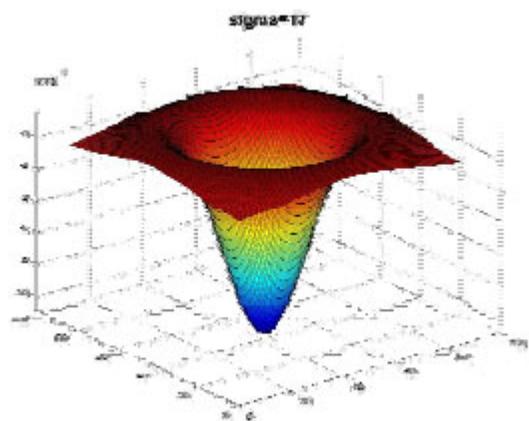
LoG响应示意图-4



LoG响应示意图-5



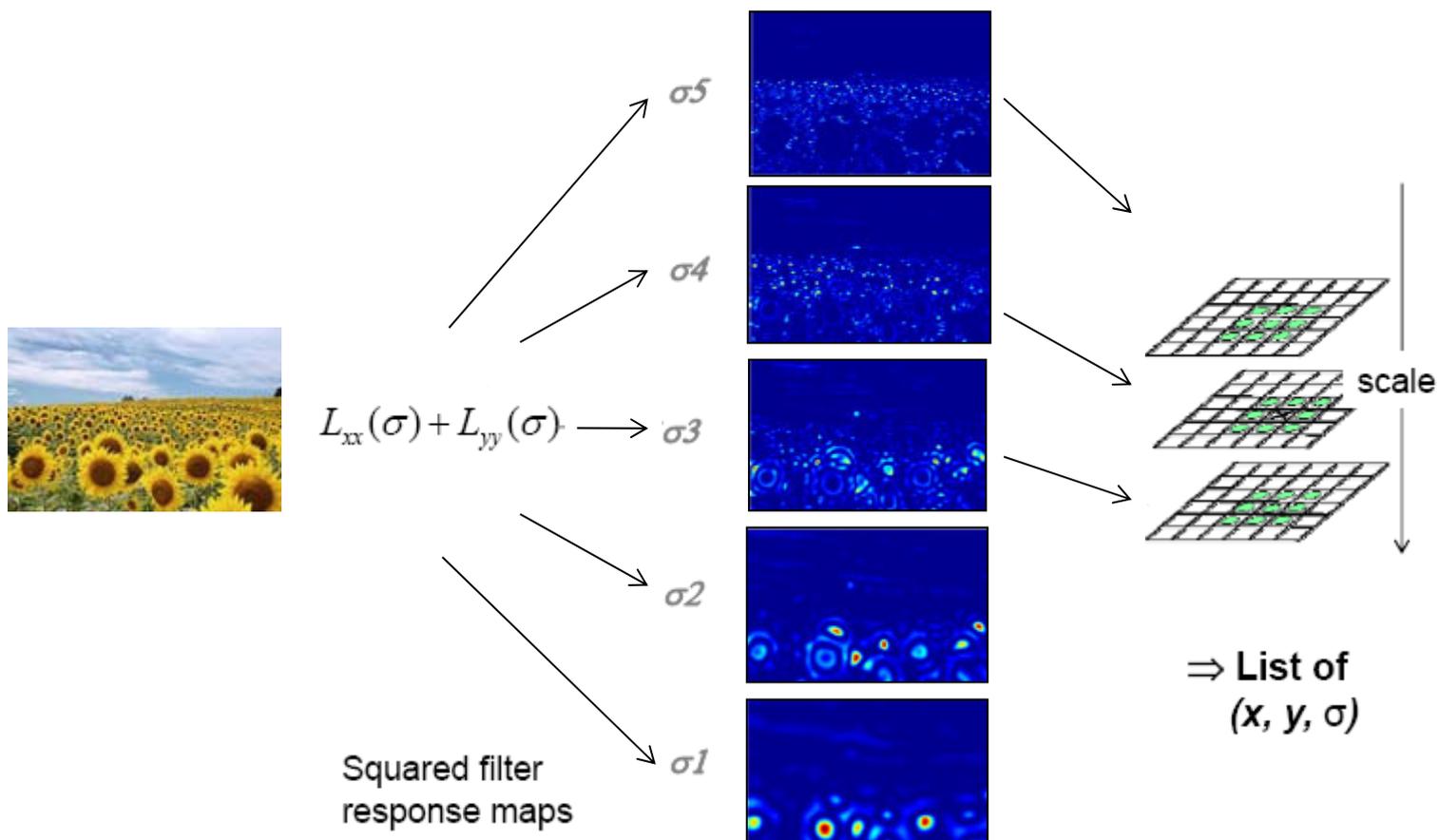
LoG响应示意图-6





尺度空间的 blob 检测

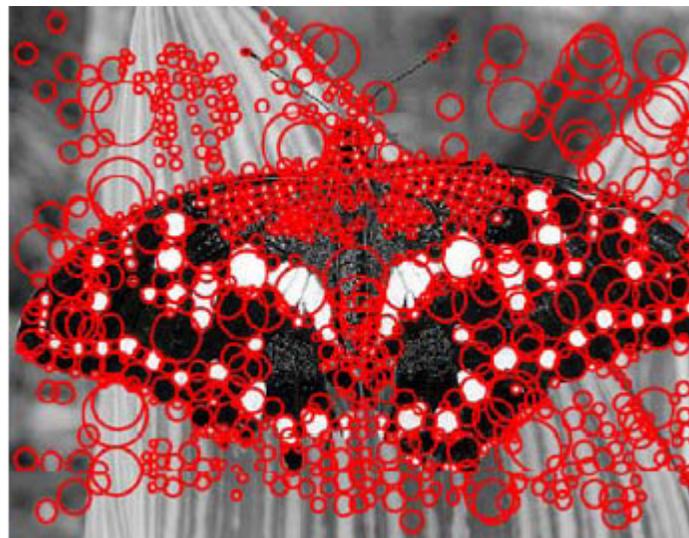
- 根据卷积响应的极大/极小值，确定适合当前像素位置的LoG的滤波器，该滤波器的尺寸即定义了当前像素的尺度





尺度空间的 blob 检测: 示例

- 检测出来的区域不一定是完整的blob或独立的区域





局部视觉特征描述

□ 局部关键点检测

■ 角点检测

✓ Harris 角点检测子

■ 块检测

✓ 拉普拉斯-高斯 (LoG) 检测子

✓ 高斯差分(DoG) 检测子

✓ MSER 检测子

□ 局部区域描述

■ SIFT

■ LIOP

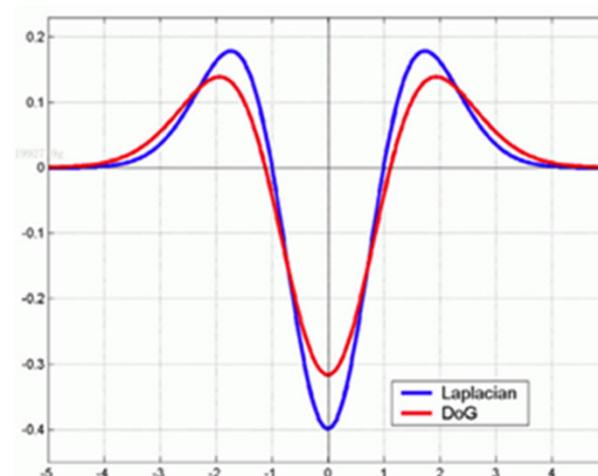


从LoG到DoG: SIFT检测子

- 采用 Difference of Gaussians (DoG) 去近似 Laplacian of Gaussians (LoG)
 - 差分阶次更低 (二阶 \rightarrow 一阶)
 - 高效的实现形式

LoG: $L = \sigma^2 (G_{xx}(x, y, \sigma) + G_{yy}(x, y, \sigma))$

DoG: $DoG = G(x, y, k\sigma) - G(x, y, \sigma)$



$I(k\sigma)$



$I(\sigma)$



-

=

$I(k\sigma) - I(\sigma)$



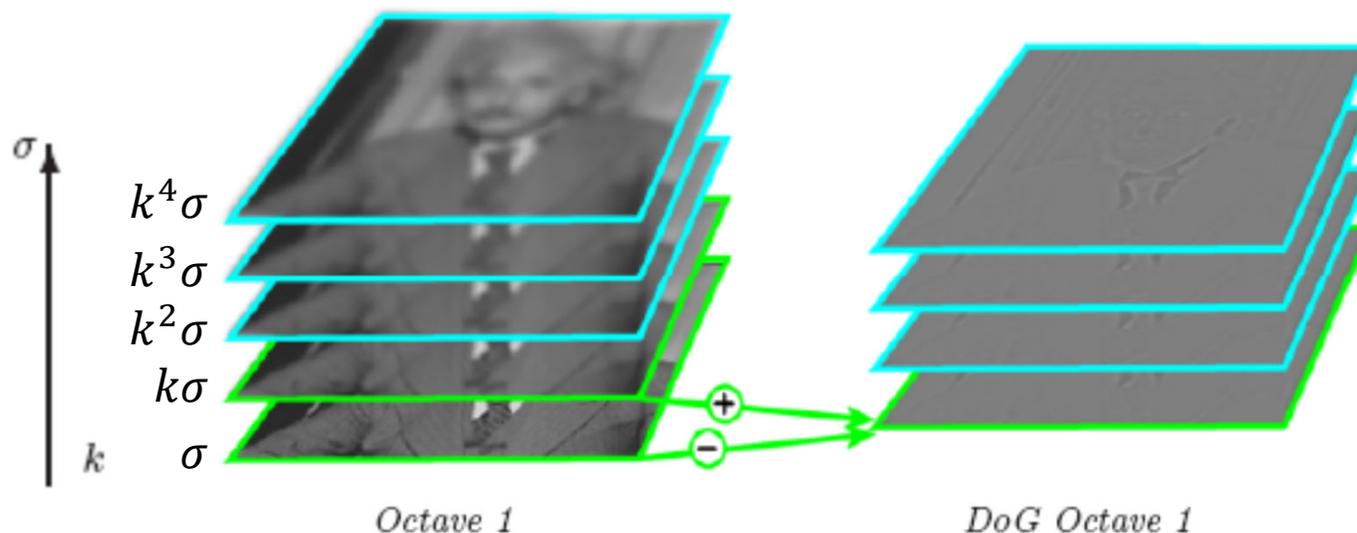


DoG 图像金字塔-1

□ 首先构建高斯金字塔

- 用尺度为 σ 的高斯核对图像做卷积，得到不同尺度的图像
- 每层octave有 $s + 3$ 副滤波结果图像， $k^s = 2$ ，即 $k = 2^{\frac{1}{s}}$
- 相邻高斯图作差，得到高斯差分图，每层octave有 $s + 2$ 张图
- ✓ 节省计算开销

$$\begin{aligned} D(x, y, \sigma) &= (G(x, y, k\sigma) - G(x, y, \sigma)) * I(x, y) \\ &= L(x, y, k\sigma) - L(x, y, \sigma). \end{aligned}$$

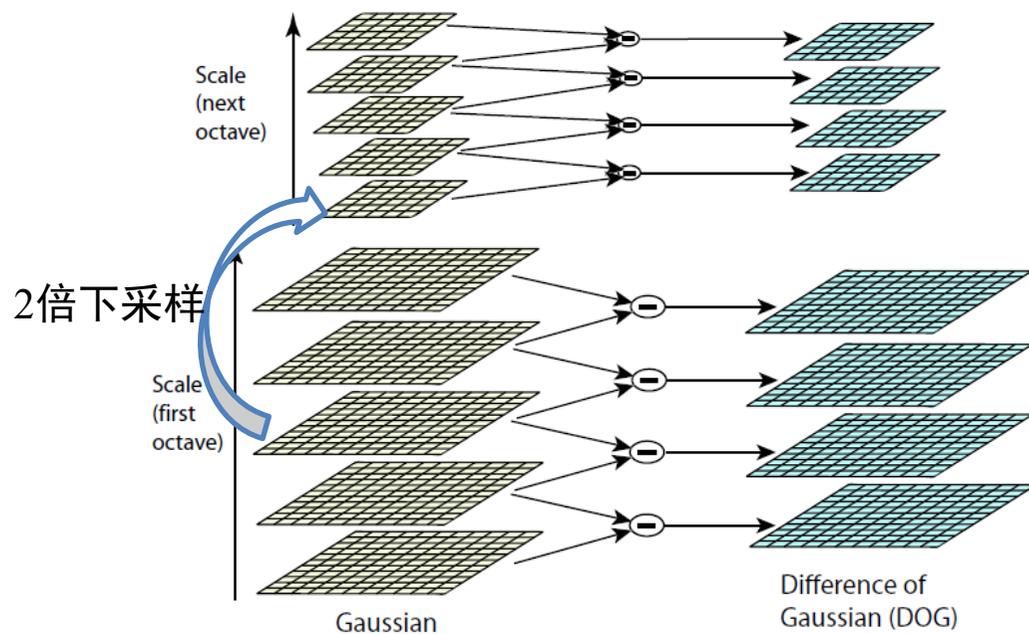




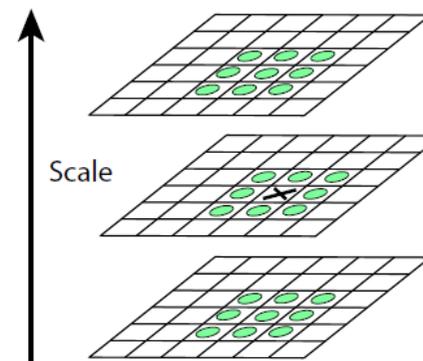
DoG 图像金字塔-2

□ 关键点检测

- 相邻两个octave的尺度差为2
- 每组octave的 $s + 2$ 副DoG图表示 (x, y, scale) 三维尺度空间
- 在 $3 \times 3 \times 3$ 的26邻域寻找局部极大、极小值点
- 对于每个octave, 局部极值点仅落在 s 副DoG图像上



构建多级octave, 相邻两级下采样率为2



在 $3 \times 3 \times 3$ 的26邻域, 检测极值点



DoG 图像金字塔-3

□ 小结

- 将图象中的关键区域的尺度估计问题转换为DoG滤波器匹配问题，将最匹配的DoG滤波器的标准差作为关键区域的尺度估计值
- 将图象的尺度空间划分为一系列子区间： $(\sigma, 2\sigma]$, $(2\sigma, 4\sigma]$, $(4\sigma, 8\sigma]$, \dots , $(2^m\sigma, 2^{m+1}\sigma]$, \dots 。每个尺度子区间对应一个octave
- 由于相邻两个octave对图象进行了2倍（行、列）下采样，所以每个octave中的都等价于在不同图象分辨率下进行尺度范围为 $[\sigma, 2\sigma)$ 的关键区域尺度估计
 - ✓ 限制DoG滤波器的尺寸，减小计算开销
- 在第 m 个octave上的尺度估计结果，通过乘以 2^m ，即可得到在原始图象分辨率下的关键区域尺度估计值



局部视觉特征描述

□ 局部关键点检测

■ 角点检测

✓ Harris 角点检测子

■ 块检测

✓ 高斯差分(DoG) 检测子

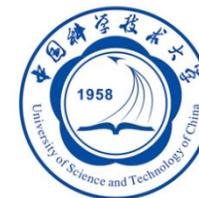
✓ 最大稳定极值区域 (MSER) 检测子

□ 局部区域描述

■ SIFT

■ LIOP

最大稳定极值区域检测子: MSER



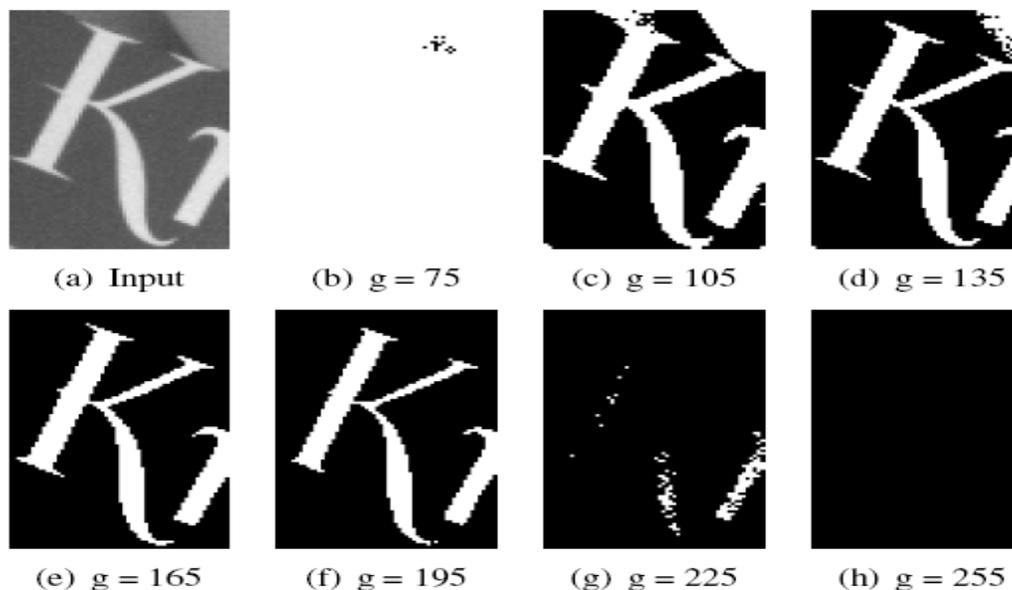
□ MSER: Maximally Stable Extremal Region

- 在一个比较大的阈值范围内，可被独立分割出来的、面积稳定的图像区域

- 区域内部和区域边界上的像素的灰度有显著差异

$$\forall p \in R_i, \forall q \in \text{boundary}(R_i) \rightarrow I(p) - I(q) > \tau$$

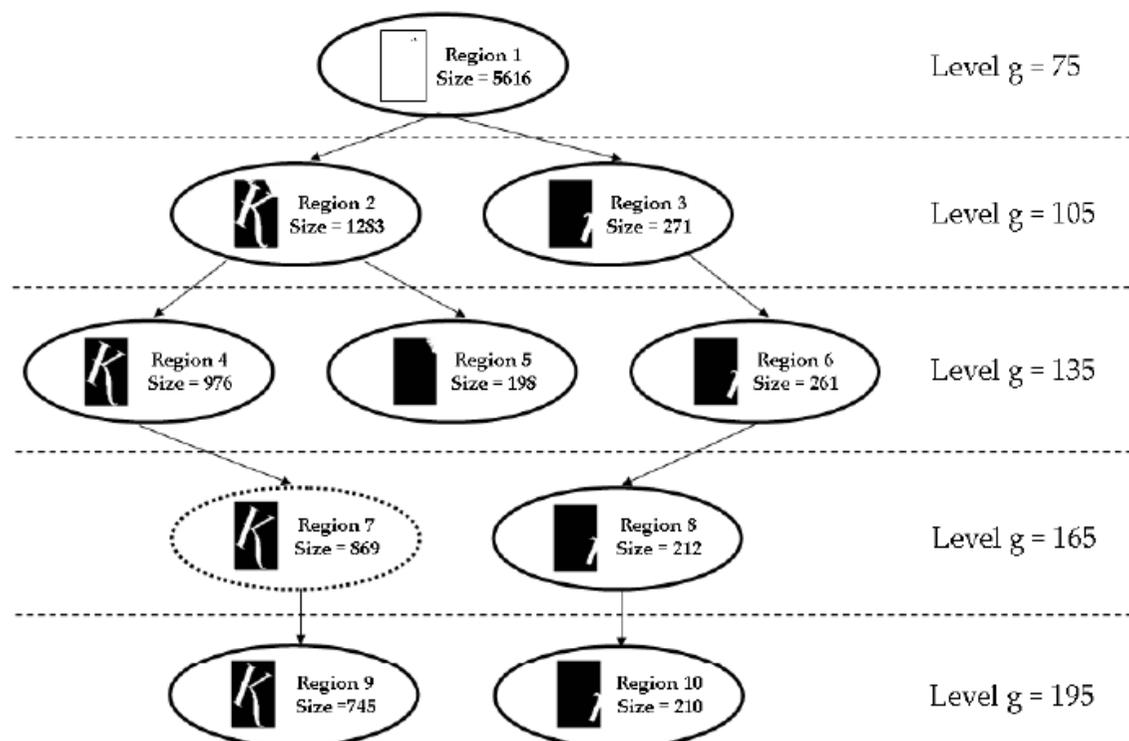
- 实现时，可用一系列渐变的阈值对图像进行分割，比较分割结果



最大稳定极值区域检测子: MSER



- 对比不同阈值下的分割结果，构建分割树
 - 该树结构中，不同层对应不同的分割阈值
 - 对各个叶节点，往上回溯到其第一个分叉节点（子节点数量大于2的节点），统计回溯的层级数；若层级数大于指定阈值，且区域面积变化较小，则该区域为一个MSER

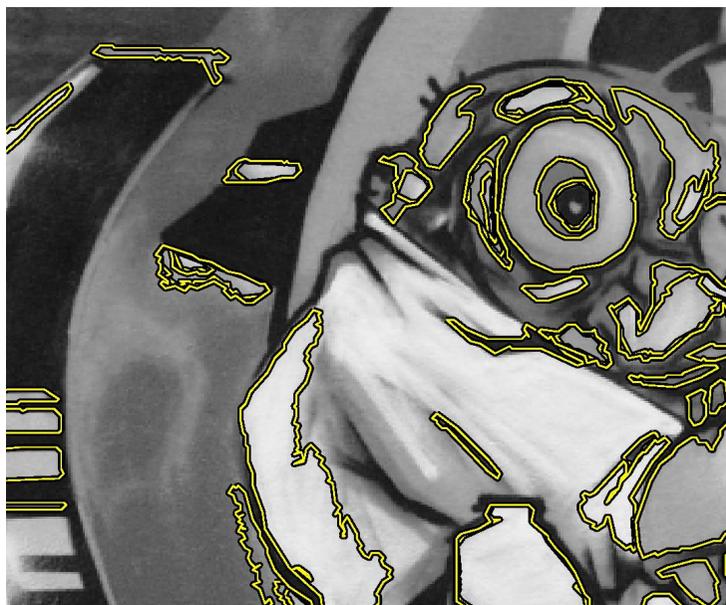


最大稳定极值区域检测子: MSER



□ MSER的特点

- 对较大仿射畸变有较好的检测鲁棒性，
 - ✓ 在可重复性（repeatability）指标上，优于其他局部特征检测子
- 存在的问题：一副图象中检测得到的MSER区域数量有限
 - ✓ 例如，对于一副 640×480 的图像，MSER数量一般 < 100
 - ✓ 可以支持的图像之间的MSER匹配数量有限





局部视觉特征描述

□ 局部关键点检测

■ 角点检测

✓ Harris 角点检测子

■ 块检测

✓ 高斯差分(DoG) 检测子

✓ MSER 检测子

□ 局部区域描述

■ SIFT

■ LIOP



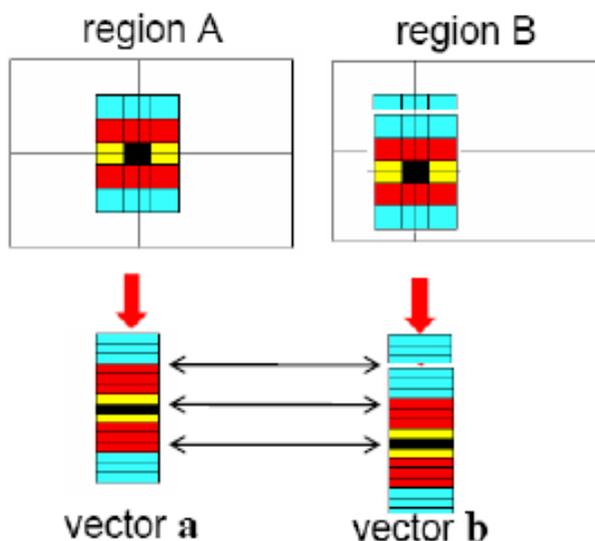
局部区域描述

□ 目标

- 将图像局部区域变换为固定维度的特征向量
- 保证描述力和区分性的同时，实现不变性：亮度不变，旋转不变

□ 将原始的像素灰度作为局部区域的描述？

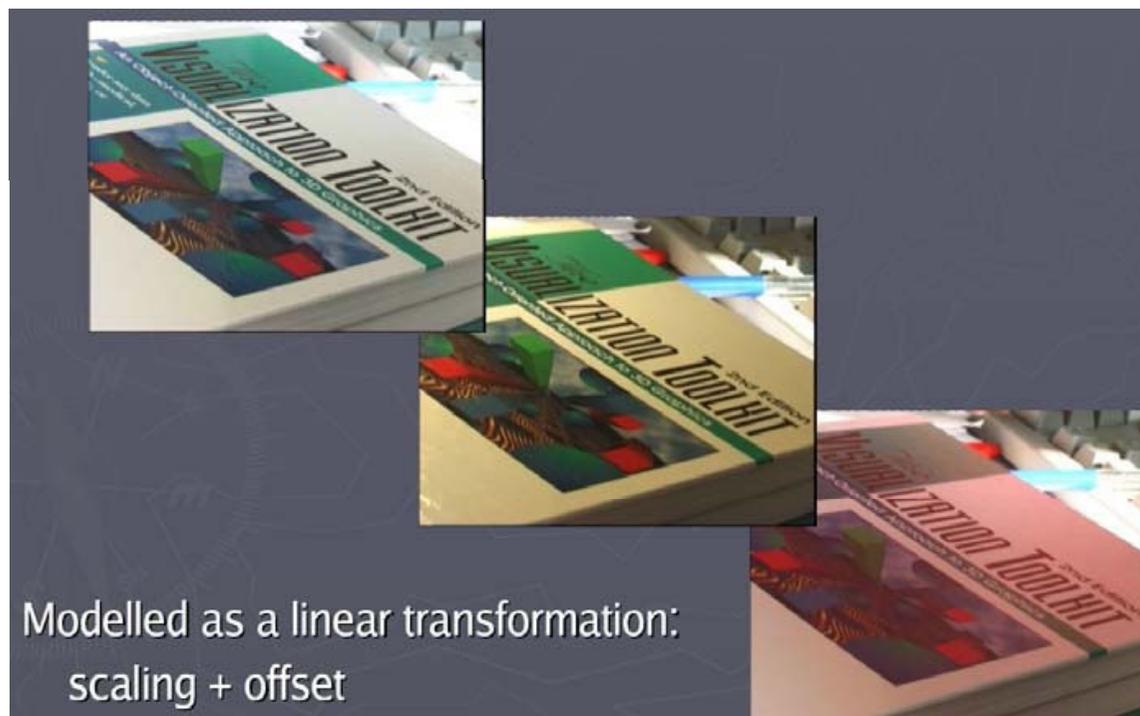
- 最简单的方式：将特征点邻域的像素灰度值逐个排列，得到一个特征向量
- 但是，这种方式对微小平移和旋转非常敏感！！！！





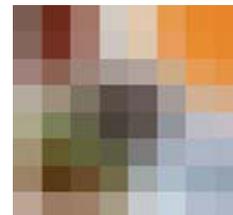
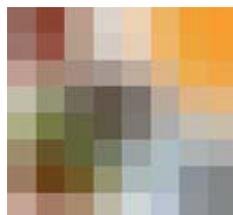
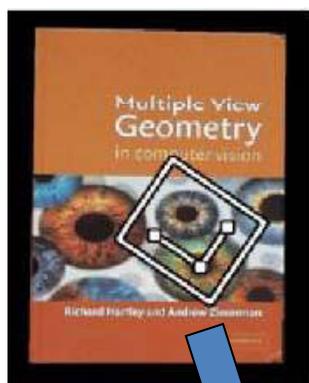
局部区域描述：示例

- 如何实现亮度变化不变性？
 - 一般将RGB图像转为灰度图像
 - 假设局部区域的灰度变换为线性：梯度方向直方图（SIFT）
 - 假设局部区域的像素相对灰度大小不变：LBP，及其变种



局部区域描述：示例

- 如何实现几何变换的不变性？
 - 旋转对齐：**主方向估计**
 - 尺寸对齐：缩放到统一尺寸





局部区域描述：SIFT描述子

- SIFT描述子由英属哥伦比亚大学Prof. Lowe于1999年提出，发表在ICCV'99，随后扩展期刊版本发表于IJCV'03
 - 两篇论文目前总被引超过8万次



David Lowe

Professor

University of British Columbia

Object recognition from local **scale-invariant** features

[DG Lowe](#) - Proceedings of the seventh IEEE international ..., 1999 - [ieeexplore.ieee.org](#)

... **feature** generation called the **Scale Invariant Feature Transform** (SIFT). This approach ...

Lindeberg [8] has shown that under some rather general assumptions on **scale invariance**, the ...

☆ 保存 引用 **被引用次数: 24909** 相关文章 所有 56 个版本

Distinctive image **features** from **scale-invariant** keypoints

[DG Lowe](#) - International journal of computer vision, 2004 - Springer

... distinctive **invariant features** from images that can be used to perform reliable matching

between different views of an object or scene. The **features** are **invariant** to image **scale** and ...

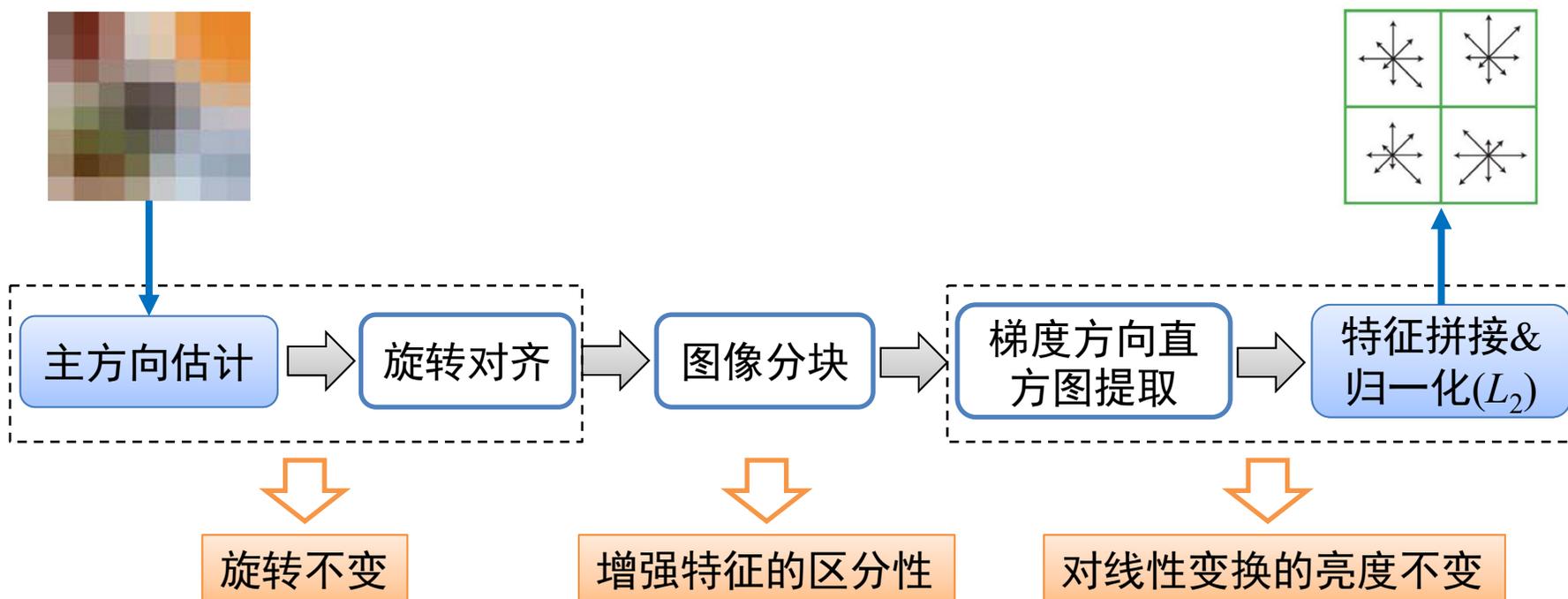
☆ 保存 引用 **被引用次数: 72837** 相关文章 所有 141 个版本



局部区域描述：SIFT描述子

□ SIFT描述子的基本流程

- SIFT: Scale Invariant Feature Transform





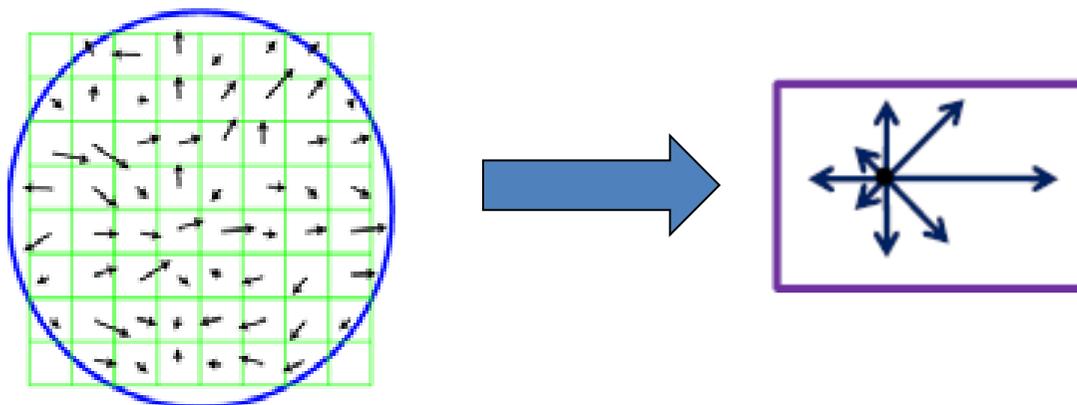
局部区域描述：SIFT描述子

□ 主方向估计

- 目标：检测图像块的主方向(dominant orientation), 用于旋转对齐

□ 具体过程

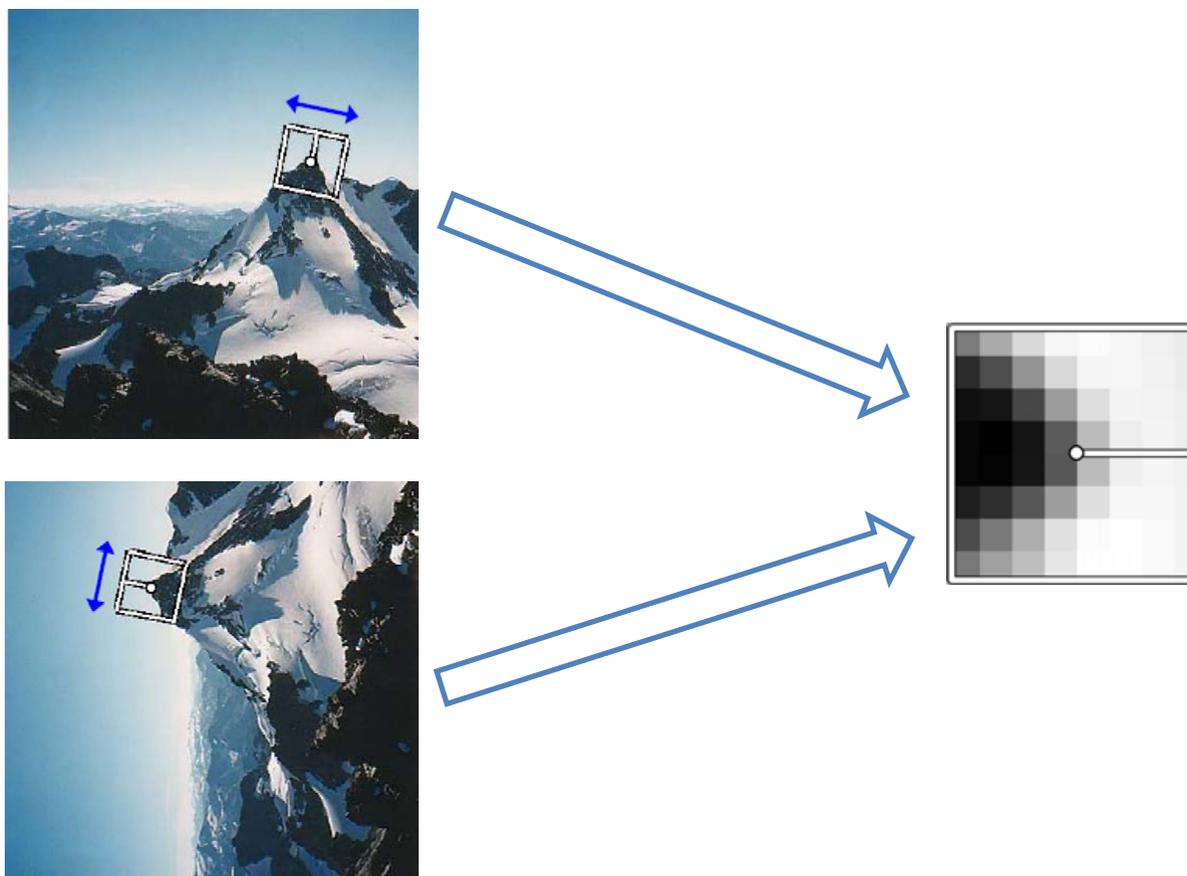
- 对图像块计算梯度，构建含36个方向的梯度方向直方图（HOG）
 - ✓ 根据梯度幅值和与特征点的距离，进行高斯加权
- 梯度方向直方图中，峰值对应的bin（方向）为主方向
 - ✓ 其他bin上的值如果大于最大值的80%，也视为主方向
 - ✓ 一个图像块可能可以得到多个主方向





局部区域描述：SIFT描述子

- 基于主方向，对图像块旋转对齐
 - 将图像块修正到一个canonical orientation.

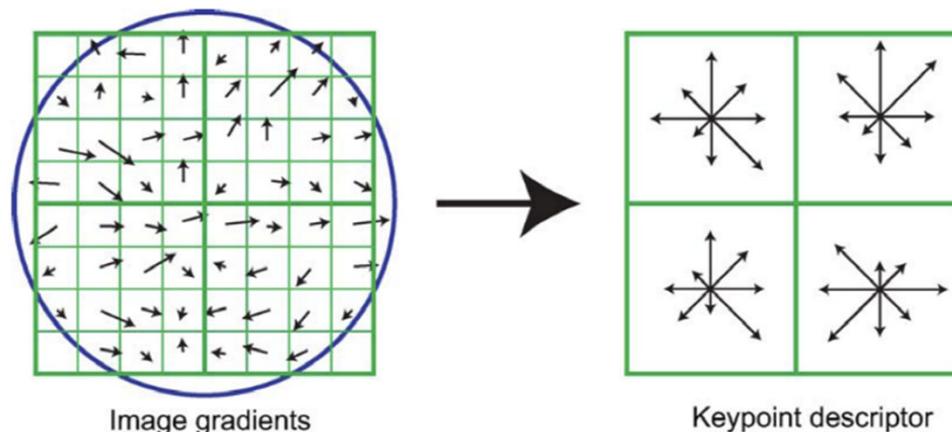




局部区域描述：SIFT描述子

□ SIFT描述子生成

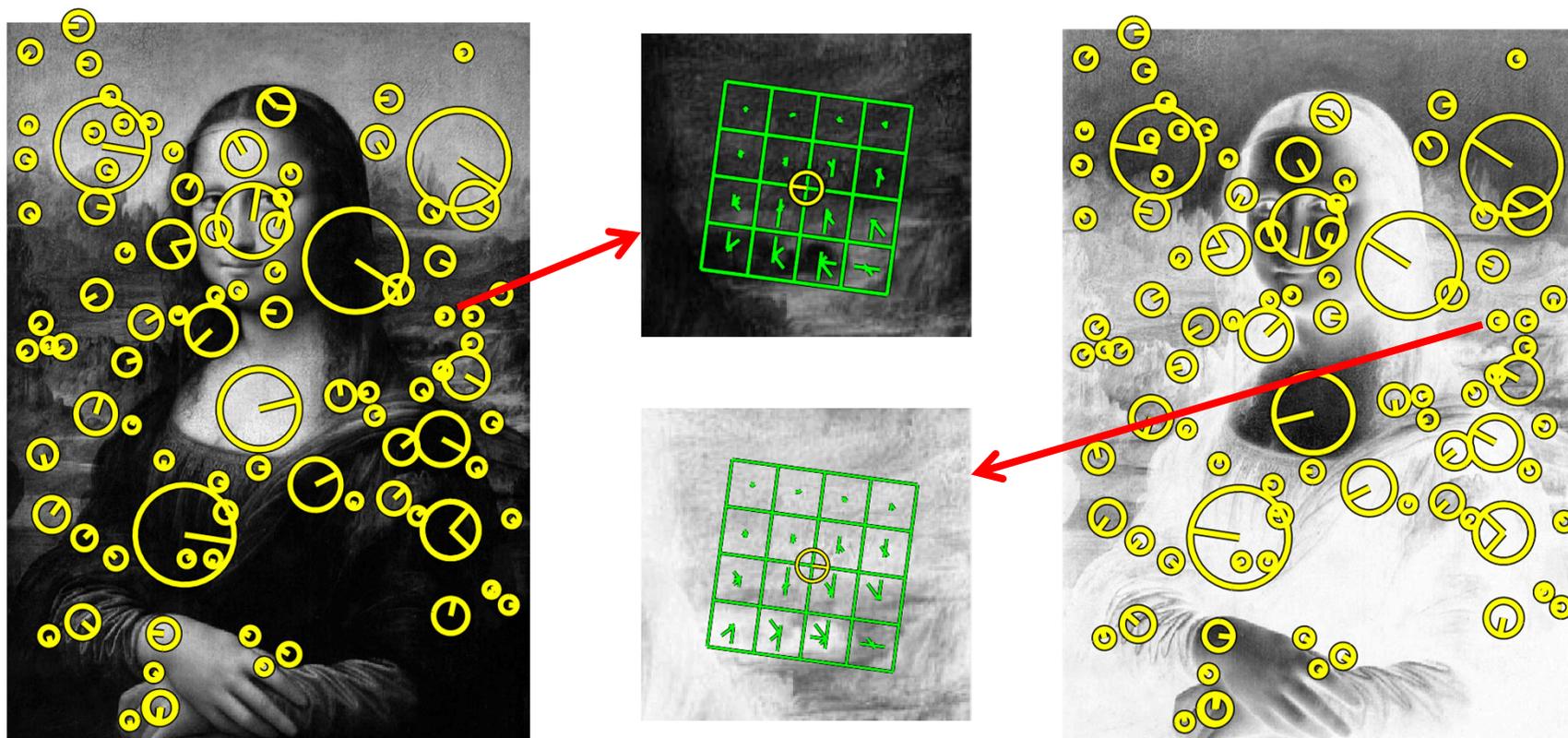
- 将图像区域缩放到固定大小，均分为 4×4 的小块
- 逐块计算梯度方向直方图（8-D）
- 将各块直方图拼接，得到128维的梯度方向直方图
- 最后，对直方图进行 L_2 归一化处理
 - ✓ 实际代码实现时，会将归一化的特征向量的模设为512，并裁减最大值为255，这样每一维仅用一个字节即可存储。



示例： 2×2 区域分块，并计算梯度方向直方图。**实际SIFT采用的是 4×4 分块。**

图像反色对SIFT特征提取的影响

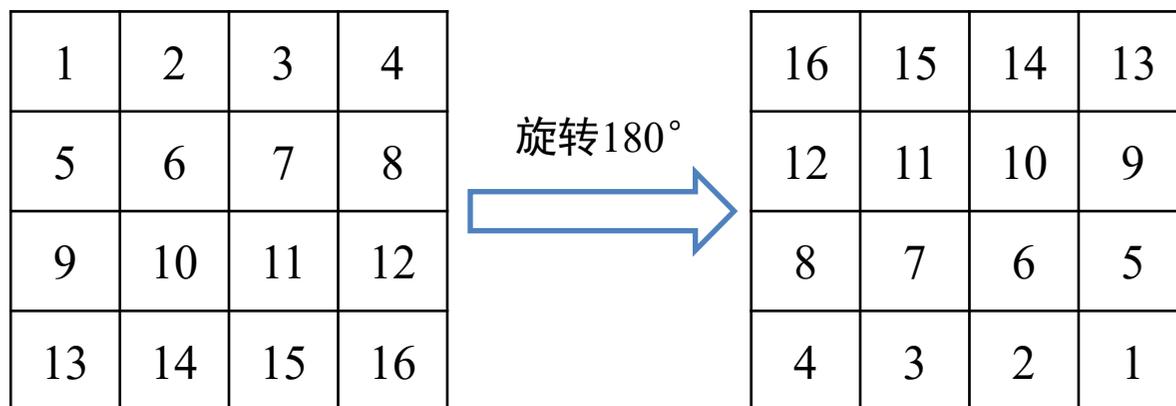
- 如果一副灰度图像发生反色变换，即 $f(I) = 255 - I$ ，图像中的SIFT特征（采样DoG检测关键点）会发生什么样的变化？
 - SIFT特征的数量，每个SIFT特征的关键点位置、主方向、特征尺度、128D描述子？





图像反色对SIFT特征提取的影响

- 如果一副灰度图像发生反色变换，即 $f(I) = 255 - I$ ，图像中的SIFT特征会发生什么样的变化？
 - SIFT特征的数量：不变
 - 每个SIFT特征的关键点位置、特征尺度：不变
 - 每个SIFT特征的主方向：相差180度
 - 每个SIFT特征的128D描述子
 - ✓ 16个格子中每个格子对应8维梯度方向直方图不变，但是16个格子的排列顺序颠倒了





局部视觉特征描述

□ 局部关键点检测

■ 角点检测

✓ Harris 角点检测子

■ 块检测

✓ 高斯差分(DoG) 检测子

✓ MSER 检测子

□ 局部区域描述

■ SIFT

■ LIOP



局部区域描述：LIOP描述子

□ SIFT特征存在的问题

- **主方向估计**存在误差，其影响会在基于主方向对图像块**旋转对齐**中积累放大
- 定量比较：逆时针旋转图像 θ 度，确定旋转前、后的图像中的对应位置的匹配的SIFT特征，计算其主方向差与 θ 的一致性

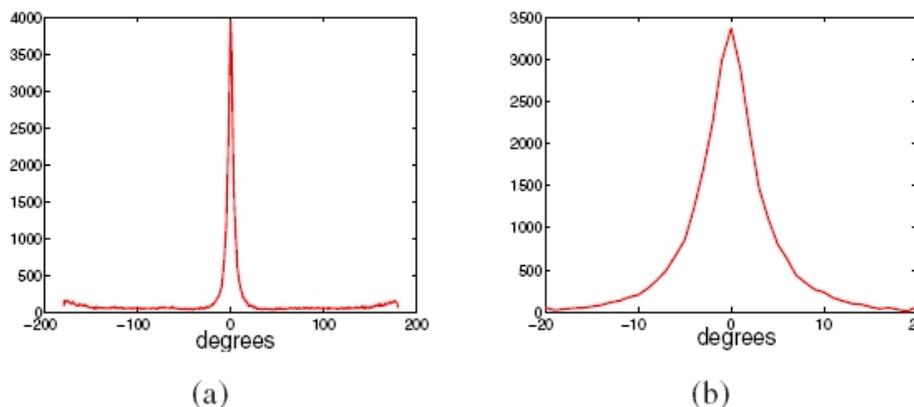


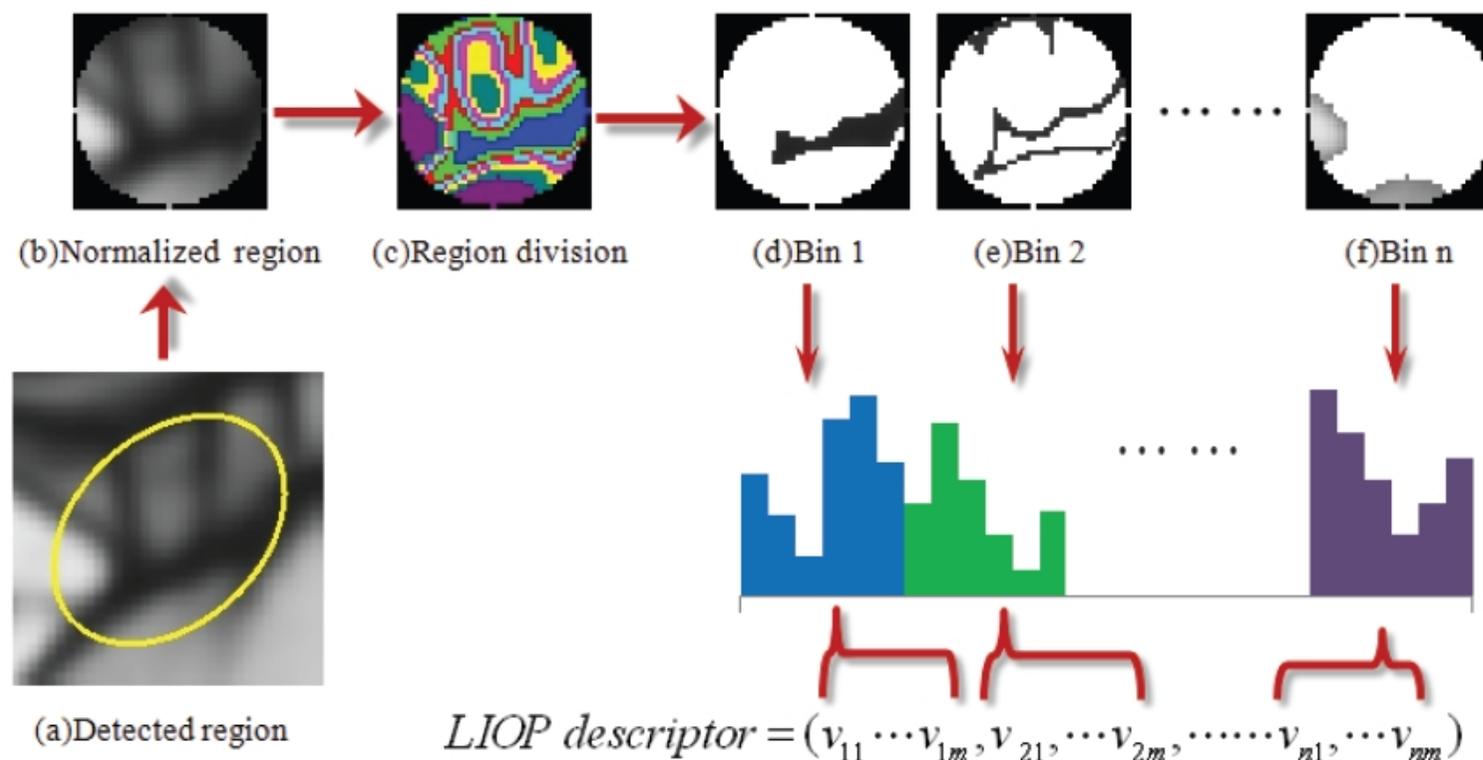
Figure. Orientation assignment errors. (a) Between corresponding points, only 63.77% of errors are in the range of $[-20,20]$. (b) Between corresponding points that are also matched by SIFT descriptors.

- 可否**绕过主方向估计**，无需对齐，即可提取特征，同时保持旋转不变性？

局部区域描述：LIOP描述子

□ LIOP特征：自适应分块

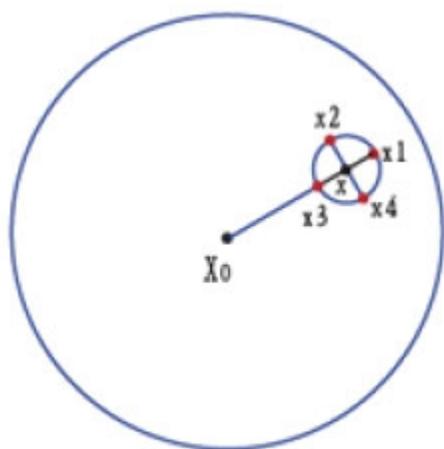
- 基本假设：图像区域中像素灰度的**相对大小关系**保持不变
- 利用像素的灰度值排序，将图像划分为 n 个不规则的区域
- 每个区域提取一个 m 维的特征向量，最后将所有区域的特征进行拼接



局部区域描述：LIOP描述子

□ LIOP特征：旋转不变性特征

- 基于极坐标空间，提取各像素梯度
- 类似于LBP，基于相对大小关系，将梯度值变为一种索引编号
- 对每一个子区域，计算像素的索引编号的直方图



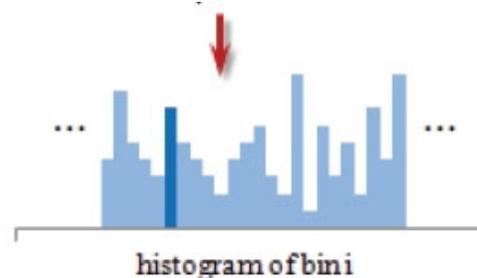
(a) Original patch

For a point x :

$$P(x) = (I(x_1), I(x_2), I(x_3), I(x_4)) \\ = (86, 217, 152, 101)$$

$$\gamma(P(x)) = (1, 4, 3, 2)$$

$$LIOP(x) = \phi(\gamma(P(x))) \\ = (0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, \dots, 0)$$



π	$Ind(\pi)$
1,2,3,4	1
1,2,4,3	2
1,3,2,4	3
1,3,4,2	4
1,4,2,3	5
1,4,3,2	6
2,1,3,4	7
2,1,4,3	8
...	...
4,3,1,2	23
4,3,2,1	24



基于局部特征的图片表达

- 图像表达基本框架
- 局部视觉特征描述
 - 局部关键点检测
 - ✓ 角点检测: Harris
 - ✓ 块检测: DoG, MSER
 - 局部区域描述
 - ✓ SIFT
- 特征编码与聚合
 - Fisher Vector
 - Bow
 - VLAD
 - PQ



Fisher Vector Representation

□ 基本思想

- 将图像中的每个局部视觉特征当作一个服从某种分布的随机变量
- 将一组特征表示为一个向量
 - ✓ 对数似然函数的梯度

□ 生成模型

$$\nabla_{\lambda} \log p(X | \lambda)$$

$X = \{x_t\}, (t = 1, \dots, T),$
 $p(\cdot)$: the PDF function,
 λ : a set of parameters

□ 假设特征之间相互独立

$$L(X|\lambda) = \log p(X|\lambda) = \log \prod_{t=1}^T p(x_t|\lambda) = \sum_{t=1}^T \log p(x_t|\lambda)$$

- F. Perronnin and C. Dance, “Fisher Kernels on Visual Vocabularies for Image Categorization”, CVPR, 2007



Fisher Vector Representation

- 用混合高斯模型GMM对分布进行近似

$$p(x_t | \lambda) = \sum_{i=1}^N w_i p_i(x_t | \lambda)$$

$$\sum_{i=1}^N w_i = 1$$

$$p_i(x | \lambda) = \frac{\exp\left\{-\frac{1}{2}(x - \mu_i)^T \Sigma_i^{-1}(x - \mu_i)\right\}}{(2\pi)^{D/2} |\Sigma_i|^{1/2}}$$

$$\lambda = \{w_i, \mu_i, \Sigma_i, i = 1, \dots, N\}$$

- 计算对数似然函数关于各参数的梯度值：

$$\nabla_{\alpha_i} \log p(X | \lambda) = \sum_{t=1}^T \left[\frac{\gamma_t(i)}{w_i} - \frac{\gamma_t(1)}{w_1} \right]$$

$$w_k = \frac{\exp(\alpha_k)}{\sum_{j=1}^K \exp(\alpha_j)}$$

$$\nabla_{\mu_i^d} \log p(X | \lambda) = \sum_{t=1}^T \gamma_t(i) \left[\frac{x_t^d - \mu_i^d}{(\sigma_i^d)^2} \right]$$

$$\gamma_t(i) = p(i | x_t, \lambda) = \frac{w_i p_i(x_t | \lambda)}{\sum_{j=1}^N w_j p_j(x_t | \lambda)}$$

$$\nabla_{\sigma_i^d} \log p(X | \lambda) = \sum_{t=1}^T \gamma_t(i) \left[\frac{(x_t^d - \mu_i^d)^2}{(\sigma_i^d)^2} - \frac{1}{\sigma_i^d} \right]$$

$$w_i = \frac{\exp(\alpha_k)}{\sum_{j=1}^N \exp(\alpha_j)}$$

- F. Perronnin and C. Dance, “Fisher Kernels on Visual Vocabularies for Image Categorization”, CVPR, 2007



FV与BoW和VLAD的关系

□ 词袋模型 (BOW: bag-of-words model)

- The gradient with respect to the weight of GMM:

$$\nabla_{\alpha_i} \log p(X | \lambda) = \sum_{t=1}^T \left[\frac{\gamma_t(i)}{w_i} - \frac{\gamma_t(1)}{w_1} \right]$$

- Soft version of BoW:

$$b_i \propto \sum_{t=1}^T \gamma_t(i) \text{ for the } i\text{-th visual word}$$

- **Sparseness** is ensured with large N

- ✓ Suitable for the inverted index

□ VLAD (vector of locally aggregated descriptor)

- The gradient with respect to the mean vector of GMM

$$\nabla_{\mu_i^d} \log p(X | \lambda) = \sum_{t=1}^T \gamma_t(i) \left[\frac{x_t^d - \mu_t^d}{(\sigma_i^d)^2} \right]$$

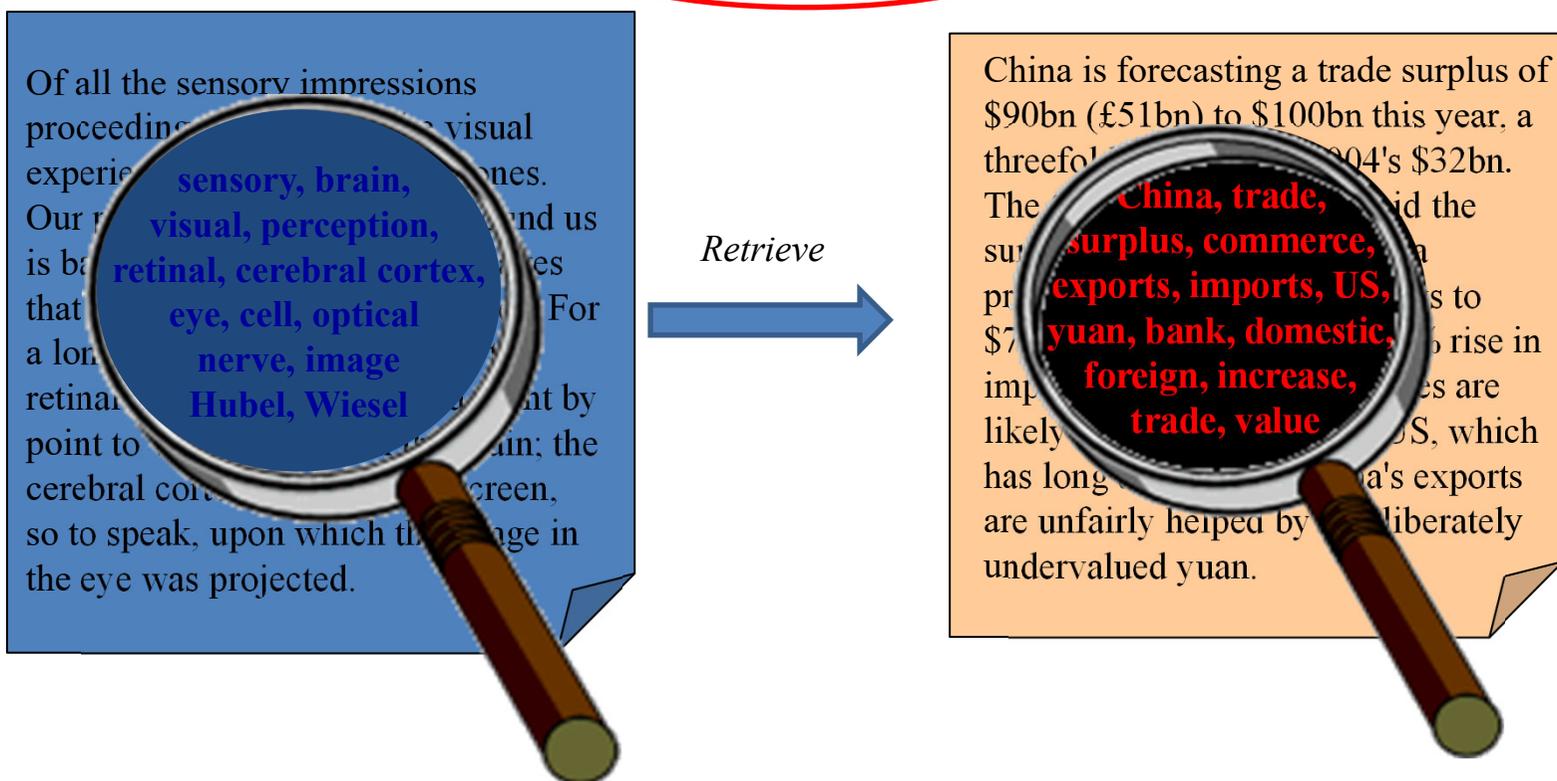
- Disadvantage

- ✓ **Non-sparse**: unsuitable to apply the inverted index

词袋模型 (Bag-of-Words Model)

- 在信息检索中，基于**文本单词字典**表达文本文档
 - 紧凑性
 - 描述力

Bag-of-Word model



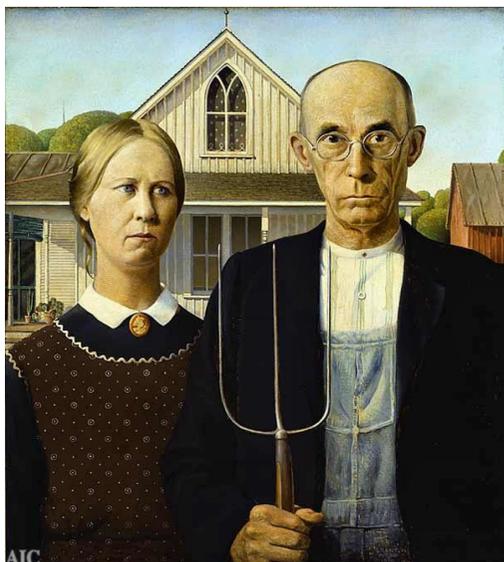
视觉词袋模型 (Bag of Visual Words)

□ 图像也表达为Bag-of-Visual Words?

Image



Bag of 'visual words'





视觉词袋模型 (Bag of Visual Words)

□ 三个基本问题

■ Q1: 如何定义视觉单词和视觉码本?

- ✓ A1: 对大量的局部视觉特征进行聚类 (如k-means), 聚类中心视为视觉单词, 所有的聚类中心构成了视觉码本。

■ Q2: 如何将每个局部视觉特征与视觉单词对应?

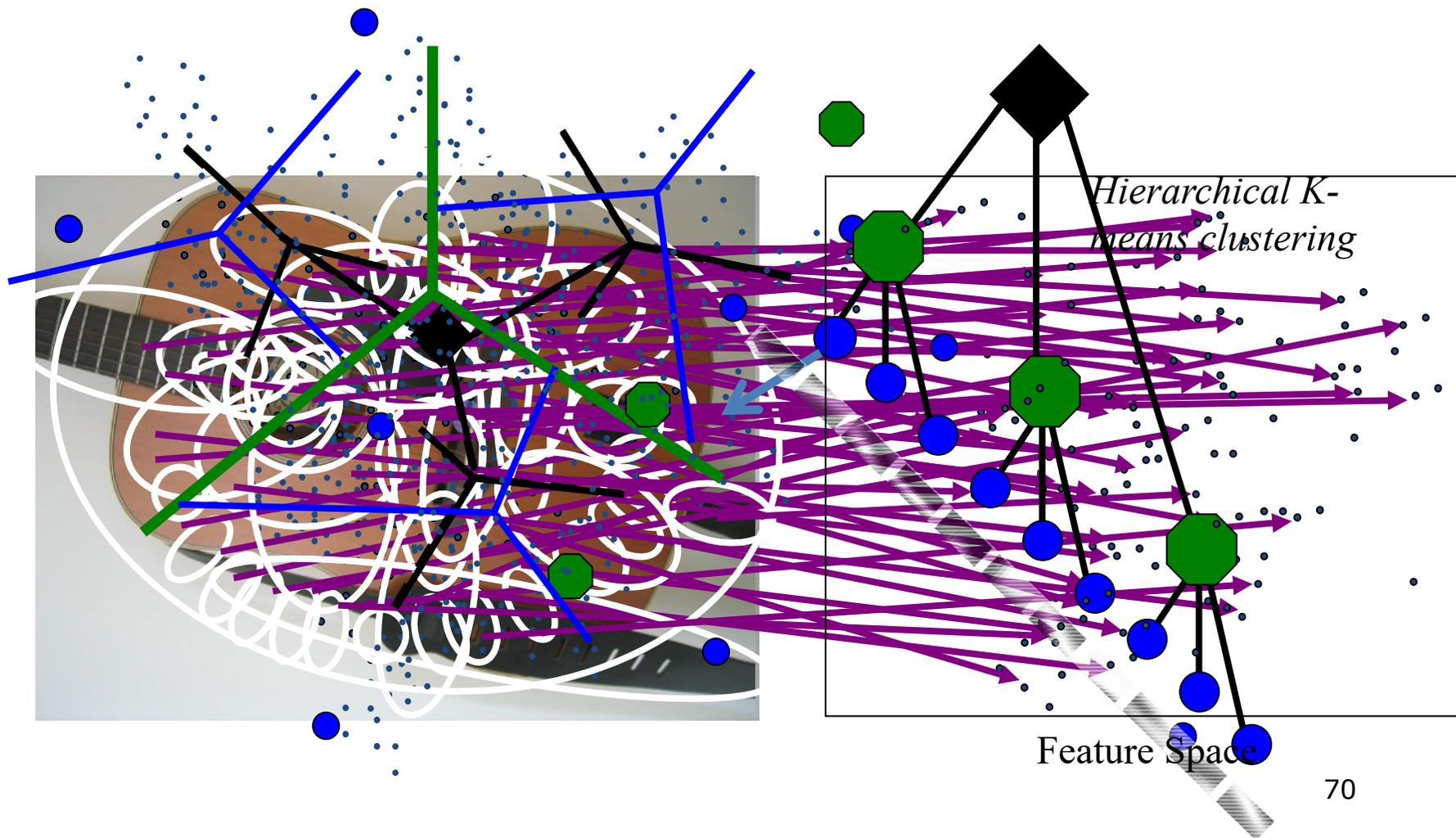
- ✓ A2: 基于视觉码本, 通过矢量量化, 将局部视觉特征量化到最近的视觉单词。
- ✓ 有损压缩 (lossy compression), 表达紧凑。

■ Q3: 如何基于对一幅图像的局部视觉特征集合进行紧凑表达?

- ✓ A2: 基于视觉单词在图像中出现的频率, 构造视觉单词直方图

基于层级聚类的视觉码本生成

□ 关键点检测和局部特征提取





视觉词袋模型：特征向量量化与匹配

□ 视觉码本的物理意义

- 通过视觉特征向量聚类，将特征空间划分为若干子空间，
- 每个聚类中心向量可视为一个视觉单词，对应一个上述子空间
- 所有的视觉单词的集合，构成视觉码本

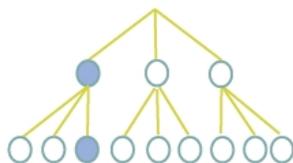
□ 通过矢量量化，实现特征匹配

- 给定一个视觉特征向量，矢量量化从视觉码本中返回与其最近的视觉单词的编号： $q(\mathbf{x}) = \arg \min_k \|\mathbf{v}_k - \mathbf{x}\|$
- 通过矢量量化，可知视觉特征向量落在哪个子空间

□ 高效的矢量量化方法

- Hierarchical k-means [Nister 06]

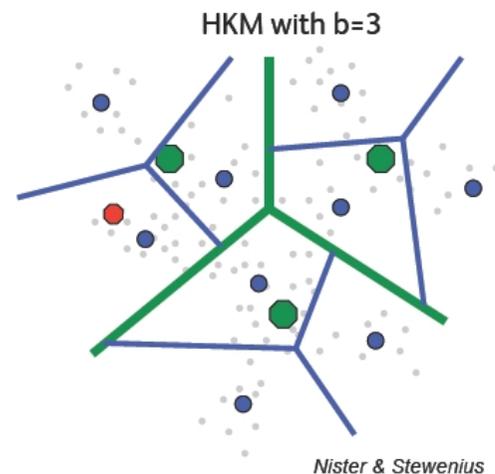
- ▶ K-means tree of height h



- ▶ Branching factor b : $k = b^h$

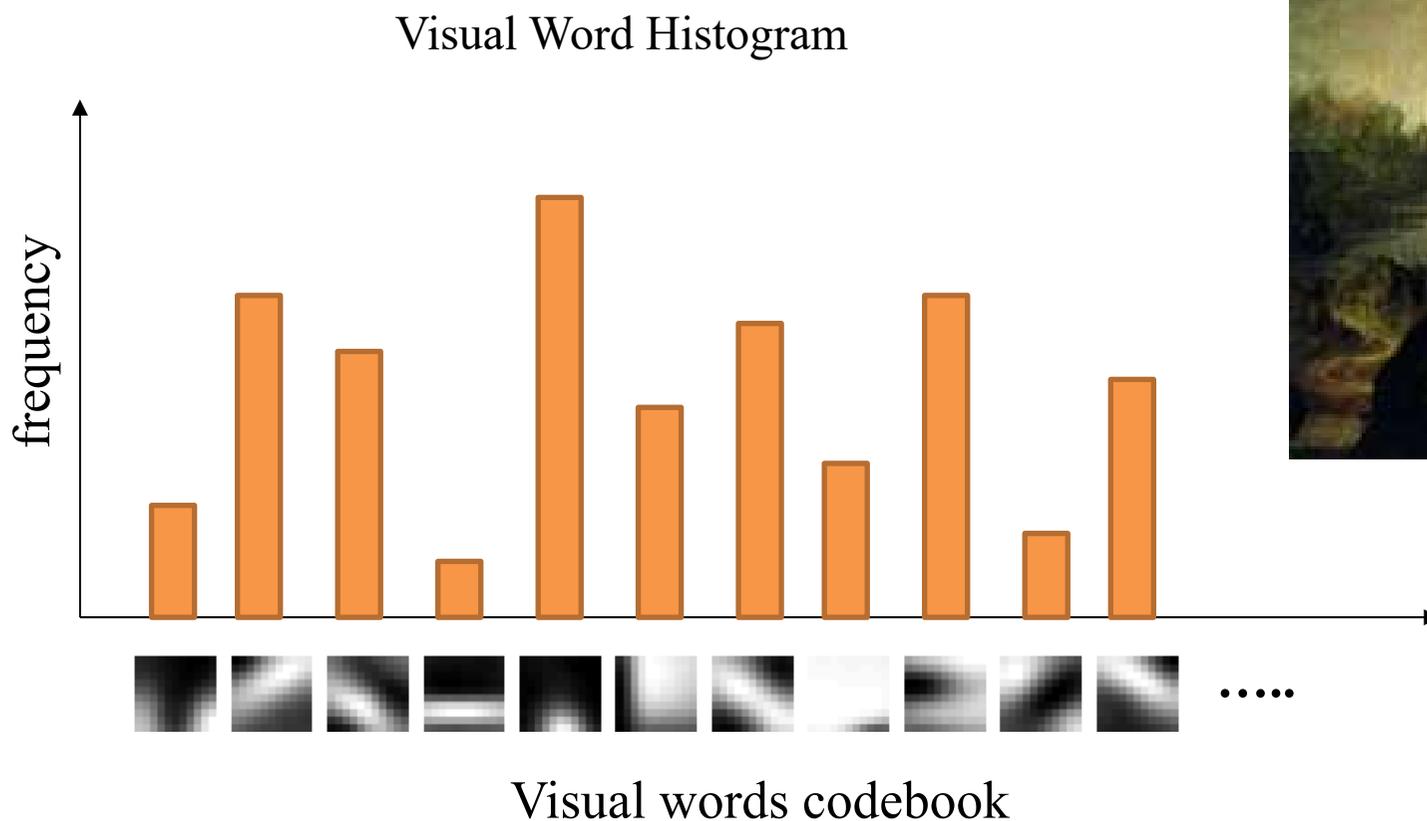
- ▶ Assignment Complexity:

$$\mathcal{O}(d h b) = \mathcal{O}(d h k^{\frac{1}{h}})$$



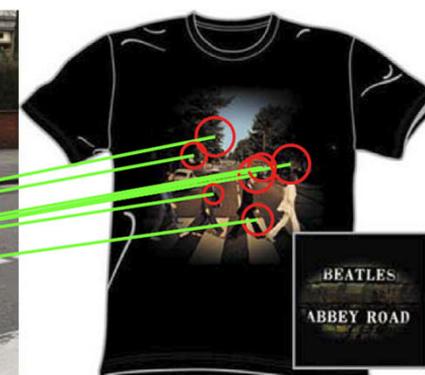
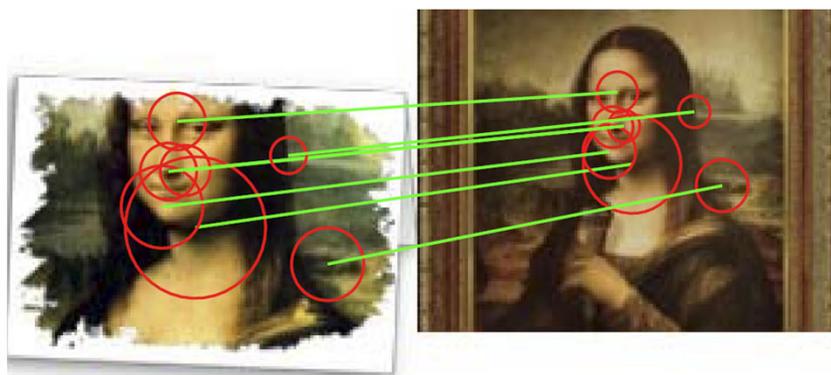
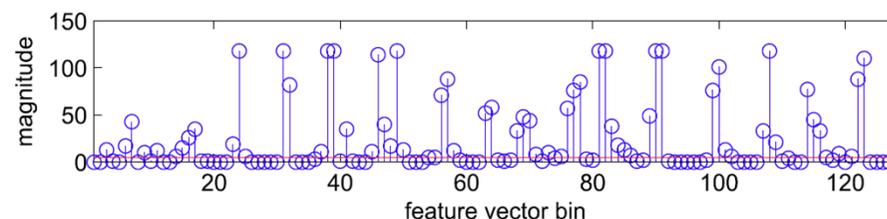
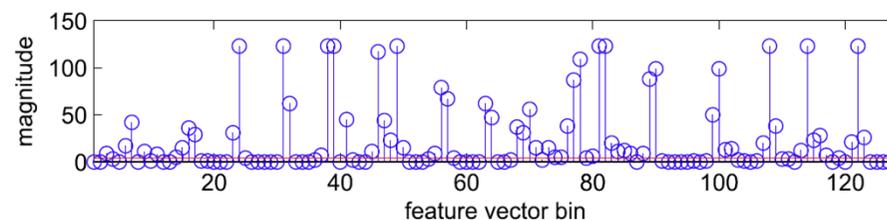
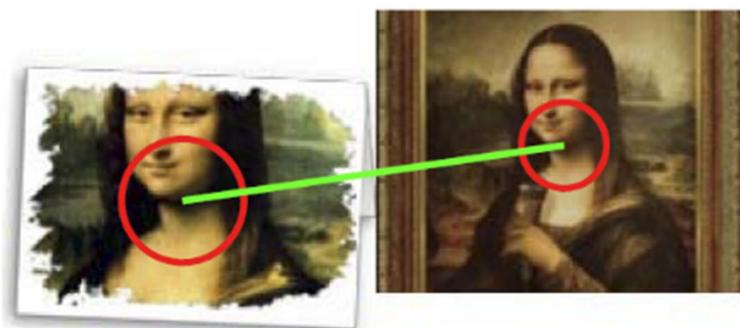
视觉词袋模型

- 将一副图像表达为视觉单词的分布直方图



基于词袋模型的图像匹配-I

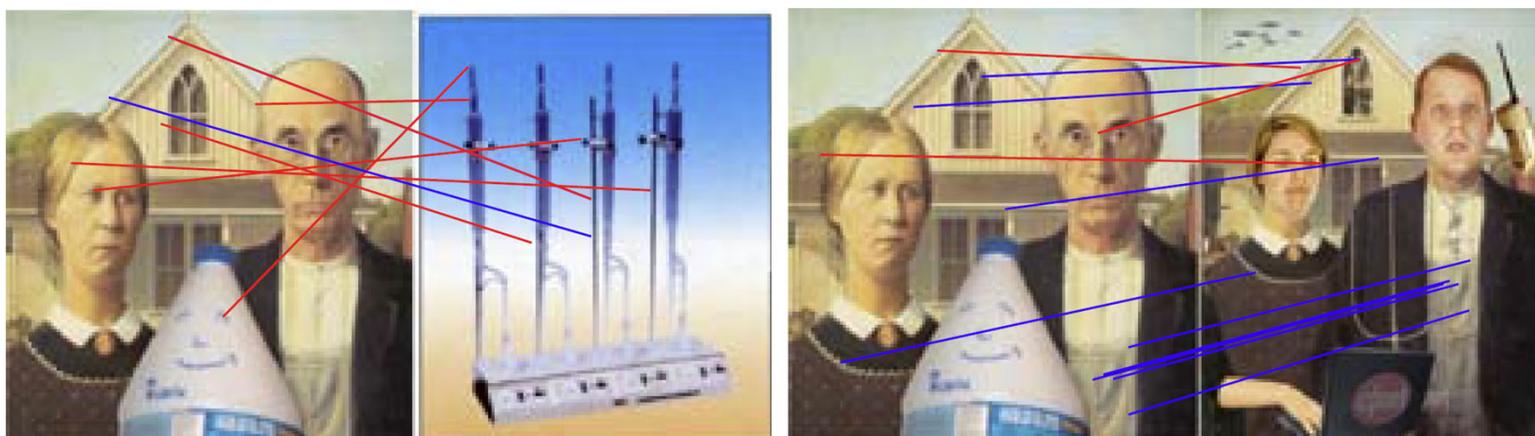
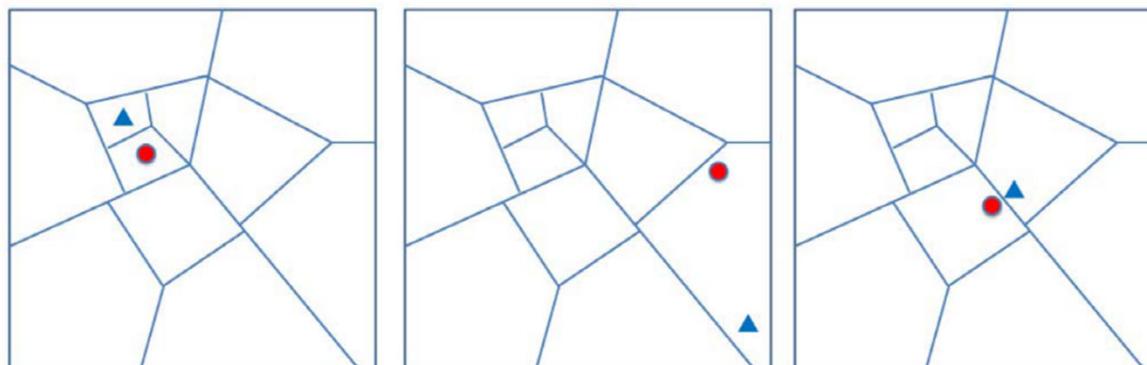
- 来自两幅图像中的SIFT特征被量化到同一个视觉单词，则构成两图之间的一对局部匹配





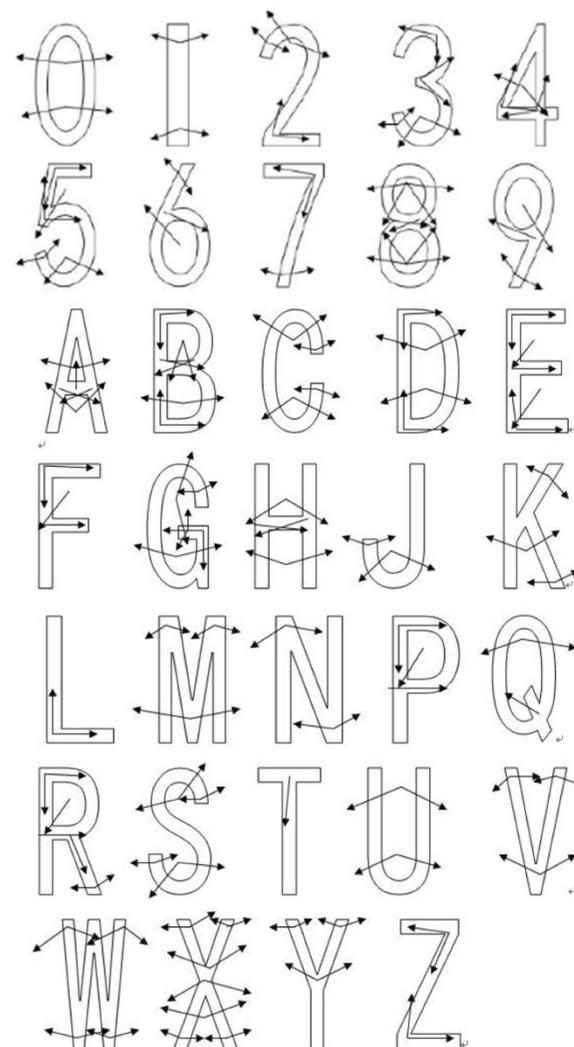
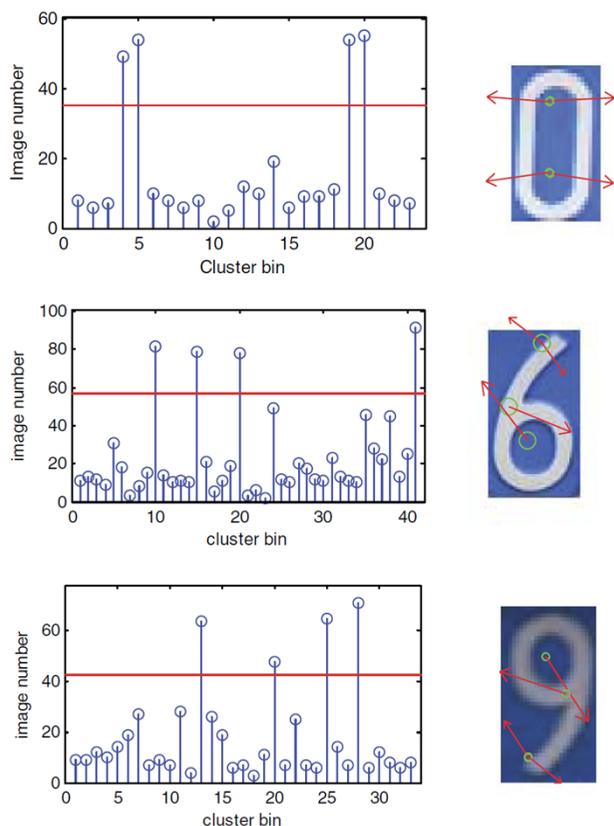
基于词袋模型的图像匹配-II

- 来自两幅图像中的SIFT特征被量化到同一个视觉单词，则构成两图之间的一对局部匹配
 - 硬量化可能会产生错误匹配



应用：车牌字符的视觉单词-I

- 对车牌中的各个字符收集图像样本，对其中的SIFT特征进行AP聚类，保留较大的类簇，作为其视觉单词：



- Wengang Zhou, Houqiang Li, Yijuan Lu, and Qi Tian, "Principal Visual Word Discovery for Automatic License Plate Detection," *IEEE Transactions on Image Processing (TIP)*, vol. 21, no. 6, pp. 4269-4279, 2012.



应用：车牌字符的视觉单词-I

□ 基于车牌主视觉单词的车牌检测



(a)



(b)



(c)



(d)

- Wengang Zhou, Houqiang Li, Yijuan Lu, and Qi Tian, "Principal Visual Word Discovery for Automatic License Plate Detection," *IEEE Transactions on Image Processing (TIP)*, vol. 21, no. 6, pp. 4269-4279, 2012.



局部聚合描述子向量

(VLAD: Vector of Locally Aggregated Descriptor)

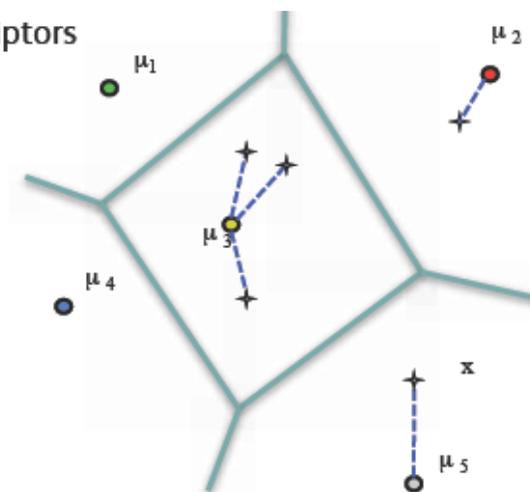
Given a codebook $\{\mu_i, i = 1 \dots N\}$,
e.g. learned with K-means, and a set of
local descriptors $X = \{x_t, t = 1 \dots T\}$:

• ① assign: $\text{NN}(x_t) = \arg \min_{\mu_i} \|x_t - \mu_i\|$

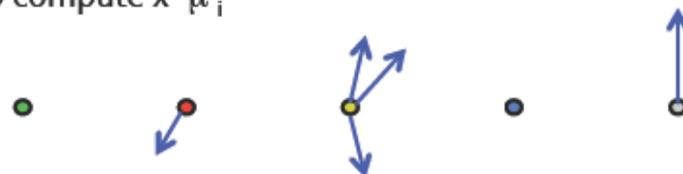
• ②③ compute: $v_i = \sum_{x_t: \text{NN}(x_t) = \mu_i} x_t - \mu_i$

• concatenate v_i 's + ℓ_2 normalize

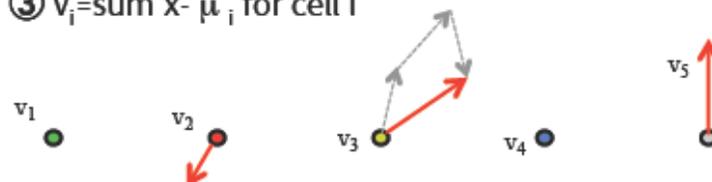
① assign descriptors



② compute $x - \mu_i$



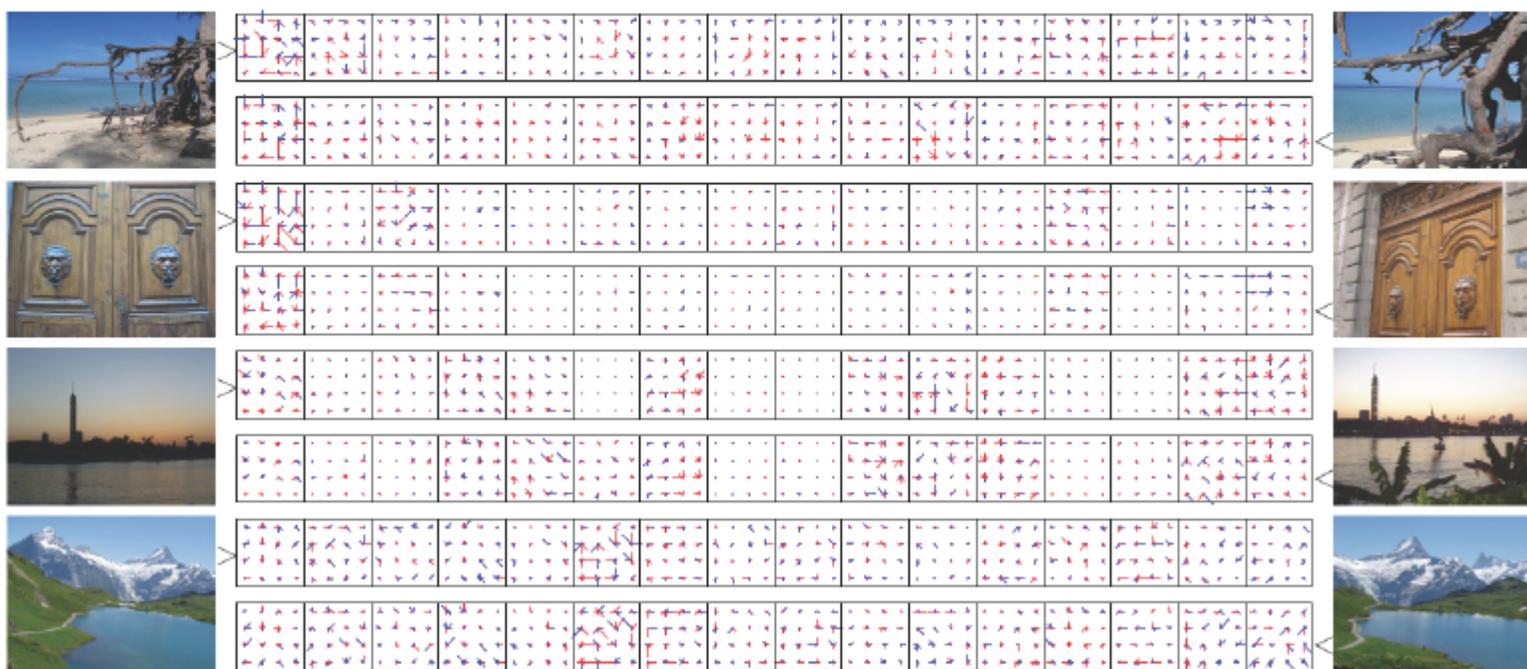
③ $v_i = \sum x - \mu_i$ for cell i



- Jégou, Douze, Schmid and Pérez, “Aggregating local descriptors into a compact image representation”, CVPR 2010.

局部聚合描述子向量：实例

A graphical representation of $v_i = \sum_{x_t: \text{NN}(x_t) = \mu_i} x_t - \mu_i$

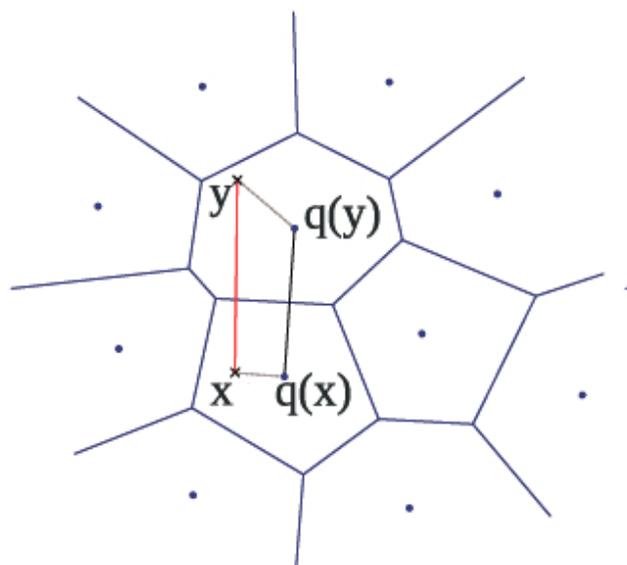




乘积量化 (Product Quantization)

□ 动机

- 给定码本，对高维特征矢量进行矢量量化，用码字来替换原始的特征矢量，可减小存储开销
- 由于码字矢量间距离可以事先计算，高维特征矢量间的距离可以用其对应的码字之间的距离来近似
- 显然：当码本越大时，每个码字对应的子空间越小，量化误差也越小，上述距离近似的精度越高





乘积量化 (Product Quantization)

□ 基本思想：对特征空间进行极度精细的划分，减小量化误差

■ 将特征向量划分为 m 段子向量

$$\underbrace{x_1, \dots, x_{D^*}}_{u_1(x)}, \dots, \underbrace{x_{D-D^*+1}, \dots, x_D}_{u_m(x)} \\ \rightarrow q_1(u_1(x)), \dots, q_m(u_m(x)),$$

■ 对每一段子向量 $u_i(\mathbf{x})$ ，用一个量化器 $q(\cdot)$ 进行量化

- ✓ 在 D^* 维空间，通过聚类生成一组聚类中心向量 $\{\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_K\}$
- ✓ 相当于：每一段子向量对应的 D^* 维空间被划分为 K 个子空间
- ✓ 等价于：整个 D 维特征空间被划分为 K^m 个子空间
- ✓ 定义量化器： $q(u_i(\mathbf{x})) = \arg \min_k \|\mathbf{v}_k - u_i(\mathbf{x})\|, (k = 1, \dots, K)$
 - 各段子向量维度相同，可独立学习量化器，或共享同一个量化器

□ 乘积量化的优势：

■ 量化计算复杂度低，可轻松实现对特征空间的极度精细的划分

乘积量化 (Product Quantization)



□ 向量距离近似计算

$$\|\mathbf{x} - \mathbf{y}\|_2^2 = \sum_{i=1}^D (x_i - y_i)^2 = \sum_{k=1}^m \|u_k(\mathbf{x}) - u_k(\mathbf{y})\|_2^2 \approx \sum_{k=1}^m \|\mathbf{c}(a_k) - \mathbf{c}(b_k)\|_2^2 = \sum_{k=1}^m d_{a_k b_k}$$

where $a_k = q_k(u_k(\mathbf{x}))$, $b_k = q_k(u_k(\mathbf{y}))$

\swarrow
 $u_k(\mathbf{x})$ 被量化到第 a_k 个聚类中心向量



□ 预先计算好的距离表

- 聚类中心两两之间距离
- 在线计算向量距离时, 仅需查表
- 计算复杂度从 $O(D)$ 降为 $O(m)$

d_{11}	d_{12}	...	d_{1K}
⋮			
d_{K1}			d_{KK}

乘积量化 (Product Quantization)



□ 误差分析

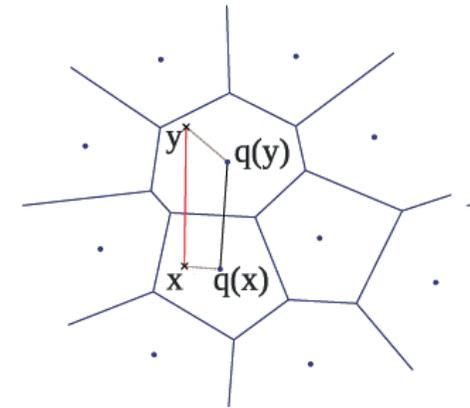
- 均方距离误差(MSDE)的上界是量化器的均方差(MSE)

$$d(x, q(y)) - d(y, q(y)) \leq d(x, y) \leq d(x, q(y)) + d(y, q(y)),$$

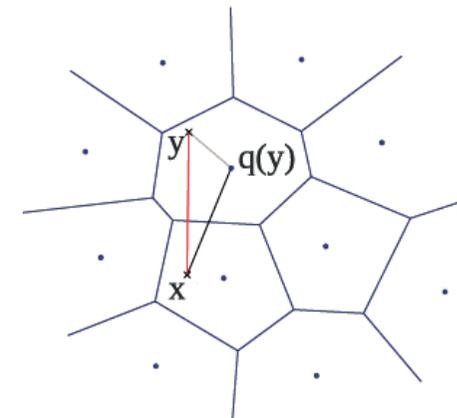
$$(d(x, y) - d(x, q(y)))^2 \leq d(y, q(y))^2.$$

$$\tilde{d}(x, y) = d(x, q(y)) = \sqrt{\sum_j d(u_j(x), q_j(u_j(y)))^2}$$

$$\begin{aligned} \text{MSDE}(q) &\triangleq \iint (d(x, y) - \tilde{d}(x, y))^2 p(x) dx p(y) dy. \\ &\leq \int p(x) \left(\int d(y, q(y))^2 p(y) dy \right) dx \\ &\leq \text{MSE}(q), \end{aligned}$$



symmetric case



asymmetric case