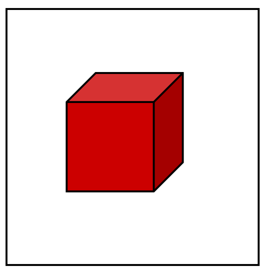
第六章 模板匹配(Template Matching)

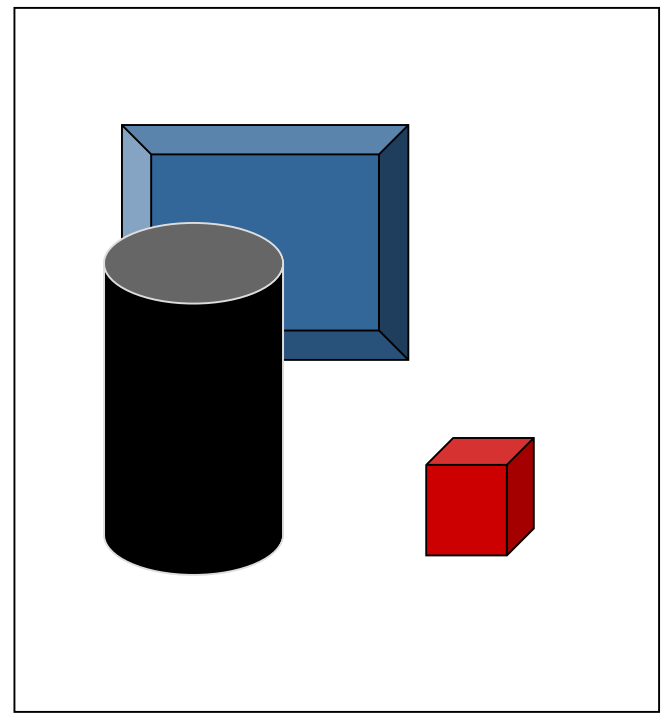
- 模版匹配方法
  - 将所要检测的物体的样板(模板)与图象中所有未知物体进行比较，如果某一未知物与该样板匹配，那就将它检测出来。
- 思想
  - 人认识事务的一般方法
- 前提
  - 根据对某种事务已有的先验知识形成关于该事物的标准模版

模板匹配示例

T(i,j)



f(m,n)



相似度量应具有的特性

- 要很好完成匹配任务，必须定义待测“图象”和已知模板间的相似度量。
- 对干扰和噪声不敏感
- 用来进行匹配的特征量，最好有位移、尺度、旋转的不变性。
- 作为匹配的相似度量，应有匹配速度快，匹配精度高（配准“峰”尖锐，抗干扰性强）的性能。
- 还可以设计好的搜索方法，减少模板匹配的计算量。

主要内容

- 6.1 相似度量
  - 6.1.1 相关系数
  - 6.1.2 平均交互信息量
  - 6.1.3 不变矩
- 6.2 分层搜索
- 6.3 Hough变换在模板匹配中的应用
  - 6.3.1 Hough 变换
  - 6.3.2 推广的Hough 变换

6.1 相似度量

- 常用的相似度量
  - 相关系数
  - 绝对差

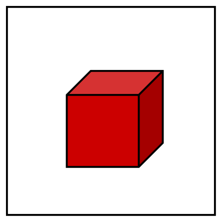
用来比较的特征可以选择：

灰度、不变矩、…

6.1.1 相关系数

T(i,j)

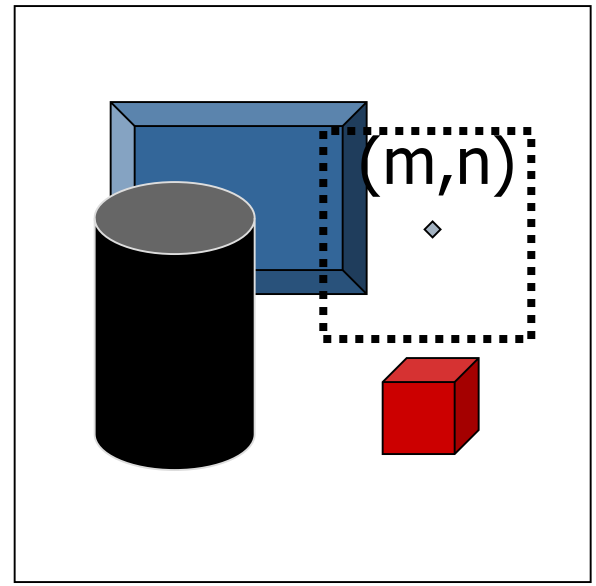
M x M



f(m,n)

N x N

M<<N



归一化相关系数

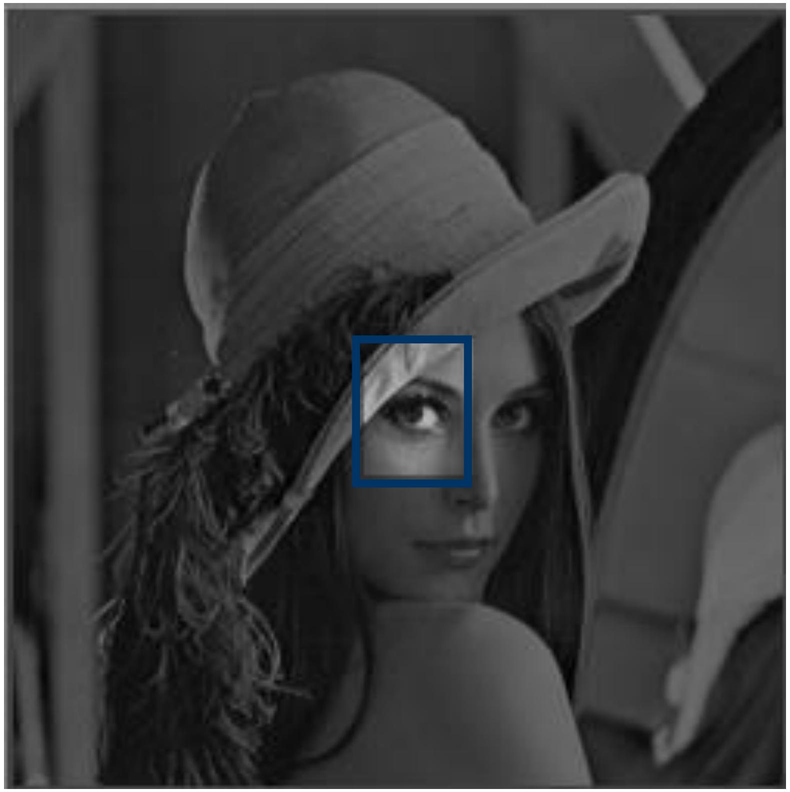
$$R(m,n)=\frac{\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{M}T(i,j)f(m-(M/2)+i,n-(M/2)+j)}{[\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{M}T^{2}(i,j)]^{1/2}[\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{M}f^{2}(m-(M/2)+i,n-(M/2)+j)]^{1/2}}$$

归一化相关系数作为匹配测度的一些问题：

- 相关函数曲线的峰值不尖锐，或被噪声掩盖。
- 用归一化相关系数作相似度量来进行模板匹配的运算量比较大。
- 这种度量不具有尺度和旋转不变性。

模板与原图

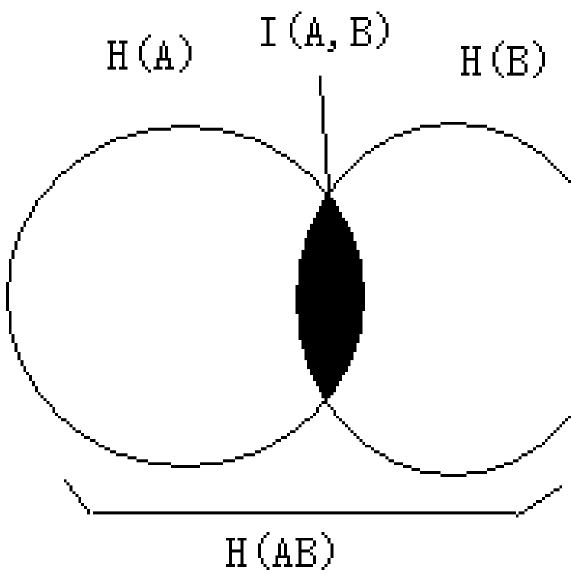
匹配结果



6.1.2 平均交互信息量

- 平均交互信息量定义

$$I(A,B)=\sum\sum p(a,b)\log\frac{p(a,b)}{p(a)p(b)}$$



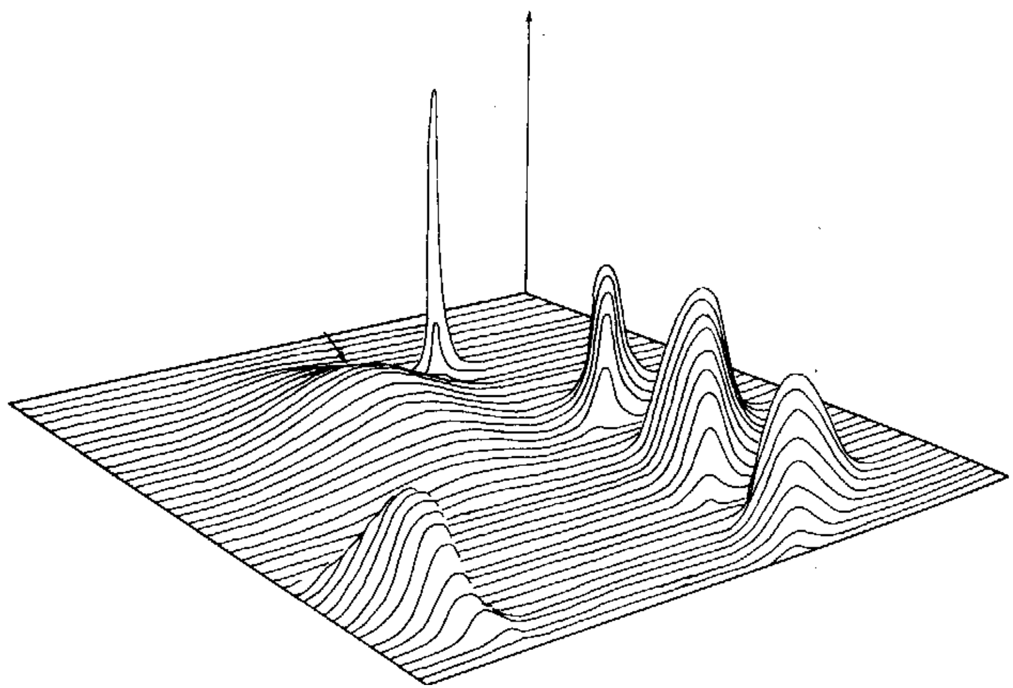
利用交互信息量匹配

- 模版图像记为A，图像记为B，T表示在图像B中平移、旋转、缩放模板A的变换，变换T下的平均交互信息量记为IT(A,B)
- 当IT(A,B)达到最大值Imax时，认为两幅图像已达到了匹配
- 模版匹配问题可归结为

$$T^* = \max_T (I_T(A,B))$$

平均交互信息量的计算

- 二维直方图



6.1.3 不变矩

- 不变矩是被测图像和模板中灰度分布特性的度量
- 不变矩方法分别对模板和被模板覆盖的图像部分计算相应的一组矩，比较两组矩的差别，差别越小，则越相似
- 不变矩具有位移、旋转、尺度不变性

高阶矩

- 将二维图象数据被看作是二维概率密度分布函数，有：

p+q 阶原点矩：

$$m_{pq} = \sum_x \sum_y x^p y^q f(x, y)$$

p+q 阶中心矩：

$$M_{pq} = \sum_x \sum_y (x - \bar{x})^p (y - \bar{y})^q f(x, y)$$

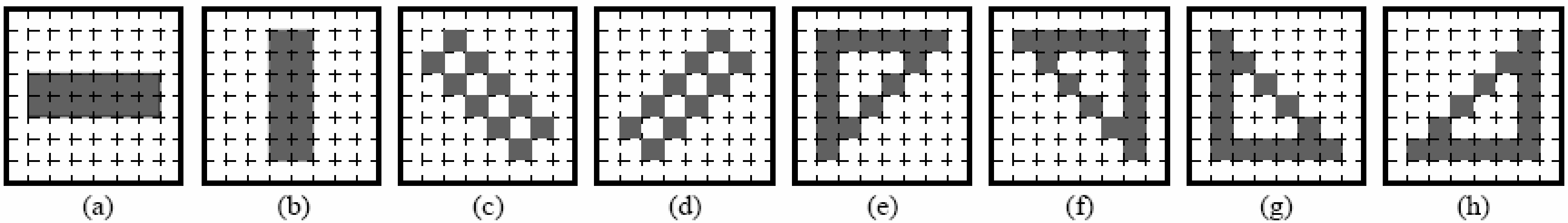
$$\bar{x} = \frac{m_{10}}{m_{00}}, \qquad \bar{y} = \frac{m_{01}}{m_{00}} \qquad \text{重心坐标}$$

规一化中心矩：

$$N_{pq} = M_{pq} / M_{00}^r$$

$$\text{其中} r = \frac{p+q}{2} + 1, \quad p + q = 2,3,\ldots$$

中心矩的计算



用于计算矩的示例图像

由上图计算得到的中心矩

序号.	中心矩	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)
1	M_{02}	3	35	22	22	43	43	43	43
2	M_{11}	0	0	–18	18	21	–21	–21	21
3	M_{20}	35	3	22	22	43	43	43	43
4	M_{12}	0	0	0	0	–19	19	–19	19
5	M_{21}	0	0	0	0	19	19	–19	–19

七个尺度、位移和旋转不变的矩度量

由归一化的二阶和三阶中心矩得到

$$T_1 = N_{20} + N_{02} \qquad T_2 = \left(N_{20} - N_{02}\right)^2 + 4N_{11}^2$$

$$T_3 = \left(N_{30} - 3N_{12}\right)^2 + \left(3N_{21} - N_{03}\right)^2 \qquad T_4 = \left(N_{30} + N_{12}\right)^2 + \left(N_{21} + N_{03}\right)^2$$

$$T_5 = \left(N_{30} - 3N_{12}\right)\left(N_{30} + N_{12}\right)\left[\left(N_{30} + N_{12}\right)^2 - 3\left(N_{21} + N_{03}\right)^2\right] + \\ (3N_{21} - N_{03})(N_{21} + N_{03})[3(N_{30} + N_{12})^2 - (N_{21} + N_{03})^2]$$

$$T_6 = \left(N_{20} - N_{02}\right)\left[\left(N_{30} + N_{12}\right)^2 - \left(N_{21} + N_{03}\right)^2\right] + \\ 4N_{11}\left(N_{30} + N_{12}\right)\left(N_{21} + N_{03}\right)$$

$$T_7 = \left(3N_{21} - N_{03}\right)\left(N_{30} + N_{12}\right)\left[\left(N_{30} + N_{12}\right)^2 - 3\left(N_{21} + N_{03}\right)^2\right] + \\ \left(3N_{12} - N_{30}\right)\left(N_{21} + N_{03}\right)\left[3\left(N_{30} + N_{12}\right)^2 - \left(N_{21} + N_{03}\right)^2\right]$$

不变矩计算实例

(a) (b) (c) (d)

同一幅图像的不同变型

不变矩计算结果

不变矩	原 始 图	旋转 45°的图	缩小一半的图	镜面对称的图
T_1	1.510494 E – 03	1.508716 E – 03	1.509853 E – 03	1.510494 E – 03
T_2	9.760256 E – 09	9.678238 E – 09	9.728370 E – 09	9.760237 E – 09
T_3	4.418879 E – 11	4.355925 E – 11	4.398158 E – 11	4.418888 E – 11
T_4	7.146467 E – 11	7.087601 E – 11	7.134290 E – 11	7.146379 E – 11
T_5	– 3.991224 E – 21	– 3.916882 E – 21	– 3.973600 E – 21	– 3.991150 E – 21
T_6	– 6.832063 E – 15	– 6.738512 E – 15	– 6.813098 E – 15	– 6.831952 E – 15
T_7	4.453588 E – 22	4.084548 E – 22	4.256447 E – 22	– 4.453826 E – 22

应用时将所选不变矩作为一组特征

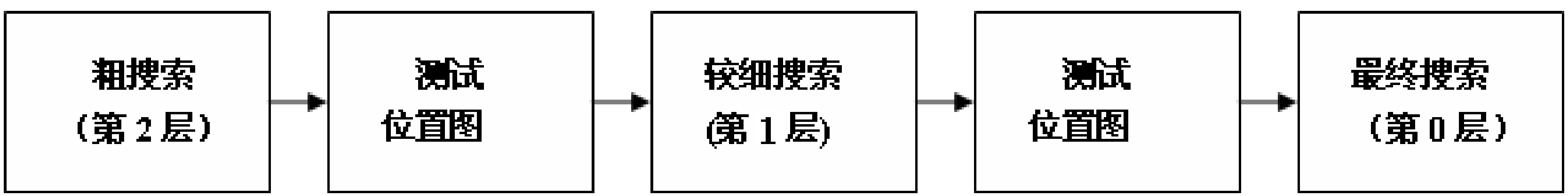
- 计算出各个已知模型的一组不变矩；
- 对于图像中的各个区域，一一计算上述一组不变矩；
- 将图像中各个区域计算的结果与已知模型的一组不变矩的值进行比较，判定图中是否有要检测的物体。（比较时可以采用模板匹配的方法）

6.2 分层搜索

- 常规模板匹配算法计算量大
  - 模板尺寸M×M，图像尺寸N×N，常规方法比须对(N－M＋1)2个点求相似度量后作判断
- 分层搜索方法
  - 由粗到细
  - 若构成L层金字塔数据结构，每层的搜索点数下降成[(N－M)/2L＋1]2

分层搜索算法

- 分别构造模板与图象的金字塔数据结构；
- 从高层开始搜索，找到匹配点，由此，形成下一层的搜索范围；
- 到下一层，在那些确定的范围中进一步搜索，再形成更下一层的搜索范围；
- 反复进行，直到搜索到最底层，找到匹配点。



分层搜索框图

分层搜索应注意的问题

- 阈值选取
  - 每层的阈值选取：苛刻则搜索范围减小，运算量减小；但漏检的可能增加
- 分层的层数
  - 应根据模板和被测图像的具体情况来决定
  - 在最高层次，被测物体的模板在图像上应保持其大体轮廓，否则在搜索结构中很难反映被测物体存在与否，不足以作为下一层搜索的依据

6.3 哈夫变换及广义哈夫变换

哈夫（Hough）变换: 图象空间和参数空间之间的一种变换

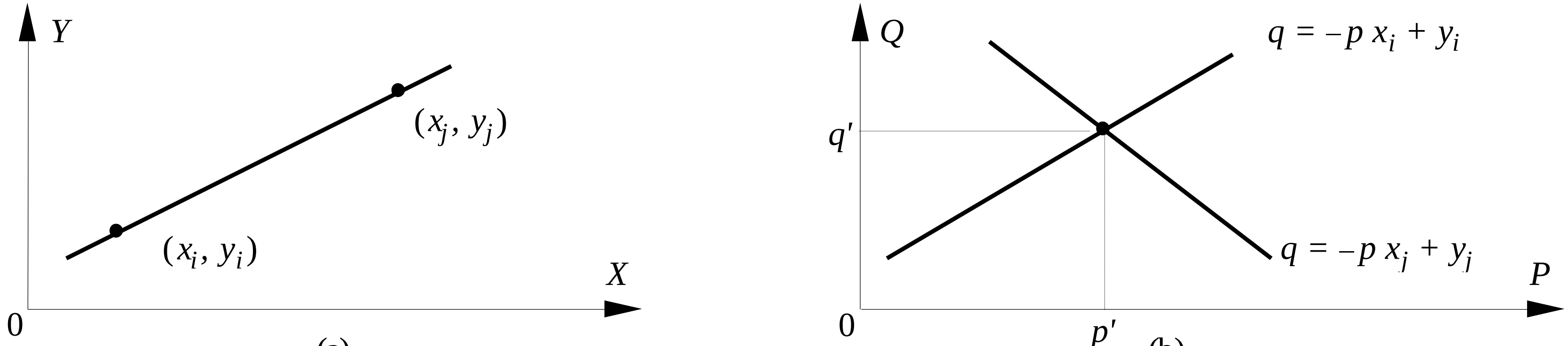
- 8.3.1 基本哈夫变换原理
- 8.3.2 哈夫变换的改进
- 8.3.3 广义哈夫变换原理
- 8.3.4 完整广义哈夫变换

6.3.1 基本哈夫变换原理

点—线的对偶性

$\boxed{y = px + q}$ 图象空间XY里所有过点(x, y)的直线

$\boxed{q = -px + y}$ 参数空间PQ中过点(p, q)的1条直线



(a) (b)

6.3.1 基本哈夫变换原理

点—线的对偶性

图象空间中共线的点⇔参数空间里相交的线

参数空间中相交于同一个点的直线⇔图象空间里共线的点

哈夫变换

把在图象空间中的检测问题转换到参数空间里，通过在参数空间里进行简单的累加统计完成检测任务

6.3.1 基本哈夫变换原理

具体方法

在参数空间PQ里建立一个2-D的累加数组

$A(p, q)$

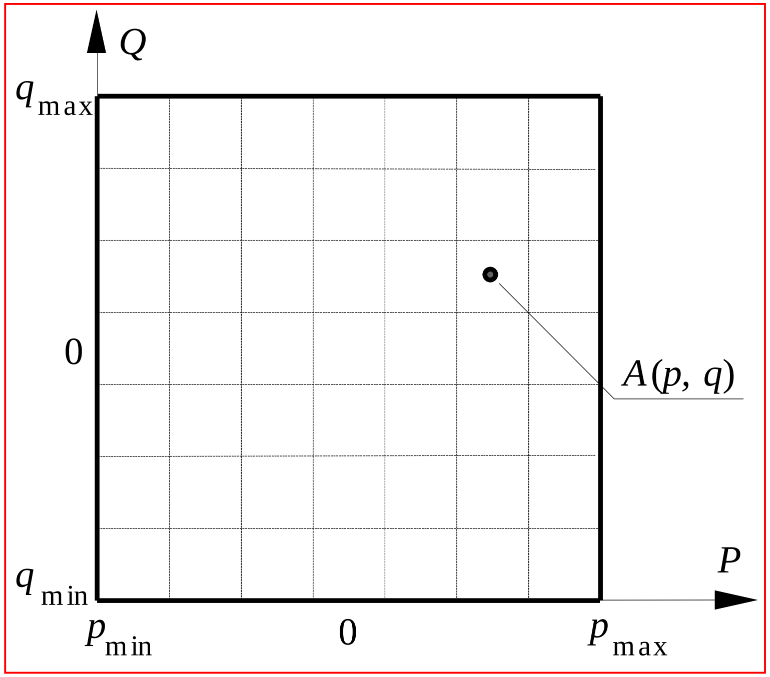
$p \in [p_{\min}, p_{\max}]$

$q \in [q_{\min}, q_{\max}]$

$$A(p, q) = A(p, q) + 1$$

$A(p, q)$值：共线点数

(p, q)值：直线方程参数



6.3.1 基本哈夫变换原理

哈夫变换

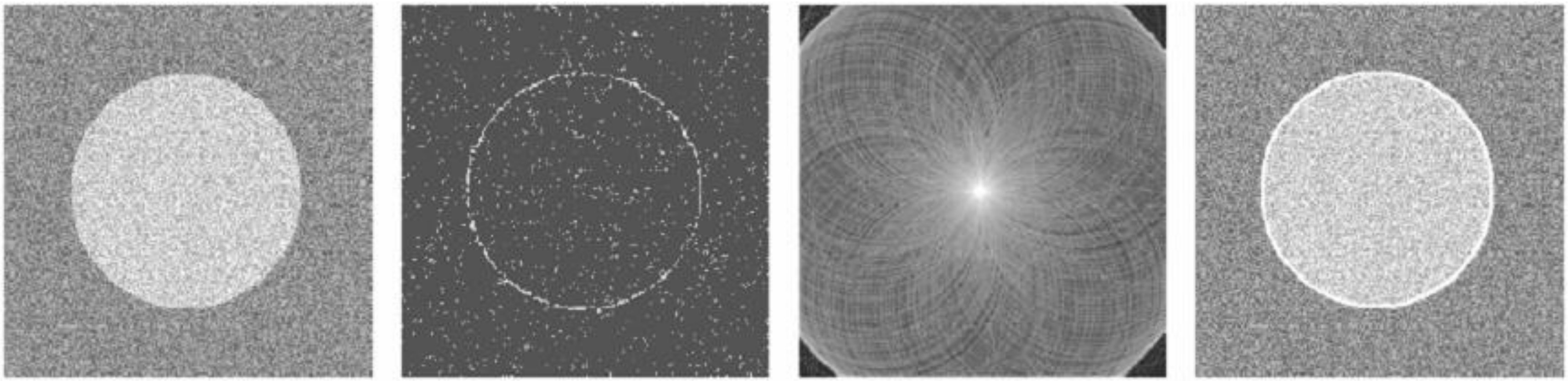
检测满足解析式 $f(\mathbf{x}, \mathbf{c}) = 0$形式的各类曲线并把曲线上的点连接起来

检测圆周

$$\boxed{(x-a)^2+(y-b)^2=r^2}$$

三个参数a，b，r，所以需要在参数空间里建立一个3-D累加数组A，其元素可写为$A(a, b, r)$

哈夫变换检测圆周示例



(a) (b) (c) (d)

用哈夫变换检测圆周示例：图(a)为256x256，灰度256级，叠加随机噪声；图(b)为求梯度(Sobel算子)取阈值后的结果；图(c)哈夫变换累计器图；图(d)为检测出的圆周附加在原图上的效果

6.3.2 哈夫变换的改进

1. 极坐标方程

采用直线的极坐标方程

$\lambda = x\cos\theta + y\sin\theta$　　　参数λ和θ唯一确定一条直线

X-Y平面中的一点对应参数空间的一条正弦曲线

$$\lambda = x_0\cos\theta + y_0\sin\theta \Leftrightarrow \lambda = A\sin(\theta + \alpha)$$

式中$\alpha = \tan^{-1}(x_0 / y_0)$, $A = \sqrt{x_0^2 + y_0^2}$

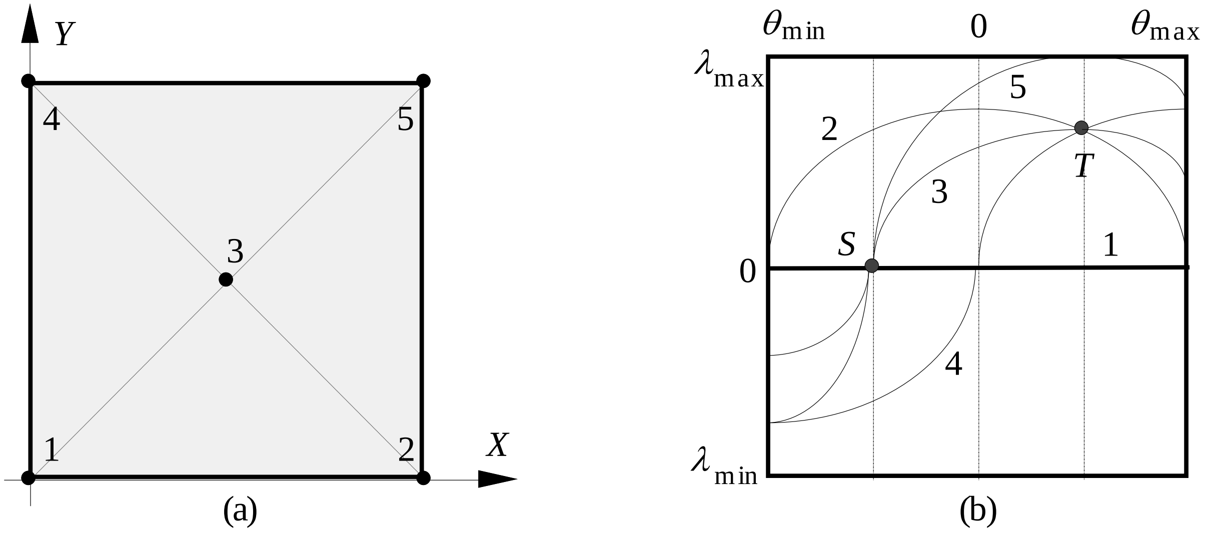
6.3.2 哈夫变换的改进

1. 极坐标方程

$$\lambda = x\cos\theta + y\sin\theta$$

减少检测接近竖直方向直线的计算量

点一正弦曲线对偶性

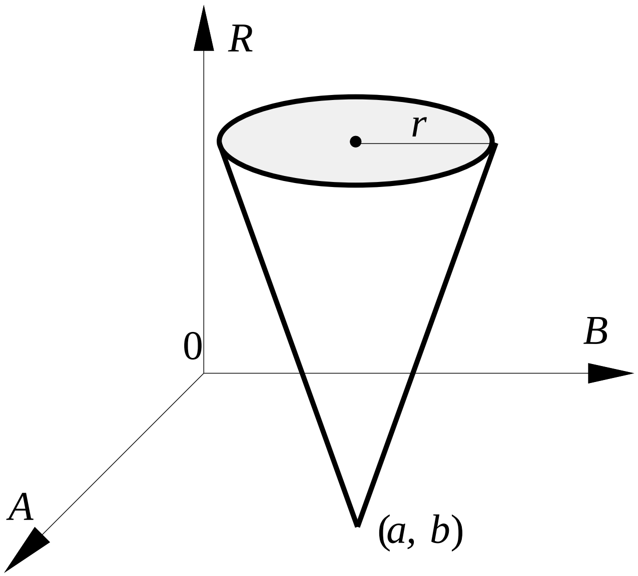


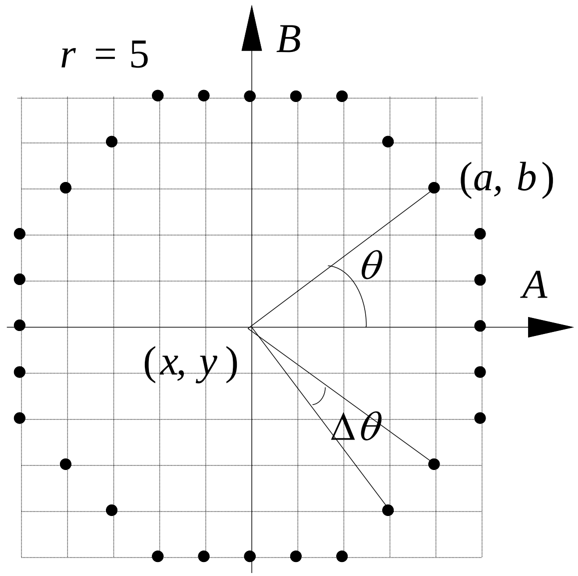
6.3.2 哈夫变换的改进

2. 利用梯度降维

使累加数组的维数减一

圆周—圆周对偶性





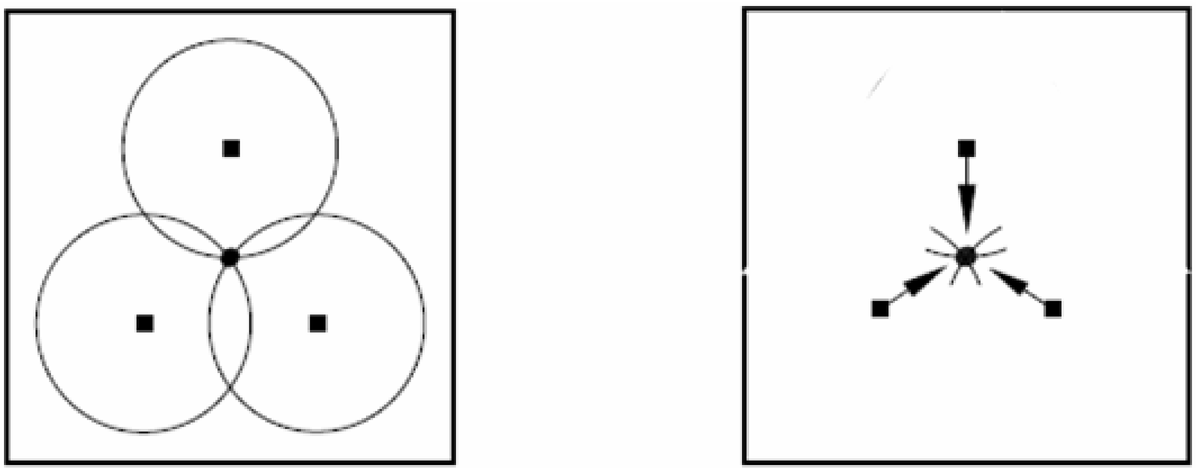
6.3.2 哈夫变换的改进

2. 利用梯度降维

$$a = x - r\sin\theta$$

$$b = y + r\cos\theta$$

1个3-D累加器数组→2个2-D累加器数组



(a) (b)

利用梯度与否 2 种情况下的累加数组示意

利用梯度信息检测椭圆

椭圆方程：4个参数 $$\frac{(x-p)^2}{a^2}+\frac{(y-q)^2}{b^2}=1$$

利用梯度信息，对x求导： $$\frac{(x-p)}{a^2}+\frac{(y-q)}{b^2}\tan\theta=0$$

两式联立：

$$p=x\pm\frac{a^2\tan\theta}{\sqrt{a^2\tan^2\theta+b^2}} \qquad q=y\pm\frac{b^2}{\sqrt{a^2\tan^2\theta+b^2}}$$

建立2个3-D累加数组Ax(p,a,b)和Ay(q,a,b)

6.3.3 广义哈夫变换

- 广义Hough变换将一般的模板匹配与Hough变换相结合
- 先对模板与图象上的物点作坐标变换，然后求相关
- 并用类似Hough变换检测物体的表决方法来确定匹配点

广义哈夫变换原理

B为模板物体的一组点集

P(x0,y0)为一参考点，常把P取为B的中心点。

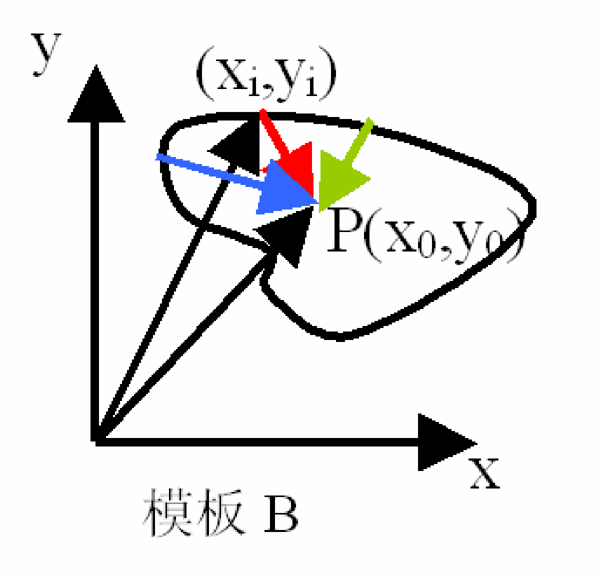
广义Hough变换是一组矢量的集合：

$$\boxed{H(B,P)}$$

$$\boxed{\{(dx_i, dy_i), i = 1,2,\Lambda\ , n\}}$$

$$\boxed{dx_i = x_0 - x_i = -(x_i - x_0)}$$

$$\boxed{dy_i = y_0 - y_i = -(y_i - y_0)}$$

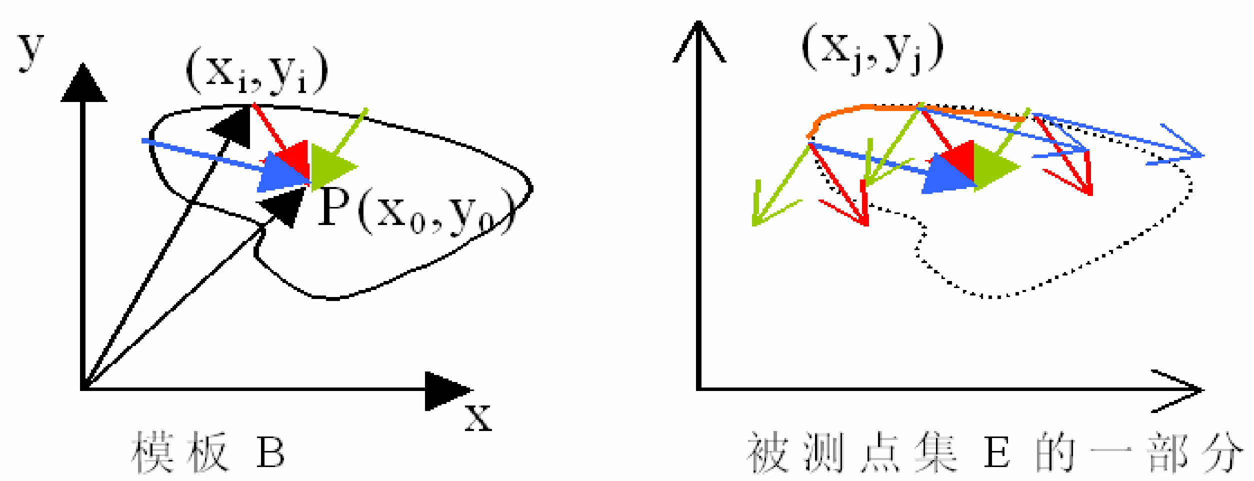


广义哈夫变换原理

检测时，将待测图象，记为点集E：

E = {(xj,yj), j = 1,2,…， m}

将待测的点集E与变换后的模板B作相关运算



广义哈夫变换原理

- 在所需检测的曲线或目标轮廓没有或不易用解析式表达时，可以利用表格来建立曲线或轮廓点与参考点间的关系，从而可继续利用哈夫变换进行检测

建立参考点与轮廓点的联系

$$\boxed{p = x + r(\theta)\cos[\phi(\theta)]}$$

$$\boxed{q = y + r(\theta)\sin[\phi(\theta)]}$$

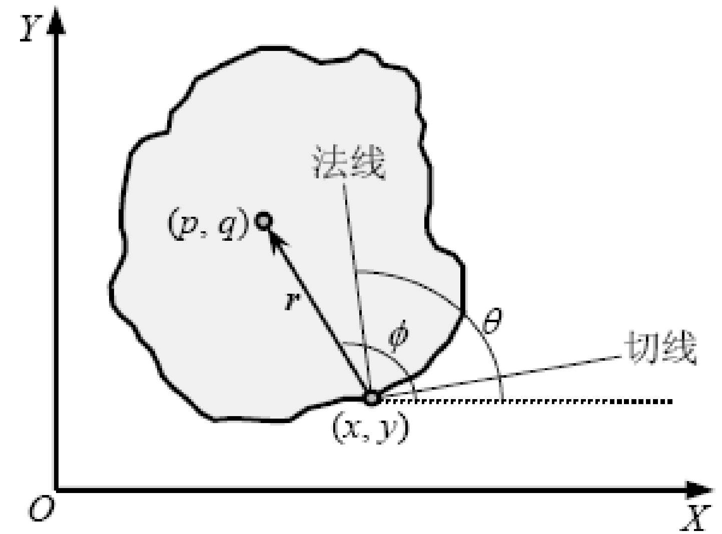


图 6.1.8　建立参考点和轮廓点的对应关系

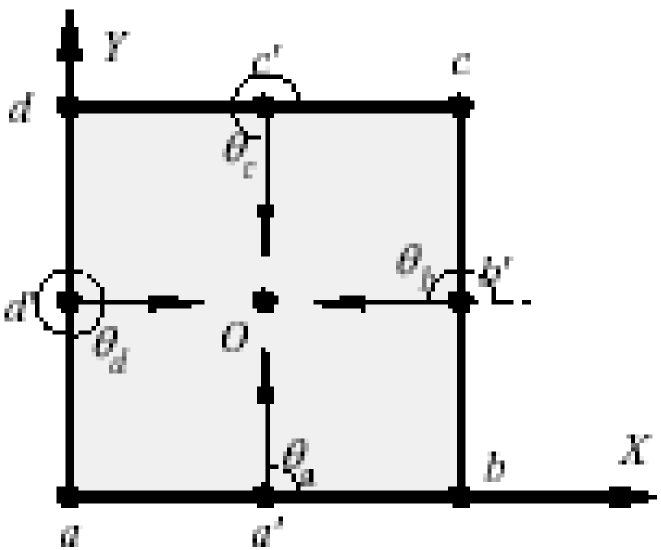
广义哈夫变换原理

- 已知轮廓形状、朝向和尺度而只需检测位置信息
- 根据r，ϕ与θ的函数关系作出参考表 — R表
- 给定一个θ，就可以确定一个可能的参考点位置

梯度角θ	矢径$r(\theta)$	矢角$\phi(\theta)$
θ_1	$r_1^1,\ r_1^2,\ \cdots,\ r_1^{N_1}$	$\phi_1^1,\ \phi_1^2,\ \cdots,\ \phi_1^{N_1}$
θ_2	$r_2^1,\ r_2^2,\ \cdots,\ r_2^{N_2}$	$\phi_2^1,\ \phi_2^2,\ \cdots,\ \phi_2^{N_2}$
$\cdots$	$\cdots$	$\cdots$
θ_M	$r_M^1,\ r_M^2,\ \cdots,\ r_M^{N_M}$	$\phi_M^1,\ \phi_M^2,\ \cdots,\ \phi_M^{N_M}$

广义哈夫变换原理

轮廓点	a	a'	b	b'	C	c'	d	d'
矢径 $r(\theta)$	$\sqrt{2}/2$	$1/2$	$\sqrt{2}/2$	$1/2$	$\sqrt{2}/2$	$1/2$	$\sqrt{2}/2$	$1/2$
矢角 $\phi(\theta)$	$1\pi/4$	$2\pi/4$	$3\pi/4$	$4\pi/4$	$5\pi/4$	$6\pi/4$	$7\pi/4$	$8\pi/4$



梯度角 θ	矢径 $r(\theta)$		矢角 $\phi(\theta)$	
$\theta_a = \pi/2$	$\sqrt{2}/2$	$1/2$	$\pi/4$	$2\pi/4$
$\theta_b = 2\pi/2$	$\sqrt{2}/2$	$1/2$	$3\pi/4$	$4\pi/4$
$\theta_c = 3\pi/2$	$\sqrt{2}/2$	$1/2$	$5\pi/4$	$6\pi/4$
$\theta_d = 4\pi/2$	$\sqrt{2}/2$	$1/2$	$7\pi/4$	$8\pi/4$

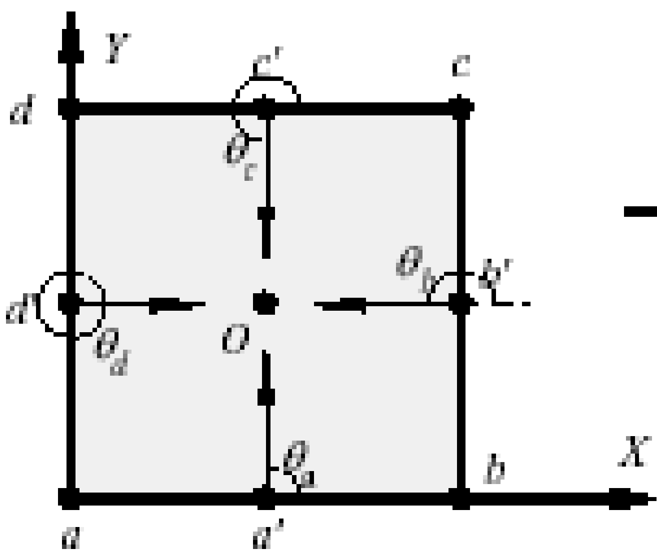
广义哈夫变换原理

利用正方形上的8个轮廓点判断可能参考点

对每个θ有

2个r及2个

ϕ与之对应



梯度角	轮廓点	可能参考点		轮廓点	可能参考点	
θ_a	a	O	d'	a'	b'	O
θ_b	b	O	a'	b'	c'	O
θ_c	c	O	b'	c'	d'	O
θ_d	d	O	c'	d'	a'	O

点O出现频率最高

广义Hough变换的性能

- 运算量较小
- 抗干扰性也较强
- 可以求出曲线的某些参数
- 可适用于不规则曲线
- 仍不具有不变性

6.3.4 完整广义哈夫变换

- 轮廓的平移 + 轮廓放缩、旋转
- 累加数组：

$$A(p_{\min}: p_{\max}, q_{\min}: q_{\max}, \beta_{\min}: \beta_{\max}, S_{\min}: S_{\max})$$

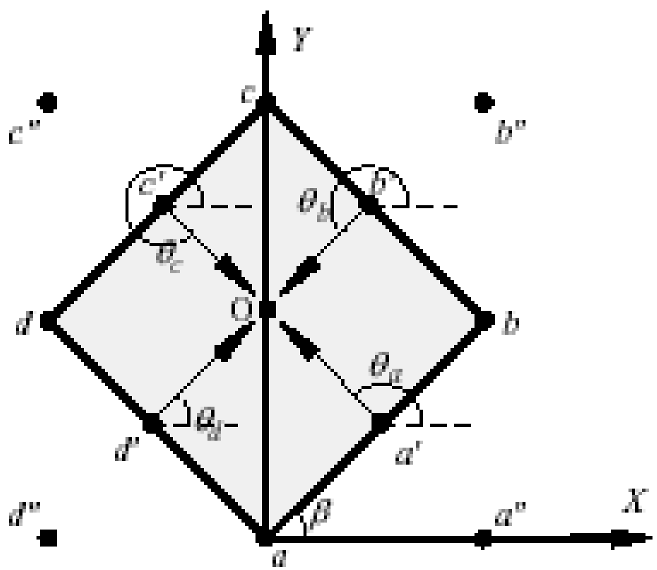
$$\boxed{p = x + S \times r(\theta) \times \cos[\phi(\theta) + \beta]}$$

$$\boxed{q = y + S \times r(\theta) \times \sin[\phi(\theta) + \beta]}$$

- 累加数组的累加：$A(p, q, \beta, S) = A(p, q, \beta, S) + 1$

6.3.4 完整广义哈夫变换

计算示例



原梯度角θ	新梯度角θ'	矢径 $r(\theta)$		新矢角$\phi(\theta)$	
$\theta_a = \pi/2$	$\theta'_a = 3\pi/4$	$\sqrt{2}/2$	$1/2$	$2\pi/4$	$3\pi/4$
$\theta_b = 2\pi/2$	$\theta'_b = 5\pi/4$	$\sqrt{2}/2$	$1/2$	$4\pi/4$	$5\pi/4$
$\theta_c = 3\pi/2$	$\theta'_c = 7\pi/4$	$\sqrt{2}/2$	$1/2$	$6\pi/4$	$7\pi/4$
$\theta_d = 4\pi/2$	$\theta'_d = \pi/4$	$\sqrt{2}/2$	$1/2$	$8\pi/4$	$1\pi/4$

梯度角	轮廓点	可能参考点		轮廓点	可能参考点	
θ'_a	a	O	d'	a'	b'	O
θ'_b	b	O	a'	b'	c'	O
θ'_c	c	O	b'	c'	d'	O
θ'_d	d	O	c'	d'	a'	O