

3D计算机视觉

原理、算法及应用

计算机视觉
丛书



3D计算机视觉

原理、算法及应用



3D COMPUTER VISION
Principles, Algorithms and Applications

3D计算机视觉

原理、算法及应用

章毓晋 编著

电子工业出版社



3D COMPUTER VISION
Principles, Algorithms and Applications

3D计算机视觉

原理、算法及应用

章毓晋 编著



责任编辑：朱雨萌
封面设计：博雅锦

ISBN 978-7-121-61950-8



定价：149.00元

中国工信出版集团

电子工业出版社
http://www.phei.com.cn



第8章 单目单图像恢复



在基于3-D景物获取2-D图像的过程中，一些有用信息确实由于投影而丢失了，但也有一些信息通过转换形式被保留下来（或者说在2-D图像中还有景物的3-D线索）

在成像过程中，一些有关景物形状的信息在成像时会转换成图像中与原景物形状对应的明暗度信息

在透视投影条件下，一些有关景物形状的信息会被保留在物体表面纹理的变化



第8章 单目单图像恢复



8.1 由影调恢复形状

8.2 亮度方程求解

8.3 由纹理恢复形状

8.4 纹理消失点检测



8.1 由影调恢复形状

亮度的空间变化（明暗变化）在成像后可表现为图像上的不同影调（也称为不同阴影）

影调与朝向

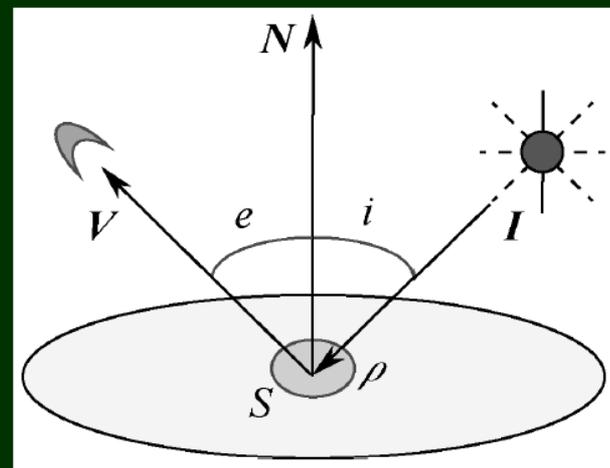
亮度层次的变化分布取决于4个因素：

N ：面元的法线向量

I ：光源的入射强度和方向

V ：观察者相对物体方位和距离

ρ ：物体表面反射特性





8.1 由影调恢复形状

影调与朝向

沿 N 的反射强度: $E(x, y) = I(x, y) \rho \cos i$

观察到的光线强度: $E(x, y) = I(x, y) \rho \cos e$

如果光源来自观察者背后且为平行光线:

$$\cos e = \cos i = \frac{[p \quad q \quad -1]^T \cdot [0 \quad 0 \quad -1]^T}{|[p \quad q \quad -1]^T| \cdot |[0 \quad 0 \quad -1]^T|} = \frac{1}{\sqrt{p^2 + q^2 + 1}}$$

观察到的图像灰度:

$$E(x, y) = I(x, y) \rho \frac{1}{\sqrt{p^2 + q^2 + 1}}$$



8.1 由影调恢复形状

影调与朝向

如果光源光线不是以 $i = e$ 角度入射:

$$\cos i = \frac{[p \quad q \quad -1]^T \cdot [0 \quad 0 \quad -1]^T}{|[p \quad q \quad -1]^T| \cdot |[0 \quad 0 \quad -1]^T|} = \frac{pp_i + qq_i + 1}{\sqrt{p^2 + q^2 + 1} \sqrt{p_i^2 + q_i^2 + 1}}$$

观察到的图像灰度

$$E(x, y) = I(x, y) \rho = \frac{pp_i + qq_i + 1}{\sqrt{p^2 + q^2 + 1} \sqrt{p_i^2 + q_i^2 + 1}}$$

图像亮度约束方程

$$E(x, y) = R(p, q)$$



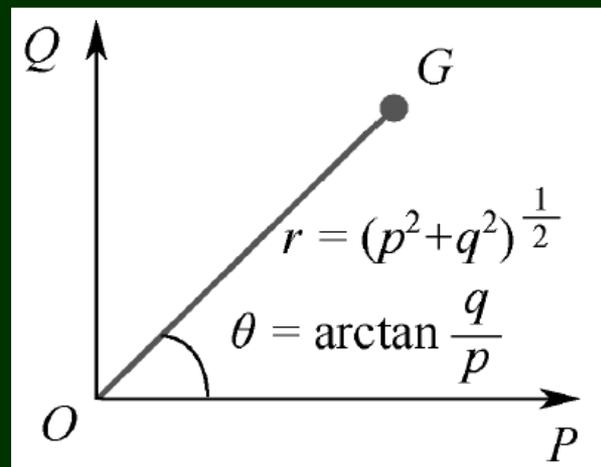
8.1 由影调恢复形状

梯度空间法

3-D空间中的表面从其取向来看只是2-D梯度空间中的一个点 $G(p, q)$

使用这种梯度空间方法研究3D表面可起到降维（从3D降到2D）的作用

梯度空间中的一个点代表了所有朝向相同的面元，但这些面元的空间位置可以各不相同





8.1 由影调恢复形状

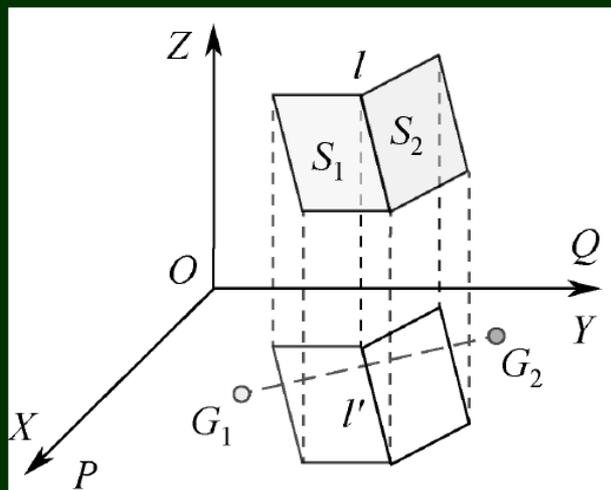
梯度空间法

判断因平面相交而形成的凸结构或凹结构

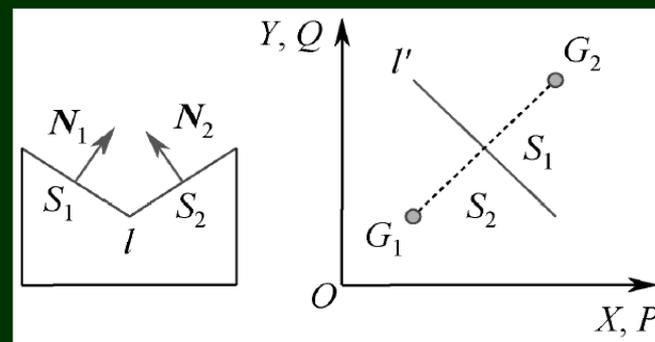
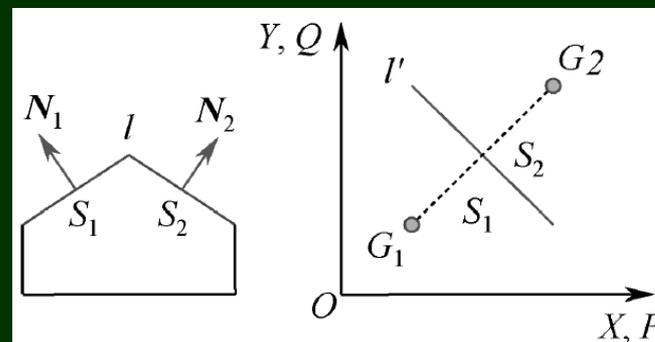
两个平面 S_1 和 S_2

相交形成交线 l

同一个面的
 S 和 G 同号



同一个面的
 S 和 G 异号



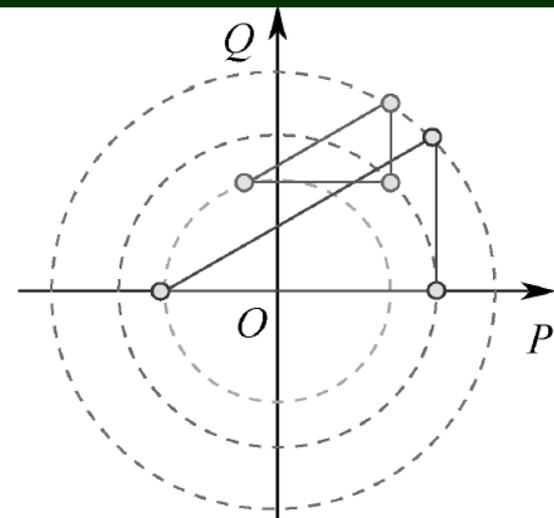
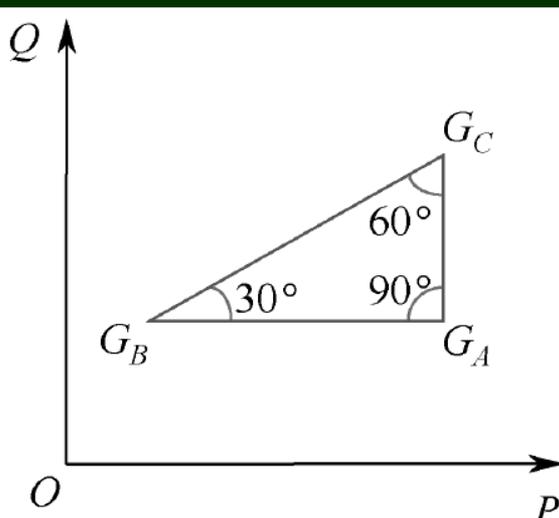
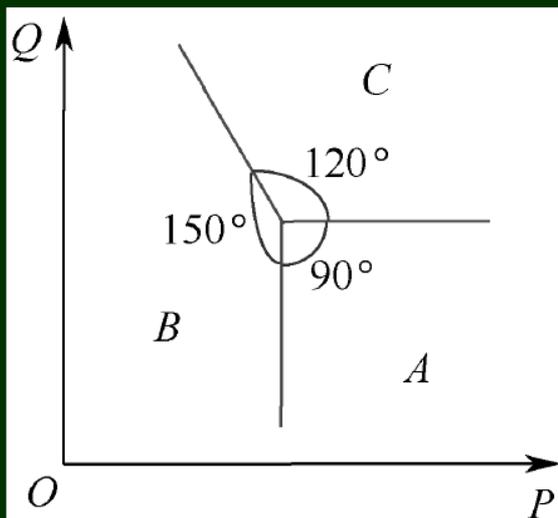


8.1 由影调恢复形状

梯度空间法

反射图应用示例

$$\begin{aligned}
 (p_A, q_A) &= (0.707, 0.707) & (p_B, q_B) &= (-0.189, 0.707) & (p_C, q_C) &= (0.707, 1.225) \\
 (p'_A, q'_A) &= (1, 0) & (p'_B, q'_B) &= (-0.732, 0) & (p'_C, q'_C) &= (1, 1)
 \end{aligned}$$





8.2 亮度方程求解

图像亮度约束方程联系像素灰度与朝向
在图像上对一个单独的点进行亮度测量只能提供一个约束，而表面的朝向有两个自由度

一般需要通过增加附加条件以建立附加方程来解决这个病态问题

许多物体表面是光滑的，或者说在深度上是连续的，进一步的偏微分也是连续的

可以利用宏观平滑约束的方法提供附加信息，进而求解图像亮度约束方程

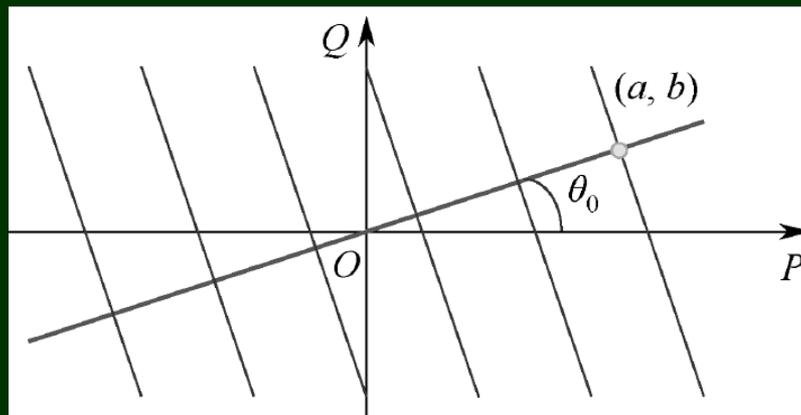


8.2 亮度方程求解

线性情况

$$R(p, q) = f(ap + bq)$$

在反射图中，梯度空间的等值线是平行线



f 是一个严格单调函数，它的反函数 f^{-1} 存在

$$s = ap + bq = f^{-1}[E(x, y)]$$



8.2 亮度方程求解

线性情况

特定方向 θ_0 的上的斜率

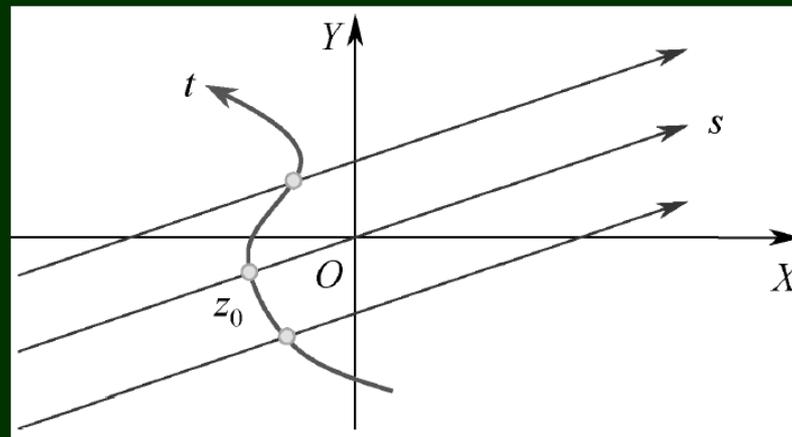
$$m(\theta_0) = \frac{ap + bq}{\sqrt{a^2 + b^2}} = \frac{1}{\sqrt{a^2 + b^2}} f^{-1}[E(x, y)]$$

从一个特定的图像点开始, z 的变化

$$\frac{dz}{ds} = \frac{1}{\sqrt{a^2 + b^2}} f^{-1}[E(x, y)]$$

对 z 积分得到

$$z(s) = z_0 + \frac{1}{\sqrt{a^2 + b^2}} \int_0^s f^{-1}[E(x, y)] ds$$





8.2 亮度方程求解

旋转对称情况

如果光源的分布对观察者来说是旋转对称的，那么反射图也是旋转对称的

$$R(p, q) = f(p^2 + q^2)$$

如果表面最速上升方向与 x 轴的夹角是 θ_s

$$m(\theta_s) = \sqrt{p^2 + q^2} = \sqrt{f^{-1}[E(x, y)]}$$

z 的变化为

$$\delta z = m \delta s = \sqrt{p^2 + q^2} \delta s = \sqrt{f^{-1}[E(x, y)]} \delta s$$



8.2 亮度方程求解

旋转对称情况

取步长为 $\sqrt{p^2 + q^2} \delta s$

$$\delta x = p \delta s \quad \delta y = q \delta s \quad \delta z = (p^2 + q^2) \delta s = \{f^{-1}[E(x, y)]\} \delta s$$

$$E_x = 2(pu + qv) f' \quad E_y = 2(pv + qw) f'$$

由于在图像平面取步长 $(\delta x, \delta y)$ 而导致的 δp 和 δq 的变化

$$\delta p = u \delta x + v \delta y \quad \delta q = v \delta x + w \delta y$$

$$\delta p = \frac{E_x}{2f'} \delta s \quad \delta q = \frac{E_y}{2f'} \delta s$$



8.2 亮度方程求解

旋转对称情况

在 $\delta s \rightarrow 0$ 的极限情况下，可得如下一组（5个）常微分方程（微分都是对 s 进行的）

$$\dot{x} = p \quad \dot{y} = q \quad \dot{z} = p^2 + q^2 \quad \dot{p} = \frac{E_x}{2f'} \quad \dot{q} = \frac{E_y}{2f'}$$

如果将前两个方程对 s 再次微分，可得到另一组方程：

$$\ddot{x} = \frac{E_x}{2f'} \quad \ddot{y} = \frac{E_y}{2f'} \quad z = f^{-1}[E(x, y)]$$



8.2 亮度方程求解

平滑约束的一般情况

认为（在物体轮廓内）物体表面是光滑的

$$(\nabla p)^2 = \left(\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial y} \right)^2 = 0 \quad (\nabla q)^2 = \left(\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} \right)^2 = 0$$

最小化如下总误差

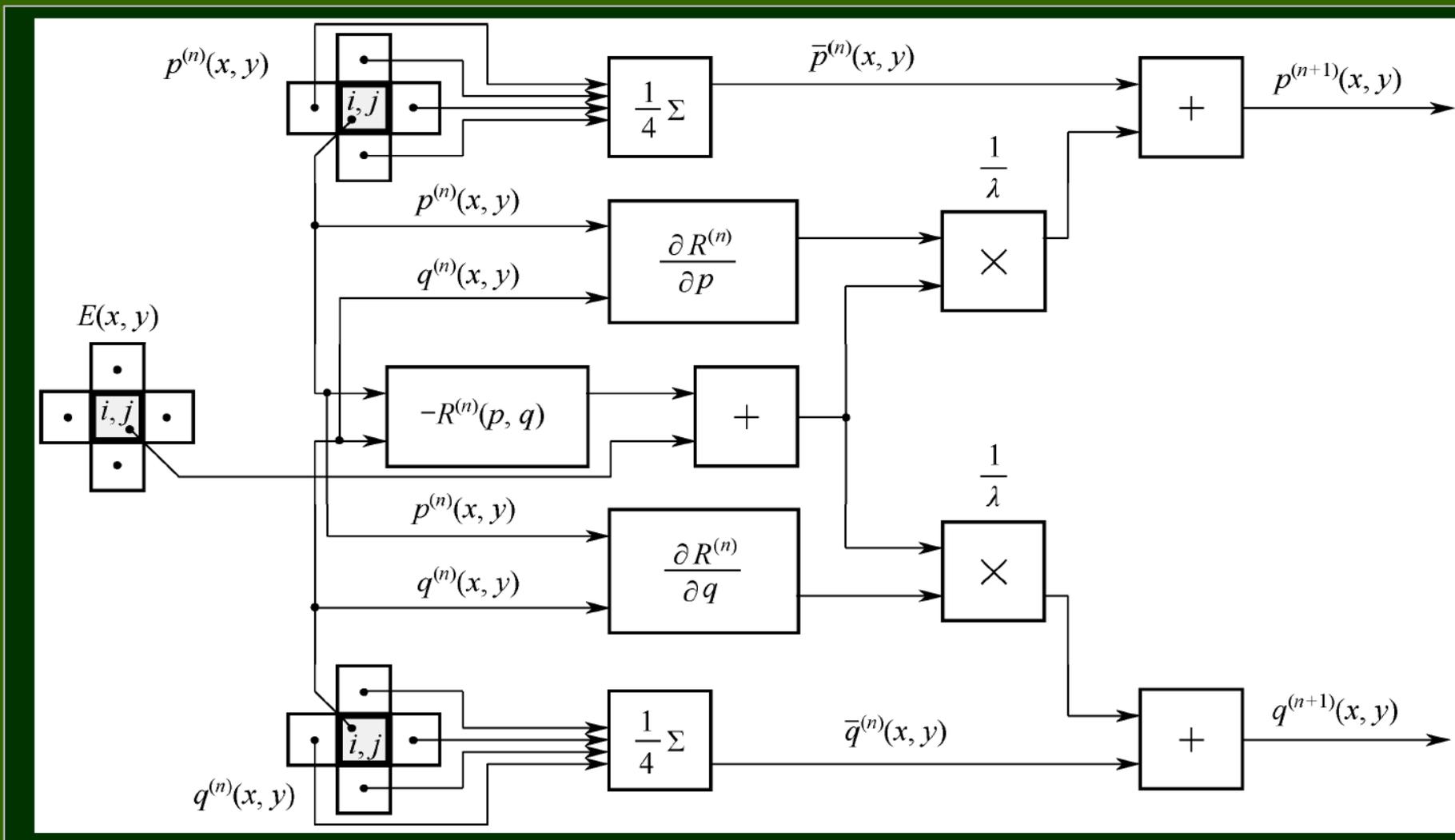
$$\varepsilon(x, y) = \sum_x \sum_y \left\{ [E(x, y) - R(p, q)]^2 + \lambda [(\nabla p)^2 + (\nabla q)^2] \right\}$$

迭代求解

$$p^{(n+1)} = \bar{p}^{(n)} + \frac{1}{\lambda} \left[E(x, y) - R(p^{(n)}, q^{(n)}) \right] \frac{\partial R^{(n)}}{\partial p}$$
$$q^{(n+1)} = \bar{q}^{(n)} + \frac{1}{\lambda} \left[E(x, y) - R(p^{(n)}, q^{(n)}) \right] \frac{\partial R^{(n)}}{\partial q}$$



8.2 亮度方程求解





8.2 亮度方程求解

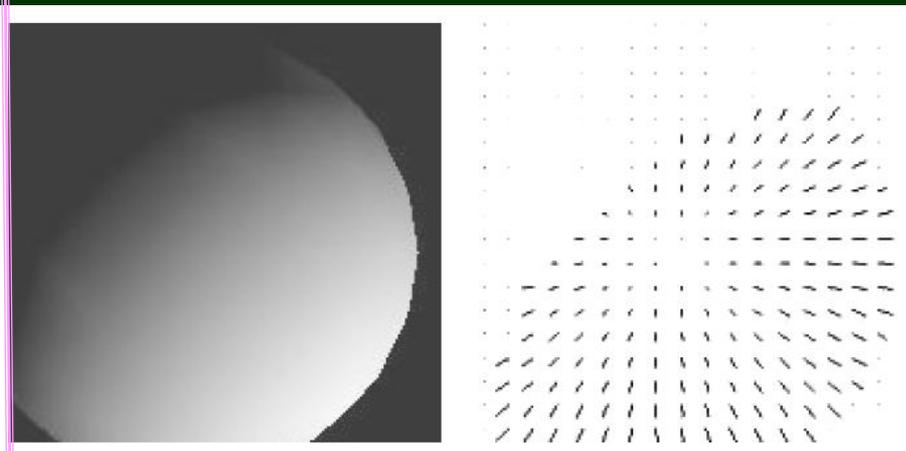
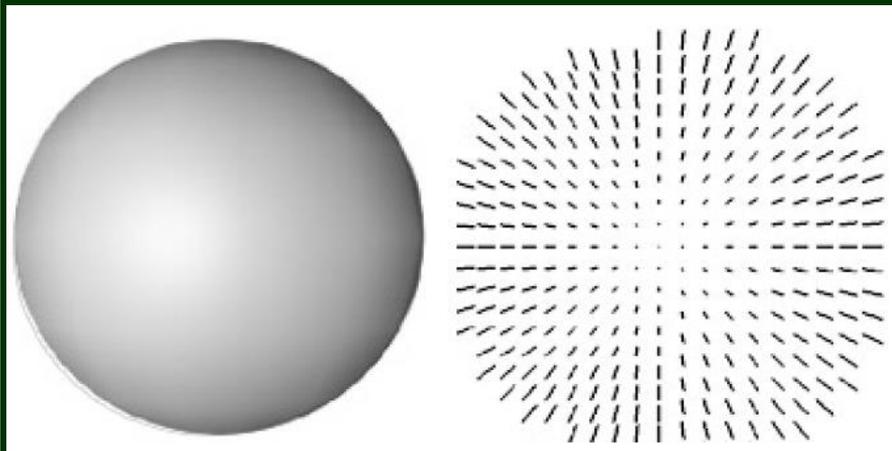
由影调恢复形状实例

圆球图像

表面朝向

圆球图像

表面朝向



光源方向与视线方向比较接近，所以对于整个可见表面基本上都可确定各点朝向

光源方向与视线方向夹角较大，所以对于光线照射不到的表面，无法确定其朝向



8.3 由纹理恢复形状

纹理在恢复表面朝向方面的作用

单目成像和畸变

物体的几何轮廓可看作由直线段连接而成

空间直线

$$s\mathbf{W}_1 + (1-s)\mathbf{W}_2 = s \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} + (1-s) \begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix}$$

投影后

$$\mathbf{P}[s\mathbf{W}_1 + (1-s)\mathbf{W}_2] = s \begin{bmatrix} kX_1 \\ kY_1 \\ kZ_1 \\ q_1 \end{bmatrix} + (1-s) \begin{bmatrix} kX_2 \\ kY_2 \\ kZ_2 \\ q_2 \end{bmatrix}$$



8.3 由纹理恢复形状

单目成像和畸变

空间点投影变换的图像平面坐标

$$\mathbf{w} = [x \quad y]^T = \left[\begin{array}{cc} \frac{sX_1 + (1-s)X_2}{sq_1 + (1-s)q_2} & \frac{sY_1 + (1-s)Y_2}{sq_1 + (1-s)q_2} \end{array} \right]^T$$

像平面上

$$\mathbf{w} = [x \quad y]^T = \left[\begin{array}{cc} t \frac{\lambda X_1}{\lambda - Z_1} + (1-t) \frac{\lambda X_2}{\lambda - Z_2} & t \frac{\lambda Y_1}{\lambda - Z_1} + (1-t) \frac{\lambda Y_2}{\lambda - Z_2} \end{array} \right]^T$$

$$s = \frac{tq_2}{tq_2 + (1-t)q_1}$$

s 与 t 是单值关系

$$t = \frac{sq_1}{sq_1 + (1-s)q_2}$$



8.3 由纹理恢复形状

单目成像和畸变

平行线的畸变

一条直线上的点 (X, Y, Z) 可表示为

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + k \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}$$

对一组平行线来说，它们的 (a, b, c) 都相同，只是 (X_0, Y_0, Z_0) 不同。具有相同 (a, b, c) 的平行线在无限延伸后将交于一点



8.3 由纹理恢复形状

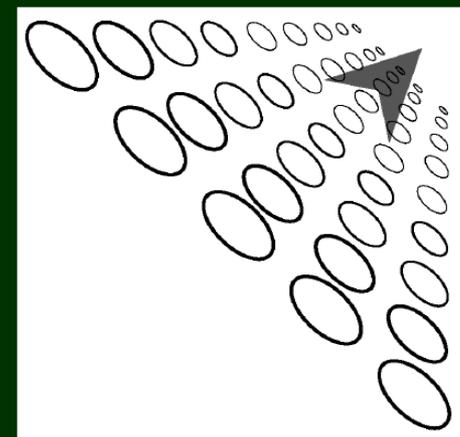
利用纹理变化恢复朝向

纹理在成像过程中产生的变化带有3-D信息

(1) 利用纹理元尺寸的变化

根据纹理元投影尺寸变化率的极大值可以确定纹理元所在平面的朝向

纹理梯度的方向取决于纹理元绕摄像机轴线旋转的角度，而纹理梯度的数值反映纹理元相对于摄像机轴线的倾斜程度





8.3 由纹理恢复形状

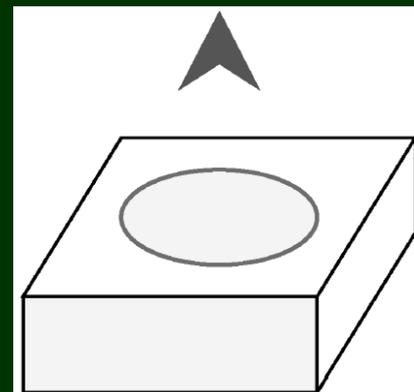
利用纹理变化恢复朝向

(2) 利用纹理元形状的变化

如果已知纹理元的原始形状，可从纹理元形状的变化推算出表面的朝向

平面的朝向是由两个角度（相对于摄像机轴线旋转的角度和相对于视线倾斜的角度）决定

圆形组成的纹理在倾斜的平面上会变成椭圆





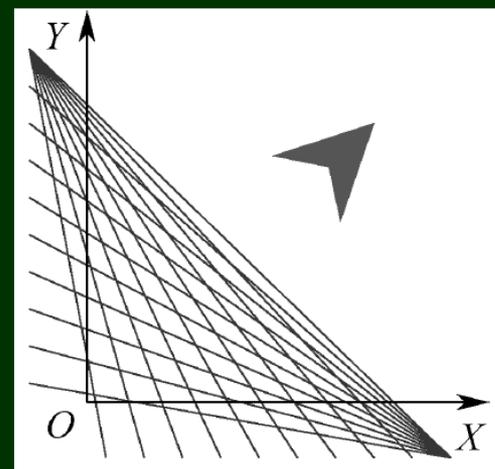
8.3 由纹理恢复形状

利用纹理变化恢复朝向

(3) 利用纹理元相互之间空间关系的变化

如果纹理是由有规律的纹理元栅格组成的，则可以通过计算其消失点/消隐点来恢复表面朝向信息

利用由同一表面纹理元栅格得到的两个消失点可以确定表面的朝向。这两个消失点所在的直线称为消失线/消隐线





8.3 由纹理恢复形状

利用纹理变化恢复朝向

在获取图像的过程中，景物表面的纹理结构有可能在图像上发生变化（产生既包括大小也包括方向的梯度变化）

表 8-1 3 种利用纹理元变化确定物体表面朝向方法的比较

方 法	相对于摄像机轴线旋转的角度	相对于摄像机轴线的倾斜角度
利用纹理元尺寸的变化	纹理梯度方向	纹理梯度数值
利用纹理元形状的变化	纹理元主轴方向	纹理元长轴与短轴之比
利用纹理元相互之间空间关系的变化	两个消失点连线的方向	两个消失点连线与 $x = 0$ 的交点



8.3 由纹理恢复形状

利用纹理变化恢复朝向

表 8-2 从纹理获取形状的典型方法

表面线索	表面种类	原始纹理	投影类型	分析方法	分析单元	单元属性
纹理梯度	平面	未知	透视	统计	波	波长
纹理梯度	平面	未知	透视	结构	区域	面积
纹理梯度	平面	均匀密度	透视	统计/结构	边缘/区域	密度
会聚线	平面	平行线	透视	统计	边缘	方向
归一化纹理特性图	平面	已知	正交	结构	线	长度
归一化纹理特性图	曲面	已知	球面	结构	区域	轴
形状畸变/失真	平面	各向同性	正交	统计	边缘	方向
形状畸变/失真	平面	未知	正交	结构	区域	形状



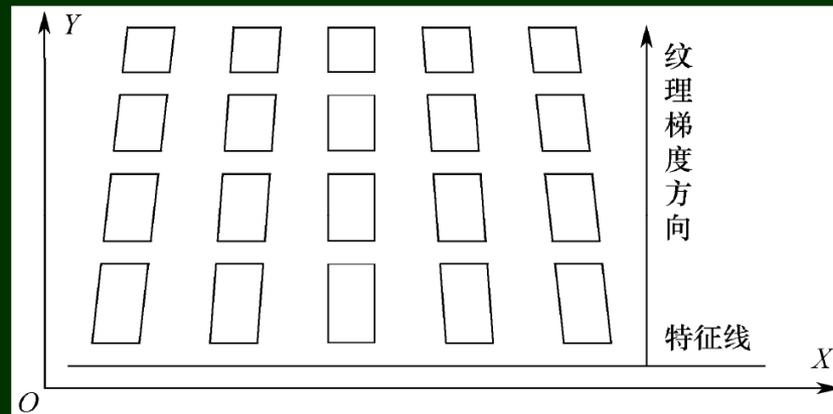
8.3 由纹理恢复形状

利用纹理变化恢复朝向

纹理立体技术：结合纹理和立体视觉方法
表面法向量

$$N = [N_x \ N_y \ N_z]^T \quad \begin{aligned} N_x &= \sin \theta_1 (a_{13} \cos \theta_2 + a_{23} \sin \theta_2) \\ N_y &= -\cos \theta_1 (a_{13} \cos \theta_2 + a_{23} \sin \theta_2) \end{aligned}$$

$$N_z = \cos \theta_1 (a_{21} \cos \theta_2 + a_{22} \sin \theta_2) - \sin \theta_1 (a_{11} \cos \theta_2 + a_{21} \sin \theta_2)$$





8.4 纹理消失点检测

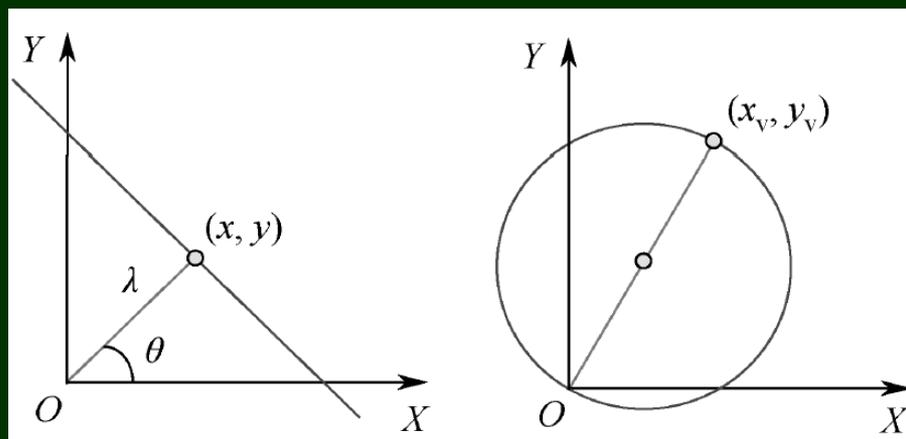
检测线段纹理消失点

可用变换 $\{x, y\} \Rightarrow \{\lambda, \theta\}$ 把线段集合从 XY 空间映射到 $\lambda\theta$ 空间中对消失点进行检测

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

$$\lambda = x_v \cos \theta + y_v \sin \theta$$

$$\left(x - \frac{x_v}{2}\right)^2 + \left(y - \frac{y_v}{2}\right)^2 = \left(\frac{x_v}{2}\right)^2 + \left(\frac{y_v}{2}\right)^2$$





8.4 纹理消失点检测

检测线段纹理消失点

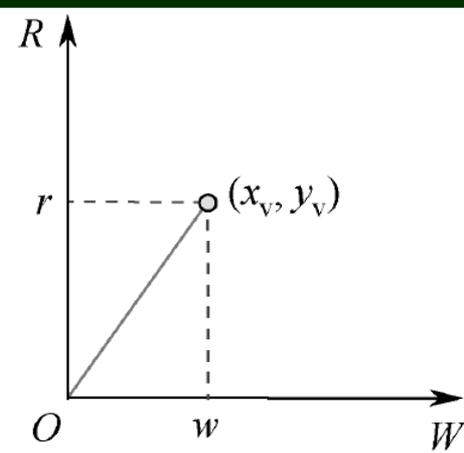
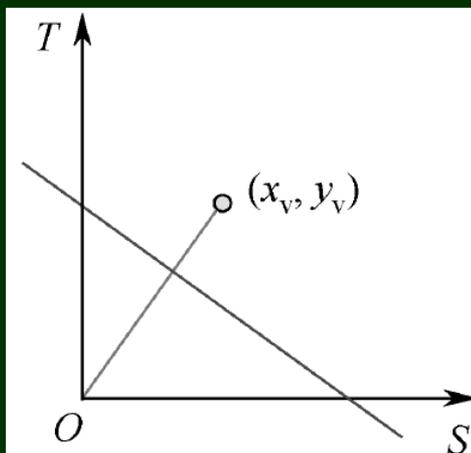
改用变换 $\{x, y\} \Rightarrow \{k/\lambda, \theta\}$

$$k = x_v s + y_v t$$

在（新的）哈夫变换空间 RW 中

$$r = \frac{k}{\sqrt{x_v^2 + y_v^2}}$$

$$w = \arctan \frac{y_v}{x_v}$$



$$x_v = \frac{k^2}{r^2 \sqrt{1 + \tan^2 w}}$$

$$y_v = \frac{k^2 \tan w}{r^2 \sqrt{1 + \tan^2 w}}$$

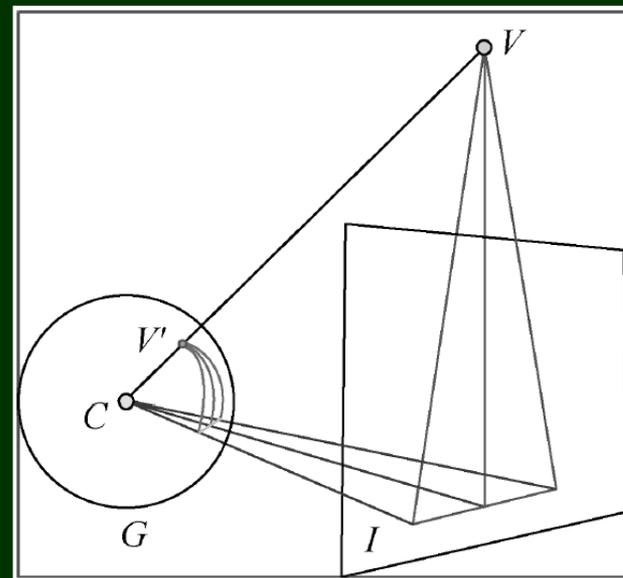


8.4 纹理消失点检测

确定图像外消失点

围绕摄像机的投影中心构建一个高斯球 G ，并且将 G （而不是扩展图像平面）作为参数空间

消失点出现在有限距离处（在无穷远处也可以），它与在高斯球（其中心为 C ）上的点有一对一的关系（ V 和 V' ）





8.4 纹理消失点检测

确定图像外消失点

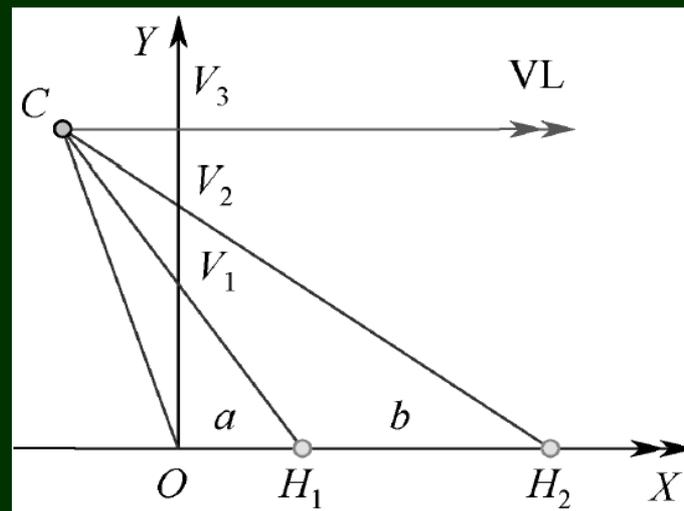
由 O 、 V_1 、 V_2 、 V_3 得到的交叉比与由 O 、 H_1 、 H_2 及水平方向上无穷远点得到的交叉比相等

$$\frac{y_1(y_3 - y_2)}{y_2(y_3 - y_1)} = \frac{x_1}{x_2} = \frac{a}{a+b}$$

$$y_3 = \frac{by_1y_2}{ay_1 + by_1 - ay_2}$$

a 和 b 的绝对数值并不

重要，只要知道它们的比值就可进行计算





8.5 各节要点和可参考的文献

- 1 由影调恢复形状
- 2 亮度方程求解
- 3 由纹理恢复形状
- 4 纹理消失点检测

自我检测题