

图 象 理 解

（第4版）

章毓晋
清华大学电子工程系 100084 北京

第2单元 景物重建

- 第6章 立体视觉：双目
 - 第7章 立体视觉：多目
 - 第8章 景物恢复：多图象
 - 第9章 景物恢复：单图象
- 对图象的理解先要从图象恢复场景，即借助2-D图象重建3-D场景
- 立体视觉是解决3-D重建的一种重要方法
- 恢复景物就是要恢复景物的本征特性
- 从形状恢复景物 \Leftrightarrow “从 X 得到形状”

第8讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第2页

第8章 景物恢复：多图象

立体视觉方法根据在不同位置获得的多幅图象来恢复景物的深度，可看作将多幅图象间的冗余信息转化为深度信息

获取含有冗余信息的多幅图象也可利用在同一位置采集变化的景物图象来得到。这些图象可仅用一个摄像机得到，所以也称为单目的方法

从（单目）多幅图象中可以确定景物的表面朝向，而由景物的表面朝向可直接得到景物各部分间的相对深度，并进一步得到绝对深度

第8讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第3页

第8章 景物恢复：多图象

- 8.1 单目景物恢复
- 8.2 光度立体学
- 8.3 从运动求取结构

第8讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第4页

8.1 单目景物恢复

单目图象（可单幅或多幅图象）恢复景物
避免了复杂的对应点匹配问题
也可恢复景物的本征特性（如形状）

“从 X 得到形状”（shape from X ）

这里 X 可以代表：

多幅图象：（景物）运动、光照（变化）

单幅图象：（明暗）影调、纹理（变化）

第8讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第5页

8.2 光度立体学

- 8.2.1 景物亮度和图象亮度
- 8.2.2 表面反射特性和亮度
- 8.2.3 景物表面朝向
- 8.2.4 反射图和亮度约束方程
- 8.2.5 光度立体学求解

第8讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第6页

8.2.1 景物亮度和图象亮度

- 景物亮度：（ \leftrightarrow 光源的辐射强度）
与**辐射亮度**或**辉度**有关。对应景物表面射出的光通量，是由光源表面单位面积在单位立体角内发出的功率，单位是 $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$
- 图象亮度：（ \leftrightarrow 景物接受到的照度）
与**辐照度**或**照度**有关。对应图象平面得到的光通量，是射到目标表面的单位面积的功率，单位是 Wm^{-2}

第8讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第7页

8.2.1 景物亮度和图象亮度

公式推导

由两个立体角
的相等可得

$$\frac{\delta O}{\delta I} = \frac{\cos \alpha}{\cos \theta} \left(\frac{z}{\lambda} \right)^2$$

立体角 = $\frac{\text{球面面积}}{\text{半径平方}}$

图象照度 E 与所感兴趣的景物亮度 L 成正比，
且与镜头的面积成正比，与镜头焦距平方成反比

(8.2.1) ~ (8.2.5)

$$E = L \frac{\pi}{4} \left(\frac{d}{\lambda} \right)^2 \cos^4 \alpha$$

第8讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第8页

8.2.1 景物亮度和图象亮度

成像时景物的亮度 L 不仅取决于入射到景物表面的光通量和入射光被反射的比例，还与光反射的几何因素有关，即与光照方向和视线方向有关：

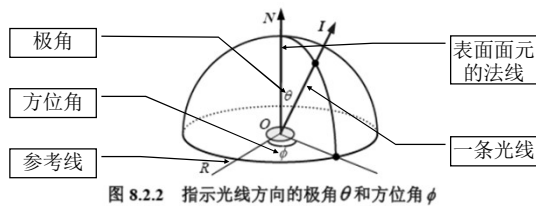


图 8.2.2 指示光线方向的极角 θ 和方位角 ϕ

第8讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第9页

8.2.1 景物亮度和图象亮度

双向反射分布函数BRDF: $f(\theta_i, \phi_i; \theta_e, \phi_e)$

光线沿方向 (θ_i, ϕ_i)
入射到景物表面而观
察者在方向 (θ_e, ϕ_e) 所观
察到的表面明亮情况

亮度和照度的比值

$$f(\theta_i, \phi_i; \theta_e, \phi_e) = \frac{\delta L(\theta_e, \phi_e)}{\delta E(\theta_i, \phi_i)}$$

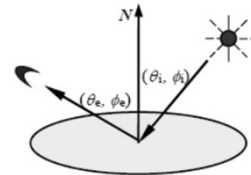


图 8.2.3 双向反射分布函数示意

双向反射分布函数关于入射和反射方向是对称的

第8讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第10页

8.2.1 景物亮度和图象亮度

常见入射和观测方式

	漫反射 d_e	定向 (θ_e, ϕ_e) 观测
漫入射 d_i	$\rho(d_i; d_e)$	$\rho(d_i; \theta_e, \phi_e)$
定向 (θ_i, ϕ_i) 入射	$\rho(\theta_i, \phi_i; d_e)$	$\rho(\theta_i, \phi_i; \theta_e, \phi_e)$

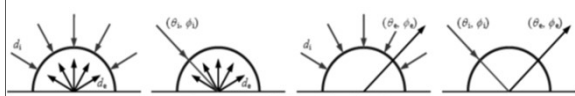


图 8.2.5 四种基本的入射和观测方式

第8讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第11页

8.2.2 表面反射特性和亮度

两种极端的情况： \Rightarrow

- 理想散射表面：朗伯（Lambertian）表面或漫反射表面，从所有观察方向看它都是同样亮的（与观察线和表面法线的夹角无关），并且它完全不吸收地反射所有入射光

$$\int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\pi/2} f(\theta_i, \phi_i; \theta_e, \phi_e) E(\theta_i, \phi_i) \cos \theta_i \sin \theta_e \cos \theta_e d\theta_e d\phi_e = E(\theta_i, \phi_i) \cos \theta_i$$

总照度

亮度积分

$$f(\theta_i, \phi_i; \theta_e, \phi_e) = 1/\pi \Rightarrow L = E/\pi$$

第8讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第12页

8.2.2 表面反射特性和亮度

2、理想镜面反射表面：

- 反射光的波长仅取决于光源而与反射面的颜色无关
- 将所有从 (θ_i, ϕ_i) 方向射入的光全部反射到 (θ_e, ϕ_e) 方向上

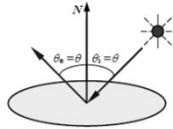


图 8.2.7 理想镜面反射表面示意图

$$L(\theta_e, \phi_e) = \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{\delta(\theta_e - \theta_i) \delta(\phi_e - \phi_i - \pi)}{\sin \theta_i \cos \theta_i} E(\theta_i, \phi_i) \sin \theta_i \cos \theta_i d\theta_i d\phi_i$$

$$= E(\theta_e, \phi_e - \pi) \quad \text{极角不变, 但方位角转了 } 180^\circ$$

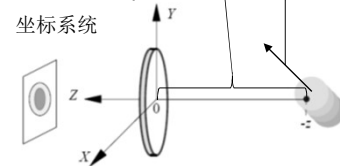
第8讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第13页

8.2.3 景物表面朝向

- 目标表面位置可用与镜头平面（与象平面平行）正交的距离（长度） $|z|$ 来描述
- 用切面的朝向来表示表面在该点的朝向
- 切面的朝向可用表面的法线矢量来指示



第8讲

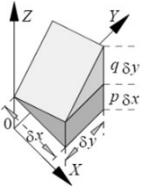
章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第14页

8.2.3 景物表面朝向

- 用偏微分参数化表面朝向 ($p = \partial z / \partial x, q = \partial z / \partial y$)
- 沿X轴方向的矢量为 $[\delta x \ 0 \ p\delta x]^T$, $r_x = [1 \ 0 \ p]^T$
- 沿Y轴方向的矢量为 $[0 \ \delta y \ q\delta y]^T$, $r_y = [0 \ 1 \ q]^T$

表面
梯度
(p, q)



$$N = r_x \times r_y \quad \text{外积}$$

$$= [1 \ 0 \ p]^T \times [0 \ 1 \ q]^T$$

$$= [-p \ -q \ 1]^T$$

• 法线指向观察者，取负号

$$\hat{N} = \frac{N}{|N|} = \frac{[-p \ -q \ 1]^T}{\sqrt{1+p^2+q^2}} \quad \text{单位矢量}$$

第8讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第15页

8.2.3 景物表面朝向

计算目标表面法线和镜头方向之间的夹角 θ_e

设目标相当接近光轴，则从目标到镜头的单位观察矢量可认为是 $[0 \ 0 \ 1]^T$ ，点积：

$$\hat{N} \cdot \hat{r} = \cos \theta_e = \frac{1}{\sqrt{1+p^2+q^2}}$$

当光源与目标的距离比目标本身的线度大很多时，表面朝向和光源射出的光线是正交的

如果目标表面的法线可用 $[-p_s \ -q_s \ 1]^T$ 表示，则光源光线的方向可用梯度 (p_s, q_s) 来指示

第8讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第16页

8.2.4 反射图和亮度约束方程

点光源照射一个朗伯表面

$$L = \frac{1}{\pi} E \cos \theta_i \quad \theta_i \geq 0$$

表面法线矢量 $[-p \ -q \ 1]^T$
指向光源矢量 $[-p_s \ -q_s \ 1]^T$

$$\cos \theta_i = \frac{1 + p_s p + q_s q}{\sqrt{1+p^2+q^2} \sqrt{1+p_s^2+q_s^2}}$$

将景物亮度与表面朝向关系的函数 $R(p, q)$ 作为梯度 (p, q) 的函数以等值线形式画出而得到的图称为反射图

$$R(p, q) = \frac{1 + p_s p + q_s q}{\sqrt{1+p^2+q^2} \sqrt{1+p_s^2+q_s^2}} = C$$

第8讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第17页

8.2.4 反射图和亮度约束方程

图象亮度约束方程

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

通过归一化将比例系数定成单位值

- 照度 $E(x, y)$ 正比于灰度 $I(x, y)$
- 在图象中 (x, y) 处像素的灰度 $I(x, y)$ 取决于该像素由 (p, q) 所表达的反射特性 $R(p, q)$
- 图象平面 XY 中任意一个位置 (x, y) 的亮度与梯度空间 PQ 表达的采样单元取向 (p, q) 的联系

第8讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第18页

8.2.4 反射图和亮度约束方程

朗伯表面的球体

(观察者在点源处)

$$R(p, q) = \frac{1}{\sqrt{1+p^2+q^2}}$$

中心在光轴上,
则表面方程为

$$z = z_0 + \sqrt{r^2 - (x^2 + y^2)}$$

$$x^2 + y^2 \leq r^2$$

$$E(x, y) = R(p, q) = \sqrt{1 - \frac{x^2 + y^2}{r^2}}$$

亮度从在图象中心的
最大值逐步减到
在图象边缘的零值

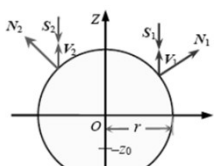


图 8.2.12 球面亮度随位置变化

第8讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第19页

8.2.5 光度立体学求解

恢复出原来成像物体的形状

- 从由 p 和 q 所确定的表面朝向到由反射图 $R(p, q)$ 所确定的亮度间的对应关系是唯一的
- 但反过来却不一定。实际中常有无穷多个表面朝向可给出相同的亮度, 在反射图上这些对应相同亮度的朝向是由等值线连起来的
- 对一个朗伯表面来说, 只有当 $(p, q) = (p_s, q_s)$ 时才有 $R(p, q) = 1$, 所以此时给定表面亮度就可唯一地确定表面朝向 (但这是一种特殊情况)

第8讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第20页

8.2.5 光度立体学求解

一般情况:

- 在每个空间位置亮度只有一个自由度 (亮度值), 而朝向有两个自由度 (梯度值)
- 从图象亮度到表面朝向的对应并不是唯一的

解决方案:

采集两幅图象 (不同
光源) 可建立两个方程

$$R_1(p, q) = E_1 \quad \text{和} \quad R_2(p, q) = E_2$$

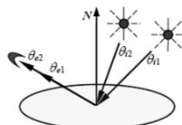


图 8.2.13 光度立体学中照明情况的变化

第8讲

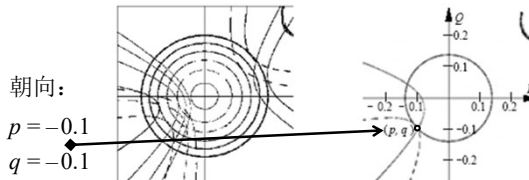
章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第21页

8.2.5 光度立体学求解

用三幅图象恢复反射系数 {例8.2.7}

将光源放在空间三个位置: $(-3.4, -0.8, -1.0)$, $(0.0, 0.0, -1.0)$, $(-4.7, -3.9, -1.0)$, 采集到三幅图象
反射系数 $r = 0.8$ 时, 三组曲线交于同一点



第8讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第22页

8.3 从运动求取结构

8.3.1 光流和运动场

8.3.2 光流方程求解

8.3.3 光流与表面取向

8.3.4 光流与相对深度

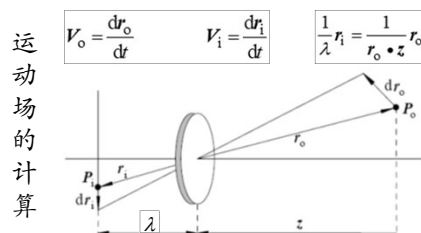
第8讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第23页

8.3.1 光流和运动场

运动可用运动场描述, 运动场由图象中
每个点的运动 (速度) 矢量构成



第8讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第24页

8.3.1 光流和运动场

光流（图象流）：

当摄像机与景物目标间有相对运动时所观察到的亮度模式的运动（P.193）

➤ 光流有三个要素：

- (1) 运动（速度场），光流形成的必要条件
- (2) 带光学特性的部位（如特定灰度的象素点等），它能携带信息
- (3) 成象投影（从场景到图象平面），因而能被观察到

第8讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

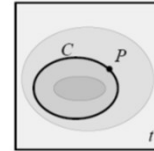
第25页

8.3.1 光流和运动场

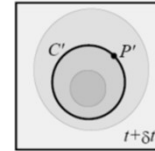
图象间对应点的确定

假设在时刻 t 有一个图象点 P 具有亮度 E 。那么在 $t+dt$ 时， P 对应哪个图象点 P' 呢？（孔径问题）

可确定
曲线 C
与曲线
 C' 对应



不能确定
点 P
与点 P'
相对应



仅靠变化图象中的局部信息并不能唯一地确定光流

第8讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第26页

8.3.2 光流方程求解

光流方程（推导见中册）

$$f_x u + f_y v + f_t = 0$$

其中 f_x , f_y 和 f_t 分别表示图象中象素灰度沿 X , Y , T 方向的梯度， u 和 v 分别是水平和垂直速度

$$(f_x, f_y) \cdot (u, v) = -f_t$$

如果一个固定的观察者去观察一幅活动的场景，那么所得图象上某一点灰度的（一阶）时间变化率是场景亮度变化率与该点运动速度的乘积

第8讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第27页

8.3.2 光流方程求解

1、光流计算：刚体运动

$$u_0 = -f_t / f_x \quad v_0 = -f_t / f_y \quad \theta = \arctan(f_x / f_y)$$

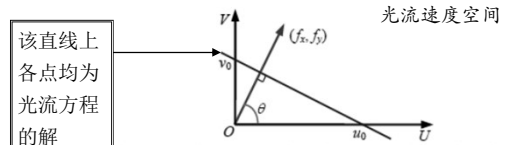


图8.3.4 满足光流约束方程的 u 和 v 值在一条直线上

仅一个光流方程并不足以唯一地确定 u 和 v 两个量

第8讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第28页

8.3.2 光流方程求解

1、光流计算：刚体运动

将所研究目标看作无变形刚体
光流速度的空间变化率应为零

$$\begin{aligned} \text{约束条件} \quad (\nabla u)^2 &= \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 = 0 \\ (\nabla v)^2 &= \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 = 0 \end{aligned} \quad \begin{aligned} &\{P.195 \\ &\text{迭代求解}\} \end{aligned}$$

$$\varepsilon(x, y) = \sum_x \sum_y \left\{ (f_x u + f_y v + f_t)^2 + \lambda^2 [(\nabla u)^2 + (\nabla v)^2] \right\}$$

第8讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第29页

8.3.2 光流方程求解

2、光流计算：平滑运动

- 平滑条件：在图象的大部分地方运动场变化一般比较缓慢稳定
- 最小化一个与平滑相偏离的测度（光流速度梯度之幅度平方的积分）

$$e_s + \lambda e_c \quad \begin{cases} e_s = \iint [(u_x^2 + u_y^2) + (v_x^2 + v_y^2)] dx dy \\ e_c = \iint [f_x u + f_y v + f_t]^2 dx dy \end{cases} \quad \begin{aligned} &\text{最小化光流约} \\ &\text{束方程的误差} \end{aligned}$$

第8讲

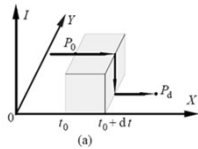
章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第30页

8.3.2 光流方程求解

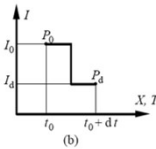
3、光流计算：灰度突变

- 从路径看灰度变化
- 从时间看灰度变化



$$I_d = \int_{t_0}^{t_0+dt} \nabla f \cdot d\mathbf{I} + I_0$$

$$I_0 = \int_{t_0}^{t_0+dt} f_t dt + I_d$$



上面两个积分限应当对应，则仍得到光流方程

第8讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第31页

8.3.2 光流方程求解

4、光流计算：基于高阶梯度

- 考虑图像本身在灰度上的连续性（即考虑图像灰度的高阶梯度），泰勒级数展开取二阶

$$f_x = \frac{\partial f(x+dx, y+dy, t)}{\partial x} = \frac{\partial f(x, y, t)}{\partial x} + \frac{\partial^2 f(x, y, t)}{\partial x^2} dx + \frac{\partial^2 f(x, y, t)}{\partial x \partial y} dy$$

$$f_y = \frac{\partial f(x+dx, y+dy, t)}{\partial y} = \frac{\partial f(x, y, t)}{\partial y} + \frac{\partial^2 f(x, y, t)}{\partial y \partial x} dx + \frac{\partial^2 f(x, y, t)}{\partial y^2} dy$$

$$f_t = \frac{\partial f(x+dx, y+dy, t)}{\partial t} = \frac{\partial f(x, y, t)}{\partial t} + \frac{\partial^2 f(x, y, t)}{\partial t \partial x} dx + \frac{\partial^2 f(x, y, t)}{\partial t \partial y} dy$$

第8讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第32页

8.3.2 光流方程求解

4、光流计算：基于高阶梯度

$$u(x+dx, y+dy, t) = u(x, y, t) + u_x(x, y, t)dx + u_y(x, y, t)dy$$

$$v(x+dx, y+dy, t) = v(x, y, t) + v_x(x, y, t)dx + v_y(x, y, t)dy$$

将上5式代入光流约束方程

$$(f_x u + f_y v + f_t) + (f_{xx} u + f_{yx} v + f_x u_x + f_y v_x + f_t) dx + (f_{xy} u + f_{yy} v + f_x u_y + f_y v_y + f_t) dy + (f_{xx} u_x + f_{yx} v_x) dx^2 + (f_{xy} u_x + f_{xx} u_y + f_{yy} v_x + f_{xy} v_y) dx dy + (f_{xy} u_y + f_{yy} v_y) dy^2 = 0$$

第8讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第33页

8.3.2 光流方程求解

4、光流计算：基于高阶梯度

$$f_x u + f_y v + f_t = 0$$

各项独立

$$f_{xx} u + f_{yx} v + f_x u_x + f_y v_x + f_t = 0$$

$$f_{xy} u + f_{yy} v + f_x u_y + f_y v_y + f_t = 0$$

$$f_{xx} u_x + f_{yx} v_x = 0$$

$$f_{xy} u_x + f_{xx} u_y + f_{yy} v_x + f_{xy} v_y = 0$$

$$f_{xx} u_y + f_{yy} v_y = 0$$

光流场的空间变化率为零
 $u_x \approx 0$
 $u_y \approx 0$
 $v_x \approx 0$
 $v_y \approx 0$

第8讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第34页

8.3.3 光流与表面取向

光流包含了场景结构的信息 \Rightarrow 表面朝向

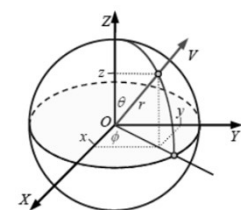


图 8.3.8 球面坐标与直角坐标

$$x = r \sin \theta \cos \phi$$

$$y = r \sin \theta \sin \phi$$

$$z = r \cos \theta$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

$$\theta = \arccos(z/r)$$

$$\phi = \arctan(y/x)$$

第8讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第35页

8.3.3 光流与表面取向

任意运动点的光流

- $(\delta, \varepsilon) = (d\phi/dt, d\theta/dt)$ 为该点在图像球坐标系中沿 ϕ 和 θ 方向的角速度

$$\delta = \frac{v \cos \phi - u \sin \phi}{r \sin \theta}$$

$$\varepsilon = \frac{(ur \sin \theta \cos \phi + vr \sin \theta \sin \phi + wr \cos \theta) \cos \theta - rw}{r^2 \sin \theta}$$

- 观察者以速度 S 沿 Z 轴（正向）运动有： $u = 0, v = 0, w = -S$

$$\delta = 0$$

$$\varepsilon = S \sin \theta / r$$

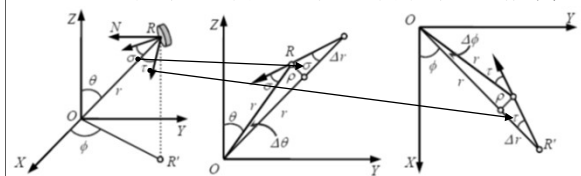
第8讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第36页

8.3.3 光流与表面取向

- 观察者在 O ，沿视线 OR 观察景物表面面元
- 将面元法线矢量 N 分解到两个垂直的方向上
 - σ : 在 ZR 平面中与 OR 的夹角
 - τ : 在与 ZR 平面垂直的 XY 平面中与 OR' 的夹角



第8讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第37页

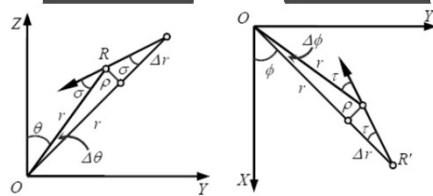
8.3.3 光流与表面取向

确定 σ 和 τ

$$\rho/r = \tan \Delta\theta \approx \Delta\theta, \quad \rho/\Delta r = \tan \sigma$$

$$r\Delta\theta = \Delta r \tan \sigma$$

$$r\Delta\phi = \Delta r \tan \tau$$



第8讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第38页

8.3.3 光流与表面取向

取极限

$$r\Delta\theta = \tan \sigma \Delta r$$

$$r\Delta\phi = \tan \tau \Delta r$$

$$\cot \sigma = \left[\frac{1}{r} \right] \frac{\partial r}{\partial \theta}$$

$$\cot \tau = \left[\frac{1}{r} \right] \frac{\partial r}{\partial \phi}$$

先确定 r ，再求偏导

$$r = \frac{S \sin \theta}{\varepsilon(\phi, \theta)}$$

$$\frac{\partial r}{\partial \phi} = S \sin \theta \frac{-1}{\varepsilon^2} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \phi}$$

求取 σ 和 τ

$$\frac{\partial r}{\partial \theta} = S \left(\frac{\cos \theta}{\varepsilon} - \frac{\sin \theta}{\varepsilon^2} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \theta} \right)$$

$$\sigma = \arccot \left\{ \cot \theta - \frac{\partial(\ln \varepsilon)}{\partial \theta} \right\}$$

$$\tau = \arccot \left[-\frac{\partial(\ln \varepsilon)}{\partial \phi} \right]$$

第8讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第39页

8.3.4 光流与相对深度

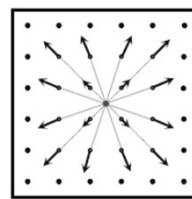
利用光流对运动进行分析，可获得摄像机和目标间在世界坐标 X, Y, Z 方向的互速度 u, v, w

一个点在 t_0 时坐标为 X_0, Y_0, Z_0 ，则其图象坐标

$$(x, y) = \left(\frac{X_0 + ut}{Z_0 + wt}, \frac{Y_0 + vt}{Z_0 + wt} \right)$$

该点与扩展焦点的距离为

$D(t)$ ，该点的速度为 $V(t)$ ，它们与光流参数的联系 $\frac{D(t)}{V(t)} = \frac{Z(t)}{w(t)}$



第8讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第40页

8.3.4 光流与相对深度

即距离函数

$$Z(t) = \frac{w(t)D(t)}{V(t)}$$

考虑图象上其他以相同速度 w 运动的点

$$w(t) = \frac{Z(t)V(t)}{D(t)} = \frac{Z'(t)V'(t)}{D'(t)}$$

相对距离

$$Z'(t) = \frac{Z(t)V'(t)D'(t)}{D(t)V(t)}$$

如能确定一个参考点，就可获得绝对距离

第8讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第41页

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/

第8讲

章毓晋 (TH-EE-IE) ZHANG YU JIN

第42页