

## 第9章 三维重建



计算机科学与技术学院

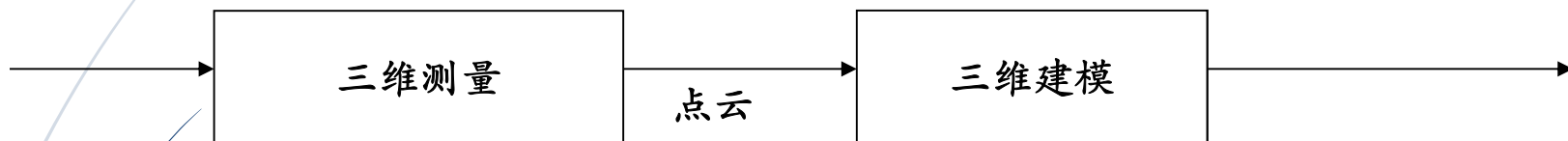
# 本次课程内容

1. 三维重建应用实例
2. 三维立体表达方法
3. 三维立体创建步骤
4. 三维重建方法



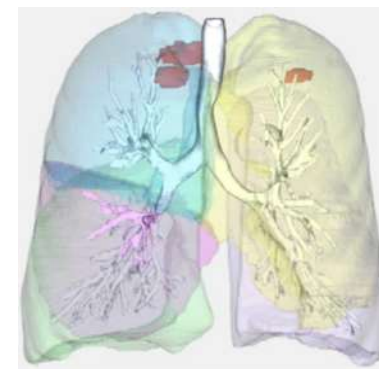
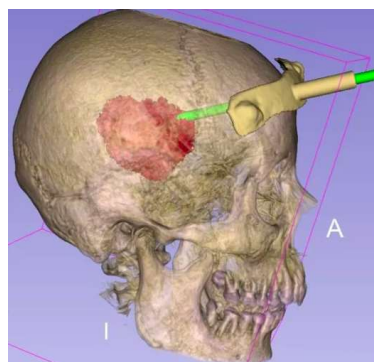
# 1. 三维重建应用实例1：三维场景建模

◆ 形成物体(object)或场景(scene)的三维表示



## 三维重建应用实例2：医学辅助诊断

- ◆ 人体三维重建技术是以医学和信息工程学为主要特征，虚拟现实环境下重建人体的三维解剖结构
- ◆ 了解病灶与周围组织的三维几何关系，医学图像的三维可视化技术：**CT、MRI**等，提供信息可视化显示，其利用计算机重建三维结构



## 三维重建应用实例3：军事及特殊地形重建

- ◆ 实时获取生成三维环境，有助于实现无人装备的自动导航
- ◆ 三维虚拟战场构建：对目标环境内建筑物、地形、植被以及其他地貌的建模。



## 2. 三维立体表达方法

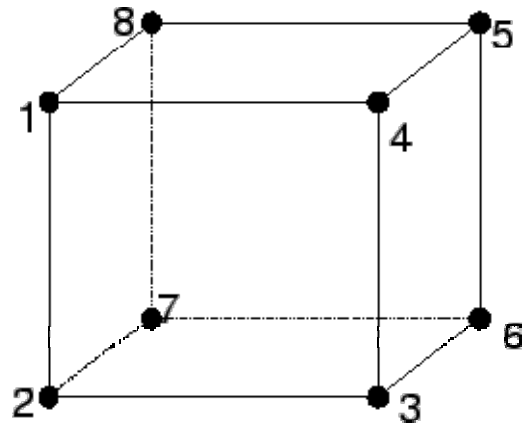
### ◆ 常见形式

- 多边形网面
- 曲面片
- 张量积曲面
- 超二次曲面
- 空间点云

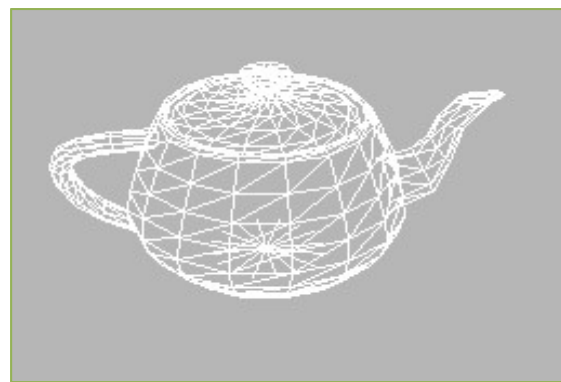
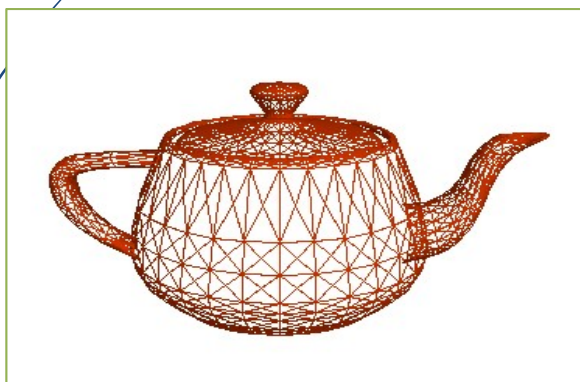
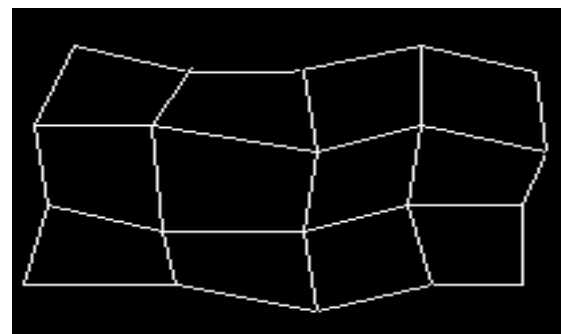


## (1) 多边形网面模型 (polygon mesh model)

- ◆ 用平面多边形 (也称平面片, planar patch) 组成多边形网面模型, 表示物体三维形状



## 三角形网面和四边形网面





## 多边形网面数据结构

### ◆ 顶点坐标表示

- 各个平面表示为顶点三维坐标的集合

问题：顶点重复出现

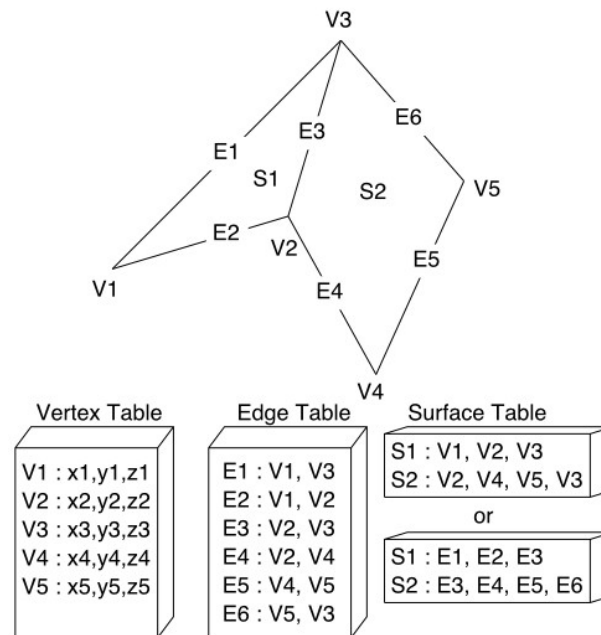
### ◆ 顶点序列表示

- 顶点按序编号，平面中顶点用编号表示

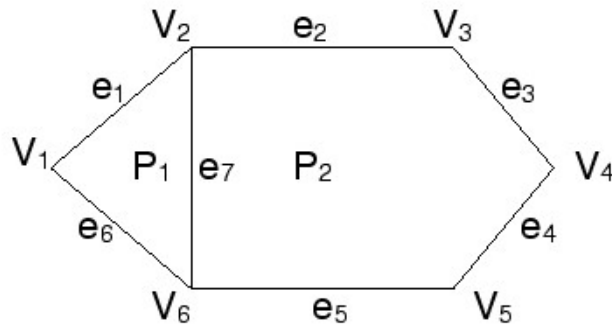
问题：边重复出现，且不能明显表示相邻平面的边界



## 多边形表表示



## 多边形网面表例



Vertex List =  $\{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6\}$

$edge_7 = \{v_2, v_6, P_1, P_2\}$

$edge_1 = \{v_1, v_2, P_1, \lambda\}$

$face_1 = \{e_1, e_7, e_6\}$



## (2) 曲面片

用双多项式表示曲面

平面:  $z=a_0+a_1x+a_2y$

双线性曲面片:  $z=a_0+a_1x+a_2y+a_3xy$

双二次曲面片:  $z=a_0+a_1x+a_2y+a_3xy+a_4x^2+a_5y^2$

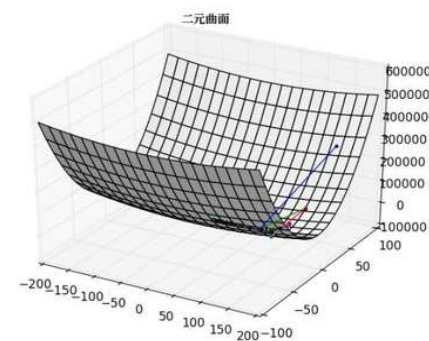
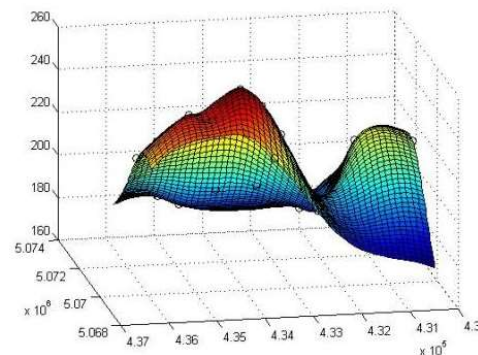
双三次曲面片:  $z=a_0+a_1x+a_2y+a_3xy+a_4x^2+a_5y^2$

$+a_6x^3+a_7x^2y+a_8xy^2+a_9y^3$

双四次曲面片:  $z=a_0+a_1x+a_2y+a_3xy+a_4x^2+a_5y^2$

$+a_6x^3+a_7x^2y+a_8xy^2+a_9y^3$

$+a_{10}x^4+a_{11}x^3y+a_{12}x^2y^2+a_{13}xy^3+a_{14}y^4$



### (3) 张量积曲面

#### ◆ 复杂曲面的参数多项式

- 张量积曲面由两条曲线合成，可以认为是两曲线的积：一条曲线以 $u$ 为坐标，另一条以 $v$ 为坐标.
- 任何平行于坐标轴的平面和张量积三次多项式曲面交线都是三次多项式曲线

$$\mathbf{p}(u, v) = \begin{bmatrix} u^3 & u^2 & u & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{a}_0 \\ \mathbf{a}_1 \\ \mathbf{a}_2 \\ \mathbf{a}_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{b}_0 & \mathbf{b}_1 & \mathbf{b}_2 & \mathbf{b}_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v^3 \\ v^2 \\ v \\ 1 \end{bmatrix}$$



## (4) 超二次曲面

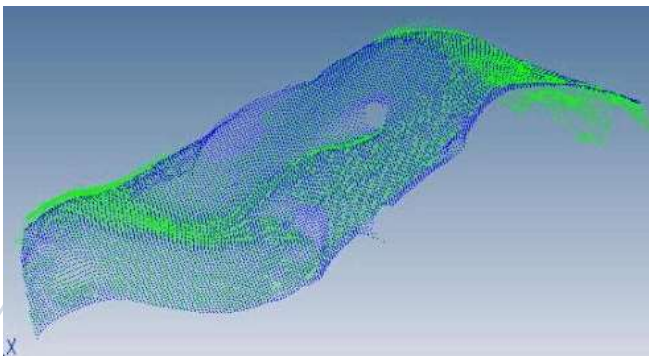
- ◆ 具有参数的二次多项式，通过调整参数可以改变物体的形状

例：超椭球

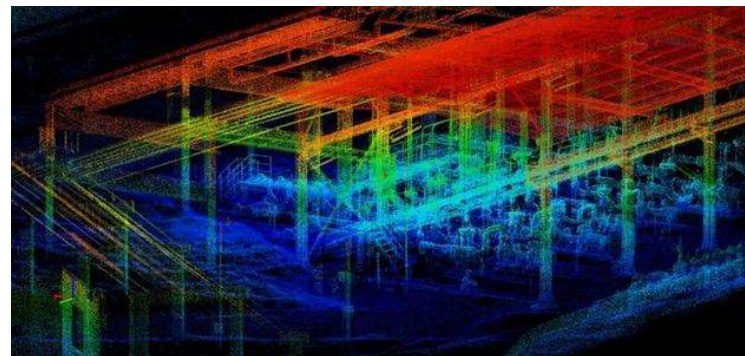
$$\left[ \left( \frac{x}{r_x} \right)^{\frac{2}{s_2}} + \left( \frac{y}{r_y} \right)^{\frac{2}{s_2}} \right]^{\frac{s_2}{s_1}} + \left( \frac{z}{r_z} \right)^{\frac{2}{s_1}} = 1$$



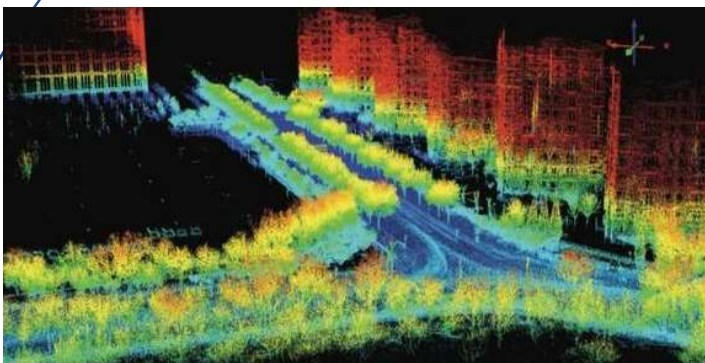
## (5) 空间点云



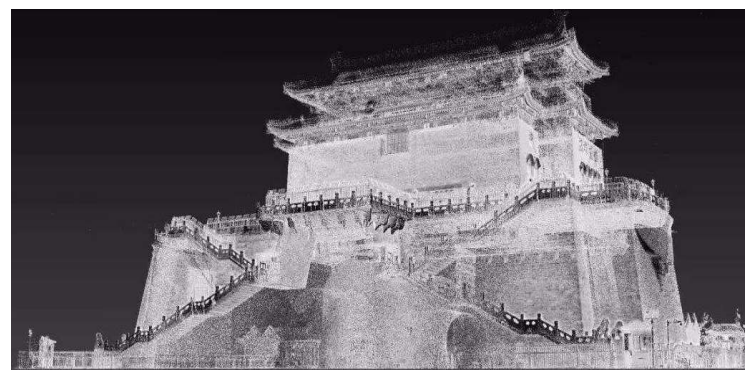
点云重建



点云数据处理



激光点云



点云模型

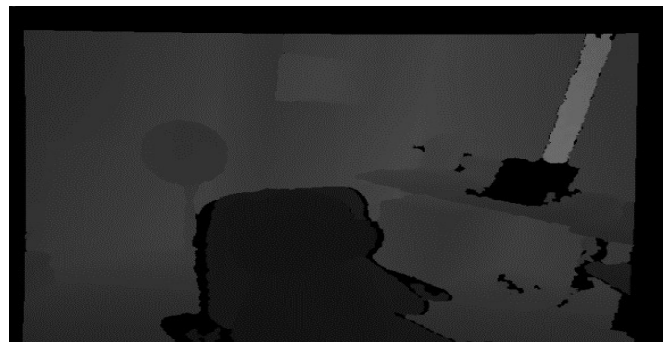
### 3. 三维立体创建基本步骤



2D RGB

3D几何 ( $x, y, z$ )

2.5D 深度点云 ( $x, y, d$ )

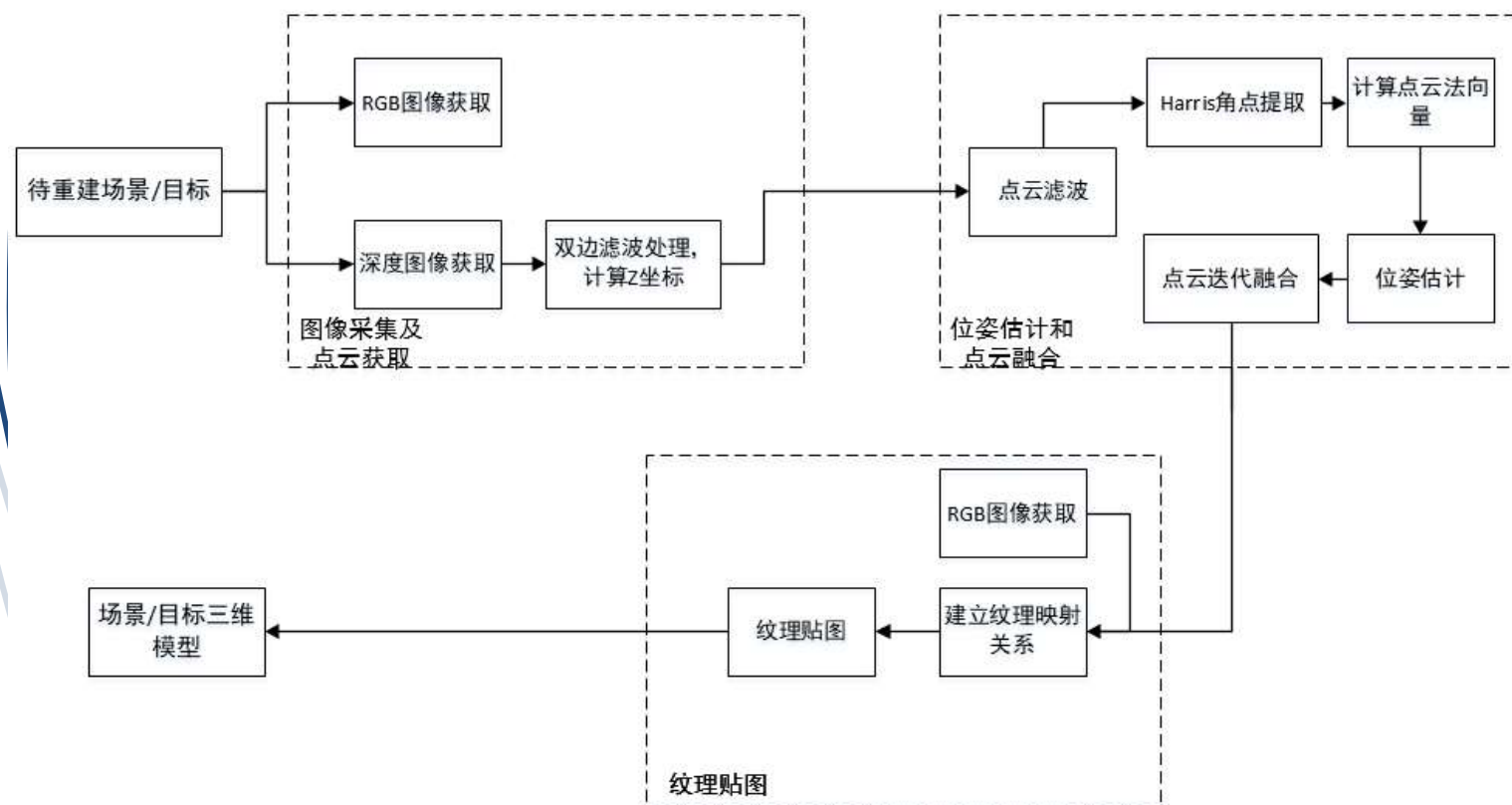


- ◆ 深度图像 (Depth map) 作为三维场景信息表达, 得到了广泛应用





## 三维立体创建实例



## 传统视觉立体创建步骤

- ◆ 计算估计得到稀疏点云（空间点）
- ◆ 如果采用视觉立体重建，原理：多视几何（至少两视图）



稀疏点云  
sparse

主要渠道：扫描，立体  
重建、结构光

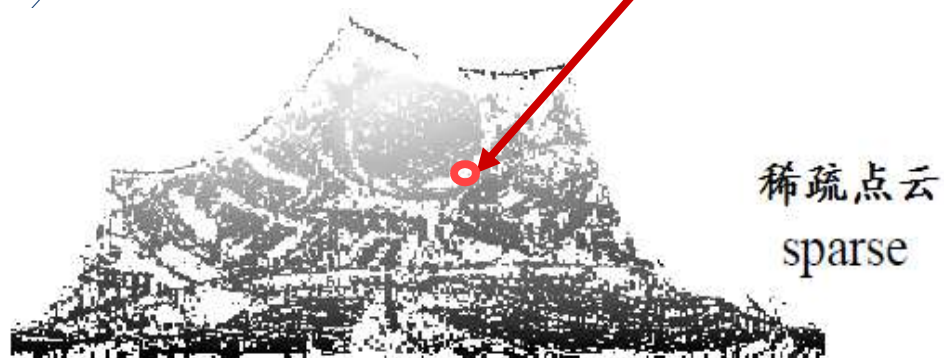


## 点云缺失问题——孔洞（空洞）

### ◆ fitting or Interpolation to 3D

空洞：没获得深度之处

解决办法：拟合、插值



## 表面拟合Surface fitting

◆ 根据深度测量值获得连续表面

### 1. 表面插值(interpolation)

通过所有测量点

### 2. 表面逼近(approximation)

不一定包含，但尽可能接近测量点

回归(regression)



## 方法1：三角形面插值

Step1: 对于图像中一点 (i, j) , 计算其图像平面坐标:

Step2: 获得深度图中包含该点的三个非共线的点

Step3: 计算三点所对应的平面

Step4: 确定 (i, j) 在该平面上的深度值

$$z_{ij} = a_0 + a_1 x_j + a_2 y_i$$

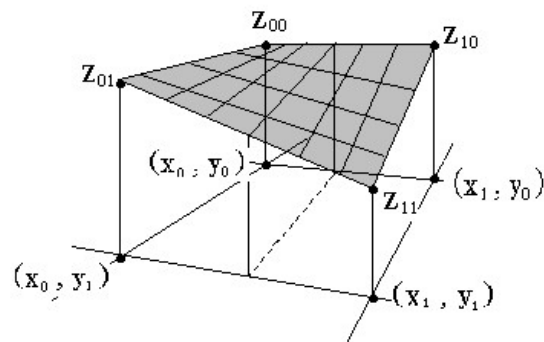


## 方法2：二元线性插值

- ◆ 用二元线性函数对曲面片建模

$$f(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy$$

- ◆ 用矩形四个顶点计算系数，代入获得深度值



## 方法3：最小中值二乘回归

◆ 用最小中值二乘准则和重采样策略实现鲁棒回归

$$\arg \min_a \{ \text{med}_{(x_i, y_i) \in N} [(z_i - f(x_i, y_i; \mathbf{a}))^2] \}$$

1. 取距离当前点最近的n个点
2. 在n个点中任取m个点，共  $C_n^m$  种组合
3. 对每一个组合，作最小中值二乘回归
4. 取各个组合中对应最小平方中值的解



## 方法4：样条回归

- ◆ 用张量积B样条对表面建模

$$f(x, y) = \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} a_{ij} B_{ij}(x, y) = \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} a_{ij} B_j(x) B_i(y)$$

- ◆ 用最小二乘法求解回归问题

$$\chi^2 = \sum_{k=0}^{N-1} (z(k) - f(x, y))^2 = \sum_{k=0}^{N-1} [z(k) - (\sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} a_{ij} B_{ij}(x, y))]^2$$





# 样条回归计算方法

1. 张量积基函数

$$B_{ij}(x, y) = B_j(x)B_i(y)$$

2. 每一个测量点对应一个包含**16**个系数（三次**B**样条）的方程
3. 用最小二乘法解线性方程组得所有系数



# 三维建模和可视化

## ◆ 三维建模过程

数据采集、过滤、孔洞填充

预处理

特征：边、点

确定拓扑

三角形网格生成

网面生成

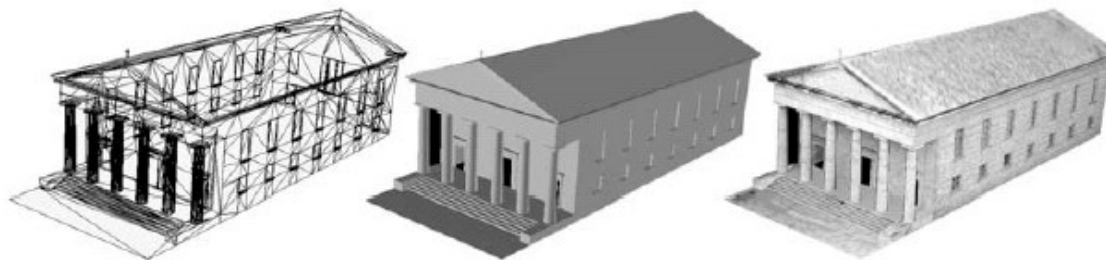
后处理，可视化

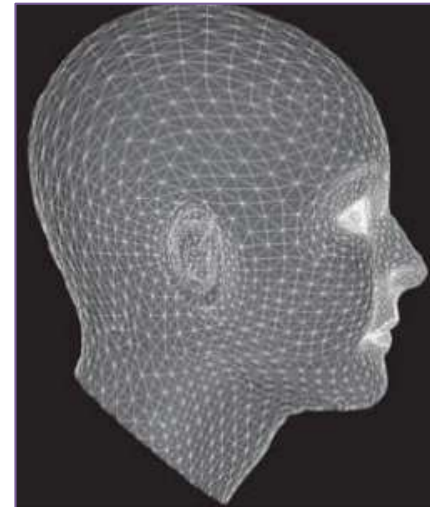
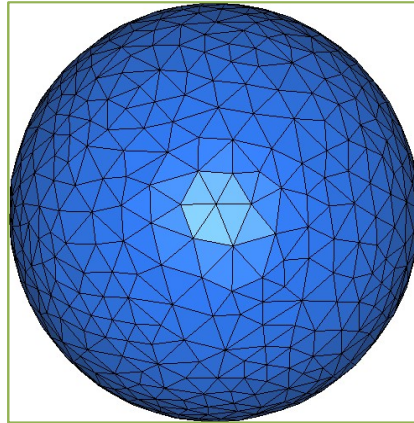
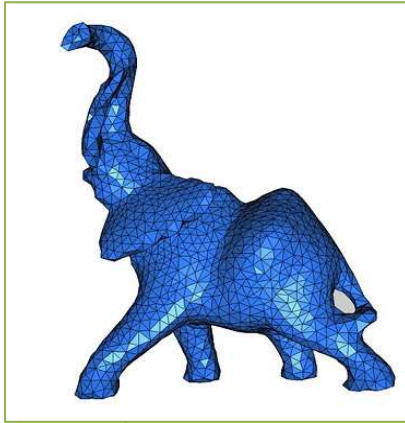


# 可视化

## ◆ 三维表现形式

1. wireframe mode
2. shaded mode
3. textured mode





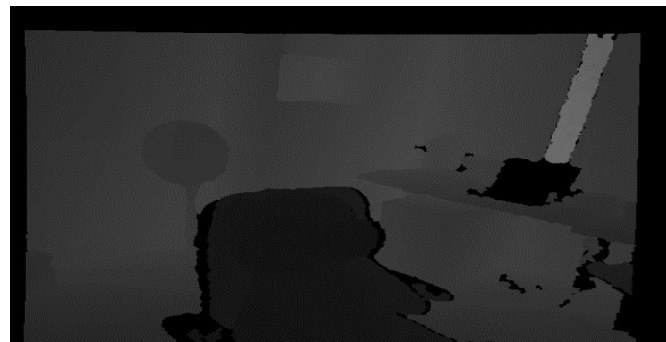
## 4. 三维重建方法



2D RGB

3D几何 ( $x, y, z$ )

2.5D 深度点云 ( $x, y, d$ )

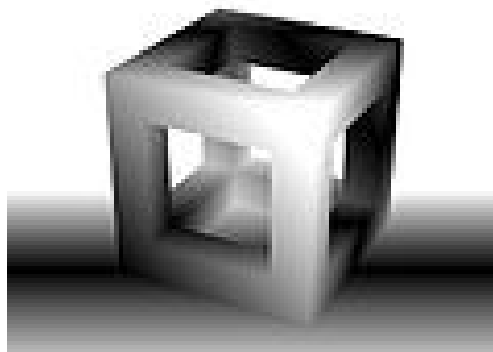


- ◆ 深度图像 (**Depth map**) 作为三维场景信息表达, 得到了广泛应用
- ◆ 深度图像的每个像素点的灰度值可用于表征场景中某一点距离摄像机的远近



## 深度映像 (Depth Map) 及点云 (Point Cloud)

- ◆ 获取场景中各点相对于摄像机的距离，是计算机视觉系统的重要任务之一
- ◆ 场景中各点相对于摄像机的距离可以用深度图 (Depth Map) 来表示



## 深度图像点云获取

- ◆ 主动式三维重建技术: 主动传感器(active sensor)->range data
- ◆ 被动式三维重建技术: 被动传感器(passive sensor)->image



## (1) 主动测距传感 (Active Sensing)

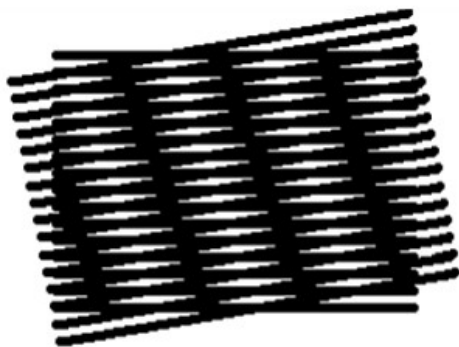
- ◆ 主动测距传感：视觉系统向场景发射能量，然后根据接收场景的反射能量获取场景三维结构。
- ◆ 光源或能量源（如激光、声波、电磁波等）发射光或能量到目标物体
- ◆ 主动测距常见方法：莫尔条纹法、飞行时间法、结构光法和三角测距法等四种方法





## 莫尔条纹法

- ◆ 莫尔条纹法起源于18世纪的法国，是一种测量方法。
- ◆ 具有精度高、实时性强的优点，但是其对光照较为敏感，抗干扰能力弱。
- ◆ 在主光栅与指示光栅的交叉重合处，因光线的透射与遮挡而产生不同的莫尔条纹，其体现待测物体表面的深度信息，再通过逆向的解调函数，实现深度信息的恢复。



两个光栅叠加的结果



## 飞行时间法

- ◆ 在光速及声速一定的前提下，通过测量发射信号与接收信号的飞行时间来获得距离
- ◆ 发射信号可以是超声波，也可以是红外线等。
- ◆ 优点：不受基线长度限制、与纹理无关、成像速度快

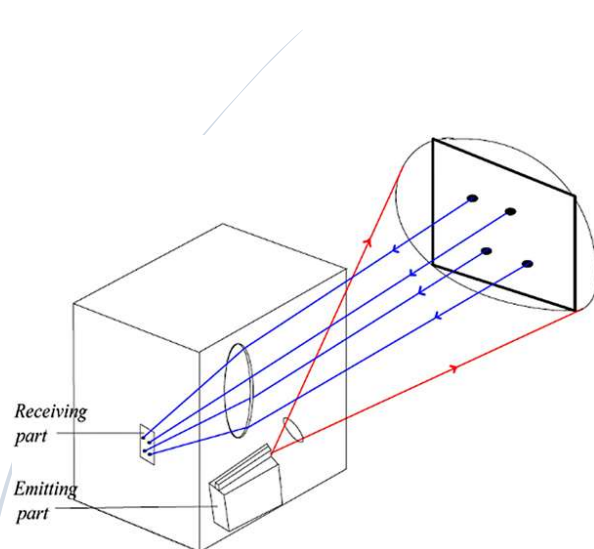


## 激光测距雷达

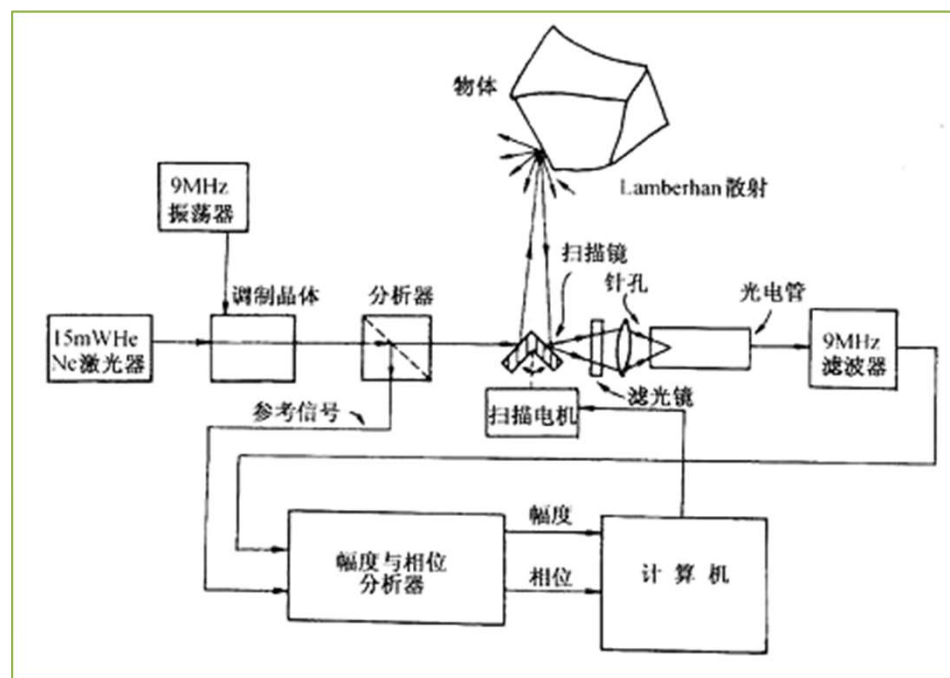
- ◆ 激光雷达：以发射激光束探测目标的位置、速度等特征量
- ◆ 向目标发射探测信号，然后将接收到的反射信号与发射信号进行比较，作进一步处理，就可获得目标的信息
- ◆ 信息：目标距离、方位、高度、速度、姿态、甚至形状等参数
- ◆ 经常对移动机器人等目标进行探测、跟踪和识别。



## 激光测距雷达



激光雷达测距示意图

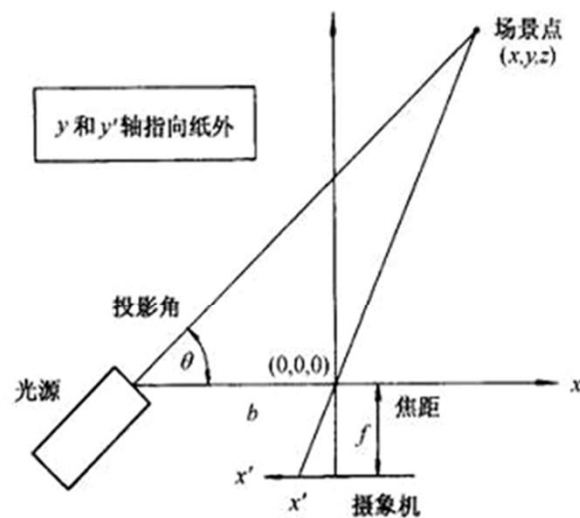


## 结构光法

- ◆ 向表面光滑无特征的物体发射光线，根据立体信息提取物体的深度
- ◆ 具体的过程包括两个步骤：
  - 利用激光投影仪向目标物体投射可编码的光束，生成特征点；
  - 然后根据投射模式与投射光的几何图案，获取生成特征点的深度信息，实现模型重建。
- ◆ 优点：实现简单且精度较高
- ◆ 结构光法的应用广泛



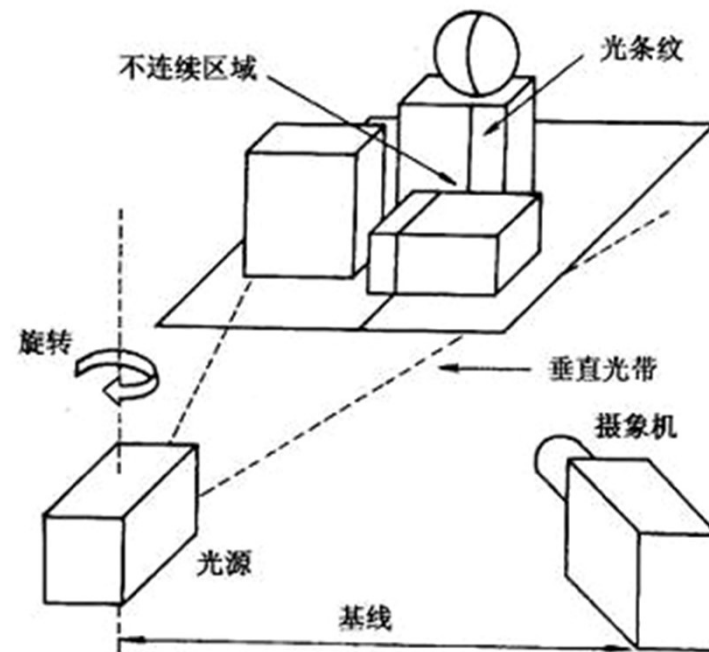
## 结构光测距



点投影测距示意图

$$[x, y, z] = \frac{b}{F \cos \theta - x'} [x', y', F]$$

一次只照明一个点。计算该点的深度，由此得到二维距离图像。



光带投影

↓  
编码光带投影

典型结构光测距原理示意图

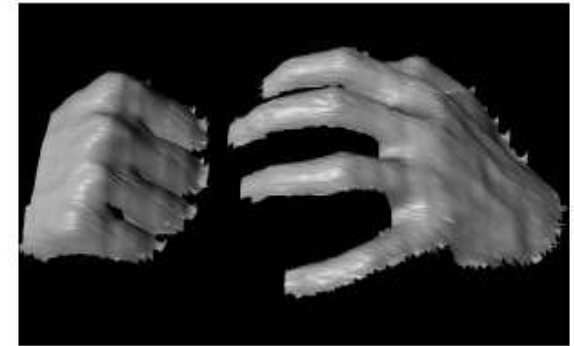
## 结构光法

- ◆ 基于结构光重建利用结构光的信息，提取图像的特征
- ◆ 对无明显特征物体进行重建，避免了图像之间的匹配
- ◆ 已有生产多种硬件设备，如
  - Prime Sensor
  - 微软公司的Kinect
  - 华硕公司的Xtion PRO LIVE等产品



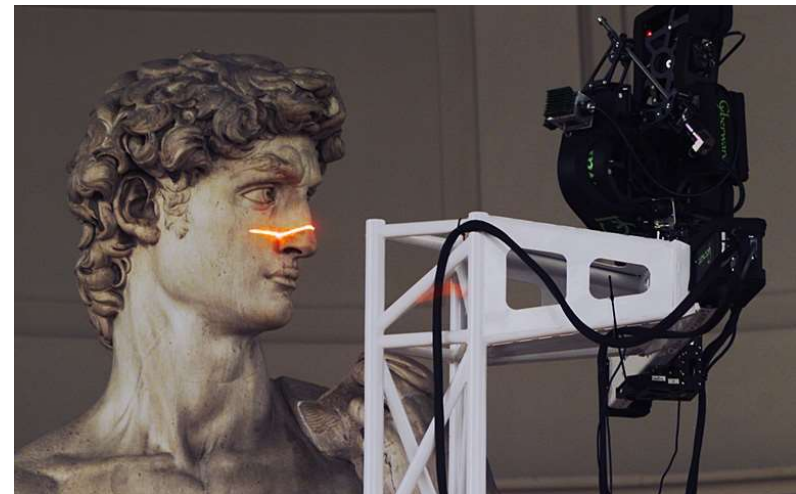
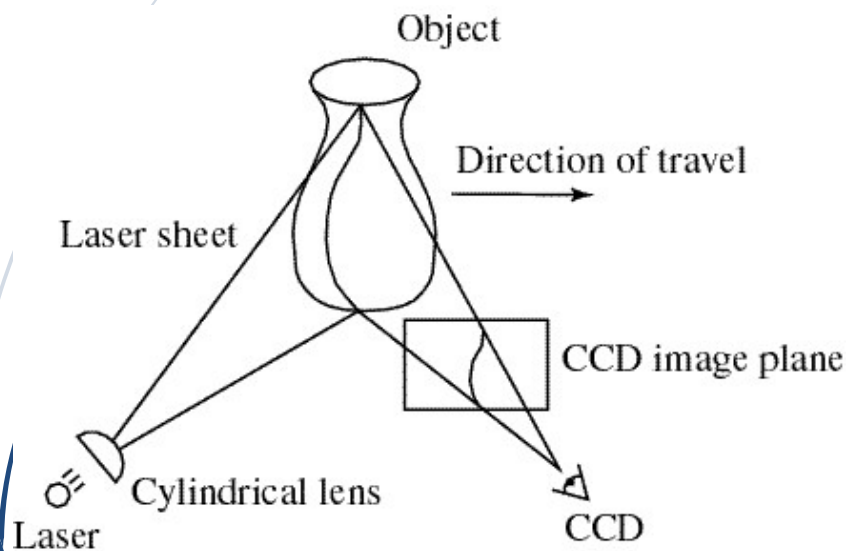


## 结构光法

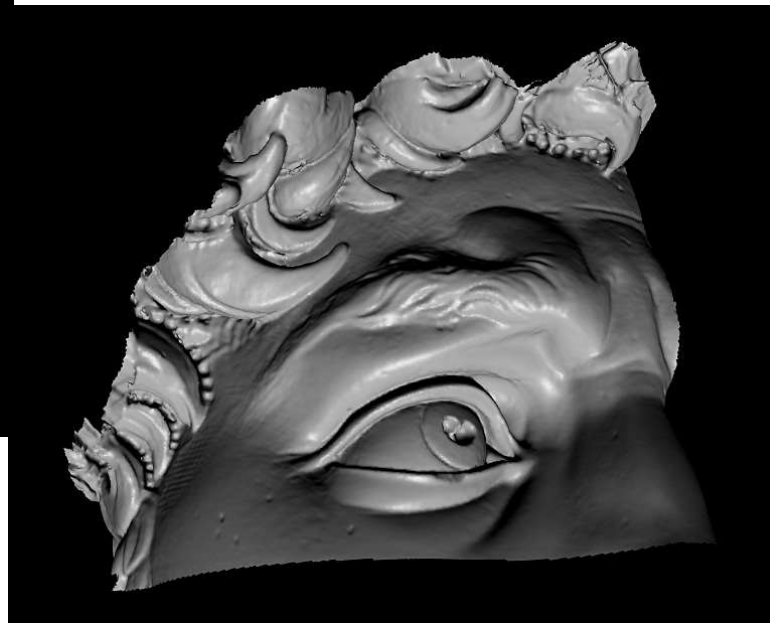
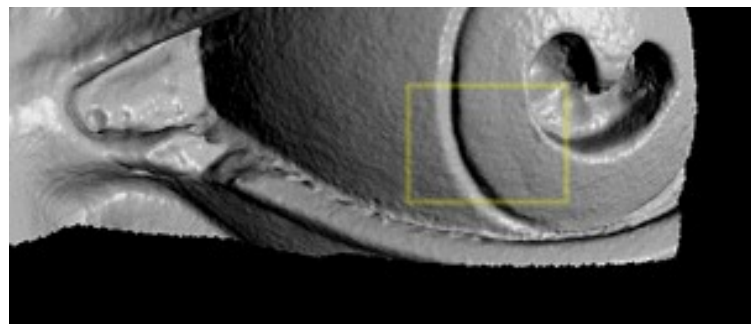
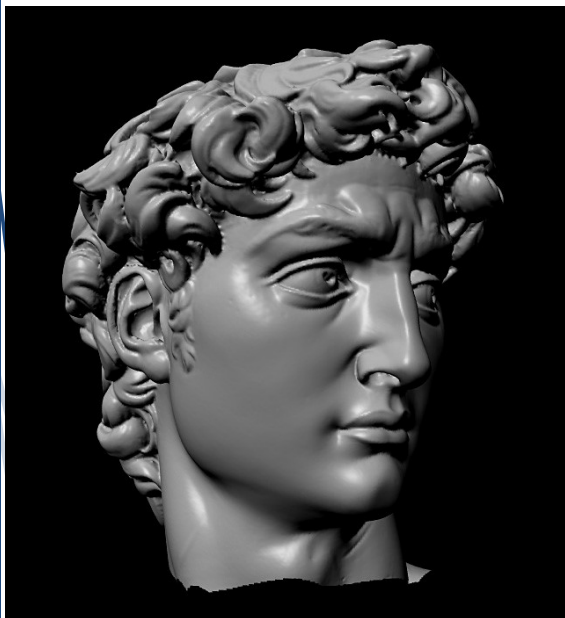


# 激光扫描

## ◆ 结构光的精细方法



## 激光扫描建模



*The Digital Michelangelo  
Project, Levoy et al.*

Source:  
S. Seitz



## 三角测距法

- ◆ 一种非接触式的测距方法
- ◆ 以三角测量原理为基础：
  - 红外设备以一定的角度向物体投射红外线，光遇到物体后发生反射并被**CCD**（**Charge-coupled Device**，电荷耦合元件）图像传感器所检测。
  - 随着目标物体的移动，获取的反射光线也会产生相应的偏移值。
  - 根据发射角度、偏移距离、中心矩值和位置关系，便能计算出发射器到物体之间的距离。
- ◆ 三角测距法在军工测量、地形勘探等领域中应用广泛



## (2) 被动测距传感

被动测距传感是指视觉系统接收来自场景发射或反射的光能量，形成有关场景光能量分布函数，即灰度图像，然后在这些图像的基础上恢复场景的深度信息

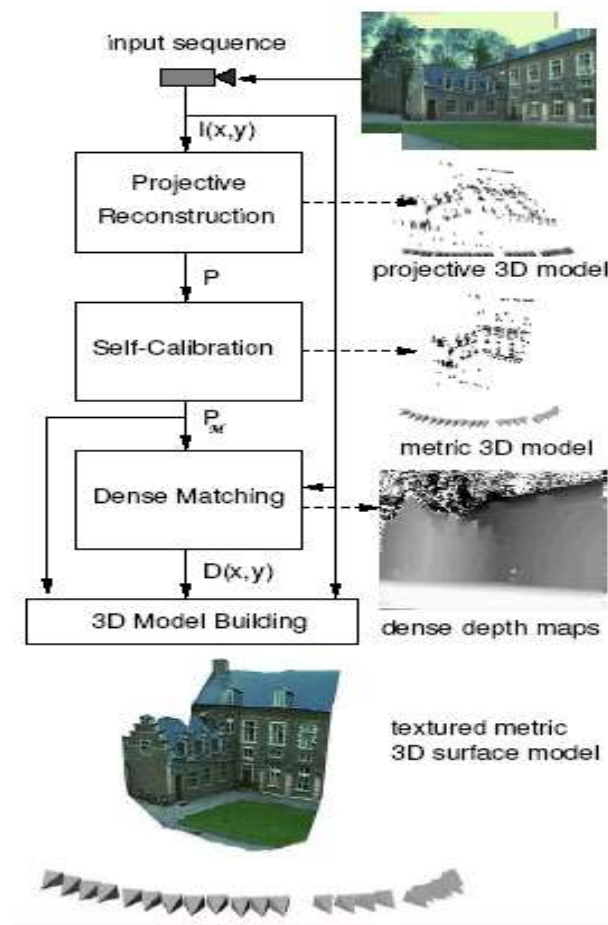
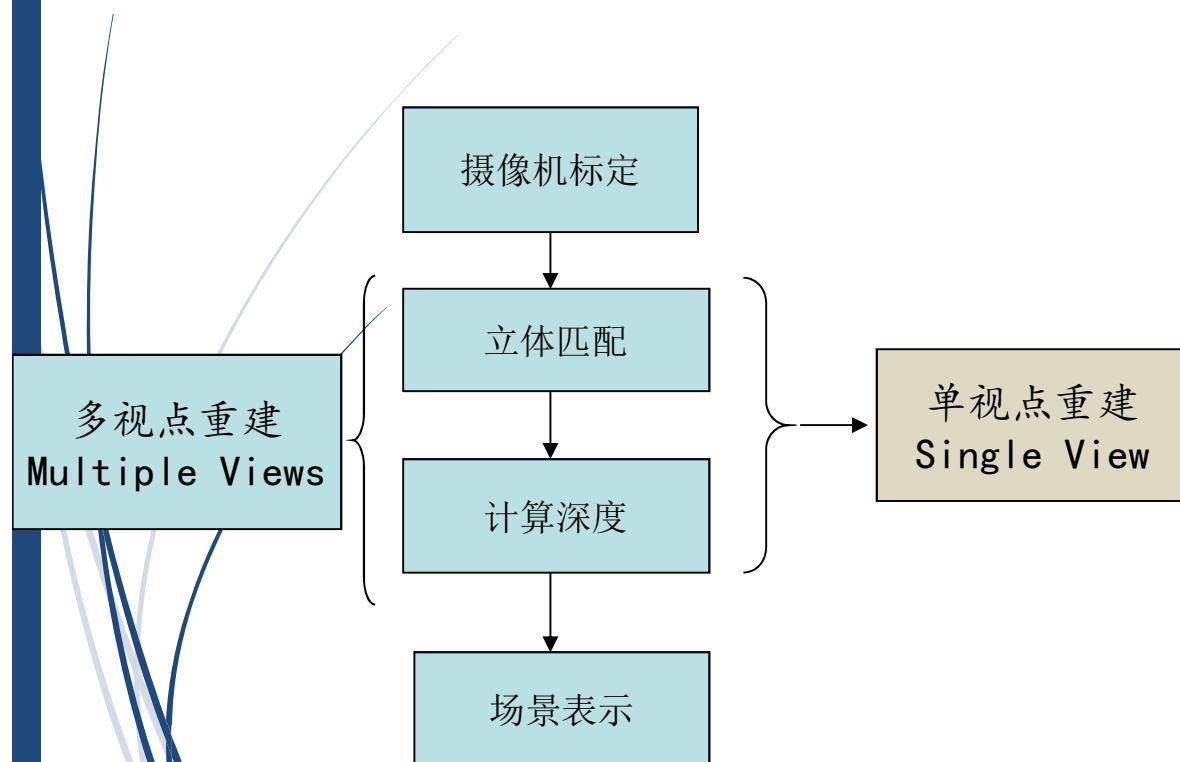


## 立体视觉法

- ◆ 立体视觉法 (Multi-View Stereo, MVS) 是常用的三维重建方法。
- ◆ 主要包括:
  - 直接利用测距器获取程距信息
  - 通过图像推测三维信息
  - 不同视点上的两幅或多幅图像恢复三维信息



## 基于Depth map的三维测量

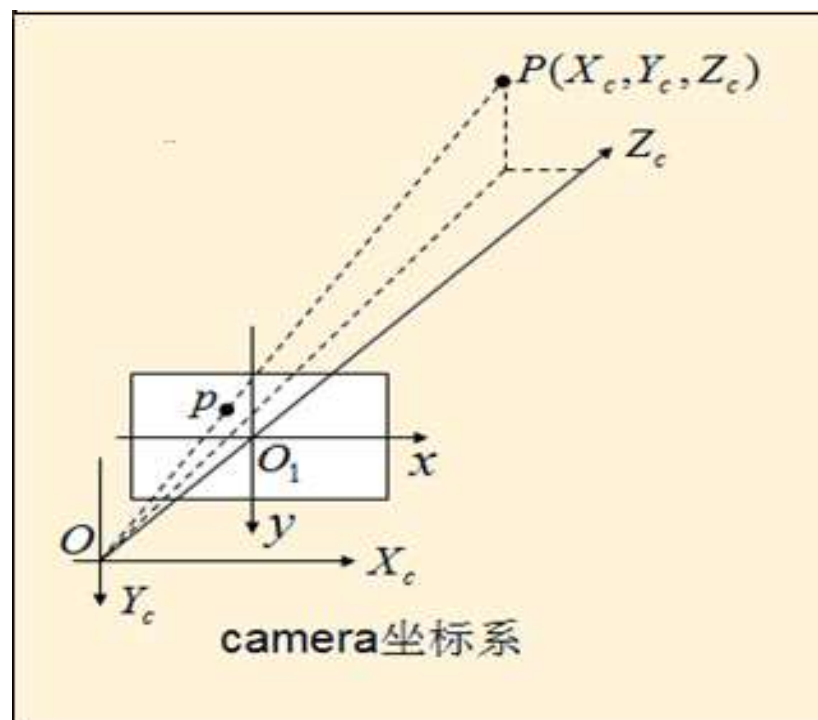




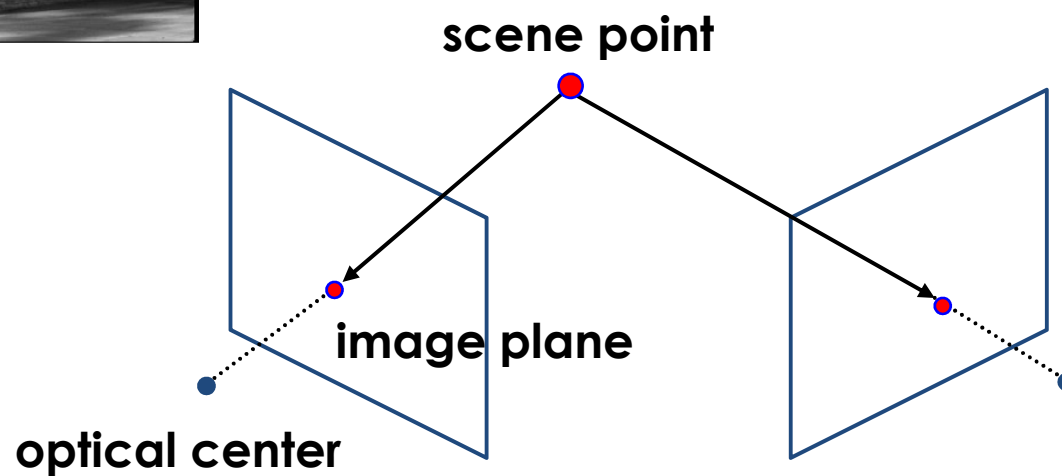
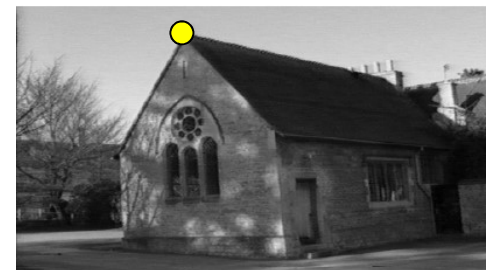
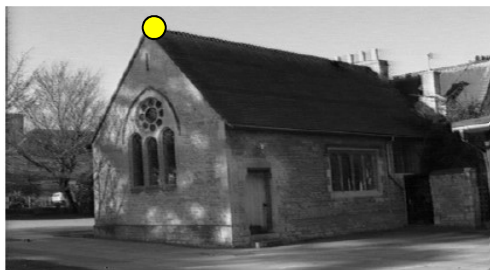


# 深度估计方法

## ◆ 坐标系回顾



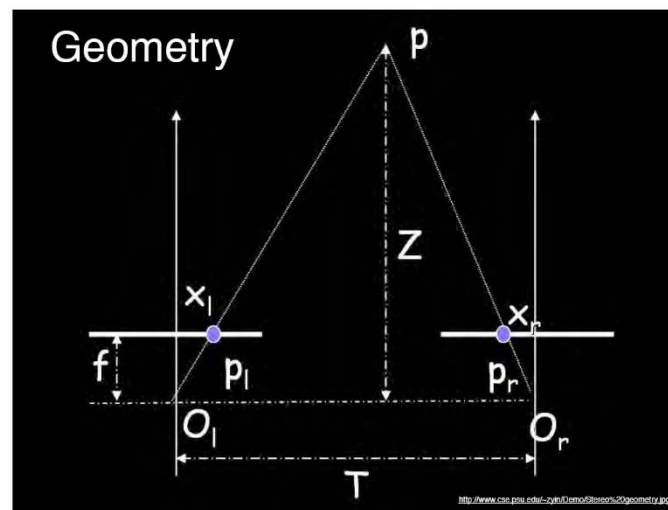
## 多视图深度估计



## 光轴平行的特殊情形

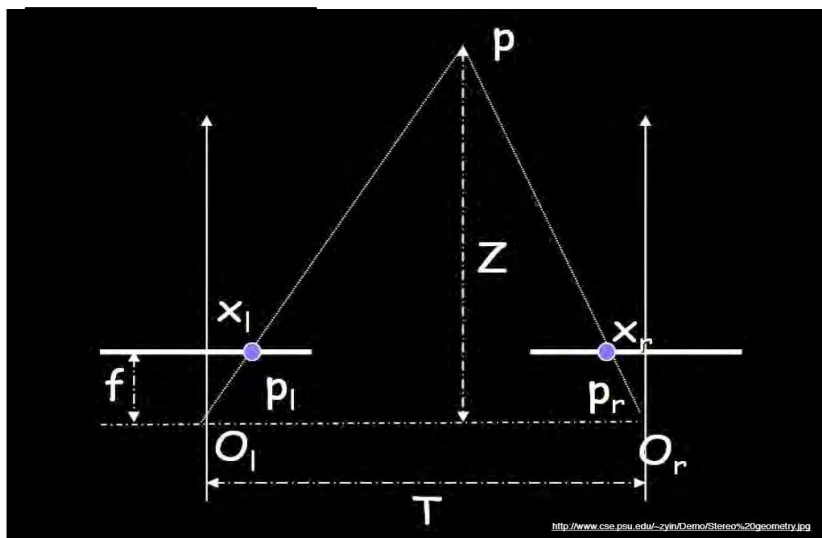
◆ 假设:

- 光轴平行
- 已知摄像参数 (已经标定)



## 深度估计方法

三角形相似 ( $p_l, P, p_r$ ) 与 ( $O_l, P, O_r$ ):



$$\frac{T + x_l - x_r}{Z - f} = \frac{T}{Z}$$

$$Z = f \frac{T}{x_r - x_l}$$

视差 disparity



image  $I(x,y)$



Disparity map  $D(x,y)$

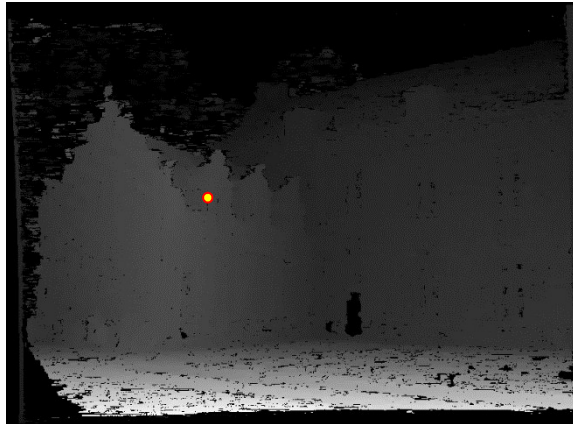


image  $I'(x',y')$

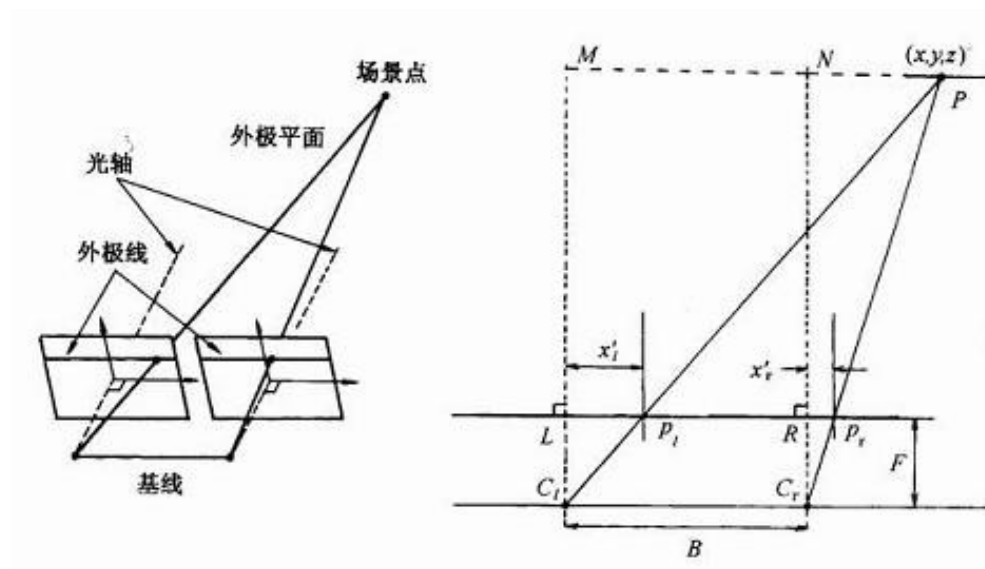


$$(x',y')=(x+D(x,y), y)$$



## 立体视觉重建 Stereo vision reconstruction

- ◆ 视差 (disparity)
- ◆ 外极 (epipolar) 平面
- ◆ 外极线



## 立体匹配 (matching)

- ◆ 首先，属于特征匹配，在外极线限定的邻域内，根据一致性约束条件得到对应点
- ◆ 再用上章学过的摄像机标定，恢复内外参数，进一步可以由2D坐标计算得到3D几何