

图象工程（下）

图 象 理 解

（第4版）

章毓晋

清华大学电子工程系 100084 北京



第1单元 采集表达

第2章 摄像机成象

第3章 压缩感知与成象

➤ 第4章 深度信息采集

第5章 3-D景物表达

- ✓ 从图象出发，认识和理解世界
 - 需要获得能反映场景内容和本质的图象
 - 需要用尽少的采样精确地重构原信号
 - 需要采集含有全面立体信息的图象
 - 需要有对3-D空间景物的3-D表达方法



第4章 深度信息采集

- 4.1 高维图象和成象方式
- 4.2 双目成象模式
- 4.3 深度图象直接采集
- 4.4 显微镜3-D分层成象



4.1 高维图象和成象方式

4.1.1 高维图象种类

4.1.2 本征图象和非本征图象

4.1.3 深度成象方式



4.1.1 高维图象种类

一般的图象表达函数应是一个具有5个变量的矢量函数

$$f(x, y, z, t, \lambda)$$

其中， x, y, z 是空间变量， t 代表时间变量， λ 是频谱变量（波长）， f 是矢量

实际图象是时空有限的，各种辐射的波长也有一定范围，所以图象表达函数是一个5-D有限函数

从 $f(x, y)$ 到 $f(x, y, z, t, \lambda)$



4.1.1 高维图象种类

(1) 从 $f(x, y)$ 到 $f(x, y, z)$

景物表面 \Rightarrow 将景物沿采集方向分成多片，对每片成像，结合起来就可获得景物完整的3-D信息（包括物体内部）

(2) 从 $f(x, y)$ 到 $f(x, y, t)$

某个给定时刻 \Rightarrow 沿时间轴连续采集多幅图象可获得一段时间内的完整信息（包括动态信息）



4.1.1 高维图象种类

(3) 从 $f(x, y)$ 到 $f(x, y, \lambda)$

对应某个波长 \Rightarrow 利用不同的波长辐射可获得反映场景不同性质（对应景物表面对不同波长 λ 的反射和吸收特性）的图象

(4) 从 $f(x, y)$ 到 $\mathbf{f}(x, y)$

给定空间位置的某一个性质 \Rightarrow 场景可有多种性质，图象在点 (x, y) 处也可有多个值

$$\mathbf{f}(x, y) = [f_r(x, y), f_g(x, y), f_b(x, y)]$$



4.1.1 高维图象种类

(5) $f(x, y)$ 和 $z = f(x, y)$

一般将 $f(x, y)$ 看作是将3-D场景进行投影而采集到的图象。在这个过程中，丢失了深度（或距离）信息

性质为深度的图象： $z = f(x, y)$ ，由深度图可进一步获得3-D图象 $f(x, y, z)$

如果结合对同一个场景在不同视点采集到的多幅图象也可获得该场景的深度信息



4.1.2 本征图象和非本征图象

图象是场景的（映）象

场景和场景中的物体具有一些与观察者和采集器性质无关的、本身客观存在的特性，称为（场景的）本征特性。例？

表示本征特性的图象称为本征图象

非本征图象所表示的物理量不仅与场景有关，而且与观察者或采集器的性质或图象采集的条件或周围环境等有关。例？



4.1.2 本征图象和非本征图象

许多图象理解问题可归结为由非本征图象去恢复本征特性，即获得本征图象

从图象采集的角度说，要获得本征图象有两种方法：一种是采集含有本征信息的非本征图象再通过图象技术恢复本征特性，一种是直接采集本征图象

- (1) 成象方式（4.2节，第6章～第9章）
- (2) 成象装置（4.3节～4.4节）



4.1.3 深度成象方式

成象的方式主要由光源、采集器和景物三者的相互位置和变化情况所决定

	成像方式	光源	采集器	景物
	单目成像	固定	固定	固定
第4,6章	双目（立体）成像	固定	两个位置	固定
第7章	多目（立体）成像	固定	多个位置	固定
第8章	视频/序列成像	固定/运动	固定/运动	运动/固定
	光移（光度立体）成像	移动	固定	固定
第13章	主动视觉成像	固定	运动	固定
	主动视觉（自运动）成像	固定	运动	运动
第4章	结构光成像	固定/转动	固定/转动	转动/固定



4.2 双目成象模式

{获得同一场景的两幅视点不同的图象}

4.2.1 双目横向模式

4.2.2 双目会聚横向模式

4.2.3 双目轴向模式



4.2.1 双目横向模式

1. 视差和深度

$$\frac{|X|}{Z - \lambda} = \frac{x_1}{\lambda}$$

$$\frac{B - |X|}{Z - \lambda} = \frac{|x_2| - B}{\lambda}$$

$$d = x_1 + |x_2| - B = \frac{\lambda B}{Z - \lambda}$$

$$Z = \lambda \left(1 + \frac{B}{d} \right)$$

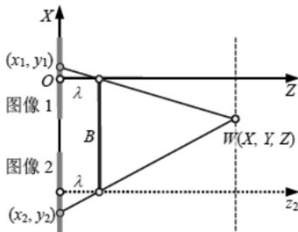


图 4.2.2 平行双目成像中的视差



4.2.1 双目横向模式

1. 视差和深度

3-D空间点同时在两个摄像机的公共视场中

✓ 测距精度 (P.88)

$$x_{1e} = x_1 + e, \quad d_{1e} = x_1 + e + |x_2| - B = d + e$$

$$\Delta Z = Z - Z_{1e} = \lambda \left(1 + \frac{B}{d} \right) - \lambda \left(1 + \frac{B}{d_{1e}} \right) = \frac{\lambda B e}{d(d+e)}$$

$$\Delta Z = \frac{e(\lambda - Z)^2}{\lambda B + e(Z - \lambda)} \approx \frac{eZ^2}{\lambda B + eZ}$$

精度高：焦距 λ 和基线 B 长，物距 Z 短



4.2.1 双目横向模式

2. 角度扫描成像

像素是按镜头的方位角和仰角均匀分布的

$$\tan \theta_1 = \frac{|X|}{Z} \quad \tan \theta_2 = \frac{B - |X|}{Z}$$

可借助镜头的方位角来表示物象间距离

$$Z = \frac{B}{\tan \theta_1 + \tan \theta_2}$$

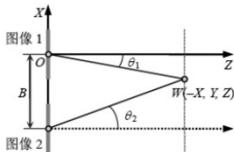


图 4.2.6 角度扫描摄像机进行立体镜成像
视差信息隐含在方位角中



4.2.2 双目会聚横向模式

1. 视差和深度

$$Z = \frac{B \cos \theta}{2 \sin \theta} + \lambda \cos \theta$$

$$\frac{|x_1|}{\lambda} = \frac{X \cos \theta}{r - X \sin \theta}$$

$$\frac{|x_2|}{\lambda} = \frac{X \cos \theta}{r + X \sin \theta}$$

$$Z = \frac{B \cos \theta}{2 \sin \theta} + \frac{2 |x_1| |x_2| \sin \theta}{d}$$

两个单目系统绕各自中心相向旋转

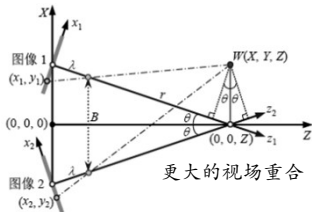


图 4.2.7 会聚双目成像中的视差



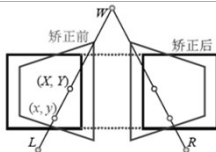
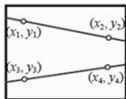
4.2.2 双目会聚横向模式

2. 图象矫正

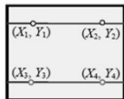
由光轴会聚到光轴平行（投影变换）

$$x = \frac{a_1X + a_2Y + a_3}{a_4X + a_5Y + 1} \quad y = \frac{a_6X + a_7Y + a_8}{a_4X + a_5Y + 1} \quad 8\text{个系数}$$

矫正前



矫正后



4.2.3 双目轴向模式

两个摄象机沿光轴线依次排列

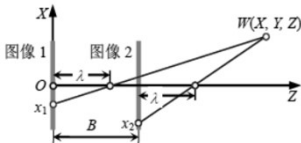


图 4.2.10 双目轴向模式成像

$$\frac{X}{Z-\lambda} = \frac{|x_1|}{\lambda} \quad \frac{X}{Z-\lambda-B} = \frac{|x_2|}{\lambda}$$

$$X = \frac{B}{\lambda} \frac{|x_1| \cdot |x_2|}{|x_2| - |x_1|} = \frac{B}{\lambda} \frac{|x_1| \cdot |x_2|}{d}$$

$$Z = \lambda + \frac{B|x_2|}{|x_2| - |x_1|} = \lambda + \frac{B|x_2|}{d}$$

- 容易确定公共视场（即前摄象机视场）边界
- 基本排除了由于遮挡造成的3-D空间点仅被一个摄象机看到的问题



4.3 深度图象直接采集

4.3.1 飞行时间法

4.3.2 结构光法

4.3.3 莫尔等高条纹法

4.3.4 深度和亮度图象同时采集



4.3 深度图象直接采集

从深度图象可方便地得到景物的几何形状和相互的空间关系（本征图象）

借助一些特殊的设备可直接采集深度图象

表 4.3.1 几种深度图像采集方法的比较

特性 \ 方法	飞行时间法	结构光法	莫尔条纹法	全息干涉法
可能达到的测距精度	0.1 mm	1 μm	1 μm	0.1 μm
最大工作距离	100 km	100 m	10 m	100 μm



4.3.1 飞行时间法

- 采用雷达测距的原理，测量光波从光源发出并经被测物反射后回到传感器所需的时间
- 基于飞行时间（time of flight）的深度图获取一般使用点源，所以也称飞点法
- 传播时间 t 与被测距离 d 的关系

$$d = ct / 2$$

- 测距的关键是精确地测量时间
如果要求空间距离分辨率为0.001m，则时间分辨率要达到 $66 \times 10^{-13} \text{s}$ （光速 $3 \times 10^8 \text{m/s}$ ）



4.3.1 飞行时间法

(1) 脉冲时间间隔测量法

测量（发射和接受）脉冲波之间的时间差

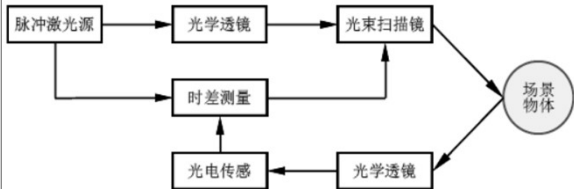


图 4.3.1 脉冲时间间隔测量法原理框图



4.3.1 飞行时间法

(2) 幅度调制的相位测量法

$$d = \frac{1}{2} \left\{ \frac{c}{2\pi f_{\text{mod}}} \theta + k \frac{c}{f_{\text{mod}}} \right\} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{r}{2\pi} \theta + kr \right\}$$

$$r = \frac{c}{f_{\text{mod}}}$$

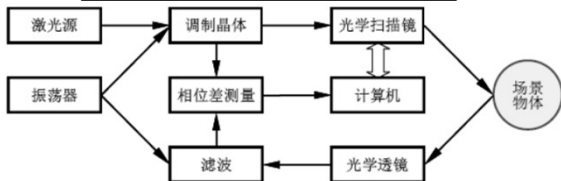


图 4.3.2 幅度调制的相位测量法原理框图



4.3.1 飞行时间法

(3) 频率调制的相干测量法

对连续激光用一定频率的线性波形进行频率调制，调制后的激光频率在 $F \pm \Delta F/2$ 之间呈现线性周期变化。激光分两路：反射光和参考光

➤拍频信号

$$f_B = \frac{\Delta F}{1/(2f_{\text{mod}})} t$$

距离

$$d = \frac{c}{4f_{\text{mod}}\Delta F} f_B$$

➤相位变化

$$\Delta\theta = 2\pi\Delta F t = 4\pi\Delta F d/c$$

$$d = \frac{c}{2\Delta F} \left(\frac{\Delta\theta}{2\pi} \right)$$

➤相干条纹数

$$N = \frac{\Delta\theta}{2\pi} = \frac{f_B}{2f_{\text{mod}}}$$

$$d = \frac{d_{\text{ref}}}{N_{\text{ref}}} N$$

实际
距离



4.3.2 结构光法

成像宽度 \Rightarrow 物体厚度

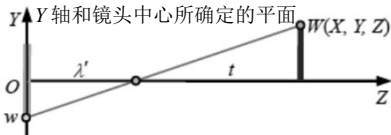


图 4.3.4 结构光成像时的顶视示意图

$$\lambda' = \sqrt{h^2 + \lambda^2}$$

$$w = \lambda' \frac{Y}{t}$$

$$Y = \frac{wt}{\lambda'} = w \sqrt{\frac{(Z - F)^2 + H^2}{h^2 + \lambda^2}}$$

$$t = \sqrt{(Z - F)^2 + H^2}$$



4.3.3 莫尔等高条纹法

基本原理

两个光栅呈一定倾角且重迭时形成莫尔条纹

- 二次空间调制

$$f(l) = f_1\{1 + m_1 \cos[w_1 l + \theta_1(l)]\} * f_2\{1 + m_2 \cos[w_2 l + \theta_2(l)]\}$$

- 四个空间频率，低通滤波（保留最低频）

$$T(l) = f_1 f_2 [1 + m_1 m_2 \cos(w_1 - w_2)l + \theta_1(l) - \theta_2(l)]$$

- 如果两个光栅的周期相同

$$f_1(l) \cos \theta_1(l) \cos \theta_2(l)$$

表面起伏所导致的相位变化



4.3.3 莫尔等高条纹法

基本方法

(4.3.18)

(4.3.21)

$$T(z) = B + S \cos\left(\frac{2\pi}{R} \frac{Dz}{z+H}\right)$$

亮条纹位置

$$Z_N = \frac{NRH}{D - NR} \quad N \in \mathbb{I}$$

高度分布 $Z = \frac{RH\theta}{2\pi D - R\theta}$

相位分布

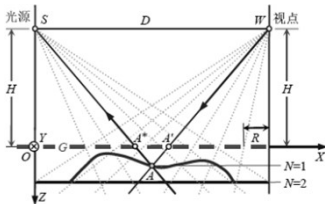


图 4.3.5 用莫尔条纹法测距示意图



4.3.3 莫尔等高条纹法

改进方法

（需要与被测物体相近尺度的光栅）

将光栅装在光源的投影系统中，利用光学系统的放大能力来获得大光栅的效果

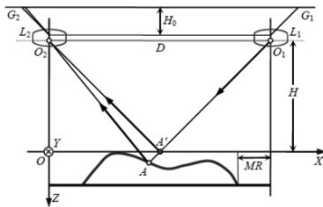


图 4.3.6 利用投影原理的莫尔条纹法测距示意图

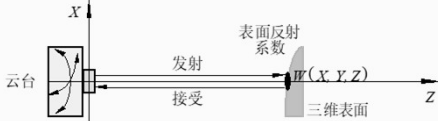


4.3.4 深度和亮度图象同时采集

LIDAR (Light Detection And Range)

3-D表面上一点的空间坐标 X 和 Y 与平台的仰俯和水平运动有关，其深度 Z 则与相位差密切联系，而该点对给定波长的激光的反射特性可借助波的幅度差来确定

同时获得两幅配准图象：深度图象和亮度图象





4.4 显微镜3-D分层成像

用摄像机每次获取一定距离平面的图象 + 让摄像机垂直于平面运动并连续采集图象 \Rightarrow 3-D图象

4.4.1 景深和焦距

4.4.2 显微镜3-D成像

4.4.3 共聚焦显微镜3-D成像



4.4.1 景深和焦距

- 一定距离内目标清晰成像的范围

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i}$$

$$d'_o = d_o + Z$$

$$d'_i = d_i - z$$

$$z = \frac{d_i^2}{d_o^2} Z$$

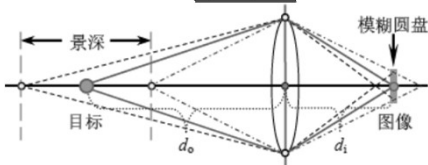


图 4.4.1 薄透镜成像时景深的示意图



4.4.1 景深和焦距

- ✓ 引入 f -因数（焦距 λ 与光圈直径 $2r$ 的比）

$$n_f = \frac{\lambda}{2r}$$

- ✓ 景深 Z 作为 r （可允许的不清晰半径）的函数

{P.102}
$$Z \approx \frac{2n_f d_o (d_o - \lambda)}{\lambda^2} r = \frac{2n_f d_o^2}{\lambda d_i} r$$

- ✓ 景深 Z 与镜头的 f -因数成正比，而 $n_f \rightarrow \infty$ 的极限对应具有无穷景深的小孔相机



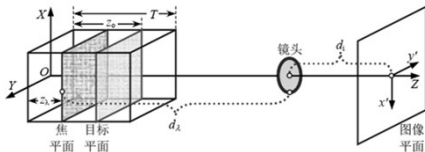
4.4.2 显微镜3-D成象

- ✓ 用显微镜观察（3-D）标本，受景深影响：
 - (1) 仅在聚焦平面的结构是清晰可见的
 - (2) 在聚焦平面附近的结构虽然可见，但模糊
 - (3) 离聚焦平面较远的结构不可见但仍然对采集的图象有贡献（光透射）
- ✓ 用显微镜观察（2-D切片）标本，两个新问题：
 - (1) 切片分别放置，配准（对应）关系会丢失
 - (2) 薄的切片在切割时会受到如拉伸、蜷缩、折叠、撕扯等影响而导致各种几何变形



4.4.2 显微镜3-D成象

光学切片



- 先考虑样本仅在 $Z = z_\lambda$ 处密度不为零
- 样本函数 $p(x, y, z)$: $p(x, y, z) = p_o(x, y)\delta(z - z_o)$
- 与焦平面偏离量 $z_o - z_\lambda$

点扩散函数

$$f_o(x, y, z_\lambda) = p_o(x, y, z_o) \otimes h(x, y, z_o - z_\lambda)$$



4.4.2 显微镜3-D成象

光学切片

- 将3-D样本模型化

$$\sum_{i=1}^N p(x, y, i\Delta z) \Delta z$$

- 在 z_λ 得到的目标平面图象

$$f(x, y, z_\lambda) = \sum_{i=1}^N p(x, y, i\Delta z) \otimes h(x, y, z_\lambda - i\Delta z) \Delta z$$

- 将求和转为积分 ($\Delta z \rightarrow 0$)
- 对厚样本用显微镜成象就是用样本函数与点扩散函数进行3-D卷积 (可用反卷积恢复 p)



4.4.2 显微镜3-D成象

消除光学切割图象带来的模糊

- 利用反卷积来恢复 $p(x, y, z)$ ，其频谱

$$P(u, v, w) = F(u, v, w)H'(u, v, w) = \frac{F(u, v, w)}{H(u, v, w)}$$

- 变换回空域

$$p(x, y, j\Delta z) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} f(x, y, i\Delta z) \otimes h'(x, y, j\Delta z - i\Delta z)\Delta z$$

- 用有限和来逼近（求2-D卷积的有限和）

$$p(x, y, j\Delta z) = \sum_{i=-K}^{N+K} f(x, y, i\Delta z) \otimes h'(x, y, j\Delta z - i\Delta z)\Delta z$$



4.4.2 显微镜3-D成象

用3-D逆卷积来恢复样本函数时会遇到
3个计算问题：

- (1) 计算3-D的PSF频谱比较复杂
- (2) 需要计算 $H'(u, v, w)$ 的3-D反变换
- (3) 当 $N + 2K$ 较大时，有限和逼近式的计算量也会相当大



4.4.3 共聚焦显微镜3-D成象

要点:

- 每次仅照明聚焦平面，仅获得聚焦平面处的图象
- 用一个激光束对显微镜的光学聚焦平面进行扫描
- 引入检测针孔，有效抑制不在焦平面的散焦问题
- 在焦平面外的贡献以与焦平面的距离平方而衰减
- 共聚焦显微镜的总点扩散函数是普通显微镜的点扩散函数的平方

4.4.3 共聚焦显微镜3-D成象

- 聚焦正确的反射光（实线）通过检测针孔被检测器检测到，而不在焦平面的散焦光线（虚线）则以与焦平面距离的平方成比例地扩散

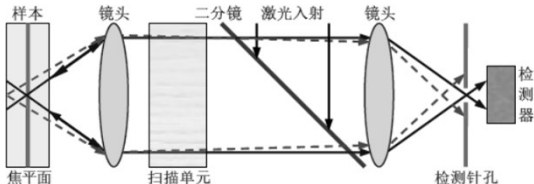


图 4.4.3 共聚焦显微镜成像示意图



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/