本章目录

常用感知传感器

第八章 多模态感知与智能决策

8.1 背景意义与图像处理基础

8.2 目标识别、跟踪与光流估计

8.3 定位建图与预测规划

8.4 常用感知传感器

8.5 多模态感知坐标转换

8.6 多模融合与控制决策

8.7 关键工具与框架接口

8.8 实验案例与真机迁移

8.9 习题与课堂讨论

本节 5 个教学单元

8.4.1 视觉相机
教材对应：第8.1.4.1节

8.4.2 激光雷达
教材对应：第8.1.4.2节

8.4.3 雷达
教材对应：第8.1.4.3至8.1.4.5节

8.4.4 声学传感器
教材对应：第8.1.4.6至8.1.4.8节

8.4.5 其他传感器
教材对应：第8.1.4.9节

8.4 常用感知传感器

8.4.1 视觉相机：传感器总览

传感器输出决定能回答的问题



图8.4 常见多模态感知传感器

- **图像信息：**颜色、纹理和热特征支持目标识别与环境理解。
- **距离与方向：**测距及空间扫描支持障碍检测、定位与建图。
- **自身与环境：**运动、压力、磁场和温湿度支持导航及工况调整。

8.4.1 视觉相机：成像与输出

彩色、深度和位姿是不同输出



(a) 单目RGB相机

SY011HD
输出彩色像素，描述外观；
距离需由其他观测约束。



(b) 深度相机

D435
输出彩色与立体深度；
支持三维重建与障碍检测。



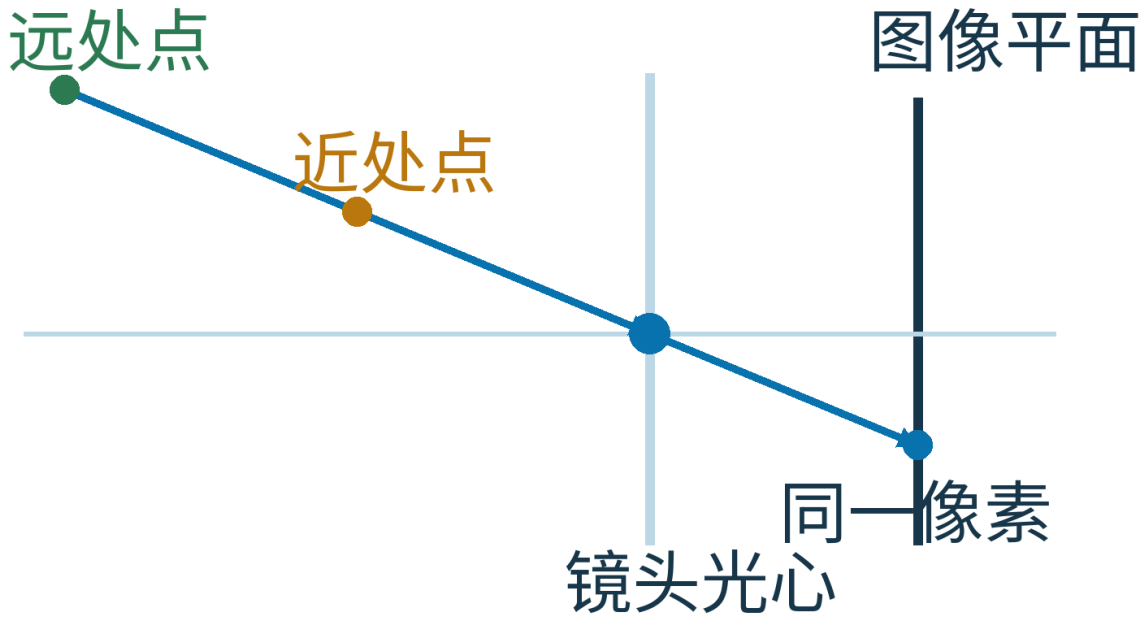
(c) 双目视觉里程计

T265
输出自身位置与姿态；
服务定位和运动跟踪。

图8.4（a-c）视觉相机与视觉里程计

8.4.1 视觉相机：RGB相机

光学成像保留外观并压缩距离



图：同一射线上的不同距离点

- **成像转换：**镜头聚光；CMOS或CCD芯片把光信号转换为数字像素。
- **可观察信息：**颜色、纹理与形状支持分类、检测、跟踪和视觉导航。
- **距离约束：**单幅RGB图像不直接给出米制深度；已知尺寸或其他传感器提供尺度。

8.4.1 视觉相机：RGB-D相机

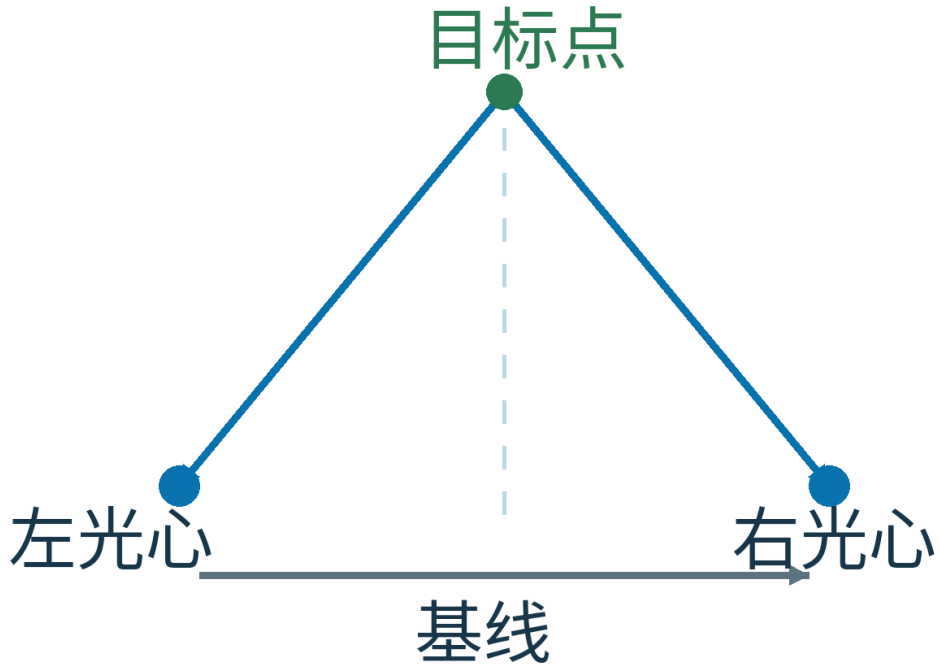
深度图由测距机制产生

深度机制	怎样获得距离	输出与使用条件
结构光	投射已知图案， 由形变和标定几何测距。	提供像素深度； 强环境光可能淹没图案。
飞行时间（ToF）	发射光，分析往返时间 或相位差估计距离。	提供距离或深度； 多径与回波强度影响结果。
主动立体	双目匹配估计视差； 红外投影增加弱纹理。	D435/D435i、 Gemini 335/335L是例子。

RGB-D表示彩色与深度输出组合；时间与空间配准后，可用点云处理库（PCL）做三维重建、障碍分析和交互。

8.4.1 视觉相机：双目与多目

视差把两幅图像连接到深度



图：两个光心与目标的测距几何

$$Z = \frac{fB}{d}$$

符号与单位：Z为光轴深度（m）；f为像素焦距（px）；B为基线（m）；d为视差（px）。

校正后的对应点横向像素差就是视差。长基线提高远距分辨率，也增加遮挡与安装约束；同步、标定和算力同样影响结果。

OAK-D双目；OAK-4P覆盖取决于配置；被动立体依赖光照与纹理。

8.4.1 视觉相机：深度算例

远处目标对视差误差更敏感

给定校正双目：$f = 800\ \text{px}$，$B = 0.12\ \text{m}$；三帧追踪同一特征。

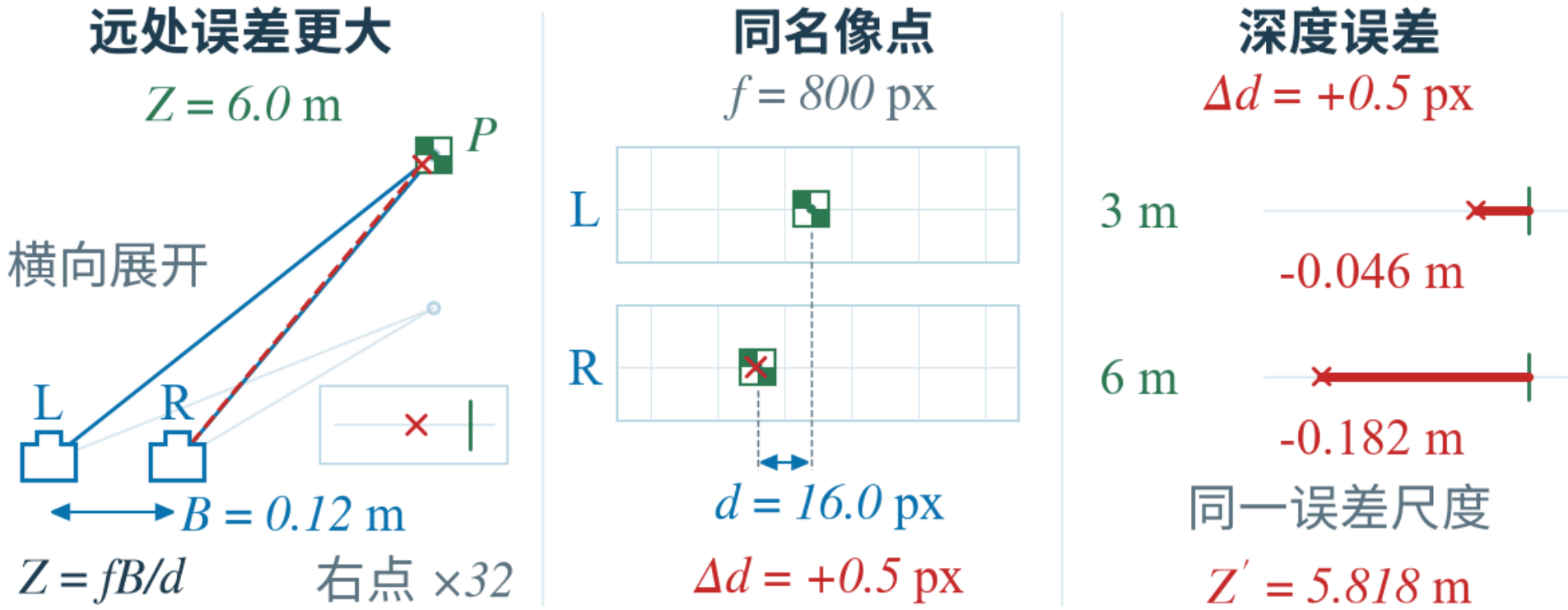
$$Z = \frac{800 \times 0.12}{d} = \frac{96}{d}\ \text{m}$$

帧序	视差（px）	深度（m）	视差加0.5px后	深度差（m）
1	32	3.000	2.954 m	-0.046
2	24	4.000	3.918 m	-0.082
3	16	6.000	5.818 m	-0.182

远处同一半像素偏差带来更大深度误差；三帧深度增加表示目标相对远离。

8.4.1 视觉相机：双目视差与深度误差

同样半像素误差，为什么远处偏得更多



图：两幅校正图的视差确定深度，同样半像素误差在远处更明显。

8.4.1 视觉相机：红外与热成像

热辐射提供夜间目标线索



图8.4（d）热成像相机

WIRIS Pro

近红外反射与
热红外辐射不同。

目标热辐射 → 红外光学 → 探测器成像

- **热成像：**记录目标热辐射分布；可用于夜视导航、搜救、防火与热源监测。
- **温度反演：**依赖发射率、反射背景和标定；图像亮度不是无条件的真实温度。
- **环境条件：**部分烟尘中可保留目标线索；雨雾也会削弱红外传播。

8.4.1 视觉相机：光电吊舱

云台稳定把多路观测对准目标



图8.4（e）MOES-188

可见光（EO） → 颜色、纹理与轮廓

热红外（IR） → 热特征与夜间目标

激光测距（可选） → 目标距离

云台稳定与自动跟踪保持视轴指向目标；转动云台会改变传感器朝向，后续定位需结合测距、机体姿态和云台角度。

练习与讨论

按任务选择成像方式

任务	参考选择与测量量	结果解释与条件
颜色/类别识别	RGB：颜色与纹理。	光照、曝光和模糊影响外观。
近距三维交互	RGB-D：彩色与深度。	量程、多径影响有效像素。
室外立体几何	双目/多目：匹配视差。	基线、纹理与遮挡影响尺度。
夜间热源搜寻	热成像：热辐射。	发射率与雨雾影响热特征。
远距持续观察	EO/IR吊舱：稳定视轴。	云台姿态及测距服务定位。

外观、几何与热特征需要互补观测。

本章目录

常用感知传感器

第八章 多模态感知与智能决策

8.1 背景意义与图像处理基础

8.2 目标识别、跟踪与光流估计

8.3 定位建图与预测规划

8.4 常用感知传感器

8.5 多模态感知坐标转换

8.6 多模融合与控制决策

8.7 关键工具与框架接口

8.8 实验案例与真机迁移

8.9 习题与课堂讨论

本节 5 个教学单元

8.4.1 视觉相机
教材对应：第8.1.4.1节

8.4.2 激光雷达
教材对应：第8.1.4.2节

8.4.3 雷达
教材对应：第8.1.4.3至8.1.4.5节

8.4.4 声学传感器
教材对应：第8.1.4.6至8.1.4.8节

8.4.5 其他传感器
教材对应：第8.1.4.9节

8.4.2 激光雷达：二维与三维

扫描平面与空间点云服务不同地图



图8.4（f）S2L



图8.4（g）Mid-360

二维扫描：一个扫描平面内的距离与方向；适合平面建图、地面机器人或低空平面避障。

三维点云：距离与水平、垂向方向形成空间点；支持地形、障碍高度、相对定位和局部规划。

8.4.2 激光雷达：飞行时间测距

往返时间决定一束激光的距离

发射近红外脉冲 → 目标表面反射 → 接收并测往返时间

$$R = \frac{c\tau}{2}$$

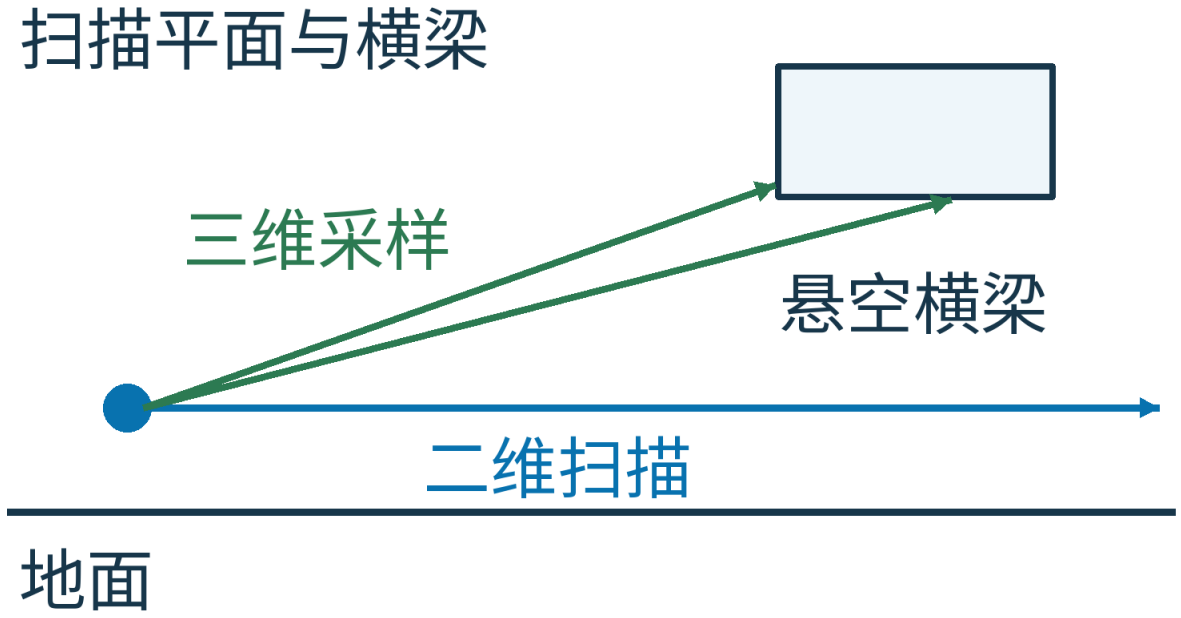
$$R = \frac{3 \times 10^8 \times 100 \times 10^{-9}}{2} = 15\ \text{m}$$

R为目标距离（m）；c为光速（m/s）；τ为往返时间（s）。本算例取$c = 3 \times 10^8$ m/s。

距离 → 结合扫描方向 → 三维几何点

8.4.2 激光雷达：扫描与地图

未被扫描的空间仍是未知

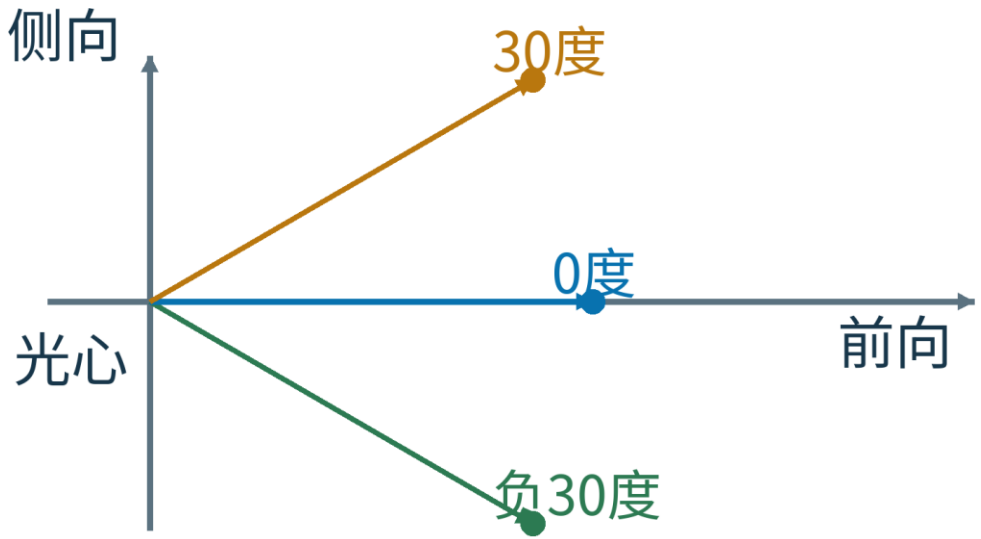


图：扫描平面与悬空横梁

- **二维地图：** GMapping、HectorSLAM用于平面地图；高度结构需要垂向采样。
- **三维地图：** OctoMap表示占据，Voxblox用距离场支持规划。
- **覆盖与代价：** 三维也有视场与遮挡；更多点增加算力、存储与共享数据量。

8.4.2 激光雷达：点云算例

距离和方向共同确定扫描点



图：5m距离的三个扫描方向

传感器扫描平面内：$R = 5\ \mathrm{m}$，θ为从前向转向正侧向的扫描角。

$$x = R\cos\theta$$

$$y = R\sin\theta$$

扫描角	前向x（m）	侧向y（m）
-30°	4.330	-2.500
0°	5.000	0.000
30°	4.330	2.500

8.4.2 激光雷达：互干扰

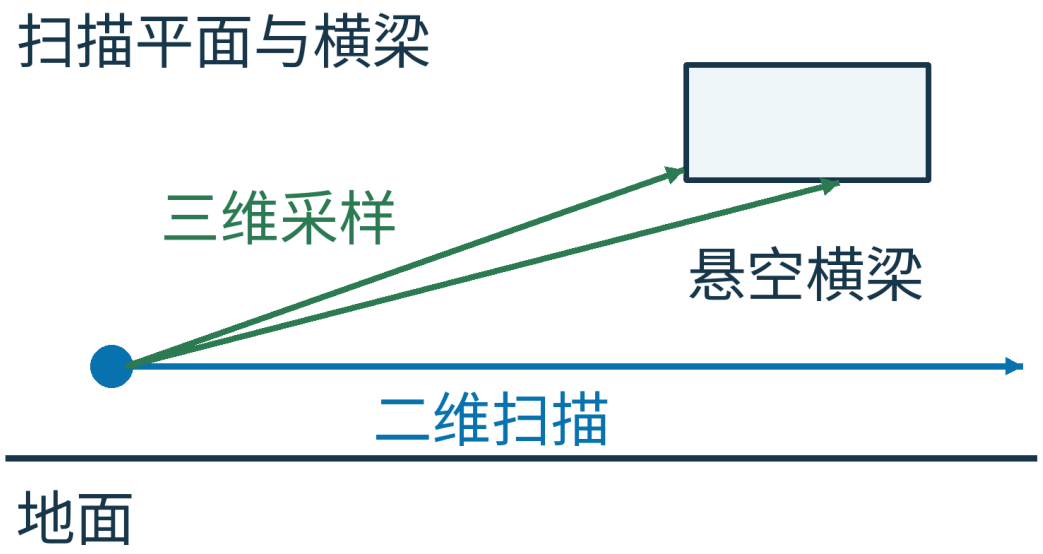
识别本机回波可减少非物理点

本机发射 → 接收混合回波 → 匹配本机特征

方法	如何区分本机回波	设计代价与条件
脉冲抖动	随机化发射间隔，破坏固定时间相关性。	需要配套计时、检测和多帧判据。
独立编码	匹配本机编码，排除外来脉冲。	编码设计与解码接收器共同作用。
调频连续波（FMCW）	相干检测利用频率/相位与本机参考的关系。	提供较强选择性；效果依赖信号和器件设计。

练习与讨论

扫描不到横梁时怎样解释



图：二维扫描从横梁下方通过

- **问题：**二维扫描前方没有回波，能否确认上方航路没有横梁?
- **参考答案：**不能。横梁高于扫描平面；该高度缺少观测，应补垂向扫描或其他观测。
- **自查判据：**检查扫描平面、视场、遮挡、反射和干扰，再解释缺失或异常点。

缺少回波不能直接推出空间可通行。

本章目录

常用感知传感器

第八章 多模态感知与智能决策

8.1 背景意义与图像处理基础

8.2 目标识别、跟踪与光流估计

8.3 定位建图与预测规划

8.4 常用感知传感器

8.5 多模态感知坐标转换

8.6 多模融合与控制决策

8.7 关键工具与框架接口

8.8 实验案例与真机迁移

8.9 习题与课堂讨论

本节 5 个教学单元

8.4.1 视觉相机
教材对应：第8.1.4.1节

8.4.2 激光雷达
教材对应：第8.1.4.2节

8.4.3 雷达
教材对应：第8.1.4.3至8.1.4.5节

8.4.4 声学传感器
教材对应：第8.1.4.6至8.1.4.8节

8.4.5 其他传感器
教材对应：第8.1.4.9节

8.4.3 雷达：类型与分类

探测、扫描和成像是不同维度



(h) 毫米波雷达
Phoenix 4D

电磁回波测量距离、
径向速度及方向信息。



(i) 有源相控阵雷达
DJI RD241608

改变阵元相位/延迟，
以电子方式控制波束。



(j) 合成孔径雷达
SAR RK-12

沿平台运动轨迹采集
相干回波并聚焦成像。

图8.4（h-j）雷达实物及不同能力

8.4.3 雷达：传播时延与多普勒

回波时延测距离，频移测径向速度



$$R = \frac{c\tau}{2}$$

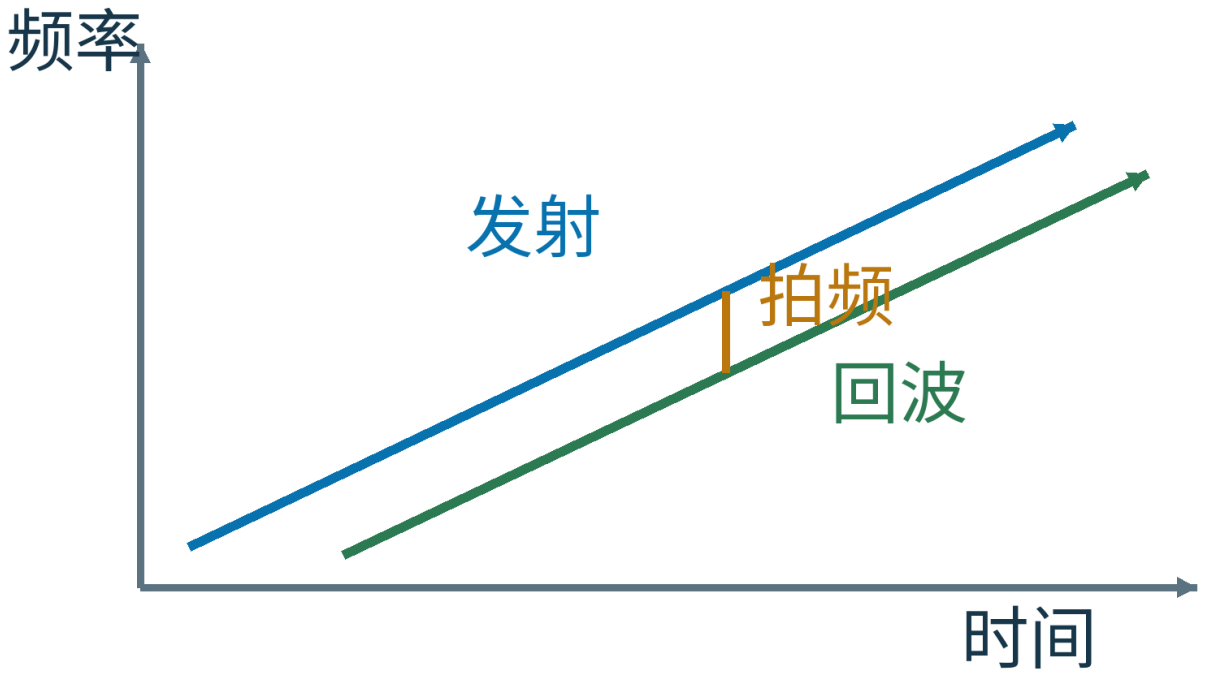
R为距离；τ为往返时间；c为光速。时延反映传播路程。

$$f_D = \frac{2v_r}{\lambda}$$

f_D为多普勒频移（Hz）；v_r为靠近雷达的径向速度（m/s）；λ为波长（m）。

8.4.3 雷达：调频连续波

扫频回波的频率差编码距离



图：线性扫频与延时回波

$$f_b = S\tau$$

$$R = \frac{cf_b}{2S}$$

S为频率上升斜率（Hz/s）；f_b为拍频（Hz）；τ 为往返延时（s）。公式按单目标、忽略速度耦合的测距模型使用。

重复扫频段的相位变化提供径向速度；接收阵列的空间相位差提供方向。

8.4.3 雷达：机载毫米波感知

低能见度中保留距离与运动观测

载频24 GHz与77 GHz；24 GHz属厘米波，工程上常合称毫米波雷达。

$$\lambda_{24} = \frac{3 \times 10^8}{24 \times 10^9} = 12.5\ \text{mm} \qquad \lambda_{77} = \frac{3 \times 10^8}{77 \times 10^9} \approx 3.90\ \text{mm}$$

- **定高与避障：**对地距离用于高度观测；障碍距离与径向速度用于动态环境感知。

- **光照与天气：**不依赖可见光，部分雨雾条件下仍有有效回波；大气衰减、湿表面与杂波仍影响结果。

- **目标与运动：**目标散射强度、方向、天线视场及速度量程决定可检测性；与相机和激光互补。

8.4.3 雷达：地面侦察

运动特征帮助从地表杂波中发现目标

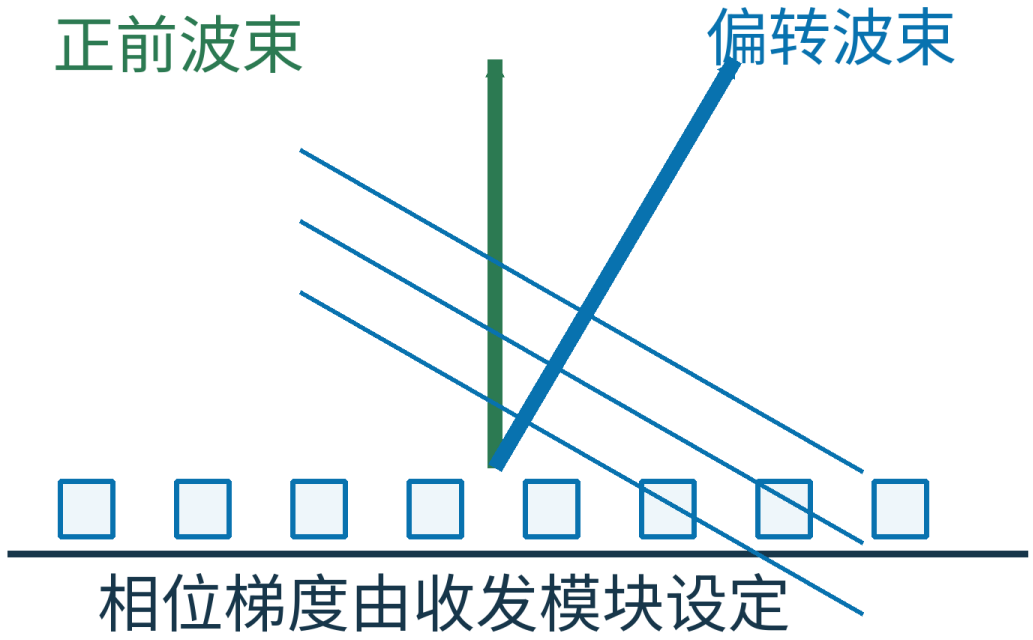
地面无人载具（UGV）或固定点：X/Ku与Ka/W等工作频段在传播衰减、天线尺寸和任务距离之间取舍。

静态地表杂波	整体目标运动	部件微动
树木、岩石等形成背景； 时间或频移差异支持 动目标处理。	距离、径向速度作线索； 雷达散射截面（RCS） 描述回波强弱。	微多普勒描述部件微动； 结合模型辅助目标分类。

广域扇扫或周扫先发现目标，再用目标方向引导光电观察；覆盖取决于系统配置。

8.4.3 雷达：有源相控阵

阵元相位差改变波束方向



图：电子波束偏转原理

独立收发模块支持电子扫描与多目标调度；覆盖、分辨率和故障冗余仍取决于系统配置。

$$|\Delta\varphi| = \frac{2\pi d|\sin\theta|}{\lambda}$$

d为阵元间距；λ为波长；θ为偏离阵面法线的角度；$\Delta\varphi$为相邻阵元相位步进（rad）。

$$d = \frac{\lambda}{2},\ \theta = 30^\circ \Rightarrow |\Delta\varphi| = 90^\circ$$

8.4.3 雷达：低空作业与地形跟随

地形跟随需要测距与波束方向

T40/T20P低空植保场景：前方障碍感知支持避障，对地距离支持高度保持与起伏地形跟随。

雷达测得斜距 → **结合波束方向** → **得到垂直对地距离**

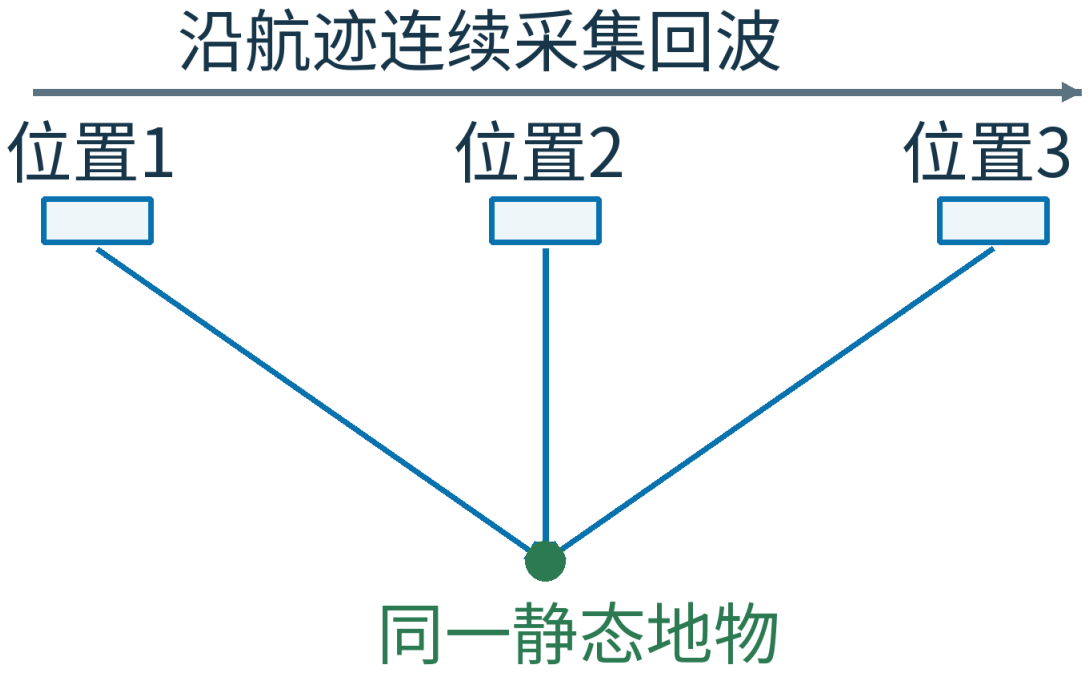
$$h = R\cos\beta \qquad R = 10\ \text{m},\ \beta = 30^\circ \Rightarrow h \approx 8.66\ \text{m}$$

R为斜距；β从竖直向下方向计；本例近似水平地面。T40水平避障通道为水平360°、垂向±45°，覆盖还取决于上下通道与安装。

T40各方向雷达视场：https://www.dji.com/t40/specs

8.4.3 雷达：合成孔径

平台运动提供多个相干观测位置



图：沿航迹重复观测同一地物

- **合成孔径雷达（SAR）：**沿移动轨迹记录同一地物的幅度与相位，再补偿相位历史聚焦成像。
- **成像条件：**需要已知平台运动、相干回波与运动补偿；静态地物是基本入门模型。

$$L = vT_{\text{int}} = 30 \times 2 = 60\ \text{m}$$

L为轨迹长度（m）；v为平台速度（m/s）；T_{int}为相干积累时间（s）。

8.4.3 雷达：遥感成像应用

散射图像与三维地形需要不同处理

SAR回波聚焦	→	幅度与相位图像	→	地形/散射判读
两期同区域图像	→	几何配准与比较	→	区域变化与灾害评估
双视角/重复相位	→	干涉几何处理	→	高程与三维地形

建筑、基础设施和植被监测使用散射与变化信息；长航时固定翼或高空伪卫星（HAPS）提供稳定航迹，支持广域成像、环境评估与辅助定位。

8.4.3 雷达：距离与速度算例

拍频和多普勒给出互补结果

单目标：$S = 20\ \mathrm{MHz/\mu s} = 2 \times 10^{13}\ \mathrm{Hz/s}$；载频77GHz。
拍频$f_b = 4\ \mathrm{MHz}$，多普勒$f_D = 1\ \mathrm{kHz}$；距离/速度已解耦，靠近为正。

$$R = \frac{cf_b}{2S} = 30\ \mathrm{m} \qquad v_r = \frac{f_D\lambda}{2} \approx 1.95\ \mathrm{m/s}$$

时间（s）	理论距离（m）	拍频（MHz）	结果解释
0.0	30.000	4.000	初始单目标输入。
0.1	29.805	3.974	径向匀速靠近，距离下降。
0.2	29.610	3.948	拍频下降与靠近方向一致。

8.4.3 雷达：方法比较

按测量对象组合雷达能力

能力侧重	测量与处理	适用任务与主要条件
传统回波量测	传播时延/拍频给距离； 多普勒给径向速度。	避障、定高或远距发现； 带宽、更新率与散射重要。
有源相控阵	可控收发模块改变相位/延迟， 快速选择波束方向。	多目标观测、低空地形跟随； 阵面、视场和安装决定覆盖。
合成孔径	沿轨迹记录幅度相位， 补偿运动后相干聚焦。	地形、区域和灾害监测； 航迹与相干性是关键条件。

FMCW波形、相控阵扫描与SAR成像可组合，不是互斥的等级。

快响应与广域成像对应不同观测过程。

练习与讨论

选择适合任务的雷达观测

任务	参考选择	解释与检验条件
动态障碍避让	快速更新的距离/方向量测，配合径向速度。	检查前方视场、目标散射、速度量程与更新时延。
起伏农田作业	对地测距与定向观测；可用合适的相控阵系统。	结合斜距和波束方向；检查高度通道及障碍覆盖。
灾后广域调查	SAR散射成像与多期比较；三维高程需额外几何观测。	检查轨迹、相干性、配准，区分影像变化与高程变化。

本章目录

常用感知传感器

第八章 多模态感知与智能决策

8.1 背景意义与图像处理基础

8.2 目标识别、跟踪与光流估计

8.3 定位建图与预测规划

8.4 常用感知传感器

8.5 多模态感知坐标转换

8.6 多模融合与控制决策

8.7 关键工具与框架接口

8.8 实验案例与真机迁移

8.9 习题与课堂讨论

本节 5 个教学单元

8.4.1 视觉相机
教材对应：第8.1.4.1节

8.4.2 激光雷达
教材对应：第8.1.4.2节

8.4.3 雷达
教材对应：第8.1.4.3至8.1.4.5节

8.4.4 声学传感器
教材对应：第8.1.4.6至8.1.4.8节

8.4.5 其他传感器
教材对应：第8.1.4.9节

8.4.4 声学传感器：介质与信号

超声、声呐和音频使用不同观测

传感器	传播与观测机制	输出和场景
空气超声测距	发射高于20kHz的脉冲， 用往返时延测距。	近距障碍/地面距离； 20°C空气声速约343m/s。
水下声呐	主动发声测回波， 或被动接收水下声源。	水下距离、方向或成像； 水中声速约1500m/s。
环境音频	麦克风采集声压波形； 阵列比较到达时差。	声源方位、事件或语义； 不主动发声的被动感知。

“超声”按频率分类，“声呐”按用途分类；水下高频声呐可以使用超声。

8.4.4 声学传感器：空气超声测距

脉冲回波适合近距低速感知

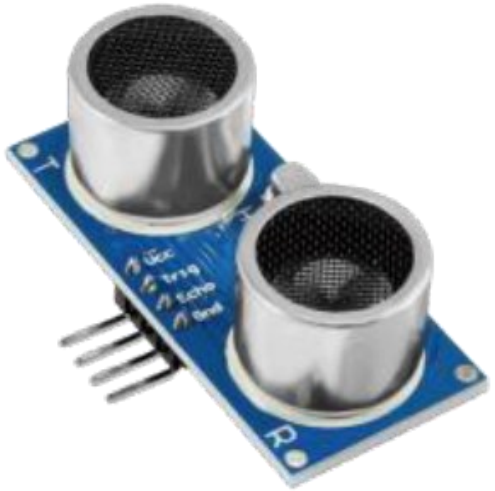


图8.4（k）HC-SR04

发射40kHz脉冲 → 接收目标回波

$$R = \frac{c_a \tau}{2}$$

c_a为空气声速；τ为往返时间。发射后残余振动形成近距盲区；倾斜、吸声、多径和噪声会改变回波。

常用于泊车盲区检测、降落接近地面、室内近距避障、悬停和贴地精细运动；适合较低速度与较短反应距离。

8.4.4 声学传感器：温度测距算例

空气声速改变往返测距尺度

给定静止平面目标距传感器2m；采用干空气近似，温度以摄氏度代入。

$$c_a \approx (331 + 0.6T_C)\ \mathrm{m/s}$$

$$\tau_{20} = \frac{2 \times 2}{343} \approx 11.66\ \mathrm{ms}$$

温度	实际声速	2m目标往返时间	固定343m/s的估计
0℃	331 m/s	12.08 ms	2.073 m：高估
20℃	343 m/s	11.66 ms	2.000 m：相符
40℃	355 m/s	11.27 ms	1.932 m：低估

温度补偿修正传播尺度；风、目标角度、吸声与多径仍是独立的回波误差来源。

8.4.4 声学传感器：主动与被动声呐

主动回波测距，被动接收声源

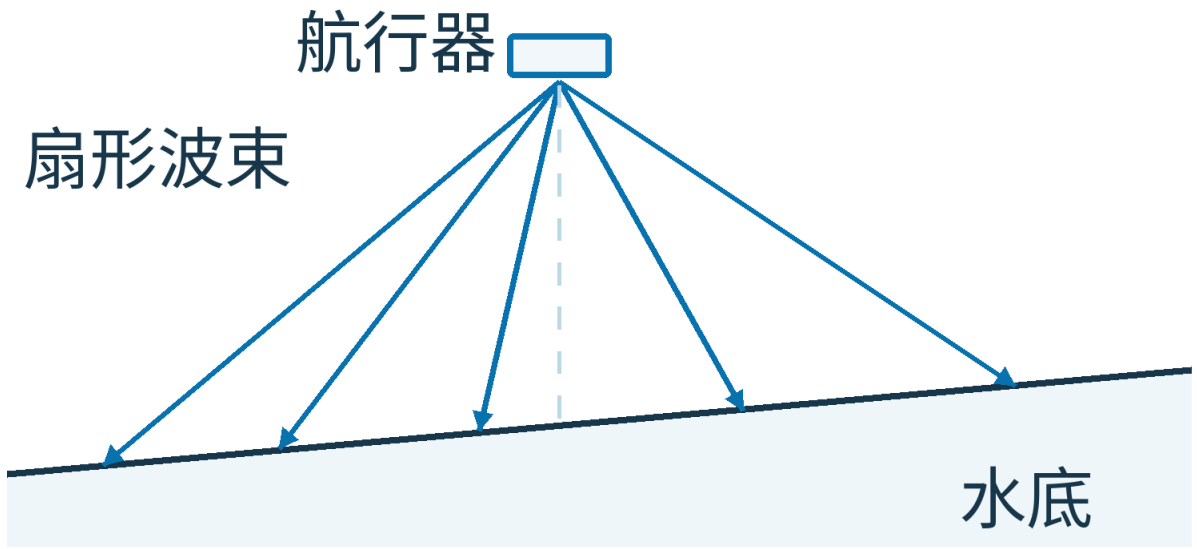
主动发声 → 水下目标反射 → 接收并分析回波

方式	测量机制与输出	适用条件
主动声呐	发射时刻已知：时延给斜距； 阵列给方向，强度/频移给线索。	适合测深、障碍探测与成像； 水声传播与反射受介质影响。
被动声呐	接收目标自身或环境声； 阵列主要得到方位与声学特征。	适合安静监听；直接距离 需多站、运动或近场几何信息。

水中声速约1500m/s；温度、盐度、压力会改变尺度和传播路径。

8.4.4 声学传感器：水下成像与导航

测深波束与侧扫图像回答不同问题

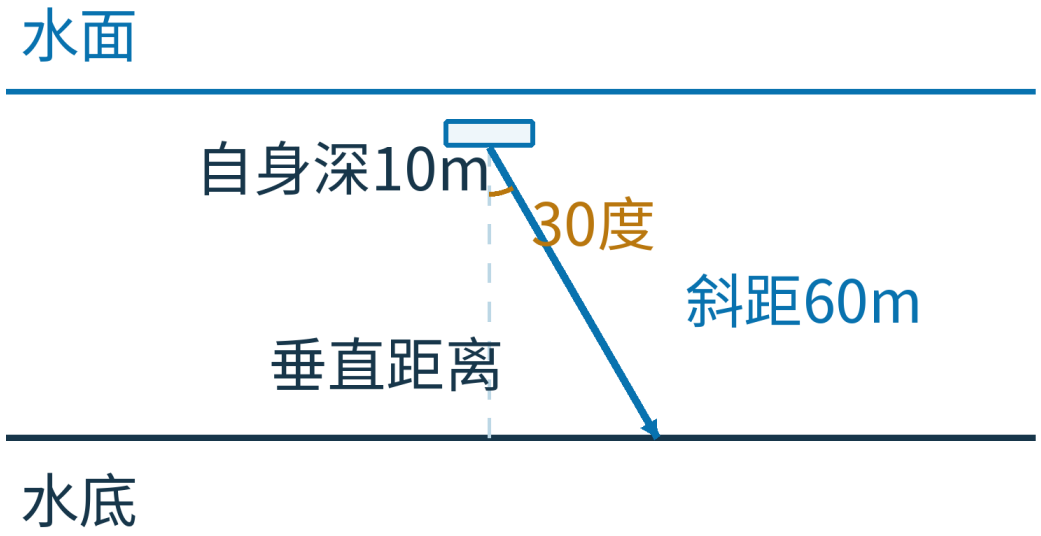


图：扇形波束测量水底轮廓

- **多波束测深：**已知方向与斜距恢复水底几何；位姿和声速修正影响三维地图。
- **侧扫与频率：**回波强度展示目标/底质纹理；低频偏远距，高频偏细节且衰减更强。
- **水下应用：**无人水下航行器（UUV）、遥控潜水器（ROV）：导航、避障、搜救及设施监测。

8.4.4 声学传感器：水下测深算例

波束斜距需要投影到垂直方向



图：斜距、垂距与水面参考

$$R = \frac{1500 \times 0.080}{2} = 60\ \mathrm{m}$$

$$h = R\cos 30^\circ \approx 51.96\ \mathrm{m}$$

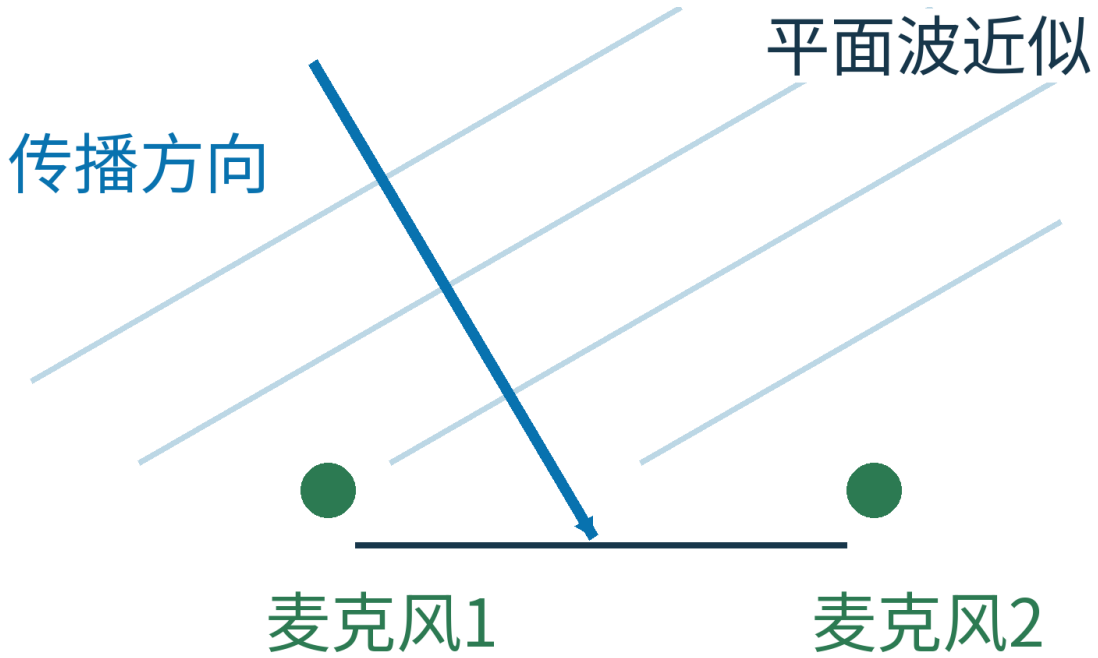
$$H = 10 + h \approx 61.96\ \mathrm{m}$$

R为斜距；h为相对航行器垂距；H为水面参考水深。给定航行器深10m，固定声速并近似直线传播。

测距、波束方向和自身深度共同确定水底位置；声速剖面与位姿误差会改变实际结果。

8.4.4 声学传感器：麦克风阵列

到达时差反映声音传播方向



图：远场声波到达同步麦克风

麦克风可按线形、圆形或球形布置。

$$\tau = t_2 - t_1 = \frac{d \sin\theta}{c_a}$$

到达时差（TDOA）：τ为两通道到达时间差；d为麦克风间距；θ从阵列法线计；c_a为空气声速。

远场平面波模型主要给方位；距离需要近场、多站或运动信息，双麦还可能有方向歧义。

8.4.4 声学传感器：方位算例

同步误差会直接改变声源方位

已知：$d = 0.20\ \mathrm{m}$，$c_a = 343\ \mathrm{m/s}$；远场单声源。
麦克风2更晚；正常时差$\tau = 0.2915\ \mathrm{ms}$，额外通道延迟会改变方位。

$$\theta = \arcsin\left(\frac{c_a\tau}{d}\right) \approx 30^\circ \qquad |\tau| \le \frac{d}{c_a} \approx 0.583\ \mathrm{ms}$$

采样情形	到达时差	方位/判据	解释
正确同步	0.2915 ms	约30.0°	给定几何的有效方位。
额外50μs延迟	0.3415 ms	约35.9°	角度偏差约5.9°。
异常相关峰	0.7000 ms	超出物理范围	排查同步、混响、错峰。

8.4.4 声学传感器：定位与语义理解

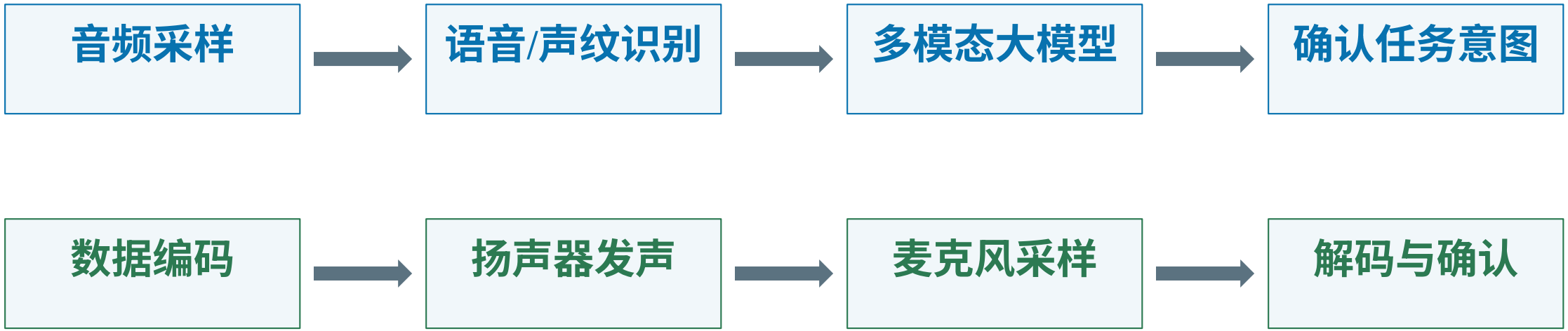
定位、分离和识别是不同处理任务

声源定位（SSL）	波束成形与源分离	事件与语义识别
用时差/空间特征估计方位，形成连续声源轨迹。	补偿延迟求和突出方向；盲源分离分开混合声源。	声音模型识别警笛、异响、语音等事件和含义。

- **非视距警笛：**建筑遮挡时仍可能有声学传播路径，提前发现声源；反射会影响方位判断。
- **搜救与追踪：**呼声或异常噪声提供搜索方向，可引导摄像头；旋翼自噪与混响可能淹没目标。
- **环境语义：**机械异响、轮胎摩擦声可辅助故障或路面状态分析，具体判断依赖模型和工况。

8.4.4 声学传感器：交互与音频通信

语义交互与声学链路需要额外模块



多模态大模型（MLLM）结合声音、图像与任务上下文；音频编码或仿生声信号可探索受干扰条件下的辅助链路，能力受传播、噪声、带宽和确认机制限制。

编码声音通信的开源实现：https://github.com/ggerganov/ggwave

练习与讨论

声学传感器按介质和任务组合

情境	参考观测组合	结果解释与局限
强风降落	超声可给近距地面观测， 结合视觉/激光/合适雷达。	风、噪声、地面角度与吸声 可能使超声回波失效。
浑水中的UUV	主动声呐给障碍/水底斜距， 水压给自身水面参考深度。	两者参考点不同；声速与位姿 影响水底几何，相机受浑水限制。
遮挡后的警笛	被动音频阵列识别事件， 估计到达方位并引导观察。	反射和自噪影响方向； 单次远场时差不直接给距离。

本章目录

常用感知传感器

第八章 多模态感知与智能决策

8.1 背景意义与图像处理基础

8.2 目标识别、跟踪与光流估计

8.3 定位建图与预测规划

8.4 常用感知传感器

8.5 多模态感知坐标转换

8.6 多模融合与控制决策

8.7 关键工具与框架接口

8.8 实验案例与真机迁移

8.9 习题与课堂讨论

本节 5 个教学单元

8.4.1 视觉相机
教材对应：第8.1.4.1节

8.4.2 激光雷达
教材对应：第8.1.4.2节

8.4.3 雷达
教材对应：第8.1.4.3至8.1.4.5节

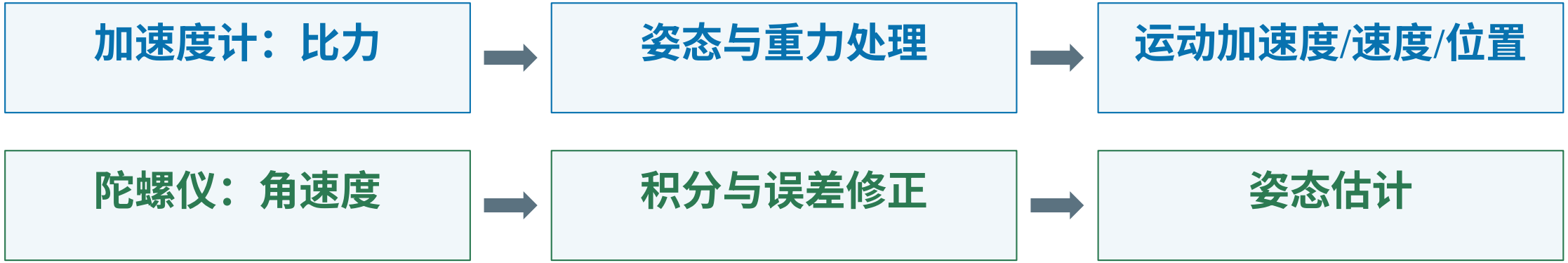
8.4.4 声学传感器
教材对应：第8.1.4.6至8.1.4.8节

8.4.5 其他传感器
教材对应：第8.1.4.9节

8.4.5 其他传感器：惯性测量单元

惯性测量提供高频自身运动观测

惯性测量单元（IMU）以三轴加速度计和三轴陀螺仪测量比力与角速度；惯性导航系统（INS）在此基础上估计运动状态。

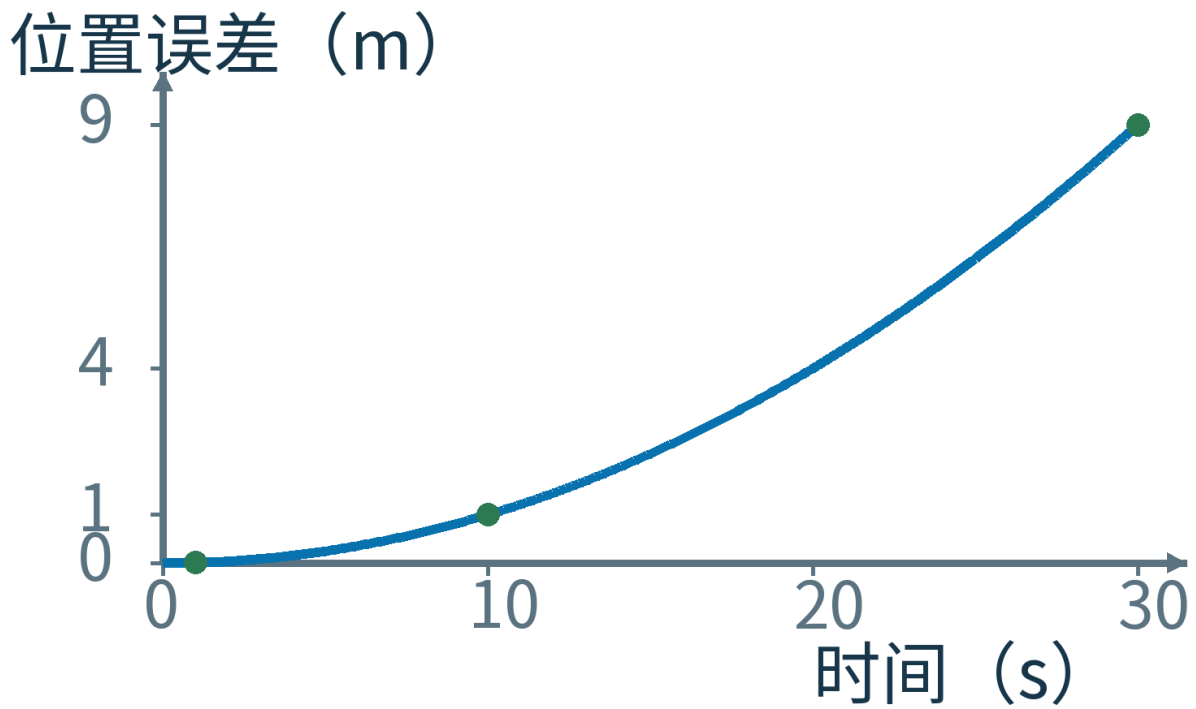


$$\mathbf{f} = \mathbf{a} - \mathbf{g}$$

同一坐标系的理想简化：$\mathbf{f}$为比力，$\mathbf{a}$为运动加速度，$\mathbf{g}$为重力。静止时比力幅值约为 $9.81\ \mathrm{m/s^2}$。

8.4.5 其他传感器：惯性漂移算例

恒定偏置使位置误差随时间平方增长



图：恒定偏置的理论位置误差

静止单轴：$b_a = 0.02\ \mathrm{m/s^2}$。
$T = 10\ \mathrm{s}$；初始误差取零。
忽略姿态误差与随机噪声。

$$\Delta v = b_a T = 0.20\ \mathrm{m/s}$$

$$\Delta p = \frac{1}{2} b_a T^2 = 1.00\ \mathrm{m}$$

1/10/30s：0.01/1/9m。
长期位置漂移需外部观测约束。

全球导航卫星系统（GNSS）、视觉或激光观测可约束惯性积分漂移。

8.4.5 其他传感器：气压高度

参考气压把压力变化变成相对高度

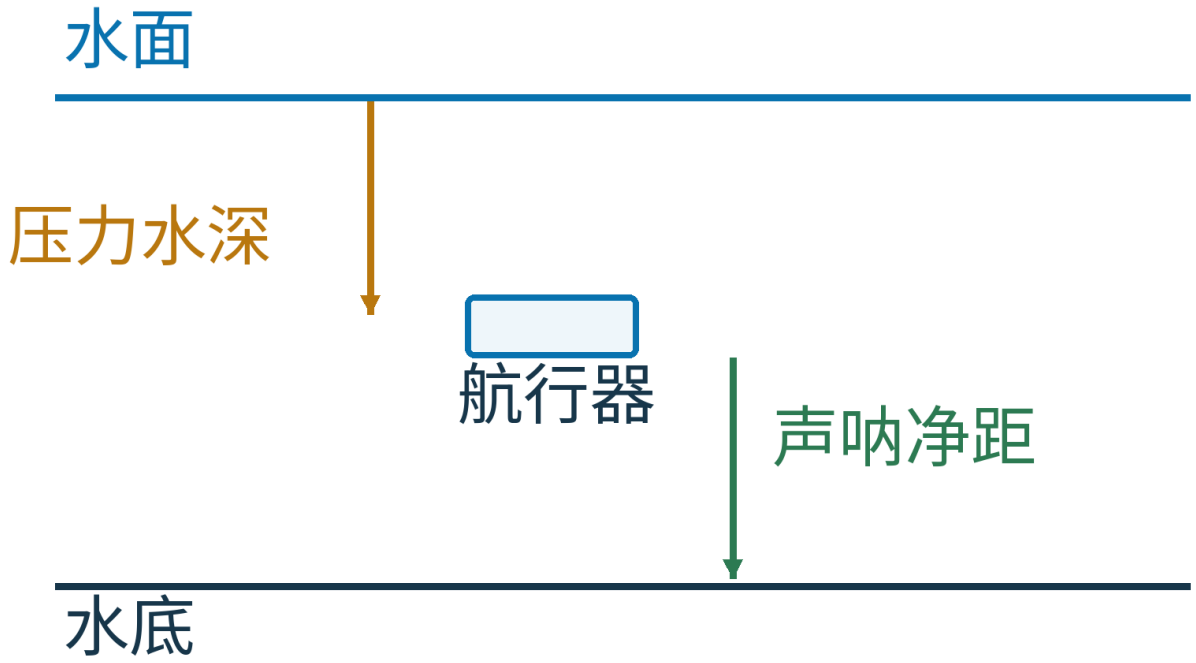
$$\Delta h = \frac{R_a T}{g} \ln\left(\frac{p_0}{p}\right)$$

等温干空气近似：$R_a = 287\ \mathrm{J/(kg \cdot K)}$为比气体常数，$T = 293\ \mathrm{K}$，$g = 9.81\ \mathrm{m/s^2}$。$p_0$为参考压力，$p$为当前压力。

给定或结果	数值与含义	实际使用条件
参考/当前气压	101325 / 101205 Pa	压力下降，对应相对上升。
相对高度	10.16 m	随温度、气流和参考压力改变。
融合用途	GNSS/视觉补充垂直位置。	地形跟随需对地测距或地形图。

8.4.5 其他传感器：水压测深

表面压力与水密度确定水深



图：水面参考深度与到底净距

$$\Delta p = p - p_0 = \rho_w g h$$

$$h = \frac{100552.5}{1025 \times 9.81} = 10.0\ \mathrm{m}$$

$\rho_w = 1025\ \mathrm{kg/m^3}$，$g = 9.81\ \mathrm{m/s^2}$。$p_0$为水面参考压力，压力增量约100.55kPa；本例近似静水、恒定密度。

水压给水面参考深度；声呐给目标或水底相对距离，两者不能直接互换。

8.4.5 其他传感器：磁力计

地磁方向为航向提供参照

三轴地磁观测 → 倾斜补偿与磁校准 → 磁北参考航向

影响因素	观测如何改变	解释与处理
机体倾斜	磁场向量随机体方向改变。	姿态投影到水平面；磁北转真北需磁偏角。
硬铁/软铁	固定磁源形成偏置； 材料改变方向或尺度。	做偏置及尺度/方向校准，避开污染位置。
电流与载荷	电机、电源及金属结构带来干扰。	结合IMU、GNSS及其他方向信息校正。

8.4.5 其他传感器：温度与湿度

环境量影响测量尺度与设备工况

观测	怎样影响系统	对应调节或解释
环境温度	改变空气声速和器件温漂。	修正测距尺度，按标定模型补偿温漂。
环境湿度	改变传播/凝露条件与工作环境。	结合温度判断工况，防护和调整任务。
部件温度	反映电池、电机或传动热状态。	热管理和输出调节需部件测点。
温度与压力	共同改变空气密度与推进条件。	辅助推进性能评估、能源与控制调整。

环境温湿度不替代部件温度；测点位置和自发热会影响读数。

练习与讨论

为三种无人系统建立观测组合

任务情境	要回答的问题	作答要求
仓库移动平台	目标是什么？近距结构怎样？ 卫星信号暂失时怎样保持运动估计？	选择外部观测与自身观测， 说明低纹理/遮挡或积分漂移。
夜间低空飞行	夜间热目标和前方障碍在哪里？ 当前姿态与参考高度怎样获得？	检查光照/雨雾、视场和散射； 区分参考高度与离地高度。
浑水中的UUV	离水面多深？距离水底和障碍多远？ 自身运动怎样保持连续？	分别标出压力与声呐的零点， 说明声速、位姿与相机限制。

每种方案写出：直接量测、估计状态、一个失效来源，以及坐标/时间/零点条件。

参考要点

组合传感器要补齐观测缺口

情境	参考组合及观测用途	关键解释与条件
仓库	RGB识别目标，双目/RGB-D或激光测几何；IMU提供比力与角速度。	弱纹理与遮挡影响几何；惯性积分有漂移，外部位置观测约束长期误差。
夜间低空	热成像观察热目标，雷达测距离与运动；IMU和气压补自身状态。	参考气压高度不等于离地高度；视场、散射与天气影响障碍检出。
浑水UUV	主动声呐给障碍/水底斜距，水压给自身深度；IMU补短时运动。	压力水深与声呐净距零点不同；温盐压影响声速，浑水限制相机观测。

本节小结

测量机制、参考系与环境共同决定可用信息

- **先看机制：**光、电磁波、声波、惯性和环境量分别提供外观、距离、运动或工况信息。
- **区分输出：**彩色像素、深度、点云、比力与估计位姿不是同一种数据；语义依赖后续处理。
- **解释误差与未知：**视场、遮挡、传播、反射和互干扰影响可用观测；没有回波不直接代表自由空间。
- **对齐参考：**斜距、水深、对地净距和气压高度有不同基准；融合还需一致坐标与时间。

传感器互补的前提是测量能够相互对应。