

SLAM理论与系统

同济大学计算机科学与技术学院
—朱亚萍

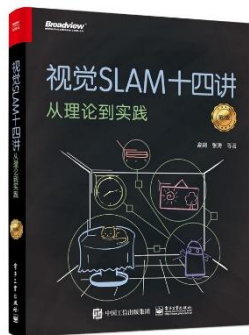


课程信息:

参考书:

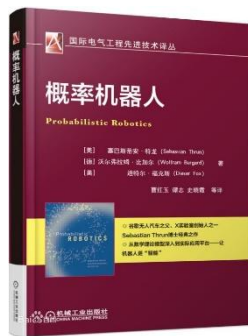
1. 《视觉SLAM十四讲——从理论到实践》

作者: 高翔 等



2. 《概率机器人》 / 《Probabilistic Robotics》

作者: Sebastian Thrun



3. 《Multiple View Geometry in Computer Vision》

课程信息：

考核方式：

考核形式（考勤/过程考核/考试等）	考核方式(期末考试/期中考试/平时成绩等)	考核内容	比重（%）
考勤	平时成绩	到课出勤率	10
过程考核1	平时成绩	作业	15
过程考核2	平时成绩	作业	20
项目考核	平时成绩	课程项目	25
考核	课程报告	课程内容	30



课程信息：

先修课程：

高等数学、线性代数、概率论


联系方式：

办公室：济事楼507室

Email: yapingzhu@tongji.edu.cn

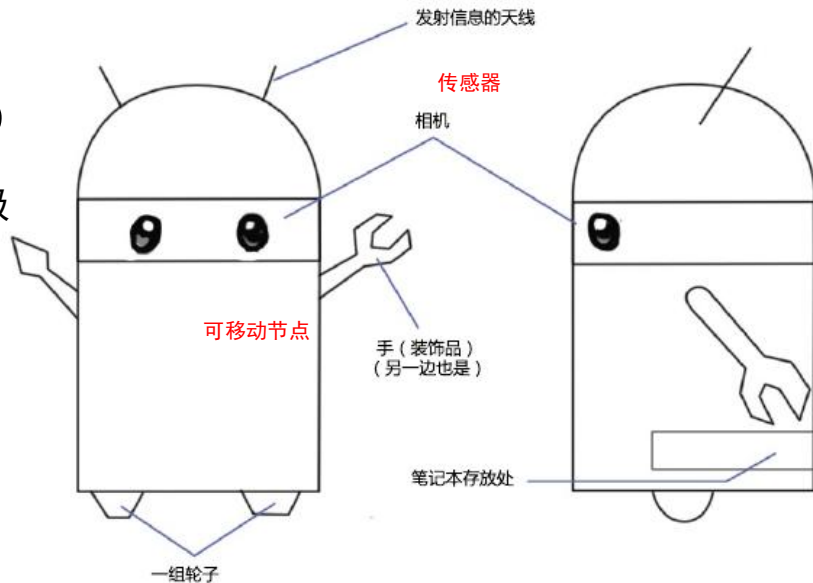


一、引言

- 定位（Localization）+ 建图（Mapping）+ simultaneously  SLAM
- SLAM的定义
 - **S**imultaneous **L**ocalization **a**nd **M**apping (SLAM)
 - 同时计算位姿和环境地图

一、引言

- 小萝卜的例子
- 对于移动机器人（Mobile robots）
 - 自主运动能力非常关键--实现更多高级功能的前提
 - 轮子和电机--移动
 - 传感器--感知环境，如相机
 - 通讯--接收与发送数据



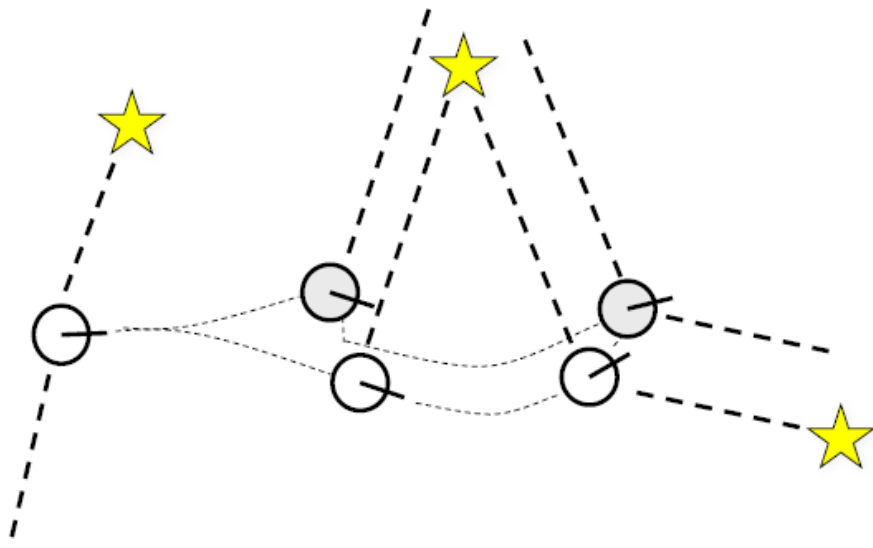
小萝卜设计图

一、引言

- Question : 自主运动（探索环境）两大基本问题
 - 我在什么地方？——定位
 - 周围长什么样子？——建图
 - 机器人的“内外兼修”：定位侧重对自身的了解，建图侧重对外在的了解

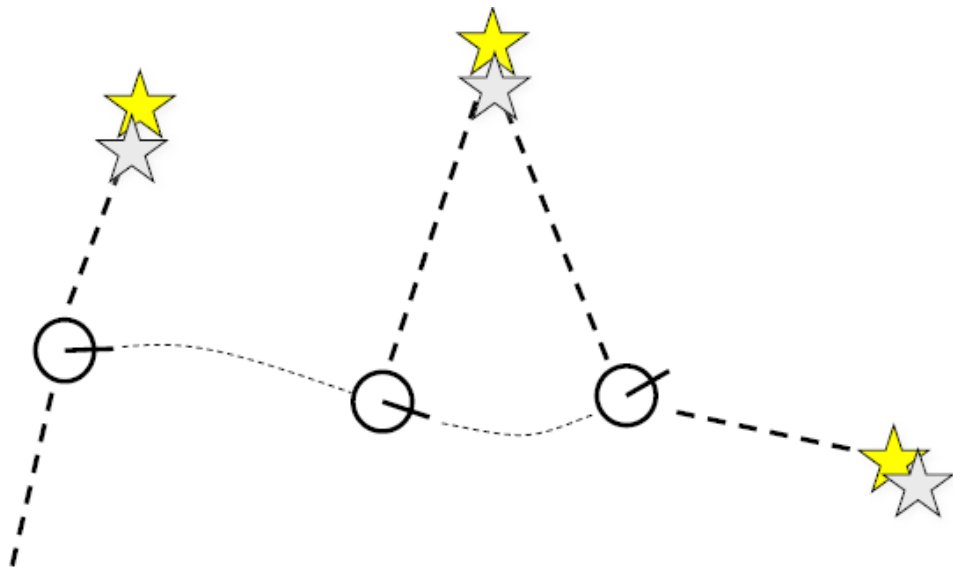
一、引言

- 定位（Localization）
 - 给定地标（landmarks）估计机器人的位姿（poses）



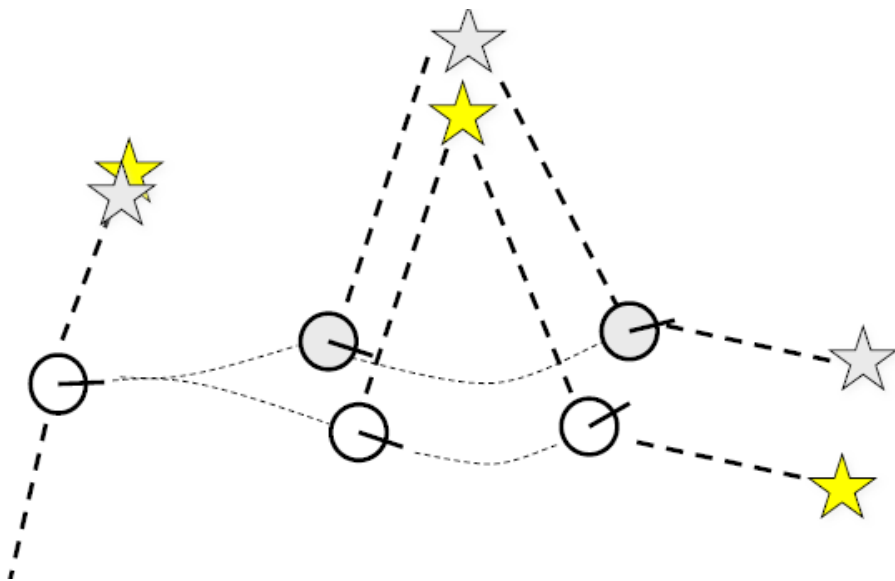
一、引言

- 建图（Mapping）
 - 通过机器人的位姿估计地标



一、引言

- SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)
 - 同时估计机器人的位姿以及估计地标



一、引言

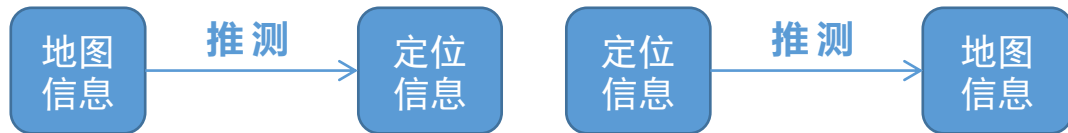
- SLAM是一个“chicken-or-egg”问题
 - 相互耦合的两个问题（定位、建图）
 - 准确的定位需要精确的地图
 - 精确的地图来自准确的定位



定位问题

VS

建图问题



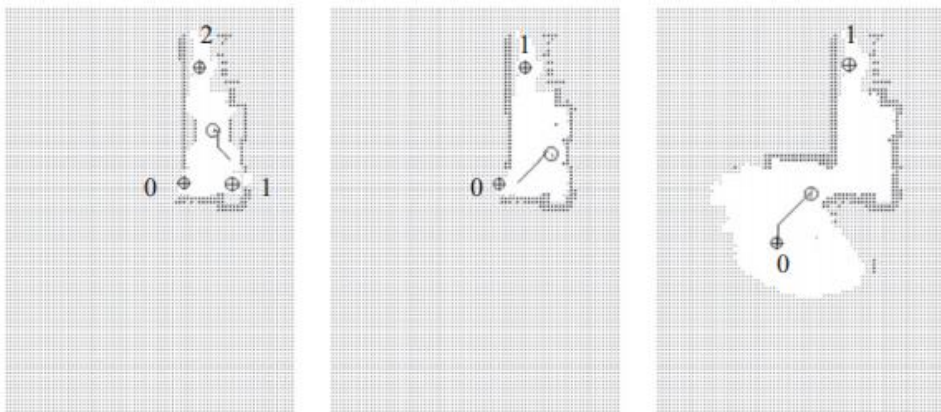
一、引言

SLAM究竟是什么？

定位问题：“我需要有地图，才能定位”

建图问题：“我需要有定位，才能建图”

SLAM问题：“定位和地图我都不需要，我自己能一边定位一边建图”



SLAM(Simultaneous Localization and Mapping)
同时定位与建图

一、引言

- SLAM
 - SLAM是实现真正自主机器人的一个基本问题。
 - SLAM是绝大多数导航系统的基础。



什么是SLAM:

https://www.bilibili.com/video/BV1FW4y1M7PV/?vd_source=6e407eea1368d3f929db36519a09dce6

一、引言

SLAM应用

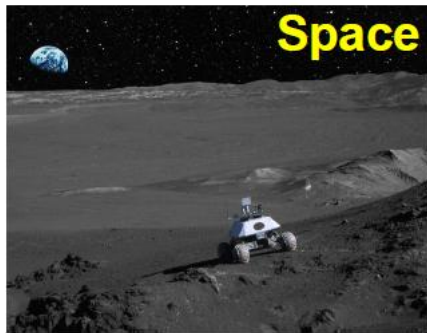


一、引言

- SLAM应用
 - SLAM是一系列室内、室外、空中和水下应用的核心。

- 举例

- 室内: 吸尘器, 割草机
 - 空中: 使用无人驾驶飞行器进行监视
 - 水下: 暗礁监控
 - 地下: 矿山勘探
 - 太空: 地形测绘定位



一、引言

- SLAM产业应用与生态

- 导览机器人
- 安防机器人
- 清扫机器人
- 配送机器人
- 家庭服务机器人
- 农业机器人
- 无人驾驶
- 特种作业机器人
- 航天军工
- 其他



一、引言

- SLAM产业应用与生态

- 导览机器人
- 安防机器人
- 清扫机器人
- 配送机器人
- 家庭服务机器人
- 农业机器人
- 无人驾驶
- 特种作业机器人
- 航天军工
- 其他



一、引言

- SLAM产业应用与生态

- 导览机器人
- 安防机器人
- 清扫机器人
- 配送机器人
- 家庭服务机器人
- 农业机器人
- 无人驾驶
- 特种作业机器人
- 航天军工
- 其他



扫地机器人：

<https://v.youku.com/video?vid=XNDY2MTk3MDM4MA%3D%3D>

一、引言

- SLAM产业应用与生态

- 导览机器人
- 安防机器人
- 清扫机器人
- 配送机器人
- 家庭服务机器人
- 农业机器人
- 无人驾驶
- 特种作业机器人
- 航天军工
- 其他



送餐



送快递



送毛巾



港口集装箱搬运

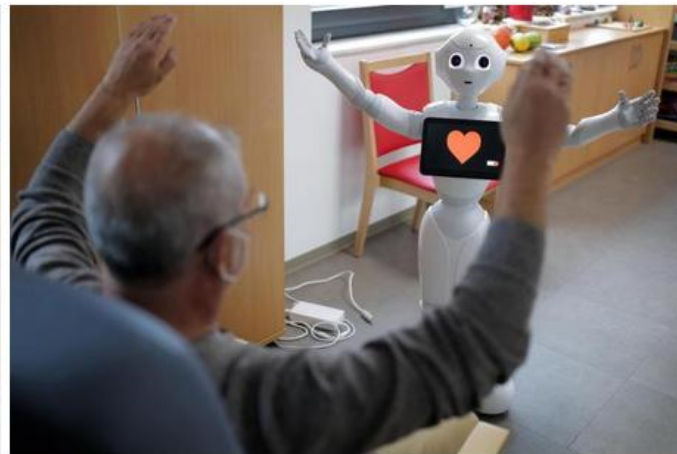


工厂物料运送AGV

一、引言

- SLAM产业应用与生态

- 导览机器人
- 安防机器人
- 清扫机器人
- 配送机器人
- 家庭服务机器人
- 农业机器人
- 无人驾驶
- 特种作业机器人
- 航天军工
- 其他



一、引言

- SLAM产业应用与生态

- 导览机器人
- 安防机器人
- 清扫机器人
- 配送机器人
- 家庭服务机器人
- 农业机器人
- 无人驾驶
- 特种作业机器人
- 航天军工
- 其他



一、引言

- SLAM产业应用与生态

- 导览机器人
- 安防机器人
- 清扫机器人
- 配送机器人
- 家庭服务机器人
- 农业机器人
- 无人驾驶
- 特种作业机器人
- 航天军工
- 其他



一、引言

- SLAM产业应用与生态

- 导览机器人
- 安防机器人
- 清扫机器人
- 配送机器人
- 家庭服务机器人
- 农业机器人
- 无人驾驶
- 特种作业机器人
- 航天军工
- 其他



一、引言

- SLAM产业应用与生态

- 导览机器人
- 安防机器人
- 清扫机器人
- 配送机器人
- 家庭服务机器人
- 农业机器人
- 无人驾驶
- 特种作业机器人
- 航天军工
- 其他



一、引言

- SLAM产业应用与生态

- 导览机器人
- 安防机器人
- 清扫机器人
- 配送机器人
- 家庭服务机器人
- 农业机器人
- 无人驾驶
- 特种作业机器人
- 航天军工
- 其他



一、引言

- SLAM产业应用与生态

- 导览机器人
- 安防机器人
- 清扫机器人
- 配送机器人
- 家庭服务机器人
- 农业机器人
- 无人驾驶
- 特种作业机器人
- 航天军工
- 其他



火星探测



机器人士兵



救援抢险



深海勘探



农业采摘



无人驾驶



物流配送



服务机器人

总之，就是需要自主移动的各种场景应用

一、引言

- How to do SLAM? ——Sensors（传感器）
 - 在房间地板上铺设导引线
 - 在墙壁上贴识别二维码
 - 在桌子上放置无线电定位设备（仓储物流机器人）
 - 在室外，安装GPS信号接收器（手机或汽车）

一、引言

- How to do SLAM? ——Sensors (传感器)



(a)



(d)



(e)



(b)



(c)



(f)

两类传感器

- 安装于环境中的：
 - 二维码 Marker
 - GPS
 - 导轨、磁条
- 携带于机器人本体上的：
 - IMU
 - 激光
 - 相机

一、引言

- 安装于环境中的传感设备：
 - 能够直接测量机器人的位置信息，简单有效地解决定位问题
 - 必须人工布置，在一定程度上限制了机器人的使用范围
- 环境中的传感器限制了应用环境
 - 需要环境允许使用GPS、允许贴marker
 - 而SLAM强调未知环境
 - 更重视便携式传感器

1. Def. of SLAM

Sensors

The methods and difficulty of SLAM depend heavily on the equipped sensors.

• Lasers

- Accurate
- Fast
- Long history in research
- Heavy
- Expensive

• Examples: SICK, Velodyne, Rplidar



• Cameras

- Cheap
- Light-weight
- Rich information
- High computation cost
- Work under assumptions

• Categories: monocular, stereo, RGBD



一、引言

- 安装于机器人本体上的传感设备：
 - 激光传感器、相机、轮式编码器、惯性测量单元（IMU）等
 - 测量的一般是**间接物理量**而不是直接的位置数据（如加速度和角速度、轮子转动角度、相机和激光传感器读取的外部观测数据等）
 - 通过间接手段推算自身位置
 - 不对环境提出任何要求，可适用于未知环境

https://www.bilibili.com/video/BV15Z4y187uR/?spm_id_from=333.337.search-card.all.click&vd_source=6e407eea1368d3f929db36519a09dce6

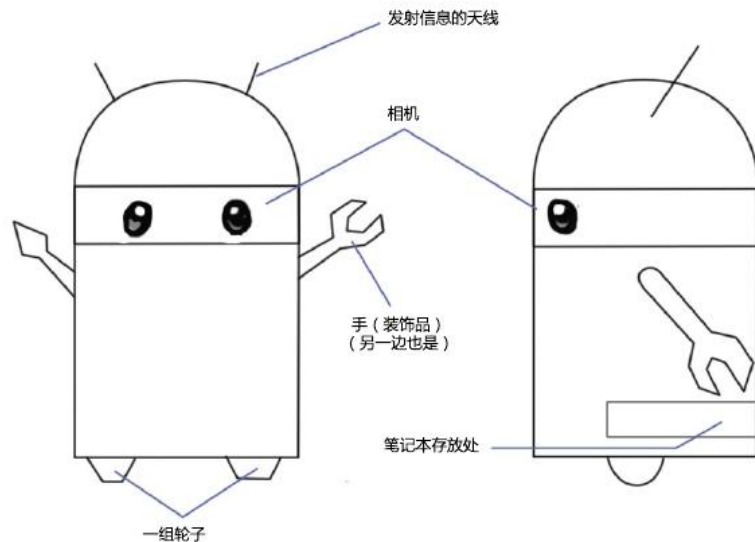
一、引言

- 对于移动机器人（Mobile robots）
 - 主要传感器：相机（使用相机解决定位和建图问题）



视觉SLAM

- 主要传感器：激光 ➡ 激光SLAM
- FastSLAM、GraphSLAM等等。



小萝卜设计图

一、引言--视觉SLAM

- 相机--“眼睛”
 - 以一定速率拍摄周围的图像，形成一个连续的**视频流**
- 分类（工作方式）
 - 单目 Monocular（一个摄像头）
 - 双目 Stereo（两个）
 - 深度 RGB-D（多个）
 - 其他：鱼眼、全景、Event Camera, etc.



一、引言--视觉SLAM

- 相机的本质
 - 以二维投影形式记录了三维世界的信息
 - 此过程丢掉了一个维度：距离
- 各类相机主要区别：有没有深度信息
 - 单目：没有深度，必须通过移动相机产生深度 Moving View Stereo
 - 双目：通过视差计算深度 Stereo
 - RGB-D：通过物理方法测量深度（除了采集彩色图片，还能读出每个像素与相机之间的距离）

一、引言--视觉SLAM

单目相机：

- 无法通过单张图片计算场景中物体与相机之间的距离（远近）

人本身的直觉--这些信息会帮助我们判断物体的远近及大小

- 近处的物体会挡住远处的物体
- 太阳、月亮等天体一般在很远的地方
- 物体受光照后会留下影子等

一、引言--视觉SLAM

单目相机



在单张图像里，无法确定一个物体的真实大小：

- 可能是很近但很小的物体
- 可能是很远但很大的物体

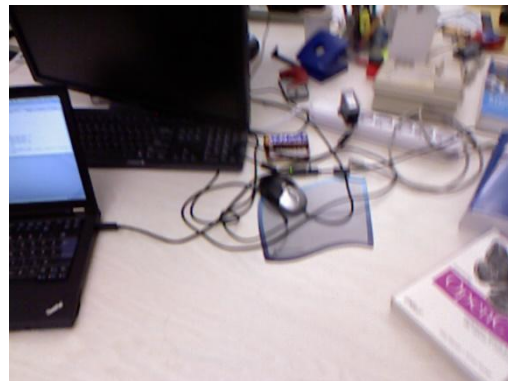
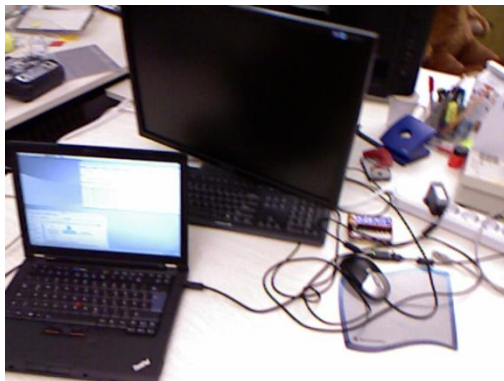
它们成像相同，必须**移动相机（转换视角）**，才能估计相机的运动，同时估计场景中物体的远近和大小（场景的结构）。

图 2-4 单目视觉中的尴尬：不知道深度时，手掌上的人是真人还是模型？

一、引言--视觉SLAM

- 当相机运动起来时

- 场景和成像有几何关系--人向右移动, 眼睛看到的物体向左移动
- 近处物体的像运动快
- 远处物体的像运动慢
- 相机移动时, 物体在图像上的运动形成视差 (Disparity), 可以推断距离



一、引言--视觉SLAM

单目SLAM估计的轨迹和地图与真实相差一个因子--**尺度**（scale）：

- 无法确定电影场景中物体的“真实尺度”：真实物体还是模型？
- 如果相机的运动与场景同时放大相同倍数，单目相机看到的像是一样的。

无法确定深度



单目SLAM无法仅凭图像确定真实尺度，称为**尺度不确定性**（Scale Ambiguity）。



双目相机、深度相机

一、引言--视觉SLAM

- 双目相机：左右眼的微小差异判断远近（**基线**--两个相机之间的距离）
- 同样，远处物体变化小，近处物体变化大——推算距离 **计算量非常大**

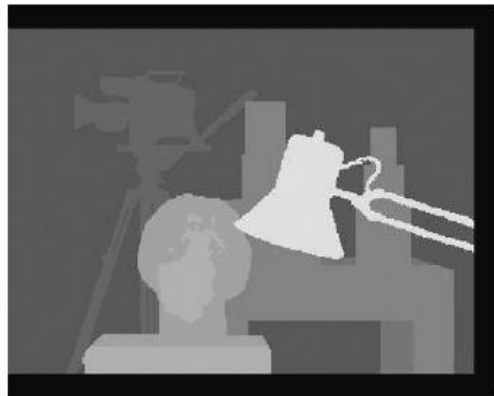
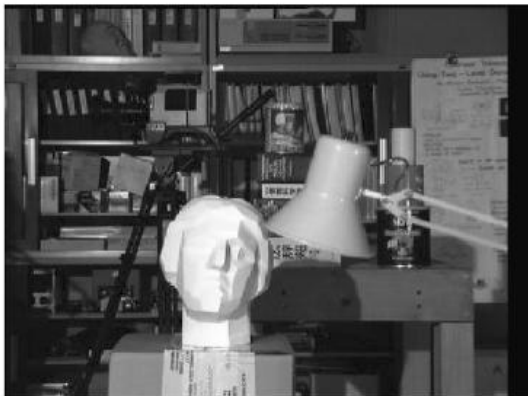


图 2-5 | 双目相机的数据：左眼图像，右眼图像。通过左右眼的差异，能够判断场景中物体离相机距离。

一、引言--视觉SLAM

双目相机：

- 需要大量计算估计每一个像素点的深度
- 基线距离越大，能够测量的物体越远
- 距离估计通过比较“左右眼”图像获得，不需要依赖其他传感器（可用于室内和室外）

缺点：1.配置与标定均比较复杂；2.深度量程和精度受双目的基线与分辨率所限；3.视差的计算需要巨大的计算资源



计算量是目前双目的主要问题之一。

一、引言--视觉SLAM

- 深度相机（RGB-D相机）

- 物理手段测量深度--节省计算资源
- 红外结构光、ToF（主动向物体发射光并接收返回的光，测出物体与相机之间的距离）
- 主动测量，功耗大
- 深度值较准确
- 缺点：测量范围窄、噪声大、视野小、易受日光干扰、无法测量透射材质等，多用于室内环境



RGBD 数据：深度相机可以直接测量物体的图像和距离，从而恢复三维结构

一、引言--视觉SLAM

- 共同点

- 利用图像和场景的几何关系，计算相机运动 and 场景结构（Motion & Structure）
- 三维空间的运动和结构
- 图像来自连续的视频

视觉SLAM通过一系列图像进行定位和地图构建



完善的算法框架

一、引言--视觉SLAM

视觉SLAM框架：

- 传感器信息读取
- 前端视觉里程计：Visual Odometry
- 后端优化：Optimization
- 回环检测：Loop Closing
- 建图：Mapping

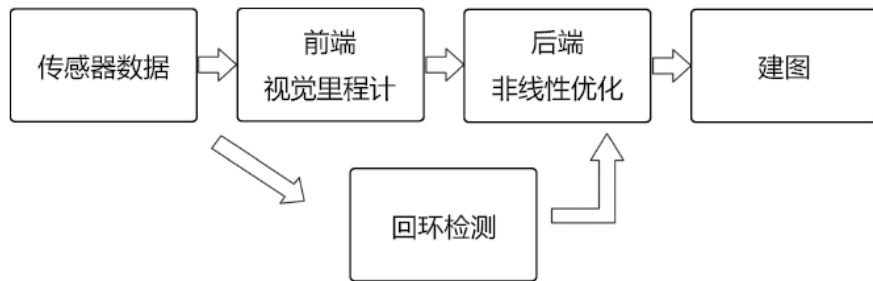


图 2-7 整体视觉 SLAM 流程图。

一、引言--视觉SLAM

- 传感器信息读取：相机图像信息的读取和预处理。
- 前端视觉里程计：估算相邻图像间相机的运动，以及局部地图的样子。
- 后端优化：接收不同时刻VO测量的相机位姿以及回环检测的信息，对它们进行优化，得到全局一致的轨迹和地图。
- 回环检测：判断机器人是否到达过先前的位置。
- 建图：根据估计的轨迹，建立与任务要求对应的地图。

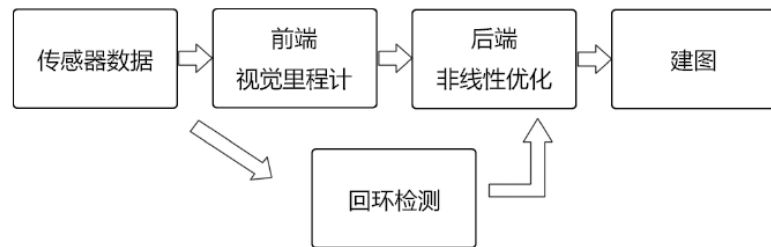


图 2-7 整体视觉 SLAM 流程图。

一、引言--视觉SLAM

- 视觉里程计（Visual Odometry）
 - 相邻图像之间的相机运动
 - 基本形式：通过两张图像计算运动和结构
 - 不可避免地有漂移
- 方法-计算机如何通过图像确定相机的运动呢？
 - 特征点法（第七讲）
 - 直接法（第八讲）



图 2-8 相机拍摄到的图片与人眼反应的运动方向



一、引言--视觉SLAM

- 累积漂移 (Accumulating Drift)

- 里程计的工作方式
- 先前时刻的误差会传递到下一时刻

- 解决方法:

- 后端优化
- 回环检测

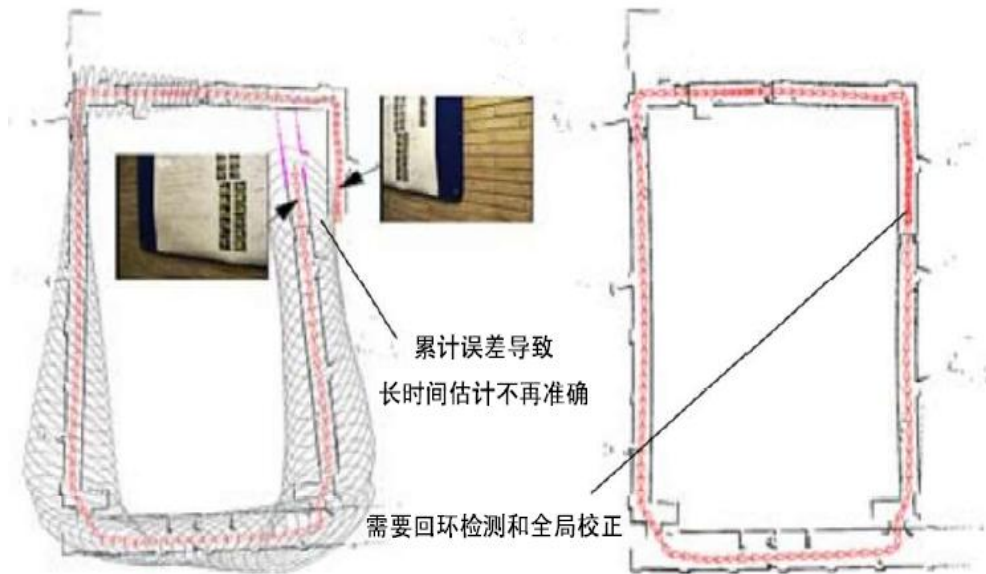


图 2-9 累积误差与回环检测的校正结果 [10]。

一、引言--视觉SLAM

- 后端优化
 - 从带有噪声的数据中优化轨迹和地图（状态估计问题）
 - 最大后验概率估计 (Maximum-a-Posteriori, MAP) --从带有噪声的数据中估计整个系统的状态，以及这个状态估计的不确定性有多大
 - 反映SLAM问题的本质：对运动主体自身和周围环境空间不确定性的估计
 - 前期以EKF（滤波器）为代表，现在以图优化为代表（第六、九、十讲）

一、引言--视觉SLAM

- 回环检测（闭环检测）
 - 解决位置估计随时间漂移的问题
 - 检测机器人是否回到早先位置
 - 识别到达过的场景
 - 设置标志物（二维码）、计算图像间的相似性（利用图像本身）
- 方法：词袋模型（第十一讲）

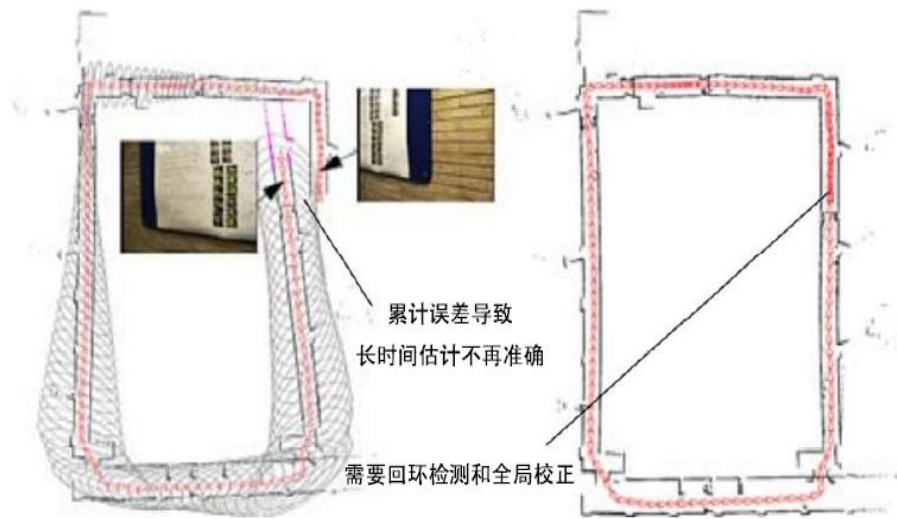
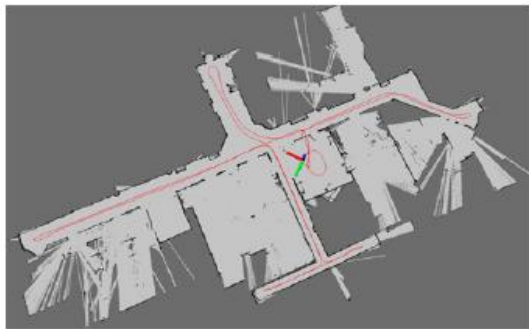


图 2-9 累计误差与回环检测的校正结果 [10]。

一、引言--视觉SLAM

- 建图（第十二讲）

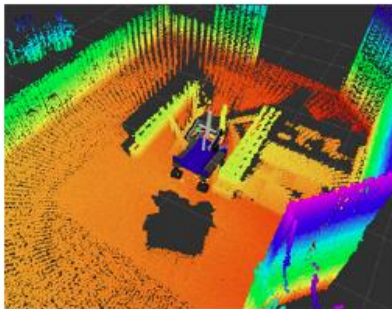
- 用于导航、规划、通讯、可视化、交互等
- 度量地图--精确表示地图中的位置关系
 - ✓ 稀疏地图：由路标组成的地图（定位）
 - ✓ 稠密地图：建模所有看到的東西（导航）
- 拓扑地图：强调地图元素之间的关系
 - ✓ 是一个图（graph），由节点和边组成
 - ✓ 只考虑节点间的连通性



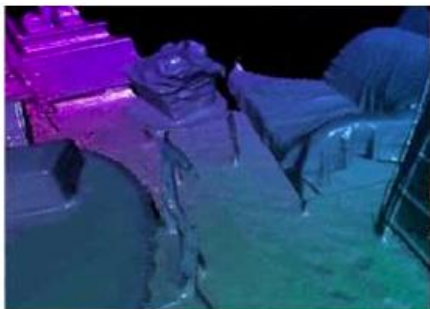
2D 栅格地图



2D 拓扑地图



3D 点云地图



3D 网格地图

一、引言

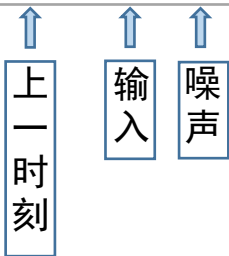
- SLAM问题的数学描述

- 离散时间: $t = 1, 2, \dots, k$
- 小萝卜的位置: x_1, x_2, \dots, x_k

需要把它们都看成随机变量，服从概率分布

- 小萝卜是从上一个时刻运动到下一个时刻的
- 运动方程:

$$x_k = f(x_{k-1}, u_k, w_k)$$



一、引言

- SLAM问题的数学描述

- 路标（三维空间点）： y_1, y_2, \dots, y_n
- 传感器在位置 x_k 处，探测到了路标 y_j
- 观测方程：

$$z_{k,j} = h(x_k, y_j, v_{k,j})$$

一、引言

- 两个基本方程：针对不同的传感器，有不同的参数化形式。

$$\begin{array}{l} \text{运动方程} \\ \text{观测方程} \end{array} \left\{ \begin{array}{l} \boldsymbol{x}_k = f(\boldsymbol{x}_{k-1}, \boldsymbol{u}_k, \boldsymbol{w}_k) \\ \boldsymbol{z}_{k,j} = h(\boldsymbol{y}_j, \boldsymbol{x}_k, \boldsymbol{v}_{k,j}) \end{array} \right. .$$

将SLAM问题构建成为一个状态估计问题：如何通过带有噪声的测量数据，估计内部的、隐藏着的状态变量？

- Question:
 - 位置是三维的，如何表述？——第三、四讲
 - 观测是相机中的像素点，如何表述？——第五讲
 - 已知 \boldsymbol{u} , \boldsymbol{z} 时，如何推断 \boldsymbol{x} , \boldsymbol{y} ？——第六讲

一、引言

- SLAM实践部分:

源代码: <https://github.com/gaoxiang12/slambook2>

- 安装Ubuntu
- 理解一个程序由哪些部分构成
- Hello SLAM
- 头文件和库文件
- 使用IDE

[https://www.bilibili.com/video/BV1C4411j7St/?spm_id_from=333.788.recommen
d_more_video.6&vd_source=6e407eea1368d3f929db36519a09dce6](https://www.bilibili.com/video/BV1C4411j7St/?spm_id_from=333.788.recommen%20more_video.6&vd_source=6e407eea1368d3f929db36519a09dce6)