中国海洋大学
OCEAN UNIVERSITY OF CHINA

实验课 II

Visual SLAM/Robot Integration

杨雅麟

计算机科学与技术学院

目录

1.实验背景与核心目标

1. 实验背景（Experiment Background）

- ROS（Robot Operating System）是机器人开发的核心中间件，并非传统操作系统，它解决了机器人多模块（如传感器、控制器、执行器）之间的通信、数据管理与功能集成问题，是实现机器人导航、自主控制的基础框架。
- 在车辆导航（VNav）领域，机器人需实时处理不同部件的坐标系数据（如激光雷达、相机、车轮里程计），而 tf 工具与齐次变换是统一坐标系、实现数据融合的关键技术。
- tf 负责跟踪各坐标系的动态关系，齐次变换则用数学方法统一表示“平移 + 旋转”，二者结合可确保不同传感器数据在同一坐标系下兼容，为后续导航算法（如路径规划、定位）提供准确数据支撑。

2. 核心目标（Core Objectives）

- 掌握 ROS 的完整安装流程，包括软件源配置、环境变量设置，确保最终能启动 ROS 核心服务（roscore）。
- 理解 ROS 的基础概念：节点（Node）、话题（Topic）、功能包（Package），能通过小海龟例程验证节点通信。
- 掌握 tf 工具的核心逻辑：坐标系树管理、变换发布与监听，理解齐次变换的数学原理（4×4 矩阵结构）。
- 完成 5 个实操练习
  - 安装 ROS
  - 使用 TF 控制无人运动
  - 无人机按照轨迹运动
  - 数学推导（Mathematical derivations）
  - 四元数属性（More properties of quaternions）

2.ROS 基础认知与安装步骤

1. ROS 基础介绍（ROS Basics Introduction）

- 定义：ROS 是“Robot Operating System”的缩写，本质是机器人开发中间件（Middleware），提供工具链与通信框架，支持 C++/Python 等语言开发。
- 核心功能：
  - 节点通信：通过“话题（Topic，异步）”和“服务（Service，同步）”实现不同节点（如控制节点、可视化节点）的数据交互。
  - 功能包管理：以“功能包（Package）”为单位组织代码，每个包包含源码、配置文件、依赖说明，便于复用与协作。
  - 工具链支持：内置 rviz（3D 可视化工具）、gazebo（仿真环境）、tf（坐标系管理）等工具，降低开发难度。
  - 实验版本提示：ROS 版本需与 Ubuntu 系统匹配（如 Ubuntu 20.04 → ROS Noetic；Ubuntu 18.04 → ROS Melodic），本实验以“Ubuntu 20.04 + ROS Noetic”为例。

2. ROS 安装详细步骤

详细步骤见文档:
https://spurious-cornflower-507.notion.site/Lab2-ROS-105e9f90e72480519605ed793e6662dc

3.tf 工具与齐次变换理论

1. tf 工具介绍（tf Tool Introduction）

- 定义：tf 是 ROS 中用于坐标系树管理的工具集，能实时跟踪机器人各部件（如基座、相机、激光雷达）的坐标系位置与姿态关系，支持多坐标系间的快速查询与转换。
- 核心功能：
  - 记录变换关系：通过“发布者（Publisher）”节点实时发布两个坐标系的相对变换（如“baselink→cameralink”的平移 + 旋转），并缓存最近 10 秒的变换数据。
  - 查询变换结果：通过“订阅者（Subscriber）”节点查询任意两个坐标系的相对姿态（位置 x/y/z + 旋转四元数），无需手动计算链式变换（如 A→B、B→C，tf 可自动推导 A→C）。
  - 可视化与调试：提供 viewframes（生成坐标系树 PDF）、rviz（实时显示坐标系）等工具，便于调试变换关系是否正确。
- 示例场景：机器人移动时，激光雷达检测到障碍物坐标为“激光雷达坐标系（laser）”下的 (5,0,0)，通过 tf 可快速转换为“基座坐标系（baselink）”下的坐标，供导航算法使用。

2. 齐次变换理论（Homogeneous Transformation Theory）

内容:

- 定义: 齐次变换是用 **4** $\times$ **4** 矩阵统一表示“平移”和“旋转”的数学方法，可避免分次计算（先旋转后平移）带来的误差，是 tf 工具的底层数学基础。
- 数学表达: 齐次变换矩阵 $\mathbf{T} = \begin{bmatrix} R & t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix}$
- R: 3×3 旋转矩阵，描述坐标系的姿态（如绕 z 轴旋转 θ 角的矩阵为 $\begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$）。

- t: 3×1 平移向量，描述坐标系的位置（如沿 x 轴平移 a、y 轴平移 b 的向量为 $\begin{bmatrix} a \\ b \\ 0 \end{bmatrix}$）。
- 0^T: 1×3 零向量，1: 齐次项，用于统一矩阵运算规则。
- 坐标变换公式: 若点 P 在坐标系 A 下的齐次坐标为 $P_A = \begin{bmatrix} x_A \\ y_A \\ z_A \\ 1 \end{bmatrix}$，坐标系 B 相对 A 的齐次变换为 $T_{A \to B}$，则点 P 在 B 下的齐次坐标为: $P_B = T_{A \to B} \times P_A$
- 应用场景：机器人基座到传感器的坐标转换、机械臂末端执行器的位姿计算、移动机器人的运动指令生成（如从当前位姿到目标位姿的变换）。

3. tf 与齐次变换的关联

- tf 工具的底层逻辑：tf 发布的“坐标系变换”本质是将“旋转四元数 + 平移向量”封装为齐次变换矩阵，并存储在缓存中；查询变换时，tf 自动将矩阵运算结果转换为“平移向量 + 旋转四元数”返回给用户。
- 示例：若“base_link→laser”的变换为：平移 $(0.5, 0, 0)$（laser 在 base_link 前方 0.5m）、绕 z 轴旋转 $0°$（无旋转），则对应的齐次变换矩阵为：

$$T_{\text{base}\to\text{laser}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0.5 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

当 laser 检测到点 $P_{\text{laser}} = (2, 0, 0, 1)$ 时，转换为 base_link 下的坐标为：

$$P_{\text{base}} = T_{\text{base}\to\text{laser}} \times P_{\text{laser}} = (2.5, 0, 0, 1)$$

即三维坐标 (2.5, 0, 0)。

4.实验内容

1. 实验 1

安装 ROS 并成功运行小海龟仿真

2. 实验 2

控制无人机运动

- 考察核心：通过 ROS 实现无人系统（无人机 / 移动机器人）的运动控制能力。具体要求：利用 ROS 的话题（Topics）、节点（Nodes）机制，编写控制节点发布运动指令（如速度、姿态指令），在仿真环境（如 Gazebo）或实际硬件中实现无人系统的自主运动（如定点悬停、路径跟随）。
- 课程关联：对应 MIT VNAV Lab 中“无人机 / 机器人控制”模块，需结合 geometrymsgs 消息类型（如 Twist 用于速度控制）、tf 坐标变换工具，实现从“指令发布”到“运动执行”的完整链路。该部分占分最高，体现对 ROS 实操能力和无人系统控制逻辑的核心考察。

3. 实验 3

根据要求控制两个无人机的轨迹运动

通过 ROS 的 rviz 工具可视化轨迹，结合 tf 变换分析不同坐标系（如世界坐标系、机体坐标系）下的轨迹表示

4. 实验 4

任务: Mathematical derivations

1. In the problem formulation, we mentioned that AV2's trajectory is an arc of parabola in the x–z plane of the world frame. Can you prove this statement?
2. Compute $o_2^1(t)$, i.e., the position of AV2 relative to AV1's body frame as a function of t.
3. Show that $o_2^1(t)$ describes a planar curve and find the equation of its plane Π.
4. Rewrite the above trajectory explicitly using a 2D frame of reference (x_p, y_p) on the plane found before. Try to ensure that the curve is centered at the origin of this 2D frame and that x_p, y_p are axes of symmetry for the curve.
5. Using the expression of $o_2^p(t)$, prove that the trajectory of AV2 relative to AV1 is an ellipse and compute the lengths of its semi-axes.

5. 实验 5

任务: More properties of quaternions

In the lecture notes, we have defined two linear maps $\Omega_1 : \mathbb{R}^4 \to \mathbb{R}^{4\times 4}$ and $\Omega_2 : \mathbb{R}^4 \to \mathbb{R}^{4\times 4}$, such that for any $q \in \mathbb{R}^4$, we have:

$$\Omega_1(q) = \begin{bmatrix} q_4 & -q_3 & -q_2 & q_1 \\ q_3 & q_4 & q_1 & q_2 \\ -q_2 & q_1 & q_4 & q_3 \\ -q_1 & -q_2 & -q_3 & q_4 \end{bmatrix}, \quad \Omega_2(q) = \begin{bmatrix} q_4 & q_3 & -q_2 & q_1 \\ -q_3 & q_4 & q_1 & q_2 \\ q_2 & -q_1 & q_4 & q_3 \\ -q_1 & -q_2 & -q_3 & q_4 \end{bmatrix}$$

The product between any two unit quaternions can then be explicitly computed as:

$$q_a \otimes q_b = \Omega_1(q_a) q_b = \Omega_2(q_b) q_a$$

In fact, the two linear maps Ω_1 and Ω_2 have more interesting properties, and you are asked to prove the following equalities:

1. For any unit quaternion q, both $\Omega_1(q)$ and $\Omega_2(q)$ are orthogonal matrices, i.e.,

$$\Omega_1(q)^T\Omega_1(q) = \Omega_1(q)\Omega_1(q)^T = I_4,$$

$$\Omega_2(q)^T\Omega_2(q) = \Omega_2(q)\Omega_2(q)^T = I_4.$$

   Intuitively, what is the reason that both $\Omega_1(q)$ and $\Omega_2(q)$ must be orthogonal?
2. For any unit quaternion q, both $\Omega_1(q)$ and $\Omega_2(q)$ convert q to be the unit quaternion that corresponds to the 3D identity rotation, i.e.

$$\Omega_1(q)^T q = \Omega_2(q)^T q = [0, 0, 0, 1]^T.$$

3. For any two vectors $x, y \in \mathbb{R}^4$, show the two linear operators commute, i.e.

$$\Omega_1(x)\Omega_2(y) = \Omega_2(y)\Omega_1(x),$$

$$\Omega_1(x)\Omega_2(y)^T = \Omega_2(y)^T\Omega_1(x).$$

5.附录

1. 参考网站

代码地址：https://github.com/MIT-SPARK/VNAV-labs
讲义地址：https://vnav.mit.edu/labs/lab2/exercises.html
教程地址：https://spurious-cornflower-507.notion.site/Lab2-ROS-105e9f90e72480519605ed793e6662dc