ROS Notebook

Wu Yutian

2021.11.13

前言

主要参考了胡春旭的《ROS 机器人开发实践》一书。

Wu Yutian

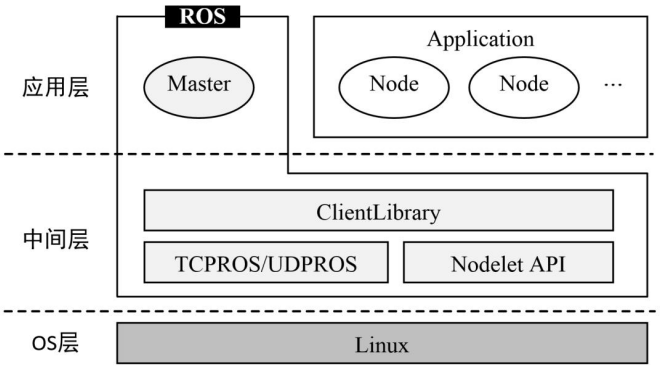
2021.11.13

Contents

Chapter 1

ROS 的基本架构——ROS1

1.1 整体架构



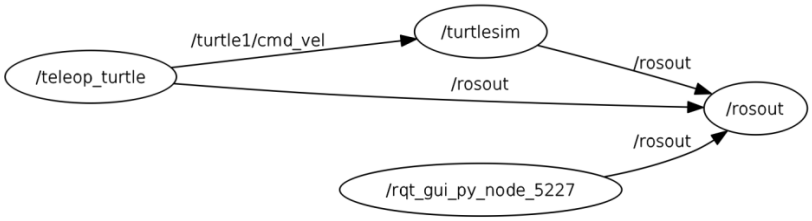
OS 层：是 ROS 依托的底层操作系统，一般是 Ubuntu。

中间层：最重要的就是基于 TCP/UDP 网络，进行封装形成的 TCPROS/UDPROS 通信系统，这其中包括了 Topic 的发布、订阅的通信方式，Service 的客户端、服务器的通信方式等。另外 ROS 还提供了一种进程内通信的方式——Nodelet，可以为多进程通信提供一种更优化的数据传输方式，适合对实时性要求较高的应用。

在通信机制的基础上，ROS 还在中间层提供了大量的机器人开发相关的实用功能，如：数据类型定义、坐标变换、运动控制等。

应用层：ROS 需要运行一个管理者——Matser，负责整个系统的正常运行。其他的一些相关的 ROS 功能包都是以节点（Node）的方式运行，一般来说，简单的开发工作只需要关注节点的标准输入输出接口，而不需要关注模块的内部实现。

1.2 计算图的视角



从计算图的视角来看 ROS 的功能模块，它们都是以节点为单位独立运行的，甚至可以分布于不同的主机中。

1.2.1 节点 Node

节点就是一些执行运算任务的进程，它们之间可以相互通信。

1.2.2 话题 Topic

消息以一种发布/订阅（publish/subscribe）的方式传递，发布者和订阅者并不了解彼此的存在，系统中可能有多个节点发布或者订阅同一个话题的消息。

1.2.3 服务 Service

对于双向的同步传输模式，采用基于客户端/服务器（Client/Server）的模型，包含请求和应答，类似于 Web 服务器，ROS 中只允许有一个节点提供指定命名的服务。

1.2.4 节点管理器 Master

节点管理器帮助 ROS 节点之间相互查找、建立连接，同时还为系统提供参数服务器，管理全局参数。

1.3 文件系统

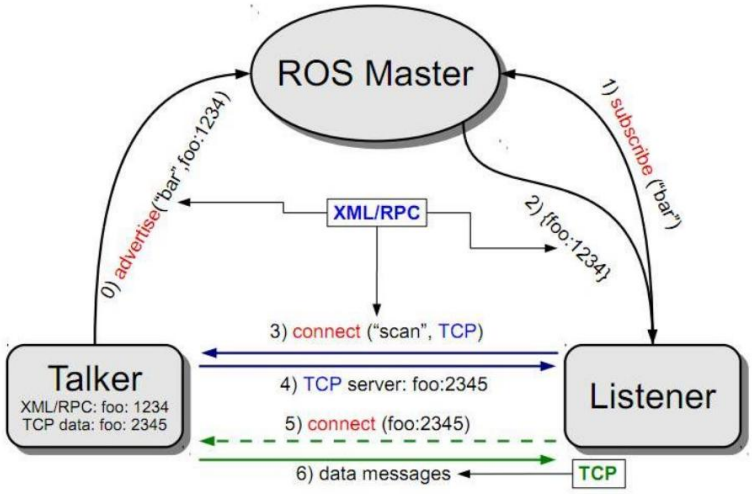
1.3.1 功能包

功能包相关的常用 ROS 命令：

命令	作用
catkin_create_pkg	创建功能包
rospack	获取功能包的信息
catkin_make	编译功能包的信息
rosdep	自动安装功能包依赖的其他包
roscd	功能包目录跳转
roscp	拷贝功能包中的文件
rosed	编辑功能包中的文件
rosrun	运行功能包中的可执行文件
roslaunch	运行启动文件

1.4 通信机制

1.4.1 话题通信机制——Topic



假设 Talker 首先启动，建立通信的详细过程：

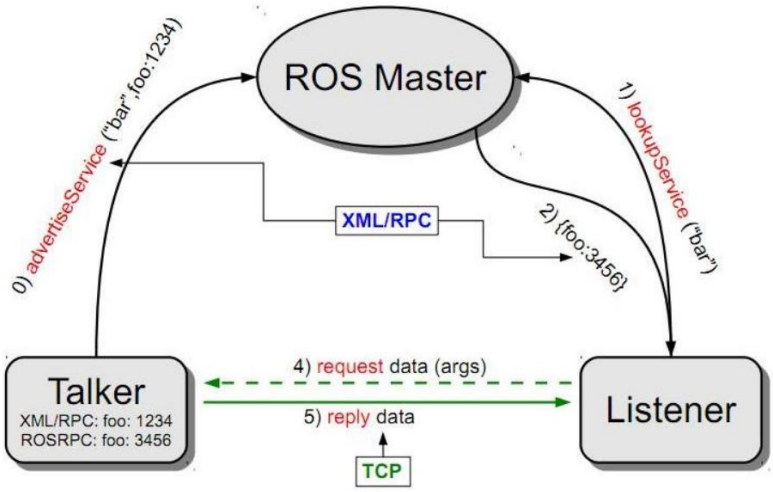
- 1、发布者（Talker）启动，通过 RPC 向 ROS Master 注册发布者的信息，包括：发布者节点信息，话题名，话题缓存大小等；Master 会将这些信息加入注册列表中；
- 2、订阅者（Listener）启动，通过 RPC 向 ROC Master 注册订阅者信息，包括：订阅者节点信息，话题名等；Master 会将这些信息加入注册列表；
- 3、Master 进行节点匹配：Master 会根据订阅者提供的信息，在注册列表中查找匹配的发布者；如果没有发布者（Talker），则等待发布者（Talker）的加入；如果找到匹配的发布者

（Talker），则会主动把发布者（Talker）（有可能是很多个 Talker）的地址通过 RPC 传送给订阅者（Listener）节点；

- 4、Listener 接收到 Master 的发出的 Talker 的地址信息，尝试通过 RPC 向 Talker 发出连接请求（信息包括：话题名，消息类型以及通讯协议（TCP/UDP））；
- 5、Talker 收到 Listener 发出的连接请求后，通过 RPC 向 Listener 确认连接请求（包含的信息为自身 TCP 地址信息）；
- 6、Listener 接收到 Talker 的确认消息后，使用 TCP 尝试与 Talker 建立网络连接；
- 7、成功连接之后，Talker 开始向 Listener 发布话题消息数据；

需要注意的是：有可能多个 Talker 连接一个 Listener，也有可能是一个 Talker 连接上多个 Listener（多对多）。

1.4.2 服务通信机制——Service



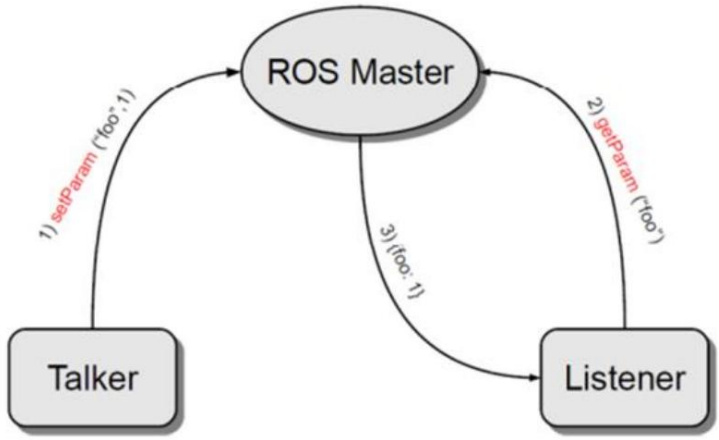
与话题的通信相比，其减少了 Listener 与 Talker 之间的 RPC 通信，建立通信的详细过程：

- 1、发布者（Talker）启动，通过 RPC 向 ROS Master 注册发布者的信息，包括：发布者节点信息，话题名，话题缓存大小等；Master 会将这些信息加入注册列表中；
- 2、订阅者（Listener）启动，通过 RPC 向 ROC Master 注册订阅者信息，包括：订阅者节点信息，话题名等；Master 会将这些信息加入注册列表；
- 3、Master 进行节点匹配：Master 会根据订阅者提供的信息，在注册列表中查找匹配的发布者；如果没有发布者（Talker），则等待发布者（Talker）的加入；如果找到匹配的发布者（Talker），则会主动把发布者（Talker）（有可能是很多个 Talker）的地址通过 RPC 传送给订阅者（Listener）节点；

- 4、Listener 接收到 Talker 的确认消息后，使用 TCP 尝试与 Talker 建立网络连接；
- 5、成功连接之后，Talker 开始向 Listener 发布话题消息数据；

需要注意的是：有可能是一个 Talker 连接上多个 Listener（一对多）。

1.4.3 参数管理机制——Parameter



参数共享机制类似于程序中的全局变量，Talker 去更新全局变量（共享的参数），Listener 去获取更新后的全局变量（共享的参数）；这个通信过程不涉及 TCP/UDP 的通信；

- 1、Talker 更新全局变量；Talker 通过 RPC 更新 ROS Master 中的共享参数（包含参数名和参数值）；
- 2、Listener 通过 RPC 向 ROS Master 发送参数查询请求（包含要查询的参数名）；
- 3、ROS Master 通过 RPC 回复 Listener 的请求（包括参数值）；

需要注意的是：如果 Listener 向实时知道共享参数的变化，需要自己不停的去询问 ROS Master；

Chapter 2

ROS 基础

2.1 turtlesim 功能包

接触的第一个 ROS 功能包：turtlesim，其核心是 tuetlesim_node 节点。
其中包含的话题和服务如下：

	名称	类型	描述
话题订阅	turtleX/cmd_vel	geometry_msgs/Twist	控制乌龟角速度与线速度的输入指令
话题发布	turtleX/pose	turtlesim/Pose	乌龟的姿态信息：包括 x 与 y 坐标、角度、线速度和角速度
服务	clear	std_srvs/Empty	清楚仿真器中的背景颜色
	reset	std_srvs/Empty	复位仿真器到初始状态
	kill	turtlesim/Kill	删除一只乌龟
	spawn	turtlesim/Spawn	新生一只乌龟
	turtleX/set_pen	turtlesim/Setpen	设置画笔的颜色和线宽
	turtleX/teleport_absolute	turtlesim/TeleportAbsolute	移动乌龟到指定的姿态
	turtleX/teleport_realative	turtlesim/TeleportRealative	移动乌龟到指定的角度和距离

2.2 创建工作空间和功能包

2.2.1 创建工作空间

工作空间初始化：

```
mkdir ~/catkin_ws/src
cd ~/catkin_ws/src
catkin_init_workspace
```

初始化后，可以编译整个工作空间：

```
cd ~/catkin_ws/
catkin_make
```

编译后，在工作空间的根目录下会产生 build 和 devel 两个文件夹，在 devel 文件夹中有 setup.bash 形式的环境变量设置脚本，则可以使用 source 命令运行这些脚本配置环境变量，如：

```
source devel/setup.bash
```

但是 source 命令设置的环境变量只在当前终端中有效，所以为了方便，可以讲终端的配置文件（ /.bashrc）中加入上面的环境变量的配置语句（要注意写全绝对路径）。

2.2.2 创建功能包

创建功能包的命令如下：

```
cd ~/catkin_ws/src
catkin_create_pkg <package_name> [depend1] [depend2] [depend3]
```

创建完成后，工作空间的 src 目录中会生成一个 <package_name> 的功能包，并且已经包含了 package.xml 和 CMakelist.txt 文件。其中 package.xml 文件提供描述功能包属性的信息，CMakelist.txt 文件记录功能包的编译规则。

进而可以回到工作空间的根目录下进行编译，并设置环境变量。

2.3 工作空间的覆盖

所有工作空间的路径会依次在 ROS_PACKAGE_PATH 环境变量中记录，当设置多个工作空间的环境变量后，新设置的路径在 ROS_PACKAGE_PATH 中会自动放在最前端。在运行时，ROS 会优先查找最前端的工作空间中是否存在指定的功能包，如果不存在，就顺序向后查找其他工作空间，知道最后一个工作空间为止。

2.4 Topic 中的 Publisher 和 Subscriber

2.4.1 Publisher 的创建

```
#include <sstream>
#include "ros/ros.h"
```

```
#include "std_msgs/String.h"
int main(int argc, char **argv){
    // ROS节点初始化
    ros::init(argc, argv, "talker");
    // 创建节点句柄
    ros::NodeHandle n;
    // 创建一个Publisher，发布名为chatter的topic，消息类型为std_msgs::String
    ros::Publisher chatter_pub = n.advertise<std_msgs::String>("chatter", 1000);
    // 设置循环的频率
    ros::Rate loop_rate(10);
    int count = 0;
    // 一旦发生异常，ros::ok()就会返回false，跳出循环
    while (ros::ok()){
        // 初始化std_msgs::String类型的消息
        std_msgs::String msg;
        std::stringstream ss;
        ss << "hello world " << count;
        msg.data = ss.str();
        // 发布消息
        ROS_INFO("%s", msg.data.c_str());
        chatter_pub.publish(msg);
        // 循环等待回调函数
        // ros::spinOnce()函数用来处理节点订阅话题的所有回调函数
        // 虽然目前的发布节点并没有任何订阅信息，ros::spinOnce()不是必须的
        // 但是为了保证功能无误，建议所有节点都默认加入该函数
        ros::spinOnce();
        // 按照循环频率延时
        loop_rate.sleep();
        ++count;
    }
    return 0;
}
```

2.4.2 Subscriber 的创建

```
#include "ros/ros.h"
#include "std_msgs/String.h"
// 接收到订阅的消息后，会进入消息回调函数
```

```
// 当有消息到达时，会自动以消息指针作为参数
void chatterCallback(const std_msgs::String::ConstPtr& msg){
    // 将接收到的消息打印出来
    ROS_INFO("I heard: [%s]", msg->data.c_str());
}
int main(int argc, char **argv){
    // 初始化ROS节点
    ros::init(argc, argv, "listener");
    // 创建节点句柄
    ros::NodeHandle n;
    // 创建一个Subscriber，订阅名为chatter的topic，注册回调函数chatterCallback
    ros::Subscriber sub = n.subscribe("chatter", 1000, chatterCallback);
    // 循环等待回调函数
    ros::spin();
    return 0;
}
```

2.4.3 自定义话题消息

编写 msg 文件

使用 msg 文件定义自己的消息类型，一般放置在功能包根目录下的 msg 文件夹中。msg 文件中既可以定义消息类型的变量，也可以定义常量：

```
string name
uint8  sex
uint8  age


uint8 unknown = 0
uint8 male    = 1
uint8 female  = 2
```

对于稍复杂一些的 ROS 自定义消息，还会包含一个标准格式的头信息 std_msgs/Header:

```
unint32 seq
time stamp
string frame_id
```

其中：seq 是消息的顺序标识，不需要手动设置，Publisher 在发布消息时会自动累加；stamp 是消息中与数据相关联的时间戳，可以用于时间同步；frame_id 是消息中与数据相关联的参考坐标系 id。

编译 msg 文件

(1) 在 package.xml 中添加功能包依赖

```
<build_depend>message_generation</build_depend>
<run_depend>message_runtime</run_depend>
```

(2) 在 CMakeLists.txt 文件中添加编译选项

在 find_package 中添加消息生成依赖的功能包 message_generation:

```
find_package(catkin REQUIRED COMPONENTS
    geometry_msgs
    roscpp
    rospy
    std_msgs
    message_generation
)
```

设置 catkin 依赖:

```
catkin_package(
    # INCLUDE_DIRS include
    # LIBRARIES learning_communication
    CATKIN_DEPENDS geometry_msgs roscpp rospy std_msgs message_runtime
    # DEPENDS system_lib
)
```

设置需要编译的 msg 文件:

```
add_message_files(FILES Person.msg)
generate_messages(DEPENDENCIES std_msgs)
```

然后对功能包进行编译，自定义的消息类型就生效了。

2.4.4 CMakeLists 的编写

几个常用的编译选项:

(1) include_directories

用于设置头文件的相对路径。功能包的一些头文件会放在功能包根目录下的 include 文件夹中，所以需要添加该文件夹。

(2) add_executable

用于设置需要编译的代码和生成的可执行文件。第一个参数为期望生成的可执行文件的名称，后面的参数为参与的源码文件 (cpp)，如果需要多个代码文件，可以在后面依次列出，中间用空格分隔。

（3）target_link_libraries

用于设置链接库。第一个参数为期望生成的可执行文件的名称，后面依次列出需要链接的库，如果没有使用其他库，添加默认链接库（${catkin_LIBRARIES}）即可。

（4）add_dependencies

用于设置依赖。在很多应用中，我们需要定义语言无关的消息类型，消息类型会在编译过程中产生相应语言的代码，如果编译的可执行文件依赖这些动态生成的代码，则需要使用 add_dependencies 添加 ${PROJECT_NAME}_generate_messages_cpp 配置，即该功能包动态产生的消息代码。

对于我们的这个例子，CMakeLists.txt 文件如下：

```
include_directories(include ${catkin_INCLUDE_DIRS})

add_executable(talker src/talker.cpp)
target_link_libraries(talker ${catkin_LIBRARIES})
add_dependencies(talker ${PROJECT_NAME}_generate_messages_cpp)

add_executable(listener src/listener.cpp)
target_link_libraries(listener ${catkin_LIBRARIES})
add_dependencies(talker ${PROJECT_NAME}_generate_messages_cpp)
```

2.5 Service 中的 Client 和 Server

2.5.1 创建 Client

```
#include <cstdlib>
#include "ros/ros.h"
#include "learning_communication/AddTwoInts.h"

int main(int argc, char **argv){
    ros::init(argc, argv, "add_two_ints_client");
    // 从终端命令行获取两个加数，argv[0]是路径，argv[1]和[2]是两个输入参数
    if (argc != 3){
        ROS_INFO("usage: add_two_ints_client X Y");
        return 1;
    }
    ros::NodeHandle n;
    // 创建一个client，请求add_two_int service
    // service消息类型是learning_communication::AddTwoInts
```

```
    ros::ServiceClient client = n.serviceClient\
        <learning_communication::AddTwoInts>("add_two_ints");
    // 创建learning_communication::AddTwoInts类型的service消息
    // 该变量包含两个成员: request和response
    learning_communication::AddTwoInts srv;
    // atoll()函数将字符串转化为整数
    srv.request.a = atoll(argv[1]);
    srv.request.b = atoll(argv[2]);
    // 发布service请求, 等待加法运算的应答结果
    // 调用过程会发生阻塞, 调用成功后返回true
    if (client.call(srv)){
        ROS_INFO("Sum: %ld", (long int)srv.response.sum);
    }
    else{
        ROS_ERROR("Failed to call service add_two_ints");
        return 1;
    }
    return 0;
}
```

2.5.2 创建 server

```
#include "ros/ros.h"
#include "learning_communication/AddTwoInts.h"
// service回调函数, 输入参数req, 输出参数res
bool add(learning_communication::AddTwoInts::Request  &req,
         learning_communication::AddTwoInts::Response &res){
    // 将输入参数中的请求数据相加, 结果放到应答变量中
    res.sum = req.a + req.b;
    ROS_INFO("request: x=%ld, y=%ld", (long int)req.a, (long int)req.b);
    ROS_INFO("sending back response: [%ld]", (long int)res.sum);
    return true;
}
int main(int argc, char **argv){
    ros::init(argc, argv, "add_two_ints_server");
    ros::NodeHandle n;
    // 创建一个名为add_two_ints的server, 注册回调函数add()
    ros::ServiceServer service = n.advertiseService("add_two_ints", add);
```

```
    // 循环等待回调函数
    ROS_INFO("Ready to add two ints.");
    ros::spin();
    return 0;
}
```

2.5.3 自定义服务数据

编写 srv 文件

使用 srv 文件定义自己的消息类型，一般放置在功能包根目录下的 srv 文件夹中。该文件包含 request 和 response 两个数据域，两个数据域之间用”—”（三个减号）分隔，如：

```
int64 a
int64 b
---
int64 sum
```

编译 srv 文件

（1）在 package.xml 中添加功能包依赖（与自定义话题消息相同）

```
<build_depend>message_generation</build_depend>
<run_depend>message_runtime</run_depend>
```

（2）在 CMakeLists.txt 文件中添加编译选项
与自定义话题消息相同也是添加 message_generation 包，

```
find_package(catkin REQUIRED COMPONENTS
    geometry_msgs
    roscpp
    rospy
    std_msgs
    message_generation
)
add_service_files(FILES AddTwoInts.srv)
```

2.5.4 CMakeLists 的编写

与 Topic 类似：

```
include_directories(include ${catkin_INCLUDE_DIRS})

add_executable(server src/server.cpp)
target_link_libraries(server ${catkin_LIBRARIES})
add_dependencies(server ${PROJECT_NAME}_gencpp)

add_executable(client src/client.cpp)
target_link_libraries(client ${catkin_LIBRARIES})
add_dependencies(client ${PROJECT_NAME}_gencpp)
```

2.6 ROS 中的命名空间

2.6.1 有效的命名

- 1、首字符必须是 ([a-z|A-Z])、波浪线 (~) 或者左斜杠 (/)
- 2、后续字母可以是字母或数字 ([0-9|a-z|A-Z])、下划线 (_) 或者左斜杠

2.6.2 命名解析

全局名称：/global/name

全局名称的首字符是左斜杠，它之所以称为全局，是因为它的解析度最高，可以在全局范围内直接访问。

但是在系统中，全局名称越少越好，因为过多的全局名称会影响功能包的可移植性。

相对名称：relative/name

相对名称由 ROS 提供默认的命名空间，不需要带有开头的左斜杠，ROS 会对一个相对名称进行解析，进而得到一个全局名称来使用，就类似与我们平时使用的相对路径。相对名称的使用会提高可移植性。

例如：在默认命名空间/relative 内使用相对名称 name，则系统会将其解析为全局名称：/relative/name。

ROS 提供的三种指定默认命名空间的方式：

- 1、通过命令参数设置

  调用 ros::init() 的程序会接受一个名为 ___ns 的命令行参数，用来设置默认命名空间：

  ```
  __ns:=deflaut-namespace
  ```

- 2、在 launch 文件中设置

  在 launch 文件中可以通过参数 ns 来设置默认命名空间：

```
<node pkg="turtlesim" type="turtlesim_node" name="turtlesim\_node" ns="sim1"/>
```

- 3、使用环境变量设置

在执行 ROS 程序的终端中设置默认命名空间的环境变量:

```
export ROS_NAMESPACE = default-namespace
```

私有名称: private/name

私有名称是一个节点内部私有的资源名称，只会在节点内部使用。私有名称以波浪线“~”开始。类似相对名称，也需要 ROS 为其解析，成为一个有意义的全局名称，不同的是，私有名称并不使用当前的默认命名空间，而是使用节点的全局名称作为命名空间。

例如有一个节点的全局名称是/sim1/pubvel，其中的一个私有名称为 ~/max_vel，则其会被解析成全局名称：/sim1/pubvel/max_vel。

ROS 命名解析总结

节点	全局名称	相对名称 (默认)	私有名称
/node1	/bar ->/bar	Bar ->/bar	∼bar ->/node1/bar
/wg/node2	/bar ->/bar	Bar ->/wg/bar	∼bar ->wg/node2/bar
/wg/node3	/foo/bar ->/foo/bar	foo/bar ->wg/foo/bar	∼foo/bar ->wg/node3/foo/bar

2.6.3 命名重映射

所有的 ROS 节点内的资源名称都可以在节点启动的时候进行重映射，这一特性支持我们同事打开多个相同的节点，而不会发生命名冲突。

命名重映射语法:

```
old\_name:=new\_name
```

例如，要将 chatter 重映射为/wg/chatter，在节点启动时候可以输入如下命令:

```
$ rosrun rospy_tutorials talker chatter:=/wg/chatter
```

需要注意: ROS 的命名解析是在命名重映射之前发生的。所以当我们使用 “foo:=bar” 时，会将节点内所有 foo 命名映射为 bar，而如果我们重映射 “/foo:=bar” 时，ROS 只会讲全局解析为/foo 的名称重映射为 bar。

命名重映射和命名解析之间的关系:

节点命名空间	重映射参数	匹配名称	解析名称
/	foo:=bar	foo,/foo	/bar
/baz	foo:=bar	foo,/baz/foo	/baz/bar
/	/foo:=bar	foo,/foo	/bar
/baz	/foo:=bar	/foo	/baz/bar
/baz	/foo:=/a/b/c/bar	/foo	/a/b/c/bar

2.7 多机通信

设置 IP 地址

- 1、确保所有计算机处于同一网络中，使用 ifconfig 命令查看本机的局域网 ip 地址。
- 2、分别在每台计算机的/etc/hosts 文件中添加其他计算机的 ip 地址和对应的计算机名称。
- 3、测试是否能够 ping 通其他计算机。

设置 ROS_MASTER_URI

因为系统中只能存在一个 Master，所以从机需要知道 Master 的位置，可以在从机中使用如下命令，将 Master 的地址写入环境变量中：

```
$ echo "export ROS_MASTER_URI = http://<主机名>::11311" >> ~/.bashrc
```

Chapter 3

ROS 中的常用组件

3.1 launch 文件

launch 文件是 ROS 中同时启动多个节点的途径，它还可以自动启动 ROS Master 节点管理器，并且实现每个节点的各种配置。

launch 文件采用 XML 的形式进行描述，XML 文件必须包含一个根元素，launch 文件的根元素采用 <launch> 标签定义，文件中的其他内容都必须包含在这个标签中。

3.1.1 启动节点

采用 <node> 标签启动 ROS 节点，语法如下：

```
<node pkg = "package-name" type = "executable-name" name = "node-name"/>
```

- pkg 定义节点所在的功能包名称
- type 定义节点的可执行文件名称
- name 定义节点运行时的名称，讲覆盖节点中 init() 赋予节点的名称

另外还有如下可选的属性参数：

- output = ”screen”: 讲节点的标准输出打印到终端 (默认输出为日志文档)
- respawn = ”true”: 复位属性，该节点停止时，会自动重启，默认为 flase
- required = ”true”: 必要节点，当该节点终止时，launch 文件中的其他节点也被终止
- ns = ”namespace”: 命名空间，为节点内的相对名称添加命名空间前缀
- args = ”arguments”: 节点需要输入的参数

3.1.2 系统参数设置

使用 <param> 标签来设置 ROS 系统运行中的参数（即 parameter），存储在参数服务器中。launch 文件执行后，parameter 就加载到 ROS 的参数服务器上。

每个活跃的节点都可以通过 ros::param::get() 接口来获取 parameter 的值，用户也可以在终端中通过 rosparam 命令获得 parameter 的值。

<param> 标签的语法如下：

```
<param name = "output_frame" value = "odom"/>
```

另外，ROS 也提供了一种从文件中批量加载参数的方法，使用标签 <rosparam>，其语法如下：

```
<rosparam file = "$(find 2dnav_pr2)/config/costmap_common_params.yamls" command
 = "load" ns = "local_costmap"/>
```

<rosparam> 标签可以帮我们将一个 YAML 格式的文件中的全部参数加载到 ROS 中，需要将 command 属性设置为”load”。

3.1.3 设置内部变量

使用 <arg> 标签可以设置 launch 文件内部的局部变量（argument），仅限于 launch 文件内部使用，语法如下：

```
<arg name = "arg-name" default = "arg-value"/>
```

在 launch 文件中使用 argument 时，可以使用如下语法进行调用：

```
<node pkg = "package" type = "type" name = "name" args = "$(arg arg-name)"/>
```

3.1.4 重映射机制

使用 <remap> 标签可以实现重映射的功能，可以给功能包的接口名称重映射一下，取一个别名，可以用来实现不同功能包之间的接口匹配，语法如下：

```
remap from = "turtlebot/cmd_vel" to = "/cmd_vel"/>
```

3.1.5 嵌套复用

使用 <include> 标签可以实现在一个 launch 文件中包含其他的 launch 文件。即可直接复用其他已有的 launch 文件中的内容，语法如下：

```
<include file = "$(dirname)/other.launch"/>
```

3.2 TF 坐标变换

TF 是一个让用户随时间跟踪多个坐标系的功能包，它使用树形数据结构，根据时间缓冲并维护多个坐标系之间的坐标变换关系。

3.2.1 TF 辅助工具

1.tf_monitor

功能是打印 TF 树中所有坐标系的发布状态，使用方法如下：

```
$ tf_monitor
$ tf_monitor <source_frame> <target_frame>
```

2.tf_echo

功能是查看指定坐标系之间的变换关系，使用方法如下：

```
$ tf_echo <source_frame> <target_frame>
```

3.static_transform_publisher?

功能是发布两个坐标系之间的静态坐标变换，这两个坐标系不发生相对的位置变化，使用方法如下：

```
$ static_transform_publisher x y z yaw pitch roll frame_id child_frame_id
period_in_ms
$ static_transform_publisher x y z qx qy qz qw frame_id child_frame_id
period_in_ms
```

以上两种命令格式，需要设置坐标的偏移参数和旋转参数：偏移参数使用相对于 xyz 轴的坐标位移；旋转参数分别采用了欧拉角和四元数的表达方式，并设置发送频率以 ms 为单位。

另外，该命令还可以在 launch 文件中使用，语法如下：

```
<launch>
<node pkg = "tf" type = "static_transform_publisher" name = "link1_broadcaster"
args = "1 0 0 0 0 0 1 link1_parent link1 100"/>
<\launch>
```

4.view_frame

这是一个可视化的调试工具，可以生成 PDF 文件，显示整棵 TF 树的信息，使用方法如下：

```
$ rosrun tf view_frames
```

3.2.2 TF 中的 Boardcaster 和 Listener

以基于 TF 的乌龟自动跟踪例程为例。

创建 Broadcaster

创建一个发布乌龟坐标系与世界坐标系之间的 TF 变换的节点。

```
#include <ros/ros.h>
#include <tf/transform_broadcaster.h>
#include <turtlesim/Pose.h>
std::string turtle_name;
//回调函数
void poseCallback(const turtlesim::PoseConstPtr& msg){
    // tf广播器
    static tf::TransformBroadcaster br;
    // 根据乌龟当前的位姿，设置相对于世界坐标系的坐标变换
    // setOrigin设置平移变换 setRotation设置旋转变换
    tf::Transform transform;
    transform.setOrigin( tf::Vector3(msg->x, msg->y, 0.0) );
    tf::Quaternion q;
    q.setRPY(0, 0, msg->theta);
    transform.setRotation(q);
    // 发布坐标变换 TF消息的数据类型为tf::StampedTransform
    // 包含坐标变换、时间戳，并指定坐标变换的源坐标系(parent)和目标坐标系(child)
    br.sendTransform(tf::StampedTransform(transform, ros::Time::now(), "world",
turtle_name));
}
int main(int argc, char** argv){
    // 初始化节点
    ros::init(argc, argv, "my_tf_broadcaster");
    if (argc != 2){
        ROS_ERROR("need turtle name as argument");
        return -1;
    };
    turtle_name = argv[1];
    ros::NodeHandle node;
    // 订阅乌龟的pose信息 订阅到之后，就会进入回调函数进行TF广播
    ros::Subscriber sub = node.subscribe(turtle_name+"/pose", 10, &poseCallback);
```

```
    ros::spin();
    return 0;
};
```

创建 Listener

监听 TF 消息，并且从中获取 turtle2 相对于 turtle1 坐标系的变换，从而控制 turtle2 移动。

```
#include <ros/ros.h>
#include <tf/transform_listener.h>
#include <geometry_msgs/Twist.h>
#include <turtlesim/Spawn.h>
int main(int argc, char** argv){
    ros::init(argc, argv, "my_tf_listener");
    ros::NodeHandle node;
    // 通过Service，产生第二只乌龟turtle2
    ros::service::waitForService("spawn");
    ros::ServiceClient add_turtle =
    node.serviceClient<turtlesim::Spawn>("spawn");
    turtlesim::Spawn srv;
    add_turtle.call(srv);
    // 定义turtle2的速度控制发布器
    ros::Publisher turtle_vel =
    node.advertise<geometry_msgs::Twist>("turtle2/cmd_vel", 10);
    // tf监听器
    tf::TransformListener listener;
    ros::Rate rate(10.0);
    while (node.ok()){
        // Broadcaster发布的就是这种类型的消息
        tf::StampedTransform transform;
        try{// 查找turtle2与turtle1的坐标变换
            // 其中/turtle2为当前坐标系，turtle1为目标坐标系
            listener.waitForTransform("/turtle2", "/turtle1", ros::Time(0),
        ros::Duration(3.0));
            listener.lookupTransform("/turtle2", "/turtle1", ros::Time(0),
        transform);
        }
        catch (tf::TransformException &ex) {
            ROS_ERROR("%s",ex.what());
```

```
            ros::Duration(1.0).sleep();
            continue;
        }
        // 根据turtle1和turtle2之间的坐标变换，计算turtle2需要的线速度和角速度
        // 并发布速度控制指令，使turtle2向turtle1移动
        geometry_msgs::Twist vel_msg;
        vel_msg.angular.z = 4.0 * atan2(transform.getOrigin().y(),
                                        transform.getOrigin().x());
        vel_msg.linear.x = 0.5 * sqrt(pow(transform.getOrigin().x(), 2) +
                                      pow(transform.getOrigin().y(), 2));
        turtle_vel.publish(vel_msg);
        rate.sleep();
    }
    return 0;
};
```

其中两个重要函数：

- waitForTransform()

  给定源坐标系和目标坐标系，等待两个坐标系之间指定时间的变换关系，该函数会阻塞程序运行，所以要设置超时时间（timeout）

- lookupTransform()

  给定源坐标系和目标坐标系，得到两个坐标系之间指定时间的坐标变换，ros::Time(0) 表示获取最新一次的坐标变换。

3.3 Qt 工具箱

这是一个基于 Qt 架构的后台图形工具套件——rqt_common_plugins。
安装命令：

```
$ sudo apt-get install ros-kinetic-rqt
$ sudo apt-get install ros-kinetic-rqt-common-plugins
```

3.3.1 日志输出工具 rqt_consile

rqt_consile 用来图像化显示和过滤 ROS 系统运行状态中的所有日志消息，包括 info、warn、error 等，使用如下命令启动：

```
$ rqt_console
```

3.3.2 计算图可视化工具 rqt_graph

rqt_graph 可以图形化显示当前 ROS 系统中的计算图，使用如下命令启动：

```
$ rqt_graph
```

3.3.3 数据绘制工具 rqt_plot

rqt_plot 是一个二位数值曲线绘制工具，可以将需要显示的数据在 xy 坐标系中使用曲线绘制出来，使用如下命令启动：

```
$ rqt_plot
```

3.3.4 参数动态配置工具 rqt_reconfigure

rqt_reconfigure 可以在不重启系统的情况下，动态配置 ROS 系统中的参数，但是该功能需要在代码中设置参数的相关属性。从而支持动态配置，使用如下命令启动：

```
$ rosrun rqt_reconfigure rqt_reconfigure
```

3.4 rviz 三维可视化平台

在 rviz 中，可以使用 XML 对机器人、周围物体等任何实物进行尺寸、质量、位置、材质、关节等属性的描述，并且在界面中呈现出来。

3.5 Gazebo 仿真环境

虽然 Gazebo 中的机器人模型与 rviz 使用的模型相同，但是需要在模型中加入机器人和周围环境的物理属性，例如质量、摩擦系数、弹性系数等。机器人的传感器信息也可以通过插件的形式加入仿真环境，以可视化的方式进行显示。

3.6 rosbag 数据记录与回放

rosbag 功能包提供了数据记录与回放的功能。

3.6.1 记录数据

开始数据记录的命令：

```
rosbag record -a
```

其中-a(all) 参数表示记录所有发布的消息。数据文件会以.bag 格式保存在当前目录下。

3.6.2 回放数据

查看数据记录文件的命令:

```
$ rosbag info <your bagfile>
```

从该命令的输出信息可以看到数据记录包中包含的所有话题、消息类型、消息数量等信息。
回放所记录的话题数据的命令:

```
$ rosbag play <your bagfile>
```

Chapter 4

机器人的建模与仿真

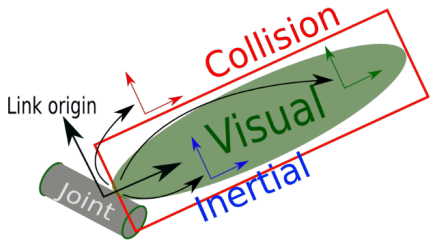
4.1 URDF 文件

URDF（Unified Robot Description Format，统一机器人描述格式）是 ROS 中一个非常重要的机器人模型描述格式，ROS 同时也提供了 URDF 文件的 C++ 解析器，可以解析 URDF 文件中使用 XML 格式描述的机器人模型。

下面说明一下 URDF 文件中常用的几个 XML 标签：

4.1.1 <link> 标签

<link> 标签用于描述机器人某个刚体部分的外形和物理属性，包括尺寸（size）、颜色（color）、形状（shape）、惯性矩阵（inertial matrix）、碰撞参数（collision properties）等。



从图中可以看出，检测碰撞的 link 区域大于外观可视的区域，这就意味着只要有其他物体与 collision 区域相交，就认为 link 发生碰撞。

<link> 标签的一般结构如下：

```
<link name = "<name of the link>">
    <inertial> ..... </inertial>
    <visual> ..... </visual>
```

```
    <collision> ..... </collision>
</link>
```

其中：

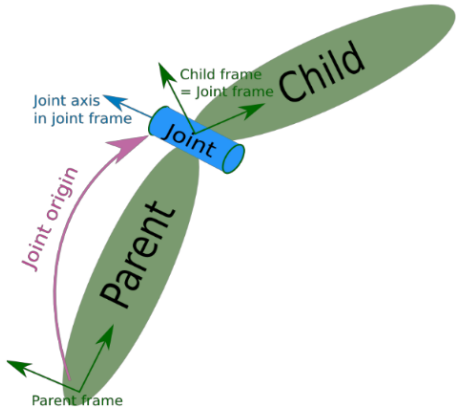
- <visual>：用于描述机器人 link 部分的外观参数
- <inertial>：用于描述 link 的惯性参数
- <collision>：用于描述 link 的碰撞部分

4.1.2 <joint> 标签

<joint> 标签用于描述机器人关节的运动学和动力学属性，包括关节运动的位置和速度限制。根据机器人的关节运动形式，可以将其分为六种类型：

关节类型	描述
continuous	旋转关节，可以围绕单轴无限旋转
revolute	旋转关节，有旋转的角度限制
prismatic	滑动关节，沿某一轴线移动的关节，带有位置极限
planar	平面关节，允许在平面正交方向上平移或者旋转
floating	浮动关节，允许进行平移、旋转运动
fixed	固定关节，不允许运动的特殊关节

机器人关节的主要作用是连接两个刚体 link，这两个 link 分别称为 parent link 和 child link，如下图所示：



<link> 标签的一般结构如下：

```
<joint name = "<name of the joint>">
```

```
    <parent link = "parent_link"/>
    <child link = "child_link"/>
    <calibration .... />
    <dynamics damping .... />
    <limit effort .... />
    ....
</joint>
```

其中必须指定 joint 的 parent link 和 child link，还可以设置关节的其他属性：

- <calibration>：关节的参考位置，用来校准关节的绝对位置。
- <dynamics>：用于描述关节的物理属性，例如阻尼、静摩擦力，经常在动力学仿真中出现。
- <limit>：用于描述运动的一些极限值，包括关节运动的上下限位置、速度限制、力矩限制等。
- <mimic>：用于描述该关节与已有关节的关系。
- <safety_controller>：用于描述安全控制器参数。

4.1.3 <robot> 标签

<robot> 是完整机器人模型的最顶层标签，<link> 和 <joint> 标签都必须包含在 <robot> 标签内。robot 标签内可以设置机器人的名称，其基本语法如下：

```
<robot name = "name of the robot">
    <link> ..... </link>
    <link> ..... </link>
    <joint> ..... </joint>
    <joint> ..... </joint>
</robot>
```

4.1.4 <gazebo> 标签

<gazebo> 标签用于描述机器人模型在 Gazebo 中仿真所需要的参数，包括机器人材料的属性、Gazebo 插件。该标签不是机器人模型的必需部分，只有在 Gazebo 中仿真时才需要加入，其基本语法如下：

```
<gazebo reference = "link_1">
    <material>Gazebo/Black</material>
</gazebo>
```

4.2 创建 URDF 模型

以 MRobot 机器人为例。

4.2.1 创建功能包

使用如下命令创建一个 urdf 模型的功能包：

```
$ catkin_create_pkg mrobot_description urdf xacro
```

创建好的功能包中包含如下四个文件夹：

- urdf：用于存放机器人模型的 URDF 文件或 xacro 文件
- mashes：用于放置 URDF 中引用的模型渲染文件
- launch：用于保存相关启动文件
- config：用于保存 rviz 的配置文件

4.2.2 URDF 模型代码

part 1

```
<?xml version="1.0" ?>
<robot name="mrobot_chassis">
```

首先在文件开头，需要生命该文件使用 XML 描述，然后使用 <robot> 根标签定义一个机器人模型，并定义机器人的名称。

part 2

```
<link name="base_link">
    <visual>
        <origin xyz=" 0 0 0" rpy="0 0 0" />
        <geometry>
            <cylinder length="0.005" radius="0.13"/>
        </geometry>
        <material name="yellow">
            <color rgba="1 0.4 0 1"/>
        </material>
    </visual>
</link>
```

这一段代码描述机器人的底盘 link，<visual> 标签定义底盘的外观属性；

在 <geometry> 标签下定义几何外观，我们将底盘抽象成一个圆柱，使用 <cylinder> 标签定义这个圆柱的半径和高；

然后声明这个底盘圆柱在三维坐标位置和旋转姿态，使用 <origin> 标签设置底盘中心位置，底盘中心位于界面的中心点，所以将坐标设置为 “0 0 0”，旋转设置也设置为 “0 0 0” 即可（圆柱体默认是垂直地面放置的）；

另外，使用 <material> 标签设置底盘的颜色——” 黄色 “，其中 <color> 标签定义颜色的 RGBA 值（这里采用百分数描述，A 为透明度参数）。

part 3

```
<joint name="base_left_motor_joint" type="fixed">
    <origin xyz="-0.055 0.075 0" rpy="0 0 0" />
    <parent link="base_link"/>
    <child link="left_motor" />
</joint>
```

这一段代码定义一个关节 joint，用来连接机器人底盘和左边驱动电机，joint 类型为 fixed 类型，这种类型的 joint 是固定的（见subsection 4.1.2）。

<origin> 标签设置了 joint 的起点，将起点设置在需要安装电机的底盘位置。

part 4

```
<link name="left_motor">
    <visual>
        <origin xyz="0 0 0" rpy="1.5707 0 0" />
        <geometry>
            <cylinder radius="0.02" length = "0.08"/>
        </geometry>
        <material name="gray">
            <color rgba="0.75 0.75 0.75 1"/>
        </material>
    </visual>
</link>
```

这一段代码描述了左侧电机的模型，外形也是圆柱体，采用 <cylinder> 标签。

关于 <origin> 标签的设置：由于我们上面定义了一个 joint 用来将电机连接到底盘上，电机的位置是相对于 joint 计算的。在 joint 的位置设置中，已经将其放置到了安装电机的位置，所以电机模型的位置设置到 “0 0 0” 坐标就可以了。

另外由于圆柱体默认垂直地面，因此我们需要将电机模型绕 x 轴旋转 90° 放置。

part 5

```
<joint name="left_wheel_joint" type="continuous">
    <origin xyz="0 0.0485 0" rpy="0 0 0"/>
    <parent link="left_motor"/>
    <child link="left_wheel_link"/>
    <axis xyz="0 1 0"/>
</joint>
```

这一段代码定义一个关节 joint，用来连接电机和轮子，joint 类型为 continuous 类型，这种类型的 joint 可以绕一个轴旋转（见subsection 4.1.2）。

<origin> 标签将轮子的起点设置到电机的一端，<axis> 标签定义该 joint 的旋转轴是 y 轴。

添加物理和碰撞属性

前面的代码仅创建了模型的可视化属性，还需要添加物理属性和碰撞属性，这里以机器人底盘 base_link 为例：

```
<link name="base_link">
    <intertial>
        <mass value="2"/>
        <origin xyz="0 0 0.0"/>
        <inertia ixx="0.01" ixy="0.0" ixz="0.0"
                 iyy="0.01" iyz="0.0"
                 izz="0.5"/>
    </inertial>

    <visual>
        <origin xyz=" 0 0 0" rpy="0 0 0" />
        <geometry>
            <cylinder length="${base_link_length}" radius="${base_link_radius}"/>
        </geometry>
        <material name="yellow">
        </material>
    </visual>

    <collision>
        <origin xyz="0 0 0" rpy="0 0 0"/>
        <geometry>
            <cylinder length="${base_link_length}" radius="${base_link_radius}"/>
```

```
        </geometry>
    </collision>
</link>
```

其中 <intertial> 标签设置惯性参数，主要包括质量和惯性矩阵，如果是规则物体，可以通过尺寸、质量等公式计算得到惯性矩阵（这里有待学习补充）。

4.3 使用 xacro 优化 URDF 模型

URDF 文件不支持代码复用的特性，因此针对 URDF 模型提出了一种精简化、可复用、模块化的描述形式——xacro。

xacro 有两点优点：精简的模型代码、提供可编程接口。模型的后缀名由.urdf 变为.xacro，并且需要在模型的 <robot> 标签中加入 xacro 的声明，代码如下：

```
<?xml version="1.0"?>
<robot name="mrobot" xmlns:xacro="http://www.ros.org/wiki/xacro">
```

4.3.1 xacro 的三个机制

使用常量定义

定义常量的语法如下：

```
<xacro:property name="M_PI" value="3.14159"/>
```

使用常量的语法如下：

```
<origin xyz="0 0 0" rpy="${M_PI} 0 0"/>
```

调用数学公式

在”$“语句中，不仅可以调用常量，还可以使用一些常用的数学运算，包括加减乘除、负号、括号等（所有运算都会被转换成浮点数进行），语法如下：

```
<origin xyz="0 ${(motor_length+wheel_length)/2} 0" rpy="0 0 0"/>
```

使用宏定义

xacro 文件可以使用宏定义来声明重复使用的代码模块，而且可以包含输入参数，以 MRobot 机器人的八根支撑柱为例，宏定义的语法示例如下：

```
<xacro:macro name="mrobot_standoff_2in" params="parent number x_loc y_loc z_loc">
    <joint name="standoff_2in_${number}_joint" type="fixed">
```

```
        <origin xyz="${x_loc} ${y_loc} ${z_loc}" rpy="0 0 0" />
        <parent link="${parent}"/>
        <child link="standoff_2in_${number}_link" />
    </joint>

    <link name="standoff_2in_${number}_link">
        <inertial>
            <mass value="0.001" />
            <origin xyz="0 0 0" />
            <inertia ixx="0.0001" ixy="0.0" ixz="0.0"
                     iyy="0.0001" iyz="0.0"
                     izz="0.0001" />
        </inertial>

        <visual>
            <origin xyz=" 0 0 0 " rpy="0 0 0" />
            <geometry>
                <box size="0.01 0.01 0.07" />
            </geometry>
            <material name="black">
                <color rgba="0.16 0.17 0.15 0.9"/>
            </material>
        </visual>

        <collision>
            <origin xyz="0.0 0.0 0.0" rpy="0 0 0" />
            <geometry>
                <box size="0.01 0.01 0.07" />
            </geometry>
        </collision>
    </link>
</xacro:macro>
```

以上的宏定义包含五个输入参数：joint 的 parent link，支撑住的序号，支撑柱在 xyz 三个方向上的偏移。这个宏定义在定义一个支撑柱的时候，分别对其 joint 和 link 两个标签进行了定义。

当需要使用该宏模块的时候，按照如下语法进行调用：

```
<mrobot_standoff_2in parent="base_link" number="1" x_loc="-${standoff_x/2 + 0.03}"
y_loc="-${standoff_y - 0.03}" z_loc="${plate_height/2}"/>
```

4.3.2 引用 xacro 文件

引用示例如下：

```
<?xml version="1.0"?>
<robot name="mrobot" xmlns:xacro="http://www.ros.org/wiki/xacro">
    <xacro:include filename="$(find mrobot_description)/urdf/mrobot_body.urdf
.xacro" />
    <!-- MRobot机器人平台 -->
    <mrobot_body/>
</robot>
```

可以看到，在 robot 标签之间，首先使用了 xacro:inlude 标签，包含了另一个 xacro 模型文件，然后我们就可以在下面使用被包含文件中的模块了。接下来调用被包含文件中的机器人模型宏定义（机器人模型文件全部是在被包含文件中用一个宏来描述的）。

这样将整个机器人模型作为一个宏有什么好处呢？把机器人整体看做一个模块，方便与其他模型进行集成，比如在后续安装传感器等其他模块时。

4.3.3 显示 xacro 优化后的模型

将 xacro 文件转化成 URDF 文件

使用如下命令可以将 xacro 文件转换成 URDF 文件：

```
$ rosrun xacro xacro.py mrobot.urdf.xacro > mrobot.urdf
```

直接调用 xacro 文件解析器

也可以省略手动转换的过程，直接在启动文件中调用 xacro 解析器，自动将 xacro 转换成 URDF 文件，在 launch 文件中使用如下语句进行配置：

```
    <arg name="model" default="$(find xacro)/xacro --inorder '$(find mrobot_description)/
<arg name="gui" default="true" />
```

进而可以直接使用这个修改后的启动文件，看到 xacro 格式的机器人模型。

4.4 添加传感器模型

首先我们需要自己创建一个传感器模型（xacro 文件），或者去网上下载一个传感器的模型，这里以一个摄像头为例，其模型文件为 camera.xacro。

进而我们可以创建一个顶层 xacro 文件，将机器人主体与摄像头连接起来：

```
<?xml version="1.0"?>
<robot name="mrobot" xmlns:xacro="http://www.ros.org/wiki/xacro">

    <xacro:include filename="$(find mrobot_description)/urdf/mrobot_body.urdf
.xacro" />
    <xacro:include filename="$(find mrobot_description)/urdf/camera.xacro" />

    <xacro:property name="camera_offset_x" value="0.1" />
    <xacro:property name="camera_offset_y" value="0" />
    <xacro:property name="camera_offset_z" value="0.02" />

    <!-- MRobot机器人平台-->
    <mrobot_body/>

    <!-- Camera -->
    <joint name="camera_joint" type="fixed">
        <origin xyz="${camera_offset_x} ${camera_offset_y} ${camera_offset_z}" rpy="0
        <parent link="plate_2_link"/>
        <child link="camera_link"/>
    </joint>

    <xacro:usb_camera prefix="camera"/>

</robot>
```

在这个顶层文件中，包含了描述摄像头的模型文件以及描述机器人的模型文件，然后使用了一个 fixed 类型的 joint 把摄像头固定到机器人的指定位置。

4.5 基于 ArbotiX 和 rviz 的仿真器

ArbotiX 提供一个差速控制器，通过接收速度控制指令更新机器人的 joint 状态，从而实现机器人在 rviz 中的运动。

4.5.1 在 ROS-melodic 中安装 ArbotiX

Arbotix 本质上就是一个功能包，我们需要像其他我们自己的功能包一样，将其放置在工作空间下的 src 目录下，直接从 git 上下载其源码：

```
$ git clone -b indigo-devel https://github.com/vanadiumlabs/arbotix_ros.git
```

然后重新编译工程即可（注意如果没有将设置环境变量的指令放到.bashrc 中，在这里要记得使用 source 命令设置环境变量）。

4.5.2 配置 ArbotiX 控制器

我们只需要适当修改原本的 launch 文件，然后再创建一个控制器相关的配置文件就可以了。

修改 launch 文件

只是在显示机器人模型的 launch 文件的基础上加上如下内容：

```
<node name="arbotix" pkg="arbotix_python" type="arbotix_driver" output="screen">
    <rosparam file="$(find mrobot_description)/config/fake_mrobot_arbotix.yaml"
command="load" />
    <param name="sim" value="true"/>
</node>
```

从以上代码可以看出，实际上就是添加了一个控制器节点，这里在仿真环境中使用，需要配置“sim” 参数为 true。另外，从这里可以看到，启动时还需要加载一个叫 “fake_mrobot_arbotix.yaml” 的配置文件。

创建配置文件

配置文件的目录为：功能包目录/config/下，文件内容如下：

```
controllers: {
    base_controller: {
        type: diff_controller,
        base_frame_id: base_footprint,
        base_width: 0.26,
        ticks_meter: 4100,
        Kp: 12,
        Kd: 12,
        Ki: 0,
        Ko: 50,
        accel_limit: 1.0
    }
}
```

控制器的名称为 “base_controller”，类型为 “diff_controller”（差速控制器），另外还给出了参考坐标系、底盘尺寸、PID 参数等。

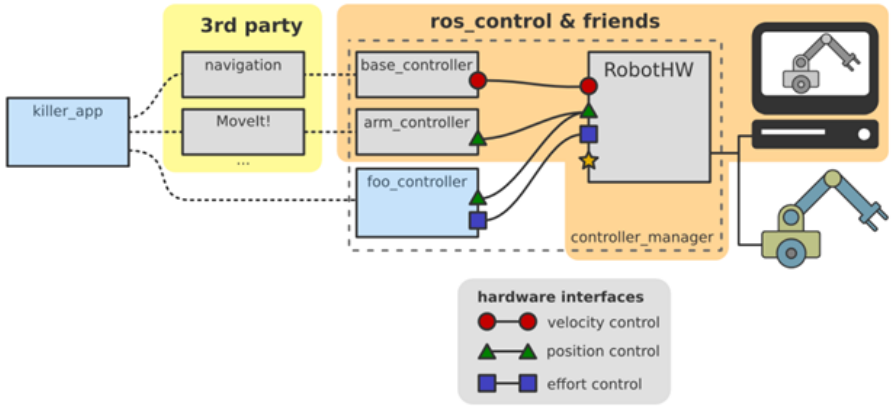
4.5.3 运行仿真

需要注意的是，我们要设置参考坐标系（fixed frame）为“odom”，才可以看到小车的移动。

4.6 ros_control

ros_control 是一套机器人控制中间件，包含一系列控制器接口、传动装置接口、硬件接口、控制器工具箱等。

4.6.1 ros_control 的框架



上图是 ros_control 的总体框架，可以看到正对不同类型的控制器（底盘、机械臂等），ros_control 可以提供多种类型的控制器，但是这些控制器的接口各不相同，为了提高代码的复用率，ros_control 还提供一个硬件的抽象层。硬件抽象层负责机器人硬件资源的管理，而 controller 从抽象层请求资源即可，并不直接接触硬件。

4.6.2 控制器

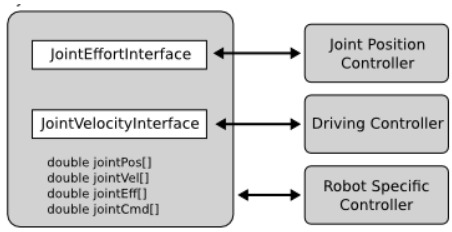
ROS 的 ros_controllers 功能包提供了一些常用的控制器：

- effort_controllers
  - joint_effort_controller
  - joint_position_controller
  - joint_velocity_controller
- joint_state_controller
  - joint_state_controller

- position_controllers
  - joint_position_controller
- velocity_controllers
  - joint_velocity_controller

另外，也可以根据自己的需求创建需要的控制器，并通过控制器管理器进行管理（具体方法有需要再补充）。

4.6.3 硬件接口



硬件接口是控制器与 RobotHW（硬件抽象层）沟通的接口，基本与控制器种类相对应。另外也可以根据自己的需求创建需要的接口（具体方法有需要再补充）。

4.6.4 传动系统

4.6.5 关节约束

4.6.6 控制器管理器

4.7 Gazebo 仿真

4.7.1 配置机器人模型

首先我们需要确定每个 link 的 <inertia> 元素已经进行了合理的设置，然后还要为每个必要的 <link>、<joint>、<robot> 设置 <gazebo> 标签，进而我们需要为模型添加传动装置以及控制器插件。

为 link 添加惯性参数和碰撞属性

这个在前面 URDF 模型文件中已经提到过了，但是在 rviz 中这一项并不是必须的，其中的模型可以只有显示部分，并没有物理属性，但是 gazebo 中进行的是物理仿真，所以相关的惯性参数以及碰撞属性等物理参数就是必须的了。

另外，这里由于我们一般都使用 xacro 文件作为模型文件，相比 URDF 文件多了宏定义的机制；而且，我们知道，对于规则均匀刚体，其惯性参数矩阵是有一个固定的计算公式的。因此我们可以不再像之前那样每一个 link 的惯性参数都手动输入了，可以按照下面的方式采用宏定义进行自动计算，例如球体，我们可以定义这样一个宏用于计算其惯性矩阵：

```
<xacro:macro name="sphere_inertial_matrix" params="m r">
    <inertial>
        <mass value="${m}" />
        <inertia ixx="${2*m*r*r/5}" ixy="0" ixz="0"
                 iyy="${2*m*r*r/5}" iyz="0"
                 izz="${2*m*r*r/5}" />
    </inertial>
</xacro:macro>
```

类似地，长方体：

```
<xacro:macro name="box_inertial_matrix" params="m w h d">
    <inertial>
        <mass value="${m}" />
        <inertia ixx="${m*(h*h+d*d)/12}" ixy = "0" ixz = "0"
                 iyy="${m*(w*w+d*d)/12}" iyz = "0"
                 izz="${m*(w*w+h*h)/12}" />
    </inertial>
</xacro:macro>
```

为 link 添加 <gazebo> 标签

需要为每一个 link 添加 <gazebo> 标签，包含的属性仅有 material。注意：这里的 material 属性和 <visual> 中的 material 属性作用相同，但是 Gazebo 无法通过 <visual> 中的 material 属性设置外观颜色，因此需要再添加 <gazebo> 标签进行设置，另外，Gazebo 中提供了一些可以直接使用的颜色供我们使用。

设置 <gazebo> 标签语法如下：

```
<gazebo reference="wheel_${lr}_link">
    <material>Gazebo/Black</material>
</gazebo>
```

为 joint 添加传动装置

需要在模型中加入 <transmission> 元素，将传动装置与 joint 进行绑定。语法如下：

```
<transmission name="wheel_${lr}_joint_trans">
    <type>transmission_interface/SimpleTransmission</type>
    <joint name="base_to_wheel_${lr}_joint" />
    <actuator name="wheel_${lr}_joint_motor">
        <hardwareInterface>VelocityJointInterface</hardwareInterface>
        <mechanicalReduction>1</mechanicalReduction>
    </actuator>
</transmission>
```

其中 <type> 标签声明了所使用的传动装置类型；<joint name> 标签定义了将要绑定驱动器的 joint；<actuator name> 标签定义了传动装置的名称；并在其中使用 <hardwareInterface> 标签定义硬件接口类型，这里是速度控制接口；使用 <mechanicalReduction> 标签设置了传动比为 1。

添加 Gazebo 控制器插件

Gazebo 插件可以根据插件的运动范围应用到 URDF 模型的 <robot>、<link>、<joint> 上，需要使用 <gazebo> 标签作为封装，这里不同于上文中提到的 “为 link 添加 <gazebo> 标签”，这里需要在 <gazebo> 标签下使用 <plugin> 标签来添加插件。

(1) 为 <link>、<joint> 标签添加插件

设置 reference 为对应 <link> 或 <joint> 的名字，其中 <plugin> 标签下的插件名字 name 可以自拟，filename 是 gazebo 提供的现成文件，可以查看 ROS 安装路径（/opt/ros/melodic/lib）下，所有插件都是以.so 命名的。

```
<gazebo reference="your_link_name">
    <plugin name="unique_name" filename="plugin_name.so"
        ...plugin parameters...
    </plugin>
</gazebo>
```

(2) 为 <robot> 标签添加插件：

不设置 reference 属性即可。

```
<gazebo>
    <plugin name="unique_name" filename="plugin_name.so"
        ...plugin parameters...
    </plugin>
</gazebo>
```

我们将一个差速控制的插件（libgazebo_ros_diff_drive.so）应用到我们的示例机器人模型上，语法如下：

```
<gazebo>
    <plugin name="differential_drive_controller" filename="libgazebo_ros_diff_drive.s
        <rosDebugLevel>Debug</rosDebugLevel>
        <publishWheelTF>true</publishWheelTF>
        <robotNamespace>/</robotNamespace>
        <publishTf>1</publishTf>
        <publishWheelJointState>true</publishWheelJointState>
        <alwaysOn>true</alwaysOn>
        <updateRate>100.0</updateRate>
        <legacyMode>true</legacyMode>
        <leftJoint>base_to_wheel_left_joint</leftJoint>
        <rightJoint>base_to_wheel_right_joint</rightJoint>
        <wheelSeparation>${base_link_radius*2}</wheelSeparation>
        <wheelDiameter>${2*wheel_radius}</wheelDiameter>
        <broadcastTF>1</broadcastTF>
        <wheelTorque>30</wheelTorque>
        <wheelAcceleration>1.8</wheelAcceleration>
        <commandTopic>cmd_vel</commandTopic>
        <odometryFrame>odom</odometryFrame>
        <odometryTopic>odom</odometryTopic>
        <robotBaseFrame>base_footprint</robotBaseFrame>
    </plugin>
</gazebo>
```

其中关键参数：

- <robotNamespace>：机器人的命名空间，插件所有数据的发布和订阅都在该命名空间下。
- <leftJoint> 和 <rightJoint>：左右轮转动关节的 joint，控制器插件最终需要控制这两个 joint 转动。
- <wheelSeparation>：轮子间距。
- <wheelDiameter>：轮子半径。
- wheelTorque>：这个怎么确定的？不重要吗？
- <wheelAcceleration>：车轮转动加速度。
- <commandTopic>：控制器订阅的速度控制指令，ROS 中一般都命名为 vel_cmd。
- <odometryFrame>：里程计数据的参考坐标系，ROS 中一般都命名为 odom。

4.7.2 显示机器人模型

使用类似于以下的 launch 文件:

```
<launch>
    <!-- 设置launch文件的参数 -->
    <arg name="world_name" value="$(find mrobot_gazebo)/worlds/playground.world"/>
    <arg name="paused" default="false"/>
    <arg name="use_sim_time" default="true"/>
    <arg name="gui" default="true"/>
    <arg name="headless" default="false"/>
    <arg name="debug" default="false"/>

    <!-- 运行gazebo仿真环境 -->
    <include file="$(find gazebo_ros)/launch/empty_world.launch">
        <arg name="world_name" value="$(arg world_name)" />
        <arg name="debug" value="$(arg debug)" />
        <arg name="gui" value="$(arg gui)" />
        <arg name="paused" value="$(arg paused)"/>
        <arg name="use_sim_time" value="$(arg use_sim_time)"/>
        <arg name="headless" value="$(arg headless)"/>
    </include>

    <!-- 加载机器人模型描述参数（模型的路径在这里） -->
    <param name="robot_description" command="$(find xacro)/xacro --inorder '$(
find mrobot_gazebo)/urdf/mrobot.urdf.xacro'" />

    <!-- 运行joint_state_publisher节点，发布机器人的关节状态  -->
    <node name="joint_state_publisher" pkg="joint_state_publisher" type="joint_
state_publisher" ></node>

    <!-- 运行robot_state_publisher节点，发布tf  -->
    <node name="robot_state_publisher" pkg="robot_state_publisher" type="robot_
state_publisher"  output="screen" >
        <param name="publish_frequency" type="double" value="50.0" />
    </node>

    <!-- 在gazebo中加载机器人模型-->
```

```
    <node name="urdf_spawner" pkg="gazebo_ros" type="spawn_model" respawn="false"
output="screen"
        args="-urdf -model mrobot -param robot_description"/>
</launch>
```

当我们想要加载一个机器人模型到 Gazebo 中，都可以使用上面的这种 launch 文件的代码形式，主要需要修改的就是我们要加载的机器人模型的路径。

接下来，我们运行这个 launch 文件就可以启动 Gazebo，并且在其中看到我们的机器人模型了。另外，由于这个模型已经订阅了 vel_cmd 话题，我们也可以发布 vel_cmd 话题消息来对 Gazebo 中的机器人进行控制了。

4.7.3 摄像头仿真

类似于机器人模型中的差速控制器插件，传感器的 Gazebo 插件也需要在 URDF 模型中进行配置，在原有的摄像头模型中添加 <gazebo> 标签，代码如下：

```
<gazebo reference="${prefix}_link">
    <material>Gazebo/Black</material>
</gazebo>

<gazebo reference="${prefix}_link">
    <sensor type="camera" name="camera_node">
        <update_rate>30.0</update_rate>
        <camera name="head">
            <horizontal_fov>1.3962634</horizontal_fov>
            <image>
                <width>1280</width>
                <height>720</height>
                <format>R8G8B8</format>
            </image>
            <clip>
                <near>0.02</near>
                <far>300</far>
            </clip>
            <noise>
                <type>gaussian</type>
                <mean>0.0</mean>
                <stddev>0.007</stddev>
            </noise>
```

```
        </camera>
        <plugin name="gazebo_camera" filename="libgazebo_ros_camera.so">
            <alwaysOn>true</alwaysOn>
            <updateRate>0.0</updateRate>
            <cameraName>/camera</cameraName>
            <imageTopicName>image_raw</imageTopicName>
            <cameraInfoTopicName>camera_info</cameraInfoTopicName>
            <frameName>camera_link</frameName>
            <hackBaseline>0.07</hackBaseline>
            <distortionK1>0.0</distortionK1>
            <distortionK2>0.0</distortionK2>
            <distortionK3>0.0</distortionK3>
            <distortionT1>0.0</distortionT1>
            <distortionT2>0.0</distortionT2>
        </plugin>
    </sensor>
</gazebo>
```

这里添加了两个 <gazebo> 标签：

第一个 <gazebo> 标签用来设置摄像头模型在 Gazebo 中的 material，与之前提到的为每一个 link 添加 <gazebo> 标签作用相同。

第二个 <gazebo> 标签设置摄像头插件。在加载摄像头插件的时候，需要使用 <sensor> 标签来包含传感器的各种属性。这里设置摄像头传感器，需要设置 type 为 camera，传感器名字 name 可以自由设置；然后使用 <camera> 标签具体描述摄像头的参数，包括分辨率、编码格式、图像范围、噪声参数等；最后使用 <plugin> 标签加载摄像头的插件文件 libgazebo_ros_camera.so，并设置插件的一下参数，包括命名空间、发布图像的话题、参考坐标系等。

启动 Gazebo 下的机器人仿真之后，输入如下命令，使用 rqt 工具来看到摄像头的图像：

```
$ rqt_image_view
```

注意需要选择合适的话题才可以正确查看。

4.7.4 Kinect 仿真

添加如下 <gazebo> 标签：

```
<gazebo reference="${prefix}_link">
    <sensor type="depth" name="${prefix}">
        <always_on>true</always_on>
        <update_rate>20.0</update_rate>
```

```
            <camera>
                <horizontal_fov>${60.0*M_PI/180.0}</horizontal_fov>
                <image>
                    <format>R8G8B8</format>
                    <width>640</width>
                    <height>480</height>
                </image>
                <clip>
                    <near>0.05</near>
                    <far>8.0</far>
                </clip>
            </camera>
            <plugin name="kinect_${prefix}_controller" filename="libgazebo_ros_openni
        _kinect.so">
                <cameraName>${prefix}</cameraName>
                <alwaysOn>true</alwaysOn>
                <updateRate>10</updateRate>
                <imageTopicName>rgb/image_raw</imageTopicName>
                <depthImageTopicName>depth/image_raw</depthImageTopicName>
                <pointCloudTopicName>depth/points</pointCloudTopicName>
                <cameraInfoTopicName>rgb/camera_info</cameraInfoTopicName>
                <depthImageCameraInfoTopicName>depth/camera_info</depthImageCameraIn
            foTopicName>
                <frameName>${prefix}_frame_optical</frameName>
                <baseline>0.1</baseline>
                <distortion_k1>0.0</distortion_k1>
                <distortion_k2>0.0</distortion_k2>
                <distortion_k3>0.0</distortion_k3>
                <distortiotinaji
    </gazebo>
```

这里为什么不需要一个 <gazebo> 标签来设置摄像头模型在 Gazebo 中的 material 了?

这里需要设置传感器类型为 depth，<camera> 中的参数与摄像头的类似，分辨率和检测距离都可以在 Kinect 的手册中找到，最后使用 <plugin> 标签加载 Kinect 的插件文件 libgazebo_ros_openni_kinect.so，并设置插件相关参数。

启动 Gazebo 下的机器人仿真之后，输入如下命令，使用 rviz 来查看 Kinect 的点云数据：

```
$ rosrun rivz rviz
```

注意需要设置 fixed frame 为 camera_frame_optical，并且添加一个 PointCloud2 插件，并设置插件的订阅话题为“/camera/depth/points”才可以正确查看。

4.7.5 激光雷达仿真

添加如下 <gazebo> 标签：

```
<gazebo reference="${prefix}_link">
    <material>Gazebo/Black</material>
</gazebo>

<gazebo reference="${prefix}_link">
    <sensor type="ray" name="rplidar">
        <pose>0 0 0 0 0 0</pose>
        <visualize>false</visualize>
        <update_rate>5.5</update_rate>
        <ray>
            <scan>
            <horizontal>
                <samples>360</samples>
                <resolution>1</resolution>
                <min_angle>-3</min_angle>
                <max_angle>3</max_angle>
            </horizontal>
            </scan>
            <range>
            <min>0.10</min>
            <max>6.0</max>
            <resolution>0.01</resolution>
            </range>
            <noise>
            <type>gaussian</type>
            <mean>0.0</mean>
            <stddev>0.01</stddev>
            </noise>
        </ray>
        <plugin name="gazebo_rplidar" filename="libgazebo_ros_laser.so">
            <topicName>/scan</topicName>
            <frameName>laser_link</frameName>
```

```
        </plugin>
    </sensor>
</gazebo>
```

激光雷达的传感器类型为 ray，rplidar 的相关参数可以在产品手册中找到，<ray> 标签中设置了如下的雷达参数：360° 检测范围、单圈 360 个采样点、5.5Hz 采样频率、最远 6m 检测范围等。最后使用 <plugin> 标签加载激光雷达的插件文件 libgazebo_ros_laser.so，并设置插件相关参数。

启动 Gazebo 下的机器人仿真之后，输入如下命令，使用 rviz 来查看激光雷达的点云数据：

```
$ rosrun rivz rviz
```

注意需要设置 fixed frame 为 base_footprint，并且添加一个 LaserScan 插件，并设置插件的订阅话题为“/scan”才可以正确查看。

Chapter 5

机器人 SLAM 与自主导航

三个重点问题：地图的精确建模、机器人准确定位、路径实时规划。