

Developers Note for ADAMR2 Project

一関高専 専攻科 生産工学専攻 2年 藤野航汰

2021年1月20日

目次

第 1 章	ハードウェア組立に関する Tips	3
1.1	被覆付圧着端子の付け方	3
第 2 章	URDF を記述する	6
2.1	URDF とは?	6
2.2	何故 URDF を書くのか?	7
2.3	ADAMR2 の実機用 URDF モデリング	7
2.4	URDF モデリング用パッケージの作成	7
2.5	base_link の作成と追加	11
2.6	caster_*_link の作成と追加	17
2.7	lidar_link の作成と追加	21
2.8	wheel_link の作成と追加	24
第 3 章	デバイス設定	28
3.1	F310/F710 ゲームパッドを ROS で利用する	28
3.2	RPLiDAR A2 を利用する	31
3.3	Realsense D435 を利用する	32
第 4 章	コントローラの実装	36
4.1	ros_control とは	36
4.2	コントローラの構築に必要なもの	37
4.3	adamr2_control パッケージの準備	37
4.4	adamr2_driver の作成	42
4.5	コントローラの起動	48
4.6	オドメトリ調整	49
第 5 章	SLAM による地図作成	54
5.1	slam_gmapping の概要	54
5.2	SLAM の実行に必要なもの	54
5.3	SLAM のためのパッケージ作成	54
5.4	SLAM の手順	56
第 6 章	slam_gmapping のパラメータチューニング	60
6.1	slam_gmapping のパラメータ	60
6.2	GMapping のアルゴリズムの概要	63
6.3	データの表現形式	70
6.4	パラメータチューニング	72
第 7 章	Navigation Stack による自律移動	74
7.1	Navigation Stack の概要	74
7.2	Navigation Stack で要求されるもの	75
7.3	パラメータファイルの記述	75
7.4	launch ファイルの記述	81
7.5	Navigation の実行	82
第 8 章	Navigation Stack のパラメータチューニング	83

第1章

ハードウェア組立に関する Tips

1.1 被覆付圧着端子の付け方

ADAMR2 では、スイッチや端子台との接続に被覆付圧着端子を使用しています。被覆付圧着端子を配線ケーブルに取り付ける際は、裸圧着端子よりも多くのことに気を付けなければなりません。ここでは被覆付圧着端子を取り付ける際の手順と注意点を説明します。

1.1.1 使用する端子とケーブルについて

ADAMR2 で使用する配線部品を表 1.1 に示します。

Name	Model Number
ニチフ 銅線用絶縁被覆付圧着端子丸型	TMEV1.25-3
差込み型接続端子 187 シリーズ (バリュー品) メス (嵌合部絶縁型)	MTR-480809-FA
絶縁付圧着端子 Y 型	F1.25-5
通信機器用ビニル電線 KV シリーズ	KV 1.25SQ カ-200
通信機器用ビニル電線 KV シリーズ	KV 1.25SQ カ-200

Table1.1 List of Wiring Components

使用する配線ケーブルは太さ AWG16(sq1.25) の撲線ビニル電線です。被覆付圧着端子は、内径 $\phi 3$ mm の丸型圧着端子、187 サイズの差込型接続端子、内径 $\phi 5$ mm の Y 型圧着端子の 3 種類です。いずれも AWG16 サイズの電線に対応しているものを使用します。

1.1.2 必要な工具

配線には以下の工具が必要となります。

- 圧着工具
- ワイヤーストリッパー
- ニッパー
- 電工ペンチ

被覆付圧着端子をケーブルに取り付けるには、専用の工具が必要となります。ここではホーザン株式会社の絶縁被覆付圧着端子用圧着工具 P-743 を使用しました。

ワイヤーストリッパーはホーザン株式会社の P-90-A を使用しました。

また、先端に被覆付圧着端子のためのカシメ部がついた電工ペンチがあると圧着を確実に行うことができるでの、あった方が望ましいです。

1.1.3 圧着の手順

圧着端子の種類が違っても、作業手順はおおよそ同じです。まずはケーブルの被覆を剥ぎます。P-90-A の 1.6 mm のスロットを使うと綺麗に電線を剥ぐことができます。およそ 6 mm だけ被覆を剥ぐと、圧着をス



Fig.1.1 HOZAN P-743



Fig.1.2 HOZAN P-90-A



Fig.1.3 A Crimp Plier

ムーズに行うことができます。

そして、ここが重要なのですが、圧着端子を付ける前に図 1.4 のように電線をねじって撲っておきます。電線をねじっておくことで、圧着した際に端子との摩擦が増し、端子が外れにくくなります。^{*1}

電線の準備ができたら、圧着端子を挿入し、圧着工具のダイスにセットします。今回使用する圧着端子のサイズはすべて 1.25 なので、P-743 の赤色のマークが付いたダイスにセットします。この時、圧着工具に端子をセットする際の向きに注意してください。正しい向きにセットしないと圧着が上手くいきません。図 1.5 を参考に、正しい向きで端子をセットしてください。

端子をダイスにセットしたら、ずれないように気を付けながらハンドルを握って圧着します。

丸型端子及び Y 型端子は、P-743 による圧着だけではしっかりと圧着することができます。しかし、差込型接続端子の場合はこれだけでは端子がすぐ抜けてしまう可能性があります。^{*2}そこで、P-743 による圧着の後、電

^{*1} 電線をねじらずに圧着すると、特に差込型接続端子は簡単にすっぽ抜けます。

^{*2} 筆者が購入した差込型接続端子の品質に問題があったからかもしれません。



Fig.1.4 Twist the Wire



Fig.1.5 Direction for Setting the Crimped Terminal

工ペンチを使ってさらに圧力をかけ、圧着を強くする必要があります。かなり強めに力を込めて追い圧着すれば、すっぽ抜けてしまうことはなくなるはずです。

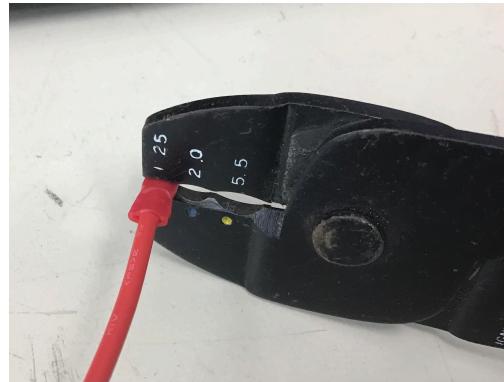


Fig.1.6 Crimp Further with Crimp Plier

以上で圧着端子のケーブルへの取り付け作業は完了です。圧着端子の取り付け方法に関しては、本ドキュメントだけでなく工具メーカーのページ等を参考に、正しい方法で作業を行うことを心掛けてください。

第2章

URDFを記述する

本章では、ROSにおいてロボットの構造をモデリングするためのフォーマットである URDF(Unified Robot Description Format) と、URDF をプログラマブルに記述することのできるマクロパッケージである `xacro`^{*1}について解説します。

2.1 URDFとは？

URDFについての説明を MathWorks の Web サイトから引用します。[1]

URDF (Unified Robotics Description Format) は、製造業の組み立てライン用ロボット マニピュレーター アームや遊園地用のアニメトロニクス ロボットなどのマルチボディ システムをモデル化するために、学術界や産業界で使用される XML 仕様です。

URDFでは、ロボットのモデルをリンク (Link) とジョイント (Joint) からなるツリー構造で表現します。ボディやホイール、センサ等、駆動しないブロックをリンクとして扱い、リンクとリンクとの接続(固定、回転、直動、etc)をジョイントとして扱います。URDFによってモデリングされたロボットは、最終的に図 2.1 のような構造になります。

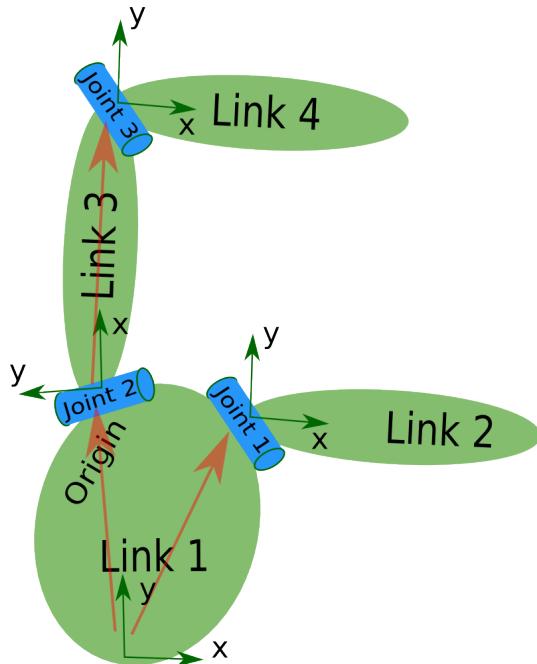


Fig.2.1 Tree Structure of URDF[2]

URDFを記述することで、ロボットを構成する各リンクの位置関係やジョイントの属性を表すことができます。また、URDFの各リンク/ジョイントに詳細なオプションを追加することで、シミュレーション用モデル

*1 <http://wiki.ros.org/xacro>

を作成することもできます。

2.2 何故 URDF を書くのか？

ROS の教本やチュートリアルでよく紹介されている URDF ですが、実のところ URDF を書かなくてもロボットの実機を動かすシステムを構築することができます。URDF が提供するのは、ロボット座標系におけるセンサやアクチュエータ等の位置関係を示す座標変換であり、これは TF パッケージを用いることでも実現できるものです。言い換えれば、TF を直接発行してロボットの各コンポーネントの座標変換を提供することができれば URDF を記述する必要は無いという事です。

では、URDF を記述する理由はあるのでしょうか？これはあくまで筆者の考えですが、以下のような利点があると考えます。

1. ロボットの各コンポーネントの位置関係を一括で管理することができる
2. ロボットの詳細な構造を可視化することができる
3. 実機と同じモデルでシミュレーションを行うことができる

URDF を記述することの大きな利点の 1 つとして、ロボットのモデルの可視化を行うことができるという点があると考えます。リンクやジョイントの座標変換を提供するだけなら TF パッケージを使うことで実現できるのですが、その場合モデルの可視化を行うことができません。そのため、入力した数値が正しいのかどうかを検証するのが困難になります。例えば、ロボットのハードウェアの設計を変更して、センサの位置が代わってしまったという場合を考えます。TF パッケージと URDF のどちらを使う場合でも、新しいセンサの位置を 3D CAD の設計データから計算して数値を導出するのは同じですが、TF パッケージを使う場合は可視化の手段が乏しいため、その数値が正しいかどうかを検証することが難しくなります。一方で URDF を使う場合は、URDF ファイルを編集^{*2}し、更新したモデルを `rviz` で可視化することで、センサの位置が正しい位置にいるのかどうかを目で確かめることができます。

また、副産物的な考え方ですが、実機用の URDF ファイルにシミュレーションのためのオプションを追記することで、ロボットのシミュレーション環境を簡単に整えることが可能になります。`ros_control`^{*3} のフレームワークと合わせることで実機とシミュレーションで同一のコントローラを使ってロボットを動かすことができるため、SLAM や Navigation 等のアプリケーションの開発を効率よく進められるようになります。

以上の理由から、ここでは URDF を記述してロボットのモデリングを行うことを強く推奨します。次の小節から、ADAMR2 で実際に使用している `xacro` ファイルをもとに、URDF によるロボットの実践的なモデリングについて解説します。

2.3 ADAMR2 の実機用 URDF モデリング

早速 `xacro` を用いて実際に ADAMR2 の実機用 URDF モデリングを行います。`xacro` を用いるため、URDF を直接記述することはありませんが、URDF の記述に関する基礎知識が必要になります。このセクションでは URDF 記述のチュートリアルについては取り扱わず、より実践的な内容を説明します。URDF モデリングのチュートリアルは Web 上に大量に存在します。この小節を読む前に、そちらを参照して基礎知識を身に付けてください。

これからモデリングするロボットのスケッチを図 2.2 に、リンクとジョイントのグラフを図 2.3 に示します。

トップレベルのリンクとして `base_footprint`(空のリンク) があり、その下にロボットのボディである `base_link` があります。ホイール、センサ、キャスターのリンクはすべて `base_link` の子リンクです。

2.4 URDF モデリング用パッケージの作成

2.4.1 ディレクトリ構成

ここから実際に URDF モデリングを行っていきます。まずは、URDF モデルを置くための ROS パッケージを作成します。慣習的に、ロボットの URDF モデルは `*_description`(*はロボットもしくはプロジェクトの名前) という名前の ROS パッケージに配置します。ADAMR2 プロジェクトならば「`adamr2_description`」という名前になります。URDF モデリングを始める前にパッケージを作っておきましょう。ビルド依存パッケージは無いので、パッケージ作成コマンドにオプションは必要ありません。

^{*2} 実際は `xacro` で記述した後に URDF をエクスポートすることが多いので、直接 URDF ファイルを編集することはありません。

^{*3} http://wiki.ros.org/ros_control

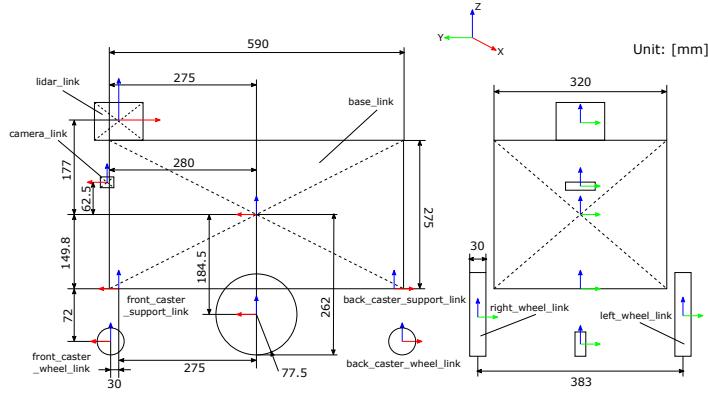


Fig.2.2 Link Structure of Diff-Drive Mobile Robot

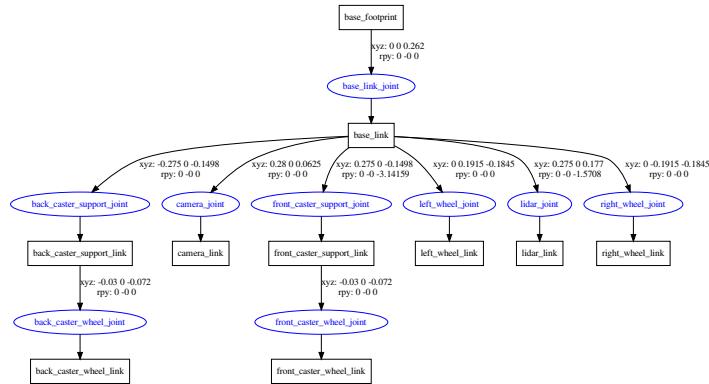


Fig.2.3 URDF Tree of ADAMR2

Code 2.1 Create a Package to put the URDF Model in

```
catkin create pkg adamr2_description
```

パッケージが作成できたら、中にいくつかのディレクトリを作成します。adamr2_description パッケージのディレクトリ構成はコード 2.2 のようにします。

Code 2.2 Directory Structure of adamr2_description

```
adamr2_description/
├─ launch/
├─ meshes/
└─ urdf/
  ├─ package.xml
  └─ CMakeLists.txt
```

launch/ディレクトリには、URDF モデルの可視化を行うための launch ファイルを置きます。meshes/ディレクトリには、STL 形式のロボットの 3D モデルを置きます。rviz/ディレクトリには、URDF モデル可視化時の rviz の設定ファイルを置きます。そして、urdf/ディレクトリに xacro ファイルを格納していきます。

urdf/ディレクトリの中身のディレクトリ構造はコードのようになります。

Code 2.3 Directory Structure of urdf/

```
urdf/
└─ base/
  └─ base.xacro
```

```

|- caster/
|   \_ caster.xacro
|- lidar/
|   \_ lidar.xacro
|- wheel/
|   \_ transmission.xacro
|   \_ wheel.xacro
robot.xacro

```

`robot.xacro` がルートファイルです。ルートファイルから各コンポーネントの `xacro` ファイルをインクルードし、ロボットのモデルを作成します。このファイルは最終的に `xacro` パッケージのノードを用いて URDF ファイルに変換されます。

ロボットの主要コンポーネントであるボディ、キャスター、LiDAR、ホイールのそれぞれに対してディレクトリを作り、その中に各々の `xacro` ファイルを格納します。ここで、キャスターはロボットの前後に 1 つずつ、ホイールはロボットの左右に 1 つずつ存在しますが、それぞれに対応する `xacro` ファイルを複数作成する必要はありません。共通のモジュールとして `xacro` ファイルを作成しておき、ルートファイルから読み込む際に名前や位置を付けることで各リンクを定義します。また、`wheel` には `transmission.xacro` というファイルがありますが、これは `ros_control` を用いたコントローラを作る際に必要となるオプションを設定するためのファイルです。

2.4.2 ルートファイルの作成

では早速、最初の `xacro` ファイルを作成してみましょう。ルートファイルである `robot.xacro` を記述してみます。urdf/ディレクトリの中に `robot.xacro` という名前の空のファイルを作成し、まずコード 2.4 のように記述します。

Code 2.4 `robot.xacro`

```

<?xml version="1.0"?>
<robot name="adamr2" xmlns:xacro="http://ros.org/wiki/xacro">
</robot>

```

URDF のルートファイルは、`robot` という要素のタグで始まる必要があります、他の全ての要素はこの `robot` タグの中に入っているなければなりません。^[3] `robot` タグの `name` 属性にはロボットの名前を指定します。ここで指定した名前は後々使用することになるので、一意な名前をつけておきましょう。また、`xmlns:xacro` 属性にも値を設定しておきます。この値は ROS 固有のものなので、コピペして構いません。1 行目の文は XML のバージョン指定です。1.0 を指定しておきます。

これだけでは何も起きてないので、`robot` タグ内に要素を追加してみましょう。コード 2.5 のように追記してみます。

Code 2.5 `robot.xacro`

```

<?xml version="1.0"?>
<robot name="adamr2" xmlns:xacro="http://ros.org/wiki/xacro">
  <link name="base_footprint"/>
</robot>

```

`link` タグを記述することにより、ロボットにリンクを追加することができます。本来、`link` タグは `inertial`、`visual`、`collision` の要素を持つのですが^[4]、`base_footprint` リンクは実体を持たない空のリンクなので、空要素タグで記述します。

`link` 空要素タグの中で `name` 属性に値を代入しています。この `name` 属性をつけた名前がリンクの名前となり、他のリンクから参照できるようになります。

2.4.3 URDFへの変換と構文チェック

まだ 1 つのリンク（しかも空のリンク）しか追加していませんが、ひとまず URDF の構文チェックを行ってみましょう。ROS のツールに `check_urdf` というものがあり、これを使用すると URDF が正しい構造になっているかどうかをチェックすることができます。

しかし、xacro ファイルのままではチェックを行うことができません。⁴そのため、まず xacro ファイルから URDF ファイルに変換し、変換したファイルをチェックにかけることになります。

xacro ファイルを URDF ファイルに変換するには、xacro パッケージのノードを使用します。roscore を起動した状態で、コードのコマンドを実行します。

Code 2.6 Conversion from xacro to urdf

```
rosrun xacro xacro robot.xacro > robot.urdf
```

このコマンドによって、robot.xacro と同じディレクトリに robot.urdf が生成され、コード 2.7 に示すような内容が書き込まれます。

Code 2.7 Generated URDF file

```
<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
<!-- =====>
<!-- | This document was autogenerated by xacro from robot.xacro | -->
<!-- | EDITING THIS FILE BY HAND IS NOT RECOMMENDED | -->
<!-- =====>
<robot name="adamr2">
  <link name="base_footprint"/>
</robot>
```

生成された URDF ファイルの先頭に書かれている通り、このファイルを直接編集することは推奨されません。生成元となった xacro ファイルを編集して修正作業等を行います。

現時点での robot.xacro は空のリンクが 1 つだけのシンプルなファイルなので、URDF に変換しても大した違いはありません。とりあえずこの URDF ファイルをチェックにかけてみましょう。コード 2.8 を実行します。

Code 2.8 Check URDF

```
check_urdf robot.urdf
```

このコマンドは ROS ノードではないため、roscore が起動していないなくても使うことができます。正しく記述できている場合、コード 2.9 に示すようなメッセージがターミナルに表示されます。

Code 2.9 Check Result

```
robot name is: adamr2
----- Successfully Parsed XML -----
root Link: base_footprint has 0 child(ren)
```

ここまで作業で、xacro ファイルの記述と URDF への変換、及び構文チェックまでを行うことができました。URDF を xacro によって記述するときは、このように URDF に変換してチェック作業を行いながら書くことになります。

2.4.4 URDF の可視化

urdf_to_graphviz コマンドを使えば、作成した URDF をグラフにして可視化することができます。コード 2.10 に示すコマンドを実行することで、URDF のツリー構造を可視化した PDF 画像ファイルを得ることができます。

Code 2.10 Visualize URDF Tree

```
urdf_to_graphviz robot.urdf
```

出力結果は図 2.4 のようになります。現時点では base_footprint リンクしか定義していないので、グラフのノードは 1 つだけです。

⁴ チェックツールを実行すること自体は可能ですが、URDF に含まれるリンク等が展開されないのでチェックにはなりません。

base_footprint

Fig.2.4 URDF Tree (base_footprint Only)

2.5 base_link の作成と追加

節 2.4 までの作業で、ルートファイル robot.xacro の作成と base_footprint リンクの定義を行いました。この節ではロボットのボディのリンクである base_link の定義とルートファイルへの追加の作業を行います。

2.5.1 base.xacro の作成

まず、base_link の要素や属性の定義を記述するファイルを作成します。urdf/ディレクトリ以下に base/ディレクトリを作成し、base.xacro という名前のファイルを作成します。そして、まずはコード 2.11 のような内容を記述します。

Code 2.11 base.xacro

```
<?xml version="1.0"?>
<robot xmlns:xacro="http://ros.org/wiki/xacro">
  <xacro:macro name="base" params="parent *joint_origin">
    </xacro:macro>
  </robot>
```

ルートファイルと同じく、robot タグをトップレベルに記述し、その中に他の全ての要素を記述していきます。ただし、コンポーネントファイルには name 属性を書く必要はありません。名前空間だけ指定しておきましょう。

robot タグの中には、xacro:macro タグが書かれています。これが xacro におけるマクロの定義であり、ルートファイルから呼び出されるものです。マクロの中に link や joint 等のタグを記述しておけば、ルートファイルから呼び出されたときにそれらが展開される、という仕組みです。xacro:macro タグには name 属性と params 属性があります。name 属性にはマクロの名前を指定します。params 属性には、そのマクロが取る引数を指定することができます。引数は複数設定することができ、半角スペースで区切って記述します。コード 2.11 では、引数として parent(親リンク名の指定) と *joint_origin^{*5}(座標原点の指定) の 2 つを取るように設定しています。

base.xacro ファイルでは、このマクロを読み込んだら「base_link の定義」と「base_footprint と base_link を繋ぐジョイント base_link_joint の定義」が行われるようにマクロを定義します。

2.5.2 joint の設定

この小節では base_link_joint の定義を行います。コード 2.12 のようにマクロタグ内に joint タグを追記します。

Code 2.12 Configurate base_link_joint

```
<?xml version="1.0"?>
```

^{*5} アスタリスクが先頭に付くパラメータは「ブロックパラメータ」と呼ばれるパラメータで、任意の要素を展開することができます。

```

<robot xmlns:xacro="http://ros.org/wiki/xacro">
  <xacro:macro name="base" params="parent *joint_origin">
    <joint name="base_link_joint" type="fixed">
      <xacro:insert_block name="joint_origin"/>
      <parent link="${parent}"/>
      <child link="base_link"/>
    </joint>
  </xacro:macro>
</robot>

```

joint タグは name と type の 2 つの属性を持ち、また以下の要素を持ちます。[5]

- origin : 親リンクから見たジョイントの原点座標
- parent : 親リンク名
- child : 子リンク名
- axis : ジョイントの軸。回転ジョイントの場合は回転軸を表す
- calibration : ジョイントの絶対位置を校正するために使用される、ジョイントの基準位置
- dynamics : ジョイントの物理的特性を指定するための要素
- limit : ジョイントの角度、力、速度のリミットを指定するための要素
- mimic : 他のジョイントの動きを真似させるときに使用する要素
- safety_controller : ジョイントが安全に動作するために設定するソフトなリミット

このうち、ジョイントの定義に必須なのは parent と child のみで、他の要素は指定しなくてもジョイントを定義することができます。

ここでは、ジョイント名を「base_link_joint」、ジョイントタイプを「fixed」とし、要素には parent と child、そして origin を設定します。

child 要素は base_link です。base_link はまだ存在せず、2.5.3 で定義します。parent 要素にはマクロが引数として受け取った値をそのまま使用します。引数をマクロ内で利用するには、\${PARAMETER_NAME} の書式を使用します。

joint タグの origin 要素で指定するのは、親リンクから見たジョイントの原点座標です。図 2.5 のように、ジョイントが子リンクの原点になります。ここでは base.link が子リンクなので、base.link の座標系原点は base_link_joint の位置になるという事になります。

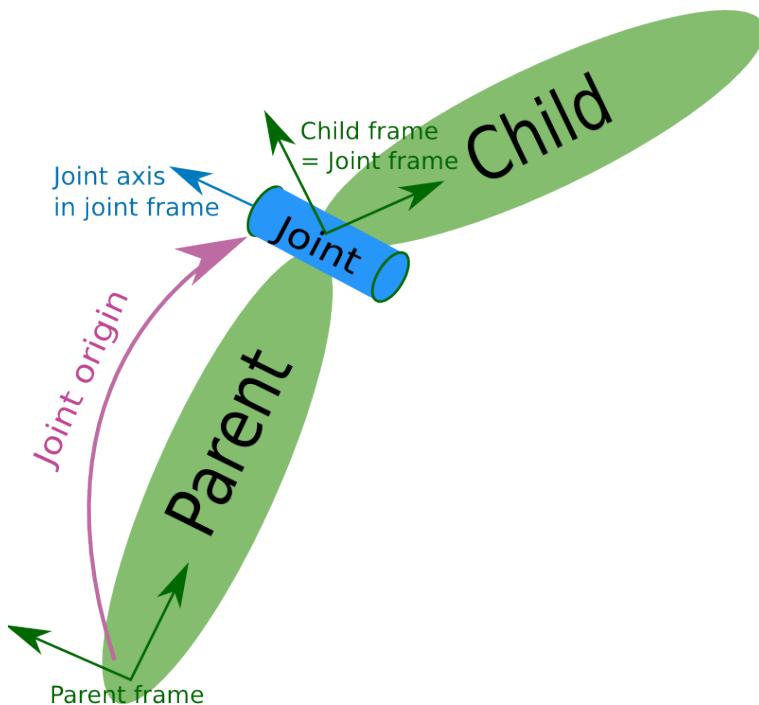


Fig.2.5 Coordinate Transformation Relationship Between Link and Joint[5]

origin 要素もマクロが引数として受け取ったものを使用します。ただし、origin 要素は単なる値ではないた

め, `parent` 要素のようにそのまま使うことはできません。そこで使用するのがブロックパラメータと呼ばれる引数です。これを使用することで、ルートファイルからジョイントの `origin` 要素を定義できるようになります。コード 2.12 では`*joint_origin` という名前でブロックパラメータを定義しています。ルートファイルから読み込む際の詳細はで説明します。

ジョイントの設定は以上で完了です。次は `link` タグの設定を行います。

2.5.3 link タグの設定

ここから `link` タグを定義して、`base_link` の要素を記述していきます。`link` タグは `inertial`, `visual`, `collision` の3つの要素を持ちます。`link` タグ及び各要素の詳細について知りたい方は、ROS Wiki のページ⁶を参照してください。

Gazebo シミュレーションを行う際は全ての要素について定義する必要がありますが、`rviz` で可視化するだけなら `visual` 要素を設定するだけで事足ります。本章では実機用 URDF の記述を目的としているため、ここではシミュレーション用の設定については説明しません。シミュレーション用の設定については後の章で解説します。

`visual` 要素はモデルの見た目の要素を定義するタグです。コード 2.13 のようにマクロタグ内に `link` タグを追記し、更にその中に `visual` 要素を記述します。

Code 2.13 link Element

```
<?xml version="1.0"?>
<robot xmlns:xacro="http://ros.org/wiki/xacro">
  <xacro:macro name="base" params="parent *joint_origin">
    <joint name="base_link_joint" type="fixed">
      <xacro:insert_block name="joint_origin"/>
      <parent link="${parent}"/>
      <child link="base_link"/>
    </joint>

    <link name="base_link">
      <visual>
        <origin xyz="0.0 0.0 0.0"/>
        <geometry>
          <mesh filename="package://adaml2_description/meshes/base_link.STL"/>
        </geometry>
        <material name="red">
          <color rgba="1.0 0.0 0.0 1.0"/>
        </material>
      </visual>
    </link>
  </xacro:macro>
</robot>
```

`visual` 要素は更に `origin`, `geometry`, `material` 要素を持ちます。`geometry` 要素ではリンクの見た目を表す形状を定義します。長方形、球、円柱等のプリミティブな図形を設定できる他、STL ファイルを読み込んで設定することができます。実際、コード 2.13 では `mesh` 要素に STL ファイルを指定して形状を設定しています。STL ファイルは 2.5.4 で作成します。

`origin` 要素では `geometry` 要素で指定した図形の原点の座標を設定することができます。リンクの座標系から見た位置、即ちこのリンクが所属するジョイントの原点からみた位置で指定することになります。このドキュメントでは、基本的にリンクの位置は `joint` タグの位置を設定することで決定します。そのため、`link` タグの `origin` 要素の値はほとんどの場合でゼロになります。

`material` 要素ではリンクの色を設定することができます。ただし、プリミティブ図形または STL ファイルを使用する場合は、単色でしか設定できません。リンクの見た目の色を詳細に決定したい場合は、COLLADA ファイル(拡張子は*.dae)を用意する必要があります。ロボットの開発にとってあまり本質的ではないと考えたので、このドキュメントでは COLLADA ファイルの作成については説明しません。

⁶ <http://wiki.ros.org/urdf/XML/link>

2.5.4 メッシュファイル(STL形式)の作成と割り当て

visual要素のmeshに指定するSTLファイルを、3D-CADソフトであるSolidWorks2019を用いて作成します。SolidWorksにはパーツファイルをSTLにエクスポートする機能があるので、これを使います。

ROS REP:103^{*7}にあるように、ROSでは長さの単位を全てメートルで扱います。しかし、3D-CADで設計を行うときはミリメートル単位でモデリングするのが一般的です。従って、そのままSTLエクスポートすると、ROSから読み込んだときにモデルの大きさが1000倍になってしまいます。また、ROSではロボットの座標軸の向きは「X軸がロボットの前進方向、Z軸は鉛直上向き方向、Y軸は右手座標系となるような向き」と決められています。3D-CADのデフォルト座標軸がこのような向きになっていることは少ないため、STLファイルをエクスポートした後にBlender等の3D-CGファイルでスケールや向きを調整しなければならない場合が殆どです。

しかし、SolidWorksにはSTLファイルをエクスポートする際に、単位系や座標系を指定することができる機能があります。そのため、適切な設定を行いさえすれば3D-CGソフトで後処理を行うことは必要ありません。

図2.6に、base_linkに対応付けるロボットのボディの3D-CADモデルを示します。これはアセンブリファイルをパーツファイルに変換したもので、筐体の他、アクチュエータ(ホイールは含まない)も内包しています。3D-CADの座標軸が図の左下に表示されていますが、X軸はロボットの前方に向いているものの、Z軸が鉛直上向きになっていません。また、ミリメートル単位で設計を行ったため、単位変換を行う必要があります。

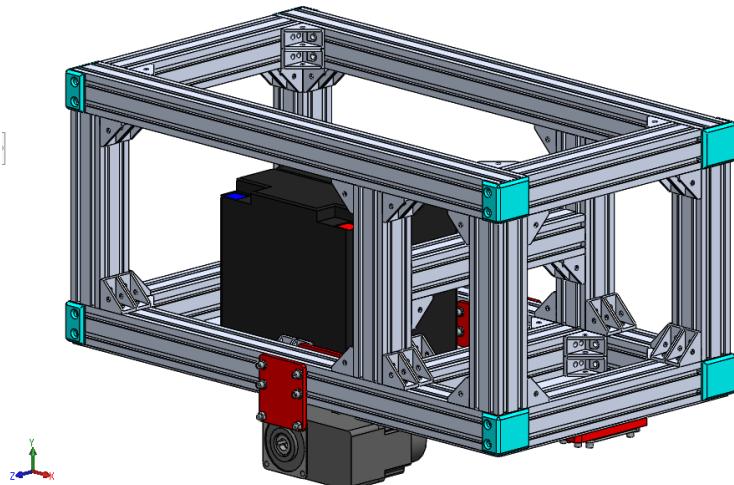


Fig.2.6 3D Model of base_link

STLファイルをエクスポートする前の準備として、まず座標系を定義しましょう。今回のモデルでは、原点はアルミフレームが描く直方体の中心に位置しているので、STLファイルの原点にしたい場所に新たに点を打つ必要はありません。まずは座標系のもとになる軸を定義します。フィーチャー→参照ジオメトリ→軸を選択します。そして、図2.7のように2つの平面を選択して、X軸、Y軸、Z軸の3本を新たに定義します。軸を追加したら、座標系を定義します。先ほど追加した軸を使って、ROSが推奨する座標軸の向きになるよう設定します。少し見づらいですが、図2.8ではX軸に軸1を、Z軸に軸3を対応付けた結果、望ましい座標軸の向きになっていることがわかります。

座標系の定義ができたので、STLファイルをエクスポートしましょう。指定保存を開き、ファイルの種類(拡張子)に「STL」を選択します。STLを選択すると、「オプション」ボタンが表示されるので、それをクリックします。

オプションを開くと、図2.10のような画面が表示されます。ここで単位と出力座標系を設定します(2.10で赤線を引いたところ)。単位をメートルに、出力座標系に先ほど作成した座標系(ここでは「座標系1」という名前)を設定し、「モデルの座標系で出力」というチェックボックスをオンにします。好みで解像度の設定もできます。「粗表示」を選ぶとモデルが粗くなってしまいますが、ファイルの容量を減らすことができます。

この設定で「OK」をクリックし、「保存」を選択することで、ROSでそのまま使用できるSTLファイルを

*7 <https://www.ros.org/reps/rep-0103.html>

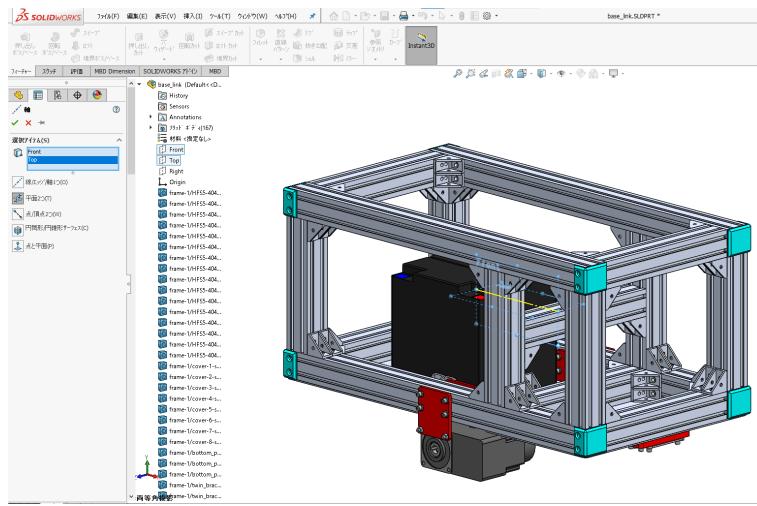


Fig.2.7 Add Axes for STL Export

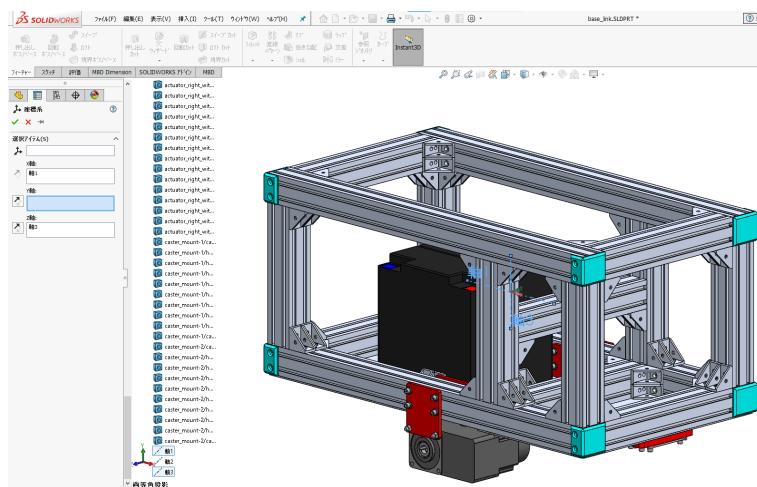


Fig.2.8 Add Coordinate System for STL Export

作成することができます。このSTLファイルを、`adamlr2_description/meshes/`ディレクトリに `base_link.STL` という名前で保存します。コード 2.13 が正しく記述されていれば、STLファイルを読み込むことができるようになります。

2.5.5 ルートファイルからインクルードする

ここまででの作業で `base_link` の定義を完了することができたので、これをルートファイルから読み込んでロボットモデルに組み込みましょう。コード 2.14 に、`robot.xacro` にいくつかの文を追記します。

Code 2.14 Add `base_link` to Robot Model

```
<?xml version="1.0"?>
<robot name="adamlr2" xmlns:xacro="http://ros.org/wiki/xacro">
  <xacro:include filename="$(find adamlr2_description)/urdf/base/base.xacro"/>

  <link name="base_footprint"/>

  <xacro:base parent="base_footprint">
    <origin xyz="0.0 0.0 0.262"/>
  </xacro:base>

</robot>
```

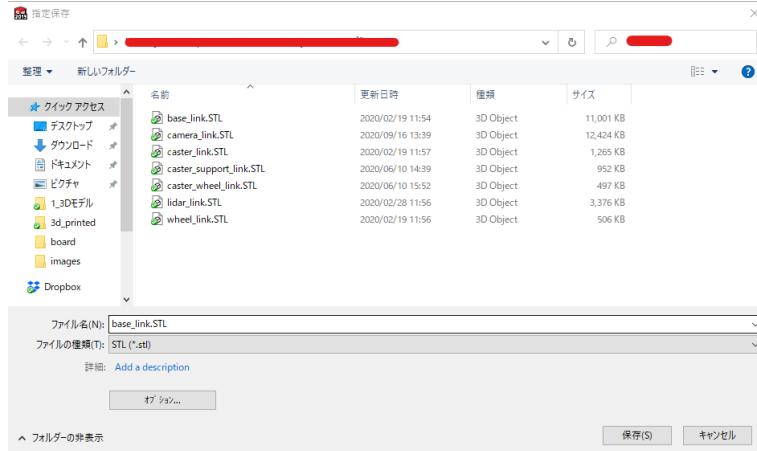


Fig.2.9 Save as STL File

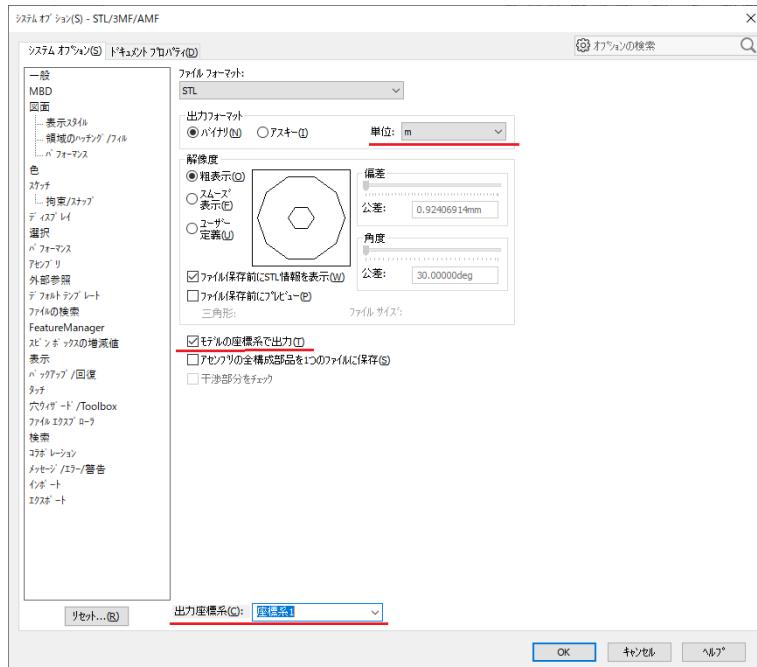


Fig.2.10 STL Export Options

3行目に追記したコマンド `xacro:include` で, `base.xacro` ファイルを読み込んでいます。これにより, `base.xacro` で定義したマクロを使用できるようになります。そして, 7行目から9行目で `xacro:base` マクロを使って `base_link` と `base_link_joint` を定義しています。マクロタグ内で `origin` 要素の記述を行っているのは、マクロがブロックパラメータとして `origin` 要素を引数としているからです。こうすることにより、設計変更が発生してリンクの場所を変更しなければならなくなっても、`robot.xacro` を編集するだけで対応することが出来るようになります。

`robot.xacro` を編集したら、念の為 URDF チェックをしておきましょう。URDF の構文チェックの手順は、2.4.3 の手順を参照してください。URDF を正しく記述できていれば、コード 2.15 のように表示されるはずです。

Code 2.15 Result of Check URDF

```
robot name is: adamr2
----- Successfully Parsed XML -----
root Link: base_footprint has 1 child(ren)
    child(1): base_link
```

2.5.6 rviz による可視化

せっかくリンクを追加したので、rviz で可視化してみましょう。launch/ディレクトリを作成し、その中に rviz を起動するための launch ファイル display.launch を作成し、コード 2.16 の内容を記述します。

Code 2.16 display.launch

```
<launch>
  <arg name="model" default="$(find adamr2_description)/urdf/robot.xacro"/>
  <param name="robot_description" command="$(find xacro)/xacro $(arg model)"/>
  <node name="robot_state_publisher" pkg="robot_state_publisher" type="robot_state_publisher" />
  <node name="rviz" pkg="rviz" type="rviz"/>
</launch>
```

param タグで robot.xacro を展開し、robot_description という名前のパラメータに登録します。ROS ではロボットのリンクやジョイントの状態を、robot_description という名前のパラメータで一元管理しています。URDF の情報をこのパラメータに登録することで、URDF で定義したロボットのモデルを ROS に伝えます。

また、この launch ファイルでは 2 つのノードを起動しています。1 つは robot_state_publisher ノードです。このノードは robot_description パラメータの情報を解釈して TF を投げてくれるノードです。2 つ目は rviz です。

launch ファイルを作成したら、一旦パッケージをビルドしておきましょう。パッケージをビルドすることで、そのパッケージに launch ファイルが存在することをシステムに登録できます。^{*8}ROS のワークスペースに移動して、コード 2.17 のコマンドを実行します。

Code 2.17 Build adamr2_description Package

```
cd ~/catkin_ws/src
catkin build adamr2_description
source ~/catkin_ws/devel/setup.bash
```

パッケージをビルドしたら、launch ファイルを実行してみましょう。

Code 2.18 Launch display.launch

```
roslaunch adamr2_description display.launch
```

launch ファイルを実行すると、rviz が起動し、図 2.11 のような画面が表示されます。

起動した直後はオプションを何も設定していないので、何も表示されません。ロボットのモデルを表示するためには、左下の「Add」ボタンを押し、「RobotModel」を追加します（図 2.12）。

そして、Fixed Frame の値を base_footprint に変更します。デフォルトの値は map というフレームが割り当てられていますが、ロボットのモデルには map というフレームは存在しません。ロボットモデルのルートとなるフレーム名は base_footprint に設定しているので、プルダウンメニューを開き、base_footprint を選択します。

ここまで設定すれば、図 2.13 のようにロボットのモデルが正しく表示されるはずです。base_link がホイールの大きさを考慮した高さに置かれていることが分かると思います。

本節では、コンポーネントとしての xacro ファイルの記述の仕方、SolidWorks を利用した STL ファイルの作成方法、ルートファイルからのインクルードの仕方、及び rviz を使った URDF モデルの可視化について説明しました。センサやホイール等のコンポーネントも、本節で説明した手順の通りに追加することができます。次節以降の作業を行う際にづまづいたときは、本節に戻って手順を確認してください。

2.6 caster_*_link の作成と追加

ロボットのモデルに自在キャスターを追加しましょう。実機用のモデルには必要のないリンクですが、後々シミュレーションを行うときに必要になるので、今のうちに追加しておきます。

^{*8} ROS1 では、ROS2 のように launch ファイルを変更する度にビルドする必要があります。ここでの作業は launch ファイルの存在をシステムに知らせるためのものです。

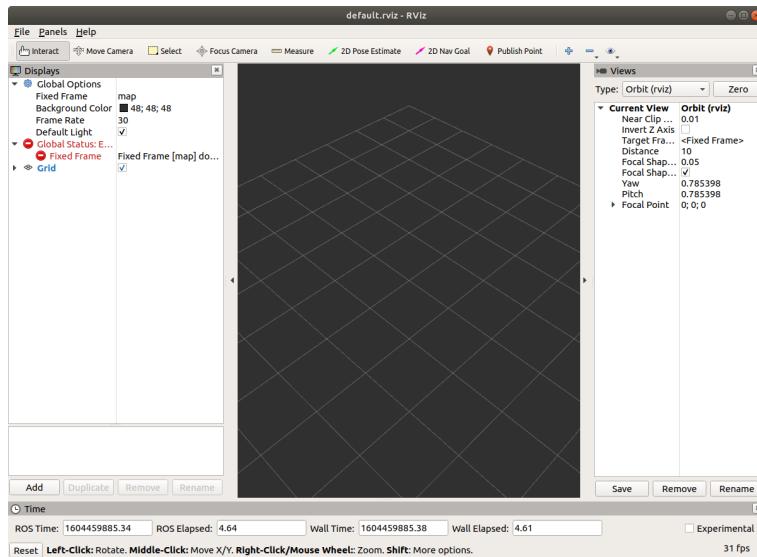


Fig.2.11 Screenshot of rviz Right After It Started

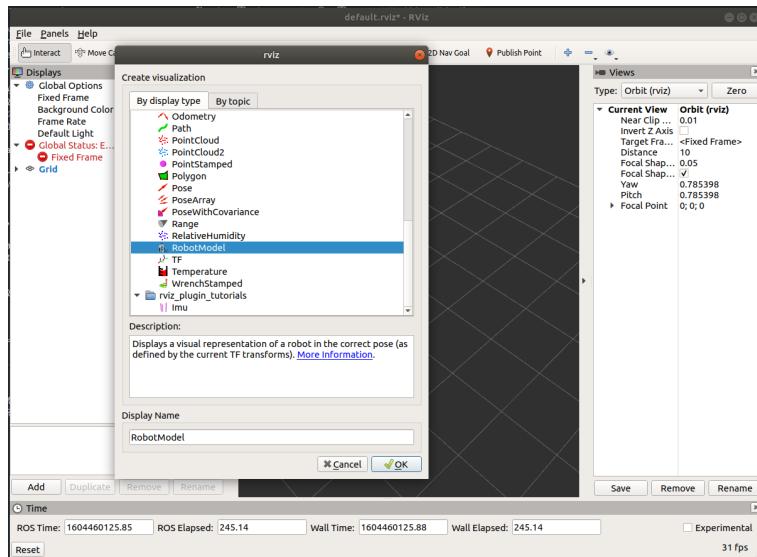


Fig.2.12 Add RobotModel to rviz

自在キャスターは2つのパーツから構成されます。1つ目はキャスターの車輪パーツ、2つ目は車輪を支えるサポートパーツです。シミュレーションを行うことを考えて、これらのパーツを別々のリンクとして定義することにします。

2.6.1 caster.xacro の作成

urdf/ディレクトリ以下にcaster/ディレクトリを作り、その中にcaster.xacroという名前のファイルを作成します。そして、コード2.19の内容を記述します。

Code 2.19 caster.xacro

```
<?xml version="1.0"?>
<robot xmlns:xacro="http://ros.org/wiki/xacro">
  <xacro:macro name="caster" params="prefix parent *joint_origin">
    <joint name="${prefix}_caster_support_joint" type="fixed">
      <xacro:insert_block name="joint_origin"/>
      <parent link="${parent}"/>
      <child link="${prefix}_caster_support_link"/>
```

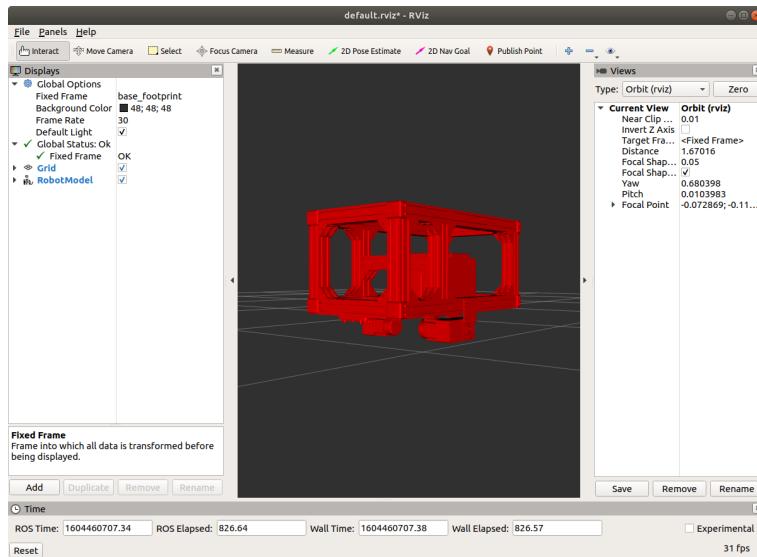


Fig.2.13 base_link is Correctly Displayed

```

</joint>

<link name="${prefix}_caster_support_link">
  <visual>
    <origin rpy="0.0 0.0 0.0"/>
    <geometry>
      <mesh filename="package://adamlr2_description/meshes/caster_support_link.STL"/>
    </geometry>
    <material name="red">
      <color rgba="0.0 0.0 0.0 1.0"/>
    </material>
  </visual>
</link>

<joint name="${prefix}_caster_wheel_joint" type="fixed">
  <origin xyz="-0.030 0.0 -0.072" rpy="0.0 0.0 0.0"/>
  <parent link="${prefix}_caster_support_link"/>
  <child link="${prefix}_caster_wheel_link"/>
</joint>

<link name="${prefix}_caster_wheel_link">
  <visual>
    <origin rpy="0.0 0.0 0.0"/>
    <geometry>
      <mesh filename="package://adamlr2_description/meshes/caster_wheel_link.STL"/>
    </geometry>
    <material name="red">
      <color rgba="0.0 0.0 0.0 1.0"/>
    </material>
  </visual>
</link>
</xacro:macro>
</robot>

```

caster.xacro では、\${prefix}_caster_support_link と \${prefix}_caster_wheel_link の 2 つのリンクと、それらを繋ぐ \${prefix}_caster_support_joint と \${prefix}_caster_wheel_joint の 2 つのジョイントを定義するマクロ caster を定義しています。caster マクロは 3 つの引数を取ります。このうち、prefix はリンクやジョイントの名前の接頭辞です。自在キャスターはロボットの前後に 1 つずつ存在しますが、それらは全く同じパーツなので、xacro ファイルを複数定義するのは無駄になります。そのため、接頭辞を引数にとって区別することで、1 つの xacro ファイルで 2 つの部品を定義できるようにしています。

base_link と \${prefix}_caster_support_link は \${prefix}_caster_support_joint によって接続されます。ジョイン

トタイプは fixed です。本来ならばこのジョイントは、Z 軸を回転中心とする連続回転ジョイントのタイプにする必要があります。しかし、実機用の URDF ファイルでこのような受動回転するコンポーネントのジョイントタイプを連続回転にすると、リンクの位置関係を取得できないために TF のエラーが発生します。そのため、実機用 URDF ではジョイントのタイプを fixed にしています。\${prefix}_caster_support_link と \${prefix}_caster_wheel_link を繋ぐジョイント \${prefix}_caster_wheel_joint も同様に固定タイプのジョイントとしています。

サポートパーツと車輪パーツの位置関係は一定なので、xacro ファイル内でローカルに \${prefix}_caster_wheel_joint の原点を設定してしまっています。一方で、自在キャスターがロボットボディのどこに取り付けられるかはユーザー次第なので、\${prefix}_caster_support_joint の原点はルートファイルから決定できるように、マクロのブロックパラメータとして設定しています。

2.6.2 STL ファイルの作成と割り当て

2.5.4 を参考に、3D-CAD ソフトから STL ファイルをエクスポートして meshes/ディレクトリに配置してください。車輪パーツとサポートパーツは別ファイルとして書き出します。出力座標系は図 2.14 を参照してください。

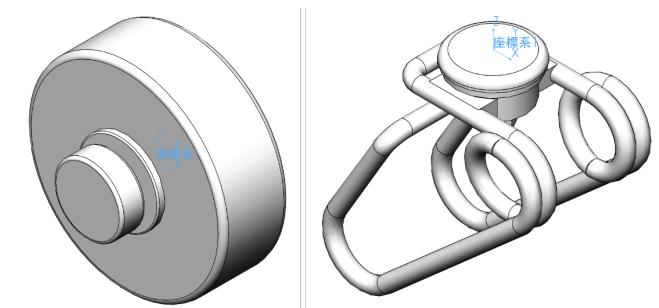


Fig.2.14 Coordinate System of Caster Parts

2.6.3 ルートファイルからインクルードする

作成したリンクをロボットモデルに組み込みましょう。robot.xacro にコード 2.20 のように追記します。

Code 2.20 Add Caster-Link to Robot Model

```
<?xml version="1.0"?>
<robot name="adamr2" xmlns:xacro="http://ros.org/wiki/xacro">
  <xacro:include filename="$(find adamr2_description)/urdf/base/base.xacro"/>
  <xacro:include filename="$(find adamr2_description)/urdf/caster/caster.xacro"/>

  <link name="base_footprint"/>

  <xacro:base parent="base_footprint">
    <origin xyz="0.0 0.0 0.262"/>
  </xacro:base>

  <xacro:caster prefix="back" parent="base_link">
    <origin xyz="-0.275 0.0 -0.1498"/>
  </xacro:caster>

  <xacro:caster prefix="front" parent="base_link">
    <origin xyz="0.275 0.0 -0.1498" rpy="0 0 ${radians(180)}"/>
  </xacro:caster>
</robot>
```

caster.xacro ファイルをインクルードし、xacro:caster マクロを使って前後の自在キャスターを定義しています。ロボットの前方に付けるキャスターは、向きを 180 度変えるために origin 要素の rpy 属性でヨー角を設定しています。

2.7 lidar_link の作成と追加

RPLiDAR のリンクをロボットモデルに追加します。ロボットの部品の中でも、センサは特に座標変換が重要なコンポーネントです。センサのデータシートやマニュアルをよく読んで、適切な座標変換ができるようにならう。

2.7.1 RPLiDAR A2 の光学窓

RPLiDAR A2M6 のデータシートを見ると、RPLiDAR A2 の光学窓は図 2.15 のようになっており、センサの底面から 30.8 mm の高さに位置していることがわかります。URDF を記述するときは、lidar_link のリンク座標系の原点がこの位置になるようにしなければなりません。

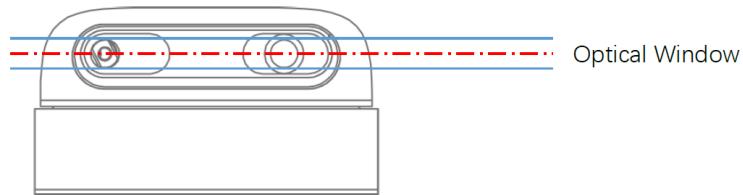


Fig.2.15 RPLiDAR A2 Optical Window

2.7.2 RPLiDAR A2 の座標系

RPLiDAR A2 は少々特殊な座標系を持っており、その向きは図 2.16 に示す通りになっています。

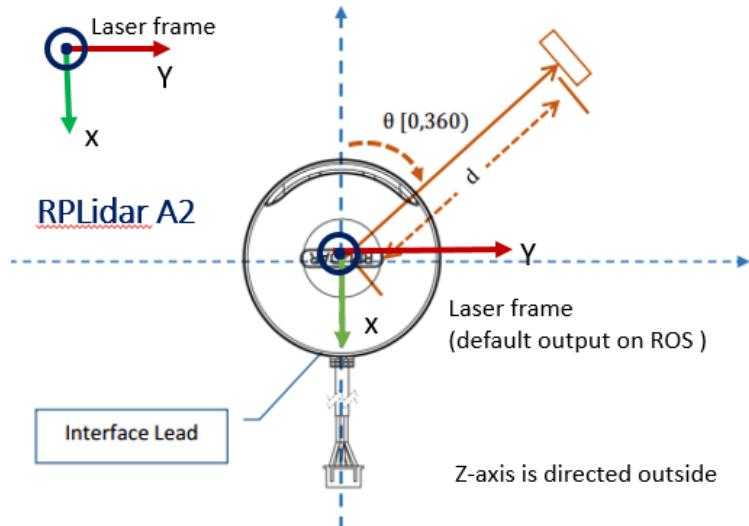


Fig.2.16 Coordinate System of RPLiDAR A2

図を見るとわかるのですが、ROS REP:103 で推奨されている座標系と一致していません (Z 軸周りに 180 度回転させた向きになっている)。そのため、モデルの見た目とセンサデータの座標変換とを両立させるために、ジョイントの向きを図 2.16 の通りにし、モデルの見た目を 180 度回転させる、という処理が必要になります。

2.7.3 STL ファイルの作成

STL ファイルの出力座標系は図 2.17 のようにします。座標系の原点はセンサ底面から 30.8 mm の高さに位置しています。

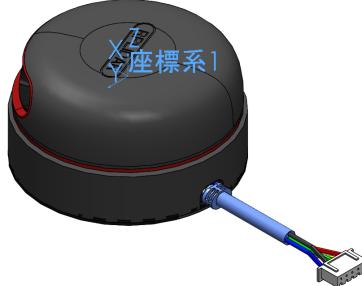


Fig.2.17 Output Coordinate System of RPLiDAR Model

2.7.4 lidar.xacro の記述

以上を踏まえて、lidar.xacro を記述します。urdf/ディレクトリ以下に lidar/ディレクトリを作り、その中にコード 2.21 の内容を記述したファイル lidar.xacro を作成します。

Code 2.21 lidar.xacro

```
<?xml version="1.0"?>
<robot xmlns:xacro="http://ros.org/wiki/xacro">
  <xacro:macro name="lidar" params="parent visual_yaw_orientation *joint_origin">
    <joint name="lidar_joint" type="fixed">
      <xacro:insert_block name="joint_origin"/>
      <parent link="${parent}"/>
      <child link="lidar_link"/>
    </joint>

    <link name="lidar_link">
      <visual>
        <origin xyz="0.0 0.0 0.0" rpy="0 0 ${visual_yaw_orientation}"/>
        <geometry>
          <mesh filename="package://adaml2_description/meshes/lidar_link.STL"/>
        </geometry>
        <material name="blue">
          <color rgba="0.0 0.0 1.0 1.0"/>
        </material>
      </visual>
    </link>
  </xacro:macro>
</robot>
```

lidar マクロは引数として親リンクの名前、モデルの見た目の向き、そしてジョイントの原点座標のブロックを取ります。ジョイント原点座標とともにモデルの向きを取ることによって、RPLiDAR 特有の座標系に起因する問題を解決しています。

2.7.5 ルートファイルからインクルードする

lidar_link をロボットモデルに取り込みましょう。コード 2.22 のように robot.xacro を編集します。lidar マクロの引数 visual_yaw_orientation に、radians マクロを使って弧度法で角度を渡しています。

Code 2.22 Add lidar_link to Robot Model

```
<?xml version="1.0"?>
```

```

<robot name="adamlr2" xmlns:xacro="http://ros.org/wiki/xacro">
  <xacro:include filename="$(find adamlr2_description)/urdf/base/base.xacro"/>
  <xacro:include filename="$(find adamlr2_description)/urdf/caster/caster.xacro"/>
  <xacro:include filename="$(find adamlr2_description)/urdf/lidar/lidar.xacro"/>

  <!-- base_footprint -->
  <link name="base_footprint"/>

  <!-- base_link -->
  <xacro:base parent="base_footprint">
    <origin xyz="0.0 0.0 0.262"/>
  </xacro:base>

  <!-- front caster -->
  <xacro:caster prefix="back" parent="base_link">
    <origin xyz="-0.275 0.0 -0.1498"/>
  </xacro:caster>

  <!-- back caster -->
  <xacro:caster prefix="front" parent="base_link">
    <origin xyz="0.275 0.0 -0.1498" rpy="0 0 ${radians(180)}"/>
  </xacro:caster>

  <!-- lidar -->
  <xacro:lidar parent="base_link" visual_yaw_orientation="${radians(180)}">
    <origin xyz="0.275 0 0.177" rpy="0 0 ${radians(180)}"/>
  </xacro:lidar>
</robot>

```

2.7.6 rviz による可視化

センサを取り付けたので、rviz で可視化して、正しい位置に取り付けられているかどうか確認します。2.5.6 を参考に、URDF モデルを rviz で可視化します。

とはいっても、可視化の度に RobotModel を追加して、基準フレームを base_footprint にして… という作業を繰り返すのは面倒です。そこで、rviz の設定ファイルを保存しておいて、可視化の度に読み込むようにしてみましょう。rviz を起動し、ロボットモデルの可視化が正しくできている状態 (RobotModel を追加して base_footprint を基準フレームに設定している状態) にします。図 2.18 のように、画面左上のツールバーから「File」-»「Save Config As」を選択します。

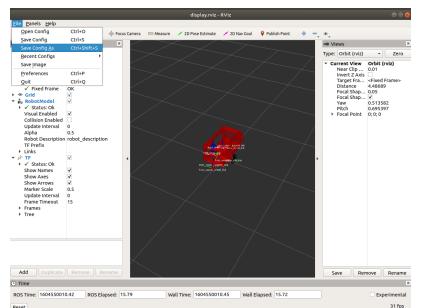


Fig.2.18 Save rviz Config File

adamlr2_description パッケージの中に設定ファイルを保存します。保存場所はどこでもいいですが、わかりやすいように rviz/ という名前のディレクトリを作り、display.rviz という名前で保存しましょう。

この設定ファイルを rviz 起動時に読み込ませることで、保存しておいた設定を復元することができます。rviz に設定ファイルを渡して起動するには、launch ファイルを少し編集する必要があります。コード 2.23 のように display.launch ファイルを編集します。

Code 2.23 rviz Load Config File at Startup

```

<launch>
  <arg name="model" default="$(find adamlr2_description)/urdf/robot.xacro"/>

```

```

<arg name="rvizconfig" default="$(find adamr2_description)/rviz/display.rviz"/>

<param name="robot_description" command="$(find xacro)/xacro $(arg model)" />

<node name="robot_state_publisher" pkg="robot_state_publisher" type="robot_state_publisher"
      />
<node name="rviz" pkg="rviz" type="rviz" args="-d $(arg rvizconfig)"/>
</launch>

```

launch ファイルの arg タグを追加して、新しい変数 rvizconfig を定義しています。これは先程保存した rviz の設定ファイルへのパスです。そして、rviz を起動する node タグの arg 属性に設定ファイルを読み込ませるオプションを追加しています。

この launch ファイルを実行することで、適切な設定がなされた状態でモデルが表示されます。このように rviz の設定ファイルを保存しておき、実行時に読み込ませることで、作業を効率よく進めることができます。テクニックとして覚えておいて損はないでしょう。

lidar_link を追加した段階でのロボットの見た目は図 2.19 のようになります。RPLiDAR が正しい位置・向きに取り付けられていることがわかります。リンクの座標軸が表示されていますが、これは TF を表示させているからです。「Add」ボタンから追加することができます。

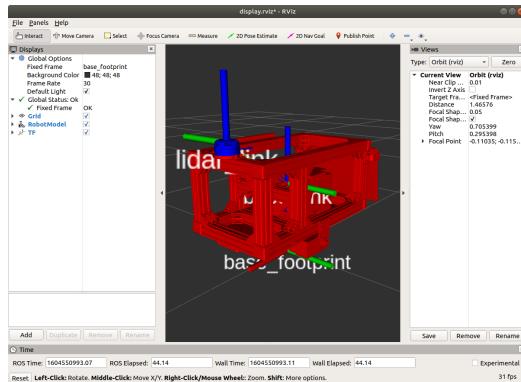


Fig.2.19 Screenshot of rviz

2.8 wheel_link の作成と追加

最後に wheel_link とそのジョイントを追加していきます。wheel_link を定義するために 2 つのファイルを準備します。wheel.xacro と transmission.xacro の 2 つです。

2.8.1 wheel.xacro の作成

まずは wheel.xacro を記述していきます。urdf/ディレクトリ以下に wheel/ディレクトリを作成し、wheel.xacro という名前のファイルを作成します。そして、コード 2.24 のように記述します。

Code 2.24 wheel.xacro

```

<?xml version="1.0"?>
<robot xmlns:xacro="http://ros.org/wiki/xacro">
  <xacro:macro name="wheel" params="prefix parent *joint_origin *joint_axis">
    <joint name="${prefix}_wheel_joint" type="continuous">
      <xacro:insert_block name="joint_origin"/>
      <parent link="${parent}"/>
      <child link="${prefix}_wheel_link"/>
      <xacro:insert_block name="joint_axis"/>
    </joint>

    <link name="${prefix}_wheel_link">
      <visual>
        <origin rpy="0.0 0.0 0.0"/>
        <geometry>

```

```

<mesh filename="package://adamr2_description/meshes/wheel_link.STL"/>
</geometry>
<material name="black">
    <color rgba="0.0 0.0 0.0 1.0"/>
</material>
</visual>
</link>
</acro:macro>
</robot>

```

wheel.xacro の内容は他のリンクとほとんど変わり映えしません。ジョイントとリンクを定義しているだけです。ホイールを繋ぐジョイントはタイプを continuous にします。

2.8.2 transmission.xacro の作成

ホイールジョイントに対する ros_control の設定を行うマクロは transmission.xacro で定義します。wheel.xacro と同じディレクトリに transmission.xacro という名前のファイルを作成し、コード 2.25 のような内容を記述します。

Code 2.25 transmission.xacro

```

<?xml version="1.0"?>
<robot xmlns:xacro="http://ros.org/wiki/xacro">
    <acro:macro name="wheel_trans" params="prefix">
        <transmission name="${prefix}_wheel_trans">
            <type>transmission_interface/SimpleTransmission</type>
            <joint name="${prefix}_wheel_joint">
                <hardwareInterface>hardware_interface/VelocityJointInterface</hardwareInterface>
            </joint>

            <actuator name="${prefix}_wheel_motor">
                <mechanicalReduction>1</mechanicalReduction>
            </actuator>
        </transmission>
    </acro:macro>
</robot>

```

このマクロではホイールのジョイントに対して transmission 要素を追加しています。transmission 要素には type, joint, actuator の 3 つの要素を持っています。この URDF は ros_control のコントローラの 1 つである diff_drive_controller から利用されることを想定しているので、type は transmission_interface/SimpleTransmission を、joint の hardwareInterface 要素には hardware_interface/VelocityJointInterface を設定しています。actuator 要素の mechanicalReduction には、ロボットのアクチュエータの減速比を設定します。ADAMR2 ではギヤード BLDC モータを使用していますが、ギア比の計算は YP-Spur が行ってくれるため、ここで設定する必要はありません。ギヤ比は 1 に設定しておきましょう。

2.8.3 ルートファイルからインクルードする

ホイールをロボットに組み込みます。robot.xacro を更に編集し、コード 2.26 のようにします。xacro:include タグを使って wheel.xacro と transmission.xacro を読み込むことを忘れないようにしてください。

Code 2.26 Add wheel_link to Robot Model

```

<?xml version="1.0"?>
<robot name="adamr2" xmlns:xacro="http://ros.org/wiki/xacro">
    <xacro:include filename="$(find adamr2_description)/urdf/base/base.xacro"/>
    <xacro:include filename="$(find adamr2_description)/urdf/caster/caster.xacro"/>
    <xacro:include filename="$(find adamr2_description)/urdf/lidar/lidar.xacro"/>
    <xacro:include filename="$(find adamr2_description)/urdf/wheel/wheel.xacro"/>
    <xacro:include filename="$(find adamr2_description)/urdf/wheel/transmission.xacro"/>

    <!-- base_footprint -->
    <link name="base_footprint"/>

```

```

<!-- base_link -->
<xacro:base parent="base_footprint">
  <origin xyz="0.0 0.0 0.262"/>
</xacro:base>

<!-- front caster -->
<xacro:caster prefix="front" parent="base_link">
  <origin xyz="0.275 0.0 -0.1498" rpy="0 0 ${radians(180)}"/>
</xacro:caster>

<!-- back caster-->
<xacro:caster prefix="back" parent="base_link">
  <origin xyz="-0.275 0.0 -0.1498"/>
</xacro:caster>

<!-- lidar -->
<xacro:lidar parent="base_link" visual_yaw_orientation="${radians(180)}">
  <origin xyz="0.275 0 0.177" rpy="0 0 ${radians(270)}"/>
</xacro:lidar>

<!-- left wheel -->
<xacro:wheel prefix="left" parent="base_link">
  <origin xyz="0.0 0.1915 -0.1845"/>
  <axis xyz="0 1 0"/>
</xacro:wheel>
<xacro:wheel_trans prefix="left"/>

<!-- right wheel -->
<xacro:wheel prefix="right" parent="base_link">
  <origin xyz="0.0 -0.1915 -0.1845"/>
  <axis xyz="0 1 0"/>
</xacro:wheel>
<xacro:wheel_trans prefix="right"/>
</robot>

```

`xacro:wheel` を呼び出してホイールを定義しています。ここで重要なのが、ホイールの回転軸は「ロボットが直進する方向を正とする」ようにしなければならないということです。コード 2.26 を見るとわかるように、左右どちらの車輪も、Y 軸正方向を回転軸に設定しています。これは `diff_drive_controller` を使用する都合で発生するものです。^{*9}

2.8.4 rviz による可視化

駆動パーツであるホイールを追加したので、`rviz` で可視化して、ついでにジョイントを動かしてみましょう。`joint_state_publisher_gui` パッケージを使用すれば、スライダーを使ってジョイントを動かすことができます。`joint_state_publisher_gui` パッケージはデフォルトで入っていない場合があるので、追加でインストールします。

Code 2.27 Install `joint_state_publisher_gui`

```

sudo apt update
sudo apt install ros-melodic-joint-state-publisher-gui

```

`display.launch` に `joint_state_publisher` と `joint_state_publisher_gui` を起動する文を追加します。

Code 2.28 `display.launch`

```

<launch>
  <arg name="model" default="$(find adamr2_description)/urdf/robot.xacro"/>
  <arg name="rvizconfig" default="$(find adamr2_description)/rviz/display.rviz" />

  <param name="robot_description" command="$(find xacro)/xacro $(arg model)" />

```

^{*9} 後述しますが³、YP-Spur における車輪の軸はこのようになっていないため、結局ドライバノード側で回転速度を反転しなければなりません。にも関わらずこのようにしているのは、できるだけシミュレーション環境と互換性を持たせるためです。

```

<node name="robot_state_publisher" pkg="robot_state_publisher" type="robot_state_publisher"
      "/>
<node name="joint_state_publisher_gui" pkg="joint_state_publisher_gui" type="joint_state_publisher_gui"/>
<node name="rviz" pkg="rviz" type="rviz" args="-d $(arg rvizconfig)" required="true"/>
</launch>

```

これを実行すると、図 2.20 のように、rviz にロボットモデルが表示され、また joint_state_publisher_gui のウィンドウが現れます。joint_state_publisher_gui のウィンドウのスライダーをマウスで動かすことによって、rviz 上のロボットのホイールも動きます。ジョイントの角度を正の数値にすると、ロボットが前進する方向へホイールが動くことを確認してください。

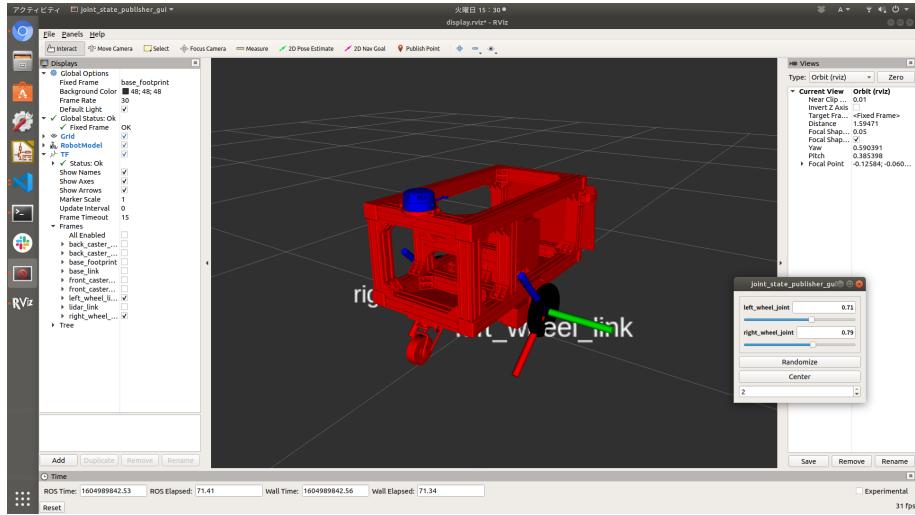


Fig.2.20 joint_state_publisher_gui

第3章

デバイス設定

3.1 F310/F710 ゲームパッドを ROS で利用する

3.1.1 製品の概要

Logicool Gamepad F310/F710 は、Logicool から発売されている USB 接続の PC 用ゲームパッドです。



Fig.3.1 Logicool F710 Gamepad

有線接続の F310 は 2310 円、無線接続の F710 は 4950 円と安価に入手することができ、ロボットの操縦用コントローラとして使用することもできます。

3.1.2 ゲームパッドの入力モード

310/F710 ゲームパッドは 2 つの入力モードを持っており、物理スイッチによってモードを切り替えることができます。

- DirectInput モード：他のゲームパッドと同じ挙動を示すモード
- XInput モード：Xbox360 コントローラを PC に繋いだときと同じ挙動を示すモード

モード切替スイッチは、F310 には本体背面に、F710 は本体側面上部に付いています。



Fig.3.2 Mode Selector Switch for F710

ROS パッケージの joy^{*1} から F310/F710 ゲームパッドを使用するときは、DirectInput モードを使用する必要があります。

3.1.3 DirectInput モードのキーマッピング

DirectInput モードで ROS に接続した際の F310/F710 ゲームパッドのキーマッピングを表 3.1 及び表 3.2 に示します。

sensor_msgs/Joy^{*2}型メッセージでは、ゲームパッドの各軸・各ボタンの信号の値が axes と buttons の 2 つのリストに格納されます。各リストに対してインデックスを指定することで、対応するボタン・軸のデータを得ることができます。

Buttons	X	A	B	Y	LB	RB	LT	RT	BACK	START	LeftStick	RightStick
index	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Table3.1 Button Mapping of F310/F710 Gamepad in ROS

Axis	Left Horiz.	Left Vert.	Right Horiz.	Right Vert.	Arrow Horiz.	Arrow Vert.
index	0	1	2	3	4	5

Table3.2 Axis Mapping of F310/F710 Gamepad in ROS

3.1.4 ゲームパッド起動用ファイルを準備する

F310/F710 ゲームパッドを ROS に接続して、ゲームパッドからロボットへ速度指令を出せるようにしてみましょう。ゲームパッドから速度指令を出せるようにするには、以下の 2 つのパッケージに含まれるノードが必要になります。

- joy
- teleop_twist_joy

joy パッケージは汎用ゲームパッドのための ROS ドライバです。teleop_twist_joy^{*3} は、sensor_msgs/Joy メッセージを geometry_msgs/Twist^{*4} メッセージに変換するためのパッケージです。Twist 型メッセージで速度指令を受け取るタイプのロボットをゲームパッドから動かす際によく使われているパッケージで、ADAMR2 でもこのパッケージを使用しています。

この 2 つのパッケージのノードを同時に起動する launch ファイルを joy.launch とし、adaml2_bringup というパッケージに保存することにします。teleop_twist_joy パッケージを利用するには適切なコンフィグファイルが必要となります。それも adaml2_bringup パッケージに置いておくことにします。

まずはパッケージを作ります。コード 3.1 のコマンドを実行して、ROS ワークスペースに adaml2_bringup パッケージを作ります。

Code 3.1 Create adaml2_bringup Package

```
cd ~/catkin_ws/src
catkin create pkg adaml2_bringup
```

adaml2_bringup パッケージの中には 2 つのディレクトリを作ります。launch/ディレクトリと config/ディレクトリです。まずは launch ファイルを準備します。launch/ディレクトリを作成し、joy.launch という名前の launch ファイルを作成します。そして、コード 3.2 のような内容を記述します。

*1 <http://wiki.ros.org/joy>

*2 http://docs.ros.org/en/melodic/api/sensor_msgs/html/msg/Joy.html

*3 http://wiki.ros.org/teleop_twist_joy

*4 http://docs.ros.org/en/melodic/api/geometry_msgs/html/msg/Twist.html

Code 3.2 joy.launch

```

<launch>
  <arg name="joy_dev" default="/dev/input/js0"/>
  <arg name="config_file_path"
        default="$(find adamr2_bringup)/config/f310.config.yml"/>

  <group ns="/adaml2/diff_drive_controller">
    <!-- joy node -->
    <node pkg="joy" type="joy_node" name="joy_node">
      <param name="dev" value="$(arg joy_dev)"/>
      <param name="deadzone" value="0.3" />
      <param name="autorepeat_rate" value="20"/>
    </node>

    <!-- teleop_twist_joy node -->
    <node pkg="teleop_twist_joy" name="teleop_twist_joy" type="teleop_node">
      <rosparam command="load" file="$(arg config_file_path)"/>
    </node>
  </group>
</launch>

```

launch ファイルのパラメータとして、joy_dev と config_file_path を宣言しています。joy_dev はゲームパッドのデバイスファイル名で、ゲームパッドデバイスを 1 つしか接続していない場合は/dev/input/js0 になります。config_file_path は teleop_twist_joy パッケージのノードに与えるパラメータを記述したコンフィグファイルのパスです。まだ作成していないので、このままでは launch ファイルを実行することはできません。

この launch ファイルでは、group ns タグで名前空間を設定しています。joy_node と teleop_node は名前空間/adaml2/diff_drive_controller の下に置かれ、トピックやパラメータの名前が変化します。名前空間の設定を行う理由は、対向 2 輪ロボット用のコントローラである diff_drive_controller が、名前空間の下に置かれた速度指令トピックを受信するようになっているためです。

次に、teleop_node のためのコンフィグファイルを記述します。ROS では、ノードに与えるパラメータを 1 つのファイルにまとめて記述する際に、YAML 形式のファイルを使用します。adaml2_bringup パッケージディレクトリ直下に config/ディレクトリを作り、f310.config.yml^{*5} という名前のファイルを作成します。そして、コード 3.3 のような内容を記述します。

Code 3.3 f310.config.yml

```

axis_linear: 1
scale_linear: 0.3
scale_linear_turbo: 0.5

axis_angular: 0
scale_angular: 0.94
scale_angular_turbo: 1.57

enable_button: 1
enable_turbo_button: 2

```

この設定では、左アナログスティックの縦軸が直進速度、横軸が旋回速度に対応するようになっています。また、押しているボタンによって速度のスケールが変わるようにになっており、A ボタンは通常のスケール、B ボタンでターボスケールになるようになっています。スケールの具体的な値は scale_linear と scale_angular で指定しています。

より詳細なパラメータの設定方法は、teleop_twist_joy の ROS Wiki のページを参照してください。

3.1.5 ゲームパッドを使ってみる

launch ファイルおよび設定ファイルの準備が終わったので、実際にゲームパッドを ROS 上で使ってみます。

^{*5} YAML 形式のファイルの拡張子は.yaml と.yml が使え(てしまい)ますが、ロボットのシステムを組む際はどちらかに統一した方が良いです。ここでは.yaml で統一していますが、ROS で SLAM をしたときに保存されるマップデータの YAML ファイル拡張子が.yaml のなので、.yaml で統一した方が良いのかもしれません。

PC にゲームパッドを接続し、正しく認識されているかどうかを確認してください。デバイスファイルが存在するかどうかのチェックは、コード 3.4 のコマンドで行うことができます。

Code 3.4 Check Device File of Gamepad

```
ls /dev/input/js*
```

「/dev/input/js0」のような表示がターミナルに表示されれば問題ありません。また、Ubuntu でゲームパッドが正しく使えるかどうかをテストするソフトウェアである「jstest-gtk」があります。ROS から利用する前に、このソフトウェアでチェックをするとよいでしょう。jstest-gtk は apt コマンドでインストールすることができます。インストールした後、ターミナルで「jstest-gtk」と実行すればソフトウェアが起動します。

Code 3.5 Install jstest-gtk

```
sudo apt update  
sudo apt install jstest-gtk
```

ゲームパッドのチェックが終わったら、ROS からゲームパッドを利用してみましょう。パッケージをビルドして環境変数を読み込んだら、launch ファイルを実行してみます。

Code 3.6 launch joy.launch

```
cd ~/catkin_ws  
catkin build  
source /opt/ros/melodic/setup.bash  
source ~/catkin_ws/devel/setup.bash  
roslaunch adamr2_bringup joy.launch
```

launch ファイルが正しく実行された場合、2つのノードが起動し、/adamr2/diff_drive_controller/joy トピックや/adamr2/diff_drive_controller/cmd_vel トピックなどの配信が開始されるはずです。

3.2 RPLiDAR A2 を利用する

3.2.1 製品の概要

RPLiDAR A2 は、SLAMTEC 社から発売されている安価な 360° 計測可能な LiDAR センサです。



Fig.3.3 SLAMTEC RPLiDAR A2

RPLiDAR シリーズの ROS ドライバは既に用意されているため^{*6}、購入後すぐに利用することができます。

3.2.2 launch ファイルの用意

RPLiDAR A2 を起動するための launch ファイルを作成します。adamr2_bringup パッケージの launch/ディレクトリに、rplidar_a2.launch という名前のファイルを作成し、コード 3.7 のように記述します。

^{*6} <http://wiki.ros.org/rplidar>

Code 3.7 rplidar_a2.launch

```
<launch>
  <arg name="device" default="/dev/ttyUSB0"/>
  <arg name="baudrate" default="115200"/>
  <arg name="frame_id" default="lidar_link"/>
  <arg name="inverted" default="false"/>
  <arg name="angle_compensate" default="true"/>

  <group ns="/adamr2">
    <node name="rplidarNode" pkg="rplidar_ros" type="rplidarNode" output="screen">
      <param name="serial_port" type="string" value="$(arg device)"/>
      <param name="serial_baudrate" type="int" value="$(arg baudrate)"/>
      <param name="frame_id" type="string" value="$(arg frame_id)"/>
      <param name="inverted" type="bool" value="$(arg inverted)"/>
      <param name="angle_compensate" type="bool" value="$(arg angle_compensate)"/>
    </node>
  </group>
</launch>
```

RPLiDAR の ROS ドライバノードである rplidarNode は、以下の 6 つのパラメータを取ります。

1. serial_port
2. serial_baudrate
3. frame_id
4. inverted
5. angle_compensate
6. scam_mode

serial_port は RPLiDAR のデバイスファイルを指定します。RPLiDAR A2 のデバイスファイルは、他に USB デバイスを繋いでいなければ「/dev/ttyUSB0」になります。serial_baudrate はシリアル通信のボーレートです。RPLiDAR A2 ならばボーレートは 115200 固定です。frame_id は LiDAR の TF フレーム名を指定します。[2.7](#) で URDF を記述した際に、「lidar_link」という名前を付けていたので、ここではそれを指定します。

また、ノードに名前空間を設定しています。名前空間の設定は必須ではありませんが、[*7](#) ここでは scan メッセージにも名前空間を指定することにします。

3.2.3 RPLiDAR を使ってみる

早速作成した launch ファイルを実行して、RPLiDAR を使ってみましょう。RPLiDAR を PC に接続して、launch ファイルを実行します。

Code 3.8 Launch rplidar_a2.launch

```
roslaunch adamr2Bringup rplidar_a2.launch
```

無事にノードが起動したら、rviz を起動してセンサデータを確認してみましょう。固定フレームに「lidar_link」を指定します。TF が配信されていないのでプルダウンメニューには表示されません。名前を直接入力しましょう。次に左下の「Add」ボタンから「LaserScan」を追加し、トピック名に「adamr2/scan」を指定します。センサデータが見えるようになれば OK です。

3.3 Realsense D435 を利用する

3.3.1 Realsense D435 について

Intel Realsense Depth Camera D435 は Intel 社が開発している深度カメラです。Realsense D435 を使うことで、画像データと 3 次元点群データを取得することができます。通常のカメラとして使うことができる他、点群データを用いて Visual SLAM を行ったり、障害物検知を行ったりすることも可能です。

Realsense D435 の ROS ラッパーは Intel 社によって用意されているので、簡単に使用することができます。

*7 複数台のロボットを制御したりしないのであれば、むしろデフォルトのままの方が混乱が起きにくいです。

本節では Realsense D435 の ROS での使い方を説明します。

3.3.2 ライブラリのインストール

ROS ラッパーは apt で公開されているので、簡単にインストールすることができます Ubuntu 18.04LTS(ROS Melodic) の場合、以下のコマンドでインストールします。

Code 3.9 Install Realsense ROS Wrapper

```
sudo apt update
sudo apt install ros-melodic-realsense2-camera ros-melodic-realsense2-description
```

ROS パッケージをインストールすることで、Realsense のドライバや Intel 公式ビューワー `realsense-viewer` もインストールされます。データの確認やファームウェアの更新は `realsense-viewer` から行えます。ターミナルで `realsense-viewer` と入力して実行することでビューワーを起動することができます。PC に Realsense を接続し、ビューワーからカメラをオンにすると点群データを確認できます。

3.3.3 Realsense 起動用 launch ファイルを準備する

Realsense を起動するための launch ファイルを記述します。 `adaml2_bringup` パッケージの `launch/` ディレクトリに `realsense.launch` という名前のファイルを作成し、コード 3.10 のように記述します。

Code 3.10 `realsense.launch`

```
<launch>
  <arg name="serial_no"           default="" />
  <arg name="usb_port_id"         default="" />
  <arg name="device_type"         default="" />
  <arg name="json_file_path"      default="" />
  <arg name="camera"              default="camera" />
  <arg name="tf_prefix"           default="$(arg camera)" />
  <arg name="external_manager"    default="false" />
  <arg name="manager"             default="realsense2_camera_manager" />

  <arg name="fisheye_width"       default="640" />
  <arg name="fisheye_height"      default="480" />
  <arg name="enable_fisheye"     default="false" />

  <arg name="depth_width"         default="640" />
  <arg name="depth_height"        default="480" />
  <arg name="enable_depth"        default="true" />

  <arg name="infra_width"         default="640" />
  <arg name="infra_height"        default="480" />
  <arg name="enable_infra"        default="false" />
  <arg name="enable_infra1"       default="false" />
  <arg name="enable_infra2"       default="false" />

  <arg name="color_width"         default="640" />
  <arg name="color_height"        default="480" />
  <arg name="enable_color"        default="true" />

  <arg name="fisheye_fps"          default="30" />
  <arg name="depth_fps"           default="30" />
  <arg name="infra_fps"            default="30" />
  <arg name="color_fps"            default="30" />
  <arg name="gyro_fps"             default="400" />
  <arg name="accel_fps"            default="250" />
  <arg name="enable_gyro"          default="false" />
  <arg name="enable_accel"         default="false" />

  <arg name="enable_pointcloud"    default="true" />
  <arg name="pointcloud_texture_stream" default="RS2_STREAM_COLOR" />
  <arg name="pointcloud_texture_index" default="0" />
```

```

<arg name="enable_sync"           default="true"/>
<arg name="align_depth"          default="false"/>

<arg name="publish_tf"           default="true"/>
<arg name="tf_publish_rate"      default="0"/>

<arg name="filters"              default="pointcloud"/>
<arg name="clip_distance"        default="-2"/>
<arg name="linear_accel_cov"    default="0.01"/>
<arg name="initial_reset"        default="false"/>
<arg name="unite_imu_method"     default="" />
<arg name="topic_odom_in"        default="odom_in"/>
<arg name="calib_odom_file"      default="" />
<arg name="publish_odom_tf"      default="true"/>
<arg name="allow_no_texture_points" default="false"/>

<group ns="/adamlr2/${arg camera}">
  <include file="$(find realsense2_camera)/launch/includes/nodelet.launch.xml">
    <arg name="tf_prefix"           value="$(arg tf_prefix)"/>
    <arg name="external_manager"    value="$(arg external_manager)"/>
    <arg name="manager"             value="$(arg manager)"/>
    <arg name="serial_no"           value="$(arg serial_no)"/>
    <arg name="usb_port_id"         value="$(arg usb_port_id)"/>
    <arg name="device_type"         value="$(arg device_type)"/>
    <arg name="json_file_path"      value="$(arg json_file_path)"/>

    <arg name="enable_pointcloud"   value="$(arg enable_pointcloud)"/>
    <arg name="pointcloud_texture_stream" value="$(arg pointcloud_texture_stream)"/>
    <arg name="pointcloud_texture_index" value="$(arg pointcloud_texture_index)"/>
    <arg name="enable_sync"          value="$(arg enable_sync)"/>
    <arg name="align_depth"         value="$(arg align_depth)"/>

    <arg name="fisheye_width"        value="$(arg fisheye_width)"/>
    <arg name="fisheye_height"       value="$(arg fisheye_height)"/>
    <arg name="enable_fisheye"       value="$(arg enable_fisheye)"/>

    <arg name="depth_width"         value="$(arg depth_width)"/>
    <arg name="depth_height"        value="$(arg depth_height)"/>
    <arg name="enable_depth"         value="$(arg enable_depth)"/>

    <arg name="color_width"          value="$(arg color_width)"/>
    <arg name="color_height"         value="$(arg color_height)"/>
    <arg name="enable_color"         value="$(arg enable_color)"/>

    <arg name="infra_width"          value="$(arg infra_width)"/>
    <arg name="infra_height"         value="$(arg infra_height)"/>
    <arg name="enable_infra"         value="$(arg enable_infra)"/>
    <arg name="enable_infra1"        value="$(arg enable_infra1)"/>
    <arg name="enable_infra2"        value="$(arg enable_infra2)"/>

    <arg name="fisheye_fps"          value="$(arg fisheye_fps)"/>
    <arg name="depth_fps"            value="$(arg depth_fps)"/>
    <arg name="infra_fps"             value="$(arg infra_fps)"/>
    <arg name="color_fps"             value="$(arg color_fps)"/>
    <arg name="gyro_fps"              value="$(arg gyro_fps)"/>
    <arg name="accel_fps"             value="$(arg accel_fps)"/>
    <arg name="enable_gyro"           value="$(arg enable_gyro)"/>
    <arg name="enable_accel"          value="$(arg enable_accel)"/>

    <arg name="publish_tf"           value="$(arg publish_tf)"/>
    <arg name="tf_publish_rate"      value="$(arg tf_publish_rate)"/>

    <arg name="filters"              value="$(arg filters)"/>
    <arg name="clip_distance"        value="$(arg clip_distance)"/>
    <arg name="linear_accel_cov"    value="$(arg linear_accel_cov)"/>
    <arg name="initial_reset"        value="$(arg initial_reset)"/>

```

```

<arg name="unite_imu_method"           value="$(arg unite_imu_method)"/>
<arg name="topic_odom_in"             value="$(arg topic_odom_in)"/>
<arg name="calib_odom_file"           value="$(arg calib_odom_file)"/>
<arg name="publish_odom_tf"           value="$(arg publish_odom_tf)"/>
<arg name="allow_no_texture_points"   value="$(arg allow_no_texture_points)"/>
</include>
</group>
</launch>

```

realsense2_camera パッケージの nodelet.launch.xml ファイルをインクルードし、パラメータを渡して起動します。^{*8} この launch ファイルはサンプルとほとんど変更点はありませんが、ノードを adamr2 名前空間に置いている点が異なります。これにより、Realsense が配信するトピックが /adamr2/** のように adamr2 名前空間の下に置かれるようになります。

3.3.4 Realsense を起動してみる

コード 3.10 の launch ファイルを実行することで Realsense D435 を ROS 上で利用することができます。Realsense D435 を PC に接続し、コード 3.11 のようにコマンドを実行します。RPLIDAR のようにデバイスファイルを指定する必要はありません。

Code 3.11 Launch realsense.launch

```
roslaunch adamr2_bringup realsense.launch
```

Realsense の起動に成功すると、トピックが配信されます。rviz から確認してみましょう。

Realsense はたまに起動に失敗することがあります。Reanselse は省電力とはいえ結構電流を食うので、バスパワー USB ハブ等には繋がず、PC の USB ポートに直接接続する方が望ましいです。また、ファームウェアのバージョンが古いと問題が発生することがあります。その場合は realsense-viewer からファームウェアの更新を行ってください。

^{*8} パラメータが直書きなのは YAML ファイルを介してパラメータを渡す方法がイマイチ良くわからなかったからです。

第4章

コントローラの実装

本章ではロボットの動作の制御を行うためのコントローラを作成します。ロボットのコントローラの構築には、ROS のコントローラフレームワークである `ros_control` を使用します。`ros_control` を使うためにはいくつかの準備が必要となるため、結構面倒だったり難しかったりしますが、完成した時の便利さはかなりのものになります。

4.1 `ros_control` とは

`ros_control`^{*1} とは、ロボットのジョイントアクチュエータを制御するためのコントローラインターフェース、コントローラマネージャ、トランスマッショナ、ハードウェアインターフェース、制御ツールボックスなどを含むパッケージ群のことです。もともと Willow Garage 社の PR2 で使用されていたコントローラを一般的なロボットに使用できるように書き直したもので、ロボットに依存しない方法でリアルタイム性能を引き出すコントローラとして開発されました。`ros_control` の枠組みを使用することで、ハードウェアを抽象化してプログラミングを簡単にしたり、共通のコントローラを使って実機のロボットとシミュレーション上のロボットを動かしたりするできるようになります。

`ros_control` のシステムの概要図を ROS Wiki から引用します。

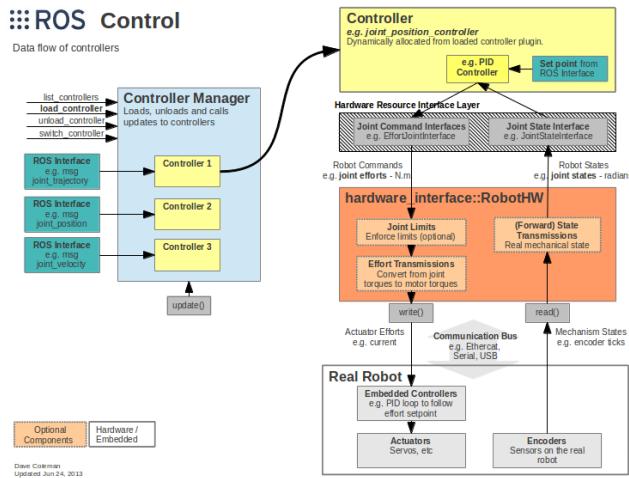


Fig.4.1 Diagram of `ros_control`

ADAMR2 では、`ros_control` に準拠したコントローラである `diff_drive_controller`^{*2} を使用して、ロボットを制御するシステムを構築しています。次節以降でシステムの構築の手順を説明していきます。

*1 http://wiki.ros.org/ros_control

*2 http://wiki.ros.org/diff_drive_controller

4.2 コントローラの構築に必要なもの

`diff_drive_controller` を使用してロボットの制御システムを作るには、以下のものが必要になります。

1. ロボットのアクチュエータの情報を記述した URDF ファイル
2. コントローラのコンフィグファイル
3. RobotHW クラスを継承して作ったハードウェアドライバノード (C++ で記述)
4. コントローラやドライバノードを起動する launch ファイル

ロボットの URDF ファイルは既に作成しました。これから作る必要があるのは、コンフィグファイルや launch ファイル、そして C++ で記述したノードです。コンフィグファイルや launch ファイルは `adamlr2_control` というパッケージを作り、その中に配置します。また、ドライバノードは `adamlr2_driver` というパッケージを作り、その中で開発します。

4.3 adamlr2_control パッケージの準備

4.3.1 パッケージ作成

ロボットのコントローラに関連するファイルを格納しておくパッケージ `adamlr2_control` を作成します。このパッケージはビルド時依存パッケージを持たないので^{*3}、オプションは必要ありません。

Code 4.1 Create `adamlr2_control` Package

```
catkin create pkg adamlr2_control
```

`adamlr2_control` パッケージのディレクトリ構成はコード 4.1 のようになります。

Code 4.2 Directory Structure of `adamlr2_control`

```
adamlr2_control/
├── config/
├── launch/
├── scripts/
└── package.xml
    └── CMakeLists.txt
```

`config`/ディレクトリには、`diff_drive_controller` や YP-Spur に与えるパラメータを記述したファイルを配置します。`launch`/ディレクトリにはコントローラを起動するための launch ファイルを配置します。`scripts`/ディレクトリには YP-Spur を実行するためのシェルスクリプトを格納します。

4.3.2 package.xml の編集

`package.xml` に依存パッケージを記述しておきます。`adamlr2_control` パッケージにはビルド時依存パッケージが無いので `CMakeLists.txt` は編集しなくてもよいのですが、他のパッケージのノードを呼び出したりする都合上、実行時依存パッケージは書いておく必要があります。^{*4} `package.xml` をコードのように編集します。`maintainer` タグや `license` タグは適切な情報を記述してください。

Code 4.3 `package.xml` in `adamlr2_control`

```
<?xml version="1.0"?>
<package format="2">
  <name>adamlr2_control</name>
  <version>0.0.0</version>
  <description>The adamlr2_control package</description>

  <maintainer email="hoge@hogehoge.com">hoge</maintainer>
```

^{*3} 実行時依存パッケージはあるので `package.xml` を編集しなければなりません。

^{*4} 実際には実行時依存パッケージを書かなくても動きます。依存パッケージを書くのは、アプリケーション実行時にパッケージが不足してシステムが起動できない等の問題を極力回避するためです。

```

<license>BSD</license>

<buildtool_depend>catkin</buildtool_depend>

<exec_depend>xacro</exec_depend>
<exec_depend>diff_drive_controller</exec_depend>
<exec_depend>joint_state_controller</exec_depend>
<exec_depend>controller_manager</exec_depend>
<exec_depend>robot_state_publisher</exec_depend>
<exec_depend>adamlr2_description</exec_depend>
<exec_depend>adamlr2_driver</exec_depend>
<exec_depend>ypspur</exec_depend>
</package>

```

これでパッケージの用意は完了です。次は launch ファイルの作成を行います。

4.3.3 コントローラを起動するための launch ファイル

ロボットのコントローラを起動する launch ファイルを作成します。「この launch ファイルを実行することで、ロボットの駆動系が立ち上がり、操縦可能になる」ような launch ファイルを作成します。

adamlr2_control パッケージ以下に、launch/ディレクトリを作成し、adamlr2_control.launch という名前のファイルを作成します。そして、コード 4.4 のように記述します。

Code 4.4 adamlr2_control.launch

```

<launch>
  <arg name="model" default="$(find adamlr2_description)/urdf/robot.xacro"/>
  <arg name="ypspur_params" default="$(find adamlr2_control)/config/adamlr2.param"/>
  <arg name="ypspur_dev" default="/dev/ttyACM0"/>

  <param name="robot_description" command="$(find xacro)/xacro $(arg model)"/>

  <rosparam file="$(find adamlr2_control)/config/controller.yaml" command="load"/>

  <group ns="adamlr2">
    <node name="controller_spawner" type="spawner" pkg="controller_manager"
      respawn="false" output="screen"
      args="joint_state_controller diff_drive_controller"/>

    <node name="robot_state_publisher" type="robot_state_publisher"
      pkg="robot_state_publisher" respawn="false"
      output="screen"/>

    <node name="ypspur_launcher" type="ypspur_launcher.sh"
      pkg="adamlr2_control" output="screen"
      args="$(arg ypspur_params) $(arg ypspur_dev)"/>

    <node name="adamlr2_driver_node" type="adamlr2_driver_node" pkg="adamlr2_driver"
      output="screen"/>
  </group>
</launch>

```

この launch ファイルは 3 つの ROS ノードと 1 つのシェルスクリプトを実行します。1 つ目は controller_manager パッケージの spawner ノードです。このノードを使って、joint_state_controller と diff_drive_controller の 2 つのコントローラをロード・実行しています。

2 つ目は robot_state_publisher です。robot_description というパラメータを読んでロボットのモデルを把握し、更に joint_state というトピックを受け取ってロボットの TF を更新します。robot_description パラメータは launch ファイル上部の`<param>`タグで設定しており、ここでは xacro ファイルを URDF に展開して robot_description パラメータに登録しています。joint_state トピックは joint_state_controller によって配信されます。

3 つ目は adamlr2_driver パッケージの adamlr2_driver_node です。diff_drive_controller によって計算された各車輪の回転速度を YP-Spur に伝える役目を持つノードです。このノードはこれから作るので、現時点ではこ

の launch ファイルを実行することはできません。

最後に、`ypspur_launcher.sh` というシェルスクリプトを実行します。これは、C++ プログラムが YP-Spur とやり取りするのに必要なアプリケーション `ypspur-coordinator` を実行するためのスクリプトです。`ypspur-coordinator` の実行には、YP-Spur に与えるパラメータファイルとモータードライバのデバイスファイルを引数として指定する必要があるので、シェルスクリプトに引数としてそれらを与えています。launch ファイル上部の `arg` タグで宣言している `ypspur_params` と `ypspur_dev` がそれに当たります。

4.3.4 コントローラのためのコンフィグファイル

`diff_drive_controller` は、`geometry_msgs/Twist` 型トピックを受け取って各車輪に与える速度を計算します。そのためには車輪の半径やトレッド長さ等の情報が必要になります。それらの情報は ROS パラメータとして与えることになるのですが、多くのパラメータを記述することになるので、1つのファイルにまとめて記述できた方が好ましいです。

`adamlr2_control` パッケージ以下に config/ディレクトリを作成し、`controller.yml` という名前のファイルを作成します。そして、コード 4.5 のように記述します。

Code 4.5 controller.yml

```
adamlr2:
  joint_state_controller:
    type: joint_state_controller/JointStateController
    publish_rate: 50

  diff_drive_controller:
    type: "diff_drive_controller/DiffDriveController"
    left_wheel: 'left_wheel_joint'
    right_wheel: 'right_wheel_joint'
    publish_rate: 50

  pose_covariance_diagonal: [0.001, 0.001, 1000000.0, 1000000.0, 1000000.0, 10.0]
  twist_covariance_diagonal: [0.001, 0.001, 1000000.0, 1000000.0, 1000000.0, 10.0]

  wheel_separation: 0.383
  wheel_separation_multiplier: 1.0
  wheel_radius: 0.0775
  left_wheel_radius_multiplier: 1.0
  right_wheel_radius_multiplier: 1.0

  cmd_vel_timeout: 0.5

  base_frame_id: base_footprint
  odom_frame_id: odom

  linear:
    x:
      has_velocity_limits: true
      max_velocity: 0.9
      min_velocity: -0.9
      has_acceleration_limits: true
      max_acceleration: 1.5
      min_acceleration: -1.5

  angular:
    z:
      has_velocity_limits: true
      max_velocity: 3.14
      min_velocity: -3.14
      has_acceleration_limits: true
      max_acceleration: 6.28
      min_acceleration: -6.28
```

このコンフィグファイルでは、`joint_state_controller` と `diff_drive_controller` の 2 つのノードに対するパラ

メータの設定を行っています。2つのノードは `adaml2` という名前空間の下に置かれます。^{*5}

`left_wheel` および `right_wheel` パラメータには、URDFで設定した車輪のジョイント名を指定します。4.4.2で名付けた通りの名前を指定してください。

`wheel_radius` で車輪の半径を、`wheel_separation` でトレッド長さを指定しています。対象のロボットのハードウェア仕様に合わせて設定してください。ADAMR2ではトレッド長さ 383 mm, ホイール半径 77.5 mm なので、メートル単位にしてそれぞれ 0.383, 0.0775 と設定しています。

`wheel_separation_multiplier`, `left_wheel_radius_multiplier` および `right_wheel_radius_multiplier` は、車輪に関するパラメータの補正係数です。ホイール半径やトレッド長さの実際の値が、設計値よりもズレている場合に、これらの係数を使って調整を行います。これらの補正係数は ROS の Dynamic Reconfigure ^{*6} という仕組みによってノード実行時に動的に数値を変更することができるため、実機を調整するのにうってつけです。`wheel_separation` 等の数値を直接変更するのではなく、補正係数を使ってオドメトリの調整を行うことをお勧めします。

`base_frame_id` にはオドメトリの基準となるロボットのフレーム名を指定します。ROS REP:105 では `base_link` にするよう推奨していますが、ADAMR2では `base_footprint` を使っているため、そのように設定します。`odom_frame_id` にはオドメトリ座標系を表す TF フレームの名前を指定します。ROS REP:105 に従って、`odom` という名前を付けておきます。

ファイルの末尾にあるのはロボットのソフトウェア的な速度・加速度制限です。直進速度と旋回速度に対してそれぞれ速度制限と加速度制限、更には躍度制限を付けることができます。ADAMR2ではハードウェアの仕様に合わせて、速度制限と加速度制限を適用しています。

`pose_covariance_diagonal` と `twist_covariance_diagonal` は、コントローラが配信する `odom` トピック (TF ではない) に載せる、それぞれ姿勢と速度のオドメトリの共分散行列の対角成分です。オドメトリによって求められたロボットの姿勢及び移動速度の、各次元の共分散の対角要素をリストとしてここに指定します。姿勢と速度の共分散行列はそれぞれ式 4.1 と 4.2 になります。オドメトリの共分散が各次元において独立と仮定することで、共分散行列は対角成分のみとなります。ロボットが移動する空間は 2D 平面ですが、共分散行列は 3 次元空間のものが使用されます。しかしロボットのオドメトリでは x , y とヨー角の情報しかなく、 z 及びロール角とピッチ角の情報は得られないので、そこに当たる共分散には十分大きな値を設定しておきます。

この共分散は `odom` トピックに載せる情報であり、主に IMU 等のセンサとのセンサフュージョンに使用されるものです。従って、センサフュージョンを使わないロボットの場合、この共分散の情報が使われることはありません。例えば ADAMR2 では IMU を搭載しておらず、SLAM や Navigation では `diff_drive_controller` によって提供された TF 情報のみを使って自己位置推定を行っています。そのためこの共分散行列の値はテキトーに設定してあります。適切な値を設定するためには、実機を何度も走らせてオドメトリの誤差の統計を取らなければなりません。

$$V_{\text{pose}} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{yy}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{zz}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{\text{roll}\cdot\text{roll}}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{\text{pitch}\cdot\text{pitch}}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{\text{yaw}\cdot\text{yaw}}^2 \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

$$V_{\text{twist}} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{yy}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{zz}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{\text{roll}\cdot\text{roll}}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{\text{pitch}\cdot\text{pitch}}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{\text{yaw}\cdot\text{yaw}}^2 \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

`diff_drive_controller` が取る ROS パラメータについてのより詳細な情報は、ROS Wiki を参照してください。

4.3.5 YP-Spur のためのパラメータファイル

YP-Spur に与えるパラメータファイルも `adaml2_control` パッケージに配置します。config/ディレクトリ内に `adaml2.param` という名前のファイルを作成し、コード 4.6 を記述します。

^{*5} 必ずしも `adaml2` のような名前空間の下に置く必要はありませんが、やはり名前空間を設定しておいた方が好ましいと考えたためこのようにしています。

^{*6} http://wiki.ros.org/dynamic_reconfigure

Code 4.6 adamr2.param

```

VERSION 4
COUNT_REV 400
VOLT 24
CYCLE 0.001
GEAR 75
MOTOR_R 0.75
MOTOR_PHASE 3
TORQUE_FINENESS 0.000001
RADIUS[0] 0.07455
RADIUS[1] -0.07455
TREAD 0.383
CONTROL_CYCLE 0.015
TORQUE_MAX 1.0
TORQUE_LIMIT 1.0
MAX_VEL 0.9
MAX_W 3.14
MAX_ACC_V 1.5
MAX_ACC_W 6.28
MAX_CENTRI_ACC 2.45
L_C1 0.01
L_K1 800
L_K2 300
L_K3 200
L_DIST 0.6
INTEGRAL_MAX 0.05
MOTOR_VC 630.0
MOTOR_TC 0.01515
MOTOR_M_INERTIA 0
TIRE_M_INERTIA 0.02
MASS 10
MOMENT_INERTIA 0.1
GAIN_KP 120
GAIN_KI 300
TORQUE_VISCOS 0.00001
TORQUE_NEWTON 0.00200

```

このパラメータは移動ロボットプラットフォーム「i-cart mini」^{*7}のものを参考にして作成しました。各種パラメータの詳細については、YP-Spur のホームページ (<https://www.roboken.iit.tsukuba.ac.jp/platform/wiki/yp-spur/parameter-file>) を参考してください。

4.3.6 ypspur_launcher.sh の作成

ypspur_launcher.sh は、ROS のプログラムとモータードライバとの通信に必要な YP-Spur のソフトウェア ypspur-coordinator を起動するためのシェルスクリプトです。admr2_control ディレクトリ以下に scripts/ ディレクトリを作成し、 ypspur_launcher.sh という名前のファイルを作成します。そして、コード 4.7 のように記述します。

Code 4.7 ypspur_launcher.sh

```

#!/bin/bash

# Execute yp-spur in background
# Argument 1 is the path of parameter file
# Argument 2 is the device file of the motor driver
ypspur-coordinator -p $1 -d $2

echo "Robot parameters [$1] loaded."

```

中身は単純で、コマンド引数として YP-Spur のパラメータファイルとモータードライバのデバイスファイルを受け取り、 ypspur-coordinator を実行するだけです。コメント文に書かれている通り、 \$1 はパラメータ

^{*7} http://t-frog.com/products/icart_mini/

ファイル, \$2 はデバイスファイルを表します。このシェルスクリプトは adamr2_control.launch ファイルから呼び出されます。

4.4 adamr2_driver の作成

いよいよモータードライバと通信するソフトウェアドライバノード adamr2_driver_node を作成します。ノードの作成には C++ 言語を使用するので、ある程度の C++ の知識が必要になります。

4.4.1 パッケージの作成

adamr2_driver_node を開発するためのパッケージを新たに作成します。パッケージ名は adamr2_driver とします。コード 4.8 を ROS ワークスペースディレクトリで実行し、パッケージを生成します。

Code 4.8 Create adamr2_driver Package

```
catkin create pkg adamr2_driver \
--catkin-deps roscpp hardware_interface transmission_interface controller_manager ypspur
```

依存パッケージとして roscpp, hardware_interface, transmission_interface, controller_manager, ypspur を指定しています。

パッケージのディレクトリ構成はコード 4.9 のようになります。roscpp を依存パッケージに指定したので、生成されたパッケージのディレクトリにはソースコードを置くためのディレクトリが自動生成されています。このパッケージには launch/ や config/ ディレクトリ等は作りません。

Code 4.9 Directory Structure of adamr2_driver

```
adamlr2_control/
├ include/adamlr2_driver/
├ src/
└ package.xml
└ CMakeLists.txt
```

4.4.2 C++ ノードの作成

ここから C++ ノードを作成していきます。ここでは以下の 3 つのソースファイルから 1 つのノードを作成することにします。

- adamr2_driver.h : クラス宣言のためのヘッダファイル
- adamr2_driver.cpp : クラス定義のためのソースファイル
- adamr2_driver_node.cpp : ノードの本体

adamlr2_driver.h は include/adamlr2_driver/ ディレクトリに、adamlr2_driver.cpp と adamlr2_driver_node.cpp は src/ ディレクトリに置きます。

adamlr2_driver.h の記述

まずはヘッダファイルから記述していきます。include/adamlr2_driver/ ディレクトリに adamlr2_driver.h という名前のファイルを作成し、コード 4.10 のように記述します。

Code 4.10 adamlr2_driver.h

```
#ifndef ADAMR2_ADAMR2_DRIVER_H_
#define ADAMR2_ADAMR2_DRIVER_H_

#include <ros/ros.h>
#include <hardware_interface/joint_command_interface.h>
#include <hardware_interface/joint_state_interface.h>
#include <hardware_interface/robot_hw.h>

namespace adamlr2 {
    class Adamr2Driver : public hardware_interface::RobotHW {
```

```

public:
    Adamr2Driver();
    ~Adamr2Driver();

    ros::Time getTime() const {
        return ros::Time::now();
    }

    ros::Duration getPeriod() const {
        return ros::Duration(0.01);
    }

    int open() const;
    void stop() const;
    void read(ros::Time, ros::Duration);
    void write(ros::Time, ros::Duration);

protected:
    hardware_interface::JointStateInterface joint_state_interface;
    hardware_interface::VelocityJointInterface joint_vel_interface;
    double cmd_[2];
    double pos_[2];
    double vel_[2];
    double eff_[2];
};

} // namespace adamr2

#endif

```

オリジナルのロボットで `ros_control` を使用する場合は、`hardware_interface::RobotHW` を継承したクラスを作成し、ロボットに合わせた設定や関数定義をする必要があります。[6]

ロボットのドライバと通信を行うのが `read()` メンバ関数と `write()` メンバ関数です。`read()` 関数でモータードライバからホイールエンコーダの情報を読み取り、`write()` 関数でモータードライバに車輪の速度を与えます。^{*8}

`open()` メンバ関数と `stop()` メンバ関数はそれぞれ YP-Spur の初期化関数と停止関数です。メンバ関数の中身の実装は `adamr2_driver.cpp` で行います。

メンバ変数の `joint_state_interface` 及び `joint_vel_interface` は、URDF で定義したホイールジョイントの情報を登録するための変数です。これらの変数の初期化はクラスコンストラクタ内で行います。

`cmd_[]` メンバ変数は、コントローラが計算した車輪への速度指令値が格納される配列です。対向 2 輪ロボットなので配列の要素数は 2 つです。`pos_[], vel_[], eff_[]` メンバ変数は、ジョイントの状態(位置、速度、トルク)を保持するための配列です。モータードライバから報告された位置、速度をこの変数に書き込み、それらの値をもとにコントローラがオドメトリ等を計算します。尚、トルクに関しては本ロボットでは扱わないので `eff_[]` 変数が更新されることはありません。

adamr2_driver.cpp の記述

次にクラスの実装を行うソースファイルを記述します。src/ディレクトリに `adamr2_driver.cpp` という名前のファイルを作成し、コード 4.11 のように記述します。

Code 4.11 adamr2_driver.cpp

```

#include "adamr2_driver/adamr2_driver.h"
#include <ros/ros.h>

#include <ypsPUR.h>

namespace adamr2 {
    Adamr2Driver::Adamr2Driver() {
        // YP-Spur initialization.
        if (this->open() < 0) {

```

^{*8} 文献によつては `read()` で指令送信、`write()` でデータ読み取りを行う、と書かれていますが、感覚的に見て `write()` で書き込み、`read()` で読み取りを行うのが道理でしょう。

```

    ROS_WARN_STREAM("Error: Couldn't open spur.\n");
}

pos_[0] = 0.0;
pos_[1] = 0.0;
vel_[0] = 0.0;
vel_[1] = 0.0;
eff_[0] = 0.0;
eff_[1] = 0.0;
cmd_[0] = 0.0;
cmd_[1] = 0.0;

// Joint state setting for right-wheel-joint
hardware_interface::JointStateHandle state_handle_1("right_wheel_joint", &pos_[0], &vel_[0], &eff_[0]);
joint_state_interface.registerHandle(state_handle_1);
// Joint state setting for left-wheel-joint
hardware_interface::JointStateHandle state_handle_2("left_wheel_joint", &pos_[1], &vel_[0], &eff_[0]);
joint_state_interface.registerHandle(state_handle_2);

registerInterface(&joint_state_interface);

// Joint handle setting for right-wheel-joint
hardware_interface::JointHandle vel_handle_1(joint_state_interface.getHandle("right_wheel_joint"), &cmd_[0]);
joint_vel_interface.registerHandle(vel_handle_1);
// Joint handle setting for left-wheel-joint
hardware_interface::JointHandle vel_handle_2(joint_state_interface.getHandle("left_wheel_joint"), &cmd_[1]);
joint_vel_interface.registerHandle(vel_handle_2);

registerInterface(&joint_vel_interface);
}

Adamr2Driver::~Adamr2Driver() {
    this->stop();
}

int Adamr2Driver::open() const {
    int ret = Spur_init();

    // Set the maximum angular velocity and acceleration.
    // unit is [rad/s] and [rad/s^2] in tire axis.
    YP_set_wheel_vel(11.6, 11.6);
    YP_set_wheel_accel(19.35, 19.35);

    return ret;
}

void Adamr2Driver::stop() const {
    YP_wheel_vel(0, 0);
    Spur_stop();
    ros::Duration(1).sleep();
    Spur_free();
}

void Adamr2Driver::read(ros::Time time, ros::Duration period) {
    // yp_vel[0] is right wheel velocity, yp_vel[1] is left wheel velocity.
    double yp_vel[2] = {0.0, 0.0};
    YP_get_wheel_vel(&yp_vel[0], &yp_vel[1]);

    // Reverse the velocity of the right wheel.
    // This is due to the coordinate system of the right wheel.
    yp_vel[0] = -yp_vel[0];

    for (unsigned int i = 0; i < 2; i++) {

```

```

        pos_[i] += yp_vel[i] * period.toSec();
        vel_[i] = yp_vel[i];
    }

    void Adamr2Driver::write(ros::Time time, ros::Duration period) {
        YP_wheel_vel(-cmd_[0], cmd_[1]);
    }
} // namespace adamr2

```

このソースファイルでは、`adamr2_driver.h`で宣言したクラスのメンバ関数の実装を行っています。以降、関数の詳細な解説を行っていきます。まずはクラスコンストラクタから解説します。コード 4.12 にクラスコンストラクタを抜粋します。

Code 4.12 Class Constructor in `adamr2_driver.cpp`

```

Adamr2Driver::Adamr2Driver() {
    // YP-Spur initialization.
    if (this->open() < 0) {
        ROS_WARN_STREAM("Error: Couldn't open spur.\n");
    }

    pos_[0] = 0.0;
    pos_[1] = 0.0;
    vel_[0] = 0.0;
    vel_[1] = 0.0;
    eff_[0] = 0.0;
    eff_[1] = 0.0;
    cmd_[0] = 0.0;
    cmd_[1] = 0.0;

    // Joint state setting for right-wheel-joint
    hardware_interface::JointStateHandle state_handle_1("right_wheel_joint", &pos_[0], &vel_[0], &eff_[0]);
    joint_state_interface.registerHandle(state_handle_1);
    // Joint state setting for left-wheel-joint
    hardware_interface::JointStateHandle state_handle_2("left_wheel_joint", &pos_[1], &vel_[0], &eff_[0]);
    joint_state_interface.registerHandle(state_handle_2);

    registerInterface(&joint_state_interface);

    // Joint handle setting for right-wheel-joint
    hardware_interface::JointHandle vel_handle_1(joint_state_interface.getHandle("right_wheel_joint"), &cmd_[0]);
    joint_vel_interface.registerHandle(vel_handle_1);
    // Joint handle setting for left-wheel-joint
    hardware_interface::JointHandle vel_handle_2(joint_state_interface.getHandle("left_wheel_joint"), &cmd_[1]);
    joint_vel_interface.registerHandle(vel_handle_2);

    registerInterface(&joint_vel_interface);
}

```

クラスコンストラクタでは、YP-Spur、メンバ変数、ジョイントインターフェースの初期化を行っています。重要なのが後半のジョイントインターフェースの初期化です。URDFで定義したホイールジョイントの情報を `hardware_interface` に登録しています。`hardware_interface::JointStateHandle` クラスに与える第一引数は、URDFで定義したホイールジョイントの名前です。で定義した通り、`right_wheel_joint` と `left_wheel_joint` という名前で登録しています。

次に、`open()` 関数と `stop()` 関数です。コード 4.13 に抜粋します。

Code 4.13 `open()` and `stop()` Member Function in `adamr2_driver.cpp`

```

int Adamr2Driver::open() const {
    int ret = Spur_init();
}

```

```

// Set the maximum angular velocity and acceleration.
// unit is [rad/s] and [rad/s^2] in tire axis.
YP_set_wheel_vel(11.6, 11.6);
YP_set_wheel_accel(19.35, 19.35);

return ret;
}

void Adamr2Driver::stop() const {
YP_wheel_vel(0, 0);
Spur_stop();
ros::Duration(1).sleep();
Spur_free();
}

```

`open()` 関数では YP-Spur の初期化を行っています。`ypspur` ライブラリの `Spur_init()` 関数を使って初期化を行っています。また、`YP_set_wheel_vel` 関数及び `YP_set_wheel_accel` 関数を使って、各車輪の最大速度と最大加速度を設定しています。第一引数が右車輪、第二引数が左車輪に対応する値です。どちらも同じ数値を設定します。ここで設定している値は、直径 155 mm のホイールを付けた際にロボットの直進移動速度が 0.9 m/s を超えないように、また直進加速度が 1.5 m/s² を超えないような値に設定しています。

次に `read()` 関数と `write()` 関数です。コード 4.14 に抜粋します。

Code 4.14 `read()` and `write()` Member Function in `adamr2_driver.cpp`

```

void Adamr2Driver::read(ros::Time time, ros::Duration period) {
// yp_vel[0] is right wheel velocity, yp_vel[1] is left wheel velocity.
double yp_vel[2] = {0.0, 0.0};
YP_get_wheel_vel(&yp_vel[0], &yp_vel[1]);

// Reverse the velocity of the right wheel.
// This is due to the coordinate system of the right wheel.
yp_vel[0] = -yp_vel[0];

for (unsigned int i = 0; i < 2; i++) {
    pos_[i] += yp_vel[i] * period.toSec();
    vel_[i] = yp_vel[i];
}
}

void Adamr2Driver::write(ros::Time time, ros::Duration period) {
    YP_wheel_vel(-cmd_[0], cmd_[1]);
}

```

`read()` 関数では `YP_get_wheel_vel()` 関数を使って、モータードライバから各車輪の速度を求めています。受け取った結果を一時変数に保持し、座標系を解決してから `pos_[]` 変数と `vel_[]` 変数に格納しています。

でも述べたように、本ロボットのホイールの座標系は、「ロボットが直進する方向を正とする」と定めています。しかし YP-Spur が返す車輪速度値はそのようにはなっていません。具体的にいうと、右車輪の速度の正負が逆さまになって返ってきます。そのため、右車輪の速度の値の正負を反転させてメンバ変数に記録しています。

YP-Spur から得られる情報は車輪速度だけですが、時間がわかっているので位置も求めることができます（あくまで推定値ですが）。`read()` 関数の最後の `for` 文で、ジョイントの位置と速度をメンバ変数に記録しています。

`write()` 関数では車輪の速度指令値を YP-Spur に与えているだけです。ここでも右車輪の値の正負は反転させなければなりません。

adamr2_driver_node.cpp の記述

最後に ROS ノードの本体となるソースファイルを記述します。`src/` ディレクトリに `adamr2_driver_node.cpp` という名前のファイルを作成し、コード 4.15 のように記述します。

Code 4.15 `adamr2_driver_node.cpp`

```

#include "adamlr2_driver/adamlr2_driver.h"
#include <ros/ros.h>
#include <controller_manager/controller_manager.h>

//extern "C" {
#include <ypspur.h>
//}

int main(int argc, char *argv[]) {
    ros::init(argc, argv, "adamlr2_driver_node");
    ros::NodeHandle nh;

    adamlr2::Adamr2Driver driver;
    controller_manager::ControllerManager cm(&driver);

    ros::AsyncSpinner spinner(1);
    spinner.start();

    while(ros::ok()) {
        ros::Time now = driver.getTime();
        ros::Duration dt = driver.getPeriod();

        if (YP_get_error_state() == 0) {
            driver.write(now, dt);
            cm.update(now, dt);

            driver.read(now, dt);
        } else {
            ROS_WARN("T-Frog driver disconnected.");
            driver.stop();

            while (driver.open() < 0) {
                ROS_WARN("Try to connect T-Frog driver...");
                ros::Duration(1).sleep();
            }
        }

        ROS_INFO("T-Frog driver connected.");
    }

    dt.sleep();
}

spinner.stop();

return 0;
}

```

adamlr2_driver.h で宣言したクラスのオブジェクト (driver) を作り、ros_control の枠組みに従って while 文で制御ループを回しています。

while ループの中で、driver.write() 関数を呼び出して速度指令値をモータードライバに送り、cm.update() 関数を呼び出して状態を更新、driver.read() 関数を呼び出して車輪の現在速度を取得しています。

4.4.3 CMakeLists.txt の編集

ノードをビルドするために、CMakeLists.txt を編集します。コード

Code 4.16 CMakeLists.txt

```

cmake_minimum_required(VERSION 2.8.3)
project(adamlr2_driver)

find_package(catkin REQUIRED COMPONENTS
    roscpp
    hardware_interface
    transmission_interface

```

```

    controller_manager
)

catkin_package()

find_library(ypspur_LIBRARIES ypspur)

include_directories(
    include
    ${catkin_INCLUDE_DIRS}
    ${ypspur_INCLUDE_DIRS}
)

add_executable(adamr2_driver_node
    src/adamr2_driver_node.cpp
    src/adamr2_driver.cpp
)

target_link_libraries(adamr2_driver_node
    ${catkin_LIBRARIES}
    ${ypspur_LIBRARIES}
)

```

4.4.4 パッケージのビルド

ROS ノードの実行可能ファイルを生成するために、ビルドを実行します。コードを実行して、ワークスペースをビルドしましょう。

Code 4.17 Build Workspace

```
catkin build
```

ビルドが通ったら、無事にドライバノードを作成できることになります。

4.5 コントローラの起動

ここまで の作業で、`ros_control` を使用したロボットの開発のための要素は揃いました。後は `adamr2_control.launch` を実行することで、コントローラが起動するはずです。

4.5.1 デバイスの接続

コントローラを起動するためには、デバイスを PC に繋いで、動作可能な状態にしておく必要があります。二軸ブラシレスモータドライバ TF-2MD-R6 に電源を接続し、PC に接続します。デバイスが PC から認識されていることを確認するには、コード 4.18 のコマンドを実行します。

Code 4.18 Cheking Motor Driver Device

```
ls /dev/ttyACM*
```

他に USB デバイスを接続していない場合は、TF-2MD-R6 は `/dev/ttyACM0` として認識されるはずです。もしデバイスファイルが 1 つも表示されなかった場合は、モータードライバに電源が供給されているか、及び PC に正しく接続されているかを確認してください。また、もしファイルの番号が `/dev/ttyACM0` ではなく `/dev/ttyACM1` や `/dev/ttyACM2` 等だった場合は、それに合わせて `adamr2_control.launch` のパラメータを変更する必要があります。

4.5.2 launch ファイルの実行

デバイスを正しく接続できたら、あとは `adamr2_control.launch` を実行すればモータードライバが起動し、移動可能になります。コード 4.19 を実行すればコントローラが起動します。

Code 4.19 launch adamr2_control.launch

```
roslaunch adamr2_control adamr2_control.launch
```

コントローラが正しく起動すれば、あとは/adamr2/diff_drive_controller/cmd_vel トピックに速度指令を送ることでロボットが動きます。手動操縦を行う場合は、[3.1](#) で作成した joy.launch を実行すれば OK です。

Code 4.20 launch joy.launch

```
roslaunch adamr2_bringup joy.launch
```

4.6 オドメトリ調整

[4.3.4](#) にて、車輪の半径やトレッド等、diff_drive_controller に与えるパラメータを記述しました。パラメータの値は設計値をそのまま設定しましたが、実際にロボットを組み立ててみると設計値からはズレが生じます。それによってオドメトリに誤差が混入してしまう問題があります。

この節では diff_drive_controller のパラメータをチューニングすることによるオドメトリ調整の手順を説明します。あくまで調整方法の例の 1 つであり、本節で説明する例が絶対的に正しいことを保証するものではありません。

4.6.1 差動二輪ロボットの運動学

ここで差動二輪ロボットの運動学について振り返っておきます。図 [4.2](#) に移動ロボットの座標系を示します。

グローバル座標系として Σ_G を、ローカル座標系として Σ_M を定義します。車輪半径を R 、ホイールトレッドを $2L$ とし、左右の車輪の回転速度をそれぞれ $\dot{\phi}_r, \dot{\phi}_l$ [rad/s] とします。また、グローバル座標系におけるロボットの位置を $\vec{x} = (x, y, \theta)^T$ とします。

ロボットの直進速度を v 、旋回速度を ω とすると、ローカル座標系におけるロボットの移動速度ベクトルは ${}^M\dot{\vec{x}} = (v, 0, \omega)^T$ 、グローバル座標系におけるロボットの移動速度ベクトルは ${}^G\dot{\vec{x}} = (v \cos \theta, v \sin \theta, \omega)^T$ となります。

以上より、差動二輪ロボットの運動学は式 [4.3](#) のようになります。

$$\begin{cases} v = R \frac{\dot{\phi}_r + \dot{\phi}_l}{2} \\ \omega = R \frac{\dot{\phi}_r - \dot{\phi}_l}{2L} \end{cases} \quad (4.3)$$

式 [4.3](#) の行列表示は式 [4.4](#) のようになります。

$$\begin{pmatrix} v \\ \omega \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{R}{2} & \frac{R}{2} \\ \frac{R}{2L} & -\frac{R}{2L} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\phi}_r \\ \dot{\phi}_l \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

ホイールオドメトリの式は、式 [4.3](#) の式から求めたロボットの速度を積分したものになります。

$$\begin{cases} \theta(t) = \int_0^t \omega(\tau) d\tau + \theta(t_0) \\ x(t) = \int_0^t v(\tau) \cos \theta(\tau) d\tau + x(t_0) \\ y(t) = \int_0^t v(\tau) \sin \theta(\tau) d\tau + y(t_0) \end{cases} \quad (4.5)$$

式 [4.5](#) より、ホイールオドメトリでは積分によって位置を求めるため、式 [4.3](#) で計算した速度に含まれる誤差が加算されていき、誤差が大きくなっていくことがわかります。式 [4.3](#) の中の誤差要因は車輪半径 R 、車輪トレッド $2L$ 、各車輪の各速度 $\dot{\phi}_r, \dot{\phi}_l$ ですが、各車輪の各速度はロータリーエンコーダの精度が十分に高い場合が多く、車輪半径 R と車輪トレッド $2L$ のばらつきによる誤差と比べると小さいことがほとんどです。そのため、調整すべきパラメータは車輪半径 R と車輪トレッド $2L$ となります。

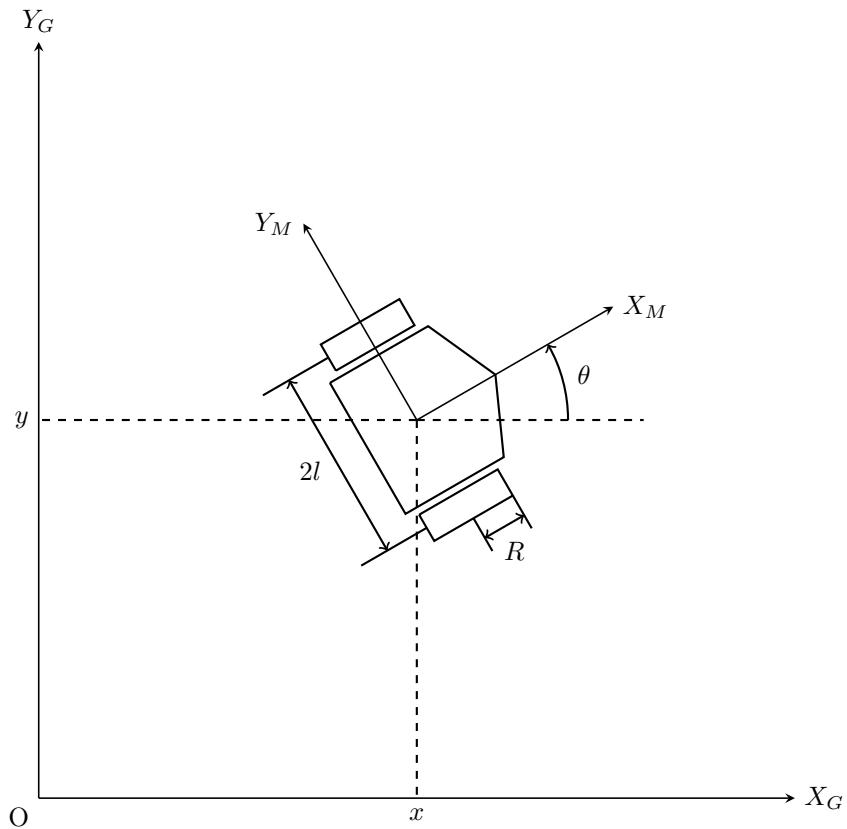


Fig.4.2 Coordinate System of Differential Drive Mobile Robot

4.6.2 調整対象のパラメータ

前小節にて、調整すべきパラメータが車輪半径と車輪トレッドであることを説明しました。`diff_drive_controller` では、これらの数値はそれぞれ `wheel_radius` と `wheel_separation` の 2 つのパラメータで指定します。

実際にパラメータを調整するときは、これらのパラメータを直接編集するのではなく、`wheel_radius_multiplier` と `wheel_separation_multiplier` というパラメータを編集することでパラメータ調整を行います。この 2 つのパラメータは `wheel_radius` と `wheel_separation` に掛かる係数で、デフォルト値は 1.0 です。

係数パラメータを変更して間接的にパラメータ調整を行う理由は 2 つあります。

- ロボットの設計値は保持しておきたい。
- `dynamic_reconfigure` によってロボット動作中にパラメータを動的に変更できる。

2 つ目の理由が特に大きいです。ROS には `dynamic_reconfigure`^{*9} という、パラメータを動的に変更するとのできる仕組みが存在します。`dynamic_reconfigure` を使うことによって、`diff_drive_controller` の実行中にパラメータを変更することができるため、パラメータ調整が効率よく行えるようになります。

`dynamic_reconfigure` には `rqt` プラグインも提供されており、GUI アプリケーションとして利用することができます。コード 4.21 を実行すると、図 4.3 のようなアプリケーションが起動します。画面左側のメニューバーから実行中のノードを選択すると、そのノードが持つ動的変更可能なパラメータが表示されます。スライドバーを編集するかテキストボックスにある数値を直接変更することにより、パラメータを変更することができます。

`diff_drive_controller` では、`left_wheel_radius_multiplier`, `right_wheel_radius_multiplier`, `wheel_separation_multiplier` の 3 つの係数を調整することができます。これらのパラメータを調整することで、オドメトリに生じる誤差を最小限にします。

*9 http://wiki.ros.org/dynamic_reconfigure

Code 4.21 Run dynamic_reconfigure

```
rosrun rqt_reconfigure rqt_reconfigure
```

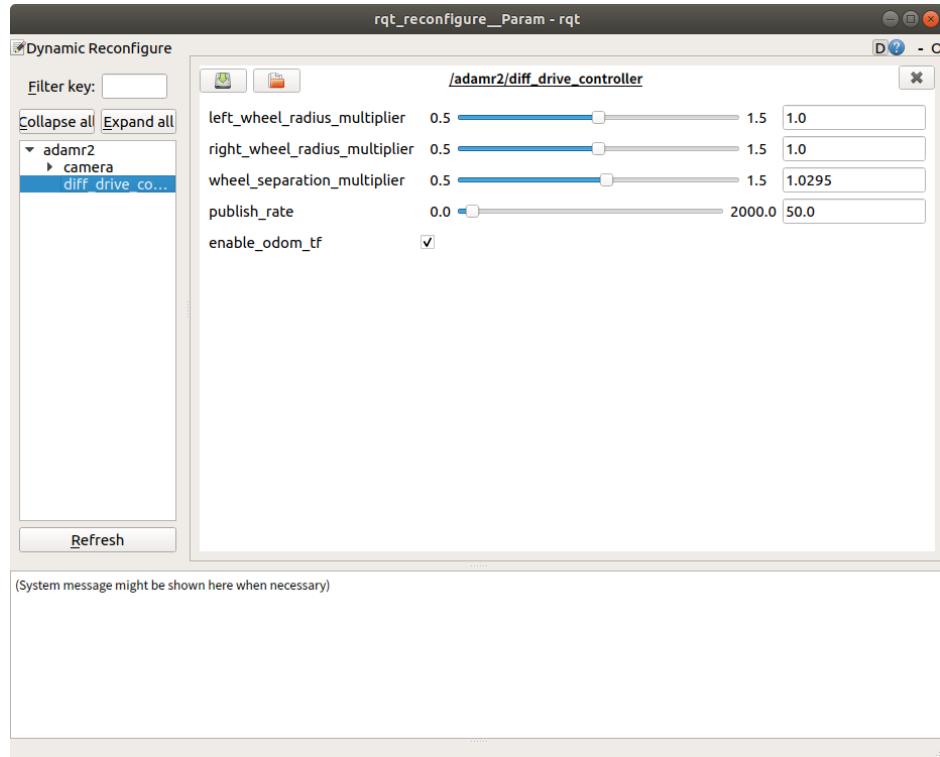


Fig.4.3 dynamic_reconfigure

4.6.3 移動距離に基づいたオドメトリ調整

ここでは移動距離に基づいたオーソドックスなオドメトリ調整の手法を紹介します。オドメトリ調整の手順は単純で、ロボットを一定距離移動させ、実際に移動した距離をメジャー等で測り、オドメトリが示した移動距離と比較するものです。

オドメトリ調整を行う際は、まず直進成分から着手します。この理由は、オドメトリの回転成分の式には車輪半径と車輪間距離の両方が関係しているのに対し、直進成分の式では車輪半径のみが関係するからです。2つのパラメータを同時にチューニングするよりも、1つずつ行った方が効率がよく、精度も向上します。

ロボットを起動し、ゲームパッド等で手動操縦して、ロボットを数メートル移動させます。このとき、ロボットに送る速度指令には旋回成分を含まないようにします。ロボットの左右の車輪が等しい半径を持つとは限らないからです。直進指令のみを出したにも関わらずロボットの軌道が曲がったりしたら、左右の車輪半径の係数も調整する必要があります。

オドメトリが計算した移動距離を見るには、/adaml2/diff_drive_controller/odom トピックを取得します。コード 4.22 を実行することで、ターミナルにオドメトリの情報を表示することができます。

Code 4.22 Show Odometry Topic Message

```
$ rostopic echo /adaml2/diff_drive_controller/odom
header:
  seq: 4713
  stamp:
    secs: 94
    nsecs: 923000000
  frame_id: "odom"
  child_frame_id: "base_footprint"
pose:
  pose:
    position:
```

```
x: -1.28079082702
y: -0.174312002338
z: 0.0
orientation:
x: -0.0
y: 0.0
z: 0.0594169792921
w: -0.998233250584
covariance: [0.001, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.001, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0,
1000000.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 1000000.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0,
1000000.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 10.0]
wist:
twist:
linear:
x: -0.000235845256857
y: 0.0
z: 0.0
angular:
x: 0.0
y: 0.0
z: 0.000285137126708
covariance: [0.001, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.001, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0,
1000000.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 1000000.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0,
1000000.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 10.0]
```

トピックを受信すると、コード 4.22 のような情報がターミナル上に表示されます。この内、`pose` の項の `position` がロボットの位置、`orientation` がロボットの回転を表します。ロボットが直進すると、`position` の x の値が増加します。この値を実測値と示し合わせ、実測値よりも小さければ `wheel_radius_multiplier` の値を大きくします。実測値よりも大きければ、`wheel_radius_multiplier` の値を小さくします。

車輪半径を調整し終えたら、次は車輪トレッドの調整を行います。車輪トレッドの調整も同様の手順で行えます。1つ問題なのが `odom` トピックの回転がクオータニオンで表示されるということです。クオータニオンをロールピッチャーに変換するのはさして難しくないのですが、一目見ただけではなかなかわかりません。従って、測定の際は何らかの工夫をしなければならないということになります。

ここではロボットが2回転するとクオータニオンが元に戻ることを利用して、ロボットを偶数回旋回させた後のオドメトリのデータを見て調整する手法を取ります。ロボットの起動直後から4回転ほど旋回させ、オドメトリのトピックデータを確認します。クオータニオンの値がロボットの起動直後と同じ値になっていれば、車輪トレッドの数値は正しいことになります。もしオドメトリの回転数が実際の回転数(4回分の回転)よりも小さければ、`wheel_separation_multiplier`の値を小さくします。オドメトリの回転数が実際の回転数よりも大きければ、`wheel_separation_multiplier`の値を大きくします。

この手法でオドメトリ調整を行う際の注意点として、以下の 2 点があります。

- ロボットを移動させるときは `odom` トピックの値をゼロに近くしてから行うこと。
 - パラメータの変更はロボットが移動する前に行うこと。

`odom` トピックはロボットのコントローラが起動してからの絶対的な移動距離を示すため、相対的な位置を(直接)求めることができません。そのため、オドメトリ調整を行う際は `odom` トピックの位置の値をゼロに近づけてから行う必要があります。バージョン 0.17.1 時点での `diff_drive_controller` にはオドメトリの位置をリセットする機能は無いので、^{*10} ロボットを移動させてから元の位置に戻す他ありません。オドメトリのパラメータを変更する前ならば、もし車輪半径やトレッドのパラメータが間違っていたとしても、元の動作の反対の動作を行えばオドメトリの原点に復帰することができます。

以上のこと気に付けてオドメトリ調整を行いましょう。

4.6.4 レーザースキヤナを利用したオドメトリ調整

オドメトリの調整手段として、レーザースキャナを利用した方法もあります。こちらは実測値に基づいているわけではないため正確さには欠けますが、レーザースキャナと壁さえあればメジャー等で測定する手間が無いという利点があります。

レーザースキャナを利用したオドメトリ調整の手順を以下に示します。

*¹⁰ GitHub の Issue(#382) で議論されてはいますが、機能の実装は検討されていないようです。

1. ロボットを壁から数メートル離れた箇所に、壁に垂直に向くように設置します。
2. adamr2_control.launch, joy.launch, rpidar.launch を起動して、ロボットが走行可能かつレーザースキャナのデータを閲覧可能な状態にします。
3. rviz を起動し、Fixed Frame を odom に設定します。
4. rviz のトピックに LaserScan を追加し、LaserScan トピックのオプションの内、減衰時間 (Decay Time) を 20 秒程度に設定します。
5. ゲームパッドを使ってロボットを動かします。直進成分の調整を行う場合は壁に向かってまっすぐ走らせ、旋回成分の調整を行う場合はその場でゆっくり旋回させます。
6. レーザースキャンのデータのズレを確認します。
 - オドメトリが正確ならば、20 秒間のレーザースキャンは 1 つのスキャンであるかのように見えるはずです。
 - オドメトリにズレがあれば、レーザースキャンは重ならず、厚くなったりズレたりします。
7. dynamic_reconfigure を使って車輪のパラメータを調整します。

レーザースキャナで壁を測定した結果をもとに、オドメトリのズレを可視化するという手法です。注意点として、ロボットを旋回させるときは十分にゆっくり旋回させなければなりません。ロボットに搭載しているレーザースキャナが、レーザーヘッドを回転させて計測するタイプのものであった場合、ロボットが高速で旋回するとスキャンに歪みが生じます。これを可能な限り減らすために、なるべくゆっくりと旋回させる必要があります。

第5章

SLAMによる地図作成

5.1 slam_gmapping の概要

slam_gmapping パッケージは、Gmapping^{*1}による SLAM を ROS で実行するためのパッケージです。Gmapping は 2D SLAM の 1 種で、ベイズフィルタ系にカテゴライズされる SLAM です。パーティクルフィルタを用いて占有格子地図を構築するアルゴリズムで実装されています。Gmapping で使われているフレームワークは FastSLAM2.0 と呼ばれており、Gmapping ではスキャンマッチングを使ってロボットの位置の候補を絞り込んでからフィルタをアップデートしています。

Gmappingについての詳しい概要は、OpenSLAMのホームページやROS Wikiの当該ページに記載されています。また、実装されているアルゴリズムについては論文 [7] に詳しく記載されています。パラメータ調整の際にはアルゴリズムに対する深い理解が必要となるので、一度は目を通すことをお勧めします。

ここまで の作業でロボットの移動機能を実装することができたので、SLAMによる地図作成実験が行えるようになりました。本章では、slam_gmapping^{*2}パッケージを使用した SLAM による地図作成実験の手順を解説します。

5.2 SLAMの実行に必要なもの

slam_gmapping パッケージを使用して SLAM を行うには、以下の要素が必要となります。

- レーザースキャンのデータ (sensor_msgs/LaserScan 型のトピックメッセージ)
- オドメトリのデータ (/tf トピックメッセージ)

slam_gmapping は、デフォルトの設定では「/tf(/tf/tfMessage)」と「/scan(/sensor_msgs/LaserScan)」の 2 つのトピックを受信します。/scan については RPLiDAR を使うことで提供することができます。/tf については、4 章で設定した diff_drive_controller が配信してくれるため、特に設定する必要はありません。

SLAM の実行にはオドメトリが必要になりますが、slam_gmapping が必要とするのは /tf の方のオドメトリなので、オドメトリのトピック (geometry_msgs/Odometry) は必ずしも必要ではありません。トピックの方のオドメトリは diff_drive_controller が同じく配信してくれるため、特に考える必要はありません。

5.3 SLAMのためのパッケージ作成

5.3.1 パッケージの作成

slam_gmapping を実行するためのパッケージを作成します。名前は adamr2_slam とします。コード 5.1 を実行して、パッケージを作成します。依存パッケージの指定はここではしなくても構いません。

Code 5.1 Create adamr2_slam Package

```
catkin create pkg adamr2_slam
```

このパッケージには slam_gmapping のノードを実行するための launch ファイルと、ノードに渡すパラメータを記述したパラメータファイルを格納します。ディレクトリ構成はコード 5.2 のようになります。

^{*1} <https://openslam-org.github.io/gmapping.html>

^{*2} <http://wiki.ros.org/gmapping>

Code 5.2 Directory Structure of adamr2_slam

```
adaml2_slam/
├─ launch/
├─ config/
└─ package.xml
  └─ CMakeLists.txt
```

launch/ディレクトリには各種 launch ファイルを格納します。config/ディレクトリにはパラメータファイルを格納します。

パッケージが作成できたら、次は launch ファイルとパラメータファイルの準備に入ります。

5.3.2 launch ファイルの作成

slam_gmapping のノードを実行するための launch ファイルを作成します。adaml2_slam パッケージの launch/ディレクトリ内に gmapping.launch という名前のファイルを作成し、コード 5.3 のように記述します。

Code 5.3 gmapping.launch

```
<launch>
  <param name="robot_description" command="$(find xacro)/xacro $(arg model)"/>

  <node pkg="gmapping" type="slam_gmapping" name="slam_gmapping" clear_params="true">
    <rosparam file="$(find adaml2_slam)/config/gmapping/gmapping.yml" command="load"/>
    <remap from="scan" to="/adaml2/scan"/>
  </node>
</launch>
```

1つのノードのみを実行する単純な launch ファイルです。rosparam タグを使って、パラメータファイルに記述したパラメータを一括でノードに渡しています。パラメータファイルは次の小節で作成するものです。また、3.2.2 で RPLiDAR が出力する sensor_msgs/LaserScan 型メッセージのトピックに名前空間を設定していましたため、それを slam_gmapping ノードが受け取れるように remap タグを使ってトピック名を変更しています。また、ロボットの URDF の情報を ROS に登録する処理も行っています。これは、後述するオフライン SLAMにおいて、ロボットのモデルを可視化するために必要な処理です。

5.3.3 パラメータファイルの作成

次に、パラメータファイルを作成します。config/ディレクトリ内に gmapping.yml という名前のファイルを作成し、コード 5.4 のように記述します。

Code 5.4 gmapping.yml

```
# Basic Parameters
throttle_scans: 1          # default = 1
base_frame: base_footprint # default = base_link
map_frame: map              # default = map
odom_frame: odom            # default = odom
map_update_interval: 5.0    # default = 5.0
transform_publish_period: 0.05 # default = 0.05

# Laser Parameters
maxRange: 18
maxUrange: 15
sigma: 0.05      # default = 0.05
kernelSize: 1    # default = 1
lstep: 0.05       # default = 0.05
astep: 0.05       # default = 0.05
iterations: 5    # default = 5
lsigma: 0.075    # default = 0.075
ogain: 3.0        # default = 3.0
lskip: 0          # default = 0
minimumScore: 0.0 # default = 0.0
```

```

# Motion Model Parameters
srr: 0.1 # default = 0.1
srt: 0.2 # default = 0.2
str: 0.1 # default = 0.1
stt: 0.2 # default = 0.2

# Particle Filter Parameters
linearUpdate: 1.0      # default = 1.0
angularUpdate: 0.5      # default = 0.5
temporalUpdate: -1.0    # default = -1.0
resampleThreshold: 0.5  # default = 0.5
particles: 30           # default = 30

# Map Parameters
xmin: -100.0      # default = -100.0
ymin: -100.0      # default = -100.0
xmax: 100.0       # default = 100.0
ymax: 100.0       # default = 100.0
delta: 0.05        # default = 0.05
occ_thresh: 0.25   # default = 0.25

# Likelihood Parameters
llsamplerange: 0.01  # default = 0.01
llsamplestep: 0.01   # default = 0.01
lasamplerange: 0.005 # default = 0.005
lasamplestep: 0.005 # default = 0.005

```

ほとんどデフォルト値に設定しています。ADAMR2 ではベースリンクを `base_footprint` にしているため、`base_frame` のみ変更しています。また、レーザーセンサの最大レンジを示す `maxRange` と、地図作成に使用するレーザーの最大距離を示す `maxUrange` については、使用するセンサに従って変更する必要があります。筆者の環境では RPLiDAR A2M6 を使用しており、このモデルは最大測定距離が 18 m のため、`maxRange` を 18 に、`maxUrange` を 15 に設定しています。

5.3.4 package.xml の編集

このパッケージは `slam_gmapping` のノードを実行するため、依存パッケージに `slam_gmapping` を追加しておきます。

`package.xml` をコード 5.5 のように編集します。

Code 5.5 package.xml

```

<?xml version="1.0"?>
<package format="2">
  <name>adamr2_slam</name>
  <version>0.0.0</version>
  <description>The adamr2_slam package</description>

  <maintainer email="hoge@hogehoge.com">hoge</maintainer>

  <license>BSD</license>

  <buildtool_depend>catkin</buildtool_depend>
  <exec_depend>slam_gmapping</exec_depend>
</package>

```

実行時に `slam_gmapping` を使用するため、`exec_depend` タグを使って `slam_gmapping` パッケージを指定しています。

5.4 SLAM の手順

SLAM を実行する前に、ROS における SLAM の手順をおさらいしておきます。

SLAM の実験のシチュエーションは、オンライン SLAM とオフライン SLAM の 2 つがあります。両者の

違いは、SLAMの処理をロボットの動作中に行うか否かにあります。オンラインSLAMではロボットの走行と同時にSLAMの処理を実行します。地図作成をリアルタイムに行うことになるので、処理の負荷はかなり大きいです。一方、オフラインSLAMは、ロボットの走行データ（オドメトリやレーザースキャン）を記録・保存しておき、そのデータを再生しながらSLAMの処理を実行する、いわゆるバッチ処理を行います。走行データを記録するのとSLAMの処理を実行するのとを分けて行うため時間と手間がかかりますが、後から処理を行えるため計算負荷が比較的小さいこと、走行データが不変なためパラメータチューニングが行いやすいこと、他のSLAMの手法と比較しやすいこと等が利点です。

ここではオフラインSLAMの手順について説明します。

5.4.1 走行データの記録

まずは走行データの記録から始めます。ROSではrosbag^{*3}という、トピックメッセージを記録するためのツールが用意されています。これを使って走行データを記録します。

SLAMに必要なデータは、5.2でも言及した通り、/tfトピックと/scanトピックです。また、SLAMの処理には必要ありませんが、SLAM実行時にロボットのモデルを可視化しておくと何かと便利なので、/tf_staticと/odomトピックも記録しておくと良いでしょう。

まずはロボットを実行します。コード5.6を実行して、4で実装したコントローラを起動します。

Code 5.6 Bring up ADAMR2

```
roslaunch adamr2_control adamr2_control.launch
```

ロボットを手動操縦するので、ジョイスティックも起動しましょう。コード??を実行して、ジョイスティックを起動します。

Code 5.7 Bring up Joystick

```
roslaunch adamr2_bringup joy.launch
```

ロボットを起動したら、rosbagを使ってトピックを記録します。rosbagはコマンドラインから利用することができます。SLAMのためのトピックを記録するには、コード5.8を実行します。

Code 5.8 Execute rosbag for SLAM

```
rosbag record -O slam.bag /tf /tf_static /adamr2/scan /adamr2/diff_drive_controller/odom
```

-Oオプションを付けることで、Bagファイル^{*4}の名前を指定することができます。コード5.8では「slam.bag」という名前を指定しています。

コード5.8を実行すると、トピックの記録が始まります。実行中のrosbagをCtrl-Cで停止することで、トピックの記録を停止、データを保存することができます。記録したデータはrosbag recordコマンドを実行したディレクトリに、1つのファイルとして保存されます。ファイル名はデフォルトでは日付と時刻が使われます。ファイル名を指定したい場合は、-Oオプションを付けてrosbagを実行します。詳しくはrosbagのROS Wikiを参照してください。

コード5.8を実行してから、地図を作成したい範囲をロボットに走行させます。障害物や壁等、地図作成に必要となる情報をできるだけ多く取れるよう、工夫して走行させる必要があります。

十分なデータが取れたら、rosbagを終了してデータを保存します。データを保存した後はロボットは動かす必要がないので、適切に終了させます。

念のためちゃんとデータが記録できたかどうかを確認しておきましょう。Bagファイルの情報をチェックするには、rosbag infoコマンドを使用します。コード5.9を実行することでチェックを行えます。

Code 5.9 Check the Bag File by rosbag info

```
rosbag info slam.bag
```

rosbag infoを実行すると、Bagファイルに記録されたトピック、及びそのデータ型、データの合計時間等の情報が表示されます。データの抜けが無いか等を確認しましょう。

*3 <http://wiki.ros.org/rosbag>

*4 rosbag recordコマンドで保存したファイルのことをBagファイルと呼びます。

5.4.2 SLAM の実行

ここからは PC 上での作業のみとなるので、ロボットを動かす必要はありません。
まずは ROS Master を起動します。

Code 5.10 Execute roscore

```
roscore
```

roscore を実行したのとは別のターミナルを開き、use_sim_time パラメータを true に設定します。これは、rosbag のファイルを再生して処理を行う際に必要となるオプションです。

Code 5.11 Set use_sim_time to true

```
rosparam use_sim_time true
```

更にもう 1 つのターミナルを開き、slam_gmapping を実行します。先ほど作成した launch ファイルを実行します。slam_gmapping はデータが送られない限り処理を行わないので、Bag ファイルを再生する前に起動しておきます。

Code 5.12 Run gmapping.launch

```
roslaunch adamr2_slam gmapping.launch
```

更にもう 1 つターミナルを開き、rviz を起動します。

Code 5.13 Run rviz

```
rosrun rviz rviz
```

rviz では「map」、「LaserScan」、「RobotModel」及び「TF」を表示するように設定します。

最後に、Bag ファイルを再生します。ターミナルを新しく開き、Bag ファイルがあるディレクトリに移動し、コード 5.14 を実行します。

Code 5.14 Replay slam.bag

```
rosbag play --clock slam.bag
```

Bag ファイルの再生が開始され、トピックのデータが配信されると、slam_gmapping が処理を開始します。rviz で適切にトピックの表示設定を行うと、地図が逐次作成されることがわかります。

地図の作成が終わったら、地図を保存します。地図の保存は map_server パッケージ^{*5} の map_saver ノードによって行います。名前が似ていて非常に紛らわしいので、間違えないように注意してください。新しいターミナルを開き、コード 5.15 を実行します。

Code 5.15 Save the Map

```
rosrun map_server map_saver
```

コード 5.15 を実行したディレクトリに、「map.pgm」と「map.yaml」の 2 つのファイルが生成されます。map.pgm は Portable Gray Map ファイルで、地図の本体です。map.yaml は地図の解像度や範囲などのメタ情報を保存するファイルです。これらのファイルは 2 つで 1 組であり、同じディレクトリ内に存在していなければなりません。

以上でオフライン SLAM の手順は終了です。後は作成した地図をもとに、Navigation 等を行えるようになります。

なお、オンライン SLAM を行いたい場合は、コード 5.3 の gmapping.launch の中の robot_description に関する param タグを削除し、^{*6} ロボットの起動中に gmapping.launch を実行すれば良いです。作成した地図は同

^{*5} http://wiki.ros.org/map_server

^{*6} adamr2_control.launch で robot_description の登録を行っているので、オンライン SLAM の場合はこの記述が余計になるからです。逆に、オフライン SLAM では adamr2_control.launch を起動しないからこの記述が必要になっている訳です。

じく `map_saver` によって保存することができます。

第 6 章

slam_gmapping のパラメータチューニング

本章では `slam_gmapping` のパラメータチューニングについて説明します。

`slam_gmapping` を使って正確な地図を作成するには、ロボットの仕様やセンサの特性、ロボットの動作環境等に合わせた適切なパラメータを設定する必要があります。しかし、パラメータチューニングを行うためには、GMapping がどのようなアルゴリズムで処理を行っているかをある程度把握していなければなりません。本章では `slam_gmapping` のパラメータチューニングを行うための情報について、GMapping のアルゴリズムや SLAM の概念を交えて解説します。[6.1](#) では、`slam_gmapping` ノードが使用しているパラメータの簡単な説明を行います。[6.2](#) で GMmapping のアルゴリズムについて簡単な解説を行います。[6.4](#) では、[6.1](#), [6.2](#) を踏まえて、`slam_gmapping` のパラメータをどのように調整すればよいかを説明します。[6.3](#) では補助的な情報として、ROS におけるデータの表現形式を説明します。

尚、本章で取り扱う `slam_gmapping` のバージョンは 1.4.2、本体となる GMmapping のバージョンは 0.2.1 です。また、本章の解説は筆者が理解できた範囲での説明となります。間違いや説明抜け等が存在するため、あくまで参考程度にするようにしてください。

6.1 `slam_gmapping` のパラメータ

ROS Wiki より、`slam_gmapping` ノードが使用するパラメータを列挙します。各パラメータは使用目的によっていくつかのグループに分類することができます。

6.1.1 ROS に関するパラメータ

- `base_frame`
string 型, default: "base_link"
ロボットのベースリンクの名前を指定します。ADAMR2 では `base_footprint` となります。
- `map_frame`
string 型, default: "map"
地図のフレーム名を指定します。特別なことが無い限りはデフォルト値のまま良いでしょう。
- `odom_frame`
string 型, default: "odom"
オドメトリ座標系のフレーム名を指定します。`diff_drive_controller` が提供するオドメトリ座標系は `odom` という名前なので、これを指定します。
- `map_update_interval`
double 型, default: 5.0
`map` トピックを配信する周期を秒単位で指定します。デフォルトでは 5 秒おきに `map` トピックが配信されます。
- `transform_publish_period`
double 型, default: 0.05
`slam_gmapping` が提供する `map` → `odom` の TF 変換の配信周期を指定します。デフォルトでは 0.05 秒おき、つまり 20 Hz で TF が配信されます。

6.1.2 レーザースキャンに関するパラメータ

- **maxRange**
double 型, default: None
ロボットが使用するレーザースキャナの最大測定距離です。この範囲を超えたデータはすべて破棄されます。このパラメータが設定されていない場合は, /scan トピックに含まれるデータを代わりに使用します。
- **maxUrange**
double 型, default: 80.0
地図作成のために使われるスキャンデータの最大値です。レーザースキャンの範囲内において, 障害物のない領域が地図上で自由空間として表示されるようにするには, $\text{maxUrange} < \text{センサの最大測定範囲} \leq \text{maxRange}$ と設定する必要があります。
- **throttle_scans**
int 型, default: 1
 n 回おきにスキャンを処理します。デフォルト値は 1 なので, 毎回スキャンを処理します。
- **sigma**
double 型, default: 0.05
スキャンマッチングのスコアの計算に使われる分散です。
- **lsigma**
double 型, default: 0.075
レーザーセンサの確率モデルにおける, 測定ノイズの分散です。
- **kernelSize**
double 型, default: 1.0
レーザーセンサの確率モデルにおける, レーザービームの終点との距離が最短となる障害物セルを探す際の探索範囲です。

GMapping ではレーザーセンサの確率モデルとして, 尤度場モデルが使用されています。尤度場モデルは Probabilistic Robotics[8] にて詳しく解説されています。

6.1.3 スキャンマッチングに関するパラメータ

- **lstep**
double 型, default: 0.05
スキャンマッチングにおける, 並進方向の初期探索ステップです。
- **astep**
double 型, default: 0.05
スキャンマッチングにおける, 回転方向の初期探索ステップです。
- **iterations**
int 型, default: 5
スキャンマッチング処理の繰り返し回数です。
- **ogain**
double 型, default: 3.0
パーティクルの正規化の際, 重みを平滑化してリサンプリングによる影響を平滑化するためのゲインです。
- **lskip**
int 型, default: 0
各スキャンにおいてスキップするレーザーの数です。デフォルト値は 0 なので, すべてのレーザーが計算に使用されます。
- **minimumScore**
double 型, default: 0.0
スキャンマッチングの最低スコアです。マッチングスコアがこの値以下になったとき, マッチングに失敗したとみなします。
- **llsamplerange**
double 型, default: 0.01

尤度計算の際に使用される、並進方向のサンプリング範囲です。

- **llsamplestep**

double 型, default: 0.01

尤度計算の際に使用される、並進方向のサンプリング単位です。

- **lasamplerange**

double 型, default: 0.005

尤度計算の際に使用される、回転方向のサンプリング範囲です。

- **lasamplestep**

double 型, default: 0.005

尤度計算の際に使用される、回転方向のサンプリング単位です。

`llsamplerange`, `llsamplestep`, `lasamplerange`, `lasamplestep` の 4 つのパラメータのデフォルト値は、地図の分解能が 5 cm のときの設定値のようです。また、ソースコードを見る限り、`slam_gmapping`においてこれらの値は使用されていません。

6.1.4 状態遷移モデルに関するパラメータ

- **srr**

double 型, default: 0.1

ロボットの並進によって生じる、並進方向の誤差の標準偏差です。

- **srt**

double 型, default: 0.2

ロボットの回転によって生じる、並進方向の誤差の標準偏差です。

- **str**

double 型, default: 0.1

ロボットの並進によって生じる、回転方向の誤差の標準偏差です。

- **stt**

double 型, default: 0.2

ロボットの回転によって生じる、回転方向の誤差の標準偏差です。

これら 4 つのパラメータは、オドメトリに基づいた状態遷移モデルにおいて使用される数値です。オドメトリに基づいた状態遷移モデルについては、Probabilistic Robotics[8] に詳細が記載されています。

6.1.5 パーティクルフィルタに関するパラメータ

- **linearUpdate**

double 型, default: 1.0

パーティクルフィルタの更新が行われるために必要なロボットの並進方向の移動距離です。ロボットがこれだけ移動しないと、フィルタのアップデートは行われません。

- **angularUpdate**

double 型, default: 0.5

パーティクルフィルタの更新が行われるために必要なロボットの回転方向の移動距離です。ロボットがこれだけ移動しないと、フィルタのアップデートは行われません。

- **temporalUpdate**

double 型, default: -1.0

時間経過によるフィルタアップデートを許可し、その周期を指定します。ロボットが一定距離を移動しなくとも、このパラメータで指定した時間が経過したらフィルタのアップデートが行われます。マイナスの値が設定されていれば、時間経過によるフィルタアップデートは行われなくなります。

- **resampleThreshold**

double 型, default: 0.5

リサンプリングを行うかどうかを決定するための閾値です。

- **particles**

int 型, default: 30

パーティクルフィルタで使用するパーティクルの数です。GMapping ではパーティクルの数は固定値です。

6.1.6 地図に関するパラメータ

- **xmin**
double 型, default: -100.0
地図の X 方向の最小値の初期値です.
- **ymin**
double 型, default: -100.0
地図の Y 方向の最小値の初期値です.
- **xmax**
double 型, default: 100.0
地図の X 方向の最大値の初期値です.
- **ymax**
double 型, default: 100.0
地図の Y 方向の最大値の初期値です.
- **delta**
double 型, default: 0.05
地図の分解能です. 占有格子地図のグリッド 1 つあたりの長さをメートル単位で指定します. デフォルト値は 0.05 なので, グリッド 1 つあたりの長さは 5 cm となります.
- **occ_thresh**
double 型, default: 0.25
占有格子地図における, 障害物の閾値です. この値以上の値を持つセルを障害物とみなします.

地図の範囲を表すパラメータに小さい値を指定していたとしても, 地図のサイズはロボットの移動とフィルタのアップデートに伴って更新されます.

6.2 GMapping のアルゴリズムの概要

GMapping は格子ベースの地図を扱うベイズフィルタ系の SLAM アルゴリズムです. FastSLAM2.0 のアプローチを採用しており, スキャンマッチングによってオドメトリを修正することにより, 少ないパーティクルでも良好な推定を行うことができるのが特徴です.

6.2.1 GMapping が扱う問題

求める解

ロボットの初期姿勢 \mathbf{x}_0 , 観測の時系列リスト $z_{1:t}$, オドメトリ情報 $u_{1:t}$ が得られたとき, ロボットの軌跡 $\mathbf{x}_{1:t}$ と地図 m の結合確率分布を求めます.^{*1}

$$p(\mathbf{x}_{1:t}, m \mid \mathbf{x}_0, z_{1:t}, u_{1:t}) \quad (6.1)$$

ここで, \mathbf{x}_t はロボットの姿勢 (Pose) を表すベクトルであり, $\mathbf{x}_x = (x_t, y_t, \theta_t)^T$ です. z_t は時刻 t で得られた観測の情報で, GMapping ではスキャンデータが用いられます. u_t は, 時刻 $t-1$ から時刻 t までにロボットが移動した距離を, ホイールオドメトリで求めた情報です. また, $1:t$ の表記は時刻 1 から時刻 t までの時系列のリストを表しています.

SLAM の目的は式 6.1 の確率分布を求ることにあります. 確率分布を求めることが可能なら, 確率密度が一番高いところにロボットがいるのが尤もらしいと言えるため, 結果的にロボットの姿勢を求めるに繋がります.

しかし, 式 6.1 の確率分布がどのような形状をしているのかは誰にもわかりません. 従って, 式 6.1 を直接求めることはほぼ不可能に近い難問になります. そのため, 何らかの近似や仮定を用いることによって確率分布を求ることになります. その近似手法の 1 つが, GMapping でも用いられているパーティクルフィルタです.

パーティクルフィルタは連続な関数である確率分布を, 重みを持ったパーティクルの集合として離散的に近似する手法です. 確率分布の内の確率密度が高い部分が, 重みの大きいパーティクルに対応します. パーティクルの数を無限大に近づけると元の確率分布に近づきます.

^{*1} 論文 [7] に書かれている数式と少し異なりますが, 表している事象は同じです.

GMapping では Rao-Blackwellization と呼ばれる因数分解を適用して、式 6.1 の確率分布を分解しています。

$$\begin{aligned} p(\mathbf{x}_{1:t}, m \mid \mathbf{x}_0, z_{1:t}, u_{1:t}) \\ = p(m \mid \mathbf{x}_{1:t}, \mathbf{x}_0, u_{1:t}, z_{1:t}) \cdot p(\mathbf{x}_{1:t} \mid \mathbf{x}_0, u_{1:t}, z_{1:t}) \\ = p(m \mid \mathbf{x}_{0:t}, z_{1:t}) \cdot p(\mathbf{x}_{1:t} \mid z_{1:t}, u_{1:t}) \end{aligned} \quad (6.2)$$

式 6.1 に Rao-Blackwellization を適用したのが式 6.2 です。式 6.2 を見ると、この問題はロボットの姿勢の分布 $p(\mathbf{x}_{1:t} \mid z_{1:t}, u_{1:t})$ を求める問題と、地図 $p(m \mid \mathbf{x}_{0:t}, z_{1:t})$ を求める問題に分解して考えられるようになります。

SLAM における用語

式 6.1 で示すような、SLAM で求める確率分布を「目標分布」または「信念(信念分布)」と呼びます。^[9] パーティクルフィルタを含むベイズフィルタの演算は単純なもので、まずロボットの移動の情報をもとに時刻 $t - 1$ の信念分布を遷移させ、その後センサ等の観測情報を用いて時刻 t の信念を確定させる、という処理を繰り返します。

ロボットの移動の情報をもとに信念分布を遷移させるときに使う確率モデルを「移動モデル」^[8] もしくは「状態遷移モデル」^[9] と呼びます。状態遷移モデルはロボットの移動に含まれるノイズやバイアスを確率的に扱うモデルで、式 6.3 で表されます。また、状態遷移モデルによって遷移させられた信念分布を「提案分布」もしくは「事前分布」と呼びます。Probabilistic Robotics では、状態遷移モデルの種類として速度動作モデル (motion_model_velocity) とオドメトリ動作モデル (motion_model_odometry) が紹介されています。

$$p(\mathbf{x}_t \mid \mathbf{x}_{t-1}, u_t) \quad (6.3)$$

状態遷移モデルによって信念分布を遷移した後、観測情報を用いて時刻 t の信念分布を確定させる際に使う確率モデルを「計測モデル」^[8] 「観測モデル」^[9] と呼びます。観測モデルは式 6.22 で表されます。提案分布に観測モデルを適用してできた分布を「目標分布」もしくは「事後分布」と呼びます。Probabilistic Robotics では、LiDAR 等のレーザーセンサのための観測モデルの種類としてビームモデル (beam_range_finder_model) と尤度場モデル (likelihood_field_model) が紹介されています。

$$p(z_t \mid \mathbf{x}_t, m) \quad (6.4)$$

6.2.2 問題の定式化

パーティクルフィルタにおいて、 i 番目のパーティクルの重み $w^{(i)}$ は式 6.5 で更新されます。

$$w^{(i)} = \frac{p(\mathbf{x}_{1:t}^{(i)} \mid z_{1:t}, u_{1:t})}{\pi(\mathbf{x}_{1:t}^{(i)} \mid z_{1:t}, u_{1:t})} \quad (6.5)$$

式 6.5 右辺の分子は事後分布、分母は提案分布です。事後分布と提案分布の差が小さい程フィルタの性能は上がりますが、提案分布 π が事後分布と一致することはまずありません。また、式 6.5 のままだと新しい観測が得られる度に各パーティクルの軌跡の重みを評価しなければならないため、時間が経過するにつれて計算負荷は増大してしまいます。ここで、提案分布が式 6.6 に従うと仮定します。

$$\pi(\mathbf{x}_{1:t} \mid z_{1:t}, u_{1:t}) = \pi(\mathbf{x}_t \mid \mathbf{x}_{1:t-1}, z_{1:t}, u_{1:t}) \cdot \pi(\mathbf{x}_{1:t-1} \mid z_{1:t-1}, u_{1:t-1}) \quad (6.6)$$

式 6.6 を使って式 6.5 を逐次式に変換すると、

$$\begin{aligned} w^{(i)} &= \frac{p(\mathbf{x}_{1:t}^{(i)} \mid z_{1:t}, u_{1:t})}{\pi(\mathbf{x}_{1:t}^{(i)} \mid z_{1:t}, u_{1:t})} \\ &= \eta \frac{p(z_{1:t} \mid \mathbf{x}_{1:t}^{(i)}, z_{1:t-1}) p(\mathbf{x}_t^{(i)} \mid \mathbf{x}_{t-1}^{(i)}, u_t)}{\pi(\mathbf{x}_t^{(i)} \mid \mathbf{x}_{1:t-1}^{(i)}, z_{1:t}, u_{1:t})} \cdot \frac{p(\mathbf{x}_{1:t-1}^{(i)} \mid z_{1:t-1}, u_{1:t-1})}{\pi(\mathbf{x}_{1:t-1}^{(i)} \mid z_{1:t-1}, u_{1:t-1})} \\ &= \eta \frac{p(z_{1:t} \mid \mathbf{x}_t^{(i)}, m_{t-1}^{(i)}) p(\mathbf{x}_t^{(i)} \mid \mathbf{x}_{t-1}^{(i)}, u_t)}{\pi(\mathbf{x}_t^{(i)} \mid \mathbf{x}_{1:t-1}^{(i)}, z_{1:t}, u_{1:t})} w_{t-1}^{(i)} \end{aligned} \quad (6.7)$$

となります。ただし、 η は式 6.7 の 2 段目でベイズの定理を適用して確率分布を分解したときに出でてきた正規化因子です。

式 6.7 を使ってパーティクルを更新するためには、提案分布 π からドローしなければなりません。パーティクルフィルタの性能は提案分布 π で決まり、 π が目標分布に近ければフィルタの性能は向上します。

FastSLAM1.0 のような従来型のアルゴリズムでは、この提案分布 π には状態遷移モデル $p(\mathbf{x}_t | \mathbf{x}_{t-1}, u_t)$ が使用されます。提案分布に状態遷移モデルを使うと、パーティクルの重みの演算が観測モデル $p(z_t | m, \mathbf{x}_t)$ だけで行えます。実際、式 6.7 の π に状態遷移モデルを代入すると、式 6.8 のようになります。

$$\begin{aligned} w_t^{(i)} &= \eta \frac{p(z_{1:t} | \mathbf{x}_t^{(i)}, m_{t-1}^{(i)}) p(\mathbf{x}_t^{(i)} | \mathbf{x}_{t-1}^{(i)}, u_t)}{\pi(\mathbf{x}_t^{(i)} | \mathbf{x}_{1:t-1}^{(i)}, z_{1:t}, u_{1:t})} w_{t-1}^{(i)} \\ &= \eta \frac{p(z_{1:t} | \mathbf{x}_t^{(i)}, m_{t-1}^{(i)}) p(\mathbf{x}_t^{(i)} | \mathbf{x}_{t-1}^{(i)}, u_t)}{p(\mathbf{x}_t^{(i)} | \mathbf{x}_{1:t-1}^{(i)}, z_{1:t}, u_{1:t})} w_{t-1}^{(i)} \\ &= \eta p(z_{1:t} | \mathbf{x}_t^{(i)}, m_{t-1}^{(i)}) w_{t-1}^{(i)} \end{aligned} \quad (6.8)$$

ここで、センサによる観測情報の精度が、オドメトリよりも十分に正確な場合を考えます。このとき、観測モデルの意味のある領域は、オドメトリ動作モデルの範囲に比べて非常に狭くなってしまいます。1次元で表すと、図 6.1 のようになります。

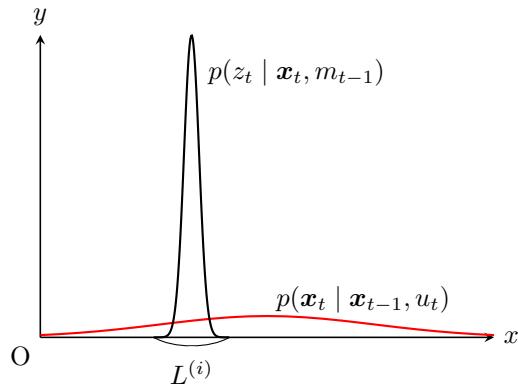


Fig.6.1 The Meaningful Area of the Observation Likelihood

このとき、オドメトリ動作モデルによってばらまかれたパーティクルの内、図 6.1 に示す観測モデルの意味のある領域 $L^{(i)}$ をカバーするパーティクルの数は非常に少なくなってしまいます。 $L^{(i)}$ を十分な数のパーティクルで近似するには、以下の 3 つの対策が考えられます。

1. 計算に使用するパーティクルの数を増やす
2. 観測モデルを平滑化して分散を大きくし、 $L^{(i)}$ を無理やり大きくする
3. パーティクルを観測に近い方向にばらまく

パーティクルの数を増やせば当然 $L^{(i)}$ をカバーするパーティクルの数も増えますが、無駄な計算も多くなります。観測モデルを平滑化して精度を落とせば $L^{(i)}$ に近いパーティクルの重みをある程度確保できますが、せっかくのセンサのデータを破棄することにつながります。

というわけで、パーティクルを観測に近い方向にばらまくような提案分布を作れば良いということになります。GMapping では提案分布に観測の情報を統合することにより、観測モデルの意味のある領域にパーティクルを集中させる方法を取っています。すなわち、

$$p(\mathbf{x}_t | m_{t-1}^{(i)}, \mathbf{x}_{t-1}^{(i)}, z_t, u_t) = \frac{p(z_t | m_{t-1}^{(i)}, \mathbf{x}_t) p(\mathbf{x}_t | \mathbf{x}_{t-1}^{(i)}, u_{t-1})}{p(z_t | m_{t-1}^{(i)}, \mathbf{x}_{t-1}^{(i)}, u_t)} \quad (6.9)$$

を提案分布として使用します。式 6.9 を提案分布として使用したとき、パーティクルの重みの計算式は、

$$\begin{aligned}
w_t^{(i)} &= \eta \frac{p(z_{1:t} | \mathbf{x}_t^{(i)}, m_{t-1}^{(i)}) p(\mathbf{x}_t^{(i)} | \mathbf{x}_{t-1}^{(i)}, u_t)}{p(\mathbf{x}_t | m_{t-1}^{(i)}, \mathbf{x}_{t-1}^{(i)}, z_t, u_t) w_{t-1}^{(i)}} \\
&= \eta \frac{p(z_{1:t} | \mathbf{x}_t^{(i)}, m_{t-1}^{(i)}) p(\mathbf{x}_t^{(i)} | \mathbf{x}_{t-1}^{(i)}, u_t)}{\frac{p(z_t | m_{t-1}^{(i)}, \mathbf{x}_t) p(\mathbf{x}_t | \mathbf{x}_{t-1}^{(i)}, u_{t-1})}{p(z_t | m_{t-1}^{(i)}, \mathbf{x}_{t-1}^{(i)}, u_t)}} \\
&= \eta p(z_t | m_{t-1}^{(i)}, \mathbf{x}_{t-1}^{(i)}, u_t) w_{t-1}^{(i)} \\
&= \int p(z_t | \mathbf{x}') p(\mathbf{x}' | \mathbf{x}_{t-1}^{(i)}, u_t) d\mathbf{x}' \cdot w_{t-1}^{(i)}
\end{aligned} \tag{6.10}$$

となります。特徴ベースの FastSLAM2.0 では、この改善された提案分布をガウス分布に近似したものを使用しています。ランドマークの計測誤差がガウス分布に従うと仮定し、提案分布をカルマンフィルタによってガウス分布に近似します。一方、GMapping のように占有格子地図を扱う SLAM では、観測モデルの形状が予想できないため、特徴ベースのようにカルマンフィルタを使って近似するといったことができません。そこで、GMapping ではスキャンマッチングを用いて、状態遷移モデルによってばらまいたパーティクルを尤もらしい位置に補正しています。

まず、状態遷移モデルに従ってパーティクルを遷移させます。この作業は FastSLAM1.0 と変わりません。次に、センサによって得られた観測情報を使って、状態遷移モデルで移動させたパーティクルを、尤度が高くなる位置に移動させます。スキャンマッチングを適用した後、分布のガウス近似の中心と分散を求めます。中⼼ $\mu_t^{(i)}$ と分散 $\Sigma_t^{(i)}$ の計算式は式 6.11 となります。

$$\begin{cases} \mu_t^{(i)} = \frac{1}{\eta^{(i)}} \sum_{j=1}^K \mathbf{x}_j \cdot p(z_t | m_{t-1}^{(i)}, \mathbf{x}_j) \cdot p(\mathbf{x}_j | \mathbf{x}_{t-1}^{(i)}, u_t) \\ \Sigma_t^{(i)} = \frac{1}{\eta^{(i)}} \sum_{j=1}^K \mathbf{x}_j | m_{t-1}^{(i)}, \mathbf{x}_j \rangle \cdot p(\mathbf{x}_j | \mathbf{x}_{t-1}^{(i)}, u_t) \cdot (\mathbf{x}_j - \mu_t^{(i)}) (\mathbf{x}_j - \mu_t^{(i)})^T \end{cases} \tag{6.11}$$

ここで、 $\eta^{(i)}$ は正規化因子で、式 6.12 で計算できます。

$$\eta^{(i)} = \sum_{j=1}^K p(z_t | m_{t-1}^{(i)}, \mathbf{x}_j) p(\mathbf{x}_j | \mathbf{x}_{t-1}^{(i)}, u_t) \tag{6.12}$$

このようにすることで、改善された提案分布を求めることができますようになります。従って、重みの計算式は式 6.13 となります。

$$\begin{aligned}
w_t^{(i)} &= p(z_t | m_{t-1}^{(i)}, \mathbf{x}_{t-1}^{(i)}, u_t) w_{t-1}^{(i)} \\
&= \int p(z_t | m_{t-1}^{(i)}, \mathbf{x}') p(\mathbf{x}' | \mathbf{x}_{t-1}^{(i)}, u_t) d\mathbf{x}' w_{t-1}^{(i)} \\
&\simeq \sum_{j=1}^K p(z_t | m_{t-1}^{(i)}, \mathbf{x}_j) p(\mathbf{x}_j | \mathbf{x}_{t-1}^{(i)}, u_t) w_{t-1}^{(i)} \\
&= \eta^{(i)} w_{t-1}^{(i)}
\end{aligned} \tag{6.13}$$

実際に計算を行う際は、観測モデル $p(z_t | \mathbf{x}_t, m_{t-1}^{(i)})$ はレーザービームの尤度場モデルが、状態遷移モデル $p(\mathbf{x}_t | \mathbf{x}_{t-1}, u_t)$ にはオドメトリ動作モデルが使われます。オドメトリ動作モデルは 6.2.4 で、尤度場モデルは 6.2.5 で説明します。

6.2.3 リサンプリングアルゴリズム

GMapping では、パーティクルをリサンプリングするタイミングを決めるための指標として、式 6.14 に示す N_{eff} という数値を導入しています。

$$N_{\text{eff}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^N (\tilde{w}_{(i)})^2} \tag{6.14}$$

N はパーティクルの数です。 N_{eff} は現在のパーティクルが事後分布をどれだけよく表しているかを示す指標で、正規化されたパーティクルの重み $w_{(i)}$ の 2乗和の逆数で計算されます。

N_{eff} の直観的解釈は以下のよう�습니다：もしパーティクルが事後分布から引き出された場合、importance sampling の原理により、それらの重みは互いに等しくなります。逆に、パーティクルによる事後分布の近似の精度が悪いと、パーティクルの重みの分散は大きくなります。言い換えれば、 N_{eff} はパーティクルの重みの分散の尺度とみなすことができるため、パーティクルの集合が事後分布をどれだけ近似しているかを評価する尺度として利用することができます。

パーティクルの重みがすべて等しいとき、 N_{eff} の値は N^2 に等しくなります。逆に各パーティクルの重みの差が大きくなると、 N_{eff} の値は 1 に近づきます。

GMapping では、 N_{eff} が閾値 $\frac{N}{2}$ を下回ったときにリサンプリングが実行されます。[7] 数式で表すと式 6.15 のようになります。

$$N_{\text{eff}} < \frac{N}{2} \quad (6.15)$$

ROS の slam_gmapping では、このリサンプリングの閾値は `resampleThreshold` で決定することができます。これは $\frac{N_{\text{eff}}}{N}$ の比の閾値として定義されており、デフォルト値は 0.5 に設定されています。すなわち、

$$\frac{N_{\text{eff}}}{N} < \text{resampleThreshold} = 0.5(\text{default}) \quad (6.16)$$

という条件を満たしたとき、リサンプリングが行われるようになります。

6.2.4 オドメトリ状態遷移モデル

ここではホイールオドメトリによって状態遷移モデル $p(\mathbf{x}_t | \mathbf{x}_{t-1}, u_t)$ を求める手順を説明します。オドメトリによって求めた時刻 t のロボットの姿勢を $\bar{\mathbf{x}}_t$ と表記することにします。ホイールオドメトリはドリフトやスリップによる誤差を含むので、オドメトリ座標系でのロボットの姿勢 $\bar{\mathbf{x}}_t$ とグローバル座標系でのロボットの姿勢 \mathbf{x}_t は一致することはありません。

一方で、 $\bar{\mathbf{x}}_{t-1}$ から $\bar{\mathbf{x}}_t$ までの相対的な移動量の差分は、真の姿勢 \mathbf{x}_{t-1} から \mathbf{x}_t との差分とそれほどズレているわけではないため、いい感じの推定量として使用することができます。そこで、ロボットの移動の情報 u_t を式 6.17 のように定義することにします。

$$u_t = \begin{pmatrix} \bar{\mathbf{x}}_{t-1} \\ \bar{\mathbf{x}}_t \end{pmatrix} \quad (6.17)$$

そして、 u_t を更に 3 つのパラメータ δ_{rot1} , δ_{trans} , δ_{rot2} に分解して考えます。 δ_{rot1} , δ_{trans} , δ_{rot2} は移動量を表す変数で、これを使うことにより、 u_t は以下のような 3 段階のシーケンスで表されます。

- 回転量 δ_{rot1} だけ旋回
- 並進量 δ_{trans} だけ並進
- 回転量 δ_{rot2} だけ旋回

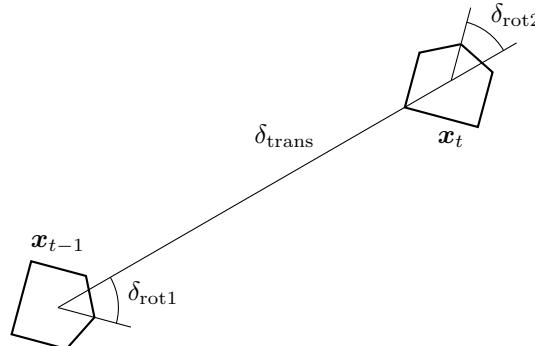


Fig.6.2 Three Parameters of the Odometry Motion Model

言い換えれば、姿勢のペア $(\bar{\mathbf{x}}_{t-1}, \bar{\mathbf{x}}_t)$ はパラメータとして要素数 3 のベクトル $(\delta_{\text{rot1}}, \delta_{\text{trans}}, \delta_{\text{rot2}})^T$ を持ち、

このベクトルは $(\bar{x}_{t-1}, \bar{x}_t)$ を再構築するのに十分な情報を持つことになります。というわけで、このベクトルをオドメトリの情報として使用することにします。

これらのパラメータ $\delta_{\text{rot}1}$, δ_{trans} , $\delta_{\text{rot}2}$ はそれぞれ独立したノイズを持つと仮定すると、状態遷移モデル $p(\mathbf{x}_t | \mathbf{x}_{t-1}, u_t)$ を計算するアルゴリズムはアルゴリズム 1 のようになります。

Algorithm 1 motion_model_odometry

Require: $\mathbf{x}_t = (x_t, y_t, \theta_t)^T$, $\mathbf{x}_{t-1} = (x_{t-1}, y_{t-1}, \theta_{t-1})^T$, $u_t = (\bar{x}_{t-1}, \bar{x}_t)^T$

Ensure: $p(\mathbf{x}_t | \mathbf{x}_{t-1}, u_t)$

- 1: $\delta_{\text{rot}1} = \text{atan}2(\bar{y}_t - \bar{y}_{t-1}, \bar{x}_t - \bar{x}_{t-1}) - \bar{\theta}_{t-1}$
 - 2: $\delta_{\text{trans}} = \sqrt{(\bar{x}_{t-1} - \bar{x}_t)^2 + (\bar{y}_{t-1} - \bar{y}_t)^2}$
 - 3: $\delta_{\text{rot}2} = \bar{\theta}_t - \bar{\theta}_{t-1} - \delta_{\text{rot}1}$
 - 4: $\hat{\delta}_{\text{rot}1} = \text{atan}2(y_t - y_{t-1}, x_t - x_{t-1}) - \theta_{t-1}$
 - 5: $\hat{\delta}_{\text{trans}} = \sqrt{(x_{t-1} - x_t)^2 + (y_{t-1} - y_t)^2}$
 - 6: $\hat{\delta}_{\text{rot}2} = \theta_t - \theta_{t-1} - \hat{\delta}_{\text{rot}1}$
 - 7: $p_1 = \text{prob}(\delta_{\text{rot}1} - \hat{\delta}_{\text{rot}1}, \alpha_1 \delta_{\text{rot}1} + \alpha_2 \hat{\delta}_{\text{trans}})$
 - 8: $p_2 = \text{prob}(\delta_{\text{trans}} - \hat{\delta}_{\text{trans}}, \alpha_3 \hat{\delta}_{\text{trans}} + \alpha_4 (\hat{\delta}_{\text{rot}1} + \hat{\delta}_{\text{rot}2}))$
 - 9: $p_3 = \text{prob}(\delta_{\text{rot}2} - \hat{\delta}_{\text{rot}2}, \alpha_1 \hat{\delta}_{\text{rot}2} + \alpha_2 \hat{\delta}_{\text{trans}})$
 - 10: return $p_1 \cdot p_2 \cdot p_3$
-

尚、アルゴリズム 1 における $\text{prob}(a, b)$ 関数は、平均 a , 分散 b の確率分布（ガウス分布もしくは三角分布）を表します。

実際にパーティクルフィルタを実装する場合は、アルゴリズム 1 を使って確率分布そのものを求めるよりも、その分布から姿勢をドローした結果を求めるのが一般的です。アルゴリズム 2 がそのアルゴリズムの実装例です。

Algorithm 2 sample_motion_model_odometry

Require: $\mathbf{x}_{t-1} = (x_{t-1}, y_{t-1}, \theta_{t-1})^T$, $u_t = (\bar{x}_{t-1}, \bar{x}_t)^T$

Ensure: $\mathbf{x}_t = (x_t, y_t, \theta_t)^T$ sampled from $p(\mathbf{x}_t | \mathbf{x}_{t-1}, u_t)$

- 1: $\delta_{\text{rot}1} = \text{atan}2(\bar{y}_t - \bar{y}_{t-1}, \bar{x}_t - \bar{x}_{t-1}) - \bar{\theta}_{t-1}$
 - 2: $\delta_{\text{trans}} = \sqrt{(\bar{x}_{t-1} - \bar{x}_t)^2 + (\bar{y}_{t-1} - \bar{y}_t)^2}$
 - 3: $\delta_{\text{rot}2} = \bar{\theta}_t - \bar{\theta}_{t-1} - \delta_{\text{rot}1}$
 - 4: $\hat{\delta}_{\text{rot}1} = \delta_{\text{rot}1} - \text{sample}(\alpha_1 \delta_{\text{rot}1} + \alpha_2 \hat{\delta}_{\text{trans}})$
 - 5: $\hat{\delta}_{\text{trans}} = \delta_{\text{trans}} - \text{sample}(\alpha_3 \delta_{\text{trans}} + \alpha_4 (\delta_{\text{rot}1} + \delta_{\text{rot}2}))$
 - 6: $\hat{\delta}_{\text{rot}2} = \delta_{\text{rot}2} - \text{sample}(\alpha_1 \delta_{\text{rot}2} + \alpha_2 \hat{\delta}_{\text{trans}})$
 - 7: $x_t = x_{t-1} + \hat{\delta}_{\text{trans}} \cos(\theta_{t-1} + \hat{\delta}_{\text{rot}1})$
 - 8: $y_t = y_{t-1} + \hat{\delta}_{\text{trans}} \sin(\theta_{t-1} + \hat{\delta}_{\text{rot}1})$
 - 9: $\theta_t = \theta_{t-1} + \hat{\delta}_{\text{rot}1} + \hat{\delta}_{\text{rot}2}$
 - 10: return $\mathbf{x}_t = (x_t, y_t, \theta_t)^T$
-

ここで、 $\text{sample}(b)$ は分散 b の分布（ガウス分布または三角分布）からノイズをドローする関数です。アルゴリズム 2 は、入力として \mathbf{x}_{t-1} と u_t を受け取り、出力として $p(\mathbf{x}_t | \mathbf{x}_{t-1}, u_t)$ に従うランダムな \mathbf{x}_t を返します。確率分布そのものを求めるよりも簡単に計算でき、ドローした姿勢をすぐに計算に使うことができるのです。プログラムとして実装する際はこちらのアルゴリズムが使用されます。

6.2.5 レーザービームの尤度場モデル

GMapping では観測モデルとしてレーザービームの尤度場モデル (likelihood_field_model) が使われています。尤度場モデルは距離センサの確率モデルの 1 つで、もっともらしい物理的な証明のないアドホックなモデルですが、良く機能するモデルとされています。

尤度場モデルのキーアイデアは、レーザースキャンの各ビームの終点をグローバル座標に投影して計算を行うことがあります。グローバル座標系における時刻 t のロボットの姿勢を $\mathbf{x}_t = (x_t, y_t, \theta_t)^T$, ロボット座標系でのセンサの位置を $(x_{k,\text{sens}}, y_{k,\text{sens}})^T$, センサから見たビームの角度を $\theta_{k,\text{sens}}$, 距離を z_t^k とすると、ビーム

の終点のグローバル座標は式 6.18 で表されます。

$$\begin{pmatrix} x_{z_t^k} \\ y_{z_t^k} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_t \\ y_t \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cos \theta_t & -\sin \theta_t \\ \sin \theta_t & \cos \theta_t \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{k,\text{sens}} \\ y_{k,\text{sens}} \end{pmatrix} + z_t^k \begin{pmatrix} \cos \theta_t + \theta_{k,\text{sens}} \\ \sin \theta_t + \theta_{k,\text{sens}} \end{pmatrix} \quad (6.18)$$

この座標変換の関係を図で表したのが図 6.3 です。図??ではグローバル座標系とオドメトリ座標系がかなり離れているように見えますが、オドメトリの精度によってはそれほど乖離することはありません。

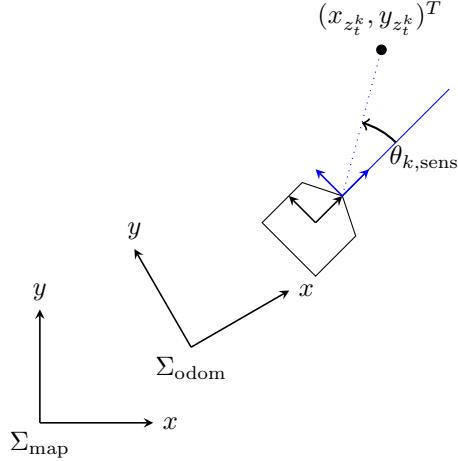


Fig.6.3 Beam Endpoint Transform

この座標変換は、センサが障害物を検知したときのみ意味を持ちます。センサが障害物を検知できなかったとき、一般的に、距離センサは最大測定範囲の数値を返します。センサが最大値を返したとき、式 6.18 の座標変換は、物理空間において意味を持たなくなります。尤度場モデルにおいて、センサが最大値を返したときは単純にその値を無視します。

尤度場モデルは以下に示す 3 つのノイズを考慮します。

1. 測定ノイズ p_{hit}

距離センサによって障害物までの距離を測定するときに混入する偶然誤差です。誤差の大きさはガウス分布によって近似することができます。

ビームの終点座標 $(x_{z_t^k}, y_{z_t^k})^T$ と、それに一番近い地図 m_{t-1} の障害物（占有格子地図では障害物セル）とのユークリッド距離を dist という変数で置くと、このノイズの確率モデルは式 6.19 で表されます。 $\epsilon_{\sigma_{\text{hit}}^2}(x)$ は平均 0、分散 σ_{hit}^2 のガウス分布です。

$$p_{\text{hit}}(z_t^k | \mathbf{x}_t, m_{t-1}) = \epsilon_{\sigma_{\text{hit}}^2}(\text{dist}^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\text{hit}}^2}} \exp\left(-\frac{\text{dist}^2}{2\sigma_{\text{hit}}^2}\right) \quad (6.19)$$

で表されます。

ガウス分布に dist を代入したときの値が、そのビームの観測尤度となります。障害物との距離が 0 のとき、すなわち観測誤差が 0 のとき、そのビームの尤度は最大になります。

2. 計測失敗 p_{max}

センサが最大測定範囲の値を返したとき、測定失敗とみなします。この誤差は極小幅の一様分布としてモデリングします。

3. ランダム測定 p_{rand}

一様に出現する原因不能なノイズをランダム測定として定義します。この分布は一様分布でモデル化します。

ビーム一本の観測モデルは、これらのモデルを線形結合したものになります。

$$p(z_t^k | \mathbf{x}_t, m_{t-1}) = z_{\text{hit}} \cdot p_{\text{hit}} + z_{\text{rand}} \cdot p_{\text{rand}} + z_{\text{max}} \cdot p_{\text{max}} \quad (6.20)$$

ただし、 z_{hit} 、 z_{rand} 、 z_{max} は各分布の重みづけ係数で、 $z_{\text{hit}} + z_{\text{rand}} + z_{\text{max}} = 1$ です。

GMapping では p_{max} 及び p_{rand} は扱わず、 p_{hit} のみを扱っているようなので、^{*2}ビームの観測モデルは式

^{*2} ソースコードを見てそう判断しました。実際そうなっているかどうかの証拠は見つかっていません。

6.21 のようになっていると思われます。

$$p(z_t^k | \mathbf{x}_t, m_{t-1}) = p_{\text{hit}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\text{hit}}^2}} \exp\left(-\frac{\text{dist}^2}{2\sigma_{\text{hit}}^2}\right) \quad (6.21)$$

式 6.21 は、レーザースキャンのビーム 1 本あたりの尤度を表しています。一度のレーザースキャンにおいて、各ビームの測定誤差がそれぞれ独立していると仮定すると、レーザースキャン z_t の尤度は式 6.22 のように計算できます。

$$p(z_t | \mathbf{x}_t, m_{t-1}) = \prod_{j=0}^{K-1} p(z_t^j | \mathbf{x}_t, m_{t-1}) \quad (6.22)$$

式 6.21 には指数の計算が含まれており、レーザースキャンのビーム本数が大きいと計算時間が大きくなります。また、6.22 では少数の掛け算を何度も繰り返すので、少数の桁落ちや精度低下が懸念されます。GMapping ではこの問題に対し、尤度関数の自然対数を取り、乗算を加算として計算しているようです。尤度関数の対数を取ると、式 6.21 は式 6.23 のように変換することができます。

$$\begin{aligned} \ln p(z_t^k | \mathbf{x}_t, m_{t-1}) &= \ln \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\text{hit}}^2}} \exp\left(-\frac{\text{dist}^2}{2\sigma_{\text{hit}}^2}\right) \right) \\ &= \ln \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\text{hit}}^2}} \right) - \frac{\text{dist}^2}{2\sigma_{\text{hit}}^2} \\ &= -\frac{1}{2} \ln (2\pi\sigma_{\text{hit}}^2) - \frac{\text{dist}^2}{2\sigma_{\text{hit}}^2} \end{aligned} \quad (6.23)$$

式 6.23 を使うことにより、式 6.22 は以下のように変換できます。

$$\begin{aligned} \ln p(z_t | \mathbf{x}_t, m_{t-1}) &= \sum_{j=0}^{K-1} \left(-\frac{1}{2} \ln (2\pi\sigma_{\text{hit}}^2) - \frac{(\text{dist}^j)^2}{2\sigma_{\text{hit}}^2} \right) \\ &= -\frac{K}{2} \ln (2\pi\sigma_{\text{hit}}^2) + \sum_{j=0}^{K-1} \left(-\frac{(\text{dist}^j)^2}{2\sigma_{\text{hit}}^2} \right) \end{aligned} \quad (6.24)$$

GMapping のソースコードでは、式 6.24 の 2 段目の 1 項目の定数項は省いて計算を行っているようです。^{*3} このとき、式 6.24 の 2 段目の 2 項目は負なので、尤度は常にマイナスの値を取ります。ただし、dist の値が小さいほど尤度が大きくなるのは変わらないため、尤度（重み）が一番大きいパーティクルがもっともらしい推定値として使用されます。^{*4}

6.3 データの表現形式

6.3.1 地図の表現形式

ROS における占有格子地図の形式は nav_msgs/OccupancyGrid^{*5}で定義されています。コード 6.1 にメッセージの定義を引用します。

Code 6.1 Message Definition of nav_msgs/OccupancyGrid

```
# This represents a 2-D grid map, in which each cell represents the probability of
# occupancy.
```

^{*3} https://github.com/ros-perception/openslam_gmapping/blob/6b9b23bf2a7ad7c04a33c6f52371c5621ffe613e/include/gmapping/scanmatcher.h#L243

^{*4} https://github.com/ros-perception/openslam_gmapping/blob/6b9b23bf2a7ad7c04a33c6f52371c5621ffe613e/gridfastslam/gridslamprocessor.cpp#L498-L507

^{*5} http://docs.ros.org/en/melodic/api/nav_msgs/html/msg/OccupancyGrid.html

```

Header header

#MetaData for the map
MapMetaData info

# The map data, in row-major order, starting with (0,0). Occupancy
# probabilities are in the range [0,100]. Unknown is -1.
int8[] data

```

nav_msgs/OccupancyGrid は地図のメタデータとセルのデータを持ちます。メタデータは nav_msgs/MapMetaData^{*6}で定義されています。コード 6.2 にメタデータの定義を引用します。

Code 6.2 Message Definition of nav_msgs/MapMetaData

```

# This hold basic information about the characteristics of the OccupancyGrid

# The time at which the map was loaded
time map_load_time
# The map resolution [m/cell]
float32 resolution
# Map width [cells]
uint32 width
# Map height [cells]
uint32 height
# The origin of the map [m, m, rad]. This is the real-world pose of the
# cell (0,0) in the map.
geometry_msgs/Pose origin

```

地図は 1 つのセルが -1 から 100 までの数値を取る 2 次元のマトリクスとして定義され、そのデータは行優先順 (Row-Major Order) で 1 次元配列として保存されます。

$$m_t = [m_{t,0}, m_{t,1}, \dots, m_{t,N}] \quad (6.25)$$

地図の幅及び高さはメタデータ内の width, height にそれぞれ記録されます。セルの原点 [0, 0] であり、地図の一番左下にあります。このセルの原点 [0, 0] が、グローバル座標系のどの位置、どの角度に対応するかを示すのが、メタデータ内の origin です。地図が更新されてサイズが大きくなったとき、この origin と width, height を更新することで、1 次元配列で 2 次元地図を表現しています。

セルの値が -1 のとき未知の領域、0 のとき自由領域、100 のとき障害物領域を示します。障害物がある確率に従って 0 から 100 までの値を取ります。

6.3.2 レーザースキャンの表現形式

ROS におけるレーザースキャンの形式は sensor_msgs/LaserScan^{*7}で定義されています。コード 6.3 にメッセージの定義を引用します。

Code 6.3 Message Definition of sensor_msgs/LaserScan

```

# Single scan from a planar laser range-finder
#
# If you have another ranging device with different behavior (e.g. a sonar
# array), please find or create a different message, since applications
# will make fairly laser-specific assumptions about this data

Header header          # timestamp in the header is the acquisition time of
# the first ray in the scan.
#
# in frame frame_id, angles are measured around
# the positive Z axis (counterclockwise, if Z is up)
# with zero angle being forward along the x axis

```

^{*6} http://docs.ros.org/en/melodic/api/nav_msgs/html/msg/MapMetaData.html

^{*7} http://docs.ros.org/en/api/sensor_msgs/html/msg/LaserScan.html

```

float32 angle_min          # start angle of the scan [rad]
float32 angle_max          # end angle of the scan [rad]
float32 angle_increment    # angular distance between measurements [rad]

float32 time_increment     # time between measurements [seconds] - if your scanner
                            # is moving, this will be used in interpolating position
                            # of 3d points
float32 scan_time          # time between scans [seconds]

float32 range_min          # minimum range value [m]
float32 range_max          # maximum range value [m]

float32[] ranges           # range data [m] (Note: values < range_min or > range_max should be
                            # discarded)
float32[] intensities      # intensity data [device-specific units]. If your
                            # device does not provide intensities, please leave
                            # the array empty.

```

レーザースキャンの各距離データは1次元配列に格納されています。

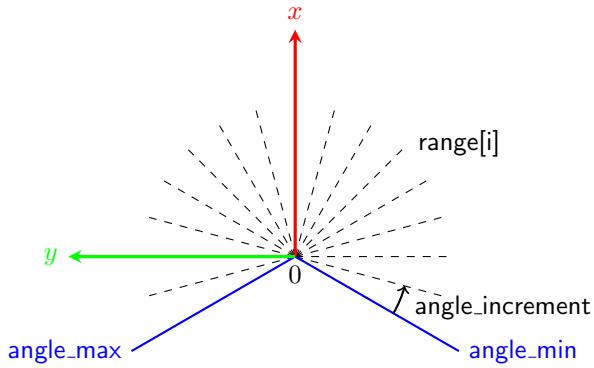


Fig.6.4 sensor_msgs/LaserScan

6.4 パラメータチューニング

本節では `slam_gmapping` のパラメータチューニングの手順の例を紹介します。あくまでチューニングの仕方の一例であり、これが絶対的に正しいという保証をするわけではないことに注意してください。

6.4.1 真っ先に変更すべきパラメータ

`base_frame`, `map_frame`, `odom_frame` はロボットの仕様に合わせて適切に変更してください。`base_frame` は ADAMMR2 では "base_footprint" に設定しましょう。`odom_frame` は、`diff_drive_controller` が提供する TF のフレーム名が "odom" なので、デフォルト値のままで大丈夫です。`map_frame` は特別な理由がない限りはデフォルト値 ("map") のままでいいでしょう。

`maxRange` および `maxUrange` は、使用するレーザースキャナの仕様に合わせて調整します。RPLiDAR A2M6 の公称最大測定値は 18m なので、`maxRange` は 18.0 に、`maxUrange` も 18.0 にします。ただし、遠くの距離を測定したときのノイズが酷いとき等は `maxUrange` の値に少し余裕をもって、16.0 とか 15.0 にした方がいいかもしれません。

地図の分解能を設定するパラメータである `delta` は、レーザースキャナの角度分解能が大きく影響します。例え地図の分解能を細かく設定しても、レーザースキャナの分解能が十分に無ければ詳細な地図を作成することはできません。RPLiDAR A2 の角度分解能は標準で 0.9 deg とされています。この程度の分解能ならば、デフォルト値である 0.05 m に設定しておくのが無難かと思われます。

6.4.2 地図の精度を上げたいとき

実験を通して作成した地図に歪みがあったり、地図作成に失敗するような場合は、レーザースキャナやオドメトリに関するパラメータを調整してみましょう。

`lsigma` は、レーザースキャンの尤度場モデルの形状を決定するパラメータです。レーザービームの測定誤差のガウス分布の分散を `lsigma` で設定します。`lsigma` という名前ですが、ソースコード中の計算式^{*8} が式 6.26 のようになっているため、数学的な意味としては標準偏差ではなく分散に、しかも 2 がかけられた値として扱う方が良いと思われます。ロボットが静止した状態で固定された壁等を計測しているときに、壁に当たっているレーザービームの測定値がばらつくときは、`lsigma` の値を大きくしてみましょう。レーザースキャンによるロボット位置の推定精度が上がるかもしれません。

$$l = \frac{-\text{dist}^2}{\text{l}\sigma} \quad (6.26)$$

また、ホイールオドメトリの精度に問題がある場合は、`srr`, `srt`, `str`, `stt` の 4 つのパラメータを調整します。これらのパラメータを 0 に設定すると、`slam_gmapping` はオドメトリの情報を 100% 信用するようになります。オドメトリ誤差が大きい場合は、これらのパラメータに大きい値を設定すると `slam_gmapping` がオドメトリ誤差を十分に考慮してくれるようになります。大体の場合、オドメトリの誤差は回転成分が大きくずれると考えられます。従って、回転成分の誤差のばらつきの係数である `str` および `stt` を大きめに設定すると良いでしょう。

`particles` パラメータを変更すると、使用するパーティクルの数を変更することができます。GMapping ではループと同じ込みを明示的に行っていません。しかし、スキャンマッチングによって再訪点検知を行い、再訪点に位置しているパーティクルの尤度が大きくなるように計算されています。そのため、パーティクルの数を増やすことでループ同じ込みが行われやすくなるようにすることができます。ロボットの探索範囲が大きく、ループが多く発生するような場所の地図作成を行うときは、パーティクルの数を増やすとよいかもしれません。ただし、パーティクルの数が増えると計算負荷もその分増えるので注意してください。

6.4.3 変更の影響が不明なパラメータ

`ogain` は尤度を平滑化するゲインであると `slam_gmapping` のソースコード中で説明されていますが、どこで使われているのかが不明です。

また、`sigma` はスキャンマッチングのスコアを評価するときに使われるパラメータで、ビーム一本当たりのスコアの計算にこれが使われています^{*9}。

^{*8} https://github.com/ros-perception/openslam_gmapping/blob/6b9b23bf2a7ad7c04a33c6f52371c5621ffe613e/include/gmapping/scanmatcher/scanmatcher.h#L243

^{*9} https://github.com/ros-perception/openslam_gmapping/blob/6b9b23bf2a7ad7c04a33c6f52371c5621ffe613e/include/gmapping/scanmatcher/scanmatcher.h#L186

第7章

Navigation Stackによる自律移動

この章では Navigation Stack による自律移動を行うためのパッケージ作成について説明します。Navigation Stack はその言葉の通り、移動ロボットの自律移動 (Navigation) のための各種パッケージ群の集まりです。移動ロボットの自律移動のためには、地図の読み込み、自己位置推定、目的地までのパス計画、パス追従、障害物検知等のアルゴリズムが必要です。Navigation Stack はこれらの機能を提供しているため、これを使うことでオリジナルの移動ロボットに自律移動の機能を追加することができます。

7.1 Navigation Stack の概要

Navigation Stack の ROS Wiki のページ^{*1}の概要文を引用してみましょう。

A 2D navigation stack that takes in information from odometry, sensor streams, and a goal pose and outputs safe velocity commands that are sent to a mobile base.

Navigation Stack は移動ロボットの 2D ナビゲーションのためのメタパッケージです。入力としてホイールオドメトリ、センサ (LiDAR, 点群等) とゴール姿勢を受け取り、出力として安全な速度指定をロボットに与えます。

Navigation Stack のパッケージの関係図を ROS Wiki から図 7.1 に引用します。

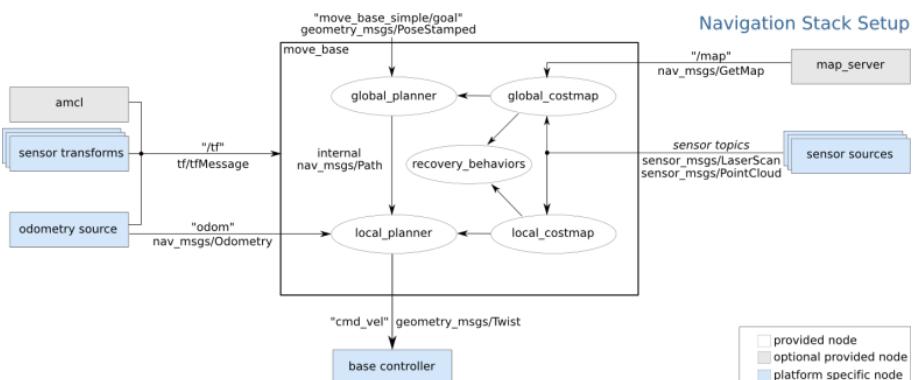


Fig.7.1 Overview of Navigation Stack System

Navigation Stack はいくつかのパッケージから構成され、それぞれのパッケージが特定の機能を実現しています。主なパッケージを以下に列挙します。

- **move_base**
核となるパッケージです。パス計画、コストマップ、速度指令出力、復帰動作等を司ります。各機能を実現するアルゴリズムはプラグインの形で切り替えることができます。
- **amcl**
センサとオドメトリからロボットの自己位置を推定します。
- **map_server**
SLAM によって作成・保存された地図データを各パッケージにトピックとして提供します。

*1 <http://wiki.ros.org/navigation>

独立したパッケージとして提供されているのは上の3つであり、ローカル・グローバルパスの計画を行うパッケージや障害物のコストマップを計算するパッケージは、move_base パッケージのプラグインとして提供されています。プラグインとしての主なパッケージは以下に挙げるものがあります。

- base_local_planner^{*2}：ローカルプランナの1つです。
- dwa_local_planner^{*3}：ローカルプランナの1つです。
- navfn^{*4}：グローバルプランナの1つです。
- global_planner^{*5}：グローバルプランナの1つです。
- costmap_2d^{*6}：コストマップを計算するパッケージです。

move_base のプラグインはパラメータを指定することで簡単に切り替えることが可能になっています。

Navigation Stack を利用して自律移動機能を実装するには、オリジナルのロボットに合わせて各パッケージのパラメータを設定し、パッケージを起動してやる必要があります。以降の節で、Navigation Stack の起動方法を説明していきます。

7.2 Navigation Stack で要求されるもの

Navigation Stack の実行には以下の要素が必要となります。

- レーザースキャンのデータ (sensor_msgs/LaserScan 型のトピックメッセージ)
- オドメトリのデータ (/tf トピックメッセージ)
- オドメトリトピック (geometry_msgs/Odometry の型トピックメッセージ)
- (Optional)3D 点群データ (sensor_msgs/PointCloud2 型のトピックメッセージ)
- SLAM で作成した地図 (map.pgm ファイルと map.yaml ファイル)

SLAM のときと同じく、レーザースキャンのデータとオドメトリデータが必要になります。Navigation Stack ではオドメトリデータとして、TF だけでなくトピックとしてのオドメトリも必要になります。これは、ロボットの動作計画の際にロボットの現在の移動速度が必要になるからです。また、SLAM で作成した地図のデータも必要となります。Navigation を実行したい環境の地図を事前に作っておく必要があるということです。

必須ではありませんが、3D 点群データも使用することができます。点群データは障害物検知に使用することができます。レーザーセンサの高さに無い障害物が存在する可能性がある環境では、点群データを使用して障害物を検知することが有効になります。

7.3 パラメータファイルの記述

7.3.1 ディレクトリ構造

ここからはパラメータファイルを記述していきます。Navigation Stack はいくつものノードが集まって自律走行を実現しているため、パラメータの数はこれまでと比べて膨大になります。従って、1つのファイルにパラメータを全て列挙するのではなく、ある程度ファイルやディレクトリを分割して記述することとします。

具体的には、adamlr2_navigation パッケージの config/ディレクトリを 7.1 のようにし、1つのノードに対して1つのファイルを割り当てるようになります。

Code 7.1 Directory Structure of config/

```
config/
  |- amcl/
  |   |- amcl.yaml
  |- costmap/
  |   |- global_costmap.yaml
  |   |- local_costmap.yaml
  |- planner/
  |   |- global/
```

^{*2} http://wiki.ros.org/base_local_planner?distro=melodic

^{*3} http://wiki.ros.org/dwa_local_planner?distro=melodic

^{*4} <http://wiki.ros.org/navfn?distro=melodic>

^{*5} http://wiki.ros.org/global_planner?distro=melodic

^{*6} http://wiki.ros.org/costmap_2d

```

|   |   \_ global_planner.yml
|   \_ local/
|       \_ trajectory_planner.yml
\_ move_base.yml

```

7.3.2 amcl のためのパラメータの記述

まずは自己位置推定パッケージ amcl のためのパラメータを記述していきます。config/ディレクトリ以下に amcl という名前のディレクトリを作り、その中に amcl.yaml という名前のファイルを作成します。そして、コード 7.2 のように記述します。

Code 7.2 amcl.yaml

```

min_particles: 30    # default = 100
max_particles: 1000 # default = 5000

kld_err: 0.01 # default = 0.01
kld_z: 0.99  # default = 0.99

update_min_d: 0.05 # default = 0.2
update_min_a: 0.05 # default = PI / 6.0 ~= 0.5

resample_interval: 1      # default = 2
transform_tolerance: 0.3  # default = 0.1
recovery_alpha_slow: 0.0  # default = 0.0
recovery_alpha_fast: 0.0 # default = 0.0

gui_publish_rate: 10.0   # default = -1.0[Hz](disable)

save_pose_rate: 0.5      # default = 0.5
use_map_topic: true      # default = false
first_map_only: false    # default = false

laser_min_range: -1.0          # default = -1.0
laser_max_range: -1.0          # default = -1.0
laser_max_beams: 60            # default = 30
laser_z_hit: 0.95             # default = 0.95
#laser_z_short: 0.05          # default = 0.1
#laser_z_max: 0.05            # default = 0.05
laser_z_rand: 0.05             # default = 0.05
laser_sigma_hit: 0.02          # default = 0.2
#laser_lambda_short: 0.1        # default = 0.1
laser_likelihood_max_dist: 2.0  # default = 2.0
laser_model_type: likelihood_field # default = likelihood_field

odom_model_type: diff-corrected # default = diff
odom_alpha1: 0.2                # default = 0.2
odom_alpha2: 0.2                # default = 0.2
odom_alpha3: 0.2                # default = 0.2
odom_alpha4: 0.2                # default = 0.2

odom_frame_id: odom           # default = odom
base_frame_id: base_footprint # default = base_link
global_frame_id: map           # default = map
tf_broadcast: true              # default = true

```

ほとんどの項目はデフォルト値のままにしています。SLAM のときと同じく、base_frame_id はロボットの URDF 構造に合わせて書き換えましょう。

7.3.3 costmap_2d のためのパラメータの記述

次にコストマップのパラメータを設定していきます。コストマップとはロボットの自律走行の際に用いられる、障害物の存在確率を示す占有格子地図の事です。単に障害物の情報を表現するだけでなく、ロボットの輪

郭形状を考慮してロボットが移動可能な領域を示す役割も果たします。コストマップは Navigation Stack の 3 つの主要機能（自己位置推定、経路計画、コストマップ）の内の 1 つであり、この設定を適切に行わなければ、うまくナビゲーションを行うことができません。

Navigation Stackにおいては、`costmap_2d` というパッケージがコストマップを提供します。パッケージは `move_base` からプラグインとして利用されます。`move_base` はグローバルとローカルの 2 つのコストマップを持ち、各々のコストマップのパラメータはそれぞれ以下のような名前空間で区切られて管理されます。

- グローバルコストマップ：`move_base/global_costmap/**`
- ローカルコストマップ：`move_base/local_costmap/**`

グローバルとローカルのコストマップが別々のインスタンスとして `move_base` に使用されますが、元となっているクラスは同じものです。パラメータの設定によってローカルコストマップのように振る舞ったり、グローバルコストマップのように振る舞ったりするだけです。[10]

`costmap_2d` のパラメータ設定の仕様は Hydro から大きく変わっており、Hydro より以前のパラメータ設定の構文は Pre-Hydro 形式と呼ばれています。多くのネット記事や日本語の ROS 書籍では Pre-Hydro 形式でコストマップの設定を行っているのですが、やはり最新の形式で設定するのが良いでしょう。

まずグローバルコストマップとローカルコストマップのそれぞれのパラメータを記述するファイルを作ります。コード 7.1 を参考に、`global_costmap.yaml` と `local_costmap.yaml` という名前のファイルを作成します。そして、コード 7.3、コード 7.4 のようにそれぞれ記述します。

Code 7.3 `global_costmap.yaml`

```
global_costmap:
  # Plugins
  plugins:
    - {name: static_layer, type: "costmap_2d::StaticLayer"}
    - {name: obstacle_layer, type: "costmap_2d::ObstacleLayer"}
    - {name: inflation_layer, type: "costmap_2d::InflationLayer"}

  # Coordinate frame and tf parameters
  global_frame: map
  robot_base_frame: base_footprint
  transform_tolerance: 0.2 # default: 0.2
  footprint: [[0.35, 0.225], [0.35, -0.225], [-0.37, -0.225], [-0.37, 0.225]]

  # Rate parameters
  update_frequency: 2.0      # default: 5.0
  publish_frequency: 2.0     # default: 0.0(disable)

  # Map management parameters
  rolling_window: false       # default: false
  always_send_full_costmap: false # default:false

  # parameters of each plugins
  static_layer:
    unknown_cost_value: -1      # default: -1
    lethal_cost_threshold: 100   # default: 100
    map_topic: map              # default: map
    first_map_only: false       # default: false
    subscribe_to_updates: false # default: false
    track_unknown_space: true   # default: true
    use_maximum: false          # default: false
    trinary_costmap: true       # default: true

  obstacle_layer:
    observation_sources: laser_scan
    laser_scan:
      topic: /adamlr2/scan
      sensor_frame: lidar_link
      observation_persistence: 0.0 # default: 0.0
      expected_update_rate: 0.2    # default: 0.0
      data_type: LaserScan
      clearing: true             # default: false
      marking: true              # default: true
```

```

    obstacle_range: 2.5    # default: 2.5
    raytrace_range: 3.0    # default: 3.0
    inf_is_valid: true    # default: false

inflation_layer:
    inflation_radius: 0.5      # default: 0.55
    cost_scaling_factor: 3.66   # default: 10.0

```

Code 7.4 local_costmap.yaml

```

local_costmap:
    # Plugins
    plugins:
        - {name: obstacle_layer, type: "costmap_2d::ObstacleLayer"}
        - {name: inflation_layer, type: "costmap_2d::InflationLayer"}

    # Coordinate frame and tf parameters
    global_frame: odom
    robot_base_frame: base_footprint
    transform_tolerance: 0.2 # default: 0.2
    footprint: [[0.35, 0.225], [0.35, -0.225], [-0.37, -0.225], [-0.37, 0.225]]

    # Rate parameters
    update_frequency: 5.0    # default: 5.0
    publish_frequency: 5.0   # default: 0.0

    # Map management parameters
    rolling_window: true
    always_send_full_costmap: false
    width: 8.0               # default: 10.0
    height: 8.0               # default: 10.0
    resolution: 0.05          # default: 0.05

    # parameters of each plugins
    obstacle_layer:
        observation_sources: laser_scan pointcloud_sensor
        laser_scan:
            topic: /adaml2/scan
            sensor_frame: lidar_link
            observation_persistence: 0.0 # default: 0.0
            expected_update_rate: 0.2    # default: 0.0
            data_type: LaserScan
            clearing: true             # default: false
            marking: true              # default: true
            obstacle_range: 2.5         # default: 2.5
            raytrace_range: 3.0         # default: 3.0
            inf_is_valid: false        # default: false
        pointcloud_sensor:
            topic: /adaml2/camera/depth/color/points
            sensor_frame: camera_depth_frame
            observation_persistence: 0.0 # default: 0.0
            expected_update_rate: 0.1    # default: 0.0
            data_type: PointCloud2
            clearing: true             # default: false
            marking: true              # default: true
            max_obstacle_height: 1.0   # default: 2.0
            min_obstacle_height: 0.1   # default: 0.0
            obstacle_range: 2.5         # default: 2.5
            raytrace_range: 3.0         # default: 3.0
            inf_is_valid: false        # default: false

    inflation_layer:
        inflation_radius: 0.4      # default: 0.55
        cost_scaling_factor: 3.66 # default: 10.0

```

コストマップは各種レイヤーのプラグインを積み重ねていくことで設定します。使用されるレイヤーは主に以下の4つです。

1. costmap_2d::StaticLayer : SLAMで作成した静的な地図を読み込むレイヤーです。
2. costmap_2d::ObstacleLayer : センサで観測した障害物の情報を記録するレイヤーです。
3. costmap_2d::InflationLayer : マップ上の障害物を任意の半径に膨張させるレイヤーです。
4. range_sensor_layer::RangeSensorLayer : 超音波センサ等のデータを記録するレイヤーです。

ここでは上3つを使用します。グローバル・ローカルで共通なのは costmap_2d::ObstacleLayer と costmap_2d::InflationLayer です。costmap_2d::StaticLayer はグローバルコストマップでのみ使用し、ローカルコストマップでは使用しません。理由は、ローカルコストマップは主にロボットの周辺の動的な障害物の情報を得るために使用するものなので、静的な情報は必要としないからです。costmap_2d::ObstacleLayer は sensor_msgs/LaserScan 型トピックと sensor_msgs/PointCloud2 型トピックを受け取ることができ、それらの情報をもとに障害物の情報を表示します。記事によってはグローバルコストマップでこのレイヤーを使用しない設定にしているものがあります。しかしその場合、人等の障害物が現れた際にグローバルパスがそれを考慮できなくなるため、ここではグローバルコストマップにも障害物レイヤーを適用しています。costmap_2d::InflationLayer はコストマップ上の障害物を表すセルを膨張させ、障害物セルの周りのセルも障害物として扱えるようにします。これにより、ロボットを障害物に近づけさせない処理が実現できます。ただし、この膨張範囲を大きく設定しすぎるとコストマップ全てが障害物セルで埋め尽くされてしまうため、環境に合わせて適切に設定する必要があります。

各プラグインを使用するには、global_costmap/plugins パラメータに使用するプラグインを列挙しなければなりません。その後、各プラグインに対する設定を記述します。

7.3.4 global_planner のためのパラメータの記述

次にグローバルパスプランナのパラメータ設定をします。グローバルパスプランナのパッケージは標準で navfn と global_planner の2つがありますが、後から実装された global_planner を使用するのが良いでしょう。これらのパッケージもコストマップと同様に move_base からプラグインとして使用されます。どのパスプランナを使用するかは /move_base/base_global_planner パラメータで指定します。

コード 7.1 を参考に、global_planner.yml という名前のファイルを作成します。そして、コード 7.5 のように記述します。

Code 7.5 global_planner.yml

```
base_global_planner: global_planner/GlobalPlanner
  GlobalPlanner:
    allow_unknown: true      # default: true
    default_tolerance: 0.3   # default: 0.0
    visualize_potential: false # default: false
    use_dijkstra: true       # default: true
    use_quadratic: true      # default: true
    use_grid_path: false     # default: false
    old_navfn_behavior: false # default: false
    lethal_cost: 253          # default: 253
    neutral_cost: 50          # default: 50
    cost_factor: 0.8          # default: 0.8
    publish_potential: false # default: true
    orientation_mode: 0       # default: 0
    orientation_window_size: 1 # default: 1
```

global_planner のパラメータはデフォルト値でも十分動作します。ユーザの環境によって調整が必要となるのは lethal_cost, neutral_cost, cost_factor の3つです。詳細なチューニングの仕方については後の節で説明します。

7.3.5 base_local_planner のためのパラメータの記述

次にローカルパスプランナのパラメータを設定します。ローカルパスプランナも move_base からプラグインとして使用され、パラメータの設定によってどのプランナを使用するかを指定できます。Navigation Stackに標準で実装されているローカルパスプランナは以下の2つです。

1. base_local_planner
2. dwa_local_planner

どちらも Dynamic Window Approach[11] を使用していますが、dwa_local_planner は base_local_planner の再実装版で、性能はこちらの方が上と思われます。しかし dwa_local_planner はその場旋回を行うことがうまくできず、ロボットの向きの反対側に目的地を設定したときの挙動がちょっと怪しかったので、base_local_planner の方を使用することにしました。

これまでと同様に、コード 7.1 を参考にして trajectory_planner.yml というファイルを作ります。そして、コード 7.6 のように記述します。

Code 7.6 trajectory_planner.yml

```
base_local_planner: base_local_planner/TrajectoryPlannerROS
TrajectoryPlannerROS:
  # Robot Configuration Parameters
  acc_lim_x: 0.75      # default: 2.5
  acc_lim_theta: 3.14    # default: 3.2

  max_vel_x: 0.3          # default: 0.5
  min_vel_x: 0.1          # default: 0.1
  max_rotational_vel: 1.57   # default: 1.0
  min_in_place_vel_theta: 0.2  # default: 0.4
  escape_vel: -0.2         # default: -0.1

  holonomic_robot: false  # default: true

  # Goal Tolerance Parameters
  yaw_goal_tolerance: 0.1    # default: 0.05
  xy_goal_tolerance: 0.25     # default: 0.10
  latch_xy_goal_tolerance: true # default: false

  # Forward Simulation Parameters
  sim_time: 4.0            # default: 1.0
  sim_granularity: 0.050     # default: 0.025
  angular_sim_granularity: 0.1  # default: 0.025
  vx_samples: 20             # default: 3
  vtheta_samples: 40          # default: 20
  #controller_frequency: 10.0    # default: 20.0

  # Trajectory Scoring Parameters
  meter_scoring: true        # default: false
  path_distance_bias: 2.0      # default: 0.6
  goal_distance_bias: 0.8       # default: 0.8
  occdist_scale: 0.02         # default: 0.01
  heading_lookahead: 0.325     # default: 0.325
  heading_scoring: true        # default: false
  heading_scoring_timestep: 0.8 # default: 0.8
  dwa: true                   # default: true
  publish_cost_grid_pc: true    # default: false
  global_frame_id: odom        # default: odom

  # Oscillation Prevention Parameters
  oscillation_reset_dist: 0.1  # default: 0.05

  # Global Plan Parameters
  prune_plan: true  # default: true
```

こちらもとりあえずデフォルト値を多めに設定しています。尚、コード 7.6 では controller_frequency というパラメータをコメントアウトしていますが、これは move_base 本体で設定することが推奨されるパラメータだからです。move_base にも controller_frequency というパラメータが存在しており、ローカルプランナ側でこのパラメータが設定されていなかった場合、move_base 側の値が適用されるようになっています。制御周期は move_base 側で設定できた方が好ましいので、このように設定しています。

7.3.6 move_base のパラメータ設定

最後に move_base 本体のパラメータを設定します。move_base.yml という名前のファイルを作成し、コード 7.7 のように記述します。

Code 7.7 move_base.yml

```
controller_frequency: 5.0 # default: 20.0
controller_patience: 15.0 # default: 15.0

planner_frequency: 1.0 # default: 0.0
planner_patience: 5.0 # default: 5.0

conservative_reset_dist: 3.0 # default: 3.0
recovery_behavior_enabled: true # default: true
clearing_rotation_allowed: true # default: true
shutdown_costmaps: false # default: false

oscillation_timeout: 5.0 # default: 0.0
oscillation_distance: 0.2 # default: 0.5

max_planning_retries: 10 # default: -1
```

move_base.yml では自律走行エージェントのマクロ的な挙動に関する数値を設定します。各パラメータの詳細な意味については後の章で説明します。

7.4 launch ファイルの記述

Navigation Stack のノードを実行する launch ファイルを記述します。1つの launch ファイルで move_base, amcl, map_server, rviz を一斉に起動するようにします。

adamr2_navigation パッケージの launch/ディレクトリに adamr2_navigation.launch という名前のファイルを作成し、コード 7.8 のように記述します。

Code 7.8 adamr2_navigation.launch

```
<launch>
<!--
  Path to the map file(.yaml) for map_server node.
  When execute this launch file, it's useful to move the directory
  where the map.yaml file is located and enter as follows:
    map_file:='pwd'/map.yaml
-->
<arg name="map_file" default="" />

<!-- Arguments for each nodes -->
<arg name="frame_id" default="map"/>

<arg name="amcl_param_file" default="$(find adamr2_navigation)/config/amcl/amcl.yaml"/>

<arg name="global_costmap_param_file" default="$(find adamr2_navigation)/config/costmap/
  global_costmap.yaml"/>
<arg name="local_costmap_param_file" default="$(find adamr2_navigation)/config/costmap/
  local_costmap.yaml"/>
<arg name="global_planner_param_file" default="$(find adamr2_navigation)/config/planner/
  global_global_planner.yaml"/>
<arg name="local_planner_param_file" default="$(find adamr2_navigation)/config/planner/
  local_trajectory_planner.yaml"/>
<arg name="move_base_param_file" default="$(find adamr2_navigation)/config/move_base.
  yaml"/>

<group unless="$(eval map_file== '')">
  <!-- MAP SERVER -->
  <node name="map_server" pkg="map_server" type="map_server" args="$(arg map_file)">
```

```

<param name="frame_id" value="$(arg frame_id)"/>
</node>

<!-- AMCL -->
<node pkg="amcl" type="amcl" name="amcl" output="screen">
  <rosparam file="$(arg amcl_param_file)" command="load" />
  <remap from="scan" to="/adamlr2/scan"/>
</node>

<!-- MOVE BASE -->
<node pkg="move_base" type="move_base" respawn="false" name="move_base" output="screen">
  <rosparam file="$(arg global_costmap_param_file)" command="load"/>
  <rosparam file="$(arg local_costmap_param_file)" command="load"/>
  <rosparam file="$(arg global_planner_param_file)" command="load"/>
  <rosparam file="$(arg local_planner_param_file)" command="load"/>
  <rosparam file="$(arg move_base_param_file)" command="load"/>

  <remap from="cmd_vel" to="/adamlr2/diff_drive_controller/cmd_vel"/>
  <remap from="odom" to="/adamlr2/diff_drive_controller/odom"/>
</node>

<!-- Rviz -->
<node name="rviz" pkg="rviz" type="rviz"/>
</group>
</launch>

```

この launch ファイルはコマンド実行時に 1 つの引数 map_file を必要とします。Navigation Stack の実行には事前地図が必須になります。map_server ノードに地図を渡すために、SLAM で作成した地図のフルパスを引数として渡さなければなりません。とはいっても、いちいちフルパスを入力するのは面倒なので、ソースコードに記載しているように、地図のファイル (map.yaml のことです。同じディレクトリに map.pgm も存在する必要があります) があるディレクトリをターミナルで開き、pwd コマンドを使ってパスを入力するやり方が便利です。引数 map_file が入力されていない場合、各ノードは起動しません。この挙動は 21 行目の group タグによるものです。

7.5 Navigation の実行

いよいよ Navigation を実行します。Navigation を実行する前に、ロボットを起動しておきます。起動する必要があるのは、ロボットのコントローラ、RPLIDAR、Realsense の 3 つです。以下のコードを各々のターミナルで実行します。

```
roslaunch adamlr2_control adamlr2_control.launch
```

```
roslaunch adamlr2_bringup rplidar_a2.launch
```

```
roslaunch adamlr2_bringup realsense.launch
```

ロボットが走行可能な状態になり、センサのデータが正しく配信されるようになれば準備は完了です。コード 7.9 を実行して、Navigation Stack の各ノードを起動します。コード 7.9 を実行する前に、目的の map.yaml があるディレクトリに移動しておくことを忘れないようにしてください。

Code 7.9 Execute Navigation

```
roslaunch adamlr2_navigation adamlr2_navigation.launch map_file:='pwd'/'map.yaml'
```

Navigation Stack の各種ノードを起動した後は、rviz 上で目的地を指定してやれば、自律走行が開始されます。ただし、パラメータチューニングを行わないとロボットが正しく動かない場合があります（むしろデフォルトのパラメータで動くロボットの方が少ないかもしれません）。具体的なパラメータチューニングについては 8 章で述べます。

第8章

Navigation Stack のパラメータチューニング

参考文献

- [1] MathWorks. URDF 入門. <https://jp.mathworks.com/help/physmod/sm/ug/urdf-model-import.html>.
- [2] Open Source Robotics Foundation. urdf/XML/model - ROS wiki. <http://wiki.ros.org/urdf/XML/model>.
- [3] Open Source Robotics Foundation. urdf/XML/robot - ROS wiki. <http://wiki.ros.org/urdf/XML/robot>.
- [4] Open Source Robotics Foundation. urdf/XML/link - ROS wiki. <http://wiki.ros.org/urdf/XML/link>.
- [5] Open Source Robotics Foundation. urdf/XML/joint - ROS wiki. <http://wiki.ros.org/urdf/XML/joint>.
- [6] 西田健, 森田賢, 岡田浩之, 原祥堯, 山崎公俊, 田向権, 垣内洋平, 大川一也, 斎藤功, 田中良道, 有田裕太, 石田裕太郎. 実用ロボット開発のための ROS プログラミング. 森北出版, 2018.
- [7] G. Grisetti, C. Stachniss, and W. Burgard. Improved techniques for grid mapping with rao-blackwellized particle filters. *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 23, No. 1, pp. 34–46, 2007.
- [8] Sebastian Thrun, Wolfram Burgard, and Dieter Fox. *Probabilistic robotics*. MIT Press, Cambridge, Mass., 2005.
- [9] 上田隆一. 詳解確率ロボティクス. 講談社, 2019.
- [10] srs. ROS 講座 115 costmap の設定を書く. <https://qiita.com/srs/items/fba2c83b96d17b2680e6>, 2020.
- [11] Brian P. Gerkey. Planning and control in unstructured terrain. 2008.