Choreonoid講習会
～ ロボットモデルの制御 ～

中村啓太（会津大学）
穴澤剛士（株式会社FSK）

講習会内容

- ❖ Choreonoidとは?
- ❖ Choreonoidの基本操作
- ❖ プロジェクトの作成
- ❖ ボディモデルとは?
- ❖ コントローラとは?
- ❖ TurtleBot2の自律走行
- ❖ カメラ画像を用いたTurtleBot2の自律走行

コントローラとは?

コントローラ

- ロボットの制御を行うためのプログラム
- Choreonoidで使用可能なコントローラ
  - **シンプルコントローラ**
    - Choreonoid独自のコントローラ実装形式
  - **BodyIoRTC**
    - ロボット用ミドルウェア『OpenRTM』との連携ができるコントローラ

コントローラの実装

❖ コントローラでは基本的に以下のことができる

1. ロボットの状態を入力
2. 制御計算
3. ロボットへ指令を出力

コントローラの作成場所

❖ シンプルコントローラは，基本的に以下の場所に作成

~/choreonoid/sample/SimpleController/

❖ ただし，今回は分かりやすいように以下の場所に作成

~/choreonoid/ext

コントローラの作成場所

- ターミナルで以下のコマンドを実行
  - ディレクトリの作成

```
$ cd ~/choreonoid/ext
$ mkdir TurtleBot2
$ cd TurtleBot2
```

  - コントローラの作成

```
$ gedit TurtleBot2JoystickController.cpp &
```

コントローラの実装例

- シンプルコントローラ
  - SimpleControllerクラスを継承し，実装
    - cnoid/SimpleControllerをインクルード
- ゲームパッドを使用
  - cnoid/Joystickをインクルード
- 『wheelNames』配列にホイール名を格納
  - 『Kobuki.body』内の『name』で指定したホイール名を指定

コントローラの実装例

```
#include <cnoid/SimpleController>
#include <cnoid/Joystick>
#include <fmt/format.h>

using namespace std;
using namespace cnoid;
using fmt::format;

class TurtleBot2JoystickController : public SimpleController
{
    static const int WHEEL_NUM = 2;
    const string wheelNames[WHEEL_NUM] = { "wheel_left", "wheel_right" };
    Link::ActuationMode actuationMode;
    Link* wheels[2];
    Joystick joystick;
    Body* body;
```

コントローラの実装例

- initialize関数でコントローラの初期化
  - 引数のioを通して，コントローラとロボット間の入出力に必要な情報を取得
    - 『body = io->body()』
      - bodyモデルの情報を取得
    - 『actuationMode = Link::JOINT_TORQUE』
      - 関節トルクを指令値に設定
    - 『option = io->optionString()』
      - コントローラオプションを取得

コントローラの実装例

```
class TurtleBot2JoystickController : public SimpleController
{
// 変数の宣言は省略
public:
    virtual bool initialize(SimpleControllerIO* io) override
    {
        ostream& os = io->os();
        // Body情報取得.
        body = io->body();

        // リンクのアクチュエーションモード設定
        actuationMode = Link::JOINT_TORQUE;
        // コントローラオプションの取得
        string option = io->optionString();
```

コントローラの実装例

- コントローラオプションの設定値で,
  アクチュエーションモードを変更
  - 『velocity』もしくは『position』：Link::JOINT_VELOCITY
  - 『torque』：Link::JOINT_TORQUE
  - それ以外：Warningを出力

コントローラの実装例

```
        if(!option.empty()){
            // コントローラオプションが空でない場合
            if(option == "velocity" || option == "position"){
                // velocityかpositionが指定されている場合
                actuationMode = Link::JOINT_VELOCITY;
            } else if(option == "torque"){
                // torqueが指定されている場合
                actuationMode = Link::JOINT_TORQUE;
            } else {
                // 上記以外の場合
                os << format("Warning: Unknown option ¥"{}¥".", option) << endl;
            }
        }
```

アクチュエーションモード

❖ 関節駆動時にどの状態変数を指令値として使うか決める

シンボル	内容	状態変数
NO_ACTUATION	駆動なし（関節はフリーの状態）	–
JOINT_EFFORT	関節に与える力やトルクが指令値	Link::u()
JOINT_FORCE	JOINT_EFFORTと同様（直動関節用）	Link::u()
JOINT_TORQUE	JOINT_EFFORTと同様（回転関節用）	Link::u()
JOINT_DISPLACEMENT	関節変位（関節角度，関節並進位置）が指令値	Link::q_target()
JOINT_ANGLE	JOINT_DISPLACEMENTと同様（回転関節用）	Link::q_target()
JOINT_VELOCITY	関節の角速度やオフセット速度が指令値	Link::dq_target()
JOINT_SURFACE_VELOCITY	リンク表面と環境との接触における相対速度が指令値（簡易クローラやベルトコンベアで使用）	Link::dq_target()

コントローラの実装例

- 『wheels[i] = body->link(リンク)』
  - 指令値を与えるリンクの取得
- 『wheels[i]->setActuationMode(actuationMode)』
  - リンクのアクチュエーションモードを設定
- 『io->enableOutput(リンク)』
  - リンクに対するコントローラからの出力を有効化
  - 有効化していないとリンクが動かない
  - 入力，入出力の有効化の場合，
    - io->enableInput(リンク)
    - io->enableIO(リンク)

コントローラの実装例

```
        for(int i = 0; i < WHEEL_NUM; ++i){
            // ホイールリンクを取得
            wheels[i] = body->link(wheelNames[i]);
            if(!wheels[i]){
                // リンクが取得できない場合
                os << format("{0} of {1} is not found.", wheelNames[i], body->name()) << endl;
                return false;
            }

            // ホイールのアクチュエーションモードを設定
            wheels[i]->setActuationMode(actuationMode);
            // ホイールに対する出力を有効化
            io->enableOutput(wheels[i]);
        }
        return true;
    }
```

コントローラの実装例

- 『joystick.readCurrentState()』
  - ジョイスティックの状態を取得
- 左ジョイスティックの変化量を設定
  - pos[0]：横方向
  - pos[1]：縦方向
- 『if(fabs(pos[i]) < 0.2)』
  - ジョイスティックを操作していない場合でも,
    若干の傾きがあり動くことがあるため，動かないように制御

コントローラの実装例

```
    virtual bool control() override
    {
        // ジョイスティックの状態取得
        joystick.readCurrentState();
        double pos[2]; // ジョイスティックの変化量
        for(int i = 0; i < 2; ++i){
            // ジョイスティックの値取得
            pos[i] = joystick.getPosition(
                    i == 0 ? Joystick::L_STICK_H_AXIS : Joystick::L_STICK_V_AXIS);

            if(fabs(pos[i]) < 0.2){
                // 変化量が0.2未満の場合
                pos[i] = 0.0;
            }
        }
```

コントローラの実装例

- 『if(actuationMode == Link::JOINT_VELOCITY)』
  - アクチュエーションモードが,
    『Link::JOINT_VELOCITY』かどうかを判定
    - 『リンク->dq_target()』に指令値を与える
- 『static const double K = 20.0』
  - ジョイスティックの感度
- 『CNOID_IMPLEMENT_SIMPLE_CONTROLLER_FACTORY(クラス名)』
  - シンプルコントローラとして利用可能

コントローラの実装例

```
        if(actuationMode == Link::JOINT_VELOCITY){
            // アクチュエーションモードがvelocitの場合
            static const double K = 20.0;
            wheels[0]->dq_target() = K * (-pos[1] + pos[0]);
            wheels[1]->dq_target() = K * (-pos[1] - pos[0]);
        }

        return true;
    }
};

CNOID_IMPLEMENT_SIMPLE_CONTROLLER_FACTORY(TurtleBot2JoystickController)
```

シンプルコントローラのビルド

❖ 作成したソースファイルと同じディレクトリの
『CMakeLists.txt』に以下を追加

❖ 1行で，『add_cnoid_simple_controller
(コントローラ名 ファイル名)』

```
add_cnoid_simple_controller
(TurtleBot2JoystickController
TurtleBot2JoystickController.cpp)
```

❖ 『CMakeLists.txt』がない場合は，新規作成を行う

```
$ gedit CMakeLists.txt &
```

シンプルコントローラのビルド

❖ 修正ができたら，Choreonoidのビルドを行う

```
$ cd ~/choreonoid/build
$ cmake ..
$ make
```

❖ 『~/choreonoid/build/lib/choreonoid-1.8/simplecontroller』ディレクトリに作成した『TurtleBot2JoystickController.so』ファイルがあるか確認

```
$ cd ~/choreonoid/build/lib/choreonoid-1.8/
simplecontroller

$ ls TurtleBot2JoystickController.so
```

TurtleBot2のシミュレーション

- PS4コントローラをUSBでPCに接続

- TurtleBot2プロジェクトを開く

```
$ cd ~/choreonoid/
$ choreonoid ext/TurtleBot2/project/TurtleBot2.cnoid
```

- 作成したコントローラを読み込む
  - シンプルコントローラアイテムを追加
  - 『コントローラモジュール』から
    『TurtleBot2JoystickController.so』を選択

TurtleBot2の自律走行

TurtleBot2の自律走行 | 直進後停止

- cnoid/RootItemをインクルード
  - アイテムツリーから対象のロボットを取得
- cnoid/SimulatorItemをインクルード
  - アクティブなシミュレータアイテムを取得
- 『SimulatorItem* simItem』
  - 実行中のシミュレータアイテム取得変数
- 『const double d = 0.115』
  - トレッド幅の半分の値を格納する定数
- 『const double Kp = 48.0』
  - 比例定数を格納する定数

TurtleBot2の自律走行 | 直進後停止

```
#include <cnoid/SimpleController>
#include <cnoid/RootItem>
#include <cnoid/SimulatorItem>
#include <fmt/format.h>

using namespace std;
using namespace cnoid;
using fmt::format;

class TurtleBot2StraightController : public SimpleController
{
    static const int WHEEL_NUM = 2;
    const string wheelNames[WHEEL_NUM] = { "wheel_left", "wheel_right" };
    Link::ActuationMode actuationMode;
    Link* wheels[2];
    Body* body;
    SimulatorItem* simItem;
    double startTime = 0.0;
    const double d = 0.115;
    const double Kp = 48.0;
```

TurtleBot2の自律走行 | 直進後停止

- 『ostream& os = io->os()』から
  『io->enableOutput(wheels[i])』まで,
  『TurtleBot2JoystickController』と同様
- 『startTime = 0.0』
- シミュレーション開始時間の初期化

```
public:
    virtual bool initialize(SimpleControllerIO* io) override
    {
        // TurtleBot2JoystickControllerと同様

        // 開始時間の初期化
        startTime = 0.0;

        return true;
    }
```

TurtleBot2の自律走行 | 直進後停止

- start関数内でRootItemを取得
  - Initialize関数では，RootItemを取得できない
- 『Item* robotItem = RootItem:: instance()->findItem("TurtleBot2")』
  - TurtleBot2という名称のアイテムを取得
- 『simItem = SimulatorItem::find ActiveSimulatorItemFor(robotItem)』
  - 実行中のシミュレータアイテムを取得

TurtleBot2の自律走行 | 直進後停止

```
    virtual bool start() override
    {
        // TurtleBot2という名称のアイテムを取得
        Item* robotItem = RootItem::instance()->findItem("TurtleBot2");
        // 実行中のシミュレータアイテムを取得
        simItem = SimulatorItem::findActiveSimulatorItemFor(robotItem);

        return true;
    }
```

TurtleBot2の自律走行 | 直進後停止

- 車体の中心の速度をvx，旋回角速度をvaとする
- 『startTime = simItem->simulationTime()』
  - 現在のシミュレーション時間を設定

```
    virtual bool control() override
    {
        // 車体の中心の速度vx(m/s), 旋回角速度va(rad/s)
        double vx, va;
        va = 0.0;
        vx = 0.3;

        if(actuationMode == Link::JOINT_VELOCITY){
            // アクチュエーションモードがvelocityの場合
            // 関節速度の指令値格納変数
            double dq_target[2];

            if(startTime == 0.0){
                // 開始時間が0.0の場合
                // 開始時間に現在のシミュレーション時間を設定
                startTime = simItem->simulationTime();

            }
```

TurtleBot2の自律走行 | 直進後停止

- 『if(simItem->simulationTime() - startTime > 2.0)』
- シミュレーション時間で2秒経過したかチェック
  - 2秒経過していれば，停止
  - 2秒経過していなければ，直進

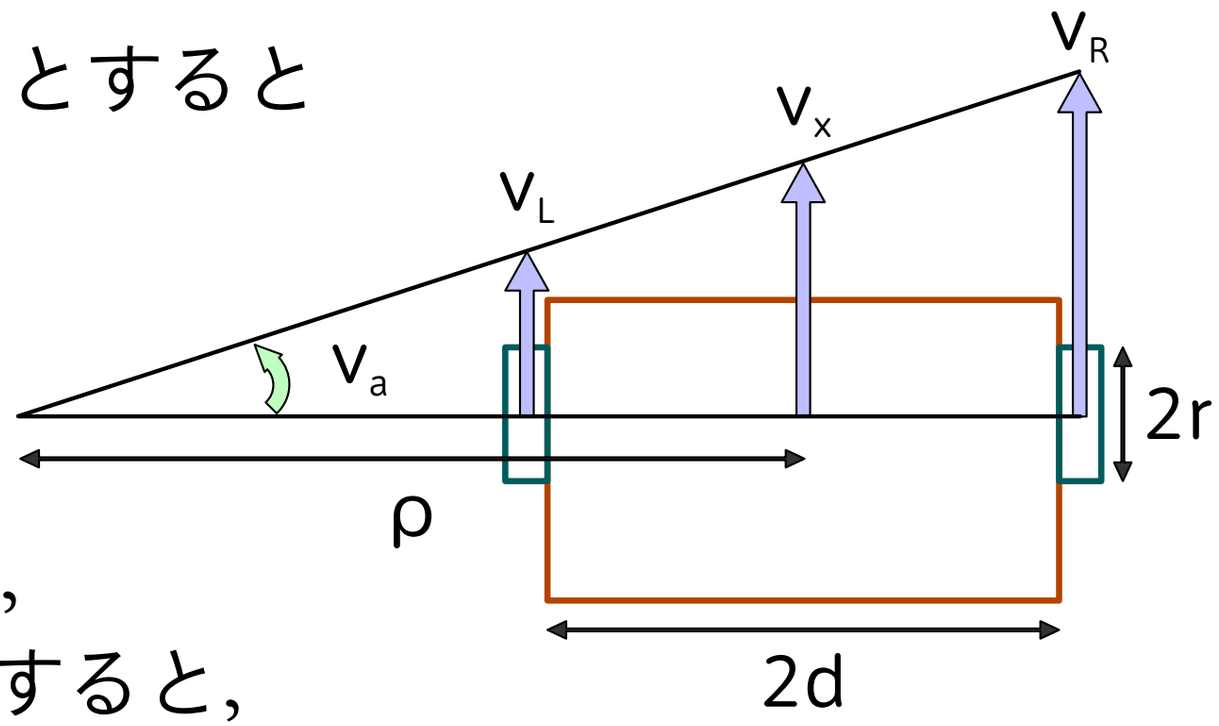
TurtleBot2の自律走行 | 直進後停止

```
            if(simItem->simulationTime() - startTime > 2.0){
                // 現在時間 - 開始時間が2.0より大きい場合
                // 左右のホイールの指令値を0.0に設定
                wheels[0]->dq_target() = 0.0;
                wheels[1]->dq_target() = 0.0;

            }else{
                dq_target[0] = Kp * (vx - va * d);
                dq_target[1] = Kp * (vx + va * d);
                // 左右のホイールに指令値を与える
                wheels[0]->dq_target() = dq_target[0];
                wheels[1]->dq_target() = dq_target[1];
            }
        }

        return true;
    }
};

CNOID_IMPLEMENT_SIMPLE_CONTROLLER_FACTORY(TurtleBot2StraightController)
```

対向2輪ロボットの操作量

❖ ロボットの旋回角速度をv_a,
中心の速度をv_x, 旋回半径をρとすると
旋回中心回りの運動は
以下の式で表すことができる

① $v_x = \rho v_a$



❖ 車輪の接地点での速度をv_R, v_L,
中心から車輪までの距離をdとすると,
それぞれの車輪の旋回半径はdだけ増減する

② $v_R = (\rho + d)v_a$

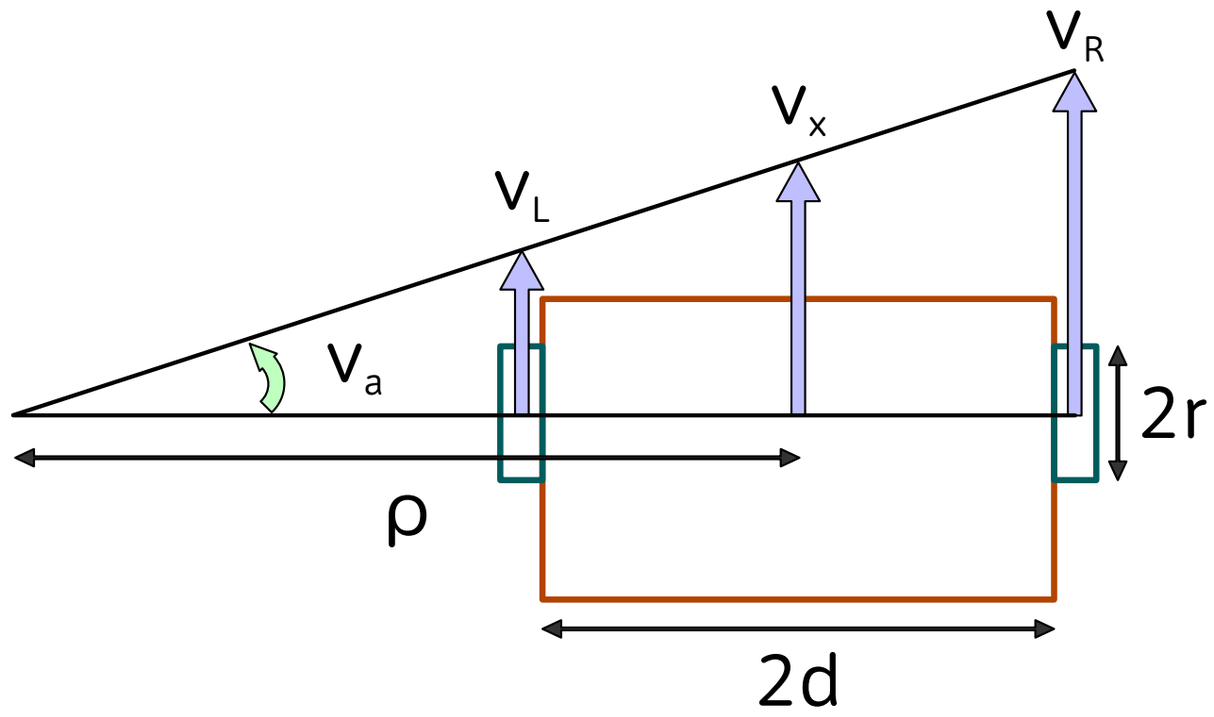
③ $v_L = (\rho - d)v_a$

対向2輪ロボットの操作量

① $v_x = \rho v_a$

② $v_R = (\rho + d)v_a$

③ $v_L = (\rho - d)v_a$



❖ ①を ρ について解くと

④ $\rho = v_x / v_a$

❖ ②，③に，④を代入すると，以下の式が得られる

1. $v_R = (v_x + d * v_a)$
2. $v_L = (v_x - d * v_a)$

TurtleBot2の自律走行 | 直進後停止

❖ TurtleBot2StraightController.cppをビルドしたら,
ターミナルで以下のコマンドを実行

```
$ cd ~/choreonoid/

$ choreonoid ext/TurtleBot2/project
TurtleBot2_Straight.cnoid
```

TurtleBot2の自律走行 | 課題

- 2秒直進後停止を行ったプログラムを参考に,
  以下の動作をするコントローラを作成してください
  - ファイル名：`TurtleBot2TurningController.cpp`
  - ①～⑥の順に動作
    ① 2秒間直進
    ② 90°右旋回
    ③ 2秒間直進
    ④ 90°左旋回
    ⑤ 2秒間直進
    ⑥ 停止

TurtleBot2の自律走行 | 課題

❖ TurtleBot2TurningController.cppをビルドしたら,
ターミナルで以下のコマンドを実行

```
$ cd ~/choreonoid/

$ choreonoid ext/TurtleBot2/project/
TurtleBot2_Turning.cnoid
```

TurtleBot2の自律走行 | 課題解答例

❖ 『control』関数の
変数『double vx, va』の
宣言後に追加する

```
        if(simItem->simulationTime() < 2.0){
            // シミュレーション時間が2s未満の場合、直進
            va = 0.0;
            vx = 0.3;
        }else if(simItem->simulationTime() < 2.2){
            va = vx = 0.0;
        }else if(simItem->simulationTime() < 2.7){
            // 90°右旋回
            va = -2.41;
            vx = 0.0;
        }else if(simItem->simulationTime() < 2.9){
            va = vx = 0.0;
        }else if(simItem->simulationTime() < 4.9){
            // 2s間直進
            va = 0.0;
            vx = 0.3;
        }else if(simItem->simulationTime() < 5.1){
            va = vx = 0.0;
        }else if(simItem->simulationTime() < 5.6){
            // 90°左旋回
            va = 2.55;
            vx = 0.0;
        }else if(simItem->simulationTime() < 5.8){
            va = vx = 0.0;
        }else if(simItem->simulationTime() < 7.8){
            // 2s間直進
            va = 0.0;
            vx = 0.3;
        }else{
            // 停止
            va = vx = 0.0;
        }
```

カメラ画像を用いた TurtleBot2の自律走行

カメラ画像による色の判定

❖ Choreonoidにカラーセンサの機能はない

❖ カメラ画像の取得は可能

❖ カメラ画像からRGB値を取得し，色の判定を行う

❖ 画像内で取得できる色の目標値を決め，
目標値に達したら停止するなどの処理を行う

TurtleBot2の自律走行 | ライン上で停止

- cnoid/Cameraをインクルード
  - カメラ情報を取得
- 『CameraPtr camera』
  - カメラ情報格納変数
- 『std::shared_ptr<const Image> prevImage』
  - 過去の画像格納変数
- 『int cnt[3]』
  - 画像内の灰色，白色，黄色の数を格納する配列
- 『static const int TARGET = 15000』
  - 停止する白線上での白色の目標値

TurtleBot2の自律走行 | ライン上で停止

```
#include <cnoid/SimpleController>
#include <cnoid/Camera>
#include <fmt/format.h>

using namespace std;
using namespace cnoid;
using fmt::format;

class TurtleBot2StopLineController : public SimpleController{
    static const int WHEEL_NUM = 2;
    const string wheelNames[WHEEL_NUM] = { "wheel_left", "wheel_right" };
    Link::ActuationMode actuationMode;
    Link* wheels[2];
    Body* body;
    // カメラデバイス情報格納変数
    CameraPtr camera;
    // 前回の画像格納変数
    std::shared_ptr<const Image> prevImage;
    // 画像内のグレー、白、黄色の数の格納変数
    int cnt[3] = { 0, 0, 0 };
    const double d = 0.115;
    // PID制御の係数
    const double Kp = 48.0;
    // 画像内の白線の目標値
    static const int TARGET = 15000;
```

TurtleBot2の自律走行 | ライン上で停止

- 『camera = body->findDevice <Camera>("カメラ名")』
  - LineTraceカメラを取得
  - TurtleBot2.body内のカメラ名を指定
- 『io->enableInput(camera)』
  - カメラからのコントローラへの入力を有効化

```
public:
    virtual bool initialize(SimpleControllerIO* io) override
    {
        // TurtleBot2JoystickControllerと同様

        // LineTraceカメラを取得
        camera = body->findDevice<Camera>("LineTrace");
        // カメラのコントローラへの入力を有効化
        io->enableInput(camera);

        return true;
    }
```

TurtleBot2の自律走行 | ライン上で停止

- 『onCameraStateChanged()』
  - 灰色，白色，黄色の割合を取得
- 『if(cnt[1] > TARGET)』
  - 画像内の白色の数が目標値より大きいかどうか判定
  - 大きければ停止

TurtleBot2の自律走行 | ライン上で停止

```
    virtual bool control() override
    {
        double vx, va;
        va = 0.0;
        vx = 0.3;

        // 黄色と白の割合を取得
        onCameraStateChanged();

        if(actuationMode == Link::JOINT_VELOCITY){
            double dq_target[2];

            dq_target[0] = Kp * (vx - va * d);
            dq_target[1] = Kp * (vx + va * d);

            wheels[0]->dq_target() = dq_target[0];
            wheels[1]->dq_target() = dq_target[1];

            if(cnt[1] > TARGET){
                // 白線が近くなったら停止
                wheels[0]->dq_target() = 0.0;
                wheels[1]->dq_target() = 0.0;
            }
        }
        return true;
    }
```

TurtleBot2の自律走行 | ライン上で停止

- 『`if(camera->sharedImage () != prevImage)`』
  - カメラ画像が更新されたか確認

- 『`const Image& image = camera->constImage()`』
  - カメラ画像を取得

- 『`unsigned char* src = (unsigned char*)image.pixels()`』
  - 画像の1ピクセルごとのデータ取得

TurtleBot2の自律走行 | ライン上で停止

```
    void onCameraStateChanged()
    {
        size_t length = 0;
        if(camera->sharedImage() != prevImage){
            // カメラ画像が更新されたか確認
            const Image& image = camera->constImage();
            if(!image.empty()){
                // カメラ画像が取得できた場合
                int width, height;
                // 画像のサイズを取得
                height = image.height();
                width = image.width();
                length = width * height * image.numComponents() * sizeof(unsigned char);
            }

            // 画像の1ピクセルごとのデータを取得
            unsigned char* src = (unsigned char*)image.pixels();

            // グレー、白、黄色のカウント用配列の初期化
            cnt[0] = cnt[1] = cnt[2] = 0;
            // RGB値格納配列
            int rgb[3];
```

TurtleBot2の自律走行 | ライン上で停止

- rgb配列にRGBの値を格納
- 画像内の灰色，白色，黄色の数を取得
  - cnt[0]：灰色の数
  - cnt[1]：白色の数
  - cnt[2]：黄色の数

TurtleBot2の自律走行 | ライン上で停止

```
            // データ数分ループ
            for(int i = 0; i < length / 3; ++i){
                // RGBの値を格納
                rgb[0] = (int)src[i * 3];
                rgb[1] = (int)src[i * 3 + 1];
                rgb[2] = (int)src[i * 3 + 2];

                if((rgb[0] >= 100 and rgb[0] < 180)
                        and (rgb[1] >= 100 and rgb[1] < 180)
                        and (rgb[2] >= 100 and rgb[2] < 180)
                        and abs(rgb[0] - rgb[1]) <= 10
                        and abs(rgb[1] - rgb[2]) <= 10
                        and abs(rgb[2] - rgb[0]) <= 10){
                    cnt[0]++;          // グレーの個数をカウント
                }else if(rgb[0] >= 180 and rgb[1] >= 180 and rgb[2] >= 180){
                    cnt[1]++;          // 白の個数をカウント
                }else if(rgb[0] >= 170 and rgb[1] >= 170 and rgb[2] <= 100){
                    cnt[2]++;          // 黄色の個数をカウント
                }
            }
            // 前回値の更新
            prevImage = camera->sharedImage();
        }
    }
```

TurtleBot2の自律走行 | ライン上で停止

❖ シミュレーション停止時に，画像から取得した
灰色，白色，黄色の数を初期化

```
virtual void stop() override
{
    for(int i = 0; i < 3; ++i){
        cnt[i] = 0;
    }
}
```

TurtleBot2の自律走行 | ライン上で停止

❖ TurtleBot2StopLineController.cppをビルドしたら,
ターミナルで以下のコマンドを実行

```
$ cd ~/choreonoid/

$ choreonoid ext/TurtleBot2/project
TurtleBot2_StopLine.cnoid
```

ライントレース | 白線上を走行

- PID制御の定数を宣言
  - `Kp`：比例定数
  - `Ki`：積分定数
  - `Kd`：微分定数

- PID制御で使用する変数を宣言
  - `diff_R, diff_L`：偏差値
  - `integral[2]`：積分値
  - `derivation[2]`：微分値

ライントレース | 白線上を走行

```
#include <cnoid/SimpleController>
#include <cnoid/Camera>
#include <fmt/format.h>

using namespace std;
using namespace cnoid;
using fmt::format;

class TurtleBot2TurnLineController : public SimpleController
{
    // TurtleBot2StopLineControllerと同様
    // タイムステップ格納変数
    double dt;
    // PID制御の定数
    const double Kp = 48.0;
    const double Ki = 0.0092;
    const double Kd = 0.00015;
    // 画像内の白線の目標値
    static const int TARGET = 10000;
    // 前回と現在の偏差値格納変数
    double diff_R[2] = { 0, 0 };
    double diff_L[2] = { 0, 0 };
    // 偏差の積分値格納変数
    double integral[2] = { 0, 0 };
    // 偏差の微分値格納変数
    double derivation[2] = { 0, 0 };
```

PID制御

- 入力値の制御を出力値と目標値との偏差，偏差の積分，偏差の微分の3つの要素で行う制御
  - **P（Proportional）：比例制御**
    - 現在発生している誤差を修正
  - **I（Integral）：積分制御**
    - 現在までに蓄積された誤差を修正
  - **D（Differential）：微分制御**
    - これから発生する誤差を修正

ライントレース | 白線上を走行

- `dt = io->timeStep()`
  - シミュレータのタイムステップを取得

```
public:
    virtual bool initialize(SimpleControllerIO* io) override
    {
        // TurtleBot2JoystickControllerと同様
        // LineTraceカメラを取得
        camera = body->findDevice<Camera>("LineTrace");
        // カメラのコントローラへの入力を有効化
        io->enableInput(camera);
        // タイムステップの設定
        dt = io->timeStep();
        return true;
    }
```

ライントレース | 白線上を走行

- `diff_L[0] = diff_L[1]`
  - 前回の偏差値を設定
- `diff_L[1] = TARGET - cnt[1]`
  - 偏差値を取得（目標値 - 白色の割合）
- `integral[0] += (diff_L[1] + diff_L[0]) / 2.0 * dt`
  - 偏差の積分値を取得
  - （{(最新の偏差 – 前回の偏差) / 2 } * 時間）
- `derivation[0] = (diff_L[1] - diff_L[0]) / dt`
  - 偏差の微分値を取得：（(最新の偏差 – 現在の偏差) / 時間）

ライントレース | 白線上を走行

```
virtual bool control() override
{
    double vx, va;
    va = 0.5;
    vx = 0.3;

    onCameraStateChanged();

    // 前回の偏差値を設定
    diff_L[0] = diff_L[1];
    // 現在の偏差値(目標値 - センサ値)を取得
    diff_L[1] = TARGET - cnt[1];
    // 偏差の積分値を取得。偏差の積分値 = (( 最新の偏差 + 前回の偏差 ) / 2 ) * 時間
    integral[0] += (diff_L[1] + diff_L[0]) / 2.0 * dt;
    // 偏差の微分値を取得。偏差の微分値 = ( 最新の偏差 - 前回の偏差 ) / 時間
    derivation[0] = (diff_L[1] - diff_L[0]) / dt;
    diff_R[0] = diff_R[1];
    // 現在の偏差値(目標値 - センサ値)を取得
    diff_R[1] = TARGET - cnt[1];
    integral[1] += (diff_R[1] + diff_R[0]) / 2.0 * dt;
    derivation[1] = (diff_R[1] - diff_R[0]) / dt;
```

ライントレース | 白線上を走行

- PID制御により指令値を算出
  - 比例定数 × (速度 – 旋回速度)
    - 偏差が大きいため，2500で割っている
  - 積分定数 × 偏差の積分値 × 旋回速度
  - 微分定数 × 偏差の微分値 × 旋回速度

```
    if(actuationMode == Link::JOINT_VELOCITY){
        // 関節速度の指令値格納変数
        double dq_target[2];

        // PID制御
        dq_target[0] = Kp * (vx - (va * d * diff_L[1] / 2500)) + Ki * (integral[0] * va * d) + Kd * (derivation[0] * va * d);
        dq_target[1] = Kp * (vx + (va * d * diff_R[1] / 2500)) + Ki * (integral[1] * va * d) + Kd * (derivation[1] * va * d);

        // 左右のホイールに指令値を与える
        wheels[0]->dq_target() = dq_target[0];
        wheels[1]->dq_target() = dq_target[1];
    }
    return true;
}
```

ライントレース | 白線上を走行

- `diff_R[i] = diff_L[i] = 0`
  - 偏差の初期化
- `integral[i] = derivation[i] = 0`
  - 偏差の積分値，偏差の微分値の初期化

```
    virtual void stop() override
    {
        for(int i = 0; i < WHEEL_NUM; ++i){
            diff_R[i] = diff_L[i] = 0;
            integral[i] = derivation[i] = 0;
        }

        for(int i = 0; i < 3; ++i){
            cnt[i] = 0;
        }
    }
```

ライントレース | 白線上を走行

❖ TurtleBot2TurnLineController.cppをビルドしたら,
ターミナルで以下のコマンドを実行

```
$ cd ~/choreonoid/

$ choreonoid ext/TurtleBot2/project
TurtleBot2_TurnLine.cnoid
```

ライントレース | 課題

- TurtleBot2StopLineController.cppを参考に,
  白と黄色の線を認識し,
  その間を走行するコントローラを作成してください
  - ファイル名：TurtleBot2AutoController.cpp
  - 目標値：1700
- TurtleBot2AutoController.cppをビルドしたら,
  ラインとレースを行ってみてください

```
$ cd ~/choreonoid/

$ choreonoid ext/TurtleBot2/project
TurtleBot2_Autorace.cnoid
```

ライントレースのグラフ化

- matplotlib-cppを使用したグラフ作成
  - matplotlib-cppをダウンロード
    - 『matplotlib-cppのインストール方法.docx』を参照
  - グラフ作成プログラム『plot.cpp』を作成
    - X軸を時間T，Y軸をX, Y座標とし，グラフをプロット
    - 読み込むファイルは，0.1秒ごとにX, Y座標を取得
  - 『plot.cpp』をコンパイル・実行するシェルスクリプト『plot.sh』を作成

グラフ作成プログラム

- 『vector<double> t, x, y』
  - ファイルから読み込んだ値を格納するため,
    動的配列として宣言

- 『string cmd = "pwd ¦ tr '\n ' '/'"』
  - カレントディレクトリ取得コマンド
  - pwdコマンド実行後の標準出力は改行が入るため,
    trコマンドで改行コードを / に置換

グラフ作成プログラム

```
#include <fstream>
#include <matplotlib-cpp/matplotlibcpp.h>

using namespace std;
namespace plt = matplotlibcpp;

int main(){
    cout << "matplot start" << endl;

    // ファイル名
    sring fileName = "plot.tsv";
    // 配列の定義
    vector<double> t, x, y;
    // タブ区切りのデータ格納変数
    string tmp;
    // ファイル入出力の宣言
    FILE* fp;
    // バッファサイズ
    static const int BUF_SIZE = 100;
    char str[BUF_SIZE];
    // カレントディレクトリの取得コマンド
    string cmd = "pwd ¦ tr '¥n' '/'";
    int cnt = 0;
```

グラフ作成プログラム

- 『fp = popen(コマンド，タイプ)』
  - タイプには以下を指定
    - r：標準出力を読み込む，w：標準入力に書き込む
  - プロセスをオープンし，
    カレントディレクトリ取得コマンドを実行
- 『fgets(読込データ格納変数，バイト数，ファイルポインタ)』
  - コマンド結果を1行ずつ読み込む
- 『pclose(fp)』
  - プロセスをクローズ

グラフ作成プログラム

- 『ifstream ifs(filePath)』：ファイルを読み込む
- 『if(ifs.fail()』：ファイル読み込みに失敗したか判定
- 『plt::xlabel(ラベル名)』：X軸のラベルを設定
- 『plt::ylabel(ラベル名)』：Y軸のラベル設定

グラフ作成プログラム

```
    // ファイルパス
    string filePath = "";

    if((fp = popen(cmd.c_str(), "r")) != NULL){
        // プロセスをオープンしコマンドを実行
        while(fgets(str, sizeof(str), fp) != NULL){
            // コマンド結果を1行ずつ読み込む
            // カレントディレクトリの取得
            filePath += str;
        }
        // プロセスをクローズ
        pclose(fp);
    }
    // ディレクトリ名とファイル名を連結
    filePath = filePath + filename;
    // ファイルを読み込む
    ifstream ifs(filePath);
    if(ifs.fail()){
        cerr << "Failed to open file." << endl;
        return false;
    }

    plt::xlabel("T");
    plt::ylabel("X, Y");
```

グラフ作成プログラム

- 『getline(データ取得ストリーム，データ格納文字列，区切り文字)』
  - 入力ストリームから文字を読み込み，文字列に格納
- 『t.push_back(格納値)』：動的配列t, x, yに値を格納
  - t(time)：1列目，x(X軸)：2列目，y(Y軸)：3列目
- 『plt::plot(X軸，Y軸，線の色)』
  - 色を指定してグラフをプロット
- 『plt::show()』：プロットしたグラフの表示

グラフ作成プログラム

```
    while(getline(ifs, tmp, '¥t')){
        if(ifs.eof()){
            ifs.close();
            break;
        } else {
            if(cnt == 0){
                t.push_back(stod(tmp));
                cnt++;
            } else if(cnt == 1){
                x.push_back(stod(tmp));
                cnt++;
            } else if(cnt == 2){
                y.push_back(stod(tmp));
                cnt = 0;
            }
        }
    }

    plt::plot(t, x, "b");
    plt::plot(t, y, "r");
    plt::show();

    return 0;
}
```

グラフ作成プログラムの実行

❖ 『plot.sh』ファイルを作成

```
#/bin/sh
# カレントディレクトリの取得
cwd='dirname "${0}"'
# 相対パスが取得された場合，絶対パスを取得
expr "${0}" : "/.*" > /dev/null ¦¦ cwd='(cd "${cwd}" && pwd)'
# 作成したplot.cppファイルをコンパイル・実行
g++ ${cwd}/plot.cpp -I/usr/include/python2.7 -lstdc++ -lpython2.7 -std=c++11 && ${cwd}/a.out
```

❖ 『plot.sh』の実行

```
$ cd ~/choreonoid/ext/TurtleBot2/
$ ./plot.sh
```

グラフ作成プログラムの実行

- 『cwd='dirname "${0}"'』
  - 指定したファイルのディレクトリパスを取得
  - ${0}：実行ファイル名

グラフ作成プログラムの実行

- 『expr "${0}" : "/.*" > /dev/null ¦¦ cwd='(cd "${cwd}" && pwd)'』
  - 『expr 文字列 : 正規表現』で文字列を評価
    - /：開始文字
    - .：任意の1文字
    - *：0回以上の繰り返し
  - 『> /dev/null』：標準出力結果の書き込みを破棄
  - 『cd ディレクトリパス && pwd』
    - ファイルが存在するディレクトリに移動し，絶対パスを取得

グラフ作成プログラムの実行

- 『`g++ ${cwd}/plot.cpp -I/usr/include/python2.7 -lstdc++ -lpython2.7 -std=c++11 && ${cwd}/a.out`』
  - `g++`：C++コンパイラコマンド
  - `-I`：ヘッダを追加
  - `-l`：ライブラリをリンク
  - `-std=c++11`：C++11の機能を有効化
  - `${cwd}/a.out`：作成されたファイルを実行

ライントレース | 課題解答例

- TurtleBot2TurnLineControllerと同様の記述を行う
  - PID制御の定数のみ変更

- 以下のインクルードを追加
  - cnoid/RootItem
  - cnoid/SimulatorItem
  - fstream
- PID制御の定数の変更

- ファイル出力に必要となる変数の定義

ライントレース | 課題解答例

```
#include <cnoid/RootItem>
#include <cnoid/SimulatorItem>
#include <fstream>

class TurtleBot2AutoController : public SimpleController
{
    // TurtleBot2TurnLineControllerと同様
    Link* rootLink;
    // PID制御の係数
    const double Kp = 48.0;
    const double Ki = 0.002;
    const double Kd = 0.0007;
    // シミュレーション時間取得変数
    SimulatorItem* simItem;
    double startTime, waitTime;
    const double INTERVAL = 0.1;
    // ファイル出力ストリーム
    ofstream ofs;
    FILE* fp;
    // バッファサイズ
    static const int BUF_SIZE = 100;
    char str[BUF_SIZE];
    // カレントディレクトリ取得コマンド
    string cmd = "cd ~/choreonoid/ext/TurtleBot2/; pwd ¦ tr '¥n' '/'";
```

ライントレース | 課題解答例

- 『rootLink->setActuationMode(Link::LINK_POSITION)』
  - アクチュエーションモードを LINK_POSITION に設定
  - リンク位置を取得するために必要
- 『fp = popen(cmd.c_str(), "r")』
  - プロセスをオープンしコマンドを実行
- 『fgets(str, sizeof(str), fp)』
  - コマンド結果を1行ずつ読み込む
- 『pclose(fp)』
  - プロセスをクローズ

ライントレース | 課題解答例

```
    // ファイルパス
    string filePath = "";
    const string FILENAME = "plot.tsv";

public:
    virtual bool initialize(SimpleControllerIO* io) override
    {
        // TurtleBot2TurnLineControllerと同様
        // TurtleBot2のコントローラへの入力を有効化
        rootLink = body->link("kobuki");
        rootLink->setActuationMode(Link::LINK_POSITION);
        io->enableInput(rootLink);

        if((fp = popen(cmd.c_str(), "r")) != NULL){
            // プロセスをオープンしコマンドを実行
            while(fgets(str, sizeof(str), fp) != NULL){
                // コマンド結果を1行ずつ読み込む
                filePath += str;
            }
            // プロセスをクローズ
            pclose(fp);
        }
```

ライントレース | 課題解答例

- 『ofs.open(ファイルパス, モード)』
  - ファイルを開く
  - モードは以下を指定可能
    - ios::out：書き込みモード
    - ios::in：読み取りモード
    - ios::app：追記モード
    - ios::trunc：上書きモード
    - ios::binary：バイナリモード

ライントレース | 課題解答例

```
        // ディレクトリ名とファイル名を連結
        filePath = filePath + FILENAME;

        ofs.open(filePath, ios::out);
        startTime = 0.0;

        return true;
    }

    virtual bool start() override
    {
        // TurtleBot2という名称のアイテムを取得
        Item* robotItem = RootItem::instance()->findItem ("TurtleBot2");
        // 実行中のシミュレータアイテムを取得
        simItem = SimulatorItem::findActiveSimulatorItem For(robotItem);

        return true;
    }
```

ラントレース | 課題解答例

- `diff_L[1] = TARGET - cnt[2]`
  - 偏差値を取得（目標値 - 黄色の割合）
- `diff_R[1] = -(TARGET - cnt[1])`
  - 偏差値を取得（目標値 - 白色の割合）
  - 符号を反転させないと反対方向に旋回
- PID制御により指令値を算出
  - 比例定数 × (速度 – 旋回速度)
    - 偏差が大きいため，500で割っている
  - 積分定数 × 偏差の積分値 × 旋回速度
  - 微分定数 × 偏差の微分値 × 旋回速度

ライントレース | 課題解答例

```
virtual bool control() override
{
    // TurtleBot2TurnLineControllerと同様

    diff_L[0] = diff_L[1];
    diff_L[1] = TARGET - cnt[2];
    integral[0] += (diff_L[1] + diff_L[0]) / 2.0 * dt;
    derivation[0] = (diff_L[1] - diff_L[0]) / dt;

    diff_R[0] = diff_R[1];
    diff_R[1] = -(TARGET - cnt[1]);
    integral[1] += (diff_R[1] + diff_R[0]) / 2.0 * dt;
    derivation[1] = (diff_R[1] - diff_R[0]) / dt;

    if(actuationMode == Link::JOINT_VELOCITY){
        double dq_target[2];
        dq_target[0] = Kp * (vx - (va * d * diff_L[1] / 500)) + Ki * (integral[0] * va * d) + Kd * (derivation[0] * va * d);
        dq_target[1] = Kp * (vx + (va * d * diff_R[1] / 500)) + Ki * (integral[1] * va * d) + Kd * (derivation[1] * va * d);
```

ラインとレース | 課題解答例

- `if(cnt[1] == 0 and cnt[2] == 0)`
  - 黄色と白色の線があるか判定
  - 存在しない場合は停止：指令値に`0`を設定
- 以降の処理は，`TurtleBot2TurnLineController`と同様
- 0.1秒毎に時間，X座標，Y座標をファイルに出力

ライントレース | 課題解答例

```
            // 左右のホイールに指令値を与える
            wheels[0]->dq_target() = dq_target[0];
            wheels[1]->dq_target() = dq_target[1];

            if(cnt[1] == 0 and cnt[2] == 0){
                // 黄色と白の線がなくなったら停止
                wheels[0]->dq_target() = 0.0;
                wheels[1]->dq_target() = 0.0;
            }
        }

        waitTime = simItem->simulationTime() - startTime;
        // 0.1s毎にファイル出力を行う
        if(waitTime >= INTERVAL){
            ofs << simItem->simulationTime() << "¥t" << rootLink-
>position().translation().x() << "¥t" << rootLink-
>position().translation().y() << "¥t" << endl; // 1行で書く
            startTime = simItem->simulationTime();
        }

        return true;
    }
```

ライントレース | 課題解答例

- 『ofs.close()』
  - シミュレーションが停止したら，ファイルをクローズ

```
    virtual void stop() override
    {
        for(int i = 0; i < WHEEL_NUM; ++i){
            diff_R[i] = diff_L[i] = 0;
            integral[i] = derivation[i] = 0;
        }

        for(int i = 0; i < 3; ++i){
            cnt[i] = 0;
        }

        ofs.close();
    }
```