

Choreonoid講習会 ～ ロボットモデルの制御 ～

2022/08/29-30

中村啓太（会津大学）

馬上雄, 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 TB2JoystickSampleController.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
 - ❖ `cnoide/SimpleController`をインクルード
- ❖ ゲームパッドを使用
 - ❖ `cnoide/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 TB2JoystickSampleController : 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 TB2JoystickSampleController : 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
 - ❖ 『¥"』と表示されている場合,
"¥"をバックスラッシュ("\")に変更

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の場合  
    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、動かないように抑制

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velocity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(TB2JoystickSampleController)
```

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(TB2JoystickSampleController TB2JoystickSampleController.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

- ❖ 修正ができたなら, 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 『TB2JoystickSampleController.so』ファイルがあるか確認

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

```
$ ls TB2JoystickSampleController.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/Education/ChoreonoidWorkshop/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

『TB2JoystickSampleController.so』を選択

TurtleBot2の自律走行

TurtleBot2の自律走行 | 直進後停止

- ❖ 『SimpleControllerIO* io』
 - ❖ シンプルコントローラ入出力情報取得変数
- ❖ 『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 <fmt/format.h>

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

class TB2StraightSampleController : 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;
    SimpleControllerIO* io;
    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,
『TB2JoystickSampleController』 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
    {
        // ioオブジェクトの取得
        this->io = io;

        // TB2JoystickSampleController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

- ❖ 車体の中心の速度をvx, 旋回角速度をvaとする
- ❖ 『startTime = io->currentTime()』
- ❖ 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 = io->currentTime();
        }
    }
}
```

TurtleBot2の自律走行 | 直進後停止

- ❖ 『`if(io->currentTime() - 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(io->currentTime() - 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(TB2StraightSampleController)
```

対向2輪ロボットの操作量

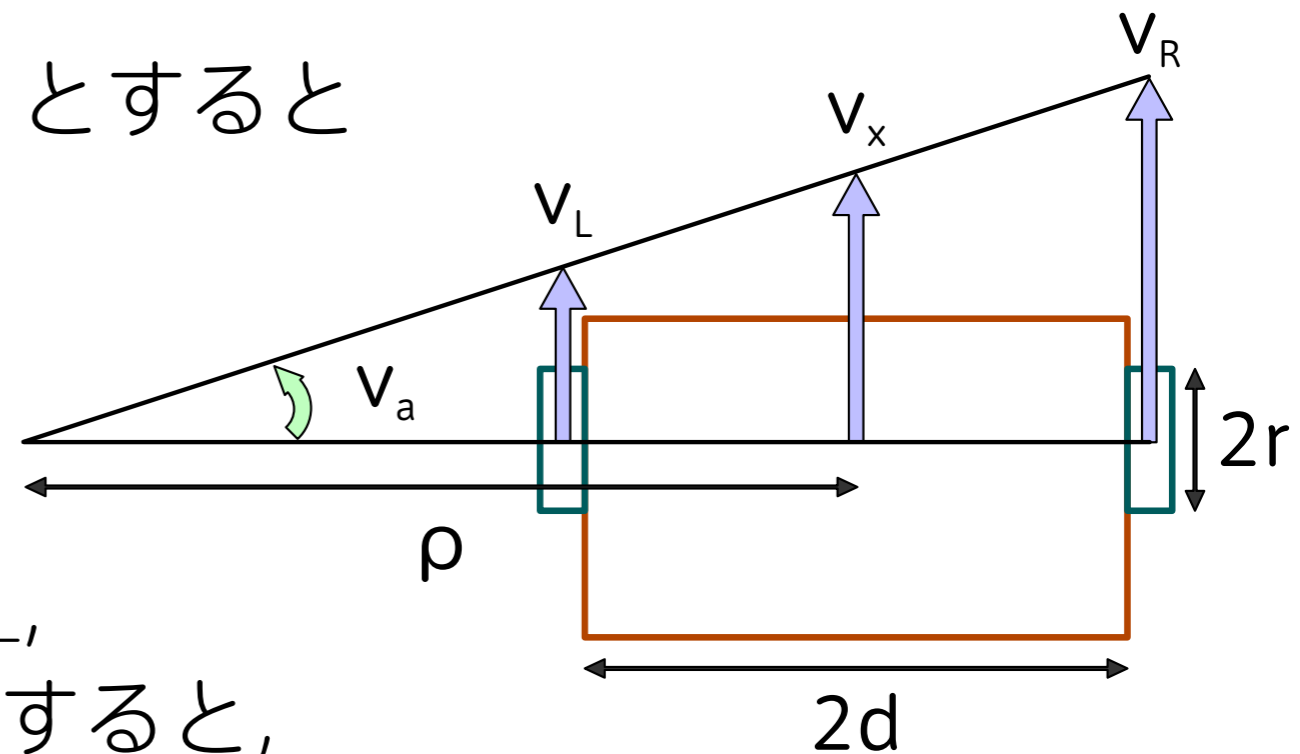
- ❖ ロボットの旋回角速度を v_a , 中心の速度を v_x , 旋回半径を ρ とすると 旋回中心回りの運動は以下の式で表すことができる

- 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 $v_L = (\rho - d)v_a$

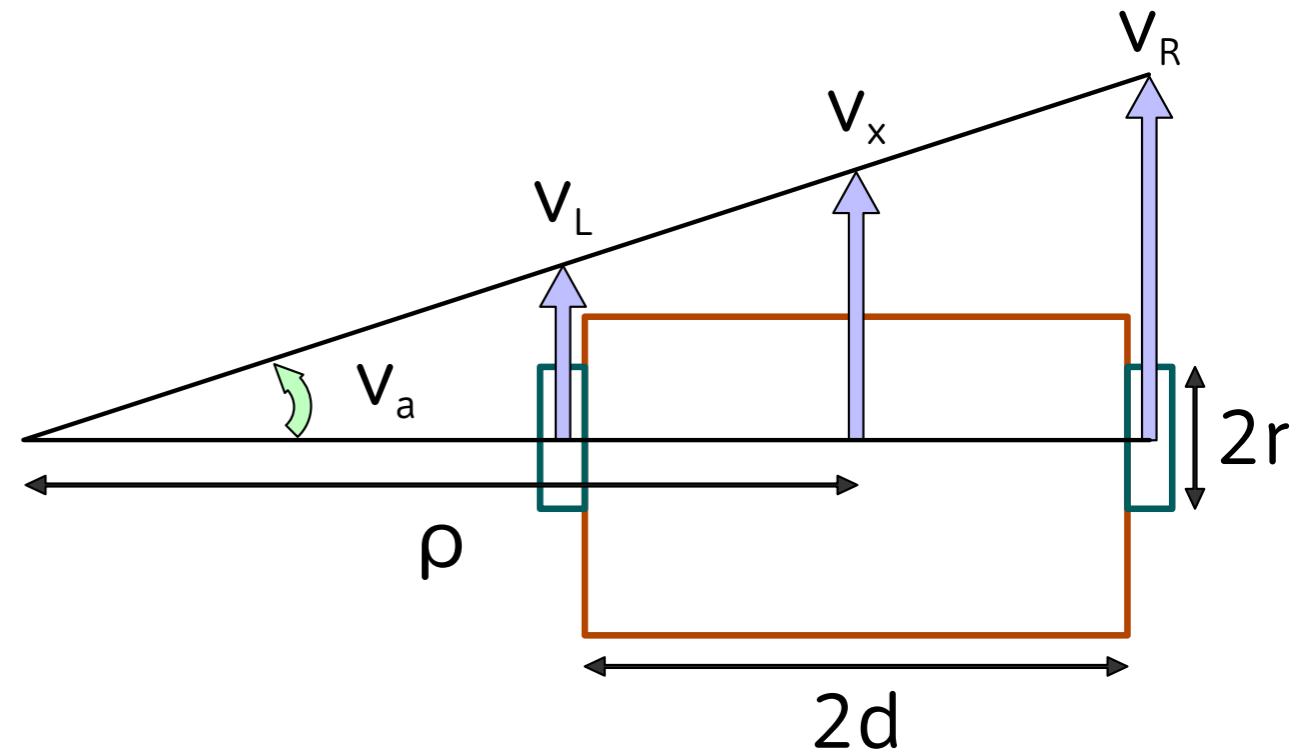
❖ ①を ρ について解くと

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

- ❖ TB2StraightSampleController.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/Education/ChoreonoidWorkshop/TurtleBot2/project/TurtleBot2_Straight.cnoid
```

TurtleBot2の自律走行 I 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: `TB2TurningSampleController.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

- ❖ TB2TurningSampleController.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/Education/ChoreonoidWorkshop/TurtleBot2/project/TurtleBot2_Turning.cnoid
```

TurtleBot2の自律走行 | 課題解答例

- ❖ 『control()』関数の『double vx, va』の宣言までは、TB2StraightSampleControllerと同様

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

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

class TB2TurningSampleController : public SimpleController
{
    // TB2StraightSampleControllerと同様
public:
    virtual bool initialize(SimpleControllerIO* io) override
    {
        // TB2StraightSampleControllerと同様
        return true;
    }

    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;
    }
};
```

TurtleBot2の自律走行 | 課題解答例

❖ 『control()』関数の
『double vx, va』の
宣言の後に追加

```
if(io->currentTime() - startTime < 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(io->currentTime() - startTime < 2.2){  
    va = vx = 0.0;  
}else if(io->currentTime() - startTime < 2.7){  
    // 90°右旋回  
    va = -2.1;  
    vx = 0.0;  
}else if(io->currentTime() - startTime < 2.9){  
    va = vx = 0.0;  
}else if(io->currentTime() - startTime < 4.9){  
    // 2s間直進  
    va = 0.0;  
    vx = 0.3;  
}else if(io->currentTime() - startTime < 5.1){  
    va = vx = 0.0;  
}else if(io->currentTime() - startTime < 5.6){  
    // 90°左旋回  
    va = 2.1;  
    vx = 0.0;  
}else if(io->currentTime() - startTime < 5.8){  
    va = vx = 0.0;  
}else if(io->currentTime() - startTime < 7.8){  
    // 2s間直進  
    va = 0.0;  
    vx = 0.3;  
}else{  
    // 停止  
    va = vx = 0.0;  
}
```

TurtleBot2の自律走行 | 課題解答例

- ❖ 『TB2StraightSampleController』の
if(actuatinMode == Link::JOINT_VELOCITY)ブロック内の
停止制御を削除

```
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 = io->currentTime();  
    }  
  
    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(TB2TurningSampleController)
```

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

- ❖ cnoide/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

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

using namespace std;
using namespace cnoide;
using fmt::format;

class TB2StopLineSampleController : 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;
    ScopedConnection cameraConnection;
```

TurtleBot2の自律走行 | ライン上で停止

- ❖ 『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
- ❖ 『ScopedConnection cameraConnection』
 - ❖ シグナル設定状態を取得する変数

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

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

class TB2StopLineSampleController : 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;
    ScopedConnection cameraConnection;
```

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
    {
        // TB2JoystickSampleController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);
        cameraConnection.disconnect();
        cameraConnection = camera->sigStateChanged().connect([&]() { onCameraStateChanged(); });

        return true;
    }
```

TurtleBot2の自律走行 | ライン上で停止

- ❖ 『cameraConnection = camera->sigStateChanged().connect([&]() { onCameraStateChanged(); });』
- ❖ センサーの状態が変わった場合, 色の割合を取得する onCameraStateChanged() 関数を呼び出す

```
public:
    virtual bool initialize(SimpleControllerIO* io) override
    {
        // TB2JoystickSampleController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);
        cameraConnection.disconnect();
        cameraConnection = camera->sigStateChanged().connect([&]() { onCameraStateChanged(); });

        return true;
    }
```

TurtleBot2の自律走行 | ライン上で停止

- ❖ 『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

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

    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 && rgb[0] < 180)
        && (rgb[1] >= 100 && rgb[1] < 180)
        && (rgb[2] >= 100 && rgb[2] < 180)
        && abs(rgb[0] - rgb[1]) <= 10
        && abs(rgb[1] - rgb[2]) <= 10
        && abs(rgb[2] - rgb[0]) <= 10){
        cnt[0]++; // グレーの個数をカウント
    }else if(rgb[0] >= 180 && rgb[1] >= 180 && rgb[2] >= 180){
        cnt[1]++; // 白の個数をカウント
    }else if(rgb[0] >= 170 && rgb[1] >= 170 && 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;
    }
    cameraConnection.disconnect();
}
};
```

```
CNOID_IMPLEMENT_SIMPLE_CONTROLLER_FACTORY(TB2StopLineSampleController)
```

TurtleBot2の自律走行 | ライン上で停止

- ❖ TB2StopLineSampleController.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/Education/ChoreonoidWorkshop/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

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

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

class TB2TurnLineSampleController : public SimpleController
{
    // TB2StopLineSampleController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 };
    ScopedConnection cameraConnection;
```

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
    {
        // TB2JoystickSampleController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);
        cameraConnection.disconnect();
        cameraConnection = camera->sigStateChanged().connect([&]() { onCameraStateChanged(); });
        // 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

- ❖ $\text{diff_L}[0] = \text{diff_L}[1]$
 - ❖ 前回の偏差値を設定
- ❖ $\text{diff_L}[1] = (\text{TARGET} - \text{cnt}[1]) / 2500$
 - ❖ 偏差値を取得 (目標値 - 白色の割合)
 - ❖ 偏差が大きいため, 2500で割っている
- ❖ $\text{integral}[0] += (\text{diff_L}[1] + \text{diff_L}[0]) / 2.0 * dt$
 - ❖ 偏差の積分値を取得
 - ❖ $\{(\text{最新の偏差} - \text{前回の偏差}) / 2\} \times \text{時間}$
- ❖ $\text{derivation}[0] = (\text{diff_L}[1] - \text{diff_L}[0]) / dt$
 - ❖ 偏差の微分値を取得: $((\text{最新の偏差} - \text{現在の偏差}) / \text{時間})$

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;

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

- ❖ $\text{diff_R}[i] = \text{diff_L}[i] = 0$
 - ❖ 偏差の初期化
- ❖ $\text{integral}[i] = \text{derivation}[i] = 0$
 - ❖ 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;
    }
    cameraConnection.disconnect();
}

void onCameraStateChanged()
{
    // TB2StopLineSampleControllerと同様
}
};

CNOID_IMPLEMENT_SIMPLE_CONTROLLER_FACTORY(TB2TurnLineSampleController)
```

ライントレース | 白線上を走行

- ❖ TB2TurnLineSampleController.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/Education/ChoreonoidWorkshop/TurtleBot2/project/TurtleBot2_TurnLine.cnoid
```

ライントレース | 課題

- ❖ TB2TurnLineSampleController.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: TB2AutoSampleController.cpp
 - ❖ 目標値: 1700
- ❖ TB2AutoSampleController.cppをビルドしたら、ライントレースを行ってみてください

```
$ cd ~/choreonoid/
```

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

ライントレース | 追加課題

- ❖ TB2StopLineSampleController.cppを修正して、停止のほかに旋回や後退などいろいろな動きをさせてみてください
- ❖ 次スライド以降を参考にして、ライントレースのグラフ化に挑戦してください

ライントレースのグラフ化

- ❖ matplotlib-cppを使用したグラフ作成
 - ❖ 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
 - ❖ 『¥n』と表示されている場合、
“¥”をバックスラッシュ(\)に変更

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 << "matplotlib start" << endl;

    // ファイル名
    string 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』と表示されている場合, “¥”をバックスラッシュ(\)に変更
- ❖ 『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/python3.6m -lstdc++ -lpython3.6m -std=c++11 && ${cwd}/a.out
```

❖ 『plot.sh』 の実行

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

```
$ sudo chmod 755 plot.sh
```

```
$ ./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/python3.6m -lstdc++ -lpython3.6m -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

- ❖ TB2TurnLineSampleControllerと同様の記述を行う
- ❖ 以下のインクルードを追加
 - ❖ `fstream`
- ❖ PID制御の定数の変更
- ❖ ファイル出力に必要なとなる変数の定義

ライントレース | 課題解答例

```
#include <fstream>
// TB2TurnLineSampleControllerと同様

class TB2AutoSampleController : public SimpleController
{
    // TB2TurnLineSampleController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
    SimpleControllerIO* io;
    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
{
    this->io = io;
    // TB2TurnLineSampleController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;  
}
```

ライントレース | 課題解答例

- ❖ $\text{diff_L}[1] = (\text{TARGET} - \text{cnt}[2]) / 500$
 - ❖ 偏差値を取得 (目標値 - 黄色の割合)
 - ❖ 偏差が大きいため, 500で割っている
- ❖ $\text{diff_R}[1] = -(\text{TARGET} - \text{cnt}[1]) / 500$
 - ❖ 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 \times (速度 - 旋回速度)
 - ❖ 積分定数 \times 偏差の積分値 \times 旋回速度
 - ❖ 微分定数 \times 偏差の微分値 \times 旋回速度

ライントレース | 課題解答例

```
virtual bool control() override
{
    // TB2TurnLineSampleControllerと同様

    diff_L[0] = diff_L[1];
    diff_L[1] = (TARGET - cnt[2]) / 500;
    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]) / 500;
    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])) + Ki * (integral[0] * va * d) + Kd * (derivation[0] * va * d);
        dq_target[1] = Kp * (vx + (va * d * diff_R[1])) + Ki * (integral[1] * va * d) + Kd * (derivation[1] * va * d);
    }
}
```

ライントレース | 課題解答例

- ❖ `if(cnt[1] == 0 && 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、`TB2TurnLineSampleController`と同様
- ❖ 0.1秒毎に時間、X座標、Y座標をファイルに出力
 - ❖ 『`¥t`』と表示されている場合、
“`¥`”をバックスラッシュ(`\`)に変更

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 = io->currentTime() - startTime;
// 0.1s毎にファイル出力を行う
if(waitTime >= INTERVAL){
    ofs << io->currentTime() << "\t" << rootLink->position().translation().x() << "\t" << rootLink->position().translation().y() << "\t" << endl;
    startTime = io->currentTime();
}

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;
    }
    cameraConnection.disconnect();
    ofs.close();
}

void onCameraStateChanged()
{
    // TB2StopLineSampleControllerと同様
}
};

CNOID_IMPLEMENT_SIMPLE_CONTROLLER_FACTORY(TB2AutoSampleController)
```