

慣性センサを活用した自己姿勢検出型自律移動ロボットの研究

情報技術科 3年 五十嵐 亜聖

電気科 3年 城倉 伸紀

指導教諭 高田 直人

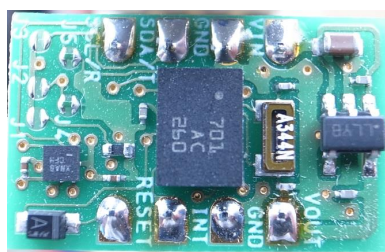
1. はじめに

自律移動ロボットの走行は、自身の姿勢（方向）を維持するために多くの場合、床面に貼り付けたトレースラインや前方や側面の壁などを活用してきた。また、トレースラインや壁がない環境では、自律移動ロボットに x 方向と y 方向の移動量が検出できるロータリエンコーダを搭載することで直進走行の姿勢制御を行ってきた。しかし、車体のヨー軸（旋回）方向の移動では、 $x \cdot y$ 方向のロータリエンコーダは旋回角度の検出精度が悪く、希望する方向への旋回が困難であるという課題をもっていた。この課題を解決するために本研究では、地磁気センサ、重力加速度センサ、角速度センサを内蔵した慣性センサ（IMU）を活用し、ロボットの姿勢に関する絶対位置情報の取得を行った。また、取得した姿勢情報を活用した自律移動ロボットの旋回方向制御について研究を行った。

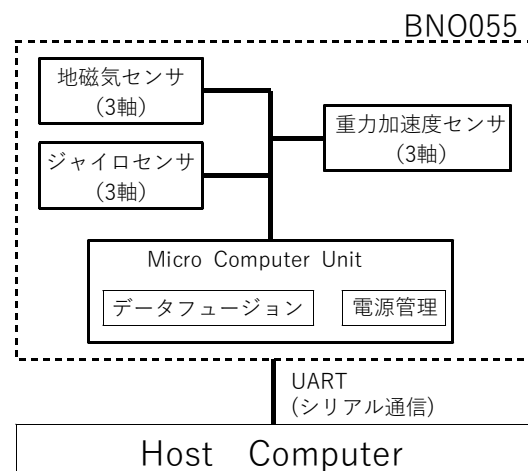
2. 慣性センサ（Inertial Measurement Unit BNO055）

2.1 BNO055のハードウェア仕様

慣性センサ BNO055 はドイツの BOSCH 社によって開発され、14 ビットの分解能で検出できる加速度計と $\pm 2000\text{deg/s}$ の範囲を 16 ビット分解能で検出できるジャイロセンサ、さらに地磁気センサを搭載している。加速度センサ、ジャイロセンサ、地磁気センサはいずれも 3 軸(x,y,z)方向に検出感度を有する 9 軸絶対方位センサと呼ばれる製品である。図 1(a)にセンサの外観を、図 1(b)にセンサのブロック図を示す。



(a)BNO055の外観



(b)ブロック図

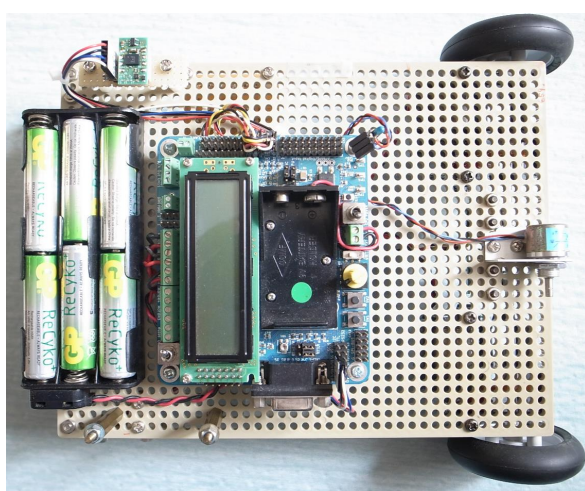
図1 慣性センサ BNO055の外観と内部構成

2.2 BNO055のセンサフュージョンモード

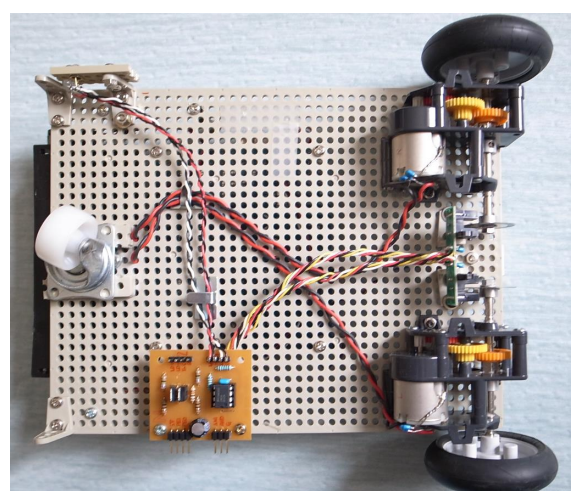
センサフュージョンモードとは、3次元空間内でセンサが置かれた向きを複数のセンサを使って計測し、その計算結果を出力するモードである。この研究では、地球が持つ磁場を使い、北磁極を基準にした絶対方位センサとして使用した。このモードでは、地球の磁場、地球の重力加速度、角速度について x,y,z 方向の3次元で計測し、複数のセンサ情報から計算によりオイラー角（ロール角、ピッチ角、ヨー角）を求めるものである。オイラー角は10msのサンプリング周期で、2byteのデジタル情報として取得することができる。今回は、自律移動ロボットの旋回角度制御に使用するため、ヨー角情報のみを利用した。

3. 自律移動ロボットの構成

慣性センサ BNO055 は、車体のヨー軸（旋回方向）の角度検出センサとして使用した。その制御効果を確認するために、図2に示すような台車を制御対象とした。台車は左右独立駆動方式とし、左右の駆動輪にはロータリエンコーダ（90パルス/回転）を設けてある。駆動系の電源は7.2V（NiMH充電電池7本直列）、ハイパワーギヤボックス（タミヤ）を減速比41.7:1で使用している。



(a)台車の上面（台車左上がBNO055）



(b)台車の裏面

図2 自律移動ロボットの外観

4. 慣性センサのヨー軸情報による台車の回転方向制御

4.1 制御方式

慣性センサを台車に取り付けることにより、北磁極を基準にして台車の姿勢（方位角）を知ることができる。この情報を基準にして、台車を現在の状態から希望する角度だけ旋回（その場回転）する制御系について検討した。台車の旋回制御には、位置制御系のI-PD制御（比例微分先行型PID制御）を適用した。一般的なPID制御では、台車が初期位置状態で目標値を新たに設定した場合、大きな操作量が発生し、駆動モータや台車系に悪影

響を及ぼすことがある。それに対して I-PD 制御は、初期操作量が抑制されるため、オーバーシュートが発生しにくいという特徴がある。位置制御系における I-PD 制御のブロック線図を図 3 に示す。

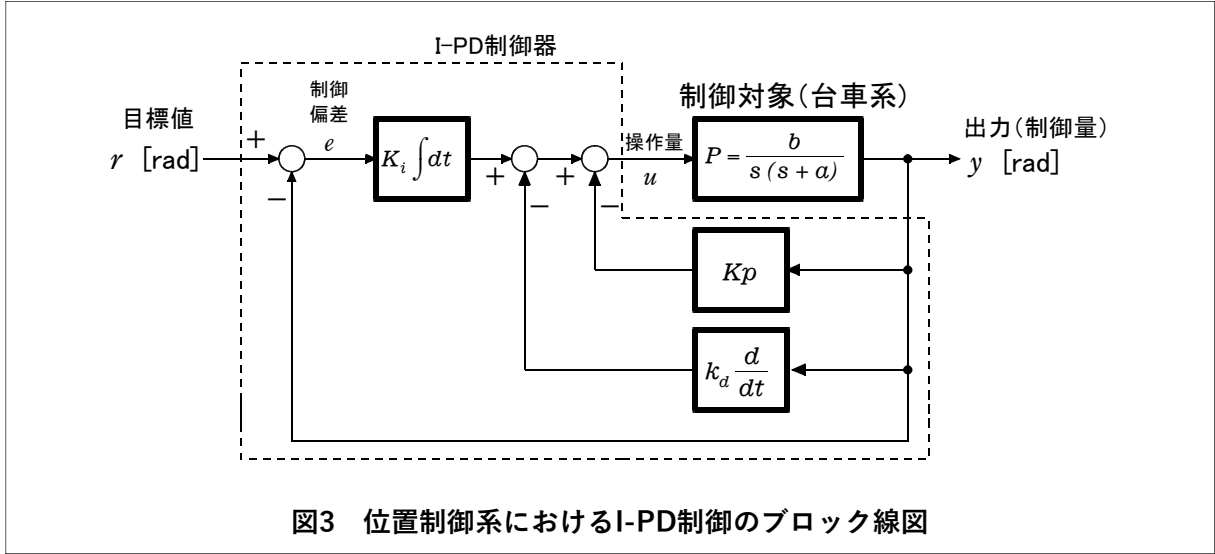


図 3 に示すブロック線図において、操作量 u は次のようになる。

$$u = k_i \int (r - y) dt - k_p y - k_d \frac{d}{dt} y \quad (1)$$

また、図 3 において、位置制御系の台車モデルを $P = \frac{b}{s(s+a)}$ としたとき、目標値 $r(\text{rad})$ から制御量(台車のヨー角) $y(\text{rad})$ までの伝達関数 P_{cl} は式(2)となる。

$$P_{cl} = \frac{b k_i}{s^3 + (a + b k_d) s^2 + b k_p s + b k_i} \quad (2)$$

I-PD 制御器の比例ゲイン k_p 、微分ゲイン k_d 、積分ゲイン k_i の設計には、式(2)より台車系のパラメータ a と b が必要である。そこで台車系のパラメータ a と b を求めるために、周波数応答法によってパラメータ同定を行った。同定実験は、比例制御系を構成した台車系において、入力信号の振幅を 0.524rad (30°) とし、比例ゲイン $k_p=10$ にして 0.1Hz から 3.0Hz までの正弦波信号を目標値として与えた。入力信号に対する応答は、振幅比と位相差から図 4 のようなボード線図が得られた。このボード線図より、台車系モデルを近似的に $P = \frac{b}{s(s+a)}$ とした場合、実験値に最も適合するパラメータ a と b を数値探索によって求め、 $a = 23.6$ 、 $b = 8.59$ が得られた。比例ゲイン k_p 、微分ゲイン k_d 、積分ゲイン k_i は式(2)より、分母の特性多項式の極を λ_1 、 λ_2 、 λ_3 とすると、式(3)によって設計することができる。

$$k_p = \frac{\lambda_1 \lambda_2 + \lambda_2 \lambda_3 + \lambda_1 \lambda_3}{b} \quad k_d = -\frac{(a + \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)}{b} \quad k_i = -\frac{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3}{b} \quad (3)$$

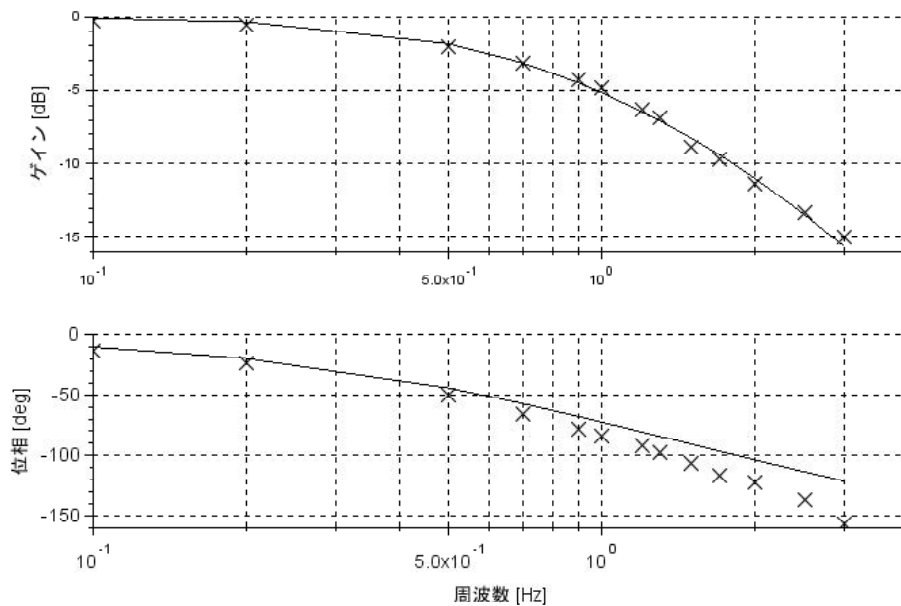


図4 台車系の旋回方向における周波数応答（振幅0.524rad, $K_p=10$ ）

4.2 制御プログラム

車体を指定した角度まで旋回する制御演算関数 `body_rote_u()` 関数を作成した。この関数は、IMU センサからの角度情報を目標値と比較して偏差を求め、I-PD 制御演算を行って操作量を計算するものである。タイマ割込を使って 10ms ごとにこの関数をコールして制御演算を行っている。`body_rote_u()` 関数をリスト 1 に示す。

リスト1 I-PD制御によるフィードバック制御関数（旋回制御）

```
void body_rote_u(void) {
    // 車体旋回の制御演算処理
    if(f.rote == 1){
        get_imu_data(); // IMUによるYaw角度取得
        er_ang = ang_cmd - angl; // 偏差(rad単位)
        ang_int += er_ang * STIME; // 積分
        uang = Ki * ang_int - Kp * angl - Kd * (angl - angl_old) * INVST; // I-PDによる操作量u
        angl_old = angl;
        if(fabs(er_ang) < 0.008){ // 偏差の収束判定0.008rad (0.5deg)
            ssc++;
            if(ssc > 100) f.rote = 0; // 収束が1sec続けば収束完了
        }
        if(uang >= 0){
            set_motor_dir1(F,R); set_motor_dir2(R,F); // 左回転
        }
        else { set_motor_dir1(R,F); set_motor_dir2(F,R); // 右回転
            uang = - uang;
        }
        dtm = uang * V2DT;
        if(dtm > 100) dtm = 95; // 上限リミッタ
        set_pwm_duty1(dtm, dtm); set_pwm_duty2(dtm, dtm);
    }
    else {
        set_motor_dir1(B,B); set_motor_dir2(B,B);
    }
}
```

4.3 制御実験結果

I-PD 制御による旋回制御のゲイン設計は、式(3)を使って行った。台車が旋回を開始して目標値への追従を完了する整定時間を約 1 秒とし、指定極を $\lambda_1 = -3$, $\lambda_2 = -5$, $\lambda_3 = -8$ とすると、比例ゲイン $k_p = 9.197$, 積分ゲイン $k_i = 13.97$, 微分ゲイン $k_d = -0.8847$ となった。この値を式(1)に代入することによって得られる操作量 u によって駆動輪のモータを制御することにより、目標とする旋回角度に対する応答を調べた。また、式(2)を使うことでシミュレーションを行って理論値と実験値を比較した。図 5 は台車を 90° (1.57rad) 旋回した場合の制御量のシミュレーションと実験結果の比較である。シミュレーションと実験結果が良好に一致し、目標値に追従していることがわかった。図 6 は操作量に関して、シミュレーションと実験結果の比較である。操作量の形は概ね一致しているが、最大値が異なっている。これは路面と駆動輪との摩擦による影響で、理論値よりも大きな操作量が必要になったためと考えられる。

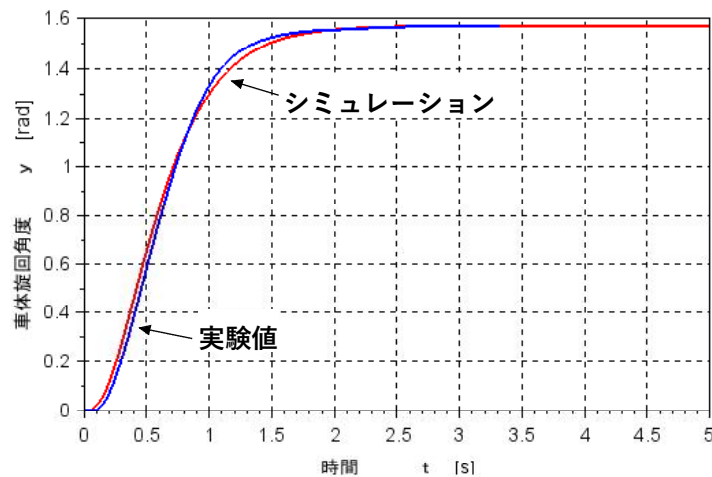


図5 台車系の旋回方向における制御実験結果（制御量）

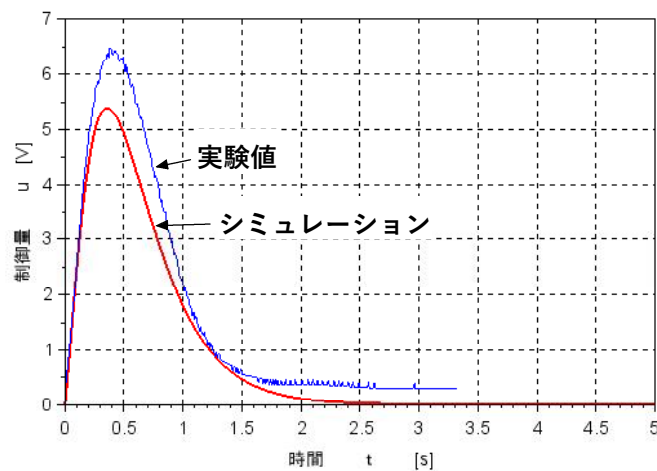


図6 台車系の旋回方向における制御実験結果（操作量）

5 おわりに

慣性センサを使った自律移動型ロボットのヨー軸（旋回）方向の姿勢制御について研究を行った。台車系モデルのパラメータ同定を周波数応答法により行い、その値を元に I-PD 制御（比例微分先行型 PID 制御）によって目標値に良好に追従する制御結果を得ることができた。その一方で、操作量の最大値がシミュレーションよりも大きな値になることが判明した。過大な操作量は駆動電源（バッテリー）の電圧降下をもたらし、制御用マイコンの動作が不安定になったり、リセットされてしまうことがある。過大な操作量が発生しないようにするためには、I-PD 制御器の比例ゲイン k_p 、微分ゲイン k_d 、積分ゲイン k_i の値を抑制することによって対応できるが、整定時間が長くなってしまう。整定時間とゲインの関係が適切になるよう実験的に検証する必要があると考えられる。

最後に、研究助成にあたり尽力いただいた関係者の皆様に感謝を申し上げます。

参考文献

- [1] 実例で学ぶ現代制御，川谷亮治著，高度ポリテクセンター(2023)