

MIZUHO(マイクロマウス)の開発 ～壁センサの新提案～

Cheese* 12 井土拓海 (@idt12312)

平成 28 年 12 月 5 日

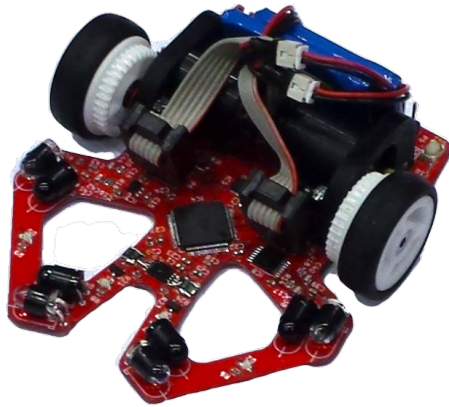


図 1: MIZUHO の外観

1 はじめに

マイクロマウスの競技のため、MIZUHO(図 1) という機体を製作した。マイクロマウスの機体の製作は初めてであるため、基本的にはよく知られたものを組み合わせさせて製作をした。しかし、唯一壁センサ周りに関しては既存のものを真似るだけではなく、独自に開発を行った。そのため、本報告書では独自に開発をした壁センサについて述べる。

マイクロマウスにおいて、壁センサはフィールドにある壁の有無や壁との距離を計測するために使われ、フィールドに対する絶対的な位置情報を取得できる唯一のセンサである。そのため、競技発足初期から現在に至るまで、また初心者から上級者までほとんどの機体で壁センサは利用されている。しかしネット上でも見られる広く知られている壁センサの構成方法 [2] には後の章で述べる問題点があるため、新たな壁センサの構成方法を開発するに至った。

ちなみに、MIZUHO の開発に関するソースコード、基板の設計データ (KiCad) は全て [github\[1\]](https://github.com/idt12312/mizuho) にて公開をしている。製作過程や Tips などは [id 研ブログ \(http://idken.net\)](http://idken.net) で公開をしているので、こちらも参照していただきたい。

2 壁センサの概要

MIZUHO はフィールドの壁情報を取得するために壁センサを 4 つ搭載している。左右の壁を見るために 2 つ、前方の壁を見るために 2 つ搭載している (図 1)。

マイクロマウスの壁を見るセンサは赤外線 LED を利用したものが最も一般的である。赤外線 LED の光を壁に当て、反射して返ってくる光量を測定することで壁の有無・壁との距離を計測することができる。なお、光量の計測にはフォトダイオードやフォトトランジスタを使用されることが多い。しかしこの方法の問題点として、照明などの周囲の光の影響を受けやすいというものが挙げられる。

この問題を解決するため、照射する光を変調するという手法が用いられている。具体的には赤外線 LED を十分に高い周波数で点滅させ、LED が ON になっているときの受光した信号と OFF になっているときに受光した信号の差をとる [2](以降従来手法と呼ぶ) というものである。会場の照明として水銀灯や蛍光灯があり、それらは数 100Hz で点滅をしているため、例えば数 kHz の周波数で変調することで照明の影響を受けなくすることができる。変調方法として、LED を一定の周波数で点滅させる方法や単純に LED を短いパルス状に点灯するという方法が用いられている。

従来手法は信号の振幅を計測する手法であるが、波形がなまりすぎている場合や変調した周波数に近い (オーダーが同じくらい) 外乱がある場合は精度よく計測をすることができないことが予想される。そこで今回は光を変調して発光、受光する回路とその変調された信号の強度を精度よく算出する方法を提案する。

提案するシステムである壁センサの関連の構成は図 2 のようになっている。

発光回路はマイコンから入力される信号に応じて LED を点灯する。ここでは部品のばらつきによって照射強度にばらつきがでない工夫がしてある。受光回路では、マイコンでの信号処理の前段階として 1 次の LPF と HPF を施しつつ、信号を増幅している。マイコン内部では、受光した信号を ADC を通して取り込み、直交復調を用いることで特定の周波数の強度を算出し

*ロ技研内のマイクロマウスの機体の製作、大会への出場を行う研究室。2016 年 12 月に設立。

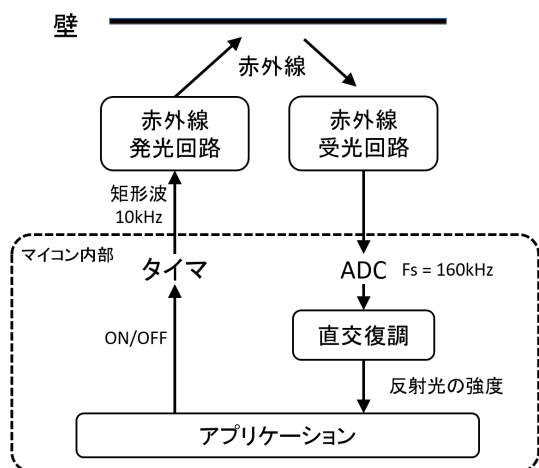


図 2: 壁センサのシステム構成

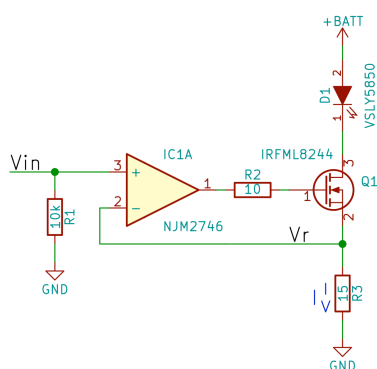


図 3: 赤外線発光回路

ている。

以降の章では発光回路, 受光回路, 直交復調の詳細について述べる。

3 発光回路

MIZUHO の壁センサの発光回路には図 3 の回路を用いた。この回路はオペアンプ, FET, R_3 の抵抗で定電流回路を構成している。この定電流回路により LED には一定の電流が流れるため、電源電圧の変動や LED の順方向電圧などの部品によるばらつきの影響を受けないようにすることができる。なお、実際には赤外線 LED を 2 個直列にしてこの回路を 2 セット用いて実装している。

LED に流れる電流はオペアンプの入力電圧 V_{in} によってアナログ的に変化させることができる。オペアンプによって $V_r = V_{in}$ になるように FET が駆動されるので、 R_3 には常に V_{in} の電圧が印加される。FET のドレインからゲートにはほとんど電流が流れないため、LED に流れる電流 I は

$$I = \frac{V_{in}}{R_3}$$

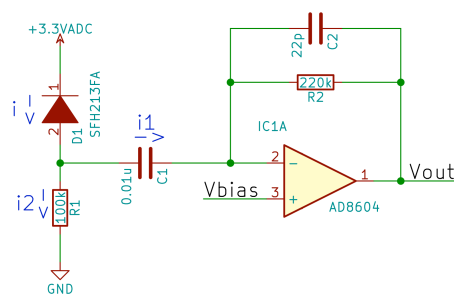


図 4: 赤外線受光回路

により決まる。

この回路を製作するには次の 3 点に注意する必要がある。一つ目は抵抗での消費電力である。抵抗では $\frac{V_r^2}{R}$ の電力が消費されることになるので、それに耐えられる抵抗を選択する必要がある。ただし、抵抗での消費電力は実効電力で考えればよいため、 V_{in} に矩形波や短いパルスを入力する場合は $\frac{V_r^2}{R}$ よりも少ない消費電力に耐えれば十分である。二つ目はオペアンプと FET で構成されるフィードバックループの安定性についてである。図 3 のオペアンプはユニティゲインで動作することになり、開ループの位相余裕は最も少ない状態になる。FET のゲート容量、ゲート抵抗 (R_2)、オペアンプの位相余裕を見て十分に位相余裕を保てるように部品を選定する必要がある。三つ目は LED の順方向電圧についてである。この回路が正常に動作するためには、FET のドレインソース間に十分 (線形 or 飽和領域で動作するように) に電圧がかかっている必要がある。FET には電源電圧から LED の順方向電圧と $V_r(V_{in})$ を引いた電圧がかかるので、それが十分に大きくなるように設計をする必要がある。

4 受光回路

MIZUHO の壁センサの受光回路には図 4 の回路を用いた。この回路ではフォトダーオードに流れる電流を電圧に変換しつつ、増幅、BPF としての機能も持っている。

光を電子信号に変換するためにフォトダイオードを使用している。フォトダイオード基本的にはダイオードと同じ動作をし、光を受けるとダイオードの逆方向に電流を流すという性質がある。フォトリンジスタと比較をすると、フォトリンジスタよりも感度が低い線形性、応答速度の面で優れている [3]。今回は高い周波数成分を持つ変調した信号を受ける必要があるために、応答速度の面からフォトダイオードを採用した。

フォトダイオードには、逆バイアス電圧を掛けることで応答速度、感度がともに増加する性質があるため [3]、図 4 のような回路構成になっている。

フォトダイオードは受光した光の強度を電流に変換するため、マイコンの ADC で読み取るためにこの電流を電圧に変換する必要がある。今回は I-V 変換回路として図 4 中のオペアンプと R_2 で構成されるものを利用している。

この回路では光の強度を電圧情報に変換するだけでなく、周波数フィルタも構成している。HPF は蛍光灯などの外乱抑制のためではなく、定常的 (0Hz) な環境光やフォトダイオードの暗電流によってオペアンプの入力が飽和しないようにする働きをする。LPF は後段のマイコンでの信号処理のために、ADC のナイキスト周波数において十分に信号の強度を下げる働きをする。回路の周波数特性と増幅率を解析するため、フォトダイオードに逆方向に流れる電流を i とし、 i からこの回路の出力 V_{out} までの伝達関数を小信号解析によって求める。小信号解析をするため、電源の +3.3VADC と V_{bias} は接地されているものとして考える。まずは R_1 と C_1 に流れる電流をそれぞれ i_1, i_2 とすると

$$i = i_1 + i_2 \quad (1)$$

という関係が成り立つ。オペアンプが理想的なオペアンプであるとするとオペアンプの-端子に電流は流れ込まず、電位は+端子と同じ 0V になる。そのため C_1 に流れた i_2 は全て R_2, C_2 に流れることになる。このことから、

$$i_2 = -\left(\frac{1}{R_2} + C_2 s\right)v_{out} \quad (2)$$

という関係が成り立つ。また、 C_1 のオペアンプ側は 0V であるので

$$R_1 i_1 = \frac{1}{C_1 s} i_2 \quad (3)$$

という関係が成り立つ。式 (1)(2)(3) から v_{out} と i の関係を計算すると

$$v_{out} = -\frac{R_1 C_1 s}{R_1 C_1 s + 1} \frac{1}{R_2 C_2 s + 1} R_2 i \quad (4)$$

のようになる。式 (4) の 1 はよく知られている RC で構成する HPF と同じ伝達関数である。ゆえに高周波域 (周波数が無限大) でのゲインは 1 でカットオフ周波数は $\frac{1}{2\pi R_1 C_1}$ になる。また、式 (4) の 2 は RC で構成される LPF と同じ伝達関数である。ゆえに低周波域 (周波数が 0) でのゲインは 1 で、カットオフ周波数は $\frac{1}{2\pi R_2 C_2}$ になる。最後に、式 (4) の R_2 は上記 LPF と HPF で構成される BPF の通過域のゲインになっている。このように式 (4) 中には LPF と HPF 両方の成分が含まれているが、それぞれ独立した部品のパラメータによって設計することができるので、所望のゲイン、HPF や LPF の特性を自由に設定することができる。

MIZUHO において実際に使用した部品定数は図 4 内に記されているものである。図 2 にある通り、赤外線

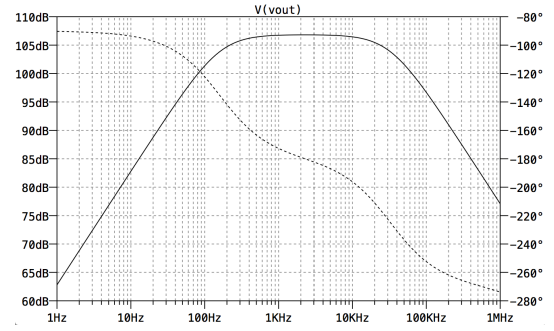


図 5: 受光回路の入力電流 → 出力電圧の周波数特性

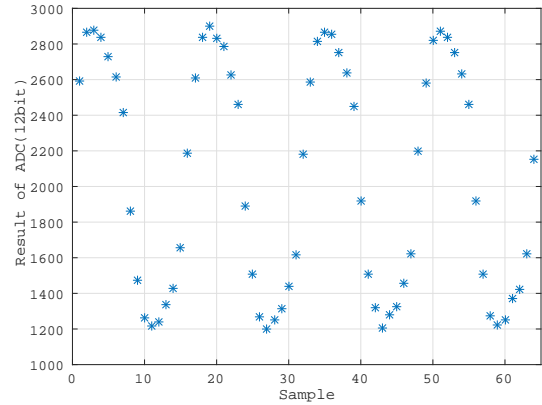


図 6: 受光した信号を ADC でサンプルした結果

LED は 10kHz の矩形波で駆動するため、10kHz は通過をさせる BPF になるようにした。矩形波で駆動するので 10kHz の奇数の整数倍で高調波がふくまれ、ADC のサンプルにおけるナイキスト周波数ではそれらの高調波が抑えられている必要がある。LPF は 10kHz のすぐ上にカットオフ周波数を持つように設計した。全体のゲインは実験により、マイクロマウスの壁がうまく検出できるように飽和などに気をつけながら決定をした。ここでの HPF は先に述べた通り、蛍光灯などの外乱抑制のためではなく、定常的 (0Hz) な環境光でオペアンプの入力が飽和しないように 0Hz をカットできさえすれば十分である。とはいえ低周波域をカットすることに越したことはない。10kHz あたりに影響を与えない 100Hz あたりにカットオフ周波数を設定した。図 4 の部品定数を用いた時の実際の周波数応答は図 5 のようになった。なお、この周波数応答の解析には LTSpice を使用した。

この受光回路の出力をマイコンの ADC でサンプルすると、図 6 のような信号が得られた。ここでは赤外線 LED は 10kHz 矩形波で駆動し、ADC のフルレンジは 3.3V12bit、160kHz で 64 サンプルをしている。図 6 をみると、信号が 2000 あたりを中心に振動している。これは受光信号が HPF で 0Hz 成分が消え、図 4 の V_{bias} によって 1.65V のオフセットが乗っているからである。

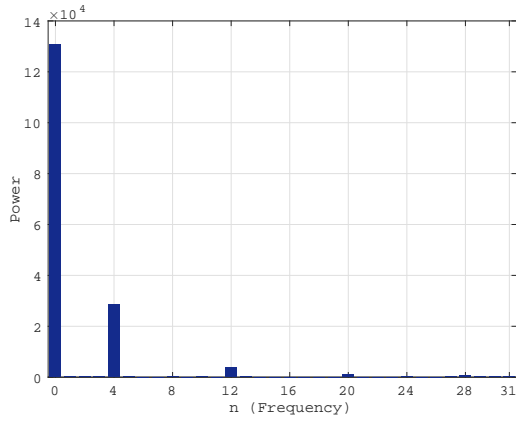


図 7: ADC でサンプルした信号の周波数分布

5 直交復調

前章までで、マイコンに図 6 のような時系列信号を取り込むことができた。本章では、この時系列信号から赤外線 LED の発した信号に起因するものだけを取り出し、さらにその信号の強度を算出する方法について述べる。

図 6 の信号の周波数分布をプロットすると図 7 のようになった。データ数は $N = 64$ で、サンプル周波数は $F_s = 160\text{kHz}$ である。 N 個の時系列信号を離散フーリエ変換したので、図 7 の横軸における 1 は $\frac{F_s}{N} [\text{Hz}]$ に相当する。ゆえに図 7 の横軸の n というのは $\frac{F_s}{N} n [\text{Hz}]$ という意味である。

図 7 によると 0Hz 以外では $10\text{kHz} (n = 4)$ のところにピークが立っている。赤外線 LED を 10kHz の矩形波で駆動したことに起因すると考えられる。矩形波で駆動したため高調波も見られるが、矩形波の振幅と基本周波数 (10kHz) は比例するため、今回は 10kHz 成分のみを取り出す方法を考える。

特定の周波数成分を取り出す方法として、信号をフーリエ変換する方法が一般的に使われている。これはフーリエ変換によって図 7 の周波数応答全体が得られるので、 $n = 4$ のところの強度のみを取り出せばよい。

時系列信号を $x[k] \in \mathbb{R} (k = 0, \dots, N-1)$, $x[k]$ を離散フーリエ変換した信号を $X[n] \in \mathbb{C} (n = 0, \dots, N-1)$ とすると、離散フーリエ変換は

$$X[n] = \sum_{k=0}^{N-1} x[k] \exp(-j \frac{2\pi n k}{N}) \quad (n = 0, \dots, N-1) \quad (5)$$

で表される。 $X[n]$ は複素数で、複素数の絶対値を計算することでその周波数の強度を計算することができる。

DFT は式 (5) の計算を $n = 0, \dots, N-1$ 全てに対して行うものであるが、今回は全ての周波数の強度を計算する必要はないので、式 (5) を特定ひとつの n を計算すれば十分である。この計算はそこまで計算量が多くない

(FFT よりも少ない) ので、マイコンで実行することも可能である。実際の MIZUHO では $F_s = 10\text{kHz}$, $N = 64$, $n = 4$ で計算をしている。

この方法は DFT の一部である、式 (5) をとある n について計算するものであると述べたが、別の解釈をすることもできる。式 (5) の n を固定し、 \exp を展開すると次式のように書ける。

$$X[n] = \sum_{k=0}^{N-1} (x[k] \cos(-\frac{2\pi n k}{N}) + j x[k] \sin(-\frac{2\pi n k}{N})) \quad (6)$$

式 (6) は時系列信号に対してお互いに直交する \sin と \cos と掛け算をしている。このように同じ周波数を持ち直交する二つの正弦波を掛け、掛け算をした正弦波と同じ周波数を持つ成分の強度を取り出す操作のことを直交復調という。直交復調は電波を使った通信分野などで広く使われている。今回紹介した方法はフーリエ変換から式を導出したものであるが、変調した信号で LED を駆動し、受光信号を復調するという意味で筆者は直交復調と呼ぶのがふさわしいと考えている。

直交復調の実際の実装については [github\[1\]](https://github.com/idt12312/MIZUHO) にコードがあるのでそちらを参照していただきたい。

6 おわりに

本報告書ではマイクロマウス機体の MIZUHO に使用した壁センサについて、発光回路、受光回路、直交復調の 3 つの要素に分けて原理や設計方法を述べた。提案手法と既存の手法において、実際の壁の検出性能などがどう違うのかについてはまだ比較ができていないので、その性能を検証をすることが今後の課題である。

参考文献

- [1] idt12312/MIZUHO の github リポジトリ, <https://github.com/idt12312/MIZUHO>
- [2] RT Robot Shop, マイクロマウスのセンサについて, <http://www.rt-shop.jp/blog/archives/2139>
- [3] 谷 善平, 改訂 オプト・デバイス応用ノウハウ (1992), CQ 出版