

1 赤外線センサ回路の製作

1.1 はじめに

赤外線センサはロボットの目となる重要なセンサであり、今回のテーマでは、灯台の方角などを知ることによってゲームをより優位に展開するためには必須と言ってよい。ここで紹介する赤外線センサ回路は、

- 高入力インピーダンス増幅回路
- 交流増幅回路
- 整流・平滑化回路
- 差動増幅回路

から構成され、オペアンプの基本回路とそのちょっとした応用になっている。同期検波回路のような高い周波数弁別能力や、オペアンプのオフセットやドリフトなどと弁別し得ないような微弱信号の増幅はあきらめなければならないが、非常に簡単な回路でそこそこの性能が得られる。

1.2 原理

灯台は、赤外発光ダイオード TLN115 を用いているので、ピーク発光波長は 950nm である。そこで、ピーク感度波長 960nm をもつフォトダイオード TPS703 を用いて灯台の光を検出し、放射照度を電圧として出力する。灯台の光は 2.5kHz で発振しているので、交流増幅してから、整流・平滑化する。以下に、回路の原理を順を追って説明する。

1.2.1 第1段階の増幅 —高入力インピーダンス増幅回路—

フォトダイオードは光をあてると PN 接合面で電圧が発生し、負荷を接続すると電流が流れる。このため、フォトダイオードは電流源とみなせるので、伝送経路でノイズを拾うことは少ない。また、PIN フォトダイオードに逆バイアスをかけると電極間容量が減り、応答速度が速くなるのでパルス変調にも対応できる。

フォトダイオードの出力は数 μA から数十 μA と微小な電流しか取り出せない。したがって、入力インピーダンスの高い増幅回路を用いて、電流から電圧に変換し、後段の交流増幅回路へと電流を供給できるようにする。

ここでは応答の速さを考慮して、フォトダイオード TPS703 に逆バイアスを掛け、その出力電流を反転増幅回路で増幅して電圧に変換する。すなわち、TPS703 のカソード(陰極)を +5V に、アノード(陽極)を仮想接地(0V)されているオペアンプの反転入力端子につなぐ(図.1.1-(a))。

オペアンプとして、入力インピーダンスの非常に大きい($10^{12}\Omega$ 程度) JFET 入力型または CMOS 型を用いることにはすれば、反転入力端子へは電流は流れないと考えてよいので、フォトダイオードの出力電流 i_i はすべて抵抗 R へと流れ込み、 v_o は

$$v_o = -R i_i$$

となる。

1.2.2 第2段階の増幅 —交流増幅—

ここでは、交流増幅として、簡単な1次のハイパスフィルタ(図.1.1-(b))を取り上げる。このままでは、蛍光灯の光などにも反応してしまうので、周波数選択性を高めるため、2次共振によるバンドパスフィルタか、PLL を用いた狭帯域な同期検波回路などを用いる必要があるかも知れない。

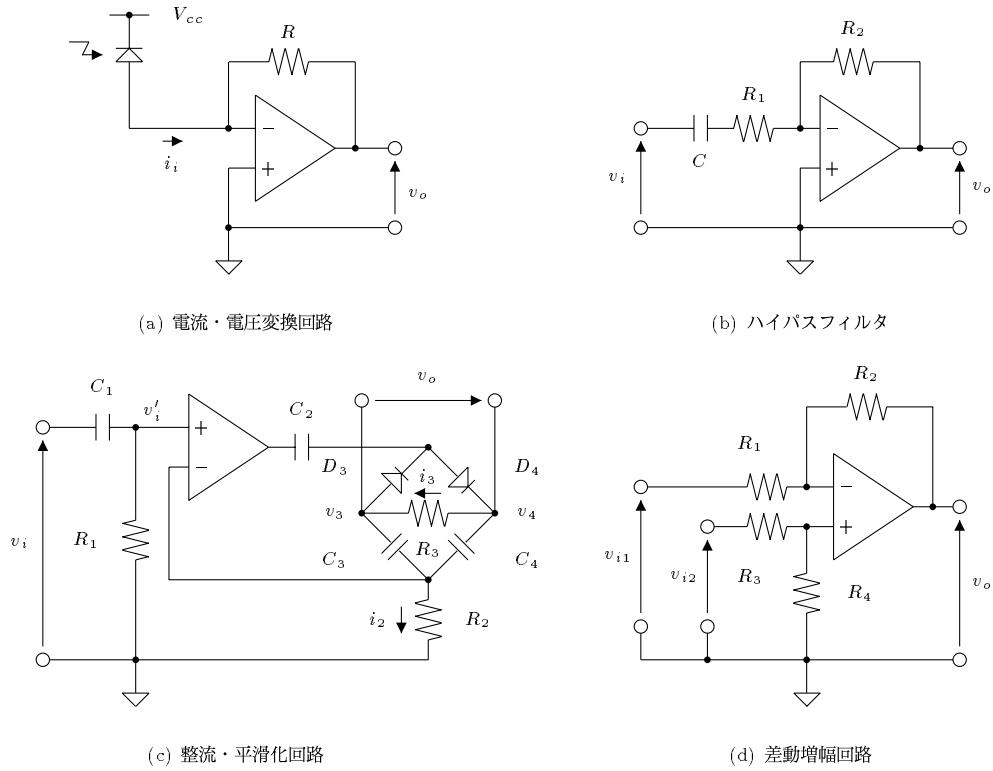


図 1.1: 赤外線センサ回路で用いる 4 つの増幅回路

ハイパスフィルタの伝達関数は、

$$\frac{v_o}{v_i} = -\frac{CR_2s}{1+CR_1s}$$

である。直流成分をカットして、 $1/(2\pi CR_1)$ Hz 以上の信号を、 R_2/R_1 倍する。

1.2.3 第3段階の増幅 —整流・平滑化—

ダイオードとコンデンサによるブリッジ回路により整流と平滑化回路を実現する(図.1.1-(c))。ダイオード、コンデンサなどが負帰還ループの中に入っているため、これらのインピーダンスの変化や非線形性などの影響が除かれる[1]。

入力段の CR 回路は直流成分をカットするためのもので、交流信号の場合は、 $v'_i = v_i$ と考えてよい。負帰還によって virtual short[2] しているはずだから反転入力端子の電圧も v_i であり、抵抗 R_2 に流れる電流 i_2 は

$$i_2 = v_i/R_2$$

である。反転入力端子には電流は流れないので、 i_2 は v_i の正負に応じて D_4 か D_3 のどちらか一方を通って C_4 か C_3 に流れ込む。 C_3, C_4 に充電された電荷は R_3 を介して放電される。

$$\bar{i}_2 = \begin{cases} i_2 & \text{if } i_2 \geq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \underline{i}_2 = \begin{cases} i_2 & \text{if } i_2 < 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

と定義し、 $C_3 = C_4 = C$ 、 $R_3 = 2R_2$ とおくと、

$$C(v_4 - v_i) = \int (\bar{i}_2 - i_3) dt$$

$$C(v_3 - v_i) = \int (\underline{i}_2 + i_3) dt$$

$$v_o := v_4 - v_3 = 2R_2 i_3$$

となる。 $\overline{i_2} - \underline{i_2} = |i_2| = |v_i|/R_2$ に注意すると、

$$\dot{v}_o = -\frac{1}{CR_2}v_o + \frac{1}{CR_2}|v_i|.$$

すなわち、

$$v_o = \frac{1}{1+CR_2s}|v_i|$$

である。時定数 CR_2 は灯台の点滅の数周期分にしておけばよいであろう。

オペアンプの出力についているコンデンサ C_2 は、直流成分をカットするためのもので、 C_3 や C_4 と同程度の容量にしておけばよい。

実験とレポート 1.1

整流・平滑化回路に周期 T の方形波、および、正弦波がそれぞれ入力として印加された場合、出力はどのような値になるか? 事前レポートとしてまとめよ。必要ならば周期 T や回路定数に仮定を設けてもよい。

1.2.4 第4段階の増幅 —差動増幅—

ブリッジ回路の出力を差動増幅して、マザーボードとグラウンドレベルをあわせる。差動増幅回路の同相信号除去比 (CMRR:common mode rejection ratio) は抵抗値の精度によって決まる [1, 2]。差動増幅回路を図.1.1-(d) に示す。

入力電圧 v_{i1}, v_{i2} と出力電圧 v_o の関係は、

$$v_o = -\frac{R_1 + R_2}{R_1} \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} v_{i1} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} v_{i2} \right)$$

となる。 $R_1 = R_3, R_2 = R_4$ とおくと、

$$v_o = -\frac{R_2}{R_1} (v_{i1} - v_{i2})$$

である。

実験とレポート 1.2

CMRR とは何か? 調べ、事前レポートとしてまとめよ。

1.3 赤外線センサ回路の説明

原理に基づいて構成した赤外線センサ回路の回路図を図.1.2 に、部品表を表.1.1 に示す。また、試作したセンサ回路の部品実装面、および、はんだ面の写真を図.1.3 に示す。回路定数の決定方法などを以下に説明する。

1.3.1 電源

オペアンプは、入力インピーダンスや単電源で動作可能などを考慮して、CMOS 型オペアンプ TLC274 を使うことにした。電源は +5V で動作可能なので、電池または安定化電源から 7.5V を供給し、3 端子レギュレータ 78L05 を用いて 5V とする。

電源ノイズの影響を軽減するために、バイパスコンデンサ [1, 2] として、 $47\mu F$ のアルミ電解コンデンサを電源部の 0-7.5V 間に入れておく。アルミ電解コンデンサの極性を間違えないこと。

また、交流増幅を行うために、基準となる電圧 2.5V を抵抗で分圧して作る。2.5V の基準ラインに流れ込む電流は、 2.5kHz 数十 μA 程度と考えられるので、基準ラインの電圧が変動しないように、余裕をみて、 $47\mu F$ のア

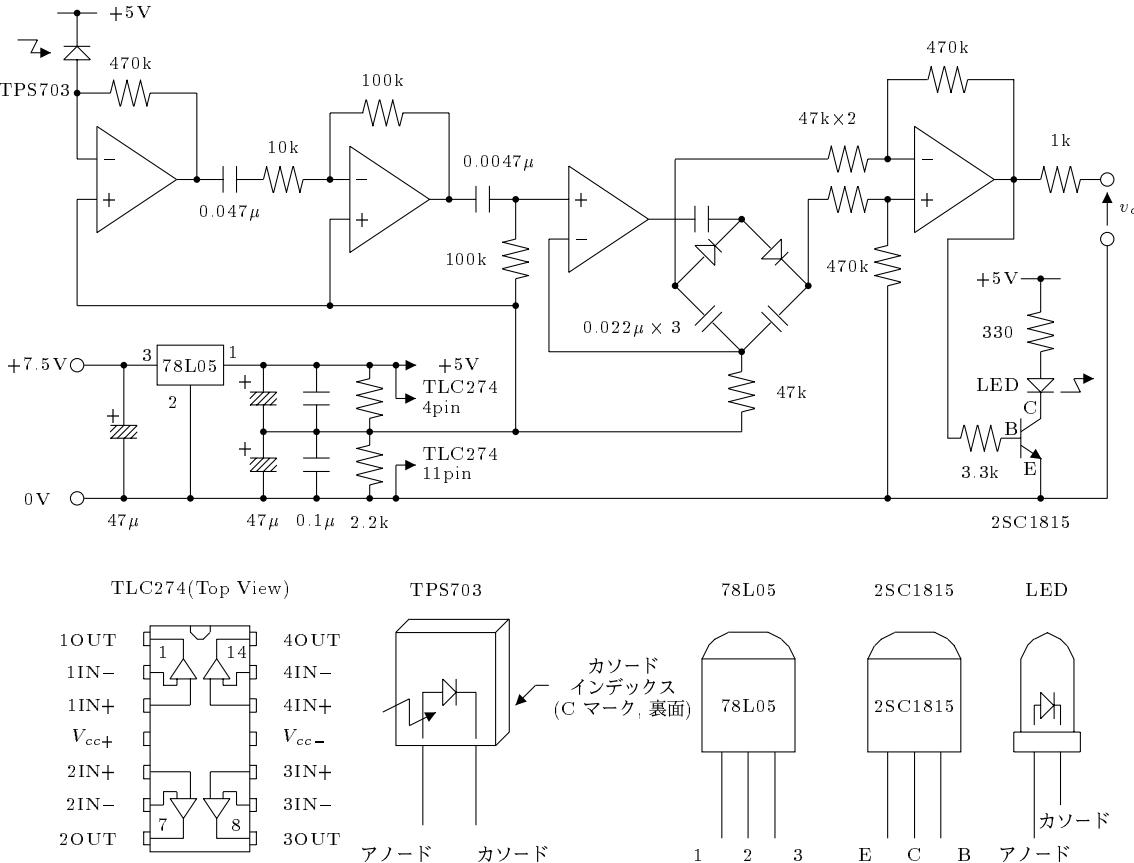


図 1.2: センサ回路図

ルミ電解コンデンサと $0.1\mu\text{F}$ の積層セラミックコンデンサを $0\text{--}2.5\text{V}$ 間、および、 $2.5\text{V}\text{--}5\text{V}$ 間にそれぞれひとつずつバイパスコンデンサとして入れておく。

cf. バイパスコンデンサという名前は用途を表すものである。一方、アルミ電解コンデンサや積層セラミックコンデンサという名前は、コンデンサを構成する材料や形状などを表している。

1.3.2 増幅回路の定数の決定

第1段階の増幅回路の帰還抵抗は、あまり大きくしきすぎると発振の恐れがあるので、 $100\text{k}\Omega$ から $470\text{k}\Omega$ 程度でよいだろう。応答が振動的になって動作が不安定な場合は、数 pF のコンデンサを抵抗と並列に挿入して1次フィルタにすると、振動成分を取り除くことができるかもしれない。

第2段階の交流増幅では、 2.5kHz の灯台の光をカットしないよう、原理のところで説明した式から、 $C = 0.047\mu\text{F}$ 、 $R_1 = 10\text{k}\Omega$ と決定すると、 338Hz 以下をカットするハイパスフィルタとなる。また、 $R_2 = 100\text{k}\Omega$ とすると、増幅率は10倍(20dB)となる。

第3段階の整流・平滑化回路では、平滑化の時定数を 1msec 程度とすればよいであろう。後段の差動増幅の入力抵抗を $47\text{k}\Omega$ とすると、 $R_2 = R_3/2 = 47\text{k}\Omega$ であり、コンデンサの容量は $C = 0.022\mu\text{F}$ となる。

第4段階の差動増幅回路の増幅率は前段までの回路の飽和やS/N比を考慮して決定する。増幅率を10倍と設定すると、差動増幅回路の出力が最大になったとき(TLC274は電源電圧が 5V のとき出力の最大値は 4V 程度)、前段の整流・平滑化回路の出力は、基準ラインの 2.5V を挟んで、 $\pm 1\text{V}$ 以内に納まり、飽和せずに済む。第4段階の増幅率を大きくしきすぎると、前段までの回路の出力電圧が小さい範囲でしか動作しなくなり、S/N比が悪くなる。

$47\text{k}\Omega$ と $470\text{k}\Omega$ の抵抗値はいくつかの抵抗の中から値の揃ったものを使うようにする。さらに、反転側および非反転側の抵抗の比がなるべく等しくなるように、 $47\text{k}\Omega$ と $470\text{k}\Omega$ のペアを作る。(本回路では、あまりCMRRは問題にならないけど、必要ならば金属皮膜抵抗を用いて精度を上げる。)

表 1.1: 部品表

半導体		
フォトダイオード	TPS703	1
OP.Amp.	TLC27M4ACN	1
ダイオード	1S1588	2
3端子レギュレータ	78L05	1
トランジスタ	2SC1815	1
LED	GL3HD8 など	1
抵抗		
330Ω	1/16w	1
1kΩ	1/16w	1
2.2kΩ	1/16w	2
3.3kΩ	1/16w	1
10kΩ	1/16w	1
47kΩ	1/16w	3
100kΩ	1/16w	2
470kΩ	1/16w	3
コンデンサ		
セラミック	0.0047μF	1
セラミック	0.022μF	3
セラミック	0.047μF	1
積層セラミック	0.1μF	2
アルミ電解	47μF	3
基板		
回路用基板	95×72mm 穴あき基板	1

1.3.3 出力段

差動増幅の結果は、1kΩ の抵抗を介して、コンピュータの A/D 変換ポートへ入力する。1kΩ の抵抗は短絡時の保護のためである。A/D 変換ポートの入力インピーダンスはこれに比べて十分大きいので、変換の精度には影響しない。

灯台の光が見えたら LED を発光させる回路を付けておこう。2SC1815 は小信号用の汎用トランジスタである。330Ω の抵抗は LED に流れる電流を 10mA 程度に抑えるため、3.3kΩ の抵抗は、差動増幅の出力が 1V 弱のときにコレクタ電流が 10mA 流れるように挿入した。

実験とレポート 1.3

灯台の光として 2.5kHz の方形波が入力されると、各オペアンプの出力はどのような波形になると予想されるか？概形をグラフ用紙に描け。基準電圧に対して + なのか – なのか？おおよその大きさはいくらなのか？分かるように描くこと。動作確認のために必要となるので、事前レポートとしてまとめよ。

1.3.4 実装上の注意

高利得が要求されるセンサ回路では、異常発振は付き物である。異常発振は一般に回路中に正帰還ループが形成され、ループゲインが 1 以上となると起こる。回路図中にそのようなループがなくても、異常発振が起こって

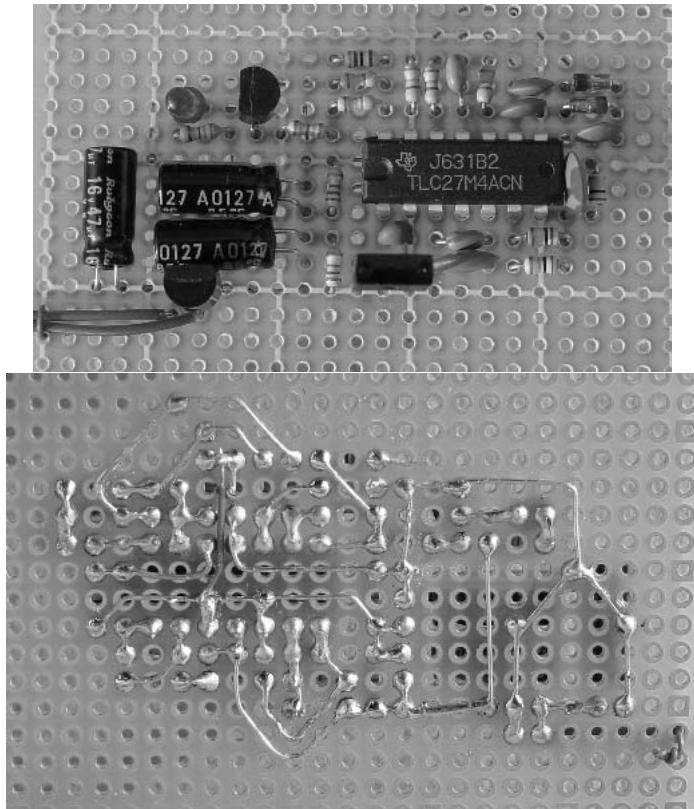


図 1.3: 試作した赤外線センサ回路

いる場合は必ず何らかのループが形成されている。高利得回路の入力と出力の間に静電的結合が存在すると、その結合が小さくてもループゲインとして 1 以上になることは十分考えられる。そのような場合は入力回路をシールド [1, 2] するのが有効である。また、配線が長くなるとそれだけ浮遊容量やインダクタンスの影響が大きくなるので、不必要に長くならないよう注意が必要である。

本回路では、あまり問題にならないと思われるが、共通インピーダンスを低く抑えた設計や、回路の発熱・熱の流れなどを考慮した熱設計なども、回路が安定して動くための重要な要素である。共通インピーダンスは、他のセンサ回路などとの共存を考えたとき、問題になるかもしれない。

共通インピーダンスとは、一つの電源にいくつかの回路が接続されているとき、それらの回路に共通するインピーダンスのことで、電源の内部インピーダンスやリード線の抵抗、インダクタンス、アース回路の抵抗、コネクタの接触抵抗などなど、さまざまなもののが要因として考えられる。共通インピーダンスがあると、ある回路の電流の急変が他の回路にノイズとなって加わってしまうので、共通インピーダンスを抑えた配線が重要である。

実験とレポート 1.4

- センサ回路図をもとに、部品面から見た部品配置図、および、はんだ面から見た配線図を事前レポートとしてまとめよ。使用するユニバーサル基板の概形を図.1.4 に示す。また、<http://lagrange.is.tokushima-u.ac.jp/ir/> の下に図.1.4 を拡大したものを探しておこう。配置のスペースは、基板の上半分だけで十分のはずである。下半分は失敗したときのためにとっておくこと。基板の銅箔には触らないこと。皮脂が付着すると錆やハンダ不良の原因となる。
- 最初に電源部のみを作製し、負荷をつないでいない状態で +5V を供給しているかどうか、確認せよ。
- センサ回路部を作製し、次の手順にしたがって動作確認をせよ。
 - 電源部につないだとき、TLC274 の 4 番ピンと 11 番ピンに正しい電圧が供給されているか、確認せよ。

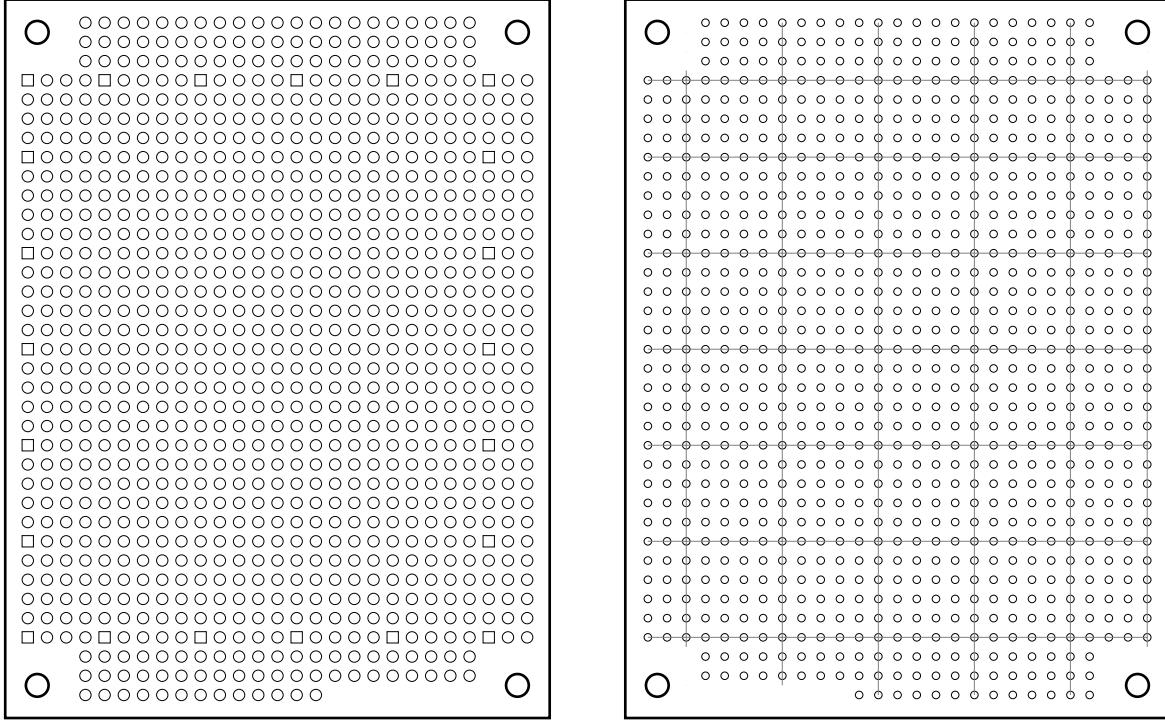


図 1.4: はんだ面(左)と部品配置面(右)

- 第1段から第4段までの各増幅器について、virtual short[2] をオシロスコープで確認せよ。(オペアンプが正常に動作しているときは反転・非反転入力端子の電位は等しいはずである。TLC274 の 2,3 番ピン、5,6 番ピン、9,10 番ピン、12,13 番ピンの電位差をオシロスコープで確認せよ。)
- 第1段から第4段までの各増幅器について、オペアンプの出力波形をグラフ用紙に描き、予想した波形と比較せよ。
- 回路を作り直すときは、必ず部品を再利用すること。特に、基板、フォトダイオード、オペアンプは値段が高いので、普段から壊さないように注意すること。(CMOS 型の IC は静電気に弱いので、触っただけで壊れることがある。水道管などに触って放電してから扱うこと。) また、3 端子レギュレータ、トランジスタ、電解コンデンサ、積層セラミックコンデンサなども、部品としては決して安くない。その他の部品も、使用可能な数に限度があるので、むだ使いしないこと。

1.4 交流増幅の改良

先の回路では、第2段の交流増幅としてハイパスフィルタを用いていたので、灯台の光(2.5kHz)以外の光も増幅してしまうため、ノイズに弱い回路であった。ノイズの影響が大きいと、ノイズなのか信号なのか区別ができず、結果として遠くまで見えないことになる。ハイパスフィルタの代わりに、2次のバンドパスフィルタを用いると、周波数選択性と増幅率を一挙に高めることが可能である。ただし、バンドパスフィルタは不安定になりやすいので、発振しない範囲で Q 値を調整する必要がある。

図1.5に示すバンドパスフィルタの伝達関数は、

$$\frac{v_o}{v_i} = \frac{-sC_3/R_1}{s^2C_3C_4 + s(C_3 + C_4)/R_5 + (1/R_1 + 1/R_2)/R_5} \quad (1.1)$$

となる。一般に、2次の帯域フィルタの伝達関数は、

$$\frac{v_o}{v_i} = \frac{-H\omega_0 s}{s^2 + \alpha\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (1.2)$$

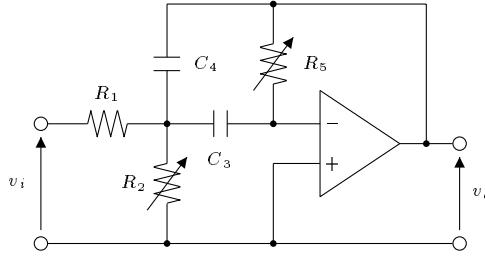


図 1.5: アクティブバンドパスフィルタ

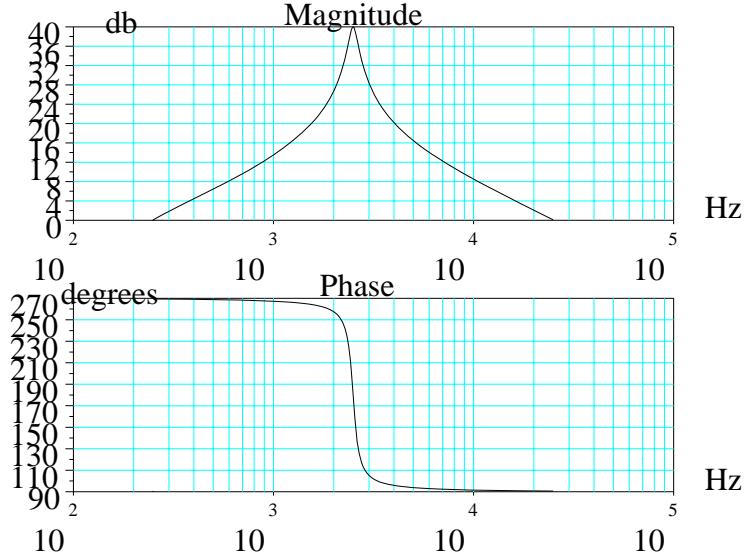


図 1.6: 2次帯域フィルタのボード線図

である。 $\omega_0 = 2\pi f_0$ は通過帯域の中心の(角)周波数、 $A_0 = H/\alpha$ は通過帯域の中心での利得、 $Q = 1/\alpha$ は Q 値と呼ばれ、周波数選択性を表す。

$f_0 = 2.5\text{kHz}$, $H = 10$, $Q = 10$ のときのボード線図を図 1.6 に示す。抵抗値などは、(1.1) 式と (1.2) 式を比較して求めることができる。 $C_1 = C_2 = 0.0047\mu\text{F}$ として、抵抗値を計算すると、そこそこの値になる。

1.5 反射板の作製

いくら増幅率をあげることができても、雑音と同じくらいのレベルの信号は、本回路で弁別するのは困難である。そこで、反射板を取り付けることによって、より多くの光を集め、より遠くまで見えるように改良する(図 1.8)。

平行光を 1 点に集める反射面は、パラボラアンテナとしてよく知られているように放物型の 2 次曲面にすればよい(図 1.7-(a))。断面の曲線を

$$y = \alpha x^2 \quad (1.3)$$

とすると、焦点距離 f と係数 α との関係は

$$4\alpha f = 1 \quad (1.4)$$

となる。お椀状の 2 次曲面は作るのが難しい上、ロボットに取り付ける際に高さ方向の調整も面倒なので、ここでは、放物型の 2 次柱面をもつ反射板を紹介する(図 1.7-(b))。 <http://lagrange.is.tokushima-u.ac.jp/ir/> の下にある反射板作製のページから PostScript ファイルをダウンロードし、焦点距離などを自分の基板に合わせて変更し、画用紙などの厚紙にプリントアウトする。アートナイフなどできれいに切り取って組み立て、反射面にアルミテープなどを張り付けて完成である。作り方の詳細は上に挙げた web ページを参照のこと。

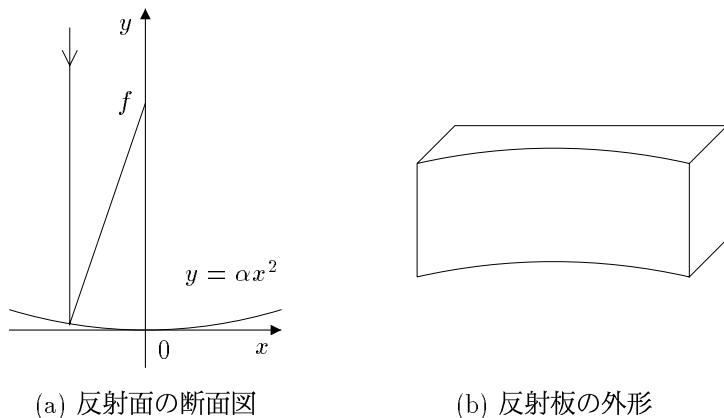


図 1.7: 反射板

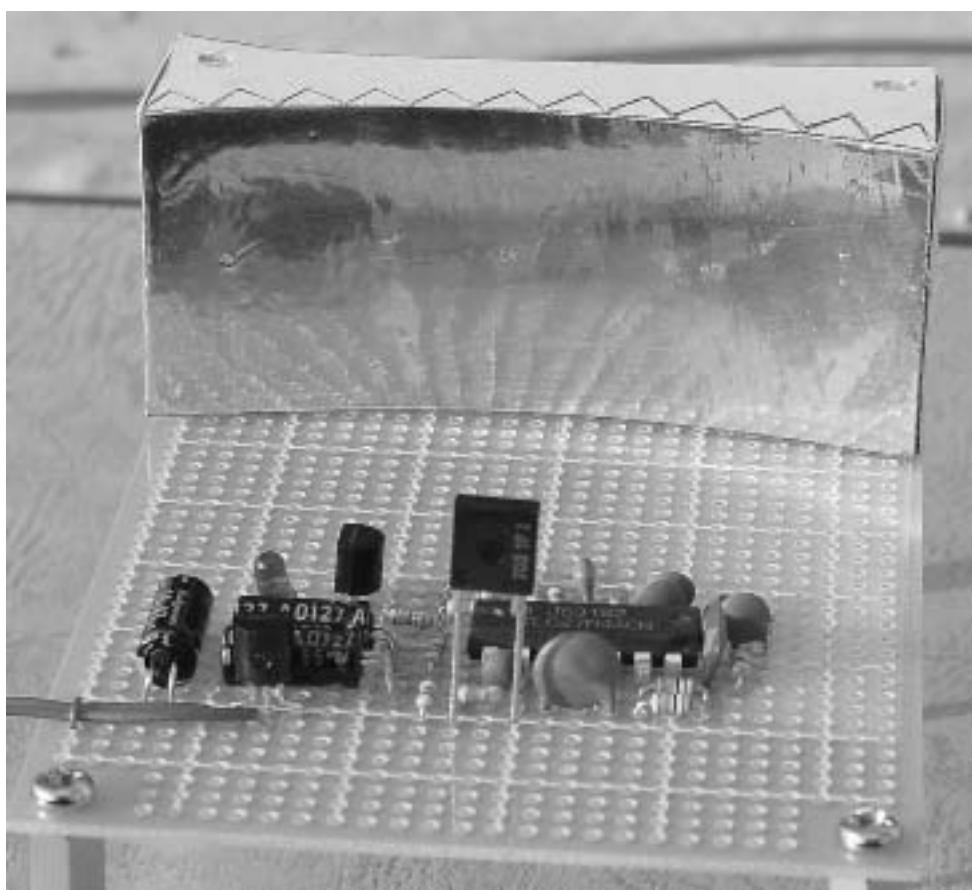


図 1.8: 反射板を取り付けたセンサ回路

実験とレポート 1.5

灯台までの距離と出力電圧との関係はどのような関係になるか? 実験により、灯台までの距離と電圧との関係を求め、両対数グラフにプロットして確かめよ。また、その結果を解析し、考察せよ。

1.6 レギュレーションコンテスト

赤外線センサのレギュレーションコンテストは、どこまで遠くの灯台を検出できるかで争われる。そのためには、增幅率を上げるだけではなく、蛍光灯などの外乱の影響をどれだけ抑えることができるかなどが問題となる。

また、信号のノイズレベルや、回路のきれいさなども審査の対象となる。(回路がきれいにできていないと、ノイズや安定性に影響するため、結果として、遠くの灯台を検出できなくなる。) レギュレーションコンテストでは、自分たちの回路のノイズレベルを考慮して、閾値を各自で決め、灯台を検出できる距離を測ることにする。あらかじめ、実験などを行い、閾値を決めてくること。

実験とレポート 1.6

暗い部屋、昼間の明るい部屋、蛍光灯の下など、条件を変えて、出力電圧をオシロスコープで観測し、閾値を決定せよ。

1.7 コンピュータへの取り込み

光センサの電気的な動作確認が済んだら、コンピュータへ信号を取り込む。AD 変換のプログラミングに関しては、「AD/DA 変換プログラミング」[3] を参照のこと。ここでは、信号の平滑化に関するプログラミングを扱うこととする。

信号には必ず雑音が加わっていると考えてよい。0~5V, 10 bit の AD 変換器を介して取り込んだ信号でも下位の何 bit かは雑音のため信用できない場合がほとんどである。もし 10 bit まで信用してよければ、 $5/2^{10} \sim 5\text{mV}$ まで検出できるところが、下位の 4 bit は信用できないとなると、 $5/2^6 \sim 78\text{mV}$ までしか検出できないことになる。結果的に、検出できる灯台までの最大距離が短くなってしまうことになる。

雑音は一般に高周波数成分を多く含むので、ローパスフィルタ (LPF) によって平滑化すれば雑音の影響を低減することができる。AD 変換器を介して信号を取り込む際にも雑音が加わるので、アナログ的な平滑化回路だけではなく、コンピュータに取り込んだ後にもデジタル的な平滑化フィルタに通すのが一般的である。ここでは、一番簡単な 1 次のデジタルローパスフィルタについて説明する。while ループなどで定期的に信号をサンプリングしており、時刻 k におけるサンプリングの値を u_k , ローパスフィルタの出力を y_k とすると、1 次のローパスフィルタは、次式によって定義される。

$$y_{k+1} = (1 - c)y_k + cu_k \quad (1.5)$$

ここで、 $c \in (0, 1)$ はローパスフィルタの時定数を決定する定数で、 c が小さい程、時定数は長くなる。デジタルフィルタとして実装する場合は、 c を 2 のべき乗分の 1 になるように定めると、計算量も少なく、数値誤差の影響も受けにくくなる。 $c = 1/64$ と選んだときのプログラム例をリスト 1.1 に示す。プログラムでは、P7-0(AN0) から取り込んだ信号を平滑化し、その結果の上位 8 ビットを、P4-0~P4-7 へ出力している。P4 には表示用の LED 回路を接続しておく。

関連書籍

- [1] 山崎 弘郎：電子回路技術，東京大学出版会，1977
- [2] 岡村 迪夫：定本 OP アンプ回路の設計，CQ 出版社，1990
- [3] 上田哲史, 辻 明典：AD/DA 変換プログラミング，システム設計及び実験資料，2001

リスト 1.1: 1次のデジタルローパスフィルタ

```
#include <3048f.h>

void iniad(void)
{
    AD.CSR.BYTE = 0x10;      /* Scan AN0 */
    AD.CSR.BIT.ADST = 1;     /* AD start */
}

int getAD(void)
{
    int a = AD.DRA >> 6;
    return a & 0x03ff;        /* return 10 bit data */
}

int main()
{
    unsigned int y=0, x;

    iniad();
    P4.DDR = 0xff;           /* P4 を出力ポートとして使う */
    while (1) {
        x = y >> 6;        /* 1st order */
        y -= x;               /* LPF */
        y += getAD();         /* y = (63 * y + ADDATA)/64; */
        P4.DR.BYTE = (y/256)&0x00ff; /* 結果の表示 */
    }
    return 0;
}
```