

特別実験レポート
3コイル浮上型コイルコイルアクチュエーターの特性評価

共同実験者: 川崎拓也

理学部物理学科 05-151503

新井友也

2017年1月19日提出

目次

1	目的	2
2	原理	2
2.1	コイル・コイルアクチュエータ	2
2.2	振り子	2
3	実験装置	3
3.1	コイル・コイルアクチュエータ	3
3.2	フィードバック制御	4
4	実験結果	5
4.1	相互インダクタンス	5
4.2	フォトセンサー	5
4.3	位相補償回路	6
4.4	オープンループ伝達関数	7
4.5	コイル・コイルアクチュエーターの伝達関数	8
5	考察	9
6	今後の展望	9
A	補遺	11
A.1	フォトセンサーの回路	11
A.2	位相補償回路	11
A.3	VGA	11
A.4	差分回路	12
A.5	コイルドライバー	13

1 目的

コイル・コイルアクチュエーターを用いてテストマスを制御する。

2 原理

2.1 コイル・コイルアクチュエータ

図1がコイル・コイルアクチュエーターを上から見た図である。制御するテストマス（振り子）の両側にコイルがくっついておりその二つのコイルはショートさせてある。コイル1とコイル2に流す電流をそれぞれ $I_1 = i_1 e^{i\omega_d t}$, $I_2 = i_2 e^{i(\omega_d t + \varphi)}$ とするとコイルアクチュエーターによってテストマスに働くトルクの時間平均のうち θ によらないものは [1]

$$\bar{K} = \frac{\mu}{2(R_0^2 + \omega_d^2 L_0^2)} \{2\omega_d M_0 R_0 i_1 i_2 \sin \varphi + \omega_d^2 M_0 L_0 (i_2^2 - i_1^2)\}$$

となる（引用した式の間違いを一部訂正した）。ただしコイル1と2は対称であるとし M_1, M_2 をそれぞれコイル0とコイル1,2のあいだの相互インダクタンスとしたときにそれぞれの相互インダクタンスが $M_{1(2)} = M_0 \pm \mu\theta$ と θ に関して線形であるとみなした。また、 ω_d はドライブ角周波数、 R_0, L_0 はそれぞれコイル0の内部抵抗と自己インダクタンスである。この式からコイル・コイルアクチュエーターは電流の振幅を変えることによってテストマスに働く力を制御することもできるし、二つのコイルに流す電流の位相差をかえてもできることが分かる。今回の実験では振幅を変えて制御した。

また、 θ に比例するものは [1]

$$\bar{K}_\theta = -\frac{\mu^2}{2} \operatorname{Re} \left[\frac{i\omega_d}{R_0 + i\omega_d L_0} (i_1^2 + i_2^2 - 2i_1 i_2 \cos \varphi) \theta \right]$$

なのでコイル・コイルアクチュエータによるバネ定数は

$$\kappa = -\frac{\mu^2}{2} \frac{\omega_d^2 L_0}{R_0^2 + \omega_d^2 L_0^2} (i_1^2 + i_2^2 - 2i_1 i_2 \cos \varphi)$$

となる。

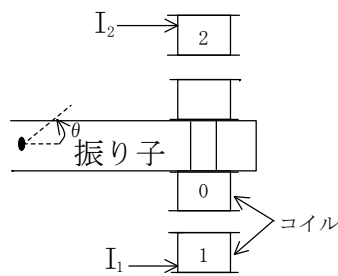


図 1: コイル・コイルアクチュエーター

2.2 振り子

ねじれ振り子の角度を θ 、慣性モーメントを I 、 Q 値を Q 、共振周波数を ω_0 、外力を F とすると運動方程式は

$$I\ddot{\theta} = -\frac{I\omega_0}{Q}\dot{\theta} - I\omega_0^2\theta + F$$

となるのでテストマスの伝達関数を G_{TM} とおくと

$$G_{TM} = \frac{1}{I(-\omega^2 + i\frac{\omega\omega_0}{Q} + \omega_0^2)}$$

となる。ただし実験では $G_{TM} \simeq \frac{1}{-I\omega^2}$ として計算した。

3 実験装置

3.1 コイル・コイルアクチュエータ

図2が振り子とコイル・コイルアクチュエータの装置を上から見た図である。テストマスにくっついているコイル0とコイル0'のコイルはそれぞれショートさせてある。コイル・コイルアクチュエータは図1のようにテストマスの片側のコイル3個だけで十分だが、駆動力を大きくするためテストマスの反対側にも同じようにコイルを設置し、コイル1と4に定電流を流してコイル2と3にフィードバック電流を流した。また、テストマスの中央の真下にネオジム磁石をおいてテストマスの並進運動をダンピングさせた。実際の装置の写真が図3である。

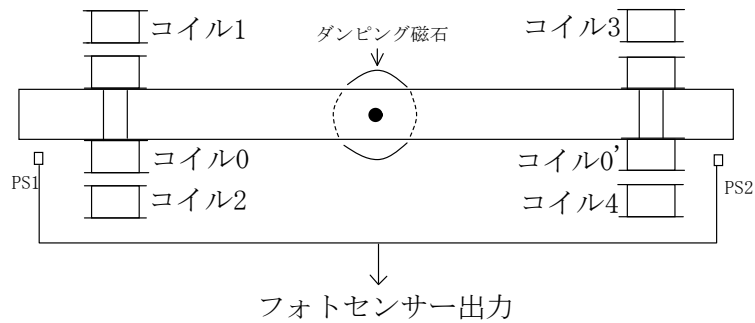


図 2: 振り子の装置図

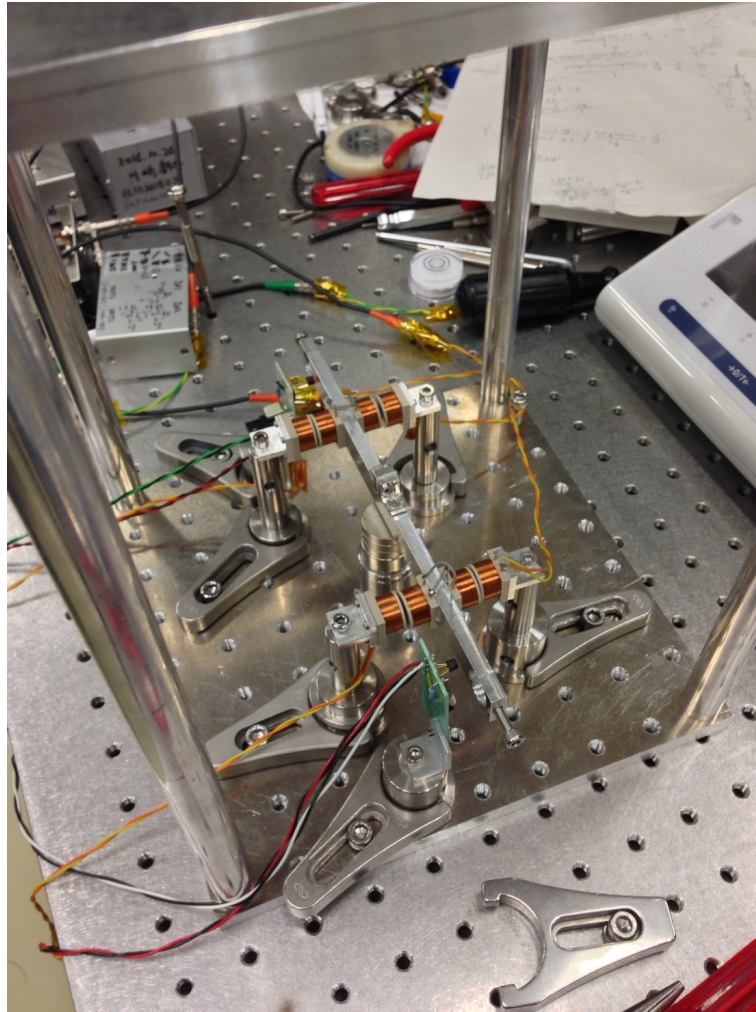


図 3: 実験装置

3.2 フィードバック制御

図 4 が実験のブロック図である。それぞれの伝達関数を図のようにおくとオープンループ伝達関数は

$$G = G_{TM} G_{PS} G_{PH} G_{VGA} G_A$$

となる。

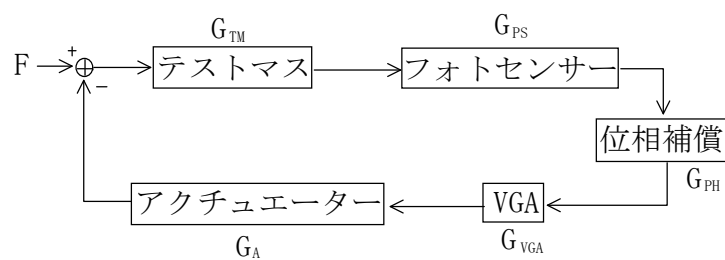


図 4: ブロック図

4 実験結果

4.1 相互インダクタンス

コイルとショートしたコイルと (図 1 でいうコイル 1 とコイル 0) の相互インダクタンスを求めるために二つのコイルの誘導起電力を測定した。そのグラフが図 5 である。このグラフのフィッティングから求めた相互インダクタンス M [H] は距離を x [m] とおくと

$$M = -0.0185x + 2.05 \times 10^{-4}$$

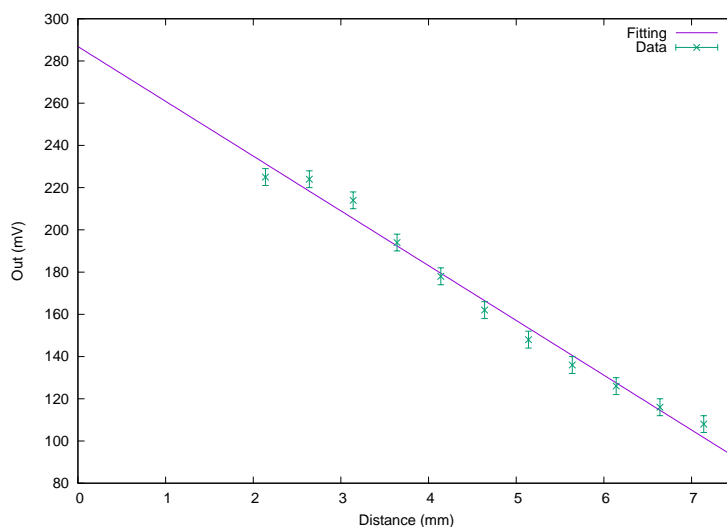


図 5: 誘導起電力と距離の関係

4.2 フォトセンサー

テストマスの位置を測定するのに用いたフォトセンサー 2 つの距離と出力の図が図 6 である。この図より出力が線形である距離 1mm 付近を実験では使用した。1,2 それぞれの傾きは 540V/m, 650V/m であった。ただしフォトセンサーの出力は差分回路 (回路図は補遺 A.4 参照) のゲインで調整した。また、フォトセンサーの回路は補遺 A.1 に記してある。

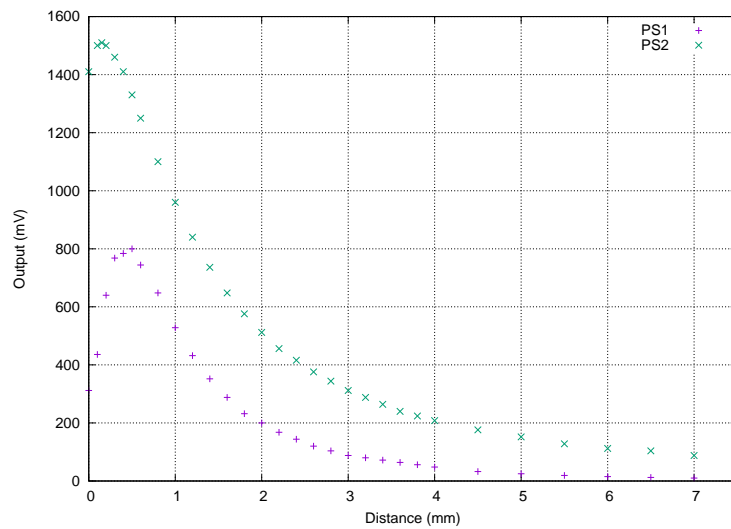


図 6: フォトセンサーの距離と出力の関係

4.3 位相補償回路

実験で用いた回路図は補遺 A.2 に記してある。制御したときの伝達関数のグラフが図 7 である。ただし実線はフィッティングしたものである。フィッティングから求めた可変抵抗の大きさは $R = 30.9 \Omega$ だった。また、図 8 は位相補償回路の位相のグラフである。ただし、位相は可変抵抗の大きさとは関係ないため実線は理論線を表していて、実験で用いた負出力の方 (補遺参照) で計算した。

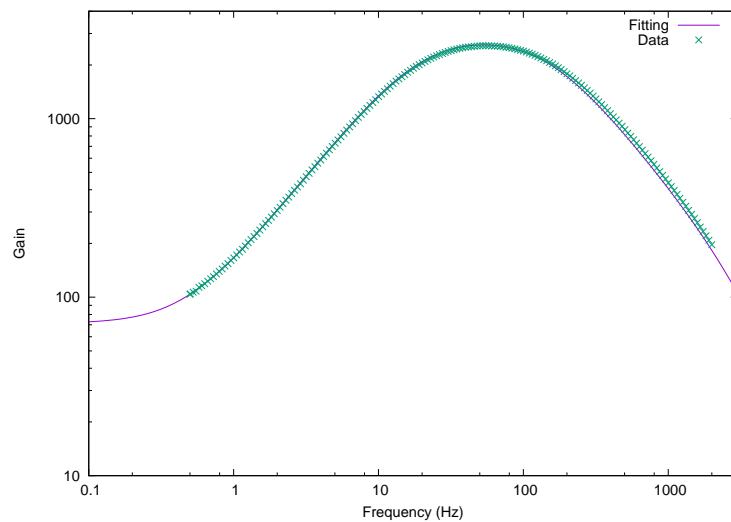


図 7: 位相補償回路の伝達関数

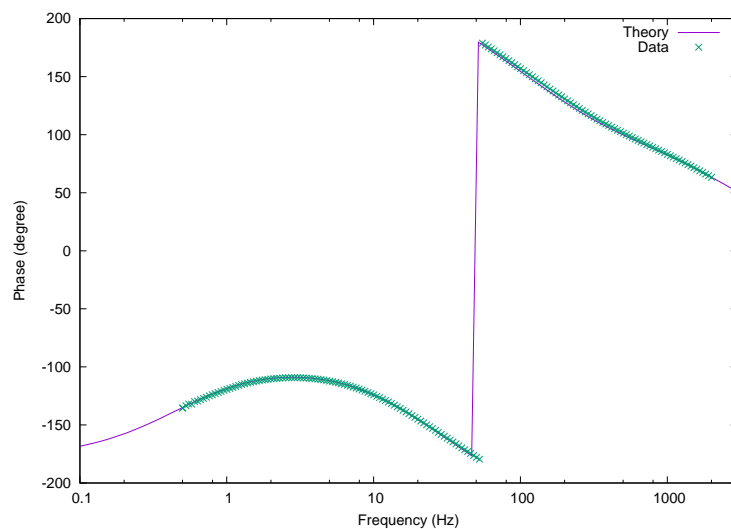


図 8: 位相補償回路の位相

4.4 オープンループ伝達関数

図 9 はオープンループ伝達関数のグラフであり、図 10 はそのときのコヒーレンスのグラフ、また図 11 は位相である。図 9 の実線は理論である。ただし慣性モーメントを求める際、振り子が直方体だと仮定したが実際はコイル等くっついており重さもコイルの重さだけおもくなっているなのでその分の誤差をつけて理論線を 3 本書いています。

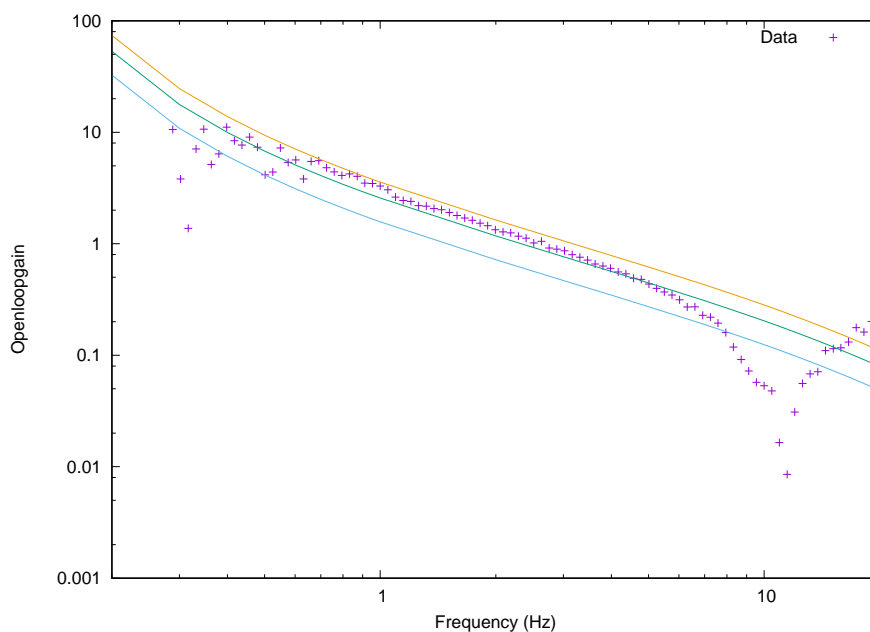


図 9: オープンループ伝達関数

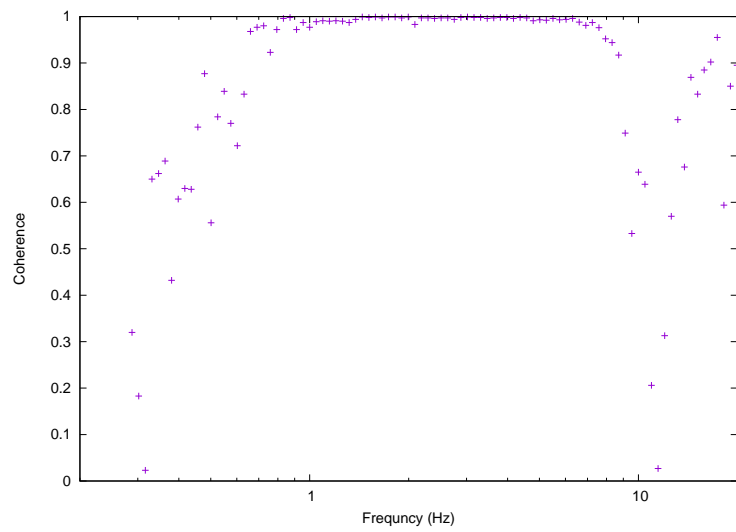


図 10: コヒーレンス

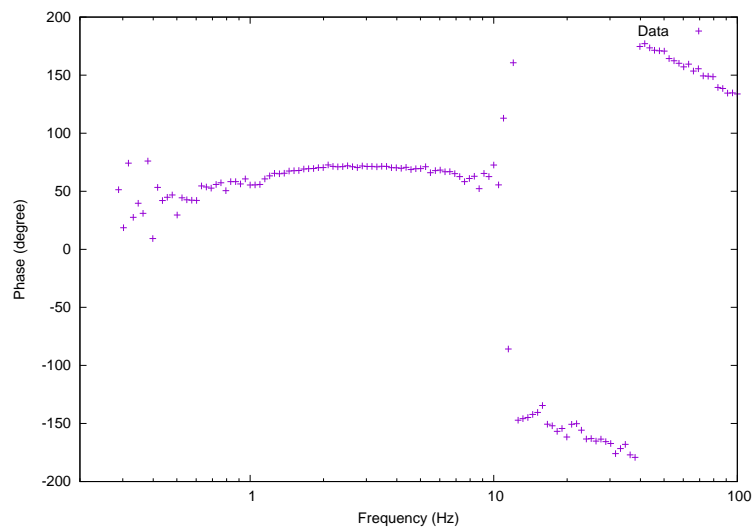


図 11: オープンループの位相

4.5 コイル・コイルアクチュエーターの伝達関数

実験では図 4 のそれぞれの伝達関数とオープンループ伝達関数 (図 9) を測定し、その結果を用いてコイル・コイルアクチュエーターの伝達関数を計算した。そのグラフは図 12 となった。誤差は慣性モーメントを誤差をつけた。また、縦軸は図 4 の G_{VGA} と G_A をまとめた伝達関数となっている。

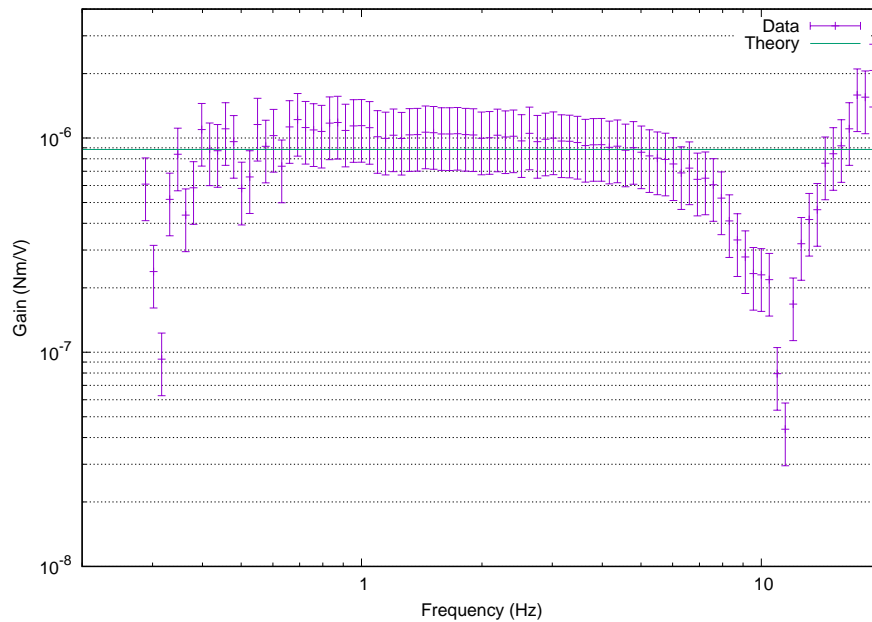


図 12: コイル・コイルアクチュエーターの伝達関数

5 考察

オープンループ伝達関数は図 9 からコヒーレンスが 1 である周波数領域では誤差の範囲内で理論値と一致しているのが確認できた。このことからテストマスの伝達関数 $G_{TM} = \frac{1}{I(-\omega^2 + i\frac{\omega\omega_0}{Q} + \omega_0^2)}$ を $G_{TM} \simeq \frac{1}{-I\omega^2}$ と近似したことによる影響は少なかったと考えられる。

また、コイル・コイルアクチュエーターの伝達関数の理論値は周波数には依存しないが、図 12 を見るとコヒーレンスが 1 である周波数領域では誤算の範囲内で理論と一致していることが分かる。

6 今後の展望

今回の実験は本来ドライブ周波数を高周波 (100kHz 程度) にして制御することだったがドライブ周波数を 1kHz にして制御することまでしかできなかった。コイルの直前にコンデンサーを入れて共振回路をつくることでドライブ周波数付近で電流が流れるように実験をしたものの電流が本来より小さい値しか流れず、その原因を探るところまでは至らなかった。一つ一つの回路が高周波でどう動作するのかを検証する必要があると考えられるので、回路の改善が必要である。

参考文献

- [1] 正田亜八香「ねじれ型重力波検出器 TOBA の開発及び背景重力波探査」(2011)

謝辞

安東准教授、道村助教、院生の有富さんをはじめとして安東研のみなさま方には大変お世話になりました。ありがとうございました。そして半年間一緒に実験をしてくれた川崎君、ありがとうございました。

A 補遺

A.1 フォトセンサーの回路

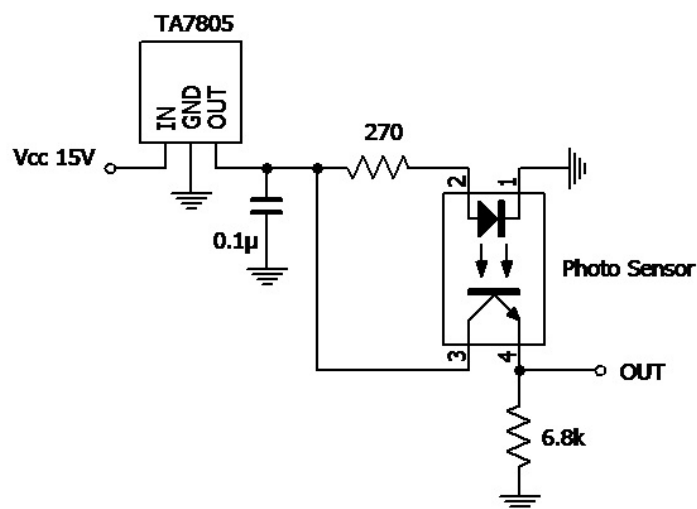


図 13: フォトセンサーの回路

A.2 位相補償回路

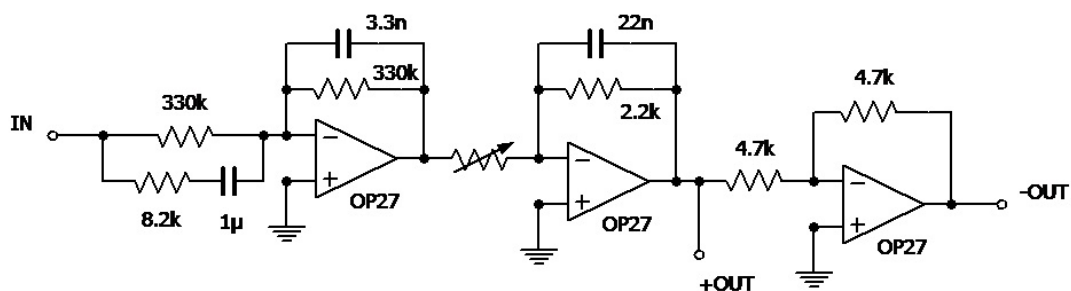


図 14: 位相補償回路

A.3 VGA

VGA の出力は $A(1+B)$ となっており、実験では A に定電圧、B にフィードバック信号を入れている。

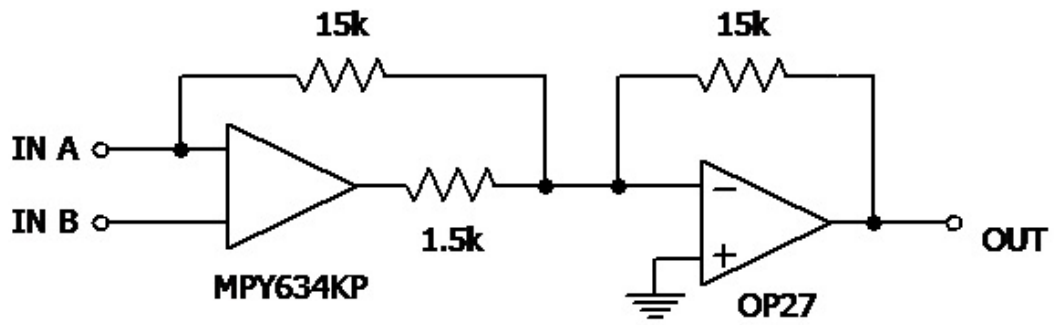


図 15: VGA

A.4 差分回路

出力は可変抵抗のゲインを G として $G \times IN1 - IN2$ となっている。

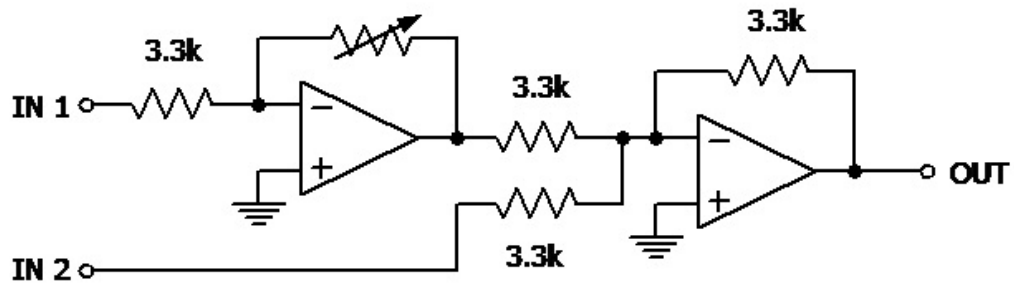


図 16: 差分回路

A.5 コイルドライバー

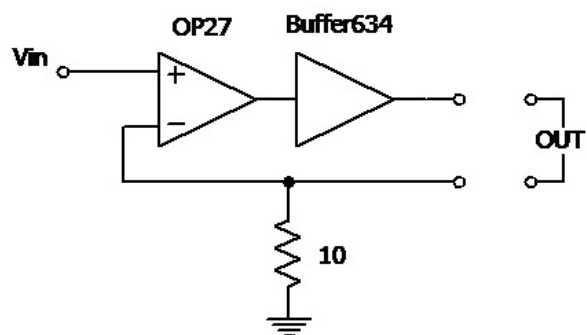


図 17: コイルドライバー