

平成21年度卒業論文

昆虫の昇降運動の動的解析を目的とした
トルク制御フライトミルの設計

福岡工業大学 工学部
知能機械工学科

06E1052 松永 龍太

指導教員 河村 良行 教授

目次

第1章 緒言-----	1
1・1 研究背景及び目的-----	1
第2章 装置概要-----	2
2・1 装置の構成-----	2
2・2 制御システム-----	2
第3章 アクチュエータ-----	6
3・1 磁気力による垂直位置制御用アクチュエータ-----	6
3・1・1 磁気力の解析-----	6
3・2 トルク制御用アクチュエータ-----	12
3・2・1 回転軌道制限用アーム-----	12
3・2・2 モータの選定-----	13
第4章 センサーの検討-----	19
4.1 インダクティブコイルセンサー-----	19
4・1・1 性能実験及び最適化-----	19
4・2 CCDセンサー-----	25
4・2・1 角度分解能及び処理時間の遅れ-----	25
4・3 2次元PSDセンサー-----	28
4・3・1 2次元PSDセンサーの加工-----	29
4・3・2 特性評価-----	29
第5章 結言-----	41
第6章 今後の課題-----	42
参考文献-----	43

付録

第1章 諸言

1・1 研究背景及び目的

昆虫の飛行特性を研究するために様々な方法が用いられている。例えば、昆虫に直接支持棒を取り付け小型風洞内で昆虫の飛行を観察する方法や、昆虫の餌となる蜜を小型風洞内に置くことで一定位置にとどまらせる、また左右の風景を変えることによって昆虫の視覚を騙し飛行させる方法などがある。その中でフライトミル法という方法がある。この方法は昆虫の軌道を制限し、飛行距離や飛行時間などの特性を得るためのものである。この方法は寄生虫や農作物にとって害となる昆虫の分布について調べるために用いられることが多い。しかし、この方法では昆虫の完全な自由飛行状態であるとは言えず、昆虫に取り付けた軌道制限用のアームの空気抵抗や機械的摩擦などの問題がある。つまり、昆虫の自由飛行状態での観測が行えていない。

そこで本研究では従来のフライトミルにアームをトルク制御することによって昆虫にかかる空気抵抗を補助し、さらにコイルによる磁気力で垂直方向の位置制御を行うことで昆虫を自由飛行状態に近づけ動的解析が可能な装置の設計を目的としている。この装置の大きな特徴は、コイルから発生する垂直方向の磁気力によって昆虫に力学的刺激を与えてその反応や飛行特性を調べることが可能な点である。

第2章 装置概要

2・1 装置の構成

まず，この実験装置において飛行特性を得る対象となる昆虫は垂直方向の飛行に優れ，多くの研究に使われているマルハナバチを想定している．マルハナバチは多くの研究で使用されており，入手が比較的容易なことや，重さが約225mg，最大速度は約1m/sで，自重の50%~100%程度まで運ぶことができるという特徴を持っている．

今回，本研究で設計する装置は，昆虫の回転軌道を制限するためのアームにφ5×3×560のカーボンパイプを使用し，回転軌道の半径 $r=0.5\text{m}$ とした．そのアームをモータに取り付け，モータのトルクで昆虫の飛行を補助する．昆虫の垂直方向の位置制御には，アームの先端に取り付けた駆動用小型永久磁石(ネオジウム磁石)を装置の上下に設置したアクチュエータ用コイルで垂直方向に磁気力を与え行う．また，昆虫とアームの接続には図2のように昆虫の背中に薄い小型永久磁石を接着し，アームから出た鉄製のピンと磁力によって接続する方法を考えている．

この装置に使用するセンサーについては，4章で3種類のセンサーの検討をしている．最終的には2次元PSD(Position Sensitive Detector)を用いるということとなった．このセンサーは受光面に当たった光の位置を電圧によって読み取るもので，本研究ではこのPSDの中心にレーザーで穴を開け，アームの回転速度及び垂直方向の位置を検出できるようにする．(4・3節参照)

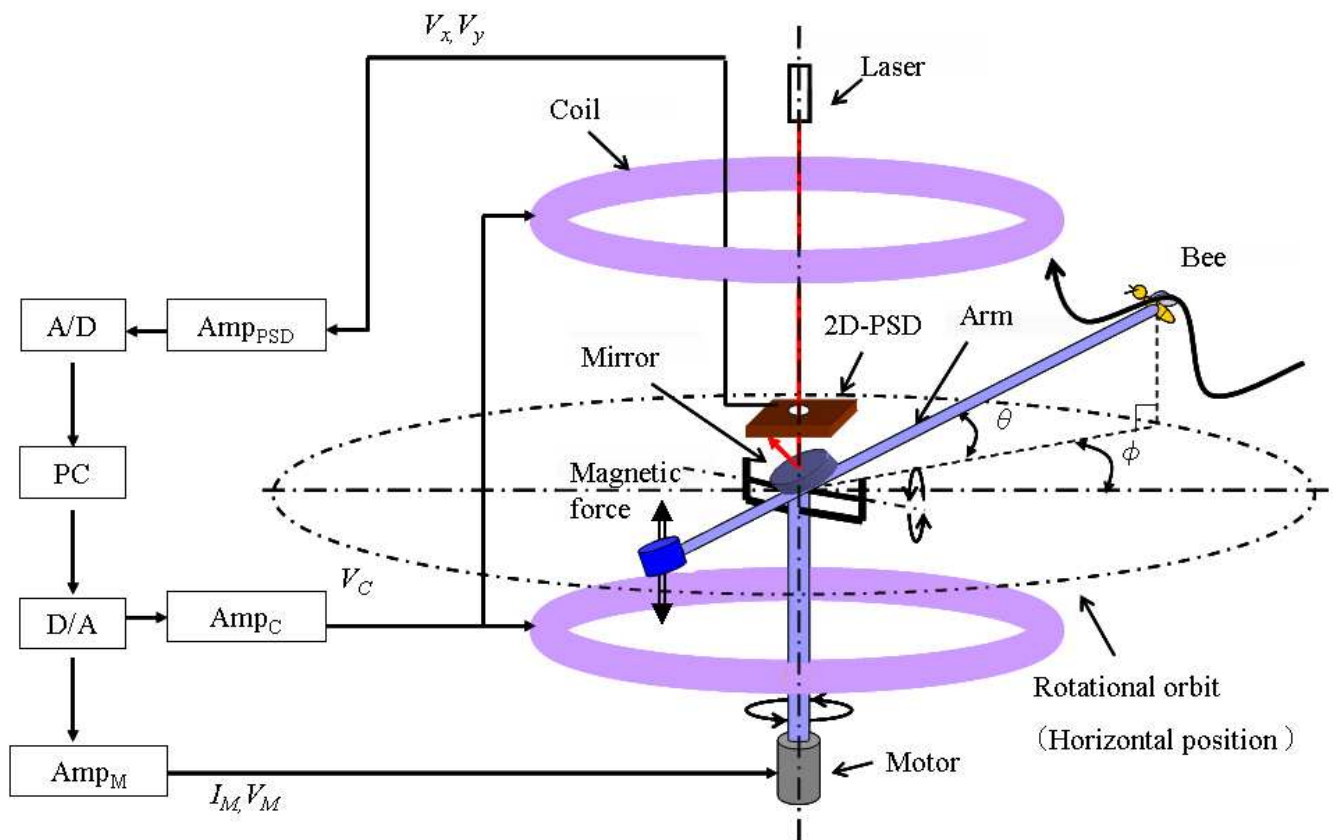


図 1 装置概要及び制御システム

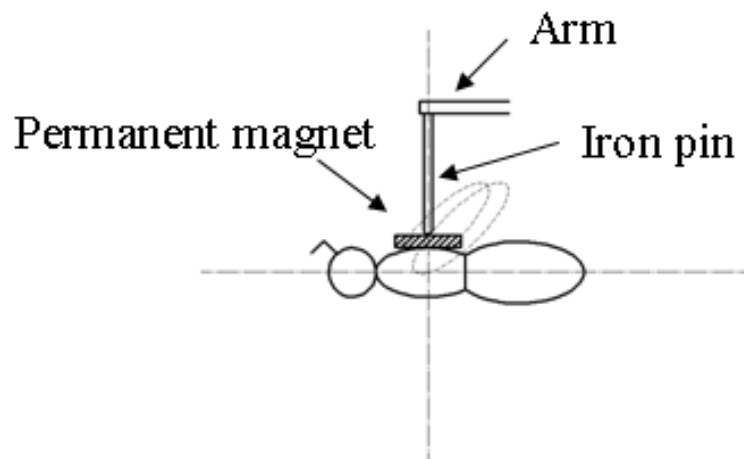


図 2 昆虫とアームの接続方法

2・2 制御システム

本研究で設計を行う装置での制御対象となるものは、昆虫の回転速度と垂直方向の位置である。この装置全体の制御システムの概要を図1に示す。回転速度については、あらかじめ昆虫を取り付けていない状態で動作したときのモータ電流 I_M と回転速度 ω との関係を求め、それに基づいてPSDセンサーから出力された電圧 V_x , V_y より得られるアームの角度 ϕ からアームの抗力に応じた電流を算出し、制御を行う。

$$\frac{d\phi}{dt} = \omega \quad (2.1)$$

$$I_M = A_1 \omega^2 + I_0 \quad (2.2)$$

$$V_M = B_1 I_M \quad (2.3)$$

このときアームの回転数はゼロに等しいのでモータ電流 I_M が停動電流で無ければならず、モータに負荷がかかってしまう。そのためモータ電圧 V_M とモータ電流 I_M の関係から算出した電流に応じて電圧をモータにかける。上記の式のA, Bは係数であり、 I_0 とはモータの無負荷電流である。実際には図3に示すようにトランジスタを用いた回路を通してモータの電圧と電流の調節を行う。

また、垂直方向の位置については回転速度の制御と同様にPSDセンサーから出力された電圧 V_x , V_y より得られる垂直方向の位置からコイルの電圧 V_C をPD制御する。まず、アームの水平位置 Z_0 を基準とし、センサーから得られた現在の位置 Z_n から以下のように速度 \dot{z} を求める。

$$\dot{z} = \frac{Z_n - Z_{n-1}}{t} \quad (2.4)$$

$$V_C = K_p(Z_0 - Z_n) - K_d \dot{z} \quad (2.5)$$

上記の式はPD制御式である。

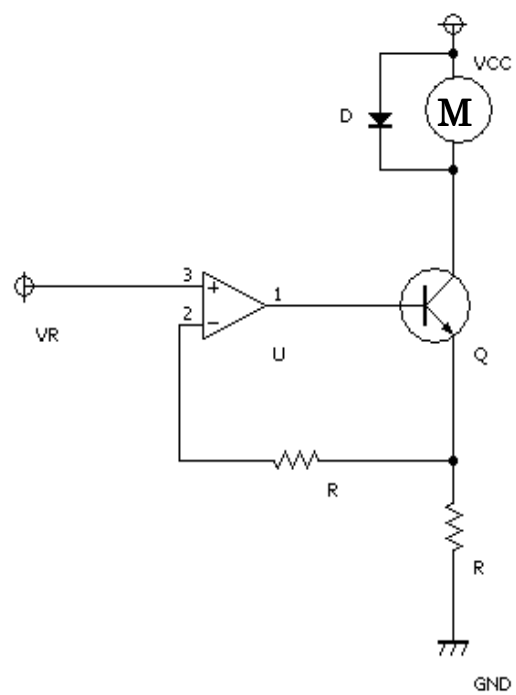


図3 トランジスタを用いたモータ電流制御回路

第3章 アクチュエータ

3・1 磁気力による垂直加速度制御用アクチュエータ

昆虫の垂直方向の位置制御や力学的刺激はコイルによる磁気力を用いる。装置の上下に設置したコイルに作用する磁場Hを解析し、コイルを電流で制御することによってアームの先端(昆虫とは反対側)に取り付けた駆動用小型永久磁石に磁気力 F_z を与え昆虫の垂直位置を制御する。

3・1・1 磁気力の解析

磁気力の解析方法は、まずビオ・サバルの法則により円形コイルの円周上の微小区分 ΔL が小型永久磁石の中心位置Pに及ぼす磁場の強さを求め、コイルの円周上に沿って足し合わせた。(1)

$$\Delta H = \frac{I}{4\pi R^2} \sin \theta \Delta L \quad (3.1)$$

次に対象となる駆動用小型永久磁石をソレノイドコイルと近似⁽²⁾させることで、ソレノイドコイルに流れる等価電流 I_E を求め小型永久磁石の磁気モーメント M を求めた。(図4, 図5)

$$I_E = \frac{2B_s}{\mu_o n} \cdot \frac{\sqrt{a^2 + L^2}}{L} \quad (3.2)$$

$$M = \mu_o S I_E n = \mu_o \pi a^2 I_E n \quad (3.3)$$

I_E : 等価電流 [A]

a : 磁石半径 [m]

B_s : 表面磁束密度 [T]

L : 磁石長さ [m]

μ_o : 透磁率 [H/m]

n : 単位長さあたりの巻数

このとき、磁石の中心位置における磁気モーメント M を計算しそれをコイルの巻数 n 倍することで永久磁石全体の磁気モーメントとした。永久磁石とコイルを垂直に置いたときに永久磁石にかかる磁気力 F の計算にはコイルが作用する磁場 H と小型永久磁石の磁気モーメント M より

$$\begin{aligned}\vec{F} &= (\vec{M} \cdot \nabla) \vec{H} \\ &= (M_x, M_y, M_z) \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right) (H_x, H_y, H_z)\end{aligned}\quad (3.4)$$

となり、これにより垂直方向の磁気力 F_z は

$$\begin{aligned}\vec{F} &= (\vec{M} \cdot \nabla) \vec{H} \\ &= \left(M_x \frac{\partial}{\partial x}, M_y \frac{\partial}{\partial y}, M_z \frac{\partial}{\partial z} \right) \vec{H} \\ &= \left(M_x \frac{dH_x}{dx}, M_y \frac{dH_y}{dy}, M_z \frac{dH_z}{dz} \right) \\ &= M_z \frac{dH_z}{dz} = F_z\end{aligned}\quad (3.4a)$$

となる。

また、永久磁石とコイルを平行に置いたときに永久磁石にかかるモーメント N は

$$\vec{N} = \vec{M} \times \vec{H} = (M_x, M_y, M_z) \times (H_x, H_y, H_z)\quad (3.5)$$

となり、

$$\begin{aligned}\vec{N} &= \vec{M} \times \vec{H} \\ &= (M_x, M_y, M_z) \times (H_x, H_y, H_z) \\ &= M_y H_z \\ &= N_x\end{aligned}\quad (3.5b)$$

となる。(3)

この計算により求めた解析値と実験によって求めた測定値の磁気力を比較した。実験にはφ140, 25巻のコイルに電流3Aを流し, φ20×30の永久磁石(ネオジウム磁石)を対象とし, 電子はかりを用いて図6, 図7のように垂直方向の磁気力 F_z の測定を行った。図8の実験結果から解析値と測定値の磁気力はよく一致した。この解析方法は永久磁石の磁気モーメント M の計算において永久磁石の中心位置でソレノイドコイルと近似したため, コイルに対して永久磁石が十分に小さい場合における解析方法である。

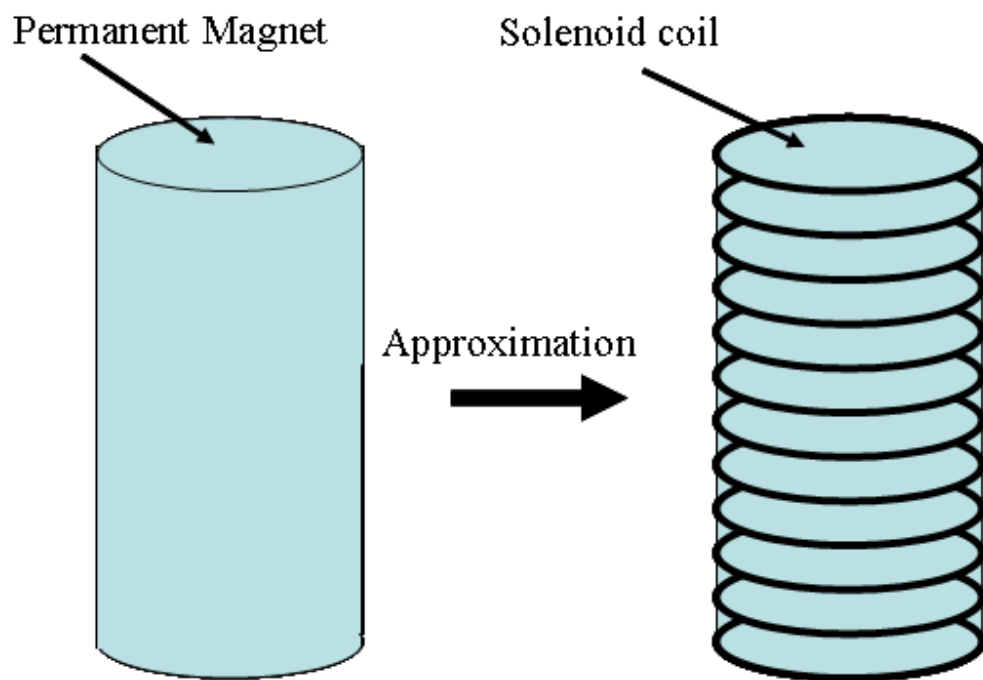


図4 ソレノイド近似

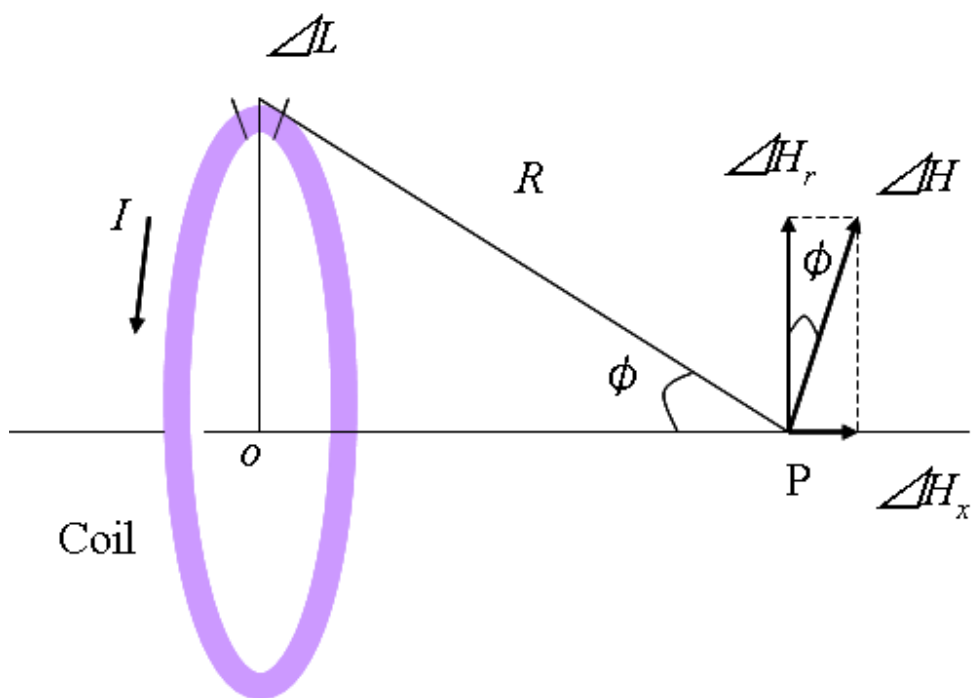


図5 ビオ・サバルの法則

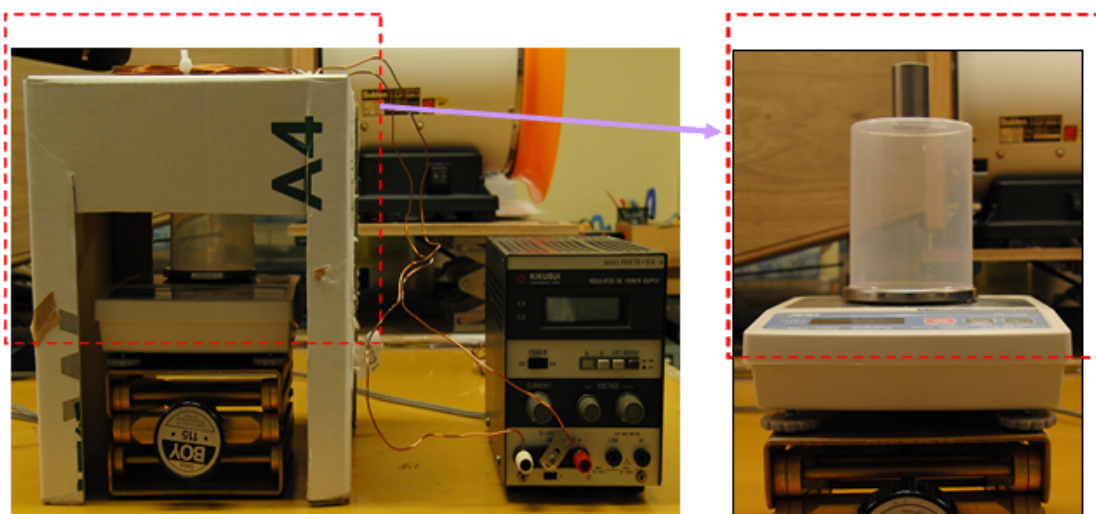


図6 磁気力の測定実験

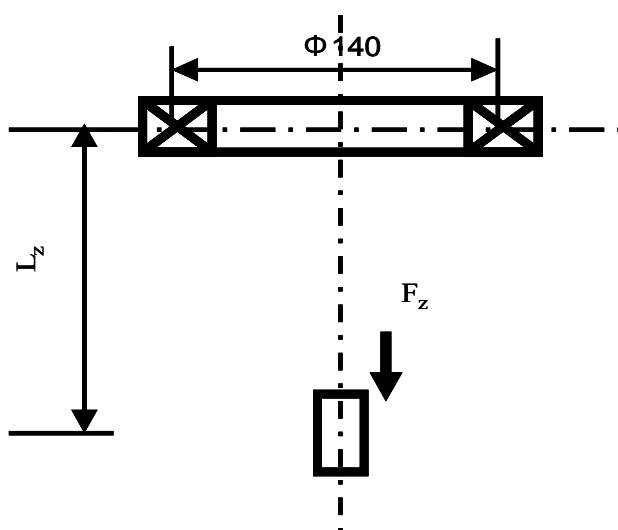


図7 磁気力の測定実験におけるコイルと磁石の関係

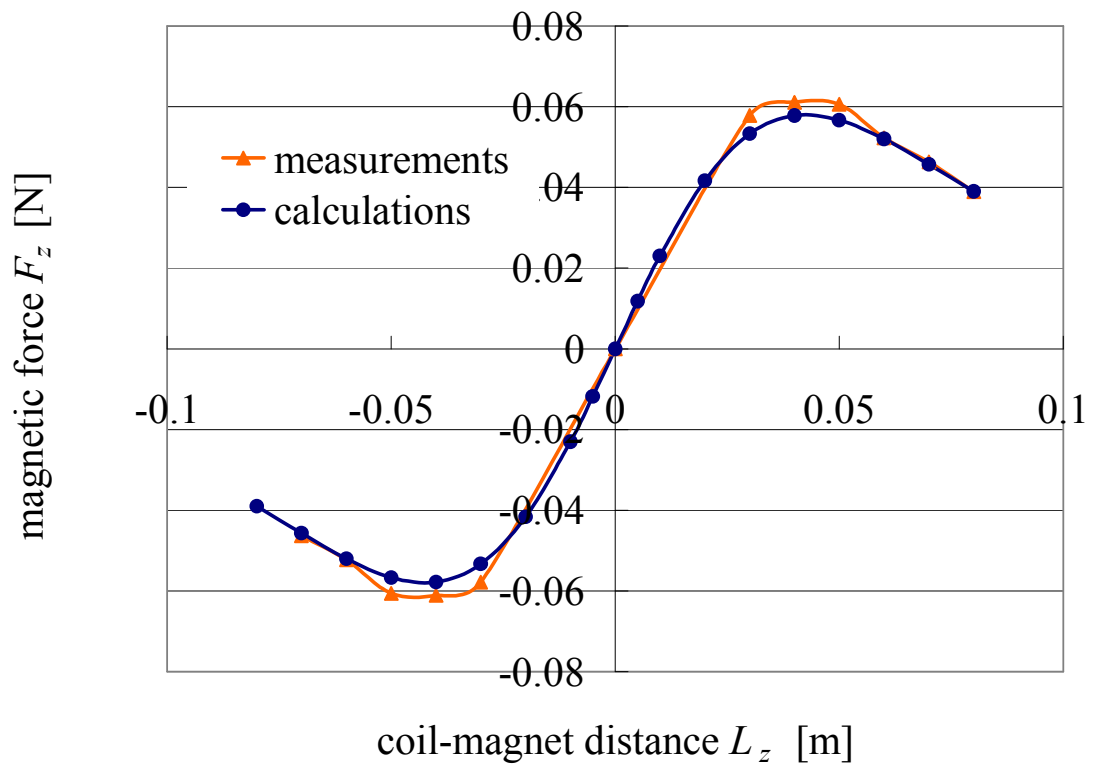


図 8 測定値と解析値の磁気力の比較

3・2 トルク制御用アクチュエータ

昆虫を自由飛行の状態にさせるためにはトルク制御用アクチュエータでアームの抗力 D_a を昆虫に感じさせないようにトルクを補助してやる必要がある。つまり、昆虫の回転加速度及び速度をセンサーで読み込み、モータの電流を制御する。3. 2. 1節ではアームに働く抗力 D_a 及びトルク T_a について述べ、3. 2. 3節で使用するモータの選定について述べる。

3・2・1 回転軌道制限用アーム

昆虫の軌道を制限しているアームには強度と軽さから先述の通り円筒型のカーボンパイプ($\phi 5 \times 3 \times 560$)を用いり、円軌道の半径 $r=0.5\text{m}$ とする。まずマルハナバチの最大速度 V_0 を 1m/s とし、レイノルズ数 Re を求めた。

$$Re = \frac{V_0 \cdot r}{\nu} \quad (3.1)$$

ここでレイノルズ数 Re の計算において動粘性係数 $\nu=15.01 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ として計算すると $Re=333$ となり、アームの抗力係数 $C_D=1.25$ とした。⁽⁴⁾ 図9のように装置を上面から見た場合、長さ r_0 のアームの回転中心を0とし微小面積 dS を積分することでアームの抗力 D_a 及びトルク T_a を求めた。このアームのトルク T_a はそのままアクチュエータに必要なトルク T_M となる。

$$\Delta D_a = C_L \frac{1}{2} \rho V^2 ds \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} T_a &= \int_0^{r_0} \Delta D_a = \frac{1}{8} C_D \rho V_0^2 r_0^2 \\ &= T_M \end{aligned} \quad (3.3)$$

式(3.2), (3.3)より $\phi 5 \times 3 \times 560$ のカーボンパイプを使用した場合での抗力及びトルク $T_M = 0.51 \text{mN} \cdot \text{m}$ となった。なお、制御の条件として昆虫の推力以下のアームの抗力でなければ回転を正確に制御することはできない。マルハナバチの推力はその飛行能力から $1.0 \text{mN} \cdot \text{m}$ と仮定した。計算結果と比べるとこの条件を満たしており、制御の範囲内だということがわかる。さらに、このアームの慣性モーメント I を求めた。

$$I = M \left(\frac{d^2}{12} + \frac{l^2}{16} \right) + M \left(\frac{l}{2} \right)^2 \quad (3.4)$$

この式を用いてアーム全長 $l = 560 \text{mm}$, アーム外径 $d = 5.0 \text{mm}$, 駆動用小型永久磁石に $\phi 20 \times 10 (27 \text{g})$ を使った場合, $I = 1.6 \text{gm}^2$ となった。また, アームの角速度 $\dot{\theta}$ 及び角加速度 $\ddot{\theta}$ は運動方程式により

$$\ddot{\theta} = \frac{T_a}{I} \quad (3.5)$$

と表せ, 計算すると $\dot{\theta} = 2.0 \text{rad/s}$, $\ddot{\theta} = 0.3 \text{rad/s}^2$ となった。各値とも軌道半径 $r = 0.5 \text{m}$, 昆虫の速度 $V_\theta = 1.0 \text{m/s}$ の場合(最大値)である。次節ではこの結果からアクチュエータとして使用するモータの選定について述べる。

3・2・2 モータの選定

前節でアクチュエータ用のモータに必要なトルク T_M を求めた。このトルク T_M は円軌道に対して角速度が遅いためモータの停動トルクである。しかし, 定格電圧で停動トルク電流を長時間流すとモータに負荷がかかることや必要とされるトルクが小さいことから定格電圧からあらかじめ電圧を下げて使用しなければならない。モータの選定にあたってまず一般的に工作用として使われるマブチモータの使用を考えた。しかし, このモータの内部にはコアが付いており, この装置では昆虫の飛行速度とアームの円軌道から回転速度が遅くなる。このモータでは内部の回転子の角度によって

停動トルク T_0 が大きく変動する可能性があった。

そのためモータを 15° 毎に回転させながら低動トルク T_0 の測定を行った。停動トルク T_0 の測定には図10のようにモータに7mmのカーボンロッドを取り付け、モータを固定し、電子はかりでカーボンロッドの先端にかかる重さを測定し、停動トルクを計算によって求めた。そのときモータの電流はテスターによって測定した。測定には工作用モータRE-260(定格電圧1.5~3.0V)を使用した。

測定結果を図11, 図12に示す。この結果からこのモータには角度によるトルクの変動が6~7回ほどあることがわかった。さらにこのモータを使用する場合エンコーダーの取り付けが不可能であるという欠点がある。この結果からこのモータはトルク制御用アクチュエータには不適切であると考えた。

次にmaxon motor社のコアレスモータの使用を考えた。このモータは内部の構造で回転子が7つありトルクの変動がマブチモータに比べて少ない。そして、このモータのもうひとつの特徴としては同軸上にギアやエンコーダーを接続ができることである。このモータを使用する上でギアの取り付けを考察したが、ギアを取り付けることによる摩擦やイナーシャがあることや、トルクがギアの減速比によって増加してしまい定格電圧より大幅に下げて使用しなければ必要なトルク T_M を得られないことからギアは取り付けないことにした。モータの選定の際には軸径とモータの特性からA-max12(軸径 ϕ 1mm)のモータが適していると考えた。このモータの定格電圧は15Vで実際に使用する場合は定格電圧の2/5である。電圧を定格電圧の2/5に下げた場合でもモータの特性から十分に駆動すると考える。A-max12の定格電圧の場合と定格電圧の2/5の場合のモータ性能特性を図13, 図14に示す。

この結果からトルク制御用アクチュエータに使用するモータは、maxon motorのA-max12を使用する。エンコーダーを使用する場合も考え、maxon motorのEncoder MR type Sを選定した。モータの選定についてまとめたものを表1に示す。このエンコーダーは磁気抵抗センサー型で、分解能は256である。

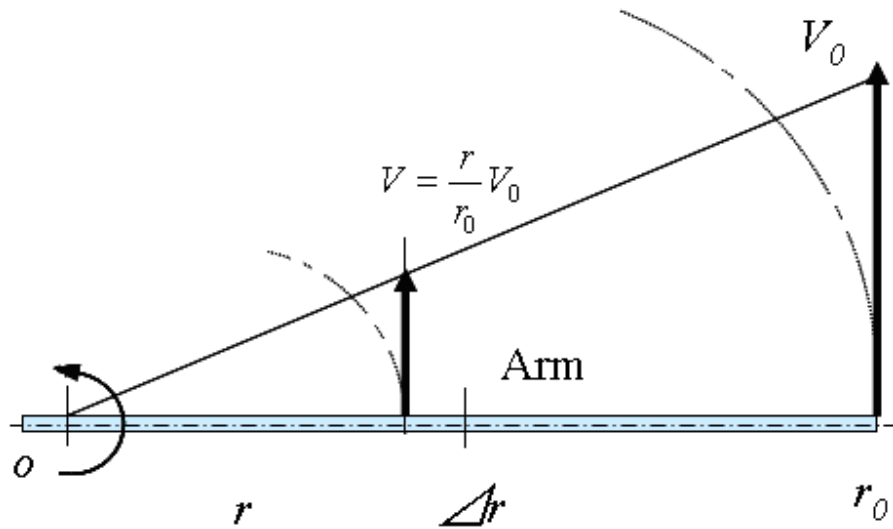


図9 装置上面から見たアーム

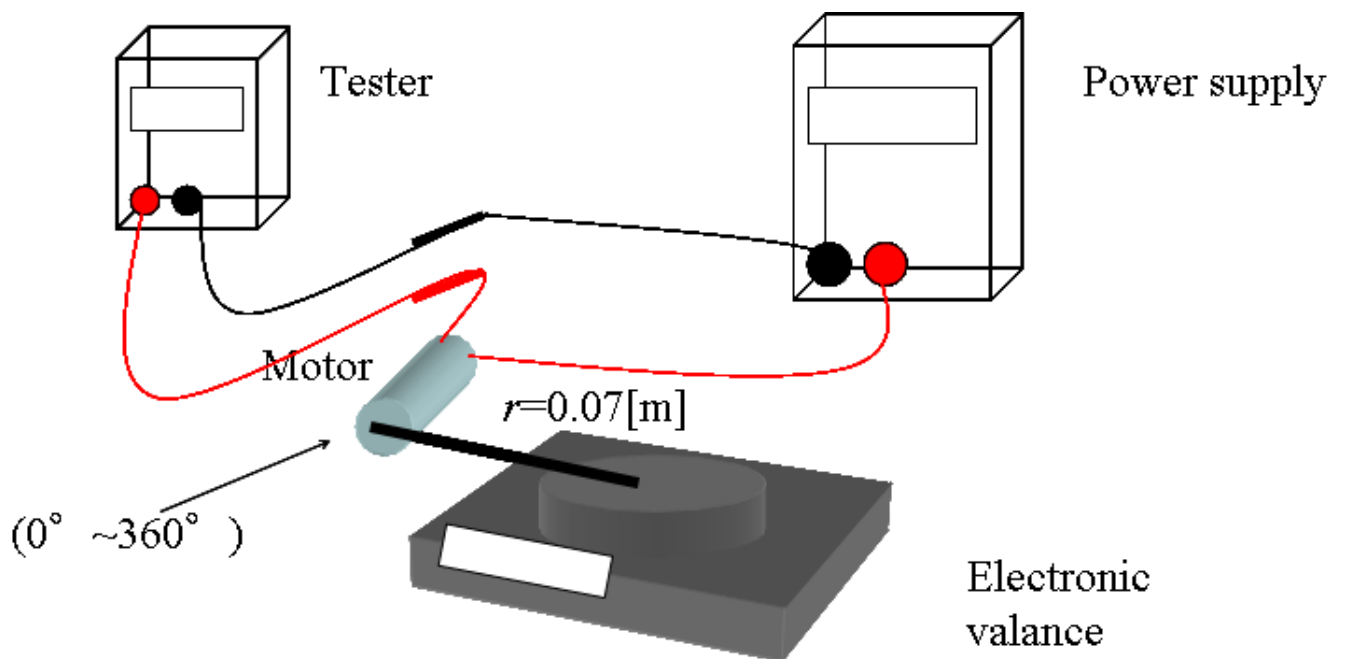


図10 モータの停動トルク測定実験

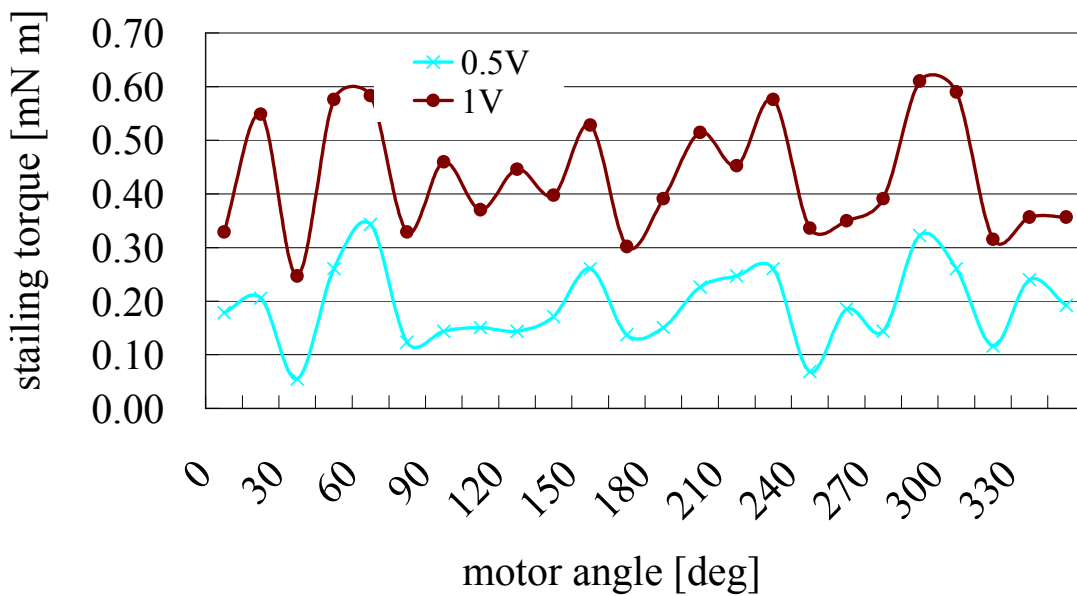


図 11 停動トルクの測定結果 (0.5V と 1V のとき)

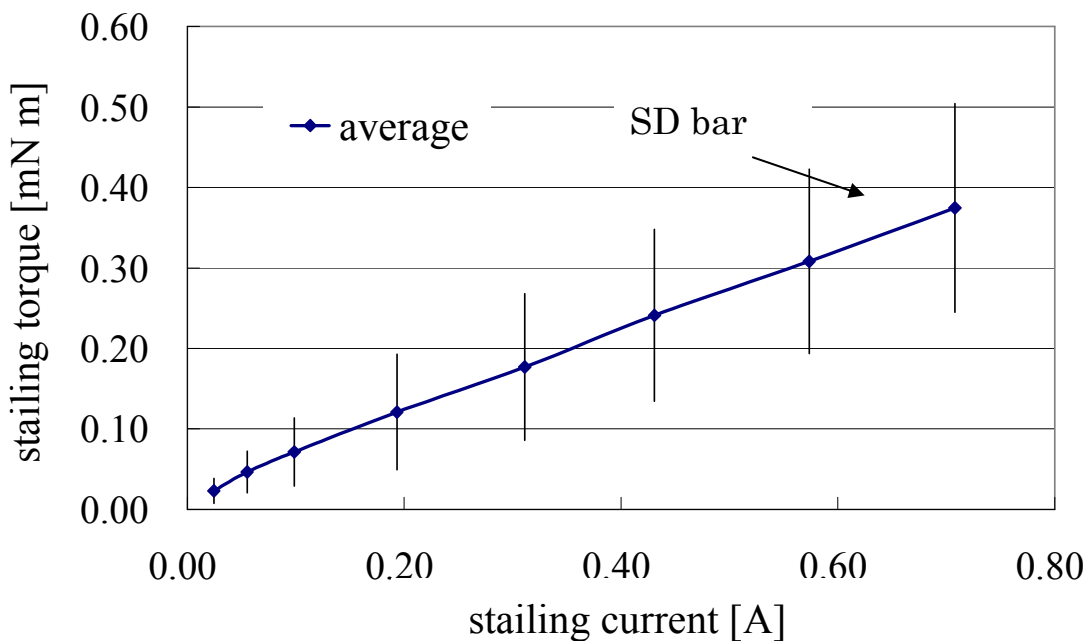


図 12 停動トルクと停動電流の関係

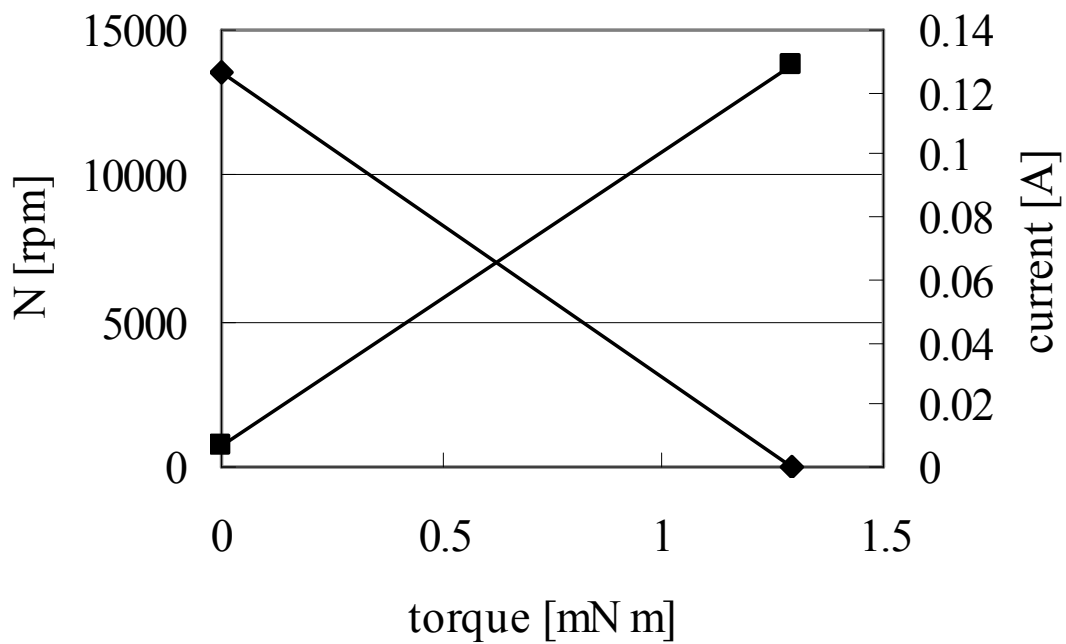


図 13 定格電圧時のモータ特性曲線 (15V)

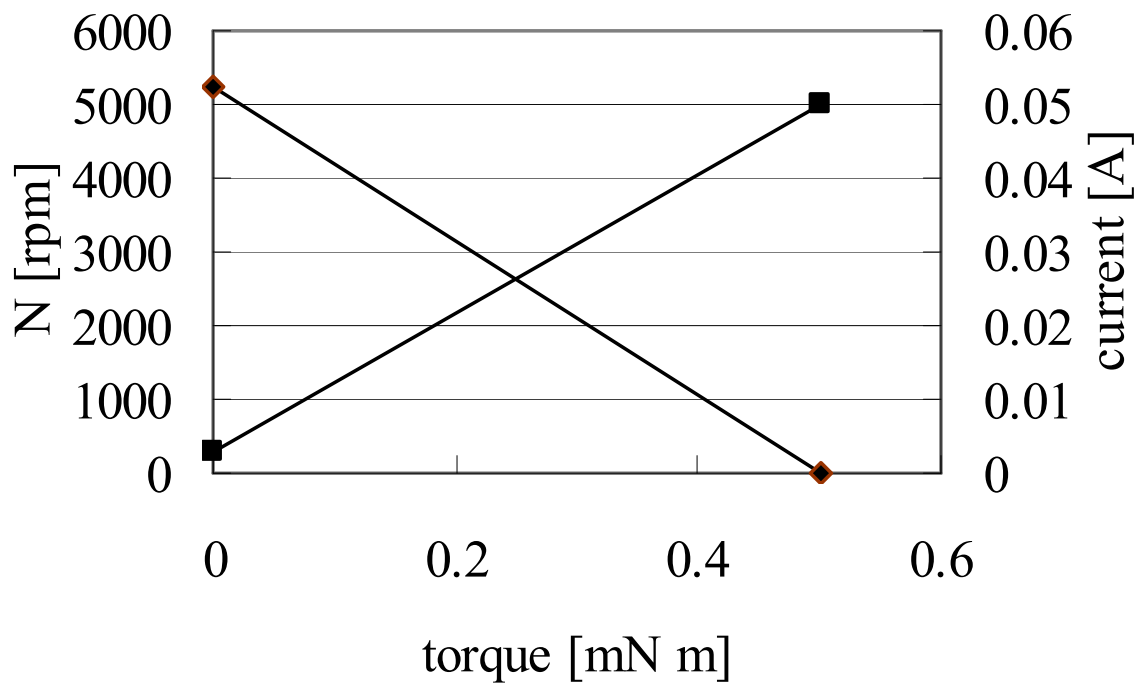


図 14 定格電圧 2/5 のときのモータ特性曲線 (5.8V)

表1 モータ選定の結果

	トルク制御	トルクの変動	軸の安定度	コスト	エンコーダー
マブチモータ	×	×	○	低	×
maxon motor (ギア付き)	○	◎	△	高	◎
maxon motor (ギアなし)	◎	○	○	高	◎

第4章 センサーの検討

この装置の垂直位置制御，トルク制御のためインダクタンス・コイルセンサー，CCDセンサー，2次元PSDセンサーと3種類のセンサーを考えた．以下の節でそれぞれの性能について述べる．

4・1 インダクタンス・コイルセンサー

インダクタンス・コイルセンサーとは，図15のようにアクチュエータ用コイルとは別にセンサーコイルを上下に設置する．アームに取り付けた駆動用小型永久磁石が上下することでセンサーコイル内のインダクタンスが変化する．このインダクタンスの変化を電圧で読み取り，上下のセンサーコイルの電圧差から垂直方向の位置を検出する仕組みになっている．

4・1・1 性能実験及び最適化

このセンサーの実験ではφ0.08の銅線を使い，現時点で考えているアクチュエータ用コイルの外形と同じφ200×6.8を2つ製作し，センサーコイル中心間を200mmにして上下に置き，±150mmの間で小型永久磁石を上下に動かした．両センサーコイルにファンクションジェネレータを接続し，2つのセンサーコイルの電圧差(V_1-V_2)をオシロスコープで読み取った．このセンサーコイルのインダクタンス L_C は長岡係数 k より計算を行った．

$$L_C = k\mu n^2 Sl \quad (4.1)$$

式(4.1)からセンサーコイルのインダクタンス $L_C=3.1\text{mH}$ となった．しかし，この実験から得られた電圧差は小さく測定データにばらつきがあった．実験で使用した回路図は図17に示す．そこで電圧差を最大にするため回路の抵抗 R とコイルのインダクタンス L_C ，ファンクションジェネレータの電圧 E_0 の関係式から回路の最適化を行った．

$$v = \frac{E_0 \cdot \omega L_C}{(R + \omega L_C)} \quad (4.2)$$

$$\frac{dv}{dL_C} = \frac{E_0 \cdot \omega L_C \cdot \omega}{(R + \omega L_C)^2}$$

$$\frac{dv}{E_0} = \frac{\omega L_C \cdot \omega \cdot dL_C}{(R + \omega L_C)^2} = \frac{dL_C}{L_C} \cdot \frac{(\omega L_C)^2}{(R + \omega L_C)^2} \quad (4.3)$$

図17の回路からオシロスコープで読み取った電圧を式(4.2)とにおいて電圧変化の割合を求めた。式(4.3)の左辺が電圧変化の割合である。式(18)より右辺の第2項によって変化の割合が決まり、右辺第2項が最大になるには $R = \omega L_C$ であればセンサーの感度($V1-V2$)が高くなることがわかった。これを元に回路を作り直し、ファンクションジェネレータの周波数を1MHzまで上げ再実験を行った。またこのときに使用した永久磁石は $\phi 10 \times 10$ (ネオジム磁石)と $\phi 10 \times 1$ (ネオジム磁石)の両方で行うと同時にセンサーコイル中心から永久磁石位置を5mm, 7mmと変え実験を行った。5mmと7mmの場合ではセンサーコイル中心から離れた7mmの方がセンサーの感度が高いという結果が得られた。例として中心から5mmと7mmでの小型永久磁石($\phi 6 \times 3$)とした実験の結果を図18, 図19に示し、周波数を1000kHzと1MHzに変えた場合の実験結果を図20と図21に示す。

この結果からセンサーの感度($V1-V2$)は対象となる永久磁石の体積を大きくし、センサーコイルの中心から離すと感度が高くなることがわかった。しかし、この実験に使用したセンサーコイルに対して対象となる永久磁石が小さいため、位置センサーとしての精度は低くこの装置に適してはいない。なお、インダクタンス・コイルセンサーはアームの垂直位置のみでトルク制御にはモータの回転数をエンコーダーで読み取り、電流を制御する。

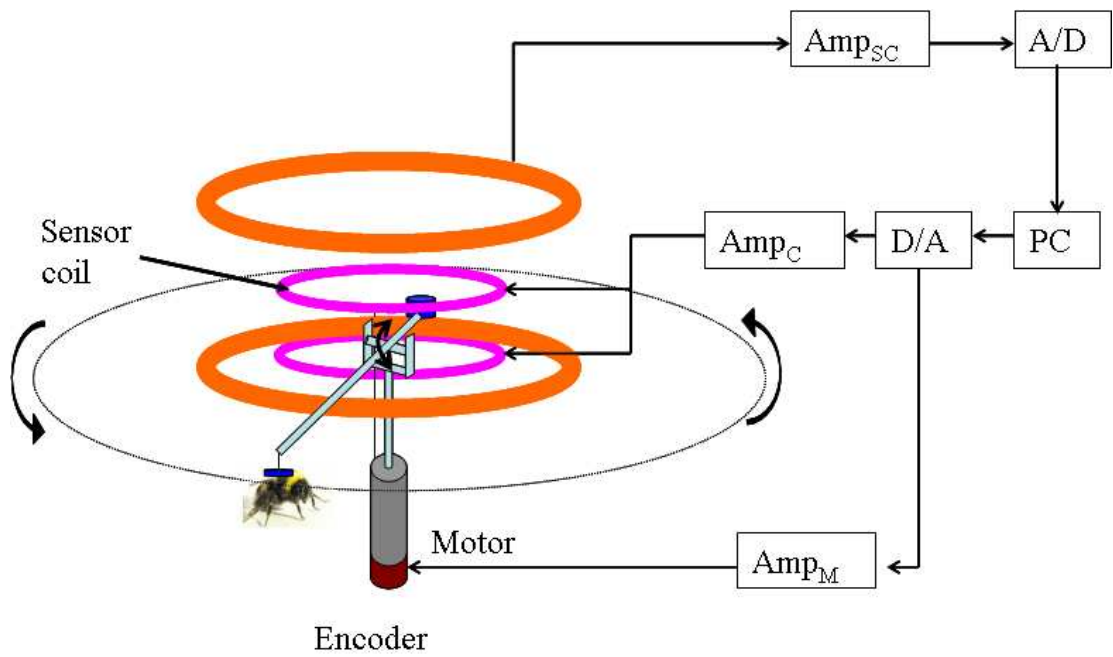


図 15 インダクタンス・コイルセンサーを用いた場合の制御システム

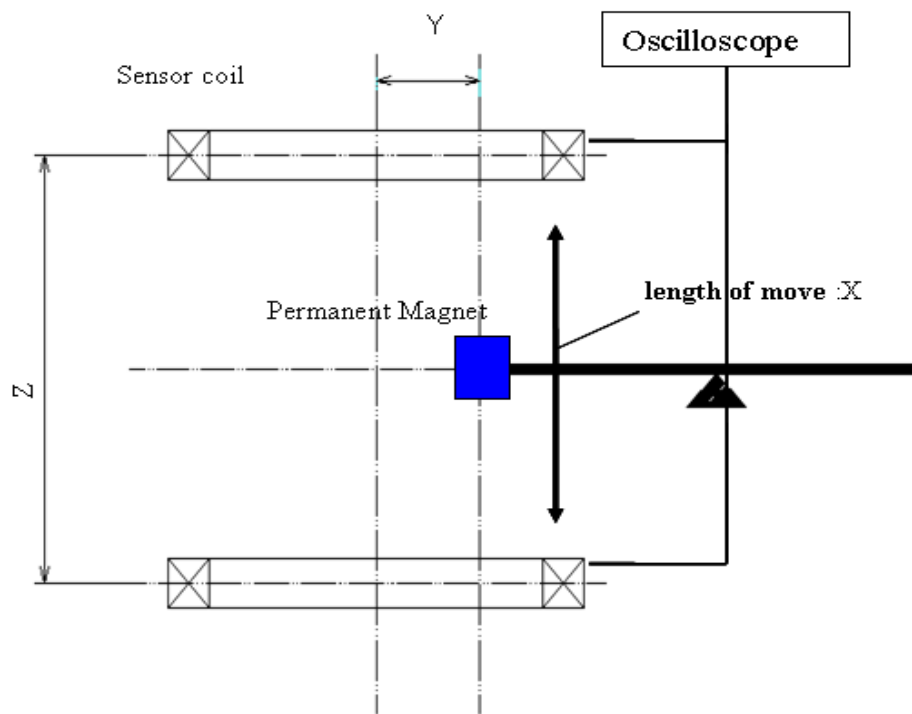


図 16 インダクタンス・コイルセンサーの性能実験

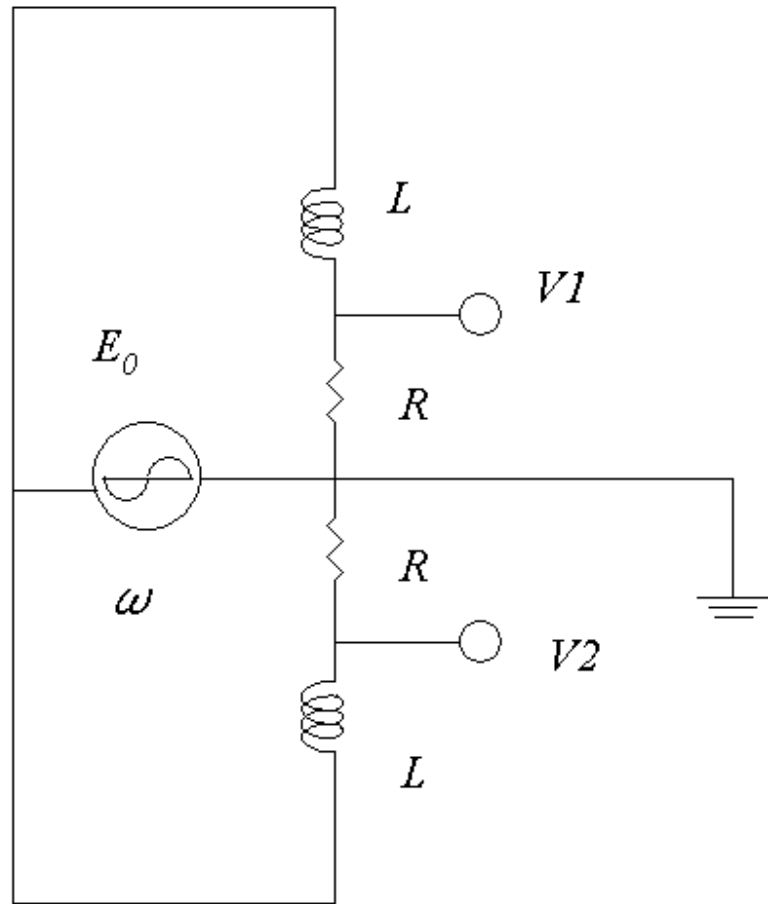


図 17 最適化を行ったインダクタンス・コイルセンサー回路

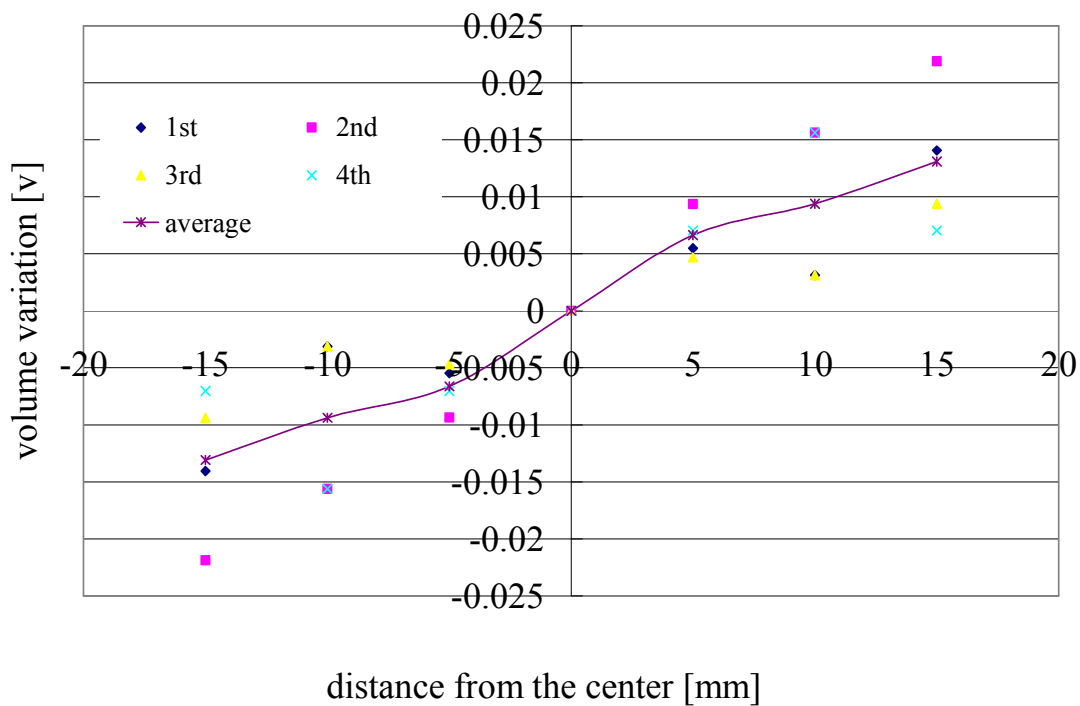


図 18 中心からの距離 5mm における電圧変化 ($\phi 6 \times 3$ 100kHz-2k Ω)

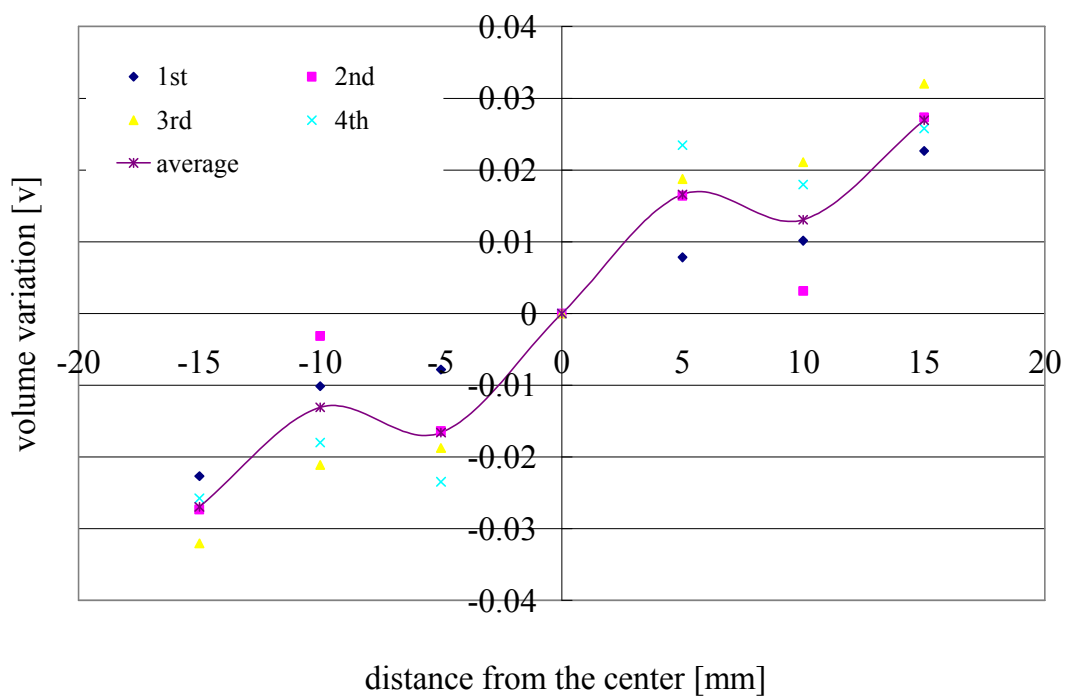


図 19 中心からの距離 5mm における電圧変化 ($\phi 6 \times 3$ 100kHz-2k Ω)

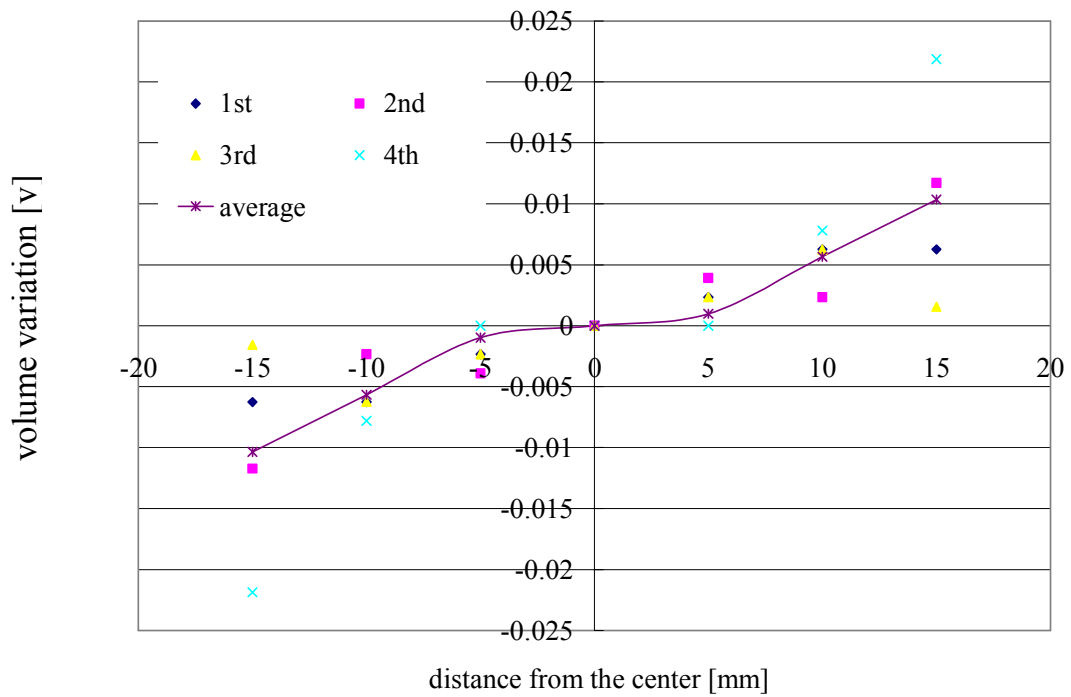


図 20 中心からの距離 7mm における電圧変化 ($\phi 10 \times 1$ 100kHz)

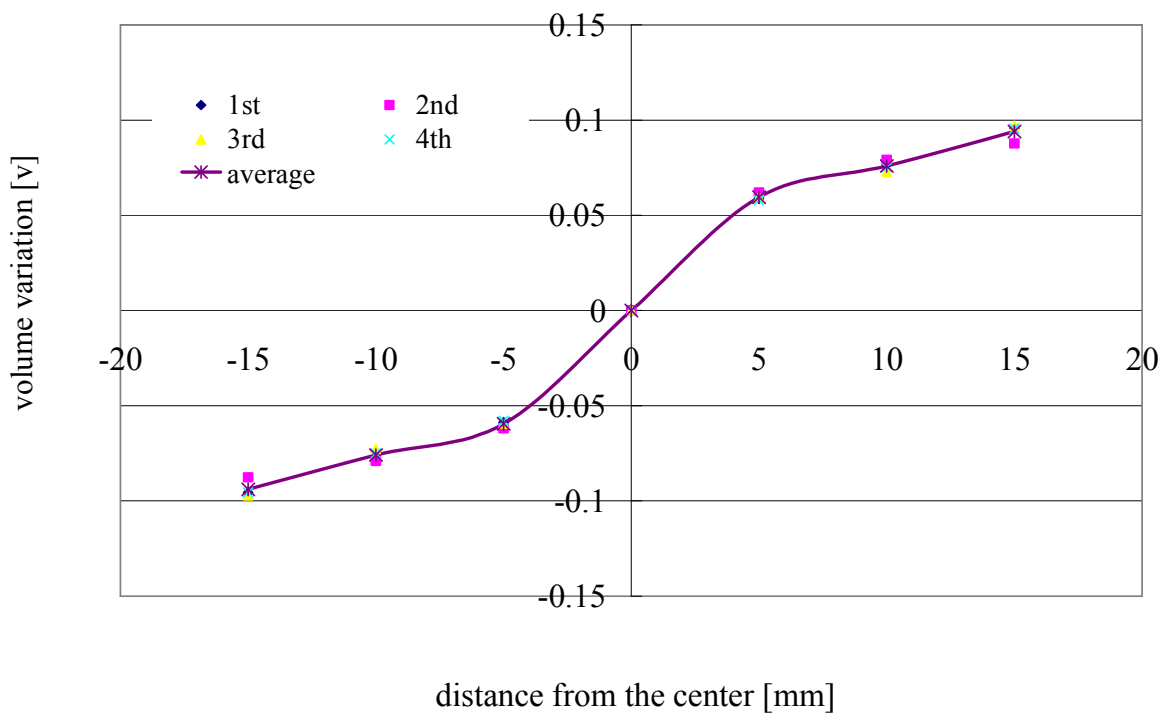


図 21 中心からの距離 7mm における電圧変化 ($\phi 10 \times 10$ 1MHz)

4・2 CCDセンサー

図22のように昆虫の回転軌道制限用アーム上部に付けたマーカの重心位置と回転角度を画像によって読み込み位置と回転を制御する。この制御方法を用いると位置と回転角度の情報を1つのセンサーで得ることができるのでモータにエンコーダーを取り付ける必要がなくなる。しかし、画像処理を行うのでカメラの読み取り時から出力されるまでに遅れが発生するので遅れ時間について調べ、角度分解能について実験を行った。

4・2・1 角度分解能及び遅れ時間

実験では図23のようにステッピングモータにマーカ(3×1.5)を取り付け、PC(lab VIEW)でステッピングモータを任意の角度で動かし、その動きをカメラ(KEYENCE 画像処理装置：CV-3000)で読み取り、実際のステッピングモータの角度 θ_S とカメラ読み取り角度 θ_C から角度分解能を調べた。(図24)また、ステッピングモータを1000ms毎に90°動かしてステッピングモータへの命令時とカメラで読み取り、画像処理装置で処理を行ってPCへの出力時を比べ遅れ時間についても調べた。(図25)この実験でのカメラとマーカの距離は0.4mとした。実験結果から角度についてステッピングモータの角度とカメラで読み取った角度を比較すると誤差は±11%以下であった。このことから装置全体から考えるとカメラの角度分解能については、制御に使える範囲内であると考えられる。しかし、遅れ時間について出力されるまでの遅れを見ると168msの遅れが見られた。このことから本装置のセンサーには不適切であると考えた。

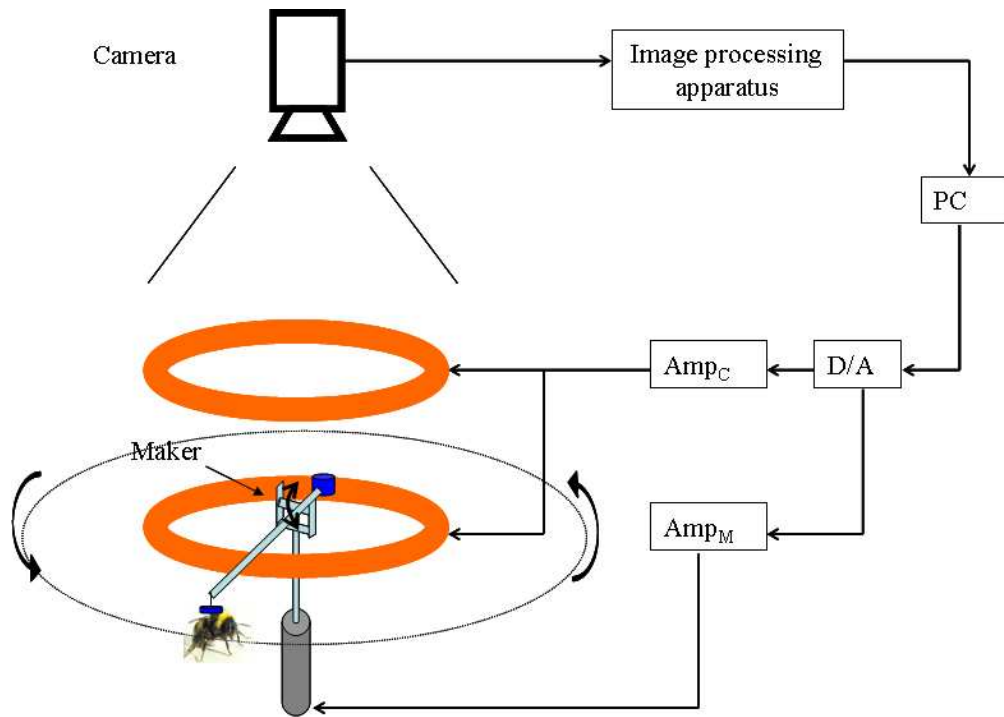


図 22 CCD センサーを用いた場合の制御システム

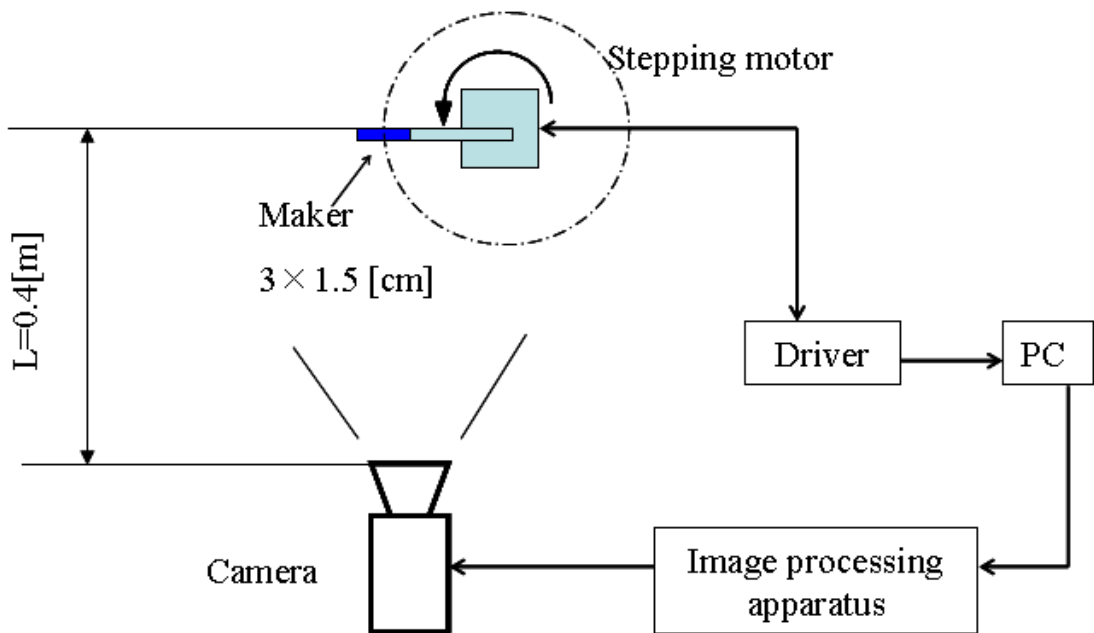


図 23 CCD センサーの性能実験

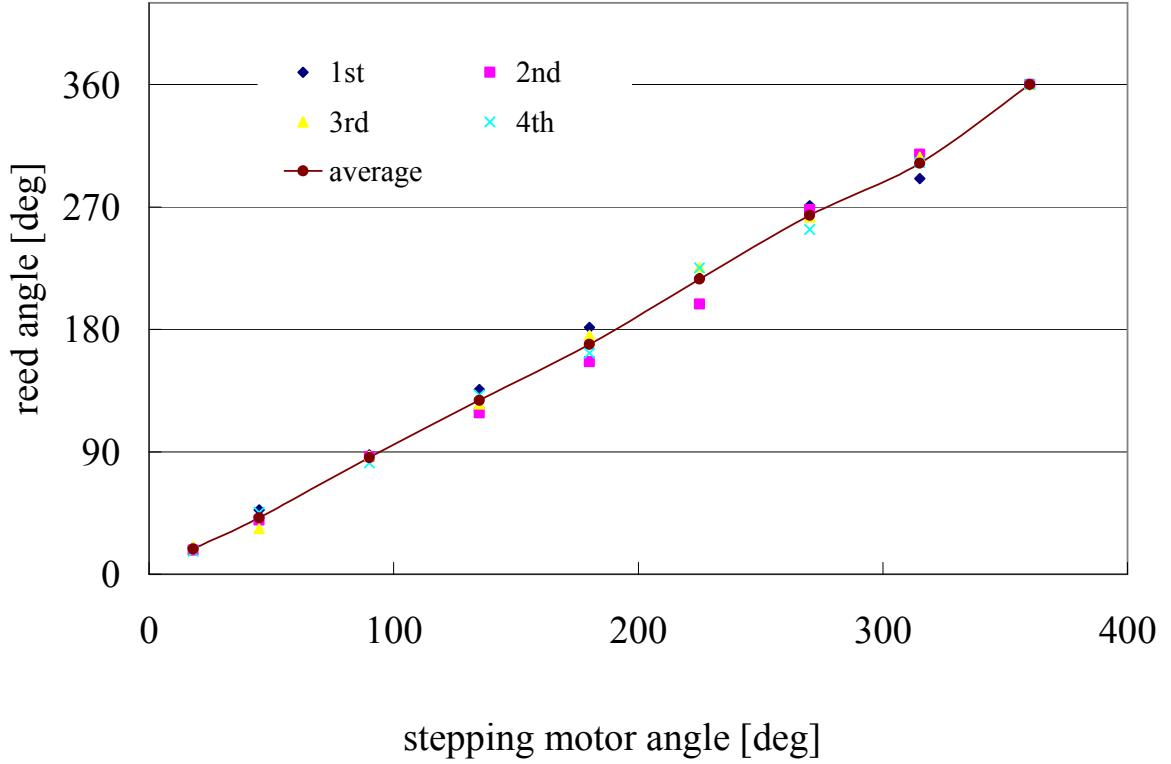


図 24 CCD センサーの角度分解能

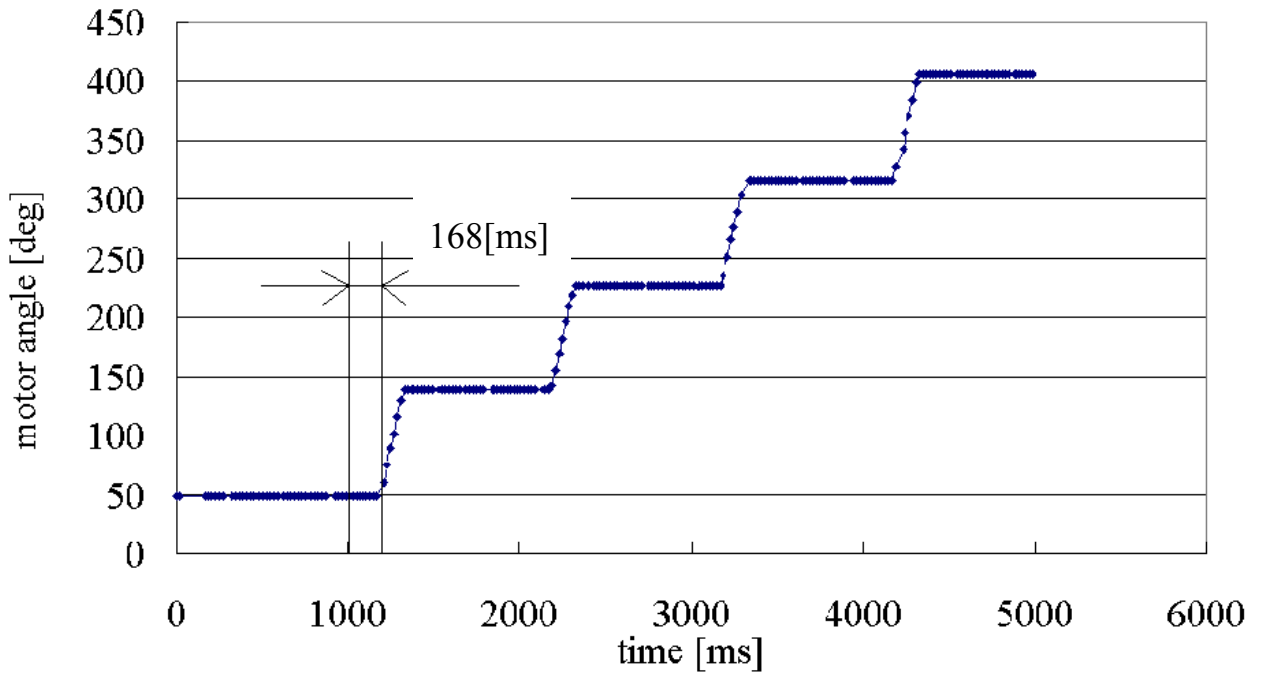


図 25 画像処理を含めたセンサーの遅れ時間

4・3 2次元PSDセンサー

PSD (Photo Sensitive Diode) は測定対象に光をあて、反射した光を受光面で受けることにより測定対象の位置を得るセンサーである。本装置ではこのPSDを用いてアームの垂直方向の位置と角速度を読み取ることを考えた。図26のように一般的な配置はアームの重心位置上に取り付け、レーザーからビームスプリッターを経由してミラー(アルミ製平板)に光をあて、反射したPSDの受光面にあてる。設計上、今回は昆虫が取り付けられたアームの先端部分を±100mm上下に動かすと想定した。アームの水平位置からの最大角度 $\theta_{1max}=0.2rad$ で、アームに取り付けたミラーの反射角 $\theta_{2max}=2\theta_{1max}$ となっている。

このことからミラーとPSDの間の距離を大きくとると、その分受光素子を大きくしなければならず、昆虫の垂直方向の稼動距離が±50mm程度と想定した稼動距離より短くなってしまう。

そのため図27に示すように受光素子の中心部分にレーザーで穴($\phi 400\mu m$)を開け、真上からレーザーの光を直接ミラーにあてることによって、小さい受光面でも位置や速度を検出でき、垂直方向の稼動距離も長くなると考えた。また、図28のように斜め方向からレーザーを当てた場合、ミラーに反射した光の軌道は楕円形になってしまう。比較として真上からレーザーを当てた場合の軌道を図29に示す。この場合加工の必要は無いが解析が難しく、真上からレーザーを当てるのが最も適していると考えた。今回使用するPSDは浜松ホトニクス製の2次元PSD、S5991-01(受光面9×9mm)を使用する。また、アーム水平時において反射光がPSD受光面中心にあたると角速度が検出できなくなるため、図30のように、あらかじめミラーを傾けておく必要がある。PSDの受光面における反射光の軌道は昆虫の上下方向の動きにより図31に示すような正弦関数的な軌道となる。これらのことにより回転を始める時のアームの方位とxy座標においての位置から垂直方向の位置と角速度を検出できると考えた。

校正方法はアーム水平位置での角度ごとのデータを基準とする。まず、2次元PSDから得られた軌

道を円に補正後、半径の長さや水平位置の関係により昆虫の飛行角度と垂直方向の位置を検出する。このとき2次元PSD受光面内の角度は補正を行っているため、そのまま昆虫の飛行角度と同じとなる。このPSDセンサー全体の概要は図1に示したとおりである。

PSDセンサーを使用する場合、電圧のばらつきや検出時に遅れが出ることも無く、このセンサーではモータにエンコーダーを取り付ける必要が無いことから本装置には最も適していると考えた。

4・3・1 2次元PSDセンサーの加工

PSDセンサーの加工には先述の通り受光面中心に対してレーザーによる加工を行う。当初、加工にはダイヤモンドドリルの使用を試みたが、受光面のシリコン基盤に負荷がかかり、基盤がめくれてしまった。そこで加工には紫外レーザーを用いて、5軸加工台にPSDを取り付け裏面から加工を行うことで中心部に穴を開けた。加工の様子は図32に示す。このとき開けた穴の直径は400 [μ m]でレーザーの照射分割数を100回、加工回数を10回にして、より円滑な穴を開けた。しかし、加工後に穴の位置を確認すると穴の中心には $x=-0.4\text{mm}, y=-0.3\text{mm}$ のずれがあった。このずれは円軌道読み取りの際に問題となるが、電圧を読み取り時に計算プログラム上で中心位置の補正を行った。

4・3・2 特性評価

2次元PSDから出力される電圧 V_{x1} , V_{x2} , V_{y1} , V_{y2} を用いて、下記換算式より受光面での光の位置である x , y の座標を求める。⁽⁵⁾

換算式

$$x = \frac{(V_{x2} + V_{y1}) - (V_{x1} + V_{y2})}{V_{x1} + V_{x2} + V_{y1} + V_{y2}} \cdot \frac{L}{2} \quad (4.4)$$

$$y = \frac{(V_{x2} + V_{y2}) - (V_{x1} + V_{y1})}{V_{x1} + V_{x2} + V_{y1} + V_{y2}} \cdot \frac{L}{2} \quad (4.5)$$

L : 受光面サイズ 10 [mm]

PSDからの出力電圧を直接A/D変換器で読み取り，デジタルで計算することも可能であるが，精度向上のため換算式の右辺第1項の分母と分子をアナログで計算するように図33のようにオペアンプによる演算回路を製作した．オペアンプは，LM324N（4回路）を3つ使用した．図34の①の部分でPSDからの電圧を増幅し，コンデンサによってノイズを除去している．次に②の部分でそれぞれの電圧を加算している．最後に③の部分では，式(4.4)(4.5)の分母に当たる4つの電圧をすべて加算したものと分子に当たる差算を行っている．A/D変換器で電圧を読み取り計算を行うより，アナログで部分的に計算を行ってからA/D変換器で読み取りを行う方が精度の良い結果となった．これはアナログで計算を行ったため位相のずれがなくなったからである．

この回路を用いてPSDの性能実験を行った．実験は図35のように赤外レーザーを一定間隔でPSD受光面に当て，PCでPSDからの電圧を読みとった．図36と図37に加工前と加工後の軸線上における性能実験結果を示す．この結果から加工前の標準偏差 σ は $x=0.66\mu\text{m}$ ， $y=0.53\mu\text{m}$ で加工後の標準偏差 σ は $x=48\mu\text{m}$ ， $y=122\mu\text{m}$ となり，加工後の表面には $\phi 1\text{mm}$ 程度の加工による歪みが見られた．そこで受光面の縦横1mm間隔ごとに赤外レーザーを平行に当て，一定間隔で読み取りを行った．その結果を図38に示すとともに1mm間隔ごとの標準偏差を表3に示す．なおこの標準偏差はセンサー有効範囲だと考える $\phi 2\text{mm}\sim 4\text{mm}$ を中心とした標準偏差である．これにより加工した穴を中心にのみ歪みが見られるのがわかる．図38において受光面の端になるにつれて歪みが見られるが，これは2次元PSDの構造上の問題で加工による歪みではない．装置の仕様上，その部分を避けて使用することについては問題ないと考えられる．図39はセンサー有効範囲内における測定例である．

本装置に使用するセンサーについて3種類検討したが，センサーとしての分解能や精度，読み取りまでの時間など様々なことを考慮した結果，2次元PSDの中心を加工したものが最も適しており，このセンサーを使用することを決定した．

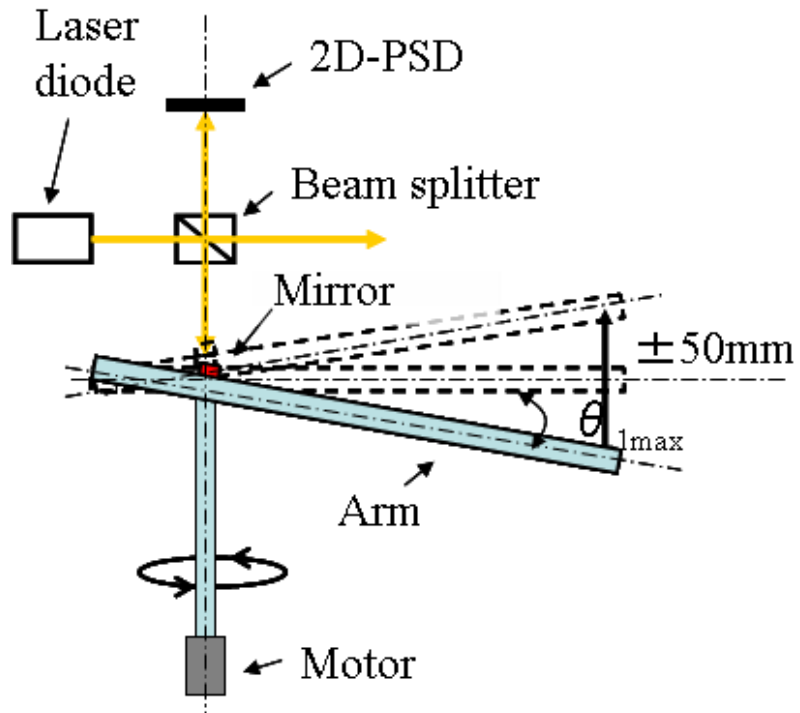


図 26 一般的な 2 次元 PSD センサーの配置

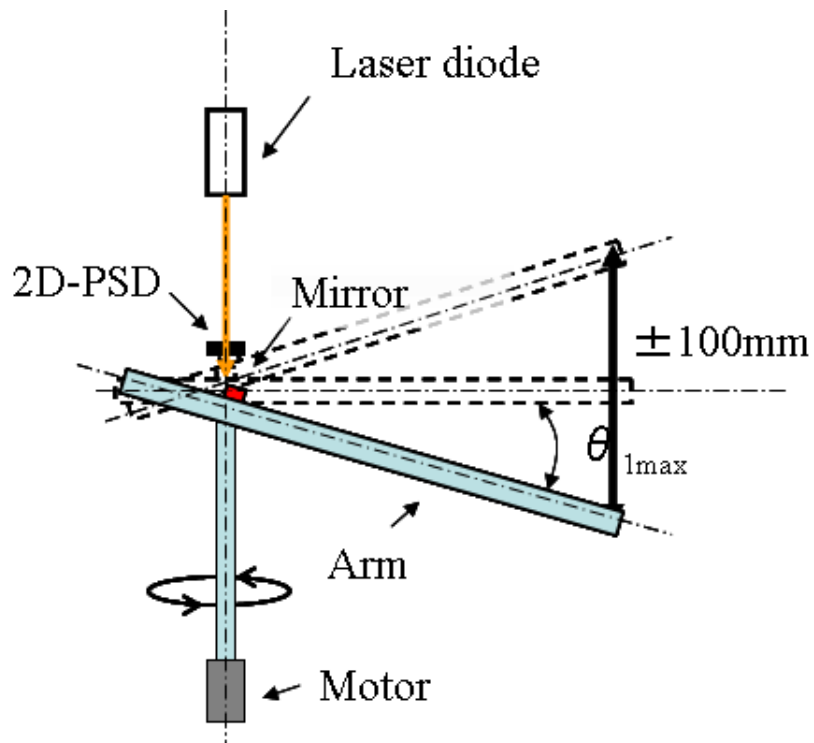


図 27 設計上最適化された 2 次元 PSD の配置

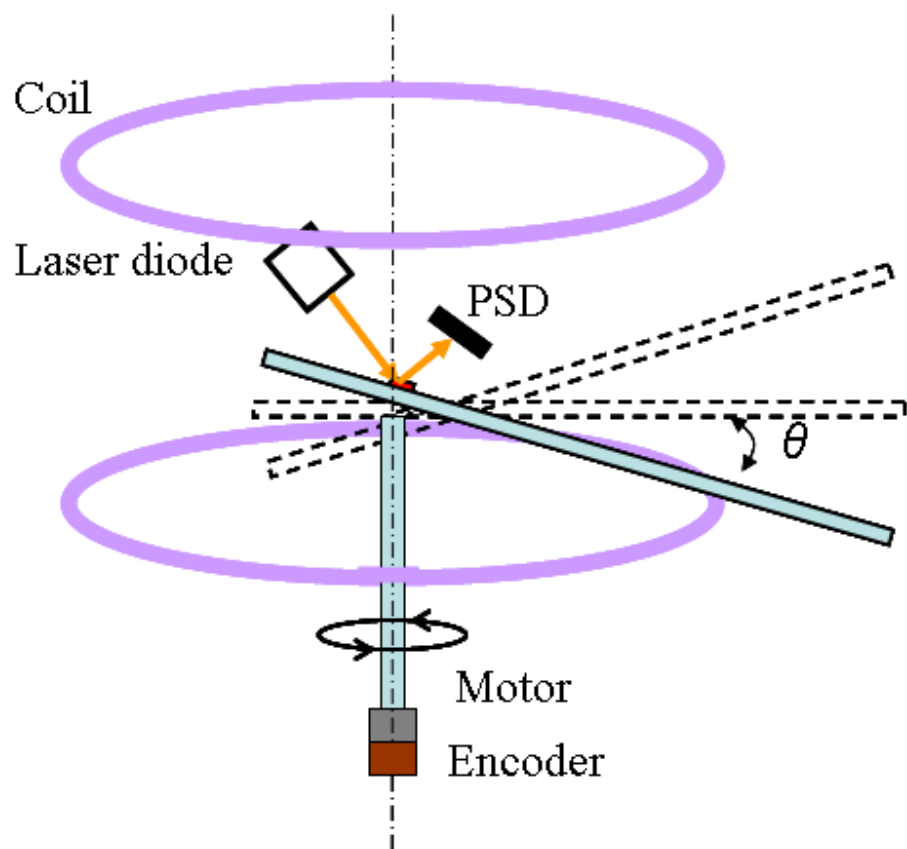


図 28 アームに取り付けたミラーに対して斜め方向からレーザーを当てた場合の軌道

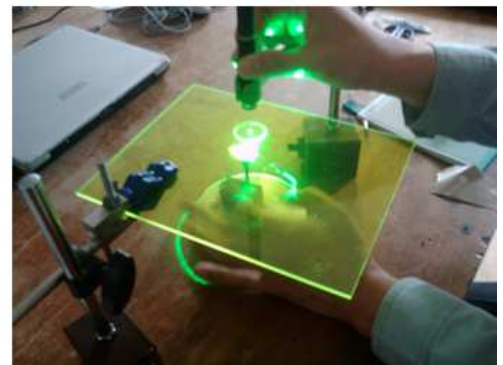
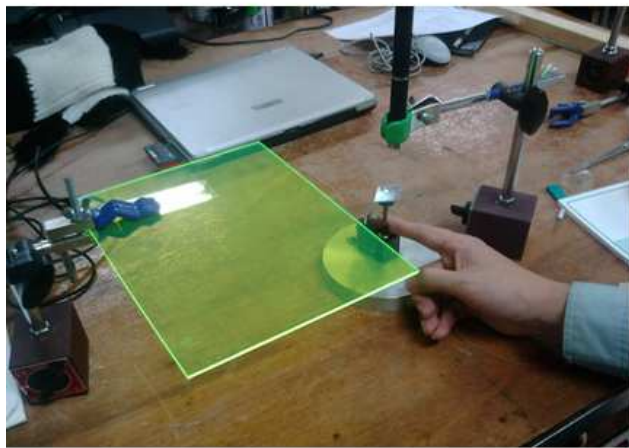


図 29 アームに取り付けたミラーに対して真上からレーザーを当てた場合の軌道

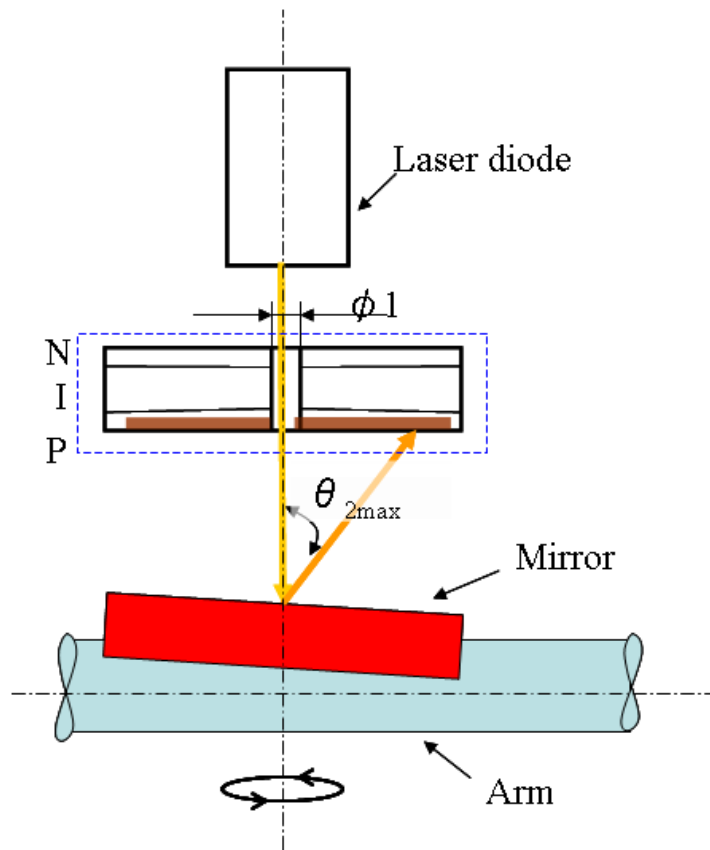


図 30 加工を行った場合における 2次元 PSD の配置

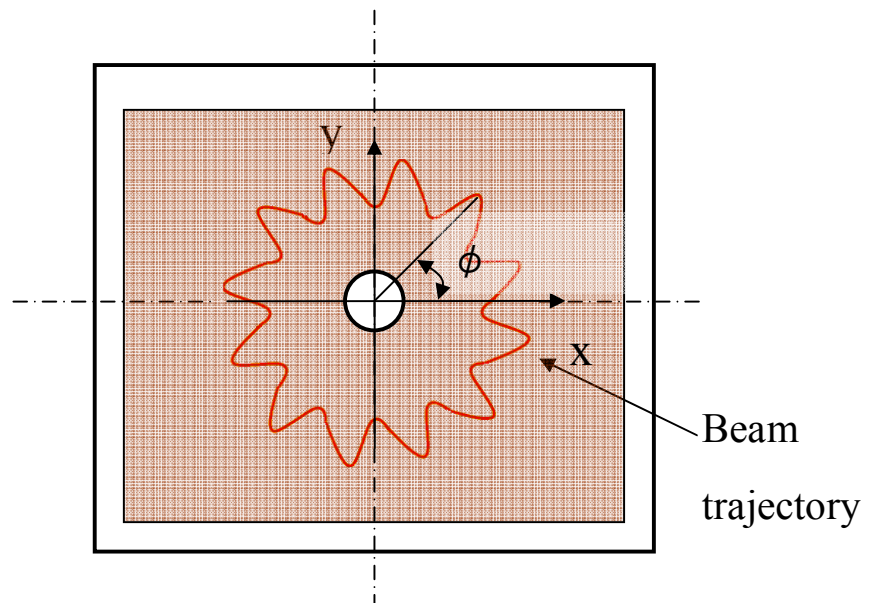


図 31 2次元 PSD 受光面におけるレーザーの軌道

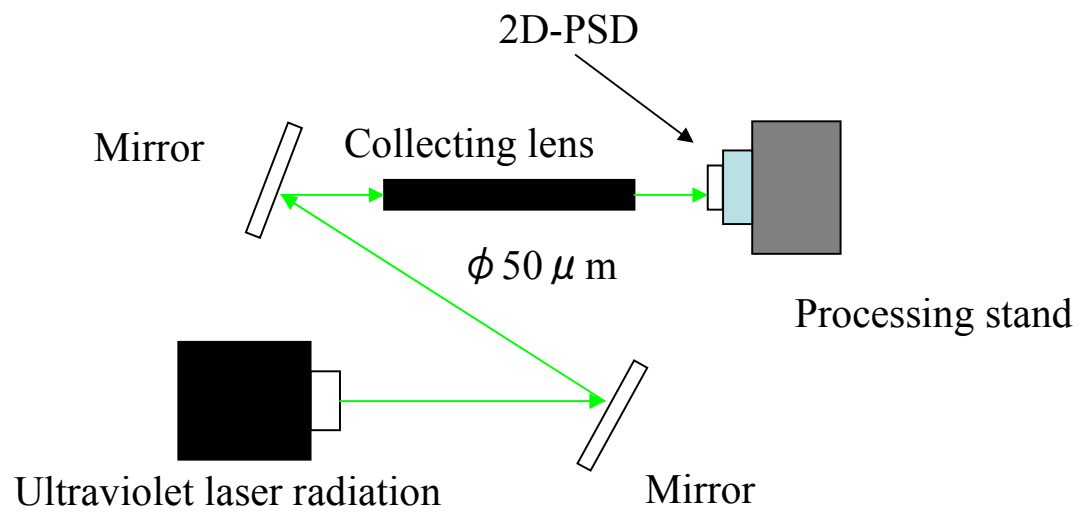
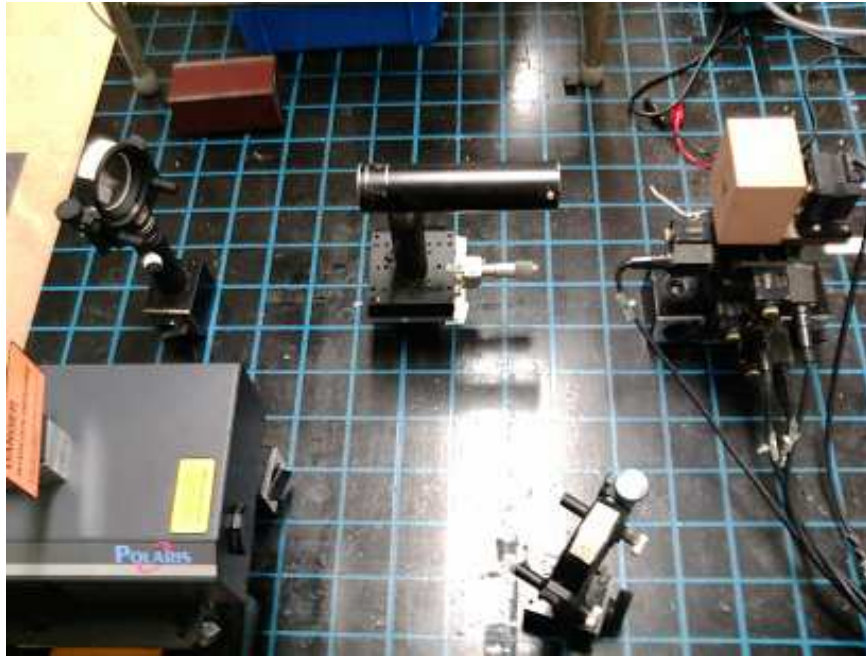


図 32 紫外レーザーによる 2 次元 PSD 受光面中心部の加工

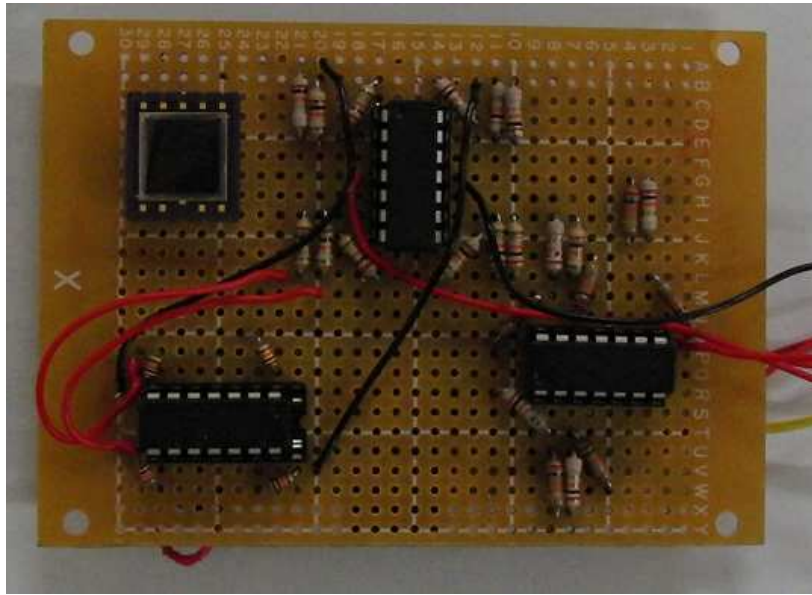


図 33 製作した 2 次元 PSD 用演算回路

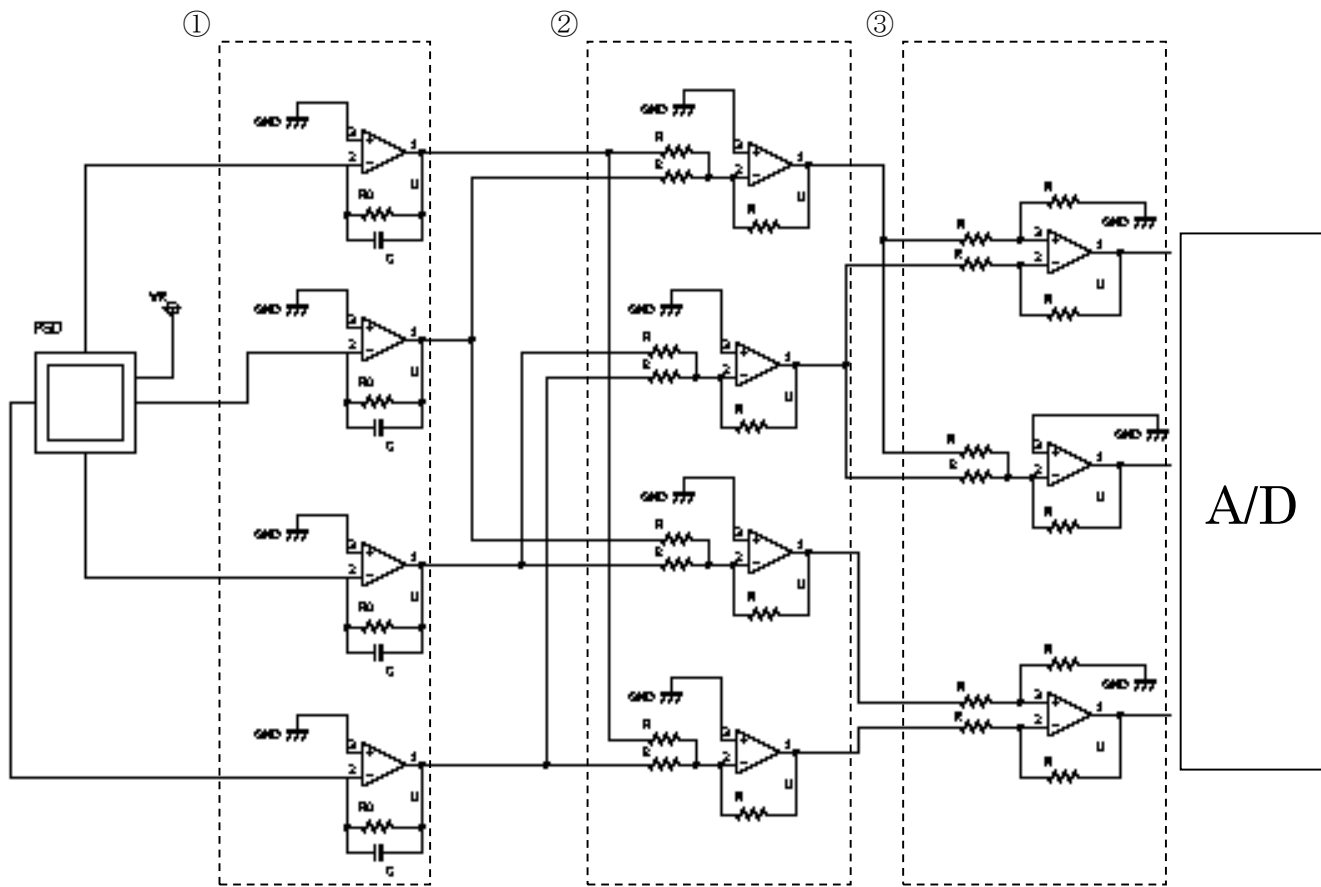


図 34 2 次元 PSD 用演算回路

表 2 2次元 PSD 用演算回路の仕様

	値	個数
R	20[k Ω]	23
R _f	10[k Ω]	4
C	0.1[μ F]	4
V _R	9[V]	1
U	-	3

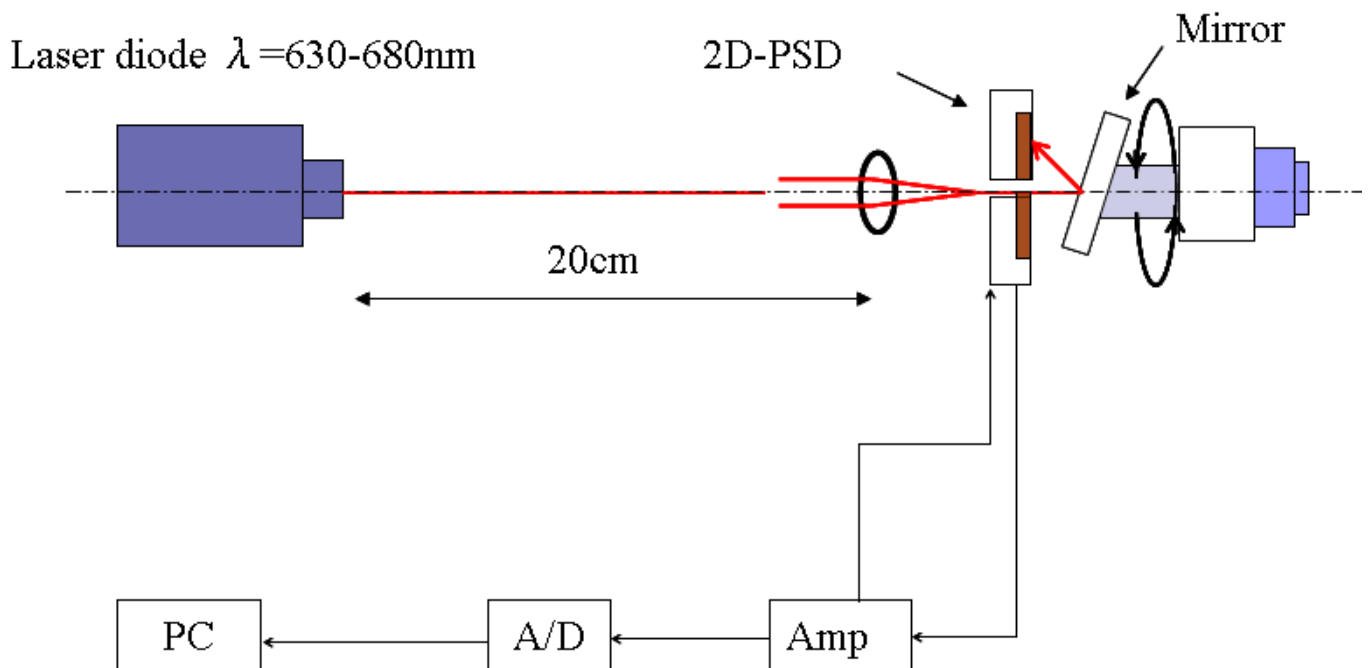


図 35 赤外レーザーによる 2次元 PSD の性能実験

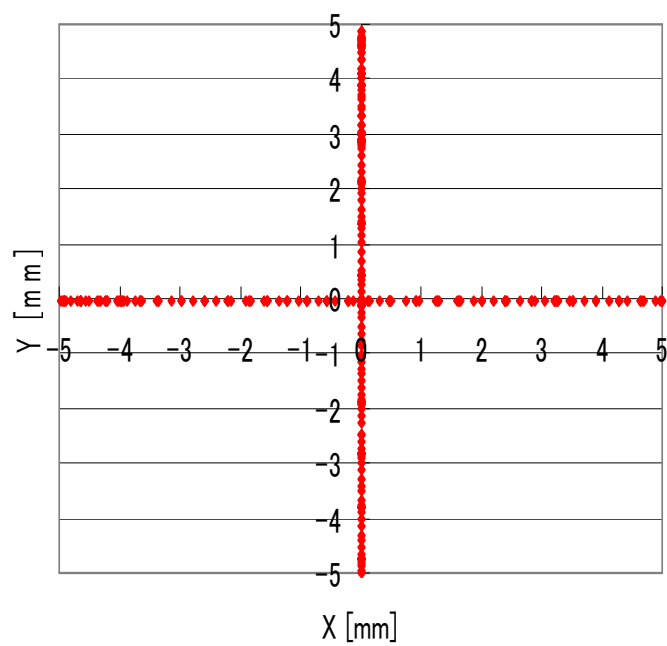


図 36 加工前の 2 次元 PSD の性能 (軸線上)

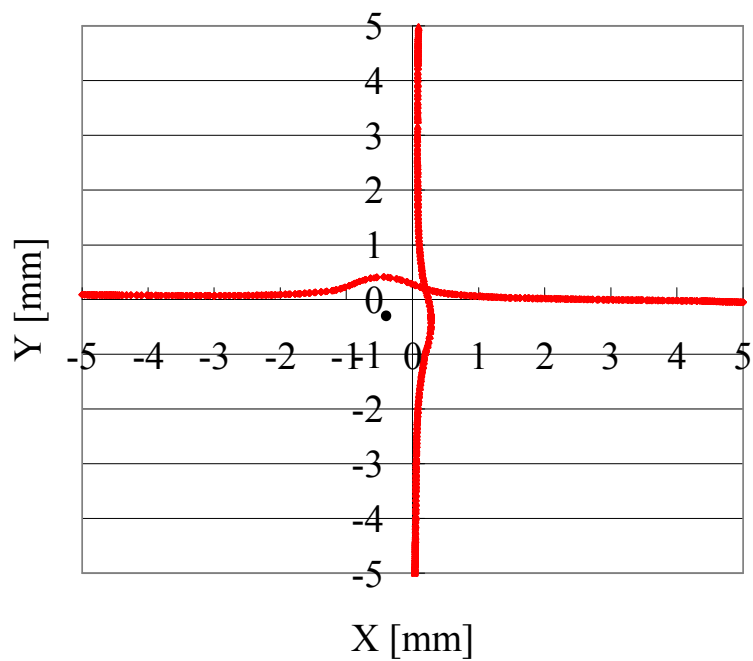


図 37 加工後の 2 次元 PSD の性能 (軸線上)

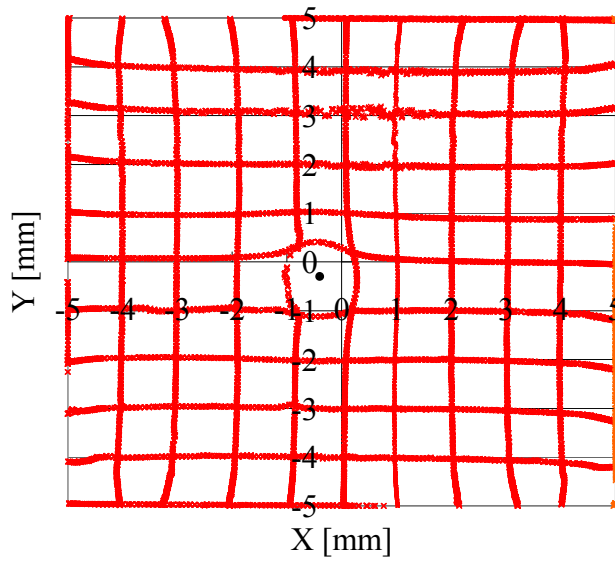


図.38 加工後の 2 次元 PSD の性能 (1mm 毎)

表.3 加工後の 2 次元 PSD の各標準偏差

σ_x							
X	-5[mm]	-4[mm]	-3[mm]	-2[mm]	-1[mm]	0[mm]	
4~-4[mm]	5.56	19.71	22.14	16.035	7.544	62.67	[μ m]
4~2[mm]	15.22	7.063	8.659	15.34	63.80	9.531	[μ m]
2~-2[mm]	25.19	19.19	19.21	15.07	11.21	65.72	[μ m]
-2~-4[mm]	19.19	22.56	21.99	18.23	46.59	1.803	[μ m]
X	1[mm]	2[mm]	3[mm]	4[mm]	5[mm]	Average	
4~-4[mm]	17.07	20.71	20.97	20.48	5.329	19.84	[μ m]
4~2[mm]	16.80	4.793	9.559	8.504	3.082	14.76	[μ m]
2~-2[mm]	4.039	10.94	12.59	11.93	0.9415	17.82	[μ m]
-2~-4[mm]	20.02	18.85	21.73	23.43	6.879	20.12	[μ m]
σ_y							
Y	-5[mm]	-4[mm]	-3[mm]	-2[mm]	-1[mm]	0[mm]	
4~-4[mm]	20.72	35.30	36.35	30.04	39.59	106.67	[μ m]
4~2[mm]	5.633	21.44	25.51	19.10	18.64	10.84	[μ m]
2~-2[mm]	9.653	20.72	23.03	15.30	42.64	118.67	[μ m]
-2~-4[mm]	5.297	13.90	9.699	6.125	24.36	3.573	[μ m]
Y	1[mm]	2[mm]	3[mm]	4[mm]	5[mm]	Average	
4~-4[mm]	49.94	33.99	44.28	41.06	25.67	42.15	[μ m]
4~2[mm]	7.187	5.122	10.95	11.88	2.816	12.65	[μ m]
2~-2[mm]	42.98	27.45	48.82	28.32	15.22	35.71	[μ m]
-2~-4[mm]	4.150	14.86	22.69	19.32	5.966	11.81	[μ m]

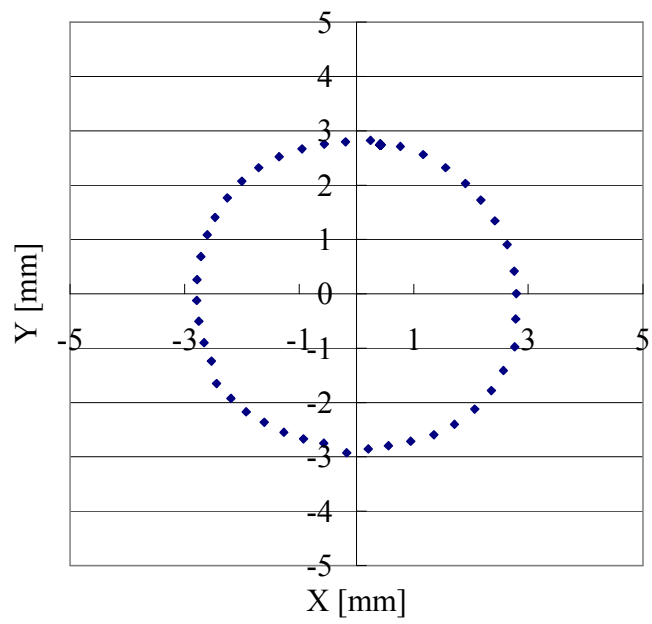


図 39 有効範囲での測定例 (φ 3mm)

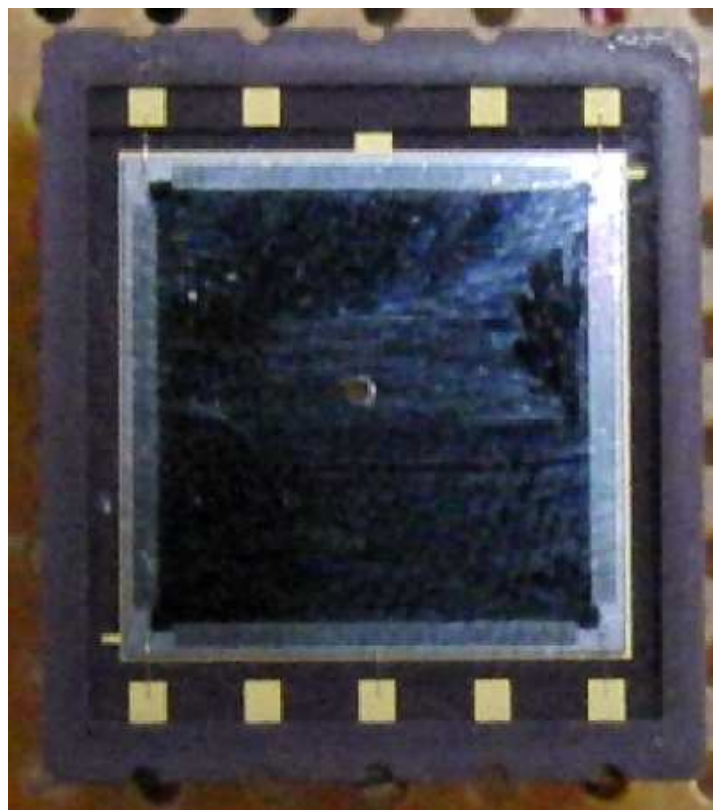


図 40 2次元 PSD 加工後の受光面 (φ 400 μm)

第5章 結言

昆虫の昇降運動の動的解析を目的としたトルク制御フライトミルの設計をするにあたって、各機構について検討し、次のことが得られた。

- ・磁気力の解析にはビオ・サバールの法則と磁気モーメントを使用し、コイルの電圧をPD制御し、コイルからの磁気力によって昆虫の垂直方向の制御及び力学的刺激を与える。
- ・トルク制御用アクチュエータに使用するモータは、トルクの変動が少ないmaxon motorのモータを使用し（ギアなし）、トランジスタを使用した回路によって、定格電圧以下で電流制御を行い、モータのトルクで昆虫にかかるアームの空気抵抗等の負荷を補助する。
- ・センサーには、PSDの中心部にレーザー加工を施したものを使用し、昆虫の回転角度 ϕ 及び上下の移動角 θ を検出する。

以上のことから装置及び各部品の図面を付録として添付する。

第6章 今後の課題

今後の課題は、昆虫の接続方法の仕様を決めることである。そして装置の各部品の加工・組み立て・テストを行っていく。また、磁場による昆虫への影響を調べなければならない。これは、実際に対象となるマルハナバチを強力な磁石（またはコイル）が入ったカゴ（ハコ）の中に入れることで磁場による昆虫への影響を調べていく。

参考文献

- 1) 池田 哲夫：“電気理論”，森北出版社
- 2) 権 彰起：「40cm×40cm 風洞実験用磁力支持天秤装置の研究」，平成 10 年度修士論文，福岡工業大学大学院 工学研究科
- 3) 澤田 秀夫：「風洞用磁力支持天秤装置」，日本 AEM 学会誌，Vol.13，No.1，(2005)，13—19
- 4) 「JSME テキストシリーズ 流体力学」，日本機械学会編，P4，表 1.3
- 5) 「2 次元 PSD S5990-01,S5991-01 データシート」 浜松ホトニクス株式会社
- 6) 相田 貞蔵，田中 卓史，中川 貴，松原 和宣 共著：“基礎電子回路”，培風館
- 7) 岩澤 孝治，大三 宗康 共著：“見方・かき方オペアンプ回路”，オーム社
- 8) 蔵本 靖明，小森 圭：「風洞実験用磁力支持天秤に関する研究」，平成 9 年度卒業論文，福岡工業大学工学部 電子機械工学科
- 9) 堀 桂太郎：“図解 labVIEW 実習～ゼロからわかるバーチャル実習～”，森北出版社

謝辞

本研究ならびに論文作成に際して数々のご指導ご助言をいただいた河村良行教授に深く感謝の意を表します。また実験等でお世話になった同研究室の皆さんに感謝の意を表します。

付録

- ・実験プログラム

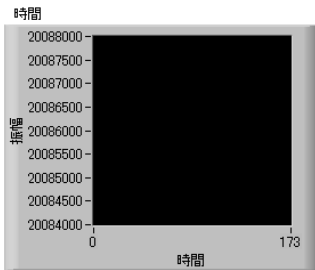
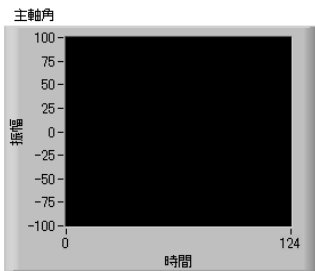
 - CCD センサー性能実験プログラム

 - 2次元 PSD 性能実験プログラム

- ・装置図面

 - 装置全体図及び各部品

停止



回転速度10設置
20
0
59.617
0
2011000

速度
0

プール 2

VISAコンバータ
CV-3000

For instructions, select **Help**>>**Show Context Help**

Channel Parameters

右回転
% Dev3/ctr0

左回転
% Dev3/ctr1

Idle State
Low

Frequency (Hz)
370.00

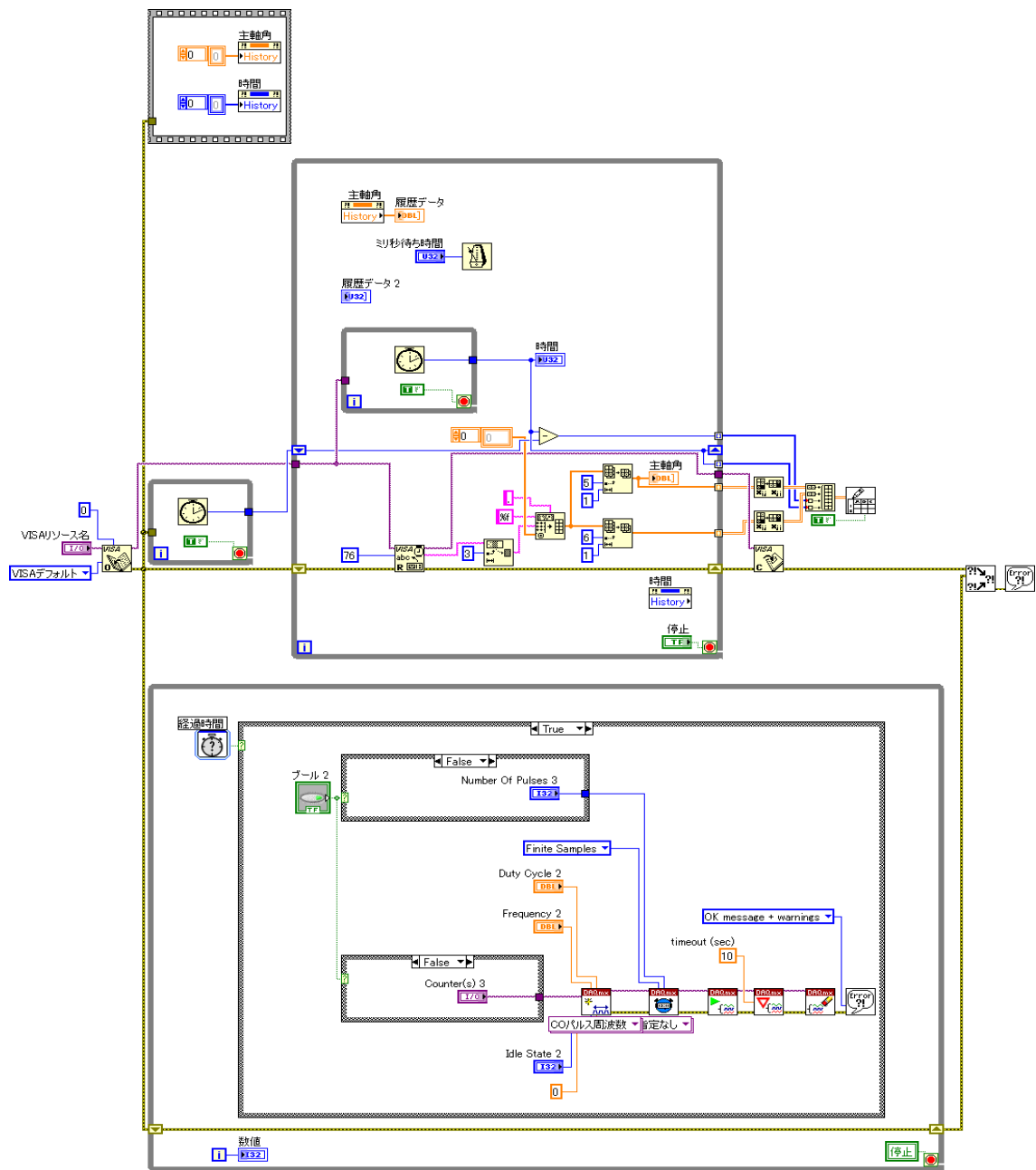
Duty Cycle
0.50

Timing Parameters

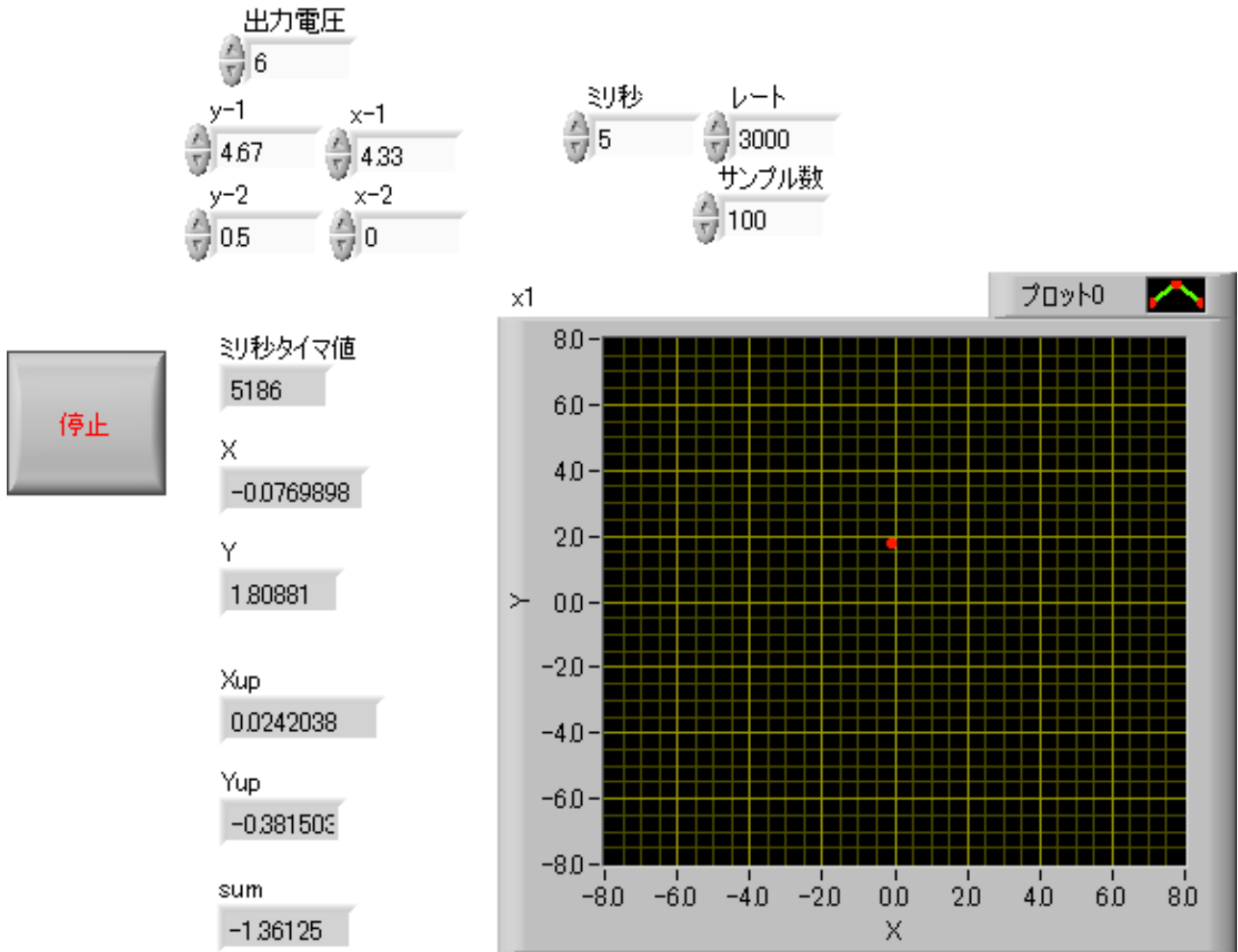
右回転
50

左回転
50

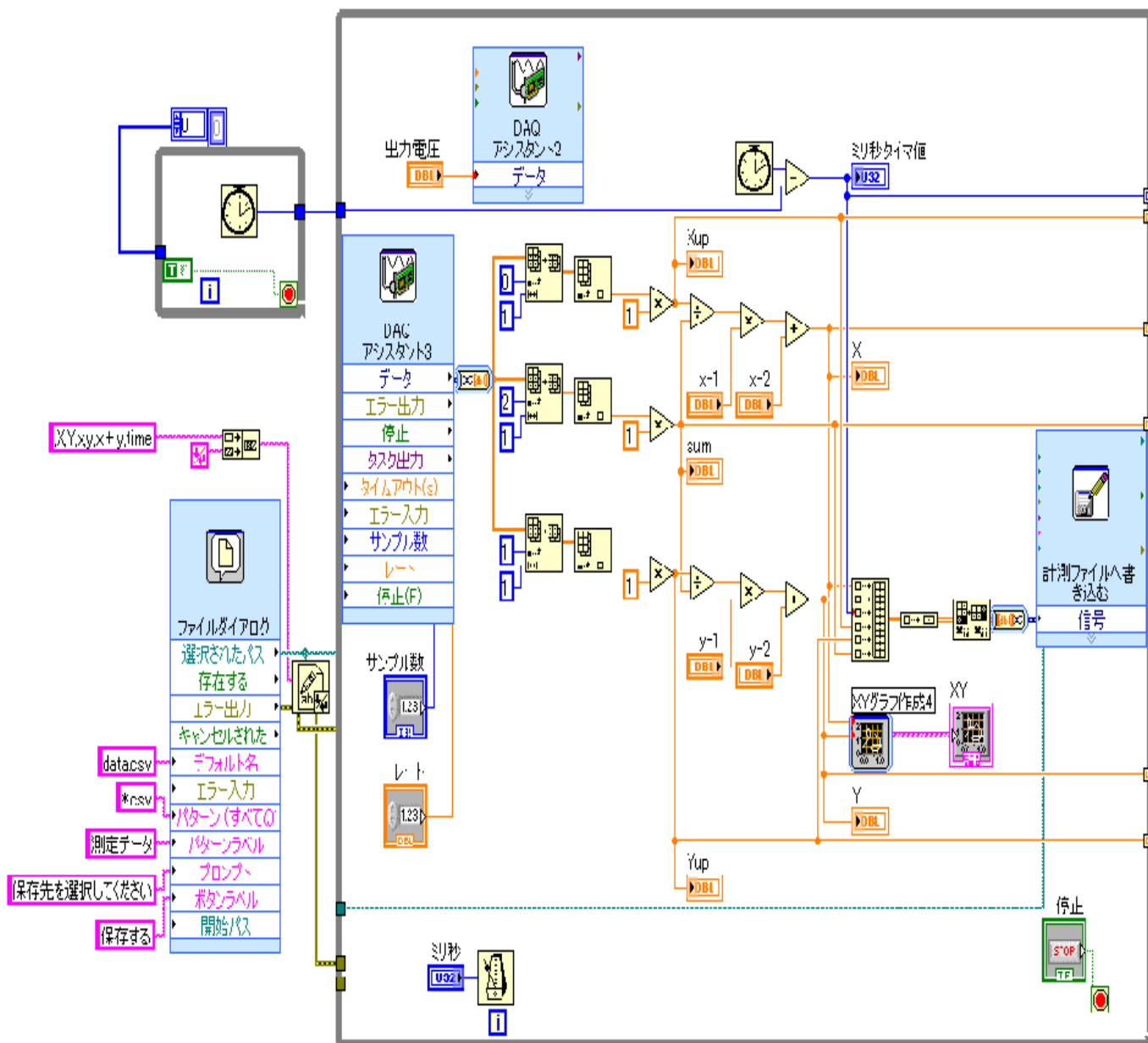
CCD センサー性能実験プログラム (フロントパネル)



CCD センサー性能実験プログラム (ブロックダイアグラム)



2次元 PSD 性能実験プログラム (フロントパネル)



2次元 PSD 性能実験プログラム (ブロックダイアグラム)