

平成 23 年度修士論文

# 磁力による 2 次元位置・方向制御装置の 開発と応用

福岡工業大学大学院 工学研究科

知能機械工学専攻

CM10014 松永 龍太

指導教員 河村 良行 教授

# 磁力による 2 次元位置及び方向制御装置の開発とその応用

福岡工業大学大学院  
工学研究科 知能機械工学専攻

CM10014 松永 龍太

## 概要

磁力支持天秤装置とは磁気力により物体の力の測定や制御することができる。本研究ではこの技術を生物の分野に応用することを目的としている。昆虫にはとても小さな体であるにも関わらず、自重の何十倍の重さを運ぶなどの特徴を持っており、昆虫の運動特性を研究するために様々な方法が用いられている。現在、その特徴は生物模範型小型ロボットの分野において注目されている。我々は磁力支持天秤装置の応用として昆虫を自由に制御することを試みた。そこで、磁力により平面での位置・方向制御装置を開発した。装置の上下にあるコイルと昆虫の背中に取り付けた小型永久磁石により昆虫に磁気力と磁気トルクを与えて測定を行った。

キーワード：昆虫、磁力支持天秤装置、磁力制御

平成 24 年 2 月 13 日

# Development and application of the two dimensional control system of the position and the direction of small insects by the magnetic force

Course of Intelligent Mechanical Engineering, Graduate School of Engineering,  
Graduate School of Fukuoka Institute of Technology

CM10014 Ryuta MATSUNAGA

## Abstract

Magnetic Suspension and Balance System (MSBS) can measure the force and control an object by magnetic force. The purpose of this study is to apply this technology in the field of biology. The insect can carry the weight of several times heavier than their weight. Recently, the walking mechanism of the insect has been studied by various methods. Now, this feature has been focused in the areas of biomimetic robot. We tried to control insects as an application of the technology of the MSBS. So, we have developed the control system of the position and the direction in two-dimensions by the magnetic force and experiments.

**Key Words :** *Insect, Magnetic suspension and balance system, Magnetic control*

February 13, 2012

# 目次

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 第1章 緒言                       | 1  |
| 第2章 赤外LED センサ式磁力制御装置         | 2  |
| 2.1 装置概要                     | 2  |
| 2.2 赤外LED センサ式磁力制御装置の製作      | 2  |
| 2.2.1 コイル                    | 2  |
| 2.2.2 センサ                    | 2  |
| 2.2.3 構造体                    | 3  |
| 2.2.4 電流制御回路                 | 3  |
| 2.3 磁気力の解析方法                 | 3  |
| 2.4 制御式                      | 4  |
| 2.5 予備実験                     | 4  |
| 第3章 赤外LED センサ式磁力制御装置での昆虫実装実験 | 15 |
| 3.1 マダガスカルゴキブリについて           | 15 |
| 3.2 磁石取り付け方法                 | 15 |
| 3.3 制御実験及び考察                 | 15 |
| 第4章 CCD カメラ式磁力制御装置           | 21 |
| 4.1 アクチュエータ                  | 21 |
| 4.2 センサ                      | 21 |
| 4.2.1 CCD カメラ                | 21 |
| 4.2.2 性能評価実験                 | 21 |
| 4.3 構造体部                     | 22 |
| 4.4 制御式                      | 22 |
| 4.5 予備実験                     | 23 |
| 第5章 CCD カメラ式磁力制御装置での昆虫実装実験   | 29 |
| 5.1 クロオオアリについて               | 29 |
| 5.2 磁石取り付け方法                 | 29 |
| 5.3 磁力制御実験                   | 29 |
| 5.3.1 磁気力による行動の変化            | 29 |
| 5.3.2 磁気力付加実験                | 30 |
| 5.3.3 磁気トルク付加実験              | 31 |

|       |                                        |    |
|-------|----------------------------------------|----|
| 5.3.4 | 磁気力及び磁気トルク制御実験.....                    | 31 |
| 5.4   | CO <sub>2</sub> による酸素濃度低下時の磁力制御実験..... | 32 |
| 5.4.1 | 酸素濃度低下による行動の変化.....                    | 32 |
| 5.4.2 | 酸素濃度低下時の磁気力付加実験.....                   | 33 |
| 5.4.3 | 小型永久磁石と制御性.....                        | 33 |
| 5.4.4 | 酸素濃度低下時の磁気力及び磁気トルク制御実験.....            | 34 |
| 5.4.5 | 考察.....                                | 34 |
| 第6章   | 結言.....                                | 57 |
| 謝辞    | .....                                  | 58 |
| 研究業績  | .....                                  | 59 |
| 参考文献  | .....                                  | 60 |
| 付録    | .....                                  | 61 |

## 第1章 緒言

風洞内においての物体に働く空気力の観測・測定方法として磁力支持天秤装置がある。この装置の主な特徴は磁気力で物体を支持していることが挙げられる。本研究室では以前磁力指示天秤装置の研究を行っており様々な剛体を使った実験がなされてきた<sup>(1)</sup>。しかし生物に対しての応用はいまだに研究されておらず、本研究ではこの技術を生物の分野に拡張することを目的としている。

そこで我々は生物の中でも昆虫に着目をした。昆虫にはとても小さな体であるにも関わらず、自重の何十倍の重さを運ぶなどの特徴を持っていることや、扱いが比較的簡単であること、また鳥などと違い、磁場の影響少ないであろうと考えたからである。昆虫の運動特性を研究するために様々な方法が用いられており、昆虫の運動特性を解析し小型のロボットとして探索機などに利用するという将来性も考えられている。しかし一般には観察に昆虫を制御することは行われていない。昆虫の動きを制御することが出来るのであれば、昆虫学の分野において新たな進展が期待できるのではないかと考えた。

よって本研究では磁力支持天秤装置の応用として昆虫を自由に制御することを目的とし、まず、磁力により平面での位置・方向制御装置を開発した。実験は装置の上下にあるコイルと昆虫の背中に取り付けた小型永久磁石により昆虫に磁気力と磁気トルクを与え、昆虫を対象に磁力による制御実験を行った。

## 第2章 赤外 LED センサ式磁力制御装置

### 2.1 装置概要

製作した装置の概要を図 2.1-1 に示す。この装置は本研究室で開発されたものを参考に製作を行った<sup>(1)</sup>。本装置は下に 4 つのコイルを取り付けている。そのコイルの電流を制御することで昆虫の位置を制御する。昆虫の背中には小型永久磁石を取り付けている。コイルとの磁気力を制御力として使用し、コイルの最大電流は 10 [A]である。

この装置には昆虫の位置を検出するためのセンサとして 2 次元 PSD を使用している。あらかじめ昆虫の背中に搭載する小型永久磁石には再帰性反射シールが取り付けられており、高出力赤外 LED を昆虫に照射してその反射光をレンズで集光する。レンズと 2 次元 PSD の距離は装置中心から 5 : 1 の距離に設置しており集光された光は 2 次元 PSD 受光面に像を作る。このセンサを装置上部に取り付けることによって昆虫の位置を検出する。検出した信号は A/D 変換機からパソコンに入力、位置座標に換算される。そして位置座標より制御電圧を計算し D/A 変換機より電流制御回路へ出力、コイル電流をフィードバック制御する。

### 2.2 赤外 LED センサ式磁力制御装置の製作

装置の製作はコイル・センサ・構造体の 3 つに分けて行った。以下にそれぞれについて述べる。

#### 2.2.1 コイル

今回コイルは  $\phi 1.2$ [mm]の銅線を使用した。接着には二液混合タイプの接着剤を使用した。まず図 2.2.1-1 のように塩化ビニル樹脂で型を作る。この型は外側 2 枚と中央の芯をボルトで締め付け 1 つにしたものでボビン状になっている。これを旋盤に取り付け銅線を引っ張りながら巻きつけていく。(図 2.2.1-2)この時旋盤はニュートラルにし手動で回していき 1 層巻きつける毎に接着剤を塗っていく。完成したコイルを図 2.2.1-3 に示す。

#### 2.2.2 センサ

センサには前述の通り赤外センサを使用した。本装置に使用しているセンサは小型永久磁石に取り付けた再帰性反射シールからの反射光を使っている。このセンサの概要を図 2.2.2-1 に示す。反射光を用いるため LED の光には高出力で半値角が小さい、さらに昆虫の眼に見ることが出来ないとされる赤外領域である必要があった。そのため波長 850 [nm]、半値角 $\pm 14$  [deg]、放射強度 180 [mW]の高出力赤外 LED (OP6-8511HP2:アルワン電子製)を使用した(図 2.2.2-2)。その LED を  $\phi 60$ [mm]、焦点距離 50 [mm]のフレネルレンズ (64x64

43025-L:エドモンドオプティクス製)の前に取り付け昆虫に取り付けた再帰性反射シールに当たりレンズを通った反射光が 2 次元 PSD (S5991-01:浜松ホトニクス製)で受光される。当初この信号処理回路を自ら製作したものを使用していたが(図 2.2.2-3)、反射光を用いているために信号の強度が弱くノイズ等の問題があった。その回路図を図 2.2.2-4 に示す。このセンサの性能評価を図 2.2.2-5 のように行い、x 方向の検出結果を図 2.2.2-6 に示す。これは実際に検出対象の再帰性反射シールを実際に 5 [mm]毎に動かした時の検出結果である。なおこのシステムにおいて x と y は同義であるため省略する。そのため図 2.2.2-7 に示す市販の 2 次元 PSD 用信号処理回路 (C4674 : 浜松ホトニクス製)を使用した。最終的に製作したセンサを図 2.2.2-8 に示す。それを用いた時の性能評価実験の結果は図 2.2.2-9 にあるように精度は上がっていた。本実験に使用する際には 2 次元 PSD の受光面のサイズが 10x10 [mm]であるため検出対象の移動距離は $\pm 20$  [mm]としている。

### 2.2.3 構造体

この装置の構造体としてフレームは組み立てが容易であるアルミフレーム (HFS5-2525:ミスミ製)を組み合わせて使用した。図 2.2.3-1 に装置外観を示す。

### 2.2.4 電流制御回路

ここには電流制御回路について示す。この回路は以前、本研究室で研究されていた磁力支持天秤装置のものを修理して使用している<sup>(1)</sup>。これはトランジスタを使った電流制御回路であり、D/A 変換器からの制御電圧に比例した電流をコイルに流すことができる。電源については $\pm 12$ [V]のスイッチング電源 (HWS12-600:TDK ラムダ製)を使用している。回路図を図 2.2.4-1 に示す。この回路はコイル 1 つにつき 1 つ使用している。

## 2.3 磁気力の解析方法

磁気力の解析方法は、まずビオ・サバールの法則により円形コイルが小型永久磁石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。次に対象となる小型永久磁石をソレノイドコイルに近似させることで、ソレノイドコイルに流れる等価電流を求め小型永久磁石の磁気モーメント  $M$  を求めた。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  $M$  より式(2.1)となる<sup>(2)</sup>。

$$\vec{F} = (\vec{M} \cdot \nabla) \vec{H} \quad (2.1)$$

この式を用いて昆虫の制御力を計算しコイルの設計を行った。製作したコイルを装置に取り付け中心位置での横方向の磁気力  $F_x$  [mN] の測定結果を図 2.3-1 に示す。なお  $x$  方向と  $y$  方向の値は同じであるため  $y$  方向は省略する。コイルと小型永久磁石の距離は上下共に 65 [mm] である。

## 2.4 制御式

まずこの装置において制御するのは昆虫の位置  $x$ 、 $y$  [mm] である。この制御には PD 制御を用いる。以下にその制御式について示す。式(2.2)の  $V_i$  [V] とは D/A 変換ボードから出力される制御電圧のことであり、4 つのコイルそれぞれにある。この式(2.2)は  $x$  軸方向だけでなく  $y$  軸についても同様の式を使う。まず 1 軸成分の制御電圧を計算し、最後にそれらを合成した電圧を出力する。

$$V_{xi} = -k_p(x_t - x) + k_d\dot{x} \quad (i = 0 \sim 3) \quad (2.2)$$

$$V_i = V_{xi} + V_{yi} \quad (i = 0 \sim 3) \quad (2.3)$$

## 2.5 ステップ応答

まずは  $x$ 、 $y$  軸方向の 2 軸同時制御を行った。この場合模型は図 2.5-1 のように小型永久磁石を棒の先端に付け倒立振り子のようなモデルを使用した。装置の中央に模型を置き  $z$  軸を固定している状態で制御を行なった。図 2.5-2 では目標値を変えることで  $x$ 、 $y$  の現在値が追従していることがわかる。目標値  $x: 1.0\text{mm}$ 、 $y: 2.5\text{mm}$  に対する平均値及び標準偏差は  $x: 1.99 \pm 0.46\text{mm}$ 、 $y: 0.75 \pm 0.49\text{mm}$  だった。また円軌道を描くように目標値を変えることで図 2.5-3 のように円や図 2.5-4 のように四角を描く結果が得られた。この結果から製作した装置が制御可能であるとわかったため実際に昆虫での実験を行なった。

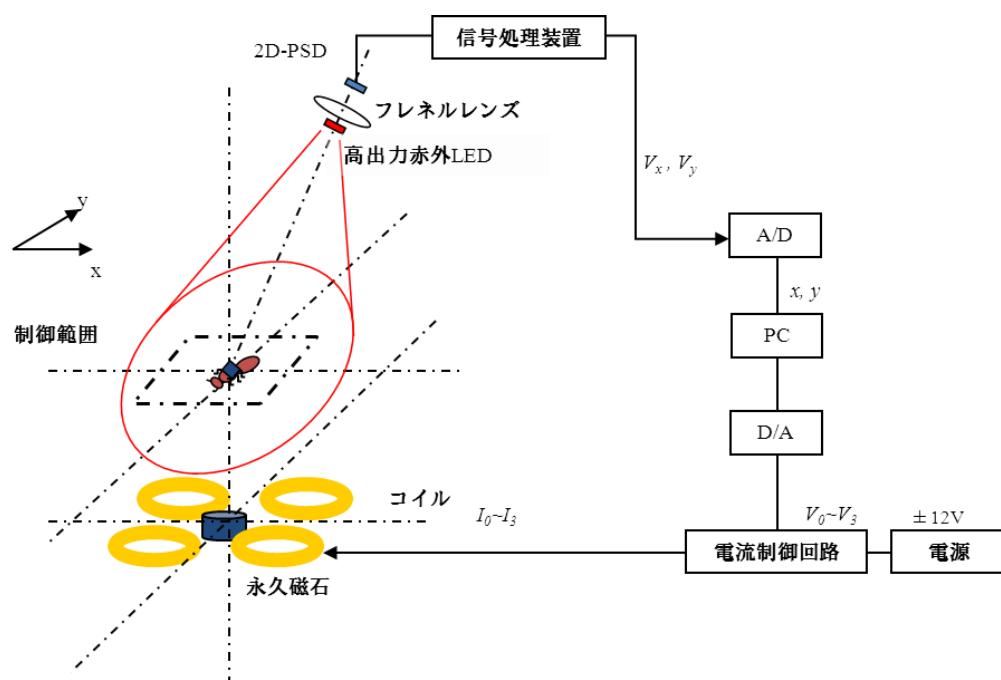


図 2.1-1 赤外LEDセンサ式磁力支持天秤装置の概要

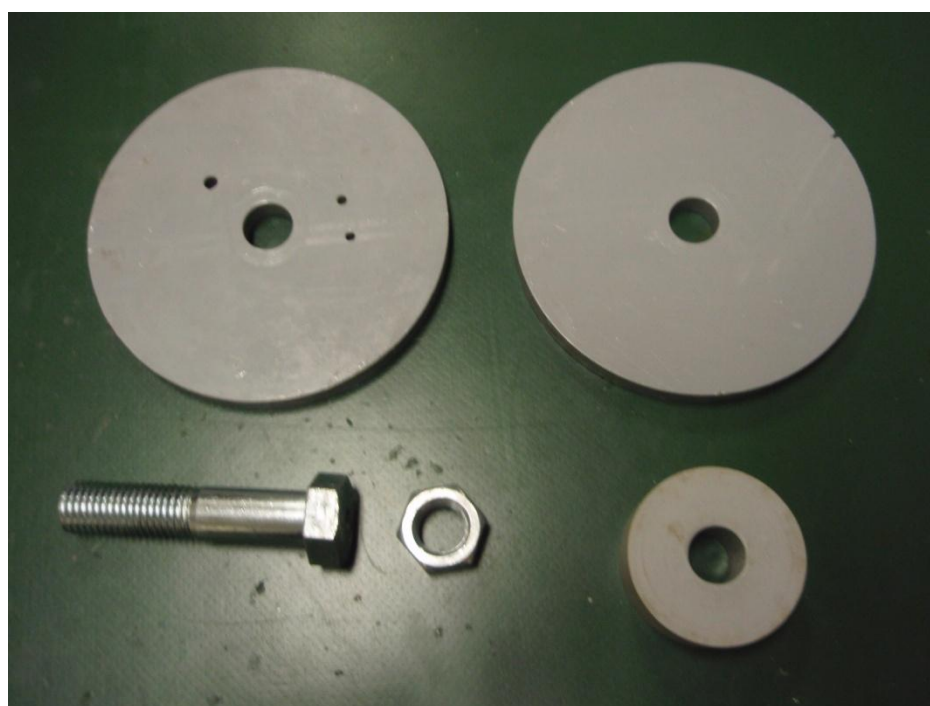


図 2.2.1-1 コイル型



図 2.2.1-2 コイル製作の様子

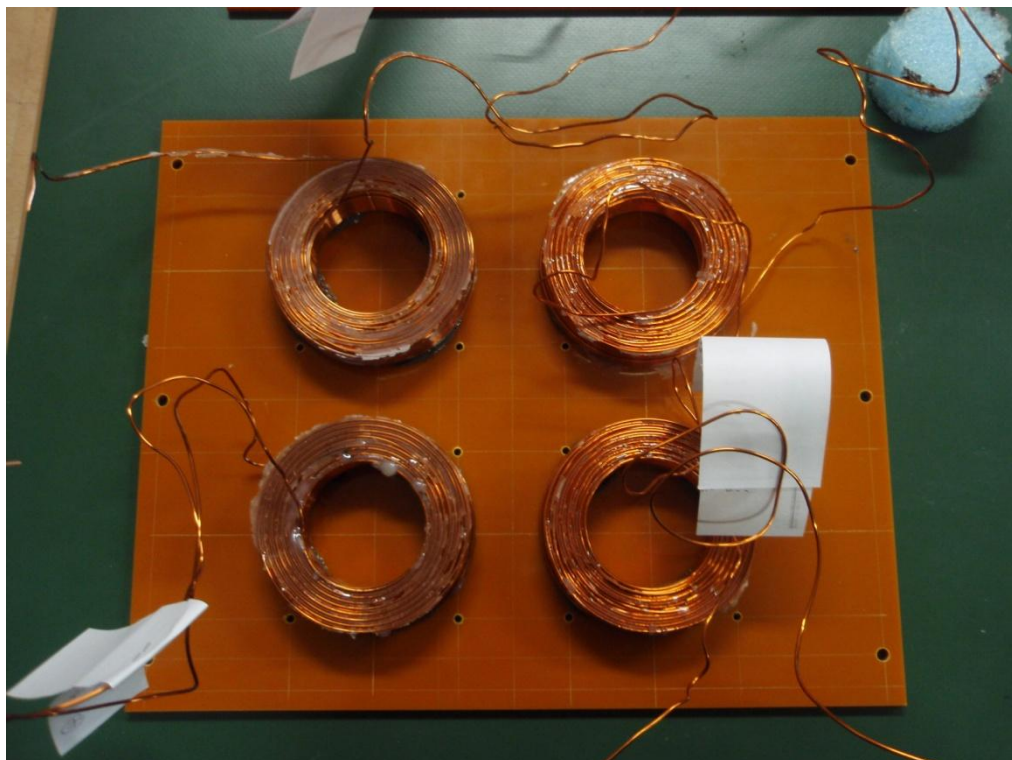


図 2.2.1-3 製作したコイル

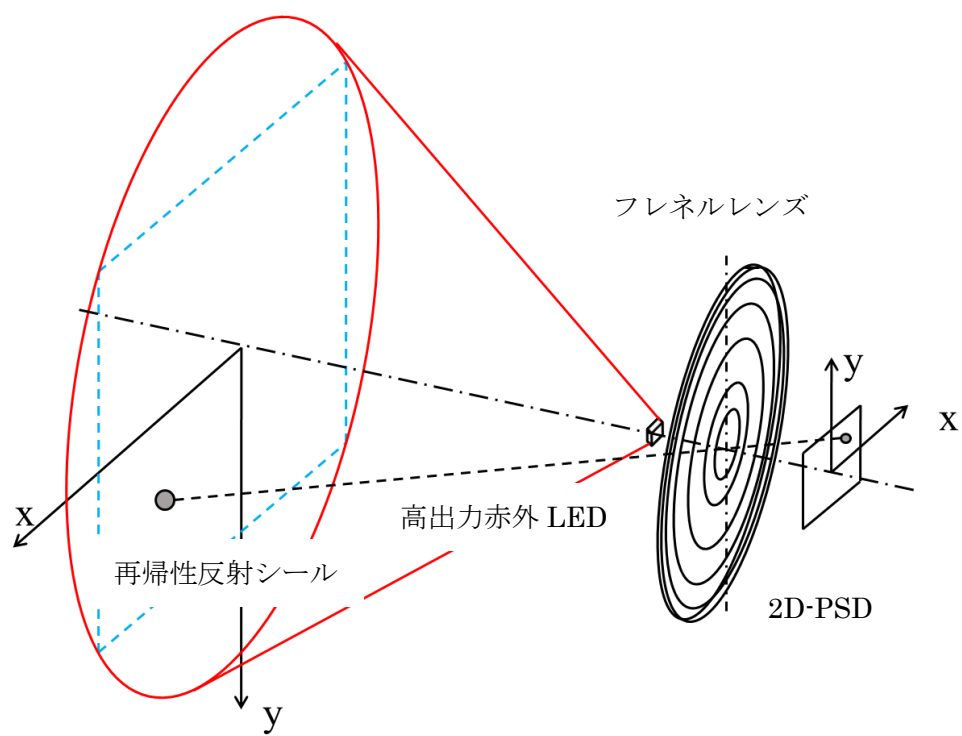


図 2.2.2-1 センサ概要

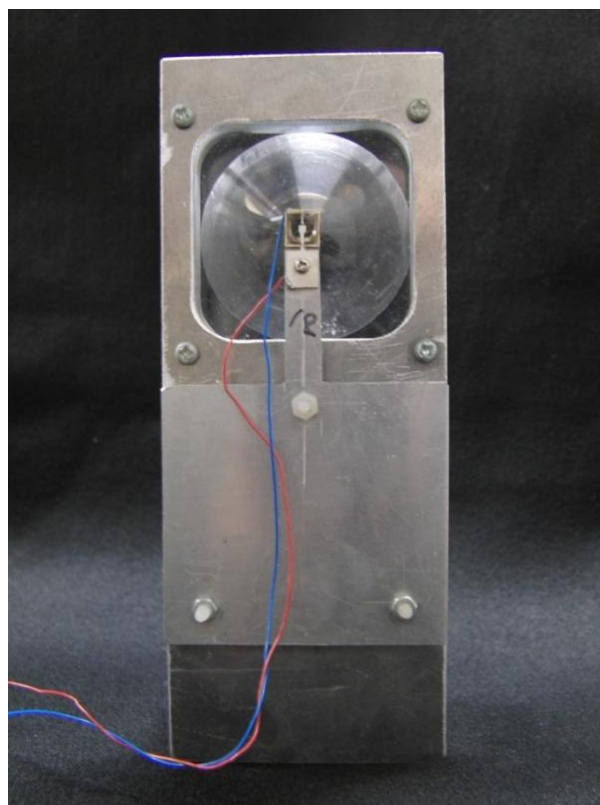


図 2.2.2-2 赤外 LED 式センサ（発光部）

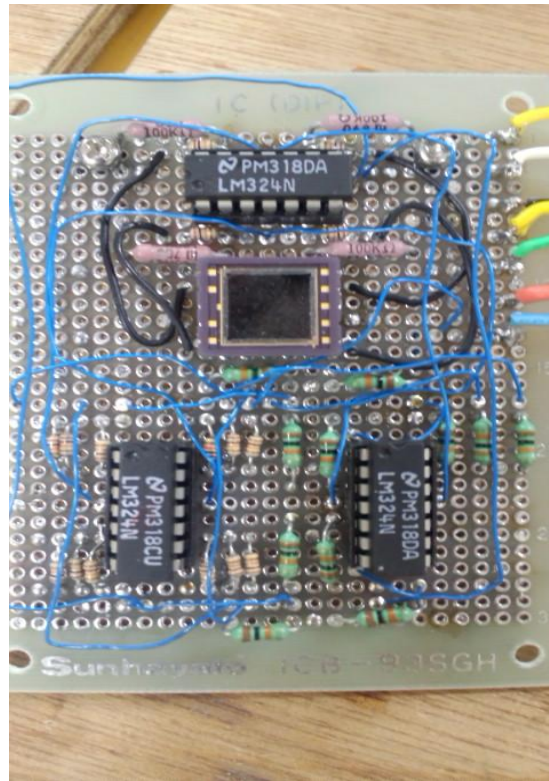


図 2.2.2-3 作成した信号処理回路

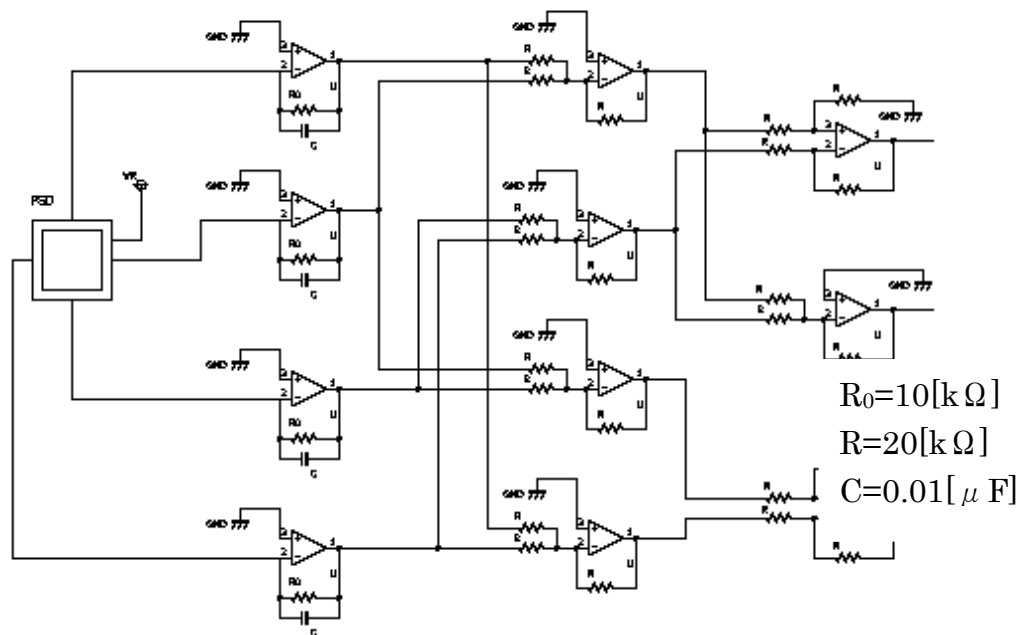


図 2.2.2-4 作成した信号処理回路

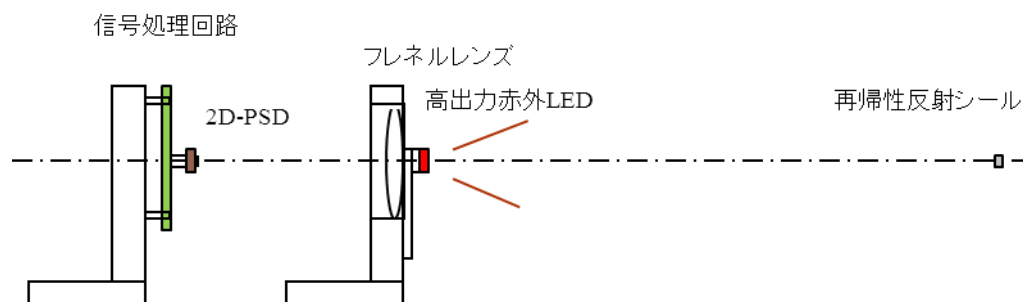


図 2.2.2-5 信号処理性能評価実験の概要

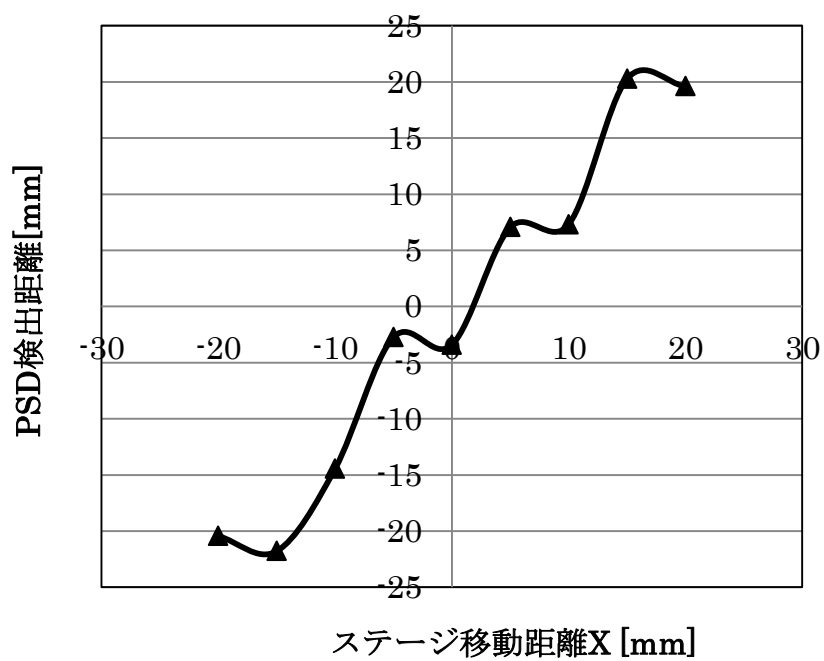


図 2.2.2-6 信号処理性能評価実験の結果

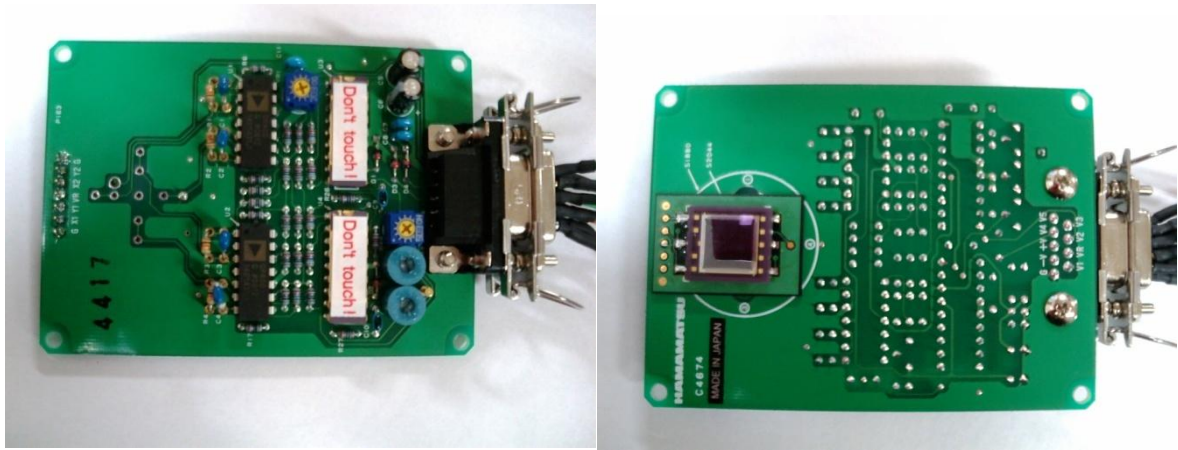


図 2.2.2-7 2次元 PSD 用信号処理回路

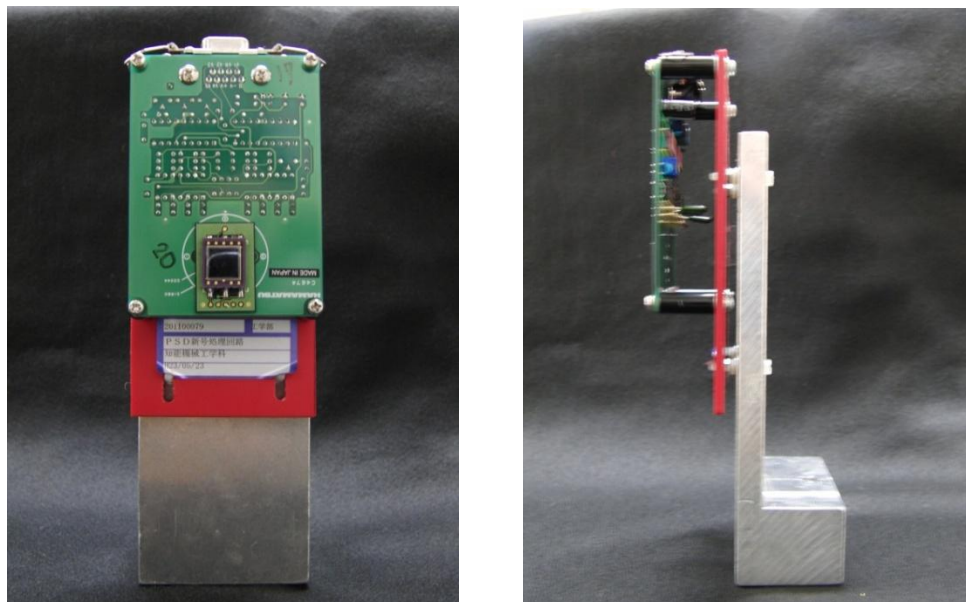


図 2.2.2-8 赤外 LED 式センサ（受光部）

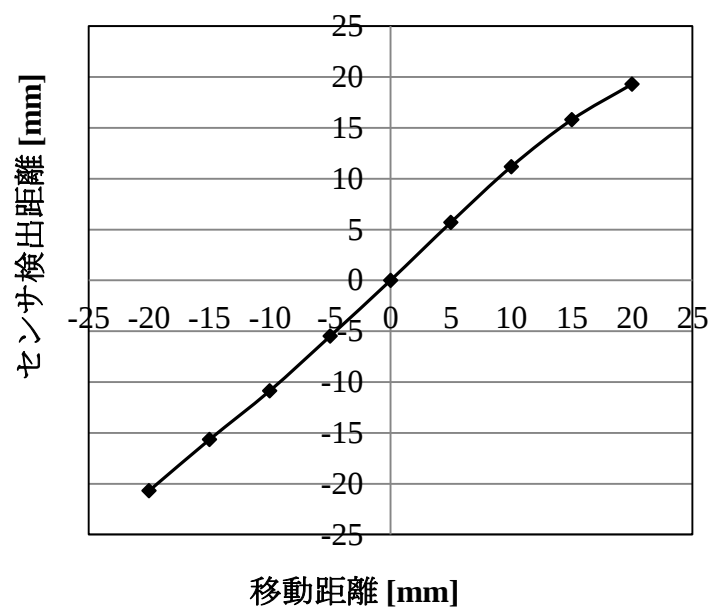


図 2.2.2-9 赤外LEDセンサ評価実験

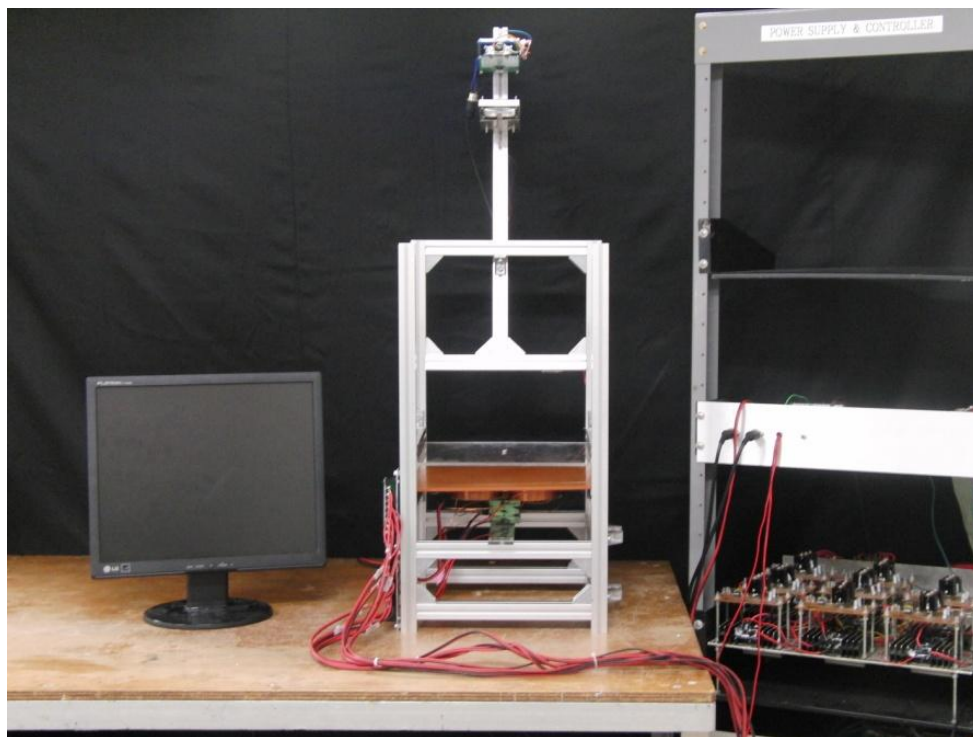


図 2.2.3-1 赤外LEDセンサ式磁力支持天秤装置

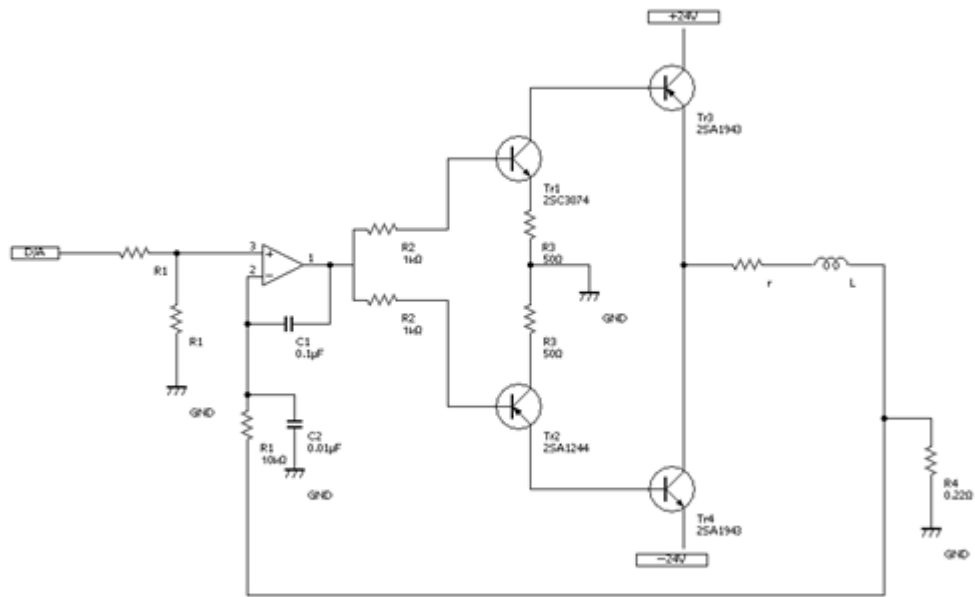


図 2.2.4-1 電流制御回路図

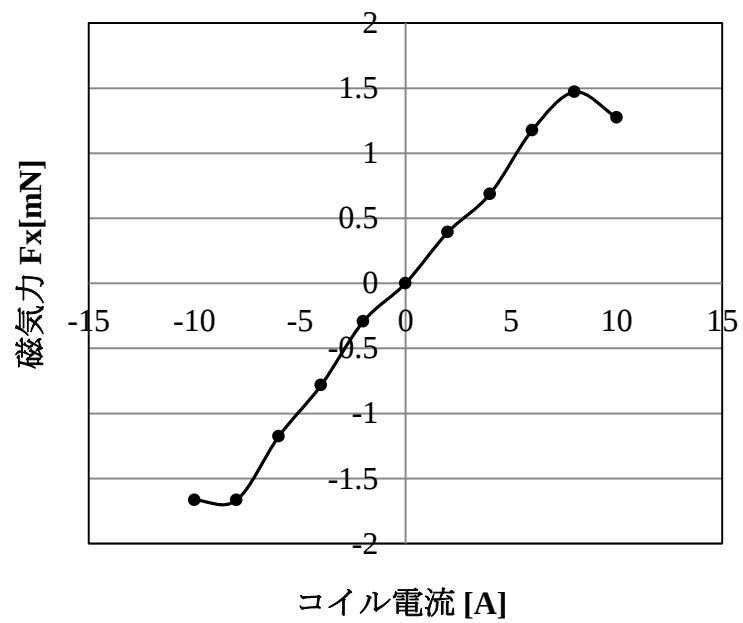


図 2.3-1 磁気力測定実験 (x 軸)

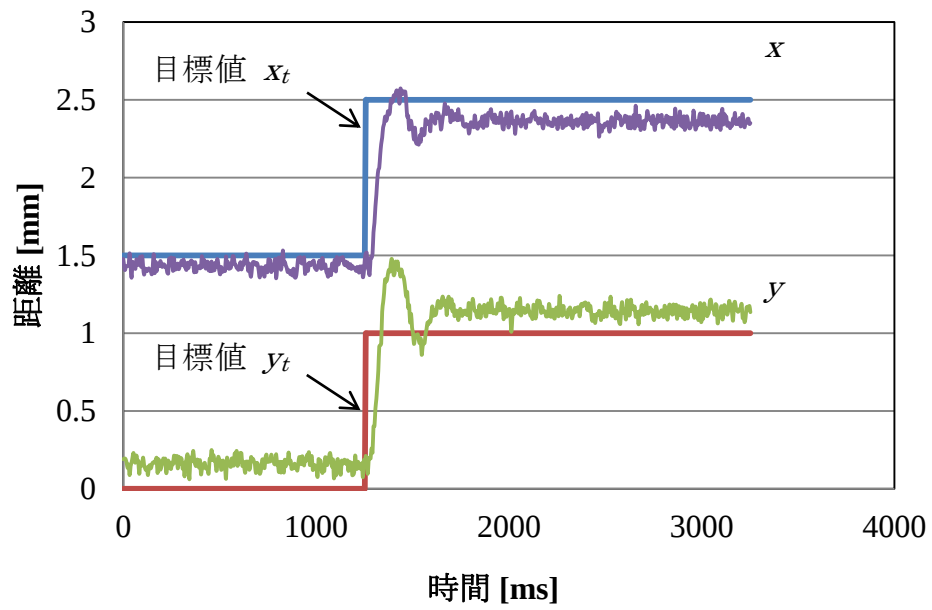


図 2.5-1 ステップ応答

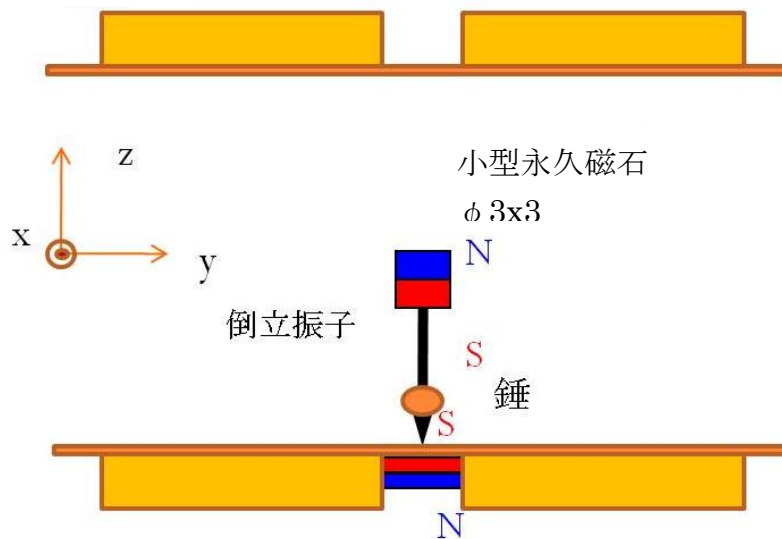


図 2.5-2 実験の様子

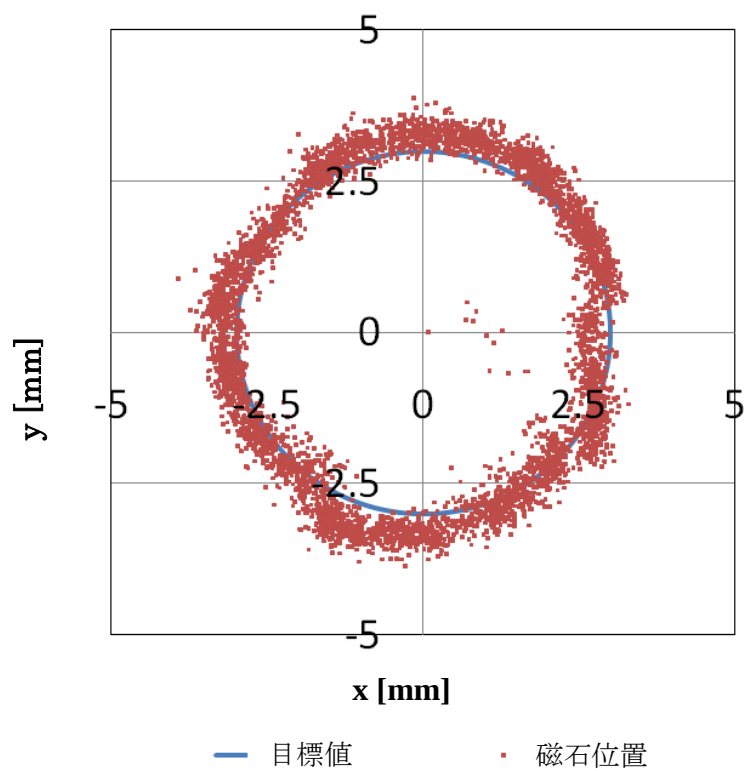


図 2.5-3 目標値を円に設定した場合

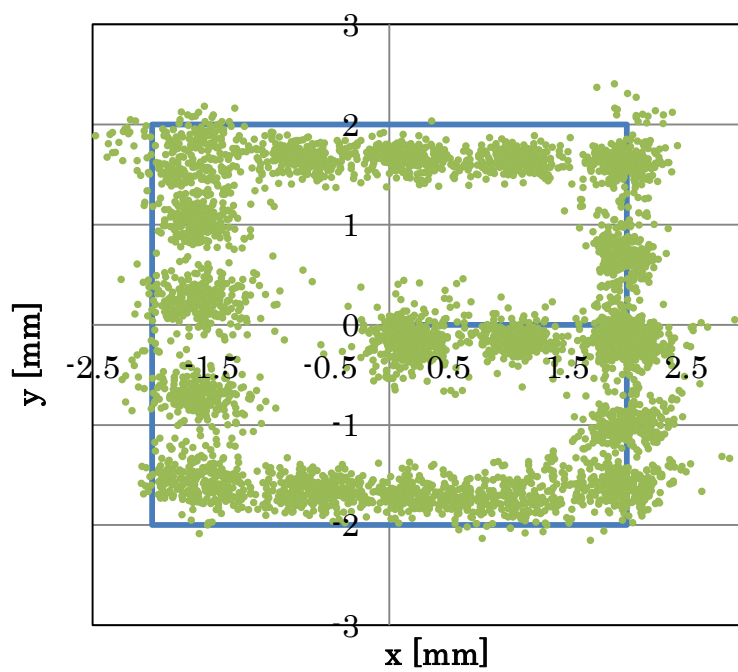


図 2.5-4 目標値を四角に設定した場合

### 第3章 赤外 LED センサ式磁力制御装置での昆虫実装実験

#### 3.1 マダガスカルゴキブリについて

マダガスカルゴキブリはマダガスカルに生息しており、体長は成虫で 6[cm]にもなる大型の昆虫である。特徴はおとなしく動きが遅く飼いやすいことである。そのため爬虫類等のペット用として販売されている。今回は昆虫にかかる磁気力は昆虫の背中に取り付けた小型永久磁石の体積に比例して強くなるため磁石は大型のものが望ましいと考えたためある程度大きさのあるマダガスカルゴキブリを実験に用いた<sup>(3)</sup>。

#### 3.2 磁石取り付け方法

昆虫に磁石を取り付ける手順を以下に示す。まず昆虫を容器に入れ、CO<sub>2</sub> を充てんし、失神させる。次に図 3.2-1 のように背中に瞬間接着剤を使ってネオジム製の小型永久磁石を取り付け、その上に再帰性反射シールを張る。この時取り付けには図 3.2-2 のように垂直になるように取り付けることに注意した。数十分後には昆虫は元のように動き出す。

#### 3.3 制御実験及び考察

実験の条件はこのようになっている。

昆虫の体重：0.3 [g]

昆虫の体長：3.5 [cm]

小型永久磁石サイズ：  $\phi$  8x2 [mm]

小型永久磁石重量： 0.6 [g]

小型永久磁石取り付け位置：重心

実験ステージ：アクリル板

実験回数：5 回

実験の結果を図 3.3-1 に示す。この実験ではマダガスカルゴキブリが移動するのを下 4 つのコイルにより 1 点に留め、それにかかった磁気力を昆虫の足の摩擦力と考えた。磁気力はコイル電流に比例することから磁気力の  $x$  方向成分と  $y$  方向成分を算出している。このとき下に取り付けた大型の永久磁石は小型永久磁石を安定させるため引き合うように取り付けている。このため昆虫は下に押し付けられた形になっている。この実験では初め原点( $x, y$ )=(0, 0)に留め制御し、30 秒後に制御を止めている。

図 3.3-2, 3.3-3 は  $x$  軸  $y$  軸それぞれの方向の磁気力と時間の関係を表している。このと

きの平均磁気力は  $x$  方向： $-0.34[\text{mN}]$ 、 $y$  方向： $-0.36[\text{mN}]$ であり、同様の実験を 5 回行った平均は  $x$  方向： $-0.34[\text{mN}]$ 、 $y$  方向： $-0.24[\text{mN}]$ だった。この実験結果からはマダガスカルゴキブリの横方向（ $y$  軸方向）の動きは少ないということがわかった。

また次に円軌道上を歩行させるように制御を行った。この時の実験条件は以下のようになっている。

昆虫の体重： $0.3 [\text{g}]$

昆虫の体長： $3.5 [\text{cm}]$

小型永久磁石サイズ： $\phi 8 \times 2 [\text{mm}]$

小型永久磁石重量： $0.6 [\text{g}]$

小型永久磁石取り付け位置：重心より前方

実験ステージ：アクリル板

実験回数：5 回

先ほどとは違い昆虫に取り付ける小型永久磁石の位置を前方に取り付けた。これは重心位置より前に磁気力をかけたほうが引っ張りやすかったためである。マダガスカルゴキブリを図 3.3-4 のように左回りに円軌道を描くように制御を行った。

図 3.3-5 は磁気力と時間の関係を表している。このときの 2 乗平均磁気力は  $x$  方向： $5.2[\text{mN}]$ 、 $y$  方向： $5.5[\text{mN}]$ で同様の実験を 5 回行った 2 乗平均は  $x$  方向： $3.6[\text{mN}]$ 、 $y$  方向： $5.6[\text{mN}]$ であった。前述の実験結果と比べると摩擦力は大きくなっていた。

これらの実験結果から昆虫の磁気力による位置制御は可能性が考えられる。しかしマダガスカルゴキブリの力は想像以上に強く、装置下には大型の永久磁石を取り付けていなければ実験が困難であった。そのためマダガスカルゴキブリは一定の荷重がかかった状態で無理やり引きずられていた。よってこの装置ではもっと小さいサイズの昆虫を使用する必要があると考える。さらに装置の下 4 つのコイルで制御しようとしたため小型永久磁石に磁気トルクがかかってしまうという問題があったため、上下にコイルを配置する必要もある。この結果をもとに装置改良及び実験を行なった。



図 3.2-1 取り付け後

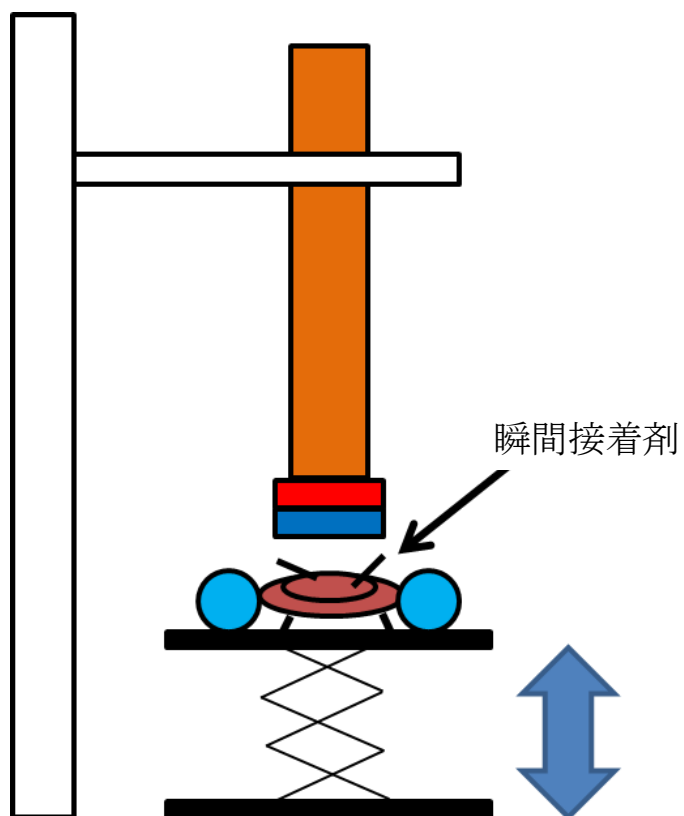


図 3.2-2 磁石取り付け方法

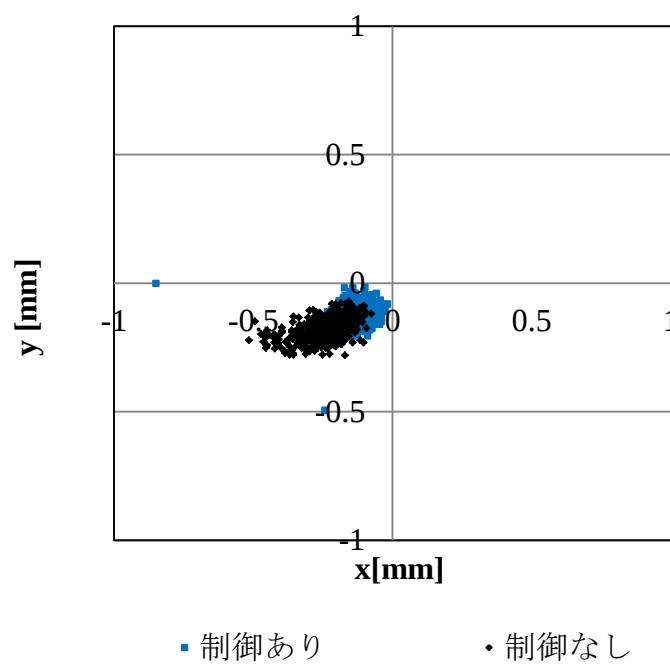


図 3.3-1 位置制御の場合

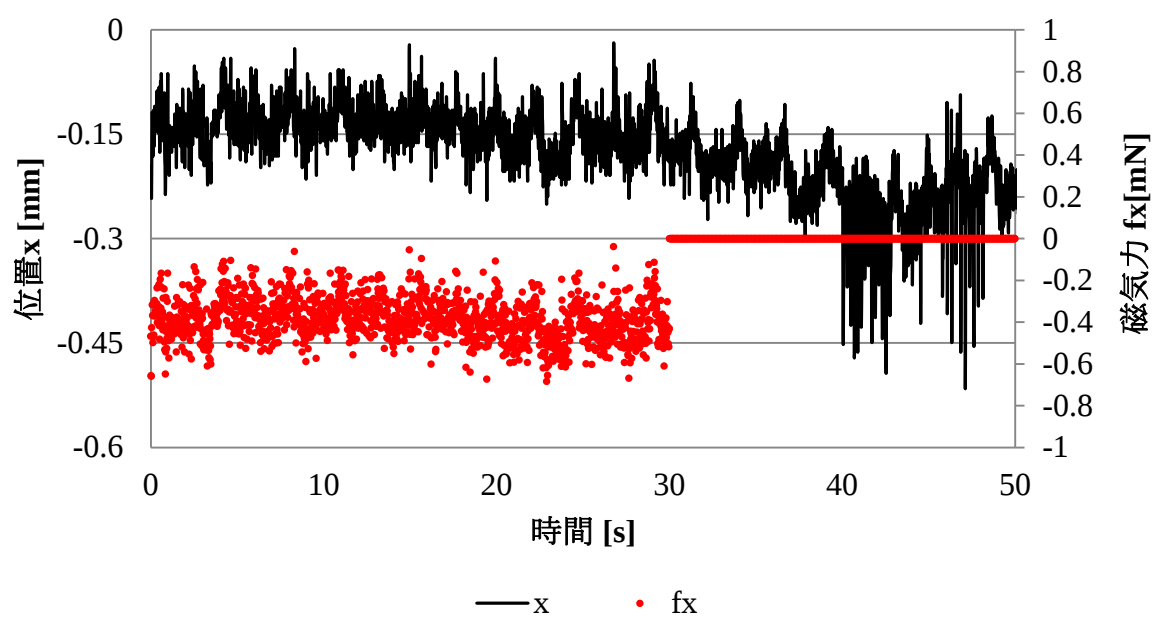


図 3.3-2 x 軸方向の測定結果

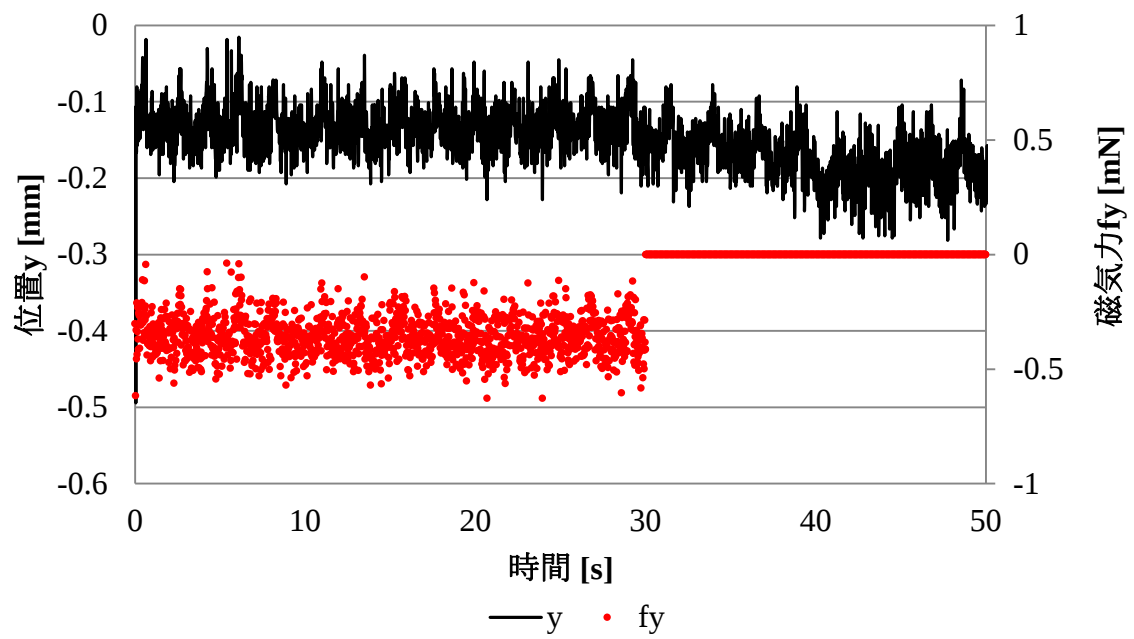


図 3.3-3  $y$  軸方向の測定結果

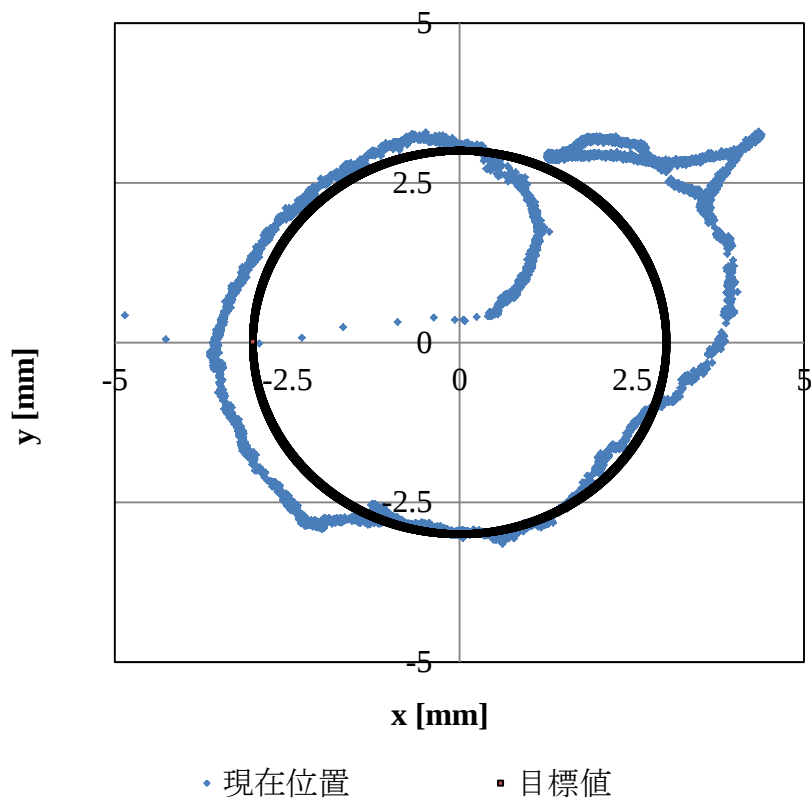


図 3.3-4 目標値が円軌道の場合

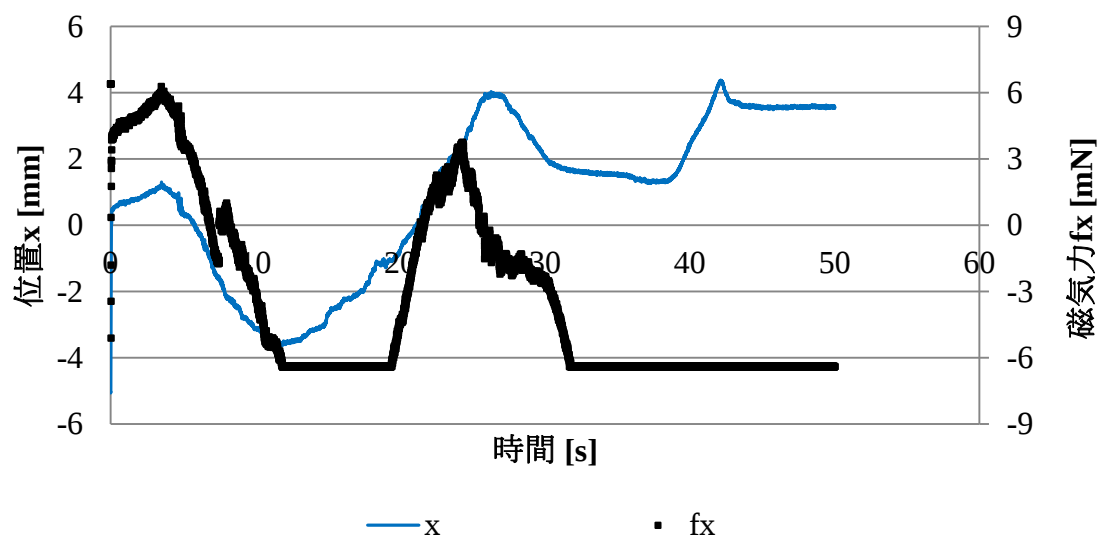
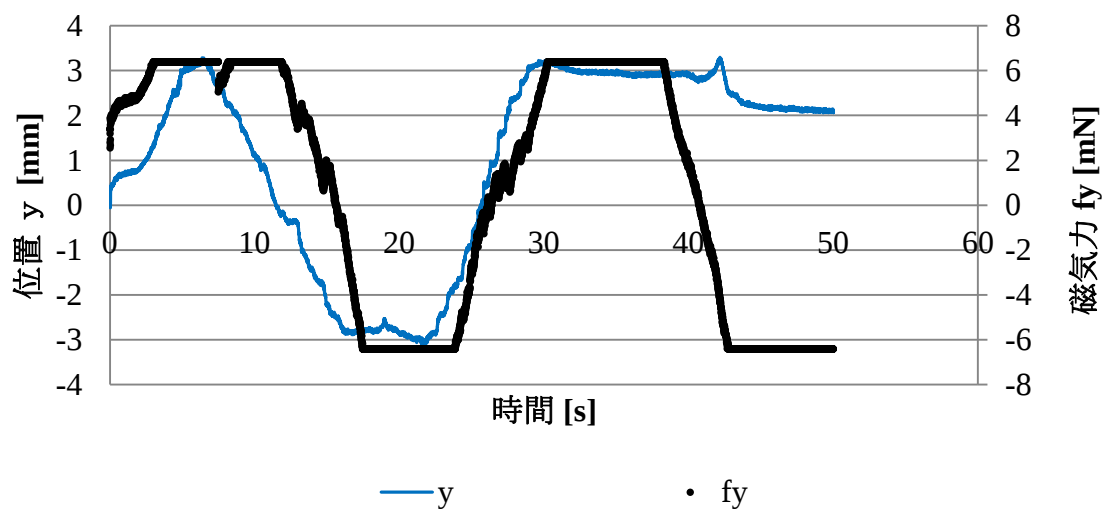


図 3.3-5 x 軸方向の測定結果



3.3-6 y 軸方向の測定結果

## 第4章 CCD カメラ式磁力制御装置

### 4.1 アクチュエータ

この章では前章の赤外 LED センサ式磁力制御装置を改良した CCD カメラ式磁力支持天秤装置（図 4.1-1）について述べる。本装置には上下に 4 つのコイルを取り付けている。そのコイルの電流を制御することで小型永久磁石との間に発生する磁力を制御力とし、昆虫の位置を制御する。この装置には昆虫の位置を検出するためのセンサとして CCD カメラによる画像処理装置を使用している。CCD を装置上面に取り付けることによって、昆虫の  $x$ ,  $y$  座標を 1 度に得ることができる。昆虫にはあらかじめマーカがついており、そのマーカの位置と角度を読み取る。そしてシーケンサ (PLC) で算出された制御電圧を D/A 変換器から電力制御回路へ出力されている。なお装置に取り付けてある各コイルの最大電流は 10 [A] である。このセンサから得られた  $x$ ,  $y$  座標を基に制御を行った。

### 4.2 センサ

この項では装置のセンサについて述べる。CCD カメラを使い画像処理装置で、昆虫に取り付けたマーカを読み取ることでセンサとして使用している。この画像処理装置には KEYENCE 社の画像処理装置 (CV-3000 : 図 4.2-1 右) と CCD カメラ (CV-035C : 図 4.2-1 左)、シーケンサ (KV-5000 : 図 4.2-2) を使用している。センサを CCD カメラに変更した理由は赤外 LED センサ式磁力制御装置では位置のみの取得しかできなかったが CCD カメラを用いると昆虫の方向まで取得できるというメリットがあったためである。

#### 4.2.1 CCD カメラ

CCD カメラの視野範囲は  $(x, y) = (56\text{mm}, 40\text{mm})$  である。装置の中心からコイルの中心の距離は CCD カメラの視野の関係上 70[mm] である。しかしこのセンサには CCD カメラのトリガ間隔や画像処理装置からシーケンサまでの転送時間等により遅れがあることが本研究室の過去の研究により明らかになっている<sup>(4)</sup>。そのため次項でその遅れがどの程度あるのかについて述べる。

#### 4.2.2 性能評価実験

画像処理装置による遅れを図るために図 4.2.2-1 のような実験を行った。この実験は電源から  $\phi 0.08[\text{mm}]$  の銅線を使いシーケンサの A/D ユニットに接続している。この銅線にはマーカをつけており、CCD カメラで座標を取得している。そしてこの導線を電動ドリルで素早く巻き上げ切断し、この時の電圧の変化と CCD カメラからの位置情報を比較してシステム全体の遅れを調べた。その結果システム全体では約 50[ms] の遅れがあることが分かつ

た。これは CCD カメラのトリガ間隔と処理時間が合わせて約 20[ms]と画像処理装置のデータ転送が約 30[ms]の合計である。この遅れは歩行する昆虫の制御をする上では問題ないと考えている。なおこの結果は本研究室で以前行われていた研究成果と比べてもほとんど差異はなかった。

### 4.3 構造体部

構造体については以前と同じようにアルミフレームを用いており、装置上部にコイルを上下対象となるように設置した以外ではこれといった変更点はない。図 4.3-1 に装置外観を示す。なお電流制御回路と電源については赤外 LED センサ式磁力支持天秤装置と同じである。

### 4.4 実験に用いた制御式

まずこの装置において読み取るのは昆虫の胸部位置  $x_1, y_1$ 、腹部位置  $x_2, y_2$  [mm]である。この 4 つのデータから式(4.1)のようにアリの角度を計算する。そして式(4.2)、(4.3)のように現在の角度  $\theta$ [rad]に応じた制御電圧をそれぞれの軸成分ごとに計算し、それぞれの成分を合成した制御電圧である  $V_0$  と  $V_1$  を式(4.4)、式(4.5)を用いて計算し D/A 変換器より出力する。ここで  $k_p$  とは比例ゲインである。

$$\theta = \tan^{-1} \frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2} \quad (4.1)$$

$$V_x = -k_p \cos \theta \quad (4.2)$$

$$V_y = -k_p \sin \theta \quad (4.3)$$

$$V_0 = V_x + V_y \quad (4.4)$$

$$V_1 = -V_x + V_y \quad (4.5)$$

なお制御電圧の最大値は $\pm 2$ [V]であり、計算の過程で最大値を超えた場合は強制的に $\pm 2$ [V]の値を出力する。

### 4.5 予備実験

実際に昆虫を実装した状態で実験をする前にまず、図 4.5-1 のように水に浮かべた模型を

使った実験で性能評価を行った。図 4.5-2、図 4.5-3 は  $x, y$  軸方向のステップ応答を示し、目標値が  $x : 0.0\text{mm}$ 、 $y : 0.0\text{mm}$  に対する平均値及び標準偏差は、 $x : 0.01 \pm 0.02\text{mm}$ 、 $y : 0.27 \pm 0.32\text{mm}$  となり赤外センサ式磁力支持天秤装置よりも制御性は向上している。図 4.5-4 は円を描くように位置制御したものである。このように改良した装置が制御可能であるという事を確認した上で昆虫の制御実験を行なった。

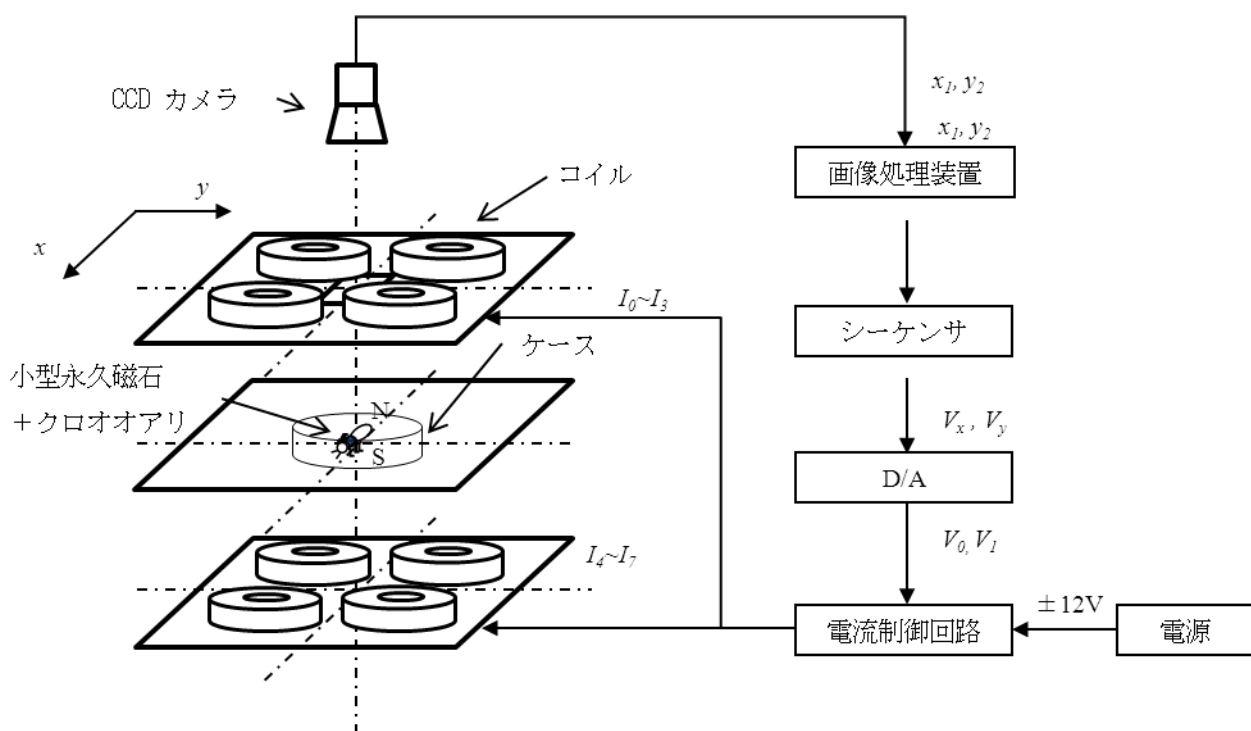


図 4.1-1 CCD カメラ式磁力支持天秤装置



図 4.2-1 CCD カメラ (CV-035C) と画像処理装置 (CV-3000)



図 4.2-2 シーケンサ (KV-5000)

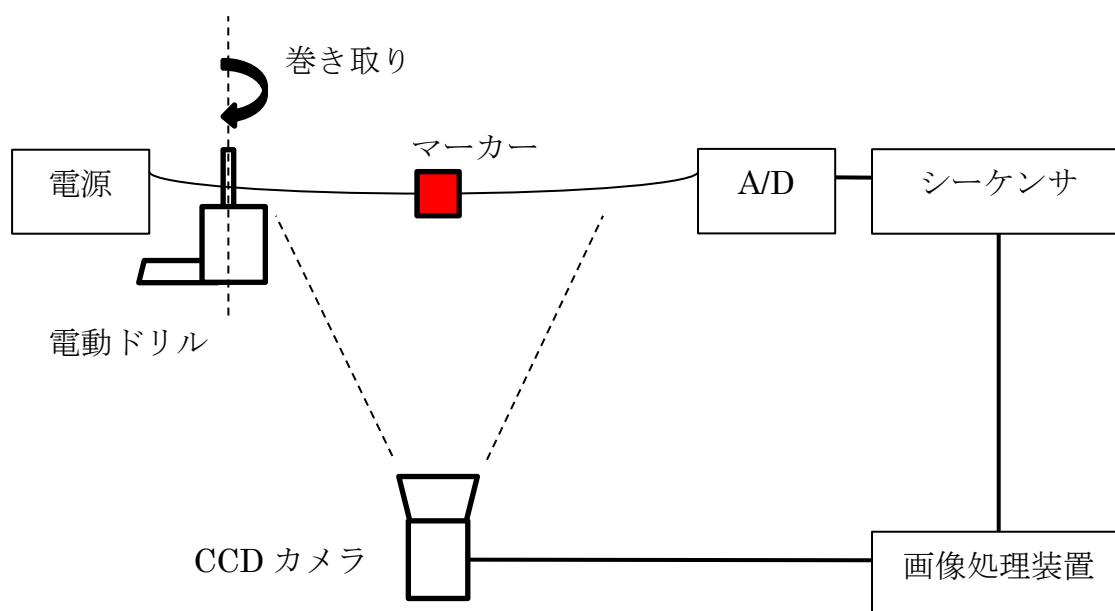


図 4.2.2-1 遅れ実験の概要

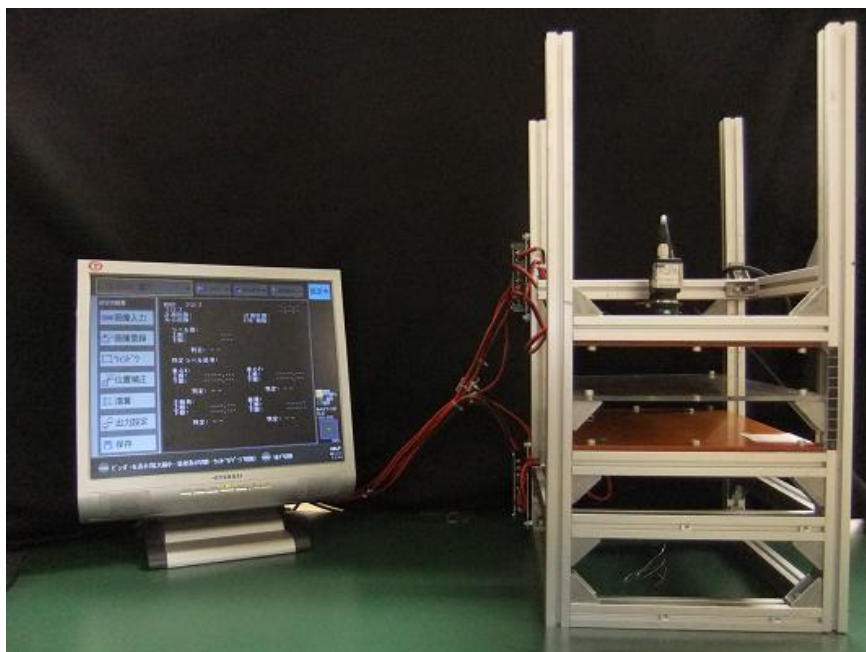


図 4.3-1 CCD カメラ式磁力支持天秤装置

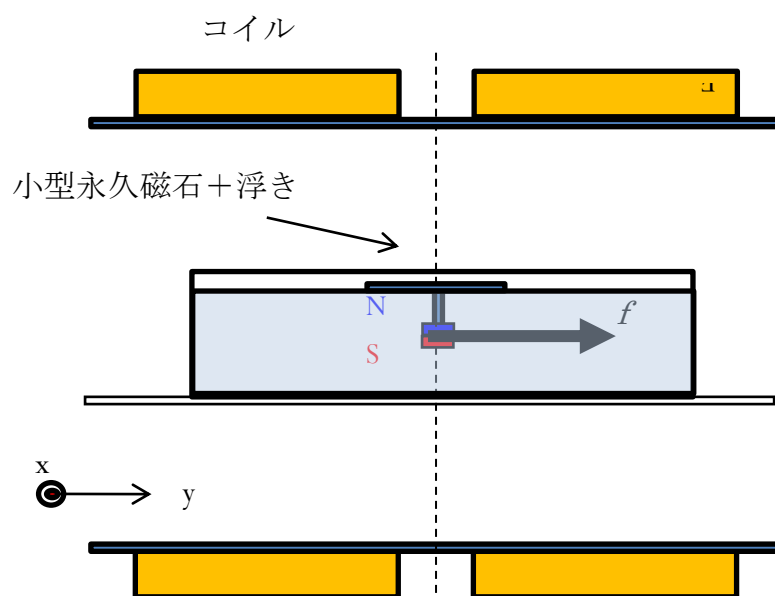


図 4.5-1 予備実験の様子

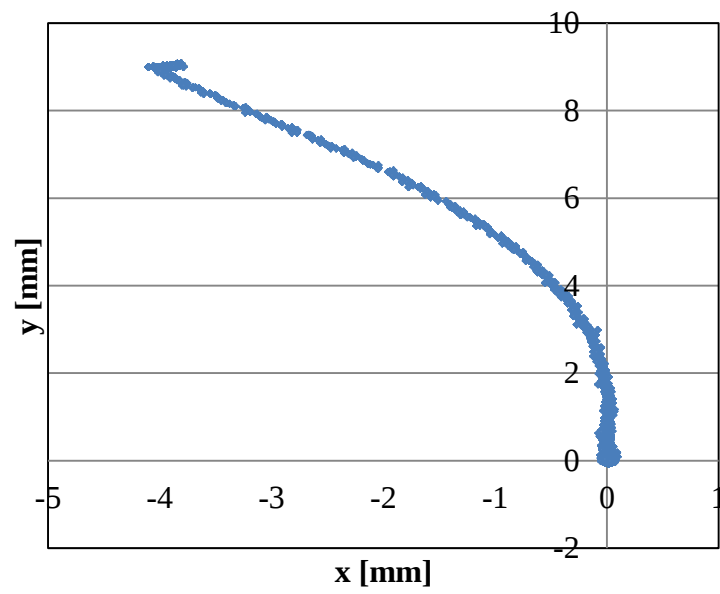


図 4.5-2  $x$ - $y$ 平面上でのステップ応答（目標位置  $x_t$ : 0.0mm、 $y_t$ : 0.0mm）

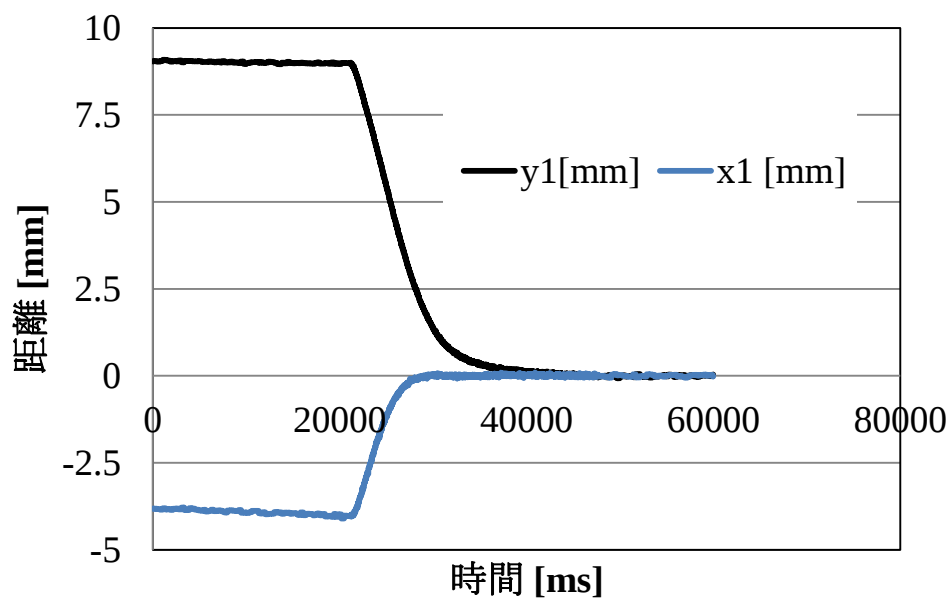


図 4.5-3 ステップ応答（目標位置  $x_t$ : 0.0mm、 $y_t$ : 0.0mm）

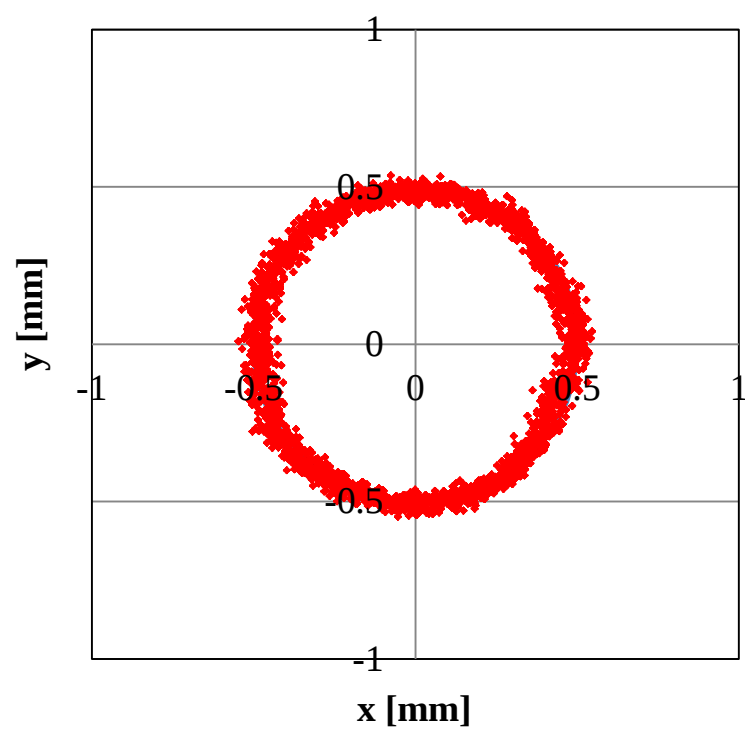


図 4.5-4 制御結果（目標値：円）

## 第5章 CCD カメラ式磁力制御装置での昆虫実装実験

### 5.1 クロオオアリについて

この実験にはハチ目・アリ科・ヤマアリ亜科・オオアリ属のクロオオアリ (*Camponotus japonicus*) を用いた(図 5.1-1)。なぜならマダガスカルゴキブリでは力が強く、また成長過程において大きさにばらつきが激しいためである。クロオオアリは日本各地に生息しており、体長は 7~12[mm]、で黒色の大型のアリである。クロオオアリを選択した理由はこの研究では昆虫に磁石を取り付ける必要があるため、扱いやすく、アリの中でも大型であるクロオオアリを採用した。図 5.1-2 のように使用したクロオオアリは専用の飼育ケースで飼育した。

### 5.2 磁石取り付け方法

アリに磁石を取り付ける方法は、まずマダガスカルゴキブリの時と同様に実験に使用するアリを容器に入れ、CO<sub>2</sub> を充てんする。CO<sub>2</sub> によりアリは失神状態に陥る。この間にアリの背中の前方 1/3 の部分に瞬間接着剤を使って、ネオジム製の小型永久磁石  $\phi 1 \times 1$  [mm] を垂直に取り付けた。このとき磁石の磁化方向はアリの背方が N 極、腹方が S 極になる様に取り付けた。取り付けの際には背方の後方にある前伸腹節気門という呼吸を行う場所を塞がないようにした。これを塞いでしまうと実験後約 1 日で死んでしまうからである。CCD カメラをセンサとして使用しているため、図 5.1-1 のように磁石の表面と腹部にはマーカーとしてアルコール系塗料を塗っている。なお CO<sub>2</sub>・磁石・瞬間接着剤・塗料についてはあらかじめアリに影響がないことを観察している。

### 5.3 磁力制御実験

#### 5.3.1 磁気力による行動の変化

まず磁気力が及ぼす影響がアリの対してどの程度生じるのかを調べた。 $\phi 1 \times 1$ [mm]での磁気力の測定結果は図 5.3.1-1 に示す。この実験において磁気力は制御せずにある一定の磁気力を一定の方向に 60 秒間作用させている。座標系を図 5.3.1-2 のとおりに A と B に分け、60 秒間にその範囲内にいた割合の差を見ることで磁気力の影響がどの程度あるのかをコイル電流別に比較した。また磁気力のかけ方についても 2 種類のかけ方で比較を行っている。一定の磁気力を連続的にかけた場合と、パルス的にかけた場合である。この時のパルスは 20[Hz]で duty 比は 50%である。なおこの実験では 5 匹のアリでサンプルをとっている。平均体長は 9.26[mm]で平均体重は 0.04[g]である。この実験の値はすべて平均値を示している。

図 5.3.1-3 は 60[s]の間に+x 方向に磁気力をかけた場合と -x 方向に磁気力をかけた場合での A の範囲にいた割合の差をとっている。この差をとることによって磁気力がかかっている方向に対して進むのか抗うのかがわかる。結果から電流を上げると差が減少しており、大きな力だと抗う傾向にある。

次に図 5.3.1-4、5.3.1-5 は+x 方向に磁気力をかけた場合と -x 方向にかけた場合での磁気力をかけていないときとの A の範囲にいた割合の差をとっている。これによって磁気力の及ぼす影響がわかると考えた。

この結果からは方向に関わらず磁気力の影響は全体的に低いものの影響があることがわかる。差が低いことの原因としては、アリの姿勢に関わらず力の方向を装置の x-y 平面上で決定したためだと考える。またこれらから磁気力は連続的にかける方がパルスより歩行に対して影響があることいえる。

### 5.3.2 磁気力付加実験

この実験では、先ほどの結果を踏まえて一定時間内に一定の磁気力を常にアリの前方（プラスの電流）と、後方（マイナスの電流）にかけた場合での総歩行距離を測定した。これによってアリの位置を制御する場合にどの方向にかけるのが最適であるかがわかると考えた。実験では 5 匹のアリでサンプルをとり、平均体長は 10.4[mm]で平均体重は 0.09[g]である。この実験の値はすべて平均値を示している。実験では、10 秒間での測定を行い、図 5.3.2-1、5.3.2-2 では総歩行距離とコイル電流との関係を表している。

これらの結果からまず磁気力のかけ方に違いはほとんどなく、影響もほとんど見られない。2 つのグラフともにデータにばらつきがあるものの、連続ではアリの前方に磁気力をかけた場合、磁気力が増加するにつれて総歩行距離が増加している。これはアリが押されている状態であったといえる。逆にパルスではアリの前方に磁気力をかけた場合、磁気力が増加するにつれて総歩行距離が減少している。

図 5.3.2-3、5.3.2-4 は磁気力をアリの前方と後方にかけた場合での差を電流で比較している。この結果からは連続的に磁気力をかけた場合ではアリは前方に、パルスの場合では後方に行きやすいという傾向がある。しかしパルスによる違いがあまり見られないことと、アリが振動し不自然な状態になるため制御では連続的に磁気力を発生させることにした。

### 5.3.3 磁気トルク付加実験

磁気力付加実験の結果から力をつけるだけでは影響が少ないことが分かった。これはクロオオアリの方向を考慮していなかったことが原因であると考えた。つまり車で例えるな

らばアクセルとハンドルとではハンドルを制御した方が操縦しやすいのではないかと  
ことである。そのため従来は図 5.3.3-1 の左のように取り付けていた小型永久磁石を図  
5.3.3-1 の右のように方向を変えて取り付けることで磁気力によって引っ張るのではなくト  
ルクによって角度  $\theta$  を変える制御を行った。磁気力及び磁気トルクと各コイルの制御電圧  
の関係を図 5.3.3-2、図 5.3.3-3、図 5.3.3-4、図 5.3.3-5 に示す。この図のようにアリには磁気  
力と磁気トルクがかかるようになっている。まずは磁気トルクの測定を行った。図 5.3.3-6  
は磁気トルクの校正結果を表している。またこの時も模型による予備実験を行っている。  
実験は第 4 章にある図 4.5-1 のように行なったが小型永久磁石の向きは 90 度回転させてあ  
る。ステップ応答の結果を図 5.3.3-7 に示す。この図のように磁気トルクによる制御も可能  
であることを確認した。

次に図 5.3.3-8 はクロオオアリに磁気トルクをかけた場合を電流で比較したものである。  
この時も 5 匹のアリでサンプルをとり、平均体長は 10.5[mm]で平均体重は 0.07[g]である。  
この実験の値はすべて平均値を示している。電流がマイナスの値であると右回り、プラス  
の場合であると左回りの磁気トルクがかかる。この結果から磁気トルクを与えたにもかか  
わらず角度の変化は磁気力の場合同様にほとんど見られない。また歩行距離に関してもア  
リに任せてあるので少ない。これはアリが前進することなくトルクに抗ったためであると  
考えた。

#### 5.3.4 磁気力及び磁気トルク制御実験

これまでの実験により磁気力だけではその力に抗ってしまい、磁気トルクだけでは前進  
せずにその場で回ってしまうことが分かった。よってこの 2 つを同時に行うことで制御が  
容易になるのではないかと考えた。この実験では図 5.3.4-1 のように目標位置を設定し、磁  
気トルクによって角度  $\theta$  を変え、なおかつ磁気力で前進させる P 制御を取り入れた。また  
制御時間を今までの 10[s]から 15[min]に変更した。

図 5.3.4-2 に実験結果を示す。この実験にはクロオオアリを 5 匹使用し平均をとっている。  
平均体長は 10.5[mm]で平均体重は 0.07[g]である。図 5.3.4-2 は制御の有無による総歩行距  
離の比較で図 5.3.4-3 は制御の有無による回転角度の比較、図 5.3.4-4 は制御の有無による  
目標位置との平均距離  $L$ [mm]の比較を行ったものである。この結果から総歩行距離と回転  
角度はともに制御を入れることで増加傾向があることがわかり、目標位置との平均距離は  
制御することで約 30%減少した。この実験に使用した制御式は以下のようになっている。

ここでまずこの装置において読み取るのは昆虫の胸部位置  $x_1$ ,  $y_1$ [mm], 腹部位置  $x_2$ ,

$y_2[\text{mm}]$ である．この4つのデータからアリの現在の角度と目標角度  $\theta_t[\text{rad}]$ を計算する．そしてあらかじめ設定した目標位置( $x_t, y_t$ )を基に式(5.3.4-3), (5.3.4-4)のように現在の角度  $\theta$  [rad]に応じた制御電圧をそれぞれの軸成分ごとに計算する．式(5.3.4-3), (5.3.4-4)の第1項は磁気力，第2項は磁気トルクの計算である．これらの式の  $k_{px}$ ,  $k_{py}$  は磁気力の比例ゲインであり， $k_{prx}$ ,  $k_{pry}$  は磁気トルクの比例ゲインである．そしてそれぞれの成分を合成した制御電圧である  $V_0$  と  $V_1$  を式(5.3.4-5), (5.3.4-6)を用いて計算し D/A 変換器より出力する．なお制御電圧の最大値は  $\pm 2[\text{V}]$  であり，計算の過程で最大値を超えた場合は強制的に  $\pm 2[\text{V}]$  の値を出力する．

$$\theta = \tan^{-1} \frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2} \quad (5.3.4-1)$$

$$\theta_t = \tan^{-1} \frac{y_1 - y_t}{x_1 - x_t} \quad (5.3.4-2)$$

$$V_x = -k_{px}(x_1 - x_t)\cos\theta - k_{pr}(\theta - \theta_t)\sin\theta \quad (5.3.4-3)$$

$$V_y = -k_{py}(y_1 - y_t)\sin\theta - k_{pr}(\theta - \theta_t)\cos\theta \quad (5.3.4-4)$$

$$V_0 = V_x + V_y \quad (5.3.4-5)$$

$$V_1 = -V_x + V_y \quad (5.3.4-6)$$

## 5.4 CO<sub>2</sub>による酸素濃度低下時の磁力制御実験

### 5.4.1 酸素濃度低下による行動の変化

前述の実験のように目標位置を設定し、その位置に昆虫を移動させる制御実験を行ったが、制御の導入する前と後での違いは約 30%であった。我われはさらなる制御性の向上を図った。昆虫に小型永久磁石を取り付ける際には CO<sub>2</sub> を用いている。これは酸素濃度が低くなるために失神状態に陥るためだと考えられる。ならば CO<sub>2</sub> で酸素濃度を調整することで昆虫自身の力を軽減させようと考え、CO<sub>2</sub> による酸素濃度低下時の磁力制御実験を行った。

制御実験を行う前に CO<sub>2</sub> の影響がどれくらいあるのか、また実験可能な時間はどのくらいあるのかを測定する実験を行った。この実験は磁気による制御をせず CO<sub>2</sub> の有無による

総移動距離と回転角度の時間変化を比較した。その実験結果を図 5.4.1-1 に示す。CO<sub>2</sub>の影響によってクロオオアリの運動量が低下していることがわかり、さらに運動量が低下した状態でも制御による運動量の変化が見られた。またこの実験データは 10 分間のものであるが、実際には 15 分間実験をしている。しかし、10 分程度経過するとアリは完全に失神状態に陥いた。これは複数のアリに対しても同様の結果が得られたため今後 CO<sub>2</sub>を併用した制御実験は 10 分間を目安とした。

#### 5.4.2 酸素濃度低下時の磁気力付加実験

この実験では CO<sub>2</sub>を用いて運動量を低下させた状態で磁気力を常にアリの前方にかけ、その速度の時間変化を比較した。実験には 5 匹のクロオオアリを使用し、平均体長は 11.6[mm]で平均体重は 0.032[g]である。この実験では磁気力は 30 秒ごとに ON-OFF を繰り返している。図 5.4.2-1 ではその間の速度の差を 60 秒ごとにとっており、値がプラスになれば磁気力によって速度が増加したことを表す。ON-OFF の差をとってしまったためあまり差がはっきりとは出なかったが、グラフを見ると 5～7 分の間に速度の差がプラスに安定している。これは CO<sub>2</sub>の影響によりアリ自体が弱まり、磁気力の影響を受けやすくなっているのではないかと考えた。このことから CO<sub>2</sub>は流入後約 5 分経過した時点から約 3 分間が制御実験に対して最も効果的であるということがわかった。

#### 5.4.3 酸素濃度低下時の磁気力及び磁気トルク制御実験

この実験では 5.3.4 項と同様の実験を CO<sub>2</sub>を用いて運動量を低下させた状態で行った。実験には 5 匹のクロオオアリを使用し、平均体長は 11.6[mm]で平均体重は 0.03[g]である。実験結果を図 5.4.3-1、図 5.4.3-2、図 5.4.3-3、に示す。これらは 5.3.4 項で示した図と比べると、総移動距離と回転角度は同じように制御を導入することで上昇する傾向があり、目標位置との差は 30%から 40%と制御性が向上した。

また今回では円軌道(直径 20mm)を歩行させるように目標位置を設定し、制御を試みた。

この結果の例として 1 分間毎の x-y グラフ上での位置を図 5.4.3-4 から図 5.4.3-8 に示す。この実験では、はじめは制御を入れているがランダムに動いており、5 分から 6 分の間に最も目標値である円に近付いている。その後、CO<sub>2</sub>の影響により歩行距離は少なくなっている。比較のため自然状態のアリの歩行を図 5.4.3-9 に示す。図 5.4.3-10 と図 5.4.3-11 は x、y それぞれの位置の時間変化を目標値とともに示している。また同様の実験で得られた速度と回転角度の時間変化の例を図 5.4.3-12、図 5.4.3-13 に示す。これは先述の酸素濃度低下時の磁気力付加実験の結果を補足するように CO<sub>2</sub>の効果は約 5 分後に最もよく表れている

ことがわかる。CO<sub>2</sub>を使用した各々の実験でこのような傾向が見られている。

#### 5.4.4 小型永久磁石と制御性

CO<sub>2</sub>による制御性の向上は見られた。我われはさらなる向上の為、次にアリの背中に取り付ける小型永久磁石のサイズがどのように制御に影響があるのか実験を行った。小型永久磁石の体積に比例して磁気力は大きくなることが、その分アリの荷重は増えていく。そこで6つの大きさの異なる磁石を使用し、実験を行った。結果を図 5.4.4-1 に示す。また制御をしている状態としていない状態での目標位置との差をアリの平均体長で基準化したものと磁石の重さをアリの平均体重で基準化したものの関係を図 5.4.4-2 に示す。相関係数を用いて評価したところ相関係数は 0.3 であった。このことから磁石の大きさと制御性はあまり関係のないことがわかる。しかしアリの自重くらいの重さまでであれば目標位置との差は少なくなっていた。そのため今までの4倍の力が発生するφ2x1[mm]、0.04[g]の磁石を使用し、制御実験を行った。その結果を図 5.4.4-3 と図 5.4.4-4 に示す。

実験の結果、磁力制御のみだと目標位置との差が制御ありとなしでは約 60%少なくなっていた。さらに酸素濃度低下時は約 70%少なくなっていた。このように制御性が大幅に向上していることが分かった。このとき CO<sub>2</sub>は使用している。この実験によって最大積載磁石荷重はアリの自重までとし、それ以上では逆にバランスを失い制御できなくなっていくことが分かった。図 5.4.4-5 に磁石変更後の磁力制御の例として磁力制御のみの時の x-y 平面上のアリの位置を示す。

#### 5.4.5 考察

CO<sub>2</sub>により酸素濃度を低下させ昆虫を弱らせることで、磁気力がより昆虫の行動に影響を与えるのではないかと磁気力付加実験や制御実験を行った。初めに行った磁気力付加実験では速度で評価することで CO<sub>2</sub>の効果が表れる時間がわかり、結果として CO<sub>2</sub>による影響が最も有効である時間帯に実験を行うことで制御性の向上が見られた。

制御に関しては、CO<sub>2</sub>を流入と取り付ける磁石の大きさを最適化することによって目標値との平均距離が制御を導入することによって 30%から 40%へと制御性の向上が見られた。さらに円軌道制御では時間の変化は目標値と異なるが位置のみでは、おおよそ同じ軌道上を歩行している。これらのことからこの手法は有効ではあったと言える。

またアリに取り付ける小型永久磁石の体積が磁気力の大きさに比例することから小型永久磁石の影響を実験により求めた。この結果、今まで使用してきたφ1x1[mm]より体積が4倍のφ2x1[mm]の磁石に変更することで磁力制御により目標位置との平均距離の減少率は

30%から 60%と 2 倍に増加した。さらにこの時も酸素濃度の低下による制御性の向上は 10%であった。これらのことから制御性向上には磁気力を増加することが最も有効な手段であることが分かった。ただし取り付ける小型永久磁石のサイズは昆虫の自重程度が限界であり、電源の最大電流を上げることやコイルの改良が必要である。

最後に、制御実験では比例制御を行なったため、目標位置に近づくにつれて磁気力は弱くなり、このことが完全な位置制御が出来なかった原因ではないかという懸念があったため目標位置に行くまで一定の力で制御する ON-OFF 制御を行なった。この結果の一例を図 5.4.5-1 に示す。結果として ON-OFF 制御では制御開始時にアリは歩行するが常に一定の力がかかっているために抵抗し、ほとんど動いていない。これは先述の付加実験の結果と同様で一定以上の大きさでは抵抗する傾向が見られた。この実験から制御実験において ON-OFF 制御は適していないと考える。



図 5.1-1 クロオオアリ



図 5.1-2 飼育ケース



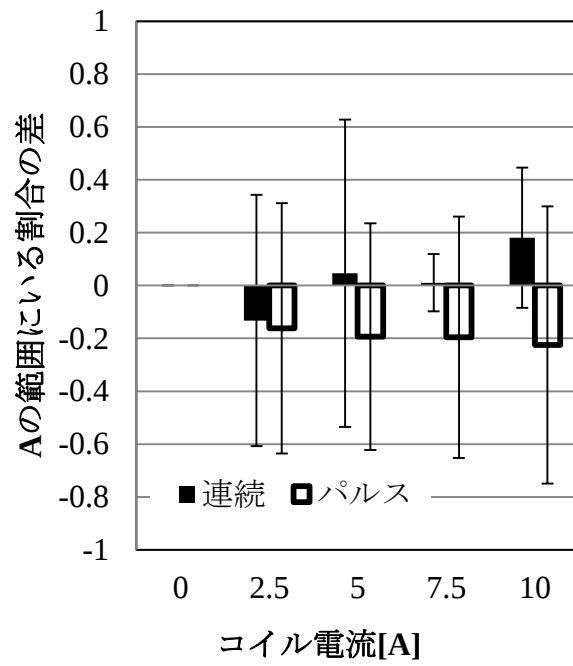


図 5.3.1-3  $+x$  方向と  $-x$  方向に磁気力をかけた場合の A の範囲にいた割合の差

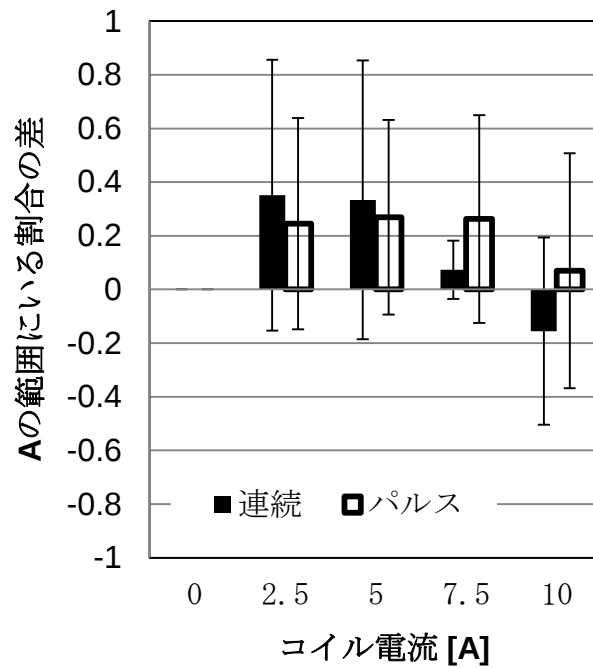


図 5.3.1-4  $+x$  方向の磁気力の有無の A の範囲にいた割合の差

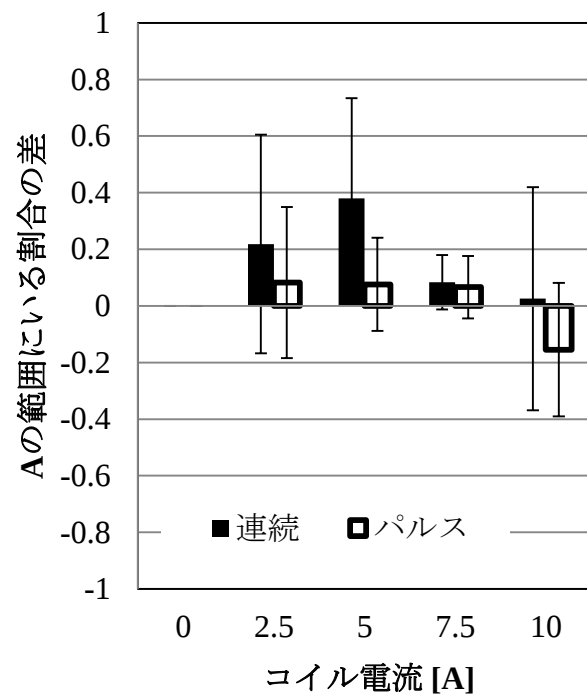


図 5.3.1-5  $-x$  方向の磁気力の有無の A の範囲にいた割合の差

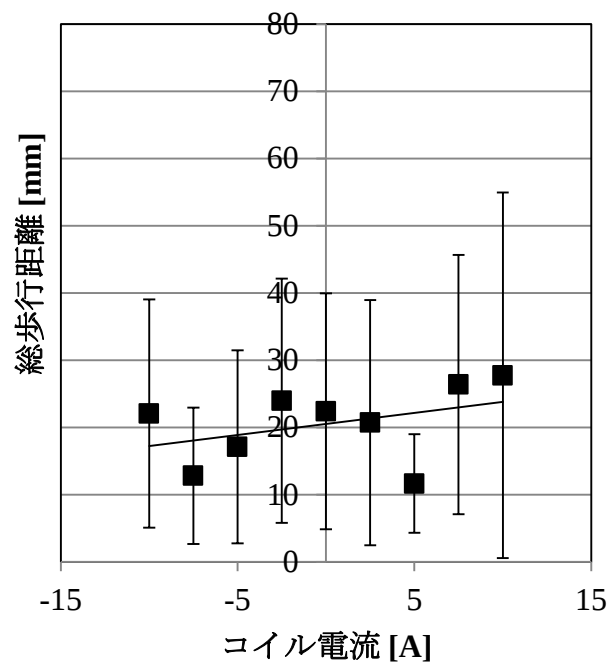


図 5.3.2-1 総歩行距離とコイル電流との関係（連続）

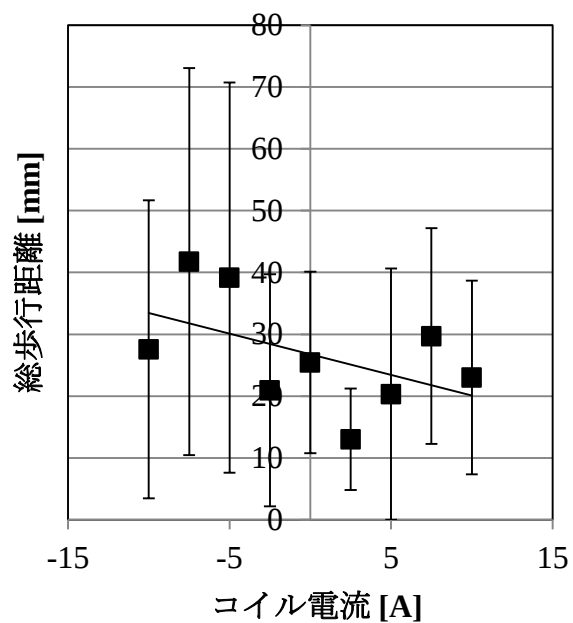


図 5.3.2-2 総歩行距離とコイル電流との関係（パルス）

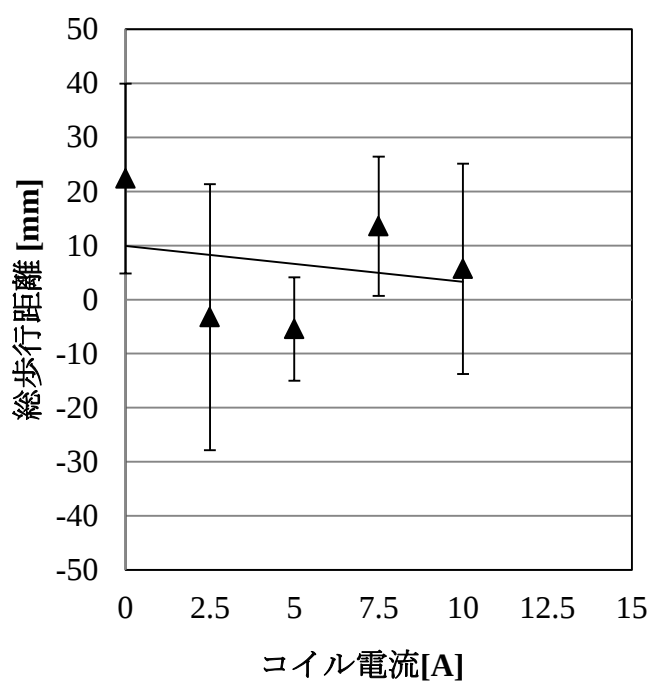


図 5.3.2-3 磁気力をアリの前方と後方にかけた場合の差とコイル電流（連続）

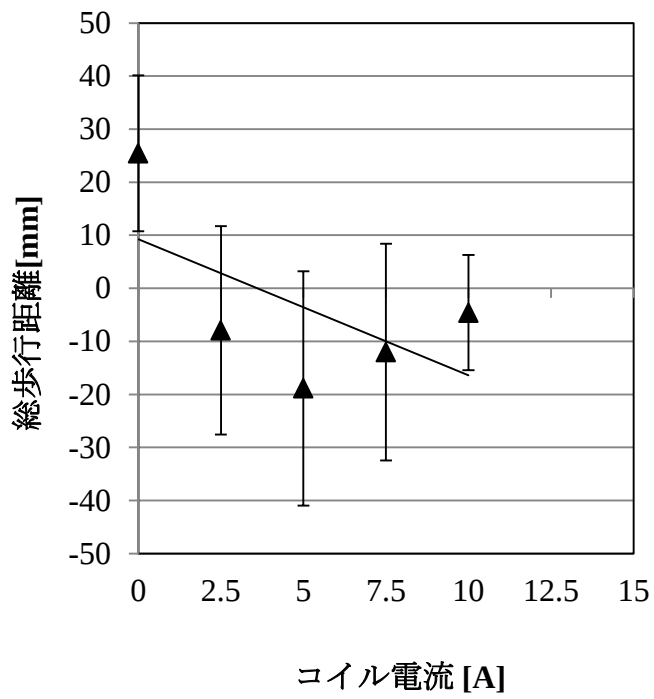


図 5.3.2-4 磁気力をアリの前方と後方にかけた場合の差とコイル電流（パルス）

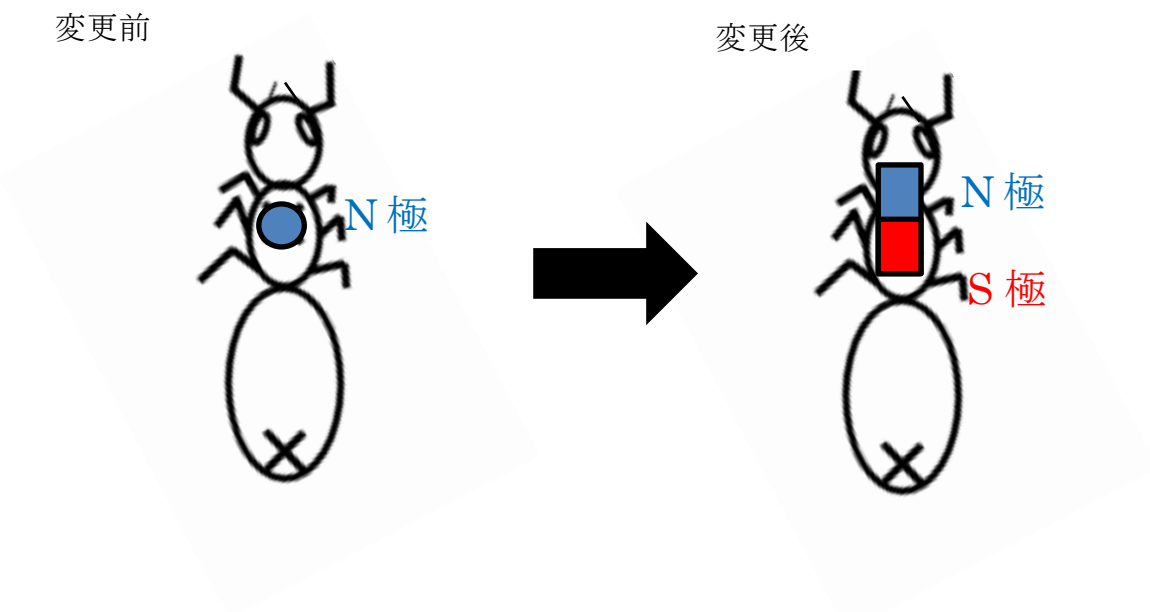


図 5.3.3-1 小型永久磁石の取り付け方の変更

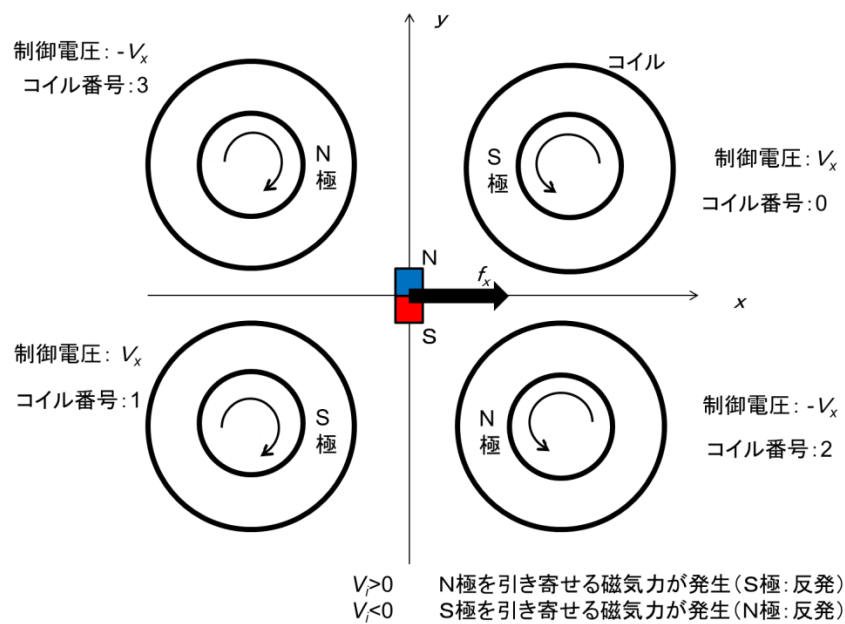


図 5.3.3-2 磁気力と制御電圧の関係( $x$  軸)

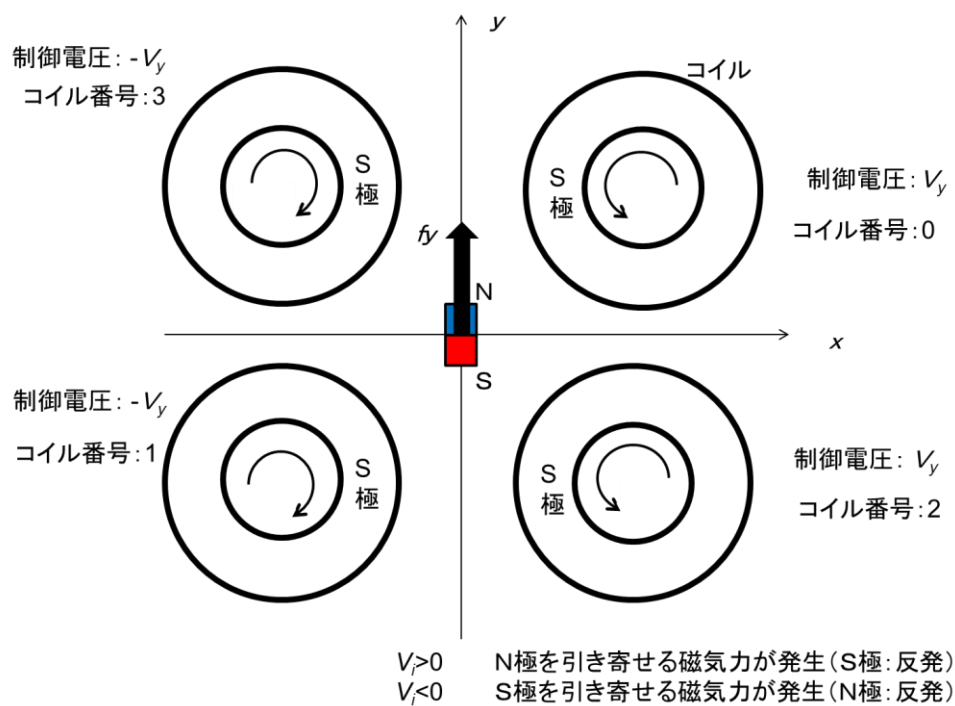


図 5.3.3-3 磁気力と制御電圧の関係( $y$  軸)

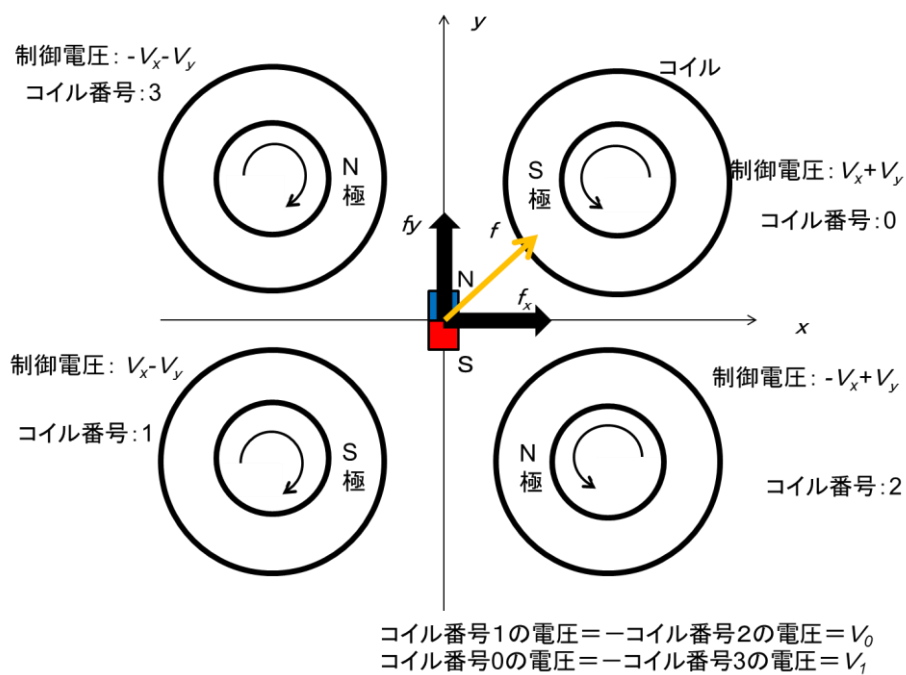


図 5.3.3-4 磁気力と制御電圧の関係(xy合成)

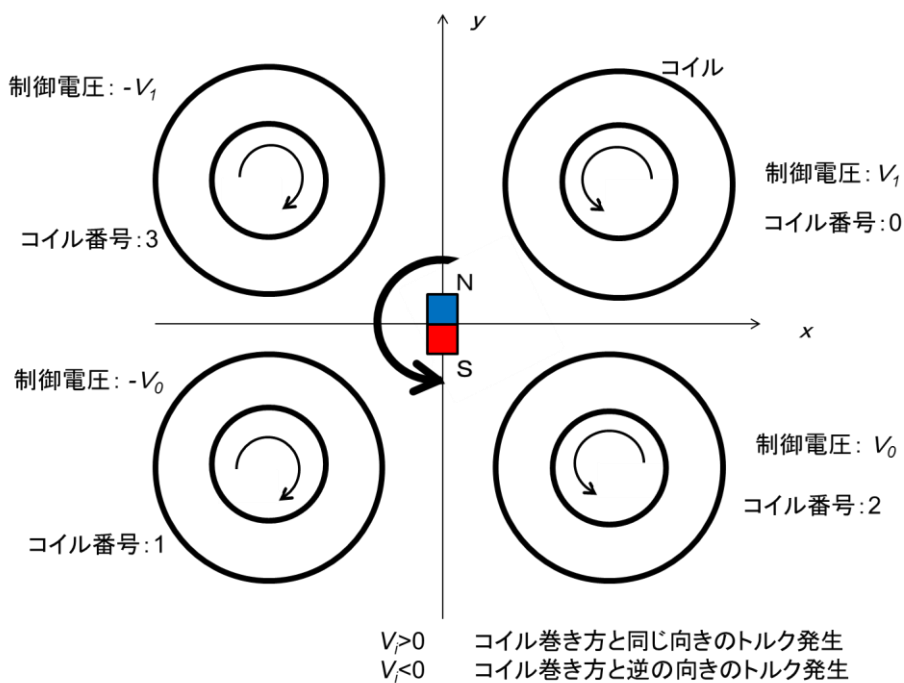


図 5.3.3-5 磁気トルクと制御電圧の関係

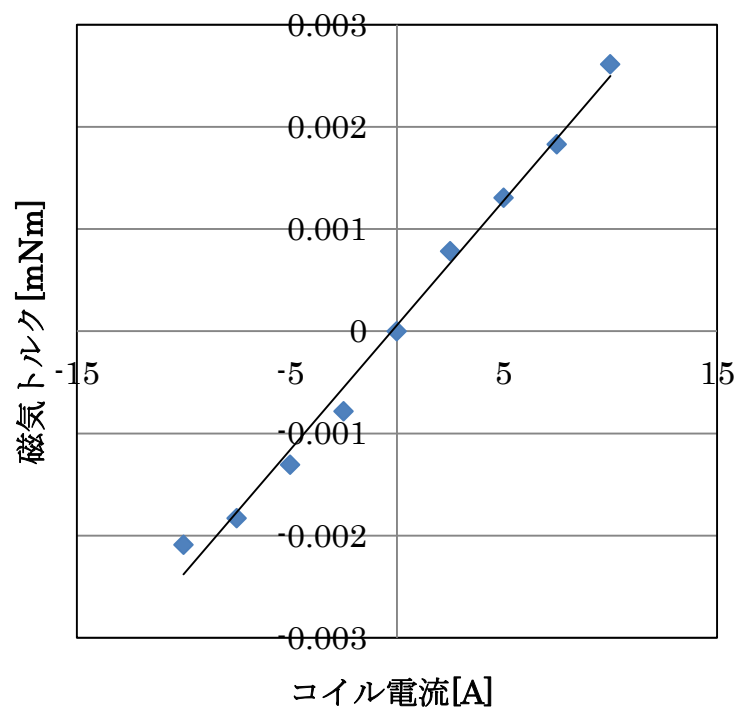


図 5.3.3-6 磁気トルク校正結果

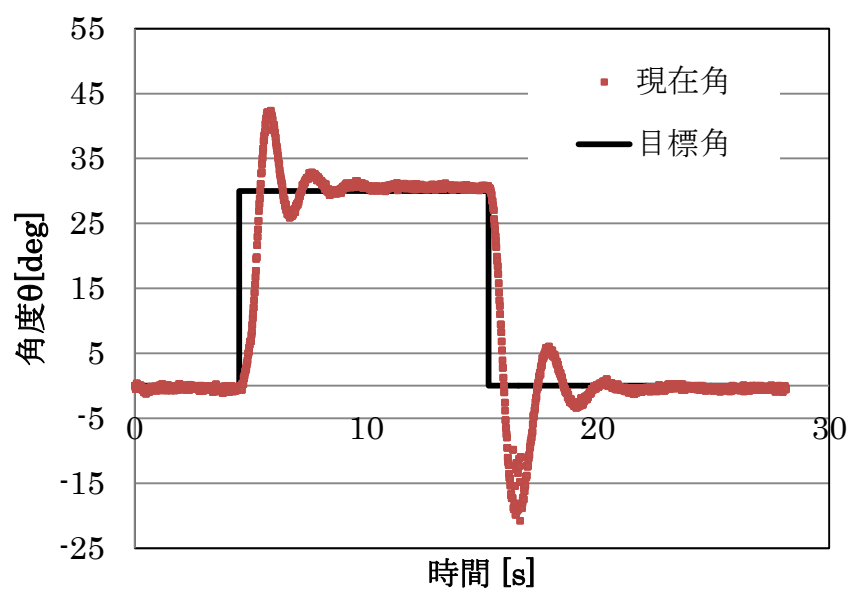


図 5.3.3-7 磁気トルク制御実験のステップ応答

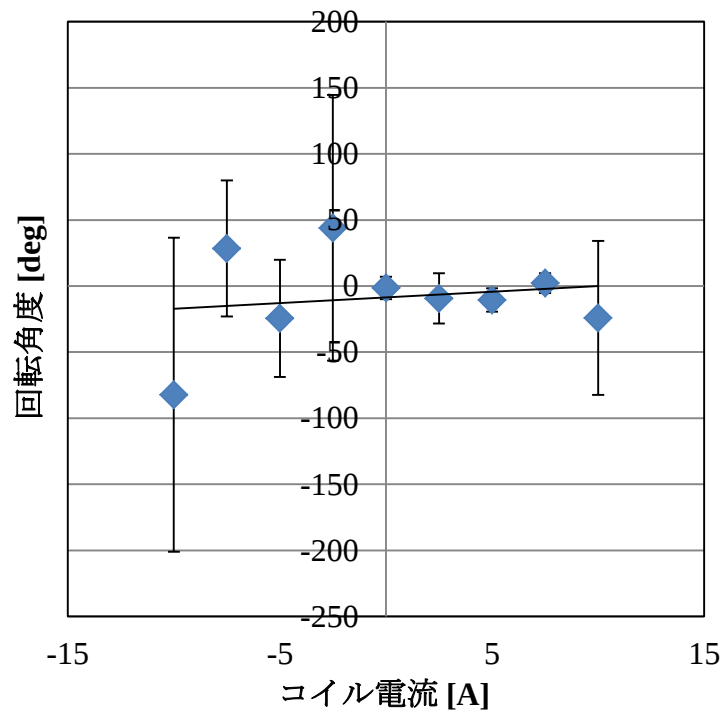


図 5.3.3-8 磁気トルク付加実験結果

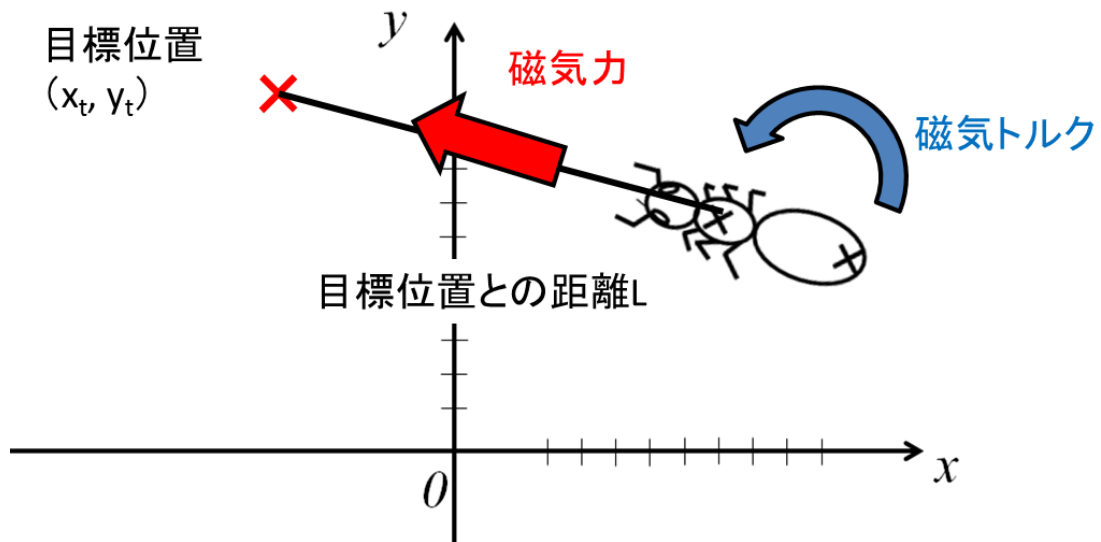


図 5.3.4-1 磁気力及び磁気トルク制御の概要

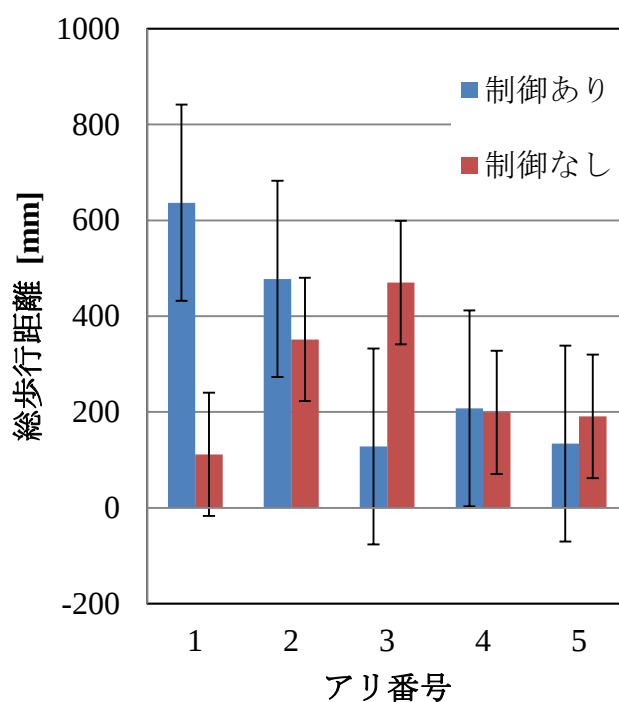


図 5.3.4-2 制御ありと制御なしの総歩行距離の比較

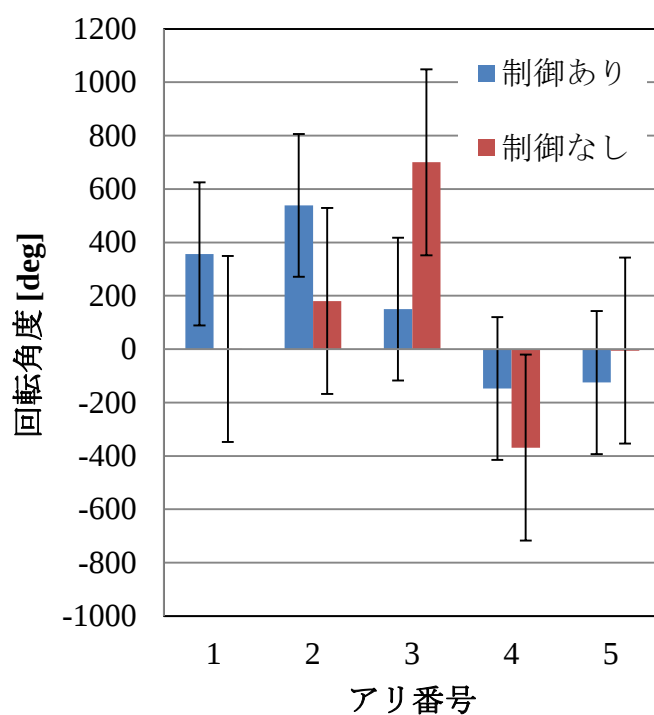


図 5.3.4-3 制御ありと制御なしの回転角度の比較

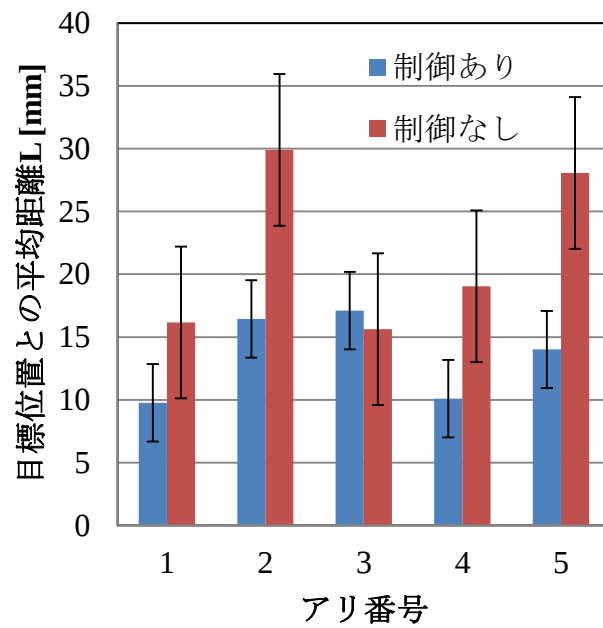


図 5.3.4-4 制御ありと制御なしの目標位置との平均距離の比較

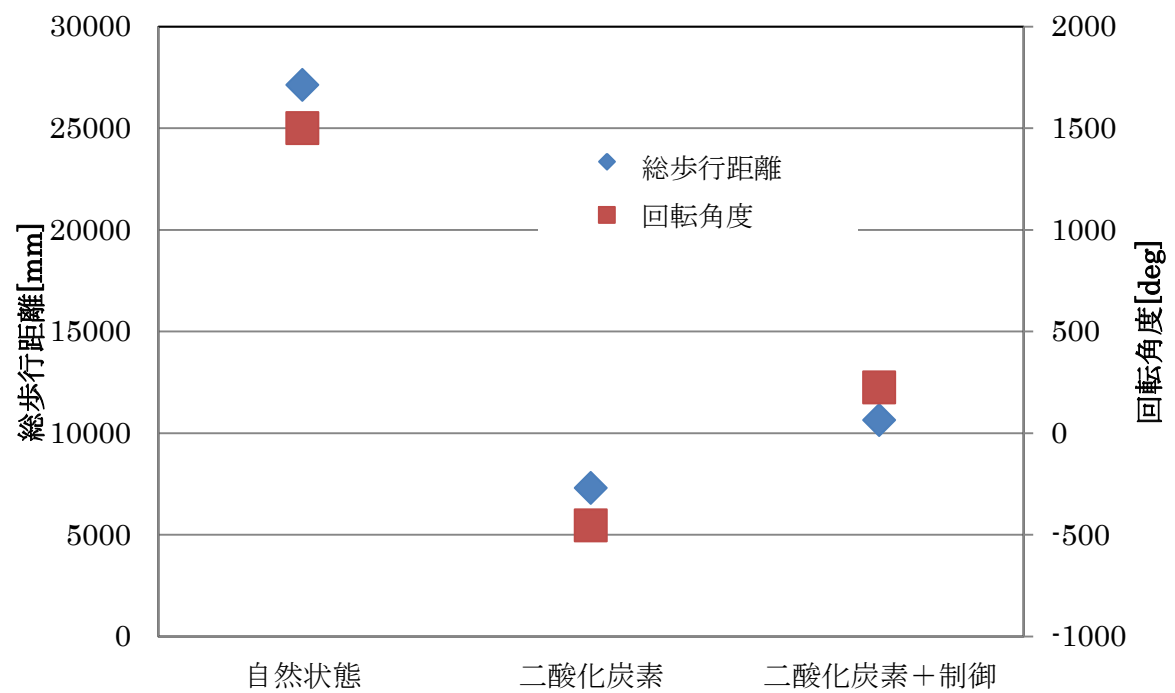


図 5.4.1-1 二酸化炭素による酸素濃度低下時の動きの比較

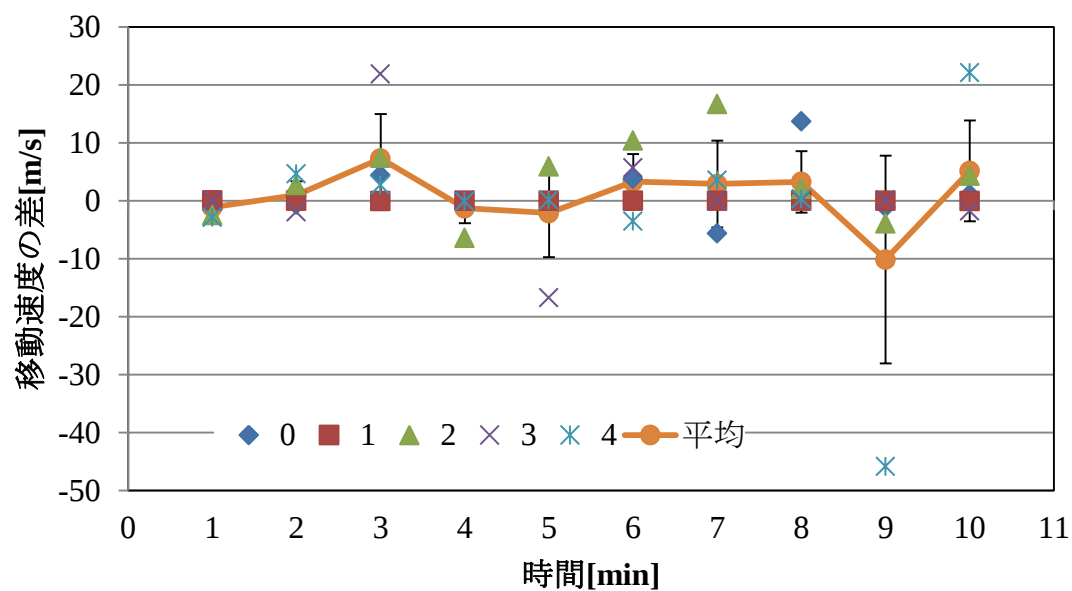


図 5.4.2-1 二酸化炭素による酸素濃度低下時の動きの比較

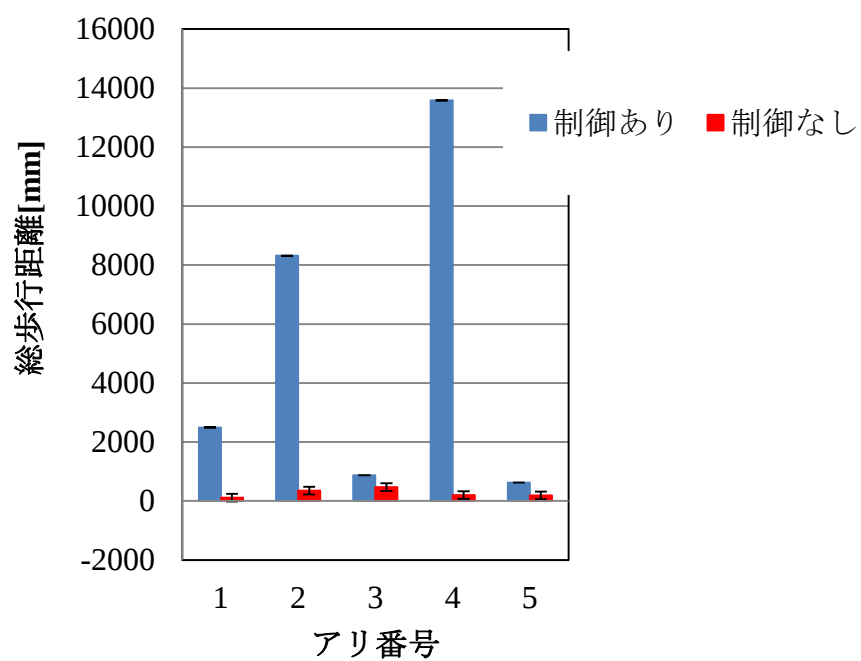


図 5.4.3-1 酸素濃度低下時の制御ありと制御なしの総歩行距離の比較

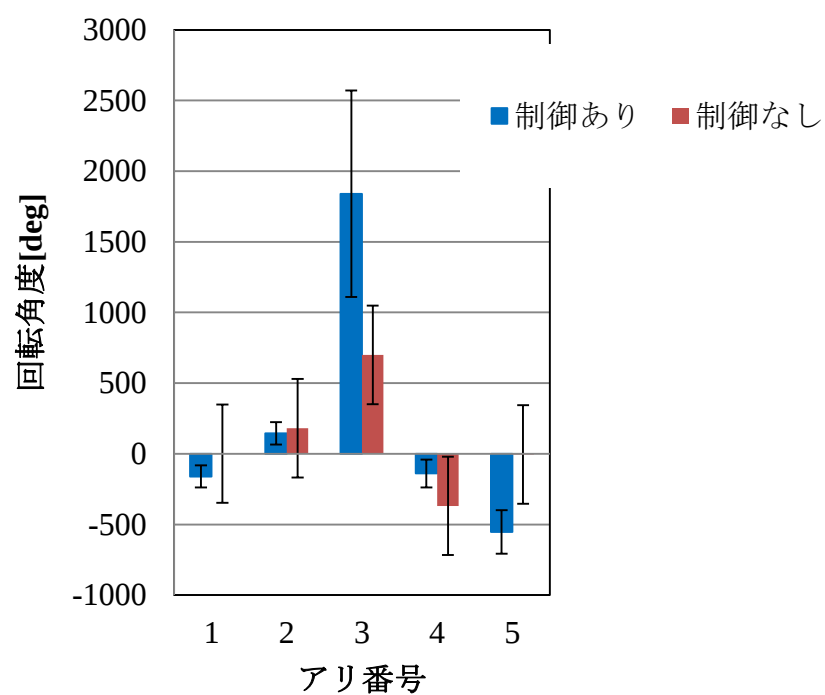


図 5.4.3-2 酸素濃度低下時の制御ありと制御なしの回転角度の比較

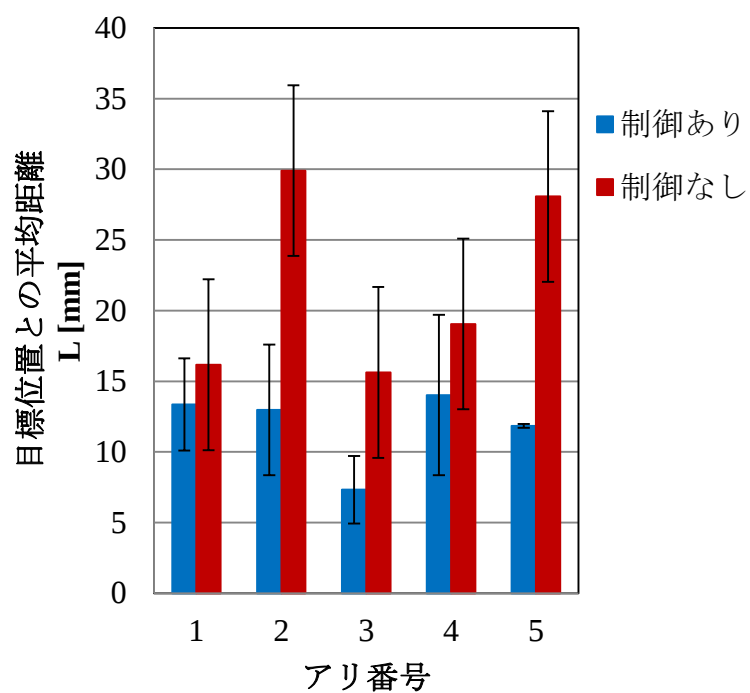


図 5.4.3-3 酸素濃度低下時の制御ありと制御なしの目標位置との平均距離の比較

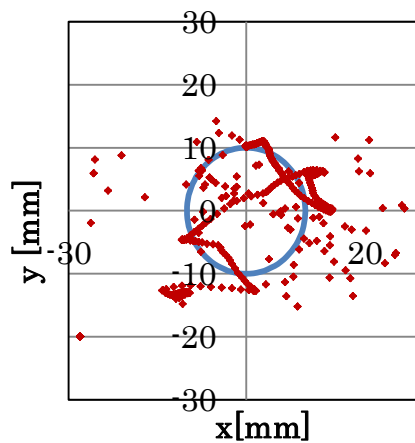
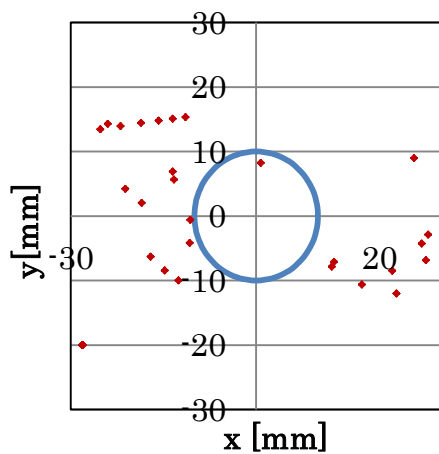


図 5.4.3-4 円軌道制御(0-1min、1-2min)

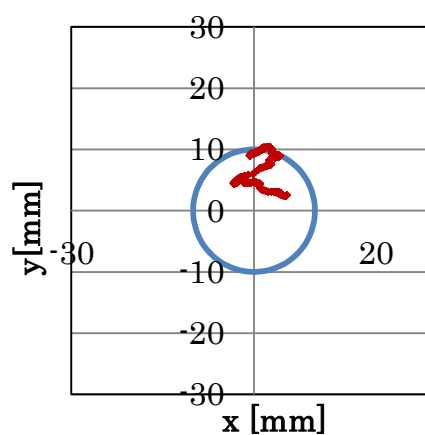
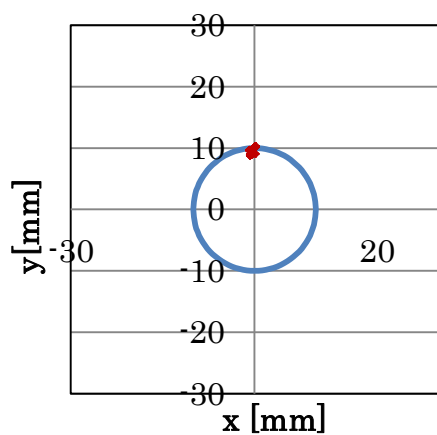


図 5.4.3-5 円軌道制御(2-3min、3-4min)

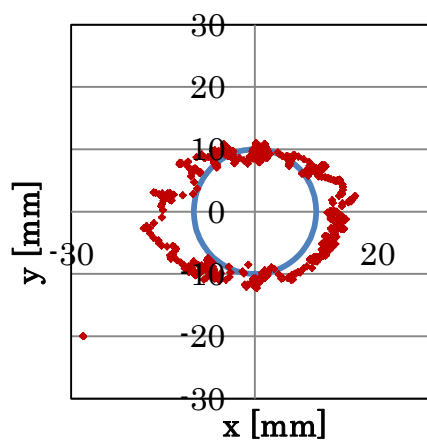
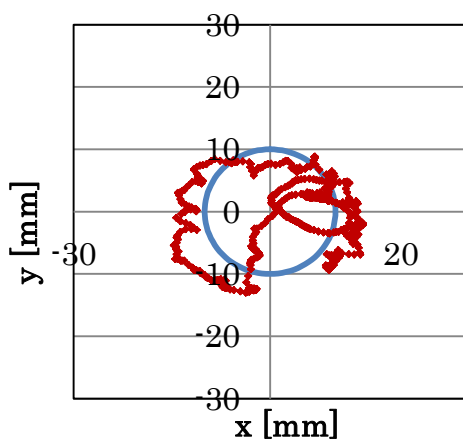


図 5.4.3-6 円軌道制御(4-5min、5-6min)

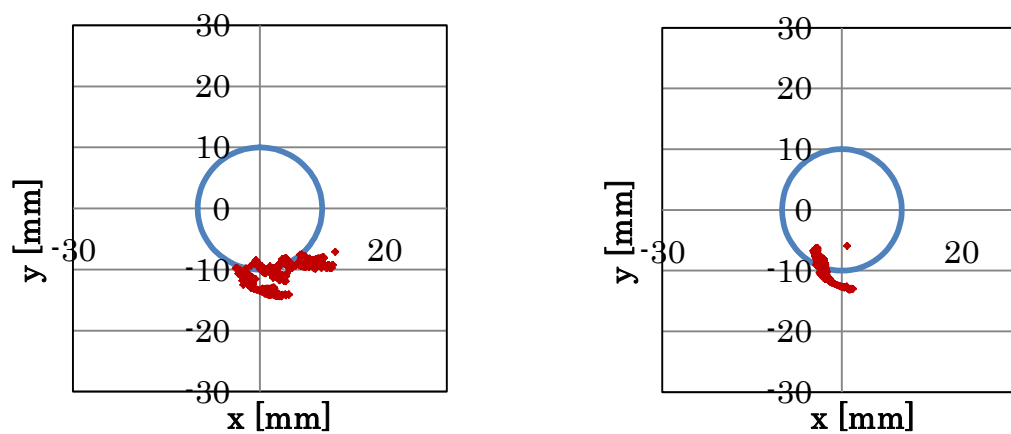


図 5.4.3-7 円軌道制御(6-7min、7-8min)

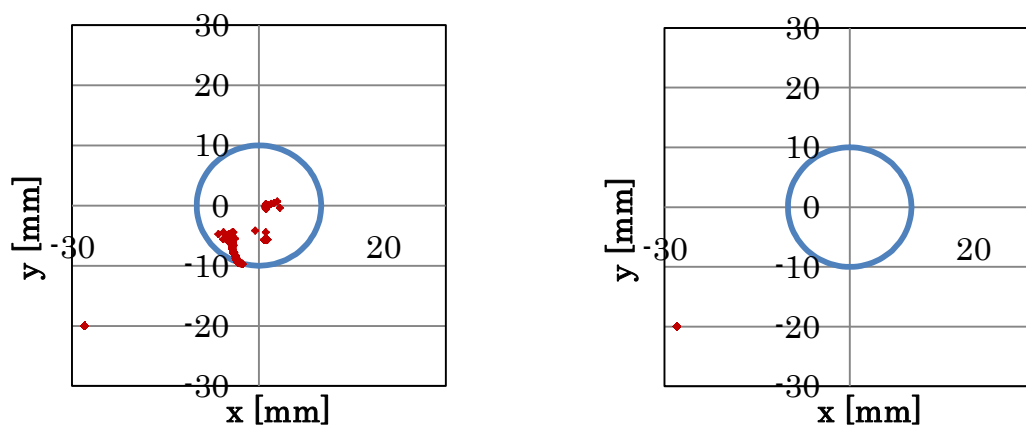


図 5.4.3-8 円軌道制御(8-9min、9-10min)

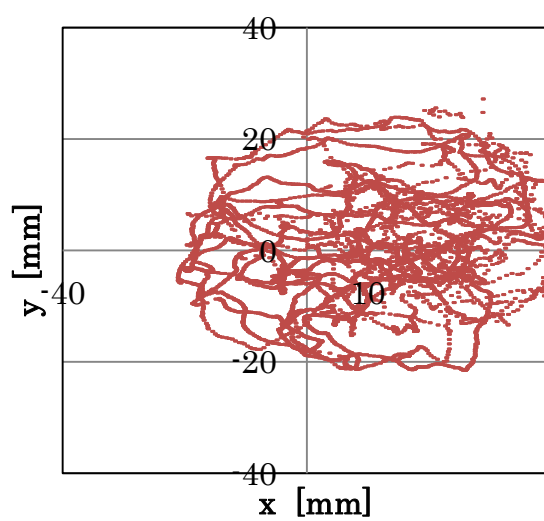


図 5.4.3-9 自然状態のアリの歩行 (10 分間)

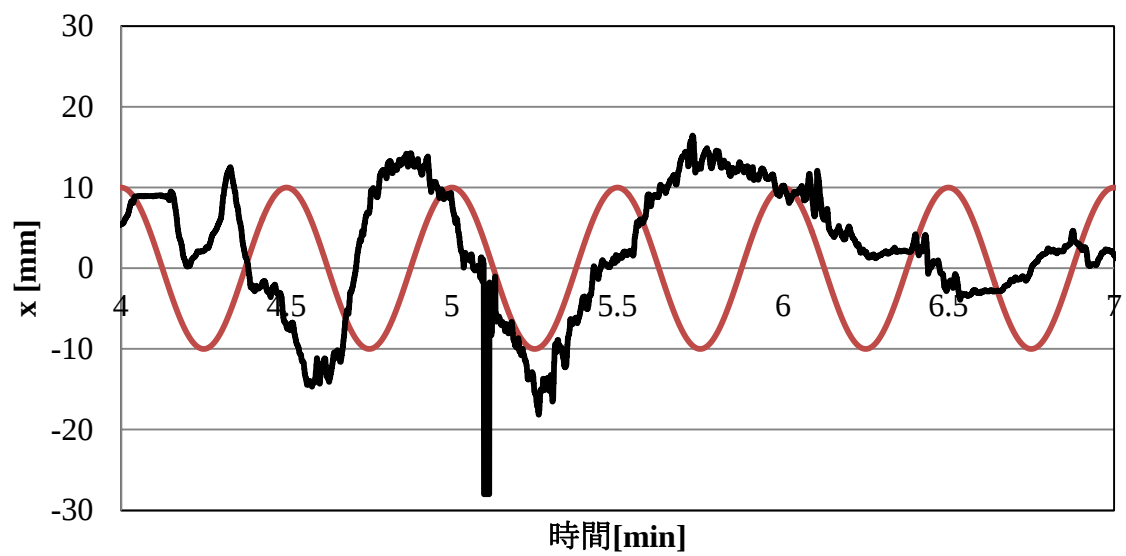


図 5.4.3-10 円軌道制御 ( $x$  軸)

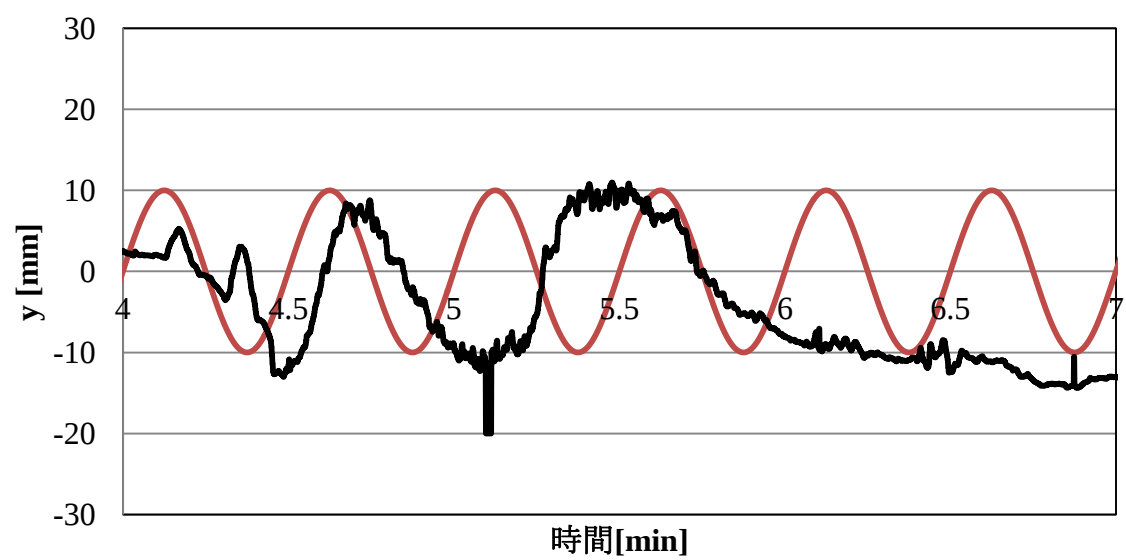


図 5.4.3-11 円軌道制御 ( $y$  軸)

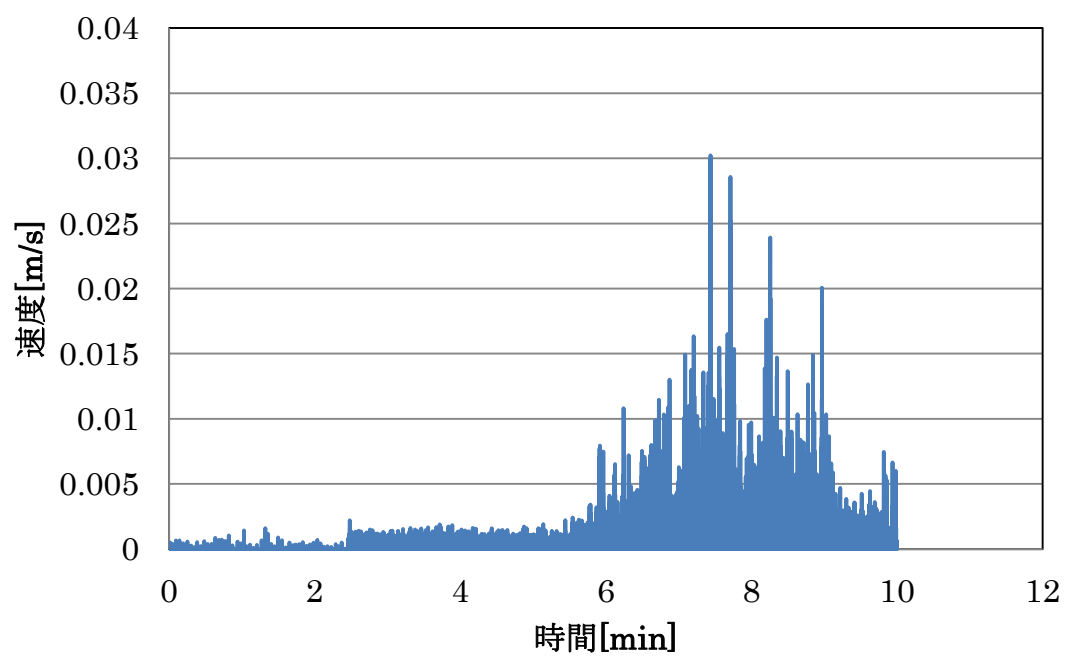


図 5.4.3-12 速度の時間変化

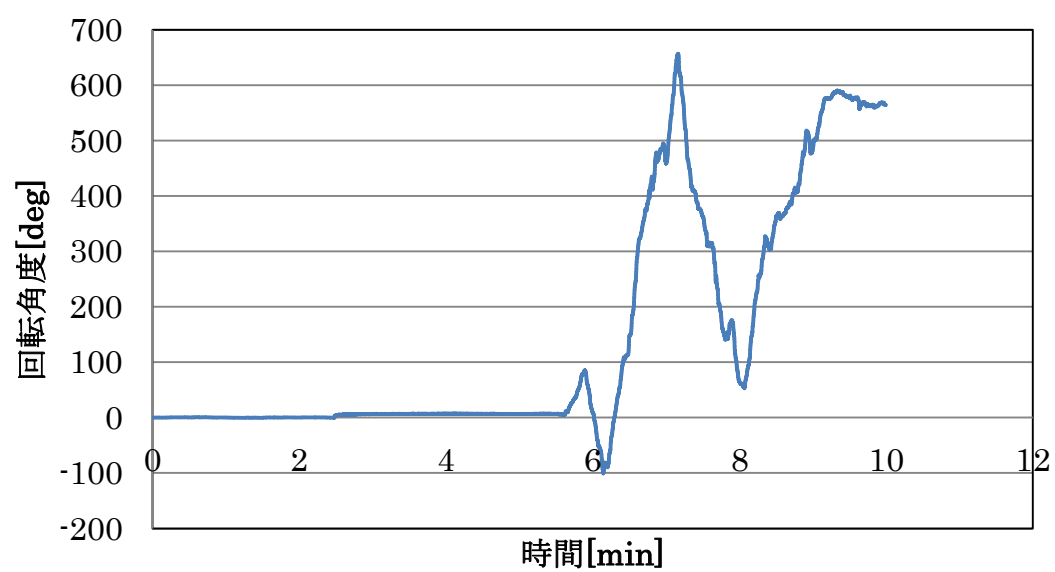


図 5.4.3-13 回転角度の時間変化

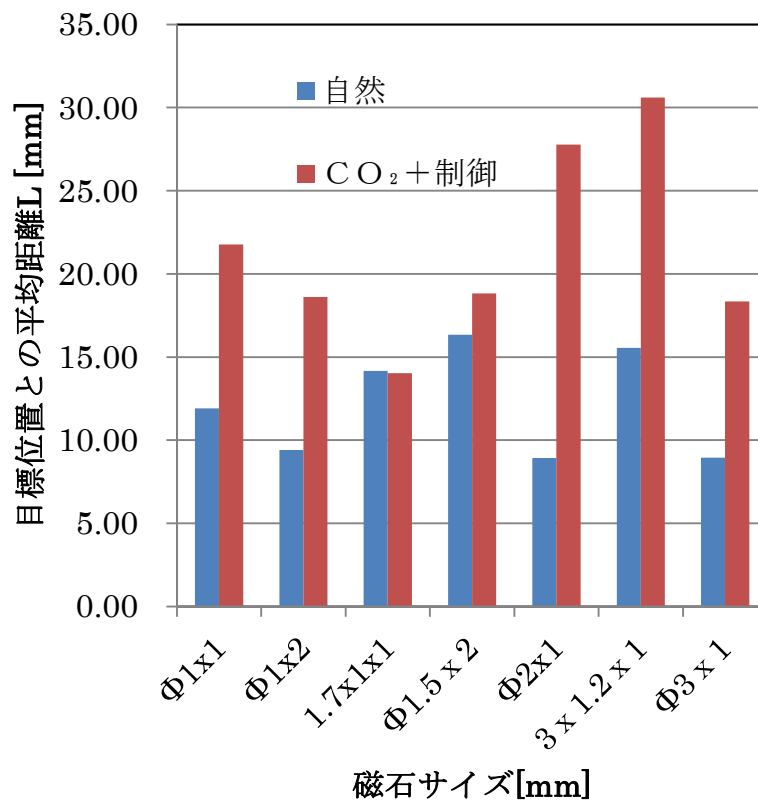


図 5.4.4-1 磁石のサイズ別制御結果

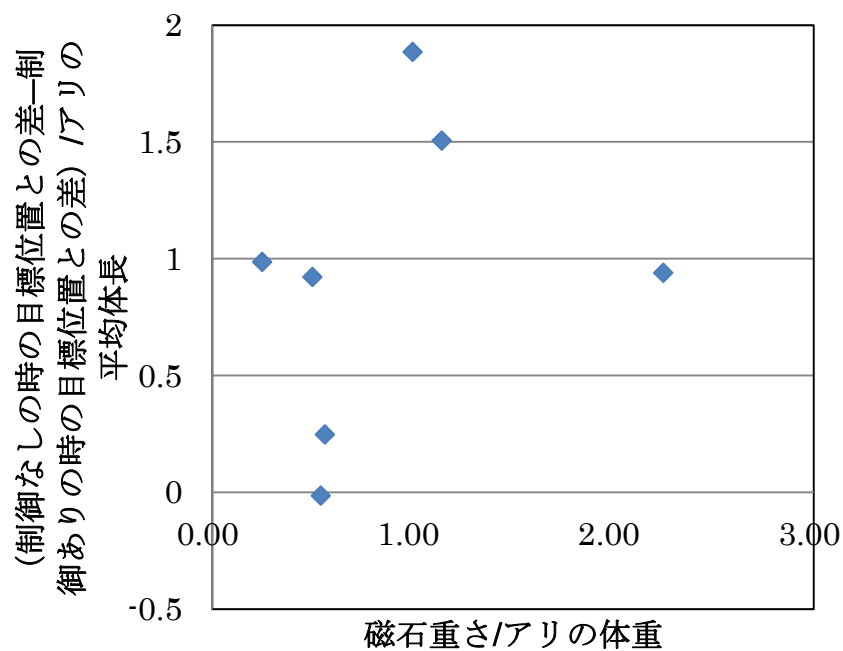


図 5.4.4-2 磁石と制御性の関係

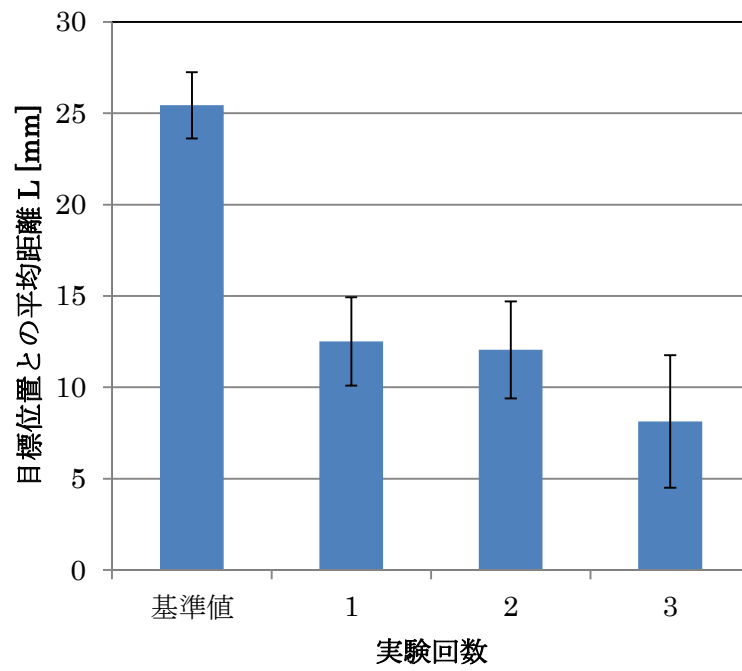


図 5.4.4-3  $\phi 2 \times 1$  [mm] の磁石を使用した場合の目標位置との平均距離

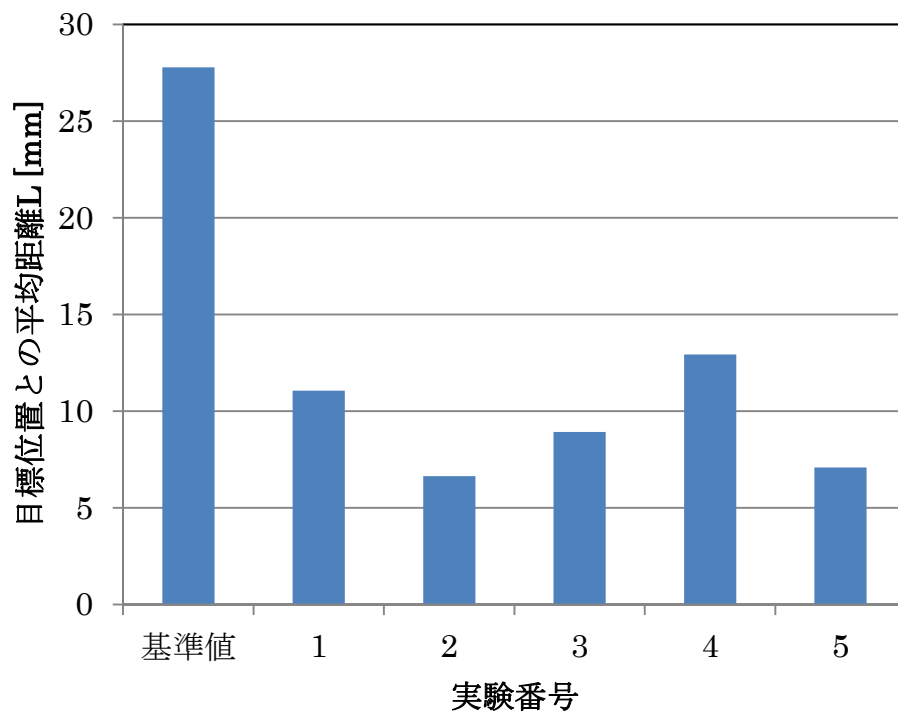


図 5.4.4-4 酸素濃度低下時の  $\phi 2 \times 1$  [mm] の磁石を使用した場合の目標位置との平均距離

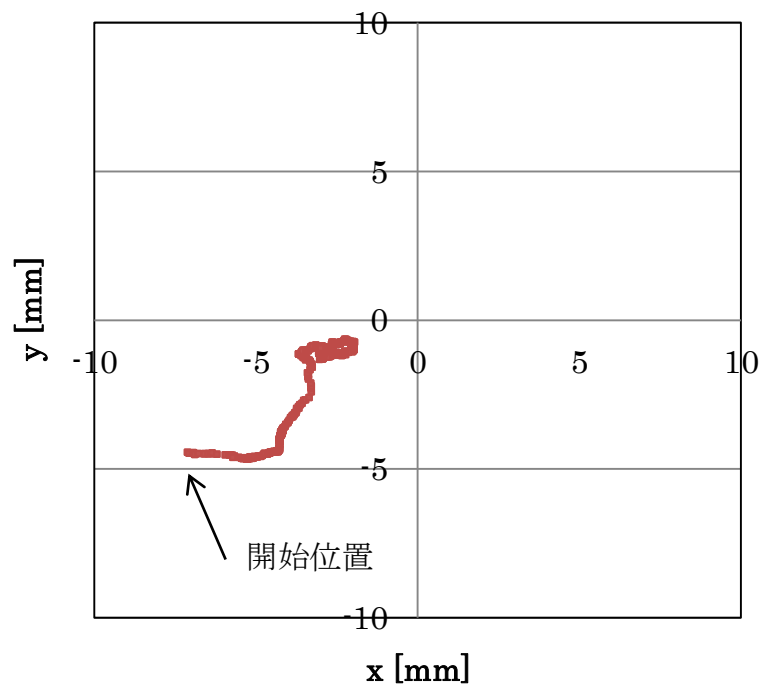


図 5.4.4-5  $\phi 2 \times 1$ [mm]の磁石を使用した場合の磁力制御(目標位置  $x_t:0.0\text{mm}$ ,  $y_t:0.0\text{mm}$ )

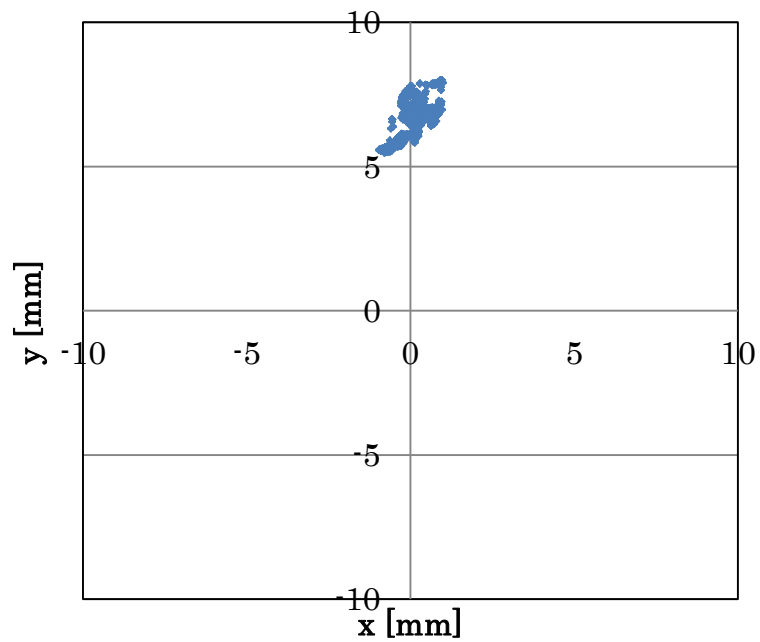


図 5.4.5-1 ON-OFF 制御(目標位置  $x_t:0.0\text{mm}$ ,  $y_t:0.0\text{mm}$ )

## 第6章 結言

本研究では磁力支持天秤に関する技術の新しい応用として生物の制御を行った。実験では模型を使用した予備実験や昆虫の位置・方向制御を磁気力及び磁気トルクを与えることで行なった。

位置制御では、制御性向上のため  $\text{CO}_2$  を用いり酸素濃度低下状態での実験を行ない、 $\text{CO}_2$  の流入によって制御していないときとの目標値との平均距離を 10%向上させた。さらに、昆虫に取り付ける小型永久磁石のサイズを変更することによって最大 70%の制御性の向上に成功した。

目標円軌道上を歩行するように行った制御ではおおよそ目標円と同じ軌道上を歩行させることができ、酸素濃度低下させることや小型永久磁石のサイズの変更が昆虫の制御に対して有効であったと言える。これらの結果は模型を制御することとは違い生物の完全な位置制御が困難であることを示しており、この原因として昆虫自身が意思を持って行動しているためであると考えている。

## 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。さらに日々の研究活動から学内・学外の発表時など丁寧かつ熱心な指導をしていただきましたこと、心より深謝いたします。

またケンブリッジ大学で1か月間の研究活動を行う機会を2年にわたりいただき、ご指導ご助言をいただいたケンブリッジ大学、動物学科、動物飛行グループのCharlie Ellington教授並びに動物飛行グループの方々や実験方法に関して助言をいただいたWalter Federle博士並びに昆虫生体力学グループの方々には厚く御礼申し上げます。そして学内の発表時や普段の講義等で多くご指導をいただいた知能機械工学科の皆様や、実験装置製作等でお世話になったモノづくりセンターの方々にも感謝の意を表します。

平成21年度より3年間にわたり本研究室では多くの大学院生や学部生にお世話になりました。まず、他の班でありながら大学院平成21年度修了生の柴田光紀氏、平成22年度修了生の根本理那氏には研究の進め方から論文の書き方、研究に対する姿勢など様々な指導をしていただきました。ここに感謝の意を表します。また、私が学部4年生の時に1年間ともに研究活動を行なった平成21年度卒業生の皆さんには実験等で協力や助言をしていただき、特に本研究室の学部4年生のときから大学院生までの同輩である山本清貴君には実験装置製作の際、機械加工全般を協力していただきました。さらに先輩としては至らない点があったとは思いますが、平成22年度卒業生の溝口由華さんをはじめ後輩にあたる平成22年度、平成23年度卒業生の方々には研究を進めるにあたり、多くの協力をしていただきました。特に平成23年度卒業生である佐藤亮太君とは1年間ともに研究活動を行ないました。そのほか、学部生、大学院生時の同輩の方々とは、ともに多くの時間を過ごすことで充実した生活を過ごすことができたと思います。最後に今まで多くの支援をしていただいた家族に心から感謝いたします。

本論文を作成するにあたり関わった皆様、本当にありがとうございました。

## 研究業績

- [1] 松永龍太, 河村良行, Gao Yanjia, Charlie Ellington: “磁力制御による昆虫飛翔実験装置の開発” 日本機械学会 2011 年度年次大会, 東京, 9 月, 2011.
- [2] Summer research program at the Department of Zoology, University of Cambridge 参加, (Supervisor: Prof. Charlie Ellington), 8/16-9/17, 2010
- [3] Summer research program at the Department of Zoology, University of Cambridge 参加, (Supervisor: Prof. Charlie Ellington) , 8/7-9/4, 2011

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] 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), pp. 13-19.
- [3] James Michael Rex Bullock, “Biomechanics of the Fibrillar Adhesive System in Insects”, Cambridge, Academic dissertation (2011).
- [4] 黒田 貴, 岡永 怜, “小型飛翔体における風洞内制御の高度化”, 平成 22 年度卒業論文, 福岡工業大学 知能機械工学科.

# 付録

## 1. 作成した実験プログラム

1.1 赤外LEDセンサ式磁力制御装置用プログラム (C++)

1.2 CCD カメラ式磁力制御装置用プログラム (Ladder)

## 2. 装置の海外輸出入のためのカルネ等の書類

2.1 カルネ手帳(コピー)

2.2 安全保障輸出管理チェックリスト

## 3. 学外発表資料

3.1 日本機械学会 2011 年度年次大会 予稿

3.2 ケンブリッジ大学での研究報告書