

はじめに  
バイオミメティクスによる制御  
内部モデルによる習熟メカニズム  
提案手法  
進捗  
まとめ

# なぞり運動における習熟メカニズムの バイオミメティクスの応用

大森 一輝

富山県立大学 情報基盤工学講座  
t915015@st.pu-toyama.ac.jp

May 31, 2022

# 1.1 本研究の背景

2/19

## 背景

- ・近年、バイオミメティクスといわれる科学技術が発展してきている。
- ・主に昆虫や動物、植物に関しての模倣が主に行われていて、人間に関しての模倣は少ないのが現状である。



図 1: バイオミメティクスの例

# 1.2 本研究の概要

## 目的

- ・人間の習熟メカニズムを解明し, 工学的に応用する.
- ・なぞり運動実験で取得した様々なデータを用いて, インピーダンスパラメータである腕の慣性, 粘性, 剛性行列を算出する.
- ・算出したインピーダンスパラメータを用いて, 内部モデルの信頼度を算出する.

## 鏡映描写課題

鏡に映った自分の手の像を見ながら図形をペンでなぞる課題.

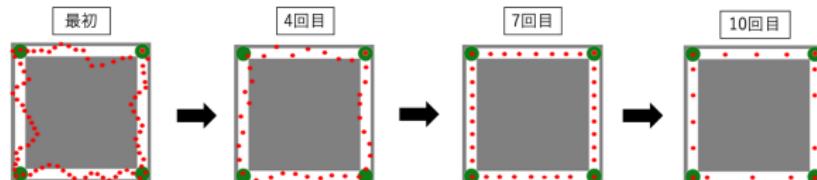


図 2: 鏡映描写課題

はじめに

バイオミメティクスによる制御

内部モデルによる  
習熟メカニズム

提案手法

進捗

まとめ

## 2.1 知覚運動学習と心理学実験

4/19

### 知覚運動学習

- ・運動学習とは、「運動学習とは熟成した行動を作り出す能力における比較的永続した変化へと続く練習もしくは経験に関連する一連の過程」と定義されている。
- ・運動学習とは、どのように関節を動かせば効率良く運動ができるか、などといった知識を得ただけでは運動スキルを習得することはできなく、実際に効率良く運動させることができない限り"運動学習した"とはいっていいことがない。

### *PsychoPy* による心理学実験

- ・PC を使って心理学実験を行うためのツール。
- ・刺激画像の表示時間の指定をしたり、刺激画像が表示されてからのボタンを押すまでの反応時間を記録するといったことができる。

はじめに

バイオミメティクスによる制御

内部モデルによる習熟メカニズム

提案手法

進捗

まとめ

## 2.2 人間性御者の数学モデル

人間の推定機能がカルマンフィルタの情報処理機構に非常によく似た傾向を示す。

人間の推定機能の大きな特徴として、人間は過去の値、特に直前の変化率が大きな情報源として推定していることが明らかになっている。

目標点が特定の傾向を持って変化する場合は推定も良いが、推定精度が低下してしまう<sup>1</sup>。

はじめに

バイオミメティクスによる制御

内部モデルによる  
習熟メカニズム

提案手法

進捗

まとめ

### 実験の流れ

- 1 : 目標点としてsin波を基本とし、外乱を加えたものを実験対象者に提示する。
- 2 : 実験対象者にあらかじめ目標点の一部を観測させる。
- 3 : それを基に実験対象者は次の点を推定していく。
- 4 : 対象者ごとに外乱である分散を変更させる。
- 5 : この試行を繰り返し、人間の推定機能とカルマンフィルタによるモデルを比較する。

図 3: 実験の流れ

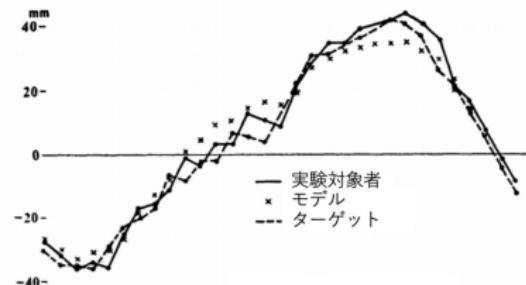


図 4: 刺激・人間御制者・モデル結果の比較 [1]

<sup>1</sup>長町 三生, 畠 正二, 秀衡美代次, 中村 正樹, 田辺 万巳, “カルマンフィルタと人間の推定機能の比較に関する研究”, 人間工学, Vol. 14, No. 3, pp.133-138, 1978.

## 2.3 インピーダンス制御とインピーダンス

対象物に接触しているマニピュレーターの運動方程式は以下である。

$$\mathbf{M}(\theta)\ddot{\theta} + \mathbf{h}(\theta, \dot{\theta}) + \mathbf{g}(\theta) = \boldsymbol{\tau} - \mathbf{J}^T(\theta)\mathbf{F}_{int}$$

$\mathbf{F}_{int}$  は  $\mathbf{F}_{int} = \mathbf{M}_e\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{B}_e\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}_e(\mathbf{X} - \mathbf{X}_e)$  のようにモデル化できる。  
非線形補償

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{h}(\theta, \dot{\theta}) + \mathbf{g}(\theta) + \mathbf{J}^T(\theta)\mathbf{F}_{int} + \mathbf{M}(\theta)\mathbf{J}^{-1}(\theta)[\mathbf{F}_{act} - \dot{\mathbf{J}}(\theta)\dot{\theta}]$$

を行うとダイナミクスは  $\ddot{\mathbf{X}} = \mathbf{F}_{act}$  のように単純化される。  
目標手先インピーダンスは、作業空間上で以下で記述できるものとする。

$$\mathbf{M}_{dd}\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{B}_{dd}\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}_{dd}\mathbf{X} = \mathbf{F}_d - \mathbf{F}_{int}$$

目標インピーダンスを実現する制御入力  $\mathbf{F}_{act}$  は、以下となる。

$$\mathbf{F}_{act} = -\mathbf{M}_d^{-1}(\mathbf{B}_{dd}\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}_{dd}\mathbf{X}) + \mathbf{M}_d^{-1}(\mathbf{F}_d - \mathbf{F}_{int}) + \ddot{\mathbf{X}}_d$$

$\mathbf{M}(\theta) \in \Re^{n \times n}$ : 慣性行列,  $\mathbf{h}(\theta, \dot{\theta}) \in \Re^{n \times 1}$ : コリオリ力・遠心力,  $\mathbf{g}(\theta) \in \Re^{n \times 1}$ : 重力トルク,  $\theta$ : 関節角度,  $\boldsymbol{\tau} \in \Re^{n \times 1}$ : 関節トルク,  $\mathbf{J}(\theta) \in \Re^{m \times n}$ : ヤコビ行列,  $\mathbf{F}_{int} \in \Re^{n \times 1}$ : 手先に作用する力,  $\mathbf{M}_e \in \Re^{m \times m}$ : 慣性,  $\mathbf{B}_e \in \Re^{m \times m}$ : 粘性,  $\mathbf{K}_e \in \Re^{m \times m}$ : 剛性,  $\mathbf{X} \in \Re^{m \times 1}$ : 手先位置,  $\mathbf{X}_e \in \Re^{m \times 1}$ : 対象物の平衡点の位置,  $\mathbf{F}_{act} \in \Re^{m \times 1}$ : 作業空間で表現した制御入力,  $\mathbf{M}_d \in \Re^{m \times m}$ : 目標慣性行列,  $\mathbf{B}_d \in \Re^{m \times m}$ : 目標粘性行列,  $\mathbf{K}_d \in \Re^{m \times m}$ : 目標剛性行列,  $d\mathbf{X} = \mathbf{X} - \mathbf{X}_d$  とし,  $\mathbf{X}_d \in \Re^{m \times 1}$ : 目標軌道,  $\mathbf{F}_d \in \Re^{m \times 1}$  は目標手先力を表す。

## 3.1 内部モデルの獲得

7/19

内部モデルを獲得する運動学習のスキームとして、フィードバック誤差学習というものがある<sup>2</sup>。

はじめに

バイオミメティクスによる制御

内部モデルによる習熟メカニズム

提案手法

進捗

まとめ

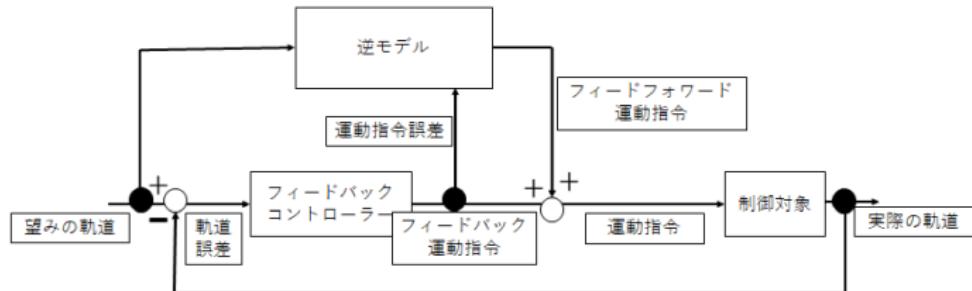


図 5: フィードバック誤差学習

### フィードバック誤差学習

- ・誤差情報をフィードバックすることによって内部モデルが修正され、徐々に正確なフィードフォワード運動指令を出力する内部モデルが生成される。
- ・運動系の逆モデルを脳が学習し、フィードバックのみでは困難な動作をフィードバックフォワードで実現する仕組みである。

<sup>2</sup>川人 光男, “小脳の内部モデルと運動学習”, 計測と制御, Vol. 33, No. 4, pp.296-303, 1994.

## 3.2 内部モデルの信頼度

「内部モデルの信頼度」とは、内部モデルの適応の進み具合をシステム内部で評価したものである。

人間は、目標行動に慣れるに従って身体の動きを大きくしていく。

このように、慣れに応じて適切な運動指令を生成するためには、内部モデルの適応進み具合を評価する必要がある<sup>3</sup>。

$$\begin{aligned}\pi_t(\xi) &= \frac{P(d_t|\xi)\pi_{t-1}(\xi)}{P(d_t)} \\ &= \frac{P(d_t|\xi; \mathbf{x}_t, m_t)}{\int P(d_t|\xi'; \mathbf{x}_t, m_t)\pi_{t-1}(\xi')d\xi'} \pi_{t-1}(\xi)\end{aligned}$$

$\mathbf{x}_t$ : 身体の位置,  $m_t$ : 運動指令,  $d_t$ : 身体の移動量,  
 $\pi_{t-1}(\xi)$ : パラメータに関する先驗分布,

$\pi_t(\xi)$ : 更新した事後分布,  $\xi$ : パラメータベクトル

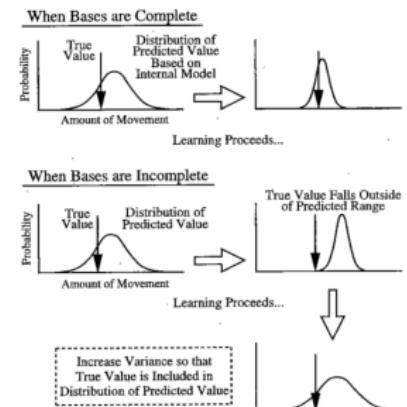


図 6: 内部モデルの分散の制御

<sup>3</sup>阪口 豊, “内部モデルの信頼度に基づく運動計画アルゴリズム”, 電子情報通信学会論文誌, D-II, Vol. J79-D-II, No.2, pp.248-256, 1996.

### 3.3 カルマンフィルタによる状態推定

9/19

カルマンフィルタは、状態空間モデルにおいて、内部の見えない「状態」を効率的に推定するための計算手法のこと。

状態方程式:  $\mathbf{x}_k = F_k \mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{u}_k + G_k \mathbf{w}_k$

観測方程式:  $\mathbf{z}_k = H_k \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k$

予測

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} = F_k \hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1} + \mathbf{u}_k$$

$$P_{k|k-1} = F_k P_{k-1|k-1} F_k^T + G_k Q_k G_k^T$$

更新

$$\mathbf{e}_k = \mathbf{z}_k - H_k \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$$

$$S_k = R_k + H_k P_{k|k-1} H_k^T$$

$$K_k = P_{k|k-1} H_k^T S_k^{-1}$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k} = \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} + K_k \mathbf{e}_k$$

$$P_{k|k} = (\mathbf{I} - K_k H_k) P_{k|k-1}$$

$F_k$ : 時間遷移に関する線形モデル,  $\mathbf{x}_k$ : 状態ベクトル,  $\mathbf{u}_k$ : 制御入力,  $G_k$ : 雑音モデルの行列,  $\mathbf{w}_k$ : 雑音,  $H_k$ : 観測モデル,  $\mathbf{v}_k$ : 雑音,  $\mathbf{e}_k$ : 観測残差,  $S_k$ : 観測残差の共分散,  $K_k$ : 最適カルマンゲイン,  $\hat{\mathbf{x}}$ : 状態の予測推定値,  $P_k$ : 予測誤差行列である。

はじめに

バイオミメティクスによる制御

内部モデルによる習熟メカニズム

提案手法

進捗

まとめ

## 4.1 習熟の検出方法

はじめに

バイオミメティク  
スによる制御

内部モデルによる  
習熟メカニズム

提案手法

進捗

まとめ

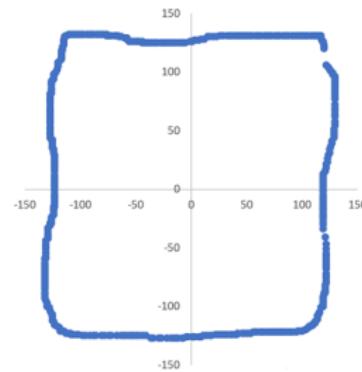


図7 なぞり書きの軌跡

座標を取得できれば以下の式から速度, 加速度を取得できる.

$$\begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ \dot{x}_k \\ \dot{y}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta & 0 & \frac{\Delta^2}{2} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta & 0 & \frac{\Delta^2}{2} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \Delta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \Delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{k-1} \\ y_{k-1} \\ \dot{x}_{k-1} \\ \dot{y}_{k-1} \\ \ddot{x}_{k-1} \\ \ddot{y}_{k-1} \end{bmatrix}$$

$\Delta$ : データの取得間隔時間,  $x, y$ : 位置,  $\dot{x}, \dot{y}$ : 速度,  $\ddot{x}, \ddot{y}$ : 加速度 である.

## 4.2 内部モデルの信頼度の算出

はじめに

バイオミメティクスによる制御

内部モデルによる  
習熟メカニズム

提案手法

進捗

まとめ

条件付き確率密度関数は以下の式である。

$$p(\mathbf{x}|\mathbf{y}) = \frac{p(\mathbf{y}|\mathbf{x})p(\mathbf{x})}{p(\mathbf{y})} = \frac{p(\mathbf{xy})}{\int p(\mathbf{xy})d\mathbf{x}}$$

ここで,  $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ : 状態ベクトル,  $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^{l \times 1}$ : 観測ベクトルである。

$$p(\mathbf{x}) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^n |\mathbf{M}|}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} (\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}})^T \mathbf{M}^{-1} (\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}}) \right\}$$

$$p(\mathbf{y}|\mathbf{x}) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^m |\mathbf{W}|}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} (\mathbf{y} - (\mathbf{Cx} + \bar{\mathbf{w}}))^T \mathbf{W}^{-1} (\mathbf{y} - (\mathbf{Cx} + \bar{\mathbf{w}})) \right\}$$

$$p(\mathbf{y}) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^m |\mathbf{W} + \mathbf{CMC}^T|}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} (\mathbf{y} - \bar{\mathbf{y}})^T (\mathbf{W} + \mathbf{CMC}^T)^{-1} (\mathbf{y} - \bar{\mathbf{y}}) \right\}$$

ここで,  $\bar{\mathbf{x}} \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ :  $\mathbf{x}$  の予測値,  $\bar{\mathbf{y}} \in \mathbb{R}^{l \times 1}$ :  $\mathbf{y}$  の予測値,  $\bar{\mathbf{w}} \in \mathbb{R}^{p \times 1}$ : 観測ノイズ,

$\mathbf{W} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ : 共分散,  $\mathbf{C} \in \mathbb{R}^{n \times p}$ : 観測行列,  $\mathbf{M} \in \mathbb{R}^{m \times m}$ : 共分散行列である。

条件付き確率密度関数に内部モデルの信頼度  $\beta$  を考慮すると

$$p(\mathbf{x}|\mathbf{y})^\beta = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^n \left| \frac{\mathbf{P}}{\beta} \right|}} \exp \left[ -\frac{1}{2} (\mathbf{x} - \mathbf{z})^T \left( \frac{\mathbf{P}}{\beta} \right)^{-1} (\mathbf{x} - \mathbf{z}) \right]$$

$$\mathbf{z} = \bar{\mathbf{x}} + \mathbf{PC}^T \mathbf{W}^{-1} (\mathbf{y} - \bar{\mathbf{y}}), \quad \beta = \frac{|\mathbf{P}_k|}{|\mathbf{P}|}$$

## 4.3 インピーダンス推定

はじめに  
バイオミメティクスによる制御  
内部モデルによる  
習熟メカニズム  
提案手法  
進捗  
まとめ

$$\mathbf{M}_d^{-1} \mathbf{K}_d = \begin{bmatrix} a1 & a2 \\ a3 & a4 \end{bmatrix}, \mathbf{M}_d^{-1} \mathbf{B}_d = \begin{bmatrix} b1 & b2 \\ b3 & b4 \end{bmatrix}, \mathbf{M}_d^{-1} = \begin{bmatrix} c1 & 0 \\ 0 & c2 \end{bmatrix}$$

と表す.  $\mathbf{M}_d$ : 慣性行列,  $\mathbf{B}_d$ : 粘性行列,  $\mathbf{K}_d$ : 剛性行列 である.

$$\begin{aligned}\ddot{x}_{t+1} &= a1(x_{t+1} - x_t) + a2(y_{t+1} - y_t) + b1(-\dot{x}_t) + b2(-\dot{y}_t) \\ \ddot{y}_{t+1} &= a3(x_{t+1} - x_t) + a4(y_{t+1} - y_t) + b3(-\dot{x}_t) + b4(-\dot{y}_t)\end{aligned}$$

以上の式を展開した式をそれぞれ回帰分析にかけ, 偏回帰係数を求める.  
回帰分析で得られる切片をそれぞれ  $s_x, s_y$  とし, 回帰モデルで予測される加速度をそれぞれ  $\ddot{x}_f, \ddot{y}_f$  とすると  $c1, c2$  を求める指揮は以下になる.

$$\begin{aligned}c1 &= s_x + (\ddot{x}_{t+1} - \ddot{x}_f) \\ c2 &= s_y + (\ddot{y}_{t+1} - \ddot{y}_f)\end{aligned}$$

求めた  $c1, c2$  と偏回帰係数を用いて慣性行列, 粘性行列, 剛性行列を算出する.

# 5.1 研究の進捗

13/19

## 新規性

インピーダンス算出の際の負の値について考えた.

## 課題

- ・インピーダンスの計算アルゴリズムの改善.

## 考察

インピーダンスが負の値を取ることについて、速度と加速度の計算を改め、時間の変化量を新たに取り入れて計算した。それでも負の値は出るので、力がそれぞれの軸に対して逆方向に加わるときに負の値をとるのではないかと考える。

## 考察 2

数式を改善しアルゴリズムを修正する。

はじめに

バイオミメティクスによる制御

内部モデルによる  
習熟メカニズム

提案手法

進捗

まとめ

## 5.2 速度, 加速度

### 速度, 加速度の計算方法

#### 速度

$$\Delta v_t = \frac{x_{t+1} - x_t}{\Delta t}$$

#### 加速度

$$\Delta a_t = \frac{v_{t+1} - v_t}{\Delta t}$$

#### 時間変化

$$\Delta t_n = t_{n+1} - t_n \quad (n \text{ はデータ数とする。})$$

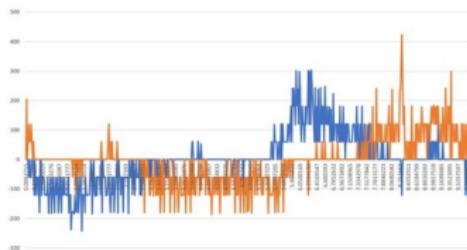


図8 速度の推移

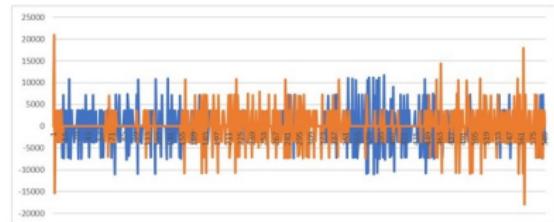


図9 加速度の推移

はじめに

バイオミメティクスによる制御

内部モデルによる  
習熟メカニズム

提案手法

進捗

まとめ

## 5.3 インピーダンス

### 慣性

トルク (角運動量) は慣性モーメントと角加速度の比例関係にある。トルクや角加速度が負の値を取ることは十分にありうるが慣性モーメントが負の値を取ることはない。

### 粘性

物体は滑る運動をする際、必ず摩擦力が生じる。なのでその力に抗うための力積が必要となる。単位平方メートルあたりの力積を示したものが粘性行列である。なので粘性行列が負であるならば、物体は自ら滑りだしてしまう物理法則に反する運動を行う。

### 剛性

剛性はその物体の曲げやすさを示す。単位平方メートルあたりに外部から力を加えることで物体は反力を持つ。そのため剛性が負になると物体は自ら反り返るような運動をし、物理法則に反する。

はじめに

バイオミメティクスによる制御

内部モデルによる  
習熟メカニズム

提案手法

進捗

まとめ

## 5.4 数式の修正

はじめに

バイオミメティクスによる制御

内部モデルによる  
習熟メカニズム

提案手法

進捗

まとめ

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_{t+1} \\ \ddot{y}_{t+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a1 & a2 \\ a3 & a4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_d - \mathbf{x}_t \\ \mathbf{y}_d - \mathbf{y}_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b1 & b2 \\ b3 & b4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}_d - \dot{\mathbf{x}}_t \\ \dot{\mathbf{y}}_d - \dot{\mathbf{y}}_t \end{bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{x}}_d \\ \ddot{\mathbf{y}}_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c1 & c2 \\ c3 & c4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{F}_x \\ \mathbf{F}_y \end{bmatrix}$$

### 変更点

- これまで目標速度  $\dot{x}_d$  を 0 として設定していたがこれを  $\dot{x}_{t-1}$  とする。
- $Fx$  と  $Fy$  はこれまで 1 としていたが力のかかり方が正の場合と負の場合とに分け、正のときは 1、負のときは  $-1$  とする。

### 変更の結果

以上の操作により各インピーダンスの対角成分に負の値は出なくなった。  
インピーダンスの算出方法はこれまでと同様に最小二乗法を用いて重回帰分析の偏回帰係数により求める。

# 5.5 実験方法

## 実験方法

正方形のなぞり運動を行う。このとき、上下が反転している設定で実験を進める。

試行回数は 30 回。被験者は現段階で 5 人。これから増やしていく予定。  
できれば年齢性別ばらばらで様々な人のデータが欲しい。

はじめに

バイオミメティクスによる制御

内部モデルによる習熟メカニズム

提案手法

進捗

まとめ

# 5.6 実験結果

## 誤差・信頼度・誤差の合計

誤差は回数が増していくほど増えている。これは課題に慣れていき速くできるようになる分、相対的に誤差が大きくなってしまうものと考える。なので誤差の合計は回数が増していくほどに少なくなる。  
信頼度は回数を増やしていくほど上がっていた。

## 慣性・粘性・剛性

局地的に力がかかっているところがあった。  
30回行うと途中から集中力が切れてくる。そのため後半で力んでしまったりミスしてしまうことがあると推測。

はじめに

バイオミメティクスによる制御

内部モデルによる  
習熟メカニズム

提案手法

進捗

まとめ

# まとめ

## 研究の内容

- ・知的運動学習を *PsychoPy* を用いて心理学実験を行った.
- ・なぞり書き運動のインピーダンスを算出し, 人間の習熟メカニズムを解明した.

## 今後の展開

- ・足裏センサを用いた歩行実験について研究を行う可能性.

## 現在行っていること

- ・足裏センサの調達
- ・足裏センサを用いた先行研究の詮索
- ・様々な人のなぞり運動データ解析
- ・卒業論文の作製

はじめに

バイオミメティクスによる制御

内部モデルによる習熟メカニズム

提案手法

進捗

まとめ