

精神疾患患者を対象とした不安障害を 緩和させる機械学習を用いた 足元センシングによる歩行支援

大森 一輝

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

January 17, 2023

はじめに

運動学習における
脳の学習とイン
ピーダンスの関連

足裏圧センサデバ
イス

提案手法

数値実験および実
験結果

進捗

まとめ

記号一覧

1 本研究の背景と目的

2/22

背景

- ・精神疾患患者の不安感

うつ病や統合失調症の患者が抱く不安，心配

→ それにより農場などの不安定な足場で歩くことを恐れてしまう．

うつ病や統合失調症の患者は不安に感じる事がよくあるため，歩行が困難なケースがある．例えば土壌が不安定で歩きにくい場所では，その歩きにくさから大きな不安を感じ心のバランスが乱れ精神バランスが崩れてしまい歩かなくなってしまう．

目的

- ・精神疾患患者の不安障害を緩和させることを目的とする．
- ・安価なセンサで必要なセンシングができることを示し、実用化を目指す．

はじめに

運動学習における
脳の学習とイン
ピーダンスの関連

足裏圧センサデバ
イス

提案手法

数値実験および実
験結果

進捗

まとめ

記号一覧

概要

足元センサデバイスを開発し、機械学習を用いて歩行時における不安障害を緩和させるコーピングを行う。

- ・ ショッカクシューズと自作デバイスの比較。

→ 自作デバイスの有意性と実用性を示す。

- ・ 人間の内部モデルを数学的に算出する。

→ 拡張カルマンフィルタを用いて足の状態推定を行う。

- ・ ニューラルネットワークによる機械学習。

→ 機械学習による行動識別、および歩行状態の危険度を算出する。

足元センサデバイスは患者の足首に装着するデバイス部と靴の中に入れるインソール部の二つから構成されており、これを用いてデータ分析を行う。

2.1 内部モデルの作成と獲得

4/22

内部モデル

内部モデルとは、外界の仕組みを脳の内部でシミュレーション・模倣する神経機構のことであり、この内部モデルにより人間は運動する際にシミュレーションを行い予測する。

PsychoPy による心理実験

刺激画像の表示時間の指定ができたり、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。本実験では上下反転させる設定で星形をなぞる試行をした。

カルマンフィルタ

カルマンフィルタとは、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である。

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

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

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

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

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

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

はじめに

運動学習における
脳の学習とイン
ピーダンスの関連

足裏圧センサデバ
イス

提案手法

数値実験および実
験結果

進捗

まとめ

記号一覧

2.1 内部モデルの作成と獲得

5/22

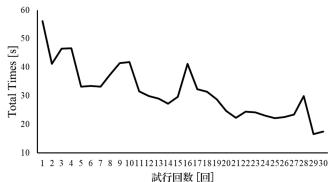


図 1: 試行に要した時間

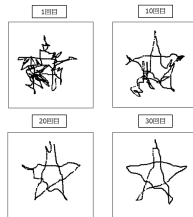


図 2: なぞり運動の軌跡

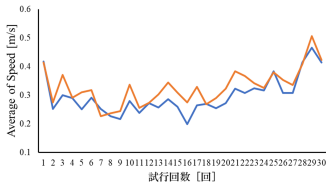


図 3: 平均速度の推移

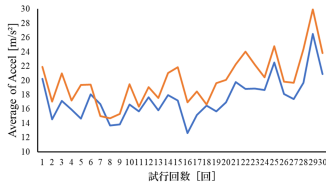


図 4: 平均加速度の推移

今回、20 代女性に実験を行っていただき、そのデータをもとに解析を行った。
30 回の試行を進める中で脳が運動を覚えて動き方を理解していくため、試行回数が増すごとに誤差が減少していき、速度と加速度が上昇することは運動学習が進んだといえる。

はじめに

運動学習における
脳の学習とイン
ピーダンスの関連

足裏圧センサデバ
イス

提案手法

数値実験および実
験結果

進捗

まとめ

記号一覧

2.2 インピーダンス推定

6/22

目標インピーダンスを実現する制御入力 F_{act} は、以下となる。

$$F_{act} = -M_d^{-1}(B_d \dot{X} + K_d X) + M_d^{-1}(F_d - F_{int}) + \ddot{X}_d$$

今回用いる速度，加速度の式は，時間変化を $\Delta t_n = t_{n+1} - t_n$ として以下のように書き表す。

$$\dot{x}_{n+1} = \frac{x_{n+1} - x_n}{\Delta t_n} \quad \ddot{x}_{n+1} = \frac{\dot{x}_{n+1} - \dot{x}_n}{\Delta t_n}$$

$M_d^{-1}K_d$, $M_d^{-1}B_d$, M_d^{-1} をそれぞれ

$$M_d^{-1}K_d = \begin{bmatrix} a1 & a2 \\ a3 & a4 \end{bmatrix} \quad M_d^{-1}B_d = \begin{bmatrix} b1 & b2 \\ b3 & b4 \end{bmatrix} \quad M_d^{-1} = \begin{bmatrix} c1 & 0 \\ 0 & c2 \end{bmatrix}$$

と表し， F_{act} を展開すると式 (1) および (2) となる。

$$\ddot{x}_{n+1} = a1(x_{n+1} - x_n) + a2(y_{n+1} - y_n) + b1(\dot{x}_{n-1} - \dot{x}_n) + b2(\dot{y}_{n-1} - \dot{y}_n) \quad (1)$$

$$\ddot{y}_{n+1} = a3(x_{n+1} - x_n) + a4(y_{n+1} - y_n) + b3(\dot{x}_{n-1} - \dot{x}_n) + b4(\dot{y}_{n-1} - \dot{y}_n) \quad (2)$$

上式を回帰分析にかける。このとき，目的変数を \ddot{x}_{n+1} , \ddot{y}_{n+1} ，説明変数を $x_{n+1} - x_t$, $y_{n+1} - y_n$, $\dot{x}_{n-1} - \dot{x}_n$, $\dot{y}_{n-1} - \dot{y}_n$ とし，偏回帰係数である $a1$, $a2$, $a3$, $a4$, $b1$, $b2$, $b3$, $b4$ を求める。また，取得したモデル式で予測される加速度をそれぞれ (1) の方は \ddot{x}_f ，(2) の方は \ddot{y}_f と表し偏回帰係数を用いて $c1$, $c2$ を求める。

$$\pm c1 = \pm \ddot{x}_{n+1} - \ddot{x}_f$$

$$\pm c2 = \pm \ddot{y}_{n+1} - \ddot{y}_f$$

取得した偏回帰係数から $M_d^{-1}K_d$, $M_d^{-1}B_d$ の両方ともに M_d をかけることで K_d , B_d を取得する。算出した M_d , K_d , B_d をそれぞれ行列で表す。

はじめに

運動学習における
脳の学習とイン
ピーダンスの関連

足裏圧センサデバ
イス

提案手法

数値実験および実
験結果

進捗

まとめ

記号一覧

2.2 インピーダンス推定

7/22

$$M_d = \begin{bmatrix} M_x & 0 \\ 0 & M_y \end{bmatrix} K_d = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} \\ K_{yx} & K_{yy} \end{bmatrix} B_d = \begin{bmatrix} B_{xx} & B_{xy} \\ B_{yx} & B_{yy} \end{bmatrix}$$

はじめに

運動学習における
脳の学習とイン
ピーダンスの関連

足裏圧センサデバ
イス

提案手法

数値実験および実
験結果

進捗

まとめ

記号一覧

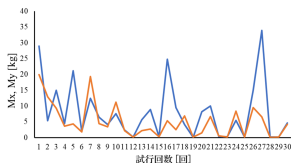


図 5: 慣性行列

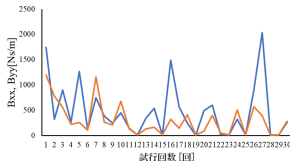


図 6: 粘性行列

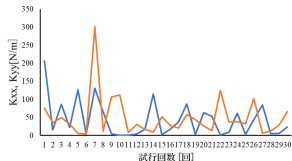


図 7: 剛性行列

図 5 と図 6, 図 7 から, 各インピーダンスパラメータについて, 試行回数を重ねるごとに数値がだんだんと小さくなっている傾向にある. またどのグラフも, 1 回目に数値が高く出ており力をかけてなぞり運動をしていることがわかる. これは初めて行う動作に対し, まずはゆっくりとなぞることで動き方を理解しているためと考える. 2 回目には数値が急激に下がっているので動き方を理解してスムーズに運動できていることがうかがえる. そこからは強弱の波を繰り返しながら運動を進めている.

2.3 内部モデルの信頼度

8/22

内部モデルの信頼度

予測の確実性を扱うには、内部モデルの「値」だけでなくその「確かさ」を同時に表せるようなモデルの記述が必要であり、そのような記述法として確率モデルを用いる。確率モデルを用いたとき、内部モデルの「確かさ」はパラメータ分布の広がりとして表されるので、「確かさ」を表す指標として内部モデルの分散の逆数を用い、これを「内部モデルの信頼度」と呼ぶ。

条件付き確率密度関数は以下の式である。

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

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

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

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

条件付き確率密度関数に内部モデルの信頼度 β を考慮する。

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

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

はじめに

運動学習における
脳の学習とイン
ピーダンスの関連

足裏圧センサデバ
イス

提案手法

数値実験および実
験結果

進捗

まとめ

記号一覧

2.3 内部モデルの信頼度

9/22

はじめに

運動学習における
脳の学習とイン
ピーダンスの関連

足裏圧センサデバ
イス

提案手法

数値実験および実
験結果

進捗

まとめ

記号一覧

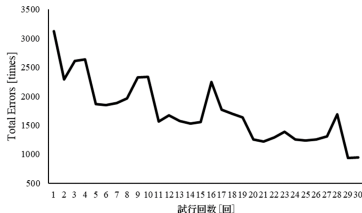


図 8: 誤差の合計

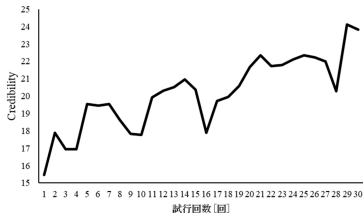


図 9: 内部モデルの信頼度の評価値

図 8 → 1 回の試行で星形の枠をはみ出してしまった誤差の回数.

図 9 → 内部モデルの信頼度を算出し、試行回数に応じて出力された値.

図 1, 図 8 より、試行回数が増えていくほど誤差が減っており同時に試行に要する時間も減っている. 図 3 より星形を一周なぞる平均の速度が上がっていることから、1 回の試行を速く行えるための運動の方法を脳が学習していることがわかる. さらに図 9 から内部モデルの信頼度も上昇傾向にあるので、このことから脳が運動のシミュレーションを高い精度で行えていることを示している.

3.1 足裏センサの研究

10/22

下山らは小型・薄型の 3 軸力センサを靴のインソール部に複数埋め込み、計測データを無線で送信するシステムを提案した。これにより、歩行などの運動に影響を与えることなく、なおかつ計測環境に縛られない、足裏部の 3 軸応力分布計測システムの実証を行った。このセンサデバイスを用いて通常歩行時と階段昇降時および傾斜路歩行時の比較を行った。

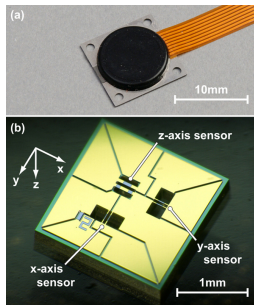


図 10: センサチップ

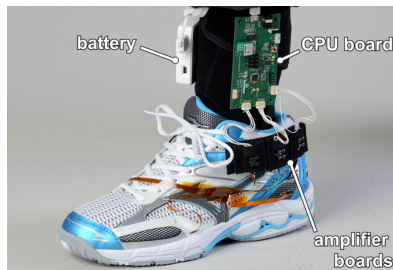


図 11: センサデバイス

はじめに

運動学習における
脳の学習とイン
ピーダンスの関連

足裏圧センサデバ
イス

提案手法

数値実験および実
験結果

進捗

まとめ

記号一覧

3.2 ショッカクシューズと自作センサ

11/22

ショッカクシューズ

- ・タッチエンス独自の 6 軸触覚センサ「ショッカクチップ 6DoF」を内蔵したセンサシューズ (図 12, 図 13 参照)。
- ・母指球, 子指球, 踵の直下に 6 軸触覚センサが 1 個ずつと土踏まず付近に 3 軸加速度, 3 軸ジャイロセンサが 1 個の計 4 個のセンサが組み込まれている。
- ・足運動データは専用の WEB サーバにアップロードされ, 独自 AI にて処理を行うことで重心や 3 軸情報足運動解析データ (地面垂直反力, 前後方向せん断力, 左右方向せん断力, 足高さ) を算出する。足運動データは 20msec(50Hz) 周期で取得できる。

6DoF

ショッカクチップは 6 軸の高感度触覚センサを $9 \times 9 \times 5\text{mm}$ に納めた, 最小の多軸触覚センサである。
センサコア部分に, MEMS を用いており, これまでにないほどの小型化を実現している。



図 12: ショッカクシューズ

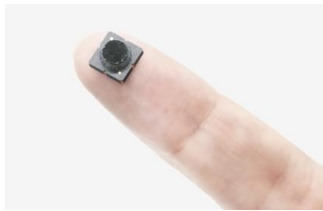


図 13: ショッカクチップ 6DoF

はじめに

運動学習における
脳の学習とイン
ピーダンスの関連

足裏圧センサデバ
イス

提案手法

数値実験および実
験結果

進捗

まとめ

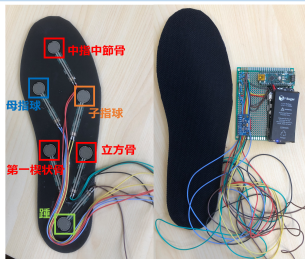
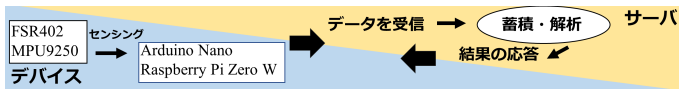
記号一覧

3.2 ショックシューズと自作センサ

12/22

自作センサ

- ・FSR402 圧力センサを 6 個設置. 位置はショックシューズと同じ場所に
加えて中指中節骨, 立方骨, 第一楔状骨に配置した.
- ・MPU9250 を用いて加速度と角速度をセンシングし, 拡張カルマンフ
ィルタを用いて姿勢状態推定を行う.



- ・圧力センサ6個搭載
- ・デバイスはゴムバンドで固定
- ・インソールは作成時に任意のサイズに調整可能
- ・バッテリー駆動約4時間



図 14: 自作センサの概要

はじめに

運動学習における
脳の学習とイン
ピーダンスの関連

足裏圧センサデバ
イス

提案手法

数値実験および実
験結果

進捗

まとめ

記号一覧

3.3 自作センサの有意性

13/22

自作センサデバイスでできること

- ・ 6 個の圧力センサから重心を推定する。

中節骨の圧力を P_1 ，中心からの距離を r_1 ，母指球の圧力を P_2 ，中心からの距離を r_2 ，子指球の圧力を P_3 ，中心からの距離を r_3 ，第一楔状骨の圧力を P_4 ，中心からの距離を r_4 ，立方骨の圧力を P_5 ，中心からの距離を r_5 ，踵の圧力を P_6 ，中心からの距離を r_6 とする。このとき， $r_n^2 = x_n^2 + y_n^2$ となる x_n と y_n が存在し， $r = 0$ はインソールの重心とする。

重心 Gx ， Gy は下式で表す。

$$Gx = \frac{\sum_{n=1}^6 P_n x_n}{\sum_{n=1}^6 P_n} \quad Gy = \frac{\sum_{n=1}^6 P_n y_n}{\sum_{n=1}^6 P_n}$$

- ・ 6 軸 MPU を用いて姿勢状態推定を行う。
拡張カルマンフィルタを用いて足首の姿勢を推定する。
- ・ PiSugar3 によるバッテリーの小型化と持続時間の増加。
ショッカクシューズのバッテリー持続時間はおよそ 30 分ほどであるのに対し，PiSugar3 は 3 から 4 時間であるので長時間の稼働が可能である。
- ・ 履き心地の向上。
ショッカクシューズはセンサが足に当たり，履き心地に若干の違和感を感じた。それと比較し，自作デバイスはセンサをインソールに挟み込むように設計したため足裏に違和感を無くすことに成功した。課題として足首に装着することの仕組みを考える必要がある。

はじめに

運動学習における
脳の学習とイン
ピーダンスの関連

足裏圧センサデバ
イス

提案手法

数値実験および実
験結果

進捗

まとめ

記号一覧

3.3 自作センサの有意性

14/22

拡張カルマンフィルタ

カルマンフィルタは線形モデルに用いられるが、今回は非線形なデータでも解析を行える拡張カルマンフィルタを用いる。

これによって加速度と角速度から姿勢状態推定を行う。

状態方程式: $\mathbf{x}_k = f(\mathbf{x}_{k-1}, \mathbf{u}_k) + \mathbf{w}_k$

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

としたとき、この数式はカルマンフィルタと同じである。この数式をヤコビアンを用いることで非線形である f と h を線形関数に近似する。

$$\mathbf{F}_k = \left. \frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}, \mathbf{u}_k}$$

$$\mathbf{H}_k = \left. \frac{\partial h}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}}$$

予測と更新は通常のカルマンフィルタと同じ式を用いる。

このとき、初期値はともに 0 とする。

有意性

ショッククシューズと比較し、圧力センサの増加、バッテリー駆動時間の増加、履き心地の向上を取り入れることに成功した。

はじめに

運動学習における
脳の学習とイン
ピーダンスの関連

足裏圧センサデバ
イス

提案手法

数値実験および実
験結果

進捗

まとめ

記号一覧

4.1 識別のための機械学習

15/22

機械学習

機械学習の手法はパーセプトロンを用いた．ニューラルネットワークを構築し、最適化アルゴリズム *Adam* で解析する．

教師用データは圧力センサ 6 種類，6 軸センサのデータ 6 種類 (加速度，角速度) が両足で 24 種類，それを行動別に *csv* 形式で保存する形で用意する．

アプリ開発

今回のデバイスを用いるためにショッカクシューズのショッカクアプリを参考にアプリを開発した．

アプリは *LINE Developers* を用いて開発しており，センサデータの解析結果を返す *LINE Bot* の役割を担う．プログラムは *Flask* を用いている．このアプリは主に行動登録，コーピング結果の応答を行う．他にも登録した行動の削除，修正ができる．

はじめに

運動学習における
脳の学習とイン
ピーダンスの関連

足裏圧センサデバ
イス

提案手法

数値実験および実
験結果

進捗

まとめ

記号一覧

4.2 歩行の比較

16/22

今後作成

はじめに

運動学習における
脳の学習とイン
ピーダンスの関連

足裏圧センサデバ
イス

提案手法

数値実験および実
験結果

進捗

まとめ

記号一覧

今後作成

はじめに

運動学習における
脳の学習とイン
ピーダンスの関連

足裏圧センサデバ
イス

提案手法

数値実験および実
験結果

進捗

まとめ

記号一覧

5 数値実験

18/22

はじめに

運動学習における
脳の学習とイン
ピーダンスの関連

足裏圧センサデバ
イス

提案手法

数値実験および実
験結果

進捗

まとめ

記号一覧

やったこと

- *LINEBot* アプリ開発
アプリで起こったバグの修正を行った.
- 本論作成
2.1 を 3 ページ, 2.2 を 4 ページ, 2.3 を 4 ページ, 第 3 章を各節 3 ページずつ書いた.

はじめに

運動学習における
脳の学習とイン
ピーダンスの関連

足裏圧センサデバ
イス

提案手法

数値実験および実
験結果

進捗

まとめ

記号一覧

はじめに

運動学習における
脳の学習とイン
ピーダンスの関連

足裏圧センサデバ
イス

提案手法

数値実験および実
験結果

進捗

まとめ

記号一覧

これまでに起こったバグ

- ・ デバイスがネットワークに接続されており、サーバにデータが蓄積されているにもかかわらず、「デバイスが接続されていません」と *LINE* 上に表示される.
- ・ 誤字を入れてしまったら削除できない.
- ・ プログラムエラー

修正できたこと

- ・ 「デバイスが接続されていません」はデータがサーバに蓄積されているかどうかで判断している. *Linux* 環境で動かすと *Windows* で動かすプログラムの書き方だとミスがあった. そこを直したら正しく動いた.
- ・ 誤字脱字をしてしまった場合でも削除してやり直せる機能を追加した.
- ・ *IndexError* や *TypeError* がまだ直せていない. 今は *TryExcept* で回避している.

進捗

- ・ 卒論第 2 章および第 3 章を書き上げた
- ・ *LINE Bot* の不具合を直した

今後の展開

- ・ バグ処理
- ・ 数値実験の実施
- ・ 本論作成
- ・ 八十住さんへシステムおよび技術継承

はじめに

運動学習における
脳の学習とイン
ピーダンスの関連

足裏圧センサデバ
イス

提案手法

数値実験および実
験結果

進捗

まとめ

記号一覧

$M(\theta) \in \mathbb{R}^{n \times n}$: 慣性行列	$h(\theta, \dot{\theta}) \in \mathbb{R}^{n \times 1}$: コリオリ力・遠心力	$g(\theta) \in \mathbb{R}^{n \times 1}$: 重力トルク
θ : 関節角度	$\tau \in \mathbb{R}^{n \times 1}$: 関節トルク	$J(\theta) \in \mathbb{R}^{m \times n}$: ヤコビ行列
$F_{int} \in \mathbb{R}^{n \times 1}$: 手先に作用する力	$M_e \in \mathbb{R}^{m \times m}$: 慣性	$B_e \in \mathbb{R}^{m \times m}$: 粘性
$K_e \in \mathbb{R}^{m \times m}$: 剛性	$X \in \mathbb{R}^{m \times 1}$: 手先位置	$X_e \in \mathbb{R}^{m \times 1}$: 対象物の平衡点の位置
$F_{act} \in \mathbb{R}^{m \times 1}$: 作業空間で表現した制御入力	$M_d \in \mathbb{R}^{m \times m}$: 目標慣性行列	$B_d \in \mathbb{R}^{m \times m}$: 目標粘性行列
$K_d \in \mathbb{R}^{m \times m}$: 目標剛性行列	$X_d \in \mathbb{R}^{m \times 1}$: 目標軌道	$F_d \in \mathbb{R}^{m \times 1}$: 目標手先力
$dX = X - X_d$	\dot{x} : 速度	\ddot{x} : 加速度
$x \in \mathbb{R}^{n \times 1}$: 状態ベクトル	$y \in \mathbb{R}^{l \times 1}$: 観測ベクトル	$\bar{x} \in \mathbb{R}^{n \times 1}$: x の予測値
$\bar{y} \in \mathbb{R}^{l \times 1}$: y の予測値	$\bar{w} \in \mathbb{R}^{p \times 1}$: 観測ノイズ	$W \in \mathbb{R}^{n \times n}$: 共分散
$C \in \mathbb{R}^{n \times p}$: 観測行列	$M \in \mathbb{R}^{m \times m}$: 共分散行列	P_k : カルマンフィルタの P_k

はじめに

運動学習における
脳の学習とイン
ピーダンスの関連

足裏圧センサデバ
イス

提案手法

数値実験および実
験結果

進捗

まとめ

記号一覧