

進捗報告

手先運動のインピーダンスと 足圧センサデバイスの開発

大森 一輝

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

June 21, 2022

はじめに

鏡映描写課題とインピーダンスバラメータ

カルマンフィルタによる内部モデルの獲得

足圧センサデバイスの開発

進捗

まとめ

1.1 本研究の背景と目的

2/18

背景

運動学習は「運動学習とは習熟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。人間は運動の知識だけでは運動スキルを習熟することはできなく、実際にその運動を行うことで「運動学習した」といえることがわかっている。昨今、足に障害を持った方が足場の悪い土壌での作業時に転倒してしまい怪我をするケースが起こっている。高齢者の場合、ひとつの転倒が骨折や感染症などの大きな怪我や病気に発展しかねない。

目的

農場などの足場が悪いところでも安全に作業ができるようにアシストを行う足圧センサデバイスを開発し、障害者や高齢者の方々へ歩行並びに就労支援を行う。

はじめに

鏡映描写課題とインビーダンスバラメータ

カルマンフィルタによる内部モデルの獲得

足圧センサデバイスの開発

進捗

まとめ

1.2 研究の概要

3/18

概要

足圧センサを組み込んだデバイスを開発しセンサデータを解析する。
歩行における運動学習時のインピーダンスパラメータを算出し、転倒事故の防止につなげる。
健常者と障害者の歩行を比較し何が違うかを考察する。



図 1: 足圧センサデバイスの例、ショッカクシューズ

はじめに

鏡映描写課題とインピーダンスパラメータ

カルマンフィルタによる内部モデルの獲得

足圧センサデバイスの開発

進捗

まとめ

2.1 鏡映描写課題

4/18

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または指でなぞる運動.

PsychoPy による心理実験

PC を使って心理実験を行うツール.

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.

自分でプログラムを書いたり、プログラムが苦手な人はアイコンを配置することで簡単に実験を作成することができる.

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.



図 2: *PsychoPy* の実験作成画面

はじめに

鏡映描写課題とインビーダンスパラメータ

カルマンフィルタによる内部モデルの獲得

足圧センサデバイスの開発

進捗

まとめ

2.2 インピーダンスパラメータ

5/18

ロボットにおけるインピーダンス制御

インピーダンス制御とは、ロボットの手先に外から力を加えた場合に生じる機械的なインピーダンス（慣性、粘性、剛性）を、目的とする作業に適切な値に設定するための位置と力の制御方法である。

慣性行列

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。この関係性は剛体の回転運動におけるものであり、並進運動における関係式は $F = ma$ の運動方程式となる。

粘性行列

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。

剛性行列

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もつ。その特徴量を剛性行列として与える。

はじめに

鏡映描写課題とインピーダンスパラメータ

カルマンフィルタによる内部モデルの獲得

足圧センサデバイスの開発

進捗

まとめ

2.3 インピーダンス制御

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

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

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。

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

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。

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

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

はじめに

鏡映描写課題とインピーダンスパラメータ

カルマンフィルタによる内部モデルの獲得

足圧センサデバイスの開発

進捗

まとめ

3.1 人間制御者の数学モデル

7/18

はじめに
鏡映描写課題とインビーダンスバラメータ

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、特に直前の変化率を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非常に良いが、変化率が大きく変動する場合には人間はそれを過大評価してしまい、推定精度が低下してしまう¹。

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

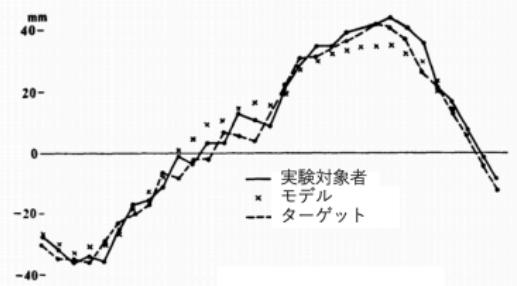


図 4: 刺激・人間御制者・モデル結果の比較 [1]

¹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.

3.2 内部モデルの信頼度

8/18

「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、内部モデルの適応の進み具合を評価する必要がある²。

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

\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	ξ : パラメータベクトル

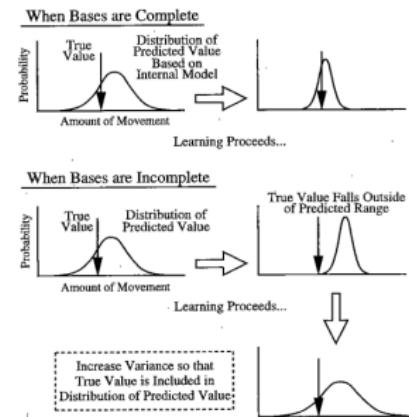


図 5: 内部モデルの分散の制御 [3]

²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

9/18

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	$\mathbf{w}_k, \mathbf{v}_k$: 雑音	H_k : 観測モデル
\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
$\hat{\mathbf{x}}_k$: 状態の予測推定値	P_k : 予測誤差行列	

4.1 センサデバイス

10/18

システム設計

はじめに

鏡映描写課題とインビーダンスバラメータ

カルマンフィルタによる内部モデルの獲得

足圧センサデバイスの開発

進捗

まとめ

インソールに圧力センサ (*FSR402*) を 3 つ取り付け, そのデータを *Arduino nano* と *RaspberryPi Zero W* 用いて収集する. 集めたデータはネットワークを経由してサーバまたは *PC* に転送する.

バッテリーは *RaspberryPi* が出している *PiSugar2* を使う. バッテリー容量は 1200mAh で駆動時間はアイドリングでおよそ 9 時間, カメラモジュールの起動または動画の連続駆動でおよそ 4 時間となっており, 充電時間はおよそ 30 分である.



図 6: *Arduino nano*



図 7: *RaspberryPi Zero W*



図 8: *PiSugar2*

4.2 内部モデルの信頼度の算出

条件付き確率密度関数は以下の式である。

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

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

$\mathbf{x} \in \Re^{n \times 1}$: 状態ベクトル	$\mathbf{y} \in \Re^{l \times 1}$: 観測ベクトル	$\bar{\mathbf{x}} \in \Re^{n \times 1}$: \mathbf{x} の予測値
$\bar{\mathbf{y}} \in \Re^{l \times 1}$: \mathbf{y} の予測値	$\bar{\mathbf{w}} \in \Re^{p \times 1}$: 観測ノイズ	$\mathbf{W} \in \Re^{n \times n}$: 共分散
$\mathbf{C} \in \Re^{n \times p}$: 観測行列	$\mathbf{M} \in \Re^{m \times m}$: 共分散行列	\mathbf{P}_k : カルマンフィルタの \mathbf{P}_k

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

鏡映描写課題とインビーダンスバラメータ

カルマンフィルタによる内部モデルの獲得

足圧センサデバイスの開発

進捗

まとめ

4.3 インピーダンス推定

はじめに

鏡映描写課題とインピーダンスパラメータ

カルマンフィルタによる内部モデルの獲得

足圧センサデバイスの開発

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。

$$\ddot{x}_{t+1} = a1(x_{t+1} - x_t) + a2(y_{t+1} - y_t) + b1(\dot{x}_{t-1} - \dot{x}_t) + b2(\dot{y}_{t-1} - \dot{y}_t)$$

$$\ddot{y}_{t+1} = a3(x_{t+1} - x_t) + a4(y_{t+1} - y_t) + b3(\dot{x}_{t-1} - \dot{x}_t) + b4(\dot{y}_{t-1} - \dot{y}_t)$$

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。
 回帰モデルで予測される加速度をそれぞれ \ddot{x}_f, \ddot{y}_f として $c1, c2$ を求める式は以下になる。

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

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

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。

今後作成

13/18



はじめに

鏡映描写課題とイ
ンビーダンスバラ
メータ

カルマンフィルタ
による内部モデル
の獲得

足圧センサデバイ
スの開発

進捗

まとめ

進捗報告

14/18

やったこと

- ・デバイスの大まかな構想
- ・インピーダンス算出アルゴリズムの評価
- ・誤差を計算するアルゴリズムの修正

はじめに

鏡映描写課題とインピーダンスパラメータ

カルマンフィルタによる内部モデルの獲得

足圧センサデバイスの開発

進捗

まとめ

デバイスの構想

15/18

提案

作成したデバイスを足につけてデータを計測する。

データは *Arduino nano* で計測, *RaspberryPi Zero W* で収集・解析し
ネットワークを経由してサーバまたは *PC* にデータを送信する。

今回 *RaspberryPi* を遠隔で操作できる *VNC* というツールを用いる。これ
までは同一ネットワーク上でしか接続できなかったがオープンでどのネッ
トワークでも *RaspberryPi* に接続できるように改良した。

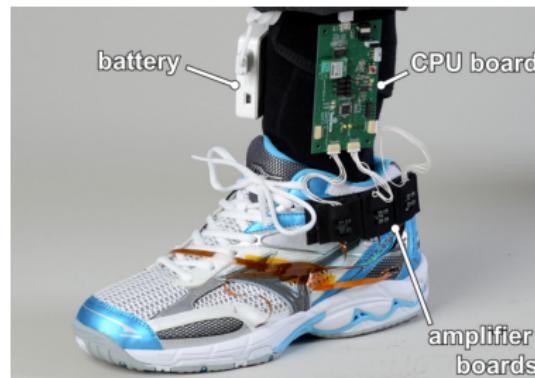


図 9: 作成デバイスのイメージ

はじめに

鏡映描写課題とイ
ンピーダンスバラ
メータ

カルマンフィルタ
による内部モデル
の獲得

足圧センサデバイ
スの開発

進捗

まとめ

インピーダンスアルゴリズムの評価

16/18

はじめに

鏡映描写課題とインピーダンスパラメータ

カルマンフィルタによる内部モデルの獲得

足圧センサデバイスの開発

進捗

まとめ

正方形のなぞり書き運動のデモデータを 2 種類作成した。

一つは等速直線運動を行うもので、もう一つは各直線の中心に向かうほど早くなるものである。最大振幅を A 、時間を t 、角速度を 1 としたとき、変化を与えた場合の速度は $v = -Asint$ 、加速度は $a = -Acost$ と設定した。なお変位は $l = Acost$ とし、変位が 0 のときは速度、加速度ともに 0 とする。

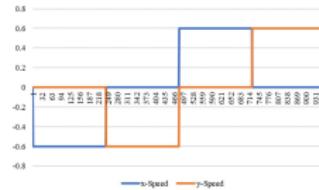


図 10: 等速直線運動の速度

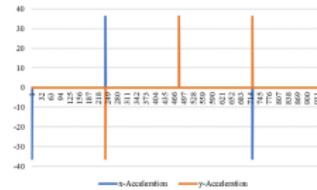


図 11: 等速直線運動の加速度

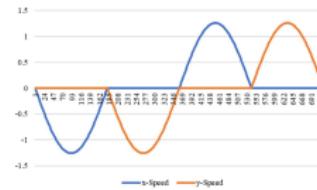


図 12: 変化を与えた場合の速度

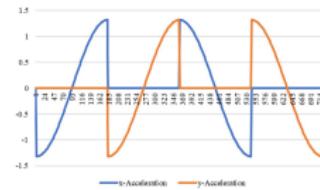


図 13: 変化を与えた場合の加速度

結果

変化に応じて慣性、粘性、剛性は特徴量を示した。

誤差を計算するアルゴリズムの修正

17/18

誤差の算出

正方形のなぞり書きにおける誤差の個数と距離を正しく計算するプログラムを作成した。
同じ要領で星形のなぞり書きにおける誤差の個数を算出するプログラムを作成した。

評価

はみ出したデータ点の個数を正しく算出することができた。

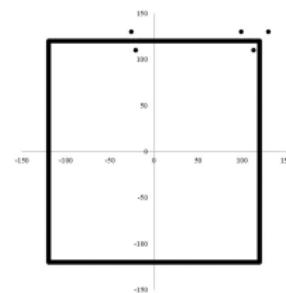


図 14: 正方形のデモデータ

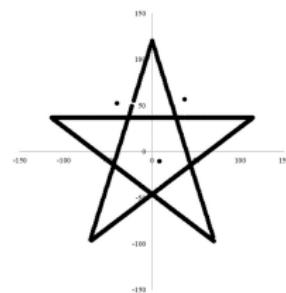


図 15: 星形のデモデータ

```
C:\Users\Fukuy\Documents\data\result\solution\Degree>python Error.py
誤差の個数
5
誤差の合計
51.14213562373095
C:\Users\Fukuy\Documents\data\result\solution\Degree>
```

図 16: 誤差算出結果 (正方形)

```
C:\Users\Fukuy\Documents\data\result\solution\Degree>python star_error.py
誤差の回数
3
C:\Users\Fukuy\Documents\data\result\solution\Degree>
```

図 17: 誤差算出結果 (星形)

はじめに

鏡映描写課題とインビーダンスバラメータ

カルマンフィルタによる内部モデルの獲得

足圧センサデバイスの開発

進捗

まとめ

まとめ

18/18

研究の内容

- ・なぞり運動とインピーダンスパラメータとの関係性について考察した.
- ・なぞり運動の誤差を修正し正しい値が出るようにした.
- ・足圧センサデバイスの開発を行った.

今後の展望

修正したプログラムを用いてセンサデータを解析する.
足圧センサから人間の歩行に関する内部モデルの信頼度をカルマンフィルタを用いて計算する.

はじめに

鏡映描写課題とインピーダンスパラメータ

カルマンフィルタによる内部モデルの獲得

足圧センサデバイスの開発

進捗

まとめ