



# 自己回帰過程のスペクトル分解に基づく筆記振動合成

Writing vibration synthesis based on spectral decomposition of autoregressive process

渡辺凌大, 山崎陽一, 井村誠孝

Ryota WATANABE, Yoichi YAMAZAKI, Masataka IMURA

関西学院大学 (〒 669-1330 兵庫県三田市学園上ヶ原 1, m.imura@kwansai.ac.jp)

**概要:** タブレット上の筆記において紙上の筆記感を再現するペン型インタフェースの研究がなされている。本研究では、計測された複数の筆記振動の自己回帰 (AR) モデルに対して、AR スペクトル分解を行い、対応する成分間でパラメータを補間することにより、筆記振動間の合成を整合性高く行う手法を提案する。少数の異なる筆記速度における振動を計測し、提案手法を適用することで、任意の筆記速度に応じた筆記感の提示を行う。

**キーワード:** ペン型インタフェース, 筆記感, 振動提示, AR スペクトル分解

## 1. はじめに

タブレット端末への入力方法として、スタイラスペンを用いて実際の筆記用具と同じ要領で筆記する方法が普及している。スタイラスペンを用いたタブレット端末への筆記は、紙上に筆記具で筆記した場合と比べると、ペン先と筆記面との間に生じる筆記振動が小さく、ユーザの指先に十分な触覚フィードバックが伝わらない。そのため、筆記具を用いた紙上での筆記感との相違によって多くのユーザが違和感を覚える。

紙上での筆記振動を再現することでユーザエクスペリエンスを向上させるペン型インタフェースの研究がなされている。静電引力の時間的変動を用いる EV-Pen[1] や、機械式振動アクチュエータを用いる RealPen[2] があるが、筆記速度に応じた筆記振動の変化には対応していない。大菅らの研究 [3] では、線形予測符号化 (Linear Predictive Coding, LPC) を用いたモデル化を行い、筆記状態に応じた振動生成を実現しているが、筆記速度はあらかじめ用意しておいた離散的なものに限定される。

本研究の目的は、筆記感を構成する要素である筆記振動を、振動アクチュエータを用いて再現することで、紙上での筆記時に生じる振動感と同等の感覚をユーザに提示することができるペン型インタフェースを開発することである。本稿では、計測された複数の筆記振動の自己回帰 (AR, Autoregressive) モデルに対して、AR スペクトル分解を行い、対応する成分間でパラメータを補間することにより、筆記振動間の合成を整合性高く行う手法を提案する。

## 2. ペン型インタフェース

本研究では、振動アクチュエータを内蔵したペン型インタフェースにより筆記振動を提示する [4]。本研究で制作するペン型インタフェースには、筆記時にペン先が筆記面に接地している状態にあるかを検出するための圧力センサと、

筆記時の書き出しタイミングを取得するための 4 個の可視光フォトダイオードで構成されるジェスチャーセンサが搭載されている。センサ出力に基づいて筆記状態を判断し、筆記状態に応じた振動を提示する。

## 3. 筆記速度ごとの筆記振動再現

本研究では、AR モデル間の補間にあたって、AR スペクトル分解 [5] を用いて特徴を捉えた補間を行うことで、任意の筆記速度に応じた筆記振動を生成して提示する。LPC によって構築された AR モデルに AR スペクトル分解を施し、パラメータを筆記速度に応じて適切に近似する近似式を算出する。近似式より得られた、リアルタイムの筆記速度に応じたパラメータから、パワースペクトルを求め、筆記振動を生成してユーザに提示する。

### 3.1 AR スペクトル分解

AR スペクトル分解とは、LPC といった AR モデルに含まれる周期的変動成分のパワーを調べる手法の一つで、複雑な周波数特性を持つ筆記振動を単純なパワースペクトルの和に分解することができる。本研究では、LPC によって構築した AR モデル

$$\hat{y}_n = e_n - \sum_{i=1}^k a_i y_{n-i} \quad (1)$$

に対して AR スペクトル分解を行う。ここで  $e_n$  は正規分布に従うホワイトノイズである。 $k$  は参照する過去のデータの範囲を決定する次数で、赤池情報量基準 (AIC) によって決定する。 $y_{n-i}$  は再構成した筆記振動の  $i$  サンプル過去の値を表す。線形予測係数  $a_i$  は、筆記速度ごとに Levinson-Durbin 法を用いて算出する。

AR モデルをパワースペクトルに分解するにあたり、式 (1) に対応する自己相関関数  $C(t)$  を求める必要がある。パワースペクトル  $P(f)$  と自己相関関数  $C(t)$  は、Wiener-Khintchine

の定理

$$P(f) = \Delta t \sum_{k=-\infty}^{\infty} C(k\Delta t) e^{-i2\pi f k \Delta t} \\ \simeq 2\Delta t \int_0^{\infty} C(k\Delta t) \cos 2\pi f k \Delta t dk \quad (2)$$

により関係付けられる。式 (1) に対応する離散的な時刻  $t = k\Delta t$  における自己相関関数は、

$$C(k\Delta t) = \sum_{j=1}^{i_1} C_j(k\Delta t) + \sum_{l=1}^{i_2} C'_l(k\Delta t) \quad (3)$$

$$C_j(k\Delta t) \equiv F_j e^{-|k|\alpha_j \Delta t} \quad (4)$$

$$C'_l(k\Delta t) \equiv e^{-|k|\beta_l \Delta t} \{G_l \cos 2\pi f_l k \Delta t - H_l \sin 2\pi f_l |k| \Delta t\} \quad (5)$$

となる。

本研究では、式 (3) の各項に式 (2) を適用してパワースペクトルを求める。  $C_j(k\Delta t)$  に対応するパワースペクトルは、

$$P_j(f) = \frac{2\alpha_j F_j}{\alpha_j^2 + 4\pi^2 f^2} \quad (6)$$

であり、  $C'_l(k\Delta t)$  に対応するパワースペクトルは、

$$P_l(f) = \frac{\beta_l G_l - H_l 2\pi(f + f_l)}{\beta_l^2 + 4\pi^2(f + f_l)^2} + \frac{\beta_l G_l + H_l 2\pi(f - f_l)}{\beta_l^2 + 4\pi^2(f - f_l)^2} \quad (7)$$

である。式 (3)～式 (7) の未知数であるパラメータ  $\alpha_j, \beta_l, f_l, F_j, G_l, H_l$  は、AR モデルの特性方程式の根

$$A(z^{-1}) = 1 - \sum_{i=1}^M a_i z^{-i} \quad (8)$$

を使って表すことができる。式 (8) は重根を持たないと仮定すれば、式 (8) は  $M$  個の異なる根  $z_1, z_2, \dots, z_M$  を持つ。そのうち、実数根の個数を  $i_1$ 、複素数根の個数を  $2i_2$  とすれば、  $i_1 + 2i_2 = M$  が成り立つ。本研究では、実数根を、

$$z_j^{(0)} = e^{-\alpha_j \Delta t} (j = 1, 2, \dots, i_1) \quad (9)$$

複素数根を、

$$z_l^{(\pm)} = e^{-\beta_l \Delta t \pm i2\pi f_l \Delta t} (l = 1, 2, \dots, i_2) \quad (10)$$

と表す。なお、式 (9) では正の実数解のみを考えている。式 (9) と式 (10) の  $\alpha_j, \beta_l, f_l$  は式 (3) のパラメータに一致している。式 (9) と式 (10) をパラメータについて解くと、

$$\alpha_j = -\frac{\ln z_j^{(0)}}{\Delta t} \quad (11)$$

$$\beta_l = -\frac{\ln |z_l^{(+)}|}{\Delta t} = -\frac{\ln |z_l^{(-)}|}{\Delta t} \quad (12)$$

$$f_l = \frac{\arg(z_l^{(+)})}{2\pi \Delta t} = -\frac{\arg(z_l^{(-)})}{2\pi \Delta t} \quad (13)$$

となる。さらに、

$$D(z) = \frac{z^{M-1}}{A(z) \frac{d}{dz} \{z^M A(z^{-1})\}} \quad (14)$$

と  $D(z)$  を定めると、式 (3) の残りのパラメータは、

$$F_j = \sigma^2 D(z_j^{(0)}) \quad (15)$$

$$G_l = 2\sigma^2 \operatorname{Re}[D(z_l^{(+)})] = 2\sigma^2 \operatorname{Re}[D(z_l^{(-)})] \quad (16)$$

$$H_l = 2\sigma^2 \operatorname{Im}[D(z_l^{(+)})] = -2\sigma^2 \operatorname{Im}[D(z_l^{(-)})] \quad (17)$$

と表される。筆記速度ごとに算出されたパラメータ  $\alpha_j, \beta_l, f_l, F_j, G_l, H_l$  を、式 (6) と式 (7) に代入し、パワースペクトルを求める。

### 3.2 任意の筆記速度に応じたパラメータの算出

筆記速度ごとに算出された各パラメータの値に対して、近似曲線を求める。近似式にリアルタイムでの筆記速度を与えることでパラメータを算出することによって、筆記速度のリアルタイムでの連続的な変化に応じたパラメータ算出とパワースペクトルの生成、任意の筆記速度に応じた筆記振動の生成が可能になる。

### 3.3 筆記振動の生成と提示

筆記振動を生成と提示は以下の手順で行う。リアルタイムでの筆記速度を取得し、前項で述べた手法パラメータを調整し、パワースペクトルを生成する。パワースペクトルに対して、逆高速フーリエ変換 (Inverse Fast Fourier Transform, IFFT) を施すことでパワースペクトルの特徴を持ったインパルス応答を求める。インパルス応答とホワイトノイズを畳み込み積分することで、筆記速度に応じた周波数特性をもつ筆記振動を生成する。ホワイトノイズを用いることで単一で周期的な筆記振動にならず、ランダム性をもった筆記振動をユーザに提示できる。

## 4. 筆記速度に応じた振動提示システムの実装

本節では紙上での筆記振動データから線形予測係数を算出し、AR スペクトル分解を用いることで、任意の筆記速度に応じたパラメータと、パラメータに対応するパワースペクトルが生成できることを示す。また、得られたパワースペクトルから、ユーザに提示する振動を再構成できること、さらに、再構成された振動は紙上での振動特性を再現できていることを示す。

### 4.1 AR スペクトル分解によるパラメータ算出

本節では AR モデルの次数=5 として AR スペクトル分解を行う。そのため実数根が 1 つと、複素数根が 2 つ得られる。

#### 4.1.1 複素数根のパラメータ ( $\beta_l, f_l, G_l, H_l$ ) 算出

Levinson-Durbin 法によって、筆記速度ごとに求めた 1 cm/s～10 cm/s(1 cm/s 刻み)、計 10 パターンの線形予測係数  $a_i$  から構築された AR モデルに対し、AR スペクトル分解を 5 回ずつ行い、パラメータ  $\beta_l, f_l, G_l, H_l$  を算出した。複素数根は 2 つ得られるが、そのうち片方に対応するパワースペクトルは常に他方の解に対応するパワースペクトルの 1%以下のパワーだったため、本研究では筆記感に影響を与えないとみなして使用しない。パラメータごとに、横軸を筆記速度、縦軸をパラメータの値としてまとめたグラフを図 1 に示す。図中の黒点は筆記速度ごとのパラメータで、赤線

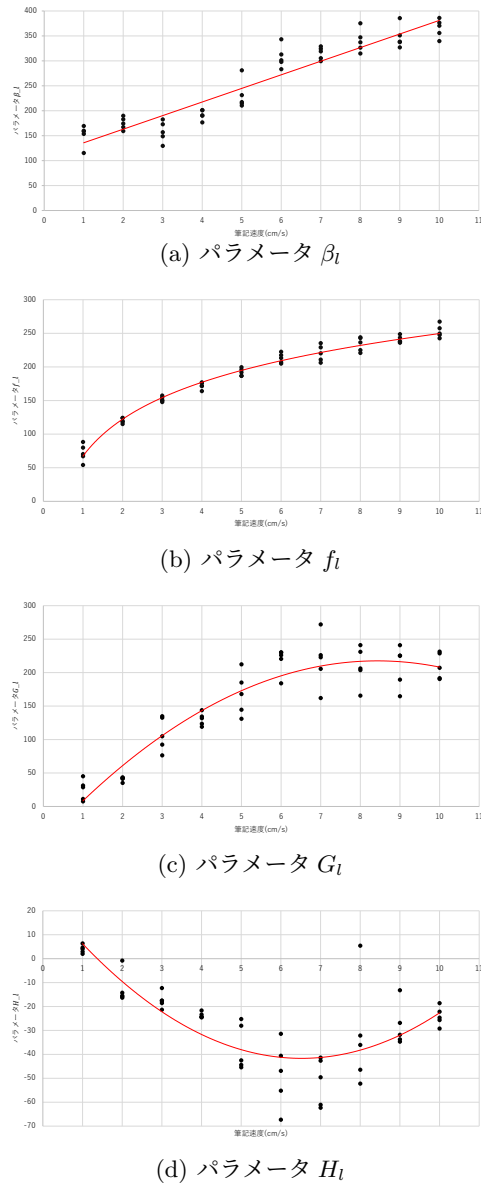


図 1: 筆記速度に応じた各パラメータの変化

はパラメータを基に算出した近似直線および近似曲線である。得られた各近似式を以下に示す。

$$\beta_l = 27.3v + 108.5 \quad (18)$$

$$f_l = 76.2 \ln v + 67.4 \quad (19)$$

$$G_l = -3.8v^2 + 63.9v - 51.5 \quad (20)$$

$$H_l = 1.6v^2 - 20.5v + 25.2 \quad (21)$$

式中の  $v$  は筆記速度 (cm/s) である。本研究では、各パラメータに対して指数近似、線形近似、対数近似、多項式近似、累乗近似、移動平均を行い、その中で最も決定係数が高い近似式を採用した。

得られた近似式に、筆記速度 2, 5, 10 cm/s を代入してパラメータを算出し、パワースペクトルを生成した。紙上での筆記振動のパワースペクトルを図 2 に、生成したパワースペクトルを図 3 に示す。筆記速度 2 cm/s における周波数

ピークは、紙上での筆記振動のパワースペクトルと生成したパワースペクトルともに、100~120 Hz、筆記速度 5 cm/s では 180 Hz 付近、筆記速度 10 cm/s では 200~220Hz となっており、筆記速度が上がるごとに周波数ピークの位置が高くなるといった、紙上での筆記速度の違いによる周波数特性を再現できている。

#### 4.1.2 実数根のパラメータ ( $\alpha_j, F_j$ ) 算出

パラメータ  $\alpha_j, F_j$  と、それらのパラメータを式 (6) に代入して得られるパワースペクトルを求めたところ、複素数根と対応するパワースペクトルと比べて、パワーが 0.5% を下回っていた。そのため本研究では、パラメータ  $\alpha_j, F_j$  からのパワースペクトルは筆記感に影響を与えないとみなして使用しない。

#### 4.2 提示振動の生成

生成したパワースペクトルに IFFT を施して、インパルス応答を求め、ホワイトノイズと畳み込み積分することで、ユーザに提示する振動を生成した。図 4 に筆記速度 10 cm/s における紙上での筆記振動のスペクトログラム、図 5 に生成した振動のスペクトログラムをそれぞれ示す。生成された振動は、紙上での筆記時に生じる筆記振動が持つ周波数特性を再現できていることがわかる。

#### 5. まとめ

本稿では、筆記速度に応じた振動を提示するにあたり、紙上での筆記振動データから線形予測係数を算出し、LPC によって構築される AR モデルに対して AR スペクトル分解を行うことによって任意の筆記速度に応じた筆記振動の提示が可能であることを示した。

#### 参考文献

- [1] Qinglong Wang, Xiangshi Ren, Sayan Sarcar, Xiaoying Sun: EV-Pen: Leveraging electrovibration haptic feedback in pen interaction, Proceedings of the 2016 ACM on Interaction, Surfaces and Spaces, pp.57-66, 2016.
- [2] Youngjun Cho, Andrea Bianchi, Nicolai Marquardt, and Nadia Bianchi-Berthouze: Realpen: Providing realism in handwriting tasks on touch surfaces using auditory-tactile feedback, Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology, pp.195-205, 2016.
- [3] 大菅誠弥, 井村誠孝, 伊藤雄一, 岸野文郎: 接触部の特性変化による多様な筆記感提示, 第 20 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 33B-2, 2015.
- [4] 渡辺凌大, 山崎陽一, 井村誠孝: 筆記感の再現性向上のための高速応答ペン型インタフェースの開発, 情報処理学会インタラクシオン 2021, 2A02, 2021.
- [5] 清野健: 自己回帰過程のスペクトル分解 -波素分析-, February 18, 2011. [http://www3.bpe.es.osaka-u.ac.jp/~kiyono/ARspec\\_decomp.pdf](http://www3.bpe.es.osaka-u.ac.jp/~kiyono/ARspec_decomp.pdf)

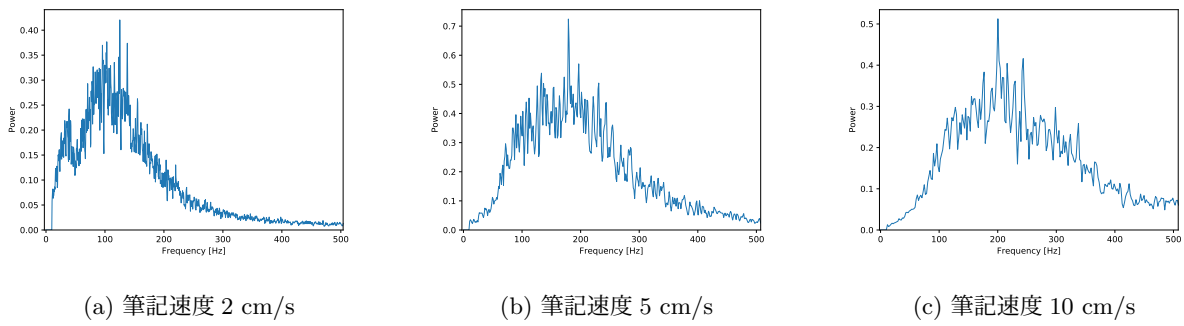


図 2: 紙上での振動のパワースペクトル

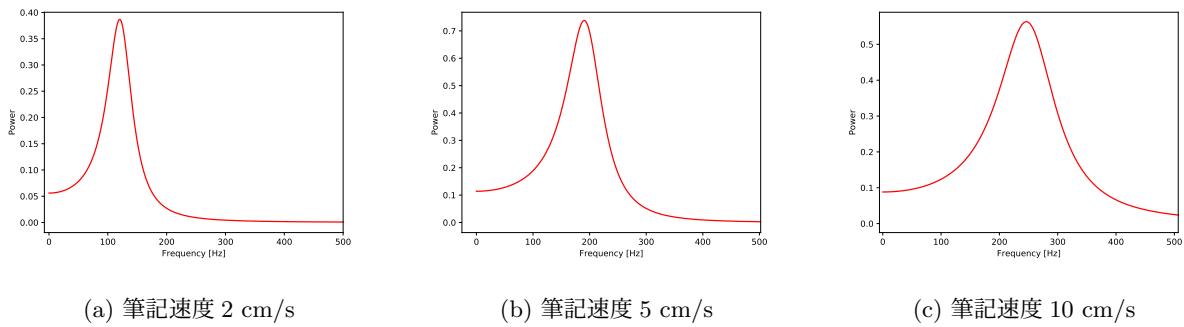


図 3: 生成された振動のパワースペクトル

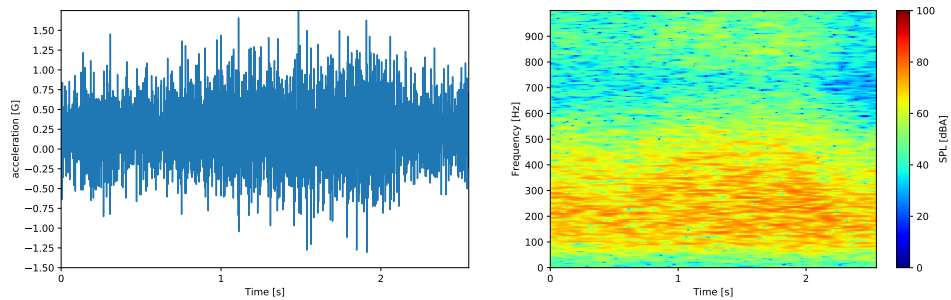


図 4: 紙上での振動波形とスペクトログラム (筆記速度: 10 cm/s)

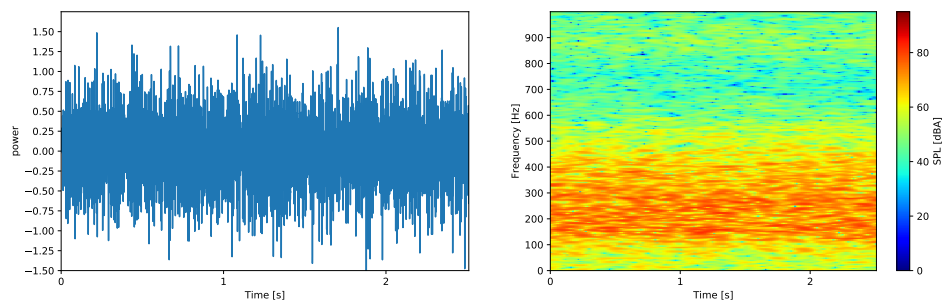


図 5: 生成された振動波形とスペクトログラム (筆記速度: 10 cm/s)