

令和元年6月24日現在

機関番号：37112

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K00315

研究課題名(和文) 筆すべりにロバストなデジタルインクのスプラインベース超圧縮法に関する研究

研究課題名(英文) A Study on Robust Spline-based Super Compression of Digital-Ink with Pen Slips

研究代表者

藤岡 寛之 (Fujioka, Hiroyuki)

福岡工業大学・情報工学部・教授

研究者番号：10349798

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、筆滑りにロバストでかつ「圧縮センシング」の考えに基づきデジタルインクデータに対してスパースな表現を与える最適な基底系を探ることで手書き文字に特化したデータ超圧縮法を確立する、ことが目的であった。そこで、(1)統計学的見地からの筆滑りの現象解明、(2)筆滑りにロバストなデジタルインク圧縮法の開発、(3)スパースコーディングと辞書学習に基づく超圧縮法の開発、の3つの課題に取り組んだ。特に、課題(3)ではk-SVD法と呼ばれる手法を用いて過完備な基底集合を構築し、LASSOに基づくデジタルインクの超圧縮法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

文字の書き間違いに関する研究はあっても、ごく自然に起こり得る筆滑りについて研究されたものは文字パターン認識をはじめとする関連分野で皆無である。本研究を通して、筆滑りはデジタルインクの「外れ値」ではなく、「バースト(塊)」として出現、同時に速度や加速度レベルで急激な時系列振る舞いが代わる「変化点」としてみなせることが分かったことは重要な基礎結果である。本課題はそのような筆滑りに対してロバストなデジタルインクの圧縮法の確立を目指すといった独創的な研究であり、オンライン文字認識をはじめ手書き文字を扱う様々な応用面での理論を発展させる上で重要な意義がある。

研究成果の概要(英文)：Main purpose of this study was to develop of highly compressing the data called "Digital-Ink" which is a sequence of position data sampled from the traced curve at a sampling rate. Also, we assume that such a digital-ink may include some pen-slips. Here, three issues were considered: (1) Finding out the mechanism of pen-slip from a statistical viewpoint, (2) development of robust compression method of Digital-Ink with Pen-Slips, (3) development of super compression method based on sparse coding and dictionary learning. As for (3), employing a method of dictionary learning called "k-SVD algorithm", we particularly created the best dictionary so that the digital-ink can be represented sparsely and then developed a super compression method of digital-ink based on LASSO.

研究分野：ロボティクス

キーワード：スプライン デジタルインク 筆滑り 超圧縮法

1. 研究開始当初の背景

申請者らはこれまでスプライン関数の理論と応用の研究を行ってきた。応用研究の一つとしてヒトの書字運動を参考にした文字フォント生成が挙げられる。B スプラインを利用することで、文字フォントはヒトの書字運動データをわずかな制御点と呼ばれる重み係数の系列で表現でき、ある意味で文字データ圧縮を取り扱っていた。しかし、圧縮後のデータは一般にスパース(疎)ではなく密であった。

近年、タブレット PC 等のデジタル機器の出現により手書き文字での入力場面が多くなりつつある。手書き文字は筆跡をある時刻ごとにサンプリングした「デジタルインク」と呼ぶ位置データの系列として生成される。ただし、筆記時間が長くなる場合などにはそのデータサイズが大きくなるといった欠点をもつ。このような文字をオンライン上でやりとりすると、送受信側共に電子機器の CPU 消費電力さらには通信コストの問題に直面する。そのため、いくつかの研究グループによってデジタルインクのデータ圧縮法について研究がなされている。多くは上述の方法とほぼ同様、デジタルインクを多項式曲線などで近似し、係数を圧縮データとして保存する。一方、傷防止等の理由から電子機器表面上は摩擦レスシートが貼られることが多い。そのため、スタイラスと呼ばれる筆記具で筆記するような際には「筆滑り(書き損じ)」をしばしば起こすが、そのような場面を想定したデジタルインク圧縮法の研究は国内外ともに皆無である。

2. 研究の目的

「筆滑り」はごく自然な事象であり、それを考慮してデジタルインクの圧縮問題に取り組むことは文字パターン認識をはじめ多様な分野において実用的かつ学術的に重要な課題であり、最近スプラインベースドアプローチを用いて筆滑りにロバストなデジタルインクデータ圧縮法についての研究を開始した。本研究では、まず「筆滑り」を統計的観点から解明し、上述の予備的研究を基礎として、筆滑りにロバスト、さらに「圧縮センシング」の考えに基づきデジタルインクデータに対してスパースな表現を与える最適な基底系を探ることで手書き文字に特化したデータ超圧縮法を確立する、ことを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 統計学的見地からの筆滑りの現象解明：

予備の実験により、ヒトの筆滑りは大よそ 0.1 秒間にバースト(塊)として現れ、そのときの微分値(速度、加速度)が瞬間的に大きくなることが判った。これにより筆滑りはデジタルインクが他のものから著しく外れた「外れ値」としてみなすよりは、デジタルインクおよびその微分値の時系列的な振る舞いが急激に変わる「変化点」とみなすことが妥当であると考えられる。そこで、平滑化スプライン曲線を利用した外れ値の検出に関する予備的研究を参考に大量の書字運動データへデータマイニング法を施し筆すべり現象の解明を行う。

(2) 筆滑りにロバストなデジタルインク圧縮法の開発：

課題(1)での結果を手掛かりに、スプラインベースドアプローチによるデジタルインクのデータ圧縮法の枠組みを完成させる。筆滑りを含むデジタルインクのデータ集合が与えられているとする。このとき、そのようなデータ集合に対して曲線を設計する問題を平滑化スプラインの理論をもとに考える。特に、この理論にサポートベクター回帰で見られる ϵ 許容誤差関数を導入することで最小自乗損失関数に較べて外れ値にはロバストである一方で変化点については未知である。したがって、評価関数の損失関数の導出がキーとなり、課題(1)で得られる筆滑りの統計的性質を考慮しながら導出することになる。一方、本問題は B スプラインを基底関数として用いるスプラインベースドアプローチを採用し、デジタルインクの圧縮問題は B スプラインの制御点系列を得る問題へと帰着される。その際、多くのスプラインの問題と同様にその際の制御点の総個数および平滑化のためのパラメータを最適に選択する方法が問題となる。

(3) スパースコーディングと辞書学習に基づく超圧縮法の開発：

本課題では、デジタルインクデータを B スプライン関数からなる観測行列を用いた上で、ある基底上でスパースに表現することでデータ圧縮の問題を考える。特に、辞書学習と呼ばれる手法を導入し大規模な書字データから学習により手書きデジタルインクデータに最も適した基底の探求を行う。スパースコーディングに基づくデジタルインク圧縮の枠組みの開発を行う。開発は、研究課題の課題(2)の手法で得られる制御点系列を、L1 正則

化の一種である Lasso (least absolute shrinkage and selection operator) を用いてスパースで表現することから試みる。一方、辞書学習と呼ばれる手法を導入しデジタルインク圧縮に最適な基底を探す。従来から正規直交基底 (例えば、フーリエ基底など) を用いることでデータのある程度スパースに表現できることは知られていた。しかし、近年、過完備な基底を利用することでよりスパースな表現が可能であることがわかってきた。例えば、Ahron らの k-SVD 法と呼ばれる手法を用いることで訓練データより特異値分解 (SVD) を行い学習することで過完備な基底集合 (辞書と呼ばれる) を構築できる。本課題では、k-SVD 法を使ってデジタルインク圧縮に最適な基底集合を求める。訓練データには、筆記に必要な技法全 8 種を含む文字「永」もしくは平仮名、カタカナ、常用漢字などの大規模なデジタルインクデータを用いる。k-SVD 法以外には多層ニューラルネットワークを用いた辞書学習についても検討を行う。提案手法をタブレット PC へ組み込み検証実験を行い、例えば課題 (B) の手法との復元誤差および圧縮率について検討する。圧縮率の良し悪しは本課題で得られる辞書とデジタルインク圧縮に対する観測行列との間のコヒーレンシに関連し、必要に応じて計測データの種類および基底構築法を再検討する。

4. 研究成果

本研究は、「筆滑り」を統計的観点から解明し、上述の予備的研究を基礎として、筆滑りにロバスト、さらに「圧縮センシング」の考えに基づきデジタルインクデータに対してスパースな表現を与える最適な基底系を探ることで手書き文字に特化したデータ超圧縮法を確立する、ことが目的であった。そこで、(1) 統計学的見地からの筆滑りの現象解明、(2) 筆滑りにロバストなデジタルインク圧縮法の開発、(3) スパースコーディングと辞書学習に基づく超圧縮法の開発、の 3 つの課題に取り組み、次のような研究成果を得た。

(1) 統計学的見地からの筆滑りの現象解明：

筆滑りに関するデータを十分に計測できず現象解明に至るのは非常に困難を極めた。そこで別アプローチでの研究を進めた。具体的には、申請者らの筆文字に関する研究成果をもとに、デジタルインクを筆文字風へと変換する方法についてディープラーニングアプローチにより検討した。変換法は、エンコーダ・デコーダ型の畳み込みニューラルネットワークによる生成器であり、エンコーダ部において得られる低次元化された特徴を抽出・分析を行うことで今後筆滑りの現象解明へと繋がる可能性は得た。

(2) 筆滑りにロバストなデジタルインク圧縮法の開発：

現時点では曲線の値だけでなくその微分値までを考慮した多階層 ϵ 許容誤差関数を導入した $L1$ 正則化による方法が筆すべりにロバストな方法であることが判明した。一方、この研究からデジタルインク圧縮方法として利用できるコンパクトスプラインの設計法の着想を得た。B スプラインを基底関数として用いた曲線を生成する際、B スプラインの重み係数である制御点の系列は曲線の輪郭を表す。すなわち、曲線の設計問題は、制御点の系列の設計問題として捉えることができ、ゆえにその曲線の形状の操作についても制御点に対する操作として定義づけできる。ただ、その操作性は制御点の個数に依存する。例えば、制御点の個数が少なければ曲線を大域的に修正しやすいであろうし、逆に、その個数が多ければ局所的に修正しやすい。そこで、スプライン曲線の形状を広義的に修正できるよう、基のスプライン曲線の形状は変化させず支配的な制御点のみで表すことができるコンパクト B スプラインの設計方法を開発した。その方法では、支配的な制御点を探索することが主なタスクとなるが、動的計画法を用いることで指定個数の制御点を高速で探索できる (図 1)。さらに、そのような探索された制御多角点から NURBS (Non Uniform Rational B-Spline) により精度よく近似できる方法を非線形計画問題として定義し、その有用性を数値実験により検討した。

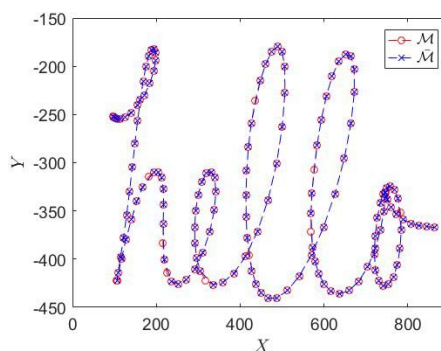


図 1：動的計画法を用いた支配的制御点探
(赤線：元制御多角形；青線：探索結果)

(3) スパースコーディングと辞書学習に基づく超圧縮法の開発：

主成果としては、これまでの基礎理論を見直すことで、平成30年度に取り組む予定であったスパースコーディングと辞書学習に基づくいわゆるデジタルインクの超圧縮法についての基礎結果を得た。具体的には、Ahronらのk-SVD法と呼ばれる手法を用いて訓練データから特異値分解を行い学習することで過完備な基底集合(辞書とも呼ぶ)を構築した。その後、Tibshiraniにより提案されたLeast absolute shrinkage and selection operator (LASSO)

と呼ばれるL1正則化を用いることでデータ超圧縮を行った。結果は離散コサイン変換法(DCT法)や乱数法を使った従来法に較べかなり良好であったが(図2)、文字の種類やサイズなどに制限があるなどの課題が残っている状態である。

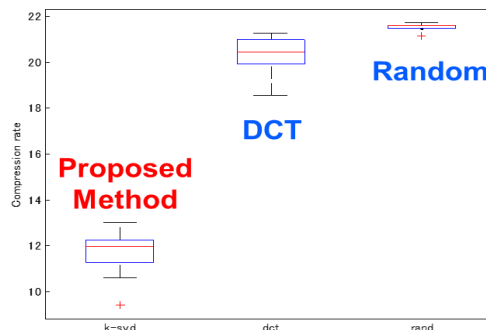


図2：データ圧縮率の実験結果(左から：提案手法、DCT、乱数法)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計3件)

- R. Soontornvorn and H. Fujioka, Design of Compact Planar B-spline Curves Using DP Control Point Selection with Multi-Level Error Functions - Towards Usability Improvement in Design of Dynamic Font-based Characters-, IEIE Transactions on Smart Processing and Computing, Vol.8, No.2, pp.108-120, 2019. 査読有
- H. Kano and H. Fujioka, Spline Trajectory Planning for Road-Like Path with Piecewise Linear Boundaries Allowing Double Corner Points, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration. Vol.11, No.6, pp.429-437, 2018. 査読有
- H. Kano and H. Fujioka, Trivariate and n-Variate Optimal Smoothing Splines with Dynamic Shape Modeling of Deforming Object, Communications in Information and Systems, Vol. 16, No. 3, pp. 147-183, 2016. 査読有

[学会発表](計10件)

- H. Fujioka, C. Ueda and A. Hidaka, Extracting Characters from Classical Japanese Character Images with Ink Bleed-Through Using Pix2Pix, to be presented at 2019 8th International Conference on Intelligent Information Processing (ICIIP 2019), Oxford, UK, Aug. 28-30, 2019.
- R. Soontornvorn, H. Fujioka, Design of Compact Planar B-spline Curves Using DP Control Point Selection : - Towards Usability Improvement in Design of Dynamic Font-based Characters -, Proc. of TENCON 2018 - 2018 IEEE Region 10 Conference, pp.1470-1473, Jeju, Korea, Oct.28-31, 2018.
- H. Kano and H. Fujioka, B-Spline Trajectory Planning with Curvature Constraint, Proc. of 2018 American Control Conference, pp.1963-1968, Milwaukee, WI, USA, Jun.27-29, 2018.
- R. Soontornvorn, H. Fujioka, V. Chutchavongz and K. Janchitrapongvej, Modeling ECG Waveform Using Optimal Smoothing B'ezier-Bernstein Curves, Proc. of TENCON 2017 - 2017 IEEE Region 10 Conference, pp.1235-1238, Penang, Malaysia, Nov.5-8, 2017.
- H. Fujioka, R. Soontornvorn and H.Kano, Design of Compact B-spline Curves Using Optimal Control Point Selection, Extended Abstract of the 49th ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications, 2 pages, Hiroshima, Nov.3-4, 2017.
- H. Fujioka, W. Zhu, A. Hidaka and H.Kano, Reconstructing Dynamic Font-based Chinese Characters using Support Vector Machine, Proc. of 2017 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, pp.1261-1266, Bunff, AL, Canada,

Oct.5-8,2017.

H. Kano and H. Fujioka, Velocity and acceleration constrained trajectory planning by smoothing splines, Proc. of 2017 IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics, pp.1167-1172, Edinburgh, UK, Jun.19-21,2017.

R. Soontornvorn, H. Fujioka and T. Shimoto, A Development of TANZAKU Calligraphy Training System using Augmented Reality and Dynamic Font, Proc. of TENCON 2016 - 2016 IEEE Region 10 Conference, pp.3720-3723, Singapore, Nov.22-25, 2016.

H. Fujioka and H. Kano, Data Compression of Digital-Ink using B-spline Approach with Sparse Coding, Proc.of 2016 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, pp.1261-1266, Budapest, Hungary, Oct.9-12,2016.

H. Kano and H. Fujioka, Spline Trajectory Planning for Path with Piecewise Linear Boundaries, Proc.of the 9th Eurosim Congress on Modelling and Simulation, Oulu, Finland, Sept.12-16,2016.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.fit.ac.jp/~fujioka>

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：狩野 弘之

ローマ字氏名：KANO HIROYUKI

所属研究機関名：東京電機大学

部局名：理工学部

職名：教授

研究者番号(8桁): 00246654

(2)研究協力者

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。