

シームレスコンピューティングのための古文書字形検索技術

末代 誠仁
桜美林大学 総合科学系

白井 啓一郎
信州大学 工学部

井上 聡
東京大学 史料編纂所

馬場 基
奈良文化財研究所

渡辺 晃宏

中川 正樹
東京農工大学 共生科学技術研究院

スマートフォン・タブレット型携帯コンピュータの普及に伴い、情報検索のスタイルには変化が生じている。様々なコンピュータに情報検索の環境を提供すること、そしてネットワークを介してデジタルアーカイブと多くのユーザが繋がることは、デジタルアーカイブの活性化に不可欠である。しかし、利用環境の差による情報処理能力の違いは、高度な情報検索技術を提供する上で問題となる。本稿では、非力なコンピュータのためのクライアント・サーバモデルに基づく古文書字形検索システムの試作について述べる。また、すべてのユーザに対して最新の認識手法と字形テンプレートをいち早く提供可能なサービスの設計・実装について示す。さらに、古文書の解読に有効な画像処理技術を提案する。最後に、古文書デジタルアーカイブとユーザの密接かつ効果的な連携について考察する。

Character pattern retrieval in historical documents for seamless computing

Akihito Kitadai
Division of Integrated Sciences
J.F. Oberlin University

Keiichiro Shirai
Faculty of Engineering
Shinshu University

Satoshi Inoue
Noriko Kurushima
Historiographical Institute
The University of Tokyo

Hajime Baba
Nara National Research Institute
For Cultural Properties

Masaki Nakagawa
Institute of Symbiotic Science and Technology
Tokyo Univ. of Agri. and Tech.

According as the smartphones and tablet-type devices become popular, the computing style of information retrieval is changed. Providing the information retrieval environment for variable computers, and connecting many digital archives and users via the computer network are necessary for activate the archives. Even though, the differences of information processing among the computers become a problem in providing the advanced technologies of information retrieval. In this research, we present the prototyping of the client-server-model based historical character pattern retrieval system for the computers with poor processor performance. Also, we show the design and implementation of the character pattern retrieval service that provides the newest functions and templates for the users immediately. Proposing fine image processing for historical document reading is another aim of this research. Finally, we consider the close and effective relationship between the digital archives of historical documents and the users.

1. まえがき

デジタルアーカイブにとって、多くの人に利用してもらうことは重要な使命の一つである。

利用者を増加させる要素としては、閲覧可能なコンテンツの充実、検索技術の改善、サービスを利用可能な環境の拡大などが挙げられる。

コンテンツ拡充の方法には、新たな情報の登録、および既存デジタルアーカイブ同士の連携を挙げることができる。例えば、著者らが研究活動を行っている東京大学史料編纂所と奈良文化財研究所では、それぞれが管理・運用するデジタルアーカイブの拡充を図ると共に、字形デジタルアーカイブ「電子くずし字字典データベース」[1]と「木簡字典」[2]を横断的に閲覧可能な連携検索サービスの提供などを通して利便性の向上を図っている[3]。この連携検索サービス

では、デジタルアーカイブのポータルサイトの新たな働きをする検索用ページを設置し、検索キーに対してそれぞれのデジタルアーカイブが提示した候補を一括表示できる。ユーザ側では複数のデジタルアーカイブを検索する際の手間は軽減され、さらに時代・用途・媒体など幅広い古文書の字形を一括で検索できるメリットが得られる。各デジタルアーカイブの仕様の差は、極端なものを除けば連携検索サービスとの間のプロトコルによって吸収できるため、管理業務への負担増も抑えられる。このようなソフトなデジタルアーカイブの連携を通して、相乗効果による利用者数の増加が期待される。

検索技術の改善については、キーに対する検索結果をメタデータでフィルタリングする絞り込み検索の実装が一般的となっている。ただし、

キー／メタデータをテキストまたは選択肢で表現することが難しい場合については工夫が必要である．筆者らは古代木簡デジタルアーカイブ「木簡字典」および解読支援システム「Mokkanshop」の研究・開発を通して、画像情報とアノテーションをキーとした字形検索技術の可能性を示すと共に、現在も検索精度向上に向けた取り組みを継続している[4] (図1)．

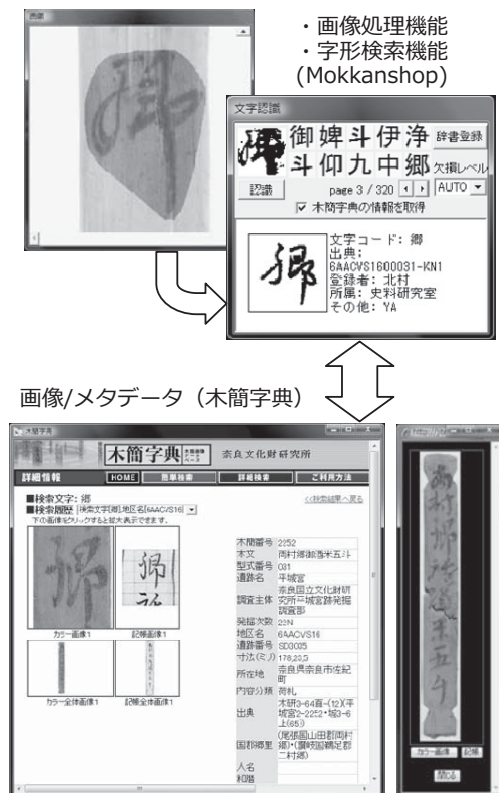


図1. 木簡字典と Mokkanshop による解読支援

デジタルアーカイブを利用可能な環境の拡大については、多様なコンピュータ上でユーザインタフェースを提供することが大事である．現在、多くのデジタルアーカイブは Web ページによるユーザインタフェースを提供することで一定の効果を挙げている．一方で、より高度で柔軟な情報検索については研究の余地がある．

例えば、筆者らが Windows 環境のネイティブアプリケーションとして提供してきた Mokkanshop の技術を OS、ハードウェアなどの環境の壁を越えてシームレスに提供できれば、字形を扱うデジタルアーカイブの利用者にとつてのメリットに繋がり、利用者増加に貢献できる可能性がある．しかし、個々の環境に合わせた検索技術を別々に開発・提供する方法ではサ

ービス提供側への負担が無視できず、統一的な検索技術の提供も困難となる．さらに、携帯性を重視したコンピュータでは、情報処理能力に応じた現実的なサービスの提供が重要となる．

そこで、本研究では情報処理の負担が大きい字形検索をクライアント・サーバモデルに基づいて設計・実装し、普及が進んでいる Android 搭載の Tablet 型携帯端末による利用を可能にすることで、多様なコンピュータに高度かつ統一的な検索技術を提供することの可能性を明らかにする．検索対象は東京大学史料編纂所で整備を進めている平安～江戸時代の代表的な字形のデータベースとする．さらに、Mokkanshop のように比較的高速なコンピュータ上での動作を前提とした情報システムに同様の検索技術を提供するメリットについて述べる．

2. 古文書字形検索技術

筆者らがこれまでに実現した字形検索技術は、(1)字形検出、(2)非線形正規化、(3)特徴抽出、(4)類似度評価、の4つのステップによって構成される．検索キーとなるのは字形を含む画像である．さらに、不完全な字形に対するユーザのアノテーション「グレーゾーン」を付加することで、検索結果に対する絞り込み検索を実現することができる．

まず、(1)の字形検出は、キーとなる画像の中で字形を構成する画素だけを検出する画像処理である．古代木簡などの古文書では汚損・経年変化などで字形とそれ以外の部分(背景)が同化し、解読を困難にすることがある．筆者らは、古代木簡に多く見られる木目などの黒ずみ、木部の腐食などを簡単な操作で字形と分離する画像処理を実現し、Mokkanshop に実装している(図2)．

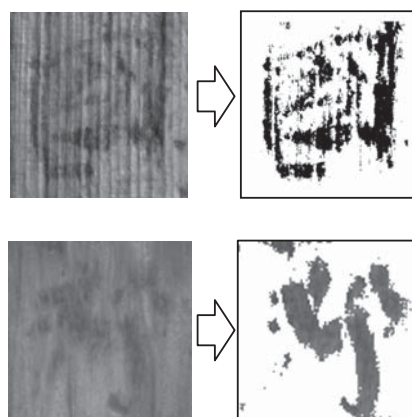


図2. 古代木簡に対する字形検出の例

次の(2)非線形正規化は、筆記者、筆記環境などによって発生する字形の変動を吸収・補正する処理である。この処理は画像内の字形情報の密度を正規化することで実現されるため、古文書の破損などにより字形に欠損が生じると、正規化の結果が不適當になることがある。そこで、欠損部分にユーザが付与したアノテーション（グレーゾーン）を利用し、正規化の結果を制御する（図3）。

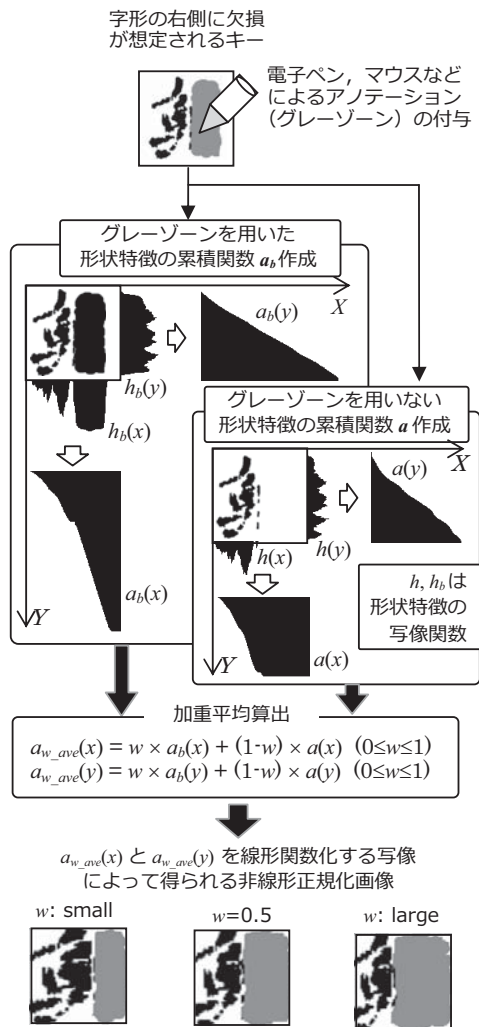


図3. グレーゾーン法による非線形正規化

続く(3)特徴抽出は、字形をぼかして得られる多段階画像の濃淡から勾配特徴を算出し、勾配の方向をサンプリングすることで特徴ベクトルを得る処理である。勾配特徴はチェーンコードに比べて抽出に必要な処理が増加するがノイズには頑健であり、破損、経年変化を伴う古文書の字形には適している（図4）。

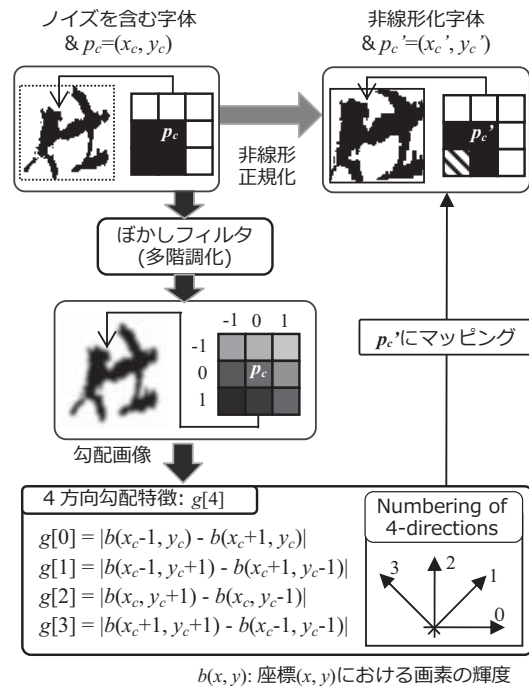


図4. 勾配特徴抽出処理

最後の(4)類似度評価は、予め用意してある字形情報（テンプレート）と特徴ベクトルを比較し、類似度の高いテンプレートを候補として得る処理である。この際、テンプレート修正法を適用することで、字形の欠損が結果に及ぼす悪影響を軽減すると共に効果的な絞り込み検索を実現している。

3. 字形検索技術の利用環境拡張に向けた検討

前述の通り、字形検索ではキーとなる画像に対する多段階の処理、および多数のテンプレートに対する参照と類似度計算が必要となる。

近年のデスクトップ型 PC および同等の処理能力を有するノート型 PC においては、高速かつ大容量なメインメモリにテンプレート群を配置することが可能であり、浮動小数点演算を含む一連の処理を現実的な時間内に完了できる。しかし、消費電力・発熱を抑えることに主眼を置いたスマートフォン・小型 Tablet 型デバイスでは、ネットワーク上のサーバによって負荷の高い処理を代替するクライアント・サーバモデル、またはアプリケーション全体をサーバ上に置くクラウドコンピューティングの導入を検討する必要がある。

サーバによる処理の代替は、ハードウェアの制限を緩和するだけでなく、シームレスで効率的なサービスの提供を可能にする。OS、ハード

ウェアなどの動作環境に固有の実装を削減することで、様々なコンピュータからデジタルアーカイブに対する字形検索を活用することができる。また、識別手法・テンプレートのアップデートは主にサーバ上での作業に移行するため、複数のコンピュータを管理する研究所などでは負担の軽減にもつながる。さらに、デジタルアーカイブおよび検索手法の更新に合わせた最新の技術を、これまでよりも短い時間でユーザに提供することが可能となる。

4. クライアント・サーバモデルに基づく字形検索技術の設計と実装

シームレスな字形検索を実現する第一歩として、本研究では Android OS 搭載の Tablet 型携帯端末で動作する字形検索アプリケーションの実装について述べる。

実装した字形検索アプリケーションは、タッチパネルに指・ペンで字形を描くことで、形状が類似した字形を検索・表示するものである。動作中のアプリケーションの画面、および実行時のフレームワークを図 5 に示す。

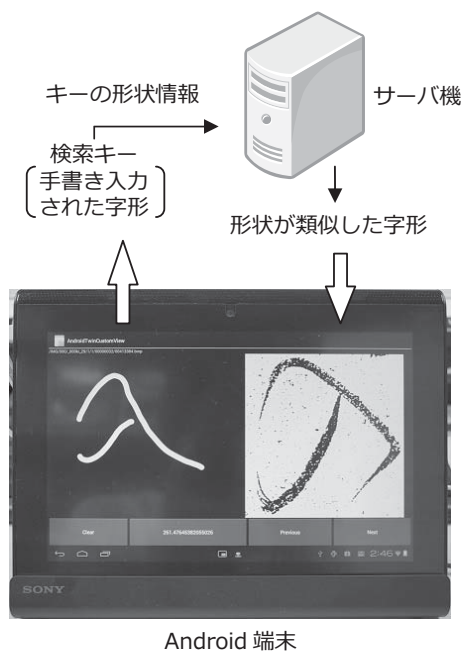


図 5. 実装した字形検索アプリケーション

検索対象とするのは東京大学史料編纂所で現在整備を進めている平安～江戸時代の代表的な字形 23,547 パターンとする。画像は二値またはグレースケールで記録されており、字種ごとに用途・時代などに応じた複数の字形が登録されている (図 6)。

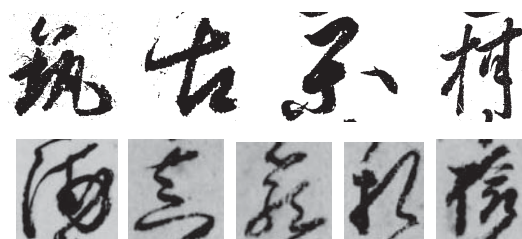


図 6. 実験に使用する字形画像 (一部)

Android を搭載した一般的な携帯端末では、無線 LAN、公衆回線など通信用インタフェースを用いたサーバとの連携が可能である。また、画面解像度は現在の PC よりも低く、多くの PC とは異なり指による操作を採用している。そこで、本研究では Android のネイティブアプリケーションとしてユーザインタフェースを構築しつつ、負荷の高い処理のみをネットワーク上のサーバ機に委託するクライアント・サーバモデルを採用した。ただし、特徴抽出処理については実験的にクライアント側に実装した。サーバとの情報のやり取りには TCP/IP による Socket 通信を用いた。なお、比較のためにクライアント側だけで動作するスタンドアロンモデルのアプリケーションも作成した。

開発環境には Eclipse+Java+Android SDK を用いた。仮想マシンはサーバ側が Java VM、クライアント側は Dalvik である。また、クライアント、サーバ双方にマルチスレッドでの実装を行い、特にサーバ側では複数の検索要求に同時に対応できるよう配慮した。

キーとテンプレートの類似度評価には、筆者らが古代木簡解読支援のために実現した手法と同様のアルゴリズムを利用した [4]。ただし、非線形正規化手法については、字形の変形過程で生じる情報の欠落を抑えて字形評価の精度を高めるための改良を行っている。また、紙文書に多く見られるノイズを除去する画像処理についても実装している。

5. レスponceに対する評価実験と考察

評価実験で利用したクライアント、サーバの動作環境を表 1、表 2 に示す。

表 1. クライアント実装環境

機種	Sony Tablet S
OS	Android 4.0.3
CPU	NVIDIA Tegra2 (1GHz)
主記憶装置	LPDDR2 / 1GB
補助記憶装置	内蔵フラッシュメモリ

表 2. サーバの実装環境

OS	Windows 7 Professional 64bit
CPU	Intel Core i7-960 (3.2GHz)
主記憶装置	DDR3 SDRAM / 6GB
補助記憶装置	HDD (非 RAID 環境)
JRE	Version 1.6

実験では、テンプレートを補助記憶装置から主記憶装置に読み込む処理、およびキーをテンプレート群と比較して類似度上位 10 個のテンプレートを選択する処理について、それぞれ時間（クライアント・サーバモデルを採用したアプリケーションではネットワーク上のデータ転送を含む）を計測した。

実験の結果、クライアント・サーバモデルのアプリケーションではテンプレートの読み込みに約 7 秒、類似度上位となるテンプレートの選択に約 3 秒（無線 LAN 環境、ルーター1 機を経由）が必要であった。前者はサーバ起動時のみ発生する処理であり、クライアントへのレスポンスにはほとんど影響しない。後者は公衆回線環境などでは伸びる可能性があるが、クライアント・サーバ間で転送されるデータのサイズは数～数百 KB に収まるため、大きな問題は生じないと考えられる。さらに、検索対象となるテンプレートが増加する場合にはサーバを並列化することで処理時間の増加を抑えることもできる。複数のデジタルアーカイブが連携して動作する場合は、テンプレート管理の観点からもサーバの並列化が望ましい。

一方、スタンドアロンモデルのアプリケーションではテンプレートの読み込みに約 3 分、テンプレートの選択に約 7 秒を要した。Android OS ではタスクスイッチなどで頻繁に主記憶の開放が行われるため、テンプレートの読み込みに掛かる時間は検索レスポンスに影響を及ぼす。ただし、後者は携帯端末の演算処理能力がリッチではないにせよ実用に耐えることを表すものである。クライアントとサーバの間で負荷分散を行う必要が生じた場合に、クライアント側の処理能力の活用が選択肢となることは、サービスおよびアプリケーションの有用性・多様性を実現する上で重要である。

6. 字形抽出の精度向上に関する検討

デジタルアーカイブの有用性を高め、利用者を増やすためには、利用可能な環境の拡大に加えて検索精度の向上が不可欠である。ここでは、古文書に対する字形抽出に有効な画像処理技術について述べる。

字形検出では、字形（墨）とそれ以外（背景）からなる二値画像を得ることが望ましい。しかし、古文書の汚損・経年変化が著しい場合、墨の脱色、字形だけを鮮明に抽出することは難

しい。墨の抽出を優先すれば背景領域に斑点状のノイズが生じ、背景の除去を優先すれば字形が細切れ状態となる。異なる判別基準を持つ二値化手法を多段階に適用する方法もあるが、多値画像（原画像）の状態が著しく悪い場合には十分な精度が得られない。そこで、本研究では二値化に対する後処理として、平滑化を用いて背景のノイズおよび切れ目の生じた文字の補間を行う方法を提案する。

通常、まばらに点在する離散領域を結合補間するには、形態学的な膨張・収縮処理を用いる。しかし、本研究で用いた字形画像については、文字領域だけでなく背景領域も誤って結合される場合が多く見られた。そこで、新たに平滑化を内在する膨張・収縮処理として、距離画像変換と異方性拡散を組み合わせた手法を用いる。

上述の膨張・収縮処理は、距離画像変換を介しても実現できる (Geodesic morphology) [6,7]。白黒境界からの距離を求め、黒画素側を正の距離、白画素側を負の距離として符号付けした後、適当な閾値で距離画像の二値化を行うことで、元の二値画像を膨張または収縮した画像が得られる。本手法では、この距離画像の段階で異方性拡散 [8] による平滑化を行い、閾値処理によって文字画像に再変換する。これにより、膨張・収縮といった二値画像用の処理よりも柔軟にグレースケール用の平滑化を実装することができる。

距離画像を介した文字の再変換は解像度の変化にロバストであり、字形を拡大縮小表示する際のリアルタイム・レンダリングに利用可能である [9]。字形画像サイズを正規化する必要がある場合にも、通常の二値化画像をリサイズするよりも、距離画像をリサイズしたほうが文字の輪郭にジャギーが生じず、特徴抽出の精度に影響を与えにくいと考えられる。

本平滑化のアルゴリズムは以下のようになる。

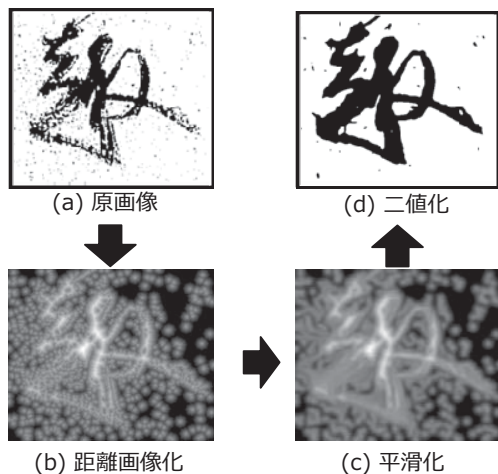
1. 文字画像を距離画像変換する
2. 距離画像に対して異方性拡散で平滑化を施す
3. 閾値処理により文字画像へ再変換する

画像サイズを正規化する場合には、手順 2 の前後にサイズの縮小と拡大を行う（処理の詳細については後述する）。

図 7 に各処理の結果を示す。それぞれ、原画像(a)、(a)に距離画像変換を行った(b)、(b)を異方性拡散で平滑化した(c)、(c)を固定閾値で二値化して文字画像に再変換した(d)となっている。

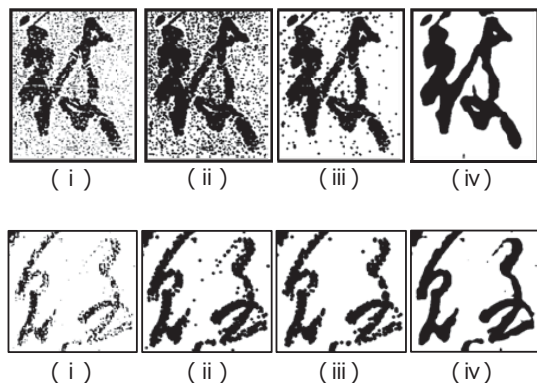
図 8 は通常の形態学的な補間処理との比較を予備実験として行ったもので、原画像(i)に対して、膨張処理(ii)とオープニング処理(iii)を施したものと、提案法の結果(iv)を示している。これらのうち、(iii)のオープニングを用いた方法では、収縮により背景ノイズを除去した後、

膨張により文字の切れ目を補間しており、比較的良好な効果が得られるが、完全に補間はできていない。一方、提案法では良好な補間結果が得られているのがわかる。



(b)、(c)では距離=0の画素を灰色とし、正の距離なら白へ、負の距離なら黒へと色を変化させた

図 7. 距離画像変換を介した平滑化と膨張・収縮処理



- (i) 原画像
- (ii) 膨張 (1 画素)
- (iii) オープニング (1 画素収縮後, 2 画素膨張)
- (iv) 提案法による膨張 (1 画素)

図 8. 通常の膨張処理との比較

以降、上述の処理 1,2,3 の順に詳細な処理内容について述べる。

(1) 文字画像の距離画像変換

距離画像変換にはラスタ走査型の変換アルゴリズムを用い[7,10], 準ユークリッド距離を使用する. 走査型の変換では, 画像の左上から右下へ辞書順の走査を行った後, 右下から左上へ逆走査を行う. 各画素においては, 既に走査の完了した近傍 4 画素の計算済みの距離を用いて, 現在位置での距離を求める.

距離画像を D とし, 画素 $\mathbf{p}=(x, y)$ での距離を $D(\mathbf{p})$ で表す. 近傍 3×3 の画素は $\mathbf{p}+\Delta, \Delta \in \{(-1,-1), (-1,0), \dots, (+1,+1)\}$ として表す. 一方, 二値化画像 $I \in \{0,1\}$ の黒(0)と白(1)の境界となる画素を $\{p_b\}$ として抽出しておく. ここでは白画素に隣接した黒画素を境界画素とした.

まず, 距離画像 D の初期化を画像 B の境界画素に関して次のように行う.

$$D(\mathbf{p}) = \begin{cases} 0 & \text{if } p = p_b \\ \text{Inf} & \text{if } p \neq p_b \end{cases}$$

ここで, Inf は十分に大きな数値を表す.

次に, 画像の左上から右下への辞書順の走査を行い, 各画素での距離を近傍画素を用いて次のように求める.

$$D(\mathbf{p}) = \min \{ D(\mathbf{p} + \Delta) + \|\Delta\| \}$$

ここで, $\Delta \in \{(-1,-1), (0,-1), (+1,-1), (-1,0), (0,0)\}$ は近傍画素への相対位置を表し (中央画素も $(0,0)$ として含む), $\|\Delta\|$ は L2 ノルムで近傍画素への距離を表す. 近傍画素での距離値に中央画素までの距離を加え, 最小となる値を新規に中央画素へと設定していく.

一方, 画像の右下から左上への逆走査については, $\Delta \in \{(+1,+1), (0,+1), (-1,+1), (+1,0), (0,0)\}$ として順走査と同様に最小値を探索していく.

最後に, 黒画素の文字候補領域に正の符号を, 白画素の背景候補領域に負の符号を付け, 符号によって文字 (+) と背景 (-) を分ける距離画像とする.

$$D(\mathbf{p}) = \begin{cases} +D(\mathbf{p}) & \text{if } I(\mathbf{p})=0 \\ -D(\mathbf{p}) & \text{if } I(\mathbf{p})=1 \end{cases}$$

(2) 異方性拡散による平滑化

異方性拡散には [8] を用い, エッジに沿って画素値を拡散・伝播し, エッジを保護しつつ平滑化を行う. 拡散の際には, 水平・垂直方向への距離勾配 $\nabla D = (D_x, D_y)^T$ をもとに重み付けを行い, 結果として導かれる方程式を最急降下法を用いて以下のように反復的に求めていく (以降

の式は各画素での計算を表し、記号 \mathbf{p} は簡略化のために省略する)。

$$\begin{cases} D^{(t=0)} = D_{\text{noisy}} \\ D^{(t+1)} = D^{(t)} + \gamma \text{trace}(\mathbf{TH}) \end{cases}$$

ここで t は反復回数, γ は収束を制御するパラメータ, trace は対角成分の和, $\mathbf{H} = \nabla(\nabla D)^T$ は勾配を再度水平・垂直に微分して得られる 2×2 のヘッセ行列となる. \mathbf{T} は勾配テンソルと呼ばれる 2×2 の行列であり, エッジの等高線方向と勾配方向を表す方向ベクトル θ_+, θ_- と各方向への勾配量 λ_+, λ_- を用いて次のように表される (各値の求め方については後述)。

$$\mathbf{T} = [f_+(\sqrt{\lambda_+ + \lambda_-})\theta_+\theta_+^T + f_-(\sqrt{\lambda_+ + \lambda_-})\theta_-\theta_-^T]$$

上式において f_{\pm} は各方向への平滑化度合いを制御する関数であり, [8] においては次のように与えられる。

$$\begin{cases} f_+(x) = (1 + x^2)^{-1} \\ f_-(x) = \sqrt{1 + x^2}^{-1} \end{cases}$$

上述した方向ベクトル θ_+, θ_- と勾配量 λ_+, λ_- は, 水平・垂直方向への勾配から作成される以下の構造テンソル \mathbf{G} の固有ベクトルおよび固有値として得られる。

$$\mathbf{G} = \begin{pmatrix} K * D_x^2 & K * D_x D_y \\ K * D_x D_y & K * D_y^2 \end{pmatrix}$$

ここで K は平滑化フィルタであり, 勾配画像ごとに平滑化を施した後, 画素ごとに構造テンソルを作成し, 固有値解析を行う. その結果, エッジ等高線方向に関する値 λ_+, θ_+ が最大固有値とそれに対応する固有ベクトルの組みとして得られ, エッジ勾配方向に関する値 λ_-, θ_- が最小固有値と固有ベクトルの組みとして得られる。

(3) 文字画像への再変換

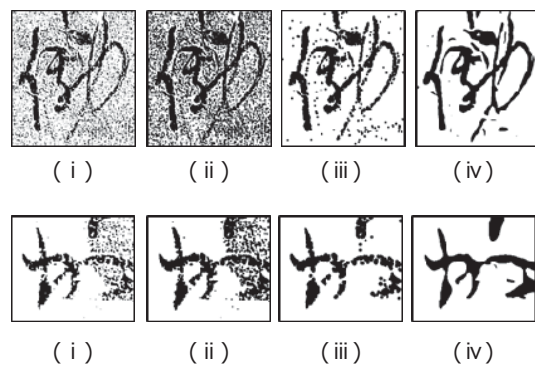
平滑化を行った距離画像に対して閾値処理による二値化を行うことで, 文字画像へと再変換しつつ膨張・収縮処理を行う。

閾値を τ とした場合, 単純な変換および膨張・収縮を伴う変換は以下のように与えられる。

$$J(p) = \begin{cases} 0 & \text{if } D(\mathbf{p}) \geq \tau \\ 1 & \text{if } D(\mathbf{p}) < \tau \end{cases}, \begin{cases} \text{膨張} & \text{if } \tau < 0 \\ \text{単純変換} & \text{if } \tau = 0 \\ \text{収縮} & \text{if } \tau > 0 \end{cases}$$

ここで $\tau=0$ の時は単なる再変換となり, 平滑化を行わなければ $J(\mathbf{p})=I(\mathbf{p})$ となり, 元の二値化画像が得られる. 負の閾値 $\tau < 0$ を用いた場合は膨張処理となり, 膨張幅は閾値の絶対値 $|\tau|$ で与えられる. 正の閾値 $\tau > 0$ を用いた場合は収縮処理となり, 収縮幅は閾値の絶対値 $|\tau|$ で与えられる。

提案法のパラメータを変更することで高精度な処理結果を得ることができた例を図 9 に示す。



(i) 原画像
(ii) 膨張 (1 画素)
(iii) オープニング (2 画素収縮後, 3 画素膨張)
(iv) 提案法による膨張 (0.8 画素)

図 9. パラメータを変更した場合の処理結果

7. あとがき

古文書デジタルアーカイブの活性化を図る上で, 利用環境の拡大, および情報検索の精度・有用性の向上は不可欠である. これらを実現できれば, デジタルアーカイブとユーザをシームレスに結びつけることが可能になる. ここでは, 本研究を総括すると共に今後の研究課題について述べる。

本研究では, Android OS 搭載の端末を対象として, クライアント・サーバモデルに基づく字形検索アプリケーションを設計・実装した. その結果, テンプレートの読込みに関して有効性が示された. Android 端末の補助記憶装置の性能については今後の改善が見込まれる一方で, デジタルアーカイブの拡充および連携が進めばテンプレート数も増加する. アプリケーションに関する処理の大部分をサーバで担うクラウドコンピューティングの採用を含めて, ネットワークおよびサーバの活用に関する検討を継続する必要がある。

また、クライアント・サーバモデルに対応した MokkaShop, および他の動作環境で利用可能な字形検索用アプリケーションの設計・実装を進めることは、今後の重要な課題である。それと同時に、今回提案した新しい画像処理画像処理手法についても、早期に利用者に提供していきたいと考えている。

画像処理については、字形を含む 2 値画像に対する効果的な平滑化手法を提案・実現することができた。今後の課題として、パラメータ調整に関する操作性の向上を図ることで適用範囲の拡大を実現することが挙げられる。

謝辞

本研究は科学研究費補助金 基盤 C-24520771, 基盤 A- 23240031, および基盤 S-20222002 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] 『電子くずし字字典データベース』：
<http://wwwap.hi.u-tokyo.ac.jp/ships/db.html>
- [2] 『木簡画像データベース・木簡字典』：
<http://jiten.nabunken.go.jp/>
- [3] 『木簡画像データベース・木簡字典』『電子くずし字字典データベース』連携検索：
<http://clioz39.hi.u-tokyo.ac.jp/ships/ZClient/W34/>
- [4] 古代木簡解読支援のための画像処理および字体検索の高度化, 人文科学とコンピュータシンポジウム論文集, Vol.2011, No.8, pp.93-98, 2011.
- [5] Akihito Kitadai, Masaki Nakagawa, Hajime Baba and Akihiro Watanabe, Similarity Evaluation and Shape Feature Extraction for Character Pattern Retrieval to Support Reading Historical Documents, Proc. 10th IAPR International Workshop on Document Analysis and Systems-2012, Vol.1, No.1, pp.359-363.
- [6] P. Solle. Morphological image analysis. Springer, 1999.
- [7] A. Criminisi, T. Sharp and C. Rother. Geodesic image and video editing. ACM Trans. on Graphics (in Proc. of SIGGRAPH), 2011.
- [8] D. Tschumperl'e and R. Deriche. Vector-valued image regularization with PDE's: a common framework for different applications. IEEE Trans. on PAMI, Vol.27, No.4, pp.506-517, 2005.
- [9] C. Green. Improved alpha-tested magnification for vector textures and special effects. in Proc. of SIGGRAPH, 2007.

- [10] R. Azriel and J. Pfaltz. Sequential operations in digital picture processing. Journal of the Association for Computing Machinery, Vol. 13, No. 4, pp. 471-494, 1966.