

学 士 論 文

題 目 ラプラス方程式を用いた冊子体
ボリュームデータからのページ
抽出

指導教員 小山田 耕二 教授

京都大学工学部 電気電子工学科

氏 名 八鳥 孝志

令和2年2月1日

Surface extraction from layered structure using Laplace equation

Takashi Hattori

Abstract

要修正

Recently, CT technology (X-ray Computed Tomography) has been widely applied in medical and archaeological aspects because of nondestructive testing it provides. This advantage leads one way to the solution of 3D booklet reconstruction problem, which is helpful to digitize ancient books. Our research explored extracting each page from CT scanned 3D data of the booklet type by establishing and solving one Laplace equation with the principle of electrostatic field analysis among capacitors. Having generated the order of pages, we separated page models. Furtherly, the accuracy of extracted pages could be evaluated by the classifier based on machine learning.

目 次

第 1 章	序論	1
第 2 章	関連研究	5
2.1	可視化ツールとしての X 線の活用	5
2.2	冊子体ボリュームデータからのページ抽出	6
第 3 章	手法	7
3.1	冊子体ボリュームデータの作成	7
3.2	アノテーションツールの設計	8
3.3	アノテーションデータの有効性の事前検証	8
3.4	非線形最小二乗法	9
3.5	手法の評価方法	9
第 4 章	実験	10
4.1	仮説	10
4.2	実験デザイン	11
4.3	実験の条件設定	11
第 5 章	実験結果	12
第 6 章	考察	13
第 7 章	結論	14
	謝 辞	15
	参 考 文 献	16
第 8 章	レイアウト・パラメータ	17

第1章 序論

歴史的な文献は、忘れられた出来事の記述を長期間保存し、人々が後世になって歴史を紐解く大きな手がかりを与えてくれる。ただそのような古文献は経年劣化やその他の外的な浸食によって、開くことやページをめくることができないほど構造的に脆くなっている場合がある。そのような古文献の調査には非侵襲的な測定法によって内部を可視化する必要がある。

非侵襲的な測定が求められる古文献の実例としては、1750年、イタリア・カンパニア州において Karl Weber がヘラクラネウム付近にて発見した、紀元79年のヴェスヴィオ火山噴火によって炭化した1800枚を超えるパピルス紙の例が挙げられる^[1]。この例ではパピルス紙は筒状に巻かれており、損傷させずに開くことは困難であった。またこのような事例は文献の経年劣化や古代の災害による損傷に限らず、近年の洪水や火災によって保管されていた文献が開くことができなくなる場合もある。そのような例に、ドイツの Duchess Anna Amalia Library での2004年の火災が挙げられる。この火災では62000を超える古文献が、火災による高温と焼失、さらに消火の際の水によって重大な被害を被った^[2]。

日本においても、歴史的な文献が水損などによって固着する被害のほか、本の綴じ目近くの「のど」と呼ばれる箇所に綴じ込まれている箇所や、紙背文書と呼ばれる、ある文書が別の文書の紙の裏側に使用された結果、袋綴じ状態となった箇所の調査手法はいまだに確立されておらず、元の文書が修復される際に、副次的に調査することが可能になるという現状がある。

非侵襲的な測定手法として最も広く普及しているものに、3次元X線CTイメージングが挙げられる。この測定手法は近年、医療用途に限らず世界文化遺産などの調査にも用いられている^[3]。過去の研究は、通常のマイクロCTスキャナーであっても古文献の調査に有効であることを示している^[4]。インクと紙のセルロースの間に、X線の減衰率の差が少しでも存在すれば測定結果に一定のコントラストとして現れるので、十分な解像度を持った3次元X線CTスキャナーであれば、古文献を非侵襲的にデジタル化することが可能である。この手法の欠点としては、測定時に対象が放射線に曝露されるため、経年劣化がスピードを加速してしまうことが挙げられる。

測定対象に放射線を浴びせずにデジタル化する手法の一つに、3次元テラヘルツイメージングがある。この手法の欠点としては、テラヘルツ波の減衰が理由で測定深度が限られていることである。文献を対象とする場合数ページの測定に限られてしまう。現時点では、テラヘルツ波が実際の歴史的文献の調査に用いられた例はなく、インクに含まれる金属粒子とテラヘルツ波の相互作用も十分に明らかではない。もう一つの手法として、X線位相イメージングがあり、複数の古文書の調査へ利用されている^{[])}。ただしこの手法を用いた測定装置は非常に大きく、持ち運びが困難であり、測定可能な施設も限られている。そのため図書館等に保管されている貴重な文献を測定する際に、研究施設に移動させる必要性があるためコストやセキュリティが測定による成果に見合わないという課題がある。マイクロCTスキャナーであれば、3次元テラヘルツイメージングに比較してより深度まで測定することが可能であり、X線位相イメージングの測定装置に比較して測定環境の準備が容易であるため、古文書の可視化に現時点でもっとも有効な手段と考えられる。

また測定手法を問わず、測定後得られた冊子体ボリュームデータからページを抽出するためには、ページ番号と大量のボクセルの対応付け（以降、アノテーションと呼ぶ。）を行う必要があり、文献の可視化の高速化、大規模化に対するボトルネックとなっている。そこで本研究では、測定手法をマイクロCTスキャナーとして、ラプラス方程式を用いた冊子体ボリュームデータのアノテーションの補完を行うシステムを提案する。これは冊子体ボリュームデータを一種の積層コンデンサとみなすことで、アノテーション数を減らすことを可能にする手法である。

本稿では、実際のCTスキャンによって得られた冊子体ボリュームデータに対する、本手法の有効性を定量的に分析する実験を行う。本手法を用いて冊子体ボリュームデータからページ抽出を行う際に十分なページ抽出精度を保ちながらアノテーション数を削減することを可能にする条件を明らかにするために、検証実験をデザインする。具体的には、鉄分を含むインクを用いて作成した擬似的な古代文献（以降、擬似試料[要修正]と呼ぶ。）を用意し、この擬似試料に対してCTスキャンを行うことで得られた冊子体ボリュームデータへアノテーションを施し、一方で本手法を様々な条件下で施した。人によるアノテーションデータを正解データとして、本手法を適用することで抽出されたデータとの比較によって本手法のページ抽出精度を定量的に評価した。

本研究において、仮説は以下のように設定する。

H1 冊子体ボリュームデータからのページ抽出課題において、ページ番号を推定する関数がラプラス方程式を満たすと仮定し、関数のパラメータを最適化すれば、ページ抽出の精度を保ちながら、必要なアノテーション数を減らすことを可能にする。

H1.1 冊子体ボリュームデータからのページ抽出課題において、ページ番号を推定する関数がラプラス方程式を満たすと仮定し、関数のパラメータを最適化すれば、ページ抽出の精度を保ちながら、1 ページあたりに必要なアノテーション数を減らすことを可能にする。

H1.2 冊子体ボリュームデータからのページ抽出課題において、ページ番号を推定する関数がラプラス方程式を満たすと仮定し、関数のパラメータを最適化すれば、ページ抽出の精度を保ちながら、アノテーションが必要なページ数を減らすことを可能にする。

H1.3 冊子体ボリュームデータからのページ抽出課題において、ページ番号を推定する関数がラプラス方程式を満たすと仮定し、関数のパラメータを最適化すれば、ページ抽出の精度を保ちながら、1 ページあたりに必要なアノテーション数とアノテーションが必要なページ数を同時に減らすことを可能にする。

H2 本手法で用いるラプラス方程式に適切な補正項を加えることで、冊子体ボリュームデータのページ分布をより精度よく推定できて、アノテーション数をさらに削減する [間に合うか不明]

本手法ではラプラス方程式のパラメータ推定に非線形最小二乗法を用いる。非線形最小二乗法のアルゴリズムは Levenberg-Marquardt 法を用いる。非線形最小二乗法は、最小二乗法を非線形関数のパラメータフィッティングへ拡張したもので、目的変数と説明変数の間の関係を表す式をサンプルデータとモデル関数の残差平方和の最小化によって得る方法である。本研究では、数値解析ソフトウェア SciPy に実装されている非線形最小二乗法の関数を用いる。

本稿の以降の構成は次のとおりである。まず第 2 章では関連研究について説明

する. 続いて第 3 章で冊子体ボリュームデータについて述べ, 第 4 章では今回の実験で用いる手法について, 第 5 章では仮説と仮説の検証方法を述べる. 第 6 章では実験結果について述べ, 第 7 章では実験結果の考察をする. 最後に第 8 章で結論を述べる.

第2章 関連研究

本章では、関連する先行研究と本研究の位置付けを述べる。

2.1 可視化ツールとしての X 線の活用

X 線 CT (X-ray computed tomography) は、近年なって幅広い分野で活用されるようになった。その応用範囲としては、医療や物性工学、古生物学や考古学などが挙げられる。その可視化原理は素材による X 線の吸収率の違いを基にしている。この手法は測定対象中に X 線の吸収率の大きく異なる領域が含まれている場合に有効である。医療用途で用いられる X 線 CT は、X 線吸収率の高い骨と X 線吸収率の低い軟組織によって生じる撮影画像のコントラストが重要な役割を果たしている [1]。本研究の対象とする古文献の構成要素は主に紙とインクである。紙の種類に関していえば、西洋においては中世には羊皮紙やパピルス紙などが手紙に用いられるようになった [2]。インクに関しては、ローマ帝国時代以来、没食子インクが広く利用された [3]。没食子インクの主な構成成分は硫酸鉄 (II) と没食子酸であり、これに含まれる鉄イオンがその色彩上の特性をもたらしている [4]。没食子インクのように鉄分を含むインクとセルロースを主成分とする紙との間に生じる X 線吸収率の差によって、書かれた文章の可視化が可能であることやその他の種類のインクとの比較検討については、Daniel Strome らによって明らかにされている。

X 線を文献の調査に用いた初期の研究としては、2007 年の Bergmann らによって行われた蛍光 X 線イメージングによる、アルキメデスによって書かれた文献の調査が挙げられる [5]。この研究は一度羊皮紙に書かれた文章が削り取られ、その上から別の文章が書かれた文献を対象に、削り取られる前の文章を可視化しようという試みである。同様の手法によって、2 種類のインクを区別する手法も Bergmann らによって確立された [6]。ただし蛍光 X 線イメージングは文献を開いた上で、直接 X 線を照射する必要がある可視化手法である。

本研究が対象とする、X 線マイクロ CT システムを用いた、開くことができない文献に対する可視化研究としては、Seales, W. B. et al. による炭化した文献の可

視化事例 [1] や, Daniel Baum らによるパピルス上に書かれた模様の可視化事例 [2], その他の豊富な研究事例 [3][4] が存在している. また, 本研究では対象としていないが, X線位相イメージングを用いた古文献の可視化事例としては, Vito Mocella らによる, 炭化したパピルス紙の巻物の内部を可視化した研究がある [5]. この研究では, パピルス紙の密度とインクの密度に大きな違いがなかったため, 通常の X線マイクロ CT システムでの可視化は不可能であり, X線位相イメージングが用いられた [5].

2.2 冊子体ボリュームデータからのページ抽出

冊子体ボリュームデータからのページ抽出における主要な問題は, ページが 3 次元的に波打っていること, また素材による影響や経年劣化により伸び縮みしていること, さらにページ同士接合していることなどが挙げられる. X線 CT によって得られた冊子体ボリュームデータから自動的, もしくは半自動的に, 独立した 1 枚のページを取り出す手法は複数提案されている. 例えば Stromer らによって提案された手法 [6] では, X線 CT によって得られた断面画像に対して, Maier, A. らによって提案された手法 [7] によって, エッジを保存したまま画像を平滑化した上で, Frangi et al. によって提案された Vesselness Filtering によって 2 値化し, ページ間のコントラストの明瞭化を図っている. また, Seales らは, ページのある一点からボリュームデータの二次微分を利用して, 同一ページの領域を推定する方法を提案している [8]. これら手法では全ての断面画像に対して, 同じページに属するピクセルを誤りなく関連付けさせる必要がある. つまり上記の手法は冊子体ボリュームデータに対して, 断面ごとに離散的に処理を行うが, 本研究の提案する手法は, ページの形状の滑らかさを利用し, 断面ごとのページの対応付けを連続的に行う試みである..

第3章 手法

本章では本研究で使用した冊子体ボリュームデータの作成手法，本研究で提案する手法及びその精度の検証に必要なアノテーションデータの作成手法及びアノテーションデータそのものの有効性の事前検証，そして非線形関数のパラメータ推定手法について述べる．

3.1 冊子体ボリュームデータの作成

本節では，本研究で使用した冊子体ボリュームデータの作成手法について述べる．本研究では空間分解能 $52.8 \mu\text{m}$ の X 線マイクロ CT システムを用いて，1 枚あたりの厚さ $100 \sim 150 \mu\text{m}$ の紙の束をスキャンし冊子体ボリュームデータを作成した．つまり断面画像において 1 ページの厚みは 12 ピクセルとなった．またページ間の空気の層の厚みはページと同様の 12 ピクセル程度となるように調整し撮影した．全体のページ数は 20 枚とした．図のように半角英数字と記号を A4 サイズの普通コピー用紙に 16pt，つまり $5.64 \times 5.64 \text{ mm}$ のサイズで印刷した．つまり一文字あたりおよそ 100×100 ピクセルの空間が与えられている．この際インクには没食子インク??[小山田先生に要確認]を用いた．没食子インクとは鉄分を含むインクである．鉄分を含んだインクを用いた理由は，重金属の粒子はセルロースをベースとした紙や空気と比較して X 線の吸収率が高く，インクの印刷領域とその他の領域のコントラストが大きくなり，印刷された文字，あるいは画像が鮮明に見えるためである．また，鉄分を含むインクは中世ヨーロッパで使用されていたことから，本研究の可視化対象に適していると判断した．

X 線マイクロ CT システムによる撮影時は平面に近い領域から大きく湾曲した領域まで，複数の条件下のデータを用意するために二つ折りにした状態で撮影を行った．本研究はラプラス方程式によってページ領域の推定を行う基礎的な検証実験を行うため，湾曲の小さい領域を選択し，本研究で提案する手法の検証に用いることとした．撮影によって得られたデータは $432 \times 275 \times 438$ ボクセルであり，今回使用する領域は $130 \times 175 \times 121$ ボクセルである．図～は冊子体ボリュームデータの x-y 断面の例である．複数のページの断面が密に重なっており，またペー

ジは完全に平らに置かれているわけではないので、このデータから x 軸で直線的にピクセルを取り出す方法では正しくページを抽出することは不可能である..

3.2 アノテーションツールの設計

本節では、提案する手法によって抽出されたページと、人間の目視によって施されたアノテーションデータによって抽出されたページを比較することで、提案する手法のページ抽出精度を評価する。

アノテーションツールによって正確にページの抽出が行われる必要があるが、CT スキャナーから得られたボリュームデータは図～に見られるようにノイズを多く含み、そのままでは正確なアノテーションを行うことが困難である。そこで～らによる先行研究で用いられたようにデータの 2 値化によるエッジの鮮明化を行う[]。本研究では適応的 2 値化を用いた。

本研究で用いたアノテーションツールの機能は、(1) 2 値化によるエッジの鮮明化、(2) カーソルの移動によって断面図上で連続した 1 ページの領域を選択（図）(3)～軸に沿って選択された複数のピクセルの y 値の中央値のピクセルを取り出して厚みのあるページの中央に沿ってピクセルを抽出する。これを全てのページ及び z 軸に沿って全ての断面に処理することで、冊子体ボリュームデータからページごとのラベルのついたアノテーションデータが得られる。アルゴリズムを以下に示す。

~~~~~

またアノテーションの一連の流れを図～に示す。アノテーションツールを用いて前節で述べた冊子体ボリュームデータから 121 枚の  $z$  軸断面図をアノテーションした結果、表～に示される数のアノテーションデータを作成した。

## 3.3 アノテーションデータの有効性の事前検証

前節で述べたアノテーションデータが正確にページの座標とラベルを示していることを検証するため、3-1 節の冊子体ボリュームデータからアノテーションデータをもとにボクセルデータを抽出した。このデータをページごとに～軸に射影した結果が図～である。~~~~~

~~~~~

よってこのアノテーションデータが本研究で提案する手法の検証に用いるデータとして有効であると判断した。

3.4 非線形最小二乗法

本研究ではボリュームデータの座標 (x,y,z) を入力, その座標のページ番号 p を出力とする関数 Φ を推定する。

この際関数 Φ はラプラス方程式の解となると仮定した。この仮定を導入した動機として, キャパシタに電位の境界値を与えてその電位分布を推定する, という問題と冊子体ボリュームデータに対しページ番号という境界条件を与えページ分布を推定する, という問題の類似性が挙げられる。

例えば平行極板の片方に 0, もう片方に 1 のポテンシャルエネルギーを与えると, 極板間のポテンシャルエネルギーは連続値をとる。

ポテンシャルエネルギーが連続値を取り, 等値面の交差がないことは, 冊子体ボリュームデータの持つ制約条件に合致する。つまり次のような関係が成立すると仮定する。これを解くために変数分離法を用いることで, 関数 Φ は以下のように表すことができる。

上記の式中の未定定数を決定するために,
パラメーター推定のアルゴリズムの紹介
めも

P9 を埋める

3.5 手法の評価方法

本研究で提案する手法のページ抽出精度の定量的な評価のために,

[めも]P10 で述べる

第4章 実験

P11 13 本章では本研究で行った実験について，詳細を述べる．

4.1 仮説

本研究において，アノテーションの数は以下の3つの意味を持つ．(1)1 ページあたりのアノテーションの数，(2) アノテーションが必要なページ数，(3)1 ページあたりのアノテーションの数とアノテーションの必要なページ数の積これを踏まえて，本研究では以下の仮説を設定した．

H1 冊子体ボリュームデータからのページ抽出課題において，ページ番号を推定する関数がラプラス方程式を満たすと仮定し，関数のパラメータを最適化すれば，ページ抽出の精度を保ちながら，必要なアノテーション数を減らすことを可能にする．

H1.1 冊子体ボリュームデータからのページ抽出課題において，ページ番号を推定する関数がラプラス方程式を満たすと仮定し，関数のパラメータを最適化すれば，ページ抽出の精度を保ちながら，1 ページあたりに必要なアノテーション数を減らすことを可能にする．

H1.2 冊子体ボリュームデータからのページ抽出課題において，ページ番号を推定する関数がラプラス方程式を満たすと仮定し，関数のパラメータを最適化すれば，ページ抽出の精度を保ちながら，アノテーションが必要なページ数を減らすことを可能にする．

H1.3 冊子体ボリュームデータからのページ抽出課題において，ページ番号を推定する関数がラプラス方程式を満たすと仮定し，関数のパラメータを最適化すれば，ページ抽出の精度を保ちながら，1 ページあたりに必要なアノテーション数とアノテーションが必要なページ数を同時に減らすことを可能にする．

H1 は冊子体ボリュームデータとコンデンサの形状と性質の類似性からコンデンサにおいて電位の初期条件から全体の電位分布を求めるのと同じ手法を用いて、部分的なアノテーションデータという形で与えられるページ番号の初期条件を元に、全体のページ分布を求めることが可能であるという仮説である。

H1.1 はラプラス方程式を満たす関数が紙の3次元的な歪みを部分的なアノテーションデータから復元し、ページ全体の形状を推定できるという仮説である。

H1.2 はラプラス方程式を満たす関数が、3次元的に歪んだ紙が重なった際に生まれる紙と紙の間隙を紙の形状が与えられた際に推定できるという仮説である。

H1.3 は H1.1 と H1.2 が同時に成立し得るという仮説である。

4.2 実験デザイン

本実験では、第3章において述べた手法によって作成したアノテーションデータを用いる。ただし1ページあたりに得られる最大アノテーション数が図～に示すようにページによって異なるため、1ページあたりのアノテーション数を～を上限とした。また実験ごとにランダムに定められた数のアノテーションデータを取得するようにした。

実験は

1. ページあたりのアノテーション数、アノテーションを行うページ番号を設定
2. 設定の条件を満たすアノテーションデータを特定の領域のアノテーションデータに偏らないようにランダムに取得
3. 設定したアノテーションデータを初期条件として、ラプラス方程式を満たす関数を推定
4. 得られた関数から今回対象としている冊子体ボリュームデータのページ分布を算出
5. 算出されたページ分布から初期条件としたアノテーションデータを含む全てのアノテーションデータを算出
6. 人によって作成されたアノテーションデータと、ラプラス方程式によって算出されたアノテーションデータを比較し、本手法を評価較

4.3 実験の条件設定

第5章 実験結果

P14 P15 2 ページ

第6章 考察

P16 17 2 ページ

第7章 結論

P18 19 2 ページ L^AT_EX209 用スタイルファイルの利用説明書 [1] には，次のように書かれていました．

京大電気系学科の修論・卒論に L^AT_EX が使われ出して 4 年目になります．最初のころは PC98 上のアスキー日本語 Micro-T_EX を使って

すなわち，30 年の長きにわたって，L^AT_EX が修論・卒論の作成に用いられていることになります．これは，L^AT_EX の論理マークアップという考え方が，論文作成と親和性が高いことの証明であると，著者は考えます．例えば，論文作成時には，論旨を明確化するために，章や節を単位として順序を頻繁に変更する必要性が生じます．相互参照 (??節) を正しく活用していれば，どのように順序を変更しても常に正しく番号が付番されるので，納得がいくまで順序を考えることができます．

このクラスファイルを活用し，皆さんがより良い修論・卒論を執筆されることを願っています．

謝 辞

本研究を進めるにあたり、京都大学学術情報メディアセンターの小山田耕二教授から熱心な研究指導を賜りました。研究の問いの立て方から論文の書き方にいたるまで、丁寧にご指導いただいたことを心より感謝致します。

本研究を進めるにあたり、有益な御指導、御助言を頂きました京都大学学術情報メディアセンターの江原康生特定准教授、夏川浩明特定助教、に深く御礼申し上げます。

本研究を進めるにあたり、日々様々な御助言を頂きました小山田研究室の皆様に深く感謝致します。

参 考 文 献

- [1] 傳康晴, 修論・卒論作成の手引き, (1991 年 11 月 25 日版).

第8章 レイアウト・パラメータ

デフォルトで利用される本文ページ，図・表ページのレイアウト・パラメータはそれぞれ表 8.1, 8.2 のようになっています。

表 8.1: 本文ページのデフォルト・レイアウト

<code>\textwidth</code>	424pt
<code>\textheight</code>	604pt
<code>\oddsidemargin</code>	0.5cm
<code>\evensidemargin</code>	0.5cm
<code>\topmargin</code>	0pt
<code>\headheight</code>	12pt
<code>\headsep</code>	25pt
<code>\footskip</code>	30pt

表 8.2: 図・表ページのデフォルト・レイアウト

<code>\textwidth</code>	424pt + 1cm
<code>\textheight</code>	604pt + 67pt
<code>\oddsidemargin</code>	0pt
<code>\evensidemargin</code>	0pt
<code>\topmargin</code>	0pt
<code>\headheight</code>	0pt
<code>\headsep</code>	0pt
<code>\footskip</code>	0pt