

実時間画像処理を用いた双方向エンタテインメントプロジェクト①

地図、絵画の高精度・高精細デジタルアーカイブ

伊能地図の複製を通じてみた歪み補正

徐 剛・高畑裕樹・田中士郎・阮 翔・橋本禎郎・藤田 誠
立命館大学、株式会社三次元メディア 日本写真印刷株式会社

概要 貴重な文化財を高精度・高精細にデジタルアーカイブを推進することは、わが国の文化遺産の公開、共有、学術研究と活用において非常に重要である。しかしデジタル画像の品質については、色調、濃度、解像度という観点から多くの研究がなされているが、形や寸法の精度について言及されることは稀である。本稿では伊能地図のデジタル化の取り組みを通じて、地図、絵画を、歪み無く正確なデジタル画像として記録するための新たな手法を紹介する。

Research on interactive entertainment with real-time image processing project①

Precise and High-Resolution Digital Archive of Maps and Pictures

Correcting Distortions during Duplication of Ino's Maps

Gang Xu, · Yuki Takahata, · Shiro Tanaka and Xiang Ruan · Yoshiro Hshimoto and Makoto Fujita
Ritsumeikan University, 3D MEDiA Co., Ltd · Nissha Printing Co., Ltd.

Abstract In order to preserve, share, study and make use of our cultural heritage, it is very important to advance high-precision and high-resolution digital archive techniques. While research has been extensively conducted to improve quality of digital images in terms of color tone, intensity and resolution, very few people have addressed the problem of accuracy in digitization. In this paper, we propose a new technique to correct both perspective and lens distortions in digitizing maps and pictures, which has been successfully used in our project of digital-archiving Ino Maps.

1. はじめに

有形無形の文化資産をデジタル情報の形で記録し、その情報をデータベース化して保管し、随時閲覧、鑑賞、情報ネットワークにより情報発信するという「デジタルアーカイブ構想」が提唱されて10年になろうとしている。この間にデジタルアーカイブは対象が拡張され導入段階から整備運用の段階に入ったと言われている。

特にこの数年は入力デバイスとしてのデジタルカメラの目覚ましい進歩や記憶媒体の大容量化、ブロードバンドの進展によりいよいよデジタルアーカイブの利活用が具体化する環境が整いつつある。

一方、記録、保管されるデジタルデータの品質については目的に応じて評価されるものであるから一概には語れないものの、ワンソースマ

ルチユースを前提とした保存用データの制作においては、より高品質なデータが必要とされる。にもかかわらず基準は各施設まかせで、デジタル化の点数のみを競い、その品質を問われることが無いのが実態ではないだろうか。

そこで高品質のデジタル画像とは何かを考察すると、文化財の劣化対策、修復、学術研究のために原資料の情報をできる限り忠実に、原寸復刻可能な精度で保存することを目標とするのは適当であろう。この品質を決定する要素は①解像度、②諧調、③色情報、④濃度情報、⑤形状の五項目である。詳細は次項以後に述べるとして、今回伊能中図という大サイズかつ緻密な史料のデジタル化にあたり、特に形状の正確さを保持するために革新的な手法を用い成功することができた。2004年デジタルアーカイブ白

書のアンケート調査によると、デジタル化が進む最も多い資料カテゴリーは、絵画・図版（27.6%）、文献資料（16.0%）、写真（14.1%）、埋蔵文化財（7.1%）の順となっている。[1] 上位を占めるカテゴリーは今回のテーマである伊能図と同様、平面のものである。

一般的に平面資料をデジタル化する方法としては二つの方法がある。一つはカラーフィルムから高解像度でスキャンする方法。もう一つは原資料からデジタルカメラやスキャナーによりダイレクトにデジタル化する方法である。

文化財デジタルアーカイブはカラーフィルムに複写された膨大な保存資料を前者の方法によってデジタル化することが多い。この場合フィルムが原本となり、いかにフィルム上の情報を正確にデジタル化するかというところに力点が置かれる。このとき原資料と比較して形状の信頼性について議論されることはない。なぜならば、カラーフィルムは三次元空間をレンズを通して二次元のフィルム面に記録したものであり、光学的・視覚的な歪みも含んだ原本をそのまま忠実にデジタルデータ化するためである。

この問題は、撮影を行う専門家にとっては既知の事実ではあるが、歪みの要素をデジタル化の工程で除去することは特定の条件を満たさない限り不可能であった。

これに対し二つ目の方法、対象となる原資料を直接デジタルカメラを用いてデジタル化する場合、単に感光体がフィルムから CCD に置き換わったということ以上に大きな意味がある。デジタル画像に内包するレンズの歪みや被写体とカメラの間で発生するあおりを計算によって割り出すことが可能になったのである。

我々は、伊能中図のデジタル化に際し分割撮影したデータをつなぎ合わせる必要性から、歪みを除去するためのプログラムを開発した。以下の項にその原理を述べる。

2. 画像の歪み補正と正面画像合成

2.1 画像の座標系

普段我々が見る画像はデジタル画像と呼ばれるものである。デジタル画像の座標系は座標の原点は左上にあり、右方向が横軸 u 、下方向が縦

軸 v である。しかし、射影関係を記述する場合には、正規化画像座標系を用いた方が便利であるので、デジタル画像座標系を正規化画像座標系へ変換する。式は以下のように表される。

$$\mathbf{m} = \mathbf{A}\mathbf{x} \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{m} = [u, v, 1]^T$ 、 $\tilde{\mathbf{x}} = [x, y, 1]^T$ はそれぞれデジタル画像座標 (u, v) と正規化画像座標 (x, y) の同次座標ベクトルである。行列 \mathbf{A} はカメラ内部行列であり、以下のように表される。

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} f_u & b & u_0 \\ 0 & f_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

ただし、 (u_0, v_0) は主点座標で、 f_u, f_v はそれぞれ画像の横方向と縦方向の焦点距離（画素単位）であり、 b は両座標軸のスキュー (skew) である。

最近のカメラの性能の向上により、 $f_u = f_v$ 、 $b=0$ とすることができ、行列 \mathbf{A} は以下のように簡略化できる [2]。

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} f & 0 & u_0 \\ 0 & f & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2.2 中心射影

我々が生活する空間は3次元であり、画像は2次元である。そういう意味でカメラは射影する装置であるとも見ることができる。一般的に知られるように、射影は下記の式で表すことができる。

$$x = \frac{X_c}{Z_c}, y = \frac{Y_c}{Z_c}$$

ここで、 X_c, Y_c, Z_c は焦点を原点とするカメラ座標系における3次元空間の点の座標である（図1を参照）。この式を下記に書き直すこともできる。

$$\tilde{\mathbf{x}} \ni \mathbf{X}_c \quad (2)$$

ただし、 \ni はベクトルが同じ方向を指すことを意味する。

式 (2) を式 (1) に代入すると、次の式が得

られる。

$$\tilde{\mathbf{m}} \cong \mathbf{A} \mathbf{X}_c \quad (3)$$

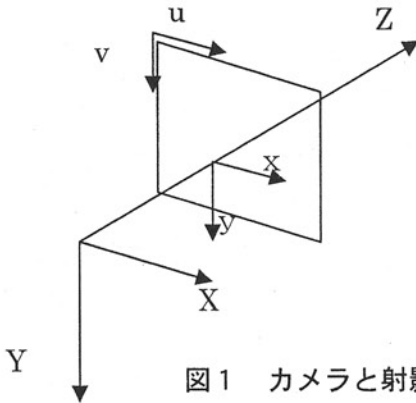


図1 カメラと射影

2.3 対象平面と画像

次に、カメラ座標系と世界座標系との関係を記述する。世界座標系における座標を \mathbf{X}_w 、回転行列を \mathbf{R} 、並進ベクトルを \mathbf{t} とすると、変換式は次式のように表すことができる。

$$\mathbf{X}_c = \mathbf{R}\mathbf{X}_w + \mathbf{t} \quad (4)$$

一方、我々が地図や絵画のような平面形状を対象としているので、平面内に X, Y 軸を置くことができる (図2)。そうすれば、平面内の点は3次元座標 $\mathbf{X}_w = [X, Y, 0]^T$ を持つ。これを式 (4) に代入すると、式 (4) は次のように変形することができる。

$$\mathbf{X}_c = \mathbf{R}\mathbf{X}_w + \mathbf{t} = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_1 & \mathbf{r}_2 & \mathbf{t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

ここで、 $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$ はそれぞれ回転行列 \mathbf{R} の 1 列目、2 列目の列ベクトルである。

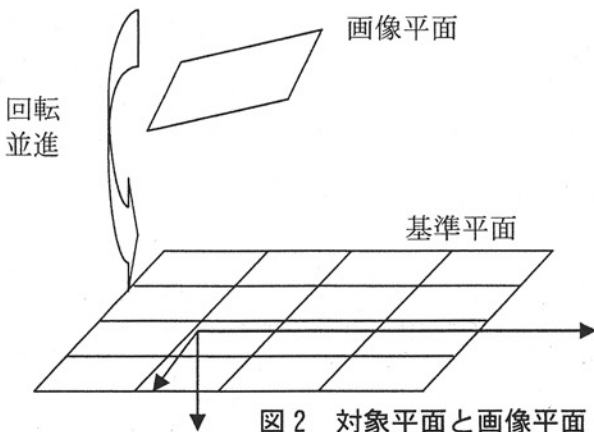


図2 対象平面と画像平面

式 (5) を式 (3) に代入すると、次の式が得られる。

$$\tilde{\mathbf{m}} \cong \mathbf{H} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

ただし、 $\mathbf{H} \cong \mathbf{A}[\mathbf{r}_1 \quad \mathbf{r}_2 \quad \mathbf{t}]$ 。この式は、平面間射影変換を表しており、変換行列を求めることができれば、画像上の点と対象平面上の点との1対1の関係が分かる。

もしカメラの光軸を厳密に対象平面に垂直に置くことができれば、対象平面と画像平面が平行となり、画像と元の平面の間、射影による歪み (あおりともいう) は発生しない。しかし、このようにカメラを設置することが現実上非常に難しい。そのため、あおりは一般的に存在し、何らかの手法で補正を行う必要がある。

2.4 レンズの歪み

今までの記述では、全ての式が線形である。この場合、3次元空間内の直線が、画像上でも直線に写る。しかし、実際、レンズの歪みにより、3次元空間の直線が画像上で曲がったように写る。レンズによる歪みはそれほど大きくなく、人間の目には目立たないことも多いが、学術的研究を行う上では無視できず、補正を行う必要がある。

レンズによる歪みは次の式で表すことができる。

$$\begin{aligned} u &= u_0 + fx(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6 + \dots) \\ v &= v_0 + fy(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6 + \dots) \end{aligned} \quad (7)$$

ただし、 $r^2 = x^2 + y^2$ 。歪みは主点 (画像中心) から離れていけばいくほど大きくなる。

2.5 パラメータ推定

今までの関係式を総合すると、対象平面の1点の座標が与えられれば、回転行列と並進ベクトルを通じてカメラ座標系の座標に変換され、正規化画像座標が得られる。そして、正規化画像座標から歪みモデルとカメラ内部パラメータを経て、デジタル画像座標に変換される。

そこで、図3に例示するような、座標が既知の丸いマーカーを置いた基準シート（または基準ボード）を作成し、それを画像で観測する。画像で観測したマーカーの位置と、上記の射影式で求めるマーカーの座標が一致すれば、回転行列や並進ベクトル及びカメラ内部パラメータ・歪みパラメータが正しく計算できたことを意味する。

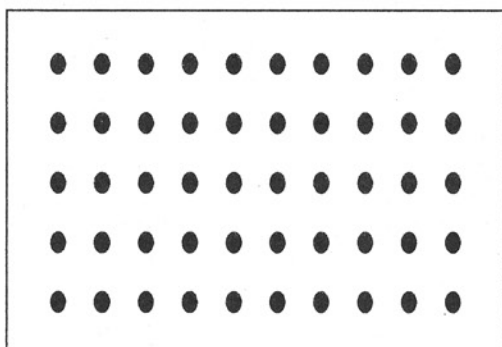


図3 基準シート

実際、ノイズの影響で両者が完全に一致することは無いが、その違いを座標間の自乗誤差として下記の評価関数を定義し、その評価関数を最小とするような回転行列・並進ベクトル・カメラ内部パラメータ・歪みパラメータを求めていく。

$$C = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \{ (u_i - u_0 - fx_i(1 + k_1 r_i^2 + k_2 r_i^4))^2 + (v_i - v_0 - fy_i(1 + k_1 r_i^2 + k_2 r_i^4))^2 \} \quad (8)$$

ここで、下付の*i*はマーカーの番号を示す。この評価関数を最小化するには、非線形漸近法であるマーカー法を用いる[3]。その際に正解に近い初期値を求めておいて、そこから出発する必要がある。

2.6 正面画像合成と計測

もし回転行列、並進ベクトルとカメラ内部パラメータ・歪みパラメータのすべてが既知であれば、対象平面上の点と画像平面上の点との関係が一意にわかる。逆にいうと、画像上の1点が元の対象平面上のどの点と対応するかがわかる。正面画像合成は、正面画像上の1点が元画像のどの点に対応するかを式(7)で求め、その画

素の色を正面画像の点に付与することで実現する。

基準シートのマーカー間距離が正しい寸法において既知なので、画像上の寸法も既知となる。この情報はDPI（ドット・パー・インチ）として画像のヘッダーに記述しておけば、画像上で距離や面積の実寸計測ができるようになる。

3. 伊能中図デジタルアーカイブの試み

上記の手法を用いてデジタルアーカイブに取り組んだ伊能中図は、1995年にフランス中部の村の民家で発見されたもので、江戸期に作成された同図は21万6000分の1の縮尺で、北海道から九州までの全8枚が全て揃っている。

発見時には非常に保存状態が良かったが2003年に伊能忠敬研究会（東京）の渡辺一郎代表理事の調査でひび割れや退色などでひどく破損していることが分かった（図4）。縦2.8メートル、横1.6メートルの大きなものもあり、「測量地点の印や複写のために開けた針穴も残る貴重な地図で資料的価値が高い」（渡辺代表）。

伊能忠敬没後、1812年に幕府に提出された地図（正本は焼失）と同じ手法で作られ、国内で8枚全部そろった副本は国の重要文化財に指定の東京国立博物館所蔵のものしかない。地名、経緯度、方位線、天測地点、地図合印が完備している。測量地点を示す針穴が数十万箇所もあり極めて資料価値が高いと評価されている。[4]

次に、この貴重な資料の劣化を食い止め、修

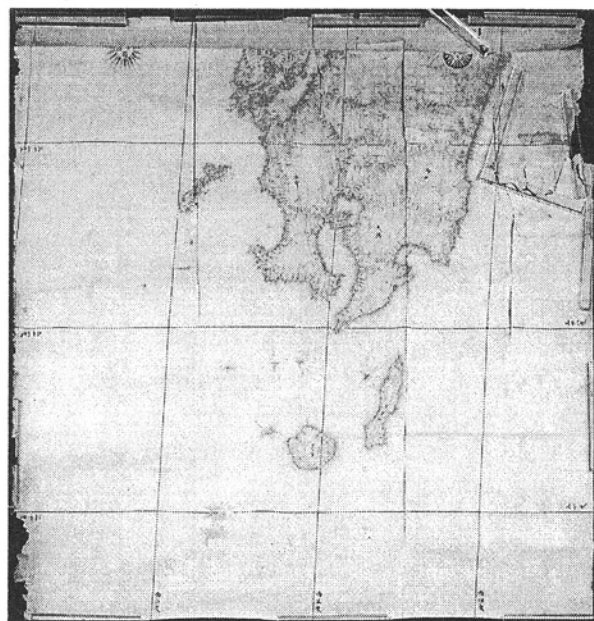
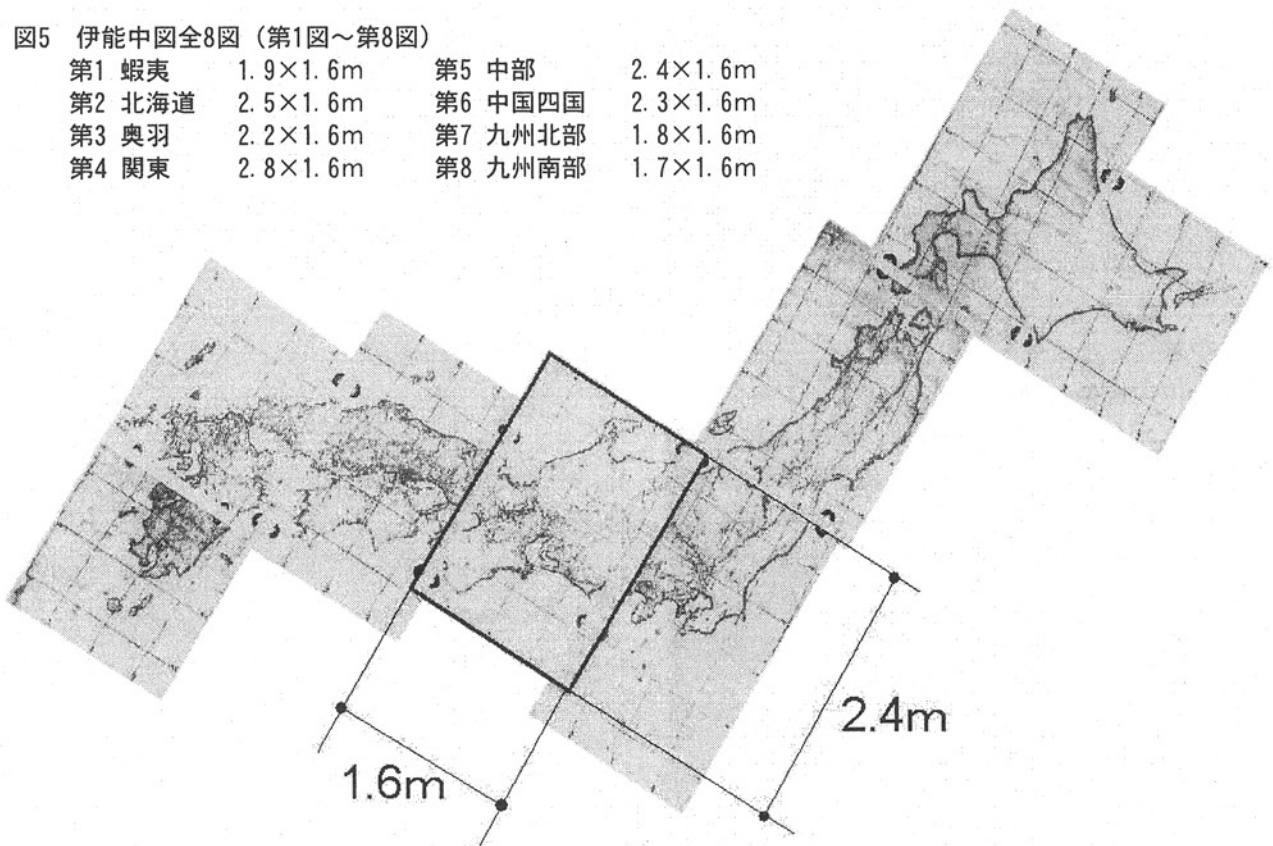


図4 修復前の痛んだ状態

図5 伊能中図全8図（第1図～第8図）

第1 蝦夷	1.9×1.6m	第5 中部	2.4×1.6m
第2 北海道	2.5×1.6m	第6 中国四国	2.3×1.6m
第3 奥羽	2.2×1.6m	第7 九州北部	1.8×1.6m
第4 関東	2.8×1.6m	第8 九州南部	1.7×1.6m



復した姿を高品位デジタルアーカイブ化する詳細について述べたい。

3.1 修復

修復プロジェクトチームは原本の和紙を分析し、こうぞ紙と中国製の竹紙の三層紙であることが判明。[5] 特漉きした同様の和紙の繊維で欠損部と破損部を修復、小口の劣化を防ぐために周囲の「補紙」を行う。

3.2 デジタル撮影

撮影条件の基本方針としては精密にして巨大な8枚の地図の細部を余すところ無く再現するために各々の地図を分割撮影して合成することが決定していた。

さらに画像品質を決める五項目について、次のように検討し具体的な仕様を決めていった。

①解像度

印刷による原寸復刻を可能とする解像度は通常300dpi～350dpiであるが、縦2.8メートル、横1.6メートルの巨大な地図に、3ミリ角の文字でぎっしりと記載された地名、測量地点を繋いで縦横無尽に引かれた0.2ミリ幅の方位線、正本から副本を制作する際の針突き穴（図6）、これら

をデータに記録するためにはテストの結果、最低400dpiの解像度が必要であると判断した。

すなわち、原寸の地図一枚に対して10億を超える画素の巨大な画像となる。

また、撮影に使用するレンズ（光学解像度）もデジタル変換されるセンサーの分解能と一致させることが重要な要素となる。400dpiの解像度を確保するためには、1億3000万画素の解像度を誇るラインセンサー式デジタルカメラで8分割撮影するという方針が決まった。

②諧調

RGB 各色 8bit [(R=256 階調) × (G=256 階調) × (B=256 階調) = 1,677,216 色] をフルカ



図6 針突き穴、天測地点、方位線などが見て取れる

ラーと呼ぶが、原稿を忠実に再現するには各色16bit[(R=65, 536 階調) × (G=65, 536 階調) × (B=65, 536 階調)]が必要であり、入力機器もそれに準じたシステムが主流となってきた。

本伊能中図の、第一層は滲みのすくない竹紙に美しく淡彩で彩色されている。繊細に描かれた沿岸部の再現には12bit以上の諧調が必要である。

③色情報

被写体の固有色情報をRGB色空間で数値化するわけだが、撮影における色情報は照明(環境光)の色温度やレンズ色収差、CCDの個体差の影響により発生するずれを基準ターゲット(グレッタグマクベス社デジタルカメラ専用チャート、カラーチェッカーDCなど)を被写体と同条件で撮影し現物データの色補正用情報として記録するものである。CMS(カラーマネジメントシステム)と言われる色管理システムは異なった表示、出力デバイス間で同一色が同じ色として見えるように変換テーブルを管理するシステムである。

④濃度情報

分割撮影を後工程で合成するためには、露出(濃度)の均一性が求められる。明るさに関してはCMSで補正されるが照明やレンズ周辺光ムラなどで発生する濃度差は被写体の持つ諧調や色情報に悪影響を与える。これもCMSと同様被写体と同じ条件下で無地均一の白紙を撮影し、発生する濃度差を測定し撮影後のデータを修正することで1/256ポイント以内の均一性を得ることが出来る。(PHASE ONE社 PowerPhase FX デジタルラインセンサー式デジタルバックシステムと専用キャプチャーソフト 3.6 に搭載のユニフォームライトツールを使用)

⑤形状

形状の記録精度を高めるために前項に詳述のプログラムを使用。理論上600万画素のデジタルカメラでA-0サイズ(840mm×1188mm)を撮影した場合の寸法精度は±0.5mmである。伊能図の撮影に先立ち35mm一眼レフタイプの1,110万画素デジタルカメラで歪み除去テストを行った。ターゲットには歪みの状況がわかりやすいように写真のマーカースシートを使用した。(格子線はガイドラインとして後から撮影データの上に引いた)

マーカース中心点間距離 30mm

左右30mm×12=360mm(長辺13マーカース)

上下30mm×8=240mm(短辺9マーカース)

カメラからマーカースシート面距離 約600mm

撮影使用システム

DIGITAL BODY CANON EOS 1 Ds

レンズ CANON LENS EF 50mm 1:1.4

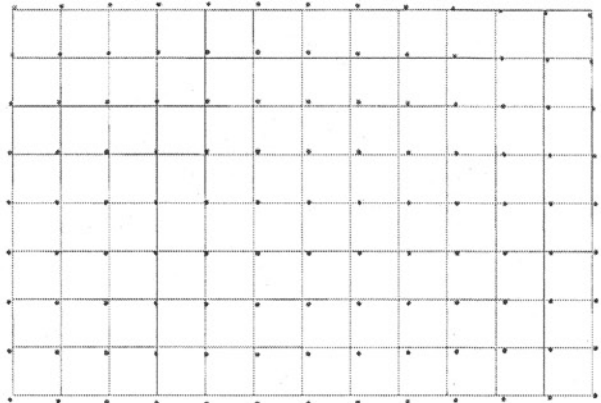


図7 補正処理前

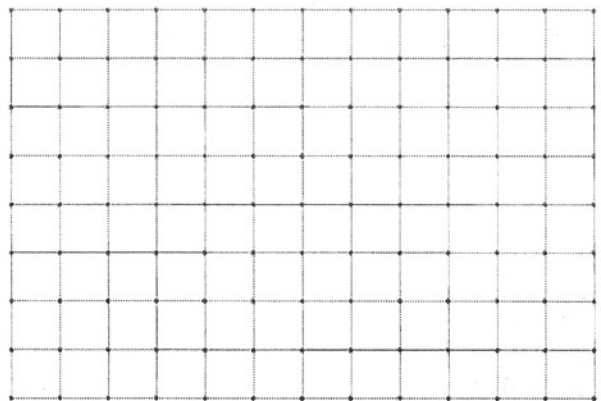


図8 補正処理後

テストに使用したレンズはもっとも一般的な焦点距離50mm標準レンズといわれるものである。図7に見られるように、驚くほど歪みが発生していることがわかる。今回の伊能中図の撮影では、ジナー4×5inchの大型カメラボディにローデンストックのアポシロナーデジタル180mm f 5.6というデジタルカメラ専用の高分解能レンズを装着した1億3000万画素のPowerPhase FXで撮影を行っているのもこれよりはるかに歪みの発生が少なくなっている。それでも歪み除去処理を施さずにつなぐことは不可能である。図9は8分割撮影した伊能地図の合成過程の説明図である。図10は、撮影の様子。

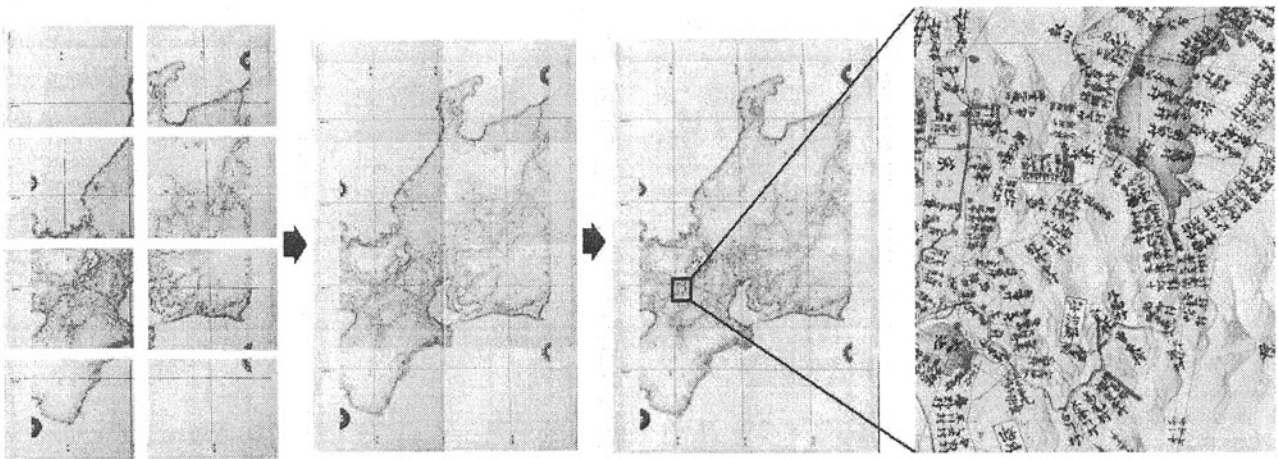


図9 分割撮影→元画像では繋ぐことが出来ない→歪み修正後合成。部分を拡大すると文字が読み取れる。

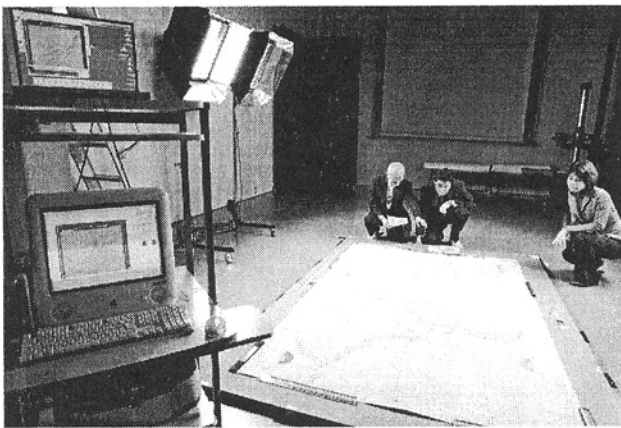


図10 スタジオでの撮影

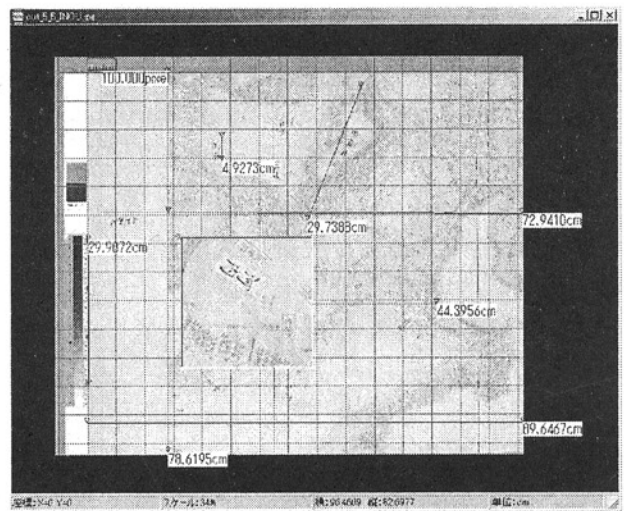


図11 画像上でポイントを拡大しながら寸法計測し、結果を記録できる

3.3 画像処理、合成

伊能地図を8分割して撮影したものをそれぞれ正面変換し、Photoshopでつなぎ合わせることで、原寸1600mm×2700mmの伊能地図を400dpiの解像度でデジタルアーカイブすることに成功した。別々に撮影した画像を各々歪み補正した結果、つなぎ合わせた際の線のずれは1画素程度にとどまり、驚くほどの精度を有していることが分かった。この変換画像には、寸法情報も同時に保存されている。

画像処理したデジタル画像の寸法計測をができるようにブラウザソフトも同時に開発した。

(図11、12)は歪み補正をした画像に対して実寸での計測を可能としており、計測した数値を保存することもできるアプリケーションソフトで、地図精度を検証するような学術研究に効果的である。

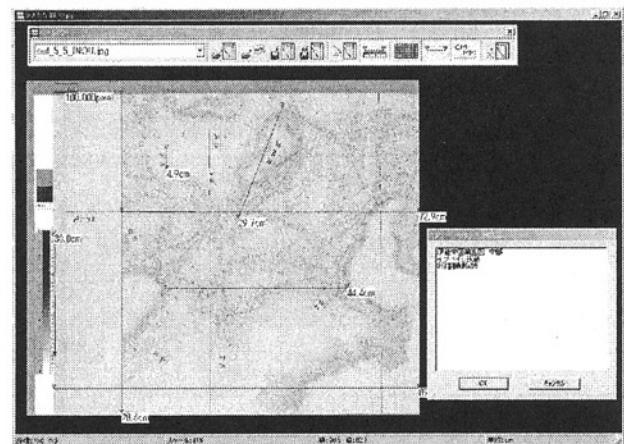


図12 計測結果にコメントを付けて、独自フォーマットで保存

4. まとめ

従来、デジタル撮影データに画像処理を加えることは、データの信頼性を損なう意味から最小限にするべきであるという考えが支配的であった。また、画像データの寸法精度、形状精度の信頼性の低さから学術研究の世界では現物主義が主流である。実際3.2項のテストで見られるように従来の撮影方法でアーカイブした全てのデータは寸法精度という点では失格である。デジタル画像の品質向上を目指して各々の項目の精度をバランス良く高めることに努めてきたが、ここで論じた5項目の条件の中で歪み除去のみが既存技術では実用的な手段がなかった。これを可能とした今回のシステムは学術研究でのデジタルアーカイブの活用の可能性を広げ、また写真界においても画期的な技術革新であり写真の本来持つ高い記録能力をさらに向上させ新たな可能性を示唆するものであると考える。

伊能地図に限らず、貴重な文化財である原資料を直接研究できる研究者はごく少数で、収集している当事者ですら原資料を収蔵庫から頻繁に出して研究することはできないものである。

まして、伊能地図のような巨大な8枚の地図を開陳し全貌を俯瞰することは現実的に不可能である。全体を把握しながら、一方で隅々まで細部を観察することができるのはデジタル画像ならではの可能な手法といえる。

こうした成果を地域を問わず世界各地の研究者がアクセスできるデータベースとしてインターネット公開することで新たな研究ネットワークの広がりを期待できるのではないだろうか。

もちろん、この手法が学術研究対象として耐え得る評価を確たるものとするにはまだまだ課題も多い。

ターゲットとなる基準シートの精度は寸法精度を左右する重要なファクターである。その精度をどう保証するのか。撮影機材の仕様や環境をどのように管理しメタデータ化するのか。それによりどこまでの精度を保証できるか、また、その精度を誰が保証するのか、など、ひとつひとつクリアしながら標準化の議論がなされることを目指していきたい。

また、歪みを除去するという機能だけでなく斜めから撮影した画像のあおりを正面化する機能(図13)を使えば、教育機関での簡易な複写ツールとして使うこともできる。今後、曲線を計測したり、選択範囲の面積計算機能などを実装し、活用領域はますます広範になるものと確信するものである。

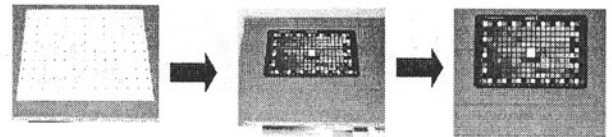


図13 斜めからの撮影を正面化する

参考文献

- [1] 「デジタルアーカイブ白書2004」、デジタルアーカイブ推進協議会、2004年
- [2] 徐剛、「写真から作る3次元CG」、近代科学社、2001年。
- [3] Pressら、「C言語による数値計算のレシピ」、技術評論社、1993。
- [4] 「アメリカにあった伊能大図とフランスの伊能中図」、(財)日本地図センター、2004年
- [5] 高知県立紙産業技術センターの調査による、2003年