

北京版チベット大蔵経の高再現性デジタル画像化： 高精度スキャンニング過程

柴田 みゆき 箕浦 暁雄 宮下 晴輝 片岡 裕
大谷大学
{neko, akio, miya, kataoka}@otani.ac.jp

北京版チベット大蔵経は2部のみがほぼ完本であり、1部を大谷大学で所蔵している。本資料は、他版のように不可読部分もなく、高い印刷品位のために強い参照要求がある。所蔵している大蔵経の公開は、退色により不能で、二次資料としてのみ公開可能である。しかし、写真印刷では、可読性を保証する分解能は得られない。そのため、本大蔵経の公開は、原本と同じ情報の保証をした高分解能のデジタル画像が必須となる。しかし、保持情報を保証したデジタルデータ化は稀であったため、35mm color reversal film を用いて、解像度等の必須情報保持が可能であることを証明し、報告した。次に、高再現性スキャンニングの条件と機材の検討を、写真撮影過程で得たフィルムを用いて行った。デジタル化過程と方式の検討を行った結果、スキャナの構造に起因する誤差は大きく、最高分解能では、最小誤差となる各条件を満足したスキャナのみが、高品位デジタルデータを生成しうることを示した。そして、デジタル画像の簡便な評価法と、精度保証付きデジタル画像を得た。

Making High Quality Digital Image Data of *Tibetan Tripitaka Beijing Red Edition*: Producing The Highest Fidelity Digital Image

Miyuki Shibata, Akio Minoura, Seiki Miyashita and Yutaka Kataoka
Otani University
{neko, akio, miya, kataoka}@otani.ac.jp

It is known as that only 4 sets of *Tibetan Tripitaka Beijing Red Edition* have kept and 2 sets are almost complete. One of the complete sets is held at Otani University. The edition is much better quality than other editions that are partially unreadable. The color of the one at Otani University is reduced and cannot be exhibited. Since photo-printing on books cannot retain enough readable information by low fidelity, the Otani's one should be exhibited as digital image data which have information as same as the original. The evaluation criteria of result film and method for required maximum resolution by 35mm film were discovered and reported. To get the finest digital image of 0.015mm width line on the film, scanning process was examined. As the result, only a few scanners designed to minimize errors can generate enough quality results from the films we took. And evaluated high fidelity image data were provided.

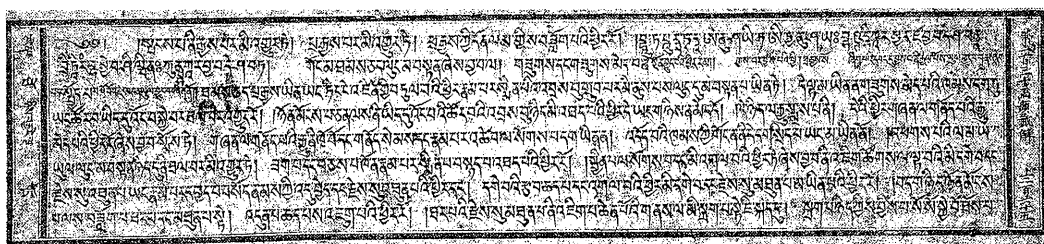


図1. 北京版チベット大蔵經の1 ページ (最小の文字が使用されているページの例)

1. 背景

デジタル図書館やデジタル博物館は、貴重資料や劣化が進行した資料のように原資料が展示不能の場合、特に重要な役割を果たす。デジタル資料提示では、デジタル化過程での条件の明示と共に、研究用原資料として利用可能な情報保持の保証が必須である。すなわち、デジタルデータの有効性は、1 次資料としての情報を持つことで、格段に高まる。しかし、情報を保証したデジタルデータは、正確なデジタル化が困難なために希である。

写真印刷では、明度階調強調による情報の欠落・アーティファクトの混入・150dpi 程度の低分解能が、多数の判読不能部位を生じ、可読性の多大な障害となっている。一方、デジタル画像データでは、ピクセル密度は CCD のフォトセル数と CCD への投影像の大きさで決まる。従って、高い分解能だけでなく、精度と再現性の保証があれば、デジタル画像データは、印刷物より再現性の高い資料となる。ディスプレイ・モニタが再現性を保証すれば、デジタルデータでは、印刷物より 1 ピクセルの持つ誤差も原理的に少ないので、より細かい対象まで正確に読み取り可能となる。

大谷大学所蔵の北京版チベット大蔵經(Tibetan Tripitaka Beijing Red Edition) (図1) は、2 部のみ存在するといわれる完本(完全な完本は、存在しない)の 1 部である。世界的に貴重な歴史的資料で、言語学的にも貴重な資料である。本大蔵經は、紙に植物性と思われる赤色色素で印刷した木版であり、保存状態によっては退色が早く、研究用限定公開も不可能である。既に部分的に極めて退色しており、コントラスト差が 0.2D 程度で、微や汚れ

によって、モノクロ写真印刷では、不可読部分が多くなり、資料価値が無い。ほとんどの古資料は、汚れや黴、退色により、モノクロ写真印刷で不可読となり、再現性のより高いカラー・デジタル化が必須である。従って、本資料のようにデジタル化が困難な資料の高精度高再現性デジタル化が簡単に可能となれば、人文科学への貢献は、極めて大きいと言える。そのため、高精度高再現性デジタルデータの作成研究を開始した[1]。

本資料は、4 万ページ以上あり、エラーなく音訳することは不可能と言える。チベット文字では、同じ図形で異なる音価の文字があり、文意がわからなければ、音訳は不可能である。また、ISO 10646 の拡張部分に包含予定のチベット文字は、図形がユニファイされ、音節文字とその子音化した文字とが区別できないだけでなく、サンスクリット語用チベット文字が含まれないので、本資料を始め、ほとんどのチベット文字資料の表記には使用できない[2]。従って、本資料のデジタル画像データ化が必須なのである。

2. 目的

北京版チベット大蔵經の、十分に可読である情報を保持した高再現性デジタル画像データの作成と高精度再現が、本研究の目的である。本資料は、幅 75cm で、直接スキャナでデジタル画像データ化できない。そのため、1) カラー・リバーサル・フィルムで撮影、2) スキャナでデジタル化、3) コンピュータとディスプレイ・モニタで高精度再現の過程となる。超高再現性写真撮影は、既に報告済みである[1]。本論文では、必要情報の保持保証を持つカラー・リバーサル・フィルムから、精度

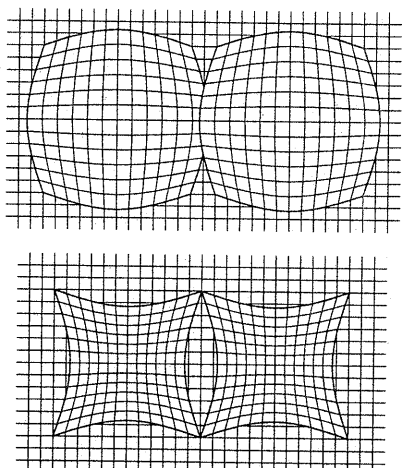


図2. 上：樽型歪み、下：糸巻き型歪み

保証付きの高分解能・高精度デジタル画像データを得るための、スキニングの条件及び手法、結果の評価法、その結果について報告する。

なお、資料が大きい場合、分割して写真に撮影した後、スキャンして接合したり、1枚の資料であつても部分ごとにスキャンしたデータを、誤差なく接合することは不可能である[3]。図2に示したように、像の歪みで、複数点のマーカを資料上に置かない限りは、十分な位置補正はできないが、それでも極めて困難である。また、位置補正可能であつても、補正によるピクセルの消去と生成によって、分解能の誤差は無視できないほど大きくなり、再現性が低下する。

3. フィルム粒子とスキニングの誤差

高再現性写真撮影過程において、資料上の

0.4mm 幅の最細線に対し、フィルム上で色素粒子数は平均約70個であつた[1]。よつて、フィルム上の1粒子の大きさは約 $0.3\mu\text{m}$ であり、スキャン時の波長以下であるため、粒子径によるスキャン時の分解能の低下と誤差の蓄積は、スキナの誤差と比較して無視できる。また、使用したKodachrome 25 Professional (Kodak)の乳剤層は十分に薄く、外式であるため粒子間密度も高い。従つて、スキナの精度だけに着目することができる。他のフィルムでは、粒形、乳剤層厚、粒子間距離が大きな誤差を蓄積する要因となる。

4. 本資料に必要なフォトセル密度と誤差

フィルム上での最小線幅は、約 $18\mu\text{m}$ である。しかし、フラット・ベッド・スキナに採用されるCCD上の1フォトセルの大きさは約 $5\mu\text{m}\sim 7\mu\text{m}$ が多く[4]、フィルム・スキナでは、約3000dpiが主で、フォトセル間隔が狭いもので4000dpiである。これは、 $18\mu\text{m}$ に対し、たかだか3フォトセルである。3フォトセルでは、極めてサンプリング誤差が大きくなる。最悪のケースでは、約50%の誤差を含むことになる。 $18\mu\text{m}$ に4フォトセルが対応(5500dpi)すれば、30%程度の誤差に激減する。 $18\mu\text{m}$ で10%以下の誤差を保証するためには、少なくとも6フォトセル(約8000dpi)が必要であり、現状では、そのようなフラット・ベッド・スキナは極めて少ない。ドラム・スキナでは、8000dpiを越えるが、1フォトセルの集光範囲が広く、互いに集光する円が重なり合い、各ピクセルの値を移動平均したような結果となり、高域特

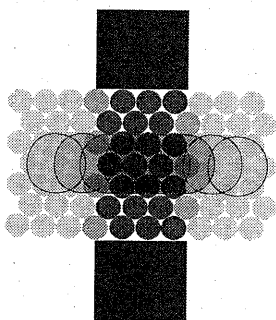
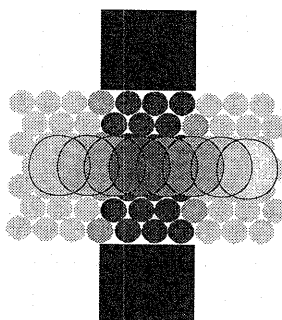


図3. スキナの集光範囲



スキニングにより生じる誤差

性が劣化し、スキヤニングによる大きな誤差となる(図3)。

すなわち、本資料に対しては、現状のスキヤナでは、本資料の最細線に対し10%以下の十分な精度は得られないが、最細線に対し30%程度の誤差で、標準線幅に対し10%以下の誤差を保証する程度の可読性のデジタル画像化は可能である。これは、十分な濃度差を持つ最細線に対し、4フォトセル以上が対応すれば良いが、フォトセル密度の小差と濃度差が、劇的に大きな誤差の違いを生じる領域である。従って、厳密にスキヤナの生成する誤差を理解していないと、精度保証は不可能である。そして、生成したデジタル画像データを簡便かつ正確に評価できなければならない。

なお、スキヤナは、使用目的に合わせて意図的に空間周波数を下げているものもあり、予想以上に誤差が大きい場合、フォトセル密度に余裕のある場合でも、高再現性データの作成には、目的に合った誤差の少ないスキヤナを選択しなければならない。スキヤナを選択では、単純に物理的なフォトセル密度や光学分解能だけを基準にはできないのである。

5. スキヤナ及び CCD カメラの構造と問題点

スキヤナの誤差は、物理的なフォトセル密度に起因するサンプリング誤差だけでなく、光学系由来の誤差や、フォトセンサー由来の誤差、AD 変換階調の量子化誤差、機械的誤差、そしてスキヤナ内部の補正ソフトウェアによって生じる。従って、スキャン結果の評価とスキヤナ選択のために、各誤差の原因を理解しておく必要がある。混入した誤差は、後から排除・修正できず、これらの誤差の少ないスキヤナの選択は言うまでもない。

5-1 CCD カメラ

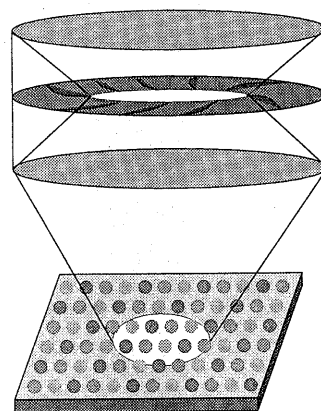
CCD カメラは、デジタル画像データの作成に多用される。CCD カメラは、出力データとしては、10Mピクセルを超える特殊な用途のものも存在する。一般には最大6Mピクセルである。CCD カメラでは、3個のフォトセルが1セットとなって1ピクセルの情報を生成するため、同一点の色情報を取得できない(図4)。そして、実際の光学分解能

は、フォトセル数の3分の1になり、補間または画素ずらし法によってピクセル数を増加させており、光学分解能が高くなるわけではない。6Mピクセルの CCD でも、大きな被写体での高再現性デジタル化には、ピクセル数が不足する。

2次元 CCD は、フォトセルの配列パターンから、斜め線での誤差が大きくなる問題を持っている。すなわち、線の角度で誤差量に変化する。さらに CCD は、極めて小さな面積に多数のフォトセルを配置するため、互いに光が漏れるという現象を生じ、高精度レンズを用いて焦点円を十分に小さくしても、解像度が向上しないという現象を起こす。また、CCD の各フォトセルを小さくすれば分解能が向上するが、小さくすると、他のフォトセルに電荷が移動するブルーミング現象が顕著となり、誤差が増加する。しかし、CCD を大きくするとレンズも大きくしなければならなくなる。ブルーミングは、高い明度差の被写体で大きな影響が出る[4]。また、フォトセル数が多いため、各フォトセルの感度差を調節する情報を保持できず、補正ソフトウェアで修正するため、誤差を見積もれない。このため、CCD カメラは、被写体が極めて限定され、高精度高再現性データ作成には不向きである。

5-2 ドラム・スキヤナ

図5に構造を示すドラム・スキヤナは、物理的に dpi 数が大きいので、写真印刷用の高密度スキヤンに多用される。



Focusing Error

図4. CCD カメラの構造

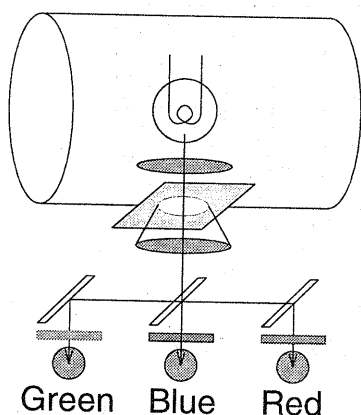
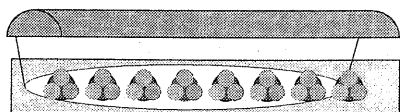
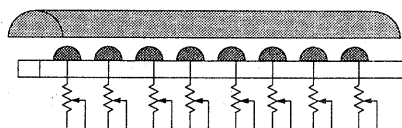


図5. ドラム・スキャナの構造

ドラム・スキャナでは、フィルムとドラムの間隙によって生じる光の干渉縞のノイズが混入する。この光干渉縞を防ぐ為、パウダーかオイルを塗布する[5]。この処理で、分解能は低下する。また、この処理によって、フィルムには回復不能な傷が付くため、十分な精度保証を保持したフィルムを作成しても、厳密には、一度限りのスキャンのみ有効となる。フィルムの光学的複製では、オリジナルと完全に同一精度の情報を保持し得ず、この問題の解決とはなりえない。

ドラムの真円度は、あまり高くできず、ドラムがシリンドリカル・レンズとして作用し、回転による振動で、焦点円の直径が大きくなる。焦点円を小さくすると、振動に起因する繰り返しノイズが混入する。そのため、センサーの移動距離を小さくしてdpiを大きくしても、図3に示すように焦点円が互いに重なり、誤差が大きくなる。すな



Focusing Error

図6. シリンドリカル・レンズ方式フラット・ベッド・スキャナの構造

わち、dpi は大きな数値となるが、空間周波数(分解能)は低くなる。商業写真に求められる被写体の傷などの消去には良いが、高精度撮影には適さない。さらに、フィルムを損傷するため、高精度スキャニングには、最も不適である。

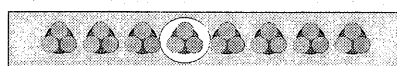
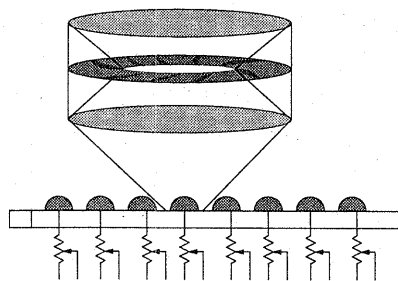
5-3 フラット・ベッド・スキャナ

フラット・ベッド・スキャナは、レンズの形状により、シリンドリカル・レンズ方式(以下C方式と呼ぶ、図6)と、円形ズーム・レンズ方式(以下Z方式と呼ぶ、図7)に分けられる。高精度のものは、各CCDの感度が補正され、ステップ・モータの移動間隔に合わせて3列のCCDを配置し、同一点の光をRGBデータとする。

C方式では、レンズの集光特性が楕円で、フォトセル列方向の光が混ざってしまう。従って、縦と横での解像度が異なる。一方、Z方式では、焦点円に起因する誤差は生じず、縦横の分解能の差は、ステップ・モータとギアの精度となる。

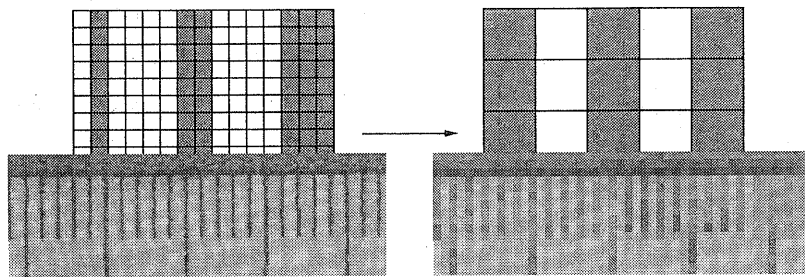
両方式共に、固定光量ランプで被写体を照射するが、C方式には絞りがなく、CCDへの光量が絶対光量となり、露出過剰被写体や不足被写体に対し、光学的補正ができない。Z方式では、レンズが絞りを持つため、常に最適光量をCCDに与えられ、CCDの直線性の良い部分を使用できる。

C方式では、光学限界解像度以下でスキャンする場合、補正ソフトウェアでdpiを低下させるため、大きな擬似解像度誤差が混入する(図8)。Z



Focusing Error

図7. 円形ズーム・レンズ方式フラット・ベッド・スキャナの構造



5300dpi (光学的解像度)

1060dpi (ソフトウェアでの減 dpi)

図8. 補正ソフトウェアによる dpi の減少で生じる誤差

方式では、ズーム・レンズを使用して投影像の大きさを変更して光学的に dpi を低下させるため、補正ソフトウェアによる誤差は混入しない。

以上の点から、高精度高再現性デジタル化には、Z 方式のフラット・ベッド・スキャナが適し、C 方式のスキャナは、不向きであることがわかる。

6. デジタル化ビット数に起因する量子化誤差

量子化誤差は、1) 機械的 dpi に依存する上述の誤差と、2) RGB の明度階調の段数に依存する誤差に分類できる。1) の誤差は、線のエッジを、フォトセルの測光面がまたぐことによって顕著に現れる。2) の例は、被写体の明度階調が低いか、または色相差が少ないときに顕著に現れる。本節では、2) に関して検討する。

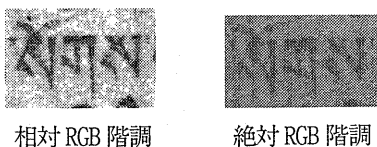
高精度スキャナでは、4D 程度の明度階調をデジタル化できる。4D は、大きな明るさの差であり、それに対して、被写体の明度差(色相差)が少ない場合、8 ビットでの 256 階調では、差が現れない。従って、スキャナが被写体の最低濃度と最高濃度を測定し、その差を 256 段階もしくは、それ以上のビット数に対応する段数にする必要がある。図9は、RGB 各 8 ビットでの相対明度・色相と、RGB8 ビットでの絶対明度・色相でのスキャン結果である。約 3.5D を 8 ビットでデジタル化したため、絶

対階調では、ほとんど情報が含まれず、明度及び色相には大きな誤差を含む。

RGB を各 16 ビットでデジタル化すれば、被写体の濃淡差が 3D を超える場合でも、量子化誤差はかなり小さくなる。なお、完全に相対 RGB 階調でデジタル化すると、色相が合わなくなる。そのため、各 RGB 基準値(一般に白色、グレイ、黒)から相対値を求めなければならない。従って、このような補正機能を持ち、同時に 12 ビット以上の階調表現が可能でないと、コントラストの大きい被写体も、逆に小さい被写体も、量子化誤差が無視できないほど大きくなってしまう。

絶対 RGB 階調では、再生時に濃度補正を必要としない利点がある。相対階調表現では、再生するソフトウェアでの補正が必要となる。なお、一般の画像処理ソフトウェアでは、12 ビット RGB が限界であり、さらに、ディスプレイ・モニタへの出力デバイスが 8 ビットであるため、ディスプレイ上では、下位ビットが捨てられ差が現れない。しかし、データとしては、可能な限り大きなビット数でデジタルデータ化しなければならない。8 ビットの例である図9の左では、下位 2 ビット分の情報となり、誤差が極めて大きく、画像処理に使用可能な情報を持つビット数も不足する。

スキャナの使用目的の大半は、高再現性ではなく、肉眼で結果を見たときの美しさである。従って、スキャナ内の補正ソフトウェアの処理を知ることが極めて重要であるが、ほとんどの機種では公開されていない。しかし、主に高域特性を下げ、エッジを強調していることが知られている。すな



相対 RGB 階調

絶対 RGB 階調

図9. スキャナによる適正階調割り当て

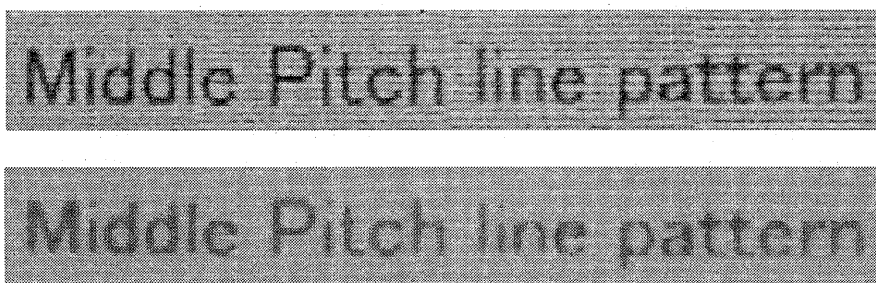


図10. 細線のスキャン結果 上: GENASCAN 5000、下: ProPhotoCD 64BASE

わち、dpi は大きい、細かいものは消え、境界のエッジがシャープになるように処理される。

7. スキャナの選択

以上の分析から、フラット・ベッド・スキャナで、円形ズーム・レンズ方式が選択される。本資料では、デジタル化の条件は、8000dpi 以上の分解能を持ち、明度差が僅少であるため 12 ビット以上の階調でのデジタル化が必要とされる。

上記の条件で、補正ソフトウェアの処理内容から、8000dpi クラスでは適切なスキャナがなく¹、5300dpi の GENASCAN 5000 (大日本スクリーン製造) を選択した。本スキャナは、高再現性を考慮して開発された。しかし、分解能が 5300dpi であるため、本資料の最細線には、エッジの位置と濃度に対して目視可能な誤差が含まれることになる。

8. スキャナの分解能と再現性の検証

解像度が十分であったとしても、スキャナの解像度の検証は必須である。本研究では、光学分解能が、最細線の量子化ノイズに大きく影響するため、特に必要となる。量子化ノイズとスキャナの構造に起因する再現性を検証するため、GENASCAN 5000 と、フィルムのデジタル化に多用される ProPhoto CD (Kodak) の 64BASE (以下 64BASE) を比較し、上述の分析を評価した。

ProPhoto CD は、シリンドリカル・レンズ方式で、64BASE は、35mm フィルムを 4069×6144 ピクセル (約 4270dpi) のイメージとする。その最大光

学解像度と内部処理階調は非公開で、出力は RGB 各 8 ビット階調である。GENASCAN 5000 は、最大光学解像度 5300dpi で、ピクセル数は 8000 である。階調は、内部処理が RGB 各 12 ビット (16 ビット TIFF 出力) である。写真撮影用ズーム・レンズを採用しており、誤差を最小限にしている。なお、使用した GENASCAN 5000 は、機械的誤差の調整前であり、やや精度が落ちている。

図 10 は、最大解像度での細線のスキャン結果である。横細線と文字は、100% 黒であり、最良スキャン条件である。線幅に対するピクセルの数は、64BASE ではほぼ 1 であり、左の最も線間隔が狭い部分で、線間隔は、線幅の 3 倍である。線間隔は、右へ線幅の 4 倍、5 倍、6 倍である。この資料のスキャンで、肉眼でも量子化誤差と分解能を検証することができる。GENASCAN 5000 でも、線幅がピクセルサイズとほぼ等しいため、上下のピクセルにかぶさり線間がグレーとなるが、線間が広がるとグレーが白に近づき、解像されている。一方、64BASE では、最左端でも、線間のグレーのままで、完全には解像されていない。この差は、4270dpi と 5300dpi から生じている。

図 10、11 は、64BASE が、CCD からの直接出力を得られないため、両機種とも標準出力データを経無処理で図示した。なお、比較のため階調はどちらも 8 ビットである。このスキャンの結果、GENASCAN 5000 であれば、線幅が 1 ピクセルという最悪の条件でも、5 ピクセルの間隔があれば、誤差 30% 程度 (濃淡差比率による) で分解していることがわかる。

¹ チベット文字固有の文字隅の鋭角が消えてしまうなど、補正ソフトウェアによるアーティファクトが多く、測定不能な誤差が大きすぎるためである。

最細線(線幅 0.4mm)の誤差検定のためより細かい金尺目盛りを使用した。実際の資料と同時に撮影したJIS1級金尺を図11に示す。金尺目盛り線(線幅 0.15mm)は、64BASEで、ほぼ1.5ピクセルに対応しており、図10より明瞭に分離している。この差は、線幅に対し1から1.5ピクセルへ増加し、量子化誤差が減少したことに起因する。64BASEでは、補正ソフトウェア起因の量子化誤差以外の誤差が、図より判明した。GENASCAN 5000であれば、最細線での誤差は、可読許容範囲内となる。

9. 結論

分析したスキャナの特徴から、上述の簡単な方法により、分解能が実測可能であることを示し、同時に本資料での最細線の分解と誤差の実測が可能であることを示した。また、2機種の結果の検討から、スキャナが目的と用途別に異なった結果を生成することを示した。再現性を目的としたGENASCAN 5000では、線幅による量子化誤差、および濃度階調による量子化誤差が、理論に近似し[6]、出力結果に、画像処理技法を活用できる。64BASEは、内部で処理された出力であり、エッジ検出などの画像処理が困難となる。このように、出力データの精度と誤差の計測は、資料の再現性保証と後の処理のため、極めて重要である。

本研究は、目的に合致したスキャナの選択基準となる各種の誤差を示し、簡便な結果の評価法を示し、実測した点で、重要な成果であると言える。

次は、精度の判明しているデジタル画像データの、ディスプレイ・モニタでの高精度再現に関し

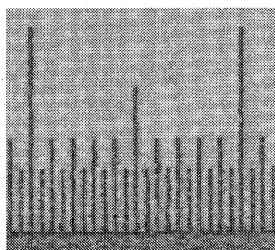
ての研究結果を報告する。

謝辞

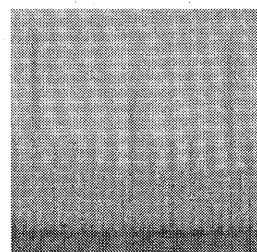
本研究は、文部省科学研究費補助金を受けている。株式会社ニコン、(株)堀内カラーの川瀬氏と神阪氏に感謝する。特に、大日本スクリーン製造(株)の岸田氏及び実原氏には、スキャナとCCDカメラの理論と実機での誤差に関して具体的にご教授を頂き、深く感謝する。

参考文献

- [1] 柴田みゆき et al., 北京版チベット大蔵經の高デジタル画像化：写真撮影過程，情報処理学会，情報処理学会研究報告 Vol.98, No.97, pp.73-80, 1998年10月.
- [2] 片岡裕，文字構造と文字コード・デザインの関係，財団法人国際情報化協力センター，平成10年度通商産業省工業技術院委託国際規格共同開発調査「多言語情報処理環境技術」成果報告書，pp.107-123, 1999年3月.
- [3] 田中益男，写真の科学，共立出版，1992年1月25日.
- [4] 竹村裕夫著，CCDカメラ技術入門，コロナ社，1997年12月15日.
- [5] 鹿野一則編，「コマーシャル・フォト・シリーズ」明解クリエイターのための印刷ガイドブック 製版・印刷編，玄光社，1988年6月15日.
- [6] 長尾真監訳，デジタル画像処理，近代科学社，1978年12月10日。(Azriel Rosenfeld and Avinash C. Kak, Digital Picture Processing, Academic Press, Inc., 1976.)



GENASCAN5000によるスキャン結果



64BASEによるスキャン結果

量子化誤差・補正ソフト由来の誤差が少ない

量子化誤差・補正ソフト由来の誤差が大きい

図11. 実資料によるスキャン結果比較(RGB 8ビット階調)