

テレセントリックレンズを採用した 大型イメージスキャナの開発

アイメジャー株式会社
代表取締役
一ノ瀬修一

1. はじめに

「光学設計のあれこれ」というお題を頂いた。私は、国産初の普及型カラーイメージスキャナの開発の現場に居合わせた幸運を皮切りに、長らく商品設計の現場を歩いてきた。そこで、量産品イメージスキャナの製品仕様の、特に光学解像度に注目して、どのような背景から製品仕様が決まるのか、基本的な要因について整理を行った。また、弊社独自開発の大型イメージスキャナ「オルソスキャナ」の開発経緯を「光学設計」の視点でまとめたのでご報告する。

2. イメージスキャナの商品設計

2-1 現場にて

1985年当時、特殊用途に使われていたフルカラーイメージスキャナの価格は、150万円程度の価格であった。600ppi, 24bitColor, A3サイズ。PCとのインターフェースは、GP-IBであった。

(※ppi: pixel per inch, 紙に印刷する業界では、dpi表記が主流だが、ディスプレイやPhotoshop等は、ppi表記になったので、こちらで統一する。)

当時、EPSONは、フルカラープリンタの開発を行っており、その高品質ソース画像の生成装置として、カラーイメージスキャナを開発を行った。カラーインクジェットプリンタは、1994年にMJ-700V2Cの登場により華々しいデビューを飾った。カラーイメージスキャナは、それに先だって、1986年に有効スキャン寸法がA6サイズのGT-3000が²⁾、1988年にA4機のGT-4000が登場する。当時の光学解像度は、GT-4000が、200ppiであった。

商品企画の常であるが、発売と同時に商品のスペック競争が始まる。毎年、海外営業拠点の責任者が集まって、次の商品企画をどうするか、長い会議が開かれる。イメージスキャナの売り文句の中でも、光学解像度は数値表現であることから訴求力が有る。200ppiの次は、300ppi, 400ppi, 600ppi, 800ppi, 1200ppiと次々に営業からの要求仕様のハードルが高まる。

商品は、「誰が、いつ、どこで、どのように使うのか?」の用途1, 用途2, 用途3の積分量のようなものだから、設計者は、とにかく「そんな高い解像度を誰が使うのか?」「そのような巨大な画像を扱えるハードウェアスペックを入手するコストはいくらになるのか?」といったことを実際に調査し、自ら体験し、無理難題を言う営業と戦わなければならない。だが実は、そうした議論はメーカー社内の内部事情ではなく、そもそも顧客はどのようなことを実現したいと考えているのか。その目標を達成するためには、現場で使われるイメージスキャナの製品仕様に換算するとどんな能力が要求されるのかを調査する日々であった。そのような作業を繰り返していく内に身に付けるのが商品企画における「仕様決め妙」なのだろうと考えている。

2-2 イメージスキャナの基本仕様

(1) 光学解像度: 原稿を空間分解する光学的能力。一般に、ppi [pixel per inch]で表記される。光

光学解像度に影響を及ぼす要因部品は、レンズ、及びセンサの画素数である。下記に、EPSON 社の当時のフラグシップ機 ES-10000G の MTF (Modulation Transfer Function) 評価結果を示す³⁾。

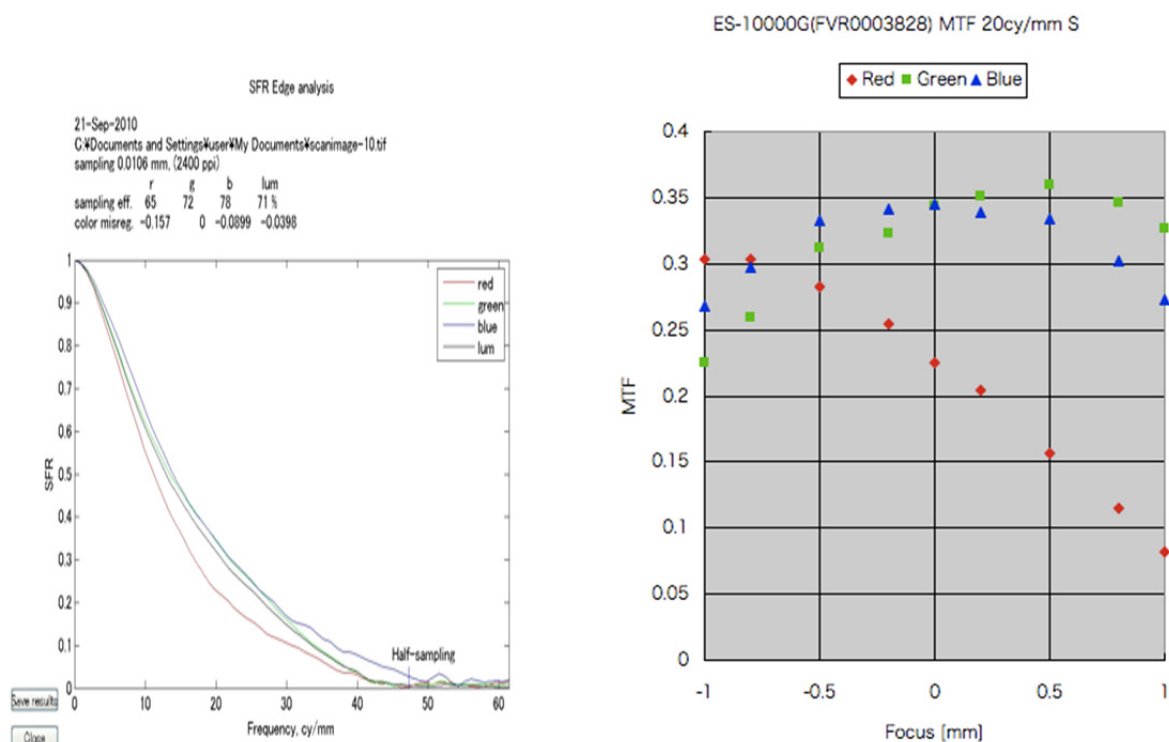


図1 ES-10000G MTF 特性 s/n: FVR0003828

(2) 階調性：原稿の明暗情報を子細に分離して取り込む際の指標である。階調性に影響を及ぼす要因部品は、A/D 変換素子の bit 数、およびセンサ 1 画素に投入される蓄積光子（フォトン）数である。写真撮影における露出(EV)範囲，ラティチュードに相当する。光ショットノイズ(N)と蓄積フォトン数(S)の関係は、

$$N = \sqrt{S} \quad \text{(式 1)}$$

で決まるため、ダイナミックレンジ(S/N)は、

$$(S/N) = \sqrt{S} \quad \text{(式 2)}$$

となる。よって信号として貯めたフォトン数(S)の平方根以上のダイナミックレンジは確保できない。一般的なイメージスキャナが蓄積しているフォトン数は、数万フォトンである^{4,5)}。

(3) 色再現性：CIE1931により肉眼の感じる色は定量化された。肉眼は3つの独立した色信号により世界を見てると仮定し、三刺激値をモノサシとして使うことで定量化する。一般的には、Red, Green, Blueの3つの独立した色分解光学系に、それぞれ階調情報を持たせることで、原稿の持つ色空間をデジタルフルカラー画像として入力することが可能となる。色再現に影響を及ぼす要因部品は、光源の発光分光特性、センサに載せる色フィルタの透過分光特性である。今回は、光学設計がテーマなので、光学解像度の設計について述べる。

2-3 光学解像度の設計

「誰が、いつ、どこで、どのように使うのか？」に沿って用途を網羅するための基本要因を整理すると、イメージスキャナにセットされる原稿の要因と、そもそもその原稿を使う人間の肉眼の性能に迫り着く。これらを以下の様に整理した。

表 1 光学解像度に関連する要因

要因	要素	指標	PPI 統一表記	出典
肉眼	水晶体と網膜	視力1.0	291	
塵	髪の毛	70 μ m	363	
印刷物	CTP分解能	175線	350	
スマートフォン	Display	pixel density	326~401	
FAX	G3規格	8本/mm	203	
デジタルアーカイブ		300~400	300~400	[6]
VRゴーグル	Display	pixel density	900	
写真フィルム	銀塩粒子	100~200本/mm	2540~5080	[7]
写真フィルム (コピー用)	銀塩粒子	400本/mm	10160	[7]

30cm 離れた原稿上で、視力 1.0 の肉眼が、どのくらいの光学分解能を持つのか計算した。

視力 1.0 の定義は、角度分解能 1 分である。角度 1 分は角度 1 度の 1/60 なので、所定の距離に置いた資料を見分ける光学分解能は以下の計算式で得られる。まず角度 1 分をラジアン表記に変換すると

$$\text{角度 1 分} = (\pi/180)/60 \text{ ラジアン} \quad (\text{式 3})$$

例えば、30cm 離れた原稿上で視力 1.0 の空間分解寸法を計算すると、

$$300\text{mm} * (\pi/180)/60 = 87.27\mu\text{m} \quad (\text{式 4})$$

この寸法を ppi 表記に変換すると、

$$25.4\text{mm}/0.08727\text{mm} = 291\text{ppi} \quad (\text{式 5})$$

となる。(私は、ニクイと覚えている。) ちなみに、髪の毛の直径は 70 μ m なので背景が同色の場所に髪の毛が落ちていた場合、目を近づけて見ない限り「見えない」サイズであることが興味深い。

3. オルソスキャナの開発

3-1 誕生の背景

当時流行していたパソコン通信 (Nifty-Serve) を通じて知り合った京都の文化財研究者の熱い要望を受け、赤外線イメージスキャナを開発した⁸⁾。直後、ある測量会社から相談が持ちかけられた。その企業の業務は、埋蔵文化財の発掘作業と報告書作成作業であった。土器などの埋蔵文化財は、文化財保護法により守られている。地中から文化財が見つかった場合は、公共事業はストップし、報告書完成まで工事は再開できない。そのため、報告書作成作業の効率化が期待された。土器などの形状を報告するために、実測図が描かれる。実測図とは土器の設計図面と言えるもので、正面図や側面図に相当する図面である。この正面図や側面図は、正射投影画像、もしくはオルソ画像と呼ばれる図面である。そこで、埋蔵文化財を撮影した写真の直接トレーシング (なぞる) 作業によって、この実測図を製作する手順の開発が試みられていた。それまで手作業で行っていた実測図製作業務を写真撮影の手法によって置き換えた発明が、正射投影撮影装置であった。

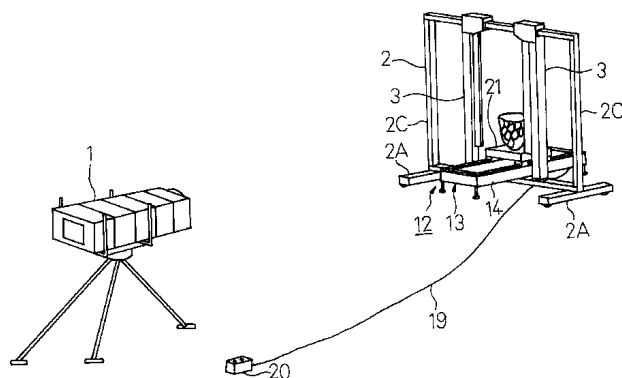


図 2 正射投影撮影装置⁹⁾

この撮影法は、暗室内でのバルブ（カメラのシャッターを開けばなし長時間露光）撮影であることが特徴だ。レンズ光軸に垂直な面内にスリット光を投光し、その「等高線光」の中を移動式ステージに乗せられた被写体（土器）がゆっくりと通り抜ける。パンフォーカス（被写界深度の深い）画像を得ることができる撮影法である。望遠レンズを使い、被写体から数メートル離して撮影することにより「擬似的な」オルソ画像を得ていた。しかし、銀塩フィルムを使った暗室内での撮影法であったため、さまざまな制約があった。例えば、出張撮影を行う場合、現場（往々にして体育館などが当てがわれる）に暗幕を張り暗室を作る。その作業は、撮影に入る前の準備時間と人件費が増大し、課題であった。そこで、新たに要求された仕様は以下の通りであった。

要求仕様 [高さ 1m の土器の撮影]

- (1) オルソ画像であること。
- (2) デジタル画像であること。
- (3) 暗室不要であること。
- (4) タクト。撮影にかかる時間。20分/点。
現状手法は、3日間で50点撮影。
- (5) 最大被写体寸法：直径 50cm×高さ 100cm の土器
- (6) 光学解像度：10pixel/mm (254ppi)
- (7) 可搬性：分解可能でありライトバンで持ち運べること。
構成パーツの重量は 20kg 以下であること。
分解組み立てによる精度再現性が高いこと。

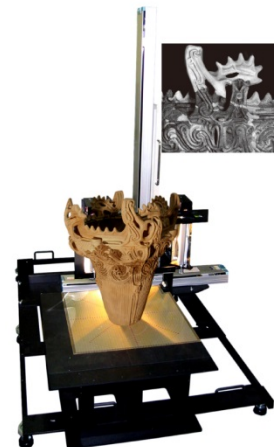


図3 正射投影イメージスキャナ¹⁰⁾

こうして3年の開発期間を経て完成したモデルが、オルソスキャナである^{10,11)}。光学設計上でのポイントは以下の点であった。至近距離でオルソ画像を得る光学部品として、テレセントリックレンズを選択した。タクトから逆算すると、一度に、10cm以上を撮影する必要が生じ、レンズは大砲の弾のように巨大なサイズになる。そこで、ラインセンサであることを逆手にとって、巨大なレンズを短冊形状に切断してしまうことを思いついた。オルソスキャナが完成した後の文化財修復関連の学会で、現物を展示公開したところ、全く同じタイミングで全く同じ目的の光学設計の異なる別の商品が展示された。奇遇にも発明は同期するようだ¹²⁾。オルソスキャナを天体望遠鏡の屈折望遠鏡に例えるならば、この開研の発案は、反射望遠鏡に相当する。

3-2 寸法精度への要求

オルソスキャナの自社専用機を導入した後、とある展示会にて（非常に古いが現役で使用されている）大型図面の画像入力業務の相談を受けた。その要求仕様は以下の通りだった。

要求仕様 [1.8m×7m の図面の複製]

- (1) 寸法精度が、1メートル長にて、±0.1mm未満であること。

これは、言い換えると±0.01%でありJIS定規1級を越える精度が要求される。イメージスキャナの仕様として挙げた代表的な3点の機能の他、第4番目の機能として、寸法精度が重要な場合がある。イメージスキャナの主たる用途は、アナログ記録をデジタル化するために画像入力することである。古地図や、古い設計図面などを再度CADデータにして再利用するためには、画像入力装置であるイメージスキャナの寸法精度が重要である¹³⁾。寸法精度に関連する一般的な数値を以下に羅列した。

表 2 寸法精度に関する一般的な数値

要因	指標	% 統一表記。
市販イメージスキャナ	0.3~1%	0.3~1%
CAD用プロッター	0.25mmまたは±0.1%のいずれか大きい方	±0.1%
JIS定規 2級	0.3mm/1m	0.03%
JIS定規 1級	0.2mm/1m	0.02%
鉄 線膨張係数	11.8E-6/K	0.012% (Δ10°C)
アルミニウム	23.1E-6/K	0.023% (Δ10°C)
木材 (繊維方向)	3~6E-6/K	0.006% (Δ10°C)
木材 (繊維に垂直)	35~60E-6/K	0.06% (Δ10°C)
氷 (0°C)	52.7E-6/K	0.05% (Δ10°C)
インバー材 (64Fe,36Ni)	0.13E-6/K	0.00013% (Δ10°C)

3-2-1 要因 1 : 温度

まずすぐに判ることは、この仕様を満足するイメージスキャナは、使用する部材の線膨張係数を考慮するならば、温度管理が必須となることだ。例えば、イメージスキャナの筐体を構成する部材として鉄を使った場合、10°C変動した際に、0.012%の伸縮が生じる。これは、要求仕様に較べ無視できない要因である。ちなみに木材（繊維方向）の線膨張係数は、鉄の半分であることが興味深い。私が小学生時代に使っていた30cm定規は、竹で作られていたことを思い出す。

3-2-2 要因 2 : オペレータの作業性 (タクト)

もう一つは、作業性である。1枚の図面を撮るためのセッティング時間、もしくは撮影後の画像を使える状態にするまでの画像処理等の時間が、想定したタクト（時間）や、コストを越えてはいけない。しかし、中心投影レンズで撮影する限り、根本的な問題が発生することがわかる。

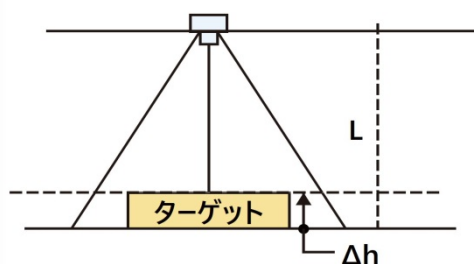


図 4-1 中心投影レンズ

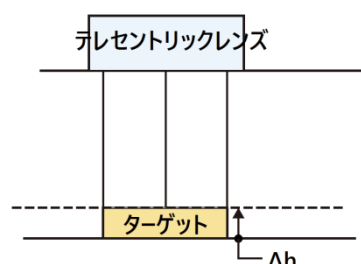


図 4-2 テレセントリックレンズ

例えば、撮影距離 $L=1000\text{mm}$ 、被写体の設置高さ誤差 $\Delta h=1\text{mm}$ と仮定すれば、0.1%もの寸法誤差になる。 $\pm 0.1\text{mm}$ に押さえるためには、 Δh を 0.1mm に管理することとなり運用上困難である。そこで、 $L=10$ メートル近くレンズを撮影対象物から離さなければならなくなり、これも現実的な光学設計ではない。（※写真製版の時代は、実際に数メートル離れて撮影する高精度かつ巨大な望遠レンズを用いた撮影装置で版下を製作していた。）テレセントリックレンズを使うことで、オペレータの作業性は格段に改善される。具体的には、図面の設置精度は、1mm程度の浮き沈みであれば無視できる。

3-3 巨大作品への対応

自社専用オルソスキャナの導入により、出張スキャンニング依頼が来るようになった。代表的な事例が、全長 2mを越える掛け軸の複製業務である。その要求仕様は、分割撮影した画像の接合において、次の2つの仕様を満たす必要があった。

要求仕様 [2mの掛け軸の複製]

- (1) 絹本（けんぼん）の絹地の継ぎ目において、絹地が繋がること。
- (2) 分割撮影した画像の継ぎ目において、明暗差が生じないこと。

この要求仕様を分析する。(1)は寸法精度に関連する。(2)は階調性に関連する。絹本に使用する絹地の布のピッチを計測すると、縦糸と横糸でピッチが異なることが判る。手元にあった絹本の絹地の計測結果は、次の通りであった¹⁴⁾。横糸のピッチ(縦方向の密度):3.61本/mm。縦糸のピッチ(横方向の密度):2.55本/mm。ppiに換算するとそれぞれ、91.7ppi, 64.8ppiであった。以上から、最低でも、200ppiでの寸法精度が期待される。1メートルあたりの、寸法精度に換算すると、

$$0.127\text{mm}/1000\text{mm} = 0.0127\% \quad (\text{式 6})$$

従って、絹本を歪み無く繋ぐためには寸法精度±0.01%が期待される。

次に、画像のつなぎ目において明暗差が生じないための階調再現性の精度について述べる。色差(Lab)計算で用いる明度(L)の式より、

$$L=116*(Y/Y_0)^{(1/3)}-16 \quad (\text{式 7})$$

仮にY(輝度)の変動が1%の時に、色差 ΔL が最大となるのは、明度100の箇所であり、その差は $\Delta L=0.39$ である。よって許容される色差を $\Delta E<1.0$ と仮定した時に、許容されるY(輝度)の変動は約2.5%であることが判る。実際には、イメージスキャナは、濃度計と同様に光学的黒(Optical Black)と白基準をサンプリングし、シェーディング補正と呼ばれる一次関数変換を行う自動校正機能を搭載している。その結果、光源による照射光の不均一性や、レンズによる周辺減光があったとしても「スキャニング中に時系列的変動が生じない限り」、すなわちパターン化した光量ムラである限り、このシェーディング補正機能により、演算bit精度(例えば、10bitであれば、1/1024の精度)で自動的に濃度が補正される。

以上から、撮影時の光源光量変動を例えば、1%未満に管理することができれば、生じる階調差(色差)は、最大でも、 $\Delta L(=\Delta E) = 0.39$ 未満となり、分割撮影画像のつなぎ目は肉眼では識別できないと推定された。

4. 最後に

「光学設計のあれこれ」というテーマに沿って、量産品イメージスキャナの製品仕様の内、特に光学解像度に注目して、どのような背景から製品仕様が決まるのか、基本的な要因や数値について整理を行った。また、弊社が開発したオルソスキャナについて開発に至った経緯、ならびに寸法精度についてその由来や光学的な実現手段について詳報した。さらに、寸法精度と階調性(濃度値の繰り返し再現性)の具体的な応用事例として、分割撮影した画像の接合事例における具体的な要求仕様を分析した。

今年12月には、4K/8Kの本格テレビ放送が開始される。手術医療現場では、8Kディスプレイを使った手術が実用化されている。更に、VR技術は、ゴーグル用ディスプレイの技術的進展により、視力2.0の肉眼で眺めても、本物かVRか判らない時代がやがてやってくるだろう。その時に、GigaPixel(10億画素)を越える高精細画像がコンテンツとして必要になるだろうと考えている。

「あたかもそこに本物の作品が在るかのようなリアリティー」を如何にデジタル技術で実現するのか。引き続き、比類無き商品の開発に向け尽力する所存である。

参考文献

- 1) 松下ら. カラーイメージスキャナ設計技術, トリケップス, 1991, 184p.
- 2) 産業技術史資料データベース <http://sts.kahaku.go.jp/sts/detail.php?no=102090041038>.
- 3) <http://imeasure.cocolog-nifty.com/blog/2010/09/post-e15c.html>
- 4) 日本画像学会技術講習会, 1999.6.24 <http://www.imeasure.co.jp/pdf/NihonGazouGakkai.pdf>
- 5) http://imeasure.cocolog-nifty.com/blog/2008/03/post_2675.html
- 6) 国立国会図書館 資料デジタル化の手引き 2017年度版.
- 7) 可視化情報学入門, 1994年, 東京電機大学 廣川利男, p84.
- 8) 画像ラボ, 2000, vol.11, no.5, p.7-12.

- 9) 【登録番号】第 2523677 号【出願番号】実願平 5-56556 (1993)
 - 10) 画像ラボ, 2004, vol.15, no.12, p.19-24.
 - 11) 株式会社シン技術コンサル, 正射投影イメージスキャナ SIOS
 - 12) <http://www.kaiken-net.jp/products/pdf/1-4.pdf> (accessed 2018-07-31).
 - 13) デジタルアーカイブ学会第二回研究大会, 研究発表, B31 (2018).
 - 14) <http://imeasure.cocolog-nifty.com/blog/2018/06/post-f889.html>
-



一ノ瀬修一 ICHINOSE, Shuichi
アイメジャー株式会社 代表取締役
〒390-0876 長野県松本市開智 2-3-33