

デジタル系 MTF の開発秘話とその周辺

Untold and related story in MTF development for digital systems

岐阜大学 藤田 広志

(大学院 医学系研究科 再生医科学専攻 知能イメージ情報分野)

1. はじめに

白石画像部会長から、「第 80 回記念大会企画として、画像部会の原点に戻り、物理評価と視覚評価の在り方と重要性というテーマで画像評価の本質を語り合い、その必要性の理解が難しくなっている若い研究者へのメッセージを届けたい」という趣旨での講演の依頼がありました。かつて第 4 代画像部会長（当時は分科会長と呼称）を 5 年間にわたり務めましたので快諾しましたが、講演の内容が定まらない中、白石先生との議論で、表記のよう講演タイトルとなりました。決して“秘密の話”ではないのですが、わざわざ語らなかつたことも少しは含んでいるだろう、ということで敢えて秘話と題しております。なお、すでに昔の話ですし、わずかに残っている実験資料と論文を引っ張り出しての短時間での執筆作業になりましたので、記憶が曖昧になっている部分も多々あり、不正確な記述があるかも知れませんが、ご容赦いただければ幸いです。

2. デジタル系の画像評価法がまだ確立されていなかった時代

筆者が研究を始めた時期は、まだ、アナログ系（増感紙-フィルム）の時代でした。ただ、デジタル撮像系としての FCR や DSA が商用化された時期でもあり、これからは確実にデジタルの時代になっていくであろう、という頃です。よって、筆者の学位論文「放射線像伝達系のエントロピー解析に関する研究」（1983 年）では、当然、増感紙-フィルムを題材にしたものでした。この当時、筆者の思いは、これからはデジタルの時代なので、学位論文を早く終わらせて、デジタルに関する研究をやりたいというものでした。こんな時期に、シカゴ大学への留学のチャンスが訪れました。

デジタル系の画像評価等について書かれた当時の解説書として、土井邦雄先生の「デジタルラジオグラフィの現状と将来」（文献 1）が挙げられます。これは、1983 年 3 月、大阪における第 39 回本学会総会での招待講演の内容が、その後の進展を考慮して加筆されたものになっています。本部会はもちろん本学会の多くの会員が、この解説書を何度も読み返して、デジタル系の画像工学に関する新しい話題について熱心に勉強をしました。この解説の構成は、「1. 緒言、2. DR システムの開発への動機、3. DR システムの主要構成因子、4. 各種の DR 方式、5. DR システムの物理的特性、6. DR システムの解像特性に影響を与える因子、7. DR システムの粒状性に影響を与える因子、8. DR システムに用いられる像処理技術、9. 像処理の効果、10. 結論、文献」となっています。デジタル系は増感紙-フィルム系に比べてシステム構成因子が多く複雑になるため、一体どのように放射線画像を評価すれば

良いのか、まだ明確になっていなかった時期ですので、この解説書はまさに“デジタル画像工学のバイブル”でした。

3. プリサンプルド MTF

上記の解説記事の中で、当時、シカゴ大学ロスマンラボ所属の大学院生であった Giger 先生（現シカゴ大学教授）の「デジタル系における解像特性に関する基礎研究」の論文内容が紹介されています（文献 2）。ある増感紙-フィルムをドラムスキャナで条件を変えてデジタル化し、デジタル系の各種パラメータ（サンプリング間隔、サンプリングアパーチャの寸法、表示系のアパーチャの寸法と間隔、画像処理など）の解像特性への影響を解析する実験が行われたもので、理論式に基づく計算機シミュレーションの結果と比較・検討がなされています。その結果として、『従来のアナログ系の MTF の考え方は、デジタル系でも利用できますが、デジタル系の不連続なデータ特性に基づくエリアシング効果について、ナイキスト周波数以下の空間周波数領域も含めて、十分に注意する必要がある』という重要なメッセージが提示されています。また、X線検出器の MTF、サンプリングアパーチャの MTF、プリサンプルド MTF（presampled MTF）（当時はプリサンプリング MTF と呼称）、デジタル MTF、画像処理効果の MTF、ディスプレイ MTF、オーバーオール MTF の概念が初めて示されています。これらの MTF の中で、プリサンプルド MTF はエリアシング効果を含まない、「デジタル系に固有な MTF」となります。

4. 斜めスリット法

筆者がシカゴ大学に留学する機会を得たのは、このような時期に該当します。最初は、DSA 装置の画像評価用ファントム製作の研究に従事しましたが（文献 3）、次には DSA あるいは I.I.(image intensifier)-TV 系の物理特性の評価の研究に移行します。そのテーマの一つとして、当時シカゴ大学に導入されていた Digitron 2 という DSA の装置を使って、アナログ系での定番であるスリット法で、具体的にプリサンプルド MTF の計測を試みます。

1) 最初は、ピクセル（画素）の中心にピタリとスリットの中心を位置合わせしようと何度も試すのですが、これは至難の業であることがすぐに分かってきます。しかも、観測できるスリット像(LSF)の測定点は、わずかに数点しかありません（図 1）。次に、スリット像を良く観察すると、図 1 (a)のように 1 点の濃淡（画素値）が最大になるところと、これに比べて図 1 (b)のように 2 点の同じ画素値が並ぶところが存在します。図 2 のスリット像からも明らかです。

2) その後、もしプリサンプルド MTF が 2 倍のナイキスト周波数以上の成分がゼロであるならば、センター配置（スリット中心と画素中心が一致する場合；図 1 (a)、図 2 “C”の位置）の MTF と半画素シフト（両中心が半画素分だけズれる場合；図 1 (b)、図 2 “S”の位置）の MTF から、プリサンプルド MTF が求まることが解析的に判明してきます（実際には、MTF ではなく位相項を含む両者の OTF の平均値）。また、もしプリサンプルド MTF が 4 倍のナイキスト周波数以上の成分がゼロであるならば、これらの両 MTF に加え、さらに $\pm (1/4)$ ピクセルシフトしたときの MTF があれば、これらの 4 つ MTF から、

プリサンプルド MTF が求まることが解析的に判明してきます (実際には4つの OTF の平均値を計算する)。これは、さらに数式で一般化されました (文献4)。

3) では、どのようにこれらの特異的な配置を実現するのか、という問題がまだ残っています。それには、「発想の大きな転換」がありました。スリット中心をピタリとセンター配置に設定しようと試みても、一般的にスリットは画素の配列系に対して、必ず数度くらいの傾きができてしまいます。完全に垂直または平行に置くことは、特殊な装置を開発しない限り不可能です。試行錯誤の結果、これが逆に大きな利点であることが分かってきます。すなわち、この“傾いたスリット (angulated slit)”には、スリットと画素位置との多くの配置の組合せを含んでいる、ということに気がつきます (図2)。すなわち、図2の2つの配置の中間点に相当するものがたくさん存在しています。

4) 次に、たくさんサンプリング点が測定できたとしても、どのデータ点がセンター配置、あるいは半画素シフト配置に相当するのか、という問題がまだ残ります。これには、図3に示すような“デジタル MTF” (スリットに対してほぼ垂直方向にスキャンしたデータ (サンプリングされた LSF 分布) のフーリエ変換より求まる) の結果を利用します。すなわち、ナイキスト周波数において、デジタル MTF が最も大きいときの位置がセンター配置で、それが最も低いとき (ゼロ) の位置が半画素シフト配置となります。

5) MTF 計測のこれらの研究と同時に、線形化の手段に必要な道具として、入力 (相対 X 線強度) と出力 (ピクセル値) との関係 (入出力特性) を示すデジタル系における特性曲線の計測法の開発にも、平行して取り組んでいます (文献5, 6)。

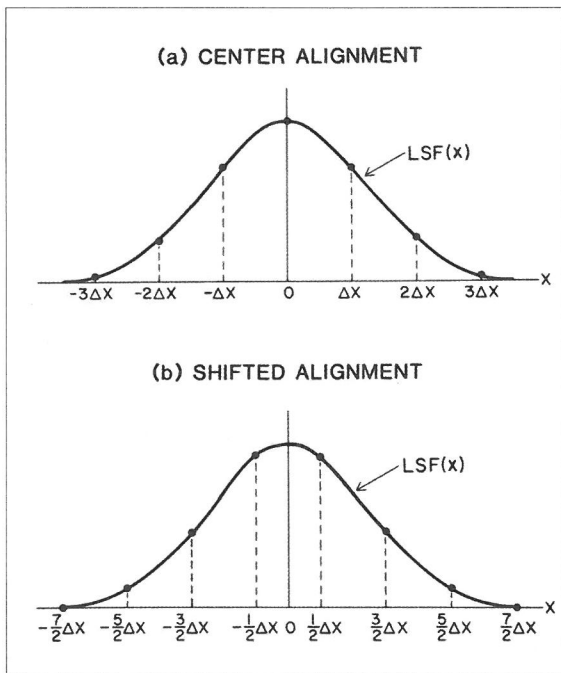


図1 アナログ LSF とサンプリング点の関係
(a: センター配置, b: 半画素シフト配置)

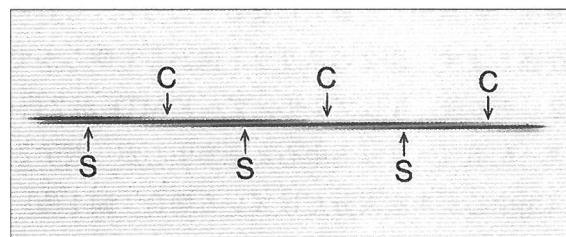


図2 水平軸に対してわずかに傾いたスリットの像 (C: センター配置, S: 半画素シフト配置)

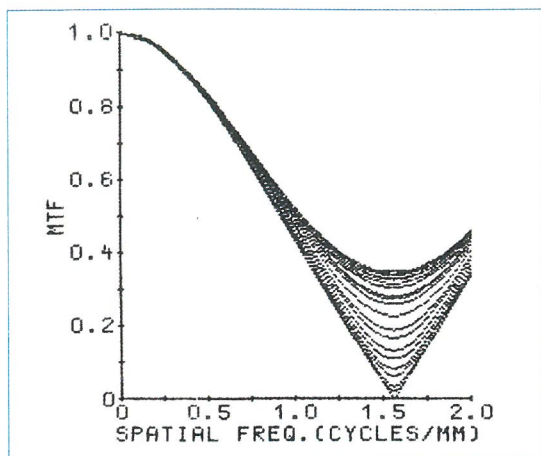


図3 デジタル MTF

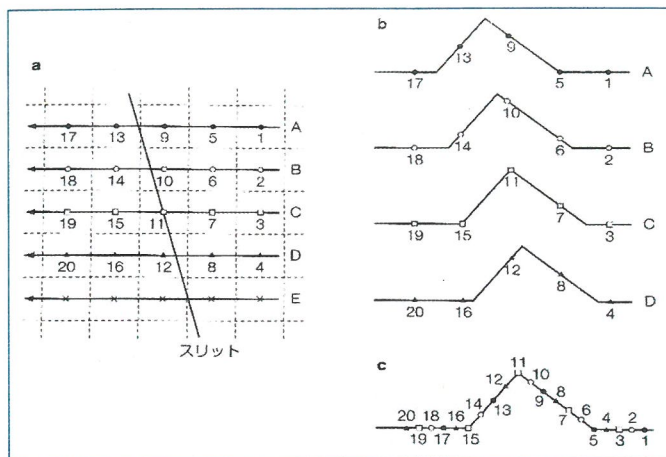


図4 わずかに傾いたスリットによる合成スリット法

5) 本手法は、プリサンプルド MTF の高周波数成分が、ナイキスト周波数の 2 の n 乗倍 (n は正の整数) を超える成分がゼロであるとの仮定のもとで、2 の n 乗個の異なる配置で得られる各 LSF 像のフーリエ変換の平均からプリサンプルド MTF が求まるというものであり、これは制約とも言えます。この制約が解除された方法もこの当時検討されていましたが、I.I.-TV 系のように、画面の周辺に歪みが存在する系 (そんなに長いスリットは使えない) では、実際的ではありませんでした。その実現については、後述するように、FCR で可能になります。

5. プリサンプルド MTF 計測法の高度化

この MTF の実験や論文の作成過程で、いろいろなアイデアがさらに創出され、また、さらなる応用論文等が作成されています。

- 1) シカゴ大学に導入された世界最大の I.I. を用いた I.I.-TV システムに本手法を適用 (文献 7)。
- 2) 画像座標系を半画素シフトした像を追加することにより (double reading)、解像度を上げるシステム開発に関する研究 (文献 8)。
- 3) プリサンプルド MTF の測定結果を利用して、撮像系のボケを補正し、DSA における正確な血管径を求める CAD の初期の研究 (文献 9)。
- 4) 留学が終了し帰国してからになりますが、当時、FCR に関する画像評価法はまだ増感紙-フィルム系でのアナログ対応の方法でしかできていませんでした。そこで、シカゴ大学で I.I.-TV に利用して開発した一連のデジタル系画像評価技術を、FCR に応用したものです。これには、当時の山口大学の 大塚先生、杜下先生、上田先生らとの共同研究により、文献 10 のように、FCR の世界初の本格的な画像評価ができるようになりました (FCR から生データを PC に取り出すところから大変でした)。
- 5) 上述のスリット法には、センター配置と特定なシフト配置を求めるという制約が存在するのですが、この制約には縛られない方法 (“合成スリット法”) は (図 4) は、すでにシカゴ大学において

実験中に基本的な考案がなされていました。留学後、これを FCR の MTF 計測に応用し、論文 11 が誕生しています。これは、“Fujita’s angulated slit method”としてもしばしば論文が紹介されており、自身で作成したすべての論文の中で、最も引用数が多い記念すべき論文となっています。また、時代が移り変わり、FPD が主流になると、再度、MTF 評価が盛んに行われるようになり、この論文が、また、多く引用されるようになっていきます。現在では、原理は同じですが、わずかに傾いたエッジ法（エッジ像分布の微分からプリサンプルド LSF が求まり、そのフーリエ変換からプリサンプルド MTF が求まる）として、発展していると言えます。

6) なお、これらを説明した解説書や教科書が当時はまだ何もない時代でしたので、1994 年に本学会より「放射線技術学叢書(7) デジタルラジオグラフィの画像評価」や、1997 年に医歯薬出版社より、「医用画像工学」として、この分野では本格的な最初の解説書や教科書が誕生するに至っています。

6. 画像部会への期待

本会への期待については、画像通信の通巻 50 号記念特集号（26 巻 1 号, 2003 年）における拙文「画像分科会を振り返る」や画像通信通巻 70 号（36 巻 1 号, 2013 年）における寄稿文「脱皮・衣替えのすすめ」でも述べました。

すなわち『画像分科会（部会）は、日本放射線技術学会の画像における先駆的なリーダーの存在であり続ける必要があると考えます。その意味でも、委員の大多数が博士取得者のメンバーで構成され、また、現役で研究をし、学術論文を書き、研究の最前線にいる必要があります。本部会誌、創刊号第 1 ページの当時の初代内田 勝部会長の原稿「出会い」にもありますように、

「後世に残る業績はここから出そう”の意気込みで進みたいものである」

が画像分科会（部会）の永遠の基本精神（“原点”）と信じます。』

最近では、イメージングバイオマーカー、Radiomics, Radiogenomics, 人工知能（特に、深層学習）、3D プリンター、8K TV システムの医療画像への応用などなど、画像部会が医師や大学/企業の工学者とも連携して、本学会を世界にリードしていく興味あるテーマがたくさん出てきています。

最後に、本部会の益々の発展を祈ります。

文献

1. 土井邦雄: デジタルラジオグラフィの現状と将来, 日本放射線技術学会雑誌, 40 (4), 581-604, (1984).
2. M.L.Giger and K.Doi: Investigation of basic imaging properties in digital radiography. 1.

- Modulation transfer function, *Medical Physics*, 11 (3), 287-295, (1984).
3. H.Fujita, K.Doi, H.-P.Chan, M.L.Giger and E.E.Duda: Dynamic and static phantoms for evaluation of digital subtraction angiographic systems, *Radiology*, 155 (3), 799-803, (1985).
 4. H.Fujita, K.Doi, and M.L.Giger: Investigation of basic imaging properties in digital radiography. 6. MTFs in II-TV digital imaging systems, *Medical Physics*, 12 (6), 713-720, (1985). 本論文の解説が、藤田広志, 土井邦雄, M.L.Giger: デジタルラジオグラフィの MTF 解析: DSA システムのプリサンプリング MTF の測定, *医用画像情報学会雑誌*, 6 (1), 1-18, (1989) に掲載されている。
 5. H.Fujita, K.Doi, M.L.Giger, and H.-P.Chan: Investigation of basic imaging properties in digital radiography. 5. Characteristic curves of II-TV digital systems, *Medical Physics*, 13 (1), 13-18, (1986).
 6. H.Fujita and K.Doi: Accurate measurement of characteristic curves of II-TV digital systems by use of aluminum stepwedge Technique, *Medical Physics*, 13 (6), 922-924, (1986).
 7. H.Fujita, K.Doi, H.MacMahon, Y.Kume, M.L.Giger, K.R. Hoffmann, T.Katafuchi, K.Ohara, and H.-P.Chan: Basic imaging properties of a large image intensifier-TV digital chest radiographic system, *Investigative Radiology*, 22 (4), 328-335, (1987).
 8. H.Fujita, M.L.Giger and K. Doi: Investigation of basic imaging properties in digital radiography. 12. Effect of matrix configuration on spatial resolution, *Medical Physics*, 15 (3), 384-390, (1988).
 9. H.Fujita, K.Doi, L.E.Fencil, and K.G.Chua: Image feature analysis and computer-aided diagnosis in digital radiography 2. Computerized determination of vessel sizes in digital subtraction angiography, *Medical Physics*, 14 (4), 549-556, (1987).
 10. H.Fujita, K.Ueda, J.Morishita, T.Fujikawa, A.Ohtsuka, and T.Sai: Basic imaging properties of a computed radiographic system with photostimulable phosphors, *Medical Physics*, 16 (1), 52-59, (1989).
 11. H.Fujita, D.Y.Tsai, T.Itho, K.Doi, J.Morishita, K.Ueda, and A.Ohtsuka: A simple method for determining the modulation transfer function in digital radiography, *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 11 (1), 34-39, (1992).

著者略歴



藤田 広志

岐阜大学大学院医学系研究科再生医科学専攻・知能イメージ情報分野 教授（分野主任）

学歴・職歴等：1976 年岐阜大学工学部電気工学科卒業，1978 年同大学院工学研究科修士課程修了，1983 年名古屋大学にて工学博士．1978 年岐阜工業高等専門学校助手，1983 年 7 月～1986 年 3 月シカゴ大学ロスマン放射線像研究所研究員，1986 年 4 月岐阜工業高等専門学校助教授．1991 年 4 月岐阜大学工学部助教授，1995 年 7 月同教授，2002 年同大学院医学系研究科に移籍．現在に至る．

所属学会・資格等：医用画像情報学会（会長），日本医用画像工学会（幹事；2017 年度大会長），電子情報通信学会（フェロー，医用画像研究会・顧問），日本生体医工学会（代議員；東海支部理事），SPIE，IEEE などの会員．日本放射線技術学会では，画像分科会長（平成 8 年 4 月より 5 年間），常務理事（平成 11 年 4 月より 4 年間），表彰委員長（平成 11 年 4 月より 2 年間），学術委員長（平成 13 年 4 月より 2 年間），平成 17 年 4 月 第 61 回総会学術大会 大会長を歴任．Asian Forum on Medical Imaging 2007 大会長（国立済州大学 1 月），12th International Workshop on Breast Imaging (IWDM2014)大会長（岐阜 6 月）．

受賞・著書等：医用画像ハンドブック（監・編著・オーム社），実践医用画像解析ハンドブック（監・編著・オーム社）はじめ，著書，論文，解説等 900 編，特許申請 70 件を越える．日本放射線技術学会学術賞(2008)，医用画像情報学会内田論文賞（1989，他 4 回），RSNA（2001，他 6 回），SPIE（1995，他 7 回）など受賞多数．これまでに研究室より，工学博士 20 名，再生医科学博士 7 名が誕生（うち診療放射線技師免許保有者 12 名）．現在，文科省科学研究費補助金・新学術領域研究「医用画像に基づく計算解剖学の多元化と高度知能化診断・治療への展開（略称：多元計算解剖学）」プロジェクト等に従事．研究室のホームページ <http://www.fjt.info.gifu-u.ac.jp/>