

マンモグラム読影のためのモニタについて

長谷川 幹夫[†], 山川 正登[†], 西 嘉一[†], 藤岡 清登[†]

[†]東京特殊電線株式会社 情報機器カンパニー 企画技術グループ 〒386-0192 上田市大屋 300
(2006年2月23日受理)

Monitor Performance in Interpretation of Digital Mammograms

Mikio HASEGAWA, Masato YAMAKAWA, Yoshikazu NISHI, and Kiyoto FUJIOKA

TOTOKU ELECTRIC CO., LTD.
300, Ohya, Ueda, Nagano 386-0192, Japan
(Received February 23, 2006)

Abstract : As digitization of mammography progress, Japan Radiological Society (JRS) and Japanese Society of Radiological Technology (JSRT) have revised the mammography guideline for film-screen systems, including articles on printing digital data onto film, in 2004. It clarified the specifics on QA control. In the meantime, the guideline has been reviewed to prepare for the softcopy interpretation and clinical studies have been conducted. Due to the particularity of mammograms, the display performance required of mammographic image displays is much higher than those of general use displays. Though it may still fall short of film, the display performance has been greatly improved and more products in the market are rated well-acceptable, thanks to higher display resolution and technical developments of peripheral circuitry and firmware. In this paper, we would first like to discuss the latest technology and regulatory trends, including comparison between softcopy and film and between softcopy and CRT, and display accuracy. We would then like to introduce our newly developed 5M monochrome LCD ME 551i2 in this paper.

Key words : Display, LCD monitor, Mammography, FFDM

はじめに

マンモグラフィのデジタル化が進み、フィルム/スクリーンシステムについては2004年にマンモグラフィガイドライン[1]がデジタル画像のフィルム表示も含めて改訂され精度管理が明確化された。現在はデジタル化本来の姿とされるモニタ診断に向けてガイドラインの見直しと臨床評価研究が行われている。

マンモグラフィ画像表示用モニタには表示画像の特殊性のため、モニタには従来に比較して一段と高度な表示性能が要求されている。現状ではモニタの表示性能はまだフィルム画像には及ばないものの、表示デバイスの高精度化、周辺回路およびファームウェアの技術開発などによりある程度評価の得られるものが商品化されつつある。

本稿は、フィルムおよびCRTとの比較、表示精度、規格動向等、液晶モニタの最新技術動向について述べ、あわせて最近開発した5Mモノクロ液晶モニタTOTOKU ME551i2の表示性能を紹介する。

1. 液晶モニタの特性と技術動向

表1に現在医用画像表示用として一般的に用いられている液晶モニタの例を示す。

表1 液晶モニタの種類

呼称	表示画素数 水平×垂直	画面サイズ		画素ピッチ mm	最大輝度 cd/m ²	解像度表示
		対角"	水平×垂直mm			
1 M	1280 × 1024	18.1	359 × 287	0.28	400~500	SXGA
2 M	1600 × 1200	21.3	432 × 329	0.27	400~500	UXGA
3 M	2048 × 1536	20.8	424 × 318	0.207	400~500	QXGA
5 M	2560 × 2048	21.3	422 × 338	0.165	500~600	QSXGA

1.1 解像度

モノクロCRTは一つの電子ビームを用い、これを水平と垂直方向にアナログ的に走査して画素空間を形成するのでCRT(ブラウン管)単体では画素数や画素サイズという概念はなく、入力画像信号の画素構成が名目上の解像度として表されることが多い。CRTモニタの解像度特性は電子ビームのスポットサイズ、走査線の数、ビデオアンプの応答特性、蛍光面の粒状性などによって決まる。これに対して液晶パネルは空間的に固定された画素をもつドットマトリックス型の表示デバイスであるため解像度は水平と垂直の画素数で表される。

画素固定型の表示デバイスでは画像信号の画素数と表示デバイスの画素数を1対1で表示しないと表示画質が低下する場合があります。特にその比率が整数倍または整数分の1以外の場合は画質の低下が著しいので注意を要する。

液晶パネルは他の表示デバイス(プラズマ、FEDなど)に比較して微細な画素を作るのに適している。しかし大画面で画素サイズの小さいものは製造歩留まりによるコストの上昇と安定供給の面から制限を受け、現状では直視型21"クラスにおいて5Mピクセル(画素サイズは0.165mm×0.165mm)が最大の表示容量となっている。

1.2 コントラスト比

コントラスト比(CR)[2]は、そのパネル固有の性能とし

て表される。バックライトの輝度を変えてもこの値は変化しない。

液晶パネルは偏光板、電極付近の分子配列の乱れ、カラーフィルタによる光の散乱などに起因し黒表示においてもある程度の光漏れが生じ、これがコントラスト比を低下させる要因となっている。近年部材の改良と生産技術の向上により暗室におけるコントラスト比 800-1000 (モノクロの場合) のものが安定に供給できるようになった。

1.3 視野角依存性

視野角を変えると複屈折性が変化するので偏光面の回転角度が変わり輝度に変化する。同じ視野角でも視線の方向によりコントラスト比が異なるので正確な表現のためには円グラフを用いる。

パネルの視野角性能は一般的には 10 以上のコントラスト比が得られる法線からの角度で定義され、モニタのカテゴリ等では水平方向と垂直方向の視野角が示されている。

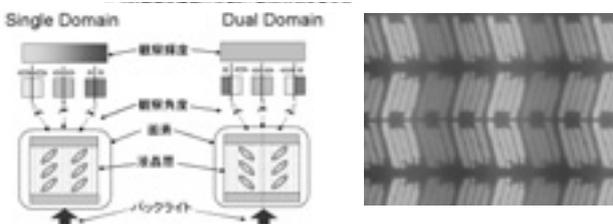


図1 マルチドメインによる視野角補償の原理

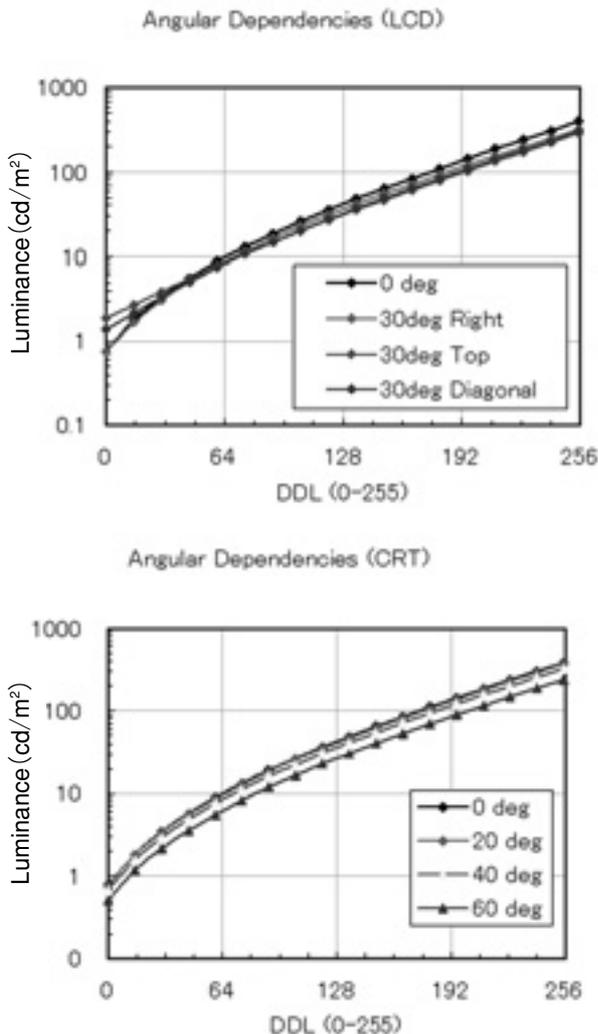


図2 輝度応答特性 (上:液晶モニタ, 下:CRT モニタ)

視野角特性はディスプレイモードに深く関係する。この補償は従来からいろいろな方法が考案され、実用化されているがCRTに比較するとまだかなりの改善余地があり研究が進められている。

次にパネルの製造において視野角改善に用いられている主な方法を示す。

・マルチドメイン

一つの画素の中を複数の領域に分割し、画素に電圧が印加されたときそれぞれの領域で液晶分子の整列方向を変えるようにした画素構造である。複数の領域を通過した光が相互に補償しあって視野角依存性が改善される (図1 IPS型の例)。

・視野角補償フィルム

液晶層の視野角による複屈折性の違いを特殊な光学的特性を持つフィルムにより補正する方法である。最近では複雑な光学特性を持つフィルムの製造が可能になり対角方向の視野角もかなり改善された。

また視野角が変わるとコントラスト比だけでなく輝度応答特性も変化するのでモニタの設置と画像観察の際には視線の角度に注意を要する。

図2に代表的な医用モニタの視野角依存性を示す。

CRTはランバertian放射面[3]であるため上下・左右・対角どの方向においても同じガンマ特性を示すのに対し液晶の場合は非ランバertian放射面で更に階調による放射分布の変化もあるので図2の上図に見られるように観察する角度によってガンマカーブが変化する。

1.4 階調

医用モニタのパネルは主として8bit階調(1フレームに同時に256階調の表示が可能)のものが用いられており、ガンマは通常約2.2で設定されている。これと異なるガンマを設定可能にするために入力画像信号と液晶パネルの間には変換用のLUTが挿入されている。変換の精度を高めるためには液晶パネルの表示可能階調数が画像信号の階調数よりも充分に大きくなければならない。そのため8bitの液晶パネルで10~12bitの階調を表示するための変換を行う。この変換はフレームレートコントロールと呼ばれ1画面の情報を複数のフレームで時空間的に表示する方法が用いられる。図3に10bit LUTと12bit LUTのGSDFとの誤差(計算値)、図4に階調変換の模式図を示す。

1.5 動画表示の画質

動画のボケは液晶分子の応答速度と画像表示方式の二つが原因する。

画素電極に電圧が印加されてから液晶分子が目標の配列に達するまでの応答時間が1フレーム時間以上かかると前のフレームの画像が次のフレームに残り結果として像が二重に表示されるのでボケとして視認される。この対策としては液晶材料の改良と回路的な補正が行われている。

また液晶モニタはフレームの期間全部に画像が提示されるホールド型表示のため静止画像ではちらつきが生じない反面、動画が流れて見える。これは液晶分子の応答速度とは無関係であり、対策としてフレーム期間にある比率で黒を挿入する方法やバックライトをスキャンする等の方法で間歇表示にする方法が実用化されている。

1.6 外光反射

外光反射は鏡面反射と拡散反射に分けられる。液晶パネルの表示面は光の干渉を利用した反射防止処理(ARコート)を施した光沢面と、表面に微細な凹凸処理(AG: Anti-Glare

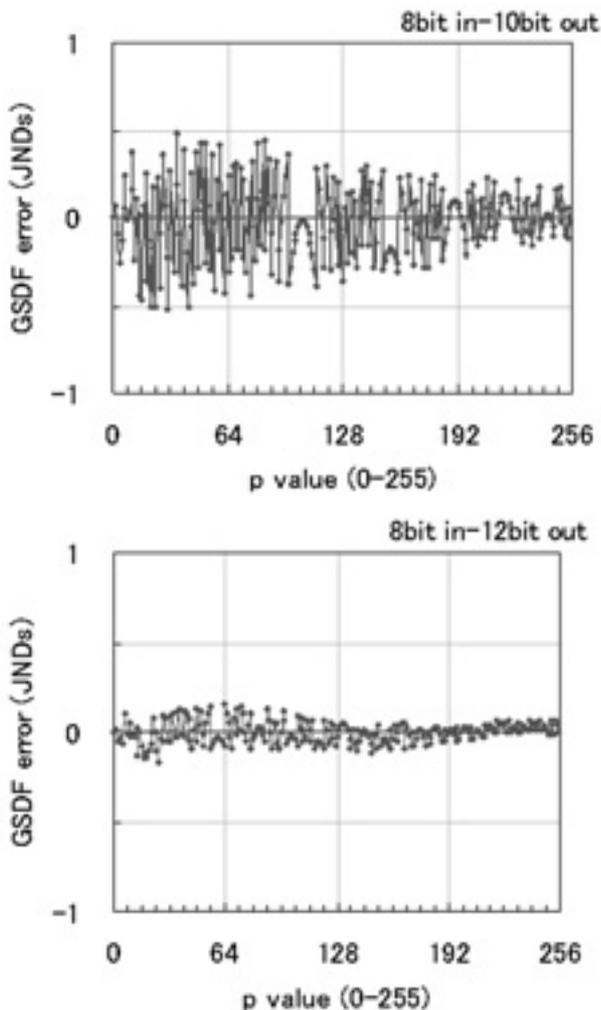


図3 10 bit LUT と 12 bit LUT の誤差の比較. GSDF との輝度誤差を JND に換算して表示上: 10bit, 下: 12bit (計算の条件は液晶パネルのネイティブ・ガンマを 2.2, $L_{max}=410\text{cd/m}^2$, $L_{min}=0.7\text{cd/m}^2$)

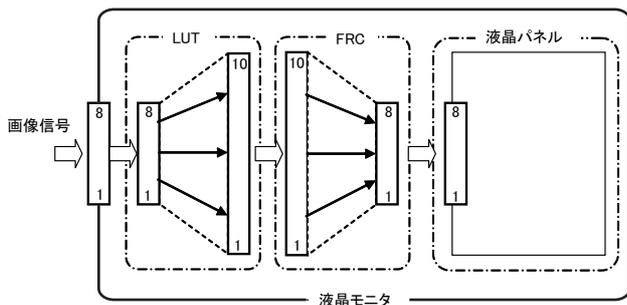


図4 階調変換の模式図

表2 マンモフィルムとモニタの比較

	マンモフィルム	5M CRTモニタ	5M液晶モニタ
表示画素数	3,600×4,800	2,048×2,560	2,048×2,560
画素ピッチ (mm)	0.05	0.148*	0.165
表示面サイズ (mm)	180×240	304×380	338×422
空間解像度 (dot/deg.)	104	35.4	31.7
最大輝度 (cd/m ²)	4,200	500	500
最小輝度 (cd/m ²)	0.2	0.1	0.5
濃度	4.3	3.7	3.0
JND の数	1008	696	659
階調表示能力	12~14 bit	8~10 bit	8~11 bit

処理) を施して拡散反射面にしたものがある。

光沢面の場合は画像の鮮明度が良い反面、照明等の光源がそのままの形で写りこむので反射像の輝度が高い。拡散反射面は写り込んだ像の反射光が拡散するので反射像の輝度が低い反面、画像の鮮明度がやや低下し同時に視線を動かしたときに液晶画素と表面の凹凸とが干渉してノイズのように見える場合がある。一概にどちらが優るとは言えず、読影環境、観察する画像、読影者の主観などにより選択される。

外光反射は低輝度領域のコントラストを低下させるので、AAPM[4]では外光反射輝度 ($Lamb$) はモニタの最小輝度 (L_{min}) の 1/1.5 以下と規定している。

拡散反射輝度は $Lamb=E \cdot Rd$ で計算される (E : 外光照度 lx , Rd : 画面の拡散反射係数 sr^{-1})[5]。

2. マンモ用モニタの性能要件

2.1 フィルムとモニタの比較

マンモ画像表示用モニタは従来から CRT が用いられてきた。しかし 5M モノクロ液晶パネルが安定的に製造可能になり、一方ではテレビやコンピュータディスプレイのフラットパネル化が急速に進んでいるので将来的にはマンモ用 CRT の安定供給が懸念される。

表2にマンモ用高濃度フィルムと代表的なモニタの主要性能を比較した(暗室で観察するものと仮定)。マンモフィルム (B 5 サイズ) は原画を $50\mu\text{m}$ ピッチでサンプリング出力したものを $10,000\text{cd/m}^2$ のシャーカステンで観察するものとし、モニタは対角 20-21" (ほぼ A3 サイズ)、空間解像度はいずれも観察距離 30cm で比較してある。

(*CRT の画素ピッチは表示画素数と画面サイズから逆算した値を示す。CRT と液晶の空間解像度の違いは表示画面サイズの違いによるものである)

図5にはフィルムとモニタの表示可能範囲を対比した。

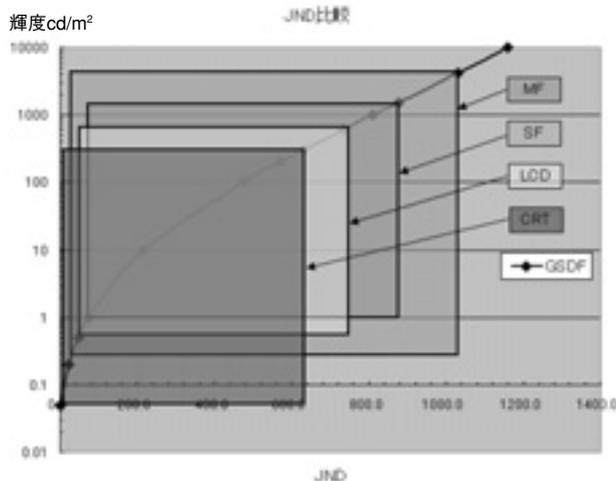


図5 表示可能な輝度範囲 (SF は通常のフィルム, MF はマンモ用フィルムを示す)

2.2 階調表示能力と視認性

モニタの理論的な表示可能階調数は端末のグラフィックスボードからモニタに出力する信号の階調情報により決まり、従来から 8bit 階調 (256 ステップ) が多く用いられてきた。しかし最近ではマンモ画像のようにより多くの階調表示の必要性が高まり、最近では 11bit 階調表示の可能なモニタが実用化されている。

このような多階調画像の視認性を高める上で重要なことはコントラスト比 (CR) を高めるだけでなく L_{max} を高

めることが必要である。モニタのコントラスト比が同じであれば、 L_{max} が高いほどその輝度範囲に含まれるJND [6]の数が多いので視認性が高い (図6)。

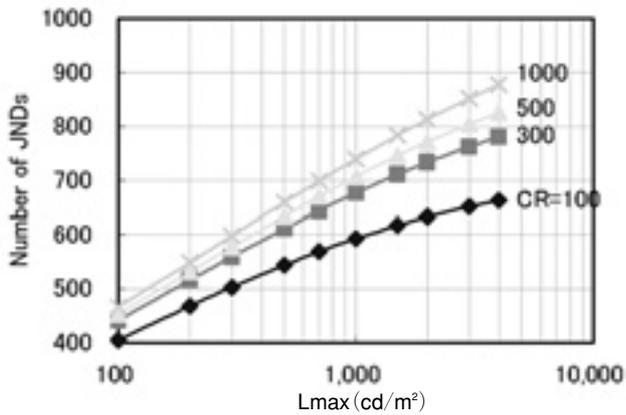


図6 最大輝度 (L_{max}) と JND の数

2.3 キャリブレーションと精度

医用モニタの階調表示特性は標準的にDICOMのGSDF特性 [7]が用いられる。モニタをGSDFに校正する操作をキャリブレーションと言い専用ソフトウェアと輝度計を用いることにより自動的に実行される。表示精度とはキャリブレーションで設定されたGSDFカーブと実際にモニタに表示される特性の一致性をいう。

AAPMでは入力信号ゼロから最大までの範囲を17等分した18種類のテストパターン (TG18-LN)を用いてそれぞれの輝度を測定し、各ステップ間の1JNDあたりのコントラスト ($\Delta L/L$)を求めてGSDFと比較する方法が採用されており一次診断用モニタでは $\pm 10\%$ 以内と規定されている (図7)。

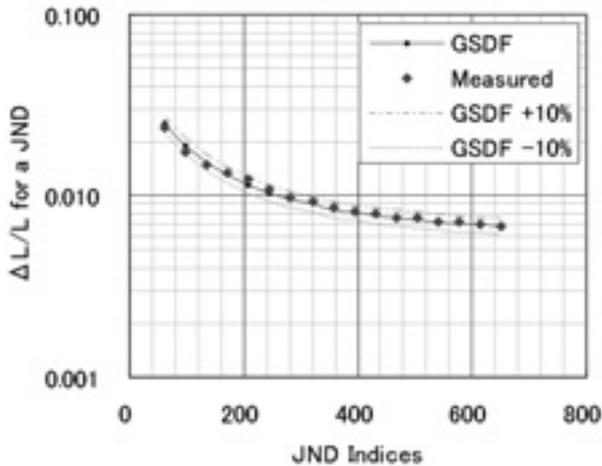


図7 GSDFのコントラスト (1JNDあたりの $\Delta L/L$) カーブを中心に $\pm 10\%$ の規格幅を設けたグラフに実測値をプロットした例

2.4 輝度の安定化

表示精度を維持するためにはキャリブレーション時に設定した輝度を常に一定に保つ必要がある。輝度が設定値 (100%) から変化したときのGSDF誤差を計算により求めた結果を図8に示す。この図が示すように暗室のような外光の少ない設定で使っている場合に比較し、外光のある設定で使っている場合の方が輝度変化に対するGSDF誤差が大きく表れる。

CCFL [8]は周囲温度による輝度変化が著しく、また水銀枯渇、蛍光体劣化、ガラス管の透過率の劣化、バックライト光学系部材の劣化などにより使用時間と共に輝度劣化が

バックライト輝度変化とGSDF誤差

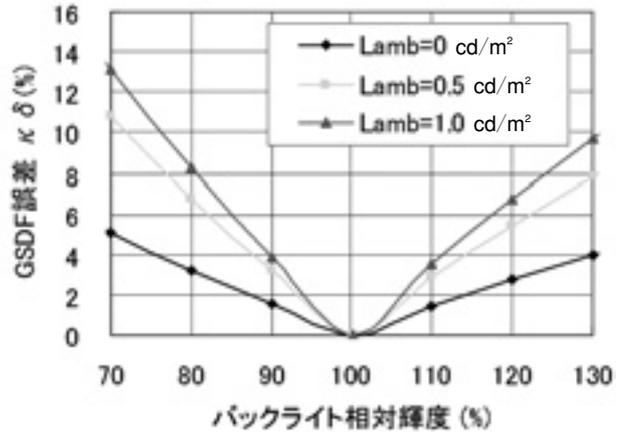


図8 輝度変動とGSDF誤差

輝度の初期ドリフト

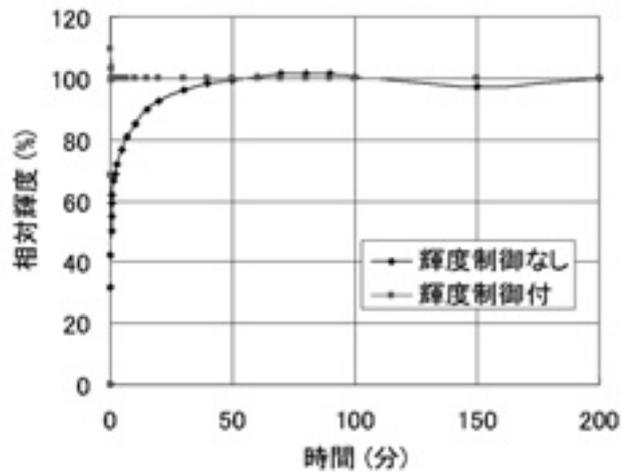


図9 電源オン後の輝度ドリフト

進むので医用モニタには輝度安定化回路が必須である。

輝度の安定化はバックライト光または液晶パネルの透過光を検出しCCFLの管電流を制御する方法が用いられる。

キャリブレーションの輝度設定を最大輝度の50%程度にして使用した場合は輝度安定化回路の作動により20,000時間程度の輝度寿命が期待できる (1日12時間・週5日使用の場合約6年間に相当する)。また輝度安定化回路はモニタ起動時の輝度立ち上がり時間を短縮し、周囲温度の変化による輝度ドリフトを抑制する効果もある (図9)。

2.5 輝度ユニフォミティ

画面の輝度ムラはノイズの一種ではあるがAAPMでは、画面上でムラの間隔が1 cm以上の低周波のものを輝度の非均一性、それよりも高周波のものをノイズと定義している [9]。液晶モニタは、主としてバックライトに用いられるCCFLや拡散板の輝度分布が原因で輝度の不均一が生じる。近年マンモシステム品質管理を定めたEUREFガイドラインや現在検討中のIEC規格で、輝度均一性改善の要求が高まり、輝度ユニフォミティ補正回路を装備した製品が開発された。

3. マンモ読影のための最新モニタ

TOTOKUではマンモ読影に適した5M解像度のモノク

ロ液晶モニタ **ME551i2** を開発し、ITEM2006 で発表した (図 10)。3 項では本機種の特長・性能と、性能を維持管理するための技術を紹介する。

3.1 液晶パネル

- 解像度・視野角・輝度・コントラスト等に優れた IPS 方式のモノクロ液晶パネルを採用した。
- ・パネルサイズ
21.3" 338×422mm (縦使用時)
- ・解像度
2048×2560ドット (画素ピッチ 0.165mm)
- ・最大輝度 750cd/m²
- ・最大コントラスト 800:1
- ・視野角 170 度 (上下左右)

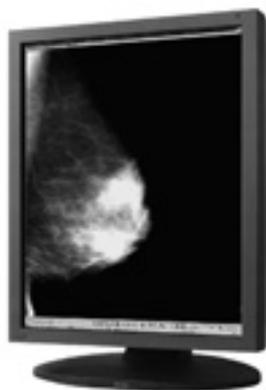


図 10 ME551i2

3.2 規格対応

一般の情報処理機器よりも高い審査基準が適用されている北米及び欧州地域内の医用安全規格を取得した。

主な取得安全規格

- ・UL60601-1, CSA C22.2 N601.1
- ・EN60601-1-1
- ・FDA510(k) (申請中)

3.3 輝度安定化回路

医用液晶モニタには輝度安定化回路が必須で、起動時・環境温度・長期使用による経時変化などの対策に大きな役目を果たしている。**ME551i2** では、液晶パネルを通過した最終的な光をフロントセンサーで常に監視しバックライト輝度をコントロールするフロントセンサー方式の輝度安定化システムを搭載した。本方式はバックライト輝度検出方式に比べ、CCFL、バックライト光学系 (反射板、拡散板、輝度上昇フィルム等)、液晶パネルなどの光学的な特性変化の影響を受けにくく、長期間にわたって輝度を一定に維持できる (図 11)。

■従来の方式

■フロントセンサー

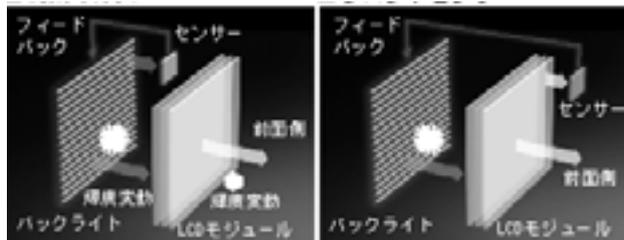


図 11 輝度検出方式

3.4 輝度ユニフォミティ補正

現状の医用モニタの規格よりも更に高度な均一性の要求に対応するために、輝度ユニフォミティ補正機能を本機に搭載した。輝度均一性は工場の調整工程で最適化されプリセットされて出荷される。

3.5 表示階調数と精度

11.9bit (3826 階調) の LUT を搭載することにより GSDF に忠実な輝度応答特性を得ることが可能となった。

GSDF の目標輝度に対する誤差は理論値で 10bit の場合の 1/3 程度に低減するため、不連続性の少ないグレースケールが表現可能である。

更に専用のビューアを用いることにより 11bit 2048 階調

の同時表示が可能となる。1 階調あたりの JND の変化 (平均値) を比較すると 256 階調表示では約 2.5JND であるのに対し、2048 階調の場合は約 0.3JND となるので知覚的に非常に滑らかなグレースケールの表現が可能である。

本機種の出荷設定は輝度 500cd/m²・ガンマ GSDF となっており最低輝度 1cd/m²とした場合、約 635 の JND 値を得ることができる。

3.6 高速描画を実現

マンモグラフィの画像表示はポートレート (縦型) 表示で行われるため通常の横型表示を 90 度回転させて表示する必要があるが、**ME551i2** は画像の回転処理をモニタに内蔵されたハードウェアで実行するため、グラフィックスカードに内蔵された回転機能や専用ソフトウェアを使用して画像を回転させる方式よりも高速で画像の乱れの少ない表示が可能である。また、オプションの専用グラフィックスカードは PCI-Express バスを採用し、高速描画が可能となっている。

3.7 カラー・モノクロ変換機能

カラー信号を入力した時、モニタ内部でグレースケール表示に変換する機能を実装した。これによりカラーモニタとモノクロモニタが混在するマルチモニタ環境でも I/F を同じにでき、違和感のない描画表現が実現可能となった。

3.8 LED インジケータ

モニタの現在の状態は、モニタ前面の LED インジケータで確認できるようになっている。

- ・輝度安定状態 消灯
- ・輝度調整中 グリーン
- ・パワーゼーブモード オレンジ
- ・異常を検出 レッド

4. モニタ管理ツール

TOTOKU では医用モニタの精度管理を行うためのツール Medivisor® [10] を用意している。

4.1 Medivisor GrayScale

Medivisor GrayScale はキャリブレーションを行うためのツールである。最大輝度 Lmax, 最小輝度 Lmin, 外光補正 Lamb, ガンマカーブの設定等が自動的に精度良く行える。ガンマカーブの種類は DICOM 標準である GSDF, 2.2 乗, リニアの 3 種類が標準で準備されており、ユーザ独自カーブを設定する機能もある。また、GSDF カーブでキャリブレーションした場合は、結果の精度検証も可能である。Medivisor GrayScale は輝度を測定するセンサーと一緒に CAL008 パッケージに同梱されている。

4.2 QA Medivisor

QA Medivisor はモニタの受入試験・不変性試験を行うためのツールである。試験を行うためのテストパターン発生、輝度・色度測定と結果計算を行い、最終結果は報告書に纏められる。報告書は pdf ファイルで出力が可能であり、後述の PM-Medivisor に取り込むこともできる。QA Medivisor は輝度・色度を測定するセンサーと一緒に CAL008 パッケージに同梱されている。

また、QA Medivisor でサポートしている各国のガイドライン名と発行元は以下となっている。

- ・JESRA X-0093⁻²⁰⁰⁵ 日本画像医療システム工業会

- ・AAPM O.R. NO.03 米国医学物理学会
- ・DIN6868-57V ドイツ規格協会

4.3 PM Medivisor

PM Medivisor は、約 1,000 台までのネットワーク内のモニタ情報を一元管理するためのツールである。設置モニタのシリアルナンバー・設置時期・稼働時間などの資産情報管理や、キャリブレーション結果、受入・不変性試験結果の管理に加えて、フロント輝度センサーにより外付けの輝度計が無くとも相対輝度管理・DICOM GSDF との一致性の検証が可能となっている (図 12)。

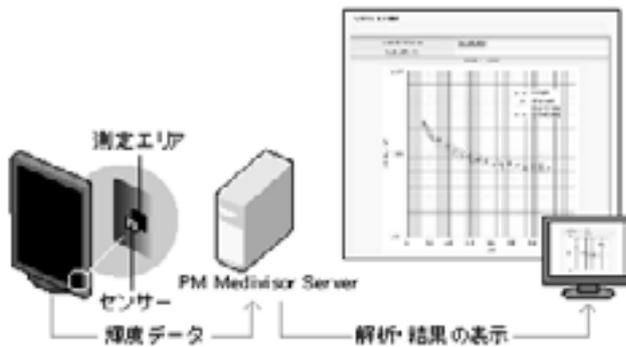


図 12 モニタの精度管理システム

終わりに

マンモ画像表示における液晶モニタはフィルム／シャーカステンに比較すると輝度，コントラスト比，解像度，視野角の点でまだ改善の余地は大きい，ビューアによる画像処理や CAD を併用することによりフィルムにはない新たな診断能を創出できると考えられる。

近年表示デバイスは急速な進化を遂げており，今後液晶

パネルも総合的な技術進歩が期待できる。医用モニタにおいても医療現場のニーズを把握し，機能・表示特性と精度管理の更なる改善を進めていきたい。

参考文献と注釈

- [1] マンモグラフィガイドライン第 2 版，日本医学放射線学会/日本放射線技術学会/マンモグラフィガイドライン委員会/乳房撮影委員会 編集，医学書院
- [2] コントラスト比 $CR=L_{max}$ (最大輝度) / L_{min} (最小輝度) で定義される。
- [3] PA Keller, Electronic Display Measurement, 25, SID. (Society for information display, John Wiley & Sons, Inc.), 1997.
- [4] The American Association of Physicists in Medicine, Task Group18でAssessment of Display Performance for Medical Imaging Systems を発行した。
- [5] Imaging informatics Subcommittee Task Group #18, Assessment of Display Performance for Medical Imaging Systems, AAPM On-line Report, 3, 76, 2005.
- [6] Just Noticeable Difference の略。最小弁別閾とも呼ばれる。通常の人間の目が知覚可能な最小の輝度差の 1 単位を意味する。
- [7] Grayscale Standard Display Function, DICOM PS3. 14-2000, 16-22, 2000.
- [8] Cold Cathode Fluorescent Lamp の略。冷陰極蛍光管とも呼ばれる。
- [9] Imaging informatics Subcommittee Task Group #18, Assessment of Display Performance for Medical Imaging Systems, AAPM On-line Report, 3, 101, 2005.
- [10] Medivisor[®]は東京特殊電線(株)の登録商標である。