実時間デジタルラジオグラフィ(DR)用 高解像度テレビカメラの開発

正会員 小野寺 洋 一[†], 正会員 横 内 久 猛^{††}
常 岡 雅 幸^{†††}, 高 橋 文 隆^{††}

Development of High-resolution TV Camera for Real Time Digital Radiography System

Yoichi Onodera[†], Hisatake Yokouchi^{††}, Masayuki Tsuneoka^{†††}
and Fumitaka Takahashi^{††}

Abstract We have developed a 2000-line TV camera which use a 1-inch SATICON as a real-time digital radiography (DR) system

We record a 60% amplitude response when 1000 TV lines are at the center of the image, and a 46 dB signal-to-noise ratio using the 2100 line scanning mode at a signal current of 550 nA

1. ま え が き

X線フィルムを用いる従来のアナログ方式と異なり、X線画像をデジタル画像として計測する方式をデジタルX線システムと総称する¹⁾ X線撮影のデジタル化によって即時表示・診断、操作性向上、画像処理による診断能向上、およびPACS (Picture Archiving and Communication System; 医療画像の総合的な保管・管理を目指すシステム)への対応が期待されている²⁾

デジタルX線システムのうち、循環器診断用のデジタルフルオログラフィ (DF: Digital Fluoro-

graphy) 装置と、消化管診断のための実時間デジタルラジオグラフィ (DR: Digital Radiography) 装置は、いずれもX線像をX線テレビカメラで観察するX線透視法という方式に属し、テレビカメラからのビデオ信号をデジタル化し、画像処理技術を用いてX線像を描出するもので、動画像、連続画像、および静止画像の撮影を可能としたものである。そのシステム構成を図1に示す

このシステムの検出系は、X線情報を増倍しながら光学像に変換するX線II (Image Intensifier) と、光学像を電気信号に変換するテレビカメラより構成される。画像処理系は、ビデオ信号をデジタル化する

キーワード 実時間デジタルラジオグラフィ、実時間DR、高解像度テレビカメラ、X線テレビカメラ系

1992年5月28日、テレビジョン学会情報入力研究会で発表

1992年9月24日受付、1993年1月11日再受付

[†] 株式会社日立製作所 中央研究所 (〒185 東京都国分寺市東恋ヶ窪 1-280, TEL 0423-23-1111)

^{††} 株式会社日立メティコ 技術研究所

^{†††} 株式会社日立メティコ 柏工場

[†] Central Research Laboratory, Hitachi, Ltd (Higashi-Koigakubo 1-280, Kokubunji-shi, Tokyo 185, Japan)

^{††} Research & Development Center, Hitachi Medical Corp (Toyofuta 2-1, Kashiwa-shi, Chiba 277, Japan)

^{†††} Kashiwa Works, Hitachi Medical Corp (ibit)

図 1 実時間 DR の構成
Real-time digital radiography system.

A/D 変換器、画像間の加減算や画像の濃度変換を行う画像処理装置、CRT ディスプレイ装置、その他、大容量の画像記録媒体としての光ディスク等により構成される。

これら DF 装置や実時間 DR 装置の画質を、X 線フィルムと同等に向上させるため、X 線画像の入力部を構成するテレビカメラの高解像度化と高 S/N 化について検討し、高精細サチコンを用いた実時間 DR 用の 2000 本テレビカメラを開発したので報告する^{3)~5)}。

2. 2000 本テレビカメラの開発

2.1 高解像度化の検討

(1) 高精細サチコン(H 4186)の評価

これまでの 1000 本走査 DF 装置用テレビカメラの撮像管としては、解像度の良い医用 1 インチサチコン(H 4141 A) が使用されている。今回、2000 本テレビカメラ用の撮像管としては、さらに解像度を高めた 1 インチ高精細サチコン(H 4186) を評価した。

(a) H 4186 と H 4141 A の解像度の比較評価

解像度計測系の構成を図 2 に示す。解像度評価用チャートをテレビカメラで撮像し、画像中央部のパターン部分に対応する 1 ラインの出力を、オシロスコープ

上で矩形波に対する振幅変調度 (AR : Amplitude Response) として測定した^{6)~8)}。評価に使用したテストチャートは RCA/P-200 チャート(写真 1)であり、テレビカメラのビデオ帯域の AR への影響が一定となる。結像レンズは Micro-Nikkor f55/2.8 を絞り F5.6 の状態で使用した。走査エリアは NTSC 方式用の走査エリア 9.5 mm×12.7 mm と同一に設定した。1000 本モードにおける解像度を図 3 に示す。

写真 1 RCA/P-200 テストチャート
RCA/P-200 Test chart.

図 2 AR 計測装置
AR measurement system.

図 3 テレビカメラの解像度特性
AR of TV camera.

表 1 実時間DR用2000本テレビカメラの仕様
Specification of 2000-lines TV camera for real-time
digital radiography.

X-ray imaging mode		Number of scanning lines (TV-lines)	Scanning rate (Frames/sec)	Scanning method
Radio-graphy	2000 lines	2100	3.75	Progressive
	1000 lines	1050	15	
	500 lines	525	60	
Fluoro-scopy	1000 lines	1125	30	Interlace
	500 lines	525	30

図 4 H 4186 の解像度特性
AR of H 4186.

H 4186 では H 4141 A に比較して、解像度の向上が確認できる。

(b) 高解像度 2000 本テレビカメラのモード仕様

DR 装置による X 線画像撮影には、透視像を使って撮影画像の位置決めを行うための透視モードと、診断用の画像の撮影を行う撮影モードが必要である⁹⁾。従来の 1000 本テレビカメラでは、透視に 500 本モード (30 F/s; インタレース), 撮影に 500 本モード (30 F/s; ノンインタレース), および 1000 本モード (7.5 F/s; ノンインタレース) を使用していた。

開発した高解像度 2000 本テレビカメラには表 1 に示す 5 種類のモードを設けた。ここで、新設した 2000 本モードは、これまでで最高の解像度を有する 1000 本システムの 2 倍の走査線数 (2100 本) を有する。電子ビームの走査ピッチが小さくなるとともに、ビームのセルフシャープニング¹⁰⁾ も顕著になるため、より高い解像度の実現が期待できる。

(c) テレビカメラの解像度の向上

撮像管 H 4186 を用いて、走査エリアを NTSC 方式と同一の 9.5 mm×12.7 mm に設定した時の AR を図 4 に示す。信号電流 (I_s), ビーム電流 (I_b) の値はそれぞれ 400 nA, 800 nA で、NTSC 方式で一般的な 2 倍ビームの条件とした。図 4 から、この走査エリアにおいて、走査線数を 1050 本から 2100 本に増加しても AR の改善効果は小さいことがわかる。これは走査電子ビーム径で決まる応答特性の影響であると考える。

(2) 走査エリア拡大による解像度の向上の検討

(a) 走査電子ビーム径、ビーム走査エリア、MTF

(Modulation Transfer Function), AR の関係

撮像管の走査ビームの強度分布が正規分布に従うと仮定し、その標準偏差を σ とすると、その周波数応答特性は

$$\text{MTF}_b = \exp(-2\pi^2\sigma^2 f^2) \quad (1)$$

となる¹¹⁾。ここで f は空間周波数 (lp/mm) で、

$$f = N/(2L) \quad (2)$$

ただし、 L は撮像管の電子ビーム走査範囲 (mm²), N は L の範囲内の走査線数である。

一方、高周波数域における AR の値と MTF の値の関係は、コルトマンの変換式

$$\text{MTF}(N) = \pi/4 \{ \text{AR}(N) + \text{AR}(3N)/3 - \text{AR}(5N)/5 + \dots \}$$

を利用した近似式

$$\text{MTF}(N) = \pi/4 \cdot \text{AR}(N)$$

により、

$$\begin{aligned} \text{MTF}_m(N) &= \text{MTF}_b(N) \cdot \text{MTF}_L(N) \\ &= (\pi/4) \text{AR}(N) \end{aligned} \quad (3)$$

と表すことができる。ここで、 MTF_m , MTF_L はそれぞれ、系の MTF およびレンズの MTF である。

(1), (2) 式から

$$\sigma = 2L(-0.5 \ln \text{MTF}_b)^{1/2} / (\pi N) \quad (4)$$

$$\text{MTF}_b = \exp\{-\pi^2\sigma^2 N^2 / (2L^2)\} \quad (5)$$

また (1), (5) 式から

$$\text{AR}(N) = (4/\pi) \text{MTF}_L \cdot \exp\{-\pi^2\sigma^2 N^2 / (2L^2)\} \quad (6)$$

である。

(b) 走査エリア拡大の効果

図 4 の 2100 本走査時の 1000 TV 本における AR の値は 37% である。(3) 式を利用してレンズの MTF_L の値、74% を補償すると MTF_b の値は 39% となる。

この場合、(4) 式から $\sigma = 4.15 \mu\text{m}$ となるので、ビーム径 D_e を半値幅 (2.355σ) で定義すると $D_e = 9.8 \mu\text{m}$ となる。この値は、1000 本走査をしたときの走査ピッチ (9.5 mm/1000 = 9.5 μm) と同程度であるため、ピッチの拡大、すなわち走査エリアの拡大を行わないと、ビーム径による応答特性の影響で AR の向

図5 走査エリア拡大の効果
Effect of enlargement of scan area.

上が望めないと考えられる。そこで走査エリア L を拡大し、AR の変化を計測する実験を行った。

実験では、NTSC の標準走査エリア $9.5 \text{ mm} \times 12.7 \text{ mm}$ に対して $13 \text{ mm} \times 17.3 \text{ mm}$ および $15 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ の拡大走査を行い、それぞれの 2000 本モードにおける解像度を計測して比較した。走査エリアの調整は、図2に示すライトボックスに固定したテストチャートと結像レンズとの距離を近づけたり遠ざけたりすることによって、撮像面上のテストチャート像を拡大・縮小し、その像に走査エリアを一致させることで行った。結果を図5に示す。同図から、走査エリアの拡大により解像度が向上することが確認できる。

以上の結果より、走査線数の増加と走査エリアの拡大を同時に行うことがテレビカメラの高解像度化に有効であることがわかる。

なお、本報告では画像中央部の特性改善についてのみ示したが、周辺部においても若干の特性改善が見られた。ただし、周辺部の特性改善については、ダイナミックフォーカスの併用等を含めた詳細な検討が不十分であり、今後順次検討を進めて行く予定である。

また、上記の改善効果は走査方式（インタレース、ノンインタレース）によっても差が生じるものと考えられるが、今回の検討では X 線画像撮影時に使用するインタレース方式下の特性について評価を行った。

(c) リングタイプ高精細サイコンの開発

H 4186 はピンリードであるため、走査エリアが約 13 mm 角以上になると撮影画像にピンの像が入ってしまう。そこで、2000 本走査用のサチコンとして、新たにリングタイプの 1 インチ高精細サチコン (H 4148) を開発し、走査エリアを 15 mm 角とした。その最大走査エリアはメッシュ電極の径により制限され、 $19 \text{ mm} \phi$ である。図6に走査の様子を示す。

図6 高解像度テレビカメラの走査エリア
Scan area of the high-resolution TV camera.

2.2 S/N の向上

DR 画像の高画質化のためには、テレビカメラの高解像度化と共に S/N の向上が必要である。これにより、ダイナミックレンジ拡大も図ることができる。

(1) S/N の向上法

テレビカメラの S/N は、信号電流を I_s 、信号電流によるショットノイズを i_{ns} 、回路ノイズを I_{nc} とすると、

$$S/N = I_s / (i_{ns}^2 + I_{nc}^2)^{1/2} \quad (7)$$

で表される。ここで、

$$i_{ns}^2 = 2eI_sB \quad (8)$$

$$I_{nc}^2 = 4kTB/R_L + (16/3)kT\pi^2C^2R_eB^3 \quad (9)$$

である。ただし、 e は電子の電荷量 ($1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$)、 B は周波数帯域、 k はボルツマン定数 ($1.38 \times 10^{-23} \text{ J/deg}$)、 T は絶対温度、 R_L は負荷抵抗、 C は浮遊容量、 R_e は回路の初段 FET の等価雑音抵抗である⁶⁾⁷⁾。(9)式の第1項は負荷抵抗の熱雑音、第2項は初段 FET の等価雑音抵抗の熱雑音である。表1のテレビカメラでは $T=293 \text{ K}$ 、 $B=10 \text{ MHz}$ 、 $R_L=475 \Omega$ 、 $R_e=50 \Omega$ 、 $C=13 \text{ pF}$ であり、 $I_{nc} \approx 1.5 \text{ nA}$ である。

また、テレビカメラのダイナミックレンジ (D_y) は、最大信号電流と回路ノイズの比で表される。したがって、 S/N の向上とダイナミックレンジの拡大のためには、信号電流の増大と回路ノイズの減少が必要である。

(a) 信号電流 I_s の増大

テレビカメラの信号電流 I_s は

$$I_s = \Delta Q / t_s \quad (10)$$

で表される．ここで， ΔQ は撮像管ターゲット面の走査領域に蓄積された電荷量(C)， t_s はターゲット面上の走査領域の1フレーム分の走査時間(sec)である．

蓄積電荷 ΔQ と光の入射による電位上昇 $\Delta V(V)$ との間には

$$\Delta Q = C_a \Delta V \quad (11)$$

の関係がある．ここで， C_a は撮像管ターゲット面の走査領域の全静電容量(F)である．

C_a は走査面積に比例するから，走査エリアの拡大は，解像度向上のみでなく S/N の向上にも有効となる． ΔV は入射光量が充分ある場合にはターゲット電圧で制限されるから，ターゲット電圧の上昇により増大できる．

(b) 走査エリア拡大とターゲット電圧上昇の効果
信号電流の増大に対する両者の効果を調べるため，2000本モードにおいて走査エリアの拡大およびターゲット電圧の上昇を行った場合の光電変換特性を調べた．実験系は図2と同一で，光入射領域を撮像面の中央部8.3mm角に制限し，NDフィルタで光量を変化させた．1走査線上の出力の最大値を信号電流とした．走査エリアは，11mm角，13mm角，15mm角の3通りとし，ターゲット電圧 V_t は標準値50Vと撮像管許容上限の90Vとした．結果を図7に示す．

NDフィルタの透過率が20%以下のような入射光量が少ない領域では，信号電流の増大に対する走査面積の拡大やターゲット電圧上昇の効果はほとんどないが，入射光量が多い領域での飽和信号電流は，走査面積とターゲット電圧に比例する．

(2) 最大信号電流 $I_{s(max)}$ の決定

テレビカメラにおいては，信号電流が大き過ぎると，図8に示すように画像周辺部に特徴的に小波アーチファクトが発生する⁹⁾．このアーチファクトが存在する画像は，診断のための画像としては使用できない．そこで，この小波アーチファクトが発生しない最大の信号電流を実用上利用可能な最大信号電流 $I_{s(max)}$ と定義した． $I_{s(max)}$ は，ボールチャート(写真2)を用い， I_s を変化させて画像を撮影した実験により決定し，2000本モードでは550nA，1000本モードでは1500nAの結果となった．なお，これらの値は，

$$I_s = \Delta Q / t_s = (C_a \Delta V / \alpha_f) N_f$$

の関係から走査スピードの影響を受けるものと思われる．ここで， α_f ：1フレーム走査中の映像期間の割合， N_f ：フレームレートである．

3. 2000本テレビカメラの解像度， S/N

表1に示したモードのうち，診断のためのDR画像

図7 高解像度テレビカメラの光電変換特性
Signal current of TV camera.

図8 小波アーチファクト
Water fall artifact.

写真2 ITE/Ball Chart テストチャート
ITE/Ball Chart.

として使用される 500 本, 1000 本, 2000 本の各モードの解像度, および 1000 本, 2000 本モードの S/N を計測した. この時の走査条件は, 走査エリア: 15 mm 角, ターゲット電圧 V_t : 90 V, 最大信号電流 $I_{s(max)}$: 550 nA (2000 本モード), 1500 nA (1000 本モード), 2000 nA (500 本モード) とした.

3.1 解像度の計測

解像度の計測結果を図 9 に示す. AR の値は 2000 本モードでは 1000 TV 本において 60%, 1000 本モードでは 1000 TV 本において 50%, 500 本モードでは 500 TV 本において 75% の結果を得た. レンズによる解像度の劣化を補正して得られた撮像面における MTF の値は, 順に 63%, 53%, および 80% となる. この補正のために使用した F5.6 の場合のマイクロニッコールレンズの MTF を図 10 に示す.

また, 2000 本, 1000 本モードによる解像度チャートの撮影例を図 11 に示す.

図 9 高解像度テレビカメラの解像度特性
AR of the high-resolution TV camera.

図 10 マイクロニッコールレンズの解像度特性
MTF of Micro-nikkor Lens.

3.2 S/N の計測

2000 本テレビカメラの S/N は, ①テレビカメラ回路系のノイズによる S/N の制限値 (光入射のないときのノイズを計測し, (7) 式のショットノイズ $I_{ns}^2=0$ として S/N 値を計算; 以下, ブラック S/N . この際の $I_s=I_{s(max)}$ の S/N がダイナミックレンジとなる), ②光入射に伴うショットノイズによる S/N の制限値 ((7) 式の回路ノイズ $I_{nc}^2=0$ として S/N を計算; 以下, ショット S/N) および, ③実際に光を入射し, 画像撮影を行って求めた S/N 値 (以下, ホワイト S/N), を比較することで評価した.

ホワイト S/N は, 一定光量のライトボックス像を 2000 本テレビカメラで撮影, デジタル画像化し, その中央部分の領域 (100 画素 $\times$ 100 画素程度をソフト的に任意指定) のゆらぎ (標準偏差) σ を求め, 同領域の信号レベル (領域内の全画素値の平均値) との比をとることで計算した. 図 12 に計測結果を示す. 2000 本モードの $I_s=550$ nA における S/N は 46 dB, 1000 本モードの $I_s=1500$ nA における S/N は 51 dB を得た.

図 11 高解像度テレビカメラによる撮影例
Photograph of output images by the high-resolution TV camera.

図 12 高解像度テレビカメラの SNR
Signal to noise ratio of the high-resolution TV camera.

また、図 12 には、ブラック S/N 値およびショット S/N 値も示した。同図に示す通り、ホワイト S/N 値は、ブラック S/N 値およびショット S/N 値の合成により求められる S/N 計算値 (図中破線) とよく一致しており、本テレビカメラがほぼ最適条件に調整されていることがわかる。

4. む す び

4.1 結 論

実時間 DR 用 2000 本走査テレビカメラを開発した。開発にあたり、新型高精細サチコンの開発、走査の最適化、走査条件の決定等を行い、解像度特性と S/N を評価した。以下に要点をまとめる。

- ① 2000 本テレビカメラは、500 本、1000 本、2000 本の撮影モードと、500 本、1000 本の透視モードを有する。
- ② 2000 本テレビカメラ用撮像管として、新たにリングタイプの 1 インチ高精細サチコン H 4148 を開発した。
- ③ 2000 本テレビカメラにおける電子ビームの走査条件は、走査エリア：15 mm 角，ターゲット電圧：90 V とした。また、最大信号電流は 2000 本モード：550 nA，1000 本モード：1500 nA である。
- ④ 各モードの解像度 (AR の値) は、2000 本モードでは 1000 TV 本において 60%，1000 本モードでは 1000 TV 本において 50%，500 本モードでは 500 TV 本において 75% である。レンズによる解像度の劣化を補正した撮像面における MTF の値は順に、63%，53%，および 80% である。
- ⑤ 2000 本テレビカメラの S/N は、2000 本モードでは信号電流 550 nA において 46 dB，1000 本モードでは信号電流 1500 nA において 51 dB である。

本開発のテレビカメラを用いた高精細実時間 DR の実現により、撮影と同時に診断が可能となり、診断能の向上、検査の効率化を図ることができる。

4.2 今後の課題

今後は、以下の点を中心に、2000 本テレビカメラの評価を進めていく予定である。

- ① デジタル画像における解像度。
- ② 解像度と信号電流の関係。
- ③ 画像周辺部の解像度。
- ④ 回路ノイズの低減による S/N の向上。

本研究にあたり、貴重なご助言、ご討論をいただいた、(株)日立小金井電子 高橋定男主任技師、(株)日

立電子開発研究所所員 長原脩策氏、(株)日立デバイス 福島正和主管技師長、(株)日立製作所電子デバイス事業部茂原製造本部 酒井英之主任技師、高畠幸男主任技師、(株)日立製作所中央研究所 平井忠明技術主幹に、紙面をお借りしてお礼申し上げます。

〔参 考 文 献〕

- 1) Ben A. Arnold, et al.: "Digital Radiography, an Overview", Appl. of Opt. Instr. in Med. IX, SPIE, 273 (1981)
- 2) 木村監修: "最近の医用画像診断装置", (株)朝倉書店(1988)
- 3) 横内ほか: "高解像度実時間 DR システムの検討", 1990 信学春季全大, D-193
- 4) 横内, 小野寺: "高解像度実時間 DR システムの検討(その 1, その 2)", 1990 年テレビ年次大 (ITEC'90) 2-14, 2-15
- 5) H. Yokouchi, et al.: "Improvement of Image Quality for High Resolution Real Time Digital Radiography", World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering, Kyoto, Medical and Biological Engineering and Computing, 29, Supplement, p. 639 (July 1991)
- 6) 二宮ほか: "撮像工学", pp. 29-35, テレビジョン学会編 画像エレクトロニクス講座, コロナ社(1981)
- 7) 樋渡監修: "不可視情報の画像化", テレビジョン学会編, 昭晃堂(1979)
- 8) 樋渡ほか: "テレビジョン測定技術", テレビジョン学会編, 日本放送出版協会(1973)
- 9) 和久井: "ITV カメラ", 日本放送出版協会(1973)
- 10) M. Kurashige, et al.: "Effect of Sharpening in Low-Velocity Electron-Beam Scanning", IEEE Trans. on Electron Devices, ED-29, 10 (Oct. 1982)
- 11) 内田ほか: "放射線画像情報工学 (I)", (株)通商産業研究社(1983)

おの でらういち

小野寺洋一 昭和 57 年、宮城県工業高等学校機械工学科卒業。同年、(株)日立製作所中央研究所に入社。昭和 62 年より、実時間デジタルラジオグラフィ (DR) の画像入力部の開発および高性能化の研究に従事。正会員。

よこうち ひさたけ

横内 久猛 昭和 46 年、徳島大学電気工学科卒業。同年、(株)日立製作所中央研究所に入社。平成 3 年、(株)日立メディコ技術研究所へ転属し、現在に至る。その間、眼底写真の自動認識、血液像の自動分類、カラーブラウン管検査の自動化、電子線描画露光装置、デジタル X 線装置の研究開発に従事。工学博士。正会員。

つねおか まさゆき

常岡 雅幸 昭和 37 年、熊本大学工学部電子工学科卒業。同年、(株)日立製作所に入社。医療機器の開発設計に従事。昭和 50 年までは主に、心電図・心音図の自動解析装置の開発、昭和 56 年からは DSA 装置の開発を担当。以後、主にデジタルラジオグラフィ装置の開発に従事し、現在に至る。

たかはし ふみたか

高橋 文隆 昭和 55 年、山形大学工学部電気工学科卒業。同年、(株)日立メディコに入社。以来、医療診断装置、デジタルラジオグラフィ (X 線イメージインテンシファイア、テレビカメラを使用した画像入力装置) の映像系の開発に従事。現在、(株)日立メディコ技術研究所技師。