

大視野 FPD 搭載天井走行式 IVR システム PARTIRE

Ceiling-support C-arm System combined with Large FOV FPD for IVR "PARTIRE"

小田 和幸 Kazuyuki Oda

清水 正巳 Masami Shimizu

株式会社日立メディコ XRシステム本部

40cm × 30cm大視野フラットパネルディテクタ(型式FPD4030)を搭載した天井走行式Cアーム型IVRシステムPARTIRE¹を開発・発売している。このシステムは、大視野・ワイドダイナミックレンジ・高コントラストのFPDを搭載したCアームと、天板高の低いアンギオテーブルから構成されている。また画像処理部には、FPDの性能を最大限活かすために新しく開発されたFAiCE(Full Automatic Image Control Engine)を搭載しており、透視 / 撮影像の高画質化を実現した。

臨床に供され、微細な血管の描出能が周辺部まで良好なこと、低濃度部の描出能が高いことなどの評価を得た。また大視野であるため、位置決めが容易で撮影回数を減少できることから、被曝量の低減・造影剤使用量の低減、さらに検査時間の短縮が期待される。

We developed and started sales of the model "PARTIRE¹", a ceiling-support C-arm IVR system equipped with a large field (40cm × 30cm) Flat Panel Detector (model FPD4030). This system consists of a low-ceiling-height angiographic table and a C-arm equipped with a flat panel detector having large field of view, wide dynamic range and high image contrast. Also, its image processing unit incorporates the FAiCE (Full Automatic Image Control Engine) which was newly developed for making the best use of the capability of FPD, realizing high image quality of both fluoroscopic and radiographic images.

The system is highly evaluated clinically that it demonstrates excellent delineation capability of fine blood vessels in peripheral areas and in low-density areas. In addition, it is expected that its large field of view facilitates patient positioning, resulting in the reduction of number of exposures, radiation dose, contrast medium quantity and examination time.

Key Words: X-ray system, FPD, IVR, Full Automatic Image Control Engine

1. はじめに

40cm × 30cm大視野フラットパネルディテクタ(型式FPD4030)を搭載した天井走行式Cアーム型IVRシステムPARTIRE¹を紹介する。「PARTIRE」とはイタリア語で「出発する」を意味し、「大視野FPDによる新しいIVRへの旅立ち」という期待を込めて命名した。

本システムのポイントは、次の2つである。

・視野サイズ40cm × 30cmの大型FPDを搭載し、その大視野・ワイドダイナミックレンジ・高コントラストという特長から、腹部血管系IVRを中心に頭部血管IVRから整形

領域に至るまで広範囲な臨床に適用できる多目的システムであること

・大視野にもかかわらず薄型でコンパクトなFPDの特長を活かし操作性の向上や術者のワーキングスペースの拡大を図ったこと

システムの主な特長として、以下の5つが挙げられる¹⁾。

- i) 新型32ビットCPUをCアーム本体制御に採用し、干渉制御、サーボ軸制御の精度の向上
- ii) 非接触センサ(セーフティアシスト)を搭載し、安全

性 & 操作性の向上

- iii) FPD用大視野補償フィルタ付きX線可動絞りの搭載
- iv) ワイドダイナミックレンジ・高コントラストのFPDの性能を最大限活かすため、新しく開発した自動最適化画像処理システムFAiCE(Full Automatic Image Control Engine)の搭載
- v) 迅速・正確・快適なIVRのための機能強化と操作性の向上

2. PARTIRE の概要

PARTIREの開発に際し、4つのコンセプトを重視した。

- (1) 低線量での透視・撮影が可能なFPD搭載フルデジタルシステム
 - (2) 大視野FPDの広い関心領域による透視・撮影画像の視認性の向上と撮影回数削減による低被曝化
 - (3) 広いワークスペースの確保と被検者への圧迫感を軽減し、術者と被検者に快適なシステム
 - (4) フォトタイマーレス最適撮影条件設定、波尾切断パルス透視およびダイナミックレンジ圧縮・表示階調自動最適化などによる透視・撮影画質の高水準化と被曝低減
- 図1にPARTIREの外観を示す。



図1 : PARTIREの外観

3. FPDの特長

FPD4030は従来のI.I.に比較してX線を直接電気信号に変換する構造上の違いにより、図2のような特長を有する。従来のI.I.は視野が円形であり、また入力面が球面の真空管構造のため画像に歪を生じるのに対し、FPDは視野が矩形で歪がない。さらにFPDは周囲の磁気の影響を受けず、構造的にソリッドで寿命がI.I.に比べ格段に長いため一般的使用においては交換の必要がない。さらに質量・厚さ寸法においてI.I.+TVカメラに対して大きなメリットを持つ。

このFPD4030は、X線を光信号に変換するシンチレータで

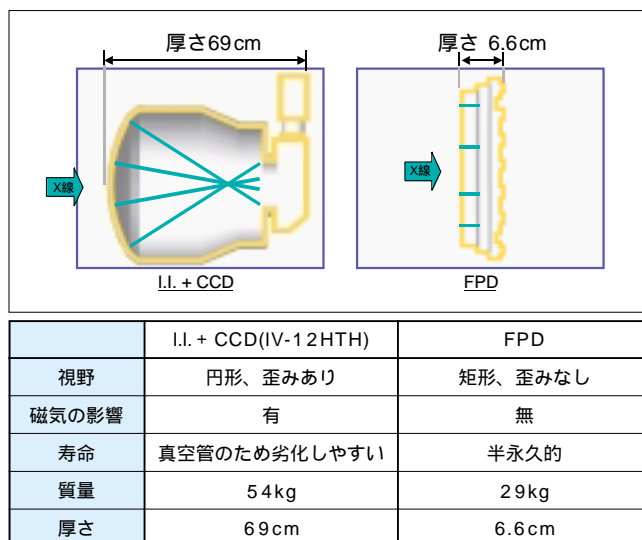


図2 : FPD4030の特長

あるヨウ化セシウム(CsI)、この光信号を電気信号へ変換するフォトダイオードとTFT(Thin Film Transistor)スイッチング素子からなるa-Si TFTアレイ、および低ノイズアンプとA/Dコンバータなどからなるデジタルボードによって構成される。

FPD4030は、CsIおよびデータ読み出しICの改良によって大幅な画質性能の改善が図られた。CsIを約 $5\mu\text{m}$ の柱状結晶構造化する改良により、透視・撮影モードともMTF特性が改善され、高周波数領域まで高いDQE特性を得た。またコントラスト比も従来のI.I.-CCDカメラシステムの5倍以上と大きく改善され、透視・撮影画像ともコントラスト分解能に優れた画像が得られている。図3にFPD4030の入出力特性を示す。

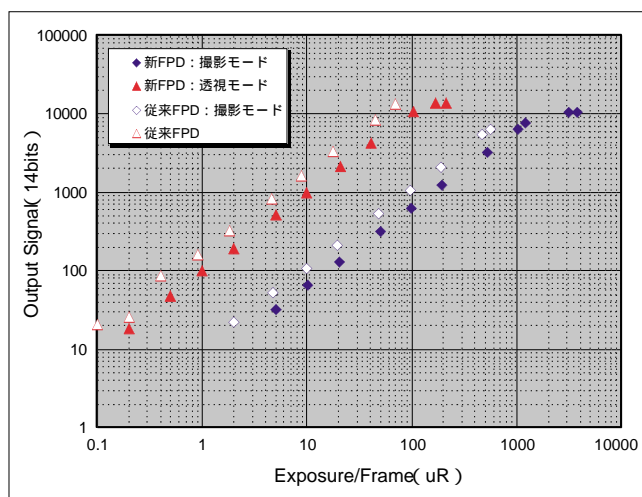


図3 : FPD4030の入出力特性

読み出しICの改良によってダイナミックレンジが大幅に改善され、最大入射線量は撮影モードで約 1.6mR (従来比約1.8倍)、透視モードで約 $130\mu\text{R}$ (従来比約1.9倍)と、いずれも2倍近い改善が図られ、撮影、透視画像共にハレーションに強い画像を得ることができている。さらに、読み出しICの改良は、透視画像においてTFTのゲート信号からのノイズ混入に

起因するライン方向のノイズ成分の低減も実現した。このラインノイズの改善は臨床評価において非常に高い評価を得、透視線量1~2 μRでのFPD4030の臨床適用を可能とした。

4. システムの主な特長

4.1 FAiCE

ワイドダイナミックレンジ・高コントラストであるFPD4030の性能を最大限活かし、高画質と低被曝を実現するための自動最適化画像処理システム(FAiCE)を新しく開発した。特にIVRにおいて最も重要とされる透視像の画質向上に注力した。

FAiCEのポイントは以下の4点である。

- 透視像の高画質化
- 撮影像の高画質化
- 透視・撮影条件の最適化
- 低被曝化

4.1.1 ダイナミック

FPDの大視野化(40cm × 30cm)により透視・撮影画像の表示領域がI.I.に比べ大幅に広がり、表示階調の適正化をさらに推し進める必要がある。従来のI.I.-CCDタイプのDR装置の時代から、日立は撮影画像をそのままプリント可能なShot & Printを目指し自動表示階調制御の適正化を進めてきた。その技術を透視のリアルタイム制御に広げ、透視表示領域に応じて表示階調特性(ガンマ特性)をリアルタイム計算することとした。これにより皮膚面から堆体部まで表現可能とした。図4に透視用の自動表示階調制御のブロック図を示す。

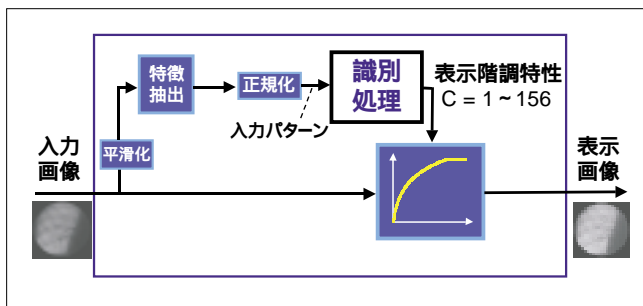


図4：自動表示階調のブロック図(透視用)

4.1.2 ダイナミックレンジ圧縮

FPD4030の持つ広いダイナミックレンジ特性を活かし、モニターおよびフィルムにより広い濃度範囲を表現するための処理の一つにダイナミックレンジ圧縮(DRC)がある。DRCの効果により皮膚面から椎体までをアンダー・オーバーなく表現可能になり、また肺野のハレーションを抑制したり堆体に重なったカテーテルのコントラストを改善する効果が得られる。

その原理は次のとおりである。原画像から二次画像を作成する。低濃度領域から関心濃度領域の範囲の傾きを1.0とする圧縮LUTにより二次画像を圧縮した成分画像を作成する。また、原画像から二次画像成分を引いた高周波成分の画像を作成する。この2画像を加算しDRC画像を得る。図5にダイナミックレンジ圧縮のアルゴリズムを示す。

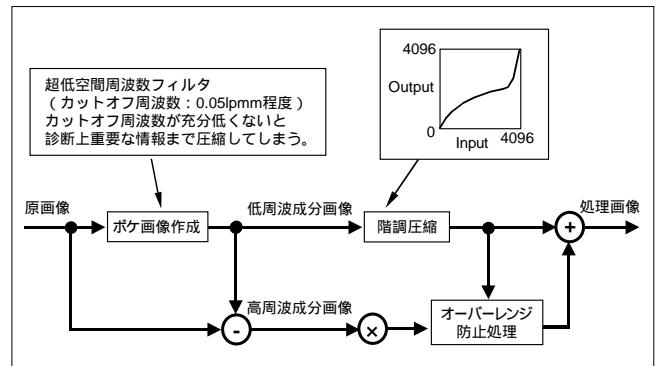


図5：ダイナミックレンジ圧縮アルゴリズム

4.1.3 フォトタイマレス自動露出制御(SEC) (図6)

X線条件はX線画像の画質および被写体の被曝線量を決定する重要な要因である。X線条件には管電圧、管電流および露出時間の3つのパラメータがあり、通常これらのパラメータの値はX線自動露出によって制御・決定される。X線自動露出制御は被検者の体厚や撮影部位などの情報に基づいて適正なX線条件を算出し、透視と撮影のX線条件を制御する。

透視時には、X線が被検者に連続X線として照射され、X線自動露出制御ではフォトセンサチューブで検出される光量 = X線信号量を参照しながらX線条件を制御し、透視X線信号量を所定の条件に近づける。透視時におけるフォトタイマ方式とフォトタイマレス方式の相違点は、透視X線信号量が前者ではフォトセンサチューブで間接的に計測されるに対し、後者ではFPD自体によって直接検出され、所定のマトリクスサイズ内のX線信号量をデジタルデータ平均値に変換し制御する。

撮影時には、まず撮影時のX線条件が透視時のX線によって決定され、続いてX線の照射が開始される。撮影は通常透視の合間あるいは直後に行われる。

透視条件と撮影条件の関係は、あらかじめ設定された線形テーブルに記録されている。残りの撮影時間についてフォトタイマ方式ではフォトセンサチューブで検出された光量信号の積算量が所定の値に達した時点でX線照射が遮断され、撮影時間が制御される。一方、フォトタイマレス方式の場合はフォトセンサチューブの役割をFPDの出力信号で置き換え、撮影時間を撮影に先だて、より精密に計算することでフォトタイマ無しのX線条件制御を実現した。フォトタイマレス方式は、安定した撮影時間制御が可能で、FPDシステムに

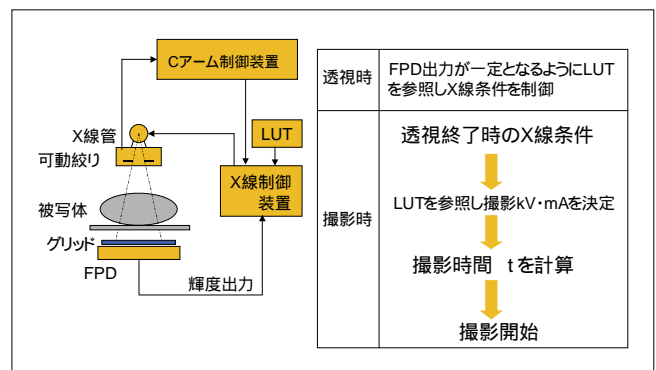


図6：フォトタイマレス自動露出制御

最適なX線自動露出制御機構である。

4.1.4 波尾切断パルス透視機能

IVRでは、X線をパルス状に照射するパルス透視が普通に用いられる。これは連続透視に比べて1フレーム当りの入射線量を多くすることにより高いS/Nが得られるとともに、フレームレートを30fpsから15fpsとすることにより被曝低減を実現できるためである。

一方われわれのX線高電圧装置では、インバータ方式の導入やスイッチング周波数の高周波化により、管電圧リップルの低減、デジタルフィードバック制御による管電圧上昇時間の高速化を図ってきたが、管電圧の波尾を積極的に遮断する機能がなく、被曝、X線管の熱蓄積、透視線量制御の点で問題があった。パルス透視制御の方法としてX線管に三極管を使用する方法があるが、専用のシステムを構成する必要がある。

本システムでは、専用のX線管を必要とせず管電圧の波尾を高速に下降させ、無効X線による被曝低減とX線管の負荷軽減が可能なパルス透視機能を搭載した。

X線管からのX線の放射を停止する期間にAnodeとCathode間の電圧(管電圧)を高速に降下させるパルス透視制御方式について図7を用いて説明する。

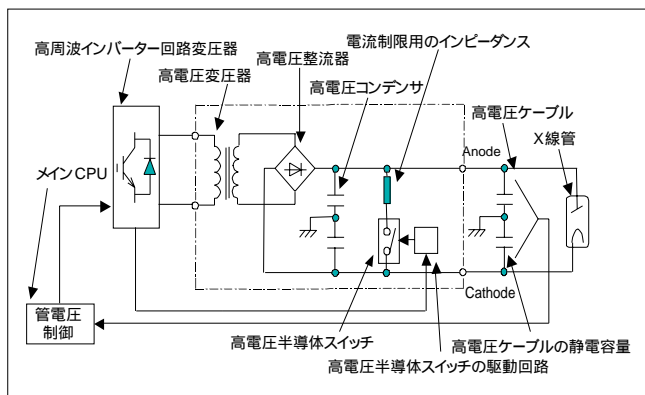


図7：波尾切断方式インバータX線高電圧装置

インバータ式X線高電圧装置は、高周波インバータ回路の出力を高電圧変圧器にて昇圧し、昇圧された交流出力を整流する高電圧整流器と高電圧コンデンサで平滑して直流電圧を生成し、高電圧ケーブルを通してX線管に供給している。このため、高電圧コンデンサと高電圧ケーブルの静電容量に電荷が蓄えられ、その電荷の放電時間と放電経路がX線管を経由することが管電圧を高速に降下させることを妨げている。

この問題を解決する方法として、X線管のAnode・Cathode間に高電圧半導体スイッチと電流制限用のインピーダンスで直列回路を接続する。高周波インバータ回路が動作停止するときに上述高電圧半導体スイッチの駆動回路にスイッチ駆動信号を入力して高電圧半導体スイッチを駆動させる。高電圧コンデンサと高電圧ケーブルの残留電荷を電流制限用のインピーダンスで高速放電させ、管電圧の波尾をなくすことができ、上述の問題点を解消した。

図8に波尾切断回路の有無による管電圧波形と蛍光量波形を示す。

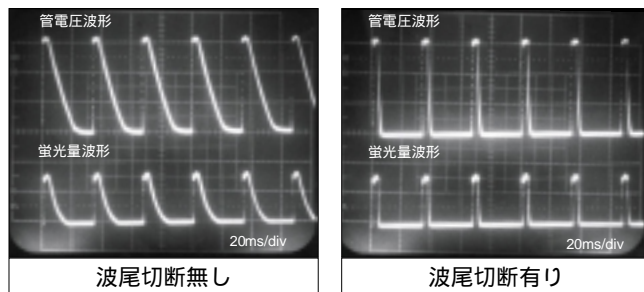


図8：パルス透視時の管電圧波形と線量波形

4.2 操作コンソール

操作コンソールは省スペース化をはかり、JISサイズのOAディスクに載るデスクトップ型とした。モニターは最大500cd/m²の白黒高輝度LCD2台の構成とし、透視/撮影・Windows²兼用機構を搭載した。

図9に操作コンソール外観を示す。



図9：操作コンソール

2台のLCDモニターは左側LCDに透視/撮影とWindows画面を切り替えて表示し、右側LCDはマルチモダリティIVRナビゲーターとした。マルチモダリティIVRナビゲーターは検査に必要な画像(過去画像、CT、MR、CR、USなど)をサムネイルインデックス化して表示する。マルチモダリティ画像を検査室内の天吊りモニターに表示でき、検査の進行支援に大変有効である。

画像操作器はジョグダイヤルとシャトルダイヤルとその周りに配置されたファンクションスイッチにより、ワンハンドで画像を操作できるようになっている。

さらに、マウス操作を併用することで、よりスピーディーな画像操作を可能とした。

ところで、大視野のFPDを搭載した多目的イメージングシステムVersiFlex³では、システムの適用分野として、DRおよびIVRを含む多目的利用を目標とした。われわれは世界初の400万画素のI.I.-CCDタイプのDR装置(Clavis⁴2000X)を発売し、広くご利用いただいております。400万画素の画像のハンドリング・ノウハウを蓄積してきた。

PARTIREの画像処理部はこのClavis2000X/1000XをベースとするWindows PCで構築した。したがってClavis

2000X/1000X から Clavis2000F へのバージョンアップも容易に実現できる。

4.3 非接触センサ(セーフティーアシスト)

従来からの安全機構であるタッチセンサ、ソフトウェアによる衝突防止機構に加え、本システムではX線絞り前面とFPD周囲に非接触センサを搭載した(図10)。非接触センサは、センサと被検者(人体)が接近した場合、その間の静電容量変化を検出して装置の動作を減速・停止し衝突を防止するものである。非接触センサ無しのシステムの場合、被検者との衝突を避けるために天板上に被検者を仮想した低速動作領域(被検者ゾーン)を設定し、この領域内にCアームが干渉した場合強制的に装置の動作をスロウダウンさせ安全性を確保していた。しかし、低速動作領域は、被検者の安全のためにかなり大きめに設定されていたため、実際に被検者との距離がまだ十分広くとも低速動作になってしまい、深いアンギュレーションを採るときなど被検者に映像装置を接近させたい場合の操作性を悪化させることがあった。本システムでは、非接触センサを搭載したことにより被検者との接近を前記のように検出できるので、あらかじめ低速動作領域を従来よりも狭くすることができ、結果安全性の向上を図るとともに、迅速な位置決めなどの操作性もより向上した。

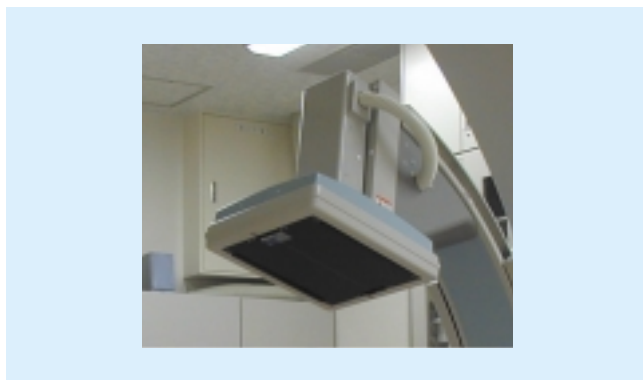


図 10 : 非接触センサ部

4.4 FPD用絞り装置

大視野であるFPDに対応するため、専用絞りを開発した。内部構造を図11に示す。

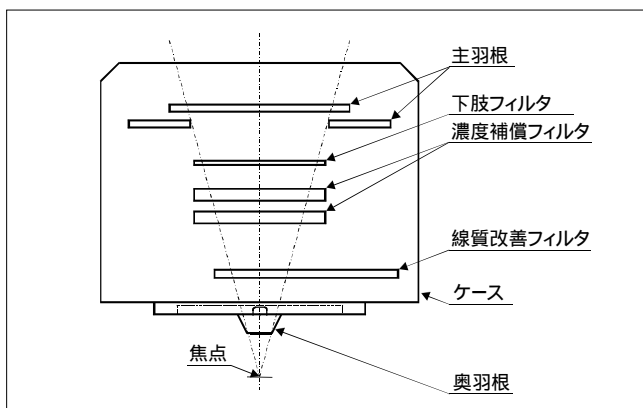


図 11 : FPD4030 用絞りの内部構造

新開発のX線可動絞りは大視野のFPD4030用にSID90cmでも視野40cmを確保した。さらに散乱線を極力抑制し、被曝低減と画質向上を図るために主羽根を最前面に配置している。

ハレーション防止用濃度補償フィルタはそれぞれ単独に回転および開閉が可能である。また被曝低減用線質改善フィルタを3種類具備しており、部位やモード別に自動切換えを可能とした。

一方、FPDの視野サイズ(拡大モード選択)で画面上の拡大率が変わるため絞り羽根の移動距離が同じでも拡大視野と全視野では透視像上の移動距離が異なる。このため拡大視野では動作速度を低速とし、全視野では高速とする視野サイズごとの速度可変とした。

この機能により術者が全ての視野サイズで主羽根と各フィルタの位置決めを迅速に行えるようになり、検査時間の短縮や患者の被曝線量低減を実現できる。

5 . 血管造影画像例

図12に血管造影のFPD4030画像例(DSA撮影像)を示す。

周辺まで解像度が劣化することなく鮮明に血管が描出されている。FPD4030の特長としてDSA像においてバックグラウンドノイズのレベルが非常に低いことと、門脈などの低濃度領域のコントラストが非常に優れていることが挙げられる。

また40cm × 30cmという形状を活かして、画像の視野をポートレート(縦長)またはランドスケープ(横長)に切換えて使用できる。このため腹部大動脈ではポートレート、腹腔動脈ではランドスケープとして使用することにより、臨床目的に応じた関心領域を設定できる²⁾³⁾。

大視野、ワイドダイナミックレンジ、高コントラストによるFPD画像は、カテーテル先端位置と造影目的の部位が1回の撮影で描出されるので、位置決めが迅速でかつ容易となるため、造影剤使用量の低減、被曝量の低減、ひいては検査時間の短縮に大きく寄与する。

6 . まとめ

40cm × 30cmの大視野FPDを搭載した天井走行式Cアーム型IVRシステムを製品化した。

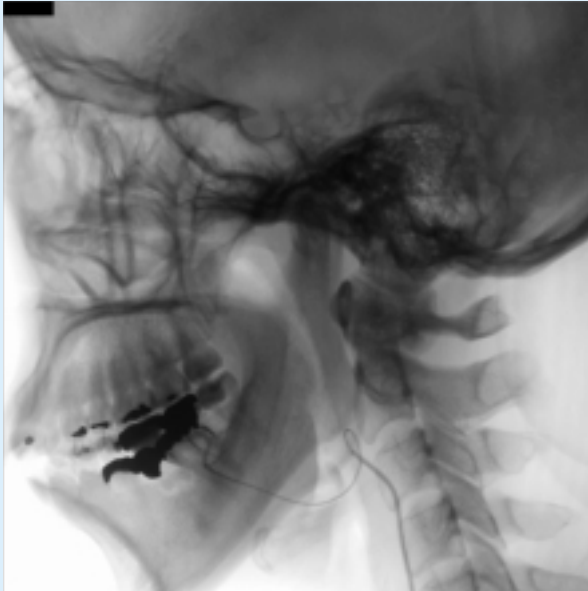
薄型なFPDの特長を活かし被検者周りの空間の拡大や低天井高、非接触センサの採用などCアームシステムの操作性・使い勝手の向上を実現した。

FPDの持つワイドダイナミックレンジ・高コントラスト・高MTFという性能を最大限活かすための自動最適化画像処理技術FAiCEを新しく開発した。これにより、特に透視像の高画質化を実現した。

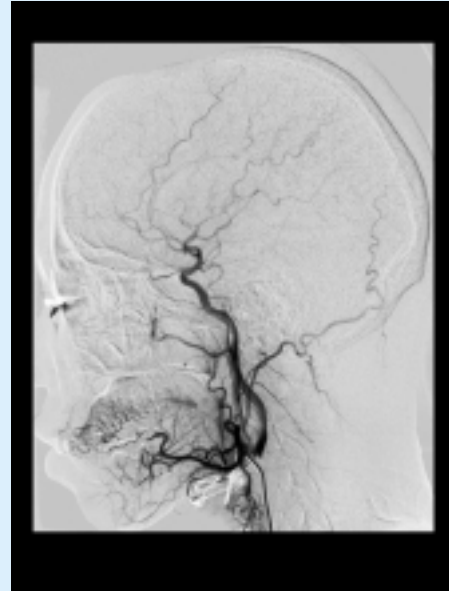
マルチモダリティナビゲーション機能や過去画像のインデックス表示機能などを搭載したオープンスタイルの操作コンソールにより、IVR対応の充実した操作支援環境を構築した。

1 PARTIRE、 3 VersiFlex、 4 Clavisは株式会社日立メディコの登録商標です。

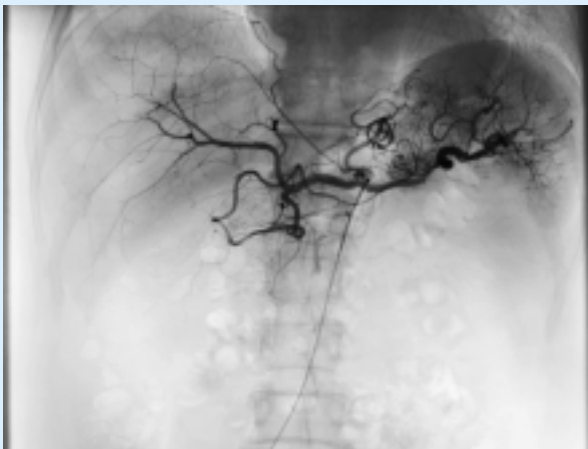
2 Windowsは米国Microsoft社の登録商標です。



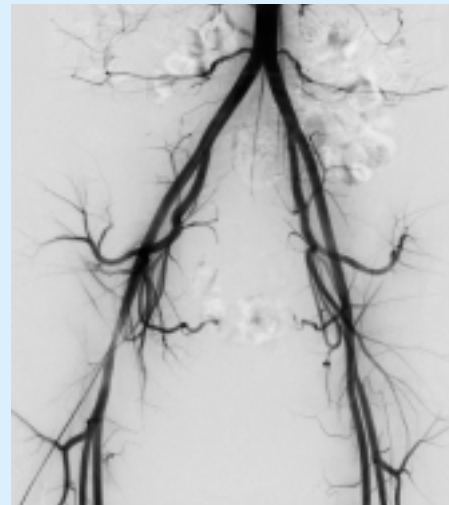
a : 頭部側面(拡大ライブ像)



b : 頭部側面



c : FPD をランドスケープに使用した例(腹腔動脈)



d : FPD をポートレートに使用した例(腸骨動脈)

図 12 : FPD による血管造影(DSA)画像例

参考文献

- 1) 清水正巳：透視撮影におけるFPDシステムの進展「Partire FPD搭載IVRデジタルイメージングシステム」・INNERVISION, (18・4), 2003.
- 2) 山本 彩, ほか：FPD搭載IVRデジタルイメージングシステムPARTIREの臨床経験. MEDIX, 39 : 26-30, 2003.
- 3) 堀 信一, ほか：透視撮影におけるFPDシステムの進展「SX-VA3000 ゲートタワー IGTクリニック」・INNERVISION, (18・4), 2003.