

Nuove modalità di imaging coronarico I. Angiografia digitale (cineless) e sistemi fluorangioscopici digitali a bassa energia

Gian Battista Danzi, Cinzia Capuano, Lorenzo Zapparoli, Marco Sesana, Luigi Fiocca

Unità Funzionale di Cardiologia Interventistica, Casa di Cura Poliambulanza, Brescia

Key words:

Cineless angiography;
Coronary angiography;
DICOM standard.

The advent of digital medical imaging offered unique new possibilities of analyzing, visualizing and communicating medical images. This article reviews the impact of the digital technology in the cardiac catheterization laboratory and covers a range of topics such as the standard DICOM, the transition to cineless angiography, the digital cardiac archive, the network system for imaging exchange and the role of the cardiac digital mobile imaging systems.

(Ital Heart J Suppl 2001; 2 (2): 118-124)

© 2001 CEPI Srl

Ricevuto l'11 ottobre
2000; accettato il 25
ottobre 2000.

Per la corrispondenza:

Dr. Gian Battista Danzi

Unità Funzionale di
Cardiologia Interventistica
Casa di Cura
Poliambulanza
Via Bissolati, 57
25124 Brescia
E-mail:
gbdanzi@mail.com

Nel laboratorio di emodinamica dell'era analogica, la pellicola da 35 mm ha costituito per circa 40 anni l'unico supporto standard, utilizzato per registrare, rivedere ed archiviare gli esami angiografici. Lo sviluppo delle pellicole richiede attrezzature ingombranti, personale specializzato, sostanze chimiche tossiche ed inquinanti; il film è unico ed eventuali copie, mai identiche all'originale, si ottengono con procedure lunghe ed onerose, mentre pile di contenitori metallici riempiono ancora oggi vasti archivi, da cui, personale dedicato, estrae manualmente i film.

Negli anni '80, la tecnologia digitale ha fatto il suo ingresso anche nel laboratorio di emodinamica, permettendo la gestione in tempo reale (on-line) delle immagini, con maggiore definizione, rapido richiamo, possibilità di elaborazioni e misurazioni quantitative (QCA)¹⁻⁴. Il rapido sviluppo di sempre più potenti hardware e di valide tecniche di compressione digitale dell'immagine, ha rivoluzionato i processi di archiviazione e recupero dei dati, gettando le basi per la costituzione di reti informatiche (network) ospedaliere che consentono la gestione elettronica completa di immagini, dati emodinamici ed anagrafici dei pazienti.

Lo standard DICOM in cardiologia

Con lo sviluppo del laboratorio digitale cineless, è sorta l'esigenza della standardizzazione del formato dei dati relativi alle immagini angiografiche, condizione neces-

saria per permettere lo scambio delle immagini e garantire in tutti i laboratori una qualità sufficiente per gli scopi clinici. Fino ai primi anni '90 lo sviluppo di svariati sistemi digitali che utilizzavano supporti diversi (nastri come i DD2, dischi magnetottici, CD-R, ecc.), rischiava di far nascere quella che Nissen et al.^{5,6} definirono una Torre di Babele. Una Task Force, formata da membri dell'American College of Cardiology, American College of Radiology e National Electrical Manufacturers Association (ACC/ACR/NEMA), fu costituita nel 1992 per far parlare ai nascenti laboratori cineless di tutto il mondo la stessa lingua. I membri della Task Force decisero che lo standard sarebbe stato una derivazione del "digital image communication in medicine" (DICOM) già utilizzato in radiologia. Il DICOM è nato allo scopo di stabilire uno standard per immagini radiologiche, fissare i requisiti minimi a cui conformarsi, permettere l'interconnessione e l'interoperabilità tra apparecchiature di diverse aziende. Esso si basa sull'"open system interconnect" (OSI) che è uno standard mondiale di comunicazione su un modello a sette strati nel quale il DICOM occupa l'ultimo, quello applicativo (application level). Il DICOM stabilisce i criteri per l'esecuzione di operazioni relative alla gestione delle immagini, definite SOP (service/object pair) come ad esempio acquisire un'immagine, stamparla, archivarla, ecc. Un'apparecchiatura conforme agli standard DICOM deve dunque seguire le DICOM SOPs, deve cioè supportare immagini con

caratteristiche idonee e gestirle secondo gli standard⁷. A partire dal 1992 la comunità cardiologica, guidata dall'American College of Cardiology, iniziò il processo di standardizzazione del formato delle immagini digitali e dei supporti per lo scambio dell'informazione tra laboratori di emodinamica dotati di apparecchiature di ditte diverse. Gli esami cardiologici, come una coronarografia, dovendo gestire immagini in movimento, generano una mole enorme di dati rispetto ad immagini radiologiche statiche. Stabilire dei criteri qualitativi e quantitativi minimi per le immagini cardiologiche comporta il raggiungimento di un compromesso tra le potenzialità di hardware e software, e le esigenze diagnostiche. Nel 1995, nello standard DICOM 3.0 sono stati fissati i criteri per la registrazione e lo scambio di immagini angiografiche cardiologiche^{7,8}. Questi criteri potranno essere in futuro aggiornati dagli esperti della Task Force in linea con le rapide evoluzioni tecnologiche. Recentemente, ad esempio, il DICOM Standards Committee ha adottato come standard per immagini ad elevata risoluzione la matrice 1024×1024 pixel \times 12 bit (4096 livelli nella scala dei grigi)⁹.

Mezzi di registrazione e scambio degli esami angiografici. Una commissione di esperti *ad hoc* (nell'ambito della Task Force ACC/ACR/NEMA) si è occupata della scelta del mezzo idoneo alla registrazione di angiogrammi coronarici che potesse sostituire la pellicola 35 mm. Sono stati analizzati più di 15 potenziali candidati tra cui nastri in vari formati (DD2, Exabyte, 3490E), dischi ottici, magneto-ottici e CD¹⁰. Oltre agli ovvi criteri quantitativi (capacità di contenere dati), sono stati determinanti nella scelta criteri qualitativi come la facile reperibilità sul mercato, il basso costo, la rispondenza a standard internazionali di sicurezza, la compatibilità con i personal computer (PC) e la non obsolescenza. Il CD-R è risultato rispondente a tutti i criteri richiesti e nel 1994 è stato scelto come mezzo standard per l'interscambio di immagini digitali nei laboratori di emodinamica cineless^{7,11}. All'epoca i lettori di CD avevano al massimo velocità di 6X pari a 0.9 Mb/s sufficiente per riprodurre immagini con matrice 512×512 pixel \times 8 bit con velocità di 7.5 frames/s. Attualmente sono installati sui comuni PC lettori 52X che consentono di riprodurre le immagini alla stessa velocità con cui sono originariamente acquisite (30 frames/s ed oltre).

Il DVD (digital versatile disk) è l'evoluzione tecnologica del CD. Esso ha una capacità pari a circa 6 Gigabytes (10 volte superiore al CD), elevate velocità di lettura dati e stesso formato del CD. Nel laboratorio cineless il DVD è destinato in breve tempo a sostituire il CD-R in maniera graduale e non traumatica, rispettando il criterio della non obsolescenza. I lettori di DVD saranno infatti in grado di leggere i CD-R per cui sarà sufficiente, con costi contenuti, un upgrading delle apparecchiature senza perdita dell'archivio storico.

Tecniche di compressione dell'immagine. Un aspetto critico nella transizione dal laboratorio analogico a quello digitale riguarda la qualità delle immagini angiografiche. Nella digitalizzazione delle immagini due parametri quantitativi risultano determinanti: i dati trasferibili in 1 s (data rate) misurati in MB/s e la quantità totale di dati da memorizzare (data capacity) misurata in MB. La risoluzione spaziale del film è ritenuta pressoché equivalente a quella di una matrice digitale di 1024×1024 pixel con una scala di grigi di 256 livelli (8 bit)^{12,13}. Ad una velocità di 30 immagini al secondo, la nostra "moviola digitale" deve essere in grado di sostenere un data rate di 30 MB/s. Un esame di 2400 immagini richiederebbe una data capacity di circa 2400 MB cioè 4 CD-R per essere registrato integralmente ed un lettore 200X per essere rivisto a velocità reale. Evidentemente per poter contenere un esame in un singolo CD e poterlo rivedere in tempi e velocità realistici, occorre comprimerlo, cioè ridurre il suo contenuto informativo (bit), attraverso processi matematici. Esistono sostanzialmente due tecniche di compressione dell'immagine, quelle definite *lossless* o *reversible* in cui non si perde informazione e quelle definite *lossy* o *irreversible* in cui parte del contenuto informativo viene perso. Le strategie di "predictive encoding" e "statistical encoding" consentono compressioni di tipo lossless con fattori di compressione da 2 a 4. Esse in sostanza esprimono i valori dei pixel di ciascuna linea della matrice come differenza dal primo (predictive encoding) ed attribuiscono codici brevi ai livelli di grigio più frequenti (statistical encoding). Le tecniche lossy si basano sul principio del "transform encoding" che consiste nell'effettuare trasformazioni matematiche che separano in ogni immagine le zone a scarsa variazione di contrasto da quelle a rapida variazione, considerando il contenuto delle prime meno importante. Successivamente, le zone più importanti (per lo più corrispondenti al lume vasale) sono compresse con tecnica lossless mentre le seconde sono codificate in maniera meno precisa. Questo secondo passo, definito "quantizzazione", è irreversibile.

Attualmente lo standard DICOM consente soltanto compressioni lossless 2:1 con standard JPEG (Joint Photographic Expert Group).

Un recente studio internazionale condotto dal DICOM Working Group I suddiviso in tre fasi, è stato disegnato per valutare l'impatto della compressione di tipo lossy con standard motion JPEG (universalmente riconosciuto, utilizzato ad esempio nelle attrezzature fotografiche digitali) sull'accuratezza diagnostica nelle angiografie coronariche^{9,14-16}. Sono stati considerati tre livelli di compressione (6:1, 10:1, 16:1) di immagini acquisite con matrice 512×512 pixel \times 8 bit. Nella fase I è stata analizzata la sensibilità diagnostica. È risultata una minore accuratezza diagnostica al crescere del livello di compressione specie nel riconoscimento delle calcificazioni coronariche. Indicatori soggettivi di qualità dell'immagine evidenziavano una ridotta capa-

cità interpretativa a partire dal livello 10:1. La fase II ha analizzato gli effetti della compressione dell'immagine sull'analisi QCA del grado di stenosi giungendo alla conclusione che compressioni 10:1 e 16:1 influiscono negativamente sui risultati della QCA e non dovrebbero pertanto essere usate in studi clinici. Nella fase III è stato fatto un confronto "side-by-side" delle immagini compresse con quelle originali nel quale gli esperti esprimevano un giudizio qualitativo con un punteggio e dovevano riconoscere dei pattern diagnostici (difetti di riempimento, dissezioni, calcio, ecc.). È risultato che una compressione lossy 6:1 può essere considerata equivalente all'originale, mentre ad un livello di 16:1 c'è un significativo aumento della percentuale di errore. Risultati intermedi sono stati ottenuti con livello di compressione 10:1. Alla luce di questi risultati il DICOM Standards Committee ha deciso di non consentire compressioni di tipo lossy JPEG per la registrazione e l'archiviazione di immagini coronarografiche. La compressione 6:1, risultata valida in condizioni ottimali (laboratori di recente concezione e lettori esperti partecipanti allo studio), potrebbe non esserlo in situazioni diverse ed espone al rischio di compressioni sequenziali con detrimento dell'immagine. Inoltre il vantaggio derivante da una compressione 6:1, rispetto all'attuale 2:1, appare relativo vista la crescente capacità di memorizzare dati nei moderni archivi e la disponibilità di lettori di CD e DVD ad elevate velocità. Una potenziale applicazione di compressioni tipo lossy è costituita dalla gestione di immagini nelle reti. A tale scopo un lieve deterioramento dell'immagine può essere tollerato a fronte di una rapida velocità di trasferimento dati.

Archivi e network

Nel laboratorio cineless le metodiche di archiviazione e recupero degli esami sono radicalmente diverse rispetto a quelle del laboratorio tradizionale, con enormi potenzialità di risparmio di spazi e tempi, di incremento di efficienza e riduzione dei costi.

Poter disporre di archivi centrali con tempi brevi di accesso alle procedure e buona qualità delle immagini sulle stazioni remote connesse costituisce certamente lo scenario ideale. Le infrastrutture e le apparecchiature necessarie per sviluppare un tale modello sono però molto onerose e spesso non alla portata dei centri con basso volume di procedure, specie se inseriti in strutture obsolete con supporto informatico precario. Il modello di archiviazione e recupero delle immagini deve essere pertanto adeguato alle caratteristiche del singolo laboratorio. La valutazione del tipo di archivio digitale da utilizzare deve tenere conto di alcune variabili importanti quali il numero di sale angiografiche, il volume di lavoro, il numero e la sede delle stazioni remote, il numero di utenti che necessitano della consultazione degli esami, la media delle eventuali revisioni contem-

poranee, il tempo massimo desiderabile tra la richiesta e la disponibilità delle immagini.

Esistono sostanzialmente due modelli di archiviazione principali. Nel più semplice (media-based archive system) il supporto di registrazione è al centro del sistema con funzione analoga a quella svolta dalla pellicola e le stazioni digitali per l'analisi off-line (workstation) sostituiscono le moviole. I sistemi più complessi si basano su network per il trasferimento dell'immagine e server centrali di archiviazione (network-based archive systems); in questi ultimi l'accesso alle immagini è eseguito automaticamente su qualsiasi workstation abilitata, situata anche in punti remoti rispetto al laboratorio di emodinamica^{17,18}.

Media-based archive. Nell'archivio digitale media-based il CD costituisce il supporto per la masterizzazione dell'esame e la successiva archiviazione manuale. L'esame può successivamente essere rivisto su una workstation dedicata o su qualunque PC dotato del software necessario^{18,19}. Un limite di questo modello di archiviazione è la data capacity del CD che è sufficiente nel 99% dei casi per contenere un esame registrato con matrice 512×512 e compressione 2:1 ma diventa spesso insufficiente nel caso di esami registrati con matrici ad elevata risoluzione. La velocità del lettore CD e le potenzialità di hardware e software delle workstation dedicate condizionano i tempi di accesso e la possibilità di rivedere in tempo reale (ad esempio 30 frames/s) le immagini. Alcuni modelli di archivio utilizzano compressioni di tipo lossy per superare i limiti del "transfer rate". L'esame viene cioè masterizzato sul CD con doppia traccia, una conforme agli standard DICOM ed una che utilizza compressioni di tipo lossy (dynamic cardio review). L'utente può utilizzare la seconda traccia per rivedere l'esame direttamente dal CD in tempi brevi ma con un'immagine di qualità inferiore rispetto all'originale. L'ormai prossimo utilizzo del DVD consentirà il superamento della maggior parte di queste limitazioni.

Network-based archive. L'archivio basato sul network utilizza un server cui vengono inviate le immagini alla fine di un esame, collegato alle stazioni remote (review station) dalle quali è possibile rivedere le procedure eseguite. Gli esami sono anche inviati ad un masterizzatore per l'archiviazione definitiva su CD¹⁹⁻²². Le immagini contenute sui CD possono in seguito essere riviste tramite il server. Le performance del server sono determinanti nella qualità dei diversi modelli di archivio. Il server può essere un semplice CD-changer o un sofisticato RAID (redundant array of independent disks). Quest'ultimo utilizza più hard disk che lavorano in parallelo consentendo una maggiore ampiezza di banda che significa data rate maggiore e possibilità di connessioni contemporanee. Oltre all'ampiezza di banda, caratteristica importante del server è la quantità di dati archiviabili (storage capacity) che deve essere adeguata al volume di lavoro del laboratorio e al tempo in cui si vuole

che le immagini rimangano accessibili in rete. Le performance del server devono essere adeguate a quelle della rete e viceversa; è inutile ad esempio acquistare un server con elevate prestazioni se non si dispone di una rete con un'adeguata ampiezza di banda.

Gli archivi network-based consentono la gestione integrata di dati di diversa natura che possono essere generati nel laboratorio di emodinamica come immagini ultrasonografiche intravascolari, dati emodinamici, elettrocardiografici, anagrafici, clinici. Lo sviluppo recente di standard DICOM per la gestione in rete di tali dati consente la creazione di una cartella clinica elettronica contenente informazioni di varia natura relative ad un paziente. I dati in formato digitale standard, possono essere utilizzati sia all'interno della stessa struttura ospedaliera che inviati a distanza. È possibile salvarli su un CD o DVD da consegnare al paziente come "relazione clinica" a fine ricovero, da utilizzare ed aggiornare ai successivi follow-up²²⁻²⁴.

Transizione dal film al cineless

La conversione di un laboratorio tradizionale basato sulla pellicola 35 mm ad uno digitale è un processo non semplice che richiede la collaborazione tra il medico responsabile del laboratorio e l'amministrazione ospedaliera. Eventuali errori potrebbero causare nella migliore delle ipotesi soltanto delle spese superflue ma potrebbero anche determinare delle serie disfunzioni del sistema.

Alcuni principi devono essere tenuti presenti nell'allestimento di un laboratorio cineless: la qualità dell'immagine finale deve essere mantenuta e possibilmente incrementata. Il servizio non deve interrompersi durante il periodo di transizione. Le apparecchiature scelte devono essere compatibili ed integrate nel sistema scelto²⁵. La varietà di soluzioni proposte dalle diverse aziende e la rapida evoluzione tecnologica possono generare confusione nell'utente, per cui bisogna avere ben chiaro in mente il modello di laboratorio cineless che si intende realizzare, ed acquistare apparecchiature rispondenti alle proprie esigenze, conformi agli standard DICOM, e potenzialmente aggiornabili. Il volume di lavoro ed il numero di sale sono determinanti nello scegliere la strategia di conversione al digitale. Laboratori con basso volume di procedure (circa 1000 procedure/anno) non necessitano di potenti hardware per l'archiviazione in rete degli esami e possono dotarsi di un sistema di archiviazione e recupero esami basato sul CD. Laboratori con più sale possono effettuare la digitalizzazione di una sala per volta adottando temporaneamente un sistema ibrido con il vantaggio di non dover interrompere il servizio. La digitalizzazione del laboratorio può essere divisa in tre livelli: acquisizione dell'immagine; proiezione su monitor; archiviazione. Nel programmare la digitalizzazione di un apparecchio tradizionale bisogna porsi delle domande come ad

esempio se l'angiografo sarà in grado di fornire immagini digitali adeguate o se la qualità dell'immagine non sia di per sé già degradata, nel qual caso ci si deve chiedere se con la sostituzione di alcune parti l'apparecchiatura può tornare a livelli validi o se invece non convenga acquistarne una nuova digitale *tout court*. È fondamentale tener presente che l'immagine digitale non sarà mai migliore di quella ottenuta con la stessa apparecchiatura su pellicola 35 mm, per cui qualora le immagini analogiche non risultino ottimali, quelle digitali potrebbero risultare inadeguate ai fini diagnostici¹³. L'aggiunta di un video processore digitale, unico elemento necessario per acquisire immagini in formato digitale, ad un'apparecchiatura obsoleta comporterà pertanto l'acquisizione di immagini scadenti. A grandi linee si può affermare che un'apparecchiatura che abbia più di 8-10 anni ha una tecnologia che ne rende difficile l'adattamento al grado di controllo da parte della catena televisiva necessario per ottenere immagini digitali ottimali²⁵.

Vantaggi economici del cineless. Per un laboratorio installato *ex novo* nel terzo millennio un capitolo sul risparmio rispetto al laboratorio tradizionale può sembrare superfluo; chi prenda in considerazione l'aggiornamento di un laboratorio analogico potrà probabilmente ricavarne degli utili consigli. A fronte dell'iniziale impegno economico per l'acquisto delle apparecchiature, un laboratorio che adotti la tecnologia digitale per l'archiviazione e lo scambio di immagini ottiene un sensibile risparmio in risorse ed in ultima analisi denaro, che ripaga ampiamente dello sforzo fatto^{26,27}. Un'analisi dettagliata dei costi di produzione del film 35 mm e del CD nel laboratorio di emodinamica è stata recentemente eseguita dal nostro gruppo¹³. Da questo studio è emerso che analizzando i costi fissi (relativi alla procedura) e variabili (relativi alle apparecchiature) per un laboratorio a medio volume di procedure (circa 1000 esami/anno) la produzione di un CD è costata globalmente il 60% in meno rispetto al film. Secondo i nostri calcoli (riferiti all'anno 1998) l'utilizzo del CD nel nostro laboratorio ha consentito un risparmio annuo di circa 90 milioni. Comunque, oltre ad un apprezzabile risparmio economico vanno considerati altri punti altrettanto importanti per ciò che concerne l'utilizzo di risorse. Da un lato il laboratorio cineless è molto più dinamico, e consente l'esecuzione di procedure specifiche, anche in assenza di personale altamente specializzato (infatti la masterizzazione di un CD, ad esempio, oltre ad essere rapida è semplice). Dall'altro l'esecuzione di elementari istruzioni operative consente a tutti i componenti dello staff di un laboratorio di emodinamica di registrare un esame su CD (non si ha più a che fare con i reagenti fotografici, lo spazio occupato dalla camera oscura può essere utilizzato per altri scopi, l'archiviazione avviene in spazi più ristretti e la produzione di una copia del CD risulterà semplice oltre che del tutto identica all'originale).

Deve essere comunque sottolineato che la nostra analisi si riferiva ad un laboratorio che adotta un sistema di archiviazione manuale dei CD; tale tipo di archiviazione (peraltro simile a quella utilizzata sino ad ora per il film) è per lo più indicata per i laboratori a medio volume di procedure. L'analisi dei costi diventa invece più complessa quando si prendono in considerazione sistemi di archiviazione automatici installati in rete che possono essere vantaggiosi soltanto per laboratori con grandi volumi di procedure e con più sale angiografiche. Attualmente sono disponibili juke-box che utilizzano CD o supporti diversi (digital linear tape, magnetic optical disk) che consentono un'elevata capacità di archiviazione dei dati. In conclusione, dotarsi di archivi automatici offre degli indubbi vantaggi, ma costituisce un impegno economico rilevante. È necessario pertanto analizzare con attenzione le esigenze del singolo laboratorio, per non annullare il vantaggio derivante dalla transizione al cineless.

Sviluppi futuri del cineless. I rapidi progressi tecnologici e la diffusione di sistemi standard di codifica dei dati, consentono già oggi la gestione integrata di dati clinici di diversa natura (anagrafici, elettrocardiografici, ecografici, angiografici, ecc.), rapidamente trasferibili, nell'ambito di reti intraospedaliere^{21,28}. Attualmente la gestione completamente informatizzata della cartella clinica, insieme alla diagnostica per immagini, viene eseguita in pochi centri pilota, ma è ipotizzabile una diffusione rapida in futuro^{29,30}. La registrazione delle informazioni su supporti standard come i CD ed i DVD consente la rapida lettura e l'aggiornamento costante dell'intero contenuto informatico relativo al singolo paziente, con un sempre minore ricorso al supporto cartaceo, ipotizzando in un futuro prossimo che ad ogni paziente venga consegnato alla dimissione un DVD (contenente tutte le informazioni cardiologiche) che possa essere letto in qualsiasi ospedale nel mondo. La tecnologia di Internet avrà verosimilmente un ruolo crescente anche in campo cardiologico, consentendo di inviare immagini cineangiografiche in posti remoti, effettuare videoconferenze e forum di discussione³¹⁻³³.

Sistemi fluorangioscopici digitali a bassa energia

L'evoluzione tecnologica dell'angiografia digitale mira alla riduzione del carico di radiazioni per il paziente e per gli operatori e al contenimento dei costi. Parallelamente si sviluppa il concetto della realizzazione di apparecchiature di piccole dimensioni, trasportabili, che consentano di ottenere immagini coronarografiche di alta qualità anche al di fuori del laboratorio di emodinamica (pronto soccorso, sala operatoria)³⁴⁻³⁶. Il contenimento delle emissioni di radiazioni si otterrà nell'immediato futuro per mezzo dello sviluppo di nuovi rivelatori a raggi X, che consentono l'acquisizione digitale diretta delle immagini. Dagli anni '50 l'utiliz-

zo degli amplificatori di brillantezza abbinati ad una telecamera, ha costituito la tecnologia di base per lo sviluppo della qualità in tecnica fluoroscopica. Agli inizi degli anni '80 venne introdotta l'angiografia digitale con sottrazione di immagine (DSA) per le applicazioni vascolari. Nella DSA il segnale video analogico proveniente dalla telecamera viene convertito in digitale, e le strutture vascolari sono visualizzate attraverso un processo digitale.

Flat panel. Nei primi anni '90 i ricercatori iniziarono lo sviluppo di nuovi rivelatori denominati "flat panel", in grado di sostituire l'attuale tecnologia, con l'obiettivo di migliorare la qualità di immagine in termini di risoluzione spaziale e risoluzione di contrasto, sia per immagini statiche che dinamiche e contenere il carico radiogeno³⁷⁻³⁹. La conversione diretta è la caratteristica innovativa di tale tecnologia. I raggi X che attraversano il corpo del paziente vengono convertiti direttamente in segnali elettrici che contribuiscono alla formazione digitale dell'immagine. Il rivelatore flat panel è composto da quattro componenti integrati: il convertitore di raggi X, il rivelatore (TFT array), l'elaboratore di segnale ad alta velocità e l'unità di trasferimento digitale.

Convertitore di raggi X. Esistono due tecnologie che utilizzano un modo diretto ed un modo indiretto. Nel modo diretto è utilizzato del selenio amorfo come materiale fotoelettrico che, esposto ai raggi X, crea direttamente un segnale elettrico proporzionale al livello di esposizione. Nel modo indiretto viene utilizzato del materiale fluorescente che converte i raggi X in luce, la quale viene convertita a sua volta dai fotodiodi in segnale elettrico. Tra le due tecnologie quella con modo diretto è molto meno sensibile alla radiazione diffusa.

Rivelatore (TFT array). La tecnologia TFT (thin film transistors) è impiegata per fabbricare delle piastre con matrici di oltre 2 milioni di rivelatori in un substrato di vetro. Ciascun rivelatore è composto da un condensatore e da un TFT. Il segnale elettrico proveniente dal convertitore viene accumulato dal condensatore e trasferito al relativo TFT. Quando il TFT viene attivato da un segnale di sincronismo, la relativa carica accumulata viene trasferita come segnale elettrico all'elaboratore di segnali ad alta velocità.

Elaboratore di segnale ad alta velocità. Questa unità genera i segnali di sincronismo per l'attivazione dei TFT della matrice. Il segnale elettrico proveniente da ciascun TFT viene quindi convertito da un A/D converter.

Unità di trasferimento digitale. I dati digitali vengono trasferiti ad un host computer. In tecnica fluoroscopica le immagini dinamiche vengono acquisite con velocità fino a 30 immagini/s, corrispondenti ad un "transmission rate" di circa 1 gigabit/s.

La nuova tecnologia flat panel verrà utilizzata nei sistemi radiologici di prossima generazione. I potenziali vantaggi in campo radiologico diagnostico e terapeutico si possono riassumere in quattro punti:

1. il sistema potrà essere utilizzato per produrre immagini di altissima qualità in termini di risoluzione spaziale e di contrasto, facilitando ulteriormente l'osservazione di differenze tissutali e caratteristiche di lesioni nelle stenosi vascolari e quindi la scelta di strumenti idonei per le procedure interventistiche;
2. il tempo totale di fluoroscopia ed il numero di esposizioni radiografiche per esame può essere diminuito riducendo al minimo la dose erogata al paziente ed agli operatori, anche in virtù del fatto che le procedure diagnostiche ed interventistiche saranno più veloci perché avvantaggiate da una maggior qualità di immagine;
3. gli impianti radiologici saranno più compatti in quanto il flat panel è molto meno pesante ed ingombrante dell'attuale amplificatore di immagine e telecamera. Gli stativi angiografici saranno più compatti e veloci, contribuendo ad aumentare la sicurezza e la velocità nelle applicazioni interventistiche;
4. questo step finale nel futuro di digitalizzazione completa favorisce la connessione a reti di imaging ospedaliere e globali, archivi digitali, riducendo drasticamente gli spazi ed i costi attuali.

Angiografi portatili. Il contenimento dei costi, l'ingombro ridotto e la trasportabilità sono prerogative degli angiografi portatili, veri laboratori di emodinamica mobili. Queste apparecchiature (che hanno un costo decisamente più contenuto rispetto ai sistemi fissi) sono entrate recentemente nella pratica clinica ed hanno enormi potenzialità che potranno essere meglio apprezzate nel prossimo futuro⁴⁰. La tecnologia di cui sono dotate è d'avanguardia con possibilità di utilizzare scopia pulsata e bassi carichi di radiazioni. I modelli recenti sono completamente digitalizzati e consentono la masterizzazione su CD in standard DICOM degli esami, mentre alcuni sono dotati di arco mobile motorizzato. I limiti attuali di queste apparecchiature sembrano soprattutto emergere nel caso di un carico di lavoro elevato (esecuzione di diversi esami consecutivi), oppure durante esami lunghi e complessi che richiedano proiezioni estreme specie in pazienti con elevato indice di massa corporea. Per ciò che concerne la qualità delle immagini ed i rilievi dosimetrici questi sistemi appaiono decisamente promettenti anche se al momento attuale mancano dati relativi a studi di confronto con apparecchiature tradizionali fisse, digitali, di ultima generazione.

Per tutti questi motivi, l'utilizzo attuale è sostanzialmente riservato a strutture che svolgono attività invasiva diagnostica con ridotto carico di lavoro (nuovi laboratori, ecc.), oppure sono presi in considerazione come sistemi di back-up per laboratori di emodinamica che svolgono attività interventistica.

Riassunto

L'avvento dell'era digitale ha rappresentato un'autentica rivoluzione nella società civile. Nel laboratorio di emodinamica dell'era analogica, la pellicola da 35 mm ha costituito per circa 40 anni l'unico supporto standard, utilizzato per registrare, rivedere ed archiviare gli esami angiografici. Negli anni '80, la tecnologia digitale ha fatto il suo ingresso anche nel laboratorio di emodinamica, permettendo la gestione in tempo reale delle immagini, con maggiore definizione, rapido richiamo, possibilità di elaborazioni e misurazioni quantitative. Questo articolo offre un up-date di questo argomento toccando punti cruciali come quello relativo allo standard DICOM, quello della transizione dal film al cineless, il problema dell'archiviazione e trasmissione delle immagini in formato digitale, e l'impatto nella pratica clinica dei sistemi fluorangiografici digitali a bassa energia.

Parole chiave: Angiografia cineless; Angiografia coronarica; Standard DICOM.

Bibliografia

1. Wondrow M. The digital cardiac catheterization laboratory (basic principles). In: Kennedy TE, Nissen SE, Simon R, et al, eds. Digital cardiac imaging in the 21st century: a primer. Bethesda, MD: The Cardiac and Vascular Information Working Group, c/o American College of Cardiology, 1997: 4-7.
2. Sheehan FH. Quantitative analysis of DICOM cardiac images. In: Kennedy TE, Nissen SE, Simon R, et al, eds. Digital cardiac imaging in the 21st century: a primer. Bethesda, MD: The Cardiac and Vascular Information Working Group, c/o American College of Cardiology, 1997: 8-22.
3. Cusma JT, Bashore TM. The digital catheterization laboratory - is it practical today? In: Reiber JHC, van der Wall EE, eds. Cardiovascular imaging. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996: 157-69.
4. Simon R. Digital imaging in cardiology: the situation in Europe. In: Kennedy TE, Nissen SE, Simon R, et al, eds. Digital cardiac imaging in the 21st century: a primer. Bethesda, MD: The Cardiac and Vascular Information Working Group, c/o American College of Cardiology, 1997: 100-1.
5. Nissen SE, Pepine CJ, Bashore TM, et al. Cardiac angiography without cine film: erecting a "tower of Babel" in the cardiac catheterization laboratory. American College of Cardiology Cardiac Catheterization Committee. J Am Coll Cardiol 1994; 24: 834-7.
6. Nissen SE. Evolution of the filmless cardiac angiography suite: promise and perils of the evolving digital era. J Am Coll Cardiol 1996; 78 (Suppl 3A): 41-4.
7. Pelanek GA. DICOM cardiology exchange. In: Kennedy TE, Nissen SE, Simon R, et al, eds. Digital cardiac imaging in the 21st century: a primer. Bethesda, MD: The Cardiac and Vascular Information Working Group, c/o American College of Cardiology, 1997: 24-44.
8. Goedhart B, Reiber J. The role of DICOM in the digital catheterization laboratory. In: Reiber JHC, van der Wall EE, eds. Cardiovascular imaging. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996: 171-84.
9. Nissen SE, Hirshfeld JW, Simon R. Introduction and back-

- ground: the International Angiographic Compression Study. *J Am Coll Cardiol* 2000; 35: 1367-9.
10. Prentice G. Digital recording media. In: Kennedy TE, Nissen SE, Simon R, et al, eds. *Digital cardiac imaging in the 21st century: a primer*. Bethesda, MD: The Cardiac and Vascular Information Working Group, c/o American College of Cardiology, 1997: 46-8.
 11. Condit PB, Pelanek G, Rourke T. Requirements for cardiac interchange media and adoption of recordable CD. In: Reiber JHC, van der Wall EE, eds. *Cardiovascular imaging*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996: 201-9.
 12. Brennecke R, Gutenber J, Kerensky R. Image compression. In: Kennedy TE, Nissen SE, Simon R, et al, eds. *Digital cardiac imaging in the 21st century: a primer*. Bethesda, MD: The Cardiac and Vascular Information Working Group, c/o American College of Cardiology, 1997: 68-74.
 13. Danzi GB, Fiocca L, Dallavalle F, et al. Il laboratorio di emodinamica cineless. Confronto tra costi di produzione del film 35 mm e del compact disk recordable. *G Ital Cardiol* 1998; 28: 887-92.
 14. Kerensky RA, Cusma JT, Kubilis P, et al. American College of Cardiology/European Society of Cardiology international study of angiographic data compression phase I: the effects of lossy data compression on recognition of diagnostic features in digital coronary angiography. *J Am Coll Cardiol* 2000; 35: 1370-9.
 15. Tuinenburg JC, Koning G, Hekking E, et al. American College of Cardiology/European Society of Cardiology international study of angiographic data compression phase II: the effects of varying JPEG data compression levels on the quantitative assessment of the degree of stenosis in digital coronary angiography. *J Am Coll Cardiol* 2000; 35: 1380-7.
 16. Brennecke R, Bürgel U, Simon R, et al. American College of Cardiology/European Society of Cardiology international study of angiographic data compression phase III: measurement of image quality differences at varying levels of data compression. *J Am Coll Cardiol* 2000; 35: 1388-97.
 17. Holmes DR, Wondrow MA, Garratt KN, Bell MR. Archival systems for cineangiographic film replacement. In: Reiber JHC, van der Wall EE, eds. *Cardiovascular imaging*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996: 233-41.
 18. Kennedy TE. Digital cardiac archive and review system strategies. In: Kennedy TE, Nissen SE, Simon R, et al, eds. *Digital cardiac imaging in the 21st century: a primer*. Bethesda, MD: The Cardiac and Vascular Information Working Group, c/o American College of Cardiology, 1997: 76-83.
 19. Goedhart B, Brand GJ, Reiber JH. The DICOM review stations: are they truly different? *Int J Card Imaging* 1998; 14: 317-22.
 20. Solomon HP. Fundamentals of network technology: a DICOM cardiology example. In: Kennedy TE, Nissen SE, Simon R, et al, eds. *Digital cardiac imaging in the 21st century: a primer*. Bethesda, MD: The Cardiac and Vascular Information Working Group, c/o American College of Cardiology, 1997: 50-9.
 21. Weterings RA. Integrated images storage solutions for the cath department. *Int J Card Imaging* 1998; 14: 349-56.
 22. Fujii S. Toshiba's approach to the digital catheterization laboratory-full-digital system with DVD and network. *Int J Card Imaging* 1998; 14 (Suppl 1): 27-30.
 23. Katz S. The digital cardiac network: today and the future. *Int J Card Imaging* 1998; 14 (Suppl 1): 23-5.
 24. Vreeswijk K. Philips CD-medical digital cardiac review, exchange and archiving: today and tomorrow. *Int J Card Imaging* 1998; 14 (Suppl 1): 17-8.
 25. Hirshfeld JW Jr. Managing the transition to filmless operation. What are the equipment acquisition issues? In: Kennedy TE, Nissen SE, Simon R, et al, eds. *Digital cardiac imaging in the 21st century: a primer*. Bethesda, MD: The Cardiac and Vascular Information Working Group, c/o American College of Cardiology, 1997: 88-92.
 26. Holmes DR, Wondrow MA. Cost and cine film replacement. In: Kennedy TE, Nissen SE, Simon R, et al, eds. *Digital cardiac imaging in the 21st century: a primer*. Bethesda, MD: The Cardiac and Vascular Information Working Group, c/o American College of Cardiology, 1997: 84-7.
 27. Oetgen ME, New G, Moussa I, et al. Procedural costs of digital vs analog archiving of diagnostic cardiac catheterizations. *Catheter Cardiovasc Interv* 2000; 49: 246-50.
 28. Bidgood WD Jr. The SNOMED DICOM microglossary: controlled terminology resource for data interchange in biomedical imaging. *Methods Inf Med* 1998; 37: 404-14.
 29. Kuzmak PM, Dayhoff RE. The use of digital imaging and communications in medicine (DICOM) in the integration of imaging into the electronic patient record at the Department of Veterans Affairs. *J Digit Imaging* 2000; 13: 133-7.
 30. Kimura M, Tani S, Baatar S, et al. Implementation of multi-vendor DICOM standard image transfer in hospital wide ATM network. *Comput Methods Programs Biomed* 1998; 57: 85-9.
 31. Fernandez-Bayo J, Barbero O, Rubies C, Sentis M, Donoso L. Distributing medical images with internet technologies: a DICOM web server and a DICOM java viewer. *Radiographics* 2000; 20: 581-90.
 32. Heautot JF, Eichelberg M, Gibaud B, et al. The RETAIN project: DICOM teleradiology over an ATM-based network. Radiological examinations transfer on an ATM integrated network. *Eur Radiol* 2000; 10: 175-82.
 33. Ganslaw LS. Digital imaging internet resources. In: Kennedy TE, Nissen SE, Simon R, et al, eds. *Digital cardiac imaging in the 21st century: a primer*. Bethesda, MD: The Cardiac and Vascular Information Working Group, c/o American College of Cardiology, 1997: 108-9.
 34. Kamm KF. The future of digital imaging. *Br J Radiol* 1997; 70: S145-S152.
 35. Bove AA. Cardiac information management in the future. In: Kennedy TE, Nissen SE, Simon R, et al, eds. *Digital cardiac imaging in the 21st century: a primer*. Bethesda, MD: The Cardiac and Vascular Information Working Group, c/o American College of Cardiology, 1997: 102-4.
 36. Lombardo A. Futures in digital cardiology. In: Kennedy TE, Nissen SE, Simon R, et al, eds. *Digital cardiac imaging in the 21st century: a primer*. Bethesda, MD: The Cardiac and Vascular Information Working Group, c/o American College of Cardiology, 1997: 105-7.
 37. Lee DL, Cheung LK, Jeromin L. A new digital detector for projection radiography. In: Van Metter RL, Beutel J, eds. *Medical imaging 1995: physics of medical imaging*. Proceedings SPIE 1995; 2432: 237-49.
 38. Antonuk LE, El-Mohri Y, Hall A, et al. A large area, 97 mm pitch, indirect-detection, active matrix, flat-panel imager (AMFPI). In: Dobbins JT, Boone JM, eds. *Medical imaging 1998: physics of medical imaging*. Proceedings SPIE 1998; 3336: 2-13.
 39. Tsukamoto A, Yamada S, Tomisaki T, et al. Development of a selenium-based flat panel detector for real-time radiography and fluoroscopy. In: Dobbins JT, Boone JM, eds. *Medical imaging 1998: physics of medical imaging*. Proceedings SPIE 1998; 3336: 388-95.
 40. Garosio G, Taverna G, Ballestrero G, Reale M. Percutaneous coronary angioplasty of unprotected left main stem: a case report. *G Ital Cardiol* 1998; 28: 1400-3.