

Automated quality control in Computed Radiography

Controlli di qualità automatizzati in Computed Radiography

R. Ropolo • O. Rampado • P. Isoardi • A. Izzo • L. Savio • T. Cammarota • O. Davini • R. De Lucchi
G. Gandini

ASO San Giovanni Battista, C.so Bramante 88, I-10126 Torino (TO)

Correspondence to: Roberto Ropolo, Tel.: +39-011-6335373, Fax: +39-011-6634547, e-mail: rropolo@molinette.piemonte.it

Received: 24 March 2006 / Accepted: 30 May 2006 / Published online: 20 December 2006

Abstract

Purpose. The purpose of this paper is to describe the automation of quality control procedures on photostimulable imaging plates by means of an image-processing tool providing automatic reading of the images and automatic calculation of the quality parameters monitored.

Materials and methods. Quality-control procedures were performed according to the main available guidelines. The quality assurance programme was applied to several Kodak and Philips devices in four radiological departments. The automatic image-processing tool was developed using public domain software (Java-based ImageJ software) and contains both reading and computation procedures.

Results. The quality checks and algorithms described were successfully applied, proving useful for identification of defective plates and for implementation of the quality assurance programme. The use of automation allowed significant savings in the time required for quality checks.

Conclusions. Completely automated image reading allows substantial economic and human resources savings, as it eliminates much of the transfer, reproduction, processing and filing procedures.

Key words Quality control • Computed Radiography • Automation

Riassunto

Obiettivo. Scopo di questo lavoro è di descrivere l'automatizzazione delle procedure di valutazione relative ai controlli di qualità eseguiti su piastre al fosforo mediante la realizzazione di un programma di calcolo che permetta una lettura automatica delle immagini ed una quantificazione automatica dei parametri utilizzati al fine di diminuire il carico di lavoro necessario per i controlli.

Materiali e metodi. I controlli di qualità sono stati eseguiti secondo le procedure indicate dalle principali linee guida attualmente disponibili. I controlli sono stati eseguiti in quattro Servizi di Radiologia su diversi tipi di apparecchiature Kodak e Philips. Il programma di analisi automatica è stato sviluppato mediante un software (Java program ImageJ) di pubblico dominio e comprende le procedure di lettura e calcolo.

Risultati. I controlli di qualità e gli algoritmi descritti sono stati adottati con successo dimostrandosi utili per l'identificazione di piastre difettose e per la realizzazione del programma di garanzia della qualità. L'uso dell'automatizzazione ha consentito una notevole riduzione del tempo necessario per l'esecuzione dei controlli.

Conclusioni. La completa automatizzazione della lettura delle immagini permette un rilevante risparmio economico e di risorse umane in quanto elimina buona parte dei processi di trasferimento, riproduzione, analisi ed archiviazione.

Parole chiave Controlli di qualità • Computed Radiography • Automazione

Introduction

The advent of digital radiography with phosphor plates [computed radiography (CR)] in addition to changing radiological procedures [1, 2] calls for a review of the protocols used for the quality control of equipment and for the introduction of checks on photostimulable phosphor plates [imaging plates (IPs)] and their reading systems.

Designing and implementing a quality assurance programme for CR equipment poses a few problems in that “the knowledge of criteria concerning the professional experience and competence of manufacturers, competent authorities and users is still inadequate” [3]. Only very recently have preliminary guidelines by professional associations [4–6] and manufacturers [7] become available. These guidelines indicate a number of standardised protocols and define quantitative and qualitative criteria to verify the performance of IPs; the protocols generally rely on exposure of test objects and analysis of the resulting digital image. Because each department will normally have a few dozen IPs (and large hospitals up to a few hundred), and because data analysis (typically optical density on print) requires that several exposures and measurements are performed for each IP, implementation of a quality assurance programme involves a considerable workload and prolonged room occupation time, all of which are factors that hinder the feasibility of an adequate quality control programme.

The purpose of this study was to describe a method whereby IP exposures and readings only are performed in radiology rooms, the images are transferred (via network or CD-ROM) and, exploiting the intrinsic capabilities of digital images, are automatically analysed to provide results without any intervention by human operators. The rationale behind this method is the possibility in CR of separating analysis of the quality indicators for the detector from those for the display system. In conventional radiology, the detector and display systems coincide (the X-ray film). In CR technology, the detector is the plate, whereas the reproduction system is either an image displayed on a monitor or a printed image obtained from the digital image extracted from the IP. It is therefore appropriate with CR technology to distinguish between the checks on the detector and those on the display system. Simple checks on the monitor or the printer will provide information about their consistency of performance, whereas checks on the detector, including the information extraction step, can be automated by exploiting the digital format of images acquired during the exposure of test objects.

Materials and methods

The devices checked in this study belong to four different radiology units and are listed in Table 1. The inspections consisted of the following steps: image acquisition, image transfer to the processing station, automated image analysis, and determination of the parameters of interest. Checks were also carried out on the printers to confirm the correct function

Introduzione

L'avvento della radiologia digitale con piastre ai fosfori (Computed Radiography, CR), oltre ad una modificazione delle procedure radiologiche [1, 2] obbliga anche ad una revisione dei protocolli per il controllo di qualità delle apparecchiature e all'introduzione di controlli sulle piastre a fosforo fotostimolabili (Imaging Plate, IP) e dei relativi sistemi di lettura.

La stesura e l'esecuzione di un programma della garanzia di qualità per le apparecchiature CR presenta alcune difficoltà in quanto “il livello di conoscenze relativo ai criteri basati sull'esperienza e sulla competenza professionale dei fabbricanti, delle autorità competenti e degli utenti è ancora insufficiente” [3]. Solo in questi ultimi anni si sono rese disponibili alcune linee guida [4–6], in genere preliminari, oltre ad alcune indicazioni fornite dai costruttori [7]. Tali linee guida indicano alcuni protocolli standardizzati e definiscono criteri quantitativi e qualitativi per la verifica delle prestazioni degli IP; tali protocolli sono normalmente basati sull'esposizione di oggetti test e sull'analisi dell'immagine digitale così ottenuta. Poiché gli IP normalmente presenti in un servizio sono alcune decine (e nei grandi ospedali possono arrivare ad alcune centinaia) e per ogni IP devono essere eseguite diverse esposizioni e misure per l'analisi dei dati (tipicamente di densità ottica sulla stampa), l'attivazione di un programma di garanzia della qualità implica un notevole carico di lavoro e un rilevante tempo di utilizzo dei locali, fattori che ostano all'effettiva fattibilità di un corretto programma di controllo.

Scopo del presente lavoro è la messa a punto di una metodica che permetta di eseguire nei locali della Radiologia le sole esposizioni e letture degli IP, di trasferire le immagini (via rete o per mezzo di CD-ROM) e, sfruttando le possibilità intrinseche della digitalizzazione dell'immagine, esegua un'analisi automatica fornendo i risultati dei parametri di interesse senza intervento di operatori umani. Il rationale che sta alla base della metodica è la possibilità di differenziare per la CR l'analisi degli indicatori di qualità relativi al rivelatore da quelli relativi al supporto di visualizzazione. Nella radiologia tradizionale, infatti, il rivelatore di radiazioni e la riproduzione radiografica sono lo stesso oggetto (la pellicola radiografica). Nella tecnologia CR, invece, il rivelatore è costituito dalla piastra mentre la riproduzione radiografica è costituita da un'immagine su monitor o su stampa ottenuta con l'immagine digitale estratta dall'IP. Risulta quindi opportuno, per la tecnologia CR, differenziare i controlli eseguiti sul rivelatore da quelli eseguiti sul sistema di visualizzazione. Semplici controlli eseguiti sui monitor o sulla stampante permetteranno quindi di avere informazioni sulla costanza delle prestazioni di tali dispositivi mentre i controlli sul rivelatore, comprendenti anche la parte di estrazione dell'informazione, potranno essere automatizzati sfruttando la forma digitale delle immagini ottenute durante le esposizioni degli oggetti test.

Table 1 Inspected computed radiography (CR) systems and types of imaging plates (IP)

Manufacturer	CR system	Type of IP
Kodak	CR 900, 800, 950	GP 25 & HR
Philips (Fuji)	AC - PCR 5000	ST

Tabella 1 Sistemi CR e tipi di IP sottoposti a controllo

Ditta	Sistema CR	Tipo di IP
Kodak	CR 900, 800, 950	GP 25 e HR
Philips (Fuji)	AC-PCR 5000	ST

of this part of the imaging chain; for this operation, SMPTE (Society of Motion Picture and Television Engineers) test images were used and assessed for linearity, spatial accuracy and printing uniformity. All quality control operations were timed.

Images were acquired under various exposure conditions using the test objects prescribed in the protocols and then filed under a name identifying the type of check. The images were sent from CR systems to the processing station at the Health Physics Division as DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine) files using the local area network and eFilm workstation software as a DICOM server. Feasibility of transmission had been previously tested by sending test images in DICOM format.

The data processing software was developed in Java using the public domain ImageJ software [8]. The application automatically opens image sets acquired sequentially, identifies the IP by reading its identification number extracted from the administrative section of the DICOM file, identifies the type of check based on the file name, calculates the parameters of interest, and creates for every IP a table listing the numerical results of the check. The magnitudes used for quality checks, the reference protocols [7, 9, 10] and the reference values adopted are listed in Table 2 and briefly described below.

To evaluate dark noise, calibration and linearity, we used the exposure index (EI) with computation mode over the entire IP. Although each manufacturer has its own method to calculate this index, the ratio between the exposure and the index value is known; hence, the EI value can be used as a response, depending on the exposure. The numerical value of the EI is contained in the DICOM heading and can be automatically read without any kind of postprocessing. Dark noise was checked by verifying that the reading of one unexposed IP yielded an EI lower than a preset threshold, whereas calibration and linearity were verified by exposing the single IPs to known and measured exposure conditions and comparing the specified EI values with the calculated EI values.

Uniformity was quantitatively verified by assessing the

Materiali e metodi

Le apparecchiature sottoposte a controllo afferiscono a quattro diversi servizi di Radiologia e sono riportate nella Tabella 1. L'esecuzione dei controlli si è svolta praticamente nelle seguenti fasi: acquisizione delle immagini, trasmissione delle immagini alla stazione di elaborazione, analisi automatizzata delle immagini e determinazione dei parametri di interesse. Collateralmente sono stati eseguiti controlli sulle stampanti per verificare il buon funzionamento di questa parte della catena di imaging; per questo controllo sono state utilizzate immagini test SMPTE e sono stati verificati linearità, accuratezza geometrica ed uniformità di stampa. Durante i controlli è stato inoltre rilevato il tempo impiegato per il loro svolgimento.

L'acquisizione delle immagini è stata eseguita nelle varie condizioni di esposizione con gli oggetti test previsti dai protocolli; le immagini ottenute sono archiviate con un nome identificativo del tipo di controllo eseguito. La trasmissione delle immagini dai sistemi CR alla stazione di elaborazione posizionata presso il servizio di Fisica Sanitaria avviene mediante l'invio delle immagini sotto forma di file DICOM utilizzando la rete aziendale e come DICOM server il programma eFilm workstation. La fattibilità della trasmissione è stata preliminarmente collaudata mediante l'invio di immagini test in formato DICOM.

Il programma di elaborazione è stato sviluppato in Java mediante l'utilizzo del software di libero utilizzo ImageJ [8]. Il programma applicativo prevede l'apertura automatica dei gruppi di immagine acquisiti in modo sequenziale, l'identificazione dell'IP mediante la lettura del suo numero identificativo estratto dalla parte amministrativa del file DICOM, l'identificazione del tipo di controllo mediante il nome del file, il calcolo dei parametri di interesse e la creazione per ogni IP di una tabella riportante i risultati numerici del controllo. Le grandezze utilizzate per i controlli di qualità, i protocolli di riferimento [7, 9, 10] e i valori di riferimento adottati sono presentati nella Tabella 2 e sono di seguito brevemente descritte.

Per la valutazione delle correnti di buio, della calibrazione e della linearità è stato utilizzato il valore dell'indice di esposizione (EI) con la modalità di computo sull'intero IP. Infatti anche se ogni ditta costruttrice ha un proprio metodo per fornire questo indice, il rapporto che lega l'esposizione al valore dell'indice è noto e il valore dell'EI può quindi essere utilizzato come risposta in funzione dell'esposizione. Il valore numerico dell'EI è presente nell'intestazione DICOM e può quindi essere letto automaticamente senza nessun tipo di post-processo. Il controllo sulle correnti di buio è stato eseguito verificando che la lettura di un IP non esposto fornisca un valore di EI inferiore ad una predeterminata soglia mentre le verifiche della calibrazione e della linearità sono state eseguite esponendo i singoli IP a condizioni note e misurate di esposizione e confrontando i valori di EI indicato con quelli dell'EI calcolato.

L'uniformità è stata verificata quantitativamente valutando la differenza di risposta di varie zone del rivelatore sotto-

Table 2 Magnitudes used in quality controls

Magnitude	Adopted protocol	Reference values of protocols	Reference values adopted [10]
Dark noise	Kodak systems: Kodak guidelines [7] Philips systems: AAPM TG10 [9]	EI value <100	EI value <100
EI calibration	Kodak systems: Kodak guidelines [7] Philips systems: AAPM TG10 [9]	Avg. value within an ROI equalling 80% of the total image area >744 EI theoretical value = 2,000±100	Avg. value within an ROI equalling 80% of the total image area >744 EI theoretical value = 2,000±100
Linearity	Kodak systems: Kodak guidelines [7] Philips systems: AAPM TG10 [9]	Sensitivity theoretical value S=200±20 EI theoretical values for other doses with tolerances equalling±100 Fit correlation coefficient >0.95	Sensitivity theoretical value S=200±20 EI theoretical values for other doses with tolerances equalling ±100 Fit correlation coefficient >0.95
Uniformity	Kodak systems: Kodak guidelines [7] Philips systems: AAPM TG10 [9]	Difference between the ROI average values in the four quadrants <300 Standard deviation within an ROI equalling 80% of the image area <20	
Noise and low contrast	Kodak systems: AAPM TG10 [9] Philips systems: AAPM TG10 [9]	Number of visible details in an appropriate object test Number of visible details in an appropriate object test	Number of details with contrast noise ratio >0.4 Number of details with contrast noise ratio >0.4
Spatial resolution	Kodak systems: Kodak guidelines [7] Philips systems: AAPM TG10 [9]	Visualisation of line-pair patterns up to 90% of Nyquist frequency Visualisation of line-pair patterns up to 90% of Nyquist frequency	Difference between expected and calculated MTF values <10% Difference between expected and calculated MTF values <10%
Spatial accuracy	Kodak systems: Kodak guidelines [7] Philips systems: AAPM TG10 [9]	Difference between measured and actual distances <3% Difference between measured and actual distances <2%	Difference between measured and actual distances < 2% Difference between measured and actual distances <2%
Laser-beam function	Kodak systems: AAPM TG10 [9] Philips systems: AAPM TG10 [9]	Absence of jitter greater than 1 pixel Absence of jitter greater than 1 pixel	Absence of jitter greater than 1 pixel Absence of jitter greater than 1 pixel
Resolution uniformity	Kodak systems: AAPM TG10 [9] Philips systems: AAPM TG10 [9]	Absence of blurring in images of wire-mesh screen films Absence of blurring in images of wire-mesh screen films	Amplitude of peak values of the power spectrum within mean values±0.07 Amplitude of peak values of the power spectrum within mean values±0.07
Spatial-accuracy uniformity	Kodak systems: AAPM TG10 [9] Philips systems: AAPM TG10 [9]	Absence of distortions in images of wire-mesh screen films Absence of distortions in images of wire-mesh screen films	Peak positions of the power spectrum within±0.02 mm ⁻¹ Peak positions of the power spectrum within±0.02 mm ⁻¹
Erasure thoroughness	Kodak systems: Kodak guidelines [7] Philips systems: AAPM TG10 [9]	EI value <100 Avg. pixel value of an ROI equalling 80% of the total image area >744	Difference between the ghost-signal region and the surrounding area <2% Difference between the ghost-signal region and the surrounding area <2%

EI exposure index, Avg. average, ROI region of interest, MTF modulation transfer function

difference in response of various zones of the detector subjected to uniform exposure. The numerical parameters [10] obtained indicate the extent of deviation from the behaviour of an ideal detector, which, if exposed uniformly, should ideally yield a uniform and constant response. To verify the absence of artefacts, the software also includes an automatic detection algorithm that segments the image and highlights nonuniform regions above a set threshold, thus providing a better depiction of possible artefacts.

Noise and low-contrast resolution characteristics were

posto ad un'esposizione uniforme. I parametri numerici [10] ottenuti esprimono lo scostamento dal comportamento di un rivelatore ideale che, se esposto in modo uniforme, deve idealmente fornire un valore di risposta costante in qualunque zona del rivelatore stesso. Per verificare l'assenza di artefatti, il programma contiene inoltre un algoritmo di rivelazione automatica che segmenta l'immagine ed evidenzia regioni non uniformi al di sopra di un predeterminata soglia, così permettendo una miglior visualizzazione di eventuali artefatti.

Tabella 2 Grandezze utilizzabili per i controlli di qualità

Grandezza	Protocollo adottato	Valori di riferimento dei protocolli	Valori di riferimento adottati [10]
Correnti di buio	Sistemi Kodak: Kodak Guidelines [7] Sistemi Philips: AAPM TG10 [9]	Valore di EI < 100	Valore di EI < 100
Calibrazione EI	Sistemi Kodak: Kodak Guidelines [7] Sistemi Philips: AAPM TG10 [9]	V.m in una ROI pari all'80% dell'area totale maggiore di 744 Valore teorico di EI = 2000 ± 100	V.m in una ROI pari all'80% dell'area totale maggiore di 744 Valore teorico di EI = 2000 ± 100
Linearità	Sistemi Kodak: Kodak Guidelines [7] Sistemi Philips: AAPM TG10 [9]	Valore teorico di sensitivity S = 200 ± 20 Valori teorici di EI ad altre dosi con tolleranza di ± 100	Valore teorico di sensitivity S = 200 ± 20 Valori teorici di EI ad altre dosi con tolleranza di ± 100
Uniformità	Sistemi Kodak: Kodak Guidelines [7] Sistemi Philips: AAPM TG10 [9]	Coefficiente di correlazione del fit > 0,95 Differenza tra i valori medi di ROI nei quattro quadranti < 300 Deviazione standard in una ROI pari all'80% dell'area minore di 20	Coefficiente di correlazione del fit > 0,95
Rumore e basso contrasto	Sistemi Kodak: AAPM TG10 [9] Sistemi Philips: AAPM TG10 [9]	Numero di dettagli visibili in un oggetto test appropriato Numero di dettagli visibili in un oggetto test appropriato	Numero di dettagli con rapporto contrasto rumore maggiore di 0,4 Numero di dettagli con rapporto contrasto rumore maggiore di 0,4
Risoluzione spaziale	Sistemi Kodak: Kodak Guidelines [7] Sistemi Philips: AAPM TG10 [9]	Visualizzazione di mire lineari fino al 90% della frequenza di Nyquist Visualizzazione di mire lineari fino al 90% della frequenza di Nyquist	Valori della curva MTF entro il 10% dall'atteso Valori della curva MTF entro il 10% dall'atteso
Accuratezza spaziale	Sistemi Kodak: Kodak Guidelines [7] Sistemi Philips: AAPM TG10 [9]	Differenze tra distanze misurate e distanze reali minori di 3% Differenze tra distanze misurate e distanze reali minori di 2%	Differenze tra distanze misurate e distanze reali minori di 2% Differenze tra distanze misurate e distanze reali minori di 2%
Funzionalità fascio laser	Sistemi Kodak: AAPM TG10 [9] Sistemi Philips: AAPM TG10 [9]	Assenza di sbavature di dimensioni maggiori di 1 pixel Assenza di sbavature di dimensioni maggiori di 1 pixel	Assenza di sbavature di dimensioni maggiori di 1 pixel Assenza di sbavature di dimensioni maggiori di 1 pixel
Uniformità di risoluzione	Sistemi Kodak: AAPM TG10 [9] Sistemi Philips: AAPM TG10 [9]	Assenza di sfocature su immagini di una griglia Assenza di sfocature su immagini di una griglia	Ampiezza dei picchi dello spettro di potenza entro v.m. ± 0,07 Ampiezza dei picchi dello spettro di potenza entro v.m. ± 0,07
Uniformità accuratezza spaziale	Sistemi Kodak: AAPM TG10 [9] Sistemi Philips: AAPM TG10 [9]	Assenza di distorsioni su immagini di una griglia Assenza di distorsioni su immagini di una griglia	Posizione dei picchi dello spettro di potenza entro ± 0,02 mm ⁻¹ Posizione dei picchi dello spettro di potenza entro ± 0,02 mm ⁻¹
Ciclo di cancellazione	Sistemi Kodak: Kodak Guidelines [7] Sistemi Philips: AAPM TG10 [9]	Valore di EI < 100 V.m. in una ROI pari all'80% dell'area totale maggiore di 744	Differenza tra regione del segnale ghost e zona circostante < 2% Differenza tra regione del segnale ghost e zona circostante < 2%

EI indice di esposizione, Avg. media, ROI regione di interesse, MTF funzione di trasferimento della modulazione

tested by acquiring three images of a test object with low-contrast inserts using exposures of 0.1, 1 and 10 mR ($1 \text{ mR} = 2.58 \cdot 10^{-7} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1}$), while quantitative values were obtained using purpose-made algorithms [10] determining the noise value and the contrast-to-noise ratio (CNR), as described in the literature [11].

Objective evaluation of spatial resolution was carried out by determining the presampling modulation transfer func-

Le caratteristiche di rumore e di risoluzione di basso contrasto sono state testate acquisendo tre immagini di un oggetto test con inserti a basso contrasto utilizzando esposizioni a 0,1, 1 e 10 mR ($1 \text{ mR} = 2,58 \cdot 10^{-7} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1}$) e la determinazione dei valori quantitativi è stata ottenuta mediante algoritmi appositamente sviluppati [10] che determinano il valore del rumore e del rapporto contrasto/rumore (CNR) come indicato dalla letteratura [11].

tion (MTF) using one of the methods suggested in the literature [12, 13]. The software can determine the MTF from the images of a slit camera, of a line pair pattern and of a sharp edge according to the methods specified in the literature.

In order to verify that the image faithfully reproduced the size and spatial relations of the objects represented, an accuracy check was performed by analysing the image of a metal object with sharp borders and known size. The software determines the apparent size of the object by automatically searching for its borders and calculates the ratios, comparing the calculated values with the actual values. Proper functioning of the laser beam was checked by analysing the edge of the metal object on the image.

Uniformity of resolution and of spatial accuracy over the entire image area was confirmed by exposing a test object made up of a wire mesh used to check the screen-film contact (Gammex 157A), made up, in turn, of a 0.63-mm-pitch grid. The evaluation was carried out within the frequency range, since the features of a cyclic image can be better studied within such a range. The software also calculates the two-dimensional (2D) Fourier transform of the wire-mesh image and the power spectrum along rows and columns using the methods described in the literature [14]. The power spectrum will show a peak in correspondence with the wire-mesh frequency and will provide indications on the presence of distortions using the position and the width at half-height of the peak, whereas information about resolution may be inferred from the relative amplitude of the peak. The steps are illustrated in Figure 1.

Proper functioning of the erasure cycle was checked by exposing a metal plate positioned centrally with high exposure parameters; the IP is then subjected to the erasure cycle and exposed uniformly again. The software quantifies the presence of latent images by evaluating the difference between the region previously occupied by the high-contrast object and the surrounding area. The presence of regions with pixel values exceeding a preset threshold in the resulting image is regarded as an indicator of latent images.

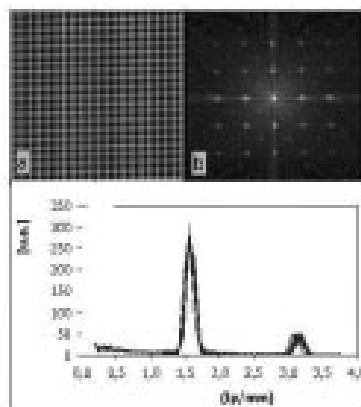


Fig. 1a,b Assessment of resolution and spatial accuracy uniformity conducted by determining the power (a) spectrum of a grid image (b).

Fig. 1a,b Valutazione dell'uniformità di risoluzione e dell'accuratezza spaziale mediante la determinazione dello spettro di potenza (a) di un'immagine di reticolo (b).

La valutazione oggettiva della risoluzione spaziale è stata eseguita mediante la determinazione della funzione di trasferimento della modulazione di presampling (MTF) utilizzando uno dei diversi metodi suggeriti dalla letteratura [12, 13]. Il programma è in grado di determinare la MTF a partire da immagini di una slit camera, di una mira lineare e di un bordo netto secondo le metodiche indicate in letteratura.

Per verificare che l'immagine riproduca fedelmente le dimensioni ed i rapporti spaziali degli oggetti rappresentati è stato eseguito un controllo dell'accuratezza mediante l'analisi di un'immagine di un oggetto metallico a bordi netti e di dimensioni note. Il programma determina le dimensioni apparenti dell'oggetto mediante una ricerca automatica dei bordi e ne calcola i rapporti, confrontando infine tali valori con quelli reali. La verifica della buona funzionalità del fascio laser è stata eseguita mediante l'analisi del bordo dell'oggetto metallico sull'immagine.

L'uniformità di risoluzione e l'uniformità dell'accuratezza spaziale sull'intera area dell'immagine sono state verificate mediante l'esposizione di un oggetto test costituito da una griglia utilizzata per il controllo del contatto schermo/pellicola (Gammex 157A) costituita da un reticolo di passo 0,63 mm. La valutazione è stata eseguita nello spazio delle frequenze in quanto in tale spazio le caratteristiche di un'immagine ciclica sono meglio studiabili. Il programma calcola quindi la trasformata di Fourier bidimensionale dell'immagine della griglia e lo spettro di potenza per righe e colonne con metodi previsti dalla letteratura [14]. Lo spettro di potenza evidenzierà un picco in corrispondenza della frequenza della griglia e fornirà indicazioni sull'eventuale presenza di distorsioni attraverso la posizione e l'ampiezza a metà altezza del picco mentre informazioni sulla risoluzione potranno essere desunte dall'ampiezza relativa del picco. Le fasi di analisi sono illustrate nella Figura 1.

Il buon funzionamento del ciclo di cancellazione è stato controllato esponendo una piastra metallica posizionata centralmente con elevati parametri di esposizione; l'IP viene quindi sottoposto al ciclo di cancellazione e riesposto uniformemente. Il programma quantifica la presenza di immagini latenti valutando la differenza tra la regione precedentemente occupata dall'oggetto ad alto contrasto e la zona circostante. La presenza nell'immagine risultante di regioni con valori di pixel che superino una soglia prefissata viene segnalata come indice di presenza di immagini latenti.

Risultati

Il programma di garanzia della qualità e gli algoritmi precedentemente descritti sono stati realizzati con successo e sono stati utilizzati per il controllo di 137 IP. I risultati del programma, considerando i valori di riferimento e le tolleranze riportate in Tabella 2, sono di seguito brevemente riassunti. I valori delle correnti di buio sono risultati essere

Results

The quality assurance programme and the algorithms previously described were successfully implemented and were used to check 137 IPs. The results of the programme, considering the reference values and the tolerances listed in Table 2, are briefly summarised below. The values of dark noise were mostly acceptable, except for two installed systems. The EI values proved correct and within the tolerance limits envisaged for 96% of the IPs. Analysis of the results obtained [10] showed that the parameters used can measure uniformity and reveal the presence of artefacts. The algorithm implemented for the automatic search for artefacts was useful for improving their visualisation.

Use of the CNR parameter turned out to be applicable [10] and demonstrated the usefulness of automated analysis. In the subjective evaluations suggested by the guidelines, evaluation of the number of visible low-contrast inserts must be carried out, for example, on a monitor, after a generic “optimisation” of levels. This introduces a further source of subjectivity in addition to the observer’s visual acuity. CNR analysis is not linked to any kind of window setting, since both the average value of pixels and their standard deviation depend linearly on the window setting. Their ratio, as a result, does not vary as a function of the setting. Noise verification showed that its dependency on the exposure followed the expected trend in all cases.

In order to confirm the accuracy of the algorithms used to calculate the MTF, the values obtained were compared with those of a recent study [15]. The comparison indicated that the data are consistent within 10%, a value that – considering the method’s errors and that the measurements regard different reading systems – appears definitely sufficient for validating the method. The use of the MTF as the parameter to evaluate resolution thus appears clearly feasible and applicable. A calculated sample MTF is given in Figure 2; the variations between the available calculation methods are small (smaller than 5%), and the trend of the curves is essentially similar. Spatial accuracy proved in all cases to fall within the tolerances prescribed by the protocols. The function of the laser beam was found to be correct in all cases, as none of

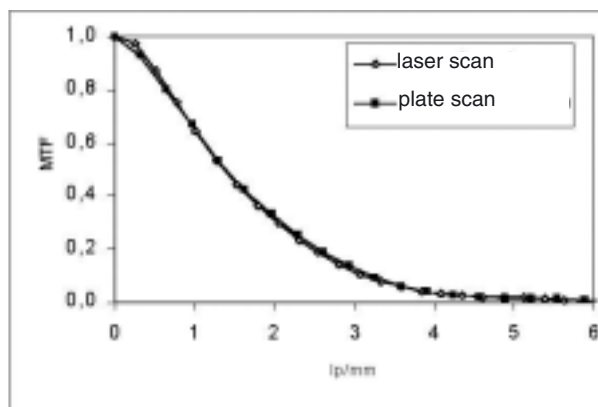


Fig. 2 Modulation transfer function (MTF) calculated for a 24×30 Philips standard image plate IP in both scan directions.

Fig. 2 MTF calcolata per una piastra formato 24×30 standard della Philips nelle due direzioni di scansione.

accettabili in quasi tutti i casi, tranne che per 2 sistemi installati. I valori dell’indice di esposizione sono risultati corretti entro i limiti di tolleranza previsti per il 96% degli IP controllati. L’analisi dei risultati ottenuti [10] ha dimostrato che i parametri utilizzati sono in grado di determinare numericamente l’uniformità e di evidenziare la presenza di artefatti. L’algoritmo implementato per la ricerca automatica di artefatti è risultato utile per una miglior visualizzazione degli stessi.

L’uso del parametro CNR è risultato applicabile [10] ed ha dimostrato l’utilità di un’analisi automatizzata. Infatti nelle valutazioni soggettive suggerite dalle linee guida la valutazione del numero di inserti a basso contrasto visibili deve essere eseguita, ad esempio a monitor, dopo una generica “ottimizzazione” dei livelli: ciò introduce un’ulteriore fonte di soggettività oltre a quella dovuta alla capacità visiva dell’osservatore. L’analisi attraverso il CNR non è legata a nessun tipo di settaggio della finestra in quanto sia il valor medio dei pixel che la loro deviazione standard dipendono linearmente dal settaggio della finestra ed il loro rapporto risulta quindi un’invariante rispetto al settaggio. Il controllo sul rumore ha mostrato che la sua dipendenza dall’esposizione ha seguito il previsto andamento in tutti i casi.

Per verificare la correttezza degli algoritmi utilizzati per il calcolo della MTF i valori ottenuti sono stati confrontati con quelli riportati in un recente studio [15]. Il confronto ha dimostrato che i dati sono consistenti entro il 10%, valore che, tenendo conto degli errori della metodica e del fatto che le misure coinvolgono diversi sistemi di lettura, appare decisamente sufficiente per validare il metodo. L’uso della MTF come parametro per la valutazione della risoluzione appare quindi decisamente fattibile ed applicabile. Un esempio di MTF calcolata è dato in Figura 2; le variazioni tra i metodi di calcolo disponibili sono minime (entro il 5%) e l’andamento delle curve è del tutto sovrapponibile. L’accuratezza geometrica è risultata in tutti i casi rientrare entro le tolleranze stabilite dai protocolli. La funzionalità del fascio laser è risultata essere corretta in tutti i casi in quanto in nessuna delle immagini si è trovato uno scostamento superiore a 0,5 pixel.

Il metodo di analisi automatica di uniformità di risoluzione e uniformità dell’accuratezza spaziale è risultato funzionale. Nella Figura 1 è mostrato lo spettro ottenuto nell’analisi di un’immagine del reticolo. Il picco presente corrisponde alla frequenza del passo del reticolo ed è dato sovrapposizione di 204 spettri ottenuti per righe e colonne. Tutti gli spettri mostrano lo stesso centroide ($1,58 \text{ cicli}\cdot\text{mm}^{-1}$ corrispondenti al passo di 0,63 mm). La larghezza a metà altezza è costante con un valor medio di $0,16 \text{ cicli}\cdot\text{mm}^{-1}$ ed una deviazione standard di $0,01 \text{ cicli}\cdot\text{mm}^{-1}$. In tali condizioni è assicurata l’assenza di distorsioni e l’uniformità dell’accuratezza spaziale. La sovrapponibilità dei picchi (in questo caso valor medio 98% e deviazione standard del 2%) anche come altezza relativa è una misura della buona uniformità di risoluzione. In nessun caso è stato osservata la presenza di rilevanti immagini latenti sulle immagine utilizzate per il con-

Table 3 Evaluation of the time needed to perform inspections using the conventional and the automated analysis method

Type of check	Acquisition and reading					Conventional analysis					Automated analysis		
	No. of exposures	Time (min)	No. of reading cycles	Time (min)	No. of prints	Time (min)	No. of measurements or checks	Time (min)	No. of parameters calculated on spreadsheets	Time (min)	Transfer and analysis of the entire packet of images	Time (min)	
Dark noise	3	2	4	5*	0	4	1	2	0.5				
Exposure calibration													
Linearity													
Uniformity	1	1	1	1*	1	5	2	2	0.5				
Noise	3	2	3	3	3	3	3	1	0.5				
Low-contrast resolution													
Spatial resolution	2	2	2	2	2	2	2	0	0			8	
Spatial accuracy	1	1	1	1	1	1	1	1	0.5				
Laser-beam functionality													
Resolution uniformity	1	1	1	1	1	1	1	0	0				
Spatial-accuracy uniformity													
Erasure thoroughness	3	2	3	3	0	2	1	0	0				
Total	14	11	15	16	8	18	11	0	2				
Resources needed to completely inspect an IP	≈ 30 min with 1 operator	≈ 15 min with 2 operators	≈ 20 min	8 prints	8 prints	8 prints	8 prints	8 prints	8 prints	8 min			

*10–15 min of preset waiting time between exposure and reading are to be added

Tabella 3 Valutazione delle tempistiche necessarie per l'esecuzione dei controlli utilizzando il metodo d'analisi tradizionale e quello automatizzato

Tipo di controllo	Acquisizione e lettura				Analisi tradizionale				Analisi automatica			
	Numero di esposizioni	Tempo, min	Numero di cicli lettura	Tempo, min	Tempo, min	Numero di stampe	Numero di misure o visure	Tempo, min	Numero di parametri calcolati con foglio elettronico	Tempo, min	Trasferimento e analisi dell'intero pacchetto immagini	Tempo, min
Correnti di buio	3	2	4	5*	0	0	4	1	2	0,5	1	8
Calibrazione dell'esposizione	1	1	1	1*	1	1	5	2	2	0,5		
Linearità	3	2	3	3	3	3	3	3	1	0,5		
Rumore												
Risoluzione di basso contrasto	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0		
Risoluzione spaziale	1	1	1	1	1	1	1	1	0,5			
Accuratezza geometrical	1	1	1	1	1	1	1	1				
Funzionalità del fascio laser	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0		
Uniformità di risoluzione e dell'accuratezza geometrica	3	2	3	3	0	0	2	1	0	0		
Controllo ciclo di cancellazione	14	11	15	16	8	8	18	11		2		
Totale												
Risorse necessarie per il controllo completo di un IP												8 minuti

*a tali tempi vanno aggiunti 10-15 minuti di tempo fisso di attesa tra esposizione e lettura

Table 4 Evaluation of the time needed for the consistency test on 36 imaging plates (IPs) of three different formats and four high-resolution IPs of a single format. The dark noise, uniformity and erasure thoroughness check is performed on all IPs; the remaining inspections are spot checks on 1 IP for each format and type

Type of check	Acquisition and reading		Conventional analysis		Automated analysis	
	Sample inspected	Time, (min)	No. of prints	Time, (min)	Transfer and analysis of an entire set of images	Time, (min)
Dark noise	40	40	0	20	10	30
Exposure calibration	4	25*	0	5		
Linearity						
Uniformity	40	50*	40	140		
Noise	4	15	12	26		
Low-contrast resolution						
Spatial resolution	4	10	8	15		
Spatial accuracy	4	5	4	10		
Laser-beam function						
Resolution and spatial-accuracy uniformity	4	5	4	8		
Erasure thoroughness	4	20	0	5		
Total	104	170	68	229		

*Including 10 min of preset waiting time between exposure and reading

Tabella 4 Valutazione delle tempistiche per il controllo di costanza per una dotazione di 36 IP di tre diversi formati e 4 IP ad alta risoluzione di unico formato. Il controllo di correnti di buio, uniformità e ciclo di cancellazione viene eseguito su tutti gli IP; i restanti controlli vengono eseguiti a campione su 1 IP per ogni formato e tipo

Tipo di controllo	Acquisizione e lettura		Analisi tradizionale		Analisi automatica	
	Campione sottoposto a controllo	Tempo, min	Numero di stampe	Tempo, min	Trasferimento e analisi dell'intero pacchetto immagini	Tempo, min
Correnti di buio	40	40	0	20	10	30
Calibrazione dell'esposizione						
Linearità	4	25*	0	5		
Uniformità	40	50*	40	140		
Rumore						
Risoluzione di basso contrasto	4	15	12	26		
Risoluzione spaziale	4	10	8	15		
Accuratezza geometrica						
Funzionalità del fascio laser	4	5	4	10		
Uniformità di risoluzione e dell'accuratezza geometrica	4	5	4	8		
Controllo ciclo di cancellazione	4	20	0	5		
Totale	104	170	68	229		

* comprende 10 minuti di tempo fisso di attesa tra esposizione e lettura

the images showed a deviation exceeding 0.5 pixels.

The method for the automatic analysis of resolution uniformity and of spatial accuracy uniformity was functional. Figure 1 shows the spectrum obtained while analysing an image of the grid. The visible peak corresponds to the frequency of the grid pitch and results from the overlay of 204 spectra obtained for rows and columns. All spectra have the same centroid (1.58 cy-

trollo del ciclo di cancellazione.

La diminuzione del carico di lavoro per l'esecuzione dei controlli è evidenziata nelle Tabelle 3 e 4. Per il controllo completo di un singolo IP, da eseguirsi per esempio in fase di accettazione, il tempo valutato per l'esecuzione delle esposizioni e la lettura degli IP è di 15+15 minuti se eseguita da due operatori esperti; l'analisi tradizionale richiede-

cles/mm⁻¹, corresponding to a 0.63-mm pitch). The half-height width is consistent, with an average value of 0.16 cycles.mm⁻¹ and a standard deviation of 0.01 cycles.mm⁻¹. Under these conditions, the absence of distortions and uniformity of spatial accuracy are guaranteed. The possibility of overlaying peaks (in this case, the mean value is 98% and the standard deviation is 2%) as relative height is a measure of good resolution uniformity. In no case was the presence of significant latent images observed among the images used to test erasure thoroughness.

The reduction in workload for performance of the checks is shown in Tables 3 and 4. For the complete test of a single IP to be performed – for example, at the acceptance stage – the time needed to perform the exposures and reading amounts to 15+15 min if carried out by two experienced operators; conventional analysis would require slightly less than 30 min with eight prints, while automated analysis requires less than 10 min with no printing. Even more significant is the difference in resources required to carry out a consistency check in a department equipped with, for example, 40 IPs, 36 of which are standard, in three different formats and four high-resolution IPs in a single format. Assuming that uniformity and dark-noise checks are performed on all IPs and that the remaining tests are carried out only on a single IP for every kind and format, in addition to the acquisition time of almost 3 h, common in both methods, the time needed for conventional analysis is just under 4 h, while the time required for automated analysis is less than 45 min (the technique, however, does not strictly require the presence of an operator). Furthermore, the conventional method would produce about 70 prints, with a cost that the automated check does not entail. The benefits of automation are obviously more noticeable if the check schedule becomes tighter, with increased samplings.

Discussion

The quality checks and the algorithms described were successfully adopted, proving useful in identifying defective plates and in implementing the quality assurance programme. The different types of calculations enabled us to select those regarded as most useful to maintain a good qualitative standard. Data analysis also stresses the importance of accurate cleaning of the plates. The programme allows rapid quality controls performed entirely on CR equipment. The complete automation of image reading involves remarkable savings in economic terms and in terms of human resources, since it eliminates much of the analysis and filing processes that otherwise would have to be carried out on the different printed images. The quantitative evaluation also allows objective analysis to be performed without the subjectivity introduced by a human observer. The use of automated procedures to carry out quality controls on photostimulable phosphor plates proved feasible and extremely useful.

Acknowledgements This study is part of the “Reduction of the risk associated with exposure to ionising radiations for medical purposes” research project funded by the Compagnia di San Paolo, Turin.

rebbe poco meno di 30 minuti con l'effettuazione di 8 stampe mentre l'analisi automatizzata richiede un tempo minore a 10 minuti e nessuna stampa. Ancor più rilevante è la differenza di risorse necessarie per eseguire un controllo di costanza presso un servizio dotato per esempio di 40 IP, 36 dei quali di tipo standard e di 3 diversi formati e 4 di tipo ad alta risoluzione di un unico formato. Supponendo di eseguire il controllo sull'uniformità e sulle correnti di buio su tutti gli IP e di eseguire i restanti controlli solo su un IP per ogni tipo e formato si ottiene che oltre al tempo della fase di acquisizione di circa tre ore, comune per entrambi i metodi, il tempo necessario per l'analisi tradizionale è di poco inferiore alle 4 ore mentre quello necessario per l'analisi automatizzata è inferiore ai 45 minuti (periodo in cui peraltro non è strettamente richiesta la presenza di un operatore). Inoltre la metodica tradizionale prevedrebbe quasi 70 stampe, con un conseguente impegno economico non richiesto invece dal controllo automatizzato. I vantaggi dell'automazione appaiono ovviamente maggiormente evidenti se il programma dei controlli diventa più stringente con l'aumento della campionatura.

Discussione

I controlli di qualità e gli algoritmi descritti sono stati adottati con successo dimostrandosi utili per l'identificazione di piastre difettose e per la realizzazione del programma di garanzia della qualità. L'esecuzione di diversi tipi di calcolo dei parametri ha permesso di selezionare quelli da ritenersi maggiormente utili per il mantenimento di un buono standard qualitativo. Dall'analisi dei dati emerge inoltre l'importanza di una corretta pulizia delle piastre. Il programma realizzato consente, in modo rapido e completo, l'esecuzione dei controlli di qualità sulle apparecchiature di computed radiography. La completa automatizzazione della lettura delle immagini permette un rilevante risparmio economico e di risorse umane in quanto elimina buona parte dei processi di analisi ed archiviazione altrimenti eseguiti su singole immagini stampate. La valutazione quantitativa permette inoltre di eseguire l'analisi in modo oggettivo e senza l'elemento di soggettività introdotto da un osservatore umano. L'utilizzo di procedure automatizzate per l'esecuzione dei controlli di qualità su piastre ai fosfori fotostimolabili si è rivelato fattibile e di grande utilità.

Ringraziamenti Il presente lavoro è stato svolto nell'ambito del Progetto di Ricerca “Riduzione del rischio associato all'esposizione a radiazioni ionizzanti per fini medici” finanziato dalla Compagnia di San Paolo di Torino.

References/Bibliografia

1. Rowland JA (2002) The physics of computed radiography. *Phys Med Biol* 47:123–166
2. Hruby W (2001) *Digital (R)evolution in Radiology*. Springer-Verlag, Berlin
3. Decreto Legislativo 26 maggio 2000, n. 187. “Attuazione della direttiva 97/43/Euratom in materia di protezione sanitaria delle persone contro i pericoli delle radiazioni ionizzanti connesse ad esposizioni mediche”
4. Linee guida per i controlli di qualità: apparecchi di radiografia digitale con piastre ai fosfori fotostimolabili (Computer radiography). Documento Associazione Italiana Fisica in Medicina, 1999
5. American Association of Physicists in Medicine (AAPM) Task Group No. 10, “Acceptance testing and quality control of photo-stimulable phosphor imaging systems”, Pre-print Draft
6. IPEM Computed Radiography Quality Control protocol (Draft)
7. Guidelines for Acceptance Testing and Quality Control. Kodak DirectView CR 800 and CR 900 System Technical and Scientific Bulletin
8. ImageJ 1.3.1, Wayne Rusband, National Institute of Health, USA, <http://rsb.info.nih.gov/ij>
9. Samei E, Seibert JA, Willis CE et al (2001) Performance evaluation of computed radiography systems. *Med Phys* 28:361–371
10. Rampado O, Isoardi P, Ropolo R (2006) Quantitative assesment of computed radiography quality control parameters. *Phys Med Biol* 51:1577–1593
11. Kwan ALC, Filipow LJ, Le LH (2003) Automatic quantitative low contrast analysis of digital chest phantom radiographs. *Med Phys* 30:312–320
12. Fujita H, Tsai DY, Itoh T et al (1992) A simple method for determining the modulation transfer function in digital radiography. *IEEE Trans Med Imaging* 11:34–39
13. Samei E, Reimann DA (1998) A method for measuring the presampled MTF of digital radiographic systems using an edge test device. *Med Phys* 25:102–113
14. Pratt WK (1991) *Digital Image Processing*. Wiley, New York
15. Samei E, Flynn MJ (2002) An experimental comparison of detector performance for computed radiography systems. *Med Phys* 29:447–459