

Torace: imaging vascolare del nuovo millennio

Antonio ORLACCHIO - Paolo DI RENZI*
Gianluigi SERGIACOMI - Roberto PASQUARELLI
Giovanni SIMONETTI

Negli ultimi anni l'enorme sviluppo tecnologico della tomografia computerizzata (TC) e della risonanza magnetica (RM) ha portato a nuovi progressi nella diagnostica per immagini. In particolare l'introduzione della TC multistrato e dell'angio-RM ha ampliato le possibilità diagnostiche nello studio vascolare in modo poco o del tutto non invasivo. I nuovi avanzamenti tecnologici hanno anche consentito studi quantitativi e funzionali. Studi recenti hanno dimostrato che la TC e RM hanno un'accuratezza nel riconoscere le anomalie vascolari equivalente alla angiografia digitale sottrattiva (DSA), mentre esse sono più precise nell'individuare eventuali patologie associate che modificano il trattamento terapeutico coinvolgenti le strutture circostanti (trachea, bronchi, esofago ecc.). Sono numerose le strutture vascolari che è necessario esaminare a livello toracico (aorta, arterie polmonari, arterie coronarie, vene polmonari, vena cava ecc.). Anche la patologia che le coinvolge è varia ed è costituita principalmente da: anomalie vascolari congenite, malformazioni vascolari, dissezione dell'aorta, sindromi compressive vascolari, patologia steno-occlusiva e dilatativa ed embolia polmonare. In quest'ultimo ambito alcuni Autori hanno dimostrato che la TC è utile nel riconoscimento di difetti di perfusione segmentari polmonari e l'angio-RM perfusionale sembra molto promettente nel riconoscimento dell'embolia polmonare sub-segmentaria. Vengono analizzati i più importanti campi di applicazione della TC e della RM nell'ambito della patologia vascolare toracica, anche a confronto con altre tecniche diagnostiche. Attenzione viene posta, inoltre, agli studi morfo-funzionali che le nuove tecnologie permettono.

Parole chiave: Torace, anatomia - Torace, TC - Torace, RM.

Thorax: new millennium vascular imaging

In recent years the technological development of computed tomography (CT) and magnetic resonance (MR) has promoted new improvements in diagnosis by means of imaging. In particular the introduction of multislice CT and MR angiography (MRA) has broadened the non-invasive diagnostic possibilities in the vascular study of the thorax. The new technological developments of CT and MR enable functional studies as well. Recent studies have demonstrated that CT and MR are as accurate in finding the vascular anomalies as digital subtraction angiography, while they are more precise in recognising possible associated pathologies which modify therapeutic treatment (for example of the trachea, bronchi, oesophagus etc.). There are many vascular structures in the thorax which need to be considered (aorta, pulmonary and coronary arteries, pulmonary veins, vena cava). The field of associated pathologies is also broad, and includes congenital vascular anomalies, vascular malformations, aorta dissection, vascular compression syndromes, atherosclerotic stenosis or occlusions, and pulmonary embolism. In pulmonary embolism some authors have demonstrated the utility of CT, in showing pulmonary segmental perfusion defects, and MRA, in identifying sub-segment pulmonary embolism. In this paper we analyse the most important CT and MR applications for the study of vascular thoracic diseases and compare them with other diagnostic techniques. We also evaluate the morpho-functional capabilities of CT and MR in this field.

Key words: Thorax, anatomy - Thorax, CT - Thorax, MR.

Introduzione

A livello toracico, come in nessun altro distretto anatomico dell'organismo, si riscontra una notevole complessità anatomica per quanto riguarda il sistema vascolare. Pertanto, sia in condizioni di normalità sia in situazioni patologiche, si riscontra un ampio novero di condizioni da studiare.

Lo sviluppo della tecnologia delle apparecchiature per Tomografia Computerizzata (TC) e Risonanza Magnetica (RM) è stato negli ultimi anni certamente superiore a quello delle apparecchiature per l'arteriografia. Questo ha consentito livelli di accuratezza diagnostica molto vicini al «gold standard» arteriografico per cui si può prevedere che in futuro, in misura sempre maggiore, saranno impiegate la TC e la RM soprattutto per lo studio dei vasi toracici.

Il sempre maggiore impiego di TC e RM per lo studio dei vasi toracici è anche dovuto alla possibilità di rispondere con un'unica indagine ai vari quesiti clinici quali ad esempio

Introduction

Unlike all other anatomical regions of the human body, the thorax is the site of significant anatomical complexity of the vascular system. For this reason, both in normal and pathological conditions, a long list of conditions to study is encountered.

The technological development of computed tomography (CT) and magnetic resonance (MR) devices in recent years has been greater than that of arteriography devices. This has enabled levels of diagnostic accuracy to approach those of the arteriographic gold standard. In future, therefore, an increasing use of CT and MR can be expected, particularly for the study of thoracic vessels.

The increasing use of CT and MR for the study of thoracic vessels is also due to the possibility of using a single examination to respond to the various clinical requirements, such as integrated anatomical assessments developed from multiphase reconstructions and image processing capable of

Dipartimento di Diagnostica per Immagini e Radiologia Interventistica - Policlinico Università Tor Vergata - Roma. - *Radiologia Diagnostica e Interventistica - aFaR-Ospedale Fatebenefratelli - Isola Tiberina - Roma.

Pervenuto alla Redazione il 20.5.2003; revisionato il 3.6.2003; restituito corretto il 7.10.2003; accettato per la pubblicazione il 17.10.2003.

Paper presented at the 40th SIRM National Congress (Rimini, 24-28 May 2002).

Indirizzo per la richiesta di estratti: Prof. A. Orlacchio - Dipartimento di Diagnostica per Immagini e Radiologia Interventistica - Policlinico Universitario "Tor Vergata" - Viale Oxford, 81 - 00133 Roma - Tel. 06/20902400-1-2 - Fax 06/20902404. - E-mail: aorlacchio@sirm.org

le valutazioni anatomiche integrate da ricostruzioni multiplanari, dalla elaborazione delle immagini ottenendo mappe vascolari sovrapponibili a quelle angiografiche con possibilità di associare anche informazioni funzionali.

Lo scopo di questa trattazione sarà quello di esaminare lo stato dell'arte delle varie apparecchiature impiegate, della tecnica di esame, delle possibilità diagnostiche e le principali applicazioni della diagnostica per immagini non arteriografica nello studio dei vasi del distretto toracico a confronto con i dati della letteratura.

Tomografia Computerizzata spirale (TCS) e multistrato (TCMS)

L'avvento della TC spirale (TCS) ha enormemente allargato le possibilità diagnostiche non invasive della patologia vascolare toracica sia nello studio della patologia aortica, acuta e non, sia nello studio dell'embolia polmonare. La TCS è diventata la metodica elettiva e, talvolta, di prima scelta nell'iter diagnostico a fronte di costi competitivi rispetto ad altre metodiche.

Con la TCMS lo studio dei vasi toracici è notevolmente migliorato grazie alla elevata risoluzione spaziale, possibile con l'impiego di spessori di strato fino a 0,5 mm. La riduzione dei tempi di acquisizione fino a 0,5 s per ogni rotazione di 360° ha permesso di ridurre gli artefatti da movimento, particolarmente significativi a livello toracico, con diminuzione della quantità di mezzo di contrasto (mdc) da iniettare.

Applicazioni cliniche

Nella valutazione della patologia traumatica dell'aorta toracica a fronte di una sensibilità del 100% e di un valore predittivo negativo del 100% analoghi a quelli dell'angiografia digitale, i costi di una TCS sono del 50% inferiori [1]. Uno studio [2] condotto su 1419 pazienti ha confermato che in caso di sospetta patologia aortica post-traumatica solo in 77 casi si è dovuto ricorrere alla conferma angiografica mentre i 1342 pazienti con TCS negativa in acuto non presentavano alterazioni patologiche dopo 8 mesi di osservazione.

Anche nello studio dell'embolia polmonare la TC è diventata la tecnica di indagine elettiva da quando Remy-Jardin *et al.* [3] hanno pubblicato il loro lavoro sul confronto tra TCS e angio-pneumografia polmonare nella valutazione dell'embolia polmonare riportando valori di sensibilità del 100% e di specificità del 96%.

L'introduzione nella pratica clinica della TCMS ha ulteriormente allargato le possibilità diagnostiche. I tempi di scansione sempre più brevi e l'aumento del numero di detectori hanno permesso di incrementare la risoluzione spaziale, la risoluzione temporale e la velocità di acquisizione delle immagini e di ridurre sia gli artefatti sia la dose di mdc somministrata (figg. 1, 2). Le apparecchiature disponibili permettono di ottimizzare i protocolli di scansione in funzione del distretto da studiare [4,6]. Nella valutazione della patologia toracica vascolare si possono utilizzare o i protocolli che privilegiano l'alta velocità di scansione per studiare ampi volumi o quelli in alta risoluzione che presuppongono l'impiego di spessori di strato di 1-1,25 mm e l'impiego di opzioni che ottimizzano la scansione in funzione dell'arrivo del mezzo di contrasto nelle strutture vascolari in esame (tab. I).

obtaining vascular maps which can be placed over angiographic maps, with the added possibility of associating functional information.

The aim of this paper is to examine the state of the art of the various devices used, the examination techniques, and the diagnostic possibilities, as well as the main applications of non arteriographic diagnostic imaging in the study of thoracic vessels in comparison with the data in the literature.

Spiral computed tomography and multislice computer tomography

The advent of spiral CT (SCT) has significantly broadened the non-invasive diagnostic possibilities of thoracic vascular pathologies, both in the study of acute and non-acute aortic pathology, and the study of pulmonary embolism. SCT has become the elective technique of choice, and at times the technique of first choice in diagnostic procedures, owing to its competitive costs compared with other techniques.

The use of multislice CT (MSCT) has significantly improved the study of thoracic vessels, thanks to the enhanced spatial resolution possible with the use of slice thicknesses as narrow as 0.5 mm. The reduction of acquisition times to 0.5 s for each 360° rotation has enabled a reduction in motion artefacts, which is particularly significant in the chest, and a reduction in the quantity of contrast material administered.

Clinical applications

In the assessment of trauma to the thoracic aorta, SCT has a 100% sensitivity value and 100% negative predictive value, which is in line with digital angiography, although the costs of SCT are 50% lower [1]. A study [2] carried out on 1419 patients confirmed that in the case of suspected post-trauma aortic pathology only in 77 cases was angiographic confirmation required, whereas 1342 patients with negative SCT in acute trauma presented no pathological alterations after eight months of follow-up.

*CT also became the technique of choice in the study of pulmonary embolism when Remy-Jardin *et al.* [3] published a study comparing SCT and pulmonary angio-pneumography in the assessment of pulmonary embolism, reporting values of 100% sensitivity and 96% specificity.*

The introduction to clinical practice of MSCT has further broadened the diagnostic possibilities. Increasingly shorter scan times and an increase in the number of detectors have enabled an improvement in the spatial resolution, the temporal resolution and the acquisition times of images as well as a reduction in artefacts and the dose of contrast material administered (figs. 1, 2). The devices available enable the optimisation of scan protocols in relation to the region to be studied [4-6]. In the assessment of thoracic vascular pathology two varieties of protocols can be used: those which emphasise high scan velocity for the study of large volumes or those which emphasise high resolution and involve the use of slice thicknesses of 1-1.25 mm and the use of options which optimise the scan in relation to the arrival of the contrast material in the vascular structures being studied (table I).

In a recent study on 93 patients a comparison was performed between SCT (45 patients) and MSCT (48 patients).

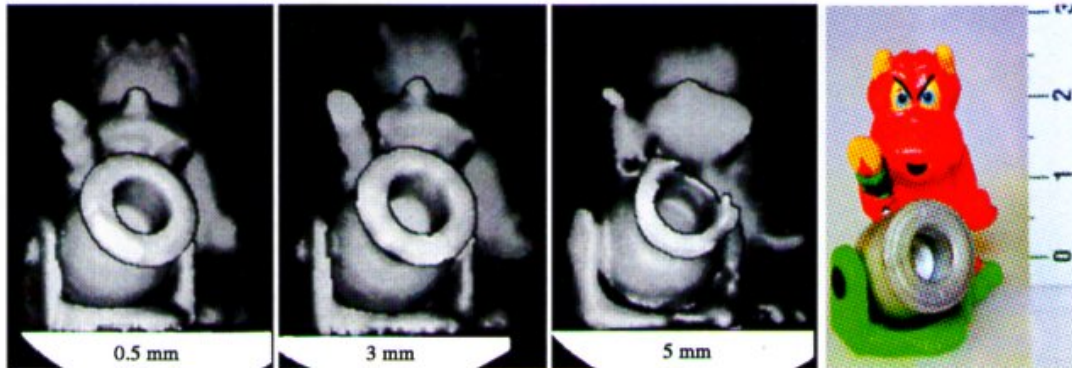


Fig. 1. — Esempio che dimostra la differente risoluzione spaziale al variare dello spessore di strato di acquisizione alla TC. La figura mostra il diverso dettaglio anatomico delle ricostruzioni tridimensionali del fantoccio nelle acquisizioni effettuate con TC spirale multistrato. È evidente il maggiore dettaglio delle scansioni effettuate a strato sottile.

Example showing varying spatial resolution in relation to varying computed tomography (CT) slice thickness. The figure shows the different anatomical detail of the 3D reconstructions of the phantom in the acquisitions performed with multislice CT (MSCT). Superior detail is clearly visible in the scans performed with thin slices.

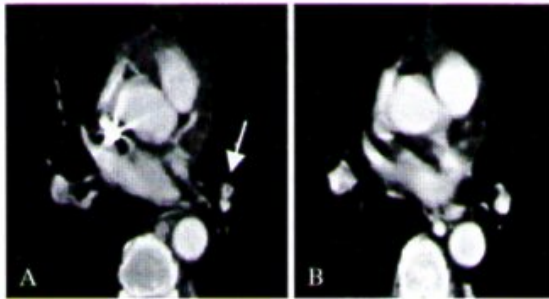


Fig. 2. — Stesso Paziente: A) scansione TC a 3 mm; B) scansione TC a 10 mm. Nella acquisizione TC con collimazione da 3 mm è meglio riconoscibile la presenza del trombo nel ramo dell'arteria polmonare per il lobo inferiore a sinistra (freccia).

The same patient: A) CT scan with 3 mm collimation and B) 10 mm collimation. The presence of a thrombus in the left inferior lobar pulmonary artery is clearly more visible in the scan with 3 mm collimation.

In un recente studio [7] è stato eseguito un confronto su 93 pazienti tra TCS (in 45 pazienti) e TCMS (in 48 pazienti) dividendo i polmoni in tre zone: centrale, media e periferica e numerando da 1 a 5 i livelli di visualizzazione qualitativamente apprezzabili (1=arteria non visibile, 2=arteria poco o nulla visibile, 3=parzialmente visibile con 2 o 3 arterie visibili, 4=adeguatamente visibili 5-6 arterie e 5=completamente visibili più di 7 arterie). I risultati degli Autori dimostrano che a fronte di una non significativa differenza nella valutazione, per le arterie centrali, si ha un netto miglioramento dei rami valutabili con la TCMS per le zone medie e periferiche (5 versus 4 e 4 versus 3).

Gli spessori di strato sottili ed i grandi volumi studiabili si possono associare alle tecniche di ricostruzione computerizzata quali le ricostruzioni multiplanari (MPR), la tecnica di massima proiezione (MIP), le ricostruzioni tridimensionali di superficie (SSD) e le tecniche di Volume Rendering 3D che

TABELLA I. — Vasi toracici. TCMS: tecniche di studio.

Protocollo Alta velocità/Grande volume — Collimazioni 2-2,5 mm×4 (torace in 8-10 s)
Protocollo Alta Risoluzione — Collimazioni 1-1,25 mm×4 (aorta e tutti i letti vascolari)
MDC — Non-ionico 120-150 ml alla velocità 2-5ml/s ritardo 10-12 s o bolus test

TABLE I.—Thoracic vessels. MSCT: examination techniques.

High velocity CT/great volume — 2-2,5×4 mm (8-10 s for the whole thorax examination)
High-resolution CT — 1-1,25×4 mm (aorta and all thoracic vessels)
Contrast material — Non-ionic 2-5 ml/s CT begins 10-12 sec. after the start of injection or bolus test

The lungs were divided into three zones (central, medial, peripheral) and a value of 1 to 5 was allocated for the level of visualisation (1=artery non visible, 2=artery barely visible, 3=2-3 partially visible arteries, 4=5-6 sufficiently visible arteries, 5=7 or more arteries fully visible). The results show that in light of a non-significant difference in the assessment of the central arteries, there is a clear improvement of the branches assessed with MSCT for the medial and peripheral zones (5 vs 4 and 4 vs 3, respectively).

The thin collimation and the large volumes which can be studied may be used in conjunction with computerised reconstruction techniques such as multi-planar reconstructions (MPR), maximum intensity projection (MIP), three dimensional surface shaded display (SSD) and 3D volume rendering

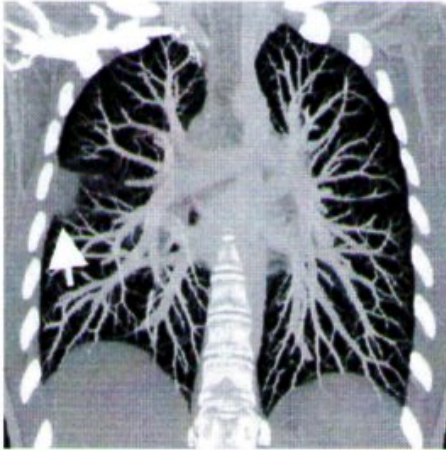


Fig. 3. — Infarto polmonare. Le ricostruzioni MIP coronali di un esame TCMS mostrano la presenza di un'area di addensamento polmonare nel territorio del segmento laterale del lobo superiore di destra (freccia). Pulmonary infarction. Coronal maximum intensity projection (MIP) reconstruction shows pulmonary thickening of the right superior basal segment (arrow).

permettono di meglio valutare le strutture vascolari, i loro reciproci rapporti e la patologia presente grazie alla maggiore percezione di profondità visiva (figg. 3, 4). Alcuni Autori [8, 9] ritengono che la TCMS sia la tecnica migliore per studiare la patologia toracica vascolare se associata alle tecniche di Volume Rendering, sia in ambito aortico sia polmonare, sia congenito o malformativo vascolare, con il vantaggio, inoltre, di fornire informazioni insuperabili nella valutazione associata delle componenti bronchiali e parenchimali polmonari.

Quasi tutti gli ultimi lavori pubblicati sull'impiego della TCMS nella diagnostica dell'embolia polmonare pongono l'accento sulla utilità delle scansioni delle arterie polmonari a strato quanto più sottile possibile, con tempi di acquisizione brevi, possibilità, queste, fruibili solo con apparecchiatura TCMS [10].

La diagnosi accurata e tempestiva di embolia polmonare è fondamentale sia per la riduzione della mortalità globale, sia per evitare terapie fibrinolitiche e anticoagulanti non necessarie e gravate da complicanze. In caso di sospetto clinico di embolia polmonare è necessario disporre di una tecnica diagnostica ampiamente diffusa e riproducibile. Sebbene la diagnosi di embolia polmonare sia facilmente accertata con l'angio-TC, non tutti concordano sulla sua esclusione in caso di TC negativa per cui ritengono comunque utile un periodo di osservazione [11].

Essa, inoltre, presenta dei limiti nel riconoscimento dei trombi nelle diramazioni subsegmentarie delle arterie polmonari, coinvolte, tuttavia, solo nel 6% dei casi [12]. Possono inoltre verificarsi dei falsi positivi dovuti alla presenza di piccoli linfonodi adiacenti ai rami arteriosi.

Con questo tipo di approccio diagnostico è possibile studiare meglio l'ipertensione polmonare pre e post-capillare (già valutabile, peraltro, con la TC ad alta definizione in relazio-

which enable improved assessment of the vascular structures, their mutual relations and the pathology present, thanks to improved perception of visual depth (figs. 3, 4). Some authors [8, 9] maintain that MSCT is the best technique for studying thoracic vascular structures used in conjunction with volume rendering, regardless of whether the pathology involves the aorta or the lungs, is congenital or malformative. It also has the advantage of providing unparalleled information in the associated assessment of bronchial components and pulmonary parenchyma.

Almost all of the studies published on the use of MSCT in the diagnosis of pulmonary embolism emphasise the usefulness of scans of the pulmonary arteries with the thinnest possible collimation with short acquisition times; this is a combination which is only possible with MSCT devices [10].

The accurate and timely diagnosis of pulmonary embolism is crucial both for the reduction in overall mortality and in the avoidance of unnecessary fibrinolytic and anticoagulant therapies which are beset with complications. In the case of clinically suspected pulmonary embolism a widespread and reproducible diagnostic technique is required. Despite its diagnosis being easily ascertainable with angio-CT, not all agree regarding its exclusion in the case of a negative CT; therefore an observation period is nonetheless advisable [11]. There are also limitations in recognising thromboses in the subsegmental branches of the pulmonary arteries, although only in 6% of cases [12]. There can also be false positives owing to the presence of small lymph nodes adjacent to the arterial branches.

MSCT is capable of an improved study of pre- and post-capillary pulmonary hypertension (also assessable with high definition CT in relation to the "mosaic" pattern of attenuation or mosaic oligemia) and can therefore obtain information on both the circulation and the parenchyma in the same exam. The technique can also be coupled particularly well with dedicated workstations which enable an assessment of pulmonary perfusion by colour coding and the processing of colour maps. The literature is also in favour of the use of contrast material for the associated assessment of deep thrombosis of the lower limbs, a cause of pulmonary embolism, during the same examination (fig. 5).

This is confirmed in a study by Gaye et al. [13] who examined 30 patients (collimation 41 mm, pitch 1.7-2.0, scan time 0.5 s) with the following inclusion criteria: a) complete visualisation without dilatation of the pulmonary arteries in the absence of pulmonary surgery, distortion of the parenchyma, and definite or suspected primitive or secondary pulmonary hypertension; and b) MSCT examination of an acceptable quality in terms of intravascular contrast (optimal breath-hold acquisition, level of enhancement of the pulmonary arteries being studied excellent or good in the absence of intra- or extraluminal anomalies). Images were reconstructed at 1.25 mm (group 1) and 3 mm (group 2) for each patient. Analysis was then performed of 600 segmental branches (20 arteries per patient), 1,200 subsegmental branches (40 arteries per patient), 2,400 branches of the 5th order (80 arterial branches per patient) and 4,800 branches of the 6th order (160 branches per patient).

The identification of subsegmental branches was greater in group 1 than in group 2 (94% vs 82%), as was the identification of branches of the 5th order (74% vs 35%) and the 6th

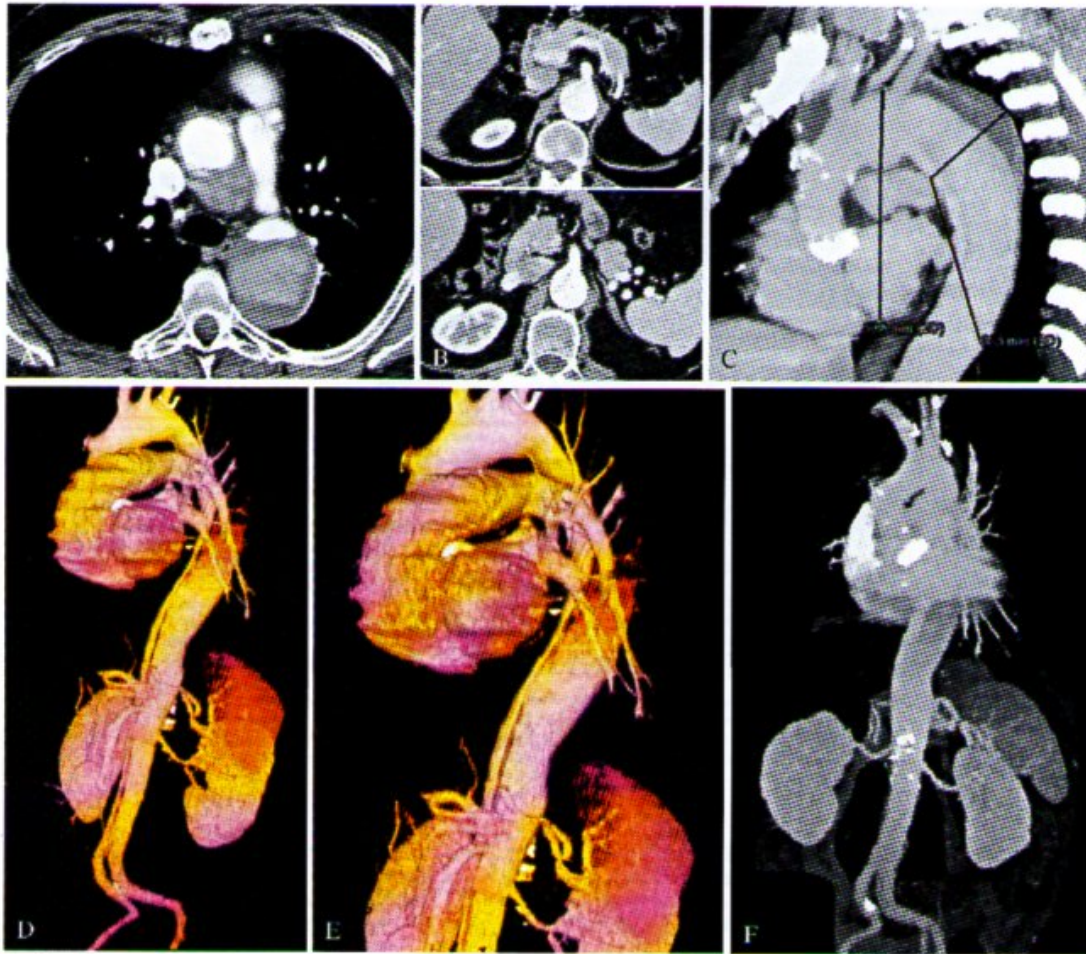


Fig. 4. — Dissezione aortica. Con un unico esame TCMS è possibile ottenere le immagini TC assiali tradizionali (A, B) che dimostrano la presenza della dissezione aortica con origine dall'arco e anche i rapporti con l'origine dei vasi viscerali addominali (tronco celiaco e arteria mesenterica superiore). Mediante la ricostruzione coronale obliqua (C), 3D volume rendering (D, E) e MIP (F), si ottengono immagini simil-angiografiche che forniscono informazioni sovrapponibili all'arteriografia, in modo meno invasivo e più rapido.

Aortic dissection. A single MSCT examination can obtain conventional axial slices (A, B), multiplanar reconstructions (MPR) and vascular images (C-F). A, B) Axial CT slices show aortic dissection arising from the aortic arch and its relationship with visceral arteries (celiac trunk and superior mesenteric artery). By means of oblique coronal reformation (C), 3D volume rendering (D, E) and MIP reconstructions (F), conventional angiogram-like images can be obtained with the same diagnostic information but less invasively and more rapidly.

ne all'aspetto di oligoemia a mosaico) ottenendo, quindi, informazioni sia sul circolo sia sul parenchima nello stesso esame. La TCMS si presta particolarmente bene all'impiego di workstation dedicate che permettono con questo tipo di acquisizione una valutazione della perfusione polmonare tramite la codifica a colore tipo "color-map". Infine, gli Autori si dichiarano favorevoli, come proposto anche da altri, di sfruttare il mdc somministrato per la valutazione associata della trombosi profonda degli arti inferiori, causa dell'embolia polmonare, nel corso dello stesso studio (fig. 5).

La conferma di quanto affermato si può trovare in un arti-

order (47% vs 16%). The causes of reduced identification were attributed to partial volume (43%), anatomical variations (39%), cardiac artefacts (17%) and respiratory artefacts (1%).

Another study [14] examined 17 patients with pulmonary embolism, reconstructing the slices acquired at 1 mm, 2 mm and 3 mm. Three radiologists examined the segmental branches of the 5th and 6th order giving an assessment of patency, occlusion or indeterminate. The findings showed that: a) using 1 mm slice thicknesses identification of the vascular branches is 40% greater with respect to 3 mm slices and 12% greater with respect to 2 mm slices; b) using slices of 1

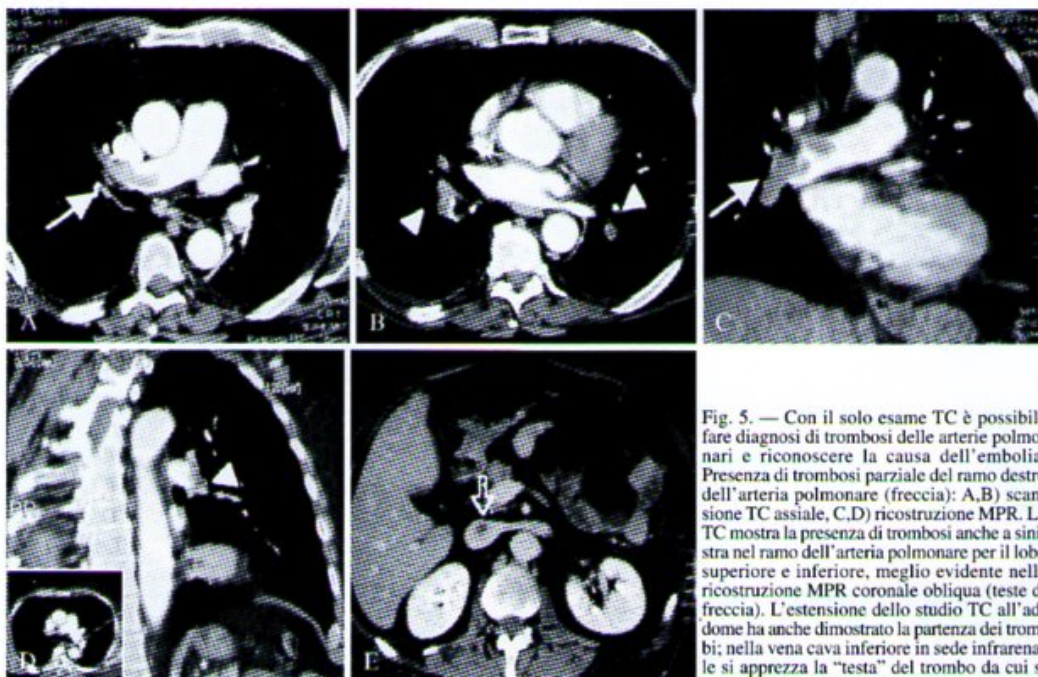


Fig. 5. — Con il solo esame TC è possibile fare diagnosi di trombosi delle arterie polmonari e riconoscere la causa dell'embolia. Presenza di trombosi parziale del ramo destro dell'arteria polmonare (freccia); A,B scansione TC assiale, C,D ricostruzione MPR. La TC mostra la presenza di trombosi anche a sinistra nel ramo dell'arteria polmonare per il lobo superiore e inferiore, meglio evidente nella ricostruzione MPR coronale obliqua (teste di freccia). L'estensione dello studio TC all'addome ha anche dimostrato la partenza dei trombi; nella vena cava inferiore in sede infrarenale si apprezza la "testa" del trombo da cui si sono staccati gli emboli (freccia vuota) (E).

A single MSCT examination can be diagnostic for pulmonary artery thrombosis and recognise the cause of embolism. CT scan (A) (arrow) and MPR (C) (arrow head) show the thrombus in the right pulmonary artery with partial occlusion of the lumen. MSCT image (B) shows thrombosis of superior and inferior branches of the left pulmonary artery (arrow) better seen on oblique coronal MPR (D) (arrow head). Abdominal CT (E) shows the cause of embolism: in the inferior vena cava: the thrombus "head" from which the emboli broke off (empty arrow).

colo di Ghaye *et al.* [13] i quali hanno studiato 30 pazienti (collimazione di 4x1 mm, pitch 1,7-2; tempo di scansione di 0,5 s) con i seguenti criteri di inclusione: a) completa visualizzazione senza dilatazione delle arterie polmonari in assenza di chirurgia polmonare, di distorsione del parenchima e di ipertensione polmonare primitiva o secondaria certa o presunta; b) esame TCMS di qualità accettabile in termini di contrasto intravascolare (acquisizione in apnea inspiratoria ottimale, grado di opacizzazione delle arterie polmonari in esame valutato come eccellente o buono e assenza di anomalie intra o extraluminari). Per ogni paziente sono state ricostruite immagini a 1,25 mm (gruppo 1) e a 3 mm (gruppo 2). È stata quindi eseguita l'analisi di 600 rami segmentali (20 arterie per paziente), 1200 subsegmentali (40 arterie per paziente), 2400 rami di 5° ordine (80 rami arteriosi per paziente) e 4800 rami di 6° ordine (160 rami per paziente).

Nel gruppo 1 si è avuta una migliore identificazione dei rami sub-segmentari (94% vs 82%) nonché dei rami di 5° ordine (74% vs 35%) e di 6° ordine (47% vs 16%) rispetto al gruppo 2. Le cause di ridotta identificazione per le arterie del gruppo 1 sono state attribuite a effetti di volume parziale (43%), varianti anatomiche (39%) nonché ad artefatti cardiaci (17%) e respiratori (1%).

In un altro studio [14] sono stati valutati 17 pazienti con embolia polmonare ricostruendo gli strati del volume acqui-

mm and 2 mm reduces the assessment of indeterminacy by 70% with respect to the use of 3 mm slices; and c) the inter-observer variability is reduced when 1 mm and 2 mm slices are used. In conclusion, the use of thinner slices enables greater diagnostic accuracy in MSCT (figs. 1, 2).

Another diagnostic advantage of MSCT is the possibility of performing cardiac synchronised imaging. The use of a system of cardiac synchronisation is fundamental for the study of the coronary arteries, as well as for the study of other thoracic vascular districts.

The use of prospective or retrospective electrocardiogram (ECG) synchronisation (table II and fig. 6) can be useful for the study of the thoracic aorta. Their role in the assessment of pulmonary embolism is, however, subject to debate.

Roos *et al.* [15] recently published the results of a study in 60 patients divided into three groups using MSCT without ECG synchronisation, with prospective ECG triggering and with retrospective ECG gating. Dividing the size of the artefact into grades (1=no artefacts, 4=maximum artefacts) it was noted that the various grades are considerably lower with the use of ECG synchronisation. The point with the highest level of artefacts, when ECG synchronisation is not used, is at the level of the aortic valve. The greater the distance from the heart the less is the difference in terms of artefacts between the synchronised and non-synchronised technique. Nonetheless,

TABELLA II. — Modalità di cardiosincronizzazione.

ECG prospettivo	ECG retrospettivo
Acquisizione ogni 2 R-R	Acquisizione continua
Aumento della collimazione per coprire la zona di interesse	Collimazione sottile
Immagini monofasiche	Immagini multifasiche (sistole-diastole)
Scarso aumento della dose di esposizione	Sensibile aumento della dose di esposizione

sito a 1, 2 e 3 mm. Tre radiologi hanno valutato i rami segmentari di 5° e 6° ordine esprimendo un giudizio di pervietà, di occlusione o indeterminato. I risultati ottenuti hanno dimostrato come: a) impiegando uno spessore di strato a 1 mm si abbia il 40% in più di identificazione di rami vascolari rispetto alle scansioni di 3 mm ed il 12% in più rispetto allo spessore di strato di 2 mm; b) utilizzando spessori di 1 e 2 mm si riducono i giudizi di indeterminazione del 70% rispetto all'impiego di strati a 3 mm; c) la variabilità interosservatore risulta minore se vengono utilizzati spessori di 1 e 2 mm. In conclusione si può affermare che l'utilizzo di strati più sottili consente una maggiore accuratezza diagnostica della TCMS (figg. 1, 2).

Un'ulteriore vantaggio diagnostico offerto dalla TCMS è la possibilità di acquisire immagini cardiosincronizzate. Per lo studio delle coronarie l'impiego di un sistema di cardiosincronizzazione è imprescindibile, ciò può essere valido anche per lo studio degli altri distretti vascolari toracici.

L'uso del gating elettrocardiografico prospettivo o retrospettivo (tab. II e fig. 6) può essere utile per lo studio dell'aorta toracica; il suo ruolo per la valutazione dell'embolia polmonare è, invece, in discussione.

Roos *et al.* [15] hanno recentemente riportato i risultati di uno studio su 60 pazienti divisi in 3 gruppi utilizzando la TCMS senza ECG, con ECG prospettivo e ECG retrospettivo. Dividendo in gradi l'entità degli artefatti (da 1 a 4 cioè dalla condizione senza artefatti a quella con il massimo degli stessi) si è visto come i vari gradi siano sensibilmente più bassi se si utilizza l'ECG. Il punto con la massima espressione degli artefatti, se non si usa l'ECG, è a livello della valvola aortica. Maggiore è la distanza dal cuore minore è la differenza in termini di artefatti tra tecnica sincronizzata e non. Tuttavia se si sincronizza si ottiene un sensibile miglioramento degli artefatti a livello dell'arco aortico e dei vasi periaortici. Siccome l'acquisizione col gating prospettivo viene eseguita ogni 2 battiti cardiaci, bisogna aumentare leggermente (a 2,5 mm) la collimazione per coprire un adeguato tratto di torace. Gli Autori sottolineano anche che l'esposizione radiologica sia stata di 3,65, 4,5 e 8,85 mSv passando rispettivamente dall'acquisizione senza ECG a quella col gating prospettivo e a quella col gating retrospettivo.

Recentemente, e proprio in relazione all'impiego di apparecchiature TCMS, è diventato possibile studiare le arterie coronarie. Lo studio di questi vasi presuppone l'impiego di gating retrospettivo, di collimazioni il più sottili possibile, 250 ms di tempo effettivo di esposizione con un tempo di studio di

TABLE II.—CT acquisition with cardiac synchronisation.

Prospective ECG triggering	Retrospective ECG gating
Acquisition every 2 R-R	Continuous acquisition
Increase of collimation to study field of interest	Thin collimation
Monophasic images	Multiphasic images (systole and diastole)
Poor increase of radiation dose	Notable increase of radiation dose

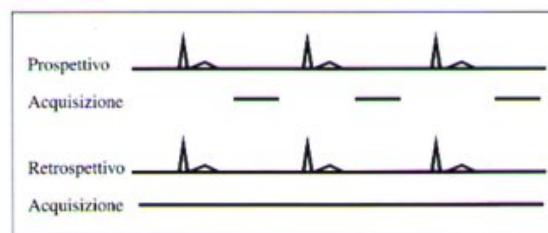


Fig. 6. — Schema che mostra le modalità di acquisizione TC cardiosincronizzata.

Figure showing MSCT cardiac gated acquisitions.

with synchronisation a noticeable improvement in the artefacts at the level of the aortic arch and the periaortic vessels is observed. Because the acquisition with prospective triggering is performed each two heartbeats, the slice thickness needs to be slightly increased (to 2.5 mm) to cover a sufficient region of the chest. The authors also emphasise that the radiation exposure for the acquisition without ECG synchronisation, with prospective triggering and with retrospective gating was 3.65 mSv, 4.5 mSv and 8.85 mSv, respectively.

Recently, and in particular respect to the use of MSCT devices, it has become possible to study the coronary arteries. The study of these vessels involves the use of retrospective gating, collimation as thin as possible, 250 ms of effective exposure time with a study time of about 35 s. MSCT is an excellent technique for the study of the proximal tracts (right coronary, left coronary and circumflex artery), branches up to the 3rd order coronary vessels with a diameter of 1.5 mm or more, the calcium score and atherosclerotic plaque. The calcium score, or the possibility of semiquantitatively defining the presence or not of atherosclerosis in the coronary arteries, until recently best performed with electron beam computed tomography, highly expensive devices which are not found in Italy. Now, using MSCT the presence or not of calcium in the coronary arteries can be assessed more adequately than with SCT, which can be used to attempt to determine the prognostic risk of ischaemic cardiopathy. Thanks to the possibility of quantising the densitometry of tissue, MSCT is capable of highlighting and quantising the extent of atherosclerotic plaque. The measurement of the vulnerability of the plaque is the most important criterion for risk assessment, and therefore for the early treatment to avoid rupture of the plaque itself [16, 17].

Currently the technique of choice in this field is intracoro-

circa 35 s. Con la TCMS si studiano bene i tratti prossimali (c. destra, c. sinistra e arteria circonflessa), le diramazioni fino al 3° ordine di divisione, i vasi coronarici che abbiano un diametro di 1,5 mm o più, il calcium score e la placca aterosclerotica. Il calcium score, che è la possibilità di definire in modo semiquantitativo la presenza di aterosclerosi o meno delle coronarie, è stato fino a tempi recentissimi appannaggio della Electron Beam Computed Tomography, apparecchiatura molto costosa e per nulla presente sul territorio italiano. Ora con la TCMS è possibile valutare in maniera più adeguata della TCS, la presenza o meno di calcio a livello delle coronarie e da questo tentare di determinare il rischio prognostico per cardiopatia ischemica. Grazie alla possibilità di quantizzare la densitometria dei tessuti, è possibile, con la TCMS, evidenziare e quantizzare l'entità delle placche aterosclerotiche. Il rilievo della vulnerabilità delle placche è il criterio più importante per la stratificazione del rischio e, quindi, per il trattamento precoce evitando la rottura della placca stessa [16, 17].

Allo stato attuale, la metodica di riferimento in tale campo è l'ultrasonografia intracoronarica (UI) che suddivide la placca in soffice (più dell'80% della placca presenta ecogenicità più bassa di quella dell'avventizia vascolare; arc of lesion calcium <90%), intermedia (più dell'80% della placca presenta ecogenicità pari o maggiore di quella dell'avventizia vascolare ma senza cono d'ombra; arc of lesion calcium <90%) e calcifica (placca con aree iperecogene e con cono d'ombra che riguardano più del 90% della circonferenza vascolare). In un recente studio [18], seppure eseguito su un numero basso di pazienti, è stata utilizzata con successo la TCMS nella valutazione di placche del tratto prossimale della discendente anteriore di pazienti candidati alla PTCA e confrontata con la UI. La TCMS identifica chiaramente 2 placche soffice, 2 placche intermedie e 2 placche calcifiche con variazione di Unità Hounsfield significative per le tre categorie e permette, quindi, di identificare e caratterizzare le placche se si utilizzano parametri adeguati (risoluzione temporale di 125 ms e ricostruzione selettiva della fase del ciclo cardiaco).

Infine, seguendo un percorso già visto in RM, si possono oggi studiare con la TCMS i by-pass coronarici. Questi, rispetto alle coronarie native, presentano il vantaggio di essere di calibro maggiore e più rettilinei nel decorso; ciò permette ricostruzioni ottimali ad elevata risoluzione spaziale con acquisizione tramite gating retrospettivo in fase diastolica. Tali possibilità saranno sicuramente ampliate con il prossimo incremento del numero di detettori disponibili sulle apparecchiature per uso clinico e già utilizzate in alcuni Centri [19].

Oltre alle valutazioni quantitative ottenibili con la TC si stanno proponendo anche studi funzionali. È stato sperimentato su maiali l'impiego del gas xenon per ottenere immagini quantitative della ventilazione regionale polmonare mediante TC [20].

Dose di radiazioni in TCMS

Il grado di esposizione alle radiazioni ionizzanti nella TCMS è ancora oggetto di numerosi studi. Dai primi risultati risulta un significativo incremento della dose in TC con acquisizione a 4 strati rispetto a quelle a strato singolo. Questa situazione è cambiata in seguito al miglioramento dei software e alla ottimizzazione della collimazione.

nary ultrasonography which divides the plaque into soft (more than 80% of the plaque presents echogenicity lower than that of the vascular adventitia; arc of lesion calcium <90%), intermediate (more than 80% of the plaque presents echogenicity equal to or greater than that of the vascular adventitia, but without shadowing; arc of lesion calcium <90%) and calcified (plaque with hyperechoic areas and a cone-shaped shadow which regards more than 90% of the vascular surroundings). In a recent study [18], despite being performed on a limited number of patients, MSCT was successfully used in the assessment of plaque in the proximal tract of the anterior descending coronary artery of patients who were candidates for percutaneous transluminal coronary angioplasty and the findings were compared with those from intracoronary ultrasonography. MSCT clearly identified two soft plaques, two intermediate plaques and two calcified plaques with significant variation of Hounsfield units for the three categories and is therefore capable of identifying and characterising plaque if the appropriate parameters are used (temporal resolution of 125 ms and selective reconstruction of the heart cycle phase).

Finally, MSCT can also be used in the study of coronary bypass arteries. With respect to native coronary arteries, these have the advantage of being of a greater diameter and more linear in their passage. This enables optimal high-spatial-resolution reconstructions with acquisitions performed via retrospective gating in the diastolic phase. These possibilities will undoubtedly be broadened with the forthcoming increase in the number of detectors available on the devices for clinical use and already used in some centres [19].

As well as the quantitative assessment achievable with CT, functional studies are also being proposed. The use of xenon gas has been experimented in pigs to obtain quantitative images of pulmonary regional ventilation using CT [20].

Radiation dose in MSCT

The level of exposure to ionising radiation in MSCT is still the subject of many studies. Early findings show a significant increase in the dose in CT with the acquisition of four slices with respect to the acquisition of a single slice. This situation has changed with the improvement in the software and the optimisation of the collimation.

Winer-Muram et al. [21] have shown that during pregnancy the dose of radiation to the fetus from a MSCT examination for the diagnosis of pulmonary embolism is lower than that of ventilatory and perfusion lung scintigraphy.

In general the dose is higher in multi-channel systems than in single channel systems and with thicker collimations than with thinner ones [22].

Magnetic Resonance

Magnetic resonance (MR) is the least invasive technique currently available for the diagnostic imaging study of the thoracic vascular system. The last two decades have seen developments from traditional diagnostic techniques based on morphological sequences (spin echo), to the use of morphofunctional sequences (gradient echo and similar) and MR angiography (MRA) (time of flight and phase contrast) which make MR the most effective of the non-invasive techniques in terms of diagnostics in this anatomical region.

Winer-Muram *et al.* [21] hanno dimostrato che durante la gravidanza la dose di radiazioni al feto, dovuta ad un esame TCMS per la diagnosi di embolia polmonare, è inferiore a quella della scintigrafia polmonare ventilatoria e perfunzionale.

In generale la dose è superiore nei sistemi multicanale rispetto a quelli monocanale e per collimazioni più spesse rispetto a quelle più sottili [22].

Risonanza Magnetica (RM)

È la tecnica meno invasiva che attualmente è possibile utilizzare nello studio mediante diagnostica per immagini del sistema vascolare toracico. Nel corso degli ultimi due decenni si è passati da una diagnostica tradizionale basata sulle sequenze morfologiche (spin-eco), all'utilizzo di sequenze morfo-funzionali (gradient-eco o analoghe), di sequenze angio-RM (Time Of Flight e Phase Contrast) che pongono la RM nel novero delle tecniche non invasive più efficaci in termini diagnostici in questo distretto anatomico.

Tutti i sistemi RM oggi in uso tendono, da un punto di vista tecnico, ad applicare sequenze più efficienti per migliorare la risoluzione spaziale, ridurre i tempi di acquisizione, migliorare la risoluzione temporale; vi è inoltre la tendenza ad impiegare matrici sempre maggiori, ad eliminare gli artefatti vascolari e da movimento e, in alcuni casi, ad abbattere il segnale dei tessuti circostanti i vasi e del tessuto adiposo in particolare. È percorrendo tali diverse strade che si è arrivati all'impiego clinico delle sequenze angio-RM con somministrazione di contrasto a respiro sospeso (Contrast Enhancement Breath Hold Magnetic Resonance Angiography). Da poco prima della metà degli anni '90 in poi, sono stati pubblicati un numero crescente di articoli sull'uso della somministrazione in bolo di gadolinio con sequenze in cui il segnale dei tessuti intorno ai vasi veniva completamente abbattuto. L'arrivo del mdc, modificando in maniera significativa il T1 ematico, forniva una opacizzazione elettiva dei vasi in studio [23-26]. Oggi quasi tutte le apparecchiature a media ed alta intensità di campo offrono la possibilità di eseguire tale tipo di angiografia con RM. A seconda del software del sistema in uso, l'acquisizione delle immagini deve essere contestuale all'arrivo del mdc nei vasi da studiare. Ciò si ottiene in vari modi: 1) eseguendo un test preliminare con piccola iniezione di mdc calcolando il tempo di arrivo (timing) per far partire la sequenza in modo che le parti centrali del K-spazio siano le prime ad essere acquisite e fare successivamente la vera acquisizione angio-RM con mdc; 2) utilizzando la fluoroscopia con RM che è una acquisizione 2D con una risoluzione temporale di circa 1 immagine/secondo con saturazione completa dei tessuti intorno ai vasi che mostra l'arrivo del bolo di mdc permettendo all'operatore di scegliere visivamente, in tempo reale, il momento più opportuno per far partire la sequenza; 3) sistemi di partenza automatica dell'acquisizione quando il bolo di mdc arriva nel vaso che si è preventivamente deciso di studiare [27].

In un recente articolo, Kreitner *et al.* [28] hanno studiato 118 pazienti valutando l'aorta toracica mediante angio-RM a respiro sospeso (Breath Hold-MRA). Gli Autori confermano che anche la tecnica di studio più semplice basata sul

From a technical point of view, all MR systems today tend to apply increasingly efficient sequences to improve spatial resolution, reduce acquisition times and improve temporal resolution. There is also the tendency to use increasingly large matrices, to eliminate vascular and motion artefacts, and in some cases to suppress the signal of the surrounding tissue and vessels, in particular of the adipose tissue. One of the outcomes of all of these different developments has been the clinical use of contrast enhancement breath-hold MRA. From a little before the mid 1990s onwards an increasing number of articles have been published on the use of sequences with the administration of gadolinium in which the signal of the tissue surrounding the vessels is completely suppressed. The arrival of the contrast material, which significantly modifies the T1 blood signal, provides an elective enhancement of the vessels being studied [23-26]. Today almost all of the medium and high intensity field devices offer the possibility of performing this kind of angiography with MR. In conformity with the software used by the system, the acquisition of images needs to take place with the arrival of the contrast material in the vessels being studied. This is obtained in a number of ways: 1) performing a preliminary test with a small injection of contrast material and calculating the arrival time to determine the beginning of the sequence such that the central parts of the k-space are the first to be acquired, and then perform the real MRA acquisition with contrast material; 2) using fluoroscopy with MR, which is a 2D acquisition with a temporal resolution of about one image per second with complete saturation of the tissue surrounding the vessels which shows the arrival of the contrast material and allows the radiologist in real time to visibly choose the most appropriate moment for beginning the sequence; and 3) systems which begin the acquisition automatically when the contrast material arrives in the vessel to be studied [27].

In a recent study involving 118 patients, Kreitner et al. [28] assessed the thoracic aorta with the use of breath-hold MRA. The authors confirmed that even the simplest technique involving timing the arrival of the contrast material provides very good images of the vessel, but in 25% of cases the images are not adequate, probably due to the significant difference of flow during breath hold and the different effectiveness of the Valsava manoeuvre on the rate and volume of blood returning to the heart. They therefore advise the use of MR fluoroscopy associated with the use of a system of automatic recognition of contrast material which begins the sequence (MR Smart Prep technique).

Regardless of the technique for beginning the acquisition, the availability of repetition times no greater than 10 ms, echo times as short as possible (1-3 ms), dedicated coils for the region to be studied (phased array), slice thicknesses of 1-2 mm, and the possibility of administering the contrast material with a special injector would be ideal [29]. The quantity of contrast material administered varies among different authors but the most common practice involves the use of a double dose of gadolinium, based on the body weight of the patient, administered at 2 ml/s followed by a similar quantity of physiological solution [27].

This technique enables the acquisition of optimal angiographic images which can be rotated through any plane in space and with short scan time (20-40 s) and which are valid for the study of acquired aortic pathology, congenital aortic pathol-

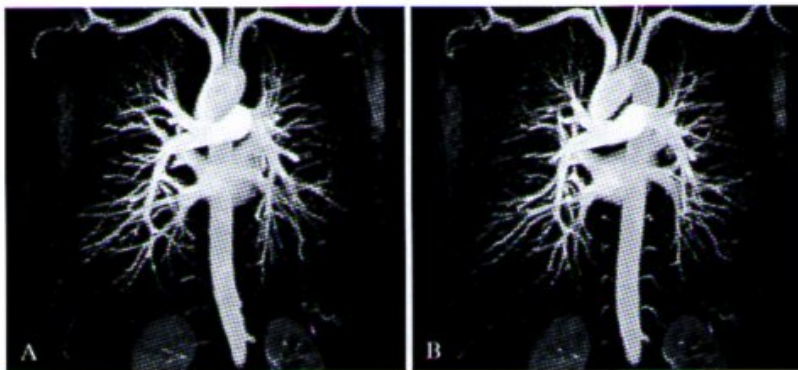


Fig. 7. — A, B) Angio-RM dei vasi toracici ottenuta mediante algoritmo di ricostruzione MIP. Le immagini possono essere fatte ruotare modificando il campo di vista. A, B) Angio-magnetic resonance (MR) of thoracic vessels obtained by means of MIP reconstruction. Images can be rotated, modifying the field of view.

timing fornisce immagini molto buone del vaso ma che, almeno in un 25% dei casi, le immagini non sono adeguate probabilmente per la grande differenza di flusso tra respiro sospeso e la differente efficacia della manovra di Valsalva sui ritorni venosi e sulla portata cardiaca. Essi consigliano, pertanto, la tecnica della visione fluoroscopica con RM associata all'impiego di un sistema di riconoscimento automatico del mdc che determina l'inizio della scansione (tecnica MR-Smart Prep).

Attualmente, a prescindere dal tipo di partenza dell'acquisizione, sarebbe opportuno avere a disposizione tempi di ripetizione (TR) non oltre i 10 ms, tempi di eco (TE) il più brevi possibili (1-3 ms), bobine dedicate per il distretto di studio (Phased Array), spessori di strato di 1-2 mm e la possibilità di iniettare il mdc con apposito iniettore [29]. La quantità di mdc iniettata varia a seconda dei vari Autori, ma quella più in uso presuppone l'impiego di doppia dose di gadolinio, in base al peso corporeo del paziente, somministrata a 2 ml/s seguita da analoga quantità di soluzione fisiologica [27].

Con l'impiego di tale tecnica è possibile ottenere immagini angiografiche ottimali, ruotabili secondo qualsiasi piano dello spazio, con tempi di scansione brevi (20-40 s), valide per lo studio della patologia aortica acquisita, per quella congenita e per i controlli post-chirurgici o post-interventivi (fig. 7). Uno studio di confronto tra BH-MRA, imaging convenzionale RM ed angiografia in 26 pazienti con coartazione aortica ha dimostrato risultati pienamente soddisfacenti in termini di valutazione della entità della stenosi sia tra BH-MRA e angiografia, sia tra i diversi operatori sia nella valutazione del calibro del tratto stenotico [30]. Inoltre, con tale tipo di tecnica, è ora possibile valutare i circoli collaterali, importanti ai fini del programma chirurgico.

Malgrado la superiorità diagnostica della TCS e della TCMS nello studio dei vasi arteriosi polmonari e dell'embolia polmonare rispetto alla RM, quest'ultima, con i recenti sviluppi legati a quanto scritto sopra, sta progressivamente avvicinandosi all'affidabilità della TC.

Nella embolia polmonare le tecniche angio-RM impiegate sono fondamentalmente due: a) acquisizione in coronale, a respiro sospeso, dell'intero torace; b) due acquisizioni separate in sagittale su ciascuna arteria polmonare. Nel primo

studio di confronto tra BH-MRA, imaging convenzionale MR ed angiografia in 26 pazienti con coartazione dell'aorta dimostrò risultati soddisfacenti in termini di valutazione della entità della stenosi sia tra BH-MRA e angiografia, sia tra i diversi operatori sia nella valutazione del calibro del tratto stenotico [30]. Questo tipo di tecnica è anche capace di valutare la circolazione collaterale, che è di particolare importanza per il follow-up chirurgico.

Nonostante la superiorità diagnostica di SCT e MSCT per lo studio delle arterie polmonari e dell'embolia polmonare, grazie agli sviluppi menzionati, la RM sta progressivamente diventando altrettanto affidabile della TC.

Esistono due principali tecniche MRA utilizzate nello studio dell'embolia polmonare: a) acquisizioni in piano coronale dell'intero torace; b) due acquisizioni separate in piano sagittale su ciascuna arteria polmonare. Gli svantaggi nel primo caso sono la necessità di un ampio campo di vista per evitare l'overturning delle immagini, e la durata della breath hold. Gli svantaggi nel secondo caso sono la doppia somministrazione di mezzo di contrasto, la difficoltà di riconoscere il momento migliore per iniziare la sequenza, e la possibilità di non riconoscere emboli nei grandi vasi centrali, anche se è improbabile che i pazienti con grandi emboli subiscano esami MR in condizioni acute. Questi requisiti possono essere soddisfatti con ulteriori miglioramenti tecnici come le sequenze navigator, le sequenze risolte nel tempo 3D, e i nuovi mezzi di contrasto intravascolari [31]. Mentre l'albumina e la polilisina Gd-DPTA sembrano ancora essere parte del dominio sperimentale, gli ultrasottili superparamagnetici di ossido di ferro (USPIO) sembrano essere più promettenti per quanto riguarda il loro possibile uso clinico [32]. I mezzi di contrasto intravascolari sono vantaggiosi a causa della loro lunga emivita plasmatica, della loro minima o nulla penetrazione nel sistema extravascolare, della loro capacità di abilitare una finestra temporale di acquisizione, del loro maggiore effetto di rilassamento T1, e della loro ridotta quantità necessaria per essere somministrati rispetto ad altri mezzi di contrasto. USPIO hanno anche la caratteristica di concentrarsi nei macrofagi e funzionano come marcatori dell'attività di questi, e sono anche utili nello studio della placca attiva (con l'effetto di suscettibilità magnetica in T2* sequenze) e abilitando lo studio, quindi, della parete vascolare [33].

La MRA a respiro sospeso con mezzo di contrasto è già corrente-

caso lo svantaggio è rappresentato dalla necessità di utilizzare ampi campi di vista per evitare il ribaltamento delle immagini e dalla lunghezza dell'apnea. Nel secondo caso lo svantaggio è rappresentato dalla doppia iniezione, dalla maggiore difficoltà nell'apprezzare quale sia il momento migliore per far partire la sequenza e la possibilità di misconoscere emboli dei grossi vasi centrali, anche se difficilmente pazienti con embolie massive eseguono studio RM in acuto. A tali requisiti si possono associare ulteriori miglioramenti tecnici quali le sequenze col Navigatore, sequenze Time Resolved ultrafast 3D e, infine, nuovi mezzi di contrasto intravascolari [31]. Il Gd-DTPA legato alla albumina e alla polilisina sembra essere relegato ancora all'impiego sperimentale; più promettenti, invece, per quanto riguarda il possibile utilizzo clinico, sembrano essere le Ultrasmall-Super-Paramagnetic-Iron-Oxides (USPIO) [32]. I mezzi di contrasto intravascolari hanno il vantaggio di possedere una lunga emivita plasmatica, di avere passaggio minimo o nullo nel sistema extravascolare, di permettere una ampia finestra temporale di acquisizione, di avere un maggiore effetto di rilassamento T1 e di permettere una riduzione della dose somministrata. Inoltre, le USPIO hanno la peculiare caratteristica di concentrarsi nei macrofagi e fungere da markers della attività di questi ultimi diventando utilizzabili anche nello studio della placca attiva (con effetto di suscettibilità magnetica nelle sequenze T2*) e permettendo di studiare, pertanto, anche la parete vascolare [33].

La angio-RM con mdc a respiro sospeso permette già oggi di seguire il bolo di mezzo di contrasto all'interno dei vasi e, sia pure per pochi istanti, di osservare la distribuzione di esso a livello del parenchima a valle. Nel caso delle arterie polmonari è possibile, utilizzando tempi di eco estremamente ridotti, seguire la distribuzione del gadolinio a livello dei polmoni effettuando una "mappa" di perfusione (fig. 8). Tale tipo di studio sembra essere destinato ad associarsi alle recenti tecniche che mirano allo studio della parte ventilatoria del polmone mediante l'impiego di gas nobili iperpolarizzati quali He³ e lo Xe¹²⁹ [34], di ossigeno molecolare (che presenta una debole paramagnetività) [35] e di aerosol in cui il gadolinio viene micronizzato e somministrato per via respiratoria [36]. Tutte le tecniche sopra riportate sono state provate sperimentalmente e, in pochi studi pilota, impiegate nell'uomo. Ciascuna di esse presenta vantaggi e svantaggi [37] ma la strada aperta sembra destinata ad allargarsi ed è verosimile che l'uso combinato di studi perfusionali e ventilatori con RM possa incrementarne il ruolo nella diagnostica non invasiva dell'embolia polmonare con RM.

Desideriamo, infine, fare un breve accenno allo studio delle coronarie con RM. Come per la TCMS lo studio delle coronarie risulta più difficoltoso di altri distretti vascolari in relazione al calibro tortuoso di tali vasi, al loro piccolo calibro, alla loro estrema mobilità e al loro flusso esclusivamente diastolico; inoltre, i movimenti respiratori e diaframmatici comportano la insorgenza di artefatti che riducono le possibilità di imaging dei vasi. L'avvento del navigator-eco e degli altri sistemi di ottimizzazione dell'acquisizione con i movimenti diaframmatici (Diminishing Variance Algorithm, Hybrid Ordered Phase Encoding) hanno permesso di ottenere immagini utili da un punto di vista clinico e comparabili con quelle ottenibili con la coronarografia. In recenti revisioni della letteratura [38, 39] vengono descritte in modo dettagliato

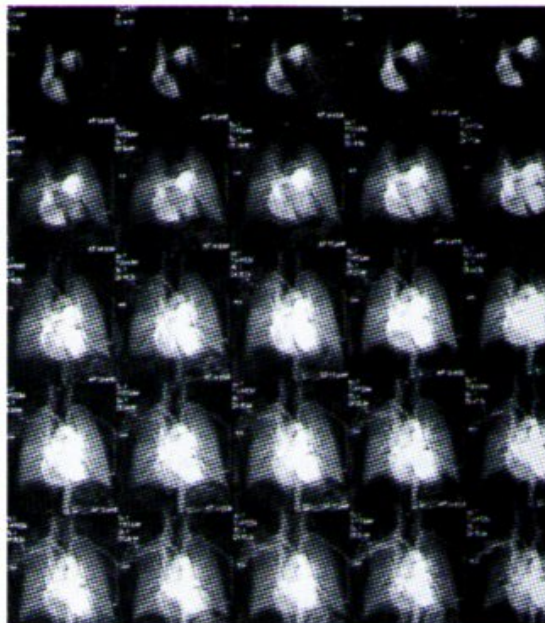


Fig. 8. — RM perfusionale in un caso di embolia polmonare. La figura mostra le varie fasi di acquisizione della RM perfusionale ottenute dopo somministrazione a bolo di mdc paramagnetico per via venosa. Si rileva un difetto di perfusione a carico del segmento laterale del lobo medio. Thoracic perfusion MR in pulmonary embolism. The image shows the phases of acquisition of perfusion MR obtained after i.v. administration of Gd-DTPA. The image shows a perfusion defect of the lateral segment of middle lobe.

ly capable of following the contrast material within the vessels as well as observing its distribution at the level of the distal parenchyma, although only for an extremely limited time. In the case of the pulmonary arteries, using extremely reduced echo times the distribution of gadolinium can be followed at the level of the lungs with the creation of a perfusion map (fig. 8). This type of study is likely to be associated with recent techniques for the study of the ventilatory part of the lung through the use of hyperpolarised noble gases such as He³ and Xe¹²⁹, molecular oxygen (which is weakly paramagnetic) [34] and aerosol in which gadolinium is micronised and administered via the airways [35]. All of these techniques are in the experimental phase and only in a few pilot studies have they been used in humans. Each of them has advantages and disadvantages [36], but the important point is that the road which has been opened will probably broaden and it is likely that the combined use of perfusion and ventilatory studies with MR will increase the role of non-invasive diagnostics of pulmonary embolism with MR.

To close this section we would like to briefly comment on the study of the coronary arteries with MR. As with MSCT the study of the coronary arteries is more difficult than other vascular regions owing to the non-linear path of these vessels, their small diameter, their extreme mobility and their exclusively diastolic flow. Furthermore, respiratory and diaphragmatic movements lead to artefacts which reduce the

TABELLA III. — Tecniche di angio-RM.

	Caratteristiche	Limiti
2D-Breath Hold coronary angiography	Sequenze a segmentazione di gradiente con incremento progressivo del flip angle. Singole fette di 3-5 mm di spessore. Normalmente 8 codifiche di fase con 16 cicli cardiaci per riempire una matrice di 128 e con il tempo di breath hold che dipende dalla frequenza cardiaca	Basso rapporto S/R, notevole esperienza dell'operatore, difficoltà nelle uniformità delle apnee
3D-Free Breathing e Breath Hold coronary angiography	Sequenze a segmentazione di gradiente con acquisizione di un volume di slab; più recentemente sequenze echo-planare e ibride a respirazione libera e, nei magneti più recenti e performanti con sequenze BH in cui viene acquisito un intero slab con un respiro. Ottime immagini	Risoluzione spaziale da migliorare così come deve essere risolto il residuo movimento delle coronarie anche se, con le ultime sequenze BH-3D, i problemi tendono progressivamente a influenzare meno l'imaging man mano che vengono impiegate sequenze sempre più veloci che riducono il tempo in cui le coronarie si possono muovere nello spazio
Imaging Spirale ed Echo Planare	Rispetto ai tempi di acquisizione di 100 ms delle 3D BH più aggiornate permettono tempi di acquisizione di 30-40 ms. Immagini di qualità molto elevata	Sono state impiegate solo in studi su volontari sani e con apparecchiature con hardware particolari
Contrast enhancement MR coronary angiography	Se l'arrivo del contrasto è ottimizzato si ottengono immagini buone sia delle coronarie sia dei by-pass aorto-coronari sia con tecnica in BH non sincronizzata sia con tecnica BH sincronizzata	Come per tutte le angio RM con mdc è di fondamentale importanza l'ottimizzazione della opacizzazione intracoronarica

TABLE III.—MRA examination techniques.

	Characteristics	Limits
2D-Breath hold coronary angiography	Segmented k-space gradient echo sequences with progressive increase of the flip angle. Single slices of 3-5 mm thickness. Normally 8 phase encoding lines with 16 cardiac cycles to fill a 128 matrix and with breath hold time dependent on heart rate	Low SNR, large experience of operatori, difficult standardization of breath hold
3D-Free breathing and breath hold coronary angiography	Segmented k-space gradient echo sequences with acquisition of a slab volume; more recently echo-planar and hybrid free-breathing sequences and with breath-hold sequences the acquisition of an entire slab with a single breath hold. Excellent images	Spatial resolution needs improving and the problem of the residual movement of the coronary arteries needs to be resolved, even though with the latest breath-old 3D sequences the problems tend to have less of an influence on imaging as faster sequences come into use, reducing the time that the coronary arteries can move in space
Spiral and Echo Planar Imaging	Compared with acquisition times of 100 ms of the latest breath-hold 3D sequences, the acquisition times these techniques are around 30-40 ms. Very high quality images	The techniques have only been used on healthy volunteers and with devices with special hardware
Contrast enhancement MR coronary angiography	If the arrival of the contrast material is optimised good images can be obtained of both the coronary arteries and the aorta-coronary by-pass, using both the synchronised and non-synchronised breath-hold technique	Correct timing of MRA is mandatory

tutte le possibilità offerte dalla tecnologia per ridurre gli artefatti ed incrementare il rapporto S/R delle coronarie.

Le principali tecniche utilizzate ed i loro limiti sono illustrati in tabella III.

Tutte le tecniche segnalate, però, con la sola eccezione di quelle che utilizzano il mdc, sono basate sul segnale elevato fornito dal sangue intracoronarico (bright-blood-coronary-MR-angiography) e sono più o meno gravate da problemi di fondo non del tutto risolti quali la difficoltà nella accurata determinazione della stenosi luminale, la sensibilità alle turbolenze di flusso, la sottostima del lume residuo, la

possibility of imaging the vessels. The advent of navigator echo and other systems for the optimisation of the acquisition in the presence of diaphragmatic movements (diminishing variance algorithm, hybrid ordered phase encoding) has enabled useful images from the clinical point of view to be obtained which are comparable with those obtained from coronary radiography. Recent literature reviews [37, 38] have provided detailed descriptions of the possibilities offered by technology for reducing artefacts and increasing the signal-to-noise ratio (SNR) of the coronary arteries. The main techniques used and their limitations are outlined in table III.

suscettibilità in presenza di eventuali componenti metalliche postchirurgiche e i falsi negativi per trombosi. Parallelamente ad esse si sta sviluppando un filone di ricerca che si basa sulla mancanza di segnale fornito dal sangue circolante come classicamente osservabile con sequenze spin-eco. Stuber M. *et al.* [39] hanno recentemente pubblicato uno studio su 12 volontari sani e 4 pazienti con cardiopatia ischemica studiati con coronarografia. Lo studio è basato sull'impiego di sequenze fast-spin-eco e di numerosi e svariati impulsi di presaturazione che permettono di abbattere completamente il segnale all'interno delle coronarie (free-breathing-black-pool-MR-angiography) fornendo immagini adeguate sia dal punto di vista iconografico, in termini di lunghezza del tratto di vaso studiabile, sia di valutazione della stenosi, del rapporto segnale/rumore (SNR) e del rapporto contrasto/rumore (CNR).

Infine ulteriori sviluppi si aspettano dai nuovi mdc intravascolari basati sull'impiego delle USPIO [40]. Le USPIO posseggono un elevato effetto T1 che si mantiene a lungo nel sangue (1-2 ore) e tale effetto sembra particolarmente efficace nello studio delle coronarie. È stato effettuato un confronto tra gadopentato dimeglumina (GdP), gadobenato dimeglumina (GdB) e USPIO; dopo somministrazione dei differenti mdc l'incremento del SNR del sangue è stato pari a 94%, 103% e 102% rispettivamente mentre per il miocardio i valori sono stati rispettivamente di 83%, 83% e 29% col risultato che l'enhancement relativo del segnale a livello delle coronarie è stato nettamente più favorevole con USPIO rispetto a GdP e GdB con conseguente maggiore evidenza delle coronarie stesse [41].

Prospettive per TCMS e RM

Abbiamo riferito come lo studio delle strutture vascolari sia con TCMS che con RM tende a fornire il maggior numero di informazioni possibili con la più bassa invasività. Rimangono però dei limiti che non permettono di escludere dalla diagnostica esami più invasivi. Da un punto di vista pratico, gli sviluppi prospettabili in TCMS sono legati all'introduzione nella pratica clinica di apparecchiature con 8, 16 e verosimilmente 32 detettori. Questo comporterà la possibilità di ottenere acquisizioni isotropiche con elevata risoluzione spaziale e riduzione degli artefatti a livello dell'addome e delle strutture venose. È lecito aspettarsi un netto incremento della qualità diagnostica delle immagini delle coronarie sia sul riconoscimento dell'entità della stenosi sia, con tutta probabilità, sul tipo di stenosi e di placca. Grazie agli spessori più sottili e ai software sempre più sofisticati sarà possibile ottenere immagini ricostruite elettronicamente in volume, superficie e MIP, sempre più sovrapponibili a quelle anatomiche, con l'ulteriore vantaggio di poter "navigare" dentro le strutture vascolari grazie alla angioscopia virtuale (fig. 9).

Parete vasale

Per la RM, oltre allo studio del cuore ottenibile con macchine sempre più efficienti, gli obiettivi nella diagnostica vascolare tendono ad una messa a punto dei problemi tecnici da superare, allo studio precipuo della parete vascolare e, in particolare, delle placche aterosclerotiche, soprattutto nel-

However, all of the abovementioned techniques, with the sole exception of the techniques which use contrast material, are based on the signal intensity provided by the intracoronary blood (bright blood coronary MRA) and are more or less beset by fundamental problems which have not been fully resolved. These include the difficulty in accurately determining the luminal stenosis, the sensitivity to flow turbulence, the underestimation of the residual lumen, the oversensitivity to the presence of post-surgical metallic components, and the false negatives created by thromboses. Alongside these techniques developments are being made based on the lack of signal supplied by circulating blood as can be observed with spin echo sequences. Stuber M. et al. [39] recently published a study on 12 healthy volunteers and four patients with ischaemic cardiopathy studied with coronary radiography. The study was based on fast spin echo sequences and numerous and various presaturation impulses which enable the signal within the coronary arteries to be completely suppressed (free breathing black pool MRA). The technique supplies adequate images both from the iconographic point of view, in terms of the length of the tract of the vessel being studied, and with regard to the assessment of the stenosis, the SNR and the contrast-to-noise ratio (CNR).

Further developments are also expected from the new intravascular contrast materials based on the use of USPIO [40, 41]. USPIO have a significant T1 effect which is maintained for a lengthy period in the blood (1-2 h), and this effect seems particularly effective in the study of the coronary arteries. A comparison was performed between gadopentate dimeglumine (Gd-DTPA), gadobenate dimeglumine (Gd-BOPTA) and USPIO; following the administration of the various contrast materials the increase in the SNR of the blood was 94%, 103% and 102%, respectively, whereas for the myocardium the values were 83%, 83% and 29%, respectively, with the result that the relative enhancement of the signal at the level of the coronary arteries was markedly more favourable with USPIO than with respect to Gd-DTPA and Gd-BOPTA, with a consequent increased visualisation of the coronary arteries themselves [41].

Prospects for MSCT and MR

We have stated that the study of vascular structures with either MSCT or MR tends to provide a significant amount of information with the lowest possible level of invasiveness. There are, nonetheless, a number of limits which do not allow more invasive diagnostic examinations to be ruled out. From the practical point of view, the likely developments in MSCT are linked to the introduction to clinical practice of devices with 8, 16 and probably 32 detectors. This will lead to the possibility of obtaining isotropic acquisitions with high spatial resolution and a reduction in artefacts at the level of the abdomen and the venous structures. A marked increase in the diagnostic quality of the images of the coronary arteries is likely, both with regard to the recognition of the extent of the stenosis, and most probably the type of stenosis and plaque. Thanks to increasingly thin slices and increasingly sophisticated software it will be possible to obtain electronically reconstructed images in volume, surface and MIP, which can be overlapped with anatomical images, with the further

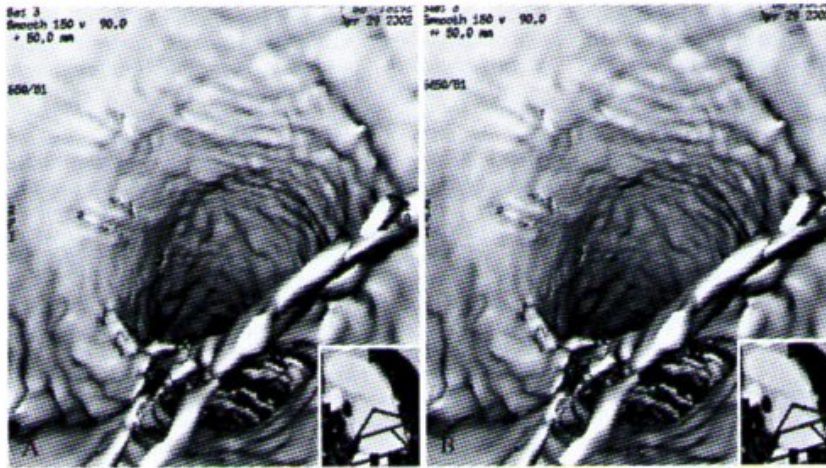


Fig. 9. — Angioscopia virtuale di dissezione aortica. Si riconosce il doppio lume a livello del tratto discendente dell'arco aortico.

Aortic dissection: virtual angiography shows the double lumen at the level of the descending portion of the aortic arch.

la identificazione di quelle in fase di rottura, causa in ogni distretto della morbilità e mortalità indotta dagli accidenti vascolari acuti [42, 43].

Dell'impiego delle USPIO si è già accennato. Tali piccole particelle ferrose vengono accumulate in tutti i siti in cui vi sia una attività fagocitaria da parte dei mononucleati comprese, pertanto, le condizioni infiammatorie delle pareti vascolari fornendo una variazione del segnale nelle sequenze T2* caratterizzata da ipointensità di segnale nel sito di interesse [44].

La TC risulta la tecnica ottimale per la valutazione della componente calcifica mentre la RM fornisce migliori informazioni sulla componente lipidica, trombotica e fibro-cellulare. Abbiamo già accennato come la TCMS stia guadagnando spazio in questo ambito per la valutazione densitometrica che permette a livello delle placche. La RM pur fornendo informazioni importanti non riesce, nell'ambito delle applicazioni tecniche normalmente in uso, a fornire quelle che dovrebbero essere considerate le caratteristiche ottimali per lo studio della parete vascolare e cioè: elevato SNR, elevato CNR, buona penetrazione del segnale in profondità, omogenea distribuzione della intensità di segnale a livello del vaso indagato. Tutti gli sforzi sono pertanto concentrati a risolvere questi punti. Da qualche tempo sono disponibili bobine phased array multiple che sono state proposte, in particolare, per lo studio delle carotidi e delle coronarie. Questo tipo di bobine forniscono, a parità di lunghezza rispetto a una bobina superficiale, un SNR decisamente più elevato e, in particolare per lo studio delle coronarie, a fronte di spessori di strato di 3-5 mm, permettono di ottenere immagini della parete vascolare con elevata risoluzione spaziale sia con la tecnica a respiro sospeso sia con l'impiego del navigatore [45, 46]. Rimangono da superare ancora i problemi legati alla profondità di esame ottenibile con tali sistemi e, pertanto, si percorre anche la strada delle bobine intravascolari (BIV). A questo tipo di bobine si sta lavorando dalla metà degli anni 90 ed il loro principale vantaggio è rappresentato dall'elevato SNR legato al piccolo voxel studiabile. Sono costituite da piccole antenne che poste su cateteri adeguati rag-

advantage of being able to "navigate" inside the vascular structures thanks to virtual angiography (fig. 9).

Vessel walls

With regard to MR, as well as the study of the heart obtainable with increasingly efficient devices, the developments in vascular diagnostics are aimed at overcoming the technical problems related to the principle study, the vascular walls and in particular the atherosclerotic plaque, especially in identifying plaque on the point of rupture, which is a cause in all regions of morbidity and mortality induced by acute vascular accidents [42, 43].

Mention has already been made of the use of USPIO. These small ferrous particles accumulate in all sites where there is phagocytic activity, also by mononucleate cells. Therefore, inflammatory conditions of the vascular walls provide a variation in the signal in T2 sequences characterized by hypointensity of the signal at the site of interest [44].*

CT is the optimal technique for the assessment of the calcified component, whereas MR provides more useful information regarding the lipidic, thrombotic and fibrocellular components. We have already stated that MSCT is gaining ground in this field owing to the densitometric assessment it enables at the level of the plaque. Although MR provides useful information, in the context of the technical applications normally in use, it is unable to provide what should be considered the optimal characteristics for the study of the vascular wall: high SNR, high CNR, good deep penetration of the signal, and homogeneous distribution of signal intensity at the level of the vessel being studied. All efforts have therefore been concentrated on resolving these points. For some time now multiple phased array coils have been available which have particularly been proposed for the study of the carotid and coronary arteries. At the same length as a surface coil, this type of coil provides a markedly higher SNR, and with particular regard to the study of the coronary arteries, in association with slice thicknesses of 3-5 mm, enables images of the vascular wall to be obtained with high spatial resolution, both with

giungono dall'interno del vaso la placca aterosclerotica permettendo non solo l'imaging ma anche la eventuale spettroscopia di essa. Il vantaggio principale delle BIV rispetto alla ecografia intravascolare è rappresentato dal migliore contrasto, che esse forniscono, dei tessuti molli e, quindi, della placca, permettendo di "vedere" al di là della placca calcifica [47]. Infine, anche gli stent vascolari sono stati impiegati come BIV presentando il vantaggio di minori artefatti a fronte di uno studio in alta definizione ancora più elevato. Inoltre lo stent inserito nel vaso può essere utilizzato come guida per l'inserimento di un vero e proprio stent ovvero per valutare l'iperplasia endoteliale responsabile di re-stenosi o occlusione dello stent stesso [48].

Non bisogna dimenticare che tali tipi di bobine, presupponendo la puntura arteriosa, sono proponibili solo in caso di procedure interventistiche sui vasi.

Un approccio completamente differente allo studio dei vasi toracici e, in particolare, dell'aorta, è rappresentato dalla messa in commercio di bobine transesofagee, caratterizzate da un bobina dritta inserita in un sondino nasogastrico di Levine modificato, con diametro di 8-12 Fr, con circuito e sistema di taratura esterno. Il sistema messo a punto al John Hopkins di Baltimora [49, 50] permette una ottimale valutazione dell'aorta toracica sia in senso longitudinale sia in senso trasversale ed un ottimale studio della parete vascolare senza i rischi legati all'ingresso nel sistema vascolare di BIV. Questo tipo di bobina, data la vicinanza con la parete aortica, permette di studiare il rapporto stress/distensione parietale di quest'ultima mediante il "tissue tagging" e permette un migliore studio della placca aterosclerotica "attiva" rispetto agli altri sistemi utilizzabili (per esempio la sottostima dell'ecografia transesofagea nella valutazione dell'estensione circonfenziale dell'aterosclerosi). Inoltre sembra che sia maggiormente accettata dal paziente rispetto alla sonda per ecocardiografia transesofagea. Ovviamente anche essa presenta dei limiti che sono rappresentati dalla non trasportabilità al letto del paziente, dal fatto che l'imaging non è in real time come per l'eco transesofagea, che vi è una enorme differenza di costi rispetto alla eco transesofagea se non è disponibile apparecchiatura RM in situ, che è comunque maggiormente invasiva rispetto alle bobine di superficie e, infine, che, a fronte della ampia capacità di studio (circa 20 cm) dell'aorta toracica, non presenta un uniforme SNR.

Conclusioni

Sembra si stia preparando una nuova affascinante era per i Radiologi nel nuovo millennio. Un grande vantaggio degli avanzamenti tecnologici delle apparecchiature sarà di poter ottenere la localizzazione di specifiche zone, lobi e di riconoscere strutture sempre più piccole in ambito toracico. A tutto questo sembra aggiungersi la possibilità di associare alle informazioni diagnostiche quelle funzionali polmonari. Diverrà un importante progresso diagnostico la possibilità di avere con un'unica tecnica informazioni sia anatomiche sia funzionali per meglio orientare le scelte terapeutiche.

Ringraziamenti. — Si ringrazia per la collaborazione tecnica il Sig. Andrea Felici TRM.

the breath hold technique and with the use of the navigator [45 46]. Problems related to the depth of the exam still need to be solved. For this reason since the middle of the 1990s studies have been carried out with intravascular coils (IVC), whose main advantage is the high SNR associated with the small voxel which can be studied. IVCs consist of small antennas which mounted on appropriate catheters reach the atherosclerotic plaque from inside the vessel, enabling not only the imaging but also the spectroscopy of the plaque. The main advantage of IVCs with respect to intravascular ultrasonography is the improved contrast that they provide of soft tissue, and therefore of the plaque, enabling the radiologist "to see" beyond the calcified plaque [47]. Lastly, vascular stents have also been used as IVCs, with the advantage of fewer artefacts when used in high definition studies. The stent inserted into the vessel can also be used as a guide for the insertion of a stent proper or to assess endothelial hyperplasia responsible for the re-stenosis or occlusion of the stent itself [48].

It should be borne in mind that these types of coils, which assume an arterial puncture, are only to be proposed in the case of intervention procedures on the vessels.

A completely different approach to the study of thoracic vessels, and in particular the aorta, regards transoesophageal coils, consisting of a loopless antenna housed inside a modified 8-12 Fr Levin gastric tube, with external matching and tuning circuitry. The system, which was developed at John Hopkins in Baltimore [49 50], provides excellent assessment of the thoracic aorta, both in the longitudinal and the transversal sense, as well as an excellent study of the vascular wall without the risks associated with entering the vascular system of IVCs. Given the proximity with the aortic wall, this type of coil enables the study of the parietal stress/distension ratio of the aorta through "tissue tagging" and enables an improved study of the "active" atherosclerotic plaque in comparison to other systems in use (such as the underestimation of the transoesophageal US in the assessment of the circumferential extension of the atherosclerosis). It also seems to be more accepted by the patient with respect to the probe for transoesophageal echocardiography. Clearly there are also limitations: the inability to bring the device to the patient's bed; the imaging does not take place in real time as with transoesophageal US; there is an enormous difference in costs with respect to transoesophageal US if an MR device is not available on site; the greater level of invasiveness with respect to surface coils; and despite its broad study capabilities (about 20 cm) of the thoracic aorta, it does not present a uniform SNR.

Conclusions

It seems that the stage has been set for a new and fascinating era for radiologists in the new millennium. A major advantage of the technological advances of the imaging devices will be the ability to obtain the localisation of specific zones and to recognise increasingly small structures in the thoracic region. Added to all of this is the possibility of associating diagnostic information with functional pulmonary data. The possibility of obtaining both anatomical and functional information with a single examination will become an important diagnostic step forward in orienting therapeutic decisions.

Acknowledgements.—Our thanks to Andrea Felici for technical assistance.

Bibliografia/References

- 1) Parker MS, Matheson TL, Rao AV *et al.*: Making the transition: the role of helical CT in the evaluation of potential acute thoracic aortic injuries. *AJR* 176: 1267-1272, 2001.
- 2) Scaglione M, Pinta A, Pinto F *et al.*: Role of contrast-enhanced helical CT in the evaluation of acute thoracic aortic injuries after blunt chest trauma. *Eur Radiol* 12: 2244-2248, 2001.
- 3) Remy-Jardin M, Remy J, Wattrinne L *et al.*: Central pulmonary thromboembolism: diagnosis with spiral volumetric CT with the single breath-hold technique-comparison with pulmonary angiography. *Radiology* 185: 381-388, 1992.
- 4) Prokop M: Multislice CT-angiography. *Eur J Radiol* 36: 86-96, 2000.
- 5) Engelke C, Schaefer-Prokop C, Sching E *et al.*: High-resolution CT and CT angiography of peripheral pulmonary vascular disorders. *Radiographics* 22: 739-764, 2002.
- 6) Katz DS, Loud PA, Bruce D *et al.*: Combined CT venography and pulmonary angiography: a comprehensive review. *Radiographics* 22: S3-S24, 2002.
- 7) Raptopoulos V, Boiselle PM: Multi-detector row spiral pulmonary angiography: comparison with single detector row spiral CT. *Radiology* 221: 606-613, 2001.
- 8) Lawler LP, Fishman EK: Multidetector row CT of thoracic disease with emphasis on 3D-volume rendering and CT angiography. *Radiographics* 21: 1257-1273, 2001.
- 9) Lawler LP, Fishman EK: Arteriovenous malformations and systemic lung vascularity: evaluation by multidetector CT and three-dimensional volume rendering. *AJR* 178: 493-495, 2002.
- 10) Hansell DM: Small-vessel diseases of the lung: CT-pathologic correlates. *Radiology* 225: 639-653, 2002.
- 11) Goodman LR, Lipchik RJ, Kuzo RS *et al.*: Subsegmental pulmonary embolism: risk after a negative helical CT pulmonary angiogram - prospective comparison with scintigraphy. *Radiology* 110: 1212-1219, 2000.
- 12) Romano L, Pinto A, Giovine S *et al.*: La tomografia computerizzata spirale come esame diagnostico di riferimento nella tromboembolia polmonare. *Radiol Med* 102: 320-324, 2001.
- 13) Ghayee B, Szapiro D, Mastore I *et al.*: Peripheral pulmonary arteries: how far in the lung does multidetector row spiral CT allow analysis? *Radiology* 219: 629-636, 2001.
- 14) Schaefer UJ, Holzkechi N, Helmberger TK *et al.*: Subsegmental pulmonary emboli: improved detection with thin collimation multirow spiral CT. *Radiology* 222: 483-490, 2002.
- 15) Roos JE, Willmann JK, Weishaupf D *et al.*: Thoracic aorta: motion artifact reduction with retrospective and prospective electrocardiography assisted multidetector row CT. *Radiology* 222: 271-277, 2002.
- 16) Bielak LF, Sheedy PF 2nd, Peyster PA: Coronary artery calcification measured at electron beam CT: agreement in dual scan runs and change overtime. *Radiology* 218: 224-229, 2001.
- 17) Callister TQ, Cool B, Raya SP *et al.*: Coronary artery disease: improved reproducibility of calcium scoring with an electron-beam CT volumetric method. *Radiology* 208: 807-814, 1998.
- 18) Kopp AF, Schroeder S, Baumbach A *et al.*: Non invasive characterisation of coronary lesion morphology and composition by multi-slice CT: first results in comparison with intracoronary ultrasound. *Eur Radiol* 11: 1607-1611, 2001.
- 19) Kopp AF, Kuttner A, Heuschmid M *et al.*: Multidetector-row CT cardiac imaging with 4 and 16 slices for coronary CTA and imaging of atherosclerotic plaques. *Eur Radiol* 12: S17-S24, 2002.
- 20) Tajik JK, Chon D, Won C *et al.*: Sub-second multisection CT of regional pulmonary ventilation. *Acad Radiol* 9: 130-146, 2002.
- 21) Winer-Muram HT, Boone JM, Brown HL *et al.*: Pulmonary embolism in pregnant patients: fetal radiation dose with helical CT. *Radiology* 224: 487-492, 2002.
- 22) Rydeberg J, Liang Y, Teague SD: Fundamentals of multichannel CT. *Radiol Clin N Am* 41: 465-474, 2003.
- 23) Prince MR: Gadolinium enhanced MR aortography. *Radiology* 191: 155-164, 1994.
- 24) Shetty AN, Shirkhoda A, Bis KG *et al.*: Contrast-enhanced three dimensional MR angiography in a single breath-hold: a novel technique. *AJR* 165: 1290-92, 1995.
- 25) Holland GA, Dougherty L, Carpenter JP *et al.*: Breath-hold ultrafast three-dimensional gadolinium enhanced MR angiography of the aorta and the renal and other visceral abdominal arteries. *AJR* 166: 971-981, 1996.
- 26) Prince MR, Narasimham DL, Jakoby WT *et al.*: Three dimensional gadolinium enhanced RM angiography of the thoracic aorta. *AJR* 166: 1387-1397, 1996.
- 27) Maki JH, Cheneved TL, Prince MR: Contrast enhanced MR angiography. *Applied Radiology* S5-20, 2000.
- 28) Kreitner KF, Kunz RP, Kalden P *et al.*: Contrast-enhanced three dimensional RM angiography of the thoracic aorta: experiences after 118 examinations with a standard dose contrast administration and different injection protocols. *Eur Radiol* 11: 1355-1363, 2001.
- 29) Redenwaldt J, Kopka L, Vosshehrich R *et al.*: 3D MR angiography of the entire aorta: modified application of the body-phased array coil for a single-shot technique. *Eur J Radiol* 33: 41-39, 2000.
- 30) Godart F, Labrot G, Devos E *et al.*: Coartation of the aorta: comparison of aortic dimensions between conventional MR imaging, 3D MR angiography, and conventional angiography. *Eur Radiol* 12: 2034-2039, 2002.
- 31) Ahlstrom KH, Johansson LO, Rodenburg JB *et al.*: Pulmonary MR angiography with ultrasmall-superparamagnetic-iron-oxide particles as a blood pool agent and a navigator echo for respiratory gating: pilot study. *Radiology* 211: 865-869, 1999.
- 32) Wang YX, Hussain SM, Krestin GP: Superparamagnetic iron oxide contrast agents: physicochemical characteristics and applications in MR imaging. *Eur Radiol* 11: 2319-2331, 2001.
- 33) Saam B, Yablonskiy DY, Gierada DS *et al.*: Rapid imaging of hyperpolarized gas using EPI. *Magn Reson Med* 42: 507-514, 1999.
- 34) Muller CJ, Schwaiblmair M, Scheider J *et al.*: Pulmonary diffusing capacity: assessment with oxygen-enhanced lung MRI. Preliminary findings. *Radiology* 222: 499-506, 2002.
- 35) Kauczor HU: MRI of the chest. Lung parenchyma. Postgraduate educational programme. Book of abstracts ECR pag 44, 2002.
- 36) Kauczor HU, Kreitner KF: MRI of the pulmonary parenchyma. MRI - from basic knowledge to advanced strategies. In: Syllabus of categorical course ECR 2000, pp 210-219. Springer Verlag 2000.
- 37) Wielopolski PA, Geuns van RJM, Feyter de PJ *et al.*: Coronary arteries. MRI - from basic knowledge to advanced strategies. In: Syllabus of categorical course ECR 2000, pp 230-253. Springer Verlag 2000.
- 38) Bunce NH, Pennell DJ: Magnetic resonance of coronary arteries. *Eur Radiol* 11: 721-731, 2001.
- 39) Stuber M, Botnar RM, Kissinger KV *et al.*: Free-breathing black-blood coronary angiography. *Radiology* 210: 278-283, 2001.
- 40) Li D, Zheng J, Weinmann HI: Contrast-enhancement MRI of coronary arteries: comparison of intra and extra-vascular contrast agents in swine. *Radiology* 218: 670-678, 2001.
- 41) Taupitz M, Schorr J, Wagner S *et al.*: Coronary RM angiography: experimental results with a monomer-stabilized blood pool contrast medium. *Radiology* 222: 120-126, 2002.
- 42) Quick HH, Ladd ME, Hilfiker PR *et al.*: Auto-perfused balloon catheter for intravascular MR imaging. *J Magn Reson Imaging* 9: 428-434, 1999.
- 43) Schimtz SA, Coupland SE, Gust R *et al.*: Super paramagnetic-iron-oxide-enhanced MRI of the atherosclerotic plaque in Watanabe hereditary hyperlipidemic rabbits. *Invest Radiol* 35: 460-471, 2000.
- 44) Botnar RM, Stuber M, Kissinger KV *et al.*: Non invasive coronary vessel wall and plaque imaging with MRI. *Circulation* 102: 2582-2587, 2000.
- 45) Fayad ZA, Fuster V, Fallon JT *et al.*: Non invasive *in vivo* human coronary artery lumen and wall imaging using black-blood MRI. *Circulation* 102: 505-510, 2000.
- 46) Quick HH, Ladd ME, Nanz D *et al.*: Vascular stents as RF antennas for intravascular RM guidance and imaging. *Magn Reson Med* 42: 738-745, 1999.
- 47) Martin AJ, Ryan LK, Godlieb AI *et al.*: Arterial imaging: comparison of high resolution US and MR imaging with histologic correlation. *Radiographics* 17: 189-202, 1997.
- 48) Quick HH, Debatin JF, Ladd ME: MR imaging of the vessel wall. *Eur Radiol* 12: 889-900, 2002.
- 49) Shunk KA, Lima JA, Heldman AW *et al.*: Transesophageal magnetic resonance imaging. *Magn Res Med* 41: 722-726, 1999.
- 50) Shunk KA, Garot J, Atalar E *et al.*: Transesophageal magnetic resonance imaging of the aortic arch and descending thoracic aorta in patients with aortic atherosclerosis. *J Am Coll Cardiol* 37: 2031-2035, 2001.

Prof. A. Orlicchio
Dipartimento di Diagnostica
per Immagini
e Radiologia Interventistica
Policlinico Universitario "Tor Vergata"
Viale Oxford, 81
00133 Roma RM
Tel. 06/20902400-1-2
Fax 06/20902404
E-mail: aorlicchio@sirm.org