

ỨNG DỤNG CỦA ZERO ECHO-TIME MRI TRONG CHẨN ĐOÁN CƠ XƯƠNG KHỚP VÀ THẦN KINH

Applications of Zero Echo-Time MRI in Musculoskeletal and Neurological Diagnosis

Nguyễn Hoàng Lâm*, Lê Thanh Phong**,
Nguyễn Huỳnh Nhật Tuấn*, Lê Văn Phước**

SUMMARY

Zero echo-time (ZTE) MRI is a new imaging technique that uses ultrafast readings to capture signals from short T2 tissues. Additional advantages of the pulse sequence include fast acquisition times, silent scanning, and artifact resistance. A powerful application of this technology is imaging the cortical bone without the use of ionizing radiation, thus presenting a viable alternative to CT for rapid screening and “one-stop” MRI. ZTE is increasingly used in musculoskeletal imaging, neuroimaging applications. In this article, we review the imaging physics of ZTE including pulse sequence options, practical limitations, and image reconstruction, image optimization including acquisition, processing, segmentation, synthetic CT generation, and artifact correction. We also introduce clinical applications of ZTE such as imaging related to malformations, trauma, tumors, and interventional procedures,...

Keywords: Zero echo-time, pulse sequence, principle, application, synthetic CT generation

I. ĐẶT VẤN ĐỀ

ZERO-TE (zero echo-time) trên cộng hưởng từ là kỹ thuật hình ảnh mới sử dụng các phép đọc cực nhanh để thu tín hiệu từ các mô có T2 ngắn. Chuỗi xung này có một số ưu điểm như thời gian khảo sát nhanh, quét im lặng và giảm ảnh giả. Một ứng dụng mạnh mẽ của công nghệ này là chụp ảnh vỏ xương mà không cần bức xạ ion hóa, đây là giải pháp thay thế khả thi cho CT để sàng lọc nhanh và chụp MRI “một cửa”. ZTE ngày càng được sử dụng nhiều trong hình ảnh cơ xương khớp, đầu và cổ, có nhiều ứng dụng hứa hẹn ở đối tượng trẻ em cần hạn chế tia X, phụ nữ mang thai và đặc biệt bệnh lý chấn thương sọ não, chấn thương cột sống ở cấp cứu. Bài viết này nhằm mục đích trình bày về nguyên lý chụp cơ bản, tối ưu hóa các thiết lập cho hình ảnh xương và các ứng dụng lâm sàng của chuỗi xung ZTE.

II. NỘI DUNG TỔNG QUAN

Bài viết được thực hiện theo phương pháp tổng quan chọn lọc có định hướng hệ thống. Nguồn tài liệu

được tìm kiếm trên các cơ sở dữ liệu quốc tế (PubMed, Scopus, Web of Science) và y văn trong nước với các từ khóa: “zero echo-time”, “ZTE MRI”, “ultrashort TE”, “bone imaging”, “synthetic CT”, “musculoskeletal MRI”, “neuroimaging”. Tiêu chí lựa chọn bao gồm: các nghiên cứu gốc, bài tổng quan, báo cáo ca hoặc nghiên cứu kỹ thuật có ứng dụng lâm sàng liên quan đến ZTE-MRI trong chẩn đoán cơ xương khớp và thần kinh. Giới hạn thời gian xuất bản trong vòng 10 năm gần đây (2015–2025).

NGUYÊN LÝ CHUỖI XUNG ZTE

ZTE là một chuỗi xung MRI dựa trên sự kích thích thể tích không chọn lọc và mã hóa không gian k (k-space) theo kiểu 3D, ly tâm. Khác với các chuỗi xung MRI thông thường, ZTE sử dụng biên độ gradient đọc được giữ không đổi trong suốt quá trình quét, chỉ thay đổi hướng nhẹ giữa các chu kỳ. Điều này giúp đạt được quét im lặng và thời gian TE ≈ 0 . Tương tự như hình ảnh TE cực ngắn (UTE), ZTE thu nhận tín hiệu từ sự suy giảm cảm ứng tự do (FID, Free Induction Decay) mà không cần tái

* Khoa Chẩn đoán hình ảnh, bệnh viện Chợ Rẫy, TP.HCM

** Bộ môn Chẩn đoán hình ảnh, Đại học Y dược TP.HCM

tạo tín hiệu qua gradient echo hay spin echo. Thuật ngữ ZTE do Weiger và cs đặt tên, dựa trên kỹ thuật RUFIS (Rotating Ultra-Fast Imaging Sequence) được phát minh từ những năm 1990 bởi Madio và Lowe [7].

Giới hạn góc lật

Trong ZTE, xung RF và gradient đọc được áp dụng đồng thời, không tách rời như trong các chuỗi MRI truyền thống. Để duy trì kích thích đồng đều bất kể hướng gradient, băng thông RF phải lớn hơn hoặc bằng băng thông đọc hình ảnh, dẫn đến yêu cầu xung RF rất ngắn. Điều này giới hạn góc lật tối đa có thể đạt được với góc lật tối đa chỉ khoảng 4°. Nếu dùng xung RF dài hơn, hình ảnh sẽ bị nhòe do sự biến đổi hướng gradient gây ra nhiễu, đặc biệt ở vùng ngoại vi trường nhìn (FOV). Gần đây, Froidevaux và cs đã phát triển phương pháp mã hóa xung mới giúp tăng góc lật bằng cách kéo dài thời gian xung RF một cách có kiểm soát [8].

Mã hóa và tái tạo hình ảnh

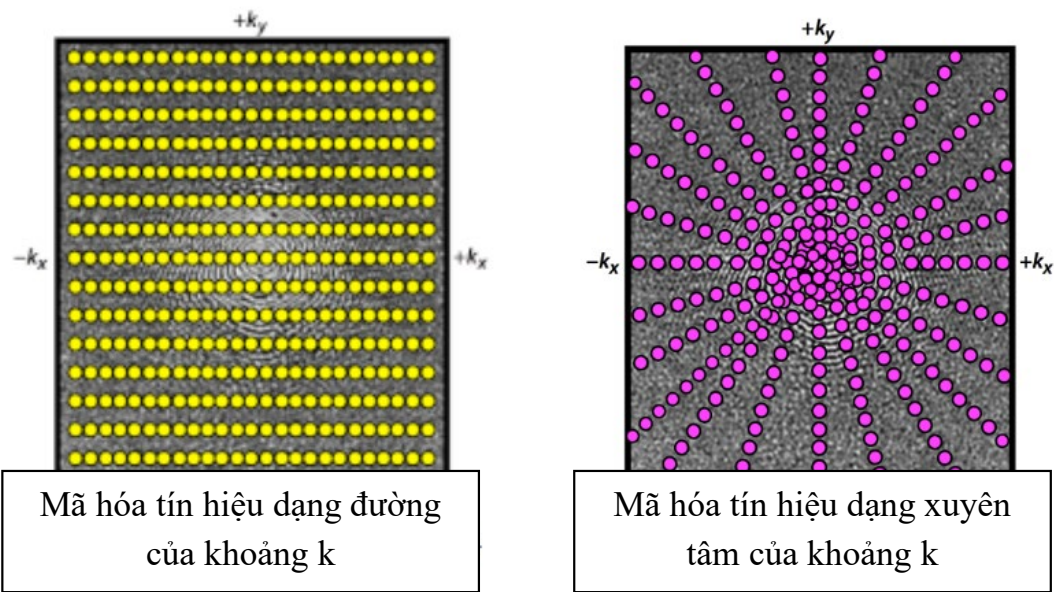
ZTE mã hóa không gian k theo dạng xuyên tâm, các tia xuyên tâm 3D xuất phát từ tâm ra ngoài, vì vậy tín hiệu thu được rất cao ở trung tâm k-space và thấp hơn về phía ngoại vi (hình 1). Kiểu lấy mẫu phi-Cartesian này yêu cầu tái tạo ảnh bằng kỹ thuật gridding 3D (hình 2).

Gần đây, một phương pháp tái tạo hình ảnh dựa trên học sâu (DL) mới đã được áp dụng cho ZTE để giảm đáng kể thời gian quét, giúp cải thiện chất lượng hình ảnh [9].

Chuẩn bị từ hóa và đa echo

Chuẩn bị từ hóa (magnetization preparation) kết hợp với đọc phân đoạn là một khái niệm dùng để tăng cường độ tương phản của các chuỗi xung bị giới hạn bởi độ tương phản. Phổ biến nhất là MP-RAGE dùng T1 phục hồi đảo ngược kết hợp với GRE phân đoạn. ZTE vốn có các đặc tính lý tưởng bao gồm TR ngắn, TE ≈ 0, mã hóa ảnh 3D nhanh, im lặng khi chụp, vì vậy kết hợp rất hiệu quả với các kỹ thuật chuẩn bị từ hóa để tăng độ tương phản mà không kéo dài thời gian chụp.

Tương tự như GRE hoặc UTE đa echo, ZTE có thể được chuyển thành chuỗi đa echo để thu được FID ban đầu, sau đó thu tiếp các echo đều đặn để khai thác thêm thông tin T2*. Ứng dụng điển hình dùng để tạo ảnh xương tương phản dương bằng cách trừ ảnh echo sau khỏi ảnh TE = 0. Sử dụng gradient lưỡng cực thông thường dẫn đến tiếng ồn âm thanh lớn. Giải pháp yên tĩnh bằng cách sử dụng chuỗi xung Looping Star khi các FID được kích thích rồi tái định hình nhiều lần theo kiểu nối tiếp thời gian, giúp giảm tiếng ồn đáng kể [10].



Hình 1. Phương pháp mã hóa tín hiệu dạng đường và dạng xuyên tâm. (Nguồn: mriquestions.com).

Khoảng trống thời gian chết

Mặc dù ZTE bắt đầu mã hóa hình ảnh ngay khi xung RF được phát ra, nhưng hệ thống MRI cần thời gian chuyển từ chế độ phát sang thu. Trong thời gian này, thường từ 8 đến 100 ms (tùy hệ thống và coil), máy không thể thu tín hiệu. Điều này dẫn đến bỏ lỡ dữ liệu ở trung tâm không gian k, đặc biệt là những điểm đầu tiên của các đường xuyên tâm trong ZTE. Hệ quả tạo ra một vùng trống hình cầu ở giữa k-space, ảnh hưởng đến độ tương phản của hình ảnh.

ỨNG DỤNG ZTE CHO HÌNH ẢNH XƯƠNG

MRI đã được chứng minh là có độ tương phản mô mềm cao với nhiều kỹ thuật chụp khác nhau, nhưng trước đây chưa từng được sử dụng rộng rãi để đánh giá cấu trúc xương, đặc biệt là vỏ xương. Nguyên nhân do vỏ xương là mô cực kỳ khô với mật độ proton thấp (~20% nước) và thời gian tồn tại tín hiệu rất ngắn ($T_2 \sim 390$ ms ở máy 3T). Các chuỗi xung MRI gradient echo thường quy hoặc các chuỗi xung spin echo với TE trong khoảng vài mili giây thường quá chậm để phát hiện tín hiệu xương có ý nghĩa.

Tái tạo hình ảnh xương

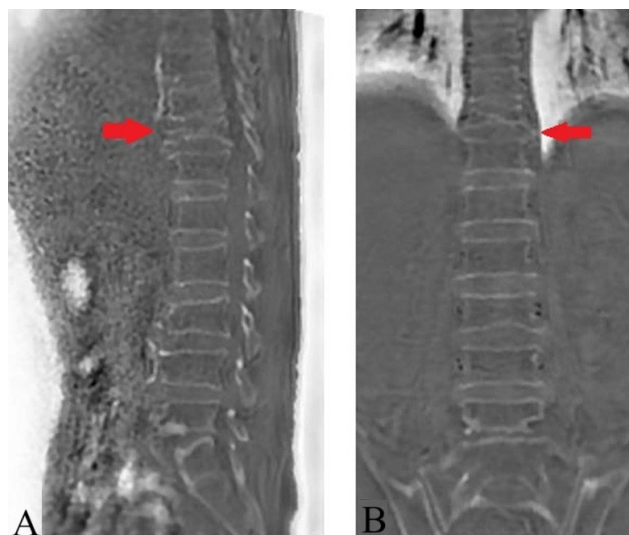
Sau khi hình ảnh ZTE được xử lý qua hiệu chỉnh độ lệch và chuẩn hóa cường độ, chất lượng hình ảnh thu được đủ tốt để thực hiện phân đoạn xương chính xác. Dựa trên biểu đồ cường độ ảnh ZTE, có 3 vùng rõ ràng gồm không khí (tín hiệu thấp nhất), xương (vùng giữa, rộng) và mô mềm (tín hiệu cao hơn). Phân đoạn không khí, mô và xương có thể thu được thông qua ngưỡng cường độ và quá trình sửa các hiệu ứng thể tích một phần. Tín hiệu ZTE xương và CT xương có tương quan tuyến tính, vì vậy ánh xạ tuyến tính đơn giản đủ tạo ra hình ảnh CT tổng hợp ảo có giá trị sử dụng thực tế. Điều này có thể được sử dụng cho các ứng dụng cơ bản như lập kế hoạch xạ trị chỉ cần MRI, hiệu chỉnh suy giảm PET/MRI.

Ảnh giả và khắc phục

Mỡ và nước có tần số cộng hưởng khác nhau nên gây ra lệch pha trong quá trình thu tín hiệu. Trong ZTE, do thu ảnh theo xuyên tâm 3D, nên các tín hiệu mỡ –

nước bắt đầu in-phase tại tâm không gian k, nhưng sẽ lệch pha dần trong suốt quá trình đọc dữ liệu. Các hiện tượng dịch chuyển hóa học gây ra hình ảnh bị mờ và nhiễu tín hiệu tại các giao diện mỡ - nước, làm giảm độ rõ nét của vỏ xương. Những hiện tượng này có thể được giảm thiểu bằng cách thay đổi các thông số hình ảnh (tăng băng thông, giảm độ phân giải không gian, giảm cường độ trường B_0) và/hoặc thực hiện tái tạo pha dựa trên phân tích dịch chuyển hóa học.

Kết hợp ZTE với các kỹ thuật UTE truyền thống như echo-subtraction, cụ thể bao gồm chụp 2 ảnh, một tại TE = 0 (xương và mô mềm) và một tại TE trễ hơn (mô mềm), trừ 2 ảnh để chỉ còn lại tín hiệu xương. Ưu điểm của phương pháp này giúp xương hiển thị rõ, mô mềm bị triệt tiêu. Tuy nhiên có hạn chế là thời gian quét dài, phức tạp trong hiệu chỉnh hình ảnh.



Hình 2. Hình MRI xương với chuỗi xung ZTE được tái tạo trên các mặt phẳng khác nhau (hình A, B) cho thấy gãy xẹp đốt sống T11.

(Nguồn: Bệnh viện Chợ Rẫy)

CÁC ỨNG DỤNG LÂM SÀNG ZTE

Với đặc điểm nhanh, 3D, im lặng và chống hiện tượng nhiễu, ZTE là một giải pháp thay thế khả thi cho CT để chụp vỏ xương mà không cần bức xạ ion hóa. Trong loạt ca bệnh trước đây bao gồm nhiều ứng dụng lâm sàng, ZTE và CT cho thấy mối tương quan chẩn

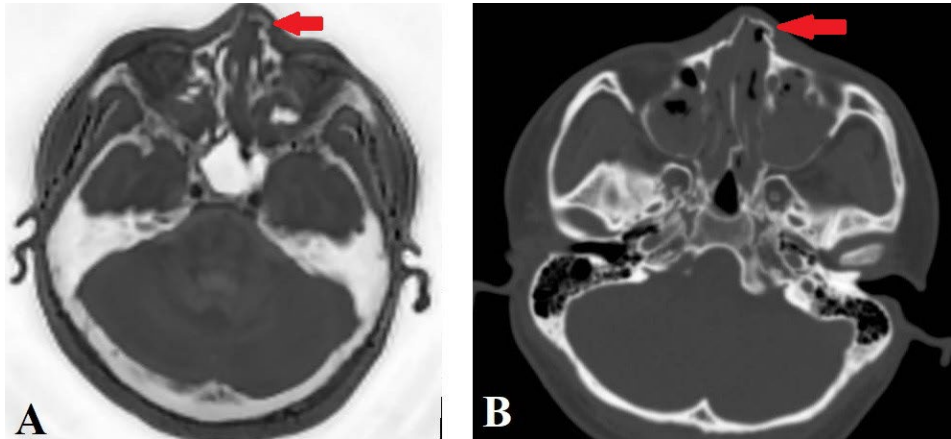
đoán tốt giữa các bác sĩ Chẩn đoán hình ảnh được đào tạo. Những hạn chế thực tế hiện tại của ZTE bao gồm SNR vốn thấp từ tín hiệu xương bị loãng xương và độ phân giải không gian hạn chế của các nền tảng MRI hiện tại (0,8–1 mm, so với 0,5–0,6 mm ở CT).

Dựa trên tốc độ chụp nhanh của ZTE, kỹ thuật này có tiềm năng ứng dụng trong lâm sàng để sàng lọc ban đầu trong bối cảnh chấn thương cấp tính (đánh giá gãy xương và chấn thương nội sọ), đánh giá tình trạng dinh liên sớm và tăng áp lực nội sọ hoặc loại trừ bệnh lý. Đối với các bệnh lý cần đánh giá toàn diện hơn, ZTE cũng

có thể được sử dụng để thu thập thông tin về xương như một phần của MRI “một cửa”. Cách tiếp cận này đặc biệt có thể cần thiết trong các trường hợp thường yêu cầu cả MRI và CT ví dụ như dị tật sọ mặt, chấn thương, khối u và các thủ thuật can thiệp. Các lần chụp MRI theo dõi tái khám với ZTE đặc biệt có giá trị đối với những bệnh nhân cần giảm thiểu hoặc loại bỏ tiếp xúc với bức xạ: trẻ em, phụ nữ mang thai, bệnh nhân có cơ địa ung thư,...

Trên thế giới, đã có một số nghiên cứu tiêu biểu về ứng dụng ZTE MRI trong chẩn đoán cơ xương khớp và thần kinh

Tác giả	Đối tượng	Chủ đề	Kết quả chính	Kết luận
Cho SB et al. (2019) [2]	40 bệnh nhân chấn thương sọ não	So sánh ZTE sọ với CT	ZTE phát hiện gãy xương sọ tương đồng CT; độ nhạy cao, đặc biệt ở gãy đường lớn	Một số gãy nhỏ <1 mm vẫn khó phát hiện
Kralik SF et al. (2019) [3]	61 trẻ nghi ngờ chấn thương sọ não do bạo hành	Black-bone MRI 3D (ZTE tương tự)	Phát hiện gãy sọ chính xác, giảm nhu cầu CT ở trẻ em	Lợi ích giảm tia xạ
Lu A et al. (2019) [4]	25 bệnh nhân dị tật sọ mặt	Đánh giá sọ mặt bằng ZTE	Tương quan hình ảnh ZTE và CT cao	MRI ‘một cửa’ hữu ích
Jans LB et al. (2021) [5]	68 bệnh nhân nghi ngờ viêm khớp cùng chậu	So sánh CT tổng hợp từ ZTE với MRI thường quy	Synthetic CT từ ZTE phát hiện tổn thương cấu trúc tốt hơn T1W	Tăng độ tin cậy chẩn đoán viêm khớp
Wiesinger F & Ho ML (2022) [1]	Tổng quan 95 bài báo	Ứng dụng ZTE trong đầu – cổ	Khẳng định tiềm năng thay thế CT trong nhiều chỉ định	Đề xuất ứng dụng lâm sàng rộng rãi
Aydingöz Ü et al. (2022) [6]	Tổng quan chuyên sâu	Cơ xương khớp	Hướng dẫn tối ưu hóa và nhận diện bất kỹ thuật	Tài liệu tham khảo thực hành

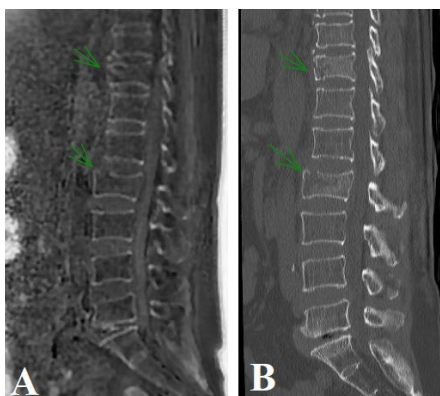


Hình 3. Hình chụp sọ mặt ở bệnh nhân chấn thương sọ não. Hình A với chuỗi xung MRI xương và hình B chụp CLVT cho thấy gãy xương mũi (mũi tên). (Nguồn: Bệnh viện Chợ Rẫy).

Chấn thương

Trong bối cảnh chấn thương cấp tính, CT đầu và cột sống cổ thường được chỉ định để phân loại nhanh các trường hợp gãy xương và xuất huyết. Khi MRI ngày càng có sẵn trong các khoa cấp cứu, có thể hình dung rằng MRI nhanh với ZTE có thể trở thành phương pháp tiếp cận tuyến đầu thay thế để chụp ảnh chấn thương lớn. Đối với những bệnh nhân có các phát hiện phức tạp, chẳng hạn như chấn thương sọ não hoặc chấn thương dây chằng, MRI nhanh sau đó có thể được nâng cấp trực tiếp thành MRI “một cửa” toàn diện theo quyết định của bác sĩ Chẩn đoán hình ảnh (hình 3, 4).

Trong trường hợp loạt chấn thương cấp tính, ZTE mô tả được các vết gãy xương ở vòm sọ, xương mặt, hàm và cột sống. Tuy nhiên có thể bỏ sót các gãy xương không di lệch hoặc gãy xương nhỏ <1 mm [2]. Với những cải tiến liên tục về phần cứng và phần mềm MRI, ZTE có khả năng sẽ có thể phân định cấu trúc vi mô xương, dựa trên các mô hình thử nghiệm. Ở giai đoạn bán cấp đến mạn tính, MRI với ZTE hữu ích để đánh giá gãy xương lành so với không lành, tổ chức tự máu và cốt hóa.



Hình 4. Hình chụp cột sống thắt lưng ở bệnh nhân chấn thương cột sống. Hình A với chuỗi xung MRI xương và hình B chụp cắt lớp vi tính cho thấy gãy đốt sống T11 và L2. (Nguồn: Bệnh viện Chợ Rẫy).

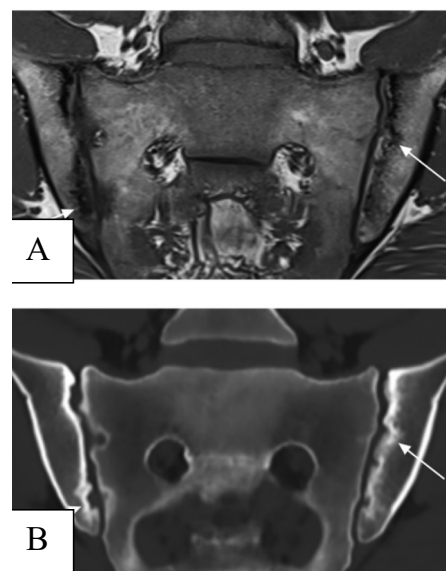
U, viêm, nhiễm trùng

ZTE thường được sử dụng trong nha khoa để đánh giá cấu trúc răng, mọc xương hàm và tái tạo xương. Với độ tương phản mô mềm vượt trội và kỹ thuật không ion hóa của MRI, phương pháp này có những ưu điểm rõ

ràng so với CT trong việc đánh giá viêm tủy xương, hoại tử xương, bệnh khớp và nghi ngờ khối u hàm có liên quan đến tủy và các dấu hiệu niêm mạc.

ZTE của các cấu trúc mặt và cổ (ổ mắt, khoang xoang mũi, nền sọ, đường thở) khó khảo sát hơn so với ở hộp sọ và hàm. Các yếu tố có thể làm giảm chất lượng hình ảnh bao gồm nhiều giao diện xương - không khí, tiết dịch niêm mạc và giải phẫu mô mềm phức tạp. Ở những bệnh nhân cần theo dõi kiểm tra bằng hình ảnh, MRI “một cửa” với ZTE là một công cụ lựa chọn đầy hứa hẹn để chẩn đoán, lập kế hoạch điều trị. Phương pháp tiếp cận này cho phép đánh giá tích hợp vỏ xương, tủy xương và mô mềm - lý tưởng cho các bệnh lý phức tạp có thể biểu hiện sự liên quan thâm nhiễm và lan rộng quanh dây thần kinh.

Đánh giá các tổn thương cấu trúc ở khớp cùng chậu có thể cải thiện độ chính xác trong chẩn đoán viêm cột sống dính khớp. Tuy nhiên, các tổn thương cấu trúc, chẳng hạn như xói mòn, rất khó đánh giá trên hình ảnh T1W thường quy. CT tổng hợp của khớp cùng chậu dựa trên MRI xương có thể chẩn đoán tốt hơn trong việc phát hiện các tổn thương cấu trúc ở những bệnh nhân nghi ngờ bị viêm khớp cùng chậu so với hình ảnh T1W (hình 5).



Hình 5. Hình ảnh viêm khớp cùng chậu trên T1W (hình A) và hình CT tổng hợp dựa trên MRI xương (hình B).

Nguồn: Jans, L. B., (2021)

Thủ thuật can thiệp

Các phương pháp tiếp cận lập thể đòi hỏi phải định vị 3D chính xác dựa trên các mốc xương cứng không biến dạng để thực hiện nhiều can thiệp khác nhau như sinh thiết, tiêm, kích thích, cấy ghép, phẫu thuật xạ trị, đốt hoặc cắt bỏ. Trong hầu hết các trường hợp, CT và MRI được thực hiện riêng biệt, sau đó được chồng lên nhau về mặt toán học bằng cách sử dụng các gói phần mềm khác nhau. Phương pháp tiếp cận này tận dụng chi tiết xương và độ phân giải không gian cao của CT, cùng với độ tương phản mô mềm của MRI. Tuy nhiên, chuyển động của bệnh nhân trong hoặc giữa các lần kiểm tra có thể làm gián đoạn quá trình ghi lại hình ảnh và dẫn đến nhầm mục tiêu không gian không chính xác. MRI “một cửa” với ZTE mà trong đó thông tin về mô mềm và xương được thu thập trong một lần chụp ảnh duy nhất mang lại một số lợi thế thực tế cho liệu pháp hướng dẫn hình ảnh.

Trong phòng phẫu thuật, đơn vị MRI trong khi phẫu thuật cho phép hướng dẫn hình ảnh theo thời gian thực. Trong quá trình theo dõi sau phẫu thuật, ZTE ít tạo ra ảnh giả hơn khi đánh giá kim, ống thông,... Ngoài ra, ZTE có thể được thực hiện trước và sau khi tiêm thuốc tương phản từ với tác động không đáng kể đến chi tiết xương.

Tóm lại, bên cạnh các ưu điểm kỹ thuật, một khía cạnh quan trọng cần nhấn mạnh là tác động lâm sàng của ZTE MRI. Kỹ thuật này không nhằm thay thế hoàn toàn CT, mà đóng vai trò như một lựa chọn ưu tiên trong những nhóm bệnh nhân đặc biệt. Cụ thể, ZTE đặc biệt hữu ích ở trẻ em, phụ nữ mang thai, hoặc những bệnh nhân cần theo dõi nhiều lần, nhờ khả năng hạn chế phơi nhiễm bức xạ. Trong bối cảnh chấn thương sọ não hoặc chấn thương cột sống, ZTE cho phép khảo sát đồng thời cấu trúc xương và mô mềm, mở ra tiềm năng triển khai MRI “một cửa” giúp tiết kiệm thời gian và giảm nhu cầu chỉ định thêm CT. Ngoài ra, trong các thủ thuật can thiệp hoặc xạ trị, ZTE có thể cung cấp thông tin về mốc xương

mà không cần bổ sung thêm chụp CT, góp phần đơn giản hóa quy trình lâm sàng..

Hạn chế

Các rào cản hiện tại đối với việc triển khai rộng rãi ZTE bao gồm nhận thức và khả năng tiếp cận của bệnh nhân, hiểu biết của bác sĩ Chẩn đoán hình ảnh, nhận thức của bác sĩ lâm sàng về giá trị kỹ thuật này, hạn chế phần cứng/phần mềm MRI vốn có và các thuật toán xử lý hậu kỳ CT tổng hợp. Khi công nghệ ZTE tiếp tục cải thiện, các nghiên cứu hiệu quả so sánh quy mô lớn sẽ giúp định lượng giá trị chẩn đoán tương đối, kết quả điều trị và hiệu quả về chi phí so với CT.

Ở bối cảnh Việt Nam, việc triển khai rộng rãi ZTE MRI vẫn còn đối mặt với nhiều thách thức. Thứ nhất, về thiết bị, không phải tất cả hệ thống MRI hiện hành đều hỗ trợ ZTE; kỹ thuật này chủ yếu khả dụng trên các máy đời mới với phần mềm chuyên dụng. Thứ hai, chi phí đầu tư nâng cấp phần mềm và phần cứng còn cao, trong khi mức chi trả của bảo hiểm y tế cho chụp MRI hiện chưa tính đến ZTE, tạo rào cản trong ứng dụng thực tế. Thứ ba, nguồn nhân lực cũng là một yếu tố then chốt: bác sĩ chẩn đoán hình ảnh và kỹ thuật viên cần được đào tạo bài bản để làm quen với protocol, ảnh giả đặc thù, cũng như quy trình tái tạo ảnh tổng hợp.

III. KẾT LUẬN

ZTE MRI là một giải pháp thay thế hữu hiệu cho CT để đánh giá vỏ xương mà không cần sử dụng bức xạ ion hóa. Kỹ thuật này mang lại những lợi thế về thời gian kiểm tra nhanh, quét im lặng và khả năng chống hiện tượng nhiễu. Các ứng dụng của ZTE ở vùng đầu và cổ trước đây bị hạn chế bởi giải phẫu và bệnh lý phức tạp, tuy nhiên hiện nay đã và đang được cải thiện. ZTE không thay thế hoàn toàn CT, nhưng có thể là lựa chọn thay thế trong một số nhóm bệnh cảnh đặc biệt. Việc áp dụng rộng rãi kỹ thuật trên lâm sàng sẽ được thúc đẩy nhanh nhờ những cải tiến về mặt kỹ thuật và hậu xử lý, phân tích hiệu quả về chi phí, tăng cường đào tạo.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Wiesinger, F., & Ho, M. L. (2022). Zero-TE MRI: principles and applications in the head and neck. *The British Journal of Radiology*, 95(1136), 20220059.
2. Cho, S. B., Baek, H. J., Ryu, K. H., Choi, B. H., Moon, J. I., Kim, T. B., ... & Hwang, M. J. (2019). Clinical feasibility of zero TE skull MRI in patients with head trauma in comparison with CT: a single-center study. *American Journal of Neuroradiology*, 40(1), 109-115.
3. Kralik, S. F., Supakul, N., Wu, I. C., Delso, G., Radhakrishnan, R., Ho, C. Y., & Eley, K. A. (2019). Black bone MRI with 3D reconstruction for the detection of skull fractures in children with suspected abusive head trauma. *Neuroradiology*, 61, 81-87.
4. Lu, A., Gorny, K. R., & Ho, M. L. (2019). Zero TE MRI for craniofacial bone imaging. *American Journal of Neuroradiology*, 40(9), 1562-1566.
5. Jans, L. B., Chen, M., Elewaut, D., Van den Bosch, F., Carron, P., Jacques, P., ... & Herregods, N. (2021). MRI-based synthetic CT in the detection of structural lesions in patients with suspected sacroiliitis: comparison with MRI. *Radiology*, 298(2), 343-349.
6. Aydıngöz, Ü., Yıldız, A. E., & Ergen, F. B. (2022). Zero echo time musculoskeletal MRI: technique, optimization, applications, and pitfalls. *Radiographics*, 42(5), 1398-1414.
7. Madio, D. P., & Lowe, I. J. (1995). Ultra-fast imaging using low flip angles and FIDs. *Magnetic resonance in medicine*, 34(4), 525-529.
8. Seevinck, P. R., Seppenwoolde, J. H., Zwanenburg, J. J., Nijsen, J. F., & Bakker, C. J. (2008). FID sampling superior to spin-echo sampling for T-based quantification of holmium-loaded microspheres: Theory and experiment. *Magnetic Resonance in Medicine: An Official Journal of the International Society for Magnetic Resonance in Medicine*, 60(6), 1466-1476.
9. Lebel, R. M. (2020). Performance characterization of a novel deep learning-based MR image reconstruction pipeline. *arXiv preprint arXiv:2008.06559*.
10. Wiesinger, F., Menini, A., & Solana, A. B. (2019). Looping star. *Magnetic resonance in medicine*, 81(1), 57-68.

TÓM TẮT

Zero echo-time (ZTE) MRI là một kỹ thuật hình ảnh mới sử dụng các phép đọc cực nhanh để thu tín hiệu từ các mô T2 ngắn. Các lợi thế bổ sung của chuỗi xung bao gồm thời gian chụp nhanh, quét im lặng và khả năng chống ảnh giả. Một ứng dụng mạnh mẽ của công nghệ này là chụp vỏ xương mà không sử dụng bức xạ ion hóa, do đó có thể là một giải pháp thay thế khả thi cho CT để sàng lọc nhanh và MRI “một cửa”. ZTE ngày càng được sử dụng nhiều trong chụp ảnh cơ xương khớp, các ứng dụng chụp ảnh thần kinh. Trong bài viết này, chúng tôi xem xét vật lý hình ảnh của ZTE bao gồm các tùy chọn chuỗi xung, các hạn chế thực tế và tái tạo hình ảnh., tối ưu hóa hình ảnh bao gồm thu thập, xử lý, phân đoạn, tạo CT tổng hợp và khắc phục ảnh giả. Chúng tôi cũng giới thiệu các ứng dụng lâm sàng của ZTE ví dụ như hình ảnh liên quan dị tật, chấn thương, khối u và các thủ thuật can thiệp,...

Từ khóa: Zero echo-time, chuỗi xung, nguyên lý, ứng dụng, tạo hình CT tổng hợp

Người iên hệ: Nguyễn Hoàng Lâm. Email: nguyenhoanglam.nt@gmail.com

Ngày nhận bài: 19/08/2025. Ngày nhận phản biện: 29/08/2025. Ngày chấp nhận đăng: 10/11/2025