

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

عنوان: شاخص‌های مکانیکی غیرخطی برای تمایز شکستگی لگن با مدل‌های المان محدود غیرخطی مبتنی

بر 3D-DXA

استاد راهنما: دکتر فخاری راد

مجله: **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology (2025)**

ارئه دهنده: مهدی شعاعی



فهرست مطالب

1. صورت مسئله و اهمیت آن
2. راهکار ها پیشرفته موجود
3. هدف مطالعه
4. مواد و روش ها : گروه مورد مطالعه و تصاویر
5. مواد و روش ها - ساخت مدل D-DXA3 و FE
6. شاخص های مکانیکی استخراج شده
7. آنالیز آماری
8. تشخیص (AUROC) شاخص های اصلی
9. تفسیر نتایج
10. مقایسه با مطالعات پیشین
11. نقاط قوت مطالعه
12. محدودیت ها
13. نتیجه گیری نهایی

صورت مسئله و اهمیت آن

- ❑ پوکی استخوان: بیماری خاموش، کاهش توده و قدرت استخوان، منجر به شکستگی‌های شکننده.
- ❑ استاندارد فعلی DXA: (دو بعدی و اندازه‌گیری $aBMD$ (چگالی ماده معدنی سطحی)).
- ❑ محدودیت $aBMD$: عدم در نظر گرفتن توزیع حجمی چگالی ($vBMD$) .
- ❑ نیاز: ابزارهای پیش‌بینی دقیق‌تر خطر شکستگی.

راهکارهای پیشرفته موجود

- مدل‌های المان محدود (FE) ابزار امیدوارکننده برای تخمین قدرت استخوان.
- انواع مدل‌های FE:
 - مبتنی بر QCT: دقت بالا، اما هزینه و دوز پرتوگیری زیاد.
 - مبتنی بر DXA دوبعدی (2D): محدودیت در اطلاعات حجمی.
 - مبتنی بر DXA سه‌بعدی (3D-DXA): پتانسیل غلبه بر محدودیت‌ها با استفاده از تصاویر استاندارد DXA.

هدف مطالعه

- ارزیابی توانایی مدل‌های FE غیرخطی مبتنی بر 3D-DXA برای تمایز شکستگی لگن.
- معرفی و بررسی شاخص‌های مکانیکی جدید (غیرخطی) مشتق شده از منحنی نیرو-جابجایی.
- مقایسه قدرت تشخیص این شاخص‌ها با aBMD و پارامترهای 3D-DXA

مواد و روش‌ها - گروه مورد مطالعه و تصاویر

- ❖ طراحی مطالعه: مورد-شاهدی گذشته‌نگر.
- ❖ شرکت‌کنندگان: 128 زن مسن (64 شکستگی لگن، 64 گروه کنترل سالم).
- ❖ تصویربرداری DXA: فمور
- ❖ ویژگی‌هایی مثل: سن، قد، وزن، BMI) بین دو گروه تفاوت چندانی وجود نداشت.

مواد و روش ها - ساخت مدل 3D-DXA و FE

ابتدا تصاویر DXA با نرم افزار **3D-Shaper** به یک مدل سه بعدی اختصاصی برای هر بیمار تبدیل شده. سپس مدل سازی FE انجام شد و برای بخش های قشری و تراکولار خواص ماده تخصیص یافت. رفتار مکانیکی استخوان به صورت **الاستیک-پلاستیک کامل** مدل شد تا رفتار غیرخطی استخوان هنگام شکست شبیه سازی شود.

شاخص‌های مکانیکی استخراج شده (1)

❖ حداکثر نیرویی که استخوان قبل از شکست تحمل میکند : F_o

جابجایی در شکست (Do)

انرژی غیرخطی: کل انرژی جذب شده تا نقطه شکست.

❖ شکل: منحنی نیرو-جابجایی و تعیین شاخص‌ها

❖ از تحلیل غیر خطی Fe این شاخصه ها به عنوان شاخصه اصلی استخراج شد

شاخص‌های مکانیکی استخراج شده (2)

- از تحلیل خطی تکه‌ای نیز این شاخص‌ها بدست می‌آید
- نیروی الاستیک خطی ($F1$) و جابجایی الاستیک خطی: ($D1$) مرتبط با سفتی.
 - انرژی الاستیک خطی.
 - تغییر شکل غیرخطی: ($D2$) تغییر شکل پس از تسلیم.
 - جابجایی باقیمانده: ($D3$) جابجایی ماندگار پس از تخلیه بار (نشانه کرنش پلاستیک).
- انرژی تلف شده و انرژی باقیمانده

آنالیز آماری

- برنامه‌ریزی مجدد از طریق مونتاژ مجدد
- هدف: ارزیابی قدرت تمایز شاخص‌ها.
- اعتبارسنجی: اعتبارسنجی متقابل ترک-یکی-بیرون. (Leave-One-Out Cross-Validation)

شاخص‌های اصلی (AUROC) - نتایج - قدرت تشخیص



BLE 4 AUROC calculated using leave-one-out cross-validation.

Methods			Descriptors	AUROC	P-value*		
					(Versus aBMD)	(Versus trabecular vBMD)	
DXA			aBMD	0.69	-	0.192	
3D-DXA measurement			Integral vBMD	0.71	0.206	0.433	
			Trabecular vBMD	0.72	0.192	-	
			Cortical aBMD	0.66	0.129	0.088	
FE-Based Mechanical Descriptors	Nonlinear FE Analysis		Strength	0.72	0.275	0.994	
			Displacement	0.78	0.057	0.14	
			Nonlinear Energy	0.52	0.0006	0.0004	
	Piecewise Linear Analysis	Linear Elastic-Based	Linear Elastic Force	0.72	0.230	0.959	
			Linear Elastic Displacement	0.72	0.583	0.979	
			Linear elastic energy	0.65	0.255	0.116	
		Nonlinear Plastic-Based	Nonlinear Deformation	0.79	0.039	0.099	
			Residual Displacement	0.79	0.033	0.085	
			Dissipated Energy	0.51	0.035	0.0083	
			Residual Energy	0.63	0.162	0.078	
	Combination of Mechanical Descriptors		Strength-Based Descriptors	Strength + Displacement	0.79	0.002	0.022
				Strength + Nonlinear Energy	0.79	0.003	0.030
				Strength + Nonlinear Deformation	0.79	0.002	0.026
				Strength + Residual Displacement	0.80	0.001	0.016
Strength + Dissipated Energy				0.79	0.002	0.022	
Strength + Residual Energy				0.73	0.100	0.621	

aBMD استاندارد: (AUROC = 0.69)

vBMD تراپیکولار = بهترین پارامتر (AUROC = 0.72): (D-DXA)

استحکام (AUROC = 0.72): (F0) مشابه vBMD تراپیکولار

جابجایی باقیمانده (AUROC = 0.79): (D3) بهبود معنی‌دار نسبت به (aBMD)

ترکیب استحکام + جابجایی باقیمانده = (AUROC = 0.80): (F0+D3)

0.80 بهترین نتیجه

تفسیر نتایج (1)

- ❖ جابجایی باقیمانده (D3) به عنوان یک شاخص مکانیکی جدید و قدرتمند معرفی شد.
- ❖ این شاخص حجم عناصر دچار تغییر شکل پلاستیک غیرقابل بازگشت را نشان می‌دهد.
- ❖ ترکیب آن با استحکام، تصویر کامل‌تری از رفتار مکانیکی استخوان (تبادل انرژی الاستیک و پلاستیک) ارائه می‌دهد.
- ❖ این ترکیب نسبت به استاندارد طلایی (aBMD) و پارامترهای 3D-DXA بهبود قابل توجهی در تشخیص خطر شکستگی نشان داد.

تفسیر نتایج (2)

- مزیت مدل غیرخطی: نسبت به مدل‌های خطی، رفتار واقعی‌تر استخوان را در حین شکست شبیه‌سازی می‌کند.
- برتری رویکرد 3D-DXA نسبت به QCT: استفاده از تصاویر DXA موجود، بدون دوز پرتو اضافی، هزینه کمتر، امکان پذیرش بالینی بیشتر.
- برتری نسبت به مدل‌های FE دوبعدی مبتنی بر DXA: در نظر گرفتن هندسه و توزیع حجمی چگالی.

مقایسه با مطالعات پیشین

همخوانی با مطالعات QCT: مدل‌های غیرخطی عملکرد بهتری دارند.

- بهبود نسبت به مطالعه Grassi و همکاران (2023) که از مدل خطی استفاده کردند.
- تأیید اهمیت در نظر گرفتن چندین جهت بارگذاری (سقوط) برای ارزیابی دقیق‌تر خطر.

نقاط قوت مطالعه

- ✓ استفاده از مدل FE غیرخطی خاص بیمار.
- ✓ معرفی شاخص‌های مکانیکی جدید با تفسیر بیومکانیکی واضح.
- ✓ استفاده از فناوری 3D-DXA بالینی و تأییدشده نرم‌افزار (3D-Shaper) زمان پردازش نسبتاً کوتاه حدود 15 دقیقه برای شبیه‌سازی FE، مناسب برای محیط بالینی.
- ✓ اعتبارسنجی قوی با روش متقاطع.

محدودیت‌ها

- با حجم نمونه متوسط ($n=128$)
- نیاز به تأیید در مطالعات آینده‌نگر با جمعیت بزرگتر.
- مدل الاستیک-پلاستیک، ساده‌سازی رفتار پیچیده شکست استخوان است.
- عدم وجود اطلاعات محل دقیق شکستگی (گردن ران در مقابل تروکانتریک).
- بازسازی چگالی سر استخوان ران در DVA با محدودیت مواجه است

نتیجه گیری نهایی (1)

- مدل سازی FE غیرخطی مبتنی بر 3D-DXA می تواند قدرت تشخیص شکستگی لگن را نسبت به aBMD استاندارد به طور معنی داری بهبود بخشد.
- شاخص "جابجایی باقیمانده (D3)" یک شاخص مکانیکی امیدوارکننده است که رفتار غیرخطی (پلاستیک) استخوان را منعکس می کند.

نتیجه گیری نهایی

- ترکیب شاخص "استحکام" با "جابجایی باقیمانده" ($Fo+D3$) قوی ترین پیش بینی کننده در این مطالعه بود.
- این رویکرد، با استفاده از تصاویر روتین DXA و افزودن تحلیل FE، می تواند ارزیابی خطر شکستگی را شخصی سازی و دقیق تر کند.
- پتانسیل ادغام در جریان کاری بالینی فعلی برای مدیریت بهتر پوکی استخوان.

چکیده:

در نهایت این مطالعه به ما نشان میدهد که ساخت مدل های FE غیر خطی از تصاویر روتین DXA و استخراج داده های جدید مثل D3 می تواند در تمایز شکستگی های لگن بسیار کارساز باشد و عملکرد بهتری از شاخص های سنتی مانند aBMD داشته باشد.

Acknowledgement

