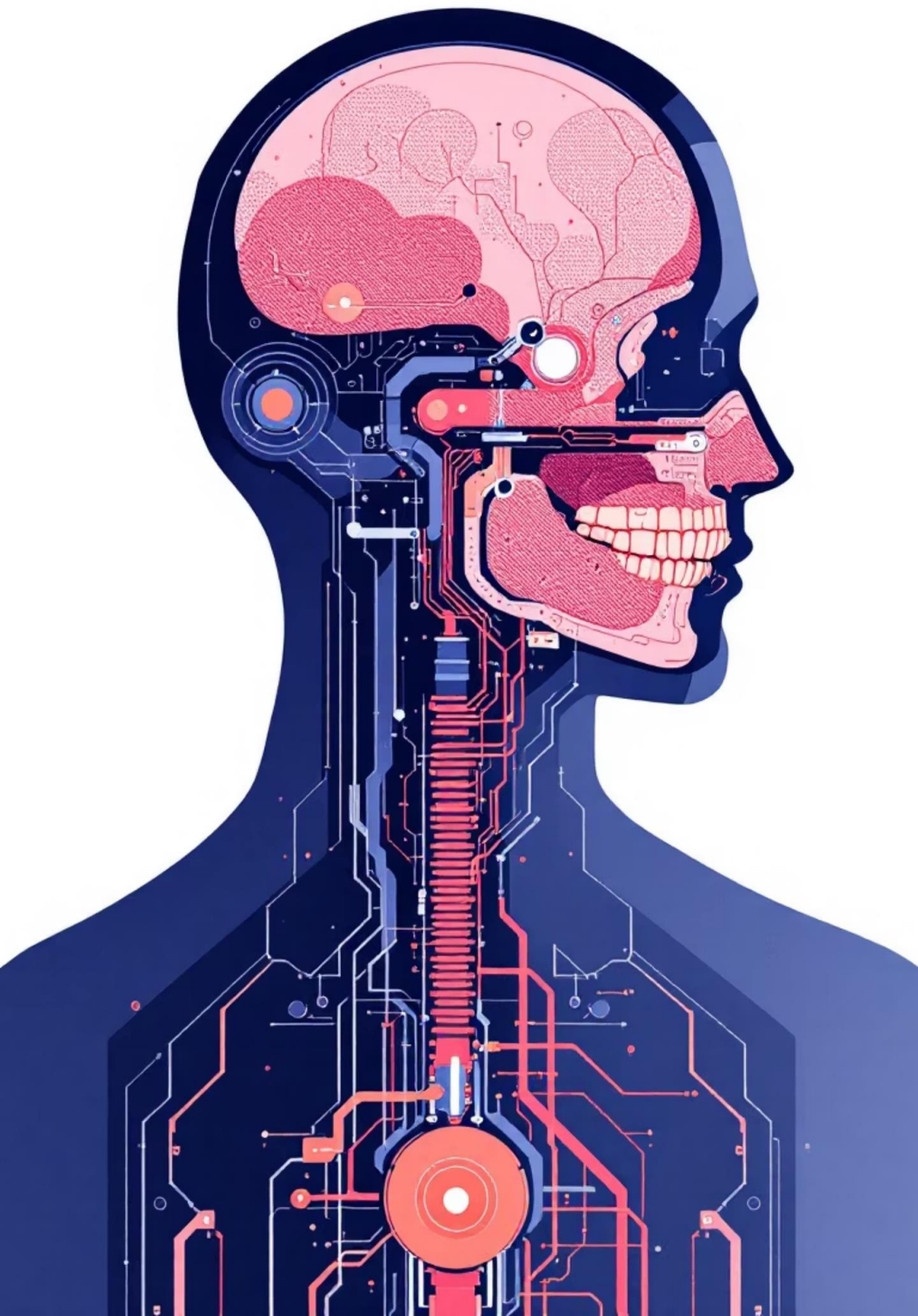


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



طراحی یک مدل **Digital Twin** برای تحلیل عملکرد عضلانی-اسکلتی انسان

رضا موسی پور

40212340106198.

دانشگاه : علوم تحقیقات

استاد : آقای فخاری

راد

نیمسال ۴۰۴۱

طراحی و اعتبارسنجی مدل **Digital Twin** برای تحلیل عملکرد عضلانی-اسکلتی با استفاده از

داده‌های پوشیدنی

فهرست مطالب



3	2	1
مفهوم Digital Twin در بیومکانیک	چالش‌های کنونی در ارزیابی عملکرد عضلاتی-اسکلتی	مقدمه: انقلاب پایش بیومکانیکی
6	5	4
روش‌شناسی مدل‌سازی بیومکانیکی	سیستم پوشیدنی و حسگرها	معماری پیشنهادی مدل Digital Twin
9	8	7
کاربردها و چشم‌اندازهای آینده	اعتبارسنجی (Validation) اولیه مدل	الگوریتم‌های پردازش و ترکیب داده



مقدمه: انقلاب پایش بیومکانیکی

با پیشرفت‌های چشمگیر در فناوری‌های پوشیدنی، امکان پایش **زنده (Real-time)** پارامترهای حرکتی و عضلانی فراهم شده است. این دستاورد، افق‌های جدیدی را در درک و تحلیل عملکرد بدن انسان گشوده است.

، رویکردی نوین و قدرتمند برای شبیه‌سازی دیجیتالی دقیق وضعیت بیومکانیکی **Digital Twin** هدف اصلی ما در این پژوهش، ایجاد مدلی **قابل اعتماد و دقیق** برای تحلیل عملکرد انسان است. 3/14 اسکلتی در **شرایط واقعی** و خارج از محیط آزمایشگاهی است - عضلانی



رضا موسی پور/دانشگاه علوم تحقیقات/استاد فخاری راد/نیمسال ۴۰۴۱



چالش‌های کنونی در ارزیابی عملکرد عضلانی-اسکلتی

روش‌های سنتی برای ارزیابی عضلات و مفاصل اغلب نیازمند **تجهیزات پر هزینه و پیچیده** یا محیط‌های آزمایشگاهی کنترل‌شده هستند که دسترسی و کاربرد آنها را در شرایط واقعی محدود می‌کند.

علاوه بر این، ثبت دقیق نیروها، گشتاورها و فعالیت عضلانی در **دنیای واقعی**، به دلیل متغیرهای محیطی و حرکات پیچیده انسانی، همواره یک چالش بزرگ بوده است.

از این رو، نیاز مبرمی به توسعه **مدلی سبک، کم هزینه و قابل استفاده** خارج از آزمایشگاه احساس می‌شود که دقت و اعتبار لازم را نیز داشته باشد.





مفهوم Digital Twin در بیومکانیک

پیش‌بینی Real-time

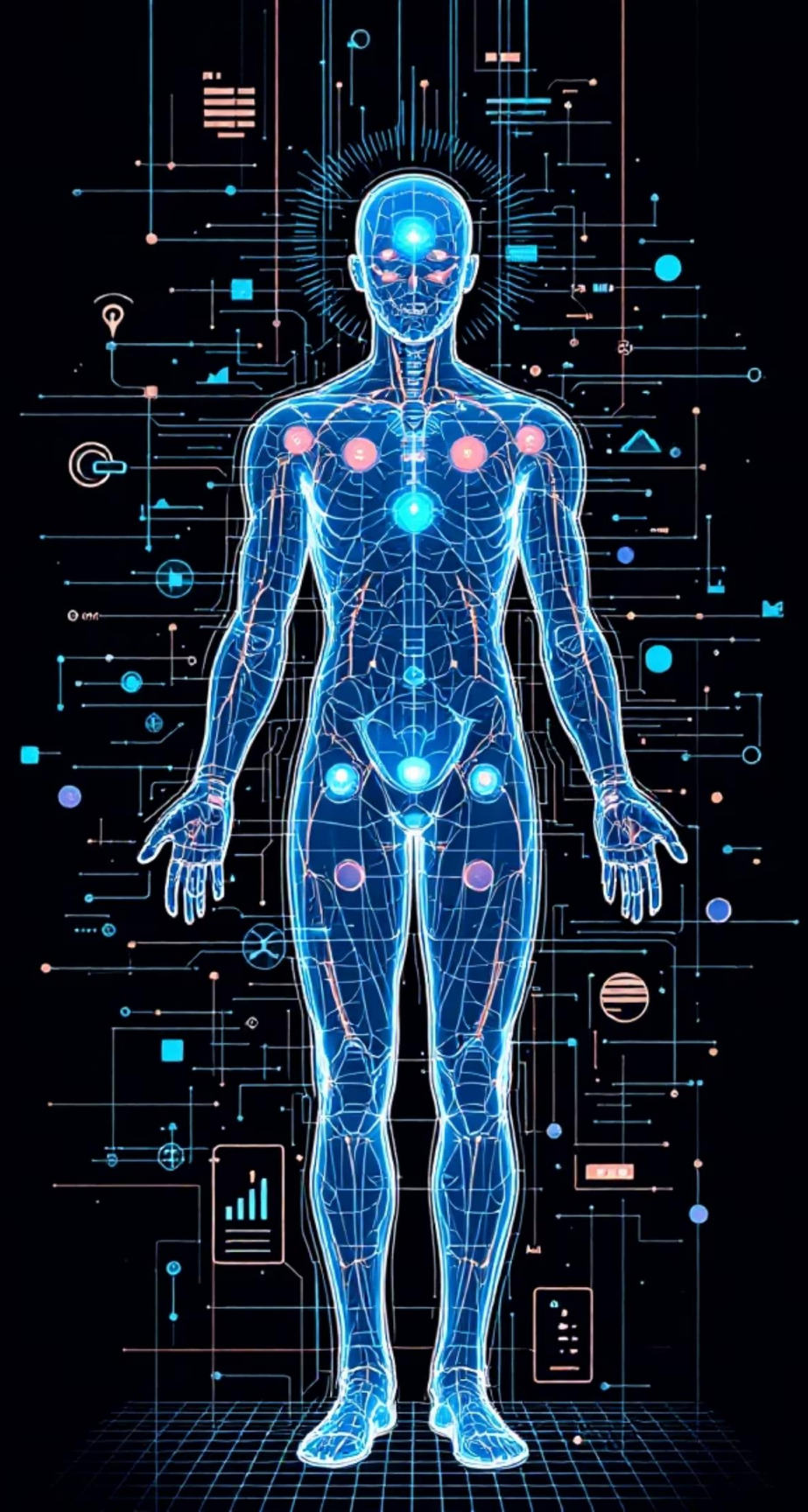
توانایی پیش‌بینی فشار، بارگذاری و رفتار عضلات در زمان واقعی و ارائه بازخورد فوری.

نسخه دیجیتالی از انسان

ساخت یک نسخه دیجیتالی پویا از بدن انسان که بر اساس داده‌های واقعی از حسگرهای پوشیدنی به‌روزرسانی می‌شود.

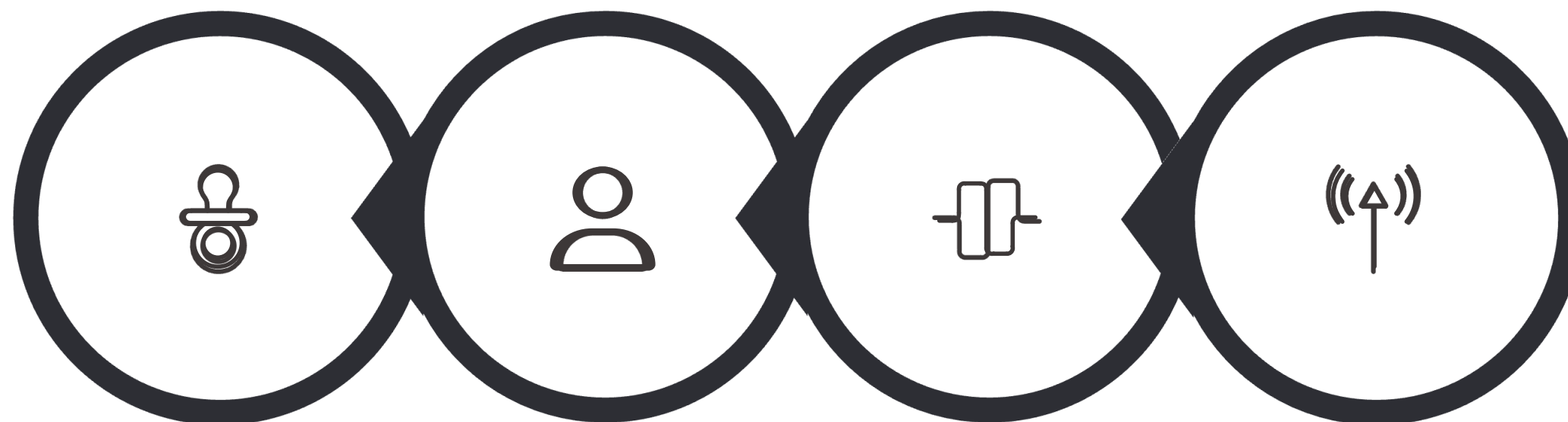
اتصال مداوم

حفظ ارتباط پیوسته بین داده‌های جمع‌آوری شده از حسگرها و مدل بیومکانیکی دیجیتال.





معماری پیشنهادی مدل Digital Twin



لایه دیجیتال توین

لایه مدل سازی

پردازش داده

جمع آوری داده

معماری پیشنهادی ما شامل چهار لایه کلیدی است که با همکاری یکدیگر یک سیستم جامع *Digital Twin* را تشکیل می دهند. این رویکرد، امکان تحلیل دقیق و *Real-time* عملکرد عضلانی-اسکلتی را فراهم می آورد.



سیستم پوشیدنی و حسگرها

- برای جمع‌آوری داده‌های حرکتی و عضلانی، از یک سیستم پوشیدنی شامل اجزای زیر استفاده می‌شود:
- **سه IMU:** برای ثبت دقیق حرکت بخش‌های کلیدی بدن مانند بازو، پا و تنه.
- برای پایش فعالیت الکتریکی عضلات اصلی و حیاتی در حین حرکت: **سطحی EMG**
- **واحد پردازشی مجتمع:** جهت ترکیب داده‌های دریافتی از حسگرها و ارسال آنها به مدل دیجیتال.
- این سیستم با طراحی سبک، قابل‌حمل و با قابلیت استفاده طولانی‌مدت، برای پایش مستمر در محیط‌های مختلف مناسب است.

7/14





روش‌شناسی مدل‌سازی بیومکانیکی

بازسازی سه‌بعدی اسکلت و اتصالات

بر اساس داده‌های دقیق حرکتی جمع‌آوری شده، مدل سه‌بعدی اسکلت و اتصالات مفصلی بازسازی می‌شود.

محاسبه معکوس نیروها و گشتاورها

با استفاده از دینامیک معکوس، نیروها و گشتاورهای مفصلی به صورت دقیق در هر لحظه از حرکت محاسبه می‌شوند.

برآورد عضلانی

الگوریتم‌های بهینه‌سازی پیشرفته برای تخمین دقیق سطح *Activation* عضلات درگیر به کار گرفته می‌شوند.

تحلیل فشارهای مفصلی

این مدل قابلیت تحلیل فشارهای وارد بر مفاصل را در حرکات پیچیده و متنوع فراهم می‌کند.





الگوریتم‌های پردازش و ترکیب داده

نرمال‌سازی EMG

نرمال‌سازی سیگنال‌های EMG برای امکان مقایسه معتبر بین افراد مختلف و جلسات اندازه‌گیری.

استخراج ویژگی‌ها

استخراج ویژگی‌های زمانی-فرکانسی از داده‌ها برای شناسایی الگوهای حرکتی و عضلانی.

فیلتراسیون سیگنال

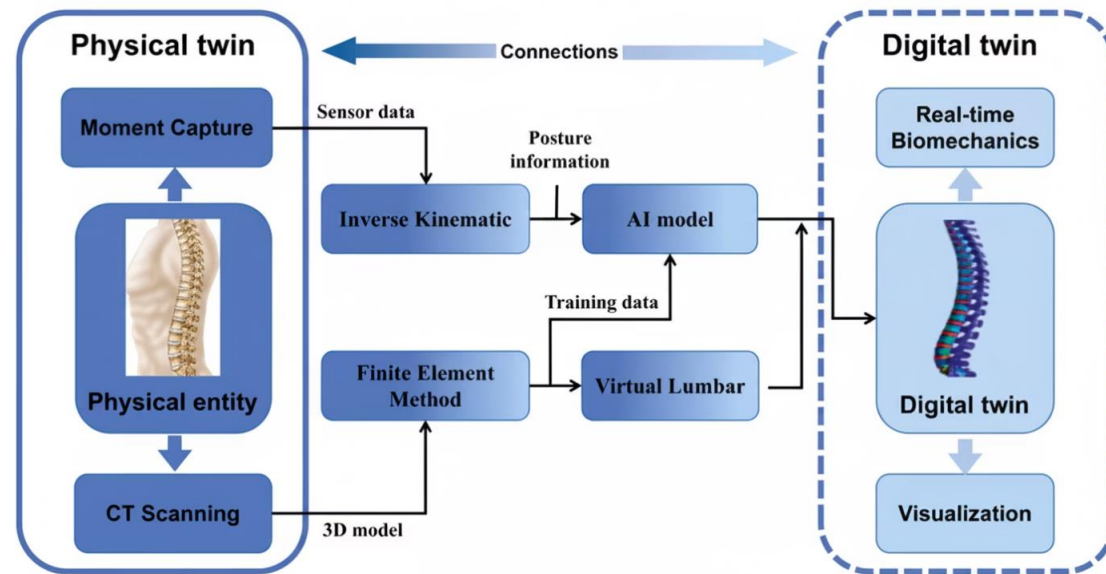
استفاده از فیلترهای پیشرفته (مانند *Band-pass* و *Kalman*) برای حذف نویز و بهبود کیفیت سیگنال.

ترکیب داده‌ها

ادغام هوشمند داده‌های IMU و EMG برای بازسازی دقیق و لحظه‌به‌لحظه حرکات انسان.



معماری کلی سیستم دوقلوی دیجیتال ستون فقرات

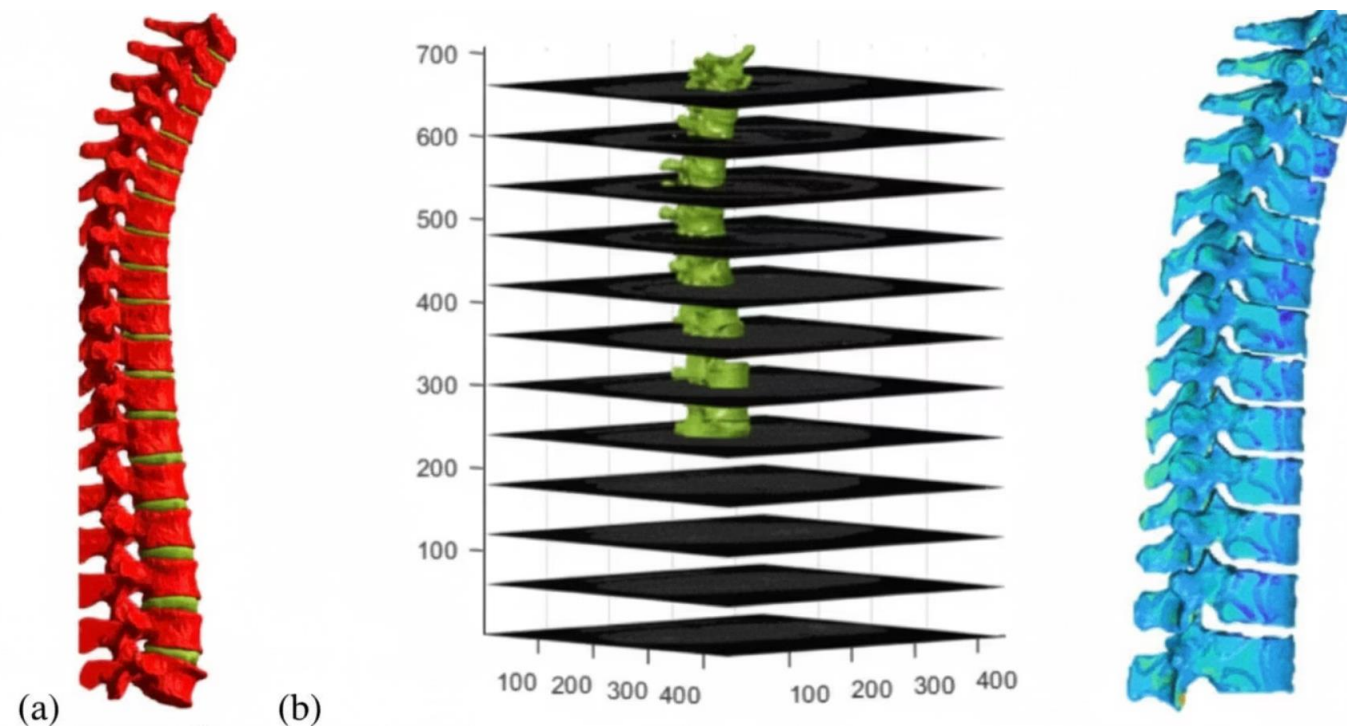


این سیستم یک نسخه دیجیتال از ستون فقرات فرد می‌سازد که قادر است حرکات، فشارها و ریسک آسیب را در لحظه پیش‌بینی و شبیه‌سازی کند.



دوقلوی فیزیکی	پردازش داده‌ها	مدل هوش مصنوعی	دوقلوی دیجیتال
- ثبت حرکت: با حسگرهای پوشیدنی - اسکن CT: مدل سه‌بعدی مهره‌ها - داده‌های واقعی: ورودی مدل دیجیتال	- دینامیک معکوس: پوزیشن و زاویه مهره‌ها - تحلیل تنش و فشار: FEM - ستون فقرات مجازی: مدل‌سازی دقیق کمری - خروجی: داده آموزشی هوش مصنوعی	- ادغام داده‌های سینماتیک FEM + - پیش‌بینی وضعیت و نیروها - تولید پاسخ در زمان واقعی	- بیومکانیک Real-time: شبیه‌سازی عملکرد - تجسم سه‌بعدی: تحلیل پزشکی و کاربر

10/14



جزئیات مدل سازی و پردازش داده ستون فقرات

تحلیل ترکیبی تصویر سه بعدی و داده های حجمی

- مدل سه بعدی ستون فقرات با داده های CT/MRI ترکیب می شود.
- ادغام داده ها امکان تشخیص دقیق تر مشکلاتی مانند شکستگی های پنهان و دژنراسیون را فراهم می کند.
- خروجی نهایی یک مدل بیومکانیکی رنگی است که فشار و تنش را روی مهره ها نشان می دهد 11/14.

ادغام $3D Video$ ، IMU و EMG

- ویدئو سه بعدی و حسگرهای حرکتی برای استخراج مسیر حرکت، سرعت و زاویه مفاصل استفاده می شوند.
- داده های EMG اطلاعات فعال سازی عضلات و خستگی عضلانی را مشخص می کند.
- این ترکیب، تحلیل کامل تری از عملکرد ستون فقرات ارائه می دهد و برای ارزیابی پیش عمل و پس عمل بسیار کاربرد دارد.



اعتبارسنجی (Validation) اولیه مدل

در فاز اولیه، اعتبارسنجی عملکردی (*Prototype Validation*) مدل پیشنهادی انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که خروجی مدل در مقایسه با اندازه‌گیری‌های واقعی آزمایشگاهی، تطابق بسیار خوبی دارد.

- خطای کم: در تخمین *Kinematics* و فعالیت عضلانی مشاهده شد.
- پیش‌بینی موفق: مدل توانست بارگذاری مفصلی را در چند سناریوی عملی با دقت قابل قبولی پیش‌بینی کند.

نتیجه: مدل اولیه قابل اعتماد است، اما برای اثبات کارایی کامل، نیازمند اعتبارسنجی بالینی گسترده‌تر در جمعیت‌های مختلف می‌باشد.





کاربردها و چشم‌اندازهای آینده



ارگونومی و سلامت شغلی

ارزیابی حرکات شغلی و طراحی محیط کار ارگونومیک
برای کاهش ریسک بیماری‌ها.



بهبود عملکرد ورزشی

تحلیل دقیق حرکات ورزشکاران برای بهینه‌سازی تکنیک
و افزایش بهرهوری.



پیشگیری از آسیب

تشخیص زود هنگام الگوهای حرکتی پرخطر برای
جلوگیری از آسیب‌های اسکلتی-عضلانی.

این تحقیق، گامی مهم در جهت توسعه یک سیستم پایش هوشمند انسان با پتانسیل‌های فراوان در ورزش، توانبخشی و ارگونومی

رضا موسی پور/دانشگاه علوم تحقیقات/استاد فخاری راد/نیمسال ۴۰۴۱

13/14

صنعتی است



با تشکر

از توجه شما به این ارائه سپاسگزاریم

14/14