

La Biomecánica desempeña un papel esencial como herramienta complementaria para la prevención, el diagnóstico y la rehabilitación de los trastornos músculo esqueléticos, además de reducir el impacto económico y social de estas patologías del aparato locomotor, contribuyendo a la sostenibilidad de los sistemas de salud.

El objetivo principal de esta tesis es el desarrollo y puesta a punto de técnicas de Análisis de Datos Funcionales (FDA, Functional Data Analysis) adaptadas al tratamiento de los datos procedentes del análisis de movimientos humanos. El FDA es una rama de la Estadística que amplía las técnicas de la Estadística univariante y multivariante al caso funcional. De esta forma, se estudian las curvas del movimiento sin extraer características previas, lo que facilita su análisis y conserva la totalidad de la información.

Se realiza una revisión sobre los tres enfoques actuales del tratamiento de datos biomecánicos (la estadística univariante y multivariante, las técnicas basadas en Inteligencia Artificial y el Análisis de Datos Funcionales), detectando una serie de limitaciones en estos enfoques y lagunas de conocimiento para la aplicación del FDA en la biomecánica.

En primer lugar, se identifican importantes limitaciones en las técnicas habituales de normalización del tiempo, primer paso necesario para ajustar la escala de tiempos y poder comparar curvas de diferente duración, que pueden alterar la dinámica del movimiento. A pesar de la existencia de diferentes métodos, falta una comparación sistemática que permita establecer criterios sólidos para su aplicación.

Después, se exploran diferentes descriptivos funcionales, como la media y desviación típica funcional, que presentan limitaciones para representar adecuadamente la centralidad y variabilidad de las curvas biomecánicas. Por ello, se propone el uso del concepto de curva profunda, equivalente funcional de la mediana, así como técnicas de estimación de regiones de confianza basadas en bootstrap, que permiten definir regiones de confianza más realistas en el ámbito funcional.

En Biomecánica, la aplicación de la inferencia estadística funcional es escasa, pese a su alto potencial clínico ya que permite una interpretación de los resultados, analizando qué partes de la curva están más o menos relacionadas con una patología. Esto no puede lograrse mediante enfoques multivariantes ni mediante modelos basados en Inteligencia Artificial.

Comenzando con los modelos de regresión lineal funcional, en esta tesis nos hemos centrado en dos tipos: la regresión función sobre escalar y la regresión escalar sobre función. En el primer caso, el enfoque habitual consiste en realizar modelos lineales punto a punto, lo que genera múltiples contrastes que incrementan el riesgo de cometer errores de tipo I si no se corrigen estos p-valores. Se propone además el uso del modelo limma, que mejora el ajuste utilizando un método empírico bayesiano. Por otro lado, la regresión escalar sobre función, pese a su gran potencial, ha sido poco utilizada en Biomecánica.

En la misma línea, los modelos de regresión logística funcional que permiten clasificar sujetos en categorías binarias (sano vs. patológico) suponen una herramienta potente para el apoyo al diagnóstico, en especial cuando la existencia o no de la patología no es evidente. Sin embargo, su aplicación en Biomecánica todavía es limitada.

Un aspecto destacable de este trabajo es la importancia de construir modelos parsimoniosos y robustos, que no solo tengan buena capacidad predictiva, sino que además permitan una interpretación de los resultados. Esto último es vital en el ámbito clínico, ya que permite conocer al personal clínico qué variables o fases del movimiento están más relacionados con la patología, a diferencia de muchos modelos basados en Inteligencia Artificial que, a pesar de su alta capacidad predictiva son “cajas negras”.

En definitiva, esta tesis propone la aplicación de un conjunto de técnicas estadísticas del Análisis de Datos Funcionales en el ámbito de la Biomecánica, demostrando su potencial y constituyendo una herramienta de ayuda al diagnóstico clínico. Todos estos análisis se llevarán a cabo sobre bases de datos biomecánicos experimentales en distintas patologías y segmentos anatómicos.