

Estimación de las propiedades mecánicas de la placa de ateroma utilizando Redes Neuronales Artificiales

Ricardo Caballero¹, Miguel Ángel Martínez^{1,2}, Estefanía Peña^{1,2}

¹Applied Mechanics and Bioengineering, Aragón Institute of Engineering Research (I3A).
Universidad de Zaragoza, Mariano Esquillor s/n, 50018, Zaragoza, Spain.

²Biomedical Research Networking Center in Bioengineering, Biomaterials and Nanomedicine (CIBER-BNN), Spain
Tel. +34-976762707, e-mail: rcaballero@unizar.es

Resumen

Predecir las propiedades mecánicas de la placa de ateroma en paciente específico es crucial para identificar el riesgo de infarto o ictus cerebral de forma rápida y eficiente en la práctica clínica a partir de la información obtenida por ecografía intravascular por ultrasonidos (IVUS).

Introducción

Las enfermedades cardiovasculares son la primera causa de muerte en el mundo siendo la aterosclerosis el origen de más del 50% de las muertes súbitas¹. Por tanto, un diagnóstico rápido y fiable es crucial para mitigar los efectos de esta patología. La estimación de las propiedades elásticas de la placa de ateroma de cada paciente a partir de la información obtenida mediante ecografía intravascular por ultrasonidos (IVUS) podría ayudar en esta difícil tarea. Dado que las Redes Neuronales Artificiales (RNA) son una potente herramienta de predicción, el objetivo de este estudio es explorar la potencialidad de dichas herramientas de Inteligencia Artificial (IA) en la predicción de las propiedades elásticas de los diferentes componentes de la placa de ateroma.

Materiales y métodos

Para construir una base de datos que permitiera entrenar la RNA para estimar los módulos de Young del núcleo (E_{core}) y de la placa (E_{placa}), se crearon nueve geometrías 2D idealizadas de arteria coronaria con placa de ateroma con diferentes grados de estenosis. Todos los modelos fueron desarrollados en ABAQUS (versión 6.14, Dassault Systems Simulia Corp., Providence, RI, USA). Las variables candidatas a formar parte de la entrada de la RNA fueron: deformación principal máxima (ϵ_1), deformación principal mínima (ϵ_2), variación del espesor del núcleo con respecto a su espesor inicial (ϵ_{core}), variación del espesor de la capa fibrótica fina que separa el núcleo del torrente sanguíneo con respecto a su espesor inicial (ϵ_{cap}), la variación del diámetro del lumen con respecto a su diámetro inicial

(ϵ_{theta}), y el grado de estenosis (SR). Los materiales que corresponden al núcleo y a la placa se modelaron como hiperelásticos, no-lineales, isótropos e incompresibles, mediante el modelo de comportamiento Neo-Hookeano². Las capas media y adventicia se modelaron mediante el modelo hiperelástico de Gasser³. La carga se aplicó en forma de presión (140 mmHg) y se impuso una condición de contorno para evitar la rotación del modelo. Teniendo en cuenta que la IA basa su capacidad predictiva en la estadística, se utilizó el software estadístico Minitab® Statistical Software (versión 18, State College, Pennsylvania, USA) para llevar a cabo varios análisis de regresión lineal múltiple utilizando el método *stepwise* con un nivel de significancia de 0.05. La selección de la estructura de la RNA se realizó con el entorno de programación Jupyter Notebook (versión 6.3.0).

Resultados

Los resultados del análisis descriptivo mostraron que la relación entre las variables candidatas y la respuesta seguía un patrón cuadrático. El estudio de las variables más influyentes en la respuesta mostró que las variables SR , $\epsilon_{core-cuad}$ y $\epsilon_{cap-cuad}$ fueron capaces de formar un modelo que predijo la respuesta con un 92.8% y un 97.67% de fiabilidad respectivamente. Además, el análisis de regresión múltiple multivariado mostró que las variables más influyentes fueron SR , $\epsilon_{core-cuad}$ y $\epsilon_{cap-cuad}$ con un *p-valor* de 0.000, y una fiabilidad del modelo del 92.8% al predecir ambas respuestas de forma simultánea. Los resultados de la búsqueda de la mejor estructura de la RNA están recogidos en la tabla 1. Notar que las pruebas 4, 5 y 6 no se han introducido en la tabla porque las características de la RNA eran las mismas que en la prueba 3. En primer lugar, se partió de una estructura con pocas capas que pretendía mantener un coste computacional bajo, contando únicamente con 400 datos (se utilizaron sólo los datos correspondientes a la geometría de $SR=40\%$). Posteriormente, se modificó la función de activación (pruebas 2a, 2b, 2c), se aumentó el número

de capas y de neuronas por capa y se añadió la variable de entrada $\varepsilon_{theta-cuad}$ (prueba 3). Con esto se consiguió una disminución drástica del error. Después se ajustó el tamaño de lote para minimizar el error (prueba 4). Finalmente, se predijeron las propiedades elásticas de una geometría con un SR diferente, pero el error obtenido fue demasiado elevado (prueba 5). Por tanto, se amplió la base de datos introduciendo información del resto de geometrías con diferentes grados de estenosis. De este modo se consiguió disminuir el error considerablemente (prueba 6, figura 1). Una vez determinados los hiperparámetros de la RNA, esta se validó con datos procedentes de IVUS reales⁴. La predicción fue aceptable cuando la geometría realista y las de entrenamiento contaban con parámetros similares de espesor de la capa fibrótica y de área del lípido, pero no en el resto.

Conclusiones

Es posible utilizar las RNA como herramienta predictiva de las propiedades elásticas de la placa de ateroma en paciente específico siempre y cuando se disponga de una base de datos lo suficientemente amplia para el entrenamiento.

Referencias y Citas

- [1]. ROTH, G., ABATE, D., ABATE, K. H., ABAY S.L., ABBAFATI, C., ABBASI, N., ABBASTABAR, H., ABD-ALLAH, F., ABDELA, J., ABDEANIM, A. Global, regional, and national age-sex-specific mortality for 282 causes of death in 195 countries and territories, 1980-2017: a systematic analysis for the global burden of disease study 2017. *The Lancet*, 392(10159):1736-1788, 2018.
- [2]. HOLZAPFEL GA, GASSER TC and OGDEN RW. A new constitutive framework for arterial wall mechanics and a comparative study of material models. 6, s.l. : *Journal of Elasticity*, 61(1):1-48, 2000.
- [3]. GASSER TC, OGDEN RW and HOLZAPFEL GA. Hyperelastic modelling of arterial layers with distributed collagen fibre orientations. 6, s.l. : *Journal of the Royal Society - Interface*, 2006, Vol. 3. ISSN:1742-5689.
- [4]. LE FLOC'H, S., OHAYON, J., TRACQUI, P., FINET, G., GHARIB, A.M., MAURICE, R.L., CLOUTIER, G. and PETTIGREW, R.I. Vulnerable Atherosclerotic Plaque Elasticity Reconstruction Based on a Segmentation-Driven Optimization Procedure Using Strain Measurements: Theoretical Framework. *IEE Trans Med Imaging*. 2009, 28(7), 1126-37. Available from: doi: 10.1109/TMI.2009.2012852.

Tabla 1. Búsqueda de la estructura de la RNA con menor error medio

	Neuronas	F.A	Lote	Error medio Ecore/Eplaca
1	50,25,10,2	ReLu	16	100/3.5
2 a, b, c	50,25,10,2	Elu Selu Softplus	16	1561/4.85 1672/6.95 1578/4.3
3	250, 150, 100, 50, 40, 30, 10, 2	Softplus	16	55.747/2.9
4	250, 150, 100, 50, 40, 30, 10, 2	Softplus	8	15.428/1.08

Tabla 2. Resultados de la validación

Geom	Ecore			Eplaca		
	1	2	3	1	2	3
Prediccion	11.2	677	0	677	717.34	1246
Real	11			601		

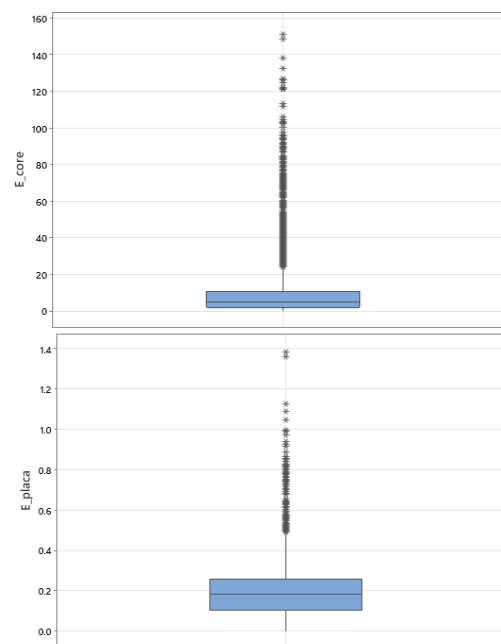


Figura 1. Error cometido en la predicción de Eplaca y Ecore durante la prueba número 6