

ORIGINAL

Aportaciones de la ingeniería industrial en el desarrollo de materiales óseos para la formación médica

Contributions of industrial engineering in the development of bone materials for medical training

Juan Antonio Juanes Méndez¹, Fernando Blaya Haro² y María Teresa Ugidos Lozano³

Resumen

La aplicación de la ingeniería industrial al ámbito biosanitario cada vez desempeña un papel más relevante en el diseño y creación de estructuras anatómicas, con fines tanto docentes como para aplicaciones médico-quirúrgicas. Gracias a la colaboración conjunta entre ingenieros industriales y profesionales en el campo de la anatomía humana, hemos generado piezas óseas muy precisas mediante técnicas de prototipado rápido, para el estudio morfológico detallado de los diferentes relieves o accidentes óseos. De esta manera, se mejora la visión anatómica de los detalles óseos que en las piezas reales, en la mayoría de los casos, no pueden verse con facilidad, por estar, generalmente, muy deteriorados.

Presentamos en este artículo la fabricación aditiva de los huesos del cráneo, tras su reconstrucción tridimensional con escáneres de alta precisión. La aplicación de técnicas y softwares específicos de ingeniería industrial para el procesamiento de modelos anatómicos tridimensionales nos ha permitido elaborar nuestras piezas óseas con una excelente similitud a los modelos reales.

Palabras clave

Ingeniería industrial, fabricación aditiva, huesos, cráneo, formación médica.

Abstract

The application of industrial engineering to the biosanitary field plays an increasingly relevant role in the design and creation of anatomical structures, for both teaching purposes and medical-surgical applications. Thanks to the joint collaboration between industrial engineers and professionals in the field of Human Anatomy, we have generated very precise bone models, using rapid prototyping techniques, for the detailed morphological study of the different reliefs. This allowed improving the anatomical view of bone details that cannot be seen in original bones because of deterioration.

In this study, we have presented additive fabrication of the skull, after performing three-dimensional reconstruction with high precision scanners. The application of specific techniques and software used in the field of industrial engineering for the processing of three-dimensional anatomical models has allowed us to elaborate our bony pieces with an excellent similarity to the original samples.

Keywords

Industrial engineering, additive fabrication, bones, cranium, medical training.

Recibido / Received: 22.09.2016. Aceptado / Accepted: 22.02.2017

¹Departamento de Anatomía Humana. Facultad de Medicina de la Universidad de Salamanca. ²Departamento de Ingeniería Mecánica, Química y Diseño Industrial. Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Diseño Industrial, de la Universidad Politécnica de Madrid. ³Médico odontólogo y estomatólogo. IUCE Universidad de Salamanca.

Autor para correspondencia / Corresponding author: Juan A. Juanes (jajm@usal.es). Departamento de Anatomía Humana, Facultad de Medicina, Avda. Alfonso X El sabio s/n, 37007 Salamanca.



PROGRAMA DE DOCTORADO

FORMACIÓN EN LA SOCIEDAD DEL CONOCIMIENTO

Aportaciones de la ingeniería industrial en el desarrollo de materiales óseos para la formación médica



Alumnas con un modelo anatómico de cráneo en 3D.

Introducción

La medicina tiene un buen pilar en las técnicas y herramientas que le ofrece la ingeniería industrial (Anderson, 2010). Gracias a esta colaboración se están construyendo materiales médicos muy valiosos tanto para la docencia de la medicina como para la práctica quirúrgica (McGurk et al., 1997; Hieu et al., 2003; Suzuki et al., 2004; Hurson et al., 2007; Drstvensek et al., 2008; Bagaria et al., 2011; Yih-Lin et al., 2012; Zhao et al., 2012).

La utilización de diferentes parámetros matemáticos para el desarrollo de piezas anatómicas constituye hoy día un avance tecnológico en ciencias de la salud al permitir elaborar así estructuras corporales sintéticas que sirven de apoyo a la formación médica (McGurk et al., 1997) y en las simulaciones quirúrgicas, como entornos o sistemas de entrenamiento previo a una intervención (Potamianos, 1998; Hieu et al., 2003; Suzuki et al., 2004; Hurson et al., 2007; Mavili et al., 2007; Drstvensek et al., 2008; Díaz y Lafont, 2012).

En este sentido, es evidente que el trabajo conjunto entre facultativos de diferentes especialidades médicas e ingenieros industriales, permitirán una



Figura 1. Digitalización de una pieza ósea con el escáner modelo FaroArm Scan Platinum.

productiva generación de modelos anatómicos de gran utilidad práctica en diversos campos de la medicina.

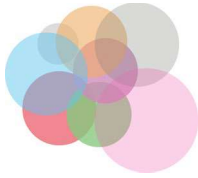
En este trabajo presentamos ejemplos desarrollados por ingenieros industriales de la Escuela Técnica Superior de la Universidad Complutense de Madrid, junto con especialistas en anatomía humana, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Salamanca.

Se han llevado a cabo la generación de piezas anatómicas óseas mediante la tecnología de fabricación aditiva.

Nuestro objetivo con este material es poder reproducir huesos que en muchas ocasiones están muy deteriorados, lo que dificulta su estudio adecuado, por carecer de algunos relieves o accidentes que presentan estas estructuras anatómicas (apófisis, espinas, protuberancias, forámenes, fosas, etc.). En este trabajo describiremos todo el procedimiento tecnológico llevado a cabo para su desarrollo, así como la opinión y valoración de los alumnos en el manejo de estas piezas óseas.

Material y métodos

Para proceder a la construcción de nuestro material óseo, se realizó en primer lugar la digitalización de forma precisa de la pieza ósea craneal, mediante un láser escáner de brazo, modelo FaroArm Scan Platinum como el que se observa en la figura 1. Con ello, obtuvimos una nube de puntos de gran precisión y fiabilidad del modelo craneal. Dichas nubes de puntos posteriormente se convirtieron a un formato de malla (*mesh* en inglés) mediante *software* específico de



Juan Antonio Juanes Méndez, Fernando Blaya Haro y María Teresa Ugidos Lozano

digitalización. Después del proceso de reparación y suavizado de las mallas se obtuvo el modelo final para su posterior impresión en tres dimensiones.

Este escáner permite capturar nubes de puntos con un gran rendimiento de adquisición de puntos, una alta resolución y una precisión de $\pm 35 \mu\text{m}$. Debido a la dificultad de acceso a todas las superficies del material óseo y su complejidad geométrica, se requirió de la preparación de utillaje específico de amarre para la obtención de múltiples nubes de puntos en diferentes posiciones para su posterior alineamiento y procesado. La nube de puntos resultante de nuestro modelo estuvo compuesta por millones de puntos, referenciados en un sistema de coordenadas local que representaron con exactitud geométrica y dimensional la estructura anatómica ósea que modelar. Esta nube de puntos contenía toda la información métrica necesaria del modelo óseo digitalizado, que sirvió para el procesamiento posterior con el software Geomagic Design X (figura 2). De esta forma, el proceso de mallado por triangulación de puntos de escaneo nos permitió pasar de un modelo 3D formado únicamente por puntos a un modelo de malla constituido por pequeños planos poligonales.

El procesado de malla requirió de diferentes pasos para llevarlo a cabo, entre los que se destacan: la eliminación de ruido superficial, la corrección de errores de solapamiento, el cierre de agujeros, el suavizado de caras y la optimización de la malla para fabricación aditiva. Una vez concluido este procedimiento, se procedió a la generación del modelo en formato .stl (STereo Lithography).

El software Geomagic Design X soporta la importación de más de 60 formatos y permite combinar datos de diseño asistido por ordenador (CAD) con datos procesados de escaneos 3D, para poder crear así modelos sólidos y editables, como son las estructuras óseas desarrolladas. Design X está construido sobre un Kernel CAD (Parasolid) que le da la flexibilidad para hacer modelos CAD reales de la manera deseada.

A partir del modelo obtenido se procedió a la fabricación aditiva (*additive manufacturing*) mediante la sucesiva superposición de capas micrométricas de un material polimérico. Empleamos el software Cura (de la casa

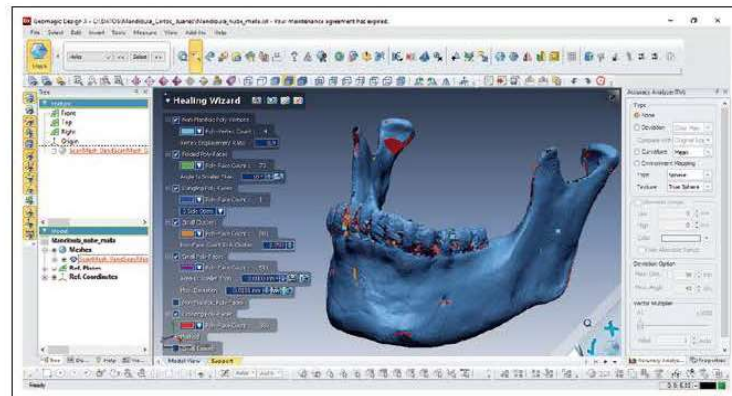


Figura 2. Proceso de reparación de errores y malla final con el software Geomagic Design X.

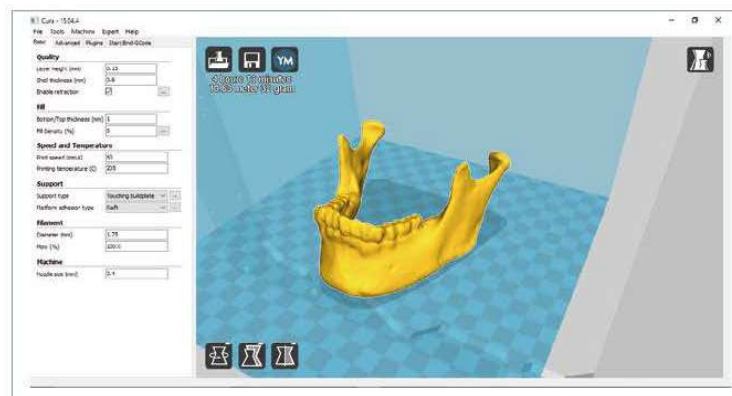


Figura 3. Previsualización de la impresión en el software Cura, de Ultimaker.

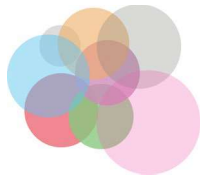
comercial Ultimaker), (figura 3), que nos permitió dividir en capas el modelo tridimensional, según un perfil de configuración optimizado. El proceso de laminado transfiere un diseño digital en 3D en formato STL (STereo Lithography) creándose unas capas delgadas en un plano de dos dimensiones que la impresora leerá. Tras apilar estas capas se crea el objeto. Este proceso se realizó mediante cálculos matemáticos por el software de generación de G-Code. Este código se genera de forma automática y podemos introducir modificaciones. Calculadas las trayectorias y generados los comandos, se transmite a la impresora y se inicia la creación las piezas anatómicas óseas.

El material utilizado fue PLA (ácido poliláctico) y la velocidad de impresión de 40 mm por segundo. Este material plástico termoestable, empleado en

la impresión 3D, una vez que sufre el proceso de calentamiento-fusión, solidifica por láminas y da lugar al modelo final con la dureza y resistencia requeridas. La máquina empleada en la fabricación fue una impresora 3D compacta marca Colido y modelo X3045 (figura 4).

Resultados

En la formación de cualquier titulación de las ciencias de la salud (medicina, odontología, fisioterapia, enfermería, terapia ocupacional, podología, etc.), una de las disciplinas que más relevancia tiene en los primeros cursos de estas titulaciones es sin duda la asignatura de Anatomía Humana. Esta materia requiere de la utilización de material humano para las clases prácticas; sin embargo, es muy frecuente que este material sea escaso y esté deteriorado, por lo que muchos detalles morfoló-



PROGRAMA DE DOCTORADO

FORMACIÓN EN LA SOCIEDAD DEL CONOCIMIENTO

Aportaciones de la ingeniería industrial en el desarrollo de materiales óseos para la formación médica.



Figura 4. Impresora modelo Colido X3045 utilizada para la fabricación aditiva de las piezas craneales.



Figura 5. Imágenes de cráneos muy deteriorados que no permiten un estudio anatómico detallado.



Figura 6. Imágenes de un cráneo fabricado con impresión 3D comparado con un cráneo deteriorado.

gicos de estructuras corporales no se visualizan correctamente. El ejemplo más representativo de este material lo constituyen los huesos del cráneo. Estos, en muchas ocasiones, están rotos y carentes de detalles óseos relevantes, como se aprecia en la figura 5. En este sentido la impresión tridimensional de estos huesos facilita y complementa la labor docente. Como se observa en la figura 6, la impresión 3D del cráneo mejoró considerablemente la visualización de todos los detalles óseos (apófisis, protuberancias, etc., entre otros muchos detalles o relieves óseos).

El modelo anatómico impreso en 3D fue analizado en toda su morfología

por un grupo de anatomistas con el objetivo de valorar su eficacia para la docencia.

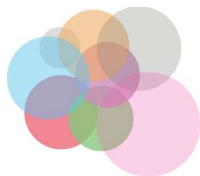
De esta forma hemos conseguido obtener un modelo craneal, a escala real, con todos los detalles anatómicos que en los huesos reales en ocasiones se desdibujan debido a su mal estado o deterioro con el paso del tiempo.

Discusión

Las diversas técnicas que se desarrollan desde la ingeniería industrial, como ayuda en los diferentes aspectos de la medicina, están consiguiendo excelentes resultados en la confección de dispositivos y procedimientos que

mejoran la práctica clínica. Un claro ejemplo de la aportación que la ingeniería industrial hace a la medicina es la generación de prótesis, ortesis y dispositivos de terapia ocupacional (Potamianos et al., 1998; Hurson et al., 2007). En el campo de la cirugía, la ingeniería industrial también está teniendo un papel importante en la creación de instrumentos para cirugías mínimamente invasivas, implantes artificiales, microcámaras, robots, etc. (Wagner et al., 2004; Suzuki et al., 2004; Zhao et al., 2012).

Las aplicaciones de la impresión 3D en el campo de la medicina están cada día en aumento, abriéndose nue-



PROGRAMA DE DOCTORADO

FORMACIÓN EN LA SOCIEDAD DEL CONOCIMIENTO

Juan Antonio Juanes Méndez, Fernando Blaya Haro y María Teresa Ugidos Lozano

vas líneas de investigación (Waran et al., 2012). No cabe duda de que en un futuro la verdadera revolución de la impresión 3D será la rapidez con la que esta tecnología se transformará en algo usual e incluso esencial en la vida cotidiana. Por tanto, una de las aplicaciones más relevantes en el futuro será en la medicina reconstructiva o en la ortopedia, ya que con las bioimpresoras tridimensionales los cirujanos tendrán a su disposición implantes y hasta órganos humanos personalizados. En este sentido, la progresión de estas técnicas de ingeniería industrial aplicadas en medicina traerá la posibilidad de crear órganos adaptados a cada caso concreto y colocarlos por un procedimiento análogo al de las técnicas de implantología dentaria. Desde la aparición de las primeras prótesis utilizadas, va a haber un antes y un después con la utilización de la impresión en 3D. No solo permite que los materiales sean más ligeros, sino que, además, la prótesis se crea con el tamaño y la forma que el paciente necesita exactamente, lográndose así una mejor adaptación a su uso. En este sentido, recientemente se empiezan a ver muchos proyectos de investigación basados en la creación de partes artificiales del cuerpo humano con el objetivo de reemplazar órganos dañados por accidentes o por alguna enfermedad grave.

La utilización de materiales termoplásticos permite generar modelos anatómicos por inyección, que proporcionan una enorme flexibilidad en la ejecución geométrica de las piezas óseas moldeadas. Esto supone un buen campo para la aplicación en la práctica de la docencia de la anatomía humana, así como la posibilidad de construir otras estructuras como prótesis que permitan sustituir, en un futuro, las tradicionales prótesis que se emplean para poder ser fabricadas de manera más personalizadas.

Los avances en impresión de tejidos van encaminados a poder disponer en un futuro cercano de órganos que se puedan implantar y que sean compatibles en los pacientes que necesiten un trasplante urgente (Huixia et al., 2010; Derby, 2012). La impresora Bioprinter, desarrollada por la compañía estadounidense *Organovo*, en colaboración con la australiana *Invetech*, permitirá reproducir tejidos y órganos gracias a

la multiplicación de sus células en impresoras 3D. Tension es otra empresa que recientemente ha presentado otro modelo de impresora *3D de órganos*.

Nuestros resultados han sido posibles gracias al esfuerzo conjunto que venimos desarrollando nuestra red de trabajo, en materia de investigación, diseño y desarrollo en favor de promover la incorporación de innovaciones a la producción industrial y la generación de aplicaciones no convencionales de las tecnologías de manufactura digital. En un futuro no muy lejano, la manufactura aditiva no dejará indiferente a ningún sector, porque implicará una nueva revolución industrial y tecnológica semejante a cuando apareció en nuestras vidas Internet, que ha cambiado nuestra forma de comunicarnos y de trabajar de una manera global. Por ello, la colaboración conjunta entre profesionales de la ingeniería industrial y de la medicina está contribuyendo al desarrollo de procedimientos útiles tanto para la formación médica como para la práctica clínico-quirúrgica, mejorando, así, la docencia, la salud y calidad de vida de las personas. Por ello, es destacable e importante fomentar que se lleven a cabo investigaciones conjuntas entre estos profesionales que lleven a una mejora en diversos procedimientos en el área de la salud.

Conclusiones

Las tecnologías de impresión 3D están experimentando un gran crecimiento y están ganando importancia en el campo biomédico.

El diseño en tres dimensiones de estructuras anatómicas corporales humanas puede ayudar a los alumnos a una mejor comprensión de los detalles morfológicos de las piezas anatómicas y son, además, un recurso duradero.

Aún queda mucho camino por recorrer en lo referente a esta tecnología de impresión 3D, pero son evidentes las grandes posibilidades que la impresión 3D ofrece al ámbito de la medicina. El avance de la ciencia y la propia técnica de impresión 3D descubrirán un futuro hasta ahora inimaginable. En un futuro no muy lejano, posiblemente, estas impresoras 3D superarán, con una gran diferencia los problemas que hoy día su pueda plantear su uso; y, sin duda, esta revolucionaria tecnología evolu-

cionará considerablemente en el campo de la medicina.

Bibliografía

- Anderson C. (2010). The new industrial revolution. *Wired magazine* 18, 2.
- Bagaria V, Deshpande S, Rasalkar DD, Kuthe A, Paunipagar BK (2011). Use of rapid prototyping and three-dimensional reconstruction modeling in the management of complex fractures. *Eur J Radiol*. 80(3), 814-820.
- Dardon U, Siquiera de Souza R, Terezinha C, Abranches S, Paglarello L. (2010). Modelagem 3D e suas aplicações na pesquisa paleontológica. *Gaea*. 6(2): 76-89.
- Derby B. (2012). Printing and Prototyping of Issues and Scaffolds. *Science*. 338(6109):921-926.
- Diaz A, Lafont P. (2012). Rapid Prototyping for Biomedical Engineering: Current Capabilities and Challenges *Annu. Rev. Biomed. Eng.* 14:3-96.
- Drstvensek I, Ihan N, Strojnik T, Brajlih T, Valentin B, Pogacar V. (2008). Applications of Rapid Prototyping in Cranio-Maxillofacial Surgery Procedures. *Int J Biol Biomed Eng.* 1(2):29-38.
- Hieu LC, Bohez E, Vander Sloten J, Phien HN, Vatcharapom E, Binh PH, Ois P. (2003). Design for medical rapid prototyping of cranioplasty implants. *Rapid Prototyping Journal*. 9(3), 175-186.
- Huixia H, Junkai C, Dongsheng W, Bing G, Hong G, Hongchen L. (2010). Gene-Modified Stem Cells Combined with Rapid Prototyping Techniques: A Novel Strategy for Periodontal Regeneration. *Stem Cell Rev and Rep.* 6:137-41.
- Hurson C, Tansley A, O'donnchadha B, Nicholson P, Rice J, McElwain J. (2007). Rapid prototyping in the assessment, classification and preoperative planning of acetabular fractures. *Injury*. 38(10), 1158-1162.
- Mavili ME., Canter HI, Saglam-Aydinay B, Kamaci S, Kocadereli I. (2007). Use of three-dimensional medical modeling methods for precise planning of orthognathic surgery. *J Craniof Surg.* 18(4), 740-747.
- McGurk M, Amis AA, Potamianos P, Goodger NM. (1997). Rapid prototyping techniques for anatomical modelling in medicine. *Ann R Coll Surg Engl.* 79:169-74.
- Potamianos P, Amis AA, Forester AJ, McGurk M, Bircher M. (1998). Rapid prototyping for orthopaedic surgery. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: J Eng Med.* 212(5), 383-393.
- Suzuki M, Ogawa Y, Kawano A, Hagiwara A, Yamaguchi H, Ono H. (2004). Rapid prototyping of temporal bone for surgical training and medical education. *Acta oto-laryngologica.* 124(4), 400-402.
- Wagner J D, Baack B, Brown GA, Kelly J (2004). Rapid 3-dimensional prototyping for surgical repair of maxillofacial fractures: a technical note. *J Oral Maxil Surg.* 62(7), 898-901.
- Waran V, Devaraj P, Chandran T H, Muthusamy KA, Rathinam AK, Balakrishnan Y K, Rahman ZA (2012). Three-dimensional anatomical accuracy of cranial models created by rapid prototyping techniques validated using a neuronavigation station. *J Clin Neurosc.* 19(4), 574-577.
- Yih-Lin Ch, Yi-Tsung L, Kan-Shan S. (2012). Rapid Prototyping Mandible Model for Dental Implant Surgery Simulation. *Computer-Aided Design & Applications.* 9(2):177-85.
- Zhao L, Patel P K, Cohen M. (2012). Application of virtual surgical planning with computer assisted design and manufacturing technology to cranio-maxillofacial surgery. *Arch Plastic Surg.* 39(4), 309-316.