

Blast features and requirements for fracturing osseous models

F.D. Pérez¹, J.J. Jiménez¹ and R.J. Jiménez¹

¹Graphics and Geomatics Group, University of Jaén, Jaén, Spain

Abstract

Fracturing osseous models is a challenge in computer graphics. The generation of bone fractures is important in the field of traumatology mainly for training. This field of research can provide specialists with a rich and varied amount of fracture cases. Traditionally, the generation of bone fractures has been carried out by using a finite element method (FEM) approach. Nevertheless, this approach requires a precise physical information of the model and the incoming forces that are not usually available. Thus, we propose a geometric approach to avoid these initial requirements. This paper evaluates the adequacy of a given generic destruction library (Blast) within the bone fracture generation context. Our aim is to assess its suitability to provide varied, uncommon cases and morphologically rich fractures in the field of bone fractures. In order to achieve quality results, bone models are evaluated at different scales, spanning from the macroscale to the nanoscale. This study highlights the advantages and shortcomings of the revised library. Additionally, it provides a groundwork for the use of this library in the context of fracturing osseous models as well as a set of addons needed to get a tool specifically designed for this aim.

CCS Concepts

•**Computing methodologies** → *Simulation tools; Shape modeling;*

1. Introducción

La informática gráfica aplicada a la medicina es un campo de investigación con numerosas líneas abiertas y que sigue en auge debido al avance de las nuevas tecnologías. Estos avances han permitido, en el ámbito de la traumatología y las fracturas óseas, la creación de técnicas asistidas por computador que permiten la reducción del tiempo de intervención y minimizan el riesgo de error de los especialistas a través del estudio de las fracturas. La aplicación principal, en las líneas de investigación relacionadas con este trabajo, es la de generar un conjunto de fracturas realistas para que los cirujanos tengan un banco de modelos geométricos de entrenamiento, incluyendo casos de fracturas poco frecuentes. En la literatura se puede encontrar un amplio catálogo de técnicas para la fractura de modelos geométricos examinados por Paulano et al. [PGJPD17] donde se analizan los últimos enfoques para fracturar modelos geométricos de estructuras óseas. Tradicionalmente, la generación de fracturas óseas se ha llevado a cabo utilizando métodos de elementos finitos (FEM), aunque este enfoque requiere como entrada una información que normalmente no está disponible.

En la actualidad, existen diferentes librerías con algoritmos para la simulación de fracturas en modelos geométricos como Blast, Bullet o LibMesh. Blast es una de las herramientas más destacadas debido a la gran cantidad de herramientas que pone a nuestra disposición y es la tecnología de referencia a la hora de destruir modelos geométricos. Este artículo tiene el objetivo de analizar

Blast y su uso para la obtención de fracturas variadas, poco frecuentes y ricas morfológicamente a diferentes escalas.

La estructura del artículo es la siguiente: en la sección 2 se revisa el estado actual en fracturación. La sección 3 describe Blast y sus características. A continuación, se estudian las ventajas y necesidades de Blast para la fractura de modelos óseos. Por último, se resaltan las conclusiones obtenidas así como el trabajo futuro.

2. Estudio previo en fracturación

Las ventajas que aportan la deformación y fractura de modelos geométricos, en campos como la arquitectura o medicina, ha provocado que sea un tema de estudio referente en la informática gráfica durante los últimos años. En el campo de la traumatología, los avances abren nuevas fronteras como la simulación y creación de prototipos de objetos frágiles, evaluación de la resistencia y estudios de resiliencia sobre los modelos [MBP14].

Una fractura se puede definir como un fenómeno que provoca como resultado la rotura de un objeto sólido a consecuencia de un golpe, fuerza o tracciones que superen su límite de elasticidad. La elasticidad es una propiedad que sólo tienen los cuerpos sólidos, y se puede definir como la capacidad de un cuerpo para recuperar su forma después de haber recibido una fuerza que lo altera. Una fractura aporta gran cantidad de información sobre las propiedades de un material y su relación con otros elementos.

2.1. Fracturación geométrica

En cuanto a la fractura de modelos geométricos, existe un amplio abanico de técnicas para simular la fractura de modelos geométricos. Muguercia et al. [MBP14] clasifica los métodos para la simulación de fracturas de modelos geométricos en tres enfoques:

- Enfoque basado en geometría: se centra en la generación de un patrón, para utilizarlo a la hora de simular fracturas geométricas, obteniendo un alto grado de control sobre la fractura en aspectos como el tamaño o forma de los diferentes fragmentos. Este enfoque no se centra en la descripción física del fenómeno de fractura [MBP14]. Este tipo de fractura es más rápida de simular respecto a otros enfoques aunque su principal inconveniente es la dificultad de simular la fractura en tiempo real.
- Enfoque basado en físicas: este enfoque tiene el objetivo de obtener fracturas más realistas simulando, por ejemplo, la propagación de una grieta a través de un modelo geométrico como propone Gobron & Chiba [GC01]. Es un enfoque muy complejo porque necesita que sean identificadas las propiedades mecánicas de los materiales a fracturar.
- Enfoque basado en ejemplos: se compone de un conjunto de métodos con el fin de obtener una fractura con apariencia real al copiar el comportamiento de un fenómeno natural de fractura [MBP14]. El principal inconveniente reside en la obtención de fracturas reales de huesos.

2.2. Fracturación de modelos óseos

La estructura jerárquica de los huesos es un punto fundamental a tener en cuenta para su fractura a través de los enfoques vistos en el apartado anterior. Los huesos tienen una estructura jerárquica muy compleja para dar soporte mecánico, y también, sirve para la reserva de minerales. La complejidad de la estructura ósea provoca que los huesos tengan una gran resistencia. A continuación, se describe la estructura jerárquica del hueso, que abarca desde la macroescala hasta la nanoescala (Fig. 1):

- Macroescala: este es el nivel del hueso completo que incluye ambos tipos de huesos: el cortical y el trabecular. En el hueso cortical las láminas se juntan con forma de círculos concéntricos formando osteonas, mientras que en el hueso trabecular se juntan de forma irregular para formar las trabéculas.
- Mesoescala: esta capa representa tanto el hueso cortical, que se compone de osteonas incrustadas en el hueso interseptal, como al hueso trabecular compuesto por una red porosa de trabéculas con formas irregulares [SNHJ15].
- Microescala: las láminas se ensamblan para formar dos tipos de tejido óseo diferentes: el cortical y el trabecular.
- Sub-Microescala: en este nivel, las fibras de colágeno se ensamblan en estructuras con forma de láminas.
- Nanoescala: este nivel se compone de fibras de colágeno mineralizadas.

Los estudios a nivel de macroescala se centran normalmente en predecir el riesgo de fractura a nivel de un hueso, mientras que los estudios a niveles microscópicos se centran en evaluar la influencia de las características microestructurales en el

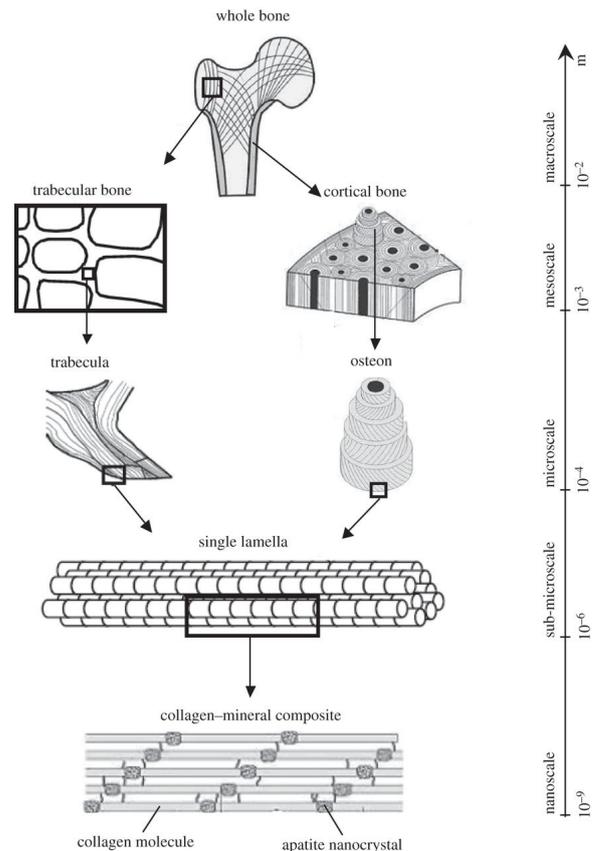


Figura 1: Estructura jerárquica del hueso, de macroescala hasta nanoescala en [SNHJ15]

comportamiento de la propagación de una grieta en el hueso [Ura11]. Uno de los estudios más importantes a nivel de macroescala es el realizado por Hamblin et al. [HBA12] donde se desarrolla un modelo basado en elementos finitos (FEM) basado en un daño continuo a un modelo para simular la fractura de un hueso utilizando las curvas de fuerza-desplazamiento (Fig. 2a y b). A nivel de mesoescala, Raeisi Najafi et al. [NAE*07] obtuvo como resultado de sus estudios sobre la propagación de la fractura, que las osteonas actúan de barreras ante las grietas e influyen considerablemente en los patrones de fractura (Fig. 2c). Al fracturar un modelo óseo hay que tener en cuenta que la caracterización de una estructura ósea no es homogénea, por lo que las propiedades deben determinarse de forma individual según el nivel estructural teniendo en cuenta su implicación a nivel global. La estructura jerárquica del hueso contribuye a que tenga una alta rigidez, resistencia, tenacidad, absorción de energía y otras propiedades mecánicas. También provoca que se aprecien errores en los mecanismos de propagación de la fractura de un modelo óseo [SNHJ15].

3. La librería de destrucción Blast

Blast es la librería de referencia en las destrucciones geométricas. Es la encargada de sustituir al módulo de destrucción

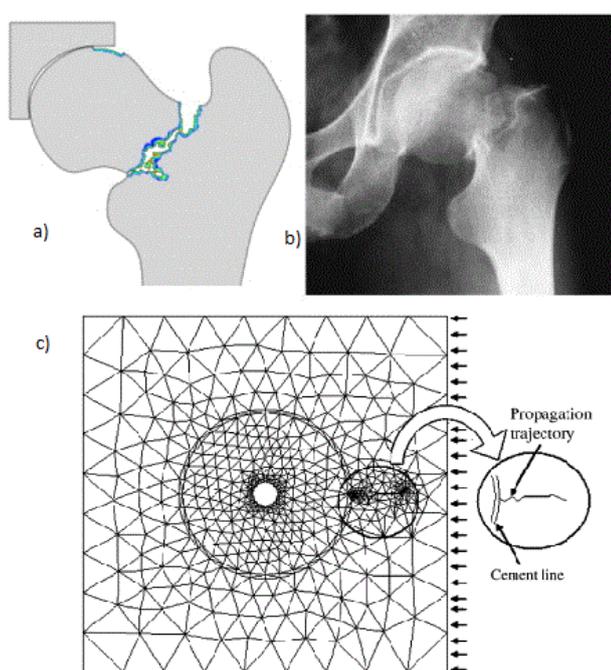


Figura 2: Comparación cualitativa entre los patrones de fractura previstos y ejemplos de fractura reales en el estudio de Hambli et al. [HBA12], y estudio de la propagación de la fractura realizado por Raeisi Najafi et al. [NAE*07]. (a) Perfil de fractura previsto. (b) Ejemplo de una radiografía de un hombre de 33 años. (c) Trayectoria de propagación de la fractura.

APEX y ha sido diseñada desde cero, centrándose en resolver las deficiencias que tenía en rendimiento, escalabilidad y flexibilidad. Se compone de tres capas: una de bajo nivel, otra de alto nivel y extensiones [NVI]. La capa de bajo nivel permite personalización y optimización. Es una API básica destinada a ser utilizada por desarrolladores experimentados y sólo se encarga de procesar las entradas suministradas por el usuario. Sin embargo, la API de alto nivel abarca la capa de bajo nivel y proporciona nuevas y potentes funciones, incluyendo la gestión de objetos y memoria. En cuanto a las extensiones, Blast dispone de una serie de extensiones que pueden ser utilizadas para completar la librería. Una de las más importantes para la fractura de modelos geométricos es “ExtAuthoring” que aporta un conjunto de herramientas para dividir la malla jerárquicamente, determinar la conectividad entre mallas y crear nuevas mallas incluyendo geometría de colisión. La extensión “ExtPhysX” nos permite administrar las propiedades físicas para la gestión de los daños de impacto.

Por otro lado, sin el uso de extensiones, no dispone de representación gráfica, físicas y colisiones. Sin embargo, está diseñado de manera que se puede usar con cualquier SDK de físicas o librería de renderizado. Blast está totalmente integrado con el motor gráfico de Unreal Engine 4(UE4) como un plugin separado, por lo que existe la opción de trabajar con el motor gráfico sin preocuparnos de la interfaz gráfica o de las extensiones.

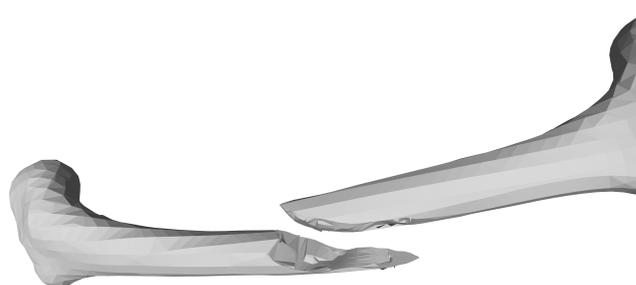


Figura 3: Fractura de una estructura ósea con PhysXLab

En [NVI] también se realiza un análisis comparativo entre APEX y Blast donde se llega a la conclusión que el rendimiento y la flexibilidad de Blast es superior.

4. Fracturas óseas con Blast

Blast es una librería de destrucción de objetos de carácter general y no dispone de ningún método específico para la fractura de modelos óseos. Ha sido diseñada para ayudar en la destrucción de modelos pre-fracturados, aunque en futuras versiones tienen la intención de implementar la fractura y deformación de modelos geométricos en tiempo real. Para poder fracturar un modelo geométrico es necesario que el volumen del modelo esté representado con una malla de triángulos. A continuación, se analizan las ventajas y necesidades de Blast a la hora de fracturar modelos geométricos óseos siguiendo los diferentes enfoques descritos en la sección 2.1.

El enfoque basado en geometría es dividido por algunos autores en dos partes, en función del método utilizado para obtener el patrón de fractura. En el caso de querer fracturar estructuras óseas con Blast mediante este enfoque, el usuario debe encargarse de gestionar el procesamiento del patrón de fractura y de recortar la malla con el patrón de fractura utilizando las herramientas que pone a nuestra disposición. También permite que las caras internas de los trozos resultantes, tras fracturar el modelo, puedan ser teseladas y se les pueda aplicar cierta deformación. PhysXLab, el entorno de destrucción de APEX, dispone de un método implementado para la fractura de modelos geométricos utilizando patrones en 2D. Este método se basa en el algoritmo descrito por Müller et al. [MCK13] y permite la fractura de modelos mediante patrones obtenidos de datos reales. En la figura 3 se muestra el resultado de fracturar un modelo óseo utilizando PhysXLab. El principal problema de este enfoque para la representación de una fractura ósea es que el resultado puede distar morfológicamente de una fractura de un hueso real. Además, en ningún momento se tienen en cuenta las propiedades de las diferentes escalas que pueden afectar al hueso.

El enfoque basado en físicas simula las condiciones de una fractura real para obtener un alto grado de realismo y una representación más rica morfológicamente del hueso. La identificación de las propiedades mecánicas es el principal problema a la hora de enfrentarnos a este enfoque. Blast nos permite simular tensiones internas del modelo geométrico junto

con tensiones externas y diferentes fuerzas. Las propiedades que incluye Blast para la simulación de las diferentes tensiones y fuerzas a la hora de fracturar un modelo geométrico son escasas y muy genéricas. Entre estas propiedades se pueden destacar la salud de los enlaces entre los diferentes fragmentos del modelo, el umbral de daño o la dureza. El uso de propiedades genéricas junto con la complejidad de la estructura ósea con respecto a la que pueden tener otros materiales hacen que Blast no sea de mucha ayuda en la representación de fracturas mediante este enfoque. Las propiedades que nos ofrece Blast no nos sirven para calcular la fractura de una estructura ósea en tiempo real, sino para calcular el daño que reciben los enlaces de los diferentes trozos de un modelo fracturado previamente, desprendiendo aquellos fragmentos cuyos enlaces se encuentren dañados.

En el enfoque basado en ejemplos, el usuario debe encargarse de implementar su algoritmo de fractura por completo, al igual que pasaba en el enfoque basado en geometría. Además la principal dificultad de este enfoque reside en la obtención de ejemplos de fracturas reales. Este enfoque está muy relacionado con el enfoque geométrico donde la mayoría de los métodos desarrollados se basan en el uso de patrones.

A continuación se resumen las ventajas y necesidades de Blast para la fractura de modelos óseos:

- Ventajas de Blast
 - Herramientas de apoyo para fracturar modelos geométricos.
 - Personalización y optimización de la capa de bajo nivel.
 - Permite crear automáticamente geometría de colisión.
 - Gestiona automáticamente las propiedades genéricas de los enlaces entre fragmentos generados.
 - Integración total con UE4.
- Necesidades en fracturación ósea
 - Incorporación de todos los métodos de fractura incluidos en APEX
 - Nuevos métodos de fractura, a diferentes niveles de escala.
 - Mejora de los mecanismos para la evaluación de los modelos fracturados.
 - Identificación y parametrización de todas las propiedades del material óseo.
 - Generación de fracturas en tiempo real.

5. Conclusiones y trabajo futuro

Tras los estudios realizados, hemos verificado que Blast es una librería genérica que sirve de base para la implementación de algoritmos de fracturas de modelos óseos, porque no dispone de ningún método implementado con el que se puedan obtener modelos fracturados de manera realista o ricos morfológicamente. La mayoría de las técnicas se centran en la obtención de una fractura de aspecto realista a nivel de macroescala sin tener en cuenta niveles microscópicos. Existe la necesidad de avanzar en la fractura de modelos geométricos a estos niveles por la riqueza que nos aporta, y más en la traumatología, donde las fracturas óseas deben tener en cuenta la complejidad de la estructura jerárquica de los huesos y parámetros como la cantidad de osteonas, conexiones existentes o líneas de cemento a la hora de estudiar la propagación

de la fractura. Para el futuro sería interesante que se pudieran fracturar modelos geométricos en tiempo real, a través de la configuración de una serie de parámetros específicos para diferentes tipos de materiales y de unas propiedades de impacto determinadas por el usuario en zonas concretas. Además, como trabajo futuro queda la evaluación y validación de los modelos generados por diferentes expertos.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido subvencionado por el Ministerio de Economía y Competitividad y la Unión Europea (vía fondos FEDER) a través del proyecto de investigación DPI2015-65123-R.

Referencias

- [GC01] GOBRON S., CHIBA N.: Crack pattern simulation based on 3d surface cellular automata. *The Visual Computer* 17, 5 (jun 2001), 287–309. URL: <https://doi.org/10.1007/s003710100099>, doi:10.1007/s003710100099. 2
- [HBA12] HAMBALI R., BETTAMER A., ALLAOUI S.: Finite element prediction of proximal femur fracture pattern based on orthotropic behaviour law coupled to quasi-brittle damage. *Medical Engineering & Physics* 34, 2 (mar 2012), 202–210. URL: <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2011.07.011>, doi:10.1016/j.medengphy.2011.07.011. 2, 3
- [MBP14] MUGUERCA L., BOSCH C., PATOW G.: Fracture modeling in computer graphics. *Computers and Graphics* 45 (2014), 86 – 100. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0097849314000806>, doi:<https://doi.org/10.1016/j.cag.2014.08.006>. 1, 2
- [MCK13] MÜLLER M., CHENTANEZ N., KIM T.-Y.: Real time dynamic fracture with volumetric approximate convex decompositions. *ACM Transactions on Graphics* 32, 4 (jul 2013), 1. URL: <https://doi.org/10.1145/2461912.2461934>, doi:10.1145/2461912.2461934. 3
- [NAE*07] NAJAFI A. R., ARSHI A., ESLAMI M., FARIBORZ S., MOEINZADEH M.: Micromechanics fracture in osteonal cortical bone: A study of the interactions between microcrack propagation, microstructure and the material properties. *Journal of Biomechanics* 40, 12 (jan 2007), 2788–2795. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2007.01.017>, doi:10.1016/j.jbiomech.2007.01.017. 2, 3
- [NVI] NVIDIA: Nvidia - blast. URL: <https://developer.nvidia.com/what-is-gameworks>. 3
- [PGJPD17] PAULANO-GODINO F., JIMÉNEZ-PÉREZ J. R., JIMÉNEZ-DELGADO J. J.: Issues on the simulation of geometric fractures of bone models. In *VipIMAGE 2017*. Springer International Publishing, oct 2017, pp. 467–475. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-68195-5_51, doi:10.1007/978-3-319-68195-5_51. 1
- [SNHJ15] SABET F. A., NAJAFI A. R., HAMED E., JASIUK I.: Modelling of bone fracture and strength at different length scales: a review. *Interface Focus* 6, 1 (dec 2015), 20150055. URL: <https://doi.org/10.1098/rsfs.2015.0055>, doi:10.1098/rsfs.2015.0055. 2
- [Ura11] URAL A.: Cohesive modeling of bone fracture at multiple scales. *Procedia Engineering* 10 (2011), 2827–2832. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.470>, doi:10.1016/j.proeng.2011.04.470. 2