

A curvature-based method for identifying the contact zone between bone fragments: first steps

J. Roberto Jiménez-Pérez¹, Félix Paulano-Godino¹ and Juan J. Jiménez-Delgado¹

¹Universidad de Jaén, España

Abstract

The use of computer-assisted procedures before or during surgery provides orthopaedic specialists additional information that help them to reduce surgery time and to improve the understanding of the fracture peculiarities. In this context, the calculation of the fracture area is one of the main tasks in order to better comprehend the fracture. This paper presents the initial results of a method for the calculation of the contact zone between bone fragments by using a curvature-based approach. The method only considers cortical tissue, thus it is robust against the deformation or lack of trabecular tissue because of the fracture. In the case of simple fractures, the contact zone coincides with the entire fracture area. However, the calculation of the contact zone in complex fractures avoids calculating correspondences between fragments; hence the proposed method favours the use of puzzle solving methods in order to address the fracture reduction computation. Our proposal is able to overcome the initial limitations of curvature-based methods such as noise sensitivity, and shows a robust behaviour under circumstances of inexact segmentation or low precision.

(see <http://www.acm.org/about/class/class/2012>)

CCS Concepts

• **Computing methodologies** → Shape modeling; Simulation types and techniques; Image processing;

1. Introducción

El desarrollo de técnicas asistidas por ordenador incrementa la información disponible para los especialistas antes de llevar a cabo una cirugía de reducción de fractura ósea. Esta información ayuda a evitar posibles errores de interpretación y a reducir el tiempo de cirugía, con los consecuentes beneficios reflejados en el tratamiento y en el tiempo de recuperación del paciente [Sug03]. La reducción de una fractura ósea requiere la identificación adecuada de los fragmentos de hueso, la colocación de estos en su posición original, y la estabilización de la fractura utilizando, si es necesario, elementos de fijación. Paralelamente, una planificación asistida por ordenador de este tipo de intervenciones se puede dividir en tres grandes etapas: generación de modelos 3D para representar los fragmentos óseos, cómputo de la reducción de la fractura, y análisis de los resultados obtenidos [JPPJ16].

La identificación de la zona de contacto entre fragmentos óseos es una etapa importante en el proceso de reducción. Las zonas de contacto proveen información adicional útil para entender mejor la fractura. Además, la reducción de la fractura puede ser calculada mediante el emparejamiento y la alineación de dichas zonas. Por tanto, para facilitar una planificación automática es importante dotarse con alguna técnica capaz de determinar con claridad la zona de fractura de cada fragmento.

En este artículo proponemos un método que permite determinar

la zona de contacto utilizando como fuente la parte cortical del hueso y prescindiendo de la zona trabecular. El método está basado en el enfoque propuesto en [PJ17], el cual utiliza tanto la zona cortical como la trabecular del hueso. A pesar de que en dicho artículo se descarta el uso de la curvatura estimada para diferenciar la zona de fractura, el preprocesamiento propuesto en este artículo posibilita su uso. El hecho de utilizar tan solo la zona cortical del hueso aporta ventajas con respecto al enfoque original, ya que esta se identifica con mayor claridad en la imagen tomográfica y no se deforma con tanta facilidad como lo hace la trabécula a causa de la fractura.

2. Trabajos previos

En la literatura se han propuesto diferentes métodos para calcular la zona de fractura tras la segmentación de los fragmentos óseos. Winkelbach et al. [WWG03] propusieron un método que se aprovecha de la forma particular de los huesos largos. Para identificar los los vértices del área de fractura, este método comprueba la orientación de las normales de cada vértice y la comparan con el eje longitudinal del hueso. El principal inconveniente de este método es que no funciona cuando las líneas de fractura son aproximadamente paralelas a dicho eje.

Otros enfoques propuestos para identificar zonas de fractura están basados en técnicas estadísticas. Willis et al. [WAT*07] utilizaron un modelo mixto consistente en dos distribuciones de pro-

bilidad Gaussianas para llevar a cabo una clasificación binaria que permite separar las zonas intactas y fracturadas de un fragmento óseo. Tras la clasificación, la superficie fracturada es la región continua de la zona fracturada con más extensión.

Otros autores propusieron métodos interactivos para identificar la zona de fractura en fracturas craneofaciales [CBRY06, CBRY09]. En estos trabajos, los contornos de las zonas de fractura se extraen de forma interactiva a partir de los fragmentos de hueso segmentados. Con ese propósito, los especialistas tienen que seleccionar puntos pertenecientes a la zona fracturada y, a continuación, un algoritmo de trazado de contornos genera el resto de puntos. Una vez calculados los contornos, la superficie de fractura se genera agrupando los contornos extraídos en cada loncha.

El análisis de la curvatura también ha sido previamente utilizado para identificar superficies de fractura. Okada et al. [OIK*09] presentaron un procedimiento basado en la curvatura de los modelos para obtener las líneas de fractura en cada loncha. Con ese fin, los autores generan una imagen de curvatura a partir de la imagen tomográfica 3D. Después, una aplicación interactiva de tracking les permite extraer las líneas de fractura a partir de la imagen de curvatura generada. Fürnstahl et al. [FSG*12] utilizaron filtro basado en normales para identificar puntos candidatos a pertenecer a la superficie de fractura. A continuación, los outliers son eliminados mediante análisis de componentes conectados. Este método puede requerir interacción del usuario para eliminar partes no pertenecientes a la zona de fractura. Kronman y Joskowicz [KJ13] presentaron un método para identificar superficies de fractura utilizando filtros de intensidad y curvatura. En dicho método se utiliza un test de conectividad para eliminar outliers. Más recientemente, [BFPK15] también propusieron un método para identificar zonas de fractura basado en la curvatura de la superficie.

3. Método propuesto

El método propuesto en este artículo posibilita la generación de un conjunto de puntos que representan las zonas de contacto entre fragmentos óseos. Para ello, el método parte de una imagen tomográfica 3D de la fractura. La figura 1 representa las etapas principales del método propuesto. Con el fin de facilitar su comprensión, en esta sección se explica el método para calcular la zona de contacto entre dos fragmentos óseos. No obstante, éste podría ser extendido para calcular la zona de contacto de un conjunto de fragmentos. Para ello, el método debe aplicarse a cada par de fragmentos que se puedan formar en el conjunto. Para ilustrar las distintas etapas, en esta sección vamos a utilizar un caso clínico de una fractura simple de peroné.

En un primer paso se identifica la parte cortical de los fragmentos óseos mediante un proceso de segmentación, con el objetivo de obtener una imagen 3D que incluya únicamente la zona cortical de los fragmentos óseos involucrados en la fractura. En el caso de la fractura de peroné, se ha segmentado la zona cortical de forma manual (figura 2).

En la siguiente etapa se genera una malla de triángulos para cada fragmento óseo utilizando el algoritmo clásico de Marching Cubes [LC87]. La figura 3 muestra una malla generada utilizando esta técnica a partir de la zona cortical segmentada de uno de los

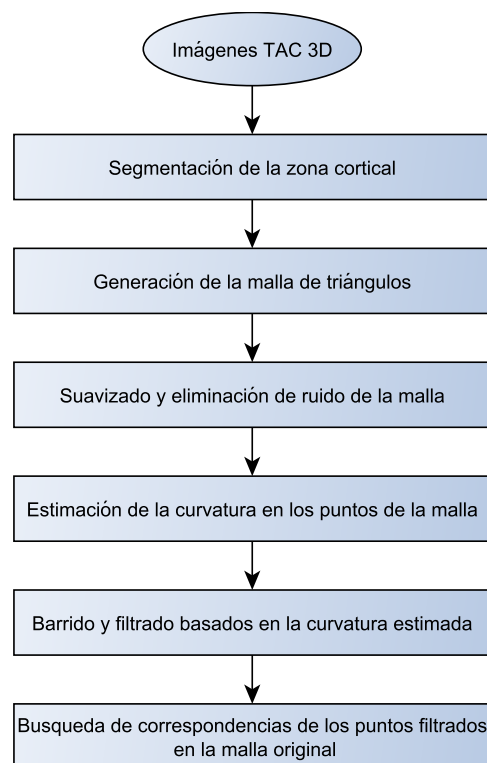


Figure 1: Principales etapas del método propuesto.

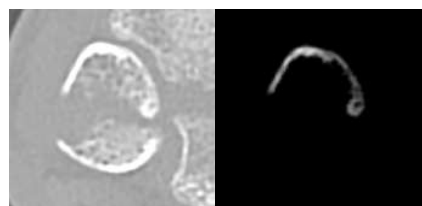


Figure 2: Izquierda, imagen CT original. Derecha, imagen CT tras segmentar la zona cortical de un fragmento.

fragmentos de peroné. Se pueden apreciar las irregularidades en la superficie del modelo debido a la baja resolución de la imagen tomográfica 3D de la que se parte, y a posibles errores cometidos en la segmentación de la zona cortical.

A continuación, con objeto de uniformar la curvatura de los modelos fuera de la zona de fractura, se lleva a cabo un suavizado de los mismos mediante la estimación de una superficie implícita de Poisson [KBH06]. Además, este proceso contribuye a evitar una dependencia excesiva de la calidad del proceso de segmentación y de los datos originales. El algoritmo de reconstrucción de Poisson recibe como entrada los puntos y las normales generadas en la etapa anterior por Marching Cubes. Como se puede ver en la figura 4, en el caso de los fragmentos de peroné esta estimación suaviza la curvatura del modelo y permite eliminar ruido y artefactos en el mismo.

El método presentado en este artículo está basado en la estima-

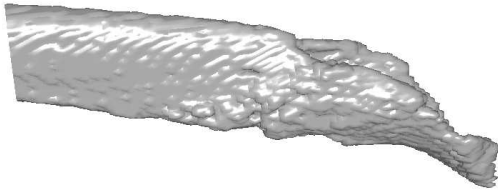


Figure 3: Malla generada por el algoritmo de Marching Cubes a partir de la imagen 3D segmentada de la zona cortical de uno de los fragmentos de peroné.

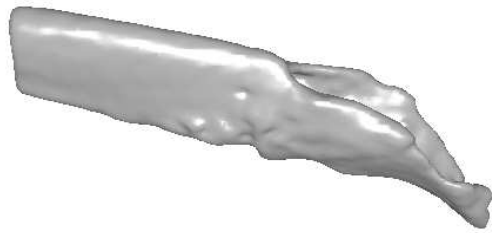


Figure 4: Reconstrucción de Poisson aplicada a los puntos y las normales generadas por Marching Cubes en el caso de los fragmentos de peroné.

ción de la curvatura en cada uno de los puntos de los modelos 3D que representan los fragmentos óseos. Para ello, se ha utilizado el algoritmo para estimar la curvatura media en cada punto implementado en VTK [SML04].

Una vez estimada la curvatura de los modelos que representan los fragmentos óseos, el método realiza un filtrado de los puntos basado en el método propuesto en [PJ17]. En una primera fase, el método realiza dos barridos para obtener los puntos de cada fragmento que tienen contacto directo con el fragmento opuesto. Estos puntos son los puntos candidatos a pertenecer a la zona de contacto. En los siguientes párrafos se explica el proceso de barrido que permite calcular la zona de contacto de uno de los fragmentos. Dicho proceso debe repetirse, intercambiando el papel de los fragmentos, para calcular la zona de contacto del otro fragmento óseo.

La dirección de barrido queda determinada por el segmento que une el centroide de ambos fragmentos. Al trabajar con los vértices de los modelos en el espacio 3D, el barrido requiere una discretización previa del espacio. Para delimitar el espacio en el que se realiza la discretización, y por tanto el barrido, se calcula la caja envolvente orientada del modelo, cuya orientación tiene la restricción de ser paralela a la dirección de barrido. Una vez definida la caja envolvente, se divide su espacio mediante una rejilla regular. Esta rejilla tiene aproximadamente la misma resolución que la imagen tomográfica 3D original, con el fin de conseguir que no más de 2 o 3 puntos queden contenidos en cada celda de la misma.

Finalmente, se realiza un barrido en la dirección que va desde el centroide del fragmento opuesto, hasta el centroide del fragmento cuya zona de contacto está siendo controlada. Considerando que dicha dirección determina el eje Z, el barrido comienza analizando

las celdas cuya posición en z es 0. Si la celda V_{xyz_k} no contiene ningún vértice, esta se descarta y se analiza la celda $V_{xyz_{k+1}}$. Por el contrario, si la celda V_{xyz_k} contiene al menos un punto, todos los puntos clasificados en ella son candidatos a pertenecer a la zona de contacto y el resto de celdas con las mismas coordenadas en x e y no se analizan. Este proceso de barrido está explicado en detalle en [PJ17].

Tras el barrido, la zona de contacto se calcula mediante un filtrado por curvatura de los puntos candidatos. El umbral de valores de curvatura es especificado por el usuario y dependerá de cada caso. La figura 5 muestra el resultado de aplicar el filtrado a los modelos que representan los fragmentos de peroné.

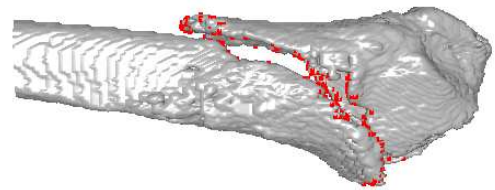


Figure 5: Zona de contacto generada por el método propuesto en el caso de los fragmentos de peroné.

La zona de contacto obtenida no representa de manera fidedigna la zona de fractura del fragmento original debido al suavizado realizado durante la estimación de la superficie de Poisson. Con el objetivo de corregir este error, en la última etapa del método se buscan correspondencias de los puntos de la zona de contacto en la malla generada mediante Marching Cubes en las primeras etapas del método. El criterio de la búsqueda es la minimización de la distancia entre el punto original y su correspondiente vértice en la malla.

4. Discusión y conclusiones

En este artículo, se presentan los primeros pasos de un método basado en curvatura para calcular la zona de contacto entre fragmentos óseos. Este método está derivado del enfoque propuesto en [PJ17]. Aunque en dicho artículo se desestima el uso de la curvatura por no filtrar bien la zona de fractura, el hecho de considerar sólo la zona cortical, junto con el preprocesamiento propuesto en este artículo, posibilita su uso. El prescindir de la zona trabecular aporta ventajas con respecto al enfoque original, ya que el tejido cortical puede distinguirse con mayor claridad en la imagen tomográfica, y no se deforma con tanta facilidad como lo hace la trabécula a causa de la fractura. A diferencia de otros métodos de la literatura basados en la curvatura, la interacción de usuario requerida por nuestro método es mínima, ya que esta se limita a establecer valores umbral.

El suavizado de los modelos llevado a cabo otorga robustez del método ante variaciones en la segmentación. Por tanto, a pesar de que en las pruebas realizadas hasta ahora la segmentación se ha llevado a cabo de forma manual, se podrían utilizar técnicas propuestas en la literatura que han demostrado tener éxito en la segmentación de tejido óseo fracturado a partir de imágenes TAC [FSH10, LLH*12, PJP14b].

Debido a que el resultado del barrido que se lleva a cabo en una de las fases del método depende de la orientación de los fragmentos, el enfoque propuesto funciona sin modificación en el caso de fracturas sin desplazamiento. En el caso de fracturas con desplazamiento, el método puede requerir un alineamiento previo de los fragmentos óseos. Para ello se pueden utilizar herramientas interactivas [PJP14a], o utilizar como plantilla el hueso contralateral [OIK*09, FSG*12]. No obstante, el desarrollo de nuevos algoritmos que permitan realizar un alineamiento aproximado de los fragmentos de manera automática y sin necesidad de utilizar plantillas, permitiría mejorar el tiempo de ejecución de nuestro enfoque y reducir los requisitos previos para su aplicación. La implementación actual tarda unos pocos segundos en calcular la zona de contacto entre dos fragmentos.

En algunos casos hemos detectado que, tras realizar el filtrado basado en la curvatura, se obtienen puntos aislados. En futuras versiones del método, estos puntos pueden ser eliminados utilizando filtros comúnmente utilizados en el procesamiento de nubes de puntos, los cuales están basados en la distancia entre puntos o incluso en la distribución estadística de la distancia entre un punto y sus vecinos en el espacio.

Una vez llevados a cabo en el método los ajustes descritos en esta sección, podremos valorar el error cometido por el mismo a la hora de identificar la zona de contacto resultante en distintos tipos de fractura, así como obtener métricas de error comparándola con la zona esperada por especialistas. No obstante, los resultados obtenidos hasta ahora han sido prometedores, observándose una aproximación razonable a la solución esperada desde un punto de vista visual. Además, tal y como permiten otros métodos propuestos para calcular la zona de contacto entre fragmentos óseos, se pueden utilizar algoritmos de registro, como ICP [BD92], con el fin de alinear correctamente las zonas de contacto, y por tanto calcular la reducción de la fractura ósea previa a la fase de estabilización.

Agradecimientos

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

References

- [BD92] BESL P. J., D. M. N.: A method for registration of 3-D shapes. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 14, 2 (1992), 239–256. doi:10.1109/34.121791. 4
- [BFPK15] BUSCHBAUM J., FREMD R., POHLEMANN T., KRISTEN A.: Computer-assisted fracture reduction: a new approach for repositioning femoral fractures and planning reduction paths. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery* 10, 2 (feb 2015), 149–159. doi:10.1007/s11548-014-1011-2. 2
- [CBRY06] CHOWDHURY A., BHANDARKAR S., ROBINSON R., YU J.: Virtual Craniofacial Reconstruction from Computed Tomography Image Sequences Exhibiting Multiple Fractures. In *2006 International Conference on Image Processing* (2006), IEEE, pp. 1173–1176. doi:10.1109/ICIP.2006.312766. 2
- [CBRY09] CHOWDHURY A. S., BHANDARKAR S. M., ROBINSON R. W., YU J. C.: Virtual multi-fracture craniofacial reconstruction using computer vision and graph matching. *Computerized medical imaging and graphics : the official journal of the Computerized Medical Imaging Society* 33, 5 (July 2009), 333–42. doi:10.1016/j.compmedimag.2009.01.006. 2
- [FSG*12] FÜRNSTAHL P., SZÉKELY G., GERBER C., HODLER J., SNEDEKER J. G., HARDERS M.: Computer assisted reconstruction of complex proximal humerus fractures for preoperative planning. *Medical image analysis* 16, 3 (Apr. 2012), 704–20. doi:10.1016/j.media.2010.07.012. 2, 4
- [FSH10] FORNARO J., SZÉKELY G., HARDERS M.: Semi-automatic segmentation of fractured pelvic bones for surgical planning. *Biomedical Simulation* 5958 (2010), 82–89. doi:10.1007/978-3-642-11615-5_9. 4
- [JPPJ16] JIMÉNEZ J. J., PAULANO F., PULIDO R., JIMÉNEZ J.: Computer assisted preoperative planning of bone fracture reduction: simulation techniques and new trends. *Medical Image Analysis* 30 (2016), 30–45. doi:10.1016/j.media.2015.12.005. 1
- [KBH06] KAZHDAN M., BOLITHO M., HOPPE H.: Poisson surface reconstruction. In *Proceedings of the fourth Eurographics symposium on Geometry processing* (Cagliari, Sardinia, Italy, 2006), Eurographics Association, pp. 61–70. 2
- [KJ13] KRONMAN A., JOSKOWICZ L.: Automatic bone fracture reduction by fracture contact surface identification and registration. In *2013 IEEE 10th International Symposium on Biomedical Imaging* (Apr. 2013), IEEE, pp. 246–249. doi:10.1109/ISBI.2013.6556458. 2
- [LC87] LORENSEN W. E., CLINE H. E.: Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm. In *ACM Siggraph Computer Graphics* (1987), vol. 21, ACM, pp. 163–169. doi:10.1145/37401.37422. 2
- [LLH*12] LEE P.-Y., LAI J.-Y., HU Y.-S., HUANG C.-Y., TSAI Y.-C., UENG W.-D.: Virtual 3D planning of pelvic fracture reduction and implant placement. *Biomedical Engineering: Applications, Basis and Communications* 24, 03 (jun 2012), 245–262. 4
- [OIK*09] OKADA T., IWASAKI Y., KOYAMA T., SUGANO N., CHEN Y.-W., YONENOBU K., SATO Y.: Computer-assisted preoperative planning for reduction of proximal femoral fracture using 3-D-CT data. *IEEE transactions on bio-medical engineering* 56, 3 (Mar. 2009), 749–59. doi:10.1109/TBME.2008.2005970. 2, 4
- [PJ17] PAULANO F., JIMÉNEZ J. J.: Identification of fracture zones and its application in automatic bone fracture reduction. *Computer Methods and Programs in Biomedicine* 141 (2017), 93 – 104. doi:http://doi.org/10.1016/j.cmpb.2016.12.014. 1, 3
- [PJP14a] PAULANO F., JIMÉNEZ J., PULIDO R.: An application to interact with 3d models reconstructed from medical images. In *Proc. of the 9th International Conference on Computer Vision Theory and Applications (VISAPP 2014)* (2014), pp. 224–229. 4
- [PJP14b] PAULANO F., JIMÉNEZ J. J., PULIDO R.: 3D segmentation and labeling of fractured bone from CT images. *The Visual Computer* 30, 6-8 (may 2014), 939–948. doi:10.1007/s00371-014-0963-0. 4
- [SML04] SCHROEDER W., MARTIN K., LORENSEN B.: *The Visualization Toolkit, Third Edition*. Kitware Inc., 2004. 3
- [Sug03] SUGANO N.: Computer-assisted orthopedic surgery. *Journal of Orthopaedic Science* 8, 3 (2003), 442–448. doi:10.1007/s10776-002-0623-6. 1
- [WAT*07] WILLIS A., ANDERSON D., THOMAS T., BROWN T., MARSH J. L.: 3D reconstruction of highly fragmented bone fractures. In *Medical Imaging 2007: Image Processing. Proceedings of the SPIE* (2007), p. 65121. doi:10.1117/12.708683. 1
- [WWG03] WINKELBACH S., WESTPHAL R., GOESLING T.: Pose Estimation of Cylindrical Fragments for Semi-automatic Bone Fracture Reduction. In *Pattern Recognition, LNCS 2781*, Michaelis B., Krell G., (Eds.), vol. 2781 of *Lecture Notes in Computer Science*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2003, pp. 566–573. doi:10.1007/978-3-540-45243-0_72. 1