



SEGMENTACIÓN DE MALLAS 3D DE EDIFICIOS HISTÓRICOS PARA LEVANTAMIENTO ARQUITECTÓNICO

3D MESH SEGMENTATION OF HISTORIC BUILDINGS FOR ARCHITECTURAL SURVEYS

Borja Javier Herráez* , Eduardo Vendrell 

Instituto de Automática e Informática Industrial, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, España.
borherco@fiv.upv.es; even@upv.es

Lo más destacado:

- Se propone un método de segmentación de mallas 3D enfocado a la representación de edificios históricos.
- Se utiliza la teoría de grafos para modelar las características de las fachadas y poder encontrarlas automáticamente.
- La metodología implementada es adecuada y puede utilizarse en técnicas de levantamiento arquitectónico 3D.

Abstract:

Advances in three-dimensional (3D) acquisition systems have introduced this technology to more fields of study, such as archaeology or architecture. In the architectural field, scanning a building is one of the first possible steps from which a 3D model can be obtained and can be later used for visualisation and/or feature analysis, thanks to computer-based pattern recognition tools. The automation of these tools allows for temporal savings and has become a strong aid for professionals, so that more and more methods are developed with this objective. In this article, a method for 3D mesh segmentation focused on the representation of historic buildings is proposed. This type of buildings is characterised by having singularities and features in façades, such as doors or windows. The main objective is to recognise these features, understanding them as those parts of the model that differ from the main structure of the building. The idea is to use a recognition algorithm for planar faces that allows users to create a graph showing the connectivity between them, therefore allowing the reflection of the shape of the 3D model. At a later step, this graph is matched against some pre-defined graphs that represent the patterns to look for. Each coincidence between both graphs indicate the position of one of the characteristics sought. The developed method has proved to be effective for feature detection and suitable for inclusion in architectural surveying applications.

Keywords: segmentation; 3D meshes; graphs; pattern recognition; features

Resumen:

Los avances en los sistemas de adquisición tridimensionales (3D) han provocado que este tipo de tecnología se introduzca en cada vez más campos de estudio, como son la arqueología o la arquitectura. En el campo arquitectónico el escaneado de edificios constituye el primer paso con el que se obtienen modelos 3D que más tarde, pueden ser utilizados para la visualización y/o análisis de las características de los mismos edificios, gracias a herramientas informáticas de reconocimiento de patrones. La automatización de estas herramientas permite un ahorro temporal y supone una ayuda a los profesionales, por lo que cada vez más métodos se desarrollan con este objetivo. En este artículo se propone un método de segmentación de mallas 3D enfocado a la representación de edificios históricos. Este tipo de edificios se caracterizan por tener singularidades y elementos característicos en las fachadas, tales como puertas o ventanas. El objetivo principal consiste en reconocer estas características en los edificios, entendiéndose como tales aquellas partes del modelo que difieren de la estructura principal del mismo. La idea es utilizar un algoritmo de reconocimiento de caras planas que permita crear un grafo que muestre la conectividad entre ellas y que por tanto refleje la forma del modelo tridimensional. En una etapa posterior, este grafo se compara con grafos predefinidos que conforman los patrones a buscar. Cada coincidencia entre ambos grafos indica la posición de una de las características buscadas. El método desarrollado ha resultado ser eficaz para la detección de características y adecuado para su inclusión en aplicaciones de levantamiento arquitectónico.

Palabras clave: segmentación; mallas 3D; grafos; reconocimiento de patrones; características

1. Introducción

En la actualidad, los objetos 3D se representan mayormente a partir de mallas poligonales, esto es, un conjunto de caras planas conectadas que conforman y aproximan la propia superficie del objeto.

Así, en las aplicaciones gráficas que incluyen representación 3D de objetos (juegos de ordenador, animaciones, etc.), estos se conforman en su mayoría por modelos o mallas poligonales cuyo elemento principal suele ser una cara triangular, representada por sus tres vértices y el vector normal a la superficie.

* Corresponding author: Borja Javier Herráez, borherco@fiv.upv.es



Cuando por cualquier motivo hay que analizar o tratar partes diferenciadas de estos modelos poligonales, se necesita *segmentar* la malla 3D. El proceso de segmentación se define como el acto de dividir o formar partes o *segmentos* de un todo. La segmentación de mallas es un componente importante que ayuda a otras tareas como la edición, el texturizado o la extracción de características de las mallas, entre otras actividades.

Segmentar una malla 3D consiste en fraccionar la misma en diferentes partes, aunque no significa necesariamente separar la malla en elementos apartados, si no en aplicar procedimientos para indicar qué partes del objeto pertenecen a un grupo determinado, en función de diversas características del mismo.

En este artículo se presenta un método de segmentación que tiene como objetivo distinguir las partes de un edificio, con el fin de asistir a los procedimientos de levantamiento arquitectónico de edificios históricos. Este trabajo surge a partir de la colaboración entre el Grupo de Robótica del Instituto Universitario de Automática e Informática Industrial (AI2) de la Universitat Politècnica de València y el *Dipartimento di Architettura de la Università degli Studi di Firenze*. En concreto, esta colaboración se plasma en el apoyo tecnológico por parte del AI2 a los procesos de levantamiento que se llevan a cabo en el *Dipartimento di Architettura de la Università degli Studi di Firenze*.

Un levantamiento arquitectónico consiste en el estudio y conocimiento completo de un edificio, incluida su forma y estructura, por lo que en este sentido los sistemas informáticos pueden ayudar en el almacenamiento y la gestión de la información asociada a este proceso.

En el artículo, después de describirse las técnicas de segmentación más usuales, se abordan las fases establecidas en el proceso propuesto.

2. La segmentación de mallas poligonales

Los métodos de segmentación, de cara a reconocer partes de un objeto, se pueden utilizar en datos primarios del mismo, como son las nubes de puntos que se obtienen del escaneado 3D de objetos reales, en este caso edificios. No obstante, usualmente el principal objetivo, una vez obtenida la nube de puntos, es la reconstrucción del modelo 3D del objeto escaneado como un modelo geométrico consistente, normalmente una malla poligonal. Para este cometido, existen dos tipos de procedimientos: los métodos basados en datos y los basados en modelos (Smpath & Shan, 2010). Los primeros se fundamentan principalmente en la detección de aristas sobre nubes de puntos. En un paso posterior, las aristas se conectan para formar las regiones que finalmente conformarán la malla 3D.

Una de las técnicas que se suele utilizar recurre a la envolvente convexa y una búsqueda por k-vecinos más cercanos (Wang & Shan, 2009). Otra alternativa se centra en detectar planos en pequeñas zonas de la nube de puntos y después utilizar un análisis de componentes conectadas para extender estos planos (Verma, Kumar, & Hsu, 2006). Otras técnicas hacen uso de las imágenes generadas por los escáneres para crear las superficies planas, que en última instancia formarán el modelo 3D de los edificios (Stamos, Gene, Wolberg, & Zokai, 2006). Por

otro lado, existen métodos de reconstrucción basados en modelos matemáticos de objetos a buscar, como es el caso de los planos. Las técnicas más utilizadas para detectar planos son la transformada de Hough (Duda & Hart, 1972) y el algoritmo RANSAC (Fischler & Bolles, 1981).

La segmentación de mallas puede interpretarse desde dos puntos de vista diferentes (Attene et al. 2006). Por un lado, de forma puramente geométrica, dividiendo la malla en un número de conjuntos que son uniformes respecto a una misma propiedad, como por ejemplo la curvatura de la superficie que definen. Por otro lado, se puede abordar la segmentación de manera semántica, con el objetivo de identificar partes de la malla que se corresponden con características relevantes de la forma o volumen del objeto y que tienen un significado propio. Por ejemplo, identificar las extremidades en modelos que representen animales o reconocer ventanas sobre modelos que representan edificios.

Entre los diferentes métodos existentes de segmentación de mallas se encuentran primeramente los que hacen uso de grafos para representar las relaciones de orientación existentes entre las caras del objeto 3D, y así posteriormente analizar las relaciones entre ellas en busca de características (Marefat & Kashyap, 1990).

Otro procedimiento para segmentar mallas 3D consiste en el denominado *algoritmo de línea divisoria de aguas (watersheds)*, en el que la segmentación se realiza en analogía a la forma en que el agua inunda una superficie. A medida que el agua va llenando una cuenca, existirán puntos donde las regiones de inundación se encuentran. Estos puntos construyen las líneas de cuencas que dividen la superficie en regiones distintas. Las diferentes cuencas representan áreas de segmentación (Mangan & Whitaker, 1999). Una mejora a este algoritmo supone la introducción de la llamada *regla de las visiones genéricas*, que establece que un objeto está segmentado por la percepción humana según zonas de concavidad (Page, Koschan, & Abidi, 2003).

Otro método comúnmente empleado se basa en la obtención en una primera etapa del esqueleto de los objetos para guiar la segmentación (Li, Toon, & Huang, 2001). Así, primero se simplifica la superficie de los modelos mediante un método de contracción de aristas, hasta que se obtiene un modelo 3D compuesto en su totalidad por las aristas que forman el esqueleto. En un paso posterior, un plano recorre el esqueleto de manera que la intersección del plano con la malla delimita los contornos de segmentación. El método analiza la forma en que varían los contornos, según cambia el plano de intersección para definir los límites de la segmentación.

Existen otras técnicas que hacen uso de la curvatura gaussiana para delimitar los puntos frontera de las regiones (Zhang, Paik, Koschan, & Abidi, 2002), o las denominadas técnicas de *spectral clustering*, que utilizan matrices de afinidad para hallar la probabilidad de cada pareja de caras a pertenecer a la misma porción de la malla (Liu & Zhang, 2004).

Los algoritmos basados en expansión o crecimiento de regiones, consisten en expandir ciertos elementos denominados *semilla (seed)*, a los que se les aplica una serie de reglas para determinar hasta qué punto pueden ser expandidos. Este tipo de algoritmos se aplicaron inicialmente sobre imágenes y posteriormente se adaptaron a mallas 3D (Vieira & Shimada, 2005).

Por último los métodos basados en *clusters* son similares a los de expansión de regiones, solo que los puntos a expandir cambian según una función predeterminada. Un ejemplo de esta aproximación supone el uso del algoritmo *k-means*, el cual agrupa una serie de muestras en *k* conjuntos diferenciados, donde cada muestra es asociada al grupo cuya media de valores se aproxime más a sí misma (Tralie, 2010).

Una selección de los principales métodos de segmentación de mallas se detalla en (Chen, Golovinsky, & Funkhouser, 2009), donde se realiza un estudio con el objetivo de comparar analíticamente los diferentes algoritmos. Se utilizaron 380 mallas, segmentadas de manera manual por personas ajenas al proyecto haciendo uso de la plataforma Amazon Mechanical Turk (Amazon, 2008). Los algoritmos analizados fueron los siguientes, a los que referimos a sus artículos originales: *K-means* (Shalfman, Tal, & Katz, 2002), *random walks* (Lai, Hu, Martin, & Rosin, 2008), *fitting primitives* (Attene, Falcidieno, & Spagnuolo, 2006), *normalized cuts* y *randomized cuts* (Golovinskiy & Funkhouser, 2008), *core extraction* (Katz, Leifman, & Tal, 2005) y *shape diameter function* (Shapira, Shamir, & Cohen-or, 2008). En este estudio, se utilizaron los parámetros recomendados por los autores para cada algoritmo sobre cada uno de los objetos 3D. Sus conclusiones fueron que ningún algoritmo es mejor que otro para todos los tipos de objetos, no obstante, los algoritmos basados en características no locales producen segmentaciones más similares a las realizadas manualmente por los humanos.

En el presente artículo se ha implementado un método que, en primer lugar, identifica las caras planas del objeto 3D. Para lograr este objetivo se ha optado por un algoritmo de crecimiento de regiones (Gonzalez & Woods, 2004). Estos algoritmos se basan en la proximidad y la similitud de los puntos. En el caso de una malla 3D los puntos son los triángulos que conforman el mallado de los objetos, los cuales cumplen la condición de proximidad entre sus vecinos al estar unidos directamente mediante aristas. Uno de los principales problemas de estos métodos es la elección de las semillas iniciales para expandir las regiones, pero este problema se simplifica en el método desarrollado, ya que cualquier triángulo puede actuar como semilla inicial. Además, debido a que se dispone de la información geométrica de los triángulos y a la información topológica dada por su conectividad, resulta sencillo establecer el criterio de expansión de las semillas, el cual se explicará más detalladamente en siguientes secciones del documento. Por este motivo, los algoritmos de crecimiento de regiones proporcionan simplicidad de diseño para el problema de identificar las caras planas y rapidez a la hora de procesar todos los triángulos del modelo 3D.

Por otro lado, se ha optado por un algoritmo basado en grafos para el reconocimiento de las características. Los grafos son una estructura ampliamente utilizada en todo tipo de ámbitos de la ciencia y la tecnología, y permiten modelizar y resolver una amplia variedad de problemas. En el caso que nos ocupa, se modela el problema de reconocimiento de características como un problema de comparación entre grafos. Así, los grafos contienen una gran variedad de métodos disponibles y resulta sencilla su implementación. Por otra parte, permiten reducir

drásticamente la información utilizada para el problema que se plantea, ya que se reduce gran parte de la información de la geometría (vértices, aristas y caras) en un solo nodo del grafo, por lo que resultan una opción apropiada para el tratamiento de mallas 3D (Li & Kuo, 1988).

Existe una alternativa al método propuesto en este artículo que hace uso de un grafo que representa los triángulos de la malla de cara a su segmentación, aunque este método se centra en el uso de aristas adicionales que relacionan una serie de modelos de la misma categoría del objeto a segmentar de cara a asistir todo el proceso (Golovinskiy & Funkhouser, 2009).

El objetivo del método que se propone consiste en aplicar un algoritmo de clasificación de características a una malla 3D que representa el modelo geométrico de un edificio histórico. Este proceso se contextualiza en los estudios de levantamiento arquitectónico que lleva a cabo el *Dipartimento di Architettura de la Università degli Studi di Firenze* sobre una serie de pequeños pueblos medievales en el valle de *La Valleriana*. Los estudios contemplan no sólo una aproximación histórica y sociológica, sino también una completa información acerca de la arquitectura de los edificios que componen estas poblaciones. Para este propósito, se realizó una aplicación que relaciona un sistema de información con los modelos 3D de esta ciudad (Troiano, Garcia, Merlo, & Vendrell, 2014). A partir de los modelos de los edificios obtenidos con escáneres laser, las nubes de puntos resultantes se trataron con un software de poligonización que transformó los puntos en una malla triangular. Por otro lado, se hizo uso de un GIS (Geographic Information System) diseñado para capturar, almacenar, analizar, manejar y presentar todo tipo de datos geográficos (Kenneth & Lynch, 1995). A partir de este esquema se diseñó una aplicación que permitía introducir información a los modelos, seleccionar las partes de la malla 3D y la posterior introducción de información relativa a éstas, lo que conforma un proceso de etiquetado semántico manual, es decir, asignar un conjunto de información a un grupo de triángulos que forman una parte de la estructura del edificio. El problema radica en que este proceso es costoso temporalmente para el usuario y requiere de mucha repetición. El presente artículo pretende ser una aproximación a un etiquetado semántico automático, que sea capaz de reconocer las partes del objeto 3D y así se les pueda asignar información según su tipo, permitiendo que en un futuro pueda añadirse al programa anterior y reduzca los tiempos que requiere el usuario para realizar este proceso de manera manual.

En comparación con los edificios que se pueden encontrar en las ciudades actuales, una fachada de un edificio histórico es mucho más irregular, lo cual genera, después del escaneado, una malla mucho más densa, es decir, con un mayor número de triángulos. Además, las características a encontrar son más dispares que en los edificios actuales. Por ejemplo, es habitual que un edificio de carácter histórico (Fig. 1), y mayormente aquellos más comunes que se encuentran en centros históricos de pueblos o ciudades, tenga ventanas de diferentes formas o tamaños, o fachadas que se adaptan a trazados irregulares de la calle. En cambio, en la actualidad prima la regularidad en los edificios (como los de viviendas), donde el diseño hace que el tamaño de las ventanas, puertas, etc., sea más uniforme en toda la fachada (Fig. 2).



Figura 1: Ejemplo de edificio objeto de estudio en el pueblo de Pietrabuona.

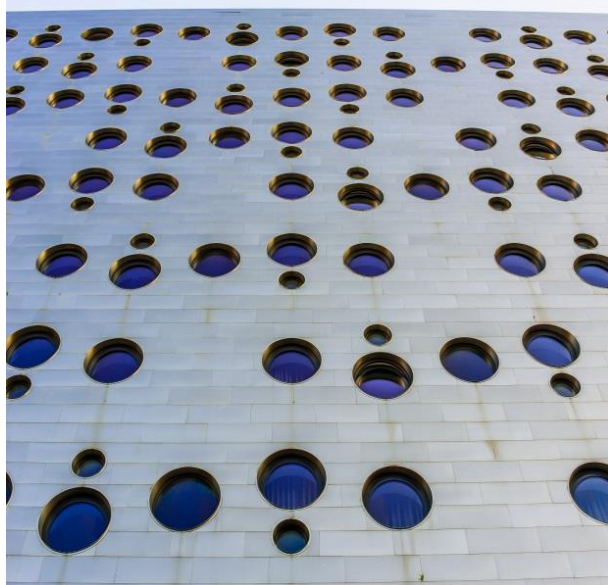


Figura 2: Ejemplo de ventanas que no siguen el principio de ortogonalidad.

3. Método propuesto

La metodología desarrollada emplea un modelo poligonal simplificado como entrada de datos, resultado del escaneado del edificio real, al que se le aplica un proceso posterior de simplificación de la malla obtenida. Estos métodos se aplican para restar densidad a la malla obtenida de la triangulación de las nubes de puntos. Aunque estos procesos pueden restar resolución a la malla, las técnicas empleadas, ya sean automáticas o asistidas por el usuario, buscan un compromiso entre simplificación y pérdida de detalle.

El método propuesto aborda como objetivo primordial la localización de partes diferenciadas de un edificio a partir del ángulo que forman los planos que las representan. Así, el principio de ortogonalidad es el argumento seguido para buscar partes diferenciadas, dado que en la mayoría de edificios este principio se encuentra en las caras que componen los elementos que los componen (puertas, ventanas).

No obstante, el método permite detectar otros elementos cuyas características no guardan el principio de

ortogonalidad, como por ejemplo ventanas redondas como las mostradas en la Fig. 2.

El procedimiento desarrollado puede ser resumido en los siguientes pasos:

1. Un algoritmo de crecimiento de regiones que distingue las caras planas.
2. Un algoritmo basado en grafos que discierne las características de la malla.

Ambos algoritmos se aplican secuencialmente, es decir, primero se extraen las caras planas del modelo, con la finalidad de crear un grafo que será empleado como entrada para el segundo algoritmo, encargado de distinguir las características del modelo.

3.1. Distinción de caras planas

Como se ha comentado anteriormente, para proceder a la distinción de las caras planas, se emplea un algoritmo de crecimiento de regiones. El primer paso que sigue este tipo de algoritmos consiste en encontrar un conjunto de elementos semilla. Una vez encontrados se expanden hasta que se alcanza una condición de parada.

El método desarrollado considera cada triángulo del malla 3D como un elemento básico potencial. Se establece un procedimiento de coloreado para identificar regiones, de manera que cada región plana estará formada por un conjunto de triángulos a los que se les asigna un mismo color. Así, a lo largo del proceso, cada triángulo que no tenga asignado un color es considerado como una *cara semilla*. Al inicio del procedimiento ningún triángulo dispone de un color asignado, por lo que cualquier triángulo que compone la malla podrá ser escogido inicialmente como cara semilla.

El siguiente paso consiste en expandir la región de las caras semilla. Para ello se comprueban sus triángulos vecinos, considerándose triángulos vecinos aquellos que comparten uno o dos vértices. A continuación se calcula el producto escalar de sus normales, cuyo resultado indica el ángulo que existe entre ellas. Se considera que un ángulo pequeño o nulo denota que los triángulos forman parte de la misma cara plana, mientras que un ángulo grande indica que forman parte de regiones diferentes. Se establece un umbral o *factor de coplanaridad* de manera que si el ángulo calculado a partir del producto escalar de las normales está por debajo de este umbral se asigna la misma región a ambos triángulos. En caso contrario, se asignan regiones diferentes. El resultado de aplicar el procedimiento anteriormente descrito se muestra en la Figura 3.

Una vez procesados todos los triángulos vecinos a la cara semilla, se detiene el proceso de expansión de la región y se prosigue buscando otra cara semilla para repetir el procedimiento. El algoritmo continúa hasta que no quedan más semillas y se tiene como resultado un conjunto de regiones coloreadas, formadas por triángulos y sus vecinos correspondientes en la misma cara plana.

Para gestionar estas regiones se ha utilizado una estructura de datos llamada *Merge-Find Set* (MFSet) (Galler & Fischer, 1964). Un MFSet permite organizar una serie de conjuntos disjuntos con un número fijo de elementos, y cada subconjunto es identificado por un miembro del grupo que actúa como *representante* del mismo.

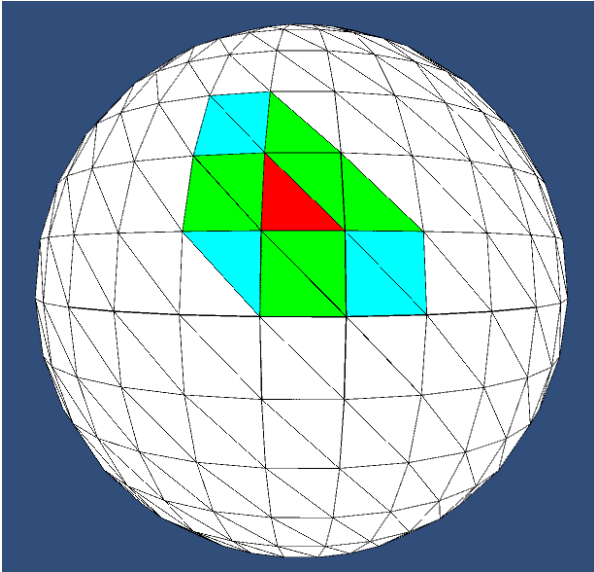


Figura 3: Ejemplo de malla poligonal en la que se distingue la cara semilla (rojo), las caras vecinas para expandir la región (verde) y las caras vecinas descartadas para la expansión de la región (azul).

En el método propuesto, los representantes de cada grupo contienen el color que va a ser asignado al resto de triángulos del conjunto. Cada vez que se detecta que dos triángulos pertenecen a la misma región plana se les asigna el mismo conjunto dentro de la mencionada estructura. De esta manera quedan clasificados los triángulos dentro de cada región plana.

3.2. Distinción de características

Se diferencian dos tipos de características, por un lado las características *cóncavas* o hendiduras en la fachada principal, tales como ventanas o puertas, y por otro lado las características *convexas* o salientes, como canalones o escudos ornamentales (Fig. 4).

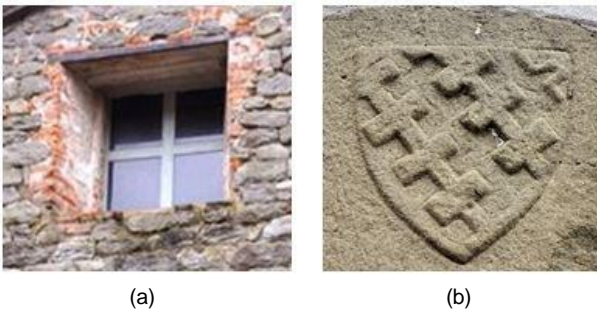


Figura 4: Ejemplo de elementos a buscar: a) Ventana; b) Escudo Ornamental.

Tras haber diferenciado las regiones planas del objeto, el siguiente paso es construir un *grafo topológico*. El grafo topológico describe las relaciones de vecindad entre las regiones planas detectadas en el paso anterior, siendo cada región plana un nodo del grafo, unidos por aristas con sus regiones planas vecinas. La propiedad que se explota de los grafos topológicos se centra en que los vértices que conforman las características del modelo se unen al resto del grafo por un vértice de corte, también llamado punto de articulación.

Por ejemplo, si se considera el caso de la fachada de un edificio, el vértice de corte se correspondería con la pared

principal de la misma. Con el fin de detectar los vértices de corte se ha empleado el algoritmo de Tarjan (Tarjan & Hopcroft, 1973). Si se elimina este vértice de corte, se divide el grafo inicial en varios subgrafos, cada uno representando una de las características que se buscan, como se puede apreciar en la Figura 5.

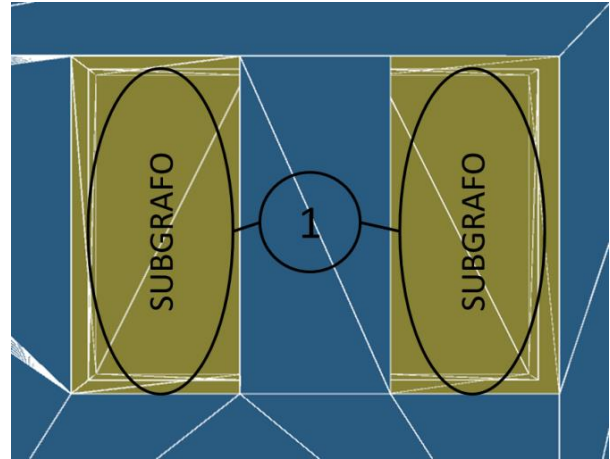


Figura 5: Representación parcial de una fachada en forma de grafo, que incluye la pared principal (en color azul) y 2 ventanas (en color marrón).

El siguiente paso consiste en definir un *grafo de consulta*. Los grafos de consulta son grafos topológicos que se corresponden con una característica concreta, de manera que cada característica representa un patrón determinado. Estos grafos son definidos por el usuario, con ello se toma ventaja del conocimiento que posee el propio usuario en la definición de la topología de las características y así poder representarlas como un grafo.

En la Fig. 6 se aprecia como una ventana simple puede ser definida fácilmente como un grafo de consulta, a partir de los elementos o caras principales que la definen. Esto es, la cara plana que define el hueco de la ventana y las cuatro caras que delimitan ese hueco. En la figura, la ventana aparece como un desplegable para facilitar su traslación al grafo de consulta asociado.

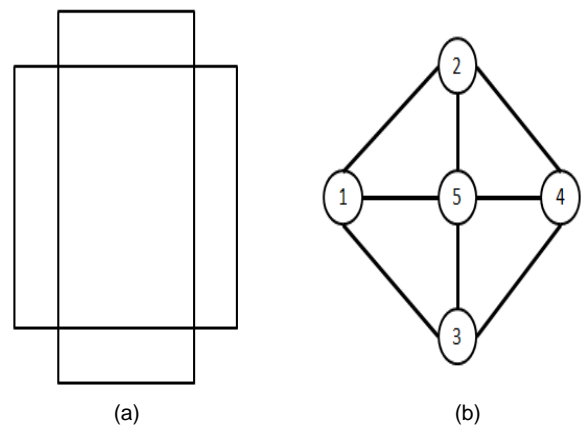


Figura 6: Ejemplo patrón de característica: a) Ventana desplegada en caras planas; y b) su grafo de consulta asociado.

En el último paso del procedimiento propuesto, se comparan los subgrafos obtenidos al eliminar los vértices de corte con los grafos de consulta definidos. La comparación de grafos se ha realizado utilizando un

algoritmo recursivo clásico (Ullman, 1976). Cada coincidencia detectada implica la existencia de la característica en la malla poligonal descrita por el grafo de consulta.

No obstante, el grafo que describe la topología del objeto no siempre es un distintivo único de la característica y será necesario en ocasiones añadir posteriores restricciones, para discernir entre características con topología similar.

4. Resultados

Para validar el trabajo presentado en este artículo se realizó una aplicación que permite visualizar los resultados de las diferentes etapas explicadas y analizar su coste temporal. Los algoritmos utilizados han sido testeados sobre un procesador Intel Core i7 a 2.30GHz y 4GB de memoria RAM.

Se trata de una aplicación *ad hoc* desarrollada con el objetivo de visualizar los resultados de los procesos anteriormente detallados, ya que el software comercial disponible, más allá de detectar elementos geométricos regulares como conjuntos de caras planas, no incluye este tipo de funcionalidad específica de detección de características.

Las pruebas realizadas han sido aplicadas sobre dos tipos de modelos diferentes. El primer grupo consiste en una serie de *edificios modelados*, formado por modelos de edificios completos o de fachadas, realizados a partir de un programa de modelado 3D. Este grupo de modelos se ha utilizado para validar los métodos propuestos, teniendo en cuenta la característica de que las normales de los triángulos que forman una misma cara plana no presentarán variabilidad alguna.

El siguiente grupo se corresponde con una serie de *edificios escaneados*. Se trata de las mallas 3D asociadas a los edificios escaneados de la ciudad medieval de Pietrabuona, en Italia. Estas mallas 3D han sido proporcionadas por el *Dipartimento di Architettura de la Università degli Studi di Firenze* a partir de un estudio de levantamiento completo realizado por profesores y doctorandos (Troiano et al., 2014).

Estos modelos no son perfectos y contienen irregularidades debidas, por un lado, a la propia fisonomía de los edificios históricos y, por otro lado, a los problemas inherentes a un proceso de escaneado 3D real. A los modelos obtenidos se les aplicó un proceso básico de triangulación sobre la nube de puntos, generándose modelos de alta densidad poligonal (más de 4 millones de polígonos). No obstante, dentro de este proyecto se requerían mallas 3D más simples para aplicarlas sobre una plataforma *online*, por lo que se limitó el número de triángulos de cada malla (Fig. 7). El proceso de limitación se llevo a cabo a través de un diagrama cromático de desviación, para que el proceso no alterase la geometría del objeto, en el cual se procede a diezmar selectivamente en partes puntuales del objeto. En este caso se trabajó directamente este tipo de mallas de menor resolución, que resultan más adecuadas para una plataforma *online*.

La Fig. 8 muestra la malla asociada a la fachada principal de un edificio modelado. Se trata de un modelo poligonal simple generado de manera automática por un programa de modelado 3D.

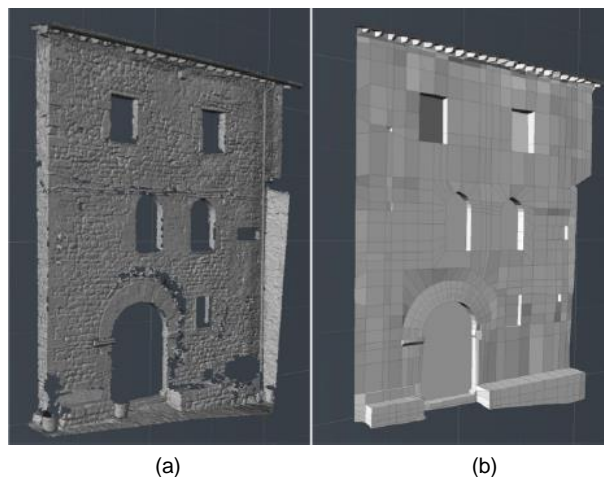


Figura 7: Ejemplo de simplificación de mallas: a) Modelo de alta resolución; b) Modelo de baja resolución.

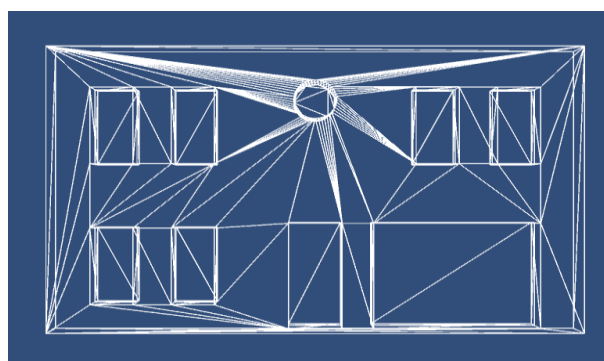


Figura 8: Malla 3D de la fachada principal de un edificio modelado.

La Fig. 9 muestra el resultado de aplicar el algoritmo de reconocimiento de caras planas sobre la misma malla 3D. Se aprecia que el algoritmo permite diferenciar de manera correcta las distintas caras planas asociadas a posibles características (en varios colores), de la cara plana asociada a la fachada principal, coloreada en verde.

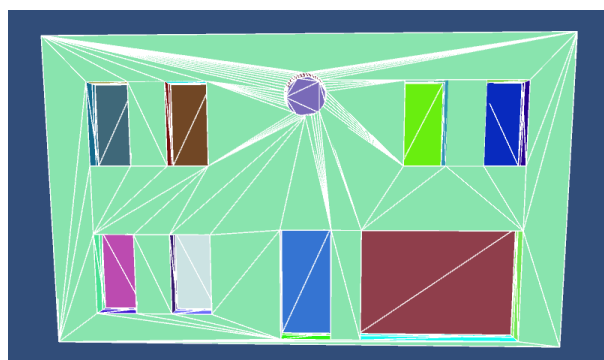
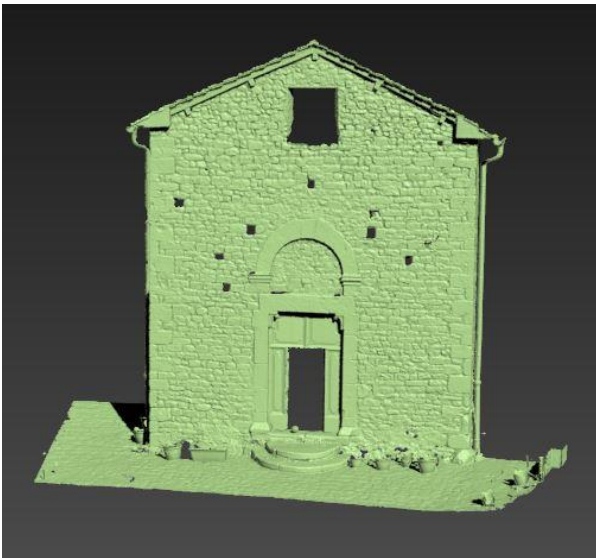
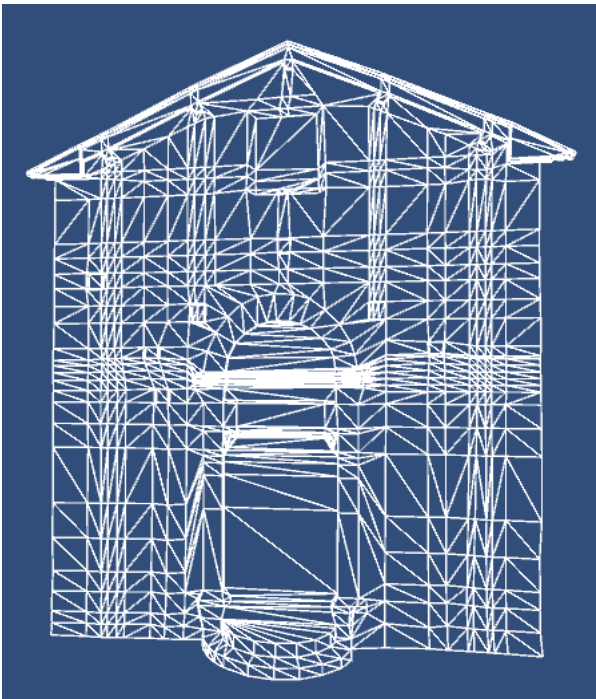


Figura 9: Reconocimiento de caras planas sobre un edificio modelado.

A continuación se muestra la aplicación del algoritmo de reconocimiento de caras planas sobre una malla 3D resultante de escanear un edificio real de la ciudad de Pietrabuona. En la Fig. 10 se puede ver el modelo 3D asociado a la fachada de un edificio. La Fig. 11 muestra el resultado de aplicar el algoritmo sobre esta malla 3D.



(a)



(b)

Figura 10: Malla 3D de la fachada principal de un edificio escaneado: a) Original; b) Simplificada.

Se puede ver que la técnica discrimina de manera correcta las caras planas asociadas a posibles características (coloreadas de diferente manera), frente a la cara plana asociada a fachada principal, coloreada de marrón.

Se muestra en la Fig. 12 el coste temporal del algoritmo. Este análisis se ha realizado para mallas 3D disponibles cuyo número de triángulos se encuentran dentro del rango 0 a 3000. Se puede apreciar una relación directa y lineal entre el número de triángulos del modelo y el coste temporal, ya que a mayor número de triángulos se tendrá, de manera general, un mayor número de detalles y por tanto más caras planas.

Se puede ver que conforme aumenta el número de caras planas, aumenta también el coste temporal (Fig. 13). No obstante, se aprecian variaciones en la gráfica, debido a

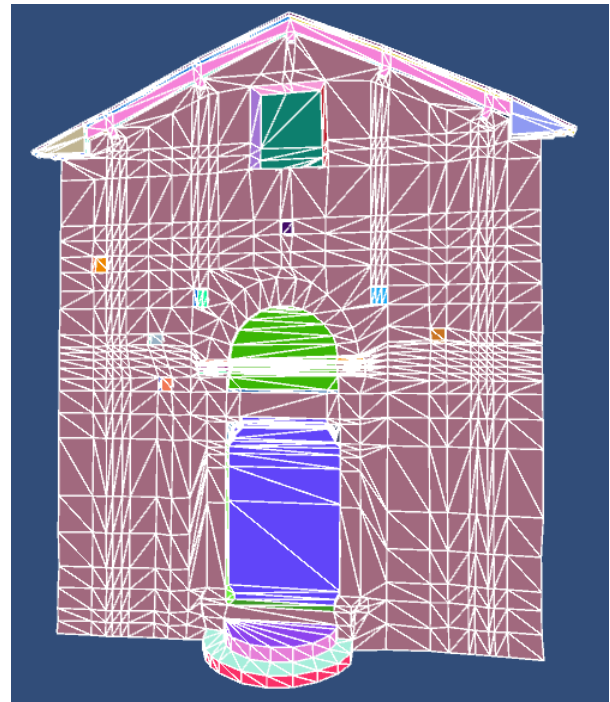


Figura 11: Reconocimiento de caras planas a partir de la malla poligonal simplificada.

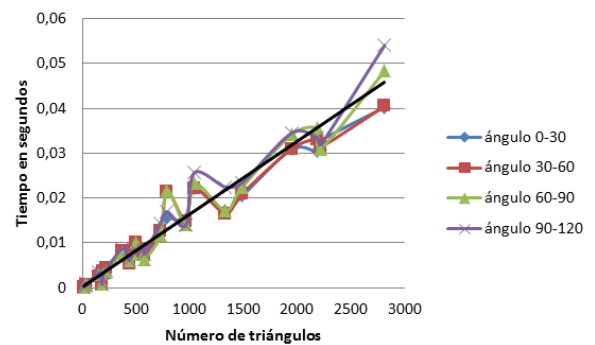


Figura 12: Coste de reconocimiento de caras planas.

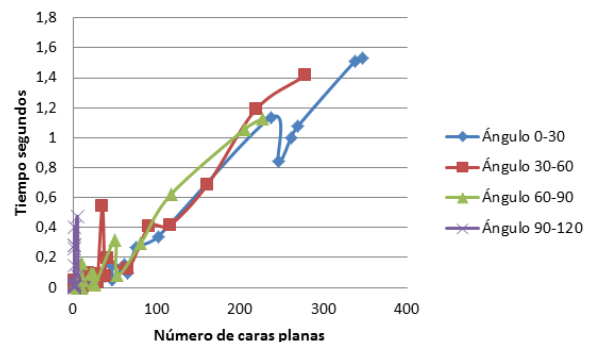


Figura 13: Relación entre el número de caras planas detectadas y el coste de reconocimiento de las características del modelo.

que el número de características también afecta al coste temporal. El caso especial sucede cuando el ángulo de coplanaridad es de 90° o mayor, ya que en esta situación el modelo tiene un número muy reducido de caras planas (1 o 2 en los modelos testeados), luego el coste temporal apenas varía entre los diferentes modelos en comparación con el resto de rangos angulares.

En la Fig. 14 se refleja el coste temporal como resultado de comparar grafos de diferentes tamaños respecto a un grafo patrón de 10 nodos. La línea de tendencia es cuadrática respecto al número de nodos a comparar, por lo que el coste temporal aumentará rápidamente conforme aumente este factor.

El coste temporal depende directamente del número de nodos que conforma el patrón que define la característica. Dado que la búsqueda se hace sobre una malla que ya está simplificada y que los patrones que definen características típicas en un edificio (ventanas, puertas, vigas, etc.) no incluyen un elevado número de nodos, se puede decir que el orden del coste temporal se sitúa en torno a los milisegundos.

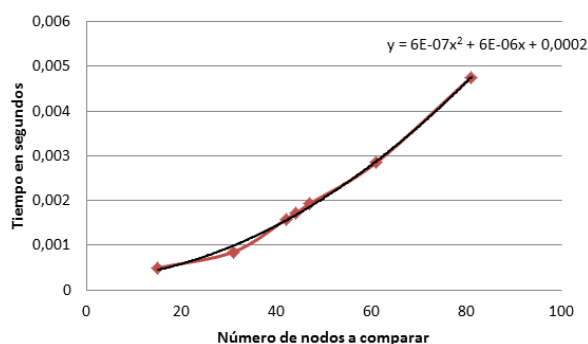


Figura 14: Coste temporal para la búsqueda de un patrón de 10 nodos.

Por último, se muestran en las Figs. 15 y 16 los resultados de aplicar el algoritmo completo a los mismos modelos de las Figs. 8 y 10, donde se puede observar que todas las características ortogonales se visualizan del mismo color, identificando las posiciones de las ventanas y características cóncavas en la fachada. También se aprecia cómo el método desarrollado es capaz de identificar características que no presentan ortogonalidad como son ventanas o escalones circulares.

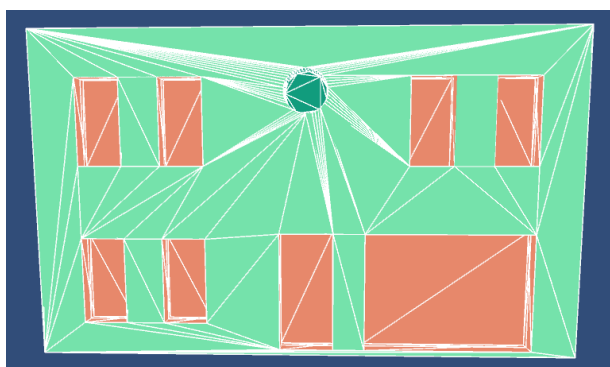


Figura 15: Reconocimiento de características (puertas y ventanas) sobre un edificio modelado.

5. Discusión

El procedimiento desarrollado pretende ser un complemento directo para una la aplicación de ayuda en el proceso de anotación semántica en el levantamiento arquitectónico (Troiano et al., 2014). La técnica descrita, no obstante, también podría complementar sistemas BIM (Eastman, Teicholz, Sacks, & Liston, 2008), aplicados en el área del patrimonio cultural, donde se

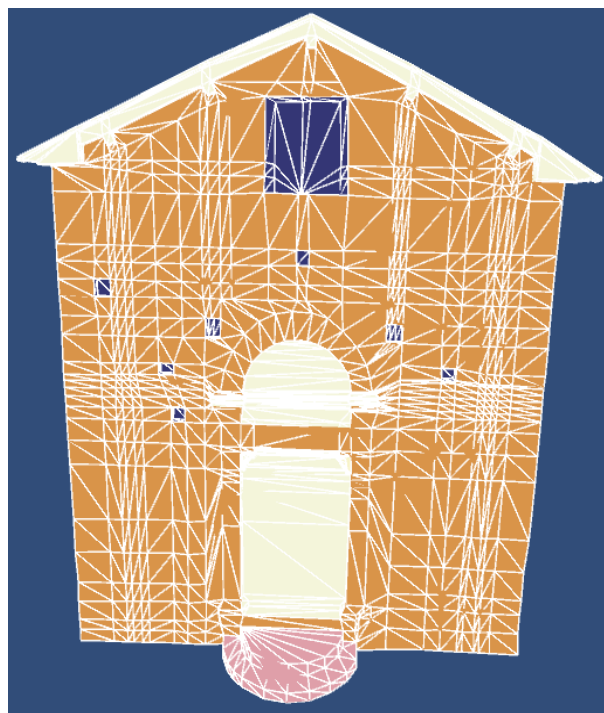


Figura 16: Reconocimiento de características sobre un edificio escaneado.

demuestra su eficacia sobre un caso real (Nieto & Moyano, 2014) o con el uso combinado de herramientas de código abierto (Logothetis & Stylianidis, 2016).

La metodología detallada utiliza una abstracción de la malla en forma de grafo, usada en otros ejemplos similares (Sheffer, 2001; Shlafma & Katz, 2002), pero utilizando criterios diferentes para la unión de vértices y aristas. Aunque existen otros ejemplos con resultados satisfactorios que proponen un algoritmo diferente para realizar la segmentación sobre el modelo completo (Golovinskiy & Funkhouser, 2009), éstos no aplican su sistema a representaciones de edificios.

En el segundo paso de la metodología aplicada se hace uso de un algoritmo que divide el grafo. Esta misma estrategia se usa en situaciones en las que se define el corte basándose en el ángulo dihédrico, eliminando aristas (Katz & Tal, 2003), mientras que en nuestro caso se buscan los vértices de articulación de cara a la división del grafo. Otros métodos hacen uso de un peso asignado a las aristas, buscando un corte de coste mínimo (Boykov, Veksler, & Zabih, 2001).

El algoritmo implementado ofrece una gran versatilidad a la hora de definir patrones, ya que cualquier característica puede interpretarse como un conjunto de caras planas y como se ha analizado anteriormente se obtienen unos tiempos de ejecución razonables para las mallas utilizadas, tiempos que aumentan según la complejidad del objeto 3D en cuanto a número de polígonos y características presentes en el mismo.

Alternativamente, se propone mejorar la definición de los patrones, haciendo más accesible la creación de los grafos de consulta para usuarios inexpertos en las herramientas de modelado 3D. Una manera de automatizar este proceso de creación de los grafos de consulta sería utilizar el algoritmo descrito en este artículo para reconocer caras planas. En lugar de definir grafos de manera manual, se podría utilizar un modelo 3D que

representara una característica que se quisiera buscar sobre otra malla, es decir, un patrón. Al disponer ya de un algoritmo de reconocimiento de caras planas que nos define un grafo topológico de una malla, se puede explotar para automatizar el proceso de creación de los grafos de consulta, pues solo se tendría que usar la malla 3D que se quisiera utilizar como patrón a buscar y ejecutar el algoritmo. La desventaja radicaría en la capacidad que tenga el usuario para modelar en 3D las características que se deseen encontrar.

Al automatizar estos procesos, el número de patrones crecería rápidamente, por lo que dejaría de ser eficiente tener estos recursos en la memoria del ordenador. Sería más adecuado introducir los patrones sobre una base de datos externa introduciendo computación en la nube, que permitiría centralizar el acceso a estos medios para multitud de usuarios.

Por otro lado, aunque el método es capaz de discernir características con superficies que presentan curvatura, resulta más complicado definir patrones para este tipo de superficies, ya que un objeto 3D con curvatura puede formarse con más o menos caras planas, en función de la resolución que se le quiera dar a la malla.

Por último, el procedimiento descrito está siendo estudiado para su uso de cara a reconocer elementos faltantes en mallas 3D que representan objetos arqueológicos reconstruidos. La idea es hacer uso del método de comparación para detectar discontinuidades en el modelo susceptibles de ser faltantes.

6. Conclusiones

En este artículo se ha presentado un método que permite la detección de características o elementos diferenciales sobre mallas 3D que representan fachadas de edificios. El procedimiento se presenta como una técnica de apoyo para el levantamiento arquitectónico de edificios históricos.

En primer lugar, se ha desarrollado un algoritmo de detección de caras planas. Con este algoritmo se crea un grafo que representa las relaciones de vecindad entre las caras planas del modelo. Posteriormente se aíslan los

subgrafos que representan las características, eliminando los vértices de corte del grafo anterior.

En una segunda instancia se crean grafos de consulta, que se comparan con los subgrafos anteriores. Encontrar una coincidencia significa que se ha encontrado una característica o elemento diferencial como la especificada en el grafo de consulta.

Por último, se han realizado una serie de pruebas sobre diferentes tipos de mallas 3D representando edificios modelados y edificios escaneados, en las que se ha comprobado la robustez de los algoritmos implementados y se han analizado sus costes temporales, estudiando los factores que más influían sobre estos.

El procedimiento propuesto ha resultado ser efectivo para la detección de características. Adicionalmente, los costes temporales observados son suficientemente pequeños, por lo que se concluye que la metodología implementada es adecuada para su inclusión en las técnicas de levantamiento arquitectónico. También cabe señalar que el algoritmo planteado es susceptible de ser aplicado en otros contextos, como el caso de la restauración arqueológica, donde el reconocimiento de caras planas y la definición de patrones pueden ayudar a la detección y reconstrucción de faltantes.

Como inmediata línea de trabajo futuro, se plantea aumentar la robustez de los patrones de comparación, dotando de información adicional a los nodos del grafo para así hacer cada patrón más único, por lo que sería más fácil distinguir las diferentes características existentes.

Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado parcialmente en el marco del proyecto de investigación "R4FA. Desarrollo de un Sistema Integrado de Restauración, Recomposición, Restitución y Representación de Fragmentos Arqueológicos" (HAR2015-69408-R), financiado por el Programa Estatal de Investigación, Desarrollo e Innovación Orientada a los Retos de la Sociedad, Convocatoria 2015, Modalidad 1: «Proyectos de I+D+I».

Referencias

- Attene, M., Katz, S., Mortara, M., Patané, G., Spagnuolo, M., & Tal, A. (2006). Mesh segmentation – A comparative study. *Proceedings of IEEE International Conference on Shape Modeling and Applications* (pp. 14–25). doi:10.1109/SMI.2006.24
- Attene, M., Falcidieno, B., & Spagnuolo, M. (2006). Hierarchical mesh segmentation based on fitting primitives. *The Visual Computer*, 22(3), 181–193. doi:10.1007/s00371-006-0375-x
- Amazon. (2008). Mechanical turk. Retrieved from www.mturk.com.
- Boykov, Y., Veksler, O., & Zabih, R. (2001). Fast approximate energy minimization via graph cuts. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 23(11), 1222–1239. doi:10.1109/34.969114
- Chen, X., Golovinskiy, A., & Funkhouser, T. (2009). A benchmark for 3D mesh segmentation. *ACM Transactions on Graphics (Proceedings of SIGGRAPH)*, 28(3), 73:1–73:12. doi:10.1145/1576246.1531379
- Duda, R. O., & Hart, P. E. (1972). Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures. *Communications of the ACM*, 15(1), 11–15. doi:10.1145/361237.361242
- Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2008). *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modelling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors*. New Jersey: John Wiley & Sons.

- Fischler, M., & Bolles, R. (1981). Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM*, 24(6), 381–395. doi:10.1145/358669.358692
- Galler, B. A., & Fischer, M. J. (1964). An improved equivalence algorithm. *Communications of the ACM*, 7(5), 301–303. doi:10.1145/364099.364331
- Golovinskiy, A., & Funkhouser, T. (2008). Randomized cuts for 3D mesh analysis. *ACM Transactions on Graphics (Proceedings of SIGGRAPH ASIA)*, 27(5), 145:1–145:12. doi:10.1145/1409060.1409098
- Golovinskiy, A., & Funkhouser, T. (2009). Consistent segmentation of 3D models. *Computers & Graphics (Shape Modeling International 09)*, 33(3), 262–269. doi:10.1016/j.cag.2009.03.010
- Gonzalez, R. C., & Woods, R. E. (2004). *Digital image processing* (2nd ed.). Upper Saddle River, New Jersey: Pearson Education.
- Hopcroft, J., & Tarjan, R. (1973). Algorithm 447: efficient algorithms for graph manipulation. *Communications of the ACM* 16(6), 372–378. doi:10.1145/362248.362272
- Katz, S., & Tal, A. (2003). Hierarchical mesh decomposition using fuzzy clustering and cuts. *ACM Transactions on Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 2003)*, 22(3), 954–961. doi:10.1145/882262.882369
- Katz, S., Leifman, G., & Tal, A. (2005). Mesh segmentation using feature point and core extraction. *The Visual Computer*, 21, 649–658. doi:10.1007/s00371-005-0344-9
- Kenneth, E., & Lynch, M. (1995). Geographic information systems as an integrating technology: Context, concepts, and definitions (Department of Geography, University of Colorado at Boulder). Retrieved from <http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/intro/intro.html>.
- Lai, Y. K., Hu, S. M., Martin, R. R., & Rosin, P. L. (2008). Fast mesh segmentation using random walks. *Symposium on Solid and Physical Modeling* (pp. 183–191). doi:10.1145/1364901.1364927
- Li, J., & Kuo, C. C. (1988). A dual graph approach to 3D triangular mesh compression. *Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing* (pp. 891–894). Chicago. doi:10.1109/ICIP.1998.723699
- Li, X., Toon, T. W., & Huang, Z. (2001). Decomposing polygon meshes for interactive applications. *Symposium on Interactive 3D graphics* (pp. 35–42). doi:10.1145/364338.364343
- Liu, R., & Zhang, H. (2004). Segmentation of 3D meshes through spectral clustering. *Pacific Conference on Computer Graphics and Applications*, 298–305. doi:10.1109/PCCGA.2004.1348360
- Logothetis, S., & Stylianidis, E. (2016). BIM Open Source Software (OSS) for the documentation of cultural heritage. *Virtual Archaeology Review*, 7(28), 28–35. doi:10.4995/var.2016.5864
- Mangan, A. P., & Whitaker, R. T. (1999). Partitioning 3D surface meshes using watershed segmentation. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 5(4), 308–321. doi:10.1109/2945.817348
- Marefat, M., & Kashyap, R. (1990). Geometric reasoning for recognition of three-dimensional object features. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 12(10), 949–965. doi:10.1109/34.58868
- Nieto, J. E., & Moyano, J. J. (2014). The paramental study on the model of information of historic building or "HBIM Project". *Virtual Archaeology Review*, 5(11), 73–85. doi:10.4995/var.2014.4183
- Page, D. L., Koschan, A., & Abidi, M. (2003). Perception-based 3D triangle mesh segmentation using fast marching watersheds. *Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 27–32). doi:10.1109/CVPR.2003.1211448
- Shapira, L., Shamir, A., & Cohen-or, D. (2008). Consistent mesh partitioning and skeletonisation using the shape diameter function. *The Visual Computer*, 24(4), 249–259. doi:10.1007/s00371-007-0197-5
- Sheffer, A., (2001). Model simplification for meshing using face clustering. *Computer Aided Design*, 33(13), 925–934. doi:10.1016/S0010-4485(00)00116-0
- Shlafman, S., Tal, A., & Katz, S. (2002). Metamorphosis of polyhedral surfaces using decomposition. *Computer Graphics Forum*, 21(3), 219–228. doi:10.1111/1467-8659.00581
- Smpath, A., & Shan, J. (2010). Segmentation and reconstruction of polyhedral building roofs from aerial lidar point clouds. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48(3), 1554–1567. doi:10.1109/TGRS.2009.2030180
- Stamos, J., Gene, Y., Wolberg, G., & Zokai, S. (2006). 3D Modeling using planar segments and mesh elements. *International Symposium on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission*, 599–606. doi:10.1109/3DPVT.2006.5

- Tralie, C. (2010). Mesh segmentation by KMeans clustering. Retrieved from <http://www.ctralie.com/Teaching/MeshSeg/>
- Troiano, D., García, A., Merlo, A., & Vendrell, E. (2014). From a model of a city to an urban information system: The SIUR 3D of the castle of Pietrabuona. In M. Ioannides, N. Magnenat-Thalmann, E. Fink, R. Žarnić, A. Yen, & E. Quak (Eds.), *Digital Heritage. Progress in Cultural Heritage: Documentation, Preservation, and Protection. EuroMed 2014. Lecture Notes in Computer Science*, 8740. Cham: Springer. doi:10.1007/978-3-319-13695-0_12
- Ullman, J. R. (1976). An algorithm for subgraph isomorphism. *Journal of the ACM*, 23(1), 31–42. doi:10.1145/321921.321925
- Verma, V., Kumar, R., & Hsu, S. (2006). 3D building detection and modelling from aerial LIDAR data. *Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Vol. 2* (pp. 2213–2220). doi:10.1109/CVPR.2006.12
- Vieira, M., & Shimada, K., (2005). Surface mesh segmentation and smooth surface extraction through region growing. *Computer-Aided Geometric Design*, 22(8), 771–792. doi:10.1016/j.cagd.2005.03.006
- Wan, J., & Shan, J. (2009). Segmentation of lidar point clouds for building extraction. In *ASPRS Annual Conference*, Baltimore, Maryland, 9–13.
- Zhang, Y., Paik, J., Koschan, A., & Abidi, M. A. (2002). A simple and efficient algorithm for part decomposition of 3D triangulated models based on curvature analysis. *Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing* (pp. 273–276). doi:10.1109/ICIP.2002.1038958