



MODELOS CON NIVEL DE DETALLE VARIABLE REALIZADOS MEDIANTE UN LEVANTAMIENTO DIGITAL APLICADOS A LA ARQUEOLOGÍA

VARIABLE LEVEL OF DETAIL IN ARCHAEOLOGICAL 3D MODELS OBTAINED THROUGH A DIGITAL SURVEY

Filippo Fantini



1

Esta contribución, centrada en el uso de tecnologías informáticas para la representación, forma parte de una serie de estudios sobre la Villa Adriana en Tívoli, que nos han llevado a investigar la decoración del Teatro Marítimo, residencia personal del Emperador Adriano, así como otras famosas arquitecturas de este conjunto arqueológico perteneciente a la Lista del Patrimonio Mundial. La riqueza de detalles que caracteriza

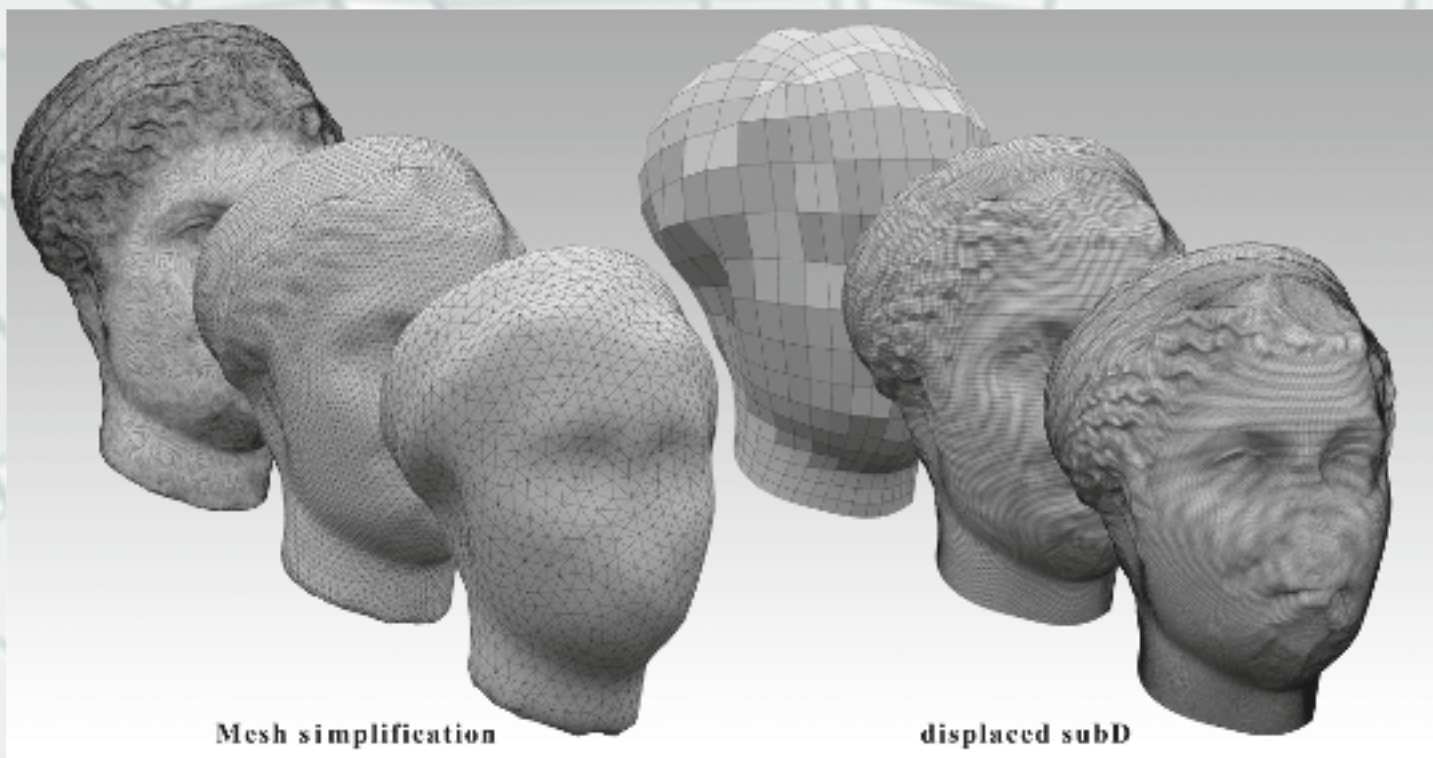
a las piezas del entablamento curvo de este emblemático edificio ha estimulado a nuestro equipo de investigación ¹ para desarrollar nuevos métodos de representación, que permitan el uso interactivo de modelos digitales de alto detalle geométrico obtenidos con escáner laser. En este artículo se explicará una nueva metodología de optimización de los datos de levantamiento digital en el campo arqueológico, desarrollado en otros

sectores de investigación, y que todavía no se han incluido en los programas para el levantamiento con escáner.

Palabras clave: Láser escáner, Villa Adriana, Modelación 3D, Superficies de subdivisión

This paper focuses on the use of information technologies in the field of archaeological representation. It is part of a series of studies on the Villa Adriana in Tivoli which have led us to investigate the decoration of the Maritime Theatre (Emperor Hadrian's personal residence) and other famous archaeological structures located within this UNESCO World Heritage listed site. The richness of detail that characterise the curved entablature pieces of this landmark building stimulated our research team ¹ to develop new methods of representation, allowing the interactive assembling of digital models of a high geometric detail obtained by means of laser scanning. This article explains a new methodology for optimising digital survey data in the archaeological field which has previously been developed in other research sectors but not yet implemented in digital survey programs.

Keywords: Laser scanner, Villa Adriana, 3D modelling, Subdivision surfaces



2

1. "Teatro Marittimo" de la Villa Adriana (Tivoli, Roma). Los fragmentos de la decoración arquitectónica de este edificio se encuentran en los museos más importantes del mundo: la técnica que se describe en este artículo facilita la gestión y mejora la visualización de modelos obtenidos por escáner láser en el ámbito de anastilosis virtuales.

2. Las displaced subD permiten incrementar el detalle de un modelo en base a una imagen que restablece el detalle geométrico del modelo original. En la práctica esta técnica es opuesta al método de disminución progresiva del detalle de un modelo mesh para gestionarlo en programas de renderizado (retrato de Matidia Minore, II siglo d.C., Villa Adriana, escaneado por Tryeco s.n.c. en colaboración con la Soprintendenza per i Beni Archeologici del Lazio).

1. Villa Adriana's "Maritime Theatre" (Tivoli, Rome). Architectural decoration fragments from this building can be seen in some of the world's most important museums. The technique described in this paper facilitates the management of 3D models obtained by laser scanning and improves their visualization for virtual anastylosis.

2. Displaced subD allows the number of polygons in a 3D model to be increased; the new vertices added to the model are displaced by means of an image in which the geometrical detail of the high definition laser scanner survey is stored. This technique contrasts with the method of progressively decreasing detail which permits the easier management and facilitation of models from a laser scanner (portrait of Matidia Minore, II century AD, Villa Adriana, survey by Tryeco s.n.c. in collaboration with the Soprintendenza per i Beni Archeologici di Lazio).

Objetivos

En este artículo se describen los aspectos generales de una metodología que permite aligerar el "peso" de los modelos 3D de alto detalle geométrico, sin perder ni la calidad de la visualización ni la capacidad de documentar un bien en ámbito arqueológico. Esta metodología de representación proviene del sector de la informática gráfica para animación digital y videojuegos, y se llama originariamente *displaced subdivision surface* (Lee, Moreton, Hoppe 2000, pp. 85-94).

Lee et al. (2000) habían desarrollado esta técnica en otro contexto muy distinto al de los bienes culturales: la animación 3D para películas. Paradójicamente, las necesidades en este sector coinciden con las que se encuentran al desarrollar maquetas virtuales para la documentación y difusión en el sector arqueológico, ya que en ambos casos es imprescindible una alta precisión así como una alto nivel de detalle geométrico: en un caso hay personajes digitales; en otro estatuas, ruinas, etc.

Aims

This paper describes the general aspects of a methodology aimed at reducing the "computational weight" of highly detailed geometric models without losing quality in both terms of morphological accuracy and the quality of its representation. This method comes from the field of computer graphics and was originally called *displaced subdivision surface* (Lee, Moreton, Hoppe 2000, pp. 85-94).

Many aspects of computer graphics & animation are quite similar to those found in developing virtual models for documenting and disseminating archaeological surveys; in both cases a high level of geometric detail and accuracy is essential. In one case we have to manage complex digital characters, in the other we have a huge ensemble of statues, ruins, architectural decorations etc.

Previously in the field of special effects, pre-visualization of virtual characters was done using clay models made by artists; these were then rebuilt using 3D modelling tools. However, today, due to the development of remote sensing technologies, sculptures can now be scanned in three dimensions and then used as 3D templates in the production of characters for animations and video games. In the case of archaeology the shapes acquired in 3D are even more complex, especially when taking into consideration the need to represent such things as degradation,

3. Friso perteneciente al “Teatro Marittimo” de la Villa Adriana, durante una campaña de levantamiento escáner láser. El detalle geométrico proporcionado a través de instrumentos de obtención mediante triangulación está en el rango de décimas de milímetro (Levantamiento Sergio Di Tondo, Filippo Fantini).

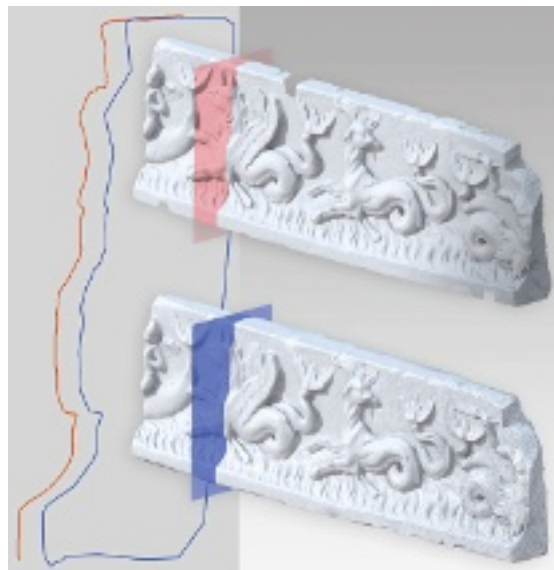
4. Comparación entre un modelo de 1.316.297 polígonos (seccionado con un plano rojo) y uno de 10.002 polígonos (seccionado con un plano azul). Gracias a texturas como los mapas de normales el modelo de abajo parece tener el mismo detalle del de arriba, pero ejecutando una sección se entiende la “ilusión” producida por esta textura.

3. Frieze belonging to the “Maritime Theatre” of the Villa Adriana, during a laser scanner survey. The level of geometric detail provided by triangulation 3D laser scanners is in the range of tenths of a millimetre (Surveying Sergio Di Tondo, Filippo Fantini).

4. Comparison between a model of 1,316,297 polygons (sectioned by a red plane) and one of 10,002 polygons (sectioned by a blue plane). Due to normal map textures the two models appear to have the same geometrical detail but on closer inspection the “illusion” can be detected.



3



4

ruptures and general loss of the original shape with scientific precision.

The question we want to answer in this paper is: is it possible to use programs and workflows from the world of animation and video games to help facilitate archaeological management and at the same time improve the quality and representation of laser scanned 3D models. *Displaced subdivision surface (displaced subD)* is implemented considerably in applications designed for entertainment; this is why a large number of users working in that field are able to manage highly detailed geometrical models (equal to those from a laser scanner) inside animation software. After an optimisation process a complex polygonal mesh can be converted in a displaced subD; this kind of representation can provide the same geometrical detail as a dense point cloud inside common computer graphics software and not just in those applications dedicated to digital surveys. The advantage compared to other operating routines lies in the fact that because of their variable geometrical level of detail displaced sub models are easier to handle. 3D models like these can be used in a very flexible way thanks to the possibility of increasing or decreasing the number of polygons that represent the shape of an object without reverting to irreversible geometrical simplification (in general called “decimation”). Conveniently it is the user who can choose to operate on a low detailed model (to simplify the task of the graphics card and processor) and afterwards, during the rendering

En el sector de los efectos especiales siempre se han empleado maquetas de plastilina que representan personajes imaginarios. Hoy, al desarrollarse el mundo de los efectos digitales, dichas esculturas se escanean en 3D y luego se utilizan para la producción de animaciones y videojuegos. En el caso de la arqueología las formas que se deben documentar en 3D son aún más complejas; todavía más teniendo en cuenta la importancia de representar la degradación, las rupturas y la pérdida de la forma original con precisión científica.

La pregunta a la que se pretende contestar con esta aportación es la siguiente: ¿es posible emplear programas y metodologías de trabajo que provienen del mundo de la animación y videojuegos para mejorar la calidad y la gestión de los modelos 3D de levantamiento 3D escáner láser en arqueología?

Como las *displaced subdivision surface (displaced subD)* son compatibles con muchas aplicaciones de informática gráfica, ponen a disposición de un gran número de usuarios el alto nivel

de detalle típico del láser escáner, que muchas veces se queda como “encarcelado” en aplicaciones dedicadas exclusivamente al tratamiento de nubes de puntos. La ventaja en comparación con otras rutinas de funcionamiento radica en el hecho de que los modelos *displaced subD*, para ser más fáciles de manejar, no deben ser objeto de operaciones irreversibles como la simplificación geométrica clásica: es el usuario, en función de su conveniencia, quien decide trabajar en un modelo de bajo detalle con el fin de simplificar la tarea de la tarjeta gráfica y del procesador. Posteriormente, en fase de renderizado, se puede aumentar a voluntad el número de polígonos con el fin de obtener representaciones de calidad que además tengan en cuenta la escala de representación. A continuación se enumeran las posibles salidas y usos proporcionados por esta forma de representación:

- Producción de imágenes sintéticas (*render*) y animaciones: en este caso se debe acordar que las *subdivision surface* admiten el teselado adaptativo, es decir que el mismo



5. Con las displaced subdivision surface es el usuario el que establece el nivel de detalle del modelo de acuerdo a sus necesidades. El modelo (a) está formado por 5.466 polígonos, y una vez convertido en una subdivision surface, gracias a un mapa de

desplazamiento puede ser aumentado de resolución: (b) 196.920 polígonos, (c) 2.830.266 polígonos.

5. When using a displaced subdivision surface it is the user who sets the level of detail in a 3D model according to his needs. The model (a) consists of

5466 polygons, and once turned into a subdivision surface, thanks to a displacement map, the resolution can be increased: (b) 196 920 polygons, (c) 2,830,266 polygons.



5

motor de renderizado se encarga de aumentar la densidad de polígonos en áreas con curvaturas más altas o en partes del modelo que están más cerca del observador.

- Realización de dibujos técnicos como secciones o fotoplanos. En este caso las *displaced subD* permiten mejorar sensiblemente la calidad alcanzable con otras metodologías que prevén el empleo de texturas como mapas de normales aplicadas a mallas simplificadas (Battini, Fantini 2007a, pp. 175-186).
- Apoyo al desarrollo de proyectos para la puesta en valor y la conservación. En este caso se podrán aprovechar las ventajas del detalle variable en comunes programas de modelado 3D que, por supuesto, garantizan una interactividad mucho más alta respecto a los programas para gestionar nubes de puntos.
- Realización de maquetas mediante impresión 3D.
- Elaboración de modelos a nivel de detalle variable que se incluirán en una *perspectiva dinámica interactiva* o aplicaciones *real-time* (Migliari 2008, pp. 6-7).

Diferentes formas de utilización de los datos de escaneado

La experimentación desarrollada tiene como punto de partida los datos obtenidos a través de escáner láser, que obviamente son muy densos y de difícil manejo en ordenadores comunes y también en programas informáticos para el renderizado. Para poner un ejemplo, la malla de alto detalle del *calidarium* de las Termas con *Eliocamino* de la Villa Adriana 2 es un modelo formado por 1.188.577 triángulos que ocupa 48.063 KB en el disco duro.

Gestionar modelos de este tipo en programas de procesamiento de mallas es una operación bastante habitual, pero la exportación a programas para el renderizado, con el propósito de crear imágenes de alta calidad, constituye un problema. Este tipo de aplicaciones están diseñadas para crear interactivamente objetos de baja-media densidad, con mallas muy regulares, que sólo durante el cálculo para el renderizado final, incrementan su resolución.

El modelo anteriormente mencionado, una vez convertido en *displaced*

phase, can decide to increase the number of polygons in order to get a better quality representation. The following is a list of possible applications provided by displaced SubD:

- Production of synthetic images (render) and animations: in this case it's important to point out that subdivision surfaces support the adaptive tessellation; this means the rendering engine of the 3D modelling software takes care of increasing the geometric density of those areas of the model characterised by higher curvatures or decreasing the number of polygons in the more distant parts of the model.
- Production of sections, drawings and orthophotos: Displaced subD improves the quality attainable with other methods based on the usage of bump and normal maps applied to simplified mesh (Battini, Fantini 2007a, pp. 175-186).
- Supports the development of maintenance and conservation projects: In this case we have the ability to vary the detail of the 3D model during the development of the project. In this way it is possible to guarantee higher interactivity during the modelling phases in comparison to the point clouds dedicated programs.
- Production of scale models by means of 3D printing technologies.
- Optimized 3D models for real-time applications (Migliari 2008, pp. 6-7).



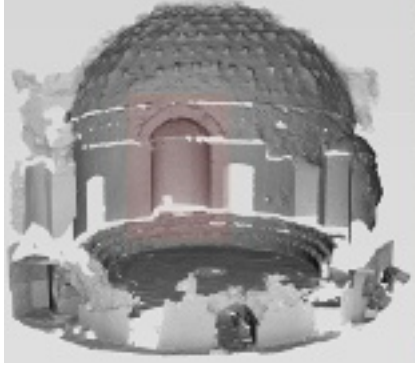
6. Modelo con alto grado de detalle del Calidarium de las Termas con Eliocamino de la Villa Adriana formado por 1.188.577 triángulos obtenidos a través de un escáner Faro Photon.

7. La ventaja de las displaced subdivision surface está en el hecho de que el modelo de alta resolución se puede convertir en otro de gran sencillez que

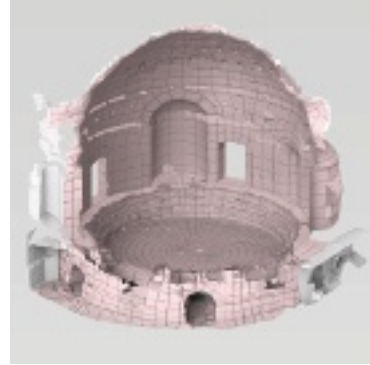
“recubre” superficialmente el primero, cuyo detalle geométrico está guardado en una imagen en escala de grises que ocupa poco espacio en el disco duro.

6. High detail model of Eliocamino's Thermal Baths at Villa Adriana: consisting of 1,188,577 triangles. Faro Photon scanner.

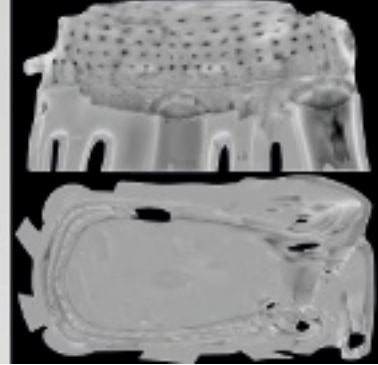
7. The advantage of a displaced subdivision surface lies in the fact that the high-resolution model can be converted into a much simpler form that “covers” the first surface; the geometrical detail is stored in a greyscale image that occupies a few space of the hard disk.



6



7



Different ways of using 3D scanner data

The tests developed during the research were started initially using the original data obtained from the laser scanner. This data typically provides very dense geometrical information which is characteristically difficult to manage: the computational weight of this data affects not just the sharing but also the visualisation on common computers and put a strain on rendering programs for entertainment. For example, the high-detail mesh of the *calidarium* of the Eliocamino's Thermal Baths inside Villa Adriana 2 is a triangle mesh that occupies 48,063 KB on the hard disk, made up of 1,188,577 polygons. Managing such models in mesh processing software is a fairly common operation but in order to create high quality images they must be exported to rendering software and this is when difficulties can arise. The reason for this is because the majority of rendering applications are designed for interactively creating objects with a low and sometimes medium number of polygons; in general those meshes are constructed by the user as regular grids (made of rows and columns) of quadrilateral polygons that during the rendering phase are subdivided for generating the final rendering. Once converted in a displaced subdivision surface one advantage of the model mentioned above is that it occupies only 392 KB on the hard disk. In addition to this it has a variable detail thanks to the subdivisions algorithm. The geometrical detail is encoded inside a 2095 KB texture that stores the needed data of the original dense model obtained by the scanner. However, the data from the scanner can be

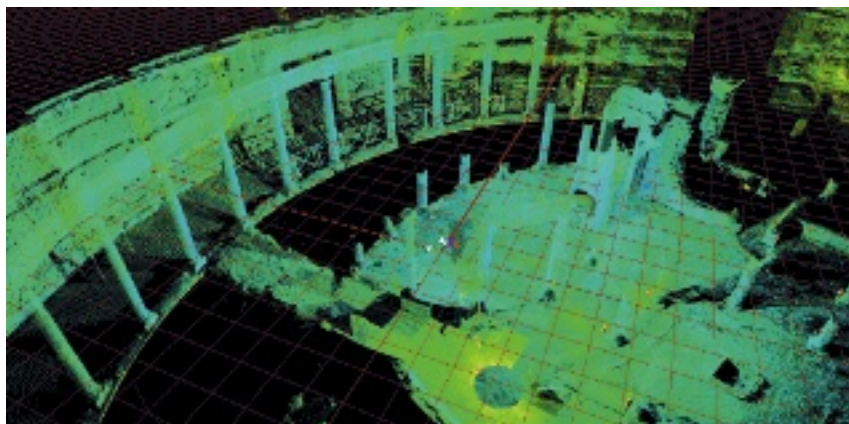
subdivision surface sólo ocupa 392 KB en el disco duro. Tiene un detalle variable gracias al algoritmo de subdivisión y lleva guardada en una textura del peso de 2095 KB, los datos necesarios para restablecer una densidad de polígonos parangonable a la del modelo obtenido por el escáner.

De todas formas, los datos de escaneado pueden ser procesados de muchas maneras diferentes en función de los objetivos que se pretende alcanzar, que por supuesto, no siempre prevén el desarrollo de maquetas virtuales (Juan Vidal, Merlo 2008, p. 310). Pero, antes de comparar las *displaced subD* con otras técnicas de gestión de datos, es importante centrar la atención sobre la necesidad que tienen los arqueólogos de un nivel de resolución geométrica variable: alta resolución para la investigación 3 y bajo detalle para la divulgación de los resultados (en particular si se prevé una divulgación de los modelos en la red). En el panorama actual hay cuatro formas diferentes de restitución del levantamiento digital en el ámbito de los bienes de interés cultural:

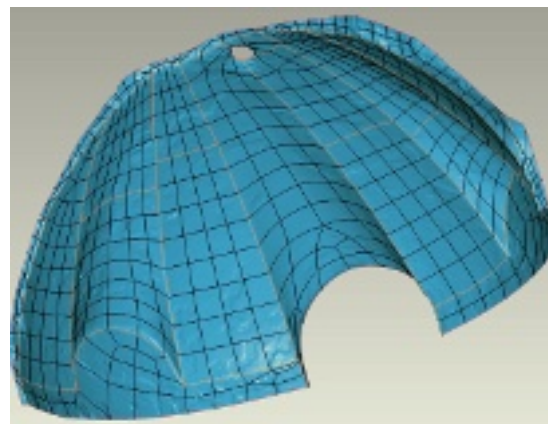
1) **Secciones de la nube de puntos:** se obtienen con el uso de polilíneas que pertenecen a los planos definidos por

el usuario de acuerdo a las necesidades específicas de los técnicos, que van desde las prácticas de mantenimiento y documentación, a la construcción de la estructura *wireframe* para el desarrollo de modelos 3D.

2) **Modelación inversa:** los programas con este propósito (Gaiani 2006, pp. 33-57) ofrecen diferentes formas automáticas y semiautomáticas de obtener un modelo matemático a partir de una malla de polígonos. El objetivo principal es obtener una maqueta 3D que pueda proporcionar una referencia fiable para evaluar y redefinir la morfología (*re-design*) del objeto levantado y plantear las operaciones de ingeniería inversa. Esta forma de hacer las restituciones nace en el sector de la industria mecánica y del diseño industrial y, a veces, se ha utilizado en el ámbito de los bienes culturales, pero no de forma tan extensa. De hecho, las operaciones de conversión en modelo matemático se expresan plenamente en los casos en que sea fácilmente reconocible un eje de simetría, la presencia de un radio constante de curvatura, etc. Evidentemente en el sector de la arqueología es muy difícil que estos programas puedan detectar automáticamente formas geométricas regulares, pero a pe-



8



9

8. Nube de puntos del “Teatro Marítimo” de la Villa Adriana (imagen Sergio Di Tondo). Una vez colocado un plano de referencia el operador puede dibujar polilíneas directamente sobre el modelo y luego exportarlas a programas de dibujo bidimensional (levantamiento: Università Politecnica delle Marche, Departamento DARDUS y Università degli Studi di Firenze, Dipartimento di Architettura).

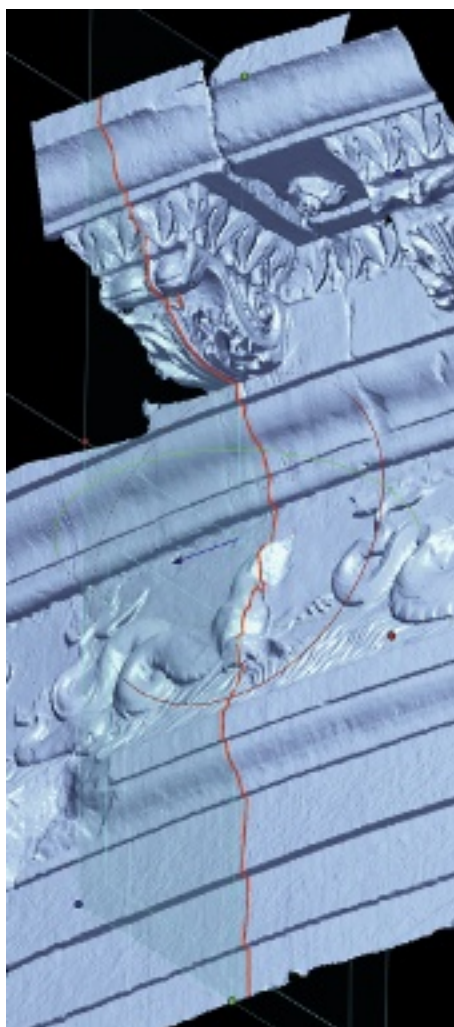
9. Fase de la modelación inversa de la Cúpula del Serapeo de la Villa Adriana: definición de las curvas características que definen el modelo matemático (imagen Sergio Di Tondo). En realidad, estas técnicas de modelado no se utilizan mucho en el campo de la arqueología ya que las irregularidades y las patologías no se prestan a ser representadas por esta forma de representación.

10. Los programas de modelación inversa permiten obtener secciones y perfiles interactivamente a partir de modelos mesh (entablamento del “Teatro Marítimo”, levantamiento Sergio Di Tondo, Filippo Fantini).

8. “Maritime Theatre” point cloud (image by Sergio Di Tondo). Once a reference plane has been placed the user can hide half of the model and draw sections as polylines that can then be exported into 2D drawing applications (survey: Università Politecnica delle Marche, DARDUS Department and Università degli Studi di Firenze, Dipartimento di Architettura).

9. A phase of the reverse modelling process (Serapeum Dome of Villa Adriana): detection of the feature curves that define the mathematical model (image Sergio Di Tondo). Actually, these modelling techniques are rarely used in the field of archaeology since the irregularities and degradation do not lend themselves to be visualized by this form of representation.

10. Reverse modelling programs allow us to obtain sections and profiles from mesh models interactively (entablature of the “Teatro Marítimo”, Sergio Di Tondo, Filippo Fantini).



10

sar de ello, algunos instrumentos de este tipo de aplicaciones permiten obtener datos de gran relevancia para la investigación en la arqueología: secciones, proyecciones, detección de planos y ejes de referencia útiles para anastilosis y reconstrucciones virtuales, etc.

3) Modelos de malla simplificados: cuando las nubes de puntos se convierten en modelos poligonales, es necesario bajar el detalle para permitir su uso en programas dedicados al renderizado (Guidi, Russo, Beraldin 2010, pp. 429-439). Para mejorar la apariencia

desarrollados en muchas formas diferentes dependiendo de los objetivos de nuestra representación que no siempre prevé el desarrollo de modelos virtuales (John Vidal, Merlo 2008, p. 310).

But before comparing sub displaced data management with other techniques it is important to focus attention on the requirements of the archaeologist, that is to say the need for a variable level of geometric resolution: high resolution is essential for the research itself and low detail for disseminating results (particularly in the case of web-oriented models).

In the Cultural Heritage field there are currently four different ways to use a laser scanner survey:

1) **Sectioned Point clouds**: polylines obtained using reference planes defined by the user according to the specific needs of technicians, ranging from maintenance practices and documentation, to the construction of the wire frame structure for the development of 3D models.

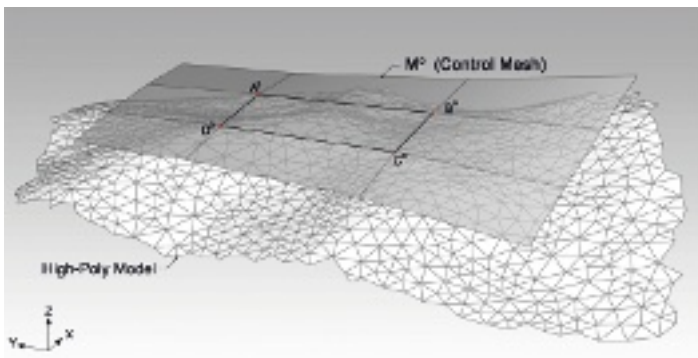
2) **Reverse modelling**: software with this purpose (Gaiani 2006, pp. 33-57) offers many automatic and semiautomatic ways to obtain a mathematical model (NURBS or solid) from a polygon mesh. The main objective is to obtain a 3D model that can provide a reliable reference to evaluate and redefine the shape of the object (re-design) or for reverse engineering. This way of reconstructing the model by means of NURBS technology comes from the field of mechanical engineering and industrial design and at times has been used in the field of cultural heritage but not in an extensive way. In fact, reverse modelling operations are fully expressed in such shapes where there is an easily recognisable symmetry axis or the presence of a constant curvature radius and so on. In archaeology it is very difficult to automatically detect regular geometries, but despite this, some instruments implemented in such applications can easily provide data of great relevance for researchers: sections, projections, detection of planes and axis that can be useful as references in

11. La malla de control M^0 constituida por cuadriláteros debe recubrir el modelo de alto detalle.

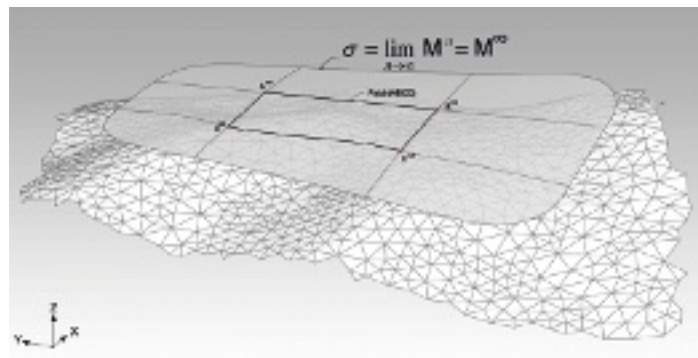
12. La superficie de dominio lisa tiene un nivel de detalle variable y puede igualar o superar el detalle geométrico del modelo inicial obtenido a través del levantamiento con escáner.

11. The control mesh M^0 (made of quadrilaterals) must cover the high-detail model.

12. The smooth domain surface has a variable level of geometric detail which can equal or exceed that of the initial laser scanned model.



11



12

anastilosis and virtual reconstructions etc.

3) **Simplified mesh models:** when the point clouds become polygonal models, it is necessary to lower their detail to allow their usage in rendering applications (Guidi, Russo, Beraldin 2010, pp. 429-439). To improve the appearance of the model it is common to use several types of textures obtained either by photographs (apparent colour maps) or through the conversion of geometric detail in images, as in the case of normal maps and bump maps. However, this geometric detail integration is only apparent because they only affect the shading; in other terms these kinds of maps will never be able to restore the acquired shape of the original digital survey (Battini, Fantini 2007b).

4) **Displaced subD:** a high detail model is covered with a "coat" made of four-sided polygons. The "coat" is a very simple model that once converted in a subdivision surface acquires the needed variable level of detail; the resolution can be increased or reduced by the user interactively or through the rendering engine. The deviation (delta) between the high detail model and subdivision surface is encoded in a greyscale image which is then applied as a displacement map. Displaced SubD should not be confused with simple polygonal models with displacement maps applied because of the following two reasons:

- The displacement map is obtained by means of a computation (called baking) and not through empirical editing of a photographic image.
- Currently a specific kind of greyscale images called OpenEXR is used. This is a high dynamic range format that supports much more information in comparison to the classic 256 intensities of the 8 bits for channel formats.

del modelo, se suelen utilizar varios tipos de texturas obtenidas bien por fotografías (mapas del color aparente) o bien a través de la conversión del detalle geométrico en imágenes, como en el caso de los mapas de normales y mapas de rugosidad (*bump map*). De todas maneras, estos tipos de integración del detalle geométrico solo son aparentes, es decir, nunca podrán restablecer la morfología capturada por el levantamiento digital original (Battini, Fantini 2007b).

4) **Displaced subD:** un modelo de alto detalle se "calca" simplificándolo mediante polígonos con cuatro lados. Este modelo es muy sencillo y se convierte en un modelo de densidad variable: la resolución se puede aumentar o reducir de forma interactiva por el usuario o a través del motor de renderizado. La desviación (el delta) entre el modelo de alto detalle y la superficie de subdivisión se guarda en una imagen en escala de grises que luego se aplicará como textura de desplazamiento. Pero las *displaced subD* no deberían confundirse con sencillos mapas de desplazamiento aplicados a modelos poligonales por dos motivos distintos:

- El mapa de desplazamiento se obtiene mediante un cálculo (*baking*)

y no a través de un retoque empírico de una imagen.

- Hoy en día se utilizan imágenes en escala de grises de alto rango dinámico (*high dynamic range*), como por ejemplo el *openEXR*, que admite muchas más intensidades respecto a las clásicas 256 de los 8 bits/canal. Con este formato novedoso, desarrollado por *Industrial Light and Magic*, cada píxel puede almacenar valores de coma flotante con 16 bits por canal (Industrial Light & Magic 2011).

Características y nomenclatura de las *displaced SubD*

La finalidad de las *displaced SubD* es la de representar de manera compacta y versátil la morfología y el color aparente de un objeto, sin realizar una simplificación de los polígonos de un modelo y, por lo tanto, sin confinar el 3D a una mera y accesoria ilustración de una obra de arte. Lee et al. (2000) han establecido la nomenclatura de esta técnica de representación que todavía falta en los programas dedicados al levantamiento digital, pero está muy difundida en todos los programas dedicados a la animación 3D y al renderizado.

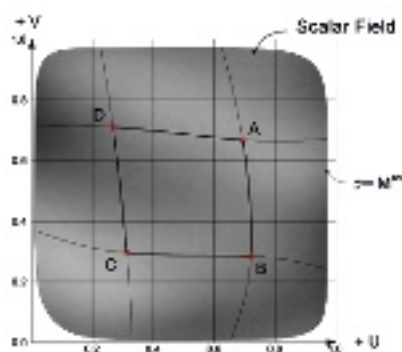


13. El Campo escalar es una imagen en formato openEXR donde se "guarda" la distancia que hay entre dos modelos: el de alto detalle y M_n , es decir, entre la malla obtenida por el escáner y la superficie de dominio lisa.

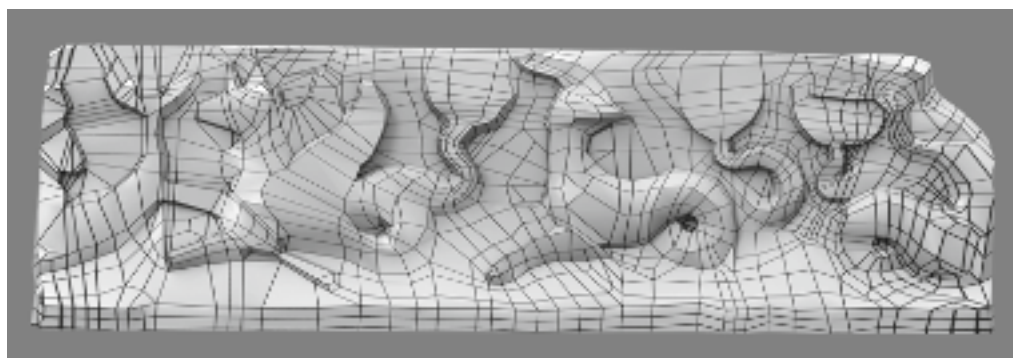
14. Malla de control M_0 obtenida por la operación llamada "retopology".

13. The scalar field is an OpenEXR image format file where the distances between two models are "stored": the high detail scan and the surface smooth domain M_n .

14. The control mesh M_0 obtained by means of "retopology."



13



14

- **Control mesh** (malla de control): el modelo de alto detalle se convierte en una malla de polígonos con un detalle muy inferior al modelo obtenido directamente por la nube de puntos. En general, es preferible construir una malla de control hecha por polígonos de forma prevalentemente cuadrangular (con los 4 bordes no necesariamente coplanarios) ya que este tipo de topología se puede convertir con sencillez en una superficie de subdivisión del tipo de Catmull-Clark (Catmull, Clark 1978, pp. 350-355). Este tipo de superficie matemática así como los modelos NURBS admiten detalle variable (LOD).

- **Smooth Domain Surface** (superficie de dominio lisa): es la superficie de detalle variable obtenida convirtiendo la malla de control en superficie de subdivisión. Si llamamos M^0 a la malla de control, a través de un algoritmo iterativo (Catmull, Clark 1978) se pueden generar mallas con un detalle superior, más lisas y continuas que se llaman M^n , desarrolladas por la n -ésima aplicación del criterio de subdivisión Catmull-Clark. $M^{(\infty)}$ o σ es la superficie teórica de resolución infinita obtenida a través del límite siguiente:

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} M^n$$

Donde n es el número de veces que se aplica el criterio de subdivisión.

- **Scalar Field** (campo escalar): es la imagen donde se ha guardado el detalle geométrico del modelo de alta resolución. Cada píxel de esta imagen representa la distancia que hay entre el modelo de alta resolución y la M^n que se ha empleado para calcular dicho campo escalar.

Metodología

Como se ha comentado anteriormente, para obtener una *displaced* subD a partir del levantamiento digital es necesaria una malla de alta resolución que hará de referencia en las operaciones siguientes:

- 1) **Retopology**: con este término se identifican una serie de pasos de modelación 3D que permiten la reconstrucción de un modelo de alto detalle a través de polígonos cuadrangulares. Así, es como tener dos versiones del mismo objeto: la malla de control M^0 y la malla de alta densidad sacada de la nube de puntos. Obviamente, los tamaños y las direcciones de las bandas de polígonos que aproximan el modelo de referencia deberían ser el producto de una operación de planificación basada en

This new kind of image, developed by Industrial Light and Magic, means that each pixel can store floating-point values with 16 bits per channel (Industrial Light & Magic 2011).

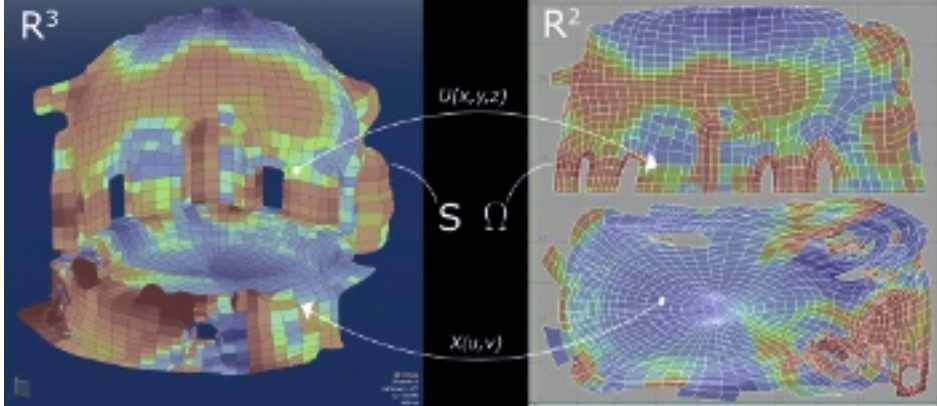
Characteristics and nomenclature of the Displaced SubD

The purpose of the displaced subD is to represent the complex morphology in a compact and versatile way so as to reflect the apparent colour of an object without recurring to mesh simplification and therefore the role of the digital 3D model is not confined to being a mere accessory to a final illustration or 'work of art'. Lee et al. (2000) have established the nomenclature of this technique that nowadays is still lacking in dedicated laser scanner survey programs yet is widespread in all 3D animation and rendering software.

- **Control mesh**: the high detail model is covered by a polygon mesh with a fairly low detail; obtained by directly sketching quadrilateral polygons on a dense triangle mesh generated by the point cloud. In general it is preferable to construct a control mesh made by predominantly rectangular polygons (with the 4 edges not necessarily coplanar) because this type of topology can be easily converted in a subdivision surface of the type named Catmull-Clark (Catmull, Clark 1978, pp. 350-355). This type of model is a mathematical representation of an object as NURBS models and supports a variable level of detail (LOD).

- **Smooth Surface Domain**: the variable level of detail surface obtained by converting the control mesh in a subdivision surface. Once

15. El mapeado y la parametrización permiten relacionar un modelo 3D con un espacio 2D llamado (u,v) de modo que se pueda, con una única imagen, cubrir la totalidad del modelo. Los programas de renderizado son los que permiten mapear con más interactividad y precisión los modelos de malla y las superficies de subdivisión.



15

called M^0 the control mesh, through an iterative algorithm (Catmull, Clark 1978) a mesh with a higher number of polygons can be generated. This is called M^n smooth and is continuously developed by the N^{th} application of the Catmull-Clark subdivision criterion. M^{∞} or σ is the theoretical infinite resolution surface obtained through the following limit:

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} M^n$$

Where n is the number of times the subdivision criterion is applied.

- **Scalar Field:** is the image in which the geometric detail of the high-resolution model is saved. Each pixel of the image represents the distance between the high-resolution model and M^0 (the model used for calculating has the scalar field).

Methodology

As mentioned above, to obtain a displaced subD from a laser scanner survey a high resolution mesh is needed and in turn will be used as a template for the following operations:

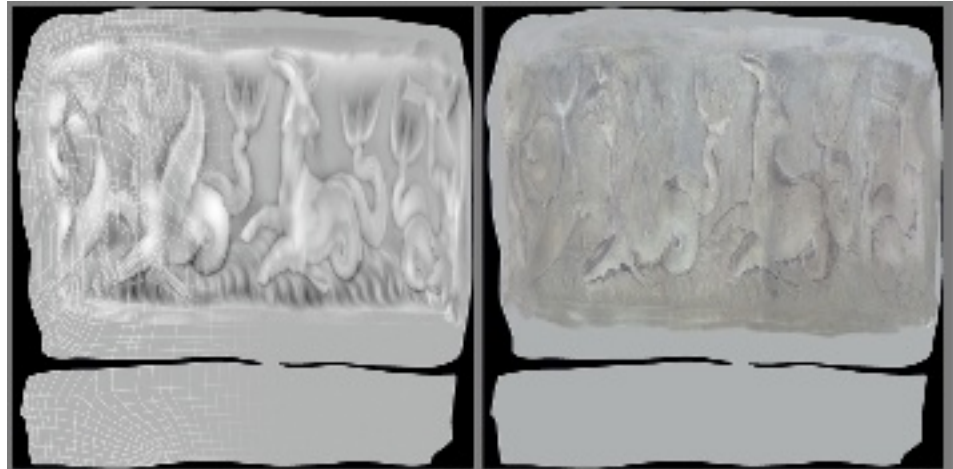
1) **Retopology:** identifies a series of 3D modelling steps that perform the complete reconstruction of a highly detailed model by means of quadrilateral rows and columns of polygons. Thus, it is like having two versions of the same object: the M^0 (control mesh) and the high density mesh from the point cloud. Obviously the sizes and directions of the bands of polygons that cover the reference model should have been previously thought out by the user in accordance with an earlier "morphological reading" of the architecture: a complex shape should be split into different areas

16. Evaluación de la distancia que hay entre el modelo de alto detalle y la superficie de dominio lisa: en rojo los vectores negativos y azul los positivos. La operación llamada baking se encarga de codificar en el sistema de referencia (u,v) los resultados de esta medición.

17. A la izquierda el campo escalar en el que están codificados los valores de desplazamiento, y a la derecha, la textura del color aparente del friso aplicada empleando el mismo sistema de referencia (u,v) .



16



17

una lectura previa de la arquitectura, que debería ser dividida en superficies distintas a través de una jerarquización semántica (Apollonio, Gaiani, Manfredini 2010, pp. 237-269).

2) **Mapping/Parameterization:** estas operaciones tienen el objetivo de poner en relación la superficie de dominio lisa con una versión bidimensional suya que se utilizará como sistema de referencia para la creación del campo escalar y luego para aplicarlo como textura a la superficie. En la jerga de la informática gráfica se suele denominar estas operaciones como mapeado UV. Usando la notación establecida por Levy (2001), dada una

15. Mapping and parameterization establish the relation between a 3D model and a 2D space called (u,v) so that a single image can cover a whole mesh. Rendering programs provide interactive and accurate tools for mapping mesh and subdivision surfaces models.

16. Evaluation of the distance between the high detail model and the smooth domain surface: the negative vectors shown in red; the positive in blue. An operation known as baking encodes the results of this measurement inside the (u,v) reference system.

17. The scalar field where all the offset values have been encoded (left) and the texture of the apparent colour (right).



superficie S en R^3 , se define “mapeo” una transformación U biyectiva que pone en correspondencia la superficie S con un subconjunto Ω de R^2 :

$$(x, y, z) \in S \rightarrow U(x, y, z) = \begin{bmatrix} U_x(x, y, z) \\ U_y(x, y, z) \end{bmatrix}$$

El conjunto Ω se llama espacio de parámetros (u, v) . La función inversa $X = U^{-1}$ se conoce como la parametrización de una superficie:

$$X(u, v) = U^{-1}(u, v) = \begin{bmatrix} x(u, v) \\ y(u, v) \\ z(u, v) \end{bmatrix}$$

3) *Baking*: es la operación que calcula la distancia existente entre el modelo de alta resolución y la superficie de dominio lisa. Estos “deltas” se guardan en las distintas intensidades de gris de los píxeles de un mapa que luego se aplicará por medio del mismo sistema de referencia (u, v) que se utilizó para generarla.

Resultados

Los resultados que se pretendían alcanzar con este método de representación están resumidos en la tabla siguiente, donde se exponen los datos con los cuales se ha comenzado esta experimentación.

Es importante recordar que no sólo la compresión es una de las ventajas (posibilidad de compartir y almacenar datos de una forma altamente compacta), si no que existe también la posibilidad de manejar modelos de alta calidad en un único ambiente de modelado 3D para evaluar, de forma interactiva, la fiabilidad de anastilosis virtuales, reconstrucciones, etc. Otro factor que no debería olvidarse es que integrar partes faltantes a los modelos obtenidos por escáner es mucho más sencillo si se trabaja sobre una malla de control (*control mesh*) de unos pocos miles de polígonos, y no millones de polígonos como ocurre en aplicaciones dedicadas

by means of a semantic hierarchy (Apollonio, Gaiani, Manfredini 2010, pp. 237-269).

2) *Mapping / Parametrization*: these operations are intended to interlink the smooth domain surface with a two-dimensional version of itself that will then be used as a reference system for creating the scalar field; this is then applied as a texture to the surface. In computer graphics jargon these operations are often called UV mapping. Using the notation established by Levy (2001), given a surface S belonging to R^3 , we define “mapping” U a bijective transformation that puts in correspondence the surface S with a subset Ω of R^2 :

$$(x, y, z) \in S \rightarrow U(x, y, z) = \begin{bmatrix} U_x(x, y, z) \\ U_y(x, y, z) \end{bmatrix}$$

The set Ω is called (u, v) parameter space. The inverse function $X = U^{-1}$ is known as parameterization of a surface:

$$X(u, v) = U^{-1}(u, v) = \begin{bmatrix} x(u, v) \\ y(u, v) \\ z(u, v) \end{bmatrix}$$

3) *Baking*: is the operation that calculates the distance between the high-resolution model and the smooth domain surface. These “deltas” are stored as different intensities of the greyscale map that, once calculated, will be applied by means of the same (u, v) reference system used to generate it.

Caso de estudio <i>Case studies</i>	Modelo de alto detalle <i>High detail model</i>	Malla de control <i>Control mesh</i>	Displacement map (openEXR) <i>Displacement map (openEXR)</i>	Color map (JPG) <i>Colour map (JPG)</i>
Friso perteneciente al “Teatro Marítimo” <i>Maritime Theatre’s frieze</i>	40 MB 1316297 polígonos / polygons	158 KB 2737 polígonos / polygons	1904 KB 2048x2048 píxeles / pixels	1522 KB 2048x2048 píxeles / pixels
Cúpula Serapeo <i>Serapeo’s dome</i>	c.a. 300 MB 4000000 polígonos / polygons	c.a. 89 KB 3472 polígonos / polygons	5536 KB 4096x4096 píxeles / pixels	6563 KB 4096x4096 píxeles / pixels
Cúpula termas con <i>eliocamino</i> <i>Eliocamino’s Thermal Baths</i>	48 MB 1188577 polígonos / polygons	392 KB 2809 polígonos / polygons	2095 KB 4096x4096 píxeles / pixels	5658 KB 4096x4096 píxeles / pixels

Results

The results obtained by means of the representation method explained in this paper along with the original data on which this experiment is based are summarised in the following table.

It is important to remember that compression is not the only advantage of this technique (the ability to share and store data in a highly compact way) and that it is also possible to handle high-quality models in a single 3D modelling environment for evaluating interactively the virtual anastilosis’ reliability; reconstructions etc. Another factor that should not be forgotten is that due to the occlusion phenomenon the missing parts of the original highly detailed model can be integrated more easily on a displaced subD than on the original model thanks to the low resolution of the control mesh. Obviously, when integrating architectural features it is quite preferable to operate on a model made up of a few thousand polygons



rather than one consisting of many millions, especially when taking into consideration the difficulty of adapting the hole-filling tools present inside reverse modelling software (Inus Rapidform, Geomagic Raindrop, etc.). The application of the apparent colour textures is another topic in which displaced sub can demonstrate its effectiveness since the mapping of a low-resolution model is much faster and more automated than a high geometrically detailed model (Piponi, Borshukov 2000, pp. 471-477). Another advantage is the ability to save time while setting up a scene before rendering 3D models because displaced subD is faster to visualise interactively than highly detailed models directly imported into rendering applications.

Conclusions and future work

Thanks to the technology of the laser scanner 3D survey and displaced subD it was possible to develop several groundbreaking studies, not only from the standpoint of the use of computer applications, but also from the standpoint of historical, artistic and archaeological investigation (Adembri 2010, pp. 222-225). Among them there is the previous study on the "Maritime Theatre" (Di Tondo 2010, pp. 61-70) that established in a more accurate way the position of various parts of the frieze surrounding the mixtilinear entablature of that famous architecture. Thanks to the scientific collaboration with the *Soprintendenza per i Beni Archeologici del Lazio* and several universities ⁴ involved in this documentation process, PhD thesis and new investigation lines began using displaced subD as a more desirable way of representing the complexity and variety of the different data gathered by means of digital surveys (time of flight, phase shift, triangulation, photogrammetry, etc.). ■

NOTES

1 / Scientist coordination: Dr. Benedetta Adembri (Soprintendenza per i Beni Archeologici del Lazio), responsables Dr. Sergio Di Tondo (Università degli Studi di Firenze, Dipartimento di Architettura, Storia, Disegno e Progetto), Dr. Filippo Fantini (Universidad Politécnica de Valencia, Instituto Universitario de Restauración del Patrimonio).

2 / Survey by Prof. Giorgio Verdiani from the Università degli Studi di Firenze in collaboration with the architects Francesco Tioli, Mirco srl Pucci and Area3D s.r.l.

3 / Of course in this field it is very important to document fractures, erosions, signs of use and reuse in a constructive element etc. because these traces can be important for different research lines.

4 / We signal the scientific collaboration between the Soprintendenza and the Universidad Politécnica of Valencia for the



18

18. Displaced subD con textura del color aplicada y en rojo el arco que evidencia el radio de curvatura del friso del "Teatro Maritimo".

18. Displaced subD with texture colour applied: the red arc shows the bend radius of the frieze ("Maritime Theatre")

al modelado inverso y procesado de malla (Inus Rapidform, Raindrop Geomagic, etc.). La aplicación de las texturas del color aparente es otro tema con utilidad de las *displaced subD*, ya que la parametrización de un modelo de baja resolución es mucho más rápida y automatizada (Piponi, Borshukov 2000, pp. 471-477). Otra ventaja es la posibilidad de ahorrar tiempo para calcular imágenes sintéticas a partir de modelos *displaced subD* en comparación con los de alto detalle importados directamente en cualquier programa para el renderizado.

Conclusiones y futuros desarrollos de la investigación

Gracias a la tecnología de levantamiento 3D láser escáner y las *displaced subD* se están desarrollando varios estudios innovadores, no sólo desde el punto de vista de la utilización de las aplicaciones informáticas, sino también desde el punto de vista histórico artístico y arqueológico (Adembri 2010, pp. 222-225). Entre ellos está el último sobre el "Teatro Maritimo" (Di Tondo 2010, pp. 61-70) que ha per-

mitido establecer con más exactitud la posición de varias piezas del friso que rodeaba el perfil mixtilíneo de esta famosa arquitectura. Gracias a la colaboración científica con la *Soprintendenza per i Beni Archeologici del Lazio* y varias Universidades ⁴ involucradas en este proceso de documentación y estudio, se están desarrollando tesis doctorales en las que la complejidad y variedad de los datos necesitan tratamientos de los modelos basados en optimización a través de imágenes, como en el caso de las *displaced subD*. ■

NOTAS

1 / Coordinación científica Dra. Benedetta Adembri (Soprintendenza per i Beni Archeologici del Lazio), responsables Dr. Sergio Di Tondo (Università degli Studi di Firenze, Dipartimento di Architettura, Storia, Disegno e Progetto), Dr. Filippo Fantini (Universidad Politécnica de Valencia, Instituto Universitario de Restauración del Patrimonio).

2 / Levantamiento hecho por el Prof. Giorgio Verdiani de la Università degli Studi di Firenze en colaboración con los arquitectos Francesco Tioli, Mirco Pucci y Area 3D s.r.l.

3 / Claramente es muy importante en este ámbito documentar incisiones, modificaciones, signos de utilización y de reutilización en un elemento constructivo, lesiones, etc., ya que estas huellas pueden ser indicios importantes para diferentes líneas de investigación.

4 / Se señala la colaboración científica entre la Soprintendenza y la Universidad Politécnica de Valencia en el ámbito del estudio sobre la decoración arquitectónica de la Piazza d'Oro en la tesis doctoral de Isabel Mtnez-Espejo Zaragoza, dirigida por el Prof. Juan Francisco Vidal. Agradecer la colaboración del profesor Pier Federico Caliarí que nos ha facilitado la viabilidad de los estudios realizados en la Vila Adriana, así como a los profesores Pablo Rodríguez y Teresa Gil por su aportación en cuanto al apoyo topográfico y fotogramétrico de la Piazza d'Oro.



19. Las displaced subD no sólo se prestan a la representación de detalles decorativos, sino también a arquitecturas más complejas donde sea necesario visualizar interactivamente detalles a varias escalas para comprobar hipótesis reconstructivas y desarrollar proyectos de intervención, disfrutando interactivamente de todo el detalle proporcionado por el escáner.

19. As well as its use in the representation of decorative details, the Displaced subD can also be used in more complex architectures where the interactive visualisation of the details at different scales is necessary.



19

Referencias

- ADEMBRI, B., 2010. *La decorazione architettonica del Teatro Marittimo*. En: Marina Sapelli Ragni, ed. 2010. *Villa Adriana. Una storia mai finita*. Electa, Milano, 2010.
- APOLLONIO, I., GAIANI, M., MANFREDINI, A.M., 2010. *Modellazione semantica metodi a multirisoluzione*. En: Benedetti, B., Gaiani, M., Remondino, F., ed. 2010. *Modelli digitali 3D in archeologia: il caso di Pompei*. Pisa. Edizioni della Normale.
- BATTINI, C., FANTINI, F., 2007. *Clouds and clay. Superfici di suddivisione e ottimizzazione*. En: L. De Carlo, ed. 2007. *Informatica e fondamenti scientifici della rappresentazione*. Roma. Gangemi.
- BATTINI, C., FANTINI, F., 2007. *Pretended geometry – Concrete perception, Utilization of the surface of subdivision and the applied normal map in archaeological context: the case of the Great Thermal Baths of Villa Adriana*. En: *Workshop 12 – Cultural Heritage and New Technologies*. Viena. Phoibos Verlag.
- CATMULL, E., CLARK, J., 1978. *Recursively generated B-spline surfaces on arbitrary topological meshes*. Computer-Aided Design, Noviembre 1978,10(6).
- DI TONDO, S., 2010. *Modelli digitali per la comprensione dell'aspetto originario del manufatto: architettura e apparato decorativo del Teatro Marittimo a Villa Adriana*. En: Mandelli, E., Velo, U., ed. 2010. *Il modello in architettura, cultura scientifica e rappresentazione*. Firenze. Alinea.

- GAIANI, M., ed. 2006. *La rappresentazione riconfigurata*. Milano, Edizioni POLI.design.
- GUIDI, G., RUSSO, M., BERARDIN, J.A., 2010. *Acquisizione 3D e modellazione poligonale*. Milano. McGraw-Hill.
- INDUSTRIAL LIGHT & MAGIC, 2011. *OpenEXR*. [en línea] disponible en: <<http://www.openexr.com/index.html>> [Consultado el 25 de octubre 2011]
- JUAN VIDAL, F., MERLO, A., 2008. *Nuevas aplicaciones del levantamiento integrado (rilievo)*. Arché, 2008, 3, p. 307-318.
- LEE, A., MORETON, H., HOPPE, H., 2000. *Displaced subdivision surfaces*. En: *SIGGRAPH 2000 Conference Proceedings*. Boston. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- LÉVY, B., 2001. *Constrained Texture Mapping for Polygonal Meshes*. En: *SIGGRAPH 2001, Conference Proceedings*. Boston. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- MIGLIARI, R., ed. 2008. *Prospettiva dinamica interattiva, la tecnologia dei videogiochi per l'esplorazione di modelli 3D di architettura*. Roma, Edizioni Kappa.
- PIPONI, D., BORSHUKOV, G., 2000. *Seamless Texture Mapping of Subdivision Surfaces by Model Pelting and Texture Blending*. En: *SIGGRAPH 2000 Conference Proceedings*. Boston. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.

research on the architectural decoration of the Piazza d'Oro developed in the PhD thesis of Isabel Mtnez-Espejo Zaragoza, directed by Prof. Francisco Juan Vidal. Thanks for the assistance of Prof. Pier Federico Calari who provided the feasibility for the studies on Adriana Vila, as well as Professors Pablo Rodriguez and Teresa Gil for their contribution in supporting the topographic and photogrammetric surveying of Piazza d'Oro.

References

- ADEMBRI, B., 2010. *La decorazione architettonica del Teatro Marittimo*. In: Marina Sapelli Ragni, ed. 2010. *Villa Adriana. Una storia mai finita*. Electa, Milano, 2010.
- APOLLONIO, I., GAIANI, M., MANFREDINI, A.M., 2010. *Modellazione semantica metodi a multirisoluzione*. En: Benedetti, B., Gaiani, M., Remondino, F., ed. 2010. *Modelli digitali 3D in archeologia: il caso di Pompei*. Pisa. Edizioni della Normale.
- BATTINI, C., FANTINI, F., 2007. *Clouds and clay. Superfici di suddivisione e ottimizzazione*. En: L. De Carlo, ed. 2007. *Informatica e fondamenti scientifici della rappresentazione*. Roma. Gangemi.
- BATTINI, C., FANTINI, F., 2007. *Pretended geometry – Concrete perception, Utilization of the surface of subdivision and the applied normal map in archaeological context: the case of the Great Thermal Baths of Villa Adriana*. In: *Workshop 12 – Cultural Heritage and New Technologies*. Viena. Phoibos Verlag.
- CATMULL, E., CLARK, J., 1978. *Recursively generated B-spline surfaces on arbitrary topological meshes*. Computer-Aided Design, Noviembre 1978,10(6).
- DI TONDO, S., 2010. *Modelli digitali per la comprensione dell'aspetto originario del manufatto: architettura e apparato decorativo del Teatro Marittimo a Villa Adriana*. In: Mandelli, E., Velo, U., ed. 2010. *Il modello in architettura, cultura scientifica e rappresentazione*. Firenze. Alinea.
- GAIANI, M., ed. 2006. *La rappresentazione riconfigurata*. Milano, Edizioni POLI.design.
- GUIDI, G., RUSSO, M., BERARDIN, J.A., 2010. *Acquisizione 3D e modellazione poligonale*. Milano. McGraw-Hill.
- Industrial Light & Magic, 2011. *OpenEXR*. [en línea] disponible en: <<http://www.openexr.com/index.html>> [October the25th 2011]
- JUAN VIDAL, F., MERLO, A., 2008. *Nuevas aplicaciones del levantamiento integrado (rilievo)*. Arché, 2008, 3, p. 307-318.
- LEE, A., MORETON, H., HOPPE, H., 2000. *Displaced subdivision surfaces*. In: *SIGGRAPH 2000 Conference Proceedings*. Boston. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- LÉVY, B., 2001. *Constrained Texture Mapping for Polygonal Meshes*. In: *SIGGRAPH 2001, Conference Proceedings*. Boston. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- MIGLIARI, R., ed. 2008. *Prospettiva dinamica interattiva, la tecnologia dei videogiochi per l'esplorazione di modelli 3D di architettura*. Roma, Edizioni Kappa.
- PIPONI, D., BORSHUKOV, G., 2000. *Seamless Texture Mapping of Subdivision Surfaces by Model Pelting and Texture Blending*. In: *SIGGRAPH 2000 Conference Proceedings*. Boston. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.