



ANÁLISIS DE DOS TÉCNICAS PARA LA DIGITALIZACIÓN DE COLECCIONES HISTÓRICAS DE MODELOS ANATÓMICOS

Fotogrametría a partir de ráfagas de fotografías y videogrametría

Analysing two techniques for the digitisation of historical collections of anatomical models
Photogrammetry from burst photography and videogrammetry

ÓSCAR HERNÁNDEZ-MUÑOZ, EMANUEL STERP MOGA , ALICIA SÁNCHEZ-ORTIZ
Universidad Complutense de Madrid, España

KEYWORDS

3D scanning
Photogrammetry
Videogrammetry
Anatomical models
Scientific collections
Cultural heritage
3D virtualisation

ABSTRACT

In this paper, we present an experience of digitisation of anatomical models belonging to historical collections by means of burst-based photogrammetry and also videogrammetry, in order to speed up the data acquisition process. The results showed a clear decrease in the time required for image capture with both methods with no significant loss of quality using burst-based photogrammetry and a more evident loss in the case of videogrammetry. The main conclusion of this study is that these methods can be useful for the digitisation of anatomical collections.

PALABRAS CLAVE

Digitalización 3D
Fotogrametría
Videogrametría
Modelos anatómicos
Colecciones científicas
Patrimonio cultural
Virtualización 3D

RESUMEN

En este trabajo, exponemos una experiencia de digitalización de modelos anatómicos pertenecientes a colecciones históricas mediante fotogrametría a partir de ráfagas de fotografías, y también de videogrametría, con el fin de agilizar el proceso de toma de datos. Los resultados mostraron una clara disminución del tiempo requerido para la captura de imágenes con ambos métodos sin una pérdida de calidad significativa empleando la fotogrametría basada en ráfagas y una pérdida más evidente en el caso de la videogrametría. La principal conclusión de este estudio es que estos métodos pueden ser de utilidad para la digitalización de colecciones anatómicas.

Recibido: 10/ 11 / 2022

Aceptado: 13/ 01 / 2023

1. Introducción

Durante los siglos XVIII al XX, diferentes museos, universidades y escuelas, especialmente europeos, encargaron a escultores o talleres especializados la creación de modelos anatómicos. Dichas figuras, elaboradas en diversos materiales como la cera de abejas, el papel maché, la escayola o la gelatina, entre otros, reproducían con gran detalle las estructuras del cuerpo humano, así como las de distintas especies animales. Su función original era la de servir como material didáctico destinado a la enseñanza de la anatomía en sustitución de los cadáveres, ya que estos últimos eran difíciles de conseguir y de conservar, especialmente durante la época estival (Ballestriero, 2010). Normalmente, la elaboración de estos modelos requería la participación de un escultor en colaboración con un cirujano, quien realizaba las preparaciones de cadáver que se deseaban reproducir (Riva et al., 2010). Los primeros talleres artesanales surgen inicialmente en Italia, donde se crean fabulosas esculturas elaboradas en cera de abejas policromada, de aspecto muy realista. Desde allí, se extienden pronto a otros países de Europa, donde existe una fuerte demanda por parte de numerosas instituciones. Con el tiempo, se comienzan a emplear para la creación de estas figuras otros materiales más livianos y resistentes, como el papel maché, y se comienzan a producir en serie durante el s.XIX. Posteriormente, ya en el s.XX, esta actividad pasó a tener un carácter más industrial con la llegada de nuevos materiales para su elaboración, como las resinas y los plásticos.

Hoy en día, se conservan múltiples colecciones de este tipo de artefactos en Universidades y Museos de distintos países, siendo valoradas en la actualidad, no solo por su valor científico e histórico, sino también por su calidad artística. No obstante, muchas de estas esculturas han llegado a nosotros en malas condiciones y requieren la intervención de expertos en conservación-restauración del patrimonio cultural para recuperar en la medida de lo posible su aspecto original y asegurar su correcta preservación. Una de las técnicas empleadas por dichos especialistas es la digitalización 3D, que ha demostrado en las últimas décadas su utilidad en este campo. Entre sus aplicaciones más destacables, figura la obtención de documentación gráfica tridimensional para el estudio del estado de conservación de una obra y la detección y clasificación de sus deterioros, así como para el análisis y planificación de posibles intervenciones. Otras aplicaciones de interés son la elaboración de réplicas mediante impresión 3D o la virtualización de obras o colecciones para su difusión (Hernández-Muñoz et al., 2019; Torres et al., 2010). Finalmente, otra función destacable de estas técnicas es la creación de archivos digitales en los que almacenar copias virtuales de gran precisión de los objetos en previsión de posibles daños futuros sobre la obra real. En este sentido, los frecuentes desastres naturales, conflictos armados, atentados terroristas, así como robos o ataques directos a obras de arte, entre otros eventos, nos alertan sobre la necesidad de realizar una virtualización 3D sistemática de nuestro patrimonio cultural (De Stefano et al., 2016; S. Liu et al., 2022). En el caso concreto de las colecciones históricas de modelos anatómicos, esta necesidad es aún mayor, debido a la fragilidad de los materiales empleados en su construcción y al precario estado de conservación en que muchos de ellos se encuentran debido a su función docente original y a su frecuente manipulación por profesores y estudiantes (Sterp Moga et al., 2021).

Disponer de un archivo gráfico tridimensional de estos bienes, permitiría restaurar con la máxima fidelidad las obras dañadas y, en caso de su destrucción total, legar a las generaciones futuras una copia precisa, tanto volumétrica como cromáticamente, de las obras desaparecidas para que, al menos, conozcan cuál era su apariencia física a través de representaciones gráficas tridimensionales o mediante la elaboración de réplicas. Sin embargo, la generación de copias digitales de un objeto es un proceso que puede resultar complejo, especialmente si no se dispone de una formación específica. A esto hay que sumar la necesaria inversión en aparatos y programas informáticos, que puede llegar a ser muy elevada si se desea obtener modelos de una gran calidad.

Dentro de las técnicas de digitalización de objetos tridimensionales empleadas en el área de la conservación y restauración del patrimonio cultural, la elaboración de modelos virtuales mediante escáneres 3D se ha convertido en un proceso habitual (Montusiewicz et al., 2021). Esto es debido principalmente a la precisión y resolución con que estos dispositivos son capaces de reproducir la geometría de los artefactos (García-Molina et al., 2021). No obstante, tanto los escáneres de luz estructurada de gama media y alta como los escáneres láser, que son las tecnologías más frecuentemente utilizadas, siguen teniendo un coste elevado, por lo que no todas las instituciones cuentan con este tipo de aparatos. Sin embargo, el material que se precisa para la realización de una fotogrametría de objeto cercano, también conocida como fotogrametría de corto alcance o rango cercano, resulta mucho más asequible, ya que puede ser ejecutada con una gran variedad de cámaras fotográficas (Evin et al., 2016). El menor coste económico de esta última técnica y los recientes avances en su precisión y velocidad han favorecido su popularización y hoy día es frecuentemente empleada en tareas de conservación y restauración del patrimonio cultural. Por otra parte, aunque la precisión de puntos y la resolución volumétrica logradas por los escáneres 3D suele ser superior a las obtenidas por fotogrametría, la extraordinaria calidad de la textura de color que poseen las cámaras digitales habitualmente empleadas para realizar los levantamientos fotogramétricos, hace que en ocasiones se prefiera la fotogrametría, si lo que se desea es mostrar una representación fiel del color, o que se empleen ambos métodos combinados (Di Paola y Inzerillo, 2018; Liu et al., 2012).

La utilización de vídeos para la obtención de modelos 3D es menos frecuente debido a que la resolución y nitidez de los fotogramas que los componen es inferior a la de las fotografías habitualmente capturadas con una cámara

digital. No obstante, existen algunos ejemplos de su uso para la digitalización de formas tridimensionales en otros campos profesionales, ya que puede agilizar la fase de registro de información y reducir la inversión necesaria (Barbero-García et al., 2017; Tuesta-Guzmán et al., 2022). También se han realizado algunas experiencias con esta técnica dentro del ámbito de la conservación-restauración de bienes culturales (Ortiz-Coder y Sánchez-Ríos, 2020; Ortiz Coder y Del Pino Espinosa, 2013).

La inmensa cantidad de artefactos conservados en museos e instituciones de todo el mundo, unida a la escasez de personal especializado en digitalización y de material con el que acometer esta tarea, son algunas de las principales causas por las cuales solamente una pequeña parte de nuestro patrimonio cultural haya podido ser virtualizada hasta el momento. Un aumento de la velocidad de realización de cualquiera de las fases del proceso de digitalización en tres dimensiones, podría incrementar la cantidad de objetos de los que se obtendría una copia digital en un mismo periodo de tiempo y, en consecuencia, estaríamos en disposición de salvaguardar de una forma más eficiente nuestra herencia cultural. En relación con esta cuestión, diferentes trabajos abordan la digitalización en masa de colecciones preservadas en museos (Collins et al., 2019; Farella et al., 2022; Guidi et al., 2015) pero, por lo general, están basados en dispositivos específicos, muchas veces complejos o de alto valor económico, y que, por tanto, no son asequibles para muchas instituciones.

2. Objetivos

El principal objetivo de este estudio fue analizar dos métodos económicos de digitalización de pequeños y medianos objetos empleando una cámara fotográfica réflex digital con el fin de comprobar su validez específicamente como técnica aplicable a la virtualización masiva de colecciones históricas de modelos anatómicos. Por un lado se utilizó la técnica de la fotogrametría de objeto cercano ejecutada a partir de ráfagas de fotografías y, por otro, la videogrametría, con objeto de determinar si es posible acelerar el proceso de registro de información sin una pérdida notable de la calidad. En ambos casos se analizó la calidad de los modelos 3D obtenidos, así como el tiempo empleado para su elaboración, y se compararon con los correspondientes a las copias digitales de esa misma obra realizadas mediante escáner de luz estructurada y fotogrametría de rango cercano convencional.

3. Metodología

El modelo anatómico empleado para realizar el estudio fue una cabeza de un buche (cría de asno) elaborada por nuestro equipo durante una investigación previa con la intención de recrear el aspecto primigenio de una figura de cera de abejas policromada perteneciente al Museo Veterinario Complutense (número de inventario MV-300), que representaba la miología de una cría de burro, y cuya cabeza original no se ha conservado (Fig. 1). La cabeza recreada tiene unas dimensiones de 27 x 19 x 12,5 cm.

La razón por la que se utilizó esta escultura para las pruebas se debe a que no posee valor histórico, aunque sí unas características físicas muy similares a las de otros modelos presentes en esta y otras colecciones históricas de modelos anatómicos.

Con el fin de establecer una comparativa entre las diferentes técnicas consideradas, se elaboró un modelo virtual de la figura con cada una de ellas. Los cuatro métodos empleados fueron los siguientes: 1) digitalización mediante escáner de luz estructurada; 2) fotogrametría de corto alcance convencional a partir de imágenes tomadas una a una con el objeto estático; 3) fotogrametría de corto alcance a partir de ráfagas de fotografías tomadas con el objeto en rotación constante; 4) videogrametría con el objeto girando también de forma permanente.

Figura 1. Modelo anatómico representando la cabeza de una cría de asno (Museo Veterinario Complutense).



Fuente: Elaboración propia.

Una vez obtenidos los modelos 3D por medio de los métodos arriba enumerados, se compararon los tiempos de captura de información para cada uno de ellos, así como la calidad de la malla poligonal y de la textura cromática, con la finalidad de analizar si los dos procedimientos en los que la captura se realiza en movimiento pudieran ser de utilidad en el campo de la conservación y restauración de bienes culturales y, en concreto, en la digitalización de colecciones históricas de modelos anatómicos.

3.1. Preparación de la fase de captura

El registro de información con el escáner de luz estructurada apenas requirió preparación. Únicamente se dispuso el modelo anatómico en una mesa de pequeño tamaño para poder acceder a él con el escáner desde todas las direcciones y, posteriormente, se conectó el dispositivo, modelo Space Spider (Artec 3D, Ciudad de Luxemburgo, Luxemburgo), a un ordenador portátil WX HP ZBOOK 17 (Hewlett Packard, Palo Alto, California, Estados Unidos) y a la fuente de alimentación.

Para la realización del registro de imágenes mediante fotogrametría y videogrametría, el modelo se ubicó dentro de una caja de luz de 60x60x60 cm, con fondos y paredes de color blanco. Con el fin de poder rotarlo con facilidad, se emplazó sobre una plataforma giratoria de 30 cm de diámetro, cubierta por una hoja de cartulina que contenía diferentes grafismos creados con el fin de que fuera mejor reconocida durante la fase de alineación de las imágenes. Sobre dicho disco, y a ambos lados del modelo, se colocaron sendas barras de escala específicas para fotogrametría (Cultural Heritage Imaging, San Francisco, California, Estados Unidos de América). La función de estas últimas era la de establecer de forma sencilla la escala real del objeto al crear el modelo 3D. Este estudio portátil se iluminó por ambos flancos utilizando cuatro focos de luz LED de 4000 lúmenes de potencia. Este set dotaba a la escena de una iluminación potente y difusa gracias a la cual se pudieron utilizar velocidades de obturación suficientemente elevadas para evitar desenfoques de movimiento en las capturas realizadas sin trípode. Gracias a que la iluminación dentro de la caja de luz era bastante difusa, tampoco fue preciso el uso de filtros polarizadores (Fig. 2).

Tanto para la realización de las fotogrametrías como de la videogrametría, se empleó una cámara SLR digital Canon EOS D7 Mark II, con una resolución fotográfica de 20,9 megapíxeles y una resolución de vídeo en el modo *HD* de 1200x720 píxeles. La velocidad máxima de captura de este dispositivo es de hasta 10 fps (fotogramas por segundo) para el disparo de fotografías en ráfaga y de 50 fps en el modo de vídeo *HD*. En ambos casos se utilizó un objetivo Canon EF 50mm, f/1.8 Macro. Para la toma de fotografías destinadas a la fotogrametría convencional, basada en capturas con objeto estático, el conjunto se estabilizó mediante un trípode y se acopló un disparador automático para reducir trepidaciones durante los disparos. En el caso de la fotogrametría a partir de ráfagas de imágenes y de la videogrametría, la cámara se manejó a pulso, sin emplear trípode, para lo cual se elevó la sensibilidad ISO.

Figura 2. Estudio de fotografía iluminado mediante focos LED.



Fuente: Elaboración propia.

3.2. Captura de información

La estrategia de captura con escáner 3D consistió en la rotación del operador del escáner alrededor de la figura, con esta en posición estática. La pantalla del ordenador mostraba una previsualización de la figura, gracias a la cual podía seguirse el progreso y distinguir las zonas donde era necesario insistir para obtener un buen registro.

En el caso de la fotogrametría convencional, el procedimiento de captura de imágenes consistió en la rotación del modelo anatómico sobre la tabla giratoria, mientras se mantenía estática la cámara durante la toma de imágenes y vídeos. Durante la fase de registro fotográfico se dispararon 144 imágenes en total. Para capturar estas fotografías, se fue rotando la tabla giratoria 15° entre toma y toma, y una vez completados los 360° del primer nivel o anillo, se ascendió la columna del trípode para tomar un nuevo grupo de imágenes en el siguiente nivel. Esta operación se repitió 6 veces para respetar también una distancia de 15° entre anillos consecutivos. Se utilizó una sensibilidad de 100 ISO, con una apertura de diafragma de $f/8$ y una velocidad de obturación de $1/100$ segundos.

Para la captura de imágenes en ráfaga destinadas a la fotogrametría en movimiento, se configuró la cámara para que la velocidad de disparo fuera de 3 fps, suficiente para registrar el número de imágenes necesario para el levantamiento fotogramétrico. No se elevó la tasa de disparo hasta el máximo que ofrece el dispositivo, de 10 fps, para no acumular un número de imágenes excesivo en la tarjeta de memoria. En este método de captura no se utilizó trípode para agilizar el proceso y se mantuvo la cámara en las manos utilizando una velocidad de disparo más elevada ($1/200$ segundos), para lo cual fue necesario incrementar la sensibilidad a 200 ISO a fin de mantener una apertura de diafragma de $f/8$. Una vez ubicada la cámara a la altura adecuada para crear el anillo de fotografías del nivel superior, se comenzó a rotar la tabla de forma constante al tiempo que se mantenía pulsado el obturador. Tras completar un giro de 360° , se procedió a descender unos centímetros la cámara para comenzar a capturar las imágenes del siguiente anillo, hasta completar en total 6 anillos.

Finalmente, en el proceso de videogrametría, la cámara se sostuvo también en las manos y se procedió de forma similar a la fotogrametría basada en ráfagas de imágenes, empezando a capturar el vídeo en el anillo del nivel superior y descendiendo ligeramente la cámara tras completar su grabación para acometer de forma ininterrumpida el registro correspondiente al siguiente nivel de altura. En este caso, se activó el método de captura de vídeo en formato HD (1200×720 píxeles) a 50 fotogramas por segundo, en modo *ALL-I*, en el que no se produjo ninguna compresión de los fotogramas, manteniéndose estos separados. En este método se decidió tomar un único vídeo para todo el proceso de registro, con el fin de agilizar aún más la tarea.

3.3. Procesamiento de las imágenes capturadas

Esta tarea fue necesaria como paso previo a la creación de los modelos 3D en las técnicas de fotogrametría y videogrametría. En primer lugar, se determinó la muestra de imágenes que se utilizaría en cada caso de cara al levantamiento fotogramétrico. Para la fotogrametría convencional basada en imágenes tomadas con el objeto estático, se tomaron las 144 fotografías capturadas durante el proceso de registro, 24 por cada uno de los niveles de altura considerados. En la fotogrametría basada en ráfagas de imágenes, el número de imágenes obtenido fue de 588, capturando 98 por nivel, aunque se seleccionaron únicamente 144 fotografías, tomando 1 de cada 4, de forma alterna, con el fin de utilizar durante el procesado un número similar al empleado en el método convencional. Finalmente, en el caso de la videogrametría, se procedió en primer lugar a separar los fotogramas que componían el vídeo empleando el programa VCL Media Player (VideoLAN, París, Francia). Mediante este procedimiento se obtuvieron 6092 imágenes, de las cuales se seleccionaron 304, tomando una de cada 20, de forma alterna, para la creación de los modelos 3D.

El revelado de las imágenes en formato RAW procedentes de la fotogrametría convencional y de la fotogrametría a partir de fotografías ráfaga, se ejecutó en el programa Adobe Camera Raw (Adobe, San José, California, Estados Unidos). Durante el mismo, se procedió a realizar el equilibrio de blancos utilizando una tarjeta Color Checker Passport. Tras efectuar el resto de ajustes necesarios, se guardaron las imágenes en formato JPG.

Los fotogramas en formato JPG extraídos a partir de las tomas de vídeo fueron igualmente editados en Adobe Camera Raw, con el fin de realizar el equilibrio de blancos y otros ajustes básicos, de la misma manera que se hizo con las imágenes procedentes de las fotogrametrías.

3.4. Creación de los modelos virtuales

El procesamiento de información registrada por el escáner de luz estructurada se realizó en el programa Artec Studio (Artec 3D, Ciudad de Luxemburgo, Luxemburgo). Los diferentes escaneados capturados de cada región de la figura fueron alineados en el citado software para, posteriormente, aplicarles un algoritmo denominado *Registro global*, que sirve para alinear cada uno de los fotogramas que componen los escaneados. A continuación

se creó la malla poligonal y, finalmente, la textura de color a partir de las fotografías realizadas por la cámara del escáner con una resolución de 16.384x16.384 píxeles

La elaboración del modelo 3D a partir de las imágenes obtenidas con la cámara fotográfica se llevó a cabo en el programa Metashape Professional (Agisoft, San Petersburgo, Federación de Rusia). Las imágenes reveladas en formato JPG se importaron al citado *software* para, a continuación, efectuar su alineamiento empleando la opción de precisión *Máxima*. Una vez concluida esta tarea, se construyó la malla poligonal en calidad *Alta*. Posteriormente se cerraron los pequeños huecos que quedaron en algún caso y, finalmente, se procesó la textura de color especificando un tamaño de la imagen de 4092x4092 píxeles.

4. Resultados

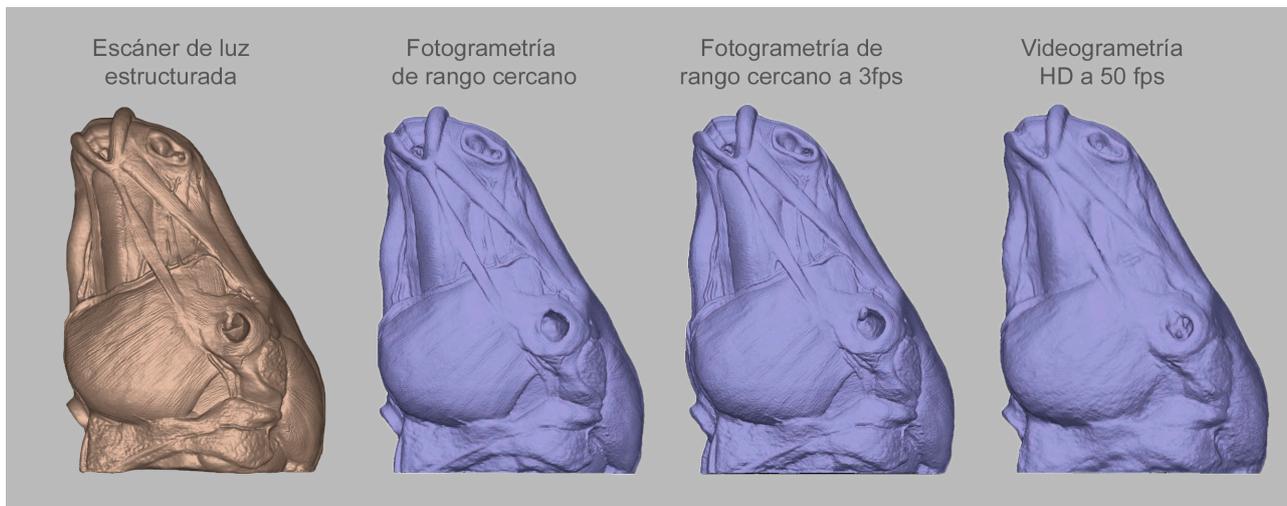
A partir de la información registrada con cada uno de los diferentes métodos empleados en el estudio, se pudieron elaborar modelos tridimensionales compuestos por una malla poligonal y su correspondiente imagen o mapa de textura representando de forma realista el color de su superficie. A continuación se especifican los resultados para cada tipo de técnica y posteriormente se comparan unos con otros.

4.1. Escáner de luz estructurada

Este fue el dispositivo de digitalización escogido como referencia para establecer la comparativa entre las técnicas analizadas en el estudio en relación con la geometría del objeto virtualizado, ya que este tipo de aparatos permiten alcanzar un alto grado de precisión volumétrica y una gran definición en las mallas generadas en comparación con las elaboradas a partir de imágenes fotográficas o de vídeo. Como era de esperar, el modelo 3D obtenido mediante el escáner de luz estructurada Artec Space Spider, poseía un extraordinario detalle y reflejaba los más pequeños relieves de la superficie de la figura anatómica de cera seleccionada para el estudio (Fig. 3 y 4). La malla obtenida tenía una resolución de 3,3 millones de polígonos y se mostraba libre de imperfecciones destacables. Pese a que la textura de color se creó con la máxima resolución disponible, de 16.384 píxeles, sin embargo la definición de la misma no fue óptima. Esto es habitual en los escaneados con este tipo de instrumentos, debido a las limitaciones técnicas de las cámaras que incorporan, que no son comparables con las DSLR de gama media o alta actuales.

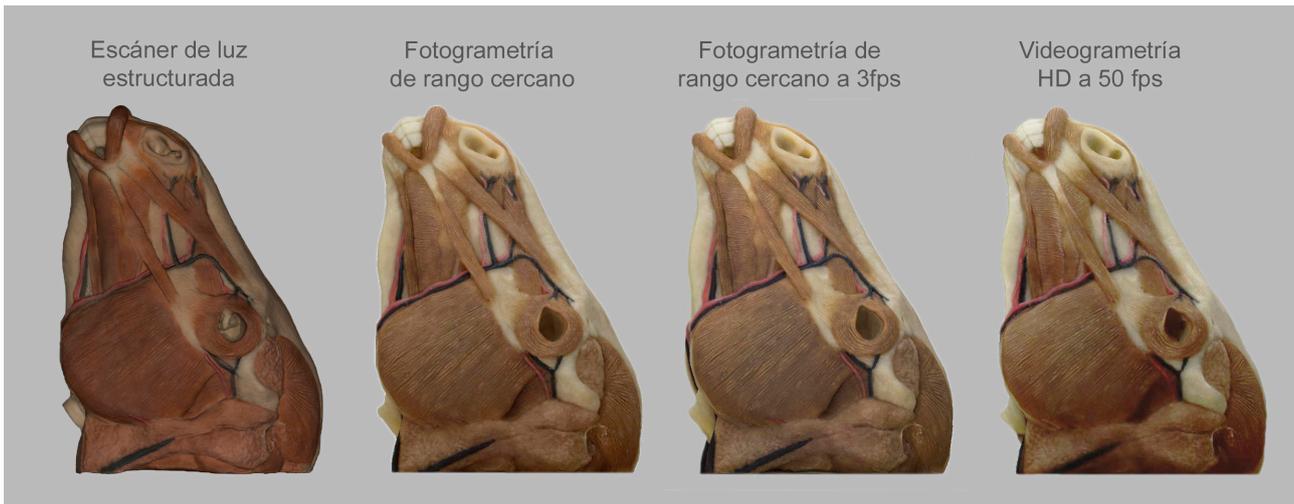
El tiempo de registro fue de 5 minutos y 19 segundos.

Figura 3. Mallas 3D obtenidas mediante las distintas técnicas de digitalización comparadas en el estudio.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4. Texturas de color obtenidas mediante las distintas técnicas de digitalización comparadas en el estudio.



Fuente: Elaboración propia.

4.2. Fotogrametría convencional

Esta técnica se eligió como método de referencia para establecer las comparaciones en relación con la textura de color de los diferentes métodos probados. El motivo es la extraordinaria nitidez y fidelidad de la imagen de textura de color que se puede lograr con este sistema, que supera en calidad a las conseguidas habitualmente por los escáneres 3D. Así, el mapa generado tenía una resolución de 4096 x 4096 píxeles pero su definición era claramente superior a la lograda por el escáner, alcanzando un fotorrealismo mucho mayor. No obstante, y como era de esperar, la apariencia del modelo desprovisto de textura, mostrando exclusivamente la malla poligonal sombreada de forma básica, era menos limpia y algo peor detallada que la escaneada, mostrando diferentes imperfecciones y una superficie algo más irregular (Fig. 3 y 4). Esta malla se utilizó también como referencia para comparar la definición geométrica obtenida con los dos procedimientos de digitalización testados basados en la utilización de cámara fotográfica: la fotogrametría a partir de ráfagas de imágenes y la videogrametría.

El tiempo de registro fue de 13 minutos y 53 segundos sin contar con la instalación del set de fotografía y la iluminación.

4.3. Fotogrametría a partir de ráfagas de fotografías

Las imágenes en ráfaga capturadas para la realización de una fotogrametría del modelo anatómico permitieron el levantamiento fotogramétrico sin necesidad de crear máscaras para ocultar el fondo de la imagen, gracias a que este era de color blanco y homogéneo. Se obtuvo un modelo tridimensional de alta definición volumétrica y cromática, formado por una malla de 8,6 millones de polígonos y una imagen de textura de 4096 x 4096 píxeles. En él se podían distinguir todos los detalles anatómicos que posee el modelo con suficiente definición. Comparando dicha copia virtual con las obtenidas mediante fotogrametría de objeto cercano convencional, la pérdida de calidad no fue apenas visible y tanto la geometría como el color fueron muy similares a los obtenidos mediante imágenes estáticas, salvo por un incremento muy ligero del ruido de superficie y la aparición de un pequeño artefacto en la órbita izquierda (Fig. 3 y 4).

El tiempo empleado para obtener todas las imágenes con esta técnica fue de 3 minutos y 12 segundos.

4.4. Videogrametría

El modelo 3D obtenido mediante videogrametría, sin embargo, pese a tener 4.1 millones de polígonos, mostró una merma apreciable de calidad, especialmente en la geometría del objeto, y de forma menos intensa en la textura de color. La pérdida de definición volumétrica en algunas estructuras anatómicas resultó evidente y ciertos relieves superficiales de menor tamaño habían desaparecido total o parcialmente. La disminución de la calidad de la imagen de textura asociada se manifestó fundamentalmente en una mayor indefinición de los detalles más finos, que aparecían algo más borrosos que en los métodos de fotogrametría probados (Fig. 3 y 4). No obstante, el aspecto con la textura de color activa era todavía más realista que el logrado con el escáner.

Con este método de captura, la duración de la fase de grabación de vídeo fue de 2 minutos y 10 segundos.

5. Discusión

Los modelos 3D obtenidos en este estudio mediante escáner de luz estructurada y fotogrametría de corto alcance convencional, poseían la calidad esperada en función de los materiales empleados, lo cual sirvió para

comprobar que todos los dispositivos funcionaron con corrección y que la técnica empleada fue la correcta. Como era predecible, la mejor calidad de la geometría de la malla se correspondió con la digitalización realizada mediante el escáner Artec Space Spider, que claramente era más limpia y definida y apenas requirió la realización de operaciones de edición. La fotogrametría de referencia dio lugar a una malla poligonal con un mayor ruido superficial que la creada con el escáner y con algunas irregularidades artificiales en ciertas regiones, algo que es habitual cuando se comparan ambos métodos. No obstante, la imagen de textura obtenida fue muy superior a la del modelo escaneado, tanto en definición como en su fidelidad al modelo de cera.

En cuanto a la fotogrametría creada a partir de ráfagas de imágenes, la pequeña pérdida de calidad del modelo 3D en comparación con la fotogrametría convencional a partir de imágenes estáticas puede deberse a la utilización de una sensibilidad ISO más elevada en la cámara con el fin de hacer posible una mayor velocidad de disparo y evitar así posibles trepidaciones debidas al movimiento del objeto. El incremento del número ISO, siempre genera un mayor ruido digital en las fotografías, que se traslada también al modelo 3D generado a partir de ellas, originando un ruido superficial caracterizado por una superficie de aspecto más rugoso. No obstante, el modelo de cámara utilizado en este trabajo permite utilizar sensibilidades de hasta 12500 ISO, por lo que el aumento de ruido generado por cada incremento de dicho valor es relativamente más pequeño que en otros dispositivos, lo que seguramente ha contribuido a que los artefactos debido a esta causa hayan sido menores de lo esperable. En este caso se alcanzó una sensibilidad moderada debido a que se utilizaron unas fuentes de luz suficientemente potentes, pero sería interesante en próximos estudios comprobar la merma de calidad que se produce empleando mayores valores ISO, ya que en ocasiones podría ser necesario usar esta técnica en condiciones de iluminación más precarias.

Otro aspecto a tener en cuenta en relación con los resultados de este estudio es que al evaluar la técnica de fotogrametría a partir de ráfagas de imágenes, únicamente se tomaron 144 de las 588 fotografías capturadas. El motivo de esta decisión fue establecer una comparación más precisa con la fotogrametría convencional. No obstante, sería factible mejorar la calidad del modelo tridimensional aumentando el número de instantáneas seleccionadas para el procesamiento. Creemos que conforme mejore la eficacia de los programas informáticos empleados para el levantamiento fotogramétrico y se aceleren los tiempos de procesado, se podrá extraer más información de estas ráfagas de imágenes y conducirán aún a mejores resultados.

Debido a la gran diferencia de tiempo de captura de imágenes que hemos encontrado en nuestro estudio entre la fotogrametría de objeto cercano tradicional y la fotogrametría creada a partir de ráfagas de fotografías, pensamos que esta última podría acortar de forma importante los tiempos destinados al registro de información cuando se trabaja en colecciones con un alto número de artefactos. Estimamos que con este método sería posible crear copias digitales de hasta el cuádruple de objetos que con la fotogrametría convencional en sesiones prolongadas. Aunque es cierto que la fase de procesado seguiría exigiendo el mismo tiempo de ejecución y que el ahorro de tiempo se produce fundamentalmente en la fase de captura, pensamos que este método puede ser de utilidad para quienes deseen digitalizar de forma masiva colecciones extensas de bienes culturales. En esos casos, se podría priorizar la toma de imágenes de los objetos que se quieren virtualizar utilizando un método rápido y eficaz como la fotogrametría a partir de ráfagas de fotografías y, posteriormente, procesarlos cuando sea posible, pues la información necesaria para construir los modelos 3D ya estaría almacenada en formato digital.

Respecto a la videogrametría, ciertamente era la técnica para la que se preveían inicialmente peores resultados debido a las características de las imágenes empleadas, con una resolución mucho más baja y con posibles problemas de trepidación. No obstante, debido a que el número de imágenes producidas durante la captura de los vídeos de cada nivel fue muy superior al registrado para las fotogrametrías, parecía razonable esperar una cierta compensación en el resultado conseguido, como así fue.

En otros estudios se han empleado dispositivos de teléfono móvil para registrar vídeos de velocidad superlenta, con tasas de varias centenas de fotogramas por segundo con el fin de extraer fotogramas más nítidos que con vídeo convencional. No obstante, hemos querido utilizar una cámara de tipo semiprofesional con un flujo de 50 fotogramas por segundo para ver si permitía obtener un modelo 3D de calidad aceptable. Es posible que la utilización de tomas de vídeo de velocidad súper lenta con una cámara de tipo profesional o semiprofesional mejorase la definición de los fotogramas y diera lugar a un modelo de aspecto más definido, aunque sería con un coste de material más elevado. No obstante, el resultado conseguido en este estudio empleando videogrametría es bastante aceptable, sobre todo si el objetivo que se persigue es la visualización en pantalla, y pensamos que esta técnica debería ser considerada como una opción válida para ciertas aplicaciones como la digitalización en masa de colecciones de objetos relativamente sencillos con una finalidad divulgativa o para dar difusión a las mismas.

Debido a que el objeto seleccionado para la realización de pruebas en esta investigación no era excesivamente complejo en su forma ni presentaba características que dificultasen especialmente su digitalización como piezas muy finas o intrincadas, partes muy brillantes u oscuras, sería conveniente en ulteriores estudios realizar nuevos test para ver si en esas circunstancias la fotogrametría basada en ráfagas o la videogrametría podrían ser también métodos válidos.

6. Conclusiones

La principal conclusión alcanzada en este trabajo es que la fotogrametría a partir de tomas fotográficas en ráfaga es un método relativamente económico y válido para la digitalización de colecciones históricas de modelos anatómicos. Esta técnica puede agilizar la creación de copias digitales de artefactos de pequeño y mediano tamaño siempre que se posea una iluminación de potencia adecuada que permita emplear velocidades de obturación suficientemente altas para evitar trepidaciones y aperturas de diafragma de rango medio con el fin de conseguir una buena profundidad de campo. Esta técnica podría emplearse como alternativa a la fotogrametría convencional basada en imágenes tomadas con el objeto estático con el fin de incrementar la velocidad de digitalización 3D de bienes culturales, especialmente cuando no poseen características físicas que dificulten el registro de información, tales como una morfología excesivamente compleja o superficies muy brillantes, oscuras o transparentes.

Por otra parte, el empleo de la videogrametría para la virtualización de este tipo de objetos podría estar justificada, especialmente con fines divulgativos o de difusión de colecciones, en situaciones en las que la brevedad del tiempo disponible para la fase de registro o el alto número de artefactos a digitalizar haga recomendable emplear tomas de vídeo en lugar de fotografías.

7. Agradecimientos

La presente propuesta se ha desarrollado dentro del marco del proyecto de investigación Ref.: PGC2018-098396-B-100 "Metodologías innovadoras en conservación-restauración de colecciones científicas con modelos didácticos de botánica, anatomía humana y animal basadas en tecnologías 3D", financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (España) dentro del Programa Estatal de Generación de Conocimiento y Fortalecimiento Científico y Tecnológico I+D+i, Subprograma Estatal de Generación de Conocimiento, y gracias a la Beca Predoctoral FPI ref.PRE2019-087870 financiada por el Ministerio de Ciencia e Innovación (España), FSE Fondo Social Europeo y la Agencia Estatal de Investigación.

Referencias

- Ballestriero, R. (2010). Anatomical models and wax Venuses: Art masterpieces or scientific craft works? *Journal of Anatomy*, 216(2), 223-234. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7580.2009.01169.x>
- Barbero-García, I., Lerma, J. L., Marqués-Mateu, A. y Miranda, P. (2017). Low-Cost Smartphone-Based Photogrammetry for the Analysis of Cranial Deformation in Infants. *World Neurosurgery*, 102, 545-554. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2017.03.015>
- Collins, T., Woolley, S. I., Gehlken, E. y Ch'ng, E. (2019). Automated low-cost photogrammetric acquisition of 3D models from small form-factor artefacts. *Electronics*, 8(12). <https://doi.org/10.3390/electronics8121441>
- Evin, A., Souter, T., Hulme-Beaman, A., Ameen, C., Allen, R., Viacava, P., Larson, G., Cucchi, T. y Dobney, K. (2016). The use of close-range photogrammetry in zooarchaeology: Creating accurate 3D models of wolf crania to study dog domestication. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 9, 87-93. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2016.06.028>
- Farella, E. M., Morelli, L., Grilli, E., Rigon, S. y Remondino, F. (2022). Handling critical aspects in massive photogrammetric digitization of museum assets. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLVI-2/W1-*, 215-222. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xlvi-2-w1-2022-215-2022>
- García-Molina, D. F., López-Lago, S., Hidalgo-Fernandez, R. E. y Triviño-Tarradas, P. (2021). Digitalization and 3D Documentation Techniques Applied to Two Pieces of Visigothic Sculptural Heritage in Merida through Structured Light Scanning. *Journal on Computing and Cultural Heritage*, 14(4), 1-19. <https://doi.org/10.1145/3427381>
- Guidi, G., Gonizzi Barsanti, S., Micoli, L. L. y Russo, M. (2015). Massive 3D digitization of museum contents. *Research for Development*, 335-346. https://doi.org/10.1007/978-3-319-08533-3_28
- Hernández-Muñoz, Ó., Sánchez Ortiz, A. y Matía Martín, P. (2019). Anatomía animal. Técnicas digitales para la reconstrucción escultórica de la apariencia original de un modelo de cera del siglo XIX. *Intervención, Revista Internacional de Conservación, Restauración y Museología*, 10(19), 64-76. <https://doi.org/10.30763/intervencion.2019.19.209>
- Liu, J. W., Jiang, Z. Q., Sun, X. y Hu, H. (2012). Integration of close Range Photogrammetry and Structured Light Scanner for Cultural Heritage Documentation. *Advanced Materials Research*, 468-471, 1966-1969. <https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/AMR.468-471.1966>
- Liu, S., Tu, Y., Wang, X., Qin, B., Xie, Z., Zhang, Y., Zhang, H. y Hu, D. (2022). Transparent reversible prosthesis, a new way to complete the conservation–restoration of a Black Ding bowl with application of 3D technologies. *Heritage Science*, 10(1), 1-14. <https://doi.org/10.1186/s40494-022-00646-0>
- Montusiewicz, J., Miłosz, M., Kęsik, J. y Żyła, K. (2021). Structured-light 3D scanning of exhibited historical clothing—a first-ever methodical trial and its results. *Heritage Science*, 9(1). <https://doi.org/10.1186/S40494-021-00544-X>
- Ortiz-Coder, P. y Sánchez-Ríos, A. (2020). An Integrated Solution for 3D Heritage Modeling Based on Videogrammetry and V-SLAM Technology. *Remote Sensing 2020, Vol. 12, Page 1529, 12(9)*, 1529. <https://doi.org/10.3390/RS12091529>
- Ortiz Coder, P. y Del Pino Espinosa, B. (2013). *Digitalización 3D automática con láser escáner, fotogrametría y videogrametría. El caso práctico del Templo de Diana (Mérida)*. www.4-e.es
- Paola di, F. y Inzerillo, L. (2018). 3D reconstruction-reverse engineering-digital fabrication of the Egyptian Palermo stone using by smartphone and light structured scanner. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 42(2), 311-318. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-311-2018>
- Riva, A., Conti, G., Solinas, P. y Loy, F. (2010). The evolution of anatomical illustration and wax modelling in Italy from the 16th to early 19th centuries. *Journal of Anatomy*, 216(2), 209-222. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7580.2009.01157.x>
- Sterp Moga, E., Hernández-Muñoz, Ó. y Sánchez-Ortiz, A. (2021). Aplicación de fuentes de iluminación en modelos fotogramétricos para la diagnosis y restauración virtual de objetos en cera policromados. *Conservar Património*, 38, 10-21. <https://doi.org/10.14568/cp2020021>
- Stefano de, A., Tausch, R., Santos, P., Kuijper, A., Di Gironimo, G., Fellner, D. W. y Siciliano, B. (2016). Modeling a virtual robotic system for automated 3D digitization of cultural heritage artifacts. *Journal of Cultural Heritage*, 19, 531-537. <https://doi.org/10.1016/J.CULHER.2015.11.008>
- Torres, J. C., Cano, P., Melero, J., España, M. y Moreno, J. (2010). Aplicaciones de la digitalización 3D del patrimonio. *Virtual Archaeology Review*, 1(1), 51-54. <https://doi.org/10.4995/VAR.2010.4768>
- Tuesta-Guzmán, J., Solórzano-Requejo, W., Grosso-Salazar, G., Ojeda, C. y Díaz Lantada, A. (2022). Innovative Methodology for the 3D Reconstruction of Body Geometries using Open-source Software. *Proceedings of the 15th International Joint Conference on Biomedical Engineering Systems and Technologies*, 162-169. <https://doi.org/10.5220/0010870200003123>