

## UNA METODOLOGÍA INTELIGENTE PARA LA DIGITALIZACIÓN DE COLECCIONES MUSEÍSTICAS

### A COMPREHENSIVE SMART METHODOLOGY FOR MUSEUM COLLECTION DIGITIZATION

Marco Gaiani, Fabrizio Ivan Apollonio, Filippo Fantini

doi: 10.4995/ega.2020.12281

El documento describe una metodología que cubre los procedimientos de levantamiento y las aplicaciones informáticas con el objetivo de convertir herramientas generalistas (teléfonos inteligentes) en dispositivos de adquisición rigurosa de BIC almacenados en los museos. Dos problemas diferentes se enfrentan: a) como las características de dichos objetos a escala micro/meso afectan su documentación; b) desarrollo de una solución multipropósito para una adquisición de bajo costo y fácil de usar para digitalizar y visualizar artefactos BIC. Se presenta un procedimiento basado en un kit de adquisición digital destinado a lograr modelos y texturas confiables, así como representaciones de color precisas. Se han seleccionado varios objetos para probar la coherencia y flexibilidad de los métodos y técnicas propuestos, y los resultados se comparan con los de las técnicas de adquisición estándar.

**PALABRAS CLAVE:** COLECCIONES DE MUSEOS, SENSORES DE TELÉFONOS INTELIGENTES, STRUCTURE FROM MOTION, CAPTURA Y VISUALIZACIÓN DE COLORES, MODELADO 3D

*The paper describes methods and techniques covering both surveying procedures and computer applications aiming to convert widespread tools as smartphones into reliable ranging devices in the field of Cultural Heritage (CH) museums small object. Two different issues are faced: a) how different features affect the documentation of micro-/meso-scale objects displayed in exhibitions; b) development of a multipurpose solution for a low-cost and easy-to-use acquisition to digitize and visualize these objects. A procedure based on a surveying kit aimed at achieving reliable models and textures, as well as accurate color renderings is presented. Several objects have been selected to test the consistency and flexibility of the proposed methods and techniques and results are compared with those from standard acquisition techniques.*

**KEYWORDS:** MUSEUM COLLECTIONS, SMARTPHONE SENSORS, STRUCTURE FROM MOTION, COLOR CAPTURE & VISUALIZATION, 3D MODELING



1. Museo de Palazzo Poggi:  
el salón de la colección Aldrovandi

1. Palazzo Poggi Museum:  
the hall of the Aldrovandi collection

Este artículo tiene como objetivo mostrar una solución a dos distintos problemas relacionados con los BIC y el conocimiento de ellos mediante sus representaciones:

- La preservación y comunicación de BIC difundidos.
- Los desafíos que surgen de las nuevas herramientas de levantamiento y representación basadas en TIC generalistas (teléfonos inteligentes).

Los teléfonos inteligentes, dispositivos constantemente conectados a Internet, que integran sensores activos y pasivos, utilizados en combinación con aplicaciones simples (“apps”) pueden proporcionar a millones de usuarios sistemas de adquisición y visualización 1D-2D-3D de bajo costo y múltiples propósitos. El problema subyacente es cómo usar y personalizar estas herramientas para satisfacer los requisitos de precisión para los Bienes Culturales que ya se han establecido a través de herramientas estándar de captura 3D, su comunicación y preservación. Según el Instituto Estadístico Italiano, Italia tiene 4976 museos, pero menos del 1% de ellos puede atraer a más de 500 mil visitantes por año (Bertollini et al., 2018). Para los museos pequeños (el 99%), la preservación y la difusión de sus colecciones, generalmente formadas por objetos de pequeñas dimensiones (inscritos en un cubo de 100 cm de lado) siguen siendo problemas sin solución, debido a la falta de presupuestos, además de la dificultad de atraer socios tecnológicos capaces de generar rápidamente soluciones basadas en las TIC, junto con la falta de competencias específicas en técnicas digitales. Este artículo presenta una solución, para adquirir y producir modelos 3D

renderizados en tiempo real de alta calidad de BIC de tamaño pequeño y mediano, utilizando cámaras de teléfonos inteligentes y un conjunto de herramientas complementarias de bajo costo y fáciles de usar. El sistema consiste en un flujo de trabajo basado en la fotogrametría automatizada (Rodríguez Navarro, 2012), en la análisis de problemas métricos de los modelos 3D desde teléfonos inteligentes (Nocerino et al., 2017), y en la confiabilidad del color tanto en la escala urbana (García Codoñer et al., 2009) como en pequeños artefactos (Cabezas Bernal & Rossi, 2017). Sin embargo, la solución desarrollada presenta varias mejoras y resultados consistentes, permitiendo que sea utilizado no solo por arquitectos o topógrafos, sino también por los conservadores de museos.

Casos de estudio y criterios de selección

El museo de Palazzo Poggi (Ottani Cavina, 1988), parte de el Sistema Museale di Ateneo 1 (SMA) de la Universidad de Bolonia, presenta variadas colecciones dedicadas a

This paper aims to show a solution focused on two different ‘hot’ problems concerning CH and its knowledge by representation:

- The preservation and communication of the widespread CH
- The challenges coming from the new IT-based representation and surveying tools exploiting general-purpose hardware and software, i.e. smartphones.

Smartphones, a device constantly connected to the Internet, integrating active and passive sensors, used in combination with simple mobile phone applications (apps) can supply millions of users with a multipurpose low-cost 1D-2D-3D acquisition and visualization systems. The underlying problem is how to use and customize these new powerful and lightweight tools to satisfy the requirements of the CH well-established accuracy standards of the surveying process at the ground of the 3D-based communication, preservation and conservation. According to Italian Statistical Institute, Italy has 4976 museums, but less than 1% of them can attract more than 500 thousand visitors per year (Bertollini et al., 2018). For small museums (the 99%) the preservation and dissemination of their collections, usually formed by small-scale objects (inscribed in a 100 cm edge cube) still remain an unsolved issue: due to adequate budgets, to the difficulty to attract technological partners able to quickly generate excellent IT-based solutions, and to the lack of specific competences in using





digital technique to manage these issues. In this paper we present a solution, to acquire and produce high-quality real-time rendered 3D models of small and medium size CH objects, using simply smartphone cameras and a set of low-cost, and easy-to-use of complementary tools. The system is based on a well-established automatic photography-based pipeline (Rodríguez Navarro, 2012), on the analysis of metric issues of smartphones-based 3D models (Nocerino et al., 2017), survey color reliability from urban scale (García Codoñer et al., 2009) to small artifacts (Cabezas Bernal & Rossi, 2017). However, the solution developed has several improvements and consistent results, allowing it to be used not only by architects or surveyors, but also by museum curators.

### Case studies and selection criteria

The Palazzo Poggi Museum (Ottani Cavina, 1988), part of the Museale di Ateneo System 1 (SMA) of the University of Bologna, presents various collections dedicated to geography and nautical sciences, military architecture, physics, natural history, chemistry, human anatomy, along with the collection of fossils and dissected animals collected by the naturalist Ulisse Aldrovandi (Fig. 1). The case studies were identified with the aim of being as representative as possible of the variety of artifacts and, above all, in order to be able to provide general operational guidelines regarding requirements, procedures and working methodologies. The adopted criteria for the selection of case studies are as follows (Fig. 2):

- Intrinsic features: surface and textural properties;
- Extrinsic features: size, geometry. Several criteria of shape analysis (Russo 2012, p.128-131) has been adapted to evaluate crucial parameters for the documentation of micro-/meso-scale objects (Fig. 2): D/d ratio; Spatial distribution; Topological complexity;
- Logistics of the surveying activity: instrument handling and portability, preservation of lighting characteristics and physical contrast due to photogrammetric applications.

2. Características generales de los objetos a escala micro/meso pertenecientes a colecciones museísticas

3. Casos de estudio: cuadros delimitadores y diagonales "D" y relativa diagramas de las características generales

2. General features of micro-/meso-scale objects belonging to museum collections

3. Subjects of the testing phase: bounding box and diagonal "D" and corresponding diagrams of general features

la geografía y las ciencias náuticas, la arquitectura militar, la física, la historia natural, la química, la anatomía humana, junto con la colección de fósiles y animales disecados recogidos por el naturalista Ulisse Aldrovandi (Fig. 1). Los casos de estudio se han identificado con el objetivo de ser lo más representativos posible de la variedad de artefactos y, sobre todo, para poder proporcionar líneas guía operativas y generalistas sobre la metodología de trabajo. Los criterios adoptados para la selección de los casos de estudio son los siguientes (Fig. 2):

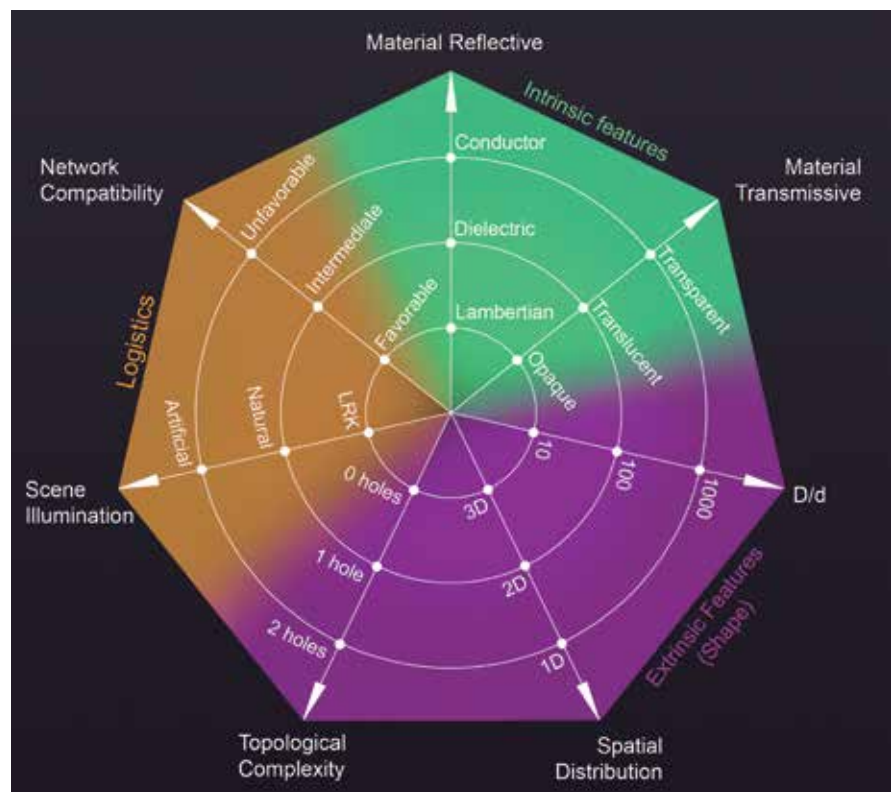
- Características intrínsecas: propiedades de superficie y textura;
- Características extrínsecas: tamaño y geometría. Varios criterios de análisis de forma (Russo, 2012, p.128-131) se han adaptado para evaluar parámetros cru-

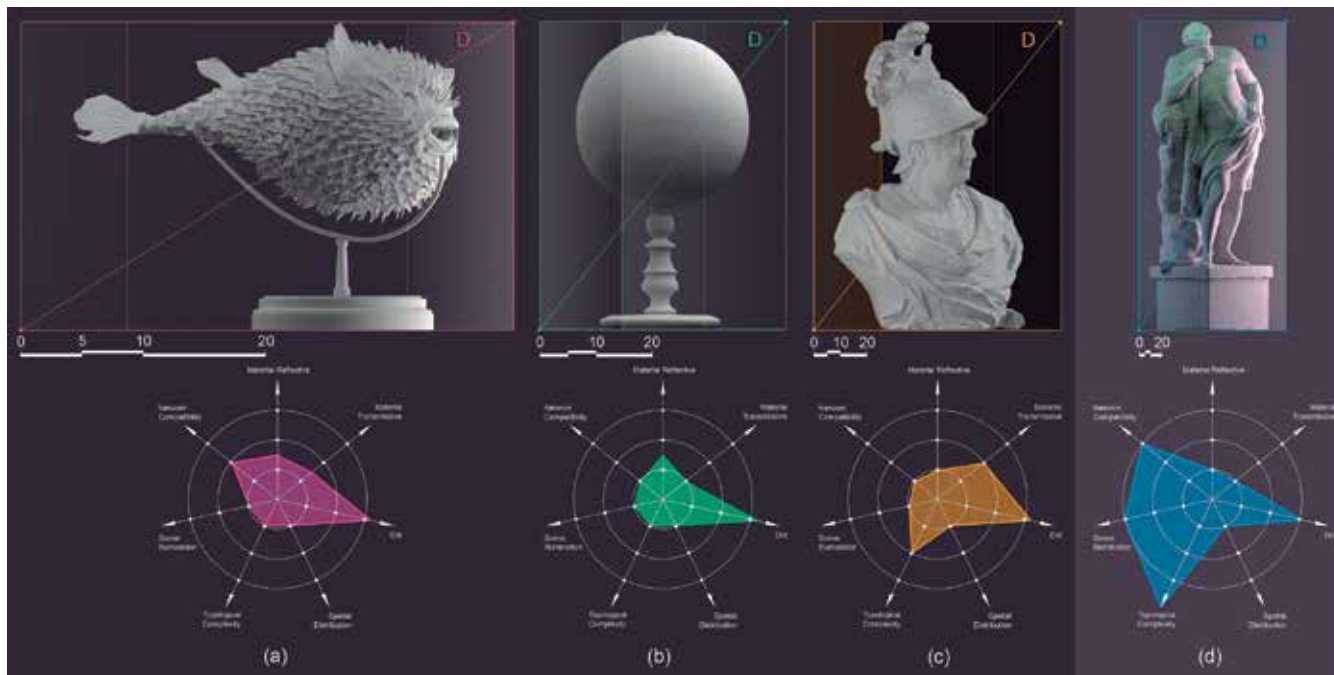
ciales para la documentación de objetos de micro/mesoescala (Fig. 2): relación D/d; Distribución espacial; Complejidad topológica;

- Logística del levantamiento: manejo y portabilidad de herramientas, preservación de las características de iluminación, obstáculos físicos que afectan a la campaña fotogramétrica.

Los ejemplos emblemáticos son:

- Un pez puercoespín: cuadro delimitador = 35x19x25 cm, piel altamente especular y pequeños detalles (Fig. 3a).
- Un globo del astrónomo Horn d'Arturo: cuadro delimitador = 31x31x46 cm, superficie regular altamente reflectante con un efecto Fresnel considerable (Fig. 3b).
- Un busto de Luigi Ferdinando Marsili (1658-1730): cuadro





3

delimitador = 41x67x99 cm, en mármol de Carrara (altamente translúcido), con tamaños de los detalles altamente variable (Fig. 3c).

Un caso separado es la estatua de Hércules (cuadro delimitador = 100x90x275 cm, en piedra arenisca). Debido a su tamaño y a sus condiciones de exhibición, ha sido un caso significativo para evaluar la aplicación del procedimiento a casos más generales (Fig. 3d).

### Herramientas de levantamiento, fines y objetivos

El procedimiento de adquisición desarrollado se basa en el uso de:

- un teléfono inteligente;
- un conjunto de herramientas de adquisición de bajo costo, fáciles de encontrar y usar (luces LED, carta para el corrector de color, trípodes);
- un procedimiento consolidado destinado a garantizar la reproducción fiel del color, así como la forma y la precisión geométrica.

El teléfono inteligente es el Apple iPhone X que presenta niveles de resolución de imagen, nitidez y precisión de color muy cercanos a las réflex digitales de lente única (SLR). Tiene una configuración de cámara dual de 12MP: un sensor gran angular con una lente de 4 mm y f/1.8; el teleobjetivo presenta una lente de 6 mm y f/2.4. El kit iluminador está equipado con dispositivos de iluminación Relio 2 (35x35x35mm, 80g), que emiten luz de espectro continuo a un CCT de 4000° K, un brillo de 40000 lux a unos 0.25 m y un CRI > 95%. Además tiene una alta fiabilidad de color en todas las longitudes de onda, y evita la emisión excesiva de calor y de radiaciones dañinas UV y IR. Una de las cuestiones más críticas en la captura y representación digital de un BIC se refiere al color y la definición tonal de las propiedades de su material de superficie: estas se enmarcan dentro del tema más general de la definición completa de las propiedades aparentes, la función de distribución de reflectancia bidireccional (BRDF), que se identifica en la captura y repro-

The acquired datasets are:

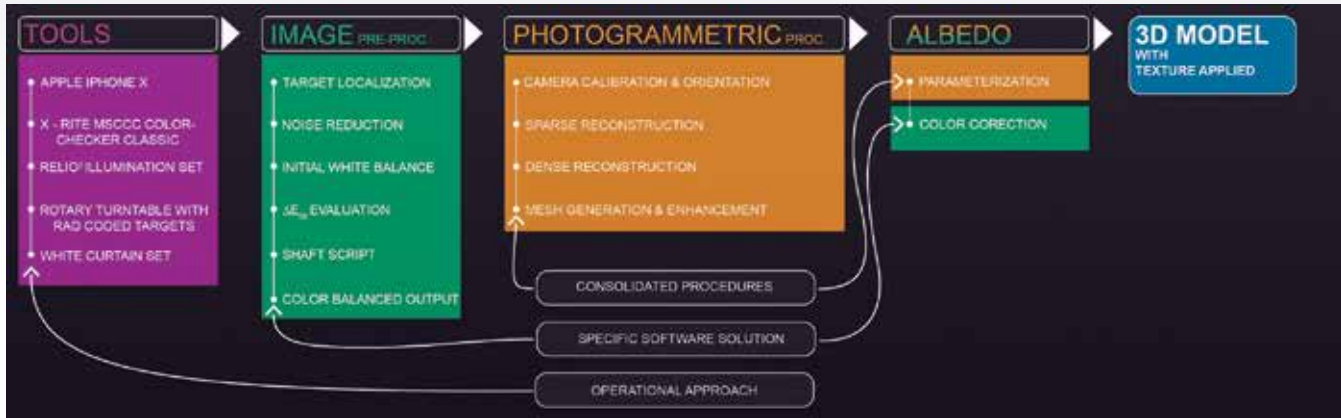
- A porcupine fish: bounding box = 35x19x25 cm, highly specular skin and tiny details (Fig. 3a).
- A globe by astronomer Horn d'Arturo: bounding box = 31x31x46 cm, highly reflective regular surface with a considerable Fresnel effect (Fig. 3b).
- A bust of the scientist, military, geologist Luigi Ferdinando Marsili (1658-1730): bounding = 41x67x99 cm, made in Carrara marble (highly translucent), with highly variable detail size (Fig. 3c).

A separate case is the statue of Hercules (bounding box = 100x90x275 cm, made in sandstone). Due to its size and its exhibition conditions, it was a significant case on which to test the procedure in order to evaluate its application to more general cases (Fig. 3d).

### Surveying tools, purposes and objectives

The acquisition procedure developed is carried out with:

- a smartphone camera;
- a small set of low-cost, easy-to-find and easy-to-use acquisition tools (LED lights, color checker, some tripods);
- a consolidated procedure aimed at guaranteeing the faithful reproduction of color, as well as shape and geometric accuracy.



4

The smartphone used is the Apple iPhone X. It presents levels of image resolution, sharpness and color accuracy very close to prosumer Single-Lens Reflex (SLR) cameras. It has a dual-12MP: a wide-angle sensor sits behind a 4 mm and f/1.8 lens; the telephoto presents a 6 mm and f/2.4 lens. The illuminator kit is supplied with Relio 2 illumination devices (35x35x35mm, 80g) emitting continuous spectrum light at a CCT of 4000° K, a neutral white with high color rendering, has a brightness of 40000 lux at 0.25 m, and has a CRI > 95%. Furthermore, it has a high color reliability on all wavelengths and it avoids the excessive heat emission and damaging UV and IR radiations. One of the most critical issue in the digital capture and rendering of a CH artifact concerns the color and tonal definition of properties of its surface material. This topic concerns the complete definition of the material properties, the Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF), therefore identified in the capture and reproduction of an albedo map. Taking into account calculation resources and available time, this issue requires major simplifications of the physical behavior of light and its interactions with the surface and environment, the impossibility of obtaining the metric fidelity of the color properties and accepting to achieve its perceptual fidelity. A crucial phase concerns the color correction (CC) of the captured images obtained, with digital cameras, using reference charts/target of color patches with known spectral reflectance. To evaluate color fidelity (Reinhard et al., 2008), the CIEDE

ducción de un mapa de albedo. Teniendo en cuenta los recursos de cálculo y el tiempo disponible, este problema requiere simplificaciones del comportamiento de la luz y de la interacción superficie-entorno, que supone la imposibilidad de obtener la fidelidad métrica de las propiedades del color y por lo tanto aceptar como logro final la fidelidad del color percibido. Una fase crucial se refiere a la corrección de color (CC) de las imágenes obtenidas con cámaras digitales, utilizando una carta que lleva “dianas cromáticas” de referencia con reflectancia espectral conocida. Para evaluar la fidelidad del color (Reinhard et al., 2008), los estándares de colorimetría CIEDE, aprobadas entre las organizaciones ISO y CIE (ISO/CIE 11664-6, 2014; Habekost, 2013), han sido reconocidos como las métricas de diferencia de color más utilizables. Esto se representa mediante la ecuación *Delta-E* ( $\Delta E$ ) que representa la distancia euclidiana en el espacio de color  $L^*a^*b^*$  entre los valores de imagen capturados y los valores medidos en parches de prueba. Los rendimientos generales de codificación de color se obtienen

normalmente sumando las medidas estadísticas de  $\Delta E$  relacionadas con el conjunto completo de muestras de color contenidas en los objetos. El valor de  $\Delta E = 1.0$  sería la menor diferencia de color que el ojo humano puede detectar. La última versión, CIEDE2000 ( $\Delta E^*_{00}$ ) (Sharma et al., 2005) se ha utilizado para permitir una mejor percepción de las no uniformidades del espacio de color  $L^*a^*b^*$ , y, por lo tanto, una mejor correlación con la diferencia de color perceptual que las ecuaciones anteriores (Mokrzycki & Tatol, 2011). La evaluación de la forma y la precisión geométrica de los modelos 3D, se llevó a cabo con respecto a:

- cámara réflex: Nikon 5200, con un sensor CMOS APS-C de 23,5x15,6 mm y una resolución de 6000x4000 px, junto con un objetivo zoom de 18-55 mm.
- datos de referencia: a) escáner láser a proyección de franjas múltiples, para objetos a pequeña escala: NextEngine 2020i Desktop con precisión nominal hasta 0,127 mm; b) escáner láser terrestre de cambio de fase, para objetos de mesoescala: Faro Focus X 130 con precisión nominal hasta 2 mm.



4. El “triple” flujo de trabajo propuesto  
5. Configuración del Lighting-Rig Kit (LRK) y foto de referencia para el ColorChecker Passport (CCP)

4. The proposed “trifold” workflow  
5. Illumination setup Lighting-Rig Kit (LRK) and reference shot to ColorChecker Passport (CCP)



colorimetry standards, approved as a joint international standard between the ISO and CIE organizations (ISO/CIE 11664-6, 2014; Habekost, 2013) have been acknowledged the most usable color difference metrics. This is represented by *Delta-E* ( $\Delta E$ ) equation that depicts the Euclidean distance in  $L^*a^*b^*$  color space between captured image values and measured values on test patches.

The overall color-coding performances are normally obtained by adding up the statistical measures of the  $\Delta E$  relating to the whole set of color samples contained in the targets. The value of  $\Delta E = 1.0$  would be the smallest color difference that the human eye can detect. The last version, CIEDE2000 ( $\Delta E^*_{00}$ ) (Sharma et al., 2005) was used allowing better perception of the  $L^*a^*b^*$  color space non-uniformities and thus better correlating with perceptual color difference than earlier equations (Mokrzycki & Tatol, 2011). Concerning the evaluation of the shape and geometric accuracy of 3D models obtained by smartphone, it was carried out with respect to:

- reference SLR camera: Nikon 5200 camera, with a 23.5 x 15.6 mm APS-C CMOS sensor, and an image resolution of 6000 x 4000 px, coupled with a zoom lens 18-55 mm
- ground truth reference/active sensors: a) NextEngine 2020i Desktop laser scanner, multiple fringe projection device 3D with point accuracy up to 0,127 mm, for small-scale objects; b) Faro Focus X 130, phase-shift terrestrial laser scanner, for meso-scale objects (point accuracy up to 2 mm).

### Best practice and operational procedure

From the operational point of view, the 3D model acquisition, construction and visualization present a “trifold” workflow (Fig.4):

- to set up and test an operational approach for network planning, illumination setup (Lighting-Rig Kit, LRK) and color checking;
- to use a specific software solution developed in order to obtain a full exploitation of frames coming from smartphones: a pre post processing for both pictures and textures is aimed at improving metric accuracy and color reliability of 3D models (Gaiani & Ballabeni, 2018);



- to apply a mature and consolidated procedure from previous researches for SfM/DVS phase and models optimization and parametrization (Gaiani, 2015).

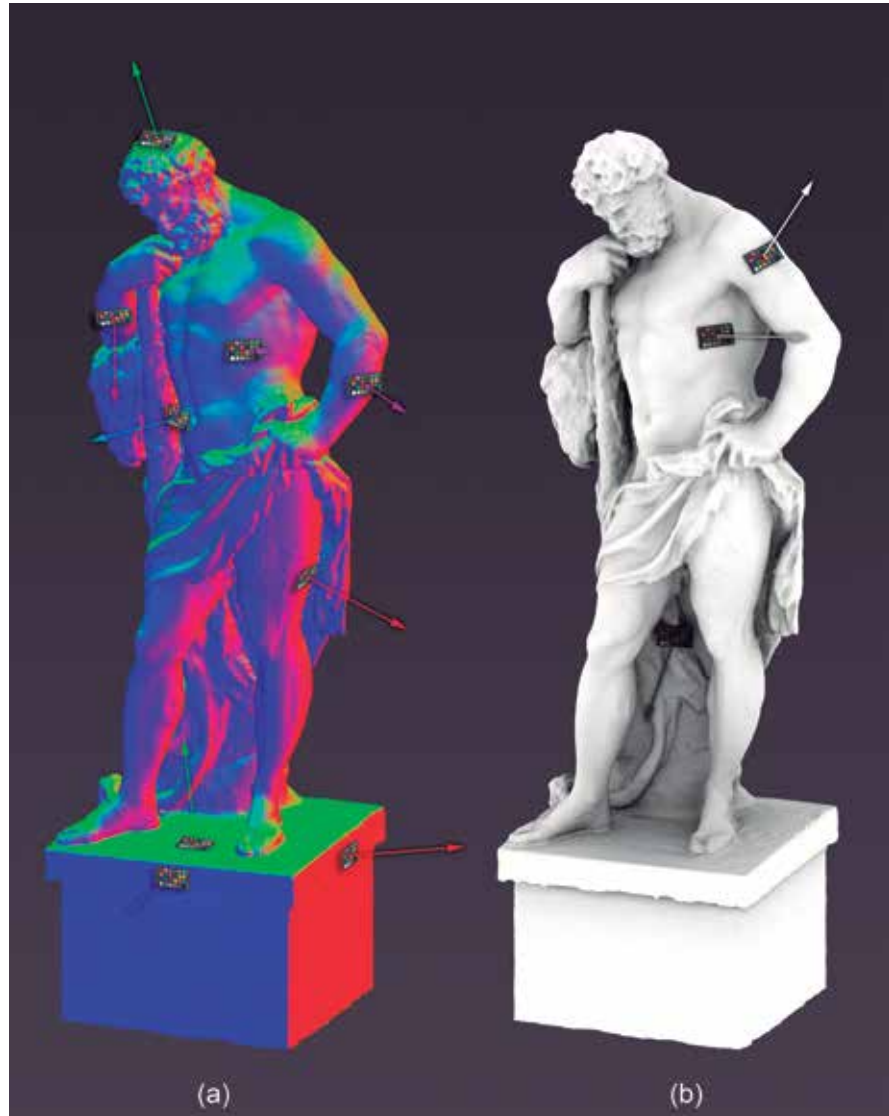
The Relio 2-based LRK was used in all case studies (with the exception of Hercules' statue where natural ambient light was exploited) and it consists in (Fig. 5):

- two sets, each one of 8 single LED lights, grouped in order to approximate a lighting panel;
- a rotating support;
- Some white translucent canvas surrounding the bounding-box containing the surveyed objects;
- A resizable structure capable to inscribe different artifacts.

In order to perform color analysis and further color processing phases an X-Rite ColorChecker Passport (CCP) physical reference chart was used during all phases of the acquisition process. The acquisition method involves the positioning of the CCP in each representative position of an area with homogeneous direction and verse (of the normals), as well as consistent illumination (Fig. 5 and 6).

### Color and geometric processing

Within the procedure developed, the color accuracy is achieved by means of an internally developed application enabled to process RAW formats. To take full advantage of the frames coming from smartphones, two processes are required: a previous one (for acquired images) and a subsequent one (for textures). Images pre-processing aims at radiometric calibration of frames using a new version of the SHAFT application (GAIANI & BALLABENI, 2018); reviewed in order to fit with smartphone features, where RAW format is not accessible to the user. Photogrammetric reconstruction through the program used in this article 2 is carried out in compliance with a consolidated workflow that provides automatic identification of "RAD" coded targets, alignment of frames and the construction of a dense point cloud then converted into a highly detailed mesh. The final stage, namely the re-projection of the frames on the polygonal surface, is a particularly delicate moment that does not



6

### Buenas prácticas y procedimiento operativo

Desde el punto de vista operativo, la adquisición, construcción y visualización del modelo 3D presenta un flujo de trabajo "triple" (Fig. 4):

- configurar y probar un enfoque operativo para la planificación del "network" de cámaras, la configuración de la iluminación (Lighting-Rig Kit, LRK) y la verificación del color;
- uso de una solución de software desarrollada con el fin de obtener la explotación de los fotogramas provenientes de los teléfonos inteligentes, que tiene

como objetivo mejorar la precisión métrica y la fiabilidad del color de los modelos 3D (Gaiani & Ballabeni, 2018).

- aplicar un procedimiento consolidado en anteriores investigaciones para la fase SfM/DVS y la optimización y parametrización de modelos (Gaiani, 2015):

El LRK basado en los Relio 2 utilizado en todos los casos de estudio, excepto el caso de Hércules donde se ha utilizado la luz ambiental, se compone de (Fig. 5):

- luces LED individuales vinculadas, en dos grupos de 8, para aproximar a dos paneles de iluminación;
- un soporte giratorio;



- un lienzo blanco translúcido que rodea el cuadro delimitador del objeto levantado;
- una estructura redimensionable capaz de inscribir diferentes artefactos.

Para realizar el análisis y otras fases de procesamiento del color, se ha utilizado un cuadro de referencia física X-Rite ColorChecker Passport (CCP) durante todas las fases del proceso de adquisición, asegurando por cada toma, una posición representativa de una área con dirección y verso homogéneo (de las normales), como por la iluminación (Figs. 5 y 6).

### Procesamiento de color y geometría

Dentro del procedimiento establecido, la precisión cromática se logra mediante una aplicación desarrollada internamente que procesa formatos RAW. Para aprovechar

completamente los fotogramas provenientes de los teléfonos inteligentes hacen falta dos procesamientos: uno previo (para las imágenes adquiridas) y uno posterior (para las texturas). El preprocesamiento de las imágenes tiene como objetivo la calibración radiométrica utilizando una nueva versión del software SHAFT para la corrección de color (Gaiani & Ballabeni, 2018), revisado para las funciones del teléfono inteligente, donde el formato RAW no es accesible para el usuario. La reconstrucción fotogramétrica a través del programa utilizado<sup>2</sup> en este artículo se lleva a cabo de acuerdo con un flujo de trabajo consolidado que proporciona la identificación automática de los objetivos codificados “RAD”, la alineación de los fotogramas y la construcción de una nube densa a partir de la cual obtener una malla de alto detalle. La etapa final de reproyección de las fotografías en la superficie po-

6. Criterios para el posicionamiento del CCP  
 7. Busto Marsili. Parametrización automática del software SfM (arriba): (a) número incontrolado de “islas”; (b) la comparación de la versión 2D del modelo con las áreas homólogas de la malla 3D presenta baja distorsión; (c) mallas muy detalladas, fenómeno de superposición considerable, falta de correspondencia biyectiva entre el modelo y la textura; Parametrización semiautomático (abajo): (d) bajo número de islas semánticamente coherentes; (e) la versión 2D presenta una distorsión ligeramente mayor de la en (b) pero facilita la edición de píxeles; (f) correspondencia biyectiva 3D-2D perfecta

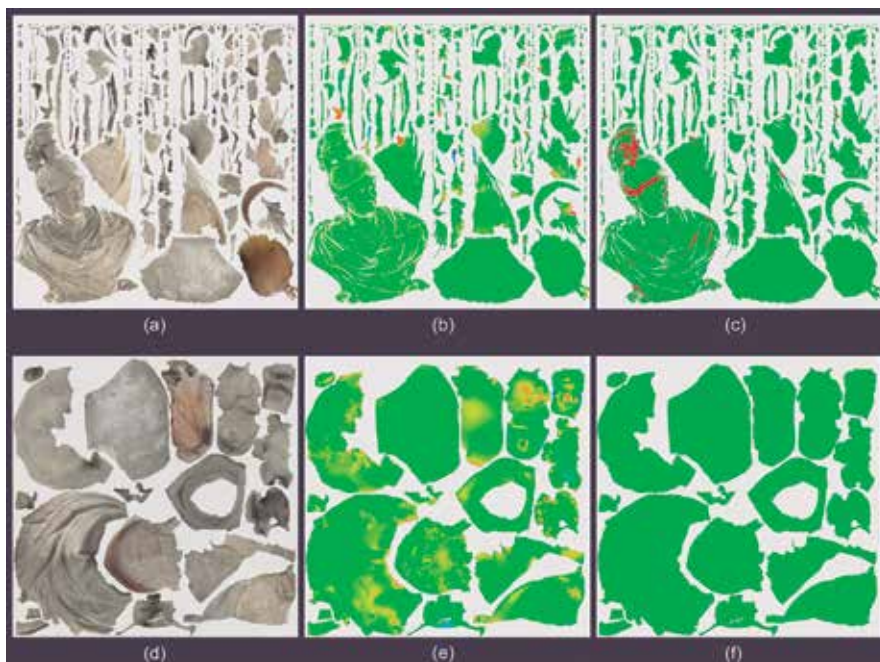
6. Criteria for CCP positioning  
 7. Marsili bust. (top) problems related to automatic parameterization from SfM software: (a) uncontrolled number of “islands”; (b) comparison of 2D version of the model to the homologous areas of the 3D mesh presents low distortion if compared; (c) highly detailed meshes, substantial overlapping phenomenon, lack of one-to-one correspondence among model and texture; (bottom) consolidated semi-automatic parameterization procedure: (d) low number of islands semantically consistent with the model, paltry waste of parameter space; (e) comparison of 2D version of the model to the homologous areas of the 3D mesh presents slightly higher distortion, but possibility to pixel editing; (f) no overlapping (perfect one-to-one correspondence)

allow a high degree of interaction within Metashape: an important role is played by the parameterization that provides the texel density and the level of coherence between the 2D “islands” and the homologous 3D areas (García-León et al., 2018). This process generates several problems in the absence of specific strategies (Fig. 7).

To cut down severe limitations of the photogrammetric software used, Metashape (Apollonio et al., 2017), which doesn't manage correctly the color, a new CC was done on the parametrized texture using newly SHAFT, in order to obtain the albedo: a CCP is always captured and reconstructed as independent chunk in the scene (Fig. 8). The CCP is properly included inside the (u,v) layout in order to run a final color correction in compliance with the color fidelity objectives.

### Results

The results achieved by applying the procedure described demonstrate excellent reliability in terms of morphological and colorimetric accuracy. Regarding the morphological results (Tables 1) from the deviation analysis, the potential of smart phone cameras has been demonstrated in a difficult subject such as porcupine fish (translucent and small elements, Fig. 9), as well as when we combine a wide range of







materials characterized by different types and values of light reflection (diffuse vs. specular), porosity, transparency, etc. Concerning color fidelity (Table 2), the tests showed absolute comparability between the results obtained with the smartphone and the Nikon SLR camera. The  $\Delta E^*_{00}$  mean error values of SLR camera and smartphone camera are almost identical (Table 2), while in the case of the Hercules case study the values differ by less than 1,00  $\Delta E^*_{00}$ . In general, we observe how controlled light conditions (LRK) lead to relevant benefits, especially in the case of the smartphone camera. Great part of the present study was aimed at restoring frames' original features through a sort of "reverse engineering" of pre-processing algorithms whose purpose is far from the achievement of color reliability typical of Cultural Heritage applications.

## Conclusions

The developed system allows a coherent and easy to use workflow able to exploit this new way of working, allowing to obtain high quality 3D models that can be used in multiple real time rendering applications. These models are multipurpose since their applications range from management to

8. Estatua de Hércules: (a) Parametrización, (b) evaluación, (c) corrección final de Albedo, (d) resultado

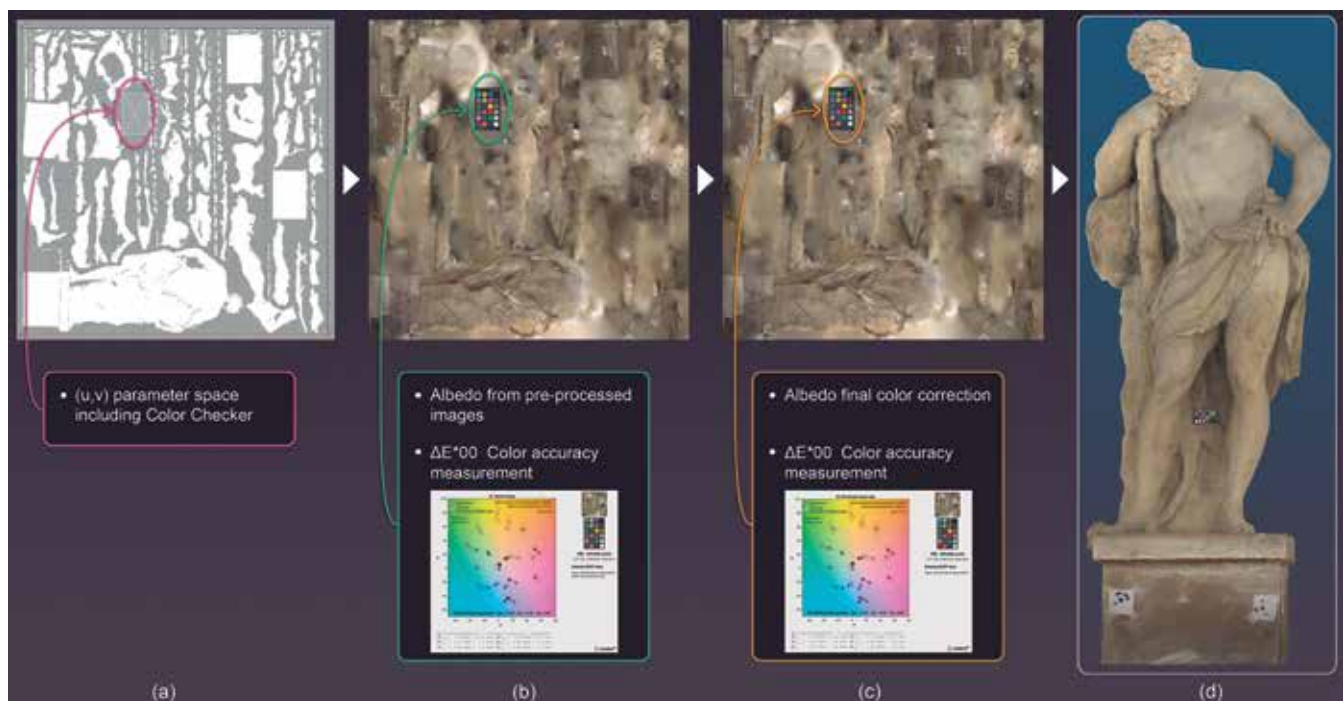
ligonal es un momento particularmente delicado que no permite un alto grado de interacción dentro de Metashape: un papel importante es jugado por la parametrización que proporciona la densidad de texel y del nivel de coherencia entre las "islas" 2D y las áreas 3D homólogas (García-León et al, 2018). Este proceso genera varios problemas en ausencia de estrategias específicas (Fig.7).

Para reducir las consistentes limitaciones del software Metashape, que no gestiona correctamente el color (Apollonio et al., 2017), se ha llevado a cabo una nueva CC sobre la textura usando la nueva versión de SHAFT, y obtener un albedo correcto: se realiza un levantamiento y materializa un CCP como parte independiente dentro de la reconstrucción fotogramétrica (Fig. 8), incluyéndolo dentro del sistema de referencia (u, v) para ejecutar una corrección de color final.

8. Hercules statue: (a) parameterization, (b) evaluation, (c) Albedo final correction, (d) result

## Resultados

Los resultados alcanzados al aplicar el procedimiento descrito demuestran una excelente confianza en términos de precisión morfológica y colorimétrica. En cuanto a los resultados morfológicos (Tabla 1) provenientes del análisis de desviaciones se ha demostrado el potencial de las cámaras de los teléfonos inteligentes en un tema difícil como el pez puercoespín (elementos translúcidos y pequeños, Fig. 9), así como cuando combinamos una amplia gama de materiales caracterizados por diferentes tipos y valores de reflexión de la luz (difusa frente a especular), porosidad, transparencia, etc. En cuanto a la fidelidad del color (Tabla 2), las pruebas han mostrado una comparabilidad absoluta entre los resultados obtenidos con el teléfono inteligente y la cámara Nikon SLR. Los valores de error



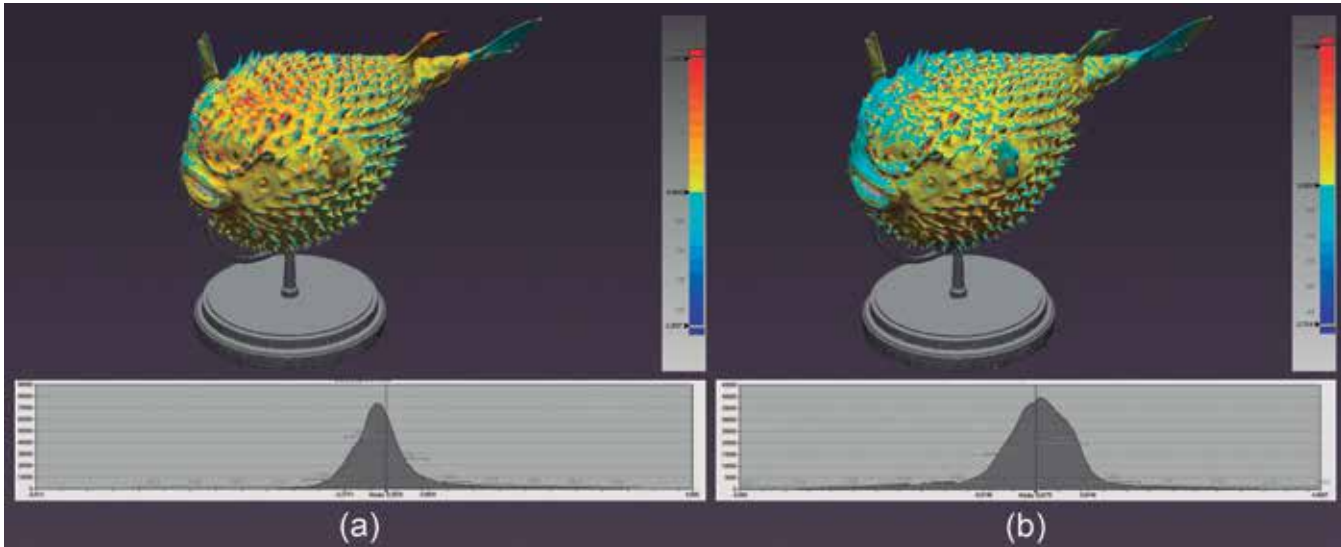
	COMPARACIÓN	ERROR MEDIO	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	PORCENTAJE DE MUESTRAS DENTRO DE $\pm 1 \sigma$
	COMPARISON	MEAN ERROR	STANDARD DEVIATION	PERCENTAGE OF SAMPLES WITHIN $\pm 1 \sigma$
<b>Pez puercoespín</b> Porcupine fish	iPhoneX-NextEngine	0,3579 mm	0,6352 mm	82,5912 %
	iPhoneX-Nikon D5200	0,0775 mm	0,8971 mm	81,991 %
<b>El globo de Horn d'Arturo</b> Horn d'Arturo's globe	iPhoneX- NextEngine	0,00019 m	0,00124 m	73,83781 %
	iPhoneX- Nikon D5200	0,00103 m	0,00089 m	82,82668 %
<b>Busto Marsili</b> Marsili Bust	iPhoneX- NextEngine	0,4725 mm	0,5131 mm	90,8291 %
	iPhoneX- Nikon D5200	4,1201 mm	0,8067 mm	77,9691 %
<b>Hércules</b> Hercules	iPhoneX-Faro TLS	-0,00003 m	0,00193 m	67,41295 %
	iPhoneX- Nikon D5200	-0,00013 m	0,00187 m	67,93515 %

Tabla 1 / Table 1

medio  $\Delta E^{*00}$  entre la cámara SLR y la cámara del teléfono inteligente han demostrado que son casi idénticos (Tabla 2), con una diferencia con el caso de Hércules de menos de 1,00  $\Delta E^{*00}$ . En general, observamos cómo las condiciones de luz controladas (LRK) conducen a beneficios relevantes, especialmente en el caso de la cámara del teléfono inteligente. Gran parte del presente estudio tuvo como objetivo “restaurar” las características originales de las fotografías a través de una especie de “ingeniería inversa” de algoritmos de preprocesamiento cuyo propósito está lejos de alcanzar la fiabilidad del color típica de las aplicaciones del Patrimonio Cultural.

		$\Delta E^{*00}$ MEDIO / MEAN
<b>iPhone X</b>	<b>Pez puercoespín</b> Porcupine fish	2,15
	<b>El globo de Horn d'Arturo</b> Horn d'Arturo's globe	2,31
	<b>Busto Marsili</b> Marsili Bust	2,65
	<b>Hércules</b> Hercules	3,38
<b>Nikon D5200</b>	<b>Pez puercoespín</b> Porcupine fish	2,22
	<b>El globo de Horn d'Arturo</b> Horn d'Arturo's globe	2,19
	<b>Busto Marsili</b> Marsili Bust	2,35
	<b>Hércules</b> Hercules	2,57

Tabla 2 / Table 2



9

enhancement of CH: monitoring of the state of preservation, production of audiovisual and interactive systems for dissemination and dissemination, scientific tools for the study and comparison of artifacts, etc. Results show that a major change is going to happen in the architect, conservator and surveyor activities, meanwhile smartphone sensors open new scenarios to their common users, including 3D capturing in a natural and easy way. ■

#### Notes

- 1 / <https://sma.unibo.it/en/the-university-museum-network> (last accessed August 29, 2019).
- 2 / Metashape, state of the art photogrammetric processing software, developed by Agisoft (<https://www.agisoft.com>) has features in common to others available on the market, such as 3D Flow ZEPHYR (<https://www.3dflow.net/it/>) and Capturing Reality RealityCapture (<https://www.capturingreality.com/>). The workflow presented in this article is consistent with the current panorama of such SfM/DVS programs.

#### References

- APOLLONIO, F.I., GAIANI, M., BASILISSI, W., RIVAROLI, L., 2017. Photogrammetry driven tools to support the restoration of open-air bronze surfaces of sculptures: an integrated solution starting from the experience of the Neptune Fountain in Bologna. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W3, 47-54. doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-47-2017.
- BERTOLLINI, M., CARAMIS, A., D'ELIA, M., PRISCO, M.R., TALICE, S., 2018. La valorizzazione del patrimonio museale: i percorsi museali 2015. <https://www.slideshare.net/slideistat/> (10 March 2019).
- CABEZOS BERNAL, P., ROSSI, A., 2017. Técnicas de musealización virtual. Los capiteles del Monasterio de San Cugat. *EGA*, 29, pp. 48-57. <https://doi.org/10.4995/ega.2017.7340>.
- GAIANI, M., BALLABENI, A., 2018. SHAFT (SAT & HUE Adaptive Fine Tuning), a new automated solution for target-based colour correction. *Colour and Colorimetry. Multidisciplinary Contributions*, XIVB, pp. 69-80.
- GAIANI, M. (ed.), 2015. *I portici di Bologna Architettura, Modelli 3D e ricerche tecnologiche*, Bologna, BONONIA UNIVERSITY PRESS.

## Conclusiones

El sistema desarrollado permite un flujo de trabajo coherente y fácil de usar capaz de explotar esta nueva forma de toma de datos, lo que permite lograr modelos 3D de alta calidad con textura de color usando solo una herramienta de uso general que se pueden utilizar en múltiples aplicaciones de renderizado en tiempo real para la gestión y puesta en valor de los BIC: monitoreo del estado de preservación, producción de sistemas audiovisuales e interactivos de difusión, herramientas científicas para el estudio y comparación de artefactos, etc. Los resultados demuestran que parece haber un cambio importante en la actividad del arquitecto, conservador, restaurador y levantador, abriendo, no obstante, también nuevos escenarios de fruición para usuarios comunes. ■

#### Notas

- 1 / <https://sma.unibo.it/en/the-university-museum-network> (último acceso 29 agosto 2019).
- 2 / Metashape software estado del arte de procesamiento fotogramétrico desarrollado por Agisoft (<https://www.agisoft.com>) tiene características comunes a otros en el mercado, como 3D Flow ZEPHYR (<https://www.3dflow.net/it/>) y Capturing Reality RealityCapture (<https://www.capturingreality.com/>). El flujo de trabajo presentado en este artículo es compatible con el panorama actual de dichos programas SfM/DVS.

#### Referencias

- APOLLONIO, F.I., GAIANI, M., BASILISSI, W., RIVAROLI, L., 2017. Photogramme-

try driven tools to support the restoration of open-air bronze surfaces of sculptures: an integrated solution starting from the experience of the Neptune Fountain in Bologna. *ISPRS*, XLII-2/W3, pp. 47-54.

- BERTOLLINI, M., CARAMIS, A., D'ELIA, M., PRISCO, M.R., TALICE, S., 2018. *La valorizzazione del patrimonio museale: i percorsi museali 2015*. <https://www.slideshare.net/slideistat/> (10 March 2019).
- CABEZOS BERNAL, P., ROSSI, A., 2017. Técnicas de musealización virtual. Los capiteles del Monasterio de San Cugat. *EGA*, 29, pp. 48-57.
- GAIANI, M., BALLABENI, A., 2018. SHAFT (SAT & HUE Adaptive Fine Tuning), a new automated solution for target-based colour correction. *Colour and Colorimetry. Multidisciplinary Contributions*, XIVB, pp. 69-80.
- GAIANI, M. (ed.), 2015. *I portici di Bologna Architettura, Modelli 3D e ricerche tecnologiche*, Bologna.
- GARCIA-CODONER, A., LLOPIS VERDÚ, J., TORRES BARCHINO, A., VILLAPLANA GUILLÉN, R., SERRA LLUCH, J., 2009. Colour as a Structural Variable of Historical Urban Form. *Color Research and Application*, 34, pp. 253-265.
- GARCÍA-LEÓN, J., SÁNCHEZ-ALLEGUE, P., PEÑA-VELASCO, C., CIPRIANI, L., FANTINI, F., 2018. Interactive dissemination of the 3D model of a baroque altarpiece: a pipeline from digital survey to game engines. *SCIRES-IT*, 8(2), pp. 59-76.
- HABEKOST, M., 2013. Which colour differencing equation should be used?. *International Circular of Graphic Education and Research*, 6, pp. 20-33.
- ISO/CIE 11664-6 (2014). *Colourimetry – Part 6: CIEDE2000 Colour-Difference Formula*.
- LOWE, D.G., 2004. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints”. *International Journal of Computer Vision*, 60 (2), pp. 91-110.
- MOKRZYCKI, W.S., TATOL, M., 2011.



10

9. Pez puercoespín: desviación; (a) iPhone X-NextEngine; (b) iPhone X-Nikon D5200. (Ver Tabla 1)

10. resultados finales: modelos texturizados optimizados para aplicaciones en tiempo real

9. Porcupine fish: mesh deviation; (a) iPhoneX-NextEngine; (b) iPhoneX-Nikon D5200. (See Table 1)

10. Final 3D assets: optimized textured models suitable for real time applications

Colour difference Delta E – A survey. *Machine graphics and vision*, 20(4), 383-412.

- NOCERINO, E., LAGO, F., MORABITO, D., REMONDINO, F., PORZI, L., POIESI, F., ROTA BULO, S., CHIPPENDALE, P., LOCHER, A., HAVLENA, M., VAN GOOL, L., EDER, M., FÖTSCHL, A., HILSMANN, A., KAUSCH, L., EISERT, P., 2017. A smartphone-based 3D pipeline for the creative industry – The REPLICATE EU Project. *ISPRS*, XLII-2/W3, 535-541.
- OTTANI CAVINA, A. (ed.), 1988. *Palazzo Poggi da dimora aristocratica a sede dell'Università di Bologna Bologna: Nuova Alfa*.
- REINHARD, E., KHAN, E.A., AKYUZ, A.O., JOHNSON, G., 2008. *Colour Imaging: Fundamentals and Applications*. New York: A K Peters.

- RODRIGUEZ NAVARRO, P., 2012. La fotogrametría digital automatizada frente a los sistemas basados en sensores 3d activos. *EGA*, 20, pp. 100-111.
- RUSSO, M., 2012. Integrated Reverse Modeling Techniques for the Survey of Complex Shapes in Industrial Design. In J. Apolinar Munoz Rodriguez (ed.), *Laser Scanner Technology*. Shanghai.
- SHARMA, G., WU, W., DALAL, E.N., 2005. The CIEDE2000 Color-difference formula: implementation notes, supplementary test data and mathematical observations. *Color Research and Application*, 30(1), pp. 21-30.

- GARCIA-CODOÑER, A., LLOPIS VERDÚ, J., TORRES BARCHINO, A., VILLAPLANA GUILLÉN, R., SERRA LLUCH, J., 2009. Colour as a Structural Variable of Historical Urban Form. *Color Res. Appl.*, 34: 253-265. [https://doi:10.1002/col.20491]https://doi:10.1002/col.20491.
- GARCÍA-LEÓN, J., SÁNCHEZ-ALLEGUE, P., PEÑA-VELASCO, C., CIPRIANI, L., FANTINI, F., 2018. Interactive dissemination of the 3D model of a baroque altarpiece: a pipeline from digital survey to game engines. *SCIRES-IT*, Volume 8, Issue 2. DOI: http://dx.doi.org/10.2423/i22394303v8n2p59.
- HABEKOST, M., 2013. Which colour differencing equation should be used? *International Circular of Graphic Education and Research*, 6, pp. 20-33.
- ISO/CIE 11664-6 (2014). Colourimetry – Part 6: CIEDE2000 Colour-Difference Formula.
- LOWE, D.G., 2004. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints". *International Journal of Computer Vision*, 60 (2): pp. 91–110. doi:10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94
- MOKRZYCKI, W.S., TATOL, M., 2011. Colour difference Delta E – A survey. *Machine graphics and vision*, 20(4), 383-412.
- NOCERINO, E., LAGO, F., MORABITO, D., REMONDINO, F., PORZI, L., POIESI, F., ROTA BULO, S., CHIPPENDALE, P., LOCHER, A., HAVLENA, M., VAN GOOL, L., EDER, M., FÖTSCHL, A., HILSMANN, A., KAUSCH, L., EISERT, P., 2017. A smartphone-based 3D pipeline for the creative industry – The REPLICATE EU Project. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W3, 535-541. doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-535-2017.
- OTTANI CAVINA, A. (ed.), *Palazzo Poggi da dimora aristocratica a sede dell'Università di Bologna*, Bologna, 1988.
- REINHARD, E., KHAN, E.A., AKYUZ, A.O., JOHNSON, G., 2008. *Colour Imaging: Fundamentals and Applications*. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
- RODRIGUEZ NAVARRO, P., 2012. La fotogrametría digital automatizada frente a los sistemas basados en sensores 3d activos. *EGA*, 20, pp. 100-111.
- RUSSO, M., 2012. Integrated Reverse Modeling Techniques for the Survey of Complex Shapes in Industrial Design. In J. Apolinar Munoz Rodriguez (ed.), *Laser Scanner Technology*. Shanghai, InTech.
- SHARMA, G., WU, W., DALAL, E.N., 2005. The CIEDE2000 Color-difference formula: implementation notes, supplementary test data and mathematical observations. *Color Research and Application*, Vol. 30 (1), pp. 21-30.