

drawing disegnare

n. 66
idee immagini
ideas images

Rivista semestrale del Dipartimento di Storia, disegno
e restauro dell'architettura – Sapienza Università di Roma
*Biannual Journal of the Department of History, representation
and restoration of architecture – Sapienza Rome University*

Worldwide distribution and digital version EBOOK
www.gangemeditore.it

Full english text



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Anno XXXIV, n. 66/2023
€ 15,00 - \$/£ 20.00





Rivista semestrale del Dipartimento di Storia, disegno e restauro dell'architettura, pubblicata con il contributo di Sapienza Università di Roma
Biannual Journal of the Department of History, representation and restoration of architecture, published with the contribution of Sapienza Rome University

Registrazione presso il Tribunale di Roma n. 00072 dell'11/02/1991

© proprietà letteraria riservata

GANGEMI EDITORE[®]
INTERNATIONAL

via Giulia 142, 00186 Roma
tel. 0039 06 6872774 fax 0039 06 68806189
e-mail info@gangemieditore.it

[catalogo on line www.gangemieditore.it](http://catalogo.online.www.gangemieditore.it)

Le nostre edizioni sono disponibili in Italia e all'estero anche in versione ebook.

Our publications, both as books and ebooks, are available in Italy and abroad.

Un numero € 15,00 – estero € 20,00 / \$/£ 24.00

Arretrati € 30,00 – estero € 40,00 / \$/£ 48.00

Abbonamento annuo € 30,00 –

estero € 35,00 / \$/£ 45.00

One issue € 15,00 – Overseas € 20,00 / \$/£ 24.00

Back issues € 30,00 – Overseas € 40,00 / \$/£ 48.00

Annual Subscription € 30,00 –

Overseas € 35,00 / \$/£ 45.00

Abbonamenti/Annual Subscription

Versamento sul c/c postale n. 15911001

intestato a Gangemi Editore SpA

IBAN: IT 71 M 076 0103 2000 0001 5911 001

Payable to: Gangemi Editore SpA

post office account n. 15911001

IBAN: IT 71 M 076 0103 2000 0001 5911 001

BIC SWIFT: BPPIITRRXXX

Distribuzione/Distribution

Librerie in Italia e all'estero/

Bookstores in Italy and overseas

Emme Promozione e Messaggerie Libri Spa – Milano

e-mail: segreteria@emmepromozione.it

www.messaggerielibri.it

Edicole in Italia e all'estero/

Newsstands in Italy and overseas

Bright Media Distribution Srl

e-mail: info@brightmediadistribution.it

Abbonamenti/Annual Subscription

EBSCO Information Services

www.ebscohost.com

ISBN 978-88-492-5068-8

ISSN IT 1123-9247

Finito di stampare nel mese di giugno 2023

Gangemi Editore Printing

Direttore scientifico/Editor-in-Chief

Mario Docci

Sapienza Università di Roma

piazza Borghese 9, 00186 Roma, Italia

mario.docci@uniroma1.it

Direttore responsabile/Managing editor

Carlo Bianchini

Sapienza Università di Roma

piazza Borghese 9, 00186 Roma, Italia

carlo.bianchini@uniroma1.it

Comitato Scientifico/Scientific Committee

Alonzo Addison, Berkeley, USA

Piero Albisinni, Roma, Italia

Carlo Bianchini, Roma, Italia

Eduardo Antonio Carazo Lefort, Valladolid, Spagna

Fabiana Carbonari, La Plata, Argentina

Laura Carnevali, Roma, Italia

Pilar Chías, Alcalá de Henares (Madrid), Spagna

Livio De Luca, Marsiglia, Francia

Francis D.K. Ching, Seattle, USA

Laura De Carlo, Roma, Italia

Mario Docci, Roma, Italia

Marco Gaiani, Bologna, Italia

Fernando Gandolfi, La Plata, Argentina

Angela García Codoñer, Valencia, Spagna

Natalia Jorquera Silva, La Serena, Cile

Joubert José Lancha, São Paulo, Brasile

Riccardo Migliari, Roma, Italia

Douglas Pritchard, Edinburgo, Scozia

Franco Purini, Roma, Italia

Mario Santana-Quintero, Ottawa, Canada

José A. Franco Taboada, La Coruña, Spagna

Comitato di Redazione/Editorial Staff

Laura Carlevaris (coordinatore)

Emanuela Chiavoni, Carlo Inglese,

Alfonso Ippolito, Luca Ribichini

Coordinamento editoriale

e segreteria/Editorial coordination

and secretarial services

Monica Filippa

Traduzioni/Translation

Erika G. Young

Redazione/Editorial office

piazza Borghese 9, 00186 Roma, Italia

tel. 0039 6 49918890

disegnare@uniroma1.it

In copertina/Cover

TStudio-Guendalina Salimei, Housing

sociale in via Bembo, Primavalle, Roma.

Alloggi bioclimatici e sostenibili, 2016-2020.

Dettaglio della facciata su strada

(fotografia di Luigi Filetici)

TStudio-Guendalina Salimei. Social housing

in Via Bembo, Primavalle, Rome. Sustainable

bioclimatic housing, 2016-2020. Detail of the

façade facing the street (photo by Luigi Filetici)

Anno XXXIV n. 66, giugno 2023

3 Editoriale di Mario Docci, Carlo Bianchini

Disegnare. Idee Immagini 3.0

Editorial by Mario Docci, Carlo Bianchini

Disegnare. Idee Immagini 3.0

9 Guendalina Salimei

Il segno e lo schizzo

The sign and the sketch

16 Livio De Luca

Un ecosistema digitale per lo studio

interdisciplinare di Notre-Dame de Paris

A digital ecosystem for the interdisciplinary

study of Notre-Dame de Paris

32 Fabrizio Ivan Apollonio, Marco Gaiani,

Simone Garagnani, Michela Martini, Carl

Brandon Strehlke

Misurare e restituire l'Annunciazione di

San Giovanni Valdarno del Beato Angelico

Measurement and restitution of the

Annunciation by Fra Angelico in San

Giovanni Valdarno

48 Douglas Pritchard

Intersezioni tra tecnologia, comunicazione

grafica e rappresentazione del patrimonio

culturale

The intersection of technology, graphic

communication, and cultural heritage

representation

64 Riccardo Migliari

Max Kleiber Perspektivikus

Max Kleiber Perspektivikus

78 Riccardo Migliari

Nostalgia ed emozione del disegno

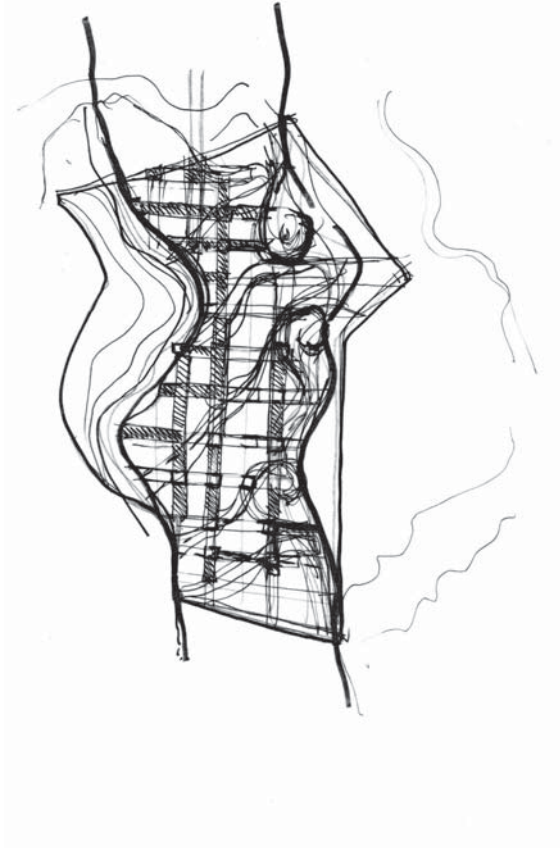
The nostalgia and emotion of drawing

80 Carlo Bianchini

Metamodellazione

Metamodelling

Guendalina Salimei, Campus dell'Università della Scienza e della Tecnologia (USTH) ad Hanoi in Vietnam. Schizzo della planimetria generale in marker e china su carta lucida.
Guendalina Salimei, Campus of the University of Science and Technology (USTH) in Hanoi (Vietnam). Sketch of the general plan using a marker and China ink on tracing paper.



Fabrizio Ivan Apollonio, Marco Gaiani, Simone Garagnani,
Michela Martini, Carl Brandon Strehlke

Misurare e restituire l'Annunciazione di San Giovanni Valdarno
del Beato Angelico
*Measurement and restitution of the Annunciation by Fra Angelico
in San Giovanni Valdarno*



<https://cdn.gangemeditore.com/DOI/10.61020/11239247-202366-04.pdf>

The *Annunciation* by the Dominican friar Giovanni da Fiesole, known as Fra Angelico, is currently housed in the Museum of the Basilica of Santa Maria delle Grazie in San Giovanni Valdarno; it was painted during the period when the arts were transitioning from the Late Gothic to the Renaissance. The painting combines the Renaissance principles of perspective construction with the old medieval values of the didactic function of art and light. This contribution presents a solution developed to acquire the painting in such a way so that it can be used through a digital surrogate, perceptually indistinguishable from the original, thus making it possible to visualise and illustrate the work as if it were in our hands, digitally re-illuminating the model in order to emphasise the characteristics that can help us understand and preserve the graphic artefact.

Keywords: Fra Angelico, *Annunciation*, digitalisation of paintings, 3D modelling, real-time rendering, photometric stereo, colour correction, survey, image stitching, survey tools.

The Annunciation now housed in the Museum of the Basilica of Santa Maria delle Grazie in San Giovanni Valdarno was previously located in the nearby Convent of San Francesco a Montecarlo. It is one of the three panels depicting the same scene, narrated by St. Luke, painted in the early 1430s by the Dominican friar Giovanni da Fiesole, known as Fra Angelico.¹ The other two panels are displayed respectively in the Prado Museum in Madrid (originally in San Domenico in Fiesole),² probably the first to be painted, and in the diocesan Museum in Cortona (originally in the church of San Domenico), reliably considered to be the third.³

In the altarpiece in San Giovanni Valdarno (fig. 1), with scenes of the life of Mary in the predella,⁴ the centre panel depicts the announcement by the Archangel Gabriel to the Virgin Mary seated in a colonnaded loggia opening onto an enclosed garden (hortus conclusus). The introduction of elements of Brunelleschi's new architecture (the colonnaded loggia) bestows proportion and measurability on the painting, albeit in a natural setting; instead the very strong light that characterises the scene, eliminating the shadows and making the colours bright and unnatural, belongs to an earlier artistic

All'intersezione delle arti proprie del Tardogotico e del Rinascimento, l'Annunciazione oggi conservata al Museo della Basilica di Santa Maria delle Grazie a San Giovanni Valdarno e dipinta dal frate domenicano Giovanni da Fiesole, conosciuto come Beato Angelico, unisce i principi della costruzione prospettica rinascimentale con i vecchi valori medievali della funzione didattica dell'arte e della luce. Questo contributo illustra una soluzione sviluppata per acquisire il dipinto e consentirne la fruizione tramite un surrogato digitale, percettivamente indistinguibile dall'originale, capace di visualizzare e presentare l'opera come se fosse nelle nostre mani, re-illuminandola digitalmente per enfatizzarne caratteristiche utili alla comprensione e alla conservazione dell'artefatto grafico.

Parole chiave: Beato Angelico, Annunciazione, digitalizzazione di dipinti, modellazione 3D, rendering in tempo reale, stereo fotometrico, correzione del colore, rilievo, mosaicatura di immagini, strumenti per il rilievo.

L'Annunciazione conservata nel Museo della Basilica di Santa Maria delle Grazie di San Giovanni Valdarno e proveniente dal vicino Convento di San Francesco a Montecarlo, è una delle tre tavole con la stessa scena, narrata dall'evangelista Luca, dipinte nei primi anni Trenta del Quattrocento dal frate domenicano Giovanni da Fiesole, il Beato Angelico¹. Le altre due sono la tavola oggi esposta al Museo del Prado di Madrid (originariamente a San Domenico di Fiesole)², probabilmente la prima a essere realizzata, e la tavola del Museo diocesano di Cortona (in origine nella chiesa di San Domenico)³, attendibilmente la terza. La pala di San Giovanni Valdarno (fig. 1), che nella predella⁴ presenta scene della vita di Maria, mostra nel pannello centrale l'annuncio dell'arcangelo Gabriele alla Vergine seduta in una loggia colonnata aperta su un giardino recintato (*hortus conclusus*). L'introduzione di elementi della nuova architettura di Brunelleschi (la loggia colonnata) permette così di conferire al dipinto proporzione e misurabilità, pur entro un ambito naturale; la luminosità fortissima che caratterizza la scena, che annulla le ombre e rende i colori accesi e innaturali, è invece propria della tradizione artistica precedente. Lo stile preciso e raffinato della pittura a tempera d'uovo è inoltre arricchito dall'uso di materiali costosi, quali il pigmento azzurro di lapislazzuli e l'oro in foglia, dosati con estrema cura. Ne emerge un'opera che mostra come la sfida affrontata da Giovanni da Fiesole sia stata proprio quella di coniugare i nuovi principi rinascimentali, come la costruzione prospettica e l'attenzione alla figura umana, con elementi tardogotici e con i tradizionali valori medievali, quali la funzione didattica dell'arte e il valore mistico della luce [Strehlke 2005]. La ricchezza di questo dipinto non può però essere colta nella sua interezza e complessità

né mediante riproduzioni fotografiche, né attraverso la visione diretta. Le prime appiattiscono il contrasto tra l'ampia composizione cromatica dai toni vivaci del giardino, della veste dell'angelo e di Maria, e la scura stanza dietro la Vergine, in un'unica intensità luminosa incapace di mostrare ombre e particolari; la visione diretta, a causa della distanza dalla quale si osserva l'opera, impedisce al visitatore di cogliere i dettagli (figg. 2, 3) – i volti, il prezioso velo di Maria – o la qualità figurativa di Adamo ed Eva (fig. 3). Inoltre le condizioni di illuminazione della attuale collocazione museale, ben distanti da quelle dell'altare del Convento di San Francesco a Montecarlo nella prima metà del Quattrocento, non consentono di comprendere quale fosse la percezione dell'opera, uniformando toni chiari e scuri a causa della riflessione diffusa della tempera e quella speculare della foglia d'oro, sovrailluminando o appiattendendo, e con punti di vista assai diversi da quelli concepiti dal frate domenicano per l'originaria collocazione (fig. 4).

Il presente contributo illustra una soluzione sviluppata per la fruizione di un surrogato digitale del dipinto del Beato Angelico, percettivamente indistinguibile dall'originale, che ne consente la comprensione e l'analisi tramite quello che Leonardo da Vinci chiamava "il miglior senso", cioè la vista, osservandolo come se fosse nelle nostre mani e re-illuminandolo per poter enfatizzare caratteristiche specifiche utili alla comprensione e all'analisi dell'opera anche ai fini della sua conservazione.

Il sistema è rivolto non solo a visitatori di mostre e musei (l'occasione per il presente lavoro è stata infatti la mostra "Masaccio e Angelico. Dialogo sulla verità nella pittura"⁵), ma anche a studiosi e restauratori per una più completa e approfondita comprensione dell'uso dei ma-

1/ Beato Angelico, Annunciazione di San Giovanni Valdarno, rappresentazione ortografica frontale del modello tridimensionale ottenuto tramite AnnunciatiOnApp.
Fra Angelico, Annunciation in San Giovanni Valdarno, frontal orthographic representation of the three-dimensional model obtained using AnnunciatiOnApp.



teriali, della realizzazione delle singole parti e della loro consistenza effettiva, e infine della costruzione e dello stato del dipinto. Il sistema consente infatti osservazioni, sia alla macroscala che alla microscala, di un surrogato digitale ottenuto servendosi di tecniche di acquisizione, visualizzazione in tempo reale e interazione che mirano a riprodurre il modo in cui il dipinto è percepito dalla visione umana nella sua *total appearance* (fig. 5)⁶. Si tratta quindi di una soluzione che mira a ottenere una replica fotorealistica tridimensionale dell'opera in grado di oltrepassare i limiti delle consuete tecniche bidimensionali, come il *Gigapixel imaging*⁷ – accurato nella ri-

soluzione ma limitato a una semplice riproduzione del colore apparente da un solo punto di vista [Cabezoz-Bernal, Rodriguez-Navarro, Gil-Piqueras 2021] – o anche delle tecniche, sempre 2D, basate sulla capacità di reilluminamento, come le *Reflectance Transformation Imaging* (RTI)⁸ efficaci nella riproduzione della microstruttura ma dalla limitata risoluzione e ancora dall'osservazione possibile da un solo punto di vista.

Il sistema, denominato AnnunciatiOnApp, trae origine dallo strumento digitale di acquisizione, visualizzazione e interazione ISLe (InSightLeonardo) [Gaiani, Apollonio, Clini 2015; Gaiani, Apollonio 2019; Apollonio et

tradition. The precise, elegant style of the egg tempera painting is also enriched by the use of expensive materials such as the blue lapis lazuli pigment and gold leaf, both applied very carefully. The work shows how the challenge tackled by Giovanni da Fiesole was in fact to couple the new principles of the Renaissance, for example perspective and attention to the human figure, with Late Gothic elements and traditional medieval values, such as the didactic role of art and the mystic value of light [Strehlke 2005].

Neither photographs nor direct observation can, however, fully convey the complexity and richness of this painting. The former flatten the contrast between the broad chromatic composition of the vivid tones of the garden, the clothes of the Angel and Mary, and the dark room behind the Virgin, into a single luminous intensity, incapable of revealing shadows and details. Due to the distance from which one views the painting, direct observation prevents the onlooker from grasping neither the details (figs. 2, 3) – the faces, Mary's precious veil – nor the figurative quality of Adam and Eve (fig. 3). Furthermore, the lighting in the room where the painting hangs is very different to the light that fell on the altar in the Convent of San Francesco in Montecarlo in the first half of the 15th century; the current lighting makes it impossible to understand how the work was perceived; it evens out light and dark tones due to the diffuse reflection of the tempera and the specular reflection of the gold leaf, either overlighting or flattening it; in addition, the viewpoints differ from the ones imagined by the Dominican friar for its original setting (fig. 4).

The solution presented in this contribution was developed in order to exploit a digital surrogate of the painting by Fra Angelico, one which is perceptively indistinguishable from the original; the surrogate makes it possible to understand and analyse the painting using what Leonardo da Vinci called 'the best sense', i.e., sight, observing it as if it were in our hands and re-lighting it in order to emphasise specific characteristics that can help us understand and analyse the work, including for conservation purposes.

2/ Beato Angelico, Annunciazione di San Giovanni Valdarno, dettagli ravvicinati del modello tridimensionale ottenuto tramite AnnunciatiOnApp: in alto il volto della Vergine, in basso da sinistra il libro delle preghiere e un dettaglio ingrandito dell'occhio della Vergine. *Fra Angelico, Annunciation in San Giovanni Valdarno, close-up details of the three-dimensional model obtained using AnnunciatiOnApp: top, the face of the Virgin; bottom left, the book of prayers; bottom right, an enlarged detail of the eye of the Virgin.*

The system is intended not only for visitors to exhibitions and museums (the opportunity to execute this project was in fact the exhibition entitled 'Masaccio e Angelico. Dialogo sulla verità della pittura'⁵), but also for scholars and restorers; the objective is to acquire a more comprehensive and in-depth understanding not only of the use of the materials, but also the execution of individual parts of the painting and their effective consistency, and finally the construction and current state of the painting. In fact the system makes it possible to observe, at both a macroscale and microscale, a digital surrogate obtained by using acquisition techniques and real time visualisation and interaction in order to reproduce the way in which the painting is perceived by the human eye in its total appearance (fig. 5).⁶

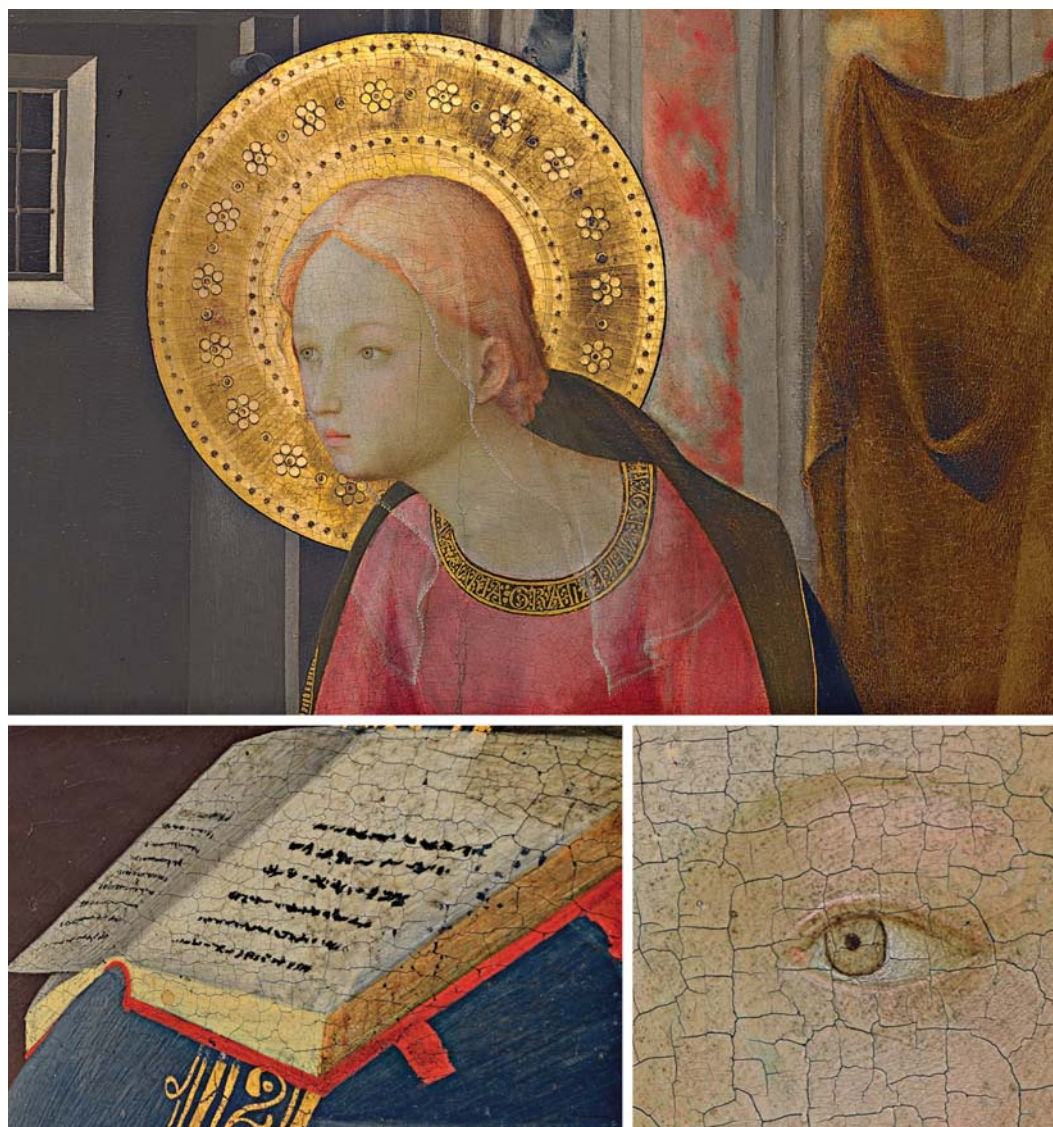
The three-dimensional photorealistic replica of the work obtained using this system goes beyond the limits of usual two-dimensional techniques: Gigapixel imaging⁷— accurate in its resolution but limited to a simple reproduction of the apparent colour from a single viewpoint [Cabezos-Bernal, Rodriguez-Navarro, Gil-Piqueras 2021]; 2D techniques based on the ability to relight, e.g., Reflectance Transformation Imaging (RTI),⁸ that successfully reproduce the microstructure but have a limited resolution; and finally possible observation from a single viewpoint.

The system, called AnnunciatiOnApp, was inspired by the digital acquisition, visualisation and interaction instrument ISLe (InSightLeonardo) [Gaiani, Apollonio, Clini 2015; Gaiani, Apollonio 2019; Apollonio et al. 2021] that began to be developed in 2010 by our team at the Alma Mater Studiorum University of Bologna to surrogate, study, describe and communicate ancient drawings. The instrument provides a completely three-dimensional restitution that also assesses the specular reflectance component and the sub-surface reflection phenomena that modify the perception of a graphic work, especially as regards the materials capable of overlighting certain angles of observation.

Like ISLe, from a technical point of view AnnunciatiOnApp is based on the digital reconstruction of form, colour and properties of reflectance of the surface, using only

al. 2021], sviluppato a partire dal 2010 dal nostro gruppo di lavoro dell'Alma Mater Studiorum Università di Bologna per surrogare, indagare, descrivere e comunicare i disegni antichi e permette una restituzione completamente tridimensionale, valutando anche la componente di riflettanza speculare e i fenomeni di riflessione sub-superficiali che modificano la percezione dell'opera grafica, soprattutto nei materiali capaci di sovrailluminare a determinati angoli di osservazione. Da un punto di vista tecnico AnnunciatiOnApp, come ISLe, è basata sulla ricostruzione digitale di forma, colore e proprietà di riflet-

tanza della superficie unicamente tramite tecniche fotografiche. Trattandosi però di un dipinto e non di un disegno, non è stato possibile applicare le stesse metodiche di ISLe, né nella valutazione delle differenze di colore (indagine colorimetrica), né nella valutazione dimensionale (dimensioni dell'artefatto, spessori e ordini di grandezza delle profondità, cioè indagine metrica), né nella valutazione delle proprietà ottiche di riflessione. Il sistema sviluppato rappresenta dunque un deciso passo in avanti rispetto alle recenti tecniche di costruzione di modelli 3D basate su fotogrammetria, accurate nella riproduzione di



3/ Beato Angelico, Annunciazione di San Giovanni Valdarno, dettaglio del modello tridimensionale ottenuto tramite AnnunciatiOnApp: la cacciata di Adamo ed Eva dal Paradiso terrestre.

Fra Angelico, Annunciation in San Giovanni Valdarno, detail of the three-dimensional model obtained using AnnunciatiOnApp: Adam and Eve cast out of the Garden of Eden.

caratteristiche metriche e talvolta nella replica del colore (principalmente se accoppiate con *imaging* multispettrale⁹), ma inadeguate a riprodurre risoluzioni al centesimo di millimetro e proprietà di riflettanza specifiche. Inoltre, AnnunciatiOnApp, sfruttando unicamente tecniche a base fotografica, si propone di fornire uno strumento meno complesso, ma altrettanto accurato, rispetto alla tecnica più utilizzata per la riproduzione digitale dei dipinti che prevede l'uso congiunto di fotografia multispettrale e laser scanner¹⁰.

Il dipinto: brevi note

Il capolavoro della collezione del Museo della basilica di Santa Maria delle Grazie è oggi concordemente attribuito al Beato Angelico per l'altissimo livello artistico emerso soprattutto dal restauro fine anni Settanta del Novecento.

La predella con le storie della Vergine (*Sposalizio, Visitazione, Adorazione dei Magi, Presentazione di Gesù al tempio e Dormitio Mariae*) rivela la sua autografia nella concezione generale e in alcune scene di più alta qualità stilistica ed esecutiva (*Sposalizio, Visitazione, Adorazione*), mentre nelle altre è probabile l'intervento del pittore e miniaturista Zanobi Strozzi, uno dei principali collaboratori del Beato Angelico fin dall'inizio della sua carriera; Strozzi possedeva infatti una proprietà poco distante dal convento di Fiesole.

Lo schema compositivo – con un loggiato e, sullo sfondo, la camera di Maria che si aprono su un rigoglioso Eden dal quale vengono cacciati Adamo ed Eva – mostra una ricchezza di riferimenti simbolici e di particolari, oltre a una distinta impostazione prospettica che porta a escludere che si tratti di una copia di un modello iniziale. È ipotizzabile piuttosto che le tre tavole con l'*Annunciazione*, che raffigurano un tema particolarmente amato dall'artista, costituiscano soluzioni differenti realizzate in base alla destinazione del dipinto e agli orientamenti stilistici prevalenti¹¹. In particolare, la pala di San Giovanni mostra una concezione straordinariamente moderna e di grande coinvolgimento emotivo: dallo schema prospettico centrale del Prado a quello laterale di Cortona si arriva a un punto di vista centrale ma ravvicinato, nel



quale l'osservatore è come invitato a entrare nel loggiato e a partecipare alla scena, senza una separazione tra spazio reale e dipinto, tra “fuori” e “dentro”.

L'opera, nonostante la persistenza di elementi tardogotici – riconoscibili nella cura dettagliata della veste dell'angelo, ricca di dorature, e nelle aureole incise – riflette le novità rinascimentali di Masaccio, nell'impianto prospettico perfettamente centrale con l'austero cubicolo di Maria e la finestra ferrata che accentua il senso di profondità, oltre che nella dolce umanità della Vergine e nelle figure di Adamo ed Eva che ricordano quelle della cappella Brancacci.

Il motivo dell'Incarnazione, evento chiave e fondante della fede, rappresentato dall'Angelico anche su affresco e in miniatura, viene fissato in una forma per sempre legata al suo nome. Con grande originalità Beato Angelico inserisce l'annuncio a Maria nell'*Historia salutis*: la storia biblica della Salvezza, che inizia con la rottura dell'Alleanza tra l'uomo e Dio e la cacciata di Adamo ed Eva, raffigurati in alto a sinistra, prosegue con la profezia di Isaia che preannuncia la nascita dell'Emmanuele, e si compie con il sì di Maria che accetta di diventare Madre di Dio. La storia continua con il Giudizio Universale e la proclamazione dell'eternità di Dio, cui alludono le iscrizio-

photographic techniques. However, since we are dealing with a painting and not a drawing, we could not apply the same ISle methods to assess the differences in colour (colourimetric test), the dimensions of the painting (size of the artefact, thicknesses and scale of the depths, i.e., metric test), or the optical properties of reflection. The system we developed is a big step forward compared to the recent techniques used to create 3D models based on photogrammetry since the latter accurately reproduce metric characteristics and sometimes replicate colour (chiefly if coupled with multispectral imaging⁹), but are inadequate when it comes to reproducing specific reflectance properties and resolutions that are a hundredth of a millimetre. In addition, AnnunciatiOnApp only exploits photographic techniques in order to provide a less complex tool which is, however, just as accurate when compared to the most commonly used technique for the digital reproduction of paintings, i.e., that envisages the joint use of multispectral photography and laser scanner.¹⁰

The painting: brief notes

The masterpiece in the collection of the Museum of the Basilica of Santa Maria delle Grazie is currently and unanimously attributed to Fra Angelico due to the extremely excellent artistry discovered chiefly during its restoration in the late seventies.

The predella with the stories of the Virgin (Marriage, Visitation, Adoration of the Magi, Presentation of Jesus in the Temple and Dormitio Mariae) provides a general outline of her autobiography; several of the scenes (Marriage, Visitation, Adoration) are more high quality as regards style and execution while other scenes reveal the probably intervention of the painter and miniaturist Zanobi Strozzi, one of Fra Angelico's chief collaborators ever since the beginning of his career. In fact Strozzi owned property quite close to the convent in Fiesole. The compositional layout includes a loggia and Mary's bedroom in the background opening onto a luxuriant garden from which Adam and Eve are being cast out; it presents an array of symbolic references and details

4/ Beato Angelico, Annunciazione di San Giovanni Valdarno, dettaglio del modello tridimensionale ottenuto tramite AnnunciatiOnApp: il dettaglio della foglia d'oro nelle ali dell'Arcangelo Gabriele.

Fra Angelico, Annunciation in San Giovanni Valdarno, detail of the three-dimensional model obtained using AnnunciatiOnApp: detail of the gold leaf in the wings of the Archangel Gabriel.

as well as a distinctive perspective approach, excluding the possibility that it was a copy of an initial model. Instead we can theorise that the three panels with the Annunciation – a topic particularly dear to the artist – are different solutions that depend not only on where the painting was to hang, but also prevailing stylistic trends.¹¹ In particular, the design of the altarpiece in San Giovanni is extraordinarily modern, sparking an profound emotional involvement: from the central perspective pattern of the painting in the Prado and the lateral perspective of the painting in Cortona, in this case there is a shift to a central, close-up viewpoint, inviting the onlooker to enter the loggia and participate in the scene, without a separation between real and painted space, between 'outside' and 'inside'.

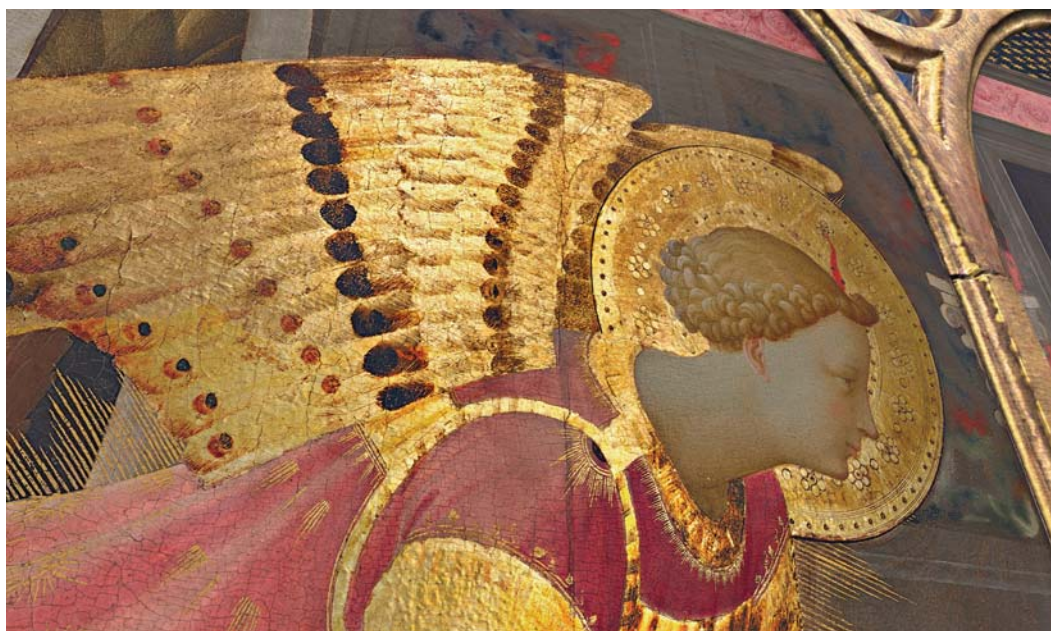
Despite the presence of Late Gothic elements – visible in the detailed execution of the Angel's very golden robes and the engraved halos – the painting reflects Masaccio's renaissance novelties: the perfectly central perspective with Mary's austere cubicle; the grille window accentuating the sense of depth; the gentle humanity of the Virgin; and the figures of Adam and Eve reminiscent of the ones in the Brancacci chapel.

The topic of the Incarnation – a fundamental, key event of the faith – which Fra Angelico also represents in a fresco and miniature, is established in a form that remains forever linked to his name. His very original approach is to insert the announcement to Maria in the *Historia salutis*: the biblical story of Salvation begins with the end of the Alliance between man and God and the eviction of Adam and Eve (depicted in the top left-hand corner) and continues with Isaiah's prophecy heralding the birth of Emmanuel, that takes place when Mary's accepts to become the Mother of God. The story continues with the Last Judgement and the proclamation of the eternity of God, alluded to by the inscriptions on the golden border of the Virgin's cloak, 'Donec veniat' and 'Est'. The work is full of Christological and Marian symbols: the Christic column¹² in the centre, symbol of the tree of the cross and of life; gold, emblem of divine light; and the palm, reminiscent of victory over sin and death, but also of the passion of Jesus Christ.

ni sul bordo dorato del manto della Vergine, "Donec veniat" e "Est". L'opera è ricca di simboli cristologici e mariani: dalla colonna cristica¹² al centro, simbolo dell'albero della croce e della vita, all'oro, emblema della luce divina, alla palma che ricorda la vittoria sul peccato e sulla morte, ma anche la passione di Cristo. Tipicamente mariani sono l'*hortus conclusus* delimitato dal recinto, che simboleggia la verginità di Maria e la varietà di fiori tra cui, oltre al classico giglio, le primule, che alludono alla nuova Primavera della vita (l'Annunciazione ricorre il 25 marzo, data del capodanno fiorentino); le stelle alpine, figura di Maria stella mattutina; il garofano rosso, simbolo di fidanzamento e per questo della sponsalità di Maria, l'amata del Cantico dei Cantici; e il melograno, allusione alla sua nuzialità feconda e all'unità della Chiesa. Meno immediati i simboli mariani della porta, della finestra ferrata e della cella; la prima si apre nella parete di fondo con una cornice in pietra dalla foggia rinascimentale ed è figura di Maria, *Ianua coeli*, porta tramite cui Dio incarnandosi è venuto al mondo; la piccola finestra ferrata, che nell'oscurità della notte fa passare un raggio di luce, allude alla verginità di Maria attraverso cui penetra solo la luce divina; infine la cella con la semplice panca, che ricorda l'essenzialità delle celle del con-

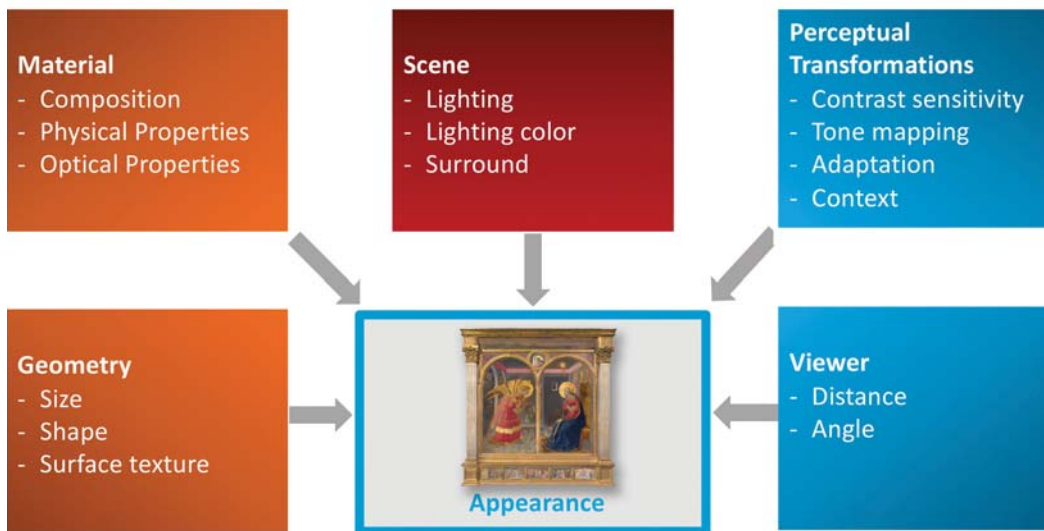
vento di Fiesole, è simbolo dell'umiltà della Vergine, scelta tra tutte le donne per diventare regina del cielo.

Le indagini riflettografiche hanno rivelato la grande padronanza del pittore nel disegno preparatorio, deciso e con pochi ripensamenti. Tuttavia è probabile che a una prima versione, più sobria e tradizionale con la tipica loggia aperta, abbia fatto seguito un adattamento al gusto rinascimentale, con la decorazione delle pareti con sfumati effetti marmorei che, oltre al fine decorativo, hanno un profondo senso simbolico, allusivo alla mutevolezza e peccaminosità del mondo, cangiante e multiforme rispetto alla simmetria del cielo stellato, emblema di perfezione divina¹³. Elemento di incredibile modernità, il pavimento nuvoloso e indefinito, come acquerellato, che l'angelo pare appena sfiorare quasi a non voler contaminare la sua natura divina, è in realtà simbolo di dispersione e peccato, da cui l'uomo grazie all'incarnazione è stato liberato. Tutto concorre a sottolineare come l'evento dell'Annunciazione si compia tra Tempo e Eternità, terra e cielo, finito e infinito. Il mistero del Verbo che si fa uomo, altrimenti non raffigurabile con i mezzi terreni, è espresso dall'indefinita mescolanza di colori, che si confondono creando quello che Georges Didi Huberman chiama "dissimi-



5/ Gli elementi principali per la definizione della total appearance dell'Annunciazione.

The main elements used to define the total appearance of the Annunciation.



le”, “dissomiglianza” e che Dante nel Paradiso esprime con “trasumanar”, l’andare oltre i limiti umani del linguaggio figurativo e verbale [Didi Huberman 2009].

Dall’acquisizione alla restituzione: problemi e soluzioni

La percezione tridimensionale di una superficie può essere riconducibile a fenomeni appartenenti a categorie proprie di tre scale differenti: la scala microscopica, che gioca un ruolo significativo nei riflessi superficiali ma non può essere distinta a occhio nudo e che per un dipinto è riassumibile negli attributi percettivi di colore (albedo diffuso), brillantezza e trasparenza/traslucenza¹⁴; la mesoscala, che descrive la rugosità della superficie (quella che può essere chiamata tessitura 3D o topografia); la scala macroscopica, descrivibile come la forma dell’oggetto a cui la superficie appartiene [Anderson 2011]. Come già precisato il passaggio dal sistema *ISLe*, sviluppato per disegni e manoscritti, alla nuova *AnnunciatiOnApp* ha richiesto di trovare soluzioni in merito a quattro problematiche fondamentali per riuscire a ricostruire correttamente tutte queste tre scale:

a. la necessità di un sistema di acquisizione delle immagini capace di assorbire il passaggio da fogli dalle dimensioni variabili tra un formato A5 e un A3 a un artefatto dalle dimensioni di 2.170x2.240 mm, cioè una superficie più grande circa 60 volte;

b. l’individuazione di un efficiente sistema di replica delle proprietà ottiche del materiale alla microscala, non solo per le decorazioni a foglia d’oro, ma per la tempera e gli effetti di rugosità, le dispersioni della luce e le sovrailluminazioni;

c. la predisposizione di una tecnica di restituzione della mesostruttura del dipinto. La superficie di un dipinto è di rado completamente piana, con caratteristiche variabili tra 10 µm e qualche millimetro, mentre un disegno presenta spessori di segni di penna o matita di circa 5÷10 µm, e una rugosità della carta che raramente eccede il decimo di millimetro. Inoltre, la superficie di un dipinto è generalmente costituita da una complessa stratigrafia: un supporto – nel nostro caso un pannello ligneo – e uno o più strati di fondo o tempera, fissati da componenti semitrasparenti con finalità protettive;

d. lo sviluppo di un *workflow* di riproduzione colorimetrica capace di replicare non solo i colori saturi (tra i quali particolarmente problematica è la riproduzione degli azzurri dei lapislazzuli, praticamente sempre errata nelle odierne riproduzioni digitali a schermo e a stampa basate sullo spazio colore sRGB), ma anche le sfumature e i chiaroscuri che richiedono una gamma cromatica più ricca rispetto a quella dei disegni.

La soluzione di queste problematiche ha portato allo sviluppo di tecniche e metodi specifici così riassumibili:

a. la progettazione e realizzazione di un nuovo dispositivo di acquisizione (fig. 6) e di una

*Typical Marian symbols are the hortus conclusus surrounded by a fence, symbolising Mary’s virginity, and the many different flowers which, apart from the classical lily, include: primroses alluding to the new Spring of life (the Annunciation falls on March 25th, date of the Florentine New Year); edelweiss, figure of Mary star of the morning; red carnations, symbol of betrothal and for this reason of Mary as spouse, the loved one of the Cantic of Canticles; and the pomegranate, alluding to her fecund nuptiality and the unity of the Church. There are other less immediate Marian symbols: the door, the grated window and the cella. The door located in the back wall has a renaissance-style stone frame; it is the figure of Mary, *Ianua coeli*, the door through which God is incarnated and comes into the world; the small grated window, which in the obscurity of night allows a ray of light to pass, alludes to Mary’s virginity through which only divine light penetrates; the cella with a single bench, reminiscent of the essentiality of the cellae in the convent in Fiesole, is the symbol of the Virgin’s humility, chosen from amongst all women to become queen of heaven.*

Reflectographic tests have unveiled the painter’s exceptional mastery of the preparatory drawing, determined and with very few rethinks. Nevertheless, it is likely that a first more modest and traditional version, with the typical open loggia, was adapted by Fra Angelico to renaissance taste by decorating the walls with nuanced marble effects which, apart from acting as a decoration, have a profound symbolic meaning; they allude to the fickleness and sinfulness of the world, ever-changing and multiform compared to the symmetry of the starry sky, emblem of divine perfection.¹³

There is also a truly modern element: the undefined, cloudy floor painted almost like a watercolour that the Angel appears to only brush against, almost as if to avoid contaminating his divine nature; in actual fact it is a symbol of dispersion and sin from which man, thanks to the incarnation, has been freed. Everything helps to emphasise how the Annunciation takes place between Time and Eternity, heaven and earth, finite

6/ Progetto dello stativo costruito per le prese fotografiche. Il sistema può raggiungere quote di lavoro differenti mantenendo la perpendicolarità al piano del dipinto.

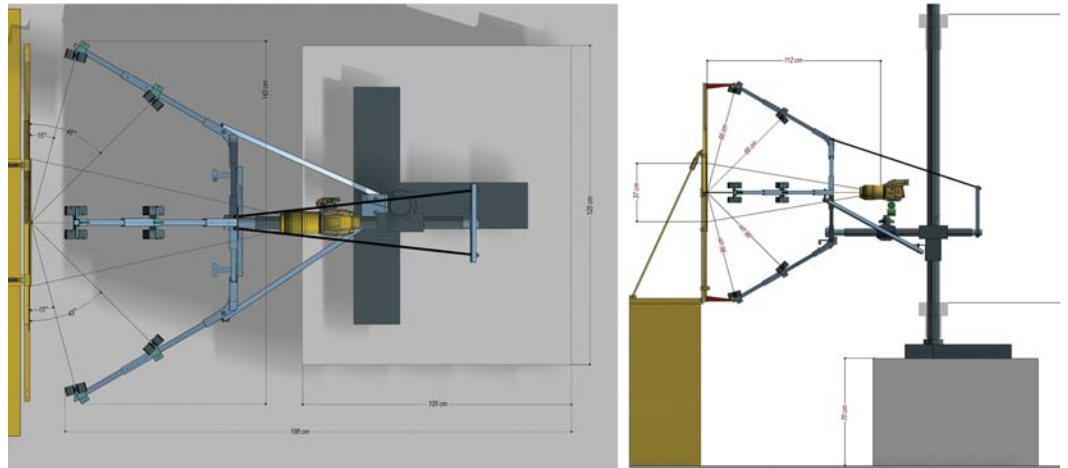
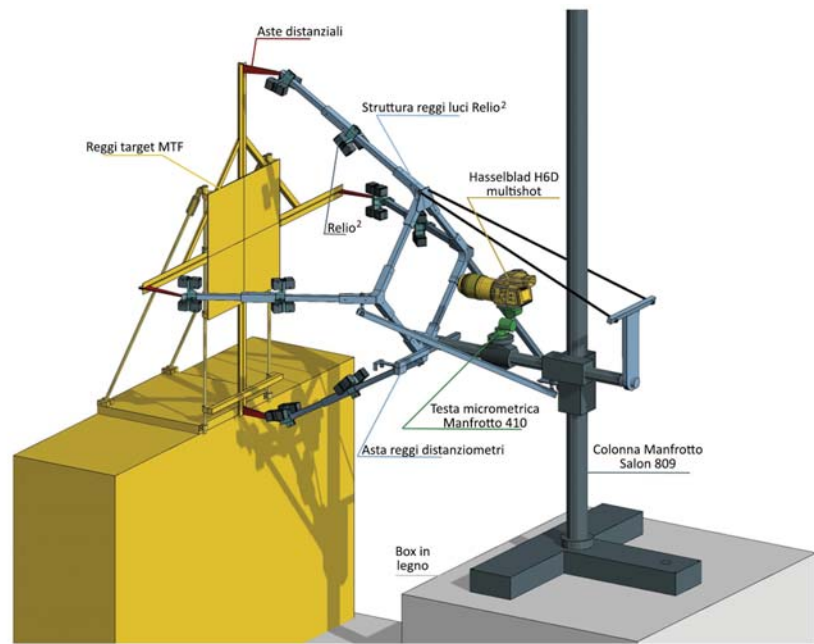
Design of the stand built for the photo shoot. The system can be set at different work heights while still remaining perpendicular to the plane of the painting.

and infinite. The mystery of the Word that becomes man, which otherwise could not be depicted using earthly tools, is expressed by the undefined mix of colours that are blurred to create what Georges Didi Huberman defines as 'dissimilar', 'dissimilarity' and Dante in Paradise expresses as 'transumanar', going beyond the human limits of figurative and verbal language [Didi Huberman 2009].

From acquisition to restitution: problems and solutions

The three-dimensional perception of a surface can be traced back to phenomena belonging to the categories of three different scales: the microscopic scale, that plays an important role in superficial reflections but cannot be seen by the naked eye and which, as concerns a painting, can be summarised in the perceptive attributes of colour (diffuse albedo), brightness and transparency/translucency¹⁴; the mesoscale, that describes the roughness of the surface (what could be called 3D texture or topography); and the macroscopic scale, describing the form of the object to which the surface belongs [Anderson 2011]. As mentioned earlier, the shift from the ISLe system, developed for drawings and manuscripts, to the new AnnunciatiOnApp, required finding solutions regarding four fundamental problems in order to correctly recreate all these three scales:

- a. the need to have an image acquisition system capable of absorbing the shift from sheets that varied in size between an A5 and an A3 format to an artefact measuring 2,170x2,240 mm, i.e., a surface 60 times bigger;*
- b. identification of an efficient system replicating the optical properties of the material on a microscale, not only for the gold leaf decorations, but also for the tempera and roughness effects, the dispersion of light and over-illumination;*
- c. preparation of a technique for the restitution of the mesostructure of the painting. The surface of a painting is rarely completely flat, with characteristics that vary between 10 µm and a few millimetres, while the thickness of a pen or pencil drawing is roughly 5÷10 µm, and the roughness of*



tecnica di mosaicatura 2D/3D per campionare un'area 60 volte maggiore rispetto a quella per la quale era stato progettato ISLe;
 b. lo sviluppo di un software di *photometric stereo*, una tecnica di *imaging* che misura la normale alla superficie in ogni suo punto campionato (cioè per pixel) [Woodham 1980], per restituire efficacemente la mesostruttura del dipinto;
 c. una tecnica di replica delle proprietà ottiche alla microscala di ciascuno dei materiali con cui è stato realizzato il dipinto, descrivendole tramite la loro *Bidirectional Reflectance Distribution Function* (BRDF)¹⁵. Nel nostro caso è stata ritrovata una BRDF approssimata analiticamente capace di renderizzare in *Real-Time Rendering* (RTR) le componenti di riflettanza speculare e diffusa, a partire dal diffusissimo modello fisico di Cook-Torrance [Cook, Torrance 1982], implementato tramite uno *shader*;
 d. una soluzione per la visualizzazione grafica ottenuta a partire dal motore grafico di RTR *High-Definition Render Pipeline* (HDRP) di Unity 3D [http://www.unity.com; giugno 2023]. Essa mira a soddisfare due requisiti divergenti: una soluzione di trasporto della luce

e di modellazione dei materiali su base fisica per una visualizzazione accurata; un sistema di *rendering* interattivo che consente a un *frame rate* di 60-100 Hz di interagire facilmente con la visualizzazione del dipinto;
 e. l'utilizzo come input al sistema di immagini corrette colorimetricamente utilizzando le cinque regole dell'*imaging* colorimetrico [Berns 2015]: temperatura di colore correlata all'illuminazione (CCT) di circa 5.000°K (D50 *workflow*); esposizione ottimale; profilo basato sulla minimizzazione del ΔE , ottenendo eccezionale accuratezza nella luminosità; validazione indipendente dalla calibrazione; spazio di codifica capace di non ritagliare i colori della scena. In particolare, come soluzione di *color correction* si è adottata una tecnica completamente automatizzata, sviluppata dal nostro gruppo di lavoro: SHAFT (*SAT & HUE Adaptive Fine Tuning*) [Gaiani, Ballabeni 2018]. Le immagini finali sono renderizzate nello spazio colore DisplayP3 in grado di riprodurre correttamente anche i colori nell'area del blu cobalto, presenti nel dipinto e visualizzabile al 100% sui monitor odierni di qualità semiprofessionale.

Il sistema di acquisizione

La restituzione della forma e della *total appearance* di un dipinto è stata sempre realizzata servendosi di tecniche multimodali, cioè mediante l'uso incrociato di più sensori, attivi e/o passivi, o differenti modalità di acquisizione, ad esempio utilizzando illuminazione di diverso tipo, al fine di ottenere precisioni dimensionali comprese tra 0,01 e 1 mm e accuratezze di riproduzione del colore prossime a quelle minime visibili dall'occhio umano allenato. Nel nostro caso ci si è orientati su un sistema interamente fotografico riconducendo il problema della registrazione tra più immagini alla classica integrazione di dati omogenei acquisiti da più punti di vista e limitando le registrazioni 2D/3D, sempre foriere di errori rilevanti.

L'uso di tecniche fotografiche è sempre stato centrale per identificare e riprodurre il colore dei dipinti e fornire risultati colorimetrici accurati [cfr. ad es. Martinez, Cupitt, Saunders 1993; Maître et al. 1996; Berns 2001], ma è stato probabilmente Roy Berns che per primo le ha utilizzate per ricostruire le normali e la geometria del dipinto e separare l'albedo dagli effetti speculari in ogni punto della superficie misurata [Berns et al. 2012]. Le normali alla superficie possono essere infatti utilizzate per trasmettere informazioni sulla sua mesostruttura, che può essere simulata implicitamente in un processo di *rendering*. Nella formulazione stereo fotometrica originale [Horn 1975], le fonti di luce erano assunte all'infinito, la fotocamera era ortografica e la superficie dell'oggetto lambertiana e convessa (cioè senza ombre o inter-riflessioni ed effetti di specularità). La soluzione, come altre successive che costituiscono la base di sviluppo odierna [ad es. Okatani, Deguchi 2001], includeva un'unica immagine per catturare la riflessione diffusa, mentre altre tre consentivano di risolvere i problemi fotometrici.

Nel nostro caso è stata sviluppata una tecnica di *photometric stereo* chiamata nLights che fa uso di otto immagini con illuminazione costante proveniente da quattro direzioni differenti, circa ortogonali fra loro, e collocate a 45° e 15° di inclinazione rispetto al piano del dipinto, mantenendo fissa la po-

sizione della camera con l'asse perpendicolare alla sua superficie, oltre a una nona con il dipinto illuminato uniformemente. nLights deriva dal toolbox di Matlab PSBox [Ying 2023], e produce una serie di mappe scartando i valori più prossimi che consentono di ricostruire mesostruttura e microstruttura con tecniche *multitexture*: albedo, normali, profondità (una mappa che permette di ricostruire a partire dal campo vettoriale normale stimato la mesostruttura coarsa), riflessione speculare (fig. 7). Inoltre, nLights restituisce una rappresentazione geometrica 3D della forma della tavola del dipinto, sotto forma di file geometrico OBJ, ottenuta dalla mappa di profondità (fig. 8).

Operativamente, per utilizzare nLights è stato progettato e realizzato un nuovo stativo capace di supportare il sistema di illuminamento prescelto (trentadue luci Relio² [http://www.relio.it; giugno 2023], un illuminatore a singolo LED che emette luce a spettro continuo a una *Color Correlated Temperature* di 4.000°K e che presenta una *Spectral power distribution* con affidabilità cromatica a tutte le lunghezze d'onda) e connetterlo rigidamente alla macchina fotografica, consentendone traslazione verticale e orizzontale. In più lo stativo assicura la conservazione del parallelismo tra macchina fotografica e piano del dipinto mediante l'utilizzo di due distanziometri laser capaci di garantire una precisione di $\pm 1,5$ mm.

Come dispositivo di acquisizione si è utilizzata una macchina fotografica a medio formato Hasselblad H6D-400C Multi-Shot [https://www.hasselblad.com/h-system/h6d-400c-multi-shot/; giugno 2023], dotata di sensore CMOS composto da 11.600×8.700 pixel e capace di una profondità colore di 48 bit. La tecnologia Multi-Shot consente di ottenere colore effettivo a ogni locazione di pixel (GRGB) e risoluzione 4x (cioè 32.300×17.400 pixel) tramite sei acquisizioni ottenute dallo spostamento del sensore di mezzo pixel alla volta. Nel nostro caso è stata utilizzata questa modalità a sei scatti che equivale, sull'area fotografata da ogni immagine di 500×375 mm, a una risoluzione di campionamento di 15 mm e una risoluzione effettiva del sistema di 21 mm¹⁶ a una distanza della fotocamera dal dipinto di 1.120 mm circa¹⁷.

paper is very seldom more than a tenth of a millimetre. In addition, the surface of a painting generally has a complex stratigraphy: a support – in this case a wooden panel – and one or more strata of a base coat or tempera, secured using semitransparent components as a protective layer;

d. the development of a colourimetric reproduction workflow to replicate not only the saturated colours (the reproduction of the blues of the lapis lazuli is particularly problematic and is practically always incorrect in current digital reproductions either viewed on a monitor or printed based on the sRGB colour space), but also the nuances and chiaroscuro tones that require a much more extensive chromatic range compared to that of drawings.

Solving these problems led to the development of specific techniques and methods, summarised below:

- a. the design and creation of a new acquisition device (fig. 6) and a 2D/3D mosaic technique to sample an area 60 times bigger than the area for which the ISLe had been designed;*
- b. the development of a photometric stereo software, an imaging technique that measures the normal line at the surface in each sample point (i.e., each pixel [Woodham 1980], in order to successfully provide the restitution of the mesostructure of the painting;*
- c. a technique to replicate the optical properties on the microscale of each of the materials used in the painting, describing them using their Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF).¹⁵ In this case we found an approximated BRDF that was analytically able to render, in Real-Time Rendering (RTR), the specular and diffuse reflectance components, starting with the very widespread Cook-Torrance physical model [Cook, Torrance 1982], implemented using a shader;*
- d. a solution for the graphic visualisation obtained based on the graphic engine of the RTR High Definition Render Pipeline (HDRP) of Unity 3D [http://www.unity.com; June 2023]. It satisfies two divergent requirements: a solution to transport light and physically model the materials to obtain an accurate visualisation; a system of interactive*

7/ Le mappe utilizzate per comporre lo shader in Unity3D col metodo multitexture.

The maps used to create the shader in Unity3D using the multitexture method.

8/ La mesh geometrica ottenuta da tecniche di photometric stereo (in basso) e la corrispondente mappa di albedo (in alto).

The geometric mesh obtained using stereo photometric techniques (bottom image) and the corresponding albedo map (top image).

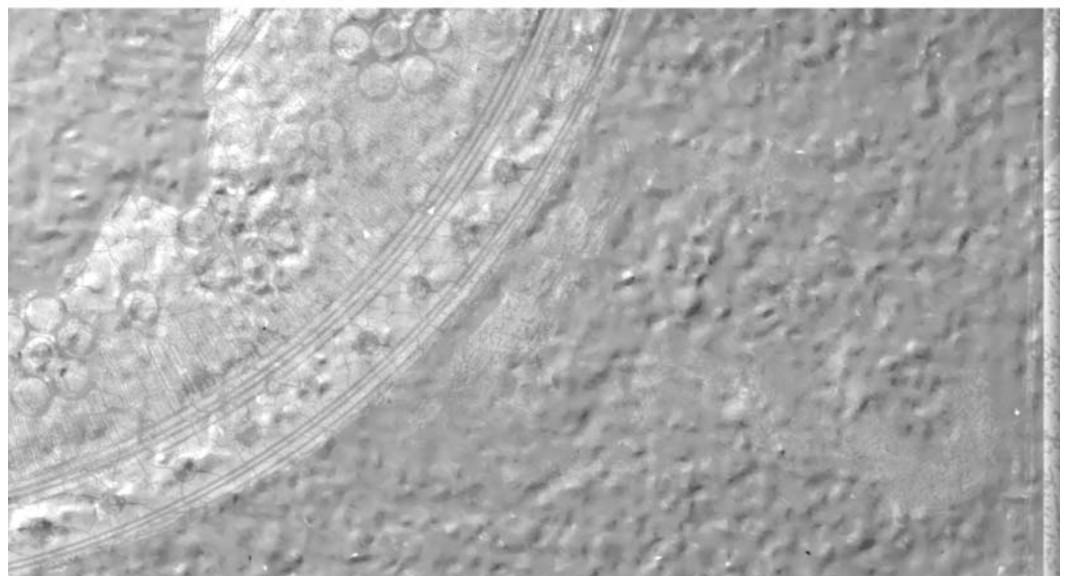
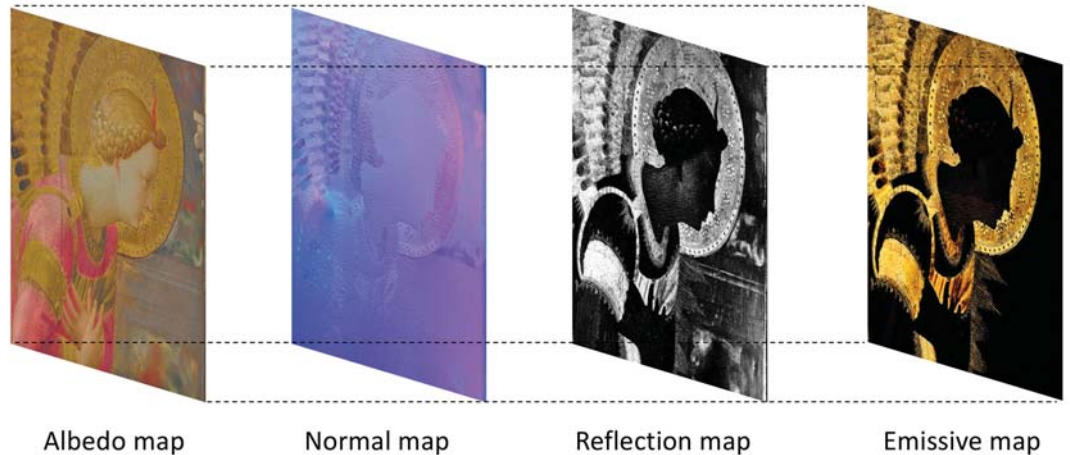
rendering that allows a frame rate of 60-100 Hz to easily interact with the visualisation of the painting;

e. its use as an input into the system of colourimetrically correct images using the five rules of colourimetric imaging [Berns 2015]: colour temperature linked to the lighting (CCT) of roughly 5,000°K (D50 workflow); optimal exposition; profile based on the minimisation of ΔE , thus obtaining exceptional accuracy regarding luminosity; validation separate from calibration; codification space that would not cut the colours in the scene. In particular, for the colour correction solution we used a completely automated technique, developed by our team: SHAFT (SAT & Hue Adaptive Fine Tuning) [Gaiani, Ballabeni 2018]. The final images are rendered in the DisplayP3 colour space capable of correctly reproducing the colours in the cobalt blue space, present in the painting and 100% viewable on current semi-professional monitors.

The acquisition system

The restitution of the form and total appearance of a painting has always been achieved by using multimodal techniques, in other words, the integrated use of multiple active and/or passive sensors or different acquisition methods, e.g., using different kinds of lighting in order to obtain a dimensional precision between 0.01 and 1 mm and accurate reproduction of the colour close to the minimal ones visible to the trained naked eye. In this case, we opted for a completely photographic system so that the problem of the registration of several images was solved by using the classical integration of homogeneous data acquired from several viewpoints and by limiting the 2D/3D registrations, which always lead to major errors.

The use of photographic techniques has always been crucial to identify and reproduce the colour of paintings and provide accurate colourimetric results [cfr. for example Martinez, Cupitt, Saunders 1993; Maître et al. 1996; Berns 2001], but Roy Berns was probably the first to use them to recreate the normal lines and geometry of the painting and separate the albedo of the specular



Tab. 1/ Numero e dimensione delle prese fotografiche per tutte le parti restituite del dipinto: il numero di pixel acquisiti fa riferimento alla dimensione del singolo scatto per il numero di prese effettuate con luci provenienti da direzioni diverse.

Number and dimension of the shots for all the restored parts of the painting: the number of acquired pixels refers to the size of each shot per number of shots taken with light coming from different directions.

Tab. 2/ Numero e dimensione delle texture impiegate nella visualizzazione interattiva HDRP del modello. *Number and dimension of the textures used for the interactive HDRP visualisation of the model.*

Allineamento di immagini e mesh

La soluzione adottata per le immagini da mosaicare risulta in linea con quella proposta da Pedro M. Cabezos-Bernal et al. [Cabezos-Bernal, Rodriguez-Navarro, Gil-Piqueras 2021] che, come quella qui illustrata, mantiene la camera parallela al dipinto e il sistema di illuminazione solidale con essa. In questo modo la distanza tra sensore e punti sul dipinto rimane costante e la nitidezza delle immagini sempre ottimale e mai limitata dalla profondità di campo. Inoltre, la luce riflessa dall'opera non cambia tra gli scatti, così da evitare lievi differenze di esposizione e problemi di riflessi speculari.

Il mosaico di immagini pianificato degli spostamenti (orizzontali e verticali) della fotocamera (fig. 9) prevede una sovrapposizione minima circa del 25% tra inquadrature adiacenti per ottenere una qualità elevata delle cuciture.

Globalmente sono state acquisite 270 immagini per un totale di circa 106 gigapixel (tab. 1), corrispondenti a 26,8 gigapixel dopo la loro fusione (tab. 2).

Una volta acquisite le immagini, il loro allineamento e fusione tridimensionale è stato re-

alizzato tramite una sovrapposizione virtuale in tre passaggi:

- allineamento e fusione delle immagini tramite tecniche di *image stitching*, meglio espresse successivamente;

- allineamento e fusione delle *mesh* relative alla mesostruttura ricavata dal *photometric stereo* delle singole stazioni utilizzando l'algoritmo di Iterative Closest Point per l'allineamento [Bergström, Edlund 2017] e la tecnica volumetrica basata sul noto algoritmo Marching Cubes per la fusione [Curless, Levoy 1996];

- allineamento delle immagini alla *mesh* 3D, tipico problema di registrazione *image-to-geometry* [Pintus et al. 2017], eseguita sfruttando metodi di registrazione su base statistica basati sulle informazioni reciproche 2D/3D (*Mutual Information*) [Corsini et al. 2009] (fig. 10).

Il processo di mosaicatura delle immagini acquisite adottato ricalca quello tradizionale dello *stitching* in tre step principali: calibrazione, registrazione e fusione. La calibrazione dell'immagine produce una stima dei parametri intrinseci ed estrinseci della fotocamera; la registrazione delle immagini confronta

effects in every point of the measured surface [Berns et al. 2012]. It is in fact possible to use the normal lines to the surface to convey information about its mesostructure, which can be implicitly simulated in a rendering process. In the original stereo photometric formulation [Horn 1975], light sources were assumed ad infinitum, the camera was orthographic, and the surface of Lambert was convex (i.e., without shadows or specular inter-reflections). The solution, like other subsequent solutions that make up the basis of present-day development [e.g., Okatani, Deguchi 2001], included a single image to capture the diffuse reflection, while another three make it possible to solve photometric problems.

Instead we developed a photometric stereo technique called nLights that uses eight images with constant illumination from four, different, almost orthogonal directions inclined at 45° and 15° compared to the plane of the painting; the camera remained in a fixed position perpendicular to its surface; a ninth image was taken of the painting with uniform lighting. nLights comes from the Matlab PSBox toolbox [Ying 2023] and produces a series of maps, discarding the closest values that make it possible to reconstruct the mesostructure and microstructure using multitexture techniques: albedo, normal, depth (a map that makes it possible to reconstruct the coarse mesostructure based on the estimated normal vector field), and specular reflection (fig. 7). Furthermore, nLights provides a 3D geometric representation of the form of the panel of the painting as an OBJ geometric file, obtained from the depth map (fig. 8).

From an operational point of view, in order to use nLights we designed and built a new stand to support the chosen illumination system (thirty-two Relio lights² [http://www.relio.it; June 2023], a single LED illuminator that emits continuous spectrum light to a Colour Correlated Temperature of 4,000°K and presents a spectral power distribution with chromatic reliability in all wavelengths) and rigidly connect it to the camera, allowing for vertical and horizontal movement. In addition, the stand ensures conservation of the

Parti del dipinto	Prese fotografiche necessarie per la copertura	Scatti totali effettuati per la parte	Dimensione del singolo scatto (pixel)	Gigapixel totali acquisiti	Dimensione dell'immagine mosaicata per la parte (pixel)
Tondo superiore	1	9	23.200x17.400	3,6	23.200x17.400
Dipinto (pannello sinistro)	12	108	23.200x17.400	42,8	43.891x76.231
Dipinto (pannello destro)	12	108	23.200x17.400	42,8	44.137x76.448
Predella	5	45	23.200x17.400	16,1	23.200x17.400x5

Parti del dipinto	Numero di porzioni mosaicate	Numero di mappe sovrapposte	Dimensione della singola porzione di mappa (pixel)	Dimensione totale mappe (pixel)	Gigapixel riprodotti (comprensivo delle 4 mappe)
Tondo superiore	1	4	11.125x11.125	11.125x11.125	0,5
Dipinto (pannello sinistro)	8	4	20.180x17.980	40.360x71.920	11,6
Dipinto (pannello destro)	8	4	20.240x17.990	40.480x71.960	11,6
Predella	5	4	18.275x8.825	18.275x8.825x5	3,2

9/ Il progetto di ripresa con l'individuazione delle singole immagini: le dimensioni dell'Annunciazione hanno portato a considerare sovrapposizioni costanti di circa il 25% per agevolare la successiva mosaicatura delle immagini.
The shoot used to identify the individual images: the dimensions of the Annunciation led us to consider constant 25% overlapping between shots in order to facilitate the subsequent mosaicking of the images.

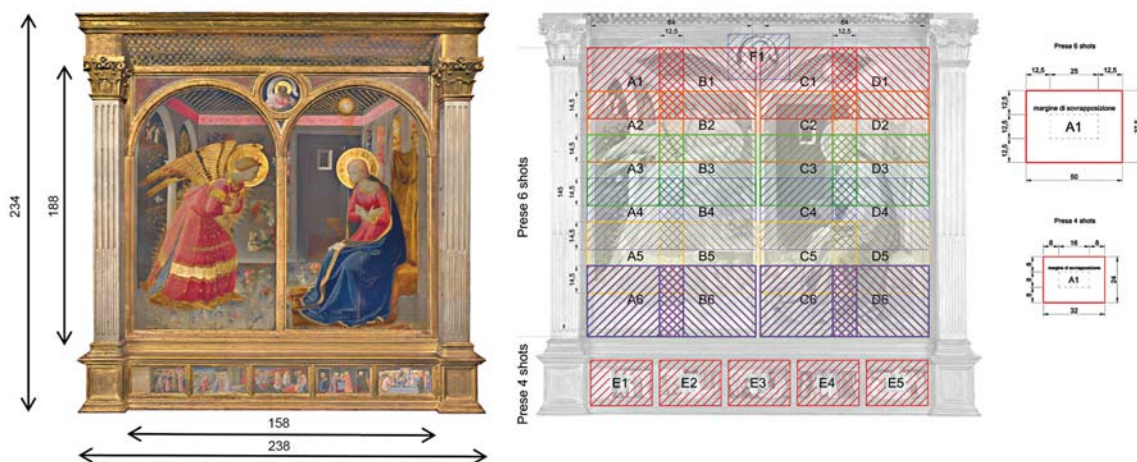
parallelism between the camera and the plane of the painting thanks to two laser distance meters that ensure ± 1.5 mm accuracy.

We used a medium format Hasselblad H6D-400C Multi-Shot as an acquisition device [https://www.hasselblad.com/h-system/h6d-400c-multi-shot/; June 2023]; it was equipped with a CMOS sensor with 11,600x8,700 pixel and had a colour depth of 48 bit. The Multi-Shot technology makes it possible to achieve real colour in every pixel location (GRGB) and a 4x resolution (i.e., 32,300x17,400 pixel) thanks to six acquisitions obtained each time by shifting the sensor by a half of a pixel. In this case we used the method six times which is equivalent, in the area photographed by every 500x375 image, to a sample resolution of 15 mm and a real resolution of the system of 21 mm¹⁶ when the camera was positioned at a distance of roughly 1,120 mm from the painting.¹⁷

Alignment of the images and mesh

The solution adopted for the images to be mosaicked is in line with the one proposed by Pedro M. Cabezas-Bernal et al. [Cabezas-Bernal, Rodriguez-Navarro, Gil-Piqueras 2021], which, like the one illustrated here, maintains the camera and the illumination system attached to it, parallel to the painting. This way the distance between the sensor and the points on the painting remains constant; the sharpness of the images always remains optimal and is never limited to the depth of field. Furthermore, the light reflected by the painting does not change from one shot to another, thus avoiding slight differences in exposure and specular reflection problems. The planned mosaic of the images involving the horizontal and vertical relocation of the camera (fig. 9) envisages a minimum superimposition of roughly 25% between adjacent frames in order to obtain good quality stitching.

Overall, 270 images were acquired for a total of 106 gigapixel (tab. 1), corresponding to 26.8 gigapixel after their fusion (tab. 2). Having acquired the images, their alignment and three-dimensional fusion was achieved thanks to virtual superimposition performed in three stages:



più immagini per trovare le traslazioni da utilizzare per il loro allineamento; la fusione unisce le varie immagini a formare un'unica immagine.

Per l'applicazione operativa di tale schema sono disponibili due approcci [Nag 2017]:

- il cosiddetto allineamento diretto (*pixel-based*), in cui la maggior parte dei pixel concorda nell'intensità (colore o luminosità) proponendosi di minimizzare la somma delle differenze assolute tra i pixel sovrapposti;
- il cosiddetto allineamento basato su *feature*, tramite corrispondenza tra le caratteristiche geometriche dell'immagine come punti, linee, e contorni.

La soluzione sviluppata (ImageMatcher.app) rientra nella seconda categoria, scelta effettuata per una maggiore affidabilità e velocità di realizzazione con minore onerosità computazionale, e capacità di scoprire automaticamente le relazioni di adiacenza (sovrapposizione) tra un insieme non ordinato di immagini [Szeliski 2022].

Principali caratteristiche dell'applicazione sono:

- a. utilizzo di un nuovo operatore di detezione-descrizione di punti caratteristici ottenuto reimplementando il detettore-descrittore ASIFT (affine SIFT) [Morel, Yu 2009], per il caso di immagini molto ruotate fra loro [Gaiani 2015];
- b. ricerca delle corrispondenze tra le immagini in forma approssimata tramite una organizzazione dei descrittori di un'immagine organizzati in un *KD-tree*, utilizzando l'im-

plementazione della ricerca dei punti omologhi FLANN [Muja, Lowe 2014] calibrata per ridurre l'approssimazione nel caso in oggetto; c. rimozione delle corrispondenze errate tramite la tecnica MSAC (*M-estimator Sample Consensus*) [Torr, Zisserman 1999] più accurata rispetto alla soluzione canonica *Random Sample Consensus* (RANSAC) [Fischler, Bolles 1981];

d. allineamento globale tramite tecniche iterative di *bundle adjustment* al fine di eliminare le mis-registrazioni tra tutte le coppie di immagini, mediante la minimizzazione ai minimi quadrati degli errori di riproiezione dei punti caratteristici [Triggs et al. 2020], garantendo un errore di riproiezione di 0,684 pixel;

e. *image blending* tramite la tecnica di livellamento proposta da Lempitsky e Ivanov e qui reimplementata per immagini *gigapixel* [Lempitsky, Ivanov 2007].

I parametri utilizzati per le mappe colore sono stati utilizzati anche per lo *stitching* delle altre mappe (normali, profondità e riflessione speculare). Il risultato ottenuto con ImageMatcher.app è illustrato in figura 11. Infine, la messa in scala è stata assicurata da una serie di misure realizzate servendosi di un laser scanner Faro Focus 3D X 130 capace di garantire una risoluzione laterale di 2 mm a 10 m e una incertezza di misura della profondità di 0,15 mm.

Le immagini mosaiccate, sia nei termini di albedo sia di normali e mappe di riflessione, sono infine confluite negli *shader multitexture* che modellizzano BRDF e mesostruttura (tab. 2).

Conclusioni

La costruzione del fac-simile digitale dell'*Annunciazione* di San Giovanni Valdarno del Beato Angelico si inserisce nel discorso sui caratteri della disciplina del rilevamento dell'architettura, pur riguardando un dipinto, innanzitutto per motivi intrinseci; in primo luogo la sua conformazione (assimilabile a una microarchitettura) e inoltre per l'ambiente culturale in cui fu realizzata, e con il quale fra Angelico ebbe profondi legami – Lorenzo Ghiberti, Filippo Brunelleschi, Leon Battista Alberti –, che produsse effetti anche nella nuova architettura all'antica che ne realizzava lo scenario e il contesto [Mozo 2019]. Ma il legame consta soprattutto nel metodo con il quale ci si è accostati a questa microarchitettura. La comprensione del dipinto richiede la conoscenza di innumerevoli elementi: misure, dettagli, colori, riflessioni delle superfici, testimonianze dei problemi emersi nel tempo e dello stato di conservazione. Si tratta di caratteri la cui conoscenza è oggi indispensabile anche nella documentazione di un manufatto architettonico ai fini della sua conservazione, ri-progettazione, pianificazione. Un rilievo costituito da un disegno 2D al contorno con poche misure ha una utilità conoscitiva e operativa assai marginale: non aiuta, infatti, a definire la forma, né la qualità dei materiali o delle incrostazioni sovrainposte dal tempo, prestandosi solo a un utilizzo come strumento di contabilizzazione e di visualizzazione di analisi tematiche [Gaiani 2012]. Come ha ben spiegato quasi un quarto di secolo fa Jean-Paul Saint Aubin, quando il digitale era una promessa più che una tecnica effettiva, il rilievo è «uno strumento che cerca di ottenere la figurazione della forma effettiva della costruzione con le mancanze, le irregolarità, le modificazioni, le aggiunte, le eliminazioni, i restauri sovrainposti nel tempo; uno strumento didattico, giacché vuole permettere la comprensione del funzionamento dell'opera nella complessità della sua storia e analizzare i modelli ai quali si riferisce e le innovazioni che introduce; infine uno strumento per conoscere lo stato di salute, la struttura e i suoi cedimenti e cercare la terapia a partire da un documento irrefutabile» [Saint-Aubin 1996, p. 230]. Il metodo proposto in questo scritto cerca di recuperare proprio questi caratteri, oggi spes-

so trascurati, in direzione di forme di conoscenza più complete e più vicine al modo in cui percepiamo ed elaboriamo logicamente gli artefatti che ci circondano.

1. Beato Angelico, *Annunciazione*, 1430-1432 circa, tempera e oro su tavola, 158x188 cm il pannello centrale, 238x234 cm compresa la predella, Museo della basilica di Santa Maria delle Grazie, San Giovanni Valdarno. Cfr. Martini, Pesci, Sacchetti 2019; Michela Martini, Filippo Boni. *Arte e storia: dalla bellezza divina incarnata all'atroce disumanità dell'uomo che si crede Dio*. In Carl Brandon Strehlke (a cura di). *Masaccio e Angelico: dialogo sulla verità nella pittura*. Arezzo: Magonza, 2022.

2. Beato Angelico, *Annunciazione*, 1430-1440 circa, tempera e oro su tavola, 194x154 cm il pannello centrale, 194x194 cm compresa la predella, Museo del Prado, Madrid. Cit. la scheda sul dipinto in Carl Brandon Strehlke (a cura di). *Fra Angelico and the Rise of the Florentine Renaissance*. Madrid: Museo Nacional del Prado, 2019, pp. 158-169.

3. Beato Angelico, *Annunciazione*, 1430-1440 circa, tempera e oro su tavola, 180x175 cm compresa la predella, Museo Diocesano, Cortona.

4. Beato Angelico, *Predella della Pala dell'Annunciazione*, 1430-1440 circa, tempera e oro su tavola, 30x184 cm (16x30 cm ciascuno scomparto), Museo della Basilica di Santa Maria delle Grazie, San Giovanni Valdarno. Cfr. Martini, Pesci, Sacchetti 2019; Martini, Boni, *Arte e storia*, cit.

5. Mostra a cura di Carl Brandon Strehlke, Michela Martini, Daniela Parenti, e Valentina Zucchi, San Giovanni Valdarno, Museo delle Terre Nuove e Museo della basilica di Santa Maria delle Grazie, 17 settembre 2022 - 15 gennaio 2023.

6. L'aspetto è definito quindi qui come la struttura ottica fisica e oggettiva a cui un materiale conduce sotto una certa illuminazione. Cfr. Happa et al. 2012.

7. Come in *Google Arts & Culture* (<<https://artsandculture.google.com/>>) o nel progetto "Operation Night Watch", del Rijksmuseum, incentrato sul dipinto *La ronda di notte* di Rembrandt (<<https://www.rijksmuseum.nl/en/whats-on/exhibitions/operation-night-watch>> [giugno 2023].

8. Sugli RTI cfr. Malzbender, Gelb, Wolters 2001; Castro et al. 2022; Duffy, Jones, Backhouse 2013.

9. Le immagini multispettrali sono una raccolta di immagini relative allo stesso oggetto o scene, acquisite in diverse bande spettrali, generalmente contigue, dello spettro visibile (o quasi visibile).

- alignment and fusion of the images using an image stitching technique, more extensively illustrated below;

- alignment and fusion of the mesh of the mesostructure obtained from the photometric stereo of each station using the algorithm of Iterative Closest Point for the alignment [Bergström, Edlund 2017], and the volumetric technique based on the well-known algorithm Marching Cubes for the fusion [Curless, Levoy 1996];

- alignment of the images with the 3D mesh, a typical problem of image-to-geometry registration [Pintus et al. 2017] executed by exploiting registration methods on a statistical basis based on reciprocal 2D/3D information (Mutual Information) [Corsini et al. 2009] (fig. 10).

The mosaicking process of the acquired images is similar to the traditional stitching process and involves three main steps: calibration of the image, registration of the image, and fusion of the images. Calibration of the image produces an estimate of the intrinsic and extrinsic parameters of the camera; registration of the images compares multiple images to find the transfers needed for their alignment; fusion unites the images to create a single image.

Two approaches can be used to operatively apply this process [Nag 2017]:

- the so-called direct alignment (pixel-based) in which most of the pixels have the same intensity (colour or luminosity); the objective is to minimise the sum of the absolute differences between the superimposed pixels;

- the so-called alignment based on features, achieved through correspondence between the geometric characteristics of the image such as points, lines and outlines.

The solution that was developed (ImageMatcher.app) falls into the second group; it was chosen so as to achieve greater reliability and speed of realisation with a less computational burden; it also has the ability to automatically pinpoint the adjacency relation (superimposition) between an unsorted ensemble of images [Szeliski 2022].

The main characteristics of the application are: a. use of a new operator of detection-description of the characteristic points obtained by

10/ Schema di registrazione image-to-geometry servendosi di tecniche su base statistica applicate alle informazioni reciproche 2D/3D tra superfici e immagini (Mutual Information).

Image-to-geometry registration scheme on a statistical basis performed on mutual 2D/3D information exchange between surfaces and images (Mutual Information).

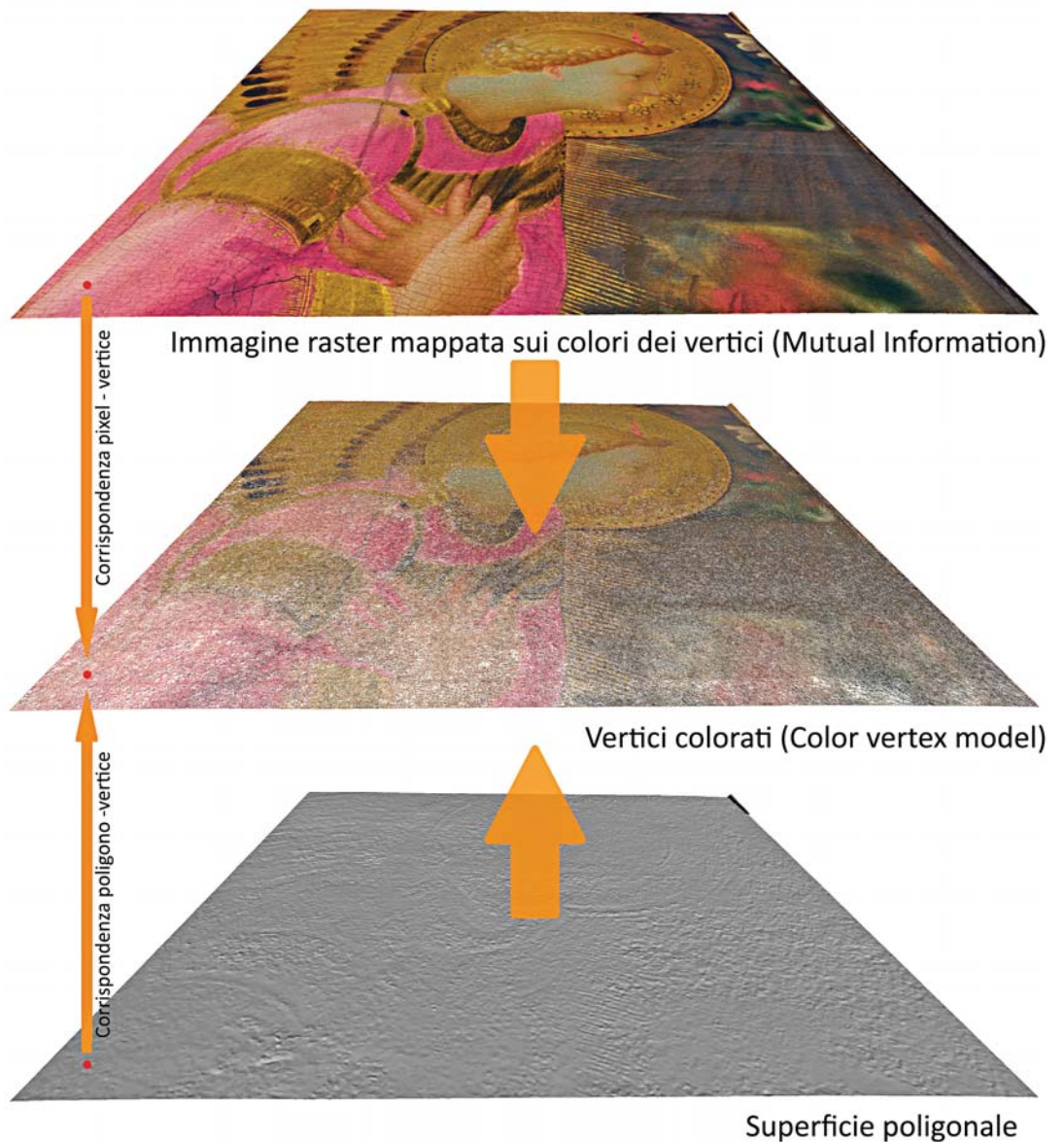
re-implementing the detector-descriptor ASIFT (affine SIFT) [Morel, Yu 2009], applied to images that are extremely rotated on themselves [Gaiani 2015];
 b. search for the correspondences between images in an approximate form by organising the descriptors of an image arranged in a KD-tree, using the implementation of the search for the homologous points FLANN [Muja, Lowe 2014] calibrated to reduce their approximation in the case in question;
 c. removal of the incorrect correspondences using the MSAC technique (M-estimator Sample Consensus) [Torr, Zisserman 1999] which is more accurate compared to the canonical Random Sample Consensus (RANSAC) solution [Fischler, Bolles 1981];
 d. global alignment using iterative bundle adjustment techniques so as to eliminate the incorrect registrations between all the pairs of images; this is achieved by minimising to the minimum squares of the reprojection errors of the characteristic points [Triggs et al. 2020], ensuring a reprojection error of 0.684 pixel;
 e. image blending using the levelling technique proposed by Lempitsky and Ivanov and re-implemented here for gigapixel images [Lempitsky, Ivanov 2007].

The parameters used for the colour maps were also used for the stitching of the other maps (normal, depth and specular reflection). The result obtained with the ImageMatcher.app is illustrated in figure 11. Finally, scale was guaranteed by a series of measurements taken using a Faro Focus 3D X 130 laser scanner that ensured a lateral resolution of 2 mm at 10 m and an uncertain measurement of the depth of 0.15 mm.

The mosaicked images, in terms of albedo, normal and reflection maps, were finally introduced into the multitexture shaders that model the BRDF and mesostructure (tab. 2).

Conclusions

The construction of the digital facsimile of the Annunciation by Fra Angelico in San Giovanni Valdarno is part of the debate on the features of the discipline of architectural survey, even though it involves a painting, primarily for intrinsic reasons. First and foremost, its conformation (similar



10. Sull'analisi multispettrale dei dipinti accoppiata con quella tridimensionale a base digitale cfr. Remondino et al. 2011.

11. Come ritiene Magnolia Scudieri [Martini, Pesci, Sacchetti 2019, pp. 40-47].

12. La colonna al centro ha anche lo scopo di separare la zona dell'angelo da quella della Vergine per ribadire che l'Incarnazione avviene per azione dello Spirito Santo, senza alcun contatto fisico.

13. Queste due fasi di esecuzione della tavola sarebbero testimoniate dalla presenza sulla parete destra di due archi ciechi e anche dagli archi nascosti, ma visibili a luce radente, sulla parete di fondo, poi non del tutto cancellati nella nuova più ricca versione dipinta a riquadri marmorei sfumati.

14. CIE (Commission Internationale de l'Eclairage) 175:2006 report. A framework for the measurement of visual appearance. Vienna 2006. Sull'aspetto dei materiali dei dipinti cfr. Van Zuijlen, Pont, Wijntjes 2020.

15. La BRDF [Nicodemus 1965] è una grandezza che misura la porzione di luce che la superficie riflette in

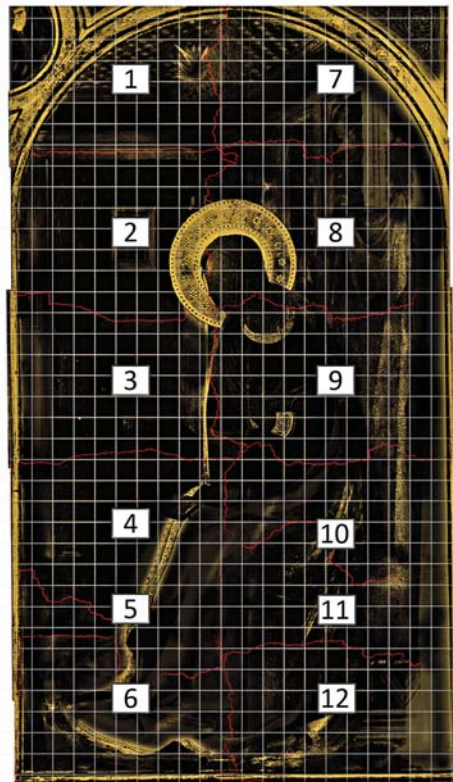
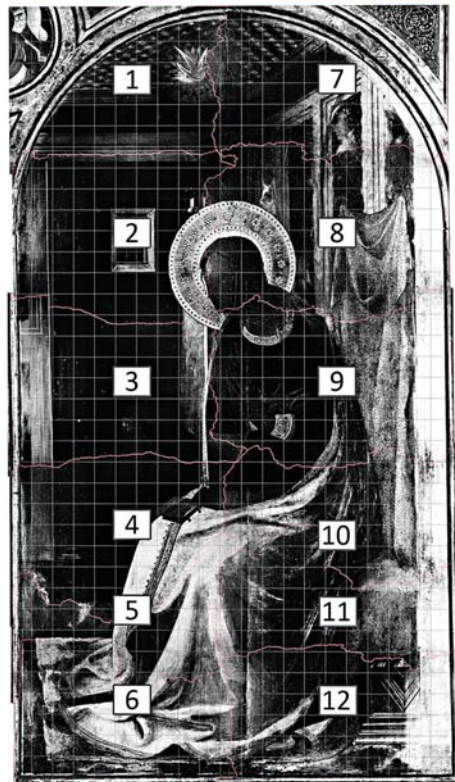
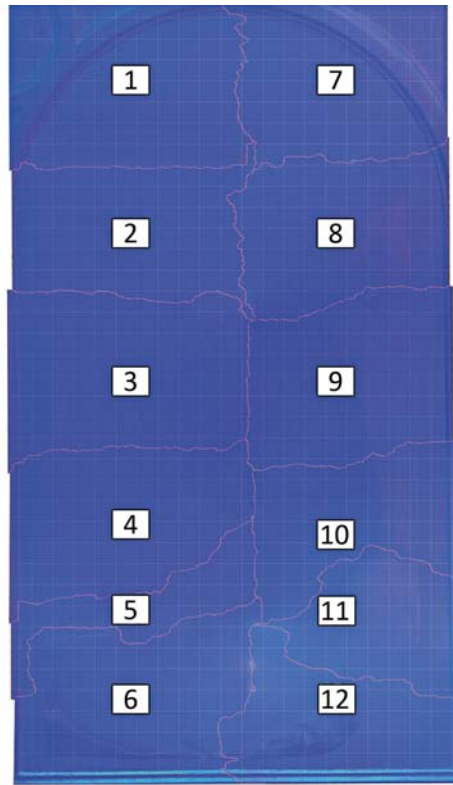
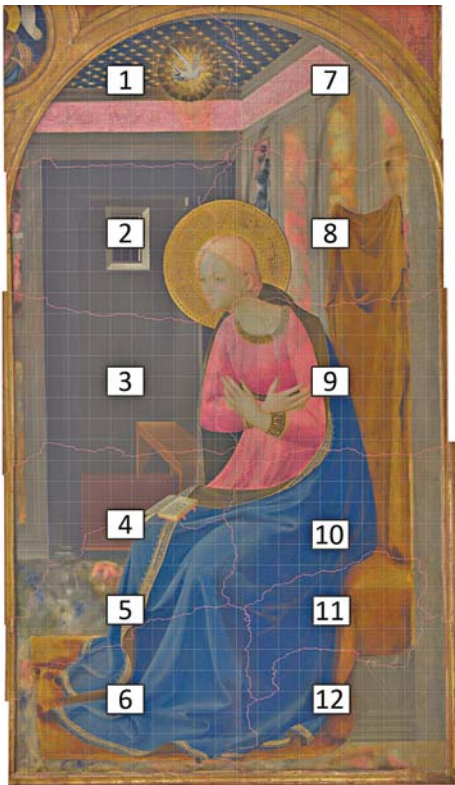
ogni direzione in funzione della luce ivi incidente. Sulla BRDF cfr. ad esempio: Dorsey, Rushmeier, Sillion 2008; Guarnera et al. 2016.

16. La risoluzione di campionamento è quella implicita dal campionamento del file immagine. Se espressa in pixel, l'intervallo di campionamento è di un pixel, e nell'intervallo di misura è misurabile in ppi (pixel per inch). La risoluzione effettiva è stata valutata tramite la Modulation Transfer Function (MTF) di sistema, una misura di quanto un dispositivo o sistema di imaging possa riprodurre accuratamente una scena, codificato dalla norma ISO 12233:2017 (<<https://www.iso.org/standard/71696.html>> [giugno 2023]). In particolare, si sono valutati l'MTF10, capace di valutare la risoluzione massima e MTF50, che indica la nitidezza dell'immagine. Sulla misurazione dell'MTF, cfr. Peter D. Burns. Slanted-Edge MTF for Digital Camera and Scanner Analysis. *Imaging Science and Technology's 2000 PICS Conference: Image Processing, Image Quality, Image Capture, Systems Conference*, 2000, pp. 135-138.

17. Questa distanza ha portato a una densità di campionamento di 1.371 pixel/inch, misurata secondo la classica formula con cui si misura anche la *Ground Sample Distance* fotogrammetrica.

11/ La mosaicatura delle immagini della porzione di destra dell'Annunciazione, per ottenere le mappe destinate allo shader finale.

The mosaicking of the images of the right portion of the Annunciation in order to obtain the maps for the final shader.



to a micro-architecture) and the cultural environment in which it was produced, an environment with which Fra Angelico had very close ties – Lorenzo Ghiberti, Filippo Brunelleschi, Leon Battista Alberti. This also produced effects in the new ancient-style architecture of the scenario and context [Mozo 2019].

However the link lies above all in the method with which we approached this micro-architecture. Countless elements have to be known in order to understand the painting: measurements, details, colours, reflections of the surfaces, evidence of the problems that have emerged over the years, and state of conservation. Being familiar with these features is currently crucial, especially when documenting an old architectural artefact for the purposes of its conservation, re-design and planning. A survey based on a 2D drawing of the outline with just a few measurements provides only marginal knowledge and operational data: it does not, in fact, help to define its form, the quality of the materials or the incrustations superimposed by time; it can only be used as an instrument to record and visualise thematic analyses [Gaiani 2012].

As explained so eloquently by Jean-Paul Saint Aubin twenty-five years ago, when digital technology was more of a promise than a real technique, survey is “a tool that tries to obtain the figuration of the real form of the construction with the missing parts, irregularities, alterations, additions, eliminations, and restorations superimposed over the years; a didactic tool, since it wishes to permit comprehension of the way the artefact functioned throughout its history and analyse the models to which it refers and the innovations it introduces; finally it is a tool to understand its state of health, its structure and where it has collapsed in order to try to find a therapy based on an irrefutable document” [Saint-Aubin 1996, p. 230].

The method proposed here attempts to recover these features, often neglected in this day and age, in order to gather more complete forms of knowledge, closer to the way in which we perceive and logically process the artefacts around us.

1. *Fra Angelico*, Annunciation, circa 1430-1432, tempera and gold on panel, 158x188 cm the central panel, 238x234 cm including the predella, Museum of the Basilica of Santa Maria delle Grazie, San Giovanni Valdarno. Cfr. Martini, Pesci, Sacchetti 2019; Michela Martini, Filippo Boni. *Arte e storia: dalla bellezza divina incarnata all'atroce disumanità dell'uomo che si crede Dio*. In Carl Brandon Strehlke (ed.). *Masaccio e Angelico: dialogo sulla verità nella pittura*. Arezzo: Magonza, 2022.

2. *Fra Angelico*, Annunciation, circa 1430-1440, tempera and gold on panel, 194x154 cm the central panel, 194x194 cm including the predella, Prado Museum, Madrid. Cit. technical sheets about the painting in Carl Brandon Strehlke (ed.). *Fra Angelico and the Rise of the Florentine Renaissance*. Madrid: Museo Nacional del Prado, 2019, pp. 158-169.

3. *Fra Angelico*, Annunciation, circa 1430-1440, tempera and gold on panel, 180x175 cm including the predella, Diocesan Museum, Cortona.

4. *Fra Angelico*, Predella of the Altarpiece of the Annunciation, circa 1430-1440, tempera and gold on panel, 30x184 cm (16x30 cm each division), Museum of the Basilica of Santa Maria delle Grazie, San Giovanni Valdarno. Cfr. Martini, Pesci, Sacchetti 2019; Martini, Boni, *Arte e storia*, cit.

5. Exhibition curated by Carl Brandon Strehlke, Michela Martini, Daniela Parenti, and Valentina Zucchi, San Giovanni Valdarno, Museum of the Terre Nuove and Museum of the Basilica di Santa Maria delle Grazie, 17 September 2022 - 15 January 2023.

6. The appearance is therefore defined here as the physical and objective optical structure produced by a material under certain light conditions. Cfr. Happa et al. 2012.

7. As in Google Arts & Culture (<<https://artsandculture.google.com/>>) or the project 'Operation Night Watch', by the Rijksmuseum, focusing on the painting entitled *The Night Watch by Rembrandt* (<<https://www.rijksmuseum.nl/en/whats-on/next-exhibitions/operation-night-watch>> [June 2023]).

8. Regarding the RTI, cfr. Malzbender, Gelb, Wolters 2001; Castro et al. 2022; Duffy, Jones, Backhouse 2013.

9. Multispectral images are a collection of images of the same object or scenes, acquired in different and generally adjacent spectral bands of the visible (or almost visible) spectrum.

10. Regarding the multispectral analysis of the paintings paired with the digital three-dimensional analysis, cfr. Remondino et al. 2011.

11. As proposed by Magnolia Scudieri (Martini, Pesci, Sacchetti 2019, pp. 40-47).

12. The column in the centre also separates the area occupied by the Angel from the area with the Virgin in order to stress that the Incarnation occurred thanks to the Holy Spirit, without any physical contact.

13. Evidence of the two execution phases comes from the presence on the right wall of two blind arches and also several hidden arches (visible using sidelight) on the rear

wall, and not completely eliminated in the new, more embellished version painted with nuanced marble squares.

14. CIE (Commission Internationale de l'Eclairage) 175:2006 report. A framework for the measurement of visual appearance. Vienna 2006. Regarding the appearance of the materials of the paintings, cfr. Van Zuijlen, Pont, Wijntjes 2020.

15. The BRDF (Nicodemus 1965) measures the amount of light that the surface reflects in every direction depending on the incident light. Regarding BRDF cfr. for example: Dorsey, Rushmeier, Sillion 2008; Guarnera et al. 2016.

16. The resolution of the sample is implicit in the sample of the image file. If expressed in pixel, the sample interval is one pixel, and in the measurement interval is measurable in ppi (pixel per inch). The real resolution was assessed using the Modulation Transfer Function (MTF), a measurement of the degree to which a device or imaging system can accurately reproduce a scene, codified by ISO 12233:2017 (<<https://www.iso.org/standard/71696.html>> [June 2023]). In particular, we assessed MTF10, capable of evaluating the maximum resolution, and MTF50, indicating the sharpness of the image. Regarding the measurement of the MTF, cfr. Peter D. Burns. *Slanted-Edge MTF for Digital Camera and Scanner Analysis*. Imaging Science and Technology's 2000 PICS Conference: Image Processing, Image Quality, Image Capture, Systems Conference, 2000, pp. 135-138.

17. This led to a sample density of 1,371 pixel/inch, measured according to the classical formula with which one also measures the photogrammetric Ground Sample Distance.

References

- Anderson 2011 = Barton L. Anderson. Visual perception of materials and surfaces. *Current Biology*, 21, 24, 2011, pp. R978-R983. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cub.2011.11.022>.
- Apollonio et al. 2021 = Fabrizio Ivan Apollonio, Riccardo Foschi, Marco Gaiani, Simone Garagnani. 2021. How to Analyze, Preserve, and Communicate Leonardo's Drawing? A Solution to Visualize in RTR Fine Art Graphics Established from "the Best Sense". *Journal on Computing and Cultural Heritage*, 14, 3, 2021, art: 36, pp. 1-30. <<https://doi.org/10.1145/3433606>>.
- Bergström, Edlund 2017 = Per Bergström, Ove Edlund. Robust registration of surfaces using a refined iterative closest point algorithm with a trust region approach. *Numerical Algorithms*, 74, 2017, pp. 755-779. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11075-016-0170-3>.
- Berns 2001 = Roy S. Berns. The Science of Digitizing Paintings for Color-Accurate Image Archives: A Review. *Journal of Imaging Science and Technology*, 45, 4, 2001, pp. 305-325.
- Berns 2015 = Roy S. Berns. *Scientific Imaging of Cultural Heritage: Minimizing visual editing and relighting* 2+3D Photography Practice and Prophecies, 2015.
- Berns et al. 2012 = Roy S. Berns, Tongbo Chen, David R. Wyble, Lin Chen. Update: Practical Total Appearance Imaging of Paintings. In *Proceedings IS&T Archiving (Copenhagen, Denmark, 2012)*. USA: Society of Imaging Science and Technology, vol. 9, art: 36, 2012, pp. 162-167. DOI: <https://doi.org/10.2352/issn>.
- Cabezos-Bernal, Rodriguez-Navarro, Gil-Piqueras 2021 = Pedro M. Cabezos-Bernal, Pablo Rodriguez-Navarro, Teresa Gil-Piqueras. Documenting paintings using Gigapixel SfM Photogrammetry. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 28th CIPA Symposium "Great Learning & Digital Emotion", 28 August-1 September 2021, Beijing, China, XLVI-M-1-2021, pp. 93-100. ISSN: 2194-9034. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVI-M-1-2021-93-2021>.
- Castro et al. 2022 = Yuly Castro, Amalia Siatou, Mattieu Rossé, Hermine Chatoux, Ramamoorthy Luxman, Gaëtan Le Goïc, Alamin Mansouri. Extended Framework for Multispectral RTI. *Archiving Conference*, 19, 2022, pp. 56-61. DOI: <https://doi.org/10.2352/issn.2168-3204.2022.19.1.12>.
- Cook, Torrance 1982 = Robert L. Cook, Kenneth E. Torrance. A reflectance model for computer graphics. *ACM Transactions on Graphics*, 1, 1, 1982, pp. 7-24. ISSN: 0730-0301. DOI: <https://doi.org/10.1145/357290.357293>.
- Corsini et al. 2009 = Corsini Massimiliano, Dellepiane Matteo, Ponchio Federico, Scopigno Roberto. 2009. Image-to-Geometry Registration: a Mutual Information Method exploiting Illumination-related Geometric Properties. *Computer Graphics Forum*, 28, 7, 2009, pp. 1755-1764.
- Curless, Levoy 1996 = Brian Curless, Marc Levoy. A volumetric method for building complex models from range images. In *Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH '96)*. New York: ACM Press, 1996, pp. 303-312. ISBN: 0897917464. DOI: <https://doi.org/10.1145/237170.237269>.
- Didi Huberman 2009 = Georges Didi Huberman. *Beato Angelico. Figure del dissimile*. Milano: Abscondita, 2009. ISBN: 8884161703.
- Dorsey, Rushmeier, Sillion 2008 = Julie Dorsey, Holly Rushmeier, François Sillion. *Digital Modeling of Material Appearance*. USA: Morgan Kaufmann Books - Elsevier, 2008. ISBN: 9780122211812. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-221181-2.X5001-0>.

-
- Duffy, Jones, Backhouse 2013 = Sarah M. Duffy, David Jones, Paul Backhouse. *Multi-light imaging for heritage applications*. London UK: English Heritage, 2013 (seconda edizione: Duffy Sarah M. 2018. *Multi-light Imaging. Highlight-Reflectance Transformation Imaging (H-RTI) for Cultural Heritage*. Swindon: Historic England, 2018. <<https://historicengland.org.uk/images-books/publications/multi-light-imaging-heritage-applications/heag069-multi-light-imaging/>> [giugno 2023].
 - Fischler, Bolles 1981 = Martin A. Fischler, Robert C. Bolles. Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography. *Communications of the ACM*, 24, 6, 1981, pp. 381-395. ISSN: 0001-0782. DOI: <https://doi.org/10.1145/358669.358692>.
 - Gaiani 2012 = Marco Gaiani. Per una revisione critica della teoria del rilievo dopo l'avvento dei mezzi digitali. In Laura Carlevaris, Monica Filippa. *Elogio della teoria. Identità delle discipline del disegno e del rilievo. 34. Convegno internazionale dei docenti della rappresentazione*. Roma: Gangemi Editore, 2012, pp. 375-382. ISBN: 9788849225198.
 - Gaiani 2015 = Marco Gaiani (a cura di). *I portici di Bologna Architettura, Modelli 3D e ricerche tecnologiche*. Bologna: Bononia University Press, 2015.
 - Gaiani, Apollonio 2019 = Marco Gaiani, Fabrizio Ivan Apollonio. Under the lens of ISLE: Leonardo da Vinci's "Landscape" drawing analysed by colourimetry. *Cultura e Scienza del Colore - Color Culture and Science*, 11, 2, 2019, pp. 73-81. DOI: <https://doi.org/10.23738/CCSJ.110208>.
 - Gaiani, Apollonio, Clini 2015 = Marco Gaiani, Fabrizio Ivan Apollonio, Paolo Clini. Innovative approach to the digital documentation and rendering of the total appearance of fine drawings and its validation on Leonardo's Vitruvian Man. *Journal of Cultural Heritage*, 16, 6, 2015, pp. 805-812. ISSN: 1296-2074. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.culher.2015.04.003>.
 - Gaiani, Ballabeni 2018 = Marco Gaiani, Andrea Ballabeni. SHAFT (SAT & HUE Adaptive Fine Tuning), a new automated solution for target-based color correction. In Veronica Marchiafava, Lia Luzzatto. *Colour and Colorimetry Multidisciplinary Contributions*. Milano: Gruppo del Colore - Associazione Italiana Colore, 2018, vol. XIVB, pp. 69-80. ISBN: 9788899513092.
 - Guarnera et al. 2016 = Darya Guarnera, Claudio Guarnera, Abhijeet Ghosh, Cornelia Denk, Mashhuda Glencross. BRDF Representation and Acquisition. *Computer Graphics Forum*, 35, 2, 2016, pp. 625-650. ISSN:1467-8659. DOI: <https://doi.org/10.1111/cgf.12867>.
 - Happa et al. 2012 = Jassim Happa, Tom Bashford-Rogers, Alexander Wilkie, Alessandro Artusi, Kurt Debattista, Alan Chalmers. Cultural Heritage Predictive Rendering. *Computer Graphics Forum*, 31, 6, 2012, pp. 1823-1836. ISSN:1467-8659. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1467-8659.2012.02098.x>.
 - Horn 1975 = Klaus Paul Berthold Horn. Obtaining shape from shading information. In Patrick Henry Winston (a cura di). *The Psychology of Computer Vision*, New York: McGraw-Hill, 1975, pp. 115-155. ISBN: 9780070710481.
 - Lempitsky, Ivanov 2007 = Victor Lempitsky, Denis Ivanov. Seamless Mosaicing of Image-Based Texture Maps. In *2007 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2007, pp. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1109/CVPR.2007.383078>.
 - Maitre et al. 1996 = Henri Maitre, Francis J.M. Schmitt, Jean-Pierre Crettez, Yifeng Wu, Jon Yngve Hardeberg. Spectrophotometric Image Analysis of Fine Art Paintings. In *International Conference on Communications in Computing (1996)*, The Fourth Color Imaging Conference: Color Science, Systems and Applications, 1996, pp. 50-53.
 - Malzbender, Gelb, Wolters 2001 = Thomas Malzbender, D. Gelb, H.J. Wolters. Polynomial texture maps. In *Proceedings of the ACM SIGGRAPH Conference on Computer Graphics*, 2001, pp. 519-528. DOI: <https://doi.org/10.1145/383259.383320>.
 - Martinez, Cupitt, Saunders 1993 = Kirk Martinez, John Cupitt, David R. Saunders. High-resolution colorimetric imaging of paintings. In Helen Marz, Robert L. Nielsen. *Proceedings of SPIE 1901, Cameras, Scanners, and Image Acquisition Systems*, 1, 1993, pp. 25-36. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.144795>.
 - Martini, Pesci, Sacchetti 2019 = Michela Martini, Lorenzo Pesci, Lucia Sacchetti. *Museo della Basilica di Santa Maria delle Grazie a San Giovanni Valdarno: pittura e scultura, arredi sacri, paramenti liturgici*. Firenze: Polistampa, 2019. ISBN: 8859619688.
 - Morel, Yu 2009 = Jean-Michel Morel, Guoshen Yu. ASIFT: A new framework for fully affine invariant comparison. *SIAM Journal on Imaging Sciences*, 2, 2, 2009, pp. 438-469. DOI: <https://doi.org/10.1137/080732730>.
 - Mozo 2019 = Ana González Mozo. Strategies for Depicting Sacred Stories. In Carl Brandon Strehlke. *Fra Angelico and the Rise of the Florentine Renaissance*. Madrid: Museo Nacional del Prado, 2019, pp. 57-77. ISBN: 9788484805298.
 - Muja, Lowe 2014 = Marius Muja, David G. Lowe. Scalable Nearest Neighbor Algorithms for High Dimensional Data. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 36, 11, 2014, pp. 2227-2240. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2014.2321376>.
 - Nag 2017 = Sayan Nag. Image Registration Techniques: A Survey. *ArXiv abs/1712.07540*, 2017. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1712.07540>.
 - Nicodemus 1965 = Fred E. Nicodemus. Directional Reflectance and Emissivity of an Opaque Surface. *Applied Optics*, 4, 7, 1965, pp. 767-775. DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.4.000767>.
 - Okatani, Deguchi 2001 = Takayuki Okatani, Koichiro Deguchi. On Uniqueness of Solutions of the Three-Light-Source Photometric Stereo: Conditions on Illumination Configuration and Surface Reflectance. *Computer Vision and Image Understanding*, 81, 2, 2001, pp. 211-226. ISSN: 1077-3142. DOI: <https://doi.org/10.1006/cviu.2000.0887>.
 - Pintus et al. 2017 = Ruggero Pintus, Enrico Gobetti, Marco Callieri, Matteo Dellepiane. Techniques for Seamless Color Registration and Mapping on Dense 3D Models. In Nicola Masini, Francesco Soldovieri (a cura di). *Sensing the Past. Geotechnologies and the Environment*. Cham: Springer, 2017, vol. 16, pp. 355-376. ISBN: 9783319505183. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-50518-3_17.
 - Remondino et al. 2011 = Fabio Remondino, Alessandro Rizzi, Luigi Barazzetti, Marco Scaioni, Francesco Fassi, Raffaella Brumana, Anna Pelagotti. Review of Geometric and Radiometric Analyses of Paintings. *The Photogrammetric Record*, 26, 136, 2011, pp. 439-461. ISSN:1477-9730. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.2011.00664.x>.
 - Saint-Aubin 1996 = Saint-Aubin Jean-Paul. Sur le relevé d'architecture: son héritage et ses métamorphoses actuelles. *TEMA*, 3/1996. Milano: Franco Angeli, 1996.
 - Strehlke 2005 = Carl Brandon Strehlke. Fra Angelico: a Florentine painter in "Roma Felix". In Laurence B. Kanter, Pia Palladino. *Fra Angelico*. New York Metropolitan Museum of Art, 2005, pp. 203-214. ISBN: 9780300111408.
 - Szeliski 2022 = Richard Szeliski. *Computer Vision: Algorithms and Applications*. New York: Springer, 2022, 2nd edition.
 - Torr, Zisserman 2000 = Philip H.S. Torr, Andrew P. Zisserman. MLESAC: A New Robust Estimator With Application to Estimating Image Geometry. *Computer Vision and Image Understanding*, 78, 1, 2000, pp. 138-156. ISSN: 1077-3142. DOI: <https://doi.org/10.1006/cviu.1999.0832>.
 - Triggs et al. 2000 = Bill Triggs, Philip F. McLauchlan, Richard I. Hartley, Andrew W. Fitzgibbon. Bundle Adjustment. A Modern Synthesis. In Bill Triggs, Andrew Zisserman, Richard Szeliski (a cura di). *Vision Algorithms: Theory and Practice. IWVA 1999. Lecture Notes in Computer Science vol. 1883*. Berlin: Springer, 2000, pp. 298-372. ISBN: 9783540-444800. DOI: https://doi.org/10.1007/3-540-44480-7_21.
 - Van Zuijlen, Pont, Wijntjes 2020 = Mitchell J. P. Van Zuijlen, Sylvia C. Pont, Maarten W.A. Wijntje. Painterly depiction of material properties. *Journal of Vision*, 20, 7, art: 7, pp. 1-17. DOI: <https://doi.org/10.1167/jov.20.7.7>.
 - Ying 2023 = Xiong Ying. PSBox <<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/45250-psbox>>, MATLAB Central File Exchange [giugno 2023].
 - Woodham 1980 = Robert J. Woodham. Photometric Method for determining surface orientation from multiple images. *Optical Engineering*, 19, 1, 1980, pp. 139-144.

La rivista è inclusa nella Web of Science Core Collection (Clarivate Analytics), dove è indicizzata nell'Arts & Humanities Citation Index e nel database di Scopus dove sono presenti gli abstract dei contributi.

La selezione degli articoli per *Disegnare. Idee Immagini* prevede la procedura di revisione e valutazione da parte di un comitato di referee (*blind peer review*); ogni contributo viene sottoposto all'attenzione di almeno due revisori, scelti in base alle loro specifiche competenze. I nomi dei revisori sono resi noti ogni anno nel numero di dicembre.

The journal has been selected for coverage in the Web of Science Core Collection (Clarivate Analytics); it is indexed in the Arts & Humanities Citation Index and abstracted in the Scopus database.

The articles published in Disegnare. Idee Immagini are examined and assessed by a blind peer review; each article is examined by at least two referees, chosen according to their specific field of competence.

The names of the referees are published every year in the December issue of the journal.

Gli autori di questo numero *Authors published in this issue*

Fabrizio Ivan Apollonio

*Dipartimento di Architettura
Alma Mater Studiorum - Università di Bologna
via Risorgimento, 2
40136 Bologna, Italia
fabrizio.apollonio@unibo.it*

Carlo Bianchini

*Dipartimento di Storia, disegno e restauro dell'architettura
Sapienza Università di Roma
piazza Borghese, 9
00186 Roma, Italia
carlo.bianchini@uniroma1.it*

Livio De Luca

*UMR CNRS/MCC MAP (Modèles et simulations
pour l'Architecture et le Patrimoine)
Campus du CNRS (Batiment US)
31, chemin Joseph Aiguier
13402 Marseille cedex 20, Francia
livio.deluca@map.cnrs.fr*

Marco Gaiani

*Dipartimento di Architettura
Alma Mater Studiorum - Università di Bologna
via Risorgimento, 2
40136 Bologna, Italia
marco.gaiani@unibo.it*

Simone Garagnani

*Dipartimento di Studi Umanistici
Università degli Studi di Urbino Carlo Bo
via Bramante, 17
61029 Urbino, Italia
simone.garagnani@uniurb.it*

Michela Martini

*Museo Basilica di Santa Maria delle Grazie
piazza Masaccio, 8
52027 San Giovanni Valdarno (AR), Italia
michelamartini29@gmail.com*

Riccardo Migliari

*Dipartimento di Storia, disegno e restauro dell'architettura
Sapienza Università di Roma
piazza Borghese, 9
00186 Roma, Italia
riccardo.migliari@uniroma1.it*

Douglas Pritchard

*Scott Sutherland School of Architecture
Robert Gordon University
Garthdee House, Garthdee Road
Aberdeen, AB10 7QB, Scozia
d.pritchard1@rgu.ac.uk*

Guendalina Salimei

*Dipartimento Architettura e Progetto
Sapienza Università di Roma
via Flaminia, 359
00196 Roma, Italia
guendalina.salimei@uniroma1.it*

Carl Brandon Strehlke

*Philadelphia Museum of Art
2600 Benjamin Franklin Parkway
Philadelphia, PA 19130, Stati Uniti
sherbornmass@gmail.com*

Guendalina Salimei
Il segno e lo schizzo
The sign and the sketch

Livio De Luca
Un ecosistema digitale per lo studio
interdisciplinare di Notre-Dame de Paris
*A digital ecosystem for the interdisciplinary study
of Notre-Dame de Paris*

Fabrizio Ivan Apollonio, Marco Gaiani,
Simone Garagnani, Michela Martini,
Carl Brandon Strehlke
Misurare e restituire l'Annunciazione
di San Giovanni Valdarno del Beato Angelico
*Measurement and restitution of the Annunciation
by Fra Angelico in San Giovanni Valdarno*

Douglas Pritchard
Intersezioni tra tecnologia, comunicazione
grafica e rappresentazione del patrimonio
culturale
*The intersection of technology, graphic
communication, and cultural heritage
representation*

Riccardo Migliari
Max Kleiber *Perspektivikus*
Max Kleiber *Perspektivikus*

Riccardo Migliari
Nostalgia ed emozione del disegno
The nostalgia and emotion of drawing

Carlo Bianchini
Metamodellazione
Metamodelling



WORLDWIDE DISTRIBUTION
AND DIGITAL VERSION
EBOOK
AMAZON, APPLE, ANDROID
WWW.GANGEMEDITORE.IT

ISSN 1123-9247
30066
ISBN 978-884925068-6
9 771123 924009
9 788849 250688