

La misura del dettaglio

Sara Antinozzi

Abstract

Il concetto di misura stabilisce il legame tra la realtà e la sua rappresentazione. In tal senso, l'aspetto metrologico dei prodotti grafici è determinante nella scelta delle risorse da impiegare per il raggiungimento di obiettivi specifici. Specialmente in condizioni limite, come attività di rilievo fotogrammetrico a grandissima scala, è necessaria una quantificazione delle variabili che entrano in gioco nei processi di acquisizione. Ciò permette di (com)misurare le fasi di cattura e di restituzione, finalizzandole alla raccolta di un numero maggiore di dati – e a una scala più grande – con accuratezze adeguate e verificabili. Questi aspetti conducono a una disamina dei sensori e delle ottiche vagliabili per gli scopi mensurati accennati, da abbinare a sistemi di acquisizione progettati ad hoc. Sono, così, confrontati all'interno di un originale set di acquisizione fotocamere reflex con ottiche macro e dispositivi più innovativi, quali i microscopi digitali USB. Il fine è quello di misurare le capacità di questi strumenti non prettamente progettati per l'utilizzo fotogrammetrico, grazie all'ideazione di complementi innovativi e alla formalizzazione di pratiche di rilievo accessibili che, specialmente per piccoli oggetti, rimangono comunque limitatamente affrontate.

Parole chiave

Fotogrammetria very close-range, microscopi digitali USB, ottiche macro.



Configurazioni
 fotogrammetriche
 "macro" e "micro" per la
 rappresentazione digitale
 di dettaglio. Elaborazione
 dell'autore.

Sistemi fotogrammetrici “macro” e “micro”

Tra gli strumenti di misura e rappresentazione avanzata per ricostruzioni a risoluzione micrometrica, la fotogrammetria *very close-range* [Yanagi, Chikatsu 2010, pp. 617-622] costituisce un approccio flessibile, specialmente per l'interdisciplinarietà propria del settore del Disegno. A tale riguardo, da alcuni anni si sta approfondendo la possibilità di restituire modelli tridimensionali dettagliati attraverso tecniche *Structure from Motion* (SfM) da immagini acquisite con microscopi digitali USB: dispositivi nati con lo scopo di rappresentare dettagli difficilmente percepibili a occhio nudo. Difatti, è stato dimostrato che questi strumenti possono essere impiegati con successo nel *3D imaging* [Esmaeili, Ebadi 2017, pp. 65-67], configurandosi come alternative competitive a strumentazioni ormai consolidate nel campo della fotogrammetria caratterizzata da elevati ingrandimenti [Arrianza et al. 2017, pp. 103-112; Mate-González et al. 2019, pp. 4-15]. Tra queste ultime, trovano largo impiego camere fotografiche con sensori *full-frame* e ottiche macro che, specifiche per la ripresa estremamente ravvicinata, consentono un “rapporto di riproduzione” elevato, una “distanza minima di messa a fuoco” tipicamente breve, un eccezionale controllo delle aberrazioni ottiche e maggiore stabilità e precisione.

Nella letteratura che affronta l'acquisizione fotogrammetrica di piccoli oggetti si assiste all'adozione – e all'ideazione – di sistemi di cattura complessi [Collins et al. 2019, pp. 1441-1458; De Paolis et al. 2020, pp. 375-394], le cui componenti lavorano simbioticamente per garantire risoluzione e accuratezza elevate (rispettivamente centesimi e decimi di millimetro). Infatti, l'utilizzo di accessori specifici, progettati caso per caso, offre un controllo più ampio del processo fotogrammetrico, consentendo migliori risultati per sistemi ottici meno avanzati, ovvero per strumenti che, pur mantenendo una discreta qualità del segnale – specialmente in relazione a dimensione e tecnologia del sensore – normalmente non riuscirebbero a garantire restituzioni tridimensionali sufficientemente valide. L'analisi comparativa tra ottiche macro professionali e quelle compatte integrate nei microscopi digitali USB, rispettivamente

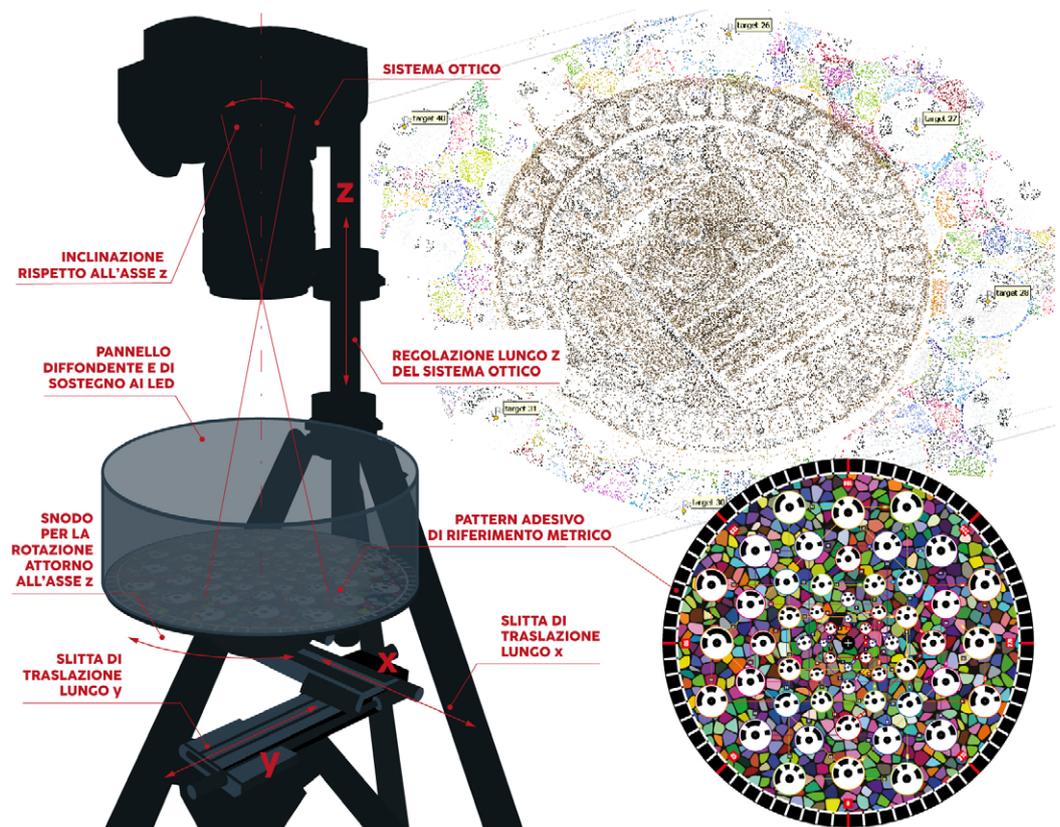


Fig. 1. A sinistra: schema del sistema 3DINO, aggiornato per supportare sia apparati “macro” che “micro”. A destra: pattern adesivo di target codificati e loro identificazione sulla Sparse Point Cloud. Elaborazione dell'autore.

definite in seguito “macro” e “micro” [1], ha consentito di quantificare l'efficienza di questi strumenti portatili, dimostrando in che misura sia possibile estenderne l'ambito applicativo. I sistemi coinvolti nella sperimentazione proposta sono:

- una camera DSLR Nikon D850 con sensore *full-frame* da 46 Mp, abbinata sia a un obiettivo AF-S Micro-Nikkor 60mm f/2.8G ED, sia a un obiettivo AF-SVR Micro-Nikkor 105 mm f/2.8G IF-ED;

- un microscopio USB Dino-Lite AM-7013-MZT Premier, con sensore da 5 Mp;

- un microscopio USB Dino-Lite AM-8917-MZT Edge Plus, con sensore da 8 Mp.

Queste quattro configurazioni sono state confrontate sulla base di un oggetto campione che, per caratteristiche geometriche e assenza di texture, si configura come una superficie “non collaborativa”, perché omogenea e riflettente, oltre che micro-incisa [Alonso et al. 2016, pp. 236-245]; superficie che ha consentito di stressare sufficientemente i sistemi per una validazione di tecnologie alternative e, contemporaneamente, per un miglioramento delle strategie di acquisizione.

Condizioni e parametri di acquisizione

La prototipazione del sistema 3DINO [2], già implementata per l'acquisizione a scala sub-millimetrica [Antinozzi et al. 2023, pp. 2244-2259], ha evidenziato la necessità di assicurare saldamente l'apparato ottico per limitare le vibrazioni e gli ingombri dei sostegni, spostando l'attenzione sui supporti per gli oggetti da rilevare. Mantenendo la possibilità di inclinare i sensori coinvolti, nonché di accomodarli lungo la direzione verticale z , nella configurazione aggiornata qui proposta è l'oggetto a traslare rispetto alla camera, oltre che a ruotare, grazie all'adozione di una slitta micrometrica a doppia direzione (x e y) predisposta al di sotto della base rotante (fig. 1).

La nuova configurazione consente di riprodurre la medesima geometria di cattura per sistemi più o meno compatti, come nel caso “macro” e “micro”, sostituendo solo il gruppo di componenti relativo al supporto della camera. A questi accorgimenti è stata aggiunta un'illuminazione diffusa e radiale, garantita da LED montati ad anello attorno a un pannello diffondente che avvolge la scena, con alla base uno schema adesivo bidimensionale di 56 target a 16-bit [3] codificati, circolari, omogeneamente ordinati secondo un motivo geometrico personalizzato e con dimensioni crescenti all'allontanarsi dal centro della tavola per meglio rispondere alle diverse dimensioni degli oggetti da digitalizzare.

Facendo scorrere l'ottica lungo la direzione z si condiziona, in primo luogo, il “rapporto di riproduzione” (R): rapporto tra le dimensioni dell'immagine proiettata dall'obiettivo sul sensore (D_I) e le dimensioni reali del soggetto inquadrato (D_R) [4]. Connesso a questo parametro è il valore assunto dalla “distanza principale” (p), tra sensore e centro ottico, che aumenta all'avvicinarsi dell'oggetto all'intero sistema, secondo la seguente relazione:

$$R = \frac{p}{l} - 1$$

in cui l rappresenta la lunghezza focale dell'obiettivo utilizzato. In tutti gli obiettivi R aumenta fino a un valore limite determinato dalla “minima distanza di messa a fuoco” (MFD), ovvero la minima distanza – misurata dal piano del sensore al piano di messa a fuoco – alla quale l'obiettivo può ancora produrre un'immagine nitida.

Vale la pena di precisare che attualmente la produzione di schemi ottici a lenti flottanti, così come il meccanismo di *Internal Focusing* (IF), determina un movimento tra gli elementi ottici, la cui distanza relativa non è costante durante la regolazione della messa a fuoco. In tal modo l'obiettivo varia la lunghezza focale, che assume il valore nominale solo per distanze superiori a una certa soglia (fig. 2); ovvero, R può aumentare senza che aumenti p , diminuendo l . Tali relazioni evidenziano una precisa scelta progettuale, consentendo di mantenere elevata la qualità della riproduzione sino a rapporti 1:1.

Affinché la comparazione prestazionale avvenga sulla base della medesima geometria di cattura, realizzata all'interno del sistema 3DINO, combinando prese ortogonali e convergenti,

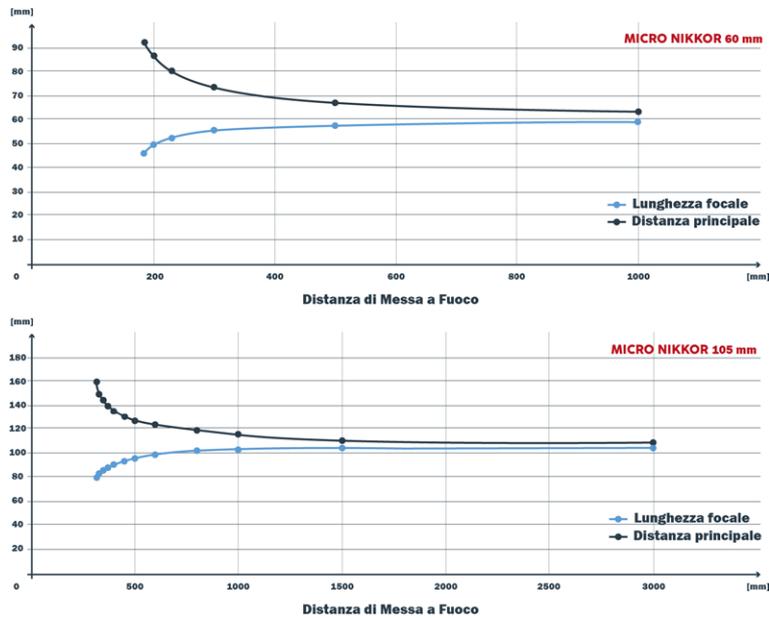


Fig. 2. Valori assunti [in mm] dalla lunghezza focale e della distanza principale rispetto alla distanza di messa a fuoco in ascisse [in mm] per l'AF-S Micro-Nikkor 60mm f/2.8G ED e l'AF-S VR Micro-Nikkor 105 mm f/2.8G IF-ED (sulla base dei valori di distanza di messa a fuoco e rapporto di riproduzione dichiarati dal produttore). Elaborazione dell'autore.

è interessante analizzare come R possa differenziare le modalità d'impiego degli strumenti in analisi, collegandosi ai diversi parametri del processo fotogrammetrico. In particolare, è stata considerata la relazione tra il rapporto di riproduzione e il grado di dettaglio del rilievo (fig. 3): operando in assenza di accessori nei sistemi "macro" non si supera il rapporto 1:1, nei sistemi "micro", al contrario, con un rapporto di 1:5 ci si trova in una condizione di ingrandimento minima. Tale differenza è controbilanciata dalla qualità

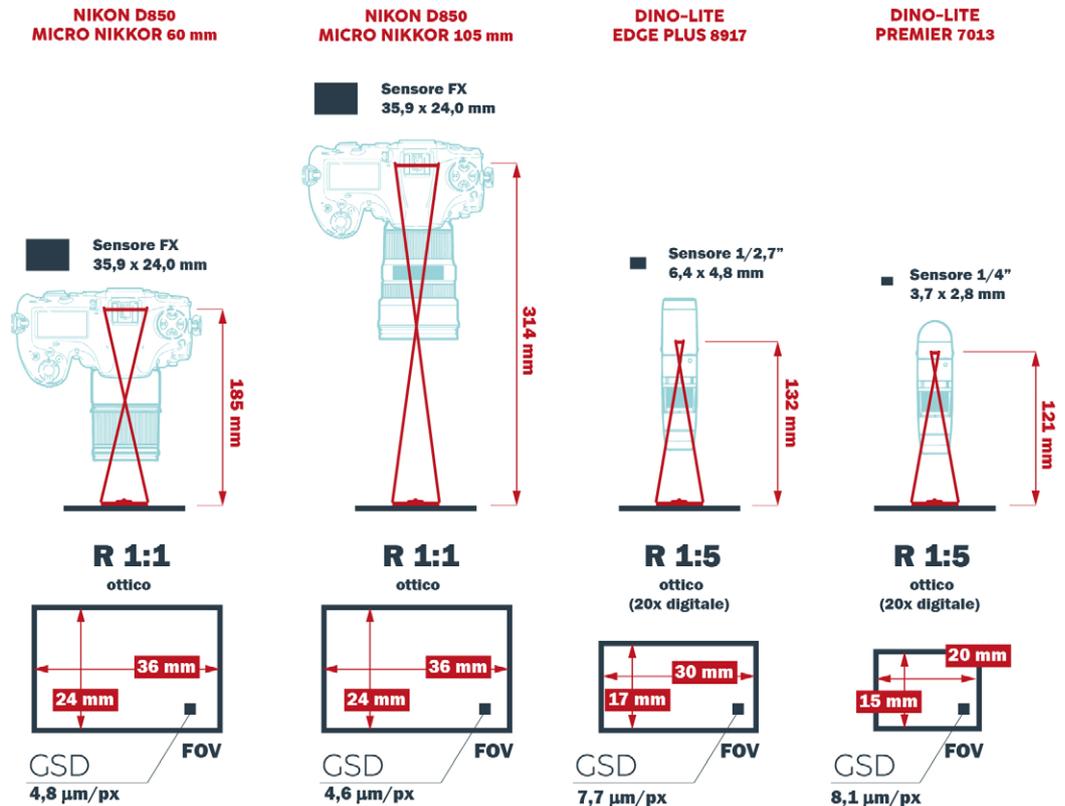


Fig. 3. Confronto fra i sistemi "macro" (a sinistra) e "micro" (a destra) e delle relative specifiche tecniche. Elaborazione dell'autore.

delle componenti ottiche e dalle dimensioni fisiche e digitali dei sensori coinvolti che comportano una maggiore degradazione dell'immagine per i sistemi "micro", con particolare riferimento a risoluzione, distorsione, aberrazione cromatica, vignettatura e, più in generale, alla trasmissione della radiazione elettromagnetica. Al rapporto di riproduzione è, inoltre, correlato l'angolo di campo (FOV), così come il restringimento delle porzioni di immagine qualitativamente valide all'area centrale del fotogramma: fattori che incidono sulla sovrapposizione di scatti contigui e obbligano a un numero maggiore di catture per i sistemi "micro". Le distanze molto ravvicinate, conseguenti ai succitati R elevati e FOV ristretti, impongono una difficoltosa gestione della "profondità di campo" (DoF). Infatti, in caso di DoF ridotta, solo una piccola porzione dell'immagine apparirà sufficientemente nitida per poter essere utilizzata nella ricostruzione 3D, comportando una diminuzione del numero di punti ricostruiti [Gallo et al. 2014, pp. 173-182], un aumento del livello di rumore e più errori topologici [Nicolae et al. 2014, pp. 451-456]. La valutazione della DoF prende in considerazione relazioni trigonometriche (fig. 4) che coinvolgono "lunghezza focale" (l), "distanza di lavoro" (w) e, di conseguenza, anche R , "apertura di diaframma" (a), diametro del "cerchio di confusione" (d).

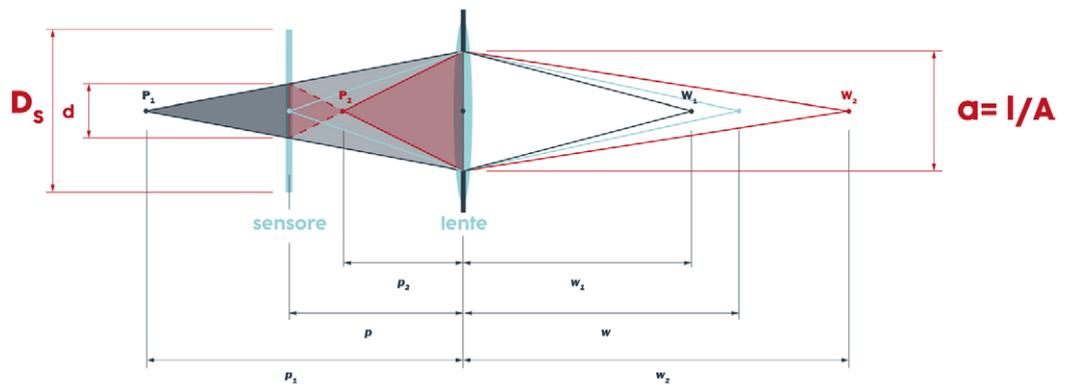


Fig. 4. Geometria ottica per l'identificazione dei parametri collegati alla valutazione della profondità di campo: W_1 e W_2 sono il primo e l'ultimo punto a rientrare nel campo nitido dello spazio oggetto, ai quali corrispondono P_1 e P_2 nello spazio immagine. Elaborazione dell'autore.

Alle brevi distanze, tuttavia, ovvero a mano a mano che il rapporto di ingrandimento tende verso l'1:1, l'influenza della focale sulla DoF viene meno [Pardi 2014, pp. 1-24], consentendo di accettare la seguente semplificazione [Polini 2010, pp. 2-27], rispetto alla formula generale per il calcolo della DoF:

$$DoF = \frac{2 \cdot A \cdot d \cdot (R+1)}{R^2}$$

in cui A è il numero corrispondente al valore f-stop del diaframma, secondo la nota relazione:

$$a = \frac{l}{A}$$

Pertanto, sulla base della DoF, tutti i sistemi analizzati si equivalgono, oscillando tra i 3 e i 4 mm di area nitida.

Analisi comparativa e risultati

Limitandosi a valutazioni di tipo geometrico, i prodotti del processo SfM sono in prima battuta confrontati in base alla qualità della *Dense Point Cloud*, che interessa un'area rilevata di circa 40 cm². In questo caso, un dato significativo è espresso non dal numero dei punti, ma dalla loro affidabilità [di Filippo et al. 2023, pp. 1-9]. Una prima valutazione prende in

considerazione la *Confidence*, un parametro che indica quante mappe di profondità sono state utilizzate per generare ciascun punto della *Dense Point Cloud*, attestando così quanto sia affidabile la stima della posizione di un punto sulla base di quella dei punti vicini e dei fotogrammi che lo contengono (consentendo di filtrare il rumore del dato, principale responsabile di false geometrie o artefatti sul modello finale). Nonostante l'elevato numero di scatti (150 per i sistemi "macro" e 300 per i "micro") la sperimentazione ha confermato una *Confidence* non altissima, perché acuita dalle caratteristiche superficiali dello *stress-tester* che hanno – volutamente – complicato l'individuazione univoca di punti omologhi (fig. 5). Particolarmente critico è l'*output* del microscopio meno

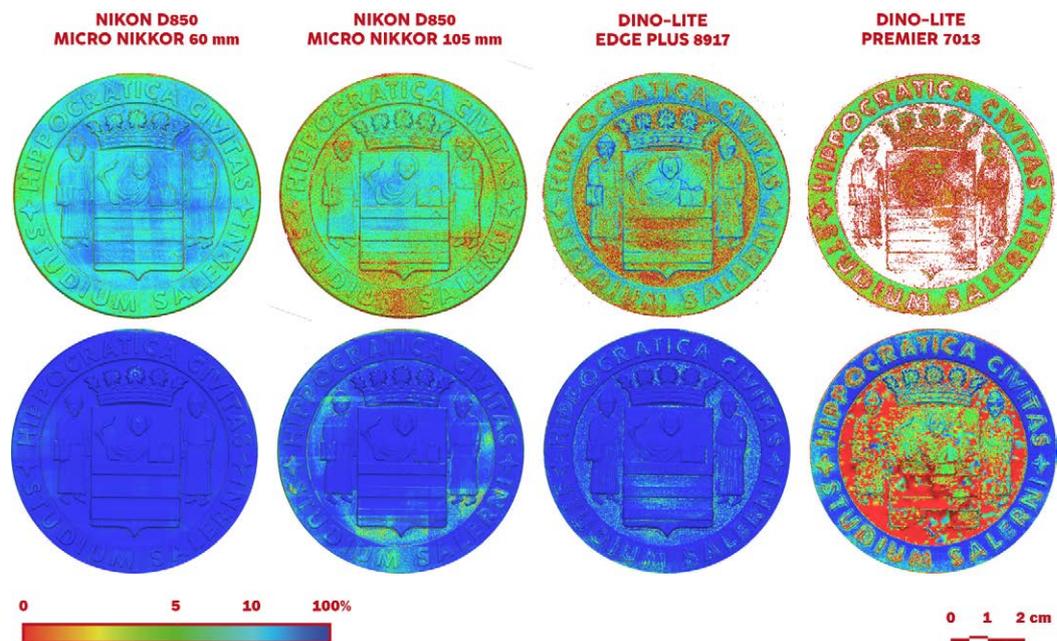


Fig. 5. Valori di *Confidence*, ottenuti in ambiente software Agisoft Metashape, associati ai pixel della *Dense Point Cloud* (in alto) e della *mesh* (in basso). Elaborazione dell'autore.

risoluto, che risulta incapace di individuare un sufficiente numero di punti nelle zone più omogenee e lisce del tester, ovvero prive di evidenti discontinuità cromatiche e geometriche. È da considerare che una maggiore inclinazione delle prese avrebbe migliorato la triangolazione dei punti, ma richiesto un'estensione della profondità di campo non supportata a questi ingrandimenti, accentuando ulteriormente – a causa del conseguente aumento di sfocatura – l'uniformità delle superfici riprese.

Sulla base poi del confronto dei *Digital Elevation Model* (DEM) è possibile quantificare la capacità dei sistemi coinvolti di rappresentare la variabilità delle quote dei punti, così da valutare – a parità di geometria di acquisizione – un eventuale appiattimento della ricostruzione lungo l'asse *z*.

Questa analisi restituisce un dato stabile per tutti i modelli (fig. 6), confermando che garantire una combinazione di prese ortogonali e convergenti mantiene coerente la ricostruzione al variare dei sensori e delle ottiche coinvolte. Tale geometria di acquisizione, infatti, consente, da un lato, di conservare l'asse della camera ortogonale al piano tangente in ogni punto della superficie dell'oggetto, dall'altro, di creare angoli di intersezione sufficientemente ampi fra i raggi proiettanti per ciascun punto; entrambe condizioni a vantaggio dell'accuratezza della ricostruzione tridimensionale.

Un'ulteriore valutazione ha coinvolto l'utilizzo di un modello di riferimento per confrontare la distribuzione delle distanze tra i diversi modelli. Le deviazioni sono computate attraverso lo strumento di comparazione "*Cloud-To-Cloud*" in ambiente software CloudCompare (fig. 7) assumendo come riferimento la nuvola di punti con *Confidence* più elevata: quella ottenuta dal sistema "macro" 60 mm. Si può notare che per il modello da "macro" 105 mm il



Fig. 6. Digital Elevation Model, ottenuti in ambiente software Agisoft Metashape, dei modelli restituiti dai sistemi a confronto. Elaborazione dell'autore.

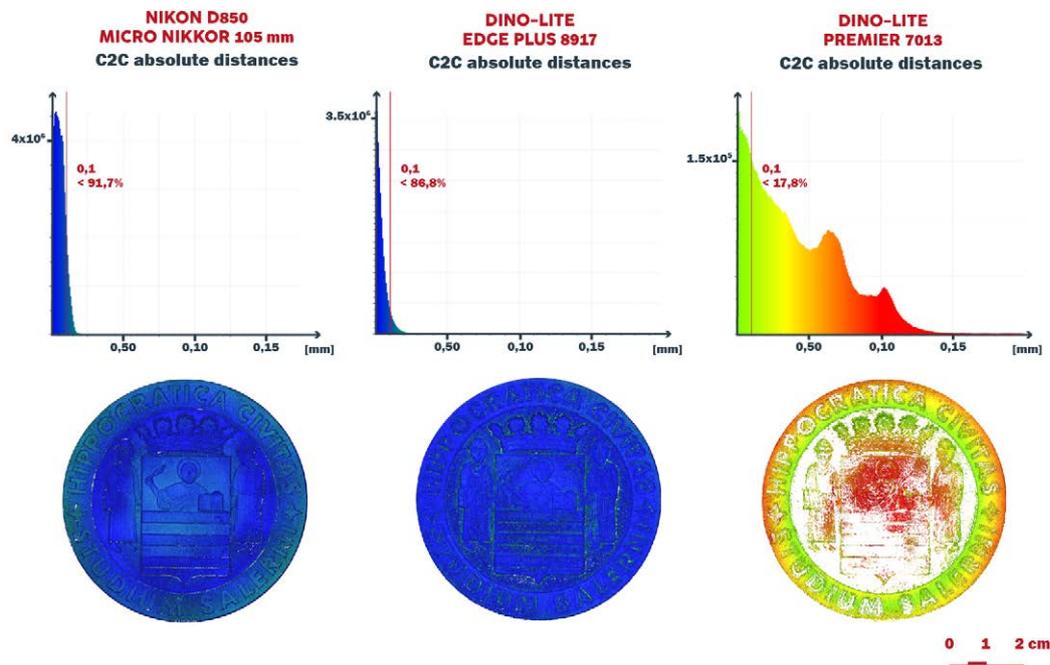


Fig. 7. Distribuzione delle distanze tra le nuvole di punti fotogrammetriche ottenuta in ambiente software CloudCompare, in cui la nuvola dal sistema "macro" 60 mm è stata assunta come riferimento. Elaborazione dell'autore.

91,7% dei punti ha uno scostamento massimo dal modello di riferimento di 0,1 mm; nello stesso intervallo ricade l'86,8% dei punti del modello da microscopio Edge Plus da 8 MP e solo il 17,8% da microscopio Premier da 5 Mp.

Queste percentuali sono in accordo con i valori di *Confidence* precedentemente ottenuti, che già evidenziavano una crescente difficoltà nell'estrazione di *Tie Points*: il risultato è, quindi, compatibile anche con il livello di rumore dei modelli finali, più evidente in una visualizzazione "solid" della mesh (fig. 8).

In generale, dunque, i sistemi "macro" assicurano una maggiore accuratezza e completezza dei dati, compensando il minor GSD rispetto ai sistemi "micro" (circa 5 μm contro gli 8 μm), che avrebbe potuto far immaginare un risultato atteso meno risoluto. Ciò conduce a una riflessione sul come la progettazione del rilievo debba tenere in considerazione non solo la risoluzione del modello finale in termini di GSD, ma anche la qualità delle componenti coinvolte, in termini di maggiore o minore degradazione dell'immagine restituita, valutando, ovviamente, anche i costi nettamente differenti delle apparecchiature (mediamente 4.000 euro dei sistemi "macro" versus 1.500 euro dei sistemi "micro"). In tal senso, è possibile osservare come il microscopio Edge Plus da 8 MP si pone in una posizione intermedia che bilancia un *design entry level* con un risultato sufficientemente comparabile a quello ottenuto da strumenti professionali.



Fig. 8. Modelli mesh in visualizzazione "shaded" e "solid" a confronto. Elaborazione dell'autore.

Considerazioni conclusive

Generare modelli tridimensionali accurati da immagini catturate con microscopi USB è un tema ancora da approfondire proprio a causa della natura dell'apparecchio, non ideato per ricostruzioni tridimensionali *image-based* e, per quanto semplice e intuitivo, non poco difficoltoso nell'utilizzo fotogrammetrico a mano libera (*handheld*). Tuttavia, sensoristiche sempre più performanti e l'ottimizzazione progressiva dei sistemi di acquisizione possono consentire a questi strumenti compatti di ritagliarsi una posizione interessante all'interno di una linea di ricerca applicata alla rappresentazione digitale del dettaglio.

I risultati delle analisi illustrate in questo lavoro confermano un ruolo *competitor* del modello più risoluto di microscopio USB Dino-Lite, anche nel caso di superfici omogenee e riflettenti. L'oggetto analizzato, infatti, configurandosi come uno *stress-tester*, ha creato condizioni limite che hanno consentito di evidenziare nettamente le soglie di applicazione delle apparecchiature coinvolte.

In aggiunta, c'è da osservare che le geometrie spigolose del tester hanno accentuato tali differenze; quindi, appare lecito poter impiegare i sistemi "micro" per applicazioni su reperti del *Cultural Heritage*, in cui omogeneità e spigoli vivi sono meno frequenti e una maggiore morbidezza della ricostruzione è compatibile con la natura degli oggetti.

Pertanto, i microscopi USB possono rappresentare una alternativa molto valida a strumentazioni convenzionali e ormai consolidate per applicazioni di fotogrammetria *very close-range*, soprattutto se si osserva che le loro prestazioni sono suscettibili di sensibili miglioramenti in fase di acquisizione.

Quest'ultima considerazione deve così spingere a concretizzare e a codificare una rappresentazione digitale innovativa per oggetti che risultano essere troppo piccoli per i comuni flussi di lavoro a distanza ravvicinata ed eccessivamente grandi per le strumentazioni utilizzate in settori di precisione.

Note

[1] Il lavoro presentato costituisce una naturale prosecuzione, nonché un ulteriore approfondimento, delle applicazioni sperimentali avviate in: Antinozzi S., Diego R., Barba S. (2020). *Macro e micro fotogrammetria per la virtualizzazione della laminetta orfica (V-IV a.C.) del Museo Nazionale di Vibo Valentia*, presentato al 42° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione.

[2] 3DINO è un apparato a basso costo, completo e portatile per la fotogrammetria *very close-range* prototipato recentemente dall'autore. È costituito da una serie di supporti meccanici progettati per accomodare fotocamere e accessori disponibili sul mercato e inserirli funzionalmente all'interno di un set di acquisizione fotogrammetrico ottimizzato.

[3] La grafica e le coordinate del calibratore (accessibili al seguente link: <http://bit.ly/3E6ZjOi>) sono state progettate *ad hoc* dall'autore così da poter essere importate nel progetto fotogrammetrico.

[4] Un rapporto unitario tra le suddette quantità (1:1), spesso definito anche come "life size", stabilisce convenzionalmente una soglia tra la più generica fotografia "close-up" e quella più propriamente definita "macro", in cui la risoluzione della restituzione tende all'ordine dei micrometri.

Riferimenti bibliografici

- Alonso B. M., Barba S., Tordesillas A. A. (2016). Cultural heritage documentation. Method based on the fusion of optical scanning triangulation and photogrammetric techniques. In *EGA Revista de Expresión Gráfica Arquitectónica*, vol. 21, n. 28, pp. 236-245.
- Antinozzi S., et al. (2023). Progetto e ottimizzazione di processi image-based per acquisizioni a scala di dettaglio / Design and Optimisation of Image-Based Processes for Detail-Scale Acquisitions. In Cannella M., Garozzo A., Morena S. (Eds.). *Transizioni. Attraversare Modulare Procedere. Atti del 44° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione*. Palermo, 14-16 settembre 2023, pp. 2244-2259. Milano: FrancoAngeli.
- Arriaza M. C., et al. (2017). Applications of Micro-Photogrammetry and Geometric Morphometrics to Studies of Tooth Mark Morphology: The Modern Olduvai Carnivore Site (Tanzania). In *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, n. 488, pp. 103-112.
- Collins T., et al. (2019). Automated Low-Cost Photogrammetric Acquisition of 3D Models from Small Form-Factor Artefacts. In *Electronics*, n. 8, pp. 1441-1458.
- De Paolis L.T., et al. (2020). Photogrammetric 3D Reconstruction of Small Objects for a Real-Time Fruition. In *Lecture Notes in Computer Science: Lecture Notes in Artificial Intelligence*, Vol. 12242, pp. 375-394.
- di Filippo A., et al. (2023). Methodologies for assessing the quality of 3D models obtained using close-range photogrammetry. In *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, pp. 1-9.
- Esmaili F., Ebadi H. (2017). Handy Microscopic Close-Range Videogrammetry. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XLII-4, pp. 65-67.
- Gallo A., Muzzupappa M., Bruno F. (2014). 3D reconstruction of small sized objects from a sequence of multi-focused images. In *Journal of Cultural Heritage*, n.15(1), pp. 173-182.
- Maté-González M. Á., et al. (2019). New Technologies Applied to Modelling Taphonomic Alterations. In *Quaternary International*, n. 517, pp. 4-15.
- Nicolae C., et al. (2014). In *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XL-5, pp. 451-456.
- Pardi V. (2014). *Profondità di campo in macro: orientarsi tra focale, diaframma e distanza soggetto in correlazione con la dimensione sensore*. <<https://www.nikonschool.it/experience/pdc-in-macro.php>> (consultato il 15 dicembre 2023).
- Polini R. (2010). *Naturalmente vicini. Tecniche e accessori per la ripresa della natura a distanza ravvicinata*. <<https://www.nikonclub.it/forum/index.php?act=attach&type=post&id=173416>> (consultato il 15 dicembre 2023).
- Yanagi H., Chikatsu H. (2010). 3D Modeling of Small Objects Using Macro Lens in Digital Very Close-Range Photogrammetry. In *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVIII, pp. 617-622.

Autore

Sara Antinozzi, Università degli Studi di Salerno, santinozzi@unisa.it

Per citare questo capitolo: Sara Antinozzi (2024). La misura del dettaglio/Measuring the detail. In Bergamo F., Calandriello A., Ciammaichella M., Friso I., Gay F., Liva G., Monteleone C. (a cura di). *Misura / Dismisura. Atti del 45° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione/Measure / Out of Measure. Transitions. Proceedings of the 45th International Conference of Representation Disciplines Teachers*. Milano: FrancoAngeli, pp. 703-720.

Measuring the detail

Sara Antinozzi

Abstract

The concept of measurement establishes the link between reality and its representation. In this context, the metrological aspects of graphic products are crucial in selecting the resources needed to achieve specific objectives. Quantifying the variables involved in the acquisition process is especially important in borderline situations, such as large-scale photogrammetric surveying. This allows for the comparison of the acquisition and restitution phases, with the goal of collecting more data on a larger scale with adequate and verifiable accuracy. These considerations lead to an examination of the sensors and optics suitable for these measurement purposes, to be used in conjunction with specially designed acquisition systems. Consequently, SLR cameras with macro-optics and more innovative devices, such as USB digital microscopes, are compared within an original acquisition setup. The aim is to assess the capabilities of these instruments, which are not specifically designed for photogrammetric use, by designing innovative complements and formalizing accessible surveying practices, particularly for small objects.

Keywords

Very close-range photogrammetry, USB digital microscopes, macro-optics.



'Macro' and 'micro' photogrammetric configurations for the digital representation of detail. Elaboration by the author.

'Macro' and 'Micro' Photogrammetric Systems

Among the advanced tools for measurement and representation in micrometric resolution reconstructions, very close-range photogrammetry [Yanagi, Chikatsu 2010, pp. 617-622] offers a flexible approach, especially considering the interdisciplinary nature of the field of Drawing. In recent years, the potential of creating detailed three-dimensional models using Structure from Motion (SfM) techniques with images captured by USB digital microscopes has been explored. These devices are designed to represent details that are difficult to perceive with the naked eye. Indeed, it has been shown that these instruments can be effectively employed in 3D imaging [Esmaeili, Ebadi 2017, pp. 65-67], acting as competitive alternatives to established instruments in photogrammetry characterised by high magnifications [Arriaza et al. 2017, pp. 103-112; Mate-González et al. 2019, pp. 4-15]. Among these, cameras with full-frame sensors and macro-optics are widely used, particularly for extremely close-range photography: they offer a high reproduction ratio, a typically short minimum focusing distance, exceptional control of optical aberrations, and greater stability and precision.

Literature on the photogrammetric acquisition of small objects reveals the adoption and conception of complex capture systems [Collins et al. 2019, pp. 1441-1458; De Paolis et al. 2020, pp. 375-394], whose components work symbiotically to ensure high resolution and accuracy (hundredths and tenths of a millimetre, respectively). The use of specific accessories, designed on a case-by-case basis, offers broader control of the photogrammetric process, yielding better results for less advanced optical systems. These systems, while maintaining a reasonable signal quality – especially considering sensor size and technology – would typically fail to guarantee sufficiently valid three-dimensional restitution.

A comparative analysis between professional macro-optics and the compact optics integrated in USB digital microscopes, respectively referred to hereafter as 'macro' and 'micro' [1], has enabled the quantification of the efficiency of these portable instruments, demonstra-

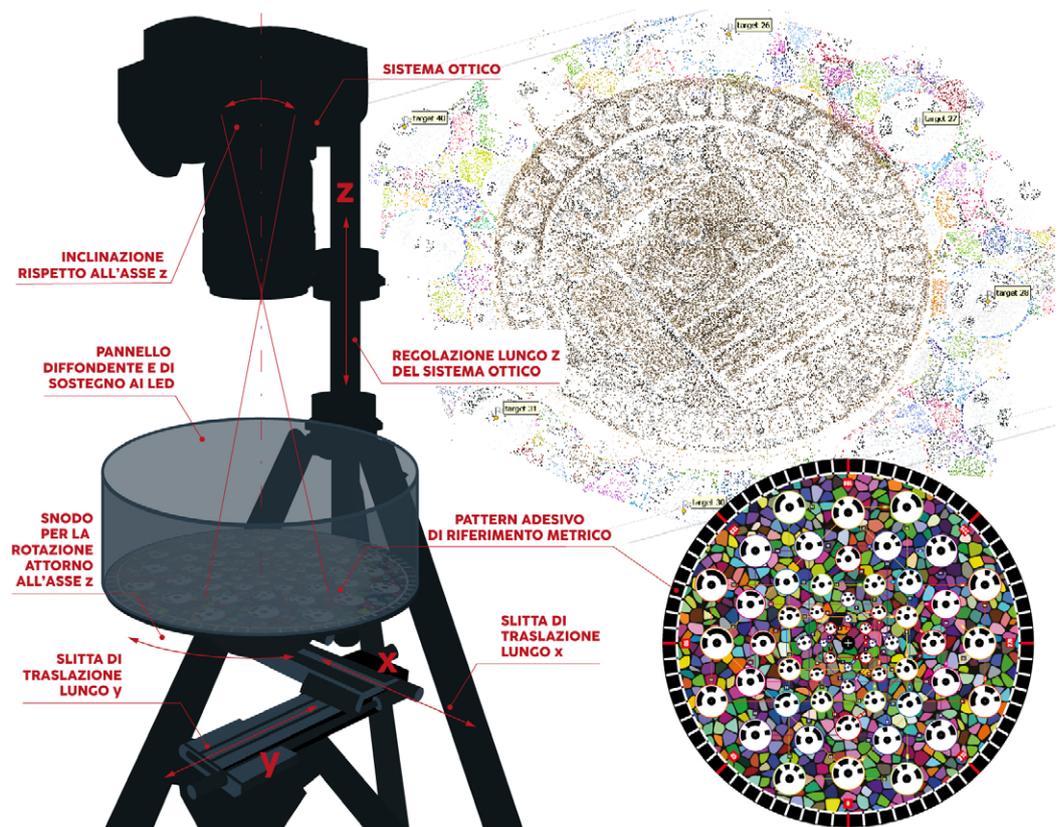


Fig. 1. Left: diagram of the 3DINO system, updated to support both 'macro' and 'micro' apparatuses. Right: adhesive pattern of coded targets and their identification on the Sparse Point Cloud. Elaboration by the author.

ting the extent to which their field of application can be extended. The systems involved in the proposed experimentation are:

- A Nikon D850 DSLR camera with a 46 MP full-frame sensor; combined with both an AF-S Micro-Nikkor 60mm f/2.8G ED lens and an AF-S VR Micro-Nikkor 105mm f/2.8G IF-ED lens;
- A Dino-Lite AM-7013-MZT Premier USB Microscope, with a 5 MP sensor;
- A Dino-Lite AM-8917-MZT Edge Plus USB Microscope, with an 8 MP sensor;

These four configurations were compared using a sample object that, due to its geometric characteristics and lack of textures, is considered a 'non-cooperative' surface, because it is homogeneous and reflective, as well as micro-etched [Alonso et al. 2016, pp. 236-245]. This surface sufficiently stressed the systems to validate alternative technologies and simultaneously improve acquisition strategies.

Acquisition conditions and parameters

The prototyping of the 3DINO system [2], initially developed for sub-millimetre scale acquisition [Antinozzi et al. 2023], highlighted the necessity of firmly securing the optical apparatus to limit vibrations and minimize the bulk of supports, shifting the attention to the supports for the objects being detected. In the updated configuration proposed here, while maintaining the ability to tilt the sensors and adjust them along the vertical z -axis, it is the object that moves relative to the camera and also rotates, thanks to the implementation of a dual-direction micrometric slide (x and y) positioned below the rotating base (fig. 1). This new configuration allows for the replication of the same capture geometry for both compact and less compact systems, as in the cases of 'macro' and 'micro', by simply replacing the components related to the camera support. Additionally, a diffuse and radial illumination is provided by LEDs mounted in a ring around a diffusing panel that envelops the scene. At the base, a two-dimensional adhesive scheme of 56 16-bit [3] encoded circular targets is arranged in a customised geometric pattern, with target sizes increasing as they move away from the centre of the board. This design better accommodates the varying dimensions of the objects to be digitised.

Sliding the optics along the z -axis primarily affects the 'reproduction ratio' (R), which is the ratio between the dimensions of the image projected by the lens onto the sensor (D_i) and the actual dimensions of the subject being photographed (D_R) [4]. Linked to this parameter is the 'principal distance' (p), the distance between the sensor and the optical centre, which increases as the object approaches the system, according to the following relationship:

$$R = \frac{p}{l} - 1$$

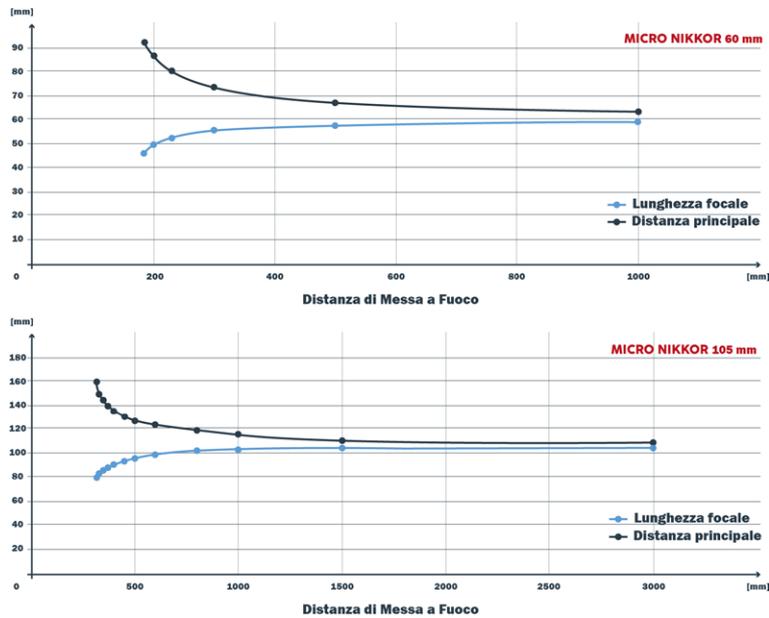
where l represents the focal length of the lens used. For all lenses, the reproduction ratio R increases to a limit value determined by the 'minimum focusing distance' (MFD), which is the minimum distance – from the sensor plane to the focusing plane – at which the lens can still produce a sharp image.

It is worth mentioning that modern floating lens designs and the Internal Focusing (IF) mechanism cause a movement between the optical elements, where their relative distance changes during focus adjustment. Consequently, the lens varies its focal length, achieving its nominal value only for distances above a certain threshold (fig. 2). This means R can increase without increasing p , by decreasing l . These relationships underline a precise design choice, allowing the reproduction quality to be maintained at up to 1:1 ratio.

For a fair performance comparison based on the same capture geometry realised within the 3DINO system – combining orthogonal and convergent shots – it is important to analyse how R differentiates the ways in which the instruments under analysis are used, linked to the various parameters of the photogrammetric process.

In particular, the relationship between the reproduction ratio and the degree of detail in

Fig. 2. Values [mm] assumed by the focal length and principal distance relative to the focusing distance on the x-axis [mm] for the AF-S Micro-Nikkor 60mm f/2.8G ED and the AF-S VR Micro-Nikkor 105mm f/2.8G IF-ED (based on the focusing distance and reproduction ratio values declared by the manufacturer). Elaboration by the author.



the survey was considered (fig. 3). Operating without accessories, 'macro' systems do not exceed a ratio of 1:1, while 'micro' systems, with a ratio of 1:5, are in a condition of minimum magnification. This difference is counterbalanced by the quality of the optical components and the physical and digital dimensions of the sensors involved, which lead to greater image degradation for 'micro' systems. This degradation particularly affects resolution, distortion, chromatic aberration, vignetting, and the general transmission of electromagnetic radiation.

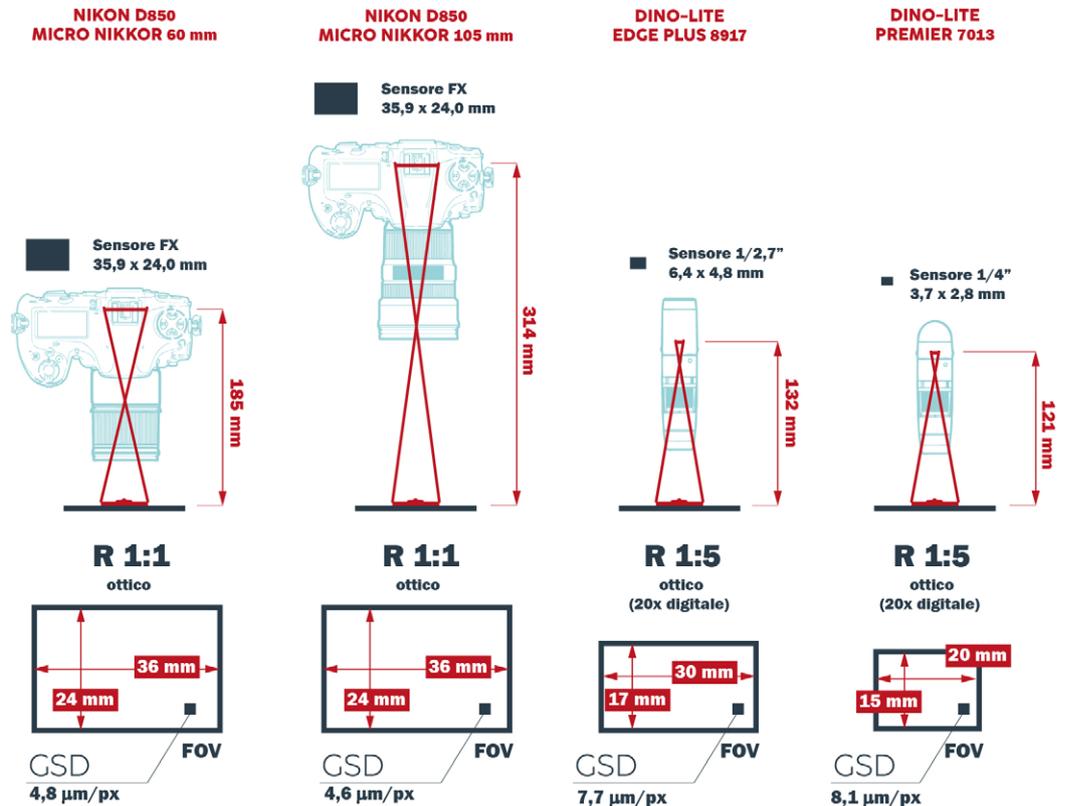


Fig. 3. Comparison between the 'macro' systems (left) and 'micro' systems (right) and their technical specifications. Elaboration by the author.

Related to the reproduction ratio is the field of view (FOV), as well as the narrowing of the qualitative image portions to the central area of the frame. These factors influence the overlap of contiguous shots and necessitate a greater number of captures for 'micro' systems. Assessing DoF involves trigonometric relationships (fig. 4) involving the 'focal length' (l), 'working distance' (w), R , 'aperture' (a), and the diameter of the 'circle of confusion' (d). At short distances, as the magnification ratio approaches 1:1, the influence of the focal length on the DoF diminishes [Pardi 2014, pp. 1-24], allowing for the acceptance of the following simplification [Polini 2010, pp. 2-27] with respect to the general formula for calculating the DoF:

$$DoF = \frac{2 \cdot A \cdot d \cdot (R+1)}{R^2}$$

where A is the number corresponding to the f-stop value of the diaphragm, according to the well-known relationship:

$$a = \frac{l}{A}$$

Therefore, based on the DoF, all analysed systems are equivalent, ranging between 3 and 4 mm sharp area.

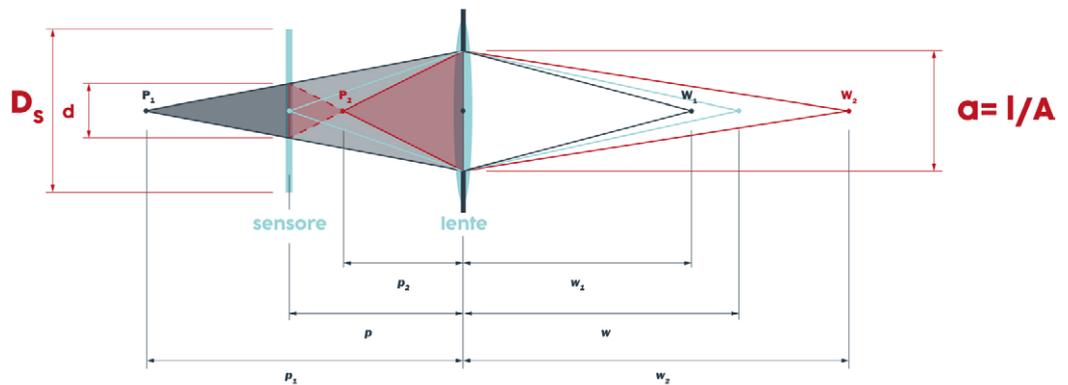


Fig. 4. Optical geometry for identifying parameters related to the evaluation of depth of field: W_1 and W_2 are the first and last points to fall within the sharp field of the object space, corresponding to P_1 and P_2 in the image space. Elaboration by the author.

Comparative analysis and results

Focusing on geometric evaluations, the products of the SfM process are first compared based on the quality of the Dense Point Cloud, covering a surveyed area of approximately 40 cm². The significant metric here is not the number of points but their reliability [di Filippo et al. 2023, pp. 1-9].

An initial evaluation considers the Confidence parameter, which indicates how many depth maps were used to generate each point of the Dense Point Cloud. This parameter attests how reliable the estimation of a point's position is. The estimation is based on its neighbouring points and on the frames that contain it (allowing for the filtering of data noise, the main contributor to false geometries or artefacts on the final model).

Despite the high number of shots (150 for the 'macro' systems and 300 for the 'micro' systems), the experiment confirmed a relatively low Confidence level. This was due to the surface characteristics of the stress-tester, which intentionally complicated the unambiguous identification of homologous points (fig. 5).

The output of the less resolved microscope was particularly critical, as it failed to identify a sufficient number of points in the more homogeneous and smooth areas of the tester, which lacked obvious chromatic and geometric discontinuities. A greater inclination of the shots

would have improved the triangulation of the points but would have required an extension of the depth of field unsupported at these magnifications. This would have further increased blurring, accentuating the uniformity of the imaged surfaces.

By comparing the Digital Elevation Models (DEM), it is possible to quantify the systems' ability to represent the variability of point elevations, assessing any potential flattening of the reconstruction along the z -axis. This analysis yielded consistent results across all models (fig. 6), confirming that combining orthogonal and convergent shots maintains reconstruction consistency despite varying sensors and optics. Such an acquisition geometry ensures the camera axis remains orthogonal to the tangent plane at each point on the object's surface,

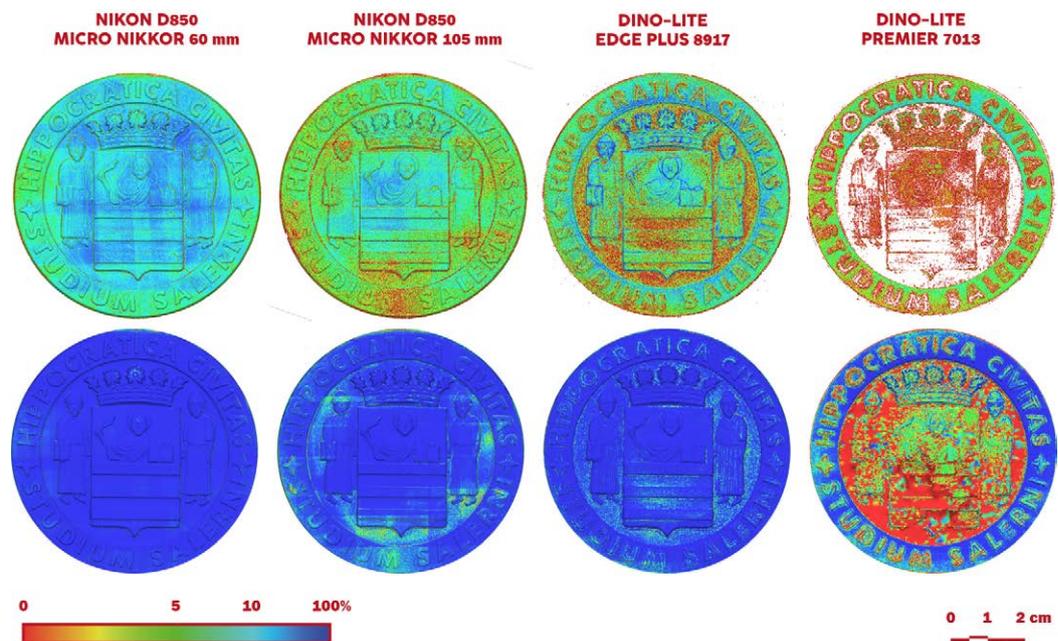


Fig. 5. Confidence values, obtained in the Agisoft Metashape software environment, associated with the pixels of the Dense Point Cloud (top) and the mesh (bottom). Elaboration by the author.

while also creating sufficiently large intersection angles between the projecting beams for each point, benefiting the accuracy of the three-dimensional reconstruction.

Further evaluation involved using a reference model to compare the distribution of distances between the different models. Deviations were calculated using the 'Cloud-To-Cloud' comparison tool in the CloudCompare software environment (fig. 7), taking the point cloud with the highest Confidence as the reference, the one obtained from the 'macro' 60mm system. The results show that for the 105mm 'macro' model, 91.7% of the points have a maximum deviation of 0.1mm from the reference model. Similarly, 86.8% of the points from the Edge Plus 8MP microscope model fall within this range, while only 17.8% of the points from the Premier 5MP microscope do. These percentages align with the previously obtained Confidence values, which indicated increasing difficulty in extracting Tie Points. Consequently, this result is also compatible with the noise level of the final models, which is more evident in a 'solid' mesh visualisation (fig. 8).

Overall, the 'macro' systems ensure greater accuracy and data completeness, compensating for their lower GSD compared to the 'micro' systems (approximately 5 μm versus 8 μm), which might have led to an expectation of less resolution. This finding suggests that the survey design must consider not only the final model's resolution in terms of GSD but also the quality of the components involved, accounting for the greater or lesser degradation of the returned image and the significantly different equipment costs (on average 4,000 euros for the 'macro' systems versus 1,500 euros for the 'micro' systems). In this context, the Edge Plus 8MP microscope occupies an intermediate position, balancing entry-level design with results sufficiently comparable to those obtained by professional instruments.



Fig. 6. Digital Elevation Model, obtained in the Agisoft Metashape software environment, of the models returned by the systems under comparison. Elaboration by the author.

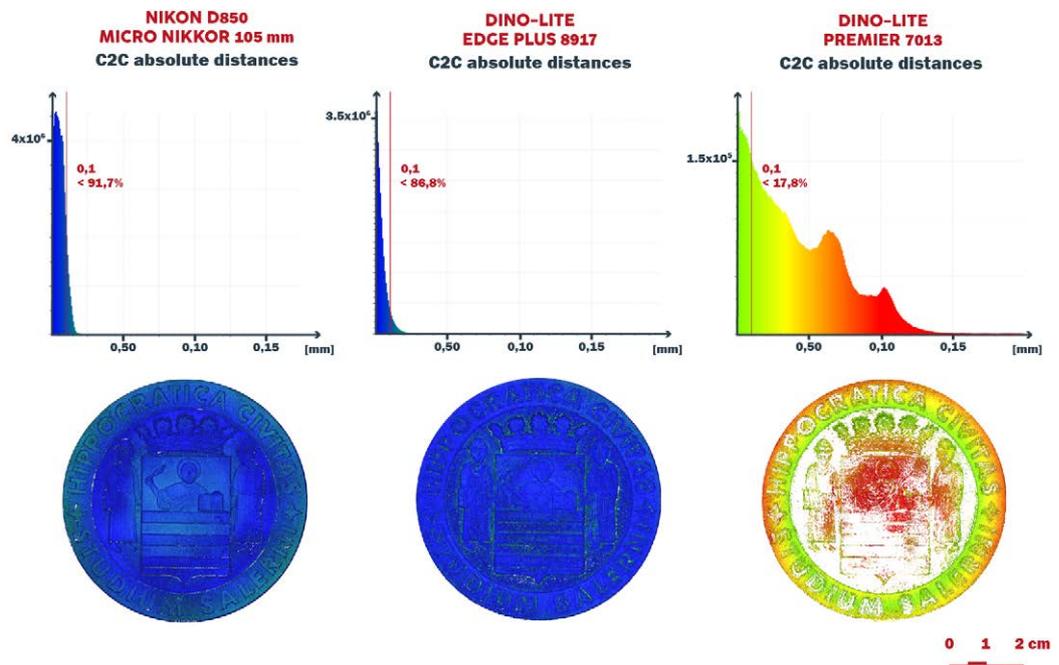


Fig. 7. Distribution of distances between the photogrammetric point clouds obtained in the CloudCompare software environment, where the cloud from the 'macro' 60 mm system was taken as the reference. Elaboration by the author.

Conclusions

Generating accurate three-dimensional models from images captured with USB microscopes is a challenging task due to the nature of these devices. Although USB microscopes are simple and intuitive, they are not designed for image-based three-dimensional reconstructions and can be difficult to use in handheld photogrammetry. However, with increasingly high-performance sensors and the progressive optimisation of acquisition systems, these compact instruments may find a significant place in research focused on the digital representation of detailed items.

The results of the analyses presented in this work confirm a competitive role for the more resolute Dino-Lite USB microscope model, even when dealing with homogeneous and reflective surfaces. The analysed object, a stress tester, created boundary conditions that clearly highlighted the application thresholds of the equipment involved. Additionally, the angular geometries of the tester accentuated these differences. Therefore, it appears legitimate to use 'micro' systems for applications on cultural heritage artefacts, where homogeneity and sharp edges are less common, and a greater softness of reconstruction is compatible with the nature of the objects. Thus, USB microscopes can serve as a viable alternative to conventional and well-established instruments for very close-range photogrammetry ap-



Fig. 8. Comparison of mesh models in 'shaded' and 'solid' visualisation. Elaboration by the author.

plications. Their performance, especially in the acquisition phase, is susceptible to significant improvements. This observation should encourage the development and standardisation of innovative digital representation techniques for objects that are too small for common close-range workflows and too large for instruments used in precision sectors.

Notes

[1] The work presented here constitutes a natural continuation and further deepening of the experimental applications initiated in: Antinozzi, S., Diego, R., Barba, S. (2020). Macro and Micro Photogrammetry for the Virtualization of the Orphic Foil (V-IV B.C) of National Museum of Vibo Valentia, presented at the 42nd International Conference of Teachers of the Disciplines of Representation.

[2] 3DINO is a low-cost, complete, and portable apparatus for very close-range photogrammetry recently prototyped by the author. It consists of a series of mechanical supports designed to accommodate commercially available cameras and accessories, fitting them functionally within an optimised photogrammetric acquisition set.

[3] The graphics and coordinates of the calibrator (accessible at the following link: <http://bit.ly/3E6ZjOi>) were designed ad hoc by the author to be imported into the photogrammetric project.

[4] A unit ratio between the aforementioned quantities (1:1), often referred to as 'life size' conventionally establishes a threshold between the more generic 'close-up' photography and the more appropriately termed 'macro' photography, where the resolution of the restitution tends to the order of micrometres.

References

- Alonso B. M., Barba S., Tordesillas A. A. (2016). Cultural heritage documentation. Method based on the fusion of optical scanning triangulation and photogrammetric techniques. In *EGA Revista de Expresión Gráfica Arquitectónica*, Vol. 21, n. 28, pp. 236-245.
- Antinozzi S., et al. (2023). Progetto e ottimizzazione di processi image-based per acquisizioni a scala di dettaglio / Design and Optimisation of Image-Based Processes for Detail-Scale Acquisitions. In Cannella M., Garozzo A., Morena S. (Eds.). *Transizioni. Attraversare Modulare Procedere. Atti del 44° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione*. Palermo, 14-16 settembre 2023, pp. 2244-2259. Milano: FrancoAngeli.
- Arriaza M. C., et al. (2017). Applications of Micro-Photogrammetry and Geometric Morphometrics to Studies of Tooth Mark Morphology: The Modern Olduvai Carnivore Site (Tanzania). In *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, n. 488, pp. 103-112.
- Collins T., et al. (2019). Automated Low-Cost Photogrammetric Acquisition of 3D Models from Small Form-Factor Artefacts. In *Electronics*, n. 8, pp. 1441-1458.
- De Paolis L.T., et al. (2020). Photogrammetric 3D Reconstruction of Small Objects for a Real-Time Fruition. In *Lecture Notes in Computer Science: Lecture Notes in Artificial Intelligence*, Vol. 12242, pp. 375-394.
- di Filippo A., et al. (2023). Methodologies for assessing the quality of 3D models obtained using close-range photogrammetry. In *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJDeM)*, pp. 1-9.
- Esmaili F., Ebadi H. (2017). Handy Microscopic Close-Range Videogrammetry. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XLII-4, pp. 65-67.
- Gallo A., Muzzupappa M., Bruno F. (2014). 3D reconstruction of small sized objects from a sequence of multi-focused images. In *Journal of Cultural Heritage*, n.15(1), pp. 173-182.

Maté-González M. Á., et al.(2019). New Technologies Applied to Modelling Taphonomic Alterations. In *Quaternary International*, n. 517, pp. 4-15.

Nicolae C., et al.(2014). In *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XL-5, pp. 451-456.

Pardi V. (2014). *Profondità di campo in macro: orientarsi tra focale, diaframma e distanza soggetto in correlazione con la dimensione sensore*. <<https://www.nikonschool.it/experience/pdc-in-macro.php>> (accessed december 15, 2023).

Polini R. (2010). *Naturalmente vicini. Tecniche e accessori per la ripresa della natura a distanza ravvicinata*. <<https://www.nikonclub.it/forum/index.php?act=attach&type=post&id=173416>> (accessed december 15, 2023).

Yanagi H., Chikatsu H. (2010). 3D Modeling of Small Objects Using Macro Lens in Digital Very Close-Range Photogrammetry. In *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVIII, pp. 617-622.

Author

Sara Antinozzi, Università degli Studi di Salerno, santinozzi@unisa.it

To cite this chapter: Sara Antinozzi (2024). La misura del dettaglio/Measuring the detail. In Bergamo F., Calandriello A., Ciammaichella M., Friso I., Gay F., Liva G., Monteleone C. (Eds.), *Misura / Dismisura. Atti del 45° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione / Measure / Out of Measure. Transitions. Proceedings of the 45th International Conference of Representation Disciplines Teachers*. Milano: FrancoAngeli, pp. 703-720.