



# Progetto e ottimizzazione di processi *image-based* per acquisizioni a scala di dettaglio

Sara Antinozzi  
Marco Limongiello  
Laura A. Lopresti  
Salvatore Barba

## Abstract

Avere accesso a un sistema di acquisizione tridimensionale efficace ed economico costituisce spesso una richiesta ancora non del tutto soddisfatta per coloro che desiderano generare e divulgare modelli digitali di oggetti di piccole o piccolissime dimensioni. Con l'intento di poter rappresentare a grande scala geometrie e *texture* non sempre percepibili a occhio nudo, questo lavoro valuta innovative soluzioni hardware *image-based* per la restituzione di modelli digitali con un elevato potere di dettaglio. La possibilità di restituire una grande quantità di dati e a un rapporto di riproduzione maggiore di 1:1 è perseguita con l'ideazione di accessori specifici, progettati ad hoc per la fase di acquisizione, grazie ai quali diviene praticabile l'impiego scientifico di nuovi strumenti, i microscopi digitali portatili USB. Un'ulteriore attenzione è riposta, inoltre, nell'identificazione di un modello geometrico di camera compatibile con questi microscopi per l'individuazione e la verifica della distanza principale. Attraverso l'interazione di diverse competenze, il lavoro dimostra come il processo fotogrammetrico possa essere reso accessibile anche a dispositivi inizialmente non progettati per tali applicazioni, svelando nuove transizioni e possibilità di ricerca.

## Parole chiave

Transizione digitale, microscopi USB, prototipazione, paradigma fotogrammetrico, scala sub-millimetrica



Produzione e assemblaggio delle componenti del sistema 3DINO per l'utilizzo fotogrammetrico di microscopi USB.

## Brevi cenni sullo stato dell'arte

Uno dei risvolti più interessanti di quella che oggi si configura come 'transizione digitale' è la progressiva interazione-integrazione di ambiti disciplinari affini. Ciò è quanto mai emblematico per le specifiche procedure di rilievo e rappresentazione *image-based*, rivoluzionate – anche nella varietà delle applicazioni – dalla progettazione di nuovi strumenti, automatizzati, compatti e oggi disponibili a costi molto più accessibili rispetto al passato [Paris 2015, pp. 1-9]. Ormai sempre più frequente è l'imbattersi, ad esempio, nell'impiego di soluzioni *image-based* per attività a scala sub-millimetrica, oltre che per le tradizionali applicazioni a scale di restituzione architettonica o territoriale. Tali soluzioni costituiscono una valida alternativa a tecniche e strumentazioni più specialistiche [Arrianza et al. 2017, pp. 103-112; Mate-González et al. 2019, pp. 4-15; Thompson et al. 2017, pp. 105-113; González et al. 2019], soprattutto per settori che si stanno sempre più cimentando nell'acquisizione digitale di oggetti di piccole dimensioni, con livelli di dettaglio e accuratezza necessariamente elevati (centesimi e decimi di millimetro, rispettivamente), come sta accadendo per i beni culturali [Parrinello et al. 2019, pp. 95-104]. Tuttavia, il rigore a cui soggiace la fotogrammetria nel caso di distanze ravvicinate (la *very close-range photogrammetry*), nonché la volontà di sistematizzare le applicazioni a costi relativamente contenuti, sono tematiche suscettibili di implementazioni e ancora oggetto di approfondimenti [Galantucci et al. 2018, pp. 57-77; Morena et al. 2019, pp. 135-142]. In particolare, l'attenzione è oggi posta sullo snellimento dei flussi di lavoro fotogrammetrici, con l'adozione di soluzioni operative basate sulla stabilizzazione del sensore, sull'impiego di basi rotanti e target codificati, su un maggiore controllo delle impostazioni della fotocamera e sull'illuminazione per il miglioramento della qualità del modello [Collins et al. 2019, pp. 1441-1458; Menna et al. 2017, pp. 155-162; De Paolis et al. 2020, pp. 375-394; Eastwood et al. 2021].

## L'innovazione dei microscopi USB

Recentemente si sta ponendo l'accento su una nuova sensoristica low-cost. In questo contesto, un'altra tipologia di dispositivi portatili e accessibili si è affacciata sulla scena fotogrammetrica, capaci di soddisfare l'esigenza di ingrandire il soggetto da rappresentare: i microscopi portatili USB. Questi si configurano come sistemi costituiti da un'ottica zoom macro collegata a una fotocamera che si interfaccia, mediante software, direttamente con il display di un computer (senza la necessità di un oculare). La qualità dell'immagine finale dipenderà ancora dalla qualità dell'obiettivo e del sensore, nonché dall'illuminazione aggiuntiva (sorgenti luminose LED integrate che circondano l'obiettivo). Alcuni modelli consentono anche una regolazione dell'esposizione, invece il diaframma è solitamente fisso; la presenza di una ghiera numerata consente di regolare il grado di ingrandimento, azionando il sistema di lenti per la messa a fuoco. In base a tale funzionamento, per utilizzare questi dispositivi si possono seguire due approcci. Il primo è definito '*Distance-based*': il dispositivo è utilizzato a una distanza prestabilita, di conseguenza è regolata la messa a fuoco e l'ingrandimento che ne deriva. Il secondo è definito '*Magnification-based*': il dispositivo è utilizzato a un ingrandimento prestabilito, di conseguenza è poi posizionato manualmente alla distanza che consente di osservare il campione (o una sua porzione specifica) alla nitidezza sufficiente.

Quello che interessa maggiormente di questi dispositivi è che, a fronte di una spesa di qualche centinaio di euro, offrano capacità di ingrandimento elevate, abbinate a dimensioni ridotte. In realtà, va considerato che l'ingrandimento è un parametro 'relativo' alla dimensione della finestra di visualizzazione dell'interfaccia software del microscopio, il che comporta la dipendenza dell'ingrandimento dalla dimensione dell'immagine a monitor, oltre che dalle specifiche del monitor stesso (e, ovviamente, del sensore della camera incorporata). All'ingrandimento dei microscopi USB riportato sulla ghiera (fig. 1) è, infatti, associato un valore numerico 'elevato' senza che vi sia abbinata, necessariamente, un'immagine altrettanto di qualità. Ciò è dovuto a forme di interpolazione che modificano sensibilmente il potere risolutivo del microscopio – attraverso la combinazione di più *pixel* adiacenti in un unico *pixel* di dimensioni maggiori – a vantaggio della fase di acquisizione, così da ottenere scatti esposti

correttamente e in tempi rapidi, ma a discapito della resa qualitativa dell'immagine finale, con una riduzione della risoluzione nativa. Inoltre, l'ingrandimento effettivamente utilizzato può discostarsi dai valori riportati sulla stessa ghiera e ciò può essere verificato confrontando le dimensioni effettive di un campione con la dimensione occupata sullo schermo, ovvero avvalendosi di una scala graduata che può così facilitare il calcolo e la verifica del rapporto d'ingrandimento. Nel caso dei microscopi della Dino-Lite, ad esempio, il software proprietario

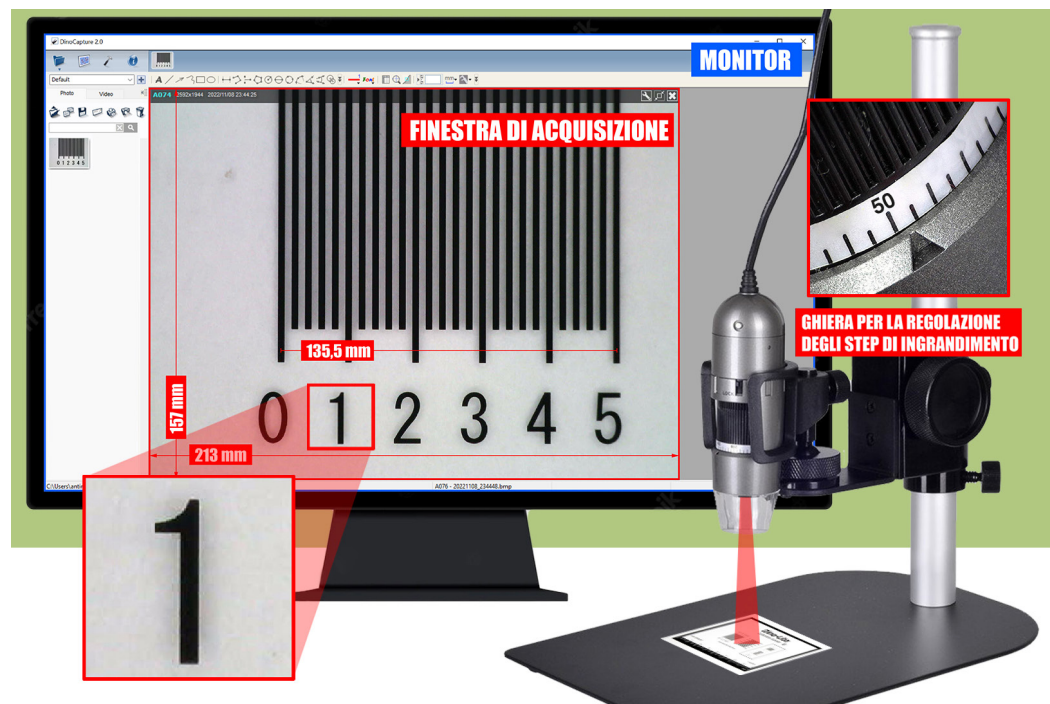


Fig. 1. Il software proprietario della Dino-Lite, 'DinoCapture 2.0', con la visualizzazione dell'area inquadrata e in evidenza una porzione dell'immagine visualizzata con uno zoom al 100%, operando con un valore dell'ingrandimento di 50× da regolazione della ghiera.

dedicato all'acquisizione presenta un'interfaccia costituita da una 'finestra di acquisizione' per la visualizzazione dell'area inquadrata, auto-settata, delle dimensioni di 213×157 mm per un monitor di 15" a risoluzione di 2560×1440 px (fig. 1); operando con un valore dell'ingrandimento che sulla ghiera è pari a 50× si può osservare che 5 mm della realtà corrispondono a un segmento visualizzato sullo schermo di 135,5 mm, da cui si ricava un ingrandimento effettivo di circa 27× ( $\cong 135,5/5$ ). La differenza nel rapporto di ingrandimento è imputabile alla scelta dei produttori di assumere come valore di riferimento della risoluzione a monitor quella di 1280×720 px, anche detta HD, un vero e proprio standard fino a soli pochi anni fa. Anche a causa dell'assenza di componenti accessorie come supporti e calibratori che li adattino a scopi fotogrammetrici, sono rare le applicazioni che vedono i microscopi portatili USB impiegati per ricostruzioni tridimensionali dell'intero volume del campione in esame. Meno insolite sono invece modellazioni parziali di oggetti la cui bidimensionalità sia prevalente, come accennato da uno studio del 2017 [Esmaili et al. 2017, pp. 65-67], che suggeriva un primo impiego fotogrammetrico di questa peculiare strumentazione.

Tali intuizioni costituiscono la base di partenza degli studi condotti per immaginare un inserimento dei microscopi USB nella pipeline fotogrammetrica, con accuratezze e precisioni adeguate e verificate, secondo un processo ottimizzato per un loro uso diffuso [1].

### Verso un processo ottimizzato

La customizzazione di accessori dedicati può permettere un miglior controllo del processo fotogrammetrico nel caso di strumentazioni professionali e financo migliori risultati nel caso di strumentazioni più *entry-level*. Con particolare riferimento all'impiego di microscopi

USB, inoltre, la necessità di una componentistica progettata ad hoc è ulteriormente motivata da fattori specifici, come il campo visivo estremamente ridotto, il difficoltoso controllo delle vibrazioni, l'opportunità di condurre acquisizioni per prese convergenti e l'elevato numero di scatti da realizzare in tempi auspicabilmente contenuti.

Pertanto, nell'ottica di un'ottimizzazione dei processi di rilievo, questi fattori andranno sempre considerati in vista di una rapidità dei flussi di lavoro e per una robustezza del modello prodotto.

Il primo aspetto può perseguirsi con la progettazione di specifiche componenti hardware, quali: accessori per il posizionamento vantaggioso dell'oggetto rispetto all'ottica, al fine di ridurre al minimo necessario il numero di scatti; riferimenti metrici per la definizione di un sistema di coordinate locali, per la messa in scala del modello e il miglioramento della procedura di allineamento delle catture; un'illuminazione a garanzia di condizioni di luce diffusa, così da minimizzare variazioni in intensità delle ombre, luci e colori a seconda delle diverse posizioni che l'oggetto assume durante la fase di acquisizione.

Queste necessarie implementazioni sono state sistematizzate con la prototipazione di una prima configurazione a basso costo, completa e portatile, basata sull'utilizzo fotogrammetrico dei microscopi USB, verificando la possibilità di riunire i diversi componenti hardware in un unico sistema: 3DINO risulta così costituito da una serie di supporti meccanici il cui telaio è interamente stampato in 3D e i cui componenti accessori sono generalmente parti standard disponibili sul mercato. Sebbene il sistema sia stato progettato per sensori fotografici di piccole dimensioni, l'idea di modularità che sta alla base della sua ideazione ne consente l'utilizzo anche nel caso di set fotogrammetrici per fotocamere reflex. Il gruppo ottico può essere inclinato rispetto all'oggetto da digitalizzare, operazione assicurata dalla struttura a C dell'elemento costola (al numero 10 in fig. 2) alla quale, in aggiunta, è fissata una slitta micrometrica per ospitare il microscopio, consentendone anche il movimento radiale verso il centro del sistema (ai numeri 7 e 8). Questa traslazione permette al gruppo ottico di avvicinarsi o di allontanarsi dall'oggetto, con il vantaggio di accomodare con precisione la distanza di messa a fuoco, seguendo l'approccio '*Distance-based*'. In buona sostanza, queste componenti lavorano come le teste fotografiche 'a 4 direzioni', con le quali l'inquadratura può rispettivamente spostarsi lungo due assi ortogonali (asse  $z$  principale e asse  $r$  principale in fig. 2); l'oggetto è invece posizionato su un supporto centrale che ne consente la regolazione in altezza e, grazie a un giunto, la rotazione di  $360^\circ$  rispetto all'asse verticale, immaginando, quindi, la possibilità di compiere una rivoluzione relativa completa per ogni inclinazione della camera. 3DINO è così progettato per un'acquisizione a prese convergenti sempre ortogonali alla superficie dell'oggetto, in cui l'asse della fotocamera è ortogonale al piano tangente alla superficie rispetto alla traccia dell'asse stesso, raggiungendo la condizione migliore dal punto di vista fotogrammetrico.

Il secondo e più importante aspetto affrontato, qui sintetizzato, riguarda i processi in ambiente *Structure from Motion* (SfM), da finalizzare ad attributi della modellazione che non siano solo rappresentativi, ma anche affidabili [di Filippo et al. 2022, pp. 31-38] attraverso la determinazione dell'accuratezza del modello fotogrammetrico in relazione alle sue caratteristiche geometriche.

Questo obiettivo è stato perseguito inizialmente con la realizzazione e utilizzazione di *pattern* a scacchiera su carta adesiva, poi fissati a supporti rigidi piani, con passo di 1 mm, dimensionati in funzione dell'area utile del microscopio, impostato a un predeterminato ingrandimento digitale (circa  $19,8 \times 14,9$  mm a  $20\times$ ). I *pattern* sono utilizzati come modelli di calibrazione bidimensionali (fig. 3) in abbinamento con la funzione '*Lens Calibration*' di Agisoft Metashape per la stima dei parametri dell'orientamento interno della camera. Infatti, la determinazione dei parametri di orientamento interno risulta estremamente significativa per l'accuratezza delle ricostruzioni 3D, nonché per la riduzione del numero di incognite nelle equazioni di collinearità e quindi per accelerare la procedura di *Bundle-Block Adjustment*.

Quindi, essendo l'*output* dei microscopi USB mancante di dati EXIF, l'attenzione è stata necessariamente rivolta all'identificazione di un modello geometrico compatibile con il microscopio USB utilizzato (il Dino-Lite AM 7013 MZT, <[www.dino-lite.eu/it/component/eshop/am-7013mzt?Itemid=0](http://www.dino-lite.eu/it/component/eshop/am-7013mzt?Itemid=0)>) e alla verifica della distanza principale stimata con '*Lens Calibration*'.

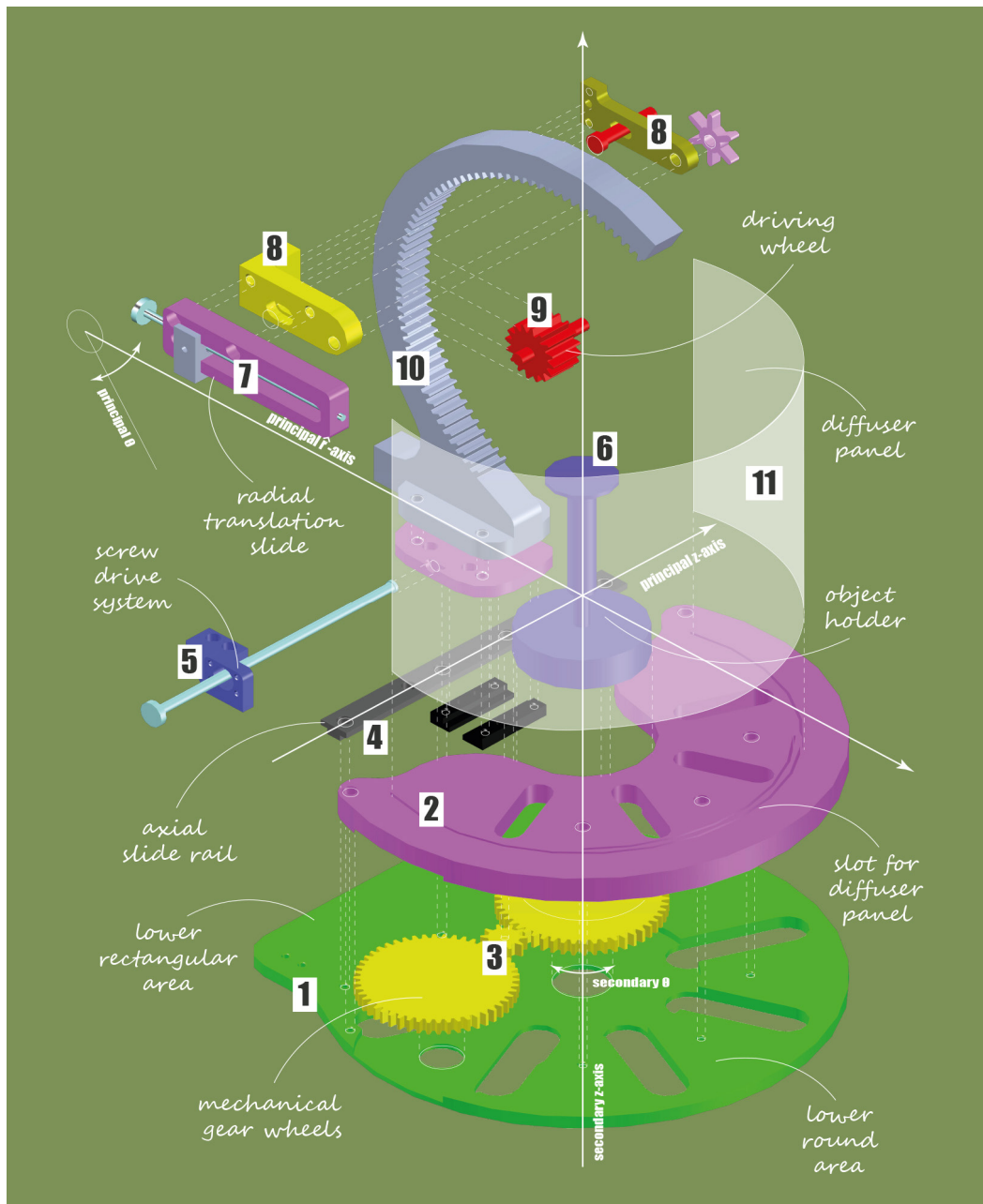


Fig. 2. Schemi grafici del primo prototipo del sistema 3DINO basato sull'utilizzo fotogrammetrico dei microscopi USB. Le diverse parti, la base (ai numeri da 1 a 5), la costola (da 7 a 10) e il supporto (6), sono opportunamente collegate e movimentate indipendentemente. Elaborazione grafica di S. Antinozzi.

Così, sulla base della relazione di proporzionalità tra l'oggetto nello spazio reale e la sua immagine sul piano del sensore (fig. 3) è possibile ammettere che il campo inquadrato  $X_{FOV}$  a un dato ingrandimento – cioè per una data posizione del centro ottico a cui si associano specifiche 'distanza principale'  $f$  e 'distanza di presa'  $H$  sia correlato alla corrispondente area occupata dall'immagine sul sensore,  $X_S$ .  
 Ciò consente di ricavare i parametri incogniti  $f$  e  $H$  per ciascun ingrandimento del microscopio USB, dalla risoluzione (poi tabellata in fig. 4) del sistema:

$$\begin{cases} \frac{X_S}{X_{FOV}} = \frac{f}{H} \\ f + H = D \end{cases}$$

Questi valori di  $f$  e  $H$ , derivanti dal modello geometrico di fig. 3, e i corrispondenti valori stimati in ambiente Agisoft Metashape, secondo la funzione 'Lens Calibration' e l'impiego del *pattern* a scacchiera, sono stati quindi messi a confronto per la valutazione della bontà delle ipotesi assunte per la formulazione del modello di proiezione che approssimi accettabilmente la geometria del sistema di presa.

Fig. 3. Identificazione di un modello geometrico di camera del microscopio USB con evidenziate le distanze: dal sensore al centro ottico ( $f$  - distanza principale); dal centro ottico all'oggetto ( $H$  - distanza di presa); dal sensore all'estremità dell'ugello del microscopio ( $SD$  - Sensor Distance); dall'ugello del microscopio all'oggetto ( $WD$  - Working Distance).

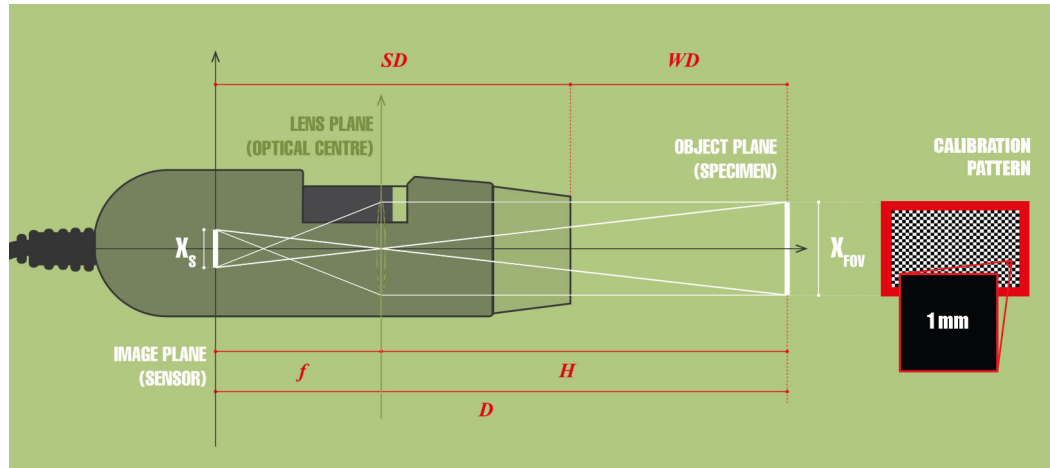


Fig. 4. Foglio di calcolo per la determinazione di un valore modellato di distanza di presa  $H$  e distanza principale  $f$ , corrispondenti a diversi valori di ingrandimento (*magnification*) del microscopio Dino-Lite AM 7013 MZT, al fine di poter effettuare un controllo da parte del rilevatore sulla bontà della fase di orientamento eseguita in ambiente software in assenza di dati EXIF.

DINO-LITE AM 7013 MZT											
Digital magnification	Optical magnification	WD [mm]	SD [mm]	I [mm]	D [mm]	$X_s$	$X_{FOV}$	GSD [mm/px]	H [mm]	f [mm]	f [px]
20×	0,2×	48,7	72,0	15,92	120,7	3,7	19,8	0,0076	101,8	18,9	13330,0
30×	0,3×	21,7	72,0	15,95	93,7	3,7	12,7	0,0050	73,3	20,4	14396,6
40×	0,4×	9,0	72,0	15,98	81,0	3,7	9,9	0,0038	59,1	21,9	15471,8
50×	0,5×	1,9	72,0	16,01	73,9	3,7	7,9	0,0030	50,5	23,4	16555,6

Durante l'elaborazione dei dati, la conoscenza a priori della distanza principale  $f$ , in funzione di ciascun ingrandimento prescelto, ha consentito di verificare se la fase di orientamento fosse andata a buon fine e di accorciare i tempi stessi di elaborazione, poiché tale valore era stato fornito come input di partenza del Bundle-Block Adjustment: in altre parole, per questa iterazione è stato suggerito al software un valore di partenza prossimo a quello di distanza principale, poi calcolato e stimato dall'algoritmo software in self-calibration.

Il sistema di equazioni descritto richiede che siano note le dimensioni in millimetri del sensore e nello specifico la dimensione di un suo pixel (il cosiddetto pixel pitch). Si noti che la calibrazione in ambiente software avviene in assenza di tale informazione, ovvero a meno di quello che può essere identificato come un mero fattore di scala. Questo significa che al valore modellato della distanza principale  $f$  espresso in millimetri (Fig. 4) è associato un valore in pixel (ottenuto dal rapporto tra  $f$  in millimetri e il pixel pitch): il valore della distanza principale  $f$  in pixel è quindi utilizzato per il confronto tra i valori modellati (secondo lo schema geometrico ipotizzato in Fig. 3) e i valori stimati in ambiente Agisoft Metashape (con la funzione "Lens Calibration" e pattern a scacchiera), confronto di cui si riportano in Fig. 5 i risultati di un campione rappresentativo di prove effettuate a un ingrandimento digitale di 20×.

DIGITAL MAGNIFICATION 20×

Campione	H modelled [mm]	H estimated [mm]	f modelled [px]	f estimated [px]	GSD modelled [mm/px]	GSD estimated [mm/px]
1	101,8	99,6	13330	13041	0,0076	0,0077
2	101,8	99,0	13330	12995	0,0076	0,0076
3	101,8	101,0	13330	13013	0,0076	0,0078
4	101,8	102,0	13330	13059	0,0076	0,0078
5	101,8	99,5	13330	13084	0,0076	0,0075
6	101,8	101,0	13330	13040	0,0076	0,0077
7	101,8	101,0	13330	13477	0,0076	0,0074
8	101,8	95,0	13330	12954	0,0076	0,0073
9	101,8	102,0	13330	13413	0,0076	0,0076
10	101,8	99,9	13330	14038	0,0076	0,0071

Fig. 5. Confronto tra i valori modellati e i valori stimati dei parametri: H - distanza di presa, f - distanza principale e GSD - *Ground Sample Distance* su un insieme di test effettuati durante le campagne sperimentali (campione rappresentativo).

## Conclusioni

I microscopi portatili USB rientrano in quella nuova gamma di strumentazioni che la transizione digitale sta mettendo a servizio della rappresentazione. La strutturazione di un apparato per l'acquisizione a scala sub-millimetrica si dimostra efficiente per l'implementazione di geometrie a prese ortogonali e convergenti, nonché, come conseguenza 'secondaria', per la riduzione dei tempi richiesti per le campagne di rilievo. Le ultime sperimentazioni condotte adottando il sistema proposto hanno consentito di definire una ricostruzione tridimensionale dell'intero volume di piccoli manufatti compresi tra i 2 e i 5 cm, con GSD pari a 7÷8 micrometri [Antinozzi et al. 2022, pp. 3133-3164] contro i 12 micrometri raggiungibili con fotocamera DSLR. I modelli ottenuti da tali acquisizioni sono stati sottoposti a una verifica della stabilità dei parametri di orientamento interno per la validazione del processo di ricostruzione fotogrammetrica (fig. 5), mostrando scarti trascurabili tra i valori modellati e quelli effettivamente restituiti dalle acquisizioni, con oscillazioni minime imputabili a due fattori: l'incertezza sulla messa a fuoco, ancora difficilmente gestibile attraverso la regolazione manuale tramite ghiera, la qualità delle ottiche degli apparecchi, paragonabili a quelle di uno smartphone, ammissibili in considerazione dei costi relativamente contenuti.

I risultati degli allineamenti sono stati poi migliorati con il filtraggio dei *Tie Points*, una nota operazione che distingue e rimuove i punti che influiscono sostanzialmente sulla qualità della ricostruzione. A valle di tale procedura, la valutazione dell'accuratezza data dall'RMSE (*Root Mean Square Error*), sulle coordinate dei GCP (*Ground Control Points*) predisposti nei set di acquisizione, è sempre risultata inferiore a 0,5 *pixel*, con un errore totale più significativo compreso tra 1 e 2 decimi di mm.

La prospettiva futura è quindi orientata all'ulteriore miglioramento delle prestazioni in termini di qualità del dato e all'automazione della geometria di cattura attraverso un controllo remoto delle inclinazioni e delle rotazioni. Quest'ultimo fattore, probabilmente, trasformerà l'approccio alla rappresentazione di dettaglio e agli strumenti che la caratterizzano, svelando nuove possibilità di sperimentazioni per la disciplina del disegno.

## Note

[1] Il seguente lavoro prende le mosse dalle applicazioni sperimentali contenute in Antinozzi S., Ronchi D., Barba S. (2020). Macro e micro fotogrammetria per la virtualizzazione della laminetta orfica (V-IV a.C.) del Museo Nazionale di Vibo Valentia / Macro and

Micro Photogrammetry for the Virtualization of the Orphic Foil (V-IV B.C) of National Museum of Vibo Valentia. In A. Arena, M. Arena, R.G. Brandolino, D. Colistra, G. Ginex, D. Mediati, S. Nucifora, P. Raffa (a cura di). *Connettere. Un disegno per annodare e tessere. Atti del 42° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione / Connecting. Drawing for weaving relationships. Proceedings of the 42nd International Conference of Representation Disciplines Teachers*, pp. 1538-1555. Milano: FrancoAngeli.

#### Riferimenti bibliografici

Antinozzi S., Fiorillo F., Surdi M. (2022). Cuneiform Tablets Micro-Surveying in an Optimized Photogrammetric Configuration. In *Heritage*, vol. 5(4), pp. 3133-3164.

Arriaza M.C., Yravedra J., Domínguez-Rodrigo M., Ángel Mate-González M., Vargas E.G., Palomeque-González J.F., Aramendi J., González-Aguilera D., Baquedano E. (2017). Applications of Micro-Photogrammetry and Geometric Morphometrics to Studies of Tooth Mark Morphology: The Modern Olduvai Carnivore Site (Tanzania). In *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 488, pp. 103-112.

Collins T., Woolley S.I., Gehlken E., Ch'ng E. (2019). Automated Low-Cost Photogrammetric Acquisition of 3D Models from Small Form-Factor Artefacts. In *Electronics*, vol. 8, pp. 1441-1458.

De Paolis L.T., De Luca V., Gatto C., D'Errico G., Paladini G.I. (2020). Photogrammetric 3D Reconstruction of Small Objects for a Real-Time Fruition. In *Lecture Notes in Computer Science: Lecture Notes in Artificial Intelligence*, 12242, pp. 375-394.

Di Filippo A., Antinozzi S., Dell'Amico A., Sanseverino A. (2022). A statistical analysis for the assessment of close-range photogrammetry geometrical features. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-2/W2-2022, pp. 31-38.

Eastwood J., Sims-Waterhouse D., Piano S., Weir R., Leach R. (2021). Towards automated Photogrammetry. In *Atti del 21st International conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology (euspen). Virtuale*, 7-10 giugno 2021, Copenhagen: Technical University of Denmark.

Esmaili F., Ebadi H. (2017). Handy Microscopic Close-Range Videogrammetry. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-4, pp. 65-67.

Galantucci M.L., Guerra M.G., Lavecchia F. (2018). Photogrammetry Applied to Small and Micro Scaled Objects: A Review. In J. Ni, V. Majstorovic, D. Djurdjanovic (a cura di). *Lecture Notes in Mechanical Engineering, 3rd International Conference on the Industry 4.0 Model for Advanced Manufacturing*. Cham: Springer.

González E.R., Pastor S.C., Casals J.R. (2019). Lost Colours: Photogrammetry, Image Analysis Using the DStretch Plugin, and 3-D Modelling of Post-Firing Painted Pottery from the Southwest Iberian Peninsula. In *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, vol. 13, pp. 1-11.

Maté-González M.Á., González-Aguilera D., Linares-Matás G., Yravedra J. (2019). New Technologies Applied to Modelling Taphonomic Alterations. In *Quaternary International*, 517, pp. 4-15.

Menna F., Nocerino E., Morabito D., Farella E.M., Perini M., Remondino F. (2017). An open source low-cost automatic system for image-based 3D digitization. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W8, pp. 155-162.

Morena S., Barba S., Álvaro-Tordesillas A. (2019). Shining 3D Einscan-pro, application and validation in the field of cultural heritage, from the Chillida-Leku Museum to the Archaeological Museum of Sarno. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W18, pp. 135-142.

Paris L. (2015). Photogrammetry 2.0. In *DISEGNARECON*, vol. 8, n. 14, pp. 1-9.

Parrinello S., La Placa S., (2019). Vectorialization practices of the image drawing of the floor mosaics of the Basilica of Nativity in Bethlehem. In *SCIRES-IT, SCientific REsearch and Information Technology*, vol. 9 (II), pp. 95-104.

Thompson J.C., Tyler Faith J., Cleghorn N., Hodgkins J. (2017). Identifying the Accumulator: Making the Most of Bone Surface Modification Data. In *Journal of Archaeological Science*, vol. 85, pp. 105-113.

#### Autori

Sara Antinozzi, Università degli Studi di Salerno, santinozzi@unisa.it  
Marco Limongiello, Università degli Studi di Salerno, mlimongiello@unisa.it  
Laura A. Lopresti, Universidad Nacional de La Plata, laura.lopresti@ing.unlp.edu.ar  
Salvatore Barba, Università degli Studi di Salerno, sbarba@unisa.it

Per citare questo capitolo: Antinozzi Sara, Limongiello Marco, Lopresti Laura A., Barba Salvatore (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. (a cura di). *Transizioni. Atti del 44° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione/Transitions. Proceedings of the 44th International Conference of Representation Disciplines Teachers*. Milano: FrancoAngeli, pp. 2244-2259.





# Design and Optimisation of Image-Based Processes for Detail-Scale Acquisitions

Sara Antinozzi  
Marco Limongiello  
Laura A. Lopresti  
Salvatore Barba

## Abstract

Having access to an efficient and cost-effective three-dimensional acquisition system is often an unmet demand for those wishing to generate and disseminate digital models of small or very small objects. Pointing to represent large-scale geometries and textures that are not always visible to the naked eye, this work evaluates innovative image-based hardware solutions to reconstruct highly detailed digital models. The possibility of displaying a large amount of data at a reproduction ratio greater than 1:1 is pursued by introducing specific accessories, designed *ad hoc* for the acquisition phase. Thanks to these, the scientific employment of new devices, the portable USB digital microscopes, becomes feasible. Further attention is also paid to the identification of a geometric camera model compatible with these microscopes for the identification and verification of the main distance. Through the interaction of different knowledge, the work proves how the photogrammetric process can also be made accessible to devices not initially conceived for such applications, exposing new transitions and research opportunities.

## Keywords

Digital transition, USB microscopes, Prototyping, Photogrammetric paradigm, Sub-millimetre scale



Manufacturing and assembling the 3DINO system components for the photogrammetric use of USB microscopes.

## A brief overview of the state of the art

One of the most interesting aspects of what nowadays is configured as 'digital transition' is the progressive interaction-integration of related disciplinary fields. This is more emblematic than ever for the specific image-based survey and representation procedures, revolutionised – also in the variety of applications – by the design of new instruments, automatised, compact and now available at much more accessible costs than in the past [Paris 2015, pp. 1-9]. This is now increasingly common to come across, for example, using image-based solutions for sub-millimetre scale surveys, as well as for traditional applications at architectural or terrain restitution scales. Those solutions provide a viable alternative to more specialised techniques and instrumentation [Arrianza et al. 2017, pp. 103-112; Mate-González et al. 2019, pp. 4-15; Thompson et al. 2017, pp. 105-113; González et al. 2019], especially for fields that are increasingly venturing into the digital acquisition of small objects, at levels of detail and accuracy that are necessarily high (hundredths and tenths of a millimetre, respectively), just as is occurring in cultural heritage [Parrinello et al. 2019, pp. 95-104]. However, the rigour to which photogrammetry is exposed in the case of very narrow distances (the very close-range photogrammetry), as well as the desire to systematise applications at a relatively low-cost, are issues that are susceptible to implementation and are still the subject of in-depth studies [Galantucci et al. 2018, pp. 57-77; Morena et al. 2019, pp. 135-142]. Particularly, the focus nowadays is pointing on streamlining photogrammetric workflows, with the adoption of operative solutions based on stabilising the sensor, the use of turntables and coded targets, increased control of camera settings and lighting for improving model quality [Collins et al. 2019, pp. 1441-1458; Menna et al. 2017, pp. 155-162; De Paolis et al. 2020, pp. 375-394; Eastwood et al. 2021].

## The USB microscope novelty

Recently, an emphasis is being placed on a new low-cost sensor technology. In this context, another type of portable and accessible device has approached the photogrammetric scene, capable of satisfying the need to magnify the subject to be represented: the portable USB microscopes. These are configured as systems composed of a macro zoom lens connected to a camera interfaced, via software, directly with a computer display (without the need for an eyepiece). The final image quality is still depending on the lens and sensor technology, as well as the additional illumination (integrated LED light sources surrounding the lens). Some models also allow for exposure adjustment, whereas the diaphragm is usually fixed; a numbered dial allows the magnification to be set by adjusting the lens system for focusing. Two different approaches can still be followed to operate such devices. The first is referred to as 'Distance-based': the device is set at a predetermined distance, and the resulting focus and magnification is adjusted accordingly. The second one is defined as 'Magnification-based': the device is used at a predetermined magnification, consequently it is then manually positioned at the distance that allows the sample (or a specific portion thereof) to be observed at sufficient sharpness.

The most interesting aspect of these devices is that, with a low-cost budget of a few hundred euros, they offer high magnification capabilities combined with their compact size. It should be considered that magnification is a parameter 'relative' to the display window dimensions of the microscope's software interface, which implies the dependence of magnification on the size of the monitor image, as well as on the specifications of the monitor itself (and, of course, of the embedded camera sensor). The magnification of USB microscopes shown on the dial (fig. 1) is, in fact, associated with a 'high' numerical value without necessarily being matched by an equally high-quality image. This is due to forms of interpolation that significantly alter the resolving power of the microscope – through the combination of several adjacent pixels into a single larger pixel – to the benefit of the acquisition phase, to obtain correctly exposed shots quickly, but to the detriment of the quality yield of the final image, with a reduction in the native resolution. In addition to that, the magnification used effectively may deviate from the values shown on the dial itself, and this can be verified by comparing the actual size of a specimen with the size occupied on the screen, i.e., by using a graduated

scale that can facilitate computation and verification of the magnification ratio. In case of the Dino-Lite microscopes, for instance, the owner software designed for the acquisition, 'Dino-Capture 2.0', presents an interface consisting of a 'capture window' for displaying the framed, self-adjusted area, measuring 213×157 mm for a 15" monitor at 2560×1440 px resolution (fig. 1). Operating with a magnification value of 50× on the dial, it can be observed that 5 mm of reality corresponds to a 135.5 mm segment displayed on the screen, resulting in an

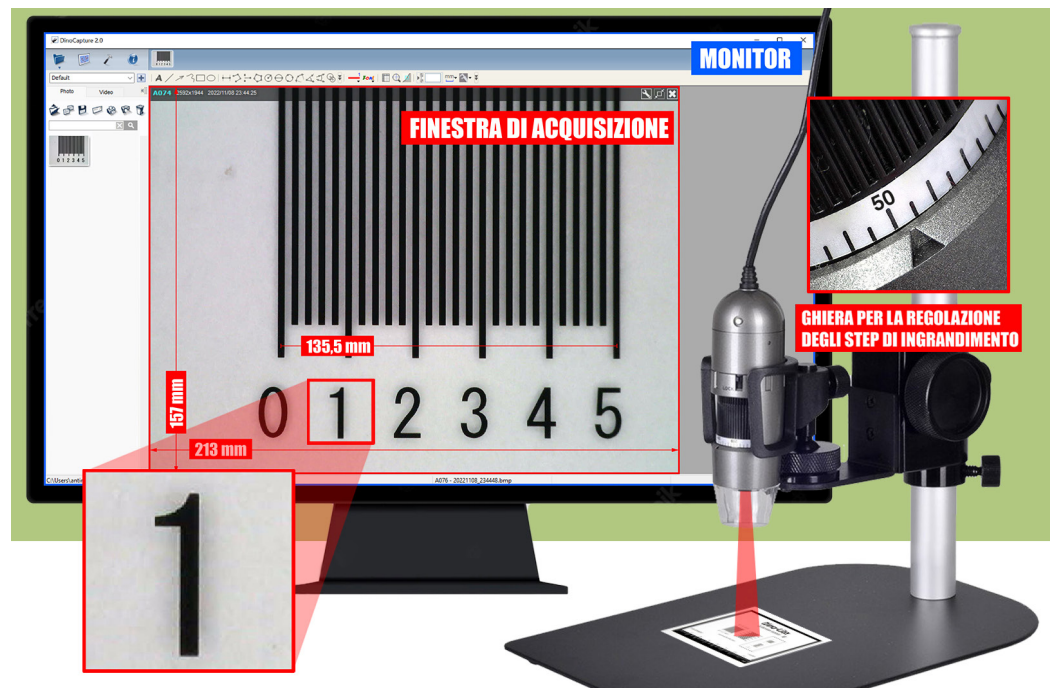


Fig. 1. Dino-Lite's proprietary software, 'DinoCapture 2.0', displaying the image area framed and highlighting a portion of the image shown with a 100% zoom, operating with a magnification value of 50× by dial adjustment.

effective magnification of approximately  $27\times$  ( $\cong 135.5/5$ ). This discrepancy can be attributed to the manufacturers' decision to take  $1280\times 720$  px, also known as HD, as the monitor resolution reference value, which was a real standard only a few years ago. Those USB portable microscopes are rarely used for three-dimensional reconstructions of the entire volume of the sample under examination, due the absence of additional components such as holders and calibrators to adapt them for photogrammetric purposes. Less unusual, on the other hand, are partial modelling of items whose bidimensionality is prevalent, as mentioned by a 2017 study [Esmæili et al. 2017, pp. 65-67], which suggested a first photogrammetric use of this peculiar instrumentation. These insights form the basis of the studies conducted to imagine an inclusion of USB microscopes in the photogrammetric workflow, with adequate and verified accuracies and precisions, according to an optimised process for their widespread use [1].

### Towards an optimised process

Customised dedicated accessories can provide better control of the photogrammetric process in case of professional equipment and even better results in the case of more entry-level ones. With reference to the use of USB microscopes, moreover, the need for *ad hoc* designed components is further motivated by specific factors, such as the extremely reduced field of view, the difficult control of vibrations, the opportunity to conduct acquisitions by converging captures and the high number of photos to be taken in a hopefully limited time.

Furthermore, pointing at the optimisation of surveying processes, these factors should always be considered to speed up workflows and for the robustness of the model produced.

The first aspect can be pursued designing specific hardware components, such as: accessories for the advantageous positioning of the object with respect to the optics, in order to reduce the number of photos to the required minimum; metric references for the definition of a local coor-

dinate system, for model scaling and capture alignment procedure improvement; lighting to guarantee diffuse illumination conditions, so as to minimise variations in shadow intensity, light and colour according to the different positions that the object assumes during the acquisition phase. These necessary implementations were systematised by prototyping with initial low-cost budget, complete and portable configuration based on the photogrammetric use of USB microscopes, verifying the possibility of bringing the different hardware components together in a single system: 3DINO thus consists of a series of mechanical mounts whose frame is entirely 3D printed and whose accessory components are generally standard parts available on the market. Although the system is designed for small photo sensors, the modularity idea behind its conception also allows it to be used in the case of photogrammetric sets for SLR cameras. The optical unit can be tilted with respect to the object to be digitised, an operation ensured by the C-shaped structure of the rib element (at number 10 in fig. 2) to which, in addition, a micrometric slide is attached to accommodate the microscope, also allowing its radial movement towards the centre of the system (at numbers 7 and 8). This translation allows the optical unit to move closer to or further away from the object, with the advantage of precisely accommodating the focusing distance, following the distance-based approach. In brief, these components work like '4-way' camera heads, with which the camera can respectively move along two orthogonal axes (main z-axis and main r-axis in fig. 2); the object is instead positioned on a central stand that can be adjusted in height and, thanks to a joint, rotated 360° with respect to the vertical axis, thus allowing a complete relative revolution to be performed for each camera tilt.

3DINO is thus designed for an acquisition with converging captures always orthogonal to the surface of the object, i.e., the axis of the camera is orthogonal to the plane tangent to the surface with respect to the trace of the axis itself, achieving the best condition from a photogrammetric point of view.

The second and most important aspect addressed, summarised here, concerns the Structure from Motion (SfM) processes, to be finalised for modelling attributes that are not only representative, but also reliable [di Filippo et al. 2022, pp. 31-38] through the accuracy determination of the photogrammetric model in relation to its geometric characteristics.

This objective was initially pursued by producing and employing 1 mm spaced checkerboard patterns on adhesive paper then fixed to flat rigid supports, sized in function of the available area of the microscope, in accordance with a predetermined digital magnification (approx. 19.8×14.9 mm at 20×). The patterns are used as bidimensional calibration templates (fig. 3) in combination with Agisoft Metashape's 'Lens Calibration' function for the estimation of the camera's internal orientation parameters. In fact, the determination of the internal orientation parameters is extremely significant for the accuracy of 3D reconstructions, as well as for reducing the number of unknowns in the collinearity equations and thus accelerating the Bundle-Block Adjustment procedure. Therefore, as the output of the USB microscopes lacks EXIF data, attention was necessarily turned to identifying a geometric model compatible with the USB microscope used (the Dino-Lite AM 7013 MZT, <www.dino-lite.eu/it/component/eshop/am-7013mzt?Itemid=0>) and verifying the main distance estimated with 'Lens Calibration'. Thus, on the basis of the proportionality relationship between the object in real space and its image on the sensor plane (fig. 3), it is possible to admit that the framed field  $X_{FOV}$  at a given magnification – i.e. for a given position of the optical centre to which one associates specific 'principal distance'  $f$  and 'capture distance'  $H$  – is related to the corresponding area occupied by the image on the sensor,  $X_s$ . This allows the unknown parameters  $f$  and  $H$  for each magnification of the USB microscope to be derived from the system's resolution (then tabulated in fig. 4):

$$\begin{cases} \frac{X_s}{X_{FOV}} = \frac{f}{H} \\ f + H = D \end{cases}$$

These values of  $f$  and  $H$ , derived from the geometric model in fig. 3, and the corresponding values estimated in the Agisoft Metashape environment, according to the 'Lens Calibration' function and the use of the checkerboard pattern, were then compared to assess the robustness of the assumptions made for the formulation of the projection model that acceptably approximates the geometry of the capture system.

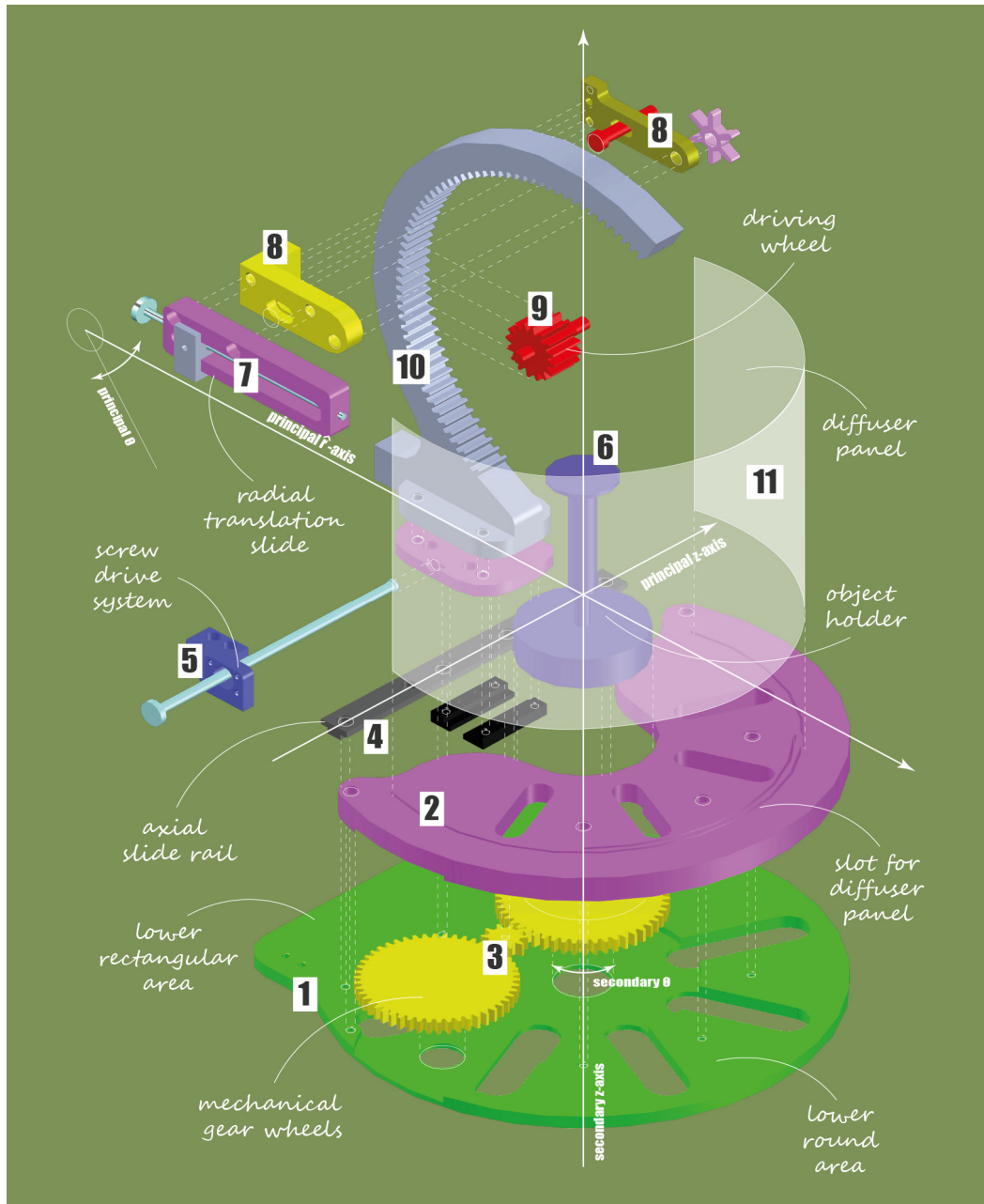


Fig. 2. Graphical diagrams of the first prototype of the 3DINO system based on the photogrammetric use of USB microscopes. The different parts, the base (numbers 1 to 5), the rib (7 to 10) and the holder (6), are properly connected and moved independently. Graphic elaboration by S. Antinozzi.

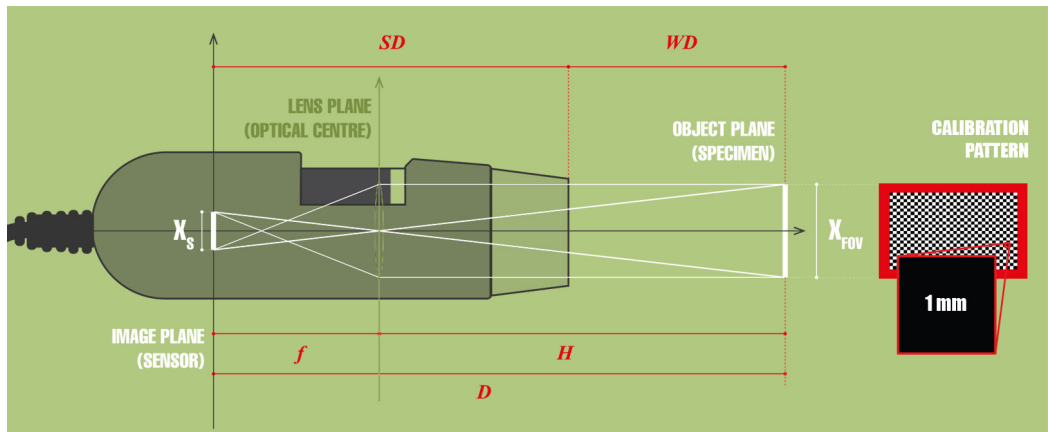


Fig. 3. Identification of a geometric camera model of the USB microscope with the following distances shown: from the sensor to the optical centre ( $f$  - Principal Distance); from the optical centre to the object ( $H$  - Capture Distance); from the sensor to the end of the microscope nozzle ( $SD$  - Sensor Distance); from the microscope nozzle to the object ( $WD$  - Working Distance).

Fig. 4. Data sheet for the determination of a modelled value of Capture Distance H and Principal Distance f, corresponding to different magnification values of the Dino-Lite AM 7013 MZT microscope, to be able to carry out a control by the observer on the quality of the orientation phase performed in the software environment in the absence of EXIF data.

DINO-LITE AM 7013 MZT												
Digital magnification	Optical magnification	WD [mm]	SD [mm]	I [mm]	D [mm]	$\chi_s$	$\chi_{FOV}$	GSD [mm/px]	H [mm]	f [mm]	f [px]	
20×	0,2×	48,7	72,0	15,92	120,7	3,7	19,8	0,0076	101,8	18,9	13330,0	
30×	0,3×	21,7	72,0	15,95	93,7	3,7	12,7	0,0050	73,3	20,4	14396,6	
40×	0,4×	9,0	72,0	15,98	81,0	3,7	9,9	0,0038	59,1	21,9	15471,8	
50×	0,5×	1,9	72,0	16,01	73,9	3,7	7,9	0,0030	50,5	23,4	16555,6	

### Conclusions

Portable USB microscopes are one of the new types of equipment the digital transition is leading to the image industry. The making of a tool for sub-millimetre scale acquisition demonstrates effectiveness in the use of orthogonal and convergent capture geometry and, as a 'secondary' consequence, in the decrease of survey campaign duration. The latest experiments carried out by the implementation of the proposed system have made it possible to define a three-dimensional reconstruction of the entire volume of small artefacts between 2 and 5 cm, with a GSD equal to 7÷8 micrometres [Antinozzi et al. 2022, pp. 3133-3164] as opposed to the 12 micrometres achievable with a DSLR camera. The models obtained from these acquisitions were subjected to a check on the stability of the internal orientation parameters for the validation of the photogrammetric reconstruction process (fig. 5), showing negligible deviations between the modelled values and those actually obtained from the acquisitions, with minimal fluctuations attributable to two factors: the uncertainty on focusing, which is still difficult to manage through manual adjustment by means of a ring dial, and the quality of the optics of the devices, which are comparable to those of a smartphone, which are acceptable in consideration of their relatively low-cost.

DIGITAL MAGNIFICATION 20×						
Campione	H modelled [mm]	H estimated [mm]	f modelled [px]	f estimated [px]	GSD modelled [mm/px]	GSD estimated [mm/px]
1	101,8	99,6	13330	13041	0,0076	0,0077
2	101,8	99,0	13330	12995	0,0076	0,0076
3	101,8	101,0	13330	13013	0,0076	0,0078
4	101,8	102,0	13330	13059	0,0076	0,0078
5	101,8	99,5	13330	13084	0,0076	0,0075
6	101,8	101,0	13330	13040	0,0076	0,0077
7	101,8	101,0	13330	13477	0,0076	0,0074
8	101,8	95,0	13330	12954	0,0076	0,0073
9	101,8	102,0	13330	13413	0,0076	0,0076
10	101,8	99,9	13330	14038	0,0076	0,0071

Fig. 5. Comparison between modelled and estimated values of the parameters: H - Capture Distance, f - Principal Distance and GSD - Ground Sample Distance on a series of trials carried out during the experimental campaigns (representative sample).

The alignment results obtained has been improved with the filtering of Tie Points, a well-known operation that distinguishes and removes points that substantially affect the quality of the reconstruction. Following this procedure, the accuracy assessment given by the RMSE (Root Mean Square Error), on the coordinates of the GCPs (Ground Control Points) arranged in the acquisition sets, was always less than 0.5 pixels, with a most significant total error between 1 and 2 tenths of mm.

The outlook is therefore geared towards further improving performance in terms of data quality and automating capture geometry through remote control of tilts and rotations. This last factor is probably leading to transform the approach to detail representation and the tools that characterise it, revealing new possibilities for experimentation in the drawing disciplines.

## Notes

[1] The following work builds on the experimental applications contained in Antinozzi S., Ronchi D., Barba S. (2020). Macro e micro fotogrammetria per la virtualizzazione della laminetta orfica (V-IV a.C.) del Museo Nazionale di Vibo Valentia / Macro and Micro Photogrammetry for the Virtualization of the Orphic Foil (V-IV B.C) of National Museum of Vibo Valentia. In A. Arena, M. Arena, R.G. Brandolino, D. Colistra, G. Ginex, D. Mediati, S. Nucifora, P. Raffa (Eds.). *Connettere. Un disegno per annodare e tessere. Atti del 42° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione / Connecting. Drawing for weaving relationships. Proceedings of the 42nd International Conference of Representation Disciplines Teachers*, pp. 1538-1555. Milan: FrancoAngeli.

## References

- Antinozzi S., Fiorillo F., Surdi M. (2022). Cuneiform Tablets Micro-Surveying in an Optimized Photogrammetric Configuration. In *Heritage*, Vol. 5(4), pp. 3133-3164.
- Arriaza M.C., Yravedra J., Domínguez-Rodrigo M., Ángel Mate-González M., Vargas E.G., Palomeque-González J.F., Aramendi J., González-Aguilera D., Baquedano E. (2017). Applications of Micro-Photogrammetry and Geometric Morphometrics to Studies of Tooth Mark Morphology: The Modern Olduvai Carnivore Site (Tanzania). In *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 488, pp. 103-112.
- Collins T., Woolley S.I., Gehlken E., Ch'ng E. (2019). Automated Low-Cost Photogrammetric Acquisition of 3D Models from Small Form-Factor Artefacts. In *Electronics*, Vol. 8, pp. 1441-1458.
- De Paolis L.T., De Luca V., Gatto C., D'Errico G., Paladini G.I. (2020). Photogrammetric 3D Reconstruction of Small Objects for a Real-Time Fruition. In *Lecture Notes in Computer Science: Lecture Notes in Artificial Intelligence*, 12242, pp. 375-394.
- di Filippo A., Antinozzi S., Dell'Amico A., Sanseverino A. (2022). A statistical analysis for the assessment of close-range photogrammetry geometrical features. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-2/W2-2022, pp. 31-38.
- Eastwood J., Sims-Waterhouse D., Piano S., Weir R., Leach R. (2021). Towards automated Photogrammetry. In *proceedings of the 21st International conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology (euspen)*. Virtual, 7-10 June 2021, Copenhagen: Technical University of Denmark.
- Esmaili F., Ebadi H. (2017). Handy Microscopic Close-Range Videogrammetry. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-4, pp. 65-67.
- Galantucci M.L., Guerra M.G., Lavecchia F. (2018). Photogrammetry Applied to Small and Micro Scaled Objects: A Review. In J. Ni, V. Majstorovic, D. Djurdjanovic (Eds.). *Lecture Notes in Mechanical Engineering, 3rd International Conference on the Industry 4.0 Model for Advanced Manufacturing*. Cham: Springer.
- González E.R., Pastor S.C., Casals J.R. (2019). Lost Colours: Photogrammetry, Image Analysis Using the DStretch Plugin, and 3-D Modelling of Post-Firing Painted Pottery from the Southwest Iberian Peninsula. In *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, Vol. 13, pp. 1-11.
- Maté-González M.Á., González-Aguilera D., Linares-Matás G., Yravedra J. (2019). New Technologies Applied to Modelling Taphonomic Alterations. In *Quaternary International*, 517, pp. 4-15.
- Menna F., Nocerino E., Morabito D., Farella E.M., Perini M., Remondino F. (2017). An open source low-cost automatic system for image-based 3D digitization. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W8, pp. 155-162.
- Morena S., Barba S., Álvaro-Tordesillas A. (2019). Shining 3D Einscan-pro, application and validation in the field of cultural heritage, from the Chillida-Leku Museum to the Archaeological Museum of Sarno. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W18, pp. 135-142.

Paris L. (2015). Photogrammetry 2.0. In *DISEGNARECON*, Vol. 8, No. 14, pp. 1-9.

Parrinello S., La Placa S., (2019). Vectorialization practices of the image drawing of the floor mosaics of the Basilica of Nativity in Bethlehem. In *SCIRES-IT, SCientific RESearch and Information Technology*, Vol. 9 (II), pp. 95-104.

Thompson J.C., Tyler Faith J., Cleghorn N., Hodgkins J. (2017). Identifying the Accumulator: Making the Most of Bone Surface Modification Data. In *Journal of Archaeological Science*, Vol. 85, pp. 105-113.

#### Authors

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

Marco Limongiello, Università degli Studi di Salerno, mlimongiello@unisa.it

Laura A. Lopresti, Universidad Nacional de La Plata, laura.lopresti@ing.unlp.edu.ar

Salvatore Barba, Università degli Studi di Salerno, sbarba@unisa.it

*To cite this chapter:* Antinozzi Sara, Limongiello Marco, Lopresti Laura A., Barba Salvatore (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. Atti del 44° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione/Transitions. Proceedings of the 44th International Conference of Representation Disciplines Teachers*. Milano: FrancoAngeli, pp. 2244-2259.