

A cura di Stefano FURLANI, a.a. 2020-2021

SFM: STRUCTURE FROM MOTION

Programma

OBIETTIVI DELLA LEZIONE

LA LEZIONE

- × Cos'è il metodo Structure-from-Motion (SfM)
- × Linee guida per l'utilizzo del metodo
- × SfM per fotogrammetria terrestre
- × SfM per fotogrammetria UAV

INTRODUZIONE

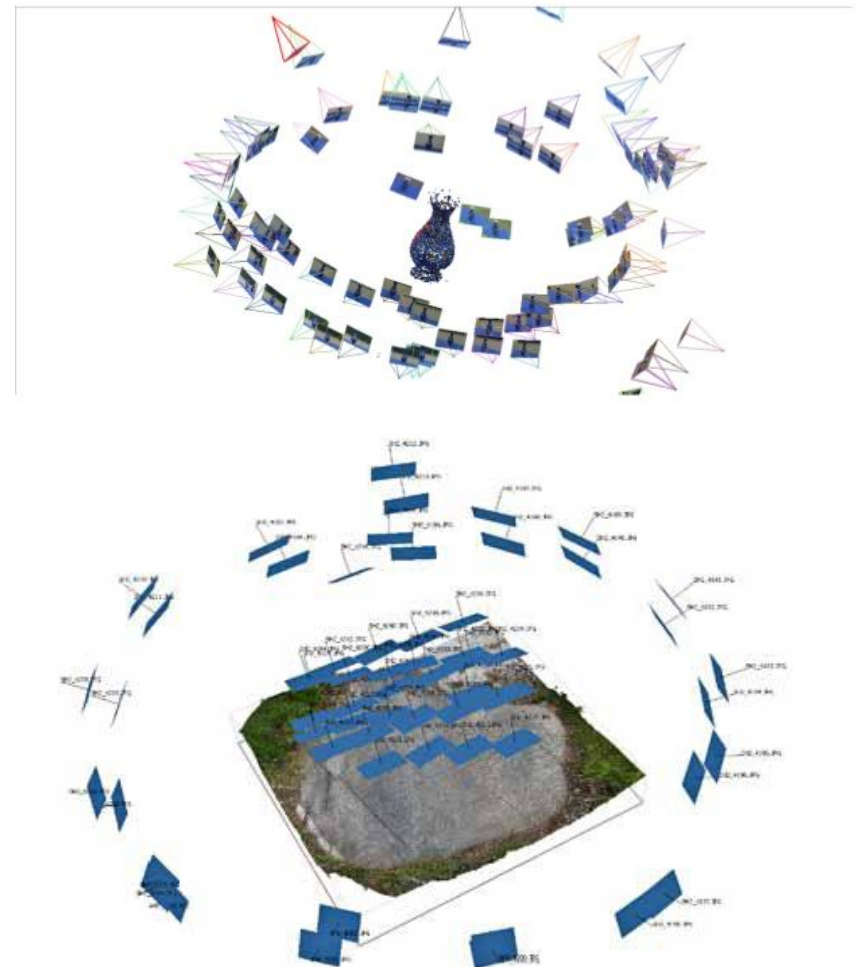
APPROCCIO ALLA GEOMORFOLOGIA APPLICATA

- × Grazie alla possibilità di creare modelli tridimensionali, SfM è un approccio molto valido per l'acquisizione ed elaborazione di dati topografici
- × Tradizionalmente la ricerca topografica era focalizzata nella creazione di digital elevation models (DEMs) che facevano uso della fotogrammetria associata a dati dGPS (differential GPS)
- × Recentemente laser scanner terrestri e Lidar hanno permesso di acquisire grandi moli di dati ad alta risoluzione



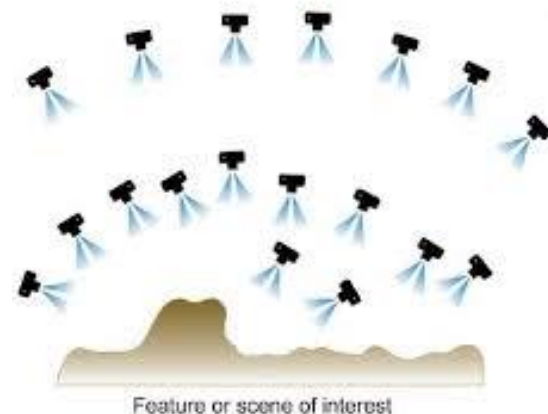
- ✘ Si tratta comunque di tecnologie piuttosto costose, che richiedono strumentazioni molto costose ed expertise nell'elaborazione dei dati;
- ✘ Il metodo Structure from Motion (SfM) fornisce una opportunità di acquisizione di dati tridimensionali low-cost;
- ✘ Abilità di elaborazione inferiori ad altre tecniche

Bundle Adjustment



COME FUNZIONA?

- × Si basa, come per altre tecniche fotogrammetriche, dell'utilizzo di immagini sovrapposte acquisite da punti di vista diversi
- × La differenza sta nella determinazione della geometria interna della fotocamera e la determinazione della posizione e dell'orientazione automatica della stessa
- × Inoltre non è necessario un set predefinito di «control points» visibili in posizioni note



Perspective



Faces: 199999 vertices: 117476

Photos



P1040294.JPG



P1040295.JPG



P1040296.JPG



P1040297.JPG



P1040298.JPG



P1040299.JPG



P1040300.JPG



P1040301.JPG



P1040302.JPG



P1040303.JPG



P1040304.JPG



P1040305.JPG



P1040306.JPG



P1040307.JPG



P1040308.JPG



P1040309.JPG



P1040310.JPG

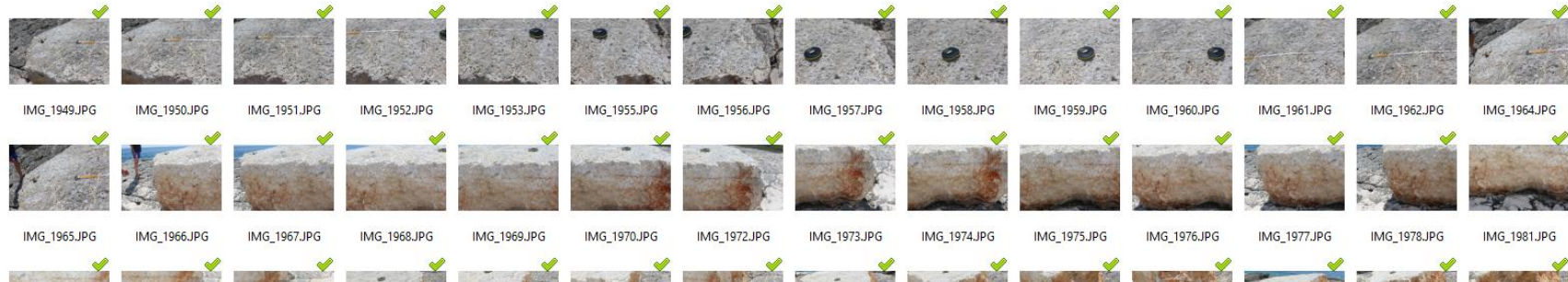
MODELLO 3D DI BULDER (PREMANTURA, HR)

Perspective 30°



faces: 9,620 vertices: 4,888

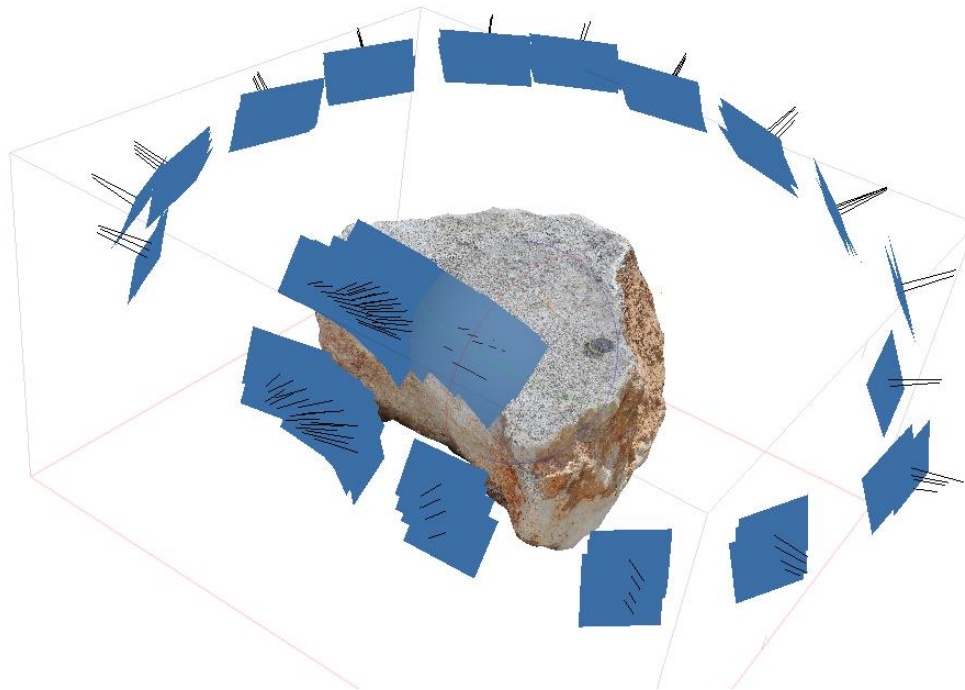
Photos



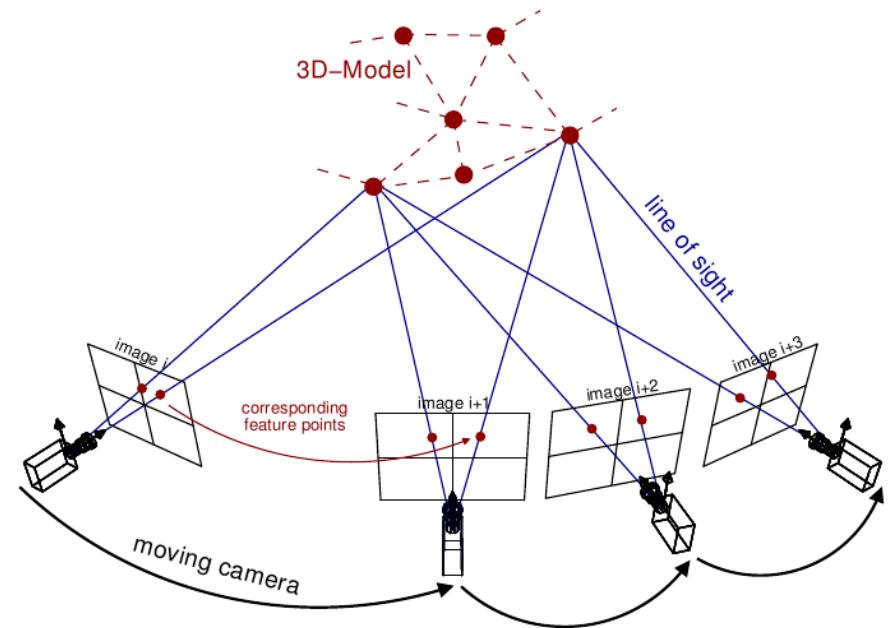
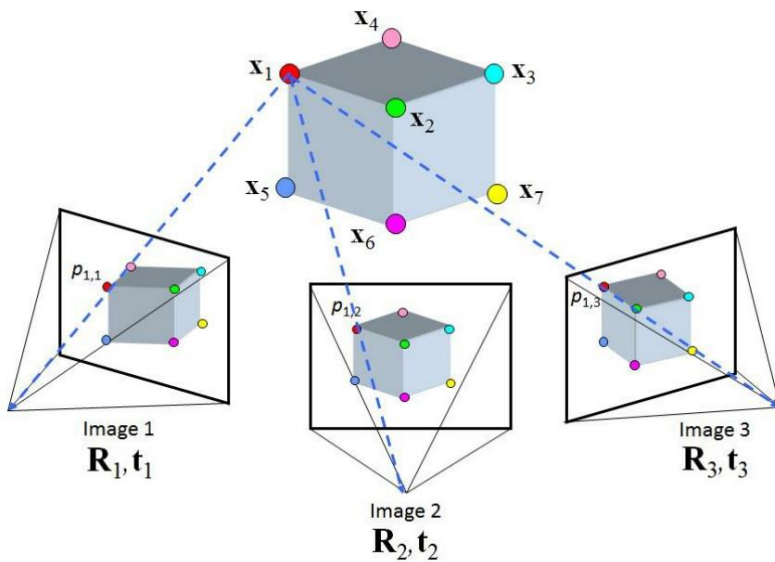
IMG_1949.JPG IMG_1950.JPG IMG_1951.JPG IMG_1952.JPG IMG_1953.JPG IMG_1955.JPG IMG_1956.JPG IMG_1957.JPG IMG_1958.JPG IMG_1959.JPG IMG_1960.JPG IMG_1961.JPG IMG_1962.JPG IMG_1964.JPG
IMG_1965.JPG IMG_1966.JPG IMG_1967.JPG IMG_1968.JPG IMG_1969.JPG IMG_1970.JPG IMG_1972.JPG IMG_1973.JPG IMG_1974.JPG IMG_1975.JPG IMG_1976.JPG IMG_1977.JPG IMG_1978.JPG IMG_1981.JPG

COSA SERVE?

- × Il nome deriva dalla necessità di avere un alto grado di sovrapposizione tra le immagini per coprire l'intera geometria dell'oggetto, da cui deriva anche il nome del metodo

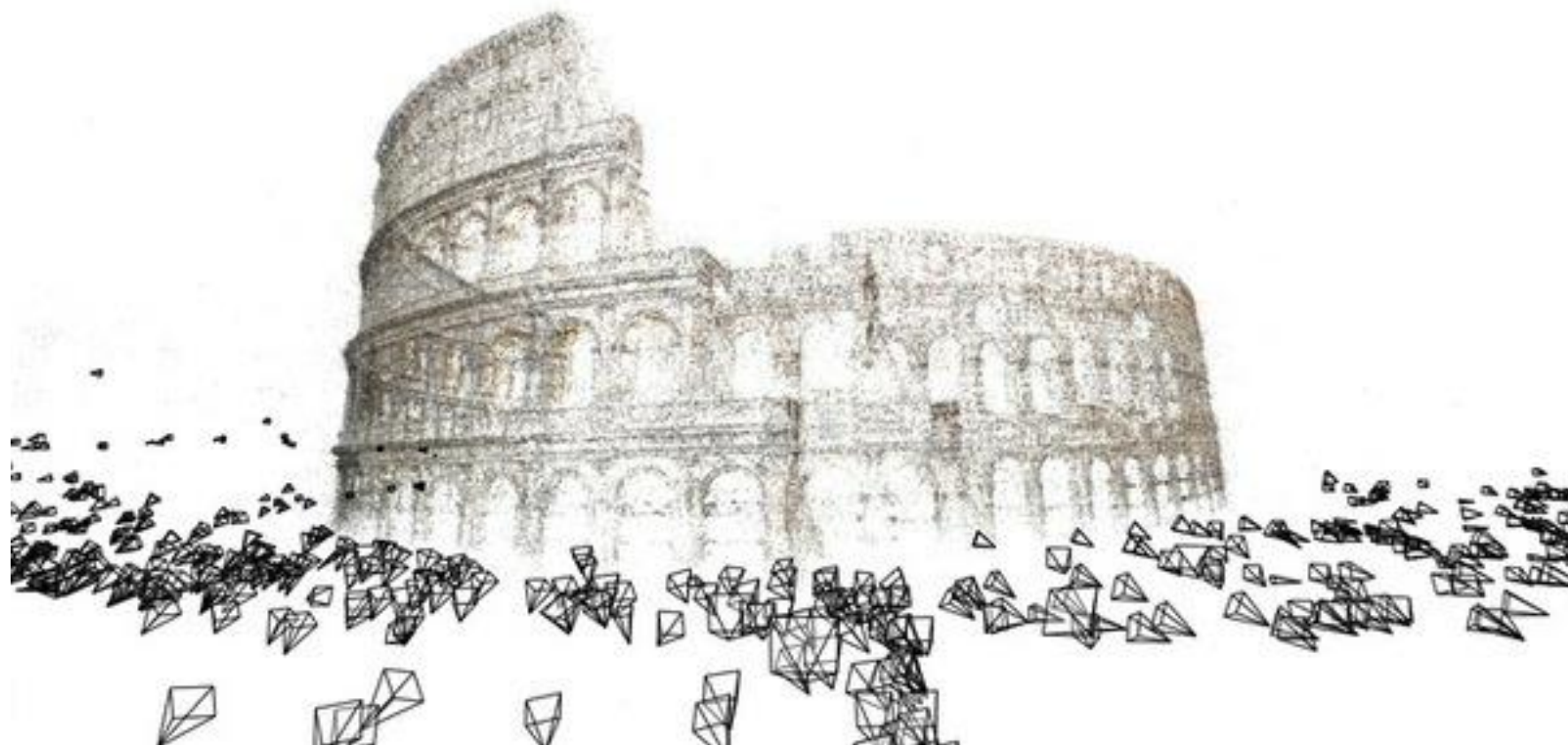


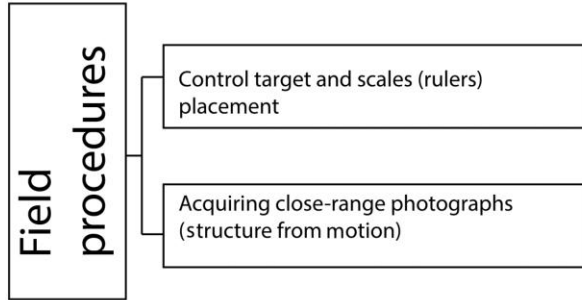
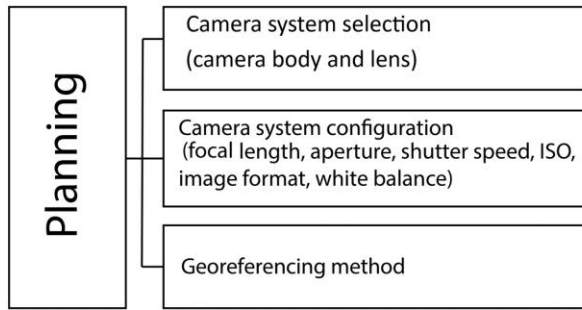
- ✘ Viste multiple di uno stesso oggetto sono catturate con un apparecchio fotografico da un range di posizioni differenti



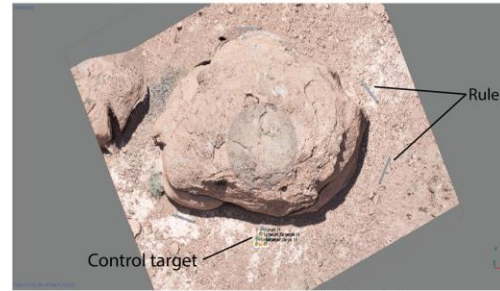
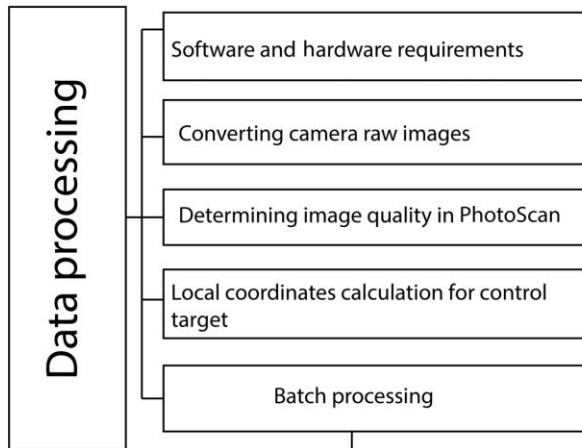
-
- × A questo punto, un procedimento di trasformazione SIFT (scale invariant feature transform) di scala invariante della feature (es. i punti d'angolo, ecc) permette di identificare punti con caratteristiche comuni all'interno del set di immagini, sufficiente per stabilire la relazione spaziale tra la posizione iniziale dell'immagine in un sistema arbitrario di coordinate 3-D;
 - × Non servono necessariamente punti noti (caposaldi, ecc);
 - × Le caratteristiche rilevate da tutte le immagini saranno poi incrociate

MODELLO TRIDIMENSIONALE

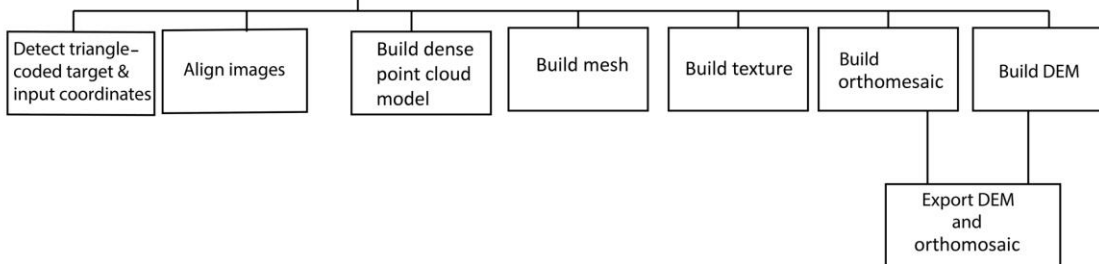


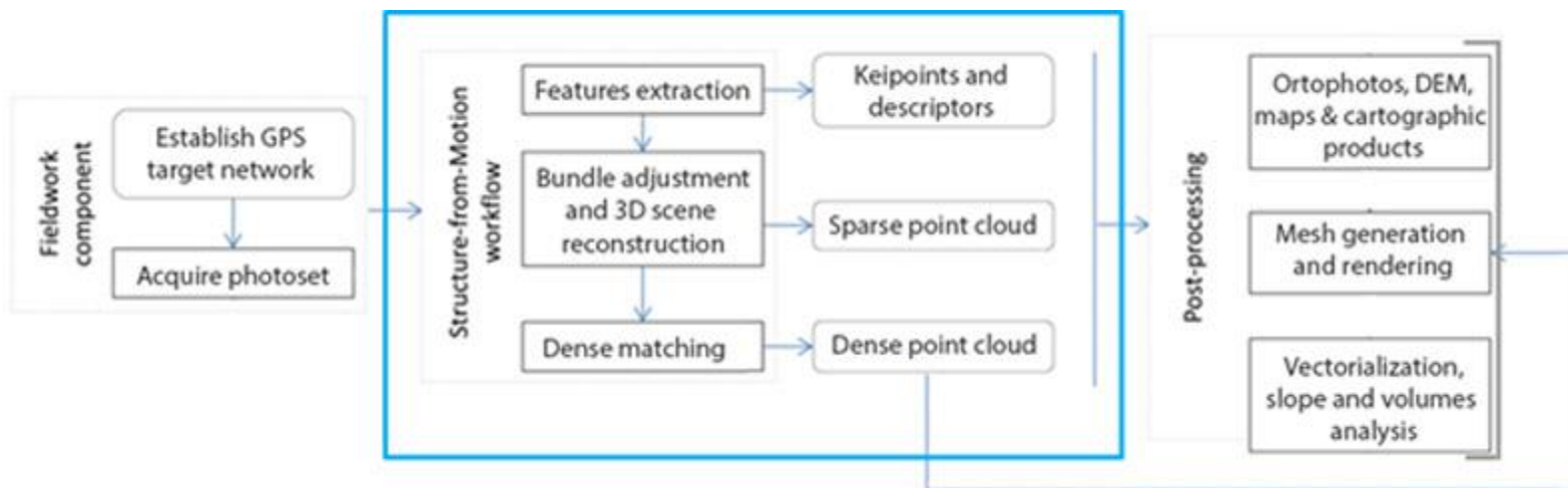


Control target

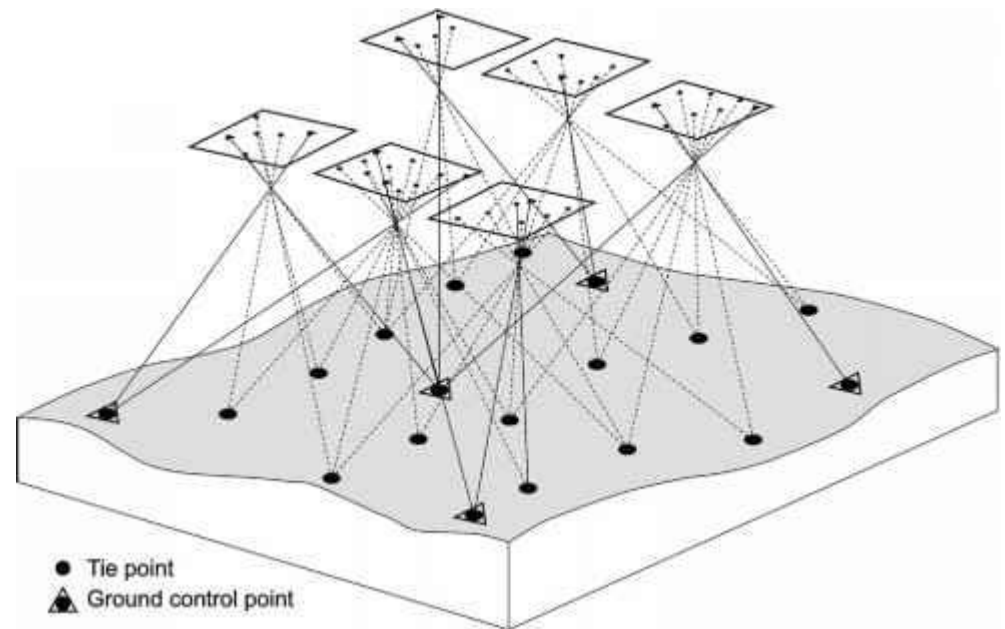
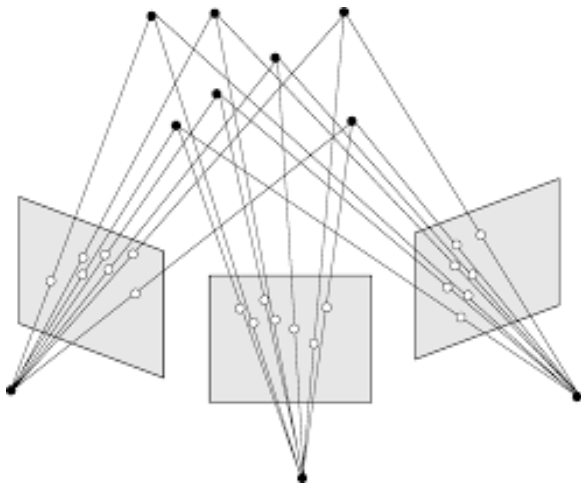


Textured model of a boulder





- ✘ Una sparse bundle adjustment (it. regolazione sparsa del fascio, es. Snavely et al., 2008), viene utilizzata per trasformare le coordinate dell'immagine in punti 3D che coprono tutta l'area di interesse.



-
- × Il risultato finale è un posizionamento tridimensionale della feature point in forma di sparse point cloud, nello stesso Sistema di coordinate locali 3-D.

-
- × La corrispondenza di key-point accurate richiede la disponibilità di texture distinti che appaiano nell'immagine;
 - × Questo punto può essere problematico in determinate condizioni di luce o determinati oggetti (può essere necessario un post-processing dell'immagine per incrementare il numero di punti elaborate);



-
- × La sparse point cloud (nuvola sparsa) viene quindi intensificata usando tecniche di Multi View Stereo (MVS, es. Furukawa and Ponce, 2010; Rothermel *et al.*, 2012).
 - × Questa tecnica permette di generare dataset ad altissima risoluzione, isolando e rimuovendo errori grossolani, e permettendo la visualizzazione in maniera molto semplice di modelli 3-D, rispetto alle elaborazioni tradizionali stereoscopiche

-
- × A causa della semplicità con cui la distorsione del sensore può essere modellata, tutti gli utilizzatori di fotocamere digitali, incluse le fotocamere degli “*smartphone*”, possono acquisire dati geomorfici utili

SOFTWARE INTERNET-BASED

An aerial photograph of a rural landscape. The central area is a large, open field with a mix of green and brown grass. A small, dark pond is visible in the middle-right section of the field. The field is bordered by dense, leafless trees, suggesting a late autumn or winter setting. In the lower part of the field, there are several small, dark structures or vehicles parked in a line.

- ✘ Esistono anche software low-cost, liberi, internet-based, in grado di caricare, processare e scaricare 3-D data in pochi minuti, quasi potenzialmente durante i rilievi di campagna.

-
- × Molto più efficace dei sistemi tradizionali, in cui l'utilizzatore doveva definire esplicitamente i parametri di orientazione interna ed esterna

PRO E CONTRO

- ✘ Molte piattaforme SfM sono ora completamente automatizzate;
- ✘ il vantaggio di SfM è che fornisce un “black-box tool” dove non è necessaria una supervisione esperta;
- ✘ Questo può essere anche uno svantaggio, nel senso che l’utente è molto meno coinvolto nel controllo della qualità dei dati e può essere complicato trovare l’origine degli errori nei dati.

COSA DERIVA DALLA FOTOGRAMMETRIA

-
- ✘ Il termine Structure-from-Motion si è sviluppato dalla comunità della cosiddetta “machine vision”, in particolare per tracciare punti attraverso le sequenze di immagini occupate da posizioni differenti
 - ✘ SfM deve la sua esistenza alle innovazioni ed ai modelli matematici sviluppati molte generazioni fa, in particolare la fotogrammetria. La condizione di coplanarità, ora usata per stabilire la relazione spaziale tra immagini, è stata applicata negli anni tra il 1950 ed il 1960 per la triangolazione aerea numerica e cartografia dalla fotografia aerea

-
- × L'aggiustamento del fascio, che implementa le condizioni di colinearità per stabilire una relazione matematica rigorosa tra immagini ed oggetti (Brown, 1971, 1976), Kenefick *et al.* (1972) e Granshaw (1980).
 - × Le immagini sono solitamente soggette a distorsioni. Solo fotocamere perfettamente metriche generano immagini che sono libere da distorsione.



CORREZIONI

Si può procedere con aggiustamenti “self-calibrating” bundle (Kenefick *et al.*, 1972; Faig and Moniwa, 1973) già presenti nei software di SfM che stimano i parametri delle distorsioni interne associate con molte fotocamere digitali di largo consumo.

Camera Calibration

HERO6 Black (3mr)
10 images, 4000x3000

Camera type: Fisheye

Pixel size (mm): 0.00173066 x 0.00173066

Focal length (mm): 3

Enable rolling shutter compensation Film camera with fiducial marks

Initial Adjusted Bands GPS/INS Offset

Type: Auto

f: 1733.43811

cx: 0 b1: 0

cy: 0 b2: 0

k1: 0 p1: 0

k2: 0 p2: 0

k3: 0 p3: 0

k4: 0 p4: 0

Fixed parameters: None

Photo-invariant parameters: None

Camera label	Resolution	Camera model	Focal length
G0900022.JPG	4000x3000	HERO6 Black	3
G0900021.JPG	4000x3000	HERO6 Black	3
G0900020.JPG	4000x3000	HERO6 Black	3
G0900019.JPG	4000x3000	HERO6 Black	3

OK Cancel

-
- × Alcuni software, anche free, consentono di utilizzare contemporaneamente fotocamere diverse, con procedure di correzione abbastanza complesse.
 - × Ogni cornice può quindi essere calibrata individualmente ed una sovrapposizione della geometria/immagine inappropriata può generare modelli non accurati.

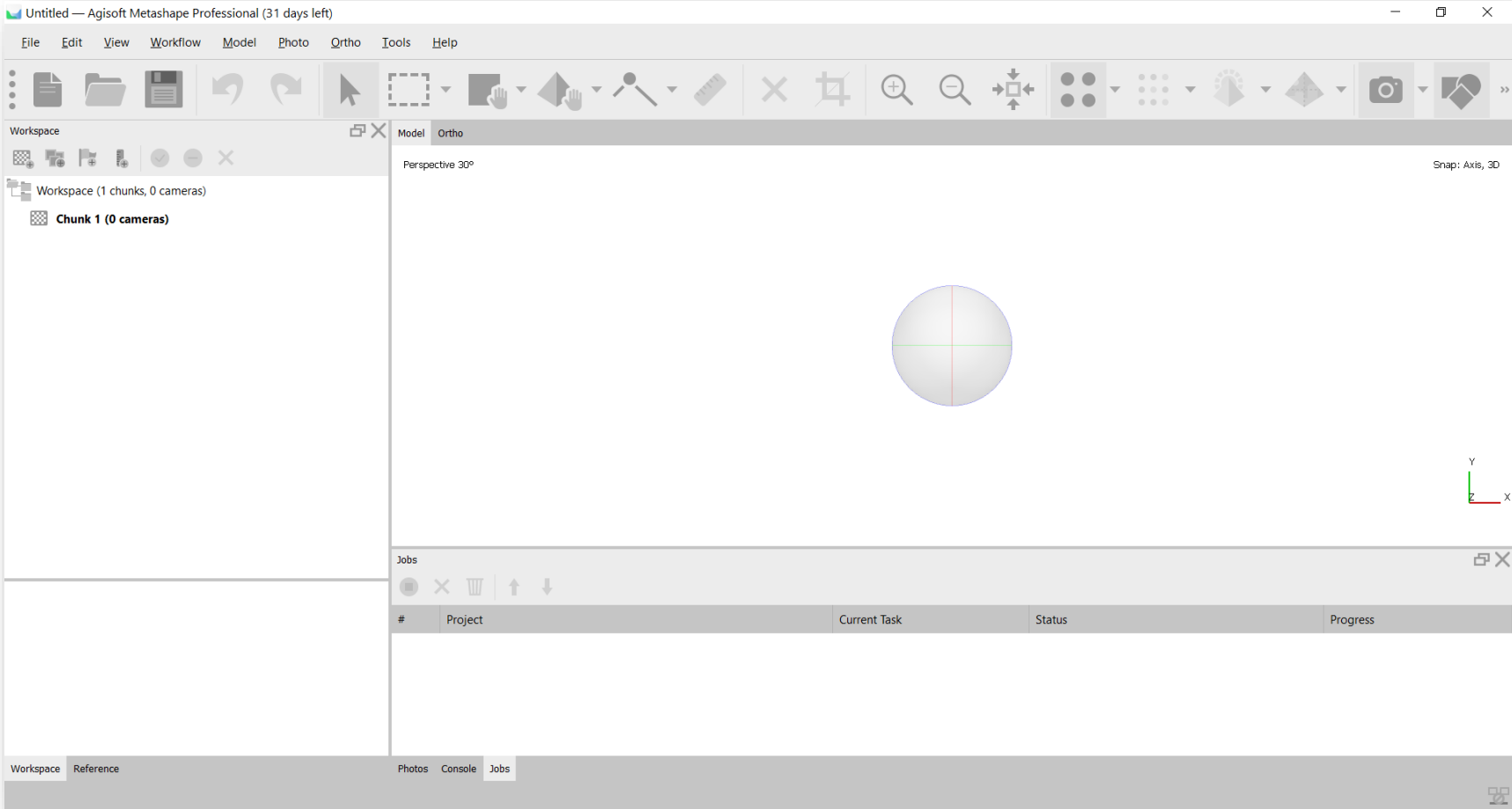
COLOSSEO DA IMMAGINI GOOGLE EARTH



IL METODO

SOFTWARE

- × Ci sono molti strumenti SfM ora a disposizione.
- × PC software, smartphone o web-based apps di solito forniscono servizi simili per la generazione di modelli usually 3-D, ma differiscono nel range di opzioni in post-processing.
- × Tuttavia, una distinzione può essere fatta tra soluzioni che caricano immagini su server on-line per poi scaricare il modello (e.g. Autodesk 123D Catch, www.123dapp.com/catch or Microsoft Photosynth, www.photosynth.net), o strumenti che processano i dati in locale (e.g. Agisoft PhotoScan/Metashape, www-agisoft.com, or VisualSFM developed by Wu, 2013, ccwum.me/vsfm).
- × Recentemente gli algoritmi SfM sono costruiti per commercial close-range photogrammetry e richiedono una sottoscrizione (e.g. PhotoModeler release 2014)..



-
- × I servizi SfM variano nelle caratteristiche ed opzioni.
 - × Alcuni ricampionano le immagini per velocizzare i calcoli (e.g. Autodesk 123D Catch, currently reduces image resolution to 3 Mega Pixels). Quindi non serve un sensore ad alta risoluzione. Viceversa necessita attenzione nella raccolta delle immagini.
 - × Anche la quantità di immagini da utilizzare può variare molto.
 - × L'output è di solito facile da usare, generalmente 3-D meshes con un controllo sulla densità. I point clouds (ovvero i nodi dei meshes) possono normalmente essere esportati in formati LAS or ASCII, permettendo anche analisi con altri software.

ACQUISIZIONE DEI DATI

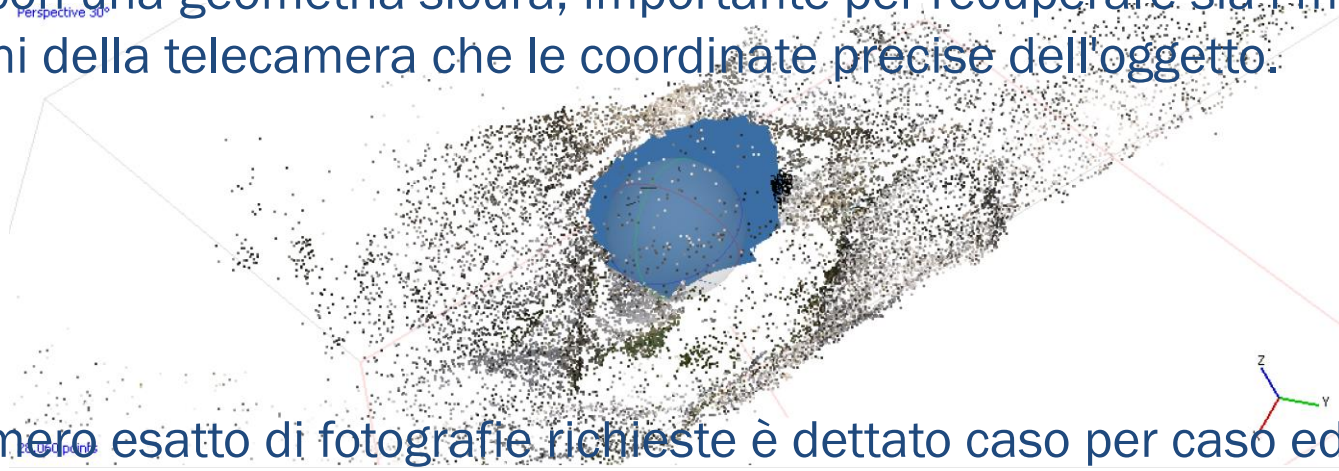
- × Lo SfM coinvolge processi che trovano automaticamente un numero limitato di features comuni tra immagini che sono poi utilizzate per stabilire sia i parametri di orientazione interna ed esterna.
- × Una ulteriore procedura poi estrae una point cloud ad alta risoluzione e una nuvola di punti ad alta risoluzione per rappresentare gli oggetti.
- × Per questa ragione, l'acquisizione di immagini con caratteristiche appropriate è fondamentale.
- × Modelli più accurate con fotocamera digitale SLR (reflex) equipaggiata con lenti a fuoco fisso (Shortis *et al.*, 2006, Sanz-Ablanedo *et al.*, 2012).



-
- ✘ Non è necessario acquisire le immagini dalla stessa distanza o avere la stessa scala. Al contrario, è consigliabile acquisire set di immagini su più livelli, che inizialmente catturano l'intero sito con pochi fotogrammi prima di ottenere immagini a distanza più ravvicinata, per catturare il dettaglio desiderato con la precisione richiesta.
 - ✘ Ciò è particolarmente importante quando si catturano aree di dettaglio che sono fisicamente oscurate da altre caratteristiche. L'intera serie di immagini viene utilizzata per l'estrazione delle features, quindi è fondamentale assicurarsi che la scena sia statica e che le esposizioni catturino i dettagli richiesti.

-
- × La fotografia flash spesso crea trame di immagini incoerenti che possono confondere il processo di abbinamento delle caratteristiche (Micheletti et al., 2014).
 - × La relazione spaziale tra le immagini è più flessibile rispetto all'acquisizione di immagini fotogrammetriche tradizionali utilizzando coppie stereo (Chandler, 1999, Remondino et al., 2014).
 - × <https://visual.ariadne-infrastructure.eu/3d/de99df5069b818151c31a87f206c6105>

- × È fondamentale acquisire immagini da quante più posizioni spaziali possibili. L'ampia gamma di direzioni dell'immagine crea quindi un set di dati con una geometria sicura, importante per recuperare sia i modelli interni della telecamera che le coordinate precise dell'oggetto.



- × Il numero esatto di fotografie richieste è dettato caso per caso ed è una funzione di occlusione, complessità della forma e scala. Un intervallo tra **10** e **100** dovrebbe essere un buon punto di partenza per la maggior parte delle applicazioni a scale chiuse (da cm a 10 s di m) e intermedie (<1 km).
- × Micheletti et al. (2014) hanno dimostrato che l'aumento del numero di immagini produce mesh più dense e migliora la precisione del modello.

-
- × Dataset più grandi aiutano a rimuovere i valori anomali quando il numero di immagini è già sufficiente per una buona rappresentazione della superficie di interesse.
 - × Quindi, set di dati molto grandi non sono sempre necessari, poiché anche i piccoli set di immagini sono in grado di fornire risultati di qualità molto soddisfacente, a condizione che la geometria dell'immagine rimanga «forte» nell'intera area di interesse.
 - × Un importante vincolo pratico è la memoria del computer.

ES. PC CONFIGURATION

RAM

In most cases the maximum project size that can be processed on a machine is limited by the amount of RAM available. Therefore, it is important to select a platform allowing to install the amount of RAM required for the projects to be processed. See [Memory Requirements](#) article for information on typical RAM consumption at common processing steps.

CPU

Complex geometry reconstruction algorithms of the photogrammetric software require a significant amount of computational resources for optimal data processing. Hence, a high speed multi core CPU (6+ cores, 3 GHz+) is recommended.

GPU

Agisoft Metashape supports GPU acceleration for most resource-intensive processing steps, thanks to this it is possible to speed up the processing using high-end OpenCL or CUDA compatible graphics cards.

Basic Configuration

up to 32 GB RAM

CPU: 4 - 8 core Intel or AMD processor, 2.0+ GHz

RAM: 16 - 32 GB

GPU: NVIDIA or AMD GPU with 700+ CUDA cores / shader processor units
(For example: GeForce GTX 1080 or Radeon RX 5700)

Advanced Configuration

up to 128 GB RAM

CPU: 6 - 24 core Intel or AMD processor, 3.0+ GHz

RAM: 32 - 128 GB

GPU: 1 - 2 NVIDIA or AMD GPUs with 1920+ CUDA cores / shader processor units
(For example: GeForce RTX 2080 Ti or Radeon VII)

Extreme Configuration

more than 128 GB RAM

For processing of extremely large data sets a dual socket Intel Xeon Workstation with Quadro/Tesla GPUs can be used.

-
- × Le superfici trasparenti, riflettenti o omogenee presentano difficoltà poiché le caratteristiche errate possono essere collegate durante il processo di abbinamento automatico delle caratteristiche (Autodesk, 2014).
 - × È di importanza fondamentale per molti studi geomorfologici che le procedure di post-registrazione ed il setting dell'acquisizione, combinate con una chiara idea dell'utilizzo finale dei dati, siano pianificate in anticipo.



× Le linee guida e i suggerimenti per l'acquisizione di immagini sono spesso forniti di strumenti ad-hoc (es. da Autodesk su www.123dapp.com).

× Una sintesi dei punti chiave è stata fornita da Micheletti et al., 2014) e include:

- 1. Pianificare in anticipo il rilievo con la telecamera e il metodo di registrazione o ridimensionamento delle immagini.*
- 2. Catturare prima l'intero soggetto e poi i dettagli, assicurandosi che le occlusioni vengano catturate adeguatamente.*
- 3. Garantire una copertura adeguata: ogni punto sul soggetto deve apparire su almeno tre immagini acquisite da posizioni spazialmente diverse.*
- 4. Scena statica.*
- 5. Luce costante.*
- 6. Evitare immagini sovraesposte e sottoesposte.*
- 7. Evita le immagini sfocate, che normalmente derivano da una bassa velocità dell'otturatore e / o dal movimento della fotocamera.*
- 8. Evitare superfici trasparenti, riflettenti o omogenee.*

-
- ✘ Per quanto riguarda i sensori, le applicazioni SfM consentono un'ampia gamma di opzioni di piattaforme di rilevamento per l'implementazione della telecamera.
 - ✘ Ancora una volta, la scelta migliore varia caso per caso, a seconda dell'oggetto di interesse e della scala. Di solito, i dispositivi portatili e le immagini terrestri basate su treppiede vengono utilizzati per piccole forme di terreno.
 - ✘ Le scene più grandi sono oggi per la maggior parte esaminate usando UAV su piccola scala (inclusi multicotteri e droni ad ala fissa, per esempio Ryan et al., 2015).
 - ✘ Queste piattaforme stanno diventando più popolari tra accademici e geometri industriali a causa della loro crescente accessibilità. Il loro chiaro vantaggio è la possibilità di collocare il sensore in posizioni che altrimenti sarebbero difficili da catturare con sensori portatili.
 - ✘ Tuttavia, l'uso di tali piattaforme può creare una geometria dell'immagine debole, modelli di fotocamera scadenti e quindi dati di bassa precisione

POST-PROCESSING

- ✘ In contrasto con la fotogrammetria tradizionale, SfM non richiede esplicitamente l'uso di punti di controllo a terra (GCP), posizioni chiaramente identificabili con coordinate del mondo reale note o presunte.
- ✘ Di conseguenza, la mesh risultante non viene né ridimensionata, né allineata, ed è quindi indipendente da un sistema di coordinate esterne stabilito.
- ✘ Per molte applicazioni questo non è un problema, in particolare se solo una visualizzazione tridimensionale o un record spaziale semplice e relativo è tutto ciò che è richiesto. Più utile, l'introduzione di una distanza nota nella scena può definire una scala reale.

-
- × Tipicamente in geomorfologia è necessario quantificare il vero cambiamento morfologico effettuando sondaggi ripetuti (vedere Williams, 2012 per dettagli su DEM di Differenza e rilevamento dei cambiamenti).
 - × Se un sistema di coordinate coerente non viene definito nel tempo, la modifica rilevata può risultare da un cambiamento del sistema di coordinate rispetto a qualsiasi processo geomorfologico reale.
 - × Se il modello generato deve essere calcolato in coordinate reali o co-registrato con dataset esistenti o futuri, è necessario determinare e applicare una trasformazione.
 - × Questo viene spesso fatto usando i parametri di rotazione, traduzione e ridimensionamento derivati dai comuni GCP. Questa procedura è stata adottata in molti studi in geomorfologia (ad esempio James e Robson, 2012; Westoby et al., 2012; Fonstad et al., 2013; Micheletti et al., 2014).
 - × Pertanto, bersagli codificati o semplici sono spesso impiegati negli approcci SfM (ad esempio la Figura 2), simili alla fotogrammetria convenzionale.

-
- × La misurazione degli obiettivi codificati può essere completamente automatizzata in alcuni software, ma la misurazione manuale degli obiettivi rimane universale.
 - × Gli obiettivi devono essere chiaramente identificabili nelle immagini, il numero e la distribuzione dipendono dalle caratteristiche del progetto.
 - × Si consiglia un minimo di cinque, sebbene sia preferibile un numero maggiore in modo che la qualità della trasformazione possa essere valutata indipendentemente. Se la scena è troppo vasta per l'uso di bersagli artificiali, è possibile utilizzare invece caratteristiche naturali facilmente identificabili (Dowling et al., 2009; Dandois and Ellis, 2010).
 - × Tuttavia, questi studi riconoscono la presenza di incertezza legata alla trasformazione. Westoby et al. (2012) indicano che l'errore nella procedura di co-registrazione può essere collegato all'identificazione manuale di punti comuni e di conseguenza impatto sulla precisione della matrice di trasformazione derivata.
 - × Nonostante ciò, e in assenza di un secondo set di dati, i modelli di georeferenziazione che utilizzano GCP possono solitamente fornire una registrazione sufficientemente precisa per molte applicazioni di geoscienza.

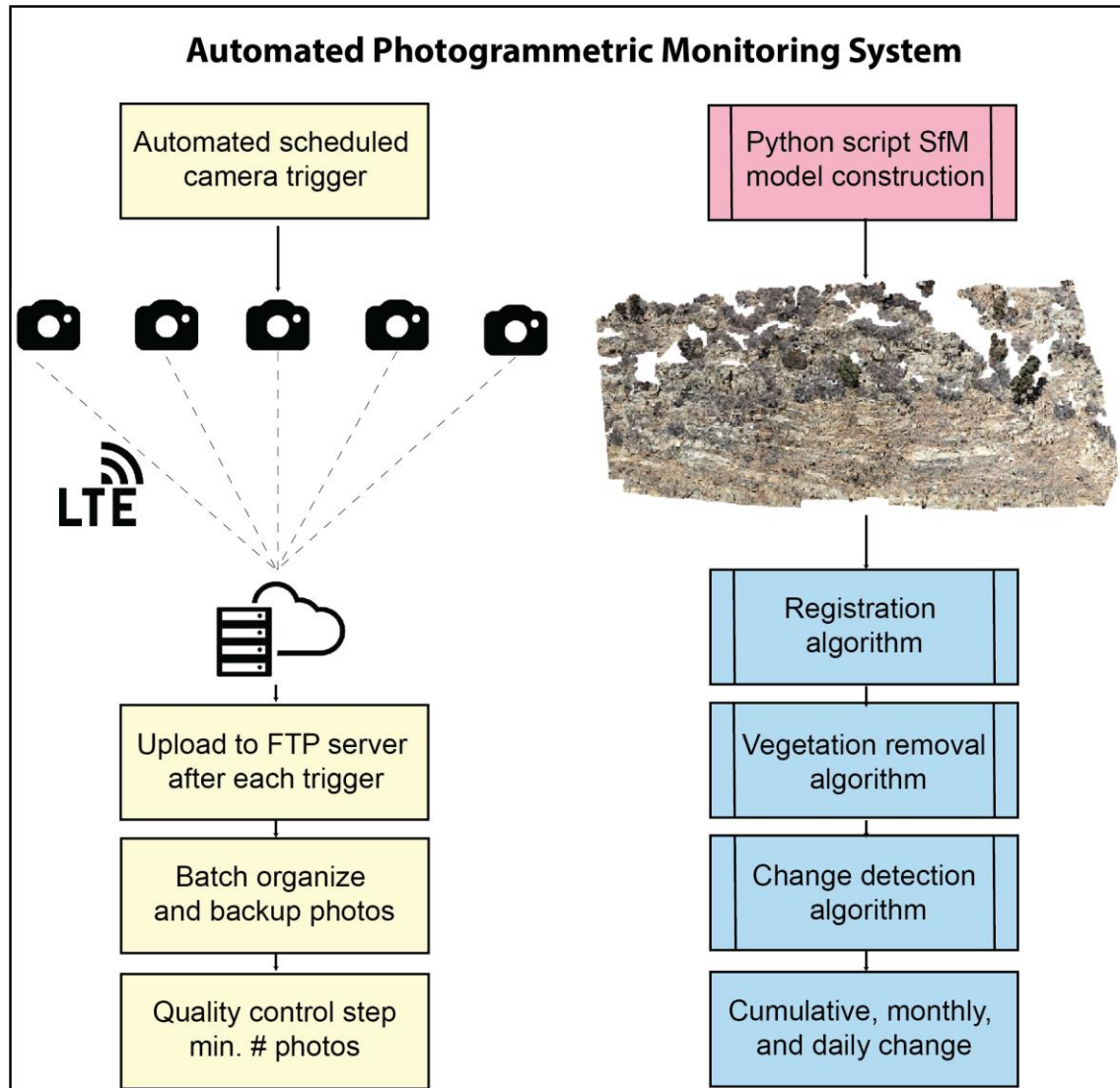
-
- × Se è disponibile un secondo set di dati, una possibile operazione per ridurre gli errori di co-registrazione è l'applicazione di un algoritmo Iterative Closest Points (ICP).
 - × L'algoritmo rivede iterativamente una soluzione di trasformazione per minimizzare la differenza spaziale tra due nuvole di punti (Zhang, 1992), per le aree in cui non vi è stato alcun cambiamento tra le date di acquisizione dell'immagine.
 - × Si è dimostrato un modo efficace per garantire che l'allineamento del sistema di coordinate tra due nuvole di punti sia il più vicino possibile (ad esempio James e Robson, 2012; Micheletti et al., 2014).
 - × Se l'obiettivo è monitorare i cambiamenti di un'area o di un oggetto nel tempo, si suggerisce di isolare le zone stabili e di applicare una procedura ICP (Micheletti et al., 2014).

-
- × Come nei metodi fotogrammetrici tradizionali, ogni fase di una ricostruzione 3D mediante la fotogrammetria SfM può creare errori significativi che si propagano al prodotto finale.
 - × Il ricorso a una routine di calibrazione "scatola nera" per modellare la geometria della telecamera è particolarmente problematico.
 - × La geometria debole dell'immagine genererà un risultato impreciso, ma ancora più importante, un insieme di parametri imprecisi per modellare la geometria della telecamera.
 - × Un convenzionale blocco di immagini aeree verticali è geometricamente debole e sia una telecamera metrica calibrata che numerosi punti di controllo a terra erano tradizionalmente necessari per mantenere l'accuratezza della mappatura e definire un sistema di coordinate.

-
- × La calibrazione di una telecamera "in-situ" utilizzando un blocco convenzionale di immagini verticali acquisite utilizzando un UAV può generare dati imprecisi. Questo si manifesta tipicamente sotto forma di una superficie di errore sistematica o "cupola" causata da un modello di lente impreciso (Wackrow and Chandler, 2008; James and Robson, 2014) che può essere spesso trascurato (ad esempio Ouédraogo et al., 2014).
 - × Una semplice raccomandazione è quella di rafforzare la geometria dell'immagine ottenendo immagini oblique oltre al set di dati verticale acquisito per la copertura dell'oggetto. Ciò richiede un'attenzione particolarmente attenta da dare alla progettazione dei sondaggi UAV.

-
- × Insieme, l'acquisizione di immagini e la registrazione dell'output rimangono passaggi delicati in una fotogrammetria SfM altrimenti altamente automatizzata.
 - × Per questo motivo, è importante considerare a priori la migliore strategia, considerando nel contempo l'applicazione e le accuratezze specifiche della geoscienza che sono realistiche.

SOLUZIONI AGGIUNTE



STRUMENTI ED ALTERNATIVE

- × Di solito, i pacchetti SfM disponibili gratuitamente hanno funzioni di post-elaborazione molto limitate.
- × Di conseguenza, è spesso necessario fare affidamento su altri software per la registrazione o analisi quantitative.
- × Poiché molti pacchetti offrono la possibilità di esportare nodi mesh in file in formato LAS o ASCII, non è difficile trovare software appropriato per leggere i dati e, se necessario, interpolarli per facilitarne l'utilizzo.
- × Se si desidera lavorare su nuvole di punti, il software di gestione dei dati cloud cloud CloudCompare sviluppato da EDF R & D (<http://progress.edf.com>) è una soluzione conveniente in termini di costi e prestazioni (il software è disponibile gratuitamente su www.danielgm.net/cc).
- × CloudCompare fornisce strumenti di registrazione manuale di base, un'applicazione dell'algoritmo ICP e anche uno strumento di confronto nuvola di punti nella nuvola di punti sotto forma di algoritmo di corrispondenza dello smusso (Barrow et al., 1977).

-
- × L'algoritmo di corrispondenza degli smussi restituisce i valori di dissomiglianza tra due set di dati sotto forma di distanze tridimensionali calcolati associando ciascun punto nel set di dati confrontato con il punto più vicino nei dati di riferimento.
 - × Inoltre, CloudCompare ora supporta anche l'algoritmo di differenziazione cloud-to-cloud M3C2 (Brodu e Lague, 2012), un'alternativa all'approccio cloud-to-cloud originale.
 - × Nonostante siano più esigenti dal punto di vista computazionale della differenza di elevazione dei DEM rasterizzati, gli approcci cloud-to-cloud rimangono un'alternativa flessibile al confronto di set di dati 3D più complessi.

SENSORI

Technical aspect	Options	Main characteristics
Survey	Smartphone	Low cost, portable wireless internet access, low quality
	Consumer-grade digital sensor	Low cost, moderate quality
	High-quality digital SLR sensor	High quality, portable, moderate cost, no internet access
	Laser Scanning (TLS and ALS)	High precision, expensive, less portable
Image processing	Internet-based SfM	Free, near real time, fully automatic, lower quality
	Local software SfM	Mostly free and automatic, better quality expected
	Traditional « stereo » photogrammetry	High quality, subscription cost, expert knowledge
	SfM-MVS photogrammetry	As above, but also greater automation and reliability
Co-registration	Scaling	Fast and easy, comparison with other datasets not possible
	Tie points	Comparison with other datasets only, average precision
	Targets + GCP	Any coordinate system, high precision, not always possible
	ICP	Refinement of alignment, needs two co-registered datasets