



Regione Toscana



FAS  
Fondo Aree  
Sottoutilizzate  
2007-2013



# Progetto MOSCARDO

## Metodi per il riconoscimento di immagini e ricostruzione 3D (D3.3)

*Confidenziale*

*Il Progetto MOSCARDO è realizzato con il determinante contributo della Regione Toscana a valere sul Programma Attuativo Regionale cofinanziato dal FAS (adesso FSC) e del contributo del MIUR a valere sui fondi FAR*

# Progetto Moscardo

---

<b><i>Partner</i></b>	<b><i>Autori (in ordine alfabetico)</i></b>
<b>INFOMOBILITY S.r.l.</b>	
<b>EIS S.r.l.</b>	
<b>CNR-ISTI<sub>WNLab</sub></b>	
<b>CNR-ISTI<sub>MMSLab</sub></b>	
<b>CNR-ISTI<sub>SILab</sub></b>	Danila Germanese, Riccardo G. Leone, Davide Moroni, Maria Antonietta Pascali, Ovidio Salvetti, Marco Tampucci
<b>DICEA UNIFI</b>	

## Sommario

---

1.	Introduzione .....	4
2.	Analisi dello scenario applicativo .....	5
2.1	LA FORTEZZA .....	5
2.2	IL VOLTONE.....	6
3.	Il Sistema di acquisizione.....	8
3.1	I COMPONENTI .....	8
3.1.1	Il drone.....	8
3.1.2	La fotocamera (spettro del visibile) .....	9
3.1.3	La termocamera.....	10
3.1.4	La scheda di acquisizione .....	11
3.2	IL SET-UP DI ACQUISIZIONE.....	12
4.	Studio dei metodi per l'analisi di fessure e crepe .....	13
4.1	METODI INVASIVI .....	13
4.2	METODI NON INVASIVI O CONTACT-LESS .....	14
4.3	INTEGRAZIONE DELLA TERMOCAMERA E POSSIBILITÀ DI ISPEZIONE .....	18
4.4	STRATEGIA SCELTA.....	22
5.	Ricostruzione 3D mediante fotogrammetria [Riccardo] .....	26
5.1	ANALISI DEI SOFTWARE E ALGORITMI DI FOTOGRAMMETRIA.....	26
5.2	STRATEGIA SCELTA.....	29
6.	Conclusioni .....	30
	Riferimenti bibliografici.....	31

## 1. Introduzione

---

L'attività 3.3 prevede lo studio e l'applicazione di metodi di image processing e computer vision per:

- l'analisi di crepe, ammaloramenti e spostamenti relativi che possano danneggiare l'integrità strutturale degli edifici presi in esame;
- la ricostruzione 3D degli scenari di interesse;

Per quanto riguarda l'**analisi e il monitoraggio degli artefatti strutturali**, sono stati studiati i diversi metodi, invasivi e non invasivi (o contact-less), presenti in letteratura, al fine di sostituire quello più classico ma anche più laborioso e soggetto ad errori: l'ispezione visiva. In seguito sono descritti nel dettaglio gli approcci studiati, da quelli più invasivi, che sfruttano ad esempio sensori e/o sonde applicati alla superficie di interesse, a quelli meno invasivi, basati su target riflettenti, fino a quelli contact-less, basati sul solo processamento di immagini acquisite mediante termocamere o camere che lavorano nello spettro del visibile.

Per quanto riguarda gli **aspetti di ricostruzione 3D**, sono state studiate tecniche di fotogrammetria per la ricostruzione tridimensionale delle strutture da monitorare. In particolare, sono stati analizzati vari software e algoritmi di fotogrammetria disponibili sia open source sia commerciali. Fra i vari prodotti analizzati è stato scelto, vista la qualità del risultato prodotto di orientarci verso l'adozione del software Photoscan di Agisoft. Il software, prese in ingresso una serie di immagini, determina l'angolo di acquisizione di ogni immagine. Esso calcola dapprima una nuvola sparsa e, successivamente, una nuvola densa. È possibile intervenire manualmente sui punti delle nuvole per apportare qualche correzione. In seguito, viene creata la mesh tridimensionale a partire dalla nuvola densa e, a partire dalle immagini originali, viene generata una opportuna texture che va a coprire la mesh 3D.

Il deliverable è così strutturato: nella Sezione 3 sono illustrati gli scenari di interesse (il Voltone e la Fortezza Vecchia a Livorno) e i punti critici da monitorare; nella Sezione 4 è descritto il set-up di acquisizione delle immagini; la Sezione 5 è quella dedicata allo studio dei metodi di analisi e monitoraggio di fessure e crepe; nella Sezione 6 saranno invece esplorati i metodi di ricostruzione 3D.

# Progetto Moscardo

## 2. Analisi dello scenario applicativo

La Fortezza Vecchia e il Voltone di Livorno sono gli edifici monumentali utilizzati come casi studio nel corso del progetto MOSCARDO per il test e la validazione delle tecniche riportate in questo documento. Essi sono brevemente descritti nelle sotto-sezioni 3.1 e 3.2.

### 2.1 La Fortezza

Monumento simbolo della città di Livorno, è chiamata anche “Quadratura dei Pisani”. Essa ha una pianta ottagonale (Figura 1), una forma asimmetrica ed è costituita da tre bastioni: l’*Ampolletta*, rivolto verso la città, la *Canaviglia*, verso il porto, e la *Capitana*, verso nord-est.

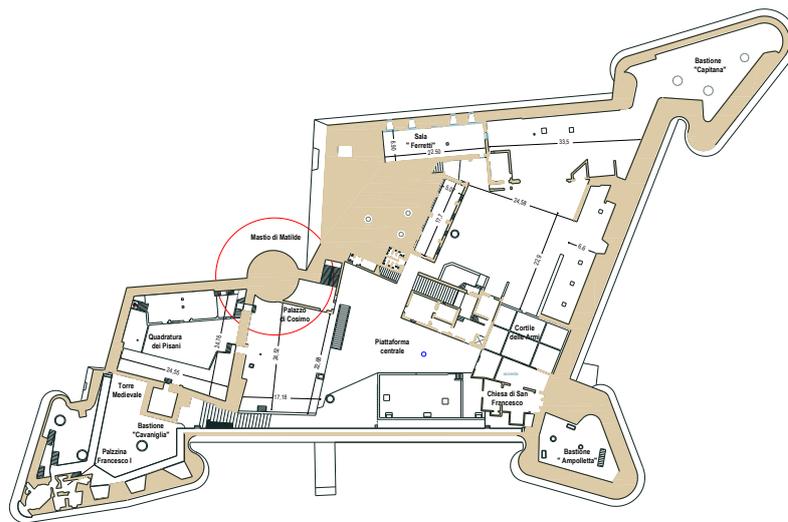


Figura 1- Pianta della Fortezza vecchia

È una struttura molto antica, come si può vedere in Figura 2, di grandissime dimensioni, a cielo aperto, e per questo soggetta a molteplici sollecitazioni atmosferiche e a degrado indotto sia dalle acque del mare, sia da cedimenti differenziali del terreno di fondazione. Inoltre, le sollecitazioni termiche provocano notevoli deformazioni stagionali.



Figura 2- La Fortezza Vecchia, Livorno

# Progetto Moscardo

---

Nel 2012 la Soing, società livornese specializzata in geofisica applicata, ha analizzato la struttura del lato est della Fortezza, danneggiato da alcuni crolli avvenuti due anni prima. Dal monitoraggio è risultato che la Fortezza è in costante movimento: durante i 4 giorni di monitoraggio, la struttura si è spostata di 0.8mm. Tuttavia, per poter eseguire una dettagliata analisi di rischio strutturale, il monitoraggio dovrebbe essere esteso ad un più ampio arco temporale (circa un anno, o più), che – se eseguito con tecniche convenzionali – comporterebbe costi troppo elevati.

Nel frattempo, come si può vedere anche in Figura 3, gli effetti del movimento della struttura, e delle costanti sollecitazioni strutturali a cui è sottoposta, sono costantemente monitorati. Le crepe di maggiore entità sono sotto stretto monitoraggio delle autorità. Il metodo è quello classico, mediante misure ed ispezioni visive.



Figura 3- Monitoraggio delle crepe sulla superficie della Fortezza Vecchia, Livorno

Il nostro obiettivo è quello di rilevare e monitorare crepe e fessure centimetriche, aventi lunghezze anche di alcuni metri. Il monitoraggio, da svolgersi durante un ampio arco temporale, utilizzerà metodi non invasivi, e il più possibile immuni da errori soggettivi.

## 2.2 Il Voltone

---

Il Voltone (Figura 4) si presenta come una struttura interrata, in muratura, che si estende sul Fosso Reale e sotto Piazza della Repubblica per circa 220m di lunghezza. Esso è accessibile in barca dal Fosso Reale.

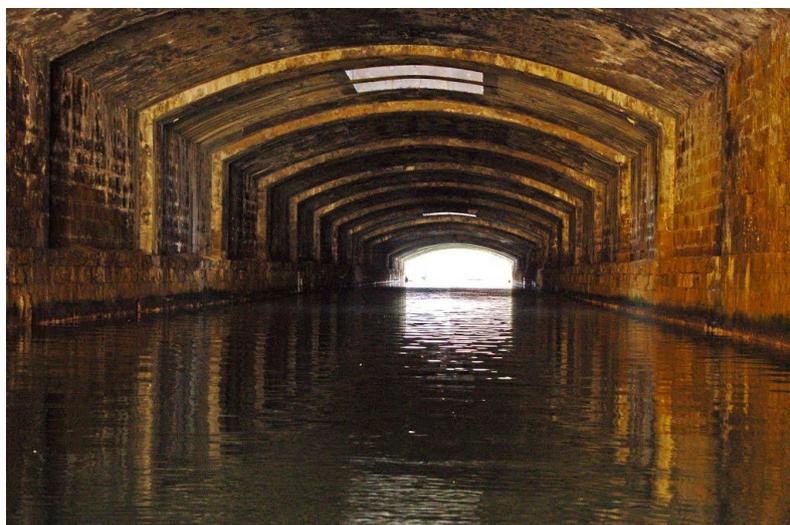


Figura 4- Il Voltone, Livorno

# Progetto Moscardo

---

È chiaro, quindi, come essa sia soggetta sia a carichi permanenti, che a carichi variabili, ovvero quelli dovuti al traffico, alle estremità, e ai passanti, che invece si concentrano principalmente nel centro della piazza (spesso impiegata, inoltre, per concerti, manifestazioni, ecc.). Precedenti indagini strutturali hanno evidenziato anche alcune criticità legate al ridotto spessore della volta sottostante la piazza.

Anche in questo caso, il nostro obiettivo sarà quello di individuare e monitorare i difetti strutturali di maggiore entità, mediante tecniche non distruttive e minimamente invasive.

## 3. Il Sistema di acquisizione

---

In questa sezione si descrive il sistema dedicato all'acquisizione di immagini e flussi video che sarà impiegato nel progetto Moscardo.

### 3.1 I componenti

---

Il sistema di acquisizione è costituito da un insieme di componenti e dispositivi. In particolare, esso sarà basato sull'utilizzo di un *Sistema Aeromobile a Pilotaggio Remoto* (SAPR), comunemente chiamato *drone*, che ospiterà i sensori di imaging costituiti rispettivamente da una *fotocamera* nel spettro visibile e da una *termocamera* nello spettro infrarosso, oltre ad opportune schede per l'acquisizione, pre-elaborazione e trasmissione dei dati raccolti. Ciascuna componente è dettagliata nella sottosezioni seguenti.

#### 3.1.1 Il drone

---

Il drone utilizzato per la sperimentazione è quello realizzato presso l'area della Ricerca CNR di Pisa; il mezzo può essere controllato sia a vista che con voli programmati tramite software dedicati; quest'ultima modalità permette di effettuare la stessa rotta di volo in spazi temporali diversi, in modo da poter creare uno storico di dati del sito interessato. Tale drone nella sua dotazione originaria è equipaggiato con un supporto per la stabilizzazione automatica (*gimbal*) dove possibile montare una fotocamera digitale oppure una videocamera. Le comunicazioni con la base a terra avvengono mediante canale analogico. Nella figura sottostante si può osservare il drone dello ISTI-CNR in volo e il gimbal (il supporto centrale).



Figura 5- Il drone dello ISTI-CNR in volo

La principale attività inerente al progetto è stata l'estensione delle funzionalità del drone dotandolo di una strumentazione hardware aggiuntiva atta alla ripresa video digitale sia nel campo del visibile che in quello

# Progetto Moscardo

infrarosso. Inoltre ci si è occupati della trasmissione dati alla unità di ricezione a terra (laboratorio mobile su autovettura attrezzata) mediante connessione ibrida wireless/4G in modo da rendere disponibili on-line i dati da qualunque sito geografico si voglia accedere ad essi.

## 3.1.2 La fotocamera (spettro del visibile)

Per il campo del visibile è stata utilizzata una Ximea xiQ compatibile con lo standard industriale USB3.0 Superspeed. È una telecamera ad alto frame rate, basso consumo e peso contenuto (32gr senza ottica). Tale fotocamera era già disponibile presso il Laboratorio Segnali e Immagini dell'ISTI. La dotazione software comprende drivers sia per Windows che per Linux ed è da tempo supportata dalla libreria OpenCV utilizzata per la elaborazione delle immagini.



Figura 6- La fotocamera nello spettro del visibile è una Ximea xiQ SuperSpeed USB3

Le specifiche tecniche della fotocamera sono riportate in Tabella 1.

Tabella 1. Specifiche tecniche della fotocamera XIMEA xiQ

Risoluzione	4.2 MP 2048 × 2048 pixel
Tipo del sensore	CMOS RGB Bayer Matrix
Modello del sensore	CMOSIS CMV4000
Dimensione del sensore	1"
Area attiva del sensore	11.27 × 11.27 mm
Dimensione del pixel	5.5 μm

# Progetto Moscardo

Bits per pixel	8, 10, (12)
Range dinamico	60 dB
Frame al secondo	90 fps
Interfaccia	USB 3.0
I/O	GPIO IN, OUT
Potenza richiesta	1.5 Watt
Lenti supportate	C or CS Mount
Peso	32 grams
Dimensioni LxAxP	26 x 26 x 30 mm
Temperatura operativa (max)	50 °C

Fonte: <https://www.ximea.com/products/usb3-vision-cameras-xiq-line/mq042cg-cm>

Il peso complessivo con l'ottica in nostro possesso è pari a 140 grammi.

### 3.1.3 La termocamera

Per quanto riguarda la ripresa ad infrarossi ci si affida invece ad una telecamera FLIR A65 a fuoco fisso dalle dimensioni compatte e dal peso di 210 grammi. Essa offre una sensibilità termica di  $0.05^{\circ}\text{C}$  @  $30^{\circ}\text{C}$ . Anche questo prodotto viene accompagnato dal software che ne permette l'utilizzo in proprie applicazioni sotto i sistemi operativi Windows e Linux. Nella figura sottostante è possibile osservare alcune applicazioni industriali tipiche di questa termocamera.

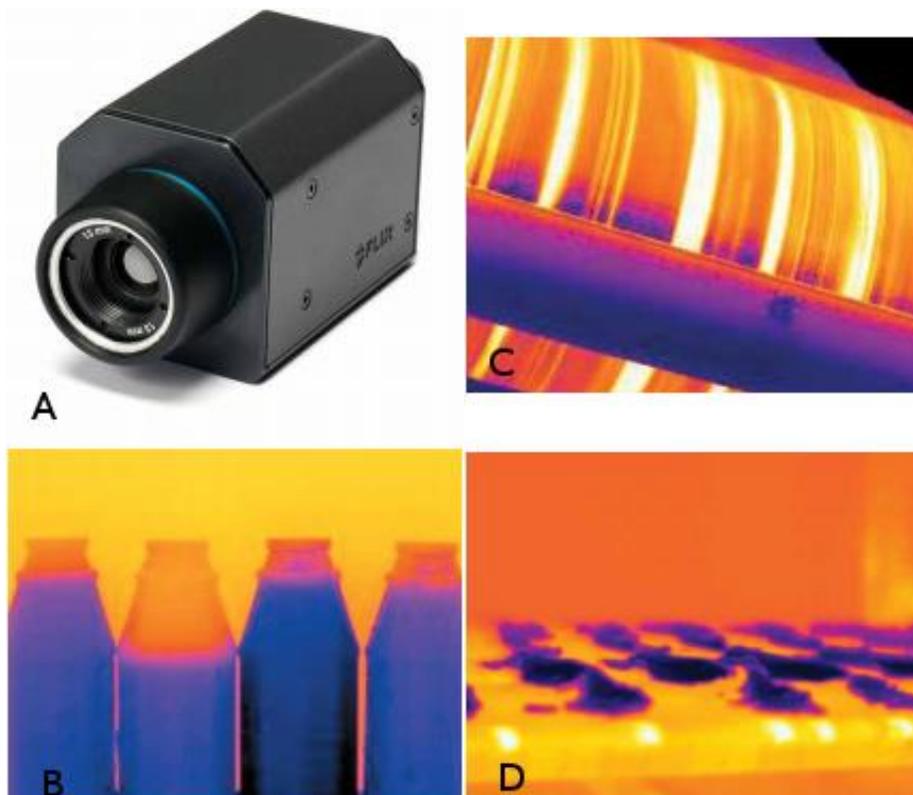


Figura 7: A) La termocamera Flir A65 – B) Controllo di livello del liquido in bottiglie opache – C) Monitoraggio della fase di asciugatura nella produzione della carta – D) Controllo di qualità nella produzione industriale di cibo.

# Progetto Moscardo

Le specifiche tecniche principali della termocamera sono riportate in Tabella 2.

**Tabella 2. Specifiche tecniche della termocamera FLIR A65**

Risoluzione IR	640 × 512 pixels
Campo visivo (FOV)	90° × 69° with 7.5 mm lens 45° × 37° with 13 mm lens 25° × 20° with 25 mm lens 12.4° × 9.92° with 50 mm lens 6.2° × 4.96° with 100 mm lens
Frequenza immagine	30 Hz
Detector Pitch	17 μm
Range di temperatura	-25°C to 135°C / -40°C to 550°C
Sensibilità termica	< 0.05°C @ 30°C (86°F) / 50 mK
Accuratezza	Accuracy ±5°C (±9°F) or ±5% of reading
Fuoco	fisso
Peso	210 g.
Dimensioni	106 × 47 × 50 mm
Interfaccia	Gigabit Ethernet
Temperatura operativa (max)	-15°C to 60°C

Per le specifiche complete fare riferimento a: <http://www.flir.com/automation/display/?id=56341>

La Tabella 3 mostra i Field of Views (FOVs) della termocamera a diverse distanze dal target sia per l'obiettivo standard da 25mm sia per quello grandangolare da 13mm. La termocamera attualmente disponibile presso il Laboratorio Segnali e Immagini è munita di un obiettivo da 25mm che risulta adatto alla maggior parte delle applicazioni su SAPR in spazi non ristretti.

**Tabella 3. FOV per i vari obiettivi**

TERMOCAMERA A65							
Pixel Camera		Lente		DISTANZA (m)	H FOV (m)	V FOV (m)	IFOV (mm)
H pixel	V pixel	H FOV (°)	V FOV (°)				
640	512	25	20	10,00	4,43	3,53	6,82
640	512	45	37	10,00	8,28	6,69	12,27
640	512	25	20	35,00	15,52	12,34	23,86
640	512	45	37	35,00	28,99	23,42	42,95
640	512	25	20	70,00	31,04	24,69	47,72
640	512	45	37	70,00	57,99	46,84	85,90
640	512	25	20	100,00	44,34	35,27	68,18
640	512	45	37	100,00	82,84	66,92	122,72

### 3.1.4 La scheda di acquisizione

Le telecamere sono terminali video che vanno connessi ad un elaboratore o una scheda embedded che ne gestisca il funzionamento.

Sul mercato esiste un numero molto limitato di schede (board) che permettono la connessione contemporanea di un dispositivo USB3 e di uno Gigabit Ethernet. Tra queste quella che offre le prestazioni

# Progetto Moscardo

migliori in termini di elaborazione è la embedded GPU Jetson TX1 1 prodotta dalla NVIDIA. Essa è di gran lunga la componente di elaborazione più utilizzata nei droni e nei SAPR. A tale modulo va associata una carrier board adatta (perché quella originale in bundle con il Development Kit risulta troppo pesante e troppo ingombrante).

Come carrier board, è stata scelta la Auvideo J120 per l'ottimo rapporto prezzo/prestazioni. In Figura 8 si possono osservare i due componenti elettronici descritti.

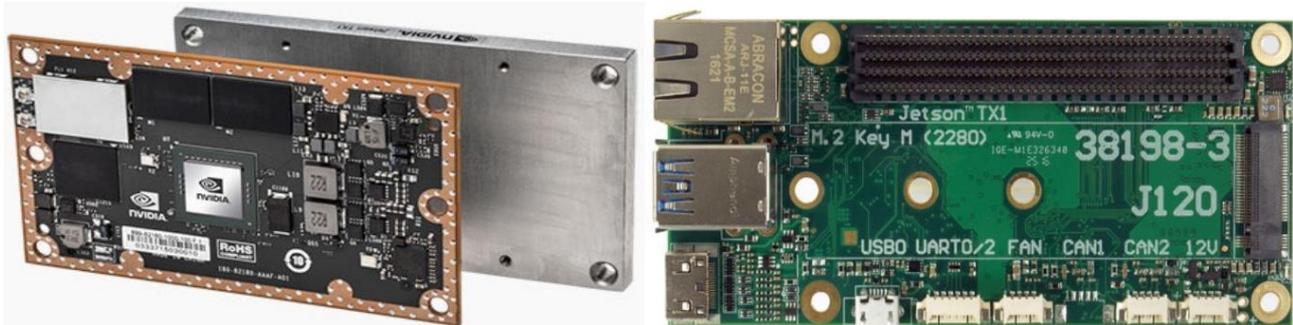


Figura 8- Il modulo di elaborazione Nvidia Jetson TX1 e a destra la carrier board Auvideo J120

Per maggiori dettagli, le specifiche della scheda embedded Jetson TX1 sono disponibili al seguente link: <http://images.nvidia.com/content/tegra/embedded-systems/pdf/JTX1-Module-Product-sheet.pdf>

Il peso della scheda embedded Jetson TX1 è di 88 grammi. Il peso sale a 140 grammi con l'inclusione del dissipatore.

Le specifiche della carrier board Auvideo selezionata sono reperibili al link:

[https://auvideo.com/download/manual/J120/J120\\_technical\\_reference\\_1.6.pdf](https://auvideo.com/download/manual/J120/J120_technical_reference_1.6.pdf)

Il peso della carrier board Auvideo J120 è di 42 grammi.

In Tabella 4 sono riportati i pesi dei possibili payload considerando sia l'utilizzo della board in bundle con il development kit sia l'impiego della carrier board Auvideo.

Tabella 4. Peso delle configurazioni possibili delle schede di acquisizione, pre-elaborazione e trasmissione dati

Configurazione	Peso (g)
TX1 + Dissipatore + Auvideo J120	180
TX1 + Dissipatore + Board in bundle col Development Kit	449

## 3.2 Il Set-up di acquisizione

In Tabella 5 sono riportati i pesi dei due possibili allestimenti del drone, ossia considerando l'utilizzo con la sola fotocamera nello spettro visibile oppure in combinazione con la termocamera.

Utilizzando la board in bundle con il Development Kit è necessario aggiungere 270g ad ogni configurazione (pari alla differenza di peso con la carrier board Auvideo). Oltre ai pesi annoverati in Tabella, bisogna considerare il peso della cavetteria di collegamento e soprattutto del circuito di alimentazione (che se prelevata dalle batterie del drone consiste in uno stabilizzatore di tensione), tuttora in fase di valutazione.

Tabella 5. Peso delle configurazioni dei possibili allestimenti del drone

Configurazione	Componenti	Peso (g)
1 Camera	TX1 + Dissipatore + Auvideo J120 + Ximea	320
2 Camere	TX1 + Dissipatore + Auvideo J120+ Ximea + Flir	420

## 4. Studio dei metodi per l'analisi di fessure e crepe

---

Il manifestarsi di crepe e fessure in una struttura in cemento, o in pietra, o in muratura, è sintomo di un problema della struttura stessa, ed è perciò importante capire se interpretarlo come un difetto puramente estetico o come un segnale di pericolo per la costruzione e per gli utenti della stessa.

Nei mesi M4-M15 del progetto Moscardo è stato approfondito lo stato dell'arte sui metodi di rilevazione, analisi e monitoraggio di fessure e crepe. Tale indagine ha permesso di individuare, definire e progettare i metodi che verranno implementati nei mesi successivi e descritti in dettaglio nel deliverable D3.1.

Innanzitutto, siamo partiti dal capire quale fosse il metodo classico, comunemente utilizzato, per analizzare i difetti strutturali di una costruzione. Sul sito <http://www.controllofessure-mg.it/index.php?fbl=a3> abbiamo trovato questa serie di interventi che vengono eseguiti in sequenza quando si vuole capire il tipo e la pericolosità delle discontinuità di un edificio:

- 1) perlustrazione visiva preliminare dell'intera struttura;
- 2) raccolta dei dati relativi all'edificio: esame del progetto, età della costruzione, tipologia costruttiva, materiali utilizzati, individuazione dello schema portante e analisi dell'uso di ogni singola parte dell'edificio;
- 3) analisi delle condizioni al contorno: natura del terreno, eventuale presenza di forti discontinuità nello stesso, presenza di avvallamenti e/o dirupi, presenza di nuovi edifici e demolizione di vecchi, informazioni su scavi o lavori recentemente effettuati nei dintorni, passaggio di mezzi pesanti;
- 4) rilievo del quadro fessurativo: individuazione di lunghezza, direzione, spessore e profondità per ciascuna crepa, distribuzione e frequenza delle fessure, controllo se le crepe non siano replicate da una parte e dall'altra del componente orizzontale (soffitto-pavimento), controllo dell'eventuale ripetizione della stessa tipologia di crepe in parti analoghe dell'edificio, realizzazione di tavole di progetto riportanti le fessure;
- 5) analisi delle condizioni della struttura, dello stato tensionale, delle sollecitazioni, e delle resistenze mediante prove di carico, prove piezometriche, geologiche e geotecniche;
- 6) controllo delle condizioni ambientali a cui è sottoposta la struttura: rilevazione di parametri quali temperatura e umidità, e verifica del grado di corrosione delle parti metalliche;
- 7) ricostruzione del modello dell'edificio;
- 8) studio dei possibili movimenti (traslazioni, rotazioni) delle singole parti;
- 9) controllo dei punti con tensione superiore a quella del materiale;
- 10) controllo dell'andamento nel tempo delle fessure, anche mediante strumentazione specialistica;
- 11) eventuale inserimento di cerniere plastiche.

Successivamente, abbiamo esplorato la letteratura per capire lo stato della ricerca in questo campo.

In seguito sono descritte e discusse le tecniche di rilevazione e monitoraggio delle discontinuità che abbiamo ritenuto più rilevanti e innovative dal punto di vista metodologico. Per maggior chiarezza, sono state suddivise in: metodi invasivi (ovvero che utilizzano una stimolazione della crepa di interesse e rilevano l'effetto che la stimolazione stessa ha avuto), metodi non invasivi o contact-less (ovvero che sfruttano esclusivamente tecniche image-based), e infine quelli che prevedono l'utilizzo di termocamere.

### 4.1 Metodi invasivi

---

Buona parte dei risultati presenti in letteratura circa il monitoraggio delle crepe, nelle strutture e nei materiali costruttivi in generale descrive metodologie "invasive", cioè basate sull'impianto dei sensori attivi o passivi che registrano e valutano la risposta del materiale (spesso cementizio) ad uno stimolo di tipo elettrico, oppure ad onde acustiche e ultrasuoni, ecc.

# Progetto Moscardo

---

Un primo studio del 2000, riportato in [1], descrive come si possa valutare in modo remoto lo sviluppo di crepe in strutture sottoposte a carico. La sperimentazione prevede che siano inseriti degli elementi piezoceramici, disposti in array, nei punti sottoposti a carico e/o stress ciclico. L'analisi del monitoraggio mostra che tale array è in grado di valutare la crescita della crepa in strutture di acciaio dolce; inoltre tali sensori sono durevoli nel tempo, e dunque si prestano ad essere inseriti stabilmente in tali strutture.

Passando a materiali più interessanti per gli obiettivi di Moscardo, e cioè quelli cementizi, per cui lo standard rimane quello dell'osservazione visuale da parte di operatori esperti, operazione costosa e impegnativa, segnaliamo il paper di Tsung del 2009 [2], dedicato allo studio della relazione tra stress strutturale e conduttività elettrica. L'assunto di base è che il composito cementizio ha una sua piezoresistività, che può essere usata per monitorare le variazioni strutturali tramite EIT (tomografia dell'impedenza elettrica). Ovviamente va valutata una baseline del composito, ma a differenza delle tecniche classiche di misurazione elettrica, che richiedono l'inserimento di appositi elettrodi, il metodo proposto sfrutterebbe le proprietà di conduzione elettrica naturali del composito cementizio attraverso l'applicazione di un nastro adesivo contenente rame (e quindi limitandosi ad applicare sensori di superficie e non interni al campione cementizio). EIT permette di ricostruire la conduttività nel materiale dalla misurazione del voltaggio sul bordo, e dunque associare la presenza di crepe alla riduzione di conduttività. Il metodo di EIT sensing per il monitoraggio di crepe e microfratture viene testato in 4 tipi di compositi ed i risultati evidenziano che il microcracking causa una variazione (rilevabile tramite IET) del fattore gage, GF, definito come il rapporto tra la variazione della resistenza elettrica e la variazione di lunghezza.

$$GF = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L}$$

Nel panorama dello SHM (structural health monitoring), molto interessante è il lavoro di Lisowski e Uhl [3] e [4], i quali hanno sviluppato sensori RFID per il monitoraggio di fratture in elementi ceramici, eventualmente immersi in altro materiale. Tale approccio risulta particolarmente interessante perché si tratta di sensori wireless e passivi che dunque non necessitano di alimentazione. Il vantaggio sembra essere la versatilità di tale approccio, estendibile al monitoraggio delle fratture anche su altri tipi di materiali, perché il rilevamento si basa sul fatto che l'esistenza di una frattura nel materiale provoca una variazione rilevabile nel segnale di backscatter del sensore.

Ancora più vicino ai casi di studio di MOSCARDÒ è lo scenario presentato da Mecocci e Abrardo in [5]. Gli autori presentano una rete di monitoraggio real-time della torre "Rognosa", sita in San Gimignano. Il sistema di monitoraggio è costituito da nodi radio, ognuno dei quali è dedicato all'acquisizione di parametri ritenuti significativi per la valutazione del complessivo stato di benessere della struttura in esame: temperatura, umidità, infiltrazioni piovane, luce ambientale. Tale sistema è inoltre dotato di un'interfaccia utente per poter accedere ai dati acquisiti.

## 4.2 Metodi non invasivi o contact-less

---

In questa sezione esploriamo quelle che sono le tecniche esclusivamente image-based per il rilevamento e il monitoraggio di crepe. Nel lavoro di Niemeier e colleghi [6] viene presentato un DRS (Digitales Rissmess-System= sistema di monitoraggio digitale delle crepe), mostrato in Figura 9 e basato su una camera commerciale e un software appositamente implementato. Alla camera è fissato un tubo cilindrico che permette un'illuminazione costante multispettrale.

# Progetto Moscardo



Figura 9 - Sistema DRS

Il software permette di adattarsi a qualsiasi tipo di fessura, bordo, erosione. In particolare, sono sfruttati tre tipi di approcci:

- 1) Algoritmo Fly-Fisher, per monitorare nel tempo la fessura e misurarne le dimensioni automaticamente;
- 2) Misura manuale delle dimensioni della crepa in un punto pre-selezionato, con la possibilità di analizzarne il profilo;
- 3) *Correlative approach*: i parametri della crepa vengono evinti dai due movimenti di traslazione e quello di rotazione necessari a far ricombaciare i due lati della fessura.

Jahanshahi e colleghi [7] propongono un approccio esclusivamente basato sulla ricostruzione 3D della scena, sul processamento delle immagini (segmentazione e binarizzazione per isolare il pattern relativo al difetto strutturale) e su algoritmi di *pattern recognition* e *decision making*. L'approccio, che sfrutta la *depth perception* sia per rilevare che quantificare lo spessore delle crepe, può essere applicato ad immagini catturate da qualsiasi distanza e acquisite utilizzando qualsiasi risoluzione e lunghezza focale.

In Figura 10 è mostrato un esempio applicativo del metodo proposto da Jahanshahi et al. per quantificare lo spessore di una crepa. I quadratini bianchi sono i pixel dell'immagine della fessura. Mediante un operatore morfologico di assottigliamento (*thinning*), si individua la linea centrale della fessura stessa (quadratini blu). Lo spessore della crepa viene calcolato secondo la direzione perpendicolare a ciascun pixel della linea centrale che corre lungo la fessura (nell'esempio è rappresentata da quadratini verdi, perpendicolari alla linea centrale della crepa nel punto individuato dal quadratino rosso). Lo spessore della crepa in pixel viene poi convertito in unità di lunghezza conoscendo la distanza camera-superficie di interesse e la lunghezza focale della camera stessa.

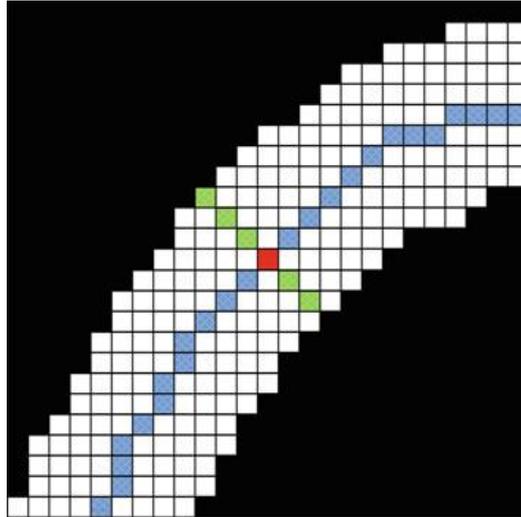


Figura 10 - Un esempio di applicazione dei metodi di quantificazione delle crepe, proposto da Jahanshahi et al.

Il metodo presentato è ulteriormente migliorato in [8]. In entrambi i casi si fa riferimento a crepe aventi piccola dimensione trasversale (0.4-1.4mm).

In [10] e [9] vengono sfruttate tecniche image-based che prevedono l'utilizzo di aeromobili. In particolare, Eschmann e colleghi [9] utilizzano un micro aeroplano pilotabile a distanza (MAV) e una camera digitale ad alta risoluzione. L'identificazione automatica di danni alla struttura è eseguita evidenziando ed estraendo il pattern relativo alle fessure. In particolare, gli autori fanno riferimento a due metodi: il primo valuta il livello di colore per ciascun pixel, al fine di aggiungere più "bianco" o più "nero" e rendendo quindi ancora più scuri i pattern relativi alle discontinuità strutturali. Il secondo si basa sulla rilevazione dei bordi mediante un blur (filtro) Gaussiano, e sottraendo successivamente l'immagine filtrata all'immagine originale. Il primo metodo fallisce quando le pareti della struttura non sono chiare. In Figura 11 invece possiamo vedere l'applicazione del secondo metodo. Come si può notare, è bene mantenere un valore di sigma né troppo basso, né troppo alto.

Nel lavoro di Ellenberg e collaboratori [10] troviamo invece una descrizione più critica di tali tecniche: vengono infatti messe in evidenza le sfide principali della *detection* automatica di crepe eseguita con metodi image-based e aeromobili a pilotaggio remoto (APR o UAV). In particolare, la sfida principale è la rimozione del rumore: la ruvidità delle superfici, i bordi di porte, finestre, e i bordi degli stessi edifici costituiscono un problema per gli algoritmi di *edge detection*. Per quanto riguarda gli UAV, la problematica principale risiede nelle condizioni ambientali: il vento incide molto sulle loro performances. Infine, il campo di vista della camera, l'angolo di orientamento dell'UAV, e la posizione GPS devono essere ben definite e settate al fine di determinare quale parte della superficie di interesse è realmente inquadrata.

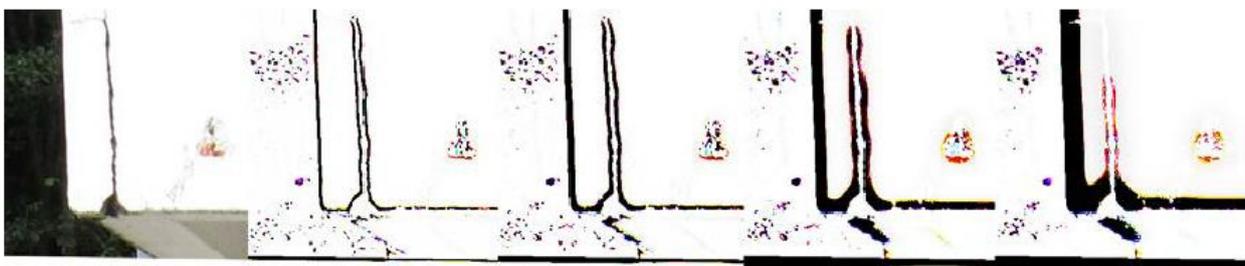


Figura 11 - Immagine originale (a sinistra) processata mediante filtro Gaussiano. il valore di sigma del filtro cresce da sinistra verso destra

Può essere molto utile "marcare" il punto più critico di una discontinuità. Nel lavoro di Nishiyama e colleghi [11], ad esempio, vengono sfruttati i cosiddetti "target riflettenti".

# Progetto Moscardo

I target sono dei markers realizzati mediante gocce di vetro per riflettere quanto più possibile la luce e posizionati a cavallo della crepa, nei punti di interesse (si veda la Figura 12). Gli spostamenti (dovuti alle forze di trazione e taglio) delle due porzioni di superficie interessate dalla crepa possono essere calcolati a partire dalle coordinate dei target, mediante anche una sola immagine digitale. Per determinare l'orientamento della superficie e della camera sono utilizzate tecniche di fotogrammetria. Il metodo è indipendente dalle condizioni di luce; la principale sorgente di errore è dovuta al calcolo delle coordinate dei centroidi. Ovviamente, maggiore sarà la distanza della camera, minore sarà la precisione con la quale verrà calcolata la larghezza della crepa. Nello studio citato è riportata una precisione di 0.1mm per una immagine della crepa catturata ad una distanza di 10m. La *ground truth* è data da misure effettuate mediante fessurimetri.

Nel caso dello studio condotto da Valenca e colleghi [12] i marker sono invece realizzati mediante una semplice griglia di punti applicata alla superficie di interesse (Figura 13). Vengono successivamente acquisite un certo numero di immagini, successivamente processate al fine di individuare delle ROI (Region of Interest), di eliminare il pattern delle discontinuità ed evidenziare quello dei target. La target detection è effettuata mediante trasformata di Hough, al fine di individuare i centri geometrici dei target. Sono utilizzate tecniche di omografia per correggere l'errore di prospettiva ed individuare le coordinate planari dei target. L'eventuale spostamento individuato dalle coordinate dei target è utilizzato per calcolare il campo di forze lungo la superficie e le discontinuità di interesse.

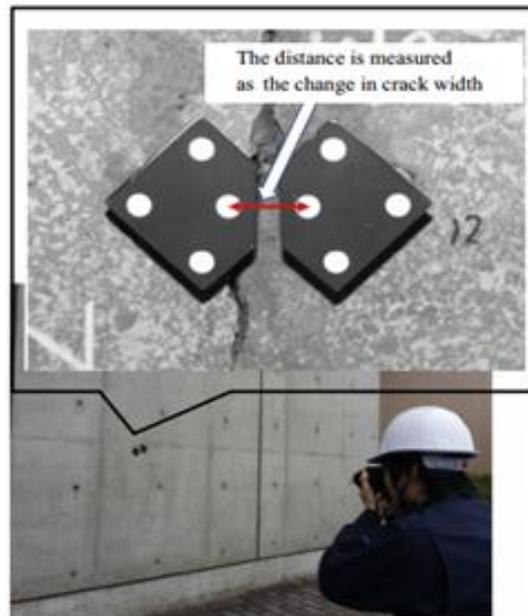


Figura 12- Target riflettenti a cavallo di una fessura

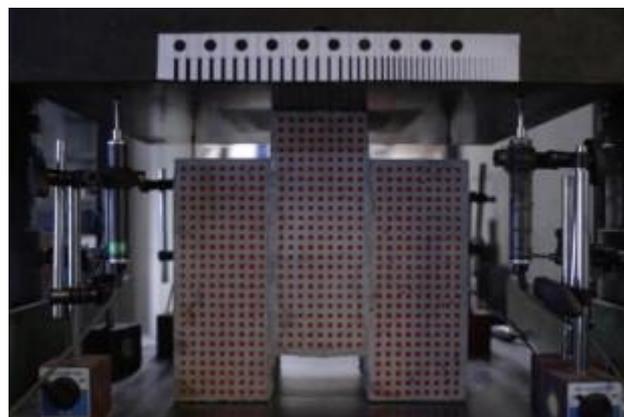


Figura 13- Griglia di punti applicata sul campione

Da questo ultimo esempio si capisce che i target possono essere anche *home-made*; al fine di realizzarli in laboratorio, utili suggerimenti possono essere presi dallo studio riportato in [13].

Tra i lavori che sfruttano la edge detection, quello di Detchev e colleghi [14] parte dal presupposto che una fessura, in un'immagine, sarà sempre rappresentata da due bordi allungati (Figura 14). Il metodo proposto utilizza allora l'algoritmo di Canny per il riconoscimento di bordi e la trasformata di Hough generalizzata per isolare (ed "appaiare") gli eventuali bordi della crepa dal resto dell'immagine. Una volta definiti i contorni della discontinuità, la media delle distanze euclidee tra coppie di punti a cavallo della fessura ne definirà le dimensioni.

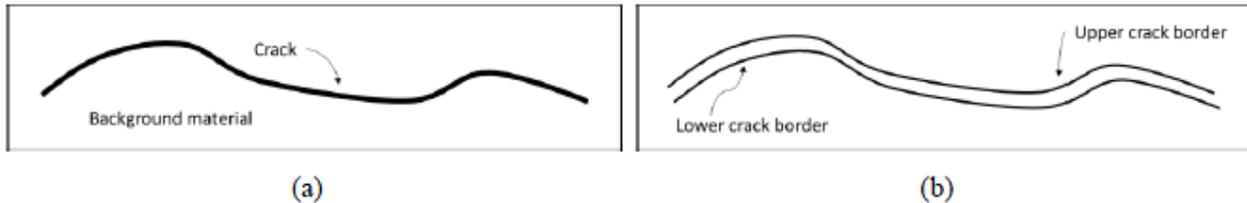


Figura 14- a) Un'esempio di fessura stilizzata b) applicazione dell'algoritmo per il riconoscimento di bordi

Possiamo concludere che i due metodi non invasivi o contact-less principalmente utilizzati sono quelli i) basati su target riflettenti e tecniche di fotogrammetria; ii) basati sul processamento di immagini e tecniche di segmentazione o rilevamento di bordi [9].

## 4.3 Integrazione della termocamera e possibilità di ispezione

Tutti i corpi aventi temperatura superiore allo zero assoluto emettono radiazione elettromagnetica nello spettro dell'infrarosso. L'imaging termico sfrutta proprio questo principio, convertendo il pattern infrarosso, invisibile all'occhio umano, in immagine. C'è da precisare, però, che la radiazione misurata dalla termocamera non dipenderà soltanto dalla temperatura dell'oggetto, ma anche dalla sua emissività (ovvero la sua efficienza di fungere da radiatore), dalla capacità termica del materiale, da quanta radiazione ha assorbito precedentemente e da eventuale altra radiazione proveniente dall'ambiente circostante che il corpo sta semplicemente riflettendo.

L'imaging termico può tornare utile per i nostri scopi in quanto le discontinuità presenti sulla superficie di un edificio non sono altro dei punti in cui il calore dell'oggetto "edificio" viene disperso in maggior quantità. A questo proposito, in questa sezione descriviamo quei lavori che ci sono sembrati più rilevanti per la nostra ricerca.

In [15], Clark e colleghi sfruttano l'imaging termico per rilevare discontinuità in un ponte in muratura presso Kilbucho, UK. La "sfida" nel loro caso è stata quella di acquisire buone termo-immagini anche a basse temperature (le quali provocano variazioni nella temperatura delle strutture monitorate). Hanno impiegato una termo-camera Agema Thermovision 900. In Figura 15 possiamo vedere il set-up sperimentale utilizzato. L'obiettivo era quello di rilevare le zone "fredde" della struttura, ossia quelle corrispondenti ad infiltrazioni d'acqua e di umidità, dal momento che, come possiamo vedere in Figura 16, il ponte è soggetto a deterioramento da parte del fiume sottostante.



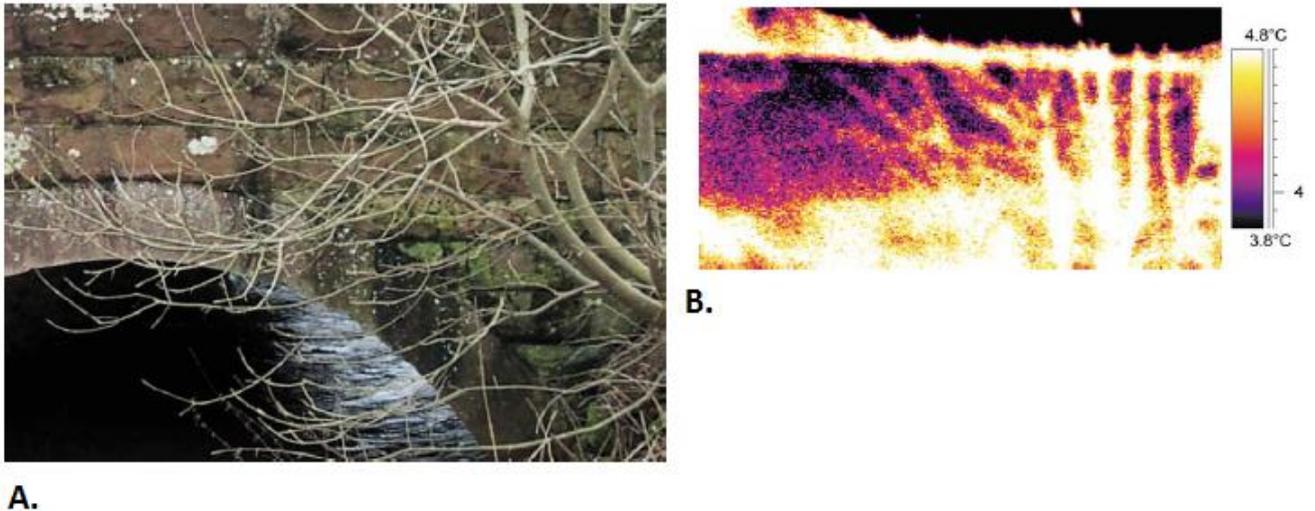
Figura 15- Set-up sperimentale in [15]



Figura 16- Il ponte è soggetto a deterioramento ed infiltrazioni causate dal fiume sottostante

In Figura 17 possiamo vedere un'immagine di una parte del ponte acquisita con la termocamera e successivamente processata. Dalla legenda possiamo riconoscere le zone a bassa temperatura, che corrispondono alle infiltrazioni di umidità. Nel processing dell'immagine acquisita con la termocamera sono stati considerati i seguenti parametri:

- Emissività del materiale (ponte in mattoni): 0.8;
- Distanza ponte- termocamera: 5m;
- Temperatura esterna: 4.5°C.



A.

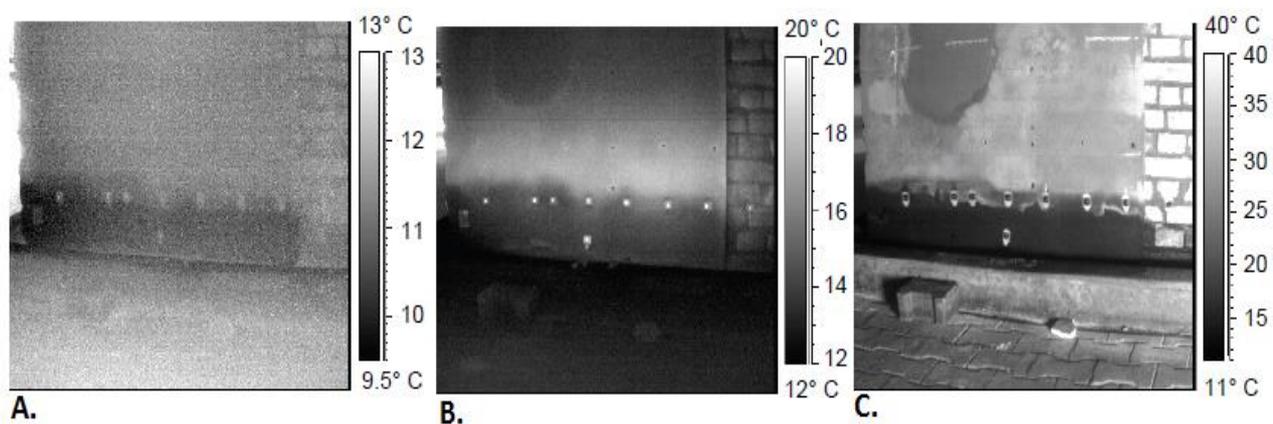
Figura 17 - Termo-immagine di una parte del ponte. Si vedono chiaramente le "zone fredde" corrispondenti ad infiltrazioni d'acqua

Nel lavoro di Maierhofer e Roellig [16], sono confrontati i seguenti approcci:

- Termografia "passiva";
- Termografia attiva, mediante utilizzo di un termoventilatore (applicato per 5 min);
- Termografia attiva, mediante utilizzo di un radiatore a infrarossi (distante 2m e applicato per circa 10 min).

Nella termografia attiva viene applicata una stimolazione termica alla superficie di interesse. Tale stimolazione va a provocare un flusso di calore non-stazionario, che si propagherà all'interno dell'oggetto a seconda delle proprietà del materiale dell'oggetto stesso (capacità termica, conduttività termica, densità). Se sono presenti disomogeneità, queste causeranno differenze di temperatura, misurabili mediante, appunto, imaging termico. Durante, infatti, il processo di raffreddamento, la radiazione termica emessa dalla superficie di interesse può essere osservata mediante camera IR.

Dalla Figura 18 si può constatare che le immagini termografiche ottenute mediante termografia attiva e radiatore IR sono migliori, ossia sono a più alto contrasto.



A.

B.

C.

Figura 18- A. immagine derivante da termografia passiva; B. immagine termografica acquisita dopo riscaldamento con termo-ventilatore; C. Immagine termografica post riscaldamento con radiatore IR

Anche in [17] si parla invece di termografia attiva, ma in questo caso la stimolazione termica proviene da un flash di luce della durata di 3ms (*flash thermography*).

A causa dei bordi ripidi delle crepe, la luce incidente vi rimbalza diverse volte, riscaldando le pareti della fessura. Quest'ultima, quindi si comporterà come una piccola cavità dalle pareti "calde" (Figura 19).

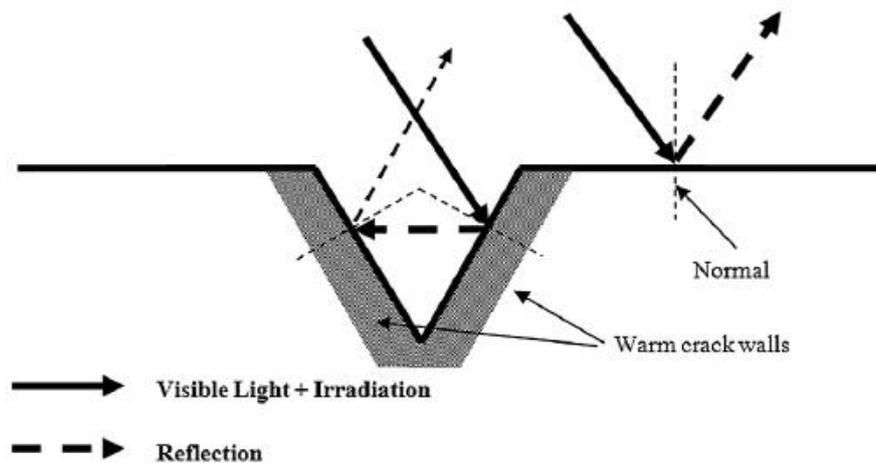


Figura 19- Principio della termografia attiva

Mediante algoritmi di riconoscimento bordi (quali gli edge detector di Sobel e di Canny), sarà poi possibile estrarre e visualizzare le discontinuità sulla superficie di interesse (Figure 20). Sham e colleghi in questo caso hanno rilevato crepe dell'ordine dei 0.5-1mm.

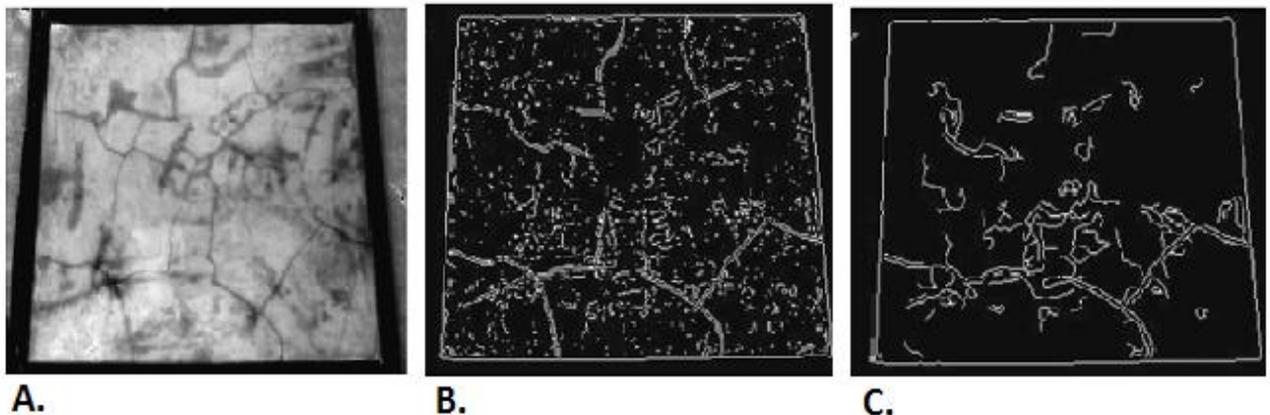


Figure 20- A. Campione di superficie; B. e C. immagini termografiche processate con algoritmi di rilevamento bordi (Sobel, Canny)

Holland e collaboratori [18] presentano un metodo di misura di crepe basato sulla vibro-termografia. Il set-up sperimentale utilizzato è mostrato in Figura 21. Esso prevede l'uso di una sorgente di vibrazioni per eccitare il campione di materiale sotto test, una camera ad infrarossi per osservare il riscaldamento indotto dalle vibrazioni, e un vibrometro laser-Doppler per monitorare l'ampiezza delle vibrazioni (la cui lunghezza d'onda è di solito dello stesso ordine di grandezza del campione in esame). La sorgente di vibrazioni è attivata per 1-2 secondi; i lati della crepa sfregano tra di loro generando così calore. Un pc processa sia le immagini riprese dalla termocamera, sia le informazioni raccolte dal vibrometro.

Nell'articolo si fa riferimento a campioni in titanio e in lega cromo+nicel. Le crepe misurate sono di dimensioni molto piccole (125mm circa).

Nel lavoro di Schlichting e colleghi [19], infine, il campione è eccitato localmente mediante una sorgente laser.

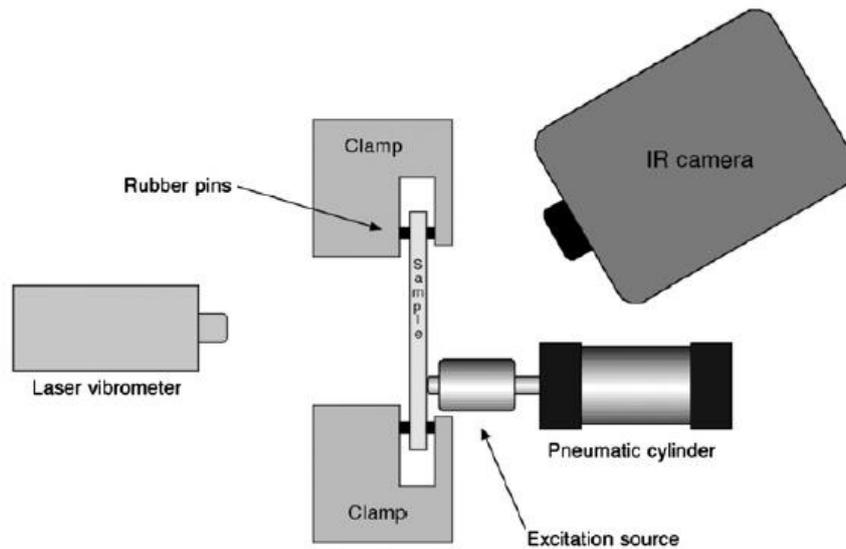


Figura 21 -Set-up sperimentale utilizzato in [T4]

## Vantaggi della termografia

- La distanza tra la superficie di interesse e la camera può variare da pochi millimetri a diversi chilometri;
- Non sono necessarie particolari condizioni di illuminazione, per cui le immagini possono essere acquisite sia di giorno che in notturna;
- Migliore visibilità: la radiazione termica attraversa più velocemente eventuale nebbia e foschia rispetto alla radiazione nel visibile;
- L'imaging termico può rilevare variazioni di temperatura anche minime ( $\pm 0.08^\circ\text{C}$ ). In questo caso sarà necessari auna termocamera avente alta lunghezza d'onda.

## Svantaggi della termografia

- La radiazione che raggiungerà il sistema di acquisizione non dipenderà esclusivamente dalla temperatura dell'oggetto, ma anche dall'emissività del materiale;
- Qualsiasi materiale con emissività  $< 1$ , non solo emetterà la propria quota di radiazione, ma rifletterà quella emessa dagli oggetti circostanti;
- Ci sarà una quota di radiazione attenuata e/o riflessa in altre direzioni dalle particelle sospese nell'atmosfera;
- Le condizioni climatiche possono influenzare la misura: la pioggia, ad esempio, provoca un abbassamento della temperatura di un oggetto mediante evaporazione, causandone una variazione nell'emissività.

## 4.4 Strategia scelta

---

Dopo un'accurata indagine dello stato dell'arte, così come descritto nelle sezioni precedenti, la metodica di rilevamento, misura e monitoraggio crepe che adotteremo ed implementeremo nei mesi successivi sarà image-based. In particolare, utilizzeremo target in bianco e nero, e lo scenario di interesse verrà ricostruito in 3D tramite algoritmi di fotogrammetria.

Per quanto riguarda il tipo di marker da utilizzare, riepiloghiamo, nella Tabella 6, quelli esistenti in letteratura. La nostra scelta ricadrà, in particolare, su quelli presenti nella libreria software basata su openCV "Aruco" [44] o su quelli forniti nell'applicativo Agisoft "Photoscan". Verranno effettuati dei test preliminari in laboratorio proprio per capire quali più si adattano ai nostri scopi: i parametri da valutare sono il materiale di stampa, le dimensioni, ed il tipo di marker. Le simulazioni, inoltre, permetteranno di stimare, nel modo più accurato possibile, la distanza ottimale della camera dai target, considerando la risoluzione dichiarata ed effettiva della strumentazione a nostra disposizione, e l'accuratezza che vogliamo

# Progetto Moscardo

ottenere (decimo del mm). Cercheremo di capire quali sono le condizioni ottimali di illuminazione e inquadratura (se ci sono oggetti che potrebbero ostruire la visuale, ad esempio, o occlusioni semi permanenti dovute alla vegetazione), simulando il monitoraggio in laboratorio e tramite l'acquisizione di dati nei luoghi di interesse.

Tabella 6. Marker disponibili in letteratura. Tabella ripresa da [13] ed estesa.

Target	Company/ Organization	Target	Company/ Organization
	University of Illinois		ETH Zurich
	Geodelta		State Research Institute of Aviation System, Russia
	AICON		Fukuyama University
	Geedetic Services Inc.		Photometrix
	Imetric SA		Topcon Corporation
	The University of Melbourne		AgiSoft Photoscan marker ( <a href="http://www.agisoft.com/">http://www.agisoft.com/</a> )
	INPHO GmbH		Aruco diamond <a href="http://www.uco.es/investiga/grupos/ava/node/26">http://www.uco.es/investiga/grupos/ava/node/26</a>

Le sfide principali sono:

- 1) rendere le tecnologie utilizzate aviotrasportate (mediante UAV);
- 2) utilizzare algoritmi innovativi di fotogrammetria.

Ulteriori test preliminari serviranno quindi a capire le condizioni ottimali di acquisizione immagini con il drone, considerando vento, umidità, illuminazione.

Infine, verrà eseguita un'ispezione visuale delle discontinuità anche mediante termo-camera. Verranno acquisite immagini passivamente (ovvero senza alcuna stimolazione di luce e/o laser, ecc.) la cui elaborazione verrà eseguita off-line e non in maniera automatica.

Per quanto riguarda gli algoritmi di fotogrammetria, la sfida è quella di ottenere una precisione molto alta nell'individuazione delle crepe e nella determinazione delle caratteristiche di ognuna di esse (estensione, profilo, larghezza, eventualmente anche la profondità). La fotogrammetria close-range (referenze) porta effettivamente a livelli di precisione molto alti: si parla di pochi micrometri, purtroppo in ambiente controllato, non paragonabile al caso reale di monitoraggio delle lesioni in oggetto. Nei casi di studio in

# Progetto Moscardo

---

Moscardo l'obiettivo è quello di ottenere una precisione dell'ordine del decimo di mm, ugualmente significativo, soprattutto nel caso in cui il monitoraggio possa durare almeno 12 mesi.

Qui di seguito elenchiamo e descriviamo brevemente le operazioni necessarie alla messa a punto del sistema di monitoraggio del quadro fessurativo, relativamente al focus del presente deliverable.

**Calibrazione della camera.** La calibrazione consiste nel determinare i parametri interni di orientazione (IOPs, interior orientation parameters) della camera: la lunghezza focale, le coordinate del punto principale, il coefficiente skew, ed i coefficienti di distorsione radiale e tangenziale. Non è necessario ripetere tale operazione ad ogni acquisizione, ma i parametri estratti sono fondamentali per la rettifica dei dati acquisiti. La determinazione dei parametri estrinseci della camera, cioè quelli associati alla posa (coordinate spaziali e orientamento) invece è funzionale alla ricostruzione della scena tramite fotogrammetria.

**Tipologia e posa dei marker.** I marker vanno fissati possibilmente in prossimità delle crepe da monitorare, in modo da essere utilizzati eventualmente anche come waypoint per il piano di volo degli UAV. Un primo approccio può essere quello di usare alcune coppie di marker che, installate sui due lati della crepa, permettano di monitorare la variazione nel tempo della sua apertura come distanza tra due marker accoppiati. Tale approccio ripercorre quello presentato in [11]. Diversamente si può pianificare di ricoprire in modo più o meno omogeneo e regolare la porzione di edificio in esame per sfruttare la conoscenza a priori del pattern ai fini della ricostruzione 3D e per l'estrazione delle misure da monitorare (ad esempio l'ampiezza/profondità delle discontinuità strutturali). Quest'ultima soluzione tuttavia appare invasiva, soprattutto dal punto di vista estetico. In entrambi i casi, preliminarmente occorre eseguire degli esperimenti per definire le caratteristiche ottimali dei marker: tipologia, dimensioni, supporto fisico e materiale di stampa, tipo di ancoraggio del marker alla struttura in esame.

**Acquisizione.** Vanno definiti i requisiti per l'acquisizione dei dati in modo che sia possibile raggiungere l'accuratezza desiderata nella ricostruzione 3D. A tal fine è necessario effettuare degli esperimenti in condizioni controllate indoor e outdoor. Si intende acquisire vari set di immagini con la strumentazione che sarà montata sul drone, manualmente e/o direttamente con il drone, in modo da variare tutti i parametri possibili (velocità di volo, assetto di ispezione, risoluzione delle immagini e frame rate, etc), e infine definire le condizioni ottimali (sia della strumentazione che ambientali) per la presa dati. Questa fase si sovrappone parzialmente a quella descritta immediatamente sopra, per quanto riguarda la scelta di tipologia e dimensione dei marker.

**Elaborazione.** L'elaborazione dei dati acquisiti viene effettuata a più livelli: diversi sono gli algoritmi che vanno implementati e integrati, in quanto diversi sono i task da eseguire: il riconoscimento automatico dei marker e la loro localizzazione, la ricostruzione 3D globale della scena, e dettagliata in prossimità delle crepe, la caratterizzazione 2D e morfologica delle crepe monitorate.

Per la scena globale ha senso utilizzare uno dei software presentati in sezione 6. Il passo fondamentale di ricostruzione verrà effettuato tramite algoritmi di SfM (structure from motion) e Multiview Stereo Reconstruction. Classicamente questi algoritmi richiedono la determinazione manuale di corrispondenze di *key points* tra 3 o più immagini (image matching). Al fine di automatizzare questo specifico step, si pensa di pianificare una conformazione ottimale di *coded marker* (come gli Aruco diamonds, per esempio) sulla struttura. La definizione del numero di tali oggetti sulla struttura e delle posizioni reciproche va ottimizzata in base alle caratteristiche della struttura e all'accuratezza richiesta per la ricostruzione.

La ricostruzione dettagliata delle regioni considerate critiche dovrà consentire la localizzazione e segmentazione delle eventuali crepe in esse contenute, e la loro caratterizzazione tramite l'analisi quantitativa di estensione e spessore, ed eventualmente profondità, disallineamento o scorrimento tra i due lembi della lesione, ecc. Per questo task sarà necessario costruire degli algoritmi ad hoc (basati su 2D image processing, e fotogrammetria close-range) per poter integrare le informazioni globali della scena con quelle locali delle zone di possibile criticità.

## Progetto Moscardo

---

Ricapitolando, occorre sottolineare che la maggior parte dei risultati in letteratura sono ottenuti in ambiente controllato, senza vincoli di carattere storico-artistico. Inoltre, i casi di studio esistenti analizzano lesioni di piccola entità, su materiale pressoché omogeneo (metallico o cementizio). Diverso è il caso della cinta muraria della Fortezza. La cinta muraria appare come una struttura piuttosto eterogenea ed irregolare, rivestita di mattoncini rossi; inoltre presenta delle lesioni molto profonde, che, in alcuni casi, determinano una completa separazione della struttura; sarebbe auspicabile descrivere tale separazione nel tempo in tutte le sue componenti (dunque considerando lo spostamento dei lembi nello spazio). Tale complessità richiede probabilmente l'integrazione di due diversi approcci. Riteniamo più promettenti, per l'implementazione nei casi di studio di Moscardo, l'approccio basato sullo SLAM ottimizzato grazie all'uso di coded marker descritto da Salinas in [45], e quello basato su digital photogrammetry, con particolare riferimento al lavoro di Nishiyama [11].

## 5. Ricostruzione 3D mediante fotogrammetria [Riccardo]

---

La costruzione di un modello digitale accurato in tre dimensioni è una fase molto importante della preservazione e conservazione dei siti di interesse storico culturale perché attraverso l'analisi delle registrazioni effettuate in momenti temporali differenti permette la pronta visualizzazione di eventuali alterazioni riscontrate.

Esistono diverse tecnologie utilizzate per la modellazione digitale 3D dei siti di interesse archeologico e/o culturale [20]. Molti sistemi si basano sulla tecnologia LiDAR (dall'inglese Light Detection And Ranging) comunemente chiamata Laser Scanner perché utilizza una luce laser per misurare la distanza degli obiettivi dal sensore che la emette [21,22,23]. Questa tecnologia è generalmente costosa e non adatta ad essere montata su MAV (Micro Air Vehicle, comunemente detto drone).

Una telecamera monoculare invece è estremamente più leggera ed adatta a questo scopo; nel prossimo paragrafo faremo una carrellata degli algoritmi e dei software che utilizzano tale sensore per ottenere una ricostruzione 3D geometricamente corretta e gradevole alla vista [24,25].

### 5.1 Metodi e software per la fotogrammetria

---

Structure from Motion (SfM) è la tecnica di fotogrammetria per stimare misure di strutture tridimensionali da una sequenza di immagini bidimensionali (video).

Distinguiamo principalmente due tipi di algoritmi, quelli online, capaci di essere eseguiti in tempo reale, e quelli offline che danno risultati molto più precisi ma solo dopo una lunga elaborazione.

Gli algoritmi online che andiamo a presentare sono conosciuti con il termine SLAM (Localizzazione e Mapping Simultaneo): essi hanno come obiettivo la costruzione della mappa del mondo circostante per poter localizzarsi in esso allo stesso tempo attraverso i dati del sensore (la telecamera). Essi sono in grado di elaborare le immagini in tempo reale e questo dato può essere utilizzato per il volo autonomo del drone.

#### **ORB-SLAM**

Definito come "Sistema SLAM accurato e versatile basato su singola telecamera"[27] è un algoritmo real time basato su caratteristiche peculiari dell'immagine[28]. Tali caratteristiche sono chiamate ORB e rappresentano una alternativa veloce ed efficiente rispetto alla più tradizionali SIFT[29].

Nel primo passo dell'algoritmo si estrae un piccolo insieme di questi punti chiave. Successivamente essi sono ricercati nelle immagini successive per ricostruire la loro posizione 3D e il movimento della telecamera. L'algoritmo non richiede nessun particolare stadio di calibrazione ed è in grado di ri-localizzarsi nel caso in cui il tracking si fosse temporaneamente perso[30]. Purtroppo solo questo insieme sparso di punti caratteristici è ricostruito in 3D.

#### **LSD-SLAM**

Large Scale Direct Monocular SLAM[31] al contrario del precedente non si basa su pochi punti caratteristici bensì su tutta l'immagine per tracciare il movimento della telecamera. La geometria 3D della scena è calcolata mediante molte comparazioni stereo[32] che fornisce in una nuvola di punti semi-densa. LSD-SLAM può funzionare in real-time anche su dispositivi a basso potere computazionale[33] e supporta la rilocalizzazione e il loop-detection attraverso il toolbox OpenFABMap [34]. Per inizializzare l'algoritmo è necessario qualche secondo di movimento traslazionale della telecamera.

#### **DPPTAM**

Dense Piecewise Planar Tracking and Mapping[35] usa un approccio diretto per tracciare i pixel ad alto gradiente in frame consecutivi. La peculiarità di questo algoritmo consiste nel cercare di individuare le superfici piane o quasi-piane come muri, tetti o facciate di palazzi, molto comuni in scenari costruiti dall'uomo. Per fare ciò DPPTAM introduce il concetto di Super Pixel ovvero quelle aree dell'immagine a basso gradiente dove la proiezione 3D soddisfa un certo insieme di vincoli. Con questo approccio

# Progetto Moscardo

l'algoritmo cerca di ricostruire le superfici uniformi spesso prive di punti caratteristici riconoscibili in immagini differenti.

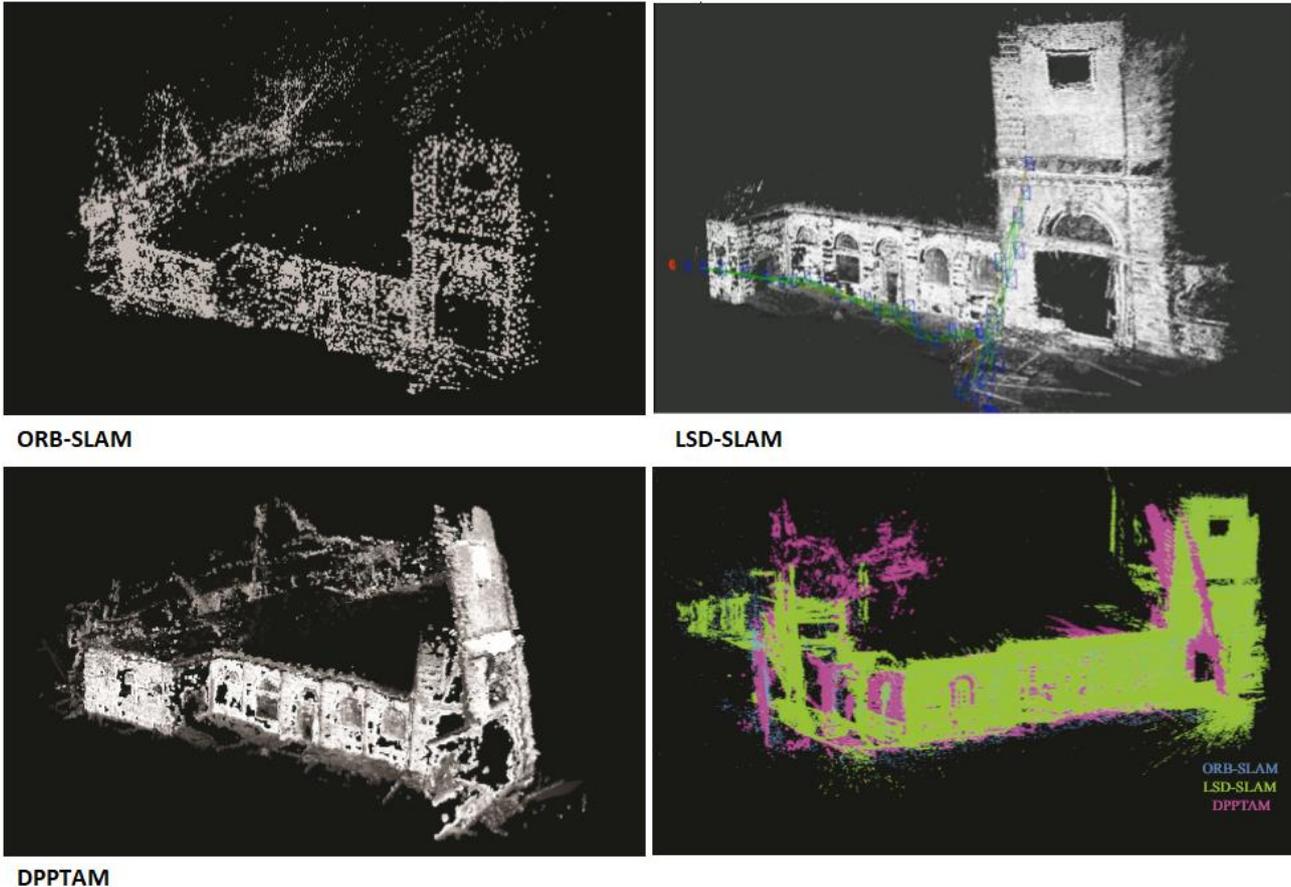


Figura 22 – La ricostruzione 3D del vecchio mattatoio di Budapest utilizzando i tre metodi online descritti come proposto in [IWCIM16]

## SOFTWARE

Alcuni prodotti commerciali hanno raggiunto ormai maturità industriale e garantiscono una perfetta ricostruzione 3D a fronte di una lunga elaborazione. Spesso vengono utilizzati a questo scopo cluster di computer[36] o PC singoli con potenti architetture GPU parallele[37]. Ne presentiamo brevemente solo alcuni dei più utilizzati:

### Agisoft Photoscan [38]

E' uno dei primi software di fotogrammetria ed ormai un punto di riferimento in questo campo. Esso ricostruisce la scena in diversi passi consecutivi. Per prima cosa vengono estratti i punti caratteristici. Questi vengono correlati in tutte le immagini in modo da ottenere i punti di controllo (le corrispondenze). Partendo da questa prima ricostruzione sparsa è calcolata una nuvola densa. Da questo output intermedio si arriva al risultato finale che consiste in una superficie poligonale detta mesh, che costituisce il modello 3D del mondo in oggetto.

### Pix4D [39]

E' un software molto più recente ed è ottimizzato per le riprese aeree effettuate dai droni. Il funzionamento è molto simile al precedente. Anche Photoscan utilizza diversi passi. All'inizio la posizione della telecamera e la prima struttura 3D sono calcolate mediante estrazione e corrispondenza dei punti chiave. L'utente può rimuovere le corrispondenze non corrette e aggiungerne manualmente altre in modo da ottenere una ricostruzione 3D coerente. In seconda battuta è elaborata la nuvola di punti densa

# Progetto Moscardò

applicando un algoritmo di corrispondenza stereo a larga baseline [40]. Infine viene calcolato il modello poligonale della scena.

## Autodesk 123D Catch [41]

La Autodesk è da decenni la azienda di riferimento per il CAD (Computer Aided Design) e per tutto il software riguardante la modellazione 3D. Non è dunque una sorpresa che siano molto attivi anche in campo di fotogrammetria per la creazione di modelli digitali della realtà. La peculiarità di questo prodotto è essere un servizio cloud: basta caricare un insieme disordinato di immagini per ottenere il modello mesh della scena.

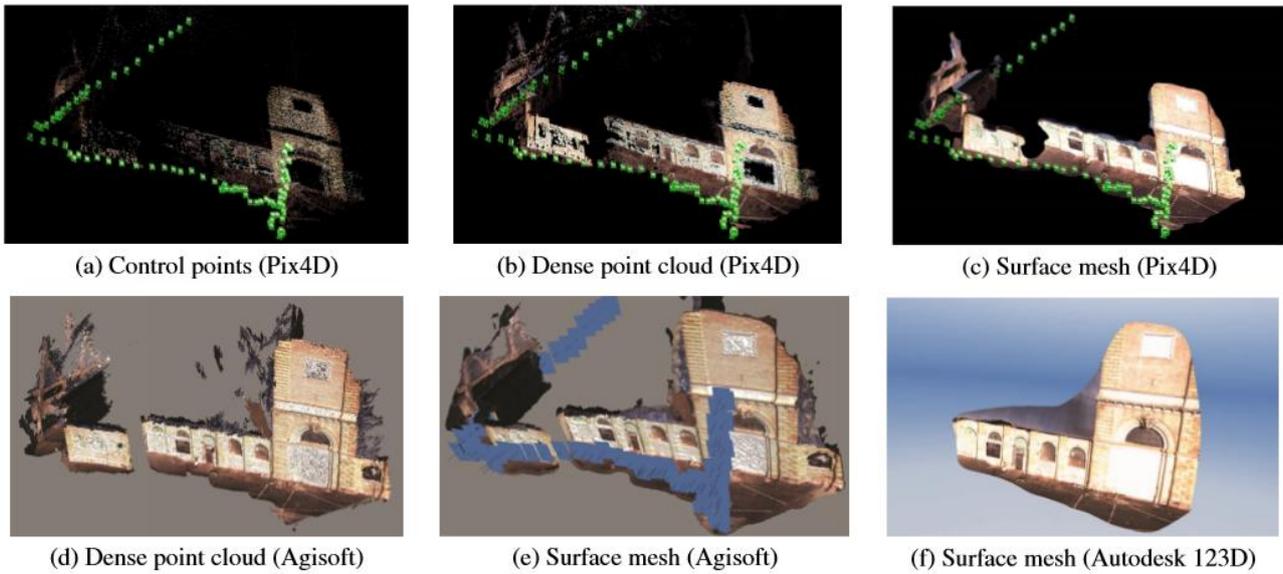


Figura 23 – Alcune fasi della ricostruzione 3D proposto in [43] utilizzando i tre software commerciali presentati

Anche il mondo open source è molto attivo nel campo della fotogrammetria e merita di essere esplorato. Il dott. Falkingham nel suo sito personale [41] analizza in dettaglio le varie applicazioni presenti. In figura 20 possiamo vedere uno schema delle possibili combinazioni software (in comparazione con Photoscan)

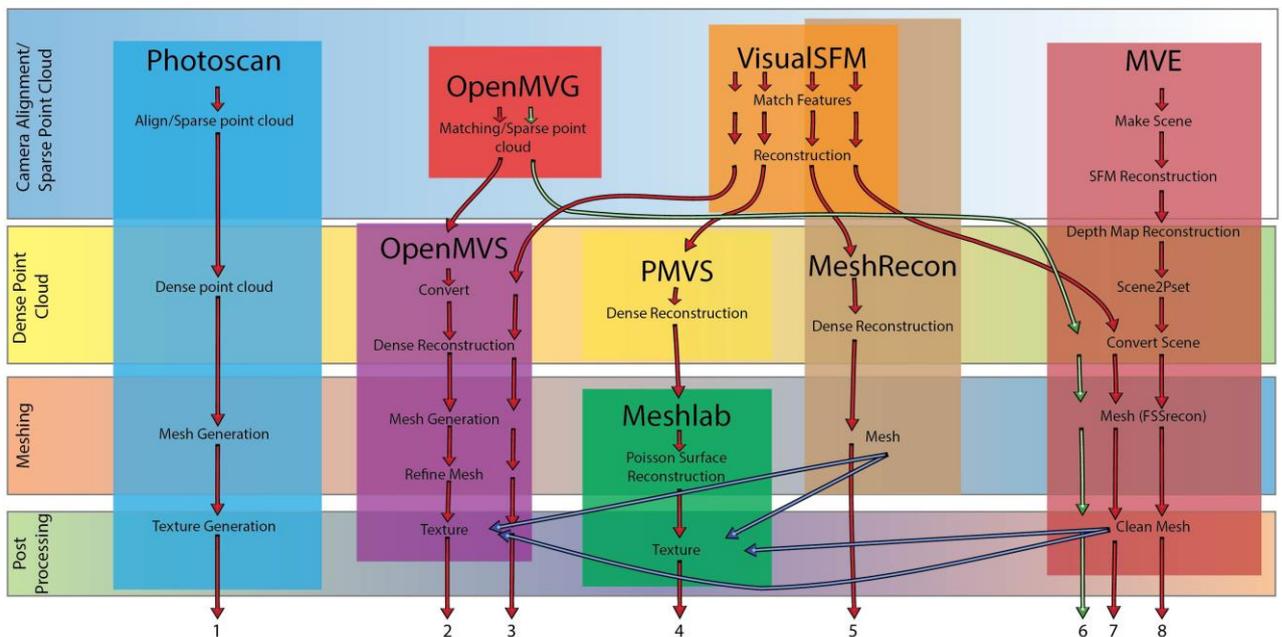


Figura 20 – Software open source alternativi ad Agisoft Photoscan

E' nostra intenzione testare con attenzione le proposte del mondo open source perché poter disporre del codice sorgente è sempre un ottimo punto di partenza per poter eventualmente migliorare l'algoritmo oggetto della ricerca.

## 5.2 Strategia scelta

---

Il modello 3D ottenuto con i software offline è di gran lunga più accurato rispetto a quello generato dai software online. L'obiettivo primario di questi ultimi infatti non è la qualità della ricostruzione bensì la localizzazione all'interno di un mondo (eventualmente) sconosciuto.

La strategia scelta è dunque quella di utilizzare un software offline per la generazione del modello di riferimento. Gli algoritmi di SLAM saranno utilizzati per la localizzazione real time del drone (e dunque visualizzazione sulla consolle dell'operatore a terra).

La scelta di quale software utilizzare, con particolare attenzione per gli open source, avverrà dopo accurati test sui dati raccolti nelle campagne di acquisizione previsti per il secondo anno di progetto.

## 6. Conclusioni

---

Lo scenario applicativo relativo ai casi di studio di Moscardo pone delle sfide tecnologiche sotto molti punti di vista. Le strutture in oggetto hanno rilevanza storico-artistica e pongono dei vincoli sul numero di sensori da usare e l'invasività della loro installazione rispetto all'estetica del bene culturale.

In questo senso, un approccio marker-based offre la possibilità di una misurazione accurata da effettuare nei punti individuati come critici o significativi ai fini del monitoraggio; l'accuratezza non sembra ottimale allo stato dell'arte (dell'ordine del millimetro, per i marker ArUco, ad esempio), ma è sicuramente migliorabile nel corso del progetto. D'altro canto, un approccio di image processing, basato sulla corrispondenza di features collezionate tramite algoritmi tipo SIFT, grazie alla ricchezza delle feature rilevabile sulle strutture in esame (particolarmente eterogenee, come quelle della cinta muraria della Fortezza Vecchia) può offrire una descrizione del quadro fessurativo della struttura complementare a quella fornita dall'approccio marker-based. Sebbene la ricchezza di tali feature (e corrispondenze) contribuisca alla robustezza della ricostruzione 3D della struttura, nel caso del monitoraggio delle lesioni nel tempo occorre sviluppare metodi ad hoc per ottenere la riproducibilità delle misurazioni effettuate (rendendo il calcolo delle corrispondenze robusto rispetto alle variazioni di illuminazione, ed alle variazioni, come quelle associate alla vegetazione presente in situ, dovute alla stagionalità) o del calcolo di opportuni descrittori di ogni lesione (basati sulla statistica delle feature rilevate ad ogni acquisizione o sulla 3D shape delle lesioni).

Per quanto riguarda la ricostruzione 3D, si utilizzerà un software offline per la generazione del modello di riferimento, mentre la localizzazione real time del drone (e dunque visualizzazione sulla consolle dell'operatore a terra) verrà ottenuta tramite l'implementazione di algoritmi di SLAM.

Le strategie scelte, sia per il monitoraggio delle lesioni, sia per la ricostruzione 3D a scopo descrittivo e a supporto della navigazione del drone, verranno implementate e testate sia in laboratorio sia nei siti di interesse nelle prossime campagne di acquisizione previste per il secondo anno di progetto.

## Riferimenti bibliografici

---

- [1] I N. Rajic, In situ Monitoring of Crack Growth in Mild Steel under Closure Conditions Using a Piezotransducer Array. Volume: 11 Issue: 9, page(s): 696-702, Issue published: September 1, 2000
- [2] Tsung-Chin Hou, Jerome P. Lynch, Electrical Impedance Tomographic Methods for Sensing Strain Fields and Crack Damage in Cementitious Structures, Volume: 20 issue: 11, page(s): 1363-1379 Article first published online: September 22, 2008; Issue published: July 1, 2009
- [3] M. Lisowski, T. Uhl, Wireless passive sensor for crack detection exploiting RFID technology, „Pomiary Automatyka Robotyka”, R. 16, Nr 12/2012, 92-99
- [4] M. Lisowski, T. Uhl, Wireless passive RFID-based sensor for crack detection – second stage of investigations, Key Engineering Materials Online:2013-10-11 ISSN: 1662-9795, Vol. 588, pp 352-359 doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.588.352, 2014
- [5] A. Mecocci et al., Monitoring Architectural Heritage by Wireless Sensors Networks: San Gimignano--A Case Study, Sensors (Basel) 14 (1), 770-778. 2014 Jan 03
- [6] W. Niemeier, B. Riedel, C. Fraser, H. Neuss, R. Stratmann, E. Ziem, *New digital crack monitoring system or measuring ad documentation of width of cracks in concrete structures*, Measuring the Changes: 13th FIG Symposium on Deformation Measurements and Analysis, 2008, 9pp
- [7] M.R. Jahanshahi, S.F. Masri, C.W. Padgett, G.S. Sukhatme, *An innovative methodology for detection and quantification of crack through incorporation of depth perception*, Machine Vision and Applications, 2011, 24, 227-241
- [8] M.R. Jahanshahi and S.F. Masri, *A new methodology for non-contact accurate crack width measurement through photogrammetry for automated structural safety evaluation*, 2013, 22, 035019 (12pp)
- [9] C. Eschmann, C.M. Kuo and C. Boller, *Unmanned Aircraft System for Remote Building Inspection and Monitoring*, Proceeding of 6<sup>th</sup> European Workop on Structural Health Monitoring, 2012
- [10] A. Ellenberg, A. Kotsos, I. Bartoli, A. Pradhan, *Masonry Crack detection Application of an Unmanned Aerial Vehicle*, Proceedings of Computing in Civil and Building Engineering, ASCE2014, 2014, 1788-1795
- [11] S.Nishiyama, N. Mianakata, T. Kikuchi, T.Yano, *Improved digital photogrammetry technique for crack monitoring*, Advanced Engineering Informatics, 2015, 29, 851-858
- [12] J. Valenca, D. Dias-da Costa, E. Júlio, H. Araújo and H. Costa, *Automatic crack monitoring using photogrammetry and image processing*. Measurement, 2013, 46(1), 433-441
- [13] M.R. Shortis and J.W. Seager, (2014). *A practical target recognition system for close range photogrammetry*. The Photogrammetric Record, 2014, 29 (147), 337-355
- [14] I.D. Detchev, A.F. Habib and M.M. El-Badry, *An algorithm for extraction of cracks in concrete beams from images*, Proceedings of Second Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures, SMAR2013, 2013, 8pp
- [15] M.R. Clark, D.M. McCann, M.C. Forde, *Application of infrared thermography to the non-destructive testing of concrete and masonry bridges*, NDT&E International, 2003, 36, 265-275
- [16] C. Maierhofer e M. Roellig, *Active thermography for the characterization of surfaces and interfaces of historic masonry structures*, Proceeding of NDTCE'09, Non-destructive Testing in Civil Engineering, Nantes, France, June 30<sup>th</sup>-July 3<sup>rd</sup>, 2009
- [17] F.C. Sham, N. Chen and L.Long, *Surface crack detection by flash thermography on concrete surface*, Insight, 2008, 50, 240-243
- [18] S.D. Holland et al., *Quantifying the vibrothermographic effect*, NDT&E International, 2011, 44, 775-782
- [19] J. Schlichting, Ch. Maierhofer, M. Kreuzbruck, *Crack sizing by laser excited thermography*, NDT&E International, 2011, 45, 133-140

- [20] F. Remondino and S. Campana, 3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage: Theory and Best Practices, BAR / International series. Archaeo-press, 2014.
- [21] N. Haalaa, M. Petera, R. Cefalua, and J. Kremerb, “Mobile lidar mapping for urban data capture,” Digital Heritage Proceedings of the 14th International Conference on Virtual Systems and Multimedia, 2008.
- [22] Fabio Remondino, “Heritage recording and 3d modeling with photogrammetry and 3d scanning,” Remote Sensing, vol. 3, no. 6, pp. 1104, 2011.
- [23] M Doerr, I Chrysakis, A Axaridou, M Theodoridou, C Georgis, E Maravelakis, A Konstantaras, and M Xinogalos, “Developing a novel system for documentation of cultural heritage monuments recorded with terrestrial 3d scanners,” Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology, CAA-GR, 2014.
- [24] M. M. Ramos and F. Remondino, “Data fusion in cultural heritage—a review.,” International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences, vol. 40, 2015.
- [25] M. Hess, V. Petrovic, D. Meyer, D. Rissolo, and F. Kuester, “Fusion of multimodal three-dimensional data for comprehensive digital documentation of cultural heritage sites,” in 2015 Digital Heritage. IEEE, 2015, vol. 2, pp. 595–602.
- [26] A. Majdik, D. Verda, Y. Albers-Schoenberg, and D. Scaramuzza, “Air-ground matching: appearance-based gps-denied urban localization of micro aerial vehicles,” Journal of Field Robotics, vol. 32, no. 7, pp. 1015–1039, 2015.
- [27] R. Mur-Artal, J. M. M. Montiel, and J. D. Tardós, “Orb-slam: a versatile and accurate monocular slam system,” IEEE Transactions on Robotics, vol. 31, no. 5, pp. 1147–1163, 2015.
- [28] D. G. Lowe, “Distinctive image features from scale-invariant keypoints,” Int. J. Comput. Vision, vol. 60, no. 2, pp. 91–110, Nov. 2004.
- [29] E. Rublee, V. Rabaud, K. Konolige, and G. Bradski, “Orb: An efficient alternative to sift or surf,” in International Conference on Computer Vision, 2011, pp. 2564–2571.
- [30] D. Gálvez-López and J. D. Tardos, “Bags of binary words for fast place recognition in image sequences,” IEEE Transactions on Robotics, vol. 28, no. 5, pp. 1188–1197, 2012.
- [31] J. Engel, T. Schöps, and D. Cremers, “LSD-SLAM: Large-scale direct monocular SLAM,” in European Conference on Computer Vision (ECCV), 2014.
- [32] J. Engel, J. Sturm, and D. Cremers, “Semi-dense visual odometry for a monocular camera,” in International Conference on Computer Vision (ICCV), 2013.
- [33] T. Schöps, J. Engel, and D. Cremers, “Semi-dense visual odometry for AR on a smartphone,” in International Symposium on Mixed and Augmented Reality, 2014.
- [34] A. Glover, W. Maddern, M. Warren, S. Reid, M. Milford, and G. Wyeth, “Openfabmap: An open source toolbox for appearance-based loop closure detection,” in International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2012, pp. 4730–4735.
- [35] A. Concha and J. Civera, “Dense Piecewise Planar Tracking and Mapping from a Monocular Sequence,” in Proc. of The International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2015.
- [36] S. Agarwal, N. Snavely, I. Simon, S. M. Seitz, and R. Szeliski, “Building Rome in a day,” in International Conference on Computer Vision, 2009, pp. 72–79.
- [37] J. M. Frahm, P. Fite-Georgel, D. Gallup, T. Johnson, R. Raguram, C. Wu, Y. H. Jen, E. Dunn, B. Clipp, S. Lazebnik, and M. Pollefeys, “Building Rome on a cloudless day,” in The 11th European Conference on Computer Vision, 2010, pp. 368–381.
- [38] <http://www.agisoft.com/>
- [39] <https://pix4d.com/>
- [40] C. Strecha, R. Fransens, and L. Van Gool, “Wide-baseline stereo from multiple views: a probabilistic account,” in Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition. IEEE, 2004, vol. 1, pp. 1–552.
- [41] <https://www.autodesk.com/solutions/123d-apps>
- [42] <https://pfalkingham.wordpress.com/2016/09/14/trying-all-the-free-photogrammetry/>

- [43] A.L. Majdik, L.Tizedes, M. Bartus, and T. Sziranyi, "Photogrammetric 3D Reconstruction of the old slaughterhouse in Budapest", Proceeding of IWCIM 2016, Reggio Calabria, Italy, 2016.
- [44] S. Garrido-Jurado, R. Munoz-Salinas, F.J. Madrid-Cuevas, M.J. Marin-Jimenez, "Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion", Pattern Recognition, vol. 47 (6), 2014, pp. 2280-2292.
- [45] R. Munoz-Salinas, M.J. Marin-Jimenez, E. Yeguas-Bolivar, R. Medina-Carnicer, "Mapping and localization from planar markers", Pattern Recognition, vol. 73, 2018, pp. 158-171.