



POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Civile

Laurea In Ingegneria Civile

Sperimentazione di una tecnica fotogrammetrica automatica per la generazione di un DTM con immagini da elicottero

Reatore: Prof. Ing. Marco Scaioni

Co-relatore: Mattia Previtali

Daniele Rossi 724657

Anno Accademico 2010/11

Questa tesi è dedicata a mia tutta la mia Famiglia, che mi ha permesso di raggiungere questo obiettivo, supportandomi e motivandomi.

INDICE

Abstract.....	1
Introduzione.....	2
1. Fotogrammetria aerea.....	3
<i>1.1 La Fotogrammetria.....</i>	<i>3</i>
<i>1.2 Le Piattaforme Aeree.....</i>	<i>3</i>
1.2.1 I Velivoli ad ala fissa.....	4
1.2.2 Gli UAV.....	4
1.2.3 Gli Elicotteri.....	5
<i>1.3 L'Aeromobile e il Sistema di Ripresa.....</i>	<i>6</i>
2. La Calibrazione della Camera Digitale.....	8
<i>2.1 Distorsione Radiale.....</i>	<i>9</i>
<i>2.2 Distorsione Tangenziale.....</i>	<i>10</i>
<i>2.3 Distorsione Affine e di Taglio.....</i>	<i>11</i>
3. Algoritmo di Orientamento Automatico.....	12
<i>3.1 Rilevazione delle features.....</i>	<i>13</i>
<i>3.2 Analisi del Descriptor.....</i>	<i>14</i>
<i>3.3 Rimozione dei Matches errati.....</i>	<i>15</i>
<i>3.4 Rifinitura delle Coordinate Immagine.....</i>	<i>16</i>
<i>3.5 Strategie di Orientamento per Sequenze o Blocchi Sparsi.....</i>	<i>16</i>
3.5.1 Sequenze di immagini.....	16
3.5.2 Blocchi sparsi di immagini.....	17
<i>3.6 Miglioramento dei risultati di Orientamento.....</i>	<i>18</i>

3.7 <i>Decimazione di Coppie di immagine e di Punti immagine.....</i>	20
4. Ricostruzione Automatica di Superfici mediante	
Tecnica Fotogrammetrica	22
4.1 <i>Tecniche di correlazione di immagini.....</i>	22
4.1.1 Metodi correlazione semplice.....	22
4.1.2 Least Squares Matching.....	24
4.1.3 Geometrically Constrained Cross-Correlation.....	24
4.1.4 Multiphoto Geometrically Constrained Matching.....	26
4.2 <i>La metodologia di ricostruzione sviluppata.....</i>	28
4.3 <i>Generazione del Seed Model.....</i>	30
4.3.1 Patch-Based Matching.....	30
4.4 <i>Utilizzazione di modello geometrico approssimato.....</i>	31
4.5 <i>Scelta delle immagini e dei parametri approssimati di LSM.....</i>	33
5. Esempi di applicazione dell'Algoritmo di Matching	
denso.....	35
5.1. <i>Fiumetto.....</i>	36
5.2. <i>Tratto di fiume Olona.....</i>	42
Conclusion.....	47
Bibliografia.....	48
<i>Allegato 1 – Set immagini “Fiumetto”.....</i>	50
<i>Allegato 21 – Set immagini “Olona”.....</i>	52

INDICE FIGURE

<i>1.1 – Esempio di velivolo ad ala fissa.....</i>	<i>4</i>
<i>1.2 – Alcune tipologie di UAVs.....</i>	<i>5</i>
<i>1.3 – esempio di elicottero leggero.....</i>	<i>6</i>
<i>1.4 – visuali di un elicottero leggero.....</i>	<i>6</i>
<i>1.5 – Visione del mount.....</i>	<i>7</i>
<i>2.1 – Prospettiva centrale.....</i>	<i>8</i>
<i>2.2 – Effetti della distorsione radiale.....</i>	<i>9</i>
<i>2.3 – Curva di distorsione radiale.....</i>	<i>10</i>
<i>2.4 – Effetti della distorsione tangenziale.....</i>	<i>10</i>
<i>2.5 – Curva di distorsione tangenziale.....</i>	<i>11</i>
<i>2.6 – Effetti della distorsione Affine (sinistra) e di Taglio (destra).....</i>	<i>11</i>
<i>3.1 – pipeline.....</i>	<i>12</i>
<i>3.2 – Elaborazione di una tripletta: (sopra) le coppie (I_i, I_{i+1}) e (I_{i+1}, I_{i+2}) sono correlate individuando 690 e 790 punti (sotto) la procedura seleziona i punti in I_{i+2} che sono visibili in entrambe le coppie: restituisce 336 punti corrispondenti per la tripletta.....</i>	<i>17</i>
<i>3.3 – Alcune immagini di un bassorilievo acquisite con un blocco sparso.....</i>	<i>18</i>
<i>3.4 – Esempio di distribuzione casuale e non uniforme delle features estratte con SIFT (sopra) e distribuzione uniforme derivata dall'approccio posposto (sotto).....</i>	<i>20</i>
<i>3.5 – La visibility map dell'oggetto in figura 8. le immagini sono rappresentate da punti e le loro connessioni da linee.....</i>	<i>21</i>
<i>4.1 – Immagine master e slave.....</i>	<i>23</i>
<i>4.2 – Principio di GC^3.....</i>	<i>25</i>
<i>4.3 – Principio di MGCM, correlazione delle coordinate terreno del punto P^* (posizione iniziale) e determinazione delle coordinate del punto terreno P (corretto posizionamento del punto, matching corretto).....</i>	<i>27</i>
<i>4.4 – Pipeline.....</i>	<i>29</i>

4.5 – esempi di patch errate che si trovano fuori o dentro la superficie corretta	31
4.6 – proiezione dei potenziali punti terreno, individuati sul raggio proiettivo, sulle immagini slave.....	32
4.7 – Posizione stimata del punto terreno.....	32
4.8 – Selezione dell'immagine master e delle slave.....	33
5.1 – grafico distorsione.....	35
5.2 – Prima immagine del set utilizzato nell'esempio 1.....	36
5.3 – Posizioni di presa e punti di legame del blocco realizzato per il provino in cls.....	37
5.4 – Nuvola di punti ottenuta con LSM.....	37
5.5 – Triangolazione della nuvola di punti ottenuta con il LSM.....	38
5.6 – DTM Approssimato.....	39
5.7 – Nuvola di punti ottenuta con MGCM.....	39
5.8 – Triangolazione della nuvola di punti ottenuta con il MGCM.....	40
5.9 – Superficie interpolata ottenuta con Surfer.....	41
5.10 – Prima immagine del set utilizzato nell'esempio 2.....	42
5.11 – Posizioni di presa e punti di legame del blocco fotogrammetrico.....	43
5.12 – DTM Approssimato.....	43
5.13 – Nuvola di punti che descrive la superficie.....	44
5.14 – Triangolazione della nuvola di punti.....	44
5.15 – Particolare della triangolazione della nuvola di punti.....	45
5.16 – Superficie interpolata del bassorilievo ottenuta con Surfer.....	45
5.17 – Correzioni apportate da MGCM al DTM approssimato.....	46

INDICE TABELLE

<i>1.1 – Caratteristiche di fotogrammetria aerea, close-range e UAV.....</i>	<i>3</i>
<i>3.1 – comparazione tra metodologia Kd-tree e Quadratic Matching.....</i>	<i>15</i>
<i>3.2 – Esempi di coppie d'immagini orientate utilizzando punti omologhi estratti automaticamente con SIFT e SURF, e successivamente migliorate con LSM. I risultati dell'orientamento sono riportati in termine di σ_0, RSM (errore di ri-proiezione) e il n° dei punti 3D.....</i>	<i>16</i>
<i>3.3 – comparazione tra procedure di orientamento Feature-Base e Corner-Base.....</i>	<i>19</i>
<i>5.1 – Parametri di calibrazione della camera utilizzata.....</i>	<i>35</i>
<i>5.2 – Parametri di orientamento esterno ottenuti con Photomodeler 6.....</i>	<i>36</i>
<i>5.3 – Parametri di orientamento esterno ottenuti con ATiPe</i>	<i>38</i>
<i>5.4 – Parametri in input per l'algoritmo MGCM.....</i>	<i>39</i>
<i>5.6 – Parametri di orientamento esterno ottenuti con ATiPe</i>	<i>42</i>
<i>5.7 – Parametri in input per l'algoritmo MGCM.....</i>	<i>44</i>

ABSTRACT

Il seguente lavoro di tesi è composto da una prima parte in cui vengono introdotti i concetti teorici che vengono applicati sperimentalmente nella seconda parte.

Nel primo capitolo vengono presentate le tipologie di piattaforme aeree più comuni con particolare attenzione a quelle montate su elicottero.

Nel capitolo 2 si parla della calibrazione delle camere digitali e delle distorsioni a cui sono affette.

Nel capitolo 3, viene introdotto e analizzato il funzionamento dell'algoritmo di Orientamento Automatico ATiPe [Barazzetti 2010].

Nel capitolo successivo, dopo una breve digressione sulle tecniche di correlazione più note, viene trattato nello specifico il metodo MGCM.

Nell'ultimo capitolo viene sperimentata la metodologia di ricostruzione delle superfici completamente automatica, introdotta teoricamente nei capitoli precedenti, applicata a riprese aerofotogrammetriche non tradizionali, per le quali le tecniche generalmente applicate tradizionalmente in fotogrammetria aerea non sono risultate applicabili.

INTRODUZIONE

La modellazione fotogrammetrica di un oggetto così come definita in [Remondino 2006] è un processo che comincia con l'acquisizione delle immagini e termina con la generazione di un modello interattivo virtuale 3D. In particolare, l'approccio fotogrammetrico alla creazione di un modello 3D prevede le seguenti fasi:

- **pre-elaborazione delle immagini;**
- **calibrazione della camera;**
- **determinazione di punti d'interesse sulle immagini;**
- **individuazione di punti omologhi tra i fotogrammi e rimozione degli errori grossolani;**
- **orientamento del blocco di immagini;**
- **generazione della nuvola di punti che ricostruisce la superficie dell'oggetto;**
- **triangolarizzazione della nuvola di punti e *texturing*;**
- **visualizzazione del modello e analisi.**

Attualmente non esiste un singolo pacchetto software in grado di eseguire tutti i passaggi sopra descritti in un singolo ambiente di lavoro.

Allo stato attuale si può ritenere che le fasi preliminari alla ricostruzione 3D (calibrazione, orientamento) siano quasi completamente automatizzate sia nelle applicazioni da aereo sia in quelle terrestri. Per quanto invece riguarda la ricostruzione 3D degli oggetti, lo stato dell'arte in applicazioni aeree consente la generazione automatica di modelli ad alta risoluzione implementati all'interno di pacchetti commerciali (LPS-eATE, Phoenix). In ambito terrestre la presenza d'immagini convergenti, le variazioni prospettiche tra di esse e le variazioni delle condizioni d'illuminazione rendono maggiormente impegnativo lo sviluppo di tecniche automatiche di ricostruzione. Allo stato attuale, in fotogrammetria terrestre (*close-range*), esistono una serie di software in grado di ricostruire un oggetto mediante un insieme denso di punti che descrivano in modo sufficientemente accurato la superficie di un oggetto a partire da immagini orientate (ImageMaster, PhotoModeler Scanner e ShapeScan, CLORAMA). Tuttavia, la maggior parte di questi si basa su tecniche di ricostruzione operanti tra coppie d'immagini. La geometria così sfruttata è tuttavia poco ridondante e il numero di errori grossolani (outliers) può essere estremamente elevato soprattutto nel caso di tessiture delle superfici uniformi o ripetute. Una geometria maggiormente robusta può essere ottenuta utilizzando delle tecniche multi-immagine (CLORAMA) che permettono di identificare e rimuovere correlazione errate tra punti. Lo scopo del presente lavoro di tesi è la sperimentazione di una metodologia di ricostruzione delle superfici che sia completamente automatica e che garantisca i requisiti di accuratezza e di analisi statistica dei risultati necessari per un rilievo fotogrammetrico. Per questo scopo è stata implementata una tecnica di correlazione (matching) multi-immagine che integra l'analisi delle somiglianze radiometriche con vincoli geometrici per la rimozione automatica dei valori anomali (Matching Multi-Immagine Vincolato Geometricamente – *Multiphoto Geometrically Constrained Matching*). In particolare, in questo elaborato si vuole presentare l'utilizzo di queste tecniche automatiche applicate a riprese aerofotogrammetriche non tradizionali, per le quali le tecniche generalmente applicate in fotogrammetria aerea non sono risultate applicabili.

Tale lavoro si affianca a un progetto della Regione Lombardia atto a schedare tutti i corsi d'acqua della regione con tecniche fotogrammetriche per permettere, una volta ottenuta una nuvola di punti sufficientemente densa e ricostruita la superficie dell'oggetto, di effettuare operazioni di misurazione direttamente sul modello digitale ottenuto.

1 - FOTOGRAMMETRIA AEREA

Nel presente capitolo, dopo una breve digressione sul significato di fotogrammetria, verranno presentate in modo sintetico le maggiori tipologie di piattaforme di ripresa per fotogrammetria aerea, mostrandone vantaggi e difetti. Inoltre verranno presentate più nello specifico le caratteristiche della piattaforma elicottero utilizzata per le riprese di questo lavoro.

1.1 La Fotogrammetria

La fotogrammetria può essere definita formalmente come “l’arte, la scienza e la tecnologia di ottenere informazioni affidabili sugli oggetti fisici e l’ambiente attraverso il processo di registrazione, misurazione e l’interpretazione delle immagini fotografiche e dei modelli di energia elettromagnetica radiante e altri fenomeni”. [Slama 1980]

Il principale componente, necessario per un progetto fotogrammetrico, è una serie d’immagini con copertura reciproca. Le immagini possono essere catturate da una grande varietà di telecamere a qualsiasi altezza e da qualsiasi piattaforma.

La fotogrammetria è informalmente divisa in due categorie fondamentali in base all’altezza della piattaforma: **tradizionale (o aerea)** e **non tradizionale (o close-range)**.

La fotogrammetria, a seguito di un periodo di minore interesse, ha ripreso a essere un ambito di ricerca particolarmente attivo. I progressi nella capacità di calcolo hanno permesso negli ultimi anni lo sviluppo di svariati software fotogrammetrici commerciali, lo sviluppo di fotocamere digitali ad alta risoluzione in campo sia aereo sia terrestre, lo sviluppo di nuove piattaforme di acquisizione UAV, sistemi aerei senza pilota. Tutti questi aspetti hanno inoltre causato, negli ultimi anni, il sovrapporsi tra le due precedenti categorie.

1.2 Le Piattaforme Aeree

Abdulla, [2004] descrive le piattaforme fotogrammetriche esistenti distinguendo in: aeree, satellitari e terrestri. Entrando in merito alle piattaforme di tipo aereo, possono essere divise in piattaforme su aeroplano con mono e bi motore, gli elicotteri, le mongolfiere e i più recenti UAV. Ognuno di questi veicoli ha caratteristiche tali da adattarsi più o meno bene a determinate situazioni di lavoro e per recuperare determinate tipologie di dati (vedi tabella).

	Aeree	Close-Range	UAV
Pianificazione	semi-automatica	manuale	automatica-manuale
Acquisizione dati/ Volo	assistita/ manuale	autonoma/ assistita/ manuale	autonoma/ assistita/ manuale
Dimensione dell’area	km ²	mm ² – m ²	m ² – km ²
Risoluzione immagine	cm - m	mm - dm	mm - m
Distanza dall’oggetto	100m – 10km	cm – 300m	m - km
Orientamento	azimutali/ oblique (elicotteri)	azimutali/ oblique	azimutali/ oblique
Accuratezza assoluta dei valori iniziali di orientamento	cm - dm	mm - m	cm – 10m
Dimensione blocco immagini/ numero di scansioni	10 - 1000	1 - 500	1 - 1000
Applicazioni speciali e caratteristiche	Aree su larga scala (mappature, silvicoltura, glaciologia, modellazione 3D)	Aree su piccola scala (Archeologia, modellazione 3D edifici)	Aree su piccola e larga scala (Archeologia, modellazione 3D)
	Visioni aeree	Visioni terrestri	Visioni aeree
		Fotogrammetria architettónica e industriale	Monitoraggio (tempo- reale)
			Applicazioni in zone inaccessibili e pericolose

Tabella 1.1 – Caratteristiche di fotogrammetria aerea, close-range e UAV

1.2.1 Velivoli ad ala fissa:

I velivoli ad ala fissa, come accennato precedentemente, sono il tipo di piattaforma aerea standard. Permettono di acquisire immagini aeree verticali di largo formato.

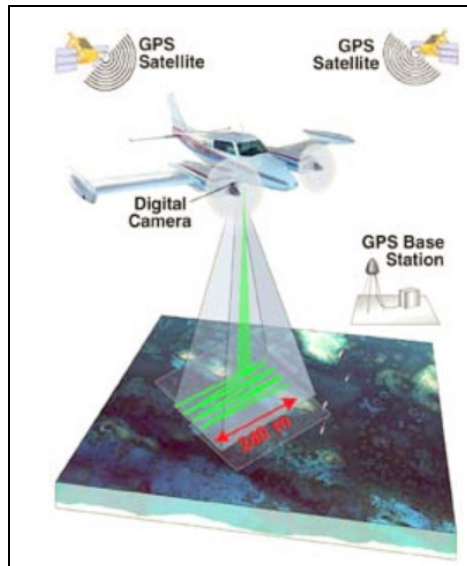


Figura 1.1 – Esempio di velivolo ad ala fissa

Il tipo di aeromobile da utilizzare dipende dalle esigenze della raccolta dei dati. Molti progetti richiedono grandi immagini su una superficie relativamente piccola. La *permuta* da e verso il sito del progetto è spesso breve, e la missione di raccolta d'immagini può essere completata in meno di un singolo giorno di volo. Molti di questi tipi di progetto possono essere realizzati con un monomotore quando l'altitudine del volo richiesta rimane al di sotto circa 18.000 slm. I progetti per la raccolta delle immagini che richiedono altitudini superiori a questa e/o richiedono più permuta, avranno bisogno di un aereo più potente plurimotore.

La ripresa avviene attraverso una botola praticata nella parte inferiore della carlinga di un aereo, l'obiettivo di una macchina fotografica di grandi dimensioni (camera fotogrammetrica) viene rivolto perpendicolarmente alla superficie terrestre. A mano a mano che l'aereo procede lungo una rotta rettilinea (linea di volo) a una determinata quota e a velocità costante, viene realizzata una "strisciata" di scatti fotografici secondo una sequenza prefissata. Il pilota naviga seguendo un percorso prestabilito programmato su uno schermo video.

Le tecnologie da aereo sono ormai ben consolidate, esse consentono sostanzialmente di ottenere una visione nadirale utilizzabile perlopiù per ottenere Ortofoto digitali, DTM e Mappe vettoriali. Esistono in commercio numerosi pacchetti software per l'orientamento automatico delle immagini acquisite sfruttando le tradizionali tecniche di Triangolazione Aerea Automatica (TAA).

1.2.2 UAV:

Il termine UAVs (uninhabited motorized aerial vehicles) descrive una piattaforma di misurazione fotogrammetrica a controllo remoto, semi-autonoma o automatica, senza un pilota seduto a bordo del veicolo. La piattaforma è equipaggiata con un sistema di misurazione fotogrammetrica, che può includere una fotocamera medio/piccola, un sistema di camere termiche o infrarossi, sistemi LiDAR. Gli UAVs standard permettono la registrazione e il monitoraggio della posizione e l'orientamento dei sensori implementati in un sistema di coordinate locali o globali.



Figura 1.2 – Alcune tipologie di UAVs

La fotogrammetria con UAVs apre nuovi orizzonti nelle applicazioni close-range, una combinazione di fotogrammetria aerea e terrestre, oltre ad introdurre un'alternativa in tempo reale a basso costo alla classica fotogrammetria aerea.

Gli UAVs possono essere usati in applicazioni di piccola o larga scala secondo la tipologia e della complessità delle attrezzature utilizzate. Di conseguenza il costo del sistema può variare molto, da € 1000 fino a diversi milioni di euro, questi ultimi prezzi simili o addirittura superiori rispetto ai prezzi di un sistema standard di aeromobili con equipaggio.

Numerosi sono i vantaggi rispetto alle piattaforme aeree standard: la possibilità di utilizzo in situazioni ad alto rischio (siti di calamità naturali) o in aree inaccessibili o difficilmente accessibili a veicoli di dimensioni standard o addirittura in luoghi dove non viene concesso il permesso di volo, l'impiego per voli a bassa quota e distanze ridotte dagli oggetti analizzati.

Ulteriori vantaggi sono la rapidità nell'acquisizione dei dati e la trasmissione di questi ultimi (dati d'immagine, video e orientamento) in tempo reale alla stazione di controllo a terra.

Le camere a bordo possono essere montate ad assetto variabile, permettendo di rilevare alcune tipologie di oggetti che attualmente non possono essere acquisite mediante un classico volo aerofotogrammetrico. Un esempio è rappresentato dagli elementi con sviluppo verticale come le facciate degli edifici elevati.

Per contro gli UAVs, in particolare quelli a basso costo, utilizzando piccole o medie camere amatoriali hanno la necessità di acquisire un numero d'immagini molto maggiore, rispetto alle camere di formato grande montate sugli aerei, per ottenere la stessa copertura. L'utilizzo di sensori, che sono in genere meno stabili di quelli di alta gamma, si traduce in una qualità d'immagine ridotta. Inoltre, UAV a basso costo sono normalmente equipaggiati con motori meno potenti, limitando l'altitudine raggiungibile.

Essendo legati via radio alla stazione di controllo, vengono limitati nella distanza di funzionamento dalla portata del collegamento radio.

In fine, per quanto riguarda l'elaborazione dei dati, non sono disponibili oggi software commerciali per orientare automaticamente le immagini acquisite mediante UAV quando la geometria del blocco comprende immagini molto convergenti. Infatti, in questo caso, le tradizionali tecniche di TAA non possono essere applicate rendendo necessarie misure di tipo manuale per eseguire la misura dei punti di legame.

1.2.3 Gli Elicotteri:

L'ultima piattaforma aerea analizzata è quella da elicottero. Quest'ultima è quella utilizzata nell'elaborazione della presente tesi.



Figura 1.3 – esempio di elicottero leggero

Come gli UAVs, può essere considerata come una combinazione tra fotogrammetria aerea standard e close-range, oppure come un'alternativa alla classica fotogrammetria aerea, secondo come viene montata la camera (nadirale o obliqua).

Presenta caratteristiche intermedie tra le due precedenti piattaforme; altezze praticabili e autonomia superiore agli UAVs con conseguente assenza di limiti di distanza nel funzionamento. Sono inoltre caratterizzati dalla possibilità di utilizzare velocità di crociera ridotte, dalla capacità di volo *stazionario* (hovering). Fotografie con elicotteri vengono eseguite con grande vantaggio in situazioni dove è richiesta una scala molto larga.

Il più grande limite di questo tipo di piattaforma è la capacità di carburante del veicolo, poiché le piattaforme elicottero in genere hanno una capacità carburante minore rispetto a piattaforme di aerei, che si traduce in tempi di missione più lunga e costi più elevati per i grandi progetti.

Inoltre, come per gli UAV, resta il problema della carenza di programmi commerciali per l'orientamento automatico nel caso di riprese con camere inclinate. Tuttavia nella seguente trattazione verrà dimostrata la possibilità di utilizzare software autoprodotti per l'orientamento automatico.

1.3 L'Aeromobile e il Sistema di Ripresa impiegato

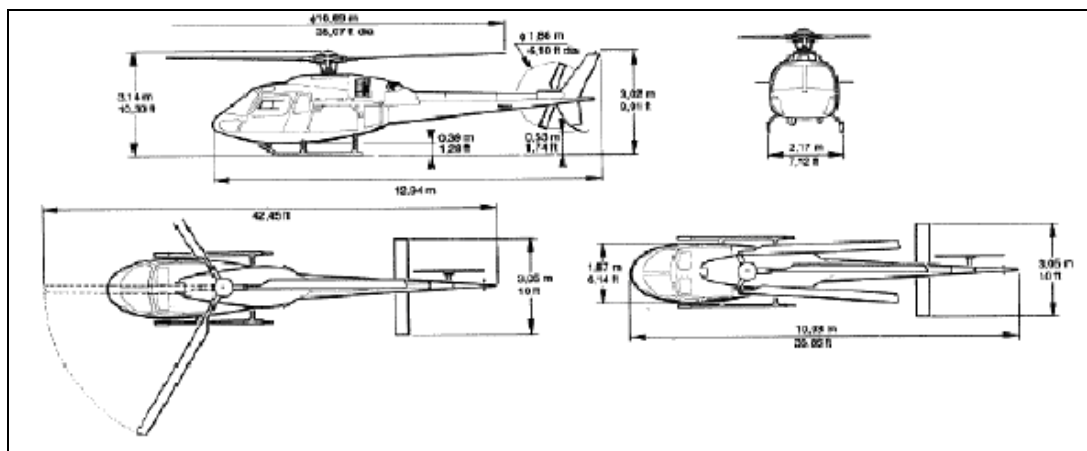


Figura 1.4 – visuali di un elicottero leggero

Per l'esecuzione delle fotografie analizzate in questa tesi, è stato utilizzato un elicottero leggero con le seguenti caratteristiche principali:

- Peso max al decollo: 2,200 kg
- Posti: 1 pilota + 5 max in configurazione standard
- Velocità massima: 120Kts
- Range operativo: 380 NM in configurazione standard

L'elicottero in configurazione "ripresе aeree" non rispecchia le caratteristiche standard, infatti, dipende dal peso dei sistemi che vengono imbarcati, questi riducono sia l'autonomia, sia il numero di persone imbarcabili.

L'equipaggio dell'aeromobile è composto come segue:

- pilota;
- operatore 1
- operatore 2

Le riprese aeree vengono effettuate da un sistema integrato, denominato "AMUVIS", composto dall'integrazione di tecnologie e tecniche di raccolta delle informazioni realmente innovative; esso è concepito per raccogliere il maggior numero d'informazioni possibile presenti sul territorio attraverso l'integrazione tecnologica dei vari sottosistemi e dei dati che essi forniscono. Il sistema AMUVIS viene installato, attraverso un *mount* all'elicottero leggero.



Figura 1.5 – Visione del mount

Il *mount*, che funge da interfaccia meccanica tra elicottero e sistema AMUVIS, è composto da una meccanica mainframe alla quale sono applicati i sensori e da una meccanica che serve, nel caso di specie, a bilanciare l'aeromobile attraverso l'installazione della suddetta e di un eventuale contrappeso nella parte posteriore dell'aeromobile.

Il sistema di visione **Helimeasure** deriva dalle più recenti tecnologie di visione artificiale, esso consiste in una matrice di camere digitali ad alta definizione, tipicamente 2048 x 2048 che inquadrano i soggetti da differenti angolazioni. Il sottosistema **Helimeasure** assicura una ripresa del tipo "wide" dove, in ogni fotogramma dello stream è presente il bacino e la relativa fascia di rispetto.

Oltre al sistema Helimeasure, possono essere applicati altri sottosistemi, non d'interesse per questa tesi, elencati per completezza in seguito:

- un sistema **CINEFLEX**, piattaforma di riprese aeree ad alta definizione sia per il settore cinematografico e televisivo, sia per riprese di forze di sicurezza e monitoraggio territoriale;
- un sistema **INFRAROSSO TERMICO** a elevate prestazioni di concezione militare integrato in uno chassis da uso da esterno.

2 - LA CALIBRAZIONE DELLA CAMERA DIGITALE

Per utilizzare un'immagine ai fini fotogrammetrici occorre determinare preliminarmente gli elementi di *orientamento interno* che di seguito saranno definiti. Tale operazione prende il nome di *calibrazione* ed è indispensabile nel processo fotogrammetrico.

Dal punto di vista geometrico un'immagine di un qualsiasi elemento può essere assimilata, con sufficiente approssimazione, a una proiezione centrale dello stesso. Ricordiamo che una proiezione centrale è ottenuta proiettando i punti dell'oggetto su un piano, (detto piano o quadro di proiezione), da un punto esterno a esso, (detto centro di proiezione o di vista).

Le rette congiungenti i punti dell'oggetto con il centro di proiezione sono dette rette proiettanti. I loro punti d'intersezione con il piano di proiezione costituiscono le proiezioni o "immagini" dei punti dell'oggetto. Le discrepanze rispetto a questo modello vengono corrette attraverso opportune funzioni di *calibrazione*, che fanno parte dell'orientamento interno.

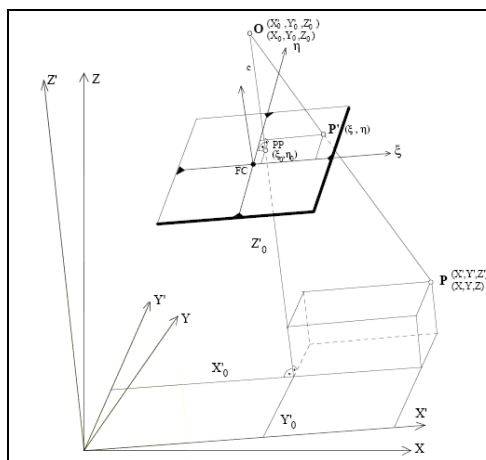


Figura 2.1 – Prospettiva centrale

L'orientamento interno di una camera implica dunque la conoscenza dei seguenti elementi:

- **Distanza principale:** è la distanza tra il centro di presa e il piano dell'immagine c ;
- **Punto principale:** è il piede della perpendicolare condotta dal centro di presa al piano focale $PP(\xi_0, \eta_0)$;
- **Distorsione:** l'obiettivo di una qualsiasi camera fotografica, per quanta cura possa essere stata posta nella sua progettazione e costruzione, non è mai totalmente privo di difetti.

Alcune di questi (aberrazioni), influiscono essenzialmente sulla qualità dell'immagine. Altre invece sulla geometria della stessa immagine e quindi sulle misure che su tale immagine devono essere eseguite. Queste ultime aberrazioni sono perciò quelle che più direttamente ci interessano. Fra esse la più importante dal punto di vista fotogrammetrico è la distorsione, che produce uno spostamento di un punto sull'immagine, dalla posizione che tale punto avrebbe assunto sull'immagine se l'obiettivo fosse stato perfetto, a una posizione definita come distorta.

In una camera fotogrammetrica, cioè in una camera costruita appositamente per essere destinata a usi fotogrammetrici, tali elementi sono normalmente determinati dal costruttore nella messa a punto della camera. Gli elementi risultanti dalla calibrazione vengono normalmente riportati in un documento detto *certificato di calibrazione*.

Per altre tipologie di fotocamere i parametri di orientamento interno non sono forniti dal costruttore e inoltre, a causa dell'usura e dei colpi subiti dalla camera, tali parametri potrebbero variare nel tempo. Per sopperire a questo è possibile eseguire una calibrazione della camera prima di procedere alle operazioni di rilievo.

Modelli matematici per la correzione della distorsione e delle deformazioni dei fotogrammi sono stati lungamente studiati dagli anni settanta del secolo scorso a partire da uno studio fondamentale di [Brown 1971] che ha posto le premesse per le tecniche di *autocalibrazione*.

Il modello più importante per il calcolo dei parametri di distorsione è quello di Brown a 10 parametri

Si introducono dei differenziali all'interno delle **equazioni di collinearità** in modo tale da poter considerare le deformazioni:

$$\begin{aligned} \xi - (\xi_0 + d\xi) &= -c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \\ \eta - (\eta_0 + d\eta) &= -c \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \end{aligned} \quad (2.1)$$

Applicando il modello di Brown:

$$\begin{aligned} d\xi &= (\xi + \xi_0) [k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6] + p_1 [r^2 + 2(\xi - \xi_0)^2] + \\ &+ 2p_2 (\xi - \xi_0)(\eta - \eta_0) + b_1 (\xi - \xi_0) + b_2 (\eta - \eta_0) \\ d\eta &= (\eta + \eta_0) [k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6] + p_2 [r^2 + 2(\eta - \eta_0)^2] + \\ &+ 2p_1 (\xi - \xi_0)(\eta - \eta_0) \end{aligned} \quad (2.2)$$

Visualizziamo quindi i 10 parametri che ci permettono di valutare le distorsioni:

$r = \sqrt{(\xi - \xi_0)^2 + (\eta - \eta_0)^2}$	Distanza radiale
c, ξ_0, η_0	
k_1, k_2, k_3	Coeff. Distorsione radiale
p_1, p_2	Coeff. Distorsione tangenziale
b_1, b_2	Coeff. Distorsione affine e taglio

2.1 Distorsione Radiale

La componente principale di distorsione è quella **radiale** (Figura 2.2), poiché si accentua con l'allontanarsi dal punto principale. È inoltre prevalente rispetto le altre distorsioni. Questa distorsione influenza sia ξ che η .

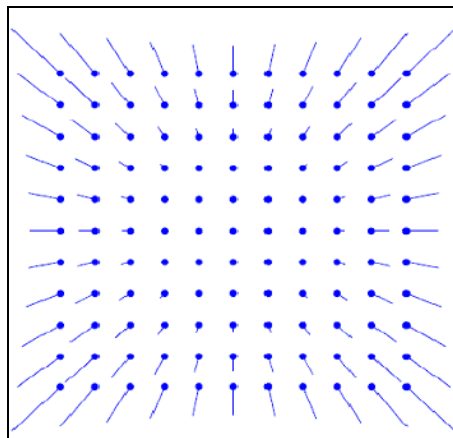


Figura 2.2 – Effetti della distorsione radiale

Il calcolo di questi coefficienti ci è dato da:

$$\partial \xi_{rad} = \frac{\xi - \xi_0}{r} \partial r \qquad \partial \eta_{rad} = \frac{\eta - \eta_0}{r} \partial r \qquad (2.3)$$

Possiamo dunque definire la curva di distorsione radiale:

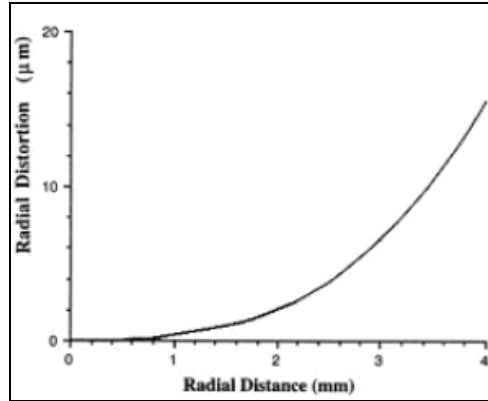


Figura 2.3 – Curva di distorsione radiale

Come possiamo notare man mano che aumenta la distanza radiale, la distorsione aumenta.

2.2 Distorsione Tangenziale

Si possono inoltre considerare effetti dovuti al non perfetto centramento delle diverse lenti che compongono l'obiettivo, che generano effetti di distorsione di tipo **tangenziale**:

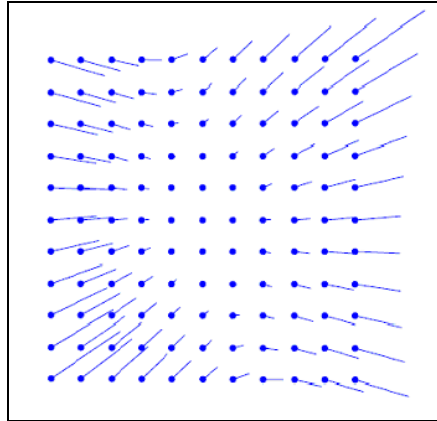


Figura 2.4 – Effetti della distorsione tangenziale

Analogamente è stato definito il calcolo per la distorsione tangenziale:

$$\begin{aligned} \Delta \xi_{tan} &= P_1(r^2 + 2(\xi - \xi_0)^2) + 2P_2(\xi - \xi_0)(\eta - \eta_0) \\ \Delta \eta_{tan} &= P_2(r^2 + 2(\eta - \eta_0)^2) + 2P_1(\xi - \xi_0)(\eta - \eta_0) \end{aligned} \qquad (2.4)$$

E la relativa curva di distorsione tangenziale:

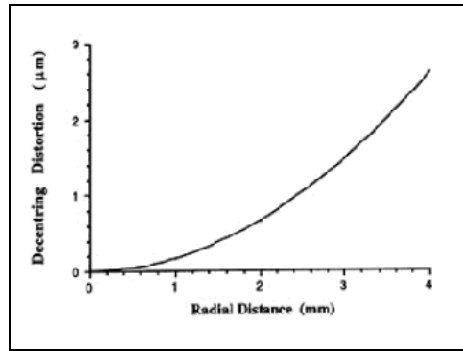


Figura 2.5 – Curva di distorsione tangenziale

2.3 Distorsione Affine e di Taglio

Arriviamo infine alla **distorsione affine** e di **taglio**:

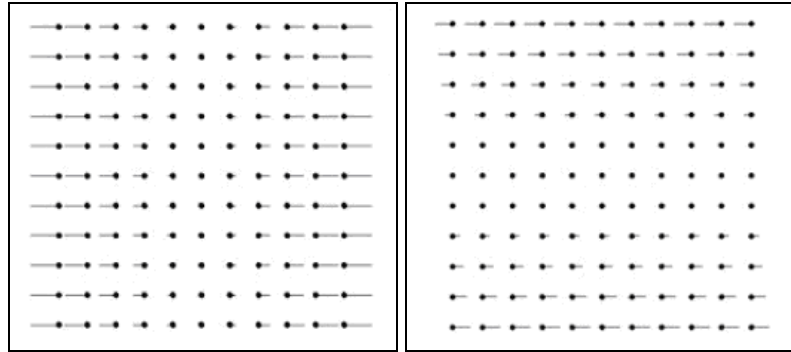


Figura 2.6 – Effetti della distorsione Affine (sinistra) e di Taglio (destra)

Questo tipo di distorsione influenza solo ξ quindi dobbiamo considerare delle deformazioni del tipo:

$$\begin{aligned}\overline{\Delta\xi}_{aff+tag} &= B_1\xi + B_2\eta \\ \overline{\Delta\eta}_{aff+tag} &= 0\end{aligned}\quad (2.5)$$

Una volta calcolati i 10 parametri, il fenomeno della distorsione dovuta alle imperfezioni della camera è completamente modellizzato.

$$\begin{aligned}d\xi &= \partial\xi_{rad} + \Delta\xi_{tan} + \overline{\Delta\xi}_{aff+tag} \\ d\eta &= \partial\eta_{rad} + \Delta\eta_{tan}\end{aligned}\quad (2.6)$$

Le immagini ottenute mediante l'eliminazione degli effetti di distorsione vengono dette immagini "distortion free".

3 - ALGORITMO DI ORIENTAMENTO AUTOMATICO

Questo capitolo sarà concentrato sulla fase di orientamento di un blocco d'immagini, prima fase necessaria alla generazione di un modello 3D ad alta precisione.

Si analizzerà quindi il funzionamento dell'algoritmo di orientamento automatico ATiPe [Barazzetti 2010], programma sviluppato presso il gruppo di lavoro del Politecnico di Milano, nei suoi vari aspetti e implementazioni.

La procedura di orientamento di una serie d'immagini può essere considerata come un processo a più gradi nel quale diversi parametri vengono stimati o raffinati (figura 3.1). La procedura può essere opportunamente regolata per lavorare più efficacemente con diversi set d'immagini grazie alla scelta facoltativa fra tecniche e i parametri d'input.

I dati d'ingresso per la procedura automatica di estrazione e trasferimento dei punti di legame sono le immagini e i parametri di calibrazione della fotocamera utilizzata.

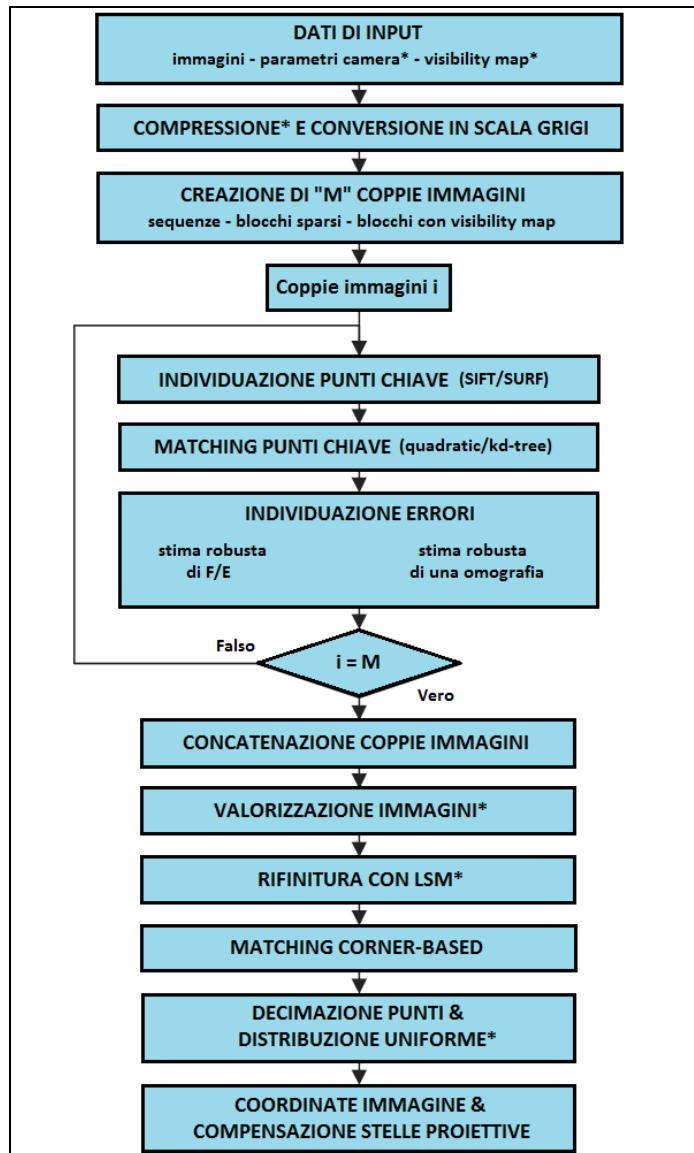


Figura 3.1 – pipeline

Un generico blocco di n immagini può essere considerato composto di $(n^2-n)/2$ combinazioni di coppie, che sono prima analizzate singolarmente per identificarne le *features*, e quindi progressivamente combinate.

Se le immagini formano una sequenza ordinata, il numero di combinazioni su cui lavorare si riduce a $n-2$, con una significativa riduzione del tempo di calcolo. Per questo motivo si sono implementate due procedure per il *matching*; una per le sequenze ordinate (*ordered sequences*) e una per i blocchi sparsi (*sparse blocks*).

Le coordinate pixel dei punti omologhi, estratte automaticamente, possono essere importate e utilizzate per l'orientamento delle immagini e per la ricostruzione della geometria sparsa nella maggior parte dei programmi fotogrammetrici in commercio. Le innovazioni di tale metodo sviluppato sono le seguenti:

- fattibilità su una larga varietà di set d'immagini disorganizzate;
- possibilità di lavoro con immagini ad alta risoluzione;
- misurazioni accurate delle coordinate immagine basata su *Least Squares Matching*;
- combinazione tra algoritmi *feature-based FB* ed *area-based AB*;
- procedure per ridurre e regolarizzare i punti immagine.

L'implementazione della tecnica proposta porta a un nuovo tipo di software fotogrammetrico chiamato **ATiPE** (*Automatic Tie Point Extraction*) [Barazzetti 2010]. Sviluppato per applicazioni fotogrammetriche e di modellazione 3D, dove l'elaborazione in tempo reale non è un problema primario, ma particolare attenzione è posta all'accuratezza finale e all'uniformità della distribuzione dei punti di legame estratti.

La strategia *Feature Based Matching* (FBM) implementata, accoppiata con un'iniziale analisi della geometria del blocco (chiamata *visibility map*), porta a un tempo di calcolo di poche ore per blocchi d'immagini composti di parecchie decine d'immagini ad alta risoluzione usate nelle loro dimensioni originali.

La rilevazione robusta delle corrispondenze con la procedura proposta si raggiunge con la combinazione dell'accuratezza tipica della fotogrammetria tradizionale e l'automazione della Computer Vision (CV).

Gli elementi d'input per ATiPE sono le immagini, l'intero set dei parametri interni di orientamento (opzionale) e la *visibility map* tra le immagini (opzionale). Tutte le immagini sono di norma utilizzate con i propri parametri di calibrazione in modo da evitare l'auto-calibrazione che è generalmente inappropriata e poco affidabile nei progetti di modellazione 3D. La *visibility map* potrebbe contenere informazioni sulla sovrapposizione tra tutte le immagini e può essere ricavata da:

- dati GNSS/INS con un'approssimativa DTM/DSM;
- con una preliminare e rapida procedura di orientamento eseguita su immagini a bassa risoluzione.

La *visibility map* può ridurre significativamente il tempo di processamento limitando le combinazioni d'immagini che dovranno essere analizzate e correlate.

3.1 Rilevazione delle features

L'estrazione delle *features* (punti d'interesse e regioni) viene effettuata dai cosiddetti *operatori d'interesse*. Generalmente, la proprietà di un *operatore d'interesse* è la sua ripetibilità, cioè la capacità di trovare lo stesso punto o *feature* in immagini riprese sotto differenti punti di vista e condizioni d'illuminazione.

L'applicazione di un operatore d'interesse porta all'individuazione di un numero variabile di *features* su ciascun'immagine. Alcune verranno selezionate su una sola immagine, altre saranno comuni a due o più immagini. Il FBM deve riconoscere le *features* omologhe, etichettandole

lungo la sequenza con il medesimo identificativo, ottenendo in sostanza un insieme di dati strutturato.

La metodologia sviluppata parte dall'estrazione delle *features* con gli operatori **SIFT** o **SURF**. Entrambi hanno un *detector* capace di trovare punti d'interesse nell'immagine e un *descriptor* per associare un vettore d'informazioni per ogni singolo punto individuato per ulteriori finalità di corrispondenza.

- **SIFT** (*scale invariant feature transform*) è un algoritmo standard in numerose applicazioni CV; è invariante alle rotazioni e ai cambi di scala delle immagini. La sua formulazione è abbastanza complessa e la sua applicazione computazionalmente onerosa, ragione per cui ne esistono parecchie varianti.
- **SURF** (*speeded up robust features*) fu realizzato per essere un operatore più veloce di SIFT. SURF dà risultati comparabili a SIFT mentre ha un tempo di calcolo inferiore, anche se generalmente restituisce meno punti rispetto a SIFT.

3.2 Analisi del Descriptor

SIFT e SURF associano un *descriptor* ad ogni *feature* estratta dall'immagine. Il *descriptor* è un vettore con un numero variabile di elementi che descrive la *feature* (vi sono versioni per entrambi gli operatori a 64 e 128 componenti). I punti omologhi possono essere trovati comparando i *descriptor*.

Esistono due strategie per comparare i *descriptor*: La **quadratic matching procedure**, lenta ma rigorosa, e la **kd-tree procedure**, veloce ma approssimativa. L'utente dovrà scegliere l'*operatore d'interesse* e la procedura per comparare i vettori ed estrarre le corrispondenze. Questa scelta dipenderà dal numero d'immagini e dalle caratteristiche estratte, con risultati che possono essere realmente differenti in termini di tempo.

- Nella **quadratic matching procedure** date due immagini I e J , nelle quali sono state individuate rispettivamente m e n *features* con i rispettivi descrittori D_m e D_n , tutti i descrittori dell'immagine I sono comparati con tutti quelli dell'immagine J . Quindi viene stimata la distanza euclidea tra i descrittori come una misura della differenza. Inoltre, viene aggiunto un vincolo tra il primo e il secondo migliore candidato per essere più distintivo. Il metodo può essere riassunto come segue:
 - ogni *descriptor* D_m è comparato con ogni *descriptor* D_n stimando la distanza Euclidea $d_{mn} = \|D_m - D_n\|$;
 - tutte le distanze d_{mn} sono ordinate dalla minore $(d_{mn})_1$ alla maggiore $(d_{mn})_n$;
 - una corrispondenza tra immagini è accettata se $(d_{mn})_1 < t \cdot (d_{mn})_2$.
 Il valore della soglia t generalmente varia da 0,5 a 0,8. Questo metodo assicura una buona robustezza ma è computazionalmente costoso. Infatti, ci sono $n \cdot m$ combinazioni da analizzare.
- La seconda strategia di comparazione dei *descriptor* è basata sull'approccio **kd-tree**, una strategia ampiamente utilizzata in applicazioni che richiedono una corrispondenza automatica tra immagini, per esempio per generare panorami da immagine non orientate. Il **kd-tree** è un albero di ricerca binario nel quale ogni nodo è un punto k -dimensionale. Per due generiche immagini I e J , la procedura crea un **kd-tree** con i *descriptor*s (D_m) dell'immagine J che viene comparato con i *descriptor*s D_n . Quindi viene applicato il controllo basato sulla distanza euclidea tra i primi due candidati.

La Tabella 1.1 mostra alcuni risultati delle strategie presentate per confrontare i descrittori e correlare i punti omologhi. La dimensione delle immagini va da 640×480 pixel a 5.616×3.744 pixel. Quando il numero di *features* rilevate aumenta, la differenza in termini di tempo di calcolo è notevole (minuti contro ore).

Dimensione Immagini	Features (immagine 1)	Features (immagine 2)	Kd-tree		Quadratic matching	
			Features Correlate	Tempo (s)	Features Correlate	Tempo (s)
640x480	1391	1405	262	1.69	328	2.78
1500x1004	5636	5017	349	5.74	419	19.09
2560x1920	18329	16816	741	36.55	1135	442.3
3072x2304	21343	20691	2018	59.11	2936	698.0
4500x3000	83729	87471	19336	161.6	27772	7900
5616x3744	94208	127359	25968	338.5	34230	22580

Tabella 3.1 – comparazione tra metodologia Kd-tree e Quadratic Matching

3.3 Rimozione dei Matches errati

Entrambe le strategie automatiche per la comparazione dei *descriptor* restituiscono un numero elevato di corrispondenze tra le quali tuttavia sono spesso presenti alcuni errori. Per rimuovere questi errori la procedura fa ricorso alla stima robusta della *Matrice Fondamentale F* oppure della *Matrice Essenziale E*.

Entrambe le matrici, di dimensione 3x3, presentano rango 2 e incapsulano la geometria epipolare tra un paio d'immagini stereo con parametri di calibrazione della camera noti (matrice E) o incogniti (matrice F).

Il metodo proposto per stimare F può essere classificato come un metodo lineare, iterativo e robusto.

Data una serie di punti immagine $\mathbf{x}_i = (x_i, y_i, 1)^T \leftrightarrow \mathbf{x}'_i = (x'_i, y'_i, 1)^T$ tra due viste (scritte in coordinate omogenee) deve essere soddisfatta la condizione:

$$\mathbf{x}'_i{}^T \mathbf{F} \mathbf{x}_i = 0 \quad (3.1)$$

Un metodo molto diffuso per stimare F è basato su 7 corrispondenze d'immagini, che rappresentano il numero minimo di osservazioni da risolvere per gli elementi incogniti della matrice. Effettivamente la matrice F ha un'ambiguità di scala che accoppiata con il vincolo $\det(\mathbf{F}) = 0$ riduce il numero di elementi indipendenti a 7.

L'eq. 3.1 porta a un sistema di equazioni nella forma:

$$\mathbf{z}_i^T \mathbf{f} = \begin{bmatrix} x'_i x_i & x'_i y_i & x'_i & y'_i x_i & y'_i y_i & y'_i & x_i & y_i & 1 \end{bmatrix} \mathbf{f} = 0 \quad (3.2)$$

dove \mathbf{f} contiene gli elementi di \mathbf{F} ordinati in un vettore. Se 7 punti sono selezionati per formare la matrice dei dati $\mathbf{Z} = [\mathbf{z}_1, \dots, \mathbf{z}_7]^T$, lo spazio nullo di $\mathbf{Z}^T \mathbf{Z}$ ha dimensione 2, eccetto degenerazioni. Quindi la soluzione è uno spazio 2D nella forma $\alpha \mathbf{F}_1 + (1-\alpha) \mathbf{F}_2 = 0$, che accoppiato al vincolo sul determinante dà $\det[\alpha \mathbf{F}_1 + (1-\alpha) \mathbf{F}_2] = 0$. Quest'ultima è un'equazione polinomiale cubica in α che può essere facilmente risolta.

La stima delle matrici \mathbf{F} (o \mathbf{E}) richiede una tecnica robusta, capace di trattare dati affetti anche da una percentuale di errori superiore al 20%. Si ricorre pertanto ai cosiddetti stimatori robusti ad *high-breakdown point* che estraggono dall'insieme delle *features* trovate tutte le combinazioni costituite dal minimo numero di osservazioni necessarie per la stima del modello adottato.

Tutti i metodi proposti sono basati sull'analisi di numerosi set di coordinate d'immagini estratte casualmente dall'intero data-set. In questa procedura sono inclusi tre stimatori robusti molto diffusi: **RANSAC**, *least median of squares* e **MAPSAC**. Metodi robusti sono realmente necessari quando le corrispondenze sono estratte automaticamente, poiché una serie di valori errati possono essere presenti nei dati, particolarmente nel caso di ampie basi di presa.

- La tecnica *least median of squares (LMedS)* si basa sulla minimizzazione della mediana degli scarti al quadrato calcolati per l'intero set di dati. Tra tutte le soluzioni calcolate si sceglie quella che minimizza la mediana.
Anche se LMedS dà generalmente buoni risultati in termini di precisione, è più restrittivo rispetto RANSAC. Tuttavia, ha un punto di rottura più basso (50%), ma non richiede alcuna impostazione del T soglia o una conoscenza a priori della varianza dei dati.
- L'algoritmo **RANSAC** (*random sampling consensus*) non ha un limite teorico alla percentuale di errori che è capace di individuare, tuttavia richiede di fissare a priori una soglia T di accettazione degli *inlier* in accordo con la precisione dei dati: sono tali le osservazioni con residui inferiori a T .
- L'algoritmo **MAPSAC** (*maximum a posteriori sample consensus*) è basato sulla stima Bayesiana della matrice F e fornisce nuovi criteri per controllare la qualità della soluzione. MAPSAC risolve il problema legato alla soglia T di RANSAC. Infatti, una T alta porta a soluzioni deboli.

3.4 Rifinitura delle Coordinate Immagine

Come mostrato in Remondino [2006], le coordinate immagini dei punti omologhi estratte con FBM possono essere migliorate con ABM. Pertanto per migliorare la precisione di posizione delle coordinate immagine estratte con SIFT e SURF, viene applicato l'algoritmo *Least Squares Matching* (LSM).

La tabella 3.2 mostra alcuni risultati sull'orientamento di due coppie d'immagini, in cui sono stati utilizzati SIFT o SURF con o senza raffinamento delle coordinate immagine estratte con LSM. E' chiaramente visibile come l'applicazione di LSM migliora sempre i risultati di orientamento. Tuttavia, il raffinamento con LSM è una scelta opzionale per l'utente. In realtà, LSM può affrontare variazioni di scala fino al 30% e rotazioni fino a 25°, perciò, dato che alcuni progetti terrestri presentano delle variazioni di scala o rotazioni maggiori, in questi casi possono essere impiegati solo gli operatori SIFT e SURF.

	Coppia I (2,560X1,920 pix)			Coppia II (2,816X2,112 pix)		
	σ_0	RMS	n°	σ_0	RMS	n°
SIFT	0.48	0.33	116	1.21	0.86	793
SIFT + LSM	0.39	0.26	106	0.86	0.61	784
SURF	0.40	0.26	54	0.47	0.33	104
SURF + LSM	0.34	0.22	47	0.35	0.24	95

Tabella 3.2 – Esempi di coppie d'immagini orientate utilizzando punti omologhi estratti automaticamente con SIFT e SURF, e successivamente migliorate con LSM. I risultati dell'orientamento sono riportati in termine di σ_0 , RSM (errore di ri-proiezione) e il n° dei punti 3D

3.5 Strategie di Orientamento per Sequenze o Blocchi sparsi

Una volta che le corrispondenze tra coppie d'immagini sono state estratte in modo robusto confrontando i *descriptor* e dopo la rimozione delle corrispondenze errate con il vincolo epipolare, il metodo cerca di collegare tutte le immagini insieme. Così la procedura di orientamento può continuare seguendo due strade a seconda se stiamo lavorando con sequenze d'immagini ordinate o un blocco sparse.

3.5.1 Sequenze d'immagini

Una sequenza orientata è composta di n immagini consecutive. Poiché tra immagini consecutive è garantita la sovrapposizione, è stata elaborata una procedura veloce per il *matching* delle corrispondenze tra immagini. Prima di tutto l'intera sequenza viene divisa in $n-2$ triplette. Data l'immagine l , ogni tripletta T_i è costituita dalle immagini $\{I_i, I_{i+1}, I_{i+2}\}$. Quindi, per ogni tripletta

T_i le coppie d'immagini $C_i = \{I_i, I_{i+1}\}$ e $C_{i+1} = \{I_{i+1}, I_{i+2}\}$ possono essere indipendentemente correlate per determinare un set di *features*. Le *features* omologhe della coppia rimanente $C_i' = \{I_i, I_{i+2}\}$ sono determinate solo da valori numerici. Infatti, siccome I_{i+1} è l'immagine centrale della tripletta, condivide punti di legame con le immagini esterne I_i e I_{i+2} .

In questo caso è possibile trasferire i punti di legame da almeno tre immagini. Dopo il *matching* della singola tripletta d'immagini, le coordinate dei punti delle triplette seguenti vengono confrontate per determinare le corrispondenze in tutta la sequenza. La tripletta T_i e la successiva $T_{i+1} = \{I_{i+1}, I_{i+2}, I_{i+3}\}$ condividono due immagini e i punti di legame possono essere trasferiti con un semplice confronto sulla base del valore delle coordinate immagine (figura 3.2). Questo metodo ha un costo computazionale lineare $O(n)$ rispetto al numero d'immagini.

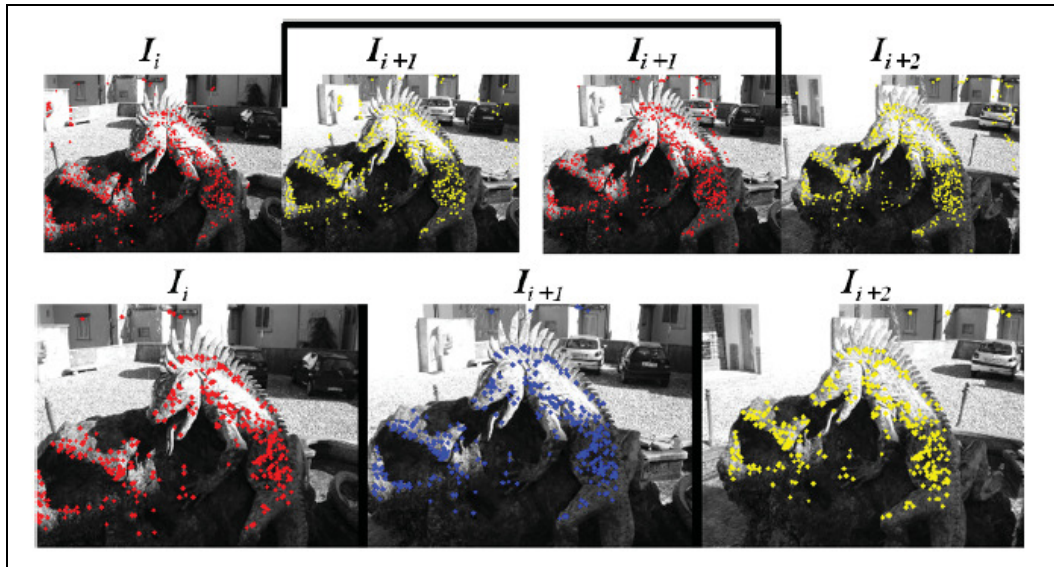


Figura 3.2 – Elaborazione di una tripletta: (sopra) le coppie (I_i, I_{i+1}) e (I_{i+1}, I_{i+2}) sono correlate individuando 690 e 790 punti (sotto) la procedura seleziona i punti in I_{i+2} che sono visibili in entrambe le coppie: restituisce 336 punti corrispondenti per la tripletta.

Le figure 3.3 e 3.4 mostrano alcune triplette correlate di due sequenze composte rispettivamente di 28 e 32 immagini. Nel primo caso è stato usato SURF con una brutale comparazione quadratica dei *descriptor*. La procedura è durata circa 6 ore, ma ripetendola con un approccio *kd-tree*, ci sono voluti meno di 15 minuti.

3.5.2 Blocchi sparsi d'immagini

Quando le immagini formano un blocco sparso, è necessario verificare tutte le possibili combinazioni di coppie dell'immagine per determinare le corrispondenze.

Pertanto ogni immagine deve essere confrontata con tutte le altre, portando a un costo computazionale $O(n^2)$ che dipende dal quadrato del numero d'immagini (date n immagini, le combinazioni d'immagini coppie sono $(n^2-n)/2$). Quindi un approccio *kd-tree* è molto più veloce e più potente.

Un tipico blocco d'immagini sparse, simile a una classica ripresa aerea, è illustrato nella figura 3.3.

Il blocco è composto da 3 strisce per un totale di 23 immagini, che producono 253 possibili combinazioni d'immagini. Per ogni immagine sono state estratte circa 23.000 *features* con SIFT. Quindi, per ogni coppia d'immagine, le *features* sono state confrontate, in meno di 5 secondi, con un approccio *kd-tree*. Globalmente, l'intero processo ha impiegato meno di 3 ore per determinare 2.448 punti omologhi tra le immagini. Per comprendere l'efficacia dell'approccio adottato, è stata elaborata una singola coppia d'immagini con *quadratic matching* per confrontare i descrittori e questo richiede circa 434 secondi. Così può essere assunto un tempo computazionale globale di più di 30 ore. Questo significa che quando le immagini hanno una

buona consistenza e il loro numero diventa significativo, è raccomandata un'analisi basata sul processo *kd-tree*.

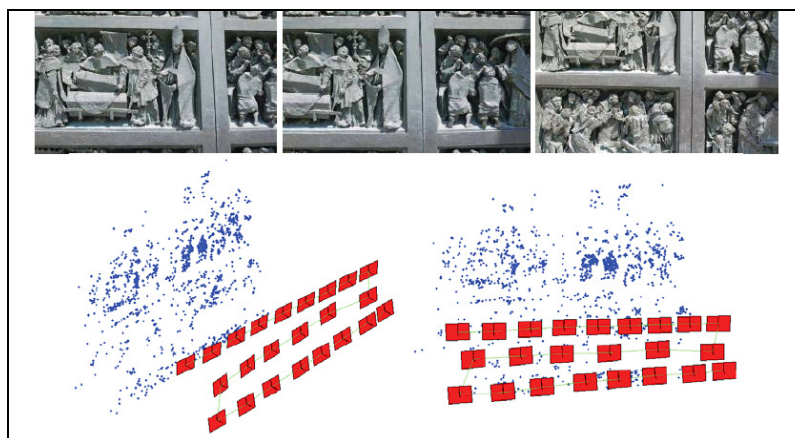


Figura 3.3 – Alcune immagini di un bassorilievo acquisite con un blocco sparso

3.6 Miglioramento dei risultati di Orientamento.

Confrontando i risultati ottenuti sin qui dopo il trasferimento automatico dei punti di legame e una compensazione a stelle proiettive con misurazioni manuali interattive, si nota che la precisione media delle coordinate oggetto è leggermente migliore in caso di misurazione manuale rispetto a quella data da un approccio di *matching* in due fasi eseguita con FBM seguita da LSM. Ciò è dovuto alla ridondanza dei punti di legame. Infatti, con le misure manuali lo stesso punto può essere identificato in più immagini mentre un operatore delle caratteristiche ha meno ripetibilità e un maggior numero d'immagini in cui lo stesso punto è visibile migliora la precisione del progetto globale.

In base a questa considerazione, è stato incluso nella strategia sviluppata l'operatore d'interesse FAST [Rosten e Drummond, 2006].

FAST ha dimostrato di estrarre un gran numero di spigoli con velocità e ripetibilità maggiori di SIFT e SURF, migliorando anche la distribuzione nelle immagini. Jazayeri e Fraser [2010] hanno dimostrato che FAST è eccellente per l'alta accuratezza nella generazione di nuvole di punti nelle reti multi-immagini.

L'algoritmo FAST opera considerando un cerchio di 16 pixels attorno a uno spigolo candidato. Uno spigolo è trovato quando n pixel continui nel cerchio risultano tutti più luminosi dell'intensità del pixel considerato più una soglia t . In questa procedura, gli spigoli sono automaticamente estratti nell'immagine una volta che l'utente ha fissato la soglia t controllando visivamente come minimo un'immagine per verificare la distribuzione dei punti. E' anche possibile specificare il numero minimo d'immagini in cui un punto deve apparire per essere utilizzato durante la fase di orientamento (una buona scelta è 4).

Quindi, le posizioni dei punti sono migliorate tramite LSM fissando la posizione di una *feature (template)* e cercando i punti rimanenti (*slave*).

Nel caso d'immagini con cattiva *texture* possono presentarsi problemi nell'estrazione degli spigoli o nell'omogeneità della disposizione. Per ovviare questi inconvenienti in ATiPE può essere utilizzata una procedura basata su una tecnologia di ottimizzazione preliminare a livello locale come il filtro di Wallis [1976].

Wallis ha proposto un filtro per immagini che divide l'immagine in piccoli blocchi rettangolari. Questi blocchi sono progressivamente analizzati considerando le loro statistiche locali.

Il filtro Wallis ha la forma:

$$I_f(x, y) = I_0(x, y)r_1 + r_2 \quad (3.3)$$

Dove:

$$r_1 = cs_0 \left(cs_0 + \frac{s_t}{c} \right) \quad (3.4)$$

e

$$r_0 = bm_t + (1 - b - r_1)m_0 \quad (3.5)$$

I_f ed I_o sono rispettivamente l'immagine filtrata e l'originale, r_0 e r_1 il parametro addizionale e quello moltiplicativo, m_o e s_o la media e la deviazione standard per l'immagine originale, m_t e s_t la media e la deviazione standard obiettivo per l'immagine filtrata, c la costante che permette di modificare il contrasto finale in relazione a quello obiettivo e b è un peso che modifica la luminosità. In sostanza, l'utente deve selezionare la dimensione del blocco: un piccolo blocco (ad esempio 7×7 pix) si traduce in un forte miglioramento, mentre un grande blocco (ad esempio 131×131 pixel) genera una perdita di dettaglio.

Per ogni singolo blocco sono stimati m_o e s_o e i valori risultanti sono assegnati al pixel centrale di ogni blocco, mentre per gli altri pixel i valori sono stimati con un'interpolazione bilineare. La media e la deviazione standard obiettivo per l'immagine filtrata m_t e s_t sono selezionate manualmente. Normalmente, per un'immagine a 8-bit una buona scelta di media obiettivo è 127, mentre il valore della deviazione standard obiettivo può essere 50. Buoni valori numerici per c sono nella gamma $[0,7, 1]$, mentre per la b la gamma suggerita $[0,5, 1]$.

La tabella 3.3 mostra il miglioramento dei risultati conseguiti con l'operatore interesse FAST per estrarre i punti di legame e perfezionare la loro posizione immagine con LSM (z rappresenta generalmente la profondità). La combinazione di FAST e LSM fornisce risultati migliori di quelle ottenibili con le caratteristiche SIFT o SURF e LSM (colonna denominata "FBM + LSM"). Inoltre, si trovano molti altri punti 3D che possono essere utili per approssimare la superficie del corpo per una più rapida trasformazione durante la fase di ricostruzione superficie con tecniche di *matching* multi-immagine. Pertanto, l'operatore FAST può essere utilizzato per migliorare la qualità del progetto quando i risultati di alta precisione sono necessari. Questa scelta è facoltativa e completa la fase di orientamento automatico.



					
6 immagini – 2,816x2,112 (pix) dimensione oggetto 1,2x1x1 (m)		9 immagini – 1,856x1,392 (pix) dimensione oggetto 7x1,5x2 (m)			
	FBM+LSM	FAST+LSM		FBM+LSM	FAST+LSM
Punti 3D	61	541	Punti 3D	185	401
σ_0 (pix)	0.32	0.28	σ_0 (pix)	0.29	0.56
RMS (pix)	0.35	0.32	RMS (pix)	0.28	0.69
σ_x (mm)	0.29	0.13	σ_x (mm)	2.6	1.2
σ_y (mm)	0.45	0.24	σ_y (mm)	1.4	0.9
σ_z (mm)	0.71	0.33	σ_z (mm)	5.9	3.3

Tabella 3.3 – comparazione tra procedure di orientamento Feature-Base e Corner-Base

3.7 Decimazione di Coppie d'immagini e di Punti immagine

L'uso di tecniche FBM come SIFT e SURF per la rilevazione dei punti d'immagine consente l'elaborazione di complessi blocchi *close-range*. Una grande varietà di deformazioni, per esempio le variazioni di scala, variazioni radiometriche, ampie linee di base, etc. possono essere prese in considerazione al fine di ottenere un buon set di punti di legame.

Normalmente, i punti rilevati in modo completamente automatizzato sono più che sufficienti per la stima dei parametri di EO. Tuttavia, potrebbero verificarsi due situazioni:

- un elevato numero di punti a seguito del FBM;
- il blocco delle immagini è composto da decine d'immagini, che devono essere progressivamente analizzate.

Il primo punto, che può sembrare erroneamente un buon risultato, presenta il notevole svantaggio che troppi punti intralciano la compensazione a stelle proiettive a causa dell'elevato costo computazionale. Questo è il caso abituale di corpi ben strutturati con immagini con la tipica configurazione aerea (ad esempio blocchi di UAV). In questa tipologia di dati, la fotocamera subisce rotazioni o traslazioni attorno al suo asse ottico durante l'acquisizione delle immagini. Essendo SIFT e SURF completamente invarianti a questi effetti spesso forniscono troppi punti, molto di più di quelli strettamente necessari per un orientamento manuale più tradizionale. Questi problemi sono aumentati anche dall'uso d'immagini ad alta risoluzione, elaborate senza alcuna compressione geometrica preliminare.

Per superare questo inconveniente è stata implementata una procedura ad hoc per la decimazione dei punti di legame. Dopo il *matching* di tutte le combinazioni di coppie d'immagini, i punti possono essere ridotti in base alla loro molteplicità (cioè il numero d'immagini in cui lo stesso punto è stato correlato). Una griglia regolare è proiettata su ogni immagine, e per ogni cella solo il punto con la molteplicità più alta viene memorizzato. Ovviamente, lo stesso punto deve essere conservato per le altre immagini.

Le dimensioni della cella dipendono dalla risoluzione geometrica delle immagini (ad esempio, per un'immagine 12 Mpix, una buona scelta è di 200×150 pixel). Questo dovrebbe essere impostata manualmente.

Come per SIFT (o SURF) l'abbinamento con FAST migliora la distribuzione geometrica dei punti caratteristici, così la successiva combinazione con la decimazione non solo migliora la qualità del risultato in termini di distribuzione geometrica, ma anche in termini di tempo calcolo. La Figura 3.4 (sopra) mostra una tripletta d'immagini con la tipica distribuzione casuale dei punti. I risultati per le stesse immagini (sotto) sono molto migliori, ma il trattamento con il filtro di Wallis e gli spigoli di FAST sono necessari.

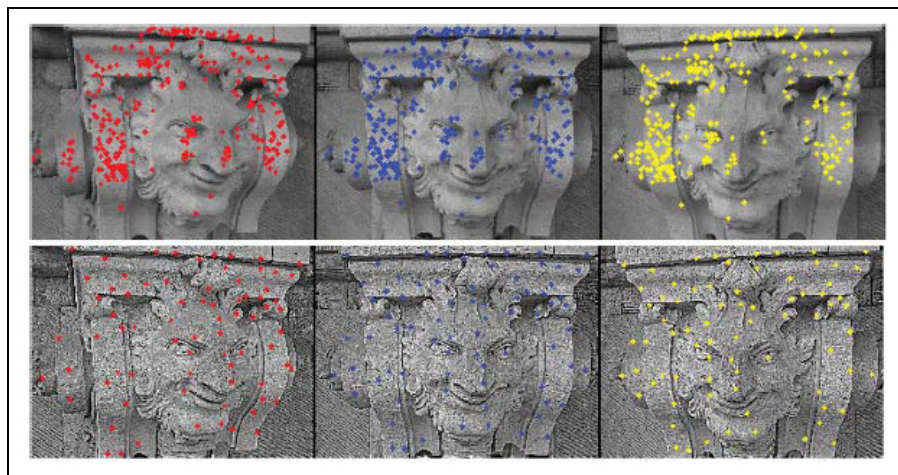


Figura 3.4 – Esempio di distribuzione casuale e non uniforme delle features estratte con SIFT (sopra) e distribuzione uniforme derivata dall'approccio posposto (sotto)

E' importante applicare questo metodo, dopo la concatenazione di tutte le combinazioni di coppie d'immagini.

Il secondo punto è correlato al numero d'immagini. Per blocchi composti da diverse decine di foto il tempo di elaborazione può aumentare significativamente. Infatti, per un blocco composto da n immagini, dovranno essere analizzate $(n^2-n)/2$ combinazioni di coppie d'immagini, con un conseguente tempo di elaborazione proporzionale al numero globale di combinazioni.

Tuttavia, solo un numero limitato di coppie diventano punti di legame, quindi i rimanenti devono essere rimossi dall'elaborazione. Il metodo utilizzato per smaltire queste inutili coppie d'immagini è una *visibility map*.

La *visibility map* contiene le connessioni tra tutte le coppie d'immagini diventate punti di legame, e i parametri per la sua stima possono essere i seguenti:

- *visibilità dalle immagini*: se sono impiegate immagini ad alta risoluzione, viene eseguita rapidamente un'elaborazione preliminare con immagini compresse (ad esempio, meno di 2 Mpx). Questa fornisce la combinazione delle immagini di tutto il blocco. Quindi, la stessa procedura di matching si ripete con le immagini originali, ma tenendo conto della mappa prodotta;
- *visibilità da dati GPS / INS*: questi valori combinati con un approssimato DSM della zona consentono la stima della sovrapposizione tra le immagini. Questo metodo è più veloce del precedente. Tuttavia, può essere applicata solo per le immagini con una configurazione simile a quella di un blocco aereo.

Una visualizzazione grafica della *visibility map* è mostrata in *figura 3.7*. Alcune immagini (punti rossi) sono collegate con linee blu per indicare la presenza di punti corrispondenti (tale rappresentazione è anche chiamato grafo di connessione). L'esempio qui proposto è legato al blocco sparso in *figura 3.5*, per i quali il numero globale delle coppie è 253, mentre la mappa di visibilità fornisce solo 141 combinazioni. Ciò significa che il trattamento può essere accelerato di circa un fattore 2.

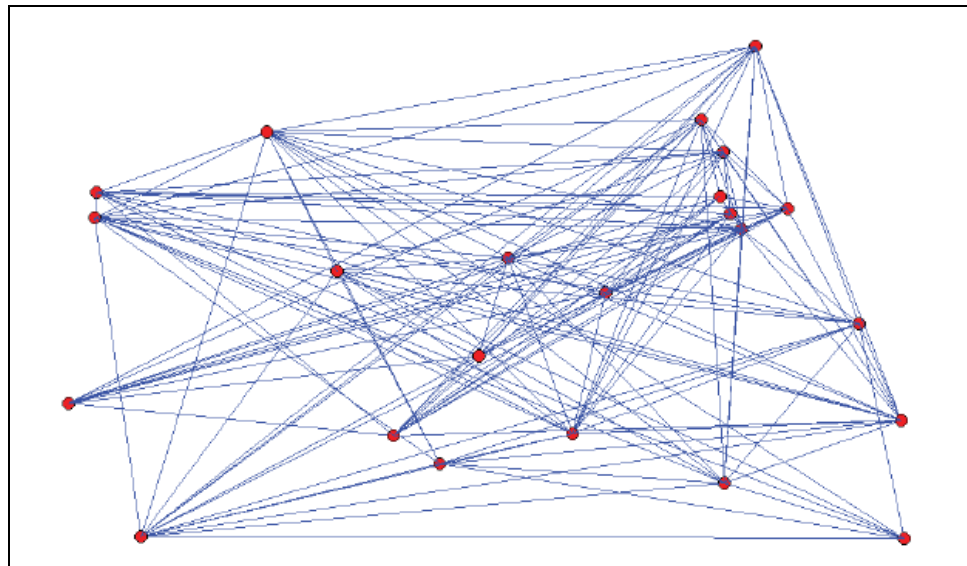


Figura 3.5 – La *visibility map* dell'oggetto in figura 8. le immagini sono rappresentate da punti e le loro connessioni da linee

4 - RICOSTRUZIONE AUTOMATICA DI SUPERFICI MEDIANTE TECNICA FOTOGRAMMETRICA

Nel presente capitolo verrà presentata la tecnica di modellazione 3D sviluppata per ottenere una descrizione fitta della geometria di una superficie, determinando su di essa un'elevata mole di punti. I modelli 3D così ottenuti presentano un'elevata precisione e possono essere utilizzati per scopi di rilievo fotogrammetrico. La metodologia sviluppata si basa sullo sviluppo di **algoritmi di correlazione** d'immagine, che applicati ricorsivamente portano a produrre modelli delle superfici costituiti da nuvole dense di punti nello spazio. Per tale ragione verranno brevemente descritte le tecniche di *matching* automatico maggiormente impiegate. In particolar modo verranno presentati gli algoritmi facenti parte della cosiddetta categoria “*area-based matching*” (ABM).

4.1 Tecniche di correlazione d'immagine

Il problema fondamentale nell'automazione delle procedure di orientamento e restituzione in fotogrammetria digitale è quello di ricercare punti corrispondenti sulle diverse immagini che riprendono la stessa porzione dell'oggetto.

Nella fase di orientamento, come accennato nel capitolo precedente, è necessario trovare punti che siano visibili sul più elevato numero d'immagini possibili in modo tale da aumentare la ridondanza locale delle osservazioni, al fine di determinare i parametri di orientamento esterno, gli eventuali parametri di calibrazione della camera e le coordinate oggetto degli stessi.

Nella fase di restituzione è la densità spaziale dei punti che assume un carattere più importante rispetto alla molteplicità dei singoli punti, quindi al numero delle immagini sulle quali il singolo punto omologo è visto. Infatti, si vanno a ricercare punti omologhi tra le diverse immagini in numero tale da poter approssimare la superficie con un numero sufficiente di punti, che sarà funzione della sua complessità e irregolarità, spesso partendo da fotogrammi orientati o da un modello approssimato dell'oggetto.

In fotogrammetria digitale si classificano gli algoritmi di *image matching* nelle seguenti categorie:

- Gli **Algoritmi Feature-Based Matching** (FBM), vanno a ricercare elementi corrispondenti (punti, linee, spigoli) tra le immagini, con il vantaggio di una maggiore robustezza nel correlare immagini che presentano forti differenze geometriche e radiometriche tra loro, ma con minore precisione e densità nella distribuzione dei punti trovati. Talvolta gli algoritmi FBM vengono utilizzati anche per una prima ricostruzione di una superficie in modo approssimato, da migliorare poi con un algoritmo ABM.
- Gli **Algoritmi Area-Based** (ABM) sono basati sostanzialmente su criteri di correlazioni d'immagine che cercano aree corrispondenti su fotogrammi differenti. La ricerca viene eseguita considerando una coppia di aree e non più solo di *features*. Gli algoritmi ABM stimano una trasformazione geometrica e radiometrica tra le 2 finestre, che permette di trovare punti omologhi anche in presenza di deformazioni prospettiche, d'illuminazione tra le immagini. Solitamente si parte dalle posizioni approssimate degli omologhi, determinate mediante *operatori d'interesse*.

Dalle caratteristiche delle due categorie sopra elencate, nella fase di restituzione risultano molto più funzionali gli algoritmi ABM rispetto agli FBM. Di seguito sono presentate brevemente le tecniche ABM maggiormente impiegate.

4.1.1 Metodi correlazione semplice

Sono i metodi ABM più semplici si basano sulla ricerca del massimo di una misura di somiglianza dei toni di grigio tra due fotogrammi, spostando con passi regolari sull'immagine di lavoro (*slave*) una finestra di dimensioni prefissate.

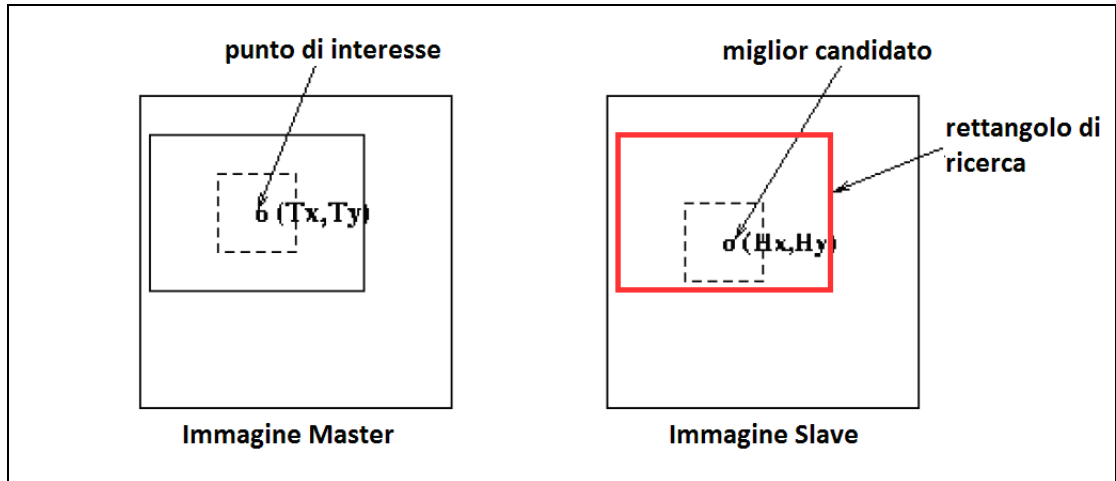


Figura 4.1 – Immagine master e slave

Le misure di correlazione più comunemente usate sono:

- *Somma delle differenze quadratiche (Sum of Squared Differences o SSD)*

$$SSD(i, j) = \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N (A(i+m, j+n) - S(m, n))^2 \quad (4.1)$$

- *Correlazione normalizzata (Normalized Cross-Correlation o NCC)*

$$NCC(i, j) = \frac{\sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N (A(i+m, j+n)B(m, n))}{\sqrt{\sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N A(i+n, j+n)^2 \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N B(m, n)^2}} \quad (4.2)$$

- *Correlazione di correlazione (Zero Mean Normalized Cross Correlation o ZNCC)*

$$ZNCC(i, j) = \rho(i, j) = \frac{\sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N ((A(i+m, j+n) - \bar{A})(B(m, n) - \bar{B}))}{\sqrt{\sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N (A(i+m, j+n) - \bar{A})^2 \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N (B(m, n) - \bar{B})^2}} \quad (4.3)$$

In cui A e B rappresentano I valori dei toni di grigio rispettivamente della patch e della *template* e A e B i valori medi di tali grandezze.

La cross-correlazione è una tecnica estremamente importante per ottenere delle corrispondenze tra immagini digitali. Essa si basa su due assunzioni fondamentali:

- le due immagini differiscono dal punto di vista geometrico solamente per una traslazione;
- le due immagini differiscono dal punto di vista radiometrico tra di loro solo per luminosità e contrasto.

Diversi autori [Martin 1995] suggeriscono tecniche al fine di ottenere l'invarianza, anche parziale, rispetto a trasformazioni geometriche quali rotazioni o variazioni di scala, tuttavia per variazioni geometriche di una certa entità i valori di similitudine misurati dalla correlazione

semplice sono bassi, anche quando il punto omologo sull'immagine slave viene individuato correttamente.

È noto che, salvo condizioni particolari, la precisione di questi metodi è limitata. Essi rimangono attuali perché estremamente veloci nel determinare corrispondenze su due immagini: il numero di operazioni richieste per il calcolo dei descrittori statistici è, infatti, molto minore rispetto ad altre tecniche di *matching*. Pertanto, quando l'area di ricerca sulle immagini di lavoro è particolarmente estesa e sono quindi necessari numerosi tentativi prima di ottenere la corrispondenza corretta o nelle applicazioni in *real time* essi sono largamente utilizzati.

Vengono anche applicati in via preliminare per fornire posizioni iniziali sufficientemente accurate per inizializzare altri metodi di *matching* più raffinati. In altre parole i metodi di correlazione possono essere utilizzati, vista la loro rapidità di esecuzione, per analizzare ampie regioni d'immagine alla ricerca di posizioni omologhe; una volta individuate approssimativamente tali zone, è un altro algoritmo a individuare con precisione la posizione del punto. D'altro canto con la cross correlazione non è possibile maneggiare in modo semplice la presenza di occlusioni. Il numero di operazioni per il calcolo del coefficiente di correlazione cresce con il quadrato della dimensione della *template*; inoltre il numero di tentativi da effettuare nella ricerca è direttamente proporzionale al numero di pixel che contengono la regione analizzata. Diversi studi sono stati compiuti per ottimizzare tali operazioni di ricerca.

4.1.2 Least Squares Matching

La tecnica della correlazione d'immagini a minimi quadrati o *Least Square Matching* (LSM) [Grün 1985] è stata sviluppata insieme con altri metodi meno noti in fotogrammetria per superare le limitazioni della cross-correlazione di fronte a trasformazioni geometriche diverse dalla traslazione e può essere considerata, per certi aspetti, una sua generalizzazione.

Il metodo LSM è caratterizzato dai seguenti elementi:

- è possibile considerare qualsiasi tipo di trasformazione geometrica di tipo parametrico tra le due immagini;
- è possibile considerare qualsiasi tipo di relazione radiometrica di tipo parametrico tra le due immagini;
- il processo di stima è molto efficiente essendo basato su uno stimatore ai Minimi Quadrati.

Prese due porzioni d'immagine, un'estratta sull'immagine di riferimento (*template*) e la seconda sull'immagine in cui si vuole trovare il punto omologo (*patch*), lo scopo dell'algoritmo è quello di determinare punti corrispondenti sulle due immagini, stimando un'opportuna trasformazione affine che renda la *patch* localmente identica (a meno degli inevitabili residui) alla *template*. I toni di grigio di ciascun pixel della *template* $f(i, j)$ vengono confrontati con quelli ritenuti omologhi sulla *patch* $g(u, v)$: il grado di somiglianza viene misurato dalla somma dei quadrati delle differenze dei valori radiometrici dei pixel corrispondenti nelle due finestre.

Il LSM si basa unicamente sulla similitudine tra i toni di grigio e non è quindi in grado di garantire che le corrispondenze estratte siano geometricamente compatibili: ad esempio non è detto che il punto estratto su un'immagine si trovi sulla linea epipolare individuata dal punto corrispondente sulla *template*, oppure che le coordinate immagine soddisfino la collinearità con il punto oggetto, per questa regione una ricerca lungo le linee epipolari è da ritenersi necessaria. Tuttavia se il *matching* viene eseguito su più di due immagini, i punti estratti su ogni slave sono indipendenti gli uni dagli altri e non è quindi possibile garantire che la collinearità con il punto oggetto sia garantita.

4.1.3 Geometrically Constrained Cross-Correlation (GC3)

Sviluppato da Zhang [2006], è un algoritmo di matching flessibile e robusto capace di sfruttare immagini multiple.

L'algoritmo è un'estensione della Cross-Correlazione Standard, è basata sul concetto del matching multi-immagine e consente la ricostruzione 3D di oggetti tramite il matching tra tutte

le immagini disponibili, senza dover effettuare dei matching individuali delle singole coppie d'immagini da unire successivamente.

Considerando una tripletta d'immagini aeree come mostrato in figura 4.2, l'immagine centrale viene scelta come immagine di riferimento e indicata come I_0 , le altre due immagini, indicate come I_1 e I_2 , sono le immagini di ricerca. Per un determinato punto p_0 nell'immagine di riferimento, possiamo stabilire (noti i parametri di orientamento dell'immagine) il raggio di proiettivo cp_0 , su cui deve giacere la corrispondenza del punto p_0 nello spazio in oggetto, conosciuti.

Intersecando il raggio cp_0 con un modello approssimato è possibile ottenere una posizione approssimata $P_0 (X_0, Y_0, Z_0)$ nello spazio oggetto. L'altezza approssimativa Z_0 può avere una variazione di ΔZ , perciò la corretta posizione di P_c nello spazio oggetto dovrebbe trovarsi tra $P_{min} (Z_0 - \Delta Z)$ e $P_{max} (Z_0 + \Delta Z)$ lungo il raggio d'immagine cp_0 .

Ri-proiettando i punti tra P_{min} e P_{max} sulle immagini di ricerca, possono essere facilmente definiti dei segmenti corrispondenti alle linee epipolari per il punto p_0 . I punti p_i corretti, individuati sulle immagini di ricerca, devono trovarsi lungo i segmenti delle linee epipolari corrispondenti.

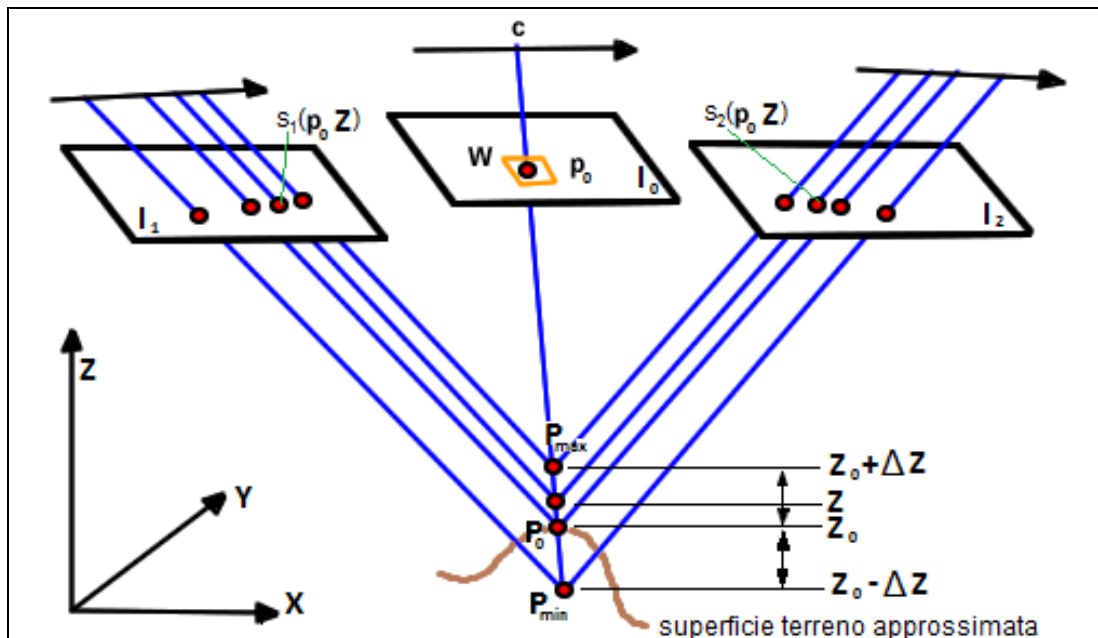


Figura 4.2 – Principio di GC³

Nell'immagine di riferimento, definiamo una finestra di correlazione W intorno al punto p_0 .

Se proiettiamo questa finestra su un DSM approssimato conosciuto a priori, possiamo ottenere la porzione di superficie corrispondente. Ri-proiettando questa porzione di superficie sulle immagini di ricerca, si vengono a generare delle finestre di correlazione sulle immagini di ricerca.

Attraverso questa procedura di rimodellamento, una finestra di correlazione quadrata nell'immagine di riferimento può essere correlata con una finestra di diverse dimensioni, forma e orientamento nelle immagini di ricerca. Di conseguenza, più immagini con diversa scala e orientamento possono essere correlate semplicemente compensando anche le distorsioni causate dal rilievo del suolo.

Il valore del *Normalized Correlation Coefficient (NCC)* tra le corrispondenti finestre di correlazione nell'immagine di riferimento e nelle i -esime immagini di ricerca, rispetto all'altezza Z per p_0 , può essere definito come:

$$NCC_i(p_0, Z) = \frac{\sum_{s \in W} (I_0(s) - \bar{I}_0)(I_i(s_i(Z)) - \bar{I}_i)}{\sqrt{\sum_{s \in W} (I_0(s) - \bar{I}_0)^2} \sqrt{\sum_{s \in W} (I_i(s_i(Z)) - \bar{I}_i)^2}} \quad (4.4)$$

$$\bar{I}_0 = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{s \in W} I_0(s); \quad \bar{I}_i = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{s \in W} I_i(s_i(Z)); \quad i = 1, 2$$

Dove, W e s indicano rispettivamente la finestra di correlazione dell'immagine di riferimento e un pixel in questa finestra; m e n denotano la dimensione della finestra di correlazione W , $s_i(Z)$ denota il punto corrispondente a s nell' i -esima immagine di ricerca. I valori d'intensità per il punto $s_i(Z)$ sono interpolati dall' i -esima immagine di ricerca utilizzando il metodo d'interpolazione bilineare.

Come si può vedere dall'equazione (1), il valore di NCC_i è definito rispetto al valore dell'altezza Z , che potrebbe essere un qualsiasi valore compreso tra $Z_0 - \Delta Z$ e $Z_0 + \Delta Z$. Così, dato un punto nell'immagine di riferimento, come pure la sua altezza approssimata Z_0 e un incremento ΔZ nello spazio oggetto, le funzioni di NCC per tutte le singole coppie stereo sono definite. Seguiamo quindi la procedura proposta da Okutomi e Kanade [1993], invece di calcolare la corretta corrispondenza del punto p_0 valutando le singole funzioni NCC tra il riferimento I_0 e le immagini di ricerca I_1 e I_2 , definiamo la somma di NCC (SNCC) per punto p_0 , rispetto alla Z , come:

$$SNCC(p_0, Z) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 NCC_i(p_0, Z) \quad (4.5)$$

Pertanto, individuando il valore Z : $Z \in [Z_0 - \Delta Z, Z_0 + \Delta Z]$ che massimizza la funzione SNCC, possiamo ottenere il valore dell'altezza corrispondente per il punto p_0 . L'incremento di altezza ΔZ determina la distanza di ricerca lungo le linee epipolare corrispondente. Attraverso la definizione della funzione SNCC, che semplicemente somma le funzioni NCC di cross-correlazione di tutte le coppie stereo, può essere ottenuta la corretta corrispondenza o l'altezza corretta nello spazio oggetto per un determinato punto dell'immagine di riferimento.

Il metodo può essere facilmente esteso per un caso più generale con $n + 1$ ($n \geq 1$) immagini.

$$SNCC(p_0, Z) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n NCC_i(p_0, Z) \quad (4.6)$$

4.1.4 Multiphoto Geometrically Constrained Matching

MGCM (*Multiphoto Geometrically Constrained Matching*) è una tecnica di *matching* presentata da Grün [1985], con successivi miglioramenti [Grün 1988] e [Baltsavias 1991], ed è tuttora il metodo più preciso per la misurazione di coordinate immagine ed è quindi appropriato ai fini metrici.

L'algoritmo MGCM combina il confronto tra i toni di grigio delle immagini, tipico di LSM, con il vincolo geometrico della collinearità, aumentando così l'affidabilità della soluzione. Inoltre, rispetto a LSM, dove è possibile analizzare contemporaneamente solo un paio d'immagini, permette il *matching* multi-immagine. Tutto questo riduce soluzioni multiple in caso di *texture* ripetitive e aiuta a superare occlusioni grazie alla possibilità di visualizzare l'oggetto da più stazioni. In più, le coordinate 3D oggetto del punto vengono calcolate direttamente assieme alla loro precisione teorica.

Di seguito sono delineati gli aspetti principali di questa tecnica per evidenziare i suoi vantaggi rispetto ad altri metodi ABM. Inoltre sono sottolineate alcune limitazioni della formulazione originale.

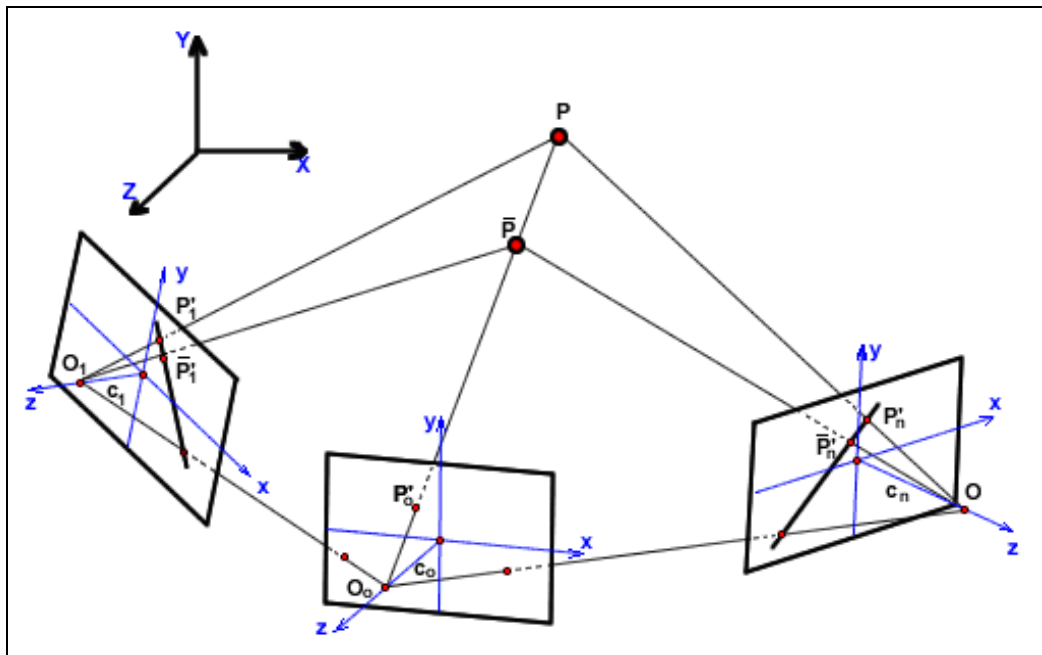


Figura 4.3 – Principio di MGCM, correlazione delle coordinate terreno del punto P* (posizione iniziale) e determinazione delle coordinate del punto terreno P (corretto posizionamento del punto, matching corretto)

Considerato un blocco d'immagini raffiguranti un oggetto; una di esse viene selezionata come *master* in base a specifici criteri (vedi paragrafo 4.5).

Sull'immagine *master* viene definito un insieme di punti (x_{pk}, y_{pk}) che vengono successivamente utilizzati per estrarre porzioni d'immagine dette *template*.

Ognuna di esse è quindi riproiettata sulle restanti immagini del blocco sfruttando un DSM approssimato dell'oggetto ed estraendo una finestra quadrata (*slave*) intorno ad ogni punto riproiettato per ogni generica immagine i , ottenendo un totale di n possibili candidati.

La deformazione geometrica tra la *template* e ogni *slave* è modellata con una trasformazione affine, che approssima abbastanza bene a livello locale le deformazioni prospettiche. Poi il *template* è confrontato con tutti i corrispondenti *slave*.

Il rapporto che descrive i valori d'intensità di ogni pixel nel *template* è dato dalla funzione discreta $f(x, y)$, dove le n *slave* sono rappresentate da funzioni $g_1(x, y), \dots, g_n(x, y)$.

Viene quindi scritta un'equazione di osservazione d'intensità per ogni pixel del *template* e i corrispondenti pixel sulle *slave i come segue:*

$$f(x, y) - e_i(x, y) - g_i^0(x, y) + g_{xi} da_{10i} + g_{xi} x_0 da_{11i} + g_{xi} y_0 da_{12i} + g_{yi} da_{20i} + g_{yi} x_0 da_{21i} + g_{yi} y_0 da_{22i} = 0 \quad (4.7)$$

dove le incognite sono correzioni ai parametri della trasformazione affine da_{jki} .

Il coefficiente $g_i^0(x, y)$ è il valore osservato nella posizione approssimativa delle *slave* mentre g_{xi} e g_{yi} sono le derivate parziali della funzione $g(x, y)$. La funzione $e_i(x, y)$ dà l'errore residuo rispetto al modello affine.

Il MGCM combina le equazioni d'intensità di osservazione (eq. 4.7) con la condizione di collinearità. Infatti, per un'immagine formata secondo le regole della proiezione centrale k il vincolo tra il punto oggetto generico $(X_p = [X_p \ Y_p \ Z_p]^T)$ e il suo punto corrispondente 2D (x_{pk}, y_{pk}) sull'immagine k è data dalla ben nota equazione di collinearità:

$$\begin{aligned} x_{pk} &= c_k \frac{r_{1k}^T(x_p \quad x_{ok})}{r_{3k}^T(x_p \quad x_{ok})} \cong F_k^x \\ y_{pk} &= c_k \frac{r_{2k}^T(x_p \quad x_{ok})}{r_{3k}^T(x_p \quad x_{ok})} \cong F_k^y \end{aligned} \quad (4.8)$$

dove c_k è la distanza principale, X_{ok} è il vettore che esprime le coordinate del centro della prospettiva, $R_k = [r_{1k} \ r_{2k} \ r_{3k}]^T$ è la matrice di rotazione. Le coordinate immagini (x_{pk} , y_{pk}) sono calcolati rispetto al punto principale.

Se entrambi i parametri di orientamento interni ed esterni (EO) di ogni stazione sono noti, l'eq. 4.8 può essere riscritta come segue:

$$\begin{aligned} \Delta x_{pk} + F_k^x + x_{pk}^0 &= 0 \\ \Delta y_{pk} + F_k^y + y_{pk}^0 &= 0 \end{aligned} \quad (4.9)$$

I parametri sconosciuti in eq. 4.9 sono gli spostamenti (Δx_{pk} , Δy_{pk}) e le coordinate del punto oggetto (X_p). Dopo la loro linearizzazione, le eq. 4.9 diventano:

$$\begin{aligned} \Delta x_{pk} + \frac{\partial F_k^x}{\partial X} dX + \frac{\partial F_k^x}{\partial Y} dY + \frac{\partial F_k^x}{\partial Z} dZ + F_k^{x^0} + x_{pk}^0 &= 0 \\ \Delta y_{pk} + \frac{\partial F_k^y}{\partial X} dX + \frac{\partial F_k^y}{\partial Y} dY + \frac{\partial F_k^y}{\partial Z} dZ + F_k^{y^0} + y_{pk}^0 &= 0 \end{aligned} \quad (4.10)$$

Gli spostamenti permettono di collegare le due serie di eq. 4.7 e 4.10, perché $\Delta x_{pk} = da_{10}$ e $\Delta y_{pk} = da_{20}$ per la stessa serie d'immagini e punto P.

Pertanto, il risultante sistema può essere risolto usando schemi di soluzione convenzionali *Least Squares* [vedi Baltsavias, 1991].

4.2 La metodologia di ricostruzione sviluppata

La metodologia sviluppata per la ricostruzione di superfici prevede, come per la fase di orientamento delle immagini, la combinazione delle discipline della fotogrammetria e della CV consentendo in tal modo di ottenere risultati accurati in un modo completamente automatico.

L'algoritmo più raffinato e maggiormente diffuso in ambito fotogrammetrico è la *Least-squares matching* (LSM), la quale viene spesso implementata nei programmi commerciali nella versione originale che si basa sull'analisi delle sole corrispondenze radiometriche tra due immagini. Tuttavia, come già discusso in precedenza, tale tecnica presenta dei limiti a causa della scarsa ridondanza che porta a un ridotto controllo sulle correlazioni errate causando di conseguenza una non corretta determinazione delle coordinate oggetto dei punti.

Per queste ragioni la tecnica di correlazione d'immagini a minimi quadrati che è stata implementata in questo lavoro combina il confronto tra i toni di grigio delle immagini con l'utilizzo della collinearità come vincolo geometrico aggiuntivo, aumentando così l'affidabilità e la precisione della soluzione.

Tale algoritmo, chiamato **MGCM** (*Multiphoto Geometrically Constrained Matching*), è caratterizzato dall'utilizzo simultaneo di più immagini, che oltre ad aumentare l'affidabilità interna delle osservazioni consente di ovviare parzialmente al problema delle occlusioni.

Poiché il cuore del processo di restituzione è l'uso combinato di MGCM e altri metodi, la procedura verrà chiamata MGCM+.

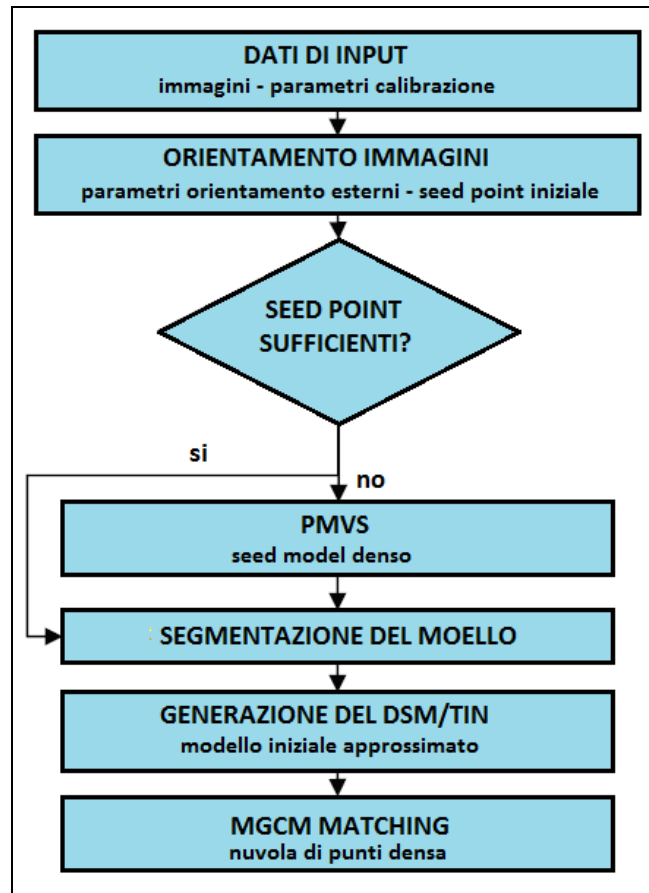


Figura 4.4 – Pipeline

La procedura completa per la ricostruzione geometrica di grandi oggetti o scene, con immagini ad alta risoluzione in un quadro stereo multi-vista è presentata nella *figura 4.4*.

Come si può notare dal diagramma, è necessario un blocco d'immagini adatte (in termini di geometria di rete e la risoluzione dell'immagine). Tutte le immagini devono essere acquisite mediante camere calibrate al fine di migliorare la precisione delle misure finali 3D, particolare attenzione deve inoltre essere posta alla pianificazione della geometria di presa in modo tale da ovviare a due necessità contrastanti. Da un lato basi presa maggiori consentono una migliore precisione in quota, dall'altro lato è necessario garantire una grande copertura in modo tale che le deformazioni geometriche siano contenute tra i vari fotogrammi in modo da poter applicare le tecniche di correlazione esposte in precedenza.

L'orientamento delle immagini è il secondo requisito di MGCM+. Può essere eseguito sia con procedure manuali, e quindi sfruttando qualche decina di punti omologhi, sia con procedure automatiche, utilizzando anche qualche centinaio di punti omologhi. Queste ultime hanno il vantaggio di generare una densa nuvola di punti di punti di legame. Essendo in possesso di una densa nuvola di punti omologhi (procedura automatica), questi possono essere usati per inizializzare MGCM+ con una superficie approssimativa. Al contrario, se il modello iniziale non è sufficientemente denso, poiché la superficie dell'oggetto presenta una scarsa tessitura o nel caso in cui si sia operata l'orientamento in modalità manuale, viene applicata una soluzione alternativa per ricavare un *seed model*. Quest'ultima si basa principalmente su l'algoritmo proposto da Furukawa e Ponce [2010] e verrà illustrata successivamente nel *paragrafo 4.3*. Il vantaggio di questo algoritmo è la sua indipendenza dal sistema di riferimento adottato e la capacità di lavorare senza alcun modello iniziale dell'oggetto.

4.3 Generazione del Seed Model

Poiché, come osservato in precedenza, l'algoritmo MGCM ha bisogno di una serie di valori approssimati dei parametri che verranno poi stimati dalla risoluzione di un sistema ai minimi quadrati, è stato aggiunto un passaggio intermedio per ottenere un *seed model preliminare*.

Nel caso i parametri EO siano stati calcolati utilizzando una procedura automatica, si potrebbero usare tutti i punti di legame correlati con gli operatori FB. Tuttavia, in alcuni casi il loro numero non è sufficiente o la loro distribuzione nelle immagini può risultare poco uniforme, lasciando alcune zone vuote.

L'importanza di buon un *seed model* è notevole non solo per la qualità geometrica del prodotto finale, ma anche in termini computazionali in quanto si può limitare la ricerca lungo i raggi proiettivi, riducendo lo spostamento della finestra di correlazione.

Come sottolineato in precedenza, nel caso in cui l'orientamento del blocco d'immagini sia stato eseguito in modo completamente automatico, le coordinate 3D dei punti di legame, stimati a seguito della compensazione a "selle proiettive", possono essere direttamente utilizzati per la creazione di un modello approssimato della superficie con cui inizializzare MGCM+.

Tuttavia, nel caso in cui il numero di punti di legame estratto nella fase di orientamento automatico sia ridotto, ad esempio a causa di una scarsa tessitura della superficie, o nel caso in cui l'orientamento sia eseguito in modalità manuale, la generazione di un *seed model* si svolge in una nuova fase di *matching*. In questa fase, i parametri di Orientamento Esterno (OE) sono mantenuti fissi per sfruttare il vincolo geometrico di collinearità.

4.3.1 Patch-Based Matching

In modo particolare all'interno della metodologia sviluppata è stato introdotto per questa operazione l'approccio *patch-based matching* (PMVS) proposto da Furukawa e Ponce [2010]. Questo algoritmo è stato incorporato nella metodologia sviluppata al fine di generare un modello a bassa risoluzione iniziale. Questa scelta è motivata dalla robustezza del metodo che combina più immagini durante la fase di *matching* denso: se almeno tre immagini sono elaborate contemporaneamente, errori e punti spuri possono essere rimossi analizzando la ridondanza dei dati locali. Inoltre, il metodo è in grado di lavorare con oggetti 3D e non richiede alcuna misurazione manuale.

PMVS implementa una procedura basata su tre passi fondamentali: *matching*, *expansion* e *filtering*:

- **Matching:** Il primo passo dell'algoritmo è quello d'individuare *features* (corner o blob) in ogni immagine utilizzando gli operatori di Harris e Difference-of-Gaussian (DoG). Per assicurare una copertura uniforme viene sovrapposta a ogni immagine una griglia regolare e per ogni cella di questa, vengono selezionate le η *feature* migliori per entrambi gli operatori. Dopo aver individuato le *features* in ogni immagine, queste vengono correlate tra loro tramite algoritmi FBM. Per ogni *feature*, viene quindi costruita una potenziale patch al fine di ricostruire una superficie approssimativa dell'oggetto formata da un set sparso di *patches*.
- **Expansion:** in questo stadio, vengono iterativamente aggiunte nuove *patches* vicine a quelle esistenti fino a che esse arrivino a coprire la superficie visibile nella scena ottenendo quindi un set denso di *patches*. Per fare ciò viene implementata una Cross-Correlazione Normalizzata (NCC), con la seguente formula:

$$N(p) = \frac{1}{|T(p)| - 1} \sum_{I \in T(p), I \neq R(p)} N(p, R(p), I) \quad (4.11)$$

- **Filtering:** in questa fase vengono applicati due filtri alle *patches* ricostruite per rafforzare ulteriormente la consistenza geometrica e rimuoverle corrispondenze errate. I filtri si basano sull'imposizione di condizioni di regolarizzazione della superficie che portano all'eliminazione di tutti quei punti che non le soddisfano. Il primo filtro si focalizza

sull'eliminazione delle patch che giacciono al di fuori dalla superficie reale. Il secondo filtro si focalizza invece nell'eliminazione degli *outliers* che giacciono all'interno della superficie.

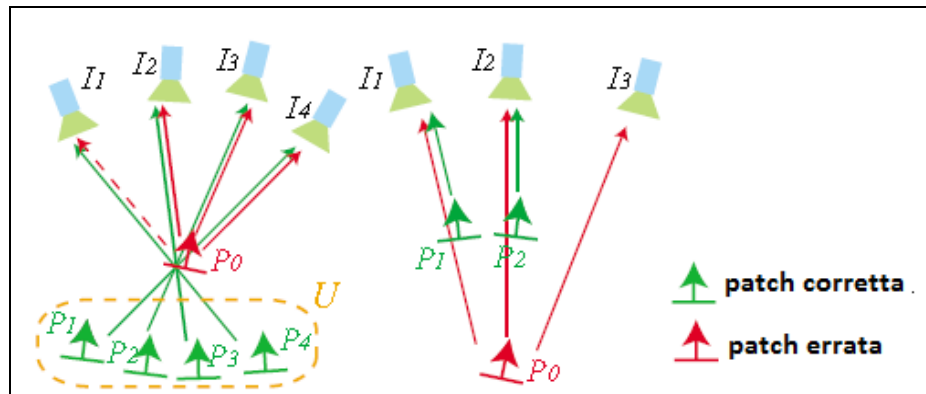


Figura 4.5 – esempi di patch errate che si trovano fuori o dentro la superficie corretta.

Questo metodo ha la particolarità di stimare non solo la posizione delle varie patches ma anche di individuarne la normale locale.

4.4 Utilizzazione di modello geometrico approssimato

Come già ampiamente discusso, un limite importante per l'algoritmo MGCM è la necessità di conoscere una posizione approssimativa dei punti oggetto, insieme ad una posizione preliminare delle posizioni dei punti omologhi nelle immagini *slave*. Per superare questo problema, come già anticipato, viene ricavato un *seed model* dell'oggetto utilizzando il metodo descritto precedentemente.

Il modello geometrico approssimato può essere costituito sia da un TIN (*Triangulated irregular network*) sia da un modello di elevazione digitale del terreno (DEM). Una struttura TIN presenta indubbi vantaggi nel caso in cui si voglia operare la ricostruzione di oggetti con una forma 3D particolarmente complessa. Nel caso invece in oggetto la superficie del terreno può essere semplicemente rappresentata mediante una geometria di tipo 2.5D, di conseguenza come approssimazione della superficie può essere preso semplicemente un modello DTM.

Note le coordinate immagine del punto *i*-esimo e nota la posizione del centro di presa dell'immagine *master* è possibile considerare la retta su cui, in base alla collinearità, si trova il punto terreno associato al punto immagine analizzato.

Considerando quindi l'intersezione tra il raggio proiettivo e la superficie del DTM è possibile definire un primo valore approssimato delle coordinate terreno del punto. A questo punto si potrebbe ri-proiettare tale punto, sempre facendo riferimento alla condizione di collinearità, su tutte le possibili immagini *slave*. Si avrebbe quindi a disposizione un insieme di punti approssimati dal quale partire con la tecnica MGCM per calcolare le correzioni e il punto sull'oggetto.

Bisogna a questo punto osservare che le correzioni dx e dy delle coordinate immagine sui vari fotogrammi e le correzioni delle coordinate terreno calcolate mediante MGCM, potrebbero essere piccole se il modello del terreno fosse preciso. In realtà, poiché questo può essere anche molto approssimato, il punto riproiettato sulle immagini *slave* può essere anche molto lontano dalla posizione corretta che soddisfa la collinearità.

Per tali ragioni oltre al punto terreno definito dall'intersezione tra il raggio proiettivo del punto immagine analizzato con la superficie del DTM, vengono considerate le coordinate di altri potenziali punti terreno sul raggio proiettivo che potrebbero essere più prossimi all'effettivo punto terreno.

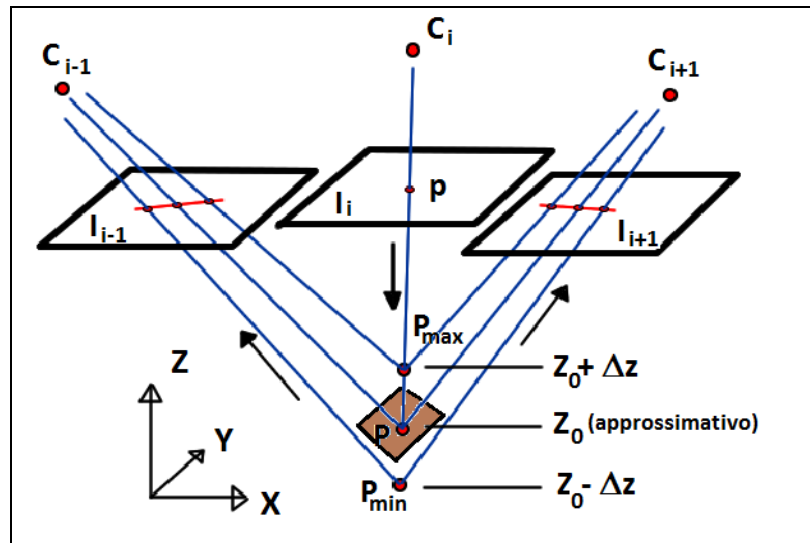


Figura 4.6 – proiezione dei potenziali punti terreno, individuati sul raggio proiettivo, sulle immagini slave

Il numero di punti aggiuntivi lungo il raggio di proiezione e la loro interdistanza sono entrambi parametri stimabili sulla base della qualità della superficie approssimata del modello. Per ogni punto definito lungo il raggio di proiezione vengono derivate le *patches* della immagine *slave* usando il principio di collinearità. Secondo questo approccio, si trova un insieme di posizioni approssimate candidate per la soluzione del sistema ai minimi quadrati.

In questa fase, entrambi i gruppi di equazioni del tipo 4.7 e 4.10 sono utilizzate al fine di calcolare le correzioni d'immagine e le posizioni dei punti oggetto.

Il fattore di media varianza σ_{0i}^2 sono stimati per ogni singola patch. Il processo viene iterato fino a quando le correzioni fornite dalla soluzione del sistema ai minimi quadrati sono trascurabili.

L'ultimo problema riguarda la scelta, tra tutte le soluzioni candidate calcolate lungo il raggio di proiezione, della posizione di corretta correlazione. In particolare, è considerato come posizione corretta quella che riduce il fattore di media varianza. Nel caso che per la soluzione considerata come corretta il coefficiente di correlazione lineare medio tra l'immagine master e le slave sia inferiore a 0,5, si ritiene che le variazioni d'illuminazione o geometriche tra le immagini siano troppo larghe per stimare correttamente la posizione del punto.

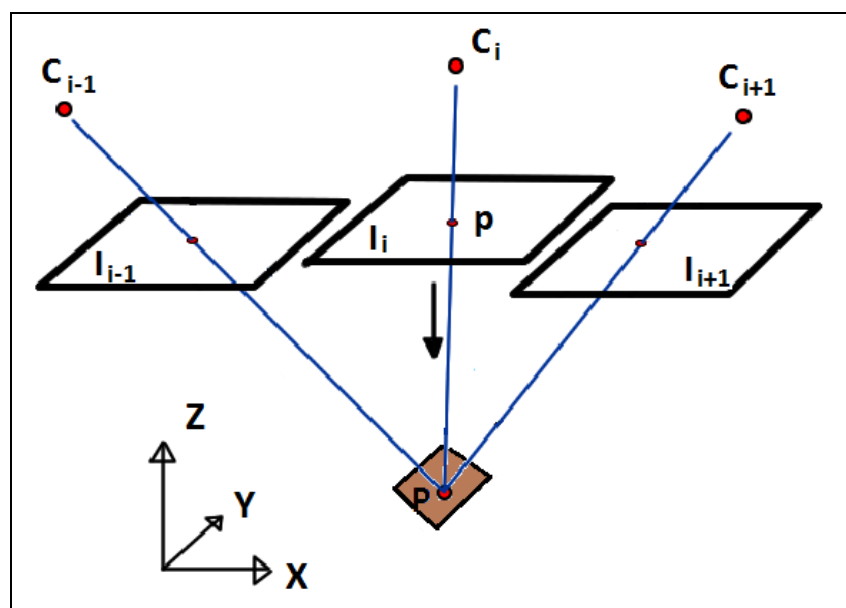


Figura 4.7 – Posizione stimata del punto terreno

4.5 Scelta delle immagini e dei parametri approssimati di LSM

Come osservato in precedenza, uno dei punti deboli nella formulazione MGCM è la scelta delle immagini *master* e *slave*. Generalmente il problema è risolto in questo modo: dato l'insieme d'immagini da elaborare, un'immagine (di solito quella centrale) è manualmente selezionata come *master*. Di conseguenza, tutte le altre immagini serviranno come *slave*. La scelta manuale della *master*, ovviamente, non è il miglior criterio di selezione. Ciò è dovuto principalmente a un paio di motivi:

- se un oggetto, approssimato con un modello 2.5D, non è interamente visibile in una sola immagine, è necessaria l'elaborazione multipla con più immagini *master*;
- l'impiego di un numero eccessivamente elevato di fotogrammi, più di 3-4, non determina nessun effettivo incremento della precisione dei risultati, determinando di converso un incremento dei tempi di calcolo e delle necessità di memoria.

Per tutte queste ragioni un'ottimizzazione nella fase di selezione delle immagini è necessaria. Per cominciare, è compiuta una selezione sulla base delle informazioni derivate dal modello approssimato. Dato un punto specifico nel DSM, tutte le immagini in cui tale punto è visibile sono considerate con una semplice ri-proiezione. La scelta del *master* è poi svolta all'interno di questo set.

Viene calcolata la direzione normale alla superficie in corrispondenza del punto oggetto considerato, quindi questa direzione viene confrontata con le normali di tutte foto in cui il punto è visibile. L'immagine la cui normale è più vicina alla direzione normale alla superficie viene scelta come *master*.

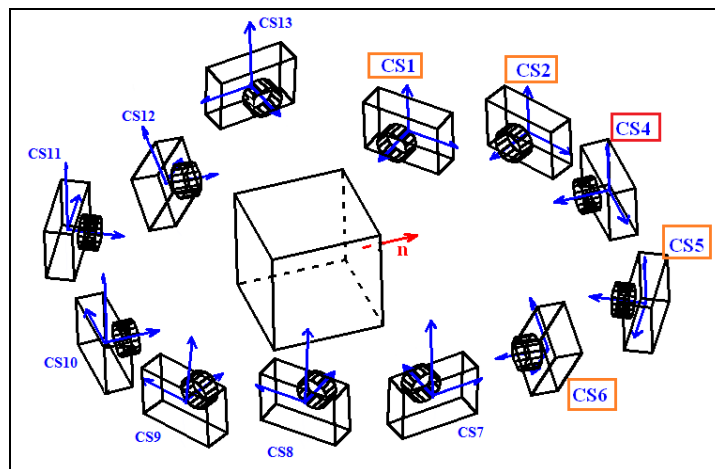


Figura 4.8 – Selezione dell'immagine master e delle slave

Con questa strategia si può gestire facilmente anche oggetti 2.5D che non sono completamente visibili in una sola immagine, senza richiedere l'interazione dell'utente.

L'ottimizzazione è obbligatoria anche per quanto riguarda la selezione delle immagini *slave*. Infatti, in molti casi le deformazioni prospettive possono diventare un problema per LSM. Per questo motivo è opportuno limitare il numero di possibili *slave* solo a quelle immagini in cui LSM è in grado di fornire buoni risultati. Anche in questo caso la scelta è gestita utilizzando il modello approssimato della superficie.

Per ogni punto del modello originale si considera la forma della cella DSM che lo contiene nelle diverse immagini. Se si verificano grandi deformazioni geometriche, la forma della cella DSM nelle immagini presenta variazioni significative. Perciò si ri-proietta la cella DSM contenente i punti oggetto in tutte le immagini e si confrontano le alterazioni delle celle tra l'immagine definita *master* e quelle delle candidate *slave*. In particolare si considerano due parametri: "l'area delle celle" e "forma delle celle".

Se l'area della cella ri-proiettata in una *slave* risulta meno della metà della superficie della cella dell'immagine *master*, la variazione tra le immagini, a causa le cambio di prospettiva o delle variazioni di scala, è considerato troppo grande e il punto non viene processato.

Tuttavia, in alcuni casi, anche se tra due immagini l'area non varia sensibilmente potrebbe intercorrere tra le immagini una deformazione prospettica eccessiva. In questo caso la "forma" della cella cambia in modo significativo. Per riconoscere questa situazione si considera l'inclinazione della cella del DSM retroproiettata sulle immagini. Se variazioni angolari tra la *template* e la *slave* candidata sono superiori al 40% l'immagine è respinta.

Infine, è importante trovare una serie di parametri approssimativi per la trasformazione affine tra il *template* e le *slave*.

Dopo aver selezionato le immagini *slave* come descritto in precedenza, la cella del DSM è individuata nelle differenti immagini. Queste informazioni possono essere utilizzate per calcolare i valori iniziali per i parametri di rotazione, affinità e scala per LSM, semplicemente utilizzando una trasformazione affine tra la ri-proiezione delle celle DSM nelle immagini *master* e *slave*.

Come mostrato in Balsavias, [1991] il significato dei parametri di modellazione nella trasformazione affine può essere valutato con le loro correlazioni. Infatti, elevate correlazioni tra i parametri del modello affine potrebbero indicare la loro non-determinabilità.

Le correlazioni tra parametri di modellazione simili (scala - taglio) e le correlazioni tra i parametri di forma nella stessa direzione hanno un'importanza essenziale. In questa fase due approcci possono essere utilizzati per valutare queste correlazioni: un approccio deterministico e uno statistico.

Nel primo caso tutti i parametri possono essere considerati come altamente correlati se il loro coefficiente di correlazione superano una soglia fissa. Questo significa che uno dei due parametri correlati può essere assunto come non significativo e quello con la varianza più grande dovrebbe essere escluso.

In molti casi l'uso di una soglia fissa per la definizione delle elevate correlazioni può essere una vera sfida e potrebbe portare a una cattiva soluzione. Qui, un approccio statistico diventa più adatto. In particolare, è possibile ipotizzare che i parametri abbiano una distribuzione normale multivariata.

Secondo questa ipotesi, e dopo aver fissato un livello di significatività per il test, la correlazione tra i parametri di forma può essere verificato utilizzando il test di Hotelling [Balsavias, 1991]. Se il test fallisce, non ci sono correlazioni, altrimenti tutti i parametri possono essere considerati statisticamente correlati. Un'ulteriore indagine deve essere effettuata per determinare quali coefficienti sono effettivamente correlati. Questo controllo può essere fatto con un test che impone l'ipotesi nulla $\rho = 0$. Come si può notare, nell'approccio statistico non è necessario imporre una soglia preventiva ma è necessario fissare solo il livello di significatività per il test. Pertanto, questa è la procedura di default nel nostro metodo.

5 - ESEMPI DI APPLICAZIONE DELL’ALGORITMO DI MATCHING DENSO

In questo capitolo vengono illustrati i risultati ottenuti dall’applicazione dei programmi presentati nei capitoli precedenti, vale a dire ATiPe (per l’orientamento) e MGCM (per la fase di restituzione), con blocchi fotografici ricavati da riprese aeree con un elicottero.

Come già espresso nell’introduzione l’ambito del quale è nata l’idea di sviluppare questa tesi è quella mostrare la possibilità di utilizzare particolari tecniche di ripresa aerea quali UAV o elicotteri in coppia con gli algoritmi automatici di ultima generazione e ricavare rappresentazioni 3D del terreno con precisioni tali da poter essere utilizzate per finalità fotogrammetriche.

Di seguito vengono presentate due applicazioni della procedura sviluppata in modo tale da ricavare una nuvola densa di punti, successivamente triangolata e texturizzata, a rappresentazione di due tratti di fiume da analizzare.

La prima applicazione riguarda la ricostruzione densa della superficie di un tratto di fiume nei pressi di Cuneo, la seconda un tratto del fiume Olona nei pressi di Rho (Milano). Per il primo caso di studio viene inoltre presentato un confronto, per verificare le differenze in termini di precisione e affidabilità, fra il metodo geometricamente vincolato sviluppato (MGCM) ed un metodo non condizionato (LSM) e tra la rilevazione manuale dei punti e quella automatica (ATiPe) al fine dell’orientamento dei fotogrammi.

Per la ripresa delle immagini in entrambi i casi si è fatto ricorso sempre allo stesso elicottero con la stessa piattaforma di presa e le stesse fotocamere. Per questa ragione si è proceduto a una fase di calibrazione comune a entrambi gli esempi.

I parametri di orientamento interno della camera, ottenuti a seguito del procedimento di autocalibrazione, sono riportati nella seguente tabella (Tabella 5.1):

	Parametri Calibrazione
c(mm)	15,0150
ζ (mm)	6,1203
η (mm)	5,1245
k_1	$2,673 \times 10^{-4}$
k_2	$-1,773 \times 10^{-6}$
k_3	$-1,394 \times 10^{-8}$
p_1	$-3,275 \times 10^{-5}$
p_2	$-8,238 \times 10^{-4}$

Tabella 5.1 – Parametri di calibrazione della camera utilizzata

Le dimensioni stimate del pixel risultano 96x96 dpi con un formato immagine pari a 2448x2050 pixel.

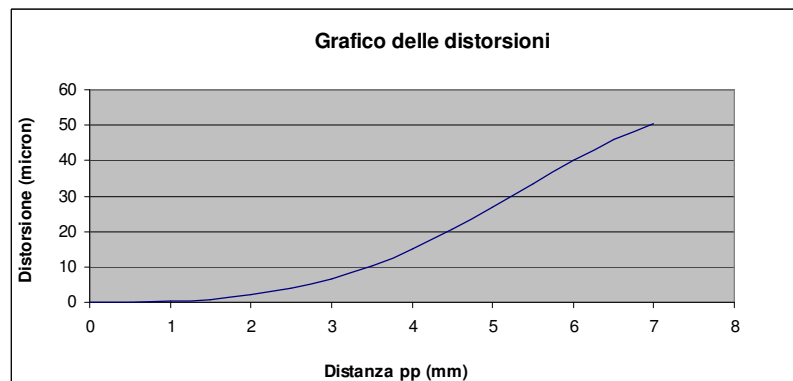


Figura 5.1 – grafico distorsione

Dalla curva di distorsione radiale (*Figura 5.1*) ottenuta con i parametri di calibrazione calcolati è possibile osservare che i valori di distorsione massima a bordo immagine sono pari a 50 μm . Gli effetti di distorsione radiale non sono trascurabili. Si è deciso quindi di operare una correzione della distorsione sulle immagini originali generando delle immagini “distortion-free” che saranno utilizzate dagli algoritmi.

5.1 Fiumetto

La prima prova eseguita riguarda la ricostruzione densa di un tratto di fiume che scorre nella campagna piemontese nei pressi di Cuneo.

La ricostruzione della superficie è stata eseguita utilizzando un set di 19 immagini in sequenza derivate da una ripresa aerea da elicottero. (*Figura 5.2 - Allegato 1*).



Figura 5.2 – Prima immagine del set utilizzato nell’esempio 1

Inizialmente l’orientamento delle immagini è stato determinato mediante la misura manuale di 64 punti di legame utilizzando il software commerciale PhotoModeler 6. I parametri di orientamento esterno, le coordinate dei centri di presa e gli angoli ω, φ e κ , sono riassunti in *Tabella 5.2*, mentre la posizione di presa dei fotogrammi e dei punti di legame del blocco è rappresentata in *Figura 5.3*.

Fotogramma	X_0 (m)	Y_0 (m)	Z_0 (m)	ω (rad)	φ (rad)	κ (rad)
1	1,33	-47,93	25,07	33,97	-0,429	2,342
2	0,654	-34,83	25,08	34,06	0,308	2,915
3	0,047	-21,84	23,32	34,09	0,640	4,195
4	-0,893	-8,664	25,31	34,09	1,190	5,190
5	-1,763	4,776	25,65	33,99	1,748	5,228
6	-2,457	18,16	25,90	34,08	1,977	4,835
7	-3,402	31,56	26,08	34,29	2,125	4,552
8	-4,752	45,28	26,22	34,62	1,832	4,958
9	-5,759	58,59	26,31	34,98	1,689	5,421
10	-7,028	71,82	26,17	34,87	2,130	5,538
11	-8,426	85,01	26,23	34,45	2,750	5,598
12	-9,976	98,44	26,18	34,67	3,097	6,027
13	-11,14	111,8	26,12	35,07	3,108	6,807
14	-12,51	125,1	25,93	35,08	2,757	7,915
15	-13,86	138,4	25,74	35,44	2,752	8,999
16	-15,58	151,7	25,88	35,88	2,624	10,12
17	-17,73	164,9	25,81	36,05	2,733	11,19
18	-20,06	177,9	25,88	36,07	3,200	12,22
19	-22,82	190,9	25,89	36,39	4,260	13,13

Tabella 5.2 – Parametri di orientamento esterno ottenuti con Photomodeler 6

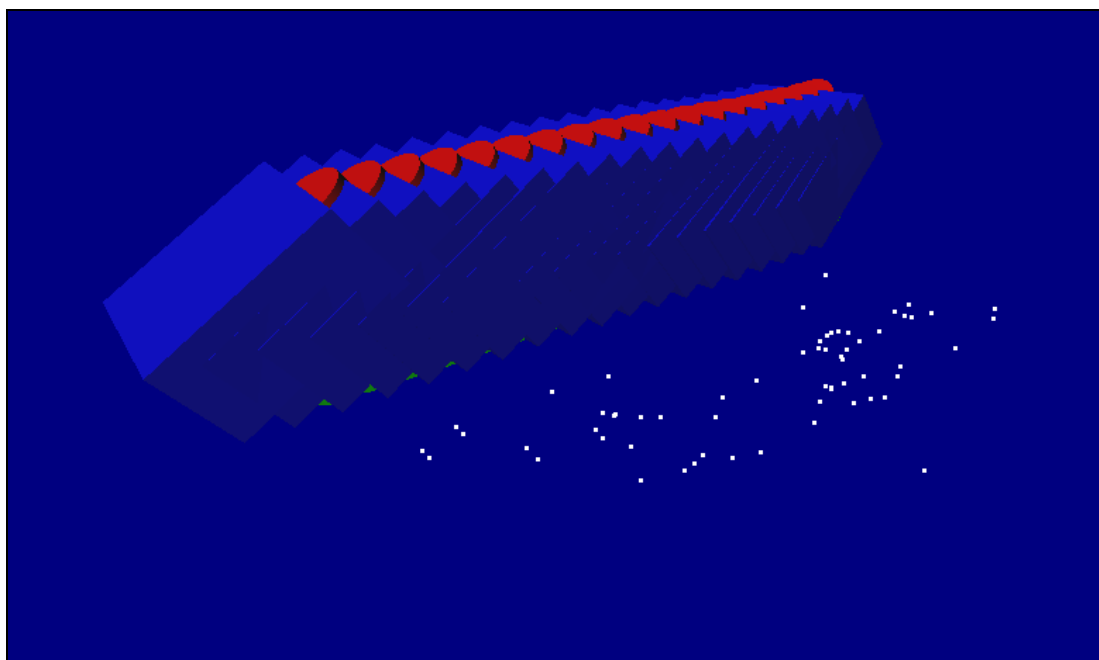


Figura 5.3 – Posizioni di presa e punti di legame del blocco realizzato per il provino in cls

Tali parametri di orientamento esterno e di orientamento interno sono stati utilizzati per effettuare il matching denso utilizzando la procedura “create dense surface” di PhotoModeler 6 che si basa sull’algoritmo Least Squares Matching (LSM).

Essendo LSM un metodo che lavora a coppie d’immagini, sono state processate tutte le possibili coppie ottenendo complessivamente una nuvola di punti costituita da 12517664 punti, riportata in Figura 5.4.

Già a occhio sono visibili numerosi errori grossolani in quanto la superficie reale dovrebbe essere pressoché pianeggiante. Tali errori sono dovuti principalmente alla scarsa tessitura della superficie in quanto nella parte sinistra dei fotogrammi vi era un campo innevato in cui l’identificazione automatica di punti omologhi è particolarmente difficile.

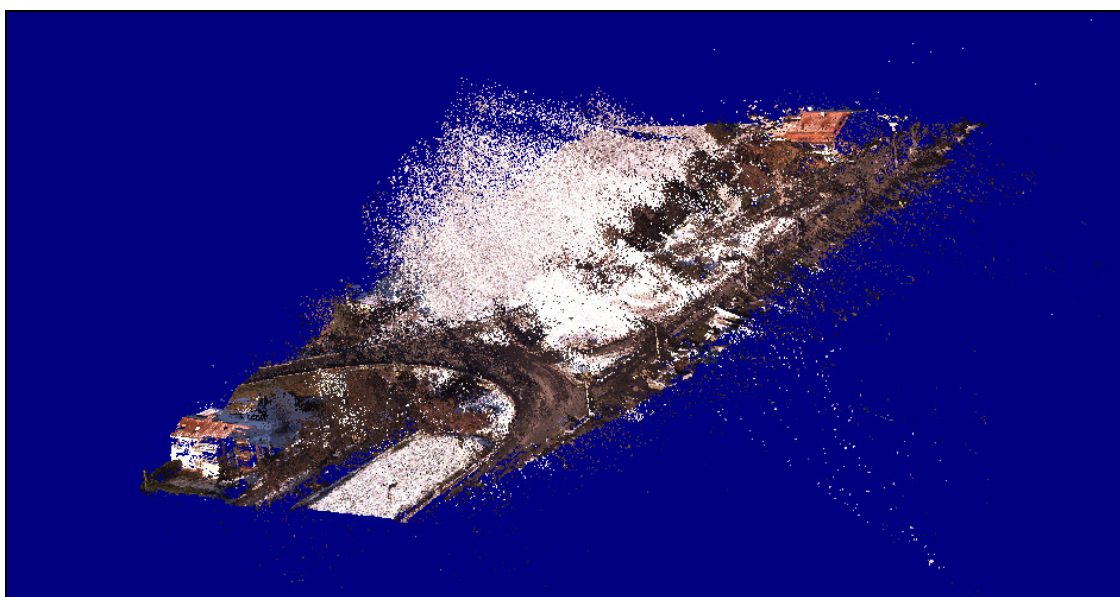


Figura 5.4 – Nuvola di punti ottenuta con LSM

Quindi importata in Geomagic Studio 10 si è proceduto alla triangolazione della nuvola e il risultato è riportato in Figura 5.5.

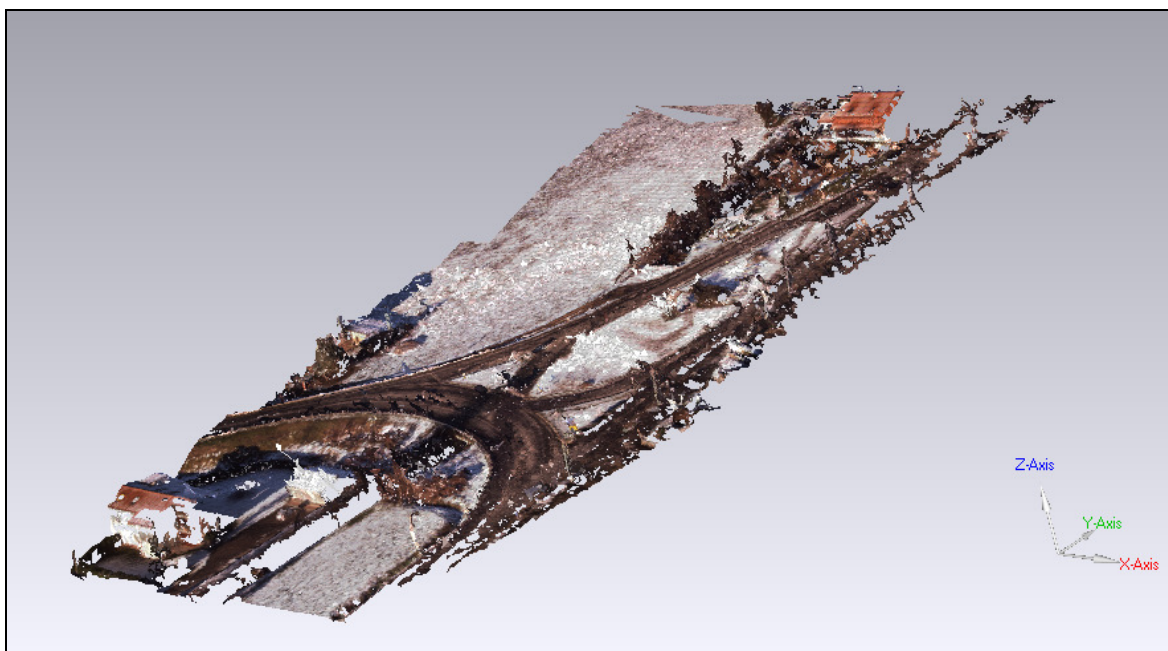


Figura 5.5 – Triangolazione della nuvola di punti ottenuta con il LSM

Successivamente, si è proceduto a rianalizzare il progetto da un punto di vista automatico. Applicando ATiPE [Barazzetti 2010], presentato esaustivamente nel capitolo 2, si è determinato l’orientamento dei fotogrammi, con i seguenti risultati:

Fotogramma	X_0 (m)	Y_0 (m)	Z_0 (m)	ω (rad)	ϕ (rad)	κ (rad)
1	-1,998	-33,59	-12,68	35,40	1,325	-0,474
2	-3,556	-19,12	-13,43	36,58	0,324	-0,682
3	-4,351	-11,70	-13,72	37,38	0,669	0,008
4	-5,193	-4,181	-13,92	38,68	1,355	1,087
5	-6,77	10,76	-14,26	40,06	1,394	1,149
6	-8,462	25,70	-14,56	39,82	3,298	1,250
7	-9,952	40,58	-14,73	39,81	2,641	2,738
8	-11,59	55,64	-14,99	39,26	3,168	2,369
9	-13,14	70,84	-15,25	40,24	1,472	0,685
10	-14,92	86,13	-15,63	40,73	3,186	1,626
11	-16,52	101,4	-15,90	40,72	2,476	1,830
12	-18,34	116,8	-16,28	40,55	3,964	2,617
13	-19,86	132,5	-16,64	40,90	1,717	1,832
14	-21,85	148,5	-16,94	41,07	2,322	2,473
15	-23,97	164,7	-17,13	41,85	0,701	1,844
16	-26,79	181,1	-17,18	41,70	2,730	2,145
17	-29,73	197,5	-17,04	42,21	4,499	1,416
18	-32,49	214,3	-16,58	43,51	4,346	3,295
19	-35,26	231,1	-15,83	45,73	5,173	2,992

Tabella 5.3 – Parametri di orientamento esterno ottenuti con ATiPe

I parametri di orientamento esterno e interno sono stati utilizzati dal software di matching denso MGCM implementato e presentato nel capitolo 4 [Previtali 2010].

Per la generazione del DTM approssimato (Figura 5.6) si sono utilizzate le coordinate dei punti terreno ottenute dall’algoritmo PMVS (Patch Multi-View Stereopsis) [Furukawa 2008].

PMVS consente di generare un set (quasi) denso di *patch* rettangolari che ricoprono la superficie visibile nelle immagini in input. A partire dai punti ottenuti con PMVS è stato possibile generare un DTM mediante il software commerciale Surfer.

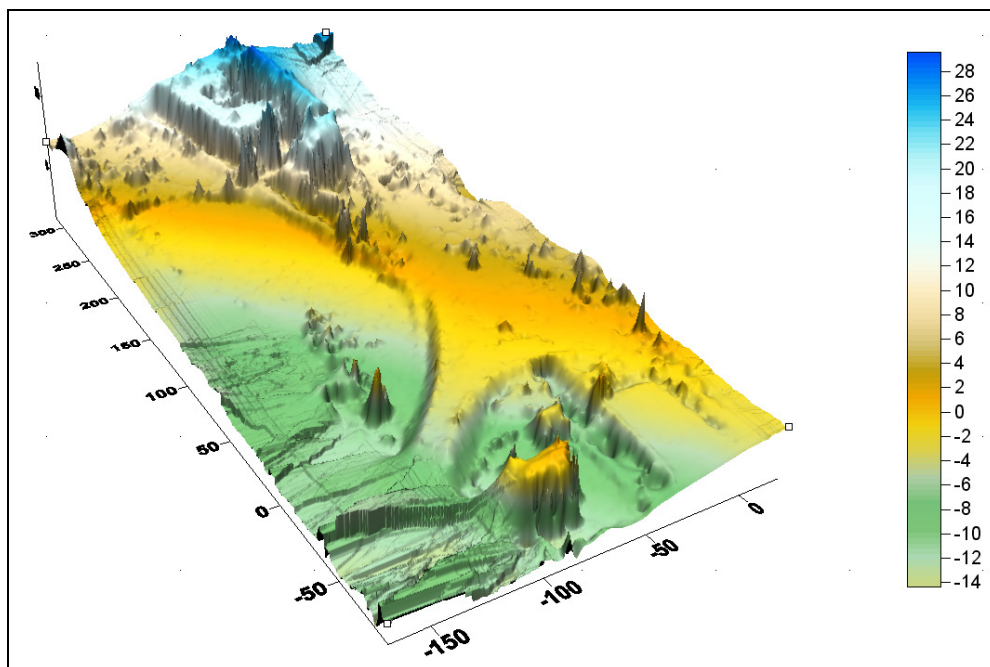


Figura 5.6 – DTM Approssimato

Gli altri parametri utilizzati dall’algoritmo MGCM sono sintetizzati in *Tabella 5.4*.

Dimensione finestra di matching	10 x 10 pixel
n° punti da considerare sull’epipolare	5
Passo dei punti sull’epipolare	0,8 m
n° massimo delle iterazione per punto	20
Distanza media tra punti sul DTM approssimato	5 cm

Tabella 5.4 – Parametri in input per l’algoritmo MGCM

Una volta forniti tali parametri in input è stata lanciata l’esecuzione dell’algoritmo MGCM. La nuvola di punti generata dal programma MGCM, costituita da 922096 punti, è riportata in *Figura 5.7*.

Come si può osservare da un’analisi visiva dei risultati, la superficie è stata ricostruita in modo sostanzialmente corretto, è stata effettivamente descritta dalla nuvola come pressoché piana, mentre il numero di errori grossolani è molto limitato.

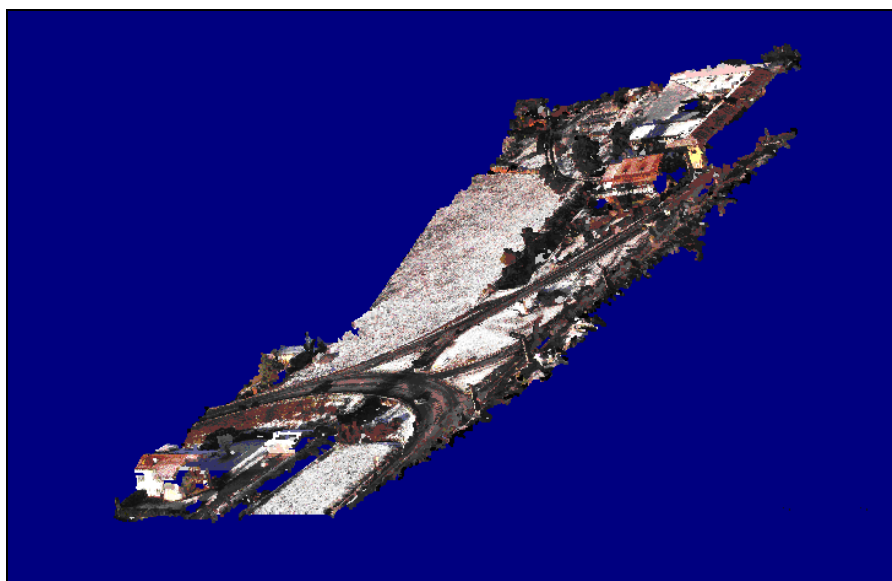


Figura 5.7 – Nuvola di punti ottenuta con MGCM

La nuvola di punti così ottenuta è stata quindi triangolata mediante una triangolazione di Delaunay (Figura 5.8).

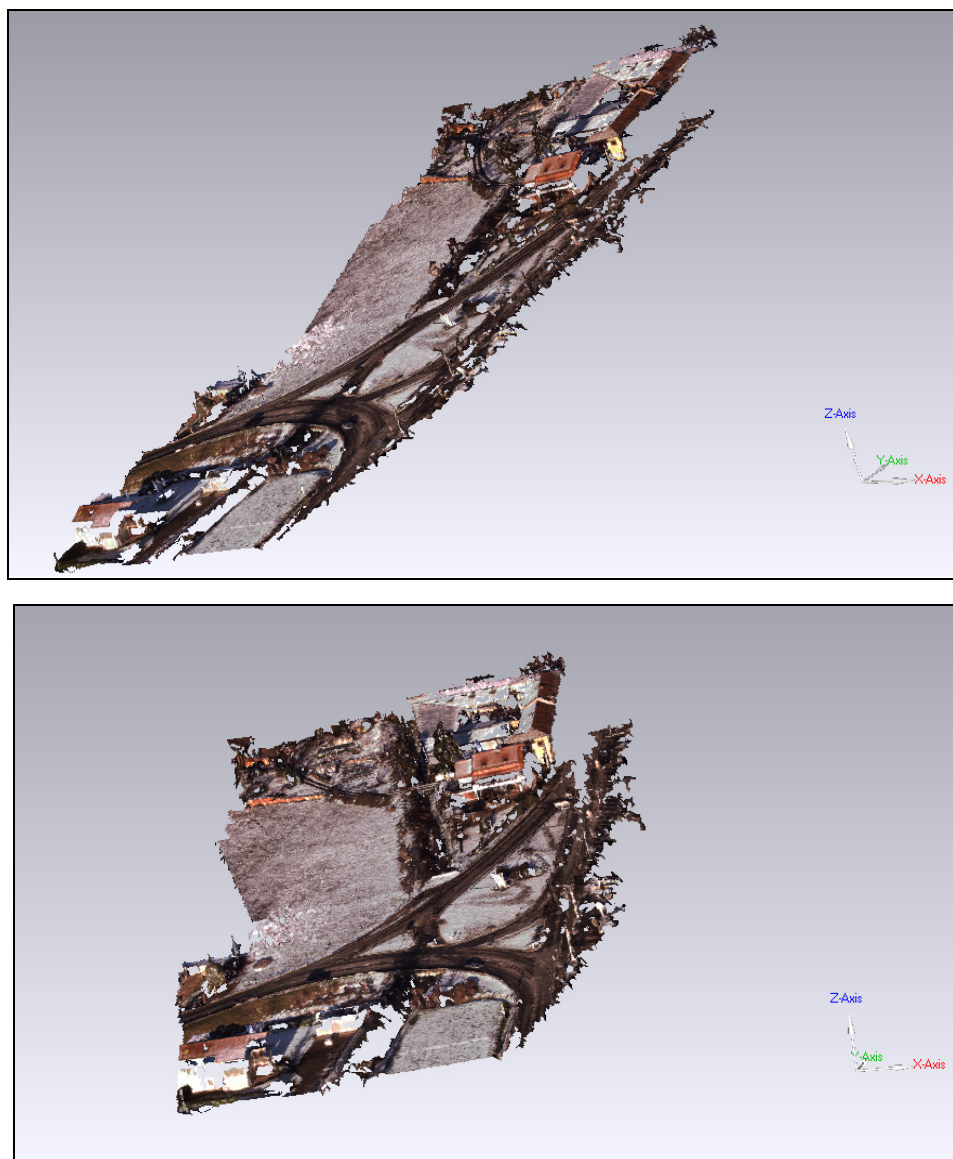


Figure 5.8 – Triangolazione della nuvola di punti ottenuta con il MGCM

Confrontando i risultati dei due metodi presentati nel paragrafo, possiamo notare che quelli ottenuti con la ricostruzione della superficie tramite LSM sono piuttosto scadenti (Figura 5.4). Come è possibile osservare il numero di errori grossolani è molto maggiore rispetto alla ricostruzione eseguita con MGCM e in generale si può notare come non venga ricostruita in modo corretto la superficie. Si può infatti osservare nella ricostruzione con LSM un andamento del terreno non riscontrabile nella realtà. Questo è dovuto alla scarsa precisione di misura delle coordinate terreno dei vari punti analizzati che non consente nel complesso una corretta ricostruzione della superficie del provino nel suo insieme.

Andando a confrontare in dettaglio le due ricostruzioni, le differenze tra i due modelli della superficie sono ancora più evidenti, la migliore rappresentazione della superficie data dall’algoritmo MGCM rispetto al semplice LSM risulta chiara.

I risultati di questa prima prova a cui l’algoritmo MGCM è stato sottoposto sono da considerarsi soddisfacenti. Infine il confronto con il LSM ha messo in rilievo le migliori prestazioni che la

tecnica MGCM è in grado di fornire grazie ai vincoli geometrici di collinearità nell’individuazione delle coordinate terreno di un punto.

Per maggiore completezza, oltre a triangolare la nuvola di punti è stata operata anche un’interpolazione della nuvola stessa con il software commerciale Surfer in modo tale da ottenere una descrizione del terreno mediante una superficie continua (Figura 5.9).

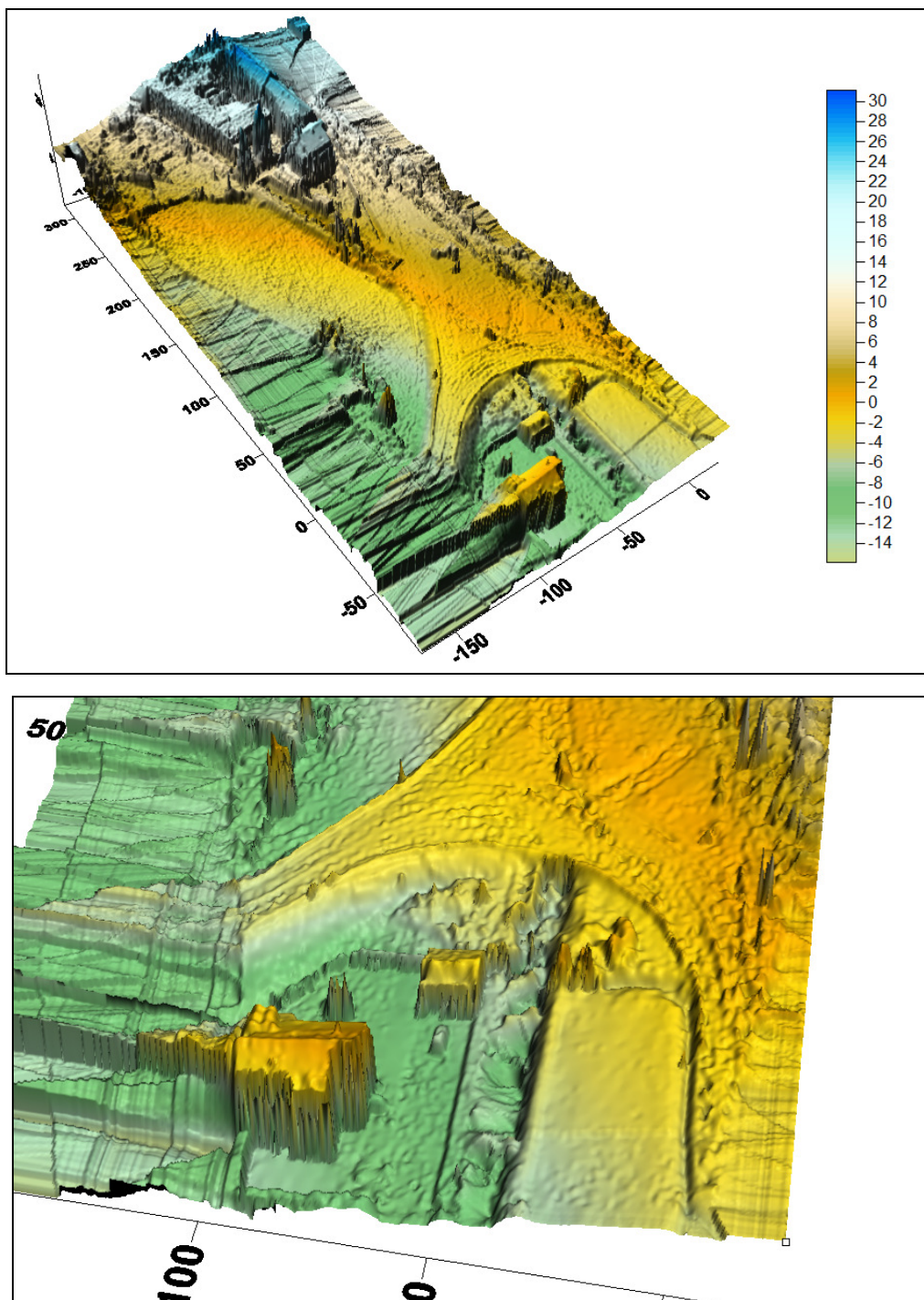


Figura 5.9 – Superficie interpolata ottenuta con Surfer

Da questa immagine si può notare il miglioramento della descrizione del terreno rispetto al primo DTM approssimato. Numerosi particolari sono ora visibili, come la macchina nel cortile. In conclusione i risultati di questa prima prova a cui l’algoritmo MGCM è stato sottoposto sono da considerarsi soddisfacenti. Infine il confronto con il LSM ha messo in rilievo le migliori

prestazioni che la tecnica MGCM è in grado di fornire grazie ai vincoli geometrici di collinearità nell’individuazione delle coordinate terreno di un punto.

5.2 Tratto di fiume Olona

La seconda prova a cui l’algoritmo di MGCM è stato sottoposto riguarda la ricostruzione densa di un tratto dell’alveo del fiume Olona nei pressi di Rho in provincia di Milano. Per la ricostruzione di questo tratto, a differenza di quanto fatto nel caso precedente, si è operato solo con MGCM sfruttando un set di 16 immagini (*Figura 5.10 – Allegato 2*).



Figura 5.10 – Prima immagine del set utilizzato nell’esempio 2

L’orientamento delle immagini è stato determinato mediante l’estrazione automatica di 2023 punti di legame tramite il programma ATiPE [Barazzetti 2010]. I parametri di orientamento esterno, le coordinate dei centri di presa e gli angoli ω, φ e κ , dei vari fotogrammi sono riassunti in *Tabella 5.6*, mentre la posizione di presa dei fotogrammi e dei punti di legame del blocco è rappresentata in *Figura 5.11*.

Fotogramma	X_0 (m)	Y_0 (m)	Z_0 (m)	ω (rad)	φ (rad)	κ (rad)
1	-16,57	-34,89	42,31	37,11	-6,609	-0,848
2	-16,32	-33,51	42,06	44,86	-5,057	0,079
3	-16,52	-21,23	42,70	37,32	-6,646	-1,992
4	-15,78	-20,33	42,58	45,38	-4,702	-1,220
5	-15,88	-7,808	43,33	38,79	-5,716	-1,442
6	-15,54	-6,250	43,39	46,31	-4,131	-0,719
7	-15,90	6,542	44,29	38,47	-5,667	-0,675
8	-15,26	7,622	43,86	46,86	-3,717	0,071
9	-15,12	20,68	44,62	39,48	-6,795	-1,173
10	-14,70	22,09	44,76	47,06	-5,078	-0,217
11	-15,16	35,73	45,85	40,23	-6,147	-0,637
12	-14,98	37,00	45,71	48,00	-4,577	0,446
13	-15,95	51,13	46,66	40,80	-5,700	-0,083
14	-15,86	52,65	46,61	48,42	-4,161	0,819
15	-16,85	66,76	48,13	42,16	-4,011	0,376
16	-16,23	68,00	47,42	50,36	-2,011	1,018

Tabella 5.6 – Parametri di orientamento esterno ottenuti con ATiPe

Tali parametri di orientamento esterno e di orientamento interno sono stati utilizzati dal software di matching denso MGCM.

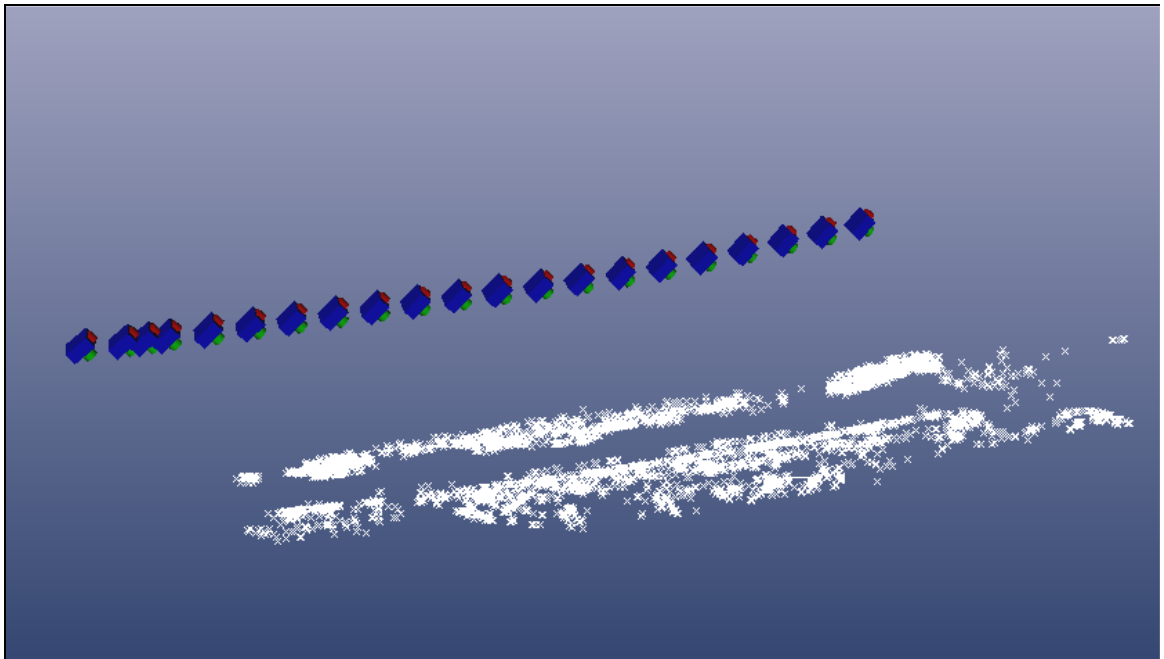


Figura 5.11 – Posizioni di presa e punti di legame del blocco fotogrammetrico

Per la generazione del DTM si è proceduto come nell’esempio precedente utilizzando il software commerciale Surfer e come input le coordinate dei punti terreno ottenute dall’algoritmo PMVS.

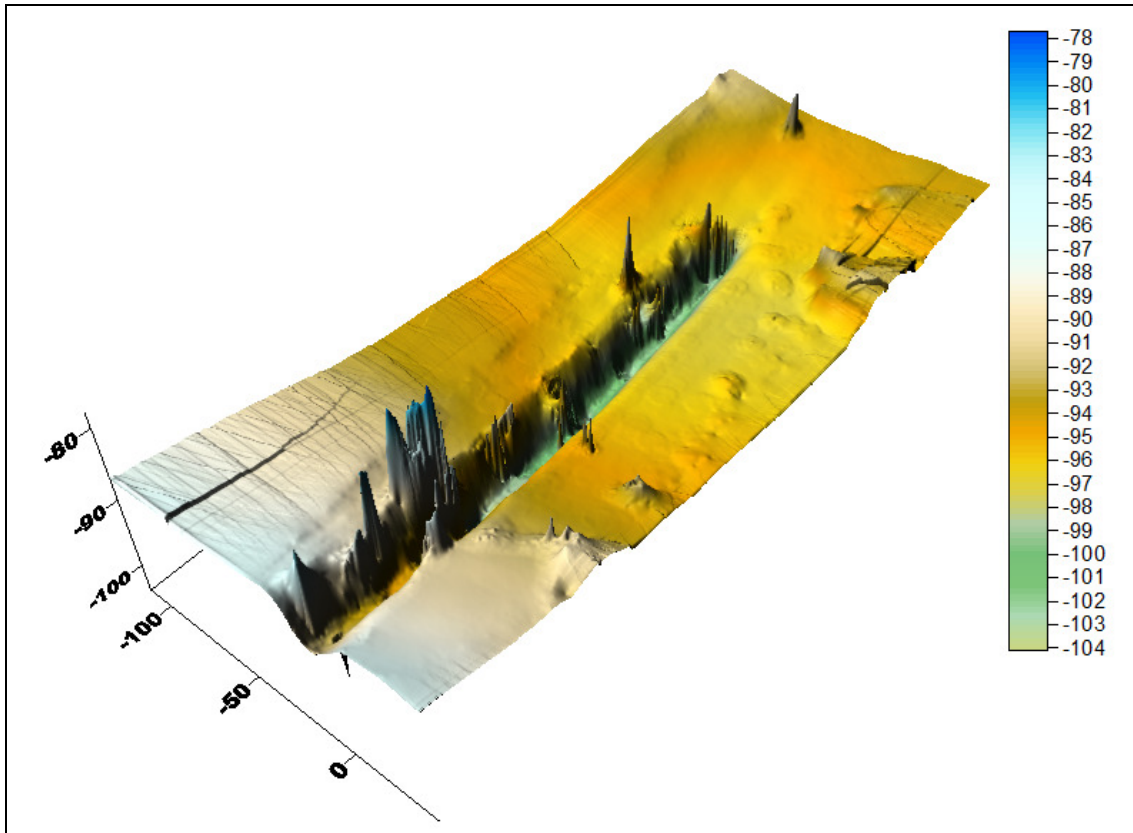


Figura 5.12 – DTM Approssimato

Mediante MGCM sono state individuate le coordinate 3D dei rispettivi punti terreno, ottenendo in tal modo una nuvola di punti densa del terreno.

Altri parametri utilizzati dall’algoritmo di matching denso sono sintetizzati in *Tabella 5.7*.

Dimensione finestra di matching	10 x 10 pixel
n° punti da considerare sull’epipolare	5
Passo dei punti sull’epipolare	0,5 m
n° massimo delle iterazione per punto	20

Tabella 5.7 – Parametri in input per l’algoritmo MGCM

La nuvola di punti, costituita da 5128632 punti, generata dal programma MGCM e riportata in *Figura 5.13*. Come si può osservare in *Figura 5.13* il terreno è stato ricostruito in modo sostanzialmente corretto. Il numero di errori grossolani è pressoché nullo grazie soprattutto alle caratteristiche peculiari dell’algoritmo MGCM, che consentono da un lato di utilizzare una tecnica multi-immagine, permettendo così di sfruttare simultaneamente le informazioni provenienti da più immagini, e dall’altro di utilizzare il vincolo di collinearità.

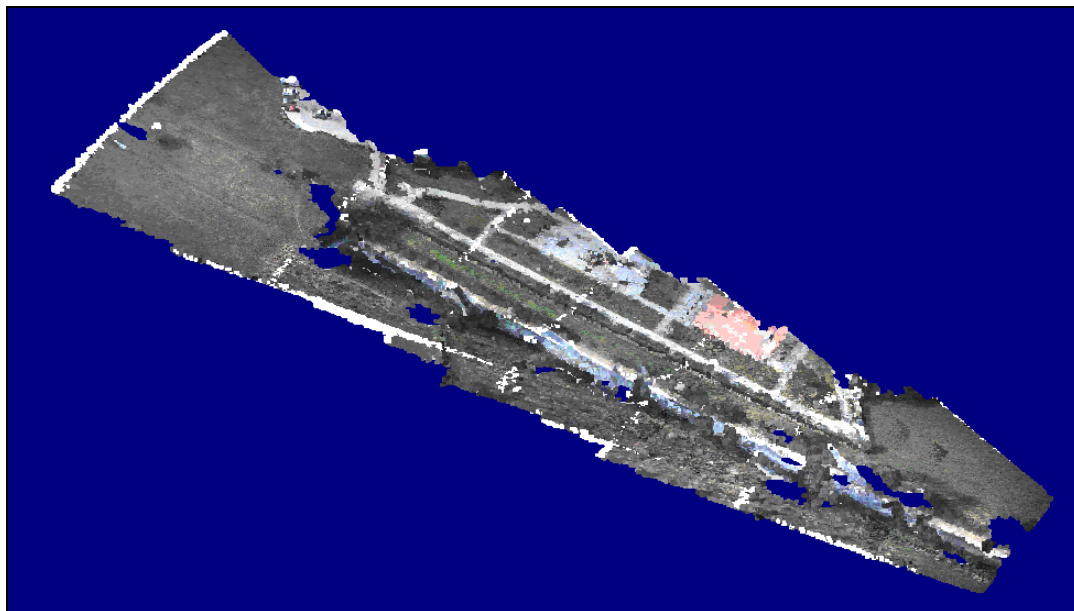


Figura 5.13 – Nuvola di punti che descrive la superficie

La nuvola di punti così ottenuta è stata quindi triangolata mediante una triangolazione di Delaunay (*Figure 5.14-5.15*).

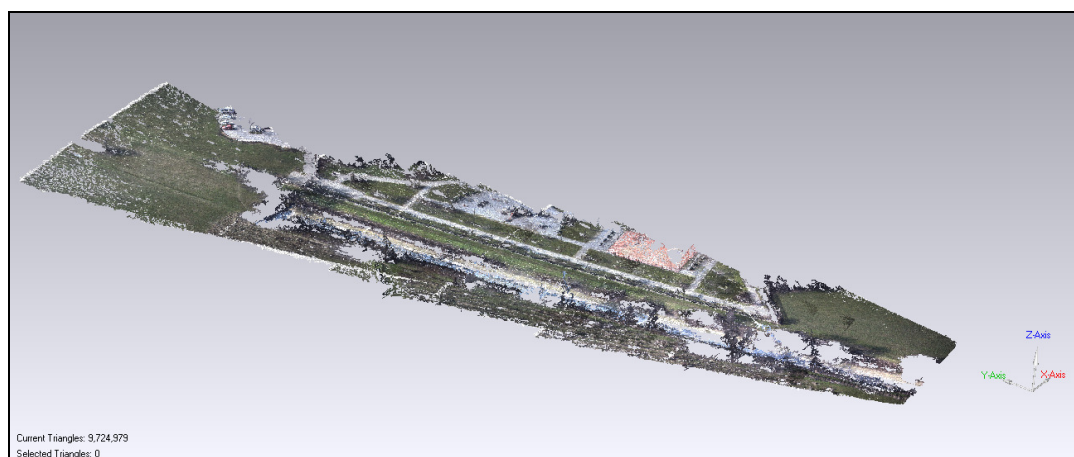


Figura 5.14 – Triangolazione della nuvola di punti

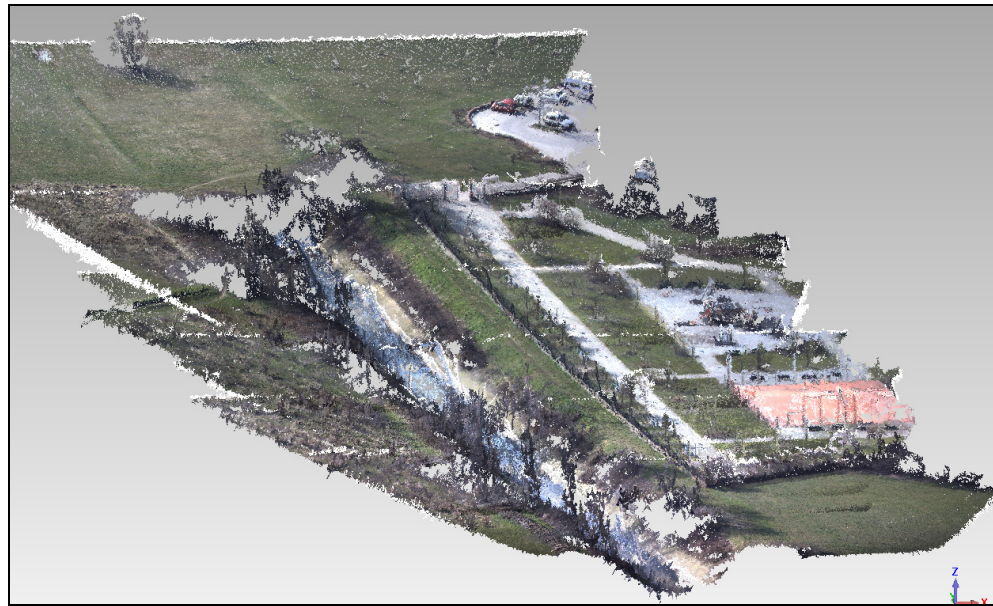


Figura 5.15 – Particolare della triangolazione della nuvola di punti

Oltre a triangolare la nuvola di punti è stata operata anche un’interpolazione della nuvola stessa con il software commerciale Surfer in modo tale da ottenere una descrizione del terreno mediante una superficie continua (Figura 5.16).

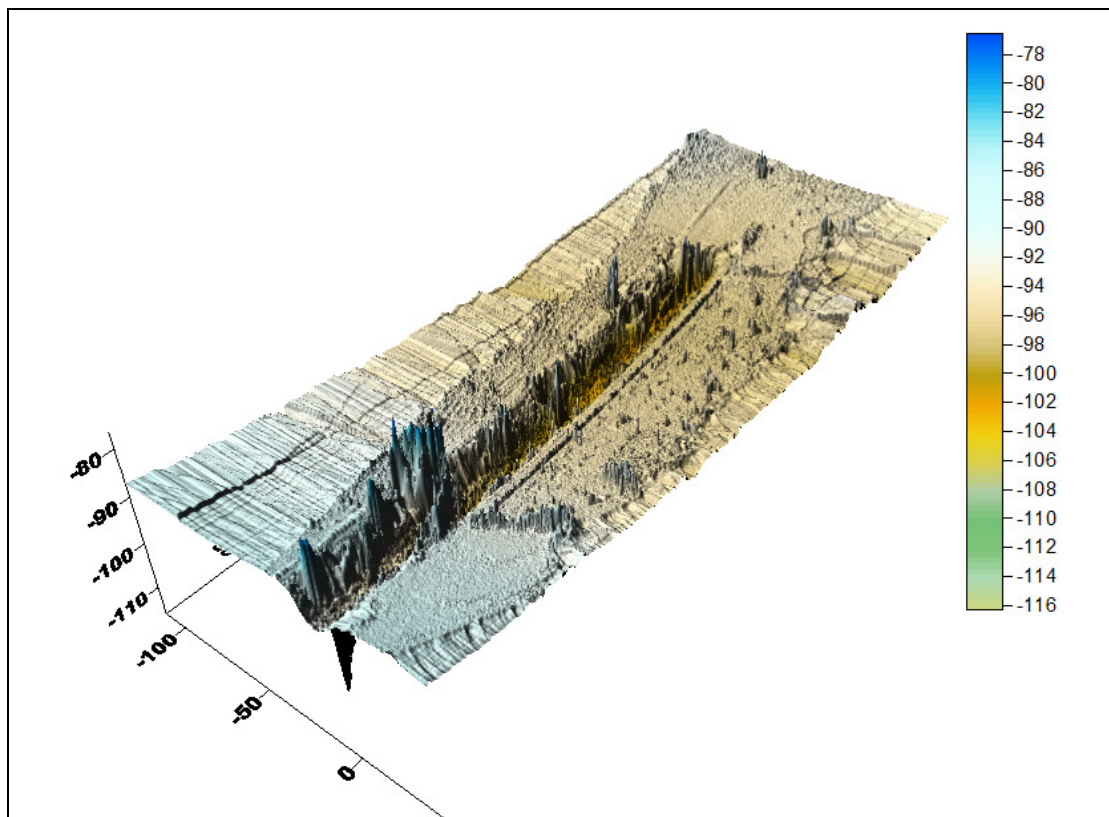


Figura 5.16 – Superficie interpolata del bassorilievo ottenuta con Surfer

Come osservato in precedenza i punti utilizzati per la ricostruzione del terreno sono stati ottenuti ri-proiettando i nodi del DTM approssimato sull’immagine *template*. In questo caso, quindi, le coordinate dei nodi del DTM approssimato vengono corrette dall’algoritmo MGCM. Per quantificare le correzioni apportate dall’algoritmo MGCM è quindi possibile eseguire una

differenza tra la superficie interpolata ottenuta a partire dai punti restituiti da MGCM ed il DTM approssimato originale (Figura 5.17).

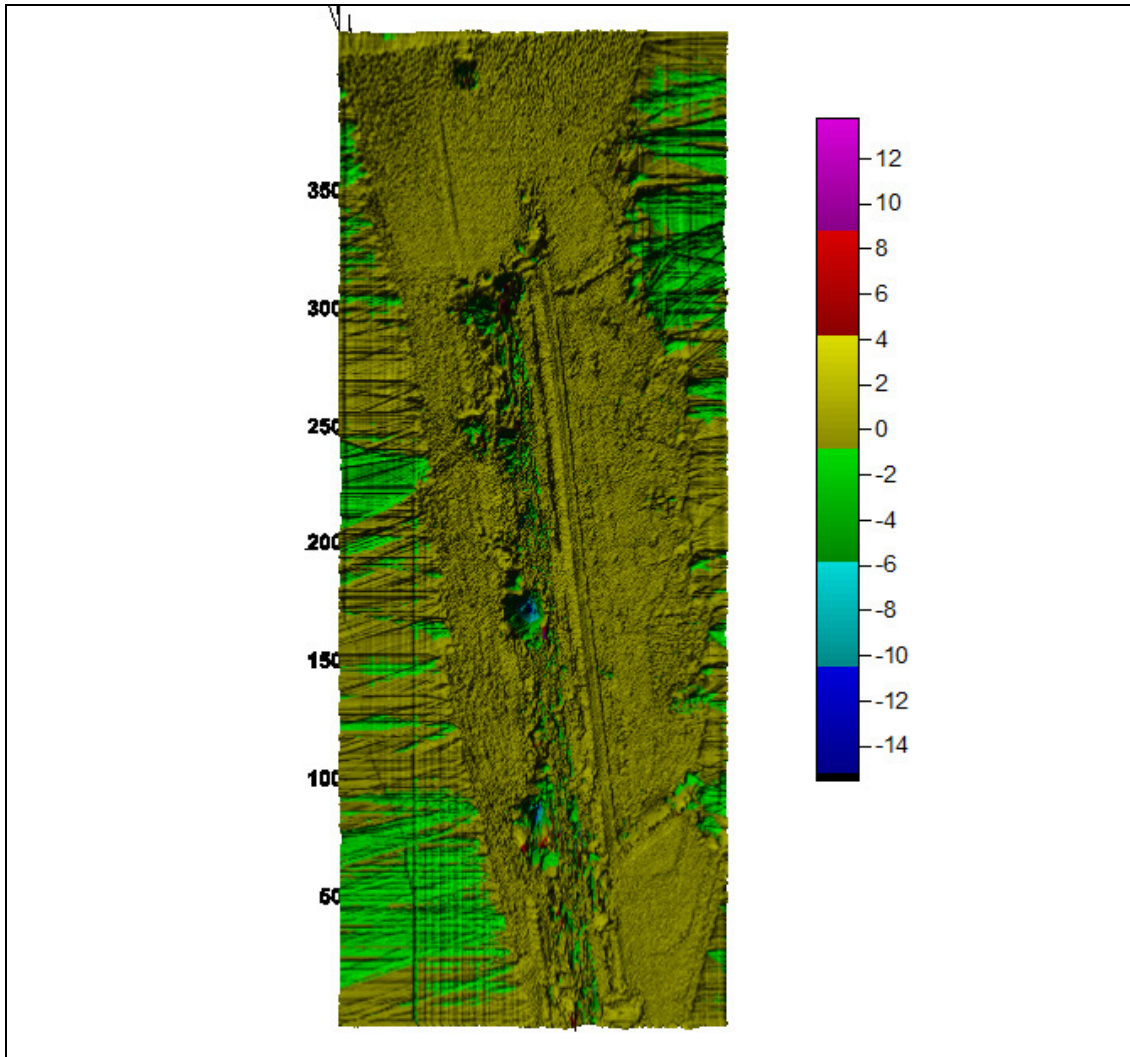


Figura 5.17 – Correzioni apportate da MGCM al DTM approssimato

Come è possibile osservare le correzioni apportate da MGCM pur non essendo nulle sono tuttavia molto limitate a pochi millimetri, soprattutto in corrispondenza delle discontinuità del bassorilievo. Questo è un risultato atteso, infatti il DTM approssimato di partenza utilizzato in questo caso era già di per sé molto buono in quanto ottenuto a partire da punti estratti con PMVS, che risulta essere un algoritmo molto efficace per la ricostruzione di oggetti di dimensioni ridotte.

CONCLUSIONI

Oggetto della presente tesi è stata la sperimentazione di tecniche di automazione in fotogrammetria aerea per la generazione di modelli tridimensionali della superficie di un tratto di terreno ripreso da un blocco d'immagini. L'applicazione finale di questo progetto è quella della modellazione geometrica di tratti di fiume per poter fornire ai tecnici un supporto geometrico per le loro analisi.

La motivazione per l'impiego in questo ambito è nata da una collaborazione con La Regione Lombardia in un ampio progetto di monitoraggio dei corsi d'acqua regionali utilizzando tecniche di fotogrammetria aerea non tradizionali, con fotocamere inclinate e quote relativamente basse, per le quali non risultano applicabili le normali tecniche di fotogrammetria aerea.

Questa tecnica, già applicata con buoni risultati in fotogrammetria close-range per la generazione di modelli numerici della superficie di oggetti, presenta numerosi vantaggi anche applicata a tecniche fotogrammetriche aeree per la modellazione tridimensionale, quali la versatilità, l'economicità e l'impiego d'immagini che costituiscono una ricchissima fonte di informazioni.

In particolar modo il lavoro condotto ha riguardato l'implementazione di un algoritmo di correlazione d'immagini, il *Multiphoto Geometrically Constrained Matching* (MGCM) accoppiato a un algoritmo di orientamento automatico, l'*Automatic Tie Point Extraction* (ATiPE).

I risultati ottenuti da tale applicazione nei casi in esempio, sono stati soddisfacenti e presentano numerose possibilità di miglioramento, date dal continuo aggiornamento degli algoritmi sul mercato, oltre che dall'aumento della qualità delle immagini ottenibile con le nuove fotocamere in commercio.

E' importante notare che questa applicazione può essere estesa a numerose altre tipologie di rilevazioni aeree, dai rilievi archeologici alle ricostruzioni architettoniche. Possono inoltre essere impiegati differenti piattaforme aeree, quali gli UAV, con i vantaggi a essi legati.

BIBLIOGRAFIA

[Abdulla, Q.A. 2004] Q.A. Abdulla. Photogrammetric platforms, In: Manual of Photogrammetry, Ed.: McGlone, J.C., American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, Maryland, USA, 677-730

[Barazzetti 2010] L. Barazzetti, M. Scaioni. Automatic Tie Point Extraction from Markerless Image Blocks in Close-range Photogrammetry, Lecco, 155 pag

[Barazzetti 2010] L. Barazzetti, M. Scaioni, F. Remondino. *Orientation and 3d modelling from markerless terrestrial images: combining accuracy with automation*. The Photogrammetric Record, 25(132)

[Barazzetti 2010] L. Barazzetti, M. Scaioni. Development and implementation of imagebased algorithms for measurement of deformations in material testing. *Sensors*: 7469- 7495.

[Barazzetti 2010] L. Barazzetti. A trip to Rome: physical replicas of historical objects created in a fully automated way from photos. *Proceedings of HCITOCH. Lecture Notes in Computer Science*, 6529: 63-72.

[Barazzetti 2009] L. Barazzetti, M. Scaioni. Automatic orientation of image sequences for 3D object reconstruction: first results of a method integrating photogrammetric and computer vision techniques. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38-5/W1, July 3-11, Trento, Italy, on CDROM.

[Baltsavias 1991] E.P. Baltsavias. *Multiphoto geometrically constrained matching*. Ph.D. thesis No. 9561, Mitteilungen Nr. 49, Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zurich, Switzerland. 221 pag.

[Brown 1971] D. Brown. *Close-range camera calibration*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 37(8), pp 855-866,1971

[Eisenbeiss 2009] H. Eisenbeiss. UAV Photogrammetry, A dissertation submitted to ETH ZURICH, 237 pag.

[Eisenbeiss 2008] H. Eisenbeiss. The autonomous mini helicopter: a powerful platform for mobile mapping. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37, Part B1: 977-983.

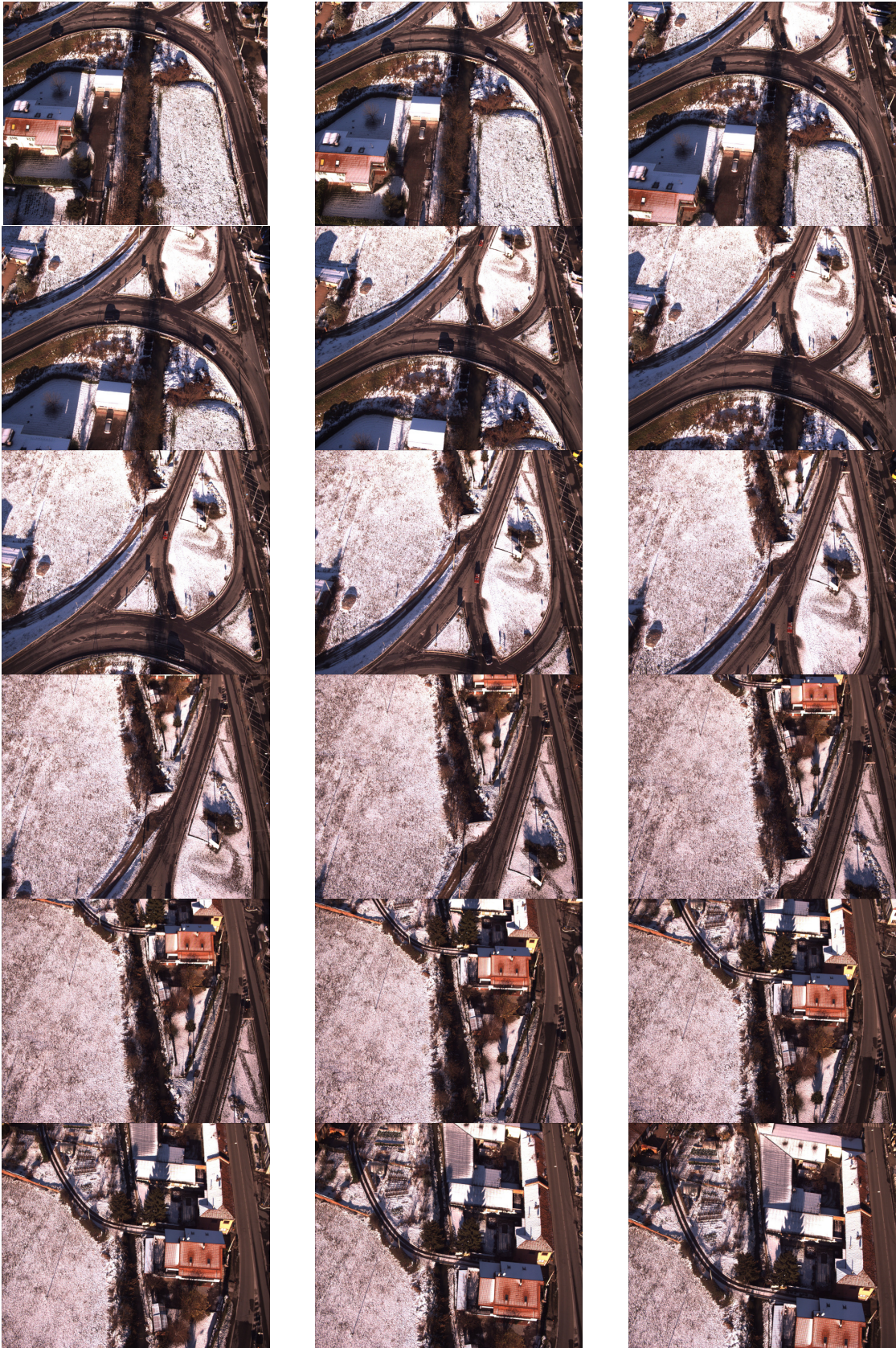
[Eisenbeiss 2007] H. Eisenbeiss. Applications of photogrammetric processing using an autonomous model helicopter. *Revue Francaise de Photogrammetrie et de Teledetection*. Symposium ISPRS Commission Technique I "Des capteurs a l'Imagerie", n°185 (2007-1), Saint-Mande Cedex, France. 6 pages.

[Eisenbeiss 2004] H. Eisenbeiss. A mini unmanned aerial vehicle (UAV): system overview and image acquisition. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36, Part 5/W1. 6 pages.

[Furukawa 2008] Y. Furukawa, J. Ponce. *Accurate, Dense, and Robust Multi-View Stereopsis*. Technical Report CVR, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2008

- [Grün 1985] A. Grün. *Adaptive least square correlation – a powerful image matching technique*. South African Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Cartography, Vol. 14(3), pp 175-187, 1985
- [Grün 1988] A. Grün and E.P. Baltsavias. *Geometrically Constrained Multiphoto Matching*. PERS, vol. 54, no 5, pp. 663-671, 1988
- [Jazayeri e Fraser 2010] I. Jazayeri, C.S. Fraser. Interest operators for feature-based matching in close range photogrammetry. *Photogrammetric Record*, 25(129): 24-41.
- [Jazayeri e Fraser 2010] I. Jazayeri, C.S. Fraser, S. Cronk. Automated 3D object reconstruction via multi-image close-range photogrammetry. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38, Part 5. 6 pages.
- [Martin 1995] J. Martin, J.L. Crowley. *Experimental comparison of correlation techniques*. In Proc: International Conf. on Intelligence Autonomous Systems
- [Piano dei Lavori 2010] Sperimentazione per la definizione di un modello informatico per l'analisi territoriale sui bacini idrici Olona, Seveso, Lambro e Mella tramite mappe interattive, pag.170
- [Previtali 2010] M. Previtali, M. Scaioni. Implementazione e sperimentazione di una tecnica di correlazione multi-immagine per la ricostruzione di superfici, Lecco, 108 pag.
- [Remondino 2006] F. Remondino. Detectors and descriptors for photogrammetric applications. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(3): 49-54.
- [Remondino 2006] F. Remondino, S. El-Hakim. Image-based 3D modelling: a review. *Photogrammetric Record*, 21(115): 269-291.
- [Remondino 2006] F. Remondino, L. Zhang. Surface reconstruction algorithms for detailed close-range object modeling. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(3): 117-123.
- [Rosten e Drummond 2006] E. Rosten, T. Drummond. Machine learning for high-speed corner detection, *Proceedings of the European Conference on Computer Vision*, Graz, Austria. Pages 430-443
- [Salma 1980] C.C. Slama. *Manual of Photogrammetry*, Fourth Edition, American Society of Photogrammetry.
- [Wallis 1976] R. Wallis. *An approach to the space variant restoration and enhancement of images*. Proc. Of Symposium on Current Mathematical Problems in Image Science, Naval Postgraduate School, Monterey, California.
- [Zang 2006] L. Zang. *Multi-image matching for DSM generation from IKONOS imagery*. ISPRS J. of Photogrammetry and Remote Sensing, 60: 195-211.

ALLEGATO 1 – SET IMMAGINI “FIUMETTO”





ALLEGATO 2 – SET IMMAGINI “OLONA”

