

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITA' DI BOLOGNA CAMPUS DI CESENA
SCUOLA DI SCIENZE

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA E SCIENZE INFORMATICHE

Immagini DTM e loro applicazione

Relazione finale in
Computer Graphics

Relatore:

Prof. Damiana Lazzaro

Presentata da:

Marco Balzani

Sessione: III
Anno Accademico: 2016/2017

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITA' DI BOLOGNA CAMPUS DI CESENA
SCUOLA DI SCIENZE

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA E SCIENZE INFORMATICHE

Immagini DTM e loro applicazione

Relazione finale in
Computer Graphics

Relatore:

Prof. Damiana Lazzaro

Presentata da:

Marco Balzani

Sessione: III
Anno Accademico: 2016/2017

INDICE

INTRODUZIONE.....	7
CAPITOLO 1.....	9
1.1 MODELLI DIGITALI DEL TERRENO	9
1.1.1 RAPPRESENTAZIONE DELLE SUPERFICI TERRESTRI	9
1.1.2 RAPPRESENTAZIONE DIGITALE DELLE SUPERFICI DEL TERRENO (DTS)	13
1.2 DIGITAL TERRAIN MODELS.....	14
1.2.1 IL CONCETTO DI MODELLO E I MODELLI MATEMATICI	14
1.2.2 I MODELLI DI TERRENO E I MODELLI DI TERRENO DIGITALI	17
1.2.3 DIGITAL ELEVATION MODELS e DIGITAL TERRAIN MODELS.....	18
1.3 DIGITAL TERRAIN MODELING.....	20
1.3.1 IL PROCESSO DI MODELLAZIONE DIGITALE DEL TERRENO	20
1.3.2 SVILUPPO DELLA MODELLAZIONE DIGITALE DEL TERRENO	22
1.4 RELAZIONI TRA DTM E ALTRE DISCIPLINE	23
CAPITOLO 2.....	27
2.1 DESCRITTORI DI TERRENO (QUALITATIVI) GENERALI.....	27
2.2 DESCRITTORI NUMERICI DEL TERRENO	28
2.2.1 SPETTRO DI FREQUENZA.....	28
2.2.2 DIMENSIONE FRATTALE	29
2.2.3 CURVATURE.....	32
2.2.4 COVARIANZA E AUTO-CORRELAZIONE	32
2.2.5 SEMIVARIOGRAMMA.....	34
2.3 VETTORE DI RUGOSITÀ DEL TERRENO: PENDENZA, RILIEVO E LUNGHEZZA D'ONDA	36
2.3.1 PENDENZA, RILIEVO E LUNGHEZZA D'ONDA COME VETTORE DI RUVIDEZZA.....	36
2.3.2 ADEGUATEZZA DEL VETTORE DI RUGOSITÀ DEL TERRENO	38
2.3.3 STIMA DELLA PENDENZA	39
2.4 BASI TEORETICHE PER CAMPIONAMENTO DI SUPERFICI.....	40
2.4.1 FONDAMENTI TEORICI PER IL CAMPIONAMENTO.....	41
2.4.2 CAMPIONARE DA PUNTI DI VISTA DIVERSI	42
2.5 STRATEGIA DI CAMPIONAMENTO PER L'ACQUISIZIONE DATI.....	46
2.5.1 CAMPIONAMENTO SELETTIVO: VERY IMPORTANT POINTS PIÙ ALTRI PUNTI	46
2.5.2 CAMPIONARE CON UNA DIMENSIONE FISSA: PROFILING E CONTOURING	46
2.5.3 CAMPIONARE CON DUE DIMENSIONI FISSE: GRIGLIA REGOLARE E CAMPIONAMENTO PROGRESSIVO.....	47
2.5.4 CAMPIONAMENTO COMPOSITO: UNA STRATEGIA INTEGRATA	48
2.6 CARATTERISTICHE DEI DATI SORGENTE CAMPIONATI.....	48
2.6.1 DISTRIBUZIONE DEI DATI SORGENTE CAMPIONATI.....	49
2.6.2 DENSITÀ DEI DATI SORGENTE CAMPIONATI.....	51

2.6.3 PRECISIONE DEI DATI SORGENTE CAMPIONATI	52
CAPITOLO 3.....	55
3.1 CONCETTI BASE DI SURFACE MODELING.....	55
3.1.1 INTERPOLAZIONE E SURFACE MODELING	55
3.1.2 MODELLAZIONE DI SUPERFICI E NETWORK DTM	56
3.1.3 FUNZIONE DI SURFACE MODELING: POLINOMIO GENERALE.....	56
3.2 STRATEGIE PER LA MODELLAZIONE DI SUPERFICI TERRESTRI.....	59
3.2.1 LE STRATEGIE DI MODELLAZIONE DI SUPERFICIE: UNA CLASSIFICAZIONE.....	59
3.2.2 SURFACE MODELING A PUNTI	60
3.2.3 SURFACE MODELING A TRIANGOLI.....	61
3.2.4 SURFACE MODELING A GRIGLIA	63
3.2.5 HYBRID SURFACE MODELING.....	64
3.3 LA CONTINUITÀ DI SUPERFICI DTM	66
3.3.1 CARATTERISTICHE DI SUPERFICI DTM: UNA CLASSIFICAZIONE	66
3.3.2 SUPERFICI DTM DISCONTINUE.....	67
3.3.3 SUPERFICI DTM CONTINUE	68
3.3.4 SUPERFICI DTM LISCE.....	70
3.4 FORMAZIONE DI NETWORK TRIANGOLARE PER MODELLARE SUPERFICI	72
3.4.1 FORMAZIONE DI NETWORK TRIANGOLARE REGOLARE DA DATI REGOLARMENTE DISTRIBUITI	72
3.4.2 FORMAZIONE DI NETWORK TRIANGOLARE IRREGOLARE DA DATI REGOLARMENTE DISTRIBUITI.....	74
3.4.3 FORMAZIONE DI NETWORK TRIANGOLARE IRREGOLARE DA DATI IRREGOLARMENTE DISTRIBUITI.....	77
3.4.4 FORMAZIONE DI NETWORK TRIANGOLARE IRREGOLARE DA DATI APPOSITAMENTE DISTRIBUITI.....	78
3.5 FORMAZIONE DI NETWORK A GRIGLIA PER SURFACE MODELING	80
3.5.1 FORMAZIONE DI NETWORK PIÙ GROSSOLANI PARTENDO DA DATI GRIGLIA PIÙ FINI: RICAMPIONAMENTO	81
3.5.2 FORMAZIONE DI NETWORK DI GRIGLIE DA DATI DISTRIBUITI CASUALMENTE.....	83
3.5.3 FORMAZIONE DI NETWORK DI GRIGLIE DA DATI DI CURVE DI LIVELLO	84
CAPITOLO 4.....	87
4.1 TECNICHE DI INTERPOLAZIONE: UNA PANORAMICA.....	87
4.2 RACCORDO ESATTO DI SUPERFICI LINEARI IN BASE ALL'AREA.....	90
4.2.1 INTERPOLAZIONE LINEARE SEMPLICE.....	90
4.2.2 INTERPOLAZIONE BILINEARE	91
4.3 RACCORDO ESATTO DI SUPERFICIE CURVA IN BASE ALL'AREA	93
4.3.1 INTERPOLAZIONE SPLINE BICUBICA.....	93
4.3.2 INTERPOLAZIONE MULTI-SUPERFICIE (METODO HARDY)	95
4.4 MONTAGGIO MIGLIORE DI SUPERFICI BASATO SULL'AREA	99

4.4.1 RACCORDO DEI MINIMI QUADRATI DI UNA SUPERFICIE LOCALE	100
4.4.2 RACCORDO DEI MINIMI QUADRATI DI ELEMENTI FINITI	103
4.5 MEDIA MOBILE IN BASE AL PUNTO	105
4.5.1 IL PRINCIPIO DI MEDIA MOBILE IN BASE AL PUNTO	105
4.5.2 RICERCA DI PUNTI VICINI	106
4.5.3 DETERMINAZIONE DELLE FUNZIONI DI PONDERAZIONE.....	108
4.6 SUPERFICI MOBILI IN BASE AL PUNTO	110
4.6.1 PRINCIPI DELLE SUPERFICI MOBILI.....	110
4.6.2 SELEZIONE DI PUNTI.....	112
CAPITOLO 5.....	113
5.1 STRATEGIE PER LA CREAZIONE DI CURVE DI LIVELLO DAI DTM.....	113
5.2 COSTRUZIONE DI CURVE DI LIVELLO BASATE SU VETTORE DA GRIGLIE DTM	114
5.2.1 RICERCA DEI PUNTI DELLE CURVE DI LIVELLO.....	115
5.2.2. INTERPOLAZIONE DEI PUNTI DELLE CURVE DI LIVELLO	117
5.2.3 RILEVAMENTO DELLE LINEE DELLE CURVE DI LIVELLO	118
5.2.4 LIVELLAZIONE DELLE LINEE DELLE CURVE DI LIVELLO	120
5.3 COSTRUZIONE DELLE CURVE DI LIVELLO BASATE SU RASTER DA DTM BASATI SU GRIGLIA	122
5.3.1 COSTRUZIONE DI CURVE DI LIVELLO BINARIE E DEI BORDI	123
5.3.2 COSTRUZIONE DELLE CURVE DI LIVELLO SECONDO SCALA DI GRIGI.....	126
5.4 COSTRUZIONE DELLE CURVE DI LIVELLO BASATE SU VETTORI DA TRIANGOLAZIONE DEI DTM	127
5.5 COSTRUZIONE DELLE CURVE DI LIVELLO STEREO DA GRIGLIA DTM.....	130
5.5.1 IL PRINCIPIO DELLE COSTRUZIONE DI CURVE DI LIVELLO STEREO.....	130
5.5.2 GENERAZIONE DI UNA COPPIA STEREO DELLA MAPPA A CURVE DI LIVELLO	132
CAPITOLO 6.....	135
6.1 VISUALIZZAZIONE DEI MODELLI DIGITALI DEL TERRENO: QUADRO GENERALE	135
6.1.1 VARIABILI DELLA VISUALIZZAZIONE	135
6.1.2 APPROCCI PER LA VISUALIZZAZIONE DEI DATI DTM.....	138
6.2 VISUALIZZAZIONE DI DTM BASATI SU IMMAGINI 2D.....	140
6.2.1 OMBREGGIATURA DELLA PENDENZA E OMBREGGIATURA DELL'ILLUMINAZIONE SOLARE RELATIVA	140
6.2.2 COLORAZIONE BASATA SULL'ALTEZZA.....	141
6.3 TECNICA DI RENDERING PER LA VISUALIZZAZIONE TRIDIMENSIONALE DEI DTM .	144
6.3.1 PRINCIPI BASE DEL RENDERING	144
6.3.2 TRASFORMAZIONI GRAFICHE.....	145
6.3.3 IDENTIFICAZIONE DELLA SUPERFICIE VISIBILE	146
6.3.4 LA SELEZIONE DEL MODELLO DI ILLUMINAZIONE	147
6.3.5 ASSEGNAZIONE DELLA SCALA DI GRIGI PER LA PRODUZIONE GRAFICA	149

6.4 TEXTURE MAPPING PER LA GENERAZIONE DI PAESAGGI VIRTUALI.....	151
6.4.1 TEXTURE MAPPING SULLA SUPERFICIE DTM	151
6.4.2 MAPPATURA DI ALTRI ELEMENTI SULLA SUPERFICIE DTM	153
6.5 TECNICHE DI ANIMAZIONE PER LA VISUALIZZAZIONE DTM.....	155
6.5.1 PRINCIPI DELL'ANIMAZIONE	155
6.5.2 PAN-VIEW SENZA INTERRUZIONI SU DTM IN UNA AREA AMPIA	158
6.5.3 "FLY-THROUGH" E "WALK-THROUGH" PER LA VISUALIZZAZIONE DTM.....	160
CAPITOLO 7.....	163
7.1 APPLICAZIONI IN INGEGNERIA CIVILE.....	163
7.1.1 DESIGN DI AUTOSTRADE E FERROVIE	164
7.1.2 SALVAGUARDIA DELL'ACQUA	167
7.2 APPLICAZIONE DI TELERILEVAMENTO E MAPPATURA.....	168
7.2.1 GENERAZIONE DI ORTOIMMAGINI	168
7.2.2 ANALISI DI IMMAGINI DA TELERILEVAMENTO	170
7.3 APPLICAZIONI IN INGEGNERIA MILITARE.....	172
7.3.1 SIMULAZIONE DI VOLO	172
7.3.2 CAMPO DI BATTAGLIA VIRTUALE.....	172
7.4 APPLICAZIONI IN AMBIENTE E RISORSE.....	173
7.4.1 MODELLI EOLICI E STUDIO AMBIENTALE	173
7.4.2 MODELLI DI LUCE SOLARE PER LA CLIMATOLOGIA	174
7.4.3 SIMULAZIONE DI INONDAZIONI.....	175
7.4.4 GESTIONE DELL'AGRICOLTURA	175
7.5 NAVIGAZIONE MARITTIMA.....	176
7.6 ALTRE APPLICAZIONI	178
BIBLIOGRAFIA	181

INTRODUZIONE

I modelli del terreno hanno sempre raccolto sia l'interesse del personale militare, programmatori, architetti di paesaggio, ingeneri civili, sia altri esperti nelle scienze ambientali.

Originariamente, i modelli del terreno erano modelli materiali composti da plastica, gomma, argilla, sabbia ecc.

Dalla fine degli anni '50, è stato introdotto in questo settore l'utilizzo del computer e i modelli della superficie terrestre sono stati digitalizzati.

Il DTM è un processo che permette di ottenere adeguati modelli della superficie terrestre con una certa accuratezza mantenuta nel tempo.

Sin dall'origine questi modelli hanno trovato larga applicazione in varie discipline come il telerilevamento, l'ingegneria civile, l'ingegneria mineraria, la geologia, la geomorfologia, l'ingegneria militare, la progettazione del territorio e le telecomunicazioni.

L'obbiettivo di questa tesi è quello di analizzare come sono strutturati e realizzati i files DTM ed i suoi derivati, come le immagini DEM, ipotizzando un loro possibile impiego in ambito del soccorso pubblico a supporto delle attuali tecnologie.

Grazie alla diffusione sempre più ampia dei dati *Open*, nello specifico dei dati *OpenGeoData* è possibile reperire abbastanza facilmente e gratuitamente su internet, diversi file DTM relativi all'intera superficie terrestre.

Questa facilità consentirebbe di procurare in maniera abbastanza rapida informazioni su una specifica porzione di territorio di nostro interesse per poter capire altrettanto rapidamente la sua conformità.

In operazioni di soccorso la tempestività è tutto ma non è sufficiente, infatti se prendiamo in esame operazioni in zone impervie, la mancata conoscenza dell'ambiente dove si andrà ad operare può portare ad insuccessi o ad allungare le operazioni di soccorso.

Per poter capire come utilizzare ed applicare nelle varie discipline i files DTM, occorre prendere in esame alcuni aspetti fondamentali quali l'analisi dei descrittori del terreno dai quali poi deriveranno le diverse strategie di campionamento dei dati del territorio di nostro interesse, permettendoci di analizzare le varie tecniche di campionamento disponibili e scegliere così quella che meglio si adatta alla zona presa in esame.

Andranno poi considerate le diverse tecniche di interpolazione e modellazione delle superfici e delle loro caratteristiche in quanto il loro corretto impiego ci permette di ottenere un migliore risultato in base al tipo di territorio preso in esame, si analizzeranno anche le tecniche di texture mapping per la visualizzazione 3D dei modelli del terreno rappresentati dai files DTM le quali permettono la creazione di paesaggi virtuali e la loro “navigazione” mediante tecniche di “fly-through” e “walk-through”.

Infine sarà svolta anche una panoramica sulle principali applicazioni del DTM nelle varie discipline con lo scopo di analizzare i diversi impieghi che questi modelli permettono grazie alla loro accuratezza e versatilità.

CAPITOLO 1

1.1 MODELLI DIGITALI DEL TERRENO

Gli uomini vivono sulla terra e imparano come far fronte ai diversi tipi di territorio.

L'ingegneria civile si occupa di disegnare e costruire edifici; la geologia cerca di studiare il territorio sottostante; la topografia misura e descrive la superficie rappresentandola in modalità diverse utilizzando mappe, immagini ortografiche, visuali prospettiche ecc.

Nonostante le differenze, le diverse materie hanno l'interesse comune di rappresentare, accuratamente, la superficie terrestre.

1.1.1 RAPPRESENTAZIONE DELLE SUPERFICI TERRESTRI

L'uomo ha provato a rappresentare in diversi modi i fenomeni terrestri con i quali ha preso confidenza sin dai tempi antichi. La più antica delle rappresentazioni è considerata la pittura, la quale offre alcune informazioni generali (ad esempio la forma e il colore) riguardo al terreno che descrive ma la qualità metrica (o accuratezza) è estremamente bassa e non può essere utilizzata per scopi ingegneristici.

Un'altra antica ma efficace rappresentazione del terreno è la mappa, ancora largamente utilizzata fino ad oggi. Le mappe hanno giocato un importante ruolo nello sviluppo della società e del linguaggio, tale da essere utilizzate come rappresentazione delle condizioni durante la storia della civiltà.

Nei tempi antichi per descrivere le tre reali dimensioni (3D) della superficie terrestre, sono state utilizzate le rappresentazioni simboliche e pittoriche, sebbene la qualità metrica (o accuratezza) risultasse molto bassa.

Utilizzando un sistema di simboli ben progettato e fondamenta matematiche consolidate per la rappresentazione, le moderne mappe possiedono tre principali caratteristiche:

1. la misurabilità garantita dalle regole matematiche
2. la visione di insieme fornita dalla generalizzazione
3. la simbolizzazione intuitiva

Le carte topografiche a curve di livello sono forse il modo più familiare di rappresentare il territorio.

Sulla mappa topografica, tutte le caratteristiche presenti sul terreno vengono proiettate ortogonalmente su un dato 2D orizzontale.

I particolari sono ridotti in scala e rappresentati da linee e simboli.

L'altezza del terreno e le informazioni morfologiche sono rappresentate dalla linea di livello.

L'uso di queste carte può essere fatto risalire già al 18esimo secolo. Si ritiene che le carte topografiche a curve di livello siano una delle più importanti invenzioni nella storia della mappatura grazie alla praticità e alla percezione intuitiva. La figura sottostante è un esempio di carta a curve di livello.



Figura 1.1 Mappa a curve di livello di una piccola isola.

Una mappa è una generalizzazione scientifica e rappresenta un'astrazione delle caratteristiche sul territorio.

Tipicamente le mappe topografiche permettono la rappresentazione in due dimensioni, delle tre dimensioni della realtà.

Per anni, i cartografi, si sono dedicati al superamento del divario tra la rappresentazione in 2D e la realtà tridimensionale.

La scenografia, l'ombreggiatura, le sfumature e le tonalità ipermetriche (strati di colore) sono state tradizionalmente utilizzate sulle mappe topografiche. In ogni caso solo le sfumature sono ancora largamente utilizzate perché facilmente generabili dai computer.

La figura è un esempio di mappa topografica con sfumature.



Figura 1.2 Mappa topografica con sfumature.

In confronto alle linee disegnate, le immagini hanno alcuni vantaggi per esempio sono molto più dettagliate e facili da comprendere. Sin dal 1849 la fotografia e successivamente la fotografia aerea sono state utilizzate per la rappresentazione del terreno.

Nella fotografia aerea l'altezza, una delle tre dimensioni della superficie, è assente. Per questo motivo una singola fotografia aerea non può essere utilizzata per fornire tutte le informazioni necessarie. Le fotografie aeree rettificate possono essere utilizzate come un piano.

La superficie tridimensionale può essere ricostruita utilizzando un paio di fotografie aeree con una certa percentuale di sovrapposizione (per esempio normalmente per il 60%), questa tecnica è chiamata fotogrammetria.

Le immagini satellitari sono state utilizzate come complemento alle fotografie aeree sin dagli anni '70.

Molti sistemi satellitari rilevano le immagini sovrapposte del terreno che possono essere utilizzate nella costruzione dei modelli 3D.

SPOT e, più recentemente, IKONOS ne sono due esempi.

Tuttavia la risoluzione delle immagini satellitari non è ancora compatibile con le immagini aeree.



Figura 1.3 Immagine IKONOS di Hong Kong con risoluzione 4m.

Il territorio può essere rappresentato anche tramite una visione in prospettiva. Il processo di rappresentazione di una superficie in questo modo prevede di proiettarlo su un piano e rimuovere quelle linee che non sono visibili dal punto di proiezione.

Il risultato è il cosiddetto “block diagram”, oltre al diagramma a curve di livello prospettiche.

Per una facile rappresentazione è essenziale un modello digitale della superficie del terreno.

1.1.2 RAPPRESENTAZIONE DIGITALE DELLE SUPERFICI DEL TERRENO (DTS)

A partire dalla metà del ventesimo secolo, diverse tecniche di rappresentazione digitale del terreno sono state messe a punto grazie allo sviluppo della tecnologia informatica, della moderna matematica e della computer graphics. Al giorno d’oggi l’utilizzo del computer è diventato un punto di riferimento significativo nell’era dell’informazione. Il computer ha assunto un importante ruolo per la rappresentazione digitale della superficie del terreno (DTS).

I DTS possono essere rappresentati matematicamente e graficamente. La serie di Fourier e i polinomi sono comuni rappresentazioni matematiche. Reticoli regolari o irregolari, curve di livello, diagrammi di sezione sono comuni rappresentazioni grafiche.

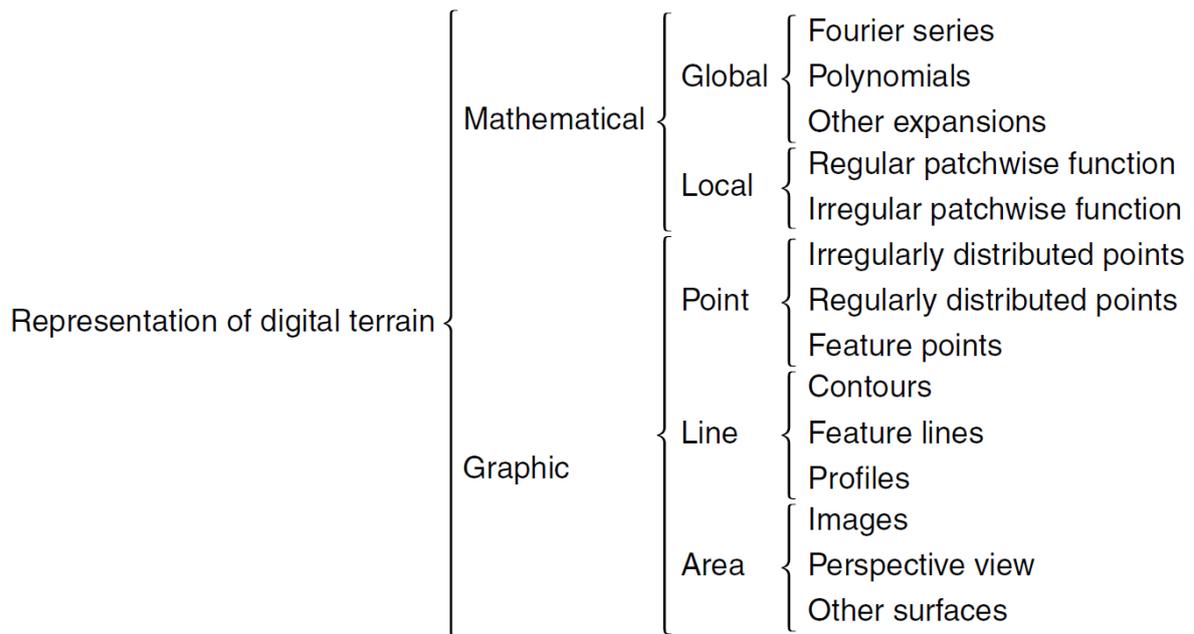


Figura 1.4 Schema di classificazione della rappresentazione delle superficie digitali del terreno.

1.2 DIGITAL TERRAIN MODELS

Nella rappresentazione della superficie terrestre, il DTM rappresenta uno dei sistemi più importanti.

1.2.1 IL CONCETTO DI MODELLO E I MODELLI MATEMATICI

“Un modello è un oggetto o un concetto utilizzato per rappresentare qualcos’altro. È la realtà su scala ridotta e convertita in una forma che è possibile comprendere”
(Meyer[44],1985).

Un modello possiede specifici scopi quali la previsione e il controllo. Il modello può essere utilizzato per rappresentare la situazione originaria (sistema o fenomeno) o la situazione prevista o proposta.

La parola “modello” in generale significa rappresentazione e in molte situazioni è adoperata per descrivere un sistema in toto.

Conseguentemente esistono notevoli differenze sul significato e utilizzo della parola modello.

Per esempio può essere applicato alla replicazione fotogrammetrica di una porzione di terreno precedentemente fotografata, oppure può descrivere una visione in prospettiva del terreno.

Generalmente esistono tre tipologie di modello:

1. concettuale
2. fisico
3. matematico

Il modello concettuale nasce nella mente di una persona riguardo a una situazione o ad un oggetto in base alle sue conoscenze o esperienze. Spesso questo particolare tipo di modello determina lo stato iniziale della modellazione e successivamente sarà seguito da un modello matematico o fisico.

Un modello fisico è solitamente un modello analogico. Per esempio un modello di terreno costruito con gomma, plastica o argilla.

Rientra in questa categoria un modello stereo del terreno basato su principi di proiezione ottica o meccanica che sono ampiamente utilizzati nella fotogrammetria.

Un modello fisico è generalmente più piccolo dell'oggetto reale.

Un modello matematico rappresenta una situazione, un oggetto o un fenomeno in termini matematici.

In altre parole un modello matematico è un modello i cui componenti sono concetti matematici come le costanti, le variabili, le funzioni, le equazioni ecc.

I modelli matematici possono essere suddivisi in due tipi (Saaty and Alexander[51], 1981):

1. *modelli quantitativi*, basati su numeri e sistemi.
2. *modelli qualitativi*, basati su una serie di teorie e non riducibile ai numeri.

Un'altra classificazione prevede di dividere i modelli matematici in:

1. *modelli funzionali*, utilizzati per risolvere problemi deterministici.
2. *modelli stocastici*, utilizzati per risolvere problemi probabilistici.

L'importanza dell'utilizzo del modello matematico è fornita dalle seguenti ragioni (Saaty and Alexander [51], 1981):

1. i modelli permettono l'astrazione basandosi su formazioni logiche che utilizzano un linguaggio convenzionale, espresso in brevi annotazioni che permettono di visualizzare meglio i principali elementi del problema, allo stesso tempo soddisfano la comunicazione, diminuendo l'ambiguità ed aumentando la possibilità di coerenza del risultato.
2. permettono di mantenere traccia della linea di pensiero, mantenendo l'attenzione sulle parti importanti del problema.
3. aiutano a generalizzare o ad applicare il risultato della soluzione del problema in altre aree.
4. forniscono l'opportunità di considerare tutte le possibilità, di valutare le alternative e di eliminare i casi impossibili.
5. sono strumenti per comprendere il mondo reale e scoprire le leggi della natura.

È necessario scegliere il modello matematico da utilizzare, ovvero giudicare l'integrità o il valore di un modello matematico.

Meyer [44] (1985) ha fornito sei criteri per la valutazione dei modelli matematici:

1. *accuratezza*: il risultato del modello è corretto o quasi uguale.
2. *realismo descrittivo*: basati su corretti presupposti.
3. *precisione*: la predizione del modello è definita da numeri, funzioni o figure geometriche.
4. *robustezza*: relativa all'immunità da errori nei dati inseriti.
5. *generalità*: applicabilità ad una ampia varietà di situazioni.
6. *fruibilità*: le conclusioni sono utili o ispiranti o indicanti la via verso altri modelli.

Al precedente elenco Li [35] (1990) ha aggiunto un altro criterio chiamato semplicità: il numero più piccolo possibile di parametri utilizzati nel modello.

La scelta è basata sul fatto che se i fenomeni sono complicati non sono sempre necessari modelli complicati, in accordo con il principio della parsimonia (Cryer [6], 1986).

1.2.2 I MODELLI DI TERRENO E I MODELLI DI TERRENO DIGITALI

I modelli del terreno sono sempre stati materia di interesse per il corpo militare, gli architetti paesaggistici, gli ingegneri civili come per altri esperti delle geoscienze.

Originariamente i modelli di terreno erano modelli fisici composti di gomme, plastica, argilla, sabbia ecc. Per esempio, durante la seconda guerra mondiale molti modelli furono prodotti dalla Marina Americana e riprodotti in gomma. Nella guerra delle Falkland nel 1982 le forze britanniche in campo utilizzarono ampiamente sabbia e argilla per programmare le operazioni militari.

L'introduzione delle tecniche numeriche, matematiche e digitali nella modellazione del terreno deve molto all'attività del lavoro dei fotogrammetristi in campo nell'ingegneria civile.

Nel 1950 la fotogrammetria ha iniziato ad essere ampiamente utilizzata per raccogliere dati verso la strada della progettazione.

Roberts [50] (1975) per primo propose l'uso dell'informatica con la fotogrammetria come nuovo strumento per acquisire dati per la pianificazione e il disegno nello sviluppo dell'ingegneria.

Miller e Laflamme [45] (1985) del Massachusetts Institute of Technology (MIT) descrissero lo sviluppo nel dettaglio. Selezionarono e misurarono, dai modelli stereo, le coordinate 3D dei punti del terreno lungo le strade progettate e formarono profili digitali al computer per assistere il disegno delle strade.

Introdussero inoltre il concetto di modello di terreno digitale definendolo:

“il modello digitale del terreno (DTM) è semplicemente una rappresentazione statistica della superficie continua del terreno mediante elevato numero di punti conosciuti selezionati come le coordinate X, Y, Z in un sistema di coordinate arbitrario”.

Confrontato con il sistema analogo tradizionale, un DTM presenta delle specifiche caratteristiche:

1. *varietà di forme di rappresentazione*: nel modello digitale possono essere facilmente prodotte varie forme di rappresentazione quali le mappe topografiche, sezioni verticali o sagittali e animazioni 3D
2. *accuratezza, senza perdita di informazioni nel tempo*: con il passare del tempo le mappe di carta possono essere deformate, mentre i DTM mantengono la precisione dovuta all'uso del mezzo digitale
3. *grande praticabilità dell'automazione e processo in tempo reale*: nella tecnica digitale l'integrazione dei dati e l'aggiornamento sono molto più flessibili che nella tecnica analogica
4. *più facile rappresentazione multi-scala*: il DTM può essere programmato con differenti risoluzioni corrispondenti a differenti rappresentazioni in diverse scale

1.2.3 DIGITAL ELEVATION MODELS e DIGITAL TERRAIN MODELS

DTM è stato definito come una rappresentazione digitale del terreno. Dal momento in cui Miller e Laflamme [45] coniarono il termine originale, sono state inserite altre terminologie che includono:

1. modelli di elevazione digitale (DEM),
2. modelli digitali di altezze (DHM),
3. modelli digitali del terreno (DGM),
4. modelli digitali di elevazione del terreno (DTEM).

Queste definizioni hanno origine da diversi Paesi.

DEM è principalmente utilizzato in America; DHM deriva dalla Germania; GDM fu utilizzato in Gran Bretagna.

Queste definizioni sono spesso assunte come sinonimi.

Li[35], ha introdotto una analisi comparativa delle differenze:

1. Terra: superficie terrestre
2. Altezza: misurazione dalla base alla cima
3. Elevazione: l'altezza da un dato livello
4. Territorio: porzione di paese considerando le componenti naturali

Il significato di territorio è più complesso, contiene il concetto di altezza includendo anche elementi geografici e componenti naturali. DTM include un ampio significato rispetto ai DHM o DEM e cerca di incorporare nel modello anche le specifiche caratteristiche del terreno quali fiumi, ponti, strade.

Gli specialisti nelle geoscienze combinano le informazioni non-topografiche con quelle topografiche, in modo tale da costruire DTM in accordo con gli specifici bisogni.

In generale i DTM contengono i seguenti quattro gruppi di informazioni (topografiche e non topografiche):

1. La *formazione morfologica*: elevazione, pendenza, forma della pendenza e altri elementi geomorfologici utilizzati per definire il rilievo del terreno
2. La *qualità del terreno*: gli elementi idrografici (fiumi, laghi, coste), la rete di trasporti (strade, ferrovie, percorsi), gli insediamenti, i confini ecc.
3. Le *risorse naturali e l'ambiente* quali il terreno, la vegetazione, la geologia, il clima ecc.
4. Le *informazioni socioeconomiche* come la distribuzione della popolazione, l'industria e l'agricoltura, il reddito ecc.

La definizione di DTM può essere generalizzata come una ordinata serie di punti di dati campione che rappresentano la distribuzione spaziale di vari tipi di informazioni sul terreno.

L'espressione matematica potrebbe essere la seguente:

$$K_p = f(u_p, v_p), \quad K = 1, 2, 3, \dots, m, \quad P = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1.1)$$

Dove K_p è l'attributo di valore del tipo di elemento naturale localizzato nel punto P (può essere un singolo punto oppure un'area centrata nel punto P); u_p, v_p sono la coppia di coordinate in 2D del punto P ; m ($m \geq 1$) è il numero totale dei tipi di informazione del terreno, n è il numero totale dei punti campione.

Per esempio se il terreno fosse categorizzato come i -esimo, l'espressione risulterebbe:

$$I_p = f_i(u_p, v_p), \quad P = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1.2)$$

Un DTM è una rappresentazione digitale della distribuzione spaziale di uno o più tipologie di informazioni del terreno ed è rappresentato da due coordinate spaziali più una rappresentazione matematica delle informazioni stesse.

Se nell'equazione (1.1), $m = 1$ e l'informazione del territorio è l'altezza, il risultato è l'espressione matematica del DEM.

Ovviamente il DEM è una sottocategoria del DTM e il suo principale componente. I DEM solitamente si riferiscono ai dati di altitudine organizzati in forma di matrice.

1.3 DIGITAL TERRAIN MODELING

1.3.1 IL PROCESSO DI MODELLAZIONE DIGITALE DEL TERRENO

Il processo di costruzione di un DTM di superficie è chiamato modellazione digitale del terreno ed è un processo di modellazione matematica. In questo processo i dati sono campionati dal terreno per essere modellati con una certa accuratezza di osservazione, densità e distribuzione; la superficie terrestre è così rappresentata dal sistema di punti rappresentativi del campione.

Se, oltre ai punti rappresentativi del campione, si vogliono ottenere attributi in punti sulla superficie digitale, si applica l'interpolazione per formare una superficie DTM a partire dai data points campionati.

Altri attributi possono essere l'altitudine, la pendenza, l'aspetto ecc.

Nella figura 1.5, si descrive l'intero processo del digital terrain modeling.

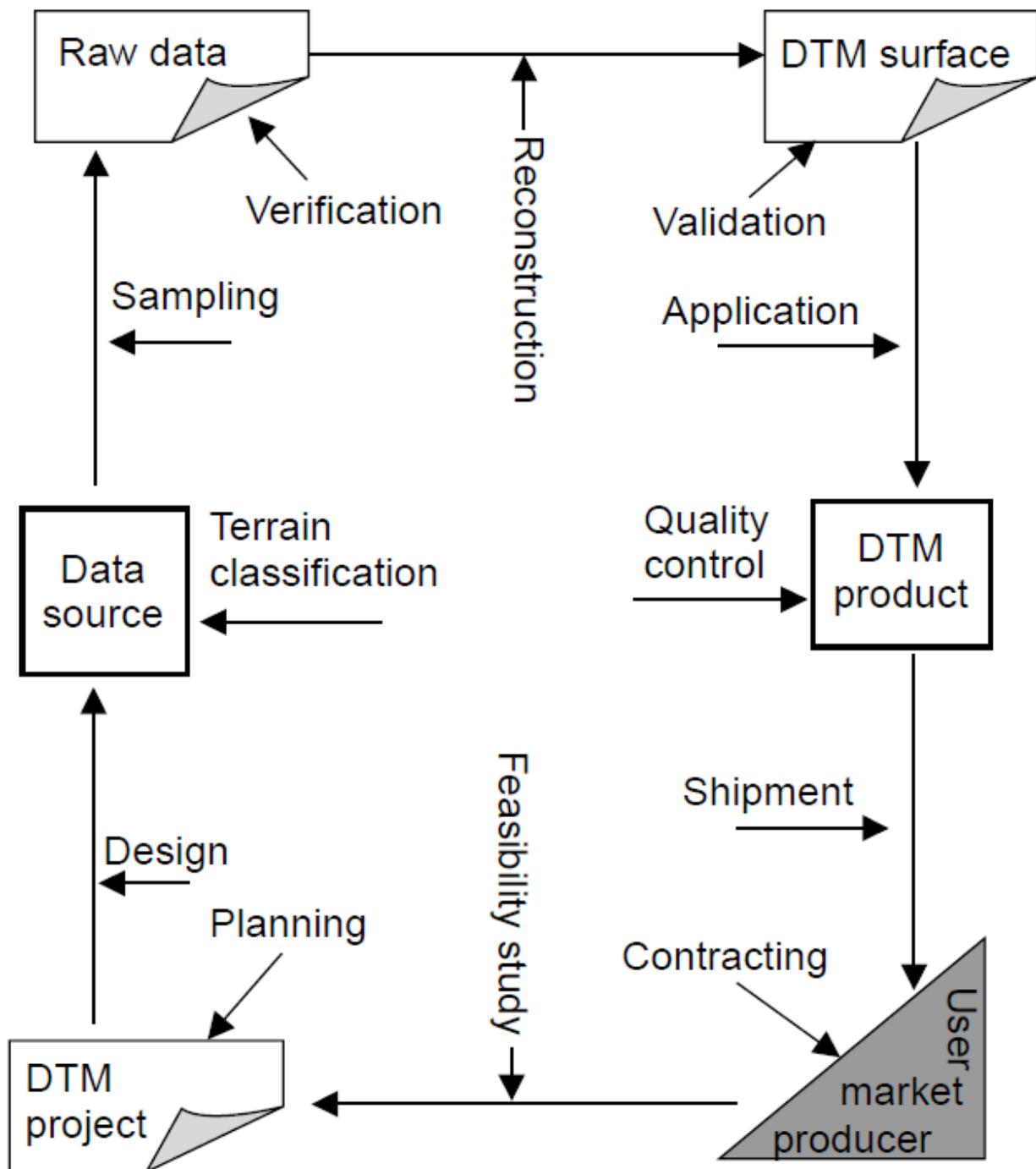


Figura 1.5 Processo del Digital Terrain Modeling (Li [35], 1990)

Sono presenti sei differenti stadi, in ciascuno uno o più azioni sono determinanti per passare allo stadio successivo.

Nella figura sono elencate un totale di 12 azioni sebbene al momento attuale uno specifico progetto DTM potrebbe prevedere solo alcune di esse.

1.3.2 SVILUPPO DELLA MODELLAZIONE DIGITALE DEL TERRENO

Alla fine degli anni '50 Miller e Laflamme[45] introdussero il DTM nell'ingegneria civile per monitorare i cambiamenti della superficie terrestre come subsidenza ed erosione. Inoltre suggerirono l'acquisizione automatica dei dati mediante la scansione di coppie stereo di fotografie aeree.

A partire dagli anni '60, il DTM è stato un'importante area di ricerca per la Società Internazionale di Fotogrammetria e Telerilevamento, così come i fotogrammetristi sono spesso produttori di DTM.

Le maggiori ricerche, negli anni '60 e '70 furono rivolte verso la modellazione di superfici e le curve di livello derivate dai DEM.

A questo punto furono proposti molti metodi di interpolazione come differenti metodi di media mobile, HIFI (altezza di interpolazione dall'elemento finiti), interpolazione prospettica, e Kriging.

Sono stati proposti, inoltre, molti metodi di triangolazione.

A partire dal 1970 l'attenzione delle ricerche si sposta verso il controllo di qualità e le strategie di campionamento. Il campionamento progressivo proposto da Makarovic[36] è un tipico esempio di strategia di campionamento utilizzata in fotogrammetria.

Si è anche cercato di determinare intervalli ottimali di campionamento basandosi sulla attendibilità dei modelli matematici per la predizione dell'accuratezza delle DTM.

A partire dalla fine degli anni '80 iniziò la produzione su larga scala.

I plotter analitici sono le macchine più largamente utilizzate per l'acquisizione dei dati per DTM. L'invenzione è attribuita a Helava [26] (1958).

Il concetto fu inizialmente utilizzato in *API* e *AP2* agli inizi del 1960.

Alla fine degli anni '80 le tecniche di corrispondenza di immagini furono sviluppate nella fotogrammetria e divenne possibile l'acquisizione automatica dei dati.

Negli anni '90, grazie allo sviluppo dei sistemi di informazione geografica (GIS), DTM diventò una importante parte delle infrastrutture geospaziali nazionali. DTM infatti ha trovato ampia applicazione in tutte le geoscienze e nell'ingegneria tra cui:

1. Pianificazione e disegno per l'ingegneria civile, stradale e mineraria
2. Animazione 3D per intenti militari, progettazione del paesaggio e pianificazione urbana
3. Analisi dei bacini e simulazioni idrauliche
4. Analisi della visibilità tra gli oggetti e la superficie terrestre
5. Analisi del terreno e calcoli volumetrici
6. Analisi geomorfologica e dell'erosione del terreno
7. Analisi e processamento delle immagini da telerilevamento
8. Varie tipologie di analisi geografica
9. Altro

1.4 RELAZIONI TRA DTM E ALTRE DISCIPLINE

La modellazione dei DTM comprende quattro principali componenti: acquisizione dei dati, modellazione, gestione dei dati e applicazione degli sviluppi. In ogni caso queste componenti non sono collegate in modo lineare. Per esempio la fotogrammetria è lo strumento per l'acquisizione dei dati, ad ogni modo DTM è anche applicato alla fotogrammetria per correzioni ortografiche delle fotografie aeree e le immagini satellitari.

Le interrelazioni sono riassunte nella figura sottostante:

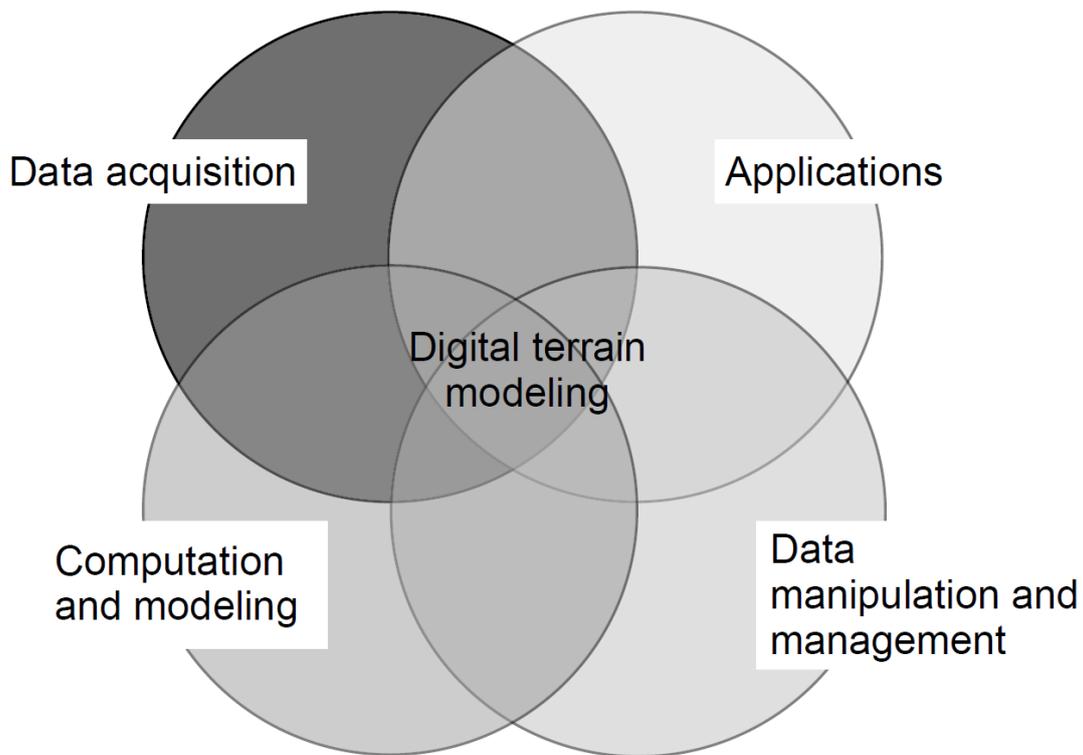


Figura 1.6 Relazioni tra modellazione digitale del terreno e altre discipline.

1. Nell’*“acquisizione dei dati”*, le principali discipline coinvolte sono: la fotogrammetria, il rilevamento della posizione globale GPS, telerilevamento e cartografia (principalmente la digitalizzazione delle mappe a curve di livello) sono le principali discipline.
2. Nel *“calcolo e modellazione”*, le principali discipline coinvolte sono: fotogrammetria, rilevamento, cartografia, geografia, geometria computazionale, grafica computerizzata ed elaborazione delle immagini.
3. Nella *“elaborazione e manipolazione dei dati”* le principali discipline coinvolte sono: tecniche di database spaziale, la codifica dei dati e tecniche di compressione, strutturazione dei dati e grafica informatica.
4. Nelle *“applicazioni”*, sono coinvolte tutte le geoscienze, incluso sopravvivenza, fotogrammetria, cartografia, telerilevamento, geografia, geomorfologia, ingegneria civile, mineraria, geologica, progettazione del paesaggio, pianificazione urbana, gestione del paesaggio, delle risorse e dei servizi e altro.

Il DTM ha anche trovato ampia applicazione nell'ingegneria militare (come simulazione di volo, simulazione di battaglie, pianificazione di percorsi di carri armati, missili e aerei navigazione, ecc.).

Oltre a queste applicazioni in scienza, tecnologia e ingegneria, il DTM ha trovato largo uso anche nei giochi per computer.

CAPITOLO 2

I DESCRIPTORI DEL TERRENO E LE STRATEGIE DI CAMPIONAMENTO

Per modellare una parte di terreno, occorre prima di tutto acquisire una serie di dati dalla superficie.

L'acquisizione di dati è la principale e più importante fase nella rappresentazione digitale dei modelli di terreno.

Si possono distinguere due diverse fasi: il campionamento e la misurazione.

Il campionamento si riferisce alla selezione del luogo, mentre la misurazione determina le coordinate del luogo stesso.

Vi sono tre importanti elementi relativi all'acquisizione dei dati DTM in formato grezzo: *densità, accuratezza e distribuzione*.

L'accuratezza è relativa alla misurazione, mentre la distribuzione e la densità sono strettamente collegate alle caratteristiche della superficie del terreno.

Per esempio se il terreno è pianeggiante, sono sufficienti tre punti in qualsiasi luogo.

2.1 DESCRIPTORI DI TERRENO (QUALITATIVI) GENERALI

In generale si possono distinguere due differenti tipi di Identificatori:

1. identificatori qualitativi o generali, i quali si esprimono in termini generali
2. identificatori quantitativi specificati da identificatori numerici

Seguono alcuni tipi di identificatori:

1. identificatori basati sul rivestimento della superficie terrestre come: vegetazione, acqua, deserto, terreno arido, neve, strade, edifici, aeroporti ecc...
2. identificatori basati sull'origine morfologica, a loro volta suddivisi in:
 - *formazione endogena*: formate da forze interne, comprese origini neotettoniche, vulcaniche e da depositi delle sorgenti termali
 - *formazione esogena*: formate da forze esterne incluse formazioni fluviali, per erosione, glaciali, calcaree, marine ecc...
3. identificatori basati sulla fisica geografica: regioni generalizzate secondo la struttura e caratteristiche delle sue forme, ognuna delle quali è mantenuta omogenea quanto più possibile ed ha caratteristiche dominanti, ad esempio, alta montagna, altopiano, montagne, colline ecc.
4. identificatori basati su altre classificazioni.

Questi descrittori possono fornire all'utente solo molte informazioni generali su un particolare paesaggio, quindi possono essere utilizzati solo per pianificazioni generali, ma non per progetti.

Per rappresentare un particolare progetto, sono essenziali descrittori numerici precisi.

2.2 DESCRITTORI NUMERICI DEL TERRENO

La complessità della superficie terrestre può essere descritta dal concetto di asperità e irregolarità ed è caratterizzata da differenti parametri numerici.

2.2.1 SPETTRO DI FREQUENZA

Una superficie può essere trasformata dal dominio spaziale al dominio di frequenza utilizzando la trasformata di Fourier.

La superficie terrestre è caratterizzata nella sua frequenza di dominio dallo spettro di frequenza.

La stima di tale spettro tramite dati discreti equamente distanziati è stata discussa da Frederiksen [17] (1978).

Lo spettro può essere approssimato dalla seguente espressione:

$$S(F) = E \times F^a$$

Dove F denota la frequenza alla quale la magnitudo dello spettro è $S(F)$ mentre E ed a sono costanti (parametri caratteristici), due statistiche che esprimono la complessità della superficie del terreno su tutta l'area.

Possono essere considerati come parametri che forniscono informazioni più dettagliate sulla superficie terrestre sebbene in maniera ancora generale.

Differenti valori di E ed a possono essere ottenuti in base a differenti tipi di terreno. In accordo con gli studi sviluppati da Frederiksen [16] (1981), se il parametro a è più grande di 2 il paesaggio è collinare con una superficie regolare, mentre se è più piccolo di 2 indica un paesaggio pianeggiante e ruvido poiché la superficie contiene larghe variazioni con alta frequenza (lunghezza d'onda corta).

Il valore di a fornisce informazioni topografiche generali.

2.2.2 DIMENSIONE FRATTALE

La dimensione frattale è un altro parametro statistico che può essere utilizzato per caratterizzare la complessità di una curva o di una superficie.

È ben conosciuto che nella geometria Euclidea una curva ha dimensione 1 e una superficie ha dimensione 2, indipendentemente dalla sua complessità.

Sebbene in realtà una curva molto irregolare è molto distante da una retta passante per gli stessi due punti e una superficie complessa ha un'area molto più ampia rispetto un piano sulla stessa area.

Se una linea è così irregolare da coprire completamente un piano diventa un piano ed ha dimensione 2, in maniera simile una superficie può avere dimensione 3.

Nella geometria frattale introdotta da Mandelbrot[42] nel 1981, la dimensionalità di un oggetto è definita dalla necessità (necessità pratica) portando alla cosiddetta dimensione effettiva.

Questo può essere spiegato prendendo l'esempio della forma della superficie Terrestre osservata da diverse distanze.

1. se l'osservatore è posto ad infinita distanza la Terra appare come un punto avendo così dimensione 0
2. se l'osservatore è posto sulla Luna, la Terra appare come una piccola palla, avendo dimensione 3
3. se l'osservatore giunge più vicino, per esempio alla distanza di circa 830km dalla superficie Terrestre (altitudine dell'orbita satellitare di SPOT) le informazioni sull'altezza sono estraibili ma non in dettaglio, in generale l'osservatore può vedere una superficie principalmente liscia con dimensione vicina a 2
4. se la superficie Terrestre è vista da terra, allora la rugosità può essere vista chiaramente, così l'effettiva dimensione della superficie potrebbe essere maggiore di 2.

Nella geometria frattale, le effettive dimensioni possono essere una frazione dette in gergo dimensioni frattali o frattali.

Per esempio la dimensione frattale di una curva varia tra 1 e 2, mentre quella di una superficie tra 2 e 3.

La dimensione frattale è calcolata come segue:

$$L = C \times r^{1-D} \quad (2.2a)$$

dove r è la scala di misura (unità principale), L è la lunghezza della misurazione, C è una costante e D è interpretata come la dimensione frattale della linea curva.

Quando si misura la dimensione frattale di una superficie curva, r diventa la principale unità della superficie utilizzata per la misurazione e la risultante area è A al posto di L .

L'espressione diventa:

$$A = C \times r^{2-D} \quad (2.2b)$$

La figura 2.1 mostra un esempio della linea di Koch con una dimensione frattale di 1.26.

Il processo di generazione di una curva è il seguente: (a) disegnare una linea con lunghezza pari ad un'unità.

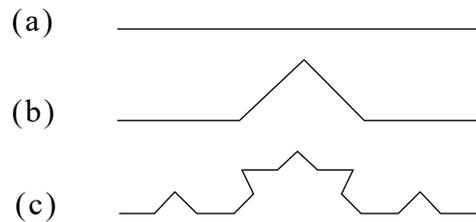


Figura 2.1 Linea di Koch complessa con dimensione frattale di 1.26

(a)Linea con una unità, (b)Linea divisa in tre segmenti e metà segmento diviso in due, (c)Ripetizione del processo.



Figura 2.2 Relazione tra curvatura e complessità: le curvature delle due linee di sinistra sono 0 poiché il raggio è infinito mentre la linea sul lato destro ha grandi curvature in quanto i raggi sono piccoli.

(b) dividere la linea in tre segmenti

(c) il segmento intermedio sarà sostituito da due polilinee con lunghezza pari all'unità.

La stessa procedura è applicata ripetutamente a tutte le linee segmentate.

Come risultato, la linea diventerà sempre più complessa, risultando in una dimensione frattale di 1.26.

Si può concludere che una dimensione frattale vicino al 3 indica una superficie molto complessa e probabilmente rugosa, mentre una superficie semplice, quasi piana, ha una dimensione frattale vicino al 2.

2.2.3 CURVATURE

La superficie del terreno può essere sintetizzata combinando elementi di forma del terreno, definiti come unità di rilievo di piani omogenei e curvature del profilo. Supponiamo che un profilo possa essere espresso come $y = f(x)$, quindi la curvatura nella posizione x può essere calcolato come segue:

$$c = \frac{\frac{d^2y}{dx^2}}{[1+(\frac{dy}{dx})^2]^{3/2}} \quad (2.3)$$

In questa formula la curvatura c è inversamente proporzionale al raggio della curva (R), ovvero, una curvatura larga è associata con un piccolo raggio (Figura 2.2) Quindi, intuitivamente si può vedere che maggiore è la curvatura più è rugosa la superficie.

Perciò le curvature possono anche essere utilizzate come misura della rugosità della superficie.

Questo criterio è già stato utilizzato per l'analisi del terreno (es. Dikau [11] 1989). Questo è un metodo comparativamente utile per pianificare le strategie di campionamento DTM.

Tuttavia, per ricavare i valori di curvatura occorre un volume piuttosto grande di dati (quello di un DTM) ciò porta ad una situazione in cui è impossibile distinguere le cause dagli effetti (problema dell'uovo e della gallina).

2.2.4 COVARIANZA E AUTO-CORRELAZIONE

Il grado di similarità tra una coppia di punti sulla superficie può essere descritto da una funzione di correlazione.

Questo può portare a molte forme come le funzioni di covarianza o auto-correlazione.

La funzione di auto-correlazione è descritta come segue:

$$R(d) = \frac{Cov(d)}{v} \quad (2.4)$$

dove $R(d)$ è il coefficiente di correlazione di tutti i punti con intervallo orizzontale d , $Cov(d)$ è la covarianza di tutti i punti con intervallo orizzontale d e V è la varianza calcolata da tutti i punti (N).

Le funzioni matematiche sono le seguenti:

$$V = \frac{\sum_{i=1}^N (Z_i - M)^2}{N - 1} \quad (2.5)$$

$$Cov(d) = \frac{\sum_{i=1}^N (Z_i - M)(Z_{i+d} - M)}{N - 1} \quad (2.6)$$

dove Z_i è l'altezza del punto i , Z_{i+d} è l'elevazione del punto con un intervallo d dal punto i , M è il valore dell'altezza media di tutti i punti e N è il numero totale di punti.

Quando il valore di d cambia, anche $Cov(d)$ e $R(d)$ cambiano perché la differenza di altezza di due punti con diversi valori di d è differente.

I valori di covarianza e auto-correlazione possono essere tracciati rispetto alla distanza tra coppie di punti di dati.

La figura 2.3 è un esempio di auto-correlazioni variabili rispetto d .

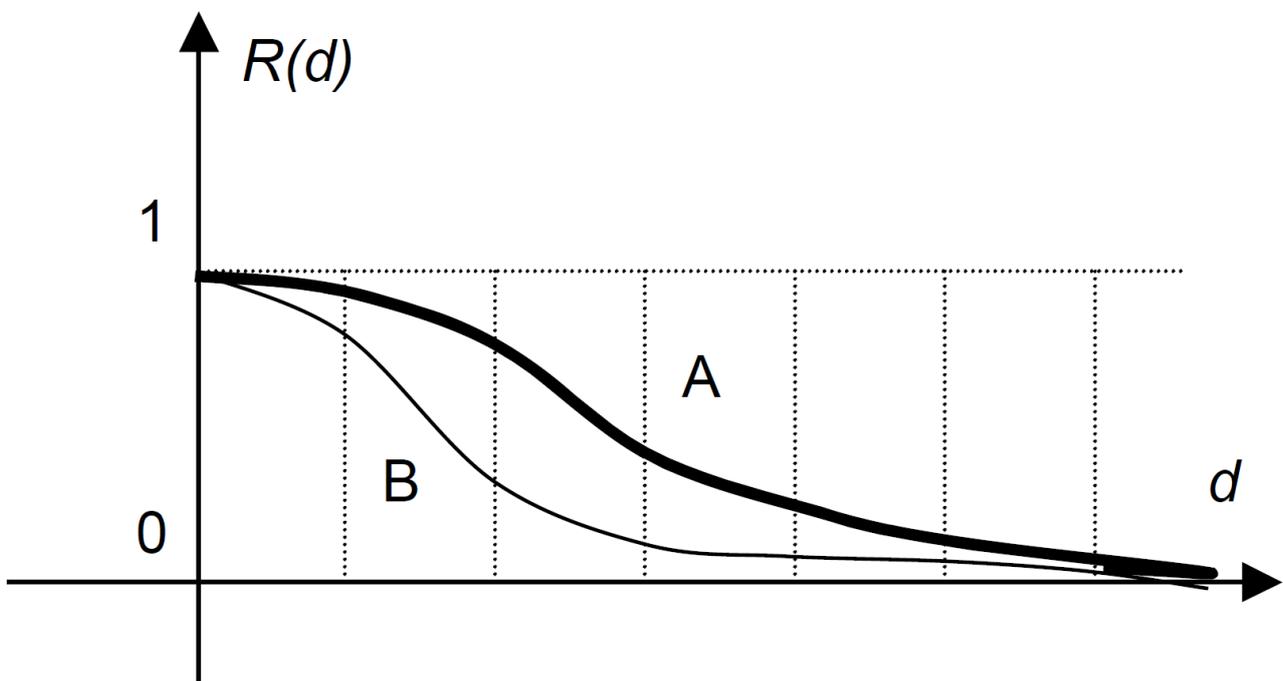


Figura 2.3 Due funzioni di auto-correlazione, i cui valori diminuiscono con un aumento della distanza tra i punti da 1 a 0.

In generale se il valore di d aumenta, il valore di $Cov(d)$ e $R(d)$ diminuisce.

La curva è solitamente descritta (Kubik and Botman[30], 1976) dalla funzione esponenziale:

$$Cov(d) = V x e^{-2d/c} \quad (2.7)$$

e il modello Gussiano:

$$Cov(d) = V x e^{-\frac{2d^2}{c^2}} \quad (2.8)$$

La relazione tra loro è che quanto più piccola è la somiglianza rispetto alla stessa distanza, tanto più complessa è la superficie del terreno.

2.2.5 SEMIVARIOGRAMMA

Il variogramma è un altro parametro usato per descrivere la somiglianza di una superficie DTM, simile all'auto-covarianza.

L'espressione per il suo calcolo è la seguente:

$$2\gamma(d) = \frac{\sum_{i=1}^N (Z_i - Z_{i+d})^2}{N} \quad (2.9)$$

dove $\gamma(d)$ è chiamato semivariogramma. Simile alla covarianza, il valore di $\gamma(d)$ varierà con la distanza.

Ma il cambio di direzione è opposto al caso della covarianza. Ovvero, $\gamma(d)$ aumenterà all'aumentare del valore di d . Il valore di $\gamma(d)$ può anche essere tracciato in relazione a d , risultando una linea curva. La curva può essere approssimata da una funzione esponenziale come segue:

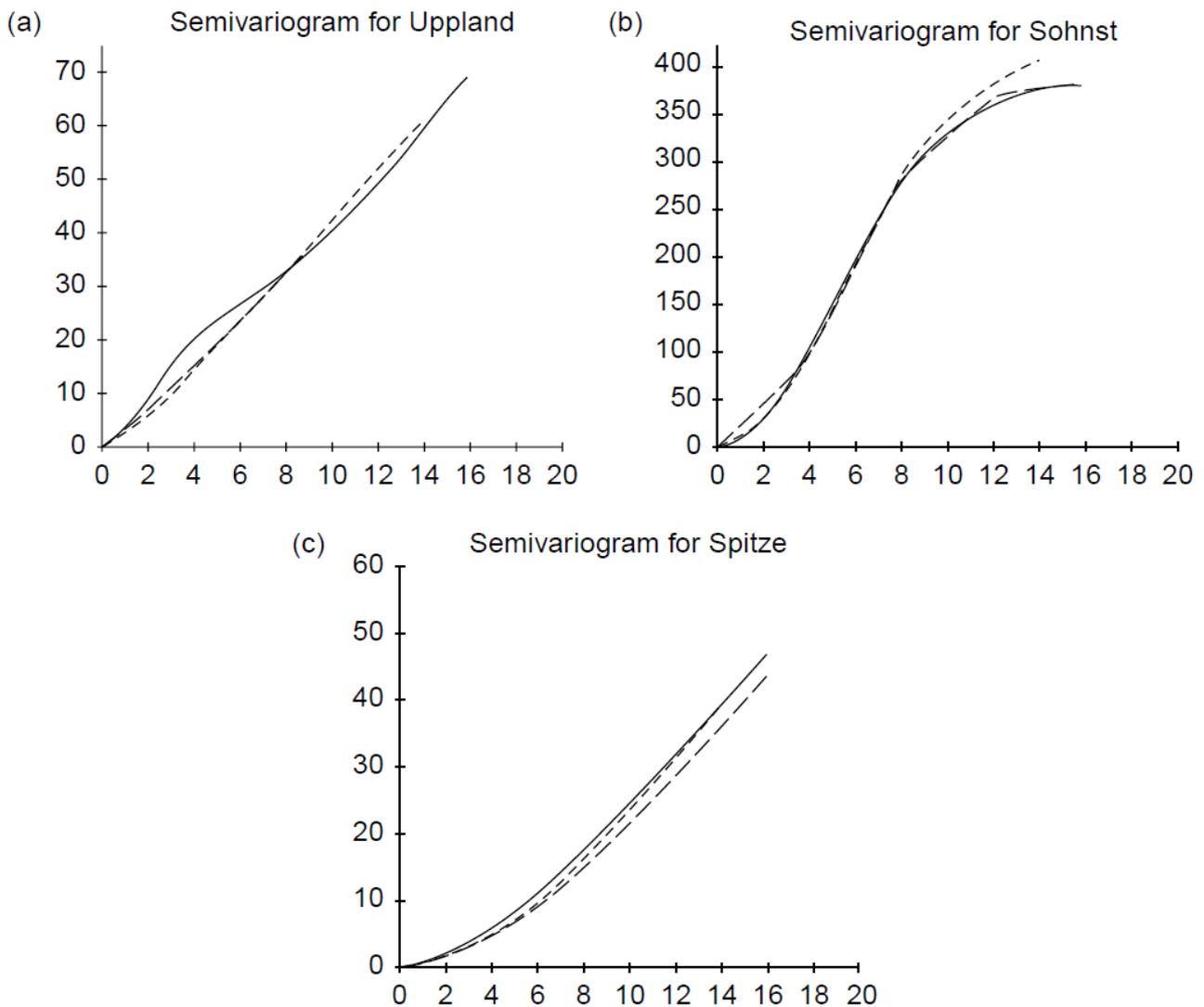
$$2\gamma(d) = A x d^b \quad (2.10)$$

dove A e b sono due costanti, esempio i parametri che descrivono la rugosità del terreno.

Una b più grande indica una superficie del terreno più liscia.

Quando b è prossima allo zero, il terreno è molto rugoso.

Sotto alcuni esempi di semivariogrammi:



Semivariogrammi per le tre aree di prova ISPRS, calcolate da serie di dati con vari intervalli

Frederiksen e altri [18,19] (1983, 1986) utilizzarono il semivariogramma per descrivere la rugosità del terreno nella modellazione digitale. Hanno anche provato a collegare questa variazione alla covarianza usata da Kubik e Botman [30] (1976).

2.3 VETTORE DI RUGOSITÀ DEL TERRENO: PENDENZA, RILIEVO E LUNGHEZZA D'ONDA

I descrittori numerici descritti sopra sono essenzialmente statistici.

Sono calcolati da un campione di punti del terreno prelevati dall'area del progetto. Solitamente alcuni profili vengono utilizzati come campione e quindi da questi ultimi viene calcolato un parametro. Tuttavia con questo approccio vi sono alcuni problemi. Uno di questi è che i parametri calcolati dai profili selezionati possono essere diversi da quelli derivati da tutta la superficie.

Se si tenta di calcolare descrittori per l'intera superficie, allora si rende necessario un campione dell'intera superficie. In questo caso si perde lo scopo di avere un descrittore del terreno per la progettazione.

Per questi motivi Li[35] (1990) ha indicato la pendenza e la lunghezza d'onda come descrittori principali per gli scopi del DTM.

2.3.1 PENDENZA, RILIEVO E LUNGHEZZA D'ONDA COME VETTORE DI RUVIDEZZA

I parametri di rugosità o complessità di una superficie del terreno utilizzati in geomorfologia sono stati anche esaminati da Mark[43] (1975). È stato rilevato che la rugosità non può essere completamente definita da un singolo parametro, ma deve essere un vettore di rugosità o un insieme di parametri.

In questo insieme di parametri, il rilievo viene utilizzato per descrivere la dimensione verticale (o l'ampiezza della topografia), mentre i termini di granulosità e trama (lunghezze d'onda più lunghe e più corte) vengono utilizzate per descrivere le variazioni orizzontali (in termini di frequenza di cambiamento).

I parametri per queste due dimensioni sono collegati dalla pendenza, pertanto, il rilievo, la lunghezza d'onda e la pendenza sono i parametri di rugosità.

La relazione tra loro può essere illustrata nella figura che segue:

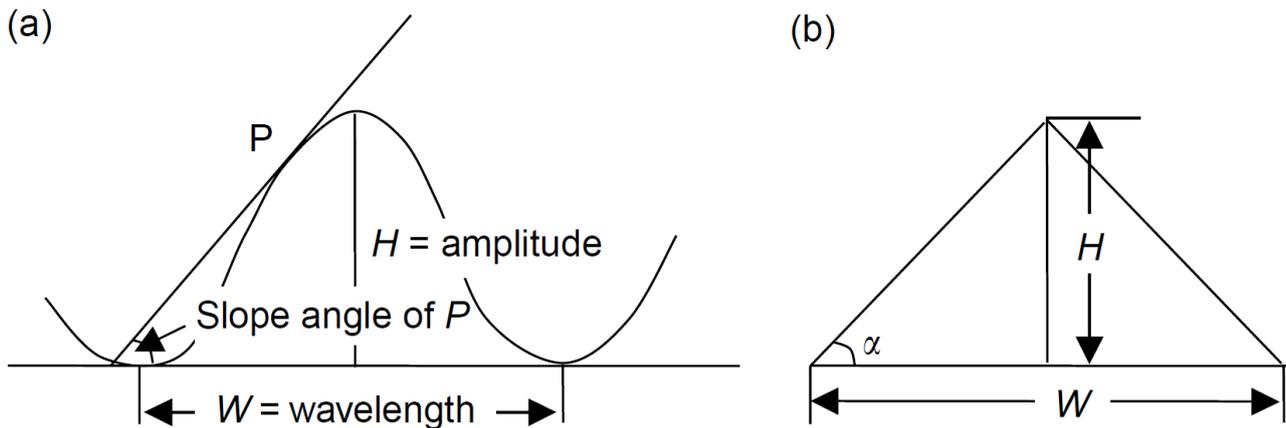


Figura 2.4 La relazione tra pendenza, lunghezza d'onda e rilievo:

(a) la loro completa relazione (b) diagramma semplificato

Si può chiaramente vedere che l'angolo di inclinazione in un punto sull'onda varia da posizione a posizione. L'equazione matematica che segue può essere usata come espressione approssimata della loro relazione:

$$\tan \alpha = \frac{H}{\frac{W}{2}} = \frac{2H}{W} \quad (2.11)$$

dove α indica il valore medio dell'angolo di pendenza, H è il valore di rilievo locale (o l'ampiezza) e W è la lunghezza d'onda. Se due di essi sono noti, allora il terzo può essere calcolato dall'equazione (2.11)

La pendenza e la lunghezza d'onda, insieme, sono raccomandate come vettore di rugosità del terreno per gli usi del DTM.

2.3.2 ADEGUATEZZA DEL VETTORE DI RUGOSITÀ DEL TERRENO

Sia dal punto di vista teorica che pratico, pendenza, altitudine, e lunghezza d'onda sono parametri importanti per la descrizione del terreno.

In geomorfologia, Evans [13] (1981) afferma:

“Una descrizione utile della morfologia in qualsiasi punto è data dall’altitudine e dalla pendenza e dalla curvatura.

La pendenza è definita da un piano tangente alla superficie in un dato punto ed è completamente specificata dalle due componenti: gradiente (componente verticale) ed aspetto (componente orizzontale).

Il gradiente è essenzialmente la derivata prima verticale della superficie di altitudine mentre l’aspetto è la derivata prima orizzontale.”

Le proprietà della superficie terrestre sono specificate dalla convessità (convessità positiva e negativa – concavità). Queste sono le variazioni di gradiente in un punto (nel profilo) e l’aspetto (nel piano tangente al contorno che passa attraverso il punto).

In altre parole sono derivate seconde.

Questi cinque attributi (altitudine, gradiente, aspetto, convessità del profilo e convessità del piano) sono gli elementi principali utilizzati per descrivere le superfici del terreno. Tra questi, l’inclinazione, che comprende sia il gradiente che l’aspetto, è l’attributo fondamentale.

Il gradiente dovrebbe essere misurato nella direzione più ripida, tuttavia, quando lo si prende di un profilo o in una direzione specifica, in realtà si ottiene e si utilizza il vettore del gradiente e dell’aspetto.

Pertanto, il termine pendenza o angolo di inclinazione viene utilizzato in questo contesto per fare riferimento al gradiente in qualsiasi direzione specifica.

L’importanza della pendenza è stata realizzata anche da altri come citato da Evans [14] (1972), Strahler[54] (1956) ha sottolineato che “la pendenza è forse l’aspetto più importante della forma della superficie, poiché le superfici possono essere formate completamente dagli angoli di pendenza...”

La pendenza è la derivata prima dell'altitudine sulla superficie del terreno, mostra il tasso di variazione in altezza del terreno rispetto alla distanza.

Dal punto di vista pratico, l'uso della pendenza (e rilievo) come descrittore principale del terreno per gli usi del DTM può essere giustificato per i seguenti motivi:

1. Tradizionalmente, la pendenza è stata riconosciuta come molto importante ed utilizzata nel rilevamento e mappatura.
2. Ad esempio, le specifiche della mappa per i contorni vengono fornite in termini di angolo di inclinazione in tutto il mondo.
3. Nella determinazione degli intervalli del contorno verticale (CIs) per le carte topografiche, pendenza e rilievo (intervallo di altezza) sono i due parametri principali considerati.
4. Ad esempio, la tabella 2.1 è un sistema di classificazione adottato dall'ufficio cinese di rilevamento e mappatura (SBSM) nelle sue specifiche per 1:50000 mappe topografiche.
5. Nella pratica del DTM, molti ricercatori (ad esempio Ackermann [1] 1979, Ley [32] 1986, Li [35,34] 1990, 1992b) hanno notato l'elevata correlazione tra gli errori DTM e l'angolo di pendenza medio della regione.

2.3.3 STIMA DELLA PENDENZA

Quando descriviamo il terreno usando la pendenza unita a lunghezza d'onda o rilievi, bisogna considerare due problemi riguardo la stima dei valori, ovvero la disponibilità e la variabilità.

Con disponibilità facciamo riferimento alla reperibilità dei valori di pendenza prima del campionamento, per facilitare il calcolo degli intervalli di campione. Se esiste un DTM in una area, allora possono essere calcolati i valori di pendenza per punti DTM, e la media può essere usata come valore rappresentativo (Zhu et al.[59], 1999). Altrimenti, la pendenza può essere stimata con l'utilizzo di un modello stereo formato da una coppia di fotografie aeree sovrapposte, oppure attraverso carta a curve di livello. Il metodo proposto da Wentworth [58] (1930) viene ancora

ampiamente usato per stimare la pendenza media di una area dalla carta a curve di livello

Table 2.1 Terrain Classification by Means of Slope and Relief

Terrain Type	CI (m)	Slope (°)	Relief (Height Range) (m)
Plain	10 (5)	<2	<80
Upland	10	2–6	80–300
Hill	20	6–25	300–600
Mountain	20	>25	>600

Il valore medio di pendenza (α) di area omogenea può essere stimata come segue:

$$\alpha = \arctan\left(\Delta H \times \frac{\sum L}{A}\right) \quad (2.12)$$

dove ΔH è l'intervallo delle curve di livello, L è la lunghezza totale delle curve dell'area e A è la dimensione dell'area.

Se non esiste una carta a curve di livello per l'area considerata, la pendenza allora può essere stimata tramite aerofotografia.

Alcuni di questi metodi di misurazione di pendenza tramite l'uso di aerofotogrammetria sono stati esaminati da Turner [56] (1997).

Con variabilità si intende come i valori di pendenza cambino da territorio a territorio, così che i valori rappresentativi di una area specifica possono non essere sufficientemente adeguati per un'altra. In questo caso possono essere usati i valori medi, come suggerito da Ley [32] (1986). Se la pendenza di una area ha una variabilità troppo alta, allora si procederà dividendo l'area in parti più piccole per procedere con la stima. Ogni area può necessitare di diverse strategie di campionamento.

2.4 BASI TEORETICHE PER CAMPIONAMENTO DI SUPERFICI

Dopo aver preso i valori di pendenza e rilievo (intervallo di altezza) è possibile calcolare le variazioni di lunghezze d'onda di un terreno. Questi parametri vengono usati per determinare la strategia di campionamento e gli intervalli per

l'acquisizione dati. In primo luogo, di seguito vennero discusse alcune teorie relative al campionamento di superficie.

2.4.1 FONDAMENTI TEORICI PER IL CAMPIONAMENTO

Dal punto di vista teorico un punto sulla superficie è 0-D, ovvero senza dimensione, mentre la superficie di un terreno include un infinito numero di punti. Se viene richiesta la geometria intera di una superficie terrena è necessario misurare un numero infinito di punti. Ciò significa che è impossibile acquisire una panoramica comprensiva di tutta la superficie. Nella pratica tuttavia un punto misurato su una superficie rappresenta l'altezza di una area di dimensione specifica: è quindi possibile usare una serie di punti finiti per costituire la superficie. Nella maggior parte dei casi infatti non vengono richiesti dati completi di superficie per un progetto DTM specifico, è pertanto necessario limitare la misurazione a punti dati sufficienti a rappresentare la superficie per un determinato grado di accuratezza e precisione.

Il problema che interessa uno specialista DTM è con quanta precisione rappresentare la superficie terrena tramite un numero limitato di punti di elevazione, ovvero, quale intervallo di campionamento usare su una superficie nota (o un profilo). Il teorema di campionamento fondamentale usato in larga scala in matematica, statistica, ingegneria e altre discipline correlate può essere sfruttato come base teorica.

Il Teorema può essere espresso come segue:

Se una funzione $g(x)$ è campionata ad un intervallo d allora le variazioni nelle frequenze più alte di $1/(2d)$ non possono essere ricostruite dai dati campione.

Ovvero, quando vengono presi due campioni (ossia due punti) da ogni periodo di onde con le frequenze più alte nella funzione $g(x)$, la funzione originale $g(x)$ può essere ricostruita completamente con i dati campione. Per i modelli di terreno, se un profilo è abbastanza lungo da essere rappresentativo per il terreno locale, esso può essere allora raffigurato attraverso la somma delle sue sinusoidi e cosinusoidi.

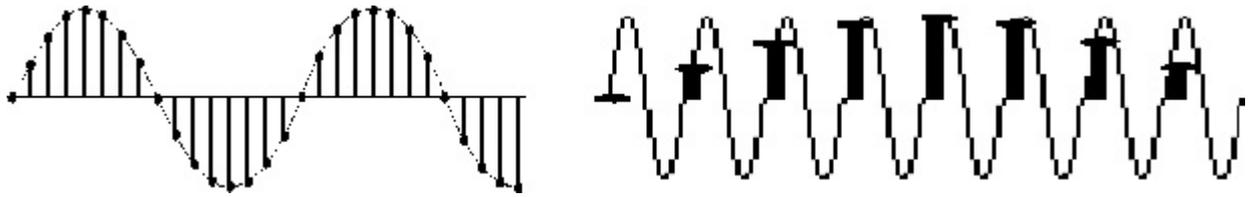


Figura 2.5 La relazione tra l'intervallo minimo e la frequenza funzionale maggiore. A sinistra: l'intervallo di campionamento è inferiore della metà della frequenza funzionale, perciò è possibile procedere con la ricostruzione completa; a destra: l'intervallo di campionamento è maggiore della metà della frequenza funzionale, dunque i dati relativi alla funzione vengono perduti.

Se presupponiamo che il numero dei termini di questa somma sia finito, esiste allora un valore massimale di frequenza, F , per questo serie di sinusoidali. Secondo il teorema, il profilo terreno può essere ricostruito per intero se l'intervallo di campionamento lungo il profilo è inferiore a $1/(2F)$ (vedi Figura 2.5, a sinistra). Estendendo questa idea alle superfici il teorema può essere usato per determinare gli intervalli di campionamento tra profili per ottenere informazioni idonee riguardo una superficie specifica. Al contrario, se un profilo è campionato su intervallo d , allora i dati del terreno con lunghezza d'onda inferiore a $2d$ saranno completamente perduti. (Figura 2.5, a destra).

Pertanto, come evidenziato da Peucker [48] (1972), “una data griglia regolare di punti di campionamento può raffigurare solo variazioni di dati con lunghezze d'onda superiori due volte o più dell'intervallo di campionamento”

2.4.2 CAMPIONARE DA PUNTI DI VISTA DIVERSI

I punti di una superficie possono essere visionati in maniera differente da molteplici punti di vista, appartenenti ad esempio alla statistica, geometria, topografia, scienza, etc. Di conseguenza è possibile ideare diversi metodi di campionamento e valutarli in base ad ognuna delle seguenti (Li [35], 1990):

1. campionamento su base statistica
2. campionamento su base geometrica
3. campionamento su base caratteristica.

Dal punto di vista statistico, una superficie terrena è una popolazione (chiamata spazio campione) e il campionamento può essere portato avanti sia in modo sistematico, sia in modo casuale. La popolazione può allora essere studiata attraverso i dati campione. Utilizzando il metodo casuale, ogni punto campione viene selezionato da un meccanismo casuale a probabilità di selezione conosciuta. La probabilità di selezione può cambiare da punto a punto. Se la probabilità è equivalente per tutti i punti di campionamento, allora si dice campione casuale semplice. Per la sistematica invece i punti sono selezionati con metodo prestabilito, ognuno con probabilità 100% di essere scelto. Altre possibili strategie sono il campionamento stratificato e cluster; questi metodi non sono però efficaci per la modellazione di terreni e saranno dunque omessi.

Dal punto di vista geometrico una superficie del terreno può essere rappresentata tramite pattern geometrici differenti, di natura regolare o irregolare. Il pattern regolare può essere suddiviso in pattern 1-D o 2-D.

Se il campionamento viene condotto tramite un pattern regolare solo per una dimensione, allora il metodo corrispondente sarà chiamato profiling (o contouring).

Un pattern regolare 2-D può essere un quadrato o una griglia regolare, oppure una serie contigua di triangoli equilateri, esagoni, o altre figure geometriche regolari.

Dal punto di vista delle caratteristiche, una superficie terrena è composta da un finito numero di punti e i contenuti di informazione di questi punti possono variare a seconda della loro posizione. I punti di superficie sono quindi classificabili in due gruppi, uno contenente i punti (e linee) a caratteristica specifica (*F-S*) (o superficie specifica), l'altro i punti casuali. Un punto *F-S* è un massimo locale sulla superficie terrena, come ad esempio picchi, fosse e passi.

Questi punti possono non solo rappresentare i loro valori di elevazione, ma anche dare maggiori informazioni topografiche riguardo le loro aree circostanti. I picchi sono le sommità di montagne e colline, perciò hanno un assortimento di punti ad altezza più bassa intorno a loro; al contrario invece i fossi sono i fondi delle vallate (buchi), e hanno di conseguenza valori ad altezza maggiore intorno a loro. I punti *F-S* sono pertanto più importanti, perché, oltre ad avere coordinate informative riguardo ad essi stessi, contengono in modo implicito informazioni riguardo le zone circostanti. Gli *F-S* sono, quindi, punti che danno informazioni sulle caratteristiche del terreno più significative rispetto ai punti comuni. Le linee che connettono punti *F-S* distinti sono chiamate linee a caratteristica specifica, come ad esempio linee di

cresta, linee di percorso (fiumi, vallate, gole etc.), linee divisorie e così via. La Figura sotto ci mostra i punti *F-S* e linee.

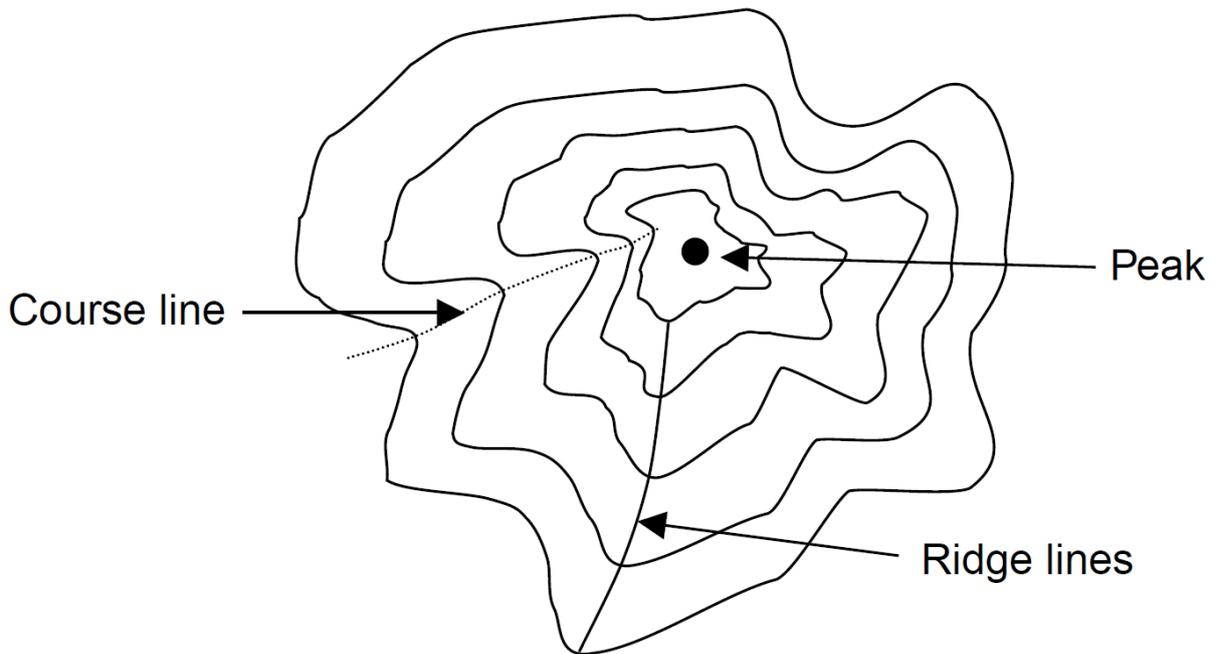


Figura 2.6 Punti e linee caratteristiche del terreno.

Le linee di cresta sono le linee che collegano coppie di punti così che i loro punti siano massimi locali (vedi Figura 2.7).

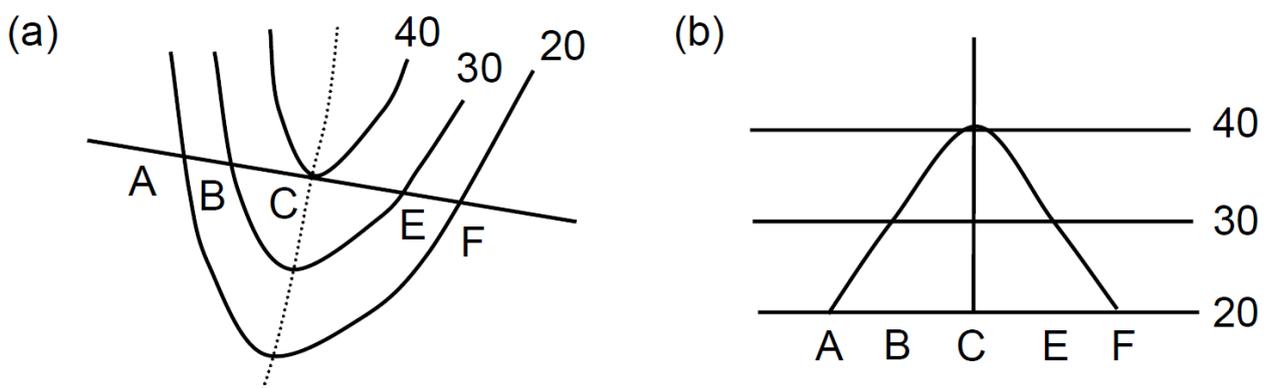


Figura 2.7 Punti (ad esempio C) su una linea di cresta che sono massimi locali.

In modo analogo le linee di percorso connettono coppie o serie di punti così che i loro punti siano minimi locali.

I punti di intersezione di questi due tipi di linee si chiamano passi. Sono quindi punti a massima elevazione in una direzione e minima in un'altra allo stesso tempo. Dal punto di vista morfologico una superficie terrena è caratterizzata del tutto dai suoi angoli di pendenza. L'importanza dei punti *F-S* nasce dunque dal fatto che in questi punti la pendenza cambia non solo in direzione, ma anche in segno e in magnitudine. Per esempio nei picchi cambia da positivo a negativo, nei fossi da negativo a positivo. Ci sono inoltre due tipi di punti dove la pendenza cambia il suo angolo verticale ma non il suo segno. Essi sono detti punti convessi e punti concavi. Se una pendenza viene vista come una transizione su-giù, la variazione di pendenza è da gentile a ripida a un punto convesso, da ripida a gentile a un punto concavo. La Figura 2.8 ci mostra questi punti:

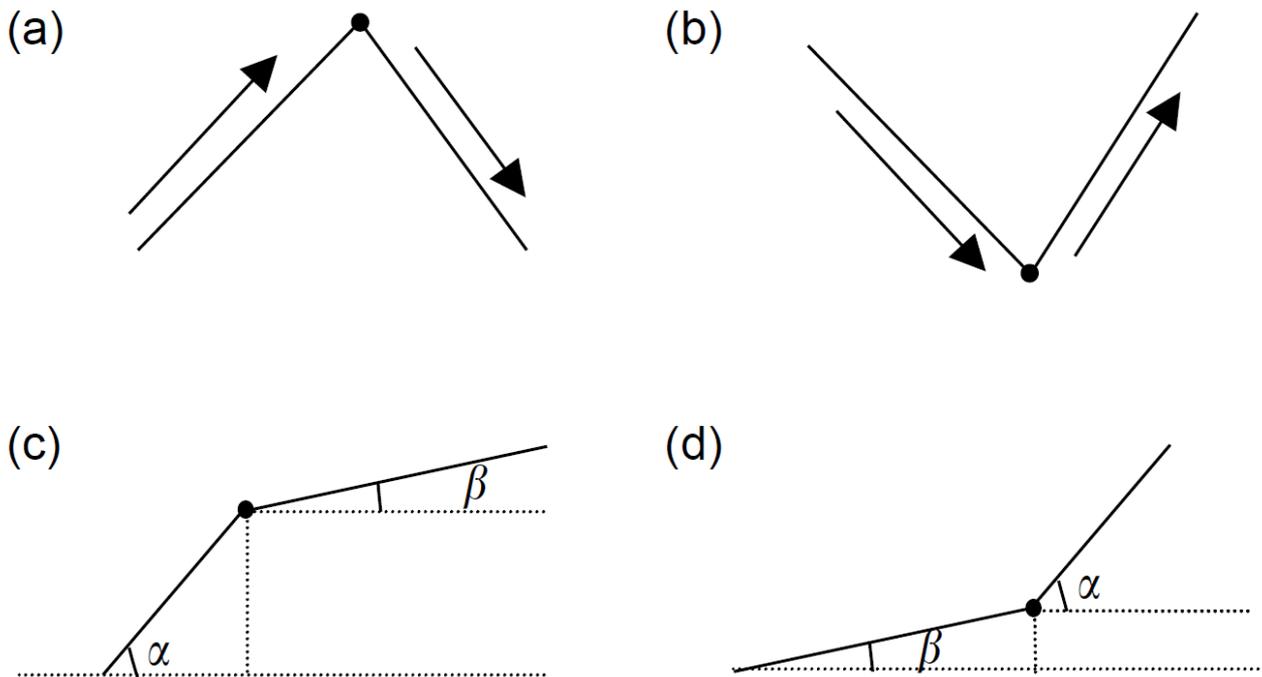


Figura 2.8 La pendenza cambia nei punti *F-S* (picchi, buche e punti convessi e concavi). (a) Picco ($+ \Rightarrow -$) (b) Pozzi ($- \Rightarrow +$) (c) Punto convesso ($\alpha \neq \beta$) (d) Punto concavo ($\alpha \neq \beta$)

I punti convessi e concavi sono anche invariabilmente punti *F-S*, uniti per diventare caratteristiche lineari. Nel caso speciale in cui la variazione di pendenza è molto improvvisa allora queste linee si chiamano linee divisorie.

2.5 STRATEGIA DI CAMPIONAMENTO PER L'ACQUISIZIONE DATI

2.5.1 CAMPIONAMENTO SELETTIVO: VERY IMPORTANT POINTS PIÙ ALTRI PUNTI

Il campionamento selettivo consiste nel selezionare i Very Important Points (VIPs) per garantire una copertura dati piuttosto esaustiva. In aggiunta, altri punti vengono presi per raggiungere una certa densità dei dati campione. Questo metodo possiede un particolare vantaggio, perché meno punti possono rappresentare la superficie con alta precisione.

Tuttavia, se si usa la fotogrammetria, questo non è un metodo efficace per selezionare punti dati, poiché richiede una interpretazione significativa del modello stereo (ovvero superficie terrena ricostruita da una coppia di fotografie aeree) da un operatore formato. Nella pratica nessuna procedura automatizzata può essere applicata sulla base di questa strategia. È dunque raro trovare questo metodo in organizzazioni per la topografia (ad esempio organizzazioni militari per il rilievo), dove la velocità di acquisizione dati è di prima importanza.

2.5.2 CAMPIONARE CON UNA DIMENSIONE FISSA: PROFILING E CONTOURING

Nella fotogrammetria analogica, i modelli stereo sono costruiti con una coppia di fotografie aeree, e la pratica più comune è la misurazione diretta di contorni tramite modello stereo ricostruito. Il valore dell'altezza viene fissato per ogni contorno e marcatori fluttuanti (uno per la fotografia di sinistra e uno per quella di destra, ed entrambi coincidenti se situati sul livello di superficie del modello stereo) vengono spostati sulla superficie del modello stereo, il quale viene realizzato tramite una combinazione di movimento in direzione X e Y , condotto da ruote meccaniche. Il termine *contouring* indica che il campionamento dati viene fatto lungo i contorni. Coincide esattamente con la tradizionale misurazione di contorni sul modello stereo, l'unica differenza è che nel campionamento dati DTM tutti i punti nelle linee di contorno sono registrati in forma digitale e la registrazione punti può essere selettiva lungo la linea di contorno.

Nel contouring il valore di altezza in dimensione Z è fissato quando si misura una linea di contorno. Al contrario, se la dimensione fissata è X , allora il movimento dei marcatori fluttuanti sulla superficie del modello stereo si trova sul piano YZ . Il risultato è un profilo sul piano YZ . Il processo atto a ottenere un profilo in forma digitale è detto profiling. Naturalmente il profiling può essere su ogni direzione diversa dai piani XZ e YZ .

2.5.3 CAMPIONARE CON DUE DIMENSIONI FISSE: GRIGLIA REGOLARE E CAMPIONAMENTO PROGRESSIVO

Come suggerisce il nome, il campionamento a griglia regolare fa sì che i dati vengano estrapolati in forma di griglia regolare. Il campionamento viene realizzato collocando intervalli prefissati in direzione X e Y per formare una griglia, poi tutti i punti sui nodi della griglia vengono misurati.

In termini di campionamento però è necessario essere in possesso di una grande quantità di dati per garantire la rilevazione di tutte le discontinuità di pendenza, o garantire che i cambiamenti topografici siano rappresentati con precisione.

Per risolvere questo problema di ridondanza dati Makarovic [37] (1973) ideò una strategia modificata, di nome campionamento progressivo. Con questo procedimento il campionamento viene riportato su un reticolo il cui intervallo cambia progressivamente da grezzo a fine lungo una area.

La procedura è la seguente. Per prima cosa, viene misurata una serie di punti griglia ad una densità bassa, poi vengono analizzati i valori di elevazione su questi punti online mediante un computer. Il computer genera le posizioni dei nuovi punti da campionare nel turno successivo. La procedura viene ripetuta fino a quando i criteri precedentemente stabiliti vengono soddisfatti.

Per questi criteri Makarovic[37] (1973) propose all'inizio di usare le differenze seconde di valori di elevazione calcolati sia lungo le righe, che le colonne della griglia grezza di campionamento. Diversi o ulteriori criteri sono stati in seguito proposti (Makarovic [38], 1975), come ad esempio il criterio parabolico, di distanza, contorno e il cosiddetto criterio di variazione random. Di certo altri criteri possono essere usati come base di strategia di campionamento per un tipo particolare di terreno.

Il campionamento progressivo può risolvere in parte il problema di ridondanza intrinseco nel campionamento a griglia regolare, però possiede comunque dei difetti, come affermato da Makarovic [40] (1979):

1. i punti di dati campionati mostrano un alto grado di ridondanza in prossimità di cambiamenti improvvisi nella superficie terrena
2. alcune caratteristiche pertinenti possono scomparire nel primo turno a causa della sua spaziatura larga (cioè grezza)
3. il percorso di tracciamento è piuttosto lungo e diminuisce l'efficienza.

2.5.4 CAMPIONAMENTO COMPOSITO: UNA STRATEGIA INTEGRATA

L'idea del campionamento progressivo sembra ottima; fu infatti applicata da alcuni sistemi di fotogrammetria, come il calcolatore analitico. Nella pratica però non fu resa effettiva a tutti a causa delle ragioni elencate nella sezione precedente. Una linea di pensiero più organica è quella di unire il campionamento a griglia regolare con il campionamento selettivo, dato che il primo è molto efficace nella misurazione, il secondo nella rappresentazione della superficie. Questa combinazione è detta campionamento composito. Con questo metodo i cambiamenti improvvisi - caratteristiche specifiche del terreno quali creste, percorsi etc. - sono campionati in maniera selettiva e i valori e i punti *F-S* - picchi, passi e valli - sono sommati ai dati campionati su griglia regolare.

Ci sono così due tipi di campionamento composito. Il primo è stato già menzionato, il secondo è una combinazione tra campionamento selettivo e progressivo. La pratica ha dimostrato che l'uso del campionamento composito può risolvere molti problemi riscontrati con la griglia regolare e il metodo progressivo.

2.6 CARATTERISTICHE DEI DATI SORGENTE CAMPIONATI

Quando si parla di modello digitale di terreno, il campionamento è il processo di selezione di quei punti che devono essere misurati in posizioni date. L'operazione può essere caratterizzata da due parametri, ovvero la distribuzione e la densità.

Misurare significa determinare le coordinate X e Y di un punto ed è un processo dipendente dalla precisione. Il campionamento può avvenire prima o dopo la presa delle misure. Campionare dopo aver misurato significa scegliere prima dei punti presi da serie di punti dati misurati, di solito con grande densità.

La precisione può dunque essere inclusa anche tra le caratteristiche dei dati campione, chiamati dati sorgente DTM (DTM source data), dati grezzi o semplicemente dati sorgente.

2.6.1 DISTRIBUZIONE DEI DATI SORGENTE CAMPIONATI

La distribuzione dei dati campione è di solito specificata secondo i termini di posizione e pattern. La posizione è definita da due coordinate, ovvero la longitudine e la latitudine in un sistema di coordinate geografiche, nord ed est invece per un sistema di coordinate a griglia. Riguardo i pattern, è presente una varietà di questi a disposizione per essere selezionati, come griglie regolari o rettangolari; questi pattern possono essere classificati in diversi modi.

La Figura 2.9 ci mostra uno di questi ordinamenti.

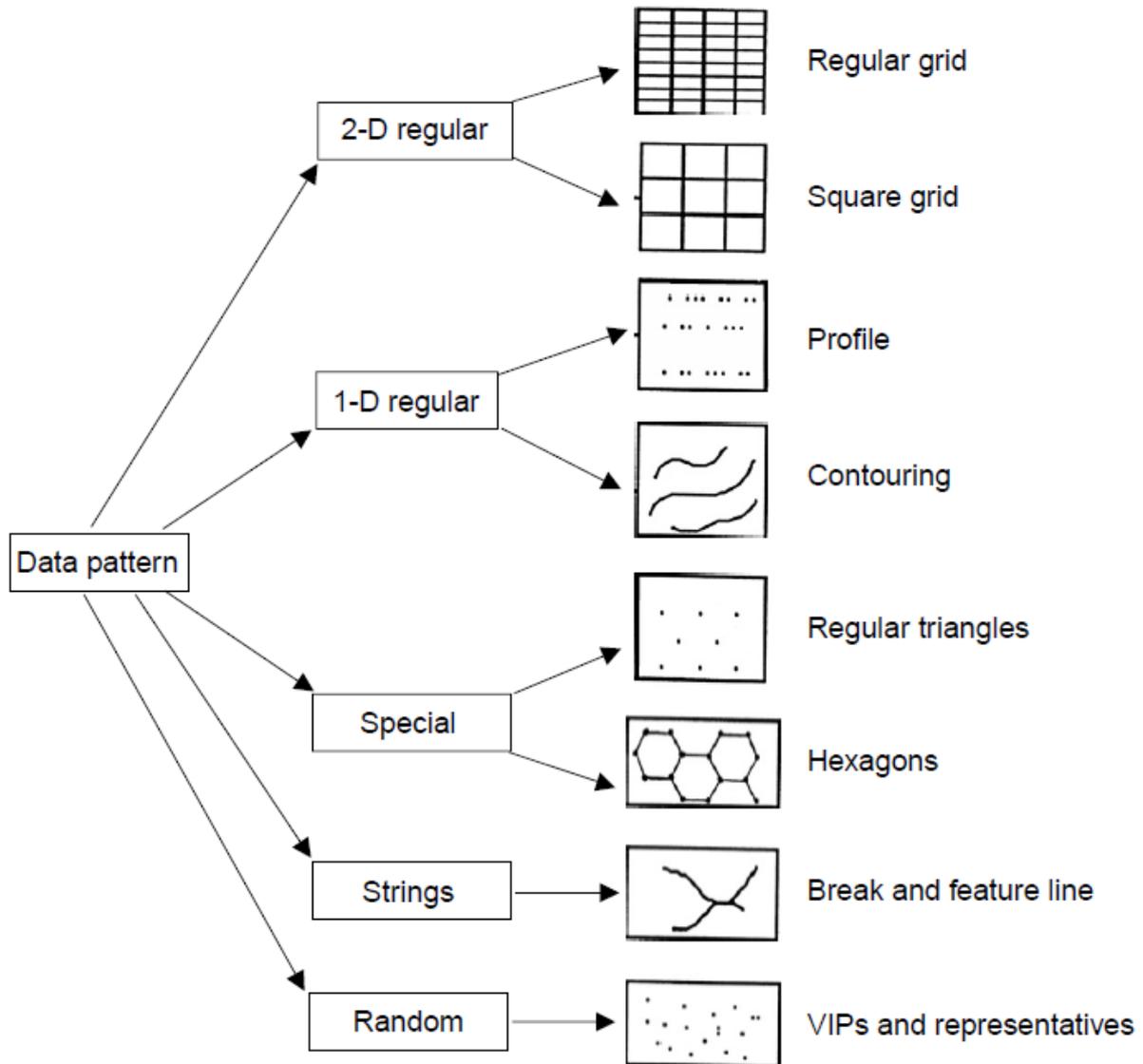


Figura 2.9 Modelli di punti di dati campionati.

I 2D regolari sono prodotti tramite griglia regolare o campionamento progressivo. Il pattern conseguente può essere una griglia rettangolare, quadrata, o una struttura gerarchica (o progressiva) di queste due. La griglia quadrata è quella usata più comunemente; i dati strutturati gerarchicamente, campionati grazie a metodo progressivo, possono essere decomposti a loro volta in una normale griglia quadrata. I dati regolari per una dimensione sono prodotti tramite campionamento con una dimensione fissa (X , Y , o Z).

Questo pattern è dunque generato grazie al profiling o contouring.

Esistono anche altri pattern regolari speciali, quali ad esempio triangoli equilateri, esagoni etc., però sembra che queste strutture non vengano usate da molti quanto griglie di dati regolari o profilati.

Come già discusso, i pattern di dati possono essere divisi in due categorie, pattern regolari e irregolari. I pattern regolari sono stati già discussi sopra. I pattern irregolari sono in genere classificati in tre gruppi, ovvero dati casuali, cluster e dati in sequenza. Con dati casuali si intende che i punti misurati sono collocati in modo casuale, ossia in forma non specifica. I dati cluster indicano dati misurati riscontrabili a grappolo, cosa molto comune in geologia. I dati in sequenza non si trovano su un pattern regolare, però seguono delle peculiarità specifiche (come ad esempio linee divisorie).

2.6.2 DENSITÀ DEI DATI SORGENTE CAMPIONATI

La densità è un'altra caratteristica dei dati campione; può essere indicata da misurazioni come la distanza tra due punti, il numero di punti per unità di superficie, la frequenza variabile (Nyquist) e così via.

La distanza tra due punti campione è in genere riferita come intervallo campione (o distanza o spaziatura). Se l'intervallo campione varia a seconda della posizione allora si può usare un valore medio. Questa misura è specificata da un numero con una unità, ad esempio 20 m. Un'altra misura che può essere usata nella pratica di modellazione del terreno è il numero di punti per unità di superficie, per esempio 500 punti per chilometro quadro.

Se l'intervallo campione viene trasformato da dominio di spazio a dominio di frequenza, allora può essere estrapolata la frequenza limite (la frequenza massima che i dati campione rappresentano). Da un'altra punto di vista la frequenza massima richiesta può essere usata anche come misura della densità dei dati, dato che l'intervallo campione può essere ottenuto anche da questa (il valore di frequenza massima).

La Figura 2.10 disegna la frequenza di una curva:

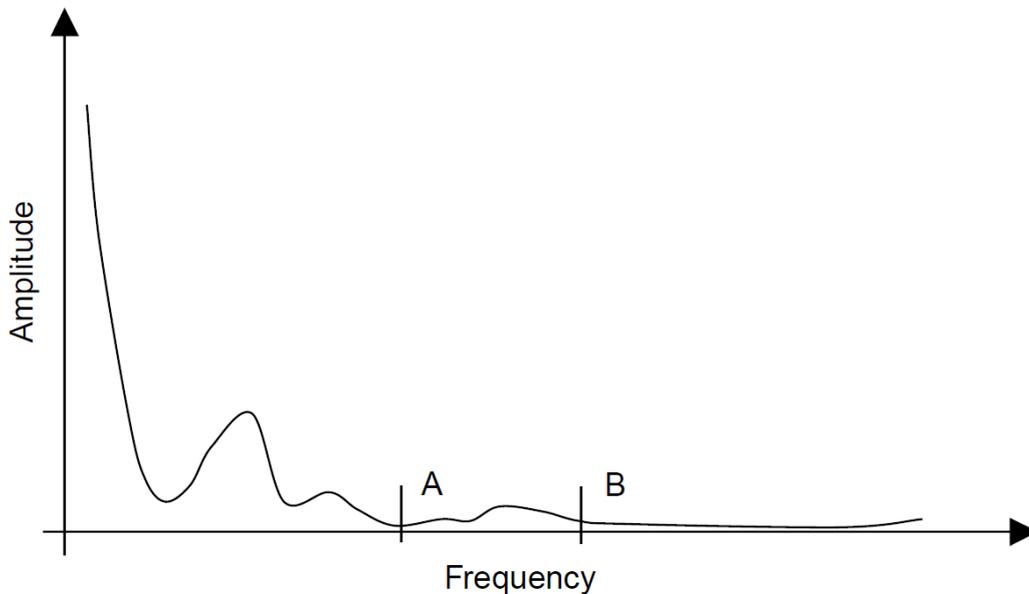


Figura 2.10 Frequenza di taglio: lo swing si approssima allo 0.

La frequenza sul punto *B* può essere considerata come il limite. Infatti, l'oscillazione del punto *A* è già vicina a 0 e il valore al punto *A* può anch'esso essere considerato come frequenza limite da un certo verso.

2.6.3 PRECISIONE DEI DATI SORGENTE CAMPIONATI

La precisione dei dati campione dipende in larga parte dai metodi usati per la misurazione, come gli strumenti usati, la modalità di calcolo e la tecnica applicata. Con tecnica intendiamo la rilevazione di campo, fotogrammetria, o la digitalizzazione della mappa. In generale, i dati acquisiti con la rilevazione sono di solito i più precisi e i dati della digitalizzazione i più incerti. Di certo esistono sempre delle eccezioni, per esempio, se gli strumenti usati per la rilevazione del territorio sono di accuratezza bassa, ma le mappe esistenti sono su larga scala e digitalizzate da strumenti molto precisi, allora questi dati potrebbero essere più definiti rispetto a quelli provenienti dalla rilevazione. Bisogna quindi prendere in considerazione delle condizioni per l'affermazione generale qui sopra espressa, ossia l'esistenza di tecniche compatibili in termini di scala.

Con strumento si indica il tipo di strumentazione che a sua volta sottintende una limitazione potenziale di precisione. Si possono estrapolare risultati ad alta

precisione solo quando gli strumenti utilizzati per la misurazione sono di alta qualità.

La modalità di misurazione può essere o statica, o dinamica. La seconda è una misurazione effettuata in modo dinamico. Per la rilevazione di territorio si usa un ricevitore GPS trasportato da un veicolo o uno strumento di perizia; per la fotogrammetria si prendono dati quando i marcatori fluttuanti sono ancora in movimento. Nella digitalizzazione si registrano punti quando si muove il cursore. Con la modalità dinamica i dati acquisiti sono in genere molto meno precisi.

CAPITOLO 3

DIGITAL TERRAIN SURFACE MODELING

Nello scorso capitolo abbiamo discusso le tecniche di acquisizione dati sorgenti DTM. La modellazione di superfici, o surface modeling, può essere applicata anche per la ricostruzione di superfici del terreno; questo processo è l'argomento di questo capitolo.

3.1 CONCETTI BASE DI SURFACE MODELING

3.1.1 INTERPOLAZIONE E SURFACE MODELING

Un modello digitale di terreno è un modello matematico (o digitale) della superficie del terreno. Usa una o più funzioni per rappresentare la superficie secondo alcuni metodi specifici, i quali si basano su serie di punti dati misurati. Queste funzioni matematiche sono in genere chiamate *funzioni interpolanti*. Il processo attraverso il quale viene rappresentata la superficie viene invece detto *ricostruzione di superfici* o *modellazione di superfici* (*surface reconstruction - surface modeling*), mentre la superficie ricostruita viene spesso chiamata a sua volta superficie DTM. Per questa ragione la ricostruzione di superfici del terreno può anche essere considerata costruzione di superfici DTM o generazione di superfici DTM. Dopo aver completato questo processo è possibile estrarre dalla superficie DTM informazioni sull'altezza di ogni punto sul modello.

Il concetto di *interpolazione* in DTM è un po' diverso rispetto alla *ricostruzione di superfici*. Il primo include l'intero processo di stima dei valori di elevazione di nuovi punti, che può essere a sua volta usato per la ricostruzione di superfici, mentre il secondo mette in evidenza il processo vero e proprio di ricostruzione, che potrebbe non includere l'interpolazione. Per dare chiarezza a questa distinzione possiamo dire che la ricostruzione di superfici tratta solo il “*come la superficie è ricostruita e di quale tipo di superficie ci stiamo occupando*”. Per fare un esempio, dovrebbe essere una superficie curva continua o dovrebbe essere una serie congiunta di facce planari?

Diversamente, l'interpolazione ha uno scopo più ampio: può includere ricostruzione di superfici ed estrazione di informazioni sull'altezza dalla superficie ricostruita; può anche comprendere la formazione di curve di livello tramite o punti di posizione casuale o serie misurate di valori di elevazione ottenute su griglia regolare. In entrambi questi casi i valori misurati sono riprodotti sulla conseguente superficie DTM e il processo di interpolazione viene eseguito solo dopo la ricostruzione di superficie, o per estrarre informazioni sull'altezza di punti specifici o per costruire dei contour plot.

3.1.2 MODELLAZIONE DI SUPERFICIE E NETWORK DTM

Un *network* è una struttura dati che interessa soprattutto l'interrelazione dei punti dati nel senso planimetrico-posizionale, ma non necessariamente nella terza dimensione. Questa è la differenza più importante tra un network e la superficie DTM costruita dal network che comprende una serie di sottosuperfici che possono avere o non avere continuità nella derivata prima. La relazione topologica per una griglia regolare è intrinseca (ovvero implicita) grazie a delle caratteristiche speciali della griglia stessa che fanno sì che questa differenza non sia apprezzabile o ben visibile. Al contrario nel caso di modelli a base triangolare la distinzione è molto netta: la relazione topologica deve essere chiarita per poter formare un network triangolare; la terza dimensione può essere poi aggiunta al network per formare una superficie continua con inclusa una serie di facce triangolari contigue.

3.1.3 FUNZIONE DI SURFACE MODELING: POLINOMIO GENERALE

Per modellare un'area su superficie del terreno bisogna utilizzare una funzione matematica. La funzione può essere espressa in frequenza o nel dominio spaziale; in quest'ultimo l'espressione matematica generale è la seguente:

Termini individuali	Ordine	Termini descrittivi	N. di Termini
$Z = a_0$	Zero	Planare 1	1
$+a_1X + a_2Y$	Primo	Lineare 2	2
$+a_3X^2 + a_4Y^2 + a_5XY$	Secondo	Quadratica 3	3
$+a_6X^3 + a_7Y^3 + a_8X^2Y + a_9XY^2$	Terzo	Cubica 4	4
$+a_{10}X^4 + a_{11}Y^4 + a_{12}X^3Y + a_{13}X^2Y^2 + a_{14}XY^3$	Quarto	Quartica 5	5
$+a_{15}X^5 + a_{16}Y^5 + a_{17}X^4Y + a_{18}X^3Y^2 + a_{19}X^2Y^3 + a_{20}XY^4$	Quinto	Quintica 6	6

Tabella 3.1 Funzione Polinomiale Usata nel Surface Reconstruction (ricostruzione superfici).

$$Z = f(x, y) \quad (3.1)$$

La funzione più in uso per la realizzazione di questa espressione è la funzione polinomiale generale mostrata nella Tabella 3.1 (Petrie e Kennie [47], 1990).

Nella Figura 3.1 possiamo vedere una rappresentazione grafica dei primi quattro termini.

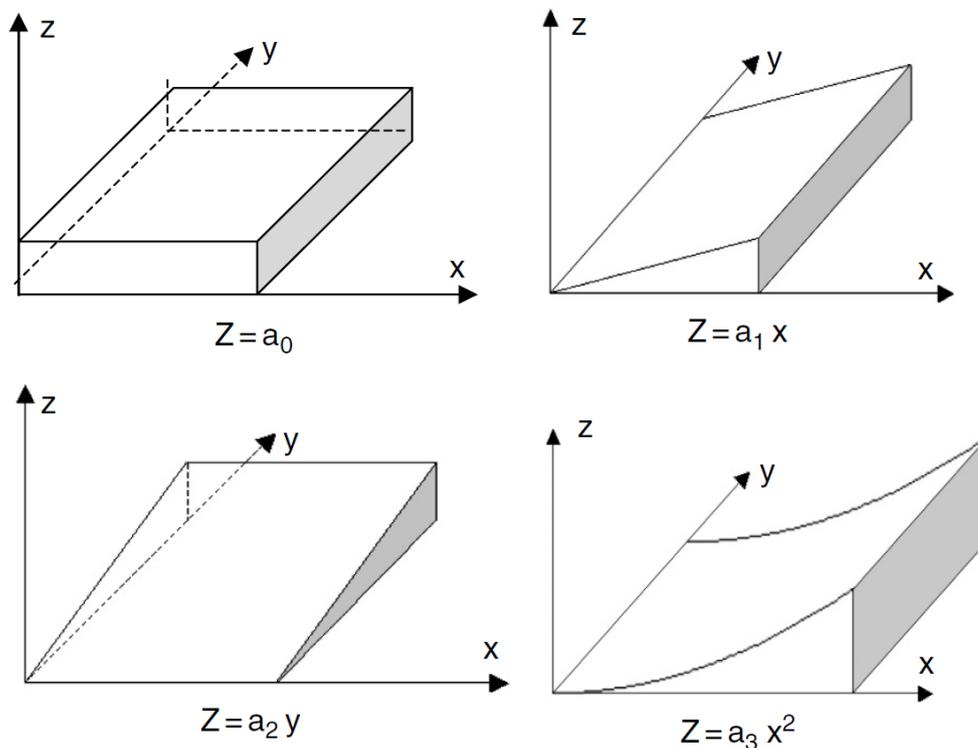


Figura 3.1 Forme di superfici ottenute dai primi quattro termini di funzione polinomiale generale.

Si può facilmente notare che ogni termine della funzione ha caratteristiche proprie in termini di forma. È possibile costruire una superficie con caratteristiche uniche utilizzando alcuni termini specifici.

Per la generazione della superficie vera e propria su programma specifico di modellazione non è necessario (e nella pratica è impossibile) usare tutti i termini insiti in questa funzione; nella pratica vengono utilizzati solo pochi termini, i quali vengono selezionati dal progettista di sistema e da chi lo mette in atto. Solo in pochi casi si ha la possibilità di decidere quali termini nella funzione potrebbero essere più idonei a modellare il pezzo specifico di terreno in questione.

3.2 STRATEGIE PER LA MODELLAZIONE DI SUPERFICI TERRESTRI

Dopo aver introdotto questi concetti generali ora discuteremo le strategie alternative per la modellazione di superfici del terreno.

3.2.1 LE STRATEGIE DI MODELLAZIONE DI SUPERFICIE: UNA CLASSIFICAZIONE

Le strategie possono essere classificate in base a diversi criteri, come ad esempio l'unità geometrica di base usata per modellare, il tipo di dati sorgente e così via.

Per quanto riguarda le unità geometriche di base è possibile identificare le seguenti strategie:

1. modellazione basata sui punti.
2. modellazione basata sui triangoli.
3. modellazione basata su una griglia.
4. una strategia ibrida che combina due dei tre punti sopra elencati.

Nelle applicazioni pratiche le modellazioni basate sui triangoli e basate sulla griglia sono le tecniche più largamente usate e sono considerate le due strategie base. Dal momento che la modellazione basata sui punti non è una strategia funzionale (ed è perciò poco usata) e la modellazione ibrida è in genere convertita in quella a triangoli, la modellazione a griglia di norma viene sfruttata per gestire dati riguardanti terreno ondeggiante su un'area di vaste dimensioni. Questa strategia ha meno pertinenza (o applicazione) per terreni frammentati con forti pendenze, numerose linee divisorie, discontinuità di terreno e così via.

A seconda del genere di dati sorgente usati è possibile dividere il processo di modellazione in due tipi:

1. costruzione diretta da dati misurati
2. costruzione indiretta da dati derivati.

È possibile costruire superfici DTM direttamente da dati sorgente (originali), per esempio usando una griglia quadrata, una griglia regolare, o attraverso triangolazione nel caso di dati a locazione casuale. Per costruire indirettamente una superficie DTM da dati derivati viene applicata un'interpolazione sui dati sorgente per formare una griglia regolare, poi la superficie viene ricostruita dai dati della griglia. Questo processo di interpolazione viene spesso chiamato *interpolazione random-to-grid*.

3.2.2 SURFACE MODELING A PUNTI

Se per realizzare superfici DTM viene usato il termine di ordine zero del polinomio, allora si otterrà un planare orizzontale (o piatto), come mostrato nella Figura 3.2.

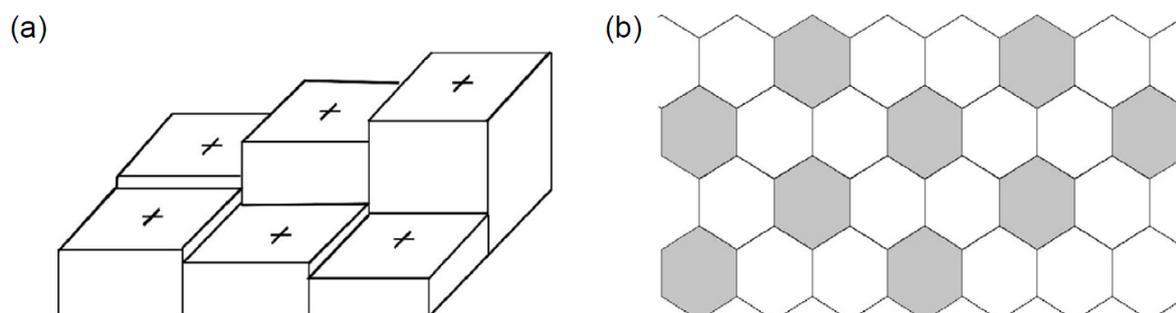


Figura 3.2 Superfici DTM discontinue risultanti da modellazione a punti: (a) dati campione con griglia quadrata e (b) dati campione con pattern esagonale.

È possibile costruire una superficie a planare orizzontale (o piatto) su ogni punto. Se questa superficie viene usata per rappresentare la piccola area intorno al punto dato (che viene chiamata anche regione di influenza di questo punto nel contesto di analisi geografica), allora l'intera superficie DTM può essere formata da una serie di queste superfici discontinue contigue. Il risultato finale sarà una superficie discontinua (vedi Figura 3.2a).

Per ogni sotto superficie planare orizzontale la semplice espressione matematica è la seguente:

$$Z_i = H_i \quad (3.2)$$

dove Z è l'altezza sulla superficie piana per un'area intorno al punto I , e H è l'altezza del punto I .

Questa strategia è molto semplice, l'unica difficoltà è definire i confini tra aree adiacenti. L'approccio più comunemente usato per stabilire questi confini è l'utilizzo del diagramma Voronoi dei punti dati, il quale verrà discusso in seguito. Siccome questa strategia forma una serie di sotto superfici in base all'altezza di punti singoli, allora la modellazione che si fonda su questo metodo si chiamerà modellazione a punti (*point-based surface modeling*).

In teoria, questa strategia è adatta per qualsiasi pattern di dati, regolari o irregolari, visto che riguarda punti singoli. Tuttavia, quando determiniamo i confini di una regione d'influenza per ogni punto, il calcolo sarà molto più semplice se si usano pattern regolari come una griglia quadrata, triangoli equilateri, esagoni etc. (Figura 3.2 b). Anche se all'apparenza attuare questa strategia nella modellazione di superfici sembra perfettamente fattibile, purtroppo non risulta molto funzionale a causa delle conseguenti discontinuità nella sua superficie. Per alcune applicazioni rimane comunque una tecnica valida (ad esempio per il calcolo di volumi totali di acqua, carbone etc.).

3.2.3 SURFACE MODELING A TRIANGOLI

Se si usano più termini è possibile costruire una superficie più complessa.

Se si considerano i primi tre termini (i due termini di grado 1 insieme al termine di grado zero) viene individuata una superficie planare. Per determinare i tre coefficienti di questo polinomio particolare è necessario prendere come minimo tre punti dati. Questi tre punti possono formare un triangolo nello spazio; è possibile poi definire e costruire una superficie planare inclinata.

Se la superficie determinata da ogni triangolo viene usata per rappresentare solo l'area costituita dal triangolo, allora l'intera superficie DTM può essere formata da una serie connessa di triangoli contigui. La modellazione che si basa su questa strategia viene in genere chiamata *modellazione a triangoli (triangle-based surface modeling)*.

La Figura 3.3 (b) è un esempio di queste superfici formate attraverso questo processo.

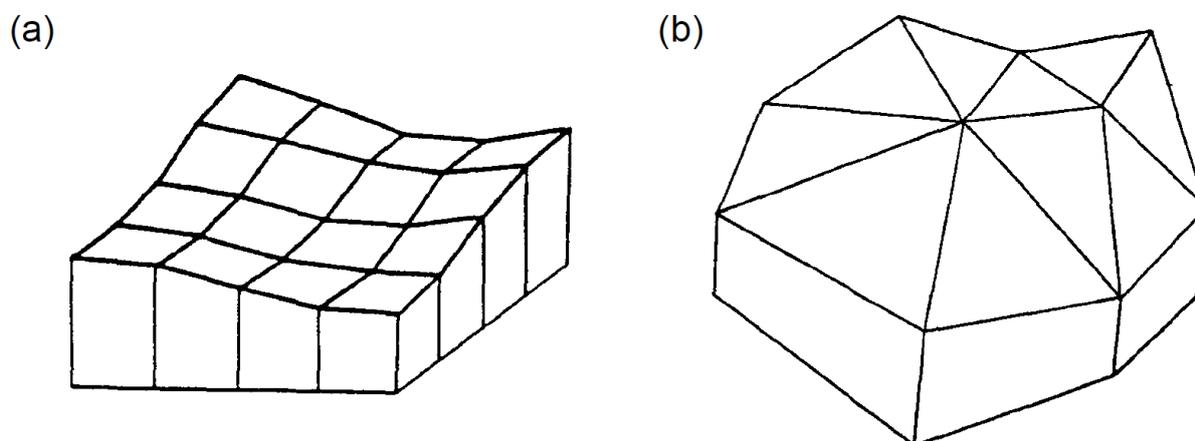


Figura 3.3 Superfici continue costruite attraverso (a) griglia e (b) modellazione a triangoli.

Il triangolo può essere considerato l'unità di base in tutti i pattern geometrici, dato che una griglia regolare di quadrati o celle rettangolari o qualsiasi altra forma di poligono può essere scomposto in una serie di triangoli. Per questo motivo la modellazione a triangoli è la strategia più realizzabile per tutti i tipi di pattern di dati, a prescindere dalla loro provenienza: campionamento selettivo, campionamento composito, campionamento a griglia regolare, profiling o contouring. Dato che i triangoli hanno molta flessibilità in termini di forma e dimensione, questa strategia può incorporare con facilità linee divisorie, linee di forma e altri tipi di dati; per questo motivo sta attirando sempre di più l'attenzione del mondo del terrain modeling, ed è considerata la strategia principale per la modellazione di superfici di terreno.

Nella modellazione basata sui triangoli è possibile usare anche polinomi di ordine superiore (di solito secondo o terzo) per creare curve sfaccettate. In questo caso, l'unità di base è una serie connessa di triangoli (ad esempio una sequenza di triangoli centrati su un punto).

3.2.4 SURFACE MODELING A GRIGLIA

Se per la ricostruzione di superfici vengono usati i primi tre termini, insieme al termine a XY del polinomio generale, allora per la loro formazione è necessario come minimo prendere quattro punti di dati; la superficie risultante viene chiamata *superficie bilineare (bilinear surface)*. Nella teoria, è possibile utilizzare quadrilateri di ogni forma, come parallelogrammi, rettangoli, quadrati o poligoni irregolari. Tuttavia, per questioni pratiche come la rappresentazione della superficie finale e la struttura dati risultante, il pattern più adatto è la griglia quadrata regolare. Similmente alla modellazione a triangoli si otterrà una serie di superfici bilineari contigue.

Anche polinomi di ordine superiore per generare superfici DTM possono essere usati (come mostrato in Figura 3.7). Ciononostante, se si utilizzano troppi termini del polinomio, e di solito su un'area vasta, possono crearsi oscillazioni imprevedibili sulla superficie DTM risultante. In pratica per ridurre questo rischio si stabiliscono un numero limitato di termini - in genere solo quelli di secondo e terzo ordine.

Il numero minimo di punti griglia necessari per costruire la superficie DTM sarà stabilito dal numero di termini usati, ma in qualsiasi caso il numero sarà più grande di quattro. Nello specifico si possono utilizzare, nella ricostruzione di superfici, pattern differenti e figure geometriche (vedi Figura 3.1) diversi dal triangolo base o celle di griglie quadrate.

Nonostante ciò, a causa delle difficoltà facilmente riscontrabili quando si strutturano e si gestiscono dati, i dati sorgente DTM che sono distribuiti uniformemente, rimangono comunque importanti, come nel caso di griglie regolari e pattern a triangoli equilateri.

I dati griglia hanno molti vantaggi in termini di gestione dati; pertanto, sono particolarmente ideali quei dati di griglia di elevazione proveniente da campionamento a griglia regolare e campionamento progressivo, soprattutto i dati su griglia quadrata. Per questa ragione alcuni pacchetti software DTM accettano solo dati localizzati su griglia. In questo caso è necessario attuare un'operazione preliminare di preelaborazione dati (*interpolazione random-to-grid*) per garantire che i dati di input siano localizzati su griglia.

3.2.5 HYBRID SURFACE MODELING

La vera e propria struttura dati implementata tramite un pattern geometrico particolare per modellare una superficie, viene in genere chiamata *network*.

Le superfici DTM di solito vengono ricostruite da uno dei due tipi principali di network - a griglia o triangolare; tuttavia, è molto comune vedere in uso anche una strategia ibrida. Per esempio, un network a griglia può essere scomposto in network triangolari per formare superfici contigue di sfaccettature lineari.

In direzione opposta, un network a griglia può anche essere formato tramite interpolazione all'interno di un network triangolare irregolare.

In alcuni pacchetti software il modeling ibrido di superfici deve possedere una griglia base formata da quadrati o triangoli e ottenuta da campionamento a griglia sistematico.

Se si possono aggiungere linee divisorie e linee di forma, allora la griglia regolare verrà scomposta in triangoli e verrà applicato un network locale di tipo triangolare irregolare.

La Figura 3.4 ci mostra un esempio di questo approccio ibrido.

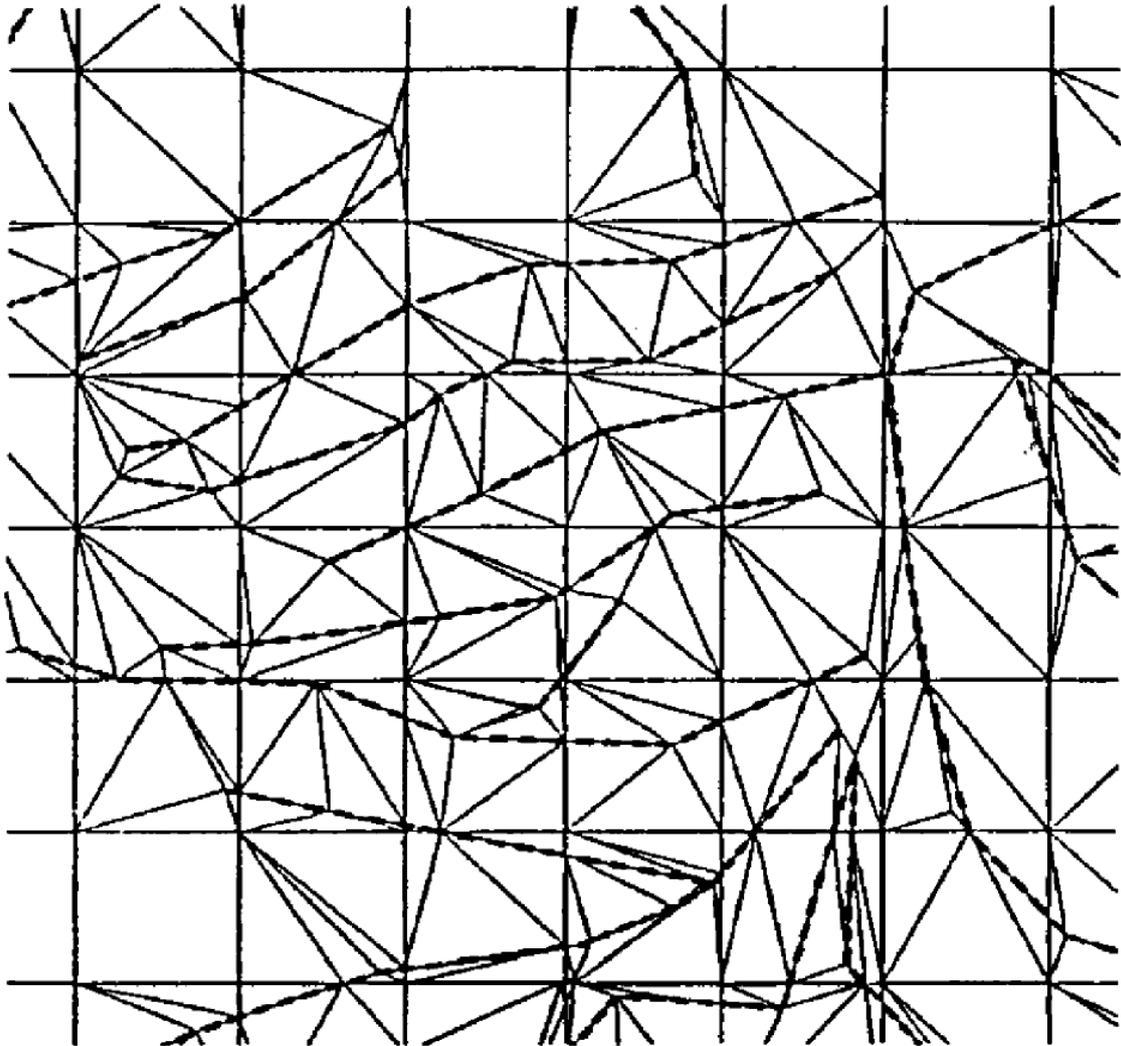


Figura 3.4 Un esempio di surface modeling tramite superficie ibrida (dalla Brochure HIFI).

Si potrebbero anche combinare i diversi tipi di modellazione a punti, griglia e triangoli per formare una strategia ibrida. O meglio, è possibile determinare i limiti della regione di influenza di un punto usando o un network a griglia o un network triangolare dove i dati sono localizzati su pattern regolare, oppure usando un network triangolare se i dati si trovano su posizioni irregolari.

3.3 LA CONTINUITÀ DI SUPERFICIE DTM

Dopo aver applicato una di queste strategie di modeling si può costruire una superficie. Questa sezione discute le caratteristiche della risultante superficie DTM; viene data enfasi alla continuità.

3.3.1 CARATTERISTICHE DI SUPERFICIE DTM: UNA CLASSIFICAZIONE

Le superfici ricostruite da punti campionati per rappresentare il terreno di un'area possono essere caratterizzate in base a criteri differenti. Dimensione di area e continuità di superficie DTM sono quelli più usati.

A seconda della dimensione (o copertura), le superfici possono essere classificate come locali, regionali e globali.

1. Una *superficie locale* è una superficie DTM che copre solo un'area ristretta, in base alla premessa che l'area da ricostruire è complessa e deve quindi essere spezzettata per centrare l'area locale di interesse.
2. Una *superficie globale* è una superficie DTM che ricopre l'area intera, in base all'accordo per cui questa area contiene identificatori di terreno molto semplici o regolari, così da poter essere descritta da una singola funzione matematica. In alternativa può essere usata quando è necessario avere solo poche informazioni generali inerenti alla superficie terrestre per attuare la perlustrazione.
3. Una *superficie regionale* è una superficie DTM avente dimensioni a metà tra quella locale e quella globale. In altre parole, l'area intera da ricostruire è divisa in pezzi più grandi rispetto alle superfici locali.

A seconda della continuità tra superfici locali, si possono individuare tre tipi di superfici:

1. superficie discontinua
2. superficie continua
3. superficie liscia

3.3.2 SUPERFICI DTM DISCONTINUE

Una *superficie DTM discontinua* è una superficie che presenta discontinuità tra le superfici locali, di cui una collezione viene usata per raffigurare l'area intera. Deriva dalla supposizione che l'informazione d'altezza di un punto campione è rappresentativo per i valori del suo circondario (Peucker [48],1972). Pertanto, l'altezza di qualsiasi punto da interpolare può essere approssimata adottando l'altezza del punto di riferimento più vicino. In questo modo, si può usare una serie di piani orizzontali (ovvero, superfici locali) per rappresentare l'intero terreno, come mostrato nella Figura 3.2.

Questo tipo di superficie è il risultato di surface modeling basata su punti. Come discusso nel paragrafo riguardante la modellazione basata su punti, questa tipologia di superfici può essere costruita a partire da qualsiasi tipo di set di dati, a prescindere dal fatto che siano regolari o irregolari. Da dati regolari è molto più semplice delineare i confini tra le sotto-superfici. Tuttavia, quando i dati sono distribuiti in modo irregolare, è necessario determinare i confini della regione di influenza di ogni punto con un algoritmo. Di norma questo processo viene eseguito costruendo i poligoni Thiessen, i quali sono stati largamente usati nell'analisi geografica sin da quando il climatologo A. H. Thiessen ha suggerito questo procedimento (Thiessen [55],1911; vedi anche Brassel e Reif[2], 1979). In realtà il poligono Thiessen è una regione racchiusa da una serie annidata di bisettrici perpendicolari, ognuna delle quali è localizzata a metà strada tra il punto considerato ed il suo circondario. I poligoni Thiessen di ogni punto formano a loro volta un diagramma di Thiessen, chiamato anche diagramma Voronoi, celle Wigner-Seitz o tassellatura Dirichlet. Il termine varia a seconda della disciplina scientifica, ma l'idea di base è comune a tutte. Negli ultimi anni il termine diagramma Voronoi sembra si stia imponendo nel campo delle scienze dell'informazione geografica. Il poligono Thiessen viene anche chiamato regione Voronoi.

La Figura 3.5 è un esempio di diagramma di Voronoi di un set di punti.

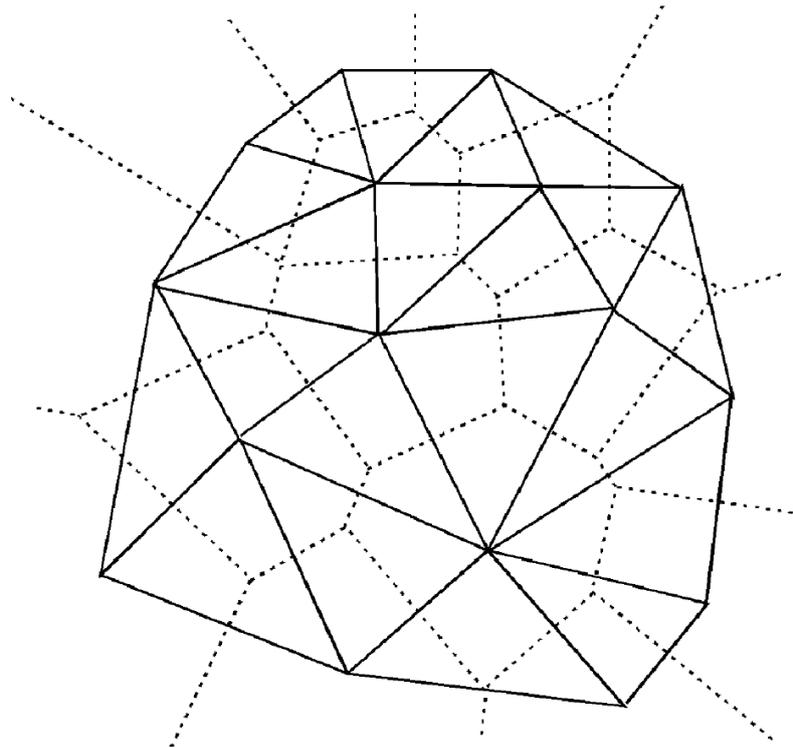


Figura 3.5 Diagramma di Voronoi di un set di punti e della sua triangolazione duale di Delaunay.

Nella Figura 3.5 si può notare che il duale del diagramma Voronoi è una triangolazione. Questa relazione doppia fu per prima riconosciuta da Delaunay [8](1934), il quale le prestò appunto il nome Delaunay.

3.3.3 SUPERFICI DTM CONTINUE

Una superficie DTM continua è una superficie che possiede una serie di superfici locali unite insieme per ricoprire il terreno che si sta modellando. Ciò si basa sull'idea che ogni punto dato rappresenta un campione di una superficie continua a valore singolo. Il confine tra due sotto-superfici adiacenti potrebbe non essere liscio, ovvero non continuo nella derivata prima e in quelle di grado superiore. La derivata prima di una superficie continua può essere sia continua, sia discontinua. Chiamiamo superfici continue solo quelle discontinue nella derivata prima, mentre chiamiamo superfici lisce quelle continue nella derivata prima.

La Figura 3.3 mostra due tipi di superfici DTM continue, mentre la Figura 3.6 illustra il problema della discontinuità nella derivata prima.

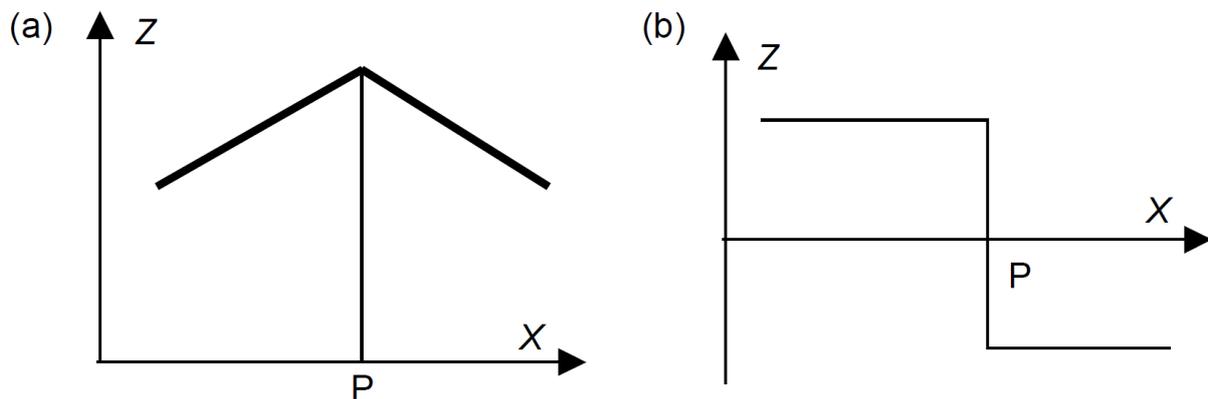


Figura 3.6 Discontinuità nella derivata prima di una superficie continua: (a) un profilo di una superficie continua e (b) la prima derivata del profilo in (a).

La mancanza di continuità nella derivata del primo ordine è, per alcuni, una caratteristica piuttosto indesiderabile sia in termini di modellazione stessa, sia in termini di output grafico finale. Tuttavia, è importante far notare che la mancanza di continuità nella derivata prima, che delinea un confine distinto tra patch adiacenti, celle griglia, o triangoli, è una caratteristica che potrebbe non essere di disturbo in certi casi, se non in molti. In effetti, può essere volutamente ricercata o introdotta nel processo di modellazione. Questo è il caso in particolare con dati localizzati lungo tratti lineari come fiumi, linee divisorie, faglie, etc. acquisiti attraverso campionamento selettivo o composito, laddove sia veramente desiderato per far sì che i contorni interpolati cambino direzione in modo repentino lungo tali linee.

Inoltre, è possibile trovare nella letteratura (ad esempio, Peucker[48] 1972) che, in molti

casi, una superficie continua che include una serie di sfaccettature lineari contigue risulta essere la meno fuorviante, anche se potrebbe non sembrare visivamente convincente o attraente.

3.3.4 SUPERFICIE DTM LISCE

Una superficie DTM liscia è una superficie che presenta continuità in derivate dal primo ordine e superiore. Sono in genere implementate a livello regionale o globale. La generazione di tale superficie DTM si basa sui seguenti presupposti:

1. I dati sulle risorse contengono sempre un certo livello di errore casuale (o rumore) nelle misure, in modo che la superficie DTM non debba passare attraverso tutti i punti dati campione.
2. La superficie da costruire deve essere più liscia di (o almeno liscia come) la variazione indicata dai dati fonte.

Affinché queste condizioni possano essere raggiunte, di norma, viene utilizzato un certo livello di ridondanza dati, ed implementato un metodo dei minimi quadrati utilizzando un polinomio a più termini per modellare la superficie.

La Figura 3.7 (a) mostra esempi di superfici lisce.

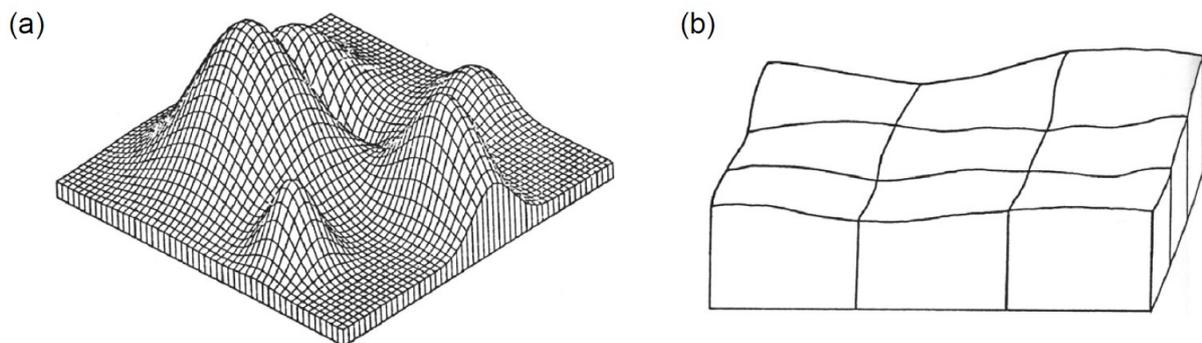


Figura 3.7 Esempi di superfici lisce: (a) una superficie globale (liscia) e (b) una superficie liscia con una serie di superfici regionali.

Per una singola superficie globale basata su un grande set di dati la totalità della superficie viene modellata da un singolo polinomio di ordine alto. Può essere coinvolta un'enorme quantità di dati, tramite un'equazione formata da ciascun punto di dati con elevata complessità computazionale o spese generali sull'operazione di modellazione. Inoltre, la superficie finale risultante spesso mostrerà oscillazioni imprevedibili tra i punti dati.

Questi fattori sono indesiderabili in termini sia dello stesso processo di modellazione di superficie, sia di fedeltà dei risultati finali, in termini di

rappresentazione reale della superficie del terreno fornita all'utente sotto forma di grafici di profilo o viste prospettiche.

Il risultato di queste considerazioni è che i set di dati sono spesso divisi in una serie di patch continue. Le patch possono essere regolari in termini di forma e dimensioni, come nel caso di celle a griglia quadrata o triangoli equilateri, oppure possono essere irregolari sia in forma che dimensione, come nel caso di punti distribuiti in modo casuale incontrati di norma in una procedura di triangolazione. All'interno di ogni patch di dati può essere usato un polinomio di grado inferiore per modellare la superficie, utilizzando sempre il metodo dei minimi quadrati se ci sono dati ridondanti. Anche se l'uso del polinomio assicura una superficie liscia all'interno di ogni patch, un'interruzione nella continuità quasi sicuramente si verificherà lungo i confini tra le patch. Come conseguenza la continuità nelle derivate prime e superiori tra patch adiacenti dovrà essere integrata nel sistema di modellazione, così che si possa ottenere una superficie liscia senza interruzioni o discontinuità lungo i confini. In altre parole, le patch devono essere unite ininterrottamente (Figura 3.7b). Inutile dire che per implementazione con successo questi requisiti è necessario farsi carico di pesanti oneri computazionali.

3.4 FORMAZIONE DI NETWORK TRIANGOLARE PER MODELLARE SUPERFICI

Il network triangolare è quello più basilare e può essere applicato su dati localizzati sia in modo regolare che irregolare. In altre parole, un network a griglia regolare può essere formato tramite interpolazione da un network triangolare e dallo stesso network può essere anche costruita una superficie continua o liscia.

3.4.1 FORMAZIONE DI NETWORK TRIANGOLARE REGOLARE DA DATI REGOLARMENTE DISTRIBUITI

Il processo di formazione di un network triangolare viene di solito definito triangolazione. La triangolazione può essere applicata a dati distribuiti regolarmente (come i dati della griglia) per formare un network regolare triangolare (TRN, *triangular regular network*), o a dati distribuiti in modo irregolare per formare un TIN, che comprende una serie di triangoli contigui di dimensioni e forma irregolari. Se i dati sorgente sono acquisiti secondo un pattern regolare, allora questo è il network più semplice da strutturare. Per griglie quadrate, una serie di triangoli regolari viene prodotta usando una semplice suddivisione per mezzo di una o due diagonali.

La Figura 3.8 mostra tre possibili modelli triangolari creati da un pattern a griglia.

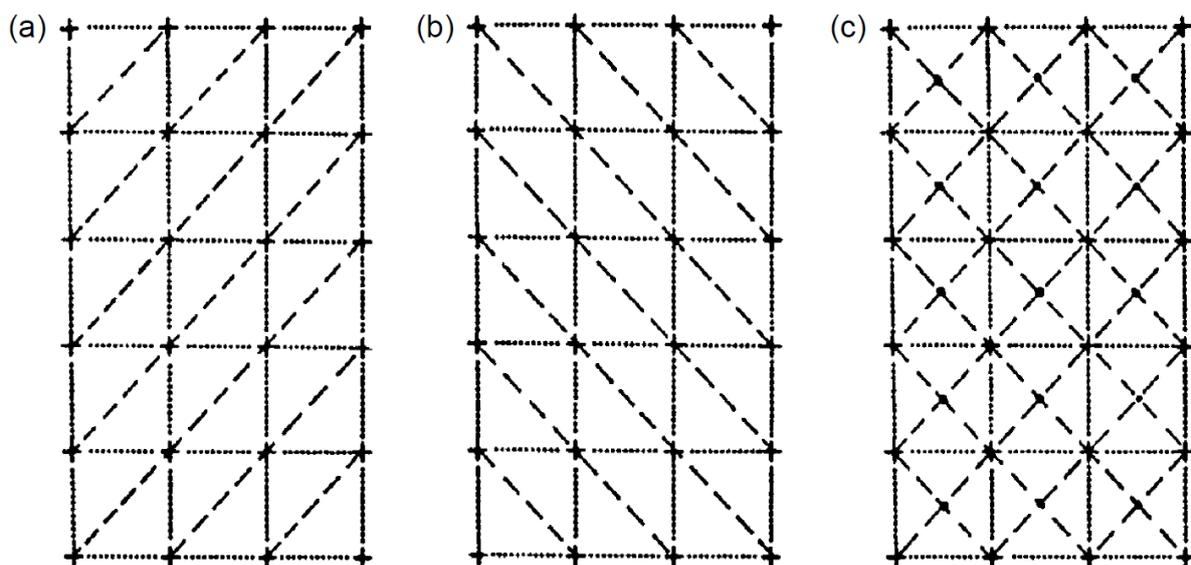


Figura 3.8 Network regolare triangolare da una griglia regolare.

Se il pattern si basa su triangoli regolari, allora il network sarà già triangolare.
La Figura 3.9 ci mostra questo.

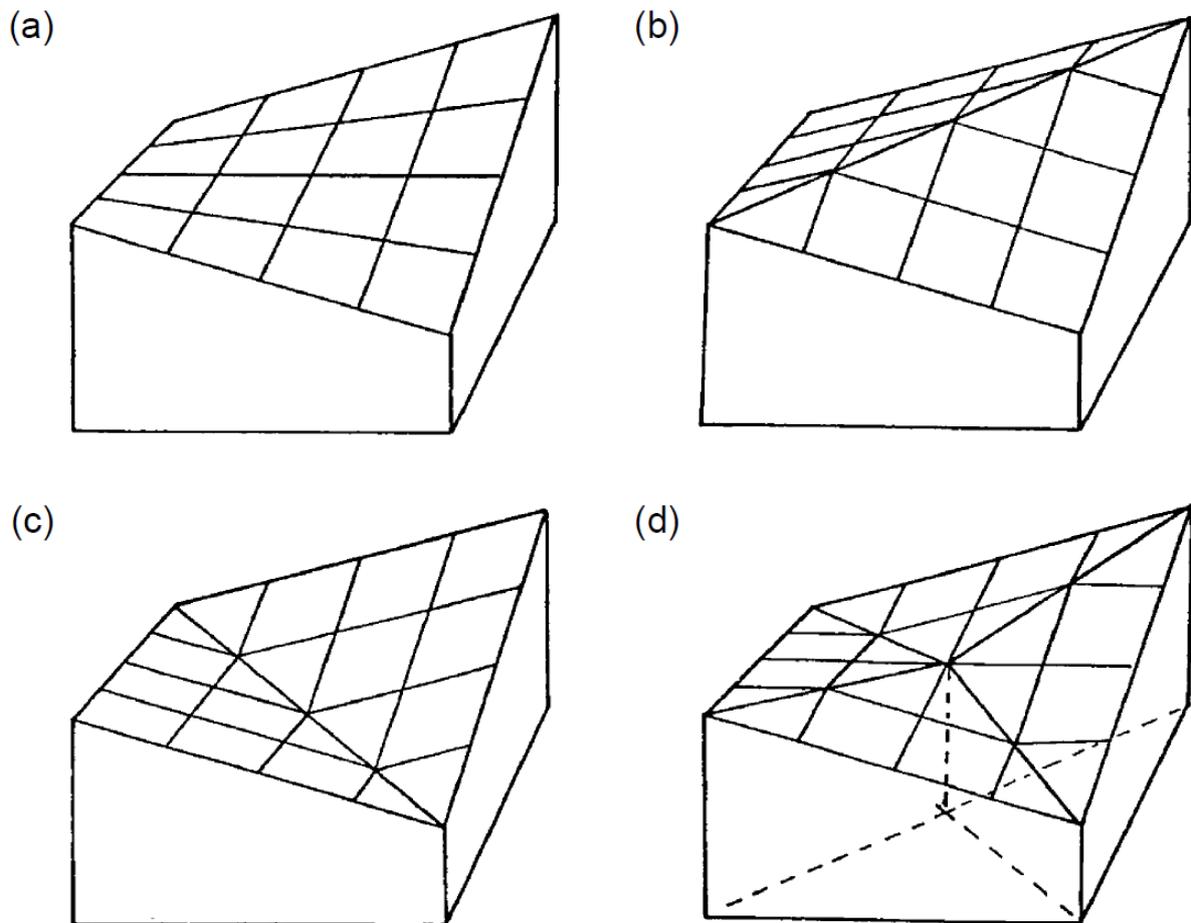


Figura 3.9 Tipi possibili di sfaccettature lineari costruite da una griglia regolare.

La Figura 3.9 (a) presenta una superficie bilineare costruita da una griglia quadrata. La Figura 3.9 (b) mostra che una cella della griglia può essere divisa in due triangoli da una singola diagonale il cui piano è mostrato nella Figura 3.8 (a).

Allo stesso modo, La Figura 3.9 (c) mostra i due triangoli corrispondenti a quelli divisi dall'alternativa singola diagonale mostrata nella Figura 3.8 (b). Infine, quelli in Figura 3.9 (d) corrispondono alla disposizione mostrata nella Figura 3.8 (c) con quattro triangoli a punta centrale formati usando entrambe le diagonali. È evidente che le informazioni di altezza di punti interpolati da queste differenti superfici mostrate dalla Figura 3.9 (a) fino alla Figura (d) saranno tutti abbastanza diversi, sebbene gli stessi valori di altezza siano stati utilizzati nei nodi della griglia in ognuno dei quattro esempi. È un problema che richiede attenzione.

Tuttavia, anche i pacchetti commerciali portano a termine ciecamente questo processo di triangolazione.

3.4.2 FORMAZIONE DI NETWORK TRIANGOLARE IRREGOLARE DA DATI REGOLARMENTE DISTRIBUITI

Nel processo di formazione di network triangolari discusso nella sezione precedente non c'è perdita di informazioni sulla superficie. La ridondanza dei dati può essere però un problema, come nel caso del campionamento di griglia regolare. In tal caso, alcuni punti meno importanti (o non importanti) sulla superficie possono essere cancellati dal set di dati. In alternativa, i *VIP* vengono conservati per formare un *TIN*.

La chiave per la selezione dei *VIP* è assegnare un valore di significatività a ogni punto in modo tale che i punti con valori ad alta significatività vengano selezionati. Chen e Guevara[3] (1987) per rappresentare il grado di significatività usarono la somma dei valori del differenziale del secondo ordine su un punto in tutte e quattro le direzioni. Supponiamo che l'altezza (H) di un punto lungo un profilo sia una funzione della sua posizione (x), come mostrato nella Figura 3.10. La distanza orizzontale tra X_{i-1} , X_i e X_{i+1} è uguale a causa del campionamento di griglia regolare. La funzione matematica di questo profilo è:

$$H = f(x) \quad (3.3)$$

Quindi, il valore del differenziale del secondo ordine al punto X_i è:

$$\frac{d^2H}{dx^2} = f''(X_i) = 2\left(f(X_{i-1}) - \frac{f(X_{i-1})+f(X_{i+1})}{2}\right) \quad (3.4)$$

In realtà la distanza AC nella Figura 3.10 è il secondo valore differenziale nel punto X_i .

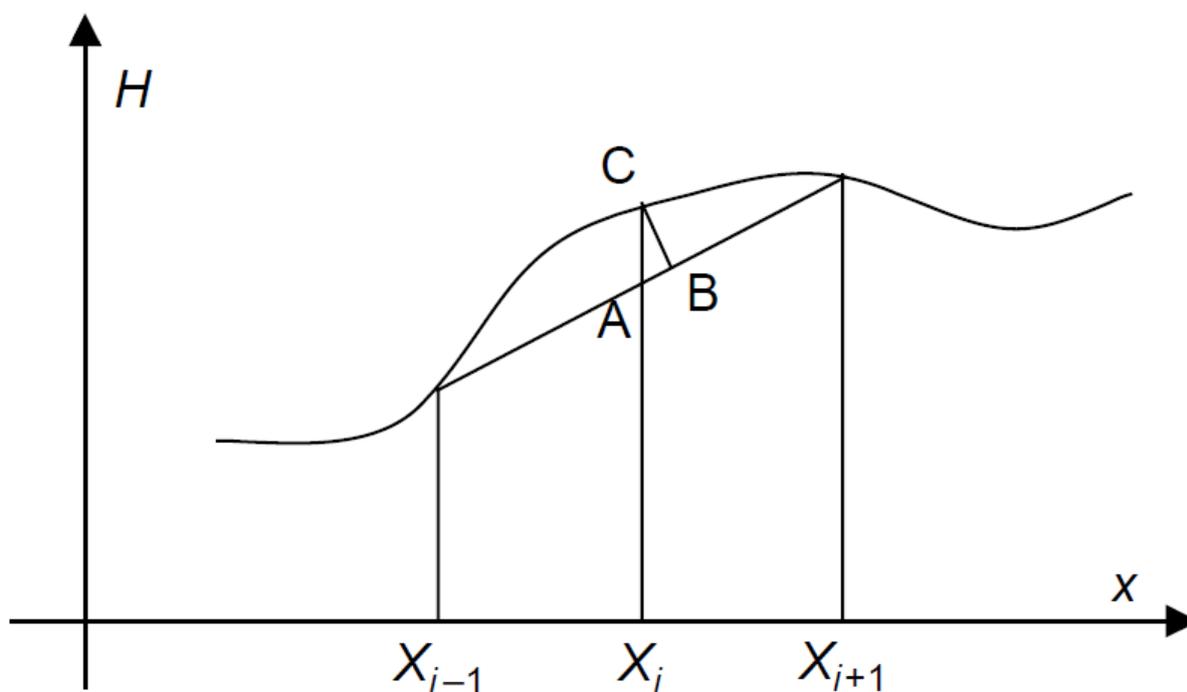


Figura 3.10 Un profilo di terreno e il suo secondo valore differenziale.

Chen e Guevara[3] (1987) considerano anche quattro direzioni, ovvero, su-giù, sinistra-destra, in alto a sinistra-in basso a destra e in basso a sinistra-in alto a destra. Per ogni punto i secondi valori differenziali per tutte e quattro le direzioni vengono aggiunti per rappresentare il grado di significatività di questo punto. Nella loro procedura il numero di punti da selezionare viene prima specificato, poi vengono selezionati i punti con significatività più alta.

Tuttavia, la selezione dei punti dovrebbe essere messa in relazione con la precisione richiesta del DTM risultante, piuttosto che usare un numero predefinito di punti. Infatti, Li[35] (1990) e Li[33] et al. (1998) hanno correlato il grado di significatività con la perdita di precisione dei DTM dopo la selezione dei VIP. In questo caso viene considerata una soglia per i valori di significatività, invece del numero di punti da conservare. Ora la domanda che sorge è "*Qual è la soglia appropriata per il valore di significatività per una accettabile perdita di precisione?*".

Per trovare tale soglia per la selezione dei punti, bisogna prendere in considerazione la distanza AC in Figura 3.10. Si può osservare che AC è l'errore in $x = X_i$ se X_i viene rimosso e il profilo è costruito mediante interpolazione lineare tra valori di elevazione a X_{i-1} e X_{i+1} . Questo rappresenta l'errore DTM; una perdita di precisione risulterà dalla selezione dei VIP o dalla rimozione di quei punti che sono stato etichettati come insignificanti.

Il problema che si presenta è "quale sarà la perdita di precisione in termini di deviazione standard o errore quadratico medio (RMSE) se tutti i punti dati con un grado di significatività più piccolo di un valore specifico vengono rimossi". In altre parole, bisogna esaminare la relazione tra la perdita di precisione e il valore critico specificato. Se la distribuzione dell'errore è conosciuta, allora la relazione può essere facilmente stabilita. Tuttavia, la distribuzione non è esattamente nota, sebbene sia quasi normale.

Pertanto, tale relazione deve essere rilevata attraverso un'indagine sperimentale. Infatti, Li [35] (1990) e Li et al. [33] (1998) hanno trovato la perdita di accuratezza di DTM (σ_{loss}) dopo

la selezione VIP e la soglia ($Sig_{Threshold}$) utilizzati per la selezione VIP:

$$\sigma_{loss} = \frac{Sig_{Threshold}}{3} \quad (3.5)$$

Questo è il risultato ottenuto da due ampie aree di test con circa 2000 punti di controllo.

Supponiamo che la precisione richiesta del DTM finale (dopo la selezione VIP) in termini di variazione sia σ_{after}^2 e la precisione del DTM iniziale (prima della selezione VIP) sia σ_{before}^2 , allora:

$$\sigma_{after}^2 = \sigma_{before}^2 + \sigma_{loss}^2 \quad (3.6)$$

Combinando le Equazioni (3.5) e (3.6), la relazione tra la soglia per la selezione VIP e la precisione finale del DTM è la seguente:

$$Sig_{Threshold} = 3\sigma_{loss} = \sqrt[3]{\sigma_{after}^2 - \sigma_{before}^2} \quad (3.7)$$

In realtà, la linea di pensiero è simile a quella usata da Makarovic[39,41] (1977, 1984), il quale lo chiamò processo a scarto progressivo e usò un operatore Laplaciano per questo processo come segue:

$$L = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

Dopo la selezione VIP i dati risultanti diventeranno irregolari nella distribuzione, poi verrà applicata una procedura di generazione TIN.

3.4.3 FORMAZIONE DI NETWORK TRIANGOLARE IRREGOLARE DA DATI IRREGOLARMENTE DISTRIBUITI

Da dati distribuiti in modo irregolare si possono formare o una griglia regolare o un network irregolare triangolare.

La formazione di un TIN da dati distribuiti irregolarmente non è facile come nel caso di TRN da griglie, anche se esistono molti algoritmi disponibili. In genere, ci sono tre requisiti di base per la formazione di TIN:

1. Per un dato set di punti dati, il TIN risultante deve essere unico se viene utilizzato lo stesso algoritmo, sebbene si possa iniziare da posti diversi, ad esempio, il centro geometrico, l'angolo superiore sinistro, l'angolo inferiore sinistro o altri punti.
2. Le forme geometriche dei triangoli risultanti sono ottimali, ovvero ogni triangolo è quasi equilatero, se non ci sono condizioni specifiche.
3. Ogni triangolo è formato con i punti più vicini tra loro, ovvero la somma dei tre lati del triangolo è minima.

In tutte le possibili alternative la triangolazione di Delaunay è quella usata di più, perché soddisfa tutti e tre i requisiti. Una triangolazione di Delaunay è un set di triangoli collegati ma non sovrapposti. Il cerchio circoscritto (circumcircle) di ogni triangolo non include altri punti, poiché questa è una delle condizioni utilizzate per la costruzione della triangolazione di Delaunay. La triangolazione di Delaunay è un doppio diagramma del diagramma Voronoi (Figura 3.5) e quindi può anche essere derivata dal diagramma Voronoi. Pertanto, un approccio alternativo per la costruzione di triangolazione di Delaunay è prima di tutto costruire un diagramma di Vironoi, quindi derivare la triangolazione.

La triangolazione di Delaunay viene costruita collegando tre punti vicini e le corrispondenti regioni Voronoi, di cui ha un vertice comune, e il suo vertice è il centro del cerchio circoscrivzionale della triangolazione di Delaunay.

La Figura 3.5 mostra che la triangolazione di Delaunay obbedisce al teorema di Eulero dei grafici planari come segue:

$$N_{regions} + N_{vertices} - N_{edges} = 2 \quad (3.9)$$

La triangolazione di Delaunay può essere formata in modalità dinamica o statica. Triangolazione statica significa che il network di triangolazione che è già stato costruito non verrà alterato aggiungendo nuovi punti nel processo di formazione. Al contrario nella triangolazione dinamica il network già costruito verrà modificato se sarà aggiunto un nuovo punto, in modo da soddisfare il principio del cerchio circoscritto Delaunay.

Esistono molti algoritmi per la triangolazione di Delaunay.

3.4.4 FORMAZIONE DI NETWORK TRIANGOLARE IRREGOLARE DA DATI APPOSITAMENTE DISTRIBUITI

Con dati appositamente distribuiti intendiamo due tipi di dati, dati compositi e di contorno. I dati compositi derivano dal campionamento composito, ovvero da una griglia regolare insieme a punti e linee identificatrici. I dati di contorno possono o essere digitalizzati da carte a curve di livello esistenti o possono essere misurati su un modello stereo per mezzo di contouring.

Per formare un network di triangolazione da dati compositi le griglie vengono prima suddivise in triangoli regolari, poi la triangolazione di Delaunay è incorporata in griglie contenenti punti identificatori.

La Figura 3.11 ci mostra un esempio.

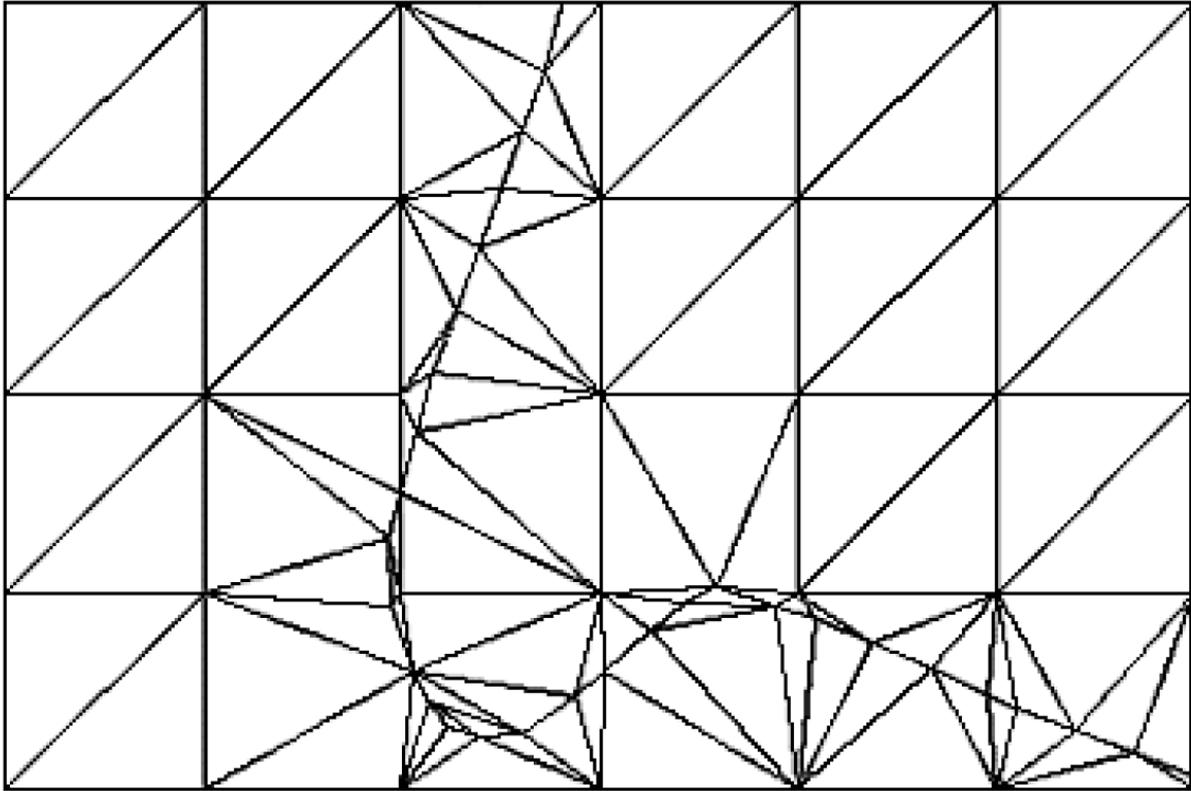


Figura 3.11 Triangolazioni di Delaunay di dati composti.

Per formare un network triangolare da dati di contorno tramite un algoritmo di triangolazione di Delaunay occorre avere particolare attenzione, altrimenti potrebbero formarsi triangoli piani (ovvero, le altezze dei tre vertici di un triangolo sono uguali).

La Figura 3.12 mostra triangoli piatti formato da due contorni.

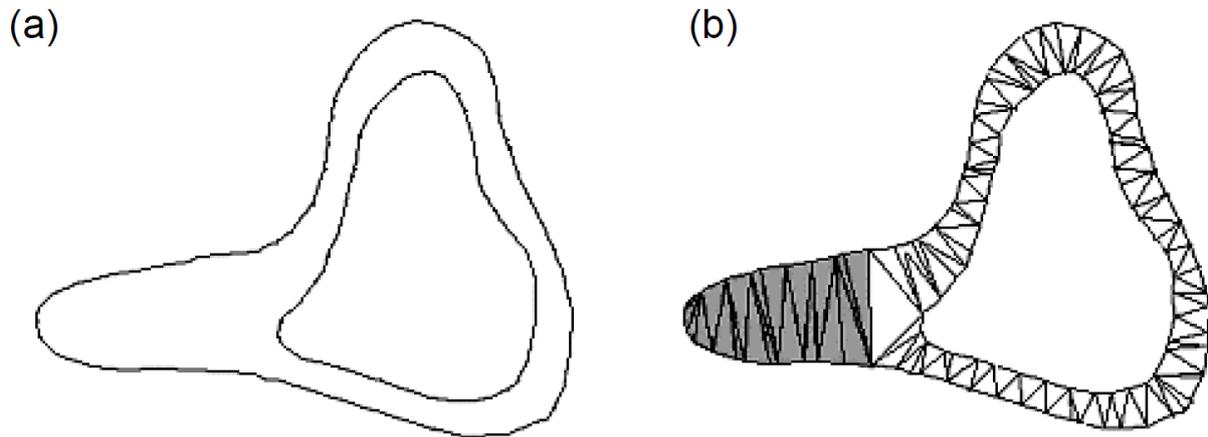


Figura 3.12 Triangoli piatti formati quando una triangolazione è costruita da dati di Curve di Livello. (a) Una mappa con due Curve di Livello. (b) Triangoli piatti formati nell'area ombreggiata.

Questo avviene perché i tre vertici sono selezionati dalla stessa curva di livello. È possibile evitare questo problema usando il vincolo che dice "non più di due punti possono essere selezionati da una singola curva di livello". Un'alternativa è produrre lo scheletro del contorno e utilizzare i punti lungo lo scheletro tutti insieme per formare la triangolazione.

3.5 FORMAZIONE DI NETWORK A GRIGLIA PER SURFACE MODELING

Come discusso in precedenza, la modellazione basata su griglie è una delle altre strategie principali per modellare superfici DTM. Se si utilizza il metodo di campionamento a griglia regolare, allora i dati risultanti hanno già una struttura a griglia e non è necessario alcun processo speciale quando vengono usati tutti i punti per la modellazione. Se ciò non si verifica è necessario ricampionare per ottenere una nuova griglia; se i dati sono distribuiti in modo irregolare è indispensabile procedere con interpolazione random-to-grid.

3.5.1 FORMAZIONE DI NETWORK PIÙ GROSSOLANI PARTENDO DA DATI GRIGLIA PIÙ FINI: RICAMPIONAMENTO

Un semplice metodo di ricampionamento senza interpolazione consiste nel selezionare alcuni punti in posizioni specifiche senza alcuna interpolazione (Li [34], 1992b).

La Figura 3.13 ci mostra griglie nuove dal semplice ricampionamento.

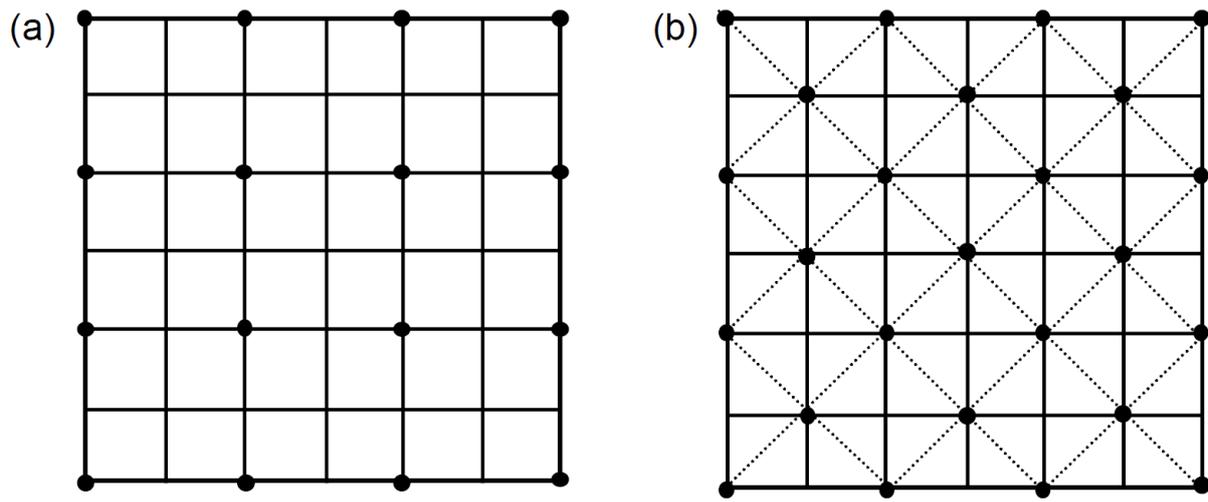


Figura 3.13 Semplice ricampionamento per la generazione di griglie grossolane dalla griglia fine (Li[34], 1992b): (a) nuovi intervalli di griglia pari a due volte il vecchio e (b) nuovi intervalli di griglia pari a $\sqrt{2}$ volte il vecchio

Nella Figura 3.13 (a), sono stati selezionati dei punti in righe e colonne alternate per formare una nuova griglia con intervalli pari a due volte gli intervalli della griglia originale.

Allo stesso modo si potrebbero ottenere nuove griglie con intervalli tre volte, quattro volte, ..., N volte più grandi degli intervalli dell'originale. La Figura 3.13 (b) mostra un'altra possibile selezione, ovvero selezionare punti lungo la diagonale. In questo caso viene generata una nuova griglia con intervalli uguali a $\sqrt{2}$ volte gli intervalli della griglia originale. In modo analogo si possono creare nuove griglie con intervalli $2\sqrt{2}$, $3\sqrt{2}$, ... $N\sqrt{2}$ volte gli originali.

Se gli intervalli desiderati del nuovo network di griglie sono sempre N o $N\sqrt{2}$ volte gli intervalli della griglia originale, allora la questione è abbastanza semplice.

Nella pratica però questo non è sempre il caso.

Ad esempio, potrebbe essere necessario avere una griglia con intervalli di 5 m partendo da una griglia originale con intervalli di 3 m (Figura 3.14a).

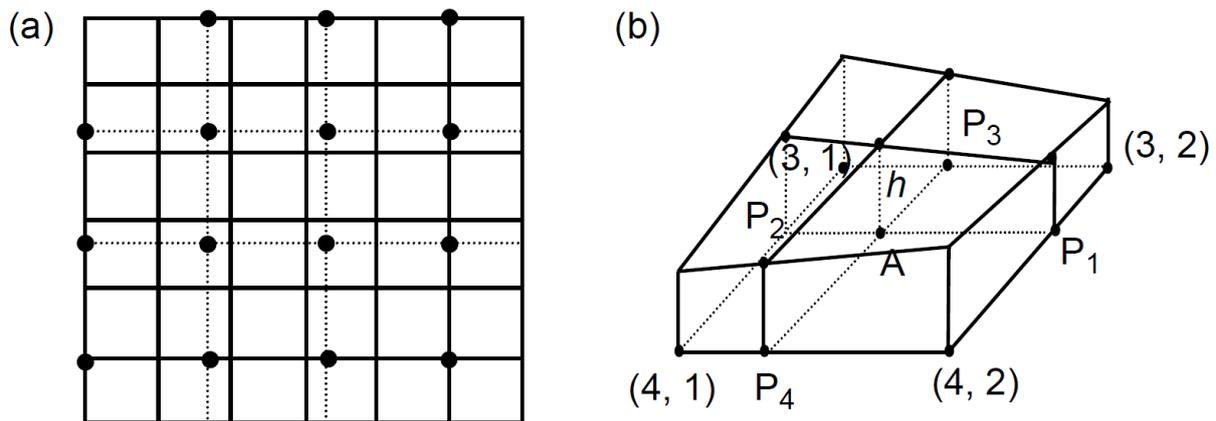


Figura 3.14 Formazione di griglie fini e grossolane tramite ricampionamento: (a) da griglia a 3 m a griglie a 5 m e (b) interpolazione bilineare.

In questo caso, alcuni punti possono essere selezionati automaticamente dalla griglia originale, mentre altri devono essere interpolati. Supponendo che le coordinate del nodo della griglia iniziale siano (0, 0), allora le posizioni in (0, 5), (5, 0) e (5, 5) diventeranno automaticamente i nodi della nuova griglia. Le coordinate di questi punti nel nuovo network di griglie sono (0, 3), (3, 0) e (3, 3). Tutti gli altri punti nuovi della griglia devono essere interpolati. I metodi di interpolazione più utilizzati sono:

1. *Punto più vicino*: Ad esempio, il punto A si trova all'interno della griglia formata da quattro nodi con coordinate (3, 1), (3, 2), (4, 1) e (4, 2). Dato che il punto A è il nodo più vicino (3, 2), l'elevazione a (3, 2) sarà assegnata al punto A.
2. *Interpolazione bilineare*: L'interpolazione bilineare, come suggerisce il nome, è l'interpolazione lineare su entrambe le direzioni X e Y (o riga e colonna); la Figura 3.14 (b) mostra questo metodo. Se si vuole ottenere l'elevazione (in posizione P) del nuovo punto della griglia (ovvero del punto A), bisogna prima interpolare linearmente l'elevazione di P1 usando i nodi (3, 2) e (4, 2), per poi interpolare linearmente l'elevazione di P2 usando i nodi (3, 1) e (4, 1). Questa è l'interpolazione lineare su colonna. In seguito si può ottenere

l'elevazione del punto A mediante interpolazione lineare usando i punti $P1$ e $P2$; questa è l'interpolazione lineare su riga. Inoltre, è possibile prima interpolare le elevazioni di $P1$ e $P2$ nella riga e poi interpolare l'elevazione per il punto A usando $P1$ e $P2$.

3. *Interpolazione bicubica*: per interpolare su entrambe le direzioni viene utilizzata una funzione cubica, invece di una funzione lineare. Di norma, la funzione bicubica viene applicata a una patch costituita ad esempio da una griglia 3×3 o 4×4 .

3.5.2 FORMAZIONE DI NETWORK DI GRIGLIE DA DATI DISTRIBUITI CASUALMENTE

Si possono formare network di griglie in due modi partendo da dati distribuiti casualmente, ovvero, attraverso interpolazione diretta random-to-grid e interpolazione indiretta da triangoli tramite processo di triangolazione.

La Figura 3.15 illustra queste due soluzioni.

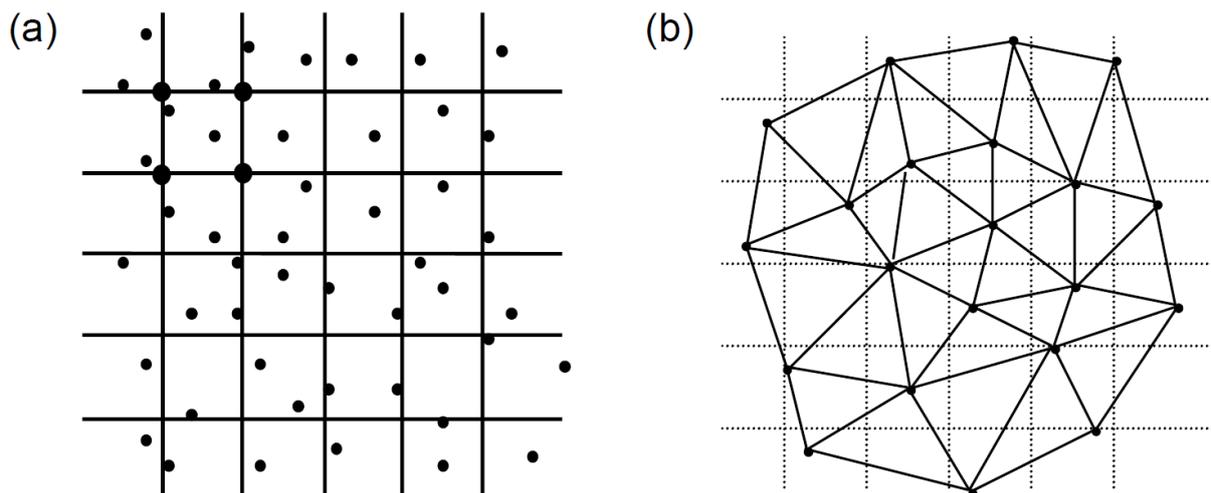


Figura 3.15 Formazione di network di griglie da dati distribuiti casualmente: interpolazione diretta random-to-grid e interpolazione indiretta tramite triangolazione.

Nell'interpolazione indiretta tramite triangolazione possono essere costruiti due tipi di superfici dai triangoli vicini. La prima è semplicemente la sfaccettatura lineare formata dal triangolo singolo all'interno del quale si trova il punto di interpolazione.

La Figura 3.16 (a) mostra dove i nodi della griglia 1, 2, 3 e 4 possono essere ottenuti mediante interpolazione lineare da sfaccettature triangolari *A*, *B*, *C* ed *E*, rispettivamente.

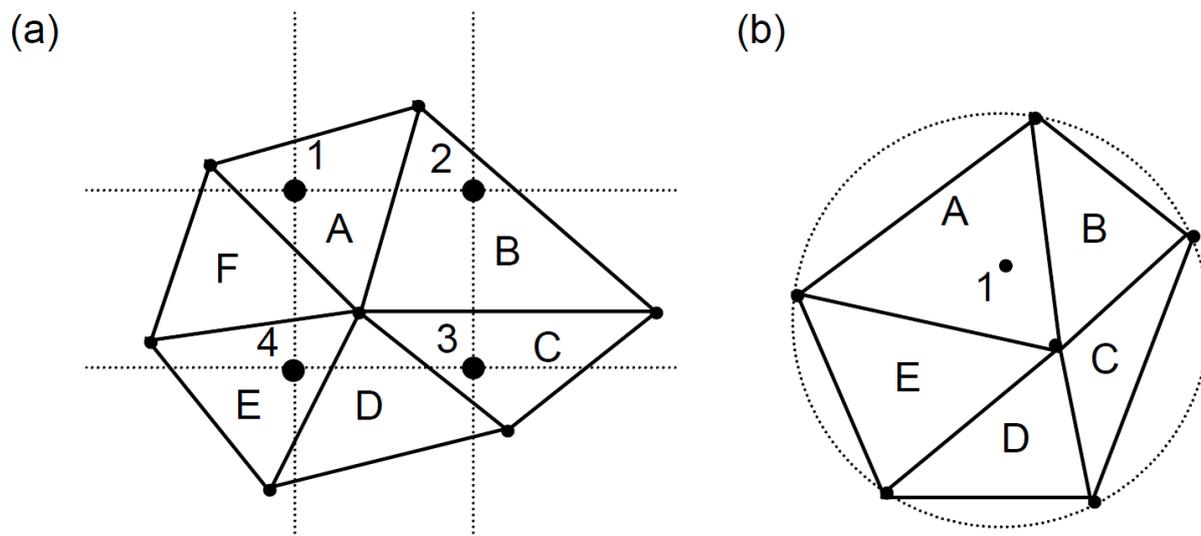


Figura 3.16 Da dati casuali a griglie di dati tramite triangolazione: (a) interpolazione lineare in sfaccettature triangolari e (b) una superficie curva formata da triangoli adiacenti.

La seconda è una superficie curva costruita da una serie di triangoli vicini al punto di interpolazione. La Figura 3.16 (b) mostra che il nodo di griglia 1 può essere interpolato dalla superficie curva formata dai triangoli *A*, *B*, *C*, *D* ed *E*.

3.5.3 FORMAZIONE DI NETWORK DI GRIGLIE DA DATI DI CURVE DI LIVELLO

Come discusso in precedenza, i dati di curve di livello sono una delle sorgenti principali per la modellazione di terreni digitali. Per formare un network di griglie da un tale set di dati è possibile agire con tre soluzioni, ovvero:

1. trattare i punti di curve di livello come punti distribuiti casualmente, poi applicare un'interpolazione random-to-grid
2. formare una triangolazione dai dati di curve di livello e quindi applicare l'interpolazione come discusso nella sezione precedente
3. progettare un metodo di interpolazione specifico per le curve di livello.

Sono di uso comune due metodi specifici per le curve di livello. Uno è l'interpolazione specifica per curve di livello lungo determinati assi prespecificati (CIPA) e l'altro è l'interpolazione cubica lungo la pendenza più ripida (CISS).

Nella CIPA il numero di assi utilizzati può essere uno, due o quattro. Per interpolare vengono usati come punti vicini i punti formati da questi assi che si intersecano e due linee di curve di livello adiacenti. In seguito viene eseguita una interpolazione per punti utilizzando una funzione ponderata in base alla distanza.

La Figura 3.17 mostra l'interpolazione del punto P usando quattro assi predefiniti. In questa figura i punti intersecanti 1, 2, ..., 8 possono essere usati per interpolare il punto P .

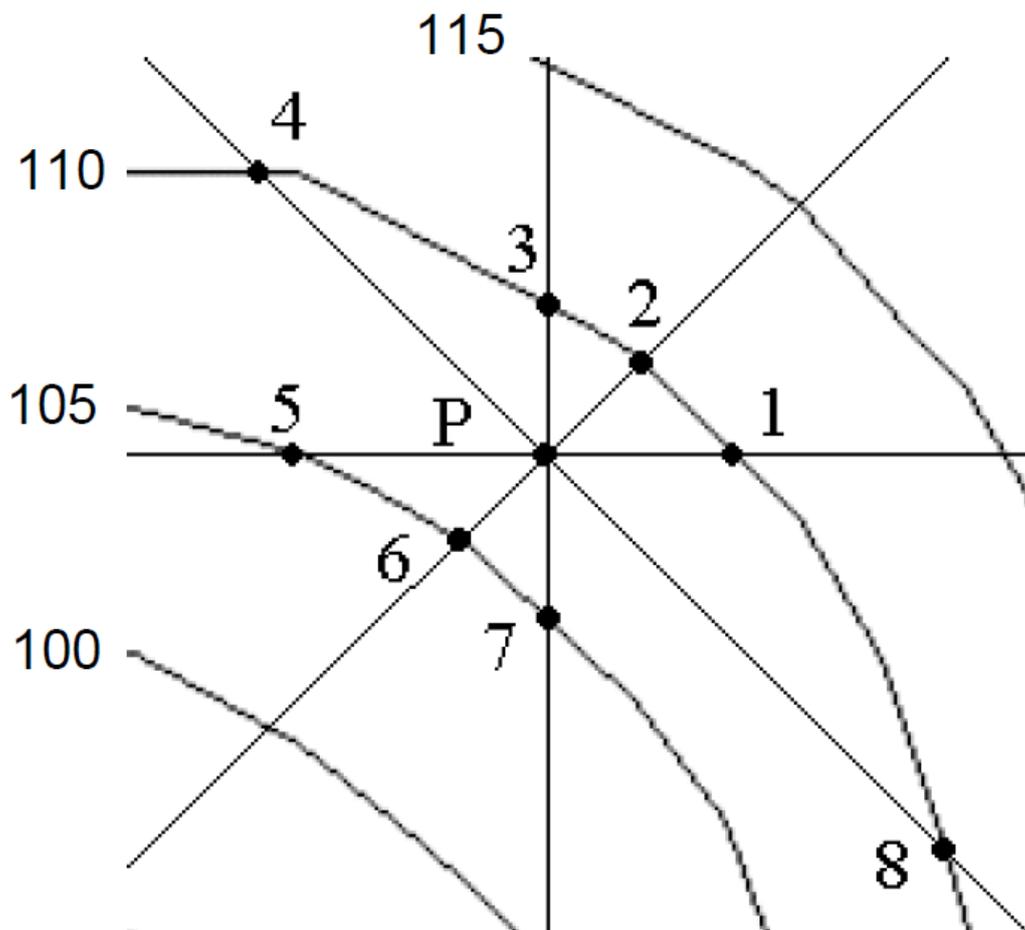


Figura 3.17 interpolazione specifica per curve di livello usando assi predefiniti.

In alternativa due punti, ciascuno su una delle due curve di livello adiacenti, ed entrambi situati lungo la pendenza più ripida che passa attraverso il punto da interpolare, potrebbero essere utilizzati per l'interpolazione lineare. Ad esempio, i punti 5 e 1 nella Figura 3.17 possono essere utilizzati per tale interpolazione.

Come discusso da Leberl e Olson [31] (1982), tutti e otto i punti di intersezione vengono usati per determinare la direzione della pendenza più ripida.

Infatti, lungo la pendenza più ripida è anche possibile applicare l'interpolazione non lineare. Clarke e al.[4] (1982) hanno usato una funzione polinomiale cubica. In questo caso si richiedono quattro punti noti per qualsiasi punto di interpolazione; in altre parole, vengono utilizzate quattro linee di curve di livello adiacenti. Su ciascuna di queste si verifica un incrocio; la Figura 3.18 ci mostra questo risultato.

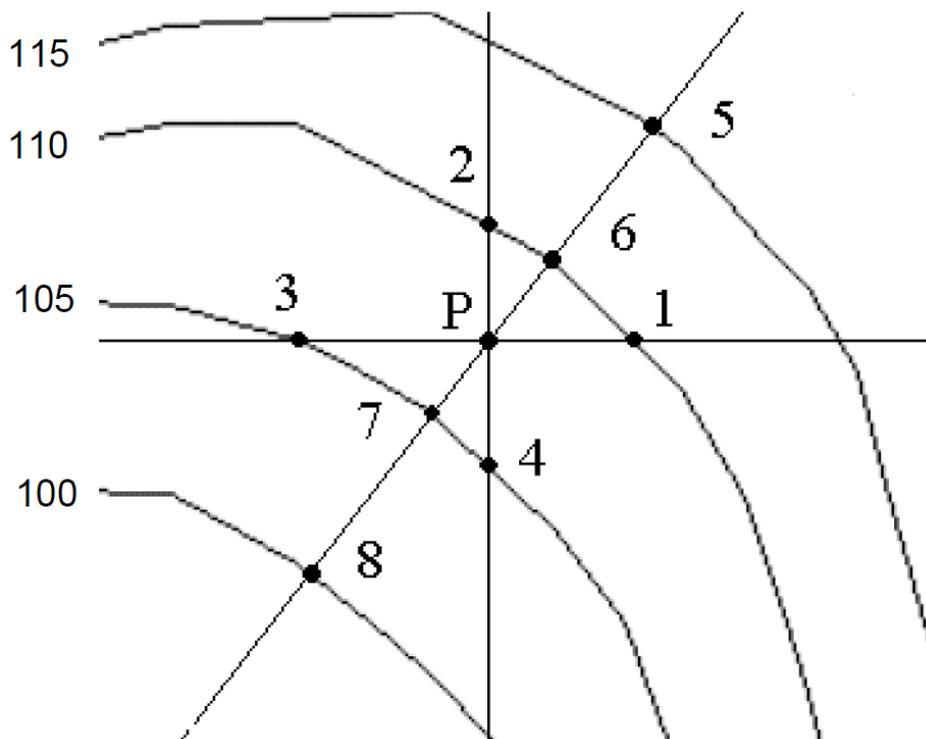


Figura 3.18 Selezione di direzione di pendenza più ripida e punti dati per interpolazione CISS.

--I punti 1-2-3-4 sono usati per determinare la pendenza più ripida.

--I punti 5-6-7-8 sono punti dati per l'interpolazione.

CAPITOLO 4

TECNICHE DI INTERPOLAZIONE PER IL TERRAIN SURFACE MODELING

4.1 TECNICHE DI INTERPOLAZIONE: UNA PANORAMICA

L'interpolazione è un problema di approssimazione in matematica e un problema di stima in statistica. L'interpolazione nella modellazione digitale del terreno viene utilizzata per determinare il valore dell'altezza di un punto usando le altezze conosciute dei punti vicini. Ci sono due presupposti impliciti dietro le tecniche di interpolazione: (a) la superficie del terreno è continua e liscia e (b) c'è un'alta correlazione tra i punti dati adiacenti. L'interpolazione è una delle tecniche di base nel DTM perché è coinvolta nelle varie fasi del processo di modeling, come il controllo di qualità, la ricostruzione di superfici, la valutazione della precisione, l'analisi del terreno e le applicazioni.

Le tecniche di interpolazione possono essere classificate secondo diversi criteri e possono essere usate per scopi diversi. La Tabella 4.1 tenta di fornire una classificazione semplice.

Criterio	Tecnica di Interpolazione
Dimensione dell'area per l'interpolazione	Per punto, per area (per patch o globale)
Esattezza della superficie	Raccordo esatto, raccordo migliore
Uniformità della superficie	Lineare, non lineare
Continuità della superficie	Gradini, continua
Precisione della funzione	Precisa, approssimativa
Certezza del problema	Funzionale, stocastica
Dominio d'interesse	Spaziale, spettrale (es. frequenza)
Complessità del fenomeno	Iterazione numerale, analitica

Tabella 4.1 Una Classificazione delle Tecniche di Interpolazione

Partendo dalla dimensione dell'area vengono identificati due approcci (Petrie 1990a), ovvero, *l'interpolazione per area e per punto*. Con l'approccio basato sull'area la superficie è costruita usando tutti i punti di riferimento (noti) all'interno dell'area e l'altezza di qualsiasi punto all'interno di questa può essere determinata usando questa superficie costruita. L'interpolazione può essere *globale* o *locale*; *l'interpolazione globale* implica la costruzione di una singola superficie 3-D dal set completo di dati dei punti misurati, da cui i valori di altezza di tutti gli altri punti possono essere ottenuti. Questo è un approccio estremo. L'utilità di questo tipo di tecnica dipende dalla complessità della superficie del terreno e dalla dimensione effettiva dell'area. Una soluzione più adattabile è quella di dividere una grande area in una serie di patch di forma e dimensioni identiche.

Questa viene chiamata *interpolazione locale o per patch*.

Viene costruita una superficie per ogni patch usando tutti i punti di riferimento, e le altezze di tutti i punti (da interpolare) all'interno di questa patch sono ottenuti da questa superficie patch.

La dimensione della patch è determinata dalla complessità dell'area e potrebbe esserci un certo grado di sovrapposizione tra patch vicine per garantire una connessione fluida tra loro. All'altro estremo, potrebbe essere costruita una superficie per l'interpolazione di ciascun punto, con conseguente *interpolazione per punto*, però questo processo richiede calcoli pesanti.

Nella costruzione di una superficie per l'interpolazione, (globale, per patch, o per punto), la superficie può passare o no attraverso tutti i punti di riferimento. Se passa attraverso tutti i punti è una ricostruzione esatta e si chiama *raccordo esatto*. Tuttavia questo potrebbe non verificarsi, a causa di errori nei punti di riferimento; in questo caso, potrebbe esserci una deviazione da ciascuno dei punti di riferimento. Se tali deviazioni sono limitate al minimo allora la superficie sarà la soluzione ottimale. Questo tipo di interpolazione si chiama *raccordo migliore*.

Una superficie potrebbe essere sotto forma di *gradini*, come mostrato nella Figura 3.2. Questa è una superficie discontinua. In molte applicazioni la continuità è un requisito, almeno visivamente, quindi è possibile costruire una superficie continua, che può o può non essere liscia. Ad esempio, come discusso nel Capitolo 4, una superficie che comprende un insieme di sfaccettature lineari contigue non è continua nella prima derivata e quindi non è liscia. Le sfaccettature triangolari e le superfici

bilineari sono entrambe superfici lineari. Di solito, una superficie liscia è costruita usando un tipo di polinomio di grado superiore.

È anche possibile utilizzare una funzione approssimativa per l'interpolazione, se la funzione originale è troppo complessa o la funzione approssimativa è buona abbastanza e molto più semplice. Ad esempio, quando x è un angolo molto piccolo, il valore di $\sin(x)$ può essere ben approssimato dalla x stessa. In altre parole, $y = x$ è un'approssimazione molto buona della funzione $y = \sin(x)$ per questa condizione.

In realtà è anche possibile (ma non nel terrain modeling) che la natura di un fenomeno sia troppo complessa e non si è in grado di stabilire una funzione analitica per il problema, ragion per cui viene usata l'approssimazione numerica per iterazione.

Un problema potrebbe essere deterministico o probabilistico. Per il primo può essere utilizzata una funzione deterministica, mentre per il secondo è necessario utilizzare un modello stocastico. A volte le piccole variazioni sul terreno sono così complesse che la variazione viene poi considerata come un processo stocastico.

L'interpolazione può avvenire nel dominio spettrale o spaziale. La maggior parte delle tecniche sono per l'interpolazione spaziale, però, è anche possibile trasformare i dati in un dominio di frequenza ed eseguire lì l'interpolazione.

Bisogna sottolineare che le tecniche di interpolazione sono ben discusse all'interno della comunità matematica ed è disponibile per la presa visione una vasta letteratura su questo argomento. Pertanto, solo quelle molto usate nella modellazione digitale di terreni sono descritte in questo capitolo; in altre parole, alcune funzioni di interpolazione, come la Kriging, sono qui omesse a causa delle loro complessità.

Inoltre, nella comunità fotogrammetrica è stato rilevato che il campionamento è l'unico passo fondamentale nella modellazione digitale del terreno, perché le informazioni perse durante fase di campionamento non possono essere ricostruite da alcuna funzione di interpolazione. Ecco perché nessuna interpolazione complicata viene utilizzata nella modellazione digitale del terreno.

4.2 RACCORDO ESATTO DI SUPERFICI LINEARI IN BASE ALL'AREA

Questa sezione discute l'interpolazione di una superficie lineare che si adatta esattamente ai punti di riferimento. In altre parole, ogni punto di riferimento viene onorato.

4.2.1 INTERPOLAZIONE LINEARE SEMPLICE

Un piano può essere determinato da tre punti su di esso; la sfaccettatura triangolare è un esempio tipico di tale superficie. La funzione matematica di un piano è come segue:

$$z = a_0 + a_1x + a_2y \quad (4.1)$$

dove a_0 , a_1 e a_2 sono i tre coefficienti e (x, y, z) è il set di coordinate di un punto di superficie. Per calcolare questi tre coefficienti bisogna prendere tre punti di riferimento con coordinate note, ad esempio $P_1(x_1, y_1, z_1)$, $P_2(x_2, y_2, z_2)$ e $P_3(x_3, y_3, z_3)$, al fine di stabilire tre equazioni come segue:

$$\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Una volta che i coefficienti a_0 , a_1 e a_2 sono calcolati, allora l'altezza z_i di qualsiasi punto i con un dato set di coordinate (x_i, y_i) può essere ottenuto sostituendo (x_i, y_i) all'Equazione (4.1).

4.2.2 INTERPOLAZIONE BILINEARE

L'interpolazione bilineare può essere eseguita per quattro punti qualsiasi (non lungo una linea). La funzione matematica è la seguente:

$$z = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy \quad (4.3)$$

dove a_0, a_1, a_2, a_3 è il set di coefficienti, i quali devono essere determinati da quattro equazioni che si formano facendo uso delle coordinate di quattro punti di riferimento, ad esempio $P_1(x_1, y_1, z_1)$, $P_2(x_2, y_2, z_2)$ e $P_3(x_3, y_3, z_3)$ e $P_4(x_4, y_4, z_4)$.

La formula matematica è la seguente:

$$\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & x_1y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & x_2y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & x_3y_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & x_4y_4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Una volta che i coefficienti a_0, a_1, a_2 e a_3 sono calcolati, allora l'altezza z_i di qualsiasi punto i con un dato set di coordinate (x_i, y_i) può essere ottenuto sostituendo (x_i, y_i) nell'Equazione (4.3).

Se i punti dati (di riferimento) sono distribuiti sotto forma di griglie quadrate, allora può essere usata la seguente formula:

$$z_p = z_1 \left(1 - \frac{\Delta x}{d}\right) \left(1 - \frac{\Delta y}{d}\right) + z_2 \left(1 - \frac{\Delta x}{d}\right) \left(\frac{\Delta x}{d}\right) + z_3 \left(\frac{\Delta x}{d}\right) \left(\frac{\Delta y}{d}\right) + z_4 \left(1 - \frac{\Delta x}{d}\right) \left(\frac{\Delta y}{d}\right) \quad (4.5)$$

Nella formula i punti 1, 2, 3 e 4 sono i quattro nodi della griglia quadrata e d è la lunghezza dell'intervallo di griglia (Figura 4.1a).

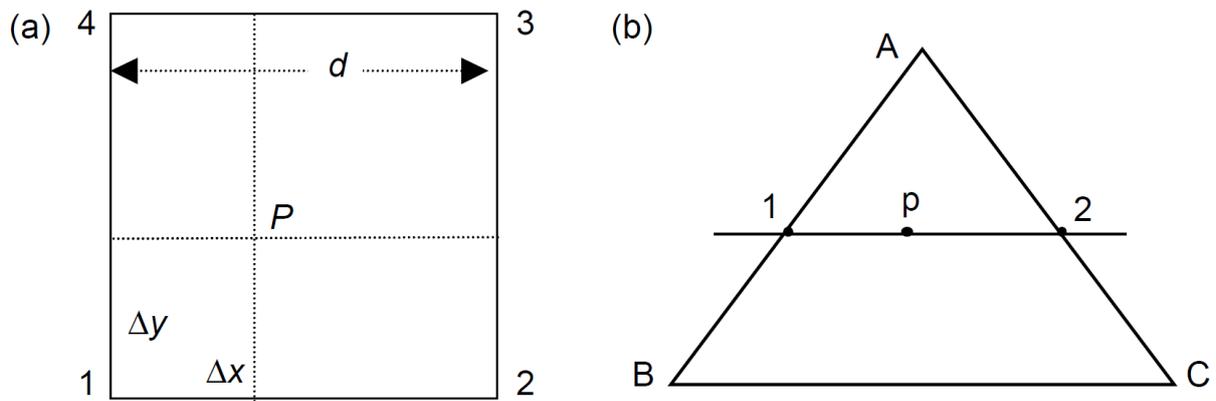


Figura 4.1 Interpolazione bilineare: (a) per griglie quadrate e (b) per triangoli.

In effetti, l'interpolazione su una sfaccettatura triangolare può anche essere eseguita in modo simile all'interpolazione bilineare su griglia.

Come mostrato nella Figura 4.1 (b), l'altezza del punto $p(x_p, y_p, z_p)$ può essere interpolata dai punti 1 e 2 come segue:

$$z_p = z_1 + (z_2 - z_1) \times (x_p - x_1) / (x_2 - x_1) \quad (4.6)$$

e

$$z_1 = z_A + (z_B - z_A) \times (x_1 - x_A) / (x_B - x_A) \quad (4.7a)$$

$$z_2 = z_A + (z_C - z_A) \times (x_2 - x_A) / (x_C - x_A) \quad (4.7b)$$

dove $y_p = y_1 = y_2$, ed i punti 1 e 2 si trovano sulle linee \overline{AB} e \overline{AC} , rispettivamente. In alternativa, le coordinate dell'area locale della Figura 4.13 possono essere utilizzate per l'interpolazione lineare usando una media ponderata, ovvero:

$$z_p = \frac{z_1 \times \Delta a_1 + z_2 \times \Delta a_2 + z_3 \times \Delta a_3}{\Delta a_1 + \Delta a_2 + \Delta a_3} \quad (4.8)$$

Questo garantisce la continuità tra triangoli adiacenti. Infatti, se la distribuzione dei punti di riferimento non è buona (ad es. lungo quasi una linea retta), allora l'equazione (4.2) non è stabile ed è consigliato in questo caso l'uso dell'equazione (4.6).

4.3 RACCORDO ESATTO DI SUPERFICIE CURVA IN BASE ALL'AREA

L'interpolazione bilineare è ampiamente utilizzata nell'interpolazione DTM perché è semplice, intuitiva e affidabile; tuttavia, la superficie risultante non è liscia. Per rendere la superficie liscia si potrebbe montare una superficie polinomiale su un set di superfici lineari contigue; in alternativa, è anche possibile attuare un raccordo esatto di superfici curve, come una funzione spline bicubica.

4.3.1 INTERPOLAZIONE SPLINE BICUBICA

Per superare le carenze delle funzioni bilineari si può usare essere una funzione spline bicubica, al fine di costruire una superficie DTM liscia su una patch composta da quattro nodi griglia, per esempio, i punti *A*, *B*, *C* e *D* nella Figura 4.2.

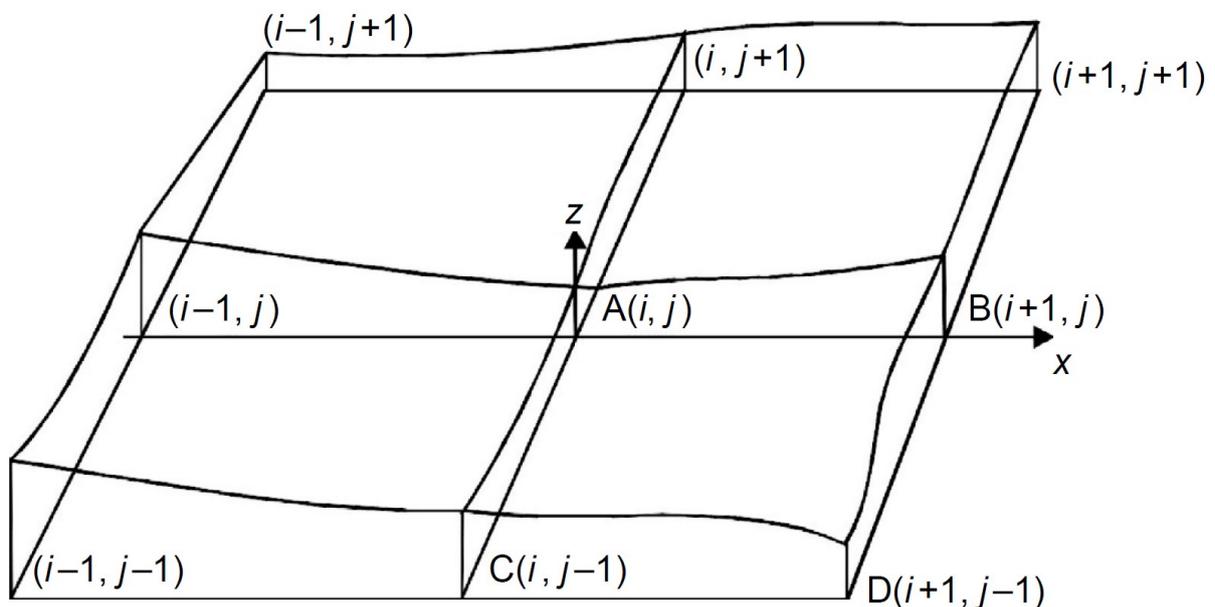


Figura 4.2 Interpolazione Spline Bicubica

La funzione matematica di una funzione bicubica è la seguente:

$$\begin{aligned}
 z = f(x, y) &= \sum_{j=0}^3 \sum_{i=0}^3 a_{i,j} x^i y^j \\
 &= a_{00} + a_{10}x + a_{20}x^2 + a_{30}x^3 \\
 &\quad + a_{01}y + a_{11}xy + a_{21}x^2y + a_{31}x^3y \\
 &\quad + a_{02}y^2 + a_{12}xy^2 + a_{22}x^2y^2 + a_{32}x^3y^2 \\
 &\quad + a_{03}y^3 + a_{13}xy^3 + a_{23}x^2y^3 + a_{33}x^3y^3 \quad (4.9)
 \end{aligned}$$

dove $a_{00}, a_{01}, a_{10}, \dots, a_{33}$ sono i 16 coefficienti da determinare.

Sono necessarie sedici equazioni per risolvere i sedici coefficienti. Conoscendo le coordinate dei quattro nodi della griglia è possibile stabilire quattro equazioni.

Pertanto, saranno necessarie altre dodici equazioni che verranno prese dalle condizioni per le connessioni tra patch, che dicono:

1. le pendenze su ogni nodo (vale a dire, la congiunzione tra quattro patch adiacenti) dovrebbero essere continue nelle direzioni x, y
2. la coppia della congiunzione delle patch adiacenti è continua a sua volta.

Sia R e S le pendenze nelle direzioni x e y rispettivamente e T sia la coppia, allora:

$$R = \frac{\partial z}{\partial x}, S = \frac{\partial z}{\partial y}, T = \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} \quad (4.10)$$

Poiché i punti di riferimento si trovano nei nodi di griglia quadrata, le differenze di altezza possono essere usate per calcolare questi valori come segue:

$$\begin{aligned}
 R_{i,j} &= \frac{\partial z}{\partial x} = \frac{z_{i+1,j} - z_{i-1,j}}{2} \\
 S_{i,j} &= \frac{\partial z}{\partial y} = \frac{z_{i,j+1} - z_{i,j-1}}{2} \\
 T_{i,j} &= \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} = \frac{(z_{i-1,j-1} + z_{i+1,j+1}) - (z_{i+1,j-1} - z_{i-1,j+1})}{4}
 \end{aligned} \quad (4.11)$$

Ci saranno dodici equazioni di questo tipo per una patch con quattro nodi, in quanto vi sono tre equazioni per ogni nodo.

Dopo che questi coefficienti sono stati risolti, allora per un punto P con coordinate (x_p, y_p) può essere calcolata l'altezza tramite Equazione (4.9).

I requisiti di connessione tra patch sono adottati dalla meccanica elastica e i risultati di tale interpolazione potrebbero non essere desiderabili come da previsto, poiché le patch del terreno non sono croste elastiche in senso stretto.

4.3.2 INTERPOLAZIONE MULTI-SUPERFICIE (METODO HARDY)

L'interpolazione multi-superficie è anche nota come metodo Hardy (Hardy[25], 1971). L'idea di base è che qualsiasi superficie curva continua (regolare o irregolare) può essere approssimata dalla somma di una serie di superfici semplici (vale a dire, superfici matematiche a valore singolo), con precisione desiderata. Potrebbe essere considerata come un'analogia della serie Fourier. Il processo effettivo stabilisce una superficie curva per ciascun punto di riferimento usando una funzione base (chiamata funzione kernel) e l'altezza di qualsiasi punto tra i punti di riferimento assumono una media ponderata da queste superfici curve. In questo modo la superficie finale sarà continua e passerà attraverso tutti i punti di riferimento.

L'espressione matematica di sovrapposizione multi-superficie è:

$$\begin{aligned} z = f(x, y) &= \sum_{i=1}^n k_i Q(x, y, x_i, y_i) \\ &= k_1 Q(x, y, x_1, y_1) + k_2 Q(x, y, x_2, y_2) + \dots + k_n Q(x, y, x_n, y_n) \end{aligned} \quad (4.12)$$

dove $Q(x, y, x_i, y_i)$ è la superficie matematica semplice (a valore singolo), chiamata funzione kernel in multi-superfici; n è il numero di superfici matematiche semplici (o il numero di strati superficiali) il cui valore è uguale al numero di punti di riferimento all'interno della patch; e $k_i (i = 1, 2, 3, \dots, n)$ è il coefficiente che rappresenta il contributo della funzione kernel i alla superficie finale.

In altre parole, le funzioni kernel sono in genere funzioni semplici dello stesso tipo e vengono formate attraverso la rotazione attorno a un asse (che passa appena attraverso il punto di riferimento). Esempi di tali funzioni semplici sono:

1. *Funzione conica:*

$$Q_1(x, y, x_i, y_i) = C + [(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2]^{1/2} \quad (4.13)$$

dove $[(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2]^{1/2}$ è la distanza orizzontale tra il punto di interpolazione $(x - x_i)$ e il punto di riferimento (x_i, y_i) .

2. *Funzione iperbolica:*

$$Q_2(x, y, x_i, y_i) = [(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + \sigma]^{1/2} \quad (4.14)$$

dove σ è un parametro diverso da zero. L'equazione (4.14) rappresenta una superficie curva che si forma attraverso la rotazione di una curva di iperbole attorno ad un asse verticale. Quando $\sigma = 0$ questa superficie curva degenera per diventare una superficie conica.

3. *Funzione cubica:*

$$Q_3(x, y, x_i, y_i) = C + [(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2]^{3/2} \quad (4.15)$$

4. *Funzione geometrica:*

$$Q_4 = 1 - \frac{D_i^2}{a^2} \quad (4.16)$$

5. *Funzione esponenziale:*

$$Q_5 = C_0 \times e^{-a^2 D_i^2} \quad (4.17)$$

dove C_0 e a sono i due parametri.

Le seguenti funzioni kernel sono ben conosciute e molto utilizzate (Li[33], 1988):

1. *Funzione Arthur:*

$$Q(d) = e^{-25d^2/a^2} \quad (4.18)$$

dove d è la distanza tra due punti e a è la distanza più lunga tra vari punti di dati.

2. *Funzione Lu:*

$$Q(d) = 1 + d^3 \quad (4.19)$$

3. *Funzione Wild:*

$$Q_2(x, y, x_i, y_i) = \left(1 + \frac{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}{(d_{ki})_{min}^2}\right)^{1/2} \quad (4.20)$$

dove $(d_{ki})_{min}^2$ rappresenta la distanza tra il punto di dati i e il suo punto di dati k più vicino. Quando $n = m$ la matrice Q è una matrice asimmetrica, poiché ogni punto di dati ha il suo proprio riferimento $(d_{ki})_{min}^2$.

La funzione Wild è il risultato della modifica dell'Equazione (4.14). Questo perché la superficie ottenuta usando l'Equazione (4.14) diventerà più liscia quando σ diventa più grande.

La Figura 4.3 mostra questa tendenza, dove sono stati utilizzati un insieme di valori per σ (ovvero, 0, 0,6 e 10).

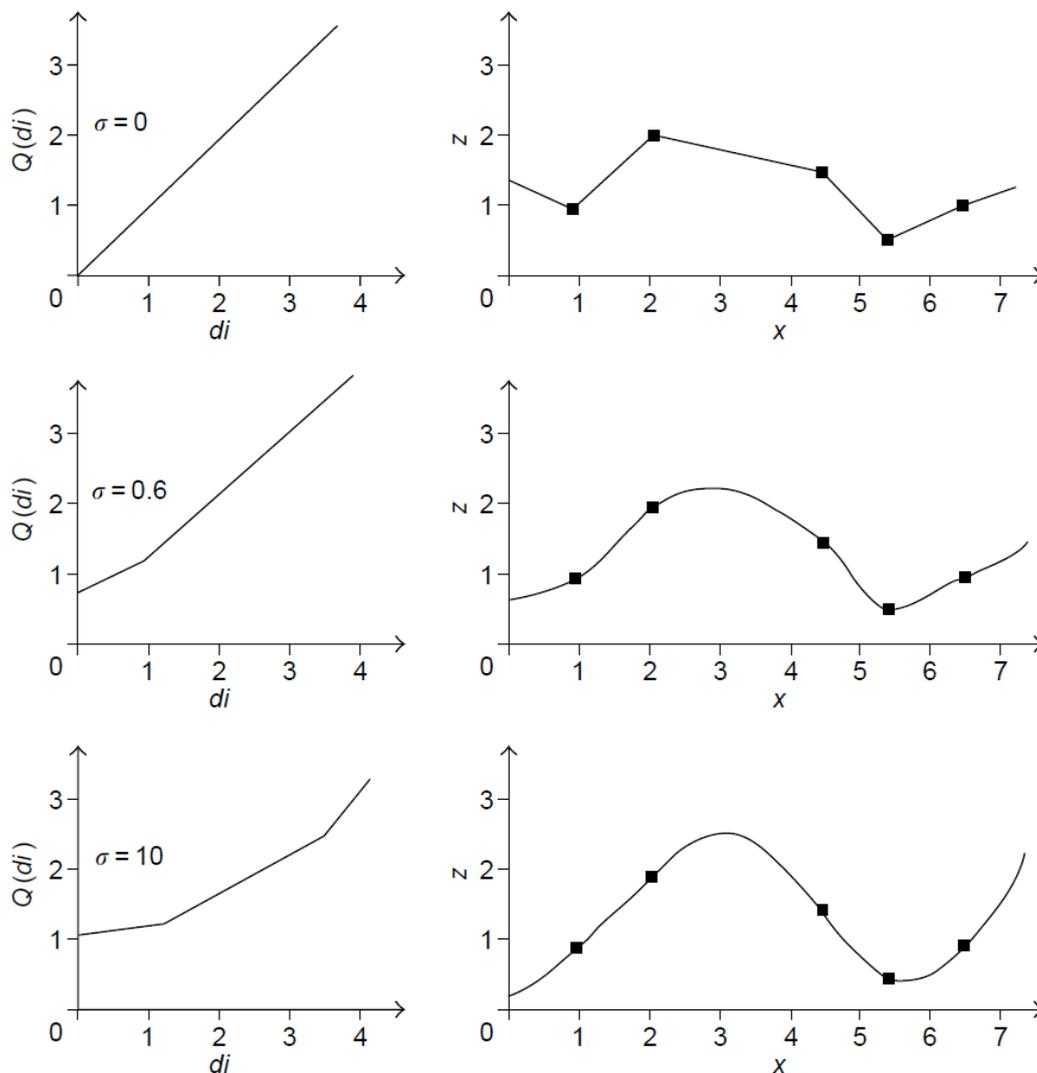


Figura 4.3 Vari valori σ e curve di interpolazione per Equazione (4.14)

Il vantaggio della funzione Wild è che i punti e le linee degli identificatori di terreno possono essere utilizzati durante il processo di interpolazione, anche con $(d_{ki})_{min}^2$ molto piccoli, purché l'insieme dei punti sia abbastanza denso. Di conseguenza potrebbe essere prodotta una forte pendenza sulla parte superiore della superficie curva. In questo modo è possibile riadattare cambiamenti bruschi nella superficie del terreno.

Se il numero dei punti di riferimento m è maggiore del numero di superfici kernel, allora viene presa una soluzione mediante minimi-quadrati, che sarà discussa più avanti in questo capitolo.

Un vantaggio dell'interpolazione multi-superficie è che potrebbero essere progettati diversi tipi di superfici kernel per adattarsi a diverse caratteristiche delle superfici del terreno.

Questo ci è utile quando la densità dei punti di riferimento campionati è bassa, ma la loro precisione è relativamente alta. Tuttavia, il processo è piuttosto complicato e inefficiente, pertanto non è ampiamente utilizzato.

4.4 MONTAGGIO MIGLIORE DI SUPERFICI BASATO SULL'AREA

Quando una superficie del terreno è complessa, è impossibile usare una funzione matematica per descriverla completamente; si usa quindi una funzione di interpolazione per approssimare la superficie del terreno.

Bisogna notare che una superficie che passa attraverso tutti i punti di riferimento non è necessariamente un'approssimazione migliore di altre superfici. Se l'area è grande e ci sono molti punti di riferimento disponibili bisogna usare polinomi di ordine altissimo per ottenere il raccordo esatto della superficie.

Questo è un processo pericoloso perché può causare un'oscillazione instabile della funzione polinomiale di ordine alto. La Figura 4.4 illustra tale oscillazione.

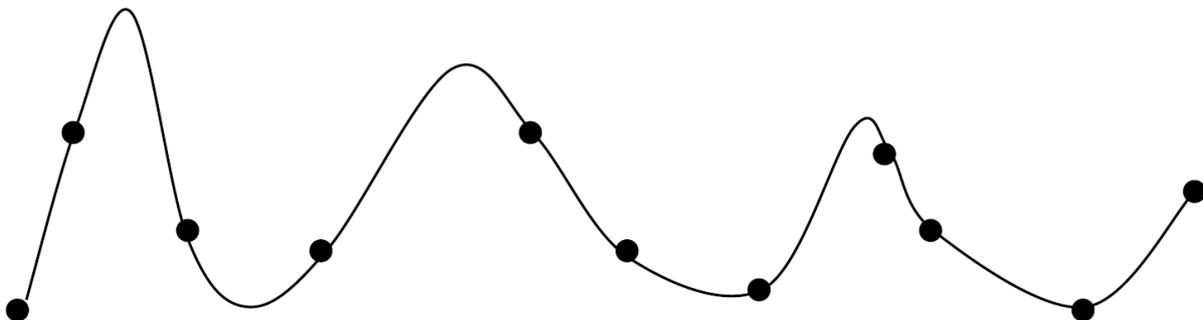


Figura 4.4 Oscillazione di superficie polinomiale di ordine alto.

Per questo motivo il raccordo migliore (al contrario di quello esatto) delle superfici curve è un metodo di largo uso. La teoria alla base del raccordo migliore è che le piccole variazioni sulla superficie del terreno sono così complesse da poter essere trattate come un processo stocastico.

4.4.1 RACCORDO DEI MINIMI QUADRATI DI UNA SUPERFICIE LOCALE

Esistono molte possibilità per il raccordo migliore, a seconda della definizione di "migliore".

Una definizione semplice potrebbe essere che il raccordo è migliore quando la somma dei valori assoluti degli errori è al minimo. Un'altra definizione molto usata è che la somma degli errori quadrati è minima, portando ai minimi quadrati, definizione ampiamente utilizzata nella teoria degli errori.

Le espressioni matematiche sono le seguenti:

$$\sum_{i=1}^n |e_i| = \min \quad (4.21)$$

$$\sum_{i=1}^n e_i^2 = \min \quad (4.22)$$

dove e_i è la deviazione del punto di riferimento i dalla superficie di raccordo e n è il numero totale di punti di riferimento.

Per un insieme di punti di riferimento e una funzione di raccordo esiste un numero infinito di raccordi.

La Figura 4.5 mostra un caso simile usando la superficie lineare come funzione di raccordo.

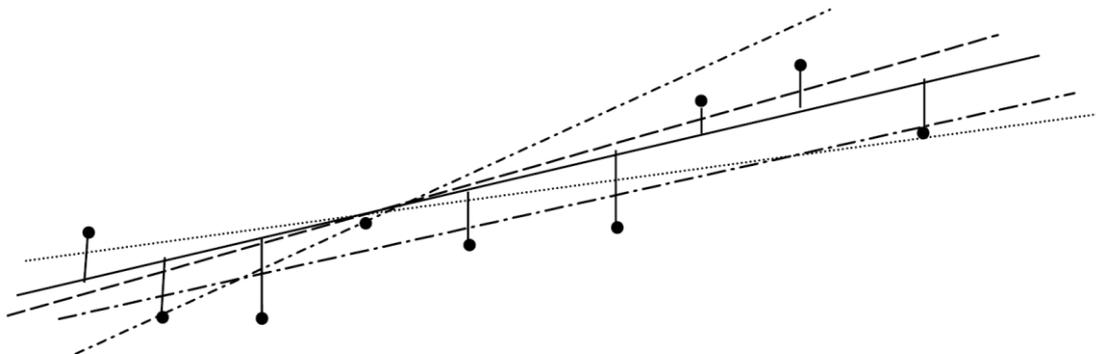


Figura 4.5 Residuali su punti di riferimento sullo stesso tipo di superficie, ma con raccordi differenti.

Questa figura mostra che può esserci una deviazione in ogni punto di riferimento dalla superficie raccordata e la deviazione viene anche chiamata residua nella teoria degli errori.

Il raccordo migliore risultante è quello con la più piccola somma di residui quadrati. La superficie raccordata ai dati potrebbe essere lineare (Figura 4.6a) o una superficie curva liscia (Figura 4.6b).

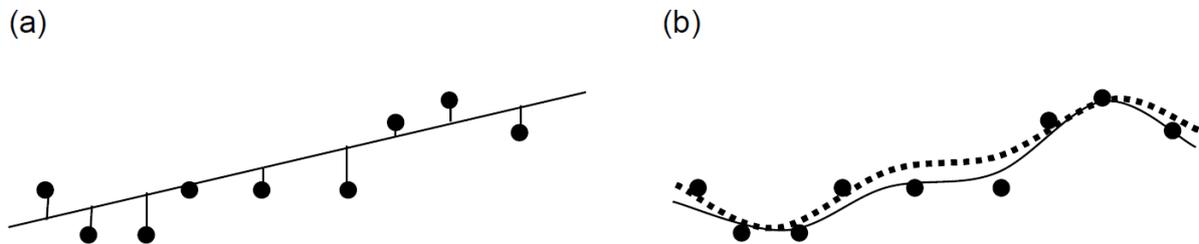


Figura 4.6 Residuali su punti di riferimento su superfici differenti.

Ci sono diversi tipi di superfici curve, come discusso nella sezione precedente. Per lo stesso insieme di dati, se la superficie raccordata è diversa, allora il residuo ad ogni riferimento potrebbe essere diverso.

Nella Figura 4.5, ci sono tre superfici (una lineare e due curve) raccordate allo stesso insieme di dati e tre serie di residui che possono essere ottenuti, ovvero:

$$Sum_{Linear} = \sum_{i=1}^n \Delta z_{i,L}^2$$

$$Sum_{Curved-1} = \sum_{i=1}^n \Delta z_{i,c-1}^2$$

$$Sum_{Curved-2} = \sum_{i=1}^n \Delta z_{i,c-2}^2$$

dove $\Delta z_{i,L}$ è il residuo al punto i nel caso della superficie lineare (cioè, la distanza verticale dal punto alla linea retta); $Sum_{Linear} = \sum_{i=1}^n \Delta z_{i,L}^2$ è la somma dei quadrati dei residui; $\Delta z_{i,c-1}$ è il residuo al punto i per il primo tipo di superficie curva (cioè la distanza verticale dal punto alla superficie curva). La condizione dei minimi quadrati dice che la superficie che produce la somma minima di errori quadrati è la migliore.

In questo esempio, tra Sum_{Linear} , $Sum_{Curved-1}$ e $Sum_{Curved-2}$, se $Sum_{Curved-2}$ è più piccola, allora la curva 2 è considerata come raccordo migliore.

Questa discussione riguarda quale tipo di superficie dobbiamo considerare.

Le funzioni utilizzate comunemente per il raccordo di superfici curve sono i polinomi di secondo e terzo ordine e funzioni bicubiche. Non importa quale sia la funzione, i principi e le procedure della soluzione al minimo quadrato sono identici. Pertanto, il polinomio più semplice di secondo ordine è utilizzato per illustrare:

$$z = f(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy + a_4x^2 + a_5y^2 \quad (4.23)$$

dove $a_0, a_1, a_2, \dots, a_5$ sono i sei coefficienti. Devono essere determinati facendo uso di punti di riferimento. Se ci sono $n (> 6)$ punti di riferimento, allora ci sono n equazioni come segue:

$$\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & x_1y_1 & x_1^2 & y_1^2 \\ 1 & x_2 & y_2 & x_2y_2 & x_2^2 & y_2^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_n & y_n & x_ny_n & x_n^2 & y_n^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_5 \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

Le funzioni di errore possono essere scritte come segue:

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & x_1y_1 & x_1^2 & y_1^2 \\ 1 & x_2 & y_2 & x_2y_2 & x_2^2 & y_2^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_n & y_n & x_ny_n & x_n^2 & y_n^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_5 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_n \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

e semplificato come

$$\begin{matrix} V \\ n \times 1 \end{matrix} = \begin{matrix} X & A \\ n \times 6 & 6 \times 1 \end{matrix} - \begin{matrix} Z \\ n \times 1 \end{matrix} \quad (4.26)$$

Secondo la soluzione dei minimi quadrati,

$$A_{6 \times 1} = \left(\begin{matrix} X^T & X \\ 6 \times n & n \times 6 \end{matrix} \right)^{-1} \left(\begin{matrix} X^T & X & Z \\ 6 \times n & n \times 6 & n \times 1 \end{matrix} \right) \quad (4.27)$$

Dopo che i coefficienti sono stati calcolati, l'altezza z_p di qualsiasi punto P nella posizione (x, y) può essere ottenuta sostituendo x, y nell'Equazione (4.23).

Deve essere specificato qui che questo è un semplice metodo di regressione.

Esistono ancora altri trattamenti sofisticati che usano il concetto dei minimi quadrati, come la *collocazione di minimi quadrati* sviluppata da Moritz [43] (1980).

4.4.2 RACCORDO DEI MINIMI QUADRATI DI ELEMENTI FINITI

L'*elemento finito* è un metodo ampiamente usato nella meccanica. Divide un grande pezzo di materiale in piccole unità (celle) per il trattamento. Nel caso della modellazione digitale del terreno una superficie su vasta area può essere divisa in unità di piccole dimensioni, come una griglia o celle triangolari. Viene quindi utilizzata una funzione matematica semplice per approssimare la superficie su ogni piccola cella. In altre parole, la superficie larga è costituita da un numero finito di unità dell'area piccola (Ebner et al. [12], 1980).

Infatti, le interpolazioni bilineari e bicubriche impiegano il concetto di analisi di elemento finito, soprattutto nel caso di raccordo esatto della spline bicubica. Tuttavia, nel caso discusso, i nodi della griglia sono sconosciuti e quindi devono essere interpolati.

La Figura 4.7 mostra un caso simile.

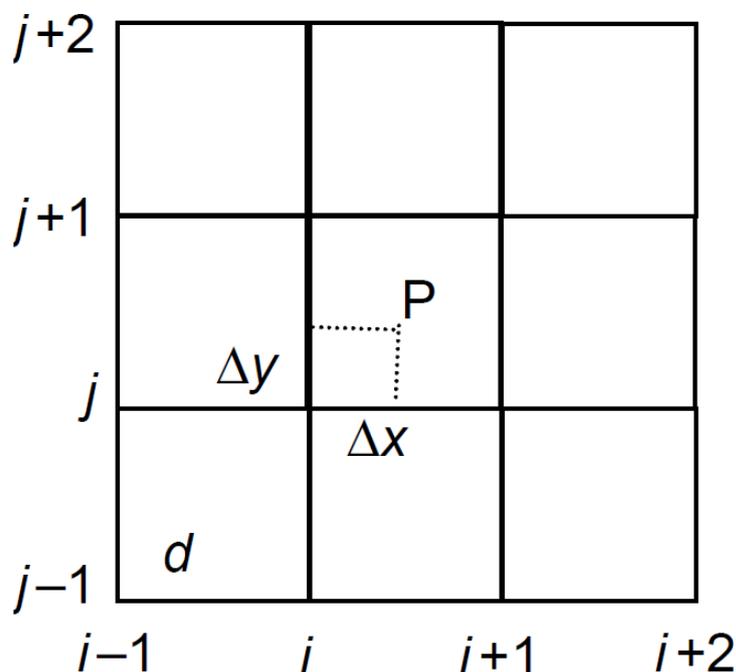


Figura 4.7 Interpolazione di elemento finito di nodi di griglia.

In questa figura è possibile determinare l'altezza del punto P sfruttando le altezze ai quattro nodi della griglia, cioè $z_{i,j}$, $z_{i+1,j}$, $z_{i+1,j+1}$, e $z_{i,j+1}$.

Ovvero,

$$z(x,y) = z_{i,j} \left(1 - \frac{\Delta x}{d}\right) \left(1 - \frac{\Delta y}{d}\right) + z_{i+1,j} \left(1 - \frac{\Delta y}{d}\right) \left(\frac{\Delta x}{d}\right) + z_{i+1,j+1} \left(\frac{\Delta x}{d}\right) \left(\frac{\Delta y}{d}\right) + z_{i,j+1} \left(1 - \frac{\Delta x}{d}\right) \left(\frac{\Delta y}{d}\right) \quad (4.28)$$

In effetti, questa equazione è identica all'Equazione (4.5).

Essendo gli incrementi $\delta x = \Delta x/d$ e $\delta y = \Delta y/d$, allora

$$z(x,y) = z_{i,j}(1 - \delta x)(1 - \delta y) + z_{i+1,j}(1 - \delta y)\delta x + z_{i+1,j+1}\delta x\delta y + z_{i,j+1}(1 - \delta x)\delta y \quad (4.29)$$

Poiché P è un punto noto e si può ottenere un'equazione di osservazione, l'equazione dell'errore è:

$$v_p = z_{i,j}(1 - \delta x)(1 - \delta y) + z_{i+1,j}(1 - \delta y)\delta x + z_{i+1,j+1}\delta x\delta y + z_{i,j+1}(1 - \delta x)\delta y - z_p \quad (4.30)$$

Al fine di garantire la scorrevolezza della superficie costruita, le seconde derivate (più precisamente, le seconde differenze) in entrambe le direzioni x e y possono essere utilizzate per costruire due equazioni di errore virtuale come segue:

$$v_x(i,j) = z_{i-1,j} - 2z_{i,j} + z_{i+1,j} = 0 \quad (4.31)$$

$$v_y(i,j) = z_{i,j-1} - 2z_{i,j} + z_{i,j+1} = 0$$

Per gli errori è anche possibile introdurre i pesi. Il trattamento più semplice dei valori dell'osservazione virtuale è supporre che non siano correlati e tutti abbiano un peso uguale a 1.

Se il peso per i punti noti è w_p , allora la condizione è:

$$\sum_{k=1}^S v_k^2 w_p + \sum_{i=2}^{n-1} \sum_{j=1}^m v_x^2(i, j) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=2}^{m-1} v_y^2(i, j) = \min \quad (4.32)$$

dove S è il numero totale di punti di riferimento e m e n sono i numeri di righe e colonne, rispettivamente, della griglia DTM che deve essere interpolata.

4.5 MEDIA MOBILE IN BASE AL PUNTO

Nella sezione precedente sono stati introdotti alcuni metodi in base all'area. In questa sezione e nelle prossime saranno introdotti alcuni metodi di interpolazione basata su punti.

4.5.1 IL PRINCIPIO DI MEDIA MOBILE IN BASE AL PUNTO

Uno dei metodi di interpolazione basata su punti è la media mobile, che è normalmente vista come un metodo per rendere la superficie liscia.

La Figura 4.8 mostra le tre linee medie mobili dell'Indice Hang Seng degli stock di Hong Kong, uno per 20 giorni e l'altro per 50 giorni, che mostrano un effetto levigante sull'Indice Hang Seng.

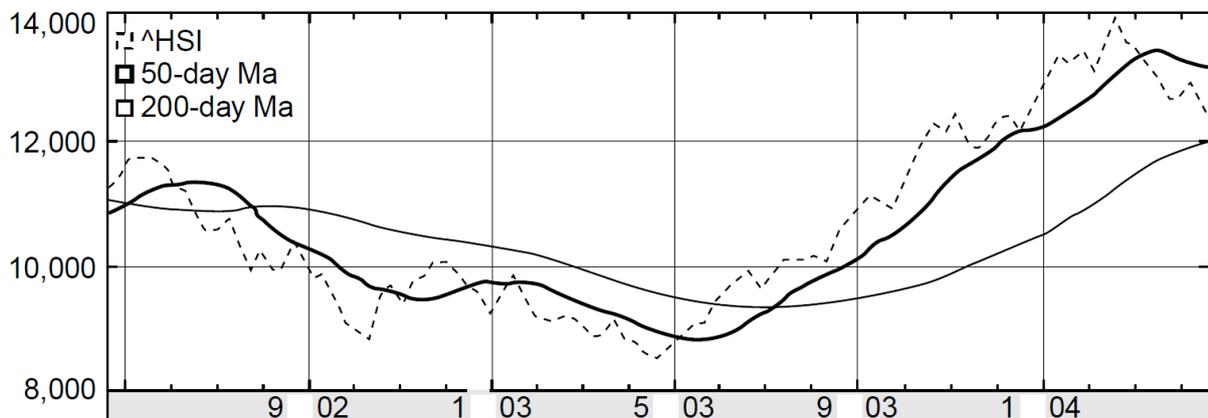


Figura 4.8 Medie mobili dell'Indice Hang Seng durante gli ultimi 3 anni.

Una tecnica simile è di uso comune nella modellazione digitale del terreno; viene usata per interpolare un punto facendo uso di un numero di punti di riferimento nelle vicinanze.

L'espressione matematica è la seguente:

$$z = \frac{\sum_{i=1}^n z_i}{n} \quad (4.33)$$

dove n è il numero totale di punti di riferimento utilizzati per l'operazione di calcolo della media e $z_i (i \in 1, n)$ è l'altezza del punto di riferimento i -esimo.

Ad esempio, se cinque punti vicini sono selezionati come punti di riferimento per l'interpolazione del punto P , e le loro altezze sono 4, 5, 6, 3.5 e 4.5, allora il valore di altezza di P è $(4 + 5 + 6 + 3.5 + 4.5)/5 = 4.4$.

Questa è una media semplice. Significa che non importa quanto un riferimento sia vicino al punto di interpolazione, il suo peso ponderato è lo stesso degli altri. Questa ponderazione equivalente sembra ingiusta rispetto a quei punti di riferimento che sono più vicini al punto di interpolazione. Questo ci porta a una media mobile ponderata come segue:

$$z = \frac{\sum_{i=1}^n w_i z_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (4.34)$$

dove w_i è il peso per il punto i -esimo, che può essere o non essere diverso da quello degli altri.

Nascono due domande: (a) quali punti dovrebbero essere usati come punti di riferimento e (b) come assegnare un peso a ciascun punto di riferimento.

4.5.2 RICERCA DI PUNTI VICINI

I punti adiacenti dovrebbero essere vicini al punto da interpolare. Utilizzando la distanza come criterio può essere disegnato attorno al punto di interpolazione un cerchio o un rettangolo, e tutti i punti all'interno di quest'area sono selezionati.

La Figura 4.9 (b) ci mostra questo.

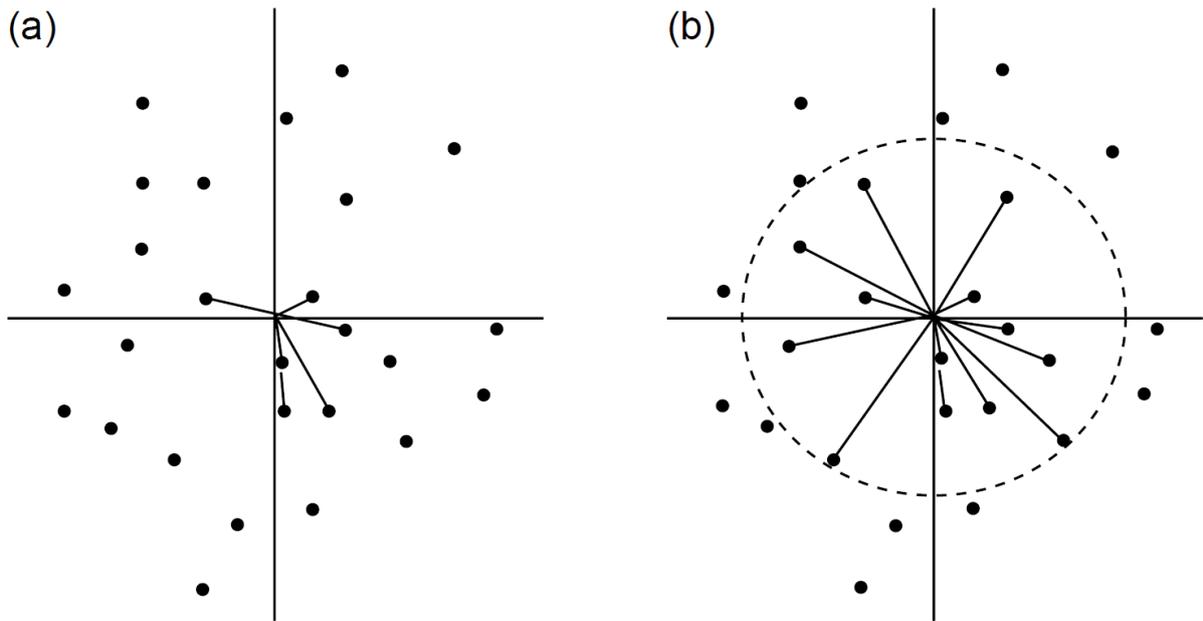


Figura 4.9 Selezione di punti vicini per l'interpolazione: (a) in base al numero di punti e (b) in base ad un range di ricerca.

Se ci sono troppi punti vicini allora può anche essere considerato il numero.

Ad esempio, sono selezionati solo i sei punti più vicini, come mostrato nella Figura 4.9 (a).

In una selezione simile potrebbe esserci il pericolo che la maggior parte dei punti si trovino in una sola direzione.

La Figura 4.10 (a) mostra questo caso.

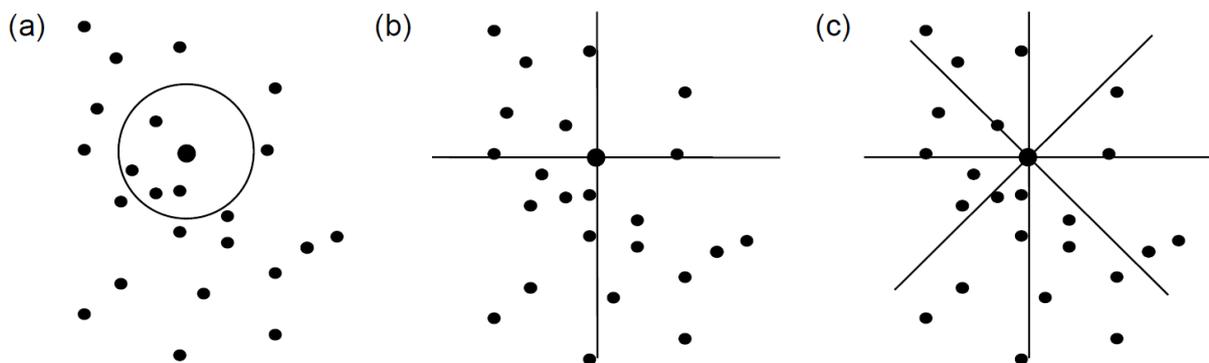


Figura 4.10 Selezione di alcuni punti da ogni settore come punti di riferimento: (a) nessun settore; (b) quattro settori; e (c) otto settori.

Un'alternativa può essere considerare la distribuzione dei punti, ovvero, i punti vengono suddivisi in quattro (Figura 4.10b) o otto (Figura 4.10c) settori, poi viene selezionato un numero di punti per ogni settore.

Un'altra alternativa, simile all'idea della spartizione, è quella di generare un diagramma di Voronoi dei punti di dati, poi vengono selezionati per l'interpolazione quei punti le quali regioni di Voronoi hanno confini in comune con la regione di Voronoi dei punti di interpolazione.

Naturalmente si potrebbe obiettare che siccome è già stato costruito un diagramma di Voronoi del set di punti, perché non dovremmo eseguire un'interpolazione sul network triangolare?

4.5.3 DETERMINAZIONE DELLE FUNZIONI DI PONDERAZIONE

L'idea fondamentale di assegnare un peso ponderato ad un punto di riferimento significa considerare l'influenza del punto di riferimento, per questo processo viene comunemente utilizzata una funzione di distanza. Ovvero, quanto minore è la distanza, tanto maggiore è il peso.

È ovvio che quanto più vicini sono i punti osservati, tanto maggiore è la loro somiglianza; più distanti sono, più piccola è la somiglianza.

Perciò, la distanza influisce sul grado di influenza di diversi punti sull'elevazione del punto da interpolare. Quindi, nella media mobile, di solito si usa una funzione di ponderazione relativa alla distanza.

Le funzioni di ponderazione comunemente utilizzate sono le seguenti:

$$w_i = \frac{1}{d_i^2} \quad (4.35)$$

$$w_i = \left(\frac{R-d_i}{d_i}\right)^2 \quad (4.36)$$

$$w_i = e^{-d_i^2/K^2} \quad (4.37)$$

dove w_i è il peso per il punto di riferimento i ; R è il raggio del cerchio; d_i è la distanza del punto di riferimento verso il punto di interpolazione; K è una costante.

Un'alternativa è rendere una funzione di ponderazione relativa all'area anziché alla distanza. La regione di Voronoi di ciascun punto di riferimento può essere utilizzata per costruire una funzione di ponderazione.

Questa determinazione può essere spiegata utilizzando la Figura 4.31

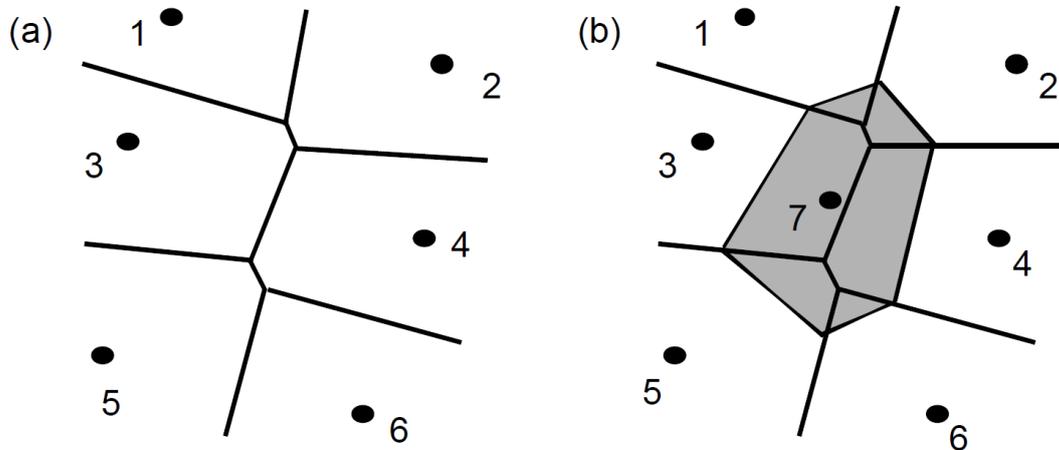


Figura 4.31 Inserimento di un punto in un diagramma Voronoi esistente.

Supponiamo che il punto 7 debba essere interpolato. Questo punto è inserito nel diagramma di Voronoi formato dai punti dell'insieme originale e viene ottenuta una regione di Voronoi del nuovo punto, "rubando" un pezzo da ciascuna delle regioni di Voronoi originali. La quantità di area rubata può essere utilizzata come peso per l'interpolazione (Gold[20], 1989).

L'area corrispondente a ciascun punto è indicata chiaramente in questa figura. Per qualsiasi punto nella lista di riferimento, se non viene rubata nessuna area della sua regione di Voronoi, allora essa non esercita alcuna influenza sul punto di interpolazione. L'intersezione tra la regione di Voronoi del punto di interpolazione e la vecchia regione di Voronoi di un punto di riferimento, per esempio p_i , è l'area rubata, che viene usata come peso per p_i .

Matematicamente:

$$w_i = V(p_i)_{old} \cap V(p_{new}) \quad (4.38)$$

$V(p_i)_{old}$ è la regione di Voronoi del punto p_i prima dell'aggiunta del nuovo punto (cioè il punto da interpolare); $V(p_{new})$ è la regione di Voronoi del nuovo punto e w_i è il peso per il punto p_i . Sibson[52,53] (1980, 1981) per primo ha descritto questo interpolante medio ponderato, il quale è liscio ovunque tranne nei punti dati ed ha una serie di pesi che si associano direttamente al set di punti di Voronoi vicini.

Dakowicz e Gold [7] (2002) descrissero come utilizzare questa tecnica per generare superfici con pendenze significative.

4.6 SUPERFICI MOBILI IN BASE AL PUNTO

Nella media mobile viene assegnato all'interpolazione il valore medio di un numero di punti vicini; infatti, con la media mobile è stata creata anche una superficie mobile. Pertanto, anche la maggior parte dei principi discussi nella sezione precedente vengono applicati in questa sezione. Vari tipi di superfici possono essere create per l'interpolazione basata su punti.

4.6.1 PRINCIPI DELLE SUPERFICI MOBILI

Per un determinato set di dati è possibile creare diversi tipi di superficie. Se l'altezza del punto di riferimento più vicino al punto di interpolazione viene assegnata al punto di interpolazione si dice interpolazione a punto più vicino, sebbene non si ha un processo di interpolazione reale. In questo caso viene creato un piano orizzontale utilizzando una funzione deterministica.

La Figura 4.11 (a) mostra questo tipo di superficie.

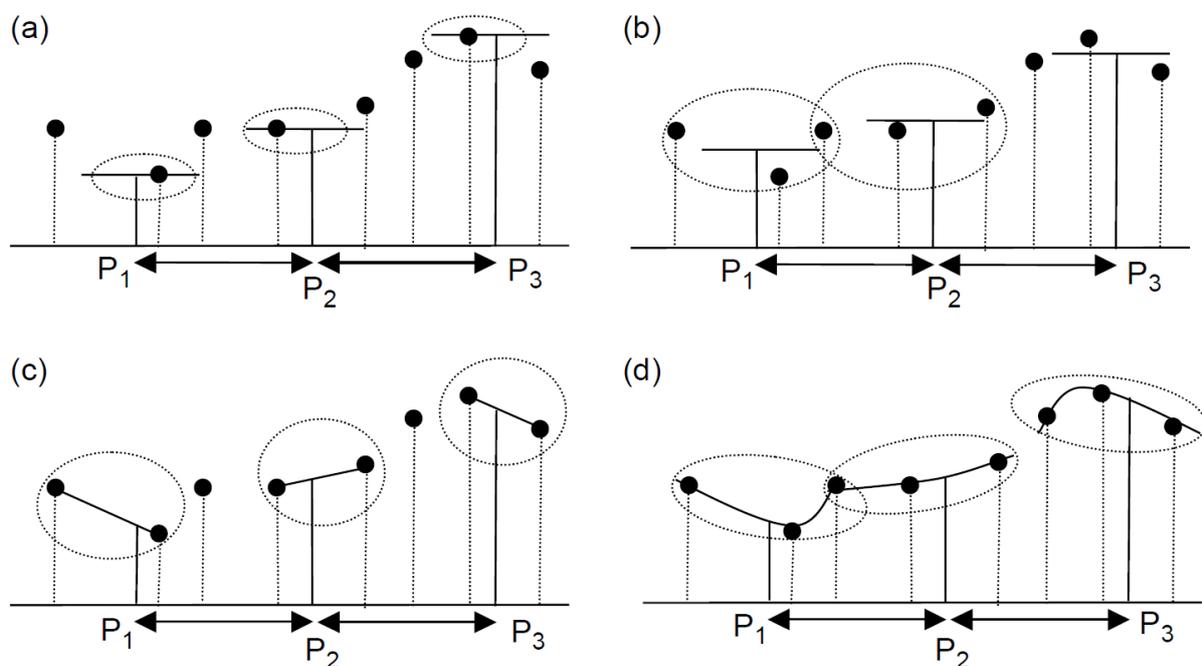


Figura 4.11 Diversi tipi superfici mobili per l'interpolazione: (a) più vicina; (b) media; (c) superficie lineare; (d) superficie curva.

La funzione matematica è:

$$z = z_i \quad \text{se } d_i = \min(d_1, d_2, \dots, d_i, \dots, d_n) \quad (4.39)$$

L'illustrazione grafica della media mobile è mostrata nella Figura 4.11 (b).

In effetti è anche un piano orizzontale, ma un modello stocastico.

La condizione di raccordo è:

$$\sum_{i=1}^k \Delta z_i = 0 \quad (4.40)$$

Infatti, qualsiasi funzione può essere utilizzata come modello per una superficie mobile. Se vengono usati i primi tre termini della funzione polinomiale allora viene creata una superficie lineare inclinata (Figura 4.11c).

La superficie curva però è di uso più comune (Figura 4.11d), come la superficie polinomiale di secondo ordine:

$$z = a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4xy + a_5y^2 \quad (4.41)$$

La condizione per il raccordo della superficie è il minimo dei quadrati.

Dopo aver selezionato un modello di superficie, per qualsiasi punto di interpolazione, ad esempio p , viene costruita una superficie da una serie di punti di riferimento vicini secondo condizioni dei minimi quadrati.

Per rendere il calcolo più efficiente è normale attuare un nuovo sistema di coordinate con il punto di interpolazione $p(x_p, y_p)$ come l'origine.

Questo è

$$x_{i,new} = x_i - x_p \quad (4.42)$$

$$y_{i,new} = y_i - y_p$$

Dopo tale trattamento si può notare dall'Equazione (4.41) che l'altezza per il il punto di interpolazione è

$$z = a_0 \quad (4.43)$$

4.6.2 SELEZIONE DI PUNTI

I principi per la selezione dei punti di riferimento discussi precedentemente sono applicabili anche in questo caso specifico, l'unica particolarità è che il numero di punti di riferimento deve essere maggiore del numero di coefficienti coinvolti nel modello matematico.

Troppi punti saranno però computazionalmente costosi; un compromesso è selezionare circa dieci punti.

Un raggio di cerchio adattativo può essere utilizzato per la selezione del punto.

L'idea è di partire dalla densità media dei punti dati per determinare il raggio R di un cerchio all'interno del quale ci sono circa dieci punti:

$$\pi R^2 = 10(A/N) \quad (4.44)$$

dove N è il numero totale dei punti e A è l'area totale.

Questo metodo prende in considerazione i due elementi per la selezione del punto, ovvero il numero di punti e il range.

CAPITOLO 5

CREAZIONE DELLE CURVE DI LIVELLO DAI MODELLI DIGITALI DEL TERRENO

La creazione di curve di livello è una delle tradizionali applicazioni dei DTM. Questo capitolo affronta la creazione delle curve di livello dai DTM.

5.1 STRATEGIE PER LA CREAZIONE DI CURVE DI LIVELLO DAI DTM

Le curve di livello possono essere prodotte sia da DTM basati su triangolazione o a griglia sia da metodi basati su vettori o su raster. Sono, teoricamente, possibili quattro combinazioni di formazione delle curve di livello dai DTM:

1. Curve di livello basate su vettori da DTM basati su griglia
2. Curve di livello basate su vettori da DTM basati su triangolazione
3. Curve di livello basate su raster da DTM basati su griglia
4. Curve di livello basate su raster da DTM basati su triangolazione

Le prime due strategie sono largamente utilizzate. La costruzione di curve di livello basate su raster da DTM basati su griglia non è molto utilizzata sebbene non sia difficile. La costruzione di curve di livello basate su raster da DTM basati su triangolazione non è un metodo pratico, perché le triangolazioni sono normalmente legate a dati distribuiti irregolarmente e perciò non è possibile formare una struttura raster senza interpolazione. È possibile produrre una registrazione di una mappa a curve di livello così che un modello stereo possa essere visto se visualizzato utilizzando uno stereoscopio.

Perciò risultano varie strategie per costruire curve di livello da DTM come mostrato in Figura 5.1

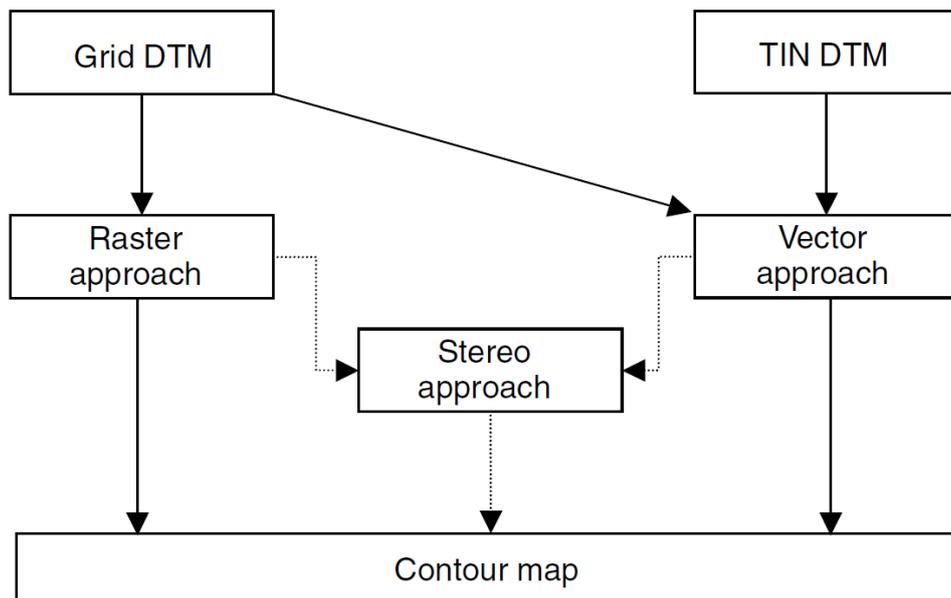


Figura 5.1 Strategie per la costruzione di curve di livello a partire dai DTM

5.2 COSTRUZIONE DI CURVE DI LIVELLO BASATE SU VETTORE DA GRIGLIE DTM

Vi sono diverse modalità per produrre le linee delle curve di livello da una griglia DTM. I principi base sono simili sebbene le procedure possano differire. Tutti i metodi nelle strategie basate su vettore cercano di risolvere i seguenti problemi:

1. Cercare il punto di partenza di ogni linea delle curve di livello
2. Interpolare i punti delle curve di livello tramite il calcolo delle coordinate dei punti di intersezione tra ogni linea della curva di livello e i bordi della griglia
3. Tracciare le linee delle curve di livello
4. Livellare le linee ricalcate delle curve di livello, se vantaggioso

5.2.1 RICERCA DEI PUNTI DELLE CURVE DI LIVELLO

Per ottenere tutte le linee delle curve di livello nell'area d'interesse, per prima cosa bisogna calcolare le altezze della curva di livello più bassa (h_{min}) e più alta (h_{max}) a partire dall'altezza del punto più basso (Z_{min}) e del punto più alto (Z_{max}) l'area:

$$\begin{aligned}h_{min} &= (Z_{min} // \Delta h + 1) \\h_{max} &= (Z_{max} // \Delta h) * \Delta h\end{aligned}\tag{5.1}$$

dove Δh è l'intervallo desiderato della curva di livello per l'area e $//$ rappresenta la divisione intera, cioè prendendo solo la parte intera del risultato della divisione, per esempio $5//2 = 2$. La fase successiva è ricercare sistematicamente ogni curva di livello per poi tracciare ognuna. Ci sono due metodi per cercare i punti delle curve di livello sui bordi della griglia. Il primo inizia con una data altezza e controlla ad uno a uno i bordi della griglia per vedere dove le curve di livello passano o no attraverso ogni cella del reticolo. L'altro comincia con un bordo della griglia e poi controlla tutte le possibili altezze delle curve di livello per vedere se quel bordo del reticolo contiene o no le curve di livello. Sono in sostanza uguali e l'unica differenza è la sequenza di ricerca. Solitamente, la ricerca dei margini della griglia comincia da un angolo, per esempio l'angolo in alto a sinistra, e termina quando viene trovato un punto della curva di livello per la data altezza o quando tutti i margini della griglia sono stati controllati. Le curve di livello aperte sono chiuse dai confini dell'area e di conseguenza i loro punti di partenza potrebbero essere trovati sugli angoli della griglia lungo i confini. Le curve di livello chiuse sono all'interno dell'area DTM. Una curva di livello aperta può passare sia attraverso poche sia attraverso due celle della griglia e una curva di livello chiusa può occupare sia pochi che quattro celle. Di conseguenza, la ricerca necessita di essere condotta su ogni cella della griglia per garantire che nessuna curva di livello sia mancata.

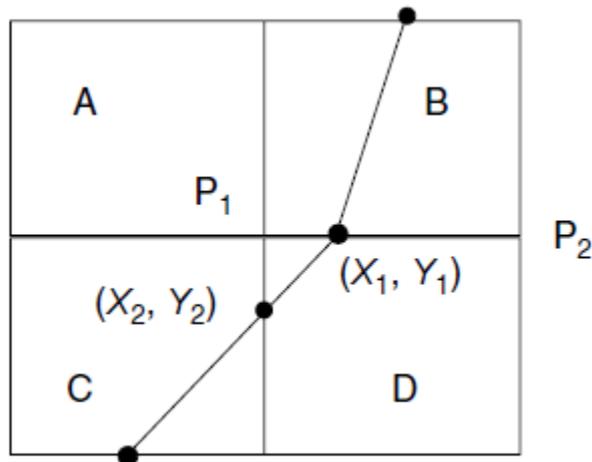


Figura 5.2 Interpolazione dei punti delle curve di livello e rilevamento delle linee delle curve di livello.

Si può verificare se un bordo della griglia (per esempio, P_1P_2 nella figura sopra) contenga o no uno o più punti delle curve di livello mediante la seguente equazione:

$$\begin{array}{lll}
 Z_{p1} > h > Z_{p2} \quad \text{o} \quad Z_{p1} < h < Z_{p2} & \rightarrow \text{all'interno di } \overline{P_1P_2} \\
 Z_{p1} = h, \quad \text{o} \quad h = Z_{p2} & \rightarrow \text{attraverso le intersezioni } P_1 \text{ o } P_2 \\
 \text{diversamente} & \rightarrow \text{non è contenuto in questi bordi}
 \end{array}$$

dove h è la curva di livello di interesse, P_1 e P_2 sono le due intersezioni con il bordo della cella; e Z_{P_1} e Z_{P_2} sono le altezze delle due intersezioni.

Allora l'equazione può essere così semplificata:

$$(Z_{P_1} - h)(Z_{P_2} - h) \leq 0 \quad (5.3)$$

Nell'equazione se il risultato è pari a 0, allora la curva di livello passerà attraverso il bordo della griglia. Questo potrebbe causare difficoltà nel determinare la direzione successiva. Per evitare ciò, è uso comune aggiungere o sottrarre un piccolo valore dall'altezza del punto di intersezione pari ad h (altezza della curva di livello).

5.2.2. INTERPOLAZIONE DEI PUNTI DELLE CURVE DI LIVELLOLO

Se il bordo $\overline{P_1P_2}$ della cella contiene un punto della curva di livello con altezza h , allora bisogna interpolare l'esatta collocazione del punto su $\overline{P_1P_2}$.

Come nella mappatura tradizionale, è solitamente adottata l'interpolazione lineare:

$$\begin{aligned} X_h &= X_{P_1} + \frac{(h - Z_{P_1})}{(Z_{P_2} - Z_{P_1})} \times (X_{P_2} - X_{P_1}) \\ Y_h &= Y_{P_1} + \frac{(h - Z_{P_1})}{(Z_{P_2} - Z_{P_1})} \times (Y_{P_2} - Y_{P_1}) \end{aligned} \quad (5.4)$$

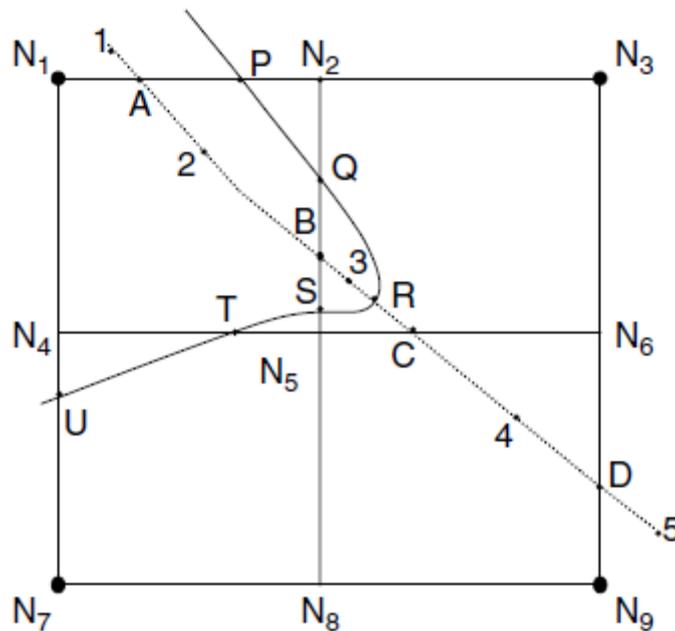


Figura 5.3 Incorporazione di linee delle curve di livello quando le linee degli elementi del terreno sono campionate.

La Figura 5.2 mostra l'interpolazione semplice utilizzando i nodi della griglia. Se i punti e le linee degli elementi del terreno sono stati campionati, come le linee $\overline{1,2,3,4,5}$ della Figura 5.3, allora devono essere considerati nell'interpolazione delle linee delle curve di livello, come segue:

1. Interpolare le intersezioni (per esempio, A , B , C e D in figura) tra una linea caratteristica e le celle della griglia per ottenere le coordinate X , Y , Z di queste intersezioni
2. Interpolare i punti delle curve di livello usando queste intersezioni e i nodi della griglia. Per esempio, i punti A e N_2 sono utilizzati per interpolare il punto P della curva di livello e il punto 3 e il punto C sono utilizzati per interpolare il punto R sulla curva di livello
3. Ottenere i punti finali della curva di livello (per esempio, P , Q , R , S , T e U) dal rilevamento e interpolazione della curva di livello.

5.2.3 RILEVAMENTO DELLE LINEE DELLE CURVE DI LIVELLO

Una volta localizzato il punto di partenza della curva di livello, la fase successiva è tracciare la curva di livello attraverso le griglie. Per un punto dato sul bordo della griglia, ci sono tre possibili uscite con quella griglia come mostrato in figura.

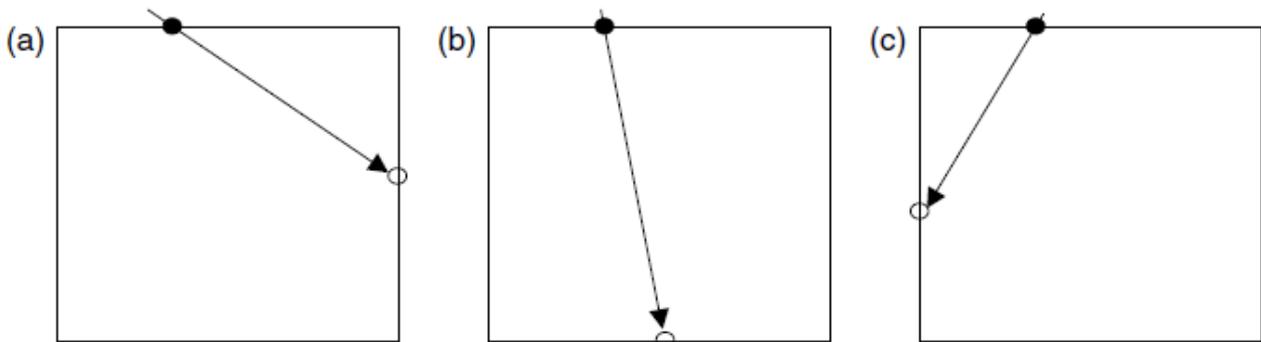


Figura 5.4 Tre possibili uscite per un dato punto sul bordo della griglia

Di conseguenza, rilevare una linea della curva di livello significa determinare l'uscita per il punto corrente e in avanti questa uscita attraverso le celle della griglia, fino a che la curva di livello si chiuda o raggiunga i confini dell'area DTM. Il principio base del rilevamento delle curve di livello è che il bordo di uscita della cella corrente della griglia sia naturalmente il bordo di entrata della griglia adiacente. La Figura 5.2 mostra il processo di inserimento, dove la linea della curva di livello entra nella cella D dalla cella B . In questo caso, il bordo $\overline{P_1P_2}$ della cella

è il bordo di uscita della cella *B* e il bordo di entrata della cella *D* nello stesso momento.

È probabile che ci siano più di una linea della curva di livello della stessa altezza nell'area DTM, di conseguenza è comunque necessario cercare altre possibili curve di livello con la stessa altezza.

Dopo che tutte le curve di livello con stessa altezza vengono interpolate, viene effettuata la ricerca di curve di livello con nuove altezze. Questo processo è ripetuto fino a che tutte le linee delle curve di livello sono interpolate.

La figura 5.5 mostra un esempio di una mappa a curve di livello.

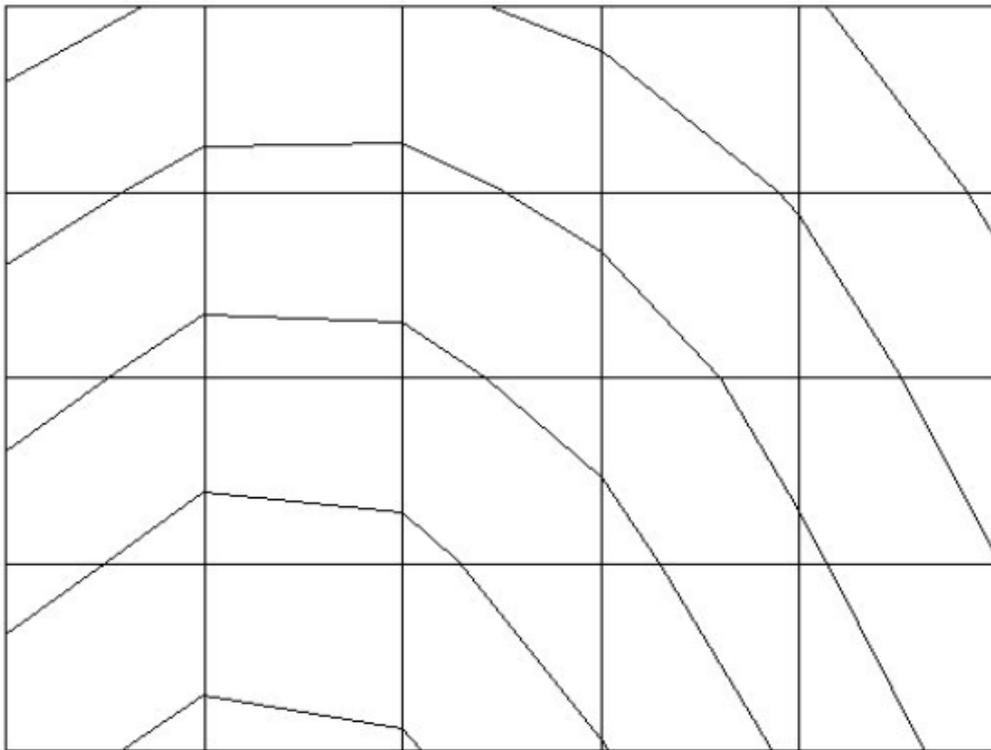


Figura 5.5 Linee delle curve di livello interpolate dalla griglia DTM utilizzando la strategia vettoriale

È anche possibile che una curva di livello abbia più di una uscita, causando una ambiguità nella direzione della linea della curva di livello.

La Figura 5.6 mostra l'ambiguità della direzione di una linea in cinque casi possibili.

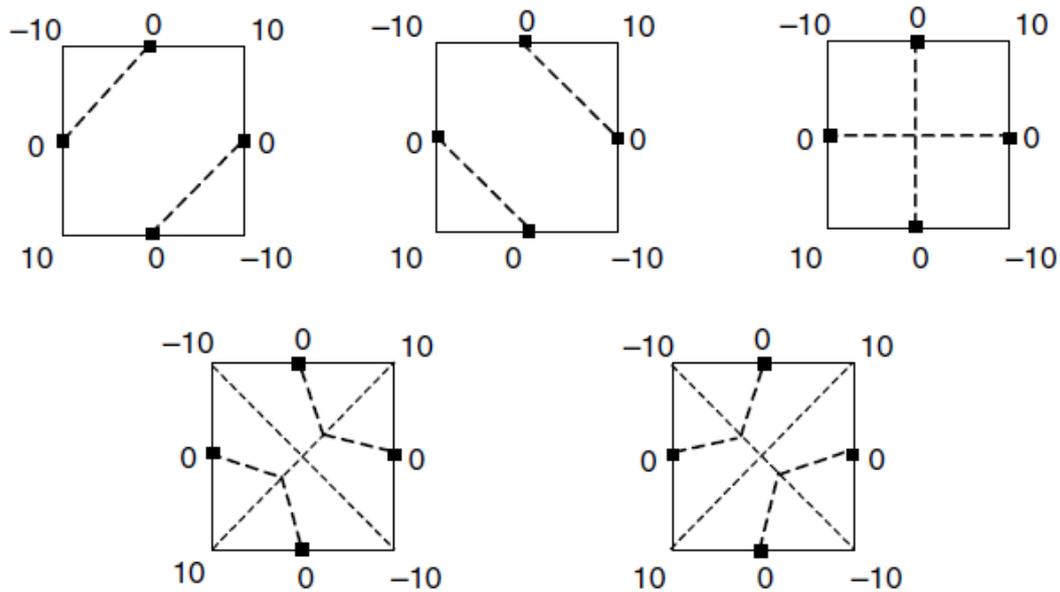


Figura 5.6 Ambiguità delle direzioni delle linee delle curve di livello (modificato da Petrie [46], 1990)

Il terzo caso è impossibile. Una soluzione a questo problema è aggiungere un punto centrale, la cui altezza è la media delle altezze dei quattro nodi della griglia. In alternativa decidere arbitrariamente un criterio di priorità (per esempio il lato destro è più alto).

5.2.4 LIVELLAZIONE DELLE LINEE DELLE CURVE DI LIVELLO

La figura 5.5 mostra che le linee delle curve di livello interpolate dalle griglie potrebbero non essere livellate come richiesto per le applicazioni pratiche. Di conseguenza, è necessario applicare il processo di livellazione. Ci sono due soluzioni possibili:

1. Suddividere la cella della griglia in un numero (per esempio 9) di sottocelle, così da ottenere linee livellate delle curve di livello
2. Applicare una tecnica di livellazione alle linee interpolate delle curve di livello

Per la prima soluzione, una superficie polinomiale è adatta per una cella della griglia (o per poche celle della griglia) così che i nodi o le celle più piccole siano interpolate nella superficie polinomiale. La Figura 5.7 illustra la suddivisione di nove celle dalla cella originale fino ad ottenere linee livellate delle curve di livello.

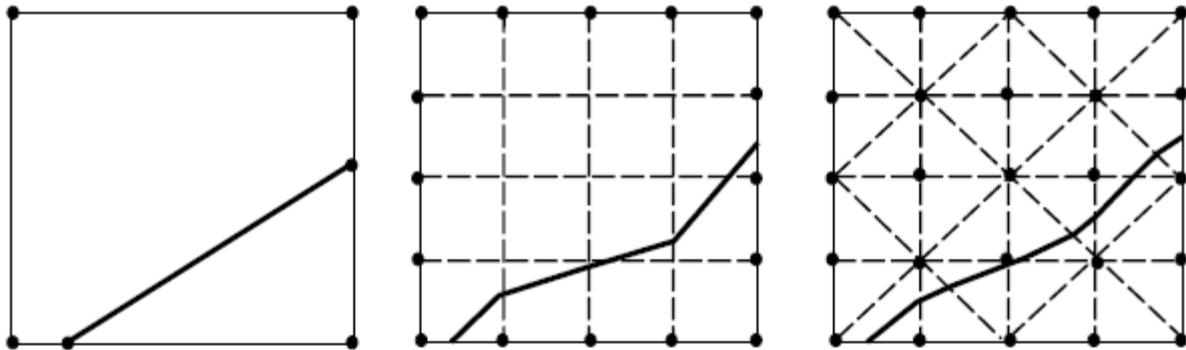


Figura 5.7 Curve di livello livellate in celle più piccole della griglia.

Per una diversa soluzione, sono possibili altre tipologie di livellamento.

La Figura 5.8 classifica queste tecniche.

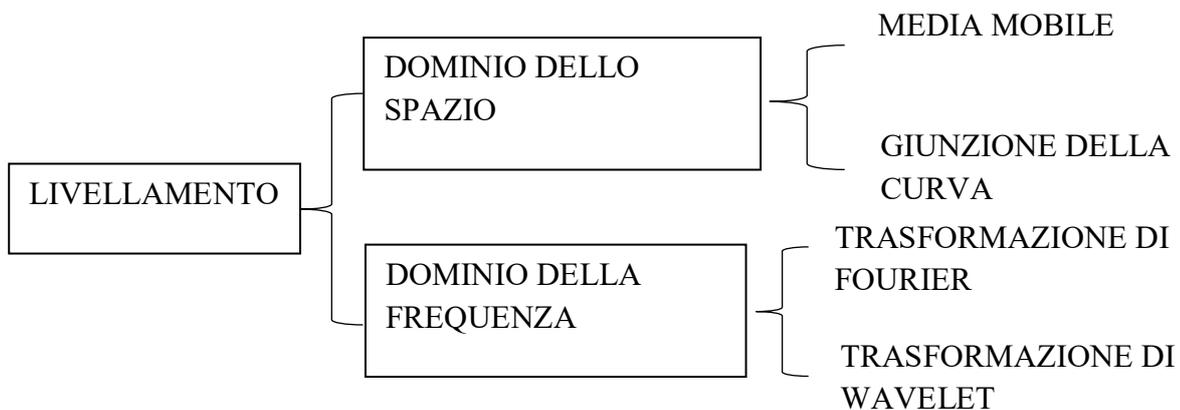


Figura 5.8 Una classificazione delle tecniche di livellamento.

Nella pratica della costruzione delle curve di livello, la giunzione delle curve è ampiamente utilizzata, includendo la giunzione delle curve con il metodo dei minimi quadrati e le spline (ad esempio la curva di Bezier, la Bspline, le spline di tensione e le spline cubiche).

La figura 5.9 mostra due esempi. Le spline sono molto utilizzate per il livellamento delle curve di livello perché con questa tecnica ogni data point può essere considerato.

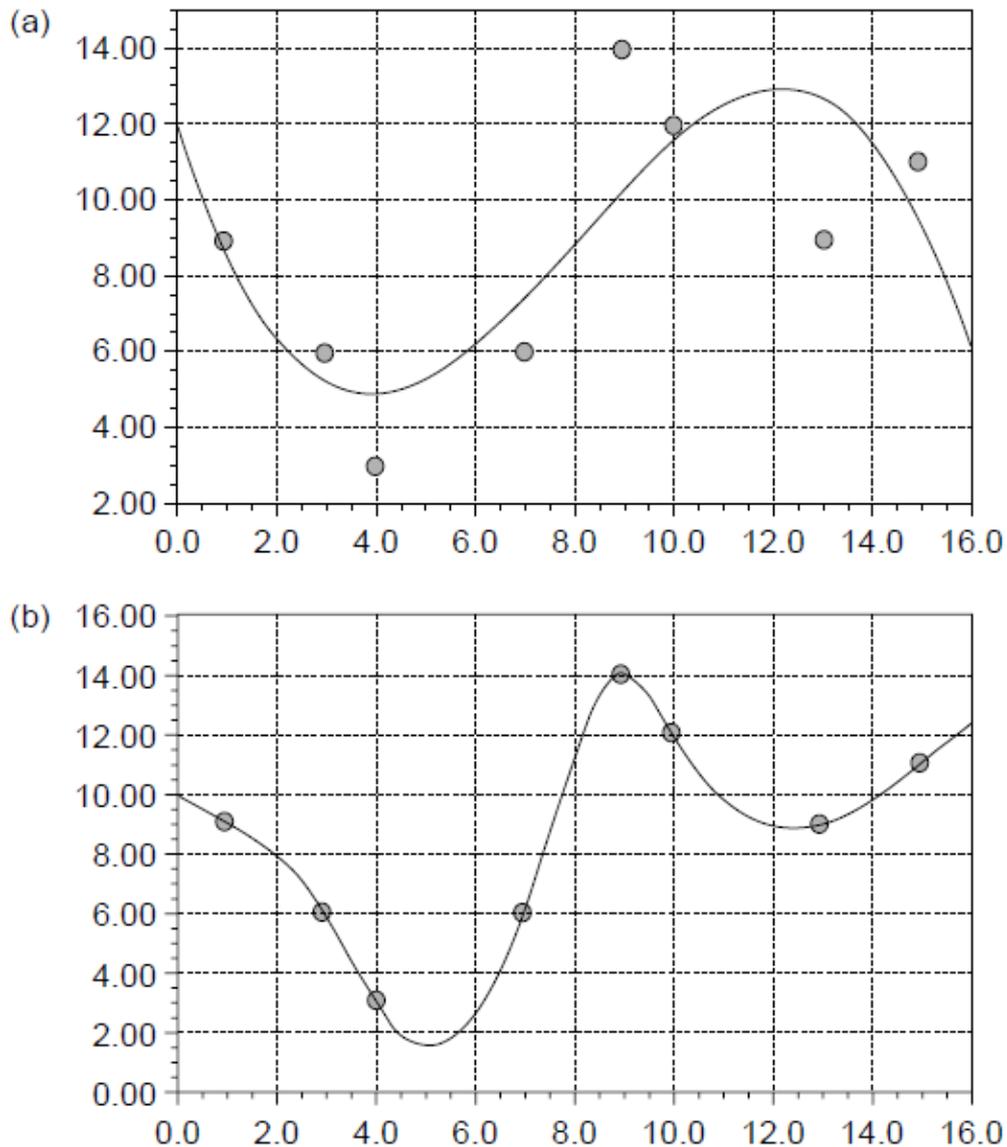


Figura 5.9 Tecniche di giunzioni delle curve per il livellamento: (a) curva cubica modellata con il metodo dei minimi quadrati e (b) curva cubica modellata con lo spline.

5.3 COSTRUZIONE DELLE CURVE DI LIVELLO BASATE SU RASTER DA DTM BASATI SU GRIGLIA

Per produrre curve di livello basate su vettori è necessaria una serie di processi (per esempio ricerca, rilevamento, interpolazione e livellamento). Successivamente si è visto come un approccio basato su raster possa essere più facile e più intuitivo se è disponibile una griglia DTM ad alta intensità, dove sono in uso stazioni di lavoro fotogrammetriche completamente digitalizzate alimentate con tecniche di image-matching.

Nel modello raster, le tecniche sviluppate nel processare le immagini digitali possono essere facilmente utilizzate per produrre curve di livello, quali la tecnica di slicing (taglio) per costruire curve di livello binarie e di rilevamento del bordo per rilevare le linee delle curve di livello da una curva di livello binaria a una curva di livello del bordo (Eyton [15], 1984).

In seguito saranno presentate alcune tecniche di costruzione delle curve di livello in modalità raster.

5.3.1 COSTRUZIONE DI CURVE DI LIVELLO BINARIE E DEI BORDI

Il taglio delle immagini produce un certo numero di sezioni (classi) con un range di altezza assegnato, detto CI. Di seguito, alle classi di altezza sono assegnate alternativamente colori bianco e nero. I confini tra due classi di diverso colore definiscono le linee delle curve di livello. Per ricavare le curve di livello del bordo, è quindi applicato il rilevamento del bordo. Il principio dell'applicazione della tecnica di slicing (taglio) alla costruzione binaria delle curve di livello è semplice. L'equazione (5.1) viene applicata per calcolare la curva di livello più alta e più bassa. Il numero totale delle curve di livello viene calcolato come segue:

$$\begin{aligned}
 h_{min} &= (Z_{min} // \Delta h + 1) \times \Delta h \\
 h_{max} &= (Z_{max} // \Delta h) \times \Delta h \\
 N_T &= \frac{h_{max} - h_{min}}{\Delta h}
 \end{aligned}
 \tag{5.5}$$

Il numero delle classi per un nodo di griglia con altezza Z può di seguito essere calcolato come segue:

$$N = \frac{Z - h_{min}}{\Delta h} + 1
 \tag{5.6}$$

La classe 0 è riservata per le altezze inferiori al valore minimo h_{min} .

Per esempio, se il valore di altezza in una area è da 3 a 16 metri e il CI è 5 metri, allora l'altezza della curva di livello più basse è $h_{min}=5$. Tutti i punti con altezza Z nell'intervallo $5 \leq Z < 10$ sono classificati 1; tutti i punti con altezza Z nell'intervallo tra $10 \leq Z < 15$ sono classificati 2 e tutti i punti con altezza uguale

o intorno a 15 sono classificati come 3. Dopo il taglio, un colore è assegnato ad ogni classe. Nella costruzione binaria delle curve di livello, sono utilizzati solo due colori: bianco e nero. Una semplice regola per l'assegnazione dei colori potrebbe essere: nero per le classi dispari e bianco per le classi pari.

La Figura 5.17 mostra alcuni esempi di queste curve di livello prodotte da DTM mostrati in Figura 5.16.

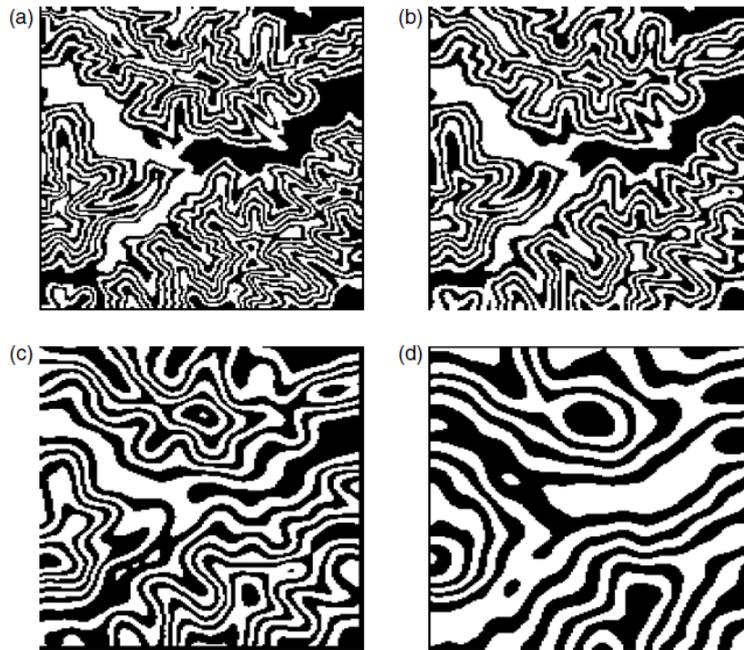


Figura 5.16 Rappresentazione delle curve di livello DTM a differenti scale

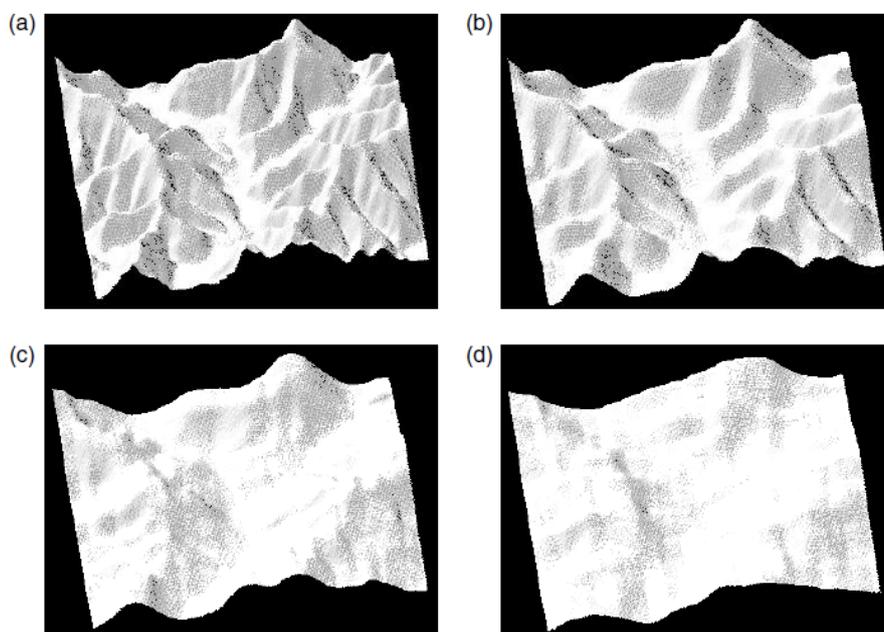


Figura 5.17 Generalizzazione di DTM a differenti scale.

Questo metodo può anche essere implementato con un plotter a linea unica (Eyton[15], 1984). Una riga di dati DTM è letta nella memoria, poi assegnata al numero di classe in base all'equazione. Se N è un numero dispari, viene disegnato un pixel nero nella posizione corrispondente e se N è un numero pari, allora il pixel è colorato di bianco. Per estrarre i confini delle classi di altezza dalle linee delle curve di livello, è necessaria la procedura di tracciamento dei bordi. Molti operatori sono stati progettati per l'elaborazione delle immagini. Questi, per convenienza nella modalità discreta, sono solitamente espressi nella forma di un template. L'operatore Sobel è una delle tecniche più popolari per il rilevamento dei bordi. I due template per questo operatore sono mostrati in figura, uno per i bordi verticali e l'altro per i bordi orizzontali. Per un bordo in direzione arbitraria, è utilizzata la radice quadrata del risultato (o la somma del valore assoluto) per queste due direzioni.

$$\begin{array}{ccc}
 \text{(a)} & 1 & 2 & 1 & \text{(b)} & -1 & 0 & 1 \\
 & 0 & 0 & 0 & & -2 & 0 & 2 \\
 & -1 & -2 & -1 & & -1 & 0 & 1
 \end{array}$$

Figura 5.10 Operatore Sobel per il rilevamento dei bordi: (a) per i bordi orizzontali e (b) per i bordi verticali.

La figura 5.11 mostra un esempio di rilevamento dei bordi dall'operatore di Sobel. Tuttavia, se i valori del pixel nelle immagini classificate per altezza sono omogenei, la ricerca dei punti di confine tra due classi adiacenti di altezza può essere semplificata. Per esempio nella figura 5.11(a), se per rappresentare la classe con intervallo di altezza [5,10) è utilizzato il codice numerico 2 e codice numerico 8 per rappresentare la classe con intervallo di altezza [10,15), allora tutti i pixel con codice 8 adiacenti ai pixel con codice 2 formano insieme la linea della curva di livello con altezza 10, che è il confine tra queste due classi.

I bordi delle curve di livello sono infatti ordinariamente linee delle curve di livello.

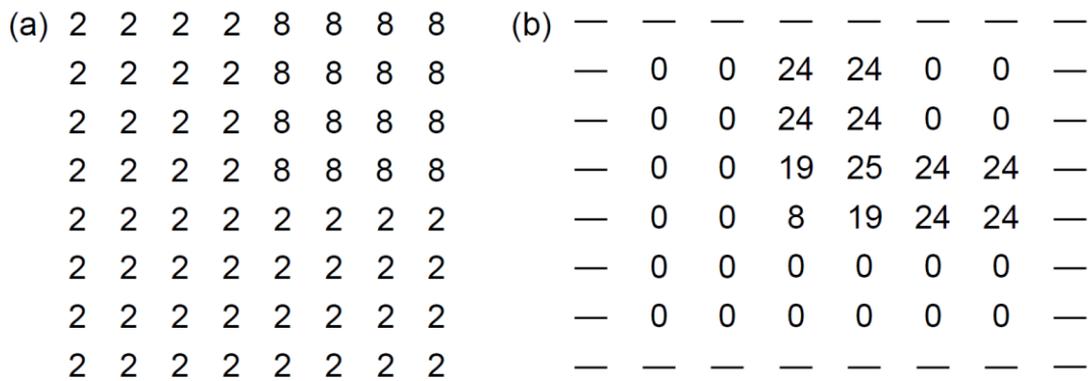


Figura 5.11 Rilevamento dei bordi da parte dell'operatore Sobel: (a) l'immagine originale e (b) i bordi eliminati.

5.3.2 COSTRUZIONE DELLE CURVE DI LIVELLO SECONDO SCALA DI GRIGI

In modalità raster possono essere prodotti molteplici tipi di visualizzazioni di contorni. Per esempio, può essere facilmente prodotto un display delle curve di livelli in scala di grigi, come per esempio:

1. *Curve di livello a tre toni*: utilizzando nero, grigio, bianco
2. *Curve di livello sopra uno sfondo grigio*: colorando curve di livello bianche sopra uno sfondo grigio
3. *Curve di livello illuminate*: disegnando curve di livello sopra uno sfondo di sfumatura

La Figura 5.12 mostra due trame con scala di grigi delle curve di livello.

La Figura 5.12(a) mostra le curve di livello disegnate sopra uno sfondo grigio e la Figura 5.12(b) mostra una mappa delle curve di livello disegnata mediante la sfumatura.

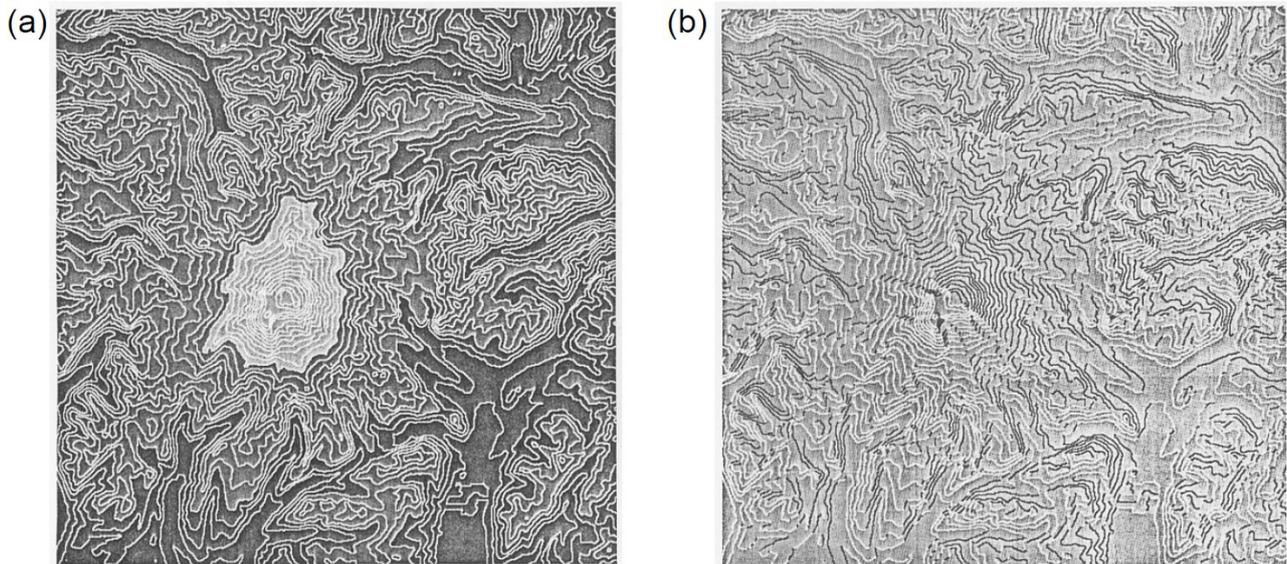


Figura 5.12 Rappresentazione in scala di grigi di una mappa a curve di livello ((Eyton [15],1984): (a) curve di livello su uno sfondo grigio; (b) mappa a curve di livello illuminata

5.4 COSTRUZIONE DELLE CURVE DI LIVELLO BASATE SU VETTORI DA TRIANGOLAZIONE DEI DTM

La costruzione di curve di livello da dati griglia è semplice e conveniente per l'implementazione degli algoritmi. Tuttavia, ci potrebbe essere una mancanza di accuratezza nel processo di interpolazione random-to-grid se i dati campionati non sono nella forma di griglia. Se i data point sono irregolarmente distribuiti, una struttura TIN è spesso la soluzione. Il processo per il rilevamento delle curve di livello in una struttura TIN è:

1. Cercare il punto di partenza di ogni linea delle curve di livello
2. Interpolare i punti delle curve di livello calcolando le coordinate dell'intersezione
3. Tracciare le linee delle curve di livello attraverso i triangoli
4. Livellare le linee delle curve di livello tracciate, se vantaggioso

La ricerca e l'interpolazione dei punti delle curve di livello nella costruzione delle curve di livello basate su vettore da TIN sono simili alla costruzione di curve di livello da griglia di dati. D'altra parte, il tracciamento dei punti delle curve di livello è leggermente differente perché la struttura dei dati è diversa. Per un triangolo, ci

sono due possibili uscite per un dato punto delle curve di livello sul bordo di un triangolo (per esempio nella figura 5.13).

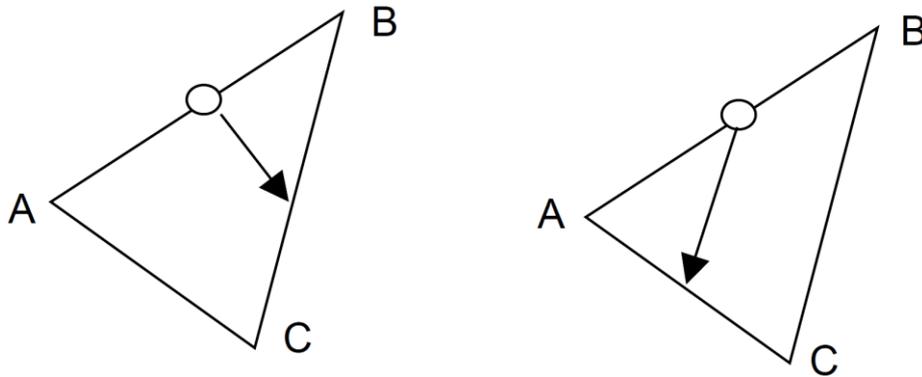


Figura 5.13 Due possibili uscite di un punto di una curva di livello sul bordo \overline{AB} di un triangolo

Il principio base anche per il tracciamento delle curve di livello è che il bordo di uscita del corrente triangolo sia il bordo di entrata del triangolo adiacente.

La Figura 5.14 mostra il processo di threading, dove la linea della curva di livello entra nel triangolo II dal triangolo I. In questo caso, il bordo del triangolo \overline{AC} è sia il bordo di uscita del triangolo I e il bordo di entrata del triangolo II.

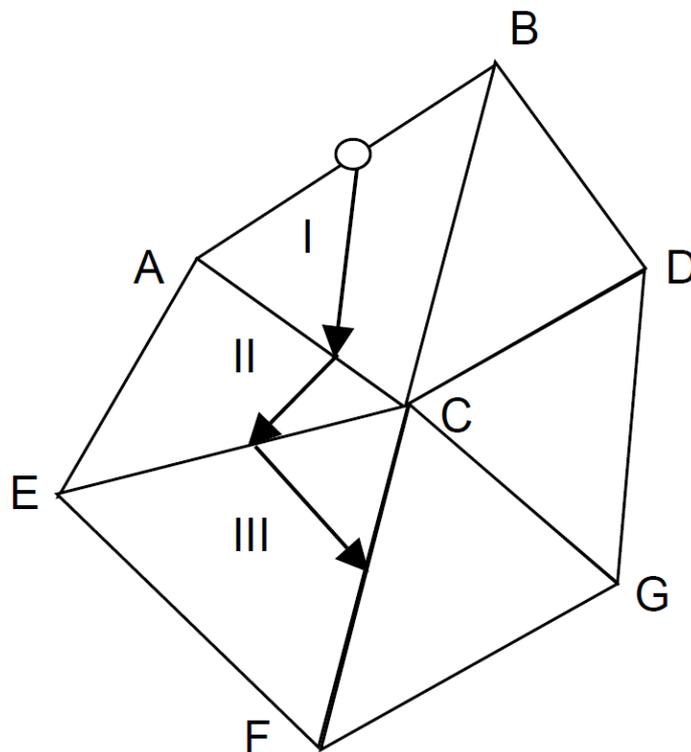


Figura 5.14 Threading delle curve di livello su DTM basato su TIN

La figura 5.15 è un esempio di costruzione delle curve di livello da un DTM basato su TIN. Le curve di livello nella figura.15 non sembrano raffinate. Vi è anche un problema di livellamento. Similarmente alla costruzione di curve di livello da griglie DTM, entrambi i seguenti metodi possono essere utilizzati per risolvere il problema: adattare le curve o eseguire la suddivisione di un triangolo in un numero di sub-triangoli (per esempio 9).

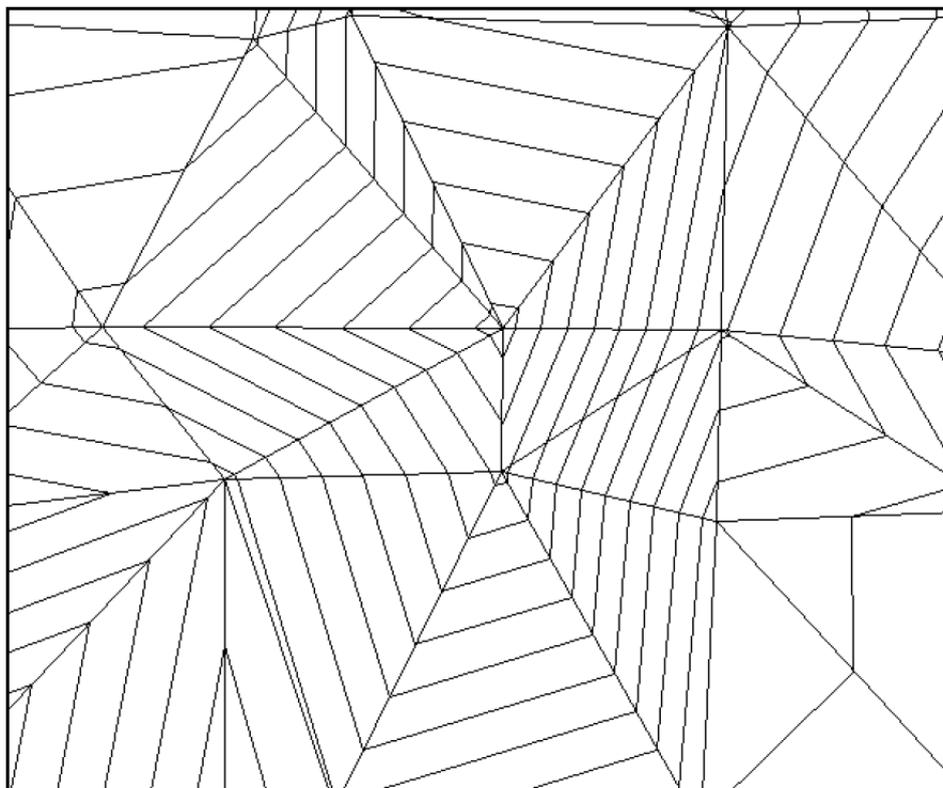


Figura 5.15 Curve di livello prodotte da DTM basato su TIN

Pertanto, le triangolazioni producono segmenti non ambigui delle curve di livello, e quindi completano le serie delle curve di livello. Un problema più interessante, come nelle griglie, consiste nell'estrazione efficiente di tutte le serie delle curve di livello dalla struttura topologica, nella modalità, tutte le celle devono essere controllate sulla presenza di curve di livello che potrebbero essere piccoli anelli chiusi.

Vari algoritmi si sono occupati di questo. Gold e Cormack [22] (1987) mostrarono che un singolo attraversamento della triangolazione può essere utilizzato per mantenere una sweepline che collezioni e mantenga le porzioni di curve di livello parzialmente scoperte. Van Kreveld [57] (1996) sviluppò strutture di dati più avanzate che migliorano significativamente l'efficienza della ricerca.

Ciononostante, a parte che per motivi di efficienza, ogni cella della griglia o la triangolazione deve essere controllata in modo da vedere se porzioni delle curve di livello passano attraverso esse, e se le porzioni di contorno debbano essere assemblate o su base continua o accordando i singoli segmenti dopo che essere stati controllati.

5.5 COSTRUZIONE DELLE CURVE DI LIVELLO STEREO DA GRIGLIA DTM

Il mondo naturale è in 3D. Le curve di livello in 2D non sono interessanti come una visualizzazione in 3D della superficie terrestre. Tuttavia, su una tale superficie, l'informazione sull'altezza non è facilmente percepibile o ottenibile durante la visione. Questo stimolò l'idea di produrre mappe delle curve di livello stereo (Jensen [27],1980; Eyton [15], 1984). Una mappa a curve di livello è solitamente indicata per misurazioni metriche, mentre l'altra è la coppia stereo che è utilizzata per la visione stereo. Questo avviene analogamente per l'immagine ortografica e la sua coppia stereo, introdotta da Collins [5] (1968). Questo è particolarmente utile nelle aree pianeggianti dove non vi sono grandi variazioni del terreno e quindi è difficile riconoscere gli andamenti del pendio perché le curve di livello sono distribuite in modo sparso.

5.5.1 IL PRINCIPIO DELLE COSTRUZIONE DI CURVE DI LIVELLO STEREO

L'essere umano percepisce e riceve informazione 3D attraverso parallassi binoculari per formare modelli stereo nella mente. I parallassi giocano un ruolo cruciale nella trasformazione dell'immagine da 2Da 3D. Nell'immagine ortografica, lo spostamento di un punto dell'immagine causato dall'altezza del terreno in base a opportuni dati, viene corretto punto per punto così che l'immagine corretta possa essere utilizzata come un piano, misurabile nelle posizioni planimetriche. In questo caso, la misurazione dell'altezza non è più possibile. Per rendere le immagini ortografiche misurabili per l'altezza, fu proposta da Collins [5] (1968) l'idea delle coppie stereo. Il principio è illustrato in figura. Il punto del terreno A è immaginato sulla foto a sinistra come a' e sulla foto a destra come a'' .

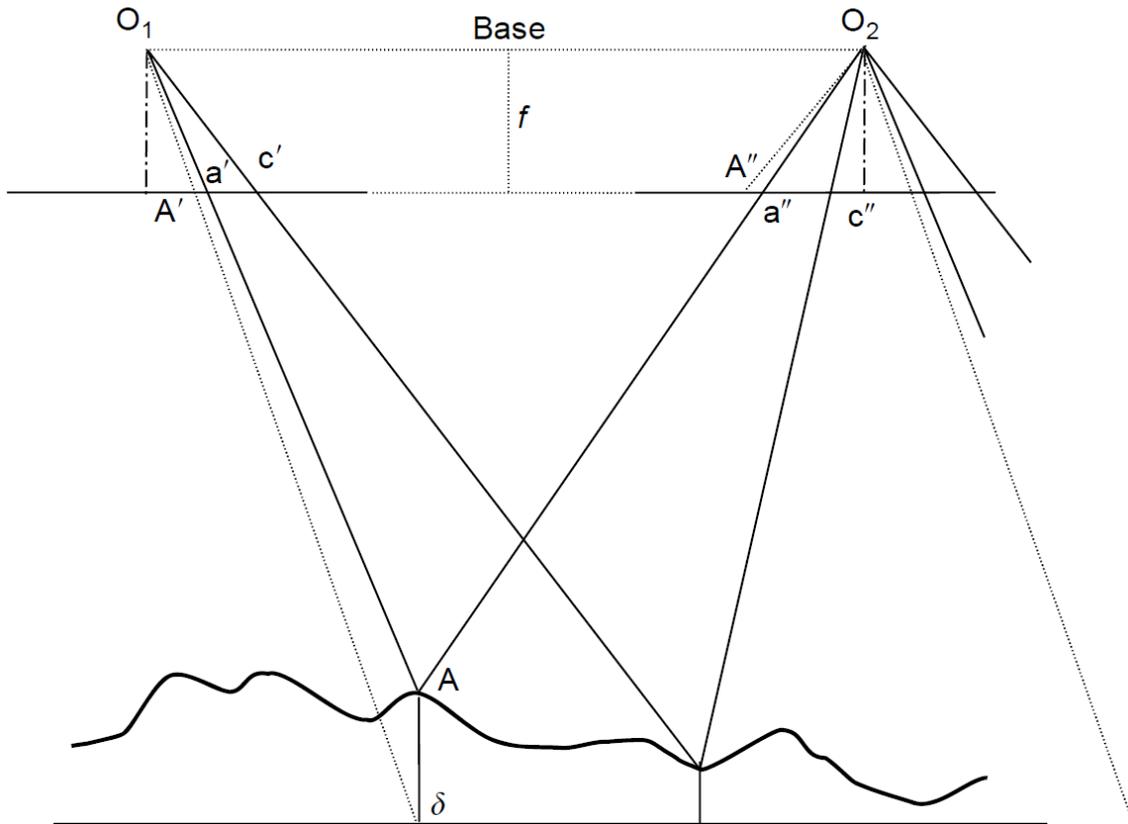


Figura 5.16 Parallasse x e misurazione stereo

Il parallasse x di questa immagine è calcolato come segue:

$$P_a = x_{a'} - x_{a''} \quad (5.7)$$

dove $x_{a'}$ è la coordinata di a' dell'immagine a sinistra e $x_{a''}$ è la coordinata x di a'' sulla destra. Se l'immagine sinistra è trasformata in un'immagine ortografica, allora la posizione sull'immagine del punto A del terreno sarà corretto dal punto a' al punto A' . In seguito, si calcola la differenza delle coordinate x $\delta x_a = x_{a'} - x_{a''}$.

Se l'immagine ortografica è utilizzata con l'immagine destra originale per formare un modello stereo, allora l'altezza di A viene modificata perché il parallasse x P_a è ridotta in relazione al valore di δx_a . Al fine di mantenere la stessa altezza del punto A , la posizione di a'' necessita di essere modificata, cioè, di essere spostata dello stesso valore corrispondente a δx_a (da a'' a A nella figura). Nella costruzione delle curve di livello stereo, il principio è lo stesso. Per prima cosa, un'ordinaria costruzione delle curve di livello è prodotta dall'originale DTM.

Poi, ai dati DTM viene applicata una procedura tale da spostare le coordinate x di ogni punto DTM di un valore proporzionale all'altezza del punto stesso. In questo modo, un nuovo DTM, cioè la coppia DTM, è creato.

La mappa a curve di livello prodotta da questa coppia DTM è quindi la coppia stereo della mappa curve di livello prodotta dall'originale DTM.

5.5.2 GENERAZIONE DI UNA COPPIA STEREO DELLA MAPPA A CURVE DI LIVELLO

Essendo una mappa a curve di livello già misurabile, non vi è necessità di conoscere il valore del parallasse- x per ogni punto. Pertanto nessuna funzione che è in grado di fornire parallasse relativamente corretti per i data point DTM sarà necessario allo scopo. La via più semplice è una funzione lineare (Eyton [15], 1984) come segue:

$$\delta x_j = \frac{\delta x}{Z_{max} - Z_{min}} * (Z_j - Z_{min}) \quad (5.8)$$

dove Z_{max} è l'altezza maggiore nell'area; Z_{min} è l'altezza minore; δx è il valore massimo di spostamento della x (per esempio, lo spostamento di x per Z_{max}); Z_j è l'altezza del punto j ; e δx_j è lo spostamento di x richiesto per il punto j .

La nuova coordinata x di ogni punto è calcolata come segue:

$$X_{j,nuovo} = X_{j,vecchio} + \delta x_j \quad (5.9)$$

La coordinata y e l'altezza di ogni punto rimangono invariati. Se i dati sono distribuiti irregolarmente, prima di uno spostamento della x di ogni punto, viene applicata una procedura di triangolazione al nuovo set di dati e la coppia della carta a curve di livello è infine prodotta da DTM basati su TIN. Se i dati originali sono in forma di grigli a regolare, allora, i nuovi dati non saranno più regolari in X perché è stato introdotto uno spostamento della x ad ogni punto in accordo con l'altezza del punto.

Vi sono due strategie alternative per la generazione della coppia della carta a curve di livello:

1. Applicare una procedura di triangolazione per costruire un TIN e poi produrre le curve di livello da DTM basati su TIN
2. Applicare una procedura di interpolazione per interpolare la nuova serie della griglia di dati, cioè, ottenere il nuovo valore dell'altezza nella posizione originale di ogni nodo della griglia

La figura 5.17 illustra il processo per l'interpolazione della nuova serie di dati sulla griglia.

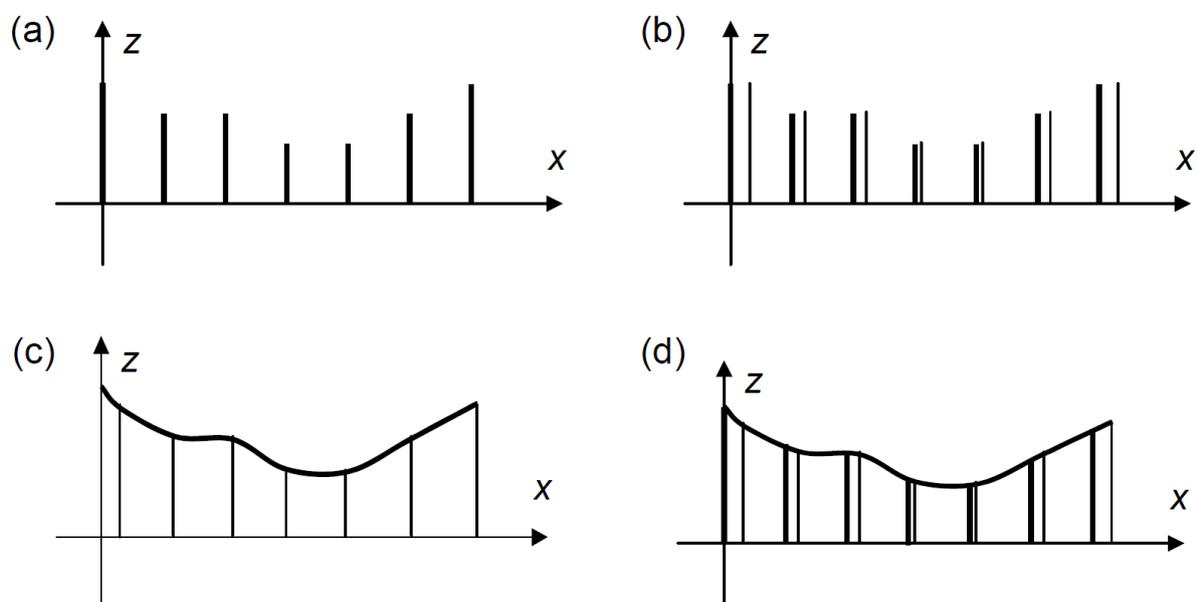


Figura 5.17 Il processo di generazione di una nuova griglia DEM con i parallaxi appropriati. (a) la prima fila della griglia originale. (b) ogni punto della griglia spostato proporzionalmente sulla destra. (c) modellamento della curva con i punti spostati. (d) interpolazione dell'altezza per ogni nodo della griglia originale

La Figura 5.17(a) è una riga nella griglia originale; la figura 5.17(b) rappresenta la situazione dopo l'applicazione di uno spostamento in x per ogni punto della griglia, cioè, ogni punto è mosso dalla posizione del nodo da uno spostamento della x calcolato nell'equazione (5.8) e (5.9). Dopo gli spostamenti, gli intervalli tra i numeri non sono più uguali. Cioè, la griglia originale è spezzata.

Per ottenere una nuova serie di dati in forma di griglia, è necessario calcolare la nuova altezza per ogni nodo della griglia originale dai punti spostati in x . Una funzione polinomiale è adatta ai punti spostati in x per l'interpolazione, come mostrato in Figura 5.17(c). La Figura 5.17(d) mostra le nuove altezze ai nodi originali della griglia.

Una carta a curve di livello, cioè, la coppia stereo, può quindi essere prodotta da questi nuovi dati.

La Figura 5.18 mostra un esempio di una mappa stereo a curve di livello.

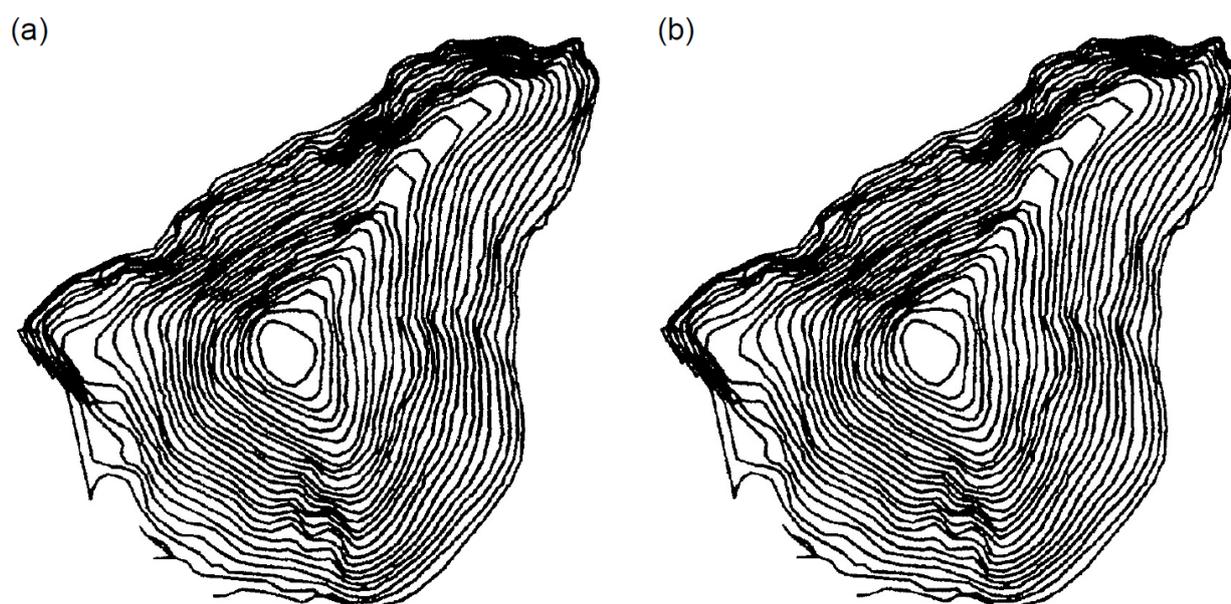


Figura 5.18 Carta stereo a curve di livello

CAPITOLO 6

VISUALIZZAZIONE DEI MODELLI DIGITALI DEL TERRENO

Si stima che più dell'80% delle informazioni siano ottenute attraverso il sistema visivo, tanto che il sistema visivo risulta sovraccaricato. Da un altro punto di vista, la visualizzazione è una questione importante in tutte le discipline incluso il modellamento digitale del terreno.

6.1 VISUALIZZAZIONE DEI MODELLI DIGITALI DEL TERRENO: QUADRO GENERALE

La visualizzazione in DTM è la naturale estensione della rappresentazione delle linee di contorno. In questo capitolo saranno discusse le variabili utilizzate nei diversi stadi, gli approcci e i principi di base.

6.1.1 VARIABILI DELLA VISUALIZZAZIONE

La rappresentazione visiva è uno strumento di comunicazione antico e le linee di contorno sono la rappresentazione grafica della comunicazione visiva. Qui comunicazione significa presentare l'informazione (i risultati) in forma grafica o altra modalità che possa essere compresa immediatamente. Per una tale presentazione sono disponibili sei variabili ottiche primarie:

1. Tre variabili geometriche:

- Forma
- Misura
- Orientamento

2. Tre variabili di colore

- Tonalità
- Valore o luminosità
- Saturazione o intensità

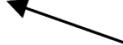
Primary visual variables	Graphic 1	Graphic 2
Size		
Shape		
Orientation		
Hue (color)		
Saturation (intensity)		
Value (brightness)		

Figura6.1 Le sei variabili ottiche primarie

La figura 6.1 mostra graficamente le sei variabili. In aggiunta sono possibili tre variabili ottiche secondarie:

1. *Composizione*: forma e configurazione dei componenti che formano il pattern.
2. *Trama*: misura e spaziatura dei componenti che formano il pattern.
3. *Orientamento*: direzione delle righe parallele dei marchi.

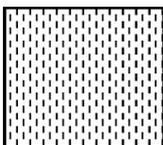
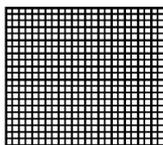
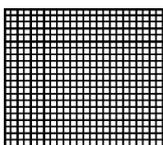
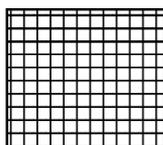
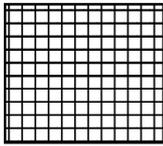
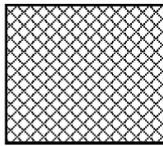
Secondary visual variables	Graphics 1	Graphics 2
Arrangement		
Texture		
Orientation		

Figura 6.2 Le tre variabili secondarie della comunicazione visiva

La visualizzazione è una naturale estensione della comunicazione e si dedica ad ambiti chiamati teorie ottiche (DiBiase [9],1990). La visualizzazione enfatizza una rappresentazione intuitiva dei dati che permette alle persone di capire la natura del fenomeno rappresentato dai dati stessi. In altre parole, la visualizzazione studia l'analisi di dati e informazioni graficamente, in modo da migliorare la conoscenza e la comprensione dei dati. Perciò la visualizzazione è stata comparata all'analisi visiva, con analogia all'analisi numerica.

La visualizzazione è una fusione di un certo numero di discipline scientifiche, quali computer graphics, user-interface methodology, processo dell'immagine, design del sistema, scienze cognitive e altro.

I maggiori componenti sono il rendering e tecniche di animazione.

Nella visualizzazione sono in uso altre serie di variabili in aggiunta alle tradizionali variabili ottiche.

Uno di essi, relativo all'analisi, è chiamato atto conoscitivo Figura 6.3.

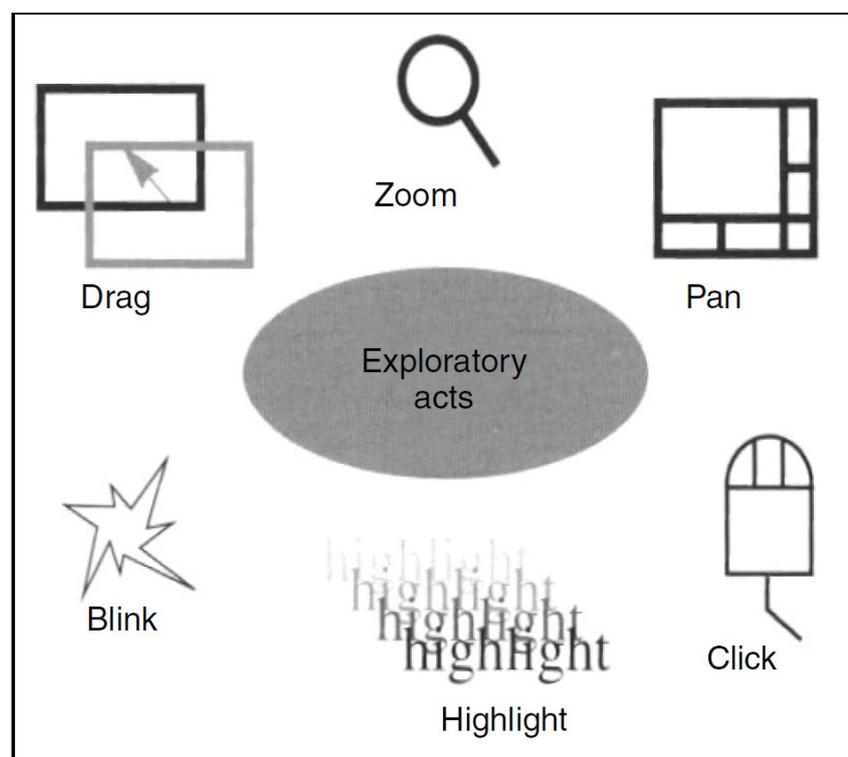


Figura 6.3 Atti esploratori per l'analisi ottica (Reprinted from Jiang [28], 1996)

E' fatto di drag, scatto, zoom, zoom indietro, flash, punto luce e altro (Jiang [28],1996).

Teoricamente, alcune variabili specifiche per proiettare il display quali l'oscurare, il mettere a fuoco e la trasparenza sono ancora in uso. (Kraak and Brown [29], 2001).

Nell'era della visualizzazione basata sul web, molti atti conoscitivi sono in uso, in particolare il browser e il plug-in. La tabella 6.1 indica le variabili in uso nei diversi stadi.

Stage	Variables in Use				
Paper graphics	Visual variables	—	—	—	—
Computer graphics	Visual variables	Screen variables	—	—	—
Visualization	Visual variables	Screen variables	Dynamic variables	Exploratory acts	—
Web-based visualization	Visual variables	Screen variables	Dynamic variables	Exploratory acts	Web variables

Tabella 6.1 Variabili nelle diverse fasi di visualizzazione

Le variabili dinamiche (DiBiase et al.[10], 1992) sono collegate all'animazione, inclusi la durata, il tasso di cambio e l'ordine.

Queste variabili saranno discusse successivamente.

6.1.2 APPROCCI PER LA VISUALIZZAZIONE DEI DATI DTM

La visualizzazione dei dati DTM fa uso di queste varianti per la rappresentazione visiva dei dati così che la natura della superficie terrestre possa essere meglio compresa. In effetti, la superficie terrestre può essere rappresentata da funzioni grafiche o matematiche. Questo capitolo focalizza l'attenzione sulle rappresentazioni grafiche. Vi sono rappresentazioni in 2D e in 3D sia in modalità statica che dinamica.

La figura mostra una classificazione degli approcci alla visualizzazione.

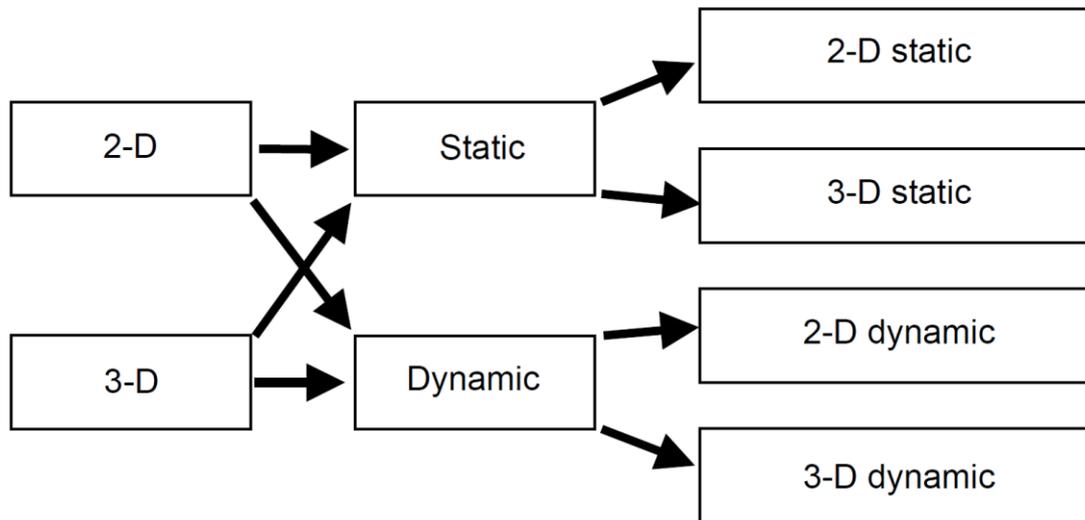


Figura 6.4 Approcci per la rappresentazione grafica della superficie DTM

Questo capitolo fornisce una breve discussione delle tecniche di rappresentazione in 2D e alcuni nuovi sviluppi nella rappresentazione in 3D:

1. *Texture mapping*: produce virtualmente paesaggi reali dalla mappatura di fotografie aeree o immagini satellitari su modelli digitali del terreno. Questa metodologia permette di mostrare il colore e la trama di tutti i tipi di oggetti del terreno e le costruzioni artificiali, ma l'aspetto geometrico del rilievo del terreno non può essere distintamente rappresentato. Ciononostante il metodo è spesso utilizzato per rappresentare aree pianeggianti dove vi sono molti elementi del terreno e attività umane, quali città e reti stradali.
2. *Rendering*: equivale a sfumature, ma nella rappresentazione 3D. È utilizzata per i modelli di illuminazione che simulano l'effetto visivo prodotto quando le luci riflettono sul terreno. Questo metodo può essere utilizzato per simulare micro rilievi del terreno (trama geometrica) e il colore utilizzando modelli matematici puri. La simulazione del terreno basata sul modello frattale è considerato il modello più promettente.
3. *Animazione*: può essere utilizzata per produrre rappresentazioni dinamiche e interattive.

Se si confrontassero tutte queste tecniche, si troverebbe che alcune tecniche sono più astratte di altre mentre alcune più simboliche di altre, come schematizzato in figura.

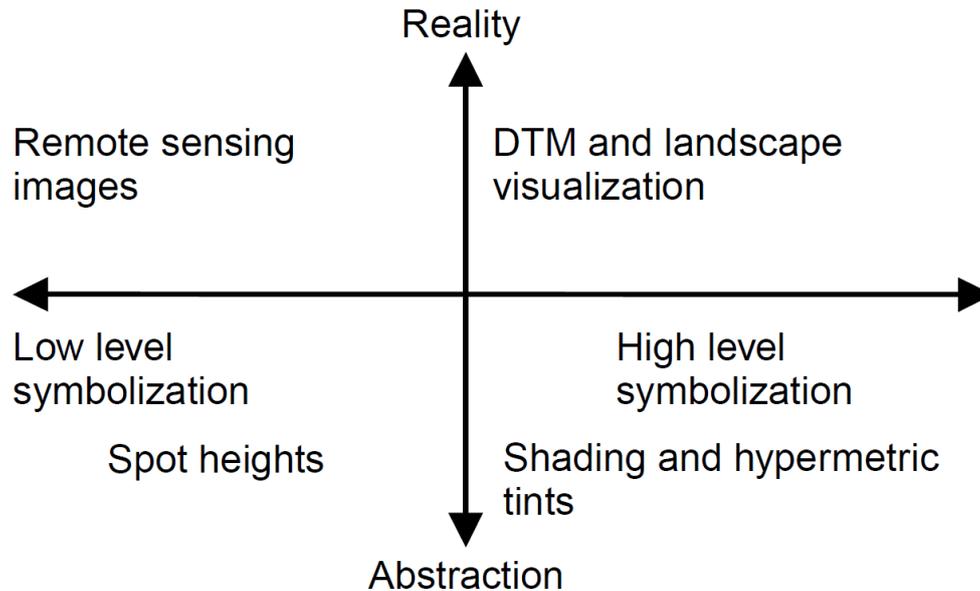


Figura 6.5 Un confronto tra le diverse tecniche di visualizzazione del terreno

6.2 VISUALIZZAZIONE DI DTM BASATI SU IMMAGINI 2D

6.2.1 OMBREGGIATURA DELLA PENDENZA E OMBREGGIATURA DELL'ILLUMINAZIONE SOLARE RELATIVA

Insieme alle tecniche basate sulle immagini, l'ombreggiatura è ancora ampiamente utilizzata. È possibile utilizzare due tipologie: l'ombreggiatura della pendenza (o obliqua) o l'ombreggiatura dell'illuminazione solare relativa (o verticale). L'ombreggiatura della pendenza assegna un valore di grigio ad ogni pixel i in accordo al valore della pendenza. Più ripida è la pendenza, più scura è l'immagine. La Figura 6.6 (a) è una piramide formata da quattro facce triangolari e una base. La Figura 6.6(b) è la visione ortogonale della Figura 6.6(a). La Figura 6.6 (d) è il risultato dell'ombreggiatura della pendenza. Si può trovare come a due facce con identico angolo di pendenza è stato assegnato lo stesso grado di grigio. La figura 6.6(c) è il risultato dell'ombreggiatura della salita. L'idea è di ritrarre le variazioni del terreno con differenti livelli di luminosità di illuminazione della piramide così da produrre l'effetto di ombre che guida al senso stereoscopico che è prodotto dall'esperienza del lettore (ma non dalla percezione a livello fisico).

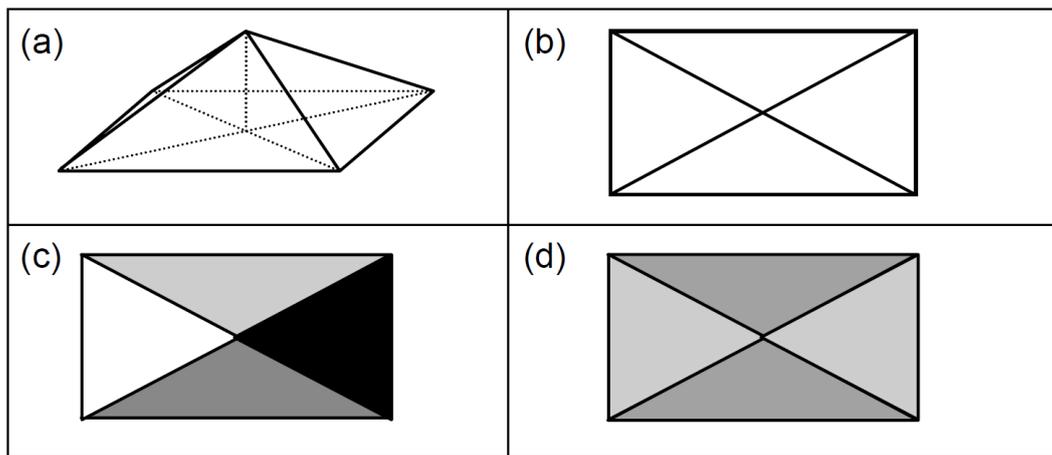


Figura 6.6 Ombreggiatura della superficie terrestre: (a) un oggetto di forma piramidale; (b) la visione ortogonale; (c) ombreggiatura della salita; (d) ombreggiatura dell'illuminazione solare relativa

Nell'ombreggiatura dell'illuminazione solare relativa, una fonte di luce è assunta normalmente da nordovest. La faccia di fronte alla luce è più illuminata della faccia lontana più scura.

6.2.2 COLORAZIONE BASATA SULL'ALTEZZA

In questo caso, il termine *colorazione basata sull'altezza* significa assegnare un colore a ciascun pixel dell'immagine basandosi sull'altezza dei dati DTM. Sono in uso due approcci: colorazione basata su intervalli e colorazione continua. La tonalità ipermetrica (strati di colore) è una colorazione basata su intervalli ampiamente utilizzata. Il principio base è l'utilizzo di differenti colori per aree con differenti altitudini. Teoricamente, si potrebbero usare un infinito numero di colori per rappresentare l'altitudine. Tuttavia, in pratica, la superficie terrestre è classificata in pochi intervalli in accordo con l'altezza e un colore è assegnato ad ogni classe. L'uso comune assegna il blu all'acqua, il verde per le basse altitudini, il giallo per le medie altitudini e il marrone o il rosso per le alte. La figura ne è un esempio.

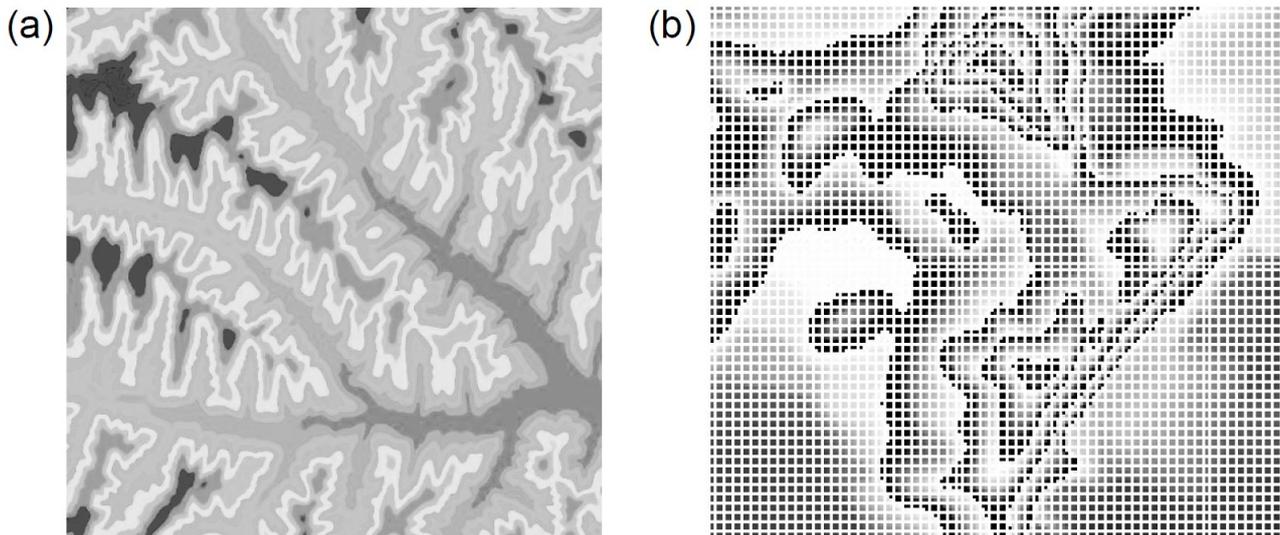


Figura 6.7 Colorazione basata su intervalli di altezza del terreno: (a) tinte ipermetriche (strati di colore) e (b) mezza tinta (strati di grigio)

Il grigio può essere utilizzato per produrre una immagine simile a quella in figura (a), come in figura (b). È possibile usare una continua variazione di toni di grigio per illustrare le variazioni della superficie del terreno (invece del range di altitudine). In altre parole, i livelli di grigio da 0 a 255 sono utilizzati per rappresentare le altezze della superficie del terreno. Un processo di mappatura è necessario per adattare le altezze del terreno nella scala di grigi. La figura mostra alcune possibili mappature.

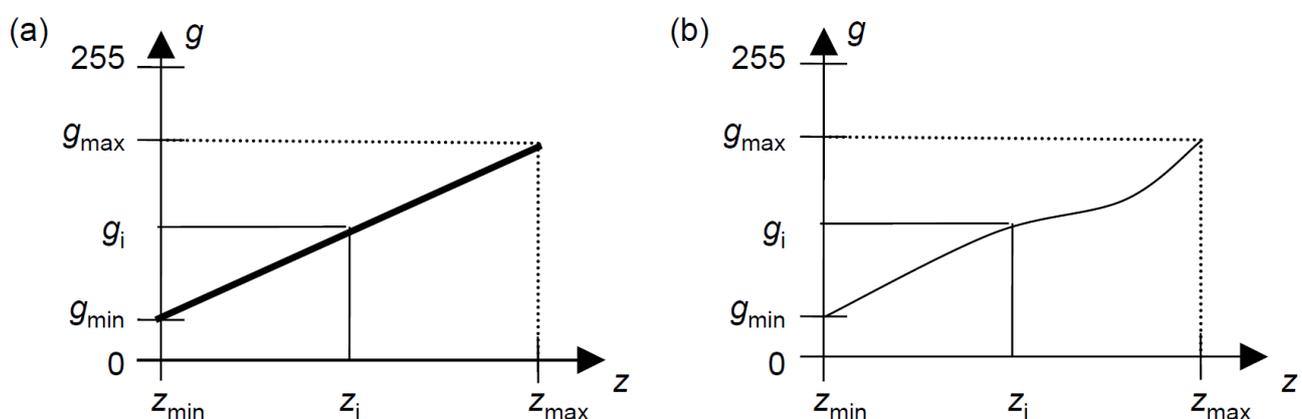


Figura 6.8 Mappatura dal valore dell'altezza al livello di grigio: (a) mappatura lineare e (b) mappatura non lineare

La più semplice è la linea retta (se la scala di altezze è molto più piccola di 256) o la linea di recessione (se la variazione è fuori dall'intervallo $[0,255]$). L'equazione è la formula per la mappatura lineare.

$$g_i = g_{min} + \frac{g_{max} - g_{min}}{z_{max} - z_{min}} (z_i - z_{min}) \quad (6.1)$$

dove g_i è il valore di grigio dell'altezza z_i ; g_{min} è il valore di grigio minimo possibile $0 \leq g_{min} < g_{max}$; g_{max} è il valore di grigio massimo definito $g_{min} < g_{max} \leq 255$; g_{min} è il valore minore dell'altezza nell'area e z_{max} è il valore maggiore dell'altezza nell'area. In questo modo, l'intervallo dell'altezza $[z_{min}, z_{max}]$ è mappato in un intervallo di grigi $[g_{min}, g_{max}]$. Solitamente, è utilizzato l'intero intervallo di grigi $[0,255]$ e così $z_{min} = 0$ e $z_{max} = 255$.

La figura è un esempio di immagine DTM in scala di grigi che mostra chiaramente la forma del paesaggio.

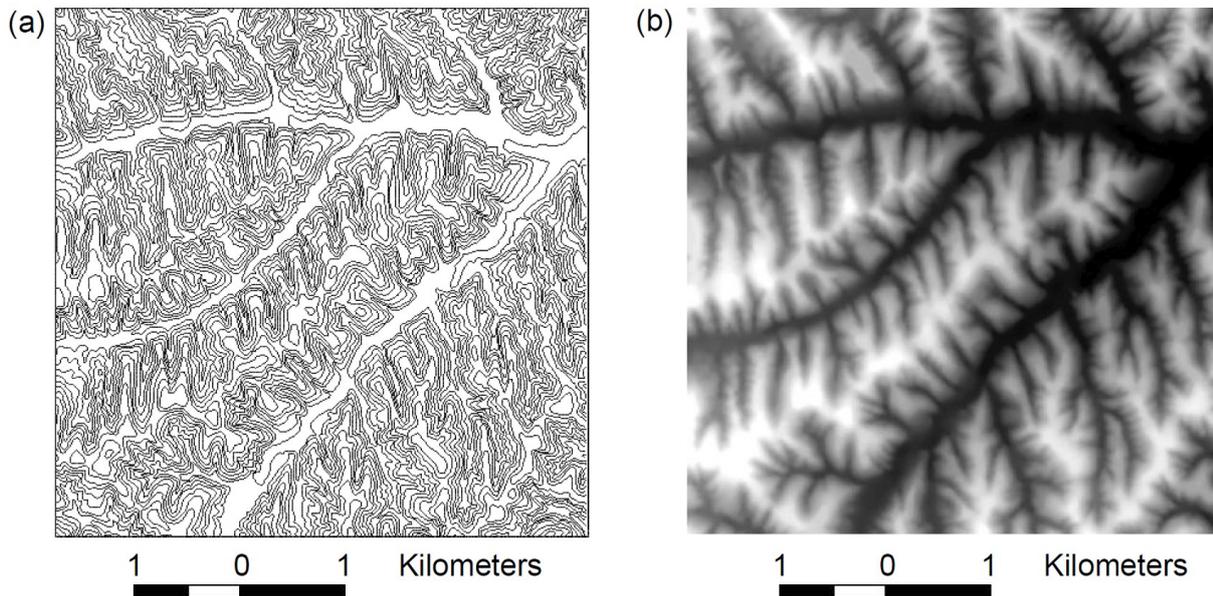


Figura 6.9 Rappresentazione DTM con immagine in scala di grigi: (a) mappa a curve di livello e (b) l'immagine in scala di grigi della mappa a curve di livello.

6.3 TECNICA DI RENDERING PER LA VISUALIZZAZIONE TRIDIMENSIONALE DEI DTM

Grazie allo sviluppo della computer graphics, la visualizzazione in 3D è la tendenza dominante della visualizzazione DTM. La visualizzazione wire frame 3D è ampiamente utilizzata, specialmente nella progettazione assistita dal computer, come mostrato in figura.

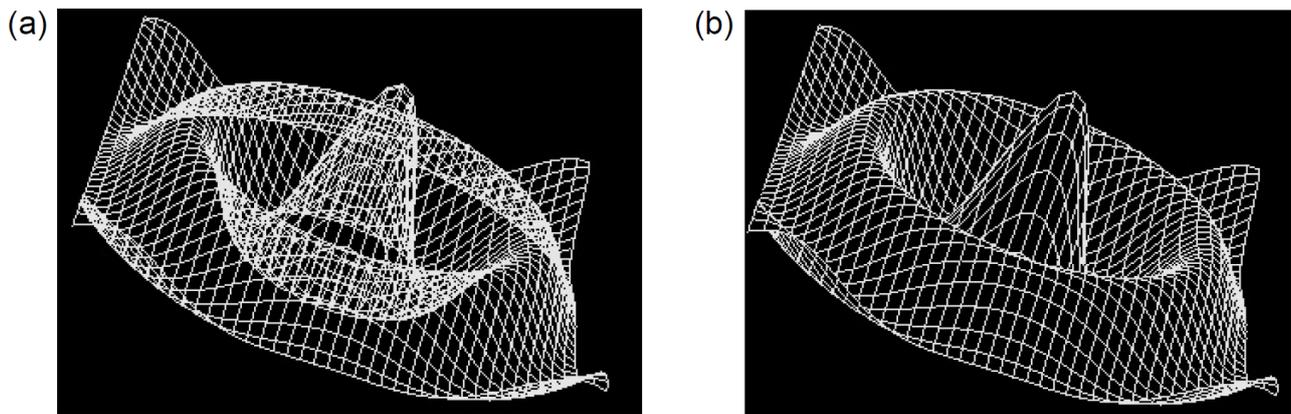


Figura 6.10 Struttura 3D di una superficie: (a) linee nascoste non rimosse; (b) linee nascoste rimosse

Tuttavia il rendering, che utilizza alcuni modelli di illuminazione per produrre una più realistica rappresentazione degli oggetti in 3D, è diventato la tecnica più popolare per la visualizzazione DTM.

6.3.1 PRINCIPI BASE DEL RENDERING

L'idea base del rendering è il produrre una realistica rappresentazione degli oggetti in 3D. Una superficie è suddivisa in un numero finito di poligoni (o triangoli nel caso di un TIN); tutti questi poligoni sono proiettati su un piano di vista da un dato punto di vista; ad ogni pixel visibile viene assegnato un valore di grigio, che è calcolato in base al modello di illuminazione e al punto di vista. In altre parole, il rendering di DTM è la trasformazione di una superficie DTM da un piano 3D a un piano 2D.

Il processo di rendering segue questi passaggi:

1. Dividere la superficie in modo da renderizzare in una serie continua di faccette triangolari.
2. Fissare un punto di vista, determinare la direzione di osservazione e trasformare la superficie del terreno in un sistema di coordinate dell'immagine.
3. Identificare le superfici visibili.
4. Calcolare la luminosità (e il colore) della superficie visibile in accordo con il modello di illuminazione.
5. Applicare sfumature di colore a tutte le porzioni triangolari visibili.

6.3.2 TRASFORMAZIONI GRAFICHE

Ciò che può essere visualizzato sullo schermo è determinato dalla posizione dell'osservatore (o punto di vista) e dalla direzione di vista. Il rendering comincia con la trasformazione della superficie del terreno dal sistema di coordinate terrestri (GCS) $O-XYZ$ al sistema di coordinate centrate al punto di vista (ECS) $O_e-X_eY_e-Z_e$ ed in seguito si proietta la superficie sul monitor che è parallelo al piano $X_eY_e-Z_e$. Questa serie di trasformazioni sono chiamate trasformazioni grafiche, le quali consistono in cambiare e ruotare le dimensioni mantenendo la scala e la proiezione. Sia il GCS che l'ECS sono sistemi di riferimento cartesiano 3D di tipo right-handed. Per quanto riguarda l'ECS la sua origine è fissata sul punto di vista e il suo asse Z_e è opposto alla direzione di vista.

Tutti i processi successivi, come riconoscimento delle porzioni visibili, trasformazione prospettica e processo di sfumatura, saranno effettuati nell'ECS.

La figura mostra le relazioni tra i due sistemi di coordinate.

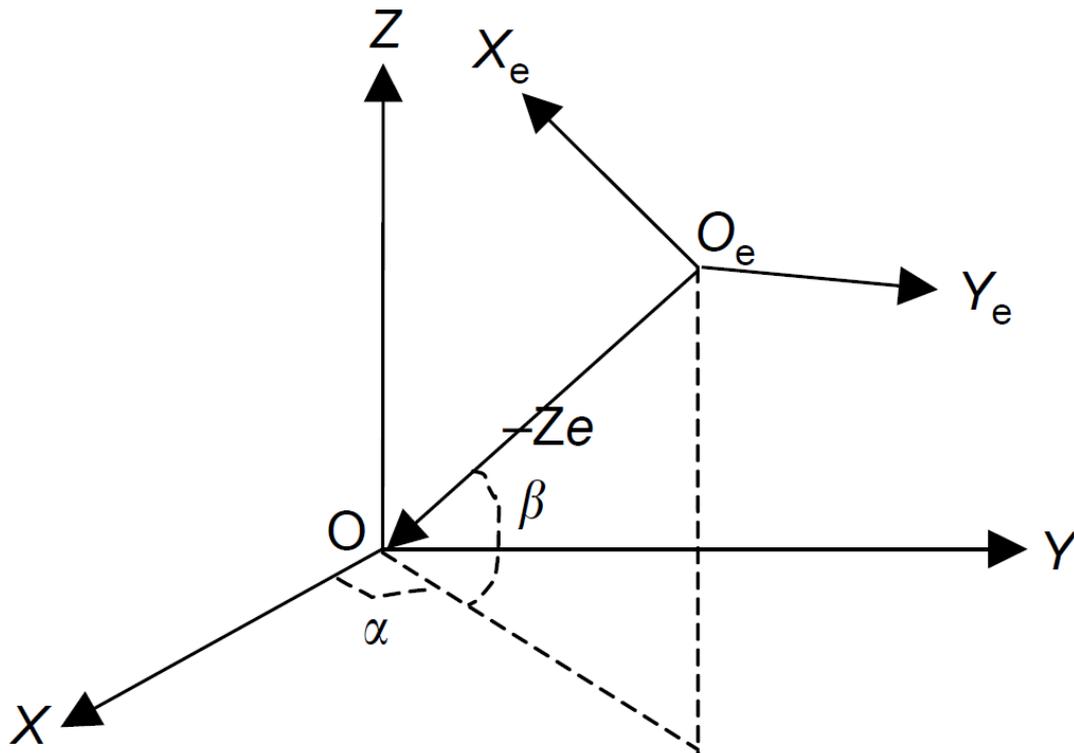


Figura 6.11 Il sistema di coordinate terrestri e il sistema di coordinate visive.

6.3.3 IDENTIFICAZIONE DELLA SUPERFICIE VISIBILE

La sfida nella generazione di immagini grafiche con senso stereoscopico è la rimozione delle superfici nascoste, che è simile alle linee nascoste rimosse nella struttura 3D. Ciò significa che bisogna identificare quelle porzioni che non possono essere viste dalla posizione corrente del punto di vista. Le porzioni di superficie fuori dal campo visivo sono eliminate, e quelle che sono nel campo visivo ma parzialmente bloccate da altre devono essere identificate. Questo processo è anche chiamato in letteratura identificazione delle porzioni visibili della superficie.

La figura mostra queste differenti porzioni.

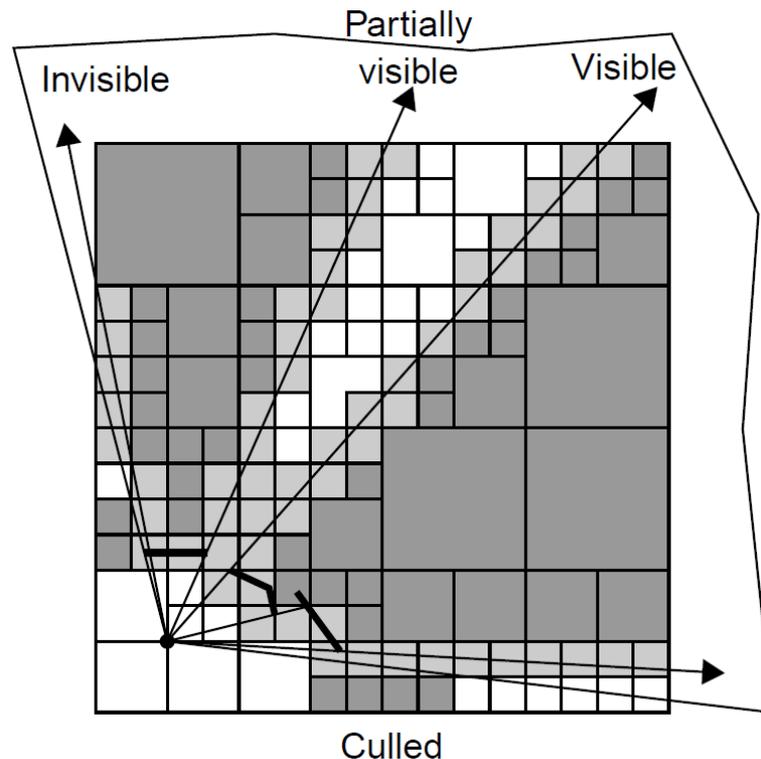


Figura 6.12 Differenti porzioni di superficie, completamente nascoste, parzialmente visibili e visibili

6.3.4 LA SELEZIONE DEL MODELLO DI ILLUMINAZIONE

Quando una porzione di superficie è identificata come visibile, il passo successivo è di assegnare differenti colori o scala di grigi alle differenti parti della superficie perché quando la luce illumina la superficie, la sfumatura di ogni parte è differente. Infatti, per ampie estensioni, il realismo di una visualizzazione 3D del terreno dipende dagli effetti di sfumatura. Per fare ciò, la superficie è scomposta in pixel e un colore viene assegnato ad ogni pixel. Per produrre sfumature intense, l'illuminazione della superficie è l'elemento chiave. Vi sono due approcci di assegnazione del colore: fare uso di illuminazione o fare uso del reale aspetto dell'oggetto. La luce visibile riflessa dagli oggetti contiene due tipi di informazioni, spaziale e spettrale, che sono le basi per l'interpretazione. Poiché diversi tipi di oggetti hanno diverse caratteristiche di riflettività, e potrebbero essere illuminate da differenti sorgenti di luce, è impossibile simulare l'effetto di illuminazione di uno scenario naturale con un realismo del 100%.

Vi sono due tipi di riflessione: diffusiva e speculare, come mostrato in figura.

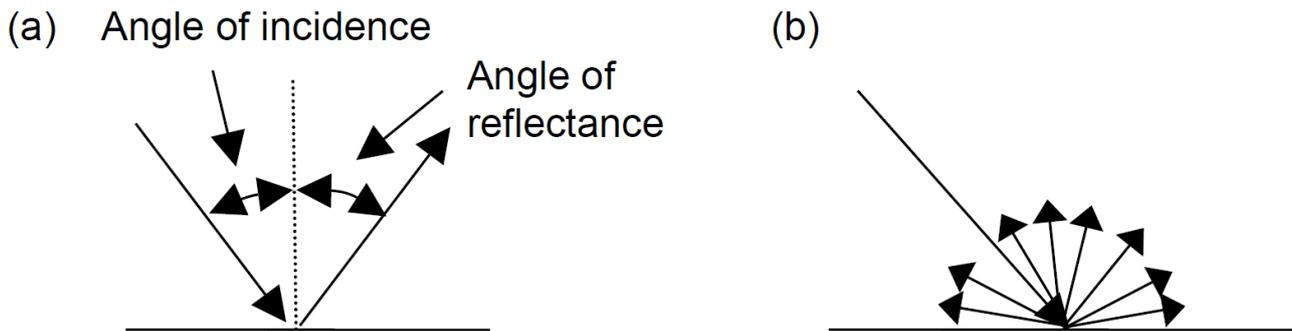


Figura 6.13 Riflessione della luce: (a) speculare e (b) diffusiva

La riflessione speculare, o riflesso speculare, avviene in una singola direzione.

La riflessione diffusiva è uniforme in tutte le direzioni. In qualsiasi modo, la superficie terrestre reale non è né una riflessione diffusiva né una riflessione speculare. Piuttosto, la maggior parte della superficie della terra è a metà tra le due. Di conseguenza, una combinazione di entrambi i modelli potrebbe essere una soluzione realistica. Bisogna considerare sia la luce riflessa che la luce ambientale. Un modello di illuminazione stabilisce le relazioni tra l'intensità della riflessione in ogni punto del terreno, la sorgente di luce e gli elementi sul terreno. La legge del coseno di Lambert descrive il modello di illuminazione per la luce riflessa.

Come mostrato nella Figura 6.13, se l'angolo di incidenza tra il vettore normale del punto P sul terreno e il vettore di direzione verso la sorgente di luce dal punto P è θ , allora l'intensità della riflessione diffusiva sul punto P , I_d è:

$$I_d = I_p \times K_d \times \cos \theta \quad (6.9)$$

dove I_p è l'intensità della sorgente di luce e $K_d \in (0,1)$ è il coefficiente di riflessione diffusiva del terreno. Poiché la luce è diffusa uniformemente in tutte le direzioni, l'intensità della riflessione diffusiva è indipendente dal punto di vista. Al contrario, con la riflessione speculare, la luce riflessa avviene in una singola direzione, cioè con un angolo uguale all'angolo di incidenza.

Dato che il terreno reale non è solitamente un riflettore speculare completo, il suo riflesso speculare non segue strettamente la legge della riflettività.

Dopo aver considerato questo, Phong [49] (1975) sviluppò il suo famoso modello:

$$I_S = I_P \times K_S \times \cos^n \alpha \quad (6.10)$$

dove α è l'angolo tra la direzione di riflessione e la direzione di vista, $K_S \in (0,1)$ è il coefficiente di riflessione speculare del terreno e n è l'indice di focus della riflessione speculare, più liscia è la superficie più grande è il valore di n .

In molti casi, per incrementare il realismo, è presa in considerazione anche la luce ambientale. Le caratteristiche della luce ambientale sono descritte da un modello di diffusione:

$$I_a = I_E \times K_a \quad (6.11)$$

Dove I_E e K_a sono rispettivamente l'intensità della luce ambientale e il coefficiente di luce ambientale riflessa del terreno. Dato che il suo effetto sulla scena è il medesimo, generalmente è considerato come una costante con valore uguale a 0.02 fino a 0.02 volte $I_P K_a$. Combinando i modelli di riflessione diffusiva e di riflessione speculare, il modello di Phong diventa:

$$I = K_a \times I_E + \sum [K_d \times I_P \times \cos \theta + K_S \times I_P \times \cos^n \alpha] \quad (6.12)$$

In questo caso, indica \sum la somma di tutte le sorgenti di luce e $K_d + K_S = 1$. In pratica, possono essere ottenuti risultati chiari utilizzando un solo punto di sorgente di luce. In questo modo, il calcolo è semplificato.

6.3.5 ASSEGNAZIONE DELLA SCALA DI GRIGI PER LA PRODUZIONE GRAFICA

Dopo la presentazione del modello di illuminazione, può essere stimato il livello di grigio per ogni area delle porzioni della superficie.

Lo shading di Gouraud [24] (1971) è un metodo semplice ma efficace per questo intento.

In questo metodo, la scala di grigi di tre vertici è prima stimata dal modello di Phong, poi tutti i pixel in quel triangolo sono interpolati linearmente dai quei tre vertici.

Come mostrato in figura.

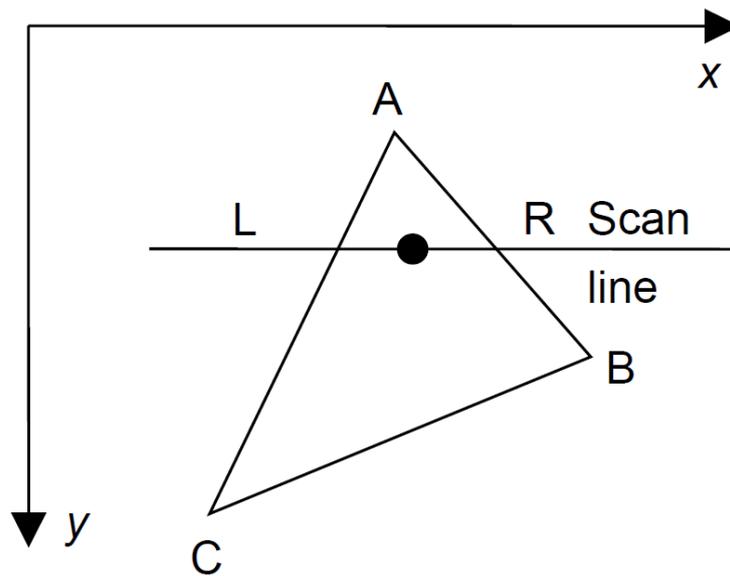


Figura 6.14 Metodo incrementale scan line

Il risultato dello shading secondo il modello di Gouraud appare liscio, dato che le intensità cambiano continuamente attraverso gli angoli del poligono.

Questo approccio è ancora oggi usato nella pipeline di rendering con accelerazione hardware (Zwicker and Gross [60], 2000). Il problema con l'interpolazione lineare è che non è liscia oltre il confine di due sfaccettature lineari. Per risolvere questo problema, Phong introdusse un modello più realistico che è in grado di simulare i punti luce speculari. In questo metodo piuttosto che le intensità vengono interpolate le normali alle sfumature.

La figura è la visione prospettica dello shading DTM prodotto da questo metodo.



Figura 6.15 Shading di DTM.

Per visualizzare le superfici terrestri più realisticamente, oltre ai livelli di grigio, possono essere utilizzati altri colori con diverse intensità.

Terreni con differenti altitudini possono essere rappresentati da diversi colori, che permettono all'immagine 3D del terreno di avere l'effetto delle tinte ipermetriche.

La figura è un esempio.

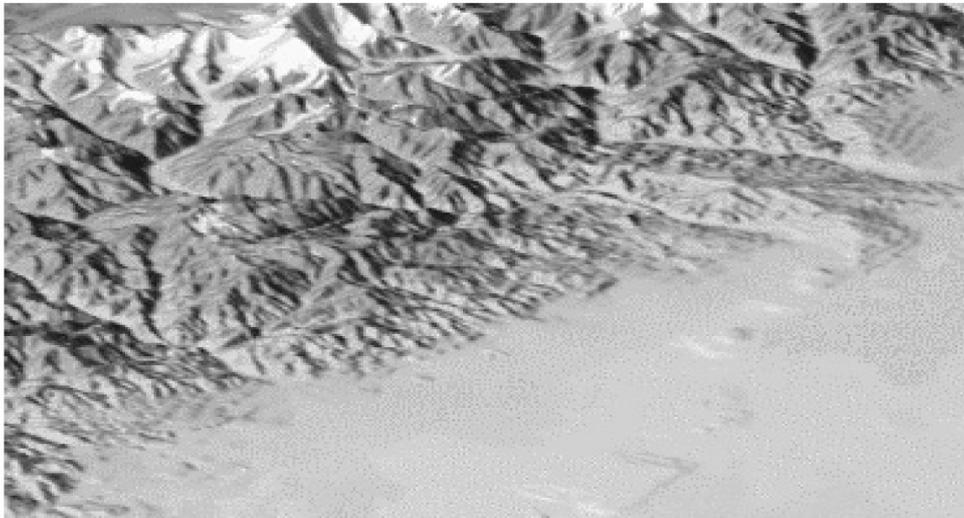


Figura 6.16 visione prospettica di DTM con colorazione di altitudine.

6.4 TEXTURE MAPPING PER LA GENERAZIONE DI PAESAGGI VIRTUALI

Questa sezione discute di come mappare la texture ed altre caratteristiche sulla superficie del terreno così da produrre una vista più realistica, chiamata paesaggio virtuale.

6.4.1 TEXTURE MAPPING SULLA SUPERFICIE DTM

Per migliorare il realismo visivo dell'immagine sintetizzata dal rendering, è stato sviluppato un certo numero di tecniche. L'idea base è di aggiungere informazioni basate sulle immagini alle primitive rappresentazioni. La tecnica più comunemente utilizzata è chiamata texture mapping, cioè mappare una funzione di una struttura in una superficie 3D. La funzione può essere a 1D, 2D o 3D e può essere rappresentata da valori discreti in un array di matrice o da una espressione

matematica. La texture mapping aumenta la ricchezza visiva delle immagini raster (ingrandite) mentre comporta solo un relativo piccolo incremento nel calcolo. La figura è un esempio di questo prodotto, mostrando parte del fiume Yangtze in Cina.



Figura 6.17 mapping texture sulla superficie di DTM

In questo contesto, la texture è definita da un array di immagine in 2D. I dati dell'immagine digitale possono essere ottenuti da fotografie o video o generate da funzioni matematiche. Poiché i dati sono in un formato di raster discreto deve essere stabilita, prima della texture mapping, una funzione continua di texture $f(U, V)$ nello spazio della texture (U, V) utilizzando questi dati discreti. Il metodo più facile è di realizzare una interpolazione utilizzando una funzione bilineare. La prima fase nel texture mapping è di mappare la texture sulla superficie 3D del terreno; la seconda fase è di mappare la superficie 3D con la texture sullo schermo. Per mappare dallo spazio della texture al terreno in 3D, il metodo più accurato è di stabilire una mappatura diretta tra il sistema di coordinate della texture (U, V) e il 3D ECS (X_e, Y_e, Z_e) basato sui principi della prospettiva centrale. La trasformazione lineare diretta (DTL) può essere usata a questo scopo:

$$U = \frac{a_1 X_e + b_1 Y_e + c_1 Z_e}{a_3 X_e + b_3 Y_e + c_3 Z_e} \quad (6.13)$$

$$V = \frac{a_2 X_e + b_2 Y_e + c_2 Z_e}{a_3 X_e + b_3 Y_e + c_3 Z_e} \quad (6.14)$$

Il calcolo richiesto in questa equazione è denso perché è una funzione non lineare. In pratica una semplice funzione simile alla funzione affine in 2D può servire a questo proposito:

$$U = a_1X_e + b_1Y_e + c_1Z_e + d_1 \quad (6.15)$$

$$V = a_2X_e + b_2Y_e + c_2Z_e + d_2 \quad (6.16)$$

Almeno quattro punti di controllo sono richiesti, dei quali texture e coordinate visive sono conosciuti. I punti di controllo nella fotogrammetria o nei dati DTM possono essere utilizzati per questa trasformazione. Nella fotogrammetria digitale, le coordinate della texture e le coordinate dello spazio degli oggetti di tutti i punti DTM sono conosciuti.

6.4.2 MAPPATURA DI ALTRI ELEMENTI SULLA SUPERIFICIE DTM

Dalla mappatura della texture sul modello DTM si ottengono chiari dettagli della superficie del terreno. In effetti, l'effetto visivo può essere migliorato aggiungendo altre informazioni sul modello, per esempio, strade disegnate, terreni utilizzati, fiumi, vegetazione e immagini. Le immagini aeree possono essere mappate in DTM per produrre paesaggi realistici. In effetti, immagini, linee, e oggetti 3D sul terreno (per esempio case, alberi) possono anche essere mappate sul DTM.

La figura mostra un esempio.

(a)



(b)



Figura 6.18 Paesaggio virtuale dal mapping texture e altri oggetti: (a) una immagine texture e elementi in 2d mappati nel DTM e (b) immagine texture e elementi 3D mappati nel DTM.

6.5 TECNICHE DI ANIMAZIONE PER LA VISUALIZZAZIONE DTM

Le tecniche di visualizzazione 3D possono diventare dinamiche dal potenziamento delle tecniche di animazione.

6.5.1 PRINCIPI DELL'ANIMAZIONE

Il fondamento dell'animazione è la tecnica della pagina rovesciata, che ha dato origine ai film. Inizialmente vengono creati un numero di fotogrammi dell'immagine e archiviati nella memoria del computer, poi sono proiettati sullo schermo in sequenza.

Tra variabili dinamiche sono possibili per controllare il processo di animazione:

1. *Durata (unità di tempo per una scena)*: normalmente la durata di 1/30 sec di un fotogramma (per esempio 30 fotogrammi al secondo) produrranno una animazione liscia. Se la durata è troppo lunga, l'azione sarà a strappi
2. *Tasso di cambio (velocità di animazione o differenze tra due scene successive)*: la figura 6.19 mostra l'animazione della vibrazione (su e giù), con quattro fotogrammi. Le differenze tra questi fotogrammi sono chiare. Se il tasso è basso, un movimento lento può essere prodotto. Dall'altra parte, un movimento veloce è prodotto se il tasso di cambio è alto.
3. *Ordine (la sequenza dei fotogrammi)*: i fotogrammi possono essere organizzati in accordo con il tempo, la posizione o le caratteristiche. La sequenza dei fotogrammi in figura 6.19 è sistemata in accordo con il tempo.

Tuttavia, i fotogrammi nella figura 6.21 e 6.22 sono organizzate in accordo con il punto di vista.

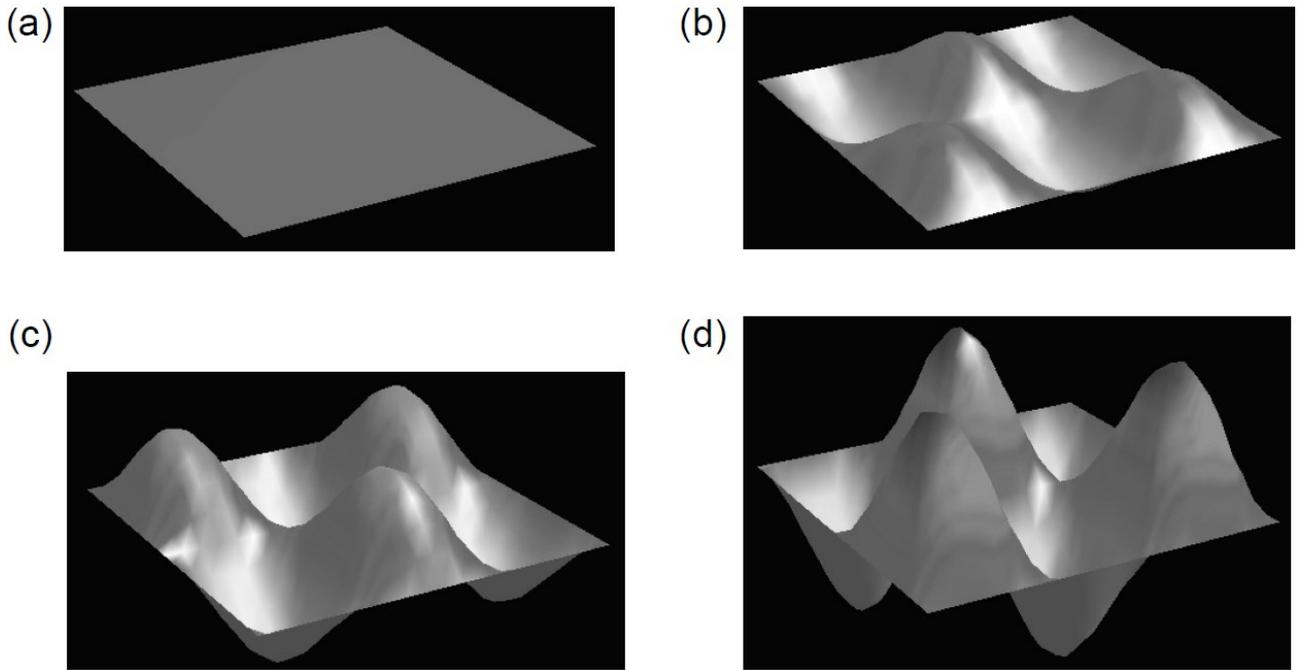


Figura 6.19 quattro fotogrammi per l'animazione della vibrazione su e giù: (a) fotogramma 1; (b) fotogramma 2; (c) fotogramma 3; (d) fotogramma 4.

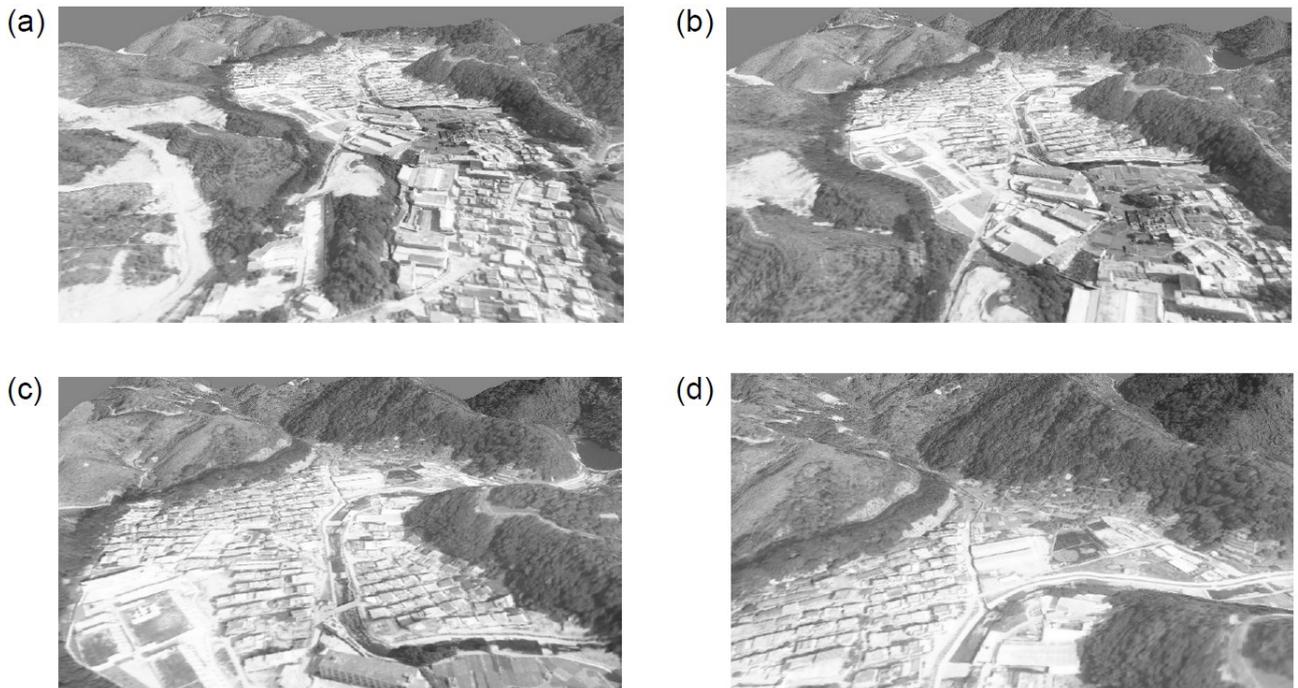


Figura 6.21 Quattro fotogrammi per animazione di volo-attraverso: (a) fotogramma 1; (b) fotogramma 2; (c) fotogramma 3; (d) fotogramma 4

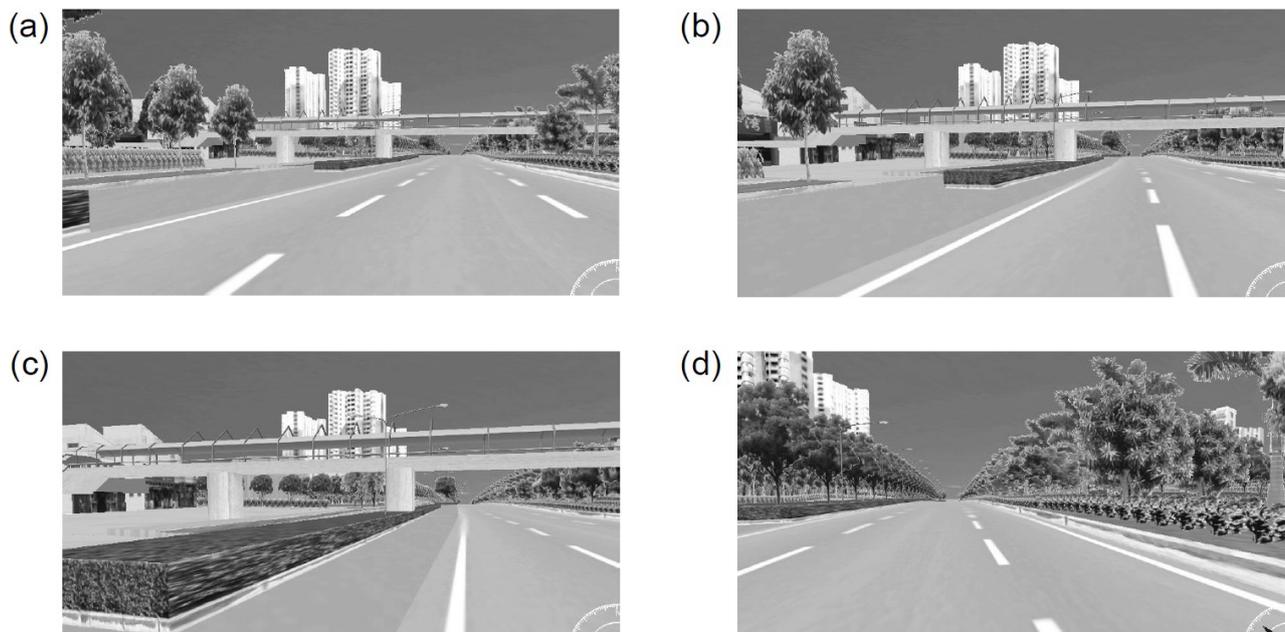


Figura 6.22 Quattro fotogrammi di animazione cammino-attraverso: (a) fotogramma 1; (b) fotogramma 2; (c) fotogramma 3; (d) fotogramma 4

Nella visualizzazione del terreno, “*Fly-Through*” e “*Walk-Through*” sono comunemente utilizzati. La sequenza di immagini animate è prodotta secondo un ordine di spazio, cioè dal movimento del punto di vista lungo un certo tragitto. Questo tipo di animazione è anche chiamata animazione del punto di vista. Vi sono due strade per accedere o visualizzare ogni fotogramma dell’immagine, fotogramma per fotogramma o per trasferimento di piccoli blocchi confinanti (bitblt). L’animazione basata sui fotogrammi è una animazione a schermo interno e l’animazione di pagina. Per prima cosa una serie di immagini a schermo pieno è prodotta e salvata in un separato buffer, in sono animate dalla disposizione delle pagine in sequenza. L’animazione per fotogrammi è considerata la miglior scelta per la complessità e la pienezza delle ombre. Nel bitblt, ogni fotogramma ogni fotogramma è solo un blocco rettangolare dell’immagine a schermo pieno. È richiesta meno memoria perché solo una piccola porzione del display a schermo pieno è manipolata ogni volta. Ciò può cambiare la performance. Per entrambi i tipi di animazione, la sequenza di immagini deve essere strutturata per prima. Per ottenere un’alta velocità, per esempio, 30 fotogrammi al secondo, tutti i fotogrammi devono essere inseriti in memoria. Pertanto, sia il numero di fotogrammi che la capacità di ogni immagine sono limitati dalla memoria del computer. Sono in uso vari concetti di raccolta proiezione dei fotogrammi, quali basati sulla RAM, basati

su EMS/ZMS, e basati sul disco. Per esempio, il metodo basato sulla RAM è solitamente utilizzato per produrre animazioni lisce quando la sequenza è corta e il complesso delle informazioni è piccolo (per esempio 30 fotogrammi, 160x100+256 colori)

6.5.2 PAN-VIEW SENZA INTERRUZIONI SU DTM IN UNA AREA AMPIA

Con lo sviluppo della computer graphics, è possibile generare un'area di visualizzazione senza interruzione di un DTM globale su un computer. D'altra parte, la limitazione dei computer all'applicazione in tempo reale di un grande quantitativo di dati DTM è evidente. Queste limitazioni principalmente rimangono nella misura della memoria, il volume dei dati della texture, la precisione delle virgole mobili del CPU, la velocità della scheda video per le sfumature geometriche e la velocità dell'accesso e del trasferimento dei dati. Con un dato computer, la chiave per una visualizzazione in tempo reale è (a) ridurre i calcoli richiesti e (b) velocizzare l'accesso e proiezione dei dati. Spesso solo una parte della superficie del terreno può essere proiettata in una volta sola a causa dell'ampio volume di dati, anche quando è utilizzato un modello LOD. Per velocizzare il rendering interattivo in tempo reale del terreno, solitamente solo una parte dei dati sono selezionati per processare e i dettagli in queste parti saranno cambiati dinamicamente con i cambiamenti nel punto di vista e nella direzione di vista. Un meccanismo efficiente per l'organizzazione e la gestione dei dati è richiesta per assicurare gli aggiornamenti della velocità del network triangolare dinamico richiesti per le scene che cambiano in base al punto di vista. Per organizzare le scene, alcuni parametri devono essere stabiliti per giudicare quali parti delle scene saranno rimossi, aggiornati, o quali hanno accesso al database e quando. Cioè, i database o le strutture di dati per l'archiviazione dei dati DTM devono essere in grado di supportare un accesso veloce ai dati. Per realizzare dei pan-views di un'ampia area in tempo reale sul desktop di un computer, la strategia comune è di applicare la paginazione a partizioni multiple dei dati basata sulla suddivisione dell'intero terreno in blocchi di dati, doppio buffer del display e schema di processo a partizioni multiple. Durante la panoramica (panning), i blocchi di dati nel campo di visione corrente sono selezionati in accordo con il punto di vista e in seguito i diversi LOD sono fissati

in accordo con la relazione tra i blocchi di dati, il punto di vista e il campo visivo. In questo modo, il numero di modelli è ridotto e l'efficienza del rendering della scena è aumentato. Il punto di vista è sempre localizzato vicino al centro della pagina dei dati. Durante la panoramica (panning), come il punto di vista si muove, i blocchi di dati sulla pagina dei dati necessitano di essere aggiornati frequentemente. La direzione di movimento del punto di vista è giudicata calcolata in base alle compensazioni tra la posizione corrente del punto di vista (x_e, y_e) e il centro geometrico (x_c, y_c) della pagina di dati:

$$\Delta X = x_e - x_c \quad (6.17)$$

$$\Delta Y = y_e - y_c \quad (6.18)$$

Quando ΔX è positivo, il punto di vista si muove attraverso il lato positivo dell'asse x , diversamente verso la direzione opposta. Se $|\Delta X| > BlockSize$ (la misura del blocco dei dati) e $\Delta X < BlockSize/2$, viene letta una nuova colonna di dati nella direzione di movimento; di conseguenza la colonna del blocco di dati nel lato opposto è cancellata dalla pagina come mostrato in figura.

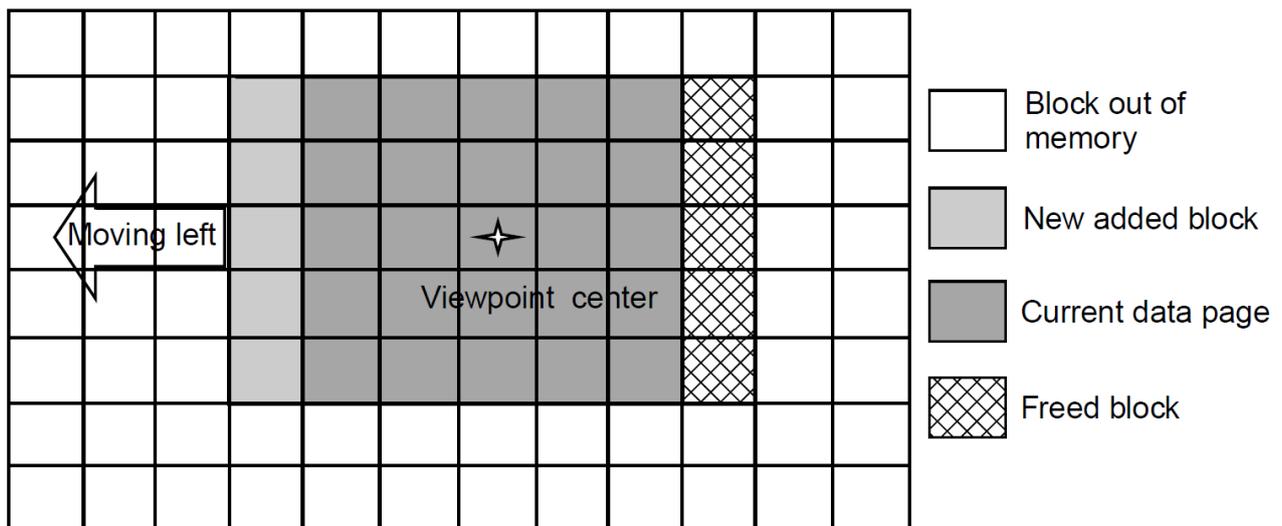


Figura 6.20 Paginazione dinamica dei dati per blocchi di dati

Sono possibili otto combinazioni di ΔX e ΔY , su, giù, destra, sinistra, in alto a sinistra, in basso a destra, in alto a destra e in basso a sinistra, così che la direzione in avanti del movimento del blocco possa essere in ciascuna delle otto direzioni. Ma, in ogni freshing, solo una nuova riga (o colonna) di un blocco di dati è aggiunta

nella pagina dei dati e una riga (o una colonna) nella direzione opposta è cancellata. In questo modo, basato sulla compensazione tra il punto di vista e il centro geometrico della pagina dei dati, l'aggiornamento frequente del data page è ottenuto e così il pan-view in tempo reale di una ampia area è realizzato.

6.5.3 “FLY-THROUGH” E “WALK-THROUGH” PER LA VISUALIZZAZIONE DTM

Fly-Through e *Walk-Through* sono due tecniche base usate nell'animazione del terreno. Permettono agli operatori di vedere un modello da angoli differenti. *Fly-Through* fornisce una visione del paesaggio continua come l'occhio di un uccello. Il punto di vista è lontano dalla superficie terrestre e può muoversi in tutte le direzioni dello spazio 3D. *Walk-Through* imita la visione umana durante il cammino. Può essere considerato come un caso speciale di *Fly-Through*, cioè il punto di vista è basso e il movimento nell'asse verticale è ristretto. Il cambio nel punto di vista di *Fly-Through* o *Walk-Through* può essere controllato mediante diverse modalità, quali l'uso di un mouse, una tastiera, una strada fissata o libertà di movimento. Similarmente al pan-view di un'ampia area, solo l'area visibile è dinamicamente caricata e progressivamente rappresentata durante i cambiamenti nel punto di vista. In molti casi, è adottato un modello LOD.

La figura mostra l'animazione di tipo cammino-attraverso del paesaggio urbano, attraverso quattro fotogrammi.

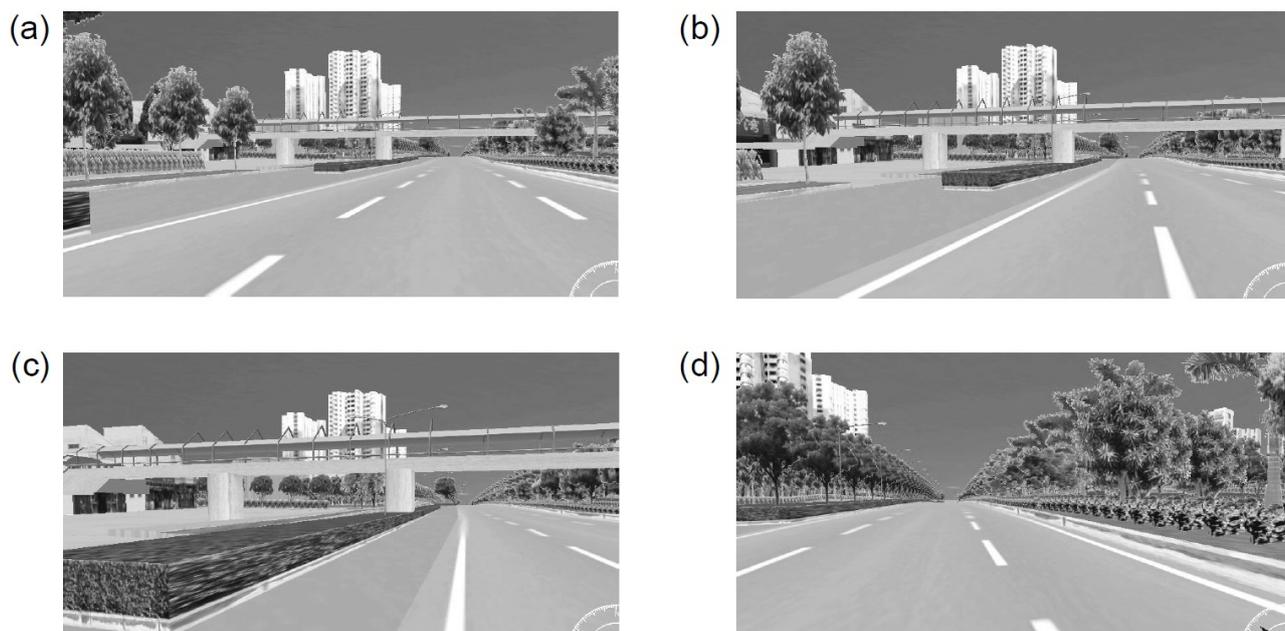


Figura 6.22 Quattro fotogrammi di animazione cammino-attraverso: (a) fotogramma 1; (b) fotogramma 2; (c) fotogramma 3; (d) fotogramma 4.

CAPITOLO 7

APPLICAZIONE DEI MODELLI DIGITALI DEL TERRENO

I DTM hanno trovato largo impiego fino dalla loro origine alla fine degli anni '50, in diverse discipline come mappature, telerilevamento, ingegneria civile, ingegneria mineraria, geologia, geomorfologia, ingegneria militare, mappatura di terreni e comunicazioni. In questo capitolo verranno fatte delle brevi descrizioni di varie applicazioni.

7.1 APPLICAZIONI IN INGEGNERIA CIVILE

La prima applicazione dei DTM è stata in ingegneria civile, più precisamente in ingegneria delle autostrade. Nel 1957 Roberts [50] ha proposto l'utilizzo dei DTM per il design delle autostrade. Un anno dopo, Miller e Laflamme [45] hanno usato i dati per mettere a punto un modello in sezione e coniato il concetto di DTM per la prima volta. Successivamente Roberts e i suoi colleghi al MIT hanno sviluppato il primo sistema di modellazione del terreno.

Questo sistema poteva non solo interpolare le sezioni (profili), ma anche calcolare le cut-and-fill tra le varie sezioni e fornire dati utili per l'ingegnerizzazione.

Nel 1966 avevano dei programmi per il design delle strade usando i DTM, la maggior parte dei quali erano basati sui calcoli cut-and-fill. Molte tecniche che originariamente erano state sviluppate per il design delle strade, sono state poi applicate all'ingegneria per le costruzioni, come il design di cisterne e dighe. I DTM sono stati anche largamente utilizzati per altre applicazioni legate all'ingegneria, come per esempio l'attività mineraria. In questa sezione saranno descritte brevemente delle applicazioni in ingegneria stradale e di salvaguardia dell'acqua.

7.1.1 DESIGN DI AUTOSTRADE E FERROVIE

Lo sviluppo di una rete di trasporti è complicato e punta a fornire una rete capace di soddisfare le richieste della società. Il processo di design può essere diviso in diversi passi, come analisi del sito, pianificazione dei percorsi e loro design, calcoli sulle modifiche da apportare al territorio, design del manto stradale, dei ponti e tunnel, e così via. I DTM aiutano nella pianificazione dei percorsi e nel design delle modifiche da apportare al territorio. A causa delle variazioni sul terreno, è molto improbabile che una strada o una ferrovia possano essere costruite senza nessun intervento sul territorio. In molti casi, tunnel e ponti devono essere costruiti, colline e pianure modificate (figura 7.1).

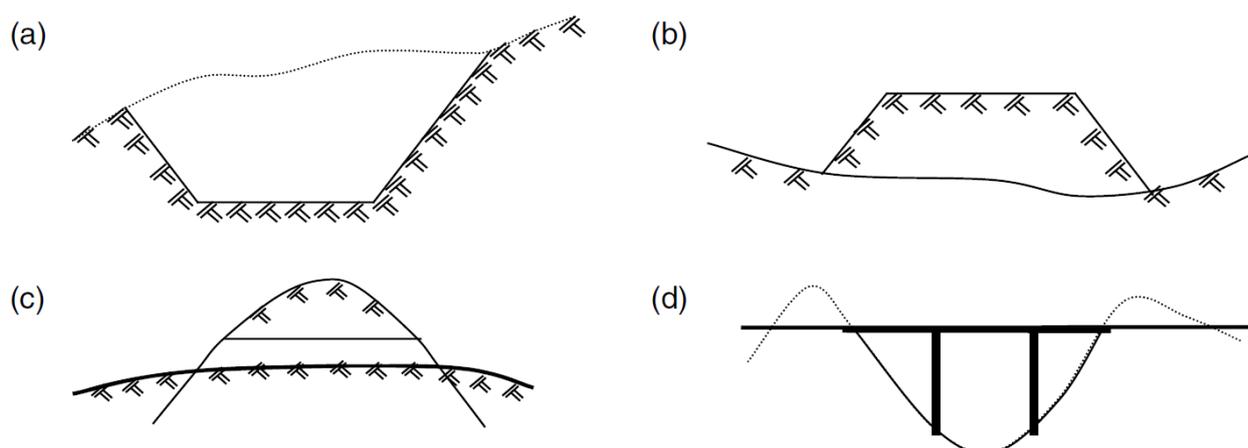


Figura 7.1: Casi collegati al design di strade e ferrovie: (a) scavo della forma del taglio (sezione trasversa); (b) argini sotto forma di riempimenti (sezione trasversa); (c) scavo della forma del tunnel (profilo); (d) costruzione nella forma del ponte (profilo)

Gli interventi sul terreno possono essere sotto forma di scavi oppure terrapieni per supportare strade o ferrovie sopraelevate. Di solito durante il design di un'autostrada o ferrovia sono necessari sia tagli che riempimenti. I progettisti fanno di tutto per utilizzare un percorso che passa attraverso aree che hanno una situazione geologica stabile, con pendenze dolci e curve piccole, al fine di minimizzare le modifiche al territorio. In passato questo lavoro era fatto sulla mappa delle linee di livello. Al giorno d'oggi i DTM sono largamente utilizzati per disegnare piantine, profili (lungo la linea centrale designata) e sezioni, al fine di calcolare il volume di modifiche sul territorio, per generare viste prospettiche, e persino per creare

animazioni 3D. Siccome per un dato progetto sono possibili diversi percorsi, l'obiettivo del progettista è quello di trovare il percorso ottimale. I requisiti base per le modifiche del paesaggio attraverso un TIN sono poter inserire ed eliminare punti con una triangolazione e assegnarli ad una determinata altezza. Anche se sarebbe opportuno avere strumenti aggiuntivi che sono specifici per l'applicazione, la manipolazione del terreno può essere fatta anche solo con questi. La figura 7.2 mostra una superficie triangolata dove i valori di altezza del ciglio della strada sono stati aggiunti al terreno originale, e alcuni dei punti originali sono stati modificati. La fig. 7.3 mostra una vista 3D di questo modello, che potrà poi essere usato per valutare la fattibilità del percorso proposto.

La figura 7.4 mostra un'autostrada sul DTM basato sul TIN con ombreggiatura.

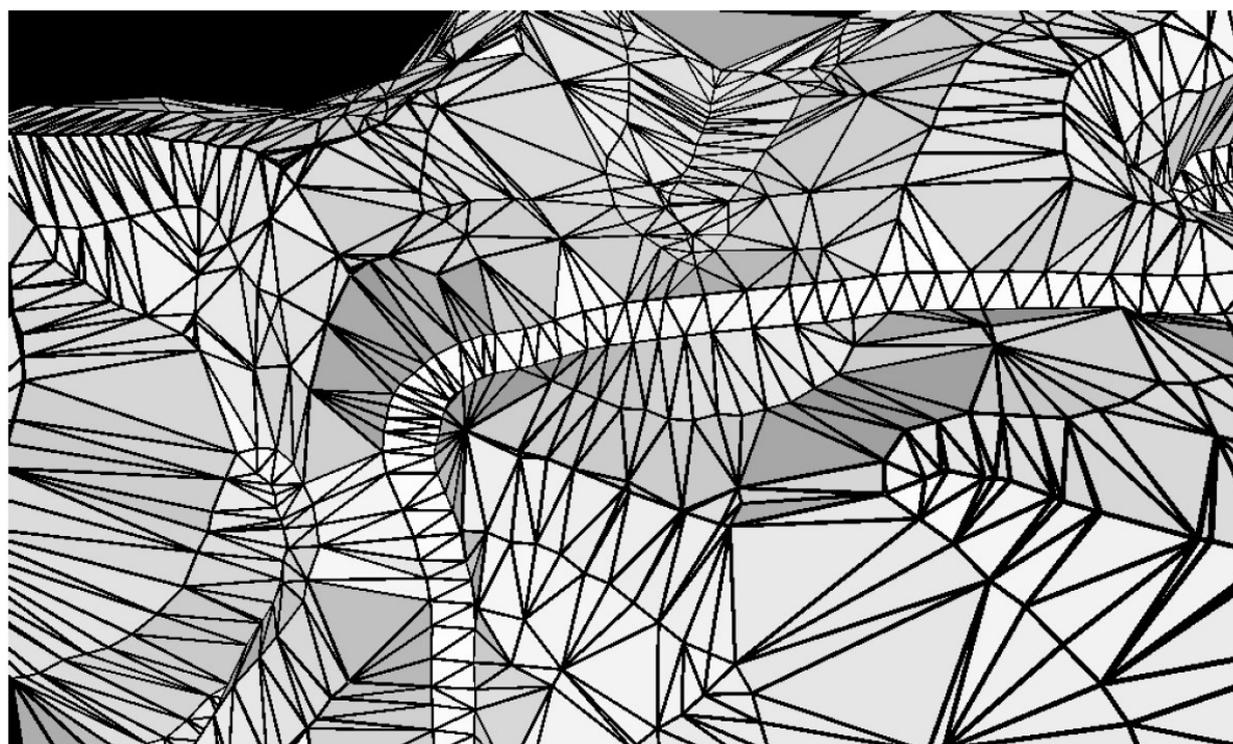


Figura 7.2: Una superficie del terreno triangolata con linee della strada aggiunte.

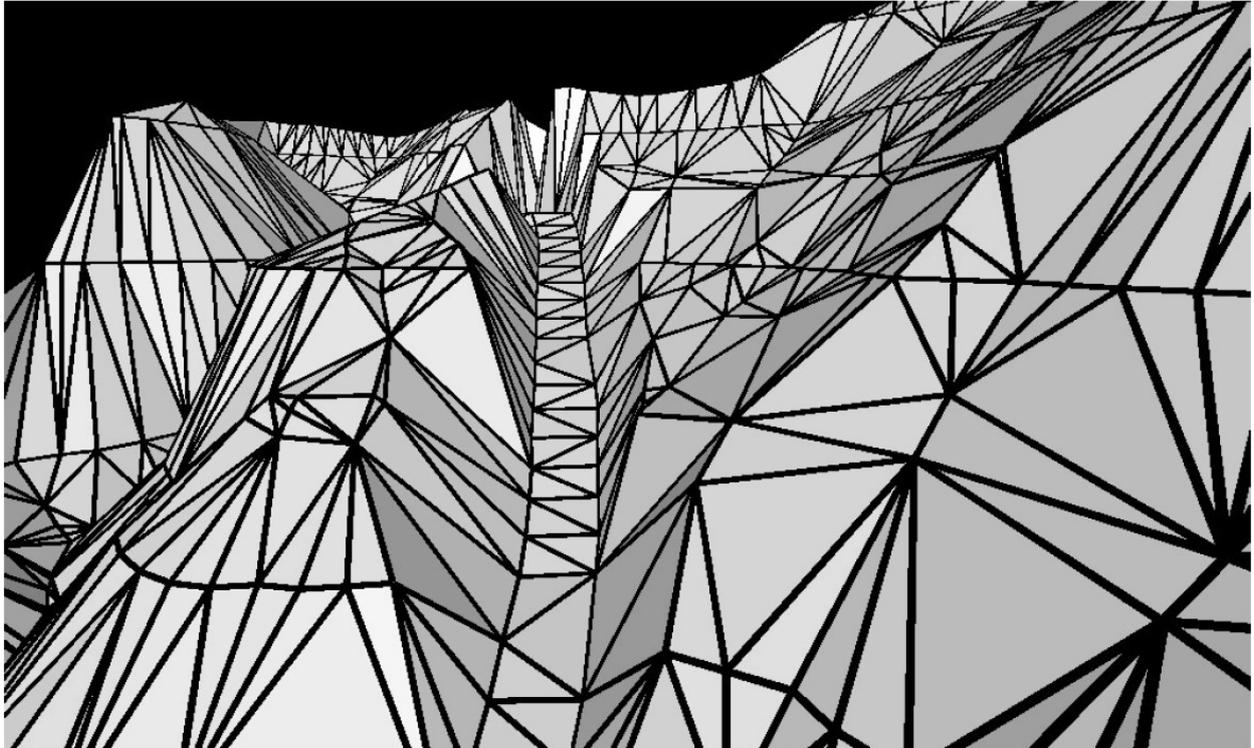


Figura7.3: Una visione 3D superficie del terreno triangolata con linee della strada aggiunte.



Figura 7.3: Autostrada progettata su DTM basati su TIN con ombreggiatura

Nell'attività mineraria i DTM sono stati usati per calcolare i volumi di terreno e per simulare la progressione mineraria.

7.1.2 SALVAGUARDIA DELL'ACQUA

Ci sono vari tipi di progetti di salvaguardia dell'acqua, come bacini idrici e canali. Il progetto di un canale è simile ad un progetto di una strada, ma ci sono alcune differenze. La differenza più grande è che l'acqua non può fluire naturalmente in salita. Quindi un canale di solito non può avere pendenze in salita. Nel progetto di un bacino idrico è necessario stimare il volume dell'acqua, determinare la location della diga e pianificare il drenaggio. Il volume e l'area del bacino sono due caratteristiche chiave. I DTM possono essere usati per rimpiazzare le tradizionali carte a linee di livello nell'aiuto alla ricerca di un sito per la diga e la stima del volume d'acqua. La procedura per il calcolo del volume d'acqua è il seguente:

1. Se i punti (x_A, Y_A) e (x_B, Y_B) sono i due punti dell'asse della diga, allora l'equazione per questo asse è:

$$y = kx + b \quad (7.1)$$

dove $k = (Y_B - Y_A)/(x_B - x_A)$ e $b = y_A + kx_A$

2. Calcolare i punti di intersezione (x_i, y_i) della diga con le linee delle curve di livello a differenti livelli, che sono derivate dai DTM dell'area del bacino idrico
3. Calcolare l'area del poligono irregolare formato da ogni curva di livello (per esempio la curva di livello k) e la diga designata:

$$A_k = \frac{1}{2} \sum (x_{i+1} + x_i)(y_{i+1} - y_i), \quad k=1,2,3,\dots,m \quad (7.2)$$

4. Calcolare il volume tra due aree adiacenti (per esempio l'area k e l'area k+1):

$$\Delta V = \frac{1}{2} (A_k + A_{k+1}) \times \Delta H \quad (7.3)$$

dove ΔH è la differenza di altezza tra due aree adiacenti

5. Calcolare il volume contenuto dal bacino idrico:

$$V = \sum \Delta V \quad (7.4)$$

Alla fine possono essere facilmente ricavate le curve che mostrano le relazioni tra il livello dell'acqua e il volume del bacino, e tra il livello dell'acqua e il volume dell'acqua.

7.2 APPLICAZIONE DI TELERILEVAMENTO E MAPPATURA

I DTM hanno molte applicazioni nel telerilevamento e mappatura, come la mappatura topografica (contorni), mappatura tematica, generazione di ortoimmagini e analisi di immagini, revisione di mappe, e così via. In questa sezione saranno discusse solo le applicazioni in generazione di ortoimmagini e analisi di immagini da telerilevamento.

7.2.1 GENERAZIONE DI ORTOIMMAGINI

Al fine di creare immagini utili come contesto per altre informazioni tematiche e mappe base, sarebbe preferibile che le immagini abbiano caratteristiche simili a quelle di tali mappe. Questo significa che è necessario adottare la stessa scala, orientamento e proiezione in un sistema di georeferenziazione (per esempio un sistema nazionale geodetico). Per poter fare questo è necessario rispettare un certo numero di requisiti:

1. Tutti i punti delle immagini devono essere registrati in un sistema di georeferenziazione come il sistema geodetico nazionale (o griglia).
2. Ogni punto (pixel) dell'immagine risultante dovrebbe avere la stessa scala se l'area del terreno è piccola, o altrimenti le variazioni di scala dovrebbero seguire una mappa di proiezione.
3. Le relazioni relative tra le caratteristiche dovrebbero essere conservate.

Le immagini da telerilevamento, che siano satellitari o aeree, non rispettano tali caratteristiche a causa della distorsione dell'immagine causata dalle imperfezioni della fotocamera o dai sistemi di scansione, l'instabilità della piattaforma (inclinazione e variazione di altitudine), la rifrazione atmosferica, la curvatura terrestre e le variazioni di altitudine del terreno. Quindi è necessaria una rettificazione geometrica. Per rettificare le immagini dev'essere stabilita la relazione tra l'immagine e i punti sul terreno. Per quanto riguarda la fotografia aerea le relazioni sono espresse nell'equazione:

$$x = -f \frac{a_1(X_A - X_S) + b_1(Y_A - Y_S) + c_1(Z_A - Z_S)}{a_3(X_A - X_S) + b_3(Y_A - Y_S) + c_3(Z_A - Z_S)}$$

$$y = -f \frac{a_2(X_A - X_S) + b_2(Y_A - Y_S) + c_2(Z_A - Z_S)}{a_3(X_A - X_S) + b_3(Y_A - Y_S) + c_3(Z_A - Z_S)}$$

Per immagini da scansione, l'equazione può essere ancora usata, ma solo per ognuna linea di scansione. Quindi non è una buona soluzione pratica utilizzare per modellizzare le immagini scansionate, perché di solito in un frame ci sono migliaia di linee di scansione, e questo porterebbe a troppe incognite. In pratica per approssimare i modelli di trasformazione geometrica si utilizza un polinomio (di solito del secondo o terz'ordine), come elencato nella Tabella 4.1.

Per calcolare i coefficienti di questo modello vengono misurati alcuni punti di riferimento sia nell'immagine che nel terreno. Quindi tutti i punti sull'immagine possono essere trasformati sul terreno. Questa è la rettificazione geometrica nella quale le distorsioni vengono corrette, minimizzate o redistribuite. In ogni caso la variazione data dalle variazioni del terreno è ancora presente.

Per rimuoverla si usa un DTM, come mostrato in figura.

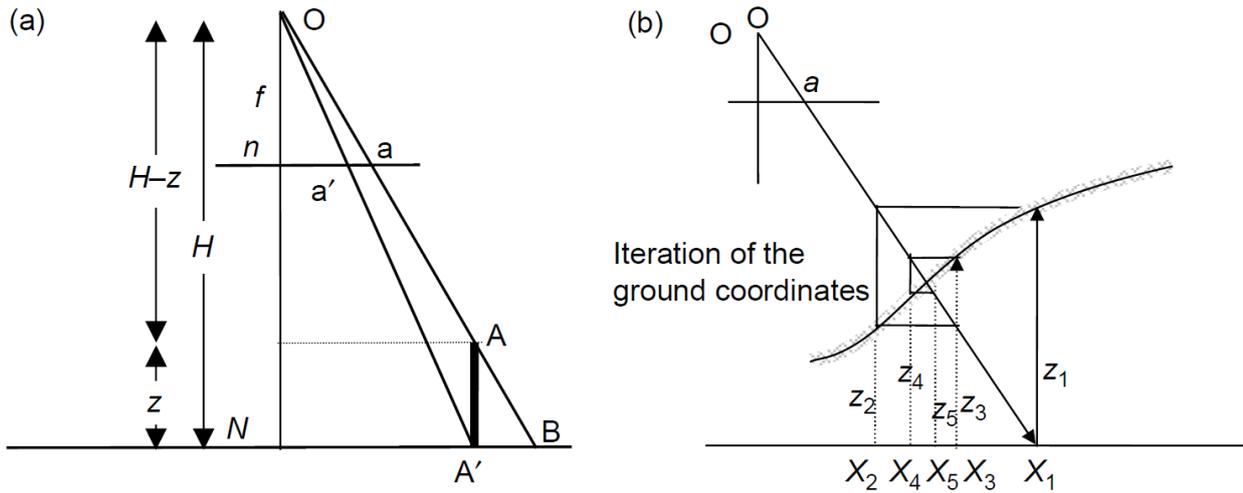


Figura 7.5: Distorsione dell'immagine a causa del rilievo e relative correzione: (a) distorsione di immagine causata dal rilievo e (b) superficie di intersezione del terreno con il fascio di luce.

In figura 7.5(a) viene mostrata la distorsione causata da un rilievo. Il punto sul terreno A ha un'altezza z rispetto ad un punto di riferimento scelto. Questo causa uno spostamento "aa" nell'immagine. Nel caso di rettificazione si può applicare una correzione se l'altezza di ogni punto sull'immagine, per esempio "a" in figura 7.5, può essere derivata dal DTM. Il calcolo dell'altezza del terreno è effettuato tramite un processo iterativo (Albertz et al. [2], 1999), come mostrato in figura 7.5(b).

7.2.2 ANALISI DI IMMAGINI DA TELERILEVAMENTO

Nei capitoli è stato usato lo shading per creare una riproduzione nitida della superficie del terreno. È stato inoltre discusso che la riflettività della superficie è diversa se la pendenza e aspetto sono diversi. Questo significa che la luminosità dei pixel dell'immagine sono influenzati anche dalla pendenza e dall'aspetto della superficie del terreno. La figura 7.6 mostra questi effetti.

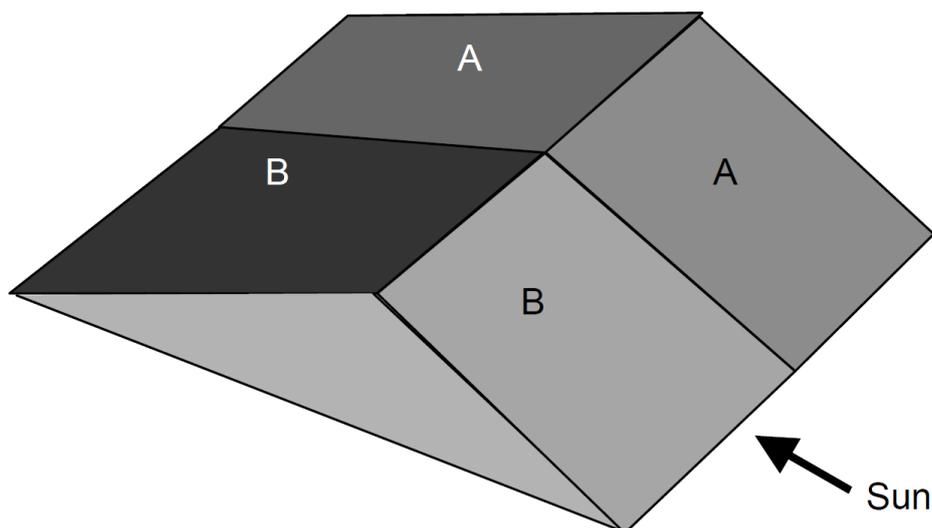


Figura 7.6: Effetto della variazione topografica sulla luminosità dell'immagine

In ogni caso l'immagine da tutte le bande subirà lo stesso effetto per quanto riguarda la stessa area. Perciò, nel telerilevamento, la radiazione di banda è largamente utilizzata per rimuovere questi effetti. Nella figura 7.6 ci sono due tipi di copertura del terreno, A e B. La luce del sole arriva dall'angolo in basso a destra. Perciò la superficie sulla parte destra apparirà più chiara nell'immagine.

La tabella 7.1 dà un possibile esempio.

Unit	Image Brightness on Slope Facing Away from Sun			Image Brightness on Slope Facing Sun		
	Red Band	NIR Band	Red/NIR	Red Band	NIR Band	Red/NIR
A	20	30	0.67	40	60	0.67
B	30	60	0.50	50	100	0.50

Tabella 7.1 Rimozione dell'effetto topografico con rapporto di banda.

Il rapporto tra le bande rossa e NIR (near infrared) è lo stesso anche se i valori assoluti sono molto diversi. Con un DTM si può facilmente creare la pendenza e l'aspetto di una mappa della superficie del terreno; quindi l'effetto topografico può essere rimosso. Infine, un'analisi più affidabile può essere ottenuta dall'immagine dopo che sono stati rimossi gli effetti topografici.

7.3 APPLICAZIONI IN INGEGNERIA MILITARE

7.3.1 SIMULAZIONE DI VOLO

L'addestramento dei piloti è complesso, costoso e spesso pericoloso. Viene naturale pensare ad una simulazione, con la quale il pilota può sedersi di fronte ad uno speciale dispositivo per imparare come controllare un aereo. In aggiunta all'addestramento di piloti, la simulazione di volo può essere anche usata per pianificare missioni e prove. Il DTM gioca un ruolo importante nella simulazione. Vengono usate tecniche di rendering 3D per simulare il terreno, spesso con tecniche LOD. La trama del terreno e altre caratteristiche possono essere mappate sulla superficie del DTM per generare scenari realistici. Per simulare cambiamenti di scenario durante il volo, viene utilizzata la tecnica "fly-through". I DTM possono anche essere usati per pilotare missili da crociera. A tale scopo vengono abbinate le superfici contenute nel DTM salvato sul computer, con quelle reali rilevate dai sensori di bordo del missile.

7.3.2 CAMPO DI BATTAGLIA VIRTUALE

Il campo di battaglia virtuale è una simulazione di un potenziale campo di battaglia generato da un computer, e permette a persone reali di essere coinvolte. La simulazione del campo di battaglia fornisce un ambiente dinamico che può essere usato per riassumere la battaglia, valutare i risultati e acquisire esperienza. Il DTM è usato per simulare l'ambiente di battaglia. In figura 7.7 è visualizzato un esempio di campo di battaglia virtuale.



Figura 7.7: Simulazione di un campo di battaglia virtuale

Diversi parametri possono essere ricavati dalla DTM per le simulazioni di campo di battaglia, come visibilità, superficie del terreno, distanza da un'unità in movimento, la minore distanza dal bersaglio e l'accessibilità del campo di battaglia.

7.4 APPLICAZIONI IN AMBIENTE E RISORSE

7.4.1 MODELLI EOLICI E STUDIO AMBIENTALE

In climatologia, ambiente e foresteria, è necessario prevedere la direzione del vento per poter prevedere la direzione degli incendi e dell'inquinamento. A tal fine è necessario ricavare informazioni sul modello eolico dell'area di interesse.

Una grande catena montuosa esercita effetti dinamici e termodinamici sull'atmosfera. Gli effetti dinamici si verificano quando con la rotazione e la gravità le montagne forzano l'aria a muoversi come onde, e ciò si traduce in cambiamenti dei fronti d'onda. L'effetto termodinamico invece si verifica quando la differenza di temperatura tra giorno e notte in parti differenti delle montagne influenza i venti locali di colline e valli. La direzione e velocità del vento varia anche con altitudine, pendenza, aspetto e ruvidità del terreno. Tutto ciò si traduce in un campo eolico instabile nelle aree montuose.

Per poter modellizzare tutto ciò, è necessario estrarre tutti i principali parametri topografici dai DTM, che sono:

1. L'altitudine media, la maggiore e la minore di ogni cella della griglia.
2. L'altitudine media la maggiore e la minore di una certa area descritta da specifiche condizioni
3. L'inclinazione media di ogni cella
4. La percentuale di celle contenenti certe caratteristiche del terreno, come picchi, valli e terreni pianeggianti.
5. La deviazione standard di altitudine e pendenza

7.4.2 MODELLI DI LUCE SOLARE PER LA CLIMATOLOGIA

Il clima montuoso è profondamente influenzato dalle variazioni del terreno. Questi effetti risultano in diversi climi sui due versanti della catena montuosa. Inoltre si possono creare climi locali in zone diverse della regione montuosa a causa di combinazioni diverse di altitudine, pendenza e aspetto, come ad esempio l'effetto di ombreggiatura creato dai picchi delle montagne. Quando si analizza il clima montuoso è necessario considerare non solo i fattori immutabili come la latitudine e l'altitudine media delle regioni, ma anche parametri topografici microscopici come le differenze di altitudine locali, aspetto e zone d'ombra. I DTM giocano un ruolo fondamentale nella modellazione della luce solare. La direzione di incidenza della luce solare è funzione di data, tempo, latitudine e longitudine dell'area. La luce solare ricevuta da ciascuna cella è inoltre dipendente da pendenza, aspetto e altitudine della cella. Al fine di creare un modello di luce solare preciso, le coordinate delle celle della griglia sono trasformate in latitudine e longitudine, viene calcolato l'angolo tra la direzione di incidenza e la normale alla superficie della cella, viene valutato il livello di ombreggiatura tramite un algoritmo hidden surface della superficie 3D, e infine la radiazione solare istantanea può essere accuratamente calcolata. La radiazione solare di una griglia di celle in 1 giorno può essere ottenuta sommando tutte le radiazioni solari istantanee. Allo stesso modo si possono calcolare le radiazioni solari di una griglia durante un mese, una stagione o un anno. Ovviamente la radiazione solare di un certo periodo di tempo su una

superficie in pendenza può essere ottenuta sommando tutti i valori di radiazione di quella griglia di celle su quella superficie.

7.4.3 SIMULAZIONE DI INONDAZIONI

Le aree pianeggianti dei bacini fluviali sono spesso oggetto di inondazioni a seguito di piogge intense. È quindi necessario studiare i rischi di inondazione. A tal fine si considerano i due parametri principali, come livelli di piena potenziali e velocità della piena. I DTM sono stati usati per simulare le inondazioni. In ogni simulazione, con una data quantità di pioggia, si possono calcolare le quantità d'acqua derivanti da diversi bacini, come descritto nel capitolo 13. Dopo aver considerato la capacità del fiume si può calcolare la quantità d'acqua che può essere accumulata. Inoltre può essere calcolata l'area soggetta ad inondazione. La figura 7.8 mostra un esempio di aree soggette ad inondazione simulate usando un DTM, con sovrapposte delle immagini satellitari.

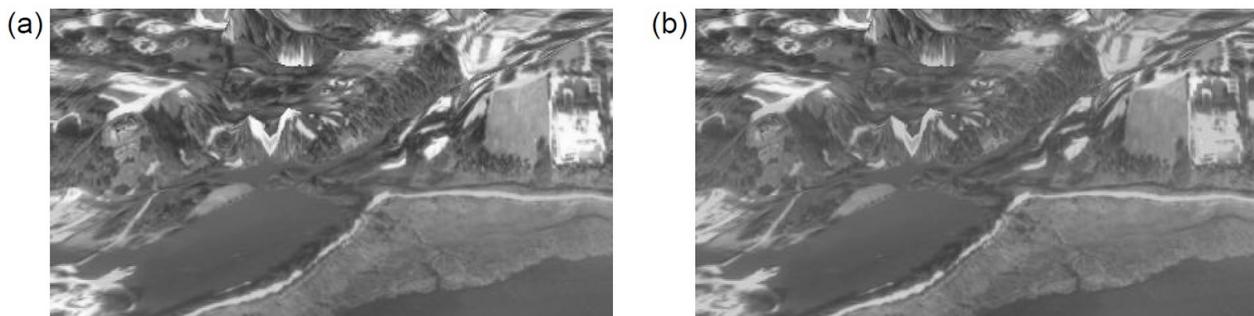


Figura 7.8: Aree di inondazione simulate con immagini satellitari sovrapposte.

7.4.4 GESTIONE DELL'AGRICOLTURA

Recentemente viene usata sempre più spesso l'espressione "precision farming". Significa che l'agricoltore può controllare la quantità di acqua, fertilizzante e pesticidi che vengono irrorate su differenti zone dei campi, basandosi sulle caratteristiche degli stessi, come il tipo e condizione del terreno, pendenza, condizione della coltura, e così via. La pendenza (e l'aspetto) sono informazioni ricavabili da un DTM. La pendenza è un fattore importante per l'erosione del terreno. In alcuni paesi in via di sviluppo le aree con forte pendenze sono ancora coltivate, causando quindi un'erosione del terreno importante. Questo era il caso, per esempio, della Cina. Alla fine degli anni 90 tuttavia il governo cinese ha

decretato che non è possibile coltivare alcun terreno che abbia pendenza oltre un certo valore. In questo modo è stata migliorato il problema dell'erosione.

7.5 NAVIGAZIONE MARITTIMA

La superficie topografica è solitamente osservata al di sopra del livello del mare, tuttavia anche la superficie del terreno che sta sotto è importante in molte applicazioni. La costruzione di modelli del terreno è spesso più difficile perché nel momento del campionamento la forma della superficie non è disponibile. Le osservazioni del fondo marino sono spesso fatte lungo le rotte delle navi, e ciò si traduce in una distribuzione fortemente anisotropica che richiede delle tecniche di interpolazione per poter ricostruire le superfici reali (Gold and Condal [21], 1995). Tuttavia l'applicazione più importante dei DTM in ambito marittimo è senza dubbio la navigazione. Essa è di solito basata sull'uso di cartine su carta o elettroniche, ma attualmente si sta considerando l'uso di rappresentazioni 3D (Gold et al. [23], 2004). La figura 7.9 mostra la vista del navigatore nel canale East Lamma, ad Hong Kong, sovrapposto ai simboli cartografici.

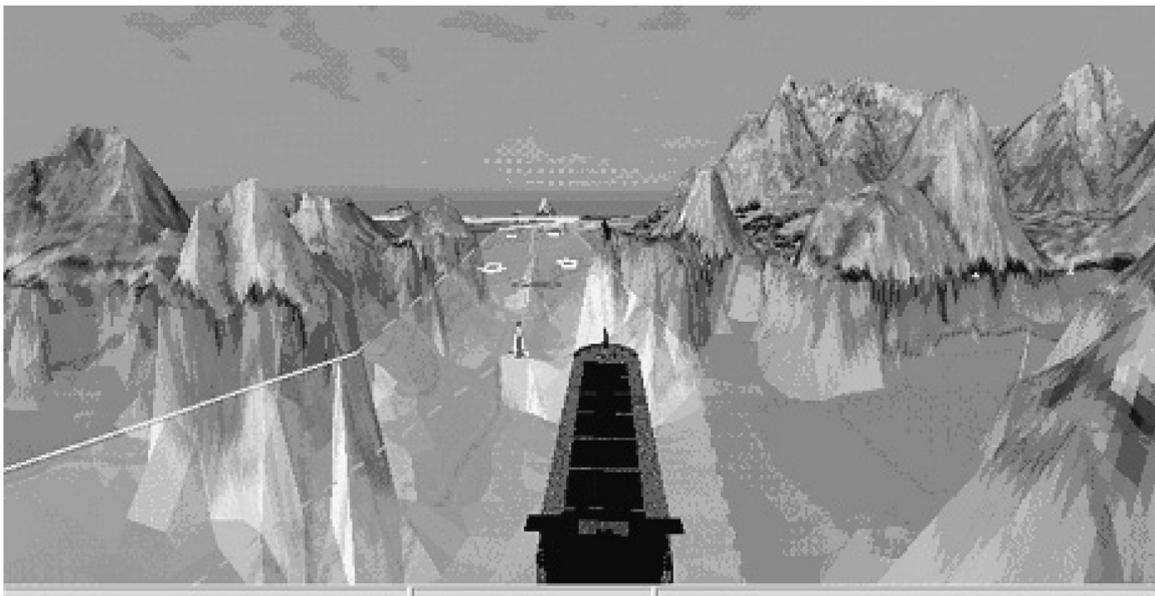


Figura 7.9: Vista del navigatore del canale East Lamma

La figura 7.10 mostra l'utilizzo di contorni di sicurezza dinamici 3D, che mettono in evidenza il canale di sicurezza per un certo pescaggio della nave.

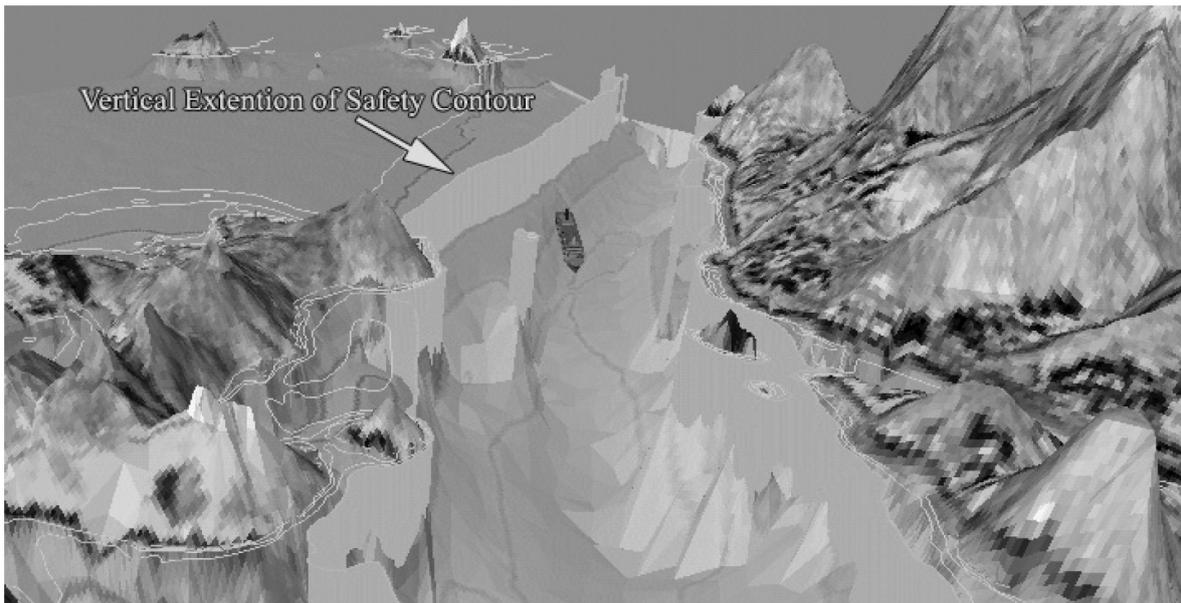


Figura 7.10 Curve di livello del canale di sicurezza basate su topografia subacquea.

La figura 7.11 mostra come l'intersezione dinamica tra il terreno con la superficie dell'onda di marea viene usata in un sistema per evitare le collisioni, con il diagramma di Voronoi (derivato dal TIN) come base.

Le collisioni sono possibili solo tra generatori di celle adiacenti.

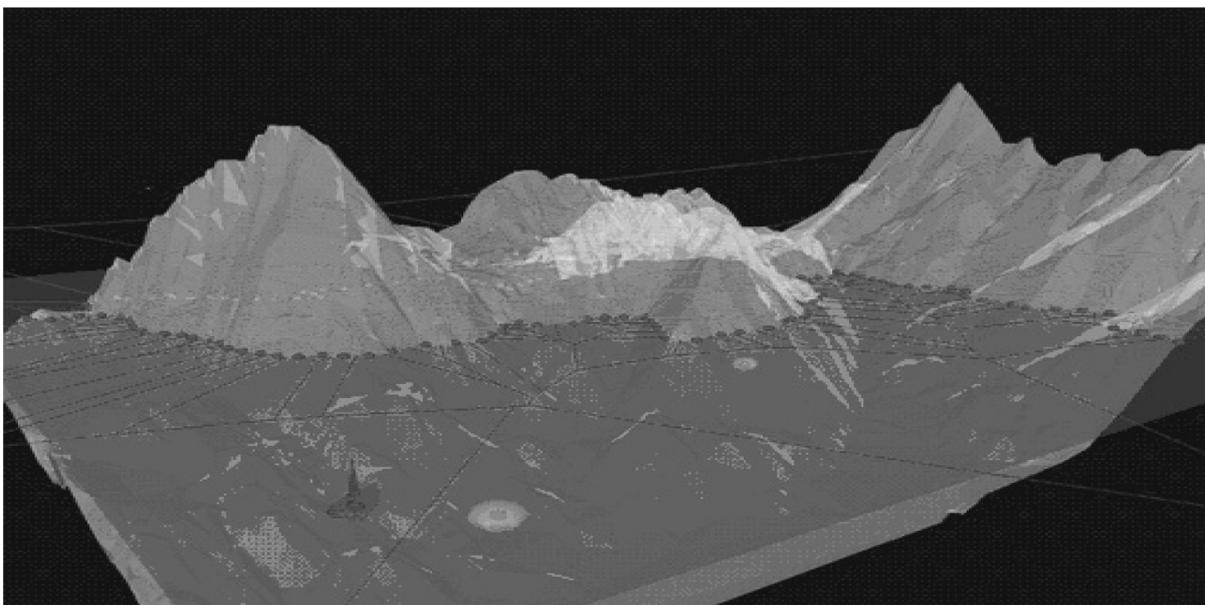


Figura 7.11: L'intersezione tra il terreno e la superficie del mare: ricerca della collisione utilizzando il diagramma dinamico di Voronoi.

7.6 ALTRE APPLICAZIONI

Nella pianificazione e design di paesaggi, l'analisi di impatto visuale (VIA) viene applicata ai nuovi design. Cioè i design sono sovrapposti su un DTM per creare un paesaggio virtuale che viene poi analizzato visivamente. I DTM possono anche essere usati per la pianificazione di reti di comunicazione. Si possono affrontare problemi come angoli morti e aree cieche nella selezione di stazioni di trasmissione radio o tv. Siccome un DTM è un modello fondamentale della superficie terrestre, ha anche applicazioni in scienze legate alla Terra.

Altre possibili applicazioni sono la riproduzione di ambienti reali in ambito ludico nella creazione di paesaggi 3D all'interno di videogame. È infatti possibile dare in pasto file DTM a specifici programmi 3D, realizzati dalla stessa software house sviluppatrice del gioco, i quali saranno in grado di leggere le curve di livello all'interno del DTM dato e di trasformarle, in maniera grossolana, in paesaggio grafico 3D.

Tale paesaggio dovrà poi essere rifinito manualmente ma, grazie al DTM, buona parte del lavoro sarà già stata svolta.

Anche nel ambito del soccorso pubblico, come può essere più specificatamente la specializzazione TAS (Topologia Applicata al Soccorso) del Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco (C.N.VV.F.), può trarre vantaggio dall'utilizzo dei DTM.

Questo servizio supporta l'attività del C.N.VV.F. con l'impiego di informazioni geografiche avanzate riferite agli scenari emergenziali, in particolare, agli scenari che richiedono l'intervento del Sistema nazionale di protezione civile. Il Servizio TAS ha come obiettivo il miglioramento dell'efficacia e dell'efficienza delle attività del Corpo attraverso l'impiego di risorse umane e strumentali per la produzione, l'analisi e l'impiego di dati geo-referenziati utili alla gestione delle emergenze ed alla documentazione delle operazioni di soccorso.

Esso è in grado di riprodurre per le esigenze del Corpo lo strumento applicativo denominato Geographic Information System (GIS) il quale è largamente utilizzato dagli organismi che si occupano della gestione territoriale.

Il Servizio TAS si è rilevato determinante nella mobilitazione delle Colonne Mobili, per il successo di attività di soccorso complesse; ha inoltre la funzione di ufficio cartografico del C.N.VV.F. e cura la gestione di tutti i dati geografici del C.N.VV.F. curandone gli standard realizzativi.

Il Servizio TAS viene mobilitato nelle prime fasi di emergenze rilevanti per permettere la ricostruzione dello scenario ed il monitoraggio delle fasi operative fornendo un indispensabile supporto alla linea decisionale.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Ackermann, F. 1979. The accuracy of digital terrain models. In: Proceedings of 37th
- [2] Albertz, J., Li, Z., and Zhang, W. 1999. Orthoimages from air-borne scanner images using flight parameters. *The Geomatics Journal of Hong Kong*, 1(2):13–24.
- [2] Brassel, K. and Reif, D. 1979. Procedure to generate Thiessen polygon. *Geographical Analysis*, 11(3):289–303.
- [3] Chen, Z. and Guevara, J. 1987. Systematic selection of very important points (VIP) from digital terrain model for constructing triangular irregular networks. *Auto Carto*, 8: 50–56.
- [4] Clarke, A., Gruen, A., and Loon, J. 1982. A contour-specific interpolation algorithm for DEM generation. *International Archive of Photogrammetry and Remote Sensing*, 14(III):68–81.
- [5] Collins, S.H. 1968. Stereoscopic orthophoto maps. *Canadian Surveyor*, 22(1):167–176.
- [6] Cryer, J. 1986. *Time Series Analysis with Minitab*. Duxbury Press, Boston.
- [7] Dakowicz, M. and Gold, C.M. 2002. Extracting meaningful slopes from terrain contours. In: Sloot, P.M.A., Tan, C.J.K., Dongarra, J.J., and Hoekstra, A.G. (Eds.), *Proceedings: Computational Science—ICCS 2002, Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 2331, Springer-Verlag, Berlin, pp. 144–153.
- [8] Delaunay, B. 1934. Sur la sphere vide. *Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR, Classe des Sciences Mathématiques et Naturelles*, 7:793–800.
- [9] DiBiase, D. 1990. Visualization in earth sciences. *Earth and Mineral Sciences, Bulletin of the College of Earth and Mineral Sciences, PSU*, 56(2):13–18.
- [10] DiBiase, D.W., MacEachren, A.M., Krygier, J.B., and Reeves, C. 1992. Animation and the role of map design in scientific visualisation. *Cartography and Geographic Information Systems*, 19:201–214, 265–266.

- [11] Dikau, R. 1989. The application of a digital relief model to landform analysis in geomorphology. In: Raper, J. (Ed.), *Three Dimensional Applications in Geographic Information Systems*, Taylor & Francis, London, pp. 51–78.
- [12] Ebner, H., Hofmann-Wellenhof, B., Reiss, P., and Steidler, F. 1980. HIFI — A minicomputer program package for height interpolation by finite elements. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 23(IV):202–241
- [13] Evans, I. 1981. General geomorphimetry. In: Goudie, A. (Ed.), *Geomorphological Techniques*, Geoge Allen & Unwin, Boston, MA, pp. 31–37.
- [14] Evans, I. 1972. General geomorphometry: Derivatives of altitude, and the descriptive statistics. In: Chorley, R. (ed.), *Spatial Analysis in Geomorphology*, London: Methuen & Co. Ltd, 17–90.
- [15] Eyton, J.R. 1984. Raster contour. *Geo-Processing*, 2:221–242
- [16] Frederiksen, P. 1981. Terrain analysis and accuracy prediction by means of the Fourier transformation. *Photogrammetria*, 36:145–157.
- [17] Frederiksen, P., Jacobi, O., and Justesen, J. 1978. Fourier transformation von hohenbeobachtungen. *ZFV*, 103:64–79.
- [18] Frederiksen, P., Jacobi, O., and Kubik, K. 1983. Measuring terrain roughness by topographic dimension. In: *Proceedings of International Colloquium on Mathematical Aspects of DEM*, Stockholm, Sweden.
- [19] Frederiksen, P., Jacobi, O., and Kubik, K. 1986. Optimum sampling spacing in digital elevation models. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 26(3/1):252–259.
- [20] Gold, C.M. 1989. Surface interpolation, spatial adjacency and GIS. In: Raper, J. (Ed.), *Three Dimensional Applications in GIS*, Taylor and Francis, London, pp. 21–36.
- [21] Gold, C.M. and Condal, A.R. 1995. A spatial data structure integrating GIS and simulation in a marine environment. *Marine Geodesy*, 18:213–228.

- [22] Gold, C.M. and Cormack, S. 1987. Spatially ordered networks and topographic reconstructions. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1:137–148.
- [23] Gold, C.M., Chau, M., Dzieszko, M., and Goralski, R. 2004. A window into the real world. In: *Proceeding Conference on Spatial Data Handling*, Leicester, U.K., August 2004.
- [24] Gouraud, H. 1971. Illumination of computer-generated pictures. *Communication of ACM*,18(60):311–317.
- [25] Hardy, R. 1971. Multiquadratic equations of topography and other irregular surfaces. *Journal of Geophysical Research*, 76:1905–1915.
- [26] Helava, U.V. 1958. New principles of photogrammetric plotters. *Photogrammetria*,14(2):89–96.
- [27] Jensen, J.R. 1980. Stereoscopic statistical maps. *The American Cartography*, 7(1):25–37.
- [28] Jiang, B. 1996. Cartographic visualization: analytical and communication tools. *Cartography*, 25(2):1–11.
- [29] Kraak, M.J. and Brown, A. 2001. *Web Cartography: Developments and Prospectus*. Taylor & Francis, London.
- [30] Kubik, K. and Botman, A. 1976. Interpolation accuracy for topographic and geological surfaces. *ITC Journal*, 1976-2:236–274.
- [31] Leberl, F. and Olson, D. 1982. Raster scanning for operational digitizing of graphical data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 48(4):615–627.
- [32] Ley, R. 1986. Accuracy assessment of digital terrain models. *Auto-Carto London*, 1:455–464.
- [33] Li, D. 1998. *Lecture on New Technology of Photography Measurement*. Press of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping, Wuhan, China.
- [34] Li, Z.L. 1992b. Variation of the accuracy of digital terrain models with sampling interval. *Photogrammetric Record*, 14(82):651–660.

- [35] Li, Z.L. 1990. Sampling Strategy and Accuracy Assessment for Digital Terrain Modelling. Ph.D. thesis, The University of Glasgow.
- [36] Makarovic, B. 1972. Information transfer on construction of data from sampled points. *Photogrammetria*, 28(4):111–130.
- [37] Makarovic, B. 1973. Progressive sampling for DTMs. *ITC Journal*, 1973-4:397–416.
- [38] Makarovic, B. 1975. Amended strategy for progressive sampling. *ITC Journal*, 1975-1:117–128.
- [39] Makarovic, B. 1977. Regressive rejection — a digital data compression technique. In: *Proceedings of ASP/ACSM Fall Convention*, Little Rock, October 1977.
- [40] Makarovic, B. 1979. From progressive sampling to composite sampling. *Geo-processing*, 1:145–166.
- [41] Makarovic, B. 1984. A test on compression of digital terrain model data. *ITC Journal*, 1983-2:133–138.
- [42] Mandelbrot, B. 1981. *The Fractal Geometry of Nature*. W.H. Freeman and Company, San Francisco, CA.
- [43] Mark, D. 1975. Geomorphometric parameters: a review and evaluation. *Geografiska Annaler*, 57A:165–177.
- [44] Meyer, W. 1985. *Concepts of Mathematical Modeling*. McGraw-Hill Book Company, New York.
- [45] Miller, C. and Laflamme, R. 1958. The digital terrain model — theory and applications, *Photogrammetric Engineering*, 24:433–442.
- [46] Petrie, G. 1990a. Modelling, interpolation and contouring procedures. In: Petrie, G. and Kennie, T. (Eds.), *Terrain Modelling in Surveying and Civil Engineering*, Whittles Publishing, Caithness, England, pp. 112–137.
- [47] Petrie, G. and Kennie, T. (Eds.) 1990. *Terrain Modelling in Surveying and Civil Engineering*. Whittles Publishing, Caithness, England.

- [48] Peucker, T. 1972. *Computer Cartography*. Association of American Geographer, Commission on College Geography, Washington, DC.
- [49] Phong, B.-T. 1975. Illumination for computer-generated pictures. *Communication of ACM*, 18(6):311–317.
- [50] Roberts, R. 1957. Using new methods in highway location. *Photogrammetric Engineering*, 23:563–569.
- [51] Saaty, T. and Alexander, J. 1981. *Thinking with Models*. Pergamon Press, Oxford.
- [52] Sibson, R. 1980. A vector identity for the Dirichlet tessellation. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 87:151–155.
- [53] Sibson, R. 1981. A brief description of natural neighbor interpolations. In: Baruett, V. (Ed.), *Interpreting Multivariate Data*, John Wiley, Chichester, U.K., pp. 21–36.
- [54] Strahler, A. 1956. Quantitative slope analysis. *Bulletin of the Geological Society of America*, 67:571–596.
- [55] Thiessen, A.H. 1911. Precipitation averages for Large Areas. *Monthly Weather Review*, 39:1082–1084.
- [56] Turner, H. 1997. A comparison of some methods for slope measurement from large-scale air photos. *Photogrammetria*, 32:209–237.
- [57] van Kreveld, M. 1996. Efficient methods for isoline extraction from a TIN. *International Journal of Geographical Information Systems*, 10:523–540.
- [58] Wentworth, C. 1930. A simplified method for the determining the average slope of land surface. *American Journal of Science*, 20:184–194.
- [59] Zhu, G., Wang, J., and Jiang, W. 1999. *Digital Map Analysis*. Publishing House of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping, Wuhan, China.
- [60] Zwicker, M. and Gross, M.H. 2000. *A Survey and Classification of Real Time Rendering Methods*. Mitsubishi Electric Research Laboratories, Cambridge

Research Center. <http://www.merl.com/papers/TR2000-09/>.
<http://www.merl.com/papers/TR2000-09/>.