

Ovidio Salvetti, Luciano Azzarelli

Diagnostica per Immagini

*Centro Studi I CAPPUCCINI
della
Cassa di Risparmio di San Miniato*

S. Miniato (Pisa), 10-11 Aprile 1997

Vigo Corsi Editore, Pisa



Comitato Scientifico

*Ovidio Salvetti
Luciano Azzarelli
Massimo Chimenti*


Organizzazione

Ettore Ricciardi

Segreteria e Grafica

Marirosa Ballati



 *Consiglio Nazionale delle Ricerche*
Istituto di Elaborazione della Informazione

e



Esprit HPCN

High Performance Computing and Networking

La presente Monografia raccoglie i contributi presentati allo workshop 'Diagnostica per Immagini', organizzato dall'Istituto di Elaborazione della Informazione del CNR di Pisa nell'ambito del Progetto "HIPERTEX: High Performance System for Textile Evaluation," finanziato dal programma EC ESPRIT High Performance Computing and Networking (HPCN).

L'immagine digitale costituisce per molte discipline tecnico-scientifiche una componente essenziale dell'iter diagnostico, consentendo di vedere e comprendere la natura interna di strutture oppure fenomeni statici o dinamici di vario tipo. L'impiego delle attuali tecnologie informatiche e di comunicazione rende possibile generare ed ottenere in tempi brevissimi, anche in tempo reale, immagini di notevole qualità, sia in termini di interpretazione soggettiva che di accuratezza e precisione nella quantizzazione.

Le problematiche legate alla diagnostica per immagini si presentano assai complesse e diversificate a causa della interdisciplinarietà spesso necessaria per la progettazione, la messa a punto e l'utilizzo delle particolari metodiche.

Le giornate dedicate a *Diagnostica per immagini* sono state rivolte alla presentazione di alcune possibilità attuali e prospettive future nel settore del trattamento avanzato di segnali e immagini sia di interesse in campo scientifico che industriale.

A partire da una trattazione degli aspetti più rilevanti del controllo di qualità di materiali e manufatti flessibili (L. Azzarelli), viene successivamente presentata una ricerca avanzata per l'analisi della distribuzione della temperatura all'interno di una camera di combustione (M. Bramanti); quindi sono illustrate esperienze industriali nei campi dell'indagine di strutture civili (A. Pasquale), del controllo visivo di qualità nel settore tessile (M. Barbieri), dell'applicazione di ispezioni termovisive per la conservazione e lo studio dei Beni Culturali (L. Rosi) e dell'uso e sviluppo di database multimediali (M. Cucchiara). Infine, vengono presentati i risultati di ricerche scientifiche svolte nell'ambito del monitoraggio ambientale, relativamente all'impiego della interferometria differenziale per lo studio della crosta terrestre (M. Tesauro) e alla elaborazione delle immagini come strumento di indagine nell'osservazione della terra dallo spazio (M. Calamia).



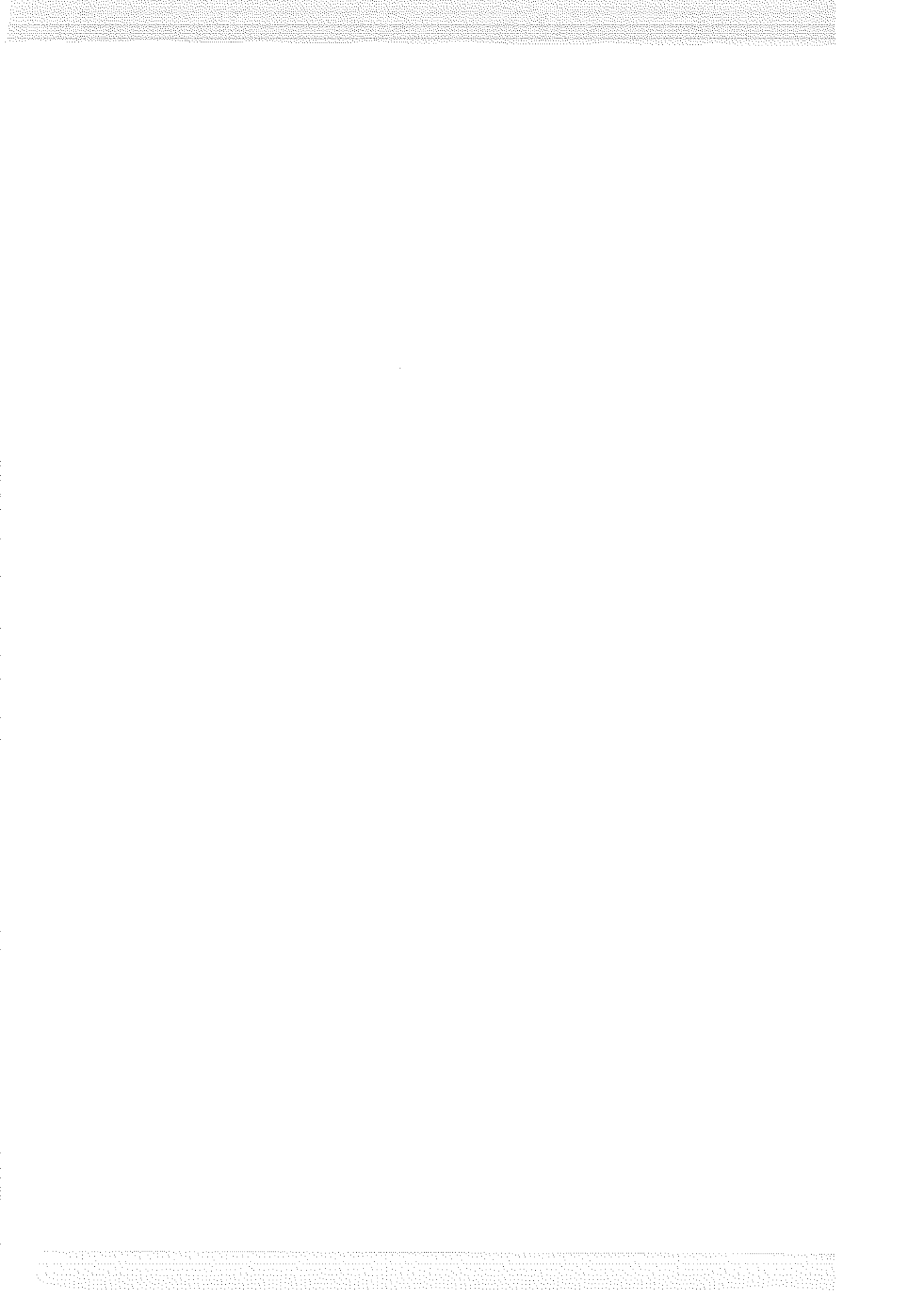
Indice

Tecniche, metodiche e strutture informatiche per il controllo di qualità di manufatti tessili	1
<i>L. Azzarelli, M. Chimenti, S. Minutoli, O. Salvetti</i>	
La ricostruzione tomografica di mappe termiche all'interno del volume di caldaia come mezzo diagnostico del processo di combustione	27
<i>M. Bramanti, E. Salerno, S. Pasini</i>	
Indagini nelle strutture civili	35
<i>A. Pasquale</i>	
Controllo visivo di qualità nel settore tessile	42
<i>M. Barbieri</i>	
Immagini termovisive per la conservazione e lo studio dei Beni Culturali: Esperienze	49
<i>L. Rosi</i>	
DB multimediali nel settore della diagnostica per immagini	56
<i>M. Cucchiara</i>	
L'interferometria differenziale per la misura degli spostamenti superficiali della crosta terrestre	62
<i>M. Tesauro</i>	
L'osservazione della terra dallo spazio: l'immagine come strumento di indagine	74
<i>M. Calamia, A. Rapaccini, A. Mori</i>	

Finito di stampare presso la
Lito-Tipografia VIGO CURSI Pisa
nel mese di Luglio 1999

Indice

Tecniche, metodiche e strutture informatiche per il controllo di qualità di manufatti tessili	1
<i>L. Azzarelli, M. Chimenti, S. Minutoli, O. Salvetti</i>	
La ricostruzione tomografica di mappe termiche all'interno del volume di caldaia come mezzo diagnostico del processo di combustione	27
<i>M. Bramanti, E. Salerno, S. Pasini</i>	
Indagini nelle strutture civili	35
<i>A. Pasquale</i>	
Controllo visivo di qualità nel settore tessile	42
<i>M. Barbieri</i>	
Immagini termovisive per la conservazione e lo studio dei Beni Culturali: Esperienze	49
<i>L. Rosi</i>	
5600	
<i>M. Cucchiara</i>	
L'interferometria differenziale per la misura degli spostamenti superficiali della crosta terrestre	62
<i>M. Tesauro</i>	
L'osservazione della terra dallo spazio: l'immagine come strumento di indagine	74
<i>M. Calamia, A. Rapaccini, A. Mori</i>	



Tecniche, metodiche e strutture informatiche per il controllo di qualità di manufatti tessili

Luciano Azzarelli, Massimo Chimenti, Salvatore Minutoli, Ovidio Salvetti

CNR - Istituto di Elaborazione della Informazione
Via Santa Maria 46, I-56126 Pisa

Sommario. Nel presente lavoro vengono esaminati gli aspetti generali e più rilevanti del controllo di qualità di materiali e manufatti tessili. In particolare vengono analizzati i principali requisiti tecnici ed operativi relativi alle metodiche di ispezione e viene definita una possibile architettura di una struttura in grado di soddisfare le specifiche esigenze applicative industriali garantendo nel contempo soddisfacenti condizioni di estendibilità e affidabilità. Nel lavoro vengono inoltre presentati alcuni risultati sperimentali di una specifica metodica di indagine sviluppata da un gruppo di ricerca dell'Istituto nell'ambito del Progetto europeo Esprit "Hipertex" (High Performance System for Textile Evaluation) e nell'ambito del Progetto Speciale del CNR "Un sistema automatico per la classificazione di difetti superficiali nell'industria manifatturiera".

1. Introduzione

Il controllo della qualità dei manufatti tessili è un processo di certificazione indispensabile per la valorizzazione dei prodotti e deve rispettare regole e procedure standard definite nel tempo congiuntamente dai produttori e dagli utilizzatori. L'attuale orientamento industriale verso un'automazione sempre più globale dei processi produttivi, ha indotto la necessità di riesaminare le metodiche di ispezione al fine di allineare l'efficienza e l'affidabilità dei controlli alle nuove e più impegnative richieste operative.

Nell'attuale prassi industriale, il controllo di qualità, inteso come verifica dell'aspetto superficiale del manufatto, viene svolto da ispettori specializzati ed è articolato nelle funzioni fondamentali di osservazione del materiale, di rilevamento delle eventuali anomalie, di interpretazione del tipo di difetto e di valutazione della sua rilevanza ai fini dell'utilizzo del manufatto.

L'automatizzazione del controllo di qualità implica l'impiego delle metodiche e tecniche numeriche proprie della diagnostica per immagini e della visione artificiale; in particolare queste metodiche, attualmente ampiamente applicate in diversificati settori industriali, biomedicali e scientifici, consentono nelle applicazioni di controllo di qualità l'esecuzione di valutazioni quantitative e oggettive a tutto vantaggio dell'affidabilità di ispezione.

In generale tutte le metodiche di indagine e di diagnosi non distruttiva per immagini, qualunque sia il settore di applicazione, pongono sempre problemi complessi relativi alla acquisizione dei dati e alla elaborazione delle informazioni la cui risoluzione può richiedere lo studio e l'impiego di tecnologie e di metodiche di indagine anche complesse e differenziate.

Nel settore tessile le difficoltà non derivano tanto dagli aspetti tecnologici e metodologici di ispezione e verifica, quanto invece dalla struttura superficiale dei tessuti e, soprattutto, dalla varietà della tessitura e colorazione che li contraddistinguono nonché dalla eterogeneità delle anomalie che possono essere presenti nei manufatti. La notevole variabilità di queste caratteristiche rende alquanto complessa la definizione di univoche specifiche tecniche ed operative indispensabili per la progettazione di una struttura di indagine sufficientemente adattabile nell'impiego. Si è reso quindi indispensabile svolgere un dettagliato studio di fattibilità, integrandolo con adeguate sperimentazioni di laboratorio, finalizzato sia alla individuazione dei necessari parametri di progettazione, sia alla catalogazione dei tessuti e dei difetti in classi relativamente omogenee per le quali sia quindi possibile definire univoche metodiche di indagine. Poiché la progettazione di ispezione è molto dipendente dal tipo di materiale sul quale deve essere svolto il controllo, lo studio è stato svolto prendendo in considerazione due tipi di tessuto in cotone di grande produzione: tessuti di tipo flat uniformi monocolori e tessuti di tipo denim che, pure essendo realizzati con filati bicolori, sono da considerarsi un sotto insieme del primo a causa delle analoghe tecniche di tessitura ortogonale.

2. Tipologie e caratteristiche delle anomalie

La particolare struttura superficiale di questi manufatti denim e flat, caratterizzata da un disegno regolare e ripetitivo che dipende sia dalla modalità di tessitura sia dalla composizione, densità e colore del filato, può rendere il processo di controllo molto complesso e articolato soprattutto se l'ispezione deve essere eseguita nel tempo reale di produzione.

Le anomalie possono essere introdotte nel manufatto durante l'intero ciclo produttivo; possono quindi derivare sia dal processo di tessitura, sia dalle successive lavorazioni alle quali il manufatto viene sottoposto (rasatura, colorazione, finissaggio ecc.), sia, anche se più limitatamente, dal processo di controllo vero e proprio (buchi, strappi, macchie ecc.). In particolare i difetti possono essere catalogati secondo la loro genesi: difetti dovuti a disfunzioni della tessitura (ad esempio fili mancanti, annodati o allentati), o ad agenti esterni (ad esempio macchie, decolorazioni, incisioni, strappi ecc.). Nel primo caso le anomalie sono in generale caratterizzate da modeste e locali variazioni geometriche del disegno di tessitura che però non comportano significative variazioni radiometriche, que-

ste invece sono tipiche delle anomalie del secondo tipo. Sulla base della loro morfologia generale i difetti possono quindi essere raggruppati in un limitato numero di fondamentali categorie che individuano la tipologia delle anomalie e la loro rilevanza ai fini della commercializzazione del manufatto; a ciascuna macro-classe possono appartenere più tipi di difetti che si differenziano per modeste variazioni della loro struttura interna la cui descrizione dettagliata può, in linea di principio, consentire una micro-classificazione utile essenzialmente per l'individuazione dell'origine del singolo difetto.

Per tessuti uniformi non stampati, caratterizzati dalla tessitura di filati dello stesso colore o bicolori, le procedure di controllo risultano più semplici e più efficienti rispetto a quelle necessarie per l'ispezione di manufatti a più colori o stampati; tuttavia anche in questi casi apparentemente favorevoli il numero dei possibili difetti per categoria di tessuto supera la cinquantina e risultano essere notevolmente differenziati nella morfologia, direzione di propagazione, aspetto e visibilità. In linea generale per le tipologie di tessuto menzionate si possono distinguere le seguenti tre principali categorie di difetti riferite fondamentalmente alle caratteristiche geometriche e alla direzione di propagazione delle anomalie.

- A) *Difetti elongati di ordito*: sono in genere dovuti a disfunzioni che si verificano durante la tessitura e si presentano nella direzione longitudinale della pezza di tessuto con forma, dimensioni ed evidenza molto variabili.
- B) *Difetti elongati, di trama*: anche questo tipo di anomalia è determinato da errori di tessitura ma si presentano nella direzione trasversale del tessuto con geometria, dimensione e forma alquanto differenziate.
- C) *Difetti di area*: queste anomalie sono in genere determinate da mal funzionamenti delle diversificate strutture meccaniche o da sostanze chimiche impiegate nelle varie lavorazioni del materiale tessile, si presentano con una distribuzione casuale e con dimensioni, forma e contrasto variabili.

A queste tre macro classi principali si possono aggiungere altre tre categorie di difetti che possono essere considerati come casi particolari di quelli appartenenti alle precedenti ma che possono richiedere metodiche di rivelazione e di analisi più specializzate.

- D) *Difetti elongati diagonali*: sono dovuti a anomalie di tessitura o a disfunzioni di lavorazione.
- E) *Difetti di aspetto*: sono determinati da un'alta densità di piccoli difetti di trama, di catena o di area, questi difetti sono insignificanti ai fini valutativi se visti singolarmente, tuttavia se la loro densità per unità di superficie è elevata modificano l'aspetto generale del tessuto e quindi l'insieme dei singoli difetti deve essere segnalato come un unico difetto globale.
- F) *Difetti generali di tessitura*: derivano da particolari disfunzioni del telaio e comportano una variazione della densità e ortogonalità di tessitura.

A titolo indicativo, nella tabella 1 è stato riportato un elenco dei difetti più ricorrenti nei tessuti di tipo denim e flat ricavato da una indagine svolta dalla industria tessile LEGLER S.p.A. nell'ambito del progetto europeo HIPERTEX; nella tabella ad ogni tipo di difetto è stata associata la corrispondente categoria di macro-classificazione T.

description	T	description	T	description	T
Dead or immature cotton	C	Missing pick	B	Tangle	C
Neps	C	Broken pick	B	Hole	C
Slub in warp	A	Slack pick / Snarls / Loopy filling	B	Cut / Tears	C
Coarse end	A	Tight pick	B	Burned place	C
Wrong number in end	A	Filling floats	B	Reediness	C
Dirt or soiled end	A	Jerk-in	B	Oil spot	C
Foreign fibre in warp	A	Loom waste	B	Water spot / Stain	C
Double end	A	Wild filling	B	Dirt stain	C
Missing end	A	Wrong warping	B	Crease	C
Broken end	A	Thick place / Uneven filling	B	Sanforize undulation	C
Slack end	A	Reed misdraw	B	Bruise / Temple bruise	C
Tight end	A	Harness misdraw	B	Broken selvedge	C
Filling slub	B	Harness balk	B	Rolled selvedge	C
Coarse pick	B	Harness breakdown	B	Irregular cloth structure	C
Wrong number in weft	B	Loom stop / Starting bar	B	Irregular width	C
Dirty or soiled pick	B	Knot	C	Irregular raising	C
Foreign fibre in weft	B	Hard size	C	Irregular shearing	C
Double pick	B	Mechanical bump	C	Colour band	

Tab. 1: Lista dei principali difetti nei tessuti denim e flat.

3. Metodi e procedure di indagine

Nella generalità delle applicazioni attuali, il controllo di qualità è di tipo visivo ed è eseguito in modo interattivo sia che venga svolto nella linea di produzione sia fuori linea in un tempo differito. In entrambi i casi l'ispettore ha la possibilità di controllare le modalità di movimentazione del manufatto adottando, a propria discrezione, le più convenienti metodologie di osservazione al fine di ottimizzare la rilevabilità delle eventuali anomalie (ad esempio illuminando e osservando il tessuto sotto diversi angoli di visuale); in particolare nei casi di dubbia interpretazione l'ispezione può essere sospesa al fine di consentire l'esecuzione di eventuali controlli più dettagliati adottando eventualmente anche diversificate metodiche di indagine.

Per l'automatizzazione di una struttura di indagine, in grado di operare sui materiali grezzi e sui materiali finiti direttamente sulle linee di produzione oppure sulle apposite linee di ispezione, si possono individuare due diversi approcci architettonici basati sull'impiego di metodiche di ispezione semiautomatiche o massimamente automatiche.

Controllo di qualità semiautomatico. In questo caso il controllo di qualità è articolabile in

due separati processi sequenziali: uno di tipo automatico mediante il quale, nel tempo reale di scorrimento del materiale, vengono acquisite e monitorate le immagini del tessuto, rilevate le anomalie strutturali, estratti i parametri geometrici e radiometrici che caratterizzano le macro-classi e predisposto un archivio digitale di immagini relative alle zone rilevate come anomale; uno interattivo svolto fuori linea da un ispettore per l'esecuzione di indagini più dettagliate sulle immagini in precedenza archiviate. In quest'ultimo processo, l'interpretazione e la valutazione possono essere facilitate impiegando opportune procedure di elaborazione delle immagini del manufatto al fine di modificarne l'aspetto esaltando le caratteristiche strutturali superficiali; inoltre la valutazione può essere semplificata mediante il confronto visivo o, se possibile, automatico con atlanti di immagini di difetti di riferimento.

Questo tipo di modalità operativa presenta rilevanti vantaggi: l'eliminazione della continua osservazione che costituisce la parte più impegnativa e onerosa del controllo di qualità, un buon livello di fattibilità, elevata adattabilità a diversificati contesti applicativi, un significativo aumento dell'oggettivazione dei controlli e della conseguente affidabilità della certificazione.

Controllo di qualità automatico. La completa automazione del processo deve, per quanto possibile, eliminare l'intervento umano al fine di ottenere una affidabile e completa oggettività di ispezione, incrementare la velocità di esecuzione del processo e consentire la conseguente riduzione dei costi complessivi di esercizio e di produzione.

In questa modalità di ispezione il processo di "osservazione artificiale" può essere identico a quello adottato nel controllo semiautomatico; diversamente i processi di interpretazione, valutazione, e validazione pure emulando quelli adottati nell'ispezione interattiva devono essere opportunamente specializzati e possono presentare diversi livelli di aleatorietà. In particolare l'automatizzazione di questi processi impone, a parità di requisiti e di vincoli tecnici imposti dallo specifico controllo di qualità, l'inarrestabilità della linea di produzione; conseguentemente non è possibile interagire con le modalità di movimentazione e quindi tutte le operazioni devono essere eseguite in linea in tempi rigidamente predefiniti e non modificabili. La realizzabilità del processo di ispezione è quindi condizionata pesantemente dalla possibilità di individuazione e definizione di univoche e affidabili procedure diagnostiche basandosi eventualmente anche sull'ausilio di una base di conoscenze definite a priori.

Limitandolo unicamente agli aspetti procedurali essenziali, il processo di ispezione, di tipo automatico o semiautomatico, deve svolgere tre funzioni fondamentali come indicato in figura 1: l'acquisizione delle immagini diagnostiche, l'individuazione delle zone anomale eventualmente presenti, la rivelazione, l'analisi, la descrizione e la classificazione dei difetti.

Le metodiche e le procedure di acquisizione sono condizionate da aspetti di tipo tecnico relativi fondamentalmente alle dimensioni del materiale da esaminare, ai parametri di risoluzione richiesti dalla applicazione e ai vincoli di velocità di spostamento del tessuto; in linea di principio si può affermare che questo processo è attivabile sia nelle procedure di indagine interattive, sia in quelle automatiche, purché in fase di progettazione si preveda una adeguata modularità hardware e software.

Le metodiche di rivelazione sono condizionate dalla tipologia del materiale, dalle caratteristiche morfo-radiometriche delle anomalie e dalle condizioni operative imposte dal-

la procedura di ispezione; in linea di principio anche questo tipo di processo può essere definito in modo da garantire una applicabilità di tipo generale.

Il processo di analisi è finalizzato alla classificazione dei difetti che può essere articolata in due procedure funzionali indipendenti e non necessariamente sequenziali.

In un primo livello una analisi di tipo radiometrico deve eseguire la macro caratterizzazione delle zone anomale classificandole nel limitato numero di categorie indicate nel capitolo precedente: questo tipo di classificazione può già essere sufficiente per i processi di ispezione che richiedono l'identificazione dei difetti e non una loro descrizione dettagliata che in genere ha poca influenza sulla certificazione di qualità del prodotto.

In un secondo livello una analisi di tipo strutturale, eseguita sui sotto-insiemi di dati immagine relativi alle zone individuate come anomale nel primo livello, deve fornire una descrizione dettagliata dei difetti classificandoli secondo la loro morfologia nei vari tipi di difetto indicati nella tabella 1: questo tipo di classificazione è sicuramente molto più complessa sia dal punto di vista algoritmico, sia da quello procedurale e non è sempre indispensabile; tuttavia può risultare necessaria in quelle applicazioni industriali che estendono il controllo di qualità all'intero processo produttivo, dalla tessitura alla finitura, con la finalità di individuare anche l'origine dei difetti in modo di consentire sia interventi di recupero del manufatto prima di sottoporlo a successive lavorazioni, sia di intervenire a monte sui macchinari di produzione.

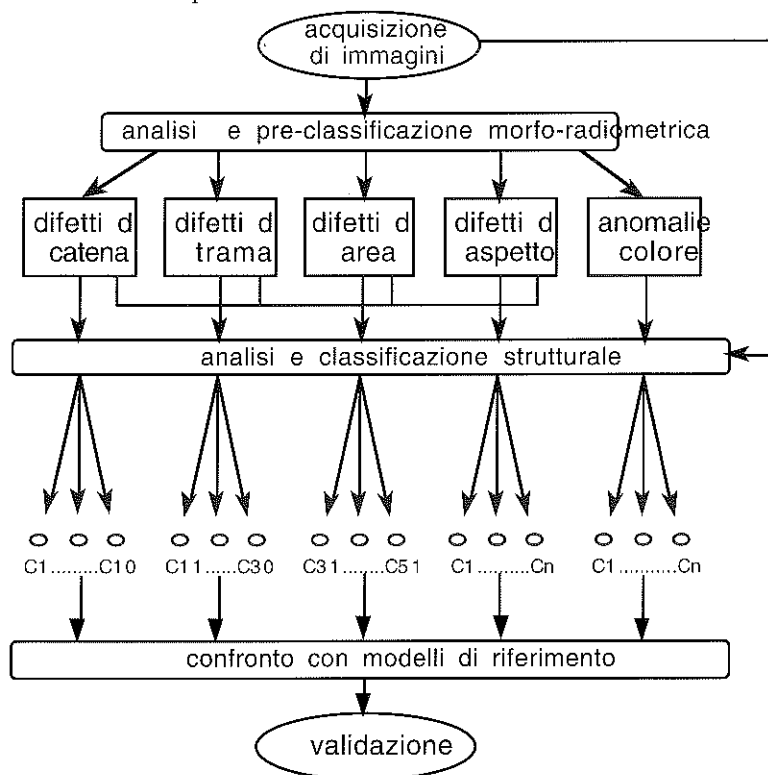


Fig. 1: Schema funzionale del processo diagnostico.

Questa doppia procedura di classificazione può risultare ridondante in un processo completamente automatico. Infatti se i vincoli imposti richiedono una classificazione dettagliata, dovrebbe essere sufficiente eseguire direttamente la classificazione di secondo livello anche se più complessa; tuttavia la classificazione di primo livello, può, per i controlli più rigorosi, fornire al secondo livello di classificazione informazioni utili alla sua semplificazione procedurale avendo già individuato la macro categoria di appartenenza.

4. Requisiti per l'acquisizione delle immagini diagnostiche

La struttura di ispezione deve essere dotata di un sotto-sistema specializzato per l'acquisizione delle immagini diagnostiche costituito da:

- uno o più dispositivi di rilevamento, che riprendano un campo corrispondente alle dimensioni del manufatto con le necessarie risoluzioni spaziale e radiometrica;
- uno o più dispositivi per l'illuminamento del campo di osservazione, il flusso luminoso deve essere regolabile in intensità, durata e angolo di incidenza al fine di mettere in risalto nel modo più opportuno la struttura superficiale del materiale e tutti gli eventuali difetti.

Le specifiche tecniche necessarie alla definizione del sotto sistema di acquisizione e delle procedure elaborative ad esso collegate devono essere ricavate da un insieme di requisiti utente, relativi alla tipologia dei materiali da esaminare e ai vincoli operativi imposti dalla specifica applicazione, e sulla base di requisiti tecnologici; in particolare questi ultimi riguardano :

1. la risoluzione spaziale delle immagini da analizzare;
2. la risoluzione fotometrica e la dinamica del trasduttore opto-elettronico;
3. la modalità di illuminamento e di esposizione del materiale da esaminare.

I punti sopra citati definiscono la quantità di dati ricavati da ogni immagine e il numero di bit necessario per la codifica di ciascun dato, e influiscono sulla definizione degli altri componenti del sistema, in particolare sulla dimensione della memoria in cui vanno caricati i dati da elaborare e sulla capacità computazionale del sistema di elaborazione.

1. *Risoluzione spaziale*: nel caso di controllo di qualità eseguito visivamente da parte di un ispettore, l'individuazione e la classificazione dei difetti sono in buona parte dipendenti dall'esperienza dell'osservatore e solo in parte dall'acuità visiva; nel caso di rilevamento automatico, la condizione primaria da soddisfare riguarda la frequenza di campionamento spaziale delle immagini, e quindi la dimensione dei pixel che compongono l'immagine digitale ricavata col processo di acquisizione. Se non si devono misurare con precisione delle particolari geometrie presenti sull'immagine, la dimensione p del pixel può essere definita in base alla dimensione d_{\min} del minimo difetto da rivelare; si ha dunque:

$$p = k \times d_{\min} \quad \text{dove: } k < 1.$$

Fissato p , il numero n di pixel contenuti in un campo di vista $A \times B$ è dato da:

$$n = A \times \frac{B}{p^2}.$$

2. *Risoluzione fotometrica e dinamica*: se il controllo del materiale non comporta anche una misurazione del colore, l'acquisizione di immagini può essere fatta impiegando un

trasduttore di tipo monocromatico (telecamera B/N).

Poiché i materiali da esaminare possono avere colori molto diversi, la riflettanza può variare notevolmente: di conseguenza, la dinamica dei trasduttori impiegati dev'essere tale che si ottengano segnali sufficientemente ampi per tutti i tipi di manufatti. Questa condizione può essere soddisfatta in due modi: utilizzando sensori con alta dinamica (3-4 decenni) e obiettivi con diaframma fisso; utilizzando sensori con dinamica contenuta (2 decenni) e variando l'esposizione in modo da ottimizzarla in funzione della riflettanza del campione. Nel primo caso la quantizzazione fotometrica dell'immagine può essere fatta su circa 2 byte e sono necessari componenti optoelettronici non standard e di costo sostenuto. Nel secondo caso la quantizzazione fotometrica dell'immagine viene espressa su 1 byte, si possono impiegare dispositivi standard, ma sono necessari degli interventi manuali o automatizzati per la regolazione ottimale delle condizioni di ripresa.

3. *Condizioni di illuminamento e di esposizione*: il campione in esame dev'essere illuminato in maniera tale da mettere in risalto gli eventuali difetti presenti su di esso, ottimizzando così il rapporto tra il segnale utile (difetto) e il segnale di fondo dell'immagine (zona non difettosa). In generale, i difetti di tipo più o meno allungato che si presentano come una modifica locale della struttura superficiale del materiale (ad esempio difetti di trama, di ordito, strappi, ecc.), possono essere messi in risalto orientando il dispositivo di illuminamento in modo che la luce incida sul campione lungo una direzione all'incirca perpendicolare al difetto stesso.

Un illuminamento di tipo trasversale esalta però anche la rugosità e il disegno tipici del materiale fino a rendere il contrasto simile ai difetti; inoltre, poiché l'orientamento dei difetti non è noto a priori e soprattutto non è univoco, non è possibile definire a priori la posizione del sistema di illuminamento rispetto al banco di supporto o alla direzione di scorrimento del materiale: il migliore tipo di illuminamento (di tipo uniforme, a luce radente o verticale, ecc.) può essere quindi determinato solo in via sperimentale, considerando sia la casistica dei difetti e la loro importanza, sia il tipo di algoritmi usati per l'analisi delle immagini acquisite.

L'esposizione del manufatto dal quale si deve ricavare la corrispondente immagine digitale, è definita dal prodotto $i_e \times t_e$, dove i_e è l'intensità del flusso luminoso e t_e è il tempo di esposizione. Poiché il manufatto è in movimento e conseguentemente l'ispezione è dinamica, si devono adottare tempi di esposizione molto piccoli per evitare di ricavare immagini mosse. Se v è la velocità di scorrimento del tessuto, il tempo t_e di esposizione deve soddisfare quindi la seguente condizione:

$$t_e = c \times \frac{p}{v}$$

dove: $c < 1$ e p è la dimensione del pixel pari al passo di campionamento.

Questo tempo può essere ottenuto mediante l'otturatore elettronico della telecamera e/o utilizzando flussi luminosi ad impulsi. In quest'ultimo caso si può ottenere la necessaria esposizione impiegando impulsi luminosi anche molto intensi, purché t_e/t sia sufficientemente piccolo rispetto al periodo di acquisizione t ; ciò consente di ottenere potenze medie di irraggiamento contenute entro i limiti massimi di dissipazione del dispositivo di illuminamento e di non danneggiare il materiale da esaminare.

5. Dispositivi di acquisizione

Per l'ispezione delle superfici possono essere impiegate telecamere analogiche o digitali basate su foto trasduttori di area o di linea ed interfacce di acquisizione hardware e software specializzate. Sul mercato è oggi disponibile una grande varietà di telecamere di linea o di area con caratteristiche di sensibilità e di risoluzione tali da soddisfare anche le più rigorose necessità di ispezione; il numero di telecamere necessarie per esaminare tutto il materiale nella direzione trasversale, e conseguentemente il numero di canali nei quali può essere parallelizzata l'elaborazione dei dati, dipende dalla dimensione trasversale del materiale, dal valore del passo di campionamento p e dalla risoluzione intrinseca del sensore. La scelta della modalità di acquisizione di un tessuto in movimento è condizionata da:

- velocità di traslazione del tessuto (supposta costante);
- risoluzione spaziale (dimensione del pixel);
- sincronizzazione della telecamera con la movimentazione e con l'elaborazione dei dati.

Supponendo di impiegare una telecamera standard CCIR si hanno le seguenti condizioni:

- 625 linee per quadro
- due semi quadri (campi) interlacciati
- un campo ogni 40 ms
- formato immagine 4:3

Per ogni immagine acquisita si ricava una matrice di $C \times R$ elementi, dove C è il numero di elementi per riga, o colonne, e R è il numero di righe; si ha quindi il formato: $C = 4/3 R$.

Poiché il tessuto è in movimento, per ogni acquisizione si può considerare solo uno dei due semi quadri, ottenendo così una matrice di dimensioni $C \times R/2$, con risoluzione verticale (lungo la direzione del movimento della stoffa) eguale a metà della risoluzione orizzontale).

Il campo ripreso con una telecamera CCIR dipende dall'ingrandimento dell'obiettivo ed ha in generale le dimensioni $l \times h$, con $l = 4/3 h$.

La risoluzione verticale dell'immagine digitale è data da:

$$p = h/(R/2)$$

Se la cadenza di acquisizione delle immagini vale Δt , in base alla velocità di scorrimento v la distanza Δs tra i punti centrali delle immagini è data da:

$$v \times \Delta t = \Delta s$$

Poiché si deve ispezionare la stoffa senza discontinuità si ha la condizione:

$$h \geq \Delta s$$

In particolare, se $h = \Delta s$ si acquisiscono zone di tessuto perfettamente adiacenti, altrimenti si ha una sovrapposizione. Se la telecamera produce un segnale video in base al sincronismo interno o esterno CCIR, la cadenza di acquisizione delle immagini deve essere obbligatoriamente un multiplo intero del periodo di quadro $Tr = 40$ ms; si ha quindi:

$$\Delta t = n \times Tr \quad \text{con } n = 1, 2, \dots$$

L'acquisizione delle immagini è dunque condizionata dai suddetti vincoli, che possono essere riassunti nella seguente disuguaglianza:

$$v/p \leq k \quad \text{dove } k = R/(2 \times n \times Tr)$$

In conclusione si possono considerare due casi a seconda dei vincoli imposti.

Velocità della stoffa prefissata, in questo caso la condizione da soddisfare diventa:

$$p \geq v/k$$

La risoluzione possibile per ottenere riprese di zone adiacenti non può essere più bassa di un valore che dipende dalla cadenza di acquisizione, la quale a sua volta dipende dal tempo necessario per elaborare i dati. In ogni caso, anche se il sistema è sufficientemente veloce, in modo da potere acquisire ed elaborare i dati alla cadenza di 40 ms ($n = 1$), la risoluzione massima è data da:

$$p = v \times 80\text{ms} / R$$

Risoluzione spaziale prefissata, in questo caso la condizione da soddisfare diventa:

$$v \leq k \times p$$

La velocità di scorrimento non può essere superiore ad un valore dipendente dalla velocità di elaborazione dei dati. Nel caso estremo, con $n = 1$, si ha:

$$v = p \times R/80 \text{ ms}$$

Attualmente, in uno dei formati più usati nei sensori di area si ha $C = 768$, $R = 572$: dall'acquisizione di un semiquadro si ottiene dunque una matrice di 768×288 elementi. I massimi valori possibili di risoluzione spaziale e velocità di scorrimento diventano quindi:

$$p \text{ (mm)} = 0.139 \text{ n} \times v \text{ (m/s)} \qquad v \text{ (m/s)} = p \text{ (mm)} \times 7.15/\text{n} \qquad (*)$$

Per ogni matrice il passo di campionamento lungo la colonne (direzione della trama) è doppio rispetto a quello lungo le righe (direzione dell'ordito). Si ottengono quindi due risoluzioni diverse che non sono giustificate dalla presenza nelle due direzioni di analoghe differenze delle frequenze spaziali, anzi al contrario dalla tabella 2, che riporta le densità di tessitura di trama e di ordito, appare evidente che in quest'ultima direzione le frequenze spaziali possono essere mediamente maggiori; inoltre le dimensioni e le strutture delle anomalie sono in generale indipendenti dalla direzione di propagazione.

In conclusione impiegando una telecamera con standard CCIR se in una direzione si campiona correttamente nell'altra sicuramente si sotto campiona o sopra campiona; inoltre nelle immagini diagnostiche viene introdotta anche una distorsione geometrica della quale bisognerà eventualmente tenere conto nella determinazione dimensionale dei difetti e nella eventuale rappresentazione delle immagini per valutazioni di tipo visivo o automatico.

Una volta definito il valore ottimale della risoluzione longitudinale, può risultare conveniente riportare ad un analogo valore quello della risoluzione trasversale prelevando un pixel ogni due, in questo modo si elimina la distorsione geometrica, e si dimezza la quantità dei dati e il tempo di elaborazione senza una significativa riduzione dell'affidabilità di ispezione.

In alternativa alle telecamere di area con standard CCIR, si possono impiegare telecamere a scansione progressiva mediante le quali si acquisisce un campo definito da una unica matrice di dimensioni $C \times R$ con formato 4:3 oppure 1:1; in questo caso però si perdono i benefici tecnici ed economici derivanti, almeno attualmente, dall'impiego di moduli hardware e software di tipo standard. Tuttavia la telecamera progressiva offre notevoli

li vantaggi oltre a quello di garantire una risoluzione identica nelle due direzioni di campionamento: è sincronizzabile con il processo di elaborazione e con lo spostamento del tessuto senza perdita di quadri e può usare cadenze di acquisizione e di trasferimento anche diverse.

Poiché la scansione longitudinale è garantita dal movimento del tessuto, l'ispezione può essere eseguita anche impiegando telecamere di linea; mediante queste il campo di osservazione $l \times h$ viene acquisito con una risoluzione trasversale che dipende dall'ingrandimento ottico e dal numero di elementi del sensore (1000 - 5000), e una risoluzione longitudinale che dipende dalla velocità di spostamento del tessuto e dalla cadenza di campionamento. Utilizzando un adeguato encoder di riferimento, è possibile sincronizzare l'acquisizione con lo spostamento del tessuto e ottenere quindi il necessario valore di risoluzione longitudinale che risulta indipendente dalle eventuali e inevitabili variazioni della velocità di trascinamento. La massima velocità di ispezione ottenibile è determinata essenzialmente dal passo p di campionamento lungo la direzione longitudinale, dal tempo di trasferimento dei dati e dal tempo richiesto per la loro elaborazione; questa dovrà essere opportunamente sincronizzata con il flusso dei dati mediante l'attivazione di processi d'acquisizione e d'elaborazione paralleli e/o concorrenti.

Con questo tipo di telecamera si introducono sui dati un minor numero di degradazioni radiometriche, che comunque sono facilmente correggibili nel tempo reale di trasferimento mediante opportune tavole di conversione, non si determinano significative distorsioni geometriche e risulta più semplice ed efficiente il controllo dei parametri di acquisizione.

Il dispositivo di illuminamento è un componente del sotto sistema di acquisizione che può facilmente risultare critico sia a causa della relativamente breve durata media della sorgente di luce, sia per le caratteristiche di uniformità e costanza del flusso luminoso richieste che incidono notevolmente sulla qualità dei dati ricavati dalla acquisizione. A prescindere dal tipo di telecamera utilizzata, l'intensità del flusso luminoso deve essere tale da garantire la necessaria esposizione senza danneggiare il materiale in esame e deve essere costante nel tempo.

In generale può risultare conveniente l'utilizzo di sorgenti luminose ad incandescenza alimentate con corrente continua, oppure lampade lineari a fluorescenza alimentate con corrente alternata ad alta frequenza o proiettori di linea a laser. In alternativa, dati i contenuti tempi di esposizione imposti dal movimento del materiale, possono essere utilizzata una sorgente a luce impulsata, basata su matrici di led operanti nel visibile o nell'infrarosso vicino e sincronizzata con la telecamera e il movimento del tessuto; questo tipo di sorgente può fornire un elevato flusso luminoso con una potenza media dissipata contenuta. L'utilizzo di radiazioni infrarosse implica però un filtraggio di tipo spettrale che comporta una compressione della dinamica di rilevamento e del contrasto con conseguente introduzione di distorsioni radiometriche che alterano l'aspetto dell'immagine digitale ricavata dal tessuto; tuttavia se non si devono eseguire misurazioni colorimetriche e se il manufatto è di tipo flat monocolori, l'operazione è accettabile. Nel caso di manufatti bicolori di tipo denim, la compressione della caratteristica di trasferimento radiometrica, e conseguentemente del contrasto, riduce, se non annulla, la possibilità di discriminazione

di alcuni tipi di anomalie caratterizzate nel caso particolare da punti chiari in campo scuro: in questo caso e per non perdere informazioni diagnostiche si impone l'uso di sorgenti luminose a luce bianca.

6. Architettura del sistema di ispezione

Nella definizione dell'architettura generale della struttura di ispezione, assumono un ruolo fondamentale le proprietà e le interconnessioni dell'ambiente interno (stato del sistema) e dell'ambiente esterno (stato della comunicazione) tra quattro categorie fondamentali di risorse fisiche e/o logiche che il sistema deve gestire in modo ottimale:

- la categoria dei dati, che determina gli schemi di interconnessione ed integrazione tra diversi tipi di informazione e che risulta strettamente correlata alle specifiche di acquisizione, restituzione, controllo, gestione e archiviazione;
- la categoria dei moduli elaborativi e delle procedure, che determina le caratteristiche del sistema operativo per il trattamento delle informazioni e la gestione dei processi;
- la categoria dei processi intelligenti, che definisce la conoscenza del sistema, secondo un modello stratificato, per la interpretazione dei dati;
- la categoria della comunicazione, che definisce i modelli di riferimento delle interfacce, in modo da standardizzare l'interscambio di dati, informazioni e processi tra i vari componenti del sistema e tra il sistema e l'ambiente esterno (altri sistemi, risorse, utenti).

Le diverse caratteristiche che il sistema deve possedere inducono quindi a valutare una struttura di calcolo complessiva che consideri:

- a) la definizione di una architettura aperta di sistema hardware/software, in relazione a funzioni, componenti, moduli ed interazioni tra i vari elementi;
- b) l'integrabilità di dispositivi di acquisizione di segnali e immagini e di moduli hardware di funzione;
- c) lo sviluppo di metodiche orientate.

Fatti salvi i concetti generali sopra esposti, la definizione della architettura di ispezione deve tenere conto delle esigenze operative e funzionali della specifica applicazione, dei vincolanti criteri di economicità realizzativa e di esercizio e delle caratteristiche di flessibilità ed espandibilità tipiche nelle applicazioni industriali: sulla base di queste osservazioni si possono avanzare alcune principali considerazioni relative alle modalità di ispezione, al sotto sistema di acquisizione, al tipo di piattaforma elaborativa da adottare, alla preelaborazione dei dati di acquisizione e al tipo di algoritmi di analisi da implementare.

1) *Modalità di ispezione*: tenendo presenti le grandi dimensioni dei materiali da esaminare (circa 1.6 m), la elevata la risoluzione richiesta dal tipo di indagine (0.1 - 0.2 mm, che comporta circa 8 - 16 k pixel per riga di scansione) e la velocità di esecuzione imposta dalle procedure industriali di controllo (1 m/s), risulta opportuno, se non indispensabile, eseguire sulle immagini acquisite dal materiale in esame una elaborazione parallela e contemporanea suddividendo l'intera altezza del tessuto in fasce di ispezione adiacenti. Ciò comporta la segmentazione dell'ispezione in più canali di analisi a ciascuno dei quali deve

essere dedicato un nodo elaborativo; l'architettura si configura come una struttura cluster nella quale sono individuabili diversi livelli di parallelismo e scambio dati: ogni nodo deve essere in grado di eseguire più algoritmi contemporaneamente sugli stessi dati, l'insieme dei nodi definisce una struttura SIMD ed infine deve essere possibile una funzionalità di "message passing" tra i singoli nodi della 'rete'. Quest'ultima funzione può essere svolta da un server dedicato, in grado anche di eseguire una analisi strutturale dei difetti su data-set limitati e relativi unicamente alle zone di tessuto individuate come anomale.

2) *Sottosistema di acquisizione*: l'architettura generale comprende un sottosistema di ingresso, dedicato alla acquisizione delle immagini del materiale in esame, costituito da una batteria di telecamere di area o di linea e dei relativi dispositivi di illuminamento. Il numero delle telecamere dipende dalla risoluzione richiesta per il campionamento lungo la dimensione trasversale del materiale e dalle dimensioni dei trasduttori impiegati; secondo la modalità di ispezione e il tipo di piattaforma elaborativa adottate; le telecamere possono essere distribuite sui diversi nodi elaborativi. Nel sottosistema di acquisizione possono essere impiegate sia telecamere di area, sia telecamere di linea; in generale le due soluzioni sono equivalenti dal punto di vista operativo (risoluzione, dinamica, velocità, ecc.) anche se presentano diversificate peculiarità applicative, di standardizzazione e di economicità.

3) *Piattaforma elaborativa*: la piattaforma hardware sulla quale deve operare il processo di indagine deve possedere una potenza computazionale tale da soddisfare tutte le condizioni in precedenza citate e in particolare quelle relative all'elaborazione parallela in un tempo reale definito a priori. La stima della necessaria potenza computazionale è fortemente influenzata dal tipo di algoritmi di analisi e dai criteri e i limiti della estendibilità procedurale; ne consegue che la scelta risulta quanto meno delicata e che è opportuno farla precedere anche da una consistente sperimentazione. Ad un primo esame sembra opportuno orientare la scelta verso una piattaforma basata su una architettura PC standard (Pentium Pro 230 multiprocessore, Digital Alpha-Pentium server, ecc.). Questo tipo di piattaforma, con una configurazione interna limitata al nucleo hardware essenziale per l'esecuzione delle funzioni richieste dalle procedure di ispezione, offre una soddisfacente potenza computazionale, ampie possibilità di integrazione di dispositivi standard per l'acquisizione delle immagini, sufficiente capacità di memoria centrale, elevata interconnettività mediante reti locali ad alta velocità ed infine costi contenuti.

Nella figura 2 è riportato lo schema di una architettura funzionale che rispetta le condizioni generali viste in precedenza; questa architettura è articolata in più nodi elaborativi il cui numero dipende dalle caratteristiche operative, dalle tecniche e dalle esigenze di utenza più volte citate. Ad ogni nodo elaborativo sono collegate, mediante interfacce di acquisizione standard, tre diverse telecamere di area o una telecamera di linea che, in linea di principio, possono essere di tipo analogico o digitale. L'insieme delle telecamere, opportunamente allineate e registrate, costituiscono una batteria di acquisitori il cui campo globale di rilevamento deve coprire l'intera dimensione trasversale del materiale (zona trasversale di ispezione); ogni telecamera invece è dedicata alla acquisizione di una diversa colonna o striscia lungo la dimensione longitudinale secondo lo schema di ispezione accennato al punto 1) e indicato in figura 3.

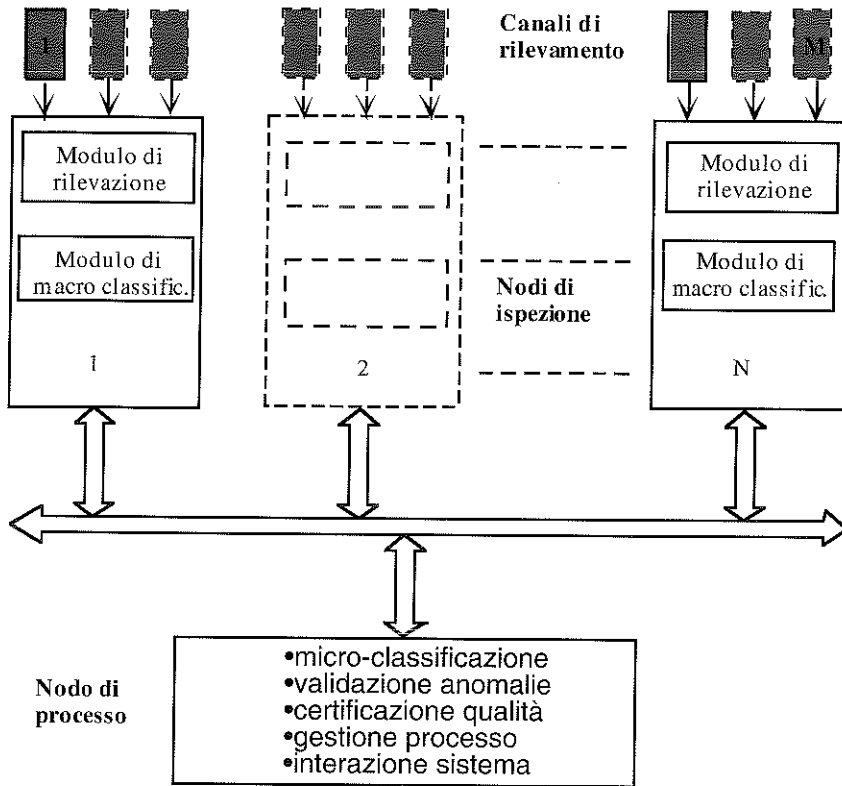


Fig. 2: Architettura funzionale della struttura di

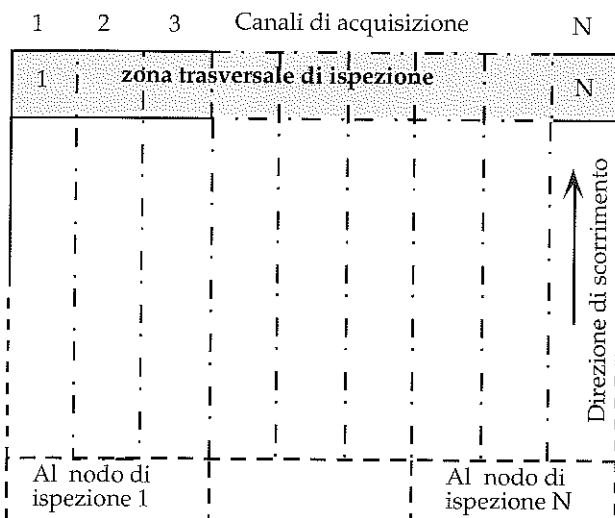


Fig. 3: Modalità di ispezione.

I dati di acquisizione vengono trasferiti nella memoria della piattaforma attraverso il bus PCI dei diversi nodi di ispezione; Su insiemi di dati diversi, relativi a zone contigue del materiale in esame (canali di ispezione), tutti i nodi elaborativi eseguono in modo sincrono e parallelo un identico processo elaborativo preposto alla rivelazione delle anomalie e alla loro classificazione nelle macro-classi in precedenza citate. I vari nodi sono collegati tramite una rete di comunicazione ad alta velocità ad un ulteriore sistema, basato sempre su un PC Pro 233 multiprocessore (2-4 processori), al quale vengono inviate le informazioni di classificazione delle anomalie e i relativi dati immagine di acquisizione limitatamente alle regioni ad esse relative per l'esecuzione di ulteriori procedure di indagine.

I dati di acquisizione vengono trasferiti nella memoria della piattaforma attraverso il bus PCI dei diversi nodi di ispezione; su insiemi di dati diversi, relativi a zone contigue del materiale in esame (canali di ispezione), tutti i nodi elaborativi eseguono in modo sincrono e parallelo un identico processo elaborativo preposto alla rivelazione delle anomalie e alla loro classificazione nelle macro-classi in precedenza citate. I vari nodi sono collegati tramite una rete di comunicazione ad alta velocità ad un ulteriore sistema, basato sempre su un PC Pro 233 multiprocessore (2-4 processori), al quale vengono inviate le informazioni di classificazione delle anomalie e i relativi dati immagine di acquisizione limitatamente alle regioni ad esse relative per l'esecuzione di ulteriori procedure di indagine.

Su questi ultimi dati e con l'ausilio delle informazioni di macro-classificazione ricavate nei nodi di ispezione, il sistema svolge le seguenti funzioni principali: l'eventuale analisi strutturale dei difetti e la micro-classificazione finale, la validazione dei difetti e la relativa etichettatura sul manufatto in esame delle zone anomale, la gestione delle procedure di taratura ed apprendimento, la gestione degli archivi e delle mappe di certificazione finale, l'interazione fuori linea per il monitoraggio e l'esecuzione di eventuali indagini visive di verifica.

4) *Procedure di preelaborazione*: al fine di ottimizzare la qualità dei dati originali, su questi devono essere applicate specifiche procedure elaborative finalizzate alla riduzione delle distorsioni radiometriche introdotte nelle immagini diagnostiche dal processo di acquisizione; queste distorsioni possono avere una distribuzione casuale oppure coerente. Le componenti di disturbo del primo tipo sono costituite fondamentalmente da rumore optronico, rumore di quantizzazione derivante dai convertitori A/D e rumore di diffusione della luce. Le componenti del secondo tipo sono costituite da artefatti radiometrici dovuti alla non uniformità di illuminamento, alla funzione di trasferimento del sistema ottico, alla non uniformità della risposta del sensore e alla struttura superficiale del tessuto. Le distorsioni casuali sono da considerarsi di tipo monodimensionale e quindi riducibili mediante operazioni di filtraggio analogico direttamente sui segnali di acquisizione al fine di non introdurre ulteriori tempi di elaborazione; gli artefatti coerenti sono invece di tipo bidimensionale e devono essere corretti in modo digitale. Al fine di contenere i tempi di elaborazione, in questo caso è opportuno e possibile operare mediante tavole di correzione di ingresso ricavate in una fase preliminare di taratura, queste tavole sono costituite da un vettore di dati di correzione nel caso di impiego di telecamere di linea, oppure da una

matrice nel caso di impiego di telecamere di area.

5) *Algoritmi di analisi*: la definizione del più conveniente approccio algoritmico è condizionata da due principali necessità: eseguibilità in tempo reale secondo i limiti funzionali imposti dai requisiti utente; operabilità su grandi quantità di dati definita dalle specifiche tecniche. Dall'analisi dei vincoli richiesti dalla generalità delle applicazioni, si può ricavare che non è realistico applicare algoritmi orientati all'analisi morfologica: questa in genere comporta complesse elaborazioni la cui durata di esecuzione dipende, oltre che dalla quantità dei dati, anche dalla loro distribuzione e organizzazione. Poiché il controllo di qualità non prevede particolari misurazioni mentre la sua efficienza e affidabilità devono essere confrontate con quelle ottenibili con le metodiche attuali basate sull'osservazione eseguita da ispettori specializzati, risulta più opportuno individuare metodiche di analisi basate su procedure elaborative di tipo statistico: con questo tipo di approccio si possono definire algoritmi di analisi le cui caratteristiche fondamentali devono essere la semplicità, l'efficienza e l'affidabilità probabilistica. Questo tipo di algoritmi sono di semplice implementazione e verifica, la loro esecuzione è in genere sufficientemente veloce ed è largamente indipendente dalla organizzazione e distribuzione dei dati.

7. Procedura di indagine e verifica sperimentale

In questo capitolo vengono riportati a titolo esplicativo i risultati di alcune attività di ricerca e sviluppo condotte dal gruppo di ricerca dell'IEI relative alla definizione di metodi e tecniche per il controllo di qualità di materiali flessibili. Tali attività vengono svolte in particolare nell'ambito del Progetto Europeo "Hipertex (High Performance System for Textile Evaluation)" e nell'ambito del Progetto Speciale del CNR "Un sistema automatico per la classificazione di difetti superficiali della pelle nell'industria manifatturiera". Per la definizione delle metodologie di ispezione e per il disegno dell'architettura generale della struttura elaborativa, sono stati seguiti i criteri definiti nei capitoli precedenti specializzandoli opportunamente per le applicazioni prese in considerazione.

Gli studi e le sperimentazioni sono state svolte in particolare per valutare la validità delle ipotesi fatte e l'efficienza generale delle procedure di analisi in un contesto il più vicino possibile a quello reale; a questo scopo sono stati adottati i requisiti utente e i vincoli operativi definiti direttamente da diversificate industrie di settore.

Per la parte sperimentale è stata sviluppata una struttura hardware basata su una architettura simile a quella descritta in figura 2, limitandola però ad un solo nodo elaborativo perché gli ulteriori nodi sono da considerarsi come una replica del primo. L'ispezione viene eseguita quindi solo su una striscia di tessuto mediante un solo canale di acquisizione; di conseguenza non sono state attivate le pur indispensabili procedure elaborative fra i vari canali e nodi per la valutazione dimensionale complessiva dei difetti.

Per l'ispezione del materiale è stato realizzato un particolare banco di movimentazione e acquisizione a controllo numerico mediante il quale è possibile simulare le condizioni operative di traslazione del manufatto e di acquisizione delle immagini diagnostiche. Per

quest'ultimo scopo sono state impiegate sia telecamere di linea sia telecamere di area al fine di verificarne le prestazioni in termini di efficienza e affidabilità.

Per eseguire le sperimentazioni sono stati presi in considerazione manufatti tessili di ampia produzione di tipo denim e flat non stampati e un congruo numero di campioni con le più ricorrenti e significative anomalie.

Per la definizione della risoluzione spaziale ottimale si è fatto riferimento alla densità dei filati per i vari tipi di tessuto riportata nella tabella 2. Per eseguire le sperimentazioni sono stati presi in considerazione manufatti tessili di ampia produzione di tipo denim e flat non stampati e un congruo numero di campioni con le più ricorrenti e significative anomalie. Per la definizione della risoluzione spaziale ottimale si è fatto riferimento alla densità dei filati per i vari tipi di tessuto riportata nella tabella 2. Questo tipo di riferimento è grossolano e solo in prima approssimazione consente di definire il valore di risoluzione nell'ipotesi, non sempre valida, che i filati siano tessuti in modo adiacente.

tipo di tessitura	categoria	numero di filati/cm			
		flat		denim	
		catena	trama	catena	trama
Twill 3/	pesante	42,2	20,0	42,2	20,0
Twill 2/1	medio	48,8	25,0	48,8	25,0
Twill 2/1	leggero	26,4	19,0		
Canvas	pesante	42,8	44,0	42,8	44,0
Canvas	medio	42,8	24,0	42,8	24,0
Canvas	leggero	42,8	40,0		
Diagonal	pesante	52,5	23,0		
Diagonal	medio	34,5	20,0		
Diagonal	leggero	44,5	50,0		

Tab. 2: Densità di tessitura per i principali tessuti flat e denim.

Requisiti di utenza - Sulla base di specifiche esigenze industriali sono stati presi in considerazione i seguenti requisiti fondamentali:

- | | |
|--|------------------------|
| • operabilità | in linea e fuori linea |
| • metodologia di ispezione | semiautomatica |
| • dimensione trasversale (denim, flat) | m 1.60 |
| • dimensione longitudinale (denim) | m 1000-1500 |
| • dimensione longitudinale (flat) | m 6000 |
| • velocità di ispezione (denim, flat) | m/s 10-60 |
| • densità di filati in trama e catena | vedi tabella 2 |
| • minima dimensione difetto | mm 0.5 |
| • accuratezza di ispezione | ≥ 95% |

- numero di macro-classi 3
- numero di micro-classi ≈ 30
- misure sui difetti lunghezza, area, perimetro, orientamento

Specifiche tecniche di progettazione - Sulla base dei requisiti utente sopra elencati e a seguito di una indagine sperimentale preliminare, sono state definite le seguenti specifiche:

- risoluzione trasversale (denim, flat) mm 0.1-0.2
- risoluzione longitudinale (denim, flat) mm 0.1-0.2
- risoluzione radiometrica livelli 256
- dinamica radiometrica decenni 2
- operabilità semiautomatica
- piattaforma elaborativa PC Pentium PRO 200
- interfaccia di acquisizione Matrox Meteor RGB
- dispositivo di acquisizione telecamera di linea 2048; telecamera di area alogeno; fluorescente; impulsato infrarosso
- illuminatori

Descrizione della procedura di analisi - È stata studiata e sviluppata una procedura di ispezione basata sull'analisi delle variazioni locali della riflettanza determinate dalle eventuali modifiche strutturali della tessitura del manufatto in esame. Questo tipo di approccio è giustificato essenzialmente per soddisfare due condizioni: una di tipo operativo, determinata dai vincoli di utenza relativi alla necessità di operare nel tempo reale di movimentazione del tessuto e che impone il contenimento dei tempi di elaborazione; una di tipo tecnico determinata dalle peculiari caratteristiche di riflettanza del materiale e dalle riducibili ma non eliminabili distorsioni radioelettriche introdotte dai dispositivi di illuminamento e di rilevamento.

La procedura di indagine è articolata in due stadi: uno di apprendimento nel quale viene esaminata la risposta radiometrica di una zona di tessuto priva di difetti al fine di ricavare specifici parametri statistici di "regolarità" che definiscono i criteri di modellazione; uno di analisi, applicata al manufatto da esaminare, mediante la quale analoghi parametri vengono rilevati e confrontati con quelli di riferimento. Le differenze eventualmente rilevate identificano le zone anomale sulle quali devono essere svolti i processi di interpretazione, di riconoscimento e di valutazione.

Nella figura 4 è mostrato lo schema funzionale della procedura di indagine: in bianco sono indicati i moduli elaborativi relativi alla procedura di apprendimento mentre quelli evidenziati individuano i moduli della procedura di analisi.

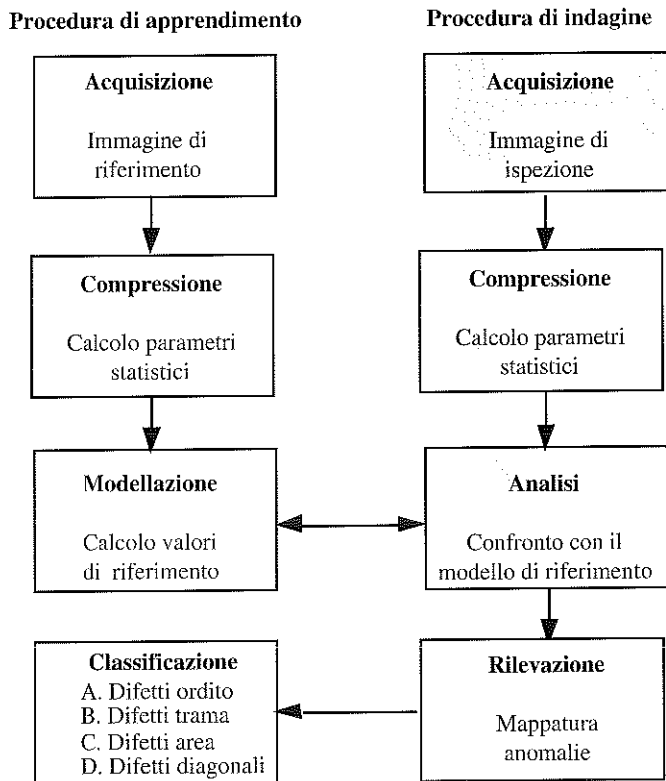


Fig. 4: Schema di flusso della procedura di indagine.

Fase di apprendimento - L'immagine di riferimento viene segmentata in ROI (spot di indagine) secondo un reticolo quadrato di passo P definito sperimentalmente in funzione del tipo di tessuto, della risoluzione spaziale adottata, del contrasto medio delle anomalie e della dimensione minima dei difetti ritenuti significativi agli effetti diagnostici; nella figura 5 è mostrato lo schema di segmentazione. Nella descrizione vengono usate le seguenti definizioni:

$A = w \cdot h$ area di ogni spot
 $h' = \frac{H}{h}$ e $w' = \frac{W}{w}$ numero di righe e colonne in cui viene suddivisa l'immagine
 $R_{i,j}$ insieme dei pixel appartenenti allo spot i,j .

Per ogni ROI vengono calcolati la media $m_{i,j}$ e lo scarto quadratico medio $S_{i,j}$:

$$m_{i,j} = \frac{1}{A} \sum_{a \in R_{i,j}} a \quad S_{i,j} = \sqrt{\frac{1}{A} \sum_{a \in R_{i,j}} (a - m_{i,j})^2}$$

Per ogni colonna di ROI si calcolano quindi media e scarto quadratico medio delle medie, e degli scarti quadratici medi

$$Mm_j = \frac{1}{h'} \sum_i m_{i,j} \quad Sm_j = \sqrt{\frac{1}{h'} \sum_i (m_{i,j} - Mm_j)^2}$$

$$Ms_j = \frac{1}{h'} \sum_i s_{i,j} \quad Ss_j = \sqrt{\frac{1}{h'} \sum_i (s_{i,j} - Ms_j)^2}$$

vengono quindi determinati per ogni colonna gli intervalli di riferimento:

$$(Mm_j - k_m \cdot Sm_j, Mm_j + k_m \cdot Sm_j) \text{ e } (Ms_j - k_s \cdot Ss_j, Ms_j + k_s \cdot Ss_j)$$

dove k_m e k_s sono dei coefficienti che specificano il campo di variabilità ammesso per un tessuto privo di difetti; questi coefficienti vengono determinati sperimentalmente in fase di taratura della procedura in funzione dei vari parametri di acquisizione e del tipo di tessuto.

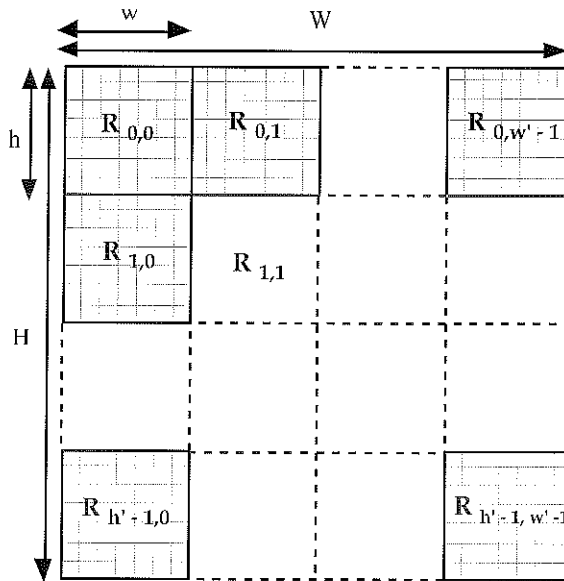


Fig. 5: Schema di segmentazione dell'immagine in ROI.

Fase di analisi - L'immagine da analizzare viene suddivisa in spot di dimensioni $w \times h$ pixel, secondo le stesse modalità di segmentazione e di calcolo dei parametri statistici

adottate nella fase di apprendimento. Viene quindi calcolata una mappa D di dimensione $w' \times h'$ in cui ogni elemento è riferito ad uno specifico spot. Ogni elemento di D assume il valore 0 se entrambi i parametri rientrano negli intervalli di riferimento, 1 altrimenti. Si ottiene quindi una matrice di dati binari che risulta essere compressa di un fattore che dipende dalle dimensioni delle ROI di ispezione. Su questa mappa binaria viene eseguita la procedura di riconoscimento degli eventuali difetti, secondo lo schema di macro classificazione indicato nella figura 6a, impiegando un classificatore articolato in quattro diversi algoritmi specializzati per le diverse tipologie di difetti: verticali (di ordito), orizzontali (di trama), di area e diagonali (di tessitura).

Per il riconoscimento dei difetti elongati di tipo orizzontale o verticale (con scostamenti di $\pm 10^\circ$), l'algoritmo di classificazione si basa sul calcolo dei profili di linea applicati alle righe o alle colonne della mappa compressa di sintesi; questi profili vengono analizzati impiegando una soglia adattiva per individuare la presenza di picchi di conteggio significativi che individuano la presenza di zone anomale. Per il riconoscimento dei difetti di area un diverso algoritmo si basa sull'analisi locale degli elementi individuati come anormali rilevando i legami di contiguità in un intorno predefinito in funzione della minima dimensione ritenuta significativa agli effetti della qualità del manufatto. Infine per il riconoscimento dei difetti diagonali un ulteriore algoritmo analizza la distribuzione degli elementi della matrice di sintesi applicando una versione semplificata della trasformata di Hough.

In figura 6a (vedi pag. 87) è mostrata una matrice compressa di 64×64 elementi binari nella quale sono stati simulati i quattro tipi di difetto sopra citati; nei riquadri A, B, C e D sono riportati i risultati della classificazione. Nelle figure 6b, 6c e 6d sono riportati i risultati della classificazione eseguita su immagini reali ricavate da campioni di tessuto.

Il classificatore individua il tipo di anomalia, la sua posizione nel campo di indagine e le sue caratteristiche geometriche e dimensionali necessarie per l'assegnazione del punteggio di qualità e per la marcatura automatica della zona difettosa; i dati immagine originali di acquisizione relativi a questa zona vengono inoltre archiviati per consentire l'eventuale esecuzione dell'analisi dettagliata delle anomalie finalizzata ad una micro classificazione.

Prestazioni rilevate - Con riferimento al metodo di ispezione riportato nelle figure 4, 5, ai requisiti utente e alle specifiche tecniche sopra indicate, sono state eseguite diversificate sperimentazioni finalizzate alla valutazione dell'efficienza generale del metodo di indagine e alla determinazione dei tempi di elaborazione. Le prove sono state basate sulle seguenti assunzioni.

I tessuti sono stati ispezionati mediante l'impiego di telecamere di area con standard CCIR; conseguentemente per ogni frame TV si ottiene una matrice di $768 \times 576 \times 8$ bit. Poiché il manufatto è in movimento, i due semi quadrati di ogni campo devono essere considerarsi come indipendenti: quindi, se la risoluzione longitudinale risulta accettabile, per ogni acquisizione deve essere elaborata una matrice definita da 768×288 bit.

Nell'ipotesi che la dimensione trasversale del manufatto sia di 1.6m, e che sia sufficiente una risoluzione trasversale di circa 0.14 mm con una sovrapposizione trasversale dei campi di vista di circa 18 pixel, l'acquisizione deve essere fatta impiegando una batte-

ria di quindici telecamere accuratamente allineate.

Con riferimento allo schema di architettura riportato nella figura 2 il processo elaborativo dovrà essere distribuito su 5 nodi. Nella nostra sperimentazione si è supposto che ad ogni nodo siano collegate tre telecamere, conseguentemente dovranno essere elaborate tre matrici di 768 x 288 byte. La tabella 3 riporta: il tempo complessivo T_t di elaborazione, i tempi T_1 necessari per l'esecuzione di ogni singola funzione e le relative percentuali di impegno computazionale.

La dimensione dell'immagine di acquisizione è di 768 x 288 byte ed è stato adottato uno spot di analisi di 8 x 8 pixel; per la sperimentazione sono stati presi in esame solo due parametri statistici dopo averne verificato la significatività ai fini diagnostici. Per elaborare quindi tre matrici di ingresso di 768 x 288 x 8 bit, prodotte da una singola acquisizione usando tre telecamere, il tempo complessivo di elaborazione risulta essere di circa 45ms. Nell'ipotesi che non si adottino per il trasferimento delle immagini particolari tecniche e metodiche di tipo parallelo che complicano l'architettura H/S del sistema, a questo tempo va sommato quello tipico di acquisizione delle immagini che risulta essere di circa 20ms (tempo di semi quadro). Alle condizioni di risoluzione in precedenza definite e con riferimento alle relazioni (*) riportate nel capitolo 5, si può rilevare che non è possibile eseguire l'ispezione alla massima velocità consentita dallo standard di acquisizione CCIR (n=1; cadenza di 40ms); lasciando inalterati i valori dei parametri di risoluzione ma adottando una cadenza di acquisizione di 80ms (con n=2) la velocità di ispezione è di circa 1 m/s con un tempo dedicabile alla elaborazione di circa 60ms.

La procedura elaborativa e i relativi algoritmi sono stati ottimizzati in funzione della piattaforma e del sistema operativo utilizzati; si possono tuttavia ottenere tempi di elaborazione significativamente minori utilizzando una piattaforma Pentium multiprocessore oppure un sotto-sistema specializzato al quale demandare il calcolo dei parametri caratteristici e, eventualmente, anche la preelaborazione finalizzata al miglioramento della qualità dei dati.

Funzione	T_1 (ms)	T_2 (%)
Calcolo dei parametri statistici	8.50	58.24
Confronto dei parametri statistici con modello di riferimento	0.63	4.31
Compressione delle anomalie in mappa binaria	0.16	1.10
Rilevamento delle coordinate delle anomalie	0.09	0.63
Classificazione difetti con profili di linea (ordito e trama)	0.04	0.27
Classificazione difetti con trasformata di Hough (diagonali)	4.73	32.43
Classificazione difetti con blob analisi (area)	0.44	3.02
Tempo totale di elaborazione	14.59	100.00

Tab. 3: Tempi di esecuzione delle funzioni di elaborazione.

8. Considerazioni sulla rilevabilità dei difetti

La visibilità e la conseguente rilevabilità delle anomalie e la loro classificazione è deter-

minata da quattro parametri fondamentali: il rapporto segnale/rumore, il coefficiente di contrasto difetto/tessuto, la struttura della tessitura, la qualità delle immagini diagnostiche. Dalle attività di sperimentazione sono state ricavate le seguenti e principali osservazioni:

- nei dati è presente molto rumore dovuto principalmente a fenomeni di diffusione della luce;
- molte anomalie sono caratterizzate da un contrasto medio estremamente basso;
- la struttura del tessuto e l'angolo di incidenza della luce determinano vari tipi di artefatti;
- i difetti possono propagarsi con caratteristiche di riflettanza e di contrasto molto variabili;
- la qualità delle immagini è molto condizionata dai parametri di esposizione e movimentazione;
- la rilevabilità dei difetti è molto condizionata dal colore del tessuto e dal tipo di illuminazione.

La rilevabilità dei difetti può essere migliorata modificando l'aspetto delle immagini diagnostiche durante l'esecuzione delle fasi di acquisizione e/o di preelaborazione ed analisi.

Durante l'acquisizione mediante l'impiego di un illuminamento obliquo che, a causa delle peculiari caratteristiche strutturali del materiale, introduce artefatti d'ombra nelle zone di discontinuità della tessitura contribuendo indirettamente alla rilevabilità delle anomalie; è opportuno però considerare che questo metodo di illuminazione comporta una non uniforme distribuzione della luce sul tessuto con la conseguente distorsione radiometrica delle immagini.

Durante l'elaborazione mediante l'impiego di operatori locali o globali di enhancement o di filtraggio che possono esaltare le discontinuità rendendole meglio rilevabili; questo metodo può esaltare anche il disegno della struttura della tessitura rendendo critico il rilevamento dei difetti.

Nel primo caso l'operazione è svolta in tempo reale in quanto non comporta procedure elaborative aggiuntive; queste elaborazioni sono invece imposte nel secondo caso e quindi costituiscono una ulteriore limitazione alla operabilità in tempo reale. In entrambi i casi sui dati immagine vengono volutamente introdotte distorsioni di tipo radiometrico che, pure esaltando il contrasto del difetto, modificano anche la struttura generale dei dati limitando conseguentemente le possibilità di successive e ulteriori analisi per una micro classificazione.

Un ispettore addestrato esegue un riconoscimento globale delle anomalie in modo che la valutazione dimensionale è largamente indipendente dalle caratteristiche radiometriche puntuali dei difetti. Un sistema di visione artificiale invece esegue operazioni locali di riconoscimento e di valutazione; una stima globale può essere eseguita solo in un secondo tempo, purché si possa disporre di tutte le indispensabili informazioni spaziali e radiometriche relative alle zone di tessuto rilevate come anomale.

Esempi di elaborazione - Al fine di verificare l'efficienza della procedura di rivelazione delle anomalie, questa è stata applicata ad un congruo numero di campioni di tessuti di tipo denim e flat nei quali sono presenti diversificati difetti appartenenti alle tre macro classi principali. I campioni sono stati selezionati fra quelli che ad una osservazione preliminare denotano una maggiore criticità per quanto concerne la rilevabilità delle anomalie

presenti; questa criticità è determinata sia dalle particolari strutture dei tessuti sia dal limitato contrasto difetto-tessuto sia infine dalle dimensioni molto contenute dei difetti stessi.

Per ogni difetto rivelato è stata individuata la classe di appartenenza (ordito, trama, area), sono stati estratti i parametri geometrici caratteristici (m , p , a) ed è stato definito in ingresso l'intervallo di discriminazione ($\pm k_m$, $\pm k_g$) determinato nella fase di apprendimento per la modellazione. Nelle figure 7 - 12 (vedi pag. 88-89) sono mostrati alcuni esempi di rivelazione di difetti presenti su tessuti di tipo denim: nella figura 7 è mostrato un difetto di ordito che nel verso diritto del tessuto non risulta rilevabile, mentre è individuato analizzando il verso rovescio come si può vedere dalla figura 8. Nelle figure 9 e 10 sono mostrati due diversi difetti di trama ben individuati, nella figura 11 è mostrato un difetto di ordito presente su un tessuto a densità di tessitura più elevata che ha richiesto l'adozione di una risoluzione di acquisizione maggiore (0.1mm), infine nella figura 12 è riportato un esempio di difetto rilevato mediante l'impiego di un illuminatore a luce impulsata IR inclinata di circa 30°. In quest'ultimo esempio è opportuno osservare che la luce IR ha distorto la risposta radiometrica del tessuto, infatti non sono visibili i caratteristici punti bianchi della tessitura denim e il difetto risulta rilevabile essenzialmente per l'artefatto d'ombra verticale introdotto lungo la discontinuità dalla luce tangenziale.

Nelle figure 13-18 (vedi pag. 89-90) sono rappresentati alcuni esempi di rilevazione di difetti presenti su tessuti di tipo flat: nelle figure 13 e 14 sono mostrati rispettivamente un difetto di ordito ed uno di trama, per una corretta rivelazione si è reso necessario adottare una risoluzione di 0.1mm; nelle figure 15 e 16 sono riportati due esempi di difetti di trama, in particolare quello di figura 15 è costituito da una ondulazione "sanford" che in realtà non è una anomalia di trama bensì di area.

Nelle figure 17 e 18 sono mostrati rispettivamente un difetto di area e un difetto di ordito; quest'ultimo, in un tessuto flat di colore nero, è dovuto all'inserimento nella tessitura di alcune fibre estranee bianche che risultano quindi ben rilevabili.

Negli esempi riportati, l'esame delle immagini diagnostiche è stata eseguita mediante spot di 8x8 o 16x16 pixel che sono stati riportati sulle immagini per evidenziare l'avvenuta rilevazione dei difetti. Dagli esempi riportati, scelti fra i più critici, si può notare come in alcuni casi gli spot che individuano le regioni anomale non sono contigui nonostante che il difetto abbia caratteristiche di continuità: ciò è dovuto alla variabilità del contrasto del difetto che talvolta è inferiore alla soglia di rilevabilità individuata nella fase di apprendimento.

Le prove hanno dimostrato che gli algoritmi di analisi e di classificazione sono sufficientemente affidabili anche in condizioni di operabilità relativamente critiche, tuttavia certi difetti su tessuti denim, dovuti in particolare alla mancanza di un filo scuro su un fondo di tessitura dello stesso colore, presentano un contrasto estremamente basso che non consente una rivelazione sempre sufficientemente affidabile. In questi casi particolarmente critici i difetti risultano però rilevabili se si esamina il verso rovescio del tessuto, di conseguenza se si vuole estendere l'efficienza applicativa può risultare indispensabile esaminare entrambe le superfici dei tessuti; ciò comporta però un incremento non indifferente sia della complessità computazionale, sia dei costi di sviluppo della struttura di ispezione.

Le prove condotte su vari campioni di tessuto denim confermano che è necessario

adottare risoluzioni spaziali diversificate in funzione del tipo di tessuto da esaminare. In generale per i tessuti denim la risoluzione può variare da 0.2 a 0.4 mm, mentre nei tessuti di tipo flat, che sono caratterizzati da una maggiore uniformità di disegno e di colore nonché da filati più sottili, la risoluzione necessaria può variare da 0.1 a 0.2 mm; in questo secondo caso si è potuto verificare che è sufficiente esaminare unicamente il verso diritto del tessuto.

L'efficienza e l'affidabilità del rilevamento dei difetti è fortemente influenzata dalla uniformità dell'illuminamento del tessuto e della risposta globale del sistema ottico e del sensore: tale uniformità deve essere maggiore del 10% (stima del valore del contrasto medio che caratterizza i difetti). Dalle prove condotte impiegando sia telecamere di area sia telecamere di linea, si è potuto verificare che nel primo caso questo valore di uniformità è difficilmente ottenibile; per ottenere dei valori accettabili, è quindi indispensabile provvedere, in linea o fuori linea, alla correzione dei dati con un conseguente incremento computazionale. Nel secondo caso invece i vincoli di uniformità possono essere più facilmente soddisfatti in via analogica operando sulla distribuzione del flusso luminoso; eventuali variazioni residue possono essere ulteriormente compensate, anche in tempo reale, mediante l'impiego di opportune tavole di correzione di ingresso.

Tenendo presente che la scansione nel verso longitudinale è garantita dal movimento di traslazione del manufatto, risulta, quantomeno dal punto di vista tecnico, più conveniente ed efficiente l'utilizzo di telecamere di linea. In particolare questo tipo di telecamera può consentire una semplice sincronizzazione della movimentazione del manufatto con l'acquisizione dei dati, quest'ultima risulta quindi indipendente dalle inevitabili variazioni della velocità di movimentazione.

Riferimenti bibliografici

- [1] Azzarelli, L., Bozzi, E., Chimenti, M. "Automatic on-line systems for detection, evaluation and mapping of defects and variations monitoring on finished fabrics". N.I. IEI B4-24, Progetto Brite n° R11B-0243, Pisa, Giugno 1990.
- [2] Azzarelli, L., Chimenti, M., Salvetti, O., Bruenig, H., Niemann, H. "Interactive processing and archiving of images", Image and Vision Computing, vol.8, n°3, August 1990.
- [3] Azzarelli, L., Bozzi, E., Chimenti, M., Salvetti, O., D'Antonio, L., Sabatino, C. "Distributed system for quality control of aerospace structures", Materials Evaluation, vol.49, n°2, February 1991.
- [4] Azzarelli, L., Bozzi, E., Chimenti, M. "Un sistema a controllo numerico per l'ispezione di materiali". Progetto Finalizzato Robotica, IEI, Nota Tecnica, dic. 1991.
- [5] Azzarelli, L., Bramanti, M., Chimenti, M., Salerno, E., Salvetti, O., Gontero, E., Nari, D. "A multiprocessor architecture for pattern segmentation". Proc. Ercim Workshop on Parallel Architectures for Computer Vision. pp.69-90, Crete, 1992.
- [6] Azzarelli, L., Chimenti, M. "Sistema integrato H/S per lo sviluppo e la gestione di

- procedure di ispezione per robot con teste multivisione". N.I. IEI B4-56, P.F. Robotica, Pisa, 1992.
- [7] Azzarelli, L., Chimenti, M., Salvetti, O. "Non contact methods for NDT of aeronautical structures. An image processing workstation for termography". Report BRITE EURAM II Project n. 3209, B4-37, 1992.
- [8] Azzarelli, L., Chimenti, M., Salvetti, O. "The hardware Architecture of the thermal imaging workstation". Report BRITE EURAM II Project n. 3209, B4-06, 1993.
- [9] L. Azzarelli, O. Salvetti, E. Gontero, D. Nari, R. Tallarico: "Ambienti real-time per l'imaging industriale". Pixel, 14, n. 1/2, pp. 11-20. Editrice il Rostro, 1993.
- [10] Azzarelli, L., Gontero, E., Nari, D., Salvetti, O. "Ambienti real-time per l'imaging industriale". PIXEL, N. 1/2, 1993
- [11] Azzarelli, L., Chimenti, M., Mandelli, E., Salvetti, O. "A study for a high performance parallel system for on-line defect detection in textile". Report Project CAPRI-PCI, 1994.
- [12] Azzarelli, L., Chimenti, M., Fantini, E., Marchetti, A. "VISIOLAM. A workstation for volumetric data acquisition". ERCIM News n. 20, 1995.
- [13] Azzarelli, L., Chimenti, M., Salvetti, O., Gontero, E., Miglietta, P. "Moderne tecniche di imaging industriale". Rivista Qualità, n. 4, (inserto speciale) Mortarino Ed., 1995.
- [14] Azzarelli, L., Chimenti, M., Salvetti, O., Gontero, E., Mandelli, E. "Feasibility Study Partetex: High performance parallel techniques for on-line defect detection on textiles". Report Project CAPRI-PCI, CNR Area ricerca, 1995.
- [15] Azzarelli, L., Chimenti, M., Cerri, S., Salvetti, O. "Controllo di qualità: acquisizione ed elaborazione a basso livello di immagini per il rilevamento di difetti superficiali", N.I. IEI B4-37, dicembre 1996.

La ricostruzione tomografica di mappe termiche all'interno del volume di caldaia come mezzo diagnostico del processo di combustione

Mauro Bramanti, Emanuele Salerno

CNR - Istituto di Elaborazione della Informazione
Via Santa Maria 46, I-56126 Pisa

Sauro Pasini

ENEL - Centro di Ricerca Termica
Via Andrea Pisano 120, I-56122 Pisa

Sommario. In questo lavoro vengono presentati alcuni risultati relativi alla ricostruzione di mappe di temperatura all'interno di caldaie in base alla misura dei tempi di volo di segnali acustici. Ciò è possibile in quanto la velocità del suono all'interno dei gas di caldaia è legata alla temperatura dei gas stessi. Gli algoritmi ricostruttivi presentati si sono dimostrati efficienti, e i risultati possono essere ritenuti soddisfacenti, specialmente se si considerano gli insiemi di dati particolarmente ridotti normalmente a disposizione.

1. Introduzione

La distribuzione di temperatura all'interno della camera di combustione è un dato molto importante nel progetto di sistemi di combustione a bassa emissione di ossidi di azoto. Infatti la formazione di questi composti è legata alla presenza di picchi di temperatura al di sopra di un certo valore critico.

In caldaie in esercizio, inoltre, è importante avere informazioni in tempi rapidi sia sul valore medio sia sui valori puntuali della funzione temperatura per poter esercitare un controllo efficace sul rendimento del sistema e sulle emissioni di inquinanti.

Misurare la distribuzione di temperatura all'interno di una caldaia industriale è un compito piuttosto arduo se deve essere portato a termine per mezzo di sonde convenzionali, come per esempio i pirometri ad aspirazione. Si possono usare delle tecniche elettroottiche, ma il loro impiego non è generale, in quanto risente dello spessore ottico del mezzo da analizzare.

Questi problemi possono essere risolti in linea di principio ricorrendo alla pirometria

sonica, che presenta inoltre il vantaggio di poter essere realizzata con strumentazione semplice e di basso costo.

Su questi temi è stata attiva per diversi anni una collaborazione tra IEI-CNR e il Centro di Ricerca Termica dell'Enel. Il principio su cui si basa la pirometria sonora è la dipendenza della velocità del suono in un gas dalla temperatura del gas stesso. Sfruttando questa dipendenza si può ricavare il legame tra il tempo di transito di un segnale acustico tra due trasduttori e la velocità media del suono lungo il percorso del segnale. Se si ha a disposizione un numero sufficiente di questi dati, oltre che ai valori medi della temperatura si può risalire anche alla sua distribuzione spaziale per mezzo di algoritmi di ricostruzione tomografica.

In questo lavoro sono descritti due di tali algoritmi, progettati specificamente per trattare insiemi di dati particolarmente ridotti, quali quelli che sono tipicamente a disposizione nei casi reali, e alcuni dei risultati ottenuti da dati simulati o realmente misurati in caldaie di centrali Enel.

2. La pirometria acustica

Se si suppone che un'onda acustica attraversi un mezzo gassoso senza trasportare calore, la relazione che lega la sua velocità v_s e la temperatura assoluta T del mezzo attraversato è:

$$v_s = \sqrt{\frac{gRT}{m}} \quad (1)$$

dove g è il rapporto tra i calori specifici a pressione e volume costante, R è la costante universale dei gas perfetti e m è il peso molecolare del gas.

Qualora si riesca a ricostruire una mappa spaziale della funzione $v_s(x,y)$, in base ad essa si può ricavare la corrispondente mappa della temperatura assoluta del gas:

$$T(x,y) = \frac{m v_s^2(x,y)}{\gamma R} \quad (2)$$

Un'analisi delle approssimazioni operate e dei conseguenti errori commessi adottando l'approccio qui descritto si può trovare in [3].

3. Ricostruzione tomografica della temperatura

Passiamo quindi a descrivere gli algoritmi usati per la ricostruzione delle mappe di temperatura sulla base delle configurazioni di misura tipiche che si possono incontrare nella pratica. Si consideri una sezione trasversale di una caldaia, con un sistema di riferimento cartesiano $x-y$, e sia $f(x,y)$ la lentezza del suono nei gas di caldaia, definita come il reciproco della velocità v_s . Se le pareti della caldaia in corrispondenza della sezione considerata sono attrezzate con trasduttori acustici in trasmissione e ricezione (vedi Figura 19), possono essere misurati i tempi di volo dei segnali acustici sui percorsi che uniscono le varie coppie di trasduttori. Supponiamo che i percorsi possibili siano N_d . A meno di errori di

varia provenienza (rumore di sistema), i tempi di volo sono dati da:

$$\tau_k = \int_{l_k} f(x, y) dl_k, \quad k = 1, \dots, N_d, \quad (3)$$

dove gli l_k sono percorsi rettilinei che uniscono i punti del perimetro della sezione di interesse in cui sono posti i trasduttori.

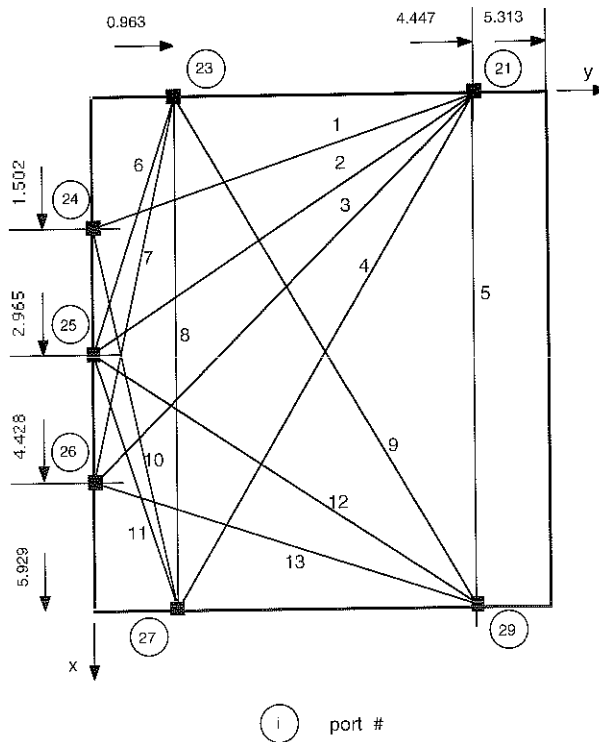


Fig. 19: Sezione di caldaia con trasduttori e i percorsi di misura dei tempi di volo.

Trovare una stima di $f(x,y)$ sulla base dei t_k è un caso particolare di ricostruzione di immagini da proiezioni [5], un problema ampiamente studiato negli ultimi trent'anni e che si incontra in tutti i sistemi di tomografia, di applicazione clinica o industriale.

La particolarità che si incontra in questo caso, come già accennato, è che N_d è in generale piuttosto piccolo, per cui si può sperare solo di ottenere delle ricostruzioni a risoluzione molto bassa, e inoltre il problema risulterà estremamente malcondizionato, o addirittura sottodeterminato, per cui gli algoritmi standard di ricostruzione tomografica

forniranno sempre soluzioni estremamente instabili. Nel seguito descriviamo due particolari approcci per risolvere il problema, l'uno basato sulla teoria della regolarizzazione di Tikhonov, l'altro progettato ad hoc per il problema ora in esame.

3.1 Parametrizzazione di Fourier e regolarizzazione di Tikhonov

Supponiamo che il dominio di definizione di $f(x,y)$ sia un rettangolo di lati L_x e L_y . Se $f(x,y)$ si considera pari e periodica con periodi $2L_x$ e $2L_y$, rispettivamente, lungo gli assi x e y , essa può essere sviluppata in serie doppia di Fourier di soli coseni, troncata ai due ordini massimi N_i e N_j

$$f(x,y) \approx \sum_{i=0}^{N_i} \sum_{j=0}^{N_j} A_{ij} \cos(i\pi u) \cos(j\pi v) \quad (4)$$

con

$$u = \frac{x}{L_x}, \quad v = \frac{y}{L_y} \quad (5)$$

Gli integrali in (3) diventano quindi:

$$\tau_k = \sum_{i=0}^{N_i} \sum_{j=0}^{N_j} A_{ij} h_{k,ij}, \quad k = 1, \dots, N_d \quad (6)$$

con

$$h_{k,ij} = \int_{I_k} \cos(i\pi u) \cos(j\pi v) dl_k \quad (7)$$

Le (6) rappresentano un sistema lineare di N_d equazioni in $N_p = N_i \times N_j$ incognite, che, dopo aver ordinato in qualche modo l'insieme a doppio indice degli A_{ij} in un insieme a un solo indice con N_p valori, assume la seguente forma matriciale:

$$\tau = Ha \quad (8)$$

In [2] e [3], la (8) è stata risolta, nel caso $N_d \geq N_p$, ricorrendo alla tecnica dei minimi quadrati vincolati. Questo tipo di soluzione, tuttavia, dà luogo a delle mappe estremamente instabili, nel senso che queste sono estremamente sensibili agli errori di misura, a causa del fatto che il sistema (8) è altamente malcondizionato. L'approccio più semplice per eliminare il malcondizionamento è costituito dalla teoria della regolarizzazione di Tikhonov [8], per mezzo della quale il problema originale viene riformulato in modo da penalizzare quelle soluzioni che non soddisfano a determinati criteri di regolarità nella soluzione.

Nel nostro caso, basandoci sul fatto che la mappa di temperatura non può presentare brusche variazioni spaziali, richiediamo che il gradiente di $f(x,y)$ non assuma valori troppo elevati. La stima del vettore a , cioè dei coefficienti incogniti A_{ij} , è quindi data da [1, 7]

$$\hat{a} = (H^T H + \lambda B^T B)^{-1} H^T \tau \quad (9)$$

in cui B è una matrice $N_p \times N_p$ tale che la norma quadrata $\|Ba\|^2$ è l'energia del gradiente di $f(x,y)$ se si assume valido il modello (4). Il parametro λ è detto parametro di regolarizzazione, e pesa l'influenza sulla soluzione finale dei dati misurati e del criterio di regolarità. Se i dati sono altamente affidabili, piccoli valori di λ assicureranno stabilità alla soluzione. Viceversa, maggiore è l'errore presente sui dati più grande dovrà essere il valore di λ in modo da far pesare di più la regolarità sulla soluzione finale.

3.2 Metodo di sezione-interpolazione

La tecnica di ricostruzione di Fourier-Tikhonov presenta alcuni inconvenienti dovuti essenzialmente alla parametrizzazione adottata per la soluzione. Questo ha giustificato lo sviluppo di un algoritmo ad hoc, che si basa su delle assunzioni abbastanza verosimili sull'andamento della funzione incognita e sulla supposta conoscenza della temperatura agli estremi dei percorsi di integrazione l_k .

Conoscendo i tempi di volo e le lunghezze dei percorsi di integrazione, si può stabilire per ogni percorso la velocità media del suono, e in base a questa, mediante una procedura iterativa [1] vista la non linearità della relazione tra temperatura e velocità, la temperatura media. A questo punto si può calcolare una approssimazione a tre parametri per il profilo di temperatura lungo ogni percorso (vedi anche [4]). Nel nostro caso abbiamo scelto un profilo di tipo parabolico:

$$\hat{T}_k(x,y) = A_k l_k^2 + B_k l_k + C_k \quad (10)$$

con coefficienti dati da

$$A_k = \frac{6}{L_k^2} \left(\frac{T_{0k} + T_{1k}}{2} - \bar{T}_k \right)$$

$$B_k = \frac{6}{L_k^2} \left(\bar{T}_k - \frac{T_{1k} + 2T_{0k}}{3} \right) \quad (11)$$

$$C_k = T_{0k}$$

in cui l_k è l'ascissa curvilinea sul k -esimo percorso, T_{0k} e T_{1k} sono le temperature assolute agli estremi del percorso, e \bar{T}_k è la k -esima temperatura media. Ottenuti così N_d profili monodimensionali, la temperatura può essere valutata mediante tecniche standard di interpolazione [6] su una griglia regolare che copre tutta la sezione di interesse.

4. Risultati sperimentali

Le prestazioni dei due algoritmi presentati sono state indagate per mezzo di simulazioni

numeriche e prove con dati reali. Le simulazioni numeriche sono state necessarie per poter verificare gli errori di ricostruzione sulla base di mappe di temperatura supposte perfettamente note, cosa che non poteva essere fatta in base a misure reali, in quanto delle misure dirette di temperatura sono difficili da ottenere, e sono anch'esse soggette ad errori.

Anche le prove in simulazione, comunque, sono state fatte considerando la configurazione reale del sistema di misura allestito presso la centrale Enel di Santa Gilla (CA), schematizzato nella Figura 19.

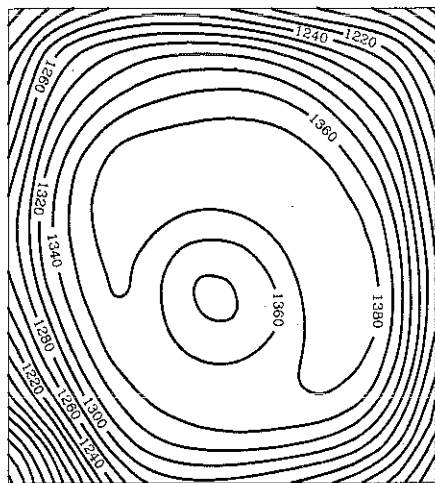
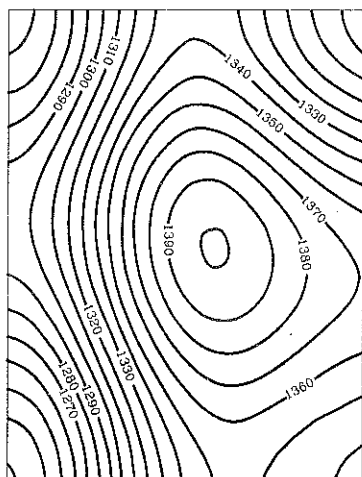


Fig. 20: Mappe termica assunta per le prove in simulazione.

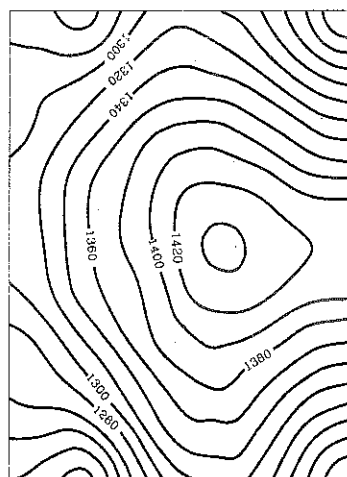
In Figura 20 è mostrata la mappa a curve di livello della distribuzione di temperatura assunta come nota, derivata dalla simulazione del comportamento termico della caldaia in specifiche condizioni di esercizio. In base a questa mappa ed alla (3) sono stati calcolati i tempi di volo e da questi, mediante gli algoritmi descritti, le mappe stimate, mostrate in Figura 21 per entrambi i metodi. Entrambe le mappe ricostruite sono abbastanza fedeli all'originale; per una valutazione quantitativa vedi [1].

Nel caso della tecnica di Fourier, si nota che, diversamente da quanto accade nell'originale, le curve di livello intersecano pressoché ortogonalmente le pareti della caldaia.

Questo comportamento è in contrasto con la realtà fisica ed è dovuto alla parametrizzazione della soluzione per mezzo di una serie di soli coseni.



(a)



(b)

Fig. 21: Mappe ricostruite con i metodi di Fourier (a) e di sezione-interpolazione (b).

Altra cosa da notare è che il livello di dettaglio nelle ricostruzioni è certamente scarso, ma ciò è una conseguenza della bassa risoluzione ottenibile da insiemi così ridotti di dati.

In base a misure reali di tempi di volo fornite dall'Enel, depurate dagli errori sistematici stimati, sono state ricostruite le due mappe di temperatura mostrate in Figura 22. I valori medio e massimo stimati dai due algoritmi nel caso mostrato sono in accordo entro i 30°C. Anche per quanto riguarda l'andamento generale delle curve di livello si riscontra un buon accordo tra le due stime, se si eccettua il comportamento peculiare dalla tecnica di Fourier già osservato nel caso di dati simulati. Sono stati fatti anche i confronti con un insieme sparso di valori di temperatura ottenuti con un pirometro ad aspirazione circa in concomitanza con le misure di tempi di volo, ed anche questi hanno rivelato un buon accordo con i valori ricostruiti con entrambe le tecniche.

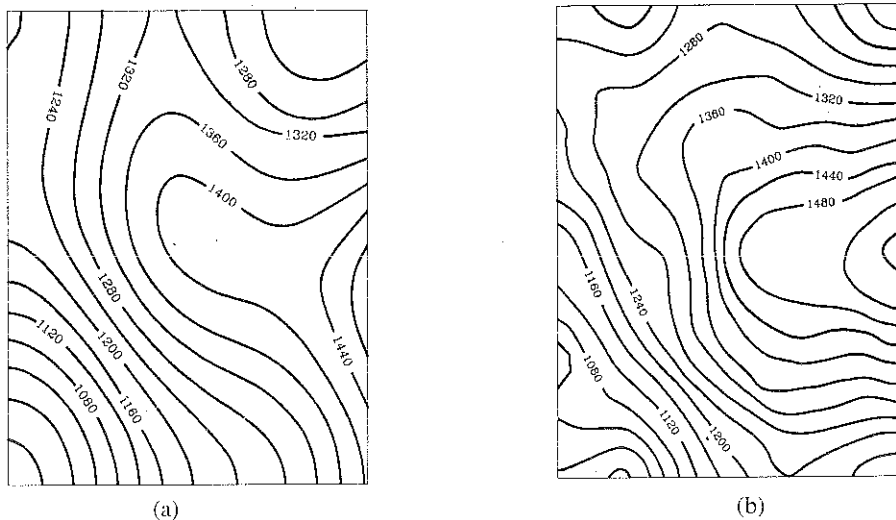


Fig. 22: Mappe ricostruite da misure reali con il metodo di Fourier (a) e di sezione interpolazione (b).

5. Conclusioni

La misura della temperatura all'interno di caldaie industriali è un problema non ancora risolto soddisfacentemente, che riveste una notevole importanza ai fini dell'ottimizzazione del rendimento di un impianto e della riduzione delle emissioni nocive. Le tecniche qui presentate si rivelano promettenti a questo scopo, e vanno valutate tenendo presente che gli esperimenti mostrati sono relativi a configurazioni di misura per cui l'insieme dei dati a disposizione è estremamente ridotto. Mentre questo rimane un vincolo quando si tratta di attrezzare caldaie esistenti, il problema può essere superato se l'introduzione del sistema di misura è prevista già dalla fase di progetto della caldaia, e in questo caso possono essere ottenute mappe di temperatura con definizione spaziale più alta e molto più affidabili di quelle qui mostrate.

Riferimenti bibliografici

- [1] Bramanti, M., Salerno, E.A., Tonazzini, A., Pasini, S., Gray, A. "An Acoustic Pyrometer System for Tomographic Thermal Imaging in Power Plant Boilers". IEEE Trans. on Instr. & Meas., **45** (1) 159-167, 1996.
- [2] Green, S.F. "An Acoustic Technique for Rapid Temperature Distribution Measurements". J. Acoust. Soc. Am., **77** (2) 759-763, 1985.
- [3] Green, S.F. "Acoustic Temperature & Velocity Measurement in Combustion Gases". Proc. Eighth Int. Heat Transfer Conf., San Francisco, USA, 1986.
- [4] Kleppe, J.A., Maskaly, J., Beam, G. "The Application of Image Processing to Acoustic Pyrometry". Proc. IEEE Int. Conf. on Image Proc., ICIP'96, Lausanne, 1996, Vol. II, 657-660.
- [5] Mersereau, R.M., Oppenheim, A.V., "Digital Reconstruction of Multidimensional Signals from their Projections". IEEE Proc., **62** (10) 1319-1338, 1974.
- [6] Pelto, C.R., Elkins, T.A., Boyd, H.A., "Automatic Contouring of Irregularly Spaced Data". Geophysics, **33** 424-430, 1968.
- [7] Salerno, E., Tonazzini, A. "2D Image Reconstruction from Sparse Line-Integral Data". Signal Processing, **23** (2) 193-203, 1991.
- [8] Tikhonov, A.N., Arsenin, V.Y. "Solution of Ill-Posed Problems". Winston-Wiley, Washington, 1977.

Indagini nelle strutture civili

Antonfranco Pasquale

AICE Consulting Srl
Via Boccaccio 20, I-56010 Ghezzano (Pisa)

Sommario. La diffusione delle metodologie d'indagine ha dato impulso ad una attività di ricerca nel settore che può considerarsi solo in parte sviluppata: nuovi strumenti d'indagine e nuove tecniche sono state fino ad oggi anche solo ipotizzate; in alcuni casi si intravede la possibilità di impiego di tecniche derivate da altri settori. In ogni caso è richiesta una sperimentazione approfondita perché esse diventino utilizzabili e redditizie. D'altra parte alcuni metodi di analisi sono ormai consolidati e regolati da normative che ne definiscono i campi di utilizzo e le modalità di applicazione (ad esempio la metodologia microsismica, lo sclerometro, il pull-out), altri non sono ancora consolidati.

1. Introduzione

Negli ultimi anni la consapevolezza della necessità ed opportunità degli interventi volti al restauro ed alla conservazione delle opere in generale, dai monumenti agli edifici civili ed industriali, alle infrastrutture come ponti e viadotti, ha favorito lo sviluppo e la diffusione delle tecniche più sofisticate di diagnosi, di analisi strutturale e di rinforzo.

L'esigenza della conservazione nasce da motivi diversi quali la vetustà del patrimonio edilizio esistente; il cambiamento delle caratteristiche dell'ambiente che hanno portato a condizioni più sfavorevoli; la volontà di mantenere gli edifici esistenti non solo per ragioni economiche, ma anche per ragioni culturali.

Le cause che impongono questi interventi possono essere il degrado dei materiali nel tempo o cause esterne che hanno provocato danneggiamenti nella struttura (ad esempio eventi sismici, cedimenti di fondazione ecc.), o una errata progettazione dell'opera.

L'importanza di poter disporre dei più efficienti metodi di indagine è fondamentale per

rilevare e raccogliere il maggior numero di informazioni sull'opera su cui si prospetta l'intervento, al fine di redigere un adeguato e corretto progetto di restauro.

La diagnosi deve infatti precedere qualsiasi decisione relativa ad eventuali azioni, accertando l'inadeguatezza strutturale, insieme con le sue cause, prima di procedere con interventi che possono risultare inadeguati o, peggio, dannosi.

2. Le prove non distruttive

Nel campo delle tecniche di diagnosi, in questi ultimi anni, hanno assunto maggior peso quei metodi definiti non distruttivi rispetto alle prove distruttive eseguite in laboratorio su campioni prelevati in situ. In realtà le due tecniche di indagine, prove non distruttive e prove distruttive, non si escludono a vicenda: per un quadro diagnostico completo è opportuno utilizzarle entrambe. Infatti le prove non distruttive permettono di definire meglio dove è possibile prelevare campioni significativi dei vari elementi costituenti l'opera, localizzando eventuali zone degradate, al fine di poter rappresentare la situazione reale del manufatto analizzato.

I parametri ricavati in laboratorio vanno poi comparati con quelli ottenuti da prove non distruttive, sempre di laboratorio, effettuate sugli stessi campioni, da impiegare come riferimento e taratura dei rilievi in situ. Ciò è utile in quanto la resistenza meccanica ricavata in laboratorio dalla rottura di provini può essere solo stimata con le prove non distruttive attraverso la misura di grandezze meccaniche diverse: in questo modo si individuano le curve di correlazione tra la resistenza meccanica e i parametri ottenuti dalla prova non distruttiva.

3. I metodi sonici e la tomografia sonica

3.1 I metodi sonici

I metodi sonici si basano sul principio che le caratteristiche del segnale sonico impulsivo (velocità, ampiezza d'onda e frequenza), trasmesso attraverso il materiale, sono correlate con le proprietà elastiche e sonore del materiale stesso.

In un buon calcestruzzo la velocità di propagazione delle onde elastiche di compressione (onde longitudinali P) è funzione del modulo elastico, della densità e del coefficiente di Poisson; la velocità dell'onda di taglio (onda trasversale S) è funzione della densità e del modulo elastico tangenziale.

In pratica i metodi sono basati sullo studio della trasmissione di un segnale sonico, consistente in treni di onde elastiche, con frequenze di 5-30 kHz, generato e ricevuto da speciali trasduttori elettroacustici. I trasduttori sono posizionati nella struttura ad una di-

stanza nota, variabile tra un metro ed alcune decine di metri. E' possibile calcolare la velocità del mezzo sulla base di tale distanza misurando il tempo che il segnale sonico impiega per viaggiare dal generatore al ricevitore.

Lo studio implica di eseguire misure lungo fori (sonic log) e misure dirette di velocità tra coppie di fori adiacenti (cross-hole), secondo percorsi orizzontali. Negli ultimi anni notevoli passi avanti sono stati fatti grazie allo sviluppo delle tecniche di tomografiaonica. Infatti, con tali tecniche è possibile ottenere una mappa dettagliata delle velocità delle onde P, su una sezione della struttura investigata, potendo così definire localmente lo stato di integrità della struttura.

Gli impulsi sonici generati da un trasmettitore viaggiano nel mezzo come onde elastiche di diverso tipo: compressionali (P); tangenziali (S) e superficiali (pseudo-Rayleigh, Stoneley), aventi differenti proprietà. Le onde P sono le più veloci, come conseguenza il loro tempo di percorso viene rilevato con buona precisione. Gli arrivi delle onde S spesso interferiscono con le code delle onde P, inoltre è difficile individuarle con grande precisione. Le onde di superficie pseudo-Rayleigh hanno generalmente alte frequenze e velocità inferiore delle onde S, non sono molto prese in considerazione in quanto il loro contenuto di informazioni sul materiale è assai scarso. Le onde di Stoneley (St) sono caratterizzate da basse frequenze, grande ampiezza e la loro velocità è leggermente più bassa di quella dell'acqua. Ampiezza e frequenza delle onde St sono notevolmente influenzate dallo stato di fessurazione del materiale e vengono facilmente riflesse dalle discontinuità intersecanti il foro.

Il *carotaggio sonico* (sonic log) consiste nel seguire le modalità di propagazione delle onde elastiche nel materiale all'intorno di un foro.

La sonda è costituita da un trasmettitore ed uno o più ricevitori piezoelettrici, usualmente distanziati di 50-100 cm. L'accoppiamento acustico tra i trasduttori ed il materiale viene assicurato dall'acqua di cui è riempito il foro.

Le misure di carotaggio sonico consistono praticamente nel misurare i tempi di percorso delle onde P ed S a differenti profondità.

Il *cross-hole* consiste nel registrare la velocità di propagazione delle onde elastiche, lungo percorsi orizzontali, tra la sorgente ed i ricevitori posti in due o più perforazioni adiacenti.

I generatori comunemente impiegati sono costituiti da trasduttori piezoelettrici, dello stesso tipo di quelli impiegati nelle sonde soniche, quando le distanze di misura sono di pochi metri, da generatori a scintilla quando le distanze sono di qualche decina di metri; questi ultimi utilizzano l'energia esplosiva generata da una scarica elettrica ad alta tensione (circa 4000 V) in una soluzione satura di cloruro di sodio. Viene creata in tal modo un'onda di pressione che dal foro di eccitazione si propaga nel materiale da indagare e raggiunge il foro di ricezione dove viene rilevata per mezzo di un ricevitore idrofonico.

La frequenza dominante dei segnali è dell'ordine di qualche decina di kHz per i trasduttori piezoelettrici e di qualche kHz per i generatori a scintilla.

Per la ricezione dei segnali si usano geofoni, anziché idrofoni; i geofoni devono essere rigidamente vincolati ai tubi di rivestimento dei fori che a loro volta devono essere cementati al terreno circostante.

Con strumentazione analoga a quella utilizzata per il carotaggio sonico viene misurato il tempo che intercorre tra l'istante di generazione e quello di ricezione delle onde P ed S; nota la distanza fra i trasduttori alle varie profondità di misura, viene facilmente calcolata la velocità di propagazione delle onde elastiche longitudinali e trasversali, che vengono diagrammate solitamente in funzione della profondità, oppure come diagrafiche a densità variabile (variable density log - VDL), analoghe a quelle che si ottengono con il carotaggio sonico.

3.2 La tomografia sonica

Nell'ambito dei metodi sonici, il più recente, innovativo e versatile, specie per quanto riguarda le indagini su grandi strutture, è sicuramente quello della "tomografia sonica".

Tale tecnica trova i suoi fondamenti nella ben nota Tomografia Assiale Computerizzata (TAC), utilizzata nella diagnosi medica con l'impiego dei raggi X, e consente di ottenere una immagine della distribuzione della velocità delle onde elastiche su sezioni piane all'interno della struttura indagata.

Il metodo consiste inizialmente nell'acquisire i tempi impiegati dai segnali sonici a compiere una fitta rete di percorsi che coprono, il più uniformemente possibile e con diverse inclinazioni, la sezione di terreno o di struttura delimitata dai fori.

Come trasmettitori possono essere usati quelli piezoelettrici od a scintilla; come ricevitori gli accelerometri o gli idrofoni.

I procedimenti di calcolo utilizzati per i metodi tomografici permettono di ottenere un'immagine dell'andamento di qualche proprietà fisica, su sezioni piane dell'oggetto indagato, a partire dalle proiezioni di tale grandezza ottenute da varie direzioni. Le proiezioni sono normalmente costituite da numerosi integrali di linea (trasformata di Radon) della proprietà fisica stessa. Nel caso della tomografia a raggi X questi integrali rappresentano l'attenuazione totale subita dai singoli fasci di raggi X; nel caso della tomografia sonica, invece, corrispondono ai tempi impiegati dalle onde soniche sui vari percorsi di misura.

Per i metodi tomografici a raggi X non esistono praticamente fenomeni di rifrazione e diffrazione, per cui gli integrali di linea sono relativi a percorsi rettilinei. Nel caso dei segnali sonici la trasformata di Radon è utilizzabile solo nel campo di validità delle leggi dell'ottica geometrica, quando cioè le lunghezze d'onda impiegate hanno dimensioni minori delle anomalie da rilevare. I percorsi dei raggi sonici, inoltre, si possono considerare rettilinei solo nel caso di piccole variazioni della velocità sonica (qualche per cento), mentre per variazioni maggiori è necessario determinare l'andamento in base alle leggi della rifrazione.

Nel caso di validità delle leggi dell'ottica geometrica, i tempi di percorso dei segnali sonici sono legati al campo di velocità per mezzo dei seguenti integrali di linea:

$$t_k = \int_{R_k} \frac{ds}{v(x, y)}$$

dove: t_k è il tempo di percorso del raggio sonico k-esimo; R_k è il percorso del raggio k-esimo; v è la velocità sonica, funzione della posizione (x,y) , nella sezione indagata.

Teoricamente la trasformata inversa di Radon risolve il problema della tomografia; tuttavia, per ottenere una buona definizione del campo della velocità e per evitare fenomeni di instabilità nell'inversione legati agli errori di misura, è necessario disporre di un elevato numero di dati, con percorsi in tutte le direzioni possibili, in modo che la sezione venga coperta il più uniformemente possibile. Poiché le strutture non sono sempre accessibili su tutti i lati ed i percorsi di misura, a causa della rifrazione, possono incurvarsi, per eseguire la trasformata di Radon si adottano metodi di espansione in serie.

Per il procedimento di calcolo la sezione di misura viene discretizzata con una griglia a maglie rettangolari (pixel), le cui dimensioni sono legate alla distanza fra due successivi punti di trasmissione o di ricezione, in cui la velocità è costante (figura 23).

Trascurando gli effetti della rifrazione, gli integrali di linea precedentemente citati, si riducono a sommatorie:

$$t_k = \sum_j \frac{\Delta s_{jk}}{v_j} = \sum_j \Delta s_{jk} \cdot p_j$$

dove p_j è la lentezza nel pixel j-esimo ed è l'inverso della velocità corrispondente.

In termini di equazione matriciale: $T = A P$, dove T è il vettore dei tempi misurati, A è la matrice dei tratti di percorso dei raggi sonici attraverso i vari pixel e P è il vettore delle lentezze. Per cui, la soluzione della tomografia consiste nella determinazione del vettore P con:

$$P = A_g^{-1} T$$

dove

è l'inversa generalizzata della matrice A .

Per il procedimento di inversione delle matrici vengono impiegati metodi iterativi, tra i quali si possono citare il metodo ART (Algebraic Reconstruction Technique schematizzato in figura 23) ed il metodo SIRT (Simultaneous Iterative Reconstruction Technique).

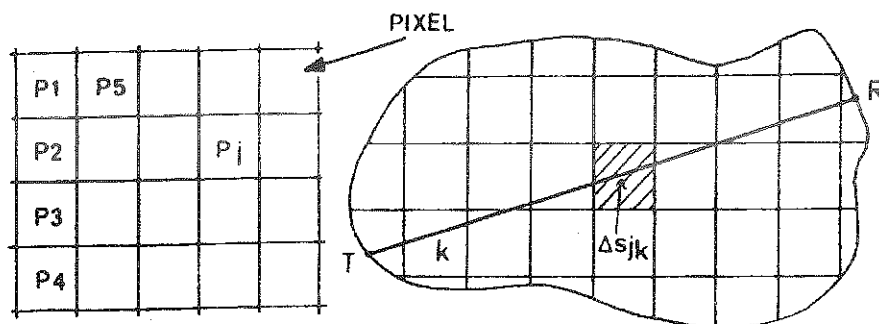


Fig. 23: Schema dell'algoritmo di calcolo ART.

Entrambi i metodi partono da un modello iniziale di velocità, normalmente uniforme, con velocità vicina alla media delle velocità dei vari percorsi, e lo modificano iterativamente in modo da minimizzare la differenza fra i tempi misurati e quelli calcolati con liberazione precedente. La differenza sostanziale fra i due metodi è che l'ART modifica il campo di velocità, considerando le differenze fra tempo misurato e quello calcolato, raggio sonico per raggio sonico, mentre il SIRT lo modifica tenendo conto dell'effetto complessivo di tutti i raggi che interessano ciascun pixel.

Per considerare anche gli effetti della rifrazione conseguenti a variazioni di velocità, nel calcolo dei tempi di percorso viene utilizzato un procedimento di "ray tracing". Infatti la tecnica attualmente usata segue sempre un procedimento iterativo, alternando il tracciamento dei percorsi sonici eseguito con un metodo di "ray tracing", con la modifica del campo di velocità effettuata utilizzando la tecnica SIRT (v. schemi di figura 24).

In tal caso l'integrale del tempo di percorso dei raggi sonici (divisi in segmenti di piccole dimensioni) può essere approssimato da:

$$t_k = \sum_{j=1}^{n-1} \frac{2}{v_j + v_{j+1}} \Delta s_j$$

Per l'utilizzazione del "ray tracing" la sezione indagata viene quindi discretizzata, suddividendola in maglie rettangolari in cui sono noti i valori di velocità nei nodi. I valori della velocità negli altri punti del campo sono determinati per mezzo di una interpolazione bilineare.

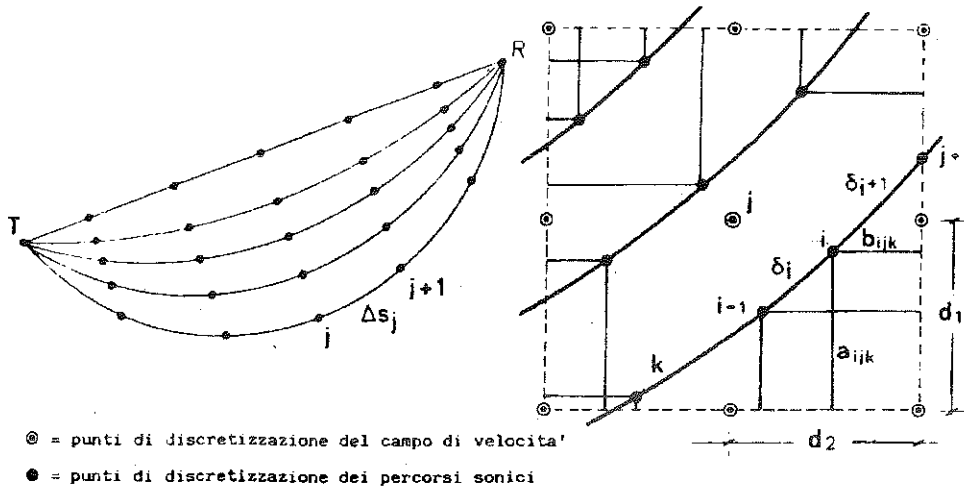


Fig. 24: Schema degli algoritmi di calcolo SIRT e "ray tracing".

Il risultato delle elaborazioni consiste in mappe dei campi di velocità della sezione investigata, le cui variazioni e distribuzioni sono evidenziate da falsi colori (tomogrammi) (vedi pag. 91-92). Di seguito si riportano le fasi intermedie ed il tomogramma finale relativo ad una indagine svolta sulla fondazione della chiesa di S. Francesco a Pistoia.

4. Conclusioni

Tra i metodi geofisici, quelli sonici, che sono localizzati, non distruttivi, rapidi, di elevata affidabilità e relativamente non molto costosi, possono essere considerati come ottimi strumenti per saggiare sistematicamente lo stato di salute di varie strutture.

In particolare, si è voluto evidenziare l'efficacia e l'affidabilità della tomografia sonica nelle seguenti tre fasi dell'indagine sull'invecchiamento delle strutture:

- *Diagnostica*; le indagini permettono di valutare lo stato di salute della struttura, individuando le aree caratterizzate dai più bassi valori di velocità sonica.
- *Guida ai ripristini*; le indagini consentono di delimitare precisamente le aree dove la struttura necessita maggiormente di essere restaurata.
- *Verifica dell'efficacia degli interventi*; ripetendo le misure con lo stesso schema delle indagini precedenti, è possibile verificare il beneficio apportato alla struttura dagli interventi di ripristino, confrontando le variazioni di velocità dei tomogrammi ottenuti prima e dopo la "cura".

Riferimenti bibliografici

- [1] Siviero, E. "Relazione introduttiva". Atti del seminario sulla sperimentazione su strutture, Venezia, 12-13 febbraio 1993.
- [2] Zainetti, A. "Tomografia sonica". Atti del seminario sulla sperimentazione su strutture, Venezia, 12-13 febbraio 1993.
- [3] Bertacchi, P., Zaninetti, A., Carabelli, E., Superbo, S. "Geophysical methods for the detection of ageing and effectiveness of repairs in dams". XVIIth International Congress of Large Dams (ICOLD). Vienna, Giugno 1991.
- [4] Bettolo, G., Brandolini, A., Zaninetti, A. "L'impiego della tomografia sonica per il controllo di grandi opere in calcestruzzo". Ass. It.di Metallurgia, Genova, 27 Nov. 1990.
- [5] Brandolini, A., Superbo, S., Zaninetti, A. "I metodi sonici per il controllo della qualità degli interventi di consolidamento dei terreni e di pali di fondazione". Ass. Italiana di Metallurgia, Genova, 27 Nov. 1990.
- [6] Carabelli, E. "Sonic velocity tomography in concrete and earth dams evaluation". 58th Annual Int. SEG Meeting, Anaheim, USA, 1988.
- [7] Carabelli, E., Gera, F., Superbo, S. "Underground applications of sonic techniques". OECD/NEA Workshop on Geophysical Investigations and Geologic Disposal of Radioactive Waste, Ottawa, Canada, 8th-10th Sept. 1982.
- [8] Carabelli, E., Sampaolo, A., Sperindè, M. "Geophysical methods for determining the integrity of concrete of a dam". XIII Int. Congr. on Large Dams (ICOLD), New Delhi, 1979.
- [9] Carabelli, E., Sampaolo, A., Superbo, S. "Mesure sonique dans les roches, les sols et le béton". IAEG/ISSMFE Int. Symp. on Soil and Rock Investigations by in Situ Testing, 18th-20th May, 1983.
- [10] Zaninetti, A. "La tomografia sonica per la diagnostica di grandi strutture". I Ciclo di Conferenze su Danneggiamento e Diagnostica di Materiali e Strutture, Politecnico di Torino, Settembre 1991.

Controllo visivo di qualità nel settore tessile

Marco Barbieri

Tecnotessile Società Nazionale di Ricerca Tecnologica r.l.
Via del Gelso 13, I-50047 Prato

Sommario. Sono descritte alcune esperienze sviluppate nell'ambito di Progetti di Ricerca Applicati per l'industria tessile, in particolare nel settore del controllo dei filati in rocche e bobine, sia ottenuti da fibre discontinue, in particolare laniere e cotoniere, che da filamenti sintetici. I sistemi di controllo sono stati sviluppati in collegamento con dispositivi automatici di manipolazione e trasporto.

1. Introduzione

I sistemi di automazione sviluppati nell'ambito delle fasi finali della filatura consentono ad oggi l'esecuzione di tutte le fasi riguardanti la movimentazione delle confezioni di filato:

- scarico macchine
- trasporto
- pesatura
- timbratura o etichettatura
- imballo

Nella maggior parte delle installazioni, anche le più moderne, nonostante l'elevato livello di perfezione raggiunto dalle moderne roccatrici, il controllo visivo nelle caratteristiche dimensionali della rocca e di integrità dell'avvolgimento, non appare eliminabile ai fini di assicurare un prodotto che garantisca una corretta esecuzione delle fasi successive del ciclo tessile. Con le attuali conoscenze, tale controllo viene effettuato quasi esclusi-

vamente da personale specializzato, il che spesso costringe a mantenere l'esecuzione manuale di almeno una delle su elencate fasi (più spesso lo scarico o l'imballo) dovendo abbinarle al controllo visivo manuale.

L'elevata affidabilità delle moderne roccatrici confina la difettosità in errori estremamente localizzati e saltuari, il che rende ancor meno efficiente il controllo visivo umano a causa dell'affaticamento e della distrazione. Inoltre non è normalmente richiesta l'individuazione del 100% dei difetti possibili, quanto quella dei difetti più vistosi e ripetuti, spesso imputabili al cattivo funzionamento di una singola testa di roccatura.

Ciò contribuisce a rendere i sistemi di controllo visivo computerizzato di estremo interesse nel settore tessile, in quanto, oltre a offrire soluzioni ai problemi descritti, consentono di immagazzinare e elaborare dati statistici in tempi tali da permettere il tempestivo intervento sulle macchine operatrici.

2. Attività di Tecnotessile

Tecnotessile, Società Nazionale di Ricerca Tecnologica, è stata costituita a Prato nel 1972, in applicazione della legge 1089 del 25/10/1968 che istituiva un fondo per la ricerca applicata. Con il crescere delle attività e con l'ampliamento del proprio raggio di azione dall'area tessile pratese a imprese del Centro e del Nord Italia, Tecnotessile ha visto progressivamente aumentare la propria base societaria con l'ingresso di primarie aziende del settore tessile/abbigliamento, dei servizi informatici e del meccanotessile.

Attualmente Tecnotessile ha in corso di svolgimento, in collaborazione con aziende tessili e meccanotessili, una quindicina di progetti di ricerca concernenti la messa a punto di nuove macchine, processi e prodotti tessili.

La Società, oltre ad operare nel mercato della ricerca applicata, dell'innovazione tecnologica e della formazione di tecnici di ricerca e di ricercatori, svolge attività di consulenza tecnologica alle imprese della filiera tessile e del meccanotessile per la risoluzione di problematiche di varia natura.

Tecnotessile infatti è organizzata in aree di competenza con riferimento a:

- la tecnologia tessile in senso proprio, dalle materie prime ai prodotti finiti; opera su contratto nell'area della ricerca e del trasferimento delle tecnologie;
- la progettazione meccanica di dispositivi, macchine, sistemi soprattutto per quello che riguarda lo sviluppo di macchine e l'automazione di processo;
- la sperimentazione di macchine e processi tessili, con il supporto interno dei laboratori tecnologico e chimico;
- l'informazione tecnico-scientifica, nonché quella economica e di mercato, utilizzando sia la propria biblioteca che i collegamenti con le principali banche dati del mondo;
- la formazione di tecnici e specialisti per i vari ambiti del sistema tessile e dei settori collegati: nei campi delle tecnologie, automazione, qualità, controllo di processo, ecologia, risparmio energetico, attraverso corsi istituzionali o progettati e svolti su speci-

fiche esigenze dell'utente;

- l'integrazione e lo sviluppo di tecnologie informatiche, le applicazioni CAD, l'automazione e il controllo di processi produttivi e di macchine;
- il testing sui prodotti tessili.

I laboratori operativi della Società sono ubicati a Prato ed occupano una superficie coperta di 850 mq.

Tecnotessile mira a uno sfruttamento ottimale delle tecnologie esistenti e un loro continuo miglioramento, lo sviluppo di nuove tecnologie di processo ed il trasferimento di know-how da altri settori (tecnologie orizzontali), un miglioramento della qualità dei prodotti, della efficienza dei processi produttivi e della organizzazione, nella convinzione che la ricerca scientifica, l'innovazione tecnologica e la formazione siano sempre più fattori strategici di competitività per le imprese del settore Tessile-Abbigliamento.

La compagine sociale della Società, ampiamente diversificata sia nel mondo del tessile che del meccanotessile e dell'automazione, risulta rappresentativa di tutta la filiera tessile. Le attività produttive di ricerca sono strettamente connesse alle commesse acquisite. La Società, in relazione alle esigenze temporali e professionali, opera anche utilizzando competenze e risorse esterne, collaborando con altri Centri di Ricerca, Università e consulenti con competenze specifiche in Italia e all'estero.

Per l'esecuzione dei progetti di ricerca, Tecnotessile incoraggia il sostegno finanziario del Fondo Speciale per la Ricerca Applicata dell'IMI (L. 46/82 e successive modificazioni), e di altre forme di contributi regionali e comunitarie. Di conseguenza, oltre alla fattiva partecipazione alle attività di ricerca con propri ricercatori, Tecnotessile ha maturato esperienza relativamente a programmazione e gestione di progetti di ricerca pluriennali e multidisciplinari, con la partecipazione di imprese industriali ed Enti di ricerca.

Nell'ambito di interesse per questo convegno Tecnotessile ha realizzato sistemi prototipali di controllo integrando sistemi di visione commissionati all'esterno e sistemi di manipolazione studiati internamente.

3. Sistema di visione e di rocche

Le specifiche del sistema prototipale sviluppato per il controllo di rocche di filato, richiedono che lo stesso accetti essenzialmente due tipi di rocche: coniche (con due inclinazioni: Figura 25) e cilindriche (Figura 26), e che possa essere integrato a bordo di una navetta di manipolazione automatica, azionata lungo rotaie a terra per lo scarico su chiamata di 18 roccatrici. Essa realizza il trasferimento delle rocche su carrelli, separando le stesse secondo una classificazione tra rocche di prima e di seconda scelta. Il tempo a disposizione per l'acquisizione, l'elaborazione delle immagini per il controllo e la classificazione è di 5-6 s. Il sistema, prima in veste prototipale, poi con prestazioni a livello industriale, è stato realizzato e sperimentato nel 1992-94 presso un importante produttore di filato laniero per maglieria, con la collaborazione della Gualchierani System S.a.s. di Prato e la Vision Systems di Biella.

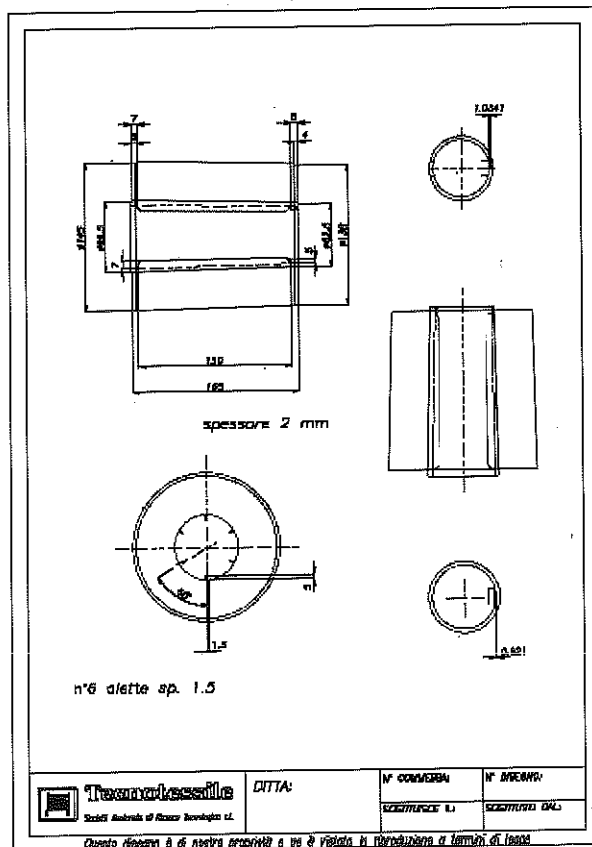


Fig. 25: Tipologia di rocche con tubetto conico

Le misure di controllo dimensionale e morfologico che il sistema deve effettuare sulle rocche sono:

- **Ispezione delle facce:**
Richiede la verifica della presenza di difetti tipo anellature dovute a mescolanze di filo di diversa provenienza sulle facce anteriore e posteriore; la verifica della presenza di difetti di avvolgimento come spire molli e spire sollevate (corde tese); la verifica della presenza di grovigli sulla faccia e all'interno del tubetto; la verifica della sporgenza corretta del tubetto.
- **Misura del diametro:**
Viene effettuata a differenti altezze del cono.
- **Ispezione del fianco:**
Consiste nella misura delle distanze dalla retta di regressione ricavata dalle rilevazioni dimensionali lungo il profilo del cono esterno, ed è rilevante ai fini del corretto dipanamento del filo nelle fasi successive e come stima indiretta della densità della

rocca ai fini di ottenere una adeguata uniformità dei trattamenti tintoriali cui la rocca potrà andare soggetta.

- **Controllo della presenza della riserva:**

La quantità di filo che compone la riserva (detta anche codino) viene valutata in termini di numero di spire su un numero di finestre variabile da 1 a 3 con dimensioni impostabili.

La configurazione hardware del sistema di visione comprende due PC (master e slave) dotati di bus ISA, tre monitor (uno principale, uno per la visualizzazione delle immagini del master e uno per le immagini dello slave), una camera di ispezione chiusa da tutti i lati montata a bordo della navetta di automazione e dotata di sportelli per l'ingresso e l'uscita delle rocche.

In prossimità degli sportelli è montato uno schermo elettrostatico, e la camera è alimentata con un flusso d'aria a circuito chiuso in leggera sovrappressione, allo scopo di eliminare l'ingresso di polvere e fibre che possano posarsi sulle ottiche delle telecamere.

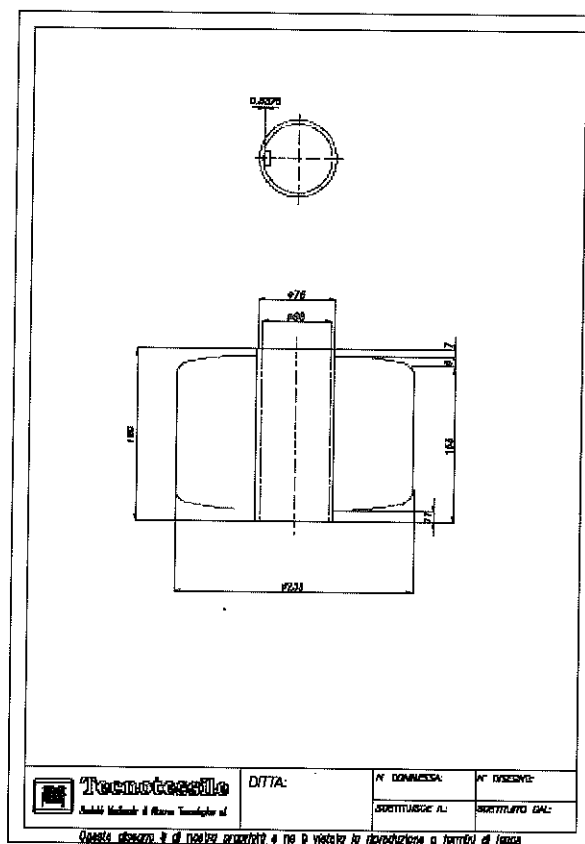


Fig. 26: Tipologia di rocche con tubetto cilindrico

Queste sono di tipo matriciale a CCD monocromatiche, e sono così distribuite:

- telecamera 1 (controllo frontale della faccia minore), montata su un supporto regolabile che consente di effettuare letture su rocche di diversa conformazione geometrica, produce le immagini per il controllo del diametro, delle spire molli, dei grovigli, e dell'inquinamento delle partite (utilizzando luce di Wood);
- telecamera 2 (controllo del fianco) per ricavare immagini su errori di uniformità della distribuzione del filato o tensioni irregolari nello stesso;
- telecamera 3 (posizionata sulla base del tubetto) consente il controllo della riserva;
- telecamere 4-10 (orientate verso la faccia posteriore della rocca) permettono di ricavare in due fasi successive un numero di immagini sufficiente per individuare le spire cadute.

Il cuore del sistema è costituito dalle schede di elaborazione di immagine IMG512 prodotte dalla Vision Systems, con 256 livelli di grigio, che integrano un frame grabber e un sistema di elaborazione delle immagini secondo i parametri che sono stati impostati dal PC.

Le varie lampade sono comandate da potenziometri che ne permettono la regolazione dell'intensità.

La postazione elabora una molteplicità di informazioni provenienti da più sistemi di visione. In particolare il PC master contiene due sistemi di visione, uno per le analisi della faccia e uno per il fianco e la riserva. Contiene inoltre il controllore dei segnali di I/O. Il PC slave contiene due sistemi di visione, entrambi dedicati all'analisi delle mescolanze sulla faccia posteriore.

Sia il sistema di visione per le analisi della faccia che quello per le analisi del fianco e della riserva, permettono anche il controllo delle relative luci e telecamere, e provvedono a commutare la scheda di visione tra le modalità live (dal vivo) e snap (blocco immagine), nonché a impostare l'immagine video in modo "lineare" (che prevede una suddivisione lineare del campo di conversione A/D).

Il controllore dei segnali di I/O permette il controllo dei seguenti segnali: apertura e chiusura dell'autoiris (regolazione automatica del diaframma telecamera) nelle due posizioni per luce di Wood, luce nera o altre; posizionamento della telecamera per la faccia minore per tenere conto delle rocche cilindriche o coniche; interfaccia con il sistema automatico di movimentazione delle rocche.

Per ogni tipo di difetto esistono dei parametri impostabili che intervengono sulla sensibilità del sistema al difetto o al contrasto con lo sfondo.

Il sistema è stato sviluppato in due versioni prototipali: una da banco per una prima messa a punto a livello di laboratorio e una integrata sulla navetta di scarico delle 18 roccatrici. Entrambe sono state sottoposte a sperimentazione con modifiche e revisioni sia a livello del software, che dei sistemi di illuminazione, che dei dispositivi elettro-pneumatici di posizionamento delle telecamere.

Il progetto è stato concluso con risultati positivi, in quanto:

- la navetta ha permesso di eliminare il vecchio carrello di accumulo e i relativi rischi di produrre ammaccature sulle rocche, che possono divenire causa di scarto;
- la memorizzazione e la impostazione dei parametri per i vari colori del filato permette di evitare che variazioni casuali possano provocare l'individuazione di falsi scarti;
- la rilevazione della riserva è stata assicurata grazie ad una migliore collocazione della telecamera, anche nei casi in cui la riserva è posizionata sotto il filato o nascosta dalla sua pelosità;

- l'individuazione della presenza di inquinamento di filato ottico su impacco non ottico e viceversa è stata ottenuta con margini di errore trascurabili.

Alcune limitazioni sono rimaste evidenti e riguardano:

- il cambio di partite e la conseguente numerosità dei parametri richiedono una archiviazione preceduta da una fase di training assistita da operatori esperti;
- con certe tipologie di filato la taratura dei parametri per ottenere un riconoscimento non troppo selettivo risulta ancora dispendiosa in termini di tempo e risorse.

4. Sistema di controllo bobine

In un diverso settore, quello dei filati sintetici testurizzati, è in corso di sviluppo un prototipo di sistema di controllo che include un sistema di visione con esigenze non limitate alla caratterizzazione geometrica e dimensionale, ma rivolto soprattutto alla individuazione di difetti del filato dovuti al processo di produzione dello stesso. Allo stato attuale del progetto, le cui specifiche non sono divulgabili, si è completato uno studio di fattibilità che ha permesso di ottenere la seguente classificazione dei difetti secondo tre livelli di problematicità:

- Difetti rilevabili con sicurezza:
 - difetti di forma
 - alterazioni della densità media della bobina
- Difetti rilevabili con difficoltà:
 - mancanza di interlacciature
 - macchie su colori chiari
 - irregolarità di tintura (cerchiature sulle facce)
 - barrature (macchie di colore diverso)
 - spire cadute
 - scalibrature su parte di una bobina (anellatura)
- Difetti giudicati non rilevabili con un sistema di visione:
 - disuniformità di colore tra bobine della stessa partita
 - difetti di testurizzazione su bobine intere

L'attività sul progetto sta proseguendo per approfondire le possibilità di impiego di sistemi di visione che utilizzano reti neurali e altre tecniche da impiegare in integrazione o in alternativa.

Allo stato attuale è stato sviluppato il sistema di misura della densità delle bobine, che si basa su tre telecamere, cui è affidato il rilievo del profilo geometrico, una bilancia per la misura del peso, e un algoritmo che effettua il calcolo del volume, la sottrazione del peso del tubetto, e quindi della densità media e il suo confronto con i limiti tolleranza impostati. In questo caso sono utilizzati un PLC a bordo della macchina e un PC con un sistema di visione.

Conclusioni

Le esperienze sviluppate hanno permesso di raggiungere risultati adeguati alle esigenze poste. Rappresentano un punto di partenza importante per la ulteriore specializzazione dei sistemi di visione nel controllo di prodotti tessili, in particolare nell'ambito di nuovi progetti di ricerca finalizzati al controllo del colore e alla ricerca di difetti su tessuti ortogonali e a maglia e su capi confezionati.

Indagini termovisive per la conservazione e lo studio dei Beni Culturali: Esperienze

Lorenzo Rosi

SICILTEST s.r.l.
Augusta (SR) - Italy

Sommario. Nelle settore delle Indagini diagnostiche non invasive finalizzate allo studio ed alla conservazione dei Beni Culturali, i rilievi termografici occupano una posizione significativa grazie alla vastità dei problemi indagabili con questa metodica ed alla capacità di questa di integrarsi con altre metodiche di indagine.

Vengono qui di seguito esposte delle esemplificazioni sui possibili campi di applicazione della metodica oggetto di argomento, seguite dalla presentazione di un'esperienza riguardante l'integrazione di differenti analitiche dell'immagine.

1. Introduzione

In questo contributo si darà una visione dell'esperienza da noi conseguita nei settori della Diagnostica per i Beni Culturali e per il Risparmio energetico mediante uso di indagini termovisive.

Queste trovano le loro basi teoriche nel fatto che grazie alla capacità di ogni materiale di emettere spontaneamente radiazioni elettromagnetiche, è possibile mediante l'uso di apparecchiature in grado di rivelare le suddette radiazioni nella banda dell'infrarosso termico, ottenere delle mappe termiche superficiali in grado di darci informazioni sul manufatto indagato.

2. Indagini termovisive per la conservazione e lo studio dei Beni Culturali

Nel settore della Diagnostica per il restauro architettonico, le indagini termografica occupano un posto di rilievo per la vastità dei possibili campi di impiego e per la possibilità di integrazione con altre metodologie di indagine quali, ad esempio, la magnetometria, l'endoscopia, la termoflussimetria.

I campi di applicazione di questa metodica nel settore in esame, sono riassumibili nei seguenti quattro gruppi:

- Indagini termografiche finalizzate all'individuazione di patologie dei materiali in opera.
- Indagini termografiche finalizzate alla conoscenza del manufatto.
- Indagini termografiche finalizzate alla verifica qualitativa di interventi per la conservazione del manufatto.
- Indagini termografiche finalizzate al contenimento energetico edilizio.

2.1 Indagini termografiche finalizzate all'individuazione di patologie dei materiali in opera

Tra le patologie riscontrabili mediante l'uso di questa metodica le più importanti sono:

Individuazione dell'umidità di risalita capillare e da percolamento, di distacchi localizzati del manto di intonaco dal paramento murario, di fessure passanti, del quadro microfessurativo dell'intonaco, della decoesione di elementi in cotto.

Per questo gruppo riportiamo due esempi. Il primo riguarda l'individuazione della linea di bagnasciuga su un setto murario il ladiri e ricoperto di intonaco affetto da umidità di risalita capillare (fig. 27).

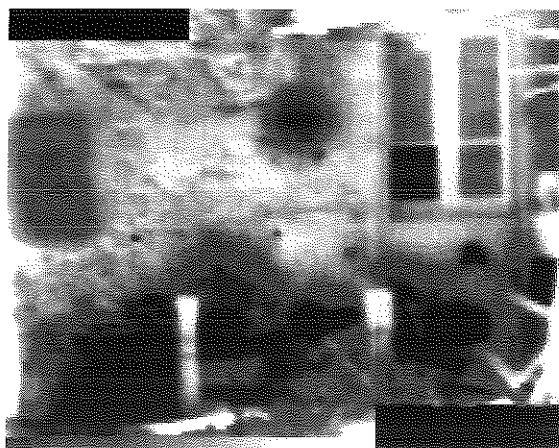


Fig. 27: Casa colonica in ladiri - Assemini (CA) [1]
Individuazione dell'umidità da risalita capillare.

Le riprese sono state effettuate in fase di emissione. Le indagini termografiche, che in questo caso vengono utilizzate solo per ottenere una visione qualitativa del fenomeno, possono essere integrate da indagini finalizzate alla determinazione del contenuto in acqua mediante, ad esempio, il metodo ponderale.

Il secondo esempio riguarda invece l'individuazione del quadro microfessurativo e dei distacchi localizzati su una superficie voltata affrescata (fig. 28).

Queste ultime immagini sono state riprese in fase di sollecitazione termica dopo circa venti minuti di riscaldamento mediante convezione. I distacchi di intonaco risultano quindi essere più caldi superficialmente (bianco nell'immagine) delle aree adiacenti non soggette alla medesima patologia.

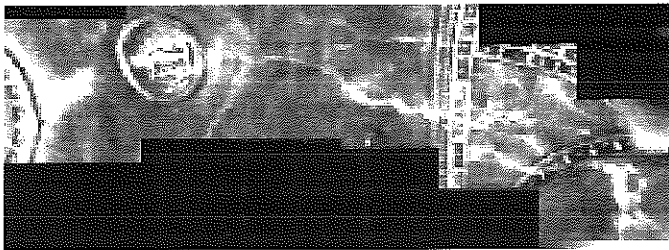


Fig. 28: Sala della Scalcheria - Palazzo Ducale di Mantova [2]
Individuazione del quadro fessurativo dell'intonaco.

2.2 Indagini termografiche finalizzate alla conoscenza del manufatto

E' possibile, grazie alle differenti caratteristiche termiche dei materiali, individuare delle "anomalie" all'interno del tessuto murario quali tamponamenti di porte e finestre, inserimenti di travi lignee, variazioni del tessuto murario e struttura delle coperture volte.

La figura 29 mostra un caso classico di individuazione di differenti fasi edilizie, su di un setto murario coperto da un manto di intonaco. In seguito ad un riscaldamento della superficie da indagare mediante convezione, le differenti risposte termiche dei materiali hanno consentito la lettura della tessitura muraria del setto caratterizzato dalla presenza di finestre tamponate.

Anche nel caso riguardante la figura 30 si è utilizzato il metodo di riscaldamento mediante convezione.

La particolare mappatura termica visibile nella figura è stata interpretata come una probabile centinatura lignea utilizzata per modificare la superficie dell'intradosso della volta in esame ed utilizzata come supporto per stendere il manto di intonaco in seguito affrescato.

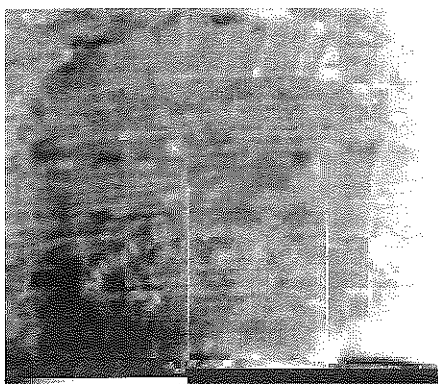


Fig. 29: Carceri Risorgimentali -
Palazzo ducale di Mantova [3]
Individuazione di fasi edilizie in un setto murario.

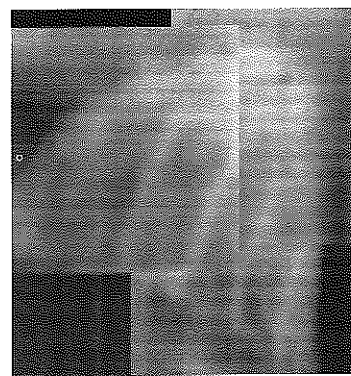


Fig. 30: Palazzo Peloso - Albenga
(SV) Individuazione di una
centinatura lignea nella volta.

2.3 Indagini termografiche finalizzate alla verifica qualitativa di interventi atti alla conservazione del manufatto

In alcuni casi risulta essere necessaria la programmazione di un monitoraggio termografico per verificare l'effettiva riuscita degli interventi di conservazione eseguiti o per tenere sotto controllo l'evoluzione di alcune patologie.

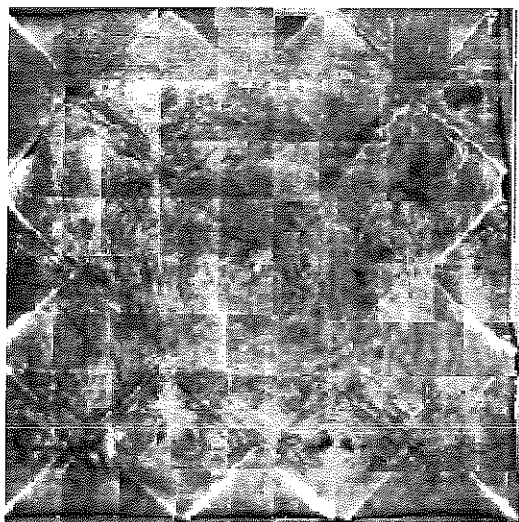


Fig. 31: Camera degli Sposi - Palazzo ducale di Mantova [4] Individuazione del quadro microfessurativo dell'intonaco affrescato della volta.

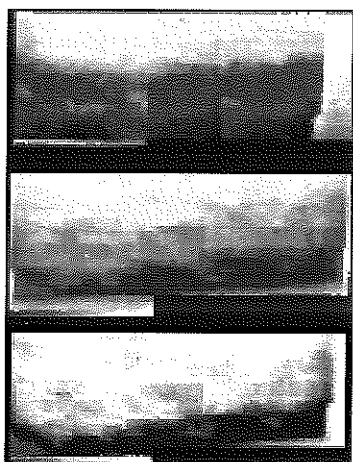


Fig. 32: Portico di S.Luca - Bologna [5] Monitoraggio dell'andamento dell'umidità da risalita capillare.

La mosaicatura termografica riportata nella figura 31 mostra la risposta termica di una superficie voltata sottoposta precedentemente a interventi di conservazione. Onde poter garantire la ripetitività della prova ed una visione perpendicolare della superficie indagata, ci si è premurati di tracciare a terra una griglia di riferimento per le riprese. Nella figura 32 vengono riportati i risultati di un monitoraggio termografico eseguito su di un setto murario affetto da umidità da risalita capillare. Le immagini sono state riprese prima, dopo uno e due mesi dall'intervento di deumidificazione. E' sensibile la diminuzione di superficie delle aree fredde interpretabili come zone umide (vedi anche la tavola a colori, pag. 93).

2.4 Indagini termografiche finalizzate al contenimento energetico edilizio

Nonostante che il risparmio energetico presenti problematiche tali da costituire un settore specifico nel campo della diagnostica, è interessante aprirvi una finestra in quanto problematiche legate alla dispersione termica ed all'impiantistica si presentano su larga scala nel patrimonio edilizio storicizzato.

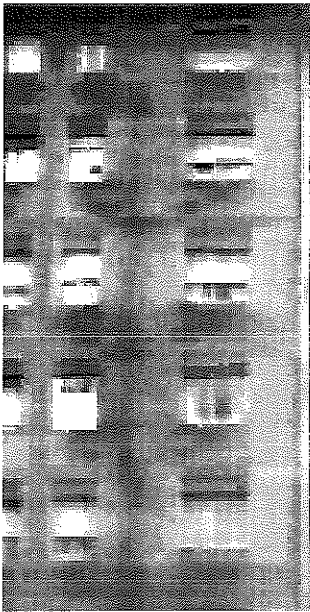


Fig. 33: Edificio di civile abitazione sito in via Zurigo - Milano. Individuazione dei ponti termici.

Problemi quali la cattiva messa in opera di materiali o il decadimento delle caratteristiche termiche di questi, possono essere evidenziati mediante la mappatura termica superficiale degli edifici come visibile nella figura 33.

Le indagini termografiche risultano essere di aiuto anche per la ricerca di perdite di acqua calda dall'impianto di riscaldamento. La mosaicatura termografica riportata nella figura 31 mostra la risposta termica di una superficie voltata sottoposta precedentemente a interventi di conservazione. Onde poter garantire la ripetitività della prova ed una visione perpendicolare della superficie indagata, ci si è premurati di tracciare a terra una griglia di riferimento per le riprese.

3. Integrazione delle indagini termovisive con altre analitiche dell'immagine

Un'ulteriore applicazione delle indagini termografiche è data dall'integrazione di questa metodologia con altre analitiche dell'immagine (fig. 34) (vedi anche le successive tavole a colori pag. 93), quali la restituzione fotogrammetrica e l'analisi stratigrafica degli alzati (fig. 35), finalizzata alla stesura di un progetto di conservazione delle superfici indagate (fig. 36) [6].

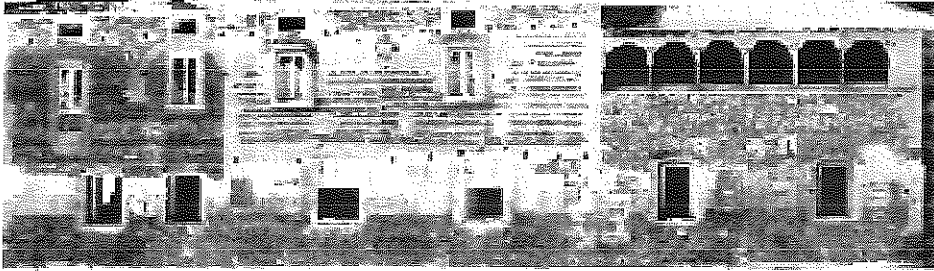


Fig. 34: Castello di Malpaga - Seriate (BG)
Indagini termografiche del prospetto est.

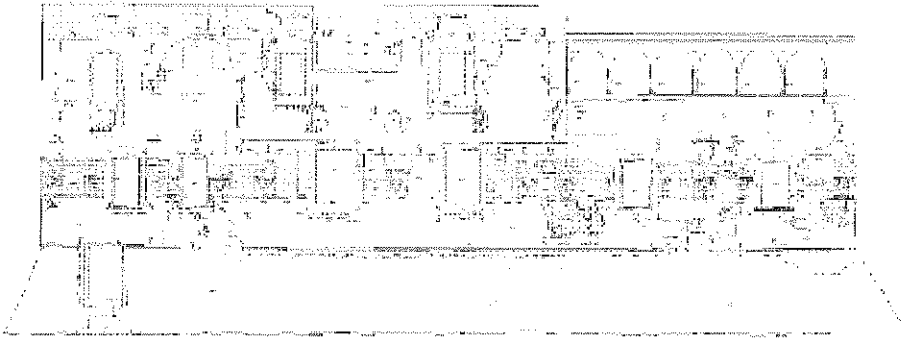


Fig. 35: Castello di Malpaga - Seriate (BG)
Lettura stratigrafica del prospetto est

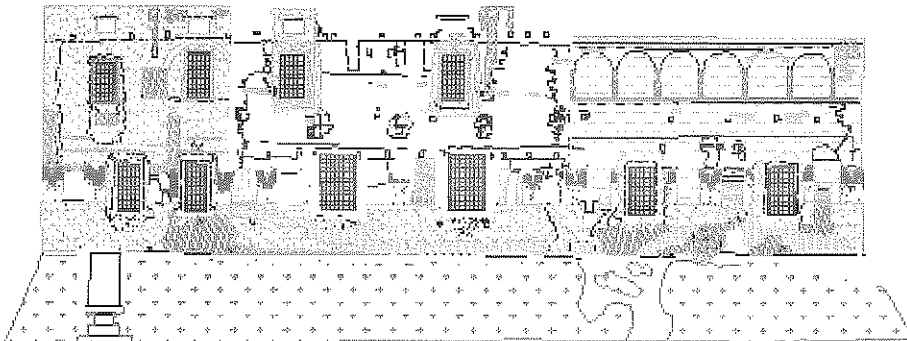


Fig. 36: Castello di Malpaga - Seriate (BG)
Rilievo delle patologie di degrado e progetto di conservazione

4. Conclusioni

Le indagini termovisive appaiono un ottimo strumento per la soluzione di alcune problematiche legate alla conservazione ed allo studio del manufatti storico-architettonici, quali l'individuazione di alcune patologie riscontrabili nell'infrarosso termico e le discontinuità del paramento murario site al di sotto del manto di intonaco.

Queste indagini appaiono ancor più preziose alla luce della necessaria non invasività dei manufatti in questione in quanto Beni da conservare.

La metodica di indagine in esame accresce il suo interesse se integrata con altri strumenti di analisi in grado di accrescere e completare le informazioni acquisite.

E' quindi nel nostro interesse lo studio delle possibili applicazioni congiunte con altri settori delle Diagnostica, quali le indagini mediante l'uso di apparecchi radar, la determinazione del flusso di calore che attraversa la parete mediante termoflussimetria e la determinazione del contenuto in acqua nella muratura mediante il metodo ponderale.

Riferimenti bibliografici

- [1] Rilievo effettuato in collaborazione con il Laboratorio del Dipartimento di Conservazione e Storia dell'Architettura del Politecnico di Milano.
- [2] Rilievo effettuato in collaborazione con la società D.P. Restauro di Venezia
- [3] Rilievo effettuato in collaborazione con la società D.P. Restauro di Venezia
- [4] Rilievo effettuato in collaborazione con la società D.P. Restauro di Venezia
- [5] Rilievo effettuato in collaborazione con lo Studio associato TECHNE' di Venezia
- [6] Ludwig, N., Macario, F., Rosi, L., Rosina, E., Suardi, G., Tucci, G. "L'integrazione del rilievo geometrico, termografico e stratigrafico per la conoscenza del patrimonio architettonico", Atti del XXII Convegno Scienza e Beni Culturali, Bressanone, 3-6 luglio 1996.

troppe tipologie di dati da modellare. E' lecito chiedersi, ad esempio, come un unico pacchetto possa gestire informazioni così diverse tra loro come immagini video, dati spaziali e serie temporali. Illustra riesce a far questo estendendo il modello di database relazionale per riconoscere nuovi tipi di dati; in altre parole, il punto fondamentale è la estensibilità.

Informix Illustra/Universal Server™ costituisce una piattaforma estensibile ad alte prestazioni per l'immagazzinamento e il recupero di oggetti. Estensioni ad oggetti, noti come moduli DataBlade(TM), permettono di aggiungere selettivamente ad Illustra motori intelligenti specifici per determinati tipi di dati, ampliando le capacità intrinseche del linguaggio SQL con funzioni personalizzate, così che Illustra possa essere sempre in grado di gestire al meglio i dati richiesti da ciascuna particolare applicazione.

I moduli DataBlade possono includere anche nuovi metodi di accesso, per consentire un accesso rapido anche a quei dati che non sono particolarmente adatti a essere ricercati attraverso gli algoritmi B-Tree presenti nei sistemi RDBMS.

Per esempio, l'algoritmo D-Tree può essere implementato per i dati testuali, mentre per i dati spaziali è indicata una ricerca di tipo R-Tree. I moduli DataBlade sono in grado di contenere anche metodi di visualizzazione alternativi per aiutare l'utente a lavorare con dati complessi.

Un modulo DataBlade arricchisce Informix Illustra/Universal Server dell'intelligenza che lo rende adatto all'immagazzinamento di dati complessi.

Illustra Server è un DBMS relazionale

Tra le principali tecnologie relazionali supportate vi sono quelle di maggior successo, tra cui:

- Accesso flessibile ai dati tramite SQL standard
- Controlli di sicurezza standard
- Integrità dei dati completa assicurata dal server
- Capacità transazionale e recovery del sistema
- Prestazioni e scalabilità

Informix Illustra/Universal Server è un DBMS a oggetti

Agli sviluppatori relazionali, Informix Illustra/Universal Server permette anche l'accesso alle principali tecnologie OO:

- Possibilità di creare qualunque tipologia di dato
- Accesso ottimizzato ai dati complessi
- Rapidità nello sviluppo di applicazioni di qualità e manutenzione ridotta mediante incapsulazione, ereditarietà e polimorfismo
- Accesso diretto ai dati attraverso gli ID degli oggetti

Regole ed alerts

Illustra supporta anche un ricco sistema di regole che permette allo sviluppatore di specificare delle azioni da prendere prima, dopo, o in alternativa a quelle richieste da un'azione dell'utente finale. E' inoltre possibile informare programmi esterni degli eventi in svolgimento all'interno del database grazie all'implementazione di particolari allarmi.

3. Moduli DataBlade: cosa sono e come funzionano

3.1 I moduli DataBlade rendono i BLOB obsoleti

Gestire con efficacia tipologie avanzate di dati significa oltrepassare le capacità limitate dei sistemi di database tradizionali. I moduli DataBlade, un'esclusiva di Illustra, permettono di aggiungere al DBMS l'intelligenza richiesta da tipologie specifiche. Con la presenza di un modulo DataBlade, Illustra "comprende" i nuovi tipi di dati, rendendo così disponibili le proprie funzioni completamente ottimizzate di memorizzazione e query anche in presenza di dati non tradizionali.

Gli attuali RDBMS lavorano molto bene con un numero limitato di tipologie di dati, quali numeri interi e in virgola mobile, date e stringhe di caratteri. All'interno del nucleo di questi DBMS tradizionali si trova un set di funzionalità chiave per ciascuna tipologia:

- Possibilità di query sui contenuti
- Operatori di confronto
- Ottimizzazione intelligente delle query
- Tecniche di memorizzazione efficienti
- Alte prestazioni
- Metodologia di memorizzazione (metodo di accesso) appropriata secondo il tipo di dato

Per poter gestire un numero maggiore di dati oltre a queste semplici tipologie predefinite, i DBMS relazionali relegano i dati complessi a uno status secondario, memorizzandoli come BLOB, Binary Large Objects. Poiché questi BLOB non sono altro che una serie di bit svincolati da qualunque interpretazione da parte del sistema, la tecnologia RDBMS non ha modo di effettuare query basate sul contenuto di tali oggetti. Mancando gli operatori di confronto, non è possibile costruire un metodo di query intelligente, né si possono ottenere alte prestazioni nelle procedure di memorizzazione e recupero dei dati stessi. Si può dire che i sistemi RDBMS non forniscono ai BLOB le stesse funzionalità che li hanno resi così utili in presenza di dati tradizionali, rendendo il database incapace di gestire dati più complessi. Il lavoro difficile viene lasciato al singolo sviluppatore, che deve comprendere i contenuti, i formati e le metodologie richieste da ciascuna tipologia, ripetendo tutte queste procedure per ogni applicazione. Ma non basta: poiché i sistemi RDBMS non possono interpretare i contenuti dei BLOB, il lavoro su questi oggetti binari deve essere demandato al client; il conseguente passaggio di BLOB sulla rete si traduce per la bandwidth in un peso non indifferente.

I moduli DataBlade rappresentano un approccio totalmente nuovo al supporto di dati complessi, oltrepassando i limiti imposti dal concetto di BLOB. Un modulo DataBlade viene aggiunto al DBMS già esistente, estendendone l'intelligenza e rendendo disponibili le funzionalità necessarie al supporto nativo di tipologie particolari di dati. Proprio come un coltellino universale può rispondere a nuove esigenze semplicemente attraverso l'inserzione di una lama appropriata, così Illustra Server può gestire nuovi tipi di dati aggiungendo il modulo DataBlade richiesto (*vedi pag. 94*).

Un modulo Illustra DataBlade(TM) estende l'orientamento agli oggetti oltre le metodologie di programmazione, facendolo arrivare alle strategie di gestione dei dati. I moduli DataBlade introducono nuove tipologie di dati e nuove funzioni, e possono integrare anche metodi di visualizzazione e metodi di accesso supplementari per consentire l'effettuazione di query intelligenti anche sui nuovi dati.

3.2 Il relazionale potenziato dagli oggetti

Illustra Server combinato con i moduli DataBlade potenzia il modello relazionale, permettendo al linguaggio SQL di gestire con efficienza anche le query su dati complessi. Tutto questo si traduce in una serie di vantaggi pratici: ricerche basate sui contenuti, ottimizzazione delle query, alte prestazioni nella ricerca e nell'estrazione dei dati tramite metodi personalizzati per ciascun tipologia di dati. Illustra è il primo DBMS che permette di integrare, spostare e gestire molteplici tipologie di dati combina la potenza degli oggetti con la flessibilità del relazionale assicura il controllo dell'integrità dei dati complessi da parte del server utilizza i moduli DataBlade rendendo obsoleti i BLOB.

Alcuni esempi di Datablade Module

Informix 2D/3D Spatial Datablade Module

Memorizza ed analizza oggetti bidimensionali e tridimensionali (vettori, mappe, etc) e permette l'accesso rapido tramite indici di tipo R-Tree. Oltre 300 funzioni disponibili, tra le quali "Overlap", Area e Perimetro, Volume.

Informix Image Datablade Module

Memorizza, converte, gestisce e tratta immagini raster in oltre 50 formati (GIF, JPEG, TARGA, etc). Le funzioni di trattamento includono rotazione, evidenziazione bordi e convoluzione.

Informix Time Series Datablade Module

Definisce e tratta serie di dati con connotazione temporale (time-stamped), come ad esempio quelli utilizzati per le analisi finanziarie. Il modulo permette accesso rapido ai dati e include medie mobili, estrazioni, allineamenti, estrapolazioni, etc.

Informix Web Datablade Module

Crea rapidamente applicazioni Web Interattive. Il modulo genera le pagine HTML dinamicamente sulla base di programmi e dati contenuti nel database stesso.

Verity Text Search Datablade Module

Applica le funzioni di ricerca testuale avanzate di Verity topicSEARCH ai documenti memorizzati nel database. Le ricerche possono essere effettuate su database, su documenti PDF, file di Word Processing, SGML, HTML e altri.

PLS Datablade Module

Offre sofisticati meccanismi, molto flessibili, per la ricerca, memorizzazione e gestione del testo.

S-Plus Datablade Module

Aggiunge ad Illustra il supporto per oltre un migliaio di funzioni statistiche.

Text Datablade Module

Fornisce funzionalità per l'analisi ed il controllo di testi. Il testo viene registrato nel suo formato originale utilizzando un meccanismo di registrazione altamente performante conosciuto come D-Tree.

VIR (Visual Information Retrieval) Datablade Module

Fornisce un potente sistema, basato sul contenuto, per il ritrovamento di immagini e video da database multimediali, utilizzando criteri di ricerca basati sul reale contenuto dell'immagine.

I criteri di ricerca includono il colore, la forma, la composizione.

4. INFORMIX & ICMIT

Informix è sponsor dell'International Consortium for Medical Imaging Technology (ICMIT). Uno degli obiettivi prioritari del consorzio è la definizione di standard per il trattamento di immagini mediche. La tecnologia e il supporto di Informix contribuiranno in modo determinante nello sviluppo della tecnologia per la gestione di immagini mediche. Utilizzando lo standard DICOM (Digital Imaging and Communication), un insieme di regole che permettono l'utilizzo di immagini mediche di apparati eterogenei, l'ICMIT ha pianificato lo sviluppo di un datablade con il quale sarà possibile manipolare immagini DICOM utilizzando il linguaggio SQL 3.

L'interferometria differenziale per la misura degli spostamenti superficiali della crosta terrestre

Manlio Tesaurò

•Dipartimento di Ingegneria Elettronica
Università di Napoli *Federico II*
Via Claudio 21, 80125 Napoli, Italy

•Istituto di Ricerca per l'Elettromagnetismo
e i Componenti Elettronici (I.R.E.C.E.) - CNR
Via Diocleziano 328, 80124 Napoli, Italy

Sommario. Il telerilevamento ambientale permette all'uomo di "osservare" oltre le sue capacità visive e fornisce informazioni di natura globale sia spaziale che temporale, caratteristiche molto utili per seguire i mutamenti degli ecosistemi che si evolvono su larga scala. In questo lavoro si pongono in luce gli aspetti legati ai sensori a microonde in particolare all'uso dell'informazione della fase dell'immagine complessa che permette una misura molto accurata degli spostamenti della superficie terrestre.

1. Introduzione

Negli ultimi anni il desiderio di arricchire la conoscenza umana e di incrementare il benessere e la qualità della vita hanno spinto l'uomo a sviluppare sempre di più i sistemi spaziali per il telerilevamento ed il monitoraggio ambientale. Le notevoli potenzialità di questi sistemi offrono oggi la possibilità di analizzare e comprendere molti fenomeni naturali terrestri su vasta scala; a tale proposito si consideri quale ruolo gioca un satellite meteorologico nello studio dei fenomeni atmosferici.

Nel telerilevamento ambientale i sistemi si differenziano in funzione del tipo di informazione da acquisire, della dimensione degli oggetti o della dinamica del fenomeno che si intende studiare. In particolare, al fine di ottenere viste sinottiche di grandi aree della superficie della Terra o di altri pianeti sono generalmente richieste immagini bidimensionali, contenenti informazioni accurate sulla geometria e sulle caratteristiche fisiche della superficie osservata.

Nell'ambito dei "sensori ad immagine" il Radar ad Apertura Sintetica (SAR) [1] è certamente uno dei mezzi più potenti per soddisfare questa esigenza. Si tratta, in particolare, di un sistema attivo a microonde in grado di conciliare l'esigenza di avere elevate risoluzioni (1-10 metri) a terra con l'uso di antenne di modeste dimensioni. Inoltre la sua modalità attiva di funzionamento e l'utilizzo delle microonde consentono di ottenere mappe

bidimensionali complesse della scena osservata, indipendentemente dall'illuminazione solare e dalle condizioni meteorologiche.

Il SAR controlla la risoluzione in *slant range* ricorrendo ad impulsi di elevata energia ma a banda molto ampia (tipicamente un *chirp*), tali quindi da essere poi opportunamente compressi in ricezione con l'ausilio di un *filtro adattato*. A differenza, però, degli altri radar per immagini, il SAR riceve un segnale corrispondente ad un'area a terra molto estesa, a causa delle modeste dimensioni dell'antenna fisica rispetto alla lunghezza d'onda. Nonostante ciò il SAR raggiunge ottime risoluzioni in *azimuth*, ricorrendo ad una tecnica di compressione del diagramma di antenna nota come *antenna sintetica* [1].

Tale tecnica, implementata sommando coerentemente tutti i ritorni elettromagnetici che provengono da uno stesso punto durante l'intero tempo di osservazione, consente di *sintetizzare* nel tempo un array fisico, le cui dimensioni lungo la direzione di *azimuth* sono decisamente maggiori rispetto a quelle dell'antenna reale.

Come già detto, il SAR fornisce immagini complesse della riflettività della scena osservata e, nonostante la fase di tali immagini normalmente esibisca caratteristiche aleatorie dovute al fading, esistono importanti applicazioni nelle quali viene proficuamente sfruttata proprio l'informazione di fase.

L'interferometria SAR (IFSAR) è una tecnica per estrarre informazioni sulla superficie della Terra a partire dalla immagine radar complessa (modulo e fase). L'idea base è che la posizione di un punto a terra può essere individuato dalla differenza di fase tra due segnali ricevuti da due antenne. Queste possono essere montate sullo stesso veicolo (*single pass interferometry*) e sono separate spazialmente o in direzione ortogonale al volo (*across-track*) o lungo essa (*along-track*). Nel primo caso la differenza di fase (interferogramma) è legata alla topografia (*digital elevation map DEM*), cioè la stessa scena è vista con due angoli differenti e la distanza tra le antenne è detta *baseline* spaziale [2]. Nel secondo caso l'interferogramma è legato ai movimenti superficiali (in questa configurazione è possibile misurare le correnti oceaniche [3]), cioè, la stessa scena è vista in due istanti differenti e la distanza tra le antenne è detta *baseline* temporale perché rappresenta il tempo di separazione tra le due acquisizioni.

La disponibilità dei dati satellitari (in particolare la missione tandem ERS-1/ERS-2) ha permesso di sfruttare una nuova tecnica per generare mappe interferometriche. Le due antenne sono montate su piattaforme separate [4] e le acquisizioni sono sintetizzate da due passaggi ripetuti dei due satelliti separati quindi sia nel tempo che nello spazio (*repeat pass interferometry*) cioè sono presenti entrambe le baseline. Questa caratteristica è molto utile poiché sia la topografia sia i movimenti superficiali possono essere misurati scegliendo accuratamente sia la separazione temporale e quella spaziale della coppia interferometrica.

Nel presente lavoro si mettono in luce prima le condizioni necessarie per generare un'interferogramma a partire da una coppia di immagini SAR e si considerano le due principali applicazioni, misura della topografia e dei movimenti superficiali, con particolare enfasi a quest'ultima.

2. Principi base per la generazione di interferogrammi

La coppia di immagini a valle della elaborazione per costruire l'antenna sintetica sono:

$$h_1(x, R_1) = \gamma_1(x, R_1) e^{-i \frac{4\pi}{\lambda} R_1} \quad (1)$$

$$h_2(x, R_1) = \gamma_2(x, R_1) e^{-i \frac{4\pi}{\lambda} (R_1 + \delta R)} \quad (2)$$

La geometria generale di un sistema IFSAR è illustrata in figura 36; in essa A1 e A2 rappresentano i centri di fase delle due antenne e P un generico elemento della scena, posizionato ad una altezza z rispetto al riferimento. Inoltre si è indicata con B la distanza tra le antenne (*baseline*), con l'angolo di osservazione del sensore (*look-angle*) e con l'angolo che la baseline individua con l'asse orizzontale (*tilt-angle*). Le variabili (x, R_1) rappresentano le coordinate azimuth e slant range e γ è una stima del coefficiente complesso di retrodiffusione. Quest'ultimo dipende sia dalle caratteristiche della superficie (rugosità, umidità del terreno, costante dielettrica, ecc.), che dall'angolo di osservazione. Come è possibile rilevare dall'eq.(1,2), la fase dell'immagine complessa SAR è costituita dalla somma di due contributi; uno legato al fattore propagativo

$$\exp\left[-i \frac{4\pi}{\lambda} R_1\right]$$

e l'altro invece di carattere aleatorio (fase di $\hat{\gamma}$), dipendente dall'interazione dell'onda elettromagnetica con i centri diffusori della cella di risoluzione.

L'interferogramma è ottenuto a partire da queste moltiplicando la prima immagine per la coniugata della seconda ed estraendo poi dal risultato la fase (*fase interferometrica*).

Si supponga che le due immagini siano caratterizzate da $\gamma_1 = \gamma_2$. In tal caso, poiché i contributi di fase legati a γ si cancelleranno vicendevolmente, si potrà attribuire la fase interferometrica ai soli fattori propagativi delle eq. (1,2) e quindi scrivere che:

$$\phi = \arg(h_1 h_2^*) = \frac{4\pi}{\lambda} \delta R \quad ,$$

dove * indica l'operazione di coniugazione.

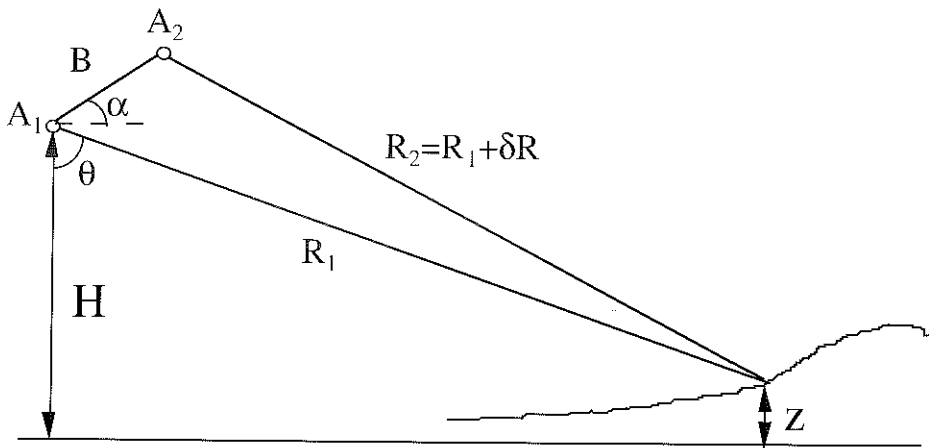


Fig. 36: Geometria di riferimento del SAR in configurazione interferometrica.

I requisiti base per ottenere informazioni dalla fase della coppia di immagini sono

- 1) stabilità del coefficiente di retrodiffusione,
- 2) condizioni atmosferiche simili,
- 3) orbite stabili,

tra le due acquisizioni.

La prima condizione comporta l'uguaglianza dei due coefficienti di retrodiffusione, dunque, la fase interferometrica dipende dalla differenza dei cammini ottici percorsi dai due segnali. In realtà i due contributi non si elidono perfettamente e una misura della cancellazione è fornita dalla coerenza, valutata tramite:

$$c(x, R) = \frac{|\mathbb{E}[h_1(x, R) \cdot h_2^*(x, R)]|}{\sqrt{\mathbb{E}[|h_1(x, R)|^2] \mathbb{E}[|h_2(x, R)|^2]}} \quad (4)$$

La non perfetta cancellazione del termine legato al coefficiente di retrodiffusione comporta la presenza di un termine additivo $\arg(\gamma_1, \gamma_2^*)$ che può essere modellato come rumore. I principali motivi di una non perfetta cancellazione sono la:

- *baseline spaziale*: è dovuta al differente angolo di vista della scena che produce una variazione del coefficiente di retrodiffusione tra le due acquisizioni (*spatial decorrelation*) e il suo effetto dipende dalla topografia locale e dagli effetti di retrodiffusione volumetrici. Questo effetto può essere visto come una traslazione spettrale nel dominio del numero d'onda per il fatto che vedo la scena con due angoli diversi. La decorrelazione spaziale pone un limite alla lunghezza della baseline (baseline critica) oltre la quale si ha una perdita di coerenza totale $c=0$ in tal caso gli spettri non si sovrappongono [5]. La baseline critica per la missione ERS vale circa 1115 m per scena piatta e dipende dalla lunghezza d'onda dall'angolo di osservazione e dalla risoluzione (minima unità telerilevata a terra).
- *baseline temporale*: è dovuta al differente istante di osservazione che produce una variazione del coefficiente di retrodiffusione tra le due acquisizioni (*temporal decorrelation*) e il suo effetto dipende da movimenti della superficie a livello sub-pixel dovuti ad esempio al vento. Queste variazioni possono essere utili in caso di classificazione della vegetazione a partire dalle mappe di coerenza.
- *rumore* può essere di natura termico di sfocamento o di un non perfetto allineamento delle immagini. Tale termine viene combattuto da un'operazione di media tra i pixel delle immagini.

La seconda condizione comporta che la differenza di fase può essere interpretata come differenza di percorso geometrico e non semplicemente di differenza di cammino ottico.

3. L'interferometria SAR per la ricostruzione dei profili altimetrici

Nelle immagini SAR gli oggetti della scena (tridimensionale) osservata sono proiettati in un piano individuato dalle coordinate *slant range* ed *azimuth*. Questo comporta che due oggetti puntiformi A e B, posizionati ad altezze differenti sulla superficie, sono individuati

solo dalla loro posizione in azimuth e range e non dalla loro quota. È quindi evidente che è impossibile, mediante una singola immagine SAR, valutare la topografia della scena ritratta.

La misura diviene invece possibile se si ha a disposizione una coppia di immagini della stessa zona, ottenute elaborando i dati acquisiti con angoli di vista differenti. In tal caso una prima strategia è quella di applicare una tecnica stereoscopica: due punti a diversa quota, osservati da angoli differenti, sono posizionati sulla coppia di immagini in celle radar distinte (sovrapposto un punto sulle due immagini il secondo sarà in una posizione traslata) e, dunque, valutando l'entità dello shift si può risalire alla quota relativa. Purtroppo a frequenze di microonde l'entità della traslazione è molto piccola (1/2 pixel per variazioni di quota dell'ordine delle centinaia di metri) e rende, quindi, impraticabile questa strada.

Una seconda tecnica, indicata con il nome di *Interferometria SAR* (IFSAR) [2], sfrutta invece la natura coerente del sensore e tramite l'informazione di fase contenuta nelle due immagini SAR consente la generazione di modelli digitali del profilo altimetrico molto accurati (DEMs).

Con riferimento alla figura 36, si consideri ora il triangolo A1-P-A2 per il quale è applicabile il teorema di Carnot [6]:

$$R_2^2 = R_1^2 + B^2 - 2BR_1 \sin(\vartheta - \alpha) \quad (5)$$

Da questa utilizzando la relazione:

$$R_2 = R_1 - \delta R \quad (6)$$

si determina che:

$$\delta R = B \sin(\vartheta - \alpha) - \frac{\delta R^2}{2R_1} - \frac{B^2}{2R_1} \quad (7)$$

Poiché la distanza che separa le antenne dai punti della scena (in particolar modo se montate su piattaforme spaziali) è molto più grande della baseline, si possono trascurare il secondo e il terzo termine all'interno dell'eq. (7); così facendo si ottiene che:

$$\delta R = (R_1 - R_2) \approx B \sin(\vartheta - \alpha) \quad (8)$$

Sempre con riferimento alla situazione di figura 1 è inoltre possibile relazionare l'altezza z del punto P al *look-angle* mediante l'equazione:

$$z = h - R_1 \cos \vartheta \quad (9)$$

dove con h si è indicata l'altezza del sensore.

Combinando infine l'eq. (3) con l'eq. (8) si ricava che :

$$\phi = \frac{4\pi}{\lambda} B \sin(\vartheta - \alpha) \quad (10)$$

che consente con l'ausilio della eq. (9) di risalire alla quota z del punto in esame.

4. L'Interferometria Differenziale SAR per la valutazione degli spostamenti centimetrici

L'Interferometria Differenziale (DIFSAR) è una tecnica che consente di individuare e misurare i movimenti superficiali di piccola entità (centimetri) che si verificano lungo la direzione di osservazione di un sensore SAR [7-11]. Questa caratteristica, associata alla capacità del SAR di riprendere zone molto estese con una elevata risoluzione, rende tale tecnica particolarmente indicata per la misura di numerosi fenomeni geofisici, quali le deformazioni e i rigonfiamenti della superficie nelle zone sopra le faglie, gli assestamenti del territorio successivi ai terremoti [7], le deformazioni anomale delle superfici dei vulcani indicatrici di prossime eruzioni [8], il movimento dei ghiacci [9] ecc.

Tale tecnica si basa sul fatto che eventuali cambiamenti della morfologia della scena, avvenuti tra due singole acquisizioni separate temporalmente, generano differenze di cammino ottico e, quindi, frange di interferenza sulla combinazione delle immagini. Ovviamente, se le due acquisizioni avvengono sulla stessa orbita, le frange risultanti per effetto di eventuali spostamenti saranno le uniche presenti, visto che i punti fermi in entrambi i passaggi sono localizzati alla stessa distanza dai sensori; tale contributo è quindi ascrivibile all'eventuale spostamento.

Poiché le orbite relative ai due passaggi normalmente non coincidono, nel singolo interferogramma si ha anche una variazione di fase dovuta ad un differente angolo di vista dello stesso punto sulla scena; tale variazione di fase è pertanto indicativa del contributo topografico. Dunque, poiché nel singolo interferogramma i due contributi sono sovrapposti, la finalità del DIFSAR sarà appunto quella di separarli. In questo caso la baseline temporale deve essere scelta in modo da contenere tra le due acquisizioni l'evento in esame. La presenza di una baseline spaziale invece produce una variazione della fase alla topografia.

Una prima tecnica sviluppata in [7] prevede l'acquisizione di un singolo interferogramma, ma sfrutta la presenza di una mappa di riferimento (DEM) esterno. Sottraendo l'interferogramma misurato e quello "sintetico", simulato dal DEM esterno con gli stessi parametri orbitali dell'interferogramma acquisito, si ricavano le frange residue. Esse vengono addebitate a cambiamenti della topografia della scena, avvenuti tra le due acquisizioni combinate nell'interferogramma misurato.

I limiti principali di questa tecnica consistono in:

- 1) non sempre si può disporre di un DEM di un determinato sito;
- 2) anche se disponibile, un DEM non sempre è accurato e le eventuali imprecisioni possono essere dell'ordine del fenomeno da osservare.

Un modo per superare tale inconveniente è quello descritto in [10], dove gli interferogrammi da differenziare vengono generati utilizzando esclusivamente le informazioni acquisite dal sensore durante tre passaggi successivi sulla medesima scena.

La teoria dell'interferometria differenziale a tre passaggi, presentata in [10], utilizza tre immagini SAR della stessa scena, acquisite in tempi differenti, per formare due coppie interferometriche, una che non osservi alcuna modificazione della topografia e l'altra, invece, scelta in modo che le due acquisizioni delimitino temporalmente il fenomeno da osservare. Questa particolare cura nella selezione delle coppie interferometriche si giustifica con la necessità di avere a disposizione due interferogrammi, dei quali solo uno posseda al suo interno il contributo dovuto agli spostamenti; in questo modo essi, opportu-

namente processati e differenziati, consentiranno la formazione di un terzo interferogramma, indicato in [14] come “*double-difference interferogram*“, il quale, essendosi cancellate vicendevolmente le frange addebitabili alla topografia, presenterà una fase diversa da zero solo nelle aree interessate dalle modificazioni superficiali, consentendone dunque l'individuazione e la misura.

Dalle tre immagini SAR si generino i due interferogrammi a *master* comune A1-A2 e A1-A3; si ipotizzi inoltre che le tre immagini abbiano una elevata coerenza in modo da poter esprimere le fasi interferometriche come dipendenti esclusivamente dalle caratteristiche geometriche. In particolare, avendo indicato con la fase interferometrica relativa alla coppia A1-A2, si avrà per essa un'espressione analoga all'eq. (10).

Si osservi inoltre (vedi figura 36) che è pari, nella ipotesi di raggi paralleli, alla componente della baseline nella direzione di osservazione (detta componente parallela $B_{//}$); ciò permette di riscrivere l'eq. (10) in forma più compatta:

$$\phi = \frac{4\pi}{\lambda} B_{//} \quad (11)$$

Tale risultato mostra che, per ogni elemento di risoluzione, la fase interferometrica è pari alla baseline parallela, misurata in termini di lunghezza d'onda e moltiplicata per 4π . Analogamente per la coppia A1-A3 si avrà similmente all'eq.(11) che:

$$\phi' = \frac{4\pi}{\lambda} B'_{//} \quad (12)$$

dove questa volta la componente parallela $B_{//}$ è $B \sin(\vartheta - \alpha')$ (l'apice indica che si sta considerando la seconda coppia di immagini). Sulla base delle considerazioni sviluppate fino a questo momento, rapportando la (11) alla (12), si determina che:

$$\frac{\phi}{\phi'} = \frac{B_{//}}{B'_{//}} \quad (13)$$

Si supponga allora che, fra la seconda (A2) e la terza (A3) acquisizione, si verifichi lungo la direzione di osservazione uno spostamento ΔR del generico elemento di risoluzione P della scena; inoltre si ipotizzi che i movimenti della superficie siano sufficientemente limitati (nell'ordine della lunghezza d'onda), in modo da non abbattere considerevolmente la coerenza nella immagine interferometrica (A1-A3).

In tal caso la fase del secondo interferogramma conterrà al suo interno, confusa con l'informazione topografica, anche l'informazione sullo spostamento, per cui ϕ' sarà esprimibile come (v. figura 37):

$$\phi' = \frac{4\pi}{\lambda} (B'_{//} + \Delta R) \quad (14)$$

Volendo allora ricavare informazioni sugli spostamenti avvenuti, bisognerà prima stimare tramite l'eq.(2.5) la fase interferometrica in assenza di spostamento e poi sottrarla alla fase effettivamente misurata; in questo modo si elimineranno dall'interferogramma le frange dovute alla topografia, lasciando quindi solo quelle associate ad eventuali movimenti della superficie.

In formule si avrà che :

$$\phi' - \frac{B'_{//}}{B_{//}} \phi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R \quad (15)$$

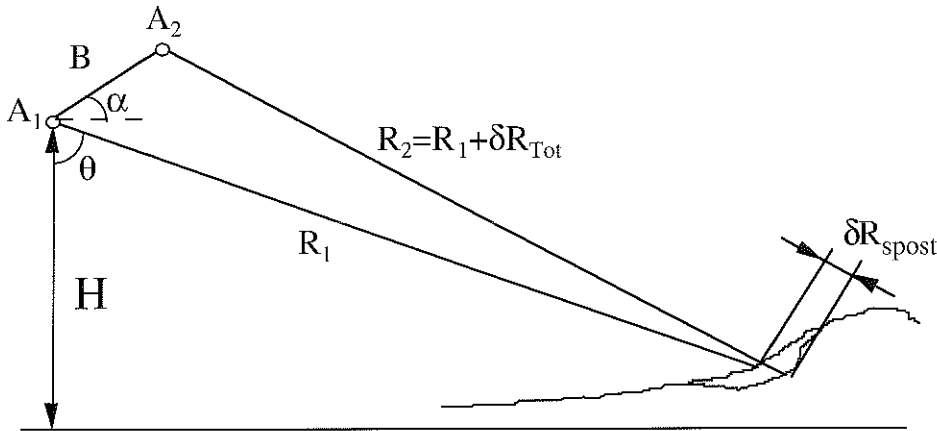


Fig. 37: Geometria del SAR in configurazione interferometrica in presenza di uno spostamento.

Bisogna quindi valutare la sensibilità che la fase interferometrica ha nei confronti dei movimenti superficiali, lungo la direzione di osservazione del sensore. In particolare, per avere un riferimento con cui confrontare tale sensibilità, si determinerà anche quella relativa alla topografia locale.

Cominciando proprio da quest'ultima, si può differenziare l'eq.(16) ottenendo che:

$$d\phi' = \frac{4\pi}{\lambda} B' \cos(\vartheta - \alpha') d\vartheta \quad (16)$$

e poi ricordando che la topografia è relazionata con il look-angle mediante la relazione:

$$dz = R \sin\vartheta d\vartheta \quad (17)$$

si ottiene la sensibilità della fase nei confronti della topografia:

$$\frac{d\phi'}{dz} = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B' \cos(\vartheta - \alpha')}{R \sin\vartheta} \quad (18)$$

Per quanto riguarda invece la sensibilità agli spostamenti, la situazione è ancora più semplice. Infatti, poiché questi si manifesteranno con una variazione di cammino ottico, sarà sufficiente differenziare l'eq.(16) per ottenere che:

$$\frac{d\phi'}{d(\Delta R)} = \frac{4\pi}{\lambda} \quad (19)$$

Dall'analisi dell'eq.(18, 19) si nota immediatamente che, essendo $B' \ll R$ (in generale circa 3 ordini di grandezza), la fase interferometrica è molto più sensibile agli spostamenti che non alle variazioni della topografia.

Altro aspetto interessante è che, a differenza di quello che accade con la topografia, la sensibilità agli spostamenti è indipendente dalla dimensione della baseline.

Volendo quantificare tale sensibilità, se a scopo esemplificativo si considerano come parametri interferometrici quelli indicati in tabella (relativi ai dati della coppia tandem

ERS1/ERS2 del giugno '96 su località Randazzo (CT)), si ottiene che, mentre 1m di variazione della quota genera una variazione di fase di $\sim 0.09 \text{ rad}$ (5.13°), 1 m di spostamento ne genera una di $\sim 221.63 \text{ rad}$ (12700°); cioè la sensibilità agli spostamenti è ~ 2500 volte maggiore di quella relativa alla topografia.

Così, a prima vista, tale risultato potrebbe non essere valutato in tutta la sua importanza; in realtà esso costituisce il cuore dell'intera teoria del differenziale. Infatti, l'affermazione secondo cui la tecnica differenziale permette di valutare movimenti superficiali nell'ordine dei millimetri, laddove invece per la topografia difficilmente si riesce ad avere una precisione al di sotto del metro, trova la sua piena giustificazione nella differente sensibilità della fase interferometrica riscontrata nei due casi.

5. Un'applicazione

Si è affrontato lo studio di un fenomeno franoso avvenuto in località Randazzo (CT) tra il 23 marzo 1996 ed il 15 aprile 1996 [12]. Ciò è stato possibile data la disponibilità dei dati ERS-1/ERS-2 della zona da esaminare, relativamente al periodo di interesse. L'uso del DIFSAR a quattro passaggi è motivato dalla difficoltà di avere a disposizione tre immagini dalle quali generare una coppia di interferogrammi con un indice di coerenza maggiore di 0.3. Infatti, poiché la frequenza portante della missione ERS è contenuta in banda C (per cui il meccanismo di retrodiffusione dipende fortemente dall'interazione dell'onda elettromagnetica con le foglie) e data la particolare stagione (primavera), che rende la vegetazione della scena rapidamente variabile, è risultato praticamente impossibile ricavare una tripletta coerente della scena interessata dal fenomeno. Per contro, la possibilità di lavorare con quattro immagini, coerenti a coppie, ha reso il tutto più semplice; infatti si sono potute utilizzare, come coppie interferometriche, le immagini acquisite dai due sensori ERS-1/ERS-2, con un ritardo di ventiquattro ore l'uno dall'altro, durante il loro passaggio sul sito in esame. In tabella sono riportati i parametri delle acquisizioni utilizzate.

S. Domenica Vittoria

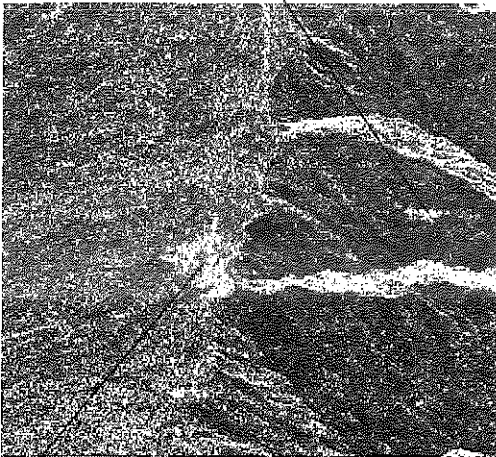
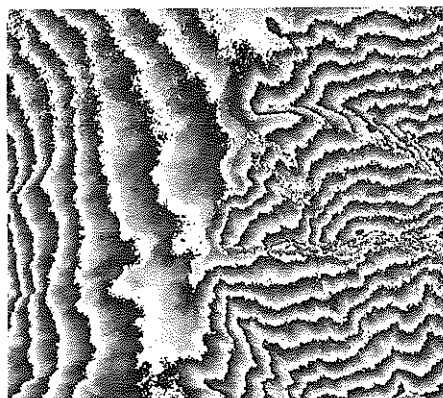


Fig. 38: Mappa di riflettività.

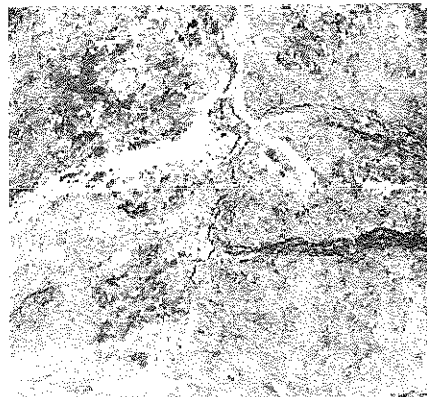
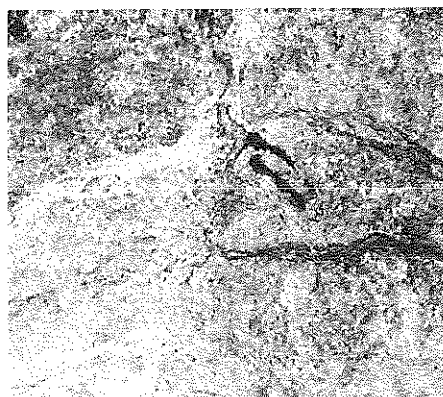
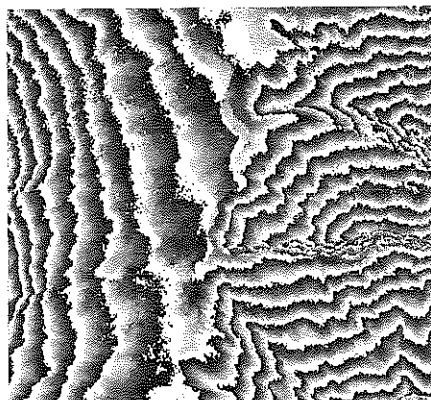
Randazzo

In figura 38 è riportata, in scala di grigio, una immagine modulo; questa è rappresentativa della riflettività della scena, dove il bianco ed il nero indicano rispettivamente punti di max e min. del coefficiente di retro-diffusione. In figura 39a sono riportati gli interferogrammi relative alle acquisizioni aprile maggio 1996. Nell'interferogramma di aprile è la presente una zona in cui la fase si presenta estremamente rumorosa. Per cercare una giustificazione a tale fenomeno si sono costruite le mappe di coerenza relative alle coppie di aprile e maggio; esse sono presentate in figura 39b. In tali mappe il tono di grigio è associato alle variazioni del contributo elettromagnetico nella singola coppia (nero massima variazione).

3-4 aprile 1996



7-8 maggio 1996



39: Frange interferometriche (in alto *a*) mappe di coerenza (in basso *b*).

Dal confronto della coppia (aprile-maggio), si evince che in aprile è presente una ulteriore zona di perdita di coerenza, dovuta alla presenza della frana come descritto in [12]. È chiaro che, essendo aprile il periodo di massima evoluzione del fenomeno, anche a distanza di sole ventiquattro ore si sono determinate variazioni della scena tali da annullare quasi del tutto la coerenza.

	ERS1-ERS2 Data	ERS1-ERS2 Orbita	Frame	$B_{//}$	B_{\perp}
aprile 1996	3-4	24666-4993	747	-55 m	-126 m
maggio 1996	7-8	25167-5494	747	-61 m	-129 m

L'interferogramma differenziale è presentato in figura 40.

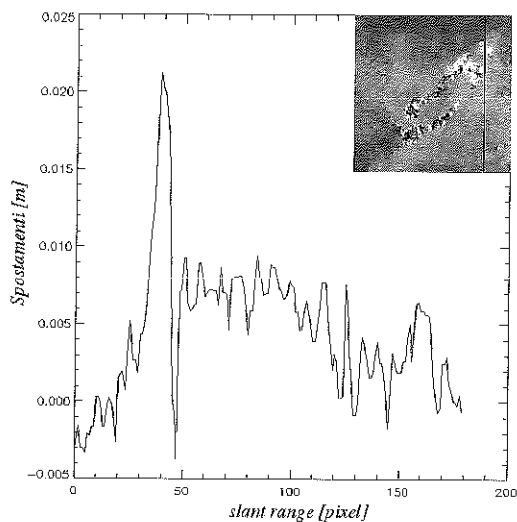


Fig. 40: Mappa degli spostamenti e relativo taglio.

Come è possibile constatare quasi tutte le frange risultano cancellate tranne alcune variazioni di fase in prossimità del corpo della frana. Queste potrebbero essere indicatrici di eventuali spostamenti avvenuti. In esso si evidenziano pixel più chiari (bianchi), i quali potrebbero rappresentare punti che hanno subito allontanamenti dal sensore lungo la direzione di osservazione.

Per avvalorare tale ipotesi si osservi che una fase differenziale di questa entità non è assolutamente ascrivibile al rumore di fase degli interferogrammi; infatti, come è possibile rilevare, la coerenza nei pixel in esame è maggiore di 0.65 e, quindi, a valle del multilook complesso il rumore di fase risulta essere minore di 35° .

Inoltre nemmeno un errore nel calcolo delle componenti delle baseline è sufficiente a spiegare la presenza di questa frangia. Infatti, qualora si trattasse di un residuo topografico, non si giustifica perché tale variazione di fase non sia presente anche in altre zone dove la topografia è sicuramente più significativa.

Sono da escludere, infine, anche eventuali cause legate alle eterogeneità atmosferiche, in quanto la fase differenziale risulta essere molto piccata e concentrata in pochi pixel, mentre in genere le variazioni atmosferiche sono distribuite su zone decisamente più estese e con un andamento molto più regolare.

6. Conclusioni

Nel presente lavoro sono state esaminate le problematiche riguardanti le tecniche di Interferometria Differenziale (DIFSAR) per l'individuazione e la misura degli spostamenti superficiali di piccola entità, avvenuti tra i vari passaggi di un sensore SAR sul sito in esame.

Il lavoro ha riguardato prevalentemente quelle procedure che utilizzano, per la loro implementazione, i soli dati acquisiti dal sistema e non informazioni di altra natura (ad esempio DEMs esterni).

L'algoritmo sviluppato impiega, invece di tre, quattro immagini della scena coerenti a coppie e quindi più facilmente reperibili rispetto alla tripletta del caso precedente. Tale peculiarità si ottiene, però, attraverso un minimo aumento della complessità elaborativa e una tollerabile riduzione nella precisione.

La tecnica sviluppata è stata poi sperimentata nell'osservazione di un evento franoso avvenuto in località Randazzo (CT) nel periodo febbraio - maggio del 1996. In questa situazione, nonostante la limitatezza delle immagini a disposizione, si è comunque riusciti ad individuare e in taluni casi a misurare con apprezzabile precisione alcuni movimenti, verificatisi tra il 3 ed il 4 aprile del '96 e la cui presenza sembra essere avvalorata dalle osservazioni geologiche effettuate.

È opportuno sottolineare che lo stesso tentativo compiuto utilizzando la tecnica a tre passaggi non ha invece dato alcun risultato.

Riferimenti bibliografici

- [1] Elachi, C. "Spaceborne Radar Remote Sensing: Application and Techniques", IEEE Press, 1988.
- [2] Graham, L. C. "Synthetic interferometric radar for topographic mapping", Proc. IEEE, **62**, 763-768, 1974.
- [3] Goldstein, R. M., Zebker, H. A. "Interferometric radar measurement of ocean surface currents", Nature, **328**, 707-709, 1987.
- [4] Gabriel, A. K., Goldstein, R. M. "Crossed orbit interferometry: theory and experimental results from SIR-B", Int. J. Remote Sensing, **9**, 857-872, 1988.
- [5] Gatelli, F., Monti-Guarnieri, A., Parizzi, F., Pasquali, P., Prati, C., Rocca, F. "The wavenumber shift in SAR interferometry", IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, **32**, 855-865, 1994.
- [6] Zebker, H. A., Werner, C. H., Rosen, P. A., Hensley S. "Accuracy of topographic maps derived from ERS-1 interferometric radar", IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, **32**, 823-836, 1994.
- [7] Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C., Ardagna, F., Peltzen, G., Feigl, K., Rabaut, T. "The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry", Nature, **364**, 138-142, 1993.
- [8] Massonnet, D., Briole P., Arnould, A "Deflation of Mount Etna monitored by spaceborn radar Interferometry", Nature, vol. 375, pp. 567-570, 1995.
- [9] Goldstein, R. M., Engelhardt, H., Kamb, B., Frolich, R. M "Satellite radar interferometry for monitoring ice sheet motion: Application to an Antarctic ice stream", Science, **262**, 1530-1534, 1993.
- [10] Gabriel, A.K., Goldstein, R.M., Zebker, H.A., "Mapping Small Elevation Changes Over Large Areas: Differential Radar Interferometry", J. Geophys. Res., **94**, pp. 9183-9191, 1989;
- [11] Zebker, H.A., Rosen, P.A., Goldstein, R.M., Gabriel, A.K., Werner, C.L. "On the derivation of coseismic displacement field using differential radar interferometry: The Landers earthquake", J. Geophys. Res., vol. **99**, pp. 19617-19634, 1994.
- [12] Rizzo, V. "Eventi Idrogeologici Predisponenti e Caratteristiche Cinematiche di un Fenomeno Franoso Complesso", Alba (CN) 5-7 novembre, 1996.

L'osservazione della terra dallo spazio: l'immagine come strumento di indagine

Mario Calamia, Angela Rapaccini, Alessandro Mori

Dipartimento Ingegneria Elettronica
Università di Firenze

Sommario. L'osservazione della superficie terrestre dallo spazio, attraverso l'uso di satelliti orbitanti, ha acquisito importanza crescente da quando lo strumento di osservazione è diventato il radar. In particolare il radar ad apertura sintetica (SAR) ha segnato una svolta qualitativa ed ha messo a disposizione di scienziati e ricercatori una quantità di dati che si stanno rivelando sempre più utili. Le immagini relative a questi dati evidenziano la loro grande utilità come mezzo di valutazione delle situazioni locali e globali e della evoluzione temporale dei fenomeni sulla superficie terrestre. Si riportano le valutazioni che stanno emergendo dall'analisi e dal confronto dei dati disponibili e delle immagini dalle due missioni SRL-1 e SRL-2, che hanno avuto luogo nel 1994 e che hanno visto coinvolti NASA (USA), DARA (Germania) e ASI (Italia) allo scopo di fornire indicazioni per la definizione dei parametri radar.

1. Introduzione

L'uso di sensori attivi per l'osservazione della Terra dallo spazio risale al 1978, con il SEASAT. Da allora le tecniche di osservazione si sono sempre più affinate, e la grande massa di dati raccolta ha posto in termini sempre più stringenti una verifica operativa dei risultati via via ottenuti, allo scopo di migliorare il rapporto costo/benefici. Tale rapporto non ha un valore assoluto legato allo strumento, ma è strettamente connesso all'uso dello stesso ed agli obiettivi che si vogliono conseguire.

Così al SEASAT (1978), che operava in banda L, sono seguiti via via il SIR-A (1981), il SIR-B (1994) e vari altri, tutti a frequenza fissa (banda L o banda C), con una sola polarizzazione (HH o VV) e non sempre ad angoli di incidenza variabile.

Nel 1988 si è pensato ad uno strumento più complesso, per una missione tipicamente

scientifica capace di dare indicazioni utili alle future osservazioni della Terra dallo spazio.

Questa missione (X-SAR/SIR-C) ha effettuato due voli nell'Aprile e nell'Ottobre 1994; l'esame dei molti dati ottenuti continua tutt'oggi e le indicazioni che ne emergono acquistano una crescente importanza anche in vista delle future missioni operative.

Il team scientifico, composto da 49 membri (Principal Investigators) e 3 associati, rappresentanti 13 nazioni, si riunisce periodicamente (l'ultima riunione si è tenuta nel Marzo 1997 a Firenze) con lo scopo di un confronto continuo dei risultati via via ottenuti.

Si vogliono qui esporre le indicazioni emerse integrandole e confrontandole con quanto la stampa scientifica periodicamente pubblica. Dopo una breve descrizione della missione, si presenteranno alcuni risultati globali per focalizzare infine l'attenzione su due discipline, l'oceanografia e l'archeologia.

2. Descrizione ed obiettivi della missione

Lo strumento utilizzato è un sistema di radar ad apertura sintetica montato sullo Shuttle Endeavour per due missioni di circa dieci giorni l'una.

Il sistema è composto da tre radar operanti rispettivamente in Banda L (1,25 GHz), in Banda C (5,3 GHz) ed in Banda X (9,6 GHz). I due radar in banda L ed C costituiscono il sistema SIR-C mentre il terzo costituisce l'X-SAR [1]. L'antenna del SIR-C è fissa con fascio a scansione elettronica ed è composta da due array planari in banda L e C, costituiti ciascuno da una griglia uniforme di antenne a microstrip a doppia polarizzazione. L'an-

Frequenza: Banda L, C ed X
Angolo di vista: 15÷60 deg.

Polarizzazione: HH, HV, VH, VV (X-SAR, VV)
Altitudine: 225 Km

Mode	Channel 1	Channel 2	Channel 3	Channel 4	Notes
0	-	-	-	-	X-SAR only
1	LHH	LHH	LHV	LHV	double swath
2	LHV	LHV	LVV	LVV	double swath
3	CHH	CHH	CHV	CHV	double swath
4	CVH	CVH	CVV	CVV	double swath, APL receives CH
5	LHH	LHH	LVV	LVV	double swath
6	CHH	CHH	CVV	CVV	double swath
7	LHH	LHH	CVV	CVV	double swath
8	LHH	LHH	CHH	CHH	double swath, APL receives CH
9	LVV	LVV	CVV	CVV	double swath
10	LVH	LVH	CVH	CVH	double swath
11	LHH	LHV	CHH	CHV	double swath, APL receives CV
12	LVH	LVV	CVH	CVV	double swath
13	LHH	LVV	CHH	CVV	double swath
14	LHH	LVH	LHV	LVV	double swath
15	CHH	CVH	CHV	CVV	double swath
16	LHH, LVH	LHV, LVV	CHH, CVH	LHV, CVV	reduced swath
17	LHH	LHH	LVV	LVV	normal swath, 40 MHz experimental mode
18	CHH	CHH	CVV	CVV	normal swath, 40 MHz experimental mode
19	LHH	LHH	CHH	CHH	normal swath, 40 MHz experimental mode
20	LVV	LVV	CVV	CVV	normal swath, 40 MHz experimental mode
21	LVH	LVV	CVV	CVV	normal swath, interferometry mode
22	CVV	CVV	CVV	CVV	normal swath, interferometry mode
23	LVH, LHH	LVV, LHV	CVH, CHH	CVV, CHV	normal swath

Tab. 1: Modi di funzionamento del sistema.

tenna dell'X-SAR è un'antenna passiva a guida d'onda fessurata che usa come trasmettitore un tubo ad onda viaggiante. È allineata con quella del SIR-C ma, a differenza di questa, è posizionabile meccanicamente, con angoli di vista che vanno da 15 a 60 gradi. Utilizzare una tecnica attiva a microonde, per frequenze adeguatamente scelte, porta il vantaggio di poter operare proficuamente anche con condizioni atmosferiche non ideali o avverse, sia di giorno che di notte.

Ricevitori a stato solido hanno distribuito i dati a quattro sistemi di elaborazione digitale (DDHA) alla velocità di 45 Mbps. I dati X-SAR sono stati inviati ad un sistema separato. A bordo erano presenti tre registratori per la memorizzazione di questi. Una piccola parte di essi è stata inviata direttamente a terra e messa a disposizione degli studiosi in tempo reale. In Tabella 1 sono schematizzati i possibili modi di funzionamento del sistema [2].

Gli obiettivi delle missioni SIR-C/X-SAR sono riassumibili nei seguenti punti:

- Migliorare la conoscenza dell'ambiente terrestre e dei suoi cambiamenti, in particolare attraverso gli studi del ciclo idrologico, dei processi climatici ed idrologici e dei fenomeni che regolano la circolazione degli oceani.
- Monitorare zone remote della terra.
- Rilevare fenomeni non investigabili con tecniche diverse.
- Ottenere indicazioni per le future missioni radar.

Fissati i parametri di eccitazione radar (frequenza, polarizzazione, angolo di vista), l'eco di ritorno del segnale è fortemente influenzato dalle proprietà della zona illuminata. È quindi possibile evidenziarne particolari caratteristiche (rugosità, caratteristiche elettromagnetiche ed omogeneità della zona). Avere a disposizione uno strumento che registri la risposta a diverse frequenze, a diverse polarizzazioni e a diversi angoli di incidenza risulta fondamentale per una efficace classificazione delle caratteristiche della zona sotto esame.

Nel paragrafo successivo sono presentati due esempi significativi. Seguono indicazioni ricavate dallo studio dei risultati delle missioni sui parametri da utilizzare nelle diverse discipline applicative.

3. Indicazioni sui parametri radar

Una determinata scena genera una risposta che dipende dalla frequenza, dalla polarizzazione e dall'angolo di vista dell'eccitazione che la illumina. I fenomeni che intervengono nell'interazione di un'onda elettromagnetica con una superficie naturale possono essere molteplici, a seconda del tipo della stessa. Vogliamo comunque descrivere alcuni comportamenti che si riscontrano in generale.

La frequenza utilizzata determina il potere di penetrazione della radiazione. Nella Figura 41 è schematicamente rappresentato il diverso comportamento di tipiche conformazioni naturali alle diverse frequenze. Com'è noto dalla teoria ad una frequenza inferiore corrisponde una profondità di penetrazione maggiore.

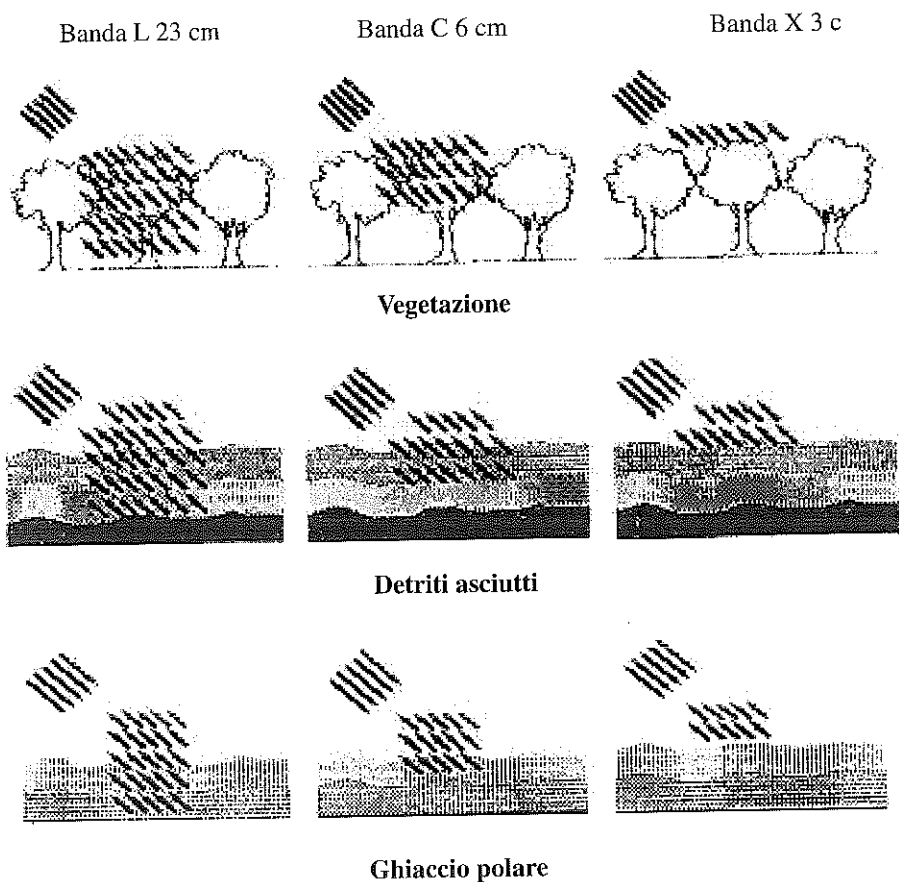


Fig. 41

In Tabella 2 sono riportati i valori teorici del potere di penetrazione radar in mezzi con perdite medio basse, per le diverse bande.

Tangente di perdita	Banda X (3 cm)	Banda C (6 cm)	Banda L (24 cm)	Mezzo geologico Esempi
0.1	0.05 (167.5)	0.10 (83.8)	0.42 (20.9)	Materiale alluvionale sabbioso da ghiaioso a moderatamente consolidato
0.05	0.10 (83.9)	0.21 (41.9)	0.83 (10.48)	Materiale alluvionale sabbioso scarsamente ghiaioso
0.01	0.13 (16.77)	0.26 (8.39)	1.04 (2.10)	Materiale alluvionale sabbioso fine
0.007	0.18 (11.74)	0.37 (5.87)	1.48 (1.47)	Sabbia eolica asciutta
0.005	0.26 (8.39)	0.52 (4.19)	2.07 (1.05)	Sabbia eolica asciutta

Tab. 2: Potere di penetrazione teorico (m) ed Attenuazione (dB/m) in funzione della tangente di perdita di mezzi desertici con perdite da basse a medie per segnali radar in banda X, C ed L.

Inoltre è da sottolineare che la rugosità della superficie è da considerarsi in rapporto alla lunghezza d'onda dell'eccitazione, e genera una maggiore dispersione dell'energia scatterata all'aumentare della frequenza. In tal caso sarà osservabile, all'aumentare del rapporto tra altezza quadratica media e lunghezza d'onda, un appiattimento delle curve di backscattering a causa del maggiore intervallo angolare in cui l'energia riflessa si distribuisce.

Per quanto riguarda l'effetto della polarizzazione dell'onda possiamo in prima approssimazione dire che l'energia retrodiffusa da un oggetto è maggiore se esiste una dimensione dominante diretta parallelamente all'onda incidente. Ad esempio se pensiamo ad una foresta, un'onda polarizzata orizzontalmente risentirà poco dell'interazione con gli alberi, ma l'eco sarà determinato essenzialmente dal terreno. Al contrario per un'onda polarizzata verticalmente prevarrà l'interazione con i tronchi e la quantità di energia che giunge al suolo sarà minima. Si può così intuire come un dato polarimetrico possa fornire indicazioni sulla struttura della scena osservata.

Altro parametro a disposizione è l'angolo di incidenza dell'onda elettromagnetica. Intuitivamente se la zona illuminata si avvicina ad una superficie localmente piana l'energia diffusa si concentrerà in un ristretto intervallo di angoli intorno all'angolo di pura riflessione. In caso contrario avremo una dispersione angolare maggiore e, per angoli di incidenza vicino a 90° , saranno dominanti le parti che sporgono dalla superficie e si verificheranno fenomeni di oscuramento.

A puro titolo di esempio in Figura 42 (vedi pag. 95) è riportato l'andamento (ottenuto con un modello perturbativo [8]) del coefficiente di backscattering σ_0 per superfici leggermente rugose con coefficiente di correlazione gaussiano in funzione dell'angolo di incidenza, per diverse polarizzazioni. A lunghezze di correlazione e minori corrispondono profili più irregolari, mentre σ indica l'altezza quadratica media dei punti della superficie. Per superfici con lunghezza di correlazione minore si può notare un appiattimento delle curve.

Sulla base di considerazioni a carattere teorico e dell'analisi dei dati ottenuti dalle già citate missioni, sono state individuate alcune indicazioni sulle configurazioni da preferire nelle diverse applicazioni. Queste vengono riportate nelle Tabelle 3, 4, 5.

Le considerazioni finali sono riassumibili nei seguenti punti:

- Si sottolinea l'importanza dell'uso delle bande X ed L, nelle varie combinazioni di polarizzazione HH, VV e HV.
- Per la banda C, l'intensità del segnale retrodiffuso dipende da una combinazione di fenomeni di scattering superficiale, sottosuperficiale e volumetrico. Una separazione di questi meccanismi è difficilmente risolvibile.
- Il backscattering in banda S non è stato studiato abbastanza. I risultati da AIRSAR mostrano che, per applicazioni geologiche o ecologiche, la banda L non è sufficiente e la banda P è desiderata.

Infine, anche se non menzionata nelle tabelle, la capacità di usare molteplici angoli di incidenza è stata dichiarata da molti Principal Investigators come necessaria.

	Research Topic/ Operational application	X			C			S*			L			P			Topo- graphy	Inter- fero- metry
		h h	v v	X	h h	v v	X	h h	v v	X	h h	v v	X	h h	v v	X		
E	Vegetation mapping	•	•	•	•	•	•	•	•	•	<	>	•	<	>	•	•	•
C	Biomass estimation										•	•	•	•	•	•	•	•
O	Canopy geometry	•	•	•	•	•	•				•	•	•	•	•	•	•	•
L	Monitoring flooded forests	-	-	-	-	-	-				•	•	•	•	•	•		
O	Non-forested wetlands	•	•	•	•	•	•				•	•	•	•	•	•		
G	Crop-monitoring	<	<	<	>	>	>				•	•	•	-	-	-		
Y	Tundra monitoring	•	•	•	•	•	•				•							
	Frozen/Thawed vegetation	<	<	<	>	>	>											

Conclusions - Mapping and monitoring requires a combination of X or C band with L or P band.

- L band or P band are essential for forest/non-forest discrimination.
- Modelling forest biomass requires cross-polarized L or P band.
- Mapping of inundated areas requires HH polarized L or P band.
- L band is the single most important band for agricultural remote sensing.
- Best crop classification results with X and L band, second best: C and L band.

Legend: 1 Important; • Whelpful;
 - Not mandatory; * only limited results have been published;
 <V> Important (only one of the polarizations is required);
 <<<V>>> Important (polarimetry is required, but only one of the two frequencies).

Tab. 3: Optimal SAR parameters for remote sensing applications.

	Research Topic/ Operational application	X			C			S*			L			P			Topo- graphy	Inter- fero- metry
		h h	v v	X	h h	v v	X	h h	v v	X	h h	v v	X	h h	v v	X		
H	Soil Moisture/Texture	-	-	-	•	•	•	•	•	•	•	•	•			•		
Y	Salinity mapping	-	-	-	-	-	-				-	•	•					
D	Soil surface roughness	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		
R	Land-water boundaries/flooding	-	-	-	•	•	-				•	-	•	•				
O	Snowpack extend	<	>	•	<	>	•	•	•	•	•	•	•	-	-	-	•	
	Snow wetness/water equivalent	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•				•	
I	Mountain glaciers	<	>	•	•	•	•				<	<	<	>	>	>	•	• (L!)
C	Sea ice discrimination	<	>	•	<	>	•				<	>	•	-	-	-		
E	Ice sheets and shelves	<	<	<	>	>	>	•			<	>	•	<	>	•	•	•
	Iceberg monitoring	<	>	•	<	>	•				-	-	-	-	-	-		

Conclusions - P band is best choice for soil moisture mapping, because of penetration through vegetation.

- On bare soil, S band has shown comparable results to L-band.
- Polarimetric L band is needed to model the volumetric water content of snow.
- Polarimetric X or C band is required to map the snowpack extend.
- Best mountain glacier discrimination with cross-pol. X and L band.
- Polarimetry and multifrequency is required for ice mapping.

Tab. 4: Optimal SAR parameters for remote sensing applications (contd.)

	Research Topic/ Operational application	X			C			S*			L			P			Topo- graphy	Inter- fero- metry
		h	v	X	h	v	X	h	v	X	h	v	X	h	v	X		
O	Currents, fronts, eddies	•	•	–	•	•	–	•	•	–	•	•	–	•	•	–		
C	Internal waves	•	•	•	•	•	–	•	•	–	•	•	–	•	•	–		
E	Surface wind stress	•	•	–	•	•	–	•	•	–	•	•	–	•	•	–		
A	Bathymetric features	•	•	–	•	•	–	•	•	–	•	•	–	•	•	–		
N	Slick detection/Monitoring	•	•	–	•	•	–	•	•	–	•	•	–	•	•	–		
	Ship and shipwake detection	–	•	–	•	•	–	•	•	–	•	•	–	•	•	–		

Conclusions - Multifrequency and co-polarization for mapping of waves and currents.
 - VV-polarized multifrequency data required for slick detection.
 - VV-polarized X and C-band necessary for shipwake detection.
 - L and P band necessary for bathymetric features.

Legend: 1 Important; • Whelpful;
 – Not mandatory; * only limited results have been published;
 <V> Important (only one of the polarizations is required);
 <<V >> Important (polarimetry is required, but only one of the two frequencies).

Tab. 5: Optimal SAR parameters for remote sensing applications (contd.)

4. Due esempi applicativi: Oceanografia ed Archeologia

In questa sezione non pretendiamo certo di essere esaurienti sulla mole di lavoro che viene svolta sui dati ricavati dalle missioni e su tutte le discipline interessate, ma ci focalizzeremo su alcuni risultati di due importanti discipline: l'Oceanografia e l'Archeologia.

4.1 Oceanografia

Poiché il backscattering è maggiormente influenzato dagli oggetti di dimensione confrontabile con la lunghezza d'onda, l'impiego di più frequenze fornisce informazioni sulla superficie sia su piccola che su grande scala, non distinguibili da sensori ad una sola frequenza o ottici. Ad esempio possono essere evidenziate increspature della superficie ed onde lunghe in modo distinto.

Le molteplici frequenze e polarizzazioni permettono lo studio in profondità delle caratteristiche di backscattering delle interazioni onda-onda ed onda-corrente. Inoltre la bassa quota orbitale ha incrementato il range delle onde oceaniche affidabilmente rilevate, per via del ridotto sfuocamento dovuto al loro movimento durante il tempo di osservazione.

Nel campo dell'oceanografia gli obiettivi della missione erano raggruppabili in tre temi: validare i modelli multifrequenza e multipolarizzazione delle interazioni onda-onda ed onda-corrente in diverse condizioni; esaminare, dalla piccola alla grande scala, i pro-

cessi sulla parte superficiale degli oceani, sull'interfaccia aria-acqua e sul limite delle zone dei ghiacci; determinare le proprietà e l'energia delle onde dell'emisfero australe per migliorare i modelli di previsione (Wave Forecast Models). Applicazioni sperimentali hanno incluso un esperimento nel Mare del Nord per l'identificazione di olii prodotti con flora e fauna marina e di petrolio.

Forse il maggior risultato inatteso è stata la comparsa di celle di pioggia e di strati limite atmosferici sulle immagini rilevate. Confrontando la risposta alle tre frequenze si ha un'alta correlazione nelle celle di pioggia tra regioni luminose in banda X (scattering da pioggia) e regioni buie in banda L (attenuazione da pioggia). È da sottolineare che una tale informazione è importante in queste regioni, critiche per il clima oceanico.

Immagini SAR multiparametriche sono state ottenute anche per i ghiacci marini. In particolare è stato ottenuto il primo insieme di immagini SAR multi-frequenza/polarizzazione nell'oceano australe. Queste sono state usate per studiare gli effetti delle onde e dei venti su strati ghiacciati e per testare le potenzialità di impiego della banda L per l'estrazione dello spessore del ghiaccio sottile [3].

Come primo esempio nella figura 43 (*vedi pag. 96*) (NASA) è riportata un'immagine a falsi colori relativa all'Oceano Atlantico nord-orientale. La zona, approssimativamente di 35x65 Km², è completamente libera da superfici emerse. I colori sono assegnati alle diverse frequenze e polarizzazioni nel modo seguente: il rosso è relativo alla banda L con polarizzazione H in trasmissione ed H in ricezione (L-HH); il verde è relativo alla banda C con polarizzazione H in trasmissione ed H in ricezione (C-HH); il blu è relativo alla banda L con polarizzazione V in trasmissione e V in ricezione (L-VV).

Il punto luminoso alla sinistra (alta riflessione per le tre componenti) è dato da una nave, ed è individuabile la scia lasciata da essa. Questa è rappresentata da una linea color porpora molto estesa, estensione che ha fatto anche pensare alla possibile presenza di olii.

È inoltre individuabile un fronte che si estende diagonalmente all'immagine. Questo separa due distinte masse d'acqua con differenti temperature, che influenzano la distribuzione dei venti sull'oceano. Le aree verde chiaro (relative alla lunghezza d'onda inferiore) rappresentano superfici increspate con vento forte, mentre quelle porpora individuano superfici più calme con venti più deboli. Le aree nere rappresentano zone calme con venti di bassa intensità, probabilmente dovute a nuvole lungo il fronte. Le zone di verde intenso si ritengono dovute a cristalli di ghiaccio nelle nuvole che scatterano le onde radar. L'increspatura che si vede su tutta l'immagine è causata da onde oceaniche lunghe, responsabili del movimento della superficie durante il tempo di osservazione.

Un'immagine SAR dell'oceano può permettere, quindi, di evidenziarne caratteristiche quali onde, fronti, coperture nuvolose, ecc., utili per la comprensione della dinamica oceanica su piccola e grande scala.

Si sono poi avute conferme sui modelli empirici di backscattering e sulla rilevazione di film di olio sulla superficie (figura 44) (*vedi pag. 96*) [4], dove è riportato un campo di trivellazione marino a circa 150 Km ad ovest di Bombay, India (Rosso=L-VV, Blu=C-VV, Verde=media dei canali L-VV e C-VV). Le piattaforme di trivellazione appaiono come punti bianchi luminosi, le striature scure sono lisce chiazze di olio, nel centro in alto sono visibili onde interne; vicino a queste, le aree azzurre indicano l'ondulazione dell'oceano.

Ulteriori studi hanno riguardato le caratteristiche di scattering delle onde per stimare

la lunghezza e la direzione delle onde lunghe marine dominanti. La rilevazione dell'onda modulata è fortemente dipendente dalla polarizzazione se l'onda si muove lungo la direzione di range, scarsamente se l'onda si muove lungo quella di azimuth.

La trasformata di Fourier bidimensionale di tali immagini SAR fornisce, dopo adeguate correzioni, una stima della lunghezza d'onda e della direzione di propagazione delle onde rilevate [5].

La figura 45 (vedi pag. 96) è un esempio di uno spettro ottenuto da un'immagine SAR. I picchi (aree circolari) indicano sistemi di onde che si propagano individualmente. La distanza del picco dal centro è inversamente proporzionale alla lunghezza d'onda e la posizione angolare indica la direzione di propagazione. Nello spettro si ha un'ambiguità di 180° ed ogni sistema di onde è rappresentato da 2 picchi a simmetria radiale.

È stata individuata una relazione semi-empirica che esprime la minima lunghezza d'onda rivelabile per un'onda diretta secondo azimuth:

$$\lambda_{\min} = A \frac{R}{V} H_s^{-\frac{1}{2}}$$

dove $A = 1 m^{1/2}/s$, H è l'altezza delle onde significative, R è la distanza dalla piattaforma e V è la velocità della piattaforma.

Praticamente risultati accettabili si hanno solo con satelliti a bassa orbita. Assumendo $H_s = 4m$, per il SIR-C ciò si traduce in una minima lunghezza d'onda rivelabile secondo azimuth di 70m ($R/V = 35s$), da confrontare con i 240m del Seasat ed ERS-1.

Un possibile utilizzo del rilevamento SAR consiste nell'integrazione e perfezionamento dei modelli di predizione. È da sottolineare che questi ultimi ricavano sempre una direzione media del sistema di onde, mentre con il rilevamento SAR sono possibili stime distinte di più sistemi.

In figura 46 (vedi pag. 96) è rappresentato il campo vettoriale di onde ricavato durante la missione SRL di Aprile (giorno 6). L'orientazione dei vettori indica la direzione di propagazione delle onde, la loro spaziatura è di 400 km, e la loro lunghezza rappresenta la distanza coperta dalle onde in 36 h.

4.2 Archeologia

La disponibilità di metodologie di ricerca non intrusive si rivela di fondamentale importanza per le applicazioni archeologiche. Le caratteristiche di ampio raggio di osservazione e di alta risoluzione delle immagini ottenute attraverso le rilevazioni SAR si adattano bene a questo campo di ricerca. La possibilità di evidenziare caratteristiche sottosuperficiali utilizzando questo tipo di immagini è stata dimostrata solamente per mezzi che si presentano irregolari al segnale radar, o con disomogeneità dielettriche che si comportano come scatteratori diffusi o di volume. Le condizioni ottimali che il mezzo deve avere per poter

essere penetrato da un segnale radar sono: essere costituito da granelli fini, essere omogeneo, essere asciutto e libero da argilla.

Molte zone della Terra presentano queste caratteristiche; viene di seguito presentato un esame della regione del Bir Safsaf nel deserto occidentale dell'Egitto e di un segmento della Grande Muraglia in una regione desertica nel centro nord della Cina.

Vogliamo qui focalizzare l'attenzione sull'importanza di avere a disposizione modi di rilevamento delle immagini con frequenze variabili, con polarizzazioni variabili (disponibilità realizzativa presente solamente nelle missioni SIR-C, X-SAR) ed angoli di incidenza variabili. Ad ogni modo operativo, infatti, corrispondono immagini in cui sono più evidenti aspetti diversi della stessa zona geografica; le immagini acquisite lavorando con un determinato modo di acquisizione (vedi tabella 1) per esempio, possono essere più adatte alla visualizzazione delle caratterizzazioni sottosuperficiali mentre altre possono evidenziare particolari conformazioni strutturali [6].

Valenza delle diverse frequenze

Come concetto generale, l'importanza della diversificazione delle frequenze dei segnali radar risiede nel diverso potere di penetrazione che hanno.

Ci sono, comunque, molti altri aspetti da considerare se si vogliono interpretare correttamente le immagini ottenute. È stato trovato per esempio [7] che le dimensioni delle particelle costituenti il mezzo penetrato influiscono molto sull'entità dello scattering volumetrico. Infatti, per dimensioni maggiori di un quinto della lunghezza d'onda l'intensità del segnale retrodiffuso è considerevole, mentre per dimensioni inferiori le perdite per scattering sono trascurabili.

Sempre da esami sui dati ottenuti dalle missioni, sono state ricavate le seguenti indicazioni generali:

- Le bande L e C sono più adatte della X per rivelare informazioni geologiche di insieme; gli echi del segnale in banda X possono essere mascherati dalla estesa copertura di sabbia.
- La banda X evidenzia meglio delle altre i profili dati dall'erosione eolica sui basamenti sedimentari; i profili sono riconoscibili anche con il segnale C-HC, C-HV, ma molto più debolmente: la sensibilità alla lunghezza d'onda di circa tre centimetri è causata da fenomeni di risonanza.

Le differenze nei valori dei coefficienti di backscattering alle diverse frequenze sono da considerare comunque come sintomo di diversità geologiche sotto la superficie: un'attenta interpretazione di questi segni può condurre ad importanti scoperte. Si considerino per esempio i canali risalenti all'età terziaria presenti nella zona del Wadi Safsaf, a sud del Bir Safsaf (vedi figura 47 - pag. 95). I canali si evidenziano come zone più scure in contrasto con la luminosità della vallata. Il materiale ghiaioso alluvionale che ricopre i canali ha un ritorno più debole del materiale con composizione calcarea che ricopre la vallata e che ha un forte scattering volumetrico. Il contrasto tra i canali e lo sfondo aumenta leggermente con il diminuire della frequenza. In modo alquanto sorprendente i canali sono visibili a tutte le frequenze, anche in banda X: una probabile motivazione è l'estrema sottigliezza dello strato di sabbia eolica (1-5 cm) sovrastante uno strato di 10-20 cm di sabbia più vecchia ma comunque poco consolidata.

Valenza delle diverse polarizzazioni

La polarizzazione del segnale è molto utile, ad esempio, per scoprire strutture costruite dall'uomo, che scatteranno con meccanismi diversi da quelli dell'ambiente naturale; è

quindi uno strumento prezioso per l'individuazione di opere nascoste. Continuando a considerare la zona del Safsaf sono state esaminate zone altamente fratturate od in cui sono presenti dei contatti geologici. Queste fratture o contatti sono sempre più evidenti al diminuire della frequenza (il contrasto è dato dall'argilla dentro le fratture che appare sempre più opaca in contrasto con i contorni). Le immagini C-HV sono migliori di quelle copolarizzate nel delineare le fratture ed i contatti geologici, in modo incredibilmente marcato; le strutture dello gneiss altamente fratturato non sono assolutamente riconoscibili in banda X. I dati L-HH, L-HV sono meglio di quelli X-VV, C-HH, C-HV per rivelare i basamenti geologici sotto la sabbia (vedi figura 48). Sono molto interessanti le combinazioni delle polarizzazioni delle immagini con gli angoli di incidenza.

Influenza degli angoli di incidenza

In generale le immagini acquisite con angoli di vista minori sono più nitide di quelle ottenute con angoli più ampi in quanto la superficie di backscattering presentata dagli oggetti è generalmente maggiore. Per zone desertiche, tuttavia, sono numerose le eccezioni a questa norma. I solchi nei basamenti sono più pronunciati nelle immagini X-VV e C-HH acquisite ad angoli grandi piuttosto che piccoli. Una possibile interpretazione è la seguente: le immagini acquisite per angoli piccoli sono più sensibili agli echi dati da riflessioni quasi speculari su superfici dolcemente ondulate come le dune di sabbia, mentre quelle acquisite per angoli maggiori sono più sensibili agli echi diffusi o incoerenti dati dalla rugosità (paragonabile alla lunghezza d'onda).

Generalmente la variabilità (al variare dell'angolo di vista) del coefficiente di backscattering è minima per i dati copolarizzati, risultando più marcata per quelli crosspolarizzati. Nella zona sotto esame due aree particolari non rispettano questo principio: l'area con vegetazione erbosa e quella vicino alla superficie dell'acqua. In banda L copolarizzata si ha un' variazione così marcata dei coefficienti di backscattering, che le immagini acquisite con angoli grandi sono pressoché scure, mentre quelle con angoli piccoli sono ben delineate. Non essendo possibile attribuirle completamente a rugosità superficiali, una tale variazione deriva probabilmente da un marcato scattering volumetrico e/o da fenomeni dielettrici relazionati alla vicinanza dell'acqua. Un comportamento del genere può essere molto utile per l'individuazione di risorse idriche.

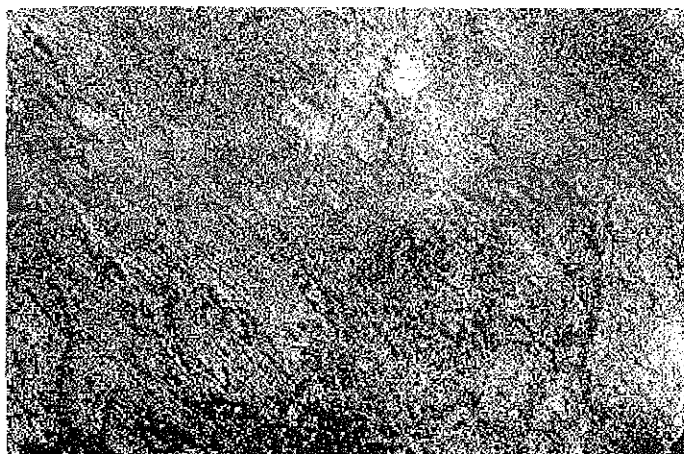


Fig. 48:

Una sintesi visuale di alcuni concetti sopra esposti è rappresentata dalle figure 7, 9 e 10. Nella figura 7 viene riportata un'immagine (NASA) in falsi colori proprio dell'oasi di Safsaf. L'immagine è formata dai segnali ottenuti in banda C ed L con polarizzazione orizzontale. Il rosso è relativo alla banda C, il verde è per la banda L ed il rapporto tra le due intensità (L/C) è indicato in blu. I colori primari e composti indicano il grado con cui i segnali in banda C, in banda L ed il rapporto delle loro intensità, rispondono alla rugosità della superficie. Usando questa colorazione le aree che appaiono riflettenti sia in banda C che in banda L sono colorate di giallo mentre quelle più riflettenti in banda L, si spostano verso il blu. Un'analisi dettagliata di questa scena indica che le immagini separate in banda L e C, hanno un aspetto globale molto simile. Questo suggerisce che i segnali in queste due bande penetrino facilmente la sottile copertura di sabbia (220 cm) e che interagiscano in modo simile con l'interfaccia appena sotto questa copertura. Questa interfaccia può essere rappresentata o da rocce affioranti sulla superficie o più probabilmente dalla ghiaia del letto di un antico fiume coperta solamente da pochi centimetri. Si nota la dettagliata struttura dei basamenti; le linee sinuose blu scuro rappresentano i canali sopra menzionati che occupano parte della vallata. Sul luogo e con immagini ottiche questi canali non sono visibili perché appunto interamente coperti da sabbia.

Come ulteriore esempio in figura 49 (*vedi pag. 97*) è riportata un'immagine relativa alla città di Ubar, scoperta nel 1992 con l'aiuto di sistemi di telerilevamento, nel sud dell'Oman, nella penisola araba. L'immagine copre un'area di circa 50 x 100km. Sono utilizzati tre canali del SIR-C/X-SAR. I dati acquisiti in banda L e polarizzazione HH sono colorati in rosso, quelli della banda C-HH in blu e quelli L-HV in verde. La zona magenta è una zona di dune di sabbia che riflettono sia la banda L che la banda C. La zona verde (L-HV) indica rocce calcaree irregolari rugose che formano un basamento roccioso; il letto di quello che fu un fiume scorre nel centro dell'immagine ed è molto brillante perché riflette tutti e tre i canali usati. I sentieri che portano alla città sono ben evidenti come tonalità rosse, (il loro uso risale a tempi molto antichi). È stata proprio la scoperta di questi sentieri a costituire la chiave di volta per il riconoscimento della città di Ubar.

In figura 50 (*vedi pag. 97*) (NASA) è invece riportata una immagine radar che mostra un segmento della Grande Muraglia cinese in una regione desertica del centro-nord della Cina.

L'immagine a sinistra copre un'area di 25 x 75 km, mentre quelle a destra sono ingrandimenti di 3,1 x 2,2 km della zona quadrettata. Il rosso corrisponde ad un modo L-HH; il verde ad un modo L-HV e il blu ad un modo C-HV.

La muraglia appare come una sottile linea arancione che si estende per tutta la lunghezza dell'immagine ed è molto brillante perché le pareti ripide e piatte costituiscono una superficie ben riflettente al raggio radar.

Le immagini in bianco e nero corrispondono ai quattro canali radar del SIR-C, come è specificato sulle immagini stesse; ciascun canale utilizza segnali sensibili ad aspetti differenti del terreno, ed è possibile differenziare le parti relative a due diverse età della muraglia. L'immagine L-HH fornisce la visione più contrastata dei due diversi tratti della muraglia: la linea più brillante che la attraversa è il tratto più giovane (risalente alla dinastia Ming, 600 anni fa); immediatamente a destra vi è una linea discontinua che corrisponde a quello più antico (1500 anni fa). I due tratti sono meno distinguibili nelle immagini L-HV e C-HH. Nelle immagini L-HV e C-HV i rettangoli luminosi vicini alla muraglia rappresentano zone coperte da frutteti. Questi modi di acquisizione, infatti sono molto sensibili alla complessa struttura di aree vegetative.

Le immagini in bianco e nero corrispondono ai quattro canali radar del SIR-C, come è specificato sulle immagini stesse; ciascun canale utilizza segnali sensibili ad aspetti differenti del terreno, ed è possibile differenziare le parti relative a due diverse età della muraglia. L'immagine L-HH fornisce la visione più contrastata dei due diversi tratti della muraglia: la linea più brillante che la attraversa è il tratto più giovane (risalente alla dinastia Ming, 600 anni fa); immediatamente a destra vi è una linea discontinua che corrisponde a quello più antico (1500 anni fa). I due tratti sono meno distinguibili nelle immagini L-HV e C-HH. Nelle immagini L-HV e C-HV i rettangoli luminosi vicini alla muraglia rappresentano zone coperte da frutteti. Questi modi di acquisizione, infatti sono molto sensibili alla complessa struttura di aree vegetative.

5. Conclusioni

Il monitoraggio attraverso le immagini SAR ottenute da piattaforme spaziali della superficie terrestre, come evidenziato dagli esempi riportati, permette l'estrazione di numerose informazioni fondamentali per le discipline delle scienze della Terra, non ottenibili con le metodologie precedenti. In particolare l'impiego di molteplici frequenze, polarizzazioni ed angoli di incidenza è fondamentale per evidenziare le diverse caratteristiche della scena osservata. Lo studio dei dati e delle immagini ottenute consente valutazioni estremamente significative che potranno migliorare attraverso l'ottimizzazione dei parametri radar, ottimizzazione resa possibile proprio dalle indicazioni che stanno emergendo dall'esame e dal confronto dei dati disponibili.

Riferimenti bibliografici

- [1] Jordan, R.L., Uneycutt, B. L.H., Werner, M. "The SIR-C/X-SAR Synthetic Aperture Radar System", *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 33, Luglio 1995, pp. 829-839.
- [2] Stofan, E.R., Evans, D.L., Schmullius, C., Holt, B., Plaut, J.J., van Zyl, J., Wall, S.D., Way, J. "Overview of Results of Spaceborne Imaging Radar-C/X-Band Synthetic Aperture Radar (RIR-C/X-SAR)", *Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 33, Luglio 1995, pp. 817-828.
- [3] Winebrenner, D.P., Farmer, L.D., Joughin, I.R. "On the response of polarimetric synthetic aperture radar signatures at 24-cm wavelength to sea ice thickness in Arctic leads", *Radio Science*, Vol. 30, no. 2, pp. 373-402, 1995.
- [4] Evans, D.L., Plaut, J.J., Stofan, E.R. "Overview of the Spaceborne Imaging Radar-C/X-Band Synthetic Aperture Radar (SIR-C/X-SAR) Missions", *Remote Sensing of Environment*, Vol. 59, no. 2, Febbraio 1997, pp. 135-145.
- [5] Monaldo, F.M., Deal, R.C. "Real-time observations of Southern Ocean wave fields from the Shuttle Imaging Radar", *IEEE trans. on geoscience and remote sensing*, Luglio 1995, Vol. 33, pp. 942-950.
- [6] Schaber, G.G., McCauley, J.F., Breed, C.S. "The use of multifrequency and polarimetric SIR-C/X-SAR data in geologic studies of Bir Safsaf, Egypt", *Remote Sensing of Environment*, Vol. 59, No. 2, Febbraio 1997, pp.337-363.
- [7] Roth, L.E., Elachi, C. "Coherent Electromagnetic Losses by Scattering from Volume in homogeneities", *IEEE trans. on antennas and propagation*, AP-23, 1975, pp. 674-675.
- [8] Ulaby, F.T., Moore, R.K., Fung, A.K. "Microwave Remote Sensing active and passive", vol. 2, Artech House, 1986, pp. 962-966.

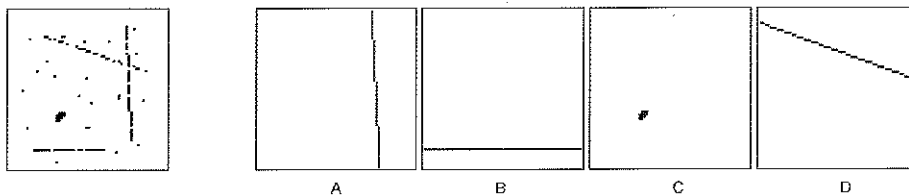


Fig. 6a: esempio in simulazione di classificazione multipla.

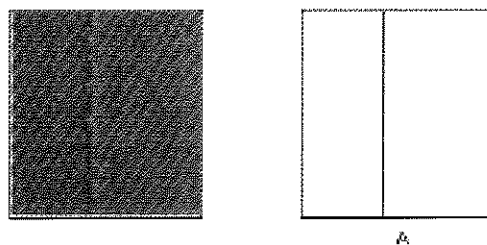


Fig. 6b: esempio in classificazione di un difetto verticale (ordito)

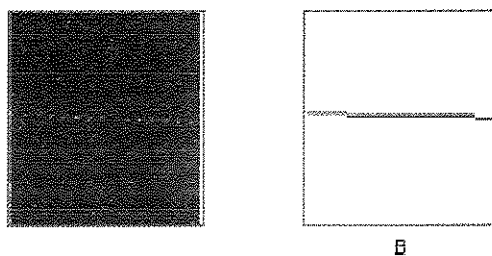


Fig. 6c: esempio di classificazione di un difetto orizzontale (trama)

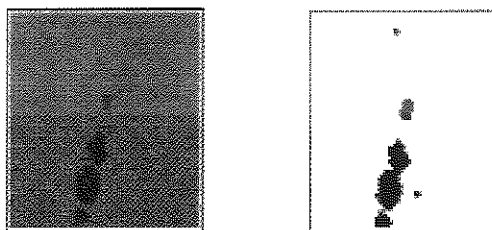


Fig. 6d: esempio di classificazione di un difetto di area (macchia)

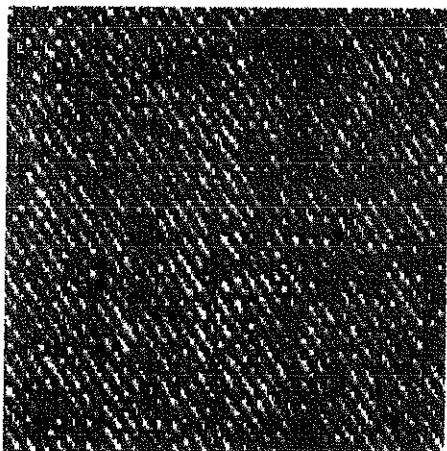


Fig. 7

C10D, verso diritto, difetto ordito
 "missing end", risoluzione 0.2mm,
 ($k_m=2.8$, $k_s=2.8$)

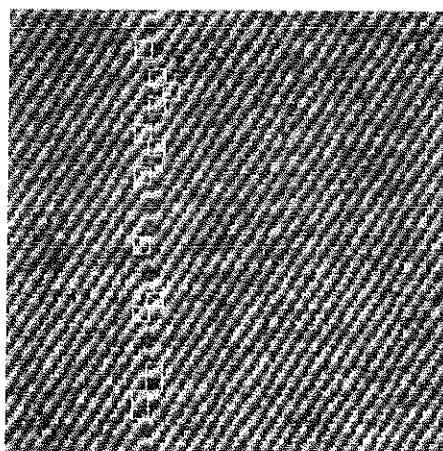


Fig. 8

C103, verso rovescio, difetto ordito
 "missing end", risoluzione 0.2mm,
 ($k_m=2.8$, $k_s=2.8$)

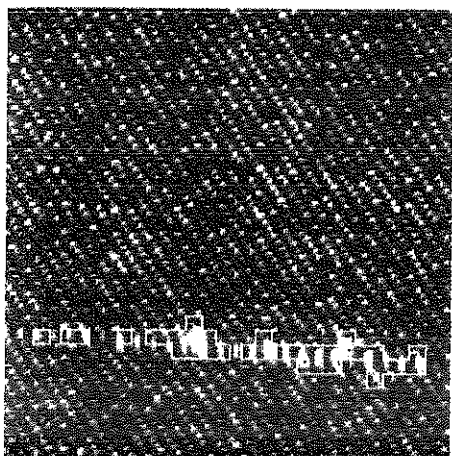


Fig. 9

C15D, verso diritto, difetto trama
 "wild filling", risoluz. 0.2mm,
 ($k_m=3$, $k_s=3$), $m=-0.05$, $p=10.7$

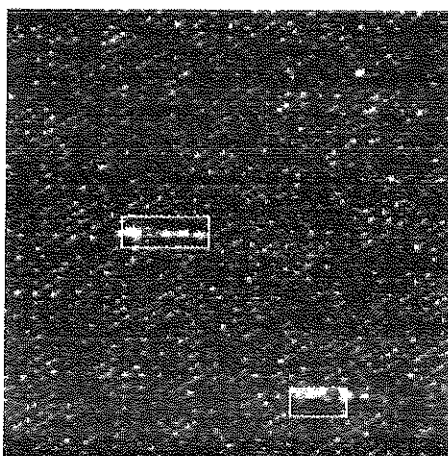


Fig. 10

C16D, verso diritto, difetti trama
 "knots", risoluzione 0.2mm,
 ($k_m=4$, $k_s=4$), $m=0$, $p=7;18$

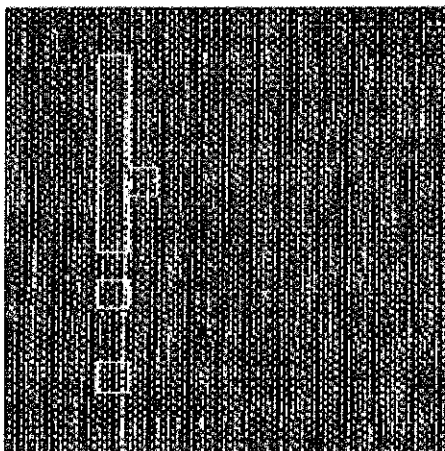


Fig. 11

C19D, verso diritto, difetto ordito
 “double pick”, risoluz. 0.2mm,
 ($k_m=3.5$, $k_s=3.5$), $m=0$; $p=15$

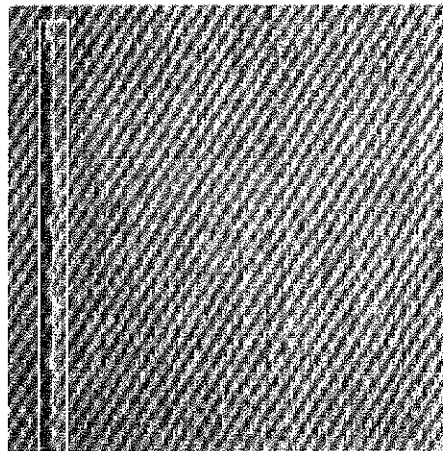


Fig. 12

C22D_IR, verso diritto, difetto ordito
 “double pick”, risoluz. 0.2mm,
 ($k_m=3.5$, $k_s=3.5$), $m=0$; $p=15$

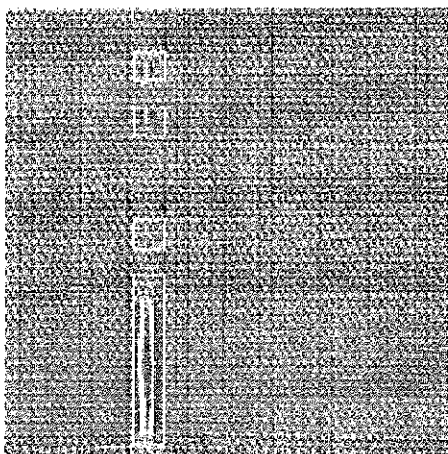


Fig. 13

F20D, verso diritto, difetto ordito “filo
 slegato”, risoluz. 0.1mm,
 ($k_m=3.5$, $k_s=3.5$)

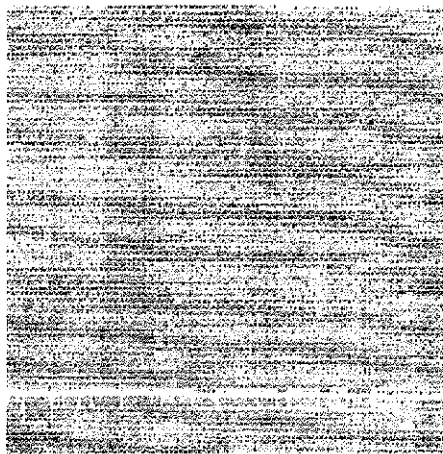


Fig. 14

F21D, diritto, difetto di trama
 “missing pick”, risoluz. 0.1mm,
 ($k_m=3$, $k_s=3$), $m=0$; $p=5$

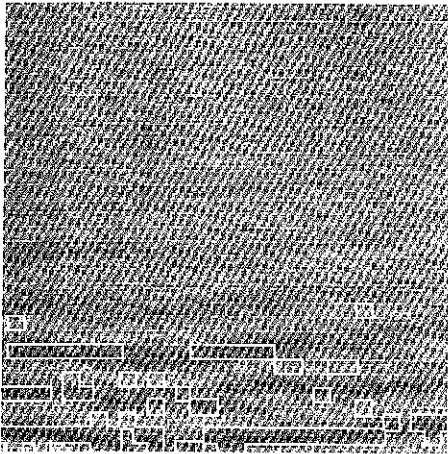


Fig. 15
 C23D, verso diritto, difetto
 "sanford waves", risoluz. 0.2mm,
 ($k_m=2.5$, $k_s=2.5$), $m=0$; $p=0;2$

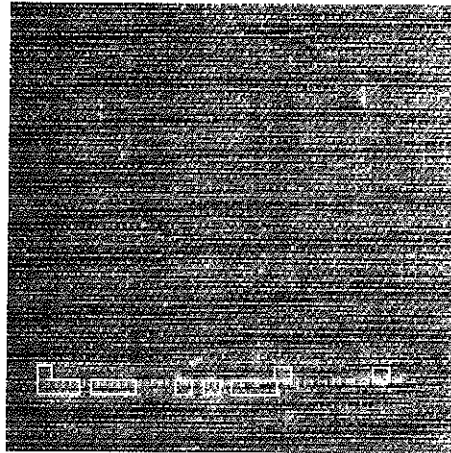


Fig. 16
 F24D, diritto, difetto di trama
 "wild filling", risoluz. 0.2mm,
 ($k_m=3.5$, $k_s=3.5$), $m=0$; $p=5$

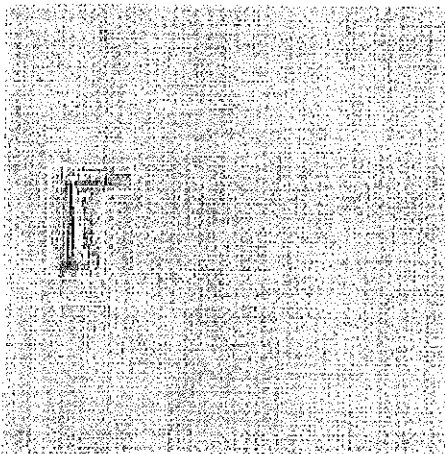


Fig. 17
 F25D, verso diritto, difetto di area
 "tangle", risoluz. 0.2mm,
 ($k_m=4$, $k_s=4$), $a=23.01=17.41$

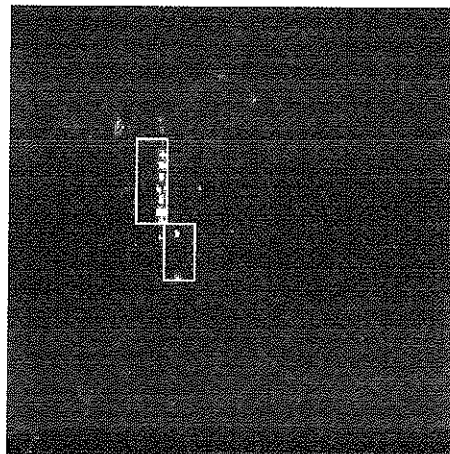
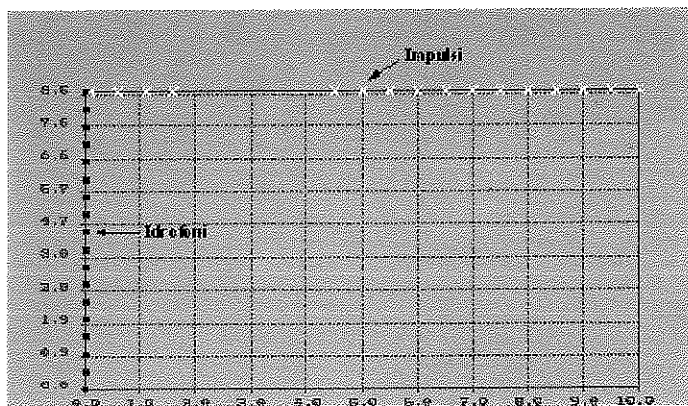
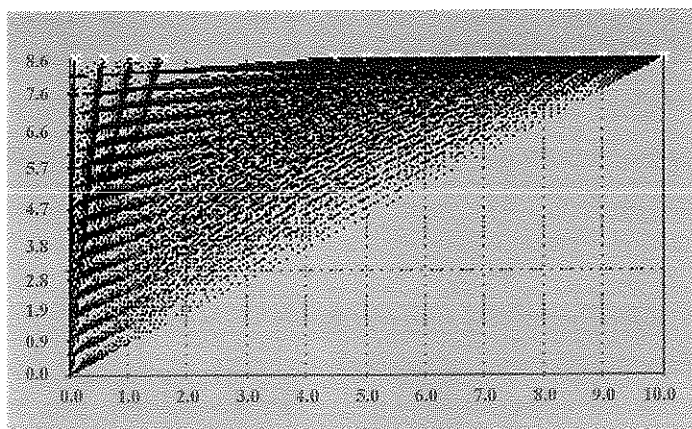


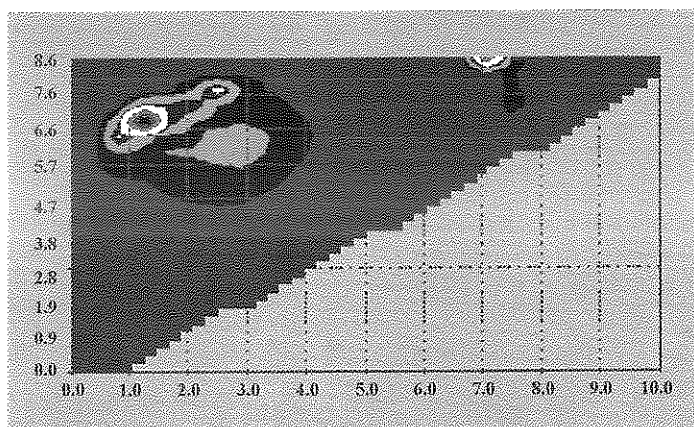
Fig. 18
 F26D, diritto, difetto d'ordito
 "foreign fiber", risoluz. 0.2mm,
 $k_m=5$, $k_s=5$, $m=0$; $p=\&$



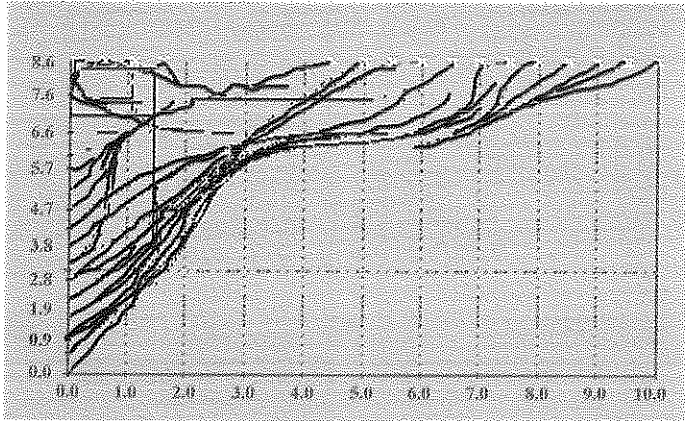
Schema di disposizione della catena idrofonica (in foro) e localizzazione degli impulsi



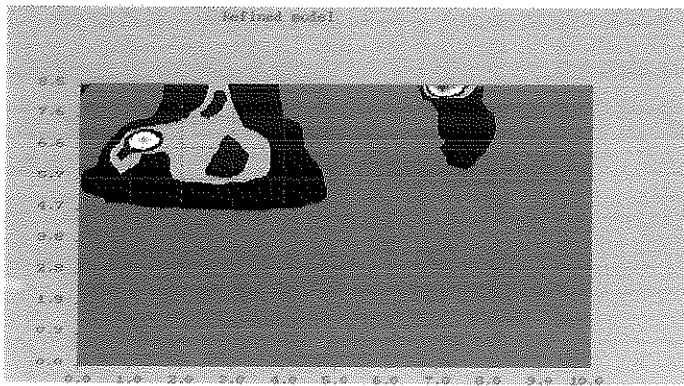
Tracciamento rettilineo iniziale dei raggi



Prima mappatura delle velocità



Tracciamento finale dei percorsi dei raggi alla fine delle elaborazioni numeriche



Mappatura delle velocità ed astrapolazione dei contorni della fondazione.

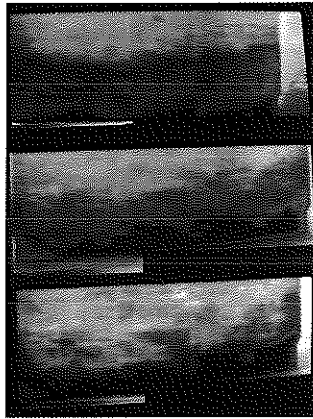


Tavola a colori (rif. Fig. 32)



Tavola a colori (rif. Fig. 34)

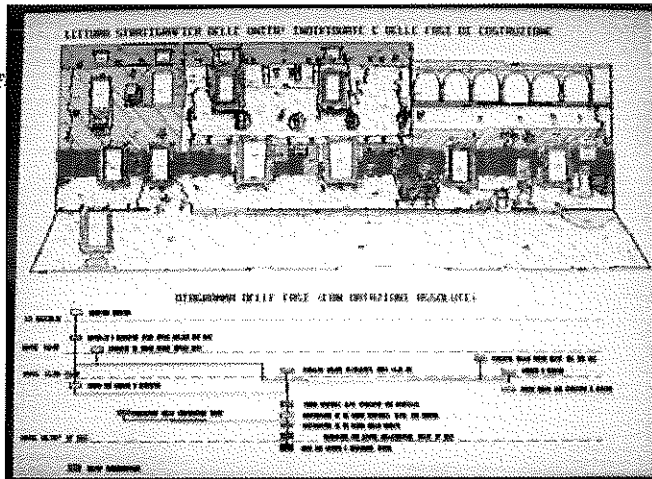


Tavola a colori (rif. Fig. 35)

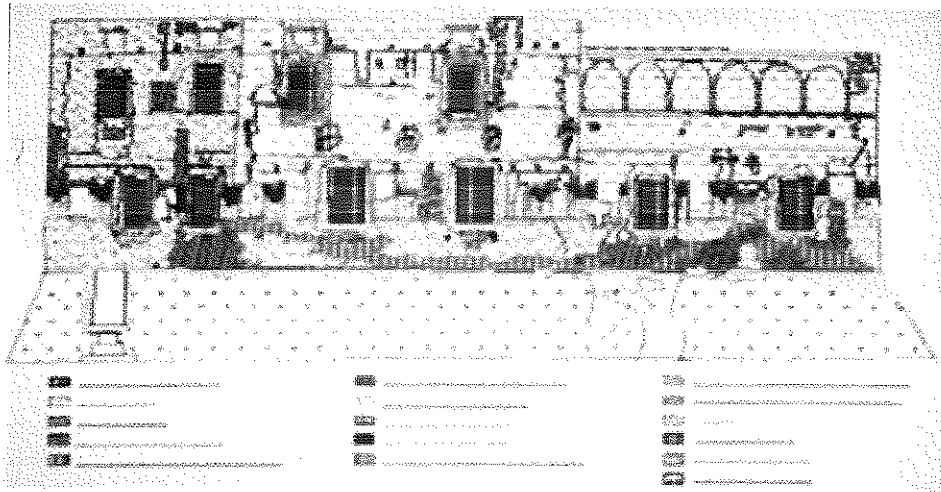
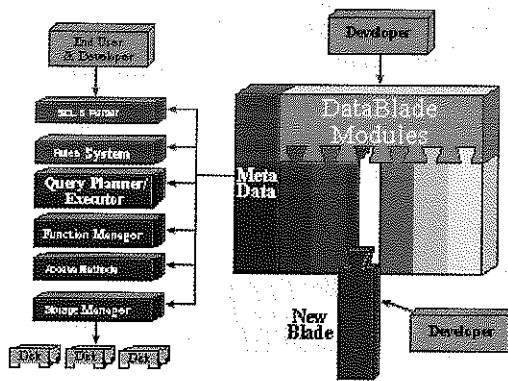
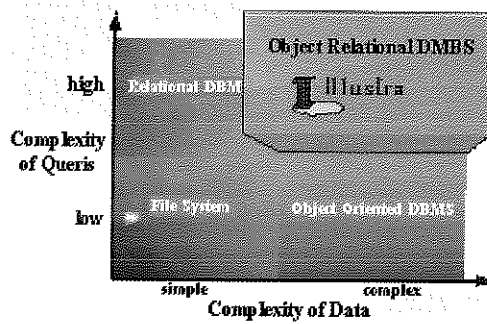


Tavola a colori (rif. Fig. 36)

Illustra: an Evolution in DBMS



**Coefficiente di Backscattering
per superfici leggermente rugose**

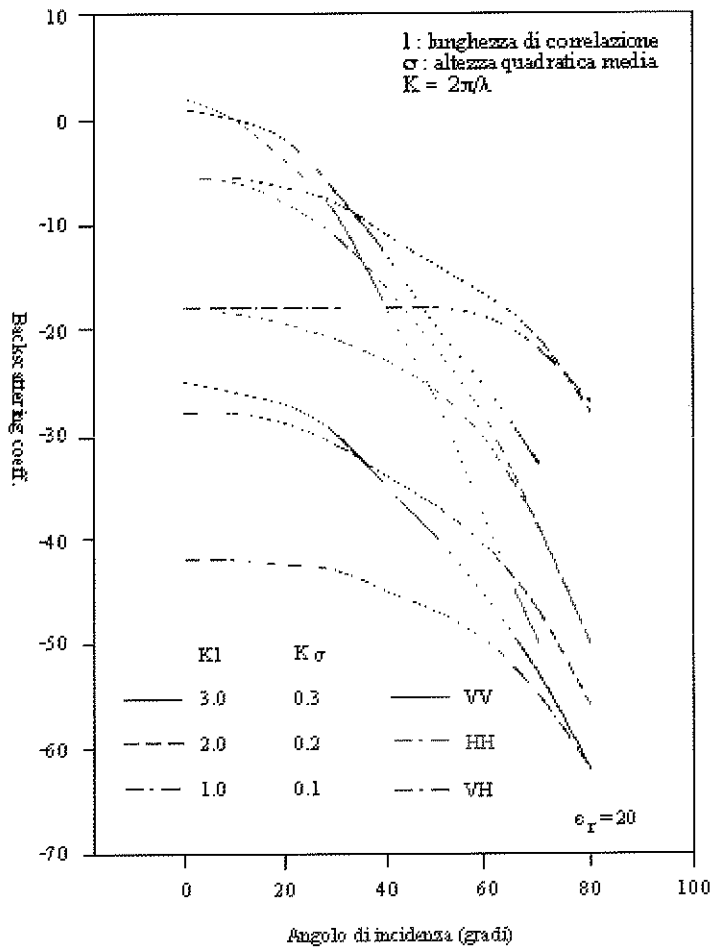


Fig. 42



Fig. 42



Fig. 44

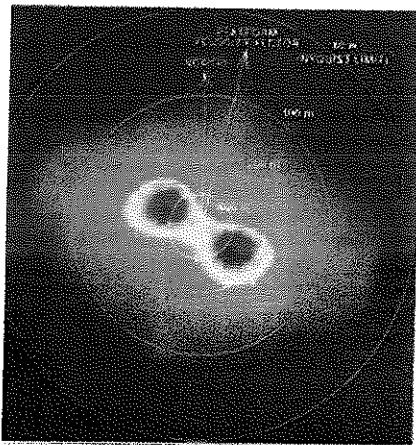


Fig. 45



Fig. 46



Fig. 47



Fig. 49

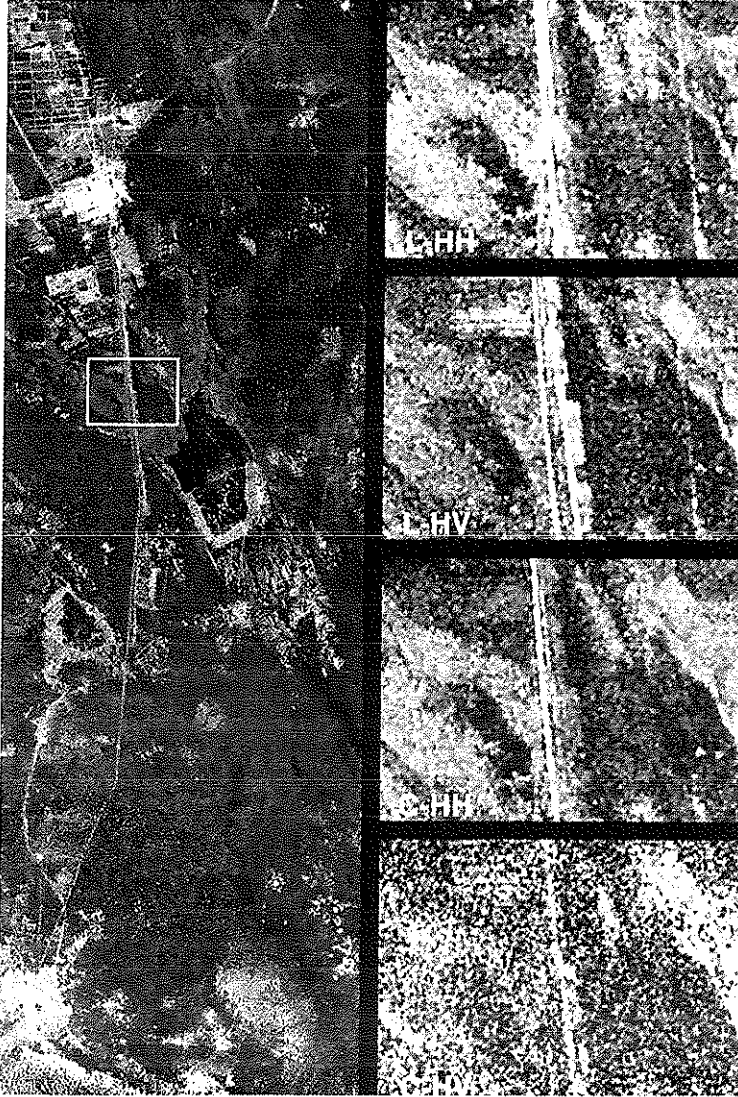


Fig. 50

Lista degli Autori

<i>Azzarelli, L.</i>	Pag. 1
<i>Barbieri, M.</i>	42
<i>Bramanti, M.</i>	27
<i>Calamia, M.</i>	74
<i>Chimenti, M.</i>	1
<i>Cucchiara, M.</i>	56
<i>Minutoli, S.</i>	1
<i>Mori, A.</i>	74
<i>Pasini, S.</i>	27
<i>Pasquale, A.</i>	35
<i>Rapaccini, A.</i>	74
<i>Rosi, L.</i>	49
<i>Salerno, E.</i>	27
<i>Salveti, O.</i>	1
<i>Tesauro, M.</i>	62

