



Consiglio Nazionale delle Ricerche

***Tecniche, metodiche e strutture informatiche per il controllo  
di qualita' di manufatti tessili***

*Luciano Azzarelli, Massimo Chimenti, Salvatore Minutoli, Ovidio Salvetti*

B4-30  
dic-1997

# **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, queste 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 favorvoli 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 stub	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 architetturali 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 dalla 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.

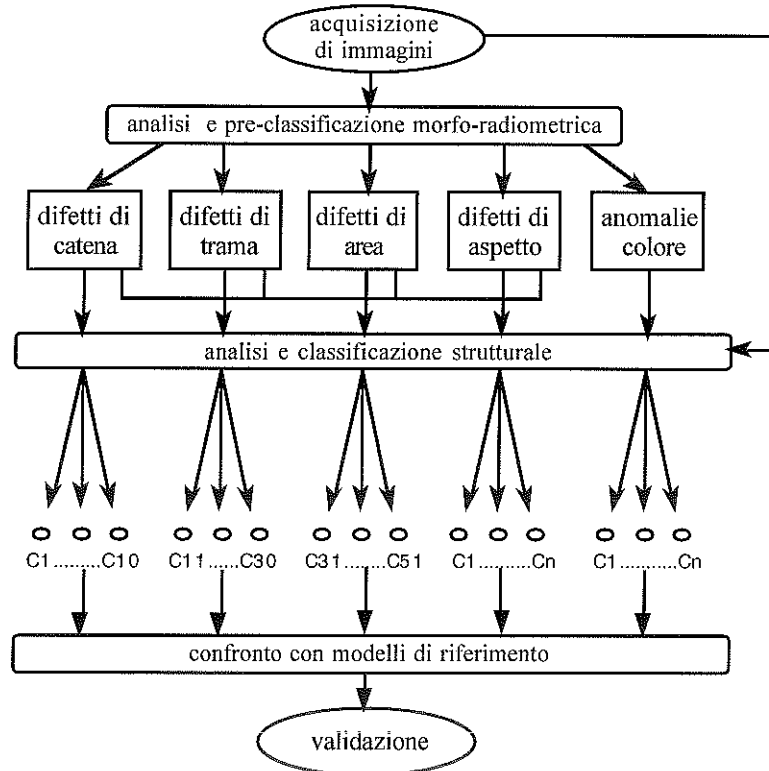


Fig. 1: Schema funzionale del processo diagnostico.

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 decadi) e obiettivi con diaframma fisso; utilizzando sensori con dinamica contenuta (2 decadi) 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  $\Delta t_a$ , in base alla velocità di scorrimento  $v$  la distanza  $\Delta s$  tra i punti centrali delle immagini è data da:

$$v \times \Delta t_a = \Delta s$$

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  $T_r = 40$  ms; si ha quindi:

$$\Delta t_a = n \times T_r \quad \text{con } n = 1, 2, \dots$$

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

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

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  $768 \times 288$  elementi. I massimi valori possibili di risoluzione spaziale e velocità di scorrimento diventano quindi:

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

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 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 monocoloro, 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'utilizzo 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.

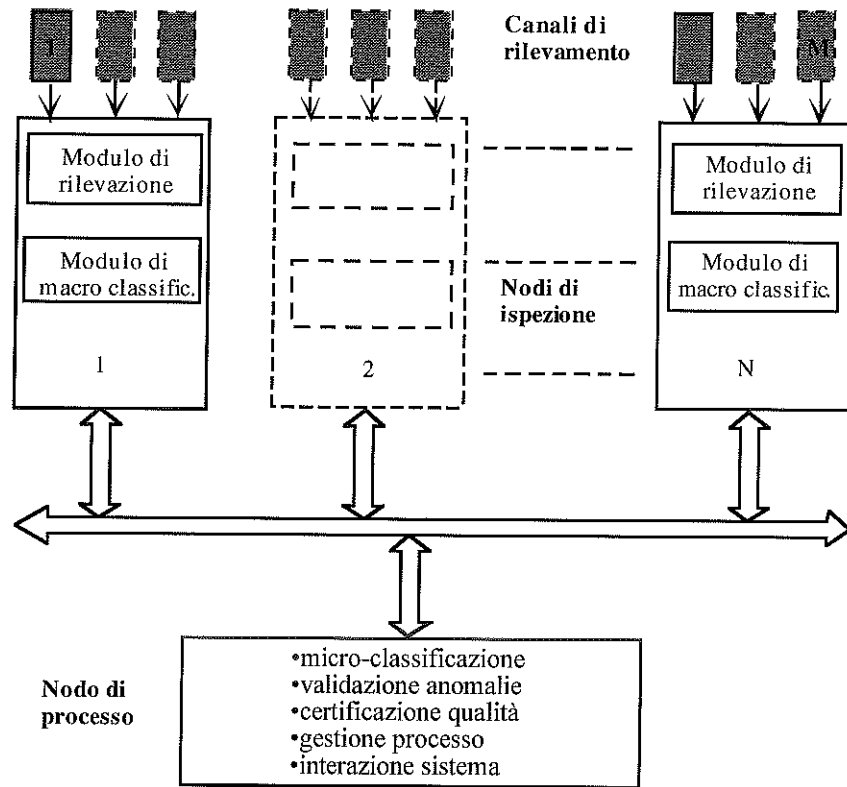


Fig. 2: Architettura funzionale della struttura di ispezione.

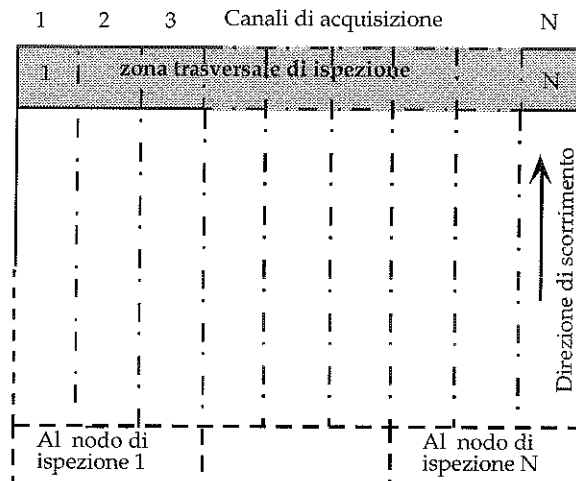


Fig. 3: Modalità di ispezione.

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 fili siano tessuti in modo adiacente.

tipo di tessitura	categoria	numero di fili/cm			
		flat		denim	
		catena	trama	catena	trama
Twill 3/1	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	52,5	40,0		
Diagonal	pesante	42,8	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 fili 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 stati 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	decadi 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
• illuminatori	alogeno; fluorescente; impulsato infrarosso

*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.

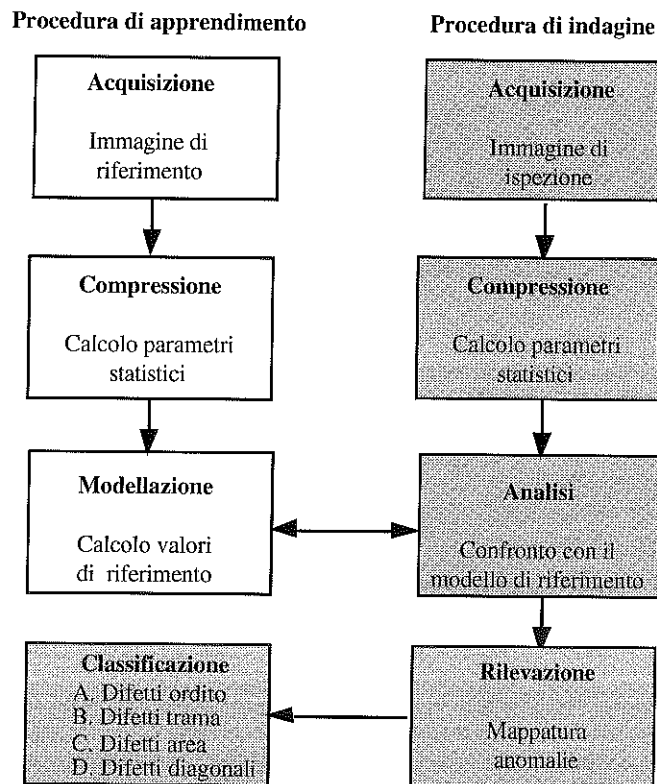


Fig. 4: Schema di flusso della procedura di indagine.

*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.

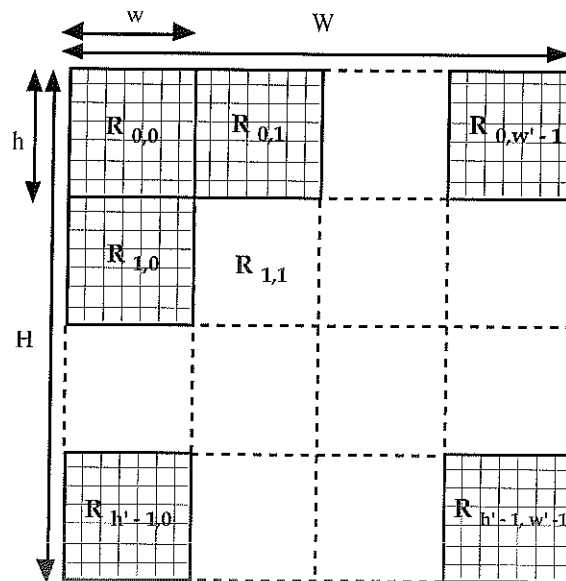


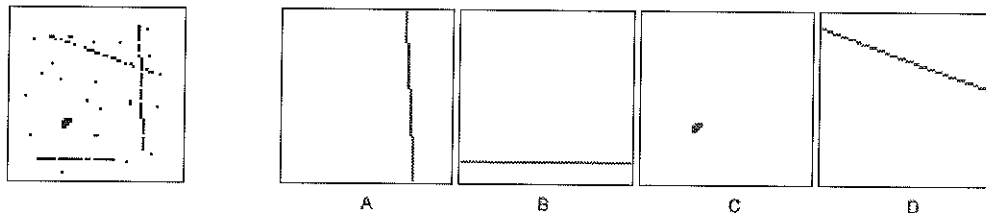
Fig. 5: Schema di segmentazione dell'immagine in ROI.

*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).

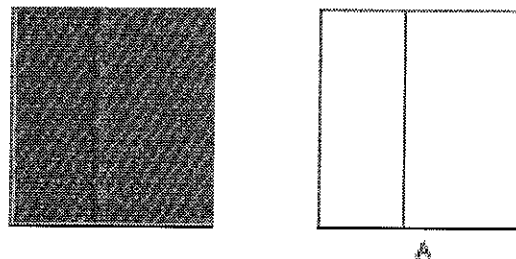
Per il riconoscimento dei difetti elongati di tipo orizzontale o verticale (con scostamenti di  $\pm 10^\circ$ ), l'algoritmo di classificazione si basa sul calcolo dei profili di linea applicati alle righe o alle colonne della mappa compressa di sintesi; questi profili vengono analizzati impiegando 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 anomali 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.

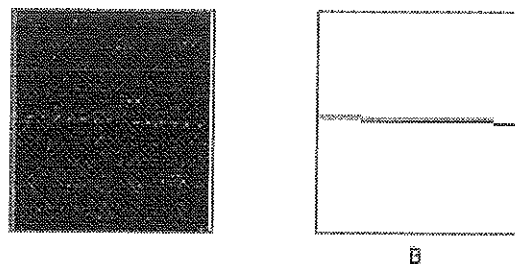
In figura 6a è mostrata una matrice compressa di 64x64 elementi binari nella quale sono stati simulati i quattro tipi di difetto sopra citati; nei riquadri A, B, C e D sono riportati i risultati della classificazione. Nelle figure 6b, 6c e 6d sono riportati i risultati della classificazione eseguita su immagini reali ricavate da campioni di tessuto.



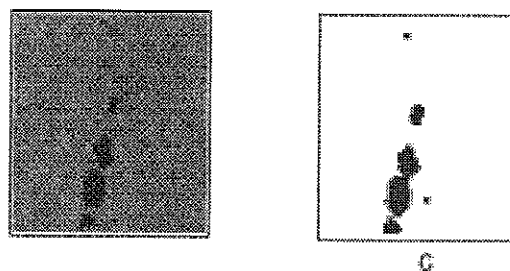
**Fig. 6a:** esempio in simulazione di classificazione multipla.



**Fig. 6b:** esempio di 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).

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 x 576 x 8 bit. Poiché il manufatto è in movimento, i due semi quadri 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 x 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 batteria 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 1m/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 sottosistema 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 determinata 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.

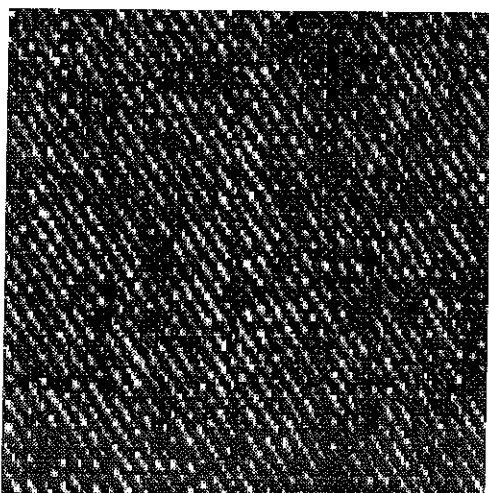
Nel primo caso l'operazione è svolta in tempo reale in quanto non comporta procedure elaborative aggiuntive; queste elaborazioni sono invece imposte nel secondo caso e quindi costituiscono una ulteriore limitazione alla operabilità in tempo reale. In entrambi i casi sui dati immagine vengono volutamente 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.

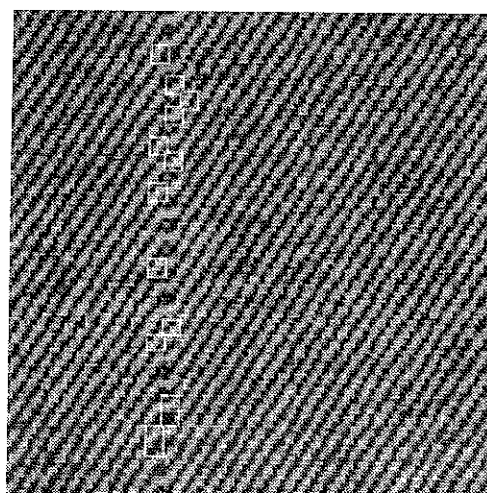
Per ogni difetto rivelato è stata individuata la classe di appartenenza (ordito, trama, area), sono stati estratti i parametri geometrici caratteristici ( $m$ ,  $p$ ,  $a$ ) ed è stato definito in ingresso l'intervallo di discriminazione ( $\pm k_m$ ,  $\pm k_s$ ) determinato nella fase di apprendimento per la modellazione. Nelle figure 7 - 12 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.



**Fig. 7**

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



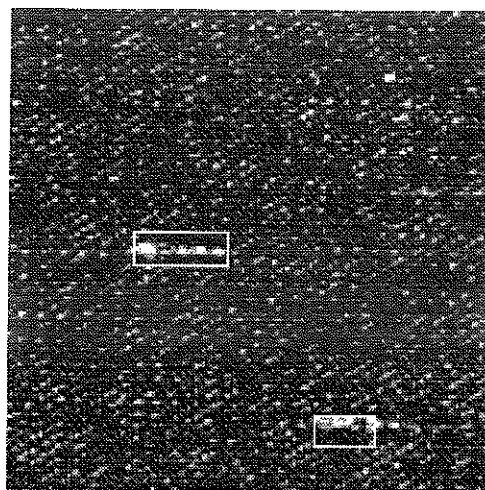
**Fig. 8**

C10R, verso rovescio, difetto ordito "missing end", risoluzione 0.2mm, ( $k_m=2.8$ ,  $k_s=2.8$ )



**Fig. 9**

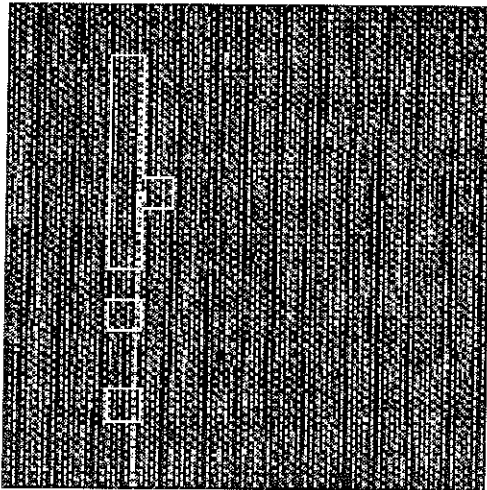
C15D, verso diritto, difetto trama "wild filling", risoluz. 0.2mm, ( $k_m=3$ ,  $k_s=3$ ),  $m=-0.05$ ,  $p=10.7$



**Fig. 10**

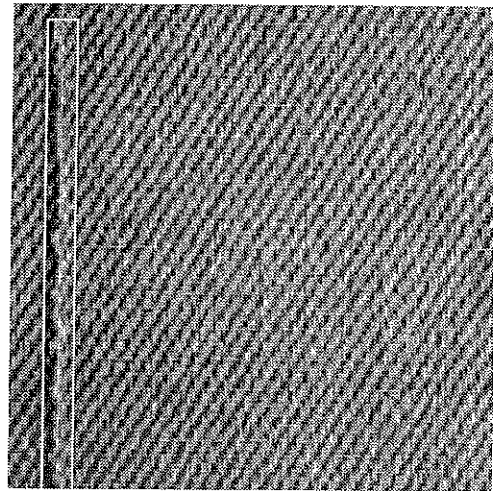
C16D, verso diritto, difetti trama "knots", risoluz. 0.2mm, ( $k_m=4$ ,  $k_s=4$ ),  $m=0$ ,  $p=7; 18$

Nelle figure 13-18 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 rilevazione 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.



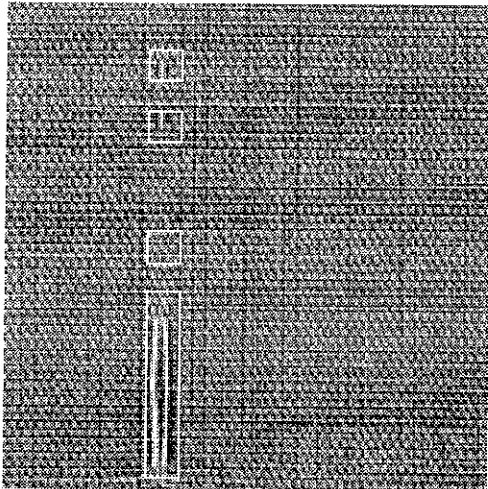
**Fig. 11**

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



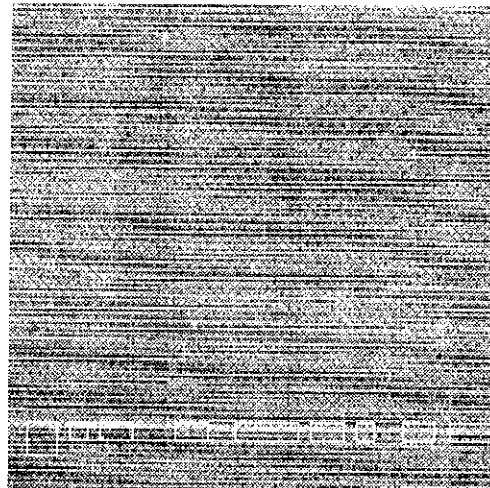
**Fig. 12**

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, ( $k_m=3.5$ ,  $k_s=3.5$ )

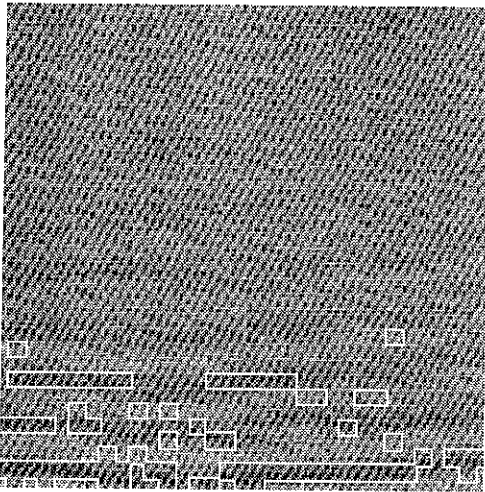


**Fig. 14**

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

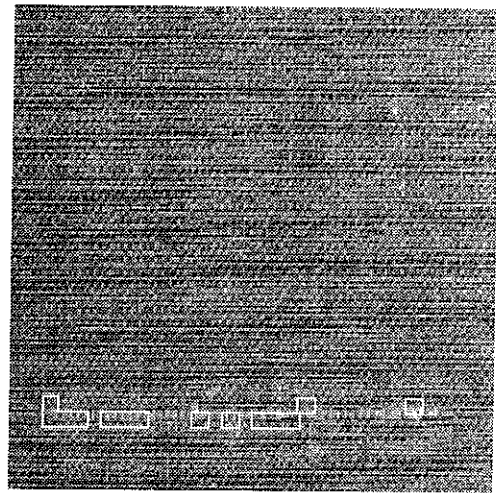
Nelle figure 17 e 18 sono mostrati rispettivamente un difetto di area e un difetto di ordito; quest'ultimo, in un tessuto flat di colore nero, è dovuto all'inserimento nella tessitura di alcune fibre estranee bianche che risultano quindi ben rilevabili.

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.



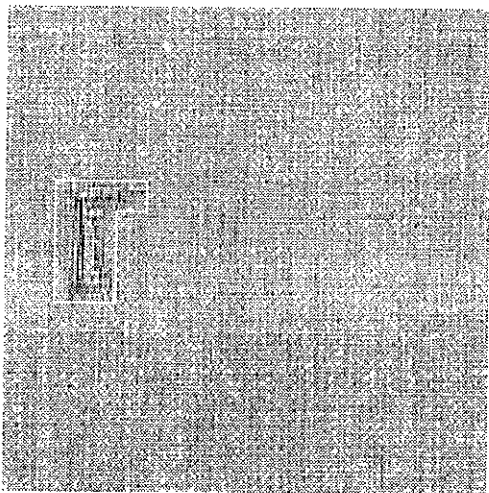
**Fig. 15**

F23D, verso diritto, difetto "sanford waves",  
risoluz. 0.2mm, ( $k_m=2.5$ ,  $k_s=2.5$ ),  $m=0$ ,  $p=0;2$



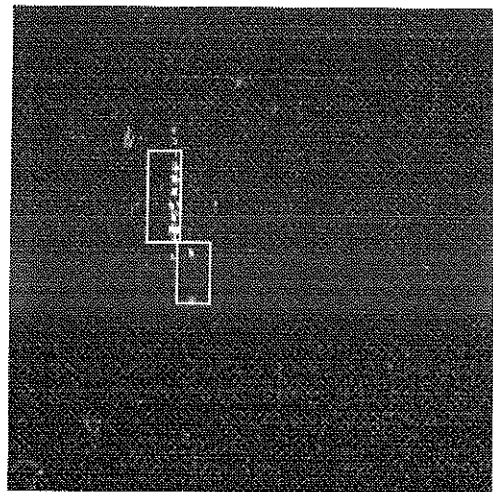
**Fig. 16**

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, ( $k_m=4$ ,  $k_s=4$ ),  $a=23.0$   $l=17.41$



**Fig. 18**

F26D, diritto, difetti d'ordito "foreign fiber"  
risoluz. 0.2mm,  $k_m=5$ ;  $k_s=5$ ,  $m=0$ ;  $p=13$



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.