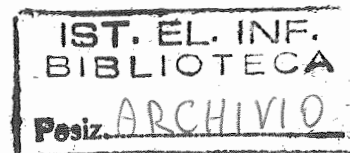


Consiglio Nazionale delle Ricerche



**ISTITUTO DI ELABORAZIONE
DELLA INFORMAZIONE**

PISA

**Simulation and design of an H/S integrated real time
system for flaws detection on denim fabrics**

Progetto Brite n° RI1B -0243

Automatic on line system for detection, evaluation and mapping
of defects and variation monitoring on finished fabrics

Luciano Azzarelli, Massimo Chimenti, Renzo Bozzi

Nota Interna B4-36

Novembre 1991

*Simulation and design of an H/S integrated real time system
for flaws detection on denim fabrics*

Luciano Azzarelli, Massimo Chimenti, Renzo Bozzi

Istituto di Elaborazione della Informazione - CNR Pisa

Sommario

Lo studio presentato in questo lavoro è stato svolto dalla Unità Operativa dell'Istituto di Elaborazione della Informazione nell'ambito del Progetto BRITE n° RI1B - 0243 "Automatic on line system for detection, evaluation and mapping of defects and variation monitoring on finished fabrics" in collaborazione con le Società Mahlo GMBH S.p.A., Scriba s.r.l. e Leglertex S.p.A..

Nel lavoro sono riassunti i risultati di una simulazione eseguita mediante acquisizione ed elaborazione fuori linea di campioni di tessuto denim contenenti differenti tipi di difetto; viene inoltre proposta e descritta un'architettura modulare a multiprocessore utilizzabile in un sistema in linea per il rilevamento e la classificazione di difetti.

Introduzione

L'attività di ricerca per lo sviluppo di una procedura per il rilevamento automatico di difetti su tessuto "denim" ha comportato per il gruppo di ricerca dell'IEI nella fase iniziale uno studio di fattibilità [1] nel quale sono stati impiegati campioni di tessuto con vari tipi di difetti che possono verificarsi durante il processo di produzione; questi campioni sono stati catalogati e forniti dalla Società Leglertex prime contractor nell'ambito del contratto Brite.

Allo studio preliminare ha fatto seguito un'attività sperimentale i cui primi risultati sono stati riportati in precedenti relazioni [2] e [3]: sono stati progettati e realizzati algoritmi per l'analisi dei dati e sono state definite delle procedure di elaborazione tenendo presente il disegno dell'architettura della stazione di rilevamento definita dalla Società Scriba partecipante alle attività del contratto in qualità di partner industriale esperto nella progettazione di sistemi per l'automazione e per il trattamento di immagini.

È stata infine condotta una fase di studio e simulazione durante la quale sono state elaborate immagini digitali di campioni del tessuto ricavate con una procedura fuori linea. I dati sono stati acquisiti con una risoluzione spaziale e fotometrica dello stesso ordine di grandezza di quelle previste nell'applicazione reale e le elaborazioni sono state eseguite con mezzi di calcolo (personal computer e stazioni di lavoro SVP2000 Scriba) con potenza computazionale paragonabile a quella dei mezzi da impiegarsi nella procedura in linea.

Il criterio seguito per la scelta degli algoritmi e per la definizione della procedura è stato basato anch'esso sui requisiti del prodotto finale; in particolare sono stati osservati i seguenti requisiti di progetto: la velocità di calcolo deve consentire di individuare e classificare i difetti esaminando il tessuto in movimento; l'efficienza del sistema deve essere valutata in base ai risultati conseguiti normalmente mediante ispezione visiva eseguita da più addetti specializzati.

1. Risultati dello studio di simulazione

La figura 1 mostra la sequenza delle operazioni da compiere per il riconoscimento e la classificazione di difetti.

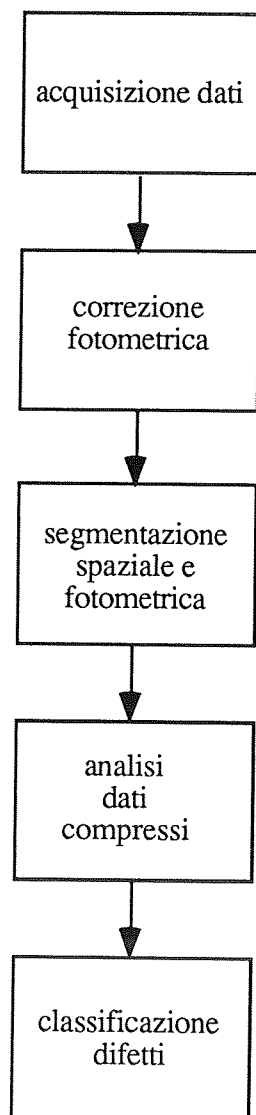


Fig. 1 - Fasi del processo di rilevamento e classificazione di difetti

Nella fase di acquisizione le immagini del tessuto vengono trasformate in matrici di dati mediante conversione analogico/digitale; i dati d'ingresso vengono successivamente elaborati per eliminare gli eventuali artefatti prodotti nella fase precedente. Le successive

elaborazioni sono rivolte al rilevamento dei difetti: i dati d'ingresso vengono inizialmente compressi riducendo sia le dimensioni della matrice che il numero di classi di quantizzazione in base ai risultati di un esame di tipo fotometrico; la matrice dei dati compressi viene poi esaminata con un'indagine di tipo morfologico e vengono così ricavati degli indici numerici che individuano la presenza di eventuali difetti e ne forniscono una prima parziale descrizione.

Di seguito si descrivono le principali fasi sviluppate nel processo simulato.

1.1. Acquisizione dati

I campioni esaminati nel processo di simulazione sono stati acquisiti mediante uno scanner ad alta risoluzione della serie MFA, avente una risoluzione spaziale di 75 μm e una risoluzione fotometrica di 256 classi [4] il tessuto viene illuminato con una sorgente lineare a luce bianca e la luce riflessa viene raccolta da una schiera di 2048 fotodiodi che producono un segnale elettrico in funzione del flusso luminoso incidente, integrato su un intervallo esteso di lunghezze d'onda.

I dati grezzi di acquisizione sono affetti da distorsioni di tipo fotometrico, causate dalla disuniformità dell'illuminamento del tessuto e dalla caratteristica fotometrica dei singoli elementi del trasduttore.

Lo scanner impiegato fa uso di un particolare tubo fluorescente alimentato ad alta frequenza, che produce una striscia luminosa con una disuniformità di circa $\pm 15\%$ rispetto al valore medio, mentre le fluttuazioni in funzione del tempo sono trascurabili.

La caratteristica fotometrica di ciascun elemento del trasduttore (tensione di uscita in funzione del flusso luminoso incidente) è una costante, il cui valore può differire di $\pm 10\%$ rispetto al valore medio definito per l'intero sensore; la caratteristica è invariante nel tempo.

Trascurando la corrente di buio (condizione resa possibile dalla limitata dinamica del segnale da rivelare), il segnale di uscita v_i generato dall' i -esimo elemento del trasduttore è dato da:

$$v_i = F_i \cdot S_i \cdot R_i \quad (1)$$

dove F_i = flusso luminoso incidente sul pixel visto dall'i-esimo elemento
 S_i = sensibilità dell'i-esimo elemento
 R_i = riflettanza dell'i-esimo pixel

È quindi possibile compensare entrambi i fattori di distorsione fotometrica moltiplicando il segnale di uscita v_i per una appropriata costante c ; infatti posto $c = 1/F_i S_i$ si ha

$$v'_i = cv_i = R_i.$$

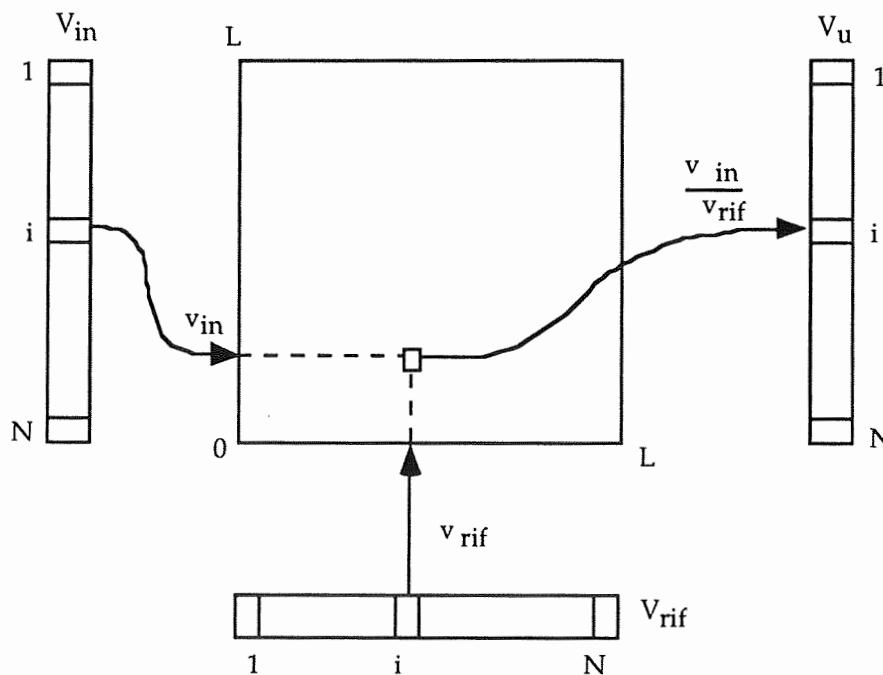


Fig. 2 - Correzione della distorsione fotometrica mediante tavola di trasformazione, nel processo di simulazione si ha $N=2048$ e $L=255$.

La correzione fotometrica è stata eseguita facendo uso di un vettore V_{rif} e di una matrice A . V_{rif} viene ricavato nell'operazione di calibrazione dello scanner, in cui viene acquisita l'immagine di una superficie campione con riflettanza unitaria: V_{rif} è dunque un vettore di N elementi, eguale al numero di celle del trasduttore, ciascuno dei quali contiene il valore $v_i = F_i \cdot S_i$ espresso in valori interi tra 0 e 255. La matrice A , di dimensioni $255 \cdot 255$, è costituita da elementi definiti

dai possibili rapporti dei numeri interi tra 1 e 255, normalizzati sull'intervallo 0-255; il generico elemento $a_{i,j}$ è dato da:

$$a_{i,j} = \begin{cases} \text{int} \left(255 \frac{i}{j} \right) & \text{per } i < j \\ 1 & \text{per } i \geq j \end{cases} \quad (2)$$

con $i = 0, 1, \dots, 255$ e $j = 1, 2, \dots, 255$

Il vettore V_{rif} e il vettore V_{in} ottenuto dalla scansione di una riga indirizzano la matrice A . Il valore v_{in} dell' i -esimo elemento di V_{in} , compreso fra 0 e 255, indirizza una riga di A , mentre il valore v_{rif} dell' i -esimo elemento di V_{rif} indirizza una colonna (v. fig. 2): l'elemento di A così selezionato viene scritto nella i -esima posizione del vettore di uscita V_u , che contiene così per ogni indice i il rapporto V_{in}/V_{rif} proporzionale alla riflettanza del pixel e indipendente dal sistema illuminatore-obiettivo-sensore.

1.2. Segmentazione spaziale e fotometrica

I dati corretti provenienti dalla acquisizione del tessuto vengono scritti in righe successive di una matrice con elementi a 256 valori. La matrice viene analizzata per individuare, localizzare e classificare eventuali difetti presenti sul tessuto in esame.

Il tessuto privo di difetti appare con una trama regolare poco evidente e con piccole variazioni casuali della riflettanza dovute fondamentalmente dalla non uniforme tensione del filato.

Un difetto può essere costituito fondamentalmente da:

- macchie disuniformi e modestamente contrastate con disegno abbastanza coerente, che riducono la riflettanza locale;
- variazioni della periodicità della trama, che producono righe uniformi con riflettanza diversa dal valore medio;
- interruzioni locali della trama, che provocano areole isolate, periodiche o addensate a bassa o alta riflettanza a seconda di quale filo, bianco o blu, risulta interrotto;
- zone più o meno estese in cui il tessuto presenta una variazione uniforme di tonalità con conseguente modifica della riflettanza.

Di conseguenza i pixel appartenenti a difetti di vario tipo possono essere individuati mediante analisi di tipo fotometrico o morfometrico.

In questo tipo di applicazione non è richiesta la misura delle aree di difetto e non si debbono riconoscere disegni di tipo particolare, per cui è sufficiente un'indagine di tipo fotometrico, che può essere eseguita in tempi contenuti e che fornisce, con sufficiente grado di attendibilità, indicazioni sull'esistenza e sulla localizzazione dei difetti.

A causa della particolare struttura del tessuto non è possibile individuare e classificare i difetti mediante un operatore di tipo puntuale, definendo ad esempio una soglia fotometrica e confrontando il valore di ciascun pixel con il valore di soglia: si deve quindi fare uso di operatori locali mediante i quali i pixel contenuti in un intorno di dimensioni prefissate (ROI) vengono modificati in base al loro valore e alla posizione nelle ROI.

I metodi di analisi della tessitura o di pattern recognition sono poco applicabili sia a causa del tempo di elaborazione in genere richiesto sia a causa delle caratteristiche geometriche e fotometriche della specifica tessitura in esame; risulta invece efficace un metodo di decisione statistica che tiene conto soltanto dei valori dei pixel contenuti nella ROI e non delle loro rispettive posizioni: questo metodo è più veloce del precedente e può offrire sufficienti gradi di sensibilità e affidabilità.

Il metodo seguito nel processo di simulazione comprende una fase iniziale di apprendimento e una fase di elaborazione.

Nella prima fase viene acquisita l'immagine di un campione di tessuto privo di difetti e la matrice dei dati viene suddivisa in ROI sulle quali vengono calcolati gli istogrammi dei valori dei pixel in esse contenuti; dagli istogrammi vengono estratti dei parametri e vengono calcolati su di essi gli intervalli di riferimento per ciascun parametro.

Nella seconda fase viene acquisita l'immagine del campione di tessuto contenente difetti e si confrontano i parametri estratti da una ROI con gli intervalli di riferimento ricavati nella fase precedente: la ROI in esame viene classificata normale se i valori dei parametri rientrano negli intervalli di riferimento, anormale, e quindi contenente probabili difetti, in caso contrario.

Poiché i difetti hanno dimensioni varie e spesso abbastanza contenute, per ricavare informazioni attendibili dall'analisi di una ROI è necessario che essa abbia dimensioni ridotte, ma significative dal punto di vista probabilistico; la dimensione della ROI può infine dipendere dal tipo di tessuto.

Come esempio si riportano i risultati ottenuti esaminando il campione C17d, corrispondente al lato diritto di un tipo di tessuto (v. fig. 3) e il campione C5r, corrispondente al rovescio di un altro tipo di tessuto (v. fig. 8).

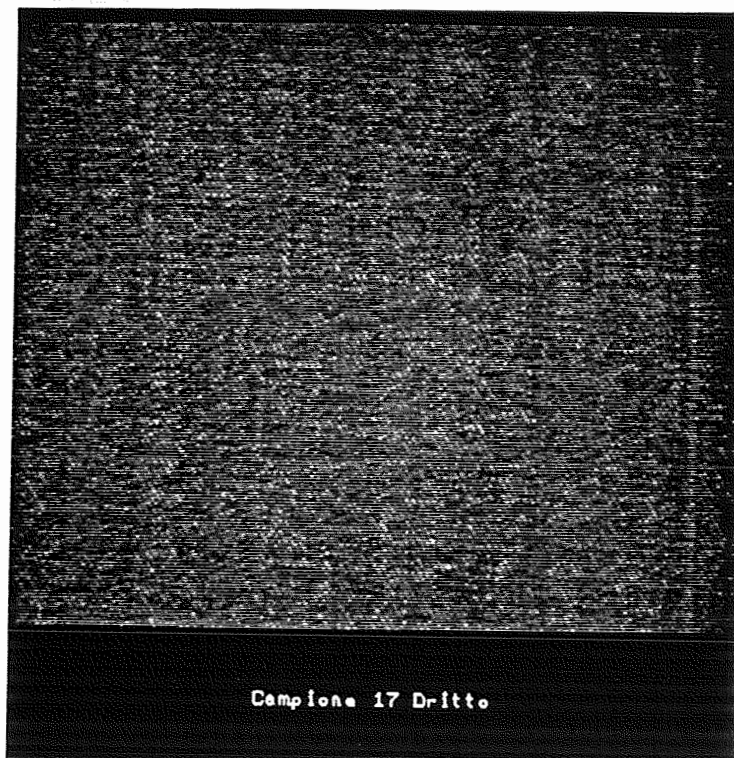


Fig. 3 Immagine digitale ricavata dall'acquisizione di un campione di tessuto C17d (lato diritto) privo di difetti; il passo di campionamento sul tessuto è di 0.3 mm, la risoluzione fotometrica di 256 classi.

Dal campione preso in esame è stata ottenuta una matrice di 416 righe per 512 colonne; la matrice è stata suddivisa in 3328 ROI adiacenti di 8x8 elementi e in ciascuna ROI è stato calcolato l'istogramma, ricavando 3328 quadruple di parametri di valor medio μ , deviazione standard σ , momento di kurtosis K e momento di skewness S.

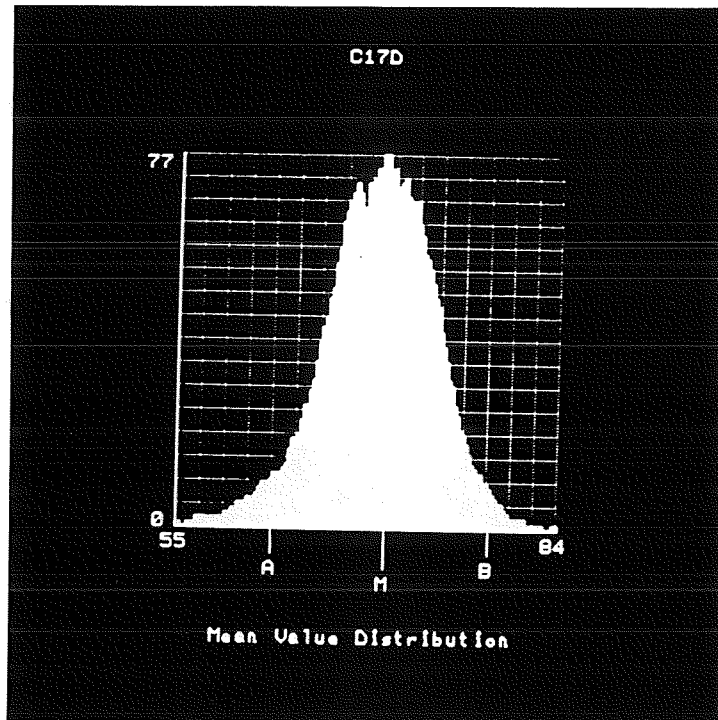


Fig. 4 Istogramma dei valori medi misurati sulle ROI in cui è stata suddivisa l'immagine di fig. 3.

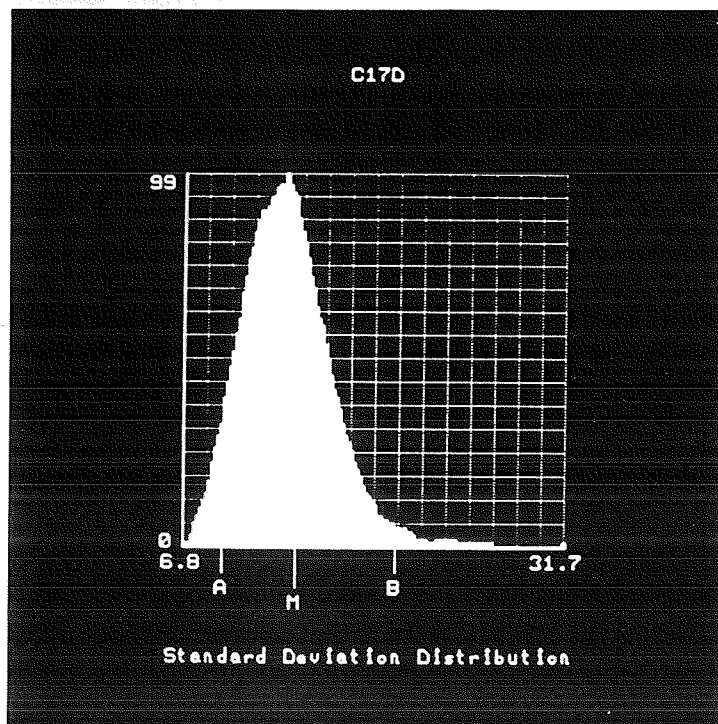


Fig. 5 Istogramma dei valori di deviazione standard misurati sulle ROI in cui è stata suddivisa l'immagine di fig. 3.

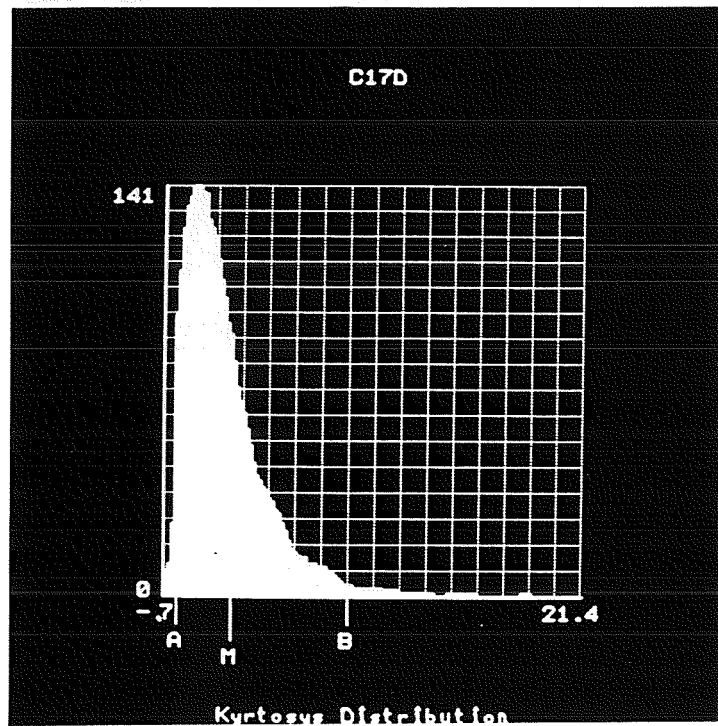


Fig. 6 Istogramma dei valori di kurtosis ricavati dalle ROI in cui è stata suddivisa l'immagine di fig. 3.

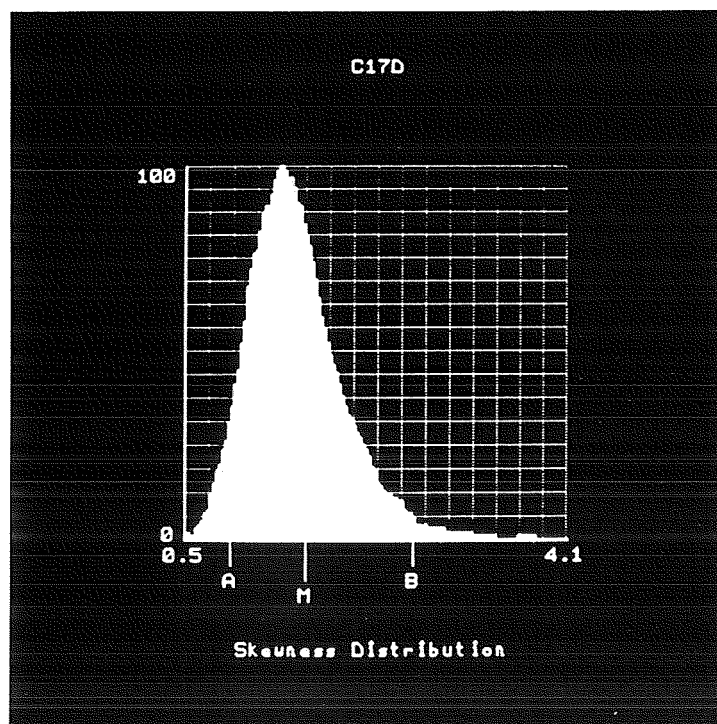


Fig. 7 Istogramma dei valori di skewness ricavati dalle ROI in cui è stata suddivisa l'immagine di fig. 3.

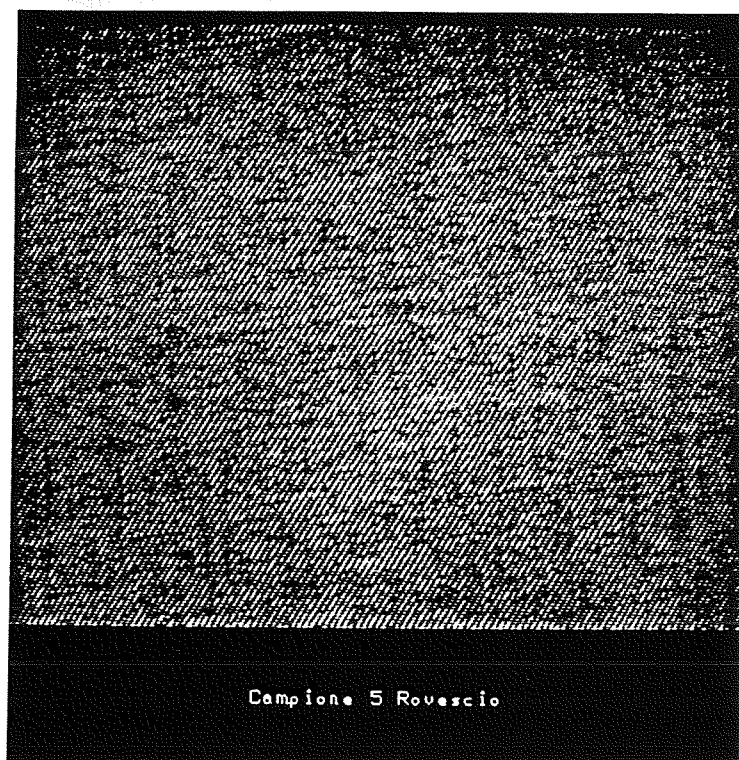


Fig. 8 Immagine digitale ricavata dall'acquisizione di un campione di tessuto C5r (lato rovescio) privo di difetti. Le condizioni di acquisizione sono le stesse di fig. 3.

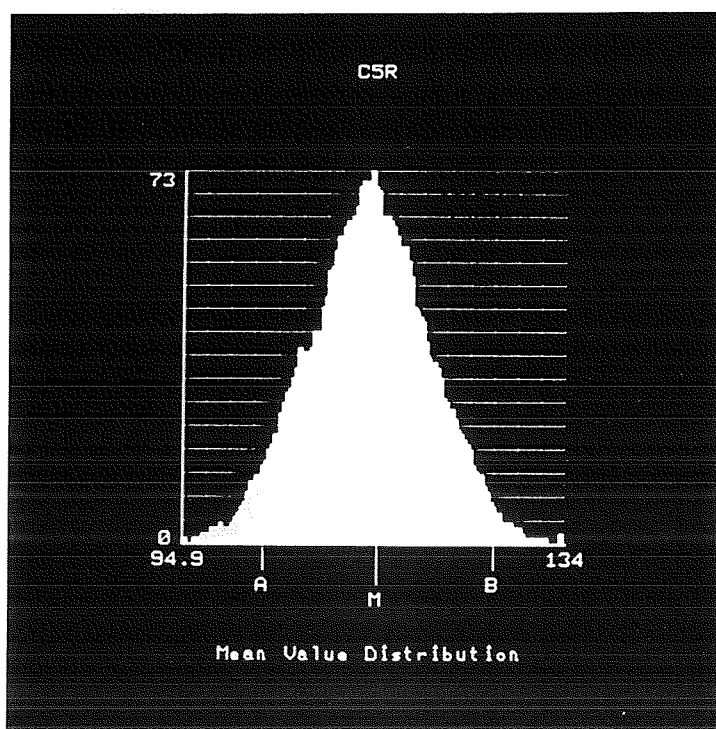


Fig. 9 Istogramma dei valori medi misurati sulle ROI in cui è stata suddivisa l'immagine di fig. 8.

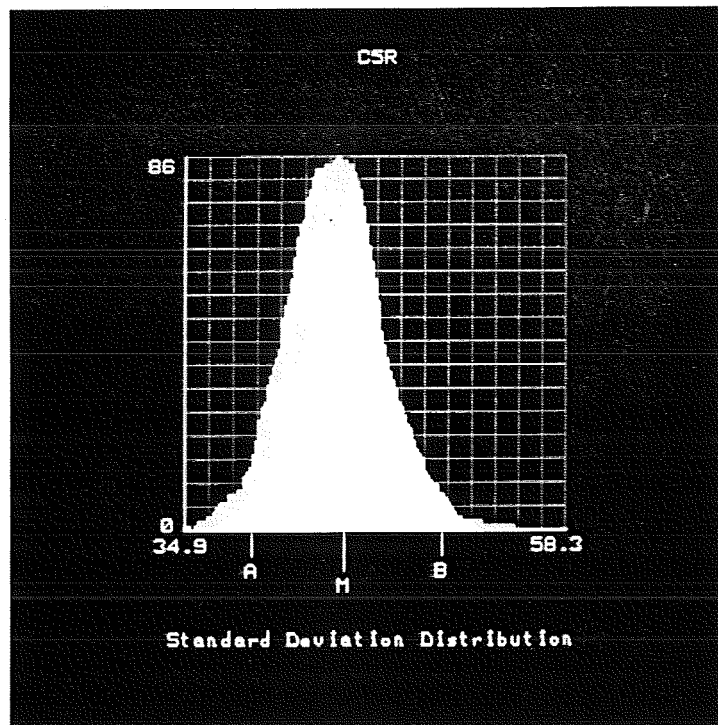


Fig. 10 Istogramma dei valori di deviazione standard misurati sulle ROI in cui è stata suddivisa l'immagine di fig. 8.

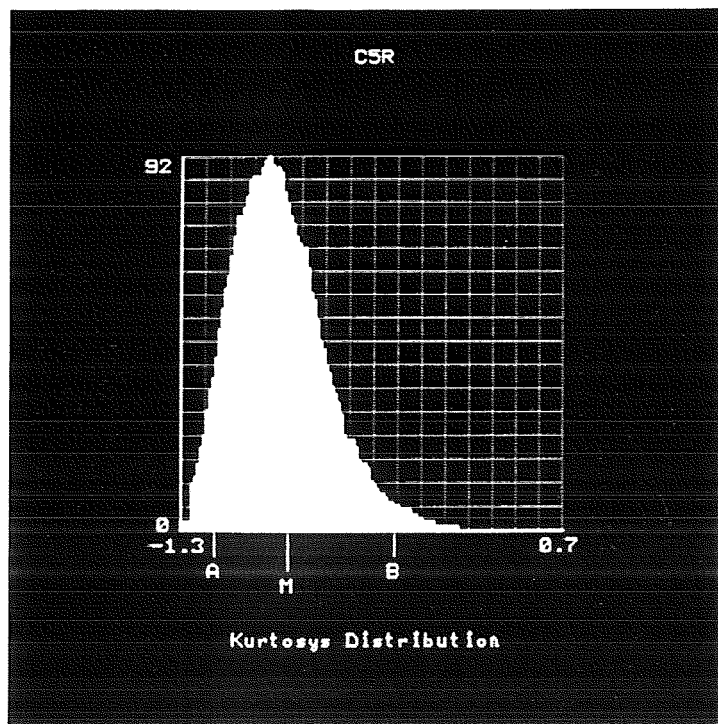


Fig. 11 Istogramma dei valori di kurtosis ricavati dalle ROI in cui è stata suddivisa l'immagine di fig. 8.

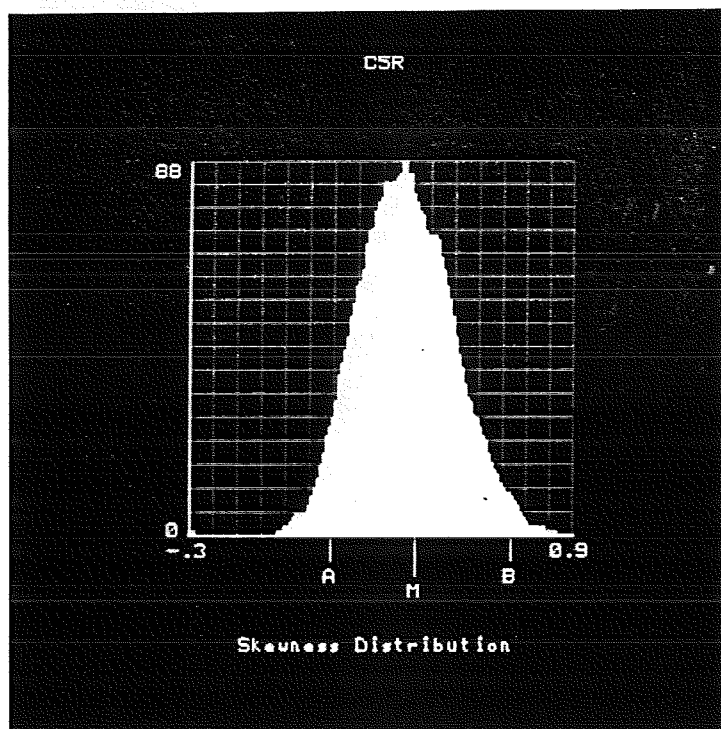


Fig. 12 Istogramma dei valori di skewness ricavati dalle ROI in cui è stata suddivisa l'immagine di fig. 8.

Il range di ciascun parametro, delimitato dai valori minimo e massimo x_{\min} e x_{\max} è stato suddiviso in 128 classi, ed è stato calcolato l'istogramma $H_i(x)$ di ciascun parametro: si sono così ottenuti quattro istogrammi dal campione C17d (v. figure 4-7) e quattro dal campione C5r (v. figure 9-12).

In entrambi i casi l'istogramma dei valori medi ha, con buona approssimazione, un andamento di tipo gaussiano, in accordo con la teoria che prevede che la distribuzione dei valori medi ricavati da sottoinsiemi di una popolazione sia di tipo normale, indipendentemente dalla distribuzione dei valori della popolazione stessa; facendo uso delle proprietà della curva normale, è possibile determinare dei valori della variabile x , espressi in funzione del valore medio μ_x e della deviazione standard σ_x , tali che l'area della curva sia suddivisa in parti note, in modo da eseguire così delle classificazioni aventi probabilità di errore determinate a priori: ad esempio, scelto un intervallo di lunghezza 2σ delimitato dagli estremi $\mu_x - \sigma_x$ e $\mu_x + \sigma_x$, si ha una probabilità di errore di circa il 5%.

Campione C17d

Parametro	valore medio	deviazione standard	estremo inferiore misurato	estremo inferiore calcolato	estremo superiore misurato	estremo superiore calcolato
x	μ_x	σ_x	x_x	$\mu_p - 2x$	x_2	$\mu_x + 2x$
μ	70.4	18	32	34	105	106
σ	37.5	15	14	7.5	71	67.5
S	40	15.7	15	8.6	76	71.4
K	20.5	13.7	4	-6.9	56	47.9

Campione C5r

Parametro	valore medio	deviazione standard	estremo inferiore misurato	estremo inferiore calcolato	estremo superiore misurato	estremo superiore calcolato
x	μ_x	σ_x	x_x	$\mu_p - 2x$	x_2	$\mu_x + 2x$
μ	65	19.7	27	26	104	104
σ	53	16	22	21	86	85
S	74.7	15.3	47	44.1	107	105.3
K	35.5	15.4	11	4.7	71	66.3

Tab. I - Intervalli di normalità ricavati dai campioni C17d e C5r.

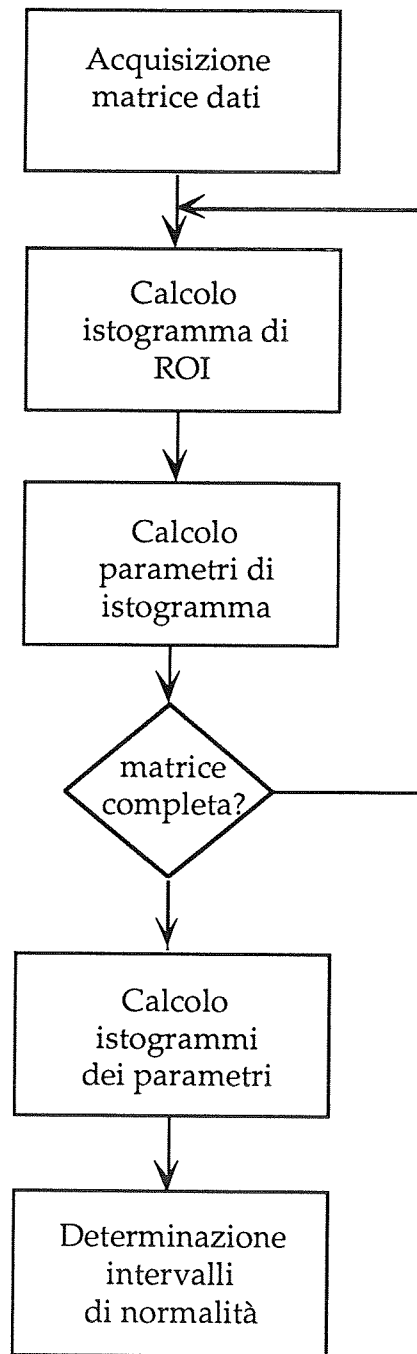


Fig. 13 - Sequenza delle operazioni nella fase di apprendimento

La tabella I riporta i valori così calcolati sugli istogrammi di figure 4-7 e 9-12: in questo modo per ciascun parametro sono stati determinati intervalli di riferimento (o normalità) tali che la classificazione di ROI normale o anormale rispetto a ciascun parametro abbia la stessa probabilità di errore.

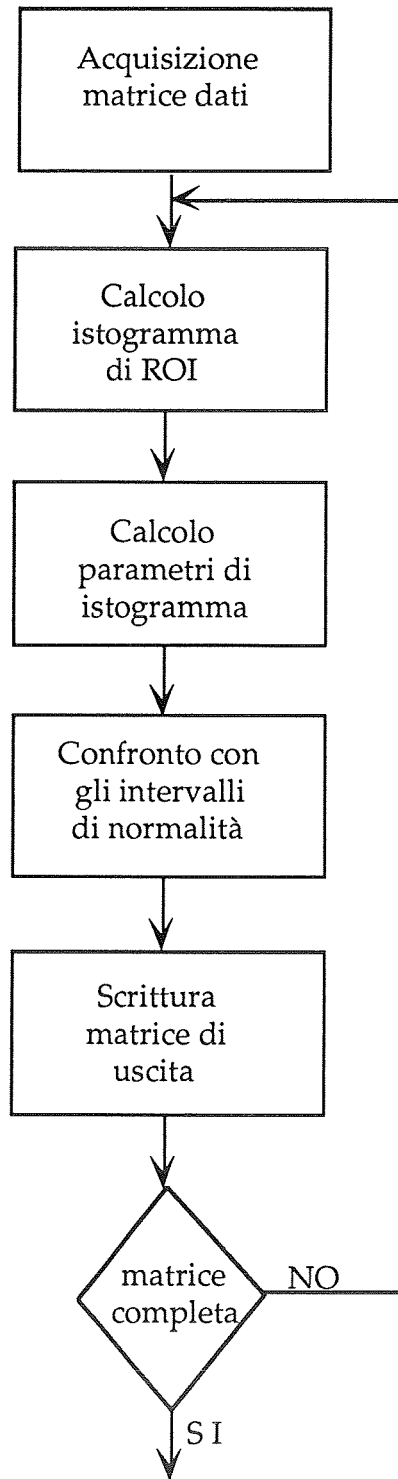


Figura 14 - Sequenza delle operazioni nella fase di segmentazione

La figura 13 riassume la sequenza delle operazioni eseguite nella fase di apprendimento durante il processo simulato.

La figura 14 mostra invece la sequenza delle operazioni eseguite nella successiva fase di segmentazione. Il campione di tessuto viene acquisito e la matrice viene esplorata con una ROI avente la stessa dimensione di quelle impiegate nella fase di apprendimento. Viene calcolato l'istogramma sulla ROI e si estraggono i parametri μ , σ , K e S : ciascun parametro viene confrontato con il corrispondente intervallo di normalità ricavato in precedenza e il risultato del confronto viene codificato in forma binaria ponendo:

$$b_i = \begin{cases} 0 & \text{per } x_i \in (x_{1i}, x_{2i}) \\ 1 & \text{per } x_i \notin (x_{1i}, x_{2i}) \end{cases} \quad (3)$$

dove $i = 0,1,2,3$ e $(x_{1i}, x_{2i}) =$ intervallo di normalità dell' i -esimo parametro.

La figura 15 mostra un esempio di documentazione ottenuto elaborando nella maniera suddetta il campione di tessuto C15. La zona contenente difetti (parte superiore della figura) è stata acquisita con la risoluzione fotometrica di 256 classi. La matrice dei dati di acquisizione, costituita da 224×512 elementi, è stata esplorata con una ROI di 16×16 elementi e per ogni posizione della ROI sono stati calcolati l'istogramma e i quattro parametri da essa estratti. I parametri sono stati confrontati con gli intervalli di normalità determinati durante la fase di apprendimento: per ogni i gli estremi dell'intervallo di normalità sono stati definiti da:

$$\begin{aligned} x_{1i} &= \mu_{xi} - 3 \sigma_{xi} \\ x_{2i} &= \mu_{xi} + 3 \sigma_{xi} \end{aligned} \quad (4)$$

Da ogni ROI si ottiene così un elemento della matrice di uscita definito da 2^4 livelli; mediante l'operazione di segmentazione si ottiene anche una compressione dei dati: si passa infatti da una matrice d'ingresso di 224×512 elementi a 256 livelli ad una matrice di uscita B di 14×32 elementi a 16 livelli.

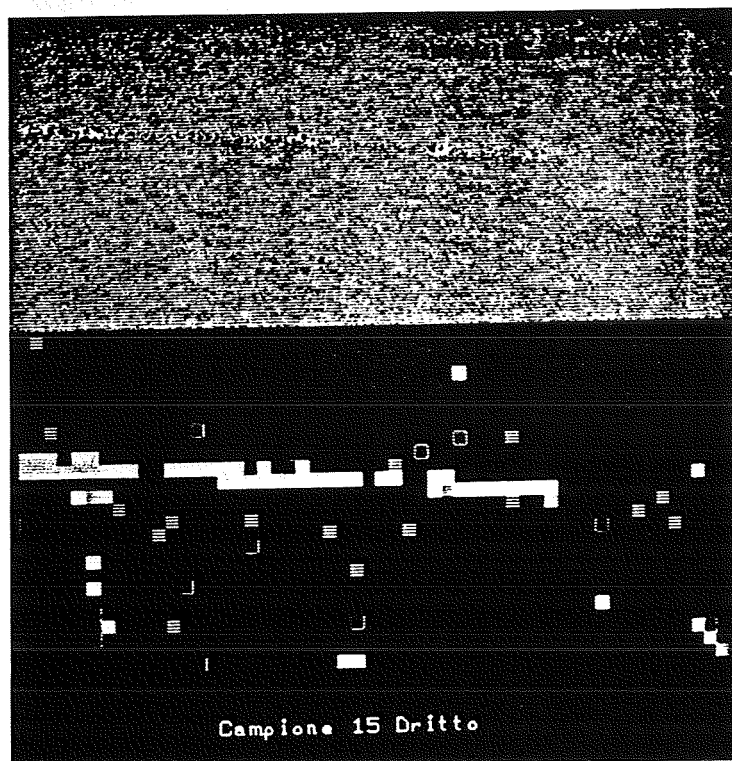


Fig. 15 - Esempio di segmentazione spaziale e fotometrica dei dati di ingresso. La parte superiore della figura mostra l'immagine digitale del campione C15; quella inferiore mostra la matrice di uscita B codificata su 16 livelli rappresentati mediante pseudo colori. La matrice di uscita è ingrandita di un fattore 16

1.3. Analisi

La matrice B ottenuta nella fase di segmentazione è scomponibile in $2^i - 1$ mappe binarie B_n nelle quali un elemento assume il valore 1 quando uno dei parametri ricavati da una ROI ha valore esterno all'intervallo di normalità: la tabella II mostra la corrispondenza fra l'indice n della mappa binaria e i parametri fuori norma secondo la convenzione adottata.

Le mappe binarie vengono elaborate per determinare le equazioni delle rette che meglio interpolano, secondo il metodo dei minimi quadrati, i punti con valore 1.

In ciascuna mappa B_n viene eseguito il procedimento iterativo mostrato in figura 16. Detto $\{P_i\}_0$ l'insieme degli elementi a valore 1, nel passo iniziale della procedura viene trovata l'equazione della retta interpolante r_0 . Si ottiene così l'insieme $\{d_i\}_0$, dove d_i è la distanza dell'i-esimo punto di $\{P_i\}_0$ dalla retta r_0 ; si calcolano il valore medio \bar{d}

e la deviazione standard σ_d dell'insieme $\{d_i\}_0$ e si determina un indice di sparpagliamento d_{\max} :

$$d_{\max} = \bar{d} + a \cdot \sigma_d \quad (5)$$

dove a è una costante che deve essere ottimizzata in funzione del tipo di tessuto.

indice n	Parametri fuori norma
1	K
2	S
3	K Λ S
4	σ
5	K Λ σ
6	S Λ σ
7	K Λ S Λ σ
8	μ
9	K Λ μ
10	S Λ μ
11	K Λ S Λ μ
12	σ Λ μ
13	K Λ σ Λ μ
14	S Λ σ Λ μ
15	K Λ S Λ σ Λ μ

Tab. II - Corrispondenza fra l'indice di mappa binaria e parametri fuori norma.

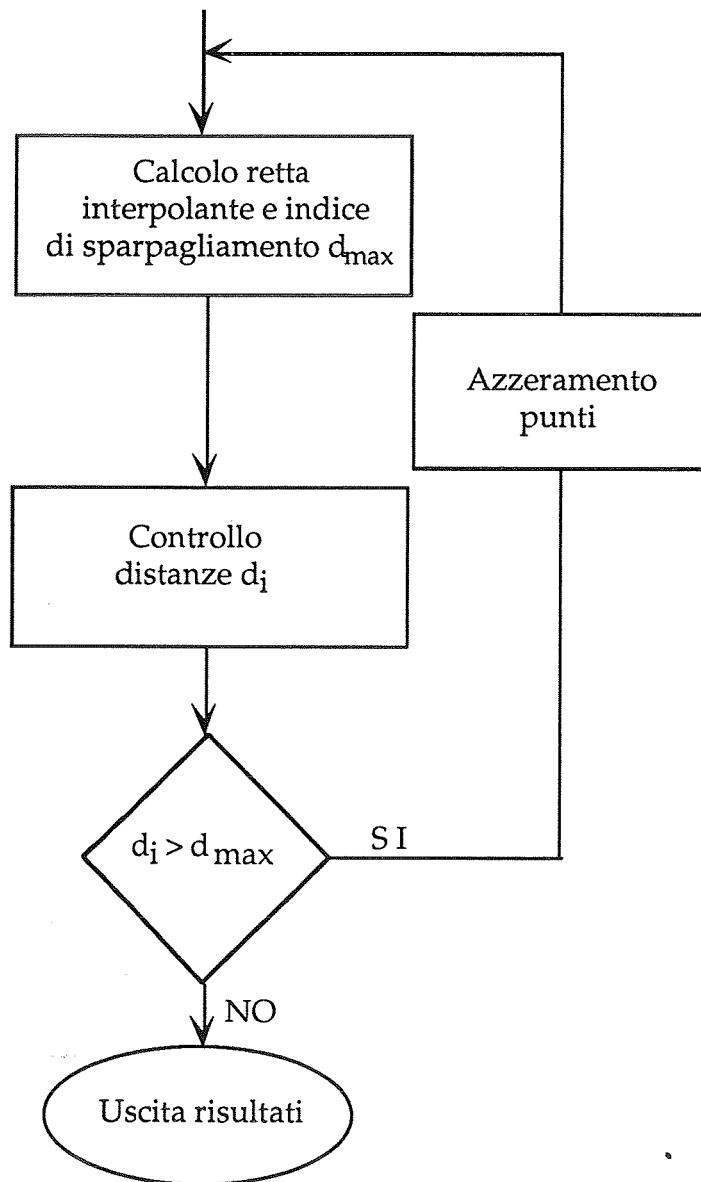


Fig. 16 - Diagramma della procedura di interpolazione lineare sulle mappe binarie

Dall'insieme dei punti $\{P_i\}_0$ vengono eliminati quelli con distanza $d_i > d_{max}$ ottenendo così un nuovo insieme $\{P_i\}_1$. Viene trovata l'equazione della retta r_1 che meglio interpola questo nuovo insieme e vengono controllate le distanze dei punti di $\{P_i\}_1$ da r_1 . Se alcuni punti si trovano a distanza $d_i > d_{max}$, l'operazione di riduzione viene ripetuta, ottenendo il nuovo insieme $\{P_i\}_2$ sul quale il processo continua; in caso contrario il processo si arresta e fornisce l'equazione della retta r , gli estremi del segmento di r determinati rispettivamente dal punto P_1 con il minimo valore di ascissa e il punto P_2 con il

massimo valore di ascissa, nonché l'indice $\chi^2 = \sum d_i^2$ calcolato sull'insieme di punti rimasti.

indice n	coeff. retta		χ^2	numero punti iniziale finale		coeff. corr.
1	0,06	323	1788	31	9	0,55
3	-0,02	331	1871	26	13	0,29
4	-0,13	343	9470	11	7	0,49
8	0,19	338	48573	22	20	0,05
12	0,08	280	901	56	48	0,88

Tabella III - Risultati delle analisi delle mappe binarie B_1, B_3, B_4, B_8 e B_{12} .

I segmenti di retta ricavati da ciascuna mappa B_n sono stati disegnati sull'immagine dei dati di acquisizione in modo da controllare la validità dei risultati.

Ad esempio, la matrice di uscita mostrata in figura 15 è stata scomposta nelle 5 matrici significative B_1, B_3, B_4, B_8 e B_{12} , che contengono un numero sufficientemente elevato di punti con valore 1; la tabella III riporta i coefficienti delle rette di interpolazione e i risultati di un'analisi dei dati, mentre la figura 17 mostra i segmenti di retta ricavati dalle elaborazioni di ciascuna mappa sovrapposti all'immagine dei dati ricavati dal campione C17d.

L'esempio riportato è in accordo con i risultati ottenuti elaborando le immagini di altri campioni contenenti questo tipo di difetto: la mappa B_{12} , relativa alla combinazione dei parametri $\mu \wedge \sigma$, è risultata la più efficace per individuare, sia nel verso diritto che in quello rovescio, il difetto denominato "fili volanti"

La stessa combinazione $\mu \wedge \sigma$ è risultata la più efficiente anche per l'individuazione di difetti del tipo "fiamma in catena" (C3), "macchia d'olio" (C4), "filo lento in catena" (C6) e "fallo macchina" (C11a): le figure 18-21 mostrano esempi dei risultati ottenuti

esaminando sia sul lato diritto che sul rovescio campioni di stoffa contenenti difetti.

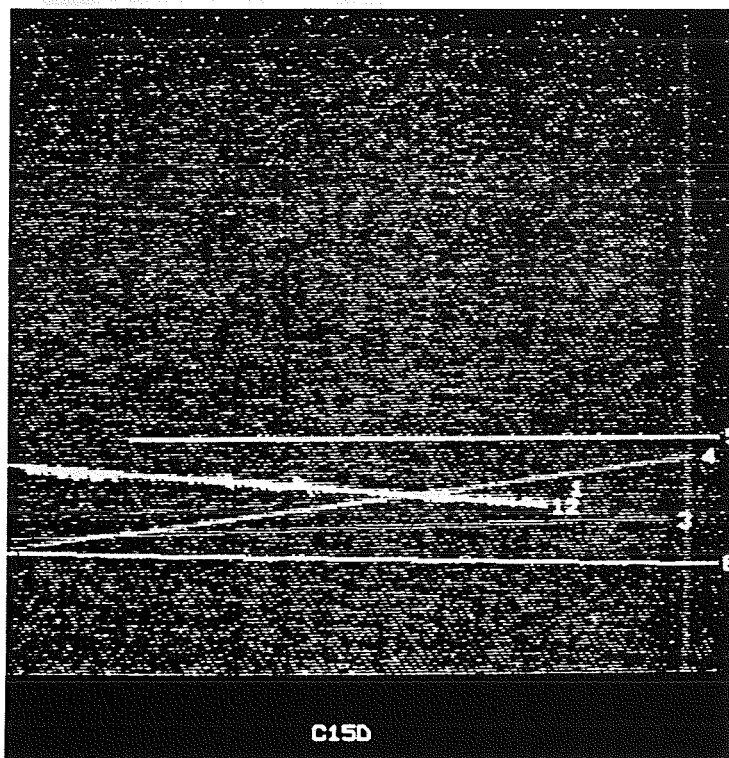


Fig. 17 - Esempio di analisi di mappe binarie. All'immagine digitale ricavata dal campione C15d sono sovrapposti i segmenti di retta ricavati dall'analisi delle mappe binarie B₁, B₃, B₄, B₈ e B₁₂ ottenute nella fase di segmentazione. I numeri associati a ciascun segmento si riferiscono all'indice delle mappe binarie da cui sono state estratti.

Il metodo di analisi sviluppato ha fornito risultati soddisfacenti sulla limitata casistica presa in esame. In particolare, oltre a quelli riportati negli esempi precedenti, si sono ottenuti positivi risultati nell'individuare i seguenti difetti del tipo: "filo doppio in catena", "trama lenta", "nodi in catena" indipendentemente quindi anche dall'orientamento assunto dal difetto stesso.

I vari parametri di calibrazione che influiscono sui risultati sono:

- le dimensioni delle ROI in cui viene suddivisa la matrice dei dati di acquisizione
- la lunghezza degli intervalli di normalità ricavati nella fase di apprendimento
- la combinazione dei parametri più efficiente per individuare un dato tipo di difetto.

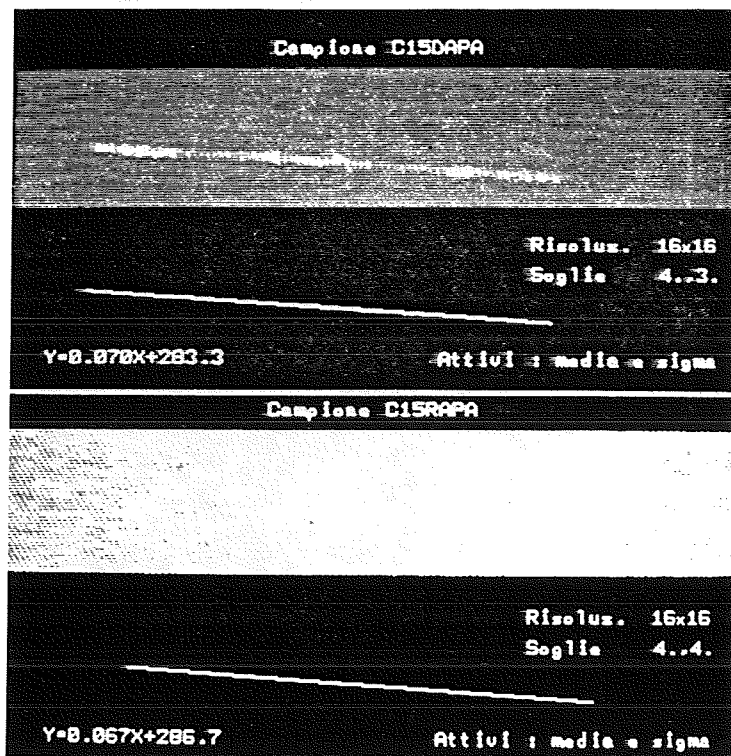


Fig. 18 - Analisi del verso diritto (d) e rovescio (r) del campione di tessuto C15. In figura sono mostrati l'immagine digitale della zona del campione, contenente un difetto di tipo elongato e il segmento di retta ottenuto analizzando i dati d'ingresso con ROI di 16x16 elementi e considerando i parametri μ e σ . È riportata anche l'equazione della retta interpolante; le coordinate sono riferite alla matrice di ingresso.

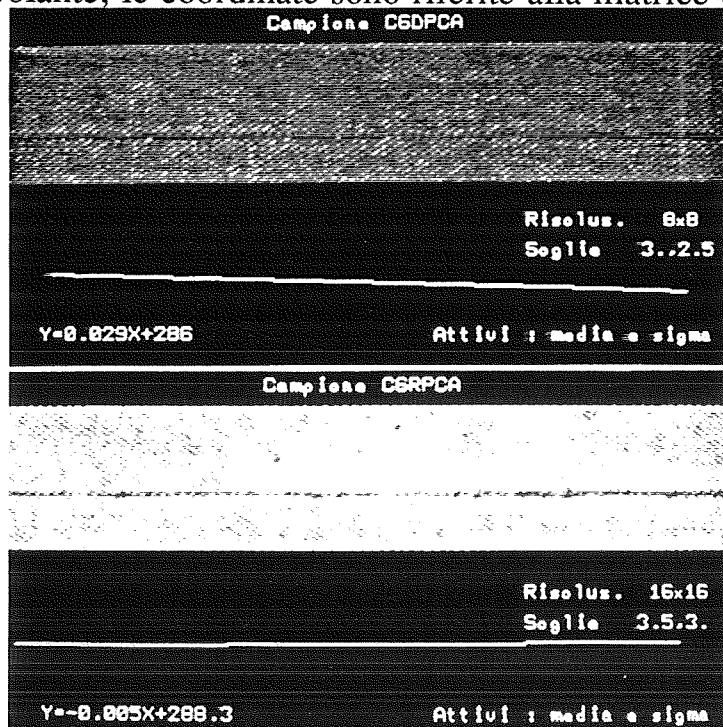


Fig. 19 - Analisi del campione C6d con ROI di 8x8 (parte alta della figura) e del campione C6r con ROI di 16x16 elementi.

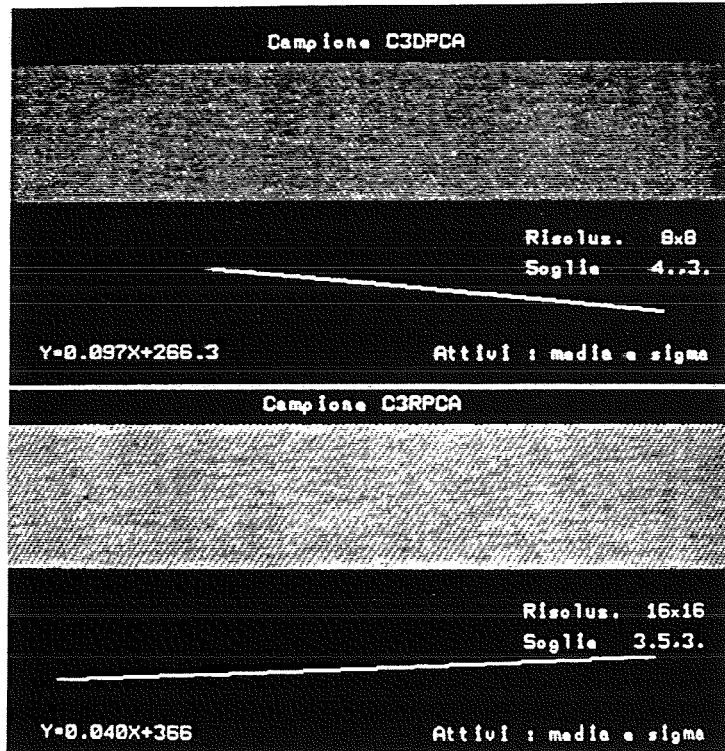


Fig. 20 - Analisi del campione C3d con ROI di 8x8 (parte alta della figura) e del campione C3r con ROI di 16x16 elementi (parte bassa).

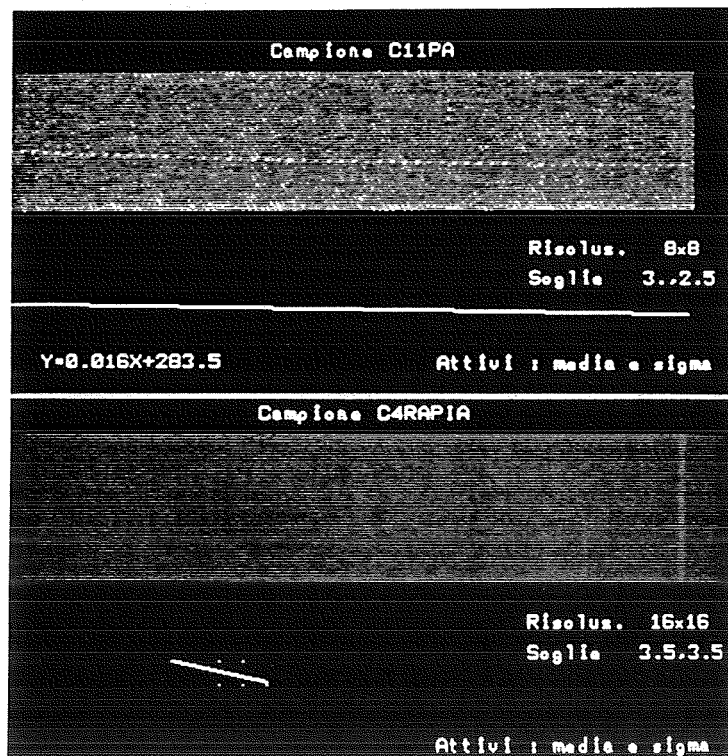


Fig. 21 - Analisi del campione C11d con ROI di 8x8 (parte alta della figura) e del campione C4r con ROI di 16x16 elementi (parte bassa).

Per ottimizzare la procedura di analisi è dunque necessario eseguire un'analisi multivariata su un sufficiente numero di campioni e determinare così i valori ottimi dei parametri. Ad esempio risultati sostanzialmente equivalenti agli esempi illustrati sono stati ottenuti elaborando gli stessi dati con ROI di 16x16 e 32x32 elementi: si vede quindi che le dimensioni della ROI possono essere aumentate rispetto a quelle usate essenzialmente nel processo di simulazione in modo da ridurre la risoluzione spaziale del dispositivo di acquisizione, abbassando così ulteriormente il carico elaborativo e semplificando l'architettura generale del sistema.

Le figure 22-25 mostrano che i risultati ottenuti dimezzando la risoluzione dei dati di acquisizione sono sostanzialmente coincidenti con quelli ricavati negli esempi riportati nelle figure 18-21; naturalmente la precisione di misura ottenuta nel caso di risoluzione spaziale più bassa è inferiore a quella relativa agli esempi ottenuti con ROI di 8x8 elementi.

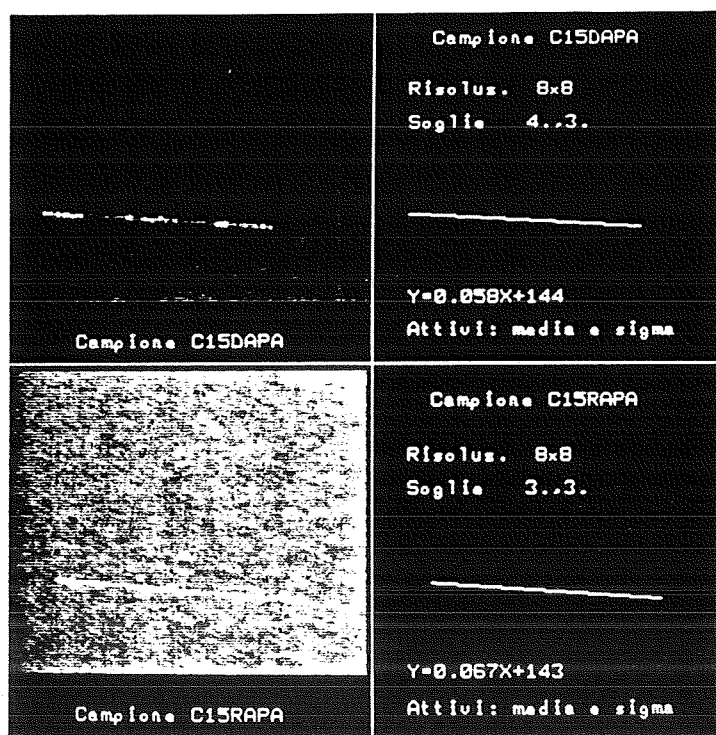


Fig. 22 - Analisi del campione C15d (parte alta della figura) e del campione C15r (parte bassa) con ROI di 8x8 elementi. Le matrici di acquisizione sono state ottenute con risoluzione spaziale eguale alla metà di quella usata per gli esempi di fig. 17-21.

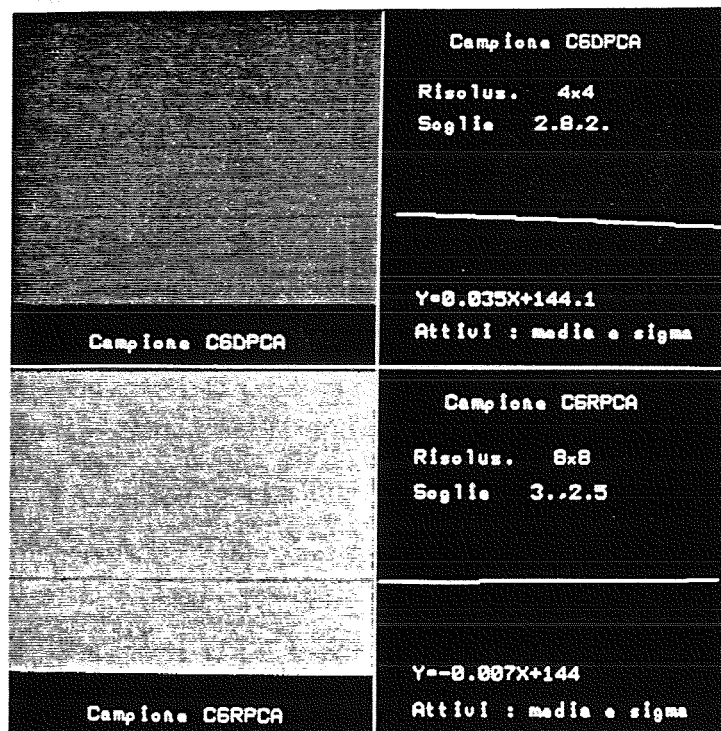


Fig. 23 - Analisi del campione C5d con ROI di 4x4 elementi (parte alta della figura) e del campione C5r con ROI di 8x8 elementi (parte bassa). La risoluzione di acquisizione è la stessa usata per la fig. 22.

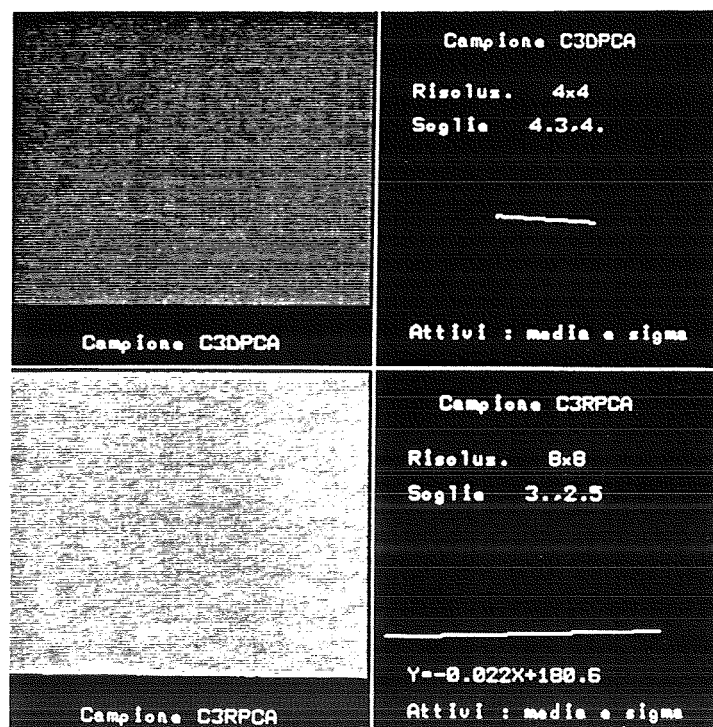


Fig. 24 - Analisi del campione C3d (parte alta della figura) e del campione C3r (parte bassa), alle stesse condizioni di fig. 23.

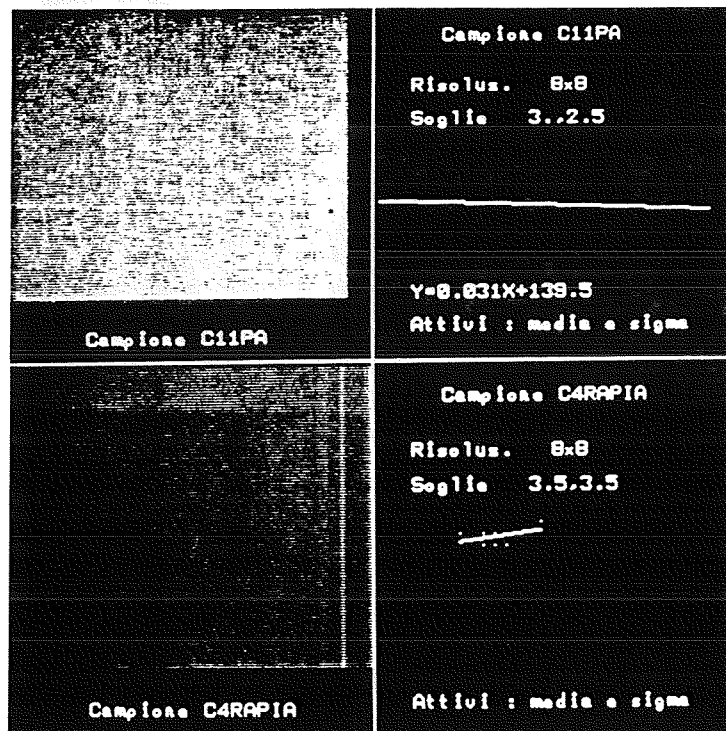


Fig. 25 - Analisi del campione C11d (parte alta della figura) e del campione C4r (parte bassa), con ROI di 8x8 elementi, con la risoluzione dell'esempio in fig. 22.

2. Architettura di un sistema on-line

Dalle esperienze condotte durante il processo di simulazione descritto nel capitolo precedente è derivato il disegno di una possibile architettura di una stazione per il controllo di qualità operante in linea durante la produzione del tessuto.

Questa architettura è caratterizzata da un'integrazione hardware delle funzioni fondamentali in precedenza illustrate e da un elevato livello di parallelismo elaborativo: ciò è necessario per consentire sia il trattamento differenziato dei dati per le varie categorie di difetti che possono essere individuabili su un solo lato del tessuto o su entrambi, sia l'esecuzione di processi anche complessi in tempi alquanto contenuti, secondo i vincoli definiti dalle modalità di produzione.

2.1. Acquisizione dei dati

Nella procedura in linea il tessuto in esame si muove con velocità costante rispetto al rivelatore d'immagini: è dunque possibile usare un trasduttore optoelettronico costituito da una singola schiera lineare di elementi, in modo da ottenere con costi contenuti la risoluzione spaziale necessaria per acquisire correttamente l'immagine. Con questa soluzione non è necessario eseguire la correzione geometrica dei dati di acquisizione per ridurre le distorsioni causate dall'orientamento della camera di ripresa rispetto all'oggetto in esame, dalle caratteristiche dell'obiettivo e dall'allineamento degli elementi del trasduttore optoelettronico: infatti la camera può essere ben controllata nel posizionamento, l'obiettivo può essere corretto per le distorsioni geometriche e le tolleranze dell'allineamento degli elementi del trasduttore e delle loro dimensioni sono ampiamente inferiori ai requisiti di precisione per l'analisi dei difetti.

Per contenere entro limiti accettabili le distorsioni di tipo fotometrico è necessario che la sorgente di luce impiegata produca un flusso luminoso il più possibile uniforme; la sorgente deve avere anche una notevole intensità per consentire l'acquisizione di segnali con il basso tempo di esposizione reso necessario dalla velocità di scorrimento del tessuto nelle condizioni normali di lavoro (~ 1 m/s).

Per correggere la distorsione causata dalla caratteristica fotometrica dei singoli elementi del trasduttore, non è utilizzabile il metodo seguito nel processo di simulazione: infatti, il flusso dei dati di ingresso può avvenire a velocità molto sostenuta (~10 MHz) e l'eventuale correzione deve essere quindi eseguita usando dei circuiti specializzati. Una possibile soluzione consiste nell'impiego di un amplificatore analogico a controllo digitale [5]: nella fase di calibrazione del trasduttore, analoga a quella descritta nel processo di simulazione, viene ricavato un vettore di costanti moltiplicative, che nella fase di acquisizione dei dati regolano l'amplificazione del segnale prodotto da ciascun elemento del trasduttore. In questo modo si correggono in tempo reale contemporaneamente la disuniformità del flusso luminoso prodotto dalla sorgente, la disuniformità della risposta del trasduttore e la degradazione dovuta alla vignettatura del sistema ottico di focalizzazione.

2.2. Compressione e analisi dei dati

Per rispettare i vincoli di velocità l'elaborazione dei dati può avvenire mediante una trasformazione con compressione dei dati ed un'analisi dei dati compressi: nella prima fase il segnale funzione del tempo prodotto dal trasduttore viene elaborato in modo da ottenere una matrice di dati che si costruisce man mano che la stoffa viene esplorata; nella seconda fase la matrice viene elaborata per rilevare le coordinate spaziali dei difetti.

La compressione dei dati di acquisizione può avvenire nella seguente maniera.

Nella fase preliminare di apprendimento, per ciascun tipo di tessuto viene esaminato un campione privo di difetti. Per ciascuna riga di scansione il traduttore produce un vettore V costituito da elementi v_i , con $i=1,2,\dots,N$, definiti su L livelli. Il vettore viene suddiviso in segmenti che vengono inviati ad una batteria di circuiti istogrammatori H_j , con $j=1,2,\dots,W$: H_1 riceve in ingresso gli elementi v_i con $i=1,2,\dots,C$, H_2 gli elementi v_i con $i=C+1,C+2,\dots,2C$, e così via. Al termine della lettura di una sequenza di R righe, all'uscita di H_1 si ha l'istogramma calcolato sugli elementi di V con indice $i=1,2,\dots,C$ e

appartenenti alle righe con indice $k=1,2,\dots,R$; all'uscita di H_2 si ha l'istogramma calcolato sugli elementi con indice $i=C+1,C+2,\dots,2C$ delle righe con indice $k=1,2,\dots,R$, e così via. Da ciascun istogramma vengono estratti i parametri $x_{j,m}$, con $j=1,2,\dots,W$ e $m=1, 2,\dots,K$. Ciascun parametro viene convertito in L_1 classi, e inviato all'ingresso di un corrispondente circuito istogrammatore, $H_{j,m}$; al termine della lettura di Q_1 sequenze di R righe, all'uscita di $H_{j,m}$ si ha l'istogramma del parametro $x_{j,m}$ calcolato su Q_1 campioni: l'istogramma viene elaborato secondo il criterio illustrato nel capitolo precedente in modo da ricavare per ciascun parametro un intervallo di valori di normalità $(x_{1(j,m)}, x_{2(j,m)})$.

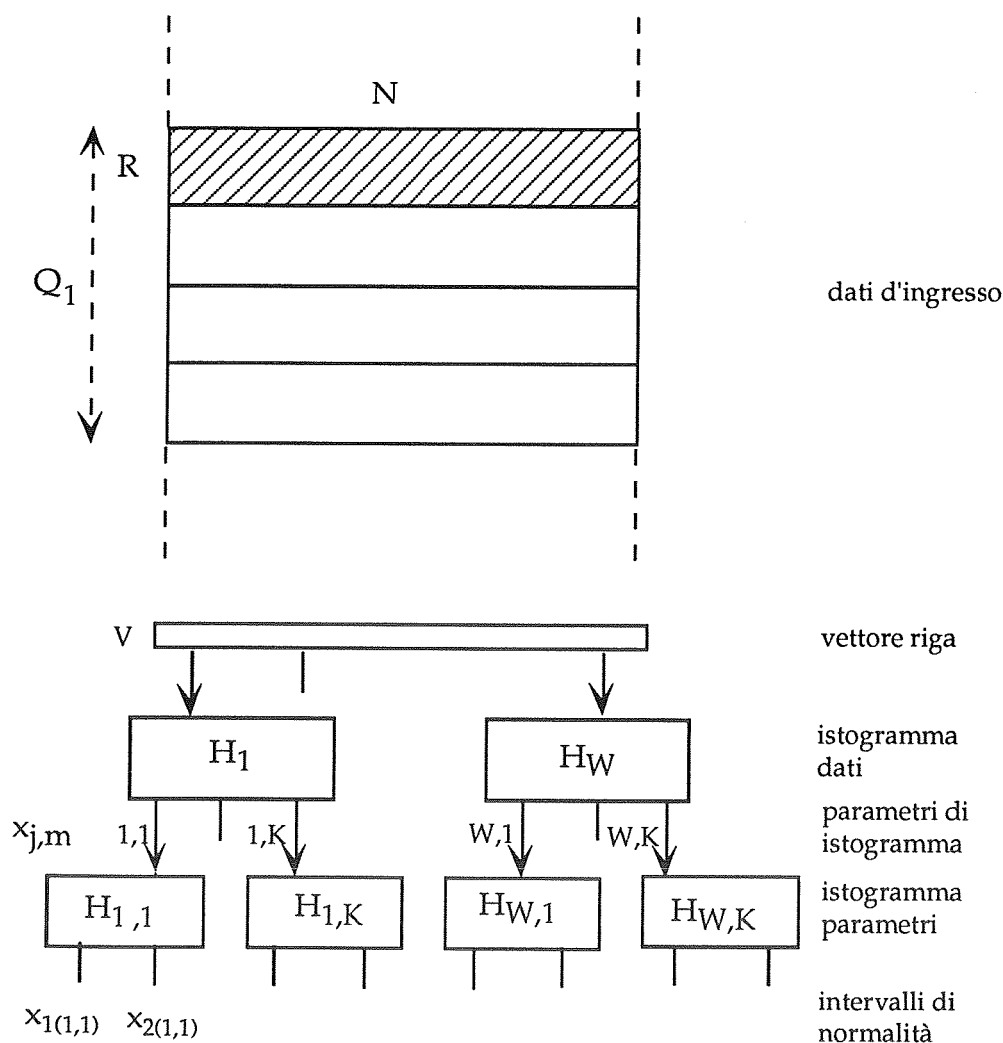


Figura 26 - Determinazione degli intervalli di normalità nella fase di apprendimento

La figura 26 riassume la procedura di apprendimento descritta; si noti che le operazioni compiute sulle Q_1 sequenze di R righe di scansione corrispondono all'elaborazione di una matrice di $(Q_1 \cdot R) \cdot N$ elementi mediante W ROI adiacenti con dimensioni $R \cdot C$, che si spostano lungo le colonne della matrice dei dati acquisiti.

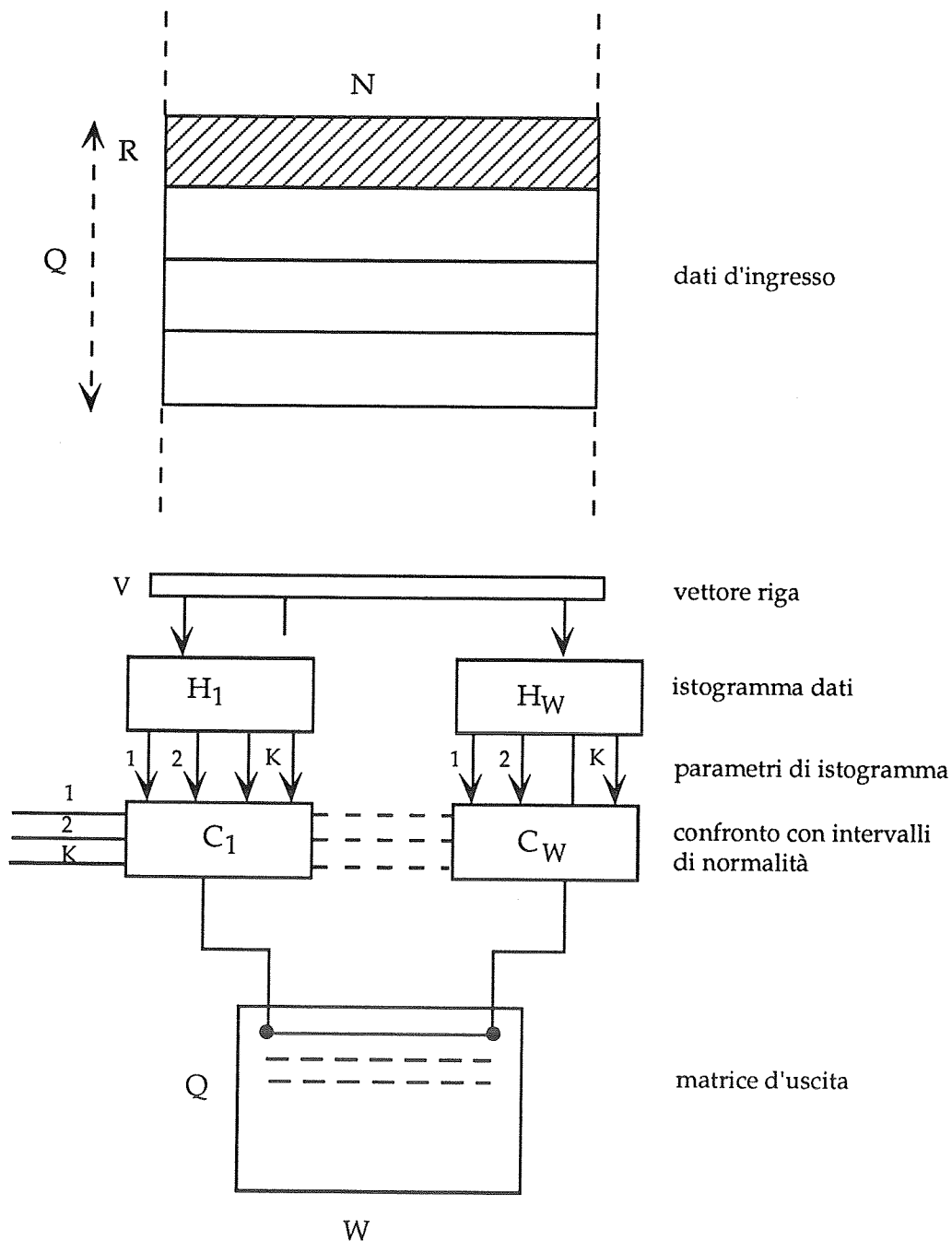


Figura 27 - Fase di compressione dei dati.

La fase di compressione può avvenire nel modo illustrato in figura 27. Il vettore V ricavato dalla scansione di una riga viene ancora scomposto in W segmenti che vengono inviati agli ingressi di W istogrammatore H_j ; al termine della lettura di una sequenza di R righe si hanno così W istogrammi, calcolati ciascuno su $R \cdot C$ elementi. Da ogni istogramma vengono ricavati i K parametri da esaminare, che vengono trasmessi agli ingressi dei circuiti di confronto C_j ; per ciascun parametro si hanno i possibili risultati:

$$b_{j,m} = \begin{cases} 0 & \text{per } x_{j,m} \in (x_{1(j,m)}, x_{2(j,m)}) \\ 1 & \text{per } x_{j,m} < x_{1(j,m)} \\ 2 & \text{per } x_{j,m} > x_{2(j,m)} \end{cases} \quad (6)$$

con $j = 1, 2, \dots, W$ e $m = 1, 2, \dots, K$

Questi valori vengono scritti in una riga della matrice d'uscita B ; la riga successiva viene riempita coi risultati ottenuti dalla sequenza di R righe successive, e così via: dopo la lettura di $Q \cdot R$ righe di N elementi ciascuna si ha una matrice d'uscita di $Q \cdot W$ elementi.

Si noti che le operazioni compiute corrispondono alla elaborazione di una matrice di $(Q \cdot R) \cdot N$ elementi mediante W ROI adiacenti di dimensioni $R \cdot C$, che si spostano lungo le colonne della matrice dei dati di acquisizione; per ogni ROI si ottiene nella matrice d'uscita un elemento con valore 0 se tutti i parametri da essa estratti rientrano nella norma, altrimenti si ottiene un elemento con valore diverso da 0.

La figura 28 mostra la temporizzazione delle operazioni. Il trasduttore produce per ogni riga di scansione N dati di acquisizione che vengono inseriti a gruppi di C nei circuiti istogrammatore H_j ; all'uscita del circuito istogrammatore si devono avere i parametri ricavati dall'istogramma ottenuto su N righe: in ogni istogrammatore vengono così accumulati $R \cdot C$ campioni.

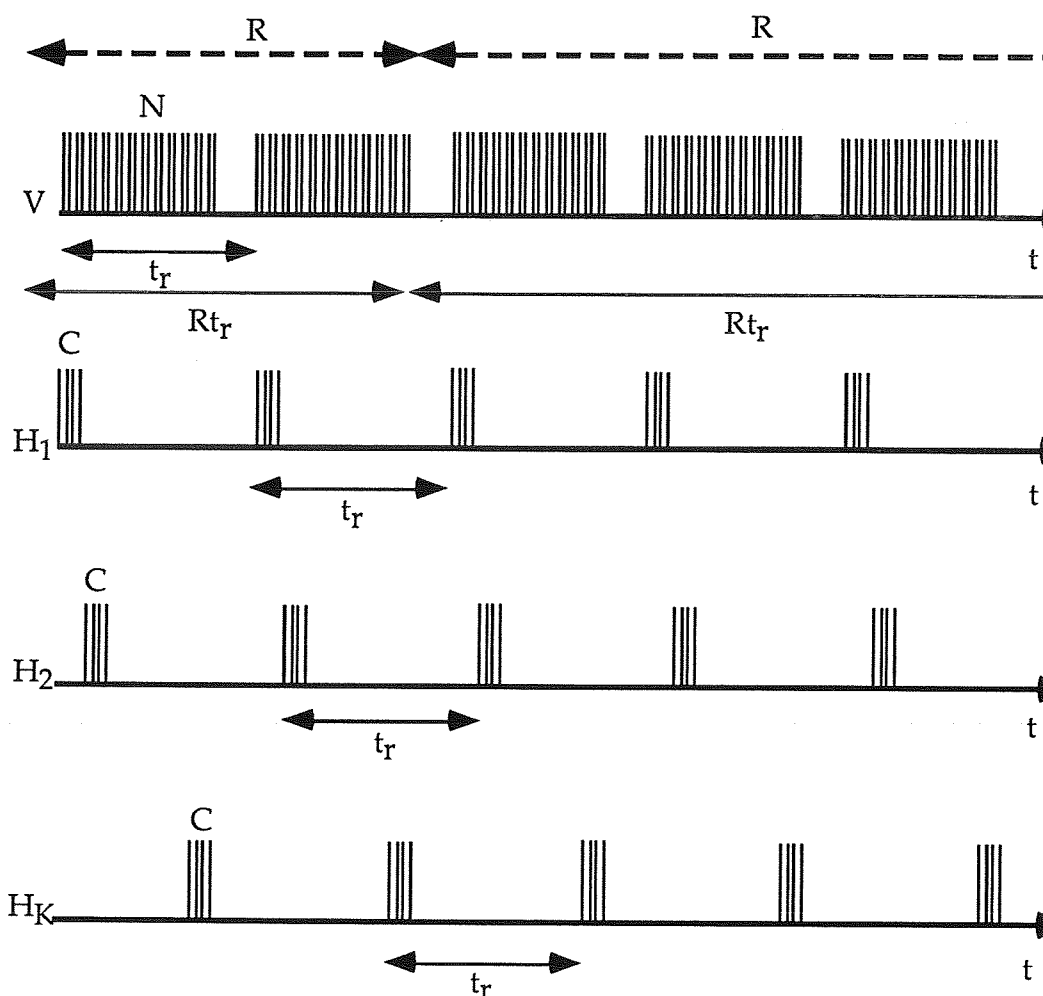


Fig. 28 - Diagramma temporale del flusso dei dati ai circuiti istogrammatori

Si possono ipotizzare due tipi di architettura:

1) *Estrazione dei parametri e codifica mediante processori multipli.*

In questo caso il circuito istogrammatore è costituito da una memoria per l'accumulo dei campioni su cui calcolare l'istogramma e da un microcontrollore DSP. Detto t_r il tempo di scansione di una riga, la memoria viene caricata durante l'intervallo di tempo $R \cdot t_r$; al termine del caricamento in memoria il microprocessore elabora i dati accumulati per estrarre i parametri, confrontarli con gli intervalli di riferimento e ricavare i valori $b_{j,m}$ da scrivere nella memoria di uscita B. Il tempo a disposizione per compiere queste operazioni è uguale al tempo di scansione t_r di una riga che dipende dalle modalità di acquisizione dei dati.

Fissati i seguenti valori

•altezza del tessuto	$h = 1.5 \text{ m}$
•velocità di trascinamento del tessuto	$v = 1 \text{ m/s}$
•numero di elementi del traduttore	$N = 2048$
•passo di campionamento	$\Delta x = \frac{h}{N} \cong 0.75 \text{ mm}$
•passo di avanzamento	$\Delta y = \Delta x = 0,75 \text{ mm}$

si ha:

$$t_r = \frac{\Delta y}{v} = \frac{0.75 \text{ mm}}{1 \text{ m/s}} = 750 \mu\text{s}$$

L'estrazione del parametro di valore medio μ dall'istogramma comporta l'esecuzione di L somme sui dati contenuti in memoria, mentre il calcolo del parametro di deviazione standard σ richiede L somme di quadrati; il DSP, opportunamente programmato, può eseguire in un ciclo interno t_0 o una somma o un quadrato. Posto $L=256$ e t_0 60 ns (caratteristico ad esempio del TMS C30) il tempo necessario per calcolare i due parametri citati risulta $t_1 \cong 30 \mu\text{s}$: questo tempo è inferiore al tempo di riga t_r e quindi una riga della matrice B può essere scritta in tempo reale al termine della lettura di R righe di scansione.

Il numero di microcontrollori richiesti in questo caso è uguale al numero W di segmenti in cui viene suddivisa la riga di scansione. Supponendo di esplorare il tessuto con ROI di forme quadrate si ha:

$$R = C \text{ e } W = \frac{N}{R}$$

posto $R=32$ sono necessari 64 DSP, mentre con $R=64$ si richiedono 32 DSP.

Le dimensioni della ROI sopra citate sono ragionevolmente impiegabili sulla base delle esperienze condotte per cui il costo complessivo della circuiteria è sufficientemente contenuto visti i prezzi unitari di DSP di medie prestazioni utilizzabili dal sistema.

2) Estrazione dei parametri mediante processore singolo.

In questo caso si hanno le memorie di accumulo $M_{j,s}$ con $j = 1, 2, \dots, W$ e $s = 1, 2$, e un singolo microprocessore. Durante la sequenza di scansione di R righe i dati di acquisizione vengono caricati a gruppi C nelle memorie $M_{j,1}$ mentre il microprocessore elabora in sequenza i dati contenuti nella memoria $M_{j,2}$ per calcolare gli istogrammi ed estrarre i parametri; durante la scansione delle R righe

successive vengono caricate le memorie $M_{j,2}$ ed elaborati i dati accumulati in $M_{j,1}$, e così via.

Il tempo complessivo a disposizione per l'elaborazione dei dati accumulati è $R \cdot t_r$; il tempo a disposizione per l'elaborazione di ciascun istogramma è dunque:

$$t_1 = \frac{R \cdot t_r}{W} = \frac{R^2 \cdot t_r}{N}$$

Per $R = 32$ si ha $t_1 = \frac{1}{2} t_r$ e per $R = 64$ si ha $t_1 = 2t_r$: in entrambi i casi t_1 risulta nettamente inferiore al tempo di calcolo indicato in precedenza.

Il rapporto di compressione r_c tra i dati di ingresso, prodotti dall'operazione di acquisizione, e i dati ottenuti mediante l'operazione di segmentazione è:

$$r_c = \frac{Q \cdot R \cdot N \cdot \log_2 L}{Q \cdot W \cdot \log_2 3^k} = \frac{R \cdot C \cdot \log_2 L}{K \cdot \log_2 3} \quad (7)$$

Ad esempio, posto $L=256$, $R=C=32$ e $K=2$ si ha:

$$r_c \cong 2500.$$

L'architettura proposta contiene due matrici d'uscita B_1 e B_2 ; mentre la matrice B_1 viene riempita coi risultati dell'elaborazione dell'immagine del tessuto che scorre sotto il trasduttore, la matrice d'uscita B_2 , costruita in precedenza, viene elaborata da uno o più processori operanti in parallelo, ciascuno dei quali elabora una combinazione dei risultati $b_{i,j}$ usando algoritmi specializzati per individuare e classificare i difetti. Ad esempio la presenza di aree con valore medio di luminanza inferiore alla normalità può essere associata a macchie sul tessuto, mentre il rilevamento di aree con valore medio di luminanza superiore al normale è presumibilmente dipendente dall'assenza di filo di colore blu nella zona esaminata: sui difetti di tipo elongato si possono determinare i segmenti di retta interpolanti, mentre sui difetti con estensione a macchia si possono determinare il baricentro, l'area e fattori di forma.

Il tempo a disposizione per l'analisi dei dati contenuti nella matrice di uscita è $R \cdot t_r$; nelle ipotesi fatte il tempo a disposizione risulta essere di 24 ms o 48 ms.

Conclusioni

I risultati ottenuti nel processo di simulazione si sono dimostrati soddisfacenti: è stato infatti possibile rivelare differenti tipi di difetto, alcuni dei quali scarsamente percepibili all'osservazione diretta, e si può quindi supporre che una struttura sviluppata in base alle indicazioni esposte si dimostri efficace in un processo in linea per il controllo di qualità.

La struttura proposta è caratterizzata da diversi gradi di parallelismo: si devono infatti esaminare entrambe le facce del tessuto usando due strutture identiche che provvedono all'acquisizione, all'elaborazione e all'analisi dei dati ricavati da ciascuna faccia; inoltre in ciascuna struttura tanto l'elaborazione dei dati, rivolta alla discriminazione dei possibili difetti, quanto l'analisi dei dati elaborati, rivolta alla classificazione dei difetti, sono eseguite da più processori che elaborano contemporaneamente gli stessi dati d'ingresso.

I dati di acquisizione sono rilevati in tempo reale sul tessuto in esame; i dati così prodotti sono anch'essi elaborati in tempo reale in un processo di trasformazione e compressione che produce una matrice di dati che viene ottenuta con un ritardo noto e costante rispetto alla acquisizione; con un ulteriore ritardo noto si hanno i risultati delle analisi di questa matrice, eseguita anch'essa in tempo reale: è quindi possibile determinare durante il processo di produzione del tessuto la posizione dei difetti rilevati e classificati.

L'individuazione di un difetto avviene mediante una prima analisi di tipo statistico sui valori fotometrici dei dati di ingresso raggruppati in sottomatrici di dimensioni opportune e, in una seconda fase di analisi di tipo morfometrico, sui dati ottenuti con la fase precedente. Durante l'analisi morfometrica vengono scartati i probabili difetti ritenuti non significativi da parte del produttore (ad es. punti isolati o leggere variazioni della tonalità del colore) e vengono determinati i fattori di forma che caratterizzano l'insieme dei punti di difetto e ne consentono la classificazione. Un ulteriore controllo di conferma di difetto può essere fatto confrontando i risultati delle analisi eseguite sulle due facce del tessuto.

Lo studio di simulazione è stato eseguito su un limitato numero di casi, anche se significativo, e di conseguenza la realizzazione della

struttura proposta deve avere caratteristiche di modularità ed espandibilità al fine di consentire, a seguito di un collaudo su grandi quantità di tessuto, una migliore definizione dei parametri relativi alla acquisizione, alla elaborazione e alle analisi dei dati: è infatti opportuno determinare sperimentalmente la dimensione delle ROI equivalenti usate per la segmentazione dei dati di acquisizione, il tipo e il numero dei parametri statistici da estrarre dagli istogrammi elaborati sulle ROI nonché il tipo e il numero di algoritmi impiegati pre l'analisi dei dati compressi.

I dispositivi DSP consentono di soddisfare i requisiti di modularità e flessibilità sopra citati: essenzialmente gli algoritmi possono essere caricati nella RAM interna del dispositivo e in seguito possono essere codificati in EPROM, rendendo così più semplice la gestione del sistema. Infine le caratteristiche di velocità dei DSP fanno prevedere la fattibilità di un sistema operante in linea per il controllo di qualità del tessuto alla velocità normale di scorrimento di 1 m/s; le caratteristiche di programmabilità rendono possibile lo sviluppo di algoritmi specializzati per il controllo sia del tessuto "denim" fino ad ora esaminato, sia di altri tipi di tessuto.

Riferimenti

- 1) Azzarelli L., Bozzi R., Chimenti M.: "Automatic on line systems for detection, evaluation and mapping of defects and variation monitoring on finished fabrics - Analisi preliminare per la definizione di un sistema per il controllo di qualità".
Progetto Brite, Contratto n. RI1B-0243, Nota Int., Aprile 1990.
- 2) Azzarelli L., Bozzi E., Chimenti M., Marchetti A.: "Automatic on line systems for detection, evaluation and mapping of defects and variation monitoring on finished fabrics - Metodologie di analisi"
Progetto Brite, Contratto n. RI1B-0243, Nota Int., Giugno 1990.
- 3) Azzarelli L., Andronico P., Ballati M., Fantini E., Marchetti A., Panicucci R.: "Automatic on line systems for detection, evaluation and mapping of defects and variation monitoring on finished fabrics - Indagine preliminare sulla qualità e distribuzione dei dati in campioni di tessuto denim"
Progetto Brite, Contratto n. RI1B-0243, Nota Int., Luglio 1990.
- 4) Azzarelli L., Ballati M., Chimenti M., Giorgi C.A., Pardi L.: "Microfotometro MFA/36: Manuale tecnico". Nota Tecnica, Aprile 1990.
- 5) Tanaka S.C.: "A need and method for non uniformity correction in solid state image sensor".
SPIE Proc., vol. 350, 1982.