

Consiglio Nazionale delle Ricerche
Istituto di Elaborazione della Informazione

IST. EL. INF.
BIBLIOTECA
Posiz. ARCHIVIO B36-56

Sistema integrato H/S per lo sviluppo e la gestione di
procedure di ispezione per robot con teste multivisione

A CURA DI

Luciano Azzarelli, Massimo Chimenti

Nota Interna B4-56

Novembre 1992

Consiglio
Nazionale
delle
Ricerche



Progetto
Finalizzato
ROBOTICA

PROGETTO FINALIZZATO ROBOTICA

SOTTOPROGETTO: 3. Sensori ed attuatori

OBIETTIVO: 3.5.2. Sistemi di visione

Consiglio Nazionale delle Ricerche
Istituto di Elaborazione della Informazione

**Sistema integrato H/S per lo sviluppo e la gestione di
procedure di ispezione per robot con teste multivisione**

Luciano Azzarelli, Massimo Chimenti

Nota Interna B4-56

Novembre 1992

PROGETTO FINALIZZATO ROBOTICA

SOTTOPROGETTO: 3. Sensori ed attuatori

OBIETTIVO: 3.5.2. Sistemi di visione

PROGETTO FINALIZZATO ROBOTICA

SOTTOPROGETTO: 3 SENSORI ED ATTUATORI

OBIETTIVO: 3.5.2. SISTEMI DI VISIONE

*Sistema integrato H/S per lo sviluppo e la gestione di procedure di
ispezione per robot con teste multivisione*

Relazione di attività

a cura di: Luciano Azzarelli e Massimo Chimenti

Istituto di Elaborazione della Informazione - CNR Pisa

Redazione: M. Ballati

Stampato dal Servizio Tecnografico dell'Area di Ricerca del CNR di Pisa - 1992.

PREFAZIONE

Nella presente relazione viene presentata una sintesi dell'attività di maggiore rilevanza svolta durante il triennio 1989-91 dalla Unità Operativa dell'Istituto di Elaborazione della Informazione (IEI) del Consiglio Nazionale delle Ricerche nell'ambito del Progetto Finalizzato "Robotica".

Il programma di lavoro è stato articolato in attività di ricerca di base e attività di progettazione e sviluppo; dallo svolgimento delle prime sono derivati prodotti innovativi (modelli, algoritmi, procedure, ecc.), dallo svolgimento delle seconde sono derivati prodotti applicativi (progetti, prototipi di dispositivi e sensori, stazioni di lavoro, processi elaborativi ecc.).

Allo svolgimento delle ricerche e delle progettazioni e all'esecuzione delle implementazioni ha contribuito personale tecnico e scientifico dell'Istituto e di società industriali formalmente inserite nella Unità Operativa. Di seguito vengono riportati i nominativi dei collaboratori elencati in ordine alfabetico e di filiazione.

Istituto di Elaborazione della Informazione

Ballati Marirosa, Bedini Luigi, Bramanti Mauro, Bozzi Edoardo, Bozzi Renzo, Casalini Pierluigi, Cerri Sirio, Chimenti Massimo, Fantini Enrico, Giorgi Carlo Antonio, Marchetti Andrea, Panicucci Romano, Pardi Luciano, Salerno Emanuele, Salvetti Ovidio, Tonazzini Anna, Vaccarelli Anna.

Società Alenia GAT S.p.A.

Cavaccini Enrico, Ciliberto Antonio, D'Antonio Luigi, Minutoli Salvatore, Claudio Sabatino.

Società Scriba s.r.l.

Gontero Enzo, Nari Dario, Tallarico Rino.

Società S. Salvadori s.r.l.

Salvadori Salvatore, Salvadori Saverio.

SOMMARIO

Introduzione	pag. 1
1. Requisiti generali di progetto <i>L. Azzarelli, M. Chimenti, D. Nari, E. Gontero, O. Salvetti</i>	pag. 3
1.1. Specifiche dei segnali sensoriali	pag. 3
1.2. Memoria per i dati di ingresso	pag. 4
1.3. Velocità e potenza computazionale del sistema	pag. 6
1.4. Software di sistema	pag. 7
1.5. Descrizione del sistema	pag. 8
1.5.1 Architettura hardware	pag. 8
1.5.2 Architettura software	pag. 12
2. Software applicativo; processi, modelli e algoritmi	pag. 13
2.1. Analisi di immagini stereoscopiche <i>R. March</i>	pag. 14
2.2. Ricostruzione e restauro di immagini <i>L. Bedini, E. Salerno, A. Tonazzini</i>	pag. 17
2.3. Riconoscimento di oggetti poliedrici <i>A. Vaccarelli</i>	pag. 19
2.4. Ricostruzione da tomogrammi <i>O. Salvetti</i>	pag. 19
3. Tecniche e metodi di indagine non distruttiva	pag. 23
3.1. Procedura di ispezione ad ultrasuoni <i>L. Azzarelli, E. Bozzi, M. Chimenti, L. D'Antonio, C. Sabatino</i>	pag. 23
3.2. Tecnica di indagine ad ultrasuoni basata sull'analisi frequenziale <i>M. Bramanti</i>	pag. 27

3.3.	Sensori per indagini non distruttive di manufatti in materiale dielettrico	pag. 32
	<i>M. Bramanti, E. Salerno</i>	
4.	Descrizione delle stazioni di lavoro	pag. 37
4.1.	Stazione per indagini a ultrasuoni	pag. 37
	<i>L. Azzarelli, E. Bozzi, S. Cerri, M. Chimenti, A. Marchetti</i>	
4.2.	Stazione per ispezioni termografiche	pag. 42
	<i>L. Azzarelli, M. Chimenti, A. Marchetti, S. Minutoli, O. Salvetti</i>	
4.3.	Stazione per l'indagine tomoscopica	pag. 47
	<i>L. Azzarelli, M. Chimenti, E. Fantini, R. Panicucci, L. Pardi</i>	
4.4.	Stazione per l'ispezione nel visibile	pag. 51
	<i>L. Azzarelli, M. Chimenti, R. Bozzi, D. Nari, E. Gontero</i>	
5.	Conclusioni	pag. 63
	Riferimenti	pag. 65

Introduzione

L'obiettivo delle attività dell'Unità Operativa dell'IEI individuato nella fase iniziale del Progetto Finalizzato "Robotica" prevedeva fondamentalmente lo studio e l'implementazione di un prototipo di sistema integrato hardware e software in grado essenzialmente di acquisire, elaborare e gestire diversificati segnali sensoriali tipici di strutture robotizzate dotate di uno o più sensori di "visione". Il programma di ricerca e sviluppo non prevedeva, almeno nella fase iniziale delle attività, lo studio e l'implementazione di processi di interazione automatica fra il rilevamento dei dati sensoriali, la loro analisi e l'azione generatrice.

Non essendo stati assegnati obiettivi applicativi specifici, lo svolgimento dell'attività di definizione e sviluppo di un sistema di acquisizione e gestione di segnali sensoriali ha richiesto l'individuazione di diversificate tecniche di rilevamento e misura (elettromagnetiche, ultrasonore, termografiche, ecc.) e conseguentemente la scelta di un definito numero di sensori, distinti per tipologia e caratteristiche operative, mediante i quali fosse possibile ricavare informazioni dalle scene in osservazione prevedendo nel contempo un ampio spettro di metodiche di ispezione.

Pur mantenendosi entro i limiti definiti dal programma di attività generale, si è ritenuto opportuno individuare almeno un settore applicativo sufficientemente vasto in modo da consentire l'impiego e la sperimentazione di diversificate tecniche di visione ed analisi impiegabili nei processi di progettazione e produzione industriale: tale campo di applicazione è stato individuato nel settore del controllo non distruttivo di materiali, componentistica e manufatti.

Questo indirizzo di attività è stato in particolare stimolato anche da alcune industrie del settore produttivo che hanno attivamente partecipato alle attività di studio e sviluppo come partner della Unità Operativa: in particolare la società Alenia di Napoli per quanto riguarda l'indagine non distruttiva di materiali e componentistica per uso aeronautico; l'industria Legler per quanto riguarda il controllo di qualità di manufatti tessili; la società Scriba per lo studio e lo sviluppo di strumenti, sistemi e strutture orientate all'automazione e al controllo di qualità nei processi produttivi; la società S.Salvadori per la

progettazione e realizzazione di dispositivi e strutture di movimentazione.

Il complesso delle attività è stato infine svolto, oltre che nell'ambito del Progetto Finalizzato Robotica per la parte di propria competenza anche nell'ambito di specifiche collaborazioni bilaterali stipulate fra l'IEI e le industrie interessate: ciò ha comportato una migliore interazione fra i componenti interni ed esterni della Unità Operativa, un più efficiente e puntuale trasferimento delle conoscenze e dei prodotti e infine, ma non meno rilevante ai fini operativi, ha contribuito al reperimento delle indispensabili risorse strumentali e finanziarie.

Dato il particolare settore applicativo scelto ed i vincoli dettati dalla tipologia delle ispezioni da esso richiesto, non è stato realizzato un sistema capace di eseguire un processo completo di riconoscimento di scene o oggetti ed interazione con essi; tuttavia il sistema è stato progettato tenendo conto di questo rilevante aspetto, per cui è in grado di eseguire separatamente le funzioni di acquisizione dei segnali e di movimentazione delle strutture elettromeccaniche adibite alla ispezione o alla manipolazione. L'architettura del sistema risulta infine, entro definiti e propri limiti operativi, aperta ad ulteriori sviluppi per una completa gestione della interazione visione-azione.

Questo criterio di impostazione del progetto ha condotto alla individuazione e alla implementazione delle varie componenti hardware, strumentali, sistemistiche, software e procedurali in grado di garantire, oltre alle adeguate caratteristiche di efficienza e affidabilità del sistema, anche le migliori caratteristiche di trasferibilità, espandibilità e versatilità di impiego per eventuali strutture più decisamente orientate verso specifiche e ben definite applicazioni. Si è ritenuto opportuno dotare il sistema di caratteristiche di elaborazione in tempo reale che, nella fase attuale delle attività, vengono utilizzate prevalentemente per l'acquisizione e la gestione dei dati sensoriali nonché per la gestione delle risorse interne del sistema; tali caratteristiche infatti risultano essere indispensabili nella realizzazione di un sistema le cui uscite devono essere "contemporanee" al verificarsi di eventi esterni riconoscibili mediante l'analisi dei segnali prodotti dai sensori che forniscono i dati di ingresso.

1. REQUISITI GENERALI DI PROGETTO

L. Azzarelli, M. Chimenti, D. Nari, E. Gontero, O. Salvetti

1.1. Specifiche dei segnali sensoriali

I dati sensoriali possono avere caratteristiche estremamente diversificate e per il loro rilevamento possono essere impiegate tecniche e metodi di acquisizione molto condizionati anche dalle specifiche applicazioni. Un sistema per il trattamento dei dati sensoriali, non specializzato per una predefinita applicazione, deve essere quindi in grado di acquisire segnali di tipo analogico o digitale, dipendenti da una o più variabili, relativi a fenomeni od eventi che possono avere tempi di evoluzione molto brevi o viceversa piuttosto estesi.

Al fine di predisporre il sistema per impieghi in più processi applicativi, sono state individuate e sperimentate differenti metodologie e tecniche di acquisizione di segnali e per ognuna sono stati definiti i limiti operativi e i vincoli di progetto.

In generale, per il settore applicativo preso come riferimento, si può individuare la necessità di impiego di almeno due categorie di sensori: sensori puntuali (fotodiodi, trasduttori piezoelettrici, dipoli elettromagnetici) e sensori di area (array di trasduttori, telecamere, termocamere); i primi producono uno o più segnali in funzione del tempo che definiscono, ad esempio, l'andamento delle misure di diversificate grandezze relative ad una certa posizione nello spazio; i secondi producono uno o più segnali, sempre funzione del tempo, ed impulsi o segnali di sincronizzazione che consentono di ottenere le misure dei punti appartenenti all'area esplorata dal sensore.

Il sistema deve dunque essere in grado di acquisire sia segnali dipendenti dal tempo, sia segnali di sincronizzazione e riferimento sia coordinate che definiscono le posizioni e gli orientamenti del sensore.

Si è ritenuto quindi necessario definire funzioni e moduli di interfacciamento in grado di acquisire e gestire i seguenti tipi di segnali:

- segnali analogici asincroni con banda estesa fino a ~ 50 MHz (ad esempio i segnali ricavabili nelle applicazioni industriali orientate alla indagine non distruttiva di materiali e componentistica)

- segnali analogici sincroni monospettrali, definiti da una banda estesa fino a ~ 40 MHz, in funzione della risoluzione adottata (ad esempio segnali video prodotti da telecamera di area o di riga impiegabili nel controllo di qualità di manufatti)
- segnali sincroni multispettrali, definiti da più componenti (ad esempio componenti cromatiche RGB) o da un singolo segnale codificato (ad esempio segnali video a colori con standard PAL): anche in questo caso la banda può estendersi fino a qualche decina di MHz
- segnali digitali che possono essere costituiti dai dati relativi alla posizione del sensore (coordinate ed angoli di orientamento rispetto ad un sistema di riferimento), oppure dai dati ricavati dalla conversione analogico-digitale del segnale prodotto da un trasduttore (dati ricavati dalla digitalizzazione di un segnale video); a seconda del tipo di ingresso si possono avere cadenze di dati all'interno di una vasta gamma di valori.

L'acquisizione di segnali di tipo analogico comporta una conversione in forma digitale mediante la quale vengono ricavati i dati da analizzare; poiché i segnali possono avere caratteristiche differenti, è necessario disporre di convertitori con dinamica di ingresso, linearità, frequenza di conversione e risoluzione tali da soddisfare le esigenze previste per le applicazioni del sistema. Per garantire una certa flessibilità di impiego la risoluzione dei convertitori A/D può variare da 8 a 16 bit a seconda della risoluzione radiometrica ritenuta necessaria e della dinamica di misura che, in genere, può variare fra 2 e 5 decenni.

1.2. Memoria per i dati di ingresso

Per motivi di velocità e sincronizzazione, il sistema deve essere dotato di una memoria tampone in grado di accogliere i dati ricavati durante l'evento da analizzare: la memoria deve soddisfare requisiti di capacità e di tempo di accesso che dipendono dal tipo di segnale da acquisire, dalla sua frequenza di campionamento, dalla durata dell'evento e dai processi di analisi e di valutazione da eseguire.

In alcune applicazioni, che possono richiedere anche tempi di risposta estremamente brevi, la scena o l'evento da analizzare può essere ben definito da una contenuta quantità di dati ricavabili, in genere, da segnali monodimensionali di durata limitata e relativi a sequenze preordinate: in questo caso la memoria tampone può avere una capacità relativamente contenuta pur mantenendo caratteristiche di elevata velocità di accesso. In altre applicazioni l'evento è viceversa definibile da segnali caratterizzati da durate e frequenze elevate oppure può essere individuabile all'interno di scene a 2 o 3 dimensioni; queste scene possono essere rilevate mediante processi di acquisizione sincrona e possono essere definite da un grande quantità di dati: in questo tipo di applicazioni la memoria tampone può richiedere capacità anche molto elevate.

Tali requisiti sono tipici per l'acquisizione di immagini. Infatti, per immagini monocromatiche acquisite con formati standard, supponendo che i dati siano espressi su un byte, è necessaria una capacità di 0.25 Mbyte per frame TV; di conseguenza sono necessari diversi Mbyte di memoria per accogliere i dati relativi ad eventi della durata di qualche secondo. A parità di durata dell'evento, la capacità della memoria tampone deve ulteriormente aumentare in proporzione al numero di componenti cromatiche che definiscono l'evento o la scena e alla cadenza di acquisizione.

Per l'acquisizione di immagini mediante tecniche televisive è necessaria una memoria tampone ad accesso veloce, questo requisito vale anche per l'acquisizione di segnali ultrasonori in impieghi di CND che possono richiedere frequenze di campionamento dell'ordine di 10^2 MHz; anche per questo caso è necessaria una memoria di grossa capacità per immagazzinare i dati ricavabili da indagini eseguite su aree anche di dimensioni contenute. Infatti, acquisendo ad esempio il segnale riflesso per l'intera sua durata mediante una scansione eseguita con passo di 0,3mm di un'area di 10cm x 10cm, area piuttosto piccola rispetto alle reali esigenze operative, e ricavando per ogni punto di misura 500 campioni espressi su 1 byte, limitazione quest'ultima non sempre accettabile, è necessaria una memoria di ~ 50 Mb.

Per soddisfare le differenti esigenze che si presentano nelle varie applicazioni, è opportuno che l'organizzazione della memoria sia modulare ed espandibile entro ampi limiti e sia configurabile sia per

quanto riguarda l'organizzazione dei dati (righe e colonne predefinite) sia per quanto riguarda la lunghezza della parola che definisce un singolo dato (8-16 bit).

1.3. Velocità e potenza computazionale del sistema

In molte applicazioni il sistema deve elaborare i dati di acquisizione in linea sia per controllare il loro corretto rilevamento, sia per gestire l'interazione fra questo e l'evoluzione di un determinato evento, sia infine per gestire il flusso dei segnali digitali e le necessarie elaborazioni da eseguire su di essi. Ad esempio per seguire il moto di oggetti che escono dal campo di vista di un sensore di immagini, è necessario controllare i movimenti di un'apparecchiatura elettromeccanica che supporta il sensore di immagini con il minimo ritardo possibile rispetto al verificarsi di certe condizioni che possono essere determinate mediante l'analisi delle immagini acquisite dal sensore stesso.

Questo requisito impone che il sistema sia in grado di funzionare in un adeguato tempo reale e quindi di acquisire correttamente il flusso dei dati, che possono essere condizionati da un orologio indipendente dal sistema, fornendo le uscite di controllo delle periferiche adibite direttamente o indirettamente alla acquisizione. Il tempo reale è necessario anche per gestire la corretta sincronizzazione fra differenti processi elaboratori che possono essere lanciati in base ai risultati dell'analisi dei dati di ingresso.

Conseguentemente, definendo con real time il tempo di trasferimento dei dati relativi a sequenze sincrone, è necessario eseguire elaborazioni veloci mediante le quali sia possibile trasformare o modificare i dati di ingresso secondo le specifiche esigenze di analisi; queste possono richiedere sia l'esecuzione di più processi elaborativi condizionati e quindi sequenziali, sia l'esecuzione di più processi elaborativi indipendenti o concorrenti e quindi parallelizzabili.

Per l'elaborazione dei dati può essere richiesta, a seconda della applicazione, una potenza computazionale anche molto elevata che deve essere definita in funzione della quantità di dati da trattare, del livello di interazione fra processi elaborativi concorrenti e della

complessità degli algoritmi elaborativi orientati al riconoscimento, classificazione e valutazione di eventi, scene o oggetti.

La potenza computazionale necessaria può risultare quella tipica di una struttura elaborativa di grandi dimensioni; tuttavia nelle applicazioni esaminate può essere più opportuno, efficiente ed economico, distribuire la necessaria potenza su più sottosistemi interconnessi, programmabili o cablati, e specializzati per categorie di funzioni elaborative che in questo modo possono essere svolte anche con un significativo livello di parallelismo. In questo modo, sempre per categorie definite di processi elaborativi, è possibile ottenere potenze computazionali complessive anche elevate con una accettabile riduzione della generalità di impiego.

1.4. *Software di sistema*

Per soddisfare le necessità di elaborazione e di gestione in precedenza citate, per facilitare le attività di sviluppo del software di base e applicativo nonché per garantire le migliori condizioni di trasferibilità dei prodotti software all'interno di processi elaborativi e gestionali basati anche su diversificate piattaforme hardware, si è ritenuto opportuno prevedere, almeno per la prima fase di progettazione e di verifica e secondo i requisiti definiti nei paragrafi precedenti, più ambienti operativi orientati verso diverse finalità e operanti su strutture hardware cooperanti.

In particolare la stazione è stata dotata di due sistemi operativi: un sistema operativo standard per favorire lo sviluppo e il trasferimento di moduli e procedure elaborative di impiego generale nonché la gestione della comunicazione con l'esterno; un sistema operativo real time per la gestione dei processi elaborativi specializzati e per il controllo delle operazioni di ingresso e uscita relativi ai dispositivi e agli strumenti dedicati al rilevamento dei dati e segnali.

Il sistema prevede un'ampia disponibilità di risorse software standard per facilitare le operazioni di scrittura e trasferimento di programmi (librerie grafiche, librerie matematiche, linguaggi ad alto livello ecc.); l'architettura hardware consente di usare per i differenti sistemi operativi gli stessi linguaggi di programmazione pur operando

predefinite molto specializzate e ricorrenti nonché per la gestione di strutture esterne che possono richiedere una gestione in real time.

Alla categoria delle funzioni di servizio appartengono: i moduli e le procedure dedicati, ad esempio, alla gestione della comunicazione seriale o parallela ad alta velocità mediante cavi coassiali o fibre ottiche per la gestione in tempo reale delle strutture periferiche di rilevamento e controllo dati; la gestione dei processi di acquisizione dei segnali sensoriali e dei segnali di sincronismo e riferimento; la gestione dei processi di restituzione, rappresentazione e monitoraggio. Alla seconda categoria appartengono specifici moduli dedicati: al calcolo di distribuzioni statistiche; alla estrazione di parametri morfologici; alle trasformazioni geometriche e radiometriche; alle elaborazioni logico-aritmetiche ripetitive oppure alla esecuzione di complesse procedure o funzioni elaborative ben definite il cui svolgimento richieda una limitata interazione con la struttura centrale.

Il sistema è basato su più bus di comunicazione: un bus VME scelto per le sue caratteristiche di standardizzazione soprattutto nelle applicazioni industriali (è ampiamente impiegato nei sistemi di governo di macchine utensili e dispositivi robotizzati); quattro bus video ad alta velocità di tipo sincrono, dedicati alla trasmissione e gestione dei dati video di ingresso, che consentono la gestione e memorizzazione parallela di dati ricavati da più sensori di area o di riga; uno o più bus VSB privati dedicati alla comunicazione veloce fra altrettante CPU specializzate e le relative memorie tampone al fine di limitare il traffico sul bus VME consentendo l'ampliamento delle possibilità di esecuzione di processi elaborativi concorrenti.

La figura 2 mostra due prototipi con diversa configurazione e potenza computazionale impiegati per lo sviluppo e la sperimentazione di procedure elaborative orientate su diverse applicazioni di particolare interesse industriale.

La struttura è dotata di uno o più moduli di acquisizione, variamente specializzati, con diversificati ingressi per l'acquisizione di dati digitali espressi su 8-16 bit e di vari ingressi per segnali analogici ad alta o bassa frequenza di tipo sincrono o asincrono (segnali da sensori di area standard CCIR o RGB; segnali da sensori di area non standard; segnali da sensori di riga o puntuali ecc.). Il modulo di acquisizione provvede alla conversione analogico-digitale, mediante

diversificati convertitori specializzati per i vari tipi di segnali; alla trasformazione dei dati digitali, secondo specifiche funzioni dettate da esigenze applicative; alla acquisizione di serie temporali sincronizzate anche da eventi esterni; alla esecuzione in tempo reale di particolari elaborazioni. I dati di ingresso vengono inviati attraverso i bus video in memorie ampiamente espandibili mediante moduli da 2 o 4 MBy; la memoria può ospitare anche i dati o le immagini di sintesi risultanti dalle elaborazioni eseguite sui dati di ingresso.

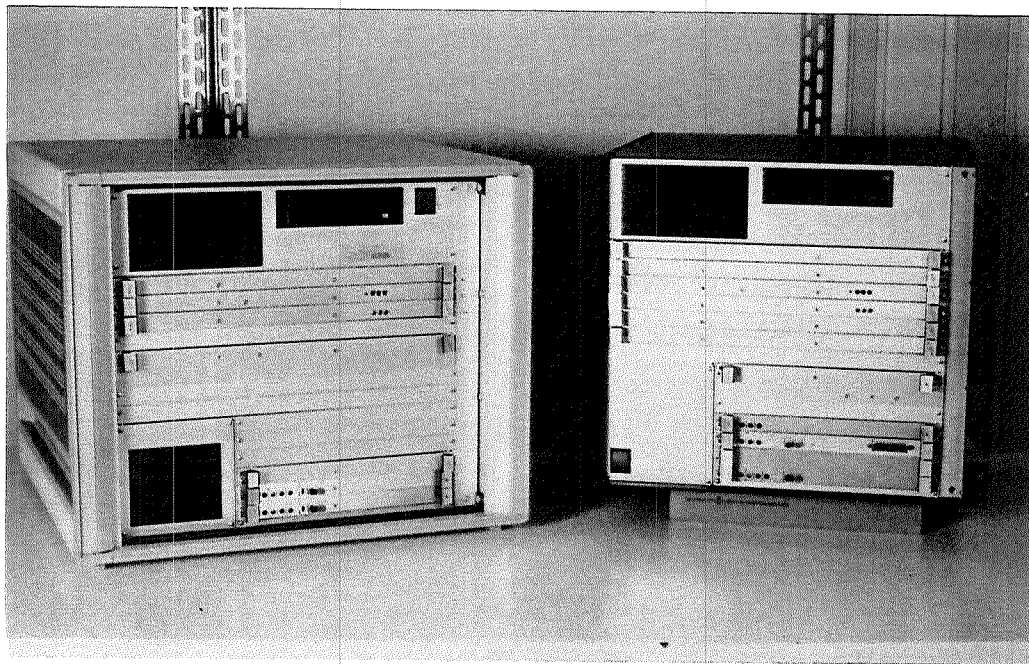


Figura 2: Prototipi di SVP 2000, utilizzati per lo sviluppo di software e per la realizzazione di stazioni di lavoro; i modelli in figura si differenziano per la capacità di memoria e la potenza delle CPU.

Le immagini definite dai dati digitali possono essere rappresentate, a seconda delle applicazioni, su uno o più monitor di restituzione gestiti da moduli programmabili.

1.5.2 Architettura software

La struttura elaborativa è dotata del sistema operativo UNIX operante su piattaforma hardware Motorola 68040; in questo modo vengono soddisfatti i requisiti di standardizzazione, trasferibilità e sviluppo citati nel capitolo precedente. Il software di base comprende anche il sistema grafico X-Window e l'interfaccia grafica di comunicazione MOTIF; le funzioni elaborative in tempo reale e la gestione delle operazioni eseguite dai moduli di acquisizione e restituzione dati, sono controllate dal sistema operativo VME-Exec operante sulle CPU Motorola 68030 oppure RISC 88000, in grado di garantire quindi l'esecuzione delle specifiche operazioni in real time nonché la gestione dei moduli hardware specializzati.

Una volta ultimato lo sviluppo delle procedure elaborative e gestionali è possibile, per impieghi ed applicazioni ben definiti, trasferire su queste CPU anche le funzioni elaborative e di gestione residenti attualmente sul sistema UNIX, riducendo così notevolmente la complessità della struttura con indubbi vantaggi operativi ed economici.

La figura 3 mostra l'organizzazione di principio del sistema software e individua le connessioni e le interazioni fra i vari moduli e contesti che ne caratterizzano l'architettura funzionale [1].

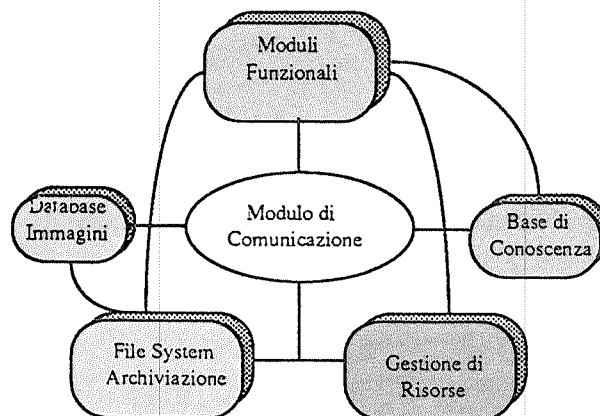


Figura 3: Organizzazione dei moduli funzionali sviluppati sul sistema H/S per l'elaborazione di segnali e immagini.

2. *SOFTWARE APPLICATIVO; PROCESSI, MODELLI E ALGORITMI*

Sul sistema di calcolo sono stati sviluppati diversi programmi per l'acquisizione, l'elaborazione e la gestione di dati sensoriali utilizzati in diversificate applicazioni. In generale, il software è costituito da moduli funzionali che interagiscono con le varie risorse del sistema e accedono agli archivi implementati su diverse memorie di massa.

Avendo come obiettivo lo sviluppo di strutture software ottimizzate nelle prestazioni e orientate a diversificate applicazioni, si è ritenuto opportuno sviluppare un consistente numero di librerie organizzate in ambienti distinti per funzione e operanti in un contesto generale di sviluppo. Da questo contesto e dall'opportuno concatenamento dei moduli "primitivi", è risultato relativamente semplice costruire le procedure specializzate per i contesti applicativi; ognuno di questi è quindi dotato di pacchetti software limitati, ottimizzati e molto orientati verso la specifica applicazione, per soddisfare le finalità funzionali applicative.

I prodotti software sviluppati appartengono a quattro categorie principali: moduli e librerie per la gestione dei sensori e l'acquisizione di segnali ed immagini; moduli elaborativi per la restaurazione dei dati; moduli per l'enhancement e moduli per l'analisi dei dati.

Nella maggior parte dei casi, mediante i segnali prodotti dai sensori collegati all'ingresso del sistema si devono costruire delle rappresentazioni di tipo pittorico in due o tre dimensioni: si è quindi sviluppato una serie di moduli software che a partire da segnali di ingresso di vario tipo (ultrasuoni, radiazioni elettromagnetiche, radiazioni termiche ecc.) realizzano la sintesi di immagini digitali in cui i valori di luminanza e le coordinate dei pixel dipendono, secondo funzioni predefinite, dai campioni dei segnali di ingresso.

Sulle matrici o sui vettori dei dati di ingresso si devono in genere eseguire operazioni di correzione di tipo geometrico o fotometrico; si devono inoltre di solito modificare i dati in base alle caratteristiche di risposta dei sensori oppure rispetto alle condizioni di misura: sono stati così realizzati moduli funzionali di trasformazione fotometrica, di

convoluzione e di filtraggio mediante i quali si ottengono dati corretti sui quali è significativo eseguire i processi di analisi.

I moduli funzionali possono essere di tipo generale, per attività di sviluppo, oppure estremamente mirati verso le specifiche applicazioni al fine di semplificarne ed ottimizzarne l'uso.

L'analisi dei dati è ottenuta sia mediante l'esecuzione di moduli per il calcolo statistico sui dati, per la segmentazione di immagini e l'analisi morfologica, sia mediante delle procedure specializzate e orientate sostanzialmente al riconoscimento, alla classificazione e valutazione di scene, eventi o oggetti: a differenza dei moduli citati in precedenza, le procedure non sono organizzate in librerie e possono avere un impiego molto mirato alle applicazioni.

Di seguito vengono in particolare sinteticamente descritti alcuni modelli ed algoritmi caratterizzati da un elevato contenuto innovativo e orientati al riconoscimento di scene o oggetti: questi processi o modelli elaborativi sono stati in genere sperimentati con dati, immagini o scene simulate, in seguito verranno sperimentati in condizioni operative reali.

2.1. Analisi di immagini stereoscopiche

R. March

È stato definito un modello matematico di stereo visione il cui obiettivo è la valutazione automatica della profondità da una coppia di immagini stereoscopiche [2, 3, 4].

La ricostruzione visiva tridimensionale è stata affrontata come un problema matematico inverso e mal posto ricorrendo alla teoria della regolarizzazione di Tikhonov. Il problema è regolarizzato e formulato come un metodo variazionale ben posto restringendo la soluzione (mappa delle profondità) ad uno spazio di funzioni regolari quasi ovunque tranne che lungo curve di discontinuità che hanno l'importante significato fisico di occlusioni tra superfici visibili diverse.

Il problema delle discontinuità ha richiesto di formulare una generalizzazione della tecnica di regolarizzazione di Tikhonov includendo nel metodo variazionale una misura dell'insieme di discontinuità aumentandone notevolmente la complessità. La

minimizzazione del corrispondente funzionale è stata affrontata mediante approssimazione con una successione di funzionali ellittici più trattabili, convergenti al funzionale effettivo nel senso della gamma-convergenza di De Giorgi. Mediante l'uso di funzionali ellittici è stato sviluppato e implementato su calcolatore un algoritmo basato sul metodo degli elementi finiti.

Attualmente l'attività di ricerca consiste sempre in una fase teorica supportata da simulazioni al calcolatore su immagini sintetiche. Poiché il modello studiato è idoneo per compiti visivi tipici dei robot, quali la manipolazione di pezzi meccanici, si prevede di passare in seguito alla sperimentazione dell'algoritmo su immagini di interesse industriale.

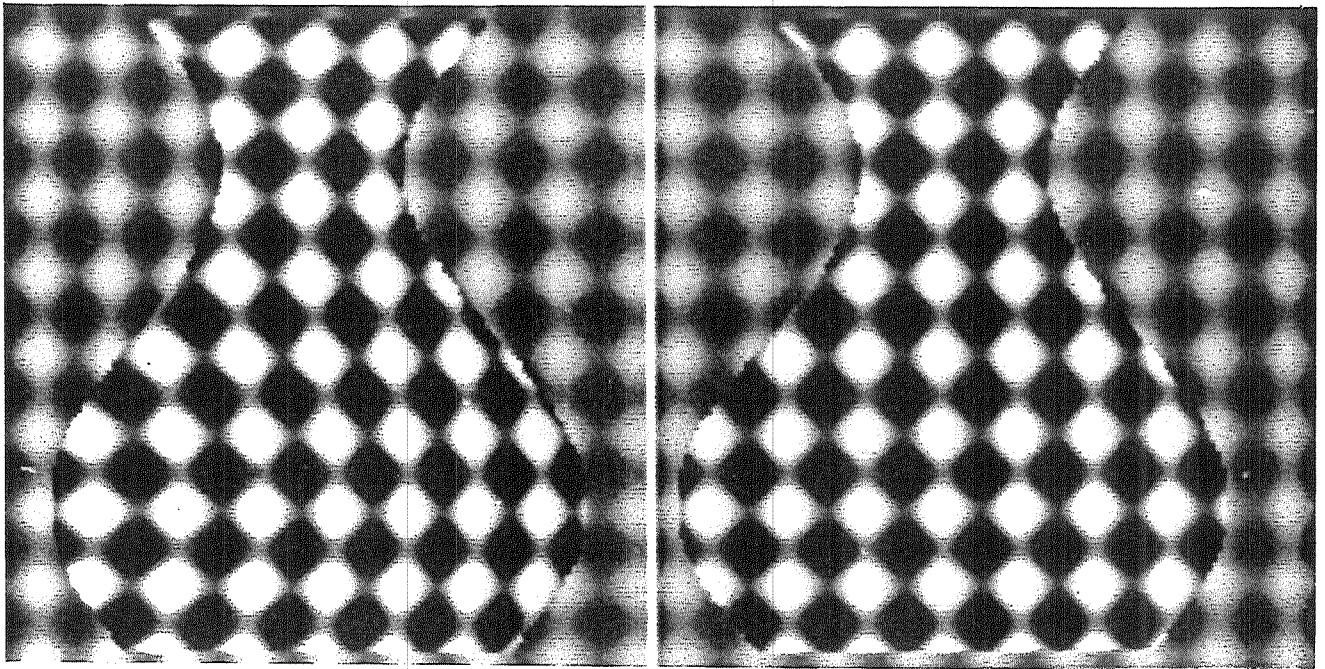


Figura 4: Coppia di immagini stereo sintetizzata al calcolatore

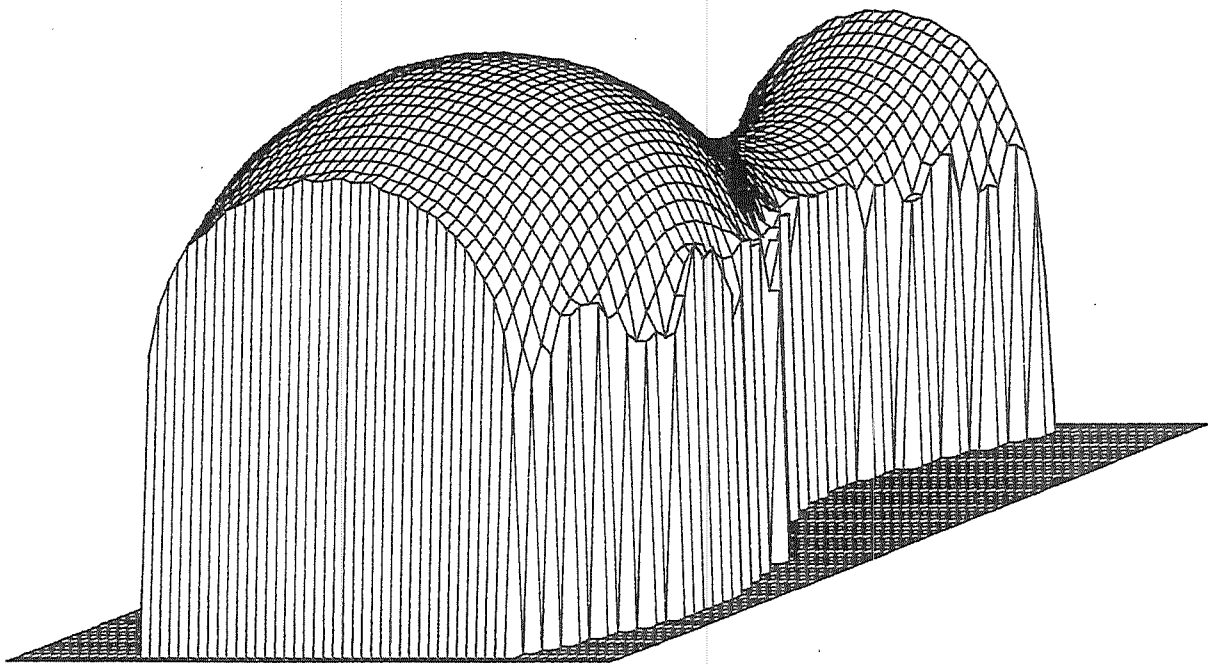


Figura 5: Ricostruzione della superficie mediante il modello matematico di visione stereoscopica.

2.2. *Ricostruzione e restauro di immagini*

L. Bedini, E. Salerno A. Tonazzini

Il problema della ricostruzione e del restauro di immagini è stato affrontato nell'ambito della teoria della risoluzione di problemi inversi mal-posti. L'attenzione è stata rivolta da una parte all'individuazione di metodi matematici che consentano di definire univocamente una soluzione stabile al problema, e dall'altra alla ricerca di algoritmi efficienti per il calcolo di tale soluzione. Per quanto riguarda i metodi matematici, sono state analizzate tecniche di regolarizzazione sia deterministiche che Bayesiane, basate sull'utilizzo di informazioni a priori. Per quanto riguarda l'individuazione di algoritmi efficienti, sono stati proposti algoritmi di mixed-annealing e di tipo Graduated Non-Convexity (GNC), evidenziando anche la possibilità di una loro implementazione su architetture dedicate di tipo parallelo, che sfruttino in parte le potenzialità di reti neurali analogiche. In particolare è stata definita una rete alla Hopfield per il restauro di immagini con il metodo della Massima Entropia, e ne sono state studiate le prestazioni mediante risoluzione di equazioni differenziali non lineari su calcolatore digitale [5, 6, 7]. Con applicazione al restauro di immagini [8] e alla ricostruzione tomografica da un numero limitato di proiezioni [9], è stato sviluppato un algoritmo di mixed-annealing per la stima MAP quando l'immagine e le sue discontinuità sono modellate come Campi di Markov interagenti localmente [10]. Tale algoritmo, basato sulla cooperazione di tecniche di descent deterministico e di metodi di rilassamento stocastico, potrebbe essere efficientemente implementato su una architettura mista analogica-digitale, che sfrutti le potenzialità di calcolo di reti neurali alla Hopfield. Successivamente, sono stati analizzati metodi che si basano sull'adozione di stabilizzatori che trattano le discontinuità in modo implicito, e sono stati sviluppati algoritmi deterministici efficienti di tipo GNC [11], per il caso di discontinuità interagenti.

La ricostruzione con tecnica volumetrica si basa sugli stessi principi degli algoritmi di superficie: un esempio di algoritmo sviluppato è mostrato in figura 9 [29].

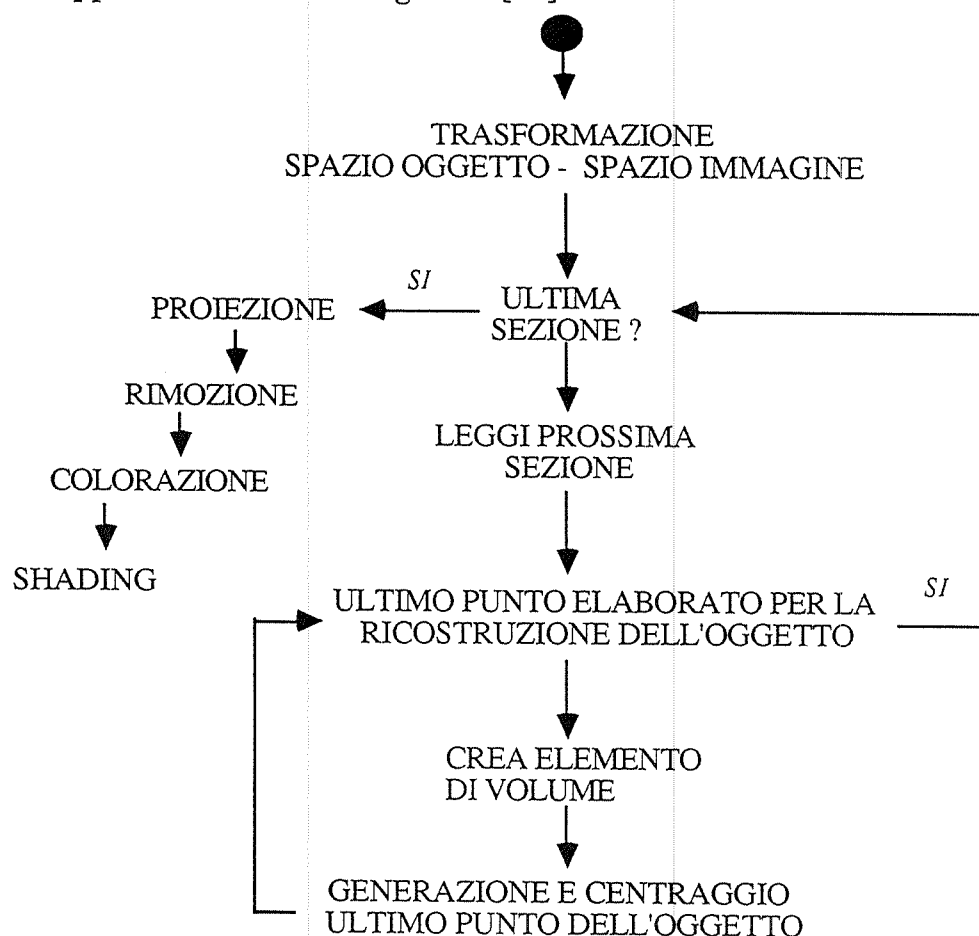


Figura 9 - Algoritmo di ricostruzione tridimensionale a elementi di volume.

Una volta effettuata la ricostruzione della struttura in esame, risultano disponibili dati geometrici e radiometrici che complessivamente descrivono una certa regione dello spazio.

I dati ricavati dalle procedure di ricostruzione possono quindi essere utilizzati per definire dei modelli tridimensionali sui quali poter effettuare simulazioni o valutazioni.

In particolare, possono essere utilizzati due possibili tipi di modelli, un modello globale, che considera tutta la struttura esaminata, ed un modello locale, nel quale, invece, la modellazione può essere riferita solamente ad una porzione specifica del volume globale.

3. *TECNICHE E METODI DI INDAGINE NON DISTRUTTIVA*

Il sistema descritto nel capitolo 2 è stato utilizzato per l'elaborazione di segnali, immagini o mappe bidimensionali ricavate con tecniche diverse. Per l'acquisizione dei segnali sono stati utilizzati sia dispositivi di rilevamento disponibili sul mercato (ad es. telecamere e sensori funzionanti nel visibile o nell'infrarosso) impiegando tecniche di acquisizione di tipo standard (ad es. rilevamento della trasmissione o della riflessione di un impulso ultrasonoro), sia dispositivi appositamente progettati e impiegando tecniche e procedure innovative sviluppate per l'estrazione di parametri caratteristici o la determinazione di informazioni diagnostiche.

3.1. *Procedura di ispezione ad ultrasuoni*

L. Azzarelli, E. Bozzi, M. Chimenti, L. D'Antonio, C. Sabatino

È stata studiata ed implementata una procedura d'indagine ad ultrasuoni orientata al controllo non distruttivo di materiali e componentistica in carbofibra per impieghi nel settore aeronautico [13]. A causa della geometria anche complessa dei materiali da esaminare e della necessità di mantenere durante l'esplorazione rigorosamente controllati i parametri di distanza e orientamento ortogonale della sonda rispetto alla superficie del campione al fine di non introdurre distorsioni o degradazioni radiometriche sulle mappe ricavate, la scansione, in genere di tipo raster, viene effettuata impiegando un braccio robotizzato a sei assi; inoltre il moto di traslazione deve essere uniforme e lineare al fine di non introdurre distorsioni geometriche.

L'indagine viene eseguita impiegando una tecnica di rilevamento per riflessione con accoppiamento acustico in acqua; la procedura prevede l'impiego di due diverse tecniche di acquisizione: a soglia singola e a onda completa. Mediante la prima viene acquisita una parte del segnale riflesso compresa entro una predefinita finestra temporale, e ne viene determinato il valore massimo dal quale si ricava il valore dell'attenuazione subita dal segnale. Mediante la seconda procedura viene acquisito l'intero segnale riflesso, compreso entro una finestra temporale che include sia l'eco frontale sia quella di fondo;

questo segnale viene elaborato per ridurre il rumore introdotto dal metodo di rilevamento nel suo complesso e per restaurare eventualmente i dati che risultano distorti a causa della attenuazione subita dal segnale attraversando il materiale.

La procedura di ispezione implementata prevede l'impiego di entrambe le metodologie anche in modo combinato. L'indagine a soglia singola fornisce fundamentalmente informazioni sulle discontinuità dell'omogeneità del materiale in esame e sulla presenza e localizzazione di eventuali difetti e, previa analisi morfologica dei dati, sulla loro geometria nel piano x,y; questo metodo invece, basandosi essenzialmente su una misura di attenuazione, non può fornire informazioni relative alla localizzazione e alle dimensioni degli eventuali difetti lungo l'asse z (profondità del campione).

Nell'indagine ad onda completa l'analisi dei parametri caratteristici del segnale riflesso all'interno della finestra temporale di osservazione (tempo di volo, ampiezze e fasi del segnale, attenuazione) può consentire una completa caratterizzazione del materiale, e quindi anche degli eventuali difetti, fornendo anche informazioni sulla loro localizzazione spaziale. Questo metodo quindi potrebbe essere sufficientemente completo ed affidabile nonostante la complessità dell'analisi dei dati necessaria per l'esecuzione di una loro affidabile interpretazione e valutazione.

Tuttavia il suo impiego, contrariamente alle reali esigenze di controllo, deve essere limitato alla esecuzione di indagini su campioni relativamente piccoli al fine di ridurre la quantità di dati che tale indagine comporta; infatti l'acquisizione del segnale riflesso richiede per ogni punto di scansione un numero di campioni che è funzione della frequenza della sonda e della durata complessiva del segnale (che a sua volta dipende dal tipo di materiale e dal suo spessore). Ad esempio, impiegando una sonda da 25 MHz e dall'esame di un laminato in carbofibra di 5mm di spessore si ricavano $\sim 10^3$ campioni espressi ciascuno su 1 o 2 byte contro un unico campione ricavato invece mediante il metodo a soglia singola: per esaminare quindi 1m^2 di superficie con una risoluzione di 1mm, nel primo caso si ricavano 10^6 dati e nel secondo caso 10^9 ; si può intuire come sia improponibile un'analisi su una tale mole di dati che può ulteriormente aumentare

se si adottano, come spesso è necessario, risoluzioni spaziali maggiori e se si devono esaminare campioni di grandi dimensioni.

Si è quindi ritenuto opportuno combinare tra loro le due metodologie in modo che con l'indagine a soglia singola si può ricavare la mappa degli eventuali difetti determinandone la localizzazione, mentre con l'indagine ad onda completa vengono esaminate esclusivamente le aree includenti i difetti individuati in precedenza.

Queste due indagini possono essere eseguite separatamente in tempi dilazionati oppure in "contemporanea"; in quest'ultimo caso per ogni punto di scansione, per il quale viene misurata con l'acquisizione a soglia singola un'attenuazione inferiore alla norma, viene eseguita anche l'acquisizione ad onda completa: la prima opera quindi come sincronismo per l'esecuzione della seconda. Si ricavano quindi una serie di matrici di dati le cui dimensioni saranno estremamente più contenute dipendendo, a parità di condizioni di rilevamento, soltanto dal numero di difetti rivelati con l'acquisizione a soglia singola e dalle loro dimensioni.

Analizzando i dati che rappresentano le ampiezze, le attenuazioni e le fasi del segnale, è possibile ricavare informazioni relative alla composizione interna del materiale e individuare, localizzare e classificare eventuali difetti in esso presenti. I dati relativi alla acquisizione a soglia singola e quelli ricavati ad onda completa possono essere rappresentati in forma di mappe 2D o 3D: su queste vengono svolte elaborazioni morfometriche o statistiche per isolare le zone di difetto ed eseguire su queste elaborazioni mirate; inoltre esse possono costituire la base della necessaria documentazione di validazione del materiale o del componente in esame.

Per la caratterizzazione delle aree o dei volumi di interesse, è in atto uno studio tendente a valutare i vantaggi che possono essere offerti dall'impiego di reti neurali; eseguendo l'analisi sul segnale a radiofrequenza rilevato dalla sonda US, di tipo monodimensionale, il metodo di diagnosi si è dimostrato sufficientemente affidabile e veloce. Quest'ultima caratteristica è di particolare rilevanza data la gran quantità di dati da trattare e può essere ulteriormente migliorata ipotizzando una conversione hardware dell'algoritmo di elaborazione.

Nella figura 10 è rappresentata (A) una proiezione prospettica della mappa ricavata con l'ispezione a soglia singola di un componente in carbofibra (B) impiegato nelle costruzioni aeronautiche.

La figura 11 mostra una mappa B-Scan ricavata dal campione di figura 10 e i grafici A-Scan ricavati rispetto a due coordinate di misura; il grafico B è relativo ad una zona priva di difetti (r1), mentre il grafico C è relativo ad una zona che presenta aree di difetto (r2) che sono anche individuabili nella mappa rappresentata in A.

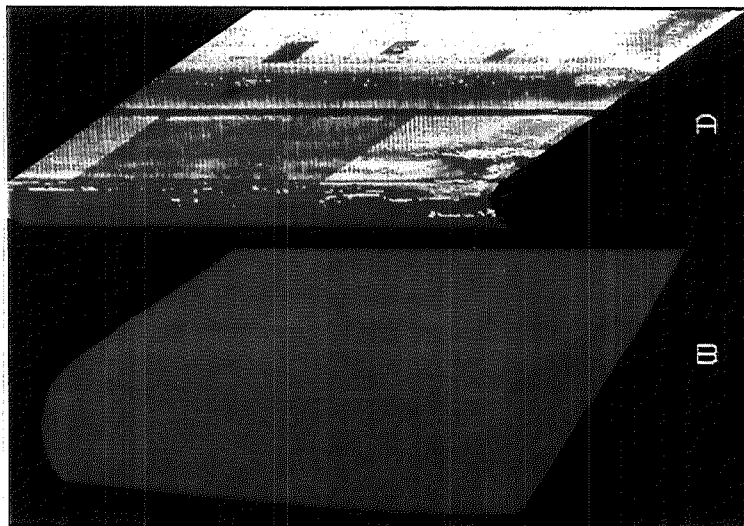


Figura 10: Rappresentazione prospettica della mappa a soglia singola (A) ricavata dall'ispezione a ultrasuoni del campione B in carbofibra mostrato nella parte inferiore della figura: le zone scure indicano la maggiore attenuazione subita dal segnale in corrispondenza di difetti o di strutture con maggiore assorbimento.

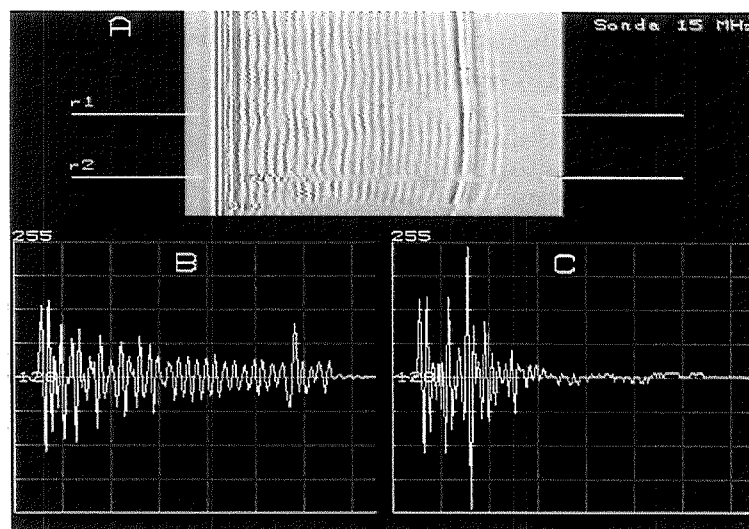


Figura 11: Rappresentazione di tipo B-Scan ricavata da una riga di scansione del campione mostrato in fig. 10. L'asse verticale individua le posizioni di misura x lungo la riga di scansione, mentre l'asse orizzontale corrisponde alla quota di profondità z all'interno del campione: l'intensità $L(x,y)$ del segnale riflesso è rappresentata mediante livelli di grigio o pseudocolori su 256 livelli.

3.2. *Tecnica di indagine ad ultrasuoni basata sull'analisi frequenziale*

M. Bramanti

È stato sviluppato un particolare metodo di indagine non distruttiva ad U.S. per la misura della profondità e spessore di distacchi all'interno di laminati. Il metodo si basa sull'analisi frequenziale del coefficiente di attenuazione e del coefficiente di riflessione relativi al pezzo sotto esame nel caso in cui questo sia esplorato con un fascio di ultrasuoni in onda continua e frequenza variabile su un intervallo di frequenze opportunamente scelto [14, 15, 16, 17].

La tecnica proposta, applicabile sia a materiali tradizionali sia di tipo composito, consente una maggior risoluzione di misura, a parità

di frequenza massima di lavoro, rispetto alle tecniche impulsive nel dominio del tempo di tipo tradizionale e presenta altresì una maggiore immunità nei riguardi del rumore.

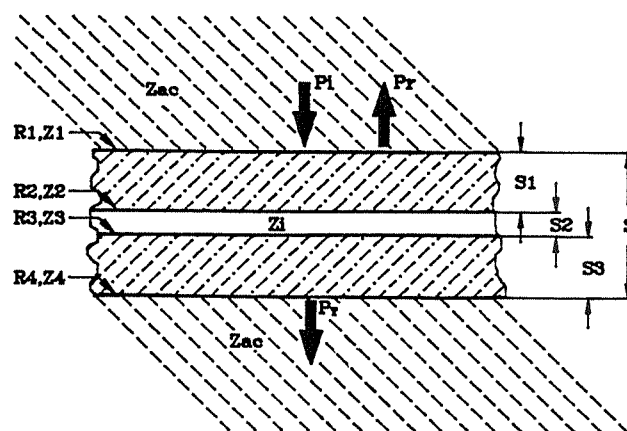


Figura 12: La struttura esaminata

Con riferimento alla figura 12 si ponga

$$A(f) = \frac{P_i}{P_t} = \text{Attenuazione del pezzo sotto test}$$

$$R(f) = \frac{P_r}{P_i} = \text{Coefficiente di riflessione del pezzo sotto test}$$

con f = frequenza del segnale U.S.

Un'analisi matematica delle funzioni $A(f)$ e $R(f)$ in funzione della frequenza dimostra che la funzione $A(f)$ è caratterizzata da una successione periodica di minimi di attenuazione con spaziatura frequenziale Δf_T determinata dallo spessore S_2 del distacco, mentre la funzione $R(f)$ presenta una successione periodica di minimi di riflessione con spaziatura frequenziale Δf_R essenzialmente dipendente dalla profondità S_1 del medesimo. Nella figura 13 si riportano esempi tipici di tracciati delle funzioni $A(f)$ e $R(f)$ relativi a un laminato in

Plexiglas® con un gap d'aria interno posto a differenti profondità (S_1) e con differenti spessori (S_2).

In figura 14 è riportata la funzione $A(f)$ per un laminato in fibra di carbonio ancora affetto da un distacco interno. È interessante notare come, nonostante il forte aumento dell'attenuazione al crescere della frequenza, i minimi di attenuazione siano anche in questo caso perfettamente rilevabili.

Il metodo proposto è stato oggetto di verifica sperimentale utilizzando un banco di misura del tipo riportato in figura 15. Il sistema di posizionamento esplora il laminato sotto test secondo una trama prestabilita, portando, collimati fra loro, un doppio traduttore trasmittente/ricevente affacciato ad una superficie del pezzo in esame ed un trasduttore ricevente singolo affacciato all'altra superficie. Ogni qual volta la presenza di un difetto causa un alto valore per A , il sistema di posizionamento si ferma, il generatore di segnale invia al trasduttore di trasmissione un segnale di frequenza variabile e l'unità di Acquisizione ed Elaborazione calcola i valori Δf_T e Δf_R e quindi S_1 e S_2 .

COEFFICIENTE DI RIFLESSIONE ATTENUAZIONE (dB)

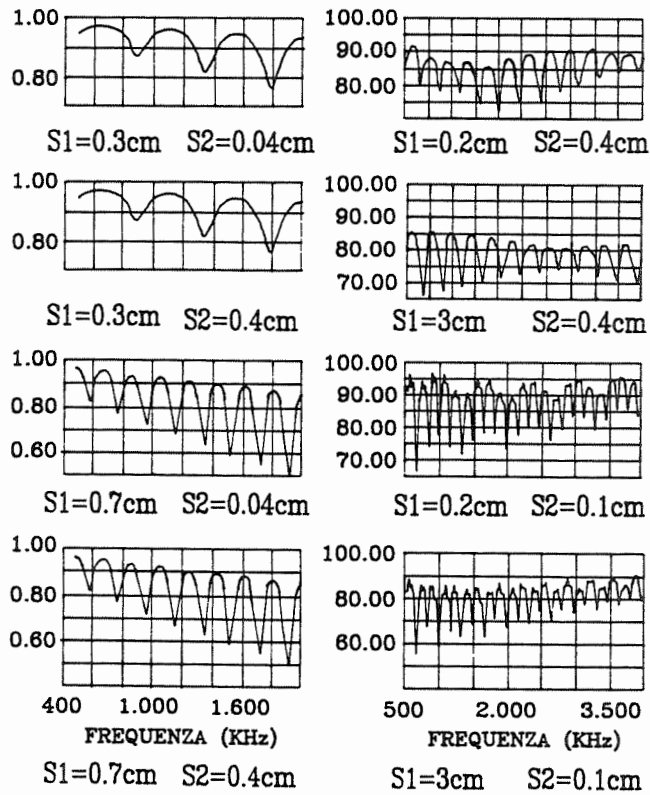


Figura 13: Coefficiente di riflessione R e di attenuazione A in funzione della frequenza f(KHz) relativo ad un laminato in Plexiglas® con un gap d'aria interno di spessore S₂ (cm) e profondità S₁ (cm). Spessore del laminato S=3.5 cm; mezzo di adattamento acqua.

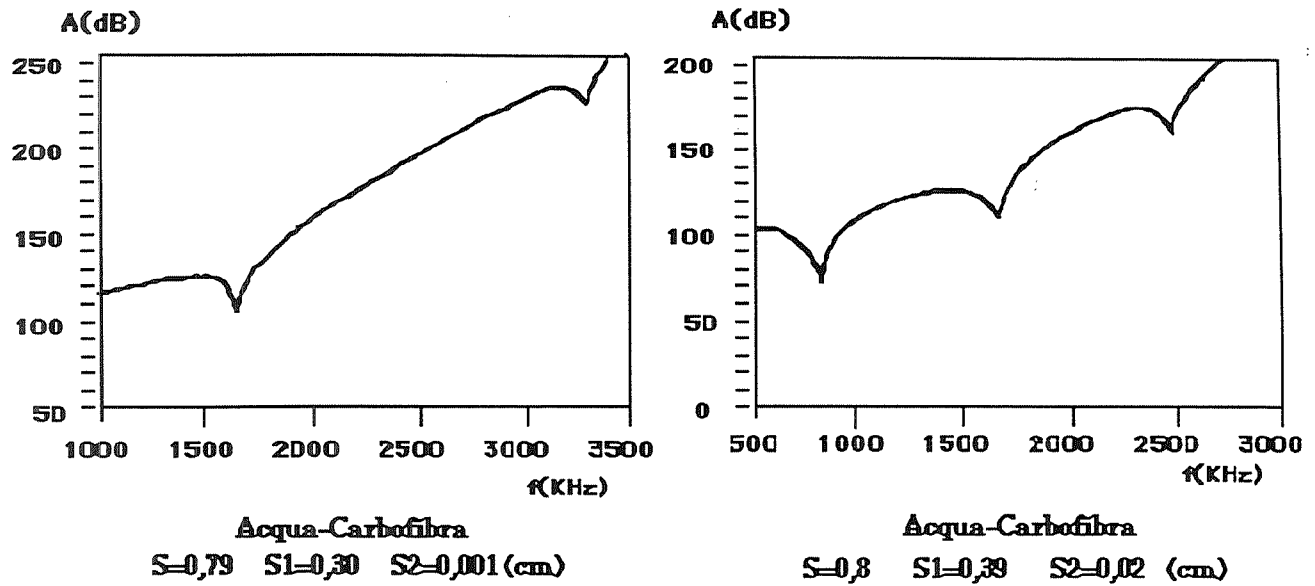


Figura 14: Coefficiente di attenuazione A(dB) in funzione della frequenza f(KHz) per la struttura di fig. 12; materiale: fibra di carbonio, inclusione d'aria con spessore S_2 (cm) e profondità S_1 (cm) • S = spessore totale.

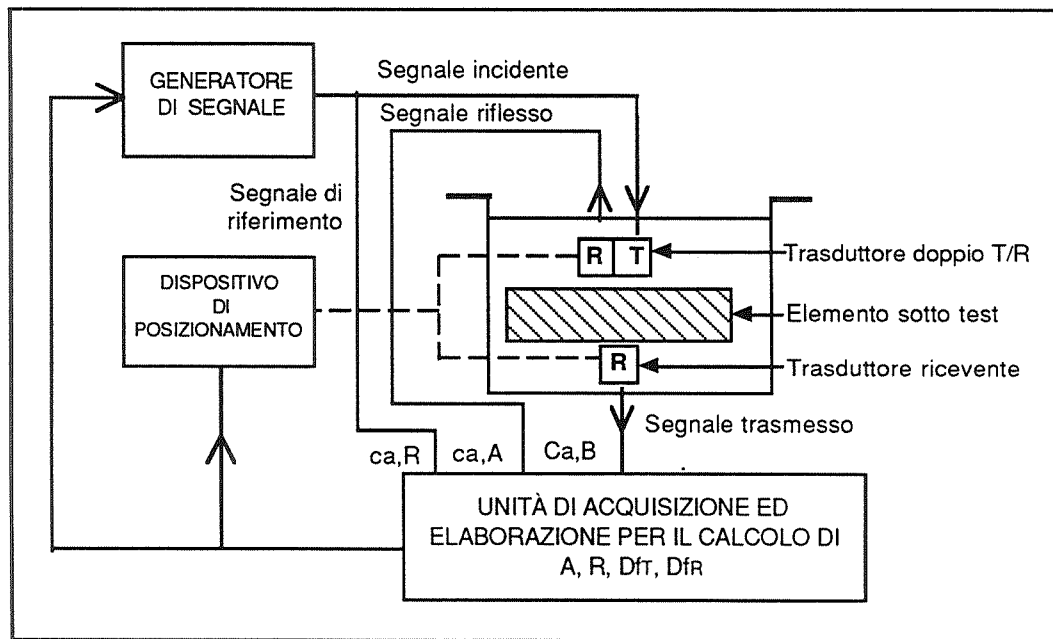


Figura 15 - Schema del banco di ispezione

In figura 15 è riportato un esempio dei tracciati sperimentali rilevati per $R(f)$ e $A(f)$ relativi a laminati in Plexiglas[®] con un distacco al loro interno.

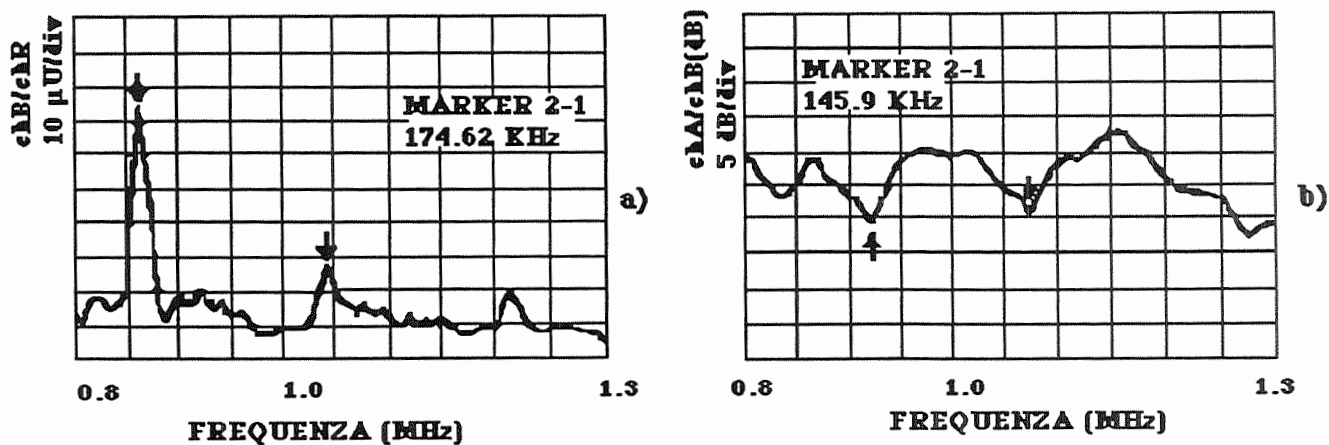


Figura 16: (a) coefficiente di attenuazione in funzione della frequenza nella banda 800-1300 KHz per $S_1=10$ mm, $S_2=1$ mm; (b) coefficiente di riflessione in funzione della frequenza nella banda 800-1300 KHz per $S_1=10$ mm, $S_2=1$ mm.

3.3. *Sensori per indagini non distruttive di manufatti in materiale dielettrico*

M. Bramanti, E. Salerno

Le tecniche di indagine di tipo elettromagnetico sono in grado di fornire informazioni sulle proprietà fisico-geometriche del corpo o sistema sotto esame sulla base di fenomeni essenzialmente legati alla costante dielettrica e alla permeabilità magnetica "vista" da opportuni sensori [18, 19, 20]. Le tecniche in questione sono numerose e diversificate, ma in ogni caso le prestazioni ottenibili sono essenzialmente legate alle caratteristiche del dispositivo che rileva l'interazione fra campo elettromagnetico e volume sotto test.

Sono state proposte e sviluppate due teste di ispezione per manufatti dielettrici, basate su sensori di costante dielettrica funzionanti nella gamma delle microonde ($f \cong 2$ GHz), al fine di rilevare difetti interni che si ripercuotono sulle proprietà dielettriche dei medesimi, in particolare sono stati considerati distacchi o difetti di polimerizzazione intervenuti al momento della costruzione.

In figura 17 è riportata la vista esplosa di un sensore basato su un risonatore in slot-line destinato all'ispezione di laminati. Durante l'ispezione il sensore è appoggiato sul laminato sotto test ed ogni difetto interno riconducibile ad una inomogeneità elettromagnetica altera la

costante dielettrica vista dal sensore medesimo, in questo caso la sua frequenza di risonanza; nel caso specifico questa è definita come la frequenza per la quale è massimo il coefficiente di trasmissione fra le bocche di ingresso-uscita.

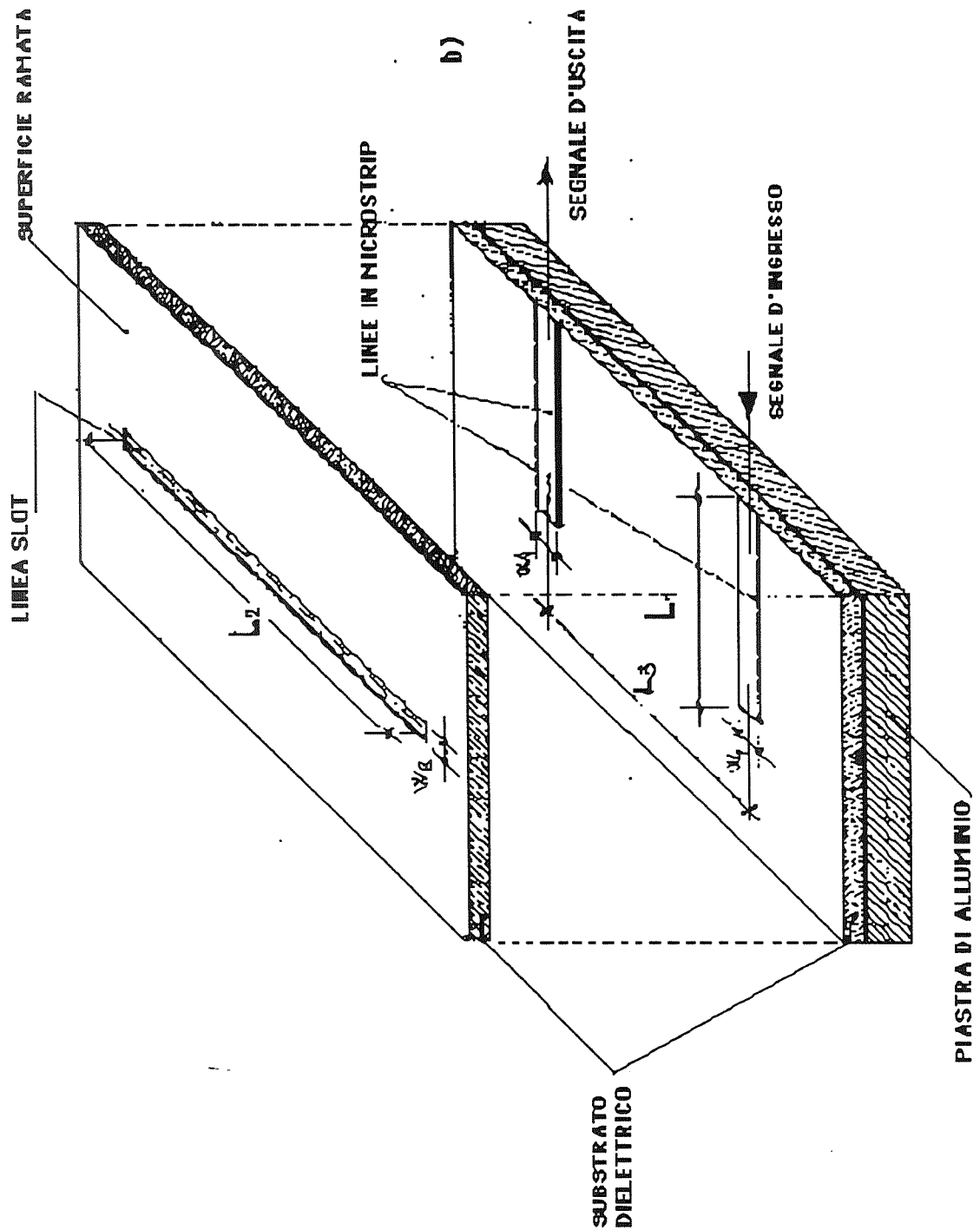


Figura 17: Vista esplosa del sensore di costante dielettrica per ispezione di strutture planari.

Usando un risonatore del tipo illustrato in figura 17, caratterizzato da una frequenza di risonanza a vuoto di 2360 MHz è stato possibile rilevare gaps d'aria di spessore pari a 0.1 mm fino a profondità di circa 10 mm in laminati dielettrici con costanti dielettriche relative comprese fra 2 e 3 (Plexiglas®, per esempio).

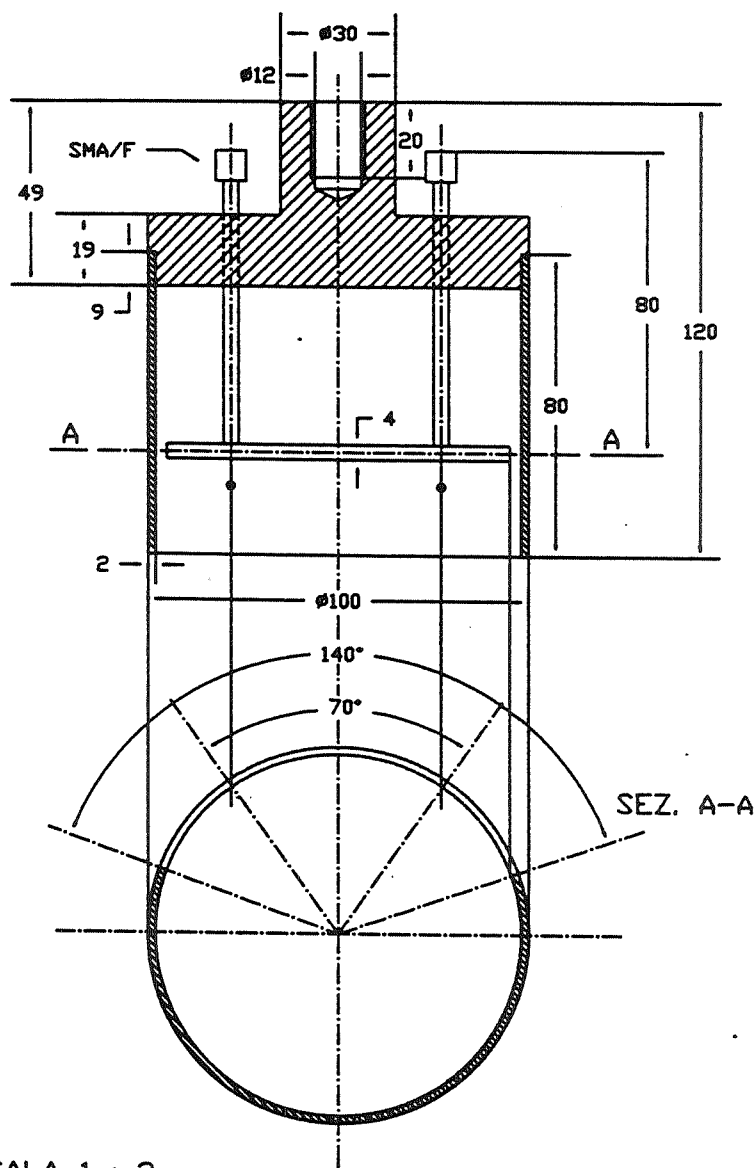


Figura 18: Struttura del sensore di costante dielettrica per ispezione di strutture cilindriche.

Il sensore ora descritto è stato opportunamente modificato al fine di consentire l'ispezione di manufatti dielettrici di forma cilindrica, realizzati in resina poliestere rinforzata con fibra di vetro (GRP) allo scopo di rivelare difetti di polimerizzazione. In figura 18 è mostrata una vista schematica del sensore a risonatore in slot-line modificato per l'applicazione in esame. In questo caso il sensore lavora in riflessione e la frequenza di risonanza è misurata dal valore di frequenza per la quale si ha un minimo del coefficiente di riflessione.

In figura 19 si riportano i diagrammi della frequenza di risonanza f_{min} in funzione delle successive posizioni del sensore per un tubo privo di difetti (A) e per un tubo con difetti di polimerizzazione (B); la scansione del pezzo si compone di un movimento angolare e di un movimento assiale ottenuti ponendo il sensore su un braccio robotizzato programmabile utilizzabile anche nell'ispezione di strutture più complesse. In figura 20 è riportata una vista della struttura utilizzata per il test dell'elemento tubolare considerato.

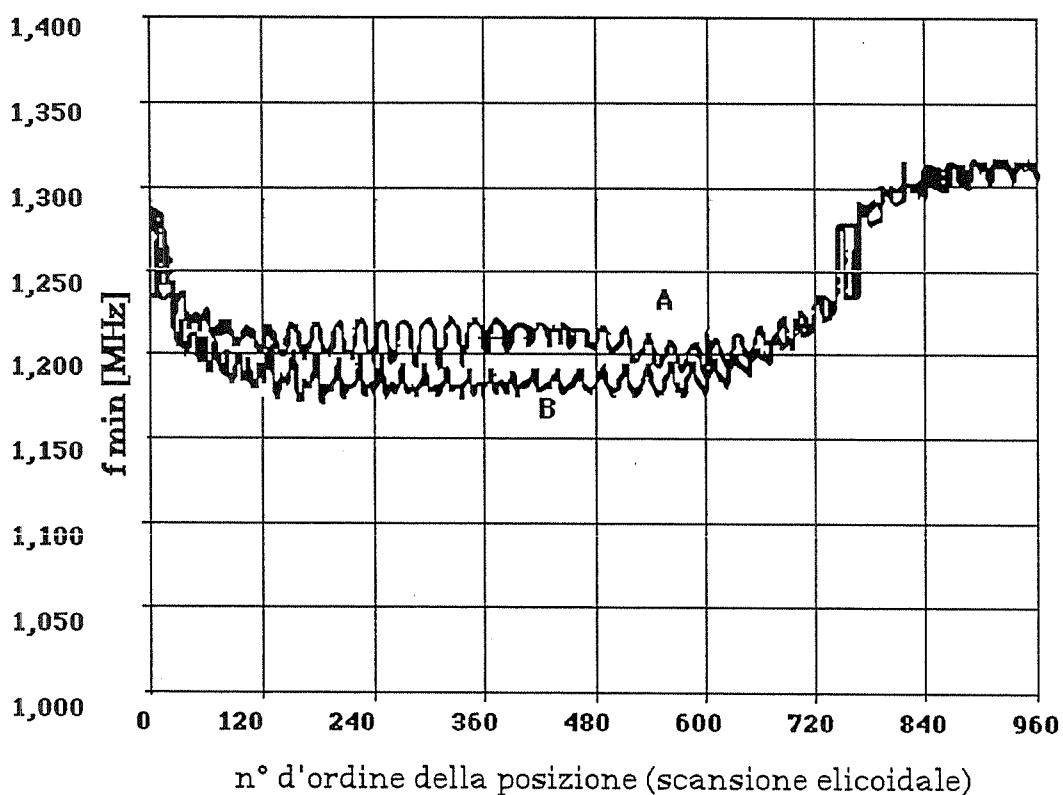


Figura 19: Diagramma delle frequenza di risonanza del sensore per ispezione di strutture cilindriche in funzione della posizione (scansione elicoidale). L'oscillazione spuria presente nei due tracciati è dovuta ad un rumore da interferenza da filtrarsi.

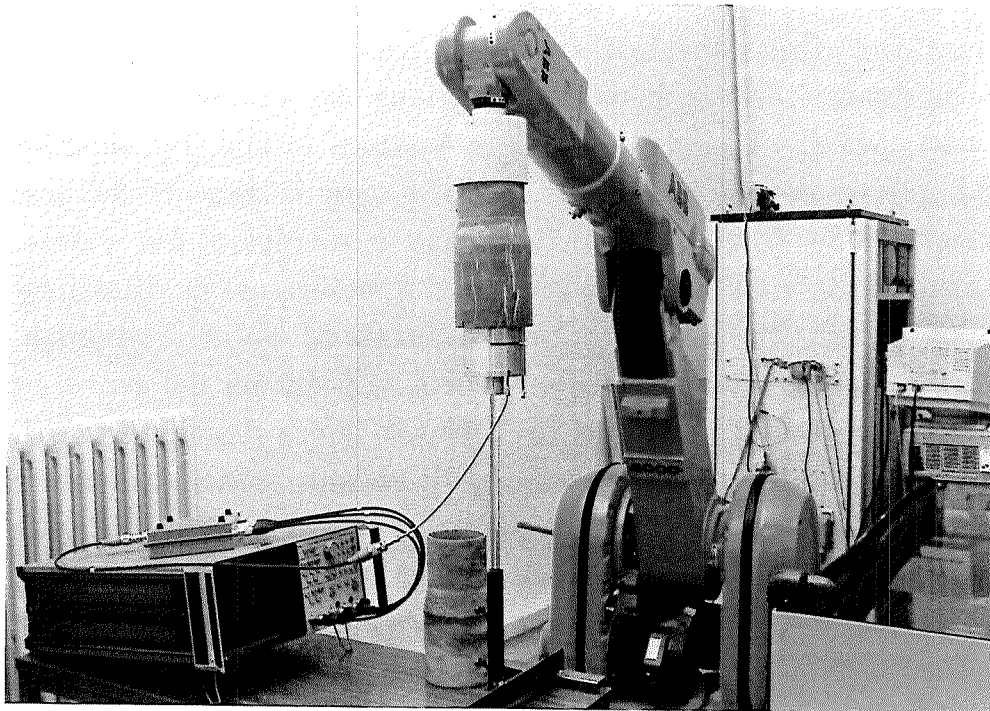


Figura 20: Vista dell'apparato sperimentale usato per l'ispezione di una struttura cilindrica.

4. DESCRIZIONE DELLE STAZIONI DI LAVORO

Utilizzando la struttura hardware generale basata sul sistema SVP 2000 e controllando differenti apparecchiature di indagine e rilevamento, sono state definite e sviluppate alcune stazioni di lavoro specializzate a livello hardware e software e orientate verso differenti applicazioni. Per ciascuna stazione è stata realizzata una specifica interfaccia utente di tipo iconografico che guida l'operatore nella interazione con il sistema e le procedure operative, simula parte della strumentazione utilizzata per l'acquisizione dei segnali e supervisiona le varie fasi ed operazioni previste nell'intero processo di indagine.

Nella prima fase di progettazione si è fatto uso del sistema H/S generale limitando quindi l'ottimizzare le risorse hardware e software per ciascun tipo di stazione; successivamente è risultato però relativamente semplice svolgere il processo di ingegnerizzazione e realizzare così delle stazioni differenziate aventi le componenti hardware e software specializzate per ogni singola applicazione.

4.1. Stazione per indagini a ultrasuoni

L. Azzarelli, E. Bozzi, S. Cerri, M. Chimenti, A. Marchetti

La figura 21 mostra lo schema semplificato della stazione di lavoro, basata sulla struttura elaborativa dell'SVP 2000, per l'ispezione di materiali e componentistica mediante l'impiego di tecniche di rilevamento e misura ad ultrasuoni. Il sistema elaborativo comunica attraverso il modulo di gestione delle periferiche con l'unità di controllo di un braccio robotizzato; in base alle istruzioni del programma principale residente nella CPU del sistema, il braccio robotizzato, dedicato alla scansione, si sposta con orientamento controllato in modo che la sua flangia porta oggetti (TCP) percorra le traiettorie volute [21, 22, 23].

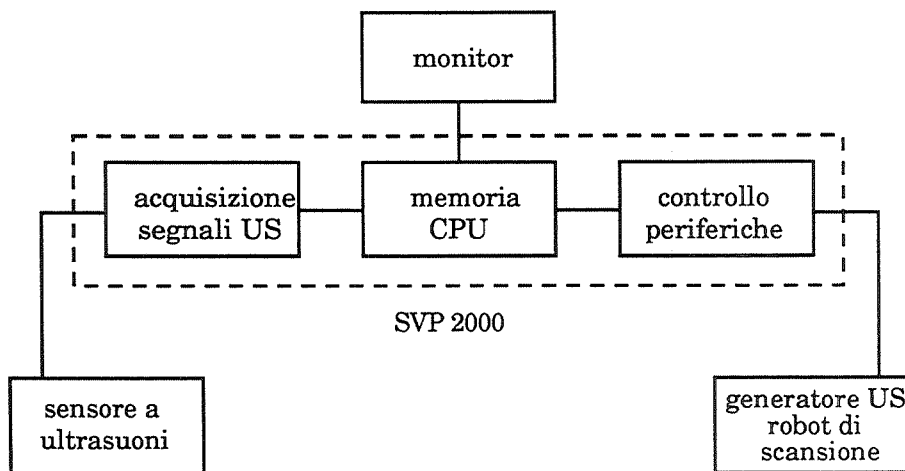


Figura 21: Schema semplificato della stazione di lavoro per ispezione a ultrasuoni.

L'SVP 2000 controlla un generatore ad ultrasuoni (US) che eccita un trasduttore, il segnale analogico del modulo di acquisizione e i dati ricavati alle coordinate di misura vengono immagazzinati nella memoria dati del sistema ed elaborati: è possibile sia eseguire una scansione lungo traiettorie predefinite e dipendenti dalla forma del campione da esaminare, sia determinare la traiettoria di scansione in base ai risultati dell'analisi dei dati rilevati in precedenza o attuali.

La frequenza del segnale analogico di ingresso dipende dal trasduttore impiegato; il modulo di acquisizione contiene un convertitore A/D che campiona il segnale ad una frequenza multipla della frequenza di risonanza della sonda: per esempio, con sonde da 25 MHz si ha una frequenza di campionamento di 100 MHz.

Per ogni coordinata di misura il segnale di ingresso viene campionato sull'intero intervallo di tempo in cui si estende l'eco di fondo: nel caso di acquisizione a onda completa (full volume) tutti i dati di campionamento vengono immagazzinati nella memoria dell'SVP 2000, mentre nel caso di acquisizione a soglia singola i dati di ingresso, relativi ad ogni punto di scansione, vengono elaborati e viene immagazzinato nella memoria soltanto il valore massimo del segnale all'interno della finestra temporale predefinita.

Nella figura 22 è schematizzata con maggiore dettaglio l'architettura generale della stazione che mette in evidenza la comunicazione dei dati, dei comandi e segnali.

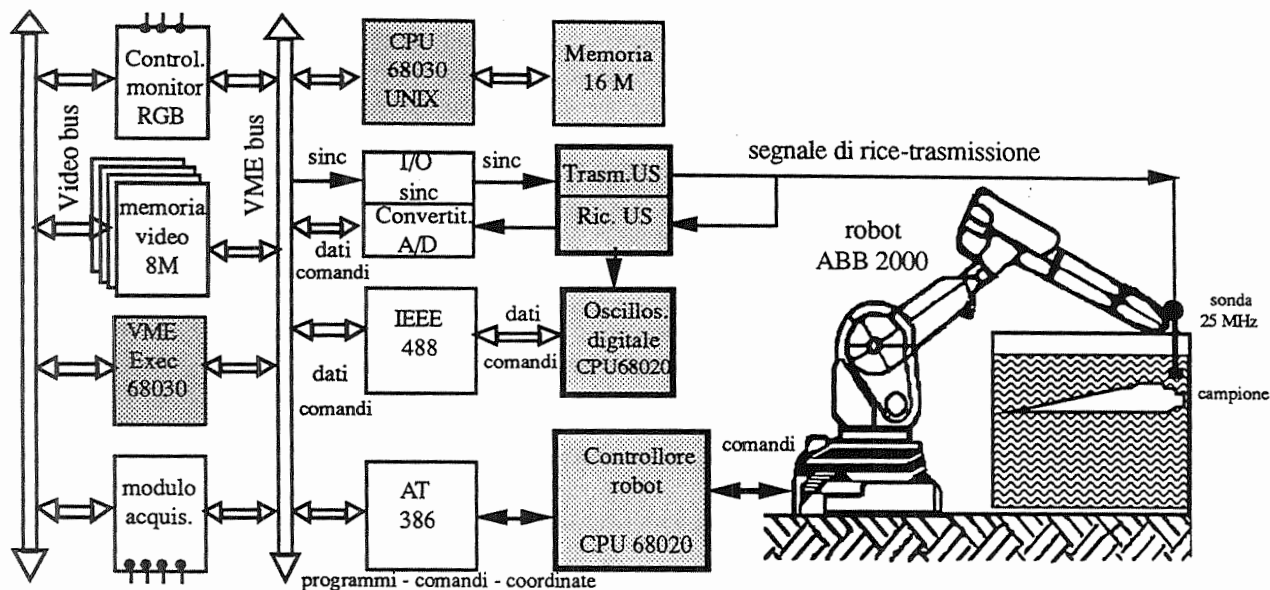


Figura 22 - Schema funzionale della struttura della stazione di lavoro.

A seconda dei casi, durante o al termine della scansione si possono rappresentare sul monitor grafico-pittorico della stazione i grafici dei segnali acquisiti (A-Scan) oppure le mappe di tipo B-Scan e C-Scan: le prime rappresentano, mediante valori fotometrici, l'intensità del segnale riflesso in funzione della traiettoria di scansione e della profondità; la seconda rappresenta, sempre mediante valori fotometrici, l'intensità del segnale di picco ricavata in un'area di scansione.

La stazione impiega le procedure di gestione ed elaborazione illustrate nel paragrafo 3.1 ed è dotata di una memoria tampone riconfigurabile a seconda del tipo di acquisizione eseguita. Nella procedura a soglia singola viene configurata come un unico banco le cui dimensioni (righe e colonne) riproducono quelle di scansione in modo da avere una diretta corrispondenza fra la mappa acquisita e il campione in esame.

Nella procedura ad onda completa la memoria viene, in particolare, configurata in modo volumetrico per cui, anche in questo caso, si determina una corrispondenza fra le mappe ricavate e il volume esaminato facilitando così la rappresentazione 3D e il riconoscimento e la localizzazione degli eventi di interesse. A causa della molteplicità di funzioni da eseguire, delle interazioni con l'unità di calcolo centrale e delle necessità di gestione in tempo reale, il

modulo di controllo è basato su una CPU dedicata operante in ambiente VME Exec.

La stazione è corredata da un sottosistema grafico mediante il quale è stato possibile sviluppare una efficiente interfaccia uomo-macchina in grado sia di facilitare l'interazione con il complesso del sistema, sia di fornire le uscite grafiche sia infine di simulare e monitorare il processo di scansione; quest'ultima funzione è particolarmente rilevante vista la particolare applicazione che implica l'azionamento di grandi apparecchiature di indagine, anche remote, e lo svolgimento di procedure di taratura anche complesse.

La stazione è infine dotata di una struttura software di gestione ed elaborazione suddivisa in due ambienti primari: ambiente procedurale, orientato alla specifica applicazione; ambiente di sviluppo, orientato alla progettazione ed implementazione di processi elaborativi utente [30].

Entrambi gli ambienti sono a loro volta suddivisi in contesti distinti per funzioni: acquisizione, preelaborazione, restauro, analisi, restituzione, archiviazione e comunicazione.

La figura 23 mostra una ripresa della stazione di lavoro.

Impiegando il prototipo della stazione è stata svolta un'intensa attività di sperimentazione, riferita in particolare ad aspetti operativi delineati dai partner industriali; questi infatti devono soddisfare sia le necessità più generali di ricerca e sviluppo tipiche della progettazione e sperimentazione di nuovi materiali e componentistica, sia quelle più specifiche e vincolanti del controllo di qualità nel processo produttivo.

Nella prima applicazione l'impiego della stazione si è dimostrato affidabile e flessibile; nella seconda invece, l'efficienza risulta essere ridotta a causa di una limitata velocità operativa. Questa limitazione è dovuta fondamentalmente al processo di scansione di campioni anche di grandi dimensioni; infatti la tecnica di indagine adottata impone rigidi vincoli alle modalità di traslazione del trasduttore ad ultrasuoni che comportando il controllo contemporaneo dei sei assi del braccio robotizzato ne limitano conseguentemente la velocità di movimentazione.

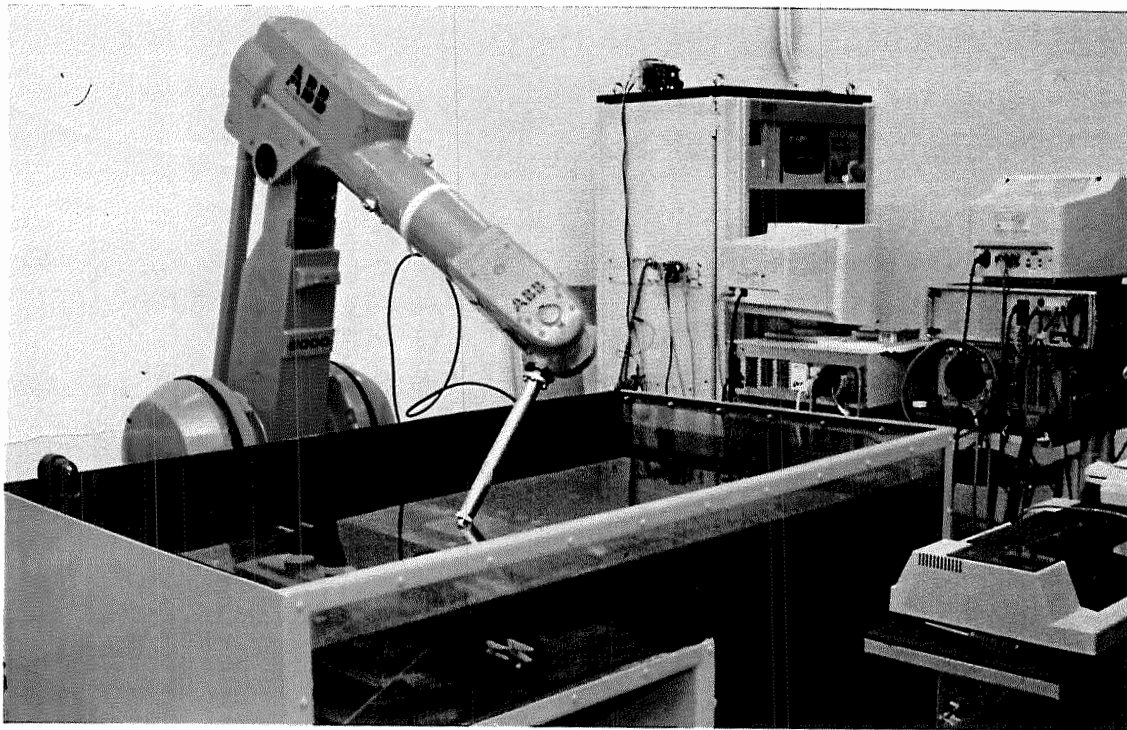


Figura 23 - Stazione di lavoro per ispezione a ultrasuoni. In primo piano si nota il braccio robotizzato con la vasca a immersione in cui vengono alloggiati i campioni da esaminare; in secondo piano si individua l'unità di controllo del robot, il monitor pittorico per la rappresentazione delle mappe di scansione e il monitor per l'interfaccia utente.

Al fine di soddisfare le esigenze operative richieste dal controllo di qualità nella produzione di componentistica a geometria relativamente semplice (laminati in materiale composito, componenti piani in carbofibra ecc.), è stato progettato, e realizzato in prototipo sperimentale da laboratorio, costituito da un banco di scansione con tre soli gradi di libertà (x,y,z), controllato automaticamente dalla stazione di lavoro e un asse di basculaggio controllabile manualmente per ottimizzare l'orientamento del trasduttore.

Nella figura 24 è mostrato il prototipo sperimentale di stazione e il relativo dispositivo di scansione.

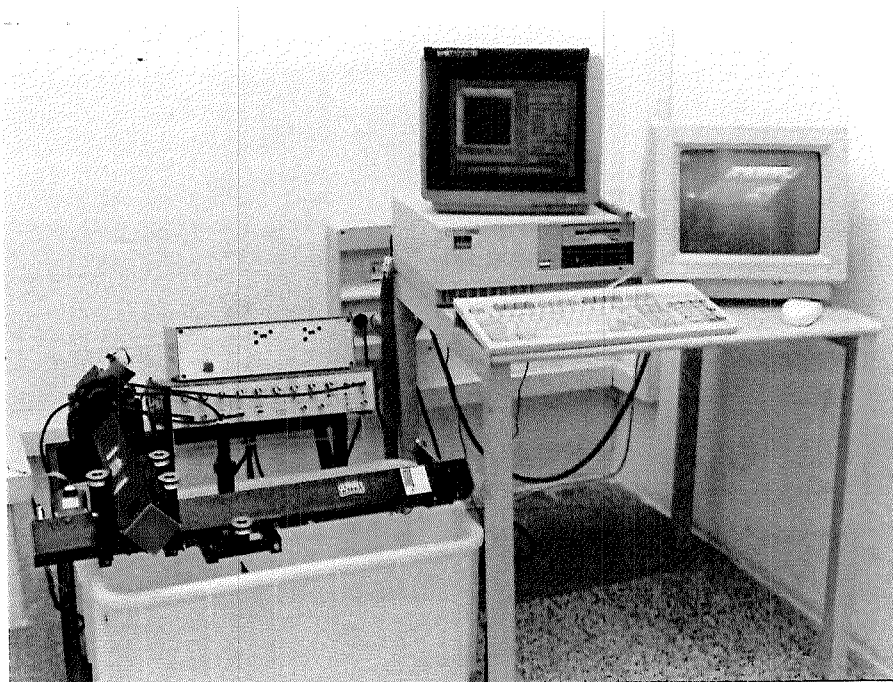


Figura 24: Prototipo sperimentale di stazione per l'indagine a ultrasuoni in riflessione; in primo piano si individua il dispositivo di scansione, il generatore di US e il calcolatore di gestione ed elaborazione.

4.2. *Stazione per ispezioni termografiche*

L. Azzarelli, M. Chimenti, A. Marchetti, S. Minutoli, O. Salvetti

La termografia è una metodologia ampiamente utilizzata, spesso in combinazione con altre tecniche di indagine, per il controllo di discontinuità e difetti presenti all'interno di materiali e componentistica; in particolare si adatta bene ad un impiego su strutture complesse assemblate o in campo. In genere si distingue in stazionaria o impulsata: la prima, che impiega una sorgente di riscaldamento in grado di stimolare il campione mediante l'emissione di energia termica per tempi relativamente lunghi, può essere utilizzata per indagini su materiali a bassa trasmissibilità termica; la

seconda, che impiega un impulso di stimolazione termico di durata molto breve e controllato in ampiezza, durata e cadenza, e impiegabile per indagini su materiali a media-grande trasmissibilità.

La figura 25 mostra lo schema semplificato della stazione di lavoro per l'ispezione di campioni e materiali mediante termografia pulsata [24].

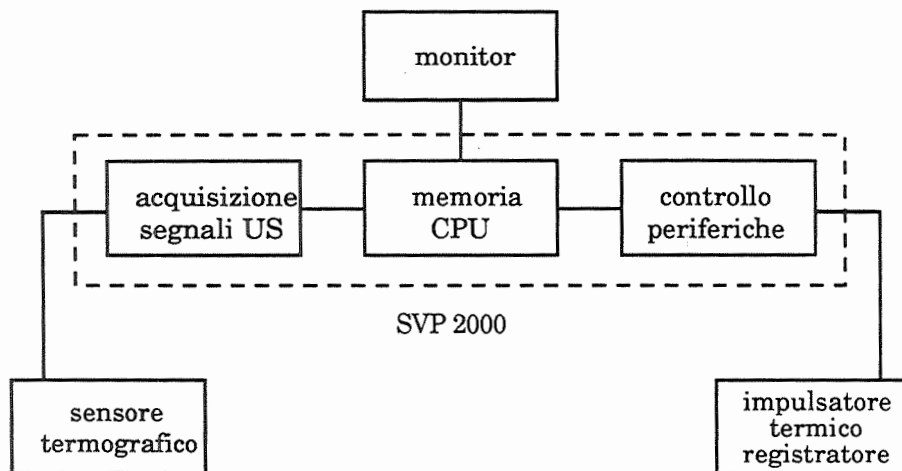


Figura 25: Schema semplificato della stazione per ispezioni termografiche.

L'unità di controllo esterno della stazione pilota un generatore che emette un impulso di energia termica. Il segnale video prodotto da una termocamera, che rileva la radiazione termica riflessa o trasmessa dal campione in seguito alla stimolazione, è applicato ad un ingresso video del modulo di acquisizione. I dati ricavati dalla conversione analogico-digitale dei frame acquisiti con cadenza e ritardo predefiniti rispetto all'istante di stimolazione, vengono inseriti direttamente nella memoria video ad accesso veloce della stazione. Nella versione attuale è possibile immagazzinare in tempo reale serie temporale di 32 frame alla frequenza massima di 50 quadri/sec, con la quale vengono campionati periodi significativi dell'evoluzione termografica; infatti, per particolari campioni in carbofibra l'evento di interesse può evolversi in modo significativo, dipendente anche dal tipo di struttura in esame, in un centinaio di millisecondi.

Il modulo di controllo interagisce con il modulo di acquisizione, con le memorie tampone e con le periferiche esterne di rilevamento; in particolare controlla, temporizza e supervisiona l'impulsatore termico, il processo di acquisizione multiplo, la scrittura e la lettura

sincronizzata su un video registratore di monitoraggio. Quest'ultimo viene impiegato sia per rilevamenti in campo, sia per rispettare i vincoli imposti dai protocolli di collaudo che prevedono la registrazione, per monitoraggi successivi, dell'intero ciclo di prova.

Nella figura 26 è schematizzata la struttura della stazione con particolare riferimento al sistema di rilevamento termografico.

Il modulo di acquisizione è stato specializzato per l'applicazione specifica tenendo quindi conto del particolare tipo di segnale e delle condizioni e necessità di rilevamento e misura: in particolare il modulo è dotato di un convertitore a 12 bit necessario per campionare il segnale con la necessaria risoluzione, compatibile con quella della termocamera (1/100 di grado) in una dinamica di misura piuttosto estesa (3÷4 decenni).

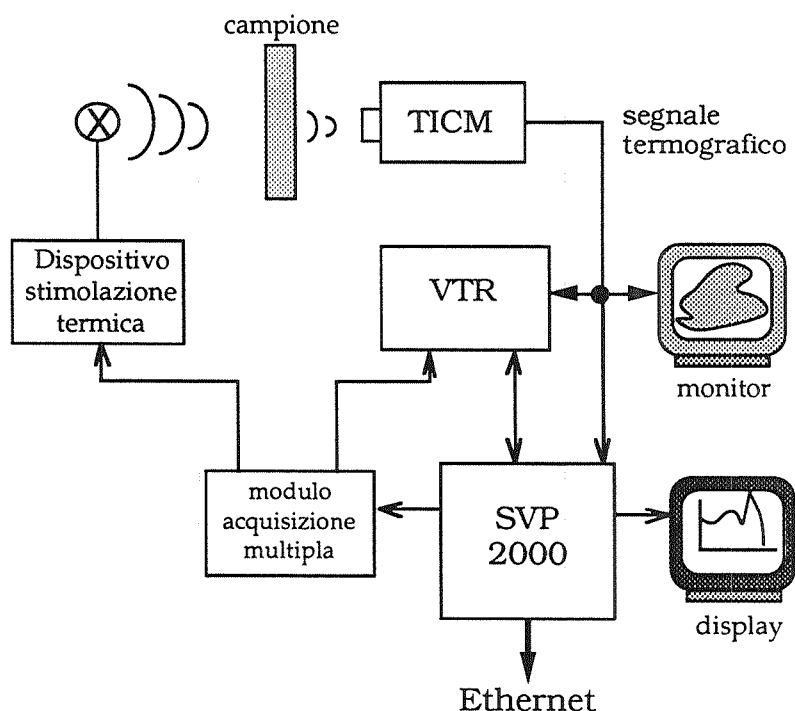


Figura 26: Schema funzionale della stazione per l'acquisizione e il trattamento di serie temporali di termogrammi.

I dati acquisiti e memorizzati nella memoria video, che in questo caso funziona fundamentalmente come memoria di transito, vengono archiviati su memoria di massa dalla quale possono essere prelevati per successive elaborazioni oppure per essere visualizzati selezionando

interattivamente o automaticamente opportuni intervalli della dinamica di rilevamento.

La struttura hardware della stazione ed alcuni moduli software di gestione opportunamente realizzati consentono l'esecuzione, nel tempo reale di acquisizione, di alcune funzioni o operazioni standard e quindi ben definibili a priori:

- funzione di acquisizione multipla integrale, che fornisce la sommatoria della sequenza di immagini all'interno di un predefinito intervallo di tempo
- funzione di acquisizione differenziale, che fornisce una sequenza di immagini ottenute come differenza fra coppie successive di immagini della sequenza di acquisizione
- funzione di differenza, che fornisce una sequenza di immagini ottenute come differenza fra una matrice di riferimento e la serie di immagini di acquisizione
- operazioni di trasformazione radiometriche, eseguite sui dati di ingresso secondo funzioni predefinite
- operazioni aritmetiche fra le immagini di ingresso ed una matrice di riferimento, un vettore o uno scalare
- operazioni di segmentazione sui valori radiometrici di ingresso.

Le mappe termiche generate dalla elaborazione dei segnali possono venire rappresentate sul display del sistema di calcolo per un monitoraggio in linea ed elaborate per estrarre parametri caratteristici dell'evento e delle discontinuità eventualmente presenti nel campione in esame. Nel caso di termografia stazionaria sono stati realizzati dei moduli di elaborazione per l'analisi del singolo frame acquisito, mediante i quali si può determinare l'andamento, secondo due variabili spaziali, di funzioni ricavate dai dati di ingresso; nel caso di termografia pulsata si possono estrarre dalle sequenze dei frame i valori di funzioni dipendenti da due coordinate spaziali e dal tempo.

La stazione è stata dotata inoltre di specifici pacchetti software molto orientati verso l'applicazione e organizzati in sei ambienti elaborativi distinti: enhancement e rappresentazione, restauro, analisi statistica, analisi matematica, analisi morfologica. I vari ambienti e le funzioni elaborative in essi contenute, sono supervisionati da una interfaccia iconografica funzionale che ne semplifica e facilita l'operabilità; questa infatti potrebbe risultare critica a causa della

notevole articolazione del processo diagnostico, della varietà di funzioni eseguibili e della grande quantità di dati da gestire che caratterizzano in genere l'indagine termografica.

Per applicazioni più orientate allo studio e verifica progettuale, la stazione è dotata di un apposito ambiente di sviluppo nel quale sono state implementate librerie di macrofunzioni; mediante la loro opportuna concatenazione è possibile, in modo relativamente semplice, di realizzare moduli e procedure elaborative utente anche complesse [25, 26, 27]. La figura 27 mostra il prototipo di stazione.

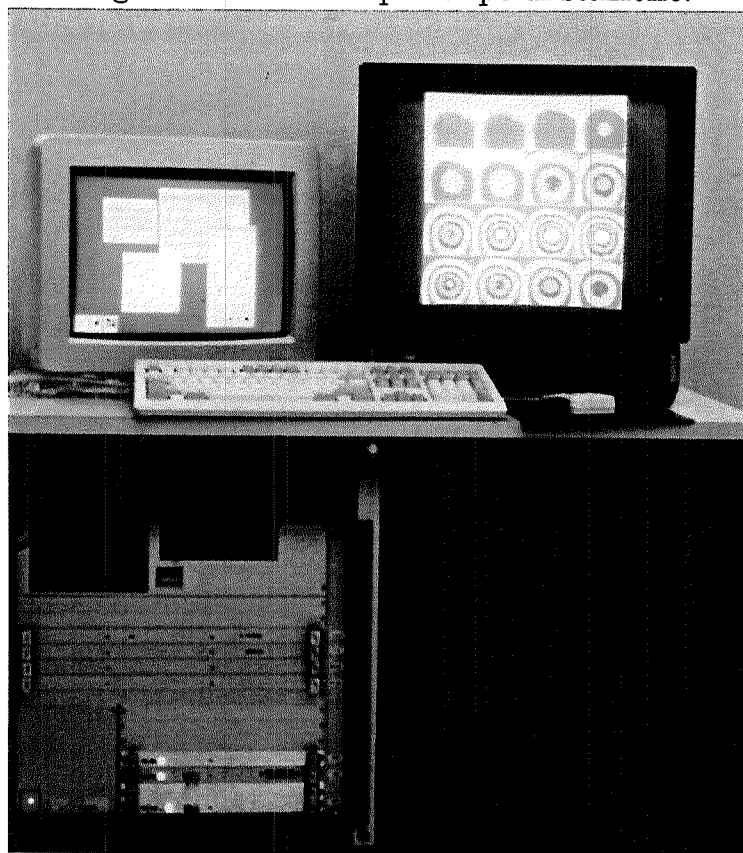


Figura 27: Stazione di lavoro per ispezioni termografiche. Si individuano il sistema SVP 2000, il monitor pittorico sul quale è rappresentata una serie di immagini termiche acquisite in sequenza e il monitor di interfaccia utente.

4.3. Stazione per l'indagine tomografica

L. Azzarelli, M. Chimenti, E. Fantini, R. Panicucci, L. Pardi

Questa stazione, il cui schema semplificato è mostrato in figura 28, è dedicata all'analisi distruttiva di campioni di materiali rigidi al fine di studiarne la struttura e la morfologia interna. La configurazione hardware è basata su: una versione ridotta del sistema SVP dotata di un modulo di acquisizione con ingresso video CCIR, un modulo per la gestione di un dispositivo elettromeccanico a più assi di movimentazione, lavorazione e visione; un dispositivo di rappresentazione e interazione.

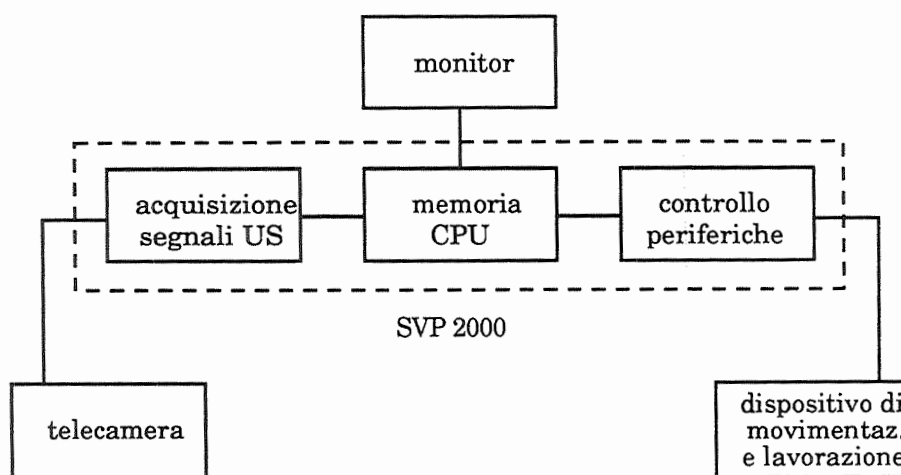


Figura 28: Schema semplificato della stazione per l'indagine tomografica.

Il modulo di acquisizione è dotato di tre ingressi analogici in grado di accettare segnali video ricavati da telecamera CCIR o da una telecamera a colori; uno o più convertitori A/D che provvedono alla conversione del segnale. Le immagini digitali ricavate vengono memorizzate nella memoria video la cui capacità, in questa particolare configurazione del sistema SVP, può essere contenuta in 1 Mb, in grado quindi di ospitare sia immagini ricavate mediante telecamere B/N o a colori a risoluzione standard, sia da telecamere B/N ad alta risoluzione; la scelta del tipo di sensore dipende dalla particolare applicazione (analisi volumetrica o analisi superficiale).

Il modulo di governo è costituito da un'interfaccia di controllo e comunicazione, da una serie di attuatori mediante i quali vengono controllati gli azionamenti del dispositivo elettromeccanico, e da una circuiteria per la sincronizzazione del processo operativo.

Il dispositivo elettromeccanico è strutturato in due stazioni: una di lavorazione dotata di un utensile per fresatura e/o lappatura azionato da un apposito motore in continua, ed una di visione dotata di una telecamera. Una piattaforma rotante, azionata da un motore in C.A. consente la traslazione del campione con moto continuo uniforme dalla stazione di lavorazione a quella di visione.

La testa di lavorazione e quella di visione sono supportate rigidamente da un carrello azionato da un motore passo-passo che consente spostamenti verticali delle due teste mantenendo costante la loro distanza dalla superficie del campione in lavorazione ed esame.

La figura 29 mostra lo schema funzionale della stazione e del dispositivo di movimentazione, lavorazione e visione [28].

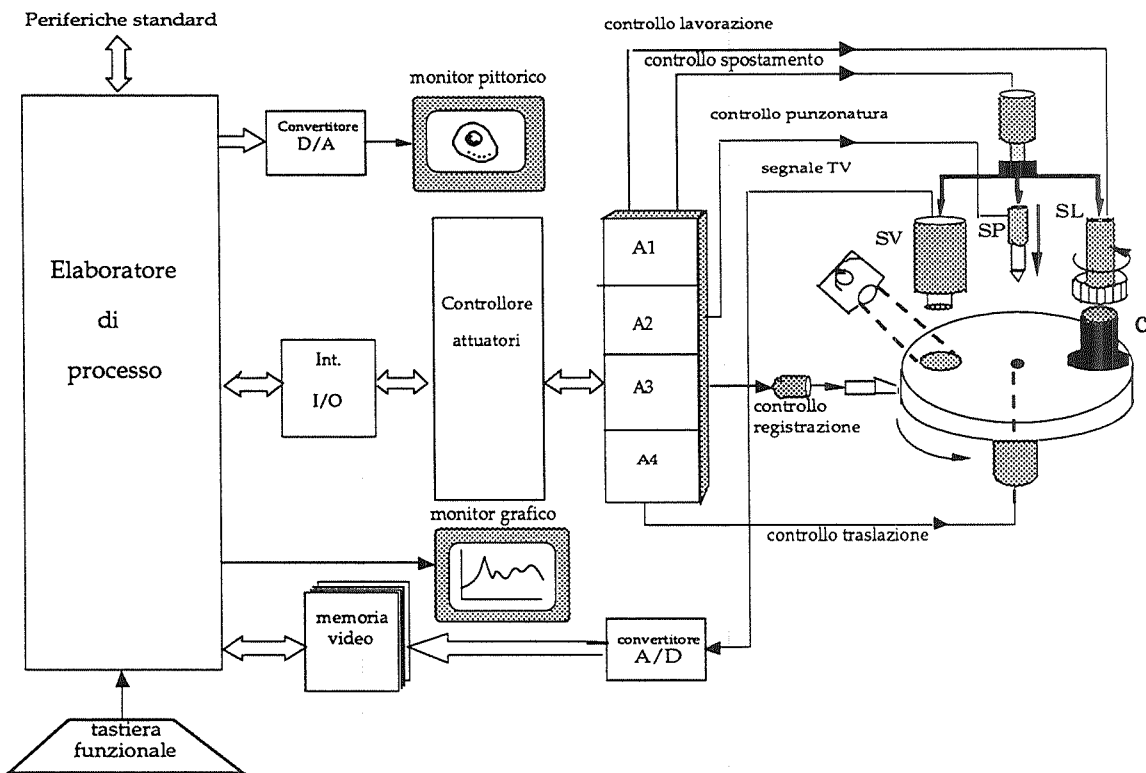


Figura 29: Schema di principio del dispositivo per la lavorazione controllata di campioni. Nella figura sono indicati la piattaforma rotante sulla quale è montato il campione C, l'utensile di lavorazione SL col rispettivo azionamento e la telecamera di ripresa SV; telecamera e utensile sono accoppiati rigidamente e sono traslati da un apposito azionamento a controllo numerico.

La procedura, una volta impostati i parametri operativi e selezionato da un apposito menù il ciclo di elaborazioni da effettuare sulle immagini acquisite, si esegue automaticamente e fornisce una

serie spaziale di immagini, fra loro registrate, che contengono informazioni sia relative alle singole superfici lavorate, sia, nel loro insieme, alle strutture che si estendono all'interno del campione. È possibile quindi, a seconda dell'applicazione, eseguire sia analisi delle strutture superficiali, con una risoluzione e precisione che dipende anche dal tipo di sistema ottico accoppiato alla telecamera, sia analisi volumetriche, con una risoluzione che dipende dal passo di erosione e dal volume esaminato, di strutture che si estendono in profondità.

La procedura prevede l'esecuzione di elaborazioni sia durante il tempo reale di acquisizione (trasformazioni e correzioni radiometriche, segmentazione secondo valori di luminanza predefinibili, operazioni aritmetiche puntuali ecc.), sia durante il tempo di traslazione e lavorazione (archiviazione, filtraggi spaziali, rivelazione di contorni, calcoli parametrici caratteristici ecc.), sia infine in un tempo dilazionato al termine del processo complessivo di acquisizione (analisi morfologica tomografica, segmentazione volumetrica, calcolo di fattori di forma, ecc.) [26].

Nella figura 30a è riportata l'interfaccia iconografica radice mediante la quale viene definito il ciclo operativo e monitorata dinamicamente la sua esecuzione. Questa stazione può essere impiegata, oltre che per lo studio morfologico delle malformazioni eventualmente presenti all'interno di campioni di materiali, anche nei settori della geologia e biologia: in quest'ultimo campo è in atto uno studio applicativo per l'analisi di campioni di strutture ossee per ricavarne immagini 3D di sintesi sulle quali eseguire esami istologici o morfologici su piani arbitrari di intersezione.

La procedura realizzata controlla la lavorazione del campione in esame e comanda l'acquisizione delle immagini del piano lavorato i cui dati vengono immagazzinati nella memoria video del sistema; il processo viene ripetuto ricavando le immagini relative a diversi piani di erosione o a differenti fasi di lavorazione.

La figura 30b mostra il prototipo della stazione attualmente impiegata per il rilevamento di difetti presenti in campioni di materiali diversificati; la stazione è in grado di estrarne le caratteristiche morfologiche, volumetriche e radiometriche da impiegarsi come parametri di riferimento in processi di riconoscimento e classificazione dei difetti.

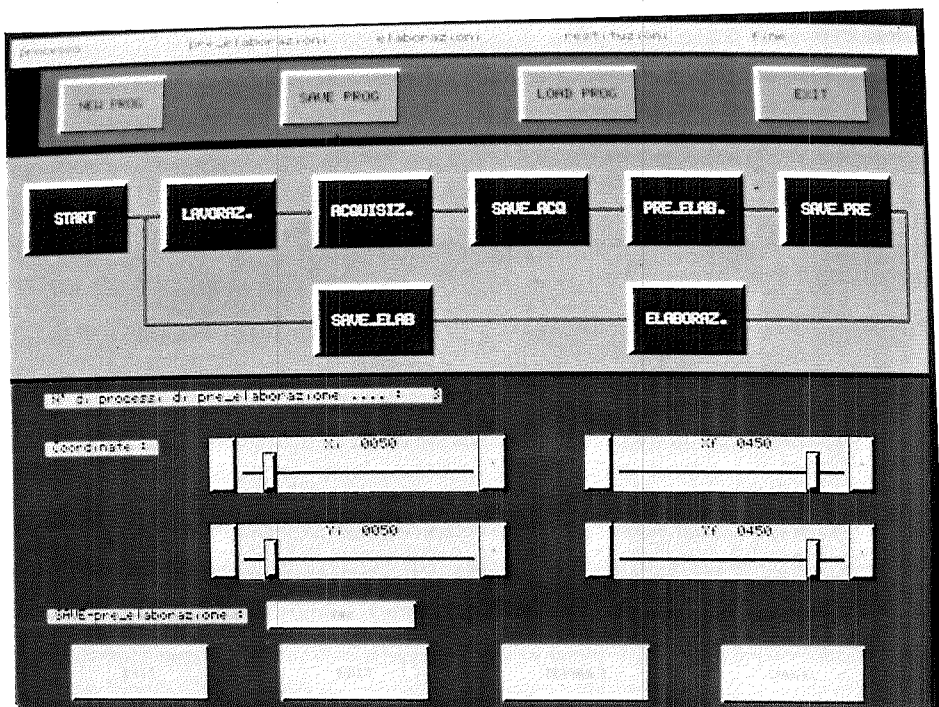


Figura 30a - Interfaccia di monitoraggio e comunicazione

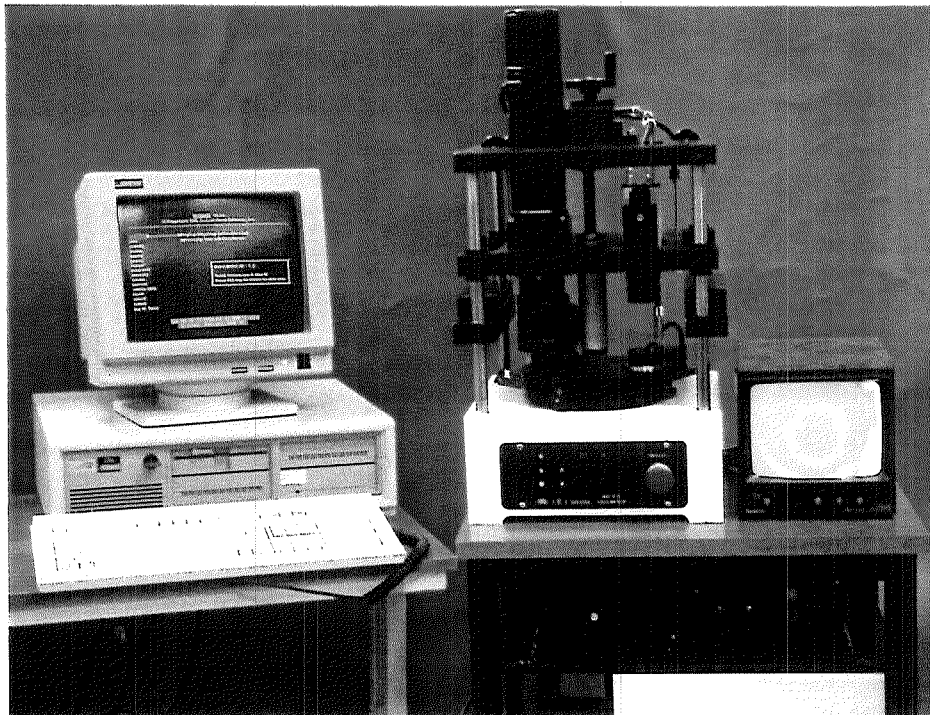


Figura 30b - Stazione di lavoro per l'indagine tomoscopica nel visibile. Si notano l'unità elettromeccanica di lavorazione con telecamera di ispezione e relativo monitor, insieme con un terminale alfanumerico.

4.4. Stazione per l'ispezione nel visibile

L. Azzarelli, M. Chimenti, R. Bozzi, D. Nari, E. Gontero

In collaborazione con le società Legler SpA, Scriba srl, Mahlo CMBH, operanti rispettivamente nei settori della produzione di tessuti, nella automazione industriale e nella produzione di macchine tessili, è stata svolta un'attività di studio e progettazione orientata alla automazione di processi di controllo di qualità di manufatti tessili.

Questa attività è stata sviluppata sia nell'ambito di un Progetto Brite finalizzata al controllo di qualità in linea, durante quindi la lavorazione, sia nell'ambito del Progetto Finalizzato per il controllo fuori linea da eseguire sul prodotto finito in un tempo dilazionato.

Nel primo caso il sistema di indagine è integrato nella struttura di produzione, con la quale interagisce a vari livelli, e, dovendo rispettare vincoli molto rigidi di velocità e sincronismo, deve eseguire procedure di analisi molto specializzate per il tipo di produzione. Nel secondo caso il sistema di indagine si identifica in una stazione di lavoro che, con vincoli meno pressanti, può avere caratteristiche di flessibilità e adattabilità che possono consentire l'esecuzione anche di indagini più complesse e comunque più generali.

Le peculiari caratteristiche del processo di produzione, la varietà di difetti possibili nonché la struttura del mezzo da indagare, possono richiedere l'impiego combinato del controllo in linea e di quello fuori linea. Con il primo metodo di indagine la malformazione o i difetti vengono rilevati, localizzati e preclassificati, la zona difettosa viene marcata e la struttura dedicata alla produzione viene controllata in conseguenza. Con il secondo metodo di indagine le zone segnalate vengono riesaminate, impiegando tecniche elaborative anche complesse (analisi morfologiche), e viene eseguita una classificazione dei difetti ed una valutazione della loro rilevanza; anche con questo tipo di indagine si devono esaminare grandi quantità di stoffa avvolta su appositi rulli la cui velocità di srotolamento però può essere, in questa applicazione, controllata dal processo stesso di indagine per consentire l'esecuzione sia di elaborazioni particolarmente lunghe, sia l'esecuzione di interventi controllati sul prodotto in esame (marcature, tagli, ecc.).

Nell'ambito del Progetto Finalizzato si è definita una stazione dedicata a quest'ultimo tipo di indagine perché la sua utilizzazione risulta essere di interesse più generale; su proposta della società Legler, è stato preso in considerazione l'esame di tessuti "denim" che presentano notevoli difficoltà di controllo dovute fondamentalmente al tipo di tessitura che lo caratterizza.

A seguito di un'indagine condotta dalla Legler sono stati individuati almeno una ventina di possibili tipi di difetti, alcuni dei quali sono individuabili unicamente su uno dei due versi del tessuto. I difetti più ricorrenti possono essere caratterizzati: da punti chiari o scuri (questo tipo di tessuto può essere considerato di tipo bicromatico) isolati o variamenti connessi a costituire righe il cui orientamento dipende dalla trama e dal tipo di tessitura (fili grossi in trama o catena, fili lenti, fili doppi, ecc.); da zone di diversa colorazione (macchie d'olio, fiamme in catena o in trama, fiamme e strade, ecc.); da aree o punti isolati di diverso contrasto (nodi in catena, fili volanti, fili rotti, fallo macchina, ecc.) [30, 31].

La stazione di lavoro si basa, come le altre illustrate nei paragrafi precedenti, sul sistema SVP 2000, descritto nel capitolo 2, la cui architettura hardware prevede però in questa applicazione alcuni moduli hardware e firmware speciali; questi moduli sono dedicati all'esecuzione di specifiche funzioni elaborative e all'acquisizione parallela dei segnali provenienti da due sensori contrapposti necessari per eseguire eventualmente l'indagine su entrambi i versi del tessuto in esame.

In figura 31 è mostrato lo schema di principio del processo di acquisizione che, a causa della diversificazione dei difetti, può richiedere l'esecuzione contemporanea di più procedure elaborative specializzate per l'esecuzione di diversificati processi di riconoscimento e di classificazione.

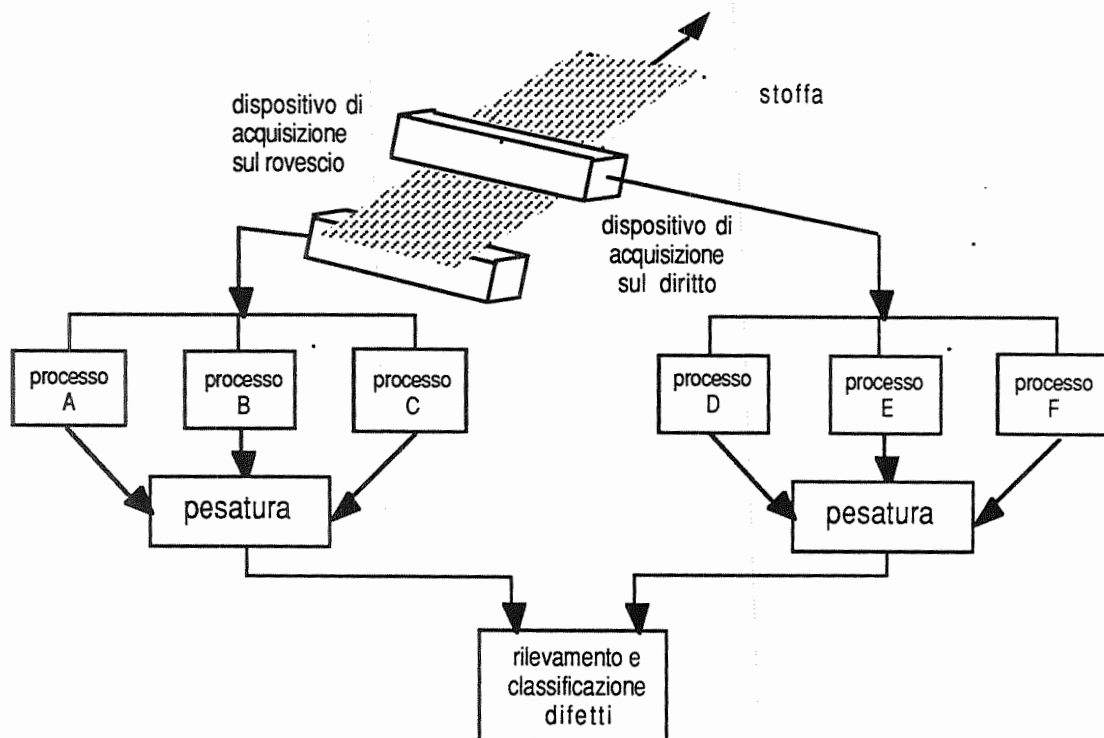


Figura 31 - Schema del processo parallelo di acquisizione e analisi

L'acquisizione dei dati viene eseguita operando nel visibile e impiegando una sorgente di luce, appositamente realizzata, costituita da un proiettore che con accoppiamento a fibre ottiche illumina una striscia del tessuto in movimento; due sensori di riga contrapposti, costituiti da 2048 o 4016 elementi fotosensibili a seconda dell'altezza del tessuto o della risoluzione richiesta, rivelano il flusso riflesso del tessuto. Il segnale viene quantizzato su 256 livelli e inviato ad una memoria tampone le cui dimensioni dipendono fondamentalmente dal tipo di preelaborazione e analisi da eseguire. Data l'alta velocità di trascinarsi del tessuto (1-2 m/s) e la grande quantità di dati di ingresso (2048-4016 byte/riga) la velocità di trasferimento, e conseguentemente di elaborazione sincrona, risulta essere compresa tra 10-20 Mb/s.

Questo processo, sempre per i motivi sopra citati, non può basarsi per la rivelazione dei difetti su un'indagine di tipo morfometrico; questa infatti, pur consentendo in genere una rivelazione e una classificazione affidabile, comporta però un inaccettabile appesantimento del processo elaborativo; il processo

quindi è stato basato su un'indagine di tipo statistico che, nonostante l'indeterminazione che caratterizza questo tipo di analisi, risulta essere sufficientemente efficiente per gli scopi previsti.

In una prima fase dei lavori si è preferito, per controllare meglio la procedura di analisi, operare in emulazione del processo di indagine: a questo fine si è emulata l'acquisizione su campioni reali di tessuti con vari tipi di difetti utilizzando un dispositivo di acquisizione con caratteristiche identiche a quello della stazione di rilevamento (tipo di illuminamento, tipo di sensore, valori di risoluzione spaziale e radiometrica); è stato quindi sviluppato un processo di indagine simulato operante su matrici di dati preacquisiti relative ai vari tipi di campioni di tessuto forniti dalla Legler.

Il metodo seguito nel processo di indagine si basa su una fase iniziale di autoapprendimento e una fase di elaborazione ed analisi.

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 calcolati alcuni parametri caratteristici e vengono calcolati su di essi gli istogrammi, in modo da ricavare un intervallo 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.

I parametri presi in esame sono costituiti dal valore medio μ , dalla deviazione standard σ , dal momento di kurtosis k e dal momento di skewness s calcolati in ciascuna ROI.

Gli istogrammi dei valori medi hanno, 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 s_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.

La figura 32a riassume la sequenza delle operazioni eseguite nella fase di apprendimento durante il processo simulato. La figura 32b mostra invece la sequenza delle operazioni eseguite nella successiva fase di segmentazione. Il campione di tessuto viene acquisito, i dati vengono preelaborati per ridurre il rumore e gli artefatti di misura e la matrice viene esplorata con una ROI avente la stessa dimensione di quelle impiegate nella fase di apprendimento.

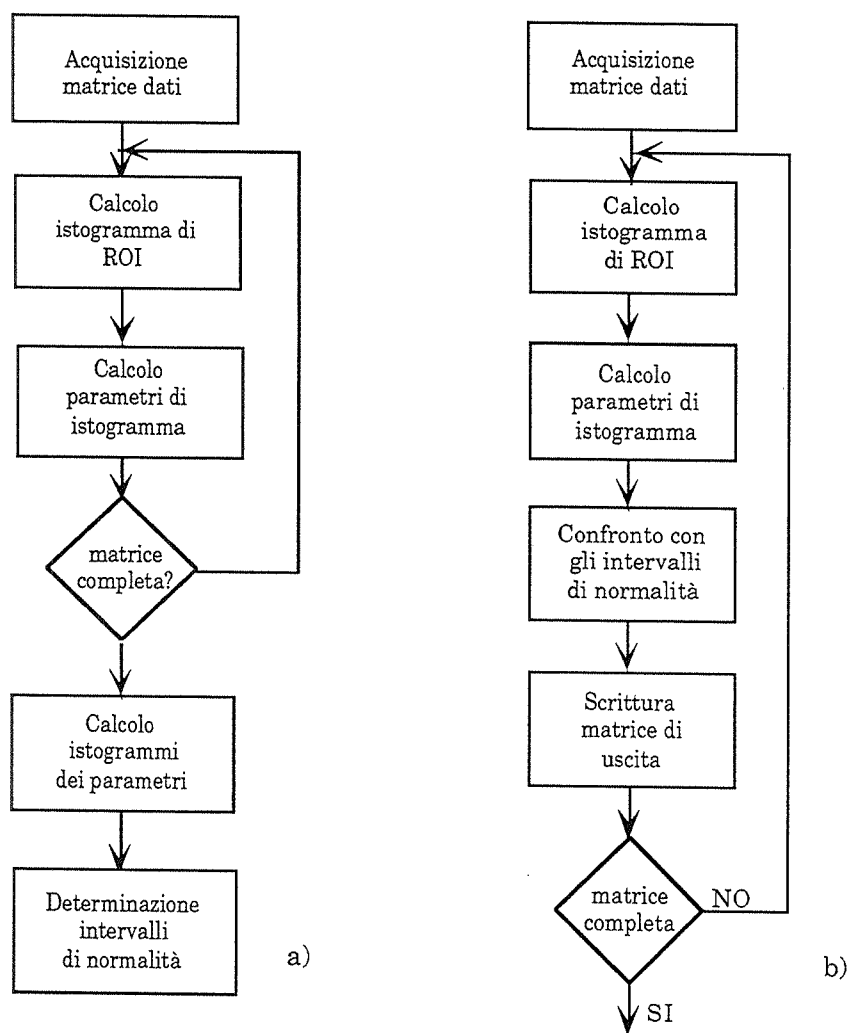


Figura 32 - a: sequenza delle operazioni nella fase di apprendimento;
b: sequenza delle operazioni nella fase di segmentazione.

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:

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

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

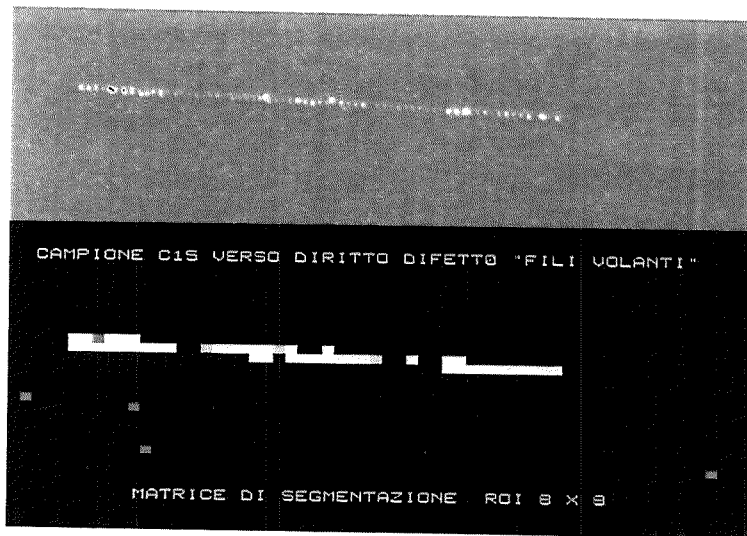


Figura 33 - Esempio di segmentazione spaziale e fotometrica dei dati di ingresso. La parte superiore della figura mostra l'immagine digitale del campione C15; quella inferiore mostra la matrice di uscita B codificata su 16 livelli rappresentati mediante pseudo colori. La matrice di uscita è "ingrandita" di un fattore 16

La figura 33 mostra un esempio ottenuto elaborando nella maniera suddetta un campione di tessuto. 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 224x512 elementi, è stata esplorata con una ROI di 16x16 elementi e per ogni posizione della ROI sono stati calcolati l'istogramma e i

quattro parametri da esso estratti. I parametri sono stati confrontati con gli intervalli di normalità determinati durante la fase di apprendimento su una zona del tessuto priva di difetti: nell'esempio riportato per ogni i gli estremi dell'intervallo di normalità sono stati definiti da:

$$x_{1i} = \mu_{xi} - 3 \sigma_{xi} \qquad x_{2i} = \mu_{xi} + 3 \sigma_{xi}$$

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: questa riduzione consente l'esecuzione delle operazioni di classificazione in tempi compatibili con le esigenze del controllo in tempo reale.

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.

Poiché le mappe contengono, oltre alle informazioni relative al difetto, anche indicazioni spurie di pseudo difetti o difetti isolati non rilevanti ai fini diagnostici, le matrici binarie vengono elaborate per scartare questi ultimi e per determinare nel contempo le equazioni delle rette che meglio interpolano, secondo il metodo dei minimi quadrati, i punti con valore 1: l'orientamento delle rette e la lunghezza dei segmenti ottenuti costituiscono elementi di valutazione per una prima classificazione dei difetti che risultano classificabili in funzione del loro orientamento e dimensione.

A questo fine in ciascuna mappa B_n viene eseguito il procedimento iterativo; 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 s_d dell'insieme $\{d_i\}_0$ e si determina un indice di sparpagliamento $d_{max} = \bar{d} + a \cdot \sigma_d$ dove a è una costante che deve essere ottimizzata in funzione del tipo di tessuto.

Dall'insieme dei punti $\{P_i\}_0$ vengono eliminati quelli con distanza $d_i > d_{max}$ ottenendo così un nuovo insieme $\{P_i\}_1$ sul quale

viene ripetuto il processo finché $d_i \leq d_{\max}$; in questo caso 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.

In funzione delle tipologie dei difetti da diagnosticare o del tipo di tessuto, possono essere usate per l'individuazione dei difetti varie combinazioni lineari dei parametri statistici. Nelle figure 34 e 35 sono riportati due esempi di analisi e riconoscimento relativi rispettivamente a difetti di tipo "filo lento in catena" (C6); "fallo macchina" (C11a); "macchia d'olio" (C4r). Per la rivelazione, in questo esempio, è stata impiegata la semplice combinazione di parametri $\mu \wedge \sigma$ che si è dimostrata essere la più semplice ed efficiente.

Dalle esperienze condotte durante il processo di simulazione descritto è derivato il disegno di una possibile architettura di una stazione per il controllo di qualità che potrebbe operare sia in linea durante la produzione del tessuto sia fuori linea in modo opportunamente semplificato. 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.

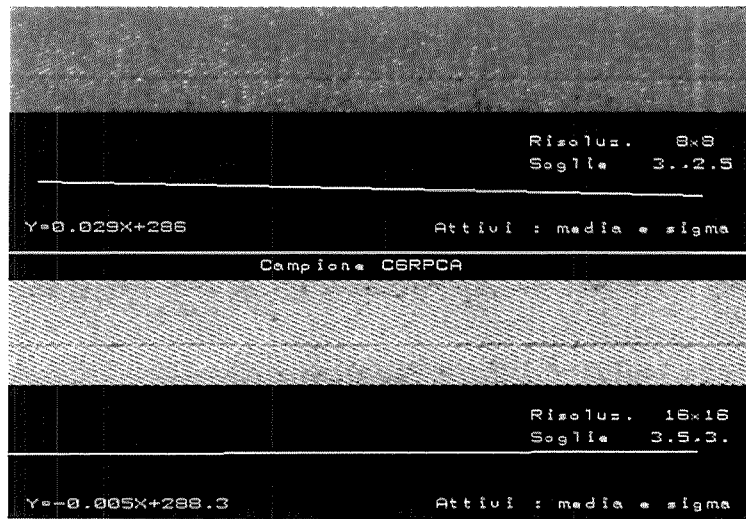


Figura 34 - Esempio di analisi del campione C6d con ROI 8•8 (parte alta della figura) e del campione C6r con ROI di 16•16 elementi.

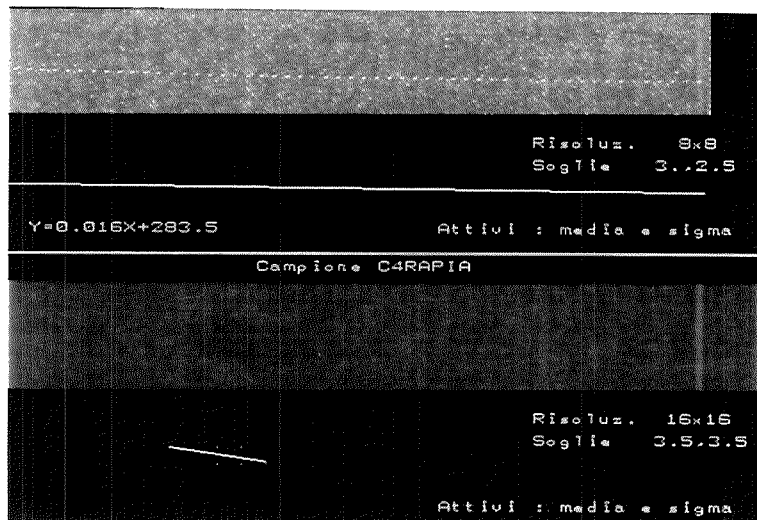


Figura 35 - Esempio di analisi del campione C11d con ROI 8•8 (parte alta della figura) e del campione C4r con ROI di 16•16 elementi (parte bassa).

L'integrazione delle nuove componenti nella stazione SVP 2000 ha comportato:

- la specializzazione del modulo di acquisizione per consentire l'esecuzione di una serie di preelaborazioni in tempo reale sui dati di ingresso al fine di contenere il rumore di acquisizione e ridurre le degradazioni dovute alla non uniformità di illuminamento
- la realizzazione di particolari moduli hardware dedicati alla compressione e all'analisi dei dati
- lo sviluppo di moduli utenti hardware e software per l'estrazione dei parametri e codifica mediante processori multipli.

Il processo di acquisizione dei dati introduce notevoli distorsioni dovute fondamentalmente alla non uniformità dell'illuminamento del tessuto e alle caratteristiche di trasferimento del dispositivo optronico di rilevamento. Tuttavia, poiché tali degradazioni sono invarianti nel verso di traslazione del tessuto, la procedura di autoapprendimento le considera alla stessa stregua delle strutture del tessuto; le degradazioni presenti contribuiscono cioè alla definizione degli intervalli di "normalità" per cui non verranno rilevate nel successivo processo di analisi, nel suo complesso quindi la procedura non richiede una correzione radiometrica che avrebbe rallentato il ciclo di immagine.

Nella fase di compressione e analisi dei dati e per rispettare i vincoli di velocità, l'elaborazione può avvenire mediante una trasformazione con compressione dei dati ed un'analisi dei dati compressi: nella prima fase il segnale 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 istogrammatore 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 $(x_{1(j,m)}, x_{2(j,m)})$.

La figura 36 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.

La procedura complessiva sinteticamente descritta è stata progettata e sperimentata in simulazione tenendo conto dei tempi reali definiti dal processo d'indagine, dalle possibilità offerte dalla attuali tecnologie basate sui microprocessori PSP e dalla struttura modulare del sistema base SVP 2000.

Attualmente si stanno valutando due possibili architetture elaborative in grado di soddisfare le esigenze del controllo di qualità anche se con diversi gradi di efficienza, complessità e relativi costi di produzione: architettura per l'estrazione dei parametri e codifica mediante processi multipli, oppure mediante processore singolo.

Nel primo caso il circuito istogrammatore è costituito da una memoria e un PSP: si ha quindi un numero di PSP uguale al numero di segmenti in cui viene suddivisa la riga di scansione (v. fig. 36).

Nel secondo caso si deve invece soddisfare la quantità di memoria necessaria per accumulare i dati ricavati durante la scansione di una sequenza di righe; analizzando in sequenza questi dati il PSP calcola gli istogrammi ed estrae i parametri di caratterizzazione [32].

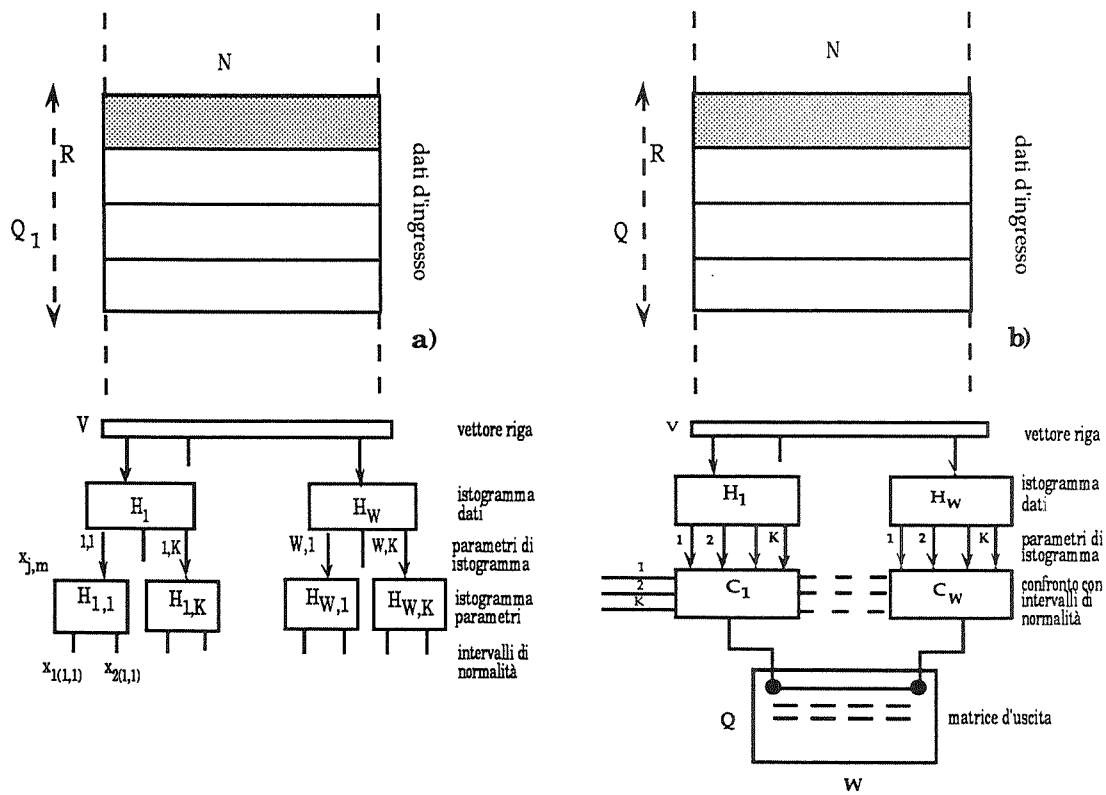


Figura 36 - a) architettura per la determinazione degli intervalli di normalità nella fase di autoapprendimento; b) architettura per la fase di compressione dei dati e successiva analisi.

5. CONCLUSIONI

Al termine della fase di attività relativa al triennio 1989-91, gli obiettivi previsti del programma di ricerca e sviluppo possono ritenersi in larga misura raggiunti. Sono stati infatti realizzati prototipi operativi di sistemi integrati hardware/software a multi processori orientati all'acquisizione e trattamento di dati sensoriali in tempo reale e stazioni di lavoro variamente orientate nel settore dell'indagine non distruttiva; sono stati sviluppati processi e procedure di controllo automatici; sono stati realizzati strumenti, sensori e dispositivi specializzati, sono stati definiti modelli, algoritmi e metodologie di analisi dei dati sensoriali per l'estrazione di informazioni. Gran parte dei prototipi vengono attualmente impiegati in applicazioni sperimentali sia presso l'Unità Operativa sia presso i laboratori dei partner industriali, al fine di valutare le prestazioni ed individuare le eventuali modifiche o ampliamenti.

In un Progetto di così lunga durata e con contenuti tecnologici così vasti, è inevitabile che le scelte adottate nel definire gli obiettivi e i criteri di progettazione siano condizionati, e talvolta invalidati, dalla evoluzione delle conoscenze e soprattutto dalla tecnologia disponibile. Tuttavia nella progettazione si è cercato di tenere conto di questi fattori individuando architetture, soluzioni e processi di tipo aperto, quindi non sempre ottimizzabili, e conseguentemente facilmente modificabili per soddisfare sia nuove necessità operative, sia per migliorare l'efficienza e l'affidabilità applicativa.

L'attività della Unità Operativa nel biennio finale del Progetto avrà gli obiettivi principali concordati con la Direzione consistenti nella supervisione per l'ingegnerizzazione dei prodotti più significativi e di interesse più decisamente industriale e la realizzazione di una stazione di lavoro specificatamente orientata verso la visione artificiale.

Il primo tipo di attività è stato già iniziato: in particolare sono state infatti definite con la Società Scriba una serie di modifiche e ampliamenti dell'architettura del sistema SVP 2000 al fine di ottenere significativi miglioramenti delle prestazioni generali e una più orientata applicabilità.

Per quanto concerne il secondo tipo di attività è iniziato uno studio tendente alla specializzazione della stazione implementando

una serie di dispositivi per il rilevamento di traiettorie e parametri caratteristici di oggetti in movimento studiati e realizzati dalla Unità Operativa del Dipartimento di Ingegneria Elettronica dell'Università di Firenze.

È inoltre iniziato lo studio per l'implementazione sulla stazione SVP 2000 degli algoritmi orientati alla segmentazione e al riconoscimento di oggetti tridimensionali mediante rilevamento stereo: utilizzando sia le procedure descritte che gli strumenti hardware e software già realizzati si potrà avere così una stazione di lavoro in grado di localizzare e riconoscere certe categorie di oggetti, anche in movimento, e di interagire con essi tramite eventuali strutture robotizzate con tempi di risposta accettabili in varie applicazioni.

RIFERIMENTI

- [1] L.Azzarelli, M.Chimenti, O.Salvetti, H.Brueinig, H.Niemann: "Interactive processing and archiving of images", *Image and Vision Computing*, Vol. 8, 3, pp.241-250, 1990.
- [2] R.March: "Computation of stereo disparity using regularization", *Pattern Recognition Letters*, Vol. 8, pp.181-187,1988.
- [3] R.March: "A regularization model for stereo vision with controlled continuity", *Pattern Recognition Letters*, Vol.10, pp.259-263, 1989.
- [4] R.March: "Visual reconstruction with discontinuities using variational methods", *Image and Vision Computing*, Vol.10, pp.30-38, 1992.
- [5] L.Bedini, A.Tonazzini: "The use of Neural Networks in Maximum Entropy Image Restoration", IEI-CNR, Pisa, B4-51, 1988.
- [6] L.Bedini, A.Tonazzini: "Reti di Hopfield per il restauro di immagini", *Rivista di Informatica*, Vol.XXII, 1, pp.29-41, Gennaio-Marzo 1992.
- [7] L.Bedini, A.Tonazzini "A neural network model for linear and non-linear image restoration", *Second IASTED Int. Symposium Expert System and Neural Networks (Honolulu Aug. 15-17 1990)*, 56-59, M.H.Hamza ed., Acta Press, 1990.
- [8] L.Bedini, A.Bonara, M.Spada, A.Tonazzini: "The Use of Neural Networks in Bayesian Image Restoration", *Int. Neural Network Conf. INNC-90 (Parigi, 9-13 Luglio 1990)*, poster, Vol. 1, 54, Kluwer, 1990.
- [9] L.Bedini, L.Benvenuti, E.Salerno, A.Tonazzini "An MRF-based approach to image reconstruction from few projections", IEI-CNR, Pisa, B4-29, 1991.
- [10] L.Bedini, A.Tonazzini: "Modelli a Campi di Markov per la Ricostruzione Bayesiana di Immagini", IEI-CNR, Pisa, B4-29, 1989.
- [11] L.Bedini, I.Gerace and A.Tonazzini: "A Deterministic Algorithm for Reconstructing Images with Interacting Discontinuities", sottomesso per la pubblicazione su *CVGIP Graphical Models and Image Processing*.
- [12] G.Marola, A.Vaccarelli:"An Algebraic Method for Detecting Three-dimensional Objects in a Picture", *Proc. 11th IAPR 92 (The Hague, Aug. 30-Sept.4 1992)*, pp. 415-419.

- [13] E.Bozzi, M.Chimenti, L.Azzarelli: "Sviluppo di procedure per la scansione a ultrasuoni di superfici curve mediante robot a sei assi". IEI-CNR, Pisa, B4-38, 1992.
- [14] M.Bramanti: "A method for obtaining more information from attenuation based material testing techniques, IEEE Trans on Instrumentation & Meas., Vol. 38, No. 1, 1989.
- [15] "Procedimento e Dispositivo per la caratterizzazione non distruttiva mediante ultrasuoni di discontinuità all'interno di manufatti laminati e simili", Brevetto di Invenzione Industriale, 009498 A/90 10 Ottobre 1990, Inventore M.Bramanti, Titolarità C.N.R..
- [16] M.Bramanti: "Tecnica ad ultrasuoni per indagini non distruttive su materiali basata sull'analisi frequenziale", Alta Frequenza - Rivista di Elettronica, Vol. IV, No. 1, 1992.
- [17] M.Bramanti: "A Nondestructive Diagnostic Method Based on Swept-Frequency Ultrasound Transmission - Reflection Measurements", IEEE Trans. on Instrumentation & Meas., Vol. 40, No. 4, 1992.
- [18] M.Bramanti: "A Slot Line Microwave Dielectric Permittivity Sensor for Measure and Control of Laminated Materials", J. of Microwave Power and Electron. Energy, Vol. 26, No. 2, pp. 67-71.
- [19] M.Bramanti: "Le Tecniche Elettromagnetiche nella Misura e Controllo di Qualità in Ambito Industriale", L'Elettrotecnica, Vol. LXXIX, N. 4, 1992.
- [20] M.Bramanti, E.Salerno: "Experiments on Some Particular Permittivity Sensors in Nondestructive Testing of Dielectric Materials", lavoro accettato e in corso di pubblicazione su J. of Microwave Power and Electron. Energy.
- [21] E.Bozzi, M.Chimenti, L.Azzarelli: "Ispezione a soglia singola mediante prototipo di stazione US". IEI-CNR, Pisa, B4-17, 1992.
- [22] L.Azzarelli E.Bozzi, M.Chimenti, O.Salvetti, L.D'Antonio, C.Sabatino: "A distributed system for the quality control of aerospace structures", Materials Evaluation, Vol. 49, n. 2, pp.290-293, 1991.
- [23] L.Azzarelli, E.Bozzi, M.Chimenti: "Valutazioni sperimentali del prototipo di stazione per il CND ad ultrasuoni e studio di fattibilità per versioni ottimizzate". IEI-CNR, Pisa, B4-23, 1991.
- [24] L.Azzarelli, M.Chimenti, O.Salvetti: "An image processing workstation for termography", IEI-CNR, Pisa, B4-37, 1992.

- [25] P.Andronico, A.Marchetti, L.Azzarelli, M.Chimenti: "Package per l'indagine statistica di immagini monocromatiche", IEI-CNR, Pisa, B4-28, 1990.
- [26] Yuhong Guo, L.Azzarelli, M.Chimenti, A.Marchetti: "An interactive method for image feature extraction based on B-Spline curves", IEI-CNR, Pisa, B4-37, 1991.
- [27] P.Andronico, R.Guerrini, A.Marchetti, L.Azzarelli, M.Chimenti: "Stereogrammi di immagini monocromatiche". IEI-CNR, Pisa, B4-12, 1990.
- [28] L.Azzarelli, E. Bozzi, M. Chimenti: "Un sistema a controllo numerico per l'ispezione di materiali" Progetto Finalizzato Robotica, IEI-CNR, Pisa, B4-49, 1991
- [29] G.Braccini, O.Salveti: "Morphometric Analysis of Sonographic Images by Spatial Geometric Modeling". Computerized Medical Imaging and Graphics, 16, 2, pp. 93-108, 1992.
- [30] L.Azzarelli, E. Bozzi, M. Chimenti: "Analisi preliminare per la definizione di un sistema per il controllo di qualità". IEI-CNR, Pisa, B4-17, 1990.
- [31] L.Azzarelli, E. Bozzi, M. Chimenti: "Automatic on-line systems for detection, evaluation and mapping of defects and variations monitoring on finished fabrics. Processo di simulazione - metodologie di analisi". Progetto Brite n° R11B-0243, IEI-CNR, Pisa, B4-24, Giugno 1990.
- [32] L.Azzarelli, M. Chimenti, R. Bozzi: "Simulation and design of an H/S integrated real-time system for flows detection on denim fabrics". IEI-CNR, Pisa, B4-36, 1991.