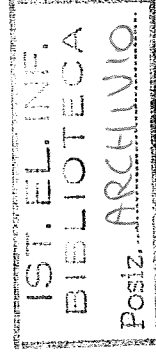


*Contratto di collaborazione tecnico-scientifica
Alenia-GAT/IEI-CNR*

**Valutazioni sperimentali del prototipo di stazione
per il CND ad ultrasuoni e studio di fattibilità
per versioni ottimizzate**

Luciano Azzarelli, Edoardo Bozzi, Massimo Chimenti

Istituto di Elaborazione della Informazione - CNR Pisa



BG-23
1991

La redazione del testo è stata curata da:

M. Ballati

INDICE

Introduzione	pag. 3
1. Specifiche generali di scansione	pag. 4
2. Rilevamento delle prestazioni dei componenti della stazione	pag.12
2.1. Sistema multiassi IRB2000	pag.13
2.1.1 Rilevamento della traiettoria	pag.13
2.1.2 Rilevamento della velocità	pag.19
2.2. Generatore a ultrasuoni Echograph 1030	pag.24
2.3. Oscilloscopio LeCroy 9450	pag.25
2.4. Personal Computer	pag.26
2.5. Influenza dell'orientamento della sonda	pag.30
3. Analisi generale delle prestazioni	pag.33
3.1. Scansione sincrona a soglia singola	pag.33
3.2. Scansione asincrona a soglia singola	pag.34
3.3. Scansione a onda completa	pag.35
4. Analisi della velocità di scansione	pag.37
4.1. Scansione a soglia singola analogica	pag.37
4.2. Scansione a soglia singola digitale	pag.39
4.3. Scansione a onda completa	pag.39
5. Soluzioni per stazioni ad alta velocità	pag.46
5.1. Esempio A	pag.46
5.2. Esempio B	pag.48
5.3. Esempio C	pag.50
Conclusioni	pag.54

Introduzione

In una attività precedente è stato definito, sviluppato e sperimentato un prototipo di struttura orientato verso il controllo non distruttivo mediante l'impiego di ultrasuoni descritto nel documento B4-64 "Progetto e sviluppo di una struttura per il CND ad ultrasuoni". La metodologia di indagine implementata consente l'esplorazione di campioni su superfici convesse o concave entro i limiti dello spazio di lavoro del braccio meccanico di scansione. La procedura consente di eseguire misure con risoluzione spaziale inferiore a 1 mm e con orientamento della sonda perpendicolare alla superficie nelle coordinate di scansione.

La precisione di posizione e di orientamento è determinata dalle caratteristiche del sistema robotizzato di scansione; le dimensioni delle superfici esplorabili e i possibili orientamenti della sonda sono vincolati dal sistema di scansione e dalle dimensioni della vasca per l'immersione dei campioni.

La procedura realizzata, pur risultando molto precisa, ha una velocità di esecuzione piuttosto contenuta: di conseguenza sono state esaminate le prestazioni dei singoli componenti della stazione nella configurazione attuale, che comprende dispositivi acquistati o messi a disposizione da parte della società Alenia, al fine di determinare la possibilità di realizzare una procedura di scansione che risulti efficiente nei processi di controllo in produzione.

I requisiti di questa procedura sono: alta velocità di scansione, risoluzione di misura di 1 ± 2 mm, precisione di posizionamento 1 mm; i vincoli da rispettare sono determinati ancora dalla struttura meccanica della vasca per l'alloggiamento dei campioni: gli spostamenti e gli orientamenti del braccio meccanico devono dunque essere controllati per evitare che esso entri in contatto con le pareti della vasca e con l'acqua.

Diversamente dalle esperienze iniziali, si può usare come trasduttore una sonda non focalizzata. In questo caso i vincoli di distanza e di orientamento della sonda rispetto alla superficie del campione diventano meno rigidi che nel caso di impiego di sonde focalizzate.

1. Specifiche generali di scansione

La figura 1 mostra la generica architettura di una stazione di lavoro per l'acquisizione di mappe a ultrasuoni nel controllo non distruttivo di materiali.

Le caratteristiche dei componenti della stazione dipendono dal tipo di analisi da compiere e dalle specifiche di precisione e ripetibilità di misura, dalla velocità di esecuzione dell'esame e dalla quantità di dati da elaborare.

I requisiti principali sono:

- esame di campioni con geometrie anche complesse
- misure di attenuazione del segnale a ultrasuoni (misure a soglia singola) e acquisizione dell'intero segnale di eco (rilevamento di onda completa)
- acquisizione di segnale a ultrasuoni con frequenze fino a 20 MHz.

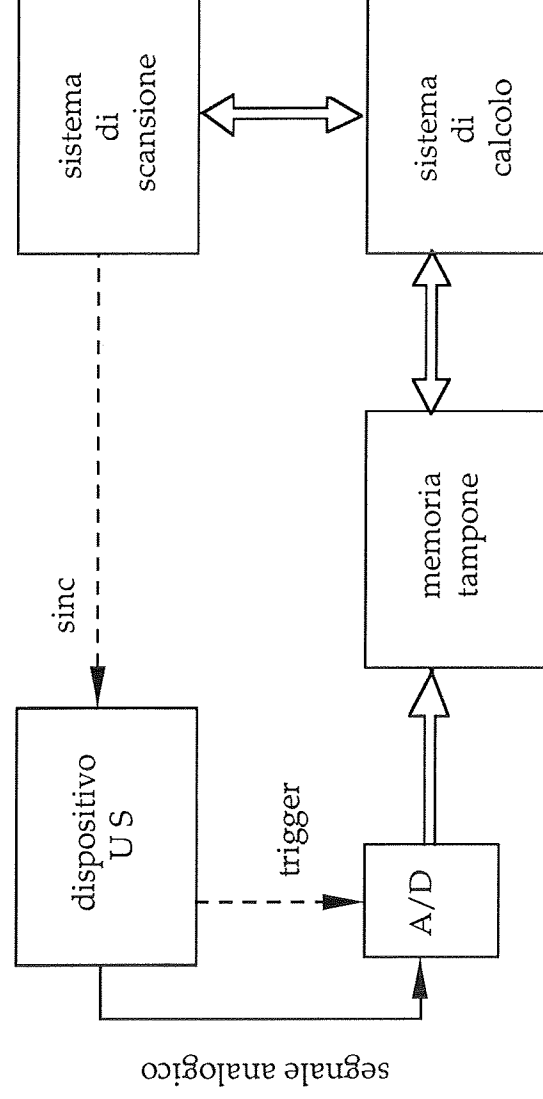


Figura 1 - Architettura della stazione di lavoro per acquisizione di mappe a ultrasuoni.

Il primo punto comporta l'impiego di un sistema di scansione con diversi gradi di libertà, in modo da consentire il corretto orientamento della sonda nei punti di misura: in pratica si deve fare uso di un braccio

meccanico con unità di controllo per la gestione dei movimenti elementari.

I punti due e tre comportano l'impiego di un convertitore analogico/digitale in grado di campionare fino a ~ 50 MHz e di una memoria tampone in grado di accettare il conseguente flusso di dati; la quantizzazione del segnale analogico è fissata per convenienza su 8 bit: la memoria deve dunque accettare dati fino a ~ 50 MByte/s.

Il sistema di calcolo contiene il programma principale per la gestione delle operazioni. Il sistema di scansione provvede a spostare la sonda lungo traiettorie predefinite e fornisce al dispositivo di generazione e ricezione di ultrasuoni gli impulsi di sincronismo in corrispondenza dei punti di misura.

Il convertitore A/D campiona il segnale analogico amplificato dal ricevitore US. Se il segnale è costituito dal segnale di eco il trigger prodotto dal dispositivo US in sincronismo con l'emissione dell'impulso fa partire l'orologio che pilota il convertitore A/D con una frequenza t_c almeno doppia della massima frequenza f_s presente nel segnale da campionare: viene così ricavata una sequenza di N dati che va inserita nella memoria tampone.

Per ciascun punto di misura p_i l'estremità della sonda dev'essere portata nelle coordinate (x_i, y, x_i) con l'orientamento, definito dall'insieme di valori $\{Q_i\}$ tale che l'asse della sonda sia ortogonale alla superficie del campione.

Nel caso più generale di esame di un campione con superficie complessa si deve aggiornare continuamente la posizione del braccio meccanico: il sistema di calcolo fornisce all'unità di controllo del robot sia le nuove coordinate spaziali che i valori di orientamento, in base alla forma della superficie specificata mediante dati CAD o funzioni generatrici.

In molti casi la superficie del campione è definibile mediante un profilo invariante per traslazione: è allora possibile esaminare il campione con righe di scansione in ciascuna delle quali l'orientamento della sonda rimane costante. La velocità di esame diventa superiore a quella ottenibile nel caso generale; infatti, il sistema di calcolo può fornire all'unità di controllo le coordinate di inizio e di fine della riga i -esima insieme col corrispondente orientamento $\{Q_i\}$ e, mentre la

sonda è in movimento, vengono eseguite le misure intervallate sulla riga di scansione.

Nel caso di campioni con superficie piana la scansione viene eseguita mediante righe parallele e con orientamento costante; in questo caso si può sfruttare la capacità elaborativa dell'unità di controllo: il sistema di calcolo si limita a fornire le coordinate di inizio e fine scansione, il passo di avanzamento e il valore di orientamento costante $\{Q_0\}$ mentre le coordinate di misura sono ricavate mediante un apposito sincronismo.

La figura 2 mostra la sequenza temporale e la sincronizzazione delle operazioni compiute dai vari componenti della stazione.

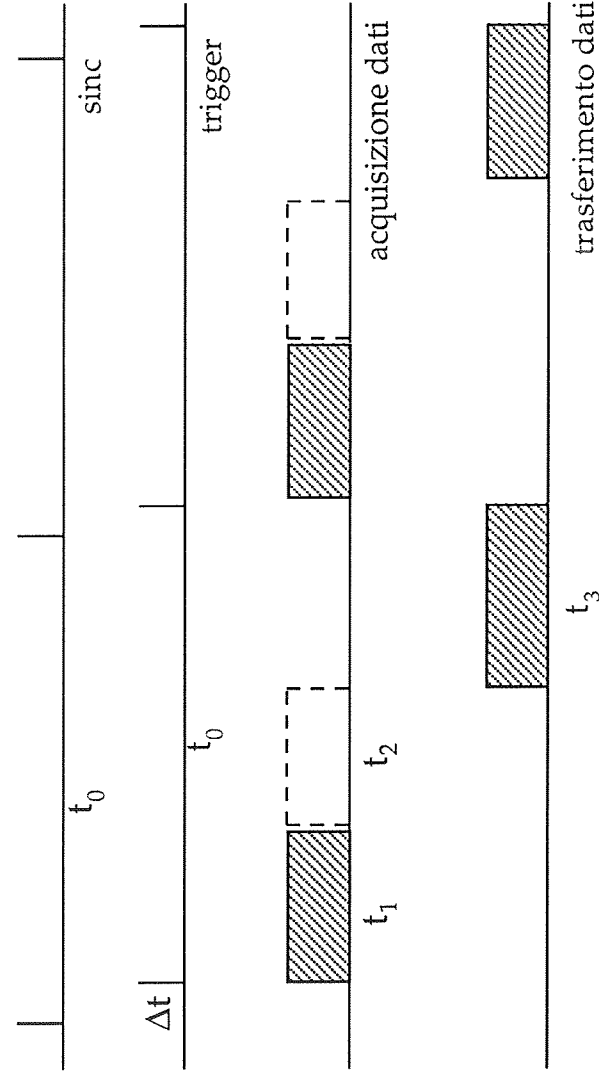


Figura 2 - Relazione temporale dei segnali tra i componenti della stazione

Si suppone di eseguire il rilevamento a onda completa di un campione con facce piane mediante scansione su linea retta a velocità costante; il periodo di ripetizione degli impulsi di sincronismo t_0 è legato alla velocità di traslazione v della sonda dalla relazione:

$$t_0 = \frac{p}{v}$$

dove p è il passo di campionamento.

Il segnale di trigger prodotto dal ricevitore US in queste condizioni ha ancora periodo t_0 ; il ritardo Δt rispetto all'impulso di sincronismo è dato da:

$$\Delta t = \frac{2s_a}{v_a}$$

dove s_a è la distanza percorsa in acqua dal segnale a ultrasuoni e v_a è la velocità di propagazione.

Il convertitore A/D carica nella memoria tampone i dati ricavati nella finestra temporale di durata t_1 , dipendente dallo spessore del campione in esame e dalla velocità di propagazione del segnale a ultrasuoni all'interno di esso. Il numero N di dati per campione è determinato da:

$$N = t_1 \cdot f_c$$

dove f_c è la frequenza di campionamento.

Al termine della finestra di acquisizione la memoria tampone è impegnata per il tempo t_2 in cui vengono eseguite operazioni di controllo. Al termine di t_2 la memoria può essere letta da parte del sistema di calcolo, ed è richiesto il tempo t_3 per il trasferimento dei dati. Si ha:

$$t_3 = t_a + \frac{N}{f_t}$$

dove t_a è il tempo di accesso al collegamento e f_t è la velocità di trasmissione dei dati attraverso l'interfaccia tra la memoria e il sistema di calcolo.

Il ciclo indicato in fig. 2 è costituito da operazioni successive di scrittura e lettura di una memoria di capacità N . Il periodo t_0 è dunque dato da:

$$t_0 \geq t_1 + t_2 + t_3$$

con t_2 eventualmente nullo, mentre la velocità di traslazione della sonda vale:

$$v = \frac{p}{t_1+t_2+t_3}$$

Il ciclo viene ripetuto per il numero M di misure da compiere; il tempo complessivo impiegato è dato da:

$$t = \frac{MN}{f_c} + \frac{MN}{f_t} + Mt_a + Mt_2$$

Se la memoria ha dimensione $Q > N$ si possono avere Q/N scritture consecutive e una lettura quando la memoria è stata riempita. In questo caso il tempo complessivo è dato da:

$$t = \frac{MN}{f_c} + \frac{MN}{f_t} + \frac{M}{Q} t_a + Mt_2$$

mentre la velocità della sonda durante le scritture consecutive diventa:

$$v = \frac{P}{t_1 + t_2}$$

La misura a soglia singola consiste nella determinazione del valore di picco del segnale di eco all'interno di un intervallo temporale opportunamente stabilito. La determinazione può essere fatta in via digitale o analogica.

Nel primo caso i dati immagazzinati nella memoria tampone per ciascun punto di misura vengono elaborati per ricavare il valore massimo, e il risultato viene trasferito nel sistema di calcolo per costruire la mappa di rilevamento. Il convertitore A/D e la memoria tampone lavorano nelle stesse condizioni descritte in precedenza per il rilevamento a onda completa; la velocità di scansione è anch'essa paragonabile a quella già espressa, e dipende in particolare dal tempo t_2 impiegato per l'elaborazione dei dati.

La misura analogica a soglia singola viene fatta da appositi circuiti del ricevitore US: all'uscita del dispositivo si ha un segnale di ampiezza proporzionale al valore di picco del segnale di eco. Questo segnale deve essere campionato da un convertitore A/D e il dato digitale così prodotto può essere inviato direttamente al sistema di calcolo. La frequenza di acquisizione dei dati è limitata in prima istanza

dalla superficie del trasduttore elettroacustico e dalle caratteristiche del campione. Il tempo trascorso tra l'emissione dell'impulso e il termine del segnale di eco è dato da:

$$\Delta t = \frac{2s_a}{v_a} + \frac{2s_c}{v_c}$$

dove s_a e s_c sono i percorsi in acqua e all'interno del campione e v_a e v_c sono le corrispondenti velocità di propagazione.

Lo spazio Δs percorso dalla sonda in tale tempo dev'essere inferiore al diametro \emptyset della sonda affinché il segnale di eco sia rivelato; posto

$$\Delta s = v \cdot \Delta t \leq \frac{1}{2} \emptyset$$

si ricava il massimo valore della velocità di traslazione v_{\max} :

$$v_{\max} \leq \frac{1}{2} \frac{\emptyset}{\Delta t}$$

In pratica, nelle normali condizioni di lavoro la velocità così determinata è superiore alla massima velocità di spostamento del braccio meccanico: è dunque quest'ultima a determinare l'effettiva velocità di acquisizione nelle misure a soglia singola.

L'esame di campioni con forme determinate da una sola generatrice richiede dei tempi confrontabili a quelli previsti per le scansioni piane. Nel caso citato ogni riga di scansione è costituita da una retta percorsa dalla sonda con velocità e orientamento costanti, e si possono dunque ripetere le considerazioni già espresse; il tempo complessivo impiegato per l'intero esame è aumentato dai tempi di collegamento impiegati all'inizio di ciascuna riga per la trasmissione dei parametri di scansione e per il movimento compiuto della sonda per assumere l'orientamento opportuno.

Il tempo necessario per l'esame di campioni con geometria complessa è difficilmente determinabile a priori. Nel caso peggiore si può supporre che la scansione sia compiuta con traiettorie elementari di lunghezza eguale al passo di campionamento spaziale; per ciascun punto è dunque richiesto il tempo:

$$t_p = t_c + t_s + t_0$$

dove t_c = tempo di trasmissione parametri di movimento dal sistema di calcolo all'unità di controllo

t_s = tempo di spostamento della sonda

t_0 = tempo di scrittura e trasferimento dei dati di misura.

I tempi t_c e t_s dipendono dalle caratteristiche del braccio meccanico: il tempo di scansione dipende quindi dai dispositivi impiegati.

Le tabelle I e II riassumono le considerazioni fatte in merito ai vari tipi di scansione eseguibili su differenti campioni.

Tipo di superficie	Parametri di scansione
complessa	(x_i, y_i, z_i, Q_i) / punto
generatrice singola	inizio, fine, Q_i / riga
piana	inizio, fine, Q_0 / matrice

Tabella I - Parametri di scansione trasmessi all'unità di controllo del dispositivo multiassi in funzione della forma del campione da esaminare.

Tipo di scansione	Dati per punto di misura	Frequenza di campionamento	Velocità sonda
Onda completa	N (512)	$f_c \geq 2f_s$ (≤ 50 MHz)	$\frac{P}{t_0}$
Soglia singola digitale	N_1 (50-100)	f_c (≤ 50 MHz)	$\frac{P}{t_p}$
Soglia singola analogica	1	$f_1 \sim \frac{v_{max}}{P}$ ($\sim 1k$ Hz)	v_{max}

Tabella II - Caratteristiche di scansione in funzione del tipo di scansione (i simboli sono descritti nel testo).

2. Rilevamento delle prestazioni delle componenti della stazione

La figura 3 mostra lo schema semplificato della stazione di lavoro sperimentale per l'acquisizione di mappe a ultrasuoni.

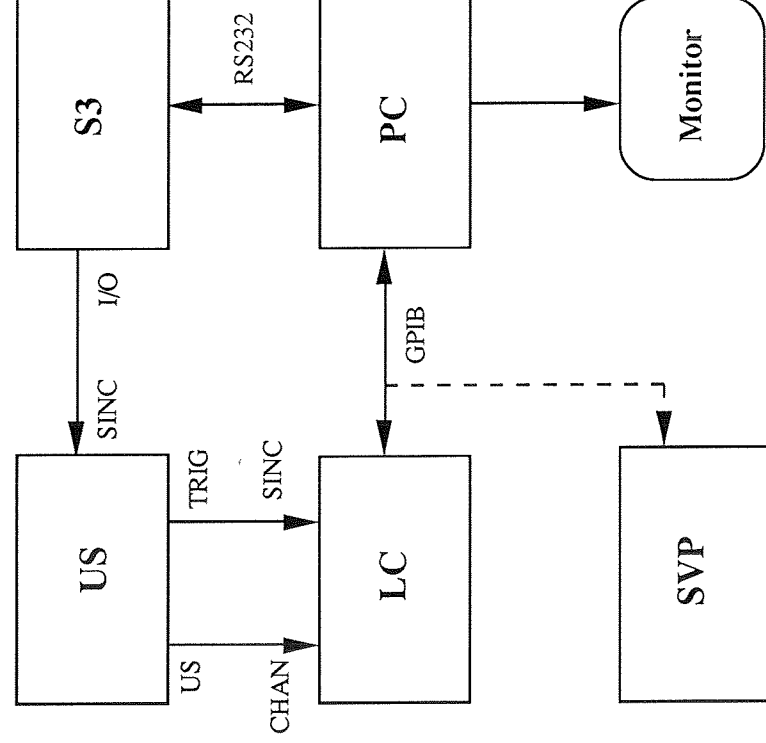


Fig. 3 - Connessioni tra i componenti della stazione per CND

Gli elementi di fig. 3 corrispondono a quelli di fig. 1. Il sistema di calcolo è costituito da un personal computer PC; il sistema di scansione è rappresentato dall'unità di controllo S3 di un robot a sei assi; il convertitore A/D e la memoria tampone sono contenuti nell'oscilloscopio digitale LC. Il calcolatore PC contiene il programma di acquisizione; PC è collegato all'unità di controllo del robot S3 mediante una linea di comunicazione RS232 usata per la trasmissione di comandi e segnali di stato.

S3 contiene il programma di scansione del braccio meccanico; attraverso una porta digitale d'uscita S3 trasmette al generatore di

impulsi a ultrasuoni US il segnale di sincronismo per la generazione del segnale di rilevamento.

Il segnale uscente dal ricevitore logaritmico di US viene inviato, insieme con l'impulso di trigger, all'oscilloscopio digitale LC.

LC è programmato per memorizzare il segnale a ultrasuoni collegato a un canale d'ingresso e quantizzato su 8 bit; LC è collegato mediante una linea di comunicazione ad un PC per la trasmissione di dati di misura e di segnali di controllo.

2.1. Sistema multiassi IRB2000

Sono state eseguite varie misure per determinare il moto del TCP del braccio meccanico, che sposta la sonda per il rilevamento del segnale a ultrasuoni. In particolare si è cercato di valutare l'effettiva traiettoria seguita dal TCP e la legge oraria del moto in condizioni nominali di moto rettilineo uniforme.

2.1.1 Rilevamento della traiettoria

La traiettoria desiderata viene definita mediante un insieme discreto di posizioni p_i ; l'unità di controllo S3 può allora guidare lo spostamento e l'orientamento del TCP in due maniere:

- moto lungo una spezzata. In questo caso ciascuna delle posizioni p_i viene raggiunta con la tolleranza minima del sistema (± 0.1 mm)
- moto lungo una curva di interpolazione. In questo caso la funzione SPF (Servo Path Following) fa passare il TCP in prossimità delle posizioni p_i con la tolleranza definita all'interno del programma di scansione.

Nel caso di traiettoria rettilinea le posizioni p_i possono essere calcolate direttamente in S3, usando le istruzioni aritmetiche e logiche di programmazione; nel caso di traiettorie curve le posizioni p_i devono essere calcolate in precedenza (ad esempio mediante un programma sul calcolatore PC) e vanno successivamente trasferite a S3 con blocchi di lunghezza opportuna: questa condizione non vale solo nel caso di traiettorie circolari con orientamento costante del TCP, in quanto S3 è

dotato di un comando per il moto lungo archi di circonferenza definiti da tre punti.

I movimenti del braccio meccanico possono avvenire in tre sistemi di coordinate: coordinate rettilinee (RECT), rettilinee modificate (MODRECT) e robot (ROBOT), che sono ottimizzate per le migliori condizioni di tempo o di velocità di esecuzione.

Nella applicazione di rilevamento di segnali US, è importante determinare la traiettoria seguita dalla sonda e il suo orientamento rispetto alla superficie del campione: più che il moto del TCP, interessa dunque conoscere il moto di un punto O posto a distanza fissa dal TCP e l'orientamento del vettore con estremi O e TCP.

A questo scopo è stata collegato alla flangia portautensili del robot un supporto portapenna della lunghezza di 17 cm, orientato lungo l'asse z del Base Coordinate System (BCS) e sono stati ricavati dei tracciati che simulano le traiettorie reali in condizioni di lavoro. La fig.4 mostra un esempio del percorso seguito dal TCP nella traslazione fra una coppia di punti appartenenti all'asse y del sistema di riferimento BCS e distanti 97,5 cm, la velocità di spostamento era di 25 mm/s.

La traccia 1 è stata ottenuta impostando il sistema RECT, caratterizzato dal movimento del TCP lungo una linea retta. In effetti, la traccia è costituita da una spezzata con tratti di lunghezza di 1-2 cm e spostamenti di circa 0,5 mm rispetto alla traiettoria teorica: le correzioni di traiettoria vengono compiute automaticamente dal controllo che governa i sei assi del braccio; gli spostamenti rispetto alla retta sono maggiori delle specifiche di precisione anche a causa delle dimensioni del pennino scrivente.

La traccia 2 è stata ottenuta impostando il sistema MODRECT, caratterizzato dal movimento del TCP lungo una linea retta con velocità costante ma con orientamento del polso (e quindi dell'asse z) variabile lungo la traiettoria. In effetti, la traccia è costituita da una curva simmetrica rispetto al punto centrale, in cui viene raggiunto il massimo spostamento (8 mm nel caso in esame) rispetto alla traiettoria teorica; l'errore percentuale di posizione vale circa 0,8%. Le modulazioni di larghezza della traccia sono causate dalle variazioni di orientamento del TCP che provocano variazioni di inclinazione e di pressione del pennino rispetto al foglio.

Figura 4

La traccia 3 è stata ottenuta impostando il sistema ROBOT, caratterizzato dal movimento simultaneo dei sei assi del braccio lungo il percorso più breve. In effetti, la traccia è costituita da una curva simmetrica rispetto al punto centrale, con spostamento massimo di 120 mm (errore relativo eguale a circa 12%); come nel caso precedente l'orientamento della penna cambia lungo la traiettoria, come si può riscontrare dalle variazioni di spessore della traccia.

La fig.5 mostra un esempio del percorso seguito dal punto O nella traslazione fra una coppia di punti appartenenti all'asse y del sistema di riferimento BCS e distanti 51 cm. Le tracce 1, 2 e 3 sono state ottenute nelle stesse condizioni descritte in precedenza. Gli errori misurati sono rispettivamente:

- traccia 2 (MODRECT): 3 mm; 0,6%
- traccia 3 (ROBOT): 34 mm; 6%

L'errore percentuale di posizione è dunque sostanzialmente proporzionale alla distanza degli estremi nel caso di MODRECT; nel caso ROBOT l'errore percentuale risulta inferiore a quello del caso precedente e sembra diminuire meno lentamente al diminuire della lunghezza del percorso.

La fig.6 mostra un esempio del percorso seguito dal punto O nella traslazione fra una coppia di punti appartenenti all'asse x del sistema di riferimento BCS e distanti 38 cm, nelle stesse condizioni descritte in precedenza. La traccia 3, relativa al moto in coordinate ROBOT, non compare in quanto la penna viene non solo inclinata ma anche notevolmente alzata rispetto al foglio a causa delle variazioni di orientamento del TCP. Gli errori misurati sulla traccia 2 sono sostanzialmente eguali a quelli ricavati dalla fig. 5.

In conclusione, se il punto O, corrispondente al centro della superficie sensibile della sonda, si deve muovere su una traiettoria rettilinea con orientamento costante, è necessario usare il sistema RECT. Con questa scelta si hanno però due tipi di limitazione:

- il sistema non si muove con velocità di traslazione costante;
- la traiettoria non può essere eseguita se su di essa giacciono dei punti singolari (singular points) che provocano l'arresto automatico.

Figura 5

Figura 6

Se la lunghezza della traiettoria è tale che gli errori di spostamento diventano paragonabili alla tolleranza minima del sistema, è possibile usare il sistema MODRECT; in questo caso non esistono punti singolari e la velocità di traslazione è teoricamente costante.

2.1.2. Rilevamento della velocità

La velocità di traslazione del TCP è stata misurata esplorando mediante un rivelatore optoelettronico una mira ottica appositamente realizzata. Il rivelatore era costituito da un fotodiodo e un obiettivo con focale 10 mm, montati su un supporto collegato alla flangia portautensili e coassiale all'asse z del braccio; la mira era costituita da una serie di righe di 0,5 mm di spessore con passo 2 mm disegnate su un supporto trasparente; le distanze coniugate obiettivo-immagine e obiettivo-oggetto erano tali che la dimensione del diametro della superficie sensibile del fotodiodo proiettata sul piano della mira valeva circa 0,2 mm.

La mira ottica è stata illuminata per trasmissione da un illuminatore con guida di luce lineare; il segnale elettrico prodotto dal fotodiodo in funzione della luce trasmessa dalla mira è stato amplificato da un convertitore corrente/tensione e inviato sul canale d'ingresso dell'oscilloscopio digitale LeCroy 9450

Il braccio del robot è stato azionato nel sistema MODRECT lungo una traiettoria nominalmente rettilinea di 35 cm di corsa; all'inizio della corsa un impulso di sincronismo prodotto da S3 fa acquisire e memorizzare il segnale da parte dell'oscilloscopio. La traccia ottenuta è costituita da una sequenza di picchi negativi in corrispondenza della misura della luce attenuata dalle righe della mira; la velocità istantanea del TCP è dunque data da:

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

dove $\Delta s = 2$ mm è la distanza costante tra ogni coppia di righe e Δt è l'intervallo di tempo tra due picchi successivi.

La tabella III riporta le misure ricavate alle velocità nominali di 0,25, 0,5 e 1 m/s; i grafici di figura 7, 8 e 9 riportano gli andamenti di varie grandezze ricavati dai dati di misura.

n° riga	Δt , ms $v=0,25$ m/s	Δt , ms $v=0,5$ m/s	Δt , ms $v=1$ m/s
1	13.2	8.6	6.7
2	12.3	8.6	6.0
3	12.3	8.15	5.6
4	12.3	7.8	5.0
5	11.0	6.9	4.4
6	10	6.9	4.4
7	10	6.5	4.4
8	10	6.5	4.0
9	10	6.5	4.1
10	9	5.8	3.8
20	8.6	5.5	3.1
30	8.2	4.6	2.8
40	8.2	4.4	2.6
50	8	4.25	2.6
60	8.2	4.1	2.5
70	8.1	4.25	2.5
80		4.2	2.4
90		4.1	2.3
100		4.1	2.4

Tabella III - Rilevamento dei tempi di scansione della mira ottica

La figura 7 riporta l'andamento della velocità del TCP in funzione del tempo misurato a partire dall'inizio del moto: la velocità passa dal valore nullo iniziale al valore nominale con una rampa di accelerazione in un intervallo di tempo dell'ordine di 10^{-1} s.

La figura 8 riporta l'andamento della velocità del TCP in funzione della distanza s , data dal prodotto dell'unità di lunghezza (2 mm) per il numero della riga cui è associata la misura di velocità: dopo un intervallo di 10 cm il TCP ha raggiunto la velocità nominale nel caso in cui la velocità impostata sia di 0,25 o 0,5 m/s; per $v=1$ m/s la velocità effettiva è inferiore a quella nominale anche dopo un percorso di 20 cm.

La figura 9 riporta l'andamento dello spazio s percorso dal TCP in funzione del tempo: s cresce in maniera non lineare a seconda delle accelerazioni caratteristiche relative ai tre diversi valori di velocità nominali.

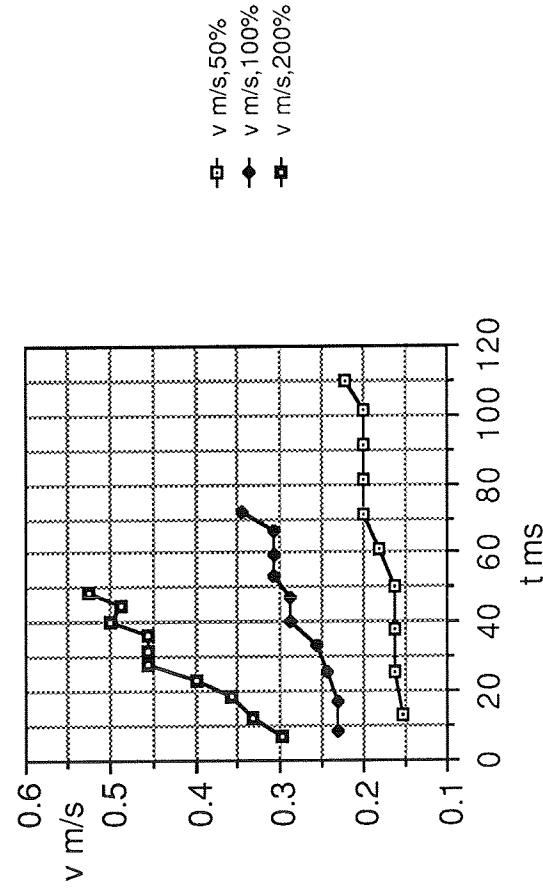


Fig. 7 - Velocità del TCP in funzione del tempo con tre velocità nominali; 100% = 0,5 m/s.

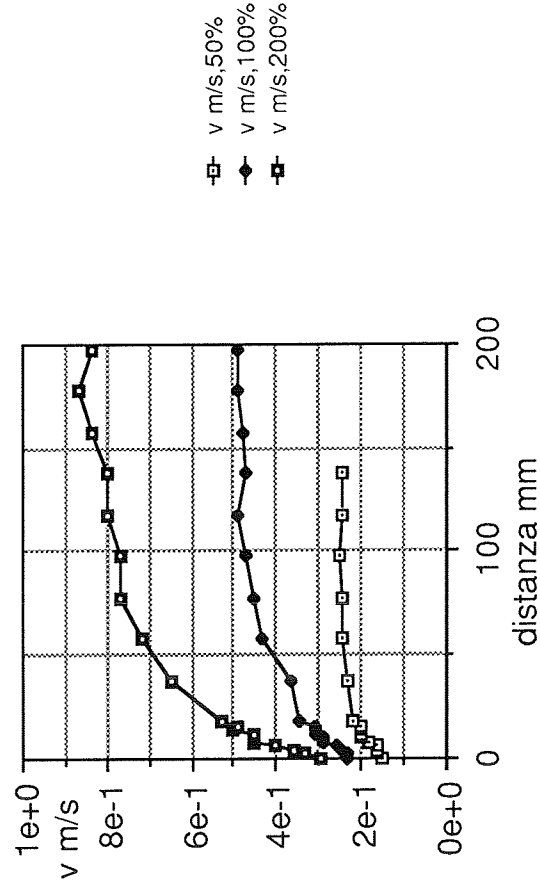


Fig. 8 - Velocità del TCP in funzione della distanza.

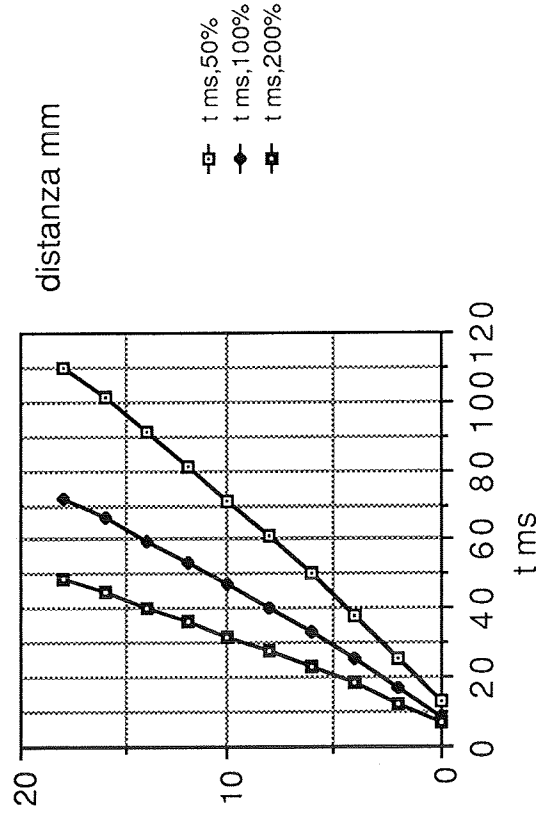


Fig. 9 - Spazio percorso dal TCP in funzione del tempo.

Le figure 10, 11 e 12 riportano le rette di interpolazione lineare sui dati di misura mediante le quali si possono ricavare le accelerazioni medie $a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$. Si ha:

$\frac{m}{s}$	$\frac{m}{a \cdot s^2}$
0,25	0,68
0,5	1,7
1	5,3

Tabella IV - Accelerazioni medie del TCP in funzione della velocità nominale

In realtà l'accelerazione non è costante e quindi le relazioni trovate sono valide solo in prima approssimazione; inoltre, si deve ritenere che l'accelerazione sia funzione anche del carico sulla flangia e degli attriti presenti nel caso di acquisizione di un campione immerso in acqua. In tali condizioni si può stimare che la velocità nominale viene raggiunta dopo un intervallo $l_0 \approx 20$ cm per $v \leq 0,5$ m/s, mentre per $v \geq 1$ m/s il tratto necessario per arrivare a regime è $l_0 > 30$ cm.

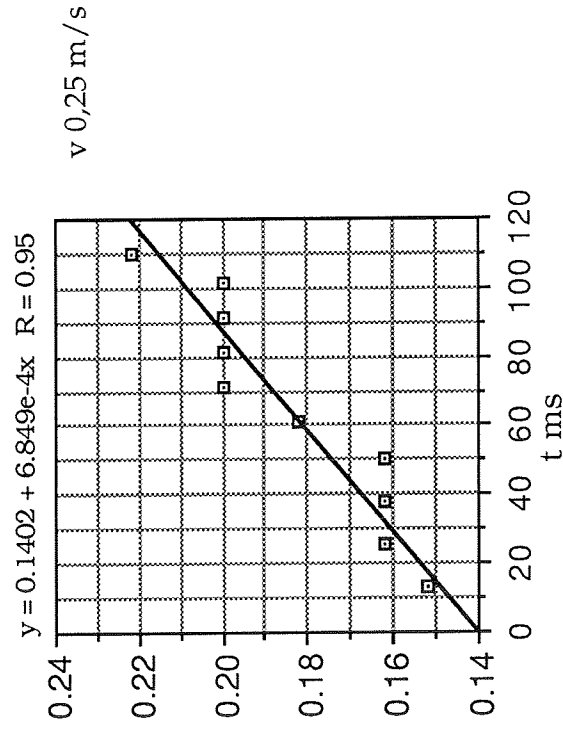


Figura 10 - Variazione media di velocità del TCP in funzione del tempo
 $v = 0,25 \text{ m/s}$

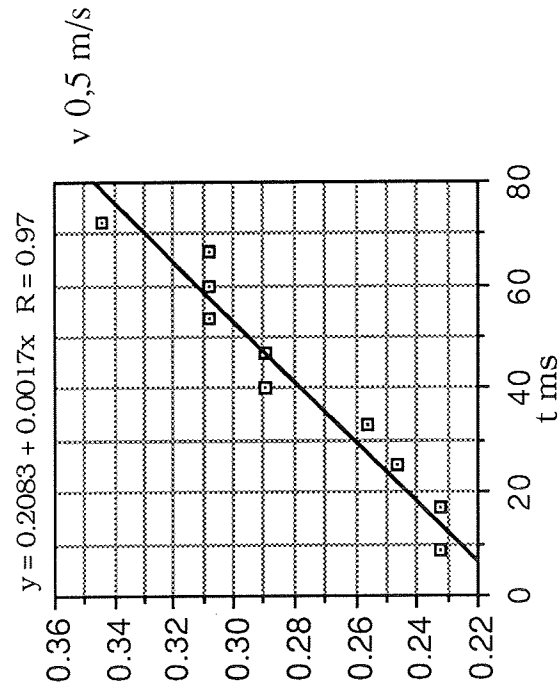


Figura 11- Variazione media di velocità del TCP in funzione del tempo
 $v = 0,5 \text{ m/s}$

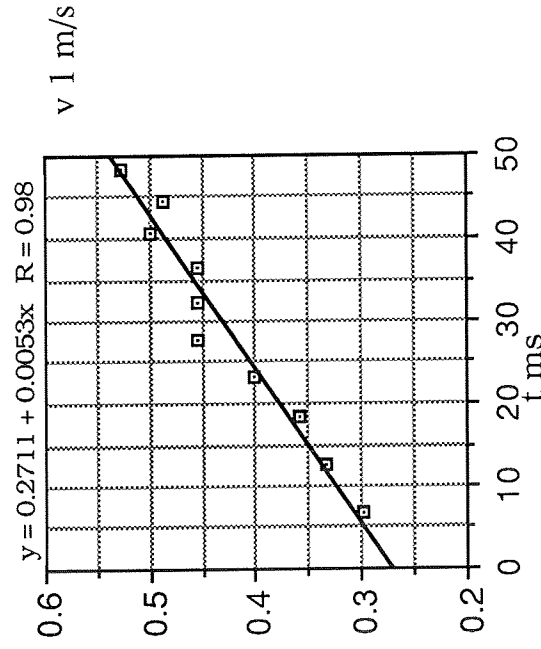


Figura 12 - Variazione media di velocità del TCP in funzione del tempo
 $v = 1 \text{ m/s}$

In base a ulteriori osservazioni (non riportate) si è verificato che le rampe di decelerazione sono simili a quelle di accelerazione: di conseguenza, per avere un intervallo l percorso a velocità costante la corsa effettiva del braccio $l_{\text{tot}} \geq l + 2l_0$ dev'essere aumentata almeno del doppio dei valori specificati in precedenza.

2.2. Generatore a ultrasuoni Echograph 1030

Il generatore è sincronizzato dall'unità di controllo S3 su una porta I/O digitale mediante un impulso positivo di 8 ms di durata; sul fronte positivo dell'impulso il generatore produce il segnale elettrico che pilota la sonda; contemporaneamente sull'uscita TRIG viene prodotto un impulso di sincronismo positivo con ampiezza eguale a 7 V e durata 120 μs . Il periodo di ripetizione del generatore in modo INT è di 2,3 ms; nel modo EXT il generatore accetta sincronismi fino alla frequenza $f = 20 \text{ KHz}$ (periodo di ripetizione di 50 μs), a parte problemi di dissipazione che potrebbero presentarsi a queste frequenze.

Il segnale di ricezione è prelevato attraverso l'uscita US: questo segnale è ricavato mediante trasformazione logaritmica del segnale elettrico generato dal trasduttore in base al segnale di eco riflesso dal

campione; il guadagno del ricevitore è regolabile manualmente con variazioni tarate in dB, mentre la banda passante è regolabile a scatti in maniera grossolana.

2.3. Oscilloscopio LeCroy 9450

In coincidenza col fronte selezionato di un impulso inviato sull'ingresso SYNC, l'oscilloscopio digitalizza il segnale applicato all'ingresso CHAN1 o CHAN2 contenuto nell'intervallo di tempo t_1 determinato dalla regolazione della base dei tempi, ricavando un numero N di dati espressi su 1 byte. I dati acquisiti vengono automaticamente elaborati per ricavare una serie di parametri che possono essere rappresentati sullo schermo dell'oscilloscopio, o trasmessi all'esterno mediante una porta di comunicazione: a causa del tempo necessario per l'elaborazione sui dati, l'oscilloscopio è in grado di acquisire finestre temporali non adiacenti, con un periodo t_0 dipendente dalla base dei tempi selezionata. Questo periodo è misurabile mediante l'uscita TRIG OUT, che produce un impulso negativo con durata $\geq 1 \mu\text{s}$ ogni volta che viene eseguita l'operazione di acquisizione; variando la base dei tempi si sono ottenuti i seguenti risultati:

base tempi	frequenza campion.	numero campioni	durata finestra	periodo
1 ms/div	4 MHz	40.000	10 ms	35 ms
100 μs /div	40 MHz	40.000	1 ms	25 ms
1 μs /div	400 MHz	4.000	10 μs	9 ms
0,5 μs /div	400 MHz	2.000	5 μs	9 ms

Tabella V - Caratteristiche di acquisizione dell'oscilloscopio LeCroy 9450

Il tempo morto t_2 fra due acquisizioni successive è dato dalla differenza tra il periodo misurato e la durata della finestra temporale: questo tempo, eguale a ~ 25 ms nel primo caso e ~ 24 ms nel secondo,

viene impiegato per l'elaborazione dei campioni ($N = 40.000$ in entrambi i casi). Al diminuire della base dei tempi il numero di campioni ricavato da un'acquisizione diminuisce e diminuisce contemporaneamente anche il tempo necessario per l'elaborazione dei dati: la cadenza di acquisizione di conseguenza aumenta.

I valori riportati in precedenza sono ottenuti senza il display della traccia sullo schermo; selezionando i vari tipi di elaborazione sui dati d'ingresso offerti dal menù, la cadenza di acquisizione varia in funzione della complessità dei calcoli da eseguire; ad esempio, con base dei tempi regolata a $0,5 \mu\text{s}/\text{div}$ si ottengono i seguenti risultati:

opzione selezionata	periodo
display traccia	34 ms
disp. traccia e parametri	85 ms

2.4. *Personal Computer*

Il calcolatore è collegato all'oscilloscopio attraverso una porta parallela GPIB, che viene usata per operazioni di comando, controllo e trasmissione dati.

Nel caso di rilevamento di mappe a soglia singola il dato da trasferire nel calcolatore è costituito dal valore massimo del segnale acquisito dall'oscilloscopio e contenuto in una finestra temporale appositamente determinata; il valore massimo viene calcolato automaticamente dall'oscilloscopio ad ogni acquisizione. Il trasferimento del dato avviene mediante due collegamenti attraverso la porta GPIB. Nel primo collegamento il calcolatore interroga l'oscilloscopio per sapere se l'operazione di acquisizione del segnale è stata eseguita; quando la risposta è affermativa, viene eseguito il secondo collegamento per il trasferimento del dato.

La velocità di trasferimento è stata controllata mediante un programma che esegue le operazioni mostrate in figura 13: vengono eseguiti accessi successivi all'unità di controllo del robot e

all'oscilloscopio digitale, simulando che entrambe le apparecchiature siano pronte per il collegamento.

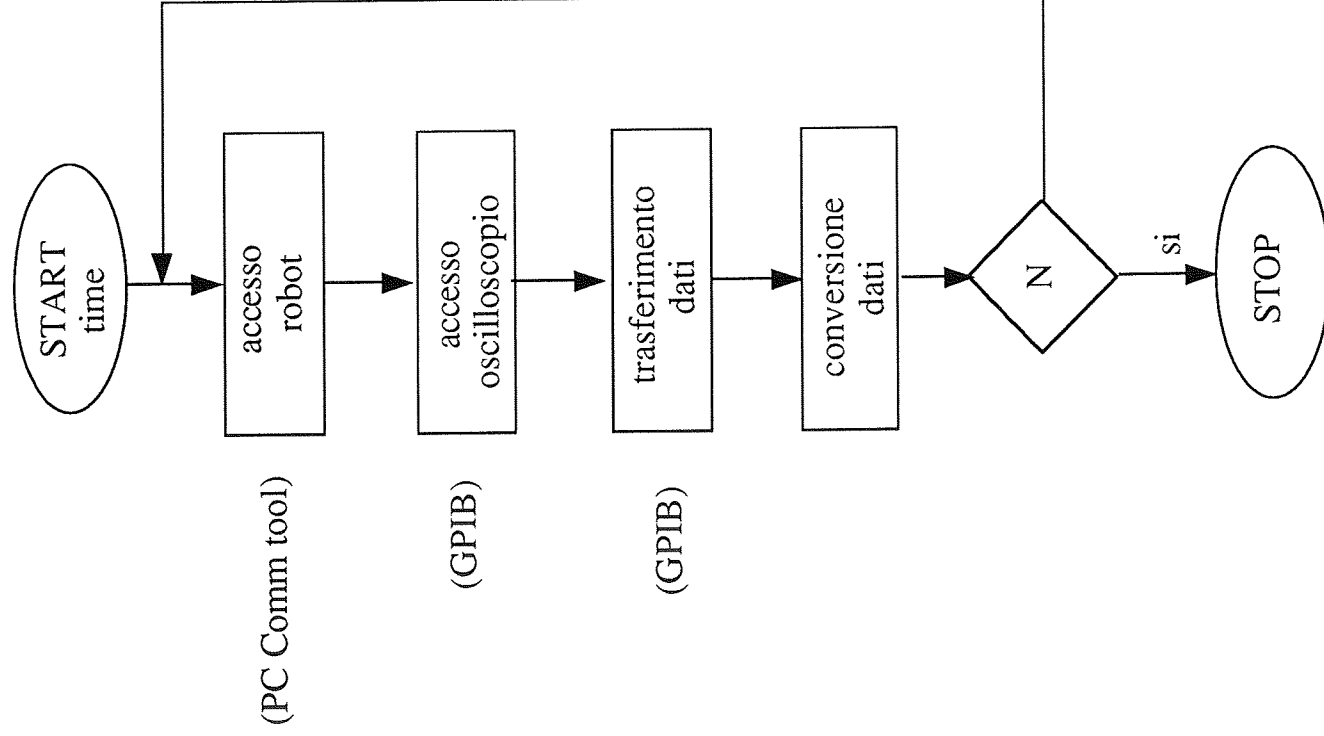


Fig. 13 - Ciclo di operazioni eseguite per determinare la velocità di trasferimento dei dati tra oscilloscopio e calcolatore.

Le operazioni di accesso al robot, per verificare il raggiungimento delle coordinate di misura, e di accesso all'oscilloscopio, per verificare l'avvenuta acquisizione del segnale, richiedono un tempo $t \sim 22 \text{ ms.} \pm 5 \text{ ms}$ La successiva operazione di trasferimento dati, in seguito ad un ulteriore collegamento tramite l'interfaccia GPIB, porta il tempo complessivo al valore $t \sim 32 \text{ ms} \pm 5 \text{ ms}$. Il tempo necessario per la conversione del dato trasferito nel formato usato dal programma di acquisizione è trascurabile: il tempo richiesto per il caricamento del dato di misura nel calcolatore nelle condizioni di simulazione è dunque $t \sim 32 \text{ ms} \pm 5 \text{ ms}$.

Nella procedura effettiva di scansione l'oscilloscopio deve acquisire il segnale d'ingresso e quindi gli accessi all'interfaccia GPIB sono rallentati rispetto alla condizione precedente: ciò comporta un aumento del tempo di caricamento dei dati. Per valutare questo comportamento sono stati inviati all'oscilloscopio dei segnali di sincronismo con periodi di ripetizione diversi e sono stati misurati i tempi necessari per eseguire 10 trasferimenti; i risultati ottenuti con la base dei tempi a $100 \mu\text{s/div}$ sono riportati in tabella VI.

periodo sinc, ms	tempo complessivo T, ms
∞	290
120	390
100	420
90	440
80	480
70	550
60	600
50	600
40	600
30	600
20	600
10	600

Tabella VI - Tempo complessivo per il trasferimento dati dall'oscilloscopio al calcolatore in presenza di segnale di sincronismo.

In assenza di impulsi di sincronismo il tempo medio per un'operazione di trasferimento è dato da:

$$t_3 = 290 \text{ ms}/10 = 29 \text{ ms}$$

che corrisponde, considerando la precisione di misura, al valore determinato in precedenza: questo è dunque il tempo minimo impiegato dal driver che gestisce le porte GPIB per attivare il collegamento.

In presenza di segnali di sincronismo T aumenta perché se è iniziata un'acquisizione l'accesso alla porta di comunicazione viene ritardato del tempo t_e sino al termine delle operazioni correnti; al variare del periodo p_s del segnale di sincronismo si ha:

$$T(p_s) = T_{(\infty)} + M t_e$$

dove M è il numero di acquisizioni eseguite durante il ciclo di letture. La differenza tra $T(p_s)$ e il tempo minimo di trasferimento è dunque proporzionale al numero di segnali acquisiti. Dai dati di misura si ricava:

$$t_e \cong 30 \text{ ms}$$

per p_s inferiore a ~ 70 ms. Quando il periodo di ripetizione degli impulsi di sincronismo scende al di sotto di tale valore, l'attivazione del collegamento fa perdere all'oscilloscopio uno o più impulsi di sincronismo e il tempo di elaborazione apparentemente diminuisce; questo comportamento è mostrato in figura 14.

Le operazioni sono dunque corrette nell'intervallo di periodo di sincronismo compreso tra ∞ e 70 ms: in base all'impulso di sincronismo il segnale viene infatti acquisito dall'oscilloscopio e trasferito al calcolatore prima dell'impulso di sincronismo successivo.

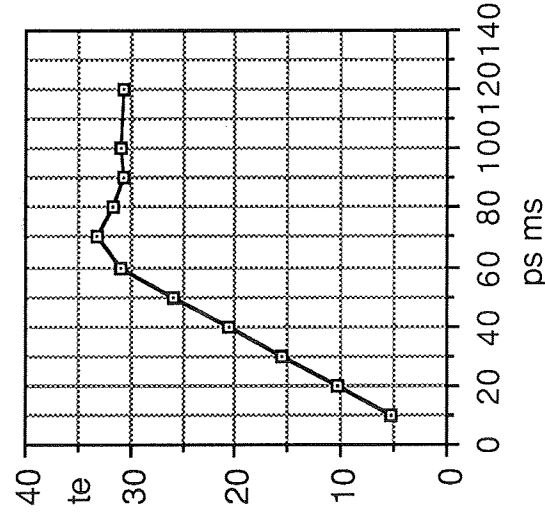


Fig.14 - Tempo apparente di elaborazione t_e in funzione del periodo di sincronismo p_s .

2.5. Influenza dell'orientamento della sonda

La scansione di campioni mediante sonde di tipo focalizzato richiede una notevole precisione dell'orientamento del trasduttore rispetto alla superficie in esame.

Per valutare le tolleranze ammissibili sono state misurate le intensità del segnale di eco riflesso da una superficie metallica piana al variare dell'orientamento dell'asse della sonda.

Mediante un apposito programma la posizione del punto centrale del trasduttore è stata spostata lungo una circonferenza di raggio eguale alla distanza di focalizzazione (5 cm nel caso in esame). La sonda impiegata, tipo KB-Aerotech ALPHA 15 MHz - .25 H114, è stata pilotata col generatore US Echograph 1030; l'ampiezza massima del segnale di eco è stata misurata mediante l'oscilloscopio LeCroy 9450.

L'angolo θ è misurato rispetto alla normale al piano (v. fig. 15). I risultati ottenuti variando l'inclinazione della sonda nel piano yz e nel piano xz del BCS del robot sono riportati in tabella VII e nel grafico di fig. 16.

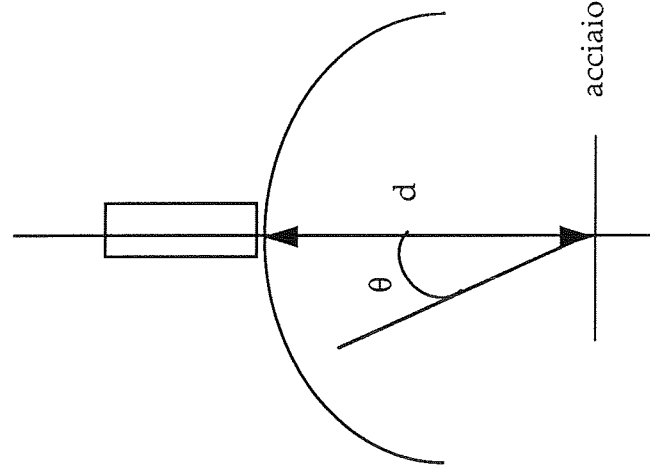


Figura 15 Spostamento della sonda per determinare la risposta in funzione della direzione rispetto alla superficie in esame.

angolo gradi	piano yx	piano xz
-6	0.03	0.04
-5	0.08	0.22
-4	0.17	0.40
-3	0.30	0.86
-2	0.72	1.10
-1	0.82	1.20
0	1.50	1.50
1	1.30	0.96
2	0.76	0.56
3	0.28	0.19
4	0.09	0.12
5	0.08	0.06
6	0.07	0.04

Tabella VII - Segnale di eco rivelato dalla sonda in funzione dell'angolo di inclinazione rispetto alla normale alla superficie del campione

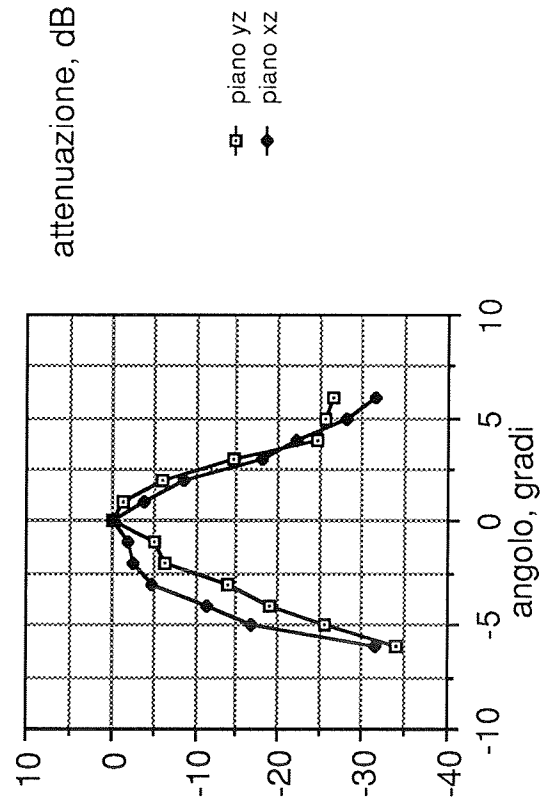


Figura 16 - Rappresentazione su scala logaritmica dei dati di tabella VII.

3. *Analisi generale delle prestazioni*

L'esame di un campione mediante la stazione di lavoro avente la configurazione di figura 3 comporta la concatenazione dei seguenti eventi:

- la sonda si trova sulla n-esima posizione di misura, vale a dire in un punto di coordinate x,y,z nel sistema di riferimento del robot, con la precisione data dalla tolleranza accettata;
- il generatore US emette l'impulso di misura e invia all'oscilloscopio il segnale di eco insieme con l'impulso di sincronismo;
- l'oscilloscopio acquisisce il segnale e, nel caso di misura a soglia singola, calcola il valore di picco del segnale all'interno della finestra temporale selezionata;
- il calcolatore legge attraverso la linea di comunicazione con l'oscilloscopio i dati di misura.

Il ciclo descritto deve terminare prima che la sonda si trovi sulla posizione di misura n+1, per l'inizio della sequenza successiva; i dati trasferiti al calcolatore devono essere organizzati in vettori, eventualmente elaborati e rappresentati sul monitor pilotato dalla memoria video.

A seconda della forma del campione da esaminare si possono realizzare differenti modi di scansione. Allo stadio attuale sono stati esaminati campioni con superfici piane e parallele (laminati): le posizioni di misura sono allora definite da un reticolo a passo costante su un piano $z = \text{cost}$. Si considera dapprima una scansione a soglia singola: essa può avvenire in modo sincrono e asincrono.

3.1. *Scansione sincrona a soglia singola*

In questo caso il movimento del robot si arresta quando la sonda ha raggiunto la posizione di misura: l'unità di controllo S3 genera un impulso di sincronismo e dà inizio allo spostamento necessario per raggiungere il punto di misura successivo.

Il minimo tempo impiegato dal braccio meccanico per compiere un passo $p = 1 \text{ mm}$ è $t_p = 120 \text{ ms}$. In questo tempo mediante due

istruzioni di output viene prodotto un impulso di sincronismo con durata di 8 ms, e vengono eseguite tre istruzioni di tipo logico e un'istruzione di posizione: circa 10^{-1} s sono necessari per percorrere la traiettoria elementare e raggiungere la posizione voluta con la precisione fissa di 0,1 mm.

La durata di t_p è sufficiente affinché il calcolatore possa accedere all'oscilloscopio per il trasferimento del dato, eseguendo anche un controllo per riscontrare eventuali artefatti durante la misura.

Il tempo necessario per l'avanzamento con passi $p > 1$ mm aumenta in maniera non lineare rispetto alla distanza poiché il braccio può raggiungere velocità maggiori; in generale, il tempo t necessario per l'acquisizione di una matrice di $N \cdot M$ valori di misura è dato da:

$$t = (N-1) \cdot M t_p + (M-1) t_r$$

dove t_r è il tempo impiegato per lo spostamento della sonda sull'inizio della riga successiva. Per lunghezze di riga di 10 - 20 cm $t_r \cong 600$ ms; per $N = M = 100$ e passo di 1 mm si ha:

$$t = 100 \cdot 99 \cdot 120 + 99 \cdot 600 \text{ ms} \cong 21 \text{ min}$$

Durante il ritorno di riga il vettore di N punti ricavato durante la scansione della riga precedente viene scritto nella memoria video, in modo che al termine della scansione la mappa di acquisizione è presente sul monitor.

3.2. Scansione asincrona a soglia singola

In questo caso il braccio si muove senza arrestarsi lungo una riga di scansione del pezzo; se la velocità di traslazione v è costante i punti di campionamento possono essere determinati mediante un orologio che produce impulsi con periodo $t_0 = p/v$, dove p è la lunghezza del passo di campionamento.

In base alle verifiche sperimentali descritte in precedenza è possibile determinare sia la lunghezza della corsa di accelerazione necessaria affinché la sonda raggiunga una velocità sostanzialmente costante, sia il tempo trascorso a partire dall'inizio di una riga di scansione: questo tempo costituisce il ritardo di avvio dell'orologio

rispetto all'istante di inizio di riga. Il periodo minimo dell'orologio è $t_0 \cong 80$ ms: infatti, con durate inferiori non è assicurato il corretto funzionamento della sequenza di acquisizione segnale-trasferimento dati tra l'oscilloscopio e il calcolatore. La velocità di traslazione della sonda è dunque data da $v = p \cdot t_0$; per $p = 1$ mm si ha:

$$v \cong 0,01 \text{ m/s}$$

Il tempo necessario per l'acquisizione di una matrice rimane così paragonabile a quello indicato in precedenza per il caso di scansione sincrona.

Una riduzione del tempo potrebbe essere conseguita modificando il criterio seguito per la trasmissione dei dati. Infatti, l'attuale procedura comporta l'interrogazione da parte del calcolatore per riscontrare sull'oscilloscopio il segnale di avvenuta acquisizione; inversamente si potrebbe usare un segnale di interrupt generato dall'oscilloscopio a seguito dell'acquisizione e in base ad esso compiere l'operazione di lettura dati. Si può comunque ipotizzare che questa soluzione, che comporta la gestione dell'interrupt da parte del programma in esecuzione sul calcolatore, ridurrebbe di non più di un fattore 2 il tempo di accesso alla linea di trasmissione: la velocità di traslazione della sonda potrebbe così salire a circa 0,02 m/s.

3.3. Scansione a onda completa

L'acquisizione dei dati da parte dell'oscilloscopio nel caso di rilevamento di onda completa è analoga a quella per il rilevamento a soglia singola. In base al segnale di sincronismo viene infatti campionato e quantizzato il segnale presente all'ingresso dell'oscilloscopio nell'intervallo di tempo determinato dalla base dei tempi; successivamente, quando è presente il segnale di acquisizione avvenuta i dati contenuti in memoria vengono trasferiti al calcolatore attraverso l'interfaccia GPIB.

Mediante le istruzioni per il controllo remoto dell'oscilloscopio digitale è possibile definire il numero complessivo dei dati da trasferire, l'indice di inizio e di fine dei dati e il passo di lettura. Con la base dei tempi impostata a 0.5 $\mu\text{s}/\text{div}$, per ogni acquisizione vengono

ricavati 2000 campioni; il numero effettivo di campioni da trasferire viene limitato per convenienza a 512 campioni/acquisizione.

La velocità di trasferimento dei dati nel caso di acquisizione a onda completa è stata determinata con un programma analogo a quello per la scansione soglia singola illustrato in fig. 13; in questo caso, per ogni lettura vengono trasferiti N dati. Si sono ottenuti i seguenti risultati:

$$\begin{array}{ll} N = 250 & t_3 \cong 34 \text{ ms} \\ N = 2000 & t_3 \cong 66 \text{ ms} \end{array}$$

Ciascun dato è espresso su 2 byte, di cui uno solo è significativo nel caso di trasferimento dei dati grezzi ricavati nell'acquisizione mediante il convertitore d'ingresso a 8 bit; il programma di gestione provvede a compattare i dati trasferiti eliminando i byte a valore zero.

L'operazione di trasferimento dei dati richiede un tempo fisso t_a per l'attivazione del collegamento e un tempo t_b dipendente dalla quantità dei dati da trasferire; si ha:

$$t_b = \frac{N}{f_t}$$

dove f_t è la frequenza di trasferimento dei dati in byte/s. In base ai risultati citati in precedenza si ha $t_a \cong 30 \text{ ms}$ e $f_t \cong 100 \text{ Kbyte/s}$.

Ponendo $N \leq 512$ il tempo necessario alla trasmissione dei dati di acquisizione vale dunque $t_3 \cong 30 \text{ ms}$, che è sostanzialmente uguale al tempo necessario nell'acquisizione a soglia singola per la trasmissione del valore di picco: in questo caso infatti il dato è trasferito in formato ASCII e il processore dell'oscilloscopio deve eseguire conversioni di formato prima di trasferire il dato.

La velocità di traslazione della sonda per una corretta procedura di scansione a onda completa risulta così analoga a quella relativa alla scansione a soglia singola: $v \cong 0,01 \text{ m/s}$.

4. Analisi della velocità di scansione

La velocità di scansione ottenuta con la stazione di lavoro descritta è limitata dal modo di scansione e dal dispositivo usato per l'acquisizione dei dati.

Nel modo di scansione sincrono (peraltro necessario per l'esame di campioni con geometria complessa) si ha un'elevata precisione di puntamento ma una bassa velocità di spostamento: il tempo impiegato dal braccio meccanico per compiere passi elementari di 1 mm è infatti di 120 ms, corrispondente a una velocità di scansione di $v \cong 0,008$ m/s.

Per esaminare campioni con geometrie particolari (superfici piane o definite da una sola funzione generatrice) si può usare il modo di scansione asincrono, se la precisione e la ripetibilità di misura così ottenute sono accettabili. In questo caso la velocità di scansione è limitata dall'oscilloscopio digitale: il tempo necessario per l'acquisizione del segnale ultrasonoro e per la trasmissione dei dati al calcolatore è di ~ 80 ms sia nel caso di misure a soglia singola che di acquisizione a onda completa: la velocità di scansione con passi di campionamento spaziale di 1 mm vale dunque $v \cong 0,012$ m/s.

Per aumentare la velocità di scansione è necessario usare componenti differenti da quelli attuali. Si possono individuare le seguenti soluzioni a seconda del tipo di analisi da eseguire.

4.1 Scansione a soglia singola analogica

La scansione a soglia singola può essere ottenuta con l'architettura mostrata in fig. 17. I componenti che caratterizzano la stazione sono:

- un orologio che genera impulsi con periodo e ritardo programmati;
- un generatore-ricevitore US con finestra temporale selezionabile e uscita analogica con ampiezza proporzionale al valore massimo del segnale all'interno della finestra;
- un convertitore analogico-digitale;
- un'interfaccia parallela per l'acquisizione dei dati e il controllo del convertitore e dell'orologio.

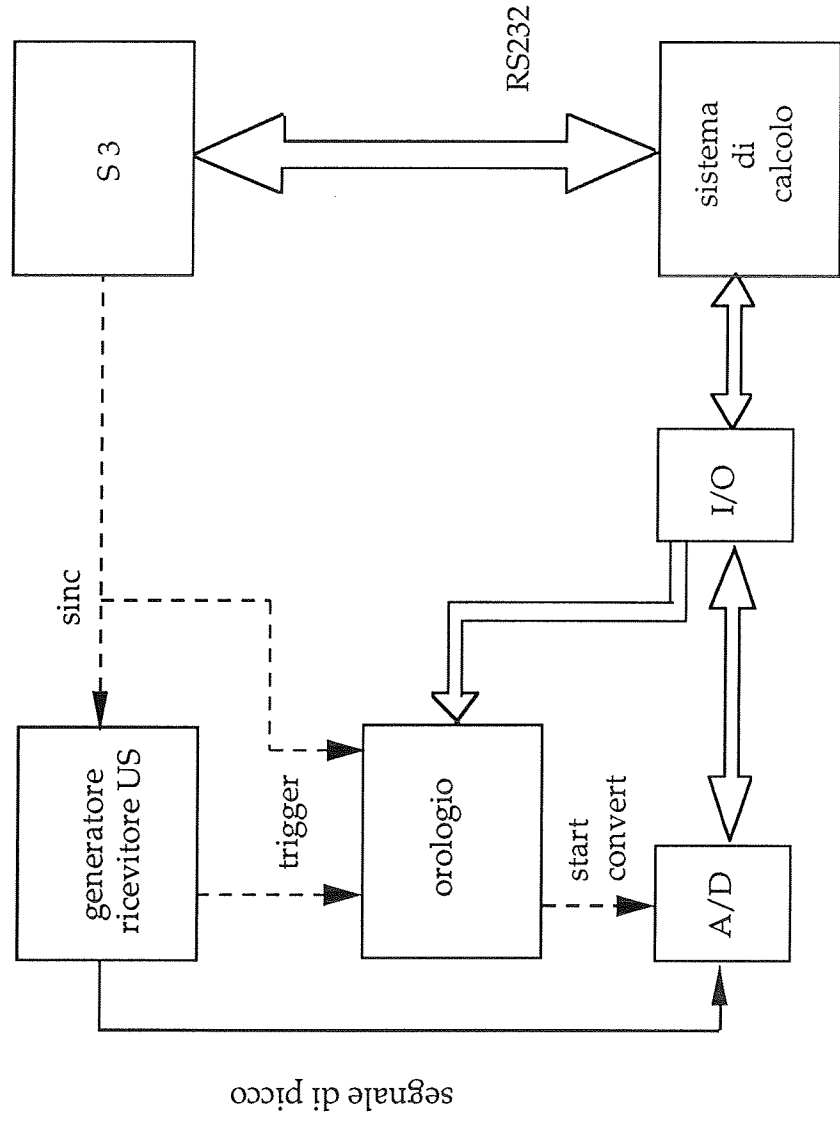


Figura 17 - Stazione di lavoro per la scansione a soglia singola analogica.

L'orologio viene azionato da un sincronismo di riga prodotto dall'unità di controllo S3 attraverso una porta digitale di I/O, mentre il convertitore viene pilotato con un segnale di START-CONVERT opportunamente ritardato rispetto al segnale di TRIGGER del ricevitore US. L'attuale risoluzione di misura è ottenibile impiegando un convertitore lineare a 8 bit se il ricevitore US produce un segnale di picco su scala logaritmica. Alla velocità di scansione di ~ 1 m/s è sufficiente un tempo di conversione di circa $10 \mu\text{s}$; la frequenza di trasmissione dei dati attraverso l'interfaccia parallela vale ~ 1 Kbyte/s.

4.2 Scansione a soglia singola digitale

In questo modo di scansione il valore di misura viene ricavato mediante elaborazione digitale del segnale di eco. L'architettura della stazione diventa quella mostrata in fig. 1: è necessario un convertitore A/D con frequenza di conversione elevata (almeno il doppio della frequenza di risonanza della sonda) e diventa così necessario l'impiego di una memoria tampone in cui i dati vengono inseriti alla frequenza di lavoro del convertitore e da cui vengono prelevati alla frequenza determinata dalla linea usata per il trasferimento nel sistema di calcolo.

I problemi incontrati in questo caso sono analoghi a quelli che si presentano nel caso di scansione a onda completa e sono descritti nel paragrafo successivo.

4.3 Scansione a onda completa

Per illustrare la sequenza delle operazioni compiute in una scansione a onda completa si considera l'esame di un campione con le massime dimensioni esplorabili col sistema multiasse IRB 2000 nella disposizione attuale.

L'area utile di lavoro è $\sim 1,8 \text{ m} \cdot 1 \text{ m}$; si ipotizza dunque una scansione per righe di 1 m di lunghezza, orientate lungo l'asse x del sistema di riferimento, con passo di campionamento di 1 mm.

Il tempo impiegato dal braccio meccanico per compiere lo spostamento di 1 m è $t_r = 1.35 \text{ s}$ alla velocità nominale di 1 m/s; la velocità media di traslazione risulta dunque:

$$\bar{v} = \frac{1 \text{ m}}{1,35 \text{ s}} = 0,74 \text{ m/s}$$

In base alle misure riportate in § 2.1.2 la riga di scansione è suddivisibile in tre segmenti:

- il tratto iniziale di accelerazione, di $\sim 15 \text{ cm}$ (cfr. fig. 8)
- il tratto centrale di $\cong 70 \text{ cm}$ percorso a velocità costante di $\sim 0,8 \text{ m/s}$
- il tratto finale di decelerazione, di $\sim 15 \text{ cm}$.

Durante il movimento della sonda lungo l'intervallo di velocità costante si hanno $N_1 = \frac{70 \text{ cm}}{p}$ punti di misura; per $p=1 \text{ mm}$ si hanno dunque $N_1 \cong 700$ punti/riga.

La fig. 18 riporta gli accessi alla memoria tampone durante una scansione in cui la sonda si muove lungo un percorso a greca.

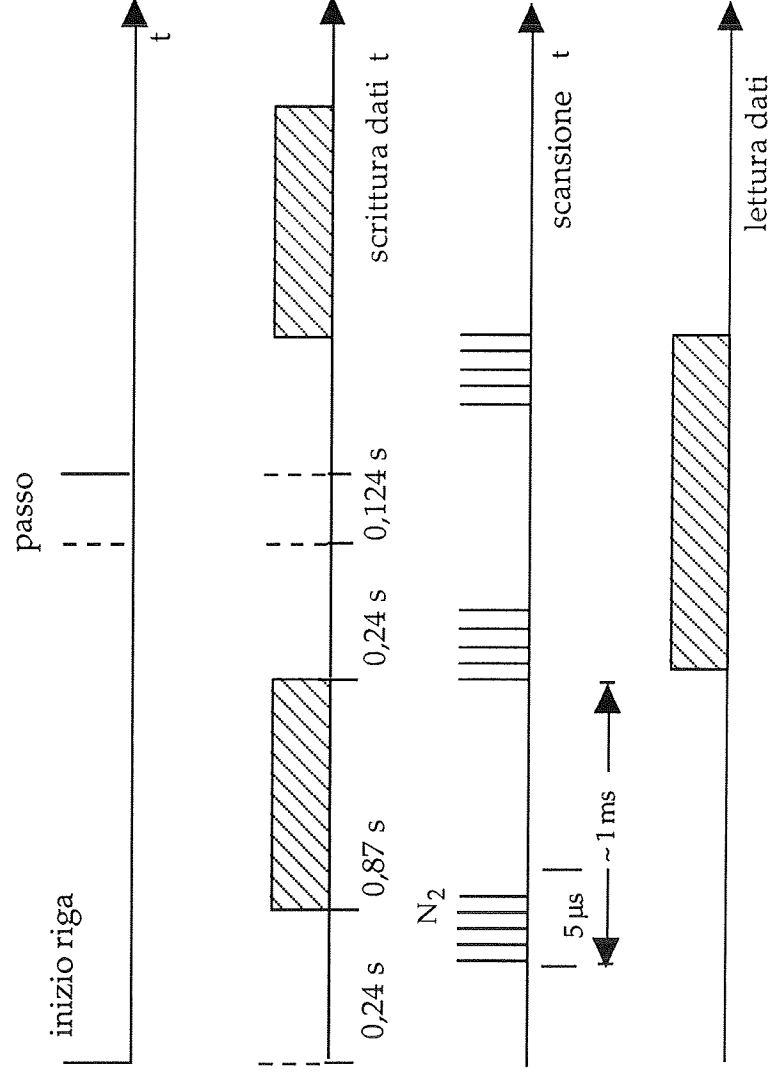


Fig. 18 - Sequenza temporale nella scansione a onda completa con percorso a greca; lunghezza di riga 1 m, velocità nominale 1 m/s.

Dopo $\sim 0,24 \text{ s}$ dal sincronismo di riga si ha un intervallo temporale di $\sim 0,87 \text{ s}$ in cui N_1 blocchi di N_2 dati ciascuno, prodotti dal convertitore A/D, vengono inseriti nella memoria. Il valore di N_2 dipende dalle caratteristiche del campione in esame e dal tipo di sonda usata.

Detta f_r la frequenza di risonanza della sonda, la massima frequenza contenuta nel segnale di eco rilevato dal ricevitore US è sostanzialmente uguale a f_r : la frequenza di campionamento f_c del convertitore A/D, e quindi la frequenza di scrittura del blocco dei dati

in memoria, è dunque $f_c \cong 2f_r$. Se la velocità di propagazione del segnale a ultrasuoni all'interno del campione è v e lo spessore del campione è s la durata Δt del segnale di eco è $\Delta t = \frac{2s}{v}$; il numero di dati/blocco è dunque:

$$N_2 \cong 2f_r \cdot \Delta t \cong 2f_r \frac{s}{v}$$

Questo numero è limitato per convenienza a 512; di conseguenza, fissata v , al crescere dello spessore del campione per mantenere N_2 al di sotto del limite citato può essere necessario usare sonde con frequenza di risonanza più bassa, diminuendo così la risoluzione di misura.

Nell'esempio riportato in figura il tempo Δt è indicato col valore di $5 \mu s$: in questo intervallo è compreso il segnale di eco riflesso da un campione in fibra di carbonio con 5 mm di spessore. Il periodo di ripetizione dei blocchi è assunto $\cong 1 \text{ ms}$, corrispondente ad un passo di campionamento di 1 mm alla velocità nominale della sonda di 1 m/s .

Il tempo di accesso alla memoria tampona attraverso una porta di comunicazione è superiore a 1 ms ; di conseguenza la lettura della memoria può essere eseguita solo al termine della scrittura degli N_1 blocchi di dati ricavati da una riga di scansione, e deve essere completata prima dell'arrivo dei dati ottenuti nella riga successiva. Nell'esempio mostrato questo tempo è di $\sim 0,6 \text{ s}$, determinato dai tempi di percorrenza degli intervalli di accelerazione e dal tempo impiegato per l'avanzamento di un passo nella direzione normale a quella di scansione ($\sim 0,12 \text{ s}$).

Il numero N_3 di dati da trasferire al termine della riga è dato da:

$$N_3 = N_1 \cdot N_2 \leq 700 \cdot 512 = 350 \text{ Kbyte}$$

Il tempo t_t necessario per la trasmissione dei dati è:

$$t_t = t_a + \frac{N_3}{f_t}$$

dove t_a è il tempo di accesso alla porta (~ 30 ms) e f_t è la frequenza di trasmissione dei dati. Per N_3 sufficientemente grande t_a è trascurabile e quindi la condizione affinché sia $t_t < 0,6$ è data da:

$$f_t > \frac{N_3}{0,6 \text{ s}} \cong 600 \text{ Kbyte/s}$$

Queste velocità di trasmissione sono al limite delle prestazioni ottenibili con porte parallele di tipo GPIB: è quindi opportuno o aumentare la dimensione della memoria tampone o diminuire la velocità di scansione per aumentare l'intervallo di tempo disponibile per la lettura.

Supponendo di scaricare la memoria al termine della scansione, la dimensione necessaria per il caricamento dei dati è:

$$N_4 = N_3 \cdot \text{numero righe} \cong 350 \text{ MByte}$$

Questo è il quantitativo di dati ricavato da un'area di $1 \text{ m} \cdot 1 \text{ m}$ con 512 campioni/punto; se la dimensione della memoria è inferiore a N_4 o si limita l'area esplorabile oppure si arresta la scansione al termine di un gruppo di righe.

Se si esegue una scansione di tipo raster, vale a dire con acquisizioni in un solo verso di movimento, la memoria può avere una capacità di 350 KByte e può essere svuotata ad ogni riga di scansione. La sequenza delle operazioni compiute in questo caso è mostrata in fig. 19. Il tempo utile di lettura diventa di $\sim 1,83$ s e la condizione per il trasferimento dei dati verso il sistema di calcolo vale:

$$f_t > 191 \text{ Kbyte/s.}$$

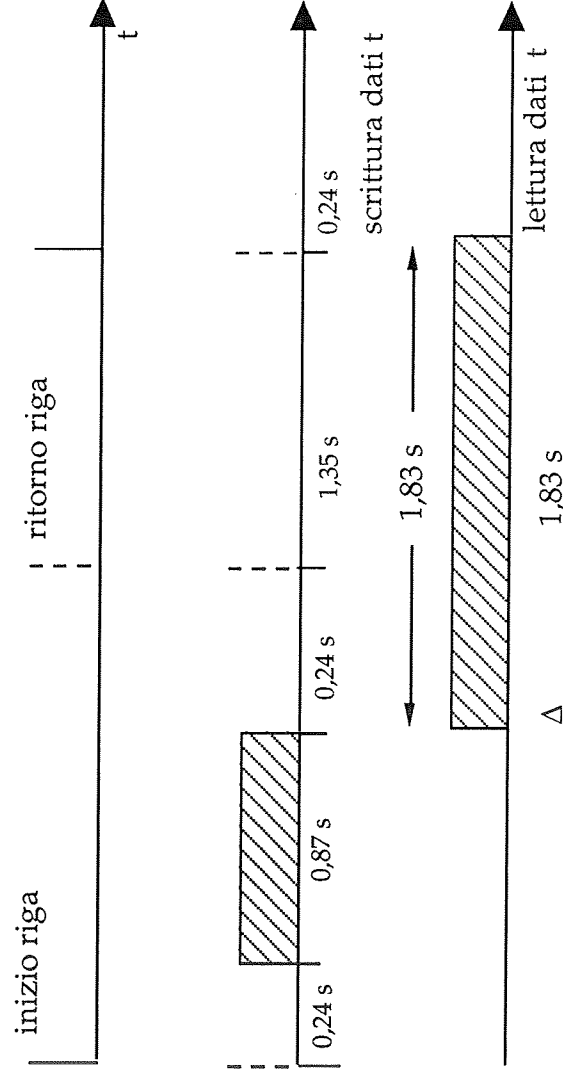


Fig. 19 - Sequenza temporale nella scansione a onda completa con percorso raster; lunghezza di riga 1 m; velocità nominale 1 m/s.

In pratica è necessario ottenere velocità di trasmissione superiori al valore indicato in quanto è necessario trasferire i dati dalla memoria tampone alla memoria centrale del calcolatore e da qui a una memoria permanente. Nel caso di impiego di unità a disco magnetico si possono ipotizzare tempi di accesso di ~ 20 ms e velocità di scrittura $f_1 \sim 1$ Mbyte/s; la condizione di scaricamento della memoria durante una scansione asincrona in modo raster diventa dunque:

$$\frac{N_3}{f_t} + \frac{N_3}{f_1} < 1,83 \text{ s}$$

da cui si ricava:

$$f_t > 233 \text{ Kbyte/s}$$

La durata complessiva di una scansione raster su un'area di 70 cm • 1 m vale:

$$T = 1000 \text{ righe} \cdot 2,7 \frac{\text{s}}{\text{riga}} \cong 45 \text{ min.}$$

Al termine della scansione la matrice prodotta è archiviata su disco e occupa 350 MByte; sono necessari un'unità dedicata e singoli supporti magnetici per ciascuna acquisizione.

La gestione di una matrice avente la dimensione suddetta presenta notevoli difficoltà di realizzazione; inoltre, pur disponendo al termine della scansione dei dati grezzi di documentazione riutilizzabili a più riprese, l'operazione di individuazione dei difetti richiede anch'esso sia un notevole tempo di esecuzione sia una complessa procedura di gestione ed elaborazione dei dati.

L'intera matrice può essere esplorata solo per sottomatrici, ottenendo ogni volta un grafico o un'immagine su dispositivi video grafico pittorici in grado di rappresentare circa 1 M pixel; l'intero campione può quindi essere esaminato con un migliaio di operazioni successive di accesso ai dati e loro rappresentazione.

Le tabelle VIII e IX riportano alcuni valori significativi per scansioni a onda completa con percorso a greca e raster alle seguenti condizioni operative:

velocità nominale della sonda	$v = 1 \text{ m/s}$
spessore del campione	$s = 5 \text{ mm}$
frequenza di risonanza sonda	$f_s = 15 \text{ MHz}$
numero di dati per punto	$N_1 = 200$

Le immagini sono rappresentate mediante una memoria video di 1 MByte e ogni punto di misura dà origine ad una riga di 200 pixel.

risoluzione spaziale mm	tempo di scansione min.	dimensione mem. tamp. byte	righe scansione/ immagine	numero immagini
1	21	140 M	5	200
2	21	35 M	10	50
3	21	15 M	15	22

Tab. VIII - Dati relativi a una scansione a onda completa con percorso a greca

risoluzione spaziale mm	tempo di scansione min.	dimensione mem. tamp. byte	dimensione matrice byte	righe scansione/ immagine	numero immagini
1	45	140 K	140 M	5	200
2	45	70 K	35 M	10	50
3	45	47 K	15 M	15	22

Tab.IX - Dati relativi a una scansione a onda completa con percorso a raster

5. Soluzioni per stazioni ad alta velocità

La procedura di esame più efficiente sembra essere quella già ipotizzata nelle fasi iniziali del progetto e illustrate nel rapporto B4-64, consistente in una prima scansione completa del campione con rilevamento a soglia singola, e in successive scansioni a onda completa limitate alle zone di difetto riscontrate sulla prima mappa.

La scansione a soglia singola analogica di un'area utile di 70•100 cm richiede ~ 21 min; al termine della scansione la mappa ricavata è definita da 700•1000 punti è rappresentata sullo schermo di un dispositivo video e le zone di difetto possono essere individuate in maniera automatica o interattiva, in modo da definire le coordinate di scansione a onda completa.

Sono state così definite tre possibili architetture di stazione di lavoro, che differiscono per alcuni componenti; gli esempi sono riportati di seguito.

5.1 Esempio A

La fig. 20 mostra una possibile architettura di una stazione di lavoro in grado di compiere:

- la scansione a soglia singola mediante digitalizzazione del segnale di picco rilevato dal ricevitore US all'interno della finestra temporale prefissata;
- la scansione a onda completa sincronizzata, con arresto del braccio meccanico ad ogni punto di misura.

Il segnale di picco prodotto da US è trasformato in forma digitale dal convertitore A/D di una scheda THEMIS TSVM 403 da inserire nel sistema SVP; la scheda riceve l'impulso di trigger da US e lo ritarda in funzione della posizione della finestra temporale. La mappa ottenuta è esplorabile con un'operazione di panning sulla memoria video dell'SVP con finestra di rappresentazione di 512•512 pixel.

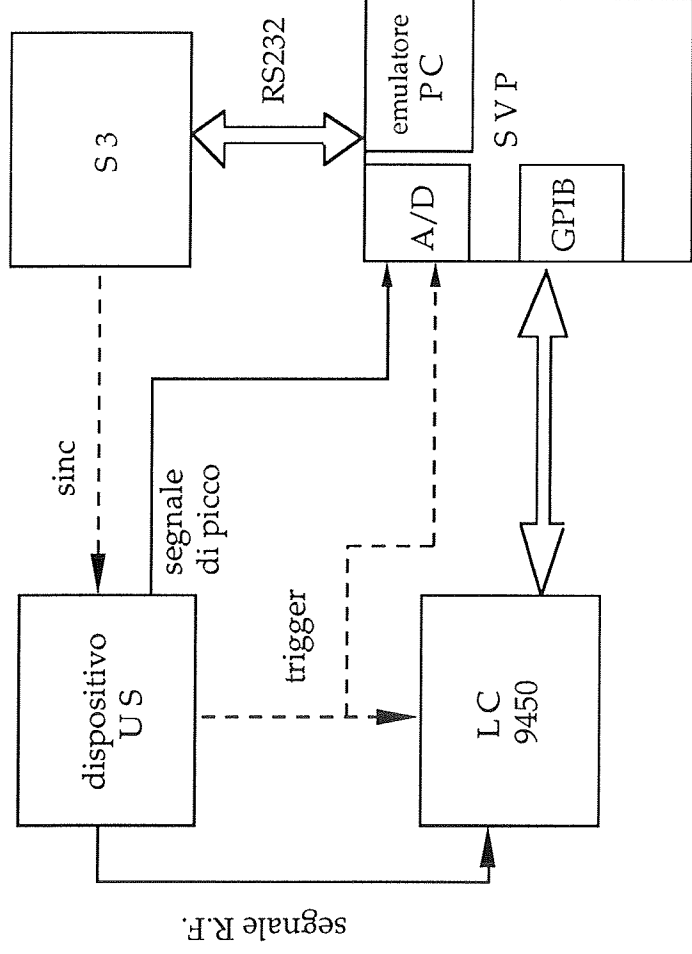


Fig. 20 - Architettura di una stazione per l'acquisizione a soglia singola analogica e a onda completa sincronizzata.

Nella scansione ad onda completa, l'oscilloscopio LeCroy 9450 svolge la funzione di conversione A/D e di memoria tampone per i dati ricavati per ogni punto di esplorazione.

La velocità di scansione è limitata, secondo quanto detto nel § 3.3, a 0,08 m/s. Questo limite può essere accettabile se le dimensioni dell'area da esplorare con rilevamento a onda completa sono limitate; ad esempio un'area di 3•3 cm viene esplorata con passi di 1 mm in meno di 5 min, durante i quali è possibile compiere anche operazioni di correzione sui dati di ingresso.

Il tempo necessario per esaminare il campione dipende dal numero di difetti rivelati sulla mappa a soglia singola; detto N questo numero, il tempo t è dato da:

$$t = 21 \text{ min} + N \cdot 5 \text{ min.}$$

5.2 Esempio B

La figura 21 mostra una possibile architettura di una stazione di lavoro in grado di compiere:

- la scansione a soglia singola analogica;
- la scansione a onda completa in modo asincrono con percorso a raster.

Il segnale a radio frequenza o il segnale di picco presenti sulle uscite analogiche del ricevitore US, sono inviate sugli ingressi di un digitalizzatore con memoria tampone ad accesso veloce in grado di immagazzinare i dati ricavati durante una riga di scansione del campione. Con questo dispositivo si possono eliminare i tempi impiegati dall'oscilloscopio digitale per le operazioni di elaborazione, avvicinando così le finestre temporali in cui si possono acquisire i dati e permettendo dunque di esplorare il campione con la sonda che si sposta anche a 1 m/s.

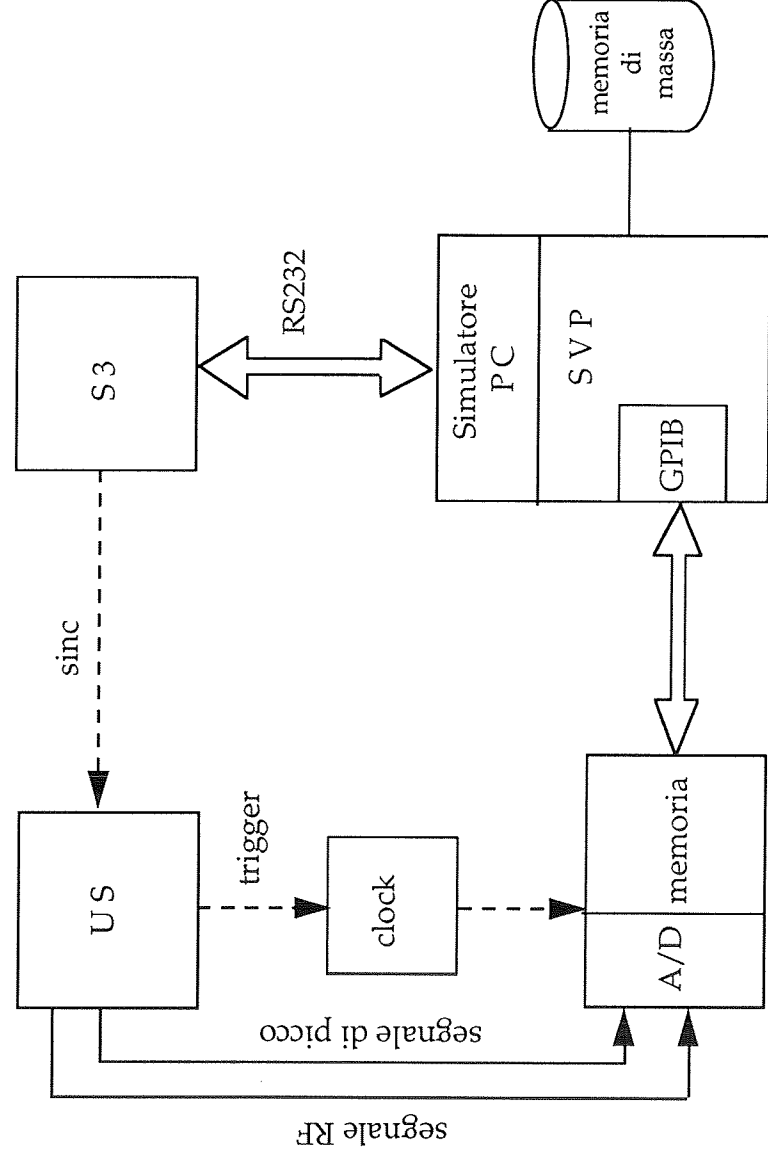


Fig. 21 - Architettura di una stazione per l'acquisizione a soglia singola analogica e scansione a onda completa asincrona e movimento raster.

Il dispositivo di digitalizzazione può ad esempio essere costituito da un TR 8828D LeCroy con un generatore di gate 2323A o 4222 LeCroy. In questo modo in una memoria digitale, segmentata opportunamente, è possibile scrivere le sequenze di dati ricavate in ciascun punto di misura a onda completa e campionati alle necessarie frequenze, oppure, impostati correttamente i valori sul generatore di gate, i singoli dati di misura ottenuti in ciascun punto della scansione a soglia singola.

La memoria viene scaricata dal calcolatore ospite attraverso una porta GPIB; i dati di scansione possono essere immagazzinati temporaneamente nella memoria video dell'SVP in modo da ottenere al termine della scansione una mappa $f(x,y)$ nel caso di rilevamento a soglia singola, oppure le immagini di tipo $f(x,y)$ o $f(y,z)$ nel caso di scansione ad onda completa (cfr. B4-64, § 5.3.2).

Una memoria tampone di 50 Kb può immagazzinare i dati prodotti da una riga composta di 100 punti, ciascuno dei quali dà origine a 512 byte: con risoluzione spaziale di 1 mm si possono dunque esplorare righe con lunghezza utile di 10 cm. Supponendo di esaminare con l'onda completa aree di interesse di forma quadrata, si ricaverebbero 5 Mb da un'area con lato di 10 cm che potrebbero essere memorizzati temporaneamente su una memoria video avente questa capacità.

Il tempo necessario per la scansione di una riga di 100 punti con sonda che si sposta alla velocità di 1 m/s e con una velocità di trasmissione attraverso la porta GPIB di 200 Kb/s, è di circa 0,4 s; il tempo impiegato per esplorare l'intera area di 10 cm • 10 cm è di ~ 1 min, contro i ~ 20 min richiesti nel caso di scansione ad onda completa sincronizzata.

Al tempo impiegato per la scansione meccanica va sommato il tempo necessario per trasferire i dati dalla memoria video nell'archivio permanente: la conversione nel formato standard per l'archivio e la scrittura su disco di 5 Mb richiede ~ 2 min.

5.3 Esempio C

La figura 22 mostra un'altra possibile soluzione per la procedura di scansione descritta al punto precedente. In questo caso la digitalizzazione del segnale analogico viene fatta impiegando una scheda di acquisizione SCRIBA da realizzarsi opportunamente. La scheda è in grado di acquisire con frequenza di campionamento fino a 100 MHz in base agli impulsi di sincronismo esterni e a ritardi programmabili via software.

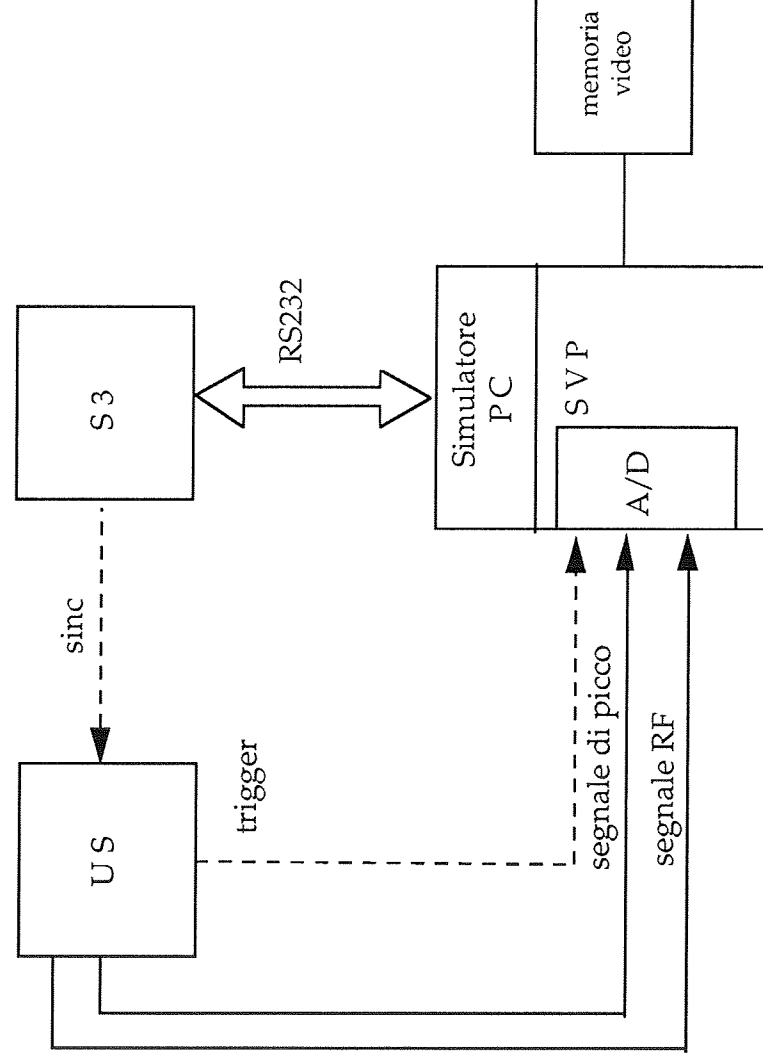


Figura 22 - Architettura di una stazione integrata per acquisizione di mappe US

I dati digitali così prodotti vengono inviati direttamente e in real time sulla memoria video e segmentandoli con moduli 256 o 512 byte; con una memoria di 5Mb si possono immagazzinare i dati ricavati dalla scansione citata nell'esempio precedente. La velocità di traslazione della sonda e il tempo impiegato per la scansione della regione di interesse

possono restare uguali a quelli citati al punto precedente; con questo tipo di soluzione si possono però compiere ulteriori operazioni in tempo reale. Infatti i dati ricavati da ciascun punto di misura (≤ 512 byte/punto) possono essere corretti facendo uso delle tavole di look-up di ingresso e scritti nella memoria video.

L'intervallo di 1 ms fra i treni di byte fra due punti successivi all'interno di una riga di scansione e l'intervallo di circa 250 ms al termine di ogni riga di scansione (v. fig. 18) possono essere usati per compiere le operazioni di conversione di formato e scrittura nel disco magnetico: al termine della scansione del campione si possono così avere sia le mappe corrette rappresentate sul monitor pittorico della stazione sia il file dei dati in archivio.

Per concludere riportiamo le grandezze caratteristiche di scansione ipotizzabili per l'esame di un campione "Control Tab" MD80.

I campioni di questo tipo hanno un inviluppo definito da una singola funzione generatrice; si può dunque eseguire una scansione asincrona con la sonda che si sposta lungo la dimensione maggiore del campione (99 cm) con moto di traslazione. Per ciascuna riga di scansione deve essere definito l'orientamento della sonda; il sistema di calcolo deve quindi inviare all'unità di controllo del robot i valori dei quaternioni ricavati in precedenza dal profilo del campione.

Vista la forma di esso, e poiché il braccio meccanico non può immergersi nell'acqua, l'intera scansione deve essere eseguita in almeno due fasi facendo assumere al campione posizioni adeguate.

Supponendo quindi di avere determinato nella maniera corretta la posizione del campione e le coordinate di misura (e disponendo di una vasca con dimensioni opportune) si hanno le specifiche riportate in tabella X, dove la velocità di traslazione è posta $v=1$ m/s su una corsa complessa di riga di ~ 130 cm comprendente gli intervalli di accelerazione e decelerazione.

passo mm	dati/punto byte	p/riga	dati/riga byte	# righe	# dati byte	t/riga s	t/faccia min
1	512	1000	500 K	420	210 M	5	~ 18
1	256	1000	250 K	420	105 M	5	~ 18
2	512	500	250 K	210	52 M	5	~ 18
2	256	500	125 K	210	26 M	5	~ 18

Tabella X - Specifiche relative alla scansione raster asincrona di un Control Tab MD80

Il valore del passo di campionamento e il numero dei dati per punto (dipendente dallo spessore del campione) determinano sia il numero di punti per riga sia la quantità complessiva dei dati ricavati dalla scansione; il numero di righe è determinato dallo sviluppo del profilo, assunto eguale a 42 cm.

I tempi indicati sono approssimativi; il tempo di riga deve infatti essere verificato in condizioni operative quando all'unità di controllo del robot vengono trasferiti i parametri di scansione; il tempo complessivo di scansione è dato dal doppio del valore indicato in colonna 8; si richiedono infatti ~ 18 minuti per ciascuna faccia e alcuni minuti per riposizionare il campione fra le due scansioni.

La figura 23 mostra la costruzione di matrici volumetriche di dati ricavati dalla scansione delle due facce (A e B) di un Control Tab MD80. Con passo di campionamento di 1 mm e con 512 byte/punto si ottiene una matrice di 210 Mb; con passo $p = 2$ mm e con 256 byte per punto si ottiene una matrice di ~ 26 Mbyte.

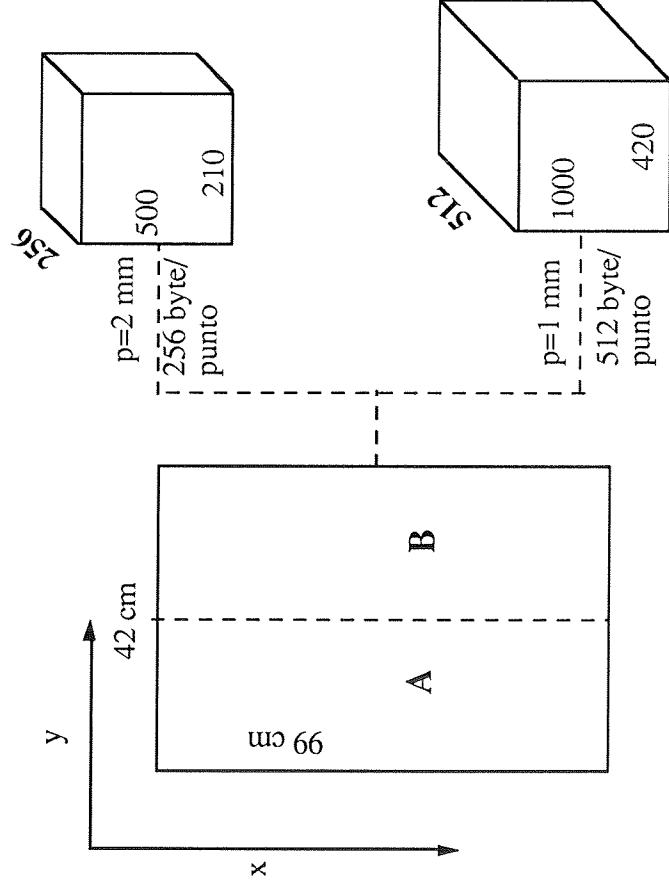


Figura 23 - Esempio di matrici volumetriche di dati ricavate dalla scansione di un campione.

Conclusioni

La stazione di lavoro nella configurazione attuale, che contiene in particolare l'oscilloscopio digitale LC 9450, ci sembra offrire notevoli vantaggi nelle applicazioni di laboratorio ove si intendono esaminare le caratteristiche di materiali o valutare la natura di difetti con dimensioni contenute.

In queste applicazioni infatti la bassa velocità di scansione è ampiamente compensata sia dalla precisione e ripetibilità di misure spaziali ottenute con la scansione sincronizzata, sia dalla possibilità di regolazione tipiche dell'oscilloscopio impiegato, che consente anche di osservare il grafico del segnale di eco durante la scansione. Inoltre la scansione a bassa velocità di tipo sincro è indispensabile nell'ipotesi in cui si vogliono esaminare campioni con superfici complesse, in cui la normale alla superficie può variare in entrambe le direzioni di scansione.

L'esame di campioni con superfici la cui normale vari soltanto in una direzione, può essere eseguita mediante la scansione di tipo asincrono, che è caratterizzata da minore precisione e maggiore velocità rispetto alla scansione sincro.

Per applicazioni di questo tipo, che sono richieste nel controllo di qualità durante il processo di produzione, ci sembra più indicata la stazione di lavoro illustrata nel § 5.3.: questa stazione infatti presenta sia caratteristiche di efficienza e di relativa flessibilità che di semplicità e velocità di gestione.

La quantità di dati ricavabili dalla scansione a onda completa di superfici di $\sim 1 \text{ m}^2$ è notevolmente elevata anche usando una risoluzione spaziale contenuta; l'archivio necessario per immagazzinare i file volumetrici con dimensioni dell'ordine di 10^2 Mb ricavati da ciascun campione dev'essere realizzato mediante memorie adeguate; inoltre sono necessarie reti di comunicazione ad altissima velocità per la trasmissione dei dati.

L'esame dei dati ricavati durante l'acquisizione al fine di individuare e caratterizzare eventuali difetti previsti nel campione consiste nella ispezione di un gran numero di immagini e richiede sia un notevole tempo che una continua interazione da parte dell'utente: ci

sembra così opportuno eseguire una prima scansione a soglia singola in modo da ottenere una mappa osservabile con una o due finestre di immagine, in modo di individuare rapidamente su di essa le eventuali zone di interesse sulle quali eseguire le analisi più accurate consentite dai corrispondenti dati di rilevamento ad onda completa.

La soluzione proposta fa uso di una scheda di conversione A/D da realizzarsi appositamente e da inserire nel video bus del sistema SVP 2000 Scriba; la massima frequenza del convertitore è di 100 MHz e quindi con questa soluzione si possono impiegare sonde con frequenza di risonanza fino a ~ 50 MHz, l'impiego di frequenze di campionamento superiori non fornisce ulteriori vantaggi mentre complica la gestione dei dati e riduce ulteriormente la velocità complessiva di indagine.

L'architettura generale della stazione risulta molto semplificata e di conseguenza risultano ottimizzate sia la sua gestione, sia l'affidabilità e l'efficienza.