

IST. EL. INF.
BIBLIOTECA
Posz. *ARCIUO*

Consiglio Nazionale delle Ricerche

**ISTITUTO DI ELABORAZIONE
DELLA INFORMAZIONE**

PISA

ELEMENTI D'INTRODUZIONE AL TRATTAMENTO DI
IMMAGINI

L. Azzarelli, M. Chimenti

Nota interna B81-04

Marzo 1981

Indice

1	Definizione di immagine	pag.	2
2	Digitalizzazione di immagini	"	10
2.1	Processo di campionamento	"	10
2.2	Processo di quantizzazione	"	13
3	Trattamento di immagini digitalizzate		15
3.1	Acquisizione d'immagini	"	15
3.2	Elaborazione d'immagini	"	24
3.3	Produzione di documenti	"	27
3.4	Gestione d'archivio	"	27

Introduzione

Nel lavoro sono accennati alcuni aspetti relativi al trattamento digitale d'immagini; la descrizione è rivolta ad un pubblico non specializzato nel settore, e di conseguenza si è seguito un criterio di massima semplicità, evitando il più possibile il ricorso alle formulazioni matematiche che sono necessarie per una trattazione più approfondita.

1. Definizione di immagine

Un oggetto luminoso O emette direttamente o per riflessione una radiazione; parte di questa radiazione è intercettata dalla lente L ; sul piano α , posto ad una particolare distanza dalla lente, si forma l'immagine dell'oggetto O . (V. fig.1).

L'immagine è, da un punto di vista fisico-matematico, una funzione f delle variabili λ, x, y : λ è la lunghezza d'onda della radiazione, x ed y sono le coordinate di un sistema di riferimento posto sul piano α . Escludiamo subito una dipendenza dal tempo e consideriamo quindi solo immagini statiche.

Alla grandezza fisica λ si può associare la sensazione di colore; l'occhio è sensibile alle radiazioni elettromagnetiche di lunghezza d'onda compresa tra $\sim 400 \text{ um}$ e $\sim 700 \text{ um}$, e quindi le immagini osservabili direttamente sono formate da radiazioni la cui lunghezza d'onda è compresa nell'intervallo citato. Si possono però formare anche delle immagini, invisibili all'occhio ma rilevabili tramite appositi sensori, mediante radiazioni appartenenti alle porzioni infrarosso o ultravioletto dello spettro di radiazione elettromagnetica. (V. fig.2).

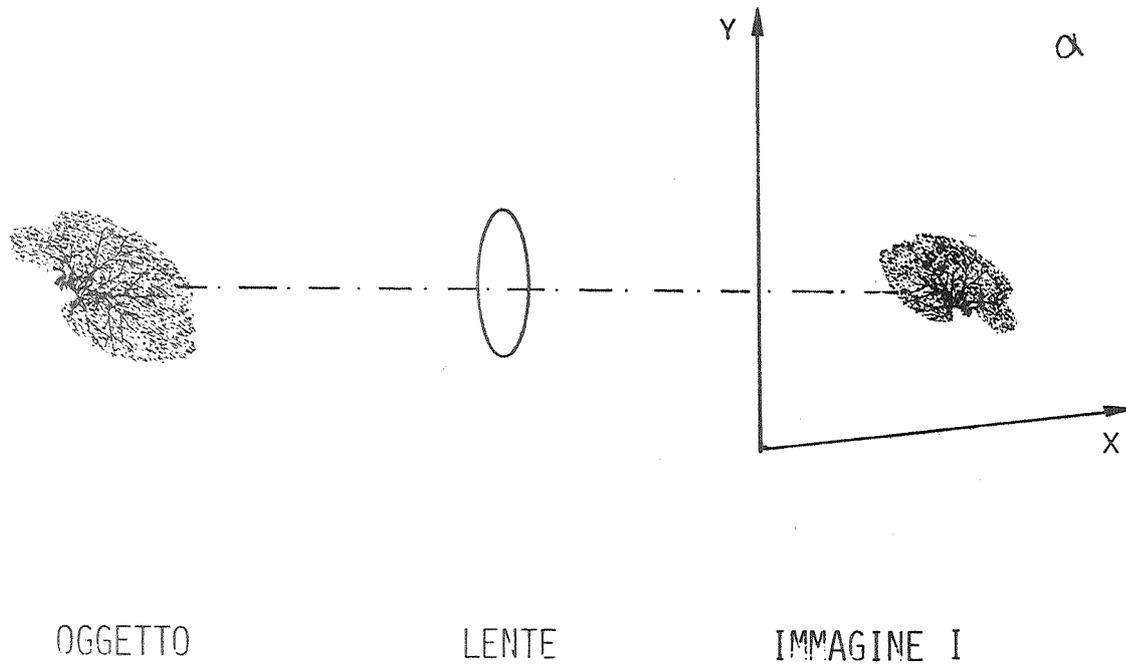
Per semplificare l'esposizione consideriamo però soltanto delle immagini monocromatiche in cui la variabile λ assume un solo valore; possiamo così definire "immagine" la funzione di due sole variabili $f(x, y)$.

Fatta questa semplificazione, possiamo suddividere queste immagini di tipo monocromatico in due classi:

- Immagini grafiche
- Immagini pittoriche

Definiamo immagini grafiche quelle per le quali la funzione f , definita in un certo dominio, può assumere due soli valo

FORMAZIONE DI UN'IMMAGINE



$$I = F(X, Y; \lambda; T)$$

FIG. 1

SPETTRO ELETTROMAGNETICO

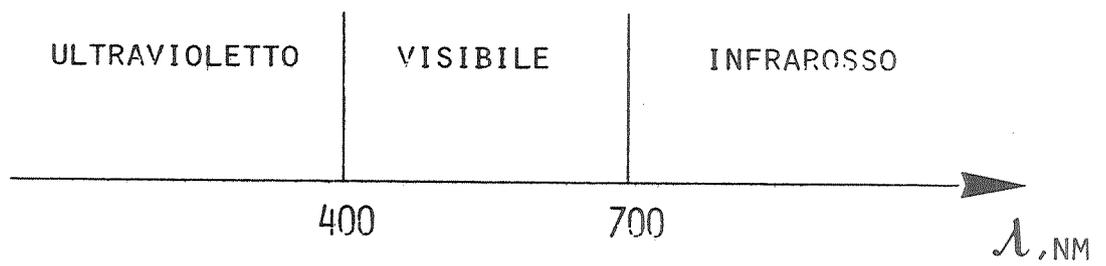


FIG. 2

ri: (v. fig.3)

$$f(x,y) = \begin{cases} f_0 \\ f_1 \end{cases}$$

I due valori possibili f_0 e f_1 possono essere indicati con una coppia qualsiasi di simboli, cosicché le immagini di questo tipo possono essere chiamate anche immagini binarie: usando questo termine si intravede subito la possibilità di impiegare un calcolatore - che funziona secondo la logica binaria - per trattare in qualche modo questo tipo d'immagini.

La $f(x,y)$ che caratterizza un'immagine grafica può essere espressa in forma analitica o no; in entrambi i casi, come vedremo, è possibile compiere elaborazioni mediante un calcolatore digitale.

Per riassumere, una immagine di tipo grafico può assumere solo due valori: così all'immagine della figura 4 si può associare la funzione

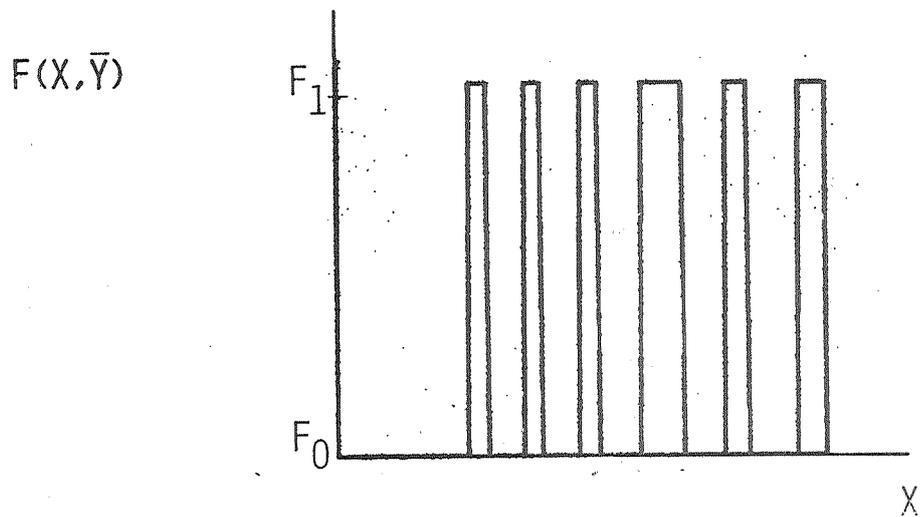
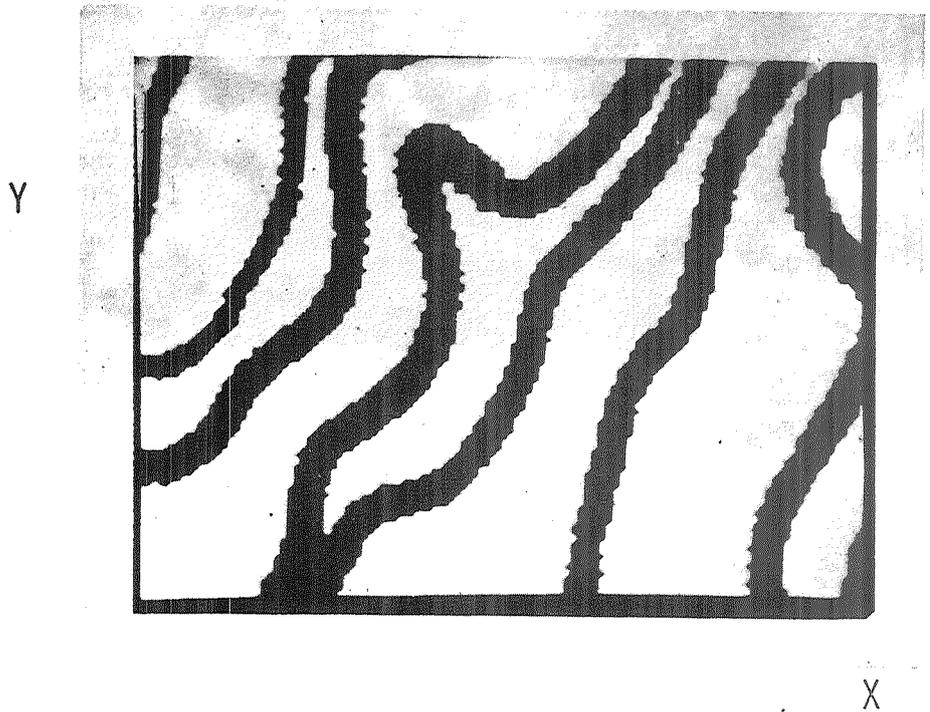
$$f(x,y) = \begin{cases} 1 & \text{per } a \leq x \leq b, c \leq y \leq d \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases}$$

Le immagini di tipo pittorico sono invece quelle in cui la funzione f può assumere un valore qualsiasi all'interno di un certo intervallo: (v. fig.5)

$$f_0 \leq f(x,y) \leq f_1$$

Le immagini di questo tipo, rappresentabili con una funzione f che non dipende dalla lunghezza d'onda λ , sono monocromatiche: si hanno dunque immagini che contengono una sola tonalità di colore, scelto in maniera arbitraria. In generale si impiegano immagini ottenute con vari livelli di grigio, ma si può impiegare un colore qualsiasi senza che il significato dell'immagine subisca variazioni. (V. fig. 6)

IMMAGINE GRAFICA: $F(X,Y) = \begin{cases} F_1 \\ F_0 \end{cases}$

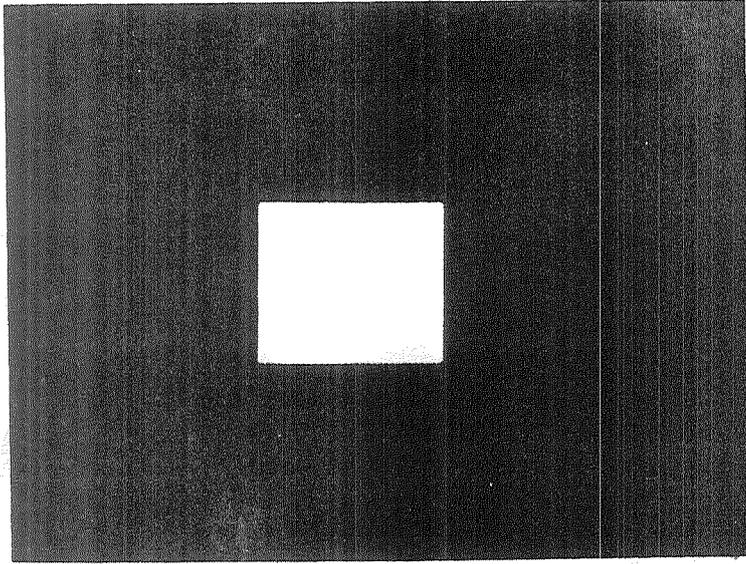


SCANSIONE DI UNA RIGA

FIG. 3

IMMAGINE GRAFICA

Y



X

$F(X,Y)$

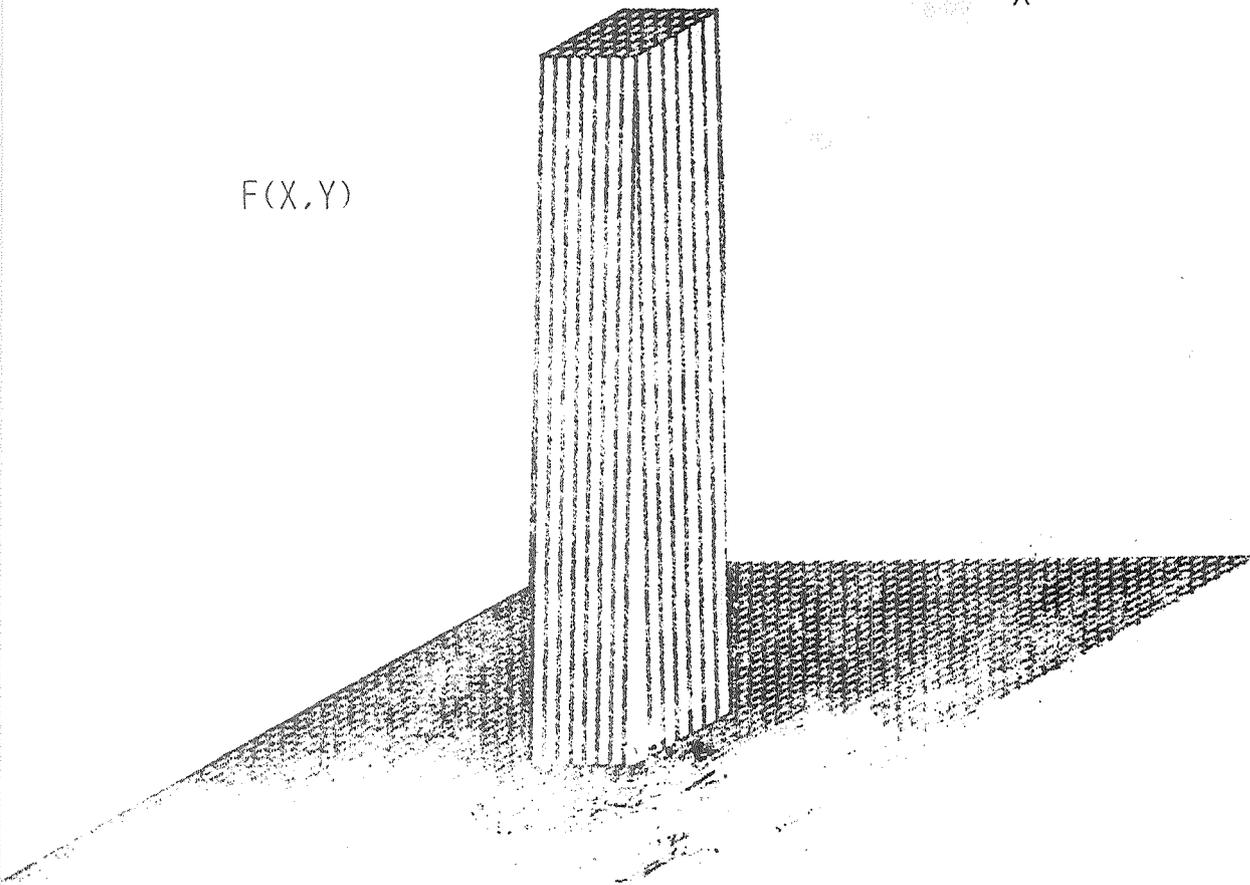
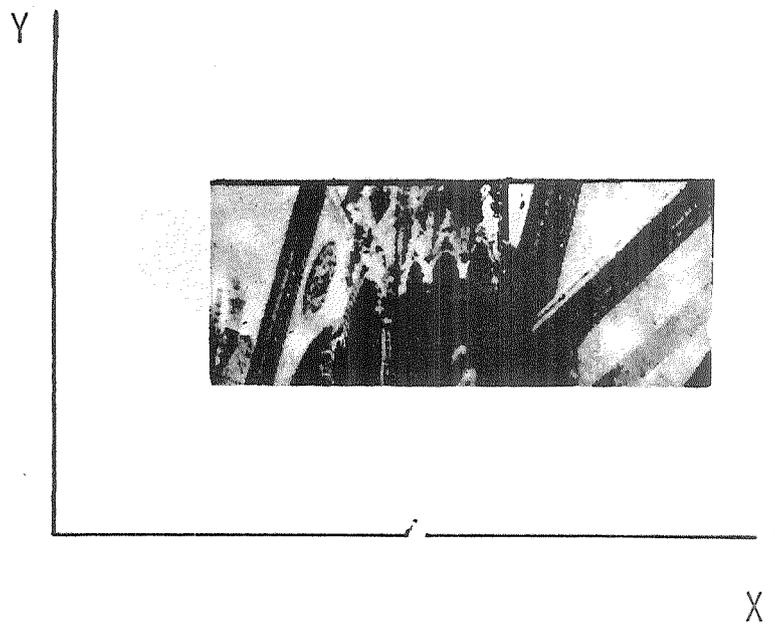
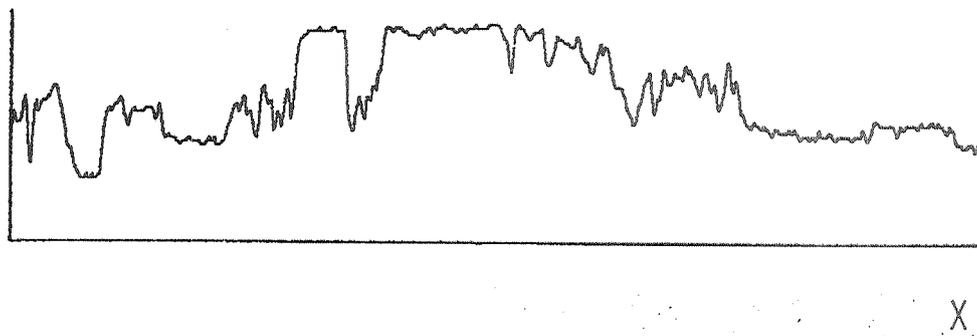


FIG.4

IMMAGINE PITTORICA: $F_0 \leq F(X,Y) \leq F_1$



$F(X, \bar{Y})$



SCANSIONE DI UNA RIGA

FIG. 5

IMMAGINE PITTORICA

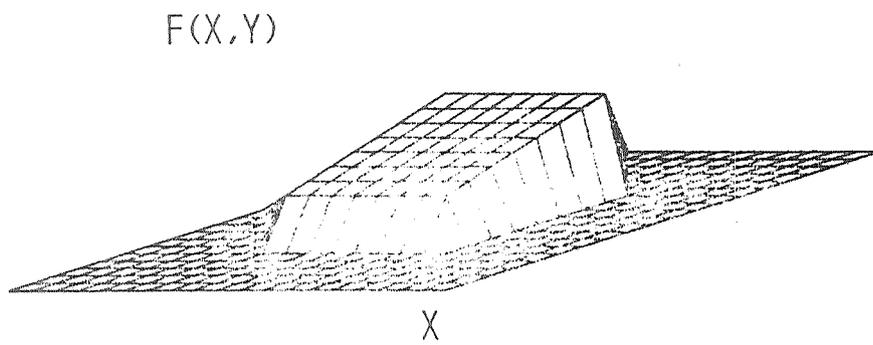
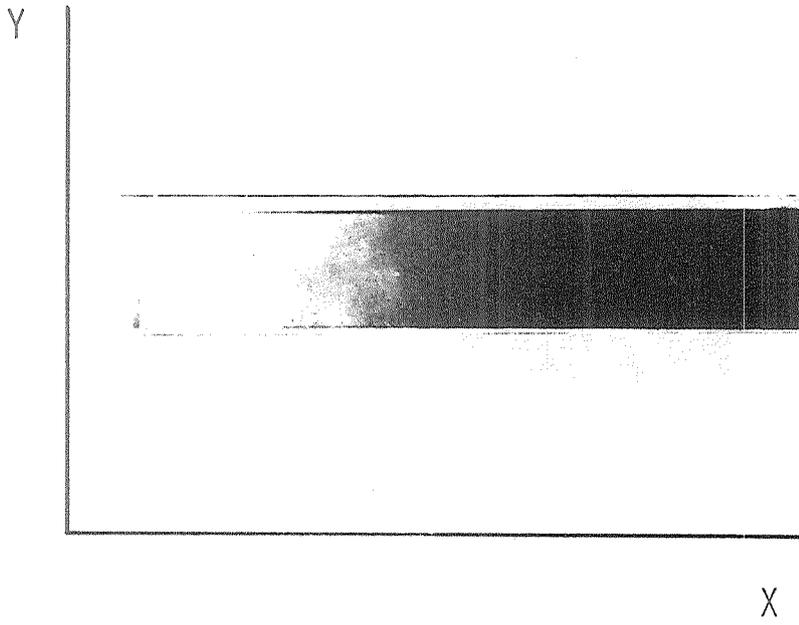


FIG. 6

2. Digitalizzazione delle immagini

Un calcolatore digitale non può essere usato per elaborare le immagini pittoriche definite da funzioni analogiche continue; il calcolatore può essere però impiegato per elaborare le funzioni continue a tratti che si possano ricavare dalle immagini pittoriche di partenza eseguendo le operazioni di campionamento e quantizzazione.

2.1 Processo di campionamento

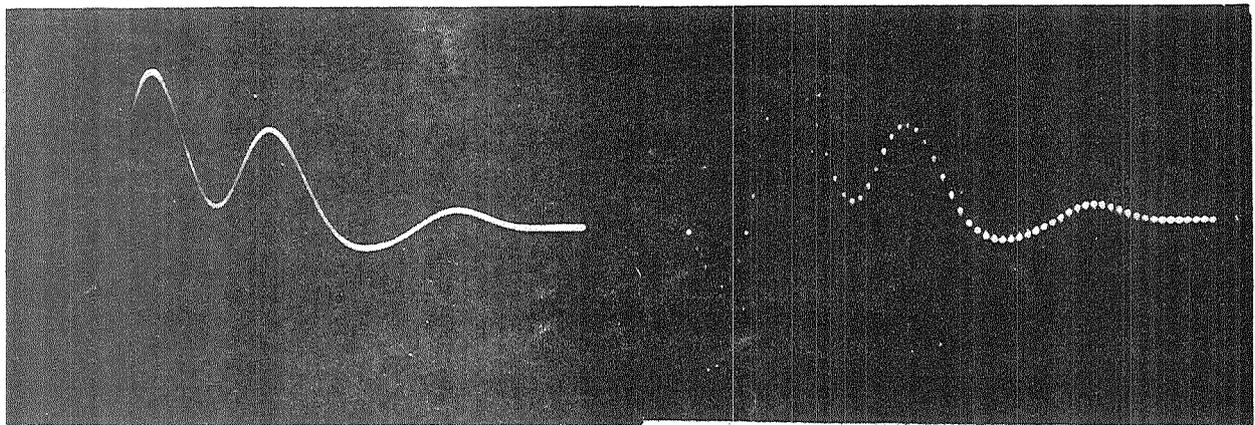
L'operazione di campionamento è la premessa teorica su cui si poggia tutta l'elaborazione numerica di segnali analogici, a una, due o enne dimensioni.

Senza entrare nei dettagli, possiamo adattare al nostro caso l'enunciato del teorema dal campionamento, ed affermare che:

L'informazione contenuta in una funzione continua $f(x,y,z...)$ può essere identica a quella contenuta nella funzione $f(x_i, y_j, z_k...)$ definita soltanto in corrispondenza dei valori discreti i, j, k delle variabili x, y, z ; condizione necessaria perché ciò sia vero è che i punti x_i, y_j, z_k , detti punti di campionamento della funzione, siano sufficientemente vicini tra loro. (V. fig.7)

Nel caso di un'immagine bidimensionale, il teorema del campionamento ci mostra che si può sostituire ad un'immagine originale continua un'immagine discreta costituita da un mosaico di tessere all'interno delle quali la funzione associabile all'immagine sia costante. Le dimensioni delle tessere (o aree di campionamento) dipendono dalla qualità dell'immagine: tanto più piccoli sono i dettagli posseduti dall'immagine, tanto più piccole sono le aree di campionamento dell'immagine. (V. fig. 8)

CAMPIONAMENTO DI UN SEGNALE



FUNZIONE ORIGINALE

FUNZIONE CAMPIONATA

FIG. 7

CAMPIONAMENTO DI UN'IMMAGINE

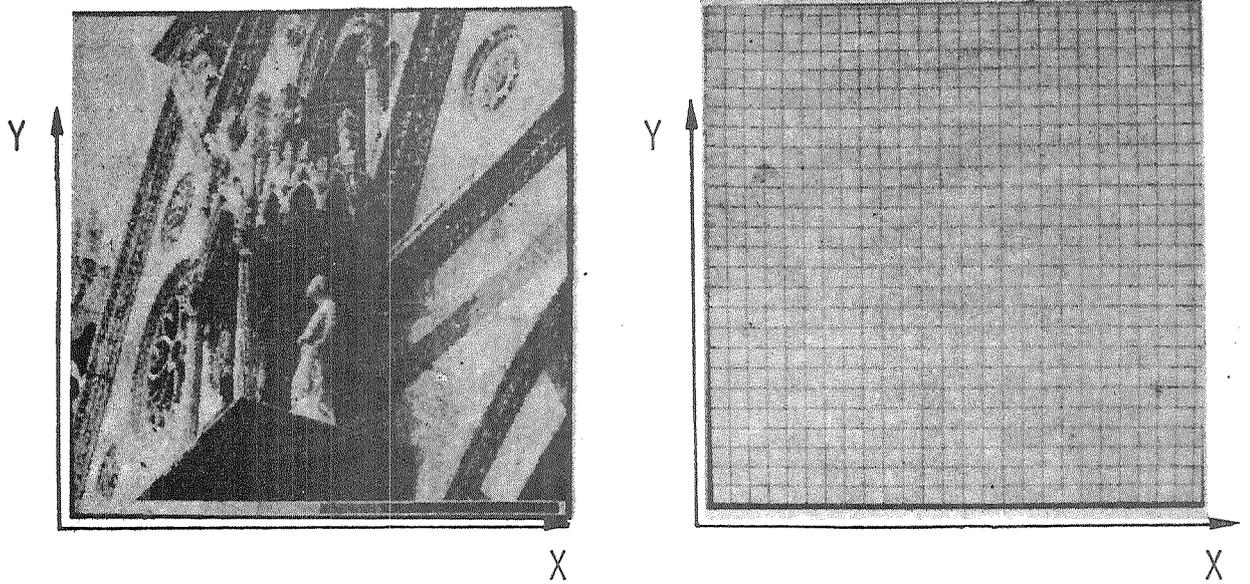


IMMAGINE ORIGINALE

RETICOLO DI CAMPIONAMENTO

$F(X,Y)$

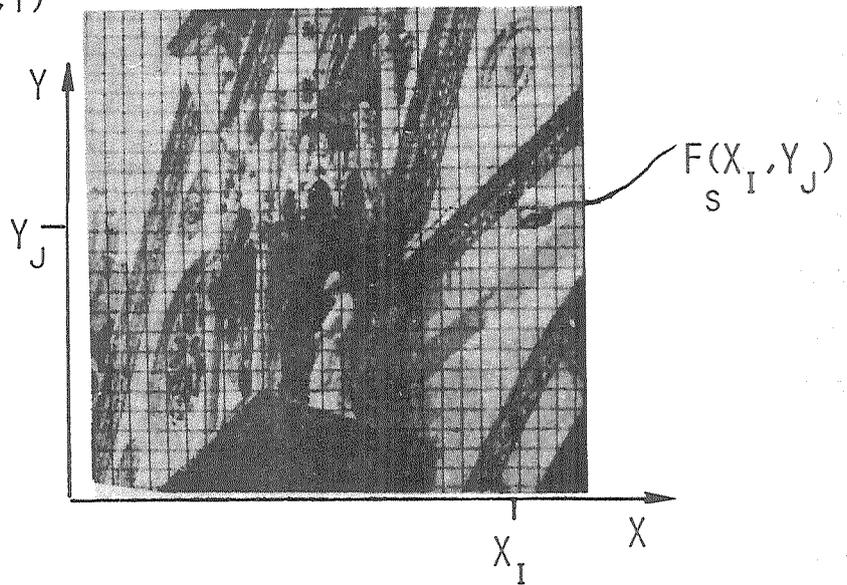


IMMAGINE CAMPIONATA

$F_S(X_I, Y_J)$

FIG. 8

2.2 Processo di quantizzazione

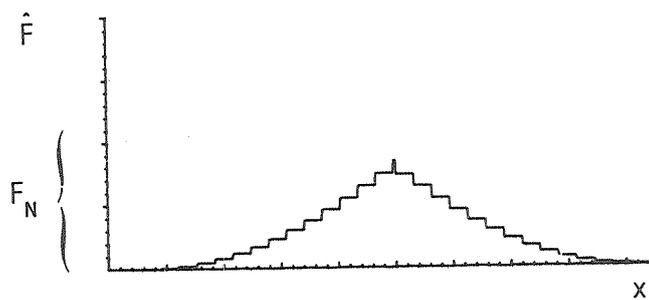
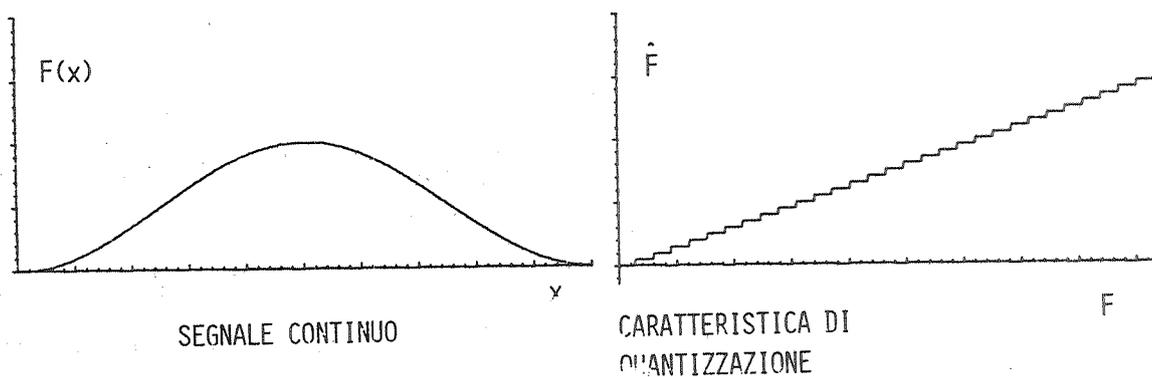
Mediante l'operazione di campionamento, l'immagine da trattare viene trasformata in una tabella di valori $f(x_i, y_j)$, definiti in corrispondenza dei punti di campionamento (x_i, y_j) . I valori della funzione f possono variare in maniera continua nell'intervallo di estremi (f_0, f_1) : se si accetta di compiere un certo errore (limitato e prevedibile), si può suddividere l'intervallo di definizione in un numero intero di sottointervalli e sostituire i valori di f compresi in ciascun intervallo con un valore unico f_n . (V. fig. 9)

A causa dell'operazione di quantizzazione, per ogni punto di misura (x_i, y_j) la funzione f può assumere uno dei valori discreti f_n ; se gli intervalli di quantizzazione hanno eguale lunghezza, i valori possibili sono multipli interi della classe di quantizzazione q , altrimenti, i valori f_n sono distribuiti secondo una progressione arbitraria.

Limitiamoci per semplicità al caso in cui la quantizzazione sia lineare: il risultato del processo di campionamento e quantizzazione è allora una matrice di numeri interi, codificabili in cifre binarie, che può essere agevolmente elaborata con un calcolatore digitale.

Le operazioni di campionamento e quantizzazione di un'immagine sono alquanto delicate; una trattazione matematica adeguata mostra in maniera esauriente ciò che appare in maniera indicativa da questa descrizione fatta in maniera sommaria: data un'immagine da analizzare è infatti necessario scegliere e regolare in maniera opportuna i dispositivi per l'acquisizione, affinché i dati successivamente elaborati costituiscano una copia fedele, affetta da un errore definito, dell'immagine in esame.

QUANTIZZAZIONE DI UN SEGNALE



SEGNALE A GRADINI

FIG. 9

3. Trattamento di immagini digitalizzate

Le operazioni principali eseguite da un sistema generale per il trattamento di immagini sono:

- a) Acquisizione di immagini
- b) Elaborazione di dati
- c) Produzione di documenti
- d) Gestione dell'archivio di dati.

3.1 Acquisizione d'immagini

I dispositivi per l'acquisizione d'immagini sono sostanzialmente costituiti da: (v. fig. 10)

- un trasduttore ottico-elettronico, che converte il flusso luminoso emesso dall'oggetto esaminato in una grandezza elettrica (tensione o corrente);
- un convertitore analogico-digitale, che trasforma il segnale continuo dell'immagine originale in una matrice finita con valori discreti.

Inoltre, ogni dispositivo contiene dei circuiti elettrici che controllano le operazioni di lettura dell'immagine; secondo la complessità di questi circuiti si possono avere dei dispositivi di acquisizione semplici, che compiono operazioni elementari, oppure dispositivi d'acquisizione complessi, che sono in grado di eseguire autonomamente una vasta serie di operazioni sull'immagine in esame.

I dispositivi di acquisizione sono dunque caratterizzati dalla quantità di elaborazione che possono aggiungere in maniera autonoma; altre caratteristiche essenziali sono la precisione di lettura e la possibilità d'impiego.

Per definire in maniera sistematica la precisione di un dispositivo è necessario fornire una serie di definizioni fisi

ACQUISIZIONE D'IMMAGINI

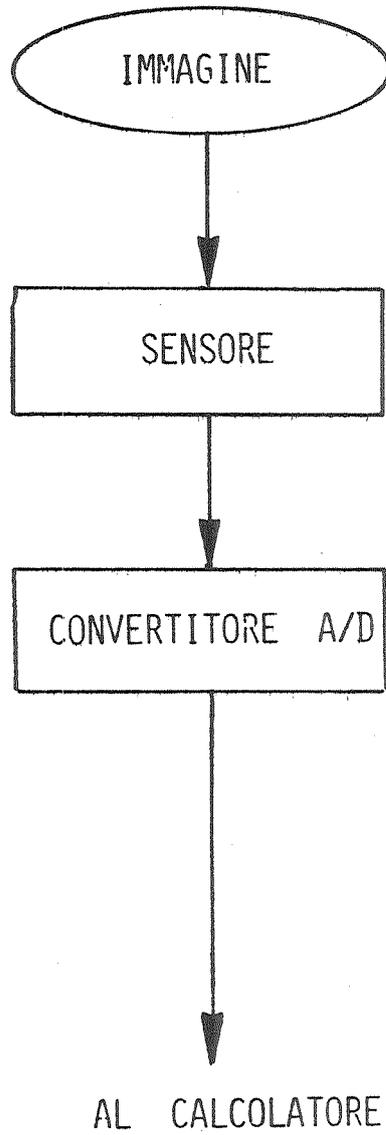


FIG.10

co-matematiche, e svolgere dei calcoli abbastanza accurati: ci limitiamo perciò a ritenere valido il concetto empirico di precisione, e a fornire nel seguito alcuni esempi numerici.

Si può invece fare senza difficoltà una distinzione delle possibilità d'impiego dei vari dispositivi di acquisizione; a questo scopo distinguiamo le riprese dal vero dalle riprese di scene registrate.

Nel caso di riprese dal vero il sensore inquadra direttamente l'oggetto in esame ed invia il segnale risultante al calcolatore di elaborazione: il collegamento tra i due mezzi può avvenire via cavo, nel caso di brevi distanze, via radio se la distanza è notevole.

Nel caso di riprese registrate il sensore esamina non l'oggetto originale, bensì una immagine di esso ricavata in precedenza: per le immagini pittoriche il mezzo più antico e, finora, più diffuso di registrazione è la fotografia.

Dal nostro punto di vista un fotogramma costituisce una memoria d'immagine; la scrittura nella memoria avviene mediante i processi di esposizione e di sviluppo del fotogramma, mentre la lettura della memoria avviene osservando il fotogramma illuminato.

Per impressionare un fotogramma si segue sostanzialmente il metodo mostrato in figura 1; se il fotogramma è posto nel piano immagine della lente, su di essa viene impressionata l'immagine prodotta dalla lente; successivamente il fotogramma illuminato costituisce l'oggetto di un sistema di ripresa, il quale esamina così una copia dell'oggetto originario: naturalmente è essenziale che la copia usata riproduca il più fedelmente possibile l'oggetto da esaminare.

Consideriamo ora più in dettaglio il comportamento di un dispositivo di acquisizione che in entrambi i casi (ripresa diretta di un oggetto o esame della sua immagine fotografica) si comporta come il modello illustrato in fig.11. In base ai comandi emessi dai circuiti di scansione il sensore esplora l'immagine $f(x,y)$ definita nel piano α e rivela la misura $f(x_i, y_j)$ associata a ciascuna delle aree definite dal reticolo di campionamento: il sensore fornisce per ogni lettura $f(x_i, y_j)$ un segnale elettrico (per es. una tensione) $v_{i,j}$, che viene quantizzata dal convertitore analogico digitale, e inviato al sistema di elaborazione. La scansione dell'immagine può essere fatta per righe o per colonne successive, oppure leggendo successivamente le aree individuate da coppie di coordinate scelte a piacere.

Il segnale $\hat{v}_{i,j}$ prodotto dal dispositivo di acquisizione differisce dall'oggetto esaminato a causa dei seguenti fenomeni: (V. fig.12)

- 1) Aberrazioni e distorsioni prodotte dal sistema ottico di ripresa
- 2) Distorsioni causate dal sensore
- 3) Approssimazioni introdotte dal convertitore A/D

Esaminiamo brevemente i diversi fattori.

- 1) Sistema ottico di ripresa.

L'immagine di un oggetto formata da un obiettivo differisce da quella teorica, prodotta in base alle leggi della geometria proiettiva e dell'ottica geometrica, a causa delle aberrazioni e delle distorsioni esibite da un obiettivo reale. A causa di questi fenomeni l'immagine ottenuta è una copia inesatta dell'oggetto esaminato: in pratica, i dettagli più

ACQUISIZIONE D'IMMAGINI

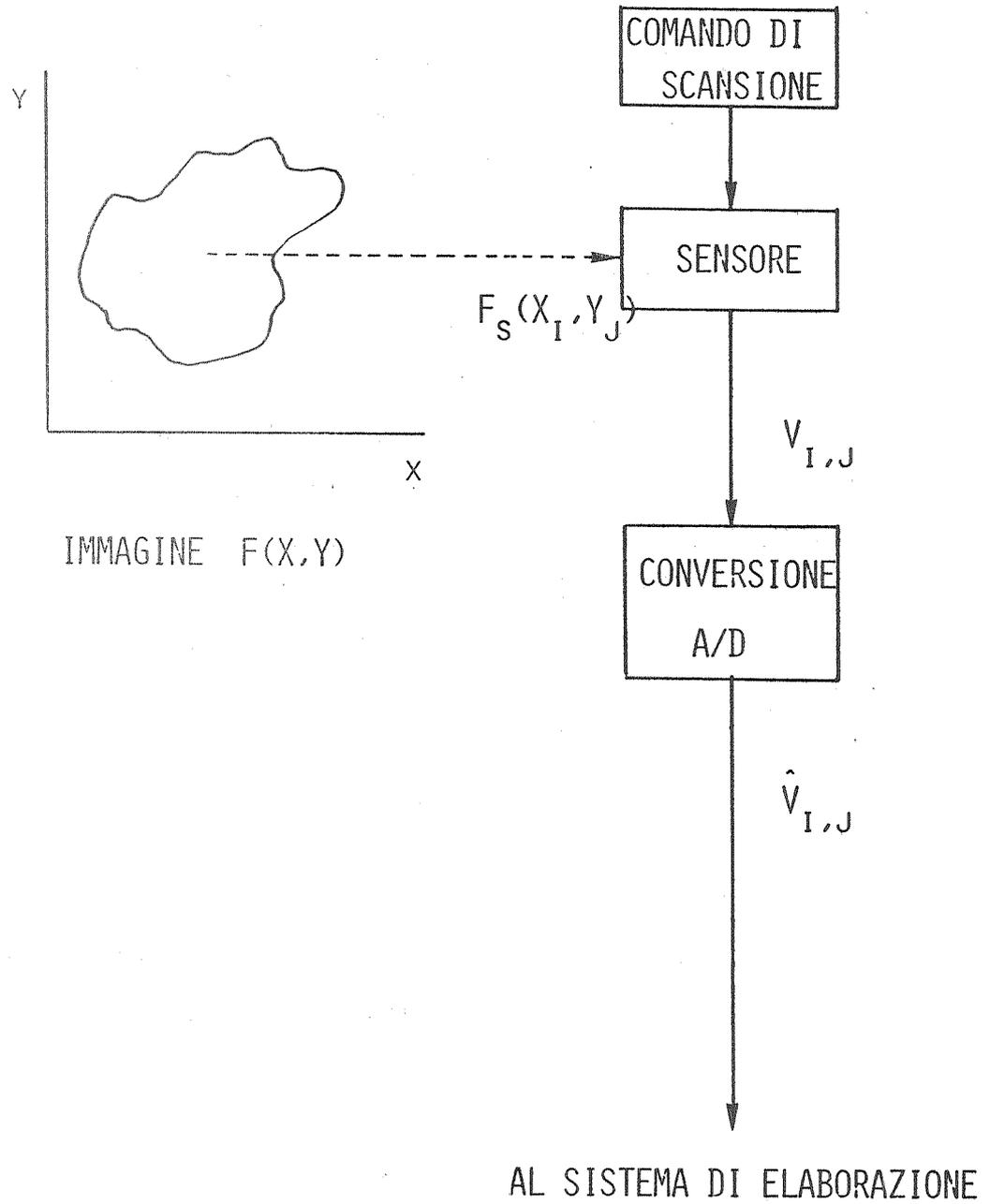


FIG.11

CAUSE DI PEGGIORAMENTO DELLA QUALITA' DI UN'IMMAGINE

- 1) ABERRAZIONI E DISTORSIONI DELL'OBBIETTIVO DI RIPRESA
- 2) CARATTERISTICA DI TRASFERIMENTO DEL SENSORE OTTICO-ELETTRONICO
- 3) ERRORE DI CONVERSIONE A/D

FIG. 12

fini di un oggetto possono non comparire nell'immagine ricavata se la lente di proiezione non ha sufficiente qualità.

2) Risposta del sensore.

Il trasduttore ottico elettronico fornisce per definizione un segnale elettrico proporzionale alla grandezza fotometrica (flusso luminoso) rilevata: ciò è vero solo in prima approssimazione, e solo all'interno di un certo intervallo di valori assunti dal flusso luminoso rilevato.

3) Conversione analogico-digitale.

Un convertitore A/D fornisce in uscita un segnale la cui ampiezza può assumere solo valori discreti; il segnale d'uscita è dunque eguale al segnale d'ingresso a meno di un errore pari alla classe di quantizzazione. Di conseguenza, noto l'errore accettabile, va scelto il tipo di convertitore più a dato.

Riassumendo, si può affermare che il risultato dell'operazione di acquisizione non è mai una copia esatta dell'oggetto in esame; un insieme di considerazioni, relative al grado di errore e distorsione accettabile, al tempo necessario per l'acquisizione ed ai costi dell'esercizio, conducono alla scelta del dispositivo più consono all'impiego previsto: è bene ribadire ancora una volta l'importanza del processo di acquisizione, poiché, evidentemente, qualsiasi elaborazione ha poco senso se i dati da elaborare provengono da un'acquisizione fatta in maniera incorretta.

Un elenco di dispositivi di acquisizione e dei rispetti ivi campi d'impiego è mostrata in figura 13.

DISPOSITIVI PER L'ACQUISIZIONE

- TELECAMERA VIDICON O : DISPOSITIVO PER LA SCANSIONE ELETTRONICA DI SCENE TRIDIMENSIONALI O DI OGGETTI BIDIMENSIONALI A COLORI.
A STATO SOLIDO
- MICRODENSITOMETRO X-Y: DISPOSITIVO DI PRECISIONE PER LA SCANSIONE ELETTROMECCANICA DI IMMAGINI A COLORI SU SUPPORTO TRASPARENTE O OPACO, CON FORMATI FINO A 400x400 MM.
O A TAMBURO
- LETTORE A FLYING SPOT: DISPOSITIVO DI PRECISIONE PER LA SCANSIONE ELETTRONICA DI IMMAGINI MONOCROMATICHE SU SUPPORTO TRASPARENTE, CON FORMATI FINO A 70x70 MM.
- LINE SCANNER : DISPOSITIVO DI PRECISIONE PER LA SCANSIONE ELETTROMECCANICA DI IMMAGINI A COLORI SU SUPPORTO OPACO, CON FORMATI FINO A 400x400 MM.

FIG. 13A

DISPOSITIVO	COSTO	RISOLUZIONE SPAZIALE E FOTOMETRICA	VELOCITA' DI SCANSIONE	IMPIEGO
TELECAMERA VIDICON O A STATO SOLIDO	BASSO	BASSA	ALTA	CONTROLLO DI PROCESSI, MICROSCOPIA, ENDOSCOPIA
MICRODENSITOMETRO	ELEVATO	MEDIO-ALTA	BASSA	ASTROFISICA, AEROFOTOGRAFIA, ARCHEOLOGIA, CARTOGRAFIA, CHIMICA, INGEGNERIA CIVILE, GEOFISICA
LETTORE A FLYING SPOT	ELEVATO	ALTA	MEDIO-ALTA	ASTROFISICA, CARDIOLOGIA, BIOLOGIA, AEROFOTOGRAFIA, GEOFISICA, FISICA NUCLEARE, INGEGNERIA CIVILE
LINE SCANNER	ELEVATO	MEDIO-ALTA	MEDIO-ALTA	RADIOGRAFIA DIAGNOSTICA, CARTOGRAFIA, ASTROFISICA, FOTOGRAMMETRIA

1
2
3
1

FIG. 13B

3.2 Elaborazione d'immagini

Le matrici di dati immagine ricavate coi dispositivi di acquisizione vengono elaborate mediante calcolatori digitali.

L'elaborazione digitale d'immagini è un settore di attività relativamente nuovo, che si sviluppa di pari passo con l'evoluzione dei calcolatori digitali e che riceve nuovi impulsi dall'introduzione sul mercato di dispositivi sempre più potenti, compatti e relativamente economici. Inoltre, l'elaborazione digitale d'immagini trova applicazione in un numero sempre crescente di settori di ricerca applicata: si possono ad esempio citare le elaborazioni compiute nell'ambito di varie discipline, come astronomia, geologia, biofisica, medicina, radioterapia, studio delle risorse terrestri, telemetria, controllo dell'inquinamento, etc.

L'elaborazione può essere fatta impiegando sia sistemi di calcolo di tipo generale, sia dispositivi di elaborazione specializzati in particolari tipi di elaborazione, usando i linguaggi di programmazione o i pacchi di programmi esistenti oppure sviluppandone dei nuovi, secondo le necessità personali.

A causa del continuo sviluppo del trattamento digitale d'immagini non è ancora ben definita una classificazione canonica dei tipi di elaborazione possibili; una suddivisione, non esauriente né definitiva può essere la seguente: (v. fig.14)

- manipolazione d'immagini
- restauro d'immagini
- analisi d'immagini

Sia la manipolazione che il restauro d'immagini hanno lo scopo di produrre immagini per un osservatore umano.

Mediante la manipolazione si modificano le immagini acqui

PROCEDURE TIPICHE PER IL TRATTAMENTO DI IMMAGINI

MANIPOLAZIONI DI
IMMAGINI

ESALTAZIONE DI CONTORNI O DI AREE
MODIFICA DEL CONTRASTO
RAPPRESENTAZIONE CON COLORI ARTIFICIALI

RESTAURO DI
IMMAGINI

CORREZIONI GEOMETRICHE E FOTOMETRICHE
CONVOLUZIONI
FILTRAGGI DIGITALI

ANALISI DI
IMMAGINI

ESTRAZIONE DI CARATTERISTICHE
DIRETTE O DERIVATE
DESCRIZIONE SIMBOLICA
RICONOSCIMENTO DI FORME

FIG. 14

site per mettere in risalto aspetti particolari contenuti nei dati originali: rientrano in questo tipo di trattamento operazioni come: esaltazione dei bordi, modifiche del contrasto di un'immagine, rappresentazioni con colori artificiali.

Il restauro dell'immagine tende invece a correggere i dati acquisiti per compensare almeno in parte le distorsioni prodotte nella fase di acquisizione, con lo scopo di ottenere un'immagine il più possibile simile all'immagine teorica prodotta da un sistema di acquisizione privo di errori; per ottenere questo risultato si compiono operazioni come: correzione geometrica dei dati, convoluzioni e filtraggi di vario tipo.

L'analisi di immagini è l'insieme delle procedure di elaborazioni mediante le quali si estraggono dai dati d'ingresso delle informazioni sull'aspetto, sulla natura e sul contenuto dell'immagine in esame: il risultato di un'analisi è costituito generalmente da una tabella di valori numerici o da un'espressione logica.

Fra le possibili procedure per l'analisi d'immagini se ne possono citare alcune, rivolte al conseguimento di scopi particolari, come: estrazione di alcune caratteristiche dell'immagine, descrizione simbolica dell'immagine, riconoscimento di forme e di strutture.

3.3 Produzione di documenti

I sistemi di elaborazione d'immagini sono corredati di diverse apparecchiature periferiche che forniscono all'utente i risultati delle operazioni.

Le periferiche di tipo normale (terminali grafici o stampanti alfanumeriche) sono sufficienti per produrre i documenti di tipo numerico; periferiche specializzate sono invece necessarie per generare le immagini che vengono esaminate durante il processo di elaborazione o che costituiscono il risultato stesso dell'elaborazione. Per questi scopi sono impiegati i terminali video adatti alla rappresentazione di segnali grafici o pittorici, i tracciatori di grafici e le stampanti a toni di grigio o a colori.

I terminali video producono dei documenti d'uscita temporanei, nel senso che l'immagine è osservabile finché l'apparecchiatura è in funzione; i terminali che stampano su carta producono invece dei documenti d'uscita permanenti. Naturalmente è possibile, nell'uno e nell'altro caso, fissare le immagini prodotte su un supporto fotografico.

3.4 Gestione dell'archivio

Le matrici numeriche ricavate dalle immagini digitalizzate possono essere archiviate nelle normali memorie di massa costituite di nastri, dischi o floppy-disk magnetici. Questi dati possono essere trasmessi a distanza, o archiviati e gestiti mediante appositi programmi; i dati risultanti da un processo di acquisizione possono essere utilizzati a piacere per compiere operazioni di tipo diverso.