

# Programma del corso di Elaborazione delle immagini I

7 marzo 2011

Questo documento contiene una descrizione del programma svolto nel corso di *Elaborazione delle immagini I*, a.a. 2009/10, in relazione agli argomenti trattati nel libro di testo: R.C. Gonzalez e R.E. Woods, *Elaborazione delle immagini digitali*, (3 ed.), Pearson Education Italia - Prentice Hall, 2008. ISBN 9788871925066.

Gli argomenti sono stati catalogati in categorie:

- Cose che non si possono non sapere: a questa categoria appartengono gli argomenti che vengono considerati basilari e che fanno parte della piattaforma culturale di chi si dedica all'elaborazione delle immagini; questi argomenti non dovrebbero essere utilizzati per le domande a piacere.
- Cose da studiare per bene: gli argomenti di questa categoria sono quelli trattati a lezione e che verranno valutati in sede d'esame.
- Cose che non sarebbe male conoscere: argomenti che non sono stati trattati a lezione per mancanza di tempo, ma che possono essere utilizzati come base per un progetto (da concordare con il docente).

**NOTA** Il programma descritto in questo documento si riferisce al corso da 6 cfu. Se qualche studente ha nel piano degli studi il corso da 5 cfu, contatti il docente per un'opportuno ridimensionamento degli argomenti.

## Cose che non si possono non sapere

Gli argomenti vengono dati per scontati sono marcati in **azzurro** nel sommario riportato in fondo al presente documento. Essi sono:

- Capitolo 1 - Introduzione
- Paragrafo 2.4 - Campionamento e quantizzazione delle immagini (a parte 2.4.4, non trattato a lezione)
- Paragrafo 2.6 - Introduzione agli strumenti matematici usati nell'elaborazione delle immagini
- Paragrafi 4.1 e 4.2 - Background e Concetti preliminari del filtraggio nel dominio della frequenza

## Cose da studiare per bene

Gli argomenti trattati a lezione sono marcati in **rosso** nel sommario riportato in fondo al presente documento. Essi sono:

- Capitolo 2 - Fondamenti delle immagini digitali (a parte 2.4.4)
- Capitolo 3 - Trasformazioni di intensità e filtraggio spaziale

- Capitolo 4 - Filtraggio nel dominio della frequenza (a parte 4.10 e 4.11)
- Capitolo 6 - Elaborazione di immagini a colori (a parte 6.8 e 6.9)
- Capitolo 8 - Compressione di immagini (a parte 8.2.6, 8.2.7, 8.2.9, 8.2.10, 8.3)
- Capitolo 9 - La morfologia applicata alle immagini digitali
- Capitolo 10 - Segmentazione di immagini (a parte 10.3.6, 10.3.8 e 10.6)

## Riduzione del programma (5 CFU)

Per gli studenti che abbiano nel piano degli studi il corso di *Elaborazione delle immagini* da 5 CFU, il programma deve essere ridotto. Alcuni argomenti considerati **fondamentali** per il corso da 6 CFU possono essere considerati **facoltativi** per il corso da 5 CFU (e sono marcati in **arancione**). In dettaglio:

- Paragrafo 6.7 - Segmentazione di immagine basata su colore
- Paragrafo 8.2.2 - Codifica di Golomb
- Paragrafo 9.6 - Morfologia in scala di grigio
- Paragrafo 10.3.7 - Soglia variabile
- Paragrafo 10.5 - Segmentazione mediante watershed morfologica

## Cose che non sarebbe male conoscere

Gli argomenti che non sono stati trattati a lezione, ma che meriterebbero almeno una lettura, sono marcati in **giallo** nel sommario riportato in fondo al presente documento.

Essi sono:

- Paragrafo 2.4.4 - Interpolazione di un'immagine
- Paragrafo 4.10 - Filtraggio selettivo
- Paragrafo 4.11 - Implementazione
- Capitolo 5 - Restauro e ricostruzione di immagini
- Paragrafo 6.8 - Rumore nelle immagini a colori
- Paragrafo 6.9 - Compressione di immagini a colori
- Capitolo 7 - Wavelet e analisi multirisoluzione
- Paragrafo 8.2.6 - Codifica basata su simboli
- Paragrafo 8.2.7 - Codifica per piani di bit
- Paragrafo 8.2.9 - Codifica predittiva
- Paragrafo 8.2.10 - Codifica wavelet
- Paragrafo 8.3 - Watermarking nelle immagini digitali
- Paragrafo 10.3.6 - Soglie multiple
- Paragrafo 10.3.8 - Soglia multivariabile
- Paragrafo 10.6 - Uso del moto nella segmentazione

## Sommario del libro di testo

Di seguito, viene riportato il sommario del libro di testo (R.C. Gonzalez e R.E. Woods, Elaborazione delle immagini digitali, (3 ed.), Pearson Education Italia - Prentice Hall, 2008. ISBN 9788871925066) con i capitoli e i paragrafi marcati a seconda della categoria in cui gli argomenti trattati rientrano:

- colore azzurro: cose che non si possono non sapere;
- colore rosso: cose da studiare per bene;
- colore giallo: cose che non sarebbe male conoscere.

Per ogni chiarimento, contattare il docente del corso.

Rafael C. Gonzalez  
Richard E. Woods

# Elaborazione delle immagini digitali

Terza edizione

Edizione italiana a cura dei  
proff. Sebastiano Battiato e Filippo Stanco



© 2008 Pearson Paravia Bruno Mondadori S.p.A.

*Authorized translation from the English language edition, entitled: **DIGITAL IMAGE PROCESSING, 3<sup>rd</sup> edition**, by Rafael C. Gonzalez; Richard E. Woods, published by Pearson Education, Inc., publishing as Prentice Hall, Copyright © 2008.*

*All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission from Pearson Education, Inc.*

*Italian language edition published by Pearson Paravia Bruno Mondadori S.p.A., Copyright © 2008.*

Le informazioni contenute in questo libro sono state verificate e documentate con la massima cura possibile. Nessuna responsabilità derivante dal loro utilizzo potrà venire imputata agli Autori, a Pearson Paravia Bruno Mondadori S.p.A. o a ogni persona e società coinvolta nella creazione, produzione e distribuzione di questo libro.

I diritti di riproduzione e di memorizzazione elettronica totale e parziale con qualsiasi mezzo, compresi i microfilm e le copie fotostatiche, sono riservati per tutti i paesi.

LA FOTOCOPIATURA DEI LIBRI È UN REATO. Le fotocopie per uso personale del lettore possono essere effettuate nei limiti del 15% di ciascun volume dietro pagamento alla SIAE del compenso previsto dall'art. 68, commi 4 e 5, della legge 22 aprile 1941 n. 633.

Le riproduzioni effettuate per finalità di carattere professionale, economico o commerciale o comunque per uso diverso da quello personale possono essere effettuate a seguito di specifica autorizzazione rilasciata da AIDRO, corso di Porta Romana n. 108, 20122 Milano, e-mail [segreteria@aidro.org](mailto:segreteria@aidro.org) e sito web [www.aidro.org](http://www.aidro.org).

Curatori per l'edizione italiana: Sebastiano Battiato e Filippo Stanco

Traduzione: Rosaria Battiato e Maddalena Bisignano

Realizzazione editoriale: Carmelo Giarratana

Grafica di copertina: Nicolo' Cannizzaro

Stampa: La Fotocromo Emiliana – Osteria Grande (Bo)

Tutti i marchi citati nel testo sono di proprietà dei loro detentori.

978-88-7192-506-6

Printed in Italy

1<sup>a</sup> edizione: ottobre 2008

Ristampa	Anno
00 01	02 03 04
	08 09 10 11 12

<b>2.4</b>	<b>Campionamento e quantizzazione delle immagini</b>	<b>51</b>
2.4.1	Concetti base di campionamento e quantizzazione	52
2.4.2	Rappresentazione delle immagini digitali	53
2.4.3	Risoluzione spaziale e di intensità	57
2.4.4	Interpolazione di un'immagine	63
<b>2.5</b>	<b>Alcune relazioni di base tra pixel</b>	<b>66</b>
2.5.1	Intorno di un pixel	66
2.5.2	Adiacenza, connettività, regioni e bordo	66
2.5.3	Misure di distanza	68
<b>2.6</b>	<b>Introduzione agli strumenti matematici usati nell'elaborazione delle immagini digitali</b>	<b>70</b>
2.6.1	Operazioni matriciali e puntuali	70
2.6.2	Operazioni lineari e non lineari	70
2.6.3	Operazioni aritmetiche	72
2.6.4	Insienmi e operazioni logiche	77
2.6.5	Operazioni spaziali	82
2.6.6	Operazioni vettoriali e matriciali	88
2.6.7	Trasformazioni di immagini	90
2.6.8	Metodi probabilistici	93
	Riepilogo	95
	Bibliografia	96
	Problemi	97
<b>Capitolo 3</b>	<b>Trasformazioni di intensità e filtraggio spaziale</b>	<b>101</b>
3.1	Background	101
3.1.1	Fondamenti di trasformazioni di intensità e filtraggio spaziale	101
3.1.2	Esempi di questo capitolo	104
3.2	Alcune funzioni per la trasformazione di intensità	104
3.2.1	Negativi dell'immagine	104
3.2.2	Trasformazioni logaritmiche	106
3.2.3	Trasformazioni di potenza (gamma)	107
3.2.4	Funzioni di trasformazione lineare a tratti	111
3.3	Elaborazione di istogrammi	115
3.3.1	Equalizzazione di istogrammi	116
3.3.2	Matching tra istogrammi	123
3.3.3	Elaborazione locale degli istogrammi	132
3.3.4	Utilizzo delle statistiche di un istogramma per il miglioramento dell'immagine	134
3.4	Elementi di base del filtraggio spaziale	139
3.4.1	Funzionamento del filtraggio spaziale	139
3.4.2	Correlazione e convoluzione spaziale	141
3.4.3	Rappresentazione vettoriale del filtraggio lineare	144
3.4.4	Creazione di maschere per filtri spaziali	145
3.5	Filtri spaziali di smoothing	146
3.5.1	Filtri lineari di smoothing	146
3.5.2	Filtri (non lineari) basati sulle statistiche d'ordine	148
<b>Prefazione all'edizione italiana</b>		<b>xiii</b>
<b>Prefazione</b>		<b>xv</b>
<b>Capitolo 1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
1.1	Che cos'è l'elaborazione dell'immagine digitale?	1
1.2	Le origini del digital image processing	3
1.3	Esempi di applicazione dell'elaborazione delle immagini digitali	7
1.3.1	Imaging a raggi gamma	7
1.3.2	Imaging a raggi X	8
1.3.3	Imaging a bande ultraviolette	11
1.3.4	Imaging nelle bande infrarosse e del visibile	13
1.3.5	Imaging nella banda delle microonde	19
1.3.6	Imaging nella banda radio	20
1.3.7	Esempi di altre modalità di imaging	21
1.4	Processi di base tipici del digital image processing	26
1.5	Le componenti di un sistema di image processing	28
	Riepilogo	30
	Bibliografia	31
<b>Capitolo 2</b>	<b>Fondamenti delle immagini digitali</b>	<b>35</b>
2.1	La percezione visiva	35
2.1.1	Struttura dell'occhio umano	36
2.1.2	La formazione dell'immagine nell'occhio	38
2.1.3	Adattamento e discriminazione alla luminosità	38
2.2	La luce e lo spettro elettromagnetico	43
2.3	Acquisizione delle immagini	46
2.3.1	Acquisizione di immagini attraverso un singolo sensore	46
2.3.2	Acquisizione di immagini attraverso sensori in linea	48
2.3.3	Acquisizione di un'immagine attraverso l'array di sensori	49
2.3.4	Un semplice modello di creazione di un'immagine	50

3.6	Filtri spaziali di sharpening	151
3.6.1	Fondamenti	151
3.6.2	Utilizzo delle derivate seconde per lo sharpening: il metodo laplaciano	153
3.6.3	Unsharp masking e filtraggio highboost	156
3.6.4	Uso delle derivate del primo ordine per lo sharpening (non lineare) delle immagini: il gradiente	158
3.7	Combinazione di metodi spaziali	162
3.8	<b>Uso di tecniche fuzzy per le trasformazioni di intensità e il filtraggio spaziale</b>	165
3.8.1	Introduzione	165
3.8.2	Principi della teoria degli insiemi fuzzy	166
3.8.3	Utilizzo degli insiemi fuzzy	170
3.8.4	Utilizzo di insiemi fuzzy per le trasformazioni di intensità	179
3.8.5	Utilizzo degli insiemi fuzzy per il filtraggio spaziale	181
	Riepilogo	183
	Bibliografia	184
	Problemi	185
	<b>Capitolo 4 Filtraggio nel dominio della frequenza</b>	<b>191</b>
4.1	<b>Background</b>	192
4.1.1	Breve storia delle serie e della trasformata di Fourier	192
4.1.2	Esempi di questo capitolo	193
4.2	<b>Concetti preliminari</b>	193
4.2.1	Numeri complessi	193
4.2.2	Serie di Fourier	194
4.2.3	Impulsi e proprietà di sifting	195
4.2.4	La trasformata di Fourier di una variabile continua	196
4.2.5	Convoluzione	201
4.3	Campionamento e trasformata di Fourier di funzioni campionate	202
4.3.1	Campionamento	202
4.3.2	La trasformata di Fourier di funzioni campionate	203
4.3.3	Il teorema del campionamento	205
4.3.4	Aliasing	208
4.3.5	Ricostruzione (recupero) di una funzione dai dati campionati a una variabile	211
4.4	Trasformata discreta di Fourier (DFT, <i>Discrete Fourier Transform</i> )	211
4.4.1	Ottenere la DFT da una trasformata continua di una funzione campionata	212
4.4.2	Relazioni fra il campionamento e gli intervalli in frequenza	214
4.5	Estensione alle funzioni a due variabili	216
4.5.1	Impulso 2-D e la sua proprietà di sifting	216
4.5.2	Coppia di Fourier continua 2-D	217
4.5.3	Campionamento bidimensionale e teorema del campionamento 2-D	218
4.5.4	Aliasing nelle immagini	220

4.5.5	La trasformata discreta di Fourier 2-D e la sua inversa	227
4.6	Alcune proprietà della trasformata discreta di Fourier 2-D	227
4.6.1	Relazione tra gli intervalli spaziali e gli intervalli della frequenza	228
4.6.2	Traslazione e rotazione	228
4.6.3	Periodicità	228
4.6.4	Proprietà di simmetria	229
4.6.5	Spettro di Fourier e angolo di fase	236
4.6.6	Teorema della convoluzione 2-D	240
4.6.7	Riepilogo delle proprietà della trasformata discreta di Fourier 2-D	244
4.7	Le basi per il filtraggio nel dominio della frequenza	247
4.7.1	Caratteristiche aggiuntive del dominio della frequenza	247
4.7.2	Filtraggio nel dominio della frequenza	248
4.7.3	Riepilogo delle procedure di filtraggio nel dominio della frequenza	254
4.7.4	Corrispondenza tra il filtraggio nel dominio spaziale e quello nel dominio della frequenza	256
4.8	Smoothing di un'immagine utilizzando i filtri nel dominio della frequenza	260
4.8.1	Filtri low pass ideali	261
4.8.2	Filtri low pass di Butterworth	265
4.8.3	Filtri low pass gaussiani	268
4.8.4	Esempi aggiuntivi di filtraggio low pass	269
4.9	Sharpening di un'immagine utilizzando i filtri nel dominio della frequenza	273
4.9.1	Filtri high pass ideali	274
4.9.2	Filtri high pass di Butterworth	276
4.9.3	Filtri high pass gaussiani	276
4.9.4	Il laplaciano nel dominio della frequenza	279
4.9.5	Unsharp masking, filtraggio highboost e filtraggio di enfasi dell'alta frequenza	280
4.9.6	Filtraggio omomorfico	282
4.10	<b>Filtraggio selettivo</b>	285
4.10.1	Filtri band pass e band reject	286
4.10.2	Filtri notch	286
4.11	<b>Implementazione</b>	290
4.11.1	Separabilità della DFT 2-D	291
4.11.2	Calcolo della IDFT utilizzando un algoritmo della DFT	292
4.11.3	La trasformata veloce di Fourier (FFT, <i>Fast Fourier Transform</i> )	292
4.11.4	Alcuni commenti sul design dei filtri	295
	Riepilogo	296
	Bibliografia	296
	Problemi	297
	<b>Capitolo 5 Restauro e ricostruzione di immagini</b>	<b>305</b>
5.1	Un modello del processo di degrado/restauro di un'immagine	306

5.2	Modelli di rumore	307
5.2.1	Proprietà spaziali e in frequenza del rumore	307
5.2.2	Alcune importanti funzioni di densità della probabilità del rumore	308
5.2.3	Rumore periodico	313
5.2.4	Stima dei parametri del rumore	313
5.3	Restauro in presenza solo di rumore – filtraggio spaziale	315
5.3.1	Filtri di media	316
5.3.2	Filtri basati sulle statistiche d'ordine	317
5.3.3	Filtri adattivi	322
5.4	Riduzione periodica del rumore tramite filtraggio nel dominio delle frequenze	328
5.4.1	Filtri band reject	328
5.4.2	Filtri band pass	329
5.4.3	Filtri notch	331
5.4.4	Filtraggio notch ottimale	332
5.5	Degrado lineare, invariante per posizione	337
5.6	Stima della funzione di degrado	340
5.6.1	Stima mediante osservazione diretta	340
5.6.2	Stima mediante sperimentazione	340
5.6.3	Stima tramite modelli	341
5.7	Filtraggio inverso	344
5.8	Filtraggio che minimizza l'errore quadratico medio (Wiener)	346
5.9	Filtraggio ai minimi quadrati vincolati	351
5.10	Filtro di media geometrica	355
5.11	Ricostruzioni di immagini da proiezioni	356
5.11.1	Introduzione	356
5.11.2	Principi di tomografia computerizzata (TC)	359
5.11.3	Proiezioni e trasformata di Radon	362
5.11.4	Il teorema di Fourier-slice	368
5.11.5	Ricostruzione tramite l'uso di retroproiezioni filtrate a raggi paralleli	370
5.11.6	Ricostruzione tramite l'uso di retroproiezioni a ventaglio filtrate	375
	Riepilogo	381
	Bibliografia	382
	Problemi	383
	<b>Capitolo 6 Elaborazione di immagini a colori</b>	<b>389</b>
6.1	Considerazioni di base sul colore	390
6.2	Modelli di colore	395
6.2.1	Il modello RGB	397
6.2.2	I modelli CMY e CMYK	401
6.2.3	Il modello HSI	402
6.3	Elaborazione di immagini a falsi colori	409
6.3.1	Ripartizione delle intensità (slicing)	409

6.3.2	Trasformazioni da intensità a colore	413
6.4	Fondamenti di elaborazione delle immagini full-color	420
6.5	Trasformazioni di colore	421
6.5.1	Formulazione	421
6.5.2	Colori complementari	425
6.5.3	Ripartizione di colore (slicing)	426
6.5.4	Correzioni di tonalità e colore	428
6.5.5	Elaborazione di istogrammi	433
6.6	Smoothing e sharpening	433
6.6.1	Smoothing di un'immagine a colori	434
6.6.2	Sharpening di un'immagine a colori	437
6.7	Segmentazione di immagine basata sul colore	438
6.7.1	Segmentazione nello spazio a colori HSI	438
6.7.2	Segmentazione nello spazio dei vettori RGB	440
6.7.3	Individuazione di edge a colori	442
6.8	Rumore nelle immagini a colori	446
6.9	Compressione di immagini a colori	449
	Riepilogo	450
	Bibliografia	451
	Problemi	452
	<b>Capitolo 7 Wavelet e analisi multirisoluzione</b>	<b>457</b>
7.1	Background	458
7.1.1	Pyramidi di immagine	459
7.1.2	Codifica per sottobande	463
7.1.3	La trasformata di Haar	470
7.2	Espansioni multirisoluzione	473
7.2.1	Espansioni in serie	474
7.2.2	Funzioni di scaling	475
7.2.3	Funzioni wavelet	479
7.3	Trasformate wavelet in una dimensione	482
7.3.1	Espansioni in serie wavelet	483
7.3.2	La trasformata wavelet discreta	484
7.3.3	La trasformata wavelet continua	487
7.4	La trasformata wavelet veloce	490
7.5	Trasformate wavelet in due dimensioni	498
7.6	Pacchetti di wavelet	507
	Riepilogo	516
	Bibliografia	518
	Problemi	519
	<b>Capitolo 8 Compressione di immagini</b>	<b>523</b>
8.1	Principi essenziali	524
8.1.1	Codificare la ridondanza	526

8.1.2	Ridondanza spaziale e temporale	527
8.1.3	Informazione irrilevante	528
8.1.4	Misurare l'informazione delle immagini	529
8.1.5	Critici di fedeltà	532
8.1.6	Modelli di compressione di un'immagine	535
8.1.7	Formati di immagine, contenitori e standard di compressione	537
82	Alcuni metodi di base per la compressione	541
82.1	Codifica di Huffman	541
82.2	Codifica di Golomb	543
82.3	Codifica aritmetica	548
82.4	Codifica LZW	550
82.5	Codifica run-length	553
82.6	Codifica basata su simboli	559
82.7	Codifica per piani di bit (bit-plane)	563
82.8	Codifica a blocchi mediante trasformata	567
82.9	Codifica predittiva	586
82.10	Codifica wavelet	605
83	Watermarking delle immagini digitali	617
	Riepilogo	624
	Bibliografia	625
	Problemi	626
<b>Capitolo 9 La morfologia applicata alle immagini digitali</b>		
9.1	Concetti preliminari	631
9.2	Erosione e dilatazione	634
9.2.1	Erosione	634
9.2.2	Dilatazione	636
9.2.3	Dualità	638
9.3	Apertura e chiusura	639
9.4	Trasformazioni hit-or-miss	643
9.5	Alcuni algoritmi morfologici fondamentali	645
9.5.1	Estrazione di contorni	646
9.5.2	Riempimento di vuoti	646
9.5.3	Estrazione di componenti connesse	649
9.5.4	Involucro convesso	650
9.5.5	Assottigliamento	653
9.5.6	Ispezzimento	654
9.5.7	Scheletrizzazione	655
9.5.8	Potatura	658
9.5.9	Ricostruzione morfologica	660
9.5.10	Riepilogo delle operazioni morfologiche su immagini binarie	666
9.6	Morfologia in scala di grigio	669
9.6.1	Erosione e dilatazione	670
9.6.2	Apertura e chiusura	672
9.6.3	Alcuni algoritmi morfologici di base in scala di grigio	674
9.6.4	Ricostruzione morfologica in scala di grigio	680

	Riepilogo	684
	Bibliografia	684
	Problemi	685
<b>Capitolo 10 Segmentazione di immagini</b>		
10.1	Fondamenti	693
10.2	Individuazione di edge, linee e punti	694
10.2.1	Materiale di base	696
10.2.2	Individuazione di punti isolati	700
10.2.3	Individuazione di linee	702
10.2.4	Modelli di edge	706
10.2.5	Individuazione degli edge	710
10.2.6	Tecniche avanzate per l'individuazione degli edge	719
10.2.7	Edge-linking e individuazione dei bordi	732
10.3	Sogliaatura	744
10.3.1	Fondamenti	744
10.3.2	Sogliaatura globale	747
10.3.3	Sogliaatura globale utilizzando il metodo di Otsu	749
10.3.4	Utilizzo dello smoothing di un'immagine per migliorare la sogliaatura globale	754
10.3.5	Utilizzo dei contorni per migliorare la sogliaatura globale	756
10.3.6	Soglie multiple	759
10.3.7	Sogliaatura variabile	763
10.3.8	Sogliaatura multivariabile	768
10.4	Segmentazione basata sulle regioni	770
10.4.1	Region growing	770
10.4.2	Region splitting e merging	773
10.5	Segmentazione mediante watershed morfologica	776
10.5.1	Fondamenti	776
10.5.2	Costruzioni di dighe	777
10.5.3	Algoritmo di segmentazione watershed	779
10.5.4	Utilizzo dei marker	783
10.6	Uso del moto nella segmentazione	784
10.6.1	Tecniche spaziali	785
10.6.2	Tecniche nel dominio della frequenza	788
	Riepilogo	792
	Bibliografia	792
	Problemi	794
<b>Appendice A Tabelle di codifica per la compressione di immagini</b>		
<b>803</b>		
<b>Appendice B Risorse in rete</b>		
<b>807</b>		
<b>Indice analitico</b>		
<b>809</b>		