

Presentazione

A. Batori

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Nullam tellus mauris, feugiat vel pretium vel, facilisis vitae nisi. Praesent vitae nulla diam. Morbi volutpat adipiscing elit, in pharetra sapien pellentesque ut. Praesent at tristique elit. Morbi eget nisi a sapien placerat vulputate ac in magna. Cras nec justo lacus, eget commodo nisl. Donec non libero orci, in scelerisque mi. Donec eget sem enim, ut malesuada ipsum. Suspendisse laoreet convallis mattis. Fusce hendrerit, nisl ac laoreet sollicitudin, metus nibh feugiat massa, in aliquet enim mauris et quam. Suspendisse potenti. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos himenaeos. Donec nec ante lorem, et dapibus neque. Ut tempus magna nec libero vehicula tempus. Suspendisse potenti.

Donec vel ullamcorper mi. Sed ac libero vel elit convallis dictum nec eget mi. Donec facilisis eros et lacus facilisis vel euismod urna accumsan. Nulla ultricies lectus id leo ultrices mattis. Mauris a convallis justo. Morbi eu ante augue, nec interdum nisl. Ut blandit imperdiet ante, vitae placerat orci dapibus non. In iaculis enim eu massa elementum euismod. Donec vehicula mi ac nunc porttitor ullamcorper. Mauris ornare accumsan mauris. Vivamus lobortis metus id elit vehicula dapibus. Praesent feugiat consequat tellus, id eleifend orci lacinia quis. Nulla nec suscipit velit.

Cras ac congue justo. Curabitur eget

ante erat. Vestibulum at lectus non felis consequat ultricies ac non enim. In tempus eros quis tellus porttitor sagittis. Cras fringilla tincidunt elit, pharetra ornare lectus accumsan non. Cras in ultricies nisi. Duis at sapien tellus, quis dapibus massa. Maecenas in odio nunc. Proin ac ante sed neque ornare dignissim a sit amet purus. Praesent eu lectus enim. Mauris ultrices suscipit velit ut rutrum. Nullam quis lacinia augue. Fusce elit sapien, hendrerit at laoreet eu, tincidunt et eros. Suspendisse id nisi erat, aliquam aliquam ligula. Aliquam erat volutpat. Donec vel euismod eros. Vestibulum nec dolor luctus tortor auctor pharetra id lobortis dolor. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos himenaeos. Sed rutrum porta dolor, porttitor dictum eros venenatis a. Sed eget elit accumsan turpis bibendum sodales.

Aenean nibh enim, convallis vel sodales non, viverra quis urna. Vivamus suscipit risus non purus imperdiet in sollicitudin lectus consectetur. Vivamus quis velit ut lacus sagittis malesuada. Phasellus vitae dolor ut mauris auctor facilisis at quis augue. Aliquam molestie tortor eu nibh pharetra consectetur. Proin sapien neque, semper vitae mollis id, elementum id ante. Duis dolor augue, condimentum eu ultricies id, cursus eu eros. Quisque condimentum porttitor ligula sit amet aliquam. Ut ut risus orci, nec cursus lacus. Integer porta, augue eu ultrices tincidunt, odio elit imperdiet nulla,

ut aliquam justo metus id dui. Aliquam tincidunt magna nec eros tincidunt a dapibus nisl cursus. Mauris eget mi vel quam auctor euismod.

In nulla dui, facilisis non ullamcorper in, luctus quis leo. Fusce nec orci in diam porttitor blandit sit amet vel nibh. Ut ligula mauris, rhoncus ac pretium at, dignissim a risus. Nulla libero justo, mollis non hendrerit vel, aliquet ac nulla. Vestibulum eu felis turpis. Maecenas ultricies odio et quam aliquam adipiscing. Aliquam congue lobortis libero ut elementum. Cras massa felis, accumsan ut suscipit sit amet, faucibus hendrerit est. Maecenas a enim libero. Proin et dui tellus. Ut vel dui et lacus faucibus luctus. Proin enim odio, euismod quis sodales vitae, luctus non erat. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aenean ac nulla et eros molestie rutrum. Vestibulum hendrerit odio eu turpis imperdiet tristique. Etiam vel tempus lectus. Aliquam iaculis lacus vel metus suscipit non bibendum arcu pulvinar.

Indice

Presentazione (A. Batori)
Introduzione (D. Matè, M.C. Sclocchi)
Gli inizi e l'evoluzione della fotografia (L. Scaramella)
Il contesto storico e la storia dei generi fotografici (A. Manodori Sagredo)

SEZIONE 1: TEORIA E STORIA DELLE TECNICHE
Introduzione

Capitolo 1 Teoria dell'immagine analogica
1.1 Luce, fotometria e sensitometria (M. Missori)
 1.1.a Natura e caratteristiche della luce
 1.1.b Cenni di interazione radiazione-materia
 1.1.c Origine del colore dei materiali
 1.1.d Elementi di fotometria e sensitometria

1.2 La formazione dell'immagine in bianco e nero (G.E. Gigante, L. Residori)
 1.2.a Processo ad annerimento diretto
 1.2.b Processo a sviluppo
 1.2.c Altri processi

1.3 La formazione dell'immagine a colori (G.E. Gigante, L. Residori)
 1.3.a Il colore
 1.3.b Processi a colori

Capitolo 2 Teoria dell'immagine digitale
2.1 Composizione dell'immagine digitale (E. Giuzio, M. Lauria, F. Liberati)
 2.1.a Acquisizione digitale
 2.1.b Immagine digitale

2.2 Teoria della compressione dati (G.E. Gigante, L. Graniero, F. Liberati)
 2.2.a Nozioni basilari di teoria dell'informazione
 2.2.b Algoritmi di compressione

2.3 Teoria della compressione applicata all'immagine digitale (A. Giuliano, F. Inghima, F. Liberati)
 2.3.a Codifica delle immagini
 2.3.b Algoritmi di compressione sulle immagini

3.1 Ripresa, sviluppo e stampa della fotografia

- 3.1.a I primi procedimenti fotografici (S. Turco, S. Valentini)
- 3.1.b L'evoluzione di fine secolo (S. Turco, S. Valentini)
- 3.1.c I processi ai sali ferrici (S. Turco, S. Valentini)
- 3.1.d I processi al bicromato (S. Turco, S. Valentini)
- 3.1.e Tecniche di stampa fotomeccaniche (S. Turco, S. Valentini)
- 3.1.f Altri procedimenti ai sali metallici (D. Matè, A. Novo, A. Argiroffo)
- 3.1.g Una tecnica particolare: l'orotone (D. Matè)
- 3.1.h I supporti vari (D. Matè, A. Novo)
- 3.1.i Lo sviluppo istantaneo (R. Bianchi, D. Matè)
- 3.1.l La microriproduzione (R. Petrosino)

3.2 Ripresa, sviluppo e stampa della fotografia a colore (G. Biancofiore, P. Piccioni)

- 3.2.a Il colore e la sua percezione
- 3.2.b Gli inizi della storia della fotografia a colori
- 3.2.c Le lastre autochromes
- 3.2.d Dal '35 in poi: le pellicole
- 3.2.e I processi istantanei
- 3.2.f Il colore digitale

3.3 Impiego moderno delle tecniche storiche (A. Novo)

- 3.3.a Letteratura, associazioni, eventi e siti web
- 3.3.b Le tecniche

3.4 Apparati di ripresa e di visione

- 3.4.a Le fotocamere dagli inizi ad oggi (A. Corrao, M.C. Sclocchi)
- 3.4.b I visori nella storia (...)

3.5 La nascita del digitale (G.E. Gigante, F. Liberati)

- 3.5.a Sintesi della storia della fotografia digitale
- 3.5.b Prospettiva della fotografia digitale

3.6 Tecnologie di acquisizione digitale (F. Birimbelli, V. Carnevale, F. Liberati)

- 3.6.a Tipologie di sensori digitali
- 3.6.b Errori di acquisizione

3.7 Apparecchiature per l'acquisizione digitale (C. Primangeli, L. Primangeli)

- 3.7.a Aspetti preventivi alla digitalizzazione
- 3.7.b Linee guida e standard internazionali

- 3.7.c Tipologie di scanner
- 3.7.d Fasi successive alla progettazione
- 3.7.e Acquisizione digitale
- 3.7.f Controllo di qualità

SEZIONE II

STRUTTURA E COMPOSIZIONE

Introduzione

Capitolo 4

Componenti della fotografia analogica

4.1 Struttura

- 4.1.a Positivi monocromi su carta (D. Matè, P. Manzone, B. Cattaneo, A. Novo)
- 4.1.b Positivi a colori su carta (D. Matè, B. Cattaneo)
- 4.1.c Positivi su metalli, vetro e materie plastiche (B. Cattaneo, D. Matè)
- 4.1.d Negativi su carta, vetro e materie plastiche (B. Cattaneo, D. Matè)
- 4.1.e Stampe digitali (B. Cattaneo, D. Matè)

4.2 Sostanze fotosensibili e componenti dello sviluppo (A. Corazza, M. Placido, L. Residori)

- 4.2.a Sostanze fotosensibili, sviluppi e fissaggi: cenni e presupposti storici
- 4.2.b Alogenuri d'argento
- 4.2.c Composti e reazioni dello sviluppo

4.3 Supporti

- 4.3.a Carta (D. Matè, A. Novo, M.C. Sclocchi, A. Magistro)
- 4.3.b Metalli, vetro e materie plastiche (D. Matè, A. Novo, M.C. Sclocchi)
- 4.3.c Altri supporti (A. Novo, M.C. Sclocchi, D. Matè)

4.4 Leganti

- 4.4.a Sistemi colloidali (L. Residori)
- 4.4.b Collodio, albumina e gelatina (D. Matè, A. Corazza, M. Placido, L. Residori, A. Novo)
- 4.4.c Altri leganti (D. Matè, M.C. Sclocchi, A. Novo)

Capitolo 5

Caratteristiche e componenti della fotografia digitale

5.1 Caratteristiche dell'immagine digitale (C. Bellucci, F. De Agostini, F. Liberati)

- 5.1.a Aspetti dell'immagine digitale
- 5.1.b Rappresentazione dell'informazione cromatica nell'immagine digitale

5.2 Formati per le immagini digitali (D. Corciulo, F. Liberati, F. Pizzi, F. Rossini, M.T. Tanasi)

- 5.2.a Principali formati
- 5.2.b Classe di formati RAW
- 5.2.c Dimensione dei file grafici
- 5.3 Metadati (A. Di Iorio, A. Giovenco)
 - 5.3.a Metadati tecnici
 - 5.3.b Standard di metadati tecnici per le immagini digitali
 - 5.3.c Esempio applicativo di metadati tecnici
- 5.4 Supporti digitali (F. Liberati, F. Rafaelli, A. Rosi)
 - 5.4.a Nastri magnetici
 - 5.4.b Dischi magnetici
 - 5.4.c Dischi ottici
 - 5.4.d Memoria e stato solido
 - 5.4.e Nuove tecnologie

Capitolo 6

Riconoscimento delle tecniche fotografiche

- 6.1 Identificazione delle tecniche e dei componenti
 - 6.1.a Metodologie e strumenti per l'identificazione (S. Valentini)
 - 6.1.b Analisi del danno (D. Palazzi, D. Matè, B. Cattaneo)
 - 6.1.c Indagini scientifiche (A. Corazza, M. Placido, L. Residori)
- 6.2 Schede tecniche dei procedimenti
 - 6.2.a Immagini uniche (B. Cattaneo, D. Matè, M.C. Sclocchi, P. Piccioni)
 - 6.2.b Positivi argentici monocromi (S. Valentini)
 - 6.2.c Processi non argentici (S. Valentini)
 - 6.2.d Negativi argentici monocromi (B. Cattaneo, P. Piccioni)
 - 6.2.e Processi a colori (B. Cattaneo)
 - 6.2.f Processi fotomeccanici (S. Valentini)
- 6.3 Sistemi e supporti per la stampa digitale (A. Corrao)
 - 6.3.a Tecnologie per la stampa
 - 6.3.b Supporti per la stampa "Fine Art"

Capitolo 7

Trattamenti di modifica delle fotografie

- 7.1 La finitura delle fotografie
 - 7.1.a Gli interventi di *finishing* (D. Matè, B. Cattaneo)
 - 7.1.b Il procedimento di smaltatura delle stampe (A. Magistro)
 - 7.1.c L'applicazione delle vernici (B. Cattaneo, D. Matè, A. Novo)

7.2 La coloritura e il ritocco delle fotografie

- 7.2.a La coloritura dei dagherrotipi (M.G. Jacob, D. Matè)
- 7.2.b Le diverse tecniche di coloritura (D. Matè, M.G. Jacob)
- 7.2.c La coloritura per imbibizione (D. Matè)
- 7.2.d La fotominiatura (D. Matè, E. Damiano)
- 7.2.e Il ritocco (D. Matè)
- 7.2.f Le materie coloranti e gli inchiostri (D. Matè, A. Novo)

7.3 I viraggi (D. Matè, A. Novo, M. Placido, L. Residori)

- 7.3.a Il viraggio all'oro
- 7.3.b Il viraggio al platino e palladio
- 7.3.c Il viraggio al solfuro
- 7.3.d Il viraggio al selenio
- 7.3.e Il viraggio ai ferrocianuri
- 7.3.f I viraggi per mordenzatura
- 7.3.g Altri viraggi

Capitolo 8

Confezionamento delle fotografie

8.1 Il mounting delle fotografie

- 8.1.a Le immagini uniche (A. Argiroffo, D. Matè, F. Vitale)
- 8.1.b Le stampe su carta (D. Matè, A. Argiroffo)
- 8.1.c Le diapositive su vetro e pellicola (G. Chiesa, D. Matè, A. Argiroffo)
- 8.1.e Gli adesivi e le colle nel montaggio (B. Cattaneo, D. Matè, A. Novo)

8.2 Gli album fotografici

- 8.2.a Un "contenitore" di immagini (F. Delia)
- 8.2.b L'evoluzione storica dell'album (G. Chiesa, P. Gosio)
- 8.2.c L'album nel Novecento e la rivoluzione digitale (G. Chiesa, P. Gosio)

Introduzione

D. Matè, M.C. Sclocchi

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Nullam tellus mauris, feugiat vel pretium vel, facilisis vitae nisi. Praesent vitae nulla diam. Morbi volutpat adipiscing elit, in pharetra sapien pellentesque ut. Praesent at tristique elit. Morbi eget nisi a sapien placerat vulputate ac in magna. Cras nec justo lacus, eget commodo nisl. Donec non libero orci, in scelerisque mi. Donec eget sem enim, ut malesuada ipsum. Suspendisse laoreet convallis mattis. Fusce hendrerit, nisl ac laoreet sollicitudin, metus nibh feugiat massa, in aliquet enim mauris et quam. Suspendisse potenti. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos himenaeos. Donec nec ante lorem, et dapibus neque. Ut tempus magna nec libero vehicula tempus. Suspendisse potenti.

Donec vel ullamcorper mi. Sed ac libero vel elit convallis dictum nec eget mi. Donec facilisis eros et lacus facilisis vel euismod urna accumsan. Nulla ultricies lectus id leo ultrices mattis. Mauris a convallis justo. Morbi eu ante augue, nec interdum nisl. Ut blandit imperdiet ante, vitae placerat orci dapibus non. In iaculis enim eu massa elementum euismod. Donec vehicula mi ac nunc porttitor ullamcorper. Mauris ornare accumsan mauris. Vivamus lobortis metus id elit vehicula dapibus. Praesent feugiat consequat tellus, id eleifend orci lacinia quis. Nulla nec suscipit velit.

Cras ac congue justo. Curabitur eget

ante erat. Vestibulum at lectus non felis consequat ultricies ac non enim. In tempus eros quis tellus porttitor sagittis. Cras fringilla tincidunt elit, pharetra ornare lectus accumsan non. Cras in ultricies nisi. Duis at sapien tellus, quis dapibus massa. Maecenas in odio nunc. Proin ac ante sed neque ornare dignissim a sit amet purus. Praesent eu lectus enim. Mauris ultrices suscipit velit ut rutrum. Nullam quis lacinia augue. Fusce elit sapien, hendrerit at laoreet eu, tincidunt et eros. Suspendisse id nisi erat, aliquam aliquam ligula. Aliquam erat volutpat. Donec vel euismod eros. Vestibulum nec dolor luctus tortor auctor pharetra id lobortis dolor. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos himenaeos. Sed rutrum porta dolor, porttitor dictum eros venenatis a. Sed eget elit accumsan turpis bibendum sodales.

Aenean nibh enim, convallis vel sodales non, viverra quis urna. Vivamus suscipit risus non purus imperdiet in sollicitudin lectus consectetur. Vivamus quis velit ut lacus sagittis malesuada. Phasellus vitae dolor ut mauris auctor facilisis at quis augue. Aliquam molestie tortor eu nibh pharetra consectetur. Proin sapien neque, semper vitae mollis id, elementum id ante. Duis dolor augue, condimentum eu ultricies id, cursus eu eros. Quisque condimentum porttitor ligula sit amet aliquam. Ut ut risus orci, nec cursus lacus. Integer porta, augue eu ultrices tincidunt, odio elit imperdiet nulla,

ut aliquam justo metus id dui. Aliquam tincidunt magna nec eros tincidunt a dapibus nisl cursus. Mauris eget mi vel quam auctor euismod.

In nulla dui, facilisis non ullamcorper in, luctus quis leo. Fusce nec orci in diam porttitor blandit sit amet vel nibh. Ut ligula mauris, rhoncus ac pretium at, dignissim a risus. Nulla libero justo, mollis non hendrerit vel, aliquet ac nulla. Vestibulum eu felis turpis. Maecenas ultricies odio et quam aliquam adipiscing. Aliquam congue lobortis libero ut elementum. Cras massa felis, accumsan ut suscipit sit amet, faucibus hendrerit est. Maecenas a enim libero. Proin et dui tellus. Ut vel dui et lacus faucibus luctus. Proin enim odio, euismod quis sodales vitae, luctus non erat. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aenean ac nulla et eros molestie rutrum. Vestibulum hendrerit odio eu turpis imperdiet tristique. Etiam vel tempus lectus. Aliquam iaculis lacus vel metus suscipit non bibendum arcu pulvinar.

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Nullam tellus mauris, feugiat vel pretium vel, facilisis vitae nisi. Praesent vitae nulla diam. Morbi volutpat adipiscing elit, in pharetra sapien pellentesque ut. Praesent at tristique elit. Morbi eget nisi a sapien placerat vulputate ac in magna. Cras nec justo lacus, eget commodo nisl. Donec non libero orci, in scelerisque mi. Donec eget sem

enim, ut malesuada ipsum. Suspendisse laoreet convallis mattis. Fusce hendrerit, nisl ac laoreet sollicitudin, metus nibh feugiat massa, in aliquet enim mauris et quam. Suspendisse potenti. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos himenaeos. Donec nec ante lorem, et dapibus neque. Ut tempus magna nec libero vehicula tempus. Suspendisse potenti.

Donec vel ullamcorper mi. Sed ac libero vel elit convallis dictum nec eget mi. Donec facilisis eros et lacus facilisis vel euismod urna accumsan. Nulla ultricies lectus id leo ultrices mattis. Mauris a convallis justo. Morbi eu ante augue, nec

interdum nisl. Ut blandit imperdiet ante, vitae placerat orci dapibus non. In iaculis enim eu massa elementum euismod. Donec vehicula mi ac nunc porttitor ullamcorper. Mauris ornare accumsan mauris. Vivamus lobortis metus id elit vehicula dapibus. Praesent feugiat consequat tellus, id eleifend orci lacinia quis. Nulla nec suscipit velit.

Cras ac congue justo. Curabitur eget ante erat. Vestibulum at lectus non felis consequat ultricies ac non enim. In tempus eros quis tellus porttitor sagittis. Cras fringilla tincidunt elit, pharetra ornare lectus accumsan non. Cras in ultricies nisi. Duis at sapien tellus, quis dapi-

bus massa. Maecenas in odio nunc. Proin ac ante sed neque ornare dignissim a sit amet purus. Praesent eu lectus enim. Mauris ultrices suscipit velit ut rutrum. Nullam quis lacinia augue. Fusce elit sapien, hendrerit at laoreet eu, tincidunt et eros. Suspendisse id nisi erat, aliquam aliquam ligula. Aliquam erat volutpat. Donec vel euismod eros. Vestibulum nec dolor luctus tortor auctor pharetra id lobortis dolor. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos himenaeos. Sed rutta dolor, .

Gli inizi e l'evoluzione della fotografia

L. Scaramella

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Nullam tellus mauris, feugiat vel pretium vel, facilisis vitae nisi. Praesent vitae nulla diam. Morbi volutpat adipiscing elit, in pharetra sapien pellentesque ut. Praesent at tristique elit. Morbi eget nisi a sapien placerat vulputate ac in magna. Cras nec justo lacus, eget commodo nisl. Donec non libero orci, in scelerisque mi. Donec eget sem enim, ut malesuada ipsum. Suspendisse laoreet convallis mattis. Fusce hendrerit, nisl ac laoreet sollicitudin, metus nibh feugiat massa, in aliquet enim mauris et quam. Suspendisse potenti. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos himenaeos. Donec nec ante lorem, et dapibus neque. Ut tempus magna nec libero vehicula tempus. Suspendisse potenti.

Donec vel ullamcorper mi. Sed ac libero vel elit convallis dictum nec eget mi. Donec facilisis eros et lacus facilisis vel euismod urna accumsan. Nulla ultricies lectus id leo ultrices mattis. Mauris a convallis justo. Morbi eu ante augue, nec interdum nisl. Ut blandit imperdiet ante, vitae placerat orci dapibus non. In iaculis enim eu massa elementum euismod. Donec vehicula mi ac nunc porttitor ullamcorper. Mauris ornare accumsan mauris. Vivamus lobortis metus id elit vehicula dapibus. Praesent feugiat consequat tellus, id eleifend orci lacinia quis. Nulla nec suscipit velit.

Cras ac congue justo. Curabitur eget

ante erat. Vestibulum at lectus non felis consequat ultricies ac non enim. In tempus eros quis tellus porttitor sagittis. Cras fringilla tincidunt elit, pharetra ornare lectus accumsan non. Cras in ultricies nisi. Duis at sapien tellus, quis dapibus massa. Maecenas in odio nunc. Proin ac ante sed neque ornare dignissim a sit amet purus. Praesent eu lectus enim. Mauris ultrices suscipit velit ut rutrum. Nullam quis lacinia augue. Fusce elit sapien, hendrerit at laoreet eu, tincidunt et eros. Suspendisse id nisi erat, aliquam aliquam ligula. Aliquam erat volutpat. Donec vel euismod eros. Vestibulum nec dolor luctus tortor auctor pharetra id lobortis dolor. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos himenaeos. Sed rutrum porta dolor, porttitor dictum eros venenatis a. Sed eget elit accumsan turpis bibendum sodales.

Aenean nibh enim, convallis vel sodales non, viverra quis urna. Vivamus suscipit risus non purus imperdiet in sollicitudin lectus consectetur. Vivamus quis velit ut lacus sagittis malesuada. Phasellus vitae dolor ut mauris auctor facilisis at quis augue. Aliquam molestie tortor eu nibh pharetra consectetur. Proin sapien neque, semper vitae mollis id, elementum id ante. Duis dolor augue, condimentum eu ultricies id, cursus eu eros. Quisque condimentum porttitor ligula sit amet aliquam. Ut ut risus orci, nec cursus lacus. Integer porta, augue eu ultrices tincidunt, odio elit imperdiet nulla,

ut aliquam justo metus id dui. Aliquam tincidunt magna nec eros tincidunt a dapibus nisl cursus. Mauris eget mi vel quam auctor euismod.

In nulla dui, facilisis non ullamcorper in, luctus quis leo. Fusce nec orci in diam porttitor blandit sit amet vel nibh. Ut ligula mauris, rhoncus ac pretium at, dignissim a risus. Nulla libero justo, mollis non hendrerit vel, aliquet ac nulla. Vestibulum eu felis turpis. Maecenas ultricies odio et quam aliquam adipiscing. Aliquam congue lobortis libero ut elementum. Cras massa felis, accumsan ut suscipit sit amet, faucibus hendrerit est. Maecenas a enim libero. Proin et dui tellus. Ut vel dui et lacus faucibus luctus. Proin enim odio, euismod quis sodales vitae, luctus non erat. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aenean ac nulla et eros molestie rutrum. Vestibulum hendrerit odio eu turpis imperdiet tristique. Etiam vel tempus lectus. Aliquam iaculis lacus vel metus suscipit non bibendum arcu pulvinar.

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Nullam tellus mauris, feugiat vel pretium vel, facilisis vitae nisi. Praesent vitae nulla diam. Morbi volutpat adipiscing elit, in pharetra sapien pellentesque ut. Praesent at tristique elit. Morbi eget nisi a sapien placerat vulputate ac in magna. Cras nec justo lacus, eget commodo nisl. Donec non libero orci, in scelerisque mi. Donec eget sem

enim, ut malesuada ipsum. Suspendisse laoreet convallis mattis. Fusce hendrerit, nisl ac laoreet sollicitudin, metus nibh feugiat massa, in aliquet enim mauris et quam. Suspendisse potenti. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos himenaeos. Donec nec ante lorem, et dapibus neque. Ut tempus magna nec libero vehicula tempus. Suspendisse potenti.

Donec vel ullamcorper mi. Sed ac libero vel elit convallis dictum nec eget mi. Donec facilisis eros et lacus facilisis vel euismod urna accumsan. Nulla ultricies lectus id leo ultrices mattis. Mauris a convallis justo. Morbi eu ante augue, nec interdum nisl. Ut blandit imperdiet ante, vitae placerat orci dapibus non. In iaculis enim eu massa elementum euismod. Donec vehicula mi ac nunc porttitor ullamcorper. Mauris ornare accumsan mauris. Vivamus lobortis metus id elit vehicula dapibus. Praesent feugiat consequat tellus, id eleifend orci lacinia quis. Nulla nec suscipit velit.

Cras ac congue justo. Curabitur eget ante erat. Vestibulum at lectus non felis consequat ultricies ac non enim. In tempus eros quis tellus porttitor sagittis. Cras fringilla tincidunt elit, pharetra ornare lectus accumsan non. Cras in ultricies nisi. Duis at sapien tellus, quis dapibus massa. Maecenas in odio nunc. Proin ac ante sed neque ornare dignissim a sit amet purus. Praesent eu lectus enim. Mauris ultrices suscipit velit ut ru-

trum. Nullam quis lacinia augue. Fusce elit sapien, hendrerit at laoreet eu, tincidunt et eros. Suspendisse id nisi erat, aliquam aliquam ligula. Aliquam erat volutpat. Donec vel euismod eros. Vestibulum nec dolor luctus tortor auctor pharetra id lobortis dolor. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos himenaeos. Sed rutrum porta dolor, porttitor dictum eros venenatis a. Sed eget elit ac Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Nullam tellus mauris, feugiat vel pretium vel, facilisis vitae nisi. Praesent vitae nulla diam. Morbi volutpat adipiscing elit, in pharetra sapien pellentesque ut. Praesent at tristique elit. Morbi eget nisi a sapien placerat vulputate ac in magna. Cras nec justo lacus, eget commodo nisl. Donec non libero orci, in scelerisque mi. Donec eget sem enim, ut malesuada ipsum. Suspendisse laoreet convallis mattis. Fusce hendrerit, nisl ac laoreet sollicitudin, metus nibh feugiat massa, in aliquet enim mauris et quam. Suspendisse potenti. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos himenaeos. Donec nec ante lorem, et dapibus neque. Ut tempus magna nec libero vehicula tempus. Suspendisse potenti.

Donec vel ullamcorper mi. Sed ac libero vel elit convallis dictum nec eget mi. Donec facilisis eros et lacus facilisis vel euismod urna accumsan. Nulla ultricies lectus id leo ultrices mattis. Mauris a convallis justo. Morbi eu ante augue, nec

interdum nisl. Ut blandit imperdiet ante, vitae placerat orci dapibus non. In iaculis enim eu massa elementum euismod. Donec vehicula mi ac nunc porttitor ullamcorper. Mauris ornare accumsan mauris. Vivamus lobortis metus id elit vehicula dapibus. Praesent feugiat consequat tellus, id eleifend orci lacinia quis. Nulla nec suscipit velit.

Cras ac congue justo. Curabitur eget ante erat. Vestibulum at lectus non felis consequat ultricies ac non enim. In tempus eros quis tellus porttitor sagittis. Cras fringilla tincidunt elit, pharetra ornare lectus accumsan non. Cras in ultricies nisi. Duis at sapien tellus, quis dapibus massa. Maecenas in odio nunc. Proin ac ante sed neque ornare dignissim a sit amet purus. Praesent eu lectus enim. Mauris ultrices suscipit velit ut rutrum. Nullam quis lacinia augue. Fusce elit sapien, hendrerit at laoreet eu, tincidunt et eros. Suspendisse id nisi erat, aliquam aliquam ligula. Aliquam erat volutpat. Donec vel euismod eros. Vestibulum nec dolor luctus tortor auctor pharetra id lobortis dolor. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos himenaeos. Sed rutrum porta dolor, porttitor dictum eros venenatis a. Sed eget elit ac

Il contesto storico e la storia dei generi fotografici

A. Manodori Sagredo

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Nullam tellus mauris, feugiat vel pretium vel, facilisis vitae nisi. Praesent vitae nulla diam. Morbi volutpat adipiscing elit, in pharetra sapien pellentesque ut. Praesent at tristique elit. Morbi eget nisi a sapien placerat vulputate ac in magna. Cras nec justo lacus, eget commodo nisl. Donec non libero orci, in scelerisque mi. Donec eget sem enim, ut malesuada ipsum. Suspendisse laoreet convallis mattis. Fusce hendrerit, nisl ac laoreet sollicitudin, metus nibh feugiat massa, in aliquet enim mauris et quam. Suspendisse potenti. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos himenaeos. Donec nec ante lorem, et dapibus neque. Ut tempus magna nec libero vehicula tempus. Suspendisse potenti.

Donec vel ullamcorper mi. Sed ac libero vel elit convallis dictum nec eget mi. Donec facilisis eros et lacus facilisis vel euismod urna accumsan. Nulla ultricies lectus id leo ultrices mattis. Mauris a convallis justo. Morbi eu ante augue, nec interdum nisl. Ut blandit imperdiet ante, vitae placerat orci dapibus non. In iaculis enim eu massa elementum euismod. Donec vehicula mi ac nunc porttitor ullamcorper. Mauris ornare accumsan mauris. Vivamus lobortis metus id elit vehicula dapibus. Praesent feugiat consequat tellus, id eleifend orci lacinia quis. Nulla nec suscipit velit.

Cras ac congue justo. Curabitur eget

ante erat. Vestibulum at lectus non felis consequat ultricies ac non enim. In tempus eros quis tellus porttitor sagittis. Cras fringilla tincidunt elit, pharetra ornare lectus accumsan non. Cras in ultricies nisi. Duis at sapien tellus, quis dapibus massa. Maecenas in odio nunc. Proin ac ante sed neque ornare dignissim a sit amet purus. Praesent eu lectus enim. Mauris ultrices suscipit velit ut rutrum. Nullam quis lacinia augue. Fusce elit sapien, hendrerit at laoreet eu, tincidunt et eros. Suspendisse id nisi erat, aliquam aliquam ligula. Aliquam erat volutpat. Donec vel euismod eros. Vestibulum nec dolor luctus tortor auctor pharetra id lobortis dolor. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos himenaeos. Sed rutrum porta dolor, porttitor dictum eros venenatis a. Sed eget elit accumsan turpis bibendum sodales.

Aenean nibh enim, convallis vel sodales non, viverra quis urna. Vivamus suscipit risus non purus imperdiet in sollicitudin lectus consectetur. Vivamus quis velit ut lacus sagittis malesuada. Phasellus vitae dolor ut mauris auctor facilisis at quis augue. Aliquam molestie tortor eu nibh pharetra consectetur. Proin sapien neque, semper vitae mollis id, elementum id ante. Duis dolor augue, condimentum eu ultricies id, cursus eu eros. Quisque condimentum porttitor ligula sit amet aliquam. Ut ut risus orci, nec cursus lacus. Integer porta, augue eu ultrices tincidunt, odio elit imperdiet nulla,

ut aliquam justo metus id dui. Aliquam tincidunt magna nec eros tincidunt a dapibus nisl cursus. Mauris eget mi vel quam auctor euismod.

In nulla dui, facilisis non ullamcorper in, luctus quis leo. Fusce nec orci in diam porttitor blandit sit amet vel nibh. Ut ligula mauris, rhoncus ac pretium at, dignissim a risus. Nulla libero justo, mollis non hendrerit vel, aliquet ac nulla. Vestibulum eu felis turpis. Maecenas ultricies odio et quam aliquam adipiscing. Aliquam congue lobortis libero ut elementum. Cras massa felis, accumsan ut suscipit sit amet, faucibus hendrerit est. Maecenas a enim libero. Proin et dui tellus. Ut vel dui et lacus faucibus luctus. Proin enim odio, euismod quis sodales vitae, luctus non erat. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aenean ac nulla et eros molestie rutrum. Vestibulum hendrerit odio eu turpis imperdiet tristique. Etiam vel tempus lectus. Aliquam iaculis lacus vel metus suscipit non bibendum arcu pulvinar.

Sezione 1

Teoria e storia delle tecniche

1 Teoria dell'immagine analogica

1.1 Luce, fotometria e sensitometria

- 1.1.a Natura e caratteristiche della luce
- 1.1.b Cenni di interazione radiazione-materia
- 1.1.c Origine del colore dei materiali
- 1.1.d Elementi di fotometria e sensitometria

1.2 La formazione dell'immagine in bianco e nero

- 1.2.a Processo ad annerimento diretto
- 1.2.b Processo a sviluppo
- 1.2.c Altri processi

1.3 La formazione dell'immagine a colori

- 1.3.a Il colore
- 1.3.b Processi a colori

1.1 Luce, fotometria e sensitometria

M. Missori

Si intende qui fornire conoscenze di base sul fenomeno fisico chiamato luce, quale elemento fondamentale del procedimento fotografico. In particolare, sarà affrontato il tema della generazione della luce, della sua interazione con i materiali, della sensazione fisiologica connessa con la presenza di luce chiamata colore, della misura dell'intensità della luce e dell'effetto che ha sui materiali fotografici.

La natura della luce è studiata da quella parte della fisica detta elettromagnetismo e, in particolare, nell'ottica. In questo paragrafo, allo scopo di meglio introdurre il lettore all'argomento, si ricostruirà brevemente il cammino storico verso la comprensione dei fenomeni luminosi fino al modello oggi accettato. Ci soffermeremo su quelle tappe che hanno rivelato aspetti dei fenomeni luminosi che poi si sono rivelati corretti e che sono oggi utilizzati per descrivere le proprietà della luce.

1.1.a Natura e caratteristiche della luce

Innanzitutto si definisce la luce come una forma di energia raggiante, che non viene, cioè, accumulata indefinitamente dal corpo che l'ha generata, ma che viene continuamente irradiata nello spazio circostante. Come sarà spiegato in seguito, la luce si propaga nello spazio circostante per mezzo di onde elettromagnetiche. Come ogni onda elettromagnetica, la luce è la testimonianza di processi di trasformazione della materia

nei quali è liberata energia.

Chiarire la natura della luce ha impegnato le migliori menti per molti secoli sin dalla Grecia classica [Weiss, 2005]. Per la Scuola pitagorica (V secolo a.C.) la luce era un fluido che veniva emesso dagli occhi e vi ritornava con l'immagine degli oggetti circostanti. Per Democrito (V-IV secolo a.C.) e gli atomisti successivi, invece, gli oggetti emettevano senza interruzione delle immagini materiali, tanto sottili però da non svuotare i corpi che le producevano. La prima tesi fu sostenuta anche da Platone (V-IV secolo a.C.) e poi da Euclide (IV secolo a.C.), che sarà anche l'iniziatore dell'ottica geometrica. Dopo il contributo greco il testimone passò al mondo islamico. I progressi più significativi furono dovuti a Alhazen (circa 1000 d.C.) che intuì la separazione fra l'agente fisico che produce la visione e la sua percezione per mezzo dell'occhio. Inoltre si interessò di ottica geometrica, delle lenti, degli specchi e delle loro aberrazioni. Le sue idee furono riprese durante il medioevo europeo dal polacco Witelo. Nella sua opera *Perspectiva*, edita a Padova nel 1572, egli introdusse, tra l'altro, l'ipotesi che la luce sia costituita da minuscole particelle molto veloci. Fra medioevo e rinascimento si approfondirono soprattutto gli aspetti pratici dell'ottica, come la produzione di lenti per occhiali. Leonardo da Vinci osservò l'analogia fra l'occhio e la camera oscura (che rappresenta l'antesignano della fotocamera moderna) mentre Francesco Maurolico (1554) investigò la funzione del cristallino. Nel

1604 Johannes Kepler (detto Keplero) propose la teoria secondo cui i raggi di luce vengono emessi in numero infinito e in tutte le direzioni da ogni punto degli oggetti.

All'inizio del '600 la disputa sulla veridicità delle immagini osservate con il cannocchiale, che era stato appena utilizzato come strumento scientifico da parte di Galilei, aveva finito per porre al centro dell'attenzione 3 ordini di problemi oramai riconosciuti distinti: la natura della luce, il meccanismo della visione e le problematiche dell'ottica geometrica. Con l'avvento del metodo sperimentale anche le teorie della luce cominciarono a basarsi sull'osservazione oggettiva dei fenomeni e sulla loro spiegazione mediante modelli matematici [Frova, 1984].

Il fisico olandese Christiaan Huygens (1629-1695) sostenne che le onde si propagavano in un mezzo sottilissimo detto etere. Tale considerazione era sorta dall'osservazione che le onde luminose si propagano anche nel vuoto, come nello spazio interplanetario, a differenza del suono, sebbene la propagazione di quest'ultimo avvenga sempre tramite onde. Con Huygens il fenomeno luminoso viene così associato ai fenomeni delle onde, intuizione che si rivelerà esatta. Le onde sono perturbazioni fisiche che, prodotte in un punto dello spazio, si propagano e producono un effetto in un altro punto. Un esempio facilmente intuibile di onde sono, quelle prodotte dalla caduta di un oggetto sulla superficie dell'acqua. Isaac Newton (1642-1727), considerando che le

onde hanno la proprietà di aggirare gli ostacoli, cosa che non sembrava vera per la luce, concluse che quest'ultima doveva essere costituita da minute particelle emesse dalla sorgente ad altissima velocità. Queste particelle facevano apparire illuminati gli oggetti dai quali venivano riflesse. Newton scoprì sperimentalmente che la luce bianca è in realtà una miscela di diversi colori (componenti cromatiche), i cui raggi vengono deviati in maniera differente dai materiali trasparenti, spiegando anche il fenomeno dell'arcobaleno: ad un estremo appare una colorazione rossa (onde più lunghe), in successione gli altri colori fino ad arrivare all'estremo opposto in cui è evidente una colorazione violetta (onde più corte). La distribuzione delle intensità luminose delle diverse componenti cromatiche in funzione della lunghezza d'onda è detta spettro della sorgente luminosa.

Con il modello di Newton l'ipotesi dell'esistenza dell'etere per spiegare la propagazione delle onde luminose nel vuoto non era più necessaria. Tuttavia la teoria ondulatoria spiegava bene la maggior parte dei fenomeni ottici mentre quella corpuscolare sembrava necessaria per il fenomeno della formazione delle ombre nette. Lo stesso Newton, per risolvere questo apparente paradosso, propose che la luce poteva avere una specie di doppia natura, per cui in taluni fenomeni essa manifesta le sue proprietà ondulatorie e in altri quelle corpuscolari, geniale intuizione che si rivelerà esatta due secoli dopo grazie al contri-

buto di Albert Einstein [Segre, 1996].

All'inizio del XIX secolo alcuni esperimenti fondamentali stabilirono in modo decisivo la supremazia della teoria ondulatoria su quella corpuscolare. Grazie al lavoro di Thomas Young (data per omogeneità) e di Augustin Fresnel (data per omogeneità) si dimostrò che la luce poteva dar luogo a interferenze, ossia, sommando luce a luce, si poteva ottenere oscurità. Questo fatto è facilmente spiegabile con la teoria ondulatoria, poiché due onde di fase opposta e della stessa ampiezza possono annullarsi, mentre questo è inspiegabile con la teoria corpuscolare. Gli esperimenti di Young e la trattazione matematica di Fresnel sembrarono stabilire in modo chiaro e definitivo il carattere ondulatorio della luce.

Le equazioni di Maxwell (1864) resero conto di tutti i fenomeni luminosi allora noti riducendoli a onde elettromagnetiche. Maxwell arrivò a calcolare la velocità con cui le onde elettromagnetiche si propagano dalla sorgente che le ha generate. Tale velocità coincideva sperimentalmente con quella della luce, a quel tempo già misurata con difficoltà ma abbastanza precisi esperimenti.

Se per la comprensione della natura della luce grandi passi erano stati compiuti, un aspetto che rimaneva da comprendere era l'interazione fra la luce e la materia. Non si capiva ancora il meccanismo con il quale la luce poteva essere emessa dai corpi luminosi oppure assorbita da quelli opachi oppure trasmessa da quelli trasparenti.

Sul finire dell'800 i progressi tecnologici consentirono di fare esperimenti di interazione fra la luce e i corpi materiali che non riuscirono ad essere spiegati mediante la teoria ondulatoria e la loro spiegazione aprì la strada alla concezione moderna della radiazione e della luce: questi esperimenti sono la misura dell'emissione termica e dell'effetto fotoelettrico. L'emissione termica riveste particolare importanza sia perché molte sorgenti luminose sono di origine termica sia per il concetto di temperatura di colore, come sarà visto in dettaglio nel seguito. Ad ogni modo, si può anticipare che l'intensità e la distribuzione spettrale della radiazione emessa da un corpo riscaldato dipendono fortemente dalla sua temperatura.

Nel 1900, per spiegare lo spettro della luce emessa da un corpo ad alta temperatura, il fisico tedesco Max Planck (1858-1947), fu costretto ad introdurre l'ipotesi che gli atomi assorbissero (o emettesse) energia luminosa in quantità discreta, ovvero in maniera non continua, secondo la formula:

$$E = n \times h \times f \quad \S 1$$

che a parole significa che l'energia trasportata dalla luce (E) è uguale a n (dove n è un numero intero) per la cosiddetta costante di Planck (h) per, infine, la frequenza dell'onda luminosa (f) [Segre, 1996].

Nel 1905 Albert Einstein (1879-1955) generalizzò ed estese la teoria di Planck spiegando l'effetto fotoelettrico ed arrivò alla conclusione che la luce è composta di quanti di energia, detti successivamente

fotoni, una sorta di quasi corpuscoli che trasportano una ben definita quantità di energia, secondo la formula §1.

Riassumendo, il fotone è la più piccola quantità di qualunque tipo di radiazione elettromagnetica, come un atomo è la più piccola quantità di materia [Frova, 1984]. Può essere descritto come un grumo di energia che si muove sempre alla velocità della luce pari a 299.792 km/s. Questi corpuscoli possiedono una doppia natura, corpuscolare e ondulatoria: i due vecchi modelli dei tempi di Huygens e Newton appaiono entrambi confermati. Se consideriamo il fotone come un'onda, allora questa può essere caratterizzata dai seguenti parametri [AA.VV., 1985].

Lunghezza d'onda (simbolo λ). Si misura in metri, oppure nei suoi multipli e sottomultipli. La lunghezza dell'onda è la misura della distanza fra 2 punti in fase dell'onda stessa (ad esempio cresta-cresta oppure minimo-minimo e così via). Nella terminologia tecnica e scientifica vengono usate le seguenti abbreviazioni riportate nella **tabella 1**.

Esiste, infine, un'unità di misura particolare per le lunghezze, indicato dal simbolo \AA , che corrisponde a $0,000000001 \text{ m} = 10^{-10} \text{ m}$.

Frequenza (f). Si misura in Hertz (simbolo Hz), ma sono molto comuni i suoi multipli kHz, MHz, GHz, ecc. La frequenza rappresenta il numero di oscillazioni che compie l'onda in un secondo.

Ampiezza d'onda. L'ampiezza dell'onda

Tabella 1 **Abbreviazioni riportate nella terminologia tecnica e scientifica**

NUMERO IN FORMA DECIMALE	NUMERO IN FORMA DI POTENZE DI 10	SIMBOLO TECNICO
1000000000	10 ⁹	G
1000000	10 ⁶	M
1000	10 ³	k
0.001	10 ⁻³	m
0.000001	10 ⁻⁶	m (*)
0.000000001	10 ⁻⁹	n

corrisponde alla massima intensità del campo elettromagnetico raggiunta durante le oscillazioni (si misura nelle unità del campo elettrico o magnetico) (Fig. 1). Nella pratica si definisce, inoltre, l'intensità I dell'onda (proporzionale al valore medio del quadrato del campo elettrico) che si misura in watt (simbolo W). Ad esempio l'intensità complessiva di tutto lo spettro solare a livello del mare è di circa 1 kW per m².

La relazione matematica fondamentale delle onde in generale e, quindi, anche di quelle elettromagnetiche è:

$$\lambda \times f = v \quad \S 2$$

ovvero lunghezza d'onda (λ) per la frequenza (f) è pari alla velocità di propagazione (v), che nel caso elettromagnetico è pari a circa 300.000 km/s (velocità della luce). Nota la lunghezza d'onda è possibile ricavare la frequenza e viceversa.

Spettro elettromagnetico. Tramite i valori

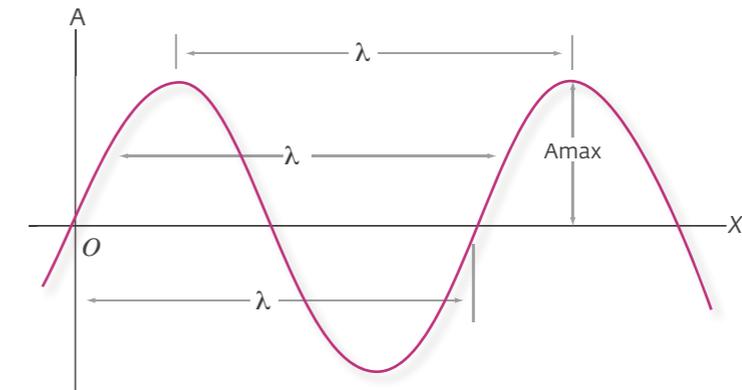


Figura 1 Andamento dell'ampiezza A di un'onda in funzione dello spazio. È rappresentata in tre diverse posizioni la lunghezza d'onda λ .

(*) Nel caso delle lunghezze, un micrometro è anche detto micron.

della lunghezza d'onda è possibile classificare in maniera coincisa la radiazione elettromagnetica, ad esempio raggi X, ultravioletto (UV), visibile, infrarosso (IR), onde radio. Nell'intervallo visibile la lunghezza d'onda determina il colore della luce percepito dal nostro occhio.

Rimarchiamo ancora il fatto che la luce visibile è solo una piccola porzione dell'intero spettro elettromagnetico (Fig. 2). La luce che siamo in grado di vedere è solitamente un miscuglio di lunghezze d'on-

da differenti, come scoperto da Newton.

I raggi ultravioletti (UV) costituiscono complessivamente circa l'8% della radiazione solare e si dividono in UV-A (lunghezza d'onda compresa fra 315 e 400 nm), responsabili dell'abbronzatura e delle reazioni fotosensibili, UV-B (280 e 315 nm) che causano le scottature e sono implicati in alcune forme di carcinoma cutaneo, UV-C (lunghezza d'onda compresa fra 200 e 290 nm), sono i più pericolosi, sono assorbiti dallo strato di ozono pre-

sente nell'alta atmosfera terrestre.

I raggi infrarossi (IR) si riferiscono alla radiazione elettromagnetica che appartiene alla regione dello spettro elettromagnetico posta oltre il rosso e la cui lunghezza d'onda è compresa tra 0.7 e 1000 micron. Negli studi scientifici si distingue un vicino infrarosso nel caso di lunghezze d'onda da 0.7 a 1.3 micron circa; un infrarosso medio per lunghezza d'onda da 1.3 a 6 micron circa; un infrarosso lontano per lunghezza d'onda da 7 a 15 micron circa. Un particolare intervallo dell'infrarosso, che va da 0.7 a 0.9 micron, è detto fotografico perché alcune pellicole speciali (dette appunto infrarosse) sono sensibili fino a queste lunghezze d'onda.

Le sorgenti di luce si possono generalmente suddividere in genere in:

1. luce naturale (luce diurna);
2. lampade ad incandescenza;
3. luce istantanea (scarica elettrica - lampo elettronico flash);
4. lampade a scarica nei gas (al neon, ai vapori di mercurio, xenon ad alta pressione, ecc);
5. sorgente a LED (*Ligth Emitting Diode*).

In fotografia vengono utilizzate prevalentemente le prime tre.

Capostipite delle sorgenti luminose è comunque la sorgente termica ovvero una sorgente che emette luce solo perché riscaldata ad alta temperatura (l'idealizzazione fisica di tale sorgente è detta corpo nero, ovvero un corpo che assorbe tutte le radiazioni e le emette solo in quanto è riscaldato). La legge teorica che ci for-

nisce l'intensità e la lunghezza d'onda della radiazione emessa in funzione della temperatura da un corpo riscaldato è detta legge di Plank (1900). Una lampada ad incandescenza oppure lo stesso sole appartengono a tale categoria e ben approssimano la legge di Plank.

Dalla radiazione di corpo nero nasce il concetto di temperatura di colore:

TEMPERATURA DI COLORE =

la temperatura di un corpo nero che emette radiazione di cromaticità più vicina a quella della radiazione luminosa considerata.

La temperatura di colore della sorgente definisce quindi il colore della luce emessa. Viene espressa in gradi Kelvin (K) ($K = ^\circ C + 273,15$)

Più alto è il suo valore, più dominanti saranno le radiazioni viola e blu dello spettro e la luce risultante sarà più bianca e fredda (Tabella 2).

Per ottenere una fedele riproduzione dei colori in una fotografia è perciò necessario utilizzare una pellicola ottimizzata per la sorgente di luce, quest'ultima definita per la sua temperatura di colore. Le pellicole a colori che vengono utilizzate per uso generico sono tarate per fornire la corretta riproduzione cromatica per sorgenti luminose con temperatura di colore di 5500 K, che corrispondono alle condizioni di illuminazione all'aperto in una giornata media. Se si utilizza questo tipo di pellicola con delle lampade ad incandescenza da appartamento di otter-

Tabella 2 Temperatura di colore di alcune sorgenti di luce usate in fotografia

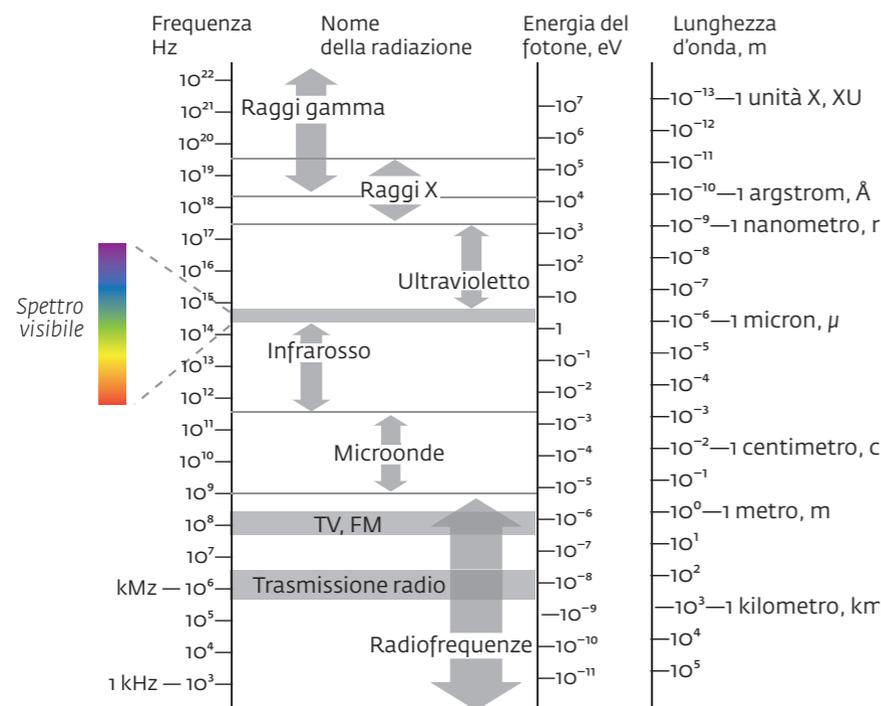
TIPO DI SORGENTE	TEMPERATURA DI COLORE T _c (K)
sole all'alba	1850
sole dopo 1 ora dall'alba	3500
sole a mezzogiorno d'estate	5500
Luna	4100
cielo coperto	6500
cielo leggermente coperto	13000
cielo azzurro intenso o nord	25000
lampade ad incandescenza	da 2400 a 3000
lampade da proiezione	da 2850 a 3200
lampade fluorescenti warm white (calda)	3000
lampade fluorescenti white (bianca)	3500
lampade fluorescenti cool white (bianca fredda)	4500
lampade fluorescenti daylight (diurna)	6500
lampe elettronico allo xenon	5500

rà una dominante rossa. Nella fotografia digitale questo problema viene risolto con la cosiddetta taratura del bianco, con la quale si bilancia per mezzo del software la risposta cromatica dell'elemento sensibile (CCD).

Si accenna infine alla lampada di Wood [Weiss, 2005]. Essa fu sviluppata dal fisico americano Robert Williams Wood (1868-1955) come sorgente di luce per comunicazioni durante la prima guerra mondiale. Il filtro di vetro speciale, detto filtro di Wood, assorbe le componenti visibili della luce e lascia passare le radiazioni invisibili UV comprese fra 320 e 400 nm circa

con un massimo di trasmissione a 365 nm. Il filtro di Wood è un vetro al bario, sodio e silicato ed incorpora inoltre il 9% di ossido di nichel. Il suo aspetto visibile è violetto scuro. Esso è utilizzato nelle tecniche fotografiche dell'ultravioletto riflesso o della fluorescenza ultravioletta, ma ha anche un grande uso nell'osservazione visuale di opere grafiche in genere, a causa della fluorescenza che è in grado di generare nei materiali che porta spesso a discriminare componenti altrimenti non visibili ad occhio nudo.

Fig. 2 Lo spettro elettromagnetico con indicati i nomi delle diverse bande, le frequenze, le energie dei fotoni e le lunghezze d'onda associate. È evidenziata la parte dello spettro visibile.



1.1.b

Cenni di interazione radiazione-materia

Nel momento in cui della radiazione elettromagnetica incide su di un materiale, si possono avere i seguenti fenomeni [AA.VV., 1985]:

- riflessione speculare e diffusa;
- rifrazione;
- dispersione della luce;
- assorbimento ottico;
- luminescenza;
- altri fenomeni più complessi come diffrazione, diffusione anelastica, emissione stimolata, fotoconduttività, ed effetti fotochimici dei materiali fotografici.

Per quanto concerne la fotografia, i fenomeni più importanti sono la riflessione, la rifrazione, la dispersione e l'assor-

bimento (Fig. 3).

Si parla del fenomeno della riflessione quando la luce incidente su di un oggetto viene in parte rimandata indietro. La riflessione può avvenire sia come riflessione speculare sia come riflessione diffusa: nella riflessione diffusa i raggi luminosi vengono rimandati indietro secondo angoli diversi.

Si parla invece di rifrazione della luce quando la direzione del raggio trasmesso attraverso un materiale trasparente è diversa da quella del raggio incidente sul materiale stesso. Mentre le leggi della riflessione sono molto semplici, ovvero la luce viene riflessa con lo stesso angolo che aveva in incidenza, una relazione leggermente più complicata regola il fenomeno della rifrazione che si basa sul concetto dell'indice di rifrazione (§3): si definisce indice di rifrazione n di un ma-

teriale il rapporto fra la velocità della luce nel vuoto c e quella v nel mezzo in questione:

$$n = \frac{c}{v} \quad \S 3$$

dove n è quindi sempre maggiore di 1. L'angolo di rifrazione si può calcolare dalla relazione §4:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{n_2}{n_1} \quad \S 4$$

dove α è l'angolo di incidenza e γ quello di rifrazione mentre n_1 ed n_2 sono gli indici di rifrazione del primo e del secondo materiale. Il fenomeno della rifrazione è utilizzato nelle lenti e quindi negli obiettivi fotografici per la formazione delle immagini proiettate del soggetto da fotografare [Missori, 2007].

La dispersione della luce è invece il fenomeno di interazione luce-materia più legato ai colori ed è quello scoperto da Newton. A parità di angolo di incidenza e di sostanza, raggi di colore diverso (diversa lunghezza d'onda) vengono deviati (rifratti) lungo direzioni diverse. Il motivo per cui questo avviene è da ricercarsi nel fatto che l'indice di rifrazione n varia in funzione della lunghezza d'onda ed è quindi diverso per i vari colori. Per questo motivo un raggio di luce bianca, ad esempio solare, passando attraverso un materiale trasparente ne esce disperso nei colori dei quali è composto. Per questo fenomeno si forma l'arcobaleno, ovvero per la dispersione della luce nelle goccioline d'acqua in sospensione nel-

l'atmosfera. Il fenomeno è più accentuato, tuttavia, quando il materiale ha forme geometriche particolari, come ad esempio quella di un prisma.

Un altro fenomeno ottico responsabile della formazione dei colori è l'assorbimento. In generale, nell'attraversare la materia la luce viene assorbita. La frazione di luce trasmessa T è data da §5

$$T = e^{-a \cdot x} \quad \S 5$$

e dipende sia dal coefficiente di assorbimento a (che a sua volta dipende da λ ed è misurato in cm^{-1}) sia dallo spessore x del materiale, mentre il prodotto di $a \cdot x$ è detto densità ottica. Il grafico di T (oppure di a) in funzione della lunghezza d'onda rappresenta lo spettro di trasmissione (assorbimento), caratteristico di ogni composto.

I fenomeni finora descritti dipendono in maniera complessa dalle caratteristiche atomiche della sostanza in gioco.

1.1.c

Origine del colore dei materiali

Abbiamo già visto che la luce è composta da radiazioni elettromagnetiche di diversa lunghezza d'onda, comprese fra circa 400 nm (violetto) e 700 nm (rosso). Ogni singola lunghezza d'onda viene percepita dall'occhio come un colore (Fig. 4) (AA.VV., 1985).

Quando una sorgente di luce illumina un oggetto la sensazione di colore che questo ci rimanda dipende dai seguenti fattori:

- 1 il tipo di sorgente (in particolare la composizione spettrale della luce emessa);
- 2 il modo in cui l'oggetto viene illuminato;
- 3 da come la luce interagisce con la materia;
- 4 dalla percezione psicologica;
- 5 ed infine dalla sensibilità dell'occhio umano.

È importante tenere bene a mente che esistono due aspetti diversi nel meccanismo della visione del colore: quelli fisici (sorgente, modo di illuminazione, interazione luce-materia) descrivibili oggettivamente e misurabili con precisione e quelli percettivi, in cui entrano in gioco aspetti soggettivi (psicologia, sensibilità dell'occhio umano).

Come abbiamo già visto la luce può essere assorbita completamente, parzialmente oppure per nulla da corpi gassosi, liquidi e solidi. La parte che non viene assorbita viene riflessa dalla superficie dei corpi liquidi e solidi.

La luce emessa dalle sorgenti, e/o quella riflessa o trasmessa dai materiali, raggiunge la retina dell'occhio dove avviene

il processo della visione tramite una serie di reazioni chimiche. Cosa succede quando la luce colpisce un oggetto?

- Se riflette tutte le radiazioni visibili in maniera diffusa, appare bianco.
- Se assorbe tutta la luce appare nero.
- Se assorbe una frazione costante della luce incidente appare grigio.
- Se ne assorbe solo una porzione dello spettro della radiazione incidente appare colorato.

Il colore di un oggetto si produce attraverso la riflessione selettiva di alcune lunghezze d'onda della luce. Le lunghezze d'onda che non vengono riflesse, sono assorbite dall'oggetto in esame. Per maggiori dettagli si rimanda alla trattazione più approfondita presente nei testi indicati in bibliografia [Palazzi, 1995; Oleari, 1998].

La sensibilità alla luce dell'occhio umano è dovuta a due tipi di cellule presenti sul fondo della retina: i coni e i bastoncelli. I bastoncelli producono uno stimolo nervoso indipendentemente dalla lunghezza d'onda della luce che li colpisce. I coni al contrario reagiscono solo in un certo intervallo di lunghezze d'onda: ne esistono

Fig. 3
Fenomeni che avvengono quando un raggio di luce incide su di un materiale.

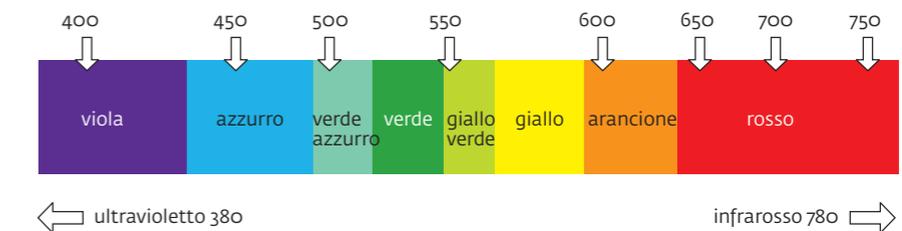
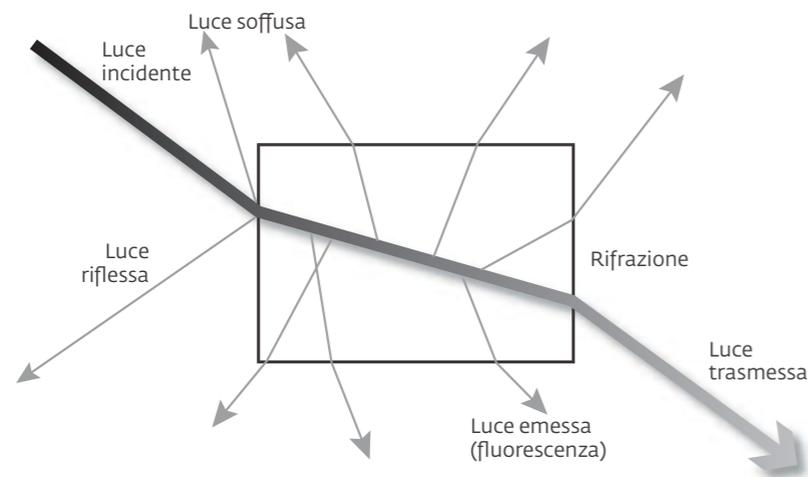


Fig. 4
Lo spettro visibile con indicate le lunghezze d'onda.

sensibili al blu (massimo della sensibilità a circa 440 nm) al verde (massimo della sensibilità a circa 545 nm) e al rosso (massimo della sensibilità a circa 580 nm).

I colori rosso verde e blu sono detti colori primari. I bastoncini, tuttavia, sono molto più sensibili alla luce e quindi sono in grado di farci vedere anche in scarse condizioni di illuminazione: è per questo motivo che in queste condizioni, ad es. di notte, non riusciamo a distinguere i colori e tutto ci sembra in bianco e nero!

Sommando luce di sorgenti corrispondenti ai colori primari additivi, rosso, verde e blu, si ottiene l'impressione del bianco (combinazione additiva di colori). Tramite questo fenomeno la televisione a colori o i monitor riescono a produrre svariate sensazioni di colori attraverso l'accensione selettiva di piccoli LED rossi, verdi e blu.

Applicando 2 o più coloranti su uno

sfondo bianco si ottiene un colore risultante meno brillante di quello ottenibile con un solo colorante (combinazione sottrattiva dei colori). Al limite, utilizzando i colori primari della sintesi sottrattiva, giallo, magenta e ciano, si ottiene il nero, poiché la combinazione di questi colori sottrae tutte le parti dello spettro visibile. Su questo principio si basano le stampanti e la fotografia a colori.

1.1.d Elementi di fotometria e sensitometria

La fotometria si occupa della misura dell'energia luminosa percepita dall'occhio umano. Va distinta dalla radiometria che si occupa invece della misura dell'intensità di tutta l'energia elettromagnetica radiante e non solo di quella percepita dall'occhio umano, quindi an-

che di quella invisibile. Nella fotometria l'energia elettromagnetica corrispondente ad ogni lunghezza d'onda viene quindi pesata con la sensibilità media dell'occhio umano stabilita una volta per tutte. L'unità principale che si incontra in fotometria è il flusso di energia luminosa, detto lumen. Dato che la risposta spettrale della retina ha un massimo a $\lambda=540$ nm, si è convenuto che il flusso luminoso (F) di una radiazione monocromatica di questa lunghezza d'onda, emessa da una sorgente della potenza di 1 watt, sia $F=683$ lumen (simbolo: lm).

Il flusso luminoso per unità di superficie è detto *illuminamento* (Tabella 3) e si misura in lux (simbolo lx=lumen/m²). Se il flusso luminoso per unità di superficie è riferito ad una superficie emittente invece che ad una superficie illuminata esso viene misurato nelle stesse unità ma viene detto *luminosità*.

La sensitometria è invece lo studio delle caratteristiche della risposta, in termini di annerimento, dei materiali sensibili per esposizione alla luce [AA.VV., 2001]. L'annerimento viene quantificato attraverso i concetti di trasmissione, opacità e densità di una pellicola.

L'esposizione è la "quantità di illuminazione" §6 che arriva sulla pellicola ed è il prodotto dell'illuminamento della stessa (misurato in lux) per il tempo di esposizione (misurato in secondi) [Kowaliski, 1972].

$$\text{Esposizione [lux} \cdot \text{s]} = \text{I [lux]} \cdot \text{t [s]} \quad \text{§6}$$

Il risultato dell'esposizione del materiale sensibile è una densità più o meno ele-

vata. Per ottenere, quindi, una determinata densità è sufficiente che il prodotto $E \cdot t$ sia costante. Questo comportamento è noto come legge di reciprocità dei materiali sensibili.

L'esposizione alla luce produce una trasformazione della pellicola fotografica che risulta, dopo il processo di sviluppo, come una perdita di trasparenza della stessa. La trasmissione (Tab. 4) indica pertanto la % della luce incidente che un corpo parzialmente trasparente, come il negativo, lascia passare. L'opacità è l'inverso della trasmissione. La densità è il logaritmo in base 10 dell'opacità.

Come è evidente dalla tabella, per ogni dimezzamento di trasmissione, ovvero per ogni raddoppio di opacità, la densità aumenta di 0.3. Essa afferma che se la corretta esposizione è ottenuta con un tempo di esposizione lungo per un piccolo illuminamento, allora potremmo ottenere lo stesso risultato usando una opportuna coppia di valori tempo di esposizione breve e grande illuminamento. Tuttavia, per questa ultima coppia di valori potremmo avere un annerimento minore, perché l'immagine latente non

ha il tempo di formarsi. Lo stesso fenomeno avviene quando si usano tempi di esposizione molto lunghi. Si parla allora di difetto di reciprocità dei materiali fotografici.

Incrementando progressivamente l'esposizione di una pellicola e misurando la densità ottenuta si costruisce la curva sensitometrica. Dalla curva sensitometrica si ricavano informazioni sulla rapidità, sul contrasto e sulla latitudine di posa di un materiale fotografico (Fig. 5).

Tabella 4
Corrispondenza fra trasmissione, opacità e densità di una pellicola

TRASMISSIONE %	OPACITÀ	DENSITÀ
100 (=1)	1	0
50 (=1/2)	2	0.3
25 (=1/4)	4	0.6
12.5 (=1/8)	8	0.9
6.25 (=1/16)	16	1.2
3.125 (=1/32)	32	1.5
1.563 (=1/64)	64	1.8

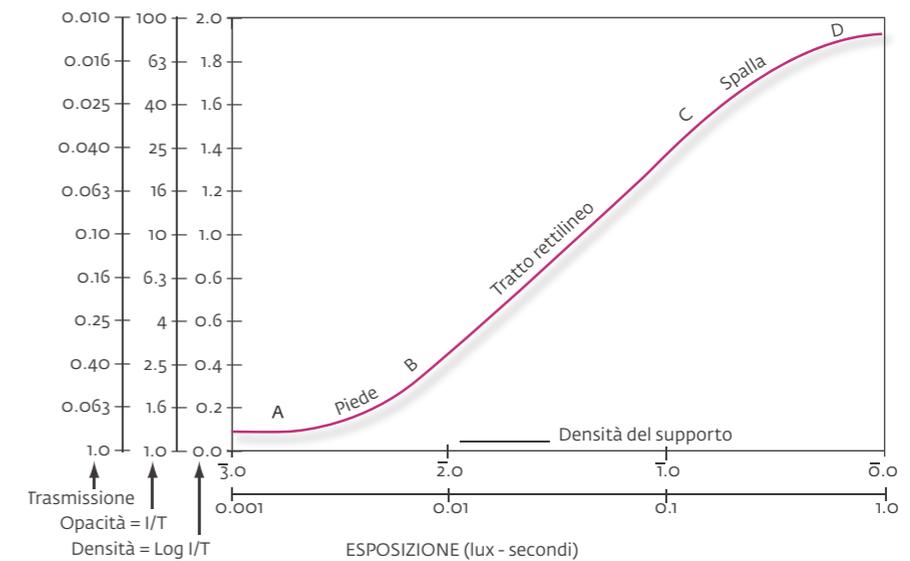


Figura 5
Caratteristiche della curva sensitometrica.

Tabella 3 Valori di riferimento per i livelli di illuminamento

SITUAZIONE	ILLUMINAMENTO (LUX)
Cielo sereno a mezzogiorno	100000
Cielo coperto a mezzogiorno	32000
Cielo sereno ore 10	65000
Cielo coperto ore 10	25000
Stanza ben illuminata + finestra	1000
Ambienti di lavoro	800-700
Interni normalmente illuminati	300-200
Scale interne	200-100
Limite per l'esposizione di beni cartacei	50

Bibliografia

- AA.VV.**, 1985. *Luce, colore, materia*. Le Scienze Quaderni, 21.
- AA.VV.**, 1994. *Il colore*. Le Scienze Quaderni, 8.
- AA.VV.**, 2001. *ABC della fotografia*. Newton & Compton Editori, Roma.
- Frova A.**, 1984. *Luce colore visione*. Editori Riuniti, Roma.
- Kowaliski P.**, 1972. *Applied photographic theory*. John Wiley & Sons, New York.
- Missori M.**, 2007. Elementi di tecnica fotografica propedeutici al restauro fotografico. In: "Libri e documenti - Le scienze per la conservazione e il restauro". M. Plossi & A. Zappalà (eds), Biblioteca Statale Isontina, Edizioni della Laguna, Gorizia, pp. 537-569.
- Oleari C.**, 1998. *Misurare il colore*. Hoepli, Milano.
- Palazzi S.**, 1995. *Colorimetria*. Nardini Editore, Firenze.
- Segre E.**, 1996. *Personaggi e scoperte della fisica classica*. Mondadori Editore, Milano.
- Weiss R.J.**, 2005. *Breve storia della luce - Arte e scienza dal rinascimento ad oggi*. Edizioni Dedalo, Bari.

1.2 La formazione dell'immagine in bianco e nero

G.E. Gigante, L. Residori

Lo scopo dello sviluppo è quello di ridurre i cristalli esposti completamente ad argento metallico in un tempo breve per quanto possibile, senza modificare quelli non esposti [Kowalisky, 1973].

È nell'uso comune quello di distinguere i processi fotografici in due principali tipologie: quella ad annerimento diretto (*printing out process*) e quella a sviluppo (*developing out process*). A queste si aggiunge il metodo chiamato a "sviluppo fisico", che come si vedrà, non è quasi mai, in pratica, impiegato da solo [Kowalisky, 1973]. Il primo consiste essenzialmente nella preparazione artigianale o industriale di materiali fotografici ai sali di argento che, una volta esposti alla luce solare, danno luogo alla formazione di una immagine monocromatica con sfumature di colore leggermente diverse, ma comunque in genere comprese tra tonalità leggermente gialline, e altre un po' più rosse. L'immagine è prodotta sul supporto fotosensibile (presenza di sali di argento) interponendo sagome più o meno sottili anche di spessore variabile, ad esempio un elemento naturale come foglie o petali sottili, oppure interponendo una carta salata tra un negativo di carta cerata ed una carta salata prodotta per la stampa, oppure, ancora mettendo a contatto un negativo di vetro (emulsione fotografica all'albumina o al collodio) su una carta da stampa salata o una carta da stampa all'albumina.

Il secondo, quello detto a sviluppo, implica l'uso di prodotti chimici in grado di ridurre ad argento metallico alcuni sali di argento attivati dalla luce, di soli-

to indicati con un asterisco: AgX^* . X sta ad indicare un generico alogenuro, cioè cloruro (Cl⁻), bromuro (Br⁻) o ioduro (I⁻). Gli alogenuri sottoposti ad illuminamento in fase di esposizione danno luogo alla formazione dell'immagine latente; a contatto con lo sviluppo riducente formano, nell'ambiente alcalino attivatore del processo, argento metallico dando luogo ad una immagine in bianco e nero con diverse densità ottiche in funzione della maggiore o minore quantità dell'argento prodotto.

Il processo ad annerimento printing out process diretto può essere così schematizzato:

- esposizione alla luce solare
- formazione dell'immagine latente
- formazione dell'immagine visibile mediante annerimento diretto
- viraggio
- lavaggio
- fissaggio
- lavaggio
- asciugatura

Il processo a sviluppo developing out process richiede l'impiego di prodotti chimici (rivelatori) che, per le loro proprietà riducenti, sono in grado di formare un'immagine visibile in bianco e nero costituita da argento metallico sotto forma di filamenti.

Il processo a sviluppo prevede:

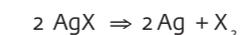
- esposizione alla luce solare o artificiale
- formazione dell'immagine latente
- sviluppo chimico dell'immagine
- lavaggio

- arresto
- lavaggio
- asciugatura

Alcune fasi sono evidentemente comuni al primo ed al secondo processo (Tab. 5).

1.2.a Processo ad annerimento diretto

Il processo ad annerimento diretto ha inizio con l'attivazione dell'alogenuro di argento AgX^* e la conseguente fotolisi del sale di alogenuro:



La reazione è detta di fotolisi; la gelatina è un accettore di alogeno. Le particelle di argento che si formano con l'annerimento hanno piccole dimensioni: l'immagine ha una risoluzione piuttosto elevata a tutto vantaggio della qualità dell'immagine della stessa.

In questo processo è frequente l'uso di soluzioni di viraggio come parte integrante del metodo; gli elementi in soluzione maggiormente utilizzati per il viraggio erano l'oro ed il platino; il fissaggio dell'immagine doveva necessariamente essere effettuato solo dopo il viraggio.

Tra le stampe più note prodotte mediante annerimento diretto si citano, oltre al disegno fotogenico, le carte salate (negativi e positivi), le stampe all'albumina (Fig. 6) e gli aristotipi.

Le particelle di argento che formano l'immagine ad annerimento diretto hanno dimensioni piuttosto ridotte a con-

Tabella 5

Schema del processo ad annerimento diretto e di quello a sviluppo chimico

PROCESSO AD ANNERIMENTO DIRETTO	PROCESSO A SVILUPPO
Esposizione	Esposizione
Immagine latente	Immagine latente
Formazione dell'immagine visibile (Annerimento diretto)	Formazione dell'immagine visibile (Sviluppo chimico)
Lavaggio	Arresto
Viraggio	Fissaggio
Fissaggio	Lavaggio
Lavaggio	Asciugatura
Asciugatura	



Fig. 6
Stampa all'albumina
(Ed. ne Alinari)
P.2. N.° 4380. Firenze -
Palazzo Riccardi.
La Giustizia, dettaglio
del soffitto.



fronto con i filamenti di argento che si formano nel processo a sviluppo.

L'immagine delle stampe all'albumina è formata, infatti, da piccole particelle di argento colloidale disperse nel legante, di forma approssimativamente sferica e di maggiore densità negli strati più superficiali. Il colore delle stampe all'albumina può dipendere dalle dimensioni e dalla forma delle particelle.

1.2.b Processo a sviluppo

Il processo a sviluppo è reso in parte più complesso per il maggiore impiego di prodotti chimici tossici, nocivi o speciali. Diversamente dal processo diretto, l'immagine non si forma gradualmente per esposizione alla luce solare, come avviene ad esempio per produrre una stampa su carta salata o all'albumina, ma soltanto dopo il trattamento di sviluppo chimico (rivelatore). In questo caso la fase di esposizione è molto più breve (frazioni di secondo) di quella richiesta per il procedimento diretto; l'immagine non è ancora visibile ma lo diventa soltanto dopo il contatto con la soluzione di sviluppo nelle condizioni operative più opportune (rivelatore, tempo, temperatura, agitazione ecc.). Dopo l'esposizione e prima dello sviluppo, in base alla teoria di Gurney-Mott, si forma una immagine latente, cioè una modificazione non visibile dei cristalli di alogenuro di argento. Lo sviluppo chimico rivela l'immagine riducendo gli alogenuri di argento esposti AgX^* ad argento metallico dando luogo alla formazione di una im-

immagine in bianco e nero con una scala di grigi più o meno estesa in funzione delle caratteristiche sensitometriche (curva caratteristica) della pellicola o della carta fotografica.

L'immagine latente si forma grazie alle proprietà di fotoconduttività e di conduttività ionica del cristallo. Come si vedrà in modo più esteso e approfondito in altra parte del volume, gli ioni Ag^+ possono muoversi per salti all'interno del reticolo cristallino. Questa possibilità rende probabile l'interazione tra gli elettroni della banda di conduzione e gli ioni Ag^+ . In questa parte del testo si anticipa, in modo conciso, quanto contenuto nel principio di Gurney e Mott.

In sintesi, quel principio suddivide il processo di formazione dell'immagine latente in due stadi: il primo elettronico, il secondo ionico (o viceversa, se si segue la teoria di Mitchell). Restando alla teoria di Gurney e Mott si possono distinguere, nella formazione dell'immagine latente, i due stadi seguenti:

- stadio elettronico
 $Br^- + h\nu \longrightarrow \text{elettrone} + Br$
- stadio ionico
 $\text{elettrone} + Ag^+ \longrightarrow Ag$

Il primo stadio è correlato alle proprietà che il cristallo di alogenuro di argento ha di produrre una fotocorrente a seguito dell'energia trasferita al cristallo da un fotone. Il secondo stadio è, invece, ionico e correlato alla migrazione di ioni Ag^+ interstiziali.

È noto che i cristalli di alogenuro di argento, a temperatura ambiente, presentano un certo numero di difetti a livello atomico detti interstiziali o di Frenkel.

Esistono anche altri tipi di difetti allo stesso livello reticolare detti di Skottky, che sono però molto meno frequenti a temperature ambientali e non sono così rilevanti per la formazione dell'immagine latente come invece lo sono quelli di Frenkel.

Gli ioni Ag^+ hanno dimensioni sufficientemente piccole per migrare attraverso gli interstizi e il numero di questi ioni che si muovono nel cristallo dipende dalla temperatura. Questi ioni sono mobili e migrano per salti attraverso il reticolo cristallino.

Difetti strutturali a livello cristallino costituiscono siti preferenziali in cui gli ioni Ag^+ e gli elettroni della banda di conduzione possono combinarsi (teorie di Gurney-Mott e di Mitchell) formando piccolissime quantità di argento metallico (immagine latente). Questo tipo di difetti si formano nel cristallo e si estendono alla superficie, oppure provengono direttamente dalla formazione di uno strato superficiale difettoso; i fotoelettroni vengono catturati sui difetti di questo tipo per formare argento metallico con gli ioni argento con maggiore facilità che con gli ioni interstiziali [Residori, 2000a]).

L'immagine latente è stabile se si forma un numero sufficiente di atomi di argento. Si deve tenere presente che i fotoelettroni si ricombinano con le buche e gli atomi di Ag si ossidano di nuovo provocando il decadimento dell'immagine latente stessa.

I siti di formazione dell'immagine latente si trovano preferenzialmente in corrispondenza dei difetti a livello cristallino.

Si è detto che l'immagine latente deve essere sviluppata chimicamente per produrre una visibile in bianco e nero.

Il contatto tra il materiale fotografico impressionato e la soluzione di sviluppo può produrre, ad esempio, un negativo o una stampa con zone di diversa densità: molto chiare, molto scure, una varietà di grigi più o meno intensi. Affinché questo avvenga devono essere soddisfatte le condizioni termodinamiche (potenziali elettrochimici): riduzione di Ag^+ ad Ag ed ossidazione del rivelatore (es. ossidazione dell'idrochinone a p-benzochinone).

Alcuni agenti di sviluppo possono essere combinati insieme in un'unica soluzione per ottenere l'effetto di superadditività che permette un trattamento più rapido [Woodlief, 1973].

Gli alogenuri di argento attivati AgX^* , in presenza di un rivelatore in ambiente alcalino, si anneriscono molto più rapidamente degli altri: l'immagine latente funziona da catalizzatore.

Lasciando la pellicola, la lastra o la carta fotografica nello sviluppo oltre il tempo necessario esso continua ad agire formando un velo sull'immagine; ciò è dovuto alla riduzione degli alogenuri di argento non impressionati, comunque suscettibili, in base ai potenziali elettrochimici, di ridursi, per effetto dello sviluppo e in tempi più o meno lunghi. L'efficienza del processo a sviluppo [Residori, 2000b] dipende dalla lunghezza

d'onda della radiazione λ e dalla temperatura. Minore è la lunghezza d'onda della radiazione, minore è l'esposizione necessaria per ottenere un determinato risultato in termini di densità; l'efficienza diminuisce con l'abbassamento della temperatura.

Il risultato finale del processo (esposizione, sviluppo, arresto, fissaggio, lavaggio, asciugatura) produce una immagine in bianco e nero stabile, formata da grani di argento sotto forma di filamenti. I grani possono variare di dimensioni in funzione del tipo di emulsione, del tipo di sviluppo e delle condizioni operative prescelte. In ogni caso si

formerà una immagine in bianco e nero con gradazione di grigi più o meno ampia e dettagli più o meno definiti. Questo dipende essenzialmente dalle dimensioni dei grani:

- grani di alogenuro di argento grandi formano grani di argento anch'essi di dimensioni piuttosto grandi
- grani di alogenuro di argento piccoli, a loro volta, formano grani di argento anch'essi relativamente piccoli

Per semplicità, nello schema sottostante (Tab. 6) i grani sono rappresentati sferici.

Come è noto, la struttura dei cristalli AgX è cubica a facce centrate (cloruro o

bromuro di argento), oppure ottaedrica (cristalli non geminati, singolarmente geminati, doppiamente geminati).

Esistono emulsioni con grani sferici molto fini, altre a forma di tavole triangolari di dimensioni di circa $20\mu\text{m}$ per lato, altre ancora a forma di aghi lunghi circa $50\mu\text{m}$. In genere, il limite superiore per emulsioni molto rapide (grana grossa) è di circa $2,5\mu\text{m}$ (Tab. 7).

Le dimensioni dei grani influiscono sulla sensibilità (rapidità) dell'emulsione, il contrasto, la latitudine di esposizione, la definizione dell'immagine. Una emulsione con un'ampia latitudine di esposizione permette di riprodurre un'ampia scala di grigi (Figg. 7, 8).

I grani di argento hanno dimensioni variabili intorno ad un valore più probabile in funzione dei fattori e dei parametri che influenzano la formazione e la crescita dei cristalli di alogenuro di argento. Essi sono molto più grandi delle particelle di argento colloidale e costituiscono sistemi dispersi.

Come già detto, le dimensioni dei grani prodotti nella preparazione dell'emulsione fotografica dipende dalle numerose variabili chimiche e fisiche che influiscono sulle specifiche caratteristiche dell'emulsione stessa. Nella precipitazione dei cristalli di AgX nel mezzo disperdente (soluzione colloidale di gelatina) si distinguono quattro stadi:

- nucleazione
- crescita
- maturazione
- ricristallizzazione.

La distribuzione della frequenza delle grandezze dei grani dipende dalla velocità di aggiunta dei reattivi, dalla temperatura, dalla presenza di altre sostanze che influiscono sulla loro crescita.

Le emulsioni fotografiche con grani di maggiori dimensioni sono più rapide. A questo proposito, si può prendere in considerazione sia la frequenza delle grandezze dei grani sia l'area prospettica totale. La distribuzione influisce sulla latitudine di esposizione: maggiore è la varietà delle dimensioni dei cristalli, minore è il contrasto, maggiore la latitudine di esposizione.

EMULSIONE A GRANA GROSSA	EMULSIONE A GRANA FINE
Pellicola più rapida	Pellicola meno rapida
Maggiore latitudine di esposizione	Minore latitudine di esposizione
Minore capacità di risoluzione	Risoluzione complessivamente migliore

È evidente che la scelta dell'emulsione dipende dall'uso che se ne vuole fare:

Emulsioni con una grande varietà di cristalli di grandezze diverse hanno un basso contrasto rispetto a quelle con cristalli di dimensioni molto simili tra loro.

Schematizzando, nello sviluppo diretto l'argento appare, ai dovuti ingrandimenti, come "filamenti" [Kowalisky, 1973] che costituiscono un deposito ed asso-

FILM	DIAMETRO DEI GRANI (μm)	SUPERFICIE MEDIA (μm^2)	N° DI GRANI x 109
Alta risoluzione	0,048	0,00188	-
Film cinematografico positivo	0,30	0,07	577,5
Film positivo	0,63	0,31	117,85
Film a grana fine	0,79	0,49	52,35
Film per ritratto	0,88	0,61	25,66
Film ad alta rapidità	1,09	0,93	22,61
Pellicola per raggi X	1,71	2,30	6,32

Tabella 7
Mees, 1966.

Tabella 6 Schema dei grani di argenti prima e dopo lo sviluppo

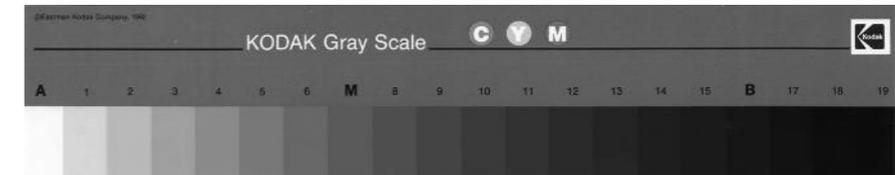
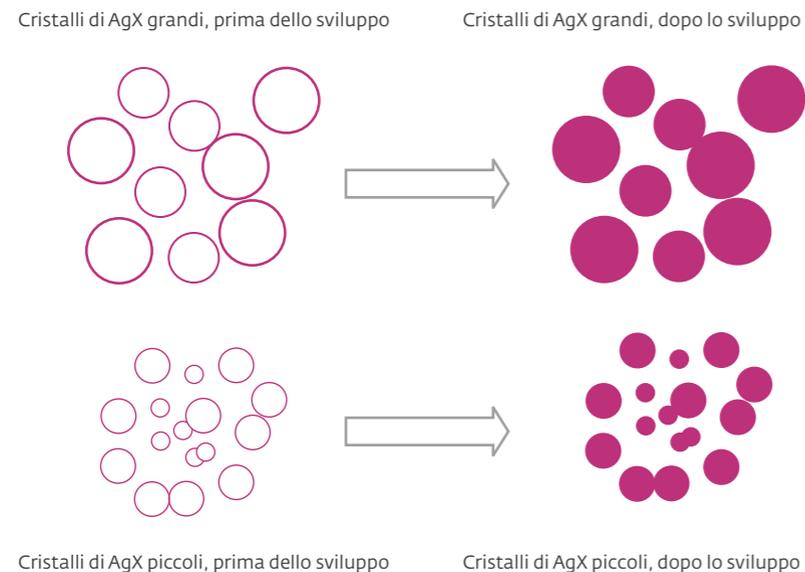


Fig. 7
Scala dei grigi - Kodak.



Fig. 8
Stampa a sviluppo bianco e nero (autore Luciano Residori - "Teatro in piazza").

migliano ad una massa impigliata e ramificata. I depositi di argento che si formano soltanto con lo sviluppo fisico [Cesentano, 1971; Residori, 2009] sono, invece, compatti e nella maggior parte dei casi quasi sferici.

Nelle condizioni pratiche dello sviluppo i filamenti rimangono sottili e "impigliati" fino che gli alogenuri sono poco dissolti. In questa fase lo sviluppo fisico è predominante e i filamenti diminuiscono di lunghezza e crescono in spessore. La formazione dei filamenti è attribuita ad un meccanismo di cristallizzazione; tuttavia essi hanno una struttura irregolare ed instabile, differente da quella che dovrebbe risultare dalla cristallizzazione.

Il colore del deposito di argento può risultare neutro nella maggior parte dei casi ma può anche slittare verso tonalità bruno-arancio o violette, oppure, meno frequentemente, leggermente bluastre.

L'assorbimento della luce blu può aumentare se si favorisce lo sviluppo di tipo "soluzione-fisico" che risulta dall'azione solvente degli sviluppi ordinari.

L'assorbimento selettivo è debole dopo lo sviluppo non-solvente; esso aumenta sensibilmente quando questo sviluppo iniziale è complementato da uno sviluppo contenente un solvente di alogenuro di argento in cui predomina lo sviluppo soluzione-fisico. La colorazione blu ha origine da diversi fenomeni tra cui l'effetto della grandezza delle particelle sull'assorbimento spettrale, la morfologia del deposito di argento, l'adsorbimento della ge-

latina sulla superficie di argento. La grandezza delle particelle ha un ruolo di rilievo soltanto se sono praticamente sferiche, come dimostrato da Klein e Metz.

Particelle molto piccole fanno sì che il deposito di argento sia bruno, mentre cristalli più grandi danno immagini neutre o tinte in funzione della morfologia del deposito, che dipende dall'anione dell'alogenuro di argento e dal tipo di sviluppo.

Un'emulsione sviluppata al cloro-bromuro dà un'immagine bruna e il deposito ha struttura filamentosa; se l'emulsione è stata fortemente indurita i grani sono più compatti e l'immagine più neutra. Depositi di argento molto fini danno tonalità calde, grani più compatti e più grandi danno depositi neutri.

Oltre alle fotografie in bianco e nero realizzate grazie alle proprietà degli alogenuri di argento sono state prodotte stampe fotografiche basate su tecniche e tecnologie diverse da quelle applicate per le emulsioni ad alogenuri di argento. Si tratta, per esempio, di stampe monocromatiche che, nella maggior parte dei casi, presentano tonalità diverse da quelle più o meno neutre delle tradizionali pellicole o stampe in bianco e nero.

1.2.c Altri processi

Ad integrazione di quanto fin qui descritto a proposito della fotografia in bianco e nero, si fa cenno ad alcuni processi fotografici diversi da quelli che utilizzano come sostanze fotosensibili gli alogenuri di argento:

- *procedimenti al bicromato* (processi al carbone, processi alla gomma bicromata)
- *procedimenti ai sali ferrici* (cianotipia, platinotipia, kallytipia)
- *procedimenti diazo* (sali di diazonio)
- *procedimenti vescicolari* (variante del procedimento precedente)

Tali procedimenti hanno in genere tonalità più o meno neutre oppure, comunque, monocromatiche [Scaramella, 1999].

Nel caso dei procedimenti al bicromato, un colloide (gelatina, gomma arabica, albumina, gomma lacca) è trattato con bicromato e diventa insolubile in acqua dopo l'esposizione alla luce. Il bicromato si trasforma in ossido di cromo. L'immagine fotografica su un supporto di carta (stampa) è in rilievo. Nell'ambito dei procedimenti al bicromato si possono distinguere:

- procedimento al carbone
- procedimento alla gomma bicromata

Nel primo la carta di supporto primario è trattata con gelatina e nerofumo, sensibilizzata con bicromato. L'insolubilizzazione del colloide dipende dall'esposizione. Lo sviluppo dell'immagine non è altro che un trattamento con acqua calda.

Nel secondo caso, quello cioè del procedimento alla gomma bicromata, la carta di supporto è trattata con gomma arabica che include pigmenti colorati e, anche in questo caso, sensibilizzata con bicromato ed esposta alla luce con conseguente insolubilizzazione del colloide, come nel caso precedente. Per lo svi-

luppo della stampa si ricorre al trattamento con acqua, questa volta, però, a temperatura ambiente.

Tra i procedimenti non argentici, uno dei procedimenti ai sali ferrici è quello della cianotipia in cui si utilizza una carta di supporto trattata con citrato ferrico ammoniacale e ferricianuro di potassio. Per esposizione alla luce solare il sale ferrico si trasforma in sale ferroso; il citrato ferroso trasforma il ferricianuro in blu di Prussia.

Nel procedimento noto come platinotipia, la carta di supporto è trattata con sali ferrici e cloruro di platino e potassio. Segue l'esposizione ed il trattamento con

ossalato di potassio. Il procedimento detto kallytipia, sostanzialmente analogo alla platinotipia, utilizza al posto del cloruro di platino il nitrato di argento.

Per quanto riguarda l'uso dei sali di diazonio ArN_2^+ , essi hanno avuto ad esempio un certo impiego per la duplicazione di pellicole per microfilm. In breve, il procedimento si basa sull'esposizione e la sbianca dei sali di diazonio, la formazione di una copia positiva da contatto costituita dal sale di diazonio non decomposto (tonalità giallo chiaro ed ancora sensibile), sviluppo con copulante (fenolo), formazione di una immagine colorata

ta azoica visibile e stabile. Queste pellicole possono riprodurre dettagli molto fini. Le pellicole vescicolari sono ad alto contrasto ed a elevata risoluzione. L'azoto sviluppato nella decomposizione del diazocomposto genera, per riscaldamento, bolle in una resina termoplastica; il fessaggio dell'immagine si ottiene mediante una ulteriore esposizione che scompone i composti diazo. Anche in questo caso, le pellicole vengono prodotte per produrre copie positive del microfilm negativo.

Bibliografia

- Kenneth Mees C. E. T. H. James**, 1966 a cura di, *The Silver halide grains*, in *The Theory of the Photographic Process*, N.Y., pp.31-44.
- F. Celentano**, 1971, *Sviluppo del negativo, sensitometria e chimica fotografica*, Milano, Il Castello
- Kowalisky P.**, 1973, *Applied Photographic Theory*, N.Y., John Wiley & Sons.
- Residori L.**, 2000a, *Struttura e composizione dei materiali fotografici*, in *Chimica e biologia applicate alla conservazione degli archivi*, Pubblicazioni degli Archivi di Stato, Saggi 74, Roma, pp. 218-270.
- Residori, L.**, 2000b, *Caratteristiche sensitometriche dei materiali fotografici*, in *Chimica e biologia applicate alla conservazione degli archivi*, Pubblicazioni degli Archivi di Stato, Saggi 74, Roma, pp. 271-295.
- Residori L.**, 2009, *Fotografie: materiali fotografici, processi e tecniche, degradazione, analisi e diagnosi*, Padova, Il Prato.
- Scaramella L.**, 1999, *Fotografia - Storia e riconoscimento dei procedimenti fotografici*, Edizioni De Luca.
- Woodlief Th. Jr.**, editor, 1973, *SPSE Handbook of Photographic Science and Engineering*, Society of Photographic Scientists and Engineers, N.Y., John Wiley & Sons.

1.3 Formazione dell'immagine a colori

G.E. Gigante, L. Residori

Non si deve pensare alla fotografia a colori come ad un processo che nulla ha a che fare con la fotografia in bianco e nero. Infatti, come si vedrà poco più avanti con semplici schemi di reazione, alcuni procedimenti a colori utilizzano, in parte, prodotti, materiali e metodi per la fotografia in bianco e nero, naturalmente con le integrazioni e le modifiche necessarie a formare (o distruggere) i coloranti.

1.3.a Il colore

Prima di trattare sinteticamente dei procedimenti, materiali e metodi utilizzati per la fotografia a colori [Residori, 2009] alcuni cenni sul colore possono essere utili premessa all'argomento. Quanto segue è tratto integralmente da "Il colore", G.E. Gigante, in Residori L., *Fotografie-materiali fotografici, processi e tecniche, degradazione, analisi e diagnosi*, 2009, Padova, Il Prato casa editrice, 2009, pp. 302.

"Il colore è una sensazione che si genera nel processo percettivo di alcuni animali superiori tra cui l'uomo. Come tutte le sensazioni, che sono a cavallo tra il mondo esterno e la sfera individuale, hanno degli elementi di oggettività e di soggettività che ne rendono difficile lo studio. Da qualunque punto di vista si veda il problema, sia quello di privilegiare gli aspetti psicofisici che quello, alternativa, di ricondurre tutto alle proprietà dei materiali, si rischia di fornire un quadro del tutto parziale.

Il colore ha origine nella visione a causa della diversa sensibilità che hanno le cellule fotosensibili dell'occhio, cioè i coni ed i bastoncelli, per la luce al variare della sua lunghezza d'onda. In particolare

solo i coni sono coinvolti nella percezione del colore, essi sono di tre differenti tipi con una sensibilità alle diverse lunghezze d'onda della luce incidente che ne definisce il ruolo nel processo di percezione. I tre tipi di coni sono infatti uno maggiormente sensibile a luce monocromatica nella banda del rosso, il secondo del verde ed il terzo del blu. I tre tipi di cellule non sono egualmente sensibili alla luce, in particolare i coni del blu sono molto meno efficienti; in figura 9 è mostrato un diagramma che mostra le diverse sensibilità dei coni.

La percezione avviene in tre fasi successive la prima in cui il fotone è rivelato sulla retina, la seconda in cui i diversi segnali che provengono dalle cellule sensoriali sono elaborati in modo da inviare l'informazione al cervello e l'ultima fase, a livello del cervello, in cui avviene l'identificazione del colore. Nella seconda fase si generano tutti gli effetti, come quello della complementarietà dei colori, che determinano successivamente la più o meno corretta identificazione del colore da parte del cervello. La prima fase è strettamente fisica, le successive sono quelle in cui si produce la sensazione del colore e sono legate alla psicofisica. Risulta quindi evidente che la psicofisica ha un ruolo determinante nella identificazione del colore, questo non deve però far pensare che i colori percepiti non possano essere misurati con buona precisione. Scopo della colorimetria è appunto quello di rendere oggettiva la misura del colore.

La colorimetria si occupa principalmente della identificazione del colore e dei meccanismi fisici e psichici che ne sono alla base. Le sorgenti di luce più comuni, a partire dal Sole, sono in genere policromatiche, cioè composte da fotoni di diversa lunghezza d'onda, esse quindi sono caratterizzate da un colore che dipende dallo spettro della sorgente stessa. Una sorgente che emette fotoni in tutta la banda del visibile produce una sensazione di un colore bianco.

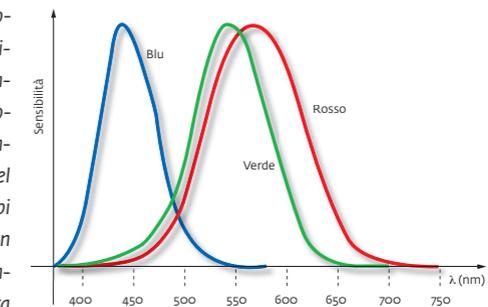
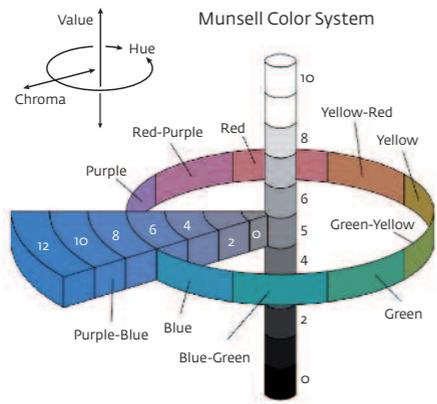
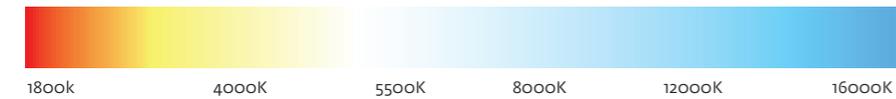


Fig. 9
Curve di sensibilità (normalizzate) dei tre tipi di coni.

Se lo spettro non è uniforme, vi sono cioè bande di colore che sono più intense di altre, anche la sorgente apparirà colorata; da questa semplice osservazione nasce il concetto di temperatura di colore che spiega il fatto che una sorgente ad incandescenza, che emette il tipico spettro del corpo nero, genera nell'uomo una sensazione di colore che, al crescere della temperatura della sorgente, va dal rosso, al giallo per arrivare al viola a temperature che sono molto al di sopra di quella del sole che è di 5400 K. In figura 10 sono mostrati i colori di una sorgente ad incandescenza al crescere della temperatura. Il concetto di temperatura di colore ha una notevole importanza in fotografia, sia nella fase di cattura dell'immagine, in cui occorre illuminare l'oggetto con una sorgente opportuna, che in quella di sviluppo che, infine, in quella di accesso in cui la presenza di sorgenti luminose non adeguate può alterare la visione dei colori.

Questa breve introduzione ci permette di affrontare meglio il problema della misura del colore, infatti è ora chiaro che ciò che va misurato e quindi classificato è la sensazione di un colore da parte dell'uomo. Il più generale e intrigante problema di come i colori si generino in natura, può per il momento essere lasciato in secondo piano. Questo non sarebbe vero se si trattasse ad esempio il problema delle sostanze coloranti e delle modalità con cui sono

Fig. 10
Colori che vengono percepiti al crescere della temperatura di una sorgente di luce ad incandescenza.



state impiegate dall'uomo per colorare oggetti e nella produzione artistica. Nel caso della fotografia, potremmo dire fortunatamente, la strada intrapresa per produrre immagini a colore è quella di stimolare la sensazione del colore in una maniera che potremmo dire fisiologica: cioè utilizzando tre pigmenti come fa l'occhio. Premettiamo che questo approccio, pure se tecnologicamente utile, non è del tutto soddisfacente, in quanto vi sono colori che in questa maniera non è possibile generare, vi sono inoltre gamme di colori che vengono in una certa misura preferite rispetto ad altre. I pittori sanno quanto sia difficile riprodurre un colore con i pigmenti disponibili, che sono in numero decisamente superiore a tre.

Il punto di partenza è quello di osservare quali sensazioni di colore generino nell'occhio le lunghezze d'onda del visibile, la risposta è semplice sono quelle tipiche dell'arcobaleno o per essere più precisi generate in tutti quei casi in cui avviene un fenomeno di dispersione della luce solare. Di qui nasce la definizione di bande di colore di cui è composto lo spettro del visibile: rosso, arancione, giallo, verde, azzurro, indaco e violetto. I colori generati dalle lunghezze d'onda dello spettro del visibile sono prese come riferimento nella classificazione degli altri colori. Essi sono definiti colori puri o saturi."

Per quanto riguarda la misura del colore si citano di seguito i diversi modelli di rappresentazione:

- Modello di colore CIE-X,Y,Z
- Modello di colore Y,x,y
- Sistema CiELab

- Lo spazio di colore RGB e sRGB
- Modello CMYK
- Modelli di colore HSV, HLS

Facendo ancora riferimento quanto pubblicato da Gigante nel 2009, si evidenzia anche l'uso di "atlanti e cataloghi" di colori che, mediante un confronto diretto, permettono di stabilire se due superfici hanno lo stesso colore. Gigante porta ad esempio il *Munsell Book of Colors* (Fig. 11) la cui idea parte da tre variabili: tinta, saturazione e luminanza (o valore).

Un altro esempio è la Scala Pantone riprodotta in figura 12.

1.3.b Processi fotografici a colori

I processi fotografici a colori più noti sono:

- autocromia
- cromogenia
- sbiancamento
- trasferimento di colorante
- trasferimento di immagine.

Prima di riassumerne i principi, le fasi e le applicazioni, fatto salvo, come si è detto, che la fotografia a colori si basa sulla teoria del colore inteso come sensazione, cioè come fenomeno psicofisico, si premette che proprio da questi elementi de-

rivò la possibilità di creare i colori mediante la "sintesi additiva" dei tre colori primari. James Clerk Maxwell (1831-1879) ne annunciò i principi e ne fece dimostrazione nel 1861.

Si deve invece a Louis Ducos du Hauron (1837-1920) il principio della "sintesi sottrattiva", (Fig. 13) resa pubblica nel 1862.

La sintesi additiva consiste nella sovrapposizione lineare dei contributi dei tre colori base. Questo avviene quando si proiettano fasci luminosi su una superficie o si osserva la luce proveniente da uno schermo di un televisore. Sovrapponendo, ad esempio un fascio di colore rosso ad uno verde si ottiene il giallo, sovrapprendo un fascio di colore rosso ad uno blu si ottiene il magenta, sovrapprendo un fascio di colore verde ad uno blu si ottiene il ciano. La sovrapposizione dei tre fasci colorati rosso, verde e blu dà il bianco.

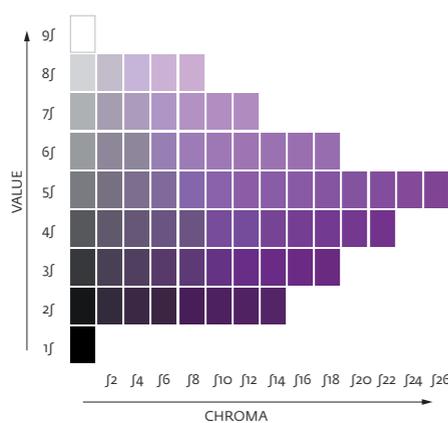
Nella caso della *sintesi sottrattiva*, tre strati successivi di colore si sommano. In questo caso lo strato sovrastante filtra quello sottostante, producendo un effetto molto diverso da quello descritto nella sintesi additiva. In pratica, ad esempio, sovrapprendo uno strato giallo ad uno magenta si ottiene un colore rosso, uno giallo ad uno blu un colore verde, uno ciano ad uno magenta un colore blu, sovrapprendo tutti e tre gli strati si ottiene il nero.

L'autocromia è un processo brevettato dai fratelli Auguste e Louis Lumière nel 1907; esso non è più in uso. Il processo si



Fig. 12
Esempio di un catalogo della Pantone.

Fig. 11
Rappresentazione schematica della classificazione dei colori proposta da Munsell.



basava sul principio additivo. L'immagine dell'autocromia è data da un doppio strato di granuli di fecola di patate diversamente colorati a formare un mosaico. Gli stadi del processo sono, nell'ordine:

- esposizione
- sviluppo del negativo
- sbianca del negativo
- esposizione alla luce "bianca"
- sviluppo
- fissaggio
- lavaggio
- asciugatura.

Si tratta, in pratica, di un particolare tipo di diapositiva in cui l'immagine è formata da granuli rosso-arancio, giallo-verde, blu-violetto [Residori, 2009]. Nelle autocromie erano evidenti dominanti blu e viola.

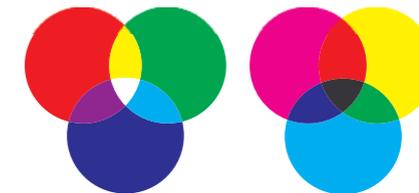


Fig. 13
Sintesi additiva (a sinistra) e sottrattiva (a destra) dei colori.

Il processo a "sviluppo cromogenico" genera, invece, coloranti nei tre strati fotosensibili dell'emulsione fotografica:

- strato di emulsione sensibile al blu
- strato di emulsione sensibile al verde
- strato di emulsione sensibile al rosso

Un filtro giallo è interposto tra il primo ed il secondo strato.

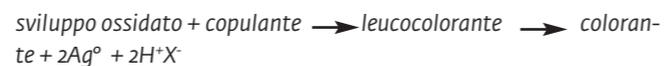
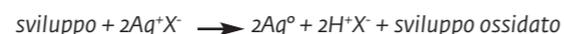
Le fasi del il processo sono le seguenti:

- esposizione e formazione dell'immagine latente (atomi di Ag del cristallo di AgX);

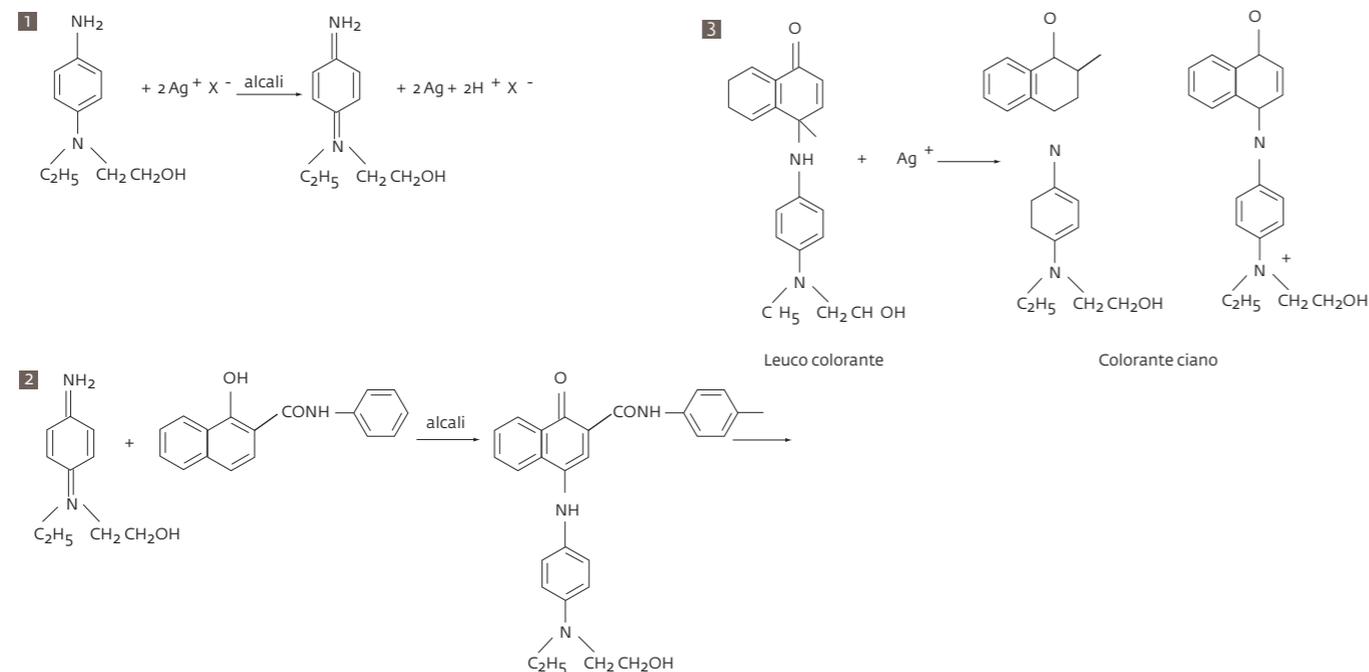
- sviluppo degli AgX* foto attivati nei tre strati fotosensibili;
- formazione dell'immagine negativa di argento in bianco e nero in ciascuno dei tre strati;
- seconda esposizione che attiva gli AgX non esposti;
- secondo sviluppo e formazione di Ag⁰;
- formazione coloranti complementari (giallo, magenta, ciano);
- sbianca (ossidazione e rimozione di Ag dall'emulsione).

Per la sbianca si utilizza, in genere, ferricianuro o bicromato. La formazione dell'immagine negativa di argento e di quella successiva a colori consistono, schematicamente, nelle se-

guenti reazioni:



Lo sviluppo ossidato reagisce con il copulante dando un composto intermedio (leucocolorante); segue la formazione dei coloranti giallo, ciano e magenta. A titolo di esempio, il processo chimico completo per la formazione di un colorante, ciano in questo caso, consiste nei seguenti stadi e reazioni:



	Emulsione sensibile al blu
	Filtro giallo*
	Emulsione sensibile al verde
	Emulsione sensibile al rosso
	Sottostrato **
Diapositive a colori*** Sezione	Supporto (plastica o vetro)
	Strato antialo ****

Le pellicole fotografiche a colori hanno tre strati sovrapposti: uno sensibile al blu, quello sottostante sensibile al verde, l'ultimo al rosso. Ciascuno strato, con l'esposizione, forma una immagine latente nello strato sensibile alla radiazione atinica incidente. Le parti bianche della scena fotografata impressionano i tre strati, le parti nere non le impressionano. Per quanto riguarda lo sviluppo cromogeno, a quanto detto si può aggiungere che i coloranti che costituiscono l'immagine si formano in funzione dello sviluppo dell'argento:

- sviluppo delle tre immagini latenti (in pratica tre negativi in bianco e nero con diverse gradazioni di grigio)
- una seconda esposizione per i sali di argento residui
- un secondo sviluppo in cui i sali d'argento residui di cui sopra reagiscono con i copulanti ed i coloranti presenti nell'emulsione o nel bagno di sviluppo
- formazione di tre immagini colorate (giallo per lo strato sensibile al blu, magenta per lo strato sensibile al verde, ciano per quello sensibile al rosso)

- eliminazione completa dell'argento mediante un trattamento di sbianca
- i tre coloranti formano un'immagine positiva a colori (pellicole invertibili)

La pellicola "Kodachrome", diversamente dalle altre, non contiene copulanti chimici cromogeni nell'emulsione, ma ciascuno dei tre copulanti è, invece, incorporato in una diversa soluzione di sviluppo.

- Il processo prevede:
- rimozione dell'antialo
 - primo sviluppo
 - riesposizione alla luce rossa
 - sviluppo con copulante ciano
 - riesposizione alla luce blu
 - sviluppo con copulante giallo
 - sviluppo per produrre velo e formazione di copulante magenta
 - sbianca
 - fissaggio.

È evidentemente un processo complesso e che richiede un controllo molto severo delle condizioni del trattamento. Per queste ragioni esso verrà qui di se-

guito descritto nel dettaglio.

Le particolarità più evidenti delle pellicole Kodachrome sono relative alla composizione dell'emulsione ed al trattamento chimico di sviluppo. Le pellicole sono molto nitide ed hanno una grana estremamente fine, di moderata e media rapidità.

Come si è detto, i copulanti cromogeni non sono nell'emulsione, ma incorporati nelle soluzioni di sviluppo. Poiché evidentemente non è possibile incorporare i copulanti in un'unica soluzione in modo da formare contemporaneamente tutti e tre i coloranti, sono impiegate soluzioni separate; ciascuna soluzione contiene un solo tipo di copulante.

Si riporta di seguito il procedimento così come è citato [Kodak, 1982].

Trattamento

La composizione della pellicola Kodachrome è stata perfezionata varie volte dal momento della sua invenzione avvenuta nel 1935 per opera di Mannes e Godowsky, e anche i prodotti chimici per il trattamento sono stati perfezionati. Con le moderne pellicole Kodachrome attualmente viene usato il Process K-14. Le fasi fondamentali sono descritte qui di seguito.

Asportazione dello strato antialone

Il rivestimento antialone nero presente sul supporto della pellicola viene ammorbidito ed asportato in modo da poter effettuare l'esposizione di inversione a luce rossa attraverso il supporto della pellicola.

*Il filtro giallo che si trova al di sotto dello strato di emulsione sensibile al blu è eliminato con il trattamento della pellicola

** Il sottostrato fa aderire le emulsioni al supporto della pellicola

*** Lo schema si riferisce, in particolare, alla pellicola Ektachrome

**** L'antialo si trova nella parte inferiore del supporto oppure nel sottostrato.

Riesposizione alla luce rossa

La pellicola viene esposta attraverso il supporto ad una luce rossa filtrata, in modo che le densità negative in argento degli altri strati non interferiscano con l'esposizione. Sono così esposti soltanto gli alogenuri d'argento dello strato inferiore che non sono stati sviluppati in precedenza; gli altri due strati non sono sensibili alla luce rossa e pertanto non sono impressionati.

Rivelatore Cyan

L'immagine positiva esposta di alogenuri di argento nello strato sensibile al rosso è sviluppata con una soluzione che contiene un copulante cyan, cosicché assieme all'immagine positiva in argento viene formata l'immagine positiva cyan.

Riesposizione alla luce blu

La pellicola è esposta dal lato dell'emulsione a una luce blu filtrata. Soltanto lo strato superiore viene influenzato, perché il filtro giallo posto immediatamente al di sotto di esso impedisce alla luce blu di raggiungere lo strato intermedio dell'emulsione.

Rivelatore giallo

Viene sviluppata l'immagine positiva di alogenuri di argento appena esposta nello strato d'emulsione sensibile al blu, e un copulante formatore di giallo presente nel rivelatore forma la corrispondente immagine in colorante giallo.

Rivelatore magenta formatore di velo

Per preparare per lo sviluppo gli alogenuri d'argento dello strato intermedio dell'emulsione non viene usata una riesposizione, poiché l'argento sviluppato nello strato superiore e in quello inferiore bloccherebbe la luce.

È invece usato un rivelatore che produce velo. Questa soluzione rende sviluppabili mediante azione chimica gli alogenuri restanti nello strato sensibile al verde, e quindi sviluppa l'immagine positiva in argento qui formata. Simultaneamente, dei copulanti formatori di colorante magenta presenti nel rivelatore formano l'immagine positiva magenta.

Sbianchimento

Tutto l'argento è stato sviluppato; ora viene sbiancato e riportato allo stato di alogenuro d'argento, e anche il filtro giallo, che è composto di argento colloidale, viene convertito in alogenuro d'argento.

Fissaggio

Tutto l'alogenuro d'argento formato nella fase di sbianchimento è convertito dal fissaggio in composti solubili d'argento; questi composti si dissolvono nel bagno di fissaggio e nel lavaggio. Le immagini positive dei coloranti rimangono nei tre strati per formare una rappresentazione del soggetto a pieni colori."

Nel caso del procedimento a colori "negativo-positivo a sviluppo cromogeno", i coloranti si formano con la riduzione ad argento metallico Ago degli alogenuri di argento AgX* esposti ed attivati; lo sbianchimento elimina l'immagine negativa di argento e resta, quindi, soltanto quella negativa formata dai coloranti. Lo sbianchimento ed il fissaggio possono essere combinati insieme. Il tono bruno arancio, che appare osservando in trasparenza il negativo così sviluppato, dipende dalla presenza dei copulanti cromogeni residui. In assenza dei copulanti residui, il negativo mostra chiaramente i colori complementari a quelli originali del soggetto o della scena fotografata.

Un semplice schema della sezione di una pellicola negativa è il seguente:

	Emulsione sensibile al blu
	Filtro giallo
	Emulsione sensibile al verde
	Emulsione sensibile al rosso
Negativi a colori - Sezione	Supporto (plastica o vetro)
	Strato antialo

Il negativo funge da matrice per ottenere un numero indefinito di stampe positive. Le pellicole negative che producono negativi a colori sono riconoscibili dal suffisso *color* che segue il nome commerciale della casa produttrice.

Dopo lo sviluppo del negativo, non è richiesta la mascheratura per la correzione dei colori, in quanto essa è data, come si è detto, dai copulanti residui incorporati nella pellicola stessa.

Si procede, quindi, alla fase di stampa (proiezione dell'immagine negativa sulla carta fotosensibile a colori) e successivo sviluppo:

- esposizione in camera oscura e fotoattivazione di AgX*
- formazione di argento metallico e di coloranti nei tre strati dell'emulsione
- sbianca
- lavaggio
- asciugatura.

Dal negativo si ottengono stampe positive su carta, oppure si possono produrre trasparenze a colori anche di grande formato.

"Ci sono due tipi principali di carta da stampa a colori: quelle positive e quelle invertibili. La carta positiva è utilizzata quando si stampa a partire da un negativo a colori che incorpora copulanti cromogeni. Quando, invece, si impiega per la ripresa una pellicola a colori diapositiva, allora si deve utilizzare per la stampa una carta invertibile. In questo ultimo caso non c'è possibilità di utilizzare quella forma di mascheratura data, nei negativi, dai copulanti cromogeni residui e risulta, così, più difficile ottenere una buona fedeltà della riproduzione dei colori. Per queste ragioni, quando è possibile, si ri-

corre al sistema Cibachrome, sistema che, si è visto, non si basa sul processo con copulanti cromogeni, bensì sul processo di sbianca. Tuttavia, si deve tenere presente che il sistema Cibachrome non è adatto per tutti gli usi. In particolare, la sensibilità (rapidità) dei materiali fotografici non è molto elevata e, quindi, adatta a riprese in movimento, ma piuttosto per quelle statiche, quali la riproduzione di quadri, mappe e documenti con elementi colorati." [Residori, 2009]

Dai negativi a colori è anche possibile ottenere stampe in bianco e nero su carte adatte a questo scopo specifico.

Nel processo di "sbianca-fissaggio a distruzione dei coloranti" i coloranti, invece di formarsi, vengono selettivamente distrutti formando immagini positive dirette.

Sia che si tratti di pellicola o carta, ognuno dei tre strati fotosensibili incorpora il colorante complementare al colore cui lo strato è sensibile. A seguito della esposizione e dello sviluppo, si ha la distruzione del colorante nelle zone esposte e la formazione di argento metallico in corrispondenza, naturalmente in modo proporzionale alle intensità relative delle radiazioni incidenti. L'argento metallico viene rimosso completamente con un trattamento di sbianca ed il risultato finale è una immagine positiva diretta. Un esempio molto noto di un processo di

questo tipo è quello Cibachrome, apprezzato per le sue caratteristiche di stabilità e di fedeltà cromatica, ma limitato nell'impiego per la bassa rapidità.

Il processo a "trasferimento di coloranti" è sottrattivo. In pratica, tre immagini (selezioni in bianco e nero) vengono trasferite a registro su un supporto di carta per produrre una stampa fotografica; il vantaggio di questo metodo è quello di potere apportare correzioni e variazioni, modificando ad esempio il bilanciamento cromatico. Si utilizza materiale fotosensibile al bicromato; la stampa è a registro. [Residori, 2009]

Infine, qualche cenno sul "processo a trasferimento di immagine". Un tipico esempio è quello della Polaroid, processo in cui i coloranti sono attaccati ai radicali idrochinonici e incorporati nell'emulsione.

"A ciascuno strato fotosensibile è affiancato un altro strato in cui c'è il colorante complementare (giallo, magenta, ciano) associato ad un rivelatore. Lo sviluppo riduce l'alogenuro di argento attivato ad Ag⁰ (si forma una immagine negativa in ciascuno dei tre strati); nelle zone impressionate i coloranti si fissano in unione con il rivelatore e non possono migrare. Nelle altre zone, invece, i coloranti si trasferiscono da uno strato all'altro verso il materiale ricevente su cui si forma l'immagine a colori" [Residori, 2009].

42

Fig. 14
Carta test colore
Kodak.



Fig. 15
Stampa a sviluppo
a colori (autore
Luciano Residori).



43

Bibliografia

Kodak, 1982, *La fotografia per tutti - Grande Enciclopedia Pratica*, Novara, Istituto Geografico De Agostini

Residori L., *Fotografie-materiali fotografici, processi e tecniche, degradazione, analisi e diagnosi*, Padova, il prato casa editrice, 2009, pp. 302

Le seguenti voci bibliografiche sono interamente tratte da volume Residori? Trovare altrimenti una collocazione all'interno oppure cancellare

AA.VV., *The Theory of the Photographic Process*, third edition edited by T.H. James, N.Y., Macmillan, 1966

C. Oleari (a cura di), *Misurare il colore*, Hoepli, 1998

Carroll B. H., Higgins G. C., James T. H., *Introduction to Photographic Theory - The Silver Halide Process*, N.Y., John Wiley & Sons, 1980

Celentano F., *Sviluppo del negativo, sensitometria e chimica fotografica*, Milano, Il Castello, 1871

Agoston G. A., *Color Theory and its Application in Art and Design*, Sprinter, 1987 (II ed.)

Wyszecki G., W.S. Stiles, *Color Science: Concepts and Methods, Quantitative data and Formulae*, Wiley, 1982 (II ed.)

Ghedina O.F., *Foto ricettario-formule, procedimenti, tecniche*, 4a edizione, Milano, Hoepli, s.a.,

International Centre of Photography - *Enciclopedia of Photography*, N.Y, Pound Press Book-Crown Publishers Inc., 1984

Kowaliski P., *Applied Photographic Theory*, London, J. Wiley & Sons, 1972

Fairchild M.D., *Color Appaerance Models*, Addison Wesley, 1998

Hunt R.W.G., *Measuring color*, Fountain Press, 1998 (III ed.)

S.A., International Centre of Photography - *Enciclopedia of Photography*, N.Y, Pound Press Book-Crown Publishers Inc., 1984

Society of Photographic Scientists and Engineers, *SPSE Handbook of Photographic Science and Engineering*, edited by Woodlief Thomas Jr., N.Y., John Wiley & Sons, 1973

Weissberger A., *Principles and Chemistry of Color Photography*, in *The Theory of the Photographic Process*, third edition edited by T.H. James, N.Y, Mcmillan Company

2 Teoria dell'immagine digitale

2.1 Composizione dell'immagine digitale

2.1.a Acquisizione digitale

2.1.b Immagine digitale

2.2 Teoria della compressione dati

2.2.a Nozioni basilari di teoria dell'informazione

2.2.b Algoritmi di compressione

2.3 Teoria della compressione applicata all'immagine digitale

2.3.a Codifica delle immagini

2.3.b Algoritmi di compressione sulle immagini

2.1 Composizione dell'immagine digitale

G.E. Gigante, F. Liberati, E. Giuzio, M. Lauria

Negli ultimi anni la rivoluzione digitale ha svolto un ruolo fondamentale nello sviluppo del sistema di comunicazione globale decretando un irreversibile cambiamento e superamento delle esistenti tecnologie analogiche. Il passaggio al digitale ha permesso, ad una grande ed eterogenea platea di utenti, di moltiplicare archiviare e condividere il proprio patrimonio culturale attraverso sistemi elettronici sempre più economici e raffinati. La fotografia è stata coinvolta completamente in questo processo: da una cattura su supporto analogico di un numero limitato e non immediatamente accessibile di riprese, si è passati a innovativi dispositivi che consentono una moltitudine di provini, direttamente modificabili e condivisibili, aventi qualità risolutive superiore rispetto alle tradizionali tecnologie. Dal 1983, anno in cui per la prima volta è stata presentata la macchina fotografica digitale, ad oggi si è assistito ad un miglioramento delle tecniche e degli strumenti di ripresa che hanno modificato profondamente il mercato e le professionalità esistenti. I molteplici vantaggi offerti dalle immagini digitali, facilmente elaborabili ed estremamente versatili, hanno coinvolto anche altri settori legati alla ripresa come ad esempio l'audiovisivo e, in particolare, la cinematografia. Questo ha consentito l'approfondimento ed il sostegno di ricerche incentrate sullo sviluppo di dispositivi di acquisizione con definizione sempre più accurate, supporti di memorizzazione con grandi capacità e si-

stemi di riproduzione di elevata qualità e fedeltà.

2.1.a Acquisizione digitale

L'immagine come entità astratta è il risultato di un processo chimico e fisico che si completa nella struttura cerebrale degli esseri viventi. Gli organi interessati alla cattura e alla sintesi delle immagini formano l'apparato visivo. Ogni essere vivente ha un sistema di percezione visivo strutturato in base alle caratteristiche ambientali e naturali ed ognuno presenta delle differenze biologiche e fisiche diverse. Prima di procedere è opportuno ricordare che, oltre alle considerazioni filosofiche della nozione di forma e di immagine di Aristotele, le prime rilevanti teorie relative ai fenomeni ottici, le lenti ed i concetti riguardanti il meccanismo della visione furono ricavati nel XVII secolo dagli studi di G.B. Della Porta, G. Klepero e G. Galilei. Un grande interesse per considerazioni fisiche e mediche, nel XVIII secolo, rivestirono i lavori di I. Newton e, più tardi di T. Young, che risultarono fondamentali per la comprensione di come avviene la percezione visiva dell'uomo e la sintesi dei colori. Tutte queste nozioni ed esperienze contribuirono, alla fine del XIX secolo, con i lavori sperimentali di J. Maxwell e T. Sutton, alla realizzazione della prima fotocamera e alla nascita della fotografia moderna ed un secolo più tardi, con l'avvento dell'informatica, alle prime macchine di ripresa digitali.

L'occhio umano è costituito da un or-

gano sferico, detto bulbo oculare, circondato da tre membrane deputate alla funzione visiva: la cornea (trasparente, parte anteriore) e la sclera (opaca, parte posteriore) la coroide, ricca di vasi sanguigni e di pigmenti; ed infine, la retina, contenente i ricettori fotosensibili. L'estremità anteriore della coroide costituisce l'iride, un diaframma che si contrae e si espande per regolare la quantità di luce entrante nell'occhio. L'apertura centrale dell'iride è la pupilla e nella cavità interna sono presenti i mezzi di rifrazione (umore vitreo, lente e corpo vitreo). La lente, o cristallino, assorbe circa un decimo della luce incidente in maniera non uniforme rispetto allo spettro della luce visibile, mentre non è in grado di effettuare alcun tipo di contrasto sia alla radiazione infrarossa che all'ultravioletta. La luce, dopo il passaggio attraverso il cristallino, giunge alla retina che occupa l'intera parete posteriore dell'occhio.

I recettori presenti sulla superficie della retina sono di due tipi: coni e bastoncelli. I coni, che variano da 6 a 7 milioni per bulbo oculare, sono concentrati principalmente nella porzione centrale della retina, la fovea, e sono sensibili al colore. Questi sono attivati in condizioni di illuminazione di intensità medio-alta e per questo sono responsabili della visione diurna. La forte concentrazione dei coni ed il fatto che ogni cono sia collegato ad una fibra nervosa danno all'occhio la capacità di discriminare dettagli molto fini in condizioni di illuminazione medio-alta. I bastoncelli, da 75 a 150 milioni per

bulbo oculare, sono distribuiti in modo più uniforme sull'intera superficie della retina e sono praticamente insensibili al colore; questi sono resi operanti in condizioni di illuminazione di bassa intensità (visione notturna). Inoltre, la distribuzione in un'area più ampia e la congiunzione di più bastoncelli con un'unica fibra nervosa diminuisce la capacità di cernita dei dettagli: i bastoncelli danno cioè un'immagine globale e meno precisa della scena presente nel campo visivo. Per questi motivi la visione notturna è caratterizzata dalla assenza di colore e da scarsa acuità [Sears,1985].

Nel campo della fotografia tradizionale la scena è ripresa grazie ad un dispositivo noto come macchina fotografica (Fig. 1). Questa ha una struttura in parte analoga a quanto descritto ed è costituita da tre componenti principali: il corpo macchina, l'obiettivo e la pellicola. Il corpo macchina è una cassa rigida a tenuta di luce con elementi ottico-meccanici (il mirino, il pentaprisma, l'otturatore) che consentono il controllo dell'immagine e

dei suoi parametri, ed elementi elettromeccanici per la gestione del lavoro fotografico (la profondità di campo o l'avanzamento della pellicola). L'obiettivo è composto da un insieme di lenti sferiche montate in un contenitore cilindrico, dotato di ghiera per la messa a fuoco e per l'apertura del diaframma; questo ultimo ha lo scopo di ridurre a misura l'intensità del fascio di luce che arriva sulla pellicola. La pellicola è costituita da un supporto, generalmente triacetato di cellulosa, su cui è fissata una gelatina nella quale sono dispersi i sali di argento (cioè i cristalli che formano la grana) sensibili alla luce e la cui funzione è quella di fissare l'informazione ottica. Quando la luce colpisce i cristalli si forma l'immagine latente e, in seguito, si produce il negativo. Variando la dimensione dei cristalli d'argento si può variare la sensibilità della pellicola, cioè la sua capacità di produrre l'immagine in condizioni di illuminazione diverse. Il contrasto, cioè la capacità della pellicola di registrare forti differenze di luminosità del soggetto, è viceversa inversamente proporzionale alla sensibilità ed alla dimensione dei cristalli. Per poter valutare la sensibilità di una pellicola, rispetto ad un'altra, esistono diversi sistemi di lettura, i più comuni sono gli indici unificati ASA, ISO e DIN [Ang, 2007].

Rispetto ad una macchina fotografica analogica, che cattura la luce attraverso un sistema di lenti (obiettivo) ed imprime l'informazione visiva sulla pellicola, un dispositivo di acquisizione digitale fissa la

scena su un sensore ottico digitale. I sensori digitali ebbero il loro sviluppo in campo astronomico, all'inizio degli anni '80 del XX secolo, grazie alla loro caratteristica di minimizzare il rumore di fondo (dovuto alla lunga esposizione) ed in breve tempo estesero la loro versatilità in diversi domini applicativi, in primo luogo quello fotografico. Il sensore digitale è in grado di misurare e catturare la quantità di fotoni (la luce) che lo raggiunge. La superficie del sensore è formata da minuscoli fotositi disposti secondo una griglia regolare (si ha cioè, una campionatura spaziale intrinseca). Praticamente ogni fotosito corrisponde ad un granulo della pellicola fotografica, solo che i granuli sono posti in maniera non uniforme nella pellicola, mentre i fotositi sono perfettamente allineati in righe e colonne riportando così un'informazione più corretta dell'immagine osservata. Questi fotositi sono microsensori che effettuano la conversione da fotoni in elettroni (corrente elettrica) in relazione alla quantità di energia elettromagnetica media che viene rilevata (Fig. 2).

Ogni gradazione di grigio, infatti, ha una sua determinata quantità di energia; viceversa per la sintesi dei colori si usano diversi sistemi di lettura, i più comuni sono gli indici unificati ASA, ISO e DIN [Ang, 2007].

Rispetto ad una macchina fotografica analogica, che cattura la luce attraverso un sistema di lenti (obiettivo) ed imprime l'informazione visiva sulla pellicola, un dispositivo di acquisizione digitale fissa la

un filtro distinto, per acquisire ciascuno una componente cromatica specifica (acquisizione a tre sensori) dell'intera immagine. Una volta generate le differenti variazioni elettriche, una circuiteria dedicata le amplifica e le campiona producendo l'informazione numerica. Alla fine di questo processo ogni valore avrà un'associazione ad una gradazione di grigio o ad un colore, secondo opportuni modelli, e potrà essere elaborato da un calcolatore elettronico [Stuart, 2006].

In generale è possibile definire una immagine come il luogo di incontro dei raggi, riflessi da uno specchio, provenienti da un fascio di raggi uscenti da una sorgente. Nel sistema visivo umano questo si concretizza con il passaggio dell'energia luminosa che viene messa a fuoco, transitando attraverso la cornea e il cristallino, sulla retina prima di essere assorbita dalla pigmentazione fotosensibile dei recettori. Nei coni questa pigmentazione è di tre tipi, il che li rende sensibili a differenti gamme spettrali che combinate insieme favoriscono la percezione dei colori. Concretamente avviene una modifica, da parte dei coni, della propria configurazione molecolare con relativa generazione di un potenziale d'azione che avvia la trasmissione dell'impulso nervoso. Il sistema visivo umano risponde alla radiazione elettromagnetica nel campo del visibile tra 360nm e 800nm circa (Fig. 3), anche se la sensibilità dell'occhio è molto ridotta tra 360nm e 410nm e tra 720nm e 800nm. Una volta convertita l'energia della ra-

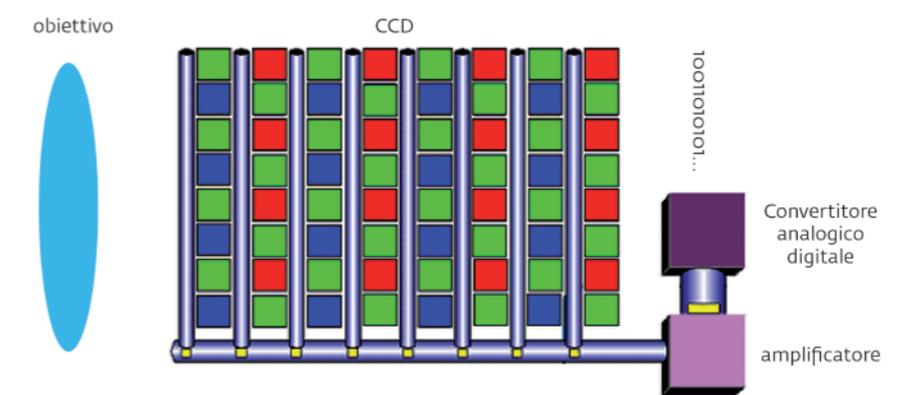


Fig. 2
Componenti principali di un sensore ottico.

diuzione elettromagnetica, cioè la luce, in segnali elettrochimici questi ultimi vengono convogliati verso la corteccia cerebrale attraverso le fibre nervose che costituiscono il nervo ottico. Una volta arrivato il segnale il cervello costruisce l'immagine visiva in accordo con le teorie sulla percezione e sulla psicologia della forma [Halliday et al., 2006].

In una macchina fotografica a pellicola la luce viene fatta convergere da una lente (l'obiettivo) attraverso un'apertura e un otturatore fino a raggiungere una porzione di pellicola posizionata sul piano focale. Chiudendo e aprendo l'apertura e variando il tempo dell'otturatore è possibile controllare come la pellicola viene esposta. Quest'ultima operazione consente il cambio di livello al quale la macchina cattura l'azione, determina quanto accuratamente la pellicola registra le informazioni sul contrasto e sulla saturazione e analizza quali parti dell'immagine risultano a fuoco. Una volta fissata,

l'immagine viene impressa sulla pellicola [Freeman, 2005].

Nei dispositivi di acquisizioni digitale il sensore campiona la luce che passa attraverso l'obiettivo e la converte in segnali elettrici. Si tratta di segnali molto deboli che devono essere prima amplificati ed in seguito inviati ad un convertitore analogico-digitale (un particolare strumento che trasforma i segnali, corrispondenti a gradazioni di grigio o ai colori, in numeri). Questi valori che hanno una rappresentazione in stringhe binarie posso-

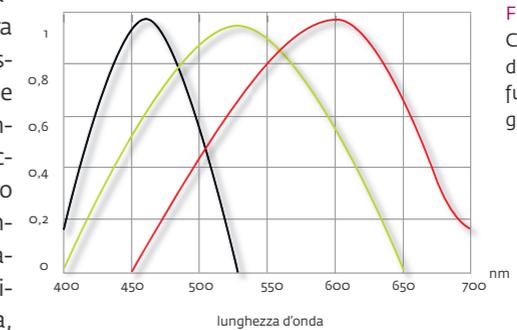
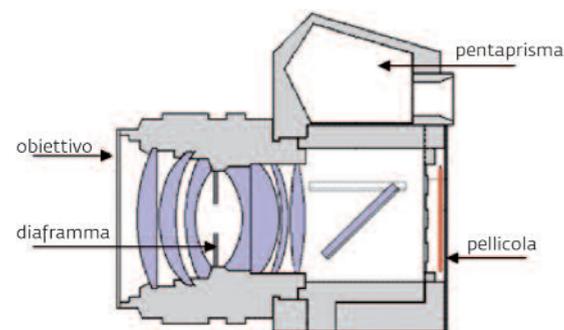


Fig. 3
Curve di risposta dei diversi tipi di coni in funzione della lunghezza d'onda.

Fig. 1
Componenti principali della macchina fotografica: corpo macchina (grigio), lenti (azzurro), pellicola (rosso).



no, in seguito, essere elaborati (miglioramento del contrasto, ricerca del contorno) o memorizzati su adeguati supporti digitali (dischi e nastri).

I sensori digitali si dividono in due grandi categorie: i dispositivi ad accoppiamento di carica (CCD, Charge Coupled Device) e i semiconduttori (CMOS, Complementary Metal Oxide Semiconductor). Il CCD è una matrice (serie ordinata in forma di tabella) di condensatori, ognuno dei quali ha la capacità di immagazzinare cariche elettriche; in altre parole, i condensatori della matrice sono gli elementi di immagine (i fotositi che in questo caso vengono detti *pixel*, acronimo di *picture elements*) del CCD. I pixel si caricano per effetto fotoelettrico, che avviene quando un fotone di luce colpisce il materiale fotosensibile del dispositivo e viene convertito in carica elettrica; i pixel conservano questa carica finché un circuito elettrico è collegato al CCD. A questo punto il valore della carica immagazzinata in ogni pixel è amplificato, convertito in un valore numerico e poi trasferito nell'elaboratore elettronico per essere memorizzato, processato o visualizzato. I CMOS, invece, hanno la maggior parte dell'elettronica (l'amplificazione del segnale elettronico, la conversione analogica-digitale e l'elaborazione relativa ad ogni pixel) direttamente nel circuito integrato [Howell, 2006]. Attualmente, vi sono sensori digitali al silicio in grado di assorbire differenti lunghezze d'onda di luce a differenti strati di profondità; in questo modo, si ottiene

una maggiore nitidezza e l'eliminazione di artefatti dovuti alla interpolazione cromatica dei recettori.

2.1.b Immagine digitale

Una immagine analogica può essere descritta come la distribuzione spaziale di energia radiante prodotta da una sorgente luminosa ed esprimibile mediante una funzione reale limitata e non negativa rispetto alle variabili spaziali e temporali:

$$f = f(x, y, \lambda, t) \quad \S 1$$

L'immagine effettivamente percepita è la funzione $\S 1$ modificata secondo una media temporale e una media rispetto alla lunghezza d'onda. In altre parole l'immagine può essere caratterizzata come una distribuzione bidimensionale di intensità luminosa, detta irradianza (o illuminanza). L'irradianza può essere rappresentata mediante l'influenza di due termini ($\S 2$): l'illuminazione $i(x, y)$ e la riflettanza $r(x, y)$.

$$f(x, y) = i(x, y) + r(x, y) \quad \S 2$$

con $i(x, y) > 0$ e $0 < r(x, y)$

L'immagine è cioè costituita da una componente dovuta alla luce proveniente direttamente dalla sorgente di illuminazione e da una componente dovuta alla luce riflessa dagli oggetti presenti nella scena. L'illuminazione è responsabile delle piccole (o lente) variazioni di luminosità (basse frequenze spaziali), mentre la riflettanza dà luogo alle

variazioni brusche di luminosità, per esempio in corrispondenza dei contorni degli oggetti (alte frequenze spaziali). L'effettiva natura di $i(x, y)$ è determinata dalla sorgente luminosa, mentre $r(x, y)$ dipende dalle caratteristiche degli oggetti presenti nella scena (Tabella 1) e varia tra 0 (assorbimento totale) e 1 (riflettanza completa) [Freeman, 1990].

Il processo di conversione di un segnale analogico in uno digitale avviene tramite due fasi di discretizzazione:

- il campionamento (discretizzazione temporale), in cui si stabiliscono e si individuano gli intervalli temporali in cui dovrà essere rilevato il segnale analogico;
- la quantizzazione (discretizzazione dei

Tabella 1 Esempi di valori di luminosità e riflettanza

ILLUMINAZIONE (SORGENTE LUMINOSA)	i
Luce solare	9000
Cielo nuvoloso	1000
Interno (ambiente di lavoro)	100
Chiaro di luna	0.01
RIFLETTANZA (OGGETTO)	r
Velluto nero	0.01
Parete bianca	0.80
Argento	0.90
Neve	0.93

livelli) cioè la trasformazione in valori numerici del segnale analogico nell'istante di rilevamento;

- la fase di codifica che permette di tenere il segnale nella forma numerica finale (ovviamente nel caso di riproduzione del segnale si seguirà il procedimento inverso, trasformando il valore numerico discreto in segnale analogico). A questo ultimo aspetto provvede un circuito che può avere caratteristiche architetturali più o meno raffinate con un diverso tipo di accuratezza: lo ADC (Convertitore Analogico Digitale - *Analogic to Digital Converter*) che trasforma i segnali analogici in digitali. Ovviamente nel caso inverso sarà utilizzato il DAC (Convertitore Digitale Analogico - *Digital to Analogic Converter*) che muta i segnali digitali in analogici [Jain, 1989].

Con il processo di campionamento si considerano solamente i valori che il segnale ha in istanti di tempo prefissati. L'andamento del segnale nei rimanenti punti può essere ricostruito a partire dai valori conosciuti, a patto che questi ultimi corrispondano ad un numero finito di istanti sufficientemente vicini tra loro. Altrettanto intuitivamente si può capire che se il segnale varia rapidamente i valori rilevati devono essere più vicini tra loro, così che tra un campione e l'altro non vi sia una insufficiente descrizione delle variazioni imprevedibili. La distanza tra due successivi valori noti del segnale è so-

litamente detta "passo" o periodo di campionamento ed i valori assunti dal segnale negli istanti noti sono i campioni del segnale (Fig. 4).

La rapidità con cui un segnale varia è legata al suo contenuto in frequenza (segnali con un alto contenuto in frequenza variano più rapidamente); per questo, la scelta del passo di campionamento deve essere legata alla banda di frequenze dal segnale.

Il valore del periodo di campionamento, T_c , viene scelto in base al cosiddetto Teorema del Campionamento (o Teorema di Shannon). Il teorema afferma che il numero dei campioni nell'unità di tempo deve essere almeno pari al doppio della frequenza massima del segnale che si vuol produrre; il numero di campioni considerato nell'unità di tempo si chiama frequenza di campionamento del segnale, f_c ed è correlata al periodo di campionamento dalla $\S 3$.

$$f_c = \frac{1}{T_c} \quad \S 3$$

In altre parole un segnale analogico può essere ricostruito a partire dalla sua versione campionata, se e solo se il segnale originale è a banda limitata tra $-h$ e $+h$, e se il periodo di campionamento T_c è minore dell'inverso del doppio della frequenza più alta del segnale originale [Gonzales et al., 2007]: cioè deve valere la $\S 4$.

$$T_c < \frac{1}{2h} \quad \S 4$$

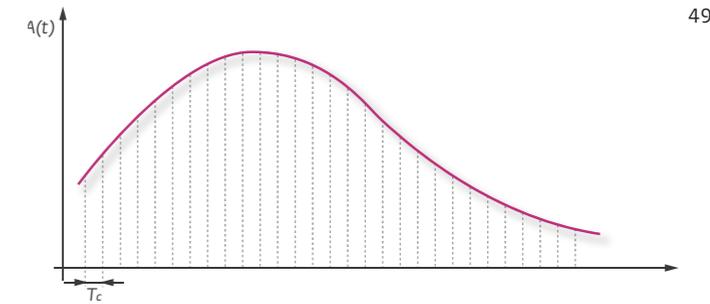


Fig. 4 Campionamenti di un segnale analogico di una immagine.

Se non si rispetta il teorema, con il segnale campionato non si riesce a descrivere esattamente il segnale analogico di partenza, e si hanno delle aberrazioni indesiderate. Quest'ultimo fenomeno descritto prende il nome di *aliasing* (Fig. 6).

Il secondo aspetto che caratterizza il processo di acquisizione digitale è la quantizzazione. Tramite il campionamento è possibile descrivere un segnale specificandone il valore assunto in un numero finito di istanti opportunamente spaziali. Anche dopo che è stato campionato, però, il segnale non è in una forma utile per essere manipolato da un elaboratore elettronico. Una rappresentazione esatta dei singoli campioni, infatti, potrebbe richiedere una quantità di memoria infinita. Si consideri, ad esempio, il caso di un campione che assume un valore di tipo logaritmico: questo potrà essere un numero reale con infinite cifre decimali e quindi la sua rappresentazione esatta richiederebbe una quantità di memoria infinita.

In generale non si è interessati al valo-

Fig. 5
Immagine originale
(sinistra) e aliasing
(destra).



re esatto del campione ma si è disposti ad accettare anche un valore approssimato purché il divario non sia troppo grossolano. In pratica si fissa una precisione ritenuta valida per ottenere il migliore risultato e ci si limita a specificare il valore dei campioni con tale accuratezza. Questa operazione di limitazione del numero di cifre decimali usate per rappre-

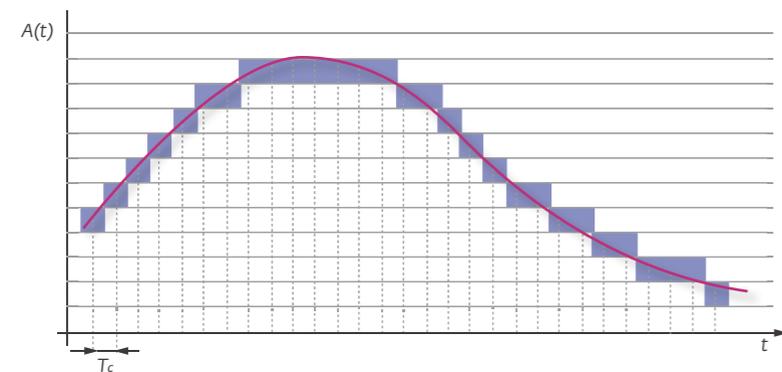
sentare i campioni va sotto il nome di quantizzazione del segnale campionato. Il processo di quantizzazione dei campioni di un segnale è ottenuto determinando la precisione con la quale i campioni devono essere rappresentati e, in seguito, suddividendo l'asse delle ordinate, in cui è riportato il segnale, in tanti intervalli ognuno con un'ampiezza pari

alla precisione richiesta (Fig. 6).

Se, ad esempio, si decide di rappresentare i campioni fino alla loro prima cifra decimale ogni intervallo unitario sarà suddiviso in dieci parti uguali (0, 0.1, 0.2, ...). Infine, a tutti i campioni che cadono in un certo intervallo viene assegnato il valore quantizzato più vicino (arrotondamento) o il valore quantizzato immediatamente inferiore al valore esatto (troncamento) [Dougherty, 1994].

L'ultimo processo è la codifica, che ad ogni campione quantizzato fa corrispondere un numero binario, cioè una sequenza di *bit*. Più esattamente, una volta definiti i livelli di quantizzazione mediante i quali approssimare i campioni del segnale, ad ognuno di essi viene fatto corrispondere un diverso numero binario. Sono tali numeri binari che vengono utilizzati come codifica interpretabile dagli elaboratori elettronici per la loro eventuale memorizzazione o elaborazione.

Fig. 6
Quantizzazione di un segnale analogico di una immagine.



Si ricorda che indicando con m_b la lunghezza intesa come numero di cifre occorrenti per rappresentare un numero N nella base 2 (base binaria) si può ricorrere alla $\S 5$:

$$N = \sum_{i=0}^{m_b-1} b_i 2^i \quad \text{con } 0 \leq b_i < 2 \quad \S 5$$

Dato il numero di livelli di quantizzazione usati, mediante l'equazione precedente è possibile ricavare immediatamente il numero di bit necessari alla codifica dei campioni. Il numero di livelli, a sua volta, può essere determinato a partire dalla precisione richiesta e dalla massima differenza del segnale in ingresso. Se, ad esempio, un segnale da convertire varia da 400nm a 800nm e lo si vuole quantizzare con una precisione di 2nm sono necessari 200 livelli, per rappresentare i quali è necessario utilizzare otto bit, cioè alcune delle combinazioni possibili di bit di lunghezza otto (in particolare quelle che vanno da 00000000 a 11000111).

È fondamentale notare che mentre il campionamento non comporta alcuna perdita delle caratteristiche del segnale (il quale, purché siano verificate le condizioni dettate dal Teorema di Shannon, può essere perfettamente ricostruito a partire dai suoi campioni), la quantizzazione provoca una perdita, in quanto i valori numerici derivati non sono uguali a quelli originali che sono andati persi nel processo di arrotondamento o di troncamento. In ogni caso questo ha un impatto poco ri-

levante sulla resa finale per considerazioni ottiche (il numero di sfumature distinguibili dall'occhio umano è limitato) e pratiche (è il compromesso implicito nel momento in cui si vuole una rappresentazione digitale).

Riesaminando il processo di digitalizzazione il primo passo che deve essere compiuto è quello di "sovrapporre" all'immagine analogica (una scena reale, una fotografia o un documento da digitalizzare) una griglia fittissima di minuscole cellette, cioè i fotorecettori del sensore digitale, dette pixel (Fig. 7).

Naturalmente, a parità di immagine, più fitta è la griglia più piccole saranno le cellette, e migliore sarà l'effetto di avere una immagine "continua". Attualmente ci sono dei sensori digitali che hanno un numero di fotositi pari a quelli presenti nella fovea (circa 340.000 per centimetro quadrato) e si raggiungono sensibilità che superano i 12800 ISO. Una volta suddivisa l'immagine in tante piccole aree cromatiche, si è cioè campionata l'immagine, è necessario effettuare l'operazione di quantizzazione ovvero rappresentare queste "aree di immagine" attraverso numeri. Ad ogni valore ottenuto, rappresentato nel sistema binario (il linguaggio dei calcolatori), si associa univocamente una scala di grigio per immagini prive dell'informazione cromatica, o un colore, seguendo particolari modelli (RGB, YUV e CMYK) o semplici tabelle di corrispondenza (*palette* o tavolozza dei colori).

La nascita delle immagini digitali e lo

sviluppo della tecnologia fotografica magnetica può essere fissata nel 1983, anno in cui venne presentata la prima fotocamera che, al posto delle normali pellicole a emulsione chimica, operava tramite sensori e memorie digitali su cui era possibile conservare alcune decine di scatti con una buona qualità. Nel tempo le evoluzioni tecnologiche relative all'acquisizione, il miglioramento del sistema di lenti e la commercializzazione massiva, hanno decretato l'inesorabile sostituzione dei dispositivi analogici a vantaggio di quelli digitali, costringendo le principali case di produzione a cambiare e differenziare la loro offerta. Le fotografie tradizionali sono state sostituite da immagini *born digital* e sempre più si è sentita la necessità di una replica in digitale di originali per consentire un restauro indiretto, una preservazione nel tempo ed una fruizione più vasta ed immediata. Questo crescente interesse ha consentito la realizzazione di sensori digitali di dimensioni e caratteristiche paragonabili alla struttura biologica

Fig. 7
Griglia di pixel di una immagine digitale (dettaglio a destra).



propria della natura umana permettendo di realizzare dispositivi in grado, grazie a programmi dedicati, di interagire con il mondo esterno mediante una rappresentazione fedele a quelle recepite dall'uomo e spingendo la ricerca nella visione artificiale e nella cibernetica. Inoltre si è sviluppato anche tutto un campo di elaborazione delle immagini (*digital image processing*) che ha consentito

non solo di replicare e di rendere immediate le operazioni di miglioramento (aggiustamento livelli, contrasto, dettaglio) ma, soprattutto di favorire operazioni di estrazioni di caratteristiche (*pattern recognition*) utili in diversi ambienti (videosorveglianza, lavorazioni industriali). Attualmente l'interesse è rivolto alla realizzazione di sistemi di memorizzazione capienti, affidabili e di di-

mensioni ridotte, fino ad arrivare ai risultati odierni in cui è possibile conservare diverse milioni di immagini in dispositivi di pochi millimetri quadrati.

Ringraziamenti

Gli autori vogliono ringraziare Valentina, Romina e Renata per i loro commenti ed il prezioso supporto. Un ringraziamento particolare al piccolo Lorenzo.

Bibliografia

Ang T., 2007, *Fotografia*, Mondadori Electa, Milano, Italia.

Dougherty E. R., 1994, *Digital Image Processing Methods*, CRC Press, London, United Kingdom.

Freeman M. H., 1990, *Optic*, Butterworth-Heinemann, Oxford, United Kingdom.

Freeman M. H., 2005, *Reflex digitali*, Mondadori Informatica, Milano, Italia.

Gonzalez R. C., Woods R. E., 2007, *Digital Image Processing*, Prentice Hall, New Jersey, USA.

Halliday D., Resnick R., Walker J., 2006, *Fondamenti di fisica. Meccanica, termologia, elettrologia, magnetismo, ottica*, CEA, Milano, Italia.

Howell S. B., 2006, *Handbook of ccd astronomy*, 2 ed, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.

Jain A. K., 1989, *Fundamentals of digital image processing*, Englewood Cliffs, Prentice Hall, New Jersey, USA.

Sears F., *Ottica*, 1965, CEA, Milano, Italia.

Stuart A. M., 2006, *CCD Astrophotography: High Quality Imaging from the Suburbs*, Springer, Berlin, Germany.

2.2 Teoria della compressione dei dati

E. Grande, L. Graniero, F. Liberati

Negli ultimi anni i sistemi di comunicazione digitali hanno avuto una notevole importanza per lo sviluppo della società. La grande quantità di informazioni, che quotidianamente è trasmessa, è aumentata esponenzialmente ed i mezzi su cui essa viaggia, viene memorizzata ed elaborata, ha avuto una evoluzione rapida e sempre più specifica. Sebbene ci siano stati accorgimenti strutturali e logici che hanno permesso la realizzazione di supporti sempre più evoluti e performanti, la quantità di dati da gestire è risultata sempre più elevata anche grazie all'adozione del digitale in diversi domini applicativi (televisione, fonìa, comunicazione - nel 2008 sono state stimate 1,5 miliardi di caselle di posta elettronica attive). In questo contesto la compressione dati ha avuto, ed ha, un ruolo fondamentale. Per compressione dati si intende una giusta ed economica codifica dell'informazione digitale; ovvero si ricercano strategie che consentano di ridurre o eliminare, in maniera adeguata, elementi ridondanti senza che vi siano alterazioni al significato del messaggio che vuole essere trasmesso o memorizzato. Esistono numerose tecniche per ottenere una riduzione dell'informazione, ma principalmente due sono i rami in cui è possibile classificarli: il "modello probabilistico", in cui vi è eliminazione della ridondanza basandosi sulla frequenza con cui i dati si ripetono e quelli che invece operano su il concetto di "contesto" esaminando il modo e la posizione in cui l'informazione si ripete nel documento di-

digitale. In letteratura sono riportati diversi algoritmi, cioè procedimenti informatici, utilizzati per la compressione. Essi si suddividono in due categorie: lossless senza perdita di informazione in cui, cioè, il messaggio ricostruito dopo il processo di decodifica, risulta essere uguale a quello originale. Si ricorre a questa tipologia di algoritmi per rappresentare testo, immagini mediche o militari, in cui l'integrità dell'informazione è un aspetto determinante. La seconda categoria è quella degli algoritmi lossy, cioè con perdita di informazione nei quali a fronte di una maggiore compressione, si verifica un'alterazione della fedeltà al dato originario. Ciò è quanto avviene quotidianamente su Internet per immagini, filmati o suoni.

2.2.a Nozioni basilari di teoria dell'informazione

Prima di introdurre gli aspetti fondamentali della compressione di dati digitali è necessario esplicitare il concetto di "messaggio" e sua "rappresentazione". Il messaggio (o informazione) può essere definito come una variazione in un sistema (quindi un cambiamento che muta una situazione a sé stante); viceversa la sua rappresentazione è il modo tramite il quale l'informazione è convogliata o descritta. Ciò significa, tra l'altro, che è possibile esplicitare un messaggio utilizzando differenti rappresentazioni. Si considerino, per esempio, due persone che

raccontano un evento, l'una in maniera prolissa e l'altra in maniera concisa. In questo caso, il messaggio è l'accadimento che si sta riferendo, mentre le parole usate dai due narratori sono la rappresentazione del messaggio stesso. Come è possibile ipotizzare, ognuno farà uso di un numero differente di parole riportando così la versione della stessa storia in due modi diversi. Almeno in un caso si avrà un certo numero di parole non essenziali, in quanto o prive di informazioni rilevanti oppure contenenti informazioni già note. In altri termini, almeno uno dei due racconti della storia è caratterizzato da ridondanza dei dati.

A partire dalla metà del Novecento, il termine comunicazione è stato sempre più spesso adottato per designare quella particolare forma di trasporto immateriale ed astratto relativo al trasferimento di informazione. Un vero e proprio punto di svolta fu costituito dall'opera di due importanti scienziati, Claude Shannon e Warren Weaver, cui si deve la formulazione della "Teoria Matematica della Comunicazione". Negli scritti che la espongono, pubblicati alla fine degli anni 1940, venne fornita, per la prima volta, una definizione generale della comunicazione come «trasferimento di informazioni mediante segnali da una sorgente a un destinatario». Naturalmente, per dare un senso compiuto a questa idea della comunicazione, Shannon e Weaver formalizzarono in termini matematici la nozione di informazione come "scelta" (o variazione di stato) ed individuando nel bit

l'unità di misura della quantità di informazione.

La teoria matematica della comunicazione era mossa da esigenze tecniche molto precise: studiare dal punto di vista fisico-matematico le condizioni di migliore efficienza del trasferimento di segnali attraverso apparati tecnici di trasmissione. Non a caso, il suo sviluppo è parallelo alla grande evoluzione delle telecomunicazioni e agli imminenti accadimenti bellici di quegli anni. Ma l'influenza delle ricerche di Shannon e Weaver andò ben al di là di questo ambito specialistico. I loro lavori contribuirono, infatti, alla definizione di "comunicazione" e alla realizzazione di uno schema generale dei processi comunicativi, che ha goduto di un seguito vastissimo negli anni seguenti, permettendo una formalizzazione anche di concetti come "codifica" e "compressione". Prima di entrare nello specifico, è opportuno descrivere il contesto in cui avviene lo scambio di informazione descrivendo il "sistema di comunicazione":

- Una sorgente di informazione che genera messaggi da inviare ad una destinazione. Si utilizzerà il termine messaggio per denotare l'informazione scambiata da una sorgente ad un destinatario;
- Un codificatore che trasforma i messaggi inviati dalla sorgente in una sequenza di segnali adatti ad essere trasmessi lungo il canale;

- Un canale utilizzato per trasferire i segnali dalla sorgente alla destinazione. Il canale può subire disturbi di varia natura alterando i dati (rumore);
- Un decodificatore che, generalmente, esegue le stesse operazioni del codificatore ma in ordine inverso cioè trasforma le sequenze di segnali, ricevuti dal canale, in messaggi;
- Un destinatario, entità a cui sono rivolti i messaggi inviati dalla sorgente.

In riferimento alle nozioni espresse in precedenza, si distingue:

- il codice con cui si rappresentano i messaggi emessi dalla sorgente (codice sorgente);
- il codice mediante il quale si rappresentano i messaggi trasmessi lungo il canale (codice canale);
- il codice finale nel caso in cui sia diverso da quello sorgente (codice destinazione).

Un esempio è quello che avviene in una comunicazione telefonica, dove il sistema è costituito dalla rete di fonia ed i terminali. I codici in gioco sono quelli relativi al parlato (codice sorgente) che è convertito in impulsi (codice canale), i quali viaggiano lungo il doppino telefonico (il canale) per poi essere convertiti nuovamente in onde sonore (codice destinazione).

Tornando ai sistemi di comunicazione, è necessario affermare che essi devono

essere costruiti in modo tale da consentire la trasmissione di tutti i messaggi aventi un qualsiasi significato. Tale potenzialità comunque trova un vincolo in specifici limiti fisici: la limitata "banda passante" dei canali di trasferimento fa in modo che messaggi lunghi possano richiedere un tempo di trasmissione elevato. Inoltre, il "supporto di memorizzazione" richiede che il messaggio sia di una capacità non maggiore a quella materialmente consentita.

Un messaggio ha come caratteristiche principali il significato e la sua rappresentazione. Ovviamente queste due particolarità sono indipendenti l'una dall'altra: la rappresentazione di un messaggio, infatti, non dipende dal significato del messaggio stesso, ma dal modo in cui esso è codificato. Si può pensare, come esempio, al valore centoventiquattro che ha una rappresentazione nel sistema decimale in 134, con tre cifre, e nel sistema di numerazione romano CXXIV, con una lunghezza di sei cifre. Con lo sviluppo dell'informatica si è posta l'attenzione alle codifiche economiche cioè codifiche che utilizzano un numero minimo di simboli per rappresentare le informazioni. Il significato della compressione è quindi la riduzione della quantità di dati necessari per convogliare o memorizzare l'informazione associata al messaggio. Per questi motivi è importante misurare l'informazione, in modo da poter stabilire, per esempio, la quantità minima di dati necessaria per

una rappresentazione congrua. Si introduce, pertanto, il concetto di "misura dell'informazione" come la quantità di informazione associata ad un messaggio la quale, a sua volta, è strettamente connessa all'incertezza della sua occorrenza.

Dalla definizione di media, se si indica con m_1, m_2, \dots, m_n i messaggi trasmessi dalla sorgente, si ottiene che l'informazione media è data dalla \int_1 :

$$H_b = \sum_{i=1}^n p(m_i) \mu(m_i) = \sum_{i=1}^n p(m_i) [-\log_b p(m_i)] \quad \int_1$$

La quantità H_b prende il nome di entropia. Pertanto, in generale, l'entropia (o incertezza della sorgente) è la quantità media di informazione associata alla singola generazione di un simbolo da parte della sorgente: se i simboli della sorgente sono equiprobabili, l'entropia è massima (ad ogni emissione la sorgente fornisce la massima informazione possibile). Supponendo che ad ogni simbolo della sorgente sia associata una parola di un codice a lunghezza variabile, allora la lunghezza media delle parole del codice, espressa in bit per simbolo, è il bit *rate* del sistema di codifica.

In assenza di rumore nel canale di trasmissione e nel sistema di codifica, un risultato fondamentale della teoria dell'informazione è espresso dal "Teorema di Shannon della codifica priva di rumore" (noto anche come I Teorema di Shannon): «per una sorgente di informazione discreta e senza memoria (o a memoria zero), il bit rate minimo è in media uguale all'entropia della sorgente» [Shannon e Weaver,

1949] [Seibit, 2006] [Abramson, 1993].

Il I Teorema di Shannon stabilisce quindi un limite inferiore, pari all'entropia della sorgente, per il bit rate di un sistema di codifica (e canale di trasmissione) privo di distorsione, quando cioè l'obiettivo principale del sistema di codifica è la compattezza della rappresentazione. L'esistenza di un limite teorico consente di stabilire in modo semplice una misura dell'efficienza di una tecnica di codifica a lunghezza variabile (dove L_{avg} è la lunghezza media delle parole del codice utilizzato) come in \int_2 :

$$\sigma = \frac{H_b}{L_{avg}} \quad \int_2$$

La definizione può essere generalizzata per valutare l'efficienza relativa di due codici distinti C_1 e C_2 (dove L_{avg1} è la lunghezza media delle parole del codice C_1 e L_{avg2} è la lunghezza media delle parole del codice C_2 e assunto che $L_{avg2} > L_{avg1}$) tramite la \int_3 :

$$\sigma = \frac{L_{avg1}}{L_{avg2}} \quad \int_3$$

È possibile capire meglio quale sia il significato dell'entropia con un esempio.

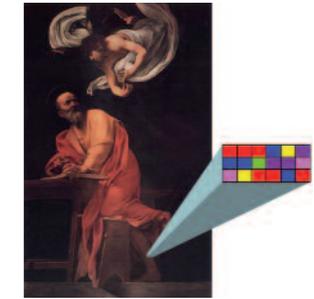
Esempio

Si prenderà in considerazione un'area di immagine avente dimensione 3x6 (vedi figura seguente); cui si assocerà una corrispondenza testuale, non solo per semplificare la rappresentazione sul modo in cui operano i vari algoritmi, ma anche per mettere in evidenza come sia possibile operare su dati testuali (ricordiamo che molte di queste tecniche sono

state realizzate principalmente in quest'ultimo dominio applicativo).

Corrispondenza testuale

Stringa: FFFAEEAACCEEBBDFFAF



Messaggi: {A,B,C,D,E,F}

■ A ■ B ■ C ■ D ■ E ■ F

Distribuzione di Probabilità:

P(A)= 4/18=0.22 P(B)= 2/18=0.11

P(C)= 1/18=0.06

P(D)= 2/18=0.11 P(E)= 3/18=0.17

P(F)= 6/18=0.33

Valore Entropia: H(p)=2.386

Questo vuol dire che il messaggio sopra riportato può essere espresso con parole (stringhe) in un opportuno codice la cui lunghezza media è di circa 2.4. Vedremo in seguito come sarà possibile individuare questo codice.

L'informazione digitale è elaborata da calcolatori elettronici che possono avere caratteristiche architettoniche e logiche diverse, la cui unica funzionalità è il processamento di messaggi (o codici) aventi un significato ben definito (istruzioni, indirizzi e dati) e facilmente trattabili dalle componenti presenti. La necessità

di poter usufruire dei messaggi mediante una rappresentazione congrua è stata una esigenza fortemente sentita nel momento in cui si cercò di formalizzare il concetto di informazione e si progettaroni i primi elaboratori elettronici. Per comprendere quali siano gli aspetti basilari è necessario introdurre alcune nozioni.

Un codice C è un insieme di parole (o stringhe) composte da simboli di un alfabeto Σ (che chiameremo alfabeto di sostegno di C). Per capire questo concetto si può pensare alle lettere dell'alfabeto italiano come elementi di Σ e alla parole presenti nel vocabolario che unite insieme, rispettando una determinata sintassi e semantica, individuano una informazione espressa con il codice della lingua italiana. La rappresentazione (o codifica) di un insieme di informazioni I in un dato codice C , è una funzione $\varphi: I \rightarrow C$ ossia una legge che associa ad ogni informazione che si intende rappresentare, un'opportuna parola del codice C . In modo analogo la decodifica di una informazione codificata in precedenza nel codice C è una corrispondenza del tipo $\sigma: C \rightarrow I$.

Una codifica viene definita non ambigua se φ risulta essere una funzione iniettiva: cioè ogni coppia di informazioni distinte di I è trasformata da φ in una coppia di parole distinte di C . Indicando con N_x la cardinalità dell'insieme X , cioè il numero di elementi che compongono l'insieme; la codifica j si definisce non-ridondante se $N_c = N_i$, ridondante se $N_c > N_i$ e ambigua se $N_c < N_i$.

Ricordiamo che la nozione di codifica ha origini antiche: esistevano codici che consentivano la comunicazioni sicure in condizioni ostili o bellicose (il più noto è il Cifrario di Cesare).

All'interno di un calcolatore elettronico, come detto, i dati sono rappresentati da codici: ad ogni codice è associato un determinato significato, a seconda di come questo viene definito e nel contesto in cui è utilizzato. Un esempio è l'associazione tra un numero ed un carattere testuale o un numero ed un elemento pittorico (un punto di colore o una gradazione di grigio). I codici possono avere un significato di valori numerici ed essere rappresentati mediante diversi alfabeti, facendo riferimento alla rappresentazione posizionale in base b (con $b \geq 2$ e b intero). Infatti, indicando con l_b la lunghezza intesa come numero di cifre occorrenti per rappresentare un numero N nella base b , si avrà che N potrà essere rappresentato mediante la §4.

$$N = \sum_{i=0}^{l_b-1} a_i b^i \quad \text{con } 0 \leq a_i < b \quad \S 4$$

$$\Sigma = \{a_{l_b-1}, a_{l_b-2}, \dots, a_1, a_0\} \quad l_b = \lceil \log_b(N) \rceil + 1$$

In questo modo il valore undici ha una rappresentazione (11) in base dieci, (13) in base otto, (23) in base quattro e (1011) in base due.

È possibile determinare la base ottima, cioè quella che consente di rappresentare numeri con poche cifre (m_b ottimizzato) e con un alfabeto composto da un numero minimo di simboli (b minimo) e

per far questo è necessario minimizzare $m_b \cdot b$. Senza entrare nello specifico è possibile dimostrare che la base due, con alfabeto $\Sigma = \{0,1\}$, si avvicina a quella ottima ed è, infatti, utilizzata in campo informatico, anche perché ben si presta al modo funzionale e strutturale dei comuni componenti elettronici che costituiscono l'elaboratore: deviatori elettronici, interruttori, flip flop, commutatori ottici, ed altri.

2.2.b Algoritmi di compressione

Una volta in possesso della teoria necessaria per capire fino a quanto è possibile spingersi nella compressione di dati, è opportuno riportare accuratamente il funzionamento di alcune tecniche utilizzate.

L'evoluzione storica della compressione di dati si è sviluppata in quanto spinta dalla necessità di dover conservare un grande numero di informazioni testuali: le prime esigenze furono sentite nella ottimizzazione della memorizzazione delle informazioni anagrafiche statunitensi. Solamente con il passare del tempo e l'introduzione delle nuove tecnologie si è pensato di perfezionare le conoscenze ottenute anche per tipi di dato diversi (immagini, suoni, filmati).

Dagli studi presenti in letteratura è possibile suddividere gli algoritmi di compressione in due grandi rami: i "codificatori antropici" ed i "codificatori mediante dizionari". I primi basano il loro funzionamento sul modello probabilistico, ov-

vero sulla conoscenza della frequenza di ogni messaggio (o simbolo dell'alfabeto) all'interno del flusso di dati (tra gli altri saranno portati in evidenza i codici di Shannon-Fano, i codici di Huffman; mentre saranno rimandate ad una altra sessione le descrizioni relative la Trasformata al Coseno e la Trasformata Wavelet, utilizzate come elementi specifici dei più comuni algoritmi di compressione per immagini con perdita di informazione). Il secondo insieme è costituito da quegli algoritmi che tendono ad eliminare la ridondanza dei dati incentrando l'attenzione su dove essa risiede. L'idea, nata da Lempel e Ziv alla fine degli anni 70, è attualmente quella sulla quale si concentra buona parte della ricerca scientifica [Cappellini, 1985]. Un aspetto importante che un sistema di codifica deve garantire è la robustezza, cioè la possibilità di evitare una corruzione irrimediabile del messaggio e del suo significato, a causa della perdita o modifica di alcuni bit. Una codifica, infatti, porta spesso alla costruzione di parole la cui alterazione spesso si ripercuote in quelle successive (codifica sequenziale) o limitrofe (codifica multi-dimensionale). Per evitare questo tipo di problemi possono essere sfruttate due strategie la prima delle quali consiste nell'utilizzo di un numero minimo di bit supplementari in grado di rilevare ed eventualmente correggere l'errore. L'altra, la tecnica più praticata, è quella di strutturare i dati in maniera affidabile attraverso un frazionamento in pacchetti dell'informazione.

Quello degli algoritmi di compressione è un campo dei più fecondi dell'informatica e della teoria dell'informazione. Probabilmente uno dei più antichi algoritmi di compressione è il codice Morse, in cui si cercava di rappresentare un messaggio con solo tre caratteri: punti, linee e spazi. Scopo del codice Morse era quello di realizzare un sistema che consentisse uno scambio rapido di messaggi, soprattutto in situazioni di pericolo. Per raggiungere questo obiettivo fu stabilito che ci fosse un'associazione caratteri-simboli inversamente proporzionata alla probabilità di comparire nella totalità delle parole usate comunemente (ad esempio il carattere e, che ha la maggior frequenza, ha una codifica minima . ; mentre la z ha codifica con più simboli in quanto meno frequente --.). Ovviamente il codice Morse aveva molti vincoli, in particolare il fatto che il ricevente fosse analogico (un operatore umano) il che non permetteva di ottimizzare ulteriormente il codice trasmettendo, per esempio, due caratteri alla volta o in altro modo. I moderni mezzi di comunicazione hanno consentito il passaggio a tecniche più raffinate e più affidabili.

In questa sessione saranno presentati alcuni dei moderni algoritmi di compressione, ed, in particolare, il *Run Length Encoding* (RLE), basato sull'eliminazione di dati ridondanti contigui; il codice di *Shannon e Fano*, esempio di codifica non distruttiva (tra i primi algoritmi teorici ottenuti subito dopo le nozioni della Teoria Matematica dell'Informazione); il *codice*

di Huffman che è uno dei più usati algoritmi di compressione statistici e senza perdita di informazione (basato sul principio di codificare messaggi con maggiore frequenza con pochi caratteri e viceversa); infine, la classe di algoritmi *Lempel e Ziv*, basati sul contesto.

Per valutare un algoritmo di codifica (e decodifica) sono considerati principalmente due aspetti: il tempo computazionale, ovvero il tempo impiegato dall'algoritmo per elaborare i dati originali e produrre la codifica compressa; e il tasso di compressione, ovvero il rapporto di compressione tra il messaggio originario e quello compresso (in altre parole, il guadagno che si ha utilizzando l'algoritmo di compressione). Il tempo computazionale è una metrica indipendente dalle tecnologie utilizzate determinato dal numero di istruzioni che devono essere eseguite per svolgere un determinato algoritmo. Il tasso di compressione (T), invece, è calcolato come il rapporto fra la dimensione dell'informazione compressa (D_c) e quella originale (D_i) ed è ottenuta dalla quantità §5:

$$T = 1 - \frac{D_c}{D_i} \quad \S 5$$

In pratica è comunemente utilizzato, il tasso di compressione espresso in percentuale (§6):

$$T_{\%} = \left(1 - \frac{D_c}{D_i}\right) \cdot 100 \quad \S 6$$

Oltre a questi aspetti ce ne sono altri come ad esempio la quantità di risorse richieste (memoria, control unit) che in questa documento saranno citati quando rilevanti.

Run Length Encoding

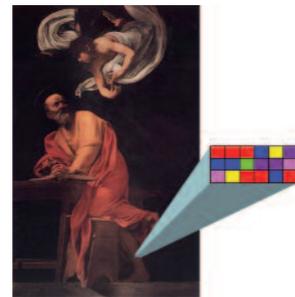
La codifica Run Length Encoding (RLE) basa il suo funzionamento sulla ricerca di una serie ripetuta di elementi uguali (*run*) e al posto di codificarli uno ad uno, codifica solo il primo e lo fa seguire da un contatore che indica quante volte è ripetuto. L'algoritmo si basa su una idea molto semplice: si individuano parole (o caratteri) uguali consecutivi incrementando un contatore. Quando si individua un nuovo carattere diverso dai precedenti si riporta il carattere e il contatore, questo ultimo viene posto a zero e si procede con il nuovo carattere, fino al termine. L'algoritmo ha una complessità computazionale lineare $O(N)$ [Salomon, 2004]: cioè, a meno di costanti moltiplicative, vengono eseguite un numero di operazioni su tutti i dati analizzati.

Questo algoritmo è spesso utilizzato, con delle opportune varianti, su informazioni testuali. Inoltre è applicato alle immagini bitonali (fax ed epistole dattiloscritte) basandosi sulla ridondanza spaziale bidimensionale, con risultati soddisfacenti per comprimere immagini contenenti ampie zone di colore uniforme (si stima un tasso di compressione intorno al 20-30%). Infine, richiedendo risorse esigue e portando vantaggi per ri-

dondanza contigua, è spesso usato come parte integrante di processi di compressione più complessi.

Esempio

Si prenderà in considerazione una area di immagine avente dimensione 3x6 (vedi figura se-



guente).

Corrispondenza testuale



Stringa: FFFADEAAACEEBBDFFAF

Messaggi: {A,B,C,D,E,F}

Codifica RLE: F3A1D1E1A2C1E2B2D1F2A1F1

Per questo esempio non si ha alcun guadagno in termini di compressione, in quanto i dati considerati sono pochi e non vi è una ripetizione frequente di elementi uguali disposti in maniera contigua.

Shannon Fano

Tale tipo di codifica, proposto da Shannon e Fano, prevede la suddivisione dei messaggi in due blocchi ordinati per valori decrescenti delle probabilità e la realizzazione di opportuni codici prefissi. Per codice prefisso si intende un codice nel quale ogni sua parola non è il prefisso di alcun'altra ed è, quindi, univoca-

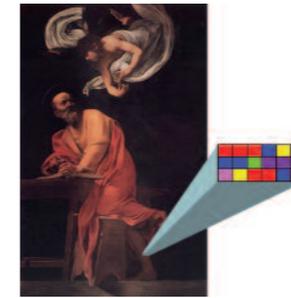
mente decifrabile. L'algoritmo ha la seguente funzione operativa:

1. Ordinare i messaggi m_i (con $i=1, \dots, n$) per valori decrescenti delle probabilità.
2. Partizionare gli n messaggi in due sottoinsiemi S_1 e S_2 in maniera tale che la somma delle probabilità in S_1 differisca il meno possibile dalla somma delle probabilità di occorrenza dei messaggi in S_2 .
3. Assegnare il primo bit del codice agli elementi dell'insieme: 0 agli elementi di S_1 ed 1 agli elementi di S_2 .
4. Effettuare il partizionamento di ciascuno dei due sottoinsiemi utilizzando lo stesso criterio per assegnare il secondo bit del codice ed iterare questo procedimento, a partire dal punto 1., fino ad ottenere sottoinsiemi che contengono un solo elemento.

Il processo di decodifica risulta essere altrettanto semplice: essendoci solo codici prefissi, univocamente determinati, basterà leggere bit a bit e decodificare quando si individua il prefisso associato. Tale algoritmo è difficilmente applicato. I motivi fondamentali sono due: la possibilità di trovare il migliore partizionamento in base alle probabilità è un problema NP-completo (con tempi di esecuzione molto lunghi) e la possibilità di bilanciare in due parti uguali i due sottoinsiemi non è sempre ottimale [Fano, 1949].

Esempio

Si prenderà in considerazione una area di immagine avente dimensione 3x6 (vedi figura seguente).



Corrispondenza testuale



Stringa: FFFADEAAACEEBBDFFAF

Messaggi: {A,B,C,D,E,F}

Distribuzione di Probabilità:

$P(A) = 4/18 = 0.22$ $P(B) = 2/18 = 0.11$

$P(C) = 1/18 = 0.06$

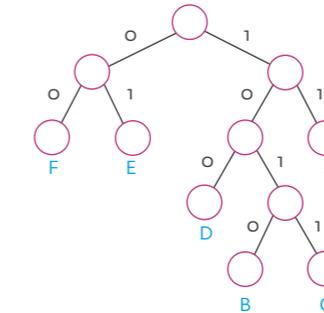
$P(D) = 2/18 = 0.11$

$P(E) = 3/18 = 0.17$

$P(F) = 6/18 = 0.33$

SIMBOLO	PROBABILITÀ	SUDDIVISIONI			
F	0.33	0	0		
E	0.17	0	1		
D	0.11	1	0	0	
B	0.11	1	0	1	0
C	0.06	1	0	1	1
A	0.22	1	1		

Le linee tratteggiate individuano le diverse foglie dell'albero top-down creato.



Codifica Shannon Fano: A=11 B=1010

C=1011 D=100 E=01 F=00

Codifica stringa:

00000011100011111101101011010101010000001100

Lunghezza media messaggio: 2.83

Il tasso di compressione è del 37.5%

Huffman

L'algoritmo di Huffman è una delle tecniche maggiormente utilizzate ed efficienti per la compressione dei dati. Generalmente si raggiunge un tasso di compressione variabile dal 20% al 90%. I codici Huffman sfruttano un algoritmo che consente di definire la stringa ottima, detta *parola*, di collezioni di dati. Per rappresentare i dati si utilizza un codice a lunghezza variabile che assegna una parola del codice corta ai caratteri molto frequenti ed una parola lunga ai caratteri meno frequenti. Huffman realizzò un algoritmo che costruisce un codice prefisso

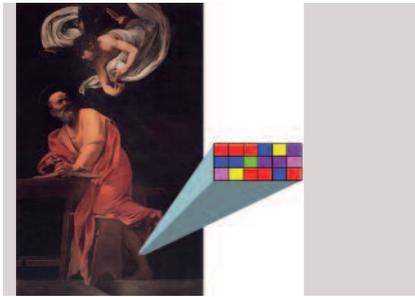
ottimo procedendo in questo modo:

1. Selezionare dall'insieme dei valori della distribuzione di probabilità due elementi con valore numerico minimo $p(m_{n-1})$ e $p(m_n)$. Le rispettive codifiche saranno: $0::f(m_{n-1})$ e $1::f(m_n)$. Segnare marcate le due distribuzioni di probabilità.
2. Sostituire ai due valori la loro somma, ottenendo così una nuova distribuzione di probabilità.
3. Ripetere il procedimento dal punto 1. fino a quando tutte le distribuzioni di probabilità sono marcate.

Il processo di decodifica risulta essere altrettanto semplice: essendoci solo codici prefissi, basterà leggere bit a bit e decodificare quando si individua il prefisso associato. Il tempo di esecuzione della procedura Huffman su un insieme di N caratteri è $O(N \lg N)$. Nel caso in cui si disponesse di un processore ad 1 Ghz, cioè in grado di eseguire 10^9 operazioni al secondo, l'algoritmo RLE su un miliardo di dati impiegherebbe un secondo per produrre la relativa codifica; viceversa l'algoritmo di Huffman avrebbe bisogno di circa venti volte tanto (ovviamente senza considerare i diversi rapporti di compressione derivanti). Si dimostra che per N avente un valore grande, tendente all'infinito, tale codifica risulta produrre un codice cui la media delle lunghezze delle parole è analoga all'entropia (citata in 2.2.1.a) [Huffman, 1952] [Tanaka, 1987].

Esempio

Si prenderà in considerazione una area di immagine avente dimensione 3x6 (vedi figura seguente).



Corrispondenza testuale

A B C D E F

Stringa: FFFADEAAACEEBBDFFAF

Messaggi: {A,B,C,D,E,F}

Distribuzione di Probabilità:

$P(A) = 4/18 = 0.22$ $P(B) = 2/18 = 0.11$

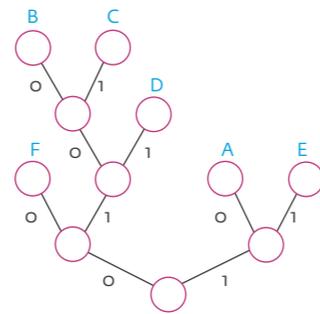
$P(C) = 1/18 = 0.06$

$P(D) = 2/18 = 0.11$ $P(E) = 3/18 = 0.17$

$P(F) = 6/18 = 0.33$

MESSAGGI	PROBABILITÀ	CODIFICA	NUOVO	PROBABILITÀ
C B	0.06 0.11	C=1 B=0	m_7	0.17
D m_7	0.11 0.17	D=1 C=10 B=00	m_8	0.28
E A	0.17 0.22	E=1 A=0	m_9	0.39
m_8 F	0.28 0.33	D=11 C=101 B=001 B=001 F=0	m_{10}	0.61
m_9 m_{10}	0.39 0.61	E=11 A=01 D=110 C=1010 B=0010 F=00	m_{11}	1

Il processo segue la creazione dell'albero *bottom-up* seguente:



Codifica Huffman: A=01 B=0010 C=1010
D=110 E=11 F=00
Codifica stringa:

0000001110101011010111001000101100
0000100

Lunghezza media messaggio: 2.83

Il tasso di compressione è del 38.9%

Codifica mediante dizionari

Nel 1977 Abraham Lempel e Jacob Ziv mutarono radicalmente la modalità operativa per ottenere una riduzione dei dati. Fino ad allora la conoscenza a priori dei messaggi trasmessi, o comunque lo studio approfondito di quali messaggi venivano scambiati con maggiore frequenza per caratteristiche linguistiche o contestuali, era di fondamentale importanza. Con il metodo promosso da Lempel e Ziv invece questa conoscenza diventa superflua: l'eliminazione della ridondanza avviene mediante l'utilizzo di un puntatore <distanza, lunghezza> o da un indice che fa riferimento ad un insieme di stringhe, le occorrenze, che si ripetono.

L'algoritmo LZ, infatti, non cambia i codici singoli con stringhe di bit corte, ma sostituisce le stringhe di dati con un codice di lunghezza fissa (tipicamente otto o sedici bit). Tale algoritmo si fonda, nella sua classe LZ78 con varianti LZ77 (*Lempel-Ziv-Welch*) e LZC (*Lempel-Ziv-Compress*), sulla realizzazione di un dizionario contenente delle stringhe di dati ricavate dall'informazione sorgente. Questo dizionario viene a mano a mano creato durante la lettura intera del documento digitale, e di solito ha una dimensione fissa (in teoria può anche essere infinito) [Ziv and Lempel, 1977] [Philips, 1992]. L'algoritmo di codifica (**Tabella 1**) è, nella sua forma più semplice, il seguente:

1. creare un dizionario di parole con un identificatore intero per ogni voce;

2. individuare la stringa più lunga S nel dizionario;
3. inviare in uscita l'identificatore di S e il carattere c successivo alla corrispondenza;
4. aggiungere la stringa Sc al dizionario.

Tabella 1

	OUTPUT	DIZIONARIO
aabaacabcabc	(0,a)	1=a
aabaacabcabc	(1,b)	2=ab
aabaacabcabc	(1,a)	3=aa
aabaacabcabc	(0,c)	4=c
aabaacabcabc	(2,c)	5=abc
aabaacabcabc	(5,b)	6=abcb

La decodifica (**Tabella 2**) usa lo stesso metodo per costruire il dizionario facendo riferimento agli identificatori (non c'è bisogno di inviare anche il dizionario).

Tabella 2

INPUT		DIZIONARIO
(0,a)	a	1=a
(1,b)	ab	2=ab
(1,a)	aa	3=aa
(0,c)	aac	4=c
(2,c)	aabc	5=abc
(5,b)	abcb	6=abcb

Nel corso degli anni, vi è stato un notevole sviluppo di questa tecnica, tanto da dare luogo a due classi di algoritmi a finestra scorrevole con dimensione fissa ed a finestra scorrevole con dimensione variabile (LZ77 e variante LZSS, Lempel-Ziv-Storer-Szymanski). Sebbene uno degli aspetti poco favorevoli sta nel fatto che la dimensione in uscita dipende fortemente dalla lunghezza del codice utilizzato, e quindi per documenti digitali di piccole dimensioni tale tecnica può risultare insoddisfacente, sono oggetto di ricerca nuove varianti [Wilkins and Wintz, 1971] [Storer, 2008]. Viceversa, per elementi testuali o immagini con aree cromatiche più volte ripetute all'interno della immagine elettronica, ed in generale per un numero di dati elevato, i risultati sono raffrontabili ai limiti dettati dall'entropia.

Con l'avvento di nuove tecnologie nella codifica dei dati digitali, soprattutto quelli multimediali quali immagini, audio e video, le tecniche di compressione hanno acquistato sempre maggiore importanza. Negli ultimi anni, la larga diffusione dei media digitali ha prodotto l'incremento del patrimonio pubblico e privato con un crescente aumento di dati elettronici che necessitano di spazio per la memorizzazione e di grandi capacità di trasmissione per la condivisione in remoto. Una riduzione dei dati assume, in questo contesto, un aspetto cruciale in

termini di costi (i dispositivi di memorizzazione possono conservare più informazione) e tempo (scambio rapido di informazioni con normali infrastrutture). Per questo motivo sono state individuate e studiate varie tecniche di compressione che minimizzano il numero di bit necessari per rappresentare l'informazione discreta, con una organizzazione più efficiente e tempi di elaborazione accettabili. Le strategie di compressione vengono applicate da appositi programmi immediatamente prima della memorizzazione o trasmissione dei dati e successivamente da procedimenti inversi che riproducono l'informazione nella sua forma fedele o in una rappresentazione variante rispetto all'originale (che, però, non altera il messaggio contenuto). Un ulteriore punto cruciale è quello di studiare e realizzare delle metodologie che consentano di rilevare e correggere errori in fase di decompressione qualora insorgano perdite o alterazioni di dati. Infine, va ricordato che sebbene il grande interesse sia rivolto alla codifica di formati audiovisivi, vista la recente trasformazione dall'analogico al digitale che ha coinvolto la televisione e l'industria cinematografica, sono ancora attuali i classici algoritmi offerti dalla teoria della compressione.

Ringraziamenti

Gli autori vogliono ringraziare Filippo e Valerio, Dimitri e Natalia per i loro commenti ed il prezioso supporto.

Bibliografia

- Abramson N.**, 1963, *Information Theory and Coding*, McGraw-Hill, New York, NY, USA.
- Cappellini V.**, 1985, *Data Compression and Error Control Techniques with Applications*, Academic Press.
- Fano R. M.**, 1949, *Transmission of Information*, M.I.T. Press, USA.
- Huffman D.**, 1952, A Method for the Construction of Minimum Redundancy Codes, in *Proceedings of the IRE*, 40(9):1098-1101, USA.
- Phillips D.**, 1992, LZW data compression, in *The Computer Application Journal*, Circuit Cellar Inc., 27:36-48, USA.
- Salomon D.**, 2004, *Data Compression: The Complete Reference*, 3rd Edition, Springer, Berlin, Germany.
- Seibt**, 2006, *Algorithmic Information Theory: Mathematics of Digital Information Processing*, Springer, Berlin, Germany.
- Shannon C. E., Weaver W.**, 1949, *The Mathematical Theory of Communication*, University of Illinois Press, Illinois, USA.
- Storer J. A.**, 2008, *Data Compression Conference (DCC)*, IEEE, USA.
- Tanaka H.**, 1987, Data Structure of Huffman Codes and Its Application to Efficient Encoding and Decoding, in *IEEE Transactions on Information Theory* 33, 1 (Jan.), 154-156, USA.
- Wilkins L. C.**, and P. A. Wintz, 1971, Bibliography on Data Compression, Picture Properties and Picture Coding, in *IEEE Transactions on Information Theory* 17, 2, 180-197, USA.
- Ziv J., Lempel A.**, 1977, A universal algorithm for sequential data compression, in *IEEE Transactions on Information Theory*, IT-23(3):337-343, USA.

2.3 Teoria della compressione applicata all'immagine digitale

A. Giuliano, F. Inghima, F. Liberati

La compressione di immagini digitali è un settore estremamente rilevante rispetto al più ampio contesto della compressione dei dati. Negli ultimi anni, infatti, la quantità di informazioni condivisa e memorizzata, ha avuto un notevole incremento anche grazie al rapido passaggio dall'analogico al digitale. Il numero di immagini digitali derivati da originali analogici e quelle direttamente prodotte (*born digital*) è cresciuto in maniera esponenziale. Le grandi campagne di digitalizzazione per la conservazione, consultazione e valorizzazione di documenti di pregio, la produzione diretta di originali elettronici e la realizzazione personale di contenuti multimediali (audio, video, immagini) hanno riscosso un notevole successo anche per fattori legati ad un risparmio di tempo e costi. Di conseguenza i supporti tecnologici e i mezzi di trasmissione, nonostante evoluti, si sono trovati a gestire una quantità di dati sempre più elevata. In questo contesto, nel campo della elaborazione delle immagini (*digital image processing*), quello della ricerca di tecniche atte alla riduzione di dati, mediante una giusta ed economica rappresentazione dell'informazione, è un ramo sempre in continua evoluzione.

Molte delle tecniche e degli algoritmi utilizzati nella compressione di immagini sono mutuati da altri ambiti, ad esempio derivati dagli studi per la compres-

sione testuale; mentre diversi altri sono stati sviluppati sfruttando la specificità dell'informazione visuale, operando sulla bidimensionalità e sulle caratteristiche del sistema visivo umano agendo, ad esempio, sulla rappresentazione cromatica. L'interesse verso la compressione di immagini ha avuto una considerevole crescita a partire dagli anni 1960, quando si consolidarono le tecniche per la trasmissione dei segnali relativi alle telecomunicazioni e vennero prodotti calcolatori elettronici in grado di produrre, elaborare e memorizzare le prime risorse digitali. Il settore, all'inizio, ha visto la significativa applicazione del lavoro teorico di C. Shannon e degli altri autori che negli anni 1940 formularono le nozioni di rappresentazione, trasmissione e compressione dell'informazione. La compressione di immagini è, tuttora, un ramo dell'informatica cruciale per una varietà crescente di applicazioni nei più svariati settori e domini applicativi basta pensare alle immagini mediche in alta definizione, in cui sono necessarie tecniche di riduzione dati che non compromettano in alcun modo la fedeltà del contenuto; rispetto a quelle a carattere commerciale dove questa ultima necessità non è sentita. Infine le considerazioni affrontate per le immagini coprono e risolvono buona parte dei problemi legati al trattamento delle risorse multimediali e dell'audiovisivo.

2.3.a Codifica delle immagini digitali

La compressione o codifica di immagini è il processo che riduce la quantità di dati necessaria a rappresentare una determinata quantità di informazione a scopo di trasmissione o di archiviazione. Tale processo deve soddisfare alcuni requisiti fondamentali che riguardano: il migliore tasso di compressione (ovvero la ricerca della migliore codifica che offra la minimizzazione della ridondanza dei dati), la garanzia di una elevata qualità delle immagini decodificate (cioè il grado di fedeltà all'immagine originale) ed, infine, il livello di complessità computazionale del processo di codifica e decodifica che deve richiedere tempi accettabili.

In letteratura esistono diversi algoritmi utilizzati per la compressione delle immagini che si suddividono in due categorie principali: *lossless* e *lossy*. Nel primo caso non vi è perdita di informazione, cioè l'immagine ricostruita dopo il processo di decodifica risulta essere uguale a quella originale. Si ricorre a questa tipologia di algoritmi per rappresentare immagini mediche o militari, in cui l'integrità dell'informazione è fondamentale. La seconda categoria è quella in cui avviene una perdita di informazione, a fronte di un'ottima compressione, si verifica un deterioramento relativo del significato principale dell'immagine stessa. Ciò è quan-

to avviene quotidianamente su Internet per immagini a carattere commerciale e propagandistico [ISO IEC 10918-1].

Esistono numerose strategie per ottenere una riduzione dell'informazione:

- quelle in cui vengono impiegate tecniche di eliminazione della ridondanza, trattando i dati come collezioni di valori su cui operare senza alcuna considerazione della immagine analizzata basandosi sul "modello probabilistico"
- quelle che operano su il concetto di "contesto" considerando le caratteristiche della informazione.

In seguito saranno presentati i due algoritmi principali il cui funzionamento è legato non solo a tecniche relative alla compressione dati, ma sfruttano anche le caratteristiche legate alle immagini per effettuare determinate scelte durante il processo di codifica e decodifica.

2.3.b Algoritmi di compressione sulle immagini

La nascita di tecniche di compressione delle immagini si realizzò come naturale continuazione dei preesistenti lavori. Dapprima si cercò di sfruttare i concetti generici utilizzati per l'eliminazione della ridondanza nei testi, successivamente si tentò di ottenere risultati migliori predisponendo una adeguata organizzazione dei dati per poi applicare uno o

più algoritmi di compressione lineare. Questa strada, però, venne abbandonata, in quanto offriva risultati non validi per la tipologia trattata e, nel contempo, escludeva la possibilità di utilizzare algoritmi modificabili in base a diverse esigenze. Per questo vennero svolti studi relativi alla tipologia delle immagini analizzando caratteristiche cromatiche, ottiche e tutti i vantaggi offerti dalla disposizione spaziale bidimensionale e, con lo sforzo collettivo di diverse professionalità, vennero definiti validi algoritmi di compressione. Non tutti, però, hanno avuto una vita lunga: i formati proprietari, sebbene validi ed efficienti, soffrono dell'incertezza legata al predominio di mercato e la compatibilità con nuove versioni; viceversa, l'uso di standard consente una gestione e migrazione in altri formati. In seguito saranno descritti due standard utilizzati per la compressione delle immagini: quello basato su trasformata discreta del coseno denominato JPEG del 1982 e quello su trasformata discreta wavelet il JPEG2000 del 2001. Infine saranno mostrate le principali caratteristiche ed i miglioramenti apportati nel tempo.

Algoritmo Joint Photographic Expert Group

Nel 1982 il comitato ISO/ITU istituì un gruppo di ricerca, ai quali si associarono fotografi, ingegneri e informatici conosciuto in seguito come JPEG (*Joint Photographic Expert Group*). L'intento era quello di definire un nuovo formato standard per le immagini digitali che permettesse una

forte riduzione dello spazio occupato in memoria a discapito di un più o meno marcato, ma accettabile, degrado della qualità. Questa esigenza si sentì necessaria per favorire la condivisione e pubblicazioni di immagini, attraverso i nuovi sistemi di comunicazione, che fino ad allora avevano formati privi di alcuna tecnica di compressione o improntati su una codifica lossless. Un esempio è il formato *Tagget Image File Format* (TIFF) versione 5.0, che sebbene può consentire l'applicazione degli algoritmi RLE, CCTT o LZW nella maggior parte dei casi non garantisce un tasso di compressione superiore al 10%. Nel 1990 il gruppo di lavoro del JPEG ufficializzò il primo standard internazionale di compressione per immagini a tono continuo sia a livelli di grigio (8 bit) che a colori (24 bit). Lo standard, nato per rispondere ad esigenze di trasmissione e archiviazioni di immagini elettroniche, in breve tempo venne adottato dall'intera comunità mondiale decretandone un successo che ancora oggi, nel 2009, rimane incontrastato nella rete Internet.

Le principali fasi in cui è suddiviso il processo di compressione riguardano la conversione dello spazio cromatico dell'immagine, l'estrazione di un blocco bidimensionale di pixel da ogni componente dell'immagine originale, l'applicazione ad ogni blocco della trasformata discreta coseno (DCT), la quantizzazione dei coefficienti ricavati dalla DCT, la compressione dei coefficienti quantizzati ed, infine, la scrittura del file (Figura 8).

Lo standard proposto dal JPEG può avere varianti più o meno dissimili dalla versione di riferimento bisogna, però, attenersi strettamente alla specifica di scrittura del documento compresso per garantire la coerenza del processo di decodifica che deve essere conforme alle direttive dettate dal gruppo di lavoro e quindi includere eventuali tabelle di riferimento o accortezze utilizzate. Nel caso che sarà successivamente analizzato si farà riferimento alla versione *Baseline*.

Come detto, il primo passo dell'algoritmo di compressione è la lettura del file di immagine e, come opzione, la conversione del suo spazio cromatico. Nel caso di immagini in tonalità di grigio, si avrà una matrice di dimensione $N \times M$ (con N ed M le dimensioni dell'immagine) e, l'elemento di posizione (i, j) per $i=1, \dots, N$ e $j=1, \dots, M$ rappresenterà nell'immagine il pixel, cioè il livello di luminosità, a quelle coordinate (Figura 9).

Per le immagini a colori, l'algoritmo può provvedere alla conversione dallo spazio cromatico originario, tipicamente RGB, a quello YUV (o YIQ). Il formato YUV consiste in tre piani colore: la luminanza (Y) e due componenti di cromaticità (U e V). Questa separazione, se pur non necessaria, permette una migliore compressione. Infatti, sfruttando un fenomeno noto nel campo dell'ottica, è possibile ridurre, in prima battuta, le dimensioni dell'immagine YUV con una leggera diminuzione della qualità applicando un riduzione delle componenti cromatiche (*down-sampling*) e mantenendo intatte le

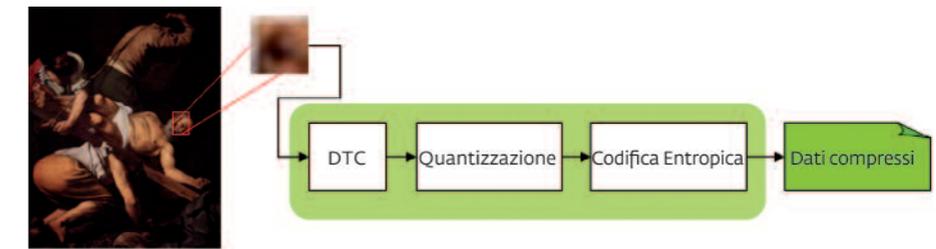


Fig. 8
Processo di codifica del JPEG.

informazioni sulla luminosità.

La riduzione avviene facendo la media a due a due tra pixel adiacenti dei piani U e V: in pratica viene dimezzata la risoluzione orizzontale di questi piani e, nel caso considerato, si parla di codifica 4:2:2 (ad ogni blocco di 2x2 pixel in Y corrispondono blocchi di 2x1). In teoria è possibile anche dimezzare la risoluzione verticale (come ad esempio avviene con la codifica video MPEG1): in questo ultimo caso si ha, comunque, la codifica 4:1:1 (ad ogni blocco di 2x2 pixel in Y corrisponde un solo pixel). Già questo accorgimento (cioè con perdita di informazioni) permette una riduzione delle dimensioni del 30% (4:2:2) o del 50% (4:1:1).

Se questa fase non viene considerata, si processa l'immagine nel modello di colore originale. Per una immagine a colori RGB, ad esempio, si avrà una matrice tridimensionale, in cui ogni tabella corrisponderà ad una delle tre componenti colore e quindi si avrà una dimensione $(M \times N \times 3)$ ed il pixel di coordinate (i, j, k) per $i=1, \dots, N; j=1, \dots, M$ e $k=1, 2, 3$; rappresenterà il pixel di coordinate i e j riferite alla k -esima componente cromatica. Infatti, qua-



Fig. 9
Piano di una immagine a toni di grigio.

lora si abbia una immagine a colori, sotto un punto di vista geometrico si hanno tre piani, ognuno rappresentante una componente cromatica, e l'insieme di questi tre restituisce l'immagine (sintesi additiva). Se però si considerano i tre piani separatamente, questi danno ognuno un'immagine in tonalità di grigio poiché sono presenti solo informazioni di luminanza relative al piano di colore (Figura 10).

Come detto, la composizione dei tre pia-

Fig. 10
Piani del canale Red (R), Green (G) e Blu (B).



Fig. 11
Risultante della composizione dei tre piani (R, G, B): sintesi addittiva



Fig. 12
Estrazione del blocco 8x8 estratto dalla componente rossa dell'immagine.

ni, contenenti informazioni di luminanza riferite ai tre colori, restituirà in tal modo l'immagine a colori (Figura 11).

Come passo successivo, per ogni componente, si procede ad una suddivisione in blocchi bidimensionali 8x8 pixel (da alto-sinistra a basso-destra). Tali blocchi contengono informazioni di luminanza, sia per immagini a colori che per immagini in tonalità di grigio, che sono valori appartenenti all'intervallo numerico di interi positivi [0, 255] (rappresentabili con otto bit). Ogni blocco viene singolarmente processato nella fase successiva: la trasformata discreta del coseno (*Discrete Cosine Transform*, DCT) nella sua versione bidimensionale. La DCT è una trasformata che in generale fa passare il segnale dal dominio del tempo al dominio della frequenza. Si tratta di una versione in campo reale della Trasformata di Fourier che invece opera in campo complesso. I coefficienti che ne derivano rappresentano le ampiezze di quei segnali armonici (coseno) che sommati ricostruiscono il segnale. Nel JPEG viene usata la versione bidimensionale della DCT ed in questo caso non si parla di tempo e frequenza, ma di "spazio" e "frequenze spaziali". Il blocco nel dominio dello "spazio" viene trasformato in uno di coefficienti nel dominio della frequenza spaziale. In questo blocco i coefficienti in alto a sinistra rappresentano le basse frequenze spaziali, mentre quelli in basso a destra le alte frequenze spaziali ossia i dettagli dell'immagine.

In particolare il primo coefficiente del blocco trasformato rappresenta la media dei valori del blocco 8x8 originario (detto anche componente continua o *coefficiente DC*), mentre i restanti 63 sono chiamati componenti variabili o *coefficienti AC*. Per completezza si riporta la formula matematica della DCT bidimensionale (1):

$$F(u,v) = \frac{1}{4} C(u) C(v) \left[\sum_{x=0}^7 \sum_{y=0}^7 f(x,y) \cdot \cos \frac{(2x+1)u\pi}{16} \cdot \cos \frac{(2y+1)v\pi}{16} \right] \quad (1)$$

$$\text{dove } C(u) C(v) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}} & \text{se } u,v = 0 \\ 1 & \text{altrimenti} \end{cases}$$

Per vedere come effettivamente opera l'algoritmo su una immagine digitale (Figura 12) si ritiene utile portare un esempio. Si consideri un blocco 8x8 cui l'informazione numerica è riportata in Tabella 2.

Questi valori hanno una rappresentazione grafica come in Figura 13.

La DCT del blocco in questione produrrà i seguenti segnali che, come si può notare, sono molto vicini in valore assoluto (Tabella 3).

Dopo la DCT, infatti, il blocco presenta leggere differenze quasi impercettibili di segnale, con un picco rappresentante il valore più alto della trasformata (Figura 14).

Tabella 2 Esempio: blocco 8x8

10	15	20	23	26	26	26	23
16	23	25	28	31	28	29	27
22	27	32	25	30	28	28	28
36	33	30	32	32	31	30	31
31	35	34	30	32	31	31	30
33	33	34	33	30	29	29	29
35	34	34	35	34	29	29	29
34	34	34	32	34	30	31	30

Tabella 3 Esempio: DCT

35.6750	-2.8673	-9.1401	-4.1051	-0.3770	-3.1189	-1.4943	2.7534
-23.9173	-17.3610	-5.3180	-2.3958	-3.4930	-1.2319	0.8174	0.2561
-11.9061	-7.2090	-4.1670	0.9521	2.5136	-0.1775	-1.6512	-0.6098
-4.3656	-2.5517	-1.0160	0.1097	1.6479	1.9706	-0.5606	-2.3067
1.8750	-1.9223	1.1432	0.6078	-0.1251	0.8327	0.4735	-0.7429
-0.0606	1.3824	0.5357	-0.1134	0.3494	1.0424	0.5917	-0.1803
-3.5922	-0.0371	1.1098	-0.1962	-1.4467	-0.1985	1.6668	1.6578
-2.3359	-0.8359	-0.0341	-0.6404	-1.3323	-0.4814	0.9786	1.1988

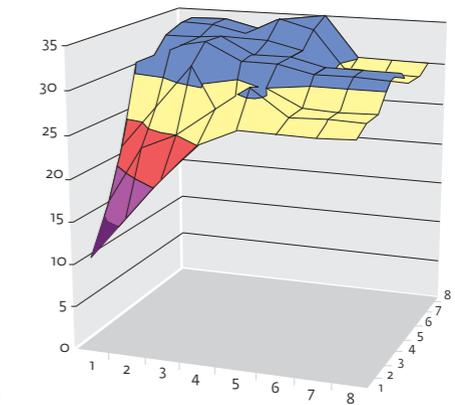


Fig. 13
Rappresentazione grafica dei valori del blocco 8x8 prima della DCT.

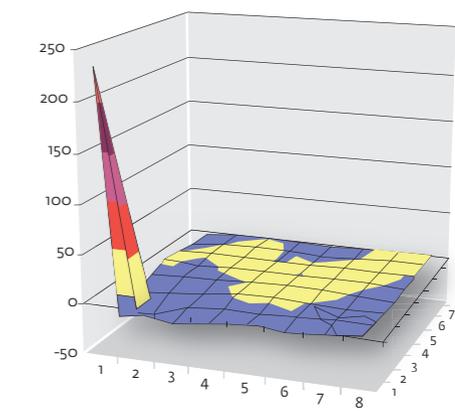


Fig. 14
Rappresentazione grafica del blocco 8x8 dopo la DCT.

In seguito l' algoritmo cerca di scartare le informazioni meno significanti a livello visuale e per questo procede con la quantizzazione.

La quantizzazione è definita come divisione di ogni coefficiente DCT per la sua tabella di quantizzazione, seguita dall'arrotondamento all'intero più vicino §2:

$$F^o(u,v) = \text{round}\left(\frac{F(u,v)}{Q(u,v)}\right) \quad \S 2$$

La quantizzazione è un tracciato molti a uno e per questo è il passaggio principale in cui avviene la perdita di dati. Concretamente questa operazione si realizza moltiplicando la matrice 8x8 di coefficienti in frequenza per una tabella di quantizzazione (*quantization table*). Tipicamente la tabella contiene valori tra 0 e 1: quelli più bassi si trovano in corrispondenza delle alte frequenze mentre quelli più alti in corrispondenza delle basse frequenze. I valori così ottenuti sono arrotondati all'intero più vicino, in questo modo i coefficienti meno significativi tendono ad azzerarsi, mentre rimangono i coefficienti relativi ai contributi informativi più importanti. Essendo già piccoli, i valori in alta frequenza vengono molto spesso arrotondati a 0. Il risultato è la concentrazione di pochi coefficienti diversi da 0 in alto a sinistra e 0 tutti gli altri. Quando in un file JPEG si sceglie il fattore di compressione, in realtà si sceglie un fattore di scala sui valori della tabella di quantizzazione. Più i valori sono bassi e maggiore è il numero di co-

efficienti che si azzerano con conseguente riduzione di quelli significativi. Questo processo, ovviamente, elimina le informazioni più importanti portando ad un progressivo deterioramento della qualità dell'immagine compressa. La tabella di quantizzazione può essere specificata dall'applicazione o può essere definita dall'utente.

Esperimenti sulla soglia psicovisuale hanno portato però alla definizione di due tabelle (Tabella 4) per la luminanza (Tabella 4a) e la crominanza (Tabella 4b) ottenute empiricamente usando un campionamento 2:1 orizzontale.

Inoltre effettuando una scalatura dei valori della matrice di quantizzazione si può ottenere una variazione sulla quantità di informazione eliminata nell'immagine. Il parametro di scalatura, ps, sarà compreso nell'intervallo [0, 100] assegnando come significato a 0, la massima perdita

Tabella 4 Tabelle di quantizzazione

TABELLA 4A (LUMINANZA)							
16	11	10	16	24	40	51	61
12	12	14	19	26	58	60	55
14	13	16	24	40	57	69	56
14	17	22	29	51	87	80	62
18	22	37	56	68	109	103	77
24	35	55	64	81	104	113	92
49	64	78	87	103	121	120	101
72	92	95	98	112	100	103	99

di informazione con una pessima qualità e a 100 il contrario, ovvero pochissima informazione scartata e, di conseguenza, un'alta qualità dell'immagine. Il parametro di scalatura agisce sulla matrice di quantizzazione Q come segue (§3):

$$\text{scalatura} = \begin{cases} \frac{5000}{ps} & \text{se } ps < 50 \\ 200 - 2ps & \text{altrimenti} \end{cases} \quad \S 3$$

La trasformata coseno e il processo di quantizzazione possono essere applicati anche a blocchi di dimensione diversa da quella 8x8, differenziandosi dall'algoritmo baseline; però è stato dimostrato che si ottengono risultati non soddisfacenti in quanto si ha una tassellizzazione (*blocking*) troppo accentuata.

Tornando all'esempio, quello che accade dopo la quantizzazione, considerando la Tabella 2 e applicando ad essa le Tabelle 3, è quanto riportato in Tabella 5:

TABELLA 4B (CROMINANZA)							
17	18	24	47	99	99	99	99
18	21	26	66	99	99	99	99
24	26	56	99	99	99	99	99
47	66	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99

Tabella 5 Esempio: quantizzazione

15	0	-1	0	0	0	0	0
-2	-1	0	0	0	0	0	0
-1	-1	0	0	0	0	0	0
-1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0

Una volta eliminati i dettagli meno importanti grazie alla DCT e alla quantizzazione, è necessario adottare una serie di tecniche non distruttive per le restanti informazioni.

Tra i coefficienti rimanenti è importante separare la componente continua (DC) dalla componente variabile (AC). Nel primo caso la componente AC viene scansionata tramite una lettura a "zig-zag" (Figura 15). Questo tipo di lettura rende adiacenti il più possibile i coefficienti uguali a 0 e permette un uso efficiente dell'algoritmo Run Length Encoding. Sulla componente DC di ciascun blocco viene invece applicata una tecnica detta *Differential* (o *Delta*) *Pulse-Code Modulation* (DPCM). In pratica esistendo, generalmente, una relazione statistica nelle immagini tra le componenti DC di blocchi adiacenti è possibile codificare la componente DC di un blocco come differenza rispetto al valore del blocco precedente. Questo stratagemma consente una ulteriore ri-

duzione dello spazio occupato dai dati.

L'ultima codifica entropica applicata ai dati è la classica codifica a lunghezza di codice variabile (varianti della codifica di Huffman). I dati vengono suddivisi in stringhe di bit (o parole), l'algoritmo analizza la frequenza statistica di ciascuna parola e ognuna viene ricodificata con un codice a lunghezza variabile in funzione della frequenza di apparizione. Dei codici corti sostituiscono le parole che appaiono spesso e codici più lunghi quelle meno frequenti. In tal modo il numero di bit necessari per rappresentare i dati si riduce consistentemente. In questo ultimo caso si effettua una codifica di tipo lossless per non incrementare l'approssimazione con l'immagine originale. Dopo alcune informazioni, comuni a tutti i file JPEG, inizia l'ultima fase che è la scrittura sequenziale dell'immagine.

Il file terminale ha estensione JPG o JPEG.

Il JPEG presenta un processo di decodifica inversa a quanto precedentemente descritto (Figura 16).

Sui dati compressi si applica la decodifica di Huffman che ricostruiscono i co-

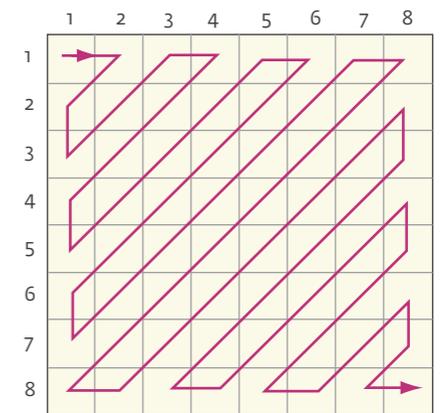
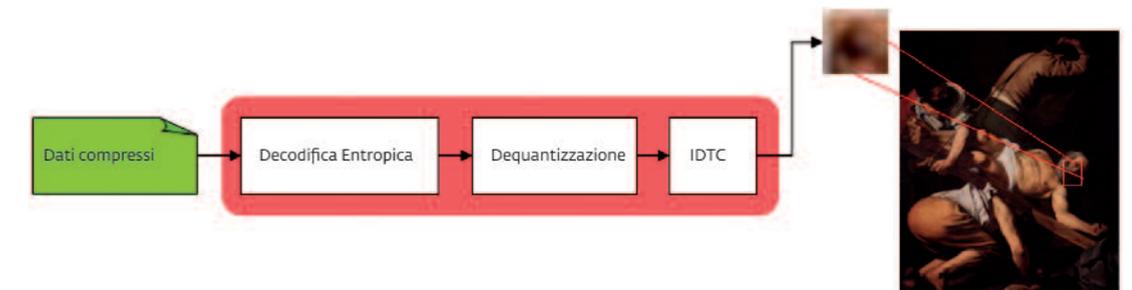


Fig. 15 Lettura a "zig-zag"

efficienti DC e AC, a questi si effettua il processo di quantizzazione inversa (o dequantizzazione) ed il blocco 8x8 risultante viene sottoposto ad una DCT inversa. Infine, a seconda delle impostazioni, si esegue la conversione da YUV a modello di colore originario [Ahmed et al., 1974; Hudson et al., 1988; Mitchell et al., 1988; Leger, et al.1991; Rabbani e Jones, 1991].

Il JPEG è uno standard abbastanza semplice nella sua essenza ma ha avuto comunque un'importanza enorme. Quoti-

Fig. 16 Lettura a "zig-zag"



dianamente infatti, immagini di tale formato vengono ogni giorno scaricate via Internet, vengono create e memorizzate in fotocamere digitali o precesate da codificatori per filmati digitali (moltissimi usano al loro interno i principi di base del JPEG per comprimere le immagini che formano le sequenze video: MPEG1 e MPEG2). Ma anche il JPEG è soggetto alla obsolescenza informatica e a una "sofferenza" per tipologie di immagini (ad esempio non è consentito utilizzare l'algoritmo con immagini aventi profondità colore superiore a 24 bit o di grandi dimensione - a cui solitamente si ripara con una operazione di mosaicatura). Per questo gli istituti interessati alla valorizzazione ad alta risoluzione dei documenti in formato elettronico e alla conservazione permanente del patrimonio digitale stanno studiando nuove strategie. Negli ultimi anni, infatti, è stato definito un nuovo standard, il JPEG2000, che permette una maggiore qualità visiva e maggiori funzionalità nell'ambito della sicurezza e della robustezza dei dati.

JPEG 2000

Alla metà degli anni '80 i membri dell'*International Telecommunication Union* (ITU) e dell'*International Organization for Standardization* (ISO) si riunirono e diedero vita allo standard JPEG (*Joint Photographic Expert Group*), basato sulla Trasformata Discreta dei Coseni (DCT), riportato nella norma ISO/IEC 10928-1 e nel ITU-T T.81. Il lavoro dei membri non si interruppe e nel Marzo del 1997 proposero lo nascita di un

nuovo standard: il JPEG2000. Il progetto, denominato JTC 1.29.14 (15444), era inteso a realizzare un nuovo sistema di codifica delle immagini in grado di poter operare su differenti caratteristiche (bifonali, toni di grigio, colore, multi-componenti) e considerare particolari tipologie (fotografia, immagini mediche e astronomiche, fax, manoscritti) e offrendo diversi modelli (trasmissioni in real time, immagini di archivio). Lo standard coordinato dal JTC1/SC92/WG1 dell'ISO/IEC ha editato un FDIS nell'Agosto del 2000 e un IS nel Dicembre 2000. Le differenze rispetto al JPEG sono numerosissime, anzi i due formati differiscono in tutti gli aspetti fondamentali.

La principale evoluzione è rappresentata dal cambiamento dello strumento matematico alla base dell'algoritmo di compressione. Infatti, mentre il JPEG usa la trasformata *Discrete Cosine Transform* (DCT) ed opera su blocchi di 8x8 pixel, il JPEG 2000 usa la *Discrete Wavelet Transform* (DWT) che può agire sull'intera immagine. Il termine *wavelet* si riferisce alla particolare scomposizione che viene fatta delle informazioni dell'immagine. Se nella DCT si scompone l'immagine in componenti armoniche (in pratica una analisi in frequenza) e blocco per blocco; viceversa, nella DWT, si suddivide l'intera immagine in sottobande a cascata. Adottando questo approccio ed estendendo l'analisi a tutta l'immagine, si elimina il principale difetto dello standard precedente: l'eccessiva tassellizzazione che si manifesta al crescere del fattore di

compressione. Questo tipo di operazione, che sarà analizzata in dettaglio, si ottiene applicando la convoluzione dell'immagine con particolari filtri: FR e FIR (inverso) che ricordano per la loro struttura delle "piccole onde". Oltre a questa considerazione, il JPEG 2000 presenta delle caratteristiche innovative:

- è il formato allo stato dell'arte per la compressione lossy e lossless delle immagini, con un risparmio di spazio a parità di qualità, rispetto allo standard JPEG, di un 20-30%;
- offre un supporto per differenti modalità e spazi-colore (immagini a due toni, in scala di grigi, a 256 colori, a milioni di colori, in standard RGB, PhotoYCC, CIELAB, CMYK) e con dimensioni superiori ai 4GB;
- permette differenti schemi di compressione adattabili in base alle esigenze;
- è uno standard aperto a successive implementazioni legate al sorgere di nuove necessità;
- consente l'inclusione di un'illimitata quantità di metadati nello spazio di intestazione del file utilizzabili per fornire informazioni private o per interagire con applicazioni software;
- ha la codifica *Region Of Interest* (ROI) cioè zone ritenute più importanti sono trattate con una risoluzione maggiore di quella usata per il resto dell'immagine;

- offre una grande robustezza alla perdita o alterazioni di dati.

Oltre a tutti gli aspetti visti, il JPEG 2000 è un formato multirisoluzione: riesce a gestire autonomamente diverse risoluzioni e consente all'utente di scegliere la risoluzione di trasmissione o riproduzione. Grazie ad opportuni programmi (image server) è possibile accedere anche in remoto a immagini ad alta risoluzione mostrando dettagli e caratteristiche altrimenti parzialmente accessibili. In questo modo non c'è più la necessità di produrre e gestire delle immagini derivate (a diverse risoluzioni) con tutti i problemi legati alla loro conservazione e manutenzione.

Lo schema di compressione adottato da JPEG2000 (Figura 17) può essere scomposto logicamente in una successione di trasformazioni così sintetizzata: all'immagine in input è applicata la trasformata wavelet, i coefficienti wavelet sono quantizzati e codificati mediante un codificatore entropico (*Embedded Block Coding with Optimized Truncation*, EBCOT) che è il cuore del processo. La codifica entropica consiste di due fasi distinte (o tier). Nel tier1 vengono raccolte informazioni statistiche utili per il processo di codifica di tipo lossless (*MQ-coder*). Nel tier2 i blocchi compressi sono raggruppati in *quality layers* progressivi. Poiché è possibile troncatura il bit-stream in diversi punti, e quindi scartare qualcuno dei layers, il tier2 rappresenta, implicitamente, una seconda fase di quantizzazione, che

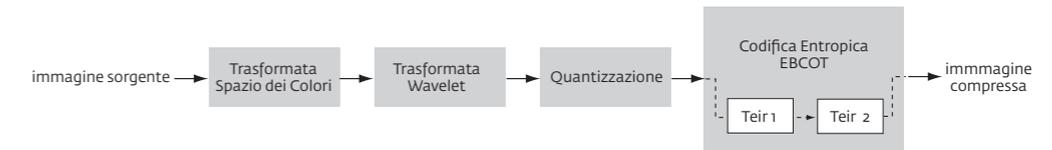


Fig. 17
Processo di codifica del JPEG2000.

può essere gestita sia in fase di codifica che decodifica.

La superficie su cui giace l'immagine è rappresentata mediante una griglia rettangolare detta *reference grid* (griglia di riferimento). La griglia è partizionata in una matrice di tile rettangolari di dimensioni regolari; le dimensioni delle tile e l'offset della prima tile in alto a sinistra possono essere scelte arbitrariamente dal codificatore con il vincolo che, pur potendo le tile superare i limiti dell'immagine, ogni campione della stessa deve appartenere ad una e una sola tile (Figura 18).

Questa particolare struttura è giustificata dalle seguenti ragioni:

- permettere semplici manipolazioni geometriche senza dover ricodificare l'intera immagine;
- effettuare modifiche localizzate dell'immagine ricodificando solo le tile interessate da tali modifiche (quando, ad esempio, si effettua uno zoom);
- codificare blocchi relativamente piccoli (con i conseguenti vantaggi in termini di gestione ed uso della memoria) evitando di introdurre artefatti ai bordi dei blocchi (che invece possono presentarsi solo ai bordi delle tile).

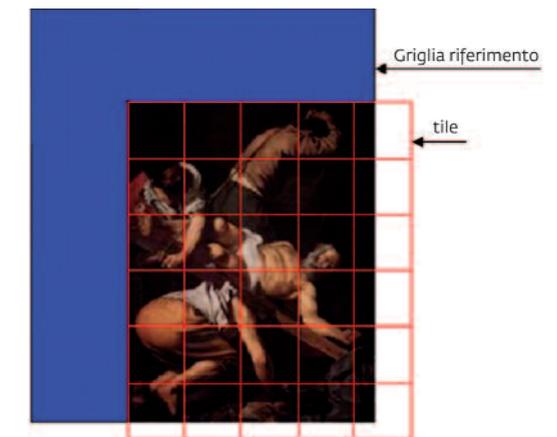


Fig. 18
JPEG2000: griglia di riferimento e partizione in tile dell'immagine.

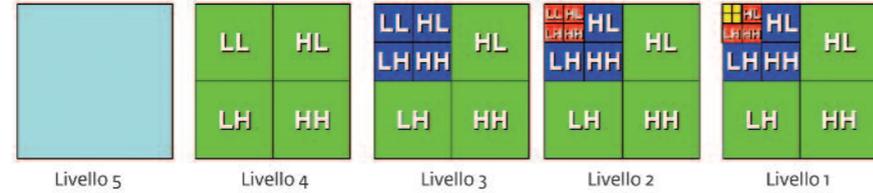
Fig. 19 Immagine decomposta mediante lo schema di Mallat.

partire dallo spazio RGB mediante le seguenti trasformazioni (§4):

$$\begin{pmatrix} Y \\ C_b \\ C_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ -0.16975 & -0.33126 & 0.5 \\ 0.5 & -0.41869 & -0.08131 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}$$

Come risulta evidente dalle precedenti formule, la trasformazione è non-reversibile a causa dell'approssimazione nei calcoli. Nella compressione lossless, viceversa, si prendono in considerazione le componenti YUV e si sfrutta la seguente formula (§5) per la trasformazione diretta:

$$\begin{pmatrix} Y_r \\ U_r \\ V_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \left[\frac{R+2G+B}{4} \right] \\ R-G \\ B-G \end{pmatrix} \quad \S 5$$



Durante la fase relativa alla trasformata wavelet ad ogni tile è applicata la trasformata wavelet, secondo uno fra i tre diversi schemi di decomposizione: Mallat, SPACL e Packet. In Figura 19 sono illustrate le caratteristiche principali delle strutture di decomposizione supportate dallo standard che sono, essenzialmente, un'estensione del ben noto schema di Mallat.

Nella classica decomposizione Mallat ciascun livello da 1 a L aggiunge 3 sottobande, denotate rispettivamente HL (passa-alto orizzontale), LH (passa-alto verticale) e HH (passa-alto orizzontale e verticale). La Figura 20 mostra i passi di una decomposizione wavelet a 3 livelli, secondo lo schema Mallat (questa, ovviamente, viene applicata ad ogni componente dell'immagine).

Nello standard, la struttura descritta sopra è estesa con un parametro ϕ_l per ogni livello di risoluzione $l=1,2,\dots,L$, detto *high-pass descent depth*, che indica il numero di livelli di decomposizione delle bande contenenti alte frequenze (LH, HL e HH) al livello l . Ad esempio ϕ_2 significa che le bande LH, HL, HH al livello l sono suddivise ciascuna in quattro sottobande; se ϕ_3 , ancora una volta le bande ad alta fre-

quenza sono suddivise in quattro sottobande ciascuna e le dodici sottobande ottenute sono a loro volta decomposte in altre quattro sottobande. I valori di ϕ_l ammessi nello standard sono 1, 2 e 3.

Lo standard JPEG2000 supporta sia la trasformata reversibile, a coefficienti interi, che quella non-reversibile, a coefficienti reali. La trasformazione irreversibile, utilizzata normalmente dal JPEG2000, impiega il filtro *Daubechies 9/7* (Tabella 6). La trasformazione reversibile, invece, viene realizzata mediante il filtro *Le Gall 5/3* (Tabella 7) la cui caratteristica principale è quella di consentire una ricostruzione completa e senza perdite (lossless) in fase di sintesi.

Lo standard permette di realizzare la trasformata wavelet in due modi diversi: "banco di filtri" e il lifting scheme. Sia il metodo a banco di filtri che il *lifting scheme* possono essere usati per la trasformata irreversibile con il filtro 9/7. La trasformata reversibile, invece, può essere implementata solo mediante il lifting scheme usando il filtro 5/3. Quindi, per la compressione lossless è possibile utilizzare o un filtro a coefficienti interi (definito da terzi e da includere nel file per la

Tabella 6 Filtro Daubechies (9, 7)

	DAUBECHIES (9, 7): ANALYSIS	
	Low band $h_L(i)$	High band $h_H(i)$
0	+0.602949018236358	+1.115087052456994
±1	+0.266864118442872	-0.591271763114247
±2	-0.078223266528988	-0.057543526228500
±3	-0.016864118442875	+0.0912717631142495
±4	+0.026748757410810	

	DAUBECHIES (9, 7): SYNTHESIS	
	Low band $g_L(i)$	High band $g_H(i)$
0	++1.115087052456994	+0.602949018236358
±1	+0.591271763114247	-0.266864118442872
±2	-0.057543526228500	-0.078223266528988
±3	-0.0912717631142495	+0.016864118442875
±4		+0.026748757410810

Tabella 7 Filtro Le Gall (5, 3)

	LE GALL (5, 3): ANALYSIS	
	Low band $h_L(i)$	High band $h_H(i)$
0	+6/8	+8/8
±1	+2/8	-4/8
±2	-1/8	

	LE GALL (5, 3): SYNTHESIS	
	Low band $g_L(i)$	High band $g_H(i)$
0	+8/8	+6/8
±1	+4/8	-2/8
±2		-1/8

corretta decodifica) o il lifting scheme con filtro 5/3. Nessuna restrizione, invece, si applica alla compressione lossy.

Quando si usa il filtraggio ai bordi di una tile sorge il problema di quali valori mettere al posto dei campioni mancanti oltre il bordo. Pertanto si estende l'immagine ai bordi in maniera simmetrica e periodica rispetto al bordo stesso (filtri simmetrici).

L'applicazione della DWT restituisce degli opportuni coefficienti che vengono poi quantizzati. La quantizzazione consiste nello stabilire il numero di bit che occorrono per memorizzare i coefficienti della trasformata riducendo la precisio-

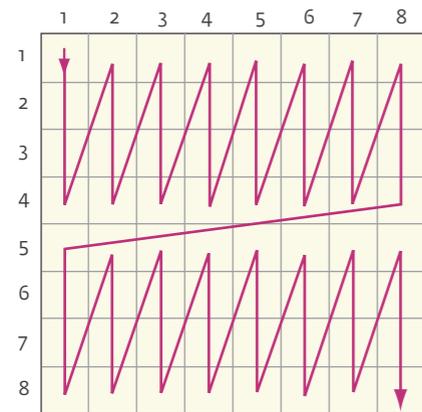
ne di questi valori. Se è applicata ad ogni singolo coefficiente si parla di quantizzazione scalare, se invece i coefficienti vengono raggruppati si ha la cosiddetta quantizzazione vettoriale o *Trellis Coded Quantization*. Questa fase implica una perdita in termini di qualità in quanto i coefficienti vengono approssimati. Nello schema di quantizzazione scalare ciascun coefficiente quantizzato è ottenuto solo come funzione del solo coefficiente wavelet di partenza, diversamente da altri metodi che utilizzano informazioni su un certo numero di coefficienti vicini. I coefficienti quantizzati sono ottenuti troncando la rappresentazione decimale dei

coefficienti originali divisi per il passo di quantizzazione. Ciò significa che i coefficienti che hanno valore inferiore al passo di quantizzazione sono azzerati e nessuna informazione potrà essere ricostruita durante il processo inverso (la dequantizzazione). Per tale motivo questa fase così realizzata è detta quantizzazione a zona morta (*dead-zone quantization*). Inoltre, il passo di quantizzazione può essere diverso per ogni sottobanda e questo permette di quantizzare in maniera più fine i coefficienti di una sottobanda rispetto a quelli di un'altra. Questo fornisce un meccanismo grezzo di quantizzazione adattativa rispetto al

Fig. 20 Immagine filtrata e decomposta mediante lo schema di Mallat.



Fig. 21
Lettura dei code-block.



contenuto delle bande. Tuttavia, proprio perché il passo è uguale per tutti i coefficienti appartenenti alla stessa banda, la quantizzazione è ancora *uniforme*. Per questo si può ricorrere ad una quantizzazione non-uniforme che, unita a considerazioni di carattere psico-visivo, spesso offre migliori risultati in termini di qualità percepita. È importante osservare che, al fine di poter ricostruire in maniera affidabile i coefficienti wavelet, deve essere segnalato durante il processo di decodifica non solo il modello usato ma anche il passo di quantizzazione.

Dopo la quantizzazione ogni sottobanda viene partizionata (processo di *packet partition*) in un insieme di rettangoli

disgiunti, detti pacchetti (o *packet*), in modo analogo a quanto fatto per il tiling. Le dimensioni dei pacchetti sono solitamente minori rispetto a quelle dei tile. Infine ciascun pacchetto è suddiviso in blocchi rettangolari disgiunti di uguali dimensioni detti *code-block* che costituiscono le entità fondamentali per la codifica entropica. L'area di ciascun code-block non può superare i 4096 coefficienti. Inoltre sia la larghezza che l'altezza dei blocchi devono essere potenze di due.

Ogni code-block è codificato in maniera indipendente dagli altri e questo rende la codifica particolarmente adatta al calcolo parallelo, nel quale è possibile processare i code-block simultaneamente. Nella codifica entropica l'ordine di scansione dei code-block è quello in **Figura 21**.

Tutto questo genera un *codestream* che, opportunamente incapsulato in pacchetti e corredato da informazioni tecniche, costituisce il file finale che ha estensione JP2 o JPK.

In modo analogo a quanto realizzato nella presentazione del processo di codifica, anche la decodifica può essere scomposta in una sequenza di trasformazioni. In **Figura 22** si riporta lo schema a blocchi: in ogni blocco si realizza la funzione in-

versa rispetto a quanto descritto per la codifica [Christopoulos et al, 2000] [ISO/IEC N1646R] [ISO/IEC 15444-1]. [Daubechies, 1990] [Mallat, 1989] [Taubman, 2000].

Lo standard JPEG2000, oltre a fornire un alto fattore di compressione con una valida qualità, genera un *bitstream* dotato di caratteristiche che lo rendono molto flessibile e capace di rispondere alle nuove esigenze del mercato per una notevole varietà di applicazioni (telefonia mobile, navigazione interattiva in remoto, campo astronomico). La sua architettura aperta permette di ottimizzare tanto il processo di codifica quanto la qualità delle immagini compresse. Inoltre è possibile applicare tutte le considerazioni viste anche nel dominio applicativo delle immagini in movimento (video): JPM.

Alcune delle caratteristiche salienti dello standard JPEG2000 sono riassunte qui di seguito:

- fattore di compressione alto e buona qualità a bassi bit-rate;
- scalabilità per risoluzione e accesso random;
- trasmissione progressiva per qualità o risoluzione;
- controllo del bit-rate (cioè: controllo della dimensione finale dei dati compressi);
- formato con compressione lossy e lossless;
- formato per immagini a toni continui e grafiche;

- regione di interesse;
- *error resilience* (resistenza agli errori);
- ridotto uso di memoria nei processi di codifica e decodifica e possibile parallelizzazione;
- inserimento metadati.

Il JPEG, il cui utilizzo ha avuto un rapido incremento a finire degli anni 1990, è il formato standard tuttora utilizzato in molti sistemi per fotocamere digitali di uso commerciale e per le immagini presenti sulla rete Internet avendo una buona efficienza per tassi di compressione bassi e un formato più snello. Ovviamente il JPEG2000, nato dieci anni dopo, è stato progettato proprio con l'intento di offrire un nuovo formato utilizzabile come sistema di archiviazione e gestione di immagini digitali. Per tassi di compressione compresi tra 1:10 e 1:30 la sua efficienza (in termini qualitativi) è del 20-30% superiore al precedente standard, mentre per tassi di compressione più alti la qualità cresce esponenzialmente (**Figura 23**). Inoltre il suo essere un formato multi risoluzione toglie la necessità di proporre una derivazione delle immagini per la pubblicazione in remoto (bassa risoluzione), la consultazione in locale (media risoluzione) e la stampa e conservazione (alta risoluzione). La possibilità di gestire immagini di grandi dimensioni (superiore ai 65536 pixel in verticale o orizzontale) permette di effet-

tuare scansioni di originali con alte risoluzioni senza dover ricorrere a tagli o processi di ricostruzione a mosaico.

Inoltre il JPEG2000 offre una forte robustezza nel caso in cui ci siano alterazioni o perdite di byte nel codestream. Infatti la sua struttura a pacchetti, definita proprio per incrementare l'eventuale alterazione dei dati immagazzinati o la perdita durante la trasmissione dati, lo rende più affidabile rispetto alla codifica offerta dal JPEG. In particolare è possibile vedere, negli esempi successivi, come una corruzione di poche decine di byte possa pregiudicare l'integrità dell'intera informazione nel caso del JPEG (**Figura 24**, sinistra), mentre questo porta ad una non sensibile degradazione dell'immagine in JPEG2000 [Wang et al., 2004].

Volendo comparare il JPEG2000 con il JPEG si può ricorrere alla **Tabella 8**.

Infine, le caratteristiche del JPEG2000 lo rendono un formato standard adeguato per la migrazione da formati proprietari e, visto la sua robustezza, garante di una preservazione nel tempo delle immagini digitali.

Ringraziamenti

Gli autori vogliono dedicare questo lavoro a Suvi, Helia e Manuela Fondi. Inoltre si ringrazia "Capo" Alessandro, Antonella, Claudio, Piero e Luca, Francesca, Giuseppe, "Il Don J." Giovanni, Luca, e Roberta per il loro prezioso supporto.

Tabella 8 Comparazione JPEG – JPEG2000

	JPEG	JPEG2000
Qualità a bit-rate alti	◇	◇
Qualità a bit-rate bassi	◇	◇
Multi-Risoluzione	•	•
Compressione lossy	•	•
Compressione lossless	•	•
Resistenza agli errori	◇	◇
Regioni di interesse	•	•
	Non Possibile • Possibile •	Scarso ◇ Buono ◇

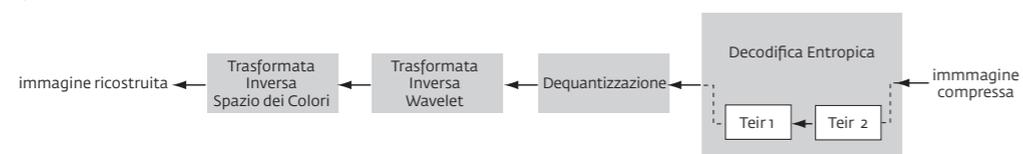


Figura 23
Immagine JPEG compressione 1:30 (sinistra) Immagine JPEG2000 compressione 1:30 (destra).



Figura 24
Robustezza JPEG 14 byte errati (sinistra) e JPEG2000 -14 byte errati (destra).

Fig. 22
Processo di decodifica del JPEG2000



Bibliografia

- Ahmed N., Natarajanand T., Rao K.R.**, 1974, Discrete Cosine Transform in *IEEE Trans. on Computers*, Vol. C-23, pp. 90-93, USA.
- Christopoulos C., Skodras A., and Ebrahimi T.**, 2000 The JPEG2000 still image coding system: an overview, in *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, Vol. 46, No. 4, pp. 1103-1127, November, USA.
- Daubechies I.**, 1990 The Wavelet Transform, Time-Frequency Localization and Signal Analysis, in *IEEE Trans. on Inform. Theory*, Vol. 36, No. 5, pp. 961-1005, September, USA.
- ISO IEC 10918-1**, *Information technology - Digital compression and coding of continuous-tone still images: Requirements and guidelines*.
- ISO/IEC**, 2000, Information Technology-JPEG2000 Image Coding System, Final Committee Draft Version 1.0, ISO/IEC JTC 1/SC 29/WG 1 N1646R, March.
- ISO/IEC**, 15444-1, *The JPEG2000 Image coding system-Part 1: core coding system*.
- Hudson G., Yasuda H. and Sebestyen I.**, 1988, The International Standardization of a Still Picture Compression Technique, in *Proc. of IEEE Global Telecommunications Conference*, pp. 1016-1021, USA.
- Legere A., Omachi T., and Wallace G.K.**, 1991, JPEG Still Picture Compression Algorithm, in *Optical Engineering*, Vol. 30, No. 7, pp. 947-954, USA.
- Mallat S.**, 1989, A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation, in *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 11, No. 7, pp. 674-693, July, USA.
- Mitchell J., Leger A. and Yamazaki Y.**, 1988, Still Picture Compression Algorithm Evaluated for International Standardization, in *Proc. of the IEEE Global Telecommunications Conference*, pp. 1028-1032, USA.
- Rabbani M. and Jones P.**, 1991, Digital Image Compression Techniques, Tutorial Texts, in *Optical Engineering*, Vol. TT7, SPIE Press, USA.
- Taubman D.**, 2000, High Performance Scalable Image Compression with EBCOT, in *IEEE Trans. Im. proc.* Vol9 No7, July USA.
- Wang Z., Bovik A. C., Sheikh H. R. and Simoncelli E. P.**, 2004, *Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity*, in *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 13, no. 4, Apr.



3 Storia delle tecniche e dei procedimenti

3.1 Ripresa, sviluppo e stampa della fotografia

- 3.1.a I primi procedimenti fotografici
- 3.1.b L'evoluzione di fine secolo
- 3.1.c I processi ai sali ferrici
- 3.1.d I processi al bicromato
- 3.1.e Tecniche di stampa fotomeccaniche
- 3.1.f Altri procedimenti ai sali metallici
- 3.1.g Una tecnica particolare: l'orotone
- 3.1.h I supporti vari
- 3.1.i Lo sviluppo istantaneo
- 3.1.l La microriproduzione

3.2 Ripresa, sviluppo e stampa della fotografia a colore

- 3.2.a Il colore e la sua percezione
- 3.2.b Gli inizi della storia della fotografia a colori
- 3.2.c Le lastre autochromes
- 3.2.d Dal '35 in poi: le pellicole
- 3.2.e I processi istantanei
- 3.2.f Il colore digitale

3.3 Impiego moderno delle tecniche storiche

- 3.3.a Letteratura, associazioni, eventi e siti web
- 3.3.b Le tecniche

3.4 Apparati di ripresa e di visione

- 3.4.a Le fotocamere dagli inizi ad oggi
- 3.4.b I visori nella storia (...)

3.5 La nascita del digitale

- 3.5.a Sintesi della storia della fotografia digitale
- 3.5.b Prospettiva della fotografia digitale

3.6 Tecnologie di acquisizione digitale

- 3.6.a Tipologie di sensori digitali
- 3.6.b Errori di acquisizione

3.7 Apparecchiature per l'acquisizione digitale

- 3.7.a Aspetti preventivi alla digitalizzazione
- 3.7.b Linee guida e standard internazionali
- 3.7.c Tipologie di scanner
- 3.7.d Fasi successive alla progettazione
- 3.7.e Acquisizione digitale
- 3.7.f Controllo di qualità

3.1 Ripresa, sviluppo e stampa della fotografia

La continua evoluzione dei calcolatori elettronici ha evaso la motivazione principale per i quali questi erano stati creati. Da semplici e pure macchine calcolatrici, preso atto delle loro potenzialità, sono divenuti, in breve tempo, fonte di sviluppo di settori eterogenei tra di essi ma convergenti in alcune caratteristiche o esigenze comuni. La fotografia tradizionale è stata immediatamente coinvolta in questo processo rivoluzionario. Da una immagine analogica, composta da milioni di pigmenti molto piccoli e spazialmente irregolari (la grana) depositati sulla pellicola, si è passati ad una rappresentazione digitale composta da punti di immagine denominati *picture element* (o *pixel*) disposti regolarmente in maniera tabellare. Questo ha consentito un abbattimento dei costi, legati ai materiali chimici per lo sviluppo e l'intervento dell'operatore, e dei tempi, grazie alla possibilità di accedere in maniera immediata a quanto ripreso e condividerlo attraverso gli attuali sistemi di comunicazione. Inoltre, anche la qualità di ripresa e la risoluzione hanno avuto un profondo miglioramento grazie alla possibilità di disporre di un maggior numero di scatti e per mezzo di sistemi di acquisizione sempre più evoluti. Inoltre, l'adozione di questa tecnologia ha consentito di effettuare operazioni di correzione cromatiche e miglioramento dei dettagli in maniera semplice e rapida ed applicare automaticamente algoritmi matematici per l'estrazione di caratteristiche. In particolare, nel tempo, si è svi-

luppato il ramo della elaborazione delle immagini (*image digital processing*) che ha promosso diversi lavori tra cui le relazioni di vicinanza e distanza, utili per rilevamenti metrici e movimenti di componenti meccanici autonomi (*cibernetica*), la definizione di percorso e contorno, per l'individuazioni di forme (*pattern recognition*), e la ricostruzione tridimensionale di oggetti (*virtual reality*).

Il processo di acquisizione avviene attraverso un sensore digitale, presente in un dispositivo (*scanner*, *frame grabber* o macchine fotografiche digitali), che effettua una sovrapposizione tra una griglia regolare (o griglia di campionamento) e l'immagine analogica. Ogni quadrato della griglia, area, dà origine ad un *pixel* e il colore ad esso associato è la media dei colori che cadono all'interno dello stesso. Una volta acquisita l'immagine, i valori discreti associati ad ogni *pixel*, devono essere opportunamente disposti e corredati di informazioni suppletive per poter essere elaborati, memorizzati e visualizzati; è necessario definire una struttura e organizzazione, il formato di immagine, che garantisca la corretta interpretazione dell'informazione digitale su diversi dispositivi.

2.2.3.a

Aspetti dell'immagine digitale

Una immagine digitale è costituita da un insieme ordinato di numeri interi ot-

tenuto da una immagine analogica mediante un dispositivo di acquisizione (*sensore ottico digitale*). L'insieme ordinato dei valori assume l'aspetto di una matrice (o tabella numerica) composta da un determinato numero di righe (*R*) e colonne (*C*) e questo consente l'individuazione di ogni elemento, detto *campione*, considerando il suo relativo numero di riga e colonna. Ogni campione rappresenta l'intensità luminosa media, o livello, di una porzione, un'area, corrispondente dell'immagine analogica, e questa area viene definita *picture elements* (o *pixel*). Il termine *livello* ha un carattere generico in quanto con esso si indica il grado di luminosità di un colore in rapporto ad un bianco fissato appartenente al sistema cromatico di riferimento. La porzione ha tipicamente una forma geometrica rettangolare ed è caratterizzata da due dimensioni: *dx* (orizzontale) e *dy* (verticale), detti *passi* di campionamento del processo di digitalizzazione. I loro reciproci corrispondono alle frequenze di campionamento, che quindi rappresentano il numero di campioni per unità di lunghezza rispetto alla dimensione orizzontale e quella verticale. Il sistema spaziale di riferimento relativo ad una immagine digitale può fare rinvio ad una metrica appartenente alla scena in considerazione o a quella propria del supporto fisico dell'immagine analogica (*cm*, *pica*, *inch*). La capacità di ogni sistema di acquisizione di effettuare una rappresentazione in digitale della scena, in maniera più o

Figg. 2
Immagine a colore:
profondità colore a 4
bit (sinistra), a 8 bit
(destra) a 24 bit
(destra)

Tabella 1
numero dei colori
rappresentabili in
diverse tipologie di
immagini con una
quantità variabile di
canali e profondità di
colore per canale.

3.5 La nascita del digitale

G.E. Gigante, F. Liberati

L'attribuire ad un periodo storico un appellativo "epoca della riforma o della controriforma" o "l'epoca delle scoperte scientifiche o della stampa" ha il significato di individuare l'elemento principale che caratterizza gli avvenimenti del periodo, almeno in una determinata sfera della società. Queste operazioni sono spesso pericolose perché focalizzano l'attenzione su un particolare aspetto, seppure importante, distogliendo l'attenzione da una analisi più complessiva. Infatti, nel momento in cui si assiste ad un radicale cambiamento, è facilmente riscontrabile come da uno stimolo scaturiscano una serie di azioni, a volte complesse, che non sono direttamente collegate al fenomeno preso a simbolo dell'epoca. Un ulteriore elemento che ostacola una analisi completa ed accurata avviene quando si cerca di descrivere un cambiamento ancora in atto e vissuto dall'interno. In questo ultimo caso, definire e dare indicazioni precise del fenomeno risulta essere un compito arduo in quanto la molteplicità dei contributi che avvengono da diversi fattori porta inevitabilmente ad una correlazione di eventi, a volte disparati, che si legano strettamente gli uni con gli altri e difficilmente sono distinguibili. Quello che si può dire, in prima istanza, riguardo la rivoluzione tecnologica avvenuta negli ultimi quarant'anni va ricondotto sicuramente alle ricerche affrontate sui materiali atti a realizzare dispositivi per il trattamento e l'elaborazione di informazioni digitali. Nel contempo però, non è possibile prescindere

dai fattori che ne hanno condizionato l'evoluzione. La formalizzazione di teorie matematiche, chimiche e fisiche, infatti, hanno concorso a definire il concetto di 'digitale' e di 'scienza dell'informazione' come sono, ora, noti.

In ogni caso, se si vuole far scaturire la nascita del digitale da un aspetto prettamente pratico è possibile affermare che il millennio in corso sarà probabilmente ricordato come l'"Età del silicio". È quest'ultimo materiale ad aver consentito una rivoluzione progettuale senza precedenti, favorendo il progressivo e naturale passaggio della conservazione e trattamento dell'informazione dai tradizionali materiali analogici ai sistemi operanti su una codifica numerica. Circuiti integrati e microprocessori, realizzati in silicio, aventi elevata complessità progettuale hanno reso possibile, a partire dagli anni Quaranta, la costruzione di sistemi in grado di effettuare un gran numero di calcoli in tempi estremamente rapidi. Inoltre, la teoria sviluppata nel campo dell'informatica (riguardo la rappresentazione, la codifica e la trasmissione dell'informazione), gli apporti della chimica dei materiali (per la costruzione dei dispositivi atti alla memorizzazione dei dati discreti, come i nastri magnetici ed i supporti ottici) e della fisica (le fibre ottiche, il laser) nonché la continua evoluzione tecnologica (la nanotecnologia) hanno permesso un ampliamento del dominio applicativo. Da strumenti dedicati unicamente al calcolo, gli elaboratori elettronici sono diventati elementi es-

senziali in molti campi: fotografico, audio, audiovisivo, multimediale. Questo passaggio è stato spesso favorito da un immediato riscontro dei benefici apportati dal digitale rispetto ai risultati ottenibili dalle tradizionali tecniche analogiche.

3.5-a Sintesi della storia della fotografia digitale

Proprio in questo contesto il rapido sviluppo delle tecnologie digitali nell'ambito della fotografia è stato un episodio molto significativo. I primi lavori sulla riproducibilità di immagini elettroniche vennero affrontati da George Smith e William Boyle nel 1969, i quali riuscirono a formalizzare la teoria e lo sviluppo dei sensori ottici: i CCD (*Charge Coupled Devices*, dispositivo ad accoppiamento di carica). Boyle e Smith erano due ricercatori impegnati nella realizzazione di nuovi dispositivi per l'acquisizione di contenuti audiovisivi (video-sorveglianza e video-comunicazioni). Questi, mutuando i risultati ottenuti per le memorie a bolle magnetiche e sfruttando le tecniche di memorizzazione delle cariche tramite un sottile strato metallico depositato sulla superficie di un cristallo di silicio, progettaronò il primo dispositivo di acquisizione, memorizzazione e riproduzione di immagini dinamiche (Fig. 1). Nell'aprile del 1970 venne presentato, nei laboratori *Bell di Murray Hill* (New Jersey), il primo prototipo di sensore ottico: una griglia regolare di sei celle fo-

Fig. 1
Smith e Boyle con un
primordiale sistema di
acquisizione basato
su CCD.



Fig. 2
Immagine a tono di
grigio 8-bit (sinistra)
Immagine a colori
24-bit (destra).



tosensibili, i *pixel*, in grado di “catturare” l’intensità luminosa da una scena di ripresa. Sebbene la produzione fu così rapida, solo a metà degli anni ottanta si riuscirono a realizzare le prime macchine digitali, che divennero un prodotto di massa a partire dalla metà degli anni Novanta. Dalla nascita del primo CCD, comunque, la fotografia tradizionale subì un progressivo ed inarrestabile cambiamento. A partire dalla Kodak, che nel 2004 ha annunciato la progressiva cessazione della fabbricazione di pellicole fotografiche e dei materiali di sviluppo, le maggiori case produttrici si stanno ritirando dal mercato di sviluppo analogico per dedicarsi completamente al digitale. Quindi, in quasi trent’anni, si è assistito al completo passaggio al digitale nell’ambito della fotografia. È un periodo estremamente breve, considerando la radicazione dell’industria delle pellicole fotografiche e la diffusione capillare della fotografia, in auge sin dai primi anni del secolo scorso.

L’archiviazione numerica delle immagini fotografiche, comunque, rappre-

senta una possibilità che ha diversi notevoli vantaggi e qualche problematicità. Il fatto che una fotografia, come qualsiasi immagine visibile (ma anche invisibile), possa essere scomposta in tanti piccoli elementi, i *pixel*, senza che si perda nulla, è un dato di fatto che ha a fondamento diverse ragioni scientifiche, che non è il caso qui di ricordare. Una fotografia digitale è quindi una tabella ordinata di numeri che possono essere utilizzati per riprodurre l’immagine stessa in una qualsivoglia periferica: video, stampante, ecc. La visualizzazione della fotografia viene fatta fissando un fattore, detto di risoluzione, che assegna il numero di *pixel* per pollice. Questo fattore è generalmente diverso nel caso in cui si impieghi un normale video (bassa risoluzione: pochi *pixel* per pollice) o che l’immagine sia stampata (alta risoluzione: molti *pixel* per pollice). Un ulteriore aspetto è la profondità cioè quante gradazioni di colore, o toni di grigio, sono rappresentate dai singoli valori numerici afferenti ai *pixel*. In immagini a toni di grigio, ad esempio, sono riservati di solito 256 livelli (8 bit) che

vanno da 0 (nero) a 255 (bianco); mentre in quelle a colori *true color* si usano almeno 24 bit, quindi 16777216 gradazioni di colore (Fig. 2).

Le motivazioni che hanno spinto a questo passaggio sono numerose, alcune delle quali legate più alla brevità del periodo di transizione piuttosto che alle conseguenze dell’inserimento della nuova tecnologia. In breve, tra i fattori determinanti nella nascita della fotografia digitale possono essere citati:

- la disponibilità di sensori ottici con elevate prestazioni sia in termini di risposta dinamica che di risoluzione e sensibilità;
- lo sviluppo di sistemi di gestione semplici ed algoritmi di elaborazione rapidi ed efficienti. Con il digitale la fase di trattamento delle immagini è immediata (contrasto, regolazione livelli etc.) ed, inoltre, si abbattano i costi dovuti ai materiali chimici per lo sviluppo e all’intervento dell’operatore addetto alla stampa;
- la nascita di algoritmi di compressione con perdita di informazione (*lossy*) o

- senza perdita di informazione (*lossless*) rispettanti le caratteristiche della sintesi di immagini nel sistema visivo umano (a fronte di una minore fedeltà e definizione dell’immagine si ha un risparmio, in termine occupazionale, rispetto all’acquisizione “grezza” *raw*);
- l’adozione di strategie per la salvaguardia dei dati e la definizione di formati standard di immagini con specifiche aperte a nuove caratteristiche (inserimento di metadati, diritti di autore, *watermarking*);
- la diffusione dei sistemi di visualizzazione, condivisione e di archiviazione dati.

Occorre notare che la nascita del digitale, nell’ambito fotografico, è avvenuta così rapidamente perché tutto era pronto affinché ciò accadesse. In particolare, la microelettronica aveva raggiunto, negli anni Ottanta, un sensazionale sviluppo, per cui erano disponibili sensori ottici di pregiata risoluzione e con costi contenuti. I sistemi di gestione ed elaborazione delle immagini erano stati sviluppati e si erano superate limitazioni, tecniche ed economiche, che impedivano in precedenza un’efficiente trattamento dei dati. Infatti, alcuni eventi di poco antecedenti, permisero un più rapido sviluppo degli elaboratori elettronici in altri domini applicativi e diversi dal semplice calcolo, grazie a due fattori:

- negli anni Cinquanta avvenne lo sviluppo della televisione e di conseguenza la nascita dei primi sistemi di

Video Tape Recorder (VTR), che aprirono la strada alla memorizzazione di grandi quantità di immagini, soprattutto televisive;

- negli anni Sessanta ci fu il grande impulso delle imprese spaziali e la conseguente ricerca di tecniche efficienti per le trasmissioni dati. In quegli anni, a bordo dei satelliti venivano messe delle telecamere i cui segnali erano convertiti in formato digitale per poter essere trasmesse a terra. Vennero così perfezionati i metodi di acquisizione e quelli relativi alla riduzione del rumore (il *bias*, il *flat* e il *dark*) per poi passare a tecniche completamente digitali. Tra i pionieri di questi lavori è opportuno citare Eugene F. Lally.

Tutto questo accadeva prima dell’inizio della fotografia digitale. In particolare, nel 1975 fu realizzata la prima videocamera digitale (funzionante a CCD) con una qualità dell’immagine sufficiente per le riprese televisive in toni di grigio. Nello stesso anno, Steven Sasson costruì un primo prototipo di macchina fotografica utilizzando alcuni componenti elettronici di memorizzazione dati, una lente da telecamera ed un esemplare di sensore elettronico CCD disponibile dal 1973 (il modello *Fairchild*). Il sistema pesava 3,6 kg, produceva immagini in toni di grigio ed aveva una risoluzione di circa 10.000 *pixel* (nel 2009, è possibile disporre di risoluzioni superiori ai 25 milioni di *pixel*). I tempi di acquisizione erano di 23 secondi circa (nel 2009, sono nell’ordine di

$10^{-3}/10^{-4}$ sec), i dati venivano salvati su un nastro magnetico digitale e la visualizzazione richiedeva un monitor dedicato. Ovviamente il sistema non è mai entrato in commercio. Sempre in quegli anni vi furono diversi tentativi in cui si sperimentarono tecnologie ibride analogiche e digitali finché, nel 1981, la Sony produsse il primo prototipo di macchina fotografica digitale la *Mavica* (*Magnetic Video Camera*) che registrava le immagini elettroniche su un apposito floppy disk. Tale dispositivo aveva due sensori CCD per misurare separatamente la luminosità ed il colore. Le immagini erano costituite da circa 720.000 *pixel* ed era possibile memorizzare solo 25 foto con risoluzione spaziale usata nel sistema televisivo (320x240) e profondità limitata a 10-8 bit (da 1024 a 256 toni di grigio o *palette* dei colori).

Da quel momento la competizione commerciale ha reso frenetica la corsa, e nel 1986 già erano in commercio sensori da 1,4 milioni di *pixel*, per fotografie di formato 13x18. Nel 1987, la Kodak, mise in commercio una gamma di prodotti per acquisire, memorizzare e stampare le fotografie digitali e, nel 1990, incidere, usando il formato *Photo CD*, direttamente sui *compact disc* (CD), fino allora usati unicamente per la riproduzione di musica digitale. Questi furono il primo tentativo di realizzare sistemi completi atti alla gestione e fruizione di fotografie digitali e dei relativi standard.

Uno dei principali canali di diffusione dei sistemi di acquisizione di immagini

elettroniche sono state le scienze, soprattutto con la rapida trasformazione dei sistemi astronomici che in meno di un decennio, a partire dal 1979, hanno visto la conversione dei telescopi al digitale, l'impiego di telecamere digitali in satelliti (*Hubble Space Telescope*, 1990) e la nascita di numerosi gruppi di astrofili che fortemente hanno lavorato per la transizione al digitale. Altrettanto importante, all'inizio, è stato il ruolo della televisione e dei nuovi sistemi di comunicazione che hanno fortemente spinto verso le tecnologie digitali con la realizzazione, fin dalla metà degli anni Settanta, delle prime telecamere per riprese televisive e all'inizio degli anni Novanta con una rapida conversione del fotogiornalismo ai sistemi digitali. Va ribadito che si sono sviluppate prima le videocamere e solo successivamente quelle fotografiche; questo è accaduto per due ragioni concomitanti:

- il sensore CCD consente un acquisizione di immagini dinamiche, quindi è stato naturale sfruttarne al meglio le sue caratteristiche;

- il mondo della televisione è molto più "giovane" di quello della fotografia, quindi più pronto ad accettare le novità. Inoltre è ben nota la scelta della BBC che da più di dieci anni ha abbandonato il sistema analogico ed invia il segnale video in digitale sfruttando sia il canale terrestre che quello satellitare.

Vi è inoltre da considerare che, inizialmente, il vero vantaggio risiedeva proprio nella rapidità di trasmissione dati, grazie anche allo sviluppo dei sistemi di comunicazione globale basati sul digitale: la rete Internet. Già nel 1984, comunque, la Canon sperimentava la fotografia digitale alle olimpiadi di Los Angeles, provando ad entrare in un settore (quello commerciale) in cui la qualità dell'immagine è molto importante, dimostrando così la avvenuta maturazione delle tecnologie.

Tutti questi elementi, essenziali per finanziare il costoso sviluppo delle tecnologie, non sarebbero bastati se non vi fosse stato la contemporanea diffusione al grande pubblico degli elaboratori elet-

tronici e, successivamente, la nascita della rete con un conseguente enorme sviluppo delle risorse (in termini di memoria e di programmi) e del mercato delle immagini. Per dare dei riferimenti più precisi si può ricordare che l'*Apple* e il *Commodore*, primi calcolatori per un mercato di massa, sono apparsi nel 1974 e la rete si è sviluppata a partire dal 1991. Lo sviluppo dei sistemi di fotografia digitale è andato in parallelo. Nel 1990 la Logitech mise sul mercato il primo sistema fotografico completamente digitale, la *Dycam Model 1*, che consentiva di archiviare 32 immagini in toni di grigio di 90240 pixel ed un tempo di acquisizione superiore ai 10^{-2} secondi. Nel 1994 la Apple introdusse l'*Apple QuickTake 100* primo sistema costruito per funzionare con un elaboratore elettronico. Un anno dopo la Kodak realizzò la *DC40*, a cui fece concorrenza la *Casio QV-11* e nel 1996 la *Sony's Cyber-Shot*, tutte in grado di interfacciarsi con i calcolatori elettronici (Fig. 3).

La possibilità di vedere e trasferire direttamente le immagini acquisite sugli elaboratori ne ha decretato l'immediato

successo. In breve tempo, inoltre, la convergenza tecnologica ha consentito un uso del documento fotografico, limitato nella sua dimensione analogica a risiedere su un supporto fisico ben definito, la carta, ad essere accessibile attraverso i più disparati dispositivi: cellulari, palmari, navigatori satellitari, cornici elettroniche ed altro.

3.5.b Prospettiva della fotografia digitale

Questi avvenimenti introducono altri temi di notevole importanza nel passaggio alla fotografia digitale. I primi sistemi usavano formati di archiviazione delle immagini digitali che erano di proprietà del costruttore. Negli anni novanta, sotto la spinta dello sviluppo dei sistemi di elaborazione e di gestione delle immagini, furono sviluppate le tecniche di compressione ed introdotti i principali formati delle immagini (TIFF, JPEG, BMP) alcuni dei quali mutuati dalla grafica digitale che aveva già avuto un significativo sviluppo. È difficile discutere in maniera sintetica i complessi rapporti che si sono intrecciati tra grafica e fotografia digitale, che hanno condiviso una fase di rapido sviluppo a partire dai primi anni Novanta. La grafica ha sicuramente il merito di aver migliorato l'usabilità dei sistemi ed, in particolare, la gestione di consultazione ed archiviazione delle fotografie digitali. Inoltre, sono stati sviluppati i primi programmi per il disegno assistito che hanno

permesso di sperimentare una serie di algoritmi che si sono successivamente dimostrati molto utili per l'elaborazione delle fotografie. Sempre merito della grafica è stato lo sviluppo dei sistemi di visualizzazione 3D e di animazione, che rappresentano attualmente la nuova frontiera della fotografia e cinematografia.

Come abbiamo in parte già detto i principali fattori che rendono la fotografia digitale molto competitiva rispetto alle tecniche convenzionali sono: una trasmissione rapida ed efficiente, una gestione ed archiviazione semplice, una elaborazione immediata e l'uso in sistemi multimediali. Anche la significativa riduzione dei costi ha la sua importanza. Tutti questi fattori non sono invece sempre determinanti nel caso della "fotografia d'arte", a parte la possibilità di integrazione multimediale. Questo spiega in parte la relativa lentezza con cui la fotografia digitale sia stata adottata dai professionisti del settore. La grande duttilità delle tecniche convenzionali, ben conosciute dagli artisti anche negli aspetti più nascosti, ha rappresentato un forte attrattore per i professionisti della generazione precedente a quella dell'avvento del digitale. I giovani fotografi stanno invece indagando le possibilità offerte dai vari algoritmi e nuove strumentazioni che estendono le tecniche convenzionali e ne propongono di nuove difficilmente ottenibili.

In ogni caso si riscontrano alcune problematiche che hanno origine dalla non

completa conoscenza dei rischi che possono incorrere al passaggio verso il digitale. Attualmente, dai dagherrotipi alle stampe e pellicole, si ha una conoscenza approfondita dei fenomeni che possono corrompere, danneggiare o degradare gli originali analogici. Tramite un intervento preventivo ed un eventuale restauro è spesso possibile controllare il processo di degrado degli originali stampati. Nel digitale, la cui natura dell'informazione è una collezione di stringhe binarie, questi fenomeni non interessano solamente i dati ma anche i sistemi atti ad elaborarli e conservarli. I problemi relativi alla possibile corruzione dei dati, durante e dopo l'acquisizione, sembrano essere risolti grazie a tecniche di rilevamento e correzione errori ben collaudate (CIRC, bit di parità, ...). Resta ancora aperta la necessità di individuare il miglior supporto di memorizzazione (la cui struttura logica e chimico-fisica variano ed i tempi di aspettativa di vita non sono sempre ben definiti) ed i formati in cui sono organizzati i dati (spesso proprietari e, a volte, desueti, con l'inevitabile migrazione verso nuove specifiche). Questi sono alcuni degli aspetti strettamente correlati alla preservazione del digitale, fortemente condizionato anche dall'obsolescenza informatica. Un grande impegno, per la fotografia digitale, sarà quello di rispettare tutte le condizioni offerte dalla tradizionale ripresa analogica a vantaggio di un utilizzo e condivisione in contesti sempre nuovi e non convenzionali.

Fig. 3
Macchine fotografiche digitali: Mavica, Dycam, QuickTake, DC40, Cyber-Shot.



3.6 Tecnologie di acquisizione del digitale

F. Birimbelli, V. Carnevale, F. Liberati

La nascita dei dispositivi di acquisizione digitale può essere fissata nel 1969, anno in cui George Smith e William Boyle, ingegneri dei laboratori Bell di Murray Hill nel New Jersey, progettaronο un *chip* che poteva essere usato come componente predisposto all'acquisizione di immagini processabili da un calcolatore elettronico. La loro intenzione era quella di costruire un semplice meccanismo di ripresa digitale (il *PicturePhone*) e, in breve tempo, consapevoli della versatilità offerta dal prototipo prodotto, mutuato per analogia dalle memorie a bolle magnetiche, riuscirono ad estendere e migliorare le funzionalità per garantire una acquisizione valida di immagini fisse ed in movimento, realizzando il sensore digitale [Boyle et al., 1970]. L'idea si fondava su nozioni note: la possibilità di memorizzare delle cariche per mezzo di un sottile strato metallico depositato sulla superficie di un cristallo di silicio. Il silicio è un materiale semiconduttore, cioè un elemento che presenta una conduttività elettrica intermedia tra quella dei conduttori metallici e quella degli isolanti. Negli anni a venire i sensori digitali ebbero un grande utilizzo in ambito astronomico, in quanto offrivano ottime prestazioni (sensibilità e definizione), la facilità di gestione dell'informazione e la possibilità di minimizzare l'eventuale presenza di rumore attraverso opportuni algoritmi [Leo et al., 1995]. Inoltre, la possibilità di modificare ed elaborare con semplici ed immediati passaggi il livello qualitativo delle informazioni cromatiche digitali,

l'immediata accessibilità e distribuzione, i nuovi algoritmi di compressione dati nel dominio applicativo delle immagini fisse o in movimento favorirono, in breve tempo, il loro utilizzo a livello commerciale. Quest'ultimo aspetto determinò l'abbandono della fotografia analogica, troppo legata all'intermediazione di un operatore per lo sviluppo e l'elaborazione e quindi con costi maggiori. Inoltre gli algoritmi applicabili alle immagini digitali sono diventati così raffinati da "simulare" in tutto e per tutto (anche se i puristi dell'analogico non concordano) le elaborazioni chimiche e le tecniche di un laboratorio fotografico.

3.6.a Tipologie di sensori digitali

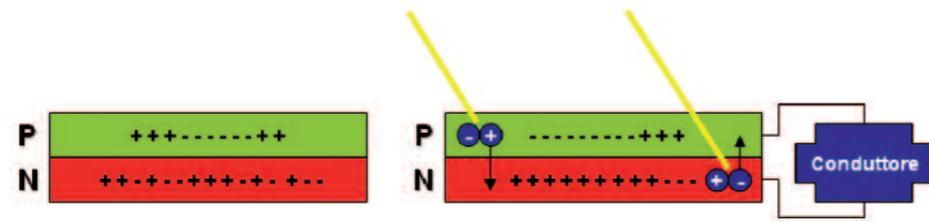
In una macchina fotografica tradizionale, la luce viene fatta convergere da una lente (l'obiettivo) attraverso un'apertura (l'otturatore), fino a raggiungere una porzione di pellicola posizionata sul piano focale. La macchina digitale ha un funzionamento analogo ma invece di catturare l'informazione cromatica su un supporto analogico, sfrutta un sensore digitale che campiona la luce filtrante attraverso l'obiettivo e la converte in segnali elettrici. Il dispositivo di acquisizione è caratterizzato da una matrice di microscopiche regioni (i fotositi, *photosite*) di diversa forma (quadra, rettangolare ed esagonale), disposte a griglia sulla superficie di un cristallo di silicio, sensibili

alla luce. I segnali elettrici vengono amplificati e poi inviati ad un convertitore analogico-digitale che li trasforma in valori discreti. I numeri risultanti sono codificati e processati da un sistema informatico che provvede a memorizzarli o elaborarli.

Il principio di funzionamento dei fotositi è teoricamente analogo a quello dei pannelli fotovoltaici. Il sensore è costituito da due zone di composizione simile, il silicio, ma addizionate con materiali diversi (drogaggio tipo N e tipo P). Con il termine drogaggio, nell'ambito dei semiconduttori, si intende l'aggiunta al semiconduttore di piccole percentuali di atomi non facenti parte del semiconduttore stesso allo scopo di modificare le proprietà elettriche del materiale. Il materiale drogato in sé continua a risultare elettricamente neutro ma nell'ambito del reticolo cristallino gli atomi droganti possono avere un elettrone in più rispetto a quelli necessari a soddisfare i legami del reticolo stesso (drogaggio tipo N) o un elettrone in meno (drogaggio tipo P). Le cariche elettriche non possono passare da una zona all'altra liberamente ma sono sottoposte a delle regole dettate dalle proprietà dei due materiali. Le due zone sono ovviamente a carica nulla, quindi in ciascuna area, prima che la luce la colpisca, il numero di cariche positive è uguale a quello delle cariche negative, cambia solo la loro disposizione (Figura 1a). Tra le due zone ve ne è una di contatto (giunzione NP detta zona di svuotamento o *depletion layer*) che agisce

Fig. 1

Funzionamento fotositi. Nella parte a sinistra (Figura 1a): zone a carica nulla dove vigono le regole di P e N. Nella parte a sinistra (Figura 1b): zone con accumulo di cariche dopo l'impatto con i fotoni.



come un filtro selettivo delle cariche che possono passare attraverso. Le regole sono le seguenti: le cariche negative possono passare da N a P e, analogamente, le cariche positive possono fare lo stesso da P ad N. Viceversa le cariche negative non possono passare da P ad N e, di conseguenza, le cariche positive non possono passare da N ad P. Quando i fotoni impattano sul silicio nella parte N, cedono energia agli elettroni "liberi" dai legami di valenza (legami del reticolo) che passano nella zona di conduzione: tale carica negativa migra verso il lato P, mentre la lacuna prodotta positiva resta dov'è (e viceversa per il lato N). In questo modo si continuano ad accumulare cariche positive da un lato e negative da un altro. Ciò determina una differenza di potenziale tra i due lati e, grazie all'uso di un conduttore, è possibile consentire il fluire di corrente. Essendo entrambi i lati proporzionali al numero di cariche prodotte e quindi al numero di fotoni ricevuti, è possibile misurare la quantità di luce che arriva al sensore.

I sensori digitali si dividono in due grandi categorie: i dispositivi ad accoppiamento di carica (CCD, *Charge Coupled*

Device) e i semiconduttori all'ossido di metallo complementare (CMOS, *Complementary Metal Oxide Semiconductor*) [Buil, 1991] [Lomheim et al., 2007] [Nakamura, 2005] [Holst, 1998]. Il dispositivo ad accoppiamento di carica (Charge Coupled Device, o CCD) è un chip di silicio ricoperto dai fotositi sistemati in una tabella: una griglia rettangolare o quadrata. Per ogni area appartenente alla griglia il sensore cattura una quantità di luce, una media, che poi viene processata in maniera adeguata. In particolare ciascun fotosito raccoglie una quantità proporzionale alla durata dell'esposizione e all'intensità del flusso luminoso incidente. Quest'ultimo è energia E definibile come §1.

$$E = \frac{hc}{l} \quad \S 1$$

dove h è la costante di Planck, c la velocità della luce e l è la lunghezza d'onda della luce.

Parte dell'energia E è trasformata in elettroni, ossia in cariche elettriche, che sono immediatamente integrate nel substrato adiacente alla matrice dei pixel. La dislocazione dei punti di rilevamento di

intensità luminosa in maniera regolare è un vantaggio rispetto alle tradizionali macchine a pellicola. In questo ultimo caso, infatti, sul supporto è presente un pulviscolo argenteo (la grana), che imprigiona le informazioni, con una disposizione spaziale irregolare. Nelle camere digitali, invece, si ha un sensore che consente una campionatura regolare intrinseca dell'immagine, in cui ogni fotosito prende il nome di *pixel* (acronimo di *picture elements*). Quindi, durante l'esposizione, cioè il processo di integrazione delle cariche, vi sarà una precisa mappa elettronica dalla scena ripresa che andrà formandosi sulla superficie del sensore. Il processo di integrazione è generalmente lineare ed esente dal difetto di reciprocità presente nelle emulsioni fotografiche, ciò vuol dire che la carica accumulata (integrata) dal fotosito è linearmente proporzionale ai fotoni che lo colpiscono (di solito un elettrone per un fotone). Inoltre, durante questa fase, è catturata una percentuale ben più alta di fotoni, dal 20% al 60% rispetto al 2-3% dell'emulsione fotografica. Tutto ciò significa maggior sensibilità (efficienza quantica) del CCD rispetto (nel 2009, 18200 ISO)

all'emulsione fotografica. Al termine dell'esposizione l'immagine "impressa" nel substrato del sensore è trasmessa sotto forma di segnale elettrico ad un circuito integrato che ne effettua il campionamento, mutando il segnale d'immagine in una ordinata sequenza numerica di valori codificati nel sistema binario (i bit).

Il termine CCD deriva dal modo in cui la macchina digitale interpreta le cariche dei singoli fotositi. In genere, dopo aver esposto il CCD, le cariche sulla prima fila di fotositi sono trasferite a un dispositivo di uscita (*read out register*) dove vengono amplificati e poi inviati al convertitore analogico-digitale. Ogni fila di cariche viene elettricamente accoppiata a quella successiva in modo che, dopo la lettura e cancellazione di una fila, quelle successive si spostano verso il basso per occupare lo spazio. Dopo che tutte le file di fotositi sono state lette il CCD viene ricaricato di elettroni ed è pronto ad acquisire una nuova immagine (Figura 2).

I fotositi sono sensibili soltanto alla quantità di luce che ricevono; non si occupano del colore. Per percepire il colore la macchina digitale deve poter effettuare una sorta di filtraggio mediante la rappresentazione in rosso, verde e blu (RGB) simile al metodo proposto da J. Maxwell. Per ottenere una sintesi dei colori è possibile operare in diversi modi, ma la più comune è quella che adopera una serie di filtri RGB sui singoli fotositi. Questa combinazione di filtri viene chiamata "allineamento di filtri a colori" (*color filter array*) e la maggior parte dei CCD

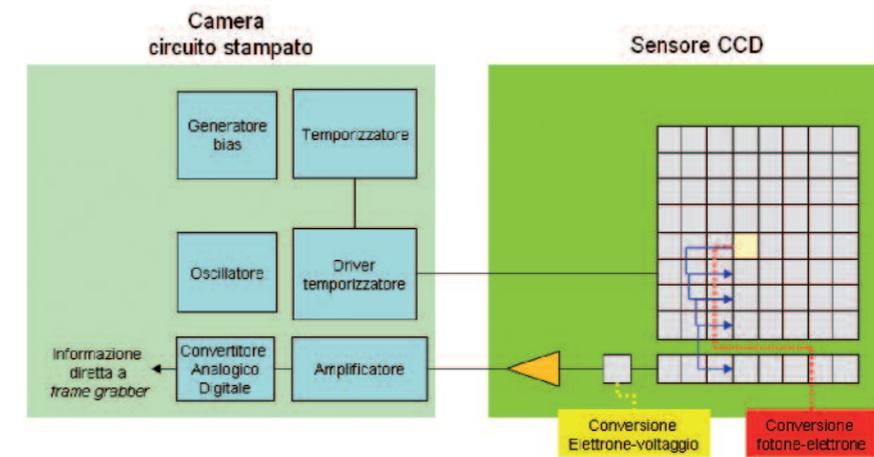


Fig. 2 Struttura generica di un CCD.

usano uno schema detto Pattern di Bayer (Figura 3).

Grazie a questi filtri, il CCD può produrre immagini distinte e incomplete di colore rosso, verde e blu. Le immagini non sono complete perché se si fa riferimento, ad esempio, al canale rosso quest'ultimo è privo di tutti quei pixel coperti da un filtro blu e viceversa l'immagine blu manca dei pixel coperti da un filtro rosso. Ad entrambe, inoltre, mancano tutti quei pixel coperti da un filtro verde. Per realizzare un'immagine a colori completa, viene utilizzato un metodo di interpolazione sofisticato: il colore di ogni pixel è determinato analizzando quelli adiacenti. Per esempio, se si osserva un pixel e si nota che i vicini hanno valori alti, allora, per la sintesi additiva dei colori (visto che si ha una campionatura per componenti RGB) il colore risultante sarà il bianco. La numerosa presenza di fotositi

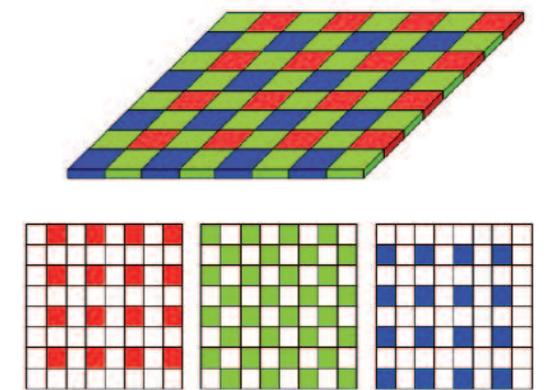


Fig. 3 Pattern di Bayer per la sintesi dei colori in un CCD.

verdi rispetto a quelli rossi o blu è giustificata dalla diversa sensibilità dell'occhio umano che è maggiore alla componente verde, per questo motivo è sempre bene avere più risoluzione di questo canale. Di algoritmi di interpolazione ve ne sono molti ed alcuni estremamente com-

Fig. 4
Schema CCD
trilineare.

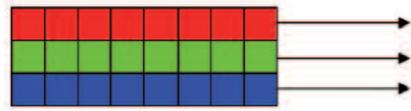
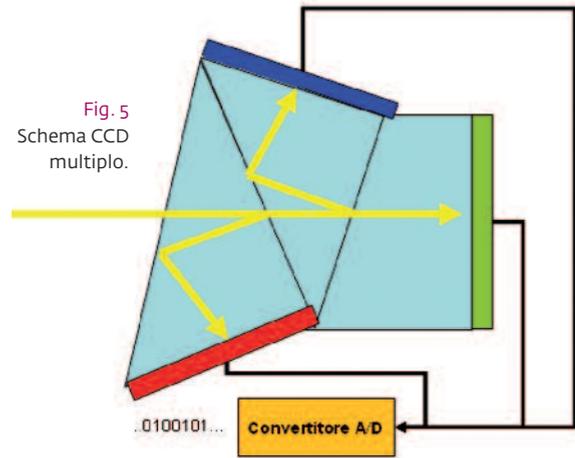


Fig. 5
Schema CCD
multiplo.



pleSSI proprio per determinare al meglio le sottili ombreggiature che servono a costituire la scena ripresa. Le differenze fra questi algoritmi sono solo una delle caratteristiche che distingue la qualità delle varie macchine digitali: l'analisi può avvenire per blocchi di dimensioni differenti (esempio la HP analizza blocchi 9x9) o con fotositi dalla forma spaziale particolare (Fuji utilizza fotoelementi con struttura ottagonale "a nido d'ape") oppure con l'utilizzo di filtri diversi CYGM (ciano, giallo, verde e magenta); in questo caso si ha una maggiore quantità di luce entrante e, di conseguenza, una minimizzazione del rumore (strategia

presente in molte delle macchine Canon). Esistono anche sistemi di acquisizione in cui si sfrutta un allineamento a tre scatti, la sintesi, cioè, di una immagine a colori grazie all'acquisizione di tre esposizioni distinte, una per componente; questo sistema si rifà alla digicromatografia, già usata nell'800, dal fotografo russo Prokudin-Gorskii. Siccome non si utilizza l'interpolazione, negli allineamenti a tre scatti non vi sono artefatti che invece possono incorrere per il sistema ad allineamento singolo (soprattutto in aree a forte contrasto). Però, scattare tre fotografie in successione richiede dei tempi maggiori in cui il soggetto deve essere statico e la luce costante; di conseguenza queste macchine risultano utili per ritrarre oggetti inanimati in uno studio. Le tecnologie viste sono quelle più usate, ma è anche vero che ci sono altri modi per l'acquisizione di informazioni cromatiche e per la realizzazione di CCD, in seguito ne saranno mostrate alcune.

Nella sua forma semplice un sistema ad allineamento lineare consiste in un sensore, con una unica fila di fotositi, che effettua tre distinti passaggi filtrati sull'area dell'immagine. Essendoci soltanto un sensore costituito da una sola fila di fotositi è possibile incrementare la risoluzione anche con costi minimi. Naturalmente, come l'allineamento a tre scatti, quello lineare, sebbene non abbia problemi relativi all'interpolazione cromatica, si presta a lavori realizzati in laboratorio.

Nei CCD trilineari ci sono tre linee di pixel, una per ogni componente colore, che

vengono traslate lungo l'immagine da acquisire (Figura 4). Con ogni allineamento filtrato separatamente, la macchina deve fare soltanto un passaggio sull'area dell'immagine.

Questo tipo di CCD è utilizzato principalmente negli scanner piani e nei dorsi digitali a scansione per le acquisizioni di grande formato. In ogni caso il soggetto della ripresa deve essere immobile, la luce costante per tutto il tempo di esposizione e la griglia di pixel deve essere mossa da un braccio elettromeccanico per garantire una acquisizione completa e regolare.

Alcune macchine digitali utilizzano allineamenti multipli, cioè una serie di CCD distinti disposti in maniera opportuna, ognuno in grado di acquisire una componente di colore specifica. Quando la luce penetra all'interno della macchina viene passata attraverso un tri-prisma che la suddivide in tre fasci-copia. Ogni copia viene indirizzata ad uno specifico CCD che è filtrato per uno specifico colore (Figura 5). In alternativa è possibile utilizzare tre prismi con due filtri dicroici (rosso/verde e blu/giallo) che separano il fascio di luce in tre copie direttamente relative alle componenti rosso, verde e blu. Le macchine ad allineamenti multipli possiedono la flessibilità di un sistema ad allineamento singolo ma senza alcun problema legato all'interpolazione. Avendo, però, il triplo di CCD rispetto ad una macchina ad allineamento singolo, spesso si va incontro a costi elevati.

Nel CCD Full-Frame tutta l'area foto-

sensibile è adibita a raccogliere l'intensità luminosa (Figura 6). La carica viene poi traslata verso il fondo, dove si trova un registro seriale, per essere accumulata ed in seguito inviata per essere interpretata. La lettura dell'immagine, al termine dell'esposizione, avviene mediante trasferimento progressivo verticale del contenuto delle righe della matrice del sensore dalla prima riga all'ultima, dalla quale il segnale è prelevato e campionato numericamente. Tutte queste fasi sono scandite da temporizzatori sequenziali e paralleli. Il Full Frame, pertanto, necessita di otturatore meccanico per bloccare la luce che colpisce il sensore durante il tempo di traslazione delle cariche verso il registro di lettura. I tempi, infatti, non sono molto rapidi (nell'ordine di 10-1 sec) e per questo si potrebbero registrare e raccogliere, durante la traslazione, ancora fotoni, quindi nuova carica, alterando l'immagine e provocando distorsioni indesiderate.

Il CCD Frame Transfer è diviso in due parti contenenti lo stesso numero di fotositi. Una parte è addeba all'acquisizione della luce, l'altra, oscurata, è addeba al trasferimento della carica al sistema di elaborazione dati (Figura 7). Quando avviene l'esposizione, la parte fotosensibile salva le cariche e le trasla verso la parte oscurata liberando così il sensore per un altro scatto quasi istantaneamente e permettendo intanto alla parte oscurata di gestire la composizione dell'immagine. Il trasferimento delle cariche da una parte all'altra del sensore è molto ve-

loce (nell'ordine di 10-4 sec) consentendo così di rinunciare alla presenza dell'otturatore e offrendo l'opportunità di dosare con l'elettronica i tempi di esposizione con una precisione equivalente al tempo di trasferimento della carica.

In questo caso vi è una disposizione in verticale dei registri di scorrimento (shift) delle cariche elettriche accumulate durante il processo di integrazione. Ad ogni colonna di elementi fotosensibili è associata una colonna adiacente di elementi (i registri) che godono in generale delle stesse proprietà e tecnologia: in sostanza il sensore comprende un'area oscurata ed una esposta (Figura 8). Alla fine del processo di integrazione le cariche accumulate negli elementi fotosensibili sono istantaneamente trasferite nei registri verticali per poi essere traslocate, riga per riga, nel registro orizzontale di lettura del segnale di uscita del CCD. Così facendo si ha una rapidità di trasferimento delle cariche al di fuori dell'area esposta come nel Frame Transfer. Lo shift delle cariche dai pixel ai registri verticali di lettura, infatti, dura poco più di un milionesimo di secondo. Lo svantaggio sta nel fatto che l'area del pixel è in gran parte, anche oltre la metà, occupata dall'area oscurata riducendo così drasticamente la quantità di luce trattata dall'area fotosensibile. La soluzione sta nell'utilizzare delle microlenti sovrapposte ad ogni pixel in modo da convogliare tutto il fascio di luce in arrivo verso le aree fotosensibili. Anche per questa tecnologia si hanno notevoli vantaggi per

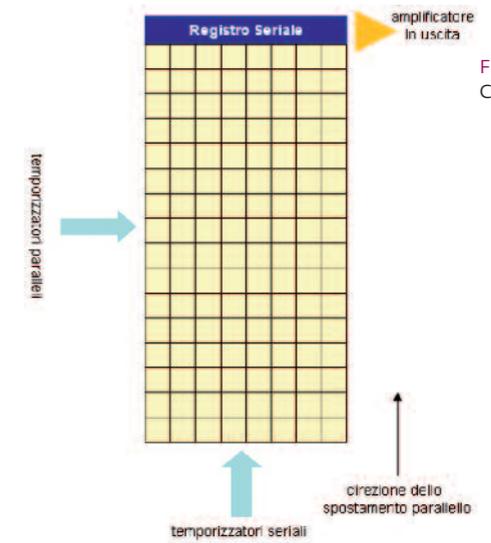


Fig. 6
CCD Full frame.

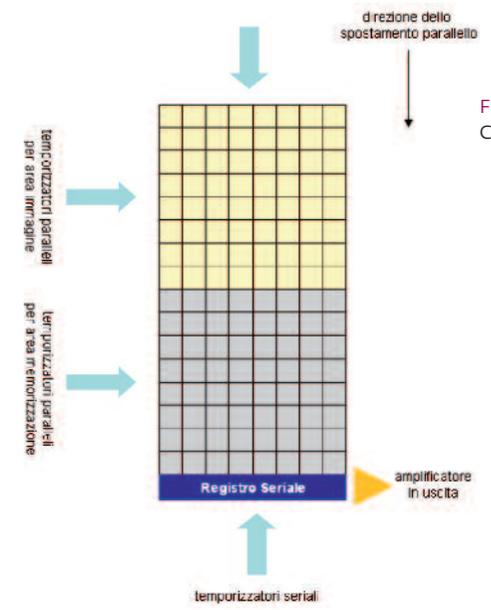
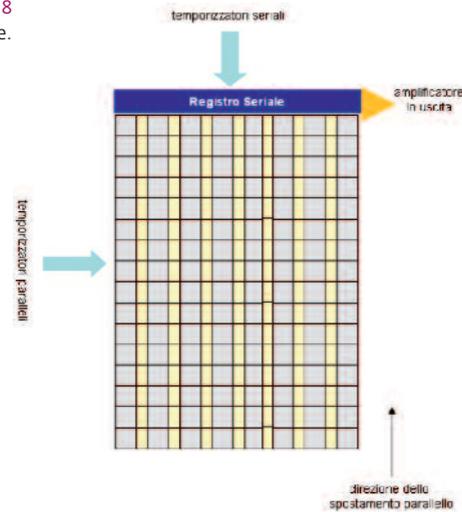


Fig. 7
CCD Frame Transfer.

Fig. 8
CCD Interline.



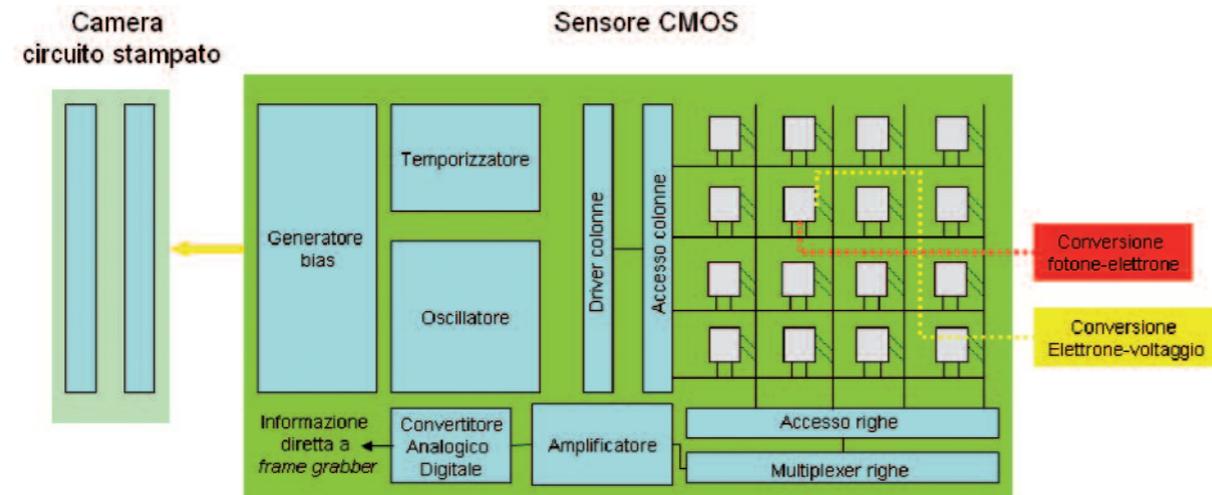
quanto riguarda scatti a raffica. Infine, le camere dotate di CCD *Interline Transfer* non hanno bisogno di disporre di otturatori elettromeccanici, in quanto sono, di per sé, dotate di efficientissimi e velocissimi otturatori elettronici.

I sensori basati su semiconduttore all'ossido di metallo complementare, CMOS, sfruttano la stessa tecnologia utilizzata per la realizzazione di microprocessori e memorie a stato solido. Un sensore CMOS può essere ricondotto ad un mosaico di elementi fotovoltaici (i pixel) che filtrano ciascuno uno dei tre canali dello spettro RGB. Quando un pixel viene stimolato dalla luce appartenente all'ampiezza di spettro che è destinata a coprire si produce una differenza di potenziale in un fotodiode. Per selezionare quale dei tre colori fondamentali andrà a

colpire il singolo sensore sopra ognuno di essi vi è un filtro che lascia passare solo il colore desiderato. Come i sensori CCD, anche i CMOS usano una matrice di fotodiodi per convertire il segnale luminoso in una carica elettrica che viene accumulata in piccoli elementi contenitivi (condensatori). Il segnale viene accresciuto da un amplificatore che, nel caso del CMOS, è presente su ciascun pixel. La carica è così scansionata prima ancora di essere trattata dai chip addetti all'elaborazione dell'immagine (Figura 9).

Nel 2007 si è avuto un miglioramento in questo campo grazie l'introduzione di una nuova tecnologia: il Foveon. Nel Foveon ogni fotosito è composto da una superficie di silicio di quattro micrometri opportunamente trattata. Questa superficie consente di filtrare le diverse lun-

Fig. 9
Struttura generica di un CMOS.



ghezze d'onda al variare della profondità. Mentre nel CMOS e nel CCD pixel contigui raccolgono diverse lunghezze d'onda, perdendo quindi parte dell'informazione in arrivo al sensore, nel Foveon la luce viene sfruttata appieno (Figura 10) senza bisogno di interpolazione per "prevedere" quali saranno i colori in ogni pixel.

In Figura 11 è riprodotta una sezione di un pixel in un sensore in cui è chiaro vedere come le lunghezze d'onda vicine all'ultravioletto (blu nel nostro caso) sono quelle più corte e vengono raccolte in superficie. La luce verde e rossa, con maggiore lunghezza d'onda, viene raccolta a profondità maggiore. Nella figura, inoltre, lo zero di riferimento è la riga viola in superficie, mentre i tre strumenti rotondi sono delle rappresentazioni dei voltmetri che misurano la differenza di potenziale tra la superficie e i vari strati. A questo punto si ha già la griglia di immagine che negli altri sensori richiedeva diversi passaggi e algoritmi di interpolazione.

Questo tipo di tecnologia favorisce un'acquisizione con colori fedeli, chiari e

nitidi (Figura 12 sinistra), permette una riduzione degli artefatti cromatici in trame (Figura 12, centro) ed elimina le aberrazioni che si creano in situazione di forte contrasto (Figura 12 destra), tipiche dei documenti bitonali (fax, lettere, ecc.) [Foveon, 2009].

3.5.b
Errori di acquisizione

Nella fotografia digitale la presenza di rumore (*noise*) all'aumentare della sensibilità è sempre stato un problema inevitabile. Nei sensori CCD il rumore può essere causato dal ripetuto passaggio di carica da un pixel all'altro. La carica infatti non riesce a passare sempre integra da una fila all'altra per via di difetti intrinseci ai materiali di progettazione stessi (la minima resistenza da parte dei conduttori, la non assoluta precisione da parte dei controllori e dei timer del processo, le cariche residue nei pixel). La dispersione delle cariche lungo i vari salti costringe il lettore alla fine della griglia ad abbassare la soglia per individuare se ad un pixel

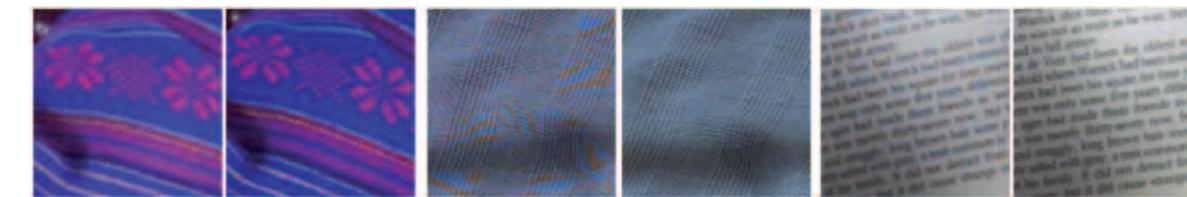


Fig. 12
Esempi di acquisizione con CCD tradizionale (sinistra) e Foveon (a destra). La figura è stata ricavata dagli esempi presenti nel sito della Foveon (www.foveon.com).

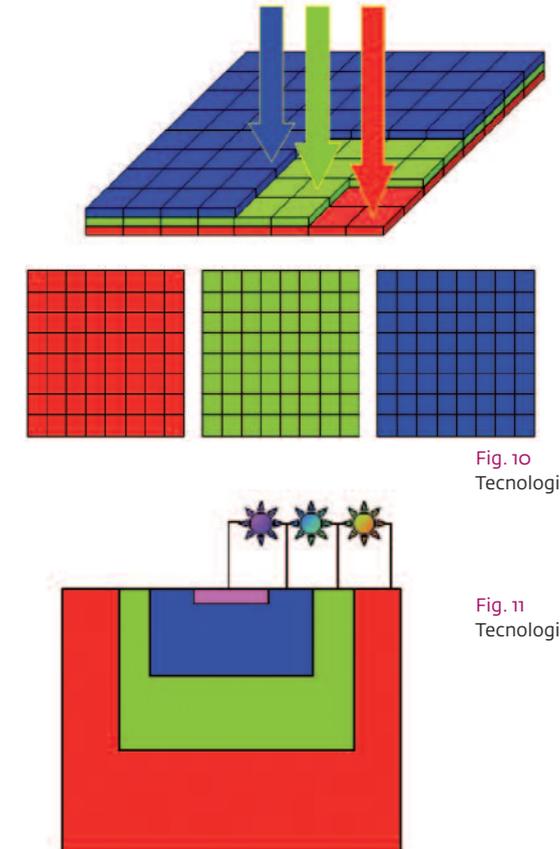


Fig. 10
Tecnologia Foveon.

Fig. 11
Tecnologia Foveon.

è arrivato il fascio luminoso in modo tale che, in condizioni di poca luce, vi sia una lettura di pixel esposti anche quando non lo sono.

Altro problema dei sensori CCD e CMOS è la deriva termica. Dovendo restare acceso per molto tempo (per usare il mirino elettronico nelle compatte, per esporre con tempi lunghi nella fotografia astronomica) il sensore (che è dotato di componenti elettrici attivi che si occupano dei trasferimenti delle cariche) comincia a scaldarsi causando una produzione di cariche termiche. Attualmente i moderni CCD hanno una produzione di cariche termiche piuttosto bassa anche a temperatura ambiente. Questi CCD, raffreddati intorno ai 30°C, producono meno di un elettrone al secondo, poco più di 200 elettroni in una posa di cinque minuti. Ciò da luogo ad un rumore termico di meno di 15 elettroni, quasi uguale al rumore di lettura dovuto all'elettronica della camera CCD, che è un valore non significativo. Nel Foveon il problema rumore è particolarmente importante: dovendo attraversare strati di silicio la luce che arriva ai vari sensori alle diverse profondità è fortemente attenuata. Anche qui il sensore di immagine, in caso di poca luce, darà una lettura errata dell'informazione in arrivo dai pixel (nei primi sensori di questo tipo la sensibilità ISO non raggiungeva valore superiore a 400).

Altro problema si presenta qualora un fotosito venga colpito da troppa luce, questo può influenzare i fotoelementi adiacenti. Se il software della macchina

digitale non è sufficientemente capace di gestire questo fenomeno si vedrà un effetto *blooming*, cioè macchie di colore e chiazze luminose nell'immagine finale. L'effetto blooming capita più spesso con quei CCD più piccoli e con quelli ad alta risoluzione, perché i fotositi sono in posizione più ravvicinata fra loro.

A questi si aggiungono problemi legati a pixel caldi o freddi cioè quelli che hanno rispettivamente una corrente di buio (*dark current*) elevata rispetto alla media o meno; la corrente di buio è la corrente che passa continuamente sul sensore di ripresa. Questo è un parametro influenzabile dai sensori, dalla corrente passante e dalla temperatura. Tale fenomeno è riproducibile: in identiche condizioni di temperatura e di durata di una esposizione un dato sensore genera sempre lo stesso numero di elettroni a meno di un fattore di dispersione statistica (Rumore Termico), variabile a seconda del tipo di sensore impiegato. La quantità di cariche elettriche generate è quasi proporzionale al tempo di integrazione. La dark current prodotta dipende fortemente dalla temperatura del sensore: la sua intensità diminuisce in genere di un fattore 2 per ogni 6°C in meno di temperatura del sensore. Per questa ragione essa viene anche chiamata corrente termica (*thermal current*) e le cariche prodotte si chiamano cariche termiche (*thermal charges*). Questo problema può essere eliminato se si opera in un modo appropriato, magari utilizzando dei sistemi di raffreddamento adeguati. Un ulteriore approccio è quello di agire di-

rettamente sull'immagine prodotta. Un istante prima di scattare la foto vera e propria il dispositivo cattura un'immagine ad otturatore chiuso: non arrivando luce al sensore l'unica cosa che esso trasmetterà all'elaboratore sarà il rumore. Sottraendo tale immagine contenente una "mappa" del rumore allo scatto vero e proprio compiuto in seguito si ottiene una drastica riduzione del rumore.

Inoltre ci possono essere problemi di vignettatura, dovuta all'ottica che tende ad illuminare di più la parte centrale delle zone periferiche con un gradiente circolare (problema noto anche nella fotografia analogica).

Anche l'inquinamento luminoso gioca un ruolo di disturbo notevole: si creano scostamenti luminosi in presenza di forti fonti lucenti.

A tutto ciò vanno aggiunte pratiche di corretta manutenzione: la presenza di polvere e grasso sul sensore, sui filtri o sul sistema ottico crea delle zone buie in quanto blocca parte della luce incidente (per questo motivo, recentemente, sono stati utilizzati filtri elettromagnetici che impediscono al pulviscolo di raggiungere il sensore); l'uso approssimativo porta la rottura di parti meccaniche ed, infine, la presenza di acqua e umidità può provocare danni ai circuiti elettronici [Massey, 1997] [Palmer et al., 2001] [Wells et al., 1994].

Ringraziamenti

Gli autori vogliono ringraziare Margherita, Federica, "Clint" e "Dolly" per i loro commenti ed il prezioso supporto.

Bibliografia

- Buil C.**, 1991. *CCD Astronomy, Construction and use of an astronomical CCD camera*, Willmann-Bell, Richmond, Virginia, USA.
- Boyle W.** and **G. Smith**, 1970. A new semiconductor device concept has been devised which shows promise of having wide application, in *System Technical Journal*. Wiley, Hoboken, New Jersey, USA. Vol. 49, n.4.
- Foveon, 2009, "Foveon technology", www.foveon.com.
- Holst G. C.**, 1998. *Ccd Arrays, Cameras and Displays, SPIE-International Society for Optical Engine*; 2 Sub edition, Bellingham, Washington, USA.
- Leo A., G. Quarra, D. Sarocchi**, 1995. Introduzione storica e descrittiva dei CCD, *Enciclopedia Astronomia Video* - Fabbri Editori, Milano, Italia.
- Lomheim T. S.** and **G. C. Holst**, 2007. CMOS/CCD Sensors and Camera Systems, in *SPIE - International Society for Optical Engine*. Bellingham, Washington, USA.
- Massey P.**, 1997. *A User's Guide to CCD Reductions with IRAF* (National Optical Astronomy Observatories: Tucson). Tucson, Arizona, USA.
- Nakamura J.**, 2005. *Image Sensors and Signal Processing for Digital Still Cameras*, CRC. 1 edition. London, United Kingdom.
- Palmer J.** and **A.C. Davenhall**, 2001. *The CCD Photometric Calibration Cookbook*, Starlink, SC/6.4. Swindon, United Kingdom.
- Wells L.A** and **D.J. Bell**, 1994. *Cleaning Images of Bad Pixels and Cosmic Rays Using IRAF* (National Optical Astronomy Observatories: Tucson). Tucson, Arizona, USA.