

Retina e visione: elogio dell'imperfezione

Seconda parte: *Imperfezioni ottiche, campionamento e "aliasing"*

ANDREA MORIONDO E MARCO PICCOLINO

Nella prima parte del nostro articolo abbiamo preso in considerazione l'organizzazione morfologica e funzionale della retina (e del sistema visivo nel suo complesso), e ci siamo soffermati in particolare a discutere il significato delle connessioni che esistono a vari livelli tra i neuroni visivi vicini (Piccolino e Moriondo 2002). Abbiamo mostrato come queste connessioni, luogo di interazioni "lateral" tra i canali di codificazione e trasmissione dell'informazione visiva, lungi dal degradare l'immagine neurale del mondo esterno, giocano un ruolo fondamentale nei processi attraverso cui il sistema visivo estrae l'informazione ambientale di maggiore rilievo per l'adattamento e la sopravvivenza dell'individuo e della specie. Abbiamo concluso mettendo in evidenza come quella che per lungo tempo era sembrata un'evidente imperfezione del disegno neurale del sistema visivo, di cui era difficile comprendere il significato nell'ambito di una concezione basata sulla "metafora" dell'immagine, è invece espressione di un'organizzazione funzionale particolarmente efficace e adatta alle necessità degli organismi viventi.

V'è un altro tipo di imperfezione a cui abbiamo già accennato, e che vorremmo ora discutere, quella che dipende dalla qualità apparentemente "scadente" del sistema ottico dell'occhio, imperfezione che si traduce in una qualità relativamente mediocre dell'immagine "fisica" che si forma sulla retina.

In effetti, nel confronto con sistemi ottici più sofisticati costruiti dall'uomo, come ad esempio quelli che sono alla base di microscopi e telescopi ottici ad elevate prestazioni, l'occhio apparirebbe a prima vista come progettato da un ingegnere abbastanza rozzo, e costruito con materiali tutto sommato scadenti, inadatti alla formazione di un'immagine nitida e senza distorsioni. Senza entrare troppo nei dettagli, possiamo elencare alcuni di questi difetti dell'ottica visiva, che sono stati riconosciuti già a partire dall'Ottocento, in un'epoca in cui, come sottolineava Helmholtz, ci si aspettava che l'occhio fosse, anche per il suo disegno fisico, un apparato di gran lunga più perfetto degli strumenti costruiti dall'uomo [Helmholtz, 1865-1876 e 1867].

In primo luogo le curvature delle superfici della cornea e del cristallino non sono state corrette per evitare le

cosiddette "aberrazioni di sfericità", aberrazioni che tendono a verificarsi soprattutto per i raggi luminosi non "parassiali", cioè per quei raggi che entrano con angolo relativamente grande rispetto all'asse ottico. Questo provoca aberrazioni che sono particolarmente severe per immagini di oggetti grandi e/o situati alla periferia del campo visivo.

In secondo luogo il sistema ottico dell'occhio presenta notevoli "aberrazioni cromatiche". Questo tipo di imperfezioni sono una conseguenza diretta delle leggi fondamentali della rifrazione, leggi che stabiliscono che, a parità di angolo di incidenza, l'angolo di rifrazione di un raggio luminoso è più piccolo per luci a grande lunghezza d'onda e, viceversa, più grande per luci a lunghezza d'onda corta. Le aberrazioni cromatiche sono la causa di un fenomeno di cui può capitare di fare esperienza nella vita quotidiana, in particolare nei giorni di bel tempo, quando ci accada di osservare i raggi del sole che attraversano una bottiglia o un coccio di vetro. La luce solare, che entrando sulla superficie del vetro appare bianco-gialla (a seconda dell'ora del giorno), si separa, dopo il passaggio attraverso il vetro, in riverberi di vario colore. Se "colpiti dalla curiosità del fenomeno" (per usare un'espressione che troviamo a volte negli scritti degli scienziati), ci soffermassimo a manipolare in vario modo gli oggetti di questa casuale osservazione (oppure se facessimo lo sforzo di ricordare le leggi della rifrazione che di solito si imparano - e si insegnano - nella scuola superiore), allora potremmo notare che i raggi azzurro-verdi tendono a convergere più vicino al vetro, mentre l'immagine del disco solare corrispondente ai raggi rossi si forma più lontano. Nel caso dell'occhio, a causa delle aberrazioni cromatiche, accade che l'immagine retinica corrispondente alle componenti azzurre della luce solare si formi "davanti" alla retina (cioè verso l'umor vitreo, la sostanza gelatinosa che riempie la cavità oculare) quando, come di solito avviene, il sistema ottico mette a fuoco sulla retina i raggi luminosi di colore giallo-arancio. Per dare un'idea quantitativa delle aberrazioni cromatiche, possiamo dire che un individuo normale dal punto di vista ottico (cioè "emmetrope"), sarebbe "miope" di circa una diottria per la luce blu allorché mette a fuoco le lunghezze d'onda più grandi.

A partire dall'Ottocento l'uomo ha appreso come correggere negli strumenti ottici le aberrazioni cromatiche. Una possibilità è quella di costruire le lenti "composte" utilizzando materiali con indici di rifrazione diversi (come accade per esempio nella costruzione dei cosiddetti "doppietti ottici"). Ma l'"architetto" che ha disegnato il nostro occhio sembra non aver preso in considerazione questo accorgimento, e il nostro meccanismo visivo non risulta essere corretto neppure per questo tipo di aberrazioni, a differenza di quanto accade per i buoni microscopi e i buoni telescopi, o anche semplicemente per le buone macchine fotografiche. A proposito di telescopi, è forse interessante osservare qui come Newton, il primo a dimostrare, con uno di quegli esperimenti che meritano, come si dice, "di far epoca negli annali della scienza", che la luce bianca del sole è in realtà composta da molti colori, riuscì a risolvere il problema delle aberrazioni ottiche nei telescopi. Non sapendo come affrontare direttamente il problema del differente indice di rifrazione corrispondente alle diverse componenti dello spettro solare, il grande scienziato inglese ricorse all'artificio di costruire il telescopio utilizzando specchi riflettenti invece che vetri trasparenti. Con gli specchi infatti il problema non si pone perché l'angolo di riflessione non varia al variare della lunghezza d'onda della luce.

L'accento ai vetri trasparenti ci porta a considerare un altro aspetto della qualità relativamente scadente dell'ottica dell'occhio. I materiali che la luce deve attraversare per andare a formare l'immagine sulla retina non sono perfettamente trasparenti, e questo dipende soprattutto dalla presenza di piccole disomogeneità al loro interno. Di questo ci si può rendere conto guardando l'azzurro del cielo o una superficie uniformemente chiara, perché allora ci capita di vedere diversi corpuscoli che si muovono al muoversi del nostro sguardo. La non perfetta trasparenza dei mezzi diottrici dell'occhio dipende almeno in parte dai processi che hanno portato alla loro formazione (per esempio alcuni degli elementi che creano disomogeneità nell'umor vitreo sono il residuo di vasi sanguigni che si sono atrofizzati nel corso dello sviluppo embrionale). Anche la struttura fibrillare del cristallino, dovuta alla disposizione ordinata di elementi cellulari e di matrice extracellulare, contribuisce a questo tipo di aberrazione ed è in parte responsabile dell'aspetto sfrangiato "a stella" col quale ci appaiono molti corpi celesti tra cui, appunto, le stelle.

La "imperfetta" trasparenza dei mezzi ottici dell'occhio rappresenta una condizione fisiologica, ma il fenomeno può assumere carattere patologico. L'esempio più comune in cui questo accade è la cataratta, una diminuzione della trasparenza del cristallino (particolarmente accentuata nella banda blu-verde dello spet-

tro), che può arrivare a compromettere in modo serio la capacità visiva (nella cataratta il cristallino assume una tinta giallastra). La cataratta tende a comparire soprattutto nell'età avanzata, e vi sono soggette in modo particolare le persone che si espongono eccessivamente alla luce solare intensa o ad altre radiazioni luminose. A questo proposito ricordiamo qui come ne fosse affetto il grande pittore francese Claude Monet (autore, nel 1873, di "*Impression soleil levant*" il quadro che diede il nome alla pittura impressionista): Monet amava passare molto tempo a dipingere all'aperto ("*en plein air*") e quindi fu particolarmente esposto agli effetti negativi dell'eccessiva irradiazione solare. Si ritiene che nell'età avanzata la sua pittura, ed in particolare i toni cromatici delle sue composizioni, risentissero in modo importante delle modificazioni percettive dovute allo sviluppo di una cataratta molto severa (che arrivò a renderlo quasi cieco obbligandolo infine a sottoporsi, nel 1923, ad un intervento chirurgico). Tra i dipinti di Monet in cui è sembrato di poter notare in modo particolarmente evidente questa relazione tra caratteristiche della pittura e sviluppo delle alterazioni percettive riconducibili alla cataratta vi sono i quadri a grande formato della serie "Ninfee" che l'artista dipinse in varie occasioni a partire dal 1900 fino alla sua morte nel 1926.

Un'altra causa di imperfezione dell'immagine retinica è rappresentata dai processi di diffrazione che si verificano in modo particolare al passaggio della luce attraverso il foro pupillare, e sono la conseguenza della natura ondulatoria della luce. Nell'ottica "geometrica" si trascura di solito il fatto che la luce si propaga sotto forma di oscillazioni di lunghezza d'onda variabile tra 400 e 700 nanometri (un nanometro corrisponde ad un milionesimo di metro, e luci con bassa lunghezza d'onda appaiono in circostanze normali come violetto-azzurre, mentre le luci a grande lunghezza d'onda appaiono rosse). Queste oscillazioni non si propagano in modo rigorosamente rettilineo come fanno i raggi geometrici con i quali di solito si illustra il cammino della luce nei diagrammi ottici. Nel calcolare le immagini in un sistema ottico, le predizioni che risultano dall'ottica geometrica sono di solito abbastanza precise tranne nei casi in cui la luce debba passare per fori molto ristretti o incontri oggetti molto piccoli (per inciso è conseguenza di processi di diffrazione la ragione del fatto per cui un microscopio ottico non può risolvere immagini di oggetti di dimensioni inferiori a circa 200 nanometri).

Per quanto riguarda l'occhio, la diffrazione diventa via via più importante come causa di imperfezione ottica a misura che il foro pupillare si restringe. I suoi effetti si fanno più evidenti quando l'illuminazione ambientale diviene più intensa, perché, per azione del riflesso pupillare, il diametro dell'iride si riduce allorché l'in-

tensità della luce aumenta. A questo proposito notiamo che per quanto riguarda la dipendenza dal diametro pupillare, le aberrazioni dovute ai processi di diffrazione dipendono da questo parametro in maniera opposta rispetto alle aberrazioni cromatiche e di sfericità. Queste ultime infatti diventano più importanti quando il foro pupillare si allarga (questo avviene in condizioni di bassa illuminazione ambientale).

Tra le cause delle imperfezioni fisiche potremmo anche considerare qui i movimenti degli occhi e in particolare quei piccoli movimenti involontari a cui abbiamo fatto cenno nella prima parte di questo articolo (“micronistagmo”). A seguito di questi movimenti, che hanno, come abbiamo detto, una frequenza di circa 80 oscillazioni al secondo, avviene che l'immagine retinica non sia mai perfettamente immobile nell'ambito temporale necessario ai fotorecettori per generare la risposta alla luce (tempo che è di circa 20 millisecondi quando la luce è forte, ma può superare i 200 millisecondi a basse intensità luminose). Se da una parte il micronistagmo contribuisce ad impedire la perdita di visibilità che si verificherebbe per immagini retiniche perfettamente stazionarie, d'altra parte esso può alterare la qualità delle immagini neurali a livello dei fotorecettori. E' facile renderci conto del perché questo possa avvenire; basti pensare a cosa succederebbe se, nel fare una foto utilizzando un tempo di esposizione relativamente lungo (da 1/60 di secondo in su), facessimo tremolare la mano con la quale manteniamo l'apparecchio fotografico.

Questa breve analisi delle imperfezioni ottiche dell'occhio potrebbe lasciarci interdetti, convinti, come spesso siamo, del fatto che l'evoluzione (o, se volete, l'*Architetto supremo*), di solito fa le cose abbastanza con cura, e certo non si scoraggerebbe, se lo volesse, dinanzi al compito di trovare accorgimenti per superare le difficoltà fisiche che gli organismi si trovano ad affrontare nel loro rapporto con l'ambiente. Cosa dire poi dell'occhio, e più in generale del sistema visivo, che rappresenta forse l'apparato sensoriale in cui il sistema nervoso dei primati, e dell'uomo in particolare, sembra aver investito la maggior quantità di risorse (si pensi in proposito che circa una metà del nostro cervello riceve in modo diretto o indiretto input visivi).

Gli studi moderni, fondati sul concetto di informazione e basati sull'uso di reticoli spaziali sinusoidali per lo studio della performance visiva (si veda il nostro precedente articolo), permettono di gettare una luce nuova anche su questi aspetti del sistema visivo, rivelando, al di là delle apparenti imperfezioni, la straordinaria perfezione del disegno globale dell'occhio.

Cercheremo ora di capire come sia possibile che un'ottica “scadente” possa paradossalmente risolversi in una performance più efficace del sistema visivo. A

questo scopo dovremo considerare alcuni aspetti della scienza dell'informazione, anche se lo faremo senza entrare troppo in dettagli tecnici.

Un teorema fondamentale della teoria della comunicazione dice che per codificare in modo adeguato un'onda sinusoidale, avendo a disposizione un sistema formato da elementi di campionamento discreti (cioè un sistema digitale), è necessario disporre di almeno due elementi di codificazione (o campionamento) per ogni ciclo della sinusoide. Se applichiamo questo teorema alle immagini retiniche, allora dobbiamo tenere conto che nella fovea, la zona centrale della retina, quella che ci permette la massima capacità di risoluzione spaziale, vi sono in media due fotorecettori (coni) per ogni cinque micron di segmento retinico (un micron corrisponde, come sappiamo, ad un millesimo di millimetro). Questo significa che i coni della retina non potrebbero codificare accuratamente immagini sinusoidali con periodo spaziale (a livello retinico) inferiore a circa cinque micron. Traducendo queste dimensioni da grandezze retiniche a grandezze dello spazio visivo possiamo dire che, se come negli esempi finora considerati, l'osservatore si ponesse a circa 60 centimetri di distanza da uno schermo, i coni non potrebbero codificare in modo appropriato sinusoidi spaziali il cui periodo (o larghezza di banda) fosse, sullo schermo, inferiore a circa un sessantesimo di centimetro.

Se nell'immagine visiva esistessero sinusoidi a banda più stretta, si potrebbe verificare un errore di “sotto-campionamento”, indicato come “*aliasing*”, in grado di compromettere in modo importante la capacità visiva, perché farebbe apparire immagini senza corrispettivo reale (nella scena visiva) in grado di disturbare la funzione percettiva. Come discuteremo in dettaglio fra poco, sinusoidi spaziali a bande molto strette sono in effetti presenti nelle immagini esterne del nostro mondo visivo quando ci troviamo dinanzi a oggetti o disegni dai contorni nitidi, e quindi esiste, almeno in linea di principio, la possibilità di insorgenza di fenomeni di aliasing. Se sinusoidi spaziali a banda molto stretta fossero presenti anche nelle immagini retiniche allora per effetto dell'aliasing la percezione visiva apparirebbe fortemente disturbata dalla comparsa di effetti di scintillazione molto fastidiosi. Fortunatamente però questa condizione non si verifica di fatto nella vita ordinaria perché il sistema visivo ha messo a punto efficaci accorgimenti per contrastare gli effetti del sottocampionamento. Questi accorgimenti sfruttano, come ora discuteremo, le apparenti imperfezioni dell'occhio, eliminando dalle immagini retiniche i dettagli più fini e le sinusoidi più spaziali più fitte, cioè quegli aspetti dell'immagine che non possono essere adeguatamente campionati dal mosaico dei fotorecettori.

In condizioni sperimentali è possibile produrre aliasing spaziale nella percezione visiva utilizzando metodiche che permettono di generare sinusoidi spaziali a banda molto stretta, aggirando in qualche modo alcune delle limitazioni ottiche dell'occhio [Campbell e Green 1965]. Queste metodiche sono basate su tecniche sofisticate ed anche potenzialmente pericolose (utilizzano l'interferenza di raggi laser) e non si prestano quindi per una dimostrazione facile, che possa essere eventualmente utilizzata anche a scopo didattico. E' possibile però dare un'idea delle condizioni in cui si produce l'aliasing spaziale facendo ricorso ad esempi che ci vengono posti, si potrebbe dire, "sotto gli occhi" dall'uso ormai tanto frequente dello schermo del computer per la visualizzazione di immagini.

Può capitare a volte di imbattersi in uno strano fenomeno quando si tenta di visualizzare sullo schermo di un computer un'immagine ad alta definizione (per esempio un'immagine che abbiamo acquisito con uno scanner utilizzando una risoluzione molto alta, 600 o 1200 punti per pollice o, come si dice, dpi – cioè "dots per inch"). In queste circostanze può accadere infatti di trovarci inaspettatamente dinanzi un'immagine pesantemente alterata dalla presenza di chiazze chiare o scure (o variamente colorate se l'immagine originaria è a colori) disposte secondo un reticolo bidimensionale. Nella figura 1 A questo tipo di aliasing appare nella visualizzazione di un ritratto di Hermann von Helmholtz, il grande scienziato tedesco che affrontò nei suoi classici studi di ottica fisiologica anche le problematiche relative ai limiti della risoluzione spaziale nelle

immagini retiniche [Helmholtz, 1867]. Il fenomeno rappresenta un caso di aliasing dovuto alla risoluzione relativamente bassa dei comuni schermi dei computer (di solito 75 dpi) rispetto alla risoluzione dell'immagine da visualizzare. Le chiazze non appaiono infatti se le immagini vengono acquisite a risoluzione relativamente bassa (e sono quindi prive di dettagli spaziali troppo fini, vedi Fig. 1 B) o se si usano schermi a definizione molto alta. Esse non appaiono di solito neppure nelle immagini stampate, perché le stampanti che noi usiamo normalmente hanno risoluzioni molto più elevate degli schermi (600 dpi ed oltre).

Dunque, in sistemi di visualizzazione basati su un campionamento di tipo digitale, vi è il rischio di pesanti distorsioni quando nell'immagine vi siano dettagli spaziali troppo fini e tali da eccedere il limite di campionamento del sistema. Questo limite, come abbiamo accennato sopra, è quello per cui devono esservi almeno due punti di campionamento per ogni ciclo delle sinusoidi spaziali a banda più stretta (o a frequenza più elevata) presenti nell'immagine (limite di Nyquist). Dal momento che, come abbiamo accennato sopra e meglio discuteremo in seguito, nelle immagini esterne del nostro mondo visivo vi possono essere sinusoidi a banda spaziale molto stretta, è necessario far ricorso ad accorgimenti tali da evitare il rischio di aliasing. A riguardo conviene considerare innanzitutto le strategie utilizzate dagli ingegneri delle comunicazioni che si trovano spesso ad affrontare il fenomeno dell'aliasing nei sistemi di trasmissione digitale di segnali, per il numero necessariamente finito dei punti di campiona-

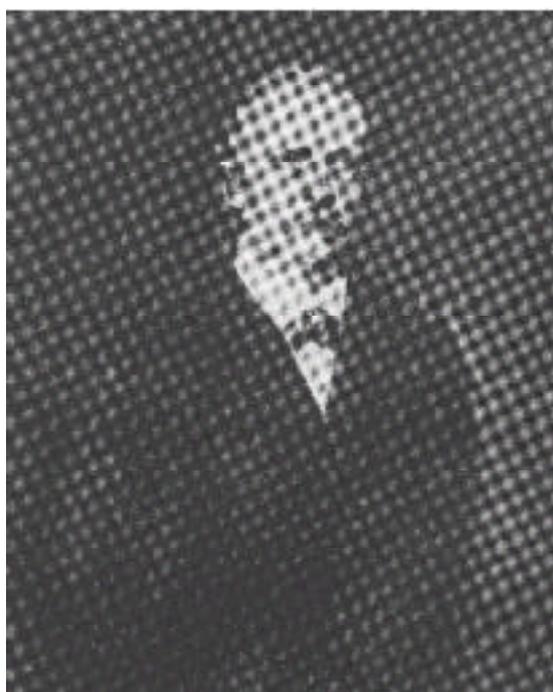


Fig. 1. Ritratto di Hermann von Helmholtz. In A il ritratto è stato acquisito con uno scanner utilizzando una risoluzione elevata (600 dpi) mentre in B la risoluzione utilizzata è stata di soli 100 dpi. Il reticolato a chiazze chiare e scure che appare in A è dovuto all'aliasing, conseguente al sottocampionamento dell'immagine che si è verificato in queste circostanze.

mento disponibili nelle linee di trasmissione. Di solito l'aliasing viene evitato facendo ricorso a opportuni filtri in grado di eliminare le componenti dei segnali a frequenza troppo elevata, che supererebbero il limite di Nyquist del sistema. Il buon ingegnere calcola con accuratezza il tipo di filtri da utilizzare. Se infatti il filtro non riuscisse ad eliminare efficacemente le sinusoidi a frequenza alta, allora l'aliasing sarebbe attenuato ma non eliminato del tutto. Se invece il filtro eliminasse, oltre alle sinusoidi "disturbanti", anche una parte delle sinusoidi a frequenza bassa (tali da poter essere codificate e trasmesse in modo efficace dal sistema disponibile), allora si avrebbe una inutile perdita di informazione e una conseguente degradazione della qualità del messaggio trasmesso.

Se ad un ingegnere esperto nella trasmissione di immagini digitali chiedessimo di suggerirci un modo per evitare l'aliasing nella retina, quasi certamente egli, dopo aver esaminato il problema, ci suggerirebbe di eliminare dall'immagine retinica, tutte le sinusoidi spaziali con larghezza di banda uguale o inferiore a 5 micron a livello del fondo dell'occhio (che nello spazio visivo corrispondono, come abbiamo già osservato, a sinusoidi di larghezza di banda di circa $1/60$ di centimetro se osservate dalla distanza di 60 centimetri). Un ingegnere moderno penserebbe forse che il modo migliore per far questo sarebbe applicare all'immagine un algoritmo opportuno (di quelli magari facilmente implementabili nei sistemi elettronici) in grado di eliminare le sinusoidi spaziali a frequenza troppo elevata (magari dopo aver trasformato l'immagine ottica in immagine elettronica in modo da renderla adatta al filtraggio digitale).

Un ingegnere meno moderno, e più saggio forse, cercherebbe di ottenere lo stesso effetto in un modo più semplice ed economico, utilizzando le risorse e gli accorgimenti facilmente disponibili in un ambiente (quello dell'occhio, dei suoi mezzi ottici, dei suoi umori acque e vitreo, delle sue cellule nervose) che non sembra prestarsi tanto immediatamente alle manipolazioni dei dati rese possibili della moderna elettronica digitale. Questo ingegnere "saggio" ci suggerirebbe molto probabilmente di rendere l'ottica dell'occhio giusto un poco imperfetta in modo tale da eliminare dall'immagine retinica le sinusoidi troppo fitte (che non potrebbero essere codificate efficacemente dai fotorecettori per il loro numero necessariamente limitato), lasciando invece le sinusoidi a banda più larga che, come vedremo, sono più ricche di informazione rilevante per la nostra sopravvivenza in circostanze ordinarie (un'ottica imperfetta degrada infatti più grossolanamente le sinusoidi a banda stretta che quelle a banda larga). Quello che il saggio ingegnere proporrebbe è proprio ciò che avviene nel nostro occhio in conseguenza di quella qualità apparentemente "sca-

dente" dell'apparato ottico sulla quale ci siamo a lungo soffermati. L'imperfezione sembra in effetti calcolata, come vedremo, per eliminare dall'immagine ottica quelle componenti sinusoidali in grado di provocare il fenomeno dell'aliasing (e cioè le sinusoidi la cui larghezza di banda è inferiore a circa 5 microns sulla retina, responsabili dei dettagli estremamente fini dell'immagine), ma non le sinusoidi con banda medio-larga. In questo modo la nostra visione di oggetti a contorni molto nitidi o di pattern a elementi molto fitti non viene disturbata dall'aliasing, senza che per questo si abbia una perdita significativa di informazione spaziale rilevante.

Per approfondire la discussione su questo argomento bisogna considerare ora le ragioni per cui sinusoidi spaziali a banda molto stretta possono essere presenti nel nostro mondo visivo, in particolare, come abbiamo detto, in immagini che contengono contorni molto definiti dovuti a variazioni molto brusche di luminosità e/o di colore. Sebbene la cosa possa sembrare tutt'altro che intuitiva (le immagini della vita reale non sembrano presentare quelle caratteristiche di periodicità spaziale che caratterizzano le sinusoidi a banda stretta - o larga - che siano), è possibile dimostrare in modo rigoroso la presenza di sinusoidi nel nostro mondo visivo abituale - ed in particolare di sinusoidi a banda stretta nelle immagini a contorni nitidi. Prendendo l'espressione da Alessandro Volta, che nel 1792 riteneva di poter spiegare in modo semplice alcune sorprendenti osservazioni di Luigi Galvani, ci sforzeremo ora di mostrare "come mai questo possa accader e d'onde". A questo scopo faremo ricorso all'analisi di Fourier.

Il teorema di Fourier, su cui questa analisi è basata, rappresenta uno degli strumenti matematico-concettuali più importanti ed efficaci di tutta la scienza occidentale. Lo dobbiamo all'ingegno del barone Jean Baptiste Fourier, scienziato dell'epoca napoleonica, uno dei *savants* che presero parte alla spedizione in Egitto, e, come tanti altri scienziati di quell'epoca affascinante e turbinosa, furono impegnati nelle vicende politiche e amministrative del loro tempo. Tra l'altro Fourier fu anche nominato prefetto da Napoleone, ma, pur assolvendo ai suoi incarichi politico-istituzionali, riuscì a trovare il tempo (e a mantenere la passione intellettuale) per sviluppare geniali elaborazioni matematiche. Egli elaborò il teorema che porta il suo nome all'inizio dell'800 per spiegare i fenomeni di propagazione del calore. Negli ultimi due secoli l'analisi spettrale derivata dagli sviluppi del teorema di Fourier è stata applicata in un numero estremamente grande di settori della scienza e della tecnologia con risultati a volte straordinari.

Prima di discutere la possibile applicazione del teorema di Fourier all'analisi delle immagini visive è bene

riprendere il problema dai suoi principi, e considerarne in primo luogo l'uso nello studio di funzioni di tipo periodico con forme d'onda le più disparate (per esempio onde "quadre", "triangolari", "rettangolari" a "dente di sega" etc. così dette dall'aspetto della loro rispettiva rappresentazione su di un grafico cartesiano). Sulla base del teorema di Fourier è possibile scomporre una determinata onda periodica in una serie di onde sinusoidali (serie o "spettro" di Fourier) le cui frequenze si dimostrano essere multipli interi di un'onda sinusoidale con periodo (e frequenza) uguale a quella dell'onda originaria. Questa onda a frequenza più bassa viene detta "fondamentale", mentre le onde a frequenza via via più elevate sono indicate come armoniche (un termine questo che deriva dal fatto che il teorema di Fourier è stato storicamente molto utilizzato per l'analisi delle onde sonore). Attraverso gli strumenti matematici forniti dal teorema di Fourier è possibile calcolare l'ampiezza e la fase di tutte le onde sinusoidali della serie in cui l'onda periodica di partenza è scomponibile. Per esempio, è possibile dimostrare che un'onda quadra è scomponibile in una serie di onde sinusoidali che hanno frequenza pari a 1, 3, 5, 7 ... n volte la fondamentale ed ampiezza progressivamente decrescente secondo un rapporto inverso rispetto alla frequenza (e cioè 1, 1/3, 1/5, 1/7 e così via) e tutte in fase tra di loro.

Uno dei motivi di interesse del teorema di Fourier è che esso, oltre a permettere di analizzare una funzione nelle sue componenti sinusoidali, si presta anche al-

l'operazione in qualche modo "reciproca", permette cioè di ricostituire la funzione originaria a partire dalla serie delle sue componenti sinusoidali. Esiste in altri termini una relazione biunivoca tra onda originaria e serie delle onde sinusoidali in cui essa è scomponibile, e si indica come analisi di Fourier l'operazione attraverso la quale si passa dall'onda originaria alle sue componenti sinusoidali, e sintesi di Fourier l'operazione reciproca (vedi Fig. 2).

Il teorema di Fourier è applicabile di fatto a tutte le onde periodiche che si incontrano nella realtà fisica. Esso può essere inoltre applicato anche a molti eventi non periodici, con l'artificio matematico di considerare questi eventi come fenomeni periodici a periodo infinitamente lungo. Questo modo particolare di concepire gli eventi non periodici rende ragione del perché l'onda fondamentale della serie di Fourier di un fenomeno aperiodico abbia frequenza infinitamente piccola (tendente cioè a zero). Questo accade in quanto, come abbiamo detto, la fondamentale della serie di Fourier ha una frequenza pari a quello dell'evento originario (che tende a zero nel caso del fenomeno non periodico perché, lo ripetiamo, il suo periodo è infinitamente lungo). Un'altra importante conseguenza è che lo spettro di un evento non periodico risulta essere continuo, costituito cioè da tutte le possibili frequenze: questo accade in quanto la serie di tutte le frequenze multiple di una frequenza infinitamente piccola è una serie continua. Questa caratteristica dello spettro delle funzioni non periodiche rappresenta un'importante

Sintesi di Fourier di un'onda quadra

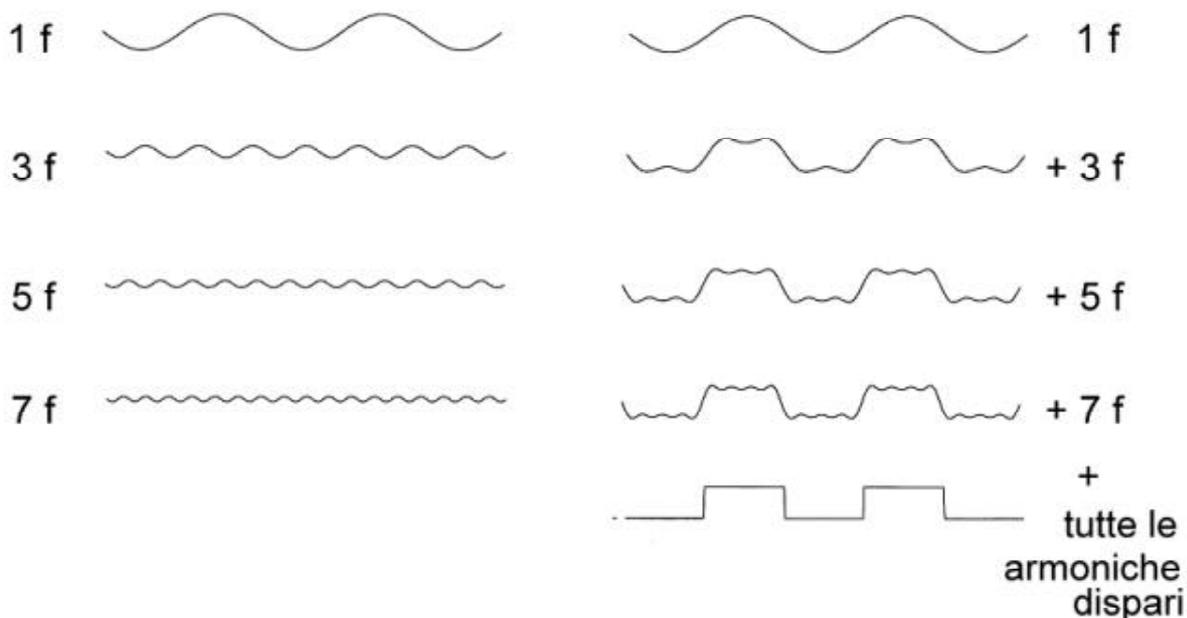


Fig. 2. Sintesi di Fourier di un'onda quadra. A partire da una sinusoida fondamentale il cui periodo è uguale a quello dell'onda quadra da sintetizzare vengono aggiunte in opportuna relazione di fase le componenti armoniche dello spettro di Fourier. A misura che questo viene fatto l'onda risultante appare via via più simile all'onda quadra.

differenza rispetto alle funzioni periodiche che hanno invece uno spettro “discreto”, costituito cioè solo da alcune onde (quelle che sono multipli interi della frequenza della fondamentale che, come abbiamo visto, è uguale, nel caso delle onde periodiche, alla frequenza dell’onda originaria ed è dunque finita).

Sebbene il ragionamento matematico possa portarci a concepire in modo astratto come un evento non periodico sia rappresentabile come evento periodico a periodo infinitamente lungo, tuttavia l’applicazione dell’analisi di Fourier ad eventi non periodici ha conseguenze sorprendenti. Nel caso delle onde sonore si può infatti dimostrare come un suono che duri un istante infinitamente breve sia scomponibile in una serie infinita di onde sonore di tutte le frequenze possibili, onde iniziate all’inizio dei tempi e che non esauriranno mai la loro oscillazione. O, in altri termini, che combinando in modo opportuno lo spettro continuo di tutte le onde sinusoidali possibili (ognuna delle quali corrisponderebbe di per sé ad un suono puro di durata infinita) si può ottenere un suono che esiste solo per un istante infinitamente breve. Questo accade in quanto è teoricamente possibile combinare uno spettro continuo di onde sinusoidali in modo tale che esse si cancellino reciprocamente l’un l’altra (perché risultano in opposizione di fase) lungo un ampissimo arco temporale, tranne che per il brevissimo istante in cui esse sono in fase tra di loro, generando allora il suono di durata infinitamente breve.

Che questo ragionamento non corrisponda ad una pura finzione mentale resa possibile dall’astrazione

matematica può essere mostrato generando un rumore di brevissima durata, ma abbastanza intenso, in presenza di tanti diapason (per esempio percuotendo con un martelletto un corpo abbastanza rigido): tutti i diapason tenderanno allora a vibrare perché entreranno in risonanza con alcune delle infinite sinusoidi di cui l’improvviso rumore prodotto dal martelletto risulta essere composto. Come nel caso di altri tipi di eventi, per quel che riguarda le immagini visive l’analisi (e la sintesi) di Fourier risultano essere relativamente semplici matematicamente nel caso in cui l’onda originaria sia periodica ed unidimensionale. Ciò accade con un pattern spaziale costituito da un profilo di luminosità monocromatico che varia secondo una sola direzione dello spazio in modo ripetitivo. Un pattern di questo tipo è per esempio un reticolo a bande verticali bianche e nere (la maglietta della Juventus, tanto per intenderci, vedi Fig. 3). In questo caso la luminosità varia solo lungo la direzione orizzontale, secondo una funzione che viene indicata matematicamente come “onda quadra”, con salti improvvisi da un minimo di luminosità, in corrispondenza delle bande scure, ad un massimo, in corrispondenza delle bande chiare. Lungo la direzione verticale la luminosità rimane invece costante. Come abbiamo già detto, la serie di Fourier di un’onda quadra è formata unicamente dai multipli dispari di una sinusoidale spaziale verticale della stessa frequenza della onda quadra di partenza (sinusoidale detta fondamentale) con ampiezza progressivamente decrescente secondo un rapporto inverso rispetto alla frequenza (e cioè $1, 1/3, 1/5, 1/7$ e così via) e tutte in fase tra di loro.

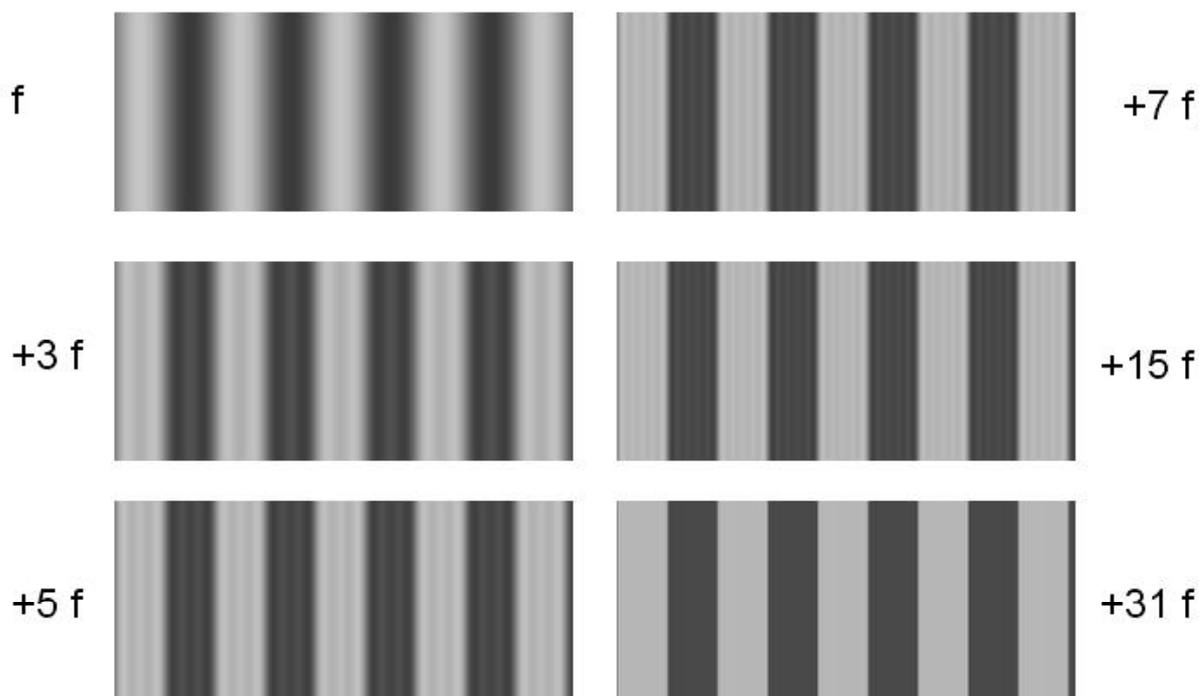


Fig. 3. Un reticolo spaziale ad onda quadra verticale e la sua sintesi di Fourier ottenuta aggiungendo alla sinusoidale fondamentale le armoniche dispari di opportuna ampiezza e relazione di fase fino a quella indicata in corrispondenza di ogni pannello.

E' possibile dare un'idea in qualche modo intuitiva della scomposizione in serie di Fourier di un pattern periodico come l'onda quadra spaziale confrontando l'aspetto dell'onda originaria con i pattern che risultano dalla somma di armoniche di frequenza via via crescente. Iniziamo dal confronto dell'onda quadra originaria con la fondamentale dello spettro di Fourier: notiamo allora una differenza ben evidente in quanto l'onda quadra appare costituita, come abbiamo detto, da transizioni nette tra i soli due valori che la funzione può assumere (minimo e massimo), mentre nella sinusoidale "fondamentale" vi è una transizione continua e dolce di luminosità tra il valore minimo ed il massimo, secondo l'andamento tipico delle funzioni sinusoidali (vedi Fig. 3). La differenza è ancora ben evidente se confrontiamo l'onda quadra con l'onda che risulta dalla combinazione della fondamentale con la terza armonica della serie (cioè con l'onda sinusoidale di frequenza tre volte più grande della fondamentale e di ampiezza tre volte minore). Man mano che aggiungiamo armoniche superiori la differenza diviene però meno percettibile, in particolare se osserviamo il pattern da una distanza sufficientemente grande. Con numero abbastanza notevole di armoniche diventa di fatto impossibile distinguere l'onda quadra originaria dall'onda risultante dalla sintesi delle onde corrispondenti allo spettro di Fourier dell'onda quadra. Questo accade perché l'aggiunta di ogni nuova armonica tende a rendere più "netta" la fase di salita dell'onda sintetizzata (perché tutte le onde sono qui in fase), e al tempo stesso a rendere più piatte le zone di luminosità minima e massima con un'evidente "squadratura" progressiva dell'onda risultante.

Come per le onde quadre, sulla base del teorema di Fourier risulta abbastanza agevole analizzare (o sintetizzare) altre funzioni periodiche monodimensionali, quali ad esempio onde "triangolari", "rettangolari", onde "a dente di sega" e così via, calcolando ampiezza e fase delle loro componenti sinusoidali. Per le onde monodimensionali è anche semplice rappresentare graficamente la serie (o spettro) di Fourier, ricorrendo per esempio ad un grafico cartesiano in cui siano riportate le frequenze delle sinusoidi componenti sulle ascisse, e sulle ordinate le rispettive ampiezze (e fasi). L'analisi di Fourier diventa più difficile per funzioni pluridimensionali non periodiche, come sono la maggior parte delle immagini che si incontrano nel corso della vita reale: questo accade anche perché in nelle immagini della vita reale la luminosità varia di solito in modo complesso e poco prevedibile, sia secondo la direzione orizzontale che verticale, e, oltre alla luminosità, variano di solito anche altri importanti parametri visivi (il colore innanzitutto). Nonostante queste difficoltà è però ora abbastanza semplice analizzare immagini visive complesse soprattutto facendo ricorso a

particolari algoritmi matematici che si prestano facilmente al calcolo automatico con i computer (la cosiddetta "Fast Fourier Transform" per esempio, e le sue numerose derivazioni).

La Fig. 4 mostra un esempio di applicazione dell'analisi di Fourier ad un'immagine bidimensionale in toni di grigio (il ritratto di Andrew Huxley, uno scienziato famoso, che insieme ad Alan Hodgkin ha chiarito proprio cinquant'anni or sono i meccanismi che sono alla base della generazione e propagazione dell'impulso nervoso). Come di solito si fa in casi di questo genere, per illustrare graficamente lo spettro di Fourier di questa immagine abbiamo utilizzato un grafico di tipo polare, in cui sono rappresentate le frequenze più basse nella parte centrale del grafico e le frequenze più elevate a distanze via via più grandi rispetto al centro, con la convenzione di rappresentare l'ampiezza delle diverse componenti con l'intensità luminosa dei punti che corrispondono alle diverse frequenze spaziali. Come si vede dal grafico, l'immagine risulta essere formata da un grande numero di sinusoidi spaziali con tutti i vari orientamenti possibili ed una "densità" spettrale particolarmente elevata nelle regioni centrali (la regione delle sinusoidi spaziali a frequenza più bassa).

E' abbastanza facile manipolare lo spettro di Fourier dell'immagine, come appare nella Fig. 4, e poi sintetizzare l'immagine dallo spettro modificato. Questo permette di valutare il contributo delle diverse frequenze spaziali all'immagine originaria, soprattutto in termini di informazione rilevante per il riconoscimento di oggetti o persone presenti nelle immagini del nostro mondo visivo. Di particolare rilievo per il problema che ci eravamo posti in rapporto ai limiti di risoluzione spaziale del mosaico dei fotorecettori retinici (ed al possibile verificarsi di fenomeni di aliasing in presenza di frequenze spaziali troppo elevate), è il contributo delle frequenze spaziali superiori a 60 cicli per grado di angolo visivo. Se noi rimuoviamo da un'immagine le sinusoidi spaziali di frequenza superiore a 60 cicli per grado non avvertiamo alcuna differenza significativa tra l'immagine così manipolata e l'immagine originaria. Che questo accada è peraltro facilmente comprensibile in quanto un pattern costituito da sinusoidi spaziali di frequenza uguale o superiore a 60 cicli per grado ci apparirebbe come uno sfondo grigio uniforme privo al suo interno di qualsiasi informazione spaziale.

Se invece rimuoviamo una quota importante delle frequenze spaziali elevate operando il "taglio" a partire da frequenze più basse otterremo immagini che appariranno via via meno nitide e prive di dettagli sempre più significativi. D'altra parte, perché l'immagine perda la sua informazione essenziale (nel caso specifico del ritratto utilizzato per il nostro esempio nella Fig. 4 perché la persona rappresentata risulti completamen-

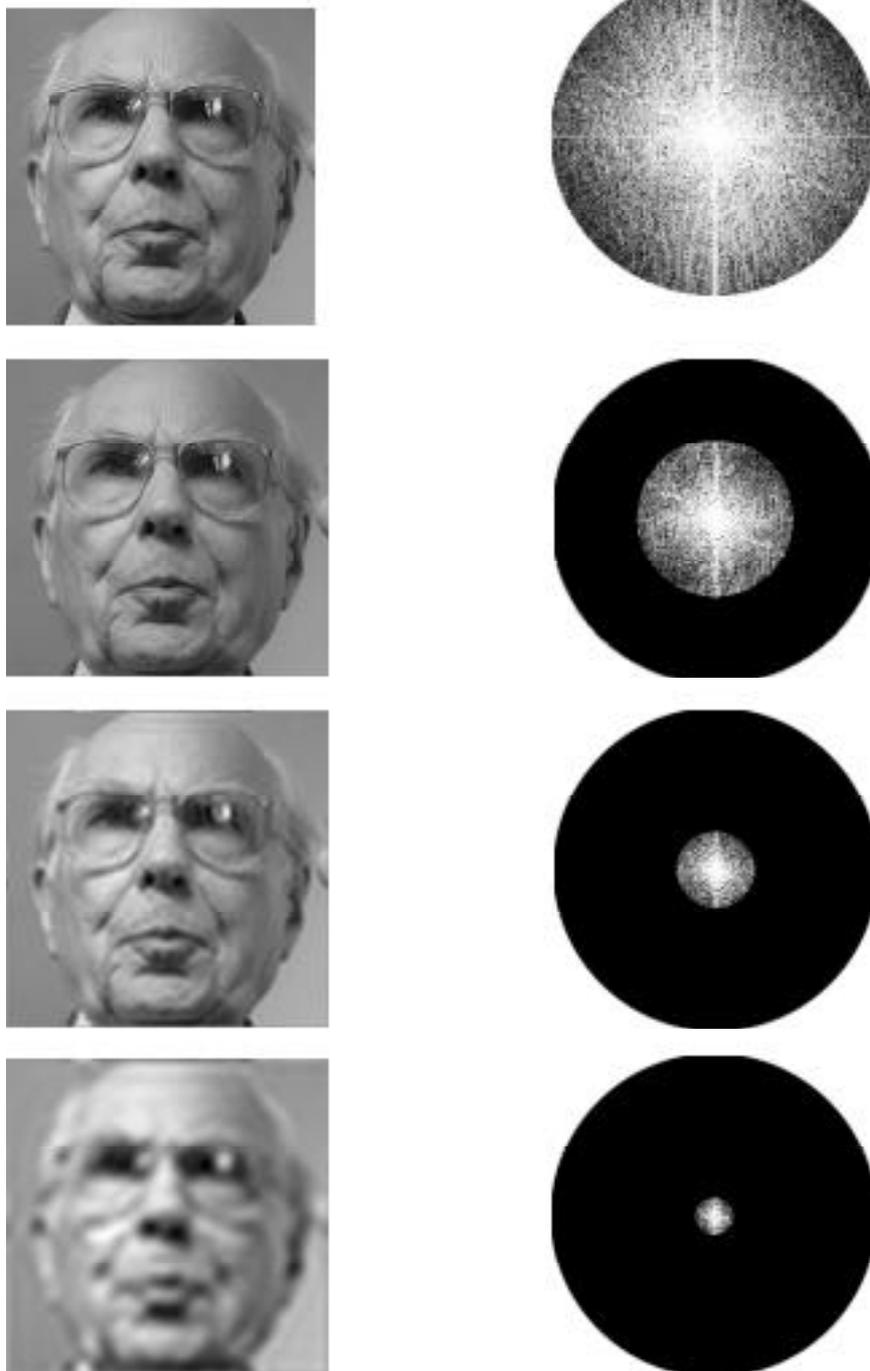


Fig. 4. Filtraggio spaziale del ritratto dello scienziato inglese Andrew Huxley con rimozione selettiva delle frequenze elevate come indicato dalla rappresentazione bidimensionale dello spettro visualizzata a destra di ogni immagine.

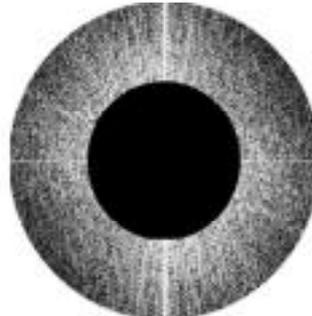
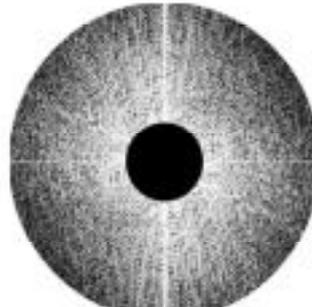
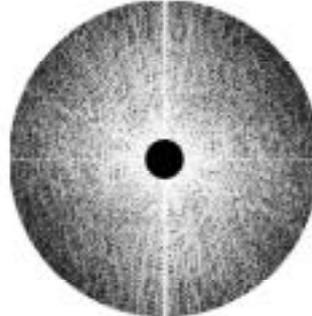
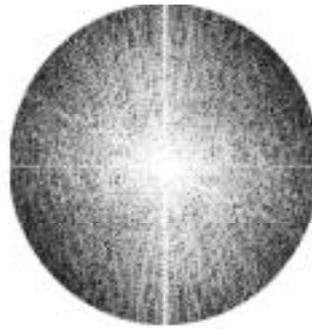
te irriconoscibile) è però necessario che venga eliminata una quota molto significativa delle frequenze spaziali medio-alte.

Un fenomeno in parte analogo a quello che si verifica per la perdita di una quota importante delle frequenze spaziali elevate è quello che avviene in persone con difetti ottici che non facciano ricorso ad occhiali appropriati. Nei miopi per esempio, un anomalo allungamento della camera posteriore dell'occhio fa sì che l'immagine non sia a fuoco sulla retina, ma davanti ad essa. In questo modo quando si guardano oggetti

lontani avviene che alcune componenti in frequenza, a partire da quelle a frequenza più elevata, vengono "filtrate" e non raggiungono più la retina. Dal momento però che queste frequenze appartengono al gruppo di quelle codificabili, la loro scomparsa fa sì che i "canali" che avrebbero dovuto portare questo tipo di informazione al cervello siano silenti, e ciò genera la visione sfocata e priva di dettagli fini tipica delle persone miopi. Con le tecniche di manipolazione delle immagini rese facilmente realizzabili con l'uso dei computer possiamo sottrarre selettivamente da un'immagine anche le componenti a frequenza bassa. Operando in questo modo ci accorgiamo che l'immagine perde rapidamente il suo contenuto informativo anche con una eliminazione relativamente esigua del suo spettro. Nel caso del ritratto di Huxley illustrato di nuovo nella Fig. 5, il personaggio risulta a malapena riconoscibile nonostante che sia stata rimossa solo una piccolissima porzione dello spettro nella zona delle frequenze spaziali basse, e si "svuota", diventando una specie di fantasma del tutto irriconoscibile, con la rimozione di una quota ancora relativamente modesta della superficie spettrale.

Possiamo concludere questo discorso dicendo che le sinusoidi spaziali ad alta frequenza

presenti nelle immagini visive portano l'informazione corrispondente ai dettagli più fini dell'immagine. D'altra parte le sinusoidi a frequenza molto elevata (superiore a 60 cicli per grado) possono essere eliminate senza alcuna perdita di informazione biologicamente rilevante. Questo accade sia perché l'informazione associata a queste sinusoidi non è rilevata dal nostro sistema visivo, sia perché essa porta elementi scarsamente utili all'identificazione del contenuto delle immagini visive. Essa non è rilevata dal sistema visivo per le caratteristiche spaziali del mosaico dei fotorecettori



tante informazione biologica. Insomma, la Natura ha agito proprio come quell'ingegnere saggio di cui abbiamo parlato, che utilizzando materiali abbastanza semplici e apparentemente poco adatti, come dicevamo, alle manipolazioni della tecnologia digitale, avrebbe filtrato dall'immagine retinica le sinusoidi spaziali a frequenza eccessivamente alta semplicemente rendendo un poco imperfetto l'apparato ottico dell'occhio.

E' importante, lo ripetiamo, che il "filtraggio" operato dall'apparato ottico dell'occhio sia ben calibrato sui limiti di risoluzione del mosaico dei fotorecettori retinici, e che non vengano eliminate sinusoidi a frequenza spaziale medio-alta che potrebbero essere adeguatamente codificate, perché se così non fosse si avrebbe una perdita di informazione che potrebbe avere conseguenze molto serie per alcuni aspetti fondamentali della performance visiva. La cosa può non sembrare immediatamente evidente perché le manipolazioni che abbiamo operato sul ritratto di Huxley mostrano che noi possiamo eliminare una porzione molto grande delle sinusoidi nella banda delle frequenze alte senza degradare l'immagine al punto da non riconoscere più il personaggio raffigurato. Per capire come una eccessiva eliminazione di frequenze spaziali medio-alte potrebbe compromettere aspetti impor-

Fig. 5. Eliminazione progressiva di basse frequenze spaziali dallo stesso ritratto di Huxley illustrato nella Fig. 4.

retinici che non permette, come abbiamo notato, il campionamento adeguato di sinusoidi a frequenza troppo alta. L'eliminazione dell'informazione portata dalle sinusoidi spaziali con frequenza superiore a 60 cicli ha, d'altra parte, il significativo vantaggio di contrastare efficacemente il fenomeno dell'aliasing che deriverebbe dal sottocampionamento di sinusoidi a frequenza troppo elevata. Le imperfezioni ottiche di cui abbiamo parlato all'inizio di questo articolo "degradano" dunque l'immagine che si forma nella retina in un modo molto particolare e preciso, eliminando proprio le sinusoidi non campionabili, prive di impor-

tanti della funzione visiva facciamo innanzitutto ricorso ad un nuovo esempio in cui il filtraggio di un'immagine visualizzata sullo schermo di un computer è spinto oltre il limite necessario ad eliminare l'aliasing. Nella Fig. 6 applichiamo le manipolazioni al ritratto di Ernst Mach, il grande fisico e filosofo austriaco, che come abbiamo detto nella prima parte di questo articolo, si occupò di psicofisiologia sensoriale e mise in evidenza particolari fenomeni di interazioni laterali nel processo visivo [vedi Piccolino e Moriondo, 2002]. La Fig. 6 B è stata ottenuta dalla Fig. 6 A eliminando solo le frequenze spaziali più alte che producevano aliasing

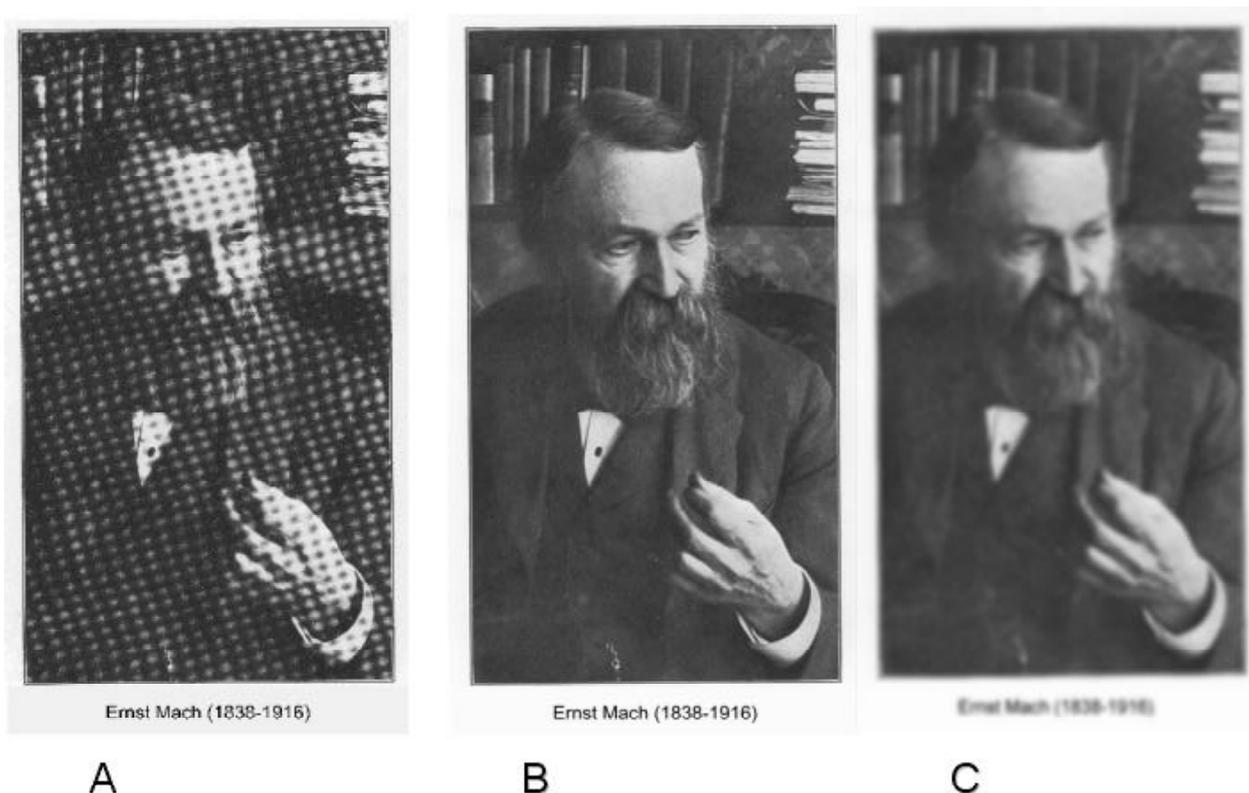


Fig. 6. Eliminazione progressiva di frequenze spaziali elevate da un ritratto di Ernst Mach acquisito con uno scanner a risoluzione elevata. Si noti come l'eccessiva eliminazione della banda delle frequenze elevate (C) renda irriconoscibile la lettura della scritta al di sotto del ritratto.

e, come si vede, il ritratto appare perfettamente nitido. Che la qualità dell'immagine come appare sullo schermo del computer non sia alterata dall'eliminazione digitale delle frequenze spaziali più elevate è facilmente comprensibile. Come abbiamo detto più sopra parlando del meccanismo retinico della visione, non si perde infatti risoluzione e qualità dell'immagine se si eliminano frequenze spaziali che non sono codificabili dal sistema di campionamento considerato (in questo caso lo schermo del computer). Nella Fig. 6 C il processo di eliminazione è stato spinto oltre ed è stata eliminata anche una banda di frequenze spaziali medio-alte. In modo analogo a quello che era accaduto con alcune delle manipolazioni sul ritratto di Huxley della Fig. 4, Mach risulta ancora riconoscibile, anche se alcuni particolari appaiono meno nitidi. Non riusciamo più però, e la cosa non è priva di importanza, a leggere la scritta col nome dello scienziato e la sua data di nascita e di morte.

Questa osservazione ci porta ad una considerazione importante relativa agli accorgimenti che la natura ha utilizzato per eliminare il rischio di aliasing nel processo visivo. Se il filtraggio delle frequenze spaziali elevate fosse stato spinto troppo oltre in modo da eliminare una quota significativa di frequenze spaziali medio-alte non avremmo apparentemente perso forse molta informazione per quel che riguarda le immagini del nostro mondo visivo abituale, in particolare quelle corrispondenti a oggetti e a persone osservate da

distanze abbastanza ravvicinate. Non avremmo però avuto la possibilità di sviluppare la scrittura (e la lettura), una funzione che richiede una elevata capacità di risoluzione spaziale.

Nonostante che il mondo verso cui ci dirigiamo sembri essere destinato al prevalere dell'immagine visiva sul linguaggio scritto, vi immaginate cosa sarebbe stato della storia della "famiglia umana" senza quei "vari accozzamenti di venti caratteruzzi su una carta" che, come Galileo ci diceva quasi quattro secoli fa, permettono all'uomo "di comunicare i suoi più reconditi pensieri a qualsivoglia altra persona, benché distante per lunghissimo intervallo di luogo e di tempo [...] parlare con quelli che son nell'Indie, parlare a quelli che non sono ancora nati né saranno se non di qua a mille e dieci mila anni." [Galileo, 1632].

Parlando di dettagli fini dell'immagine, dobbiamo considerare che essi non sono necessari soltanto a prestazioni evolutivamente così sofisticate quali la scrittura (e la lettura). Una grande capacità di risoluzione spaziale fu infatti molto utile ai cacciatori primitivi soprattutto quando la caccia (e purtroppo anche la guerra) cominciò a basarsi sull'uso di strumenti che permettevano di colpire bersagli lontani e relativamente piccoli (per esempio arco e frecce per la caccia ad uccelli e a piccoli mammiferi). La frequenza spaziale delle componenti dell'immagine retinica di un oggetto o di un animale del nostro mondo visivo aumenta infatti con l'aumentare della distanza di osservazione.

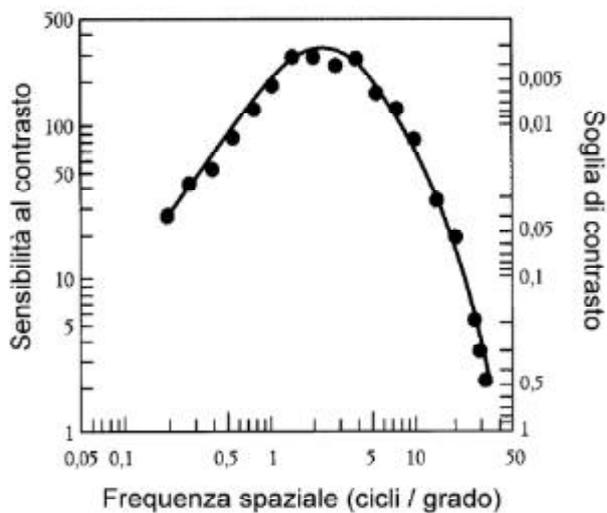


Fig. 7 Curva di sensibilità al contrasto spaziale ottenuta con metodo psicofisico in un soggetto umano normale dal punto di vista visivo. (da Campbell, e Maffei 1970).

Quindi una buona risoluzione spaziale, basata sulla possibilità di rilevamento delle componenti spaziali a frequenza elevata diventa particolarmente importante quando si entra in relazione preferenziale con un mondo visivo distante di cui è importante decifrare il contenuto informativo. Prima dell'invenzione del cannocchiale i mozzi di una nave o gli avvistatori della torre di guardia o del faro di un'isola avevano bisogno di una acuità visiva molto più grande rispetto a persone addette a certi tipi di lavori manuali pesanti il cui universo visivo si svolgeva prevalentemente in ambiti ravvicinati e non implicava la risoluzione dei dettagli fini delle immagini.

In tema di visione a distanza è utile qui fare anche un'altra considerazione che ci ripropone il problema dell'aliasing. Anche non vi fosse una componente significativa di sinusoidi spaziali a frequenza elevata nella maggior parte delle immagini di oggetti nostro mondo visivo ordinario, il rischio di sottocampionamento si presenterebbe comunque qualora osservassimo questi oggetti da lontano se si formasse sulla retina un'immagine perfettamente nitida. Questo avverrebbe perché, con l'allontanarsi progressivo dell'oggetto osservato, aumentano le componenti ad alta frequenza nell'immagine retinica. Se non avessimo un'ottica un poco imperfetta non potremmo, per esempio, osservare da lontano un prato erboso senza che si producesse quel particolare sfarfallio che accompagna in particolari situazioni sperimentali la produzione di aliasing visivo.

Se allarghiamo il discorso alle necessità adattative di specie animali diverse possiamo renderci conto di aspetti importanti della funzione visuo-spaziale di animali differenti in rapporto al loro habitat e al loro comportamento. A questo riguardo il ricorso alle sinusoidi spaziali risulta particolarmente utile sia concettualmente che praticamente.

L'importanza pratica delle sinusoidi spaziali nello studio della funzione visiva degli animali dipende principalmente dal fatto che è possibile modificare la tecnica di indagine basata sull'uso di pattern sinusoidali a cui abbiamo fatto cenno nella prima parte di questo articolo in modo da poterla utilizzare anche in animali (o in persone che per vario motivo non sono in grado di dirci se, e cosa, vedono). A proposito della visione spaziale dell'uomo studiata con la metodica psicofisica del contrasto minimo a cui le sinusoidi di diversa frequenza (o larghezza di banda) risultano visibili, ricordiamo che la visibilità massima si ha per sinusoidi di frequenza spaziale di circa 3 cicli per grado (cioè per sinusoidi che abbiano tre cicli di alternanza completa tra banda chiara e banda scura quando siano osservate da circa 60 centimetri di distanza). Come si può osservare dalla Fig. 7, nella curva tipica di un soggetto adulto normale (dal punto di vista visivo) si ha una rapida discesa della capacità visiva per le frequenze spaziali più elevate (cioè le sinusoidi più fitte), e il limite di frequenze visibili (a contrasto massimo) è di circa 50 cicli per grado. Questo corrisponde a quanto abbiamo detto più volte, e cioè che il sistema visivo non riesce a rilevare frequenze superiori a 60 cicli per grado. Vi è però una ridotta capacità visiva anche per le frequenze spaziali più basse (le sinusoidi a banda più larga), una caratteristica questa che spiega il fenomeno, già notato nel precedente articolo di questa serie, del ridursi della visibilità di un pattern costituito da sinusoidi a banda larga quando ci si avvicina con lo sguardo all'immagine. La possibilità offerta dalla metodica basata sull'uso dei reticoli spaziali sinusoidali per valutare la performance visiva in un modo "obiettivo", indipendentemente cioè dalla possibilità del soggetto di comunicare in modo esplicito ciò che vede, dipende dal fatto che, in certe condizioni, la stimolazione con pattern sinusoidali può generare potenziali elettrici rilevabili sulla cute del cranio, in corrispondenza della corteccia visiva. Questi potenziali (indicati come "potenziali evocati visivi"), sono evidenti solo se lo stimolo è visibile da parte dell'osservatore. La loro presenza (o assenza) nella risposta a pattern di diversa frequenza spaziale e diverso contrasto può essere utilizzata quindi come metodo per stabilire se il soggetto vede (o non vede) il pattern che gli viene presentato.

Con la tecnica dei potenziali evocati visivi è stato possibile dimostrare che animali diversi vedono preferenzialmente sinusoidi spaziali di differente larghezza di banda. Mentre l'uomo e le scimmie più evolute (come per esempio i macachi) mostrano una massima capacità visiva per sinusoidi con frequenza spaziale di circa 3 cicli per grado, un gatto ha il massimo di capacità visiva per sinusoidi di frequenza circa 10 volte inferiori (0,3 cicli per grado). Il falco e altri rapaci diurni hanno invece massimo di capacità visiva per frequenze

spaziali 10 volte più elevate dell'uomo (e cioè circa 30 cicli per grado). Come nell'uomo, in quasi tutti gli animali studiati la capacità visiva declina abbastanza rapidamente al di fuori delle larghezze di banda ottimali. Questo fa sì, per esempio, che un gatto non veda affatto i reticoli sinusoidali visibili per il falco, a meno che le sinusoidi non abbiano contrasto molto forte. L'uomo vede a malapena i reticoli che sono più visibili per il gatto, perché sono di banda troppo larga per la nostra curva di visibilità, e, d'altro canto vede anche poco i reticoli molto fitti, che sono invece i target più visibili per i falchi e per altri rapaci diurni. Un modo intuitivo di figurarci cosa vede un gatto o un falco rispetto ad un uomo, almeno dal punto di vista della visione spaziale, potrebbe essere quello di dire che i tre soggetti vedono gli stessi particolari di una scena se la guardano da distanze diverse; e cioè il gatto da un metro, l'uomo da dieci metri e il falco da cento metri. Oppure che, confrontato all'uomo, è come se il gatto guardasse la stessa scena attraverso un cannocchiale a dieci ingrandimenti, ma rovesciato, e il falco invece usasse nel modo "dritto" lo stesso cannocchiale.

La possibilità di usare i reticoli sinusoidali spaziali per analizzare in modo oggettivo la funzione visiva ha avuto una grande importanza pratica nella pratica clinica, soprattutto perché ha permesso di studiare le capacità visive in bambini fin dai primi mesi di vita. Con questo metodo, messo a punto a Pisa da Adriana Fiorentini e dai suoi collaboratori, si dimostra che il lattante ha una capacità di rilevazione delle sinusoidi spaziali che è all'incirca un decimo di quella dell'adulto. Nel bambino la prestazione visuo-spaziale migliora poi rapidamente, ma raggiunge il livello dell'adulto solo verso i tre, quattro anni. Il metodo permette di svelare in fase precoce deficit che passerebbero inosservati, e potrebbero compromettere poi in modo irreversibile lo sviluppo di una normale funzione visiva. Molti studi hanno messo infatti in evidenza la necessità, ai fini di una corretta maturazione dei processi percettivi, di un'esperienza visiva normale già nelle prime fasi della vita post-natale. Anomalie dell'esperienza visiva, come quelle che possono essere indotte sperimentalmente negli animali (per esempi tenendoli al buio, o impedendo la visione da un occhio), o quelle che si producono nei bambini per anomalie o patologie oculari (cataratta congenita, strabismo), possono compromettere un normale sviluppo della visione per l'imperfetta maturazione che esse comportano delle vie e dei centri nervosi della visione. Una correzione di queste anomalie oculari in età adulta potrebbe rivelarsi inefficace ai fini del recupero di una funzione visiva normale, e questo impone la necessità di una diagnosi precoce, che, come abbiamo detto, può essere ottenuta con la metodica dei reticoli spaziali (o con tecniche analoghe).

Nel concludere questa nostra discussione sui principi di funzionamento del sistema visivo, e della complessità e del fascino che appaiono evidenti a chi tenta di capirne nel profondo i meccanismi operativi, potremmo a questo punto fare qualche considerazione su di un problema che è da tanto tempo al centro della riflessione dell'uomo, quello relativo alla fedeltà o alla fallacia dei dati dei sensi. Il sistema visivo, e più in generale i sistemi sensoriali, si sono sviluppati nel corso dell'evoluzione per permettere un'interazione efficace dell'organismo con l'ambiente, e a questo scopo essi hanno messo a punto meccanismi sofisticati per estrarre dal mondo che ci circonda l'informazione più ricca di valore adattativo. Questi meccanismi sono efficaci, nel senso che permettono di trasmettere ed elaborare l'informazione secondo tempi e modalità corrispondenti alle necessità funzionali dell'organismo, e rendono così possibile la sopravvivenza dell'individuo e della specie. Non pretendono però di fornirci una rappresentazione "vera" del mondo che ci circonda, rappresentazione che, per usare la metafora dell'immagine, sarebbe contenuta in quell'immagine "perfetta" di cui abbiamo più volte parlato. Questo tipo di immagine è, come abbiamo visto, da un lato fisicamente irrealizzabile, e dall'altro del tutto inadatta alle necessità funzionali degli organismi viventi. Da questo punto di vista è forse un falso problema dire se i sensi siano veridici o fallaci.

A proposito di "fallacia" dei sensi, è da considerare però il grande interesse che hanno per gli studiosi della visione quei fenomeni che mettono in evidenza la corrispondenza apparentemente inesatta tra i dati dei sensi e la realtà fisica del mondo esterno (come per esempio le bande di Mach, l'effetto Cornsweet e altri sorprendenti fenomeni percettivi, e in particolare molti fenomeni riguardanti la visione dei colori sui quali non abbiamo potuto soffermarci per ragioni di brevità). Molti di questi fenomeni sono in effetti di grande rilievo perché offrono una finestra per penetrare i meccanismi operazionali del funzionamento dei sistemi sensoriali, e la constatazione della loro presenza induce gli studiosi del campo a considerazioni diverse da quelle pessimistiche sulla umana "imperfezione". A chi sottolineasse i limiti e le apparenti inadeguatezze dei sensi potremmo rispondere, con Cajal, dando la parola al "genio creatore della vita", il quale "se si degnasse di rispondere forse ci direbbe", secondo quanto scrive il grande scienziato spagnolo:

Vi ho dotati degli organi sensoriali indispensabili alla difesa e conservazione dell'esistenza, nell'ambito delle situazioni più comuni; se però desiderate penetrare profondamente nell'arcano dell'universo, non siete totalmente disarmati. A questo fine vi ho concesso qualcosa di molto più prezioso di tutte le eccellenze sensoriali; un cervello privilegiato, organo sovrano di conoscenza

ed azione, che se sapientemente utilizzato aumenterà fino all'infinito la potenza analitica dei vostri sensi. [Cajal 1934]

I sensi continueranno a dirci che il sole ruota attorno alla terra, ma il cervello (cioè la scienza, la ragione, la riflessione) ci dimostrano che è la terra a ruotare intorno ad un sole relativamente immobile, e ci permettono altresì di dotarci di nuovi strumenti, tecnologici e concettuali, che sopperiscono all'apparente inadeguatezza dei nostri sistemi sensoriali, aiutandoci così nel tentativo di “penetrare profondamente nell'arcano dell'universo”.

Andrea Moriondo e Marco Piccolino

Bibliografia

- S. R. Y Cajal, (1934) *El mundo visto a los ochenta años. impresiones de un arterioesclerótico*. Madrid
- F. W. Campbell, D. G. Green (1965) *Optical and retinal factors affecting visual resolution* J. Physiol (London) 181: 576-593
- F. W. Campbell, L. Maffei (1970) *Electrophysiological evidence for the existence of orientation and size detectors in the human visual system*. J Physiol. (London) 207:635-52
- H. L. F. Helmholtz (1867) *Handbuch der physiologischen Optik* L. Voss, Leipzig
- H. L. F. Helmholtz (1865-1876) *Populäre wissenschaftliche Vorträge*. F. Vieweg, Braunschweig
- M. Piccolino, A. Moriondo (2002) *Retina e visione: elogio dell'imperfezione. Prima parte. L'immagine imperfetta e l'informazione biologicamente rilevante* NATURALMENTE 15 (2) pp. 3-13
- J. S Werner (1998) *Aging through the eye of Monet in Color vision. Perspectives from different disciplines* (a cura di G. K. Werner, R.K. Backhaus, J. S. Werner) de Gruyter, Berlin